

Jets

Jets: Beobachtungsüberblick

- Morphologie, Parameter, Klassifizierung

Scheinbare Überlichtgeschwindigkeit

Doppler-“boosting”, Jet-Einseitigkeit

Jetentstehung: Beschleunigung & Kollimation

- Magnetohydrodynamische Jets

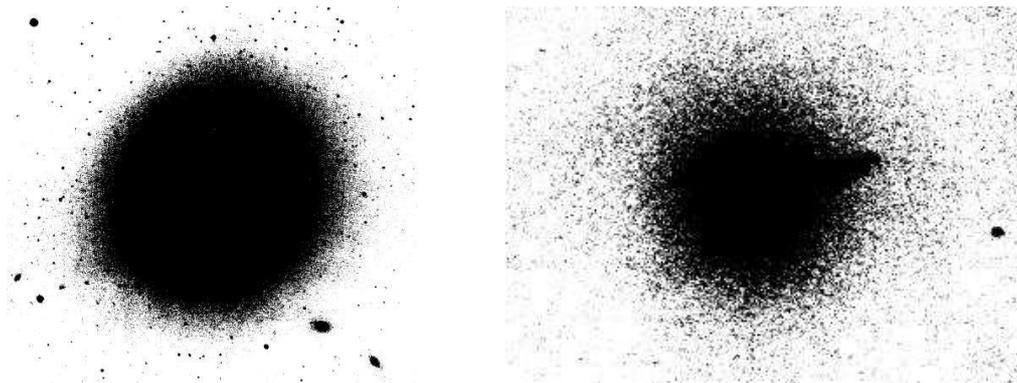
Schocks, Heizung

Jets von AGN – Geschichtliches

→ Zuerst optisch detektiert (Curtis 1918): M87

“A curious straight ray lies ... in the nebulosity ... apparently connected with the nucleus by a thin line of matter”.

→ Identifikation mit Radioquelle Vir A (Baade & Minkowski 1954):



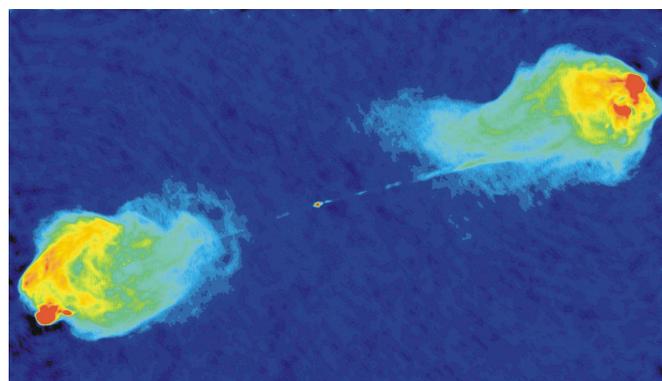
Links: 3600–5000Å, rechts: <4000Å

“...interpretation ... that the jet was formed by ejection from the nucleus...”

“no possibility exists at this time of forming any hypothesis on the formation of the jet, the physical state of its material, and the mechanism which connects the existence of the jet with the observed radio emission.”

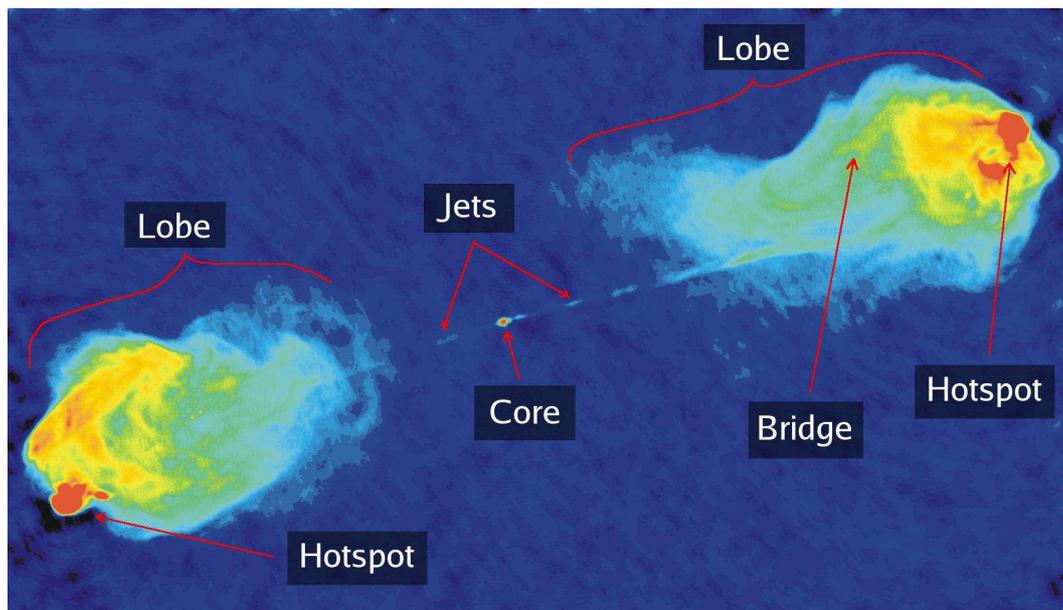
→ Namensgebung der “unique peculiarity” → **Jet**

→ Entdeckung der Radiogalaxien i.d. 60ern (Ryle et al. 1965):



→ Hypothese: Andauernde “Fütterung” der Radiolobes aus dem Kerngebiet (Blandford & Rees 1974)

AGN-Jets – Morphologie der Radioquellen



Detektiert in Radiosynchrotron-Strahlung (→ Magnetfelder)

- Core: zentrale Kernemission, z.T. aufgelöst
- Lobes: Radiobögen am Ende der Jets
- Jet: längliche, knotige Struktur, verbindet Core mit Lobes

Historisch: Zwei Klassen: FR 1, FR 2 (Fanaroff & Riley 1974)

→ Verhältnis Ausdehnung zwischen Leuchtkraftmaxima und Gesamtausdehnung R_{FR}

FR 1: (“core-dominated”): $R_{\text{FR}} < 0.5$, weniger helle Quellen Emission dominiert durch Kerngebiet

80% der FR 1-Quellen haben Jets

(projiz.) **B**-Richtung im Jet: ||, dann \perp zum Jet

Zweiseitige Jets, sub-sonisch (?)

FR 2: (“lobe-dominated”): $R_{\text{FR}} > 0.5$, helle Quellen Emission ausgedehnter Bögen, “hot spots”

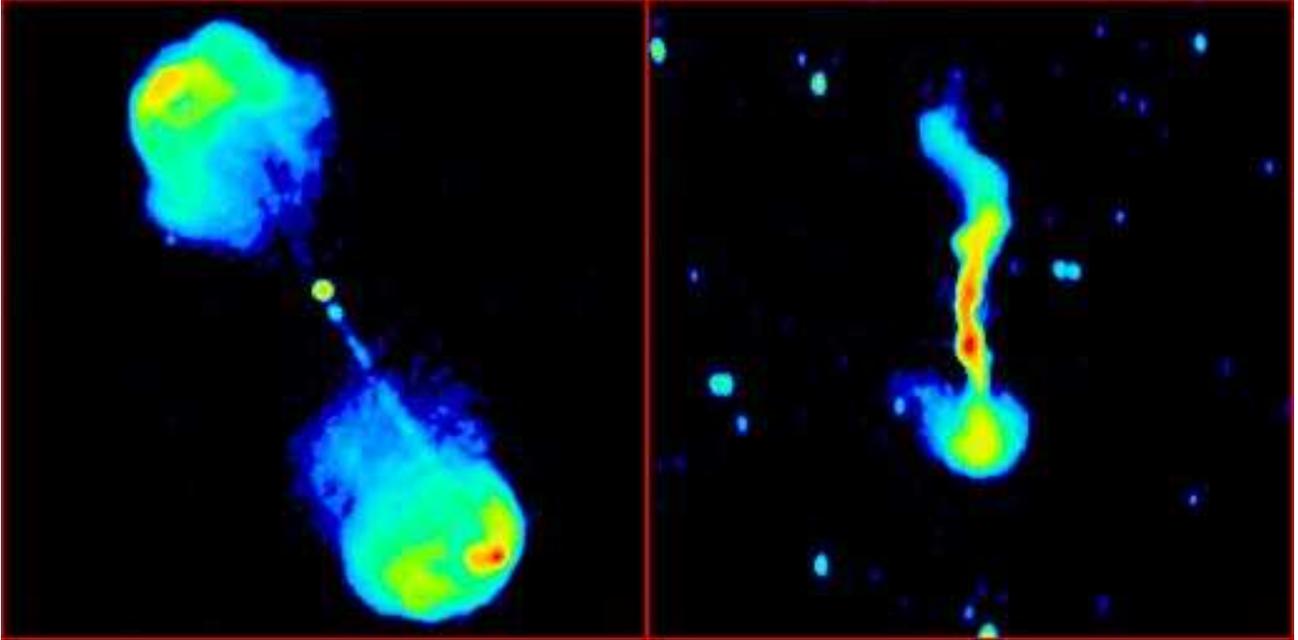
(projiz.) **B**-Richtung im Jet: ||, in den Knoten \perp zum Jet

Oft einseitige Jets, super-sonisch (?)

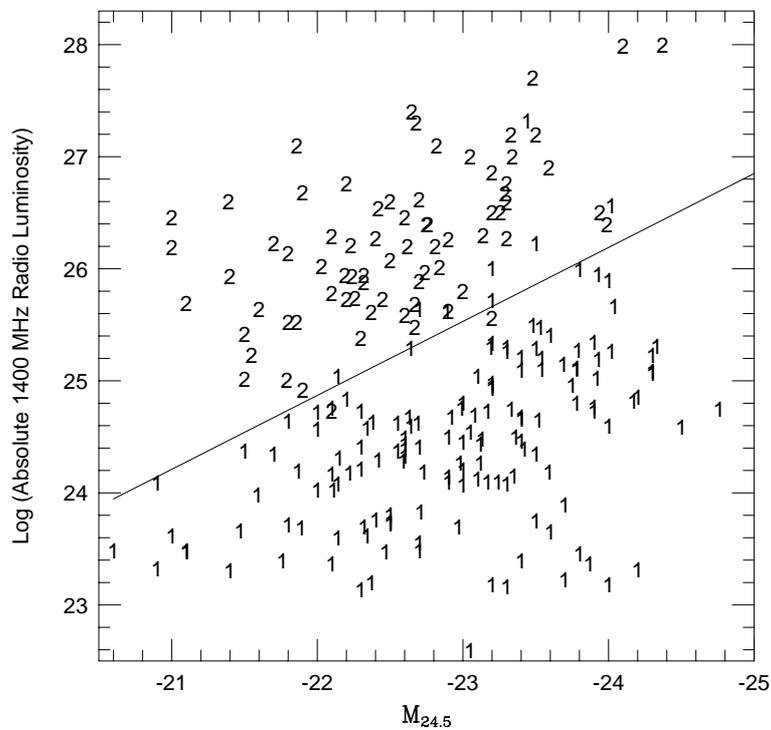
(Ungelöste) Frage: FR 1-, FR 2-Unterschied intrinsisch (“inner engine”) oder durch externe WW?

AGN-Jets – Morphologie der Radioquellen

Zwei Klassen : FR 1, FR 2 (Fanaroff & Riley 1974)



(Atlas Database, <http://www.jp.man.ac.uk/atlas/>)



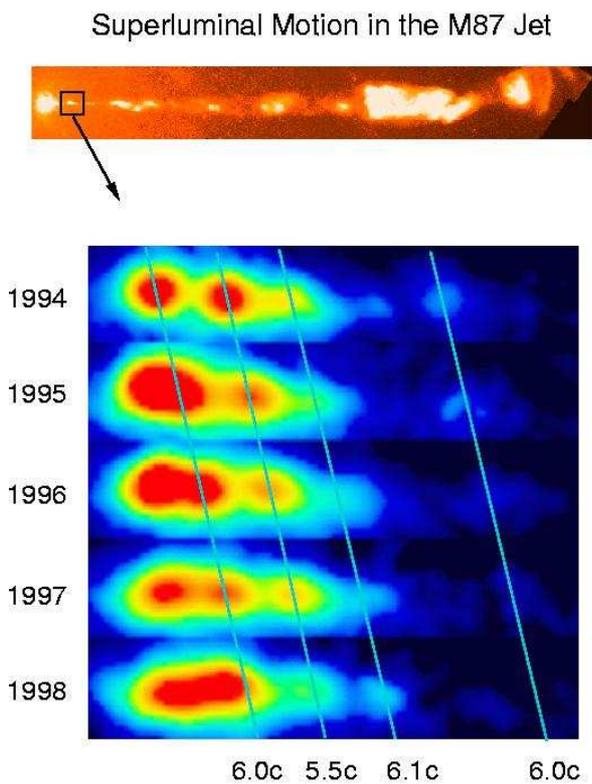
Radioleuchtkraft-Galaxienleuchtkraft- Diagramm, Trennlinie $L_{\text{radio}} \sim L_{\text{opt}}^2$
(Ledlow & Owen 1996)

AGN-Jets – scheinb. Überlichtgeschwindigkeit

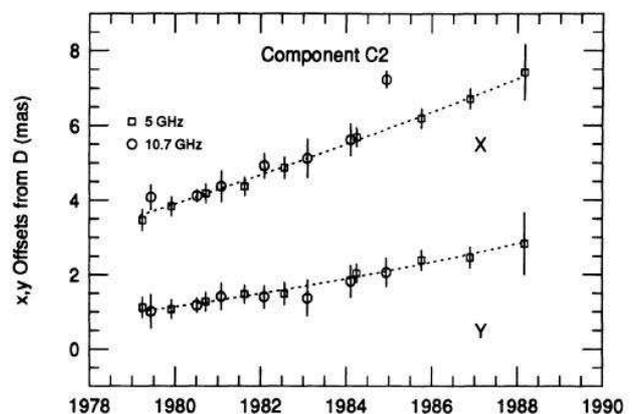
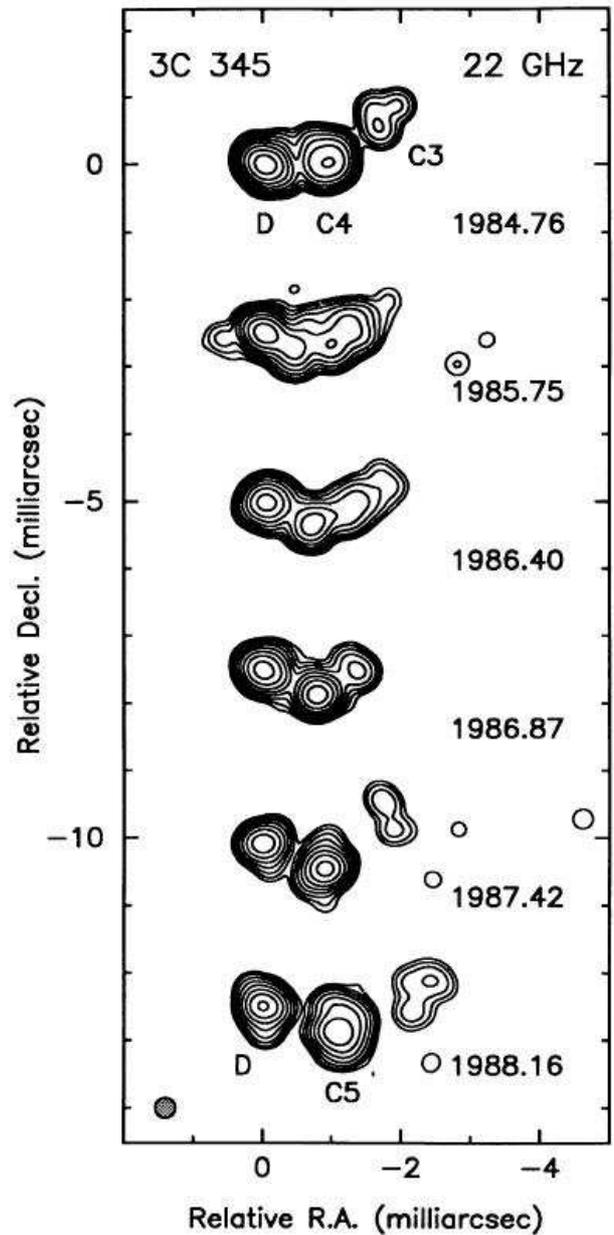
Beobachtung scheinbarer Überlichtgeschwindigkeit der Jetknoten:
Kombination aus Projektionseffekt und relativistischer Geschwindigkeit

$$\beta_{\text{app}} = \frac{v_{\text{app}}}{c} = \frac{\beta \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta}$$

- Winkel θ zwischen Sichtlinie und Bewegungsrichtung
- Beobachtet werden $\beta_{\text{app}} < 15$



(Biretta et al. 1999)



(Zensus et al. 1995)

AGN-Jets – scheinb. Überlichtgeschwindigkeit

Zeit $t = 0$: Emission 1. Signal

Zeit $t = dt$: Emission 2. Signal

Ankunft 1. Signal: Zeit $t_1 = D/c$

⊥ l.o.s.: Knoten reist $d = \beta dt \sin \theta$

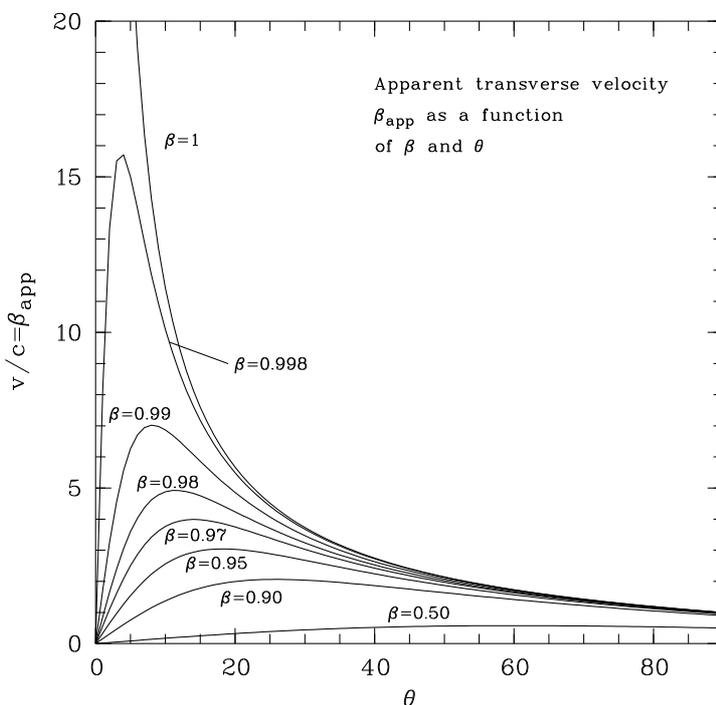
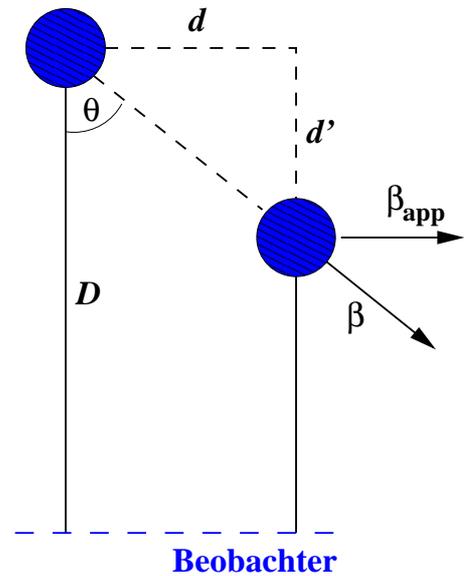
|| l.o.s.: Knoten reist $d' = \beta dt \cos \theta$

Ankunft 2. Signal:

Zeit $t_2 = dt + (D - d')/c = dt + D/c - dt\beta \cos \theta$

Scheinbare Geschwindigkeit ⊥ l.o.s.:

$$\beta_{\text{app}} = \frac{d}{t_2 - t_1} = \frac{\beta \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta}$$



- Für $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2} > 3 \rightarrow v_{\text{app}} > c$ für alle θ
- Maximum: $d\beta_{\text{app}}/d\theta = 0$: $\cos \theta_{\text{mx}} = \beta$, $\beta_{\text{app,mx}} = \beta\gamma$
- Sehr kleine $\beta \rightarrow v_{\text{app}}$ kleiner

AGN-Jets – Doppler-Effekt/Verstärkung

Dopplereffekt relativistischer ($\beta = (v/c) \simeq 1$) AGN-Jets:

(1) Strahlungsquelle mit $\beta \simeq 1$ im Winkel θ zur l.o.s.

(2) Zeitdilatation zwischen Jet (ν') und Beobachtersystem (ν)

$$\nu = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{\gamma \Delta t'} = \frac{\nu'}{\gamma}, \quad (\gamma = \sqrt{1 - \beta^2})$$

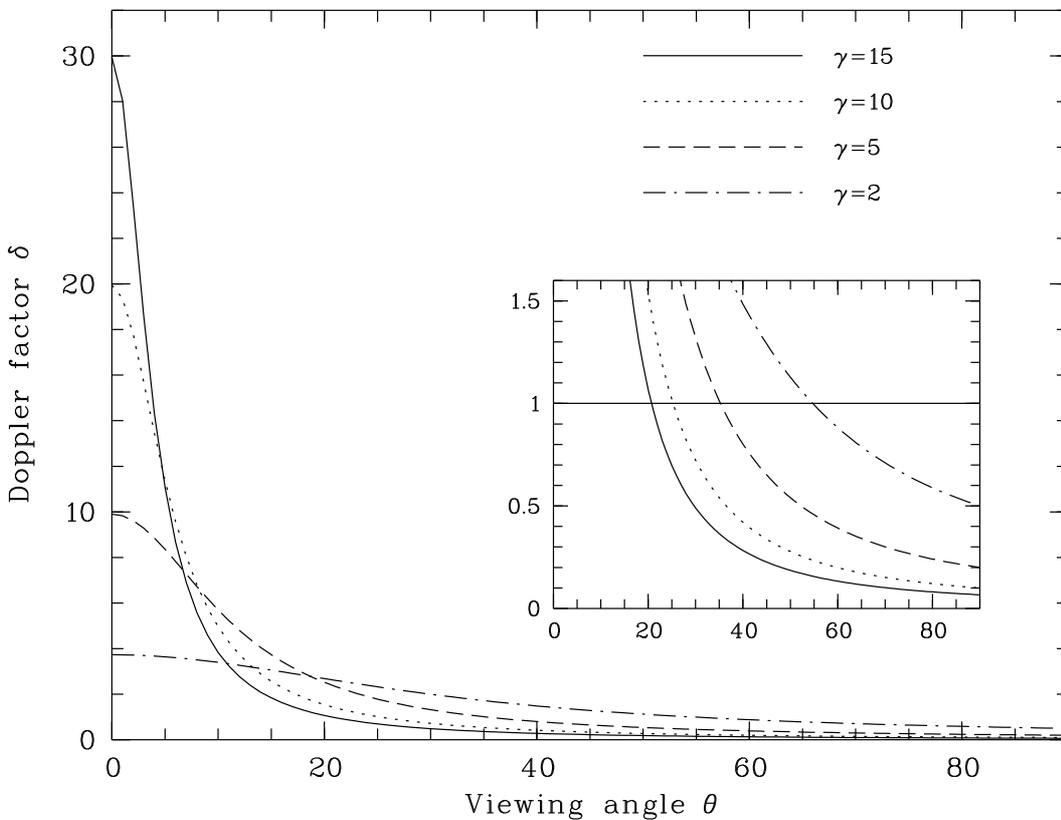
(3) Wegen $v \simeq c$: Ankunftszeiten der Photonen verkürzt

(Quelle wandert $\Delta s = v \Delta t \cos \theta$)

$$\Delta t_A = \Delta t(1 - \beta \cos \theta), \quad \nu_{\text{obs}} = \frac{1}{\Delta t_A} = \frac{\nu'}{\gamma(1 - \beta \cos \theta)}$$

(4) Relativistischer Dopplerfaktor: $\delta \equiv 1/(\gamma(1 - \beta \cos \theta))$

(γ als Unterschied zum klassischen Dopplereffekt)



AGN-Jets – Doppler-Verstärkung

Doppler-Verstärkung (“boosting”) der emittierten Strahlung

Strahlungsemission bei relativistischen Bewegung:

→ Erhaltungsgröße unter Lorentztransformation:

$$\rightarrow \frac{I_\nu}{\nu^3} \frac{I'_{\nu'}{}^3}{\nu'^3} \rightarrow I_\nu(\nu) = \delta^3 I'_{\nu'}(\nu')$$

(Zeitintervall: $\nu = \delta\nu'$, Raumwinkel: $d\Omega = \delta^2 d\Omega'$)

Dopplerverstärkung:

– Isotroper Strahlungsfluß einer Sphäre: $S_\nu(\nu) = \delta^3 S'_{\nu'}(\nu')$

– dito mit Potenzspektrums α : $S_\nu(\nu) = \delta^{3+\alpha} S'_{\nu'}(\nu')$

– Generell: $S_\nu(\nu) \sim \delta^{p+\alpha} S'_{\nu'}(\nu')$:

Kugel: $p = 3$; Kontinuierlicher Jet: $p = 2$;

Synchrotron-Radiospektrum $S_\nu \sim \nu^3$, $0.3 > \alpha > -1$

Veränderung des Strahlungskegels:

Ruhesystem isotroper Strahlungsquelle:

Halber Strahlungsfluß in Richtung zwischen $-\pi/2, \pi/2$ (halber Öffnungswinkel $\theta' = \pi/2$)

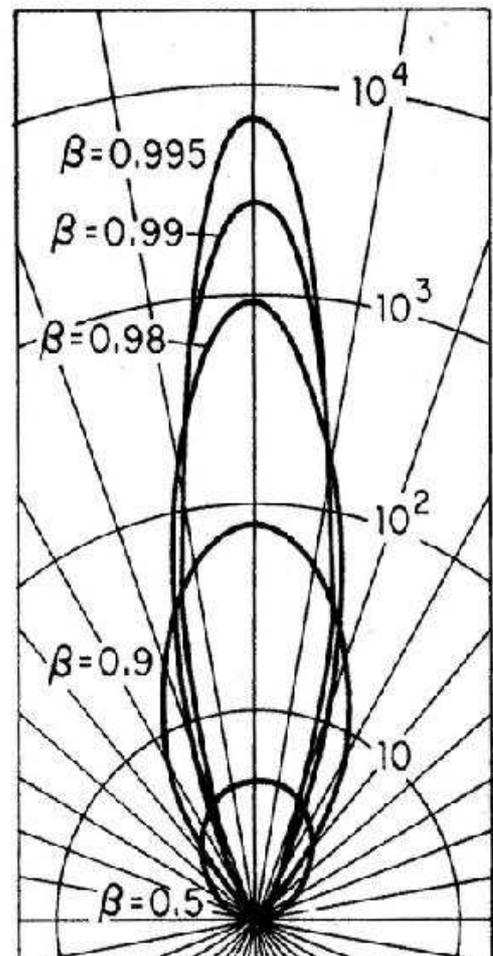
Relativistische Abberation: $\theta' \rightarrow \theta$

(Winkel-Koordinatentransformation)

$$\tan \theta = \frac{\sin \theta'}{\gamma(\cos \theta' + \beta)}$$

→ Verkleinerung des Strahlungskegels:

$$\tan \theta = \frac{1}{\gamma\beta}, \quad \rightarrow \simeq \frac{1}{\gamma}, \quad \text{für } \gamma \gg 1$$



AGN-Jets – Jetentstehung

Problem der Jetentstehung:

- (1) Beschleunigung auf relativistische Geschwindigkeiten
- (2) Kollimation der Strömung in einen engen Strahl

Randbedingungen aus der Beobachtung:

- Jets entstehen aus Quellen mit Akkretionsscheiben
→ Akkretierende Materie wird z.T. in den Jet umgelenkt
- Schwarzes Loch im Zentrum der Quelle
→ Tiefes Gravitationspotential: Energiereservoir für relativistischen Jet
- Evidenz für Magnetfelder in den Jets
→ Magnetische Kräfte für Kollimation/Beschleunigung (?)
- Hohe Leuchtkraft der AGN
→ Strahlungsdruck Ursache für Beschleunigung (?)

Modellvorstellungen zur Jetentstehung:

- (1) Düsenwirkung des Umgebungsmaterials: (Blandford & Rees 1974)

Kollimation durch thermischen Druck: $\mathbf{F} = \nabla P_{\text{gas}}$

Initiale Beschleunigung? (dann Düsenwirkung)

- (2) Strahlungsdruck:

Beschleunigung: $\mathbf{F} = \nabla P_{\text{gas}}$; Kollimation?

- (3) MHD Scheibenwind: (Blandford & Payne 1982)

Scheibenmaterial wird in Jet überführt

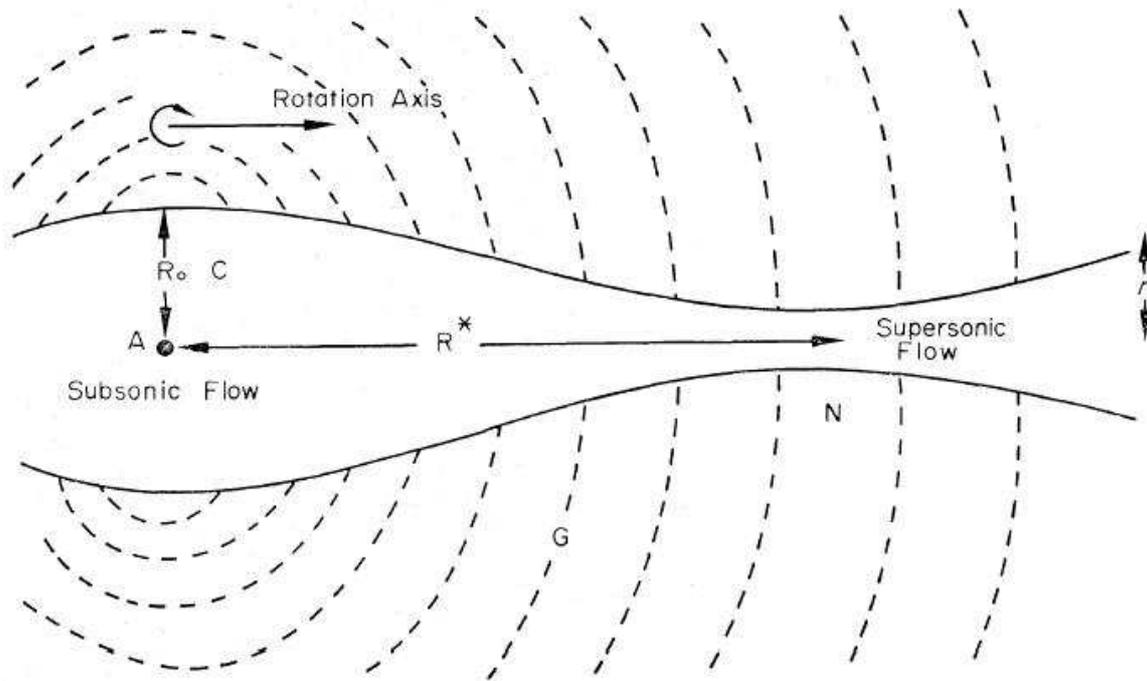
Kollimation/ Beschleunigung: Lorentzkräfte: $\mathbf{F} \sim \mathbf{j} \times \mathbf{B}$

- (4) Magnetfeld und schwarzes Loch (Blandford & Znajek 1977)

Energiegewinn aus Rotation des schwarzen Lochs

Materie? (Paar-Erzeugung im elektromagnetischen Feld)

AGN-Jetentstehung – Düse; Schwarzes Loch



“Twin-exhaust”-Modell (Blandford & Rees 1974)

- Zentr. Energiequelle (undefiniert) beschleunigt Gas ($> 10^6$ Jhr)
- Druckprofil des externen Mediums $p \sim l^{-2}$
- Hydrodynamische Strömung durch ext. Medium
- Düsenwirkung: Strömung wird supersonisch
- Ballistische Bewegung, Jetradius $\simeq 0.6\gamma r_{\text{nz}} \simeq 0.6(p/p_0)^{-1/4} r_{\text{nz}}$
- Jet-Öffnungswinkel: $\theta \sim r/l \sim l^{-1/2}$

Problem: Beobachtete (VLBI) Kollimationsskala < 1 pc erfordert hohen Umgebungsdruck/-temperatur: nicht beobachtet in Röntgen

Magnetfeld eines rotierenden BH (Blandford & Znajek 1977)

- Zentrale Energiequelle: Rotationsenergie des BH
- Energieübertrag: magnetische Kopplung BH zu Jetmaterie
- Frage: Woher kommt Jetmaterie?

Paarbildung im starken Strahlungsfeld → nur “leichte” Jets

AGN-Jetentstehung – MHD-Jets

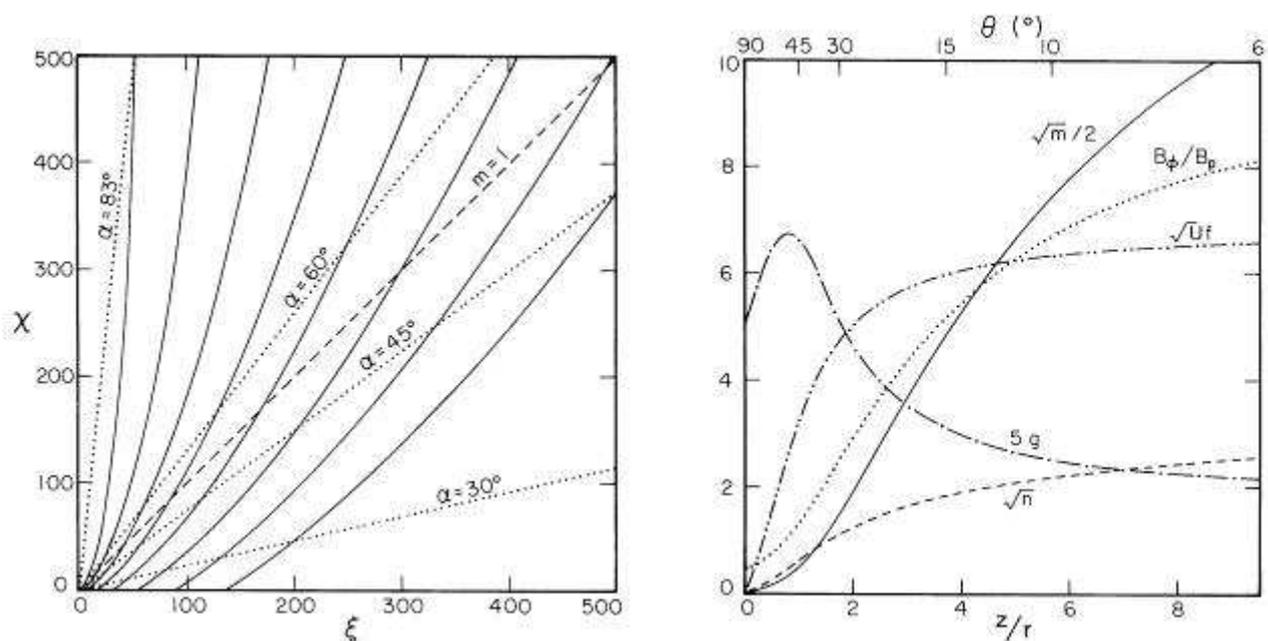
Kollimierender MHD-Scheibenwind (Blandford & Payne 1982):

- Rotierende Akkretionsscheibe, großskaliges Magnetfeld
- Magnetozenrifugale Beschleunigung, für \mathbf{B} -Inklination $> 30^\circ$
- Aufwickeln des Magnetfeldes $\mathbf{B}_P \rightarrow \mathbf{B}_\phi$ durch Trägheitskräfte
- Beschleunigende/kollimierende Lorentzkraftkomponenten:

$$\mathbf{F}_L \equiv \mathbf{F}_{L,\parallel} + \mathbf{F}_{L,\perp}, \quad \mathbf{F}_{L,\parallel} \equiv \mathbf{j}_\perp \times \mathbf{B}_\phi, \quad \mathbf{F}_{L,\perp} \equiv \mathbf{j}_\parallel \times \mathbf{B}$$

Stationäre Lösungen der MHD-Gleichungen zeigen:

- Beschleunigung durch Magnetfelder
- Kollimation der rotierenden MHD-Strömung
- Jet wird super-magnetosonisch (d.h. schneller als SM Wellen)
- Energietransfer: magnetisch → kinetisch
- Drehimpulstransfer: kinetisch → magnetisch
- $v_z \gg v_\phi$, $B_z \ll v_\phi$
- Relativistische Strömung kann erreicht werden

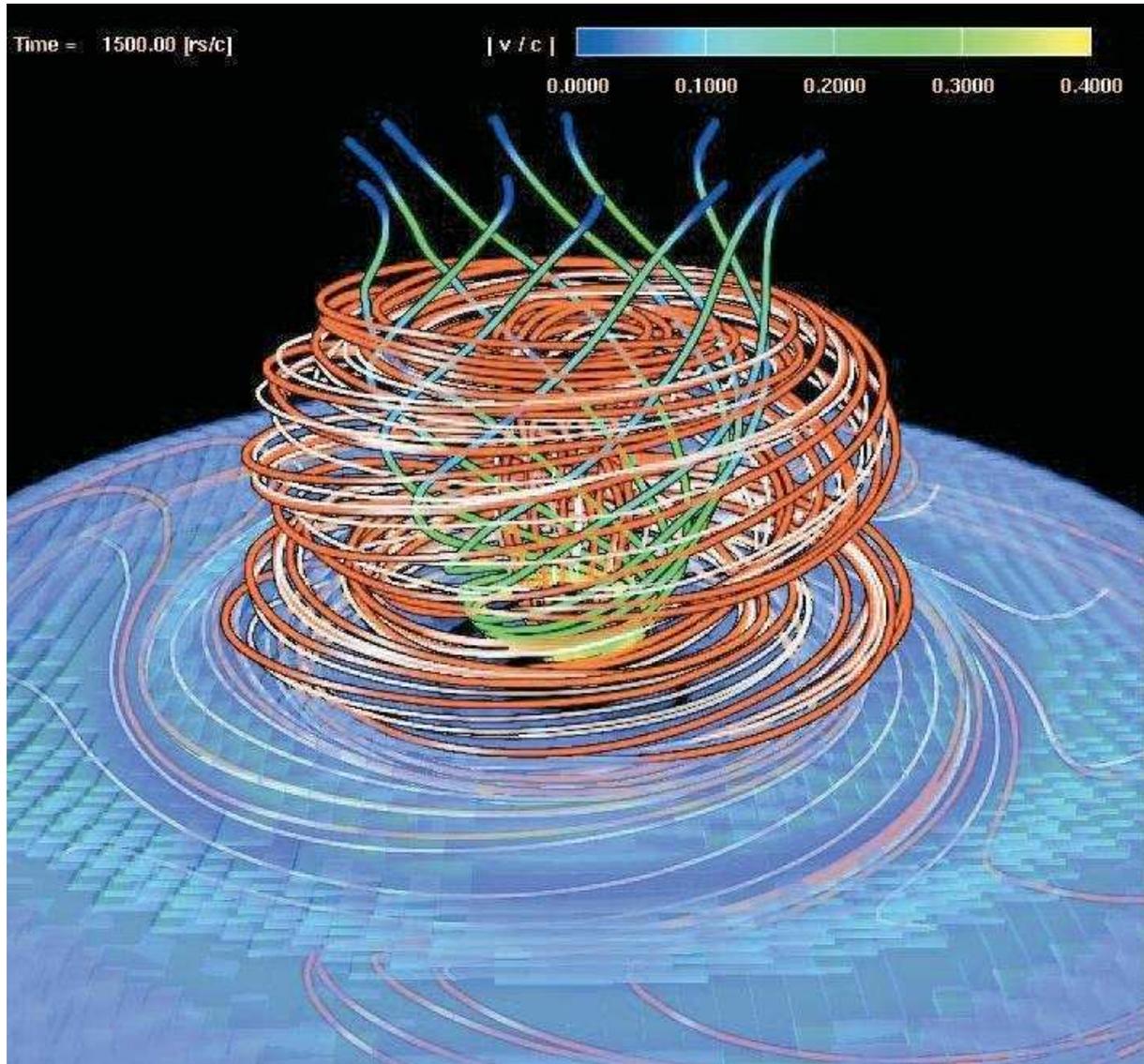


Links: Magnetfeldstruktur (axialsymmetrisch); rechts: Strömungsdynamik

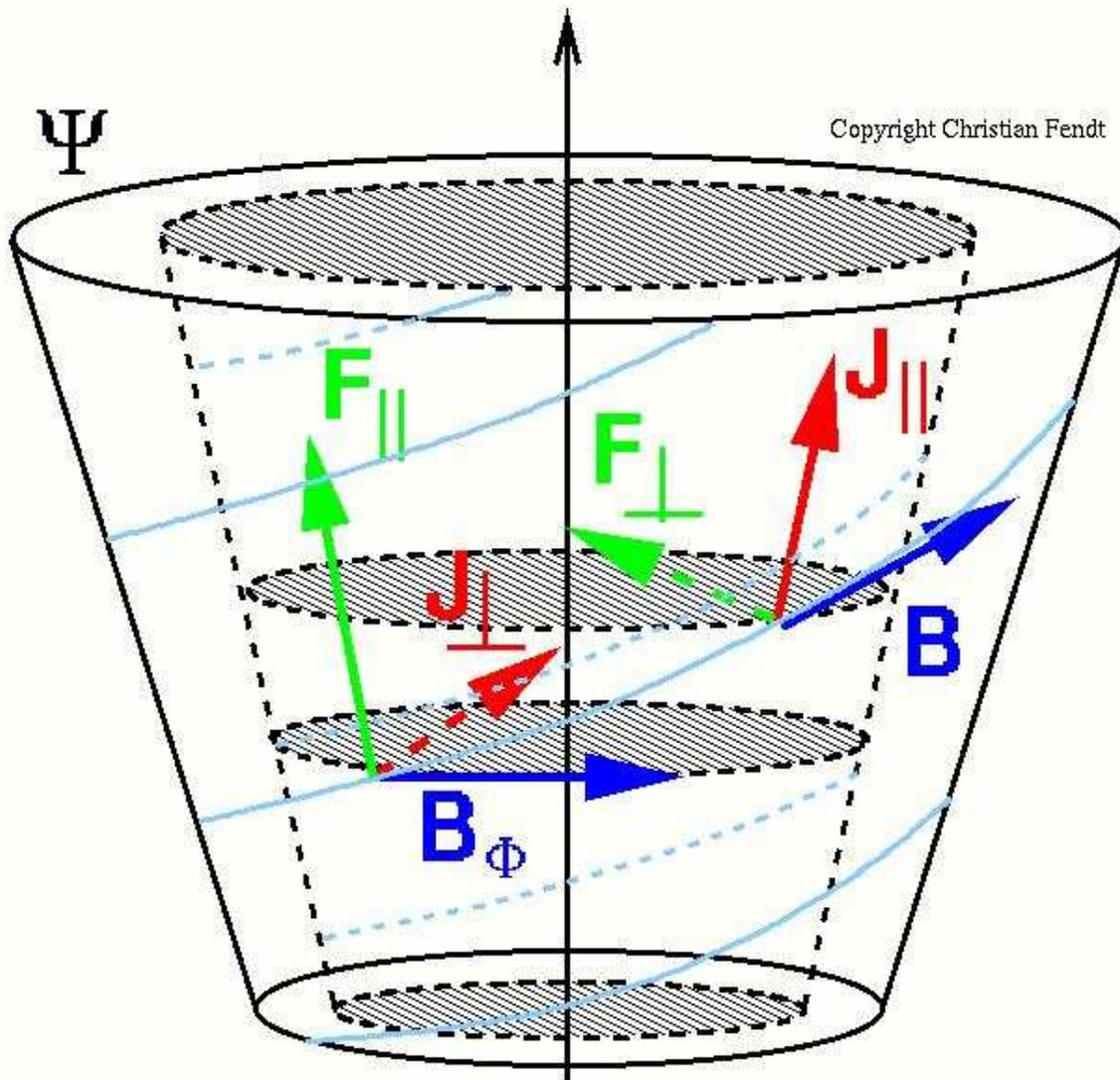
AGN-Jetentstehung – MHD-Jet-Modell

Jets als kollimierender MHD-Wind

Magnetozentrifugale Beschleunigung, “Aufwicklung” des Magnetfeldes



(Kato et al. 2004)



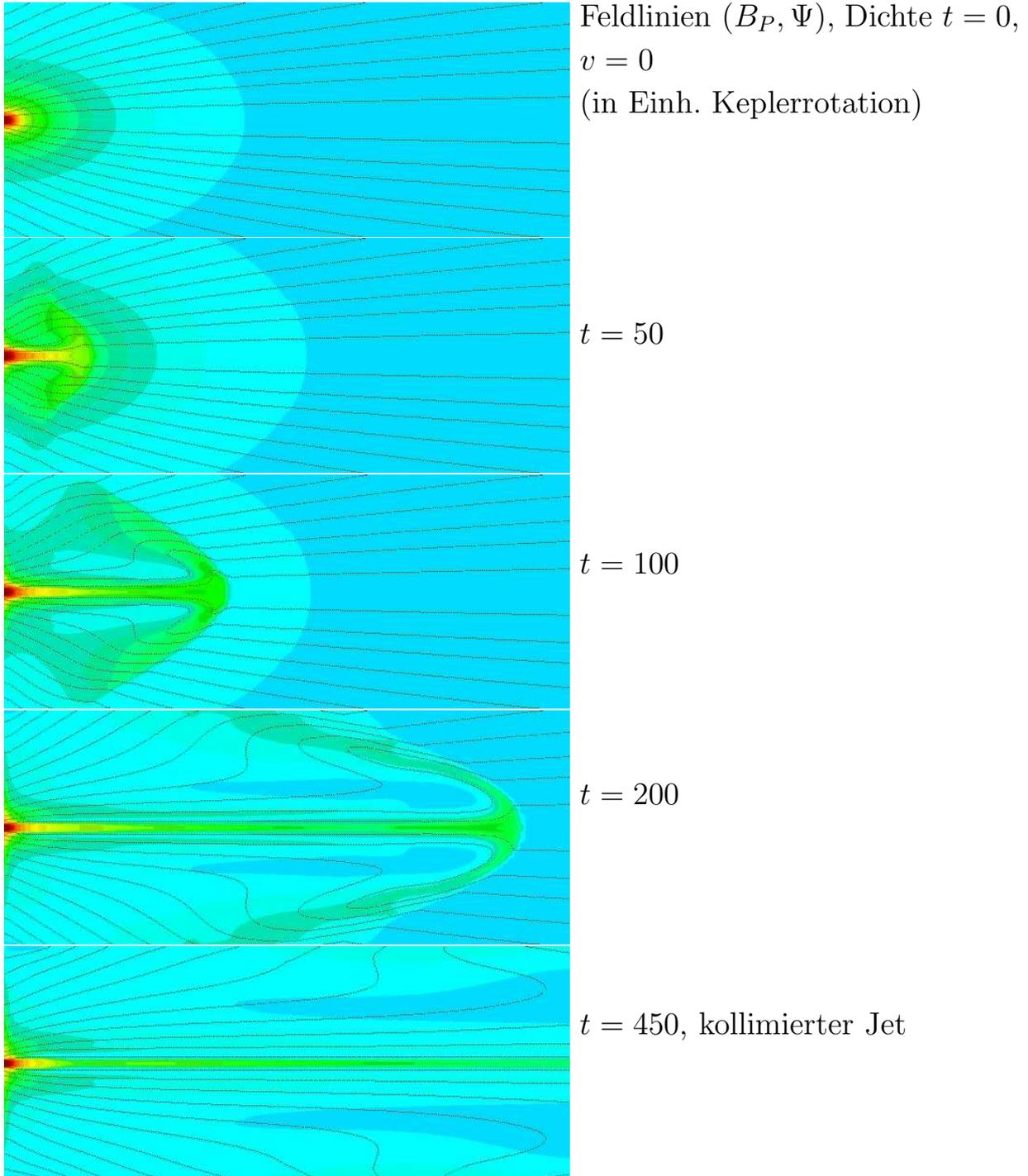
(Christian Fendt)

Geschachtelte Flußflächen (magnetischer und Massenfluß) $\Psi(r, z) = \int B_z dA$
 Lorentzkraftkomponenten senkrecht und parallel zu Ψ

AGN-Jetentstehung – MHD-Simulationen

Zeitabhängige MHD-Simulation der Jetentstehung:

Numerische Lösung der magnetohydrodynamischen Gleichungen:



AGN-Jets – Schocks, Heizung

Beispiel Jet: Bewegte Gasströmung trifft auf ruhendes Gas

→ Ausbildung eines Schocks:

Dünne Grenzfläche zwischen den Medien, in der das bewegte Gas abgebremst wird

Schockdicke durch mikroskopische Physik bestimmt (Viskosität):

$\Delta x \simeq l$ (freie Weglänge für Kollisionen)

Beispiel: Stationärer hydrodynamischer Schock:

Aus Erhaltungsgleichungen (Energie, Impuls, Masse) → Rankine-Hugoniot “jump”-Bedingungen: z.B.

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{(\Gamma + 1)\mathcal{M}_1^2}{(\Gamma - 1)\mathcal{M}_1^2 + 2}, \quad \frac{T_2}{T_1} = \frac{(2\Gamma\mathcal{M}_1^2 - (\Gamma - 1))(\Gamma - 1)\mathcal{M}_1^2 + 2}{(\Gamma + 1)^2\mathcal{M}_1^2}$$

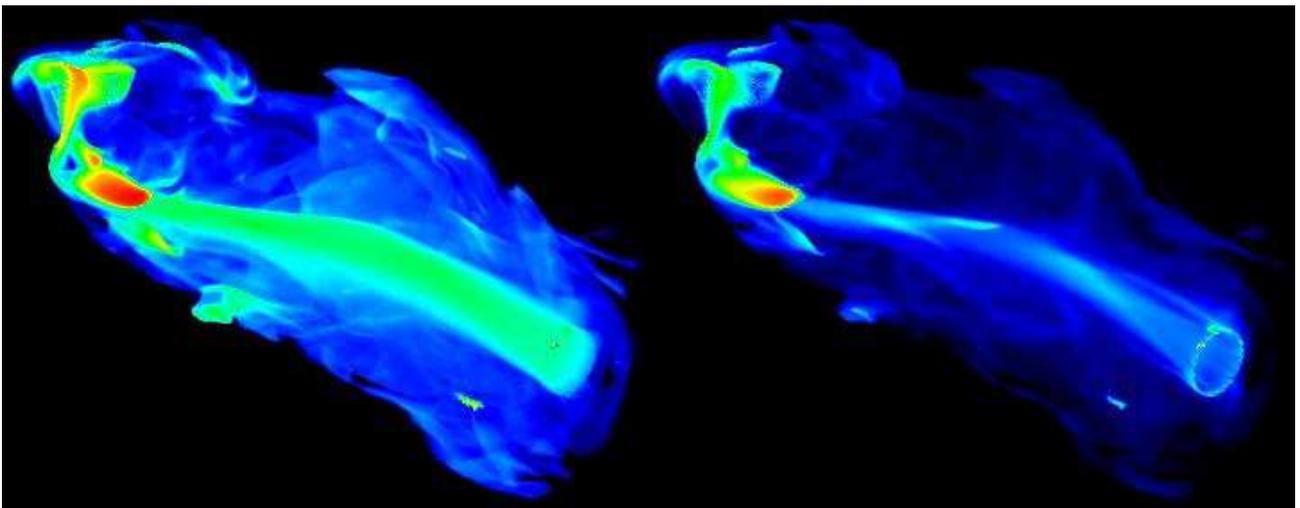
für polytropes Gas ($p \sim \rho^\Gamma$), Machzahl $\mathcal{M} \equiv (v/c_s)$

Bedingung für Schock: $\mathcal{M}_1 > 1$, → $(\rho_2/\rho_1) > 1$

Bei MHD-Schock wird senkrechte B-Komponente komprimiert

Wichtig für Jets: Heizung des Plasmas:

Im Jet $\gamma_{\text{ther}} \simeq 10^3$ beobachtet (Synchr.); Lobes: $T \simeq 10^8$ K



MHD Simulation: <http://www.msi.umn.edu:80/Projects/twj/radjet/radjet.html>
5.4 GHz Synchrotron-Radiobild; 1.2keV X-ray, SSC der Radiophotonen