

WS 2004/05

Hochauflösende Radiobeobachtungen aktiver Galaxienkerne

Silke Britzen

MPIfR, Bonn



Max-Planck-Institut
für
Radioastronomie

Jede 2. Woche!

Termine:

05.11.2004

19.11.2004

03.12.2004

17.12.2004

14.01.2005

28.01.2005

11.02.2005

Im Internet auf:

<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen>

pdf-Version der Vorlesung im Internet

Meine e-mail:

sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de

Heute: Jets

Überblick: Wintersemester 2004/05

■ Astrophysik aktiver Galaxienkerne

■ Einführung und Überblick

- Aktive Galaxienkerne
- Was heißt „aktiv“?
- Welche Arten gibt es – der Zoo, wichtigste Merkmale
- AGN Radio-Durchmusterungen

■ Schwarze Löcher:

- Das Standardmodell: Schwarzes Loch + Akkretionsscheibe + Jet

■ Das Jet-Phänomen

- Jets von pc- zu kpc-Skalen
- Scheinbar überlichtschnelle Bewegungen
- Krümmungen & Präzession
- Jetsimulationen

■ Variabilität

- Überblick: Zeitskalen & Wellenlängen
- Theoretische Modelle

Überblick: Wintersemester 2004/05

- Astrophysik aktiver Galaxienkerne
- Kosmologische Evolution der AGN – Hierarchisches Modell
- Unsere Milchstraße und die Möglichkeit eines Schwarzen Lochs im Zentrum
- Vereinheitlichungstheorien
- Kosmologie mit Aktiven Galaxienkernen
- Offene Fragen der Erforschung aktiver Galaxienkerne

Literatur & mehr

■ Internet:

- *Homepage von A. Müller, LSW:*

www.lsw.uni-heidelberg.de/users/amueller

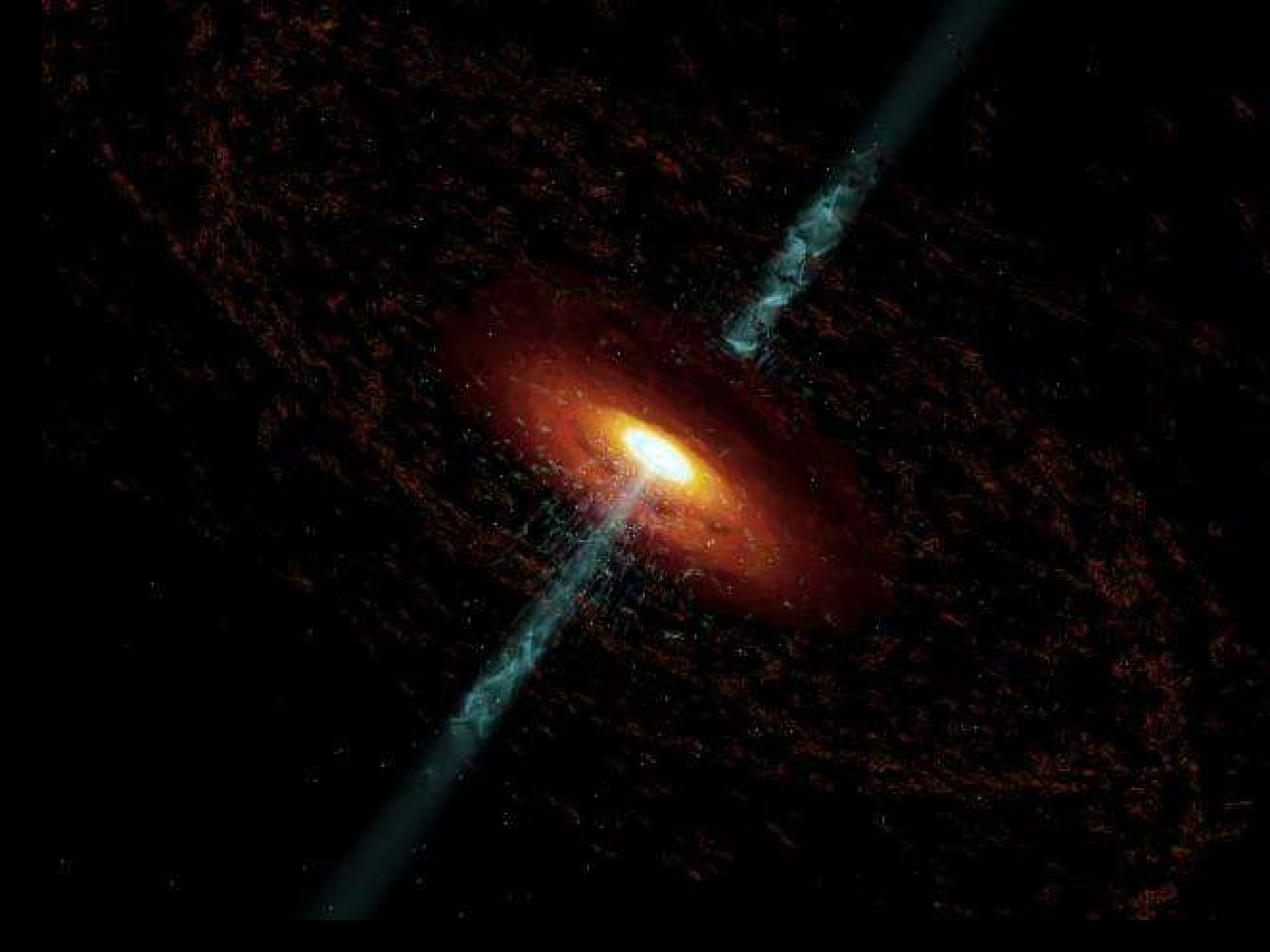
■ Articles:

- *Modeling Extragalactic Jets*, A. Ferrari, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 1998. 36: 359-98
- *Parsec-Scale Jets in Extragalactic Radio Sources*, J.A. Zensus, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 1997. 35: 607-36
- *Theory of Extragalactic Radio Sources*, Begelman, M.C., R.D. Blandford, & M.J. Rees, 1984, *Revs. Modern Physics* **56**, 255

Literatur & mehr

■ Books:

- *Active galactic nuclei*, 1990, R.D. Blandford, 20th SAAS-FEE lectures
- *An Introduction to Active Galactic Nuclei*, Bradley M. Peterson
- *Active Galactic Nuclei: From the Central Black Hole to the Galactic Environment*, Julian H. Krolik
- *Quasars and Active Galactic Nuclei : An Introduction* Ajit Kembhavi & Jayant V. Narlikar



Jets

- Wo werden Jets beobachtet?
- Wie sehen Jets aus?
- Wie füttert das Schwarze Loch den Jet?
- Merkwürdigkeiten: scheinbar überlichtschnelle Bewegungen, Jetknoten,
- Woraus bestehen sie? Was sind Jetknoten wirklich?
- Wie werden Jets erzeugt?
- Was ist ihre Lebensdauer?
- Wie werden Jets kollimiert?
- Wie funktionieren Jets, kann man sie simulieren?

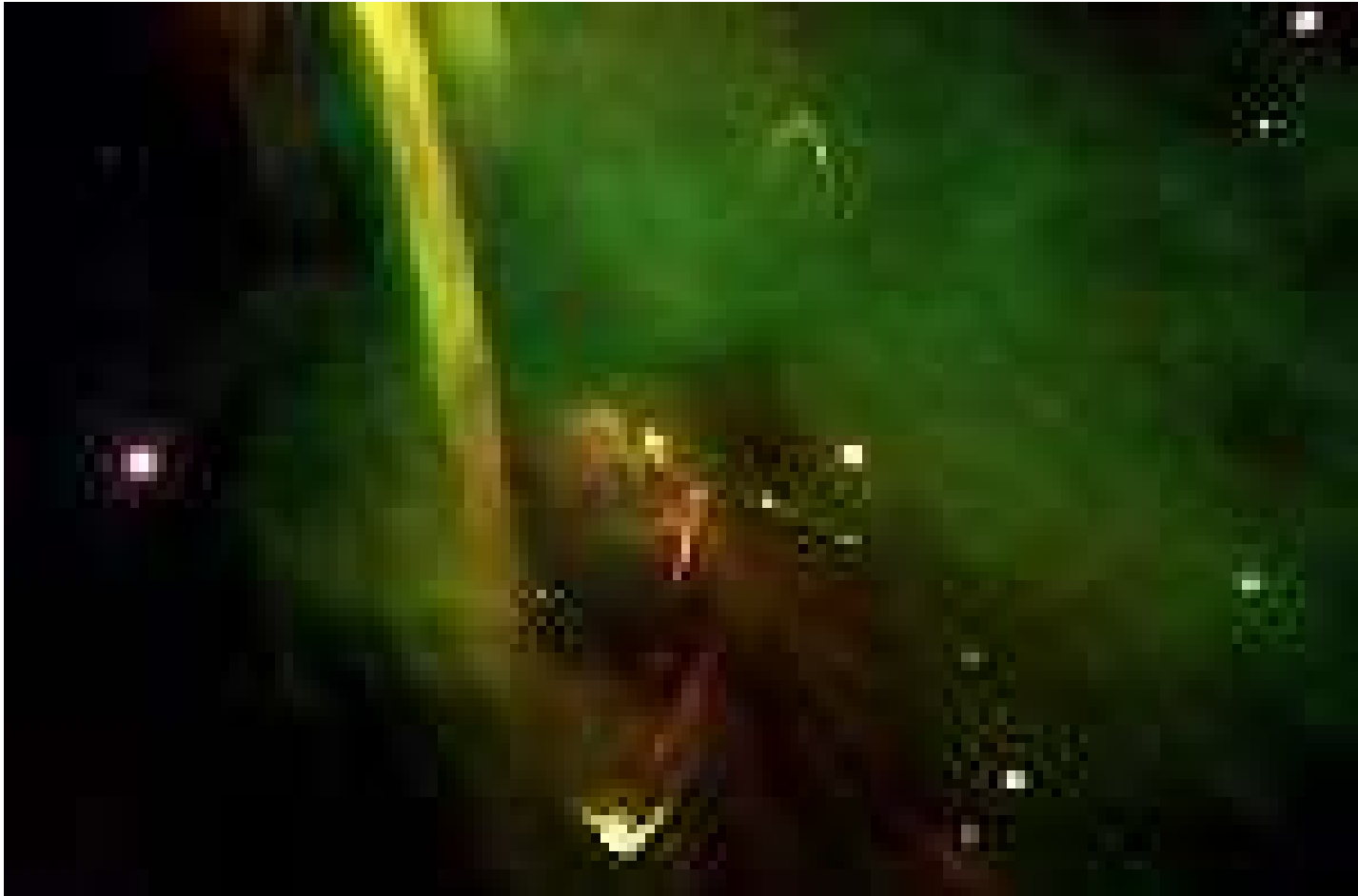
Wo werden Jets beobachtet?

- Jets sind die grössten **Teilchenbeschleuniger** des Universums!
- Es handelt sich dabei um **Materieausflüsse** von astrophysikalischen Objekten, die auf allen Längenskalen vertreten sind.
- So beobachtet man die **protostellaren Jets oder Jets junger Sterne** (*Young Stellar Objects*, YSOs) beispielsweise in Herbig-Haro-Objekten oder T-Tauri-Sternen, die also von stellarer Grössenordnung sind.
- In Röntgendoppelsternen fliesst Materie eines massereichen Sterns auf ein kompaktes Objekt. Dabei entstehen auch Jets auf der stellaren Längenskala, die Jets der Mikroquasare. Sämtliche Jets dieser kleineren Grössenordnung subsummiert man unter dem Begriff **Mikro-Jets**.
- Aber man beobachtet auch die viel grösseren Jets - die **Makro-Jets** - von Aktiven Galaktischen Kernen (AGN), also beispielsweise bei Radiogalaxien oder Quasaren. Sie haben Längen auf der kpc- oder sogar Mpc-Skala!

- **Protostellare Jets**
- **Mikro-Jets (Microquasare)**
- **Makro-Jets (Aktive Galaxienkerne)**

Protostellare Jets

- Werden in Herbig-Haro Objekten oder T-Tauri Sternen beobachtet

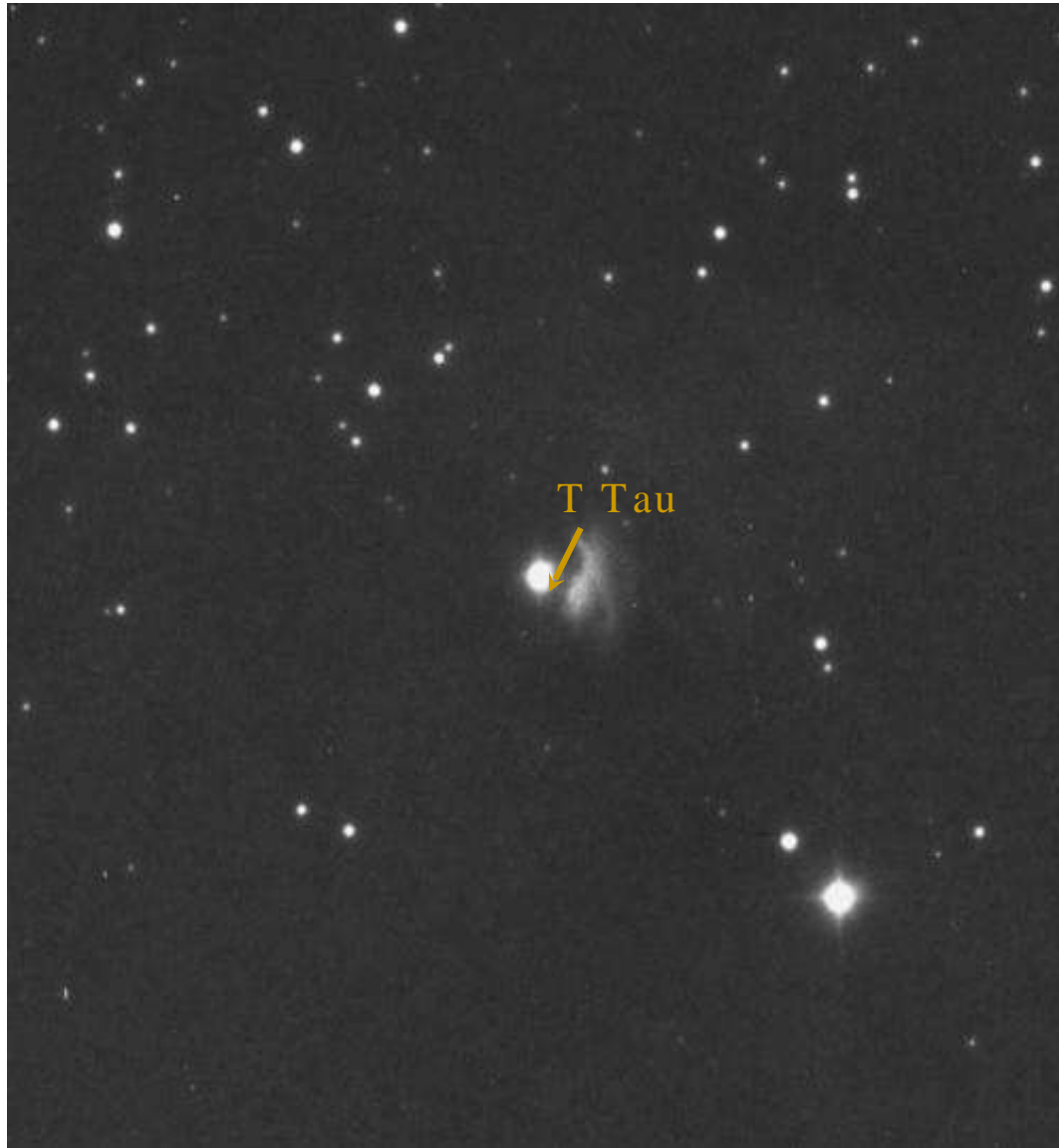


Allgemeines über T Tauri Sterne



- Name nach dem Prototyp in den Dunkelwolken des Sternbildes Taurus
- Weitere Bezeichnungen:
 - RW-Aurigae-Sterne
 - Orion- bzw. Nebelveränderliche
 - Young Stellar Objects (YSOs)

T Tau im optischen Bereich



T Tau

RA: 04 21 59.4

Dec: +19 32 06

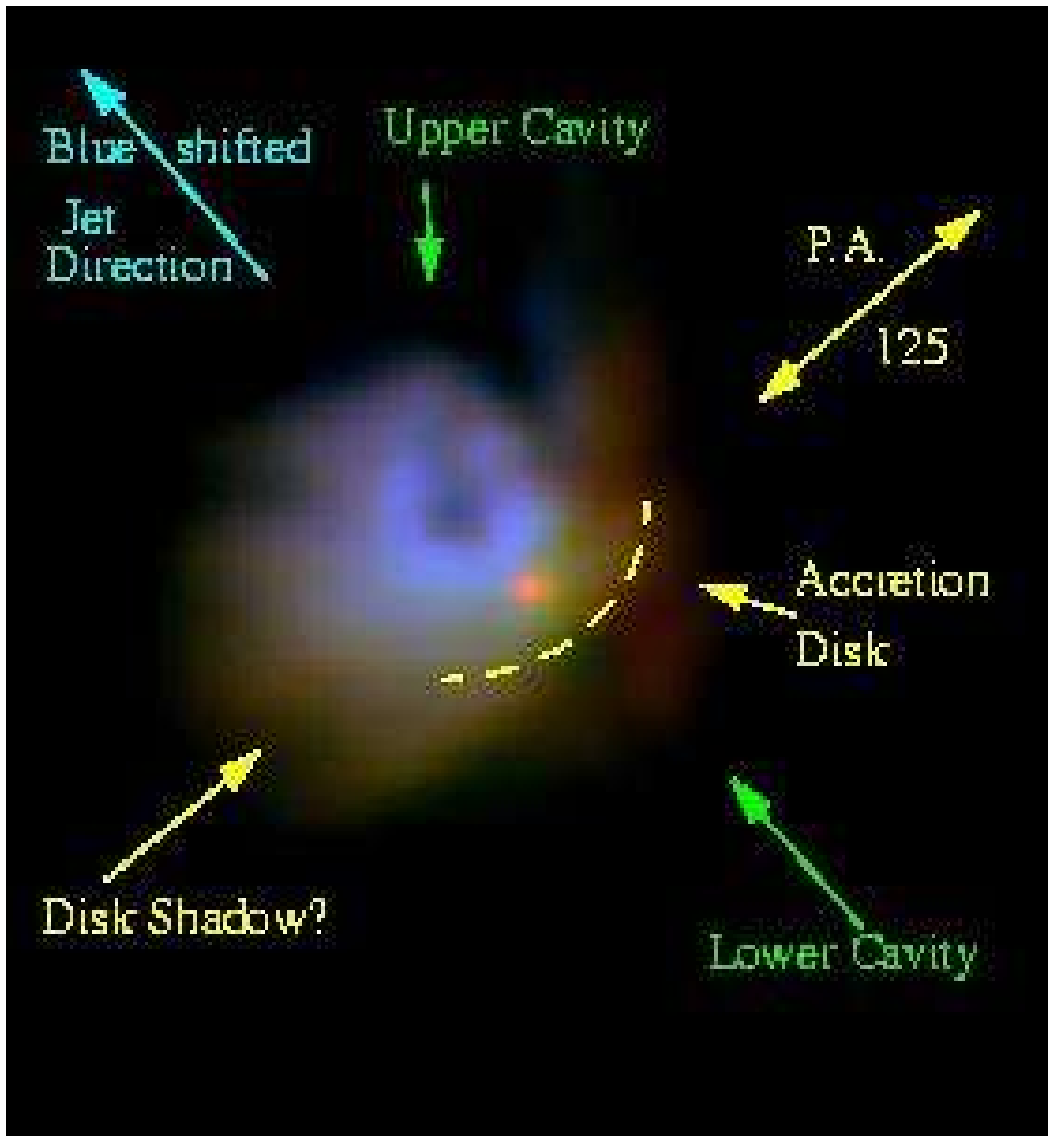
Size: 14'1 x 14'1

Survey:

Palomar Observatory

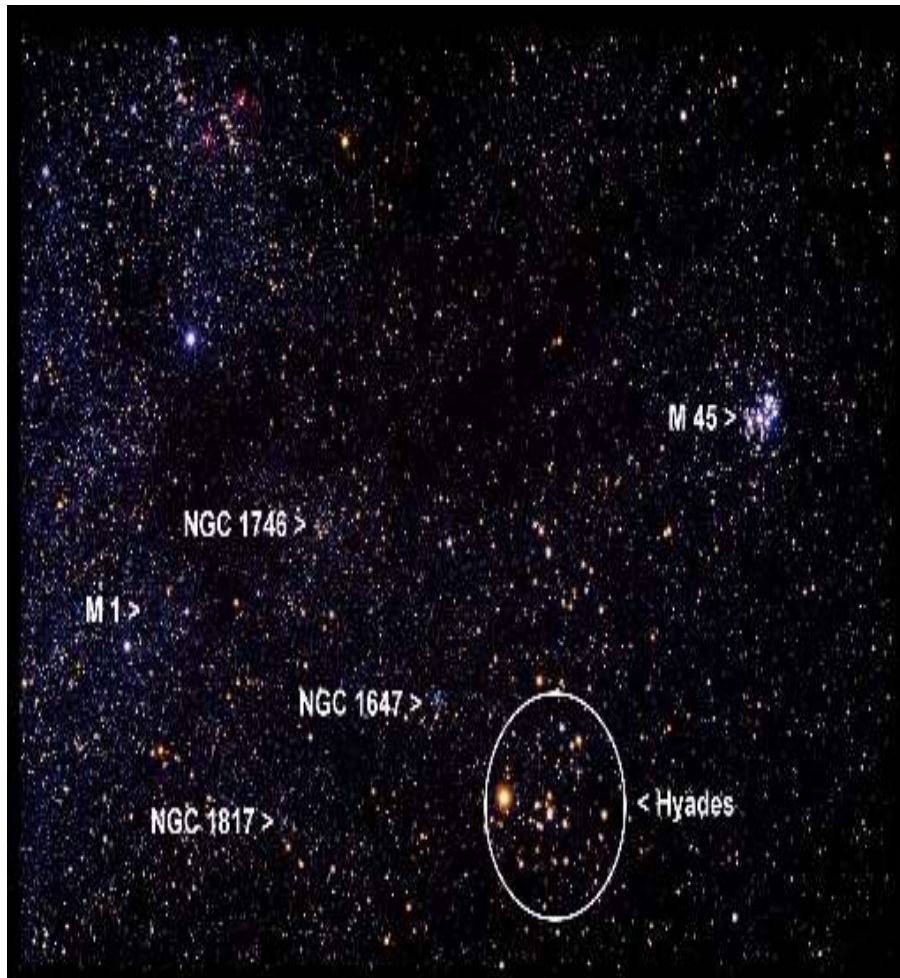
Sky Survey

HL Tau im IR - Bereich



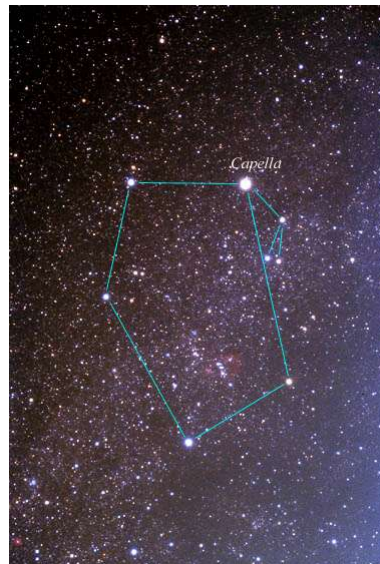
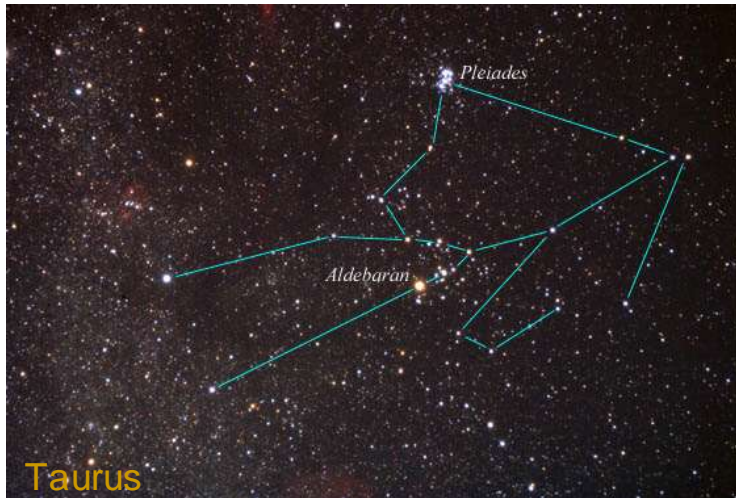
- 3-Farbenbild (im I-, J- und H-Band)
- Aktive Akkretions-scheibe um einen Protostern

Allgemeines über T Tauri Sterne



- Name nach dem Prototyp in den Dunkelwolken des Sternbildes Taurus
- Weitere Bezeichnungen:
 - RW-Auriga-Sterne
 - Orion bzw. Nebelveränderliche
 - Young Stellar Objects (YSOs)

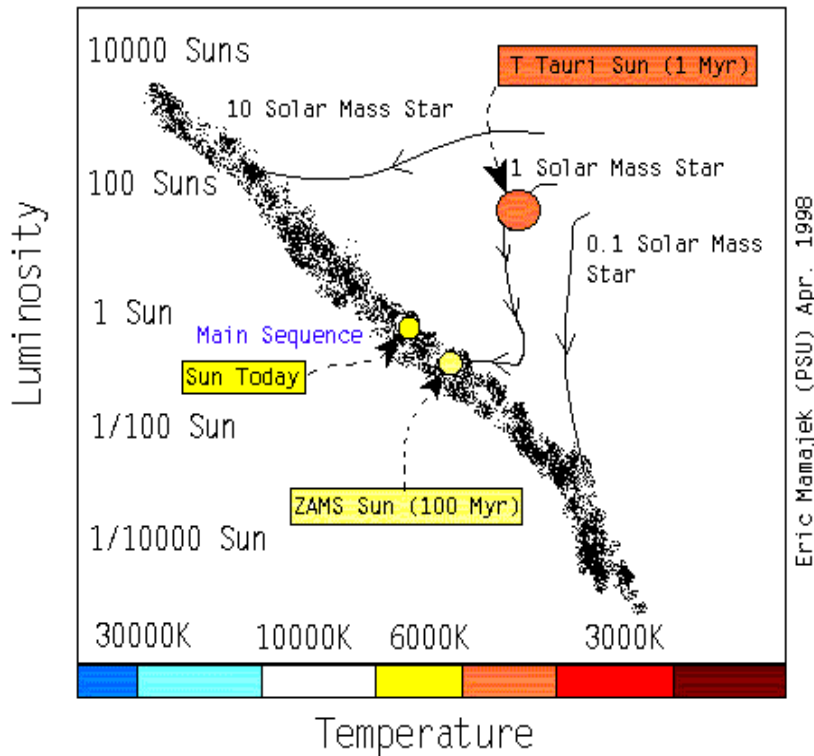
Was sind T Tauri Sterne?



- Junge, sonnenähnliche Sterne: $10^5 - 10^7$ Jahre
- Eruptive Veränderliche
- Irregulärer Lichtwechsel
- Emissionsliniensterne der Spektralklassen G bis M
- Starke Emissionslinien v.a. von H, Ca II und He I

Eigenschaften der T Tauri Sterne

Hertzsprung-Russell Diagramm



Renate Zechner

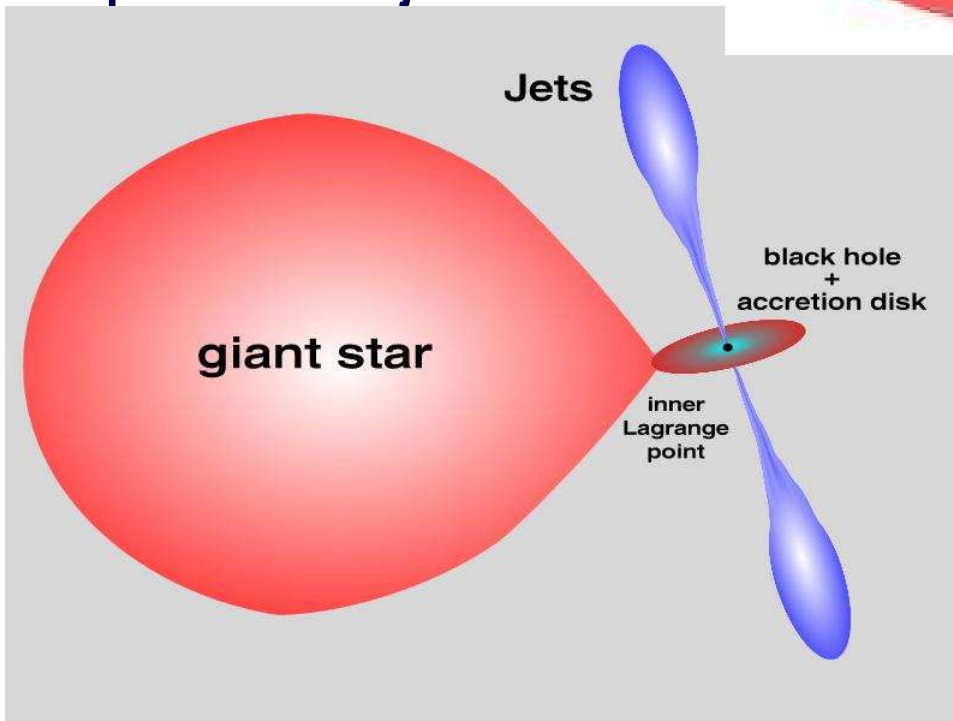
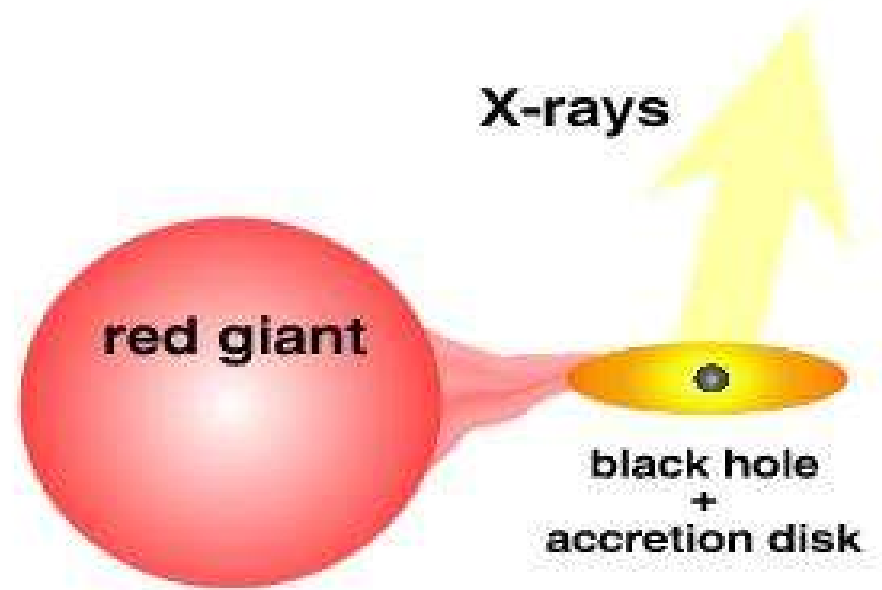
- Vorkommen in T-Assoziationen
- Überhäufigkeit von Li
- Rasche Rotation
- Magnetische Aktivität
- Oft von einer Akkretionsscheibe umgeben
- Häufig Doppelsternsystem
- Lage im HRD:

Microquasar



Microquasare

- Röntgendoppelsterne
- Materie fließt von massereichem Stern auf kompaktes Objekt

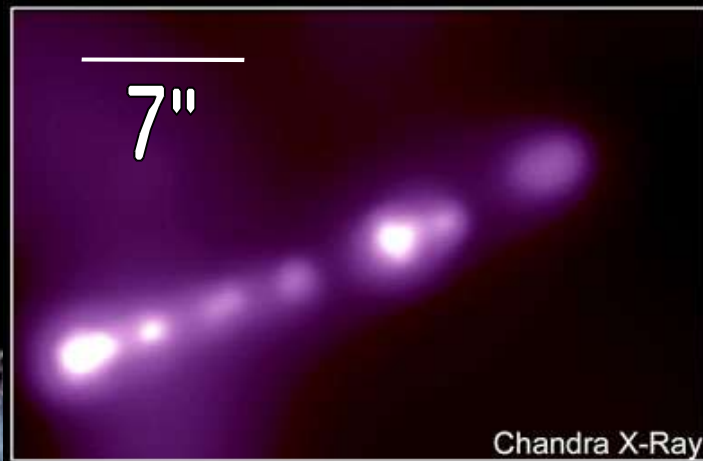
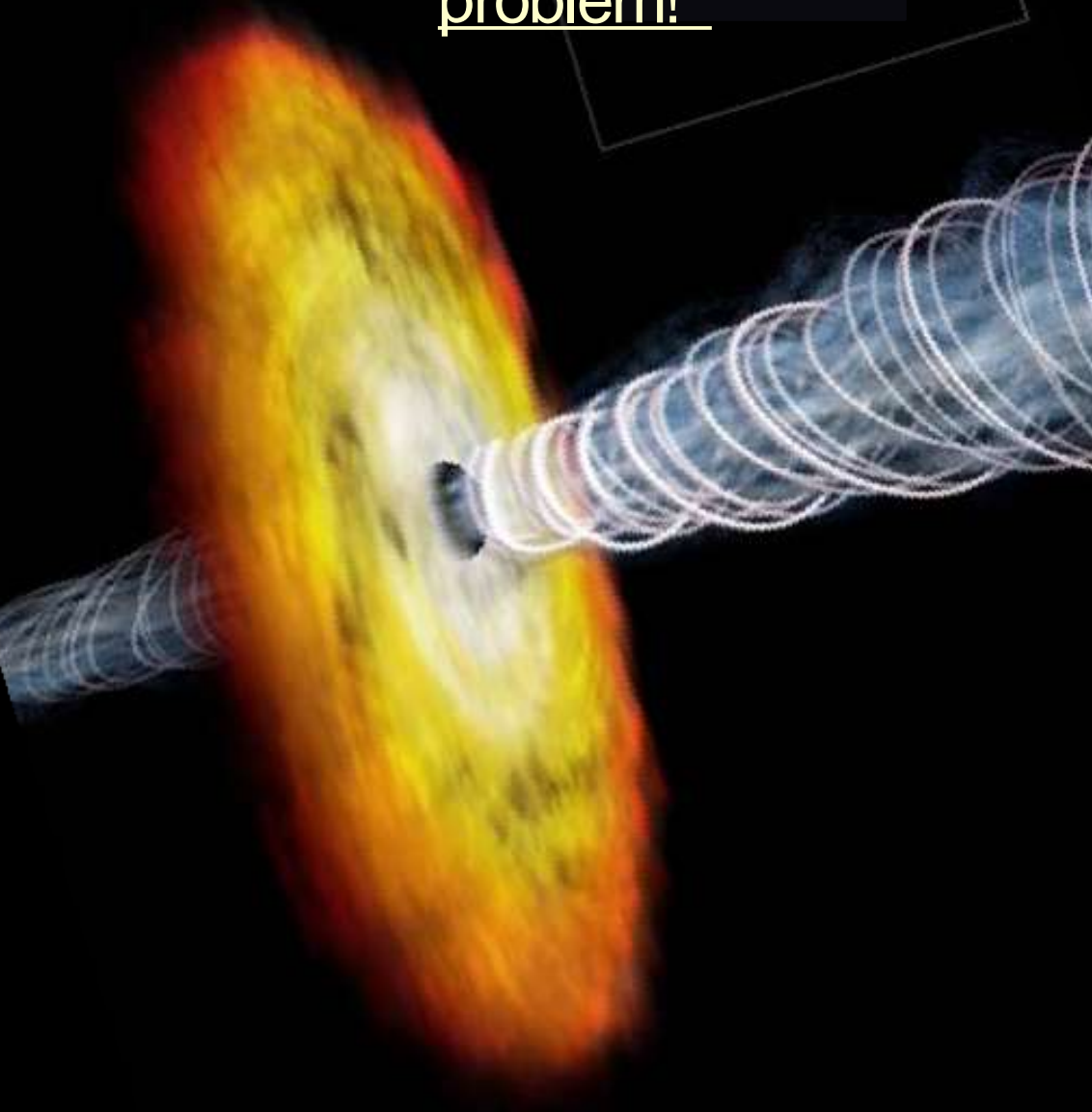


A. Müller

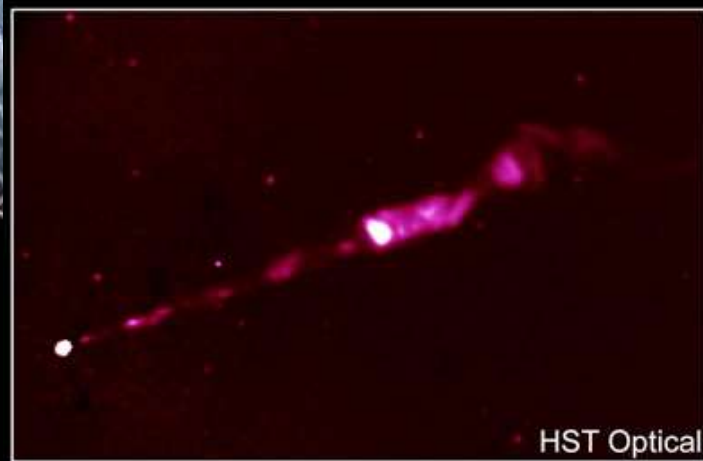
Entdeckung der Jets in Aktiven Galaxienkernen

- **1918: Heber Curtis sieht einen „curious straight jet“ bei Beobachtungen von M87**
- **Beobachtungen der Doppel-Keulen in ausgedehnten Radio-Galaxien wie Cygnus A (Jennison & Das Gupta 1953); gigantische Dimensionen und erstaunliche Leistung**
- **Baade und Minkowski prägen den Namen 1954 bei Beobachtungen von M87**

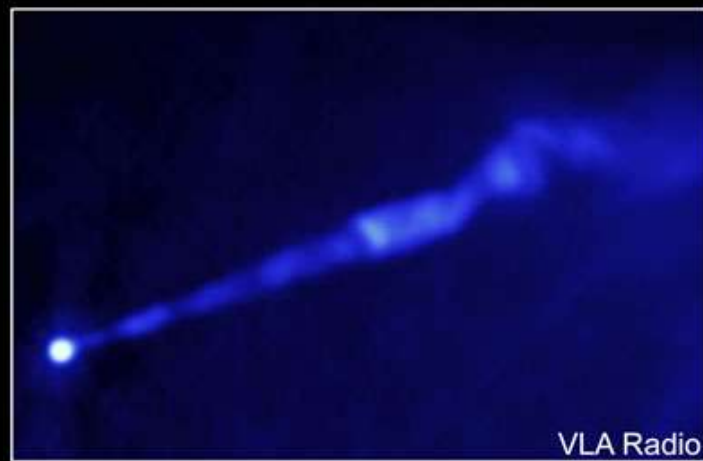
„Jets have a knotty problem!“



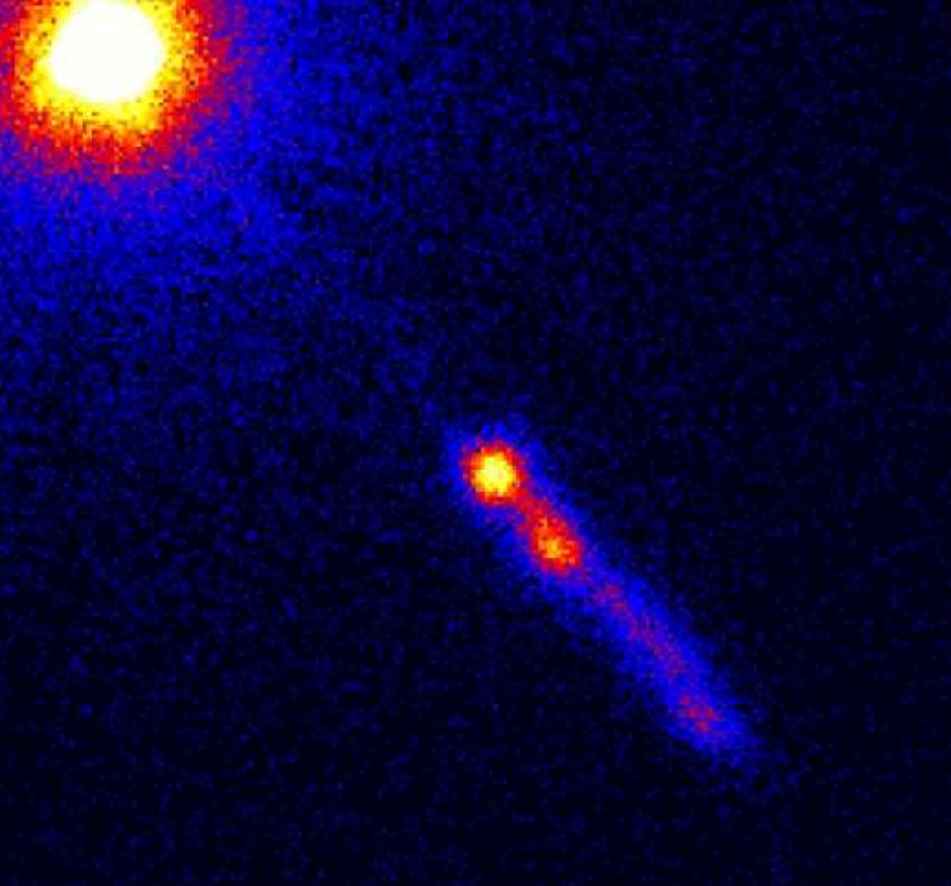
Chandra X-Ray



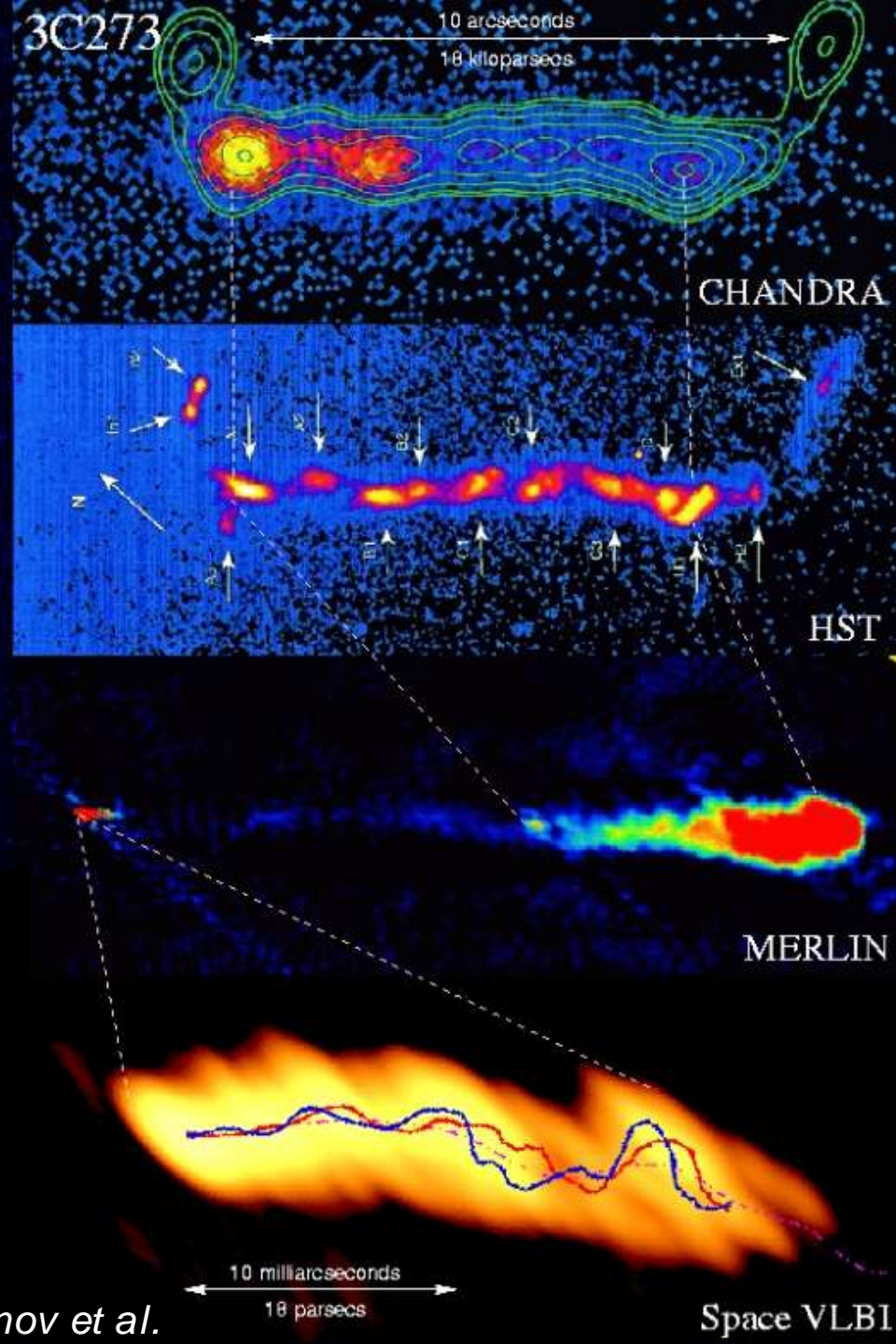
HST Optical



VLA Radio

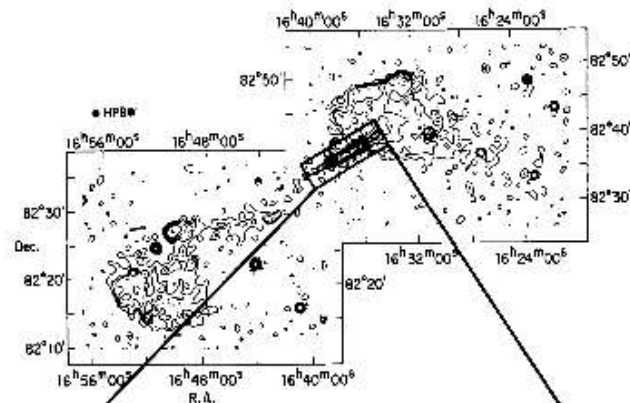
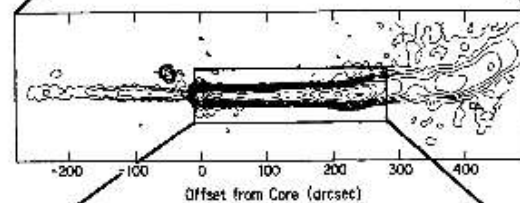
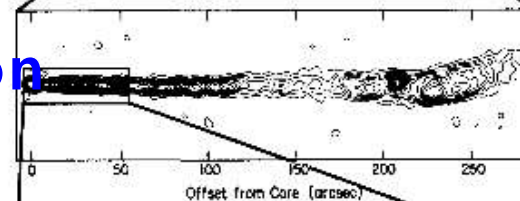
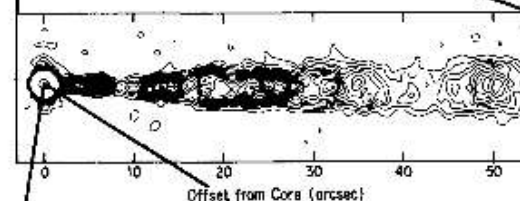
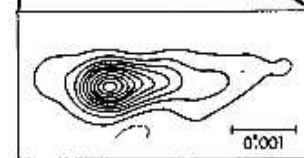


Der „erste“ Quasar:
3C273



Lobanov et al.

NGC 6251

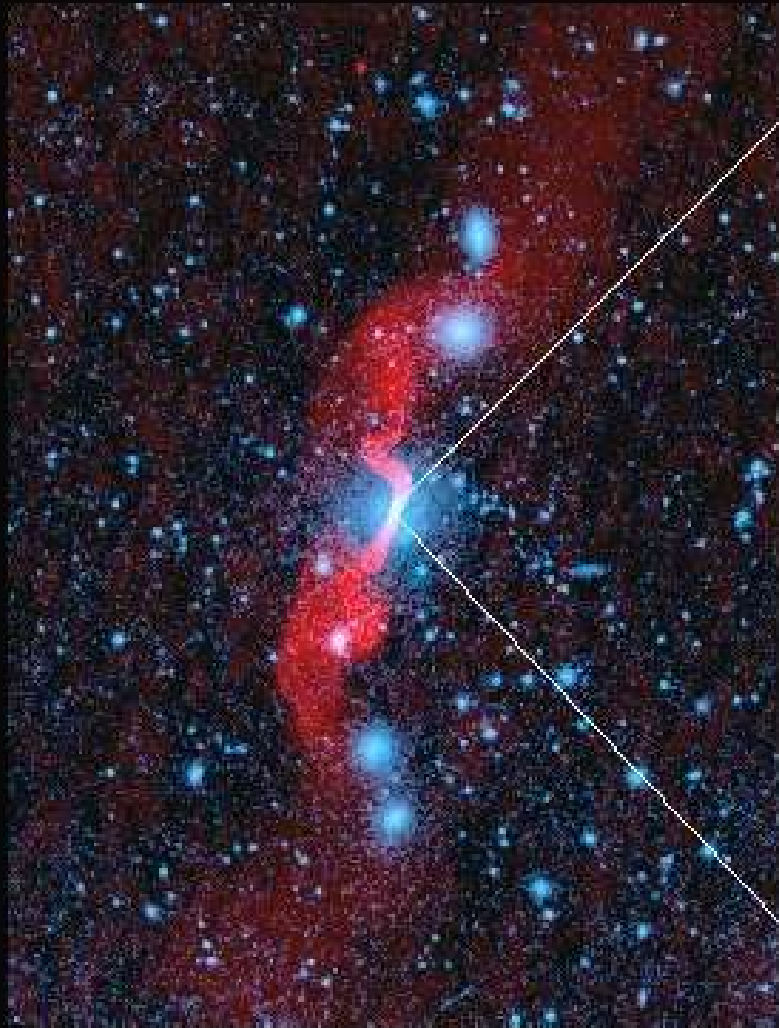
WSRT
610 MHzVLA
1664 MHzVLA
1410 MHzVLA
1662 MHzVLB
10651 MHz

- ★ Radiostrahlung oftmals extrem ausgedehnt, in Form von "Jets" und weit von der Muttergalaxie (host galaxy) liegenden Radiokeulen (radio lobes)

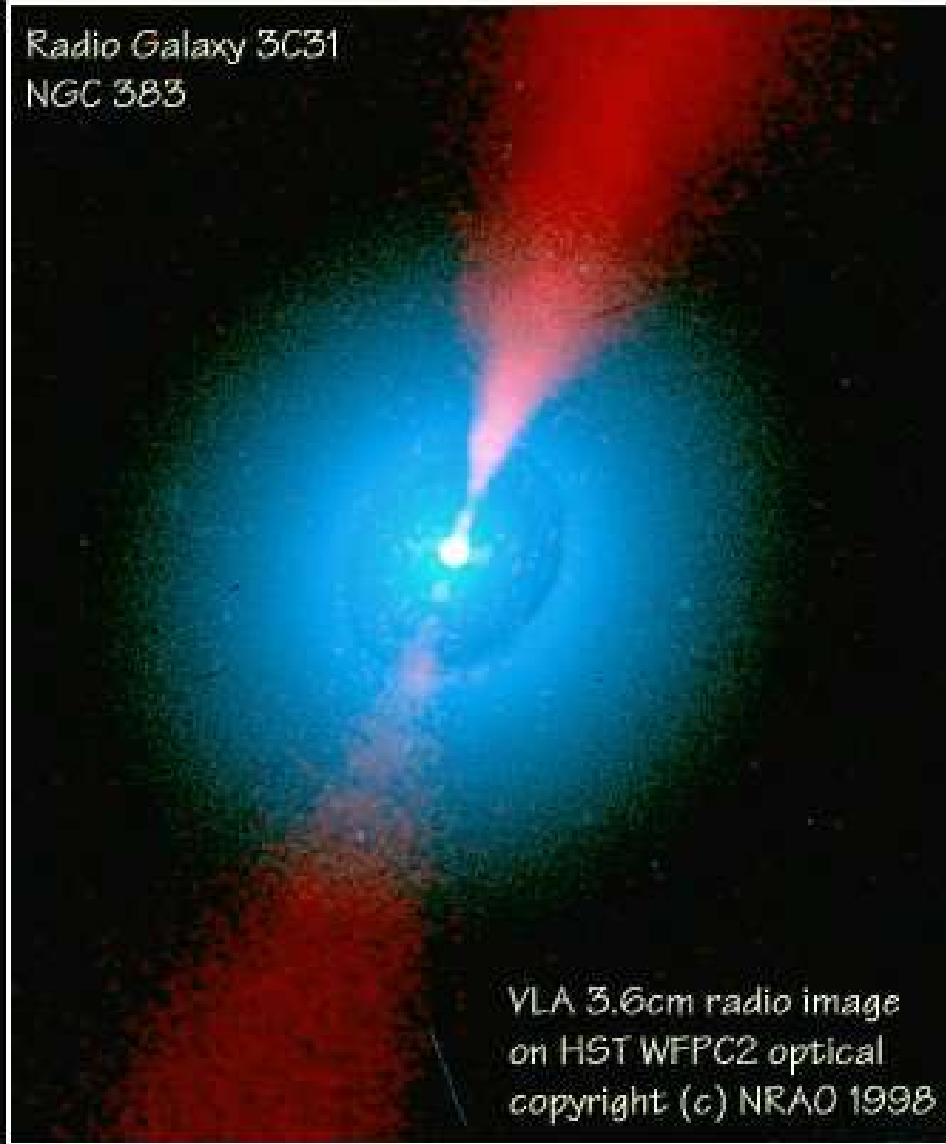
Jet-Emission auf Skalen von
300 kpc bis zu < 1 pc

kpc-Jet und pc-Jet:
aufgrund von VLA
und MERLIN bzw.
VLBI und VLBA-
Beobachtungen

Radiogalaxie
NGC6251,
 $z=0.024881$



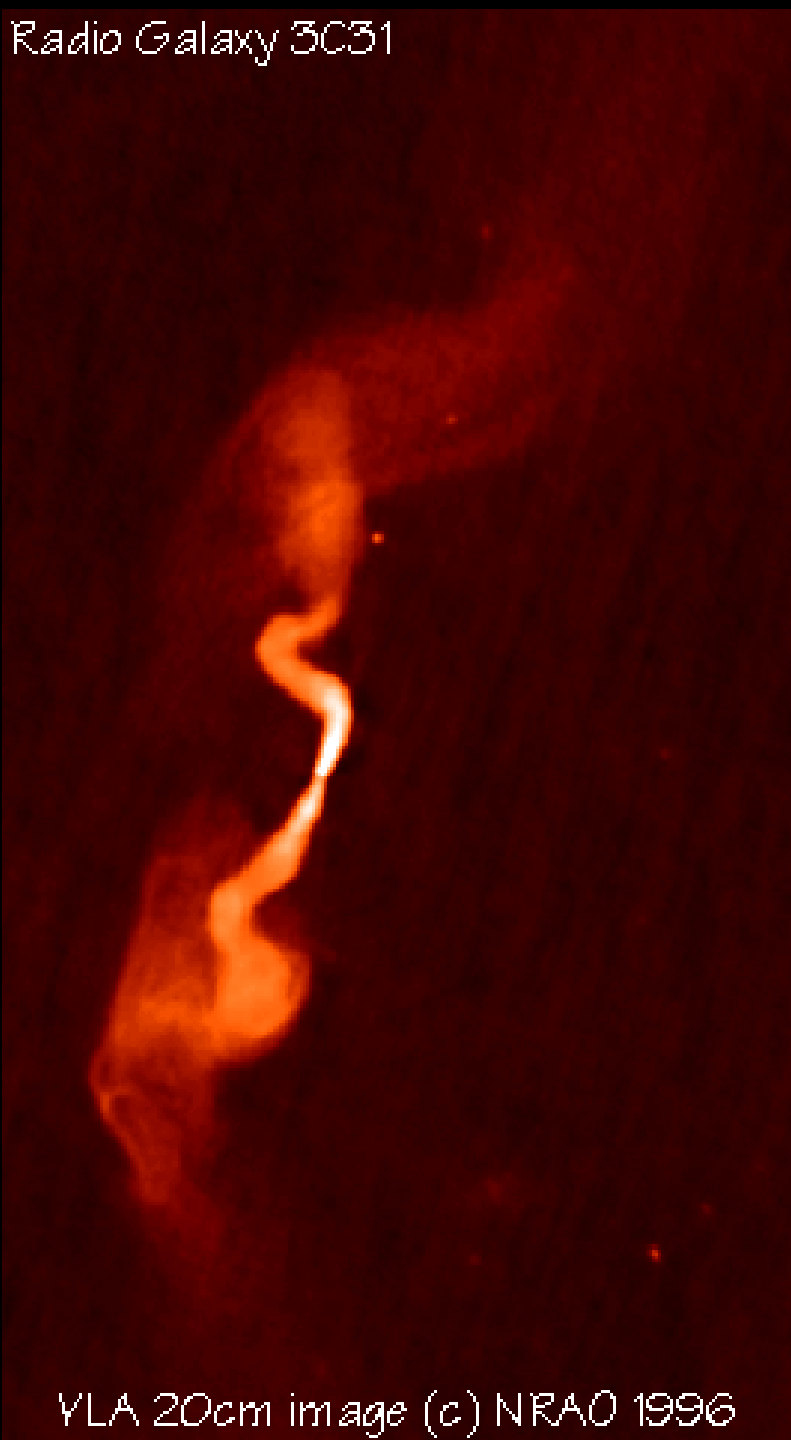
Radio Galaxy 3C31
NGC 383



VLA 3.6cm radio image
on HST WFPC2 optical
copyright (c) NRAO 1998

**Radio data of Robert Laing (RGO), Alan Bridle and Richard Perley (NRAO),
Luigina Feretti, Gabriele Giovannini and Paola Parma (Bologna), to be published.**

Radio Galaxy 3C31

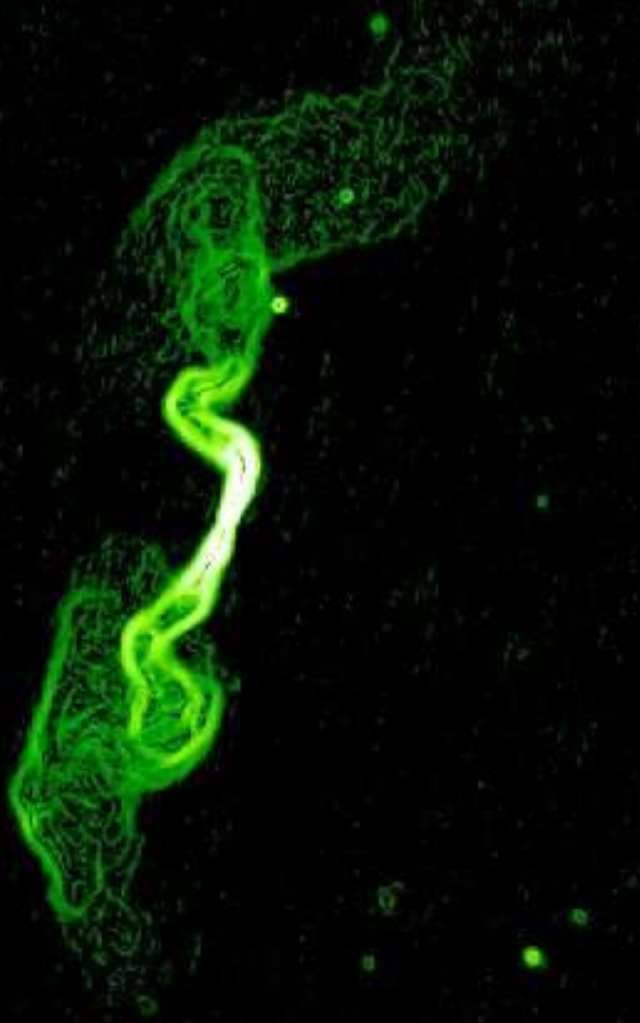


VLA 20cm image (c) NRAO 1996

- FR I (plumed) radio galaxy at $z=0.0169$ ($51/h$ Mpc, $H = 100h$ km/s/Mpc)
- Filamentary plumes extend $300/h$ kpc from galaxy
- Conical inner jet and counterjet
- Large-scale distortion (wiggling) of both plumes
- VLA 1.4 GHz image at 5.5 arcsec resolution

Radio data of Robert Laing (RGO), Alan Bridle and Richard Perley (NRAO), Luigina Feretti, Gabriele Giovannini and Paola Parma (Bologna), to be published.

Radio Galaxy 3C31
Intensity Gradient



VLA 20cm image (c) NRAO/AUI 2000

- FR I (plumed) radio galaxy at $z=0.0169$ ($51/h$ Mpc, $H = 100h$ km/s/Mpc)
- Filamentary plumes extend $300/h$ kpc from galaxy
- Conical inner jet and counterjet
- VLA 1.4 GHz data at 5.5 arcsec resolution
- Processed with Sobel (intensity-gradient) filter

Radio data of Robert Laing (RGO), Alan Bridle and Richard Perley (NRAO), Luigina Feretti, Gabriele Giovannini and Paola Parma (Bologna), to be published.



Radio Galaxy 3C31
VLA 3.6cm image
Copyright (c)
NRAO/AUI 2000

- FR I (plumed) radio galaxy at $z=0.0169$ ($51/h$ Mpc, $H = 100h$ km/s/Mpc)
- Large-scale arcs in jets before they bend
- Rapidly expanding, then recollimating, jet and counterjet
- Northern jet base is bright
- Gaps between both jets and nuclear source
- Evidence for rapid slowdown of bulk relativistic outflow
- VLA 8 GHz data at 0.3 arcsec resolution

Radio data of Robert Laing (RGO), Alan Bridle and Richard Perley (NRAO), Luigina Feretti, Gabriele Giovannini and Paola Parma (Bologna), to be published.

Radio Galaxy 3C31
NGC 383



Copyright (c) NRAO/AUI 2000

- FR I (plumed) radio galaxy at $z=0.0169$ (51/h Mpc, $H = 100h$ km/s/Mpc)
- Rapidly expanding, then recollimating, jet and counterjet
- Northern jet base is brightest just before jet boundary "flares"
- Fainter, narrow inner jet close to central source
- Evidence for rapid slowdown of bulk relativistic outflow
- VLA 8 GHz data at 0.3 arcsec resolution

Radio data of Robert Laing (RGO), Alan Bridle and Richard Perley (NRAO), Luigina Feretti, Gabriele Giovannini and Paola Parma (Bologna), to be published.

Idee & Konzept

- **Lichtschnelle Plasmastrahlen**
- **Erreichen Ausdehnung von mehreren Mio. Lichtjahren**
- **Entstehen im Zentrum von Galaxien: werden vermutlich von Akkretionsscheiben produziert, welche sich um ultra-schnelle Schwarze Löcher gebildet haben und Materie entlang ihrer Rotationsachse ausstoßen**
- **Am Ursprung des Jets findet sich fast immer ein sehr kompakter Radiokern mit flachem Radiospektrum und sekundären Komponenten, die sich oft mit scheinbaren Überlichtgeschwindigkeiten vom Zentrum entfernen**
- **Jet sind Quellen starker Radiostrahlung, aber offensichtlich auch Quellen von Röntgen, Gamma- und mögliche Quellen ultra-hochenergetischer Teilchen**
- **Jets inzwischen auch in radio-leisen Objekten gefunden**

Idee & Konzept

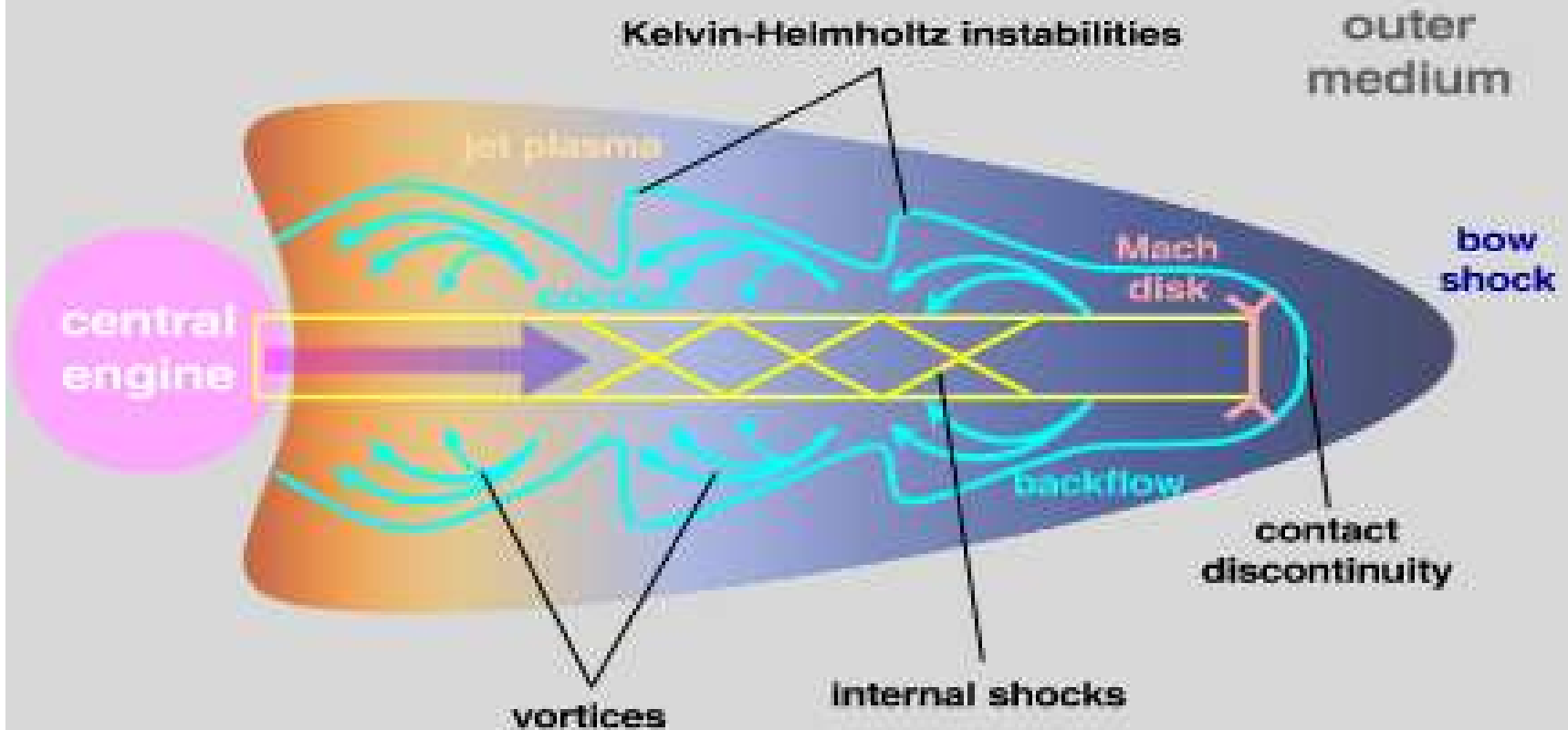
- Peter Scheuer (1974), Blandford & Rees (1974): Radiokeulen werden gefüttert durch Energietransport aus den Kernen optischer Galaxien via schmaler Jets!! (postuliert bevor beobachtet ...)
- Basis: Relativistisches Jet Modell von Blandford & Königl (1979): ist das de facto generelle AGN Paradigma: postuliert, daß AGN angetrieben werden durch ein Schwarzes Loch mit Akkretionsscheibe an der Basis eines relativistischen Stroms in Form von symmetrischen Zwillings-Jets
- Theorie beruht auf folgenden Grundlagen:
 - Quellencharakteristiken werden durch relativistische Verstärkung (relativistic beaming) bestimmt (Shklovskii 1963)
 - Relativistische Injektion von galaktischen Kernen (Rees 1966)
 - Akkretion von Materie auf ein zentrales Schwarzes Loch (Begelman et al. 1984)
 - Die inneren Jets werden magnetisch aus der schnell rotierenden Akkretionsscheibe gebildet (Blandford & Payne 1982)

■ Woraus bestehen Jets?

- **Synchrotron Plasma: vollständig ionisiert und wechselwirkungsfrei** (kann wie kontinuierlicher Fluß behandelt werden)
- Zusammensetzung: ? Elektron-Positron Plasma, könnte relativistische Protonen oder Positronen und nicht-relativistische (thermische) Protonen und Elektronen beinhalten; aufgrund des Ladungsausgleichs müssen positive Teilchen sein, müssen aber nicht zwangsläufig relativistisch sein + Magnetfeld: eingefroren im Plasma

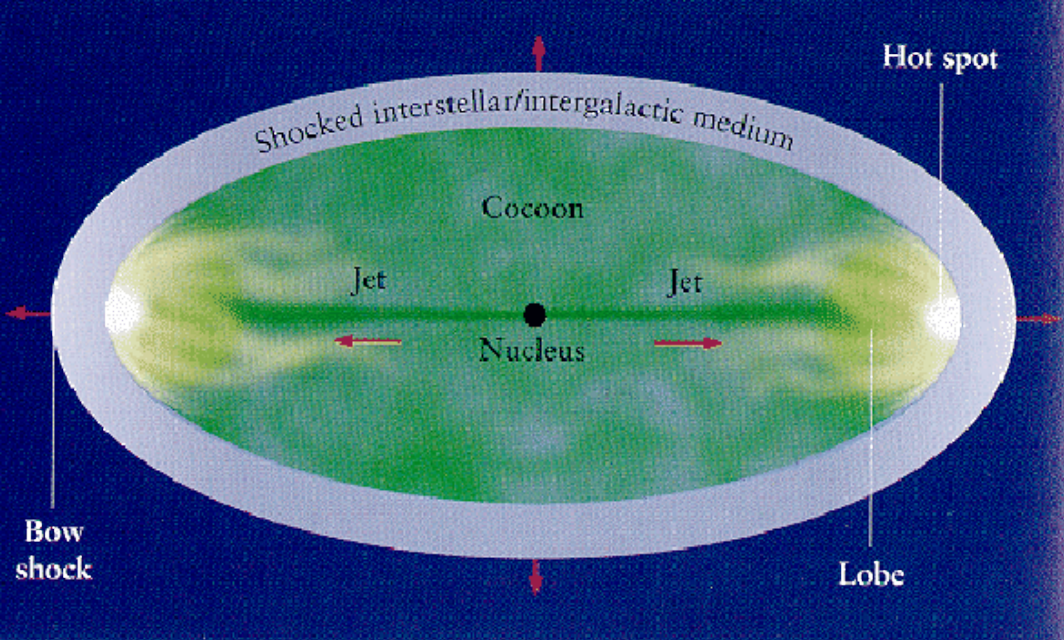
- Bewegung des Mediums wird meist adiabatisch sein, d.h. kein Wärmeaustausch mit benachbarten Elementen oder Produktion von Wärme durch internen Druck
- einige (empirisch gefundene) Gesetzmäßigkeiten:
 - Geschwindigkeit der Jets skaliert mit der Entweichgeschwindigkeit vom Zentralobjekt (bei Stern-Jets: einige 100 km/s; Neutronensterne: Bruchteil von c ; Schwarze Löcher: nahe c)
 - Massenausfluß in Quasaren: ein paar Prozent
 - Energie im Jet muß gleichmäßig auf Magnetfeld, relativistische Teilchen und kinetische Jetenergie verteilt sein
 - **=> radiolaute Quasare z.B. leiten fast ebensoviel Energie in ihre Jets, wie sie durch Heizung der Akkretionsscheibe abstrahlen (Jet muß im Innern produziert werden, genügend Energie)**

Jet propagation



Wechselwirkung des Jets mit seiner Umgebung

- Die stärksten Radioquellen haben eine Größe von 1 - 300 kpc, einfache Doppelstruktur und wohldefinierte äußere **hot spots**, die schwächeren Quellen erscheinen komplexer und sind "edge-darkened" ; Erklärung durch Vorstoß des Jetkopfes in das umgebende Medium
- junge Jets: kurz & wohl-kollimiert, Energiedichte am Jetende hoch und strahlungseffizient
- ältere Jets: Jet deutlich länger, Kollimierung nimmt ab, die Strahlunseffizienz läßt nach
- Die Geschwindigkeit mit der sich der **Jetkopf** des Kanals in das umgebende Medium ausbreitet ist sub-relativistisch ($>0.1c$) (sonst wären Radioquellen heller und größer)

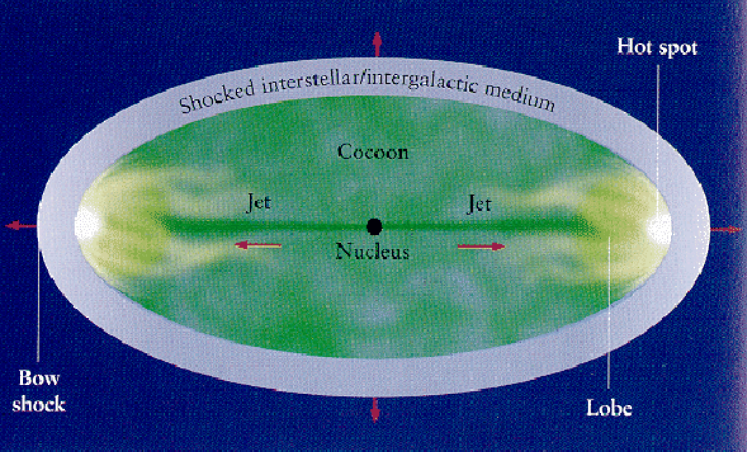


- Hot-spots: Regionen hoher Radio-Oberflächenhelligkeit an den äußeren Regionen der Radiokomponenten; einige kpc in Größe, elongiert senkrecht zur Quellenachse und mit sehr scharfen Kanten, rückwärts diffus ausgedehnt in Richtung der zentralen Komponente
- Projektionseffekt: in Wirklichkeit scheibenartig, Spektralindex zwischen 0.5 und 0.9
- Optische Leuchtkraft ist normalerweise geringer als die Radio-Leuchtkraft

Hot-spots

- In situ Teilchenbeschleunigung muß in den leuchtkräftigsten **hot spots** auftreten, Synchrotron Lebenszeiten der relativistischen Elektronen bei Radiofrequenzen substantiell geringer als die "Transportzeit des Jets" vom Kern
- Werden als Arbeitsfläche (working surface) am Ende des Jets interpretiert (Blandford und Rees 1974)
- Jet wird abgebremst in einem starken kollisionslosen Schock wobei Teilchen-Beschleunigung und Feldverstärkung auftreten können
- geschocktes Jetmaterial immer noch heiß wenn es **hot spot** Region verläßt
- Strom wird zurückgelenkt, Strom separiert von dem geschockten externen Medium durch Diskontinuität in welcher Mischung auftreten kann

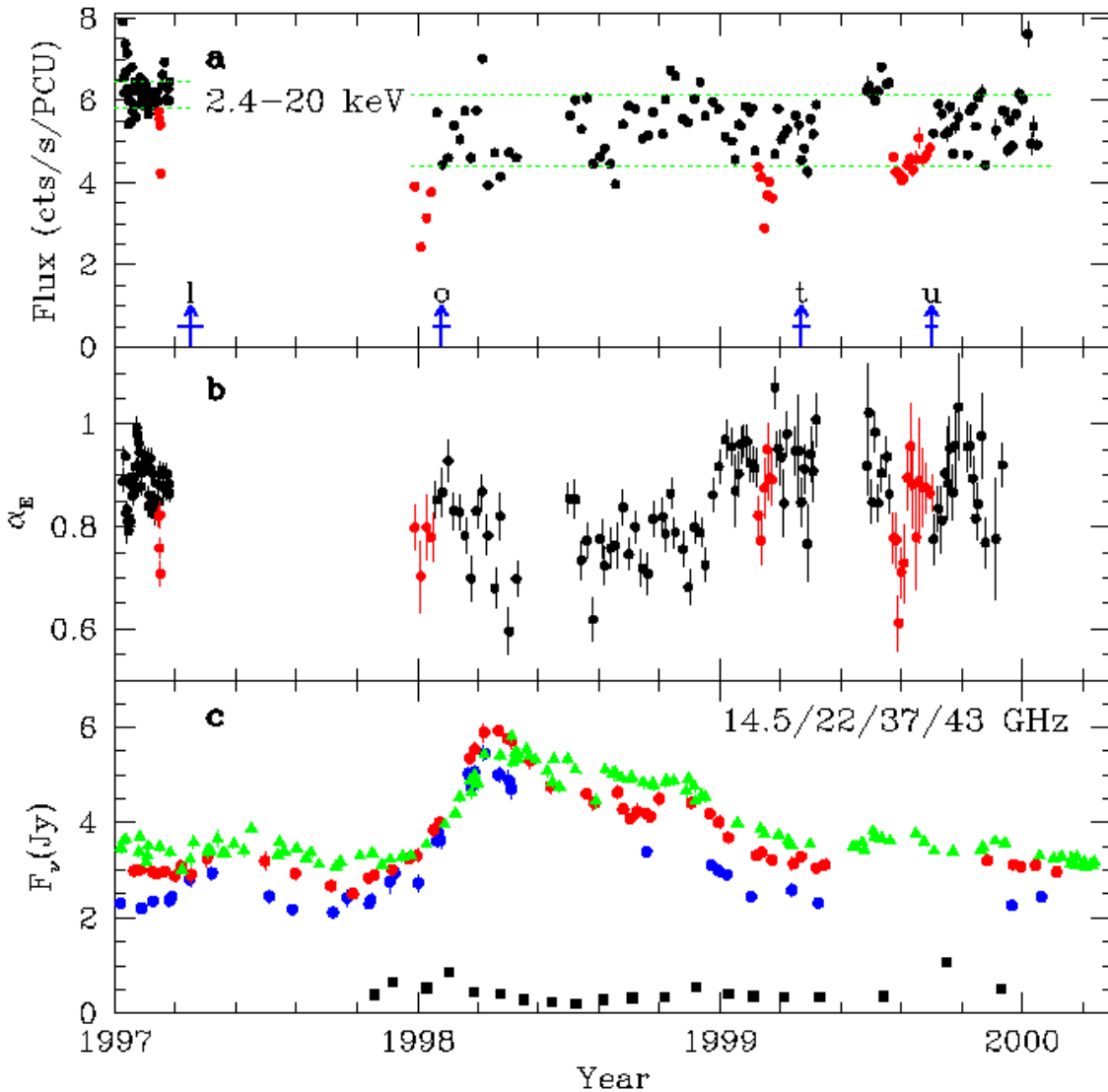
Cocoons



- Ober-und ausserhalb der **hot spots** gibt es Strahlung von Material aus den **hot spots**: häufig größere totale Synchrotron-Leuchtkraft als die begleitenden **hot spots**, aber Oberflächenhelligkeit geringer.
- **Cocoon** umgibt die Jets und häufig die gesamte Quelle, die Entwicklung der Form wird bestimmt durch
 - den Vorstoß des Jets und
 - den **Cocoon** Druck: seitwärts gerichtete Ausdehnung in das umgebende Medium

We füttert das Schwarze Loch den Jet?

„Massives Schwarzes Loch füttert seinen Jet“



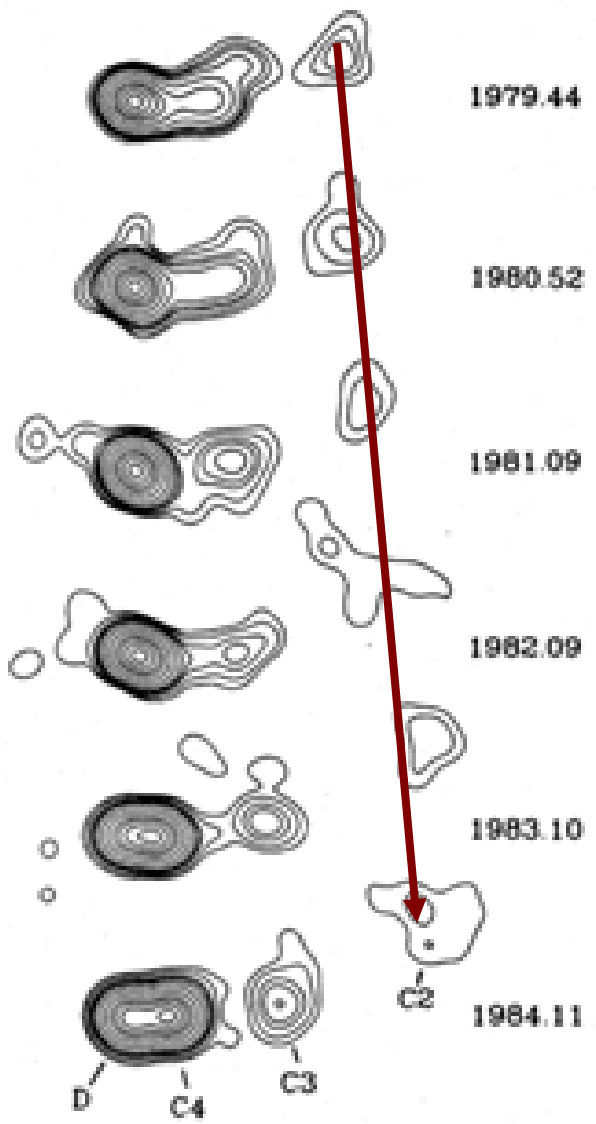
● X-ray (RXTE)

● Radio (Michigan)

Scheinbare überlichtschnelle Bewegungen?

3C345

10.7 GHz



1979.44

1980.52

1981.09

1982.09

1983.10

1984.11

D C4 C3

2 mas

3C 345

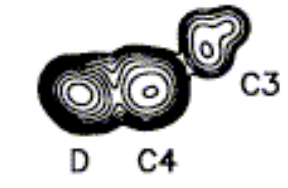
22 GHz

Relative Decl. (milliarcsec)

0

-5

-10



C3

D C4

1984.76



1985.75



1986.40



1986.87



1987.42



D C5

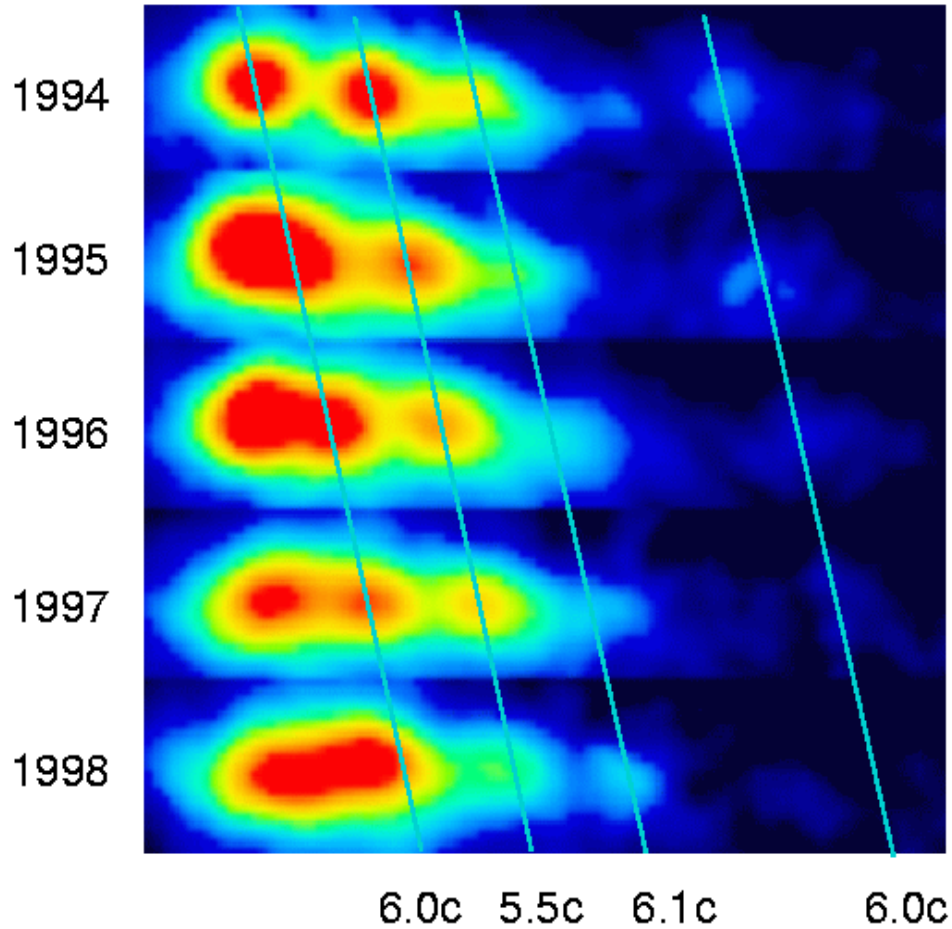
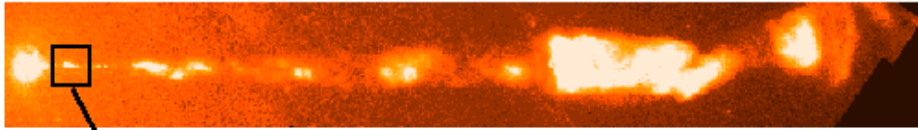
1988.16

0 -2 -4

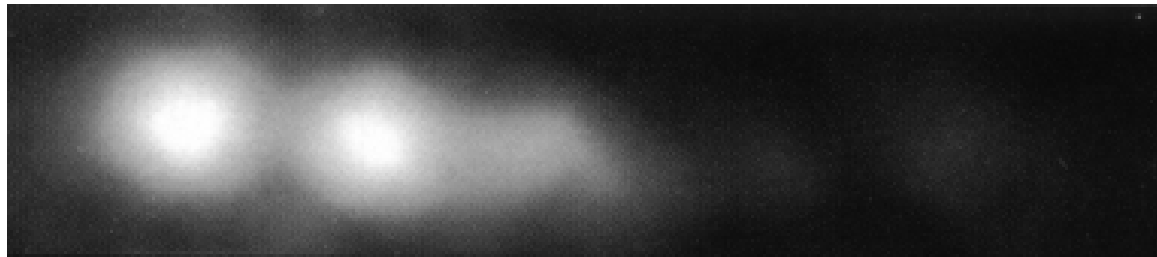
Relative R.A. (milliarcsec)

Scheinbar überlichtschnelle Bewegungen

Superluminal Motion in the M87 Jet

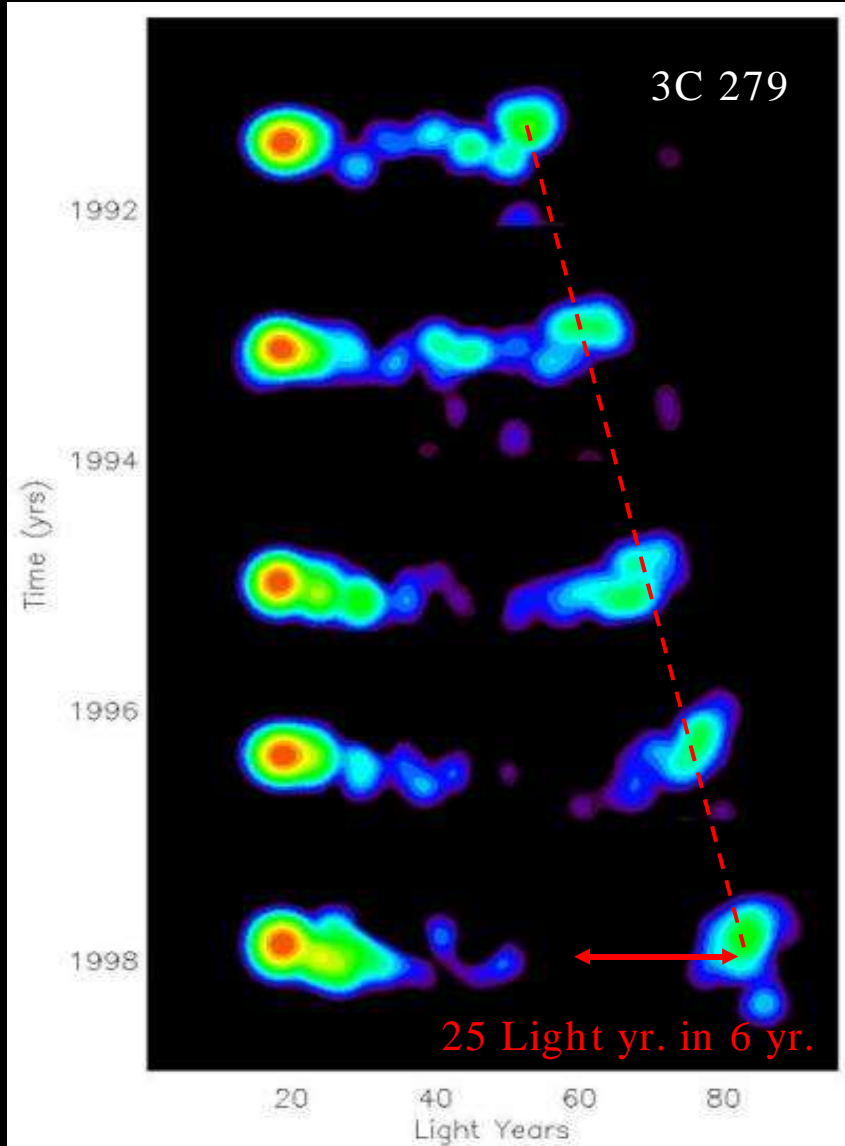


Scheinbar überlichtschnelle Bewegungen



John Biretta, Space Science Institute,
M 87, 6 fache Lichtgeschwindigkeit

Scheinbar überlichtschnelle Bewegungen



Wehrle et al. 2001

AT PARSEC SCALE

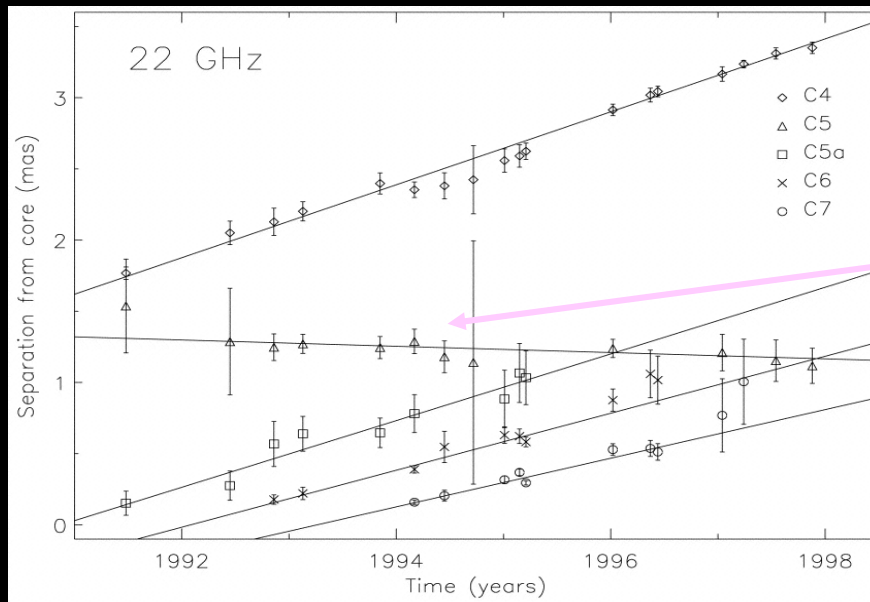
Typical VLBI observations show:

- Compact core (the innermost visible jet region)
- Knotty (components) jet like structure

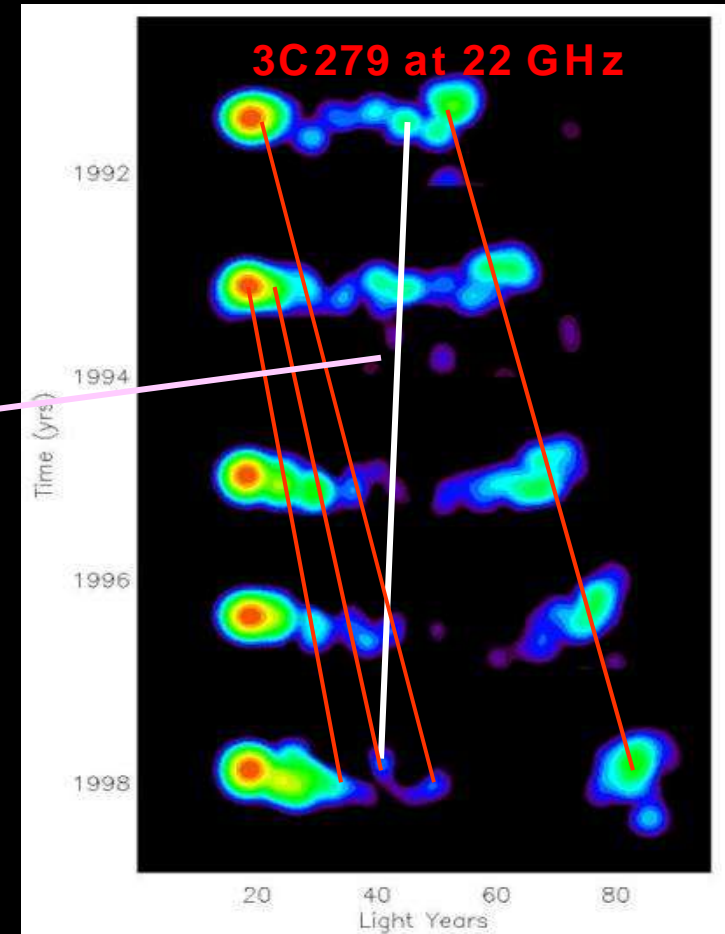
Very commonly observed are the

Scheinbar überlichtschnelle Bewegungen

AT PARSEC SCALE *Backward motions* are even possible



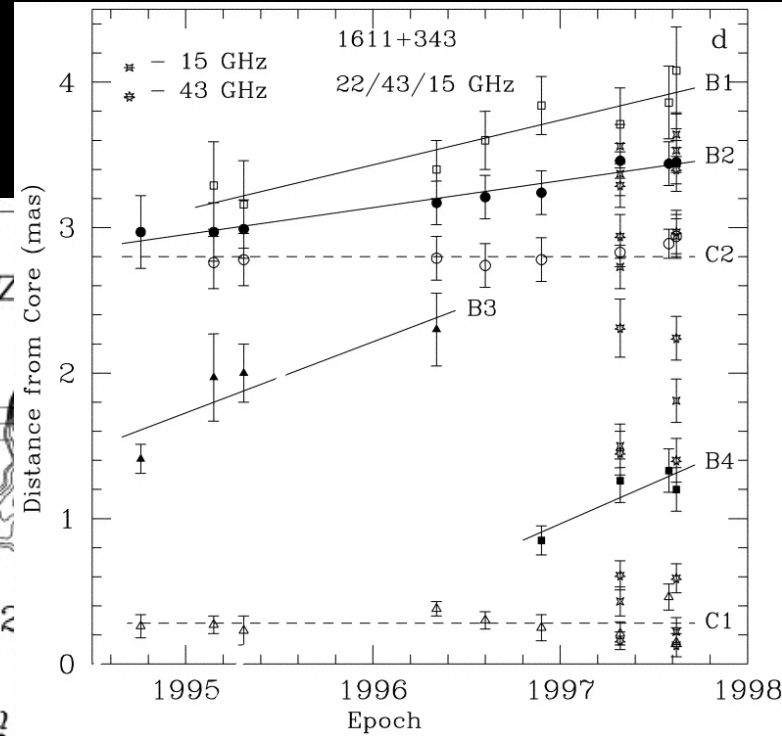
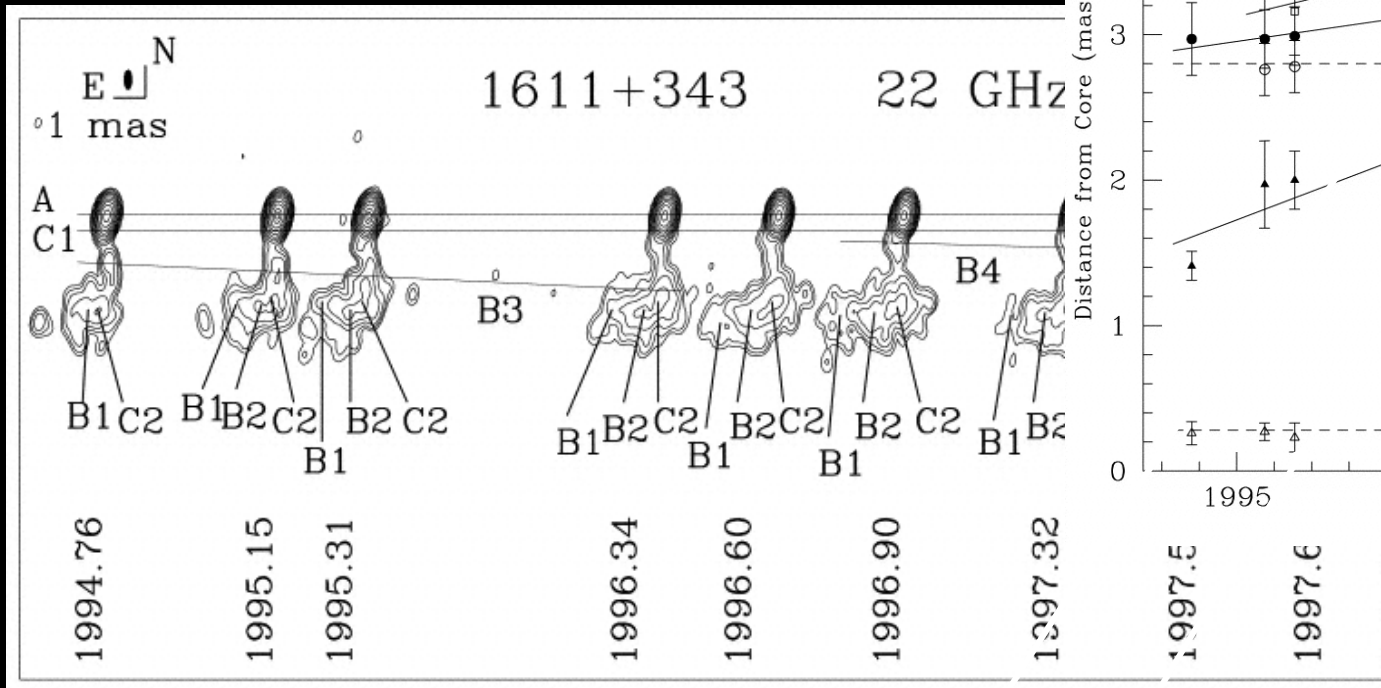
Indications of inward motions



Wehrle et al. (2001)

AT PARSEC SCALE stationary components, are also common

Motions in a sample of 42 γ -ray



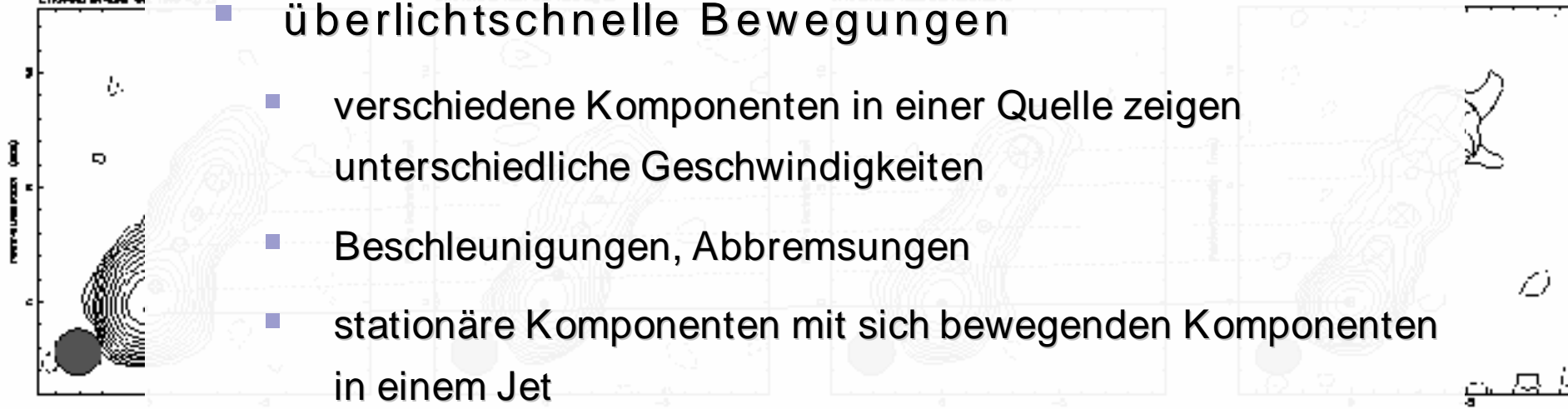
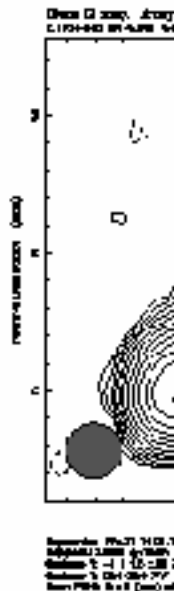
Jorstad et al. (2001)

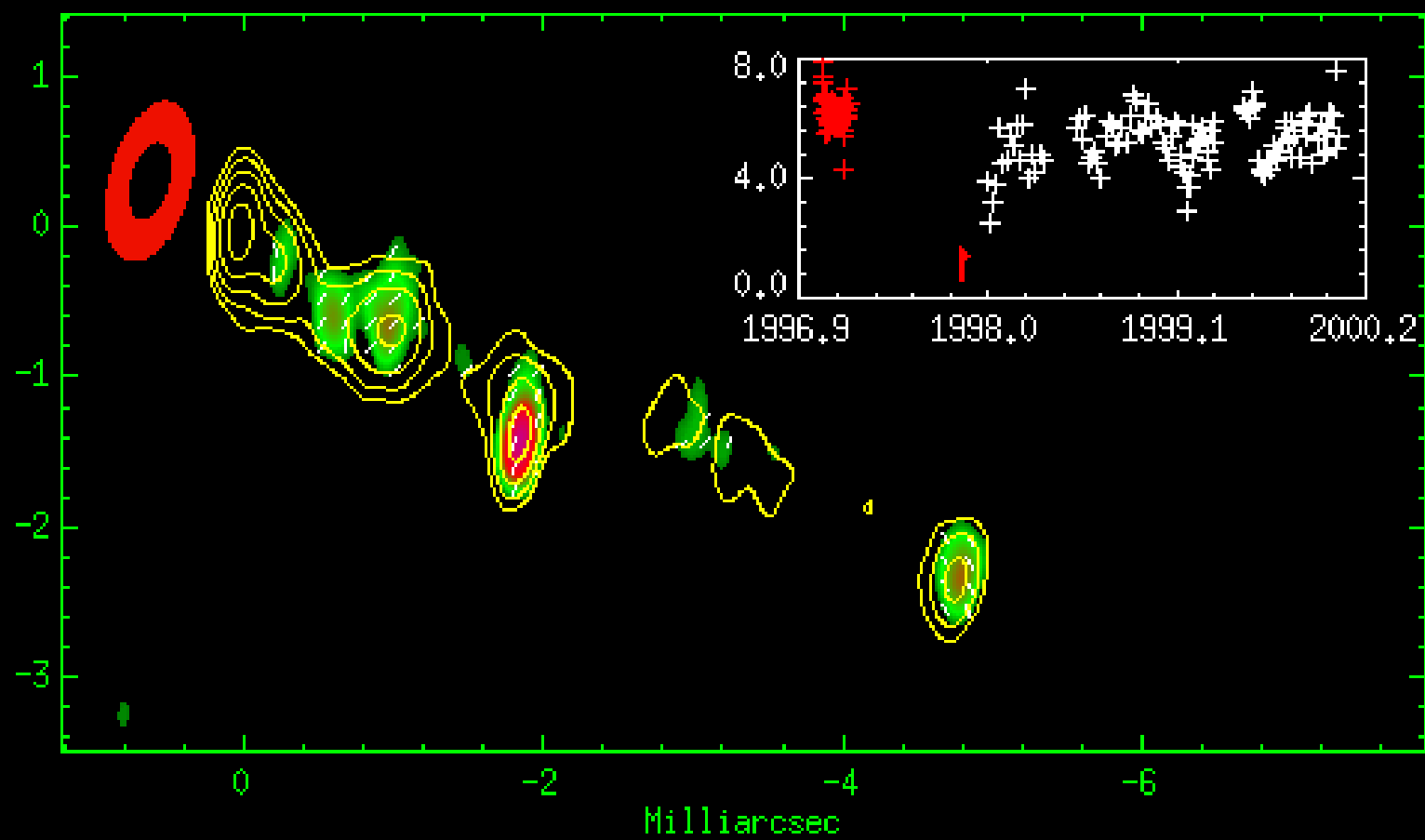
Most of the sources present stationary features!
 Close to the core associated with
 recollimation shocks
 Farther down the jet associated with bends

■ Morphologische Änderungen:

■ überlichtschnelle Bewegungen

- verschiedene Komponenten in einer Quelle zeigen unterschiedliche Geschwindigkeiten
- Beschleunigungen, Abbremsungen
- stationäre Komponenten mit sich bewegenden Komponenten in einem Jet
- komplizierte gekrümmte Pfade; unterschiedlich für verschiedene Komponenten
- Komponenten können im Jet "entstehen"
- ...





Doppler-Verstärkung = beaming

- Relativistische Jets:
- Einseitige Kern-Jet Morphologie & scheinbare überlichtschnelle Bewegungen; Grund:
 - Relativistische Bewegungen sehr nahe zur Sichtlinie (Rees 1966; Blandford, McKee, Rees 1977); scheinbare Einseitigkeit reflektiert die Doppler-Verstärkung der Strahlung des uns entgegenkommenden Jets im Vergleich zu dem Jet, der sich von uns wegbewegt
- **Doppler-Favorisierung reagiert sehr kritisch auf die Orientierung, die beobachteten Flußdichten unterscheiden sich um den Faktor:**

Doppler-Verstärkung

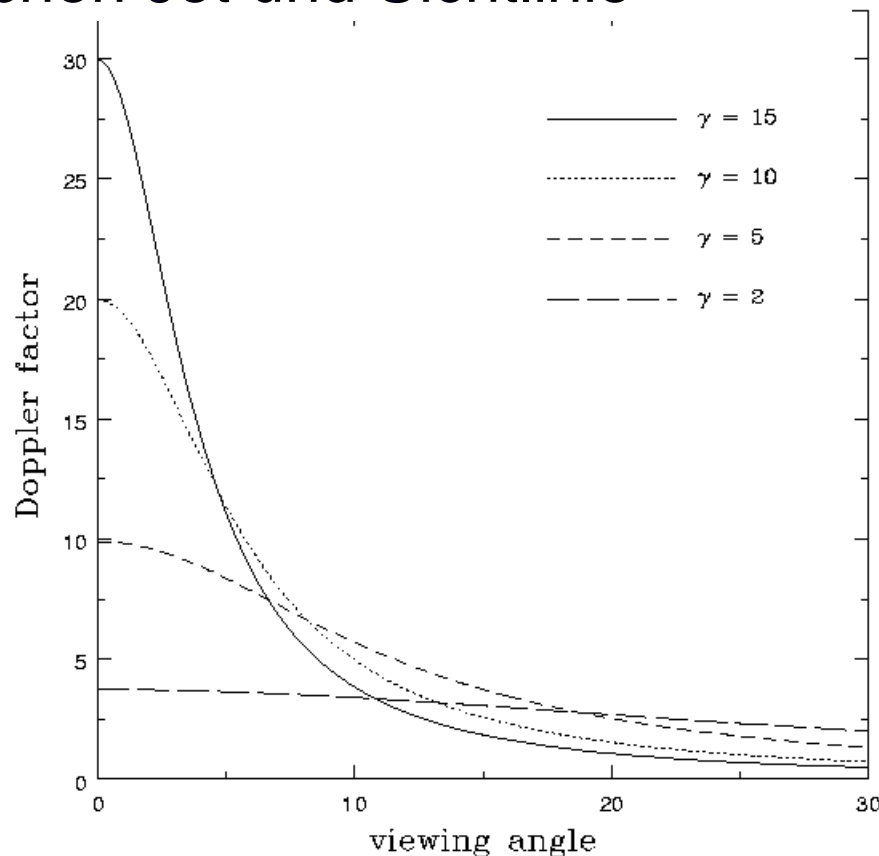
■ Verstärkungsfaktor:

$$\left[\frac{1 + v_j \cos\theta / c}{1 - v_j \cos\theta / c} \right]^{2+\alpha};$$

v_j ist die Jet-Geschwindigkeit;

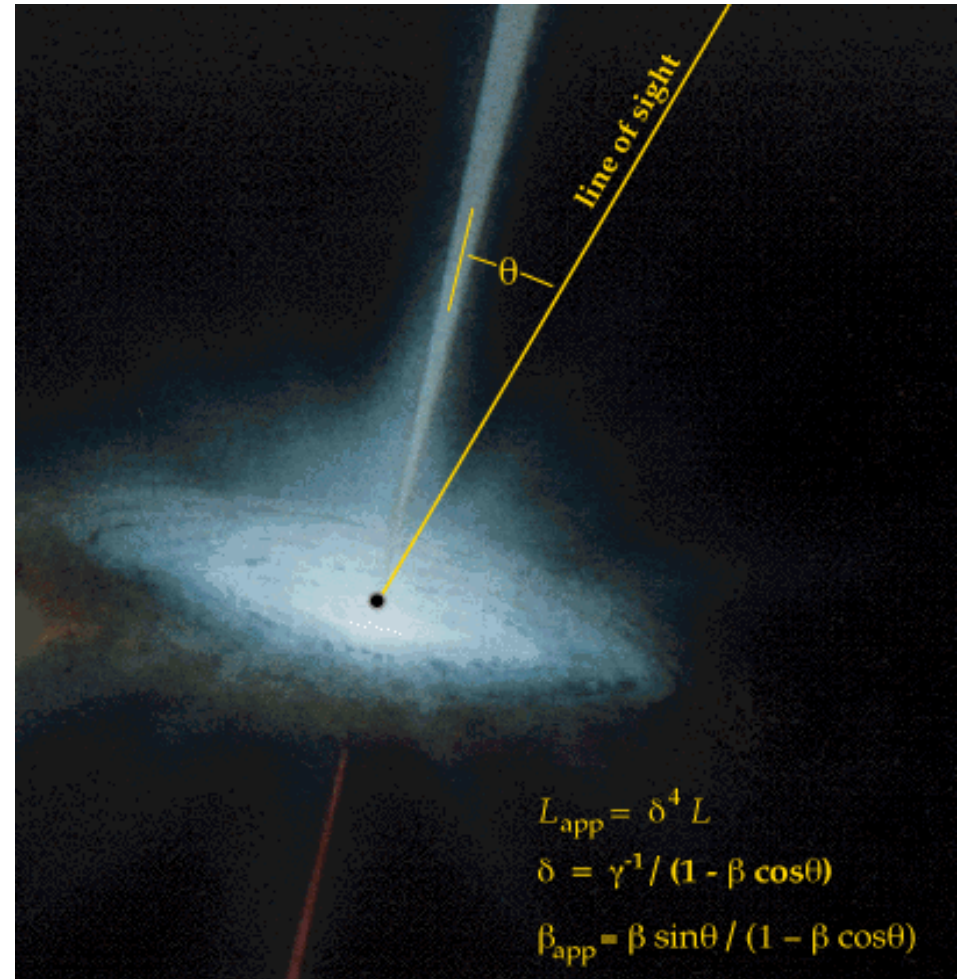
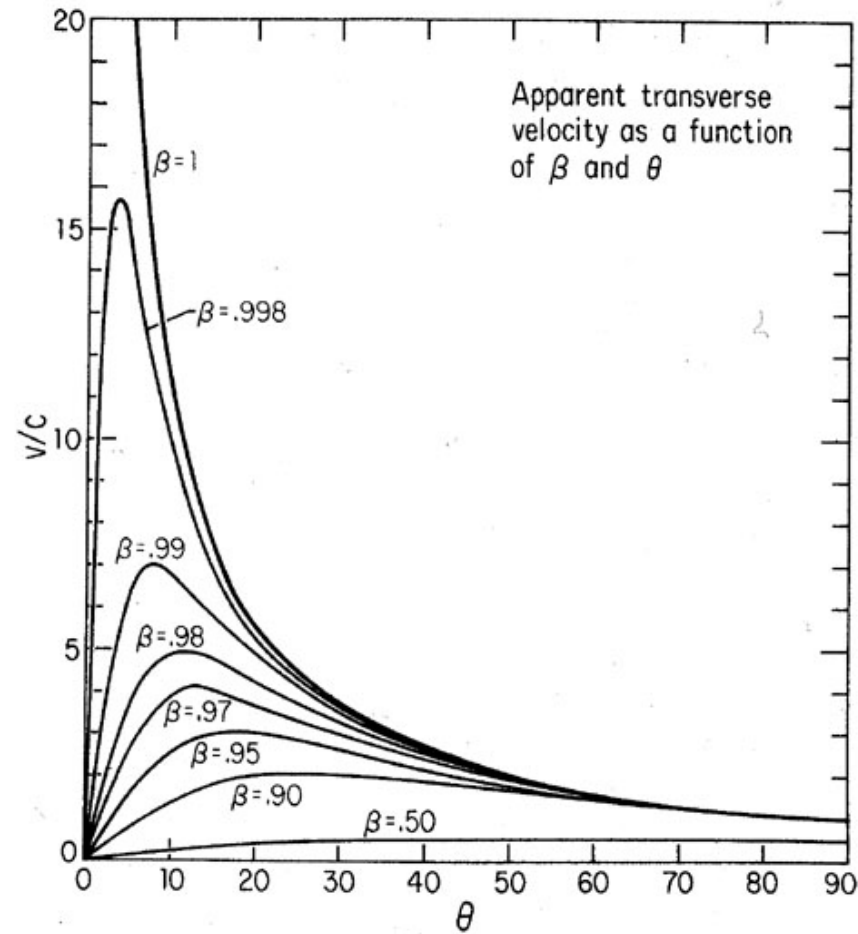
α Spektralindex; θ Winkel

zwischen Jet und Sichtlinie

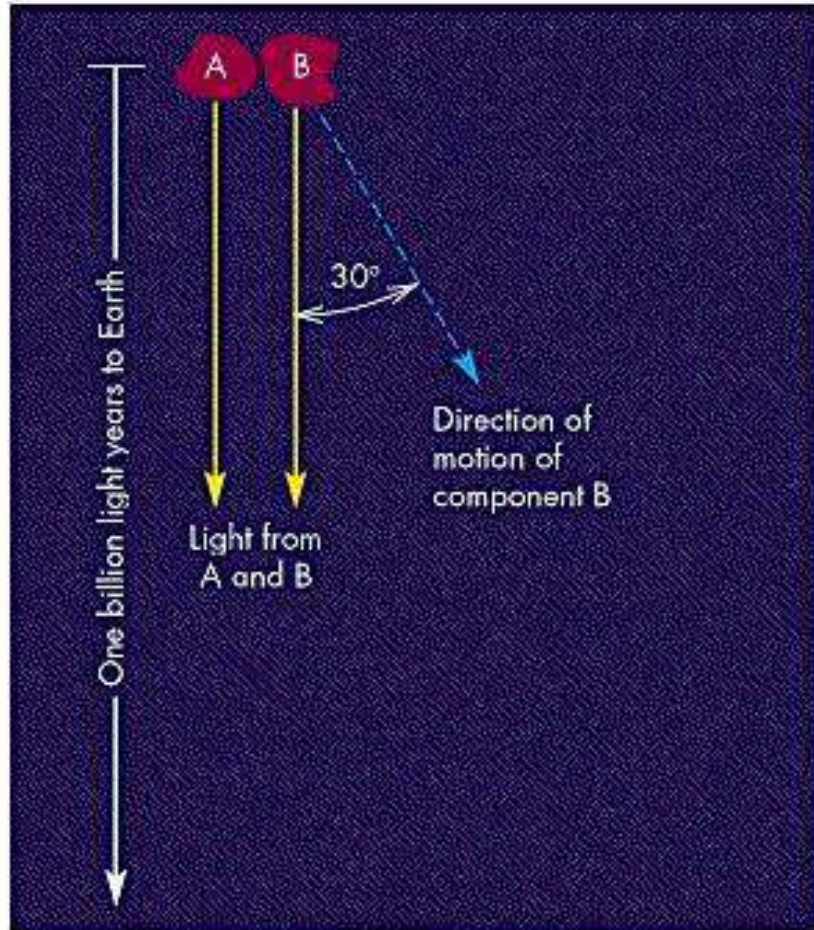


★ Relativistische Jet-Geschwindigkeiten sind die Basis für eine generelle Erklärung von einseitigen kompakten Jets

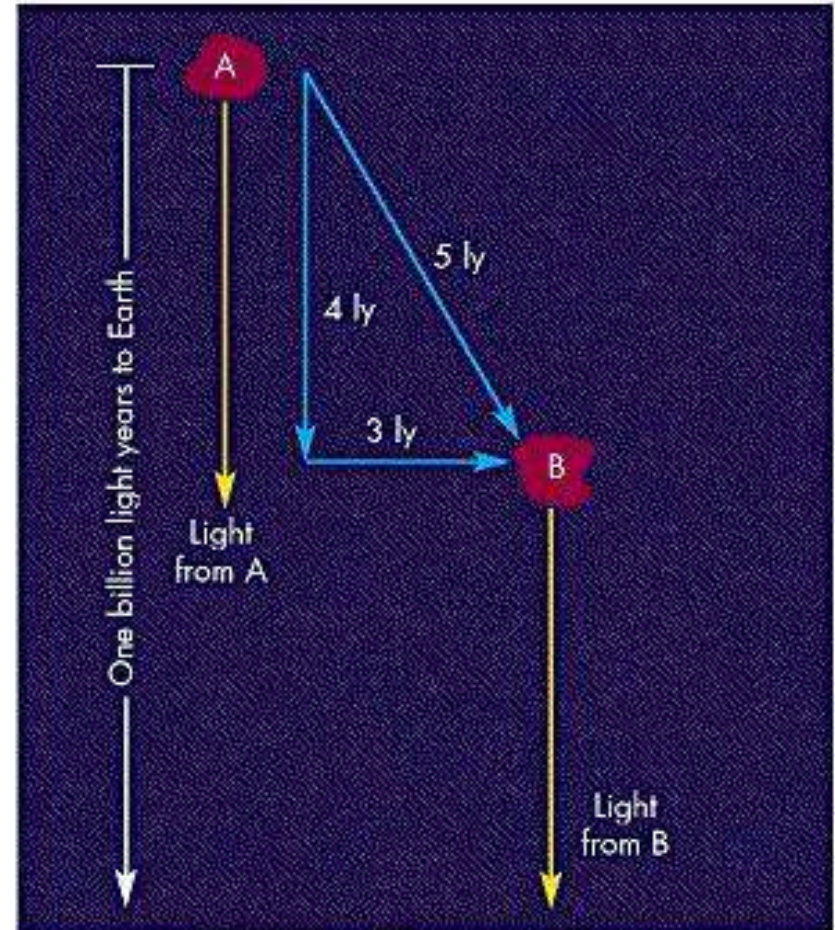
Scheinbar überlichtschnelle Bewegungen



Scheinbare überlichtschnelle Bewegungen



A Light from quasar components A and B is observed on Earth 1 billion years later

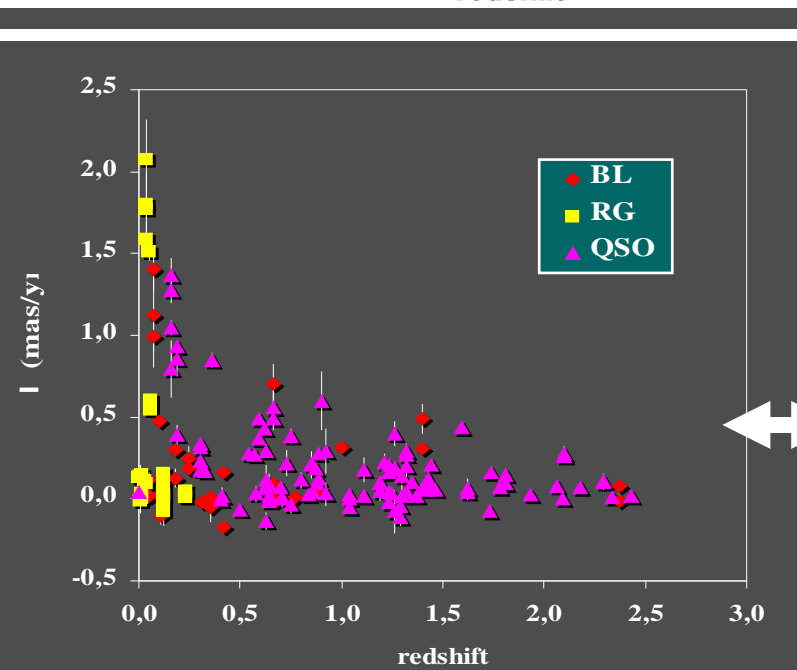
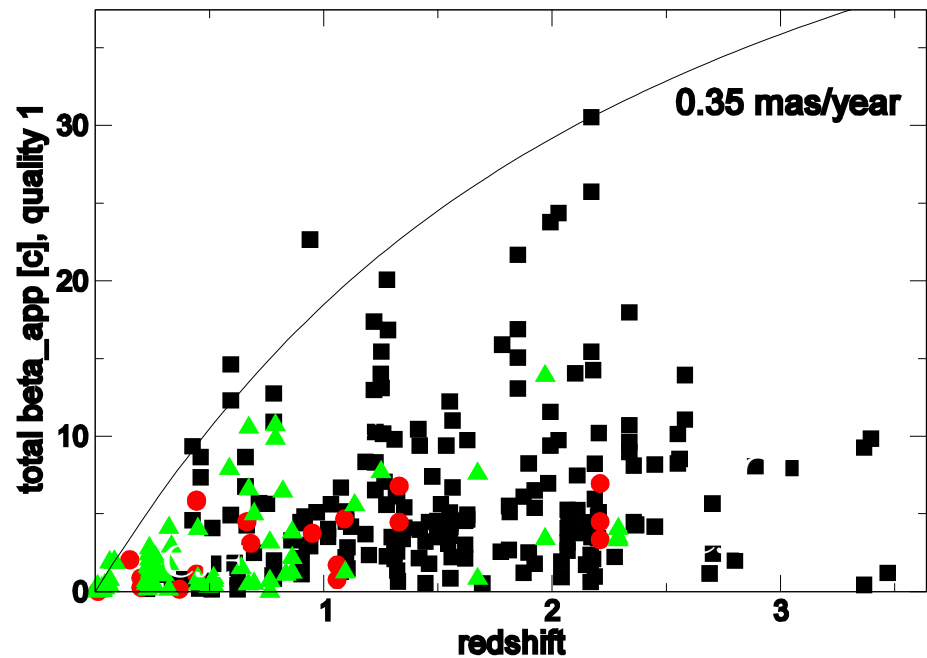
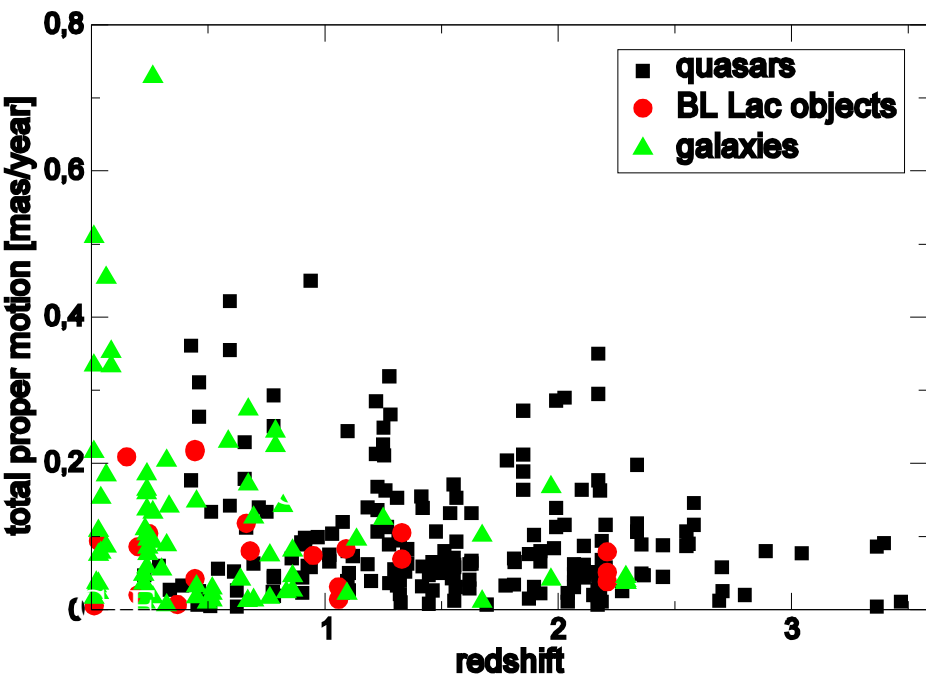


B Five years later: Light from A still takes 1 billion years to reach Earth; light from B takes 4 years less

Relativistische Jets & Probleme

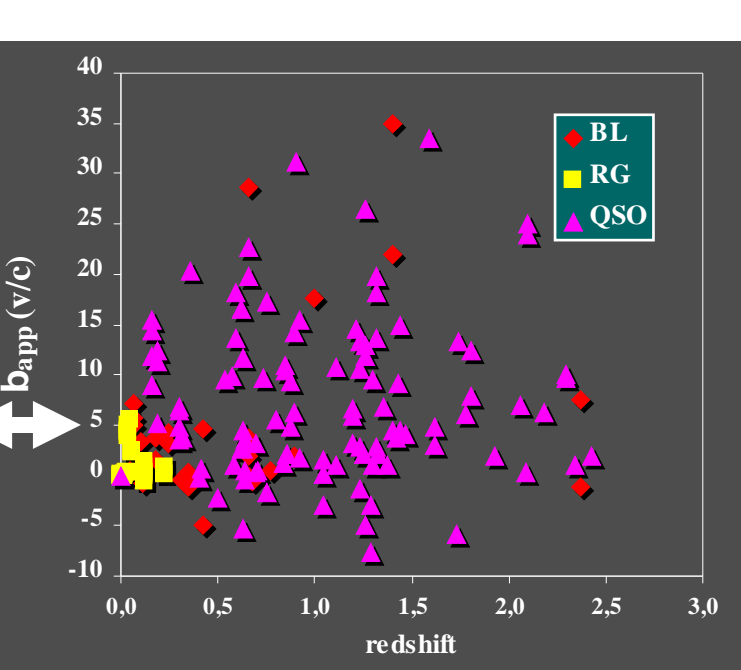
■ Probleme mit der relativistischen Interpretation:

- Wenn große Jets auf uns zu "gebeamt" sind, dann sind ihre wahren Längen deutlich größer
- Einige durch die Doppler-Favorisierung verstärkten Quellen weisen Krümmungen auf -> subrelativistische Jet-Geschwindigkeiten; wir gehen von linearen Bewegungen aus -> werden noch schneller !
- In einigen Quellen gibt es unabhängig Geschwindigkeits-Informationen, siehe NGC 1265: 10 000 km/s; oder 3C 449: 300-500 km/s

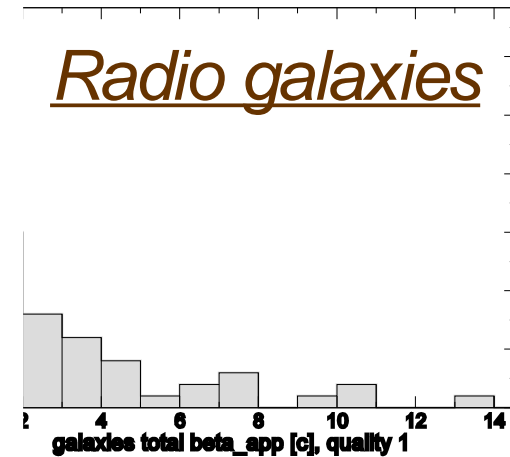
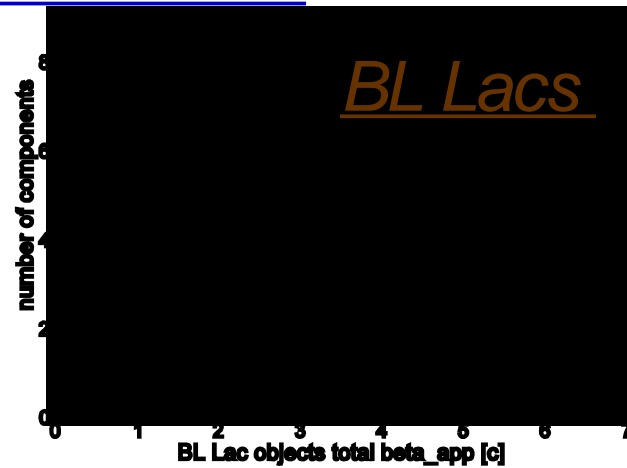
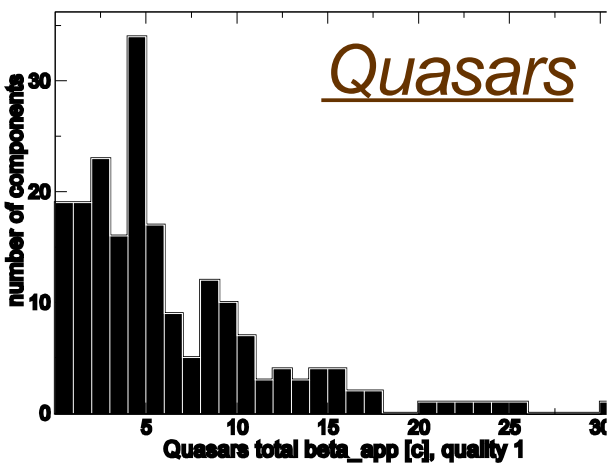


CJF, Britzen et al. In prep
2 cm survey
Kellermann et al., 2004,

H0=65, Wm=0.3



Scheinbare überlichtschnelle Bewegungen für verschiedene Klassen von AGK



■ Apparent motions:

- Quasars ($4.5 \pm 4.2c$) > BL Lac Objects ($3.1 \pm 2.8c$) > Radio Galaxies ($1.2 \pm 1.9c$) => *in agreement with unification scenarios*
- **mainly acceleration**, broad range of velocities within jets
- Slower apparent velocities than in 2cm-survey (Kellermann et al., subm.) => **increase in apparent velocity with frequency of the survey** (see also Jorstad et al.): no final explanation yet!!

Lebensdauer der Jets?

Lebensdauer der Jets

- **Beobachtung:** äußere "lobes" befinden sich in Entfernungen von 300 kpc vom Kern !!
 - auch wenn Material mit Lichtgeschwindigkeit fliegt -> muß den Kern vor 1 Mio Jahren verlassen haben
- **Beobachtung:** Jet ist kontinuierlich !!
 - Prozeß muß über die gesamte Zeit kontinuierlich gewesen sein
- **schwer beobachtbar:** Jets können intrinsisch gekrümmt sein !
 - Zeitskala für Transport wird deutlich länger
- **Beobachtung:** aus Radioleuchtkraft der lobes kann das Alter bestimmt werden

Millionen von Jahren, klein im Vergleich zum Alter des Al

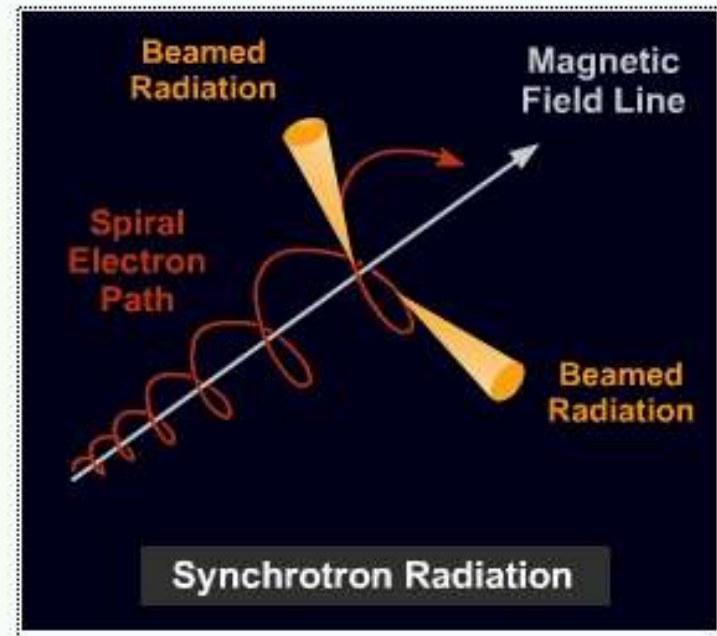
Jetphysik

■ Beobachtung: Synchrotron-Strahlung von Jets -> energetische Elektronen Magnetfeld

- Problem: Synchrotron strahlendes Ensemble von Elektronen hat eine Lebensdauer von

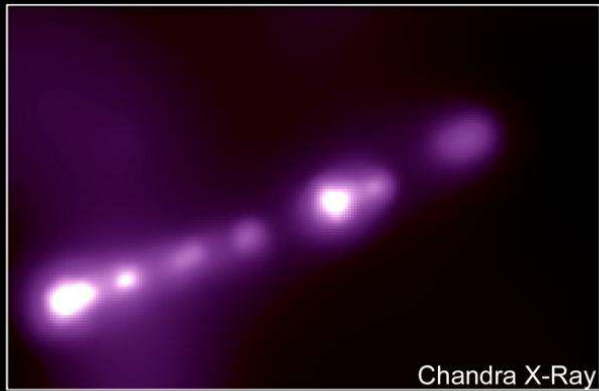
$$= (m_e c^2)^2 / (10^{-14} B^2 E) \text{ sec}$$

mehrere Größenordnungen geringer als die Zeit, die die Elektronen brauchen, um an die äußersten Regionen zu gelangen

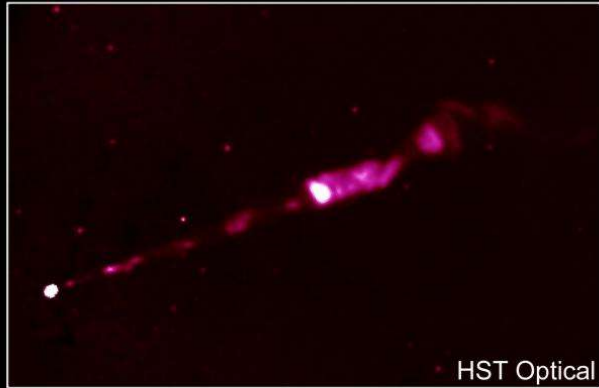


Lösung: zur Erklärung zu großer Lebenszeiten wird komplexe Form des Transports von Jetmaterial benötigt, der die Synchrotronstrahlung unterdrückt; und zwar durch Mechanismen wie

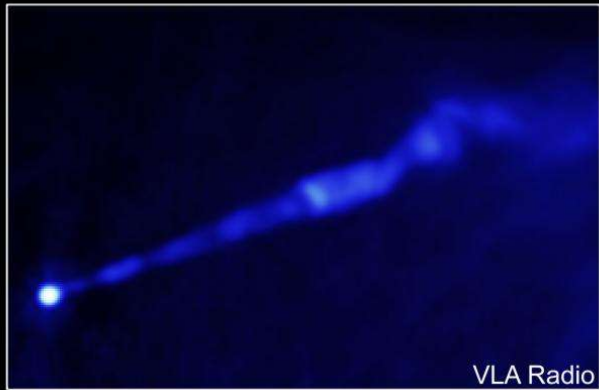
Kollimation



Chandra X-Ray



HST Optical



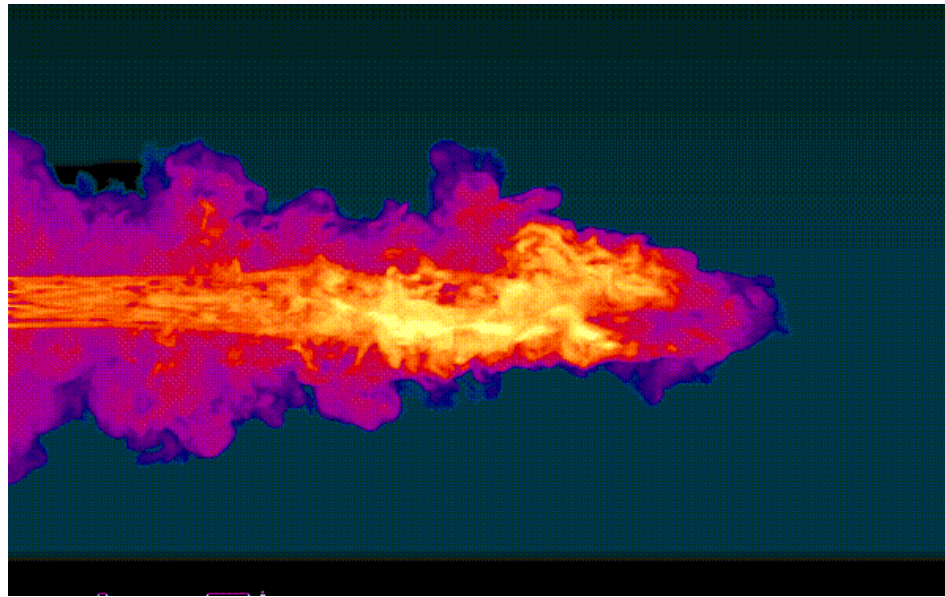
VLA Radio

- "freier Jet" (nicht eingeschränkt), dehnt sich bei Vorwärtsbewegung zu den Seiten hin aus
- => extrem langer Bleistift-beam muß kollimiert werden, durch
 - interne Kollimation, oder
 - äußeren Druck

NASA/MIT/H.Marshall et al. (Chandra), NSF/NRAO/VLA (VLA), NASA/STScI/UMBC/E. Perlman et al. (Hubble)

Kollimation

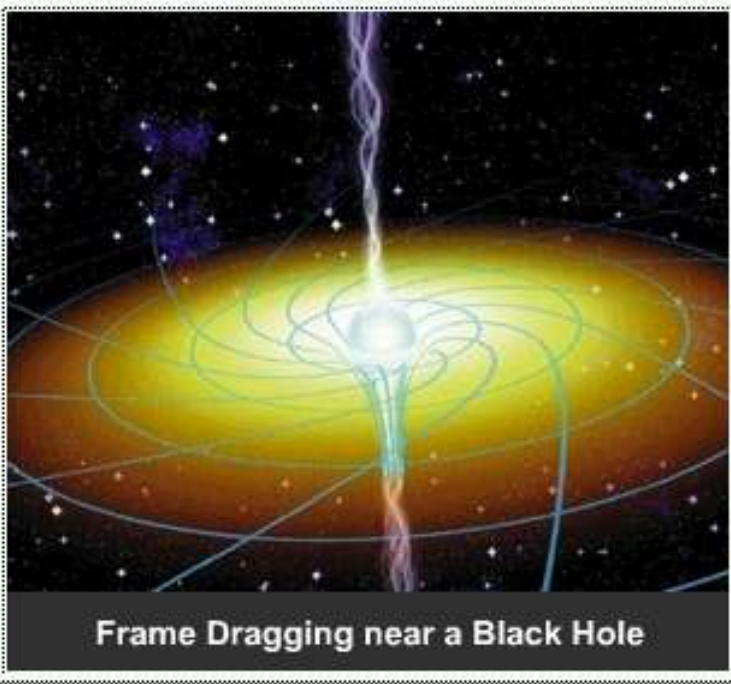
- **Beobachtung:** der Strom von Jets geringer Geschwindigkeit wird schnell zerstört
- **Beobachtung:** ist der Jet supersonisch: wird er nicht gestört; Jets bleiben solange kollimiert, wie sie supersonisch sind
- Modelle können Jets inzwischen recht gut reproduzieren, reale Jets spannen eine Längenskala von 10^8 : weit jenseits der Modelle



Kollimation

- zwei Parameter bestimmen die Struktur der **Jets** und **lobes**:
 - wie supersonisch der **Jet** ist (Mach-Zahl: Geschwindigkeit des Stroms verglichen mit der Geschwindigkeit des Schalls in dem Material)
 - das Verhältnis von Dichte des Gases innerhalb des Jets zu dem des umgebenden Mediums
 - Modelle heute: supersonischer Jet produziert **Bow-Schock**, **cocoon**-artigen Rückfluß (vorausgesagt von Scheuer und Blandford & Rees)
- **Beobachtung**: viele Jets wurden bereits "quer" aufgelöst in Richtung über den Jet und zeigen die hellste Region im Innern: Emission stammt vom Material, welches im Jet transportiert wird, und nicht vom umgebenden Material, welches durch die Ausdehnung des Jets durch **das Medium** angeregt wird

Erzeugung der Jets



■ das beste Modell zur Zeit: dünne Akkretionsscheiben können kollimierte und relativistische Jets erzeugen

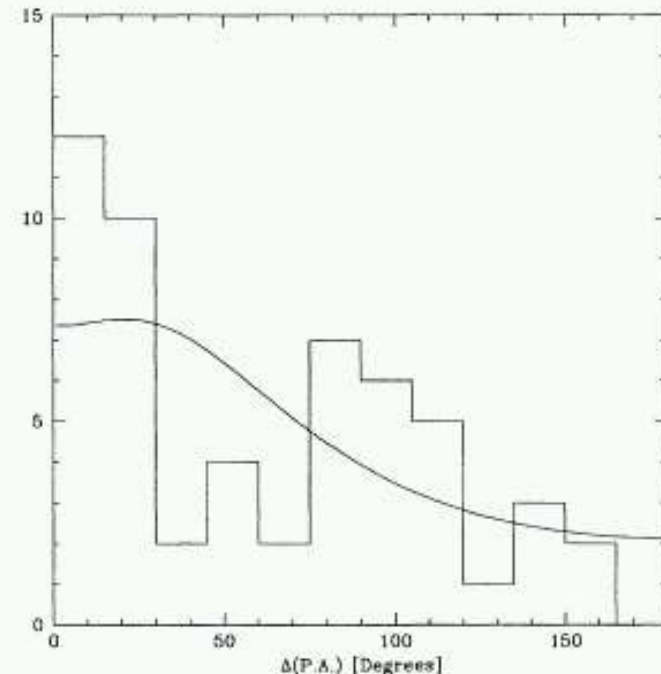
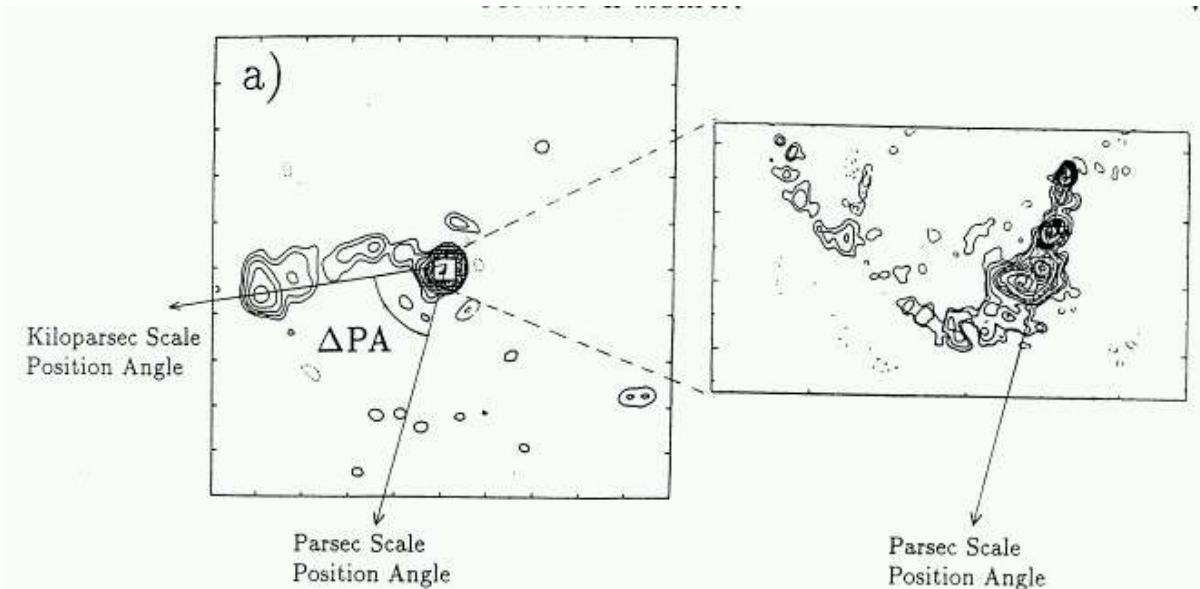
- Haupt-Kollimations-Mechanismus: Wechselwirkung der strömenden Teilchen mit Magnetfeld; Strom der Teilchen nach außen kommt vom Druck der extrem heißen Korona eingefädelt durch rotierende magnetische, current-carrying Feldlinien; Magnetfeldlinien reichen so weit nach außen, bis magnetische Reconnection geschieht, da die Feldlinien nicht länger mit der Scheibe mitrotieren können

Kollimation

- Jet wird so stromabwärts kollimiert durch re-connected magnetische Ummantelung -> könnte der "Kern" des Jets sein
- Modell prophezeit: Akkretionsrate und Jetgeschwindigkeit sollten korreliert sein -> Quasare sollten stark relativistische Jets haben und FRI Quellen schwächere oder sub-relativistische Jets -> wird im Wesentlichen von Beobachtungen gestützt
- Modelle produzieren relativistische Jets mit großem Bereich an möglichen Lorentz-Faktoren, viel höher als zur Zeit beobachtet wird -> Mechanismus wird benötigt, der dem Lorentz Faktor natürliches Limit setzt

Misalignment = Falschausrichtung

- Resultat der ersten Caltech-Jodrell Bank VLBI Stichprobe: Problem der falsch ausgerichteten Jets
 - der Winkel zwischen der durch die **VLBI-Beobachtungen bestimmten pc-Jets** und des durch **VLA-Beobachtungen bestimmten kpc-Jets** ein und derselben Quelle => die meisten Quellen weisen Unterschied von 0 Grad auf (d.h. gleich ausgerichtet); aber: zu große Anzahl mit 90 Grad !!



Misaligned AGN

■ Pearson & Readhead 1988: too many misaligned jets!!

- Misalignment Angle: Angle between pc- Jet (VLBI- scale) and kpc- Jet (VLA- scale) of the same source => misalignment angle of 0 (i.e. aligned) for most sources; but: beaming cannot explain number of misaligned objects!!

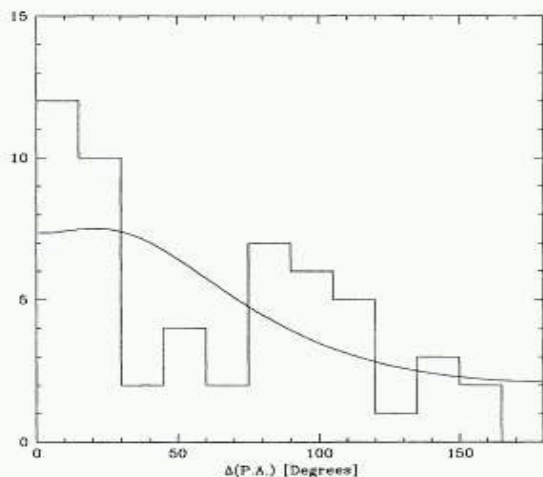
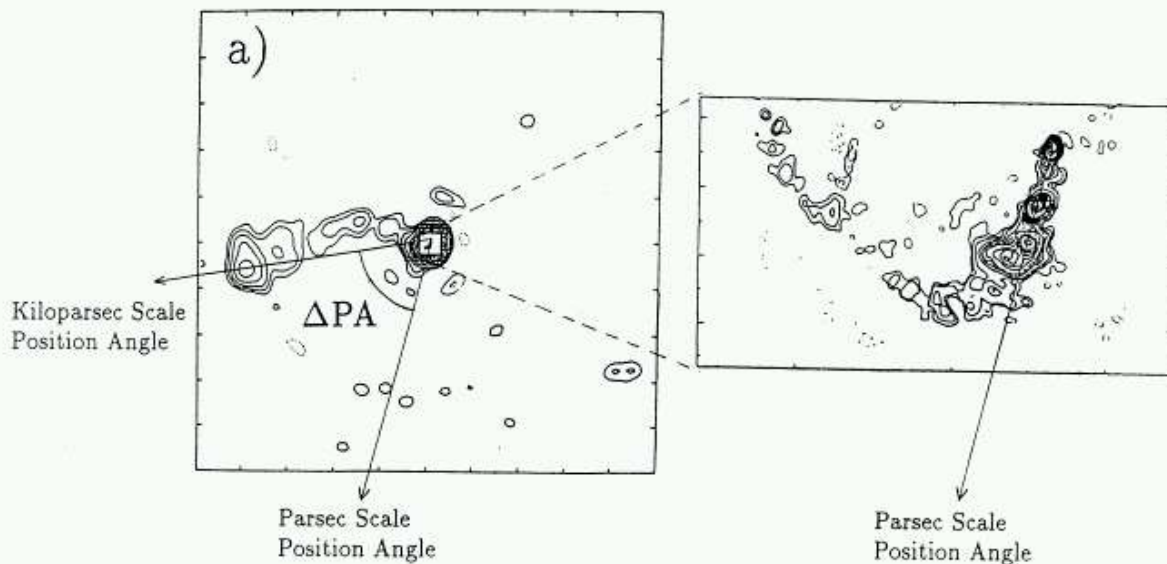


Fig. 1. Histogram of misalignment angle $(\Delta PA)_{\max}$ between nuclear jet and extended structure for 54 sources of the samples PEA88, KOL92, WEH92 and CON93. There are 55% of sources with $\Delta PA > 45^\circ$. The solid line shows the best fit obtained by a simple bend model with $\psi = 6.5^\circ$ and $\gamma = 10$. Its probability to be compatible with the data is only 20% (see Table 1).



3C 309.1 .

Conway & Murphy, 1993, ApJ

411, 89

Appl et al. 1996,
A&A 310, 419

Misalignment = Falschausrichtung

- **bedeutet:** kpc-Jet wurde gekrümmt um rechten Winkel während er sich aus der Kern Region nach außen ausgebreitet hat
- Astronomen hofften, dies sei Statistik mit kleinen Zahlen und würde bei einem größeren Datensatz verschwinden
- zweite **Caltech-Jodrell Bank VLBI Stichprobe**: 90 Grad Peak verschwand, größerer Datensatz
- war nicht das Ende der Geschichte: erneute Darstellung der Quellen mit hoher optischer Polarisation: 90 Grad Peak ist wieder da !!

Misalignment = Falschrichtung, Lösung

a)

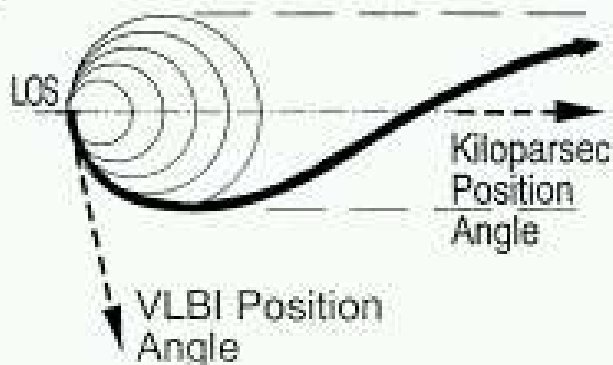


- werden die Jets tatsächlich um 90 Grad gekrümmt von pcs zu kpcs?
Unwahrscheinlich, bislang keine befriedigende Theorie oder Modell

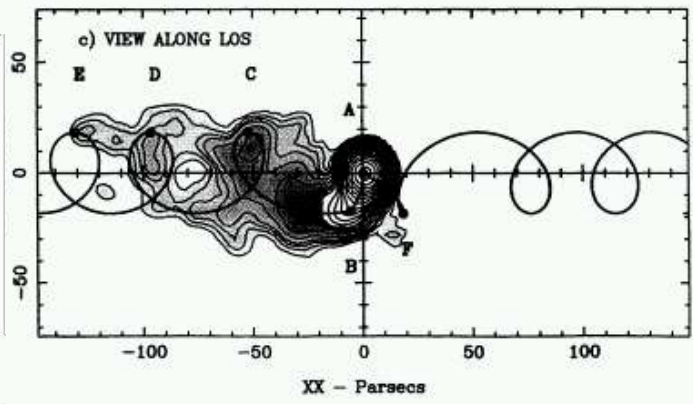
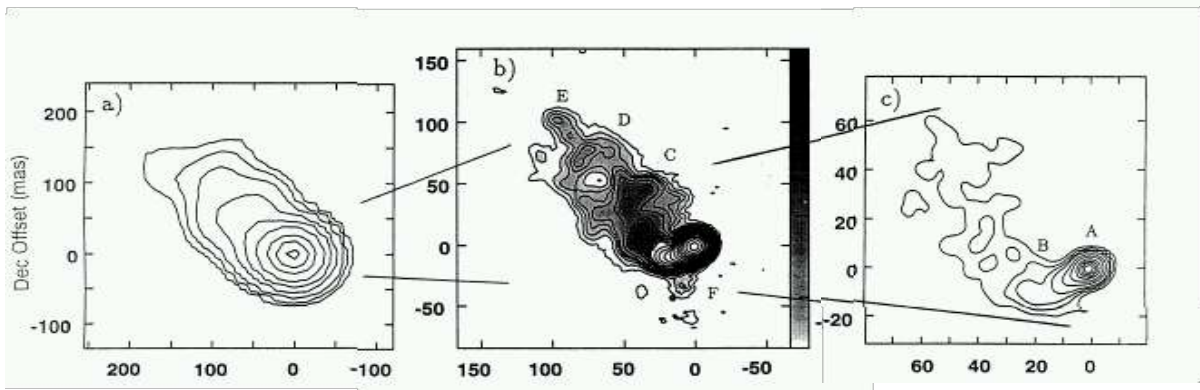
■ **Lösung:** pc-Jet bewegt sich in **helikaler Art**, Doppler Verstärkung erzeugt einen bevorzugten Sichtwinkel für den helikalen Jet : **exakt 90 Grad**

■ => VLBI Jet für die “gebeamten” Quellen zeigt nicht die wahre Richtung des Stroms

b)

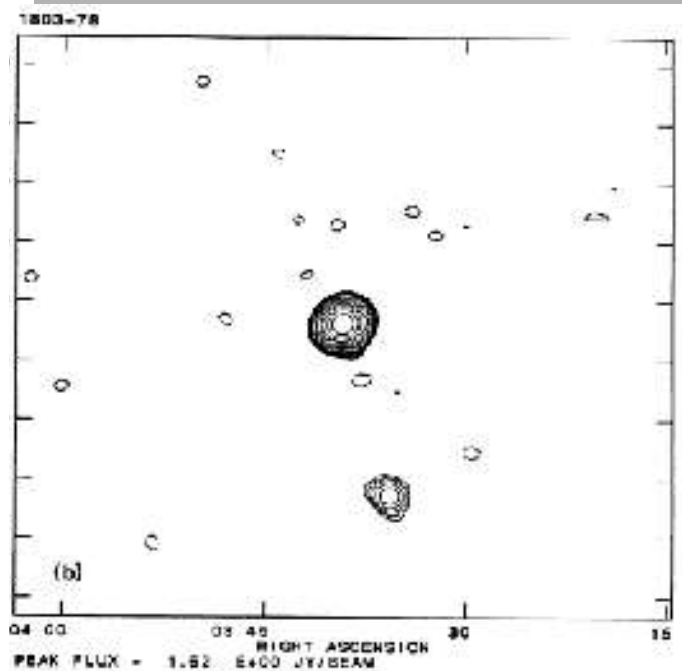
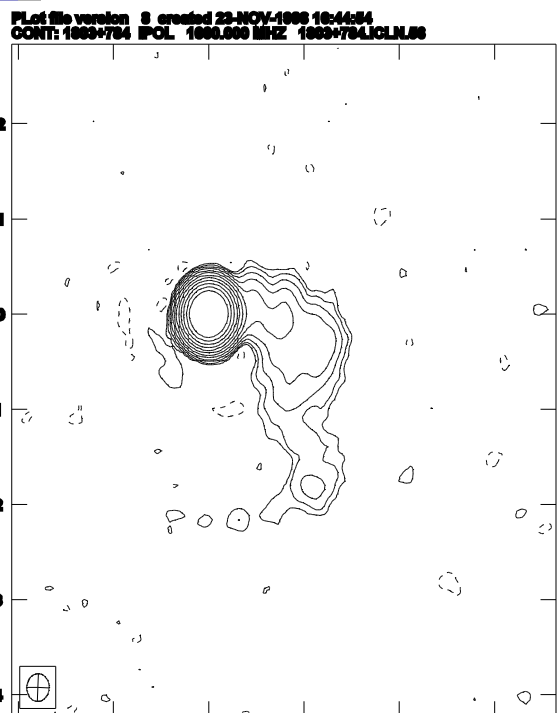
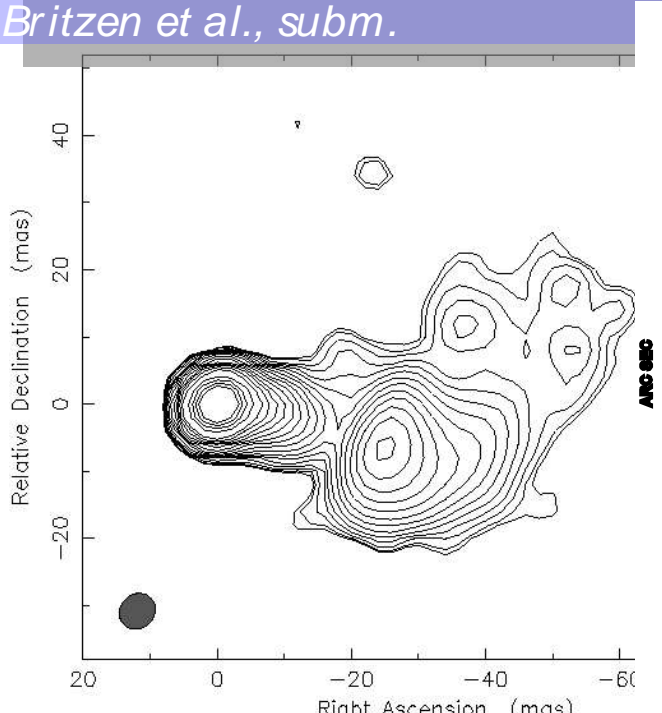


Beziehung zwischen helikalen Jets, Falschrichtung und BBH

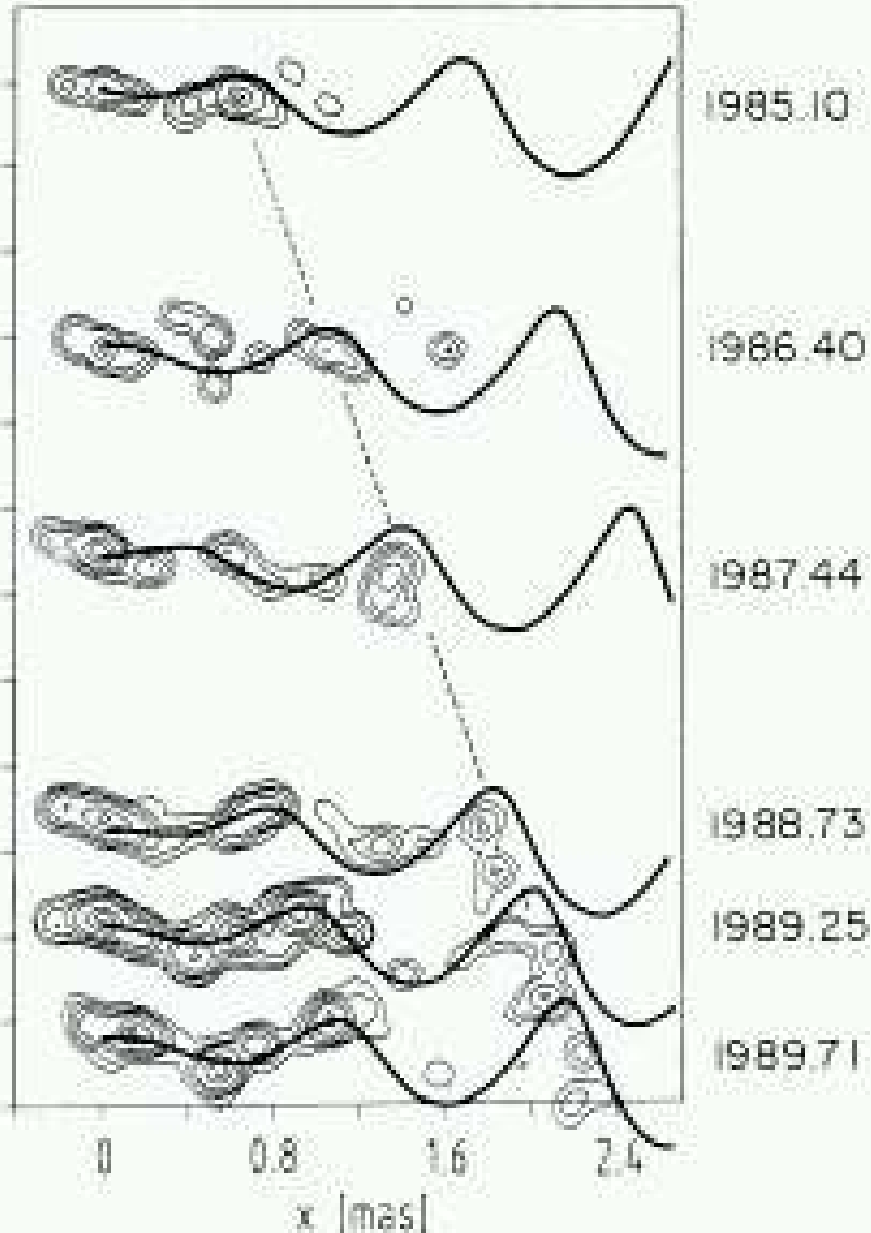


1803+784
 Britzen et al. 1999
 Britzen et al., subm.

Mrk 501 .
 Conway & Wrobel, 1995, ApJ 439
 98



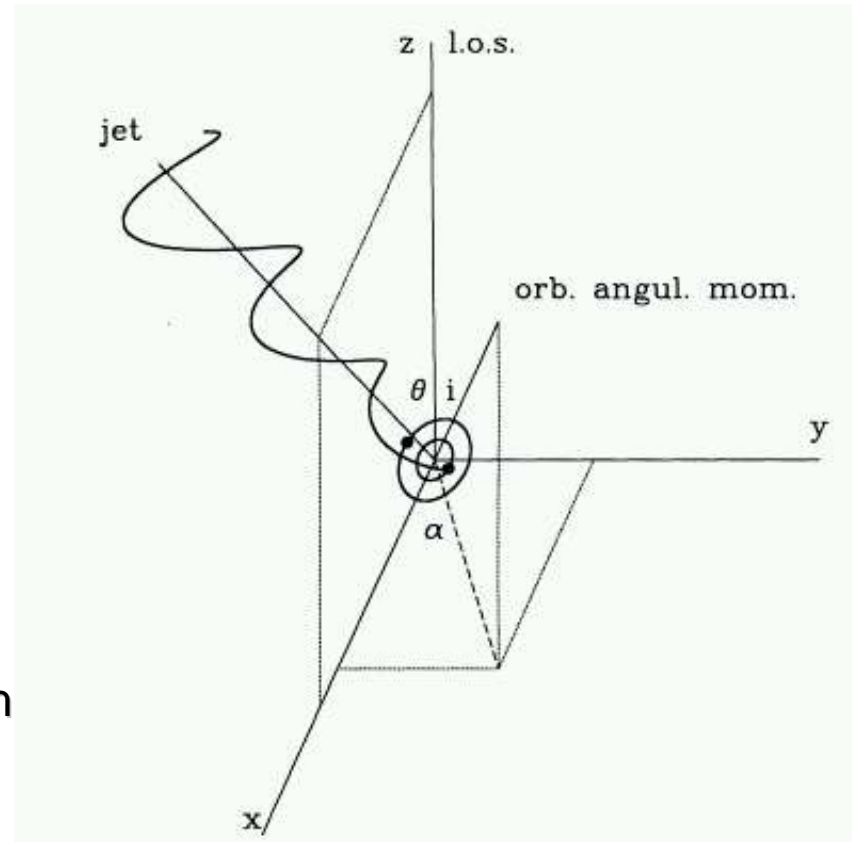
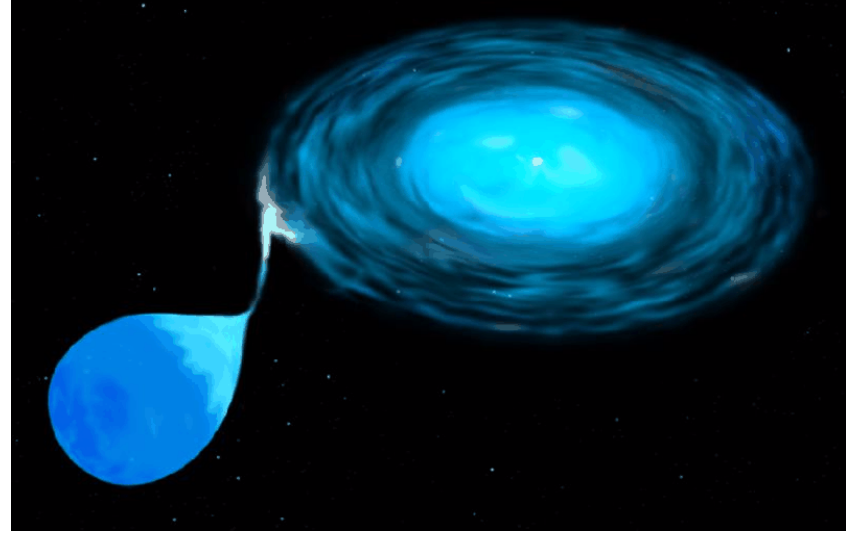
Helikale Jets



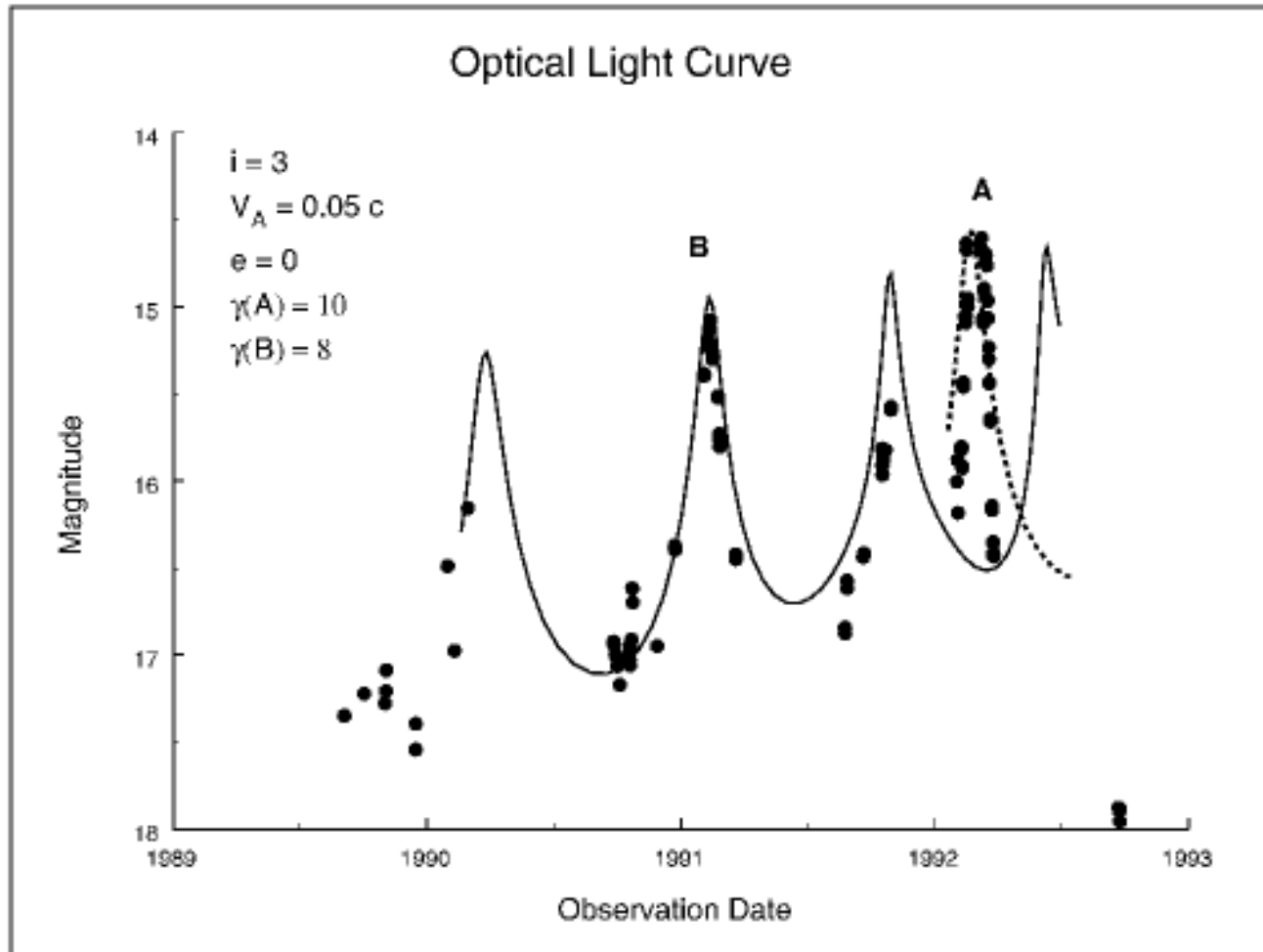
Sinusartiger Verlauf der
Jetlinie, VLBI Karten von
1928+738 (oder 4C73.18)
Roos et al., 1993,
ApJ, 409, 130

Ursprung der Krümmungen

- Warum bildet sich ein helikaler Jet?
- Präzession!
- Was kann die Präzession eines Supermassiven Schwarzen Lochs verursachen ?
- Ein weiteres Schwarzes Loch!
- Kann man die Existenz eines binären Schwarzen Lochs erklären?
- Antwort liegt in der Theorie der Bildung von aktiven Galaxien im frühen Universum: Rechnungen zeigen, die Möglichkeit der Bildung eines binären Schwarzen Lochs ist recht wahrscheinlich



Gekrümmte Jets und Binäre Schwarze Löcher



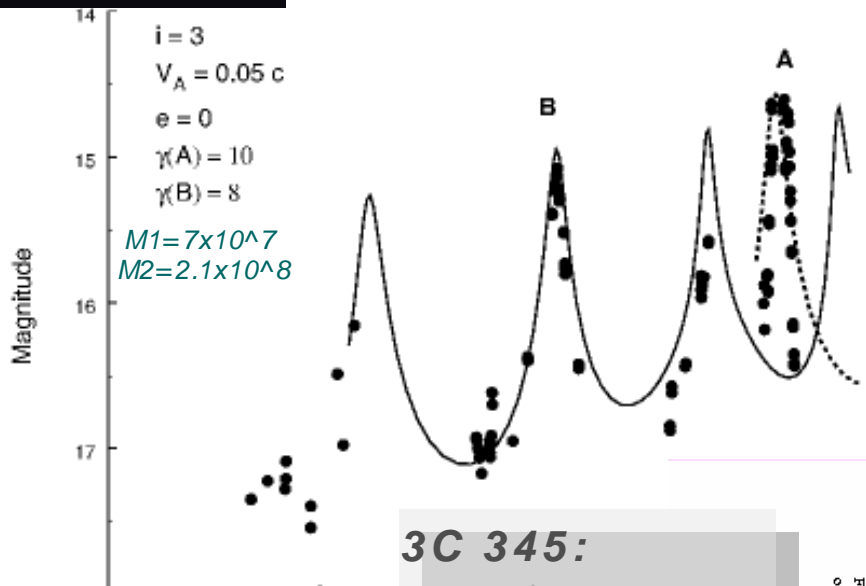
Britzen, Roland, Laskar et al., 2001, A & A 374, 748

Periodische, optische Variabilität enlarvt binäre Schwarze Löcher

Löcher

PKS 0420-014

Optical Light Curve



PKS 0420-014:

Britzen, et al., 2001,

A&A 374, 748

OJ287: The Rosetta

Stone of Blazars

e.g., Takalo 1994,

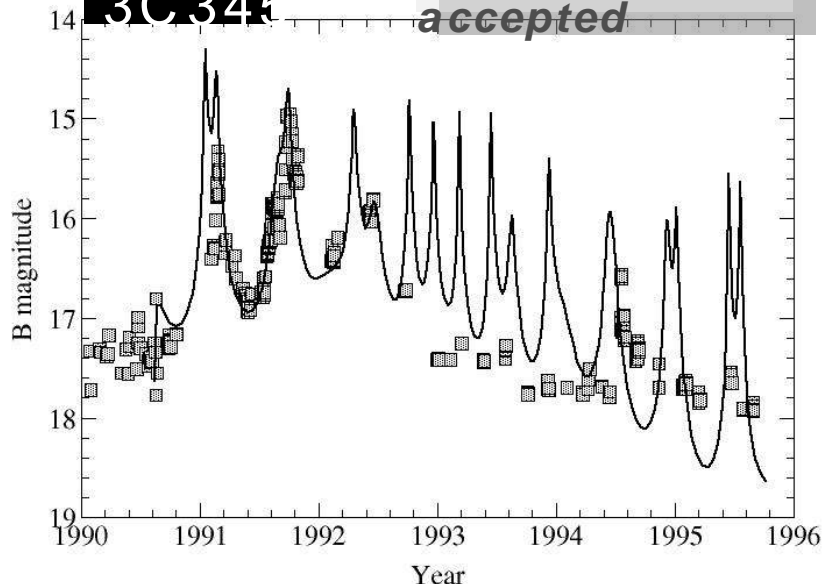
Abraham 2000, A&A 355, 9

3C 345:

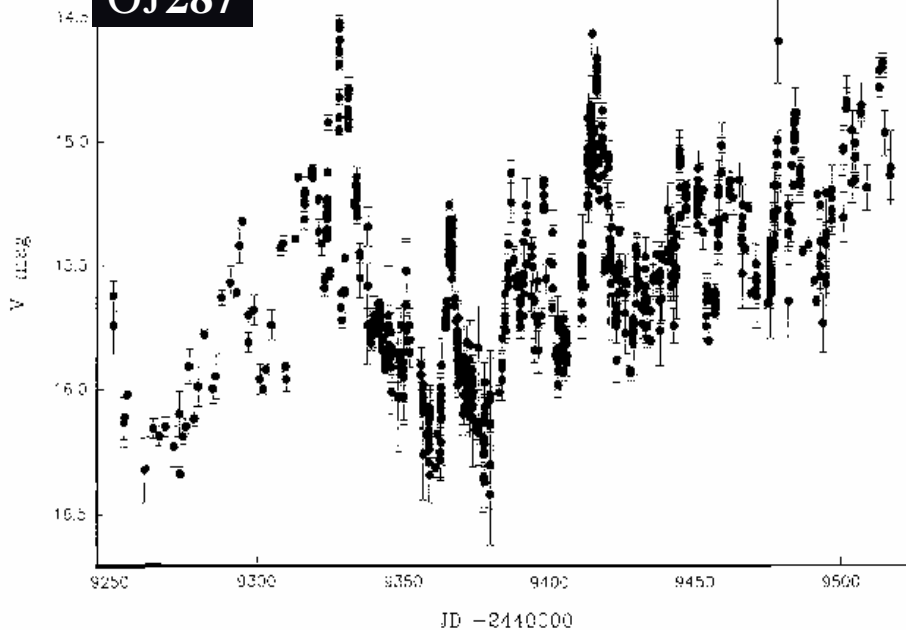
Lobanov & Roland,

accepted

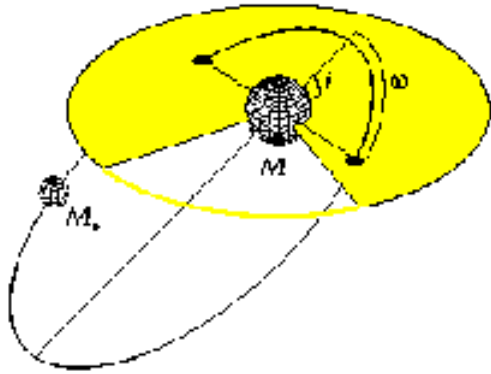
3C 345



OJ287



Binary Black Hole Systems (3C 345)

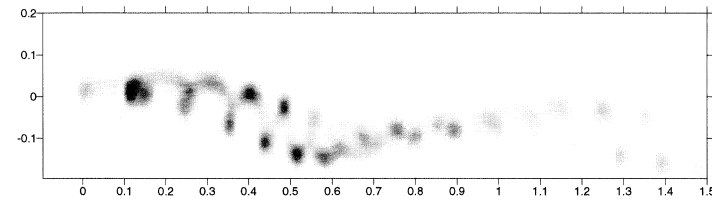
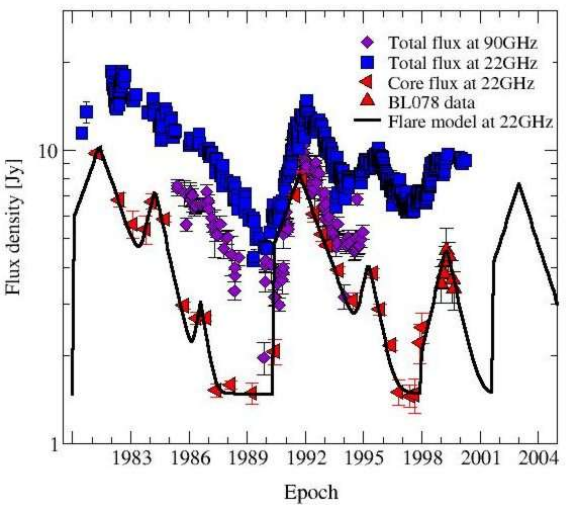
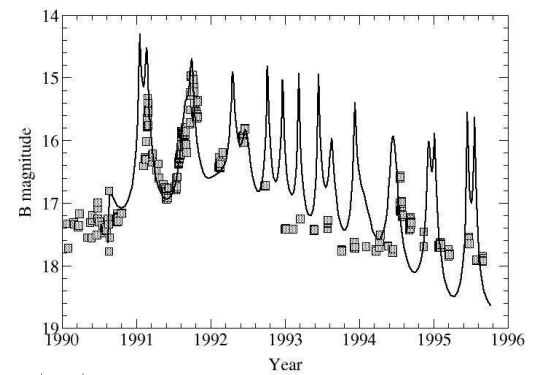
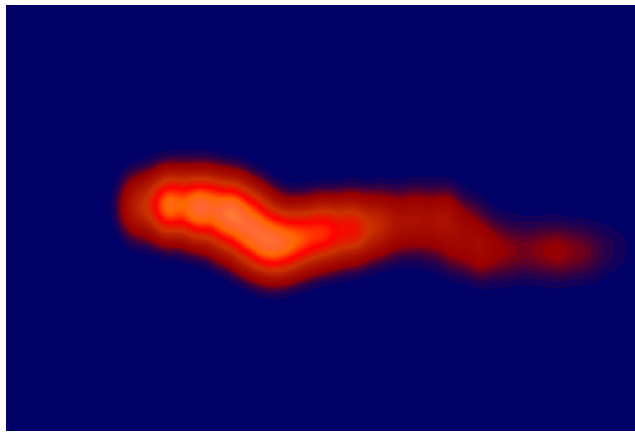
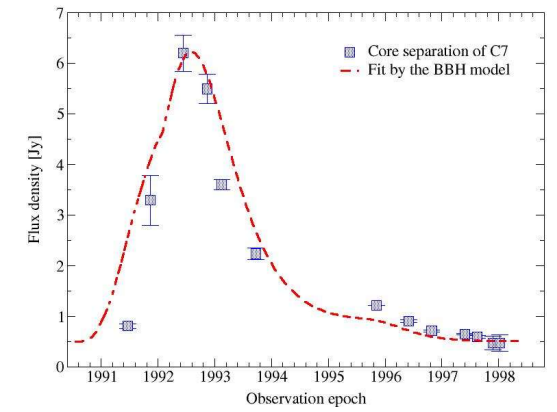
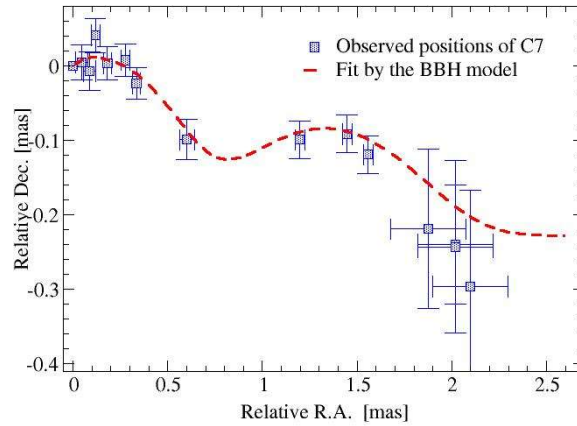


$$M_1 = 1 \cdot 10^9 M_\odot, \quad M_2 = 5 \cdot 10^8 M_\odot$$

$$a_\phi = 0.6 \text{ p } \mathbb{C} \quad \mathbb{E} \quad e = 0.1$$

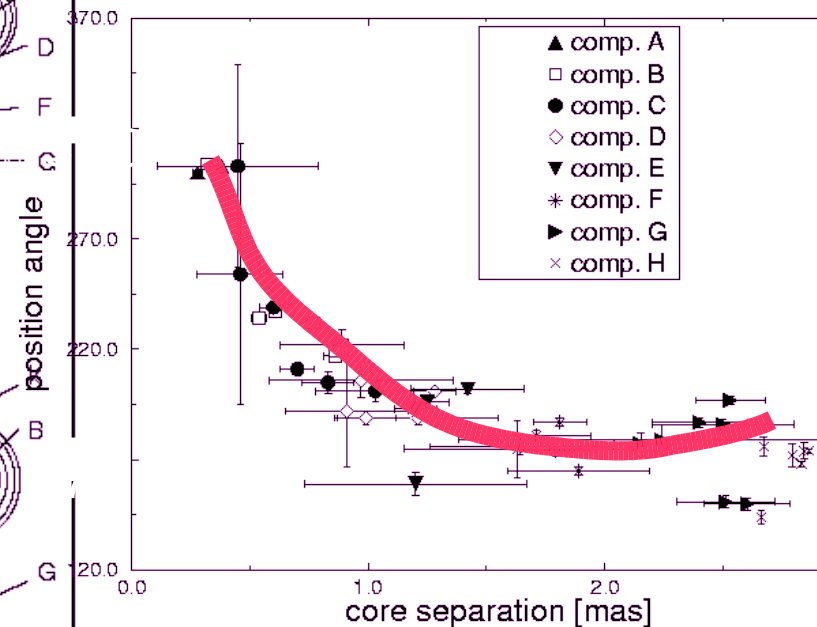
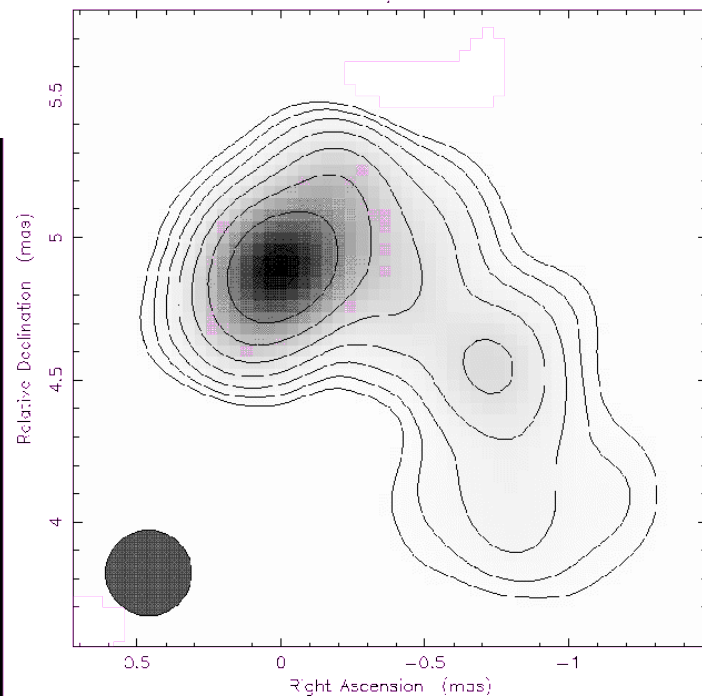
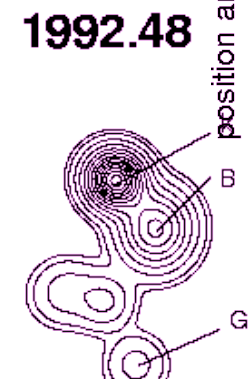
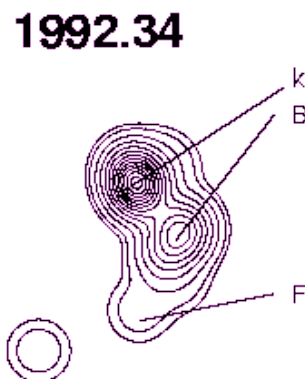
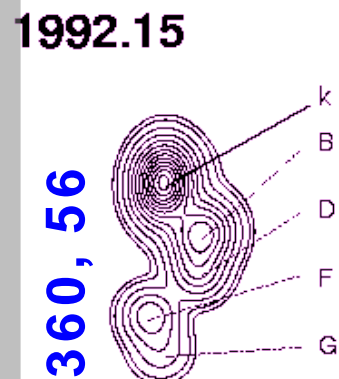
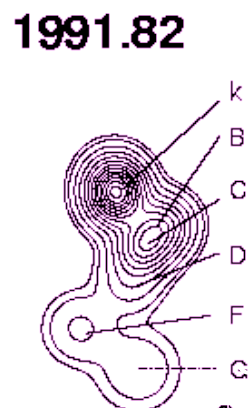
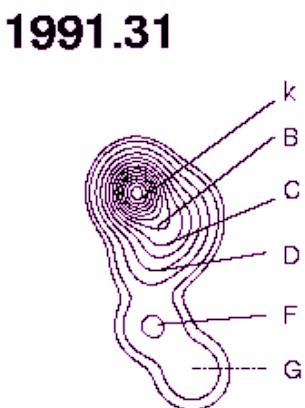
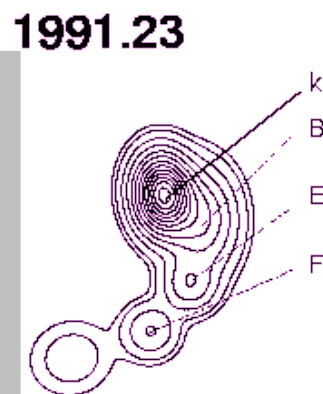
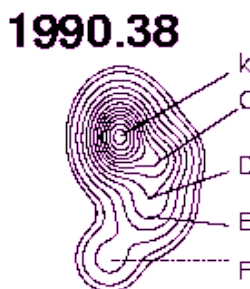
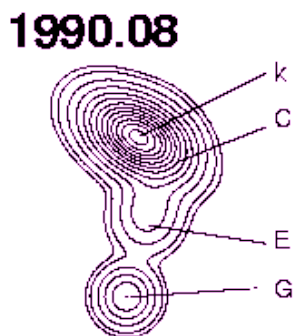
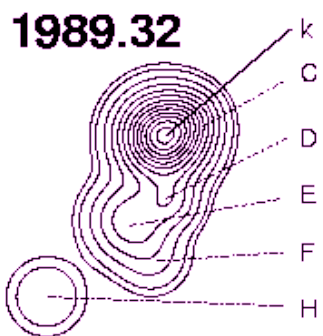
$$P_\phi \approx \mathbb{D} \text{ y}$$

$$P_p \approx \mathbb{D} \text{ y}$$



Jetknoten auf gekrümmten Pfaden

Clean map. Array: BRUNTPKP
0420-014 at 43.221 GHz 1992 May 27

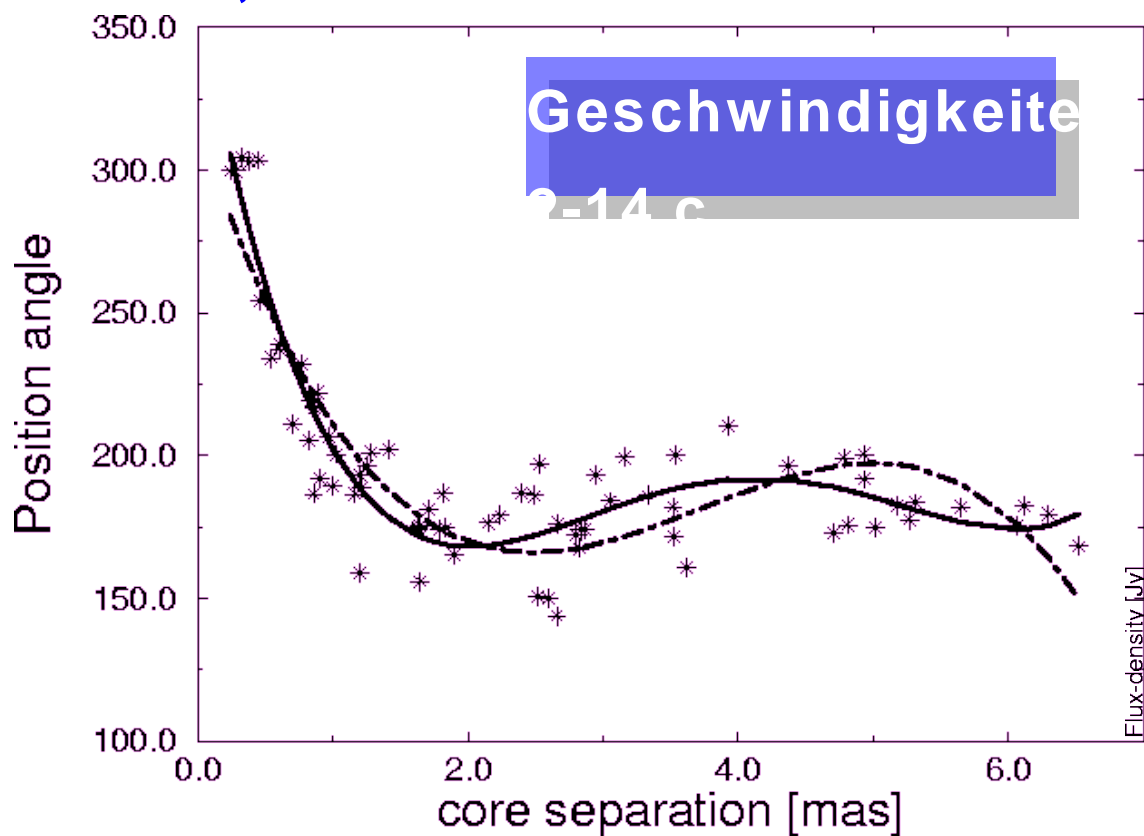


Britzen et al. 1999, A&A

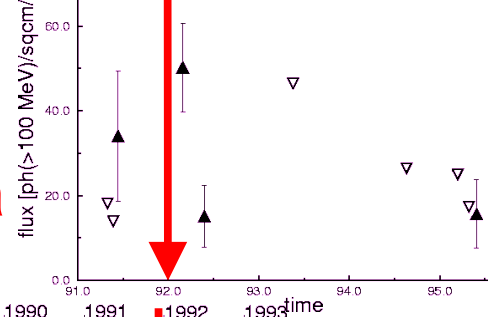
360, 56

Ausstoß neuer Jetknoten und Variabilität

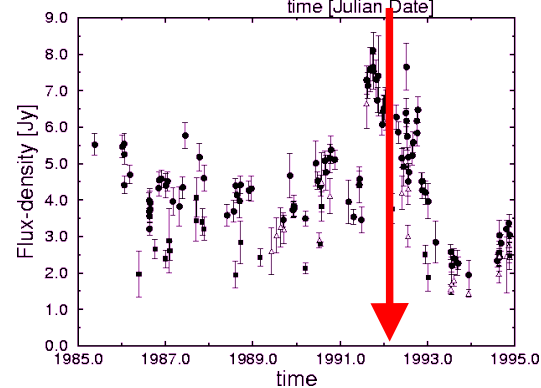
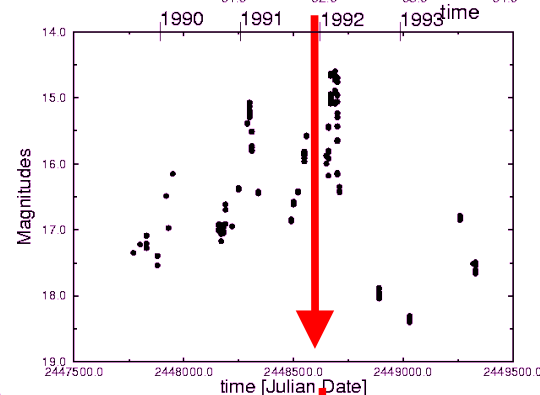
Britzen et al. 1999,
A & A 360, 56



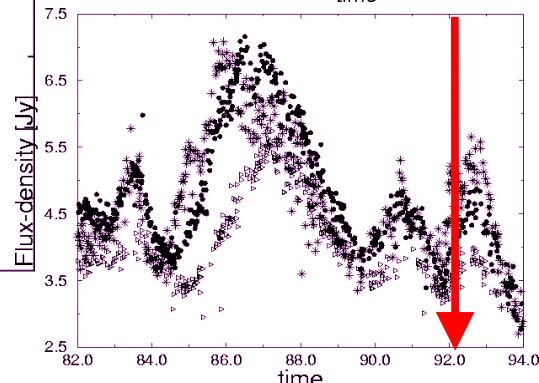
Gamma



optisch



mm



cm

A binary black hole in the centre of PKS 0420-014 ? $z=0.915$

VLBI images
 $\lambda=3.6 \text{ cm}$

1989.32

1991.82

1990.08

1992.15

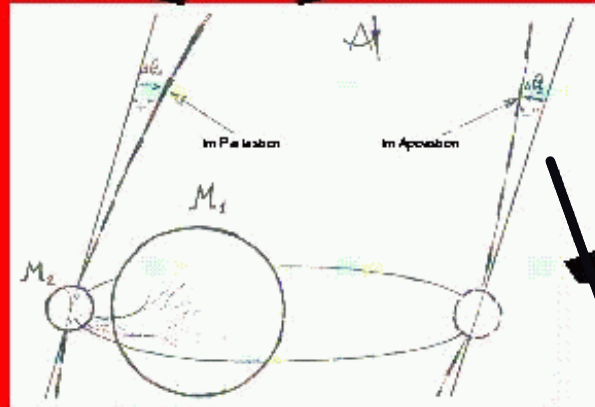
1990.38

1992.34

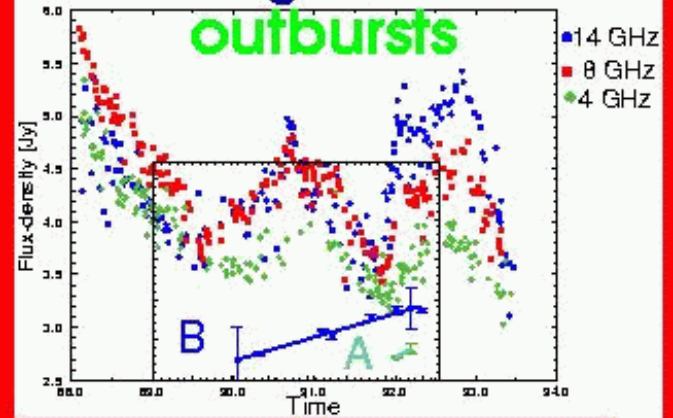
1991.23

1992.48

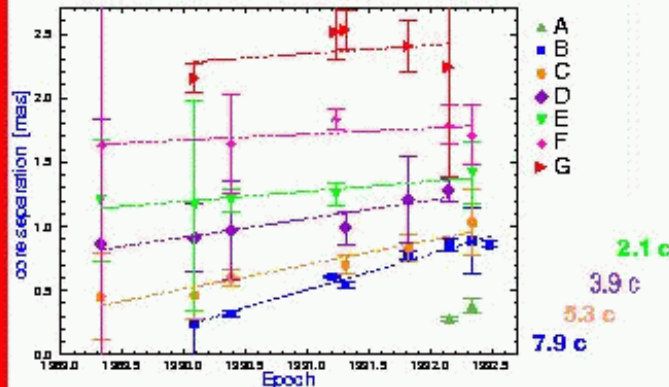
1991.31



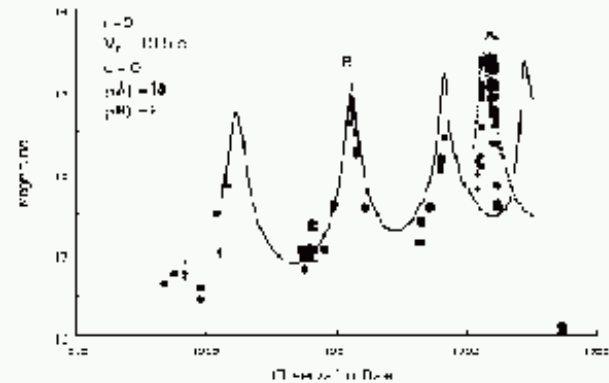
Radio lightcurves



superluminal motion



Optical Light Curve



**simultaneous
 optical γ -ray flaring**

Binary Black hole Systems in AGN

How to detect these BBHS?

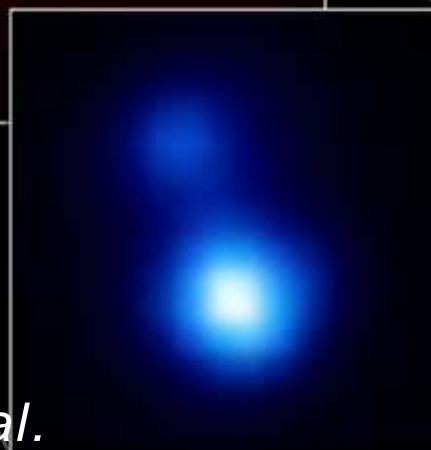
1. *pc- scale radio jets: curved jet structures, helicity*

2. *Light curves: periodic flaring*

=> some examples ..

„Chandra makes first positive I.D. of active Binary Black hole“

NASA/ CXC/ MPE/ S. Komossa et al.

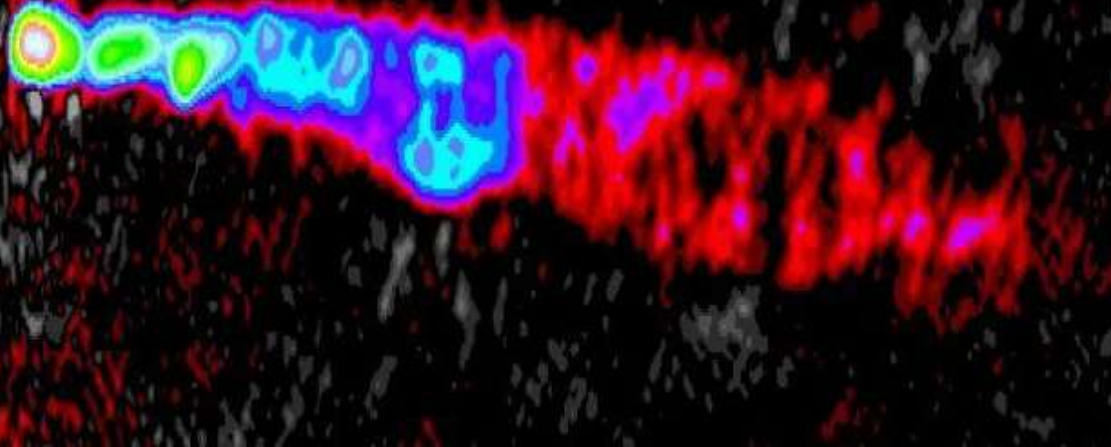


The image depicts a binary black hole system. On the right, a large, bright yellow-white sphere represents one of the black holes, surrounded by a glowing accretion disk. A blue jet of light extends upwards from a smaller, similar structure on the left. A blue stream of light connects the two structures, suggesting the interaction between their accretion disks. The background is a dark, starry space.

Periodicity

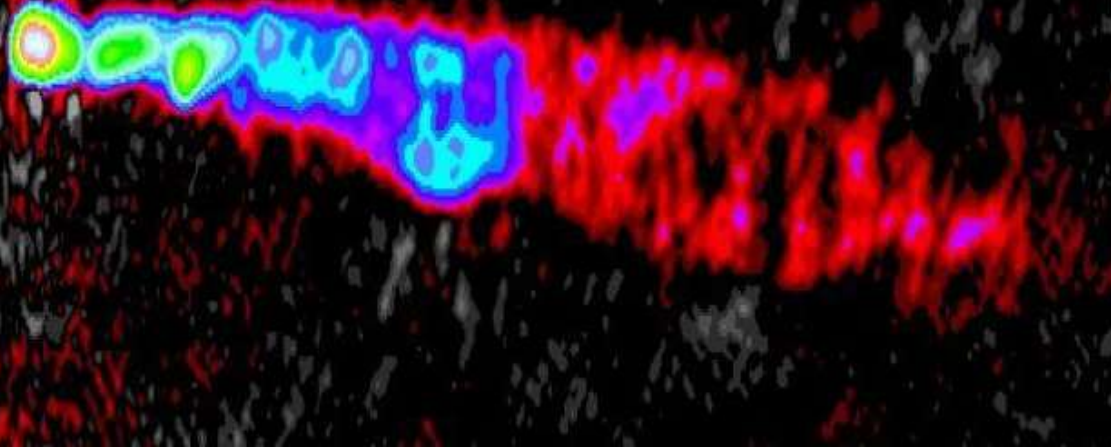
Fingerabdrücke
Binärer Schwarzer Löcher?

Die Natur der Jetknoten

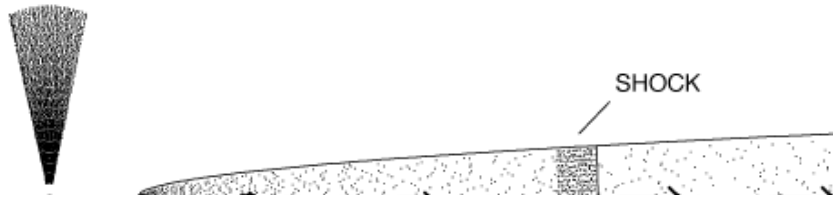


- Zur Erklärung der "**blobs**" wurden neue relativistische Jetmodelle entworfen: Schocks als Ursprung der "**blobs**" und der Strahlungsausbrüche in Blazaren (Blandford & Königl 1979)
- Modelle wurden inzwischen verfeinert
- erklären mittlerweile in den meisten Fällen qualitativ und in

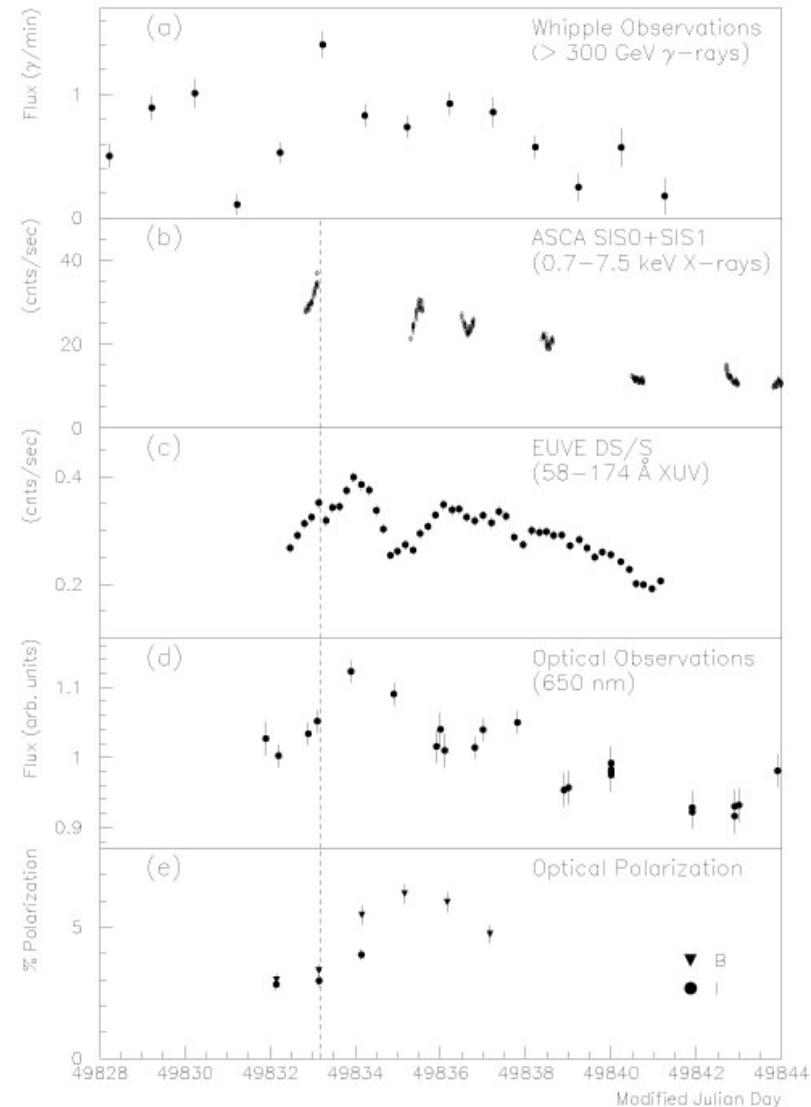
Die Natur der Jetknoten



- ' Zeitskala der Variabilität ist abnehmende Funktion der Wellenlänge - die Blazare variieren schneller im Optischen als im Radio
- ' Schockmodelle erklären dies dadurch, dass die höherenergetischen Elektronen (für die Emission bei kürzeren Wellenlängen verantwortlich) sind auf eine dünne Schicht nahe der Schockfront begrenzt -- die niederenergetischen Elektronen können sich weiter



- bildet sich ein Schock, sieht man zunächst die Röntgen-Emission, dann Anstieg im mm-submm Teil des Spektrums, und letztlich einen Abfall bei der submm-Radio-Emission
- Gamma-Strahlung durch Invers-Compton Streuung an Elektronen im Jet:
 - in-Jet Szenario: Synchrotron-Selbst-Compton (SSC)

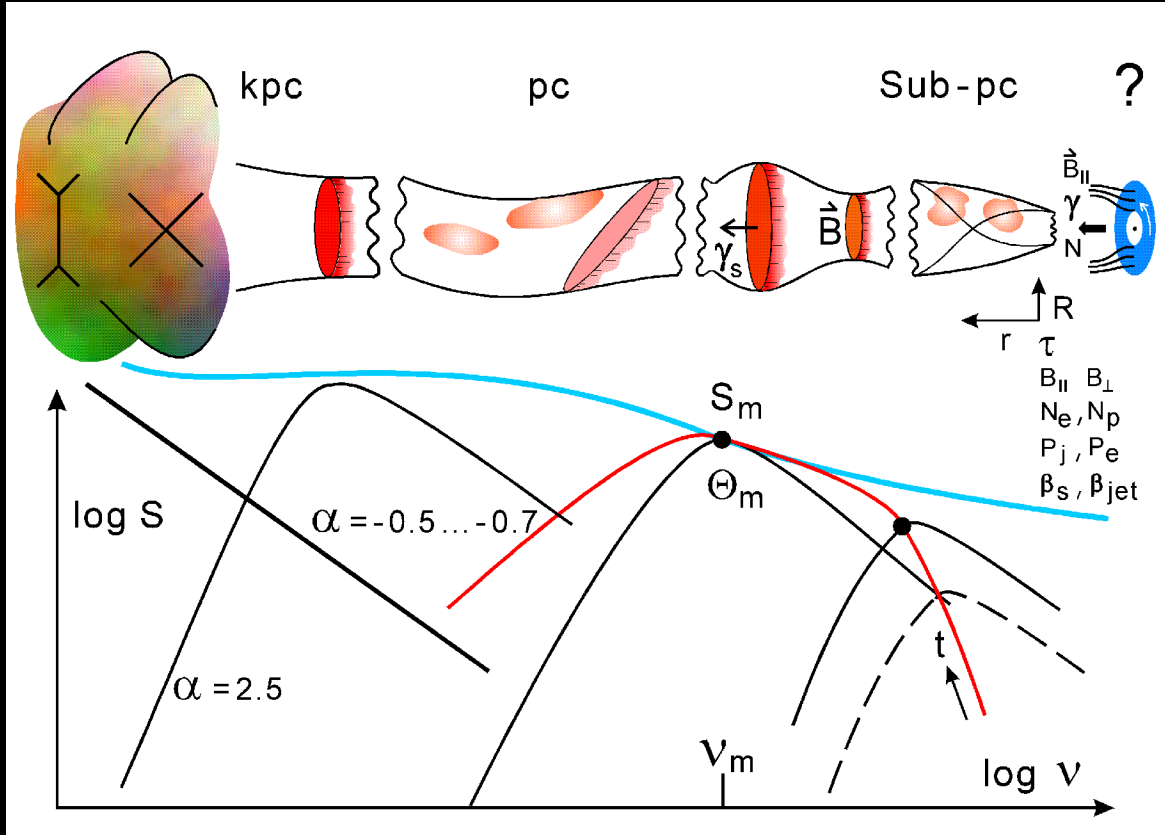


Die Beziehung zwischen Variabilität und Komponentenausstößen

in blazars, broad-band flux-density outbursts and the appearance of new jet components are closely linked.

at short (mm-) wavelengths, the flares appear most pronounced and the new jet components can be detected in the direct vicinity of their place of creation.

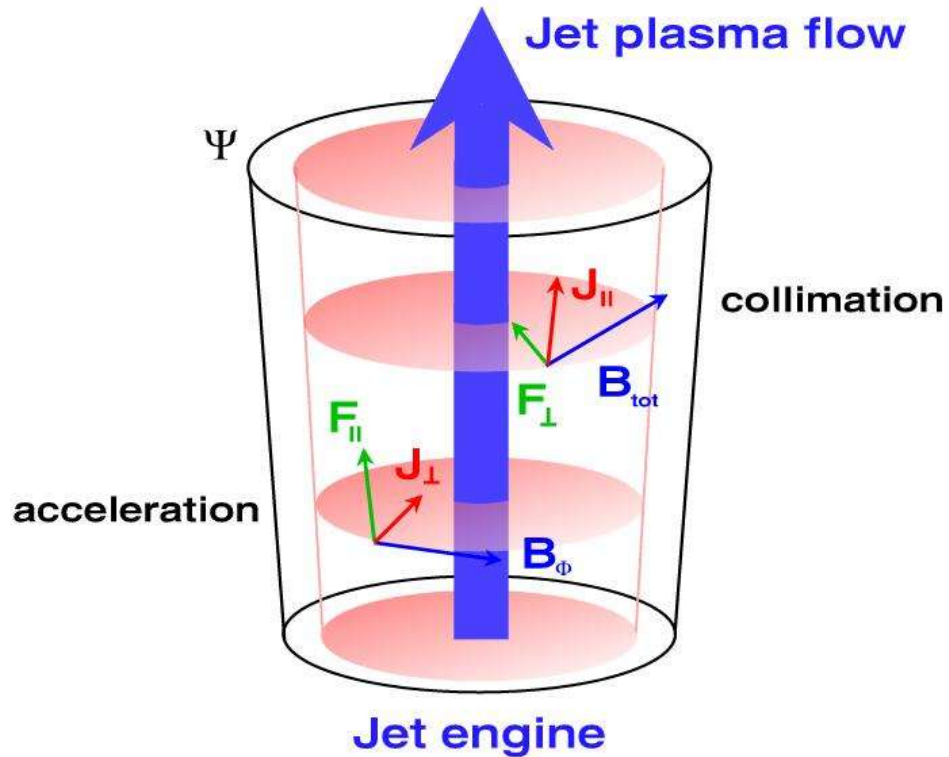
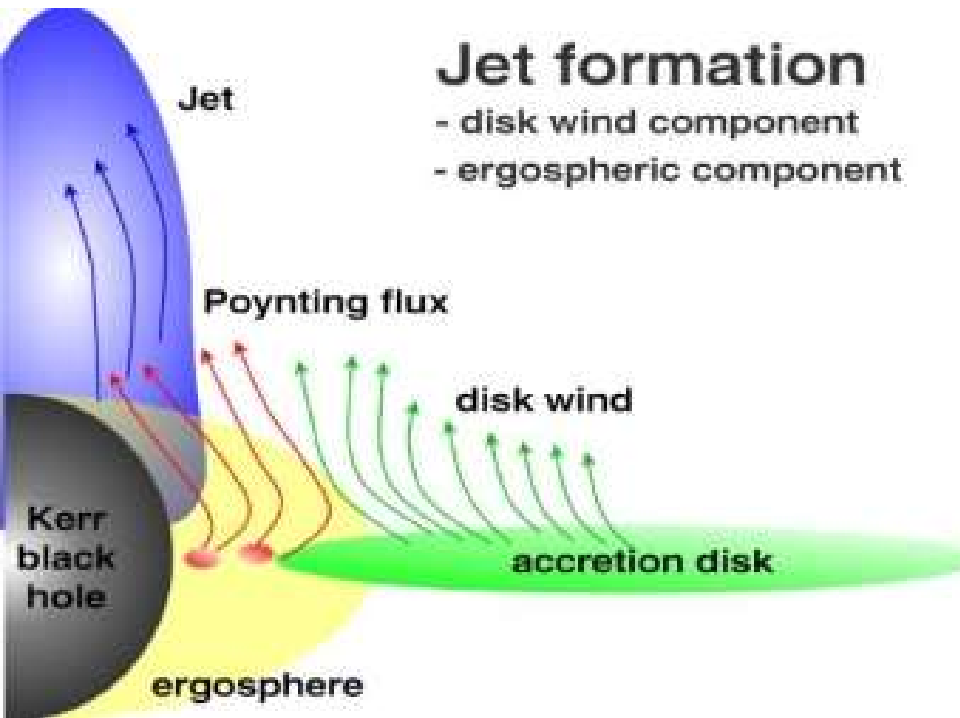
a detailed study of outburst-ejection relations, including the kinematical, polarimetric and spectral evolution of the ejecta,



copyright Krichbaum@MPIfR

Wie werden Jets erzeugt?

Bildung der Jets



J current density

Ψ magnetic flux surface

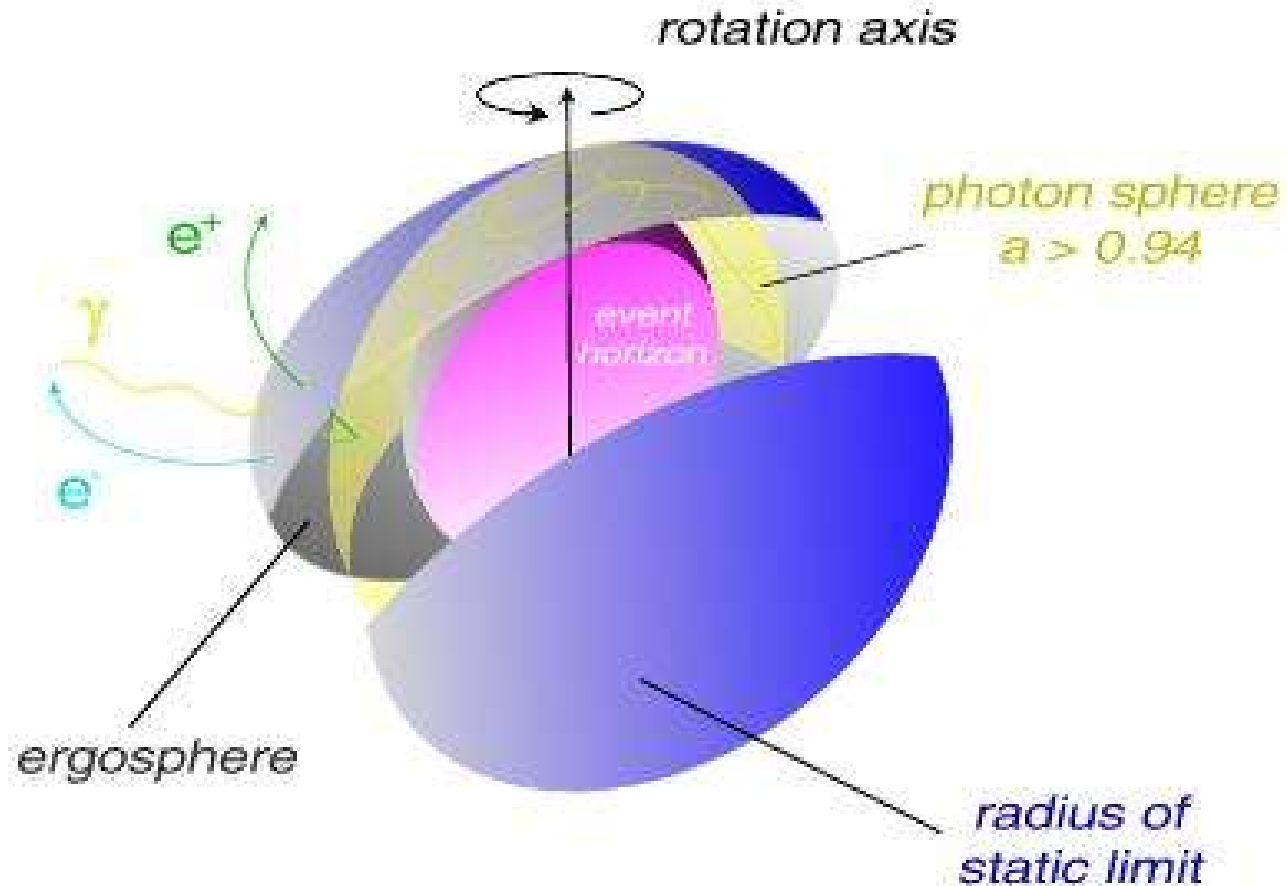
B magnetic field

F Lorentz force

Die Erzeugung der Jets

■ Wichtige Prozesse:

- Blandford-Znajek Mechanismus
- Penrose-Prozeß
- Frame-Dragg

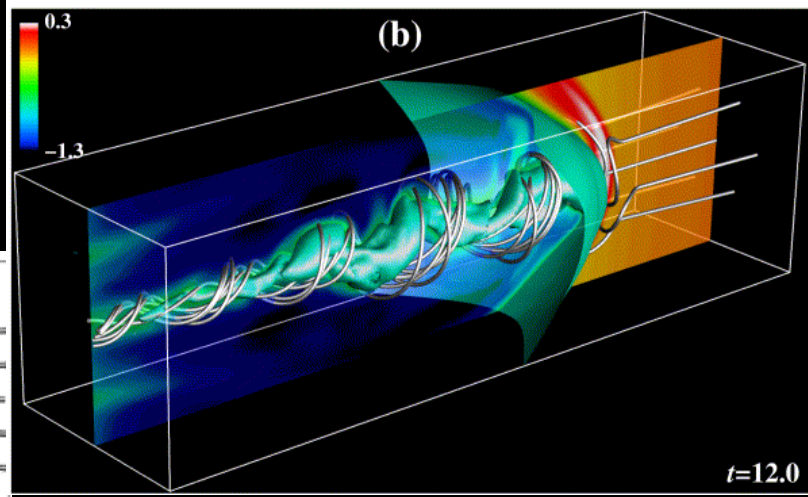
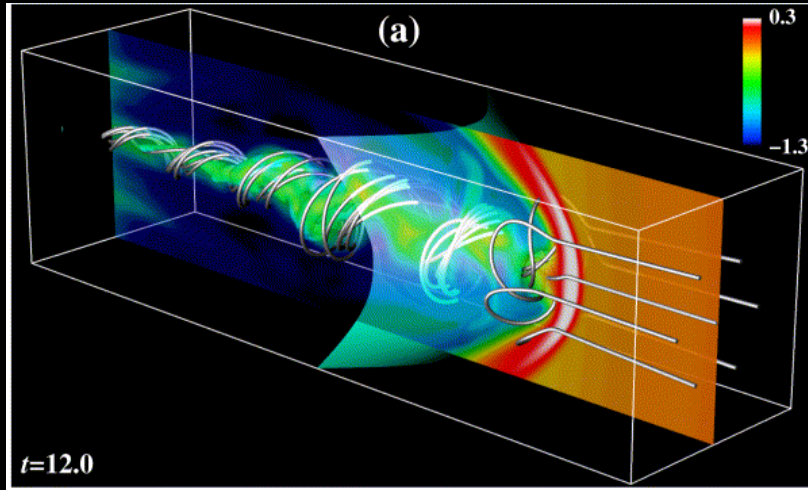
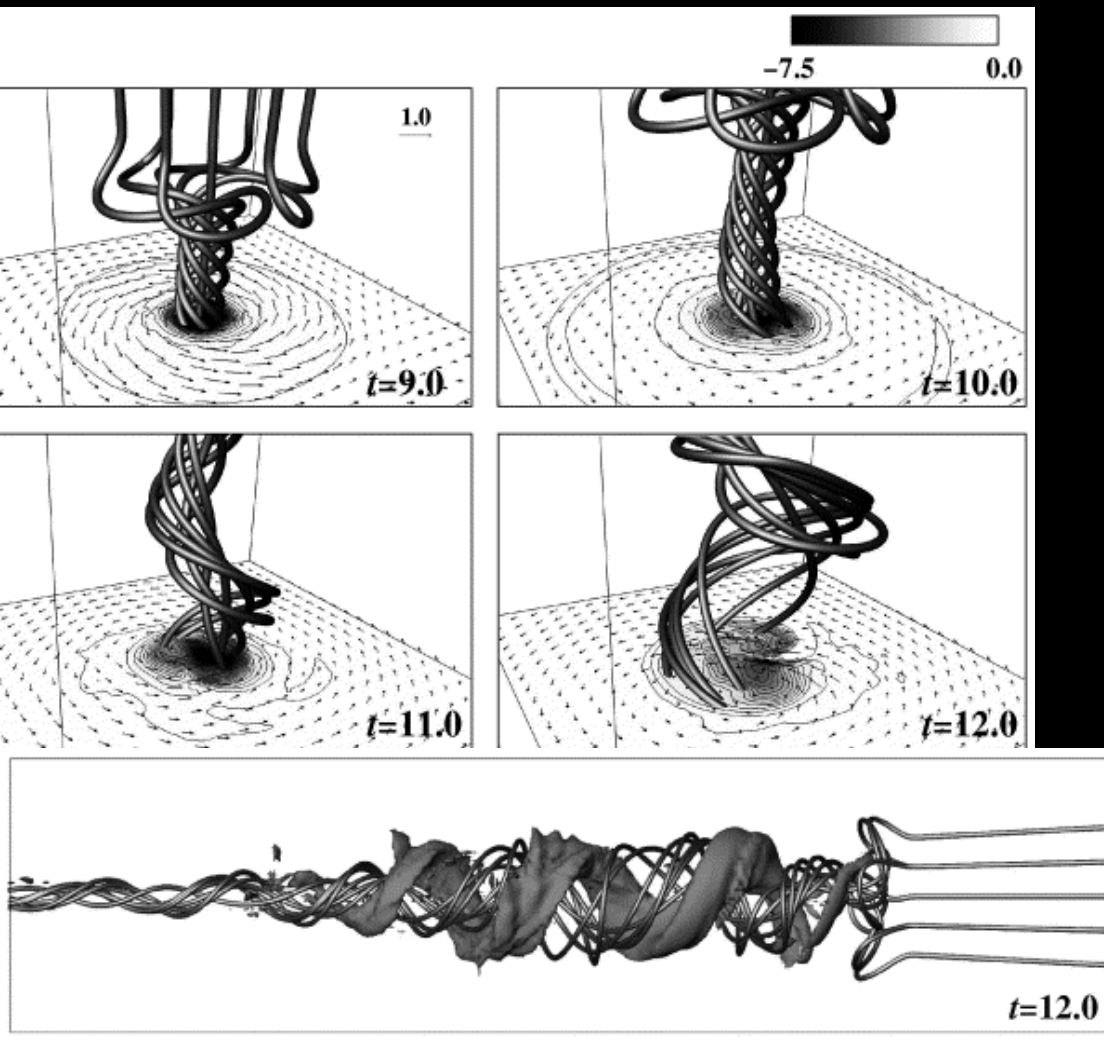


Modelle für die Jetbildung

- VLBI erprobt Skalen von 0.1 pc aufwärts, Phänomene der Jetbildung auf Skalen 2-3 Größenordnungen geringer
- komplexe Prozesse: allgemeine Relativität + Hydrodynamik + Plasmaphysik + Strahlungstransport: Farben auf der Palette der Astrophysiker -> resultierende Bilder sind sehr unterschiedlich
- Unterscheidung verschiedener Modelle:
- **1) Hydrodynamische Jet-Produktion: Magnetische Felder spielen keine Rolle:** weder in Extraktion von Energie aus der Nähe des SL, auch nicht bei Beschleunigung und Kollimation der Jets; dicke Akkretionsscheiben: akkretierendes Material kann Jets hervorbringen (nicht genügend Kollimation & Geschwindigkeit)

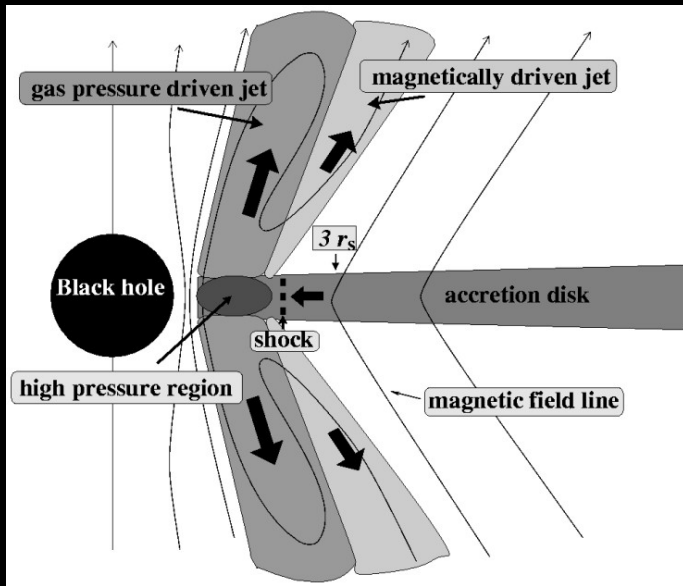
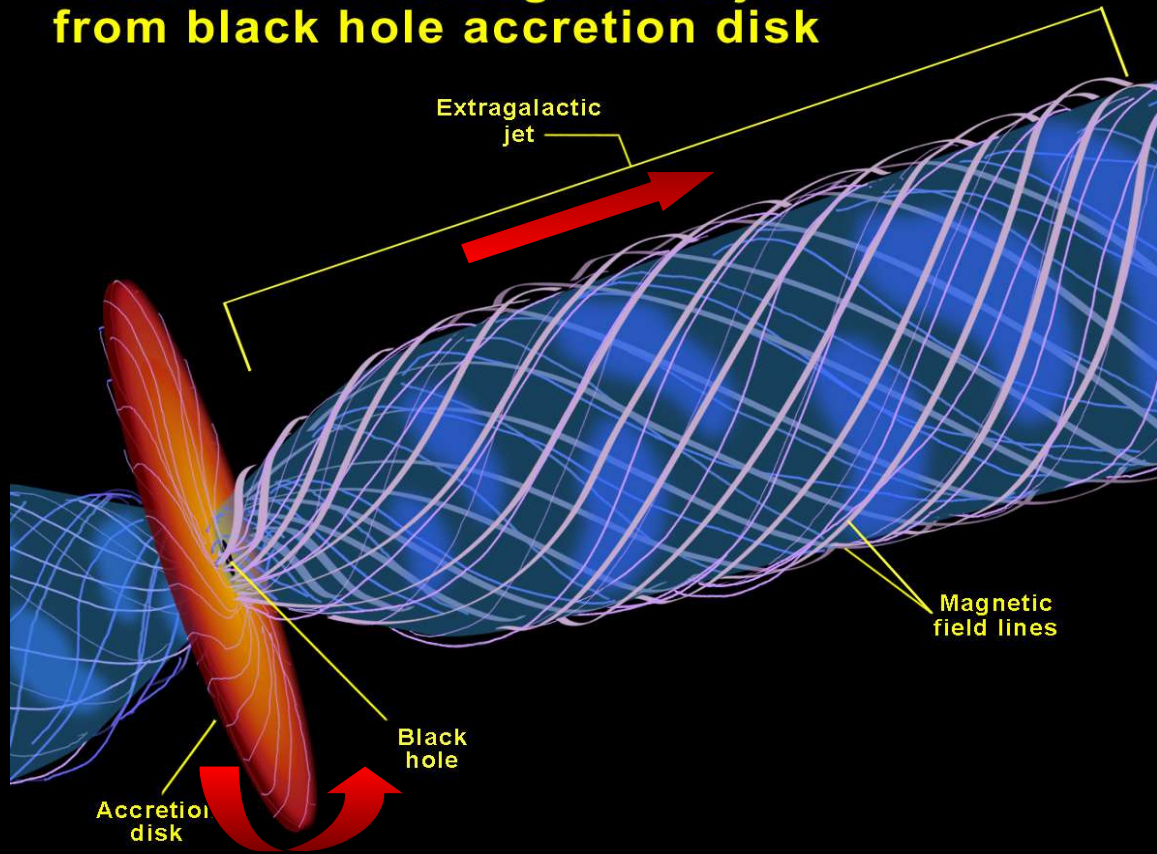
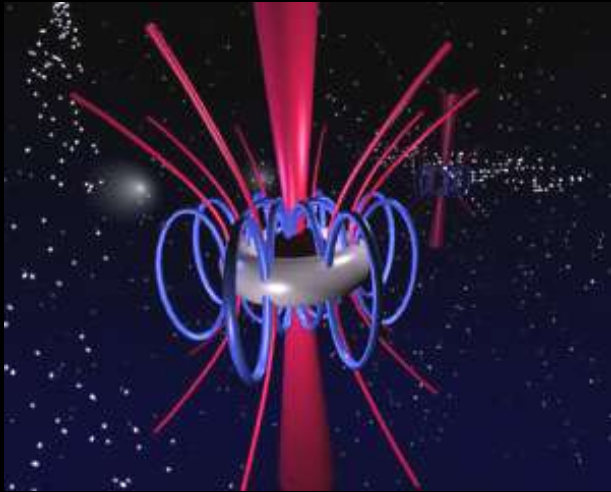
Modelle für die Jetbildung

- **2) Magneto hydrodynamische Jet-Produktion: Magnetfelder von entscheidender Bedeutung:** konsistent mit Polarisationsbeobachtungen und Erklärungen für Kontinuum (Synchrotron Selbst Compton) -> noch schwieriger !! kann simultan die Erzeugung relativistischer Geschwindigkeiten, schmale Jets, etc. erklären
- Einführung in MHD Jet Produktion: Spruit, H.C. 1996, in Evolutionary Processes in Binary Stars, eds R.A.M.J. Wijers, M.B. Davies, C.A. Tout (Dordrecht: Kluwer), S. 249
- Modelle zur Produktion der Jets: Wiita, P.J. 1991, in Beams and Jets in Astrophysics, ed. P.A. Hughes (Cambridge: CUP), S. 379
- Camenzind et al.



3-dimensional magnetohydrodynamic (MHD) jet simulations

Formation of extragalactic jets from black hole accretion disk



MHD simulation of a confining B-field anchored in a rotating disk