

## Eigenschaften von Molekülwolken

Molekülwolken gehören zu den massereichsten Objekten der Galaxien.

- **Masse:**  $10^4 - 10^6 M_{\odot}$
- **Dichte:**  $100 \text{ cm}^{-3} \rightarrow M_{\text{Jeans}} \approx 20 M_{\odot}$
- **Temperatur:**  $10 - 30 \text{ K} \rightarrow c_s = 0.3 \text{ km/s}$
- **Magnetfeldstärke:**  $\sim 10^{-5} \text{ G}$
- **Kollapszeit:**  $t_{\text{ff}} = 2 \cdot 10^6 \text{ yrs}$

### Massenverteilung:

$$N(m) \sim m^{-2}$$

Wolken mit Massen von  $10^5 M_{\odot} - 10^6 M_{\odot}$  enthalten das meiste molekulare Gas in der Galaxis.

## Das Problem der Stabilität von Molekülwolken

Sternentstehungsrate:  $SFR = \eta_{sf} \cdot \left( \frac{2 \cdot 10^9 M_{\odot}}{t_{ff}} \right) \approx 10 - 100 M_{\odot} / yr$

Beobachtung:

$$SFR = 1 M_{\odot} / yr \xrightarrow{\eta_{sf} \approx 1\% - 10\%} t_{sf} \approx 5 \cdot 10^7 yr \approx 20 \cdot t_{ff}$$

- Molekülwolken sollten **viele freie Fallzeiten** existieren

Was verhindert den Kollaps von Molekülwolken?

# Innere Struktur der Taurus-Molekülwolke

(Mizuno et al. 1995)

- Klumpige Unterstruktur:

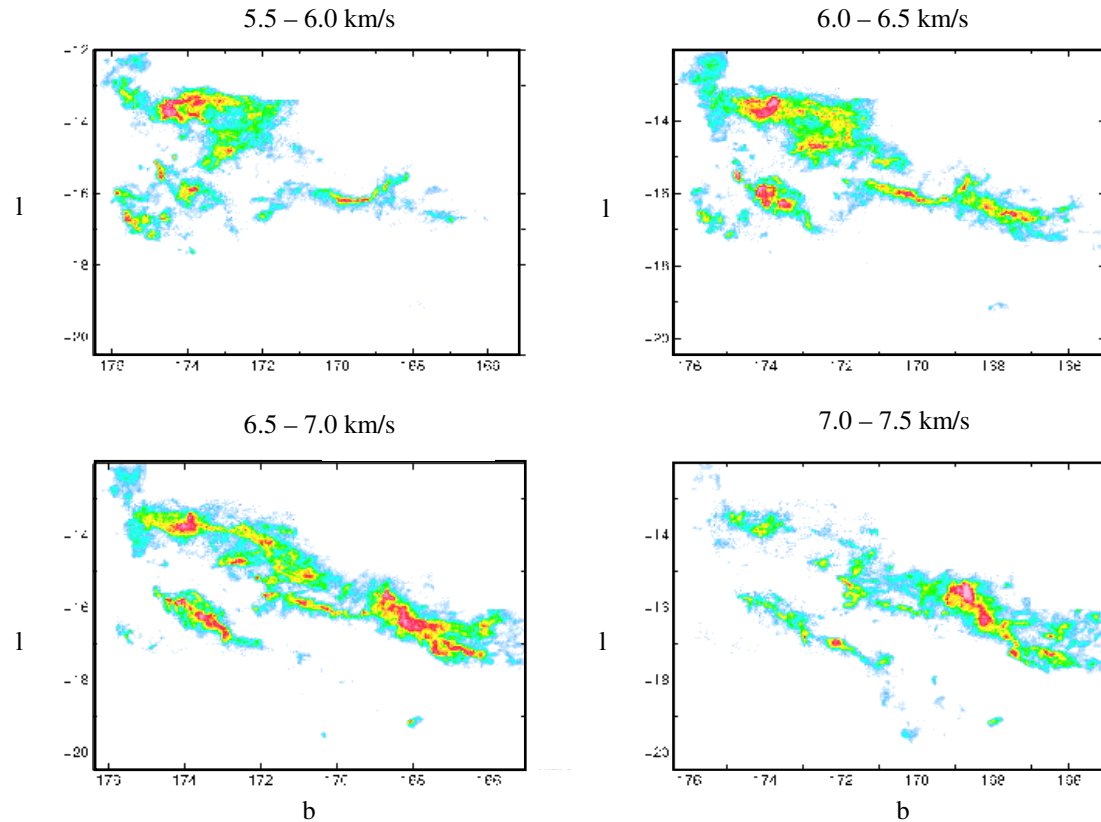
$$M_c \sim R_c^2, N_c \sim M_c^{-2}$$

- Geschwindigkeitsdispersion:

$$\sigma \approx 3 \text{ km/s} \approx 10 c_s$$

- Turbulente Jeansmasse:

$$M_{\text{Jeans}} \approx 2 \cdot 10^4 M_{\odot}$$



**Molekülwolken werden durch den internen turbulenten Druck gestützt.**

# Numerische Simulationen von turbulenten Molekülwolken

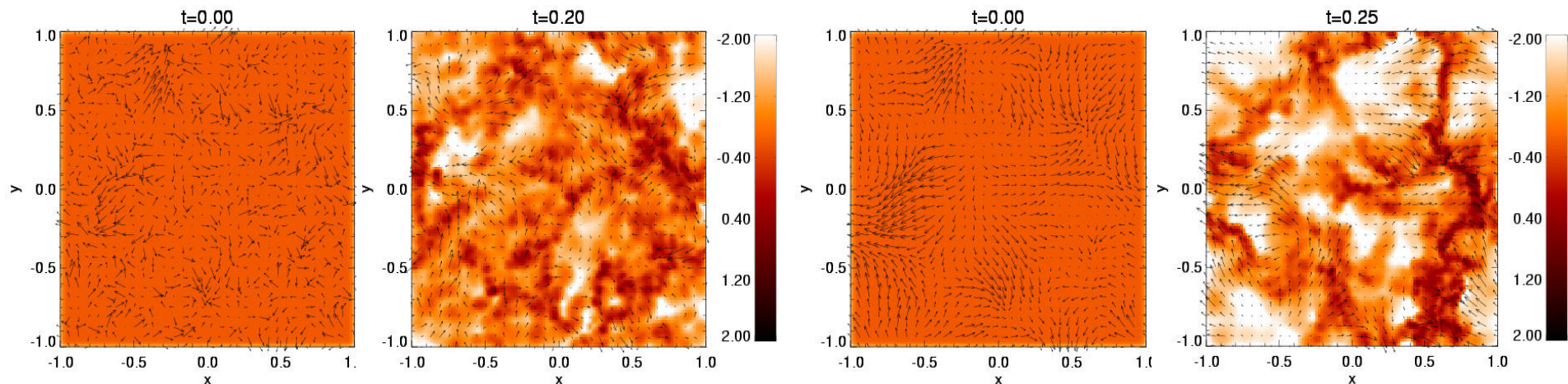
## Anfangsbedingung:

- Homogene Dichteverteilung
- Überlagerung von Geschwindigkeitsmoden mit  $P(k) \sim k^{-n}$

$$P(k) \sim k^{-2}$$

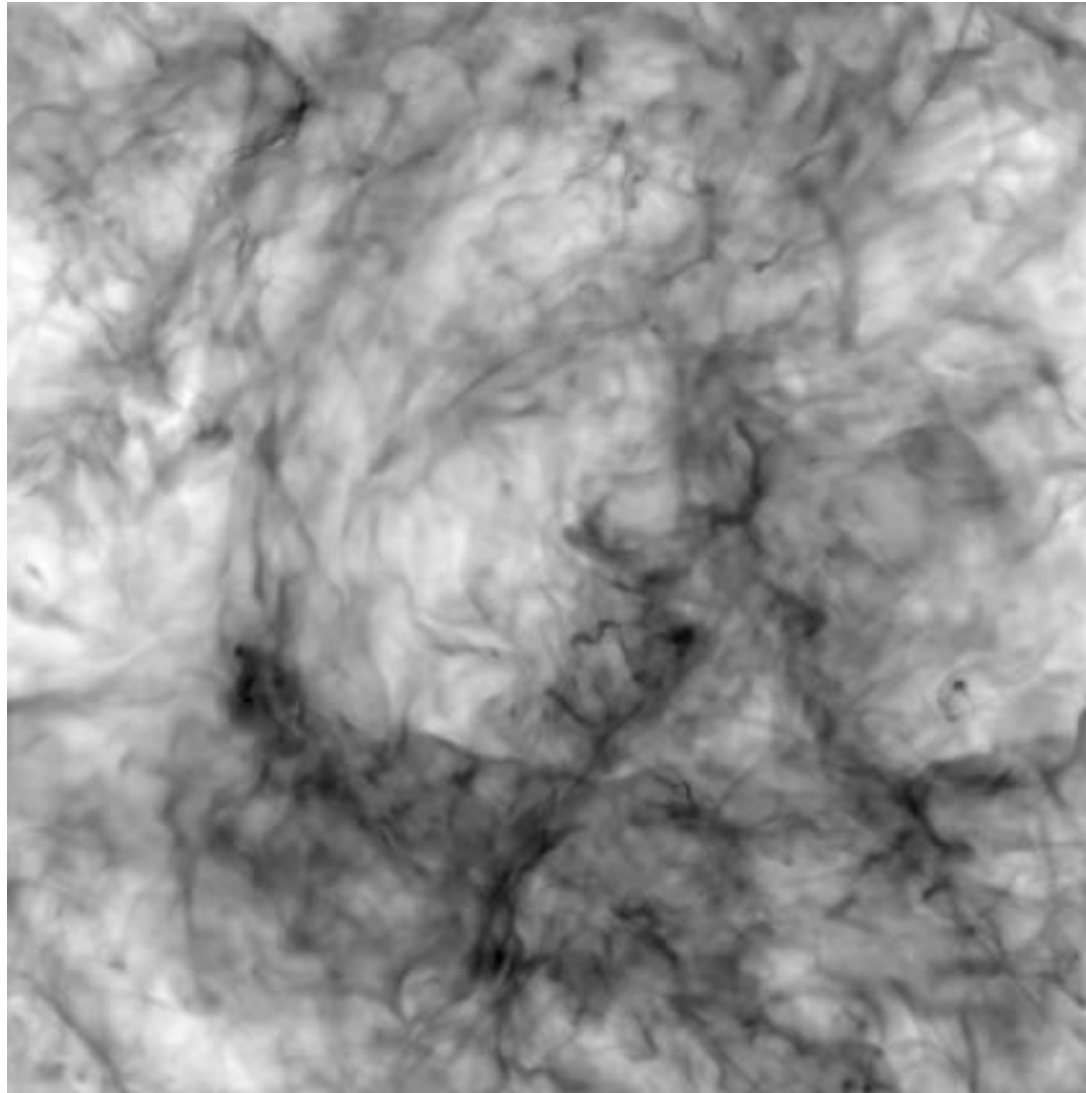
Mach = 5

$$P(k) \sim k^{-4}$$



**Problem:** Entwicklung von Anfangsbedingung abhängig

## **Oberflächendichte einer mit Mach 5 getriebenen Gaswolke**



- Die numerischen Rechnungen zeigen, dass die Turbulenz auf **dynamischen Zeitskalen**, d.h.  $\sim 10^5$  Jahren dissipiert wird.

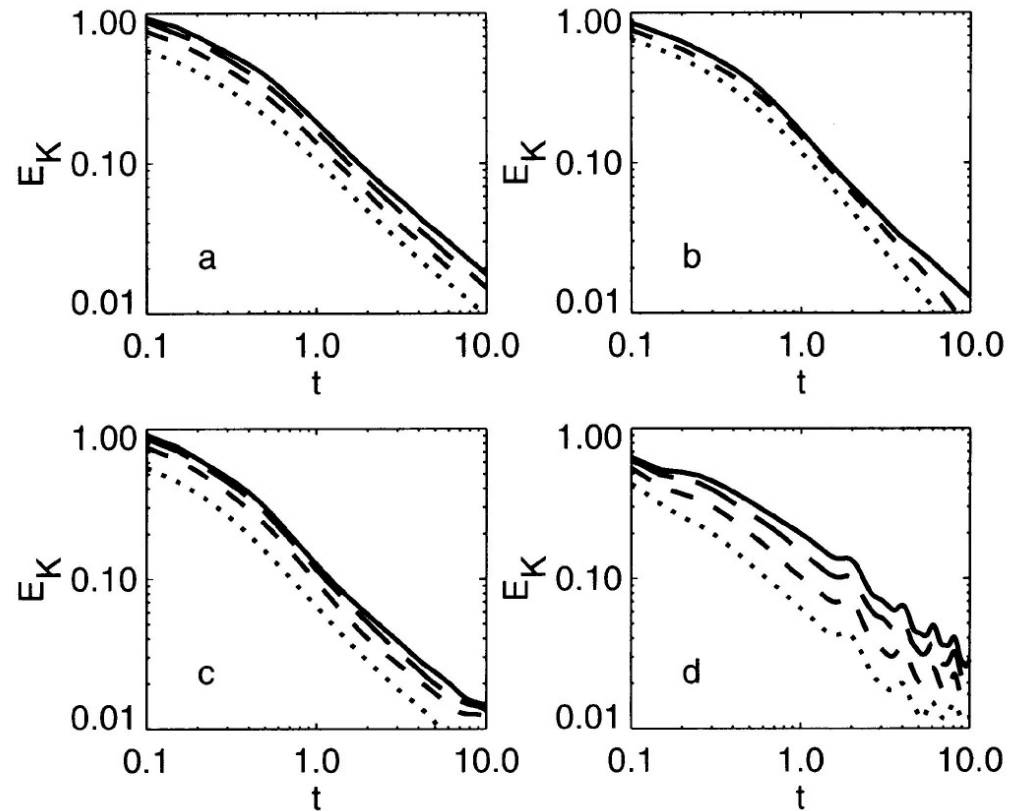
### Kinetische Energiedissipation

- Gitterverfahren
- Teilchenverfahren
- Schwaches Magnetfeld

$$\beta = \frac{p_{th}}{p_{mag}} = \frac{2\mu_0 \rho c_s^2}{B^2} = 5$$

- Starkes Magnetfeld

$$\beta = 0.5$$



(Mac Low, Klessen, Burkert & Smith 1998)

## Das T-Tauri-Problem:

Altersunterschied der jungen Sterne:

$1-3 \cdot 10^6$  Jahre

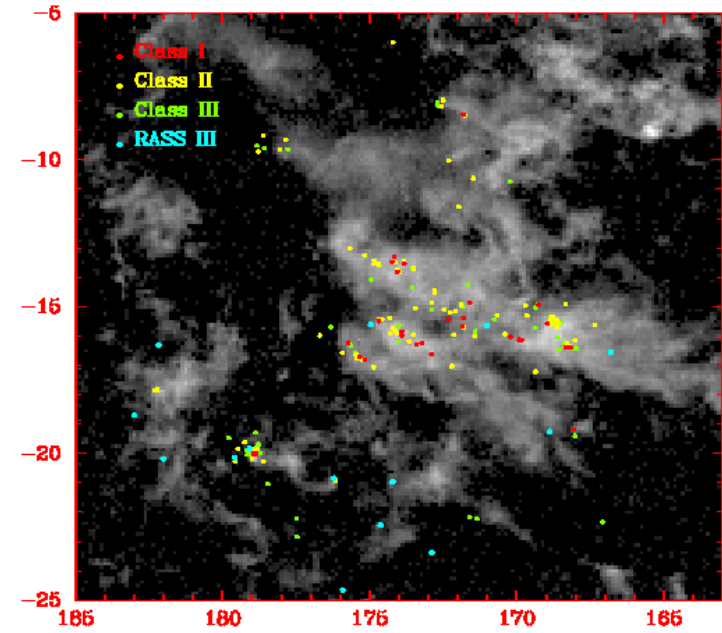
Dynamische Zeitskala:

$2-3 \cdot 10^7$  Jahre

## Welcher Prozess führt zur Sternentstehung?

- **Turbulenz** und **irreguläre Bewegungen** entstehen schon bei der Bildung der Molekülwolken in **konvergierenden HI Strömungen**

Taurus



(Hartmann 2000, 2001)

- Supernovae treiben **große HI Strömungen** mit Ausdehnungen von **100-150 pc** und typischen Geschwindigkeiten von **5 - 10 km/s**
- Wenn diese Ströme **kollidieren** bilden sich große **Gaswolken** auf Zeitskalen von:

$$\tau_{\text{Wolke}} = \frac{M_{\text{GMC}}}{\rho_{\text{HI}} v R^2} \approx \frac{5 \cdot 10^5 M_{\odot}}{5 \cdot 10^{-24} \text{ g cm}^{-3} \cdot 10 \text{ km/s} \cdot (100 \text{ pc})^2} \approx 2 - 3 \cdot 10^7 \text{ yrs}$$

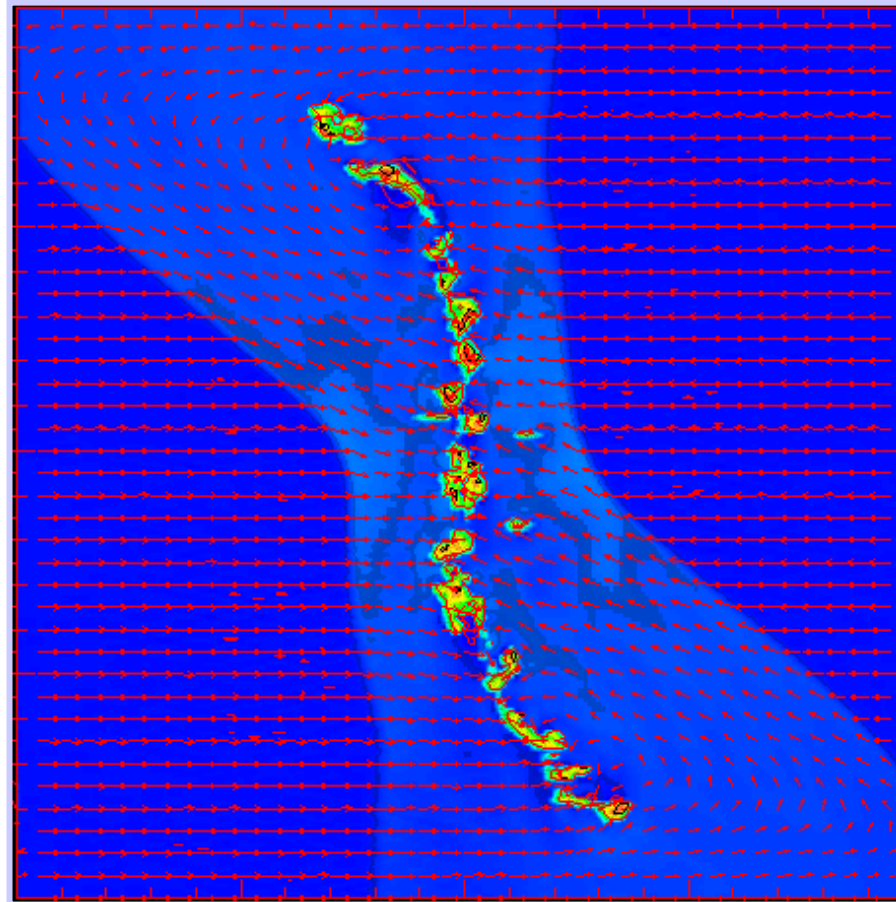
- Da der **Altersunterschied der jungen Sterne** einen Faktor **10** kleiner ist, muss Sternentstehung zunächst durch Turbulenz **verhindert** werden.
- Bedingung für **H<sub>2</sub> Bildung**:  $\Sigma \approx 1 - 2 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-2}$

➔ **Molekularer Gas bildet sich nach einer Zeit von**

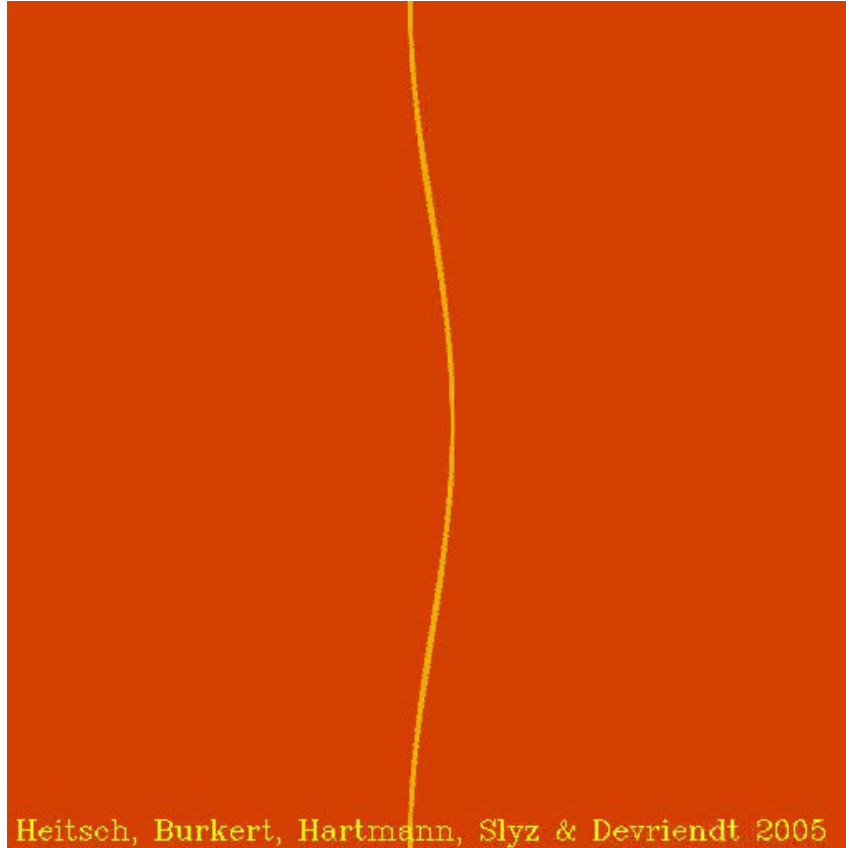
$$\tau = \frac{\Sigma}{nv} \approx 2 \cdot 10^7 \text{ yrs} \approx \tau_{\text{Wolke}}$$



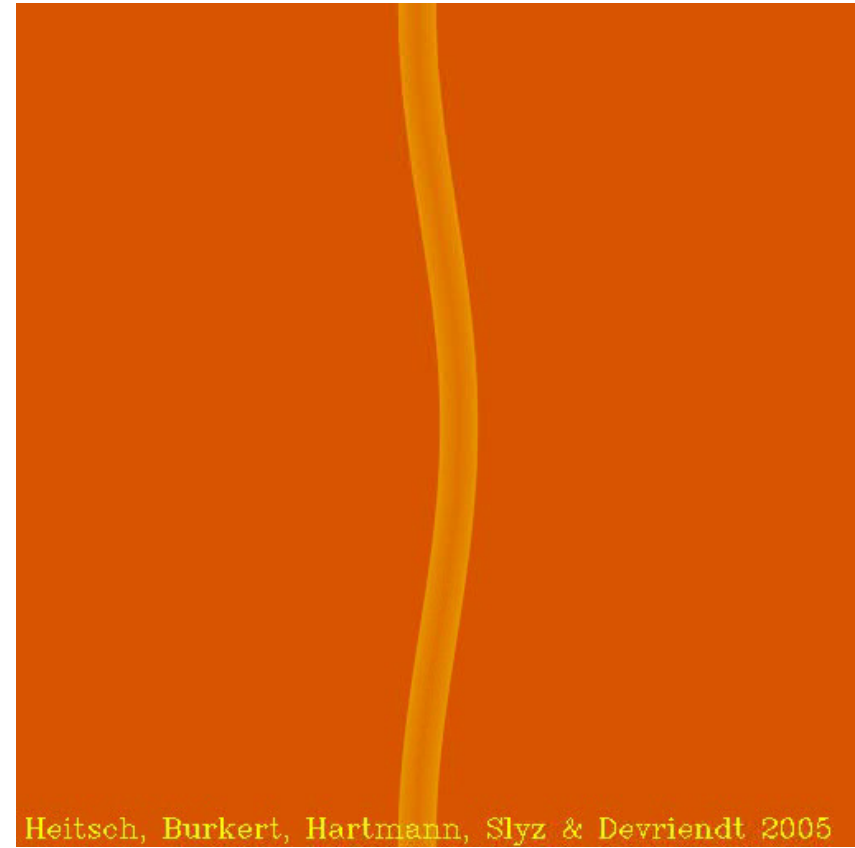
# Entstehung von Turbulenz in kollidierenden Strömungen

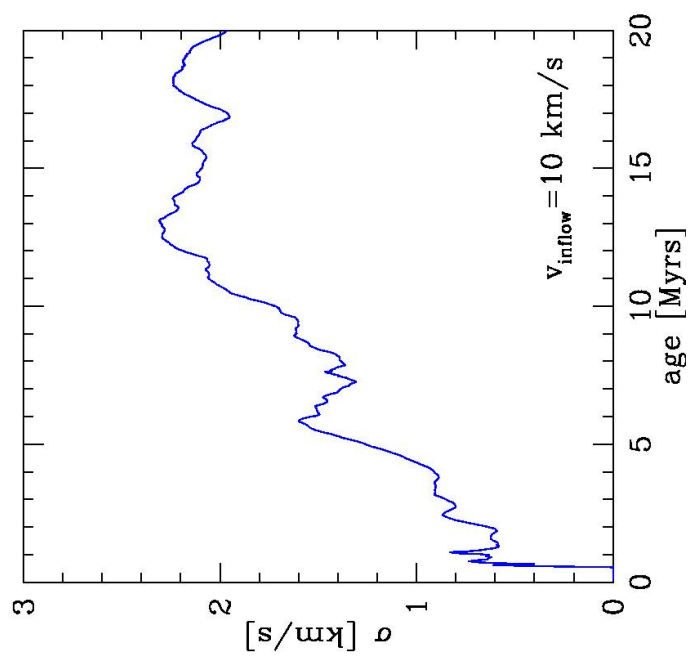
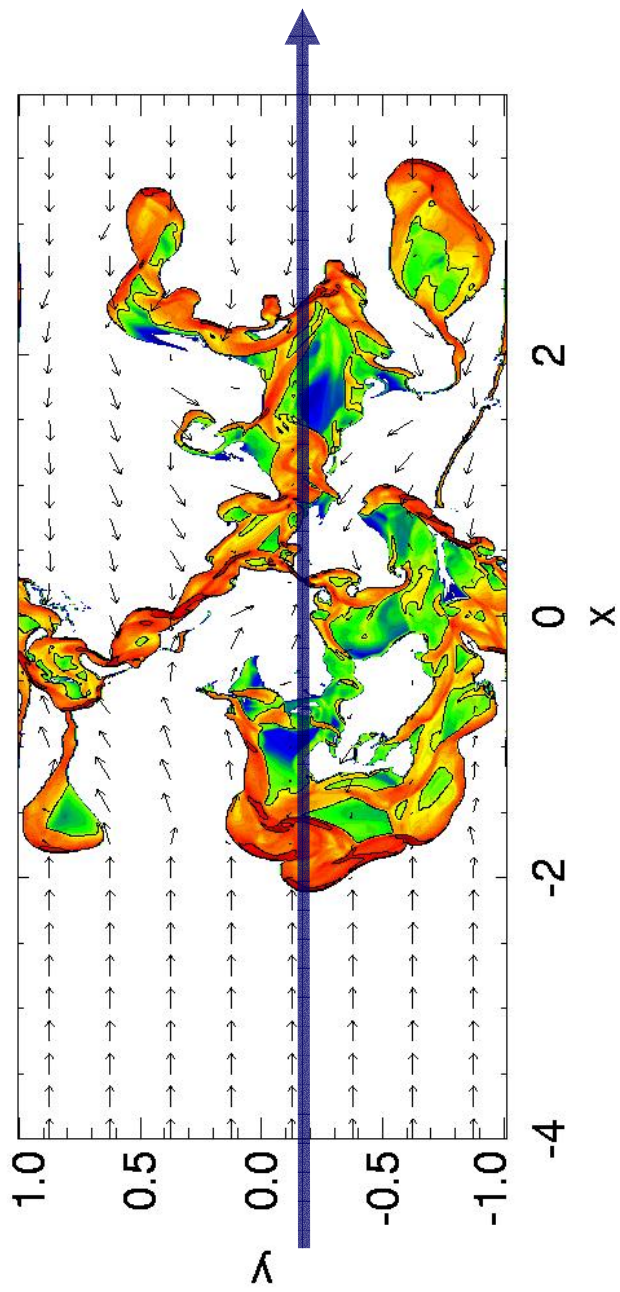


## Hohe Relativgeschwindigkeit



## Niedrige Relativgeschwindigkeit

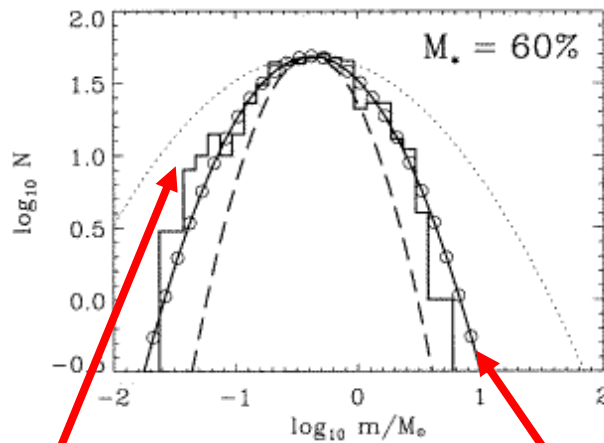




# Numerische Simulation der Fragmentation und Sternentstehung

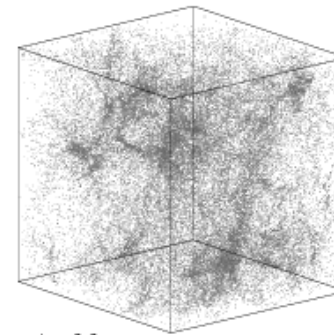
(Klessen & Burkert, 1998, 2000, 2001)

## Massenfunktion der Sterne

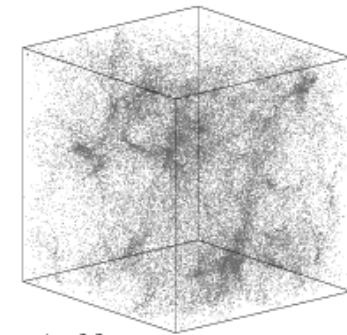


Simulation

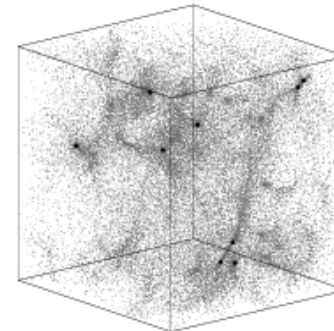
Beobachtung



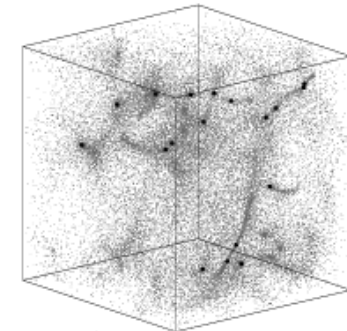
$t = 0.0$   
 $M_* = 0\%$



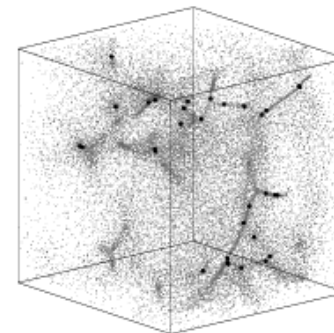
$t = 0.2$   
 $M_* = 0\%$



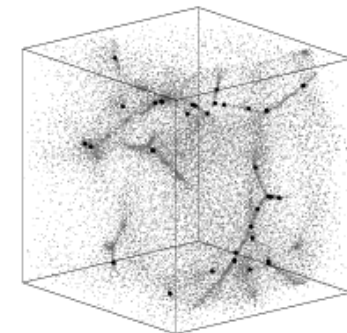
$t = 0.5$   
 $M_* = 5\%$



$t = 0.7$   
 $M_* = 10\%$



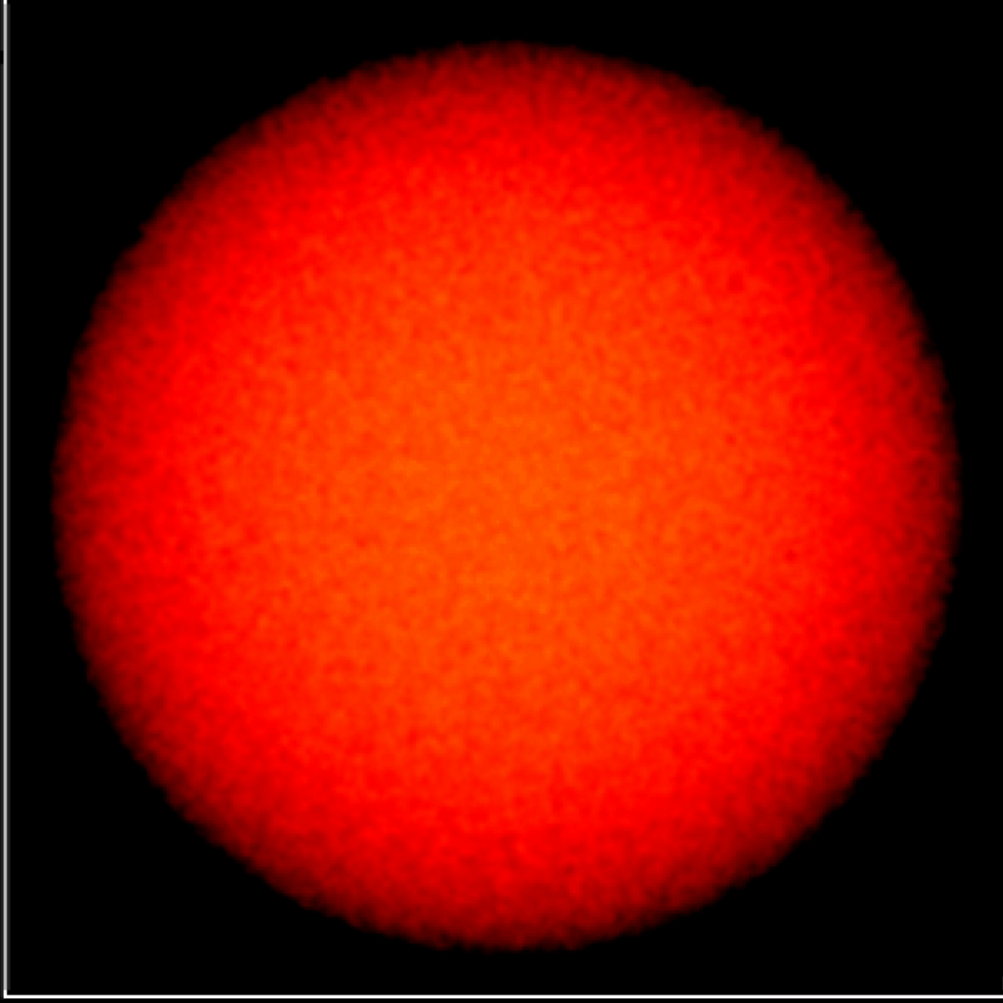
$t = 1.0$   
 $M_* = 20\%$



$t = 1.2$   
 $M_* = 30\%$

Dimensions: 82500. AU

Time: 0. yr

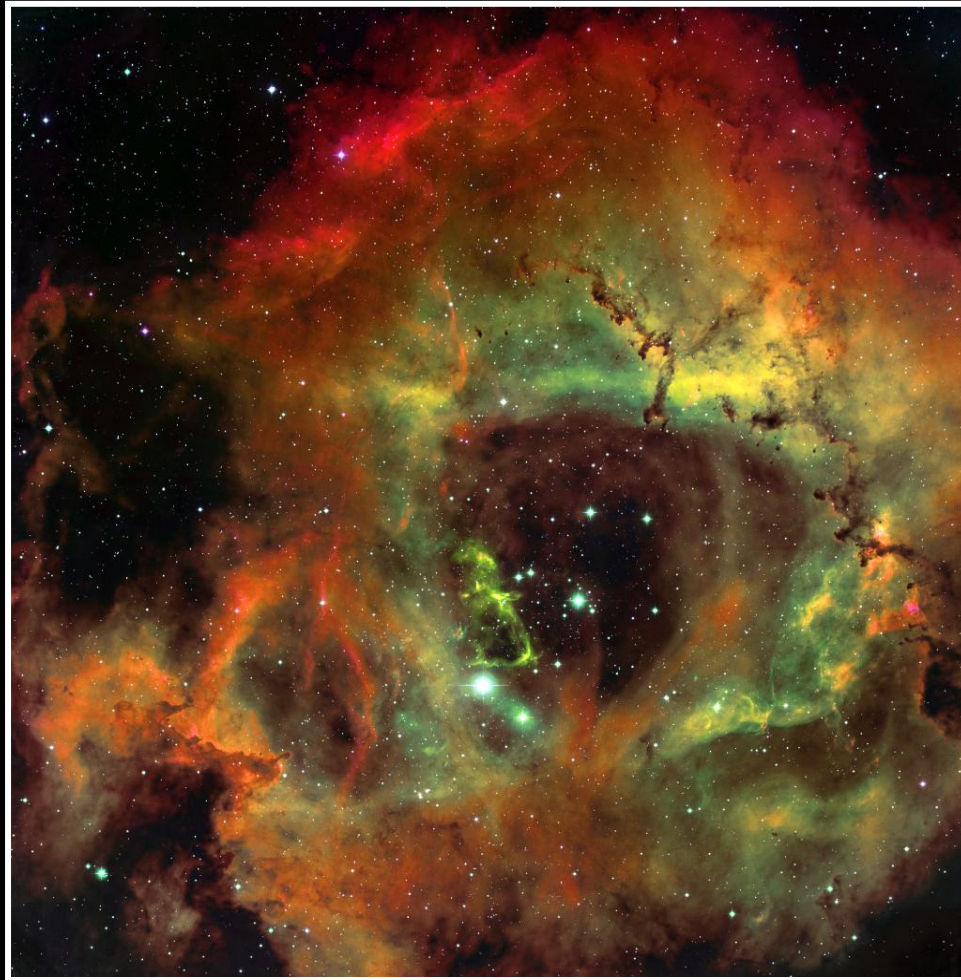


-1.4 -1.2 -1.0 -0.8 -0.6 -0.4 -0.2 0.0

Log Column Density [g/cm<sup>2</sup>]

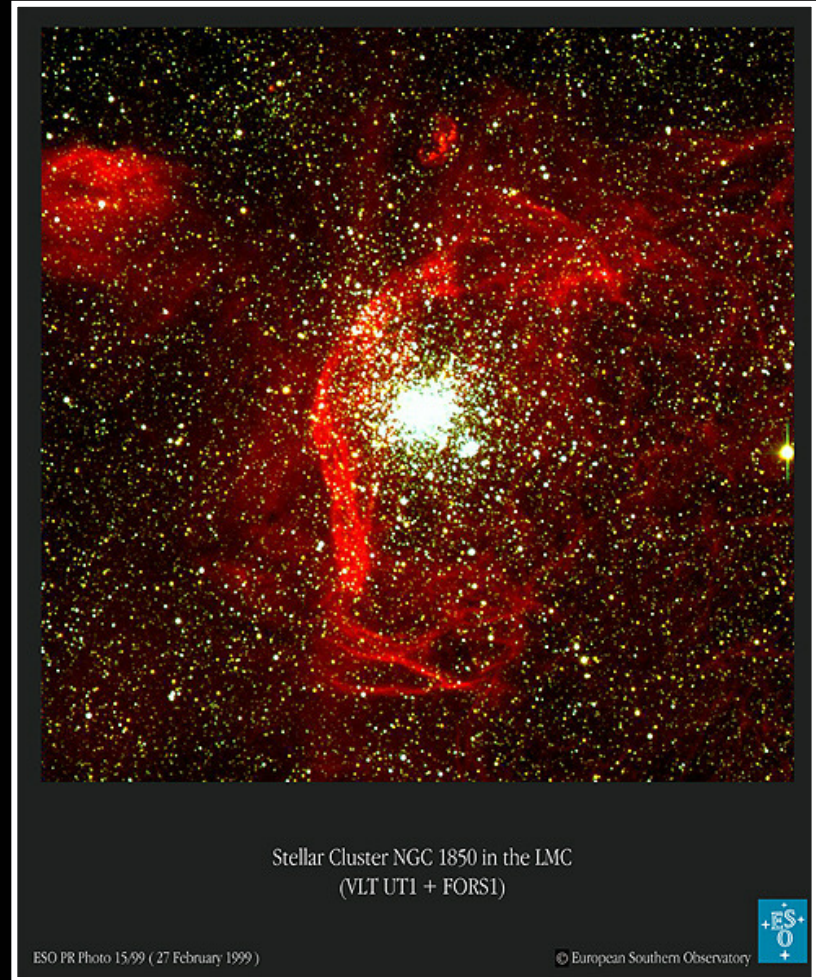
Matthew Bate

Rosette-Nebula



(Rector et al.)

NGC 1850



Stellar Cluster NGC 1850 in the LMC  
(VLT UT1 + FORS1)

ESO PR Photo 15/99 (27 February 1999)

© European Southern Observatory

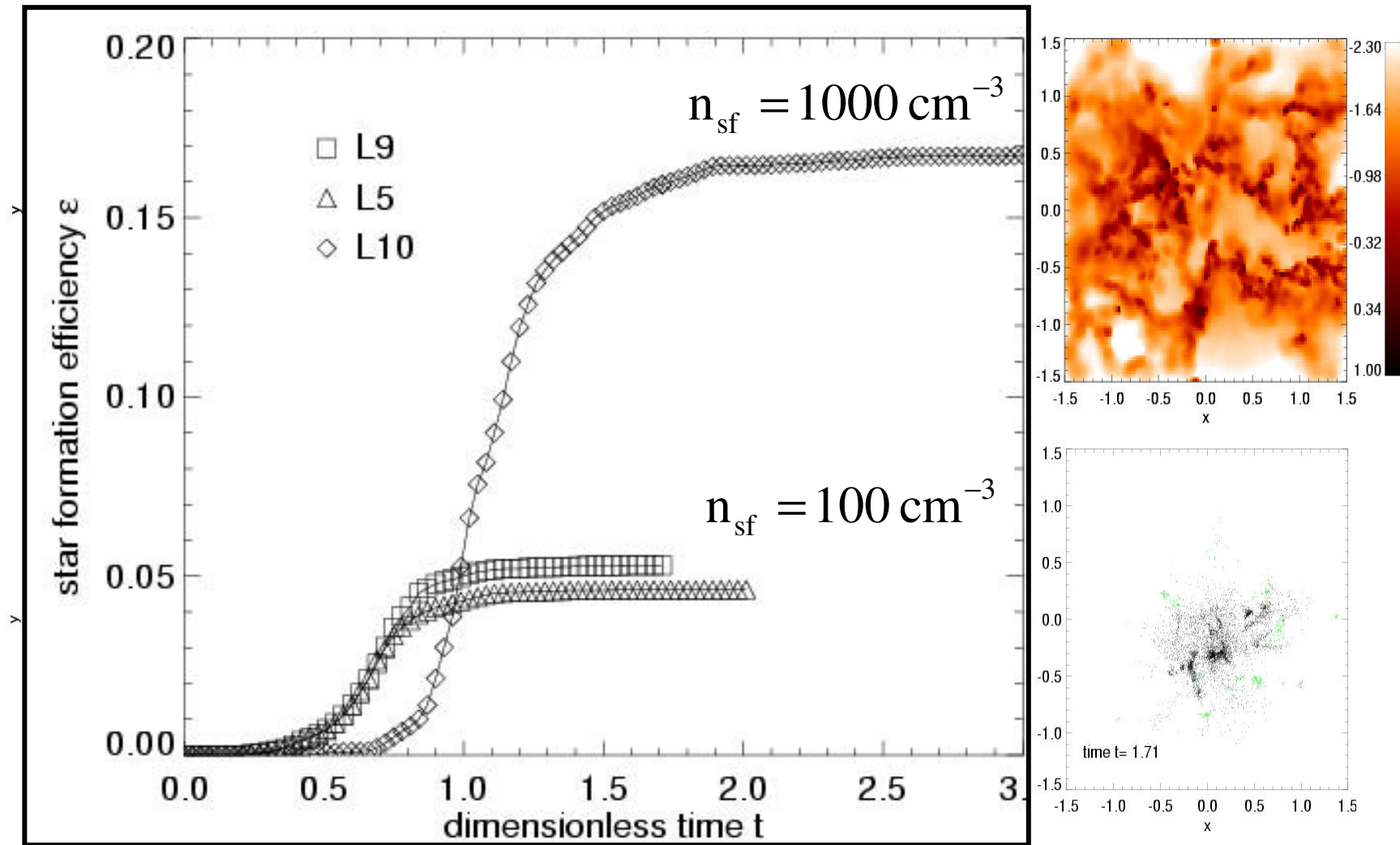


(ESO PR Photo 15/99)

# Numerische Simulation der Entstehung eines Sternhaufens

Gas

$$n_{sf} = 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

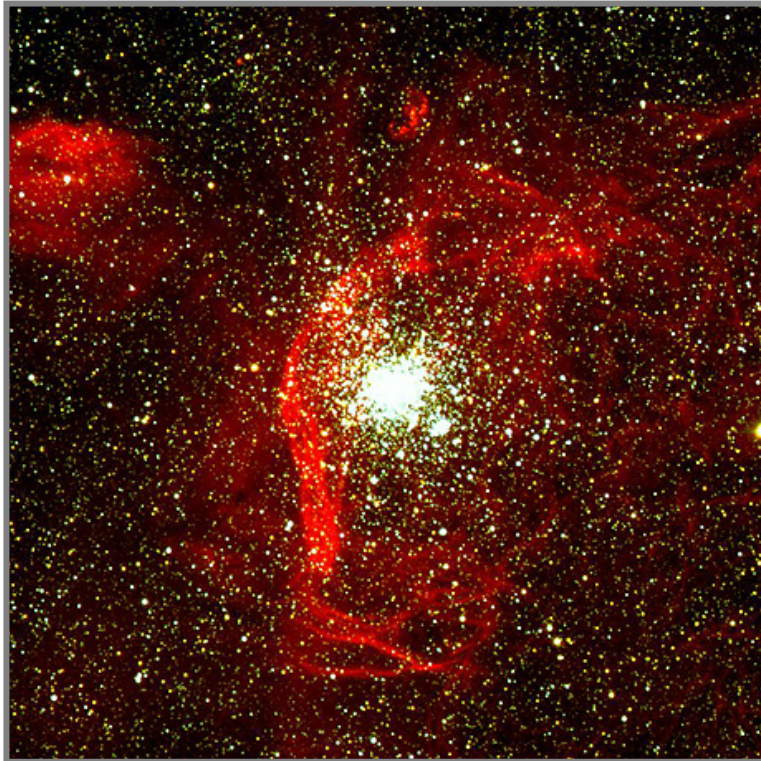


Sterne

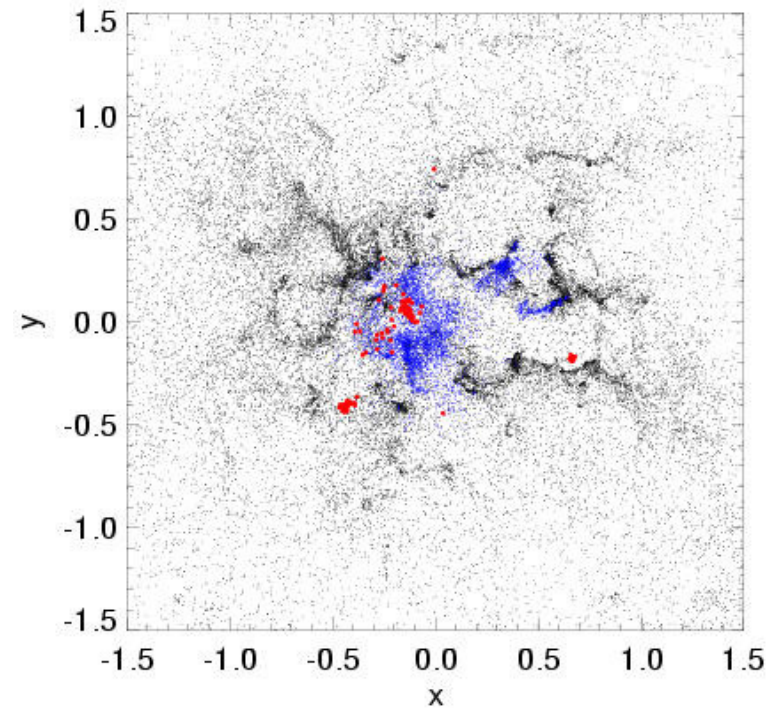
(Geyer & Burkert, 2003)

## Struktur des jungen Sternhaufens

NGC 1850



Numerische Simulation



blau: gebundene Sterne

rot: ungebundene Sterne

schwarz: Gas



# Relaxationsphase des Sternhaufens

