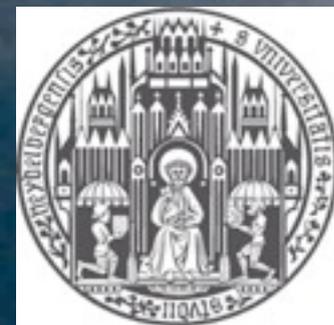


Von galaktischen Gaswolken zu stellaren Scheiben: Sternentstehung in Computersimulationen

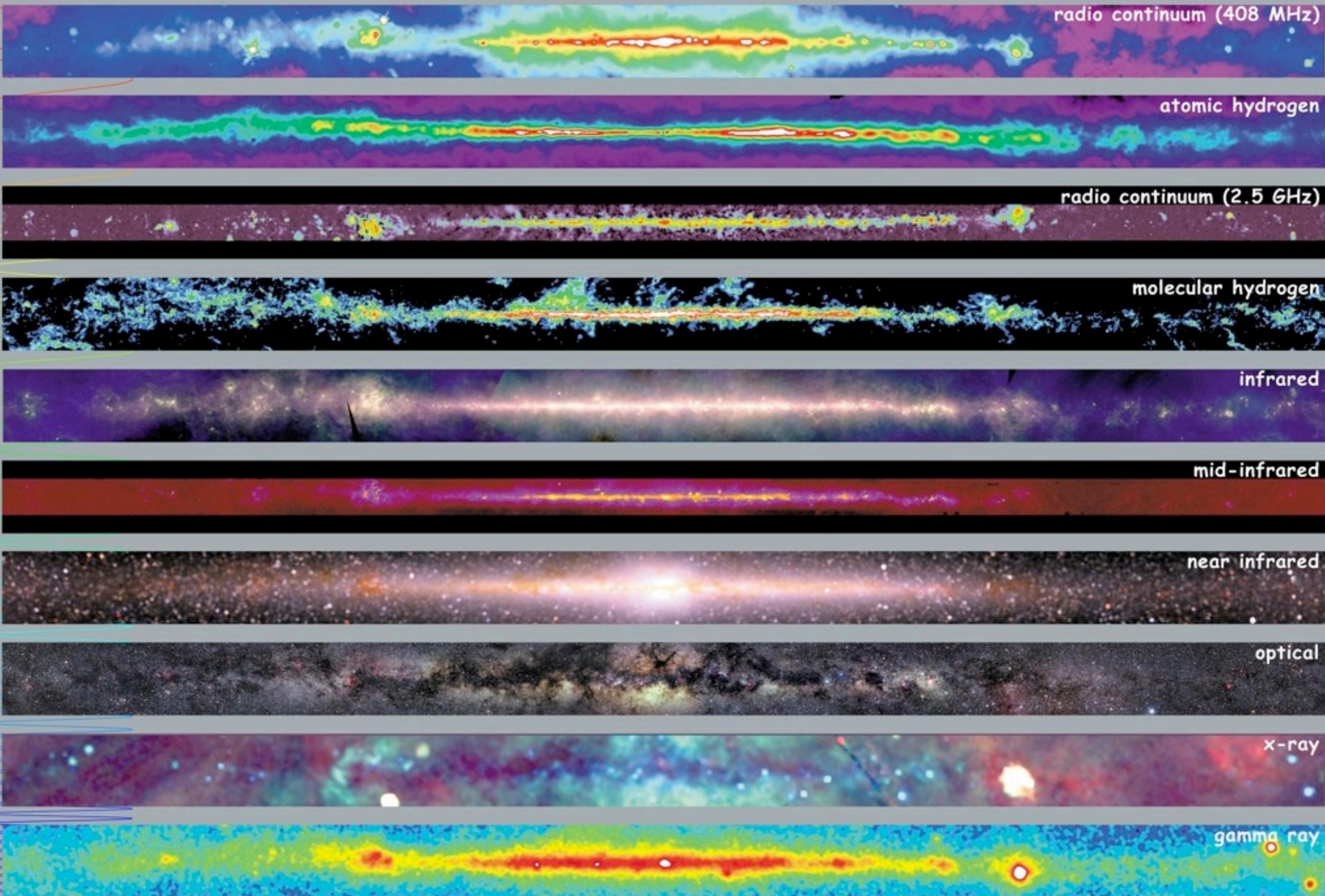
von
Robi Banerjee







Wie entstehen eigentlich Sterne?



Multiwavelength Milky Way

Typische Galaxie



M i l k y W a y G a l a x y

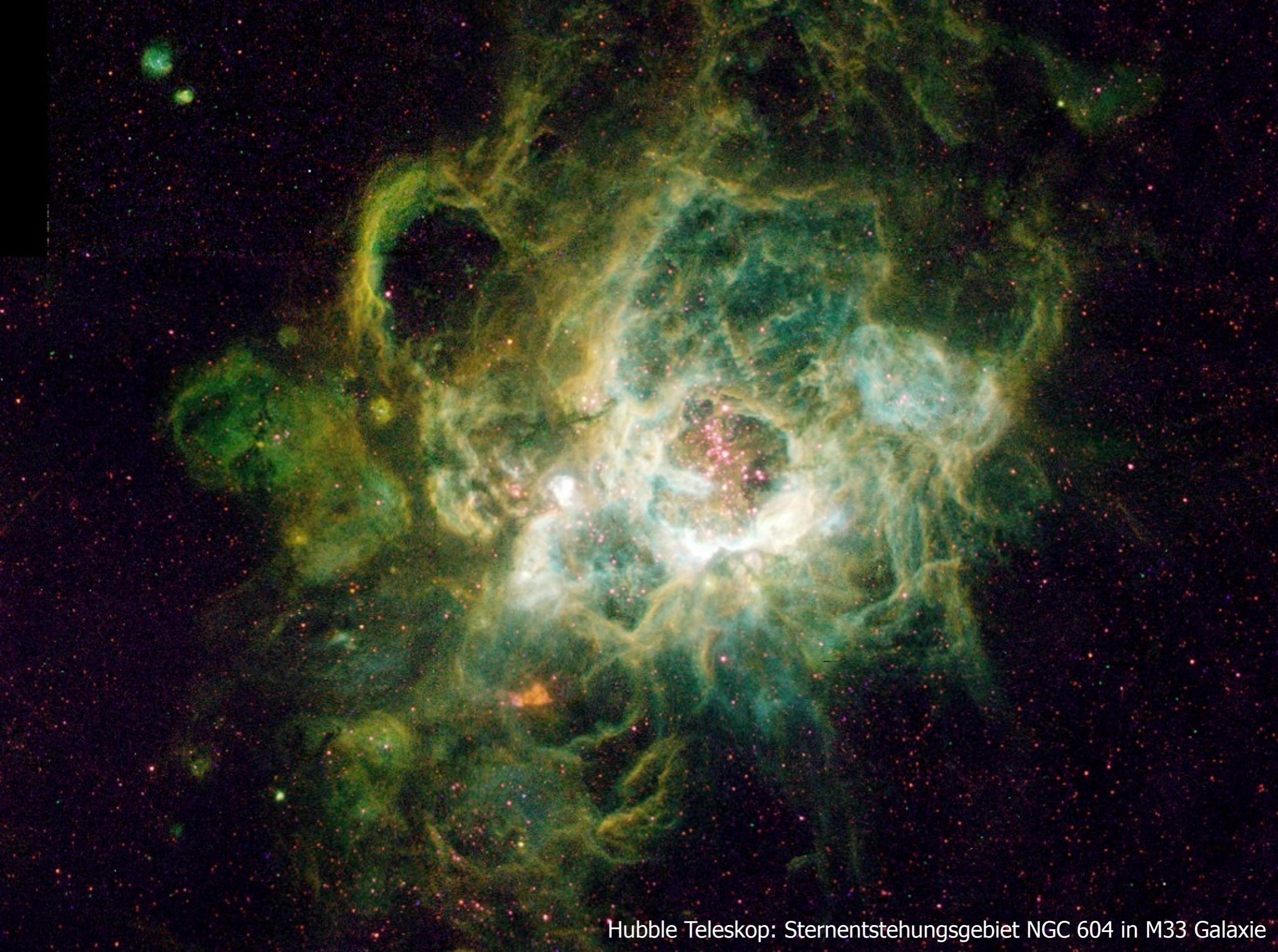
- Sterne: ~ 100 Milliarden
- Insterstellare Medium (ISM): atomares Gas, ionisiert, neutral, $T \sim$ tausend - Million Grad
- Molekülwolken: $< 1\%$ des Volumens; H_2 , CO, Staub
- Sternentstehungsrate heute: 3-5/Jahr
- Lebensdauer von Sternen: Millionen - Milliarden Jahre

Molekülwolken: Sternentstehungsgebiete

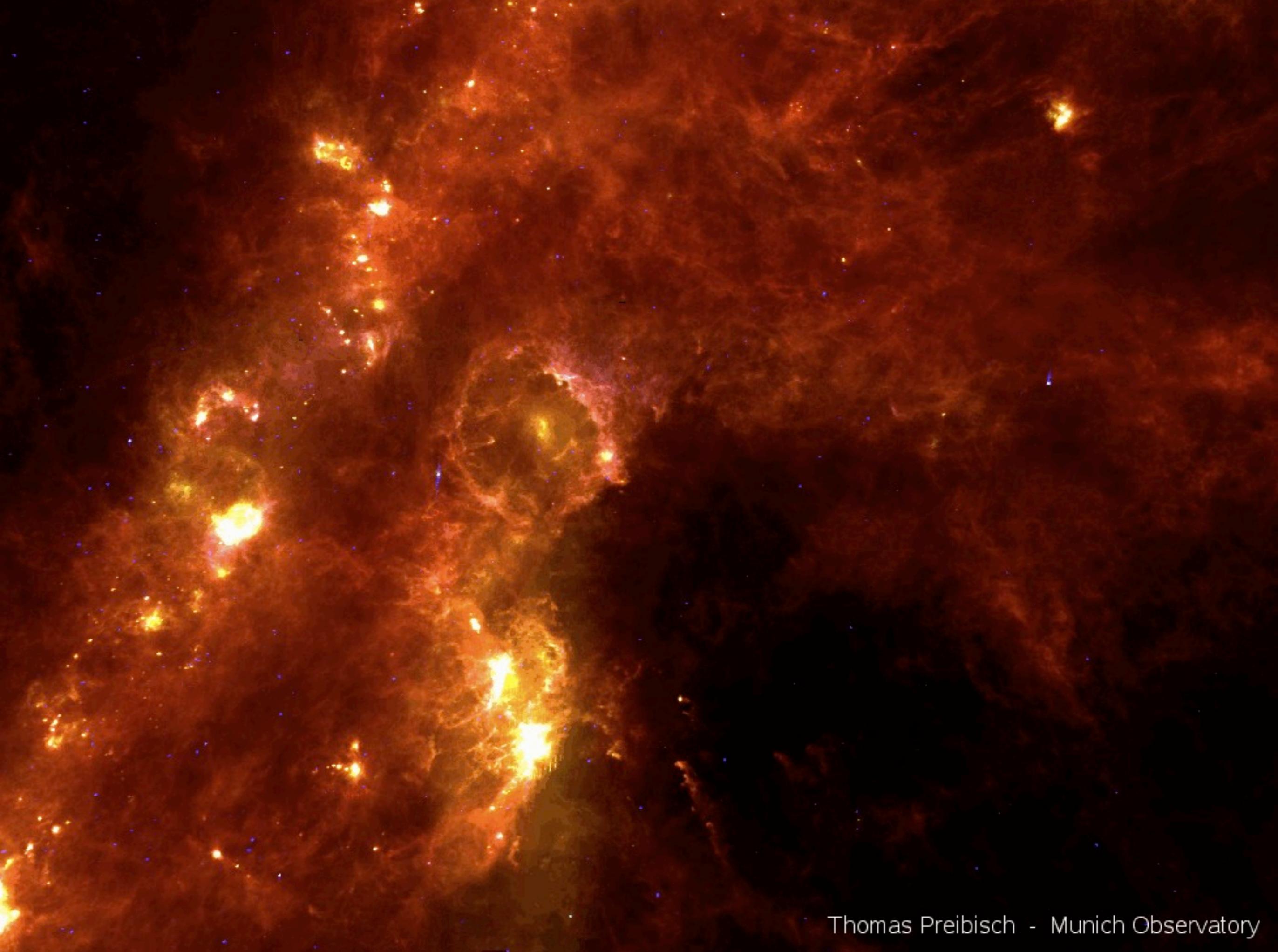
- vorwiegend molekular:
H₂, CO + Staub (~ 1%)
- Ausdehnung ~ 10 - 100 pc
- Masse ~ 10⁵ M_{sol} (GMCs)
- Dichte: 100 - 10⁶ cm⁻³
- kalt (10 - 20 K)
- chaotische Geschwindigkeitsfluktuationen, d.h. Überschall-Turbulenz
- Magnetfelder, B ~ 10 μG



extrem Vakuum 10⁴ - 10⁹
ultrahochvakuum < 10⁴

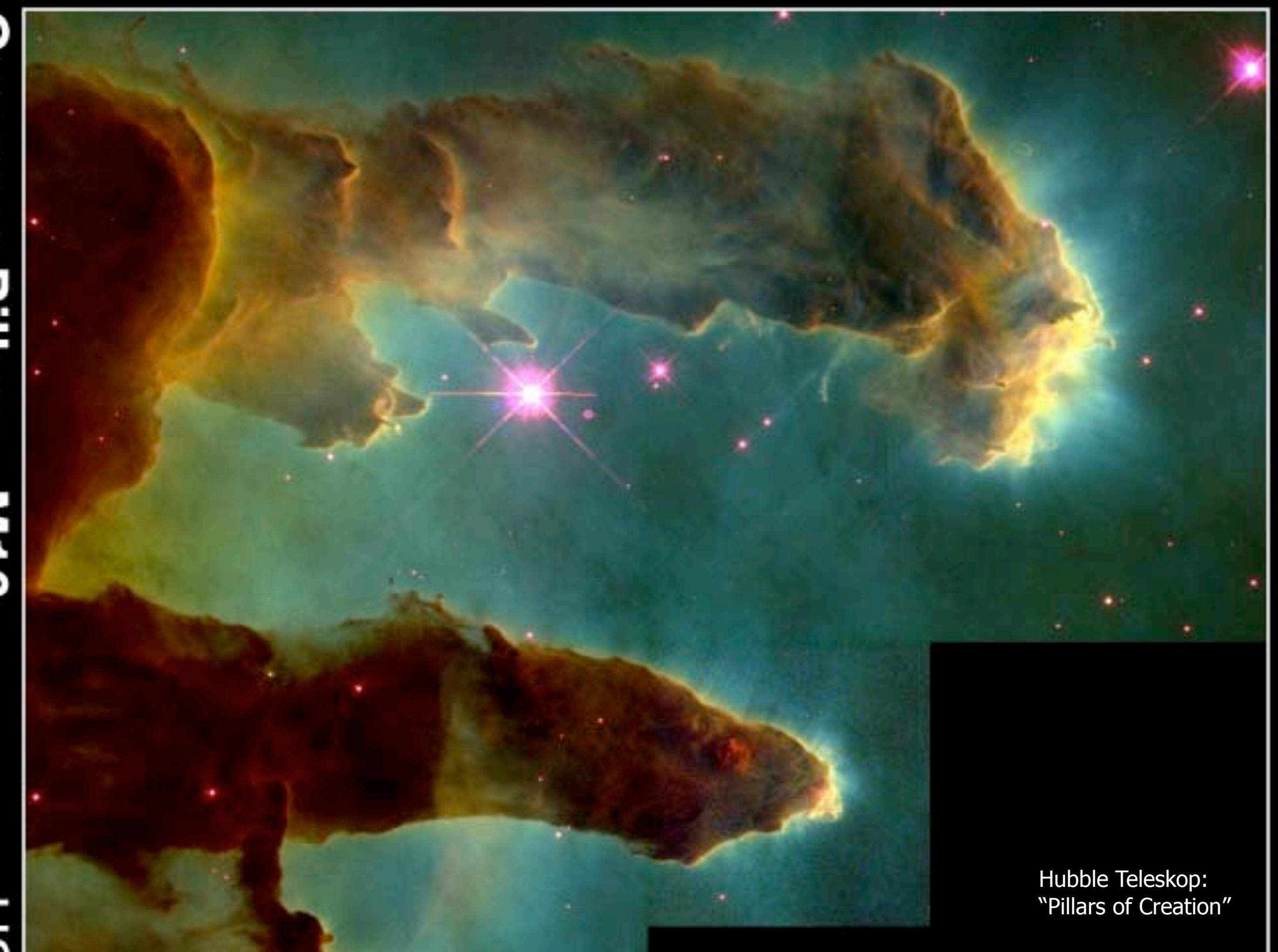


Hubble Teleskop: Sternentstehungsgebiet NGC 604 in M33 Galaxie



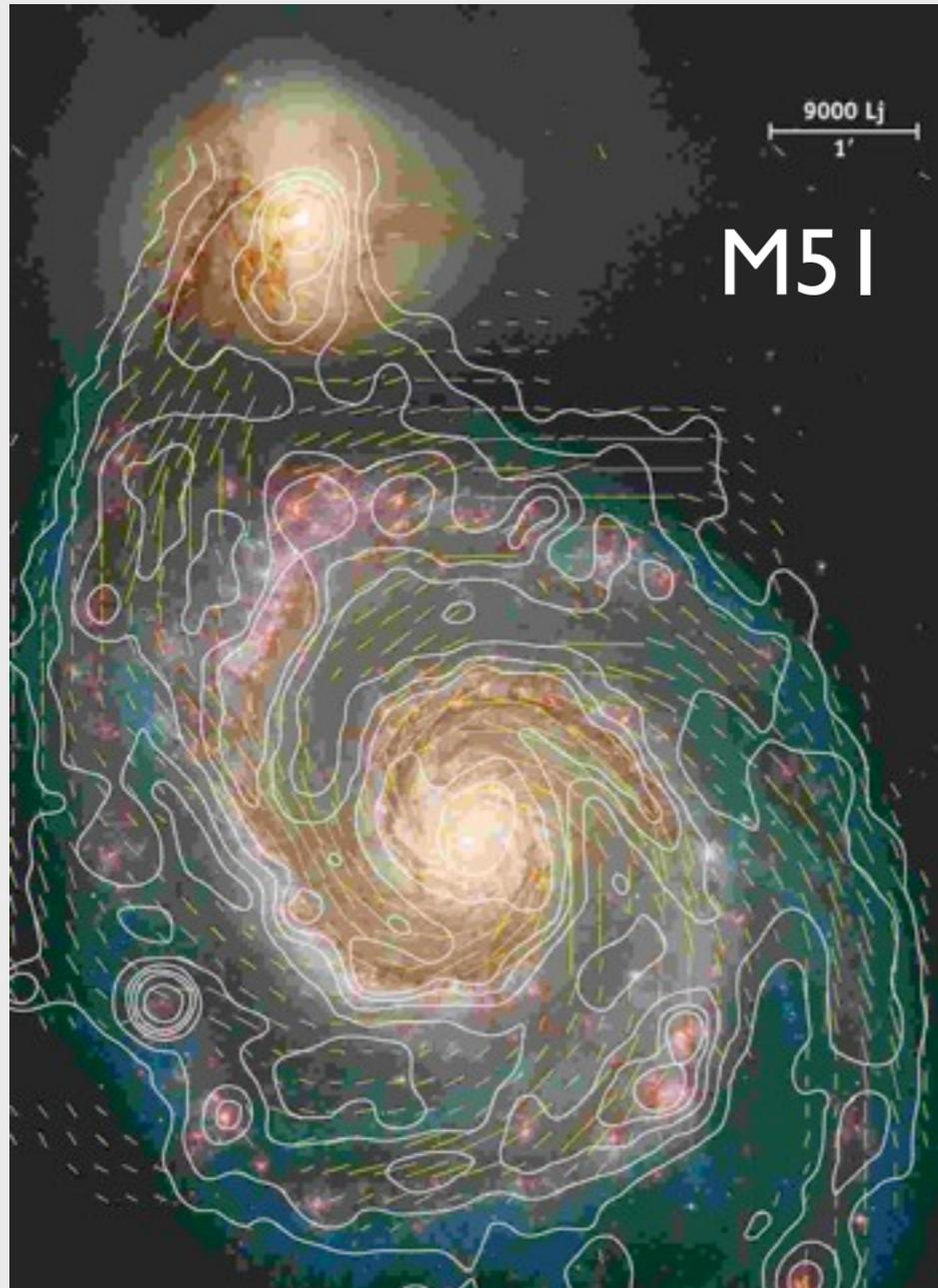


ESA Herschel Teleskop: Sternentstehungsgebiet Rosetta Nebel

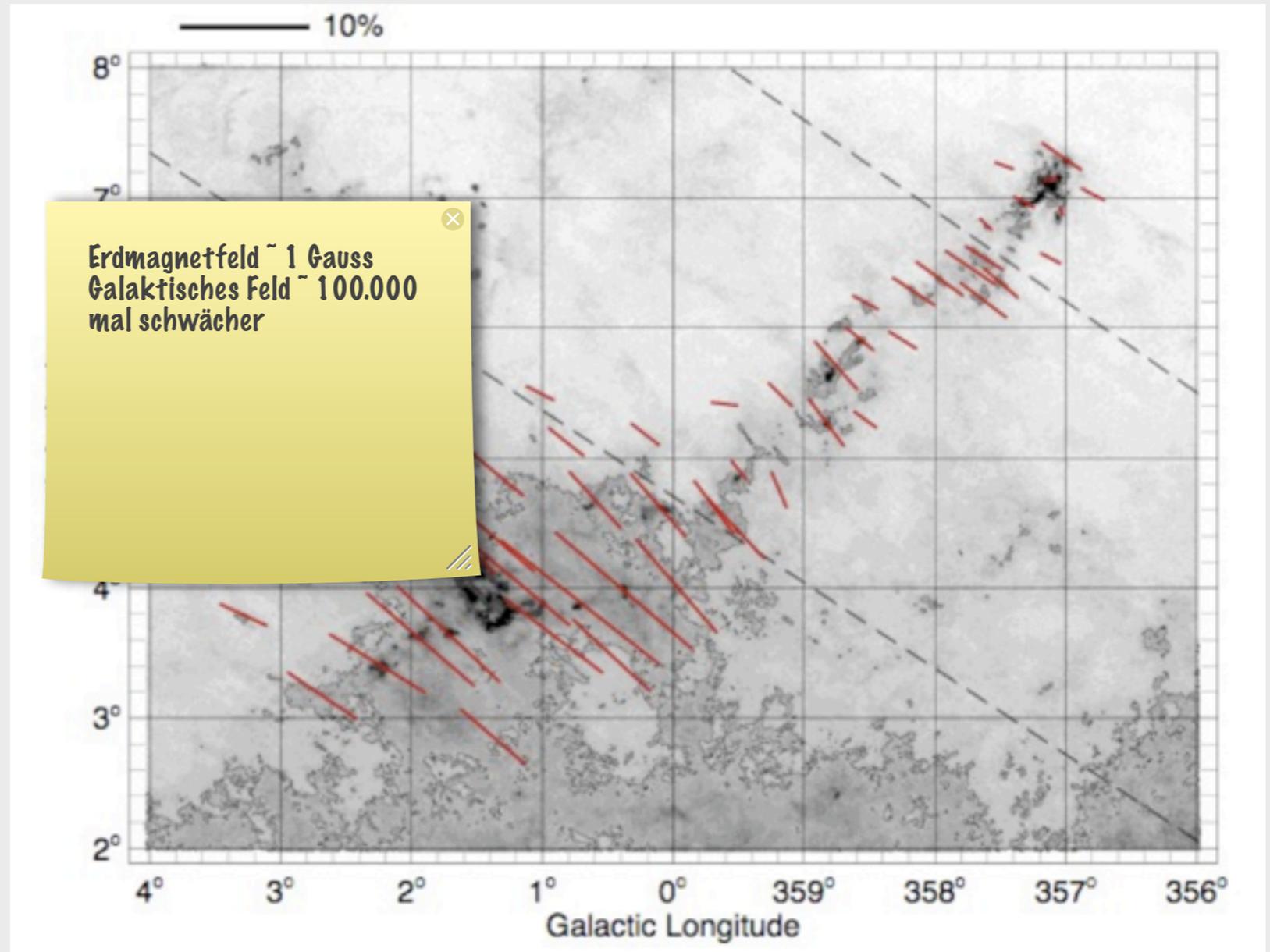


Hubble Teleskop:
"Pillars of Creation"

Magnetfelder



Galaktisches B-Feld (e.g. *R.Beck 2001*)
großskalige Komponente: $\sim 4\mu\text{G}$
Gesamtstärke: $\sim 6\mu\text{G}$

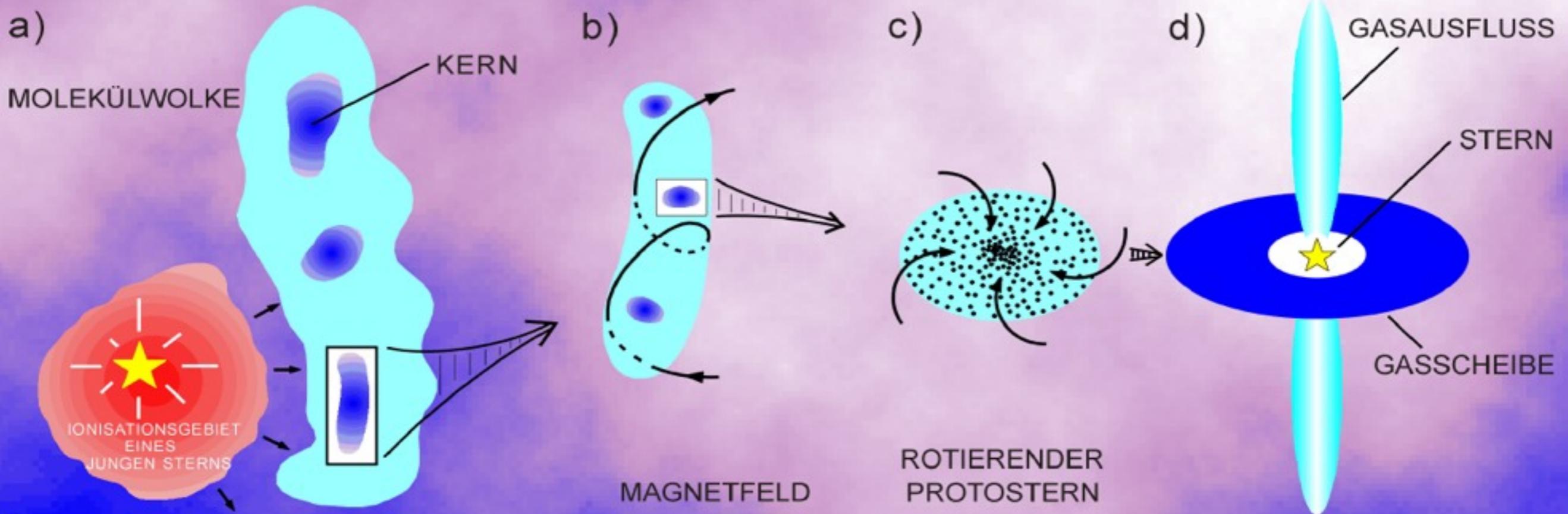


Polarisationkarte des Pfeifennebels
F.O.Alves, Franco, Girart 2008

Sternentstehung schematisch

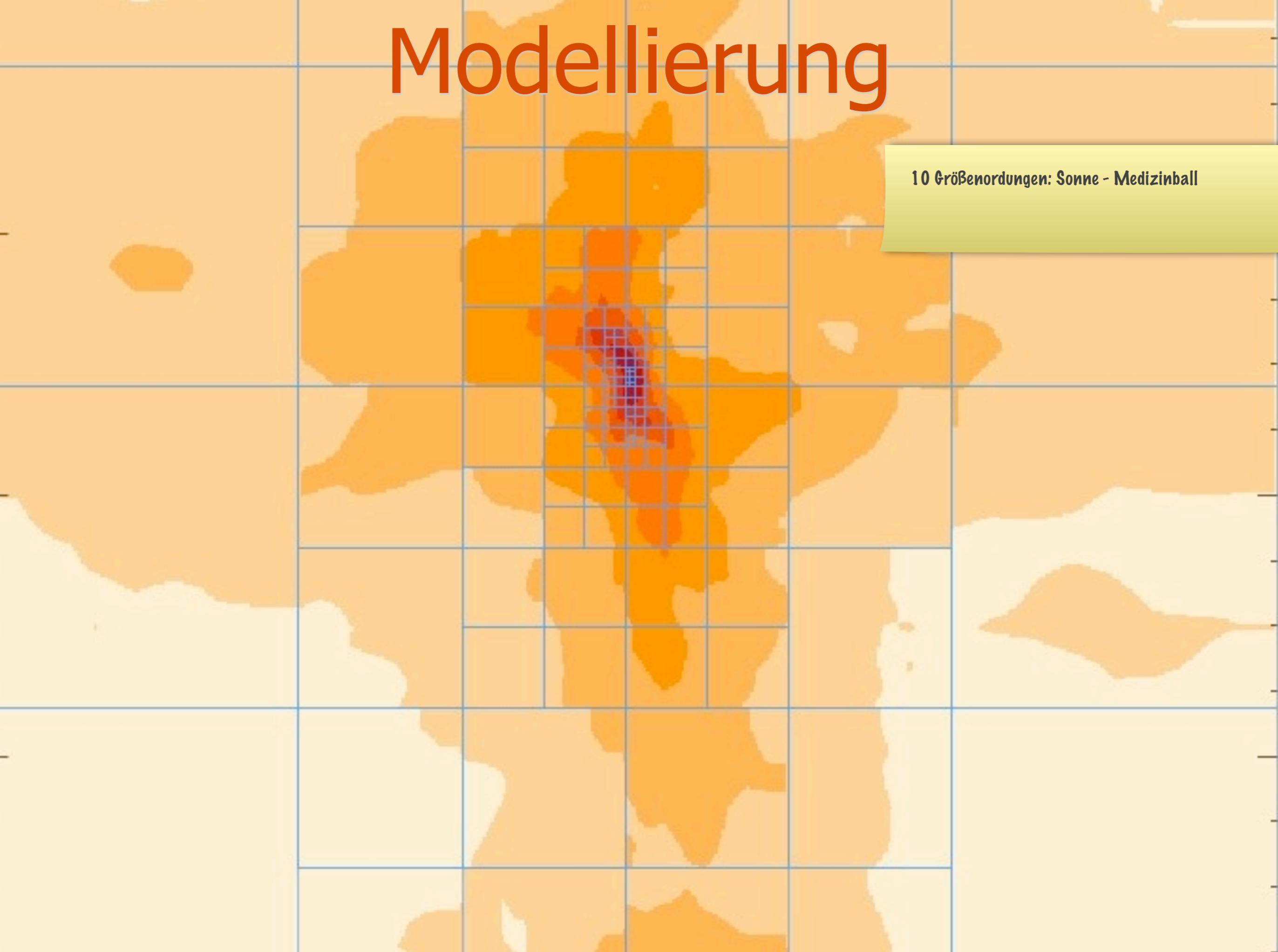
Sternentstehung schematisch

DIE ENTWICKLUNGSSTUFEN DER STERNENTSTEHUNG



Modellierung

10 Größenordnungen: Sonne - Medizinball



Modellierung

10 Größenordnungen: Sonne - Medizinball

- riesige Längenskalen: $100 \text{ pc} - 1 R_{\text{sun}}$ (10 Größenordnungen!!)
 - Lösungen: adaptives Gitter / Teilchen basierend
- unterschiedlichste Zeitskalen: 1 Millionen Jahre - Sekunden
- verschiedenste Prozesse: Gravitation, Hydrodynamik, Thermodynamik, Strahlung, Magnetfelder, ...

Modellierung in Supercomputern



Kolob GPU-Cluster, Uni Heidelberg
aus Bremen

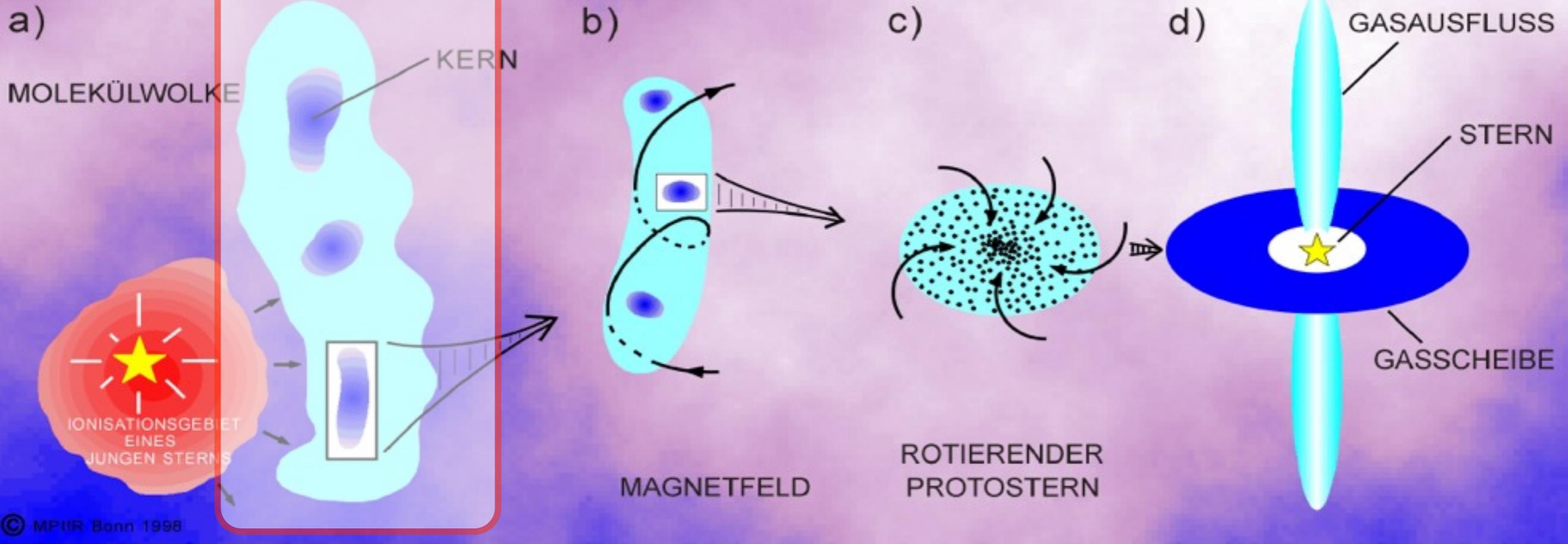
17 TFLOPS



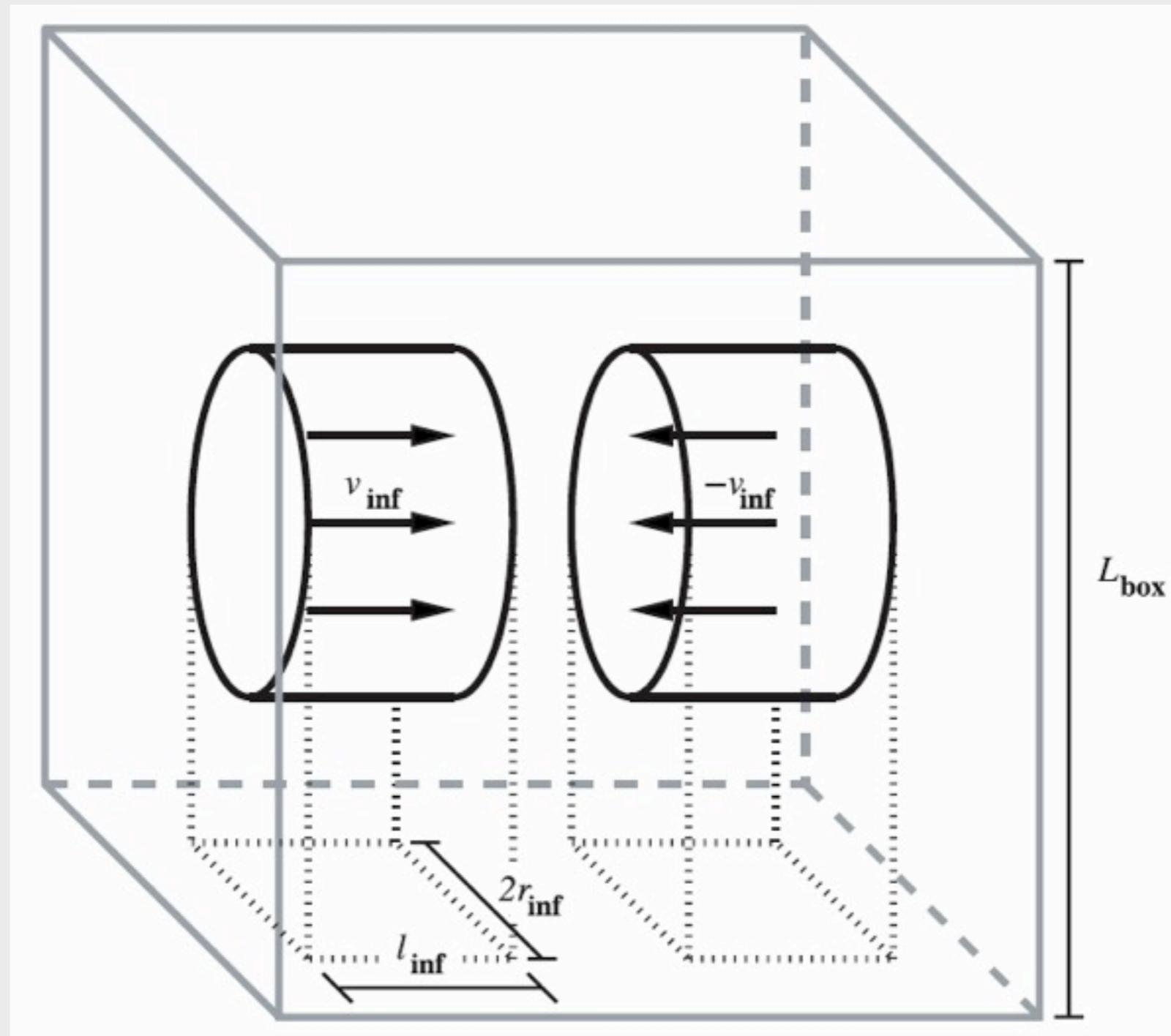
JUGENE Supercomputer, Jülich Forschungszentrum

Entstehung von Molekülwolken

DIE ENTWICKLUNGSTUFEN DER STERNENTSTEHUNG



Entstehung von Molekülwolken



Anfangskonfiguration:
Zusammenstoß zweier heißer Gasstöße

Entstehung von Molekülwolken

Entstehung von Molekülwolken

0.00 Myr

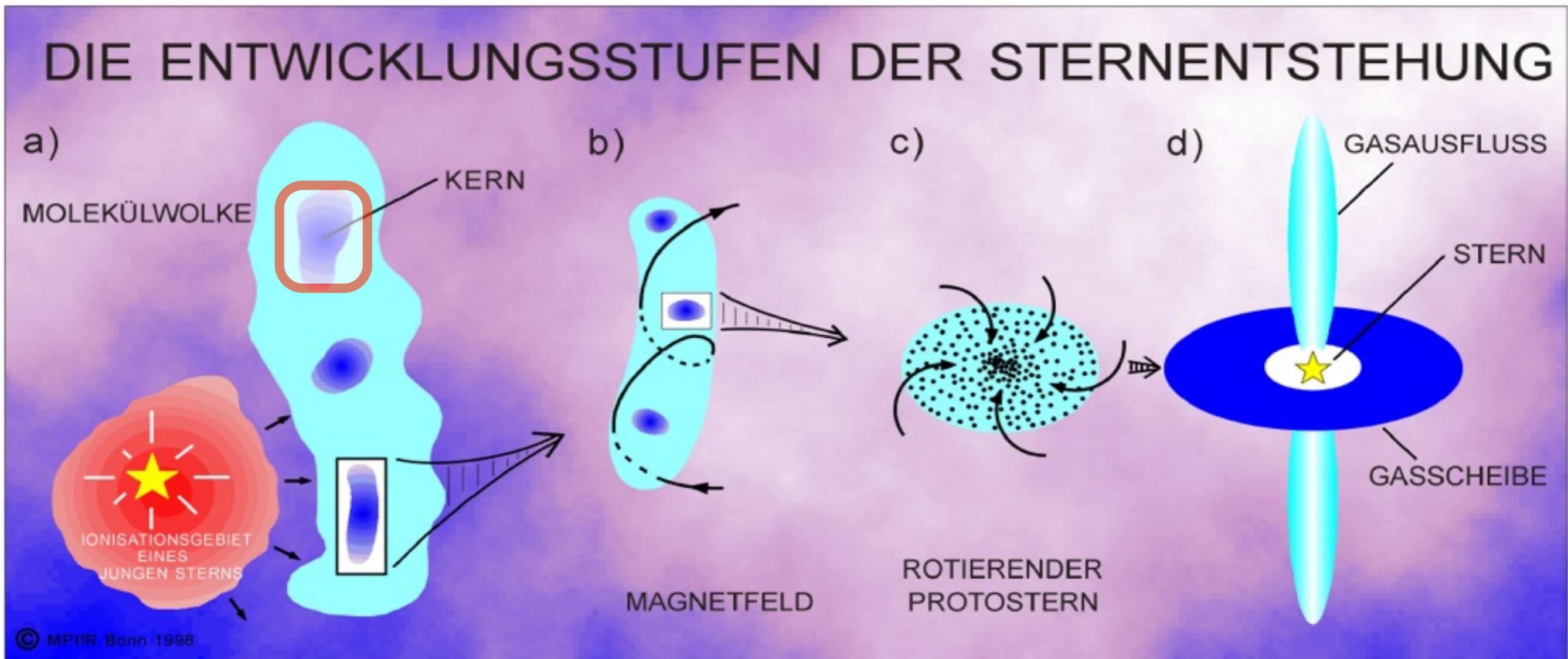
Boxsize 80.0 pc

Entstehung von Molekülwolken

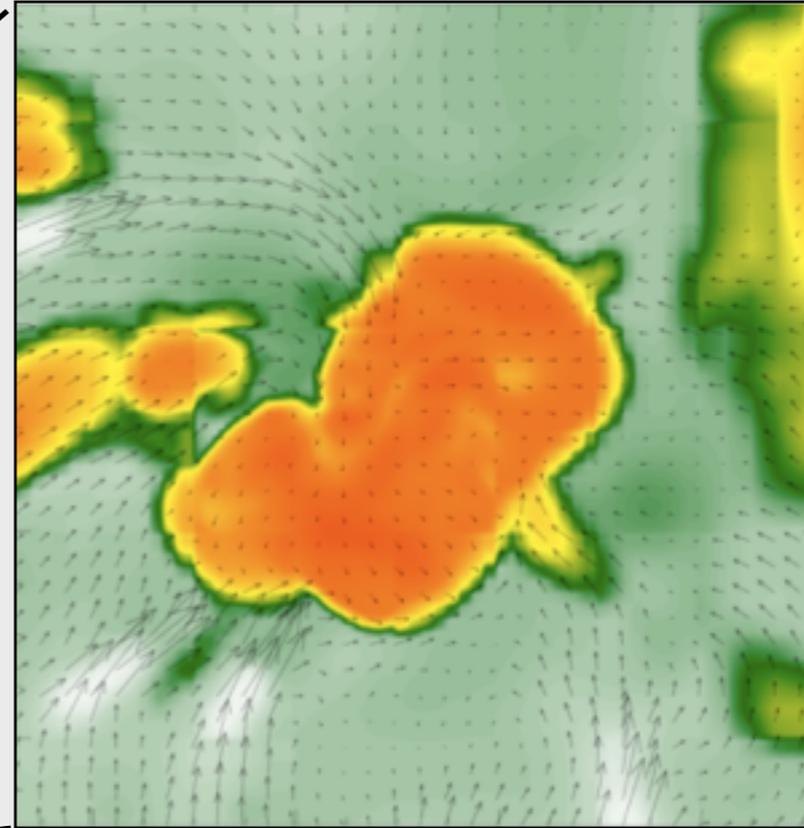
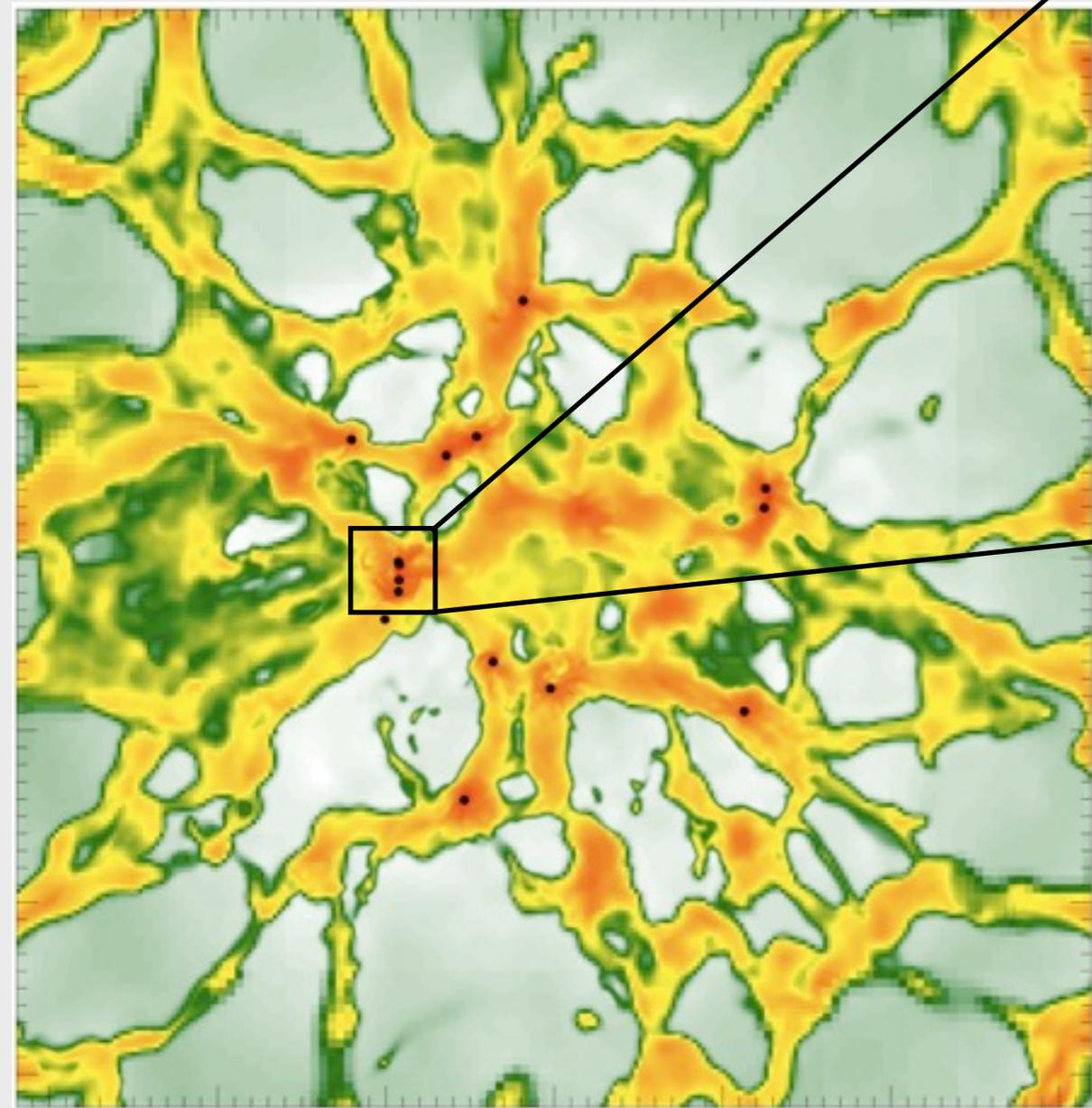
Entstehung von Molekülwolken



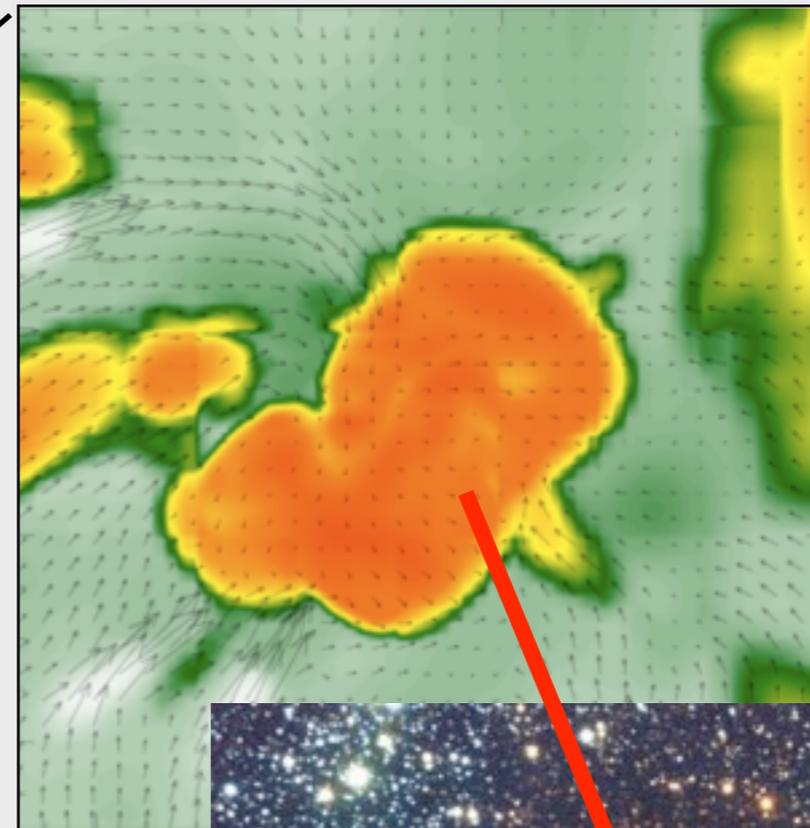
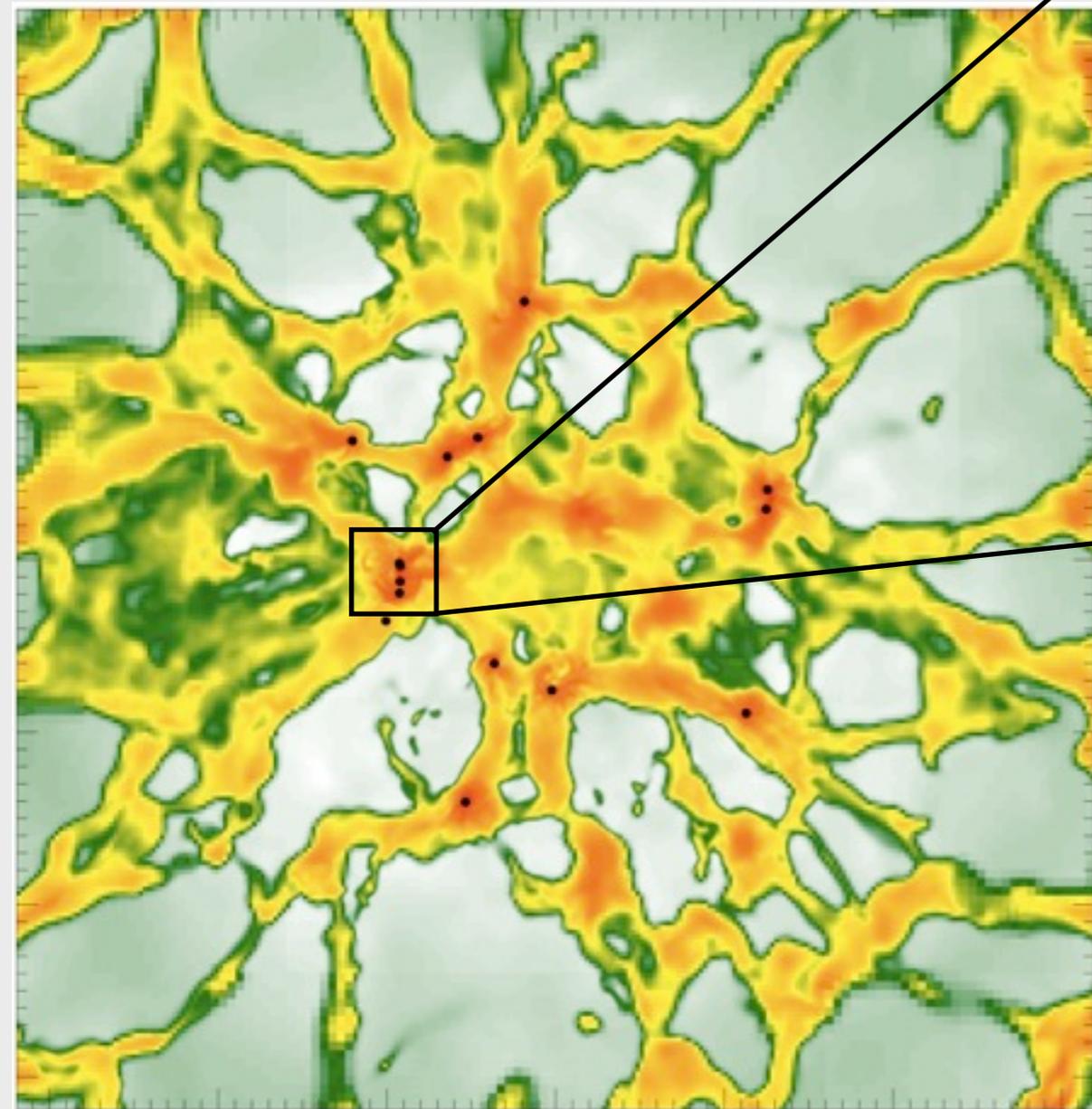
Kollaps von prästellaren Kernen



Kollaps von prästellaren Kernen

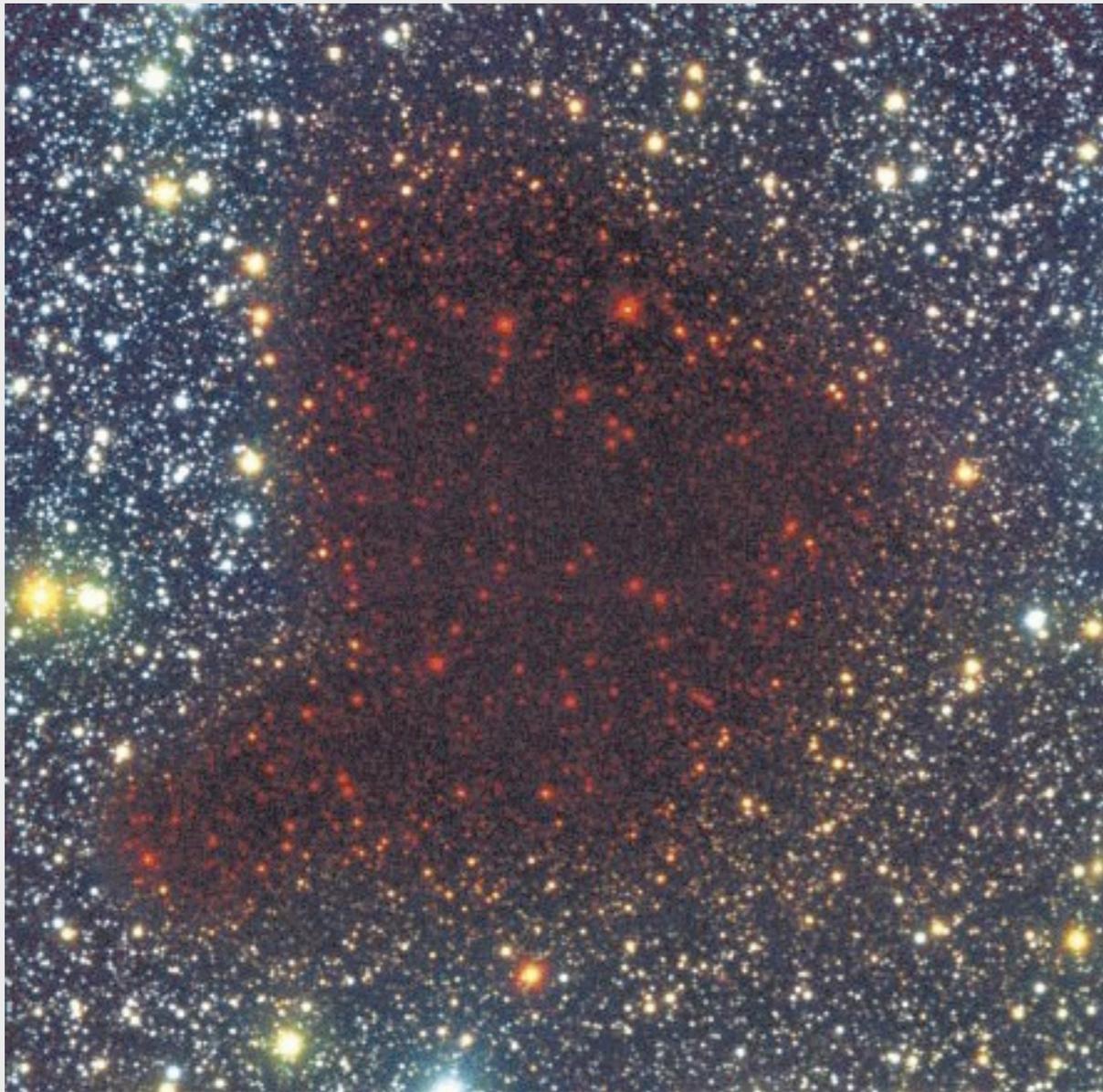


Kollaps von prästellaren Kernen

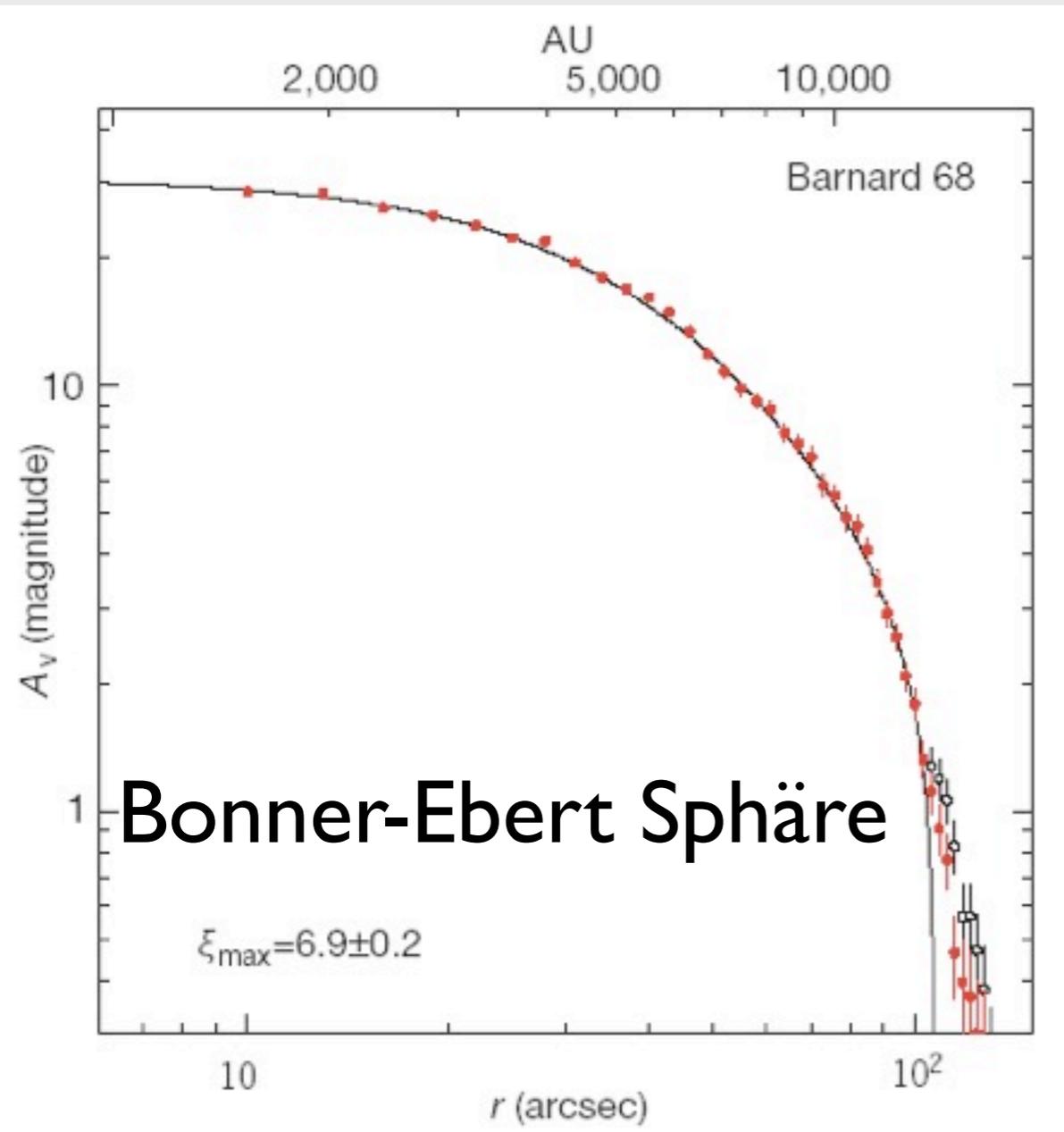


Bok Globule B 68: Alves et al. 2001

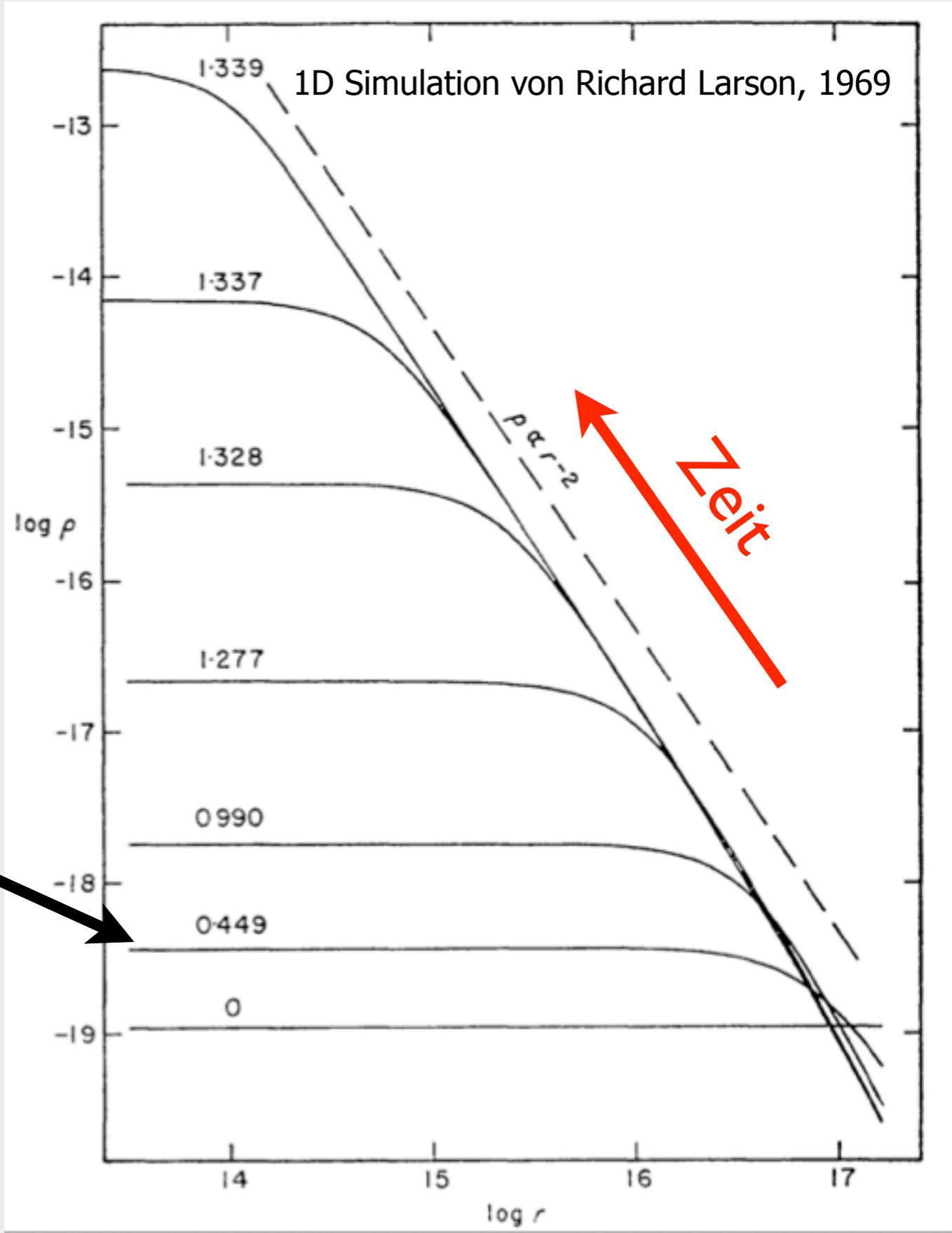
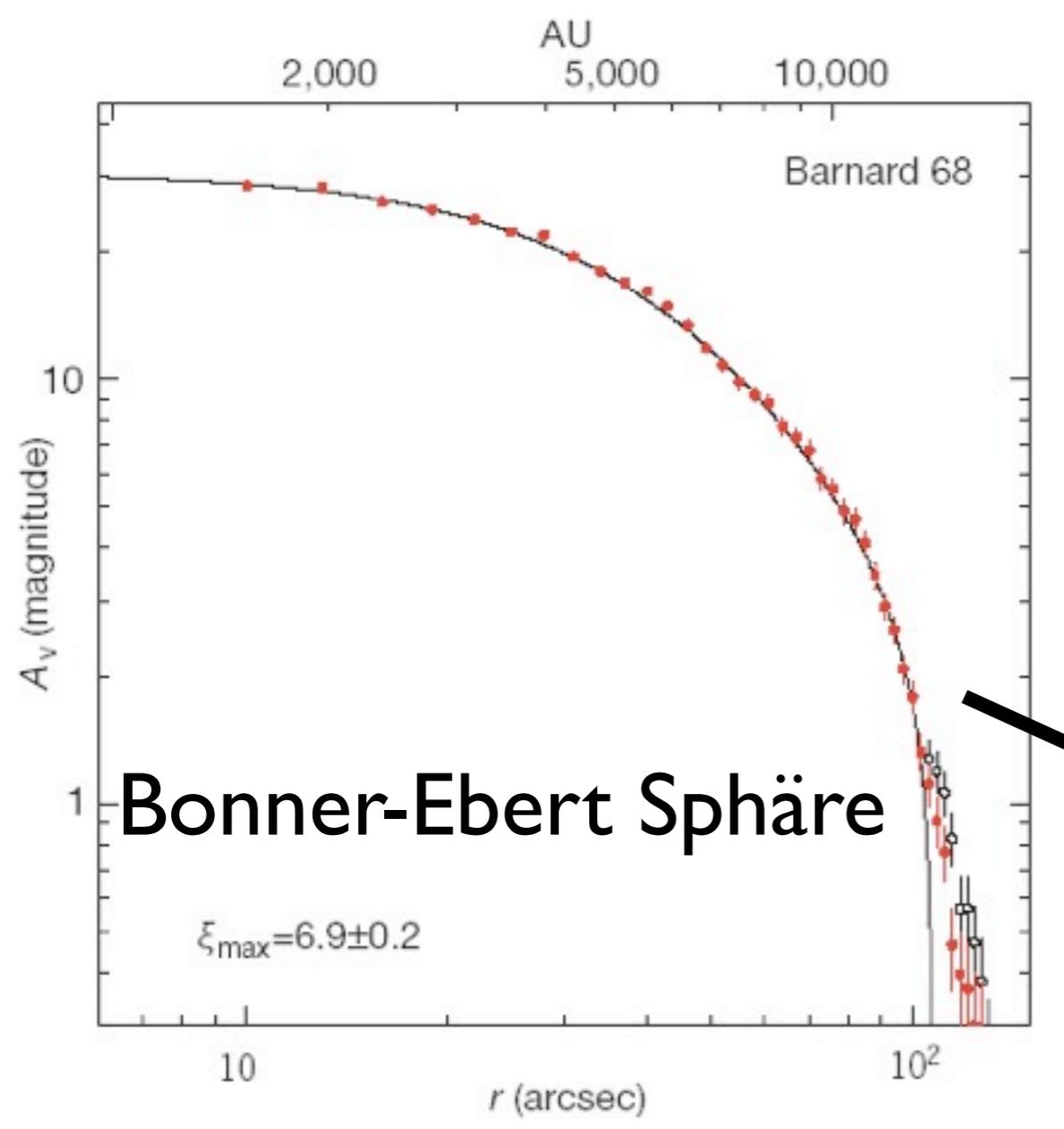
Kollaps von prästellaren Kernen



Kollaps von prästellaren Kernen



Kollaps von prästellaren Kernen



Gravitations-Instabilität

Gravitations-Instabilität

Virialsatz:

$$2K + U$$

$$\frac{3}{2} N k_B T$$

thermische
Energie

$$-\frac{3}{5} \frac{G M^2}{R}$$

Gravitationsenergie
homogene Gas-Sphäre

$\left\{ \begin{array}{l} < 0 : \text{Kollaps} \\ = 0 : \text{stabil} \\ > 0 : \text{Expansion} \end{array} \right.$

Gravitations-Instabilität

Virialsatz: $2K + U$

$\frac{3}{2} N k_B T$ $-\frac{3}{5} \frac{G M^2}{R}$

thermische Energie Gravitationsenergie
homogene Gas-Sphäre

$\left\{ \begin{array}{l} < 0 : \text{Kollaps} \\ = 0 : \text{stabil} \\ > 0 : \text{Expansion} \end{array} \right.$

Kollaps:

$$M_{\text{Kern}} > M_{\text{Jeans}} \propto T^{3/2} \rho^{-1/2}$$

Gravitations-Instabilität

Virialsatz: $2K + U$

$\frac{3}{2} N k_B T$ $-\frac{3}{5} \frac{G M^2}{R}$

thermische Energie Gravitationsenergie
homogene Gas-Sphäre

$\left\{ \begin{array}{l} < 0 : \text{Kollaps} \\ = 0 : \text{stabil} \\ > 0 : \text{Expansion} \end{array} \right.$

Kollaps:

$$M_{\text{Kern}} > M_{\text{Jeans}} \propto T^{3/2} \rho^{-1/2}$$

Gravitations-Instabilität

Jeans Masse: $M_{\text{Jeans}} \approx 1 M_{\text{Sonne}}$

Gravitations-Instabilität

Jeans Masse: $M_{\text{Jeans}} \approx 1 M_{\text{Sonne}}$

Jeans Länge: $L_{\text{Jeans}} \approx 10.000 \text{ AU}$

Gravitations-Instabilität

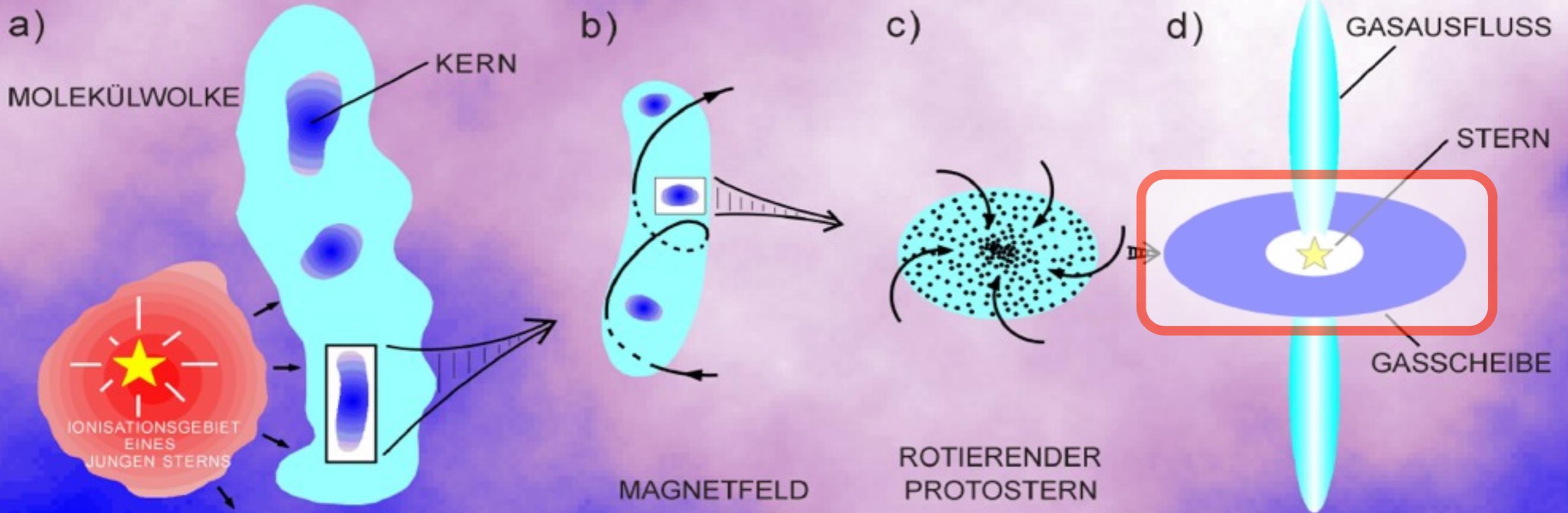
Jeans Masse: $M_{\text{Jeans}} \approx 1 M_{\text{Sonne}}$

Jeans Länge: $L_{\text{Jeans}} \approx 10.000 \text{ AU}$

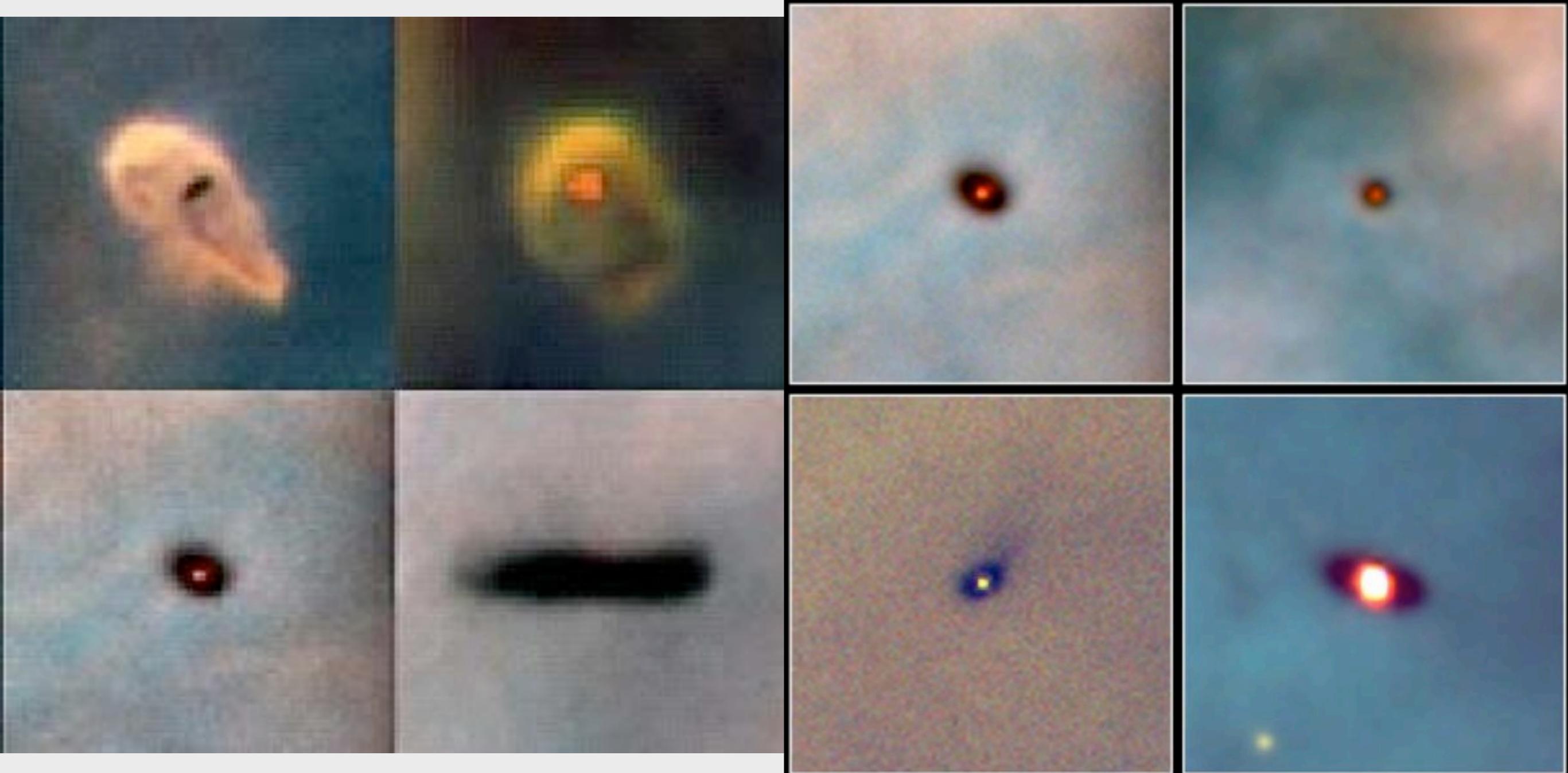
Frei-Fall-Zeit: $t_{\text{ff}} \approx 100.000 \text{ Jahre}$

Scheiben

DIE ENTWICKLUNGSTUFEN DER STERNENTSTEHUNG



Scheiben



**Protoplanetary Disks
Orion Nebula**

HST • WFPC2

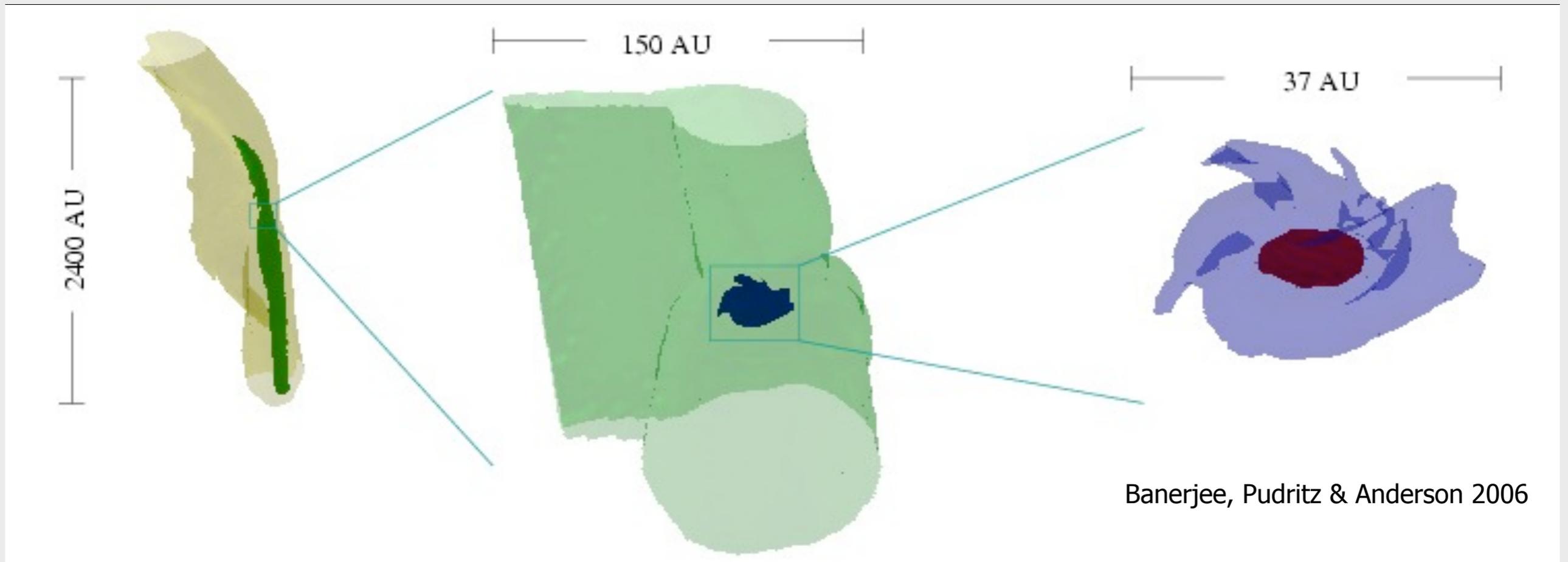
PRC95-45b • ST ScI OPO • November 20, 1995
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

Scheiben

Filament

Filament + eingebettete Scheibe

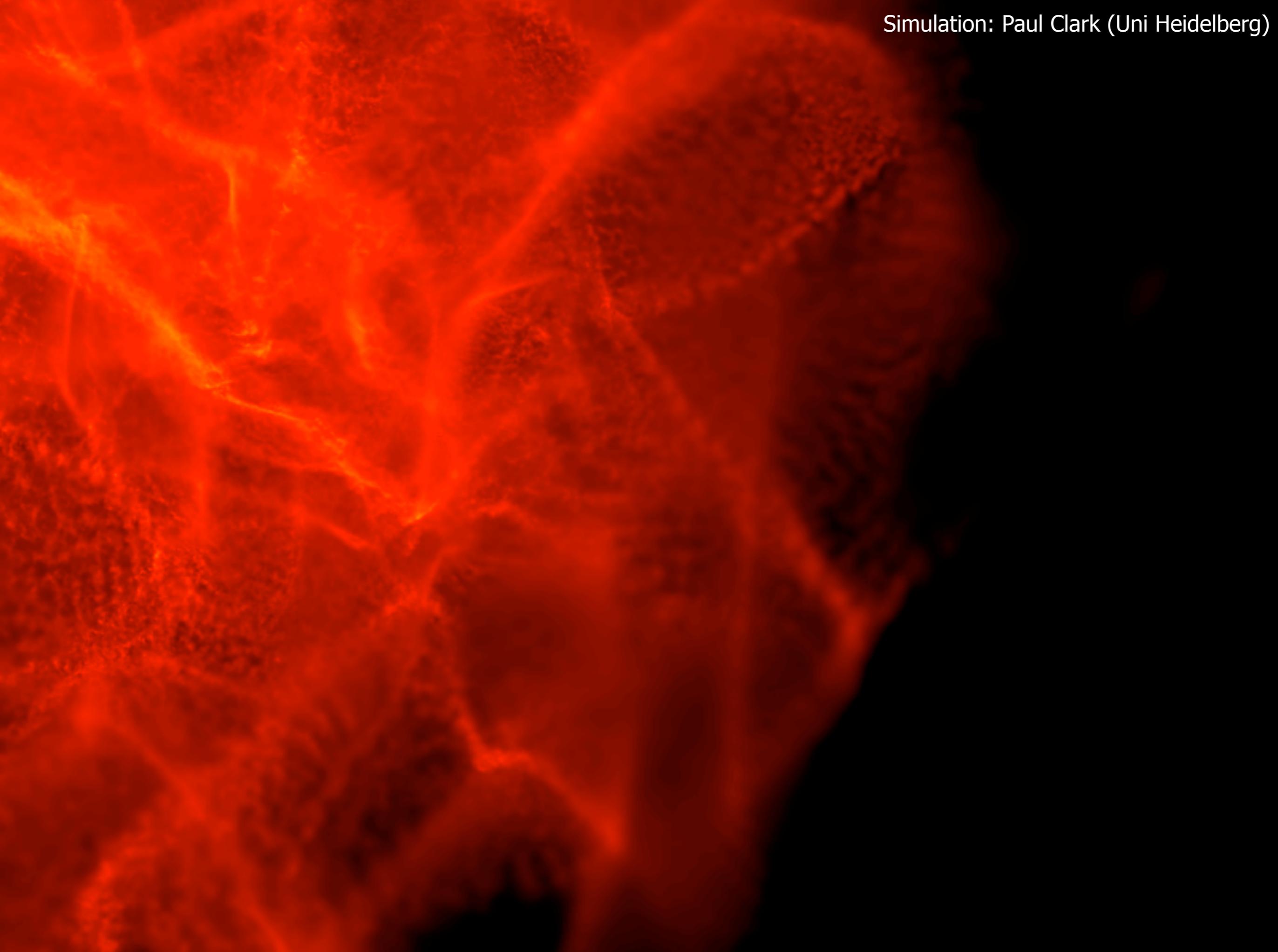
Scheibe + adiabatischer Kern



Drehimpuls durch Stöße von Gaströmungen

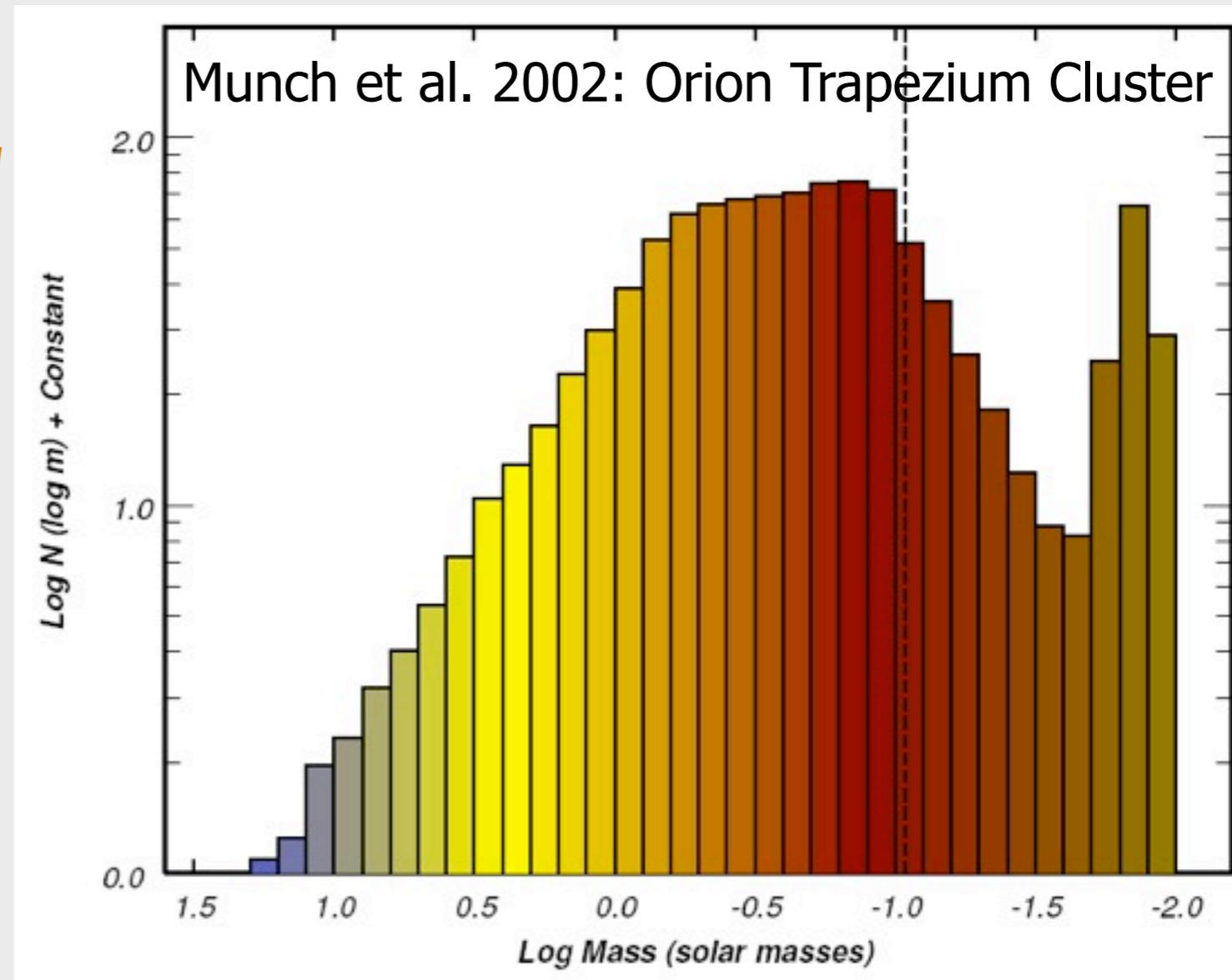
Turbulenz und Fragmentierung





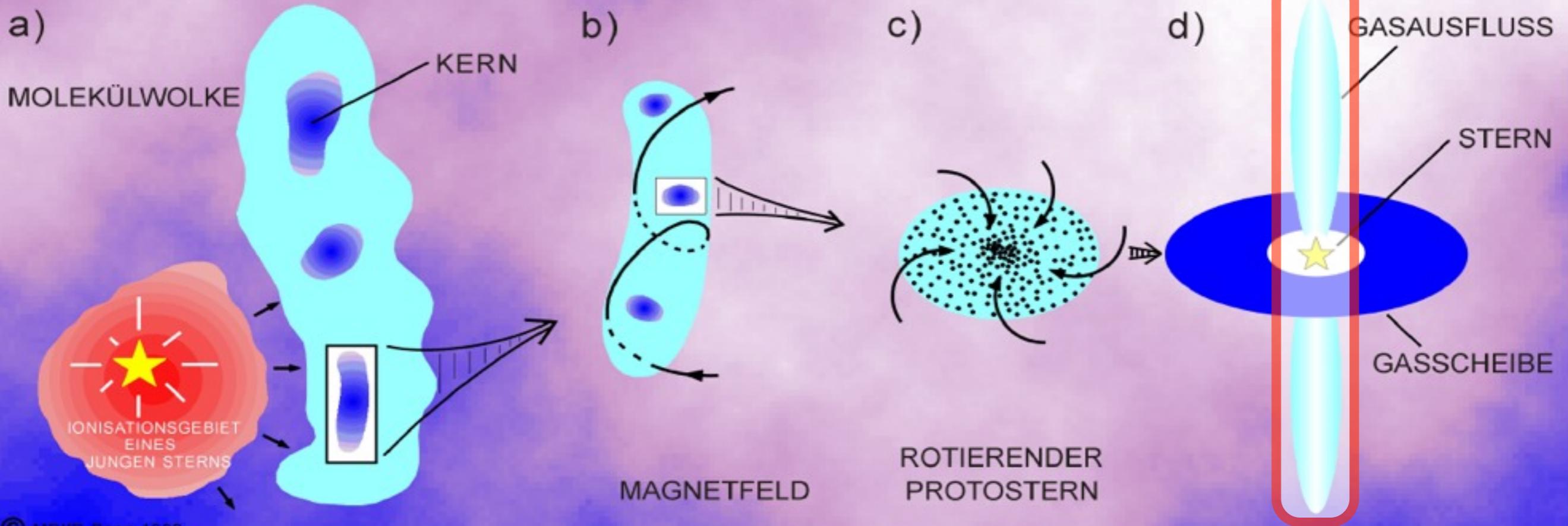
Massenverteilung der Sterne

- **Universelle** Massenverteilung der Sterne (*Initial Mass Function, IMF*)?
- Parametrisierung:
$$dN(M) \propto M^{-\xi} dM$$
- für $M > 0.5 M_{\text{sol}}$:
 $\xi = 2.35$ (*Salpeter 1955*)



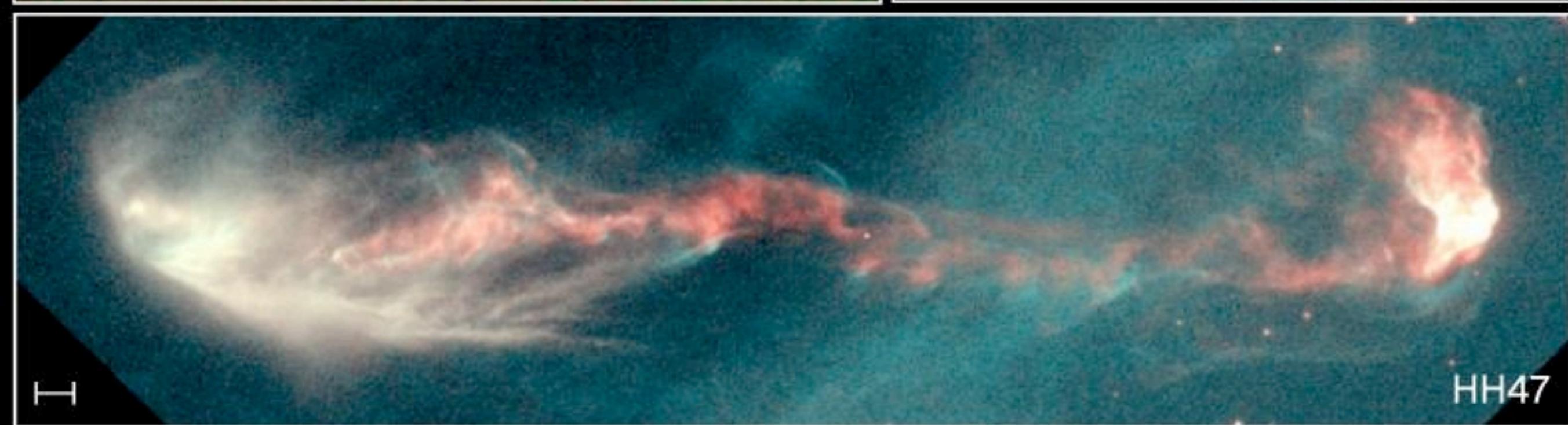
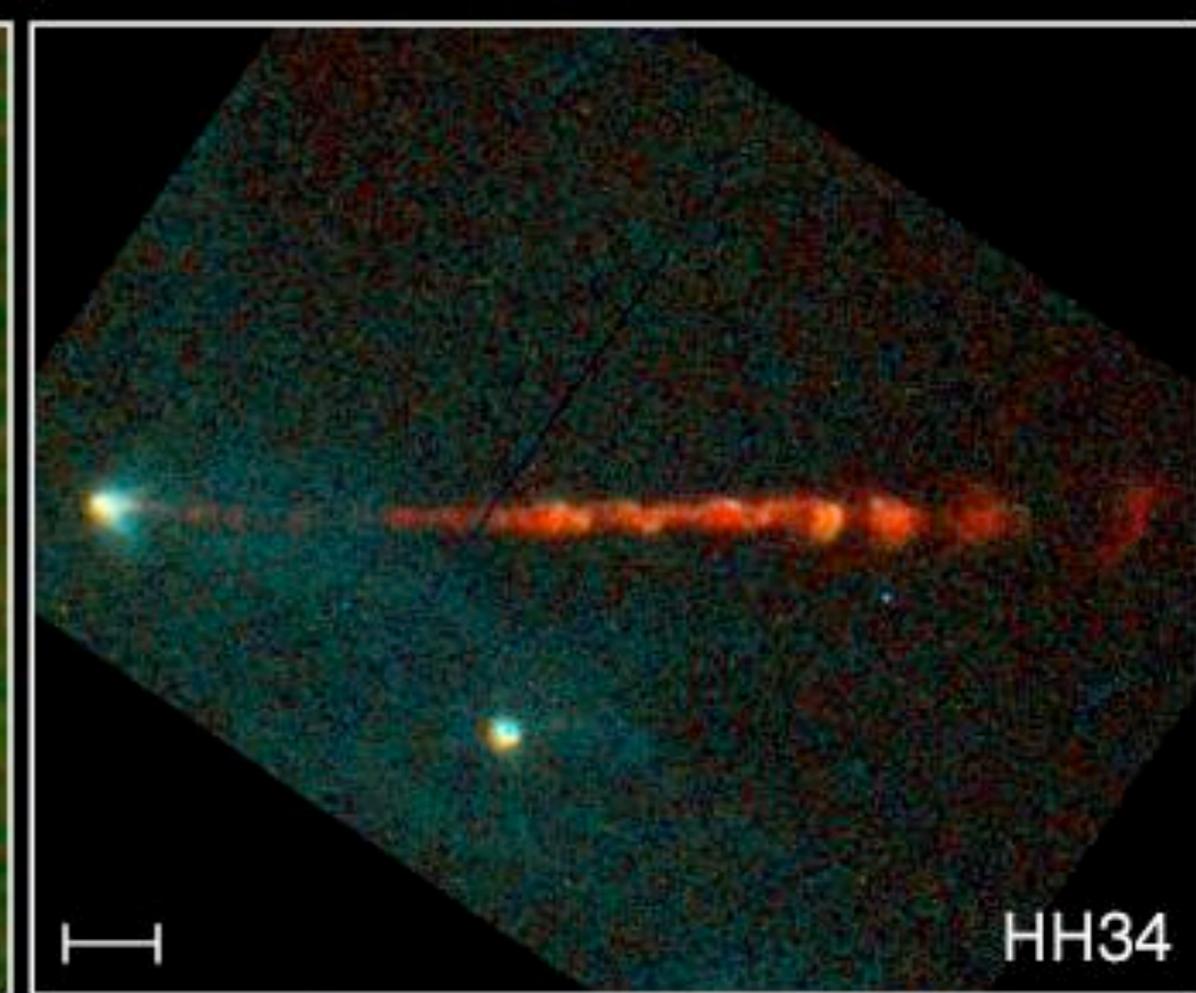
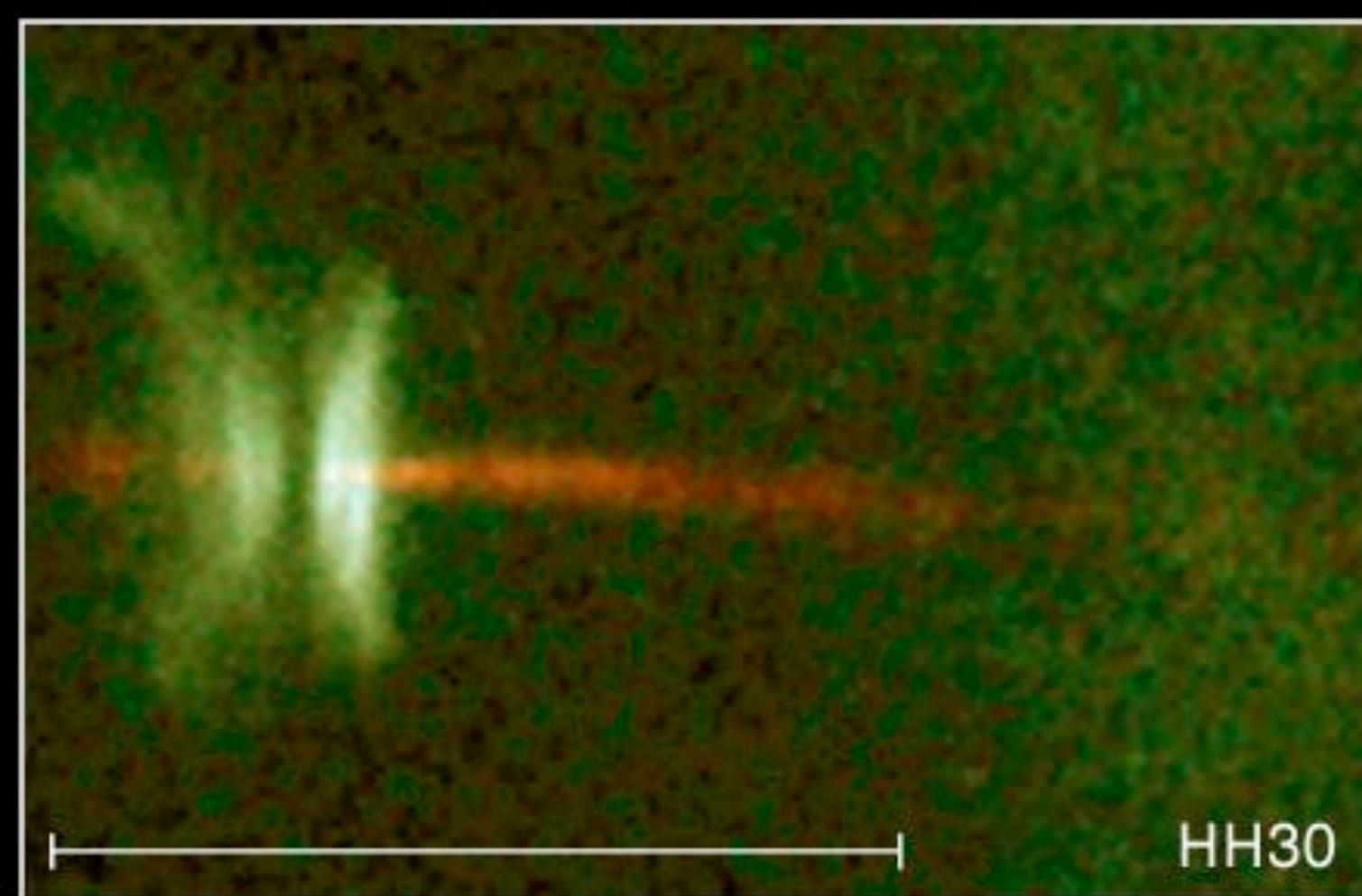
Jets & Gasausflüsse

DIE ENTWICKLUNGSTUFEN DER STERNENTSTEHUNG



Rückkopplungsprozesse

- Jets & Gasausflüsse
- Stellare Winde
- Supernovae



Jets from Young Stars

PRC95-24a · ST ScI OPO · June 6, 1995

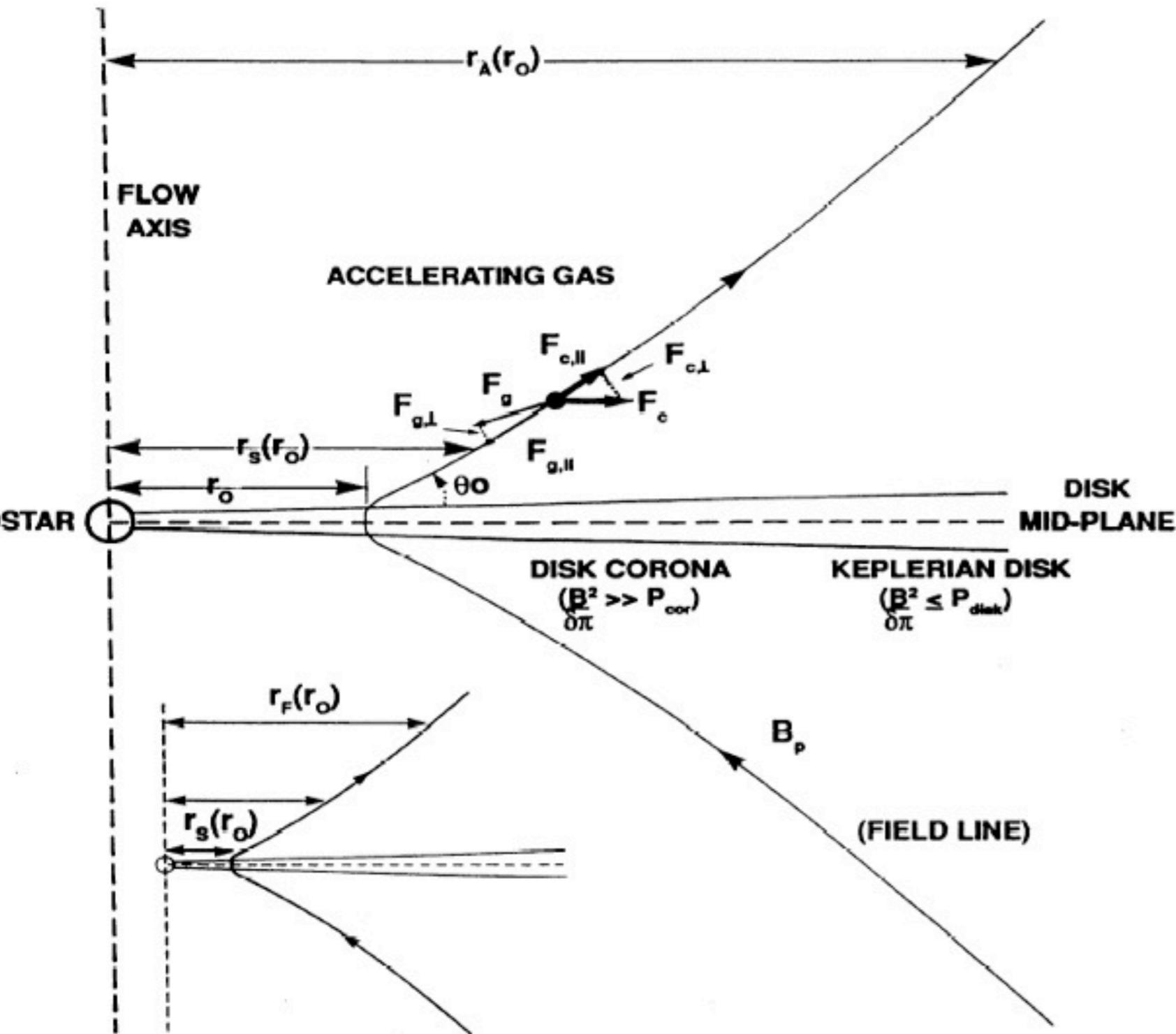
C. Burrows (ST ScI), J. Hester (AZ State U.), J. Morse (ST ScI), NASA

HST · WFPC2



HH 34, Aufnahme: VLT

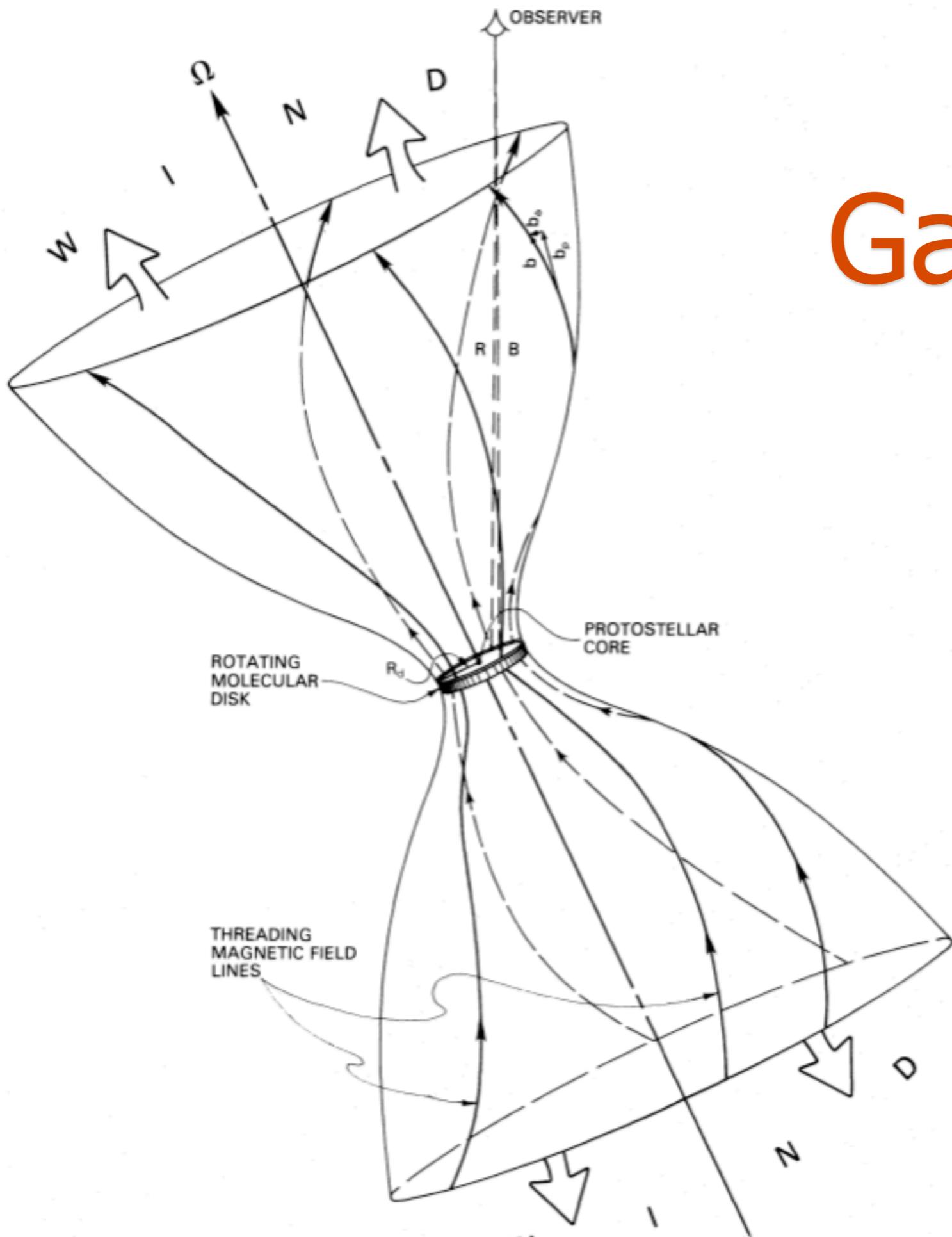
Jets & Gasausflüsse



Blandford & Payne 1982:

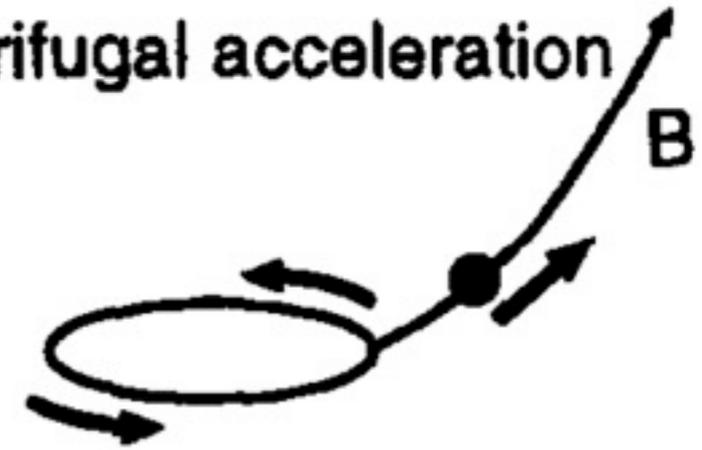
Magnetisch-zentrifugal
getriebener Jet:
Winkel von B_p mit der
Scheibenebene $< 60^\circ$

Jets & Gasausflüsse

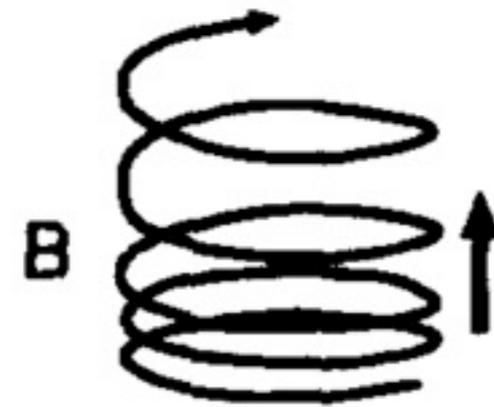


Pudritz & Norman 1986

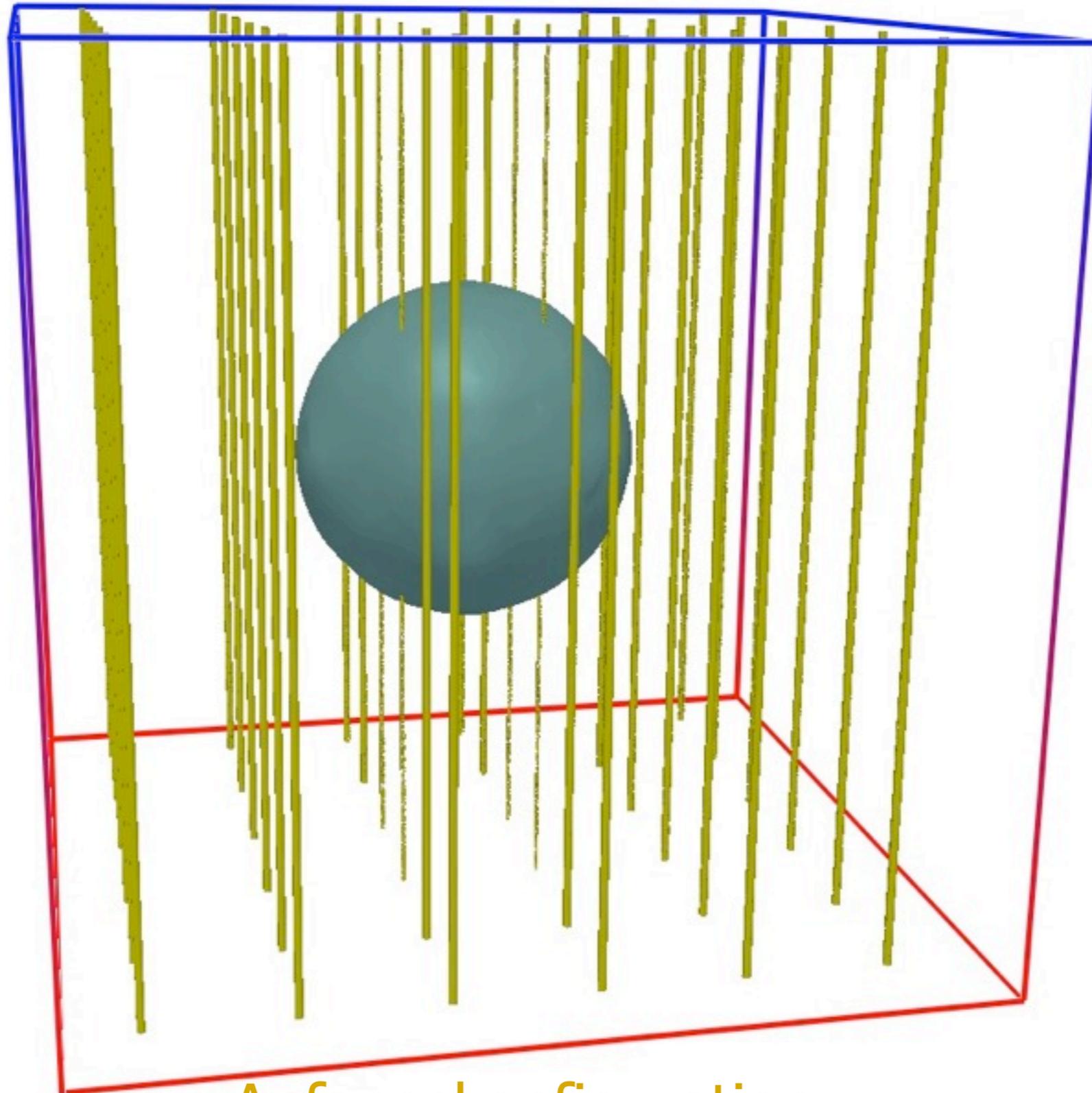
centrifugal acceleration



magnetic pressure acceleration

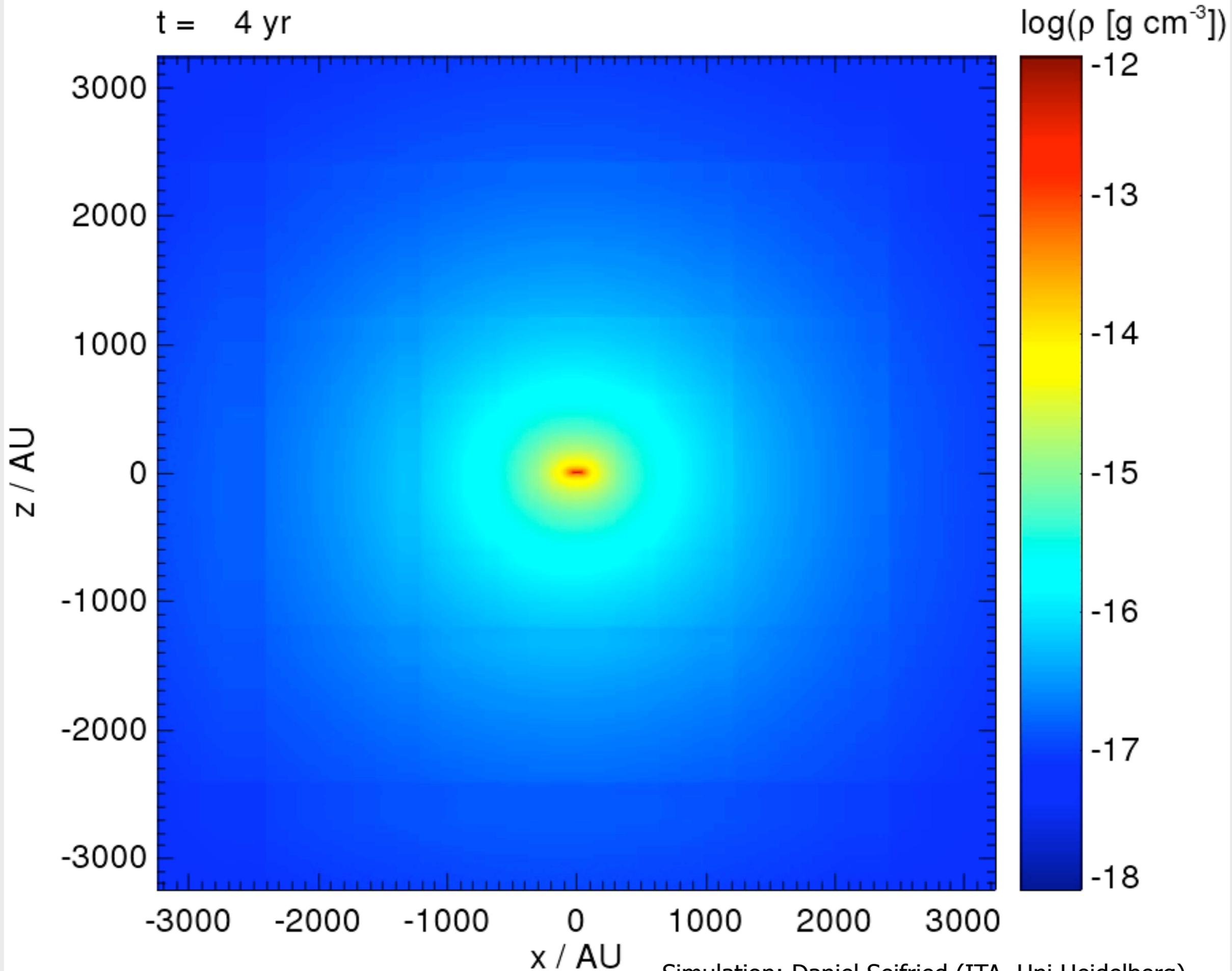


Jets & Gasausflüsse

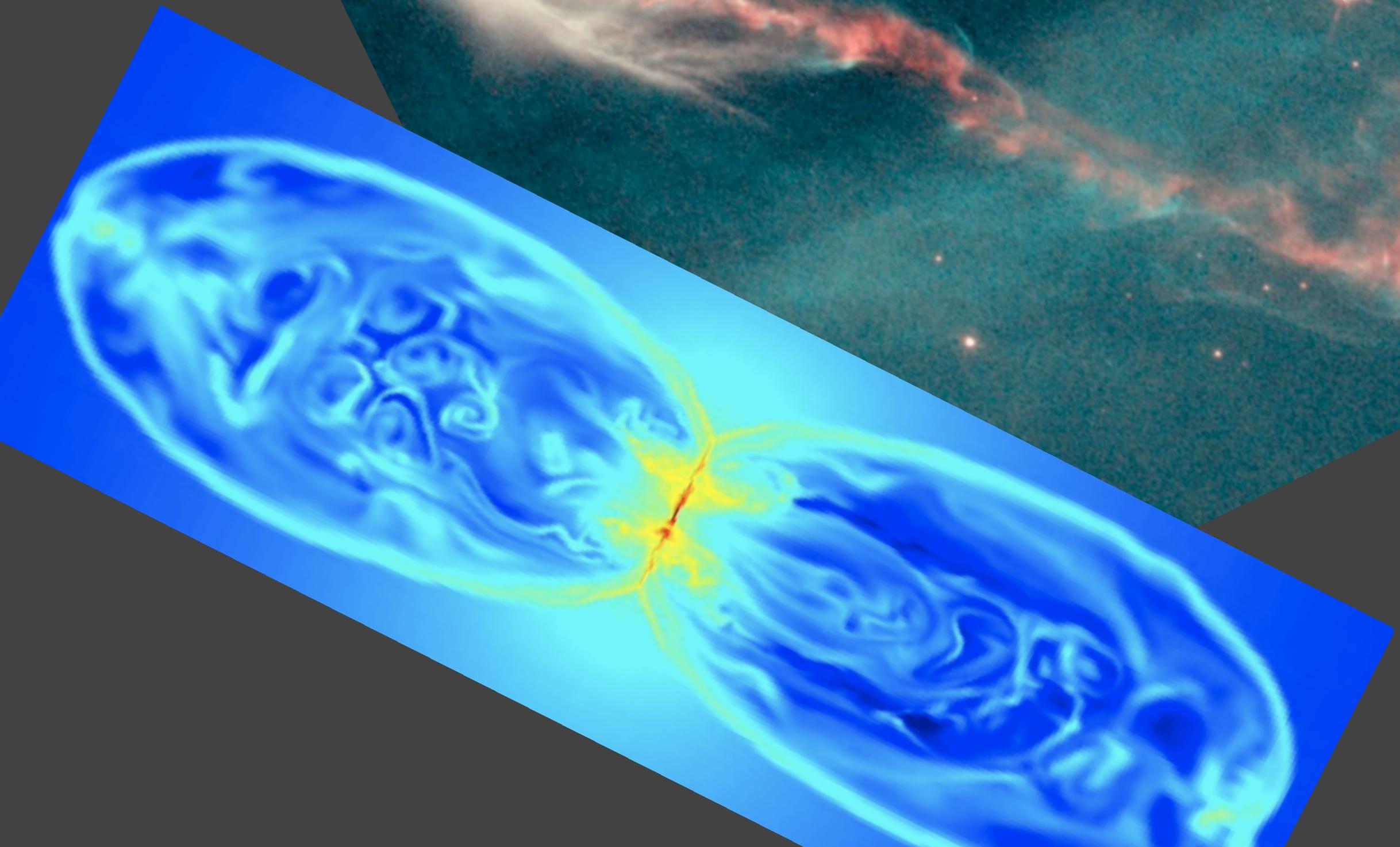
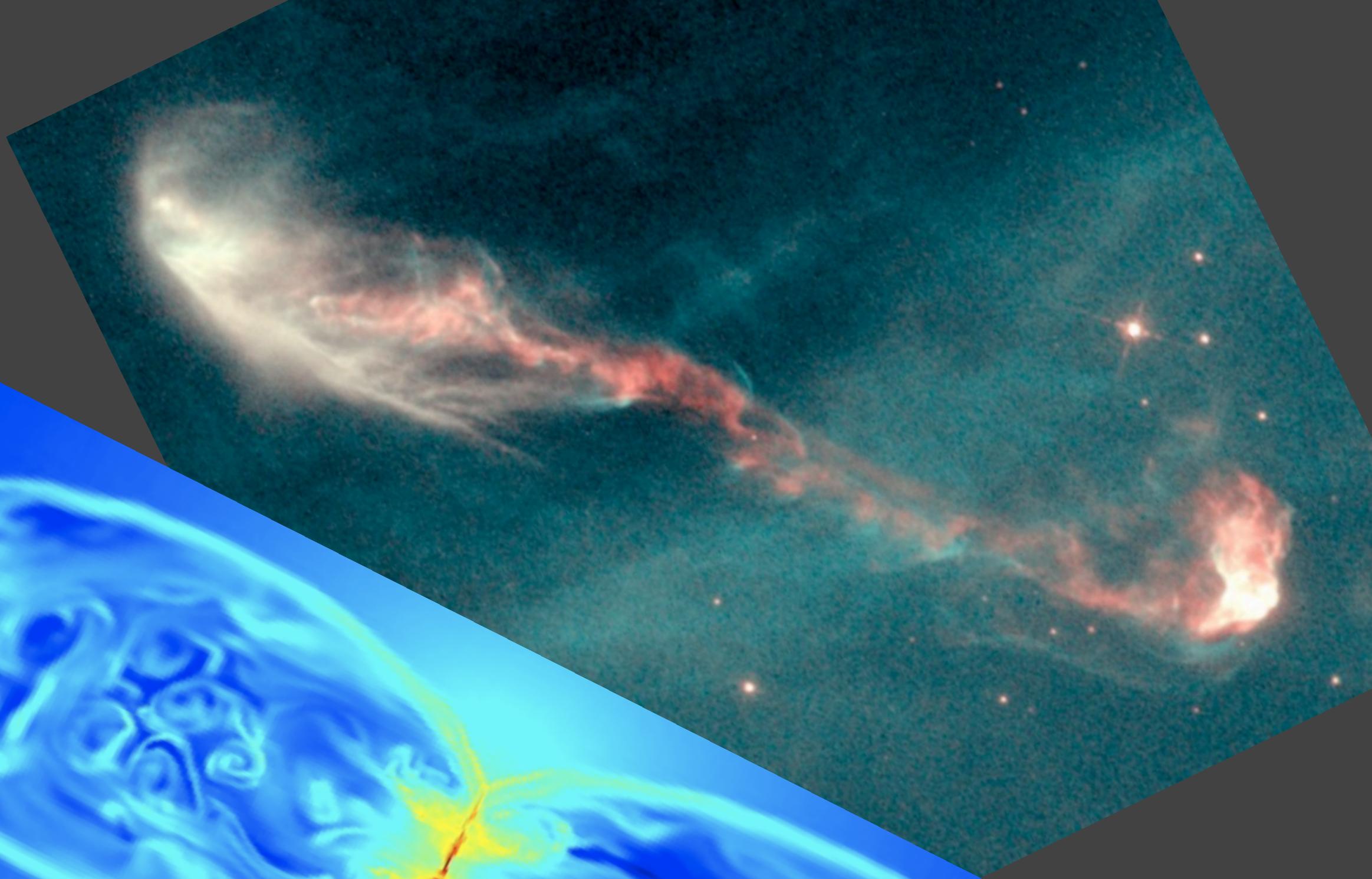


Anfangskonfiguration:
rotierende Gassphäre + Magnetfeld

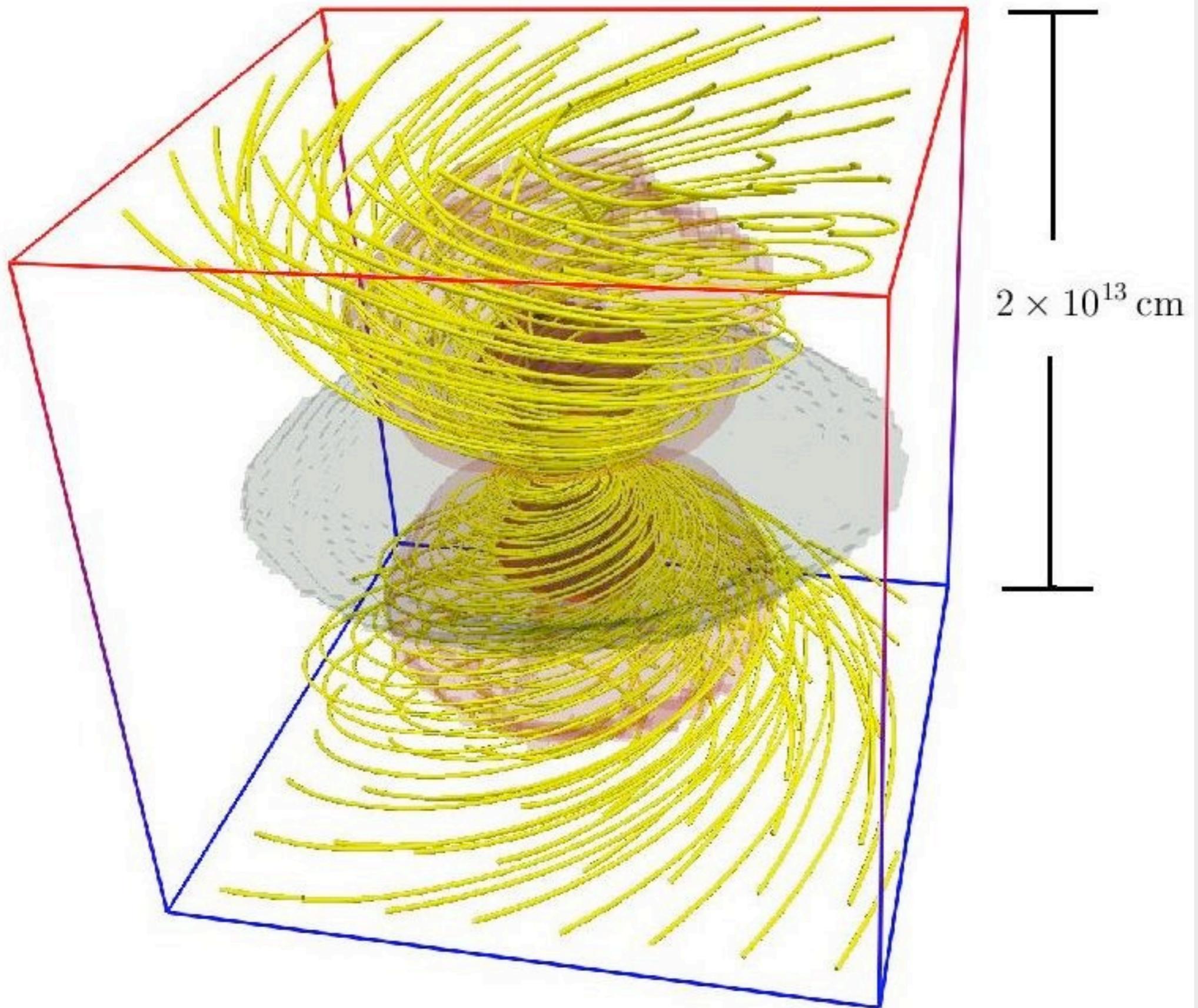
t = 4 yr



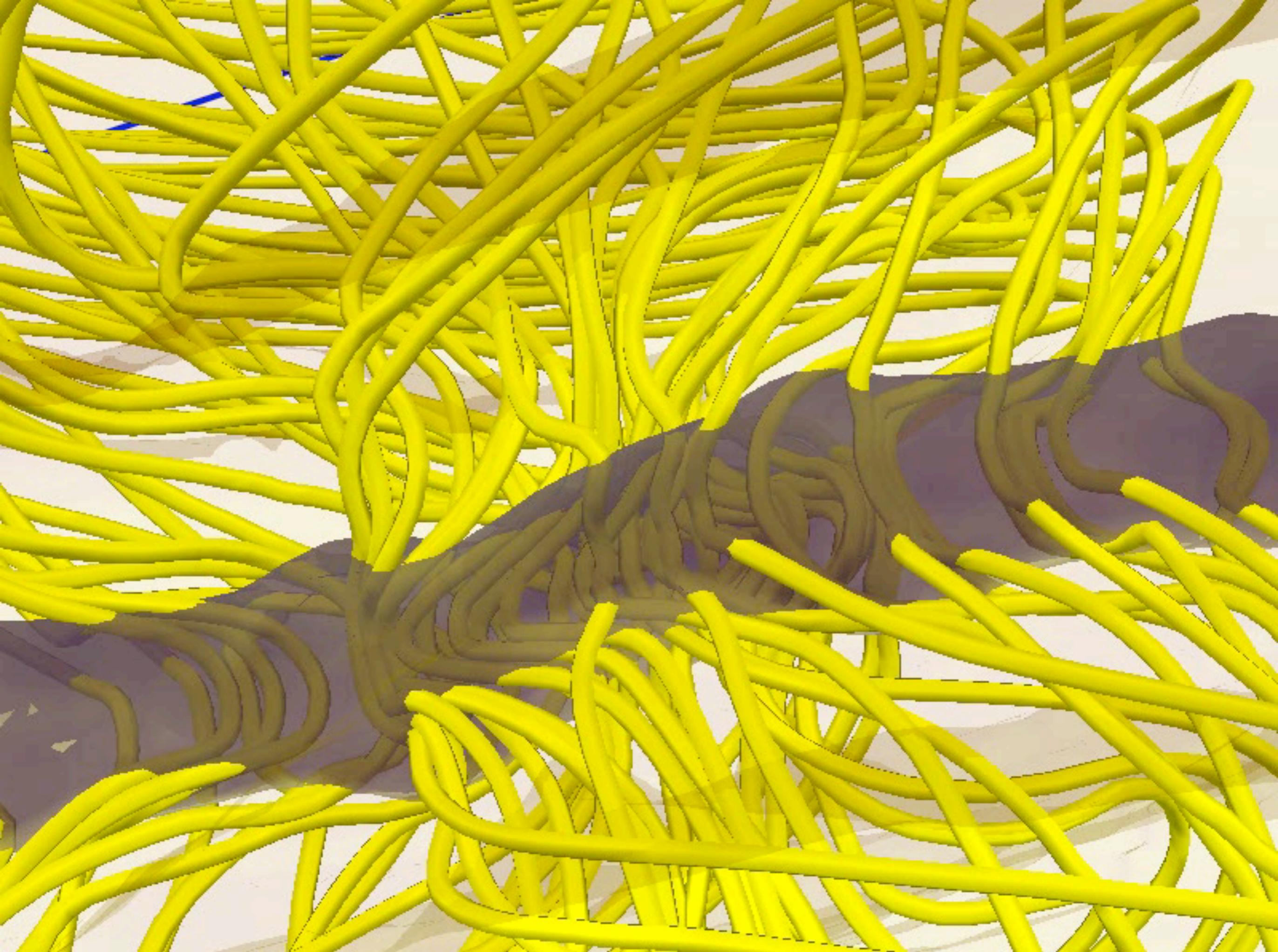
Simulation: Daniel Seifried (ITA, Uni Heidelberg)

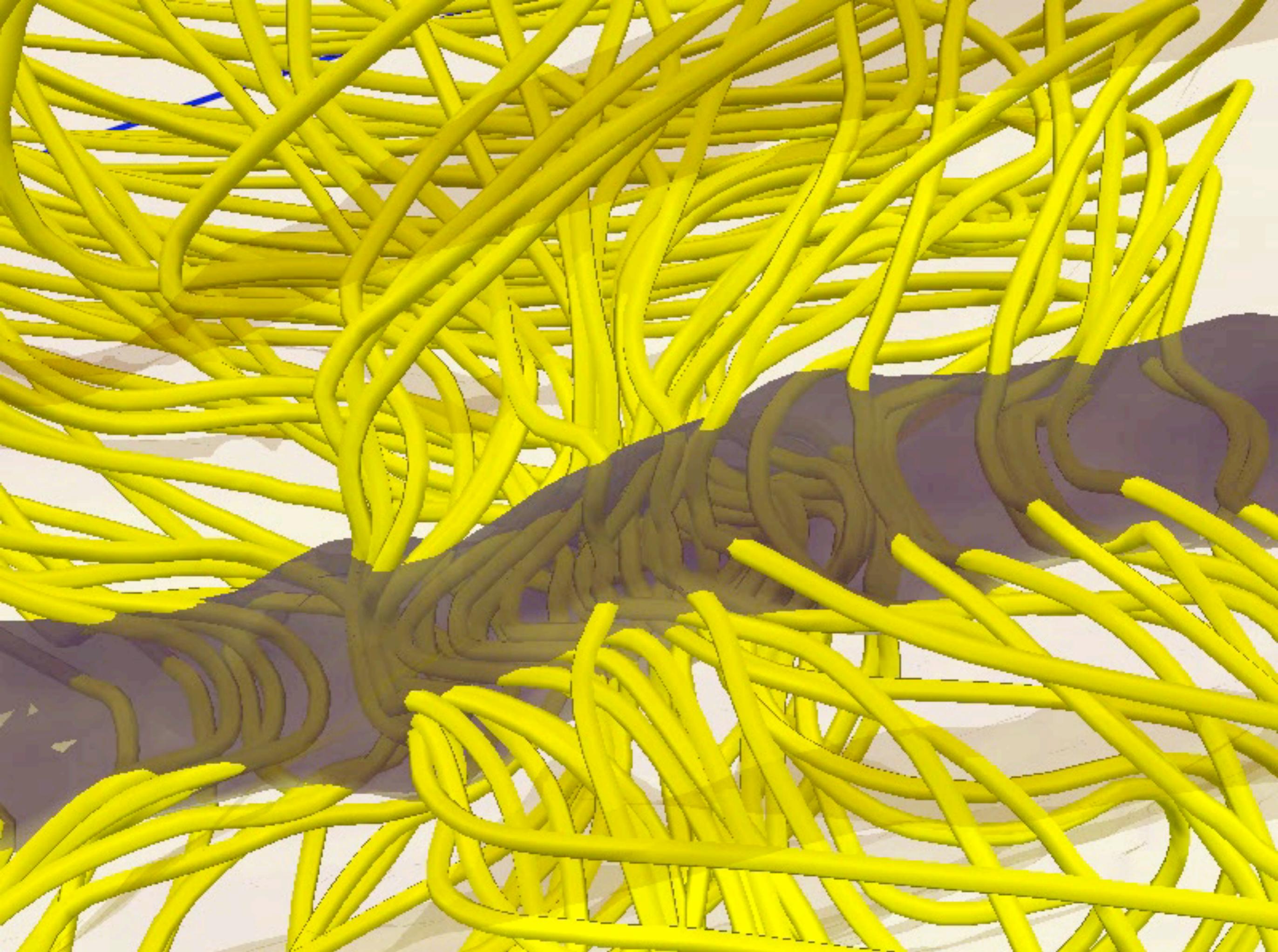


Magnetfeldlinien



Magnetfeldlinien





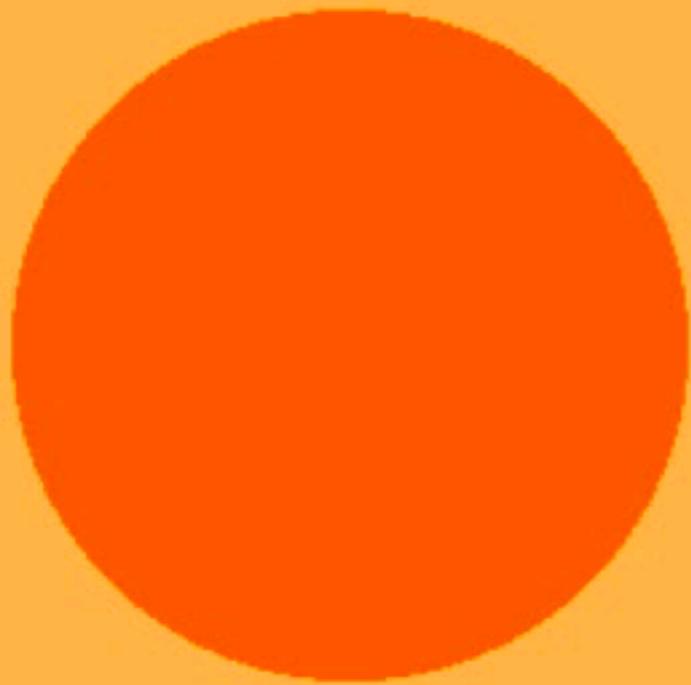
Turbulenz von Jets?



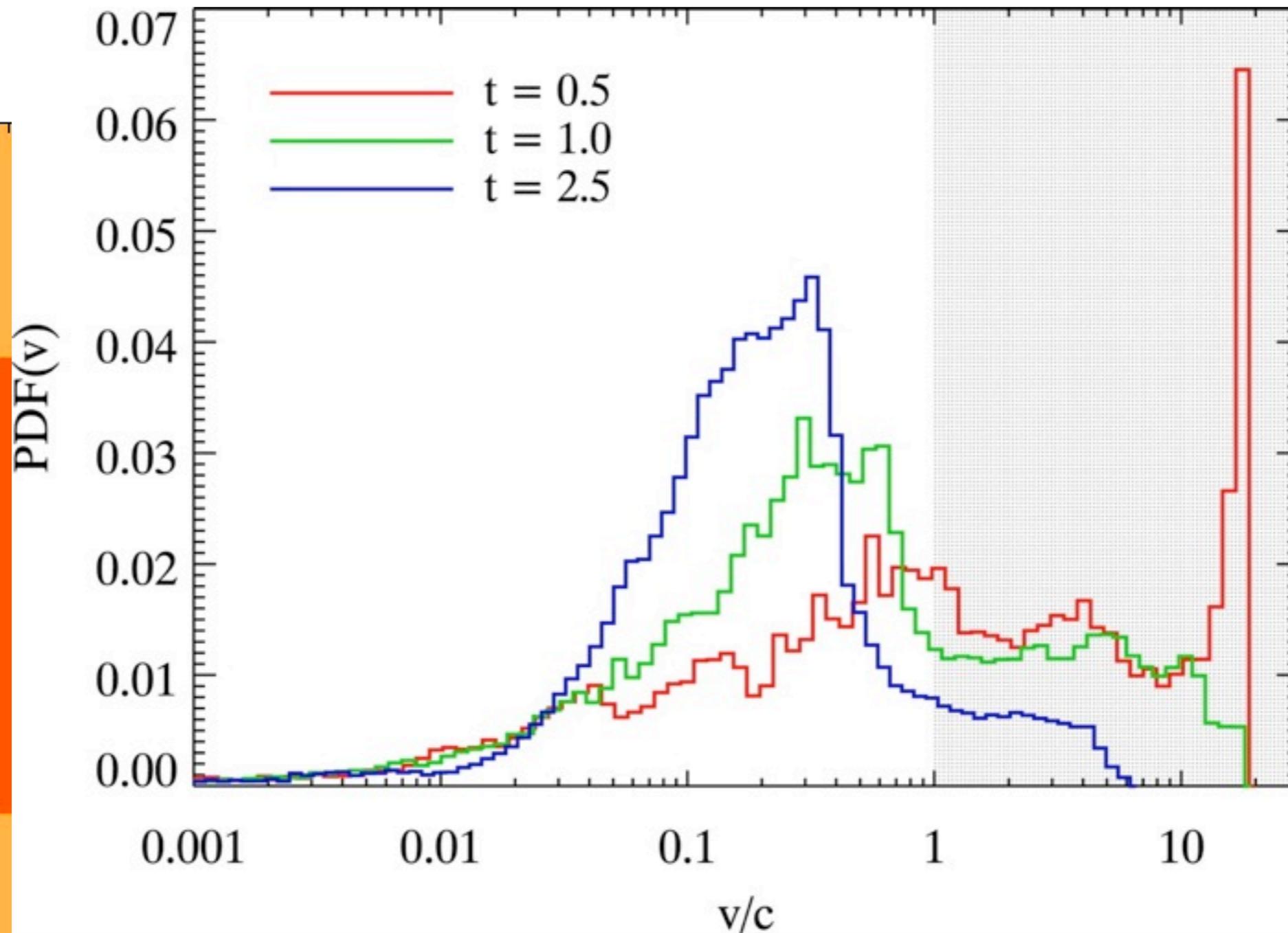
Turbulenz von Jets?

Turbulenz von Jets?

Log10 Density (g/cm^3)



Turbulenz von Jets?



1

2

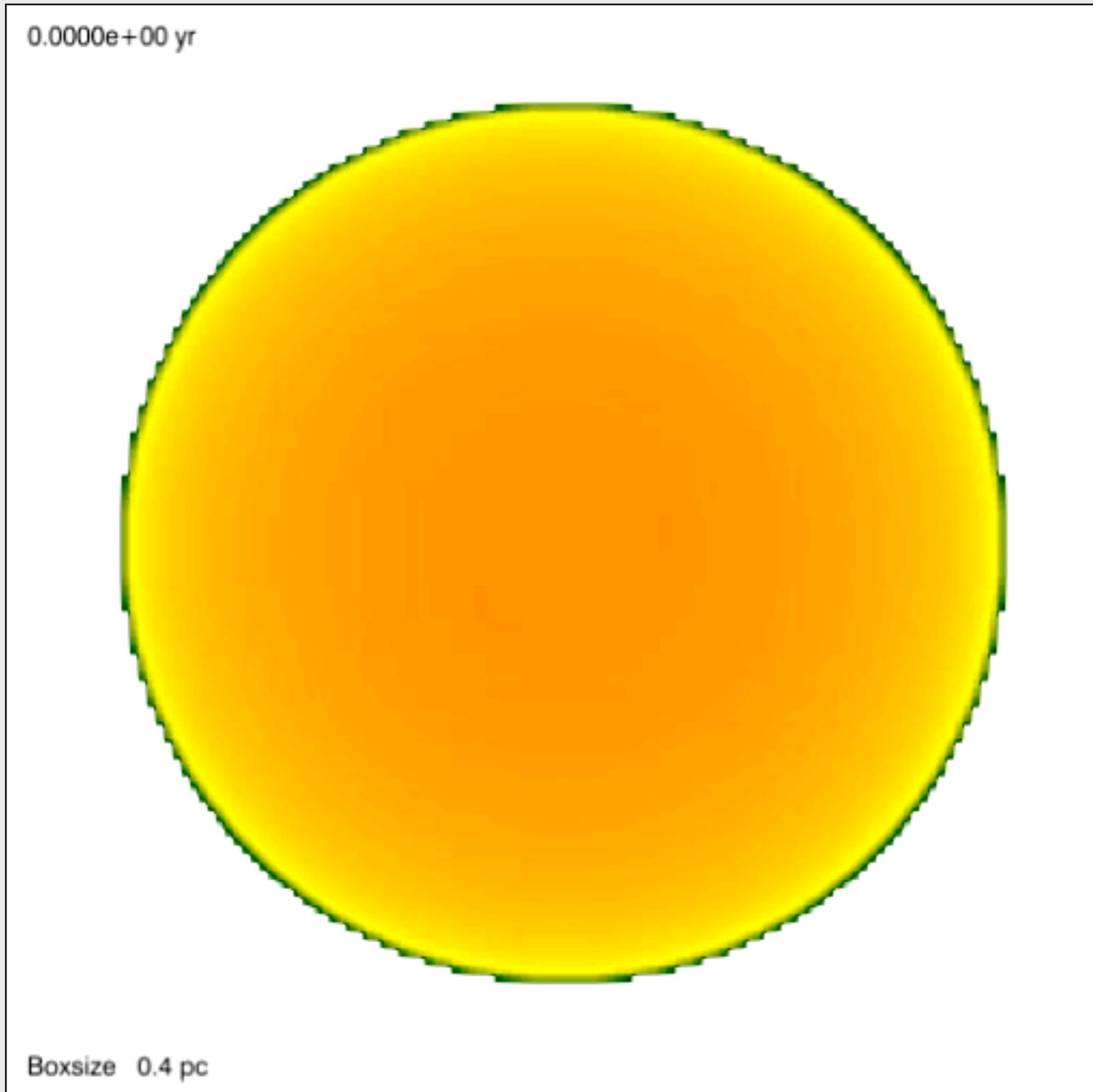
3

4

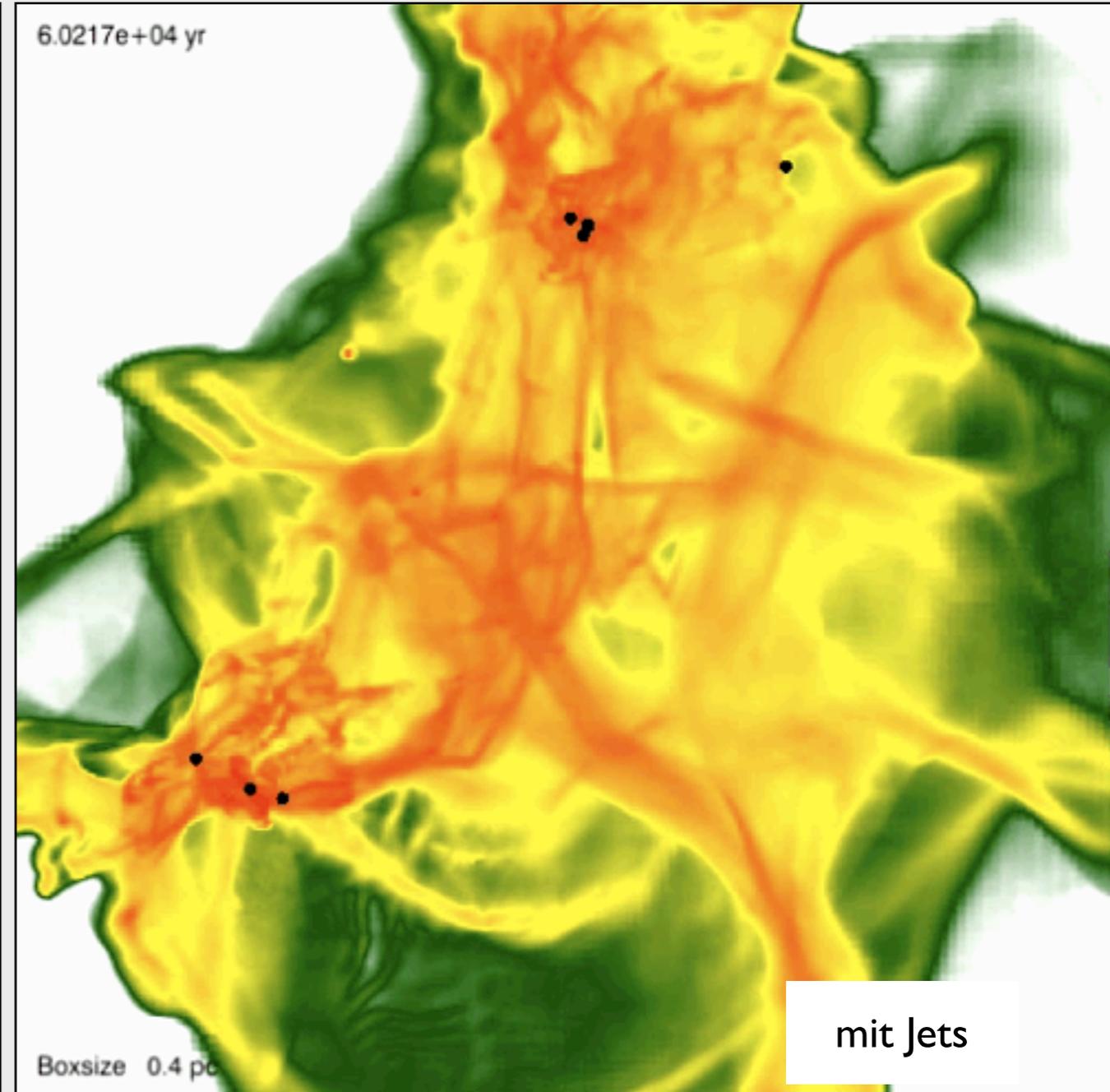
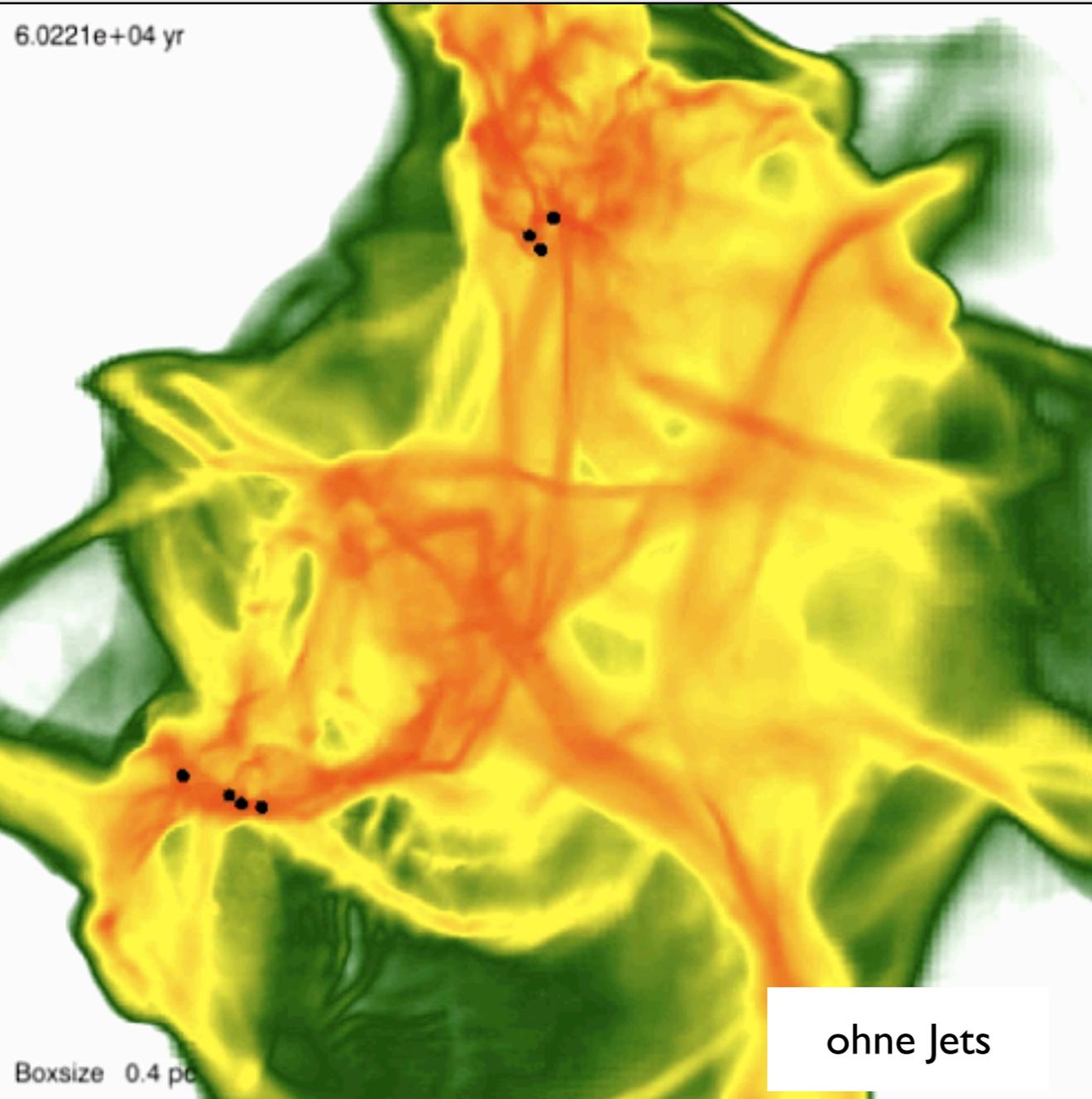
5

Turbulenz von Jets?

Turbulenz von Jets?



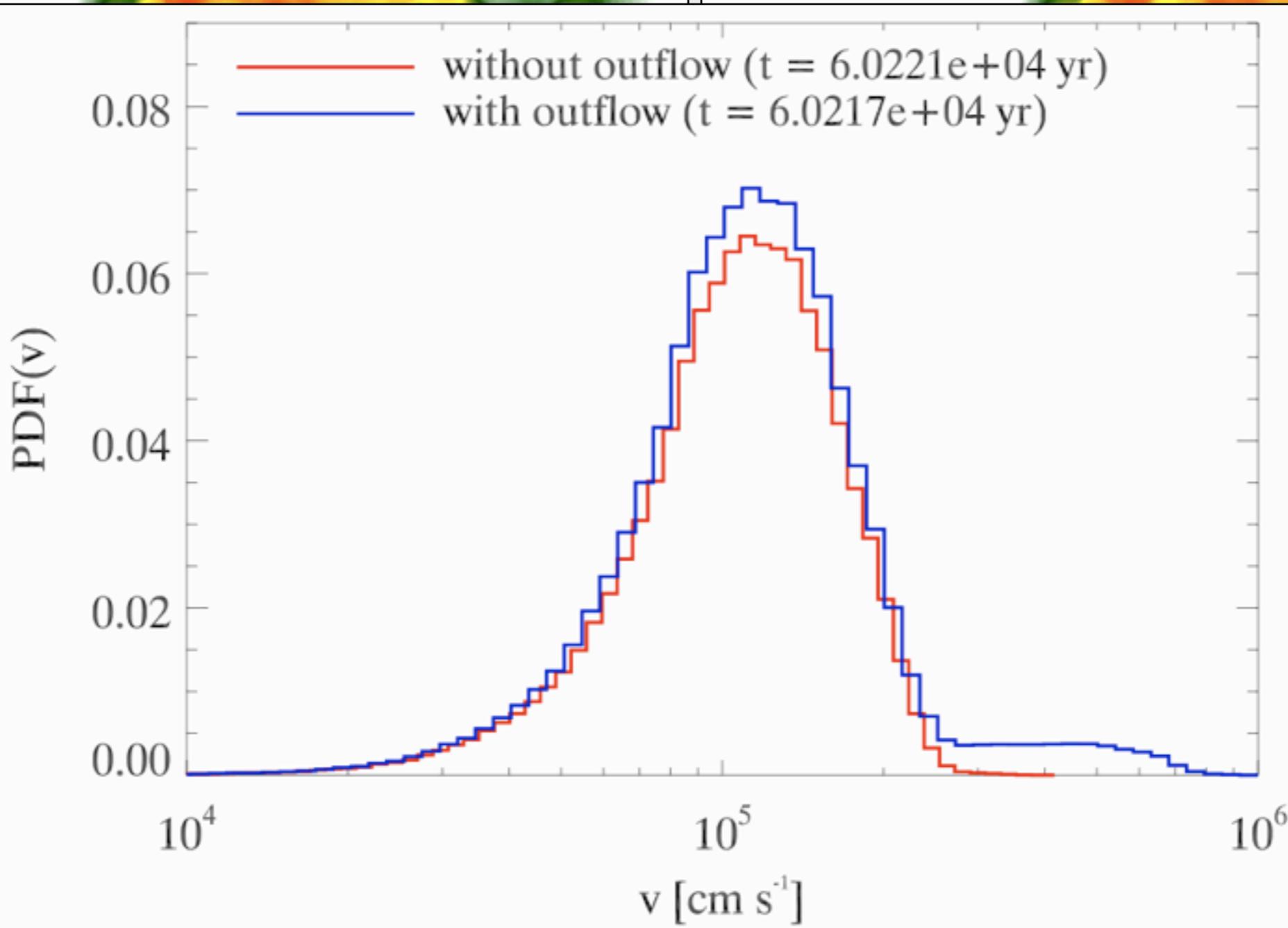
Turbulenz?



Turbulenz?

6.0221e+04 yr

6.0217e+04 yr



Boxsize 0.4 pc

mit Jets

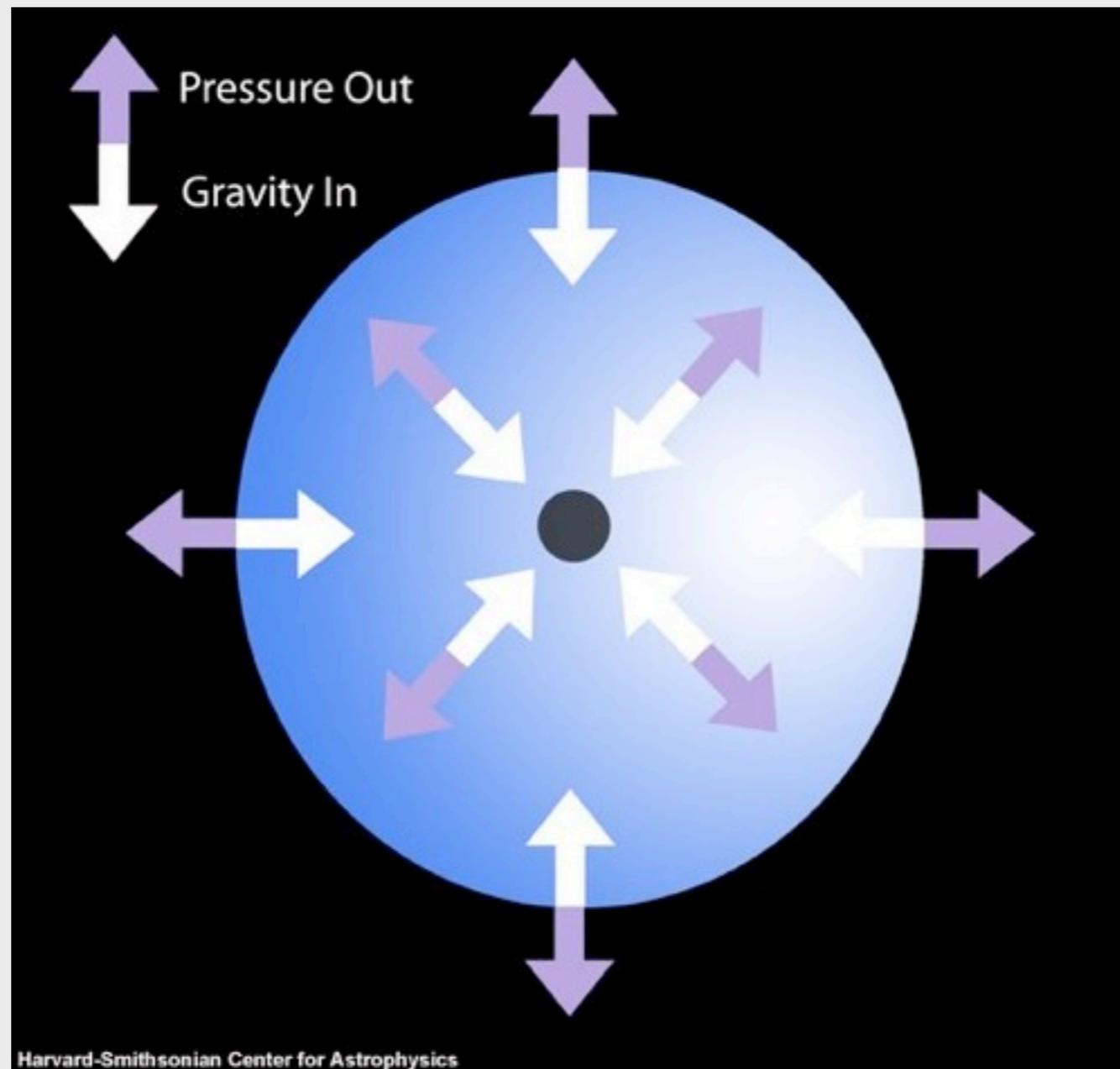
Stellare Winde



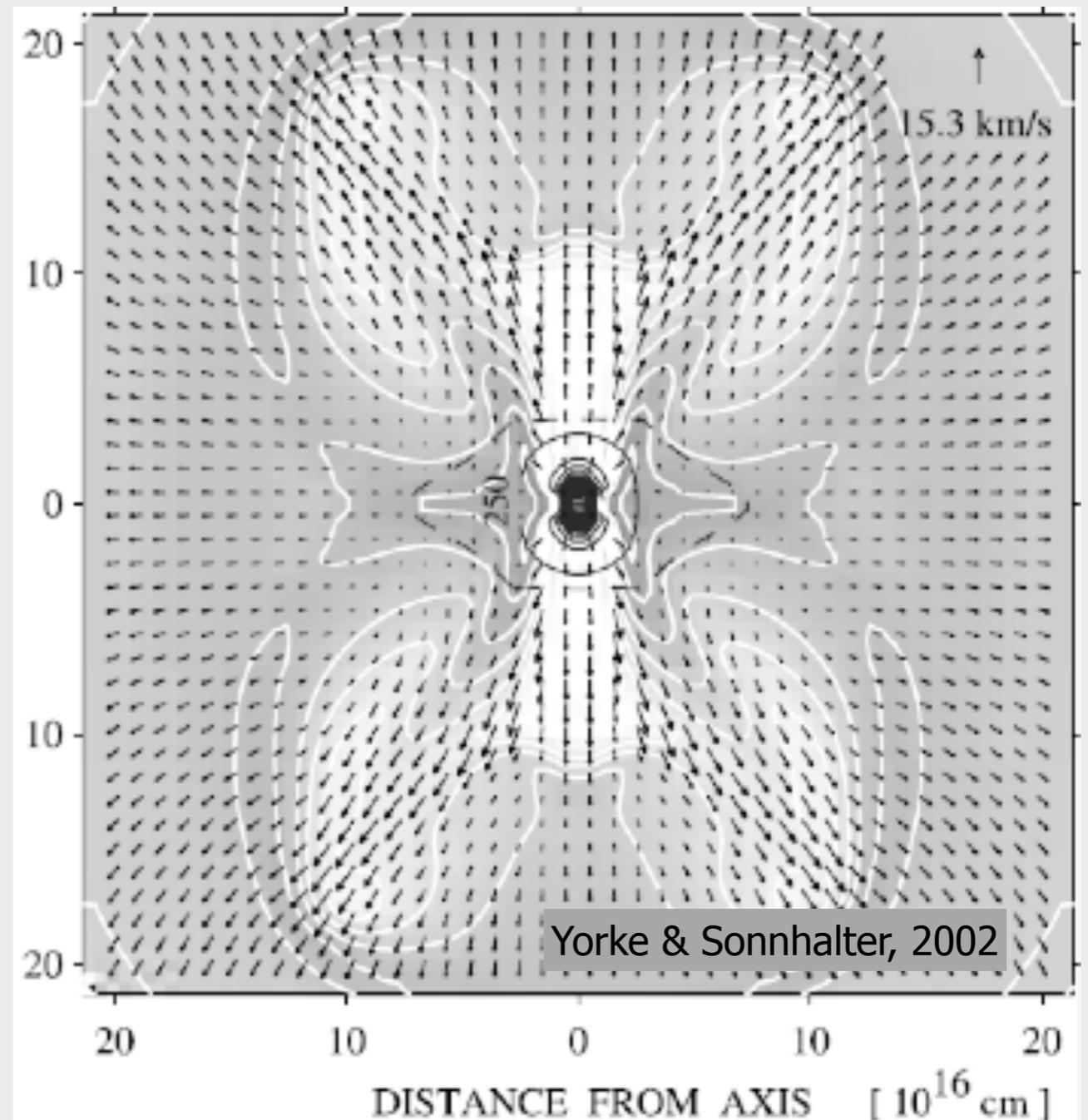
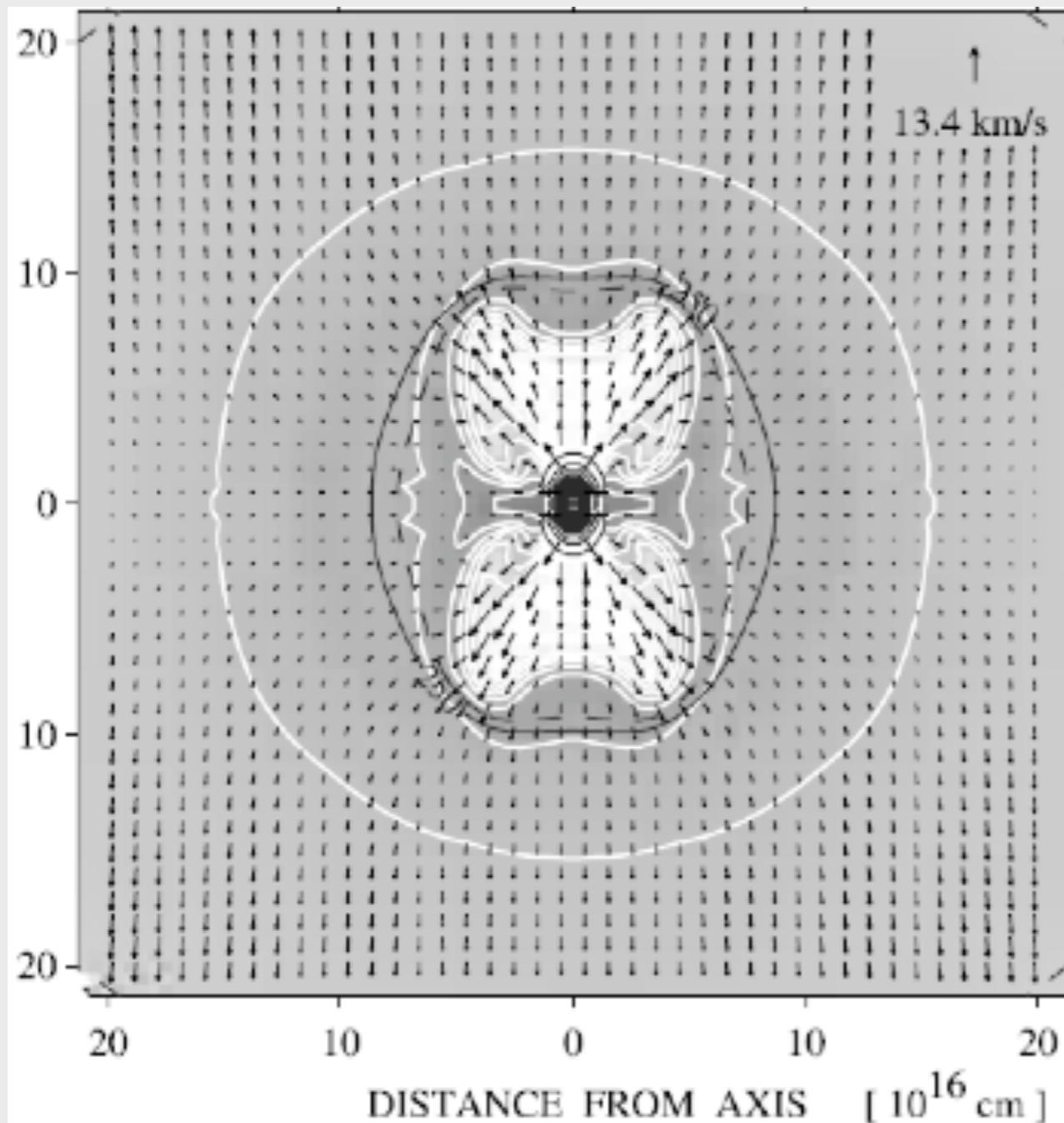
Stellare Winde

Problem bei massereichen Sternen:

In sphärischer Symmetrie (1D) kann der Strahlungsdruck die Gasakkretion stoppen
(**Eddington Limit**)

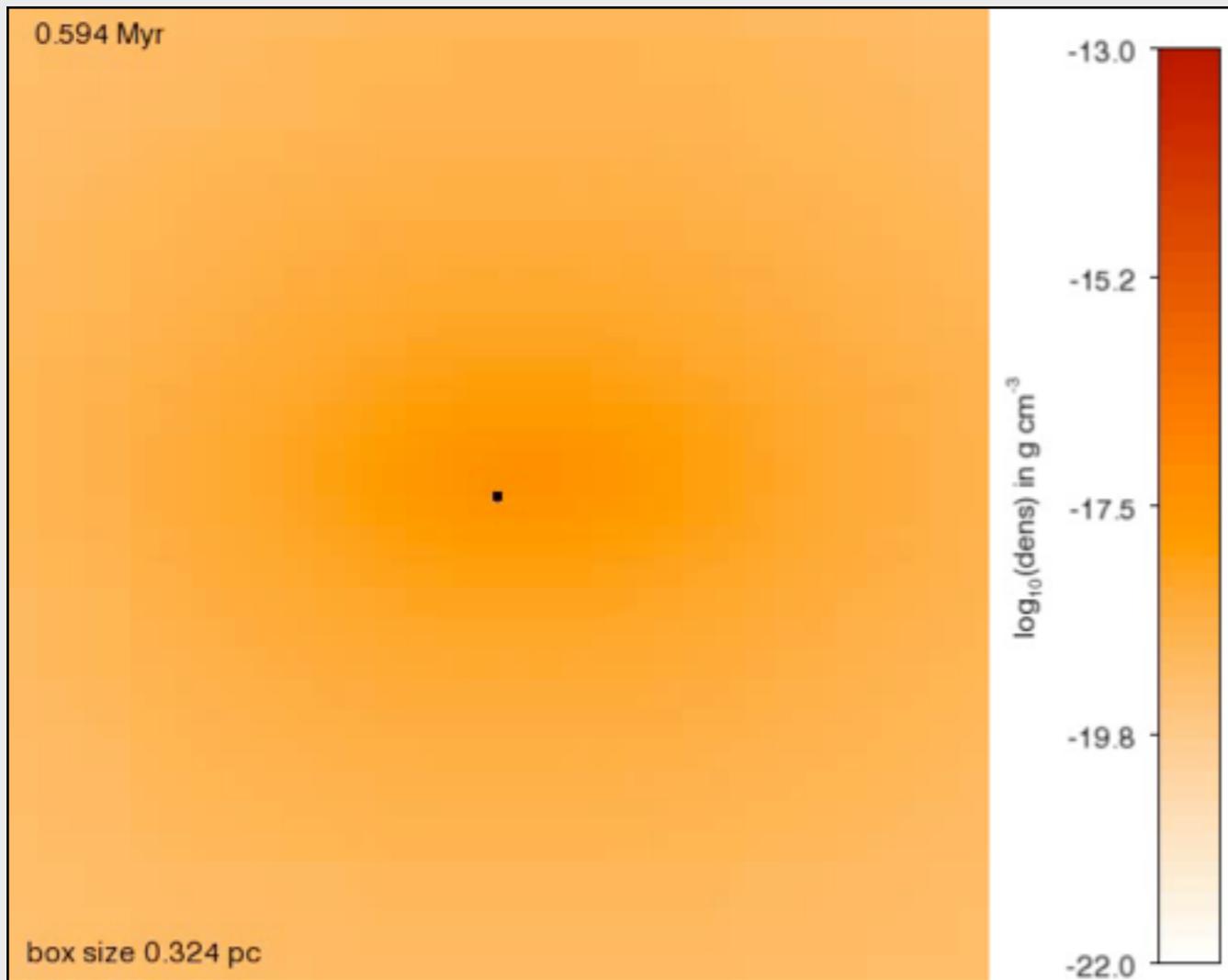


Winde von massereichen Sternen

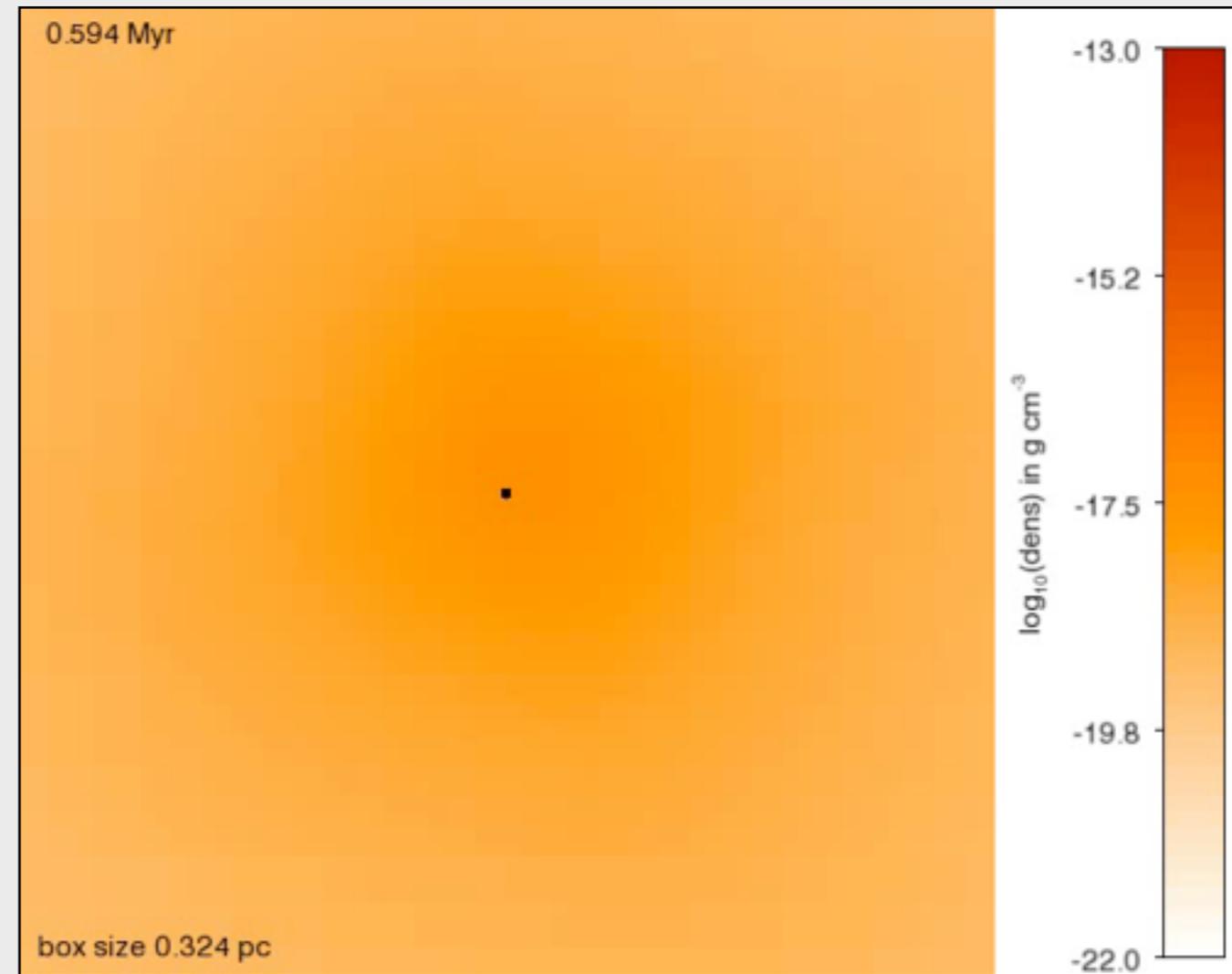


2D: symmetrischer Ausfluss

Winde von massereichen Sternen

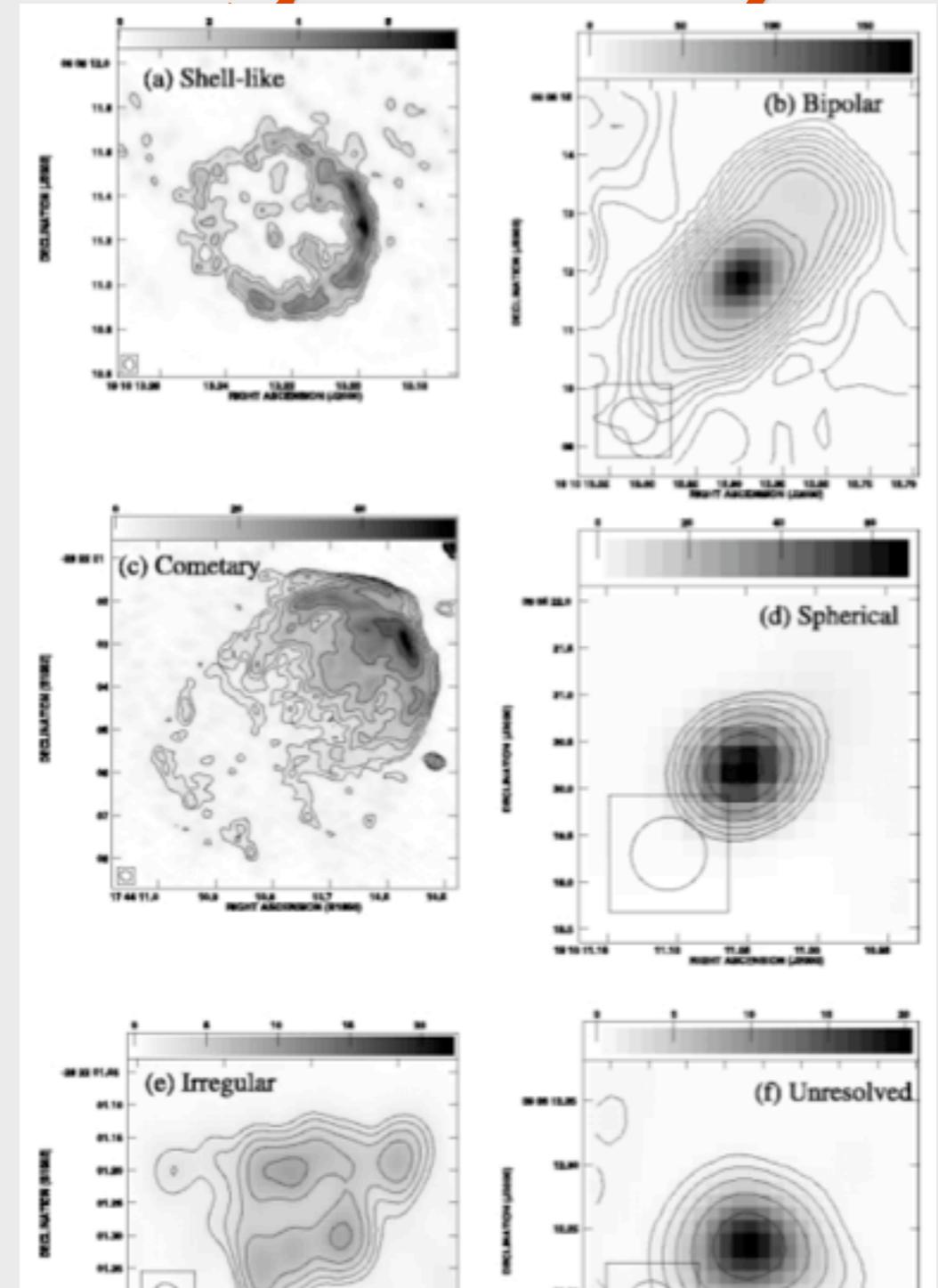
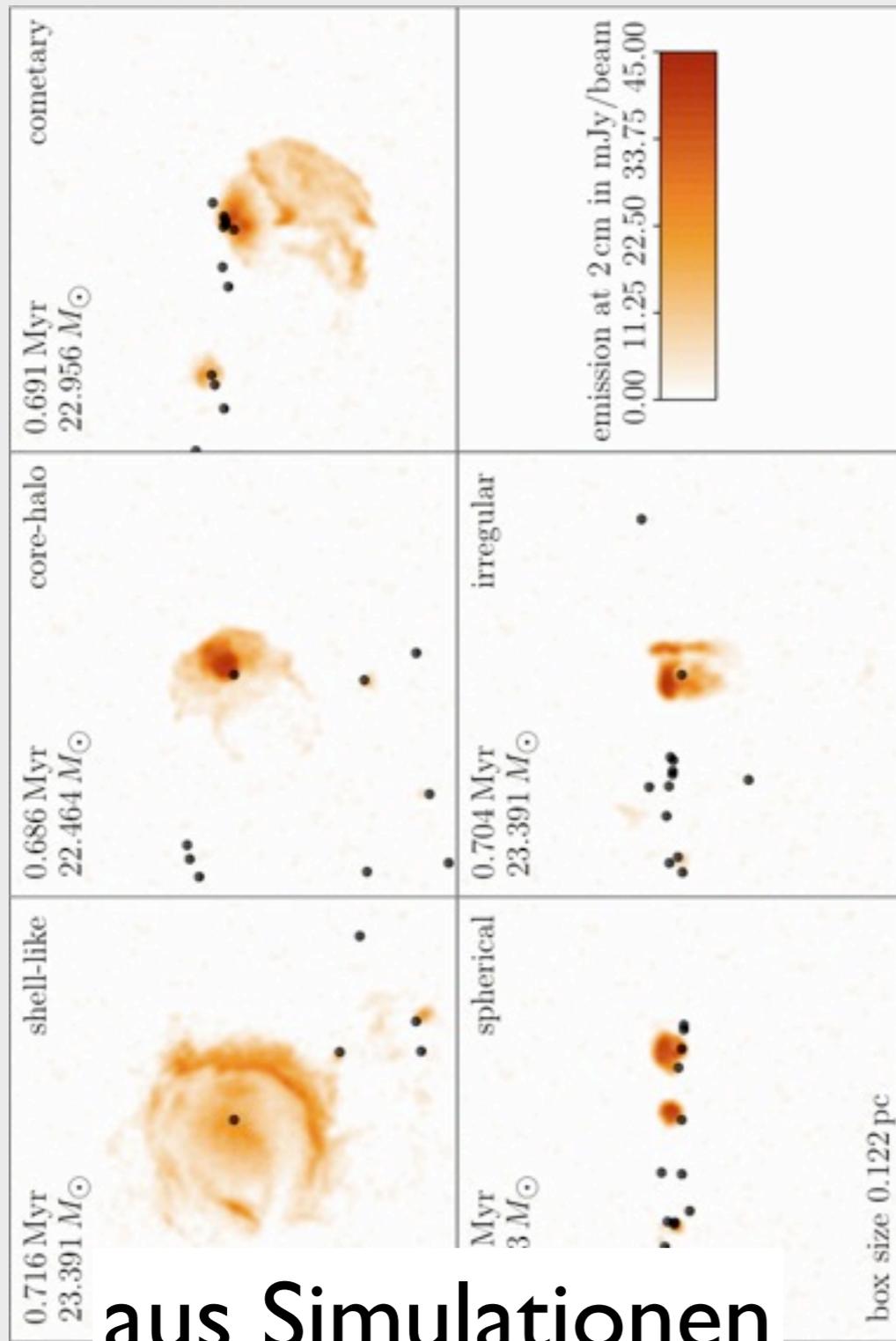


Scheibe: Seitenansicht



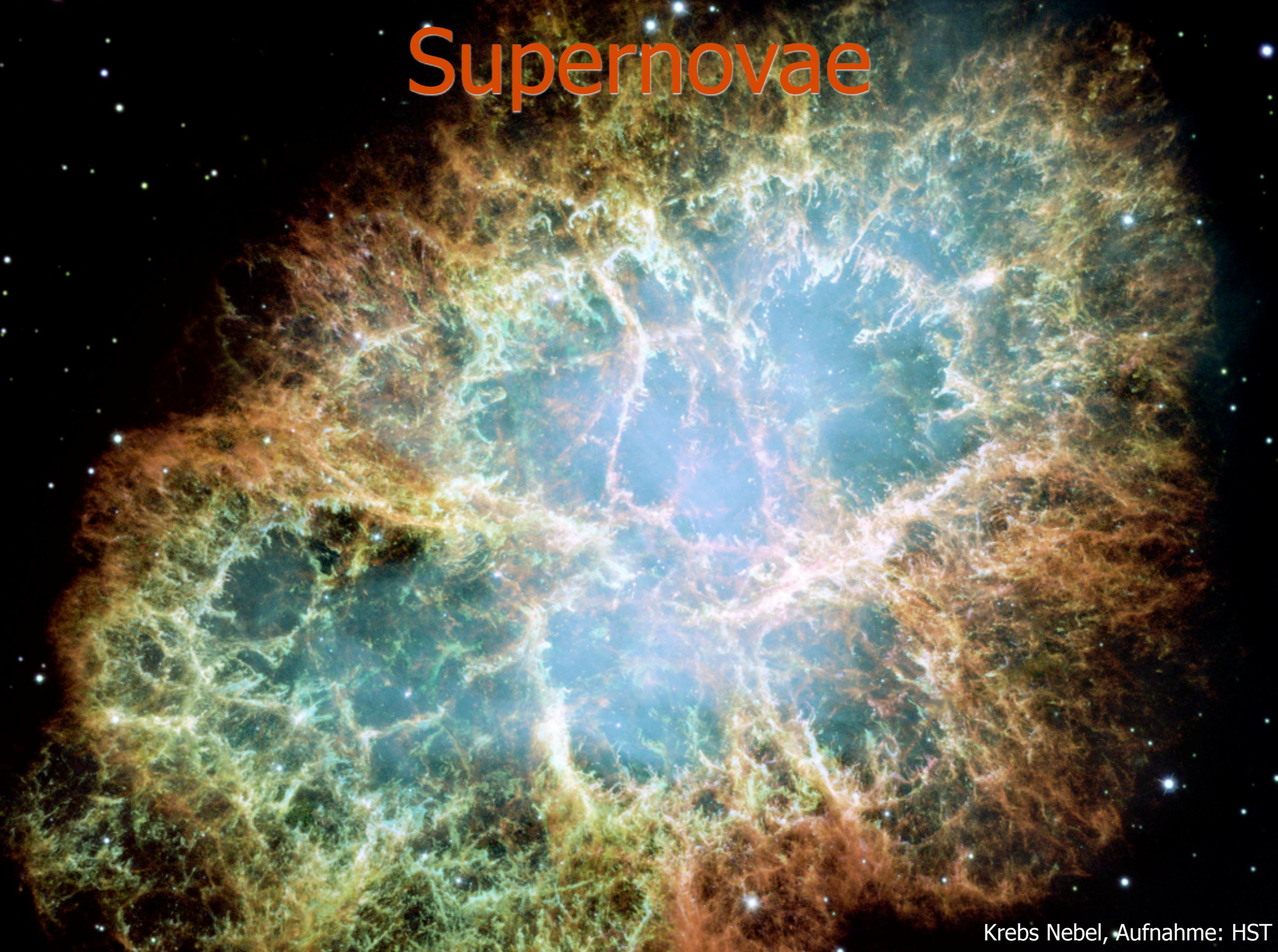
Scheibe: Draufsicht

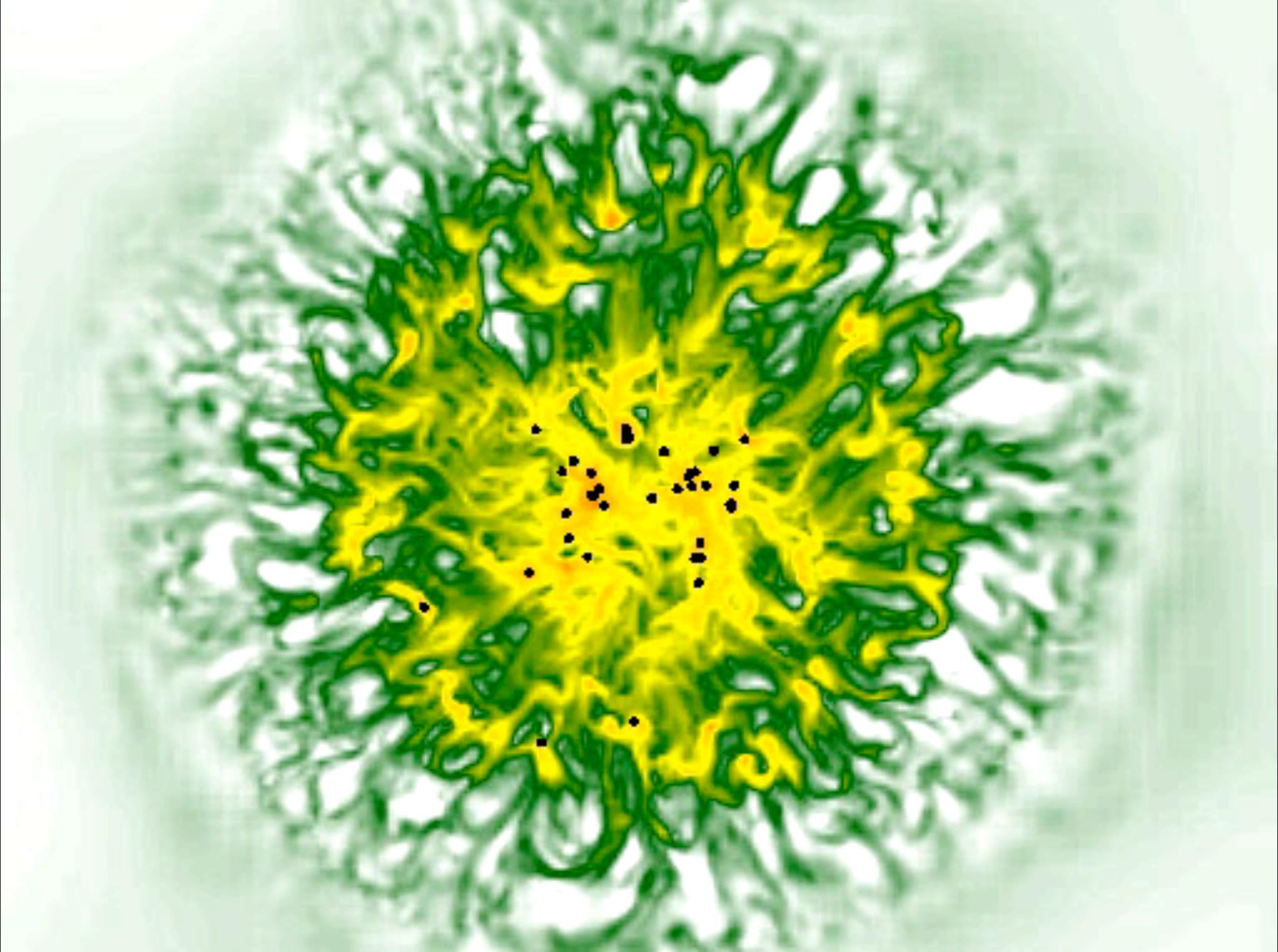
Winde von massereichen Sternen (HII Regionen)



Radiobeobachtungen

Supernovae







**Vielen Dank für
Ihre
Aufmerksamkeit**