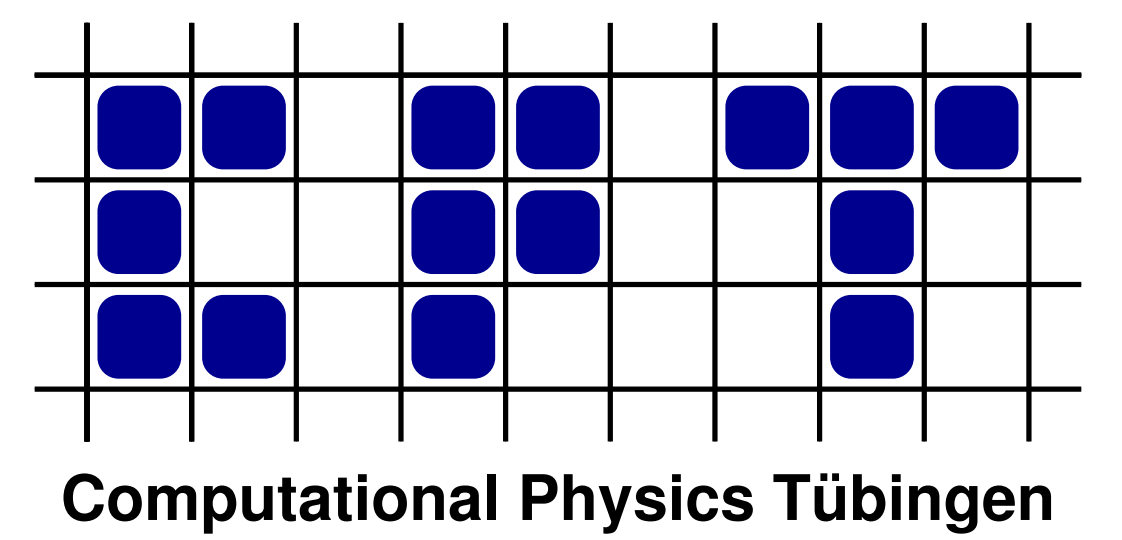


## DREIDIMENSIONALE MRHD

W. Kley, Astronomie und Astrophysik, Tübingen

H. Klahr, MPI Astronomie, Heidelberg



### Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts wurde ein neues paralleles Programm zur Lösung der dreidimensionalen Gleichungen der Magneto hydrodynamik unter Verwendung von modernen Programmier-Techniken in C++ erstellt, getestet und angewendet.

### Die Gleichungen der idealen MHD

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) &= 0 \\ \frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) &= -\nabla p - \rho \nabla \Psi + \frac{1}{4\pi} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} + \nabla \cdot \mathbf{Q} \\ \frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (e \mathbf{v}) &= -p \nabla \cdot \mathbf{v} + \mathbf{Q} : \nabla \mathbf{v} - \nabla \cdot \mathbf{F} \\ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) &= 0 \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ p &= (\gamma - 1)e \end{aligned}$$

Magnetische Terme, Viskosität (eg. künstliche), Strahlungsdiffusion

### Der numerische Algorithmus & Code-Aufbau Methoden

- Finite Volumen (Upwind): 2. Ordnung in Raum & Zeit
- Nicht uniformes Gitter (cart., cyl., spher., staggered)
- Kovariante Implementierung der Differenzen-Gleichungen
- Operator und Directional Splitting
- Multi-Grid Poisson-Löser
- **Contraint Transport (CT) für Induktionsgleichung**
- **Explizit/Impliziter Strahlungstransport** (in Arbeit)

**Der Code:** **Tramp-MP** (erstellt von Richard Günther & Daniel Marik)

Parallelisierung abstrahiert durch die POOMA C++ Bibliothek.

- Datenparalleles Programmieren mit Arrays, seriell ohne Overhead
- Neue, optimierte MPI Parallelisierung (distributed memory)
- Erstmals OpenMP parallel (shared memory, Threads)
- Parallele Ein-/Ausgabe mit HDF5
- Parallele Löser für elliptische Gleichungen mit PETSc
- Verbesserte Performance durch Optimierung von Bibliothek und Compiler
- Visualisierung mit Anbindung an OpenDX

### Tests

- Shocks: Sod, MHD, Sedov
- Akkretionsscheiben
- Sternoszillationen

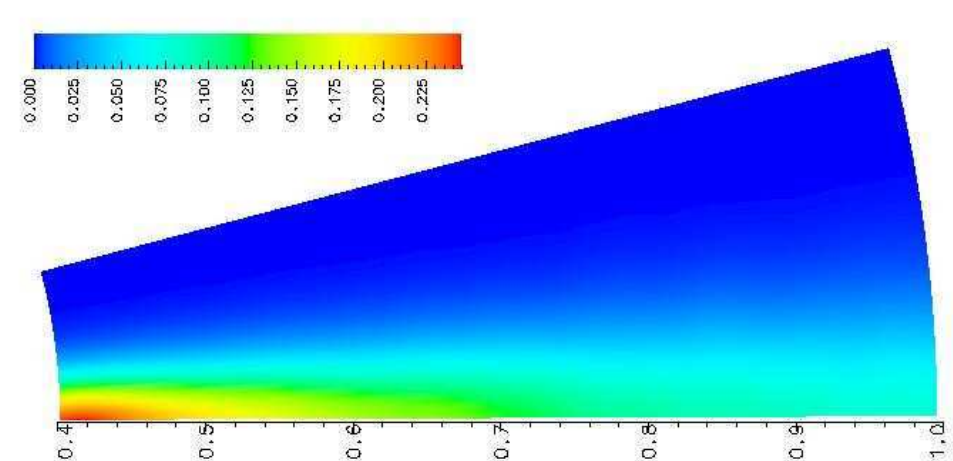


Figure 1: 3D Akkretionsscheibe

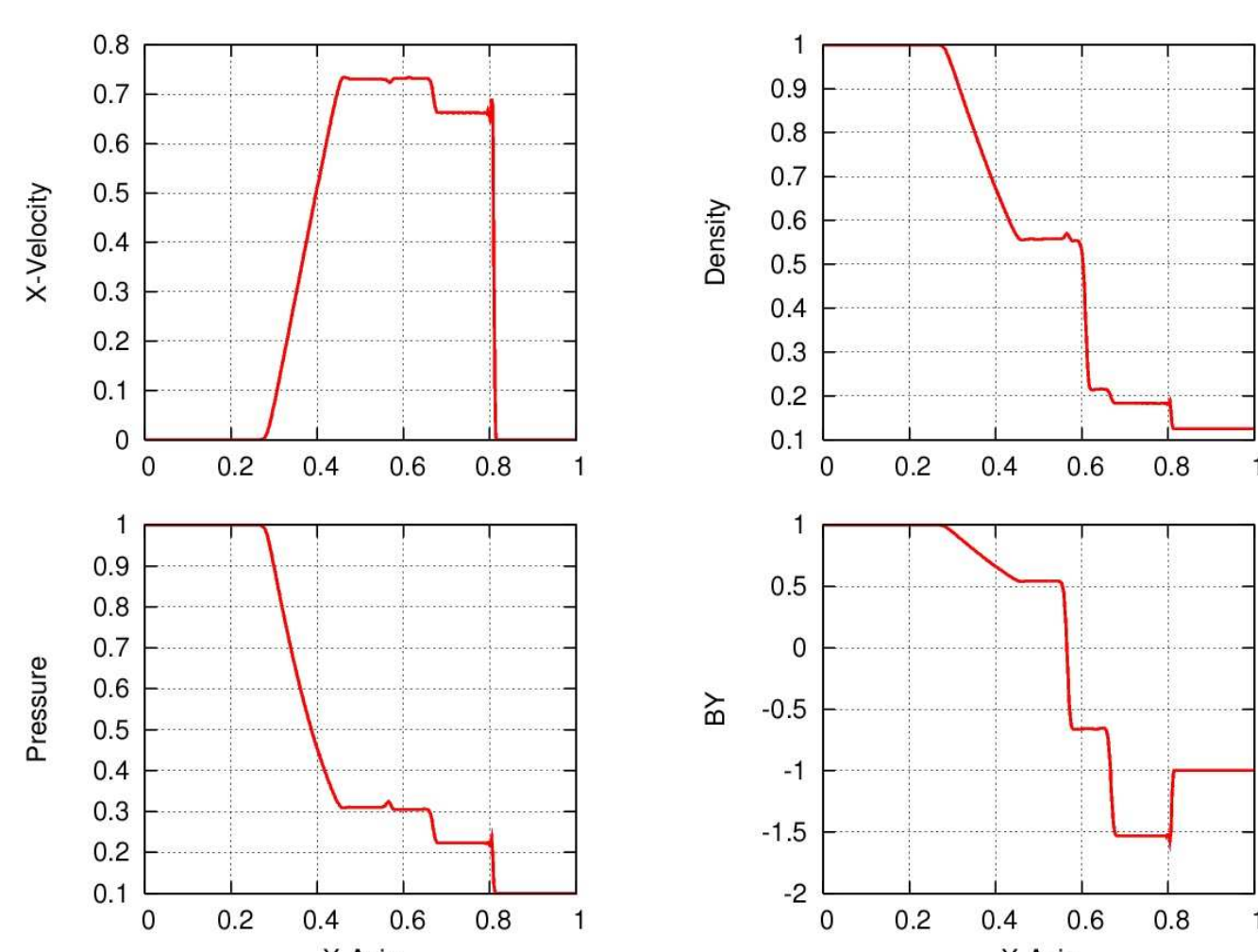


Figure 2: 1D MHD Shock-Tube

### Performance

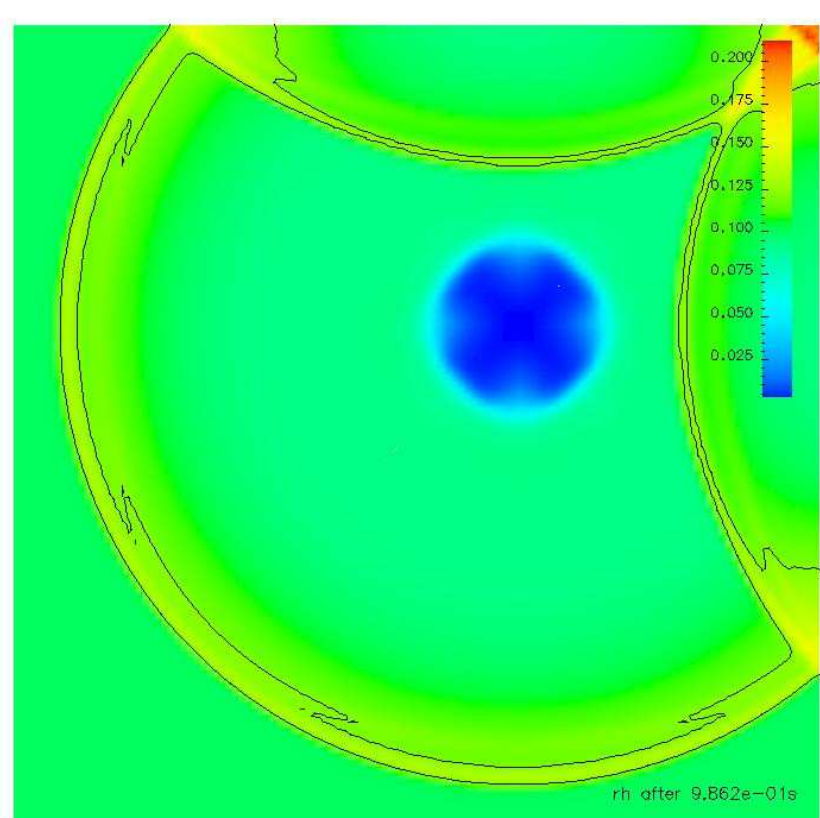
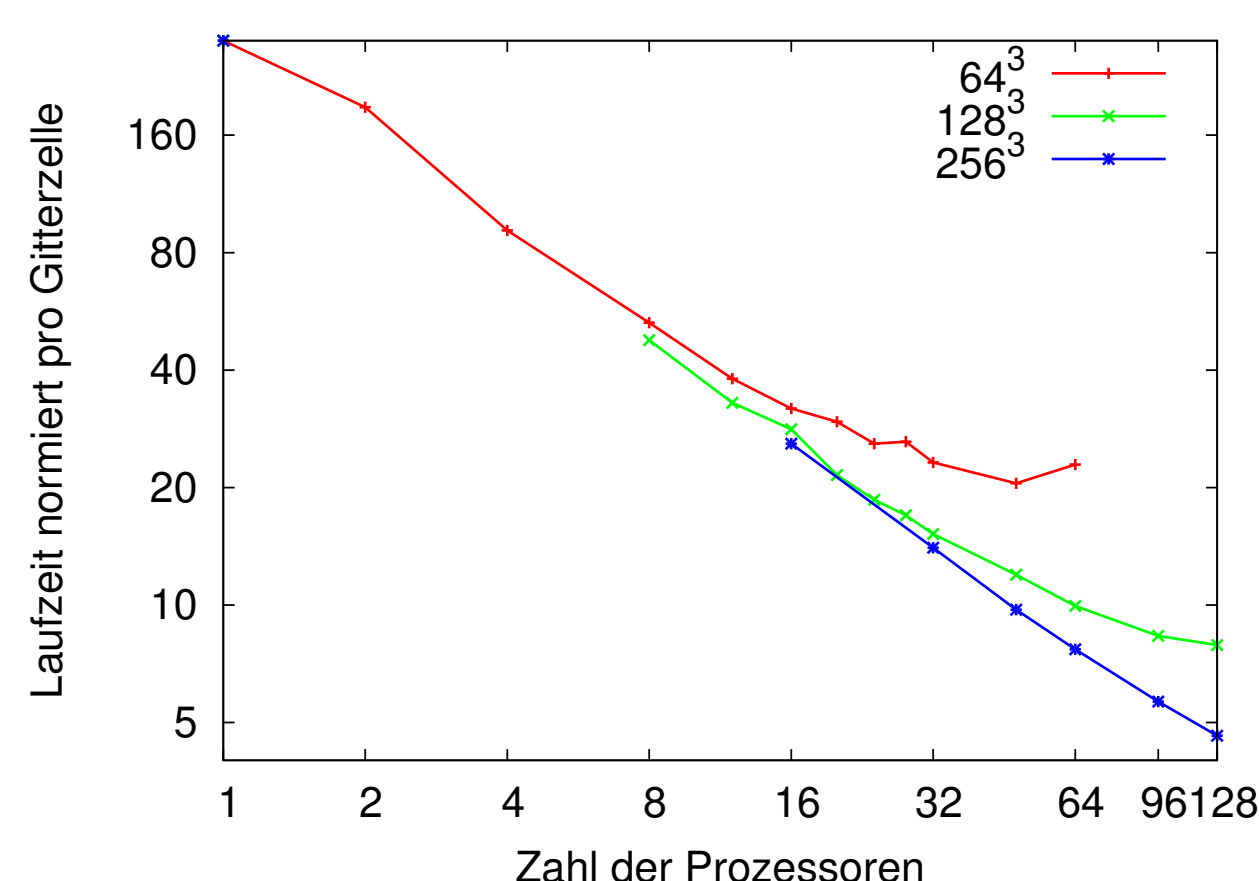


Figure 3: 2d & 3d Sedov Explosion auf Kepler Cluster, 64 x Dual-P3 mit Myrinet.



### Physikalische Anwendungen

#### Turbulent Box

Modell einer Molekülwolke

- Periodische Box der Länge  $L$
- Homogenes  $\rho$  und  $T$
- Homogenes  $\vec{B}$ -Feld  $(B, 0, 0)$
- Ohne Eigengravitation
- Zufällige Geschwindigkeitsstörung
- Charakterisierung durch  $\beta = P_{gas}/P_{mag}$
- Untersuche Abklingraten der Energie

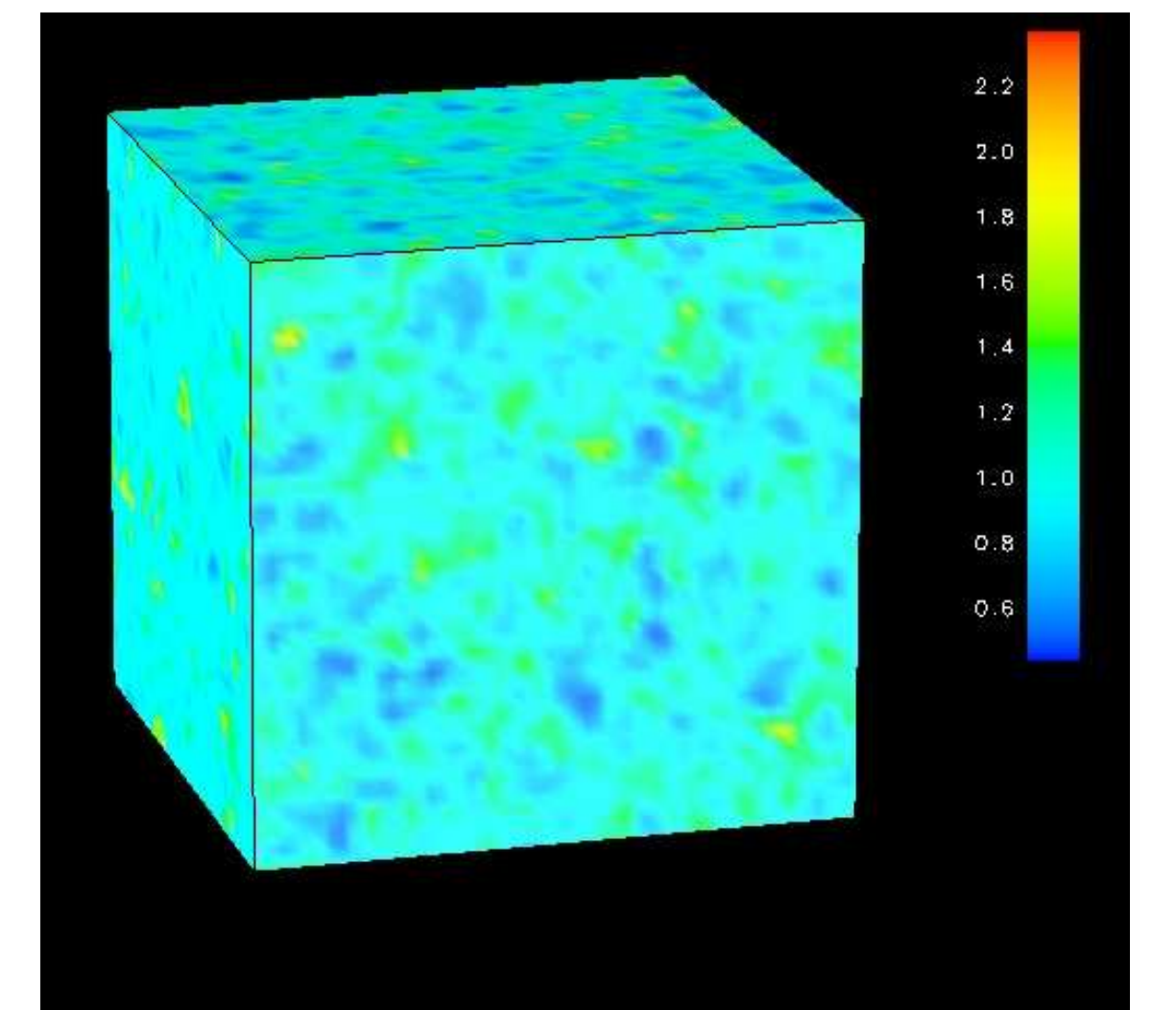


Figure 4: Dichtekonturen

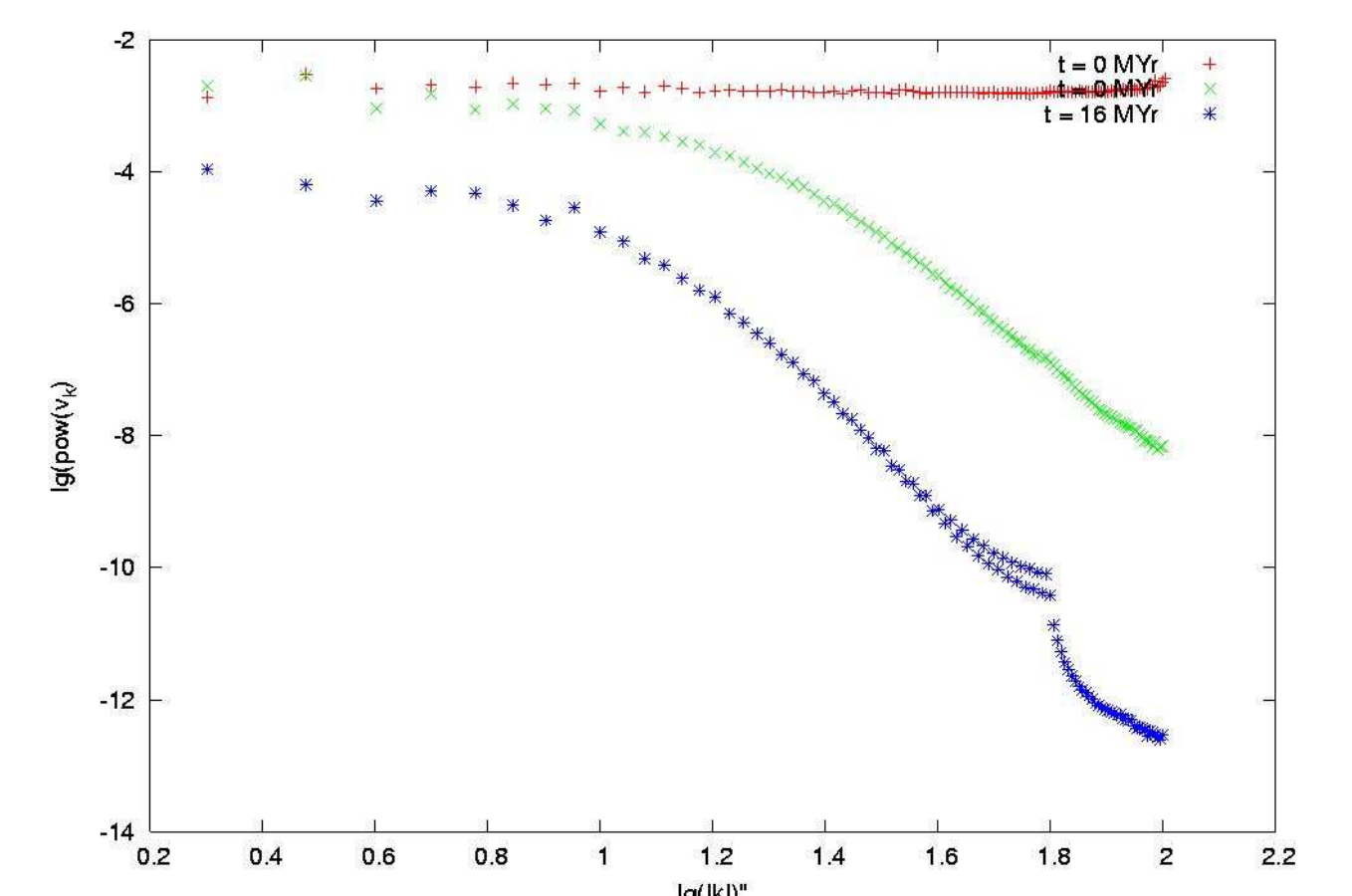
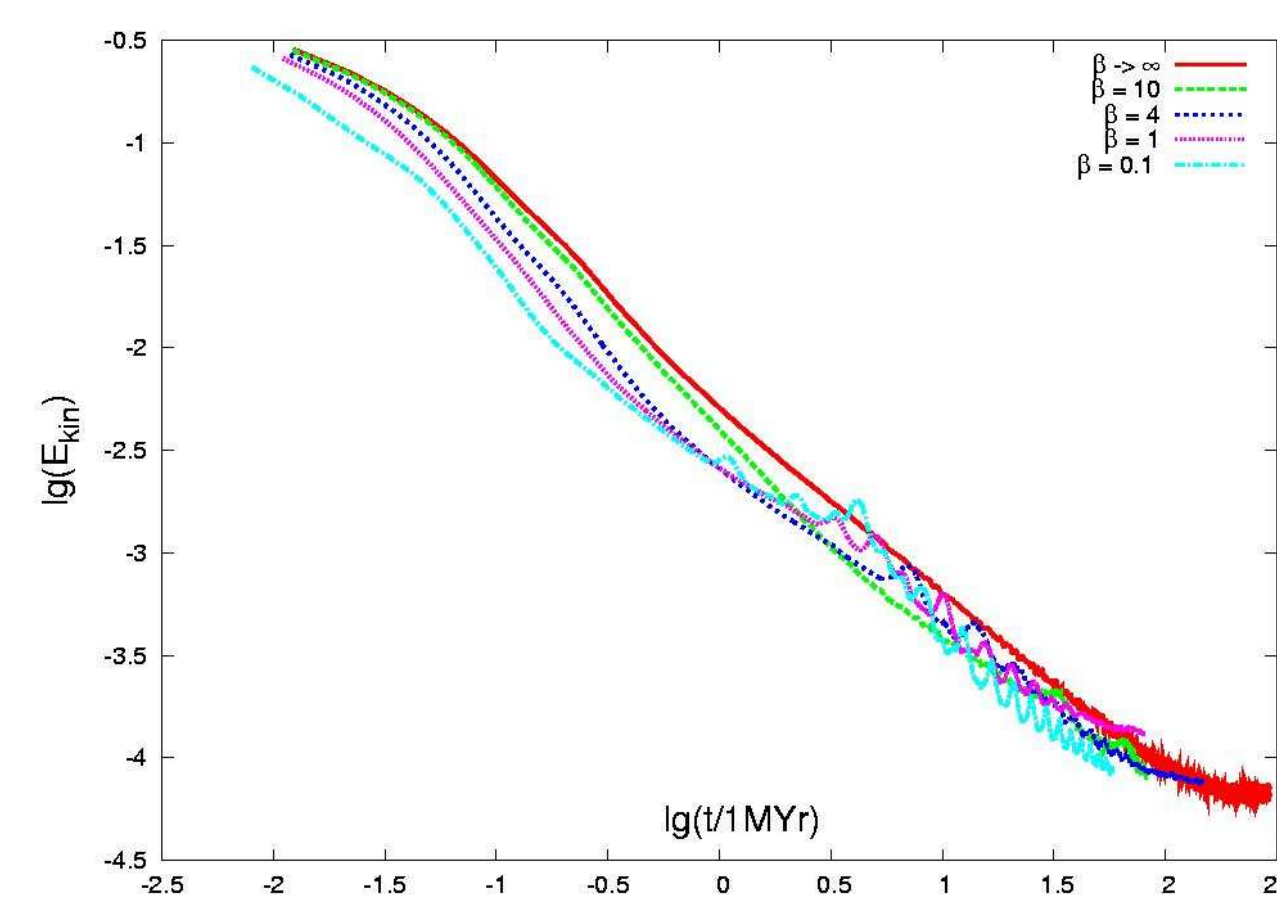


Figure 5: Abklingrate der kin. Energie, und das turb. Energiespektrum

#### Circumbinary Disk

Scheiben um Doppelstern

- Sterne meist in Mehrfachsystemen
- Grav. Kollaps & Fragmentation  
⇒ Doppelsternsystem in Molekülwolke
- Zwei bekannte aufgelöste Systeme (GG Tau, UY Aur)
- Spektroskopische Systeme (DQ Tau, AK Sco)
- Gezeitenkräfte: Innere Lücke (Ring)

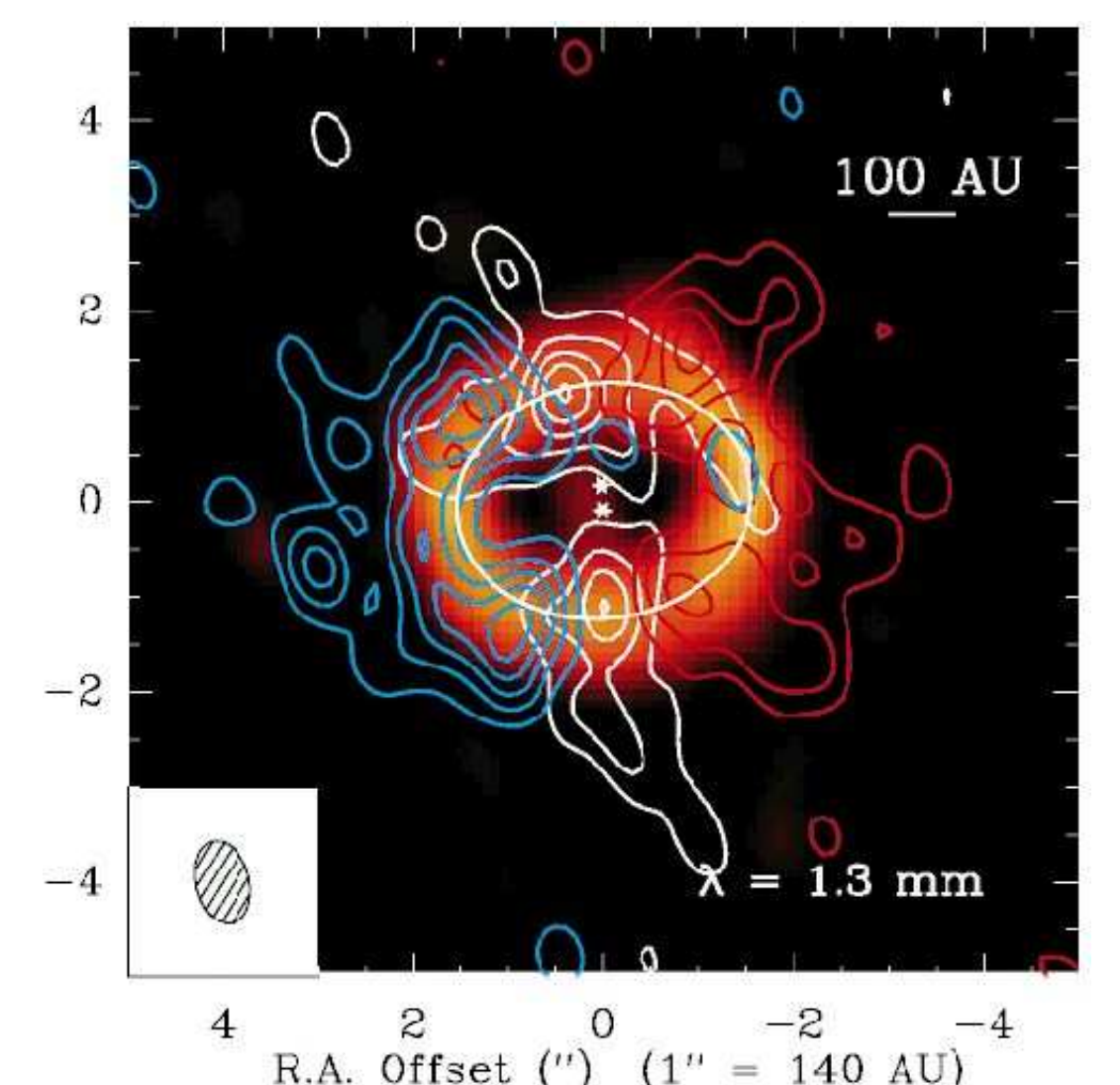


Figure 6: GG Tau (Guilloteau et al. 1999)

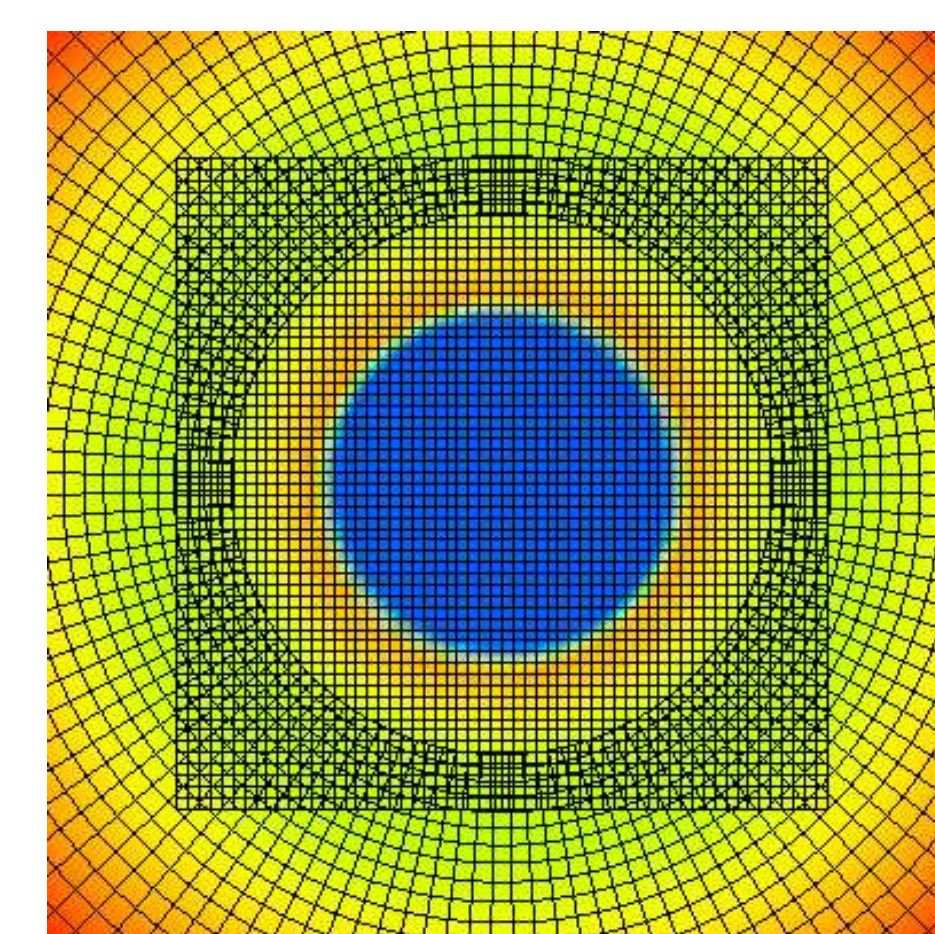


Figure 7: Dual Grid Technik

Modelliere zeitliche Entwicklung

- Vertikal gemittelte Akkretionsscheibe
- 2d Navier-Stokes ( $r - \phi$ )
- Shakura-Sunyaev Viskosität
- Ideales Gas
- Vertikale Kühlung, viskose Heizung
- Irradiation durch Sterne
- **Dual Grid Technik** (Fig. 7, Ref. [1])

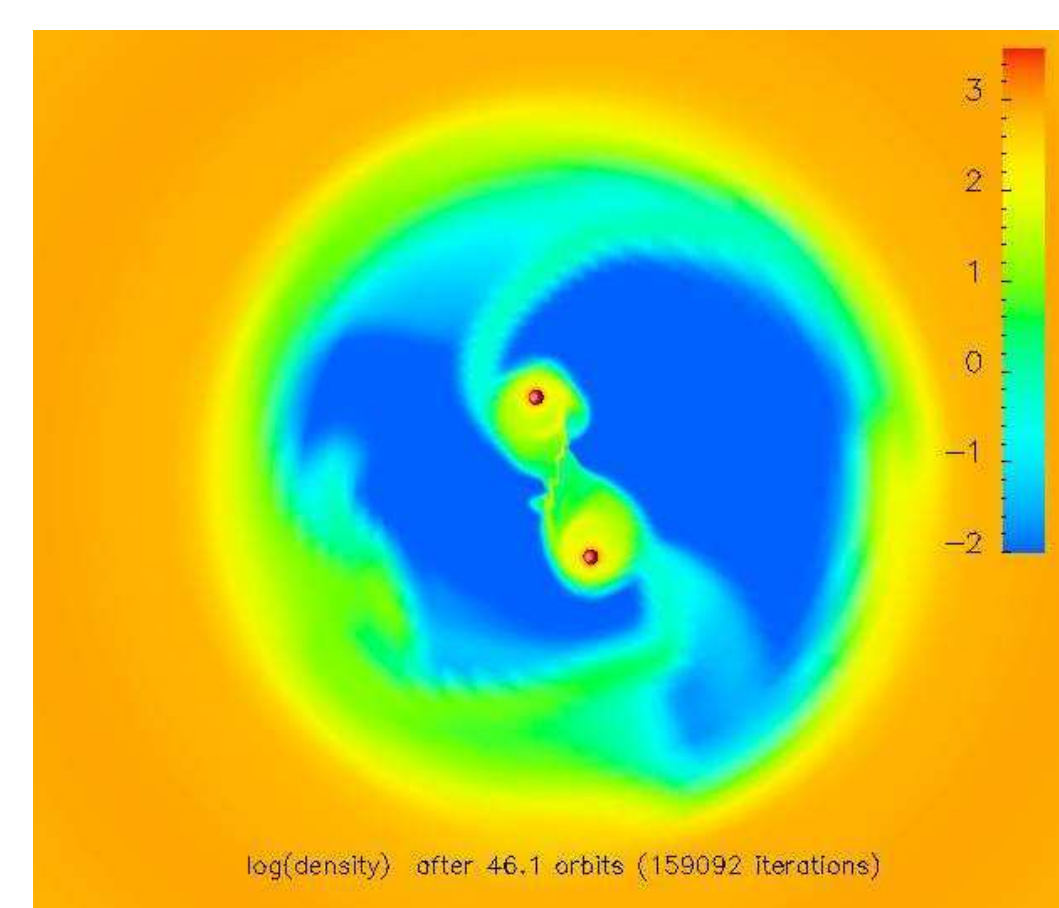
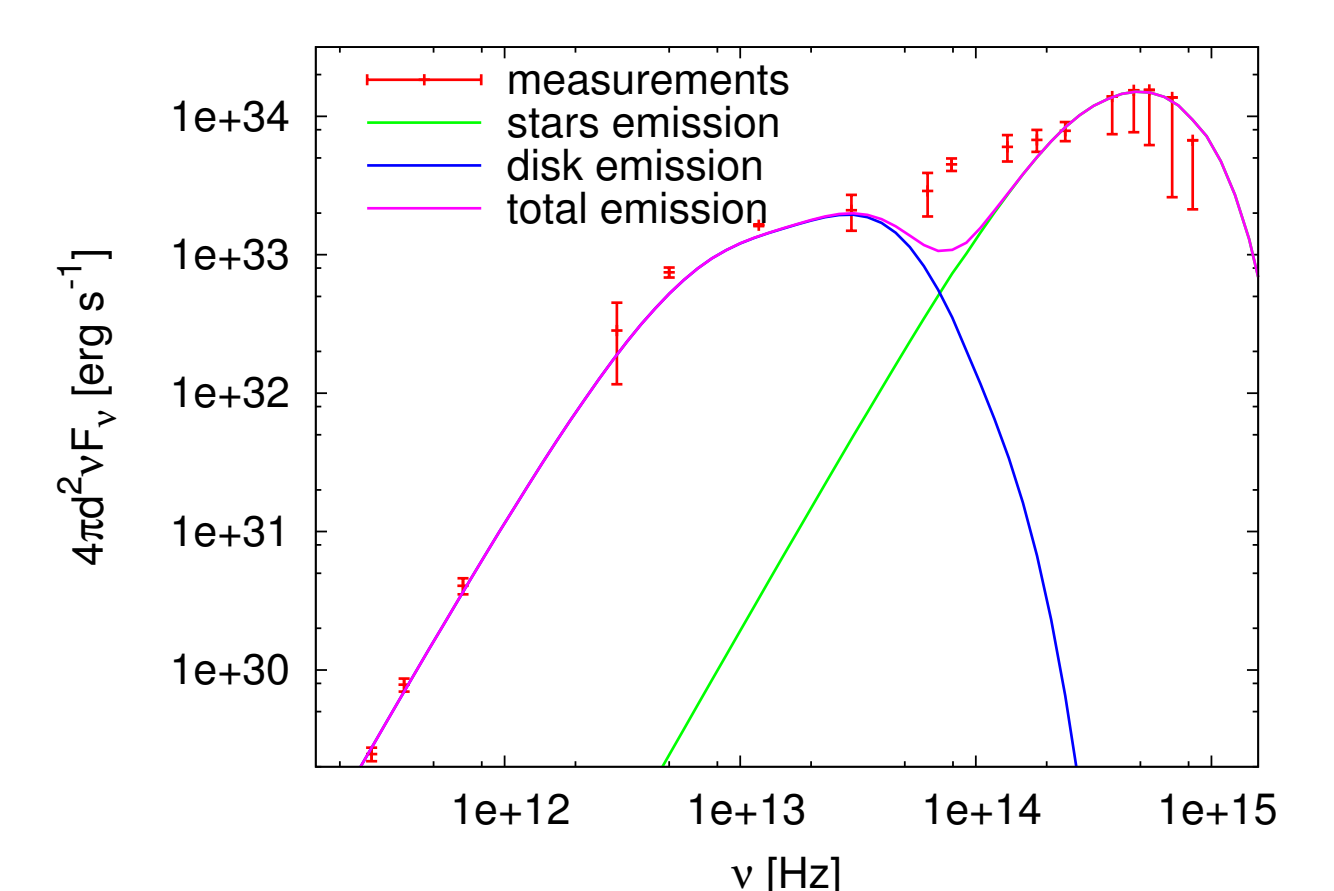


Figure 8: Ergebnisse für AK Sco (Ref. [1,2])



### Publikationen

- [1] Günther, R. & Kley W.: 2002, *Astron. Astrophys.*, **387**, 550, *Circumbinary Disk evolution*
- [2] Günther, R., Schäfer, Chr. & Kley, W.: 2004, *Astron. Astrophys.*, **423**, 559, *Evolution of irradiated Circumbinary Disks*
- [3] Günther, R. & Schäfer, Chr.: 2003, Annual Scientific Meeting of the Astronomische Gesellschaft in Freiburg, *Astron. Nachrichten, Supplementary Issue 3*, **324**, p3, *Circumbinary disk evolution*
- [4] Schäfer, Chr., Speith, R., Günther, R., Kley, W.: 2004, Annual Scientific Meeting of the Astronomische Gesellschaft in Prag, Sept. 20-25, 2004, *Astron. Nachrichten, Supplementary Issue 1*, **325**, p84, *Impact Simulations with SPH*