

C19

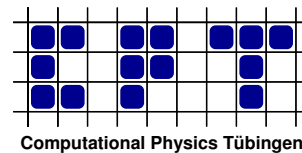
Magnetohydrodynamische Turbulenz

Wilhelm Kley

(Hubert Klahr, Richard Günther, Daniel Marik, Jochen Peitz)

Institut für Astronomie & Astrophysik
Universität Tübingen

EBERHARD KARLS
UNIVERSITÄT
TÜBINGEN



19. September, 2006

IAAT

C19 Astrophysikalische Turbulenz



Weite Verbreitung

- Erde Wetter, Kochtopf
- Sonne Granulation, Konvektion
- Milchstraße Interstellare Materie
- Kosmos Akkretionsscheiben

Oft verbunden mit Magnetfeldern

Theoretische Beschreibung durch **Magnetohydrodynamik** (MHD)

C19: Entwicklung numerischer Methoden zur Lösung der MHD-Gleichungen



$$\frac{\partial \varrho}{\partial t} + \nabla \cdot (\varrho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\varrho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\varrho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p - \rho \nabla \Psi + \frac{1}{4\pi} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} + \nabla \cdot \mathbf{Q} \quad (2)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (e \mathbf{v}) = -p \nabla \cdot \mathbf{v} + \mathbf{Q} : \nabla \mathbf{v} - \nabla \cdot \mathbf{F} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (5)$$

$$p = (\gamma - 1)e \quad (6)$$

Magnetische Terme

Viskosität (eg. künstliche)

Strahlungsdiffusion



Basierend auf F77-GridCodes

- RH2D, zwei-dimensionale RHD
- TRAMP, drei-dimensionale RHD
- NIRVANA v0, drei-dimensionale MHD

Neuentwicklung

- Modern (C++, objektorientiert)
- Parallel (MPI, OpenMP)
- Full-featured (physikalisch, technisch)

⇒ **Tramp-MP-Code** (Richard Günther & Daniel Marik)

Funded by: [SFB 382 & Landesstiftung BW](#)

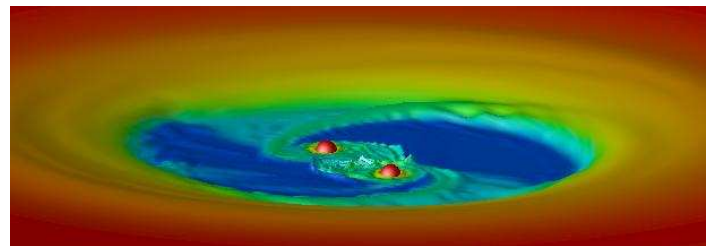
Ein Gitter basierter Code (finite Volumen)

- 2. Ordnung in Raum und Zeit
- Kartesische, zylindrische oder sphärische Koord.
- MHD: Constraint Transport (divergenzfrei)
- Tensor Viskosität
- N-body Integrator
- OpenMP und/oder MPI parallel (Pooma-Library)
- Paralleler Poisson-Löser (Multi-Grid, PETSc library)
- HDF5 (parallele I/O)
- OpenDX (Visualisierung, *Movies*)
- Zukunft: Radiation (diffusiven Strahlungstransport)

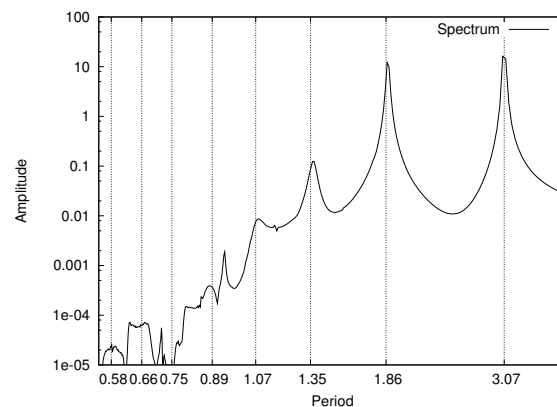
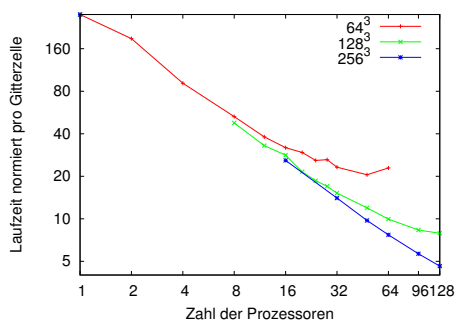
C19 Tests & Performance



- Shocks → **Poster**
- Akkretionsscheiben
Circumbinary Disks
→ **Poster, Movie**
- Planetenentstehung
- Sternoszillationen
polytrope Sterne
- Scaling → **Poster**



Circumbinary Disk



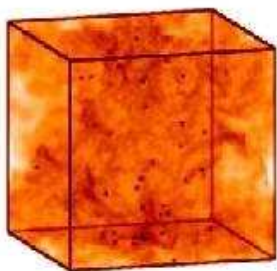
Fourierspektrum (3D Sternoszillationen)

Zwei Anwendungen

I Turbulente Molekülwolken

II Akkretionsscheiben

Wichtig für Sternentstehung (z.B. Barnard 68, 1)



(R.Klessen)

Kubischer Bereich

Homogene Dichte und Temperatur
(isotherm)

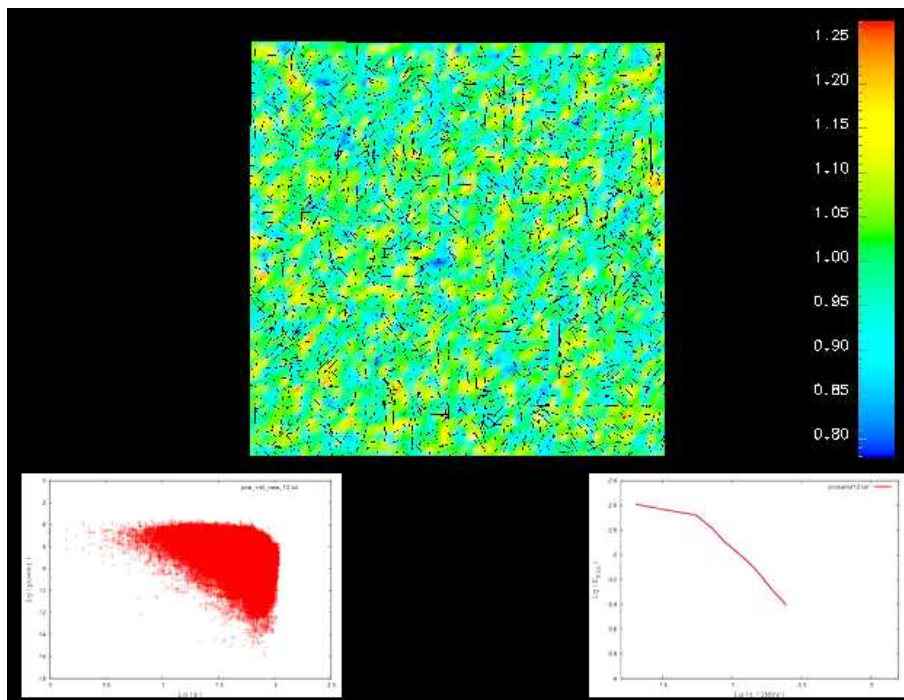
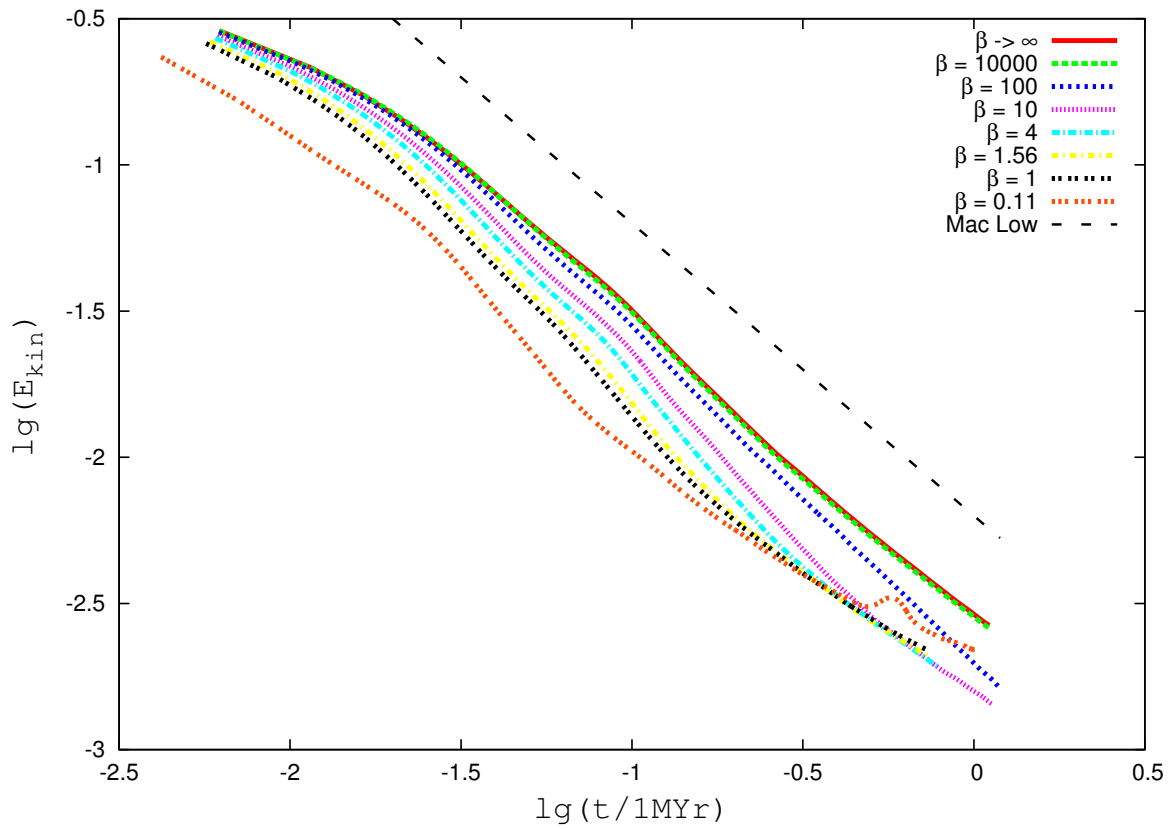
Konstantes vertikales Magnetfeld

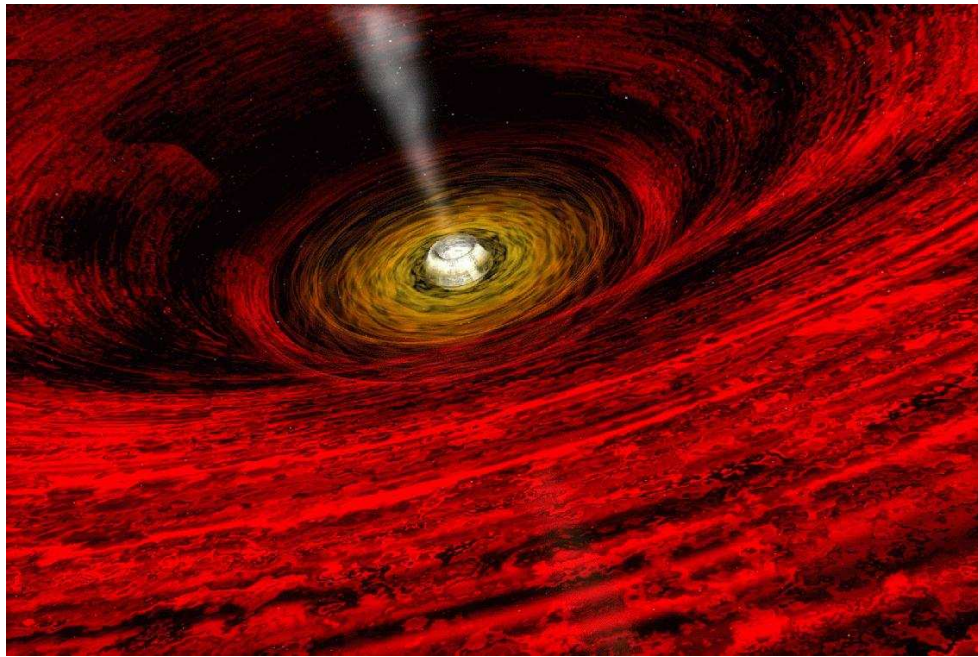
Periodische Randbedingungen

Zufällige Geschwindigkeitsfluktuationen

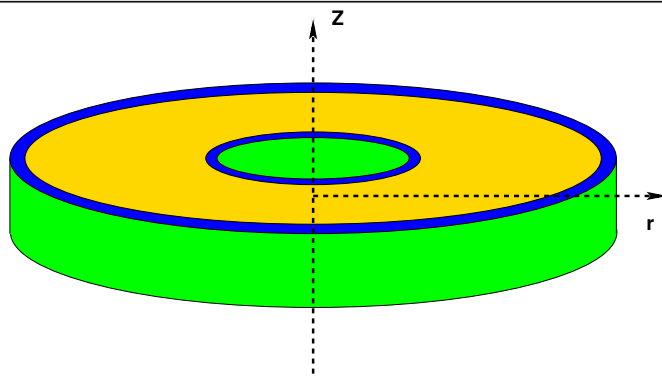
Charakterisierung durch $\beta = P_{gas}/P_{mag}$

64³ Gitterzellen





Abgeflachte, rotierende **Scheibe um Zentralkörper** (PS, WZ, NS, SL)
 Astrophysikalisch wichtig: Massen- und Drehimpulstransport
Turbulenz: hydrodynamisch stabil \Rightarrow MHD-Instabilität

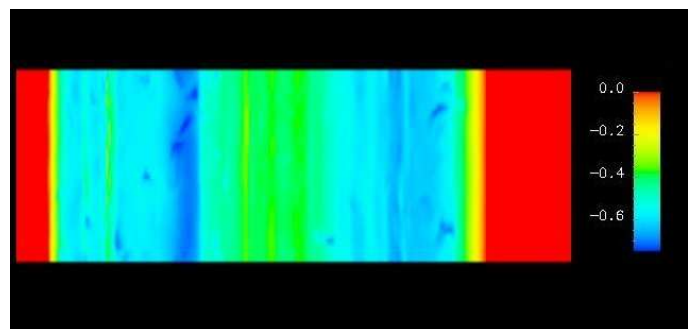
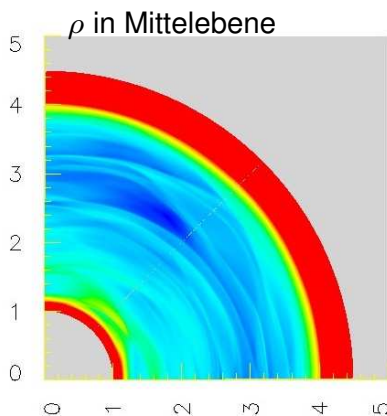


Zylindergeometrie (r, φ, z)
 Ohne vertikale Gravitation
 Periodisch in z und φ
 Axialsym. Anfangsmodell ($\vec{B} = 0$)
 Nicht-Axialsym. Störungen (v_r, B_φ)

Aktive Zone
 Radiale Puffer (Sandwich)
 Höhe $H \ll r$

Löse volle 3D-MHD Gleichungen

$(N_r = 384, N_\varphi = 108, N_z = 36, \Delta\varphi = 90^\circ)$



Dichte, $r - z$ Koord., Schnitt bei $\varphi = 0$

C19 II Turbulenter Transport



Zylindergeometrie (r, φ, z)
Ohne vertikale Gravitation
Periodisch in z und φ
Axialsym. Anfangsmodell ($\vec{B} = 0$)
Nicht-Axialsym. Störungen (v_r, B_φ)

Zero Net toroidal Flux

$$\Rightarrow \alpha \approx 5 \times 10^{-3}$$

Turbulenter Transport von
Masse & Drehimpuls

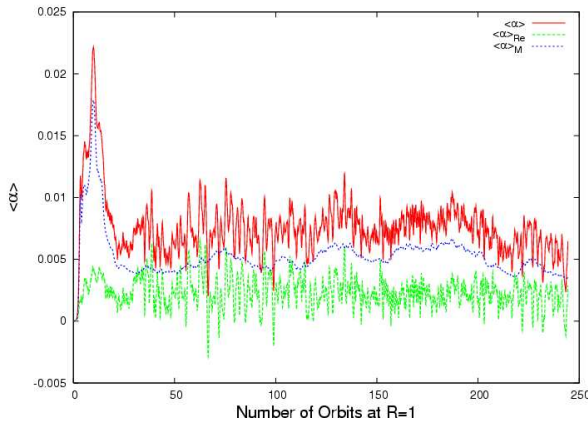
$$T_{r\varphi} = \alpha P \quad \alpha\text{-Scheibe}$$

$$T_{r\varphi} = \{T_{Mag}, T_{Hyd}\}$$

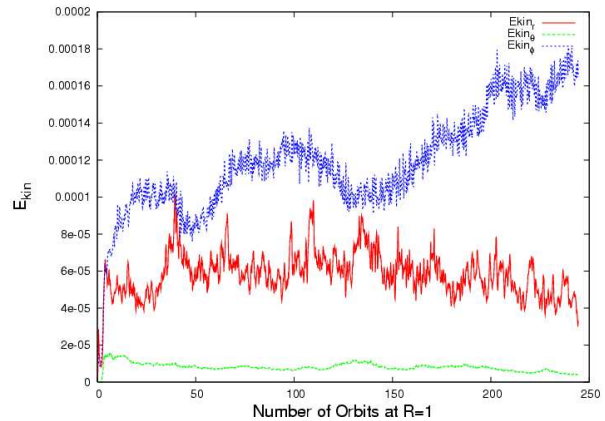
$$T_{Mag} \propto \langle B_r B_\varphi \rangle$$

$$T_{Hyd} \propto \langle \delta v_r \delta v_\varphi \rangle$$

$\alpha(t)$ (Tot Hyd Mag)



$E_{kin}(t)$ ($r \theta \varphi$)



C19 Zusammenfassung



MRHD

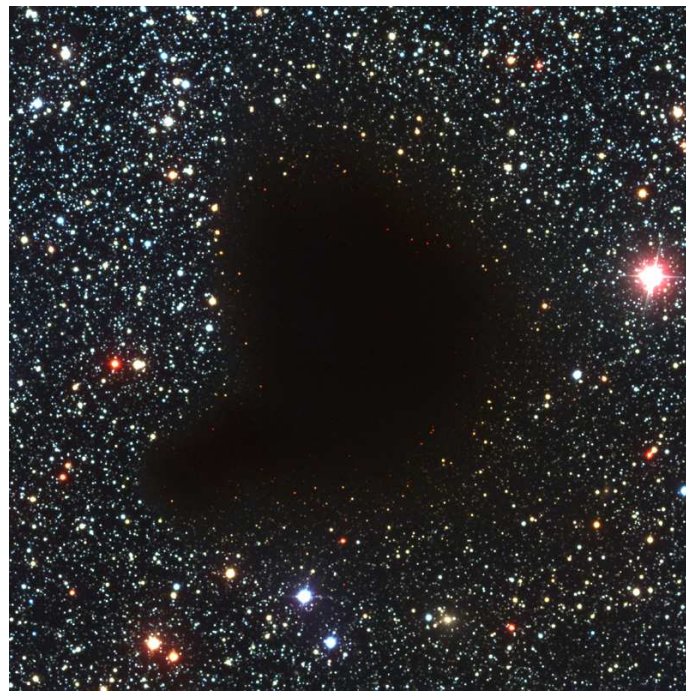
- Implementierung eines parallelen 3D-MHD Codes
- Erfolgreiche Validierung durch Tests
- Anwendungen auf astrophysikalische Turbulenz

MRHD

- Erweiterung um Strahlungstransport



Vielen Dank für
Ihre Aufmerksamkeit !



ESO PR Photo 23a/99 (30 April 1999)

The "Black Cloud" B68
(VLT ANTU + FORS1)

© European Southern Observatory



Abbildung 1: ESO-VLT