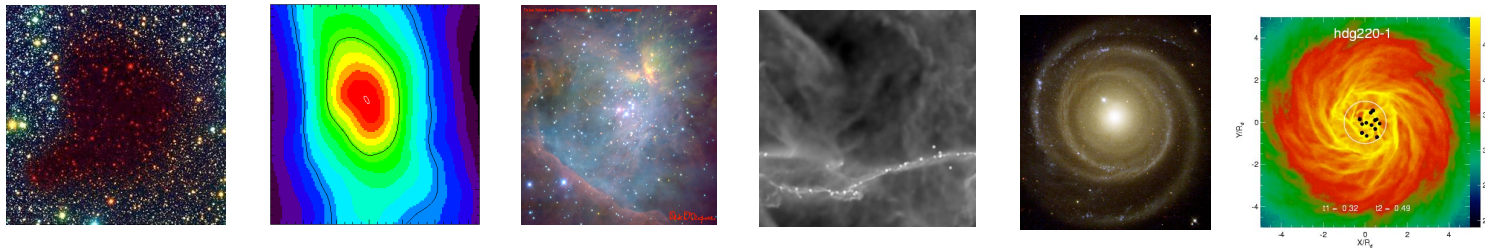


# PizzaNacht: Sternentstehung



**Ralf Klessen**

Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg  
Institut für Theoretische Astrophysik



# Institut für Theoretische Astrophysik

- Professoren: Matthias Bartelmann, Ralf Klessen, Werner Tscharnuter
- ursprüngliches Uni-Institut
- Aktuelle Forschungsgebiete:
  - Planetenbildung
  - Sternentstehung, Galaxiendynamik
  - Kosmologie: Dunkle Materie, Dunkle Energie
  - numerische Astrophysik (Hydrodynamik, Strahlungstransport)



**Institut für Theoretische Astrophysik**



Uni > ZAH > ITA > Forschung >

## Arbeitsgruppe Sternentstehung

Wir beschäftigen uns mit verschiedenen Aspekten der Sternentstehung in der Milchstraße und im frühen Universum. Wir untersuchen interstellare Turbulenz und die Entstehung und Entwicklung von Galaktischen Gaswolken. Und versuchen die dynamische Entwicklung der Milchstraße und ihrer Satellitengalaxien zu verstehen. Da unsere Arbeit sehr stark numerisch geprägt ist, beschäftigen wir uns auch mit der Entwicklung und Verbesserung numerischer Algorithmen.

### Arbeitsgruppe

**i** Aktuelles

**F** Forschung

**A** Lehre

**V** Veröffentlichungen

**O** Offene Stellen

**I** Internes

**IT** ITA Startseite

**C** Center for Astronomy

### Gruppenmitglieder

Leitung:

Emmy-Noether

Nachwuchsgruppenleiter:

Postdocs:

Doktoranden:

Diplomanden:

Ralf Klessen

Robi Banerjee

Ingo Berentzen

Paul C. Clark

Simon Glover

Stefan Schmeja

Christoph Federrath

Philipp Girichidis

Thomas Greif

Milica Milosavljevic

Thomas Peters

Dominik Schleicher

Bernd Vökl

Julien Fieger

Susanne Horn

Hendrik Lönngren

### Forschungsthemen

Sternentstehung, Interstellare Turbulenz, Molekülwolkendynamik, Galaxiendynamik, Erste Sterne, Numerische Methoden

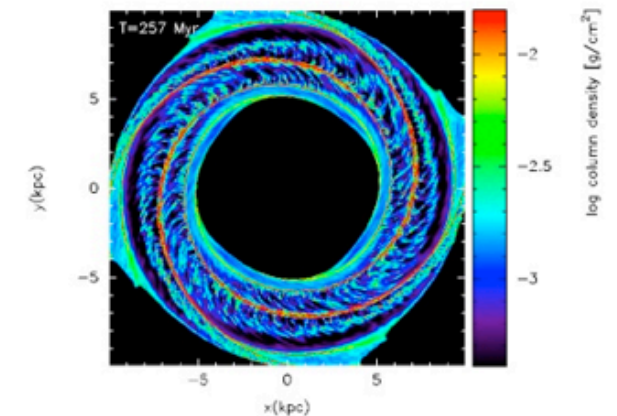
### Lehre

laufende und frühere Vorlesungen und Seminare

### Unser GPU-Cluster

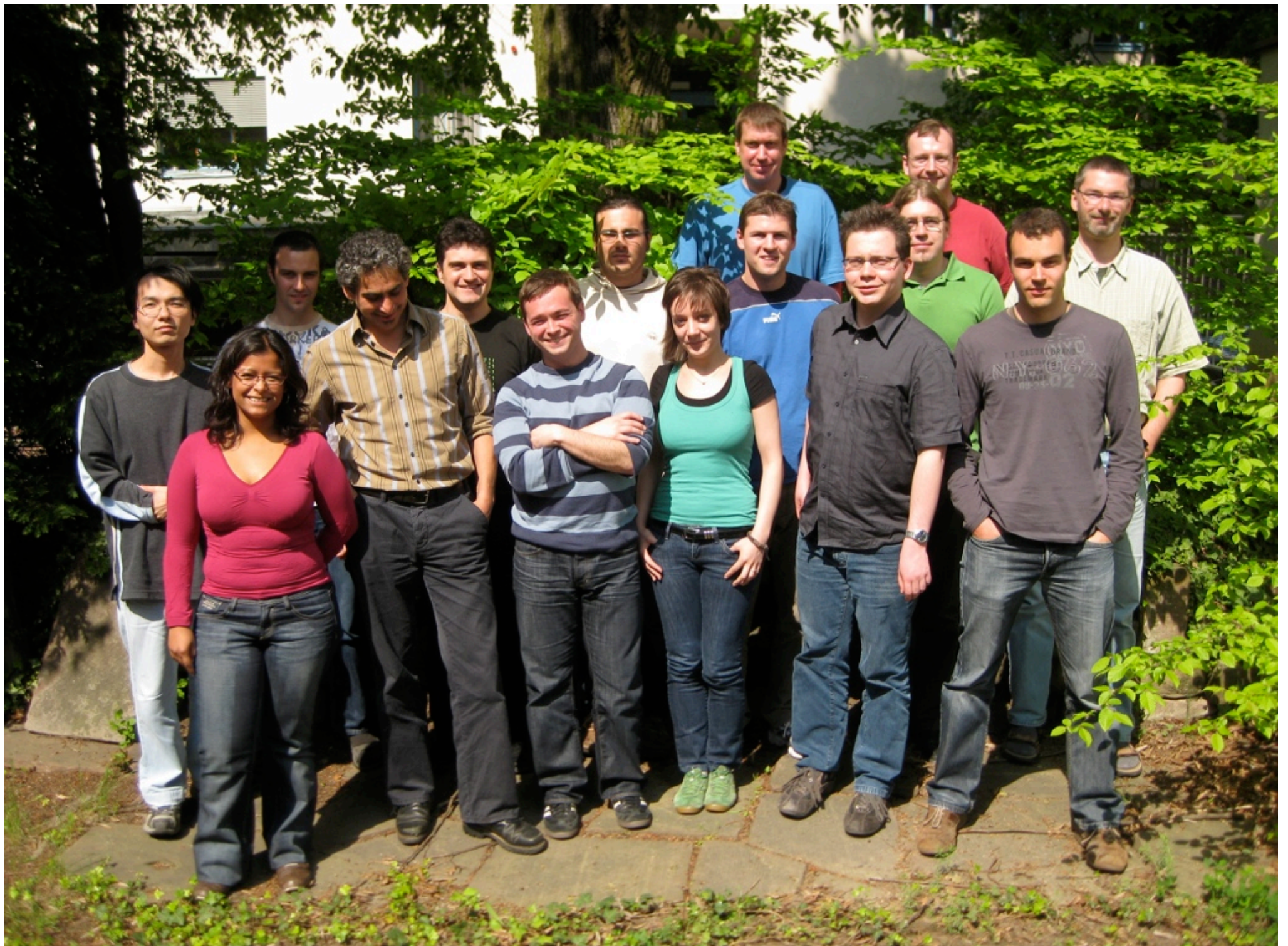
Kolob

### Bild des Monats: Bildung von Molekülwolken in der galaktischen Scheibe.



Für weitere Informationen klicken Sie das Bild an.



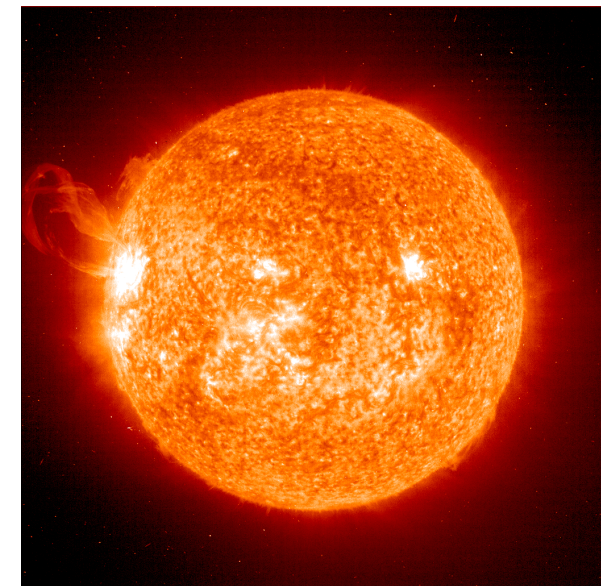
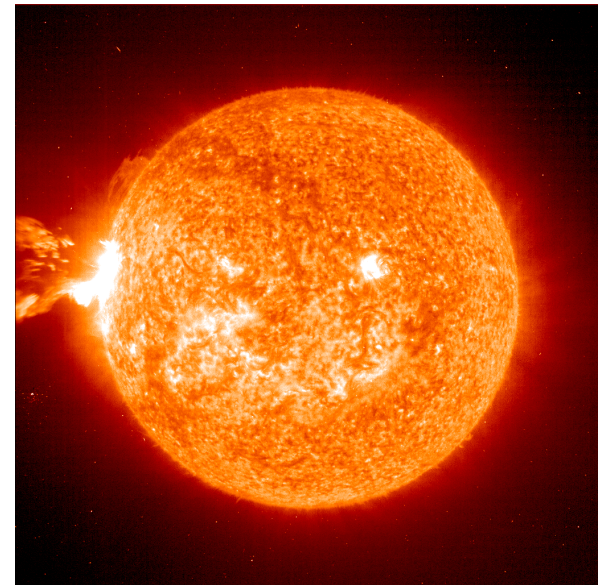
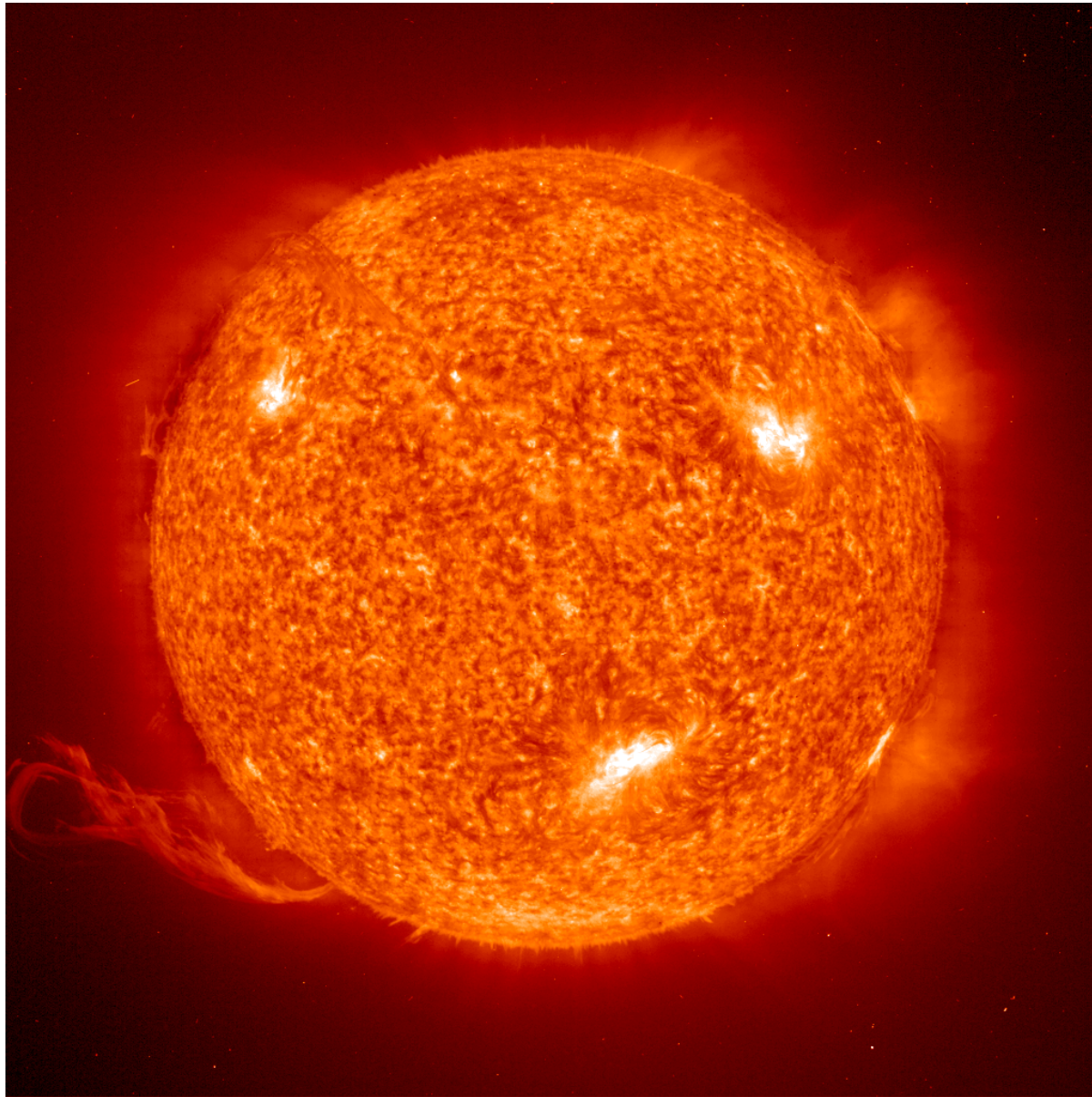


# Sternentstehung

- Early Universe (reionization, 21 cm line, optical depth)
- Dark Stars ...
- First Stars ...
- Second Generation of Stars ...
- Formation of First Galaxies ...
- Star Formation in the Milky Way
- Formation and Evolution of Stellar Clusters
- Formation and Evolution of Star Forming Interstellar Gas Cloud
- Protostellar Collapse: formation of individual stars and their planetary systems

# Arbeitsgruppe

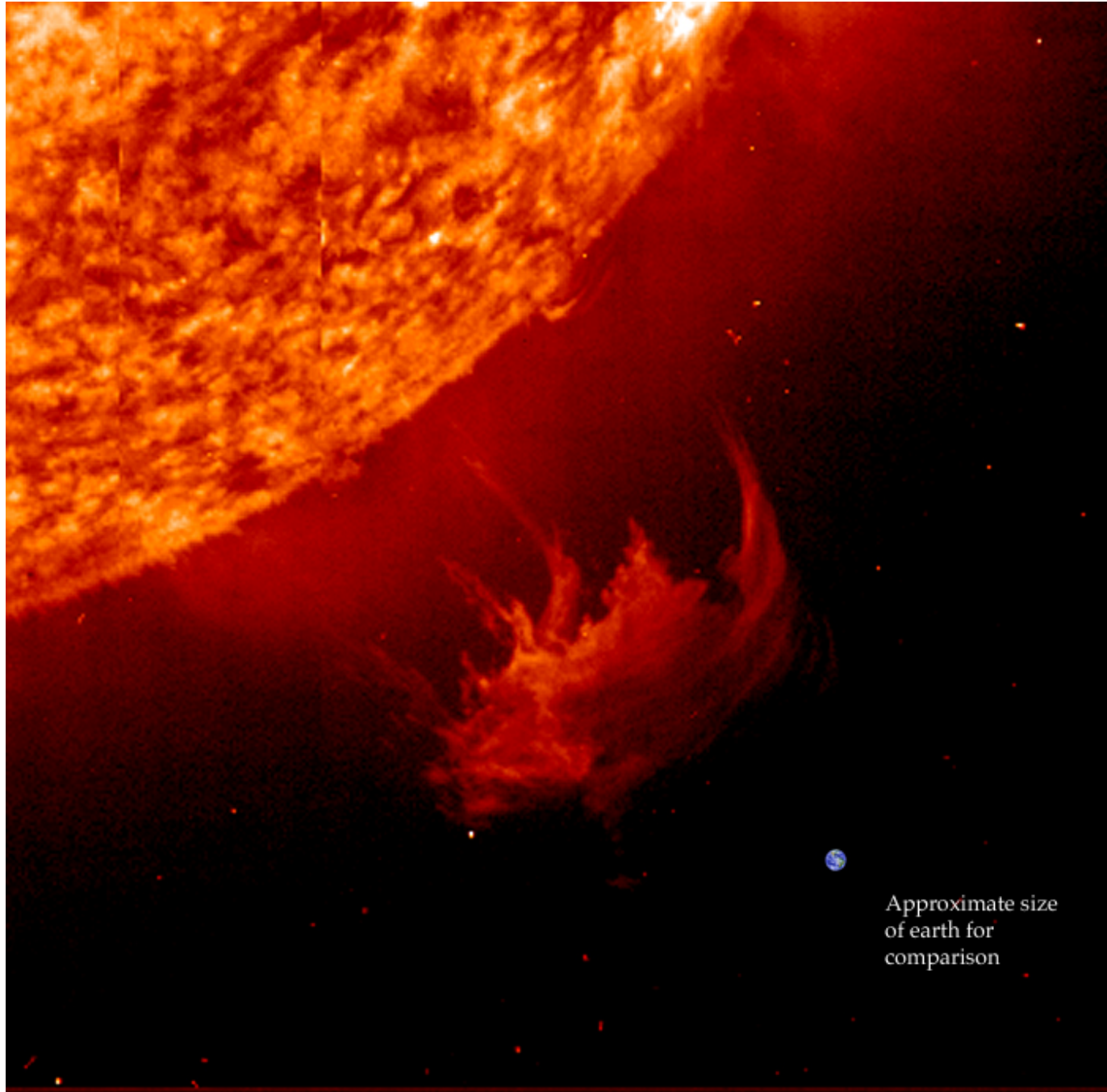
- 5 postdocs: Robi Banerjee, Ingo Berentzen, Paul Clark, Simon Glover, Stefan Schmeja
- 7 Doktoranden: Christoph Federrath, Philipp Girichidis, Thomas Greif, Milica Milosavljevic, Thomas Peters, Dominik Schleicher, Bernd Völkl
- 2 Diplomanden: Julien Fieger, Hendrik Lönngren
- 4 Miniforscher (in den letzten Ferien)



Unsere Sonne in verschiedenen Aktivitätsphasen

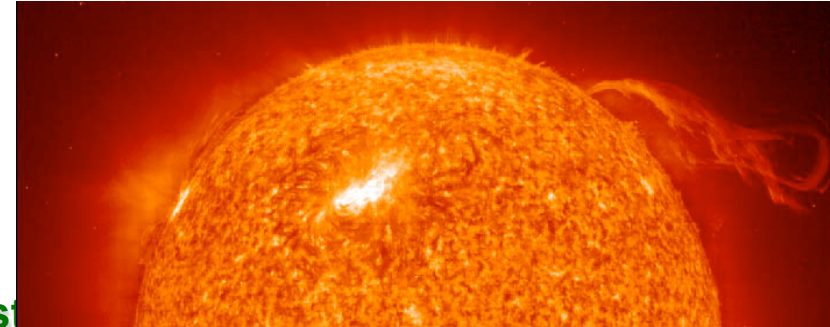


# Größenvergleich: Sonne - Erde



# Sterne: die Sonne

Eigenschaften der Sterne  
(Stellare Zustandsgrößen):



Unsere Sonne ☉ als Referenzstern

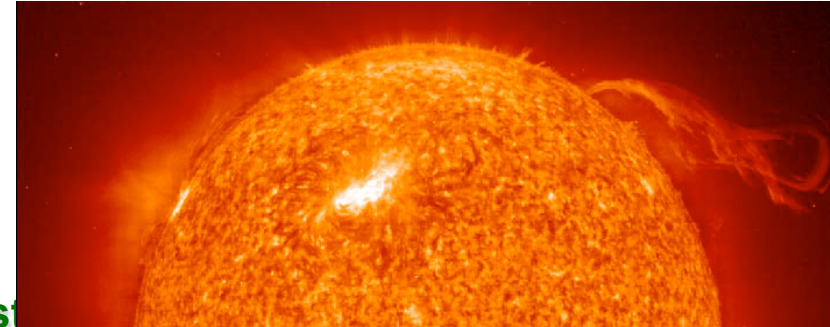
Radius  $R_{\odot}$  696 000 km  
Masse  $M_{\odot}$   $1,989 \times 10^{30}$  kg  
Leuchtkraft  $L_{\odot}$   $3,86 \times 10^{26}$  W  
effektive Temperatur  $T_{\text{eff}}$  5800 K (Oberfläche)  
Zentraltemperatur  $T_{\text{zentral}}$   $15 \times 10^6$  K  
Alter  $t_{\odot}$   $4,5 \times 10^9$  a

auf der Erde:  
Solarkonstante  
 $1.37 \text{ kW/m}^2$

Spektraltyp G2  
Leuchtkraftklasse V  
chemische Zusammensetzung (Massenanteil)  
73% Wasserstoff X  
25% Helium Y  
2% Metalle Z

# Sterne: die Sonne

Eigenschaften der Sterne  
(Stellare Zustandsgrößen):



Unsere Sonne  $\odot$  als Referenzstern

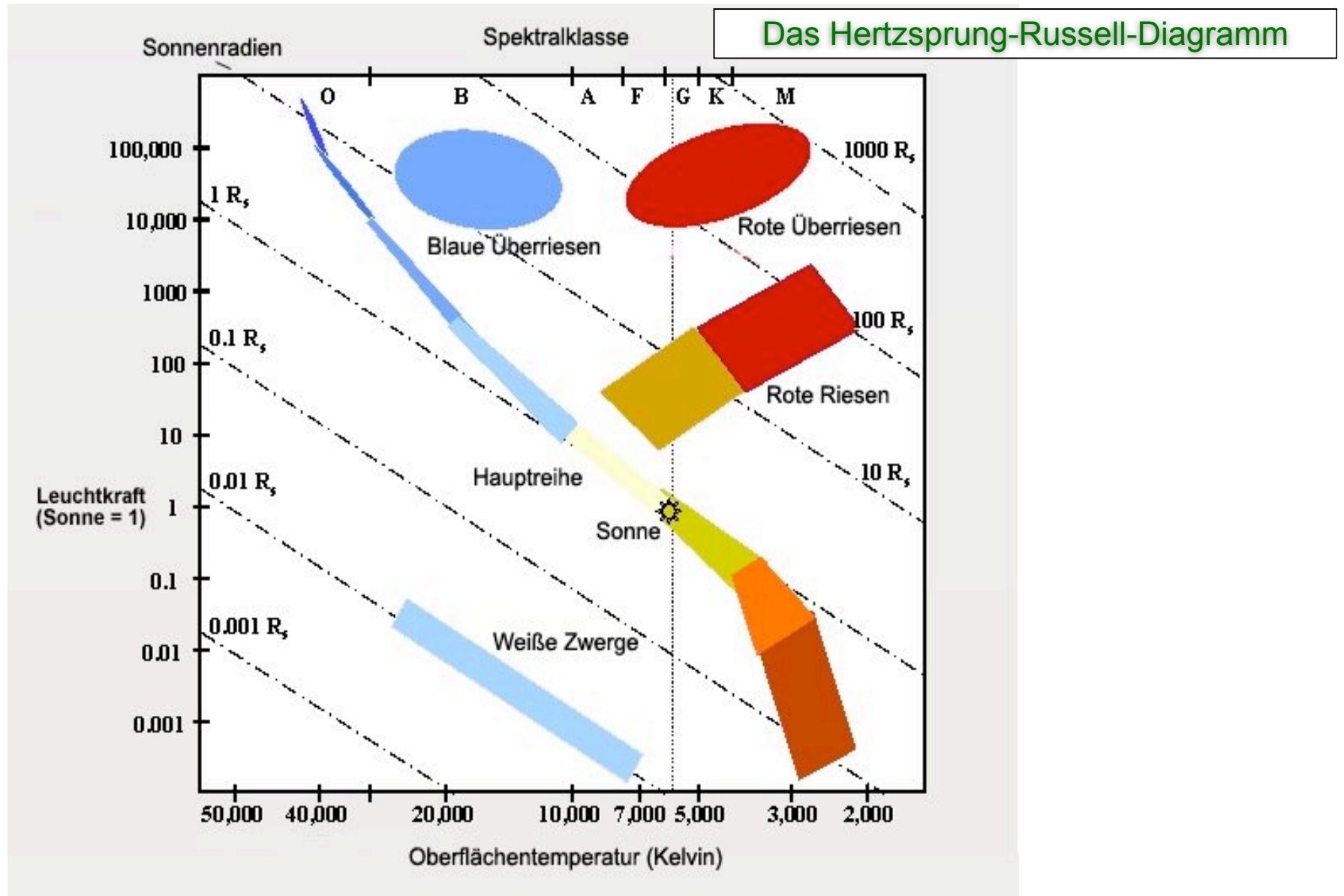
Radius $R_{\odot}$	$7 \times 10^{10}$ cm
Masse $M_{\odot}$	$2 \times 10^{33}$ g
Leuchtkraft $L_{\odot}$	$4 \times 10^{33}$ erg/s
effektive Temperatur $T_{\text{eff}}$	5800 K
Zentraltemperatur $T_{\text{zentral}}$	$15 \times 10^6$ K
Alter $t_{\odot}$	$1.7 \times 10^{17}$ s

in cgs Einheiten

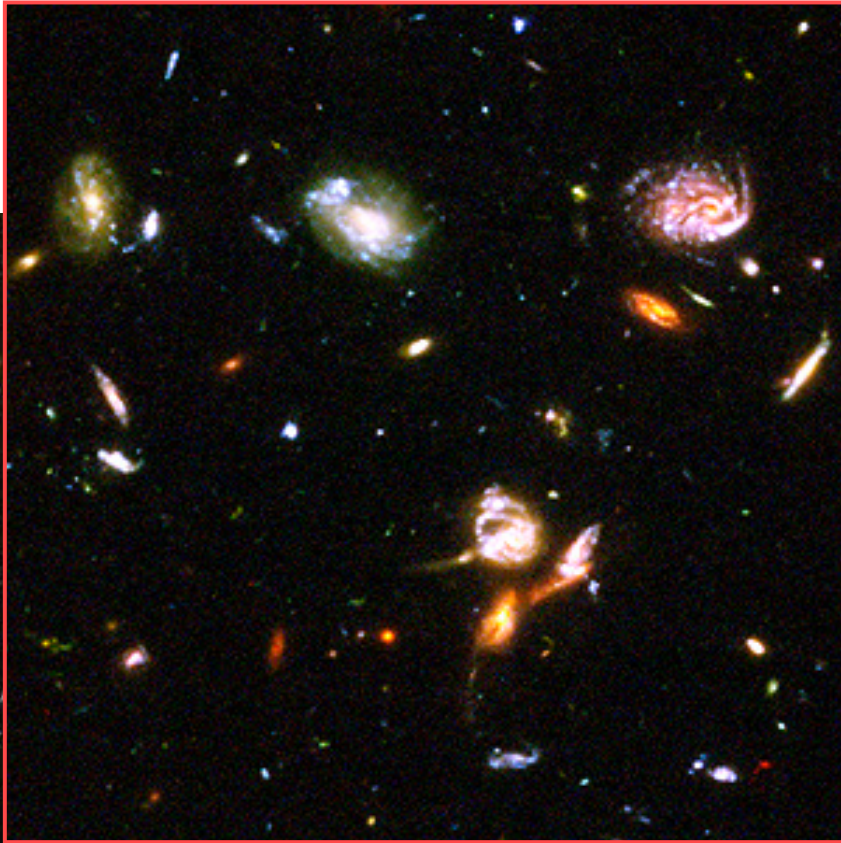
Spektraltyp G2  
Leuchtkraftklasse V  
chemische Zusammensetzung (Massenanteil)  
73% Wasserstoff X  
25% Helium Y  
2% Metalle Z

# Sterne: Einteilung

Helligkeit / Leuchtkraft



Farbe / Temperatur



ldung  
innt

n

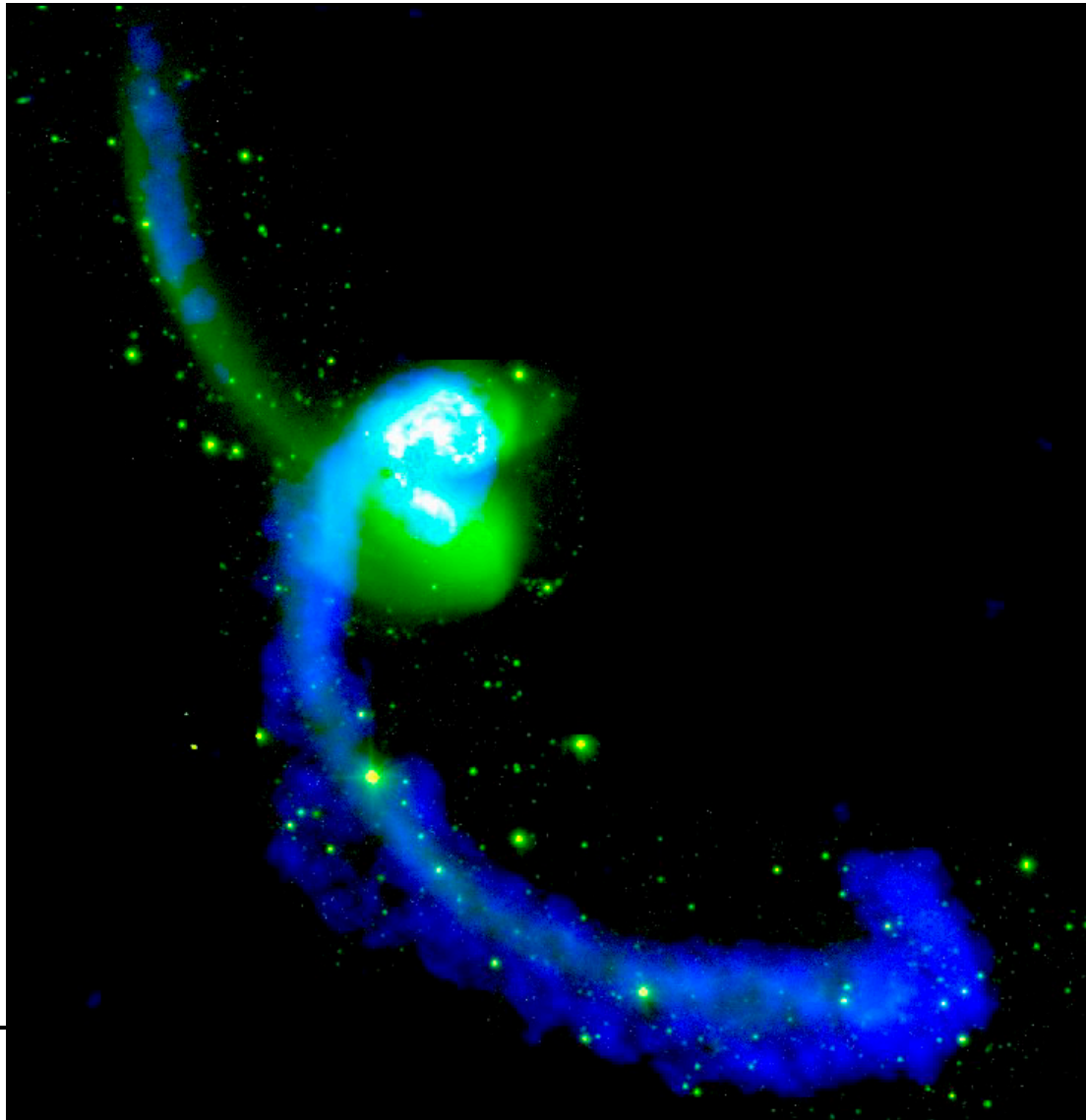
als 1Ga  
(Urknall)

Sterne  
entstehen  
in  
Galaxien  
und

Protogalaxie

(Ausschnitt aus dem Hubble Ultra-Deep Field, von HST Webseite)

# Sternentstehung in wechselwirkenden Galaxien



## Antennae

### Galaxie

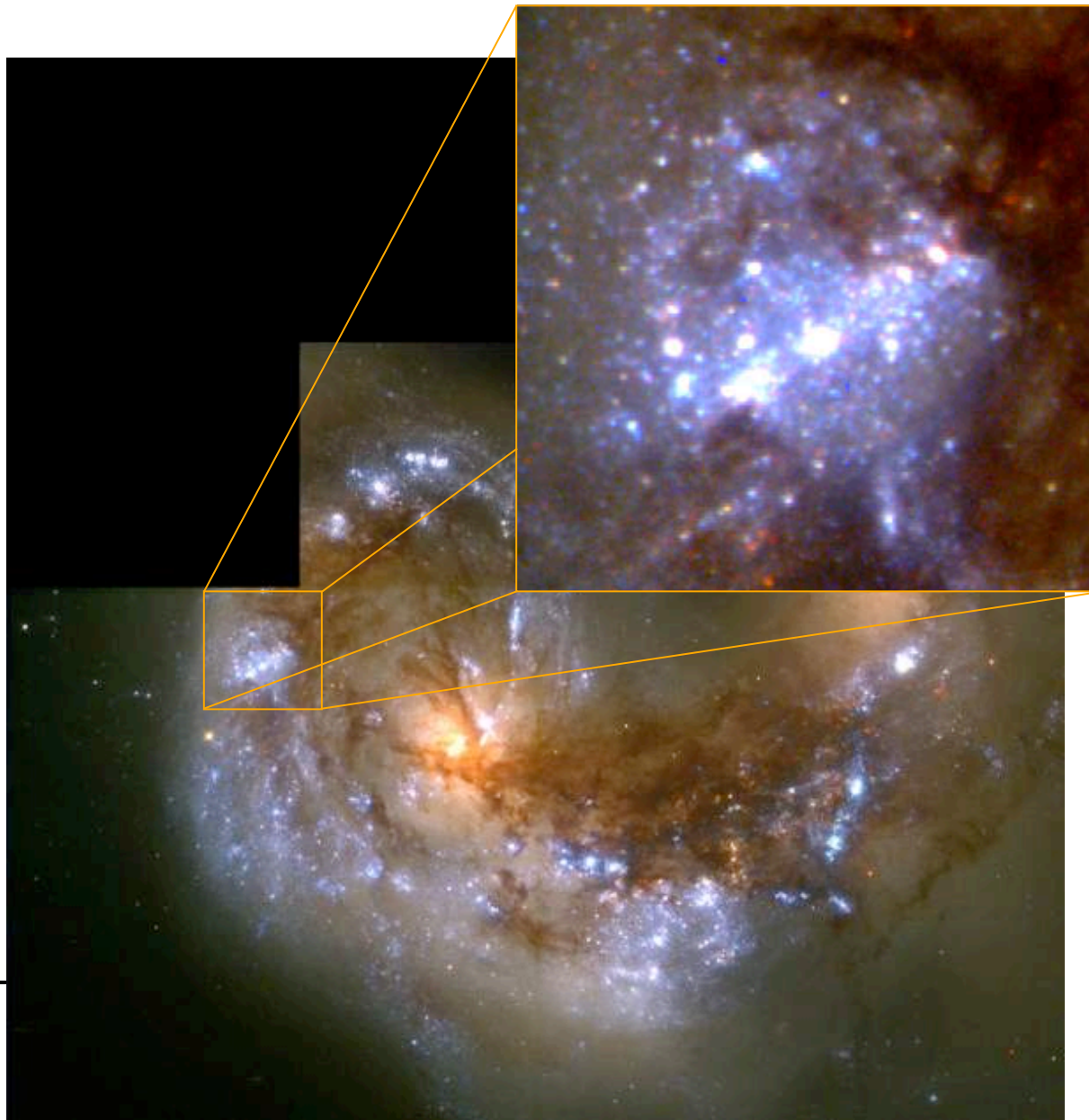
- NGC4038/39
- Entfernung:  
19.2Mpc
- vis. Magn: 11.2
- *optisch: weiß, grün*
- *radio: blau*

(Antennae Galaxie: Chandra Webpage)

# Sternentstehung in wechselwirkenden Galaxien

## Antennae Galaxie

- Burst von Sternentstehung in wechselwirkenden Galaxien (dh. in stark gestörten Systemen)
- Sternbildung in Gezeitenarmen
- Großskalige, gravitative Bewegungen bestimmen SE
- Sterne entstehen in "Knoten" (dh. in Superhaufen)



(HST: Whitmore & Schweizer 1997)

# Sternentstehung in "normalen" Galaxien:



(from the Hubble Heritage Team)

- Sternentstehung dauert bis *heute*

**NGC 4622.**

- Sternentstehung ist *immer* verbunden mit

**Wolken aus Gas und Staub.**

- Staub- und Gasbänder findet man *häufig* (aber nicht immer) in Verbindung mit Spiralarmen



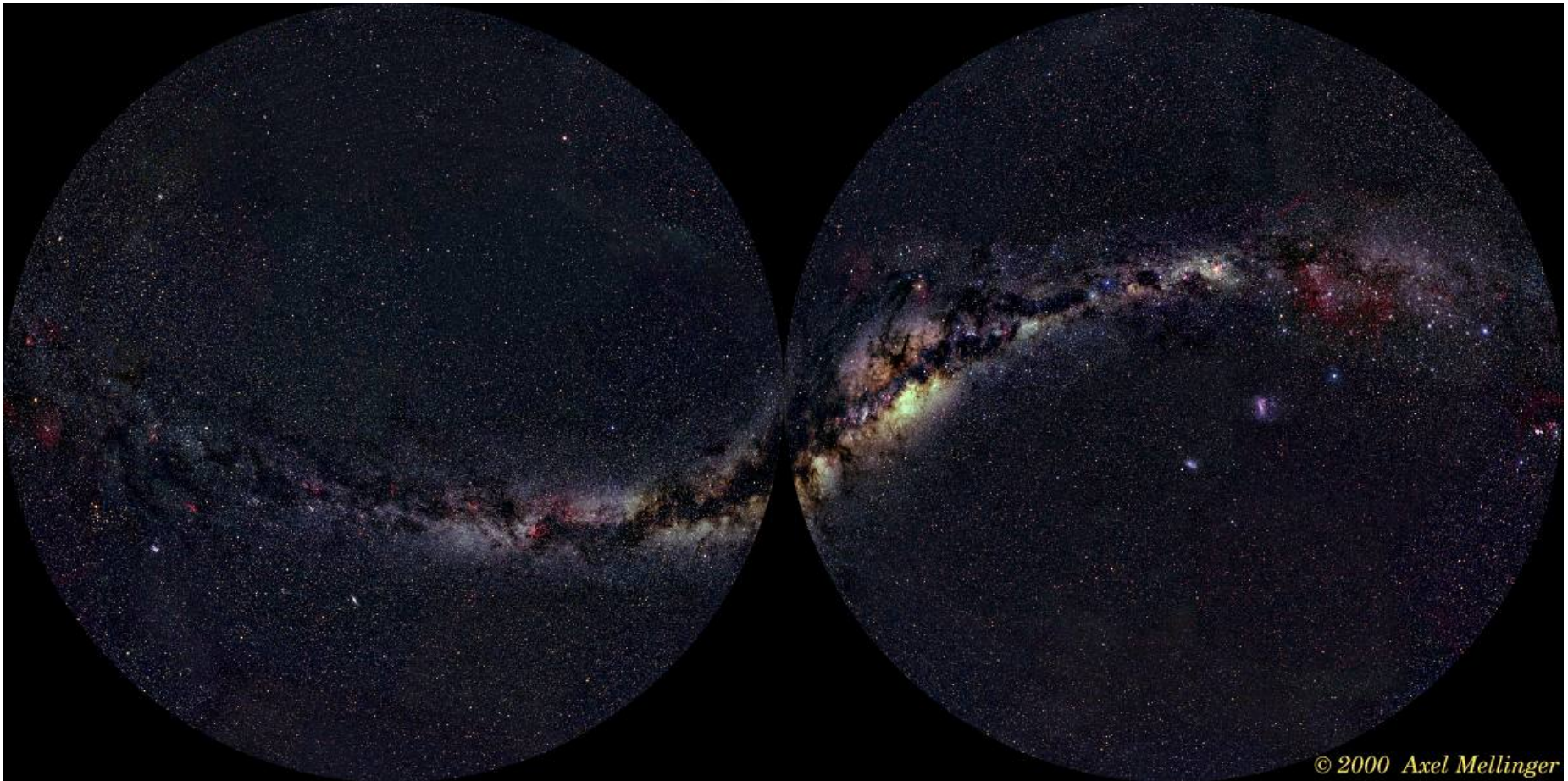


The Sombrero Galaxy — M104

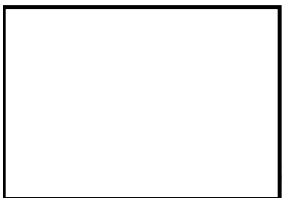


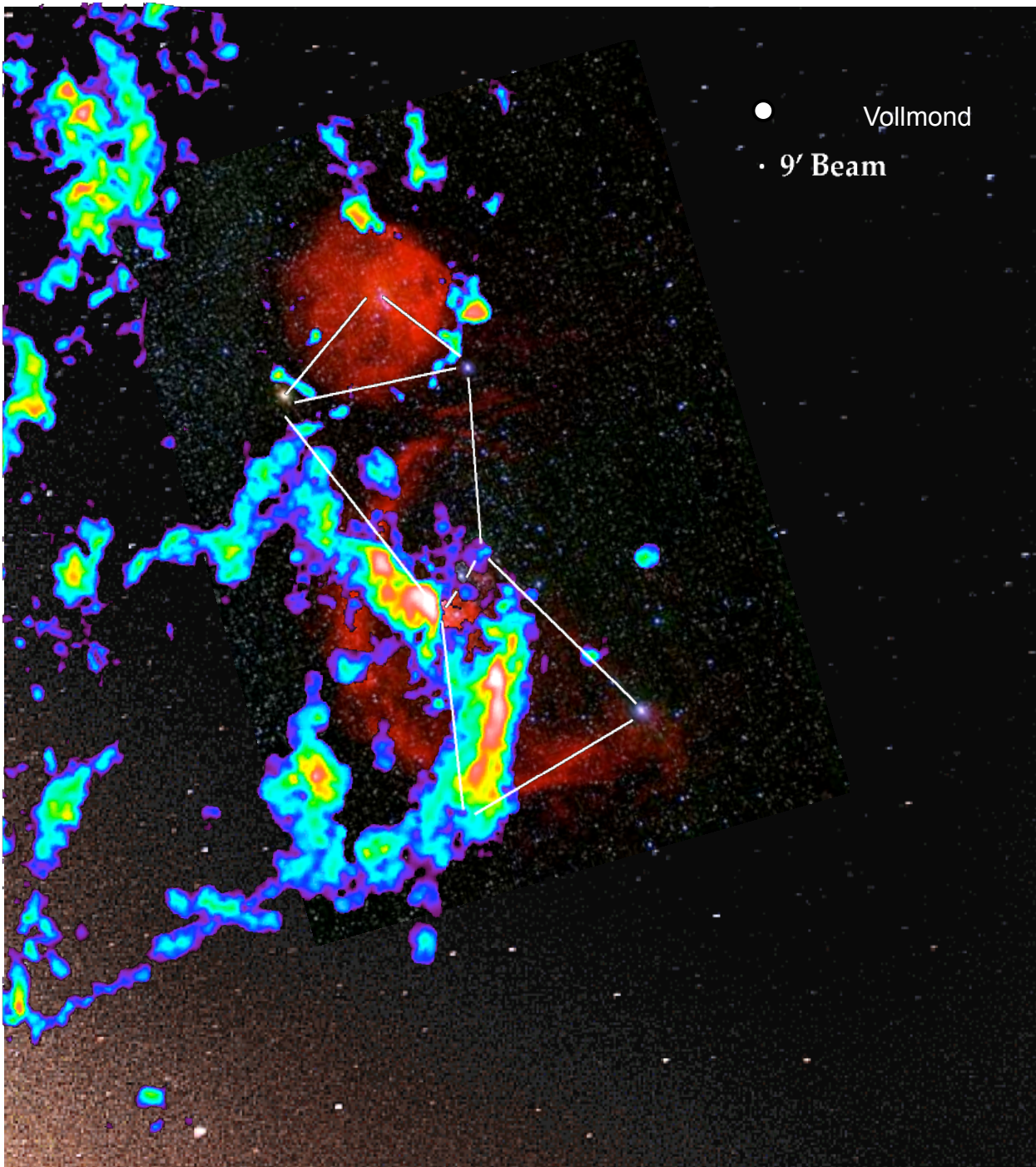
HUBBLESITE.org

# Sternentstehung in der Milchstraße



Am Nachthimmel sieht man **Dunkelwolken** und **Sterne**:  
Die hellsten Sterne sind *massereich* und daher *jung*.  
→ Sternentstehung ist wichtig um beobachtete Struktur  
der Milchstraße zu verstehen.





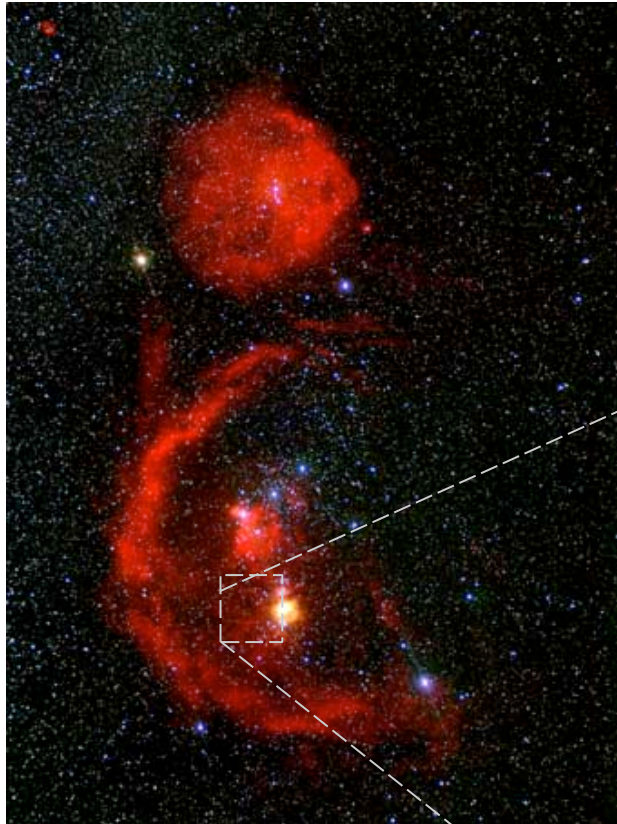
# Stern- entstehur in Orion

Wir sehen

- *Sterne* (im sichtbaren Licht)
- Atomaren Wasserstoff
- Molekularen Wasserstoff  
 $H_2$

(Radiostrahlung von Tracermolekül CO *farbcodiert*)

# Lokales SE Gebiet: Trapezhaufen in Orion



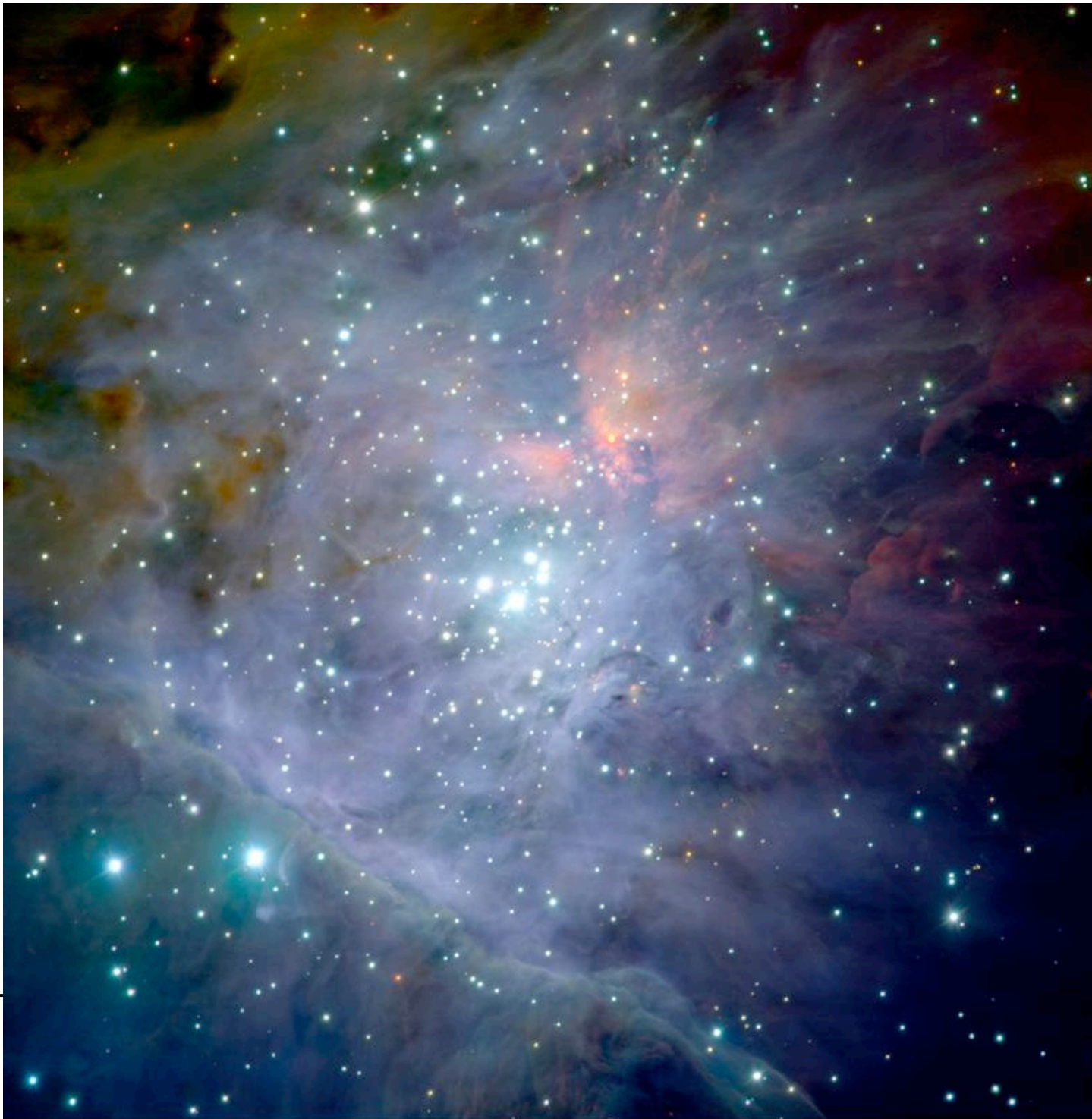
Sternbild Orion

Die Orionmolekülwolke ist die Geburtsstätte mehrerer junger Sternhaufen.

Der Trapezhaufen ist noch "eingebettet" und nur im IR Wellenbereich sichtbar. Der Haufen besteht aus ~2000 jungen Sternen.



Trapezhaufen



## Trapez- haufen (Detail)

- Sterne ent-  
stehen in
- **Haufen**
- Sterne ent-  
stehen in
- **Rückkopp-  
wolken  
lungseffekt**

e

sind

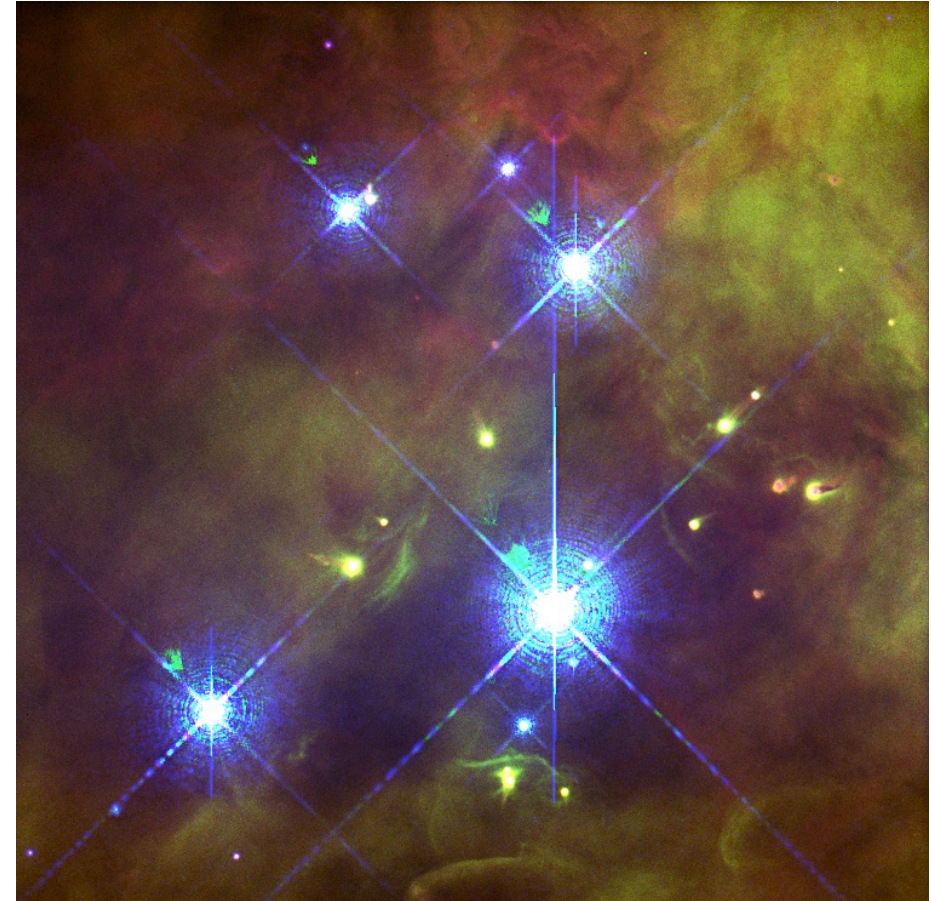
(Mehrfarbenaufnahme  
in J,H,K; McCloughreen,  
VLT, Paranal, Chile)

wichtig

# Trapezhaufen: Zentralgebiet



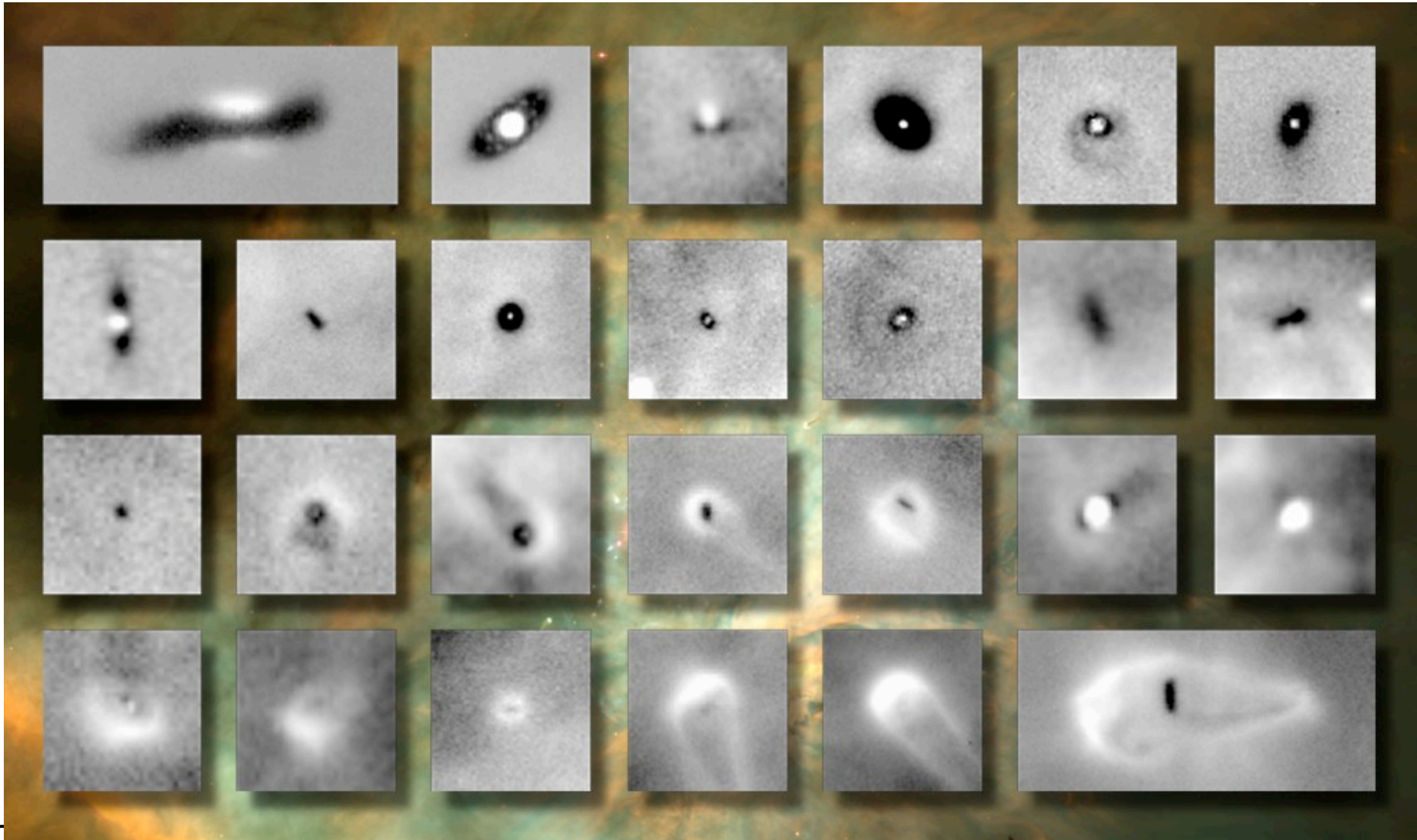
Der Großteil der ionisierenden Strahlung  
kommt vom Zentralstern **Theta 1C Orionis**



**Proplyds:** Verdampfende ``protoplanetare`` Scheiben  
um junge massearme Protosterne

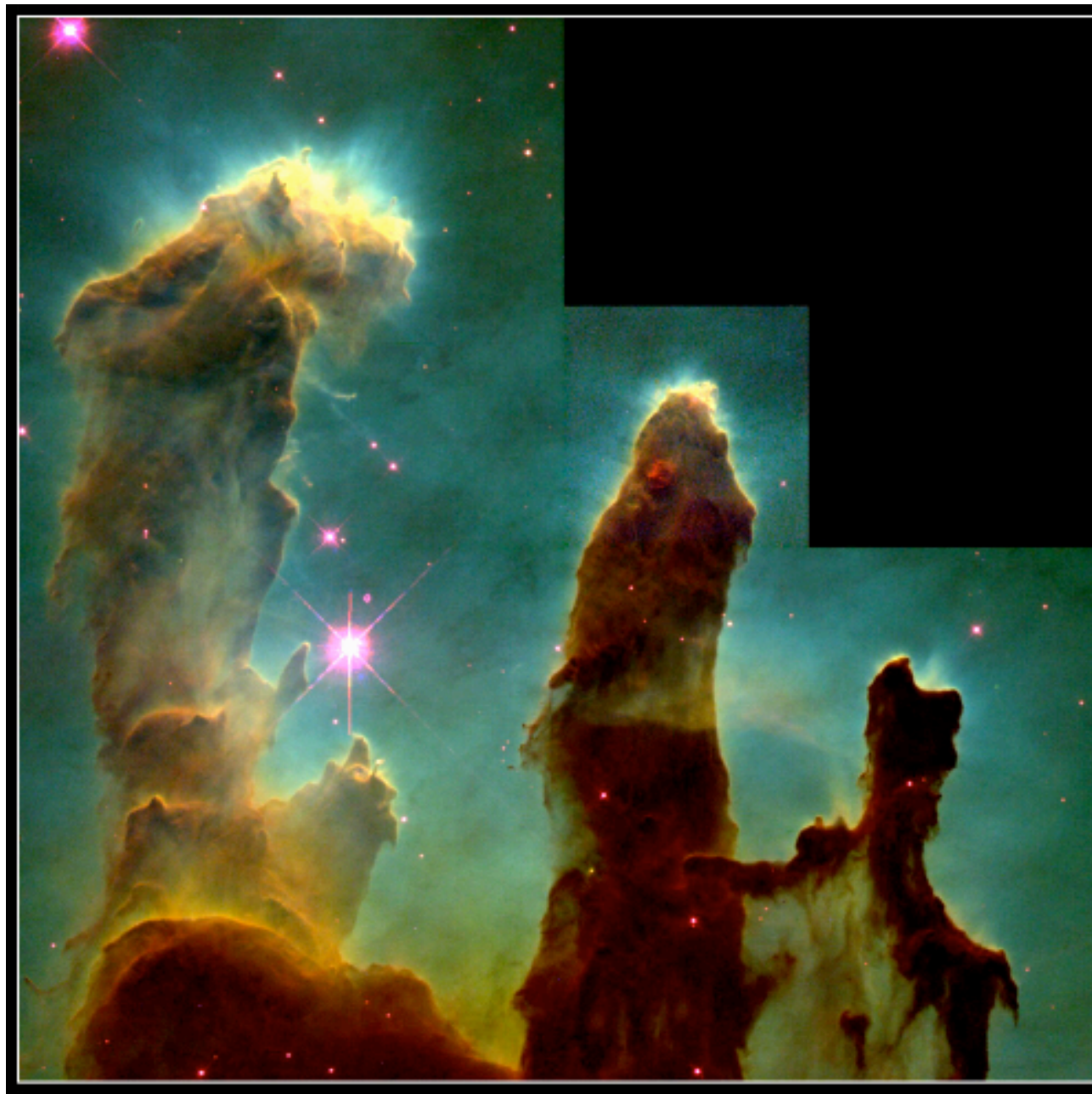
(Abbildung Doug Johnstone et al.)

# Weitere Details: Siluett-Scheiben in Orion



Protostellare Scheiben schatten die Photodissoziationsregion im Hintergrund ab. Jedes Bild ist 750 AU x 750 AU groß.

(Daten von Mark McCaughrean)



HST Aufnahme

*Pillars of God* (im Adlernebel): Entstehung kleiner Gruppen junger Sterne in den ``Spitzen`` der Gas- und Staubsäulen....





Aufnahme im  
Infraroten.



(Andersen et al 2005)



Head of Column No.1 in Eagle Nebula (IR-View)  
(VLT ANTU + ISAAC)

ESO PR Photo 57c/01 (20 December 2001)

© European Southern Observatory



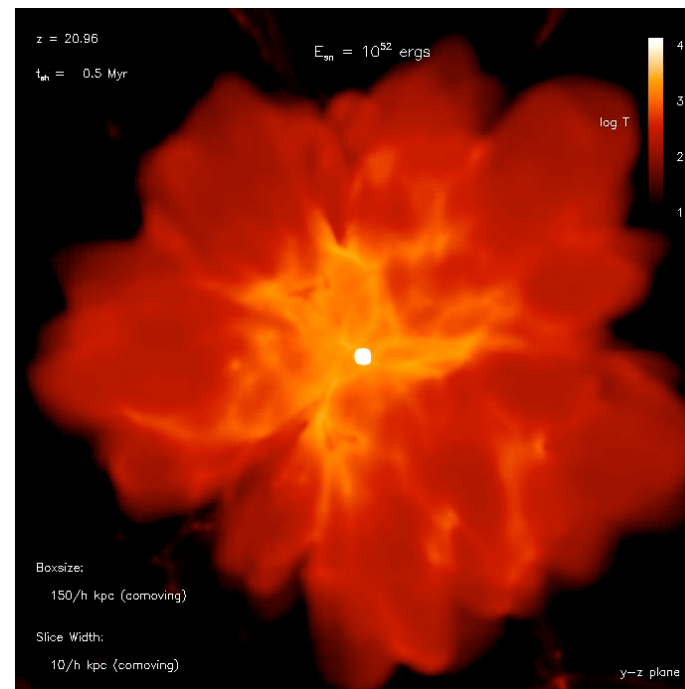
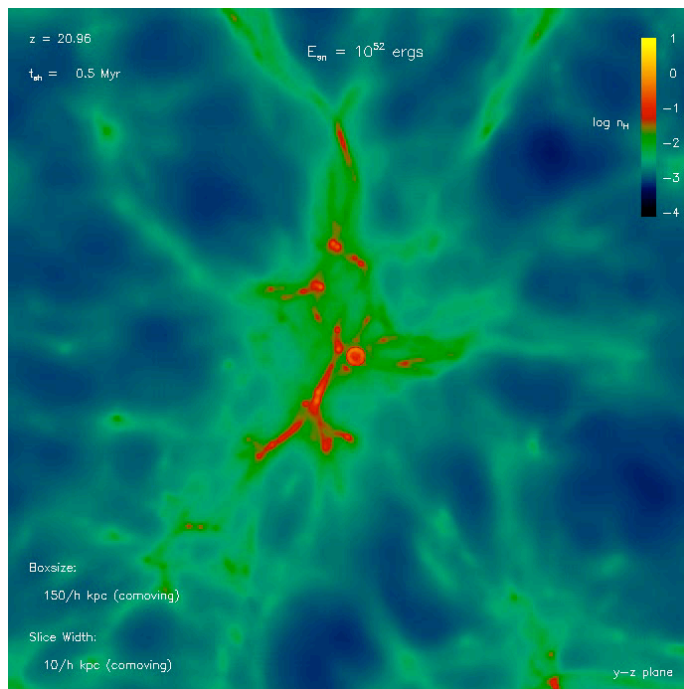
IR Aufnahme mit dem ESO-VLT

*Pillars of God* (im Adlernebel): Entstehung  
kleiner Gruppen junger Sterne in den ``Spitzen``  
der Gas- und Staubsäulen....

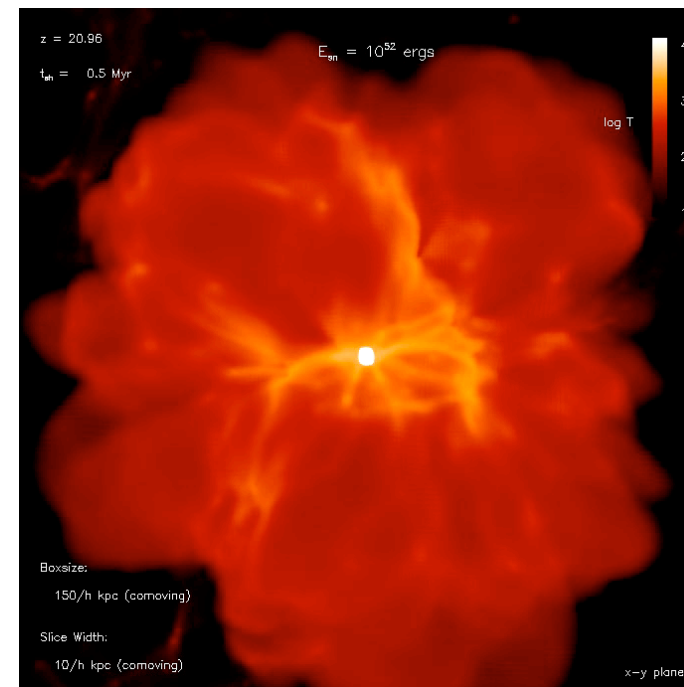
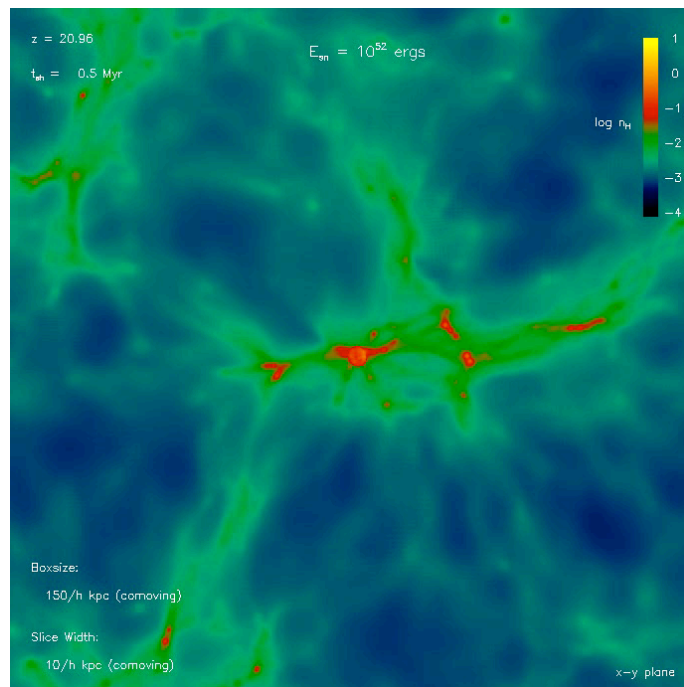
# Mögliche Projekte

- Sternentstehung im frühen Universum
- Sternentstehung auf Galaktischen Skalen (Modelling the Milky Way)
- Entstehung von galaktischen Molekülwolken
- Entstehung von Sternhaufen
- Entstehung massereicher Sterne
- Charakterisierung interstellarer Turbulenz

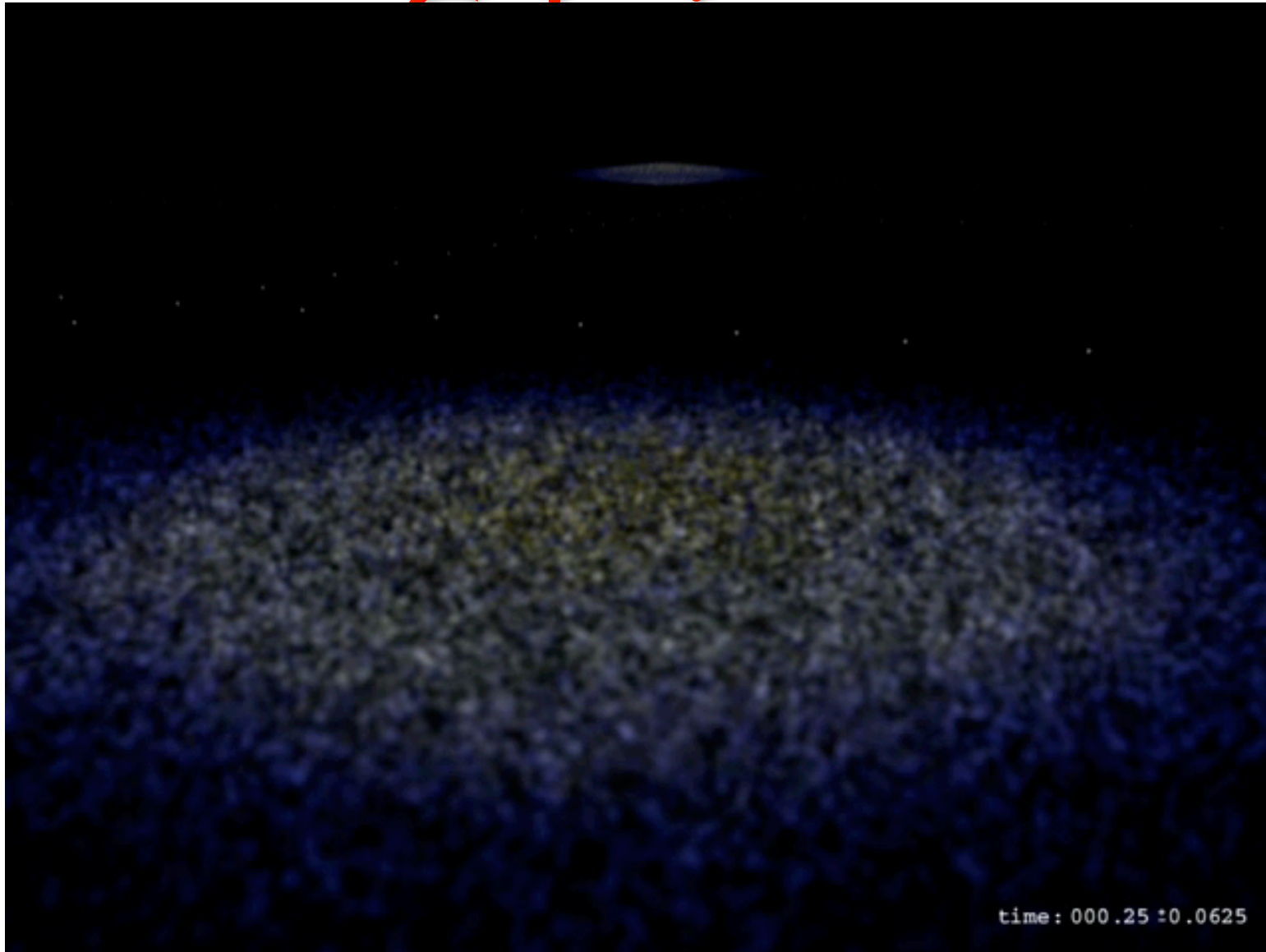
# SE im frühen Universum



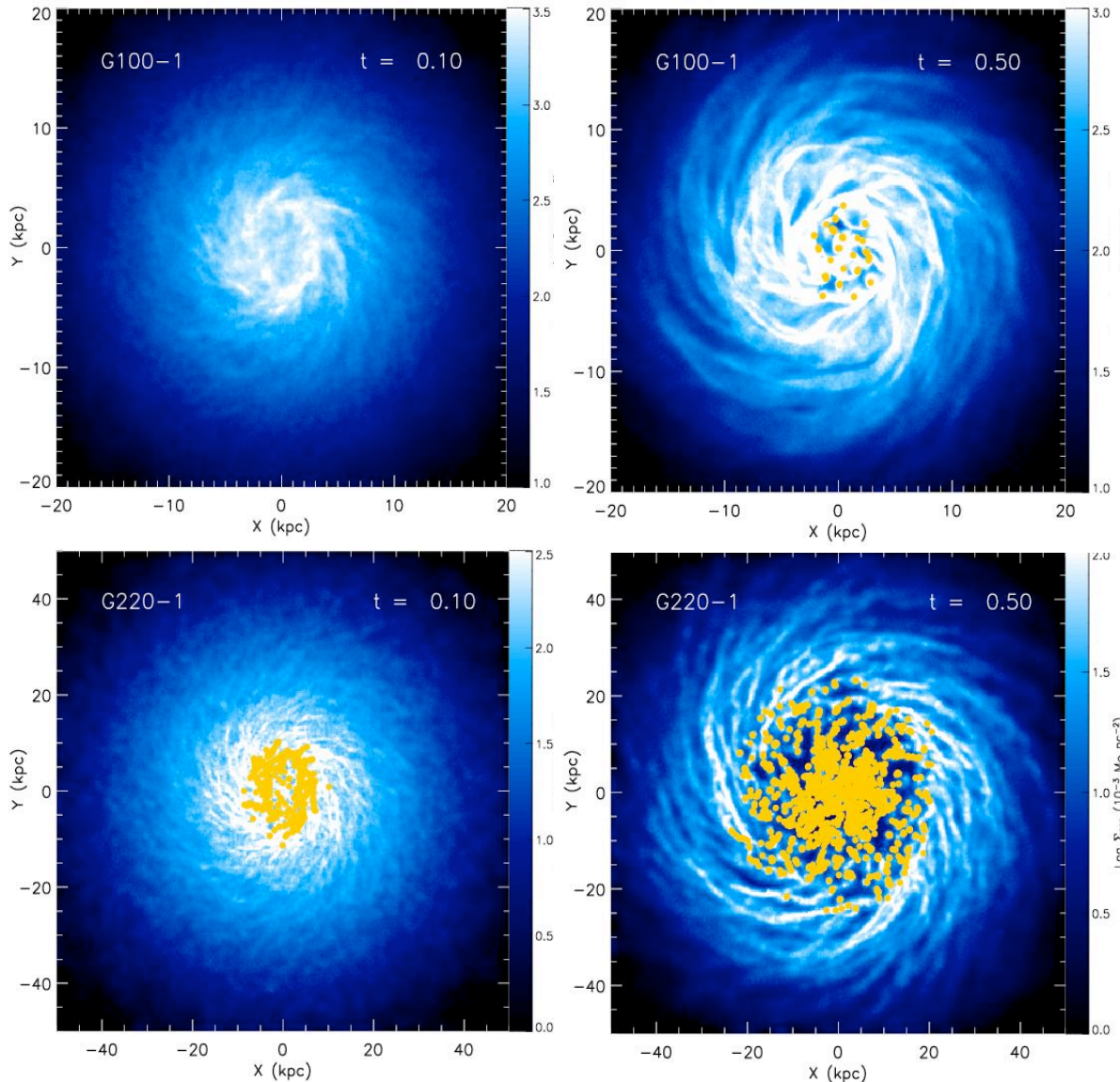
# SE im frühen Universum



# Sternentstehung in



# Modeling galactic SF

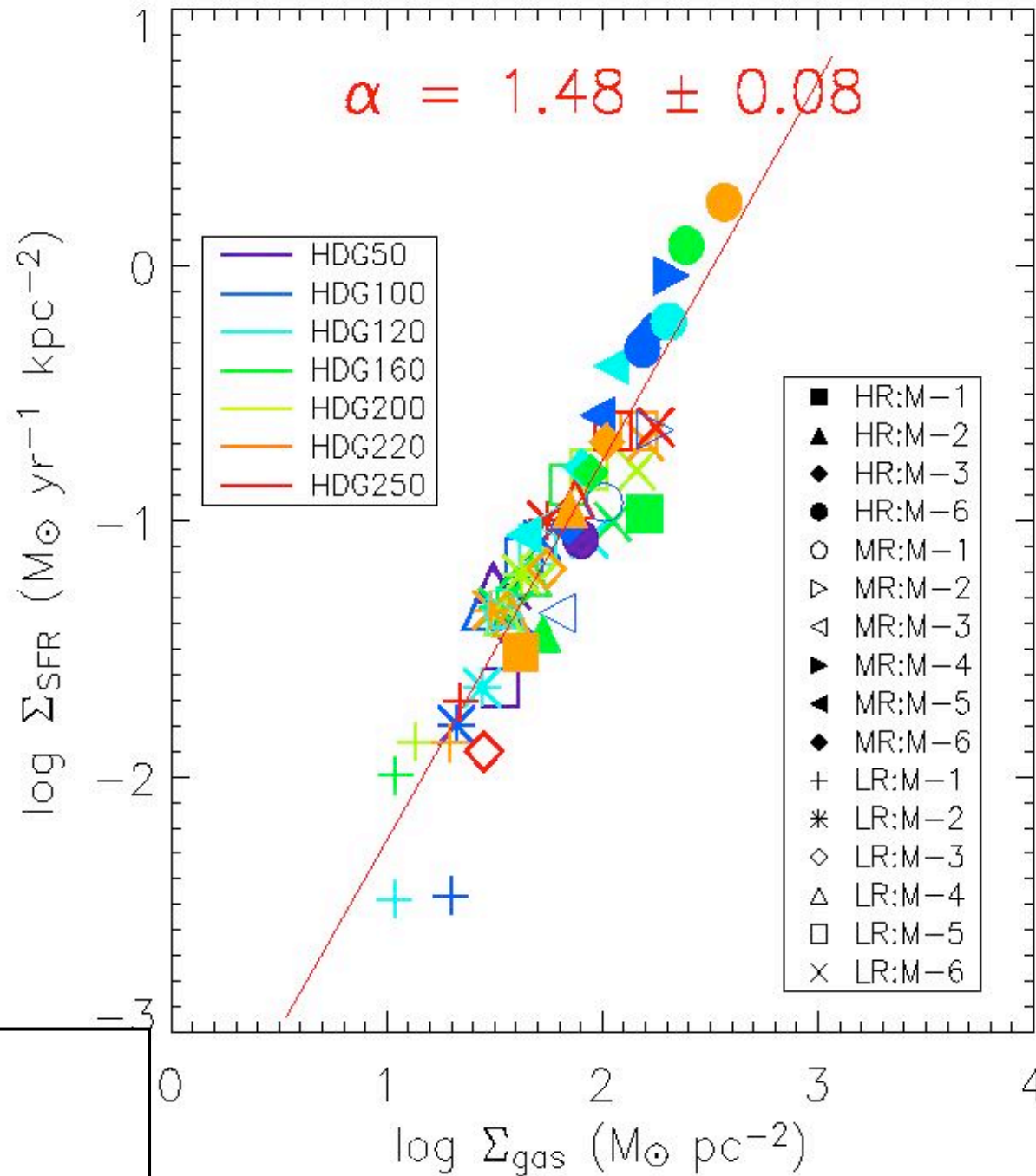


(Li et al 2005, 2006)

SPH + stars + DM  
models of isolated  
disk galaxies with  
several million  
particles

→ begin to resolve  
individual molecular clouds  
→ we need to care about  
„small-scale“ physics (i.e.  
*transition from atomic gas  
to molecular*)

(simple physics: gravity +  
hydrodynamics (isothermal EOS)  
+ stellar dynamics [stars + DM])



**Result:**  
gravitational  
instability alone  
leads to the *Schmidt*  
*law*

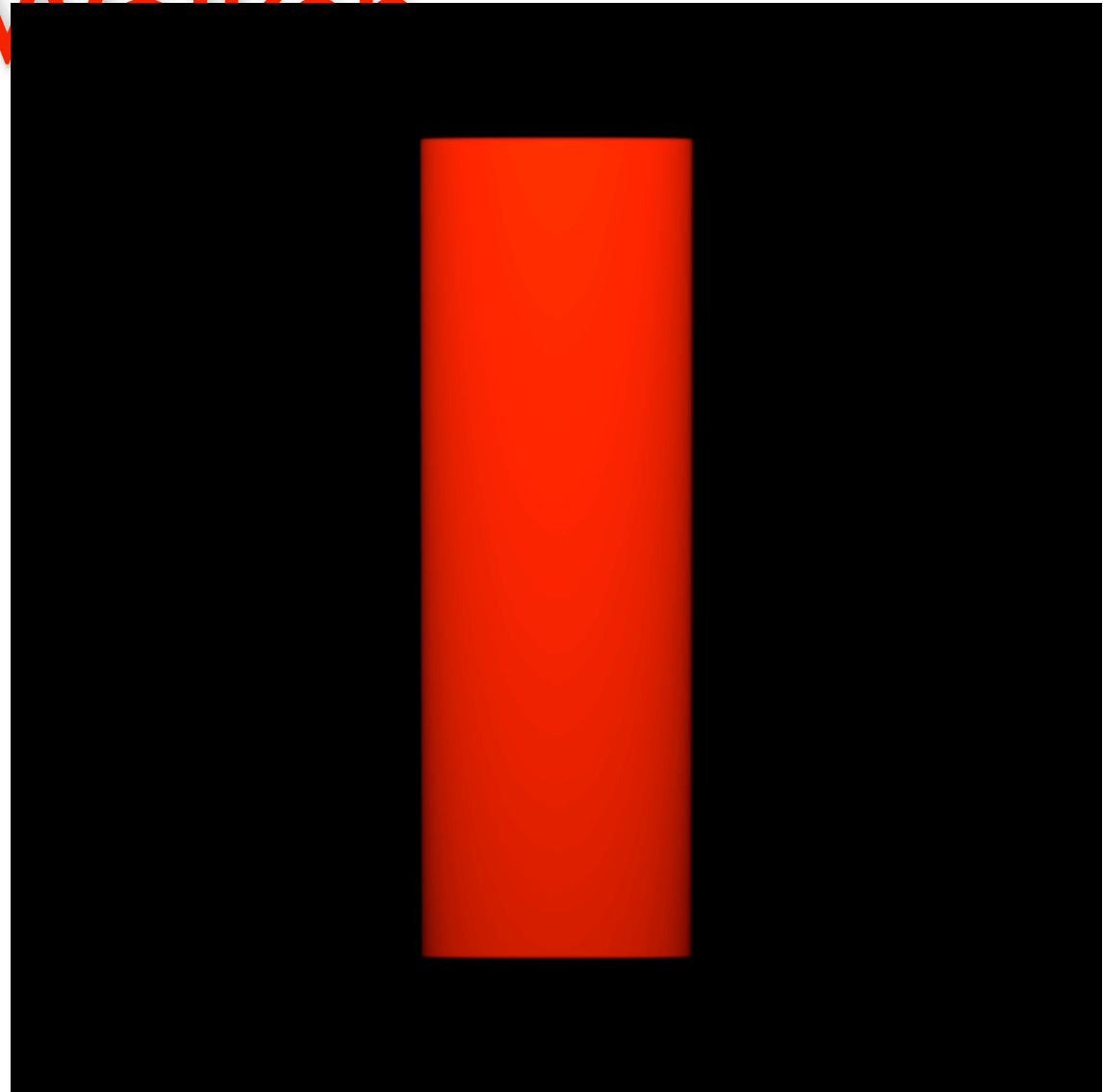
(power-law correlation  
between star formation  
and surface density)

$$\Sigma_{\text{SFR}} \propto \Sigma_{\text{gas}}^{1.5}$$



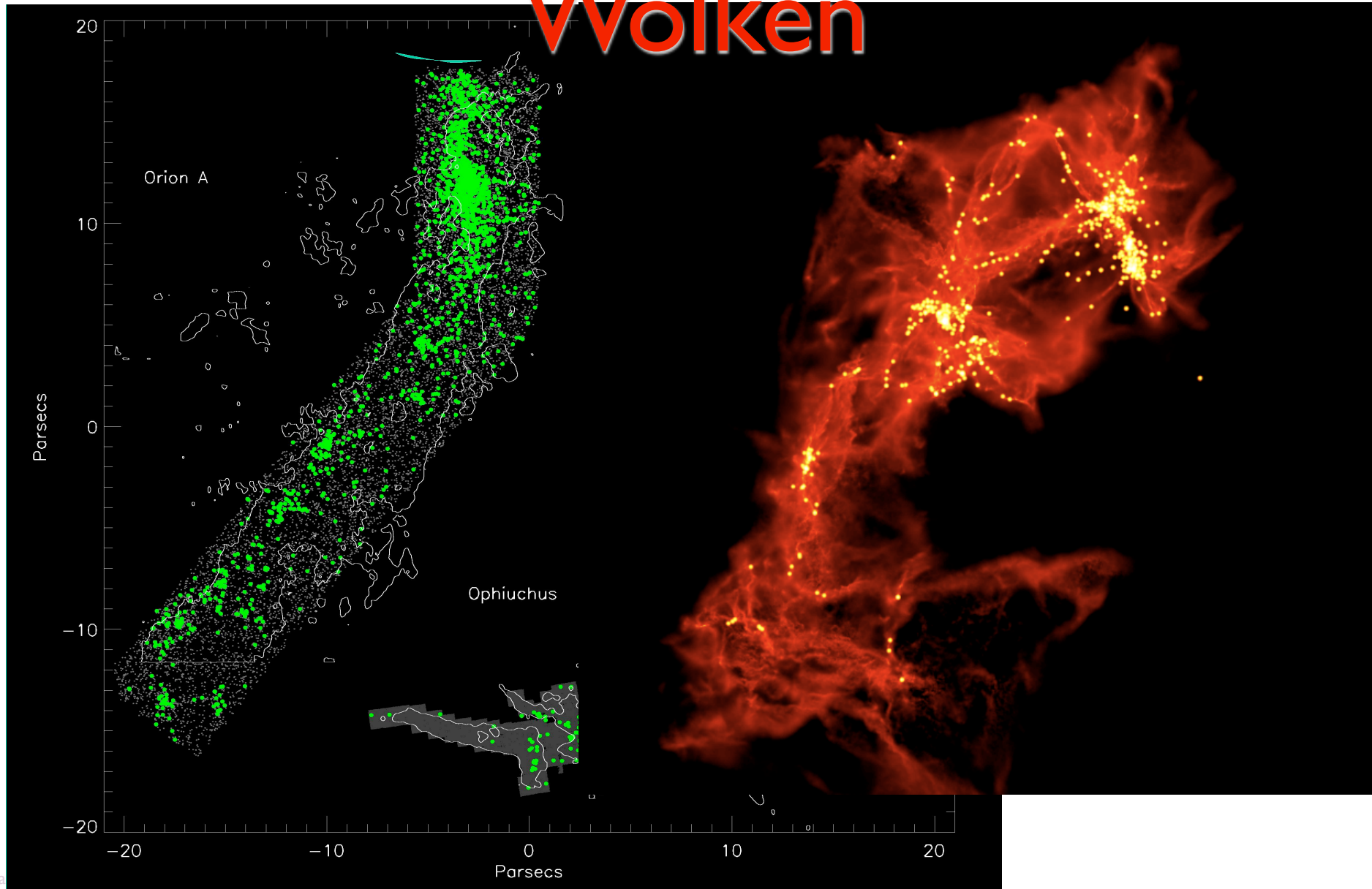
# Gravitativer Kollaps in Wolken

Model für die Orion Wolke:  
 $M = 10^4 M_{\text{sun}}$ , isotherme  
Zustandsgleichung, SPH  
Rechnung



(Bonnell et al. 2006)

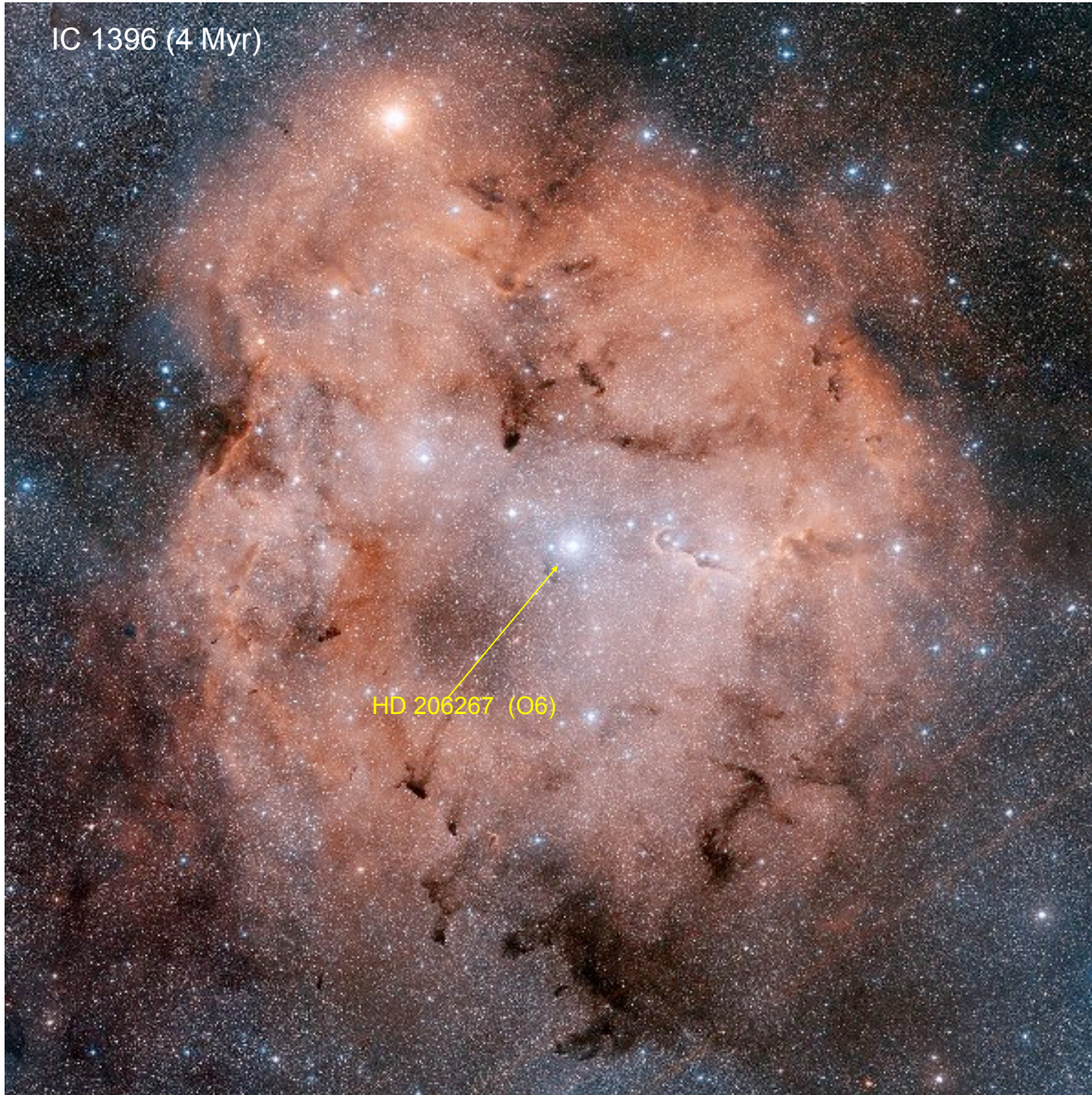
# Gravitativer Kollaps in Wolken



IC 1396 (4 Myr)

ein massereicher Stern

HD 206267 (O6)

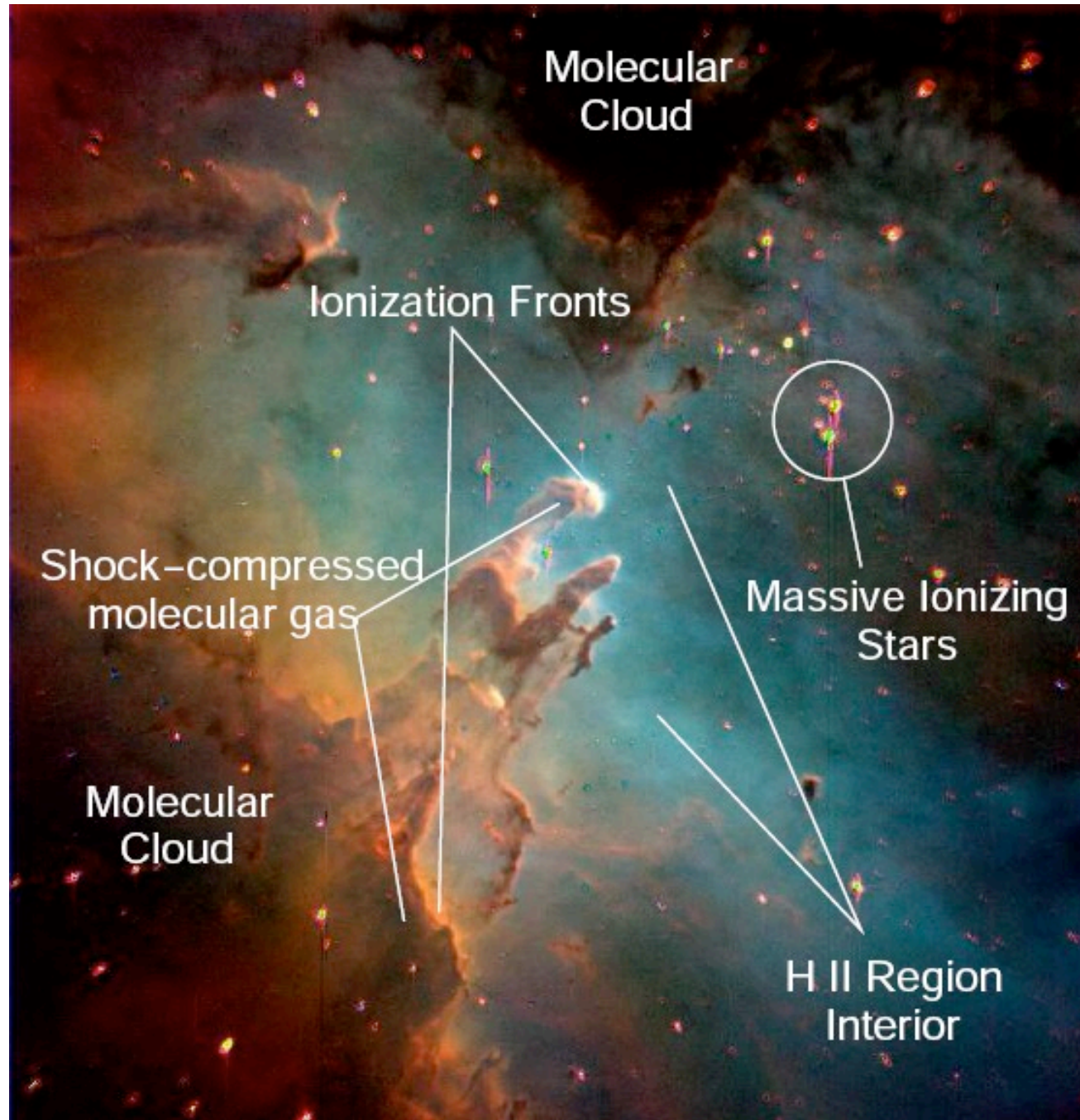


viele massereicher Stern



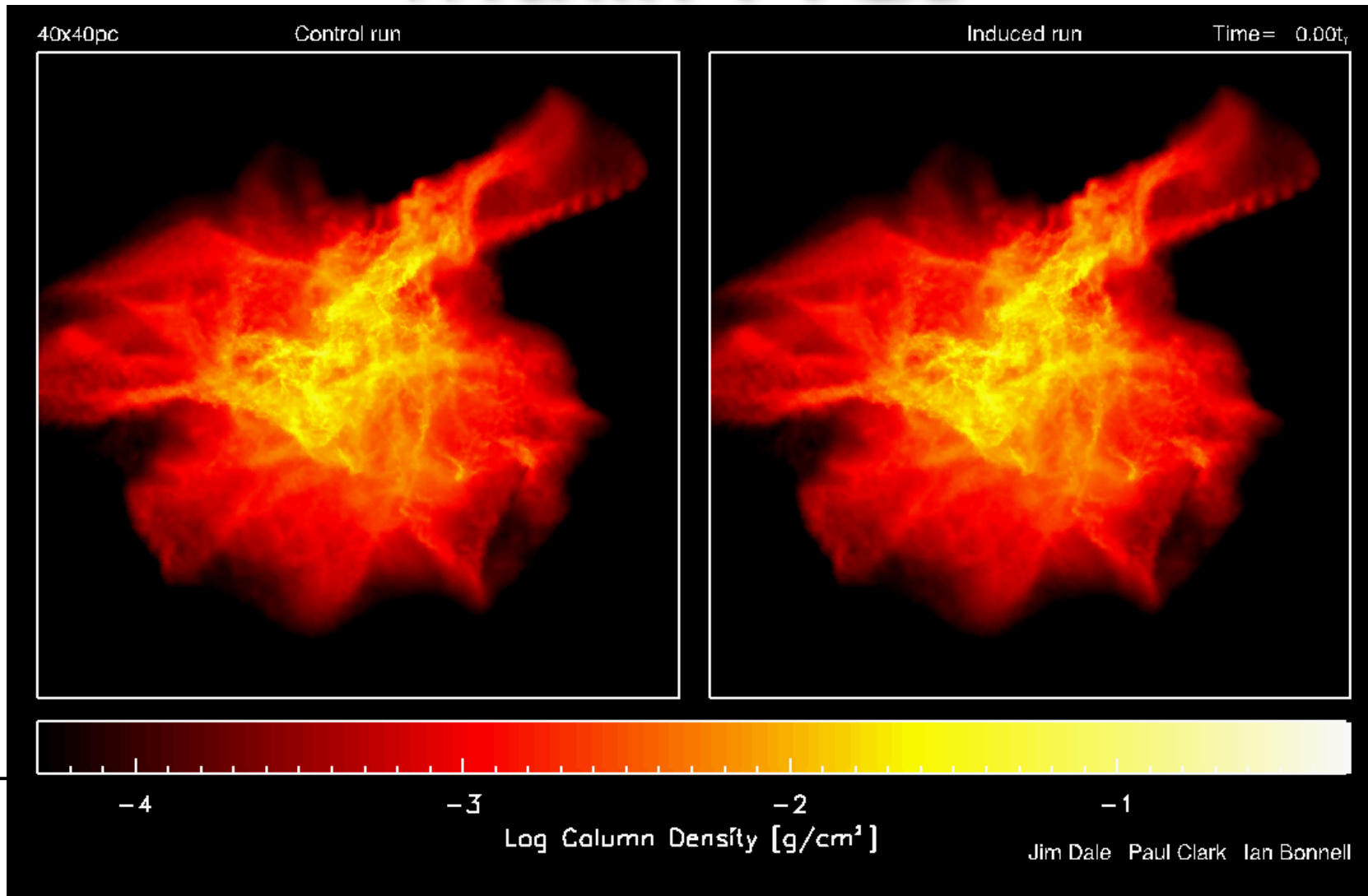
30 Doradus Region in der Großen Magellanschen Wolke

alles in einem Bild



# Gravitational collapse within MCs

immediate future: SPH with radiation feedback (first validation runs)

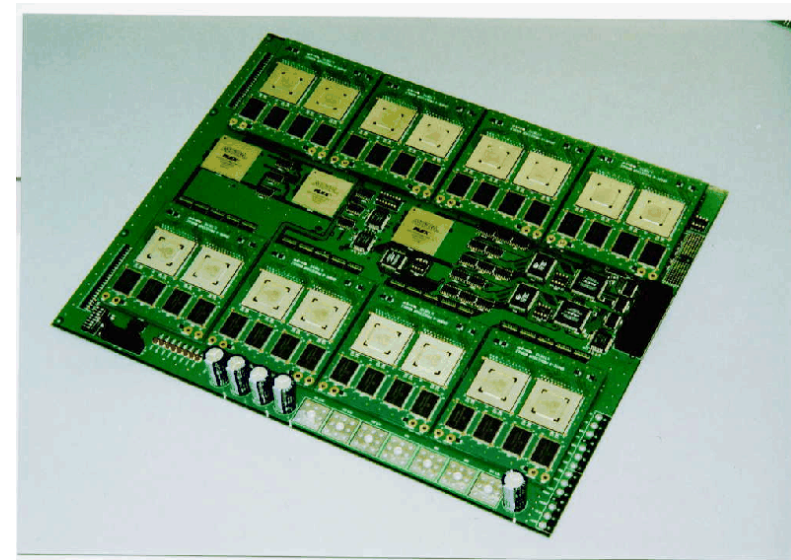
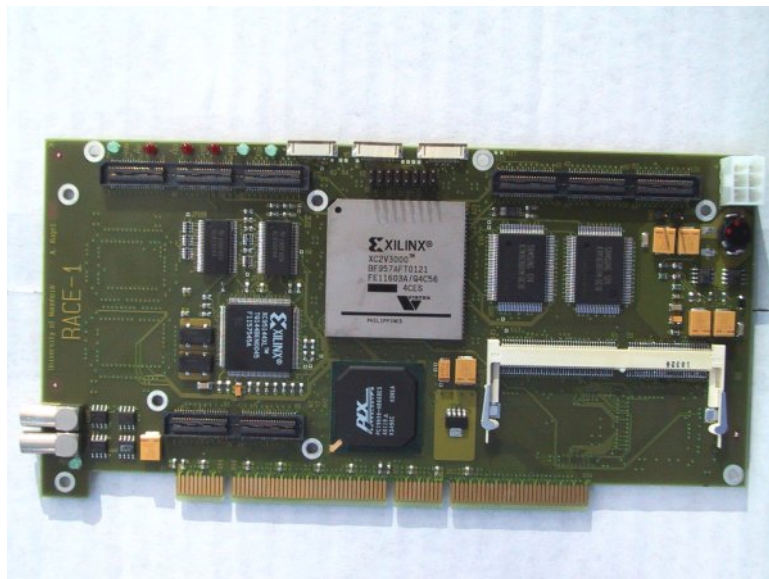


# Numerical Projects

- **Participation in GRACE (GRAPE+RACE) project**

(PI: R. Spurzem,ARI; with R. Männer,TI)

- Support by Volkswagen-Stiftung
- Goal: Build a high-performance computer by integrating GRAPE and FPGA architecture into Beowulf PC cluster.



- Improved implementation of SPH algorithm
- State-of-the-art scientific computing

# Zusammenfassung