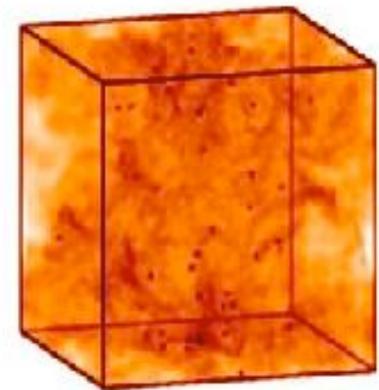
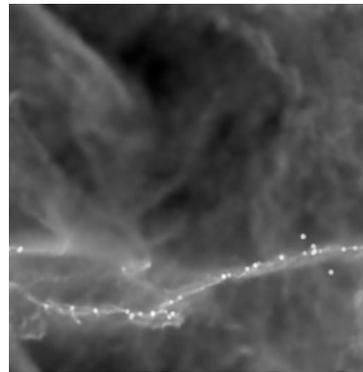
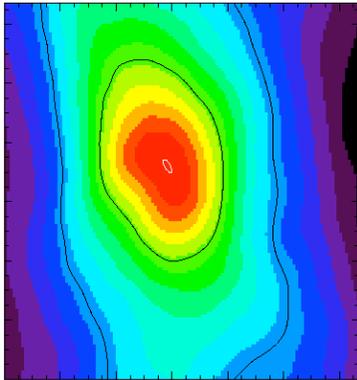




Klassen: Die turbulente Geburt der Sterne

Die turbulente Geburt der Sterne



Ralf Klessen

Astrophysikalisches Institut Potsdam
Emmy-Noether-Forschungsgruppe (DFG)



Übersicht

WAS?

- Was sind überhaupt Sterne?
- Astronomische Skalen

WO und WANN?

- Wo und wann bilden sich Sterne?
...eine Reise durch Raum und Zeit

WIE?

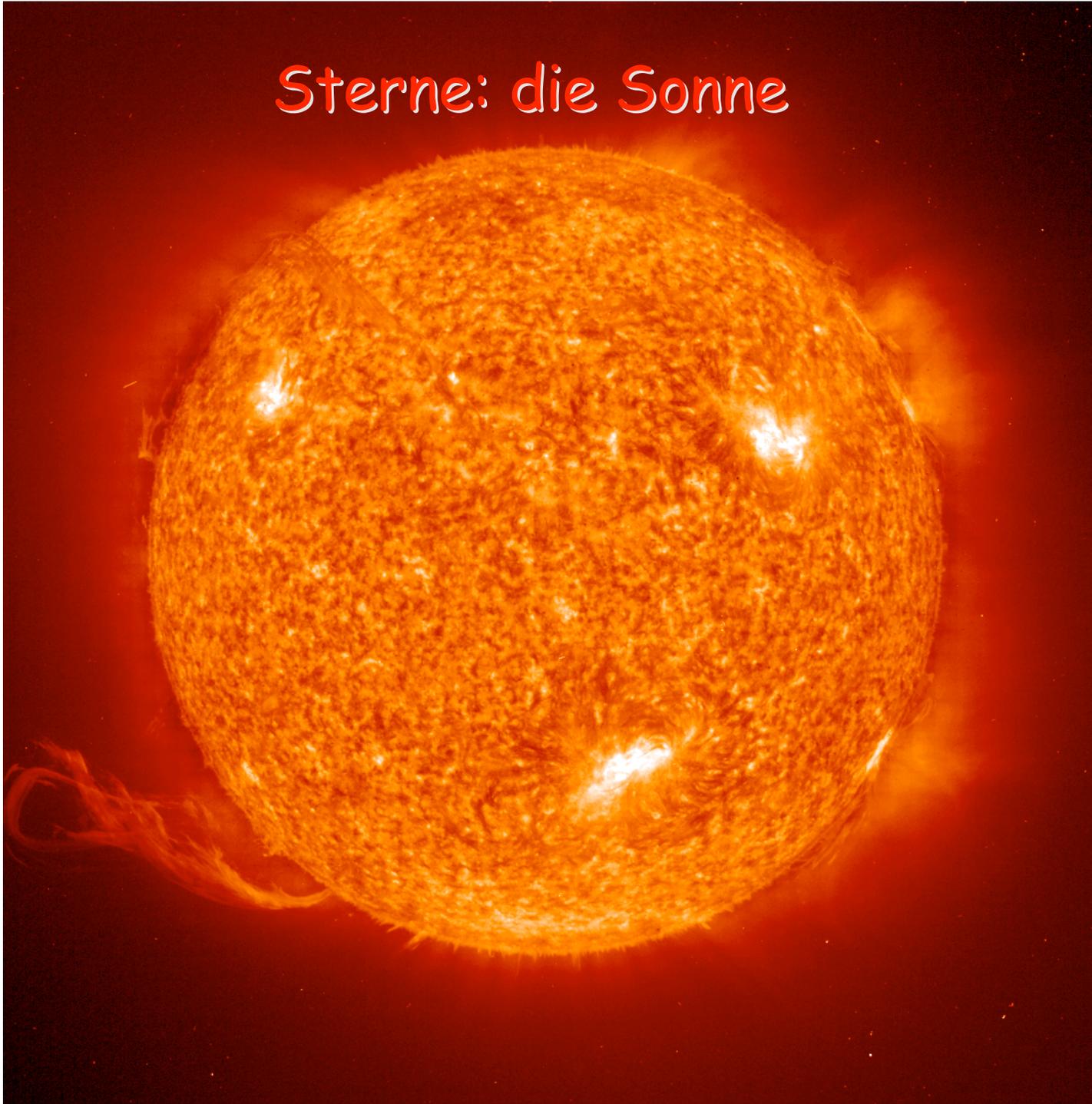
- Wie bilden sich Sterne?
Theorie der turbulenten Sternentstehung
(Galaktische Skalen, Einzelsterne)

Wie geht's weiter?

Planetenbildung

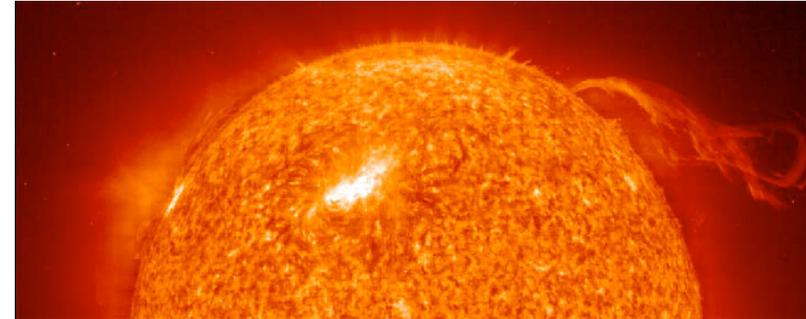
WAS?

Sterne: die Sonne



Sterne: die Sonne

Eigenschaften der Sterne
(Stellare Zustandsgrößen):



Unsere Sonne ☉ als Referenzstern

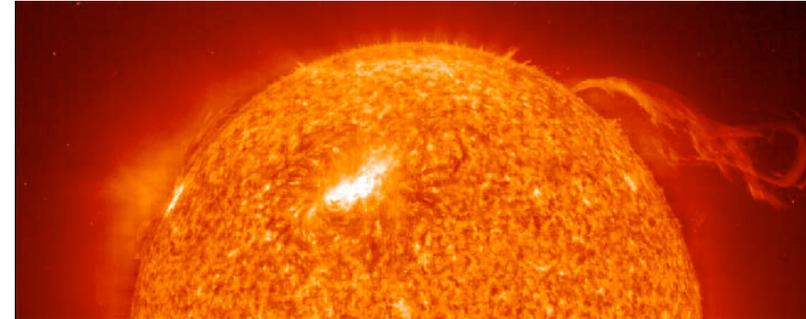
Radius	R_{\odot}	696 000 km
Masse	M_{\odot}	$1,989 \times 10^{30}$ kg
Leuchtkraft	L_{\odot}	$3,86 \times 10^{26}$ W
effektive Temperatur	T_{eff}	5800 K (Oberfläche)
Zentraltemperatur	T_{zentral}	15×10^6 K
Alter	t_{\odot}	4.5×10^9 a

auf der Erde:
Solarkonstante
 1.37 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):

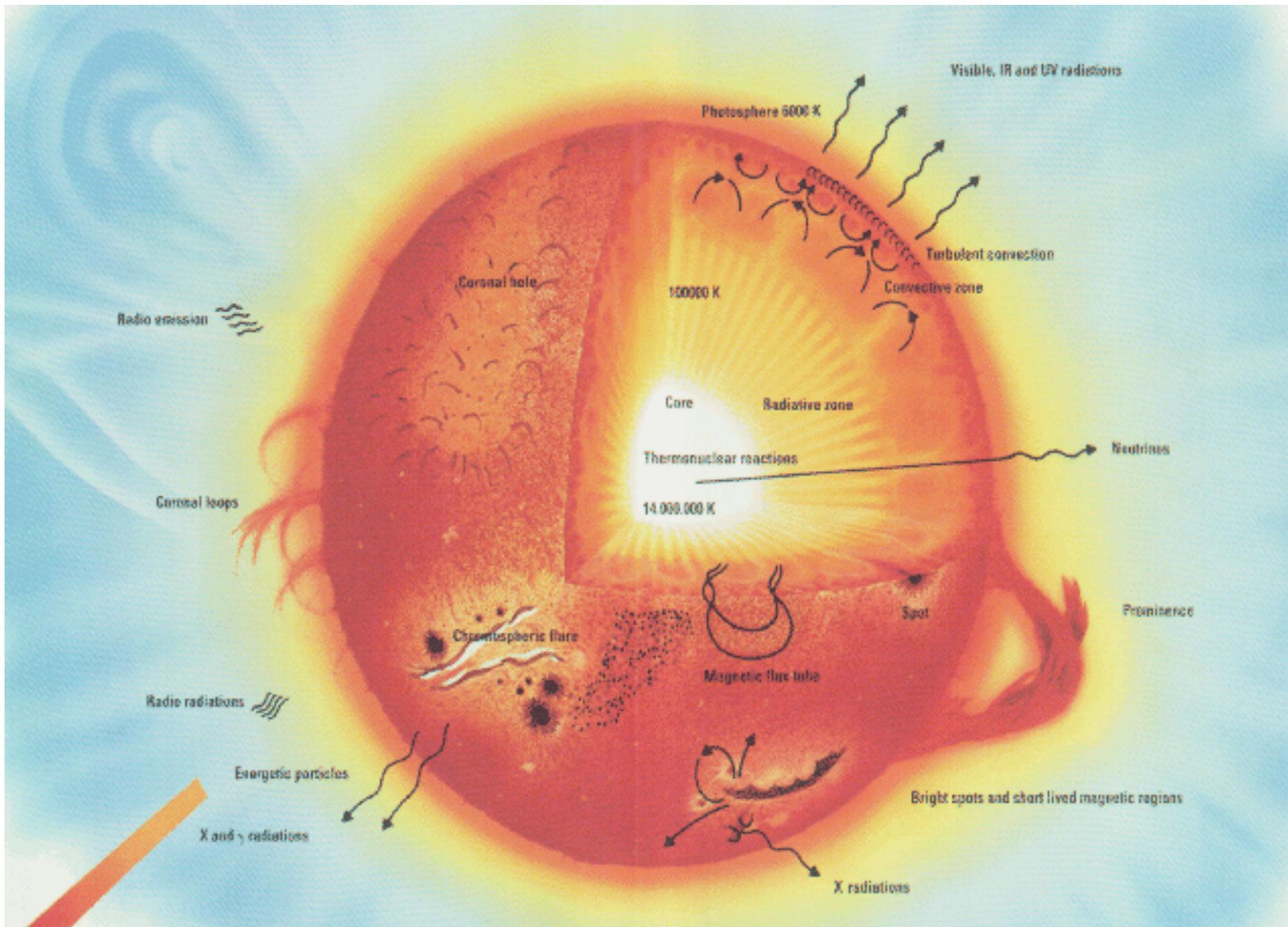


Unsere Sonne ☉ als Referenzstern

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

in cgs Einheiten

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



Klassen: Die turbulente Geburt der Sterne

Sterne: Eigenschaften

Massenverteilung:

minimale Masse $\approx 0,07 M_{\odot}$ Grenze des Wasserstoffbrennens

maximale Masse $\approx 120 M_{\odot}$ Eddington-Limit, $F_{\text{rad}} = F_{\text{grav}}$

Ursprüngliche

Massenverteilung $dN(M) \propto M^{\alpha} dM$, $\alpha \approx -2.3$ für Sterne massereicher als die Sonne

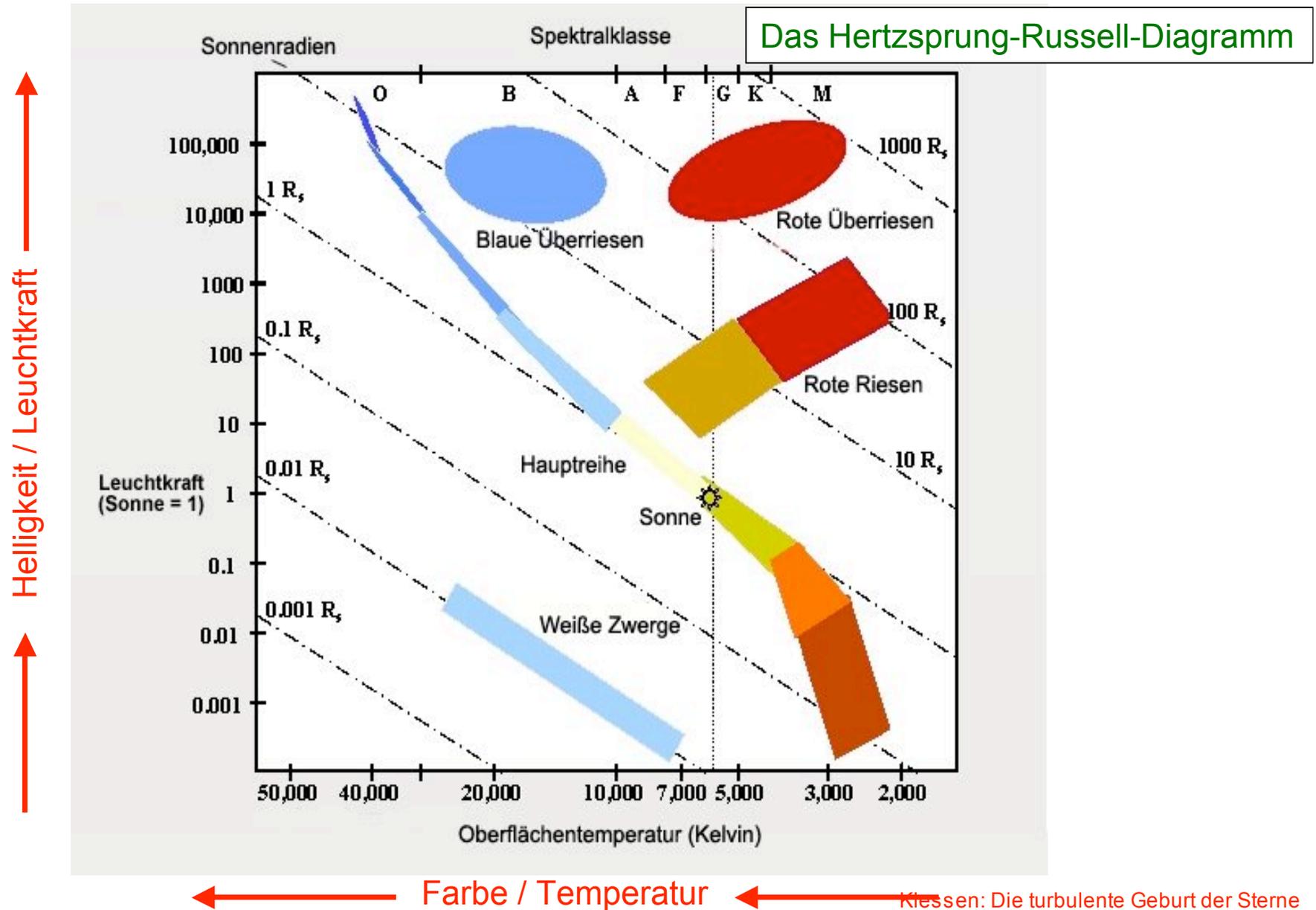
Masse-Leuchtkraft-Beziehung

$$L \propto M^{3.5}$$

Weitere Eigenschaften:

Spektraltyp	T_{eff} [K]	$M[M_{\odot}]$	$L [L_{\odot}]$	T_{HR} [a]
O7.5	38 000	25	80 000	2×10^6
B0	33 000	16	10 000	1×10^7
B5	17 000	6	600	6×10^7
A0	9 500	3	60	3×10^8
F0	6 900	1,5	6	1.5×10^9
G0	5 800	1	1	6×10^9
K0	4 800	0,8	0,4	12×10^9
M0	3 670	0,5	0,08	35×10^9

Sterne: Farben-Helligkeits-Diagramm



Sterne: Statistische Charakteristika

Häufigkeit von Doppelsternen unter jungen Sternen mit $M \approx 1 M_{\odot} \approx 90\%$

Sterndichte in der Sonnenumgebung $n_* \approx 0,05 \text{ pc}^{-3}$

Sterndichte im Orion-Trapezhaufen $n_* \approx 10^3 \text{ pc}^{-3}$

Sterndichte in Starburst-Regionen $n_* \approx 10^4 \text{ pc}^{-3}$

$$1 \text{ pc} = 3,086 \times 10^{18} \text{ cm}$$

Anzahl der Sterne in der Milchstraße: $\approx 10^{11}$
Sternentstehungsrate: $\approx 2 M_{\odot} / \text{Jahr}$

Sternentstehungsrate
war *größer* in der
jungen Galaxie

Astronomische Skalen

Länge	1 parsec	=	$3,086 \times 10^{18}$ cm	≈	3,26 Lichtjahre
	1 AU	=	$1,50 \times 10^{13}$ cm	≈	1/200.000 pc
Masse	1 M _☉	=	$1,99 \times 10^{33}$ g		
Zeit	1 Jahr	=	$3,15 \times 10^7$ s		
Geschwindigkeit	1 km/s	=	10^5 cm/s	=	3.600 km/h
			(Lichtgeschwindigkeit c	=	3×10^{10} cm/s)

Beispiel 1:

Milchstraße	∅	≈	30 kpc	≈	10^{23} cm	≈	100.000 Lichtjahre
Sonnensystem (Pluto-Bahn)	∅	≈	80 AU	≈	10^{15} cm	≈	11 Lichtstunden
Erdbahn	∅	≈	2 AU	≈	3×10^{15} cm	≈	17 Lichtminuten
Sonnendurchmesser	∅	≈	$1,4 \times 10^{11}$ cm				
Erddurchmesser	∅	≈	$1,3 \times 10^9$ cm				

(Größenvergleich: Kiste voll Sandkörner verstreut bis zur Mondbahn)

Astronomische Skalen

Länge	1 parsec	=	$3,086 \times 10^{18}$ cm	≈	3,26 Lichtjahre
	1 AU	=	$1,50 \times 10^{13}$ cm	≈	1/200.000 pc
Masse	1 M_{\odot}	=	$1,99 \times 10^{33}$ g		
Zeit	1 Jahr	=	$3,15 \times 10^7$ s		
Geschwindigkeit	1 km/s	=	10^5 cm/s	=	3.600 km/h
			(Lichtgeschwindigkeit c	=	3×10^{10} cm/s)

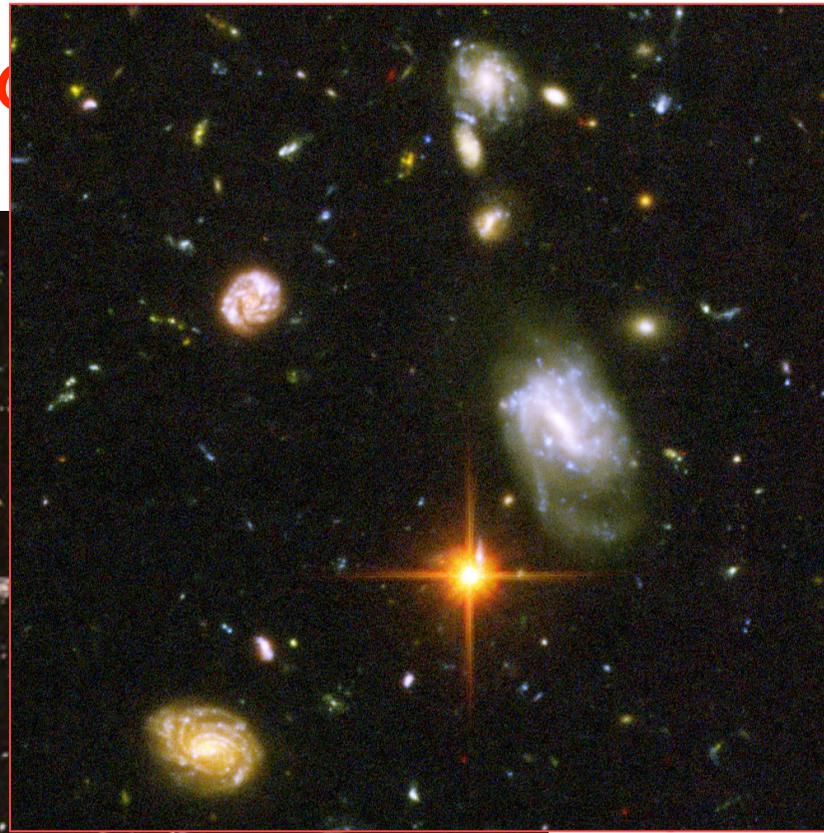
Beispiel 2:

Druck im Sonneninneren	$2,5 \times 10^{11}$ bar	≈	$7,8 \times 10^{25}$ Teilchen / cm ³	(130 g/cm ³)
Druck in Erdatmosphäre	1013 bar	≈	$2,5 \times 10^{19}$ Teilchen / cm ³	
technisch erzeugtes Ultrahochvakuum	10^{-9} bar	≈	$2,5 \times 10^7$ Teilchen / cm ³	
Sternbildendes Gas	$10^3 - 10^4$	Teilchen / cm ³		
Interstellares Gas im Mittel	<i>einige</i>	Teilchen / cm ³		

WANN?
WO?

WANN und WO?

1. Kurzer Streifzug durch Sternentstehung im Universum....
.... von Starburst-Galaxien zu Low-Surface-Galaxien
2. Sternentstehungsgebiete in unserer Nachbarschaft...
.... Orion, ρ Ophiuchi, Adlernebel



ng
üh

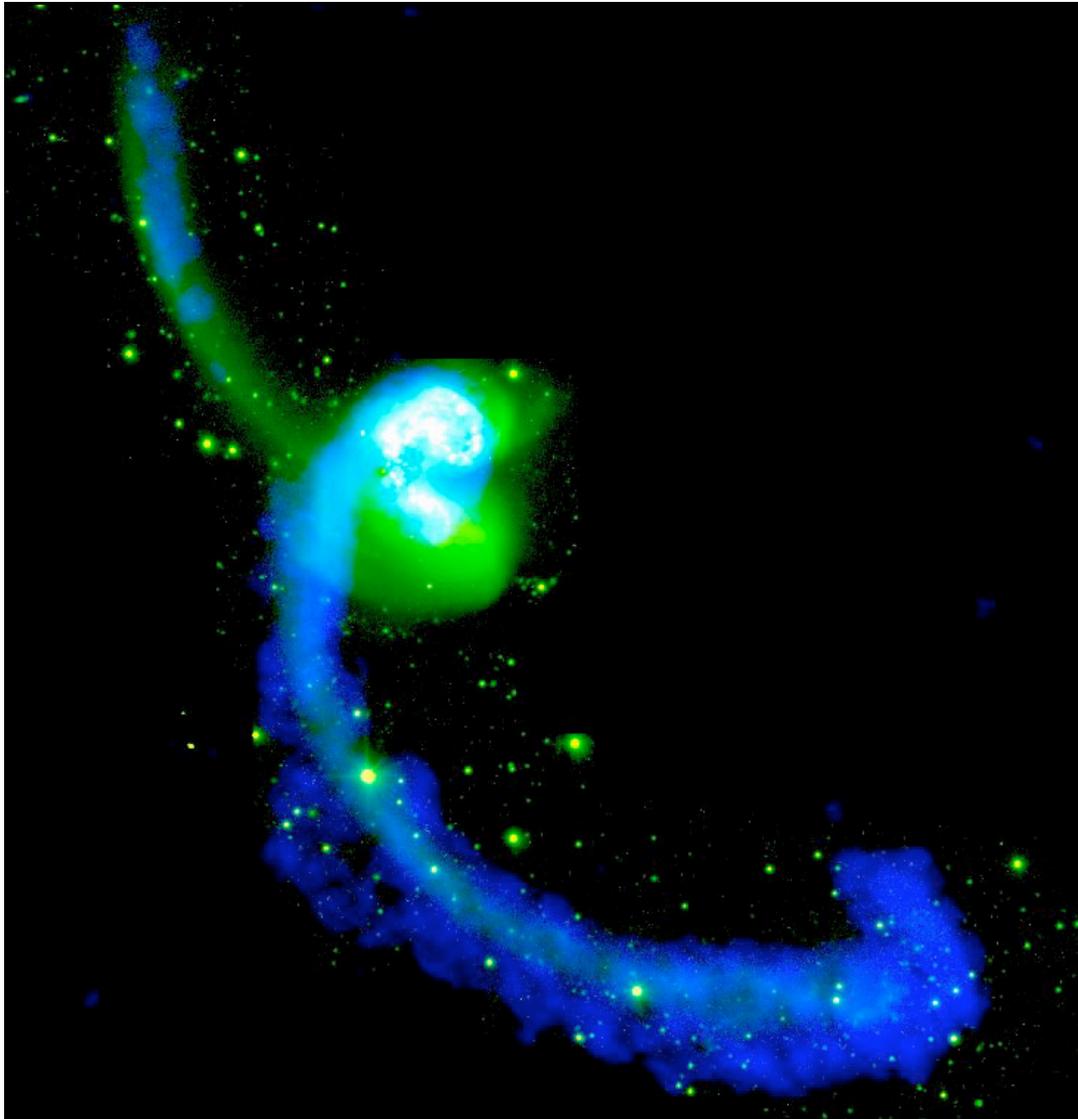
(weniger als 1Ga
nach dem Urknall)

Sterne
entstehen in
Galaxien und
Protogalaxien

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

Klassen: Die turbulente Geburt der Sterne

Sternentstehung in wechselwirkenden Galaxien



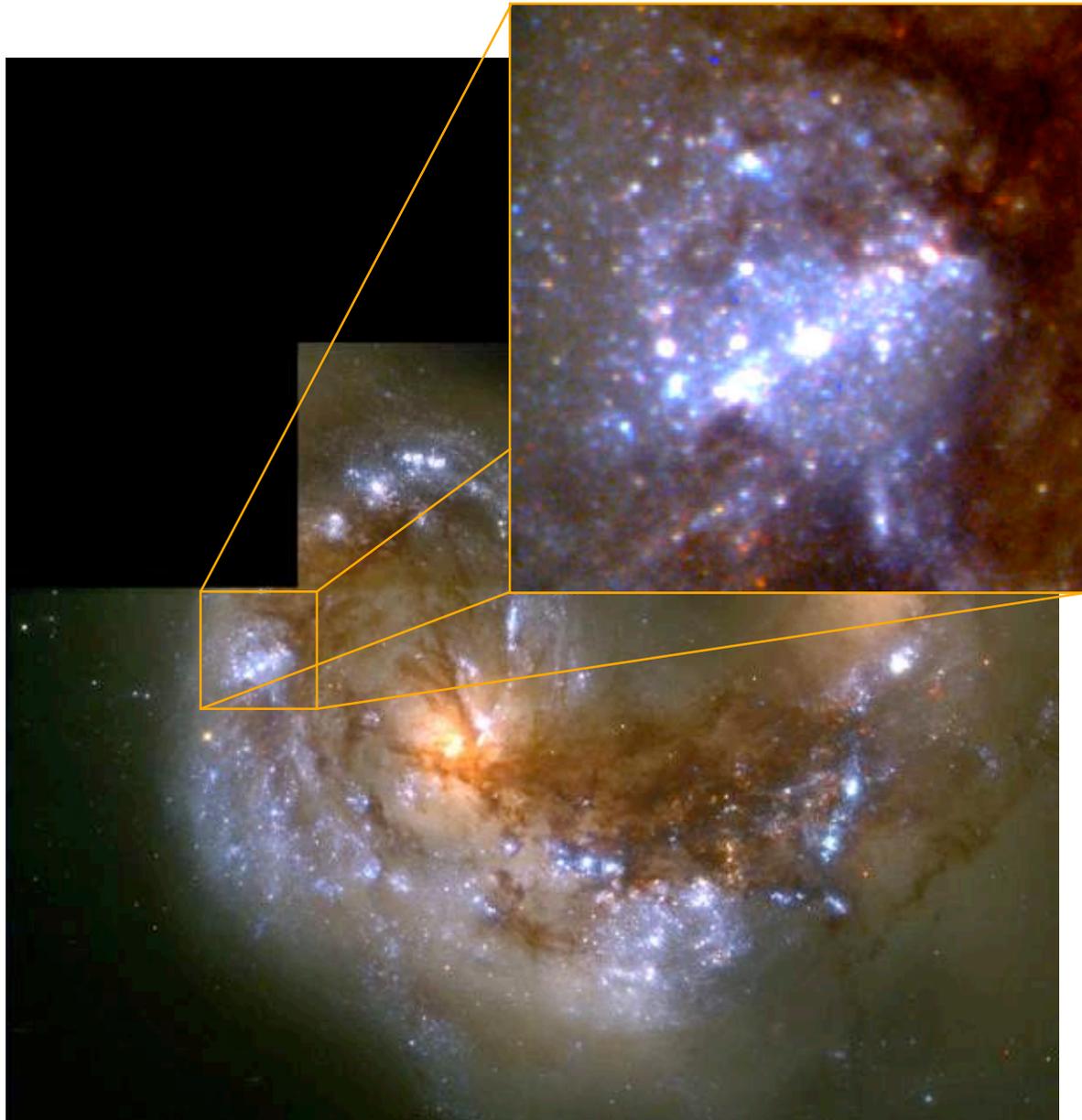
(Antennae Galaxie: Chandra Webpage)

Antennae Galaxie

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

Sternentstehung in wechselwirkenden Galaxien

(HST: Whitmore & Schweizer 1997)



Antennae Galaxie

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

Sternentstehung in "normalen" Galaxien:



(from the Hubble Heritage Team)

NGC4622

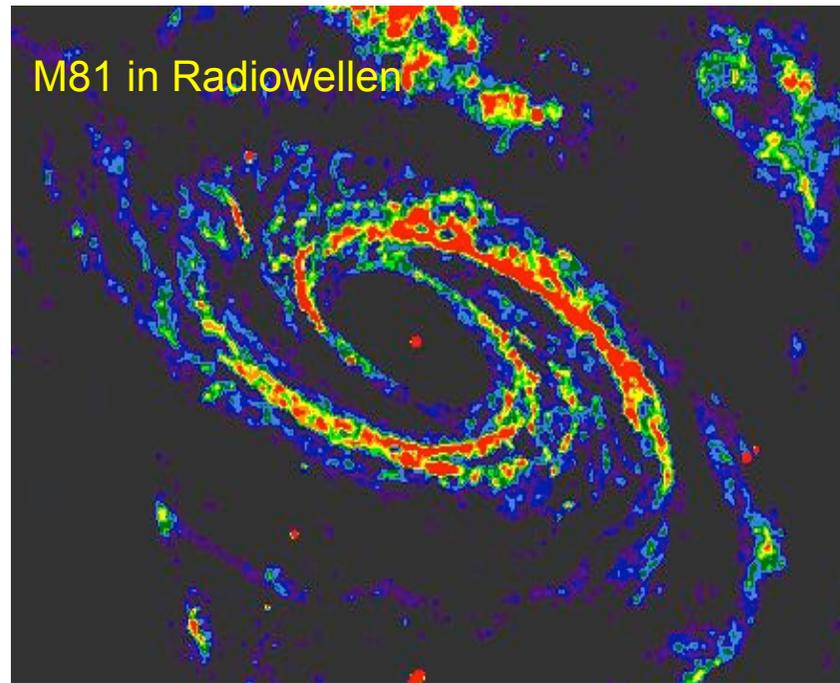
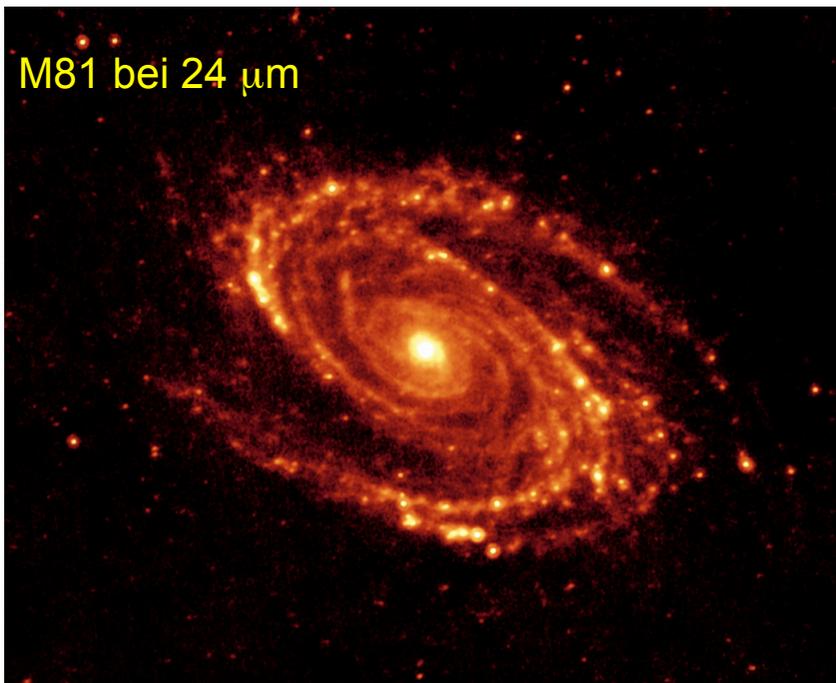
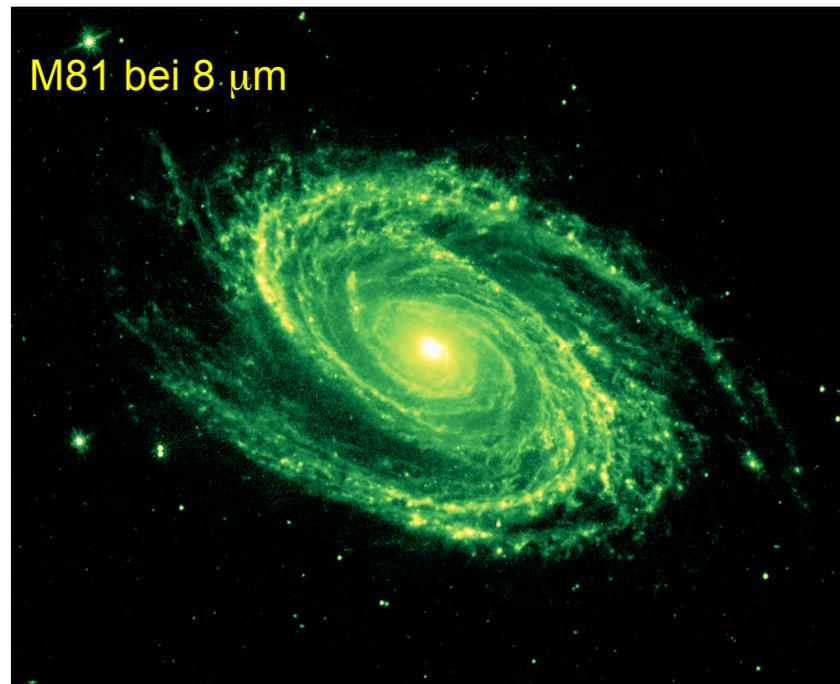
- Sternentstehung dauert bis *heute* an.
- Sternentstehung ist *immer* verbunden mit *Wolken aus Gas und Staub*.
- Staub- und Gasbänder findet man *häufig* (aber nicht immer) in Verbindung mit Spiralarmen
- Dasselbe gilt für die Sternentstehung.



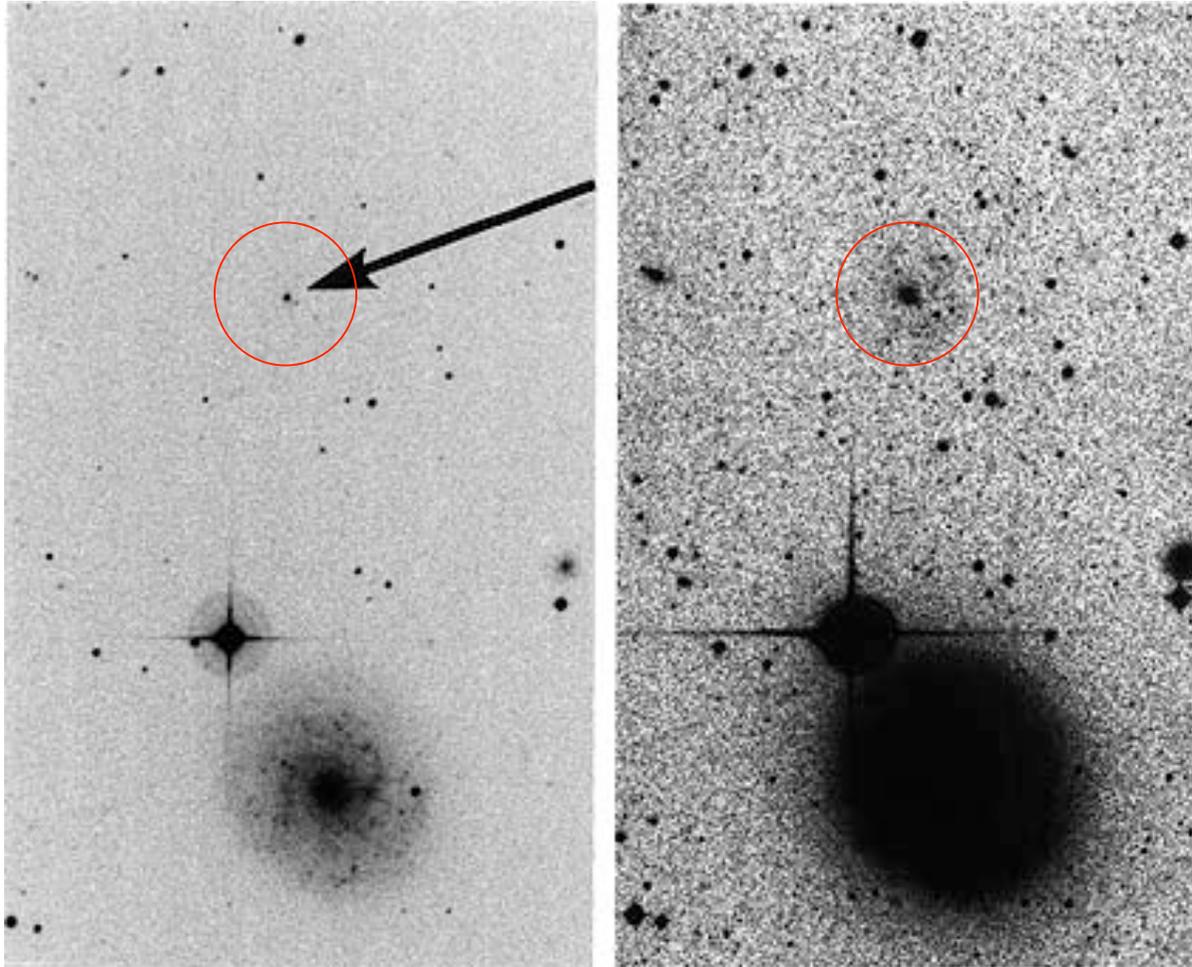
The Sombrero Galaxy — M104  HUBBLESITE.org

Klassen: Die turbulente Geburt der Sterne

Zusammenhang zwischen Sternbildung und Gasverteilung am Beispiel von M81



Sternentstehung in LSB Galaxien

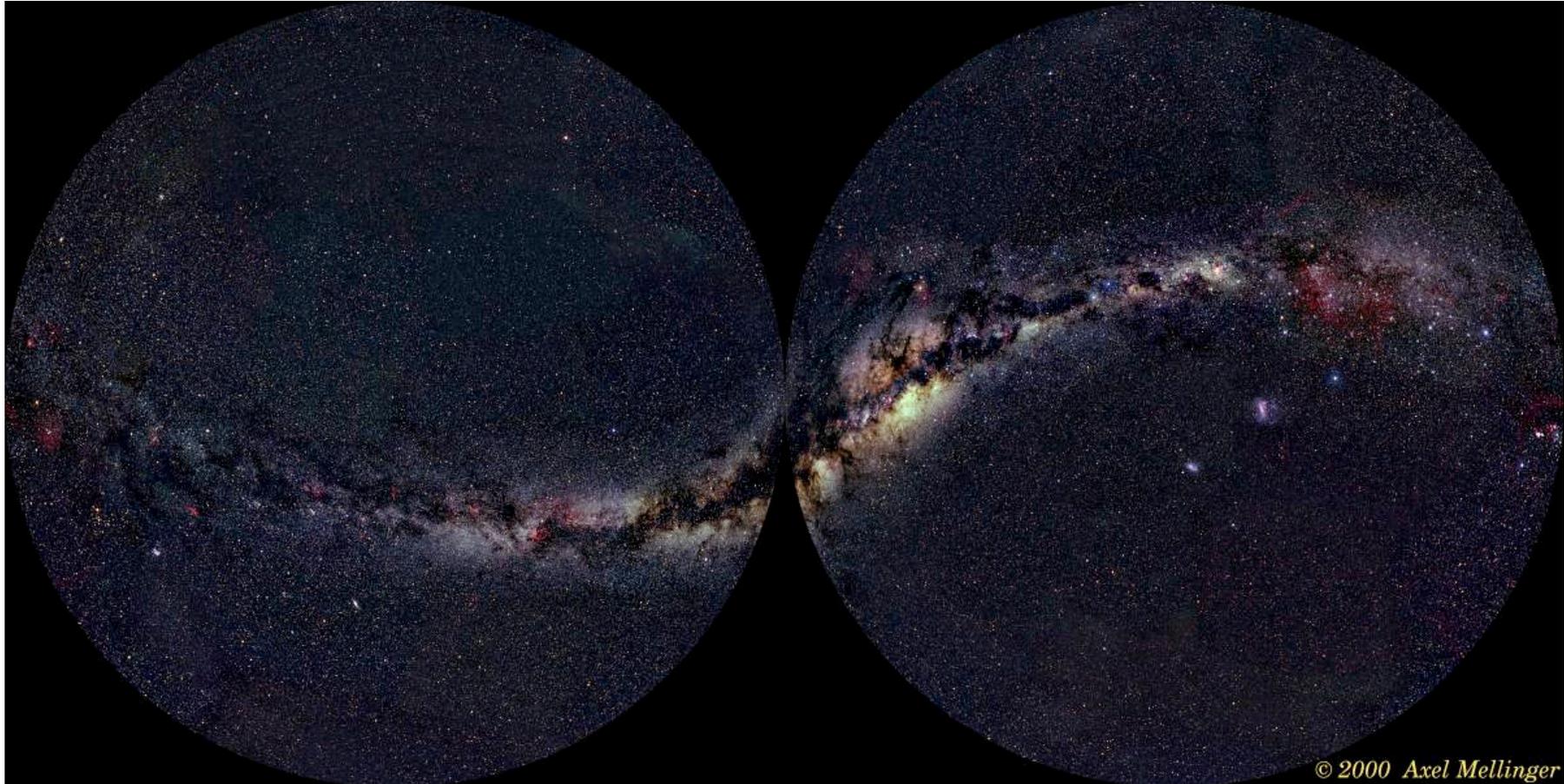


(Aufnahme mit dem UK Schmitd Teleskop)

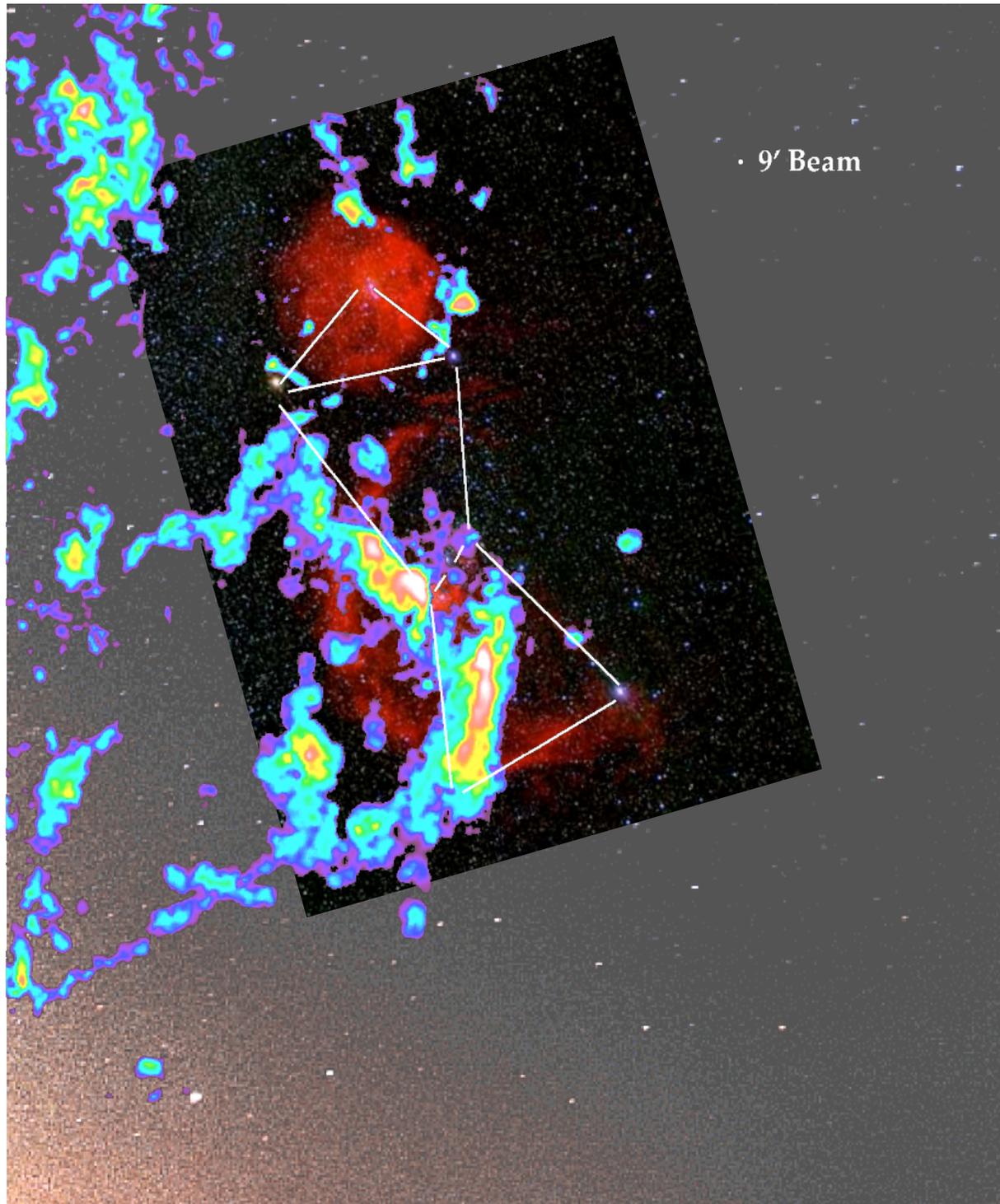
Malin 1

- Sternentstehung extrem ineffizient!
- Malin 1 ist größer als Milchstraße
- Es ist genügend Gas zur Sternentstehung da, aber...
- **BIG QUESTION:** Was verhindert effiziente Sternentstehung in LSB Galaxien?

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.

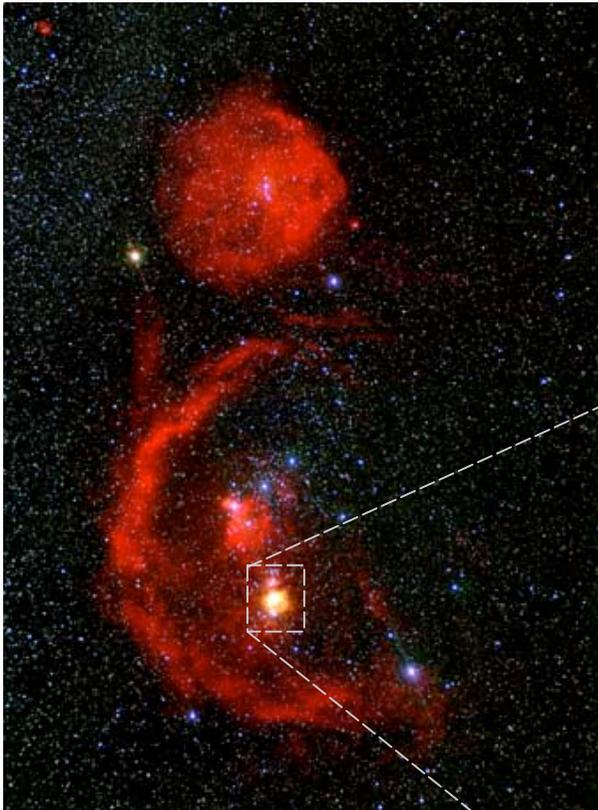


Stern- entstehung in Orion

Wir sehen

- *Sterne* (im sichtbaren Licht)
- Atomaren Wasserstoff (in $H\alpha$ -- rot)
- Molekularen Wasserstoff H_2 (Radiostrahlung -- farbcodiert)

Lokales SE Gebiet: Trapezhaufen in Orion



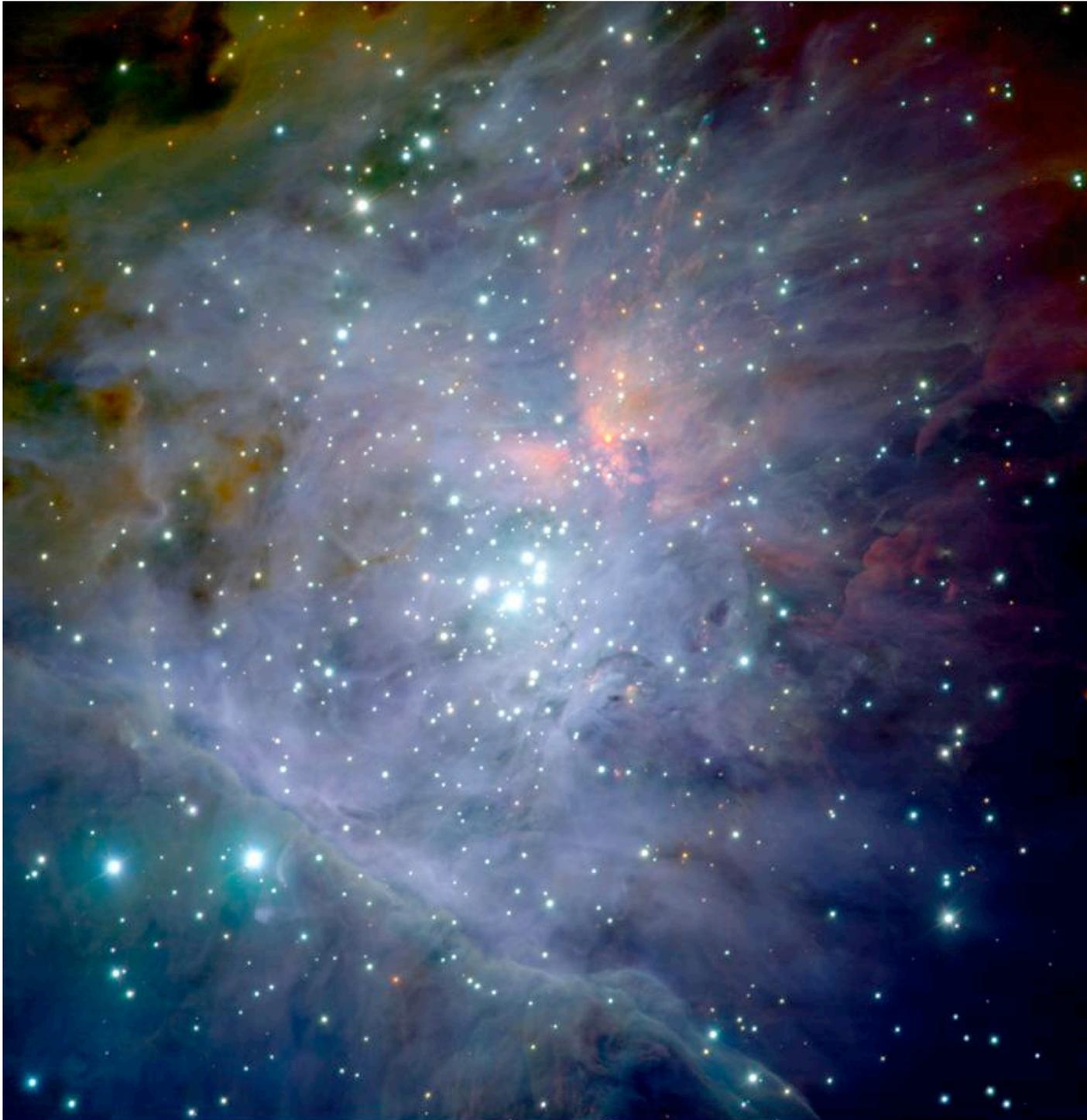
Sternbild Orion

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

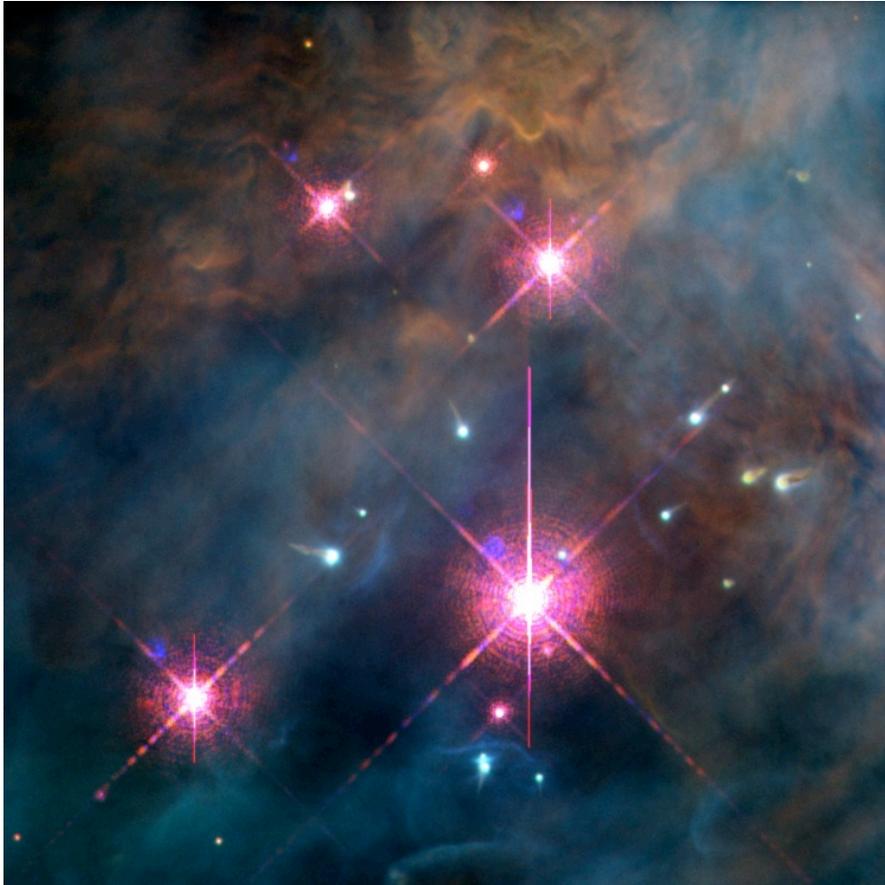


Trapez- haufen (Detail)

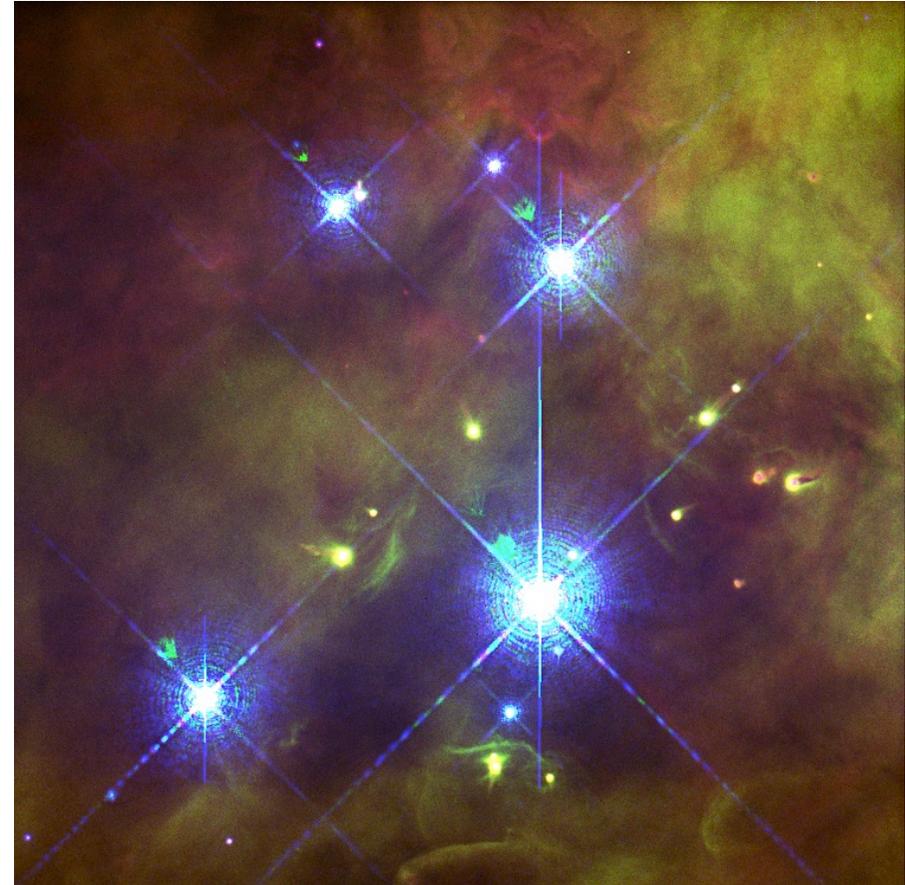
- Sterne ent-
stehen in
Haufen
- Sterne ent-
stehen in
**Molekül-
wolken**
- **Rückkopp-
lungseffekte**
sind wichtig

(Mehrfarbenaufnahme
in J,H,K: McCaughrean,
VLT, Paranal, Chile)

Trapezhaufen: Zentralgebiet



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

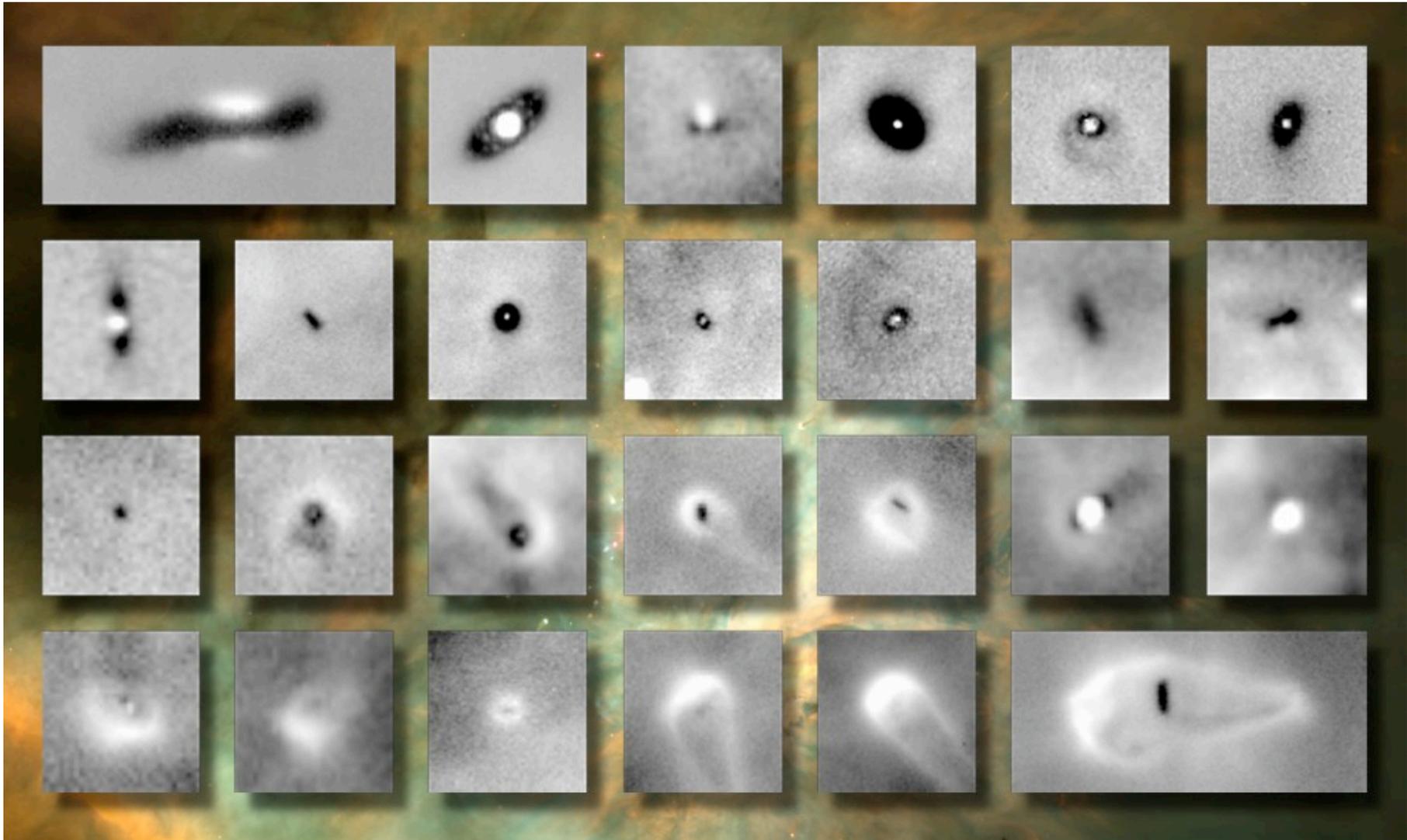


Proplyds: Verdampfende ``protoplanetare`` Scheiben um junge massearme Protosterne

(Abbildung Doug Johnstone et al.)

Klassen: Die turbulente Geburt der Sterne

Weitere Details: Siluett-Scheiben in Orion

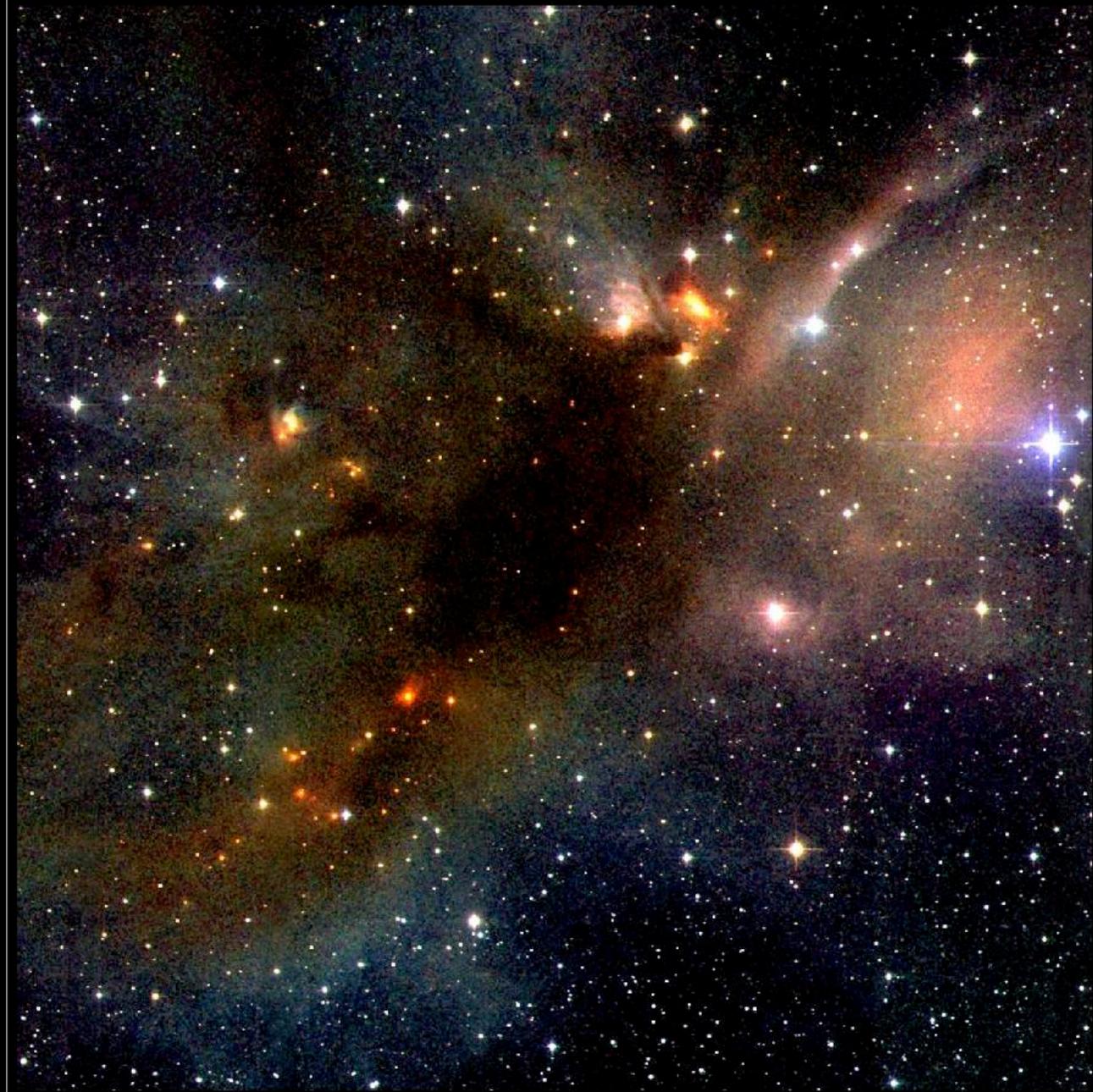


Protostellare Scheiben schatten die Photodissoziationsregion im Hintergrund ab. Jedes Bild ist 750 AU x 750 AU groß.

(Daten von Mark McCaughrean)

Klassen: Die turbulente Geburt der Sterne

The rho Ophiuchi Dark Cloud



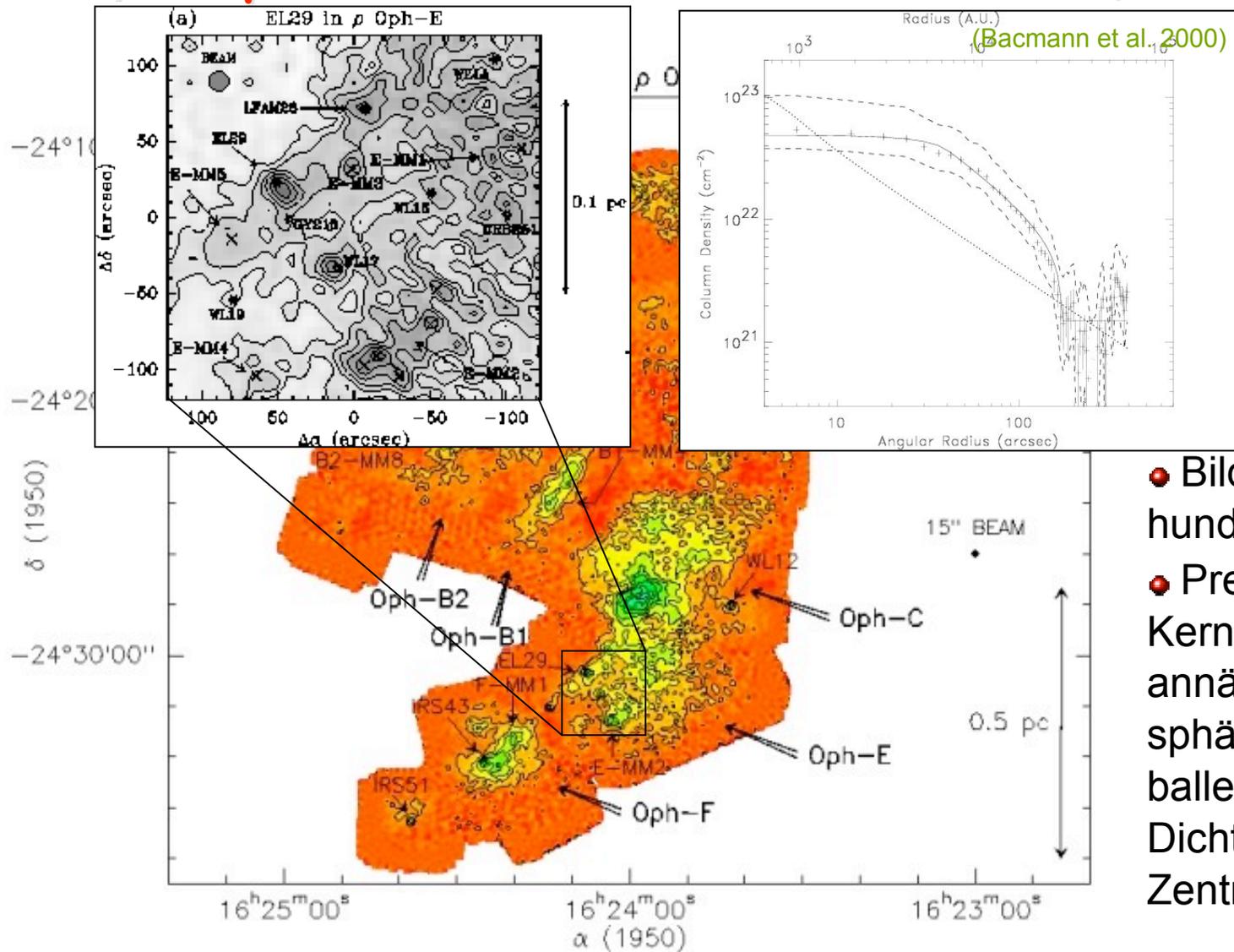
Two Micron All Sky Survey
— Southern Facility —
2MASS Atlas Image Mosaic

Infrared Processing and Analysis Center/Caltech & University of Massachusetts

Sternent-
stehungs-
gebiet
 ρ -Oph
im IR

en: Die turbulente Geburt der Sterne

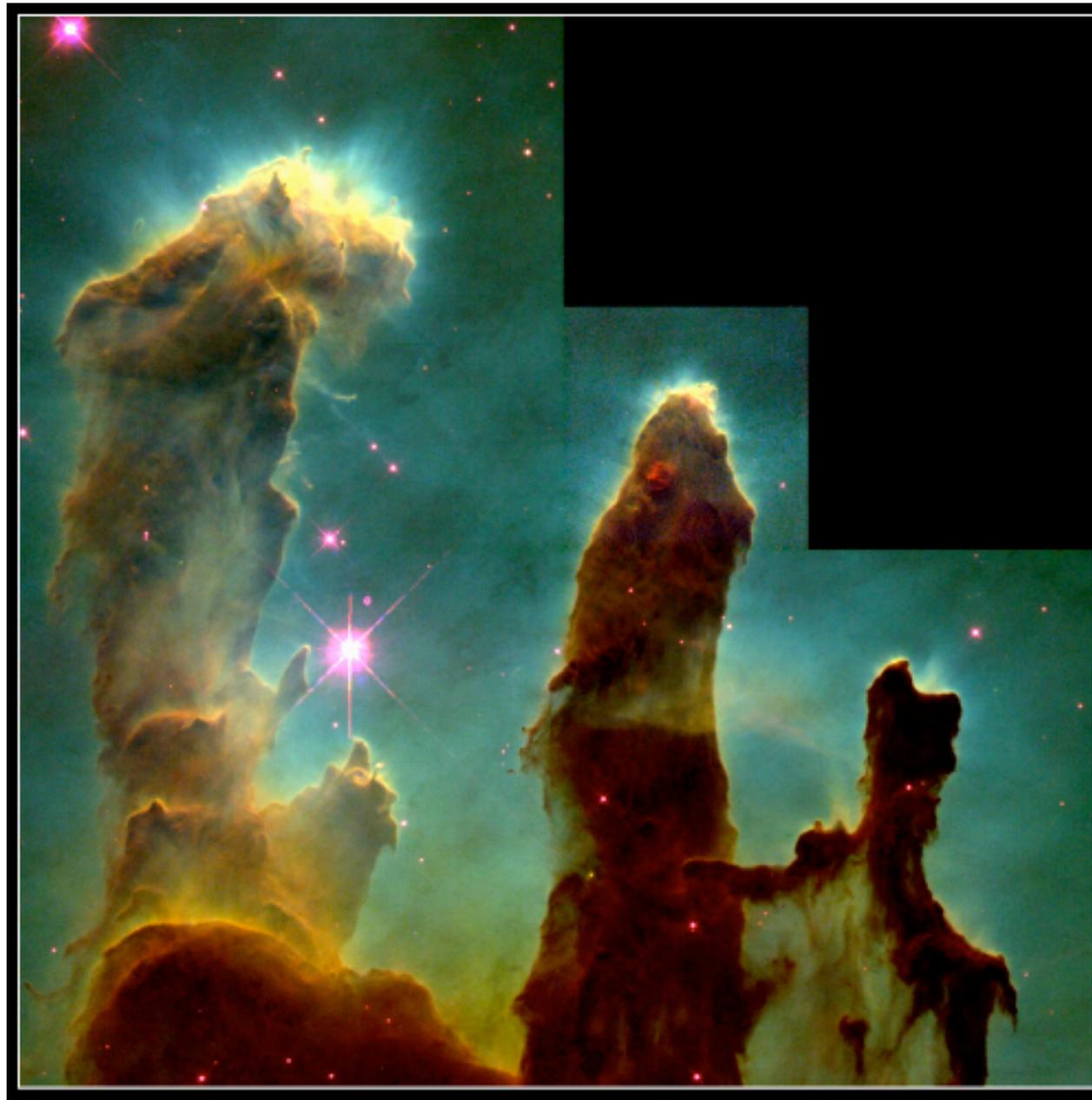
ρ -Ophiuchus: Staubemission (sub-mm)



angangsphase
entstehung
existenz von
stellaren und
ellaren Objek-

- Bildung einiger hunder Sterne
- Prestellare Kerne sind annähernd sphärische Gasballen mit flachem Dichteprofil im Zentrum

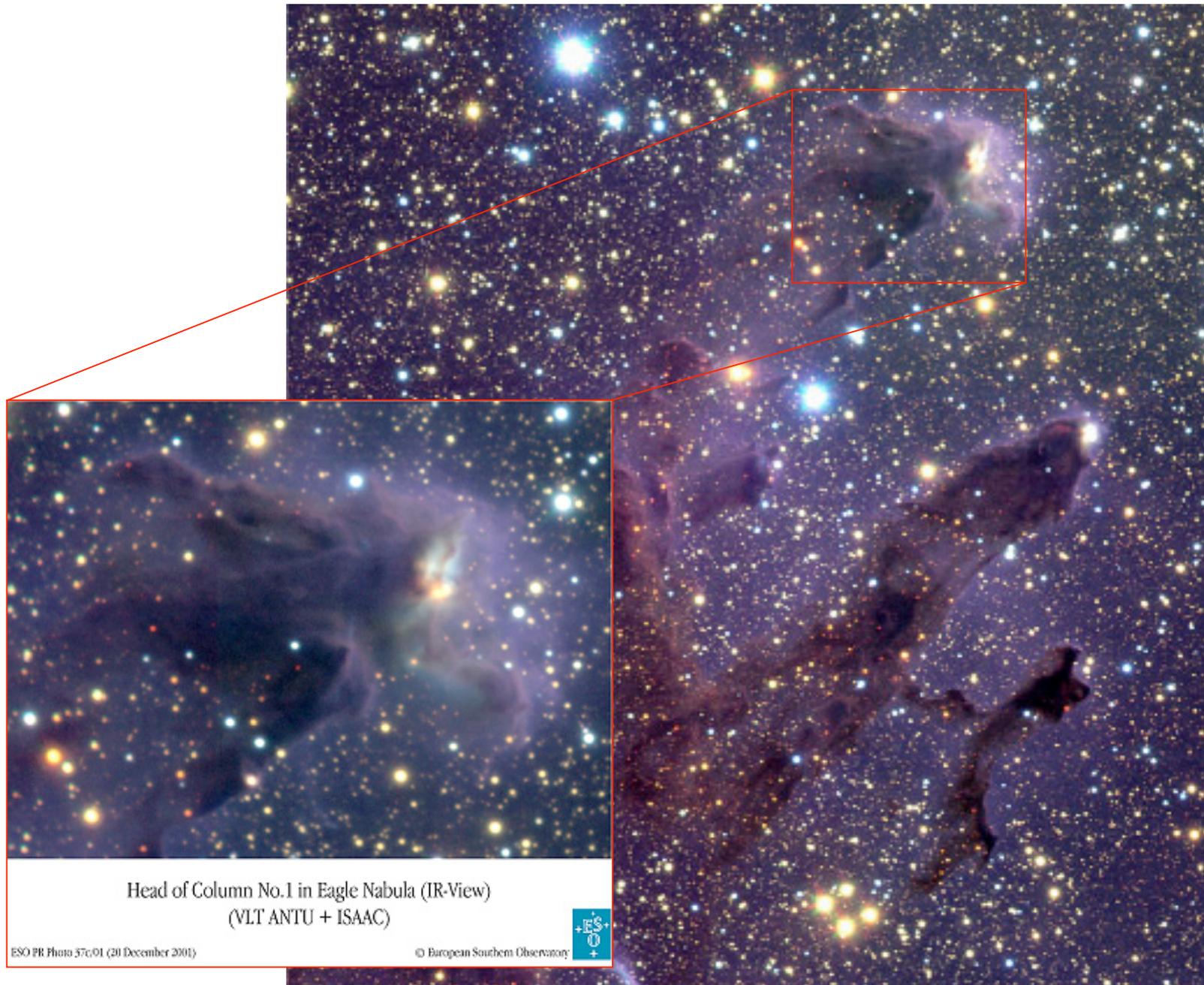
(Motte, André, & Neri 1998)



HST Aufnahme

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

Klassen: Die turbulente Geburt der Sterne



IR Aufnahme mit dem ESO-VLT

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

t der Sterne



IR Aufnahme mit dem ESO-VLT

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

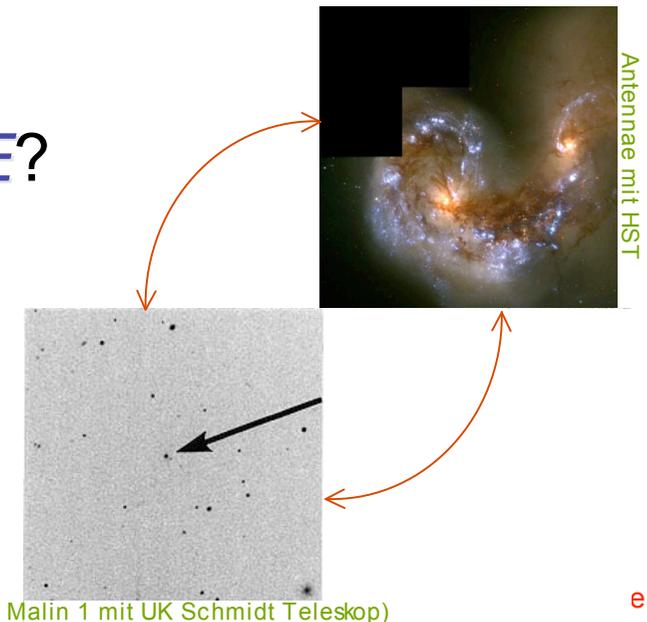
t der Sterne

WIE?

Sternentstehung

- *Wie* bilden sich Sterne?
- Was bestimmt *wo* und *wann* Sterne entstehen?
- Welche physikalische Prozesse *initiieren* und *regulieren* Sternentstehung und ihre *Effizienz*?
- Wie beeinflussen *globale* Eigenschaften der Galaxie die Sternentstehung auf *lokalen* Skalen, und umgekehrt?
- Gibt es verschiedene *Modi* der *SE*? (Star Burst Galaxien ↔ LSBs, *isolate* SE ↔ SE im *Haufen*)

→ *Identifikation der relevanten physikalischen Prozesse!*



Gravoturbulente Sternentstehung

- These:

*Sternentstehung wird kontrolliert
durch das Wechselspiel von
Gravitation und
Überschallturbulenz!*

- Duale Rolle der Turbulenz:

- *Stabilität auf großen Skalen*
- *Initiiert Kollaps auf kleinen Skalen*

Gravoturbulente Sternentstehung

- These:

*Sternentstehung wird kontrolliert
durch das Wechselspiel von
Gravitation und
Überschallturbulenz!*

- Gültigkeit:

Dies gilt auf *allen Skalen* und betrifft sowohl die Entstehung einzelner Sterne innerhalb von Molekülwolken als auch die Bildung von Molekülwolken in der galaktischen Scheibe.

Im Detail...

Wie funktioniert Sternentstehung

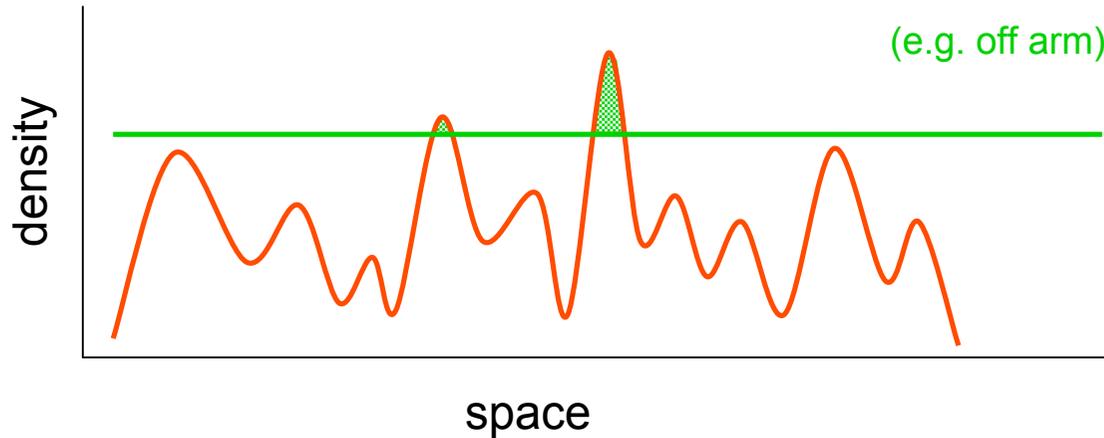
1. Galaktische Skalen....
 - Scheibengalaxien wie die Milchstraße
 - wechselwirkende Galaxien
2. Sternentstehung in der Galaktischen Scheibe...
 - Molekülwolken
 - Überschallturbulenz
 - Gravitation
3. Bildung einzelner Sterne und Planetensysteme...
 - gravitativer Kollaps
 - protostellare Scheiben

Galaktische Skalen

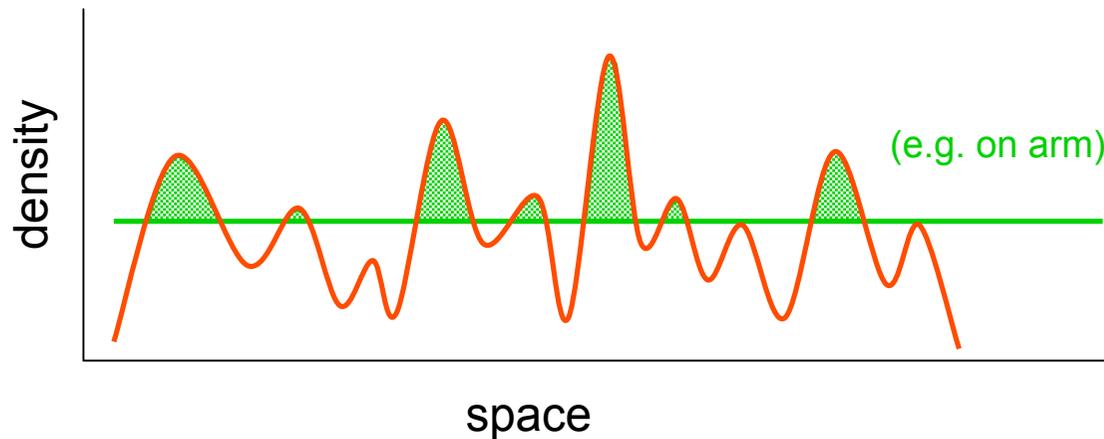
SE in Scheibengalaxien

- SE auf globalen Skalen [!] = Bildung von Molekülwolken
- Molekülwolken bilden sich an *Stagnationspunkten konvergenter großskaliger Strömungen* (Gas aus $\sim 0.5 \text{kpc}^3$) → hohe Dichte
→ eff. Kühlung → schnelle H₂ Bildung & grav. Instabilität
→ lokaler Kollaps & Sternentstehung
- Molekülwolkenbildung *bestimmt* durch Wechselspiel von *Gravitation, Kühlung und Heizung, und Überschallturbulenz*
- Externe Störungen *erhöhen* lokale Wahrscheinlichkeit der Molekülwolkenbildung (z.B. in Spiralarmen oder bei Galaxienwechselwirkung, usw.)

SE in Scheibengalaxien



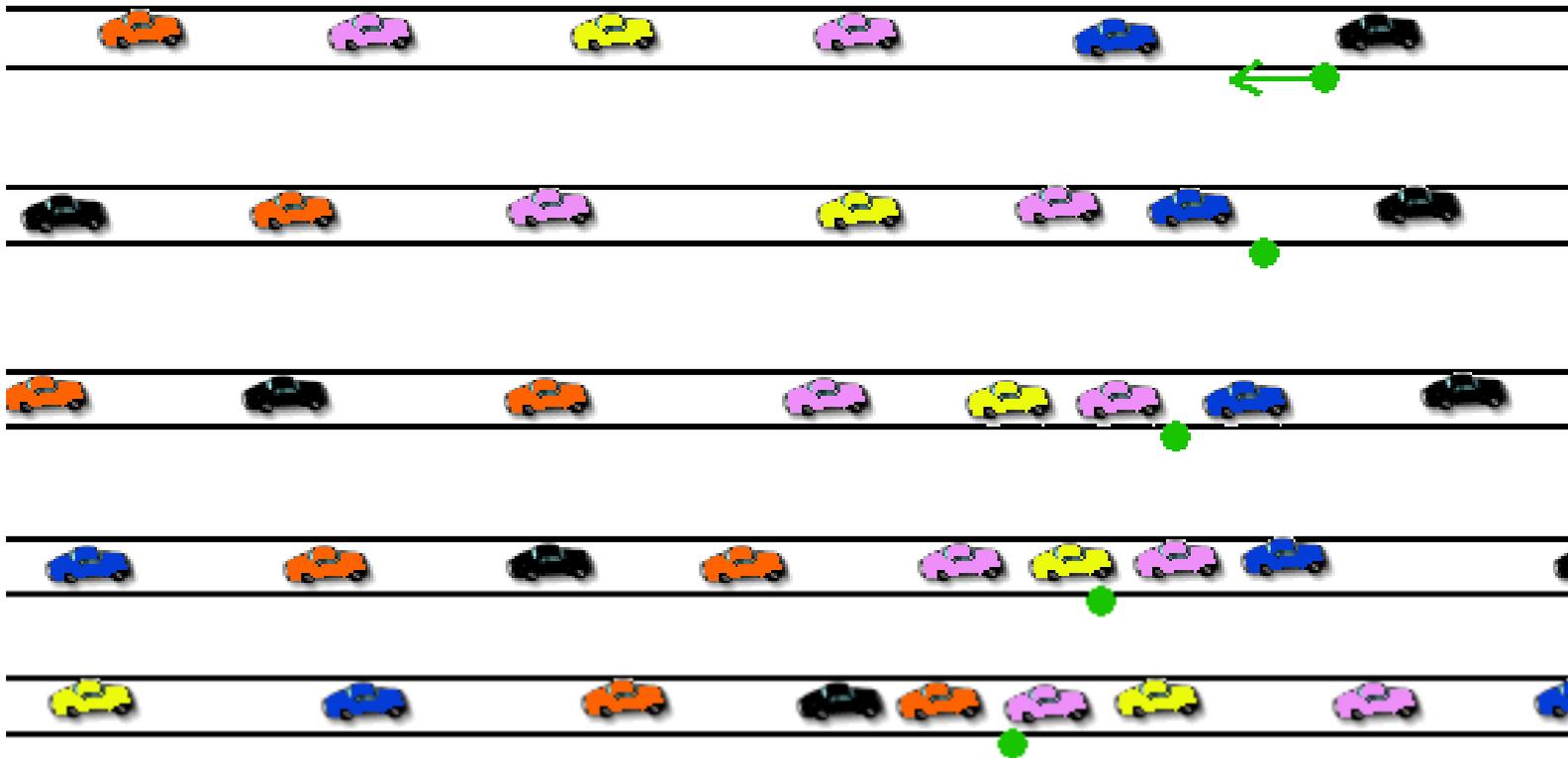
Überschallturbulenz erzeugt große Dichteschwankungen in warmer atomarer ISM



In einigen Gebieten ist die Dichte hoch genug, um in "ausreichender Zeit" H_2 zu bilden
→ *Molekülwolken entstehen*

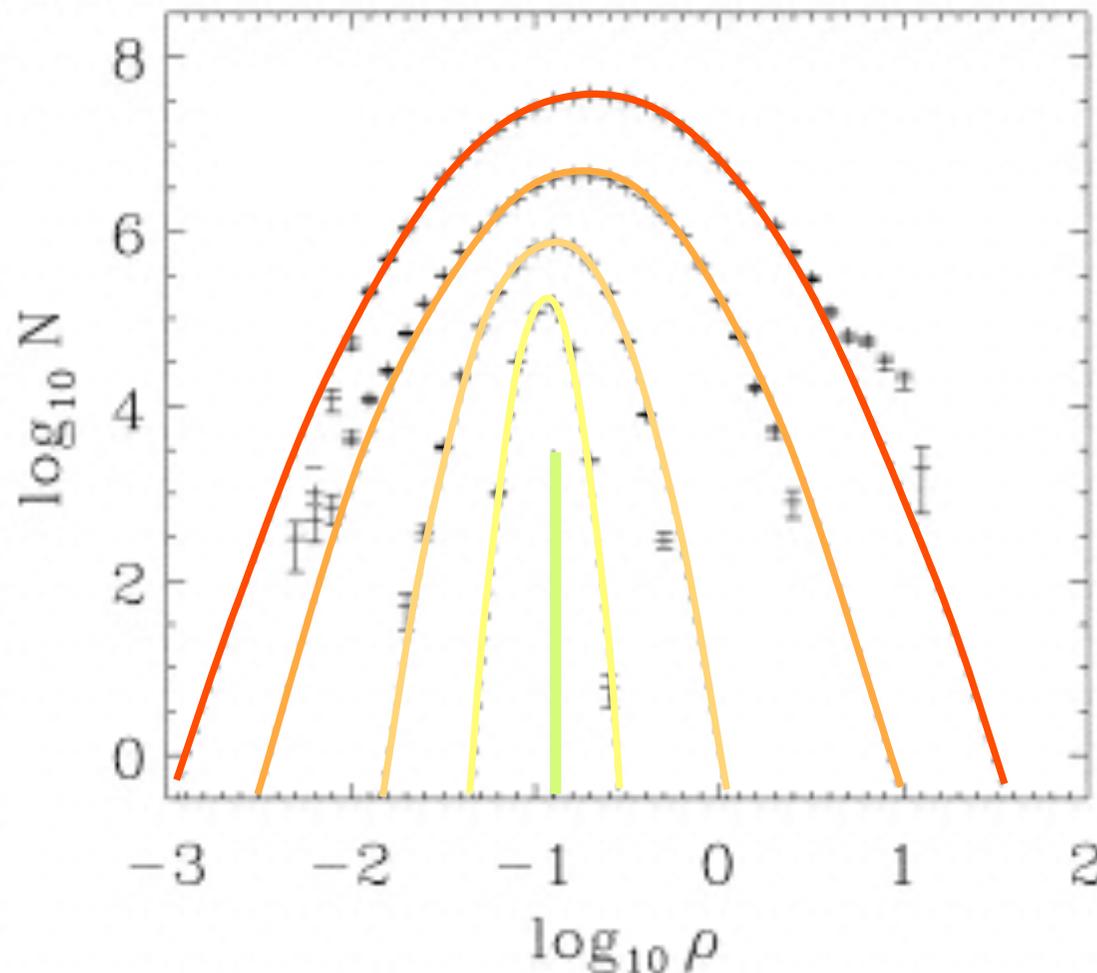
Externe Störungen (z.B. im Potential) erhöhen diese Wahrscheinlichkeit

Dichtwellentheorie



Dichtewellen: Spiralarme sind „Stautellen“ im Fluss der interstellaren Materie.

SE in Scheibengalaxien



Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion der Dichte (ρ -pdf) für frei dissipierende Überschall-turbulenz

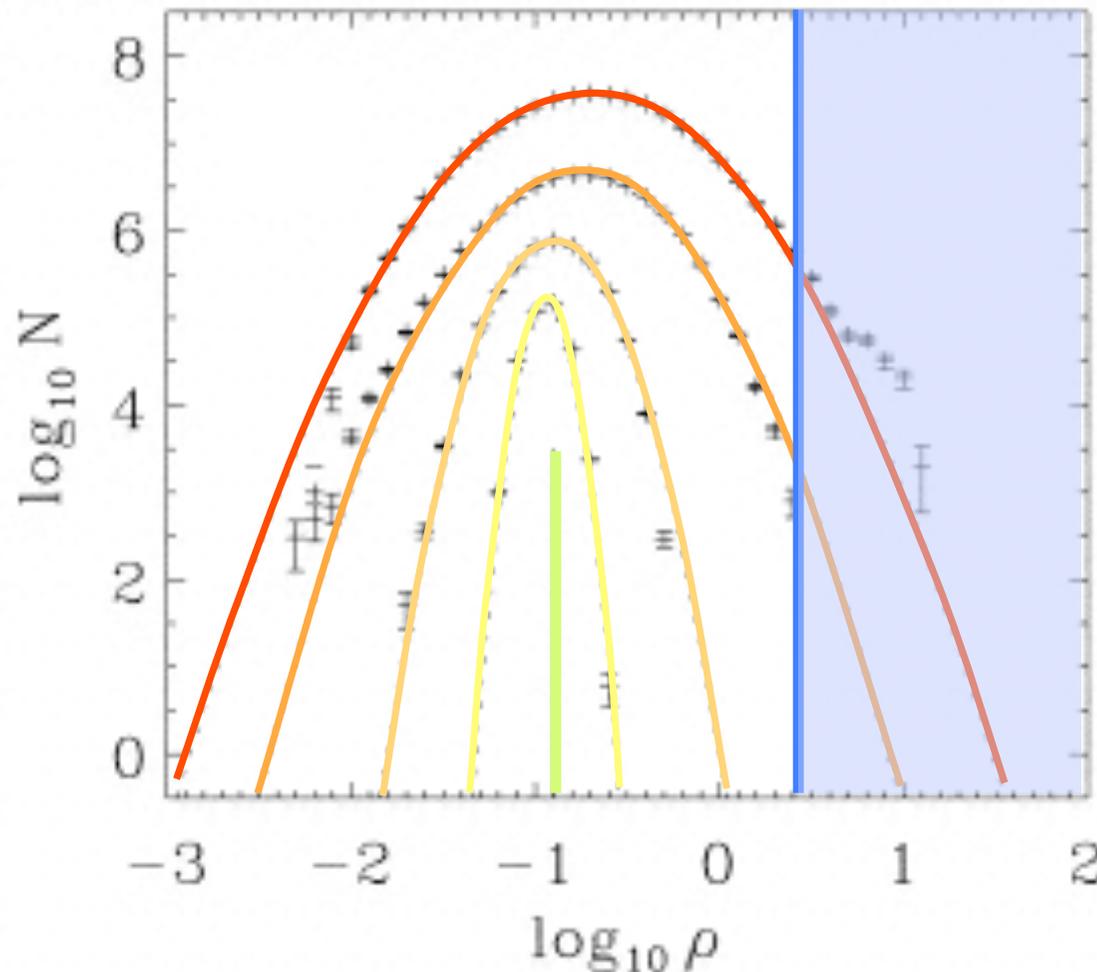
Änderung der rms Machzahl:

M1 > **M2** >
M3 > **M4** > 0

Dichteverteilung in Abhängigkeit der turbulenten Machzahl M

(aus Klessen, 2001)

SE in Scheibengalaxien



H₂ Bildungsrate:

$$\tau_{\text{H}_2} \approx \frac{1.5 \text{ Gyr}}{n_{\text{H}} / 1 \text{ cm}^{-3}}$$

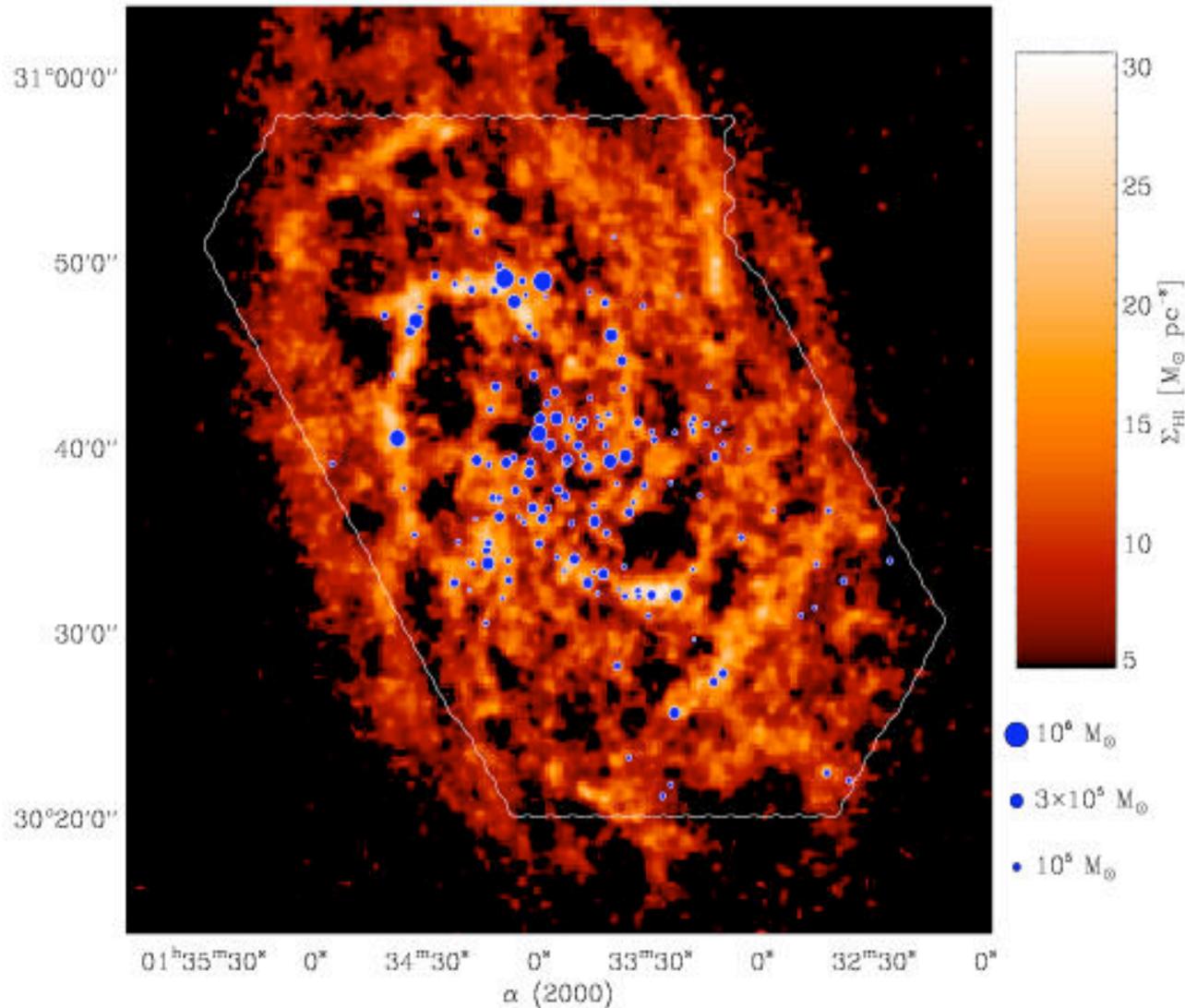
Bei $n_{\text{H}} \geq 100 \text{ cm}^{-3}$,
entsteht H₂ in 10⁷
Jahren; dies ist
typische Lebenszeit
der MW'en.

*Welcher Anteil
der ISM erreicht
solche Dichten?*

Dichteverteilung in Abhängigkeit der turbulenten Machzahl M

(aus Klessen, 2001; Rate aus Hollenbach, Werner, & Salpeter 1971)

Korrelation zwischen H_2 und HI



Vergleich H_2 - HI in M33:

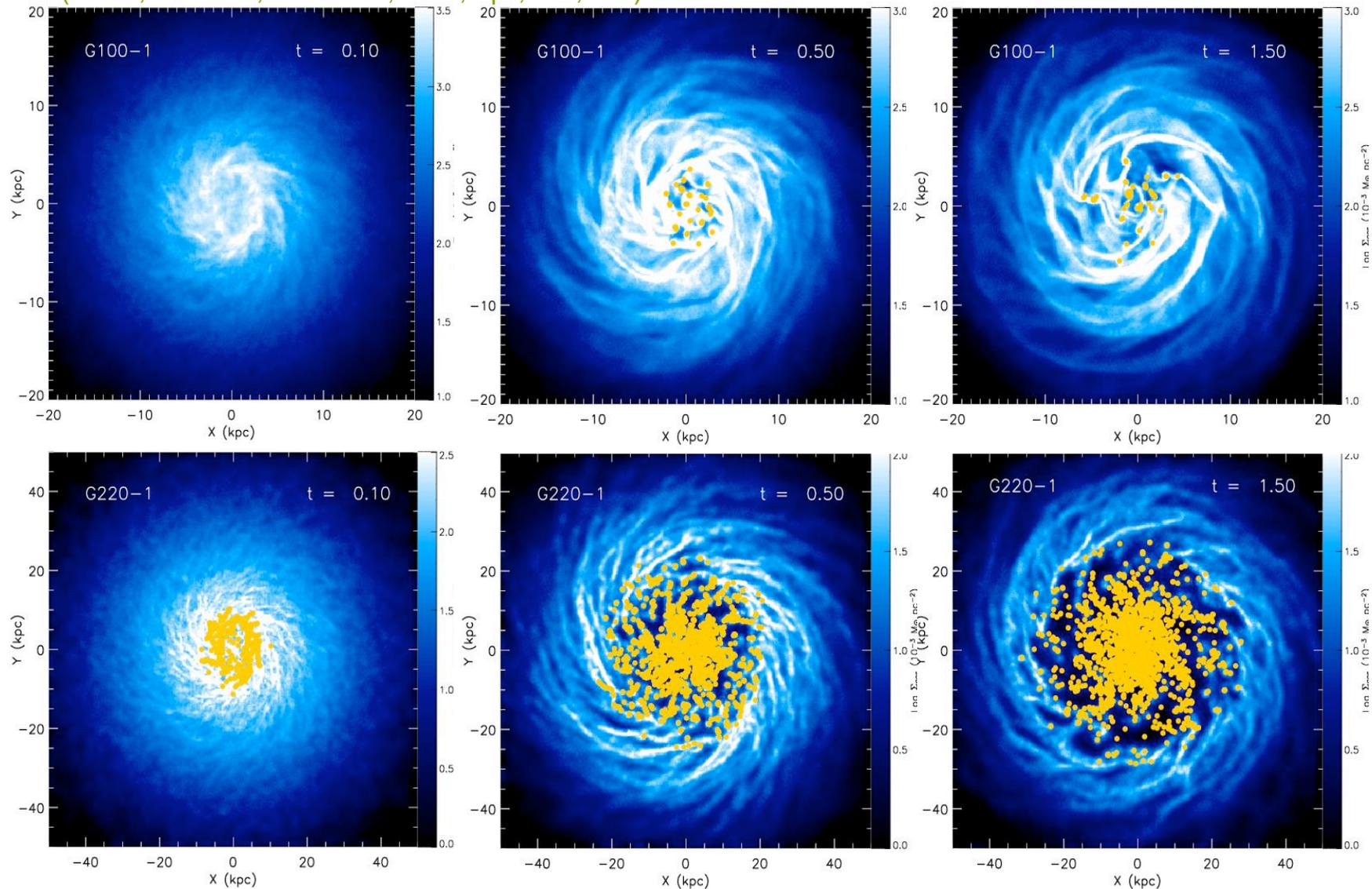
- H_2 : BIMA-SONG Survey, siehe Blitz et al.
- HI: Beobachtung mit Westerbork Teleskop

H_2 -Wolken findet man in Gebieten hoher HI-Dichte (in Spiralarmen und Filamenten)

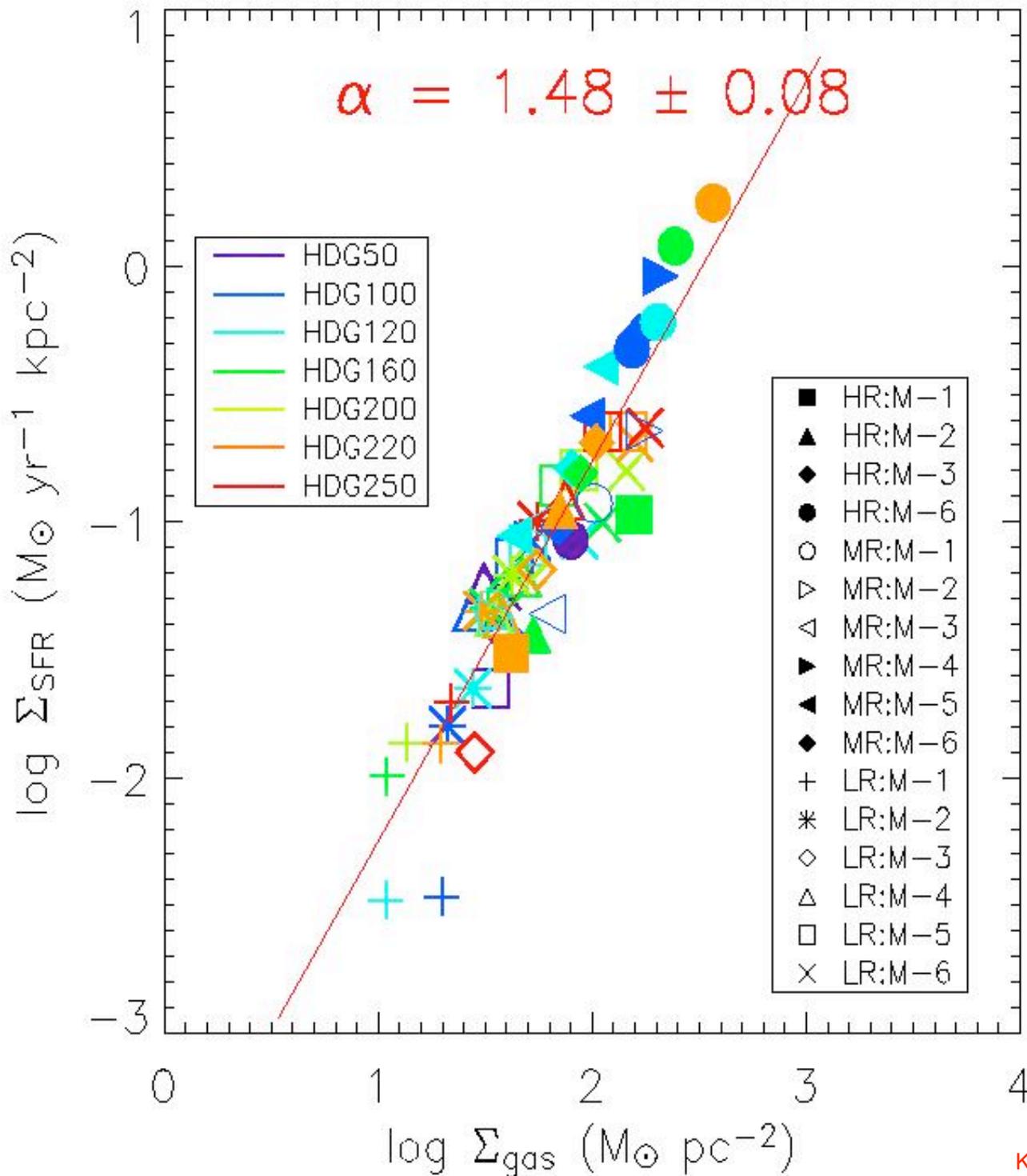
(Deul & van der Hulst 1987, Blitz et al. 2004)

Modelle von Scheibengalaxien

(aus Li, Mac Low, & Klessen, 2005, ApJ, 620, L19)



Klessen: Die turbulente Geburt der Sterne



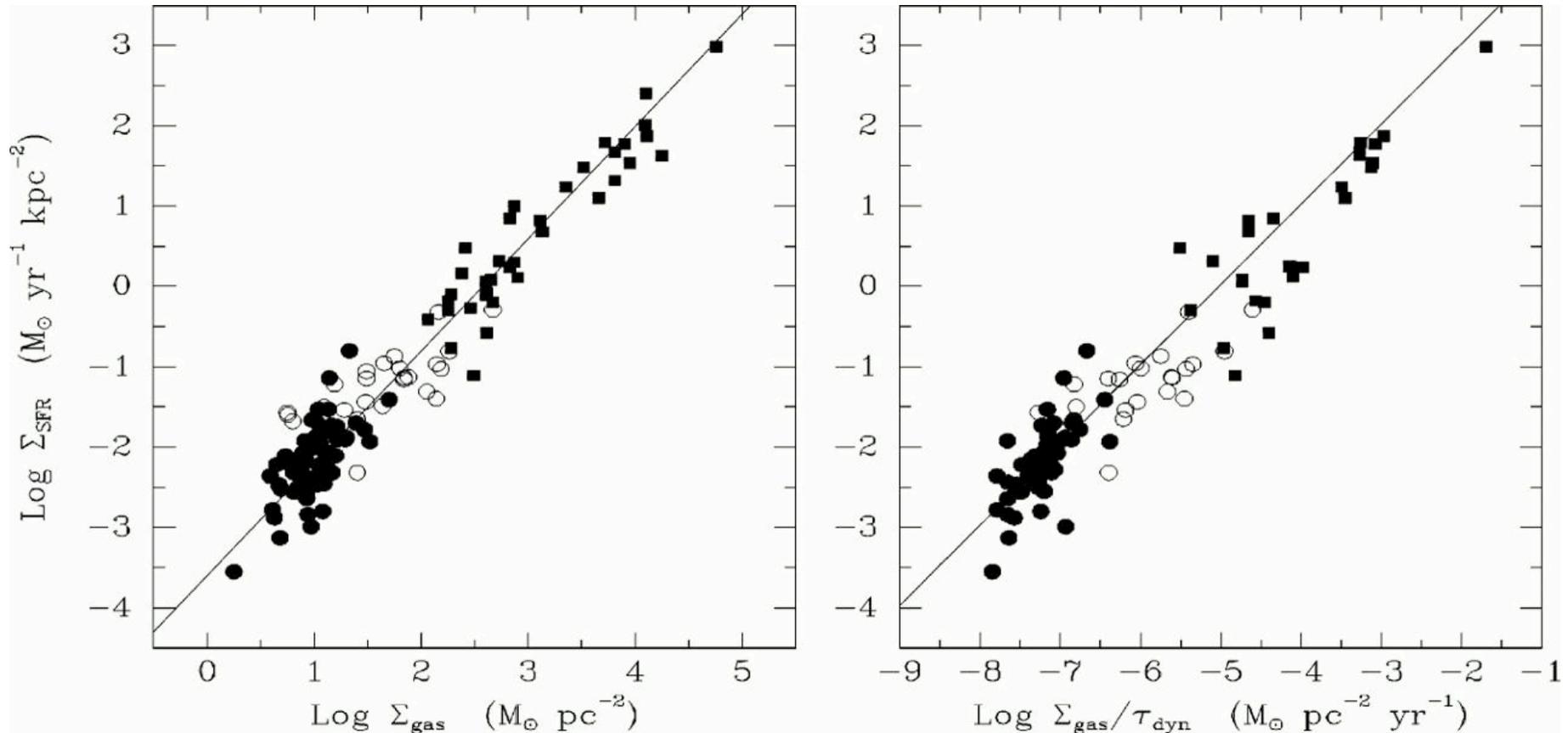
(Li, Mac Low, & Klessen, 2005, ApJ, 620, L19)

Wir finden
Korrelation
zwischen
Sternent-
stehungsrate
und *Gas-*
flächendichte:

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

globales
Schmidt-
Gesetz

Beobachtetes Schmidt-Gesetz

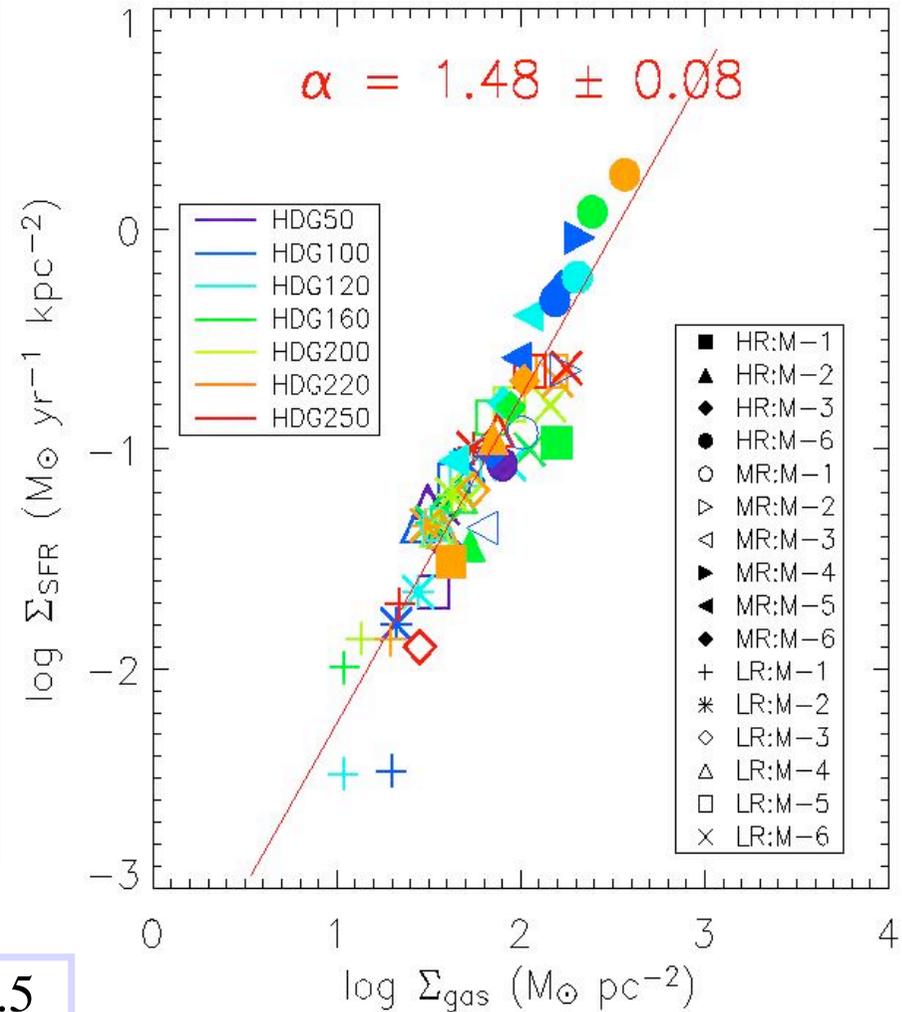
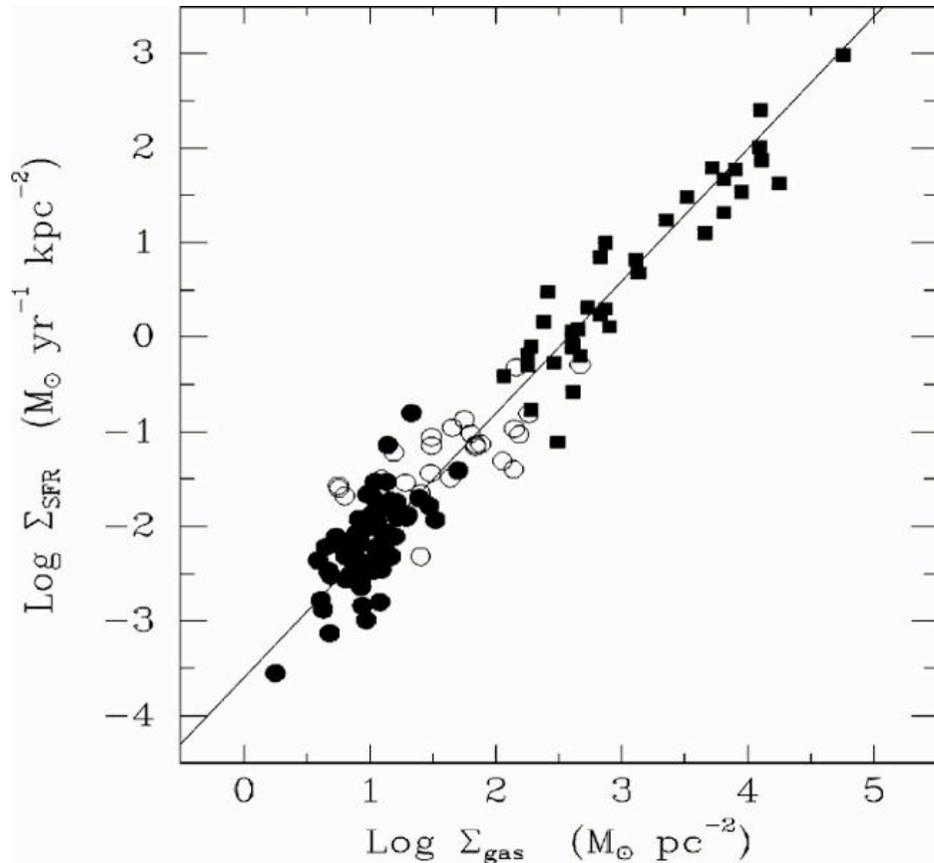


$$\Sigma_{\text{SFR}} = (2.5 \pm 0.7) \times 10^{-4} \left(\frac{\Sigma_{\text{gas}}}{1 M_{\odot} \text{ pc}^{-2}} \right)^{1.4 \pm 0.15} M_{\odot} \text{ year}^{-1} \text{ kpc}^{-2},$$

(aus Kennicutt 1998)

Klassen: Die turbulente Geburt der Sterne

Beobachtetes Schmidt-Gesetz



in beiden Fällen

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

(from Kennicutt 1998)

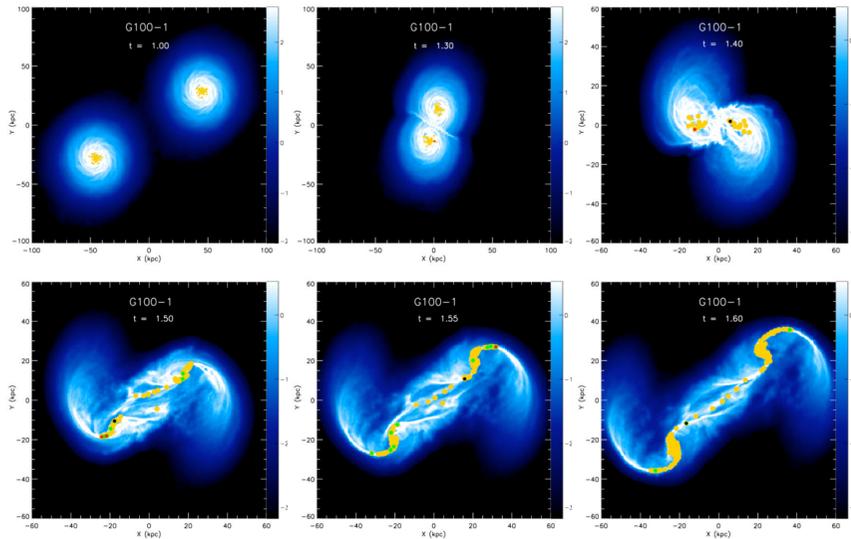
Klassen: Die turbulente Geburt der Sterne

Wechselwirkende Galaxien

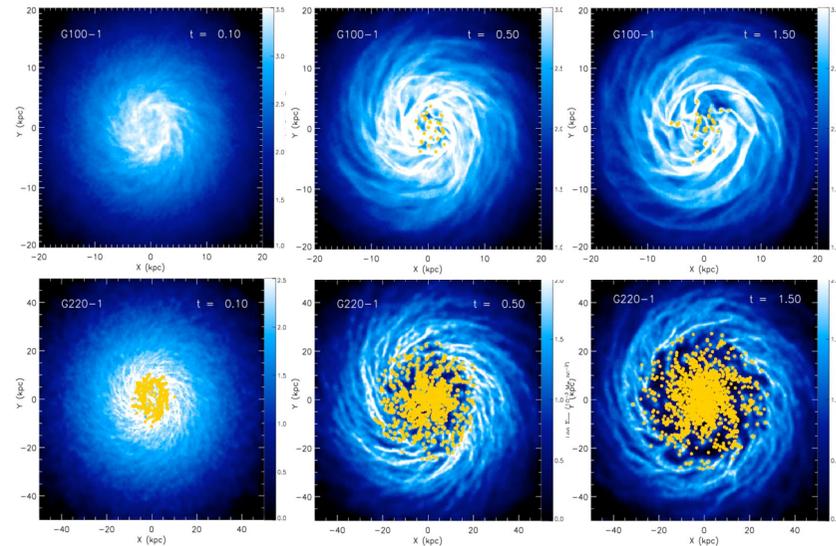
Vergleiche

Sternentstehung in wechselwirkenden Galaxien

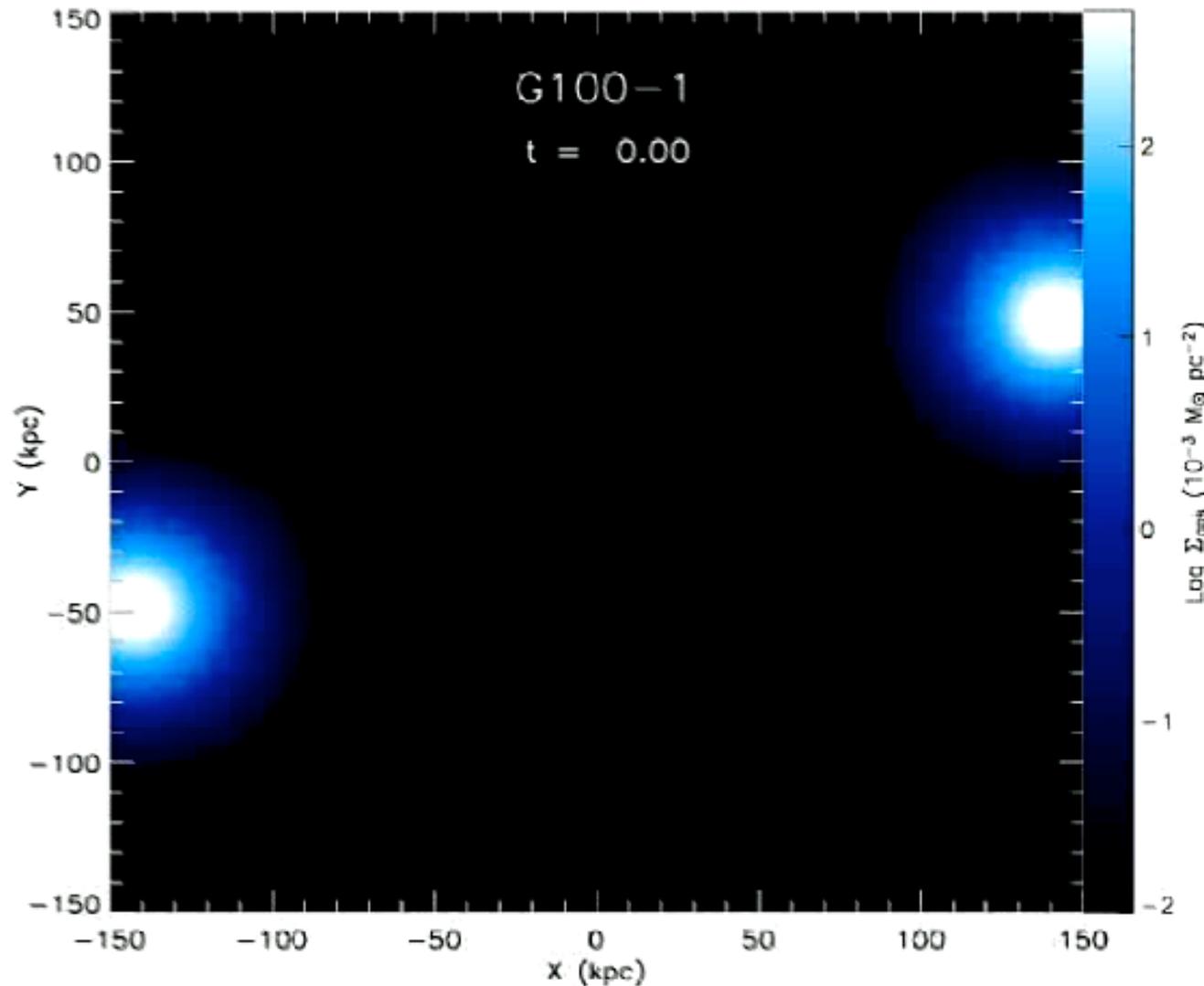
Sternentstehung in isolierten Galaxien



(Li, Mac Low, & Klessen, 2004a, ApJ, 614, L29)



(Li, Mac Low, & Klessen, 2004b, ApJ, 620, L19)



Beispiel: Bildung junger Sternhaufen (Kugelsternhaufen) in verschmelzenden Galaxien (aus Li, Mac Low, Klessen, 2004, ApJ, 614, L29)

SE auf galaktischen Skalen

- In *isolierten Scheibengalaxien* wie unserer *Milchstraße* entstehen neue Sterne in Gebieten in denen die *Schwerkraft* die Effekte von *Gasdruck* und *Turbulenz* überwiegt.
 - Das ist vor allem in den *Spiralarmen* der Fall (*Dichtewellen*).
 - Sternentstehung *erzeugt* Turbulenz. --> Daher sinkt die Wahrscheinlichkeit für weitere Sternbildung. --> Es stellt sich ein *dynamischer Gleichgewichtszustand* ein mit nahezu *konstanter Sternentstehungsrate*.
- In *wechselwirkenden Galaxien* überwiegt die *Schwerkraft*. --> Es kommt zu einem „Ausbruch“ von Sternbildung!
--> *Starburst Galaxie*
- Dominiert die *Überschallturbulenz* in der Scheibe die dynamische Entwicklung wird Sternbildung unterdrückt.
--> *Low-Surface-Brightness Galaxie*

Lokale Skalen

Gravoturbulente Sternentstehung

- *Überschallturbulenz* in der galaktischen Scheibe produziert starke *Dichtefluktuationen* (in Schocks: $\delta\rho/\rho \propto M^2$)
 - chemischer Phasenübergang: atomar \rightarrow molekular
 - Kühlungsinstabilität
 - gravitative Instabilität
- Kalte *Molekülwolken* entstehen in Gebieten hoher Dichte
- *Turbulenz* erzeugt Dichtestruktur, *Gravitation* selektiert für Kollaps
—————→ **GRAVOTUBULENTE FRAGMENTATION**

- *Turbulente Kaskade*: Lokale Kompression *im Inneren* der Wolke führt zu Kollaps \rightarrow *Sterne* und *Sternhaufen*

Vorgehensweise...

- Was ist Turbulenz?
- Woher wissen wir von der Turbulenz in interstellaren Gaswolken?
- Welche Eigenschaften von Molekülwolken sind wichtig für die Sternentstehung?
- Wie funktioniert die gravoturbulente Theorie der Sternentstehung?
- Was passiert auf kleinen Skalen?
(Planetenbildung)

Was ist Turbulenz?

- **Formal:** Der Charakter einer Strömung ändert sich von laminar in turbulent wenn die Reynold-Zahl sehr groß wird:

$$\text{Re} = \frac{VL}{\nu}$$

- **Turbulente Energiekaskade:** Energie fließt von großen zu kleinen Skalen und wird schließlich durch molekulare Viskosität dissipiert:

$$\dot{E} = \eta V^3 / L$$

- **Überschallturbulenz:** mittlere Geschwindigkeit ist größer als Schallgeschwindigkeit:

$$\sigma_{rms} > c_s$$

ISM-Eigenschaften

- Verschiedene Phasen: am wichtigsten für Sternentstehung ist Molekularer Wasserstoff → **Molekülwolken**
- Wichtigste Wellenlängen: **IR und Radio-Strahlung**
(Staubkontinuum und Moleküllinien: CO, NH₃, CS, etc.)
(über 100 verschiedene Moleküle identifiziert)
- **ACHTUNG**: immer nur in **Projektion** (*PPV*) beobachtbar!
- Säulendichte aus Intensität der Emission
- Geschwindigkeiten entlang der Sichtlinie durch Doppler-Verschiebung der Linie

Phasen der interstellaren Materie

Die Dominanz von Wasserstoff legt eine Klassifizierung der Regionen des ISM gemäß des Zustands von H nahe:

Ionisierter atomarer Wasserstoff HII (H^+)
Neutraler atomarer Wasserstoff HI (H)
Molekularer Wasserstoff H_2

 Ionisation
Phasenübergang

Die jeweiligen Regionen bestehen nahezu zu 100% aus der entsprechenden Komponente, wobei, die Grenzgebiete zwischen HII, H und H_2 sehr dünn sind.

Der größte Teil (ca. 80%) des ISM machen HI und HII-Gebiete niedriger Dichte aus. H_2 befindet sich in *Molekülwolken*, die oft von HII-Gebiete hoher Dichte begleitet werden. In der Milchstraße entstehen Sterne immer in Molekülwolken!

Chemische Zusammensetzung

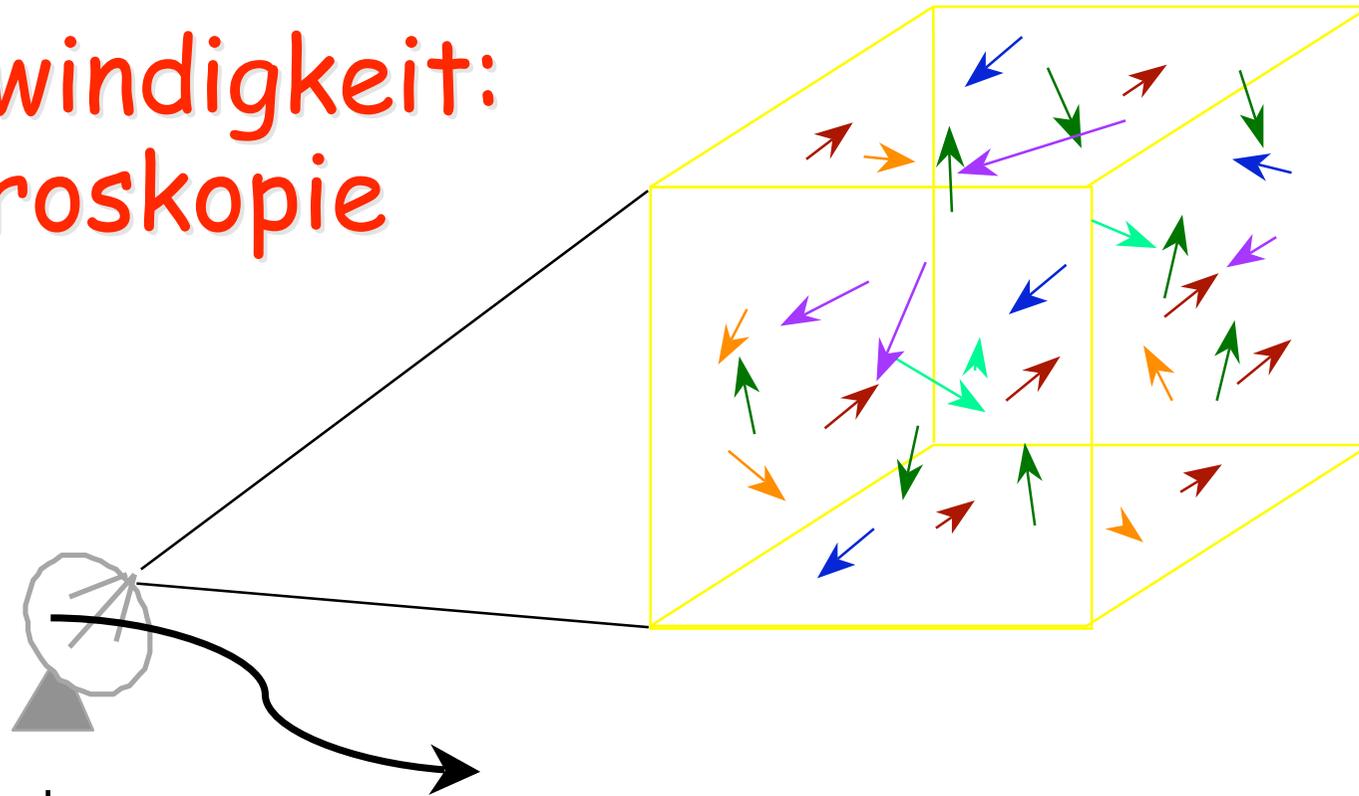
Häufigkeit bezogen auf 1.000.000 Wasserstoff-Atome

Element Ordnungszahl kosmische Häufigkeit

Wasserstoff	H	1	1.000.000
Deuterium	${}_1\text{H}^2$	1	16
Helium	He	2	68.000
Kohlenstoff	C	6	420
Stickstoff	N	7	90
Sauerstoff	O	8	700
Neon	Ne	10	100
Natrium	Na	11	2
Magnesium	Mg	12	40
Aluminium	Al	13	3
Silicium	Si	14	38
Schwefel	S	16	20
Calcium	Ca	20	2
Eisen	Fe	26	34
Nickel	Ni	28	2

Wasserstoff ist das häufigste Element (mehr als 90% aller Atome). Im Vergleich zur kosmischen Häufigkeit sind manche Elemente im ISM seltener, d.h. abgereichert. Ein Teil ihrer Atome befinden sich nicht mehr in der Gasphase, sondern in Staubteilchen.

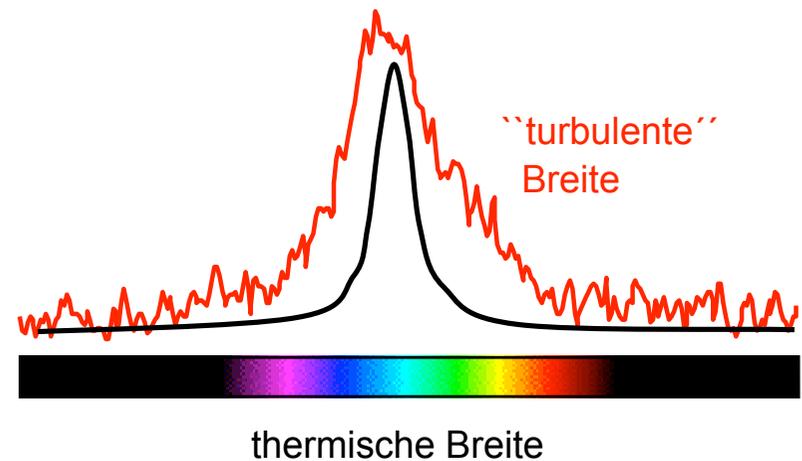
Geschwindigkeit: Spektroskopie



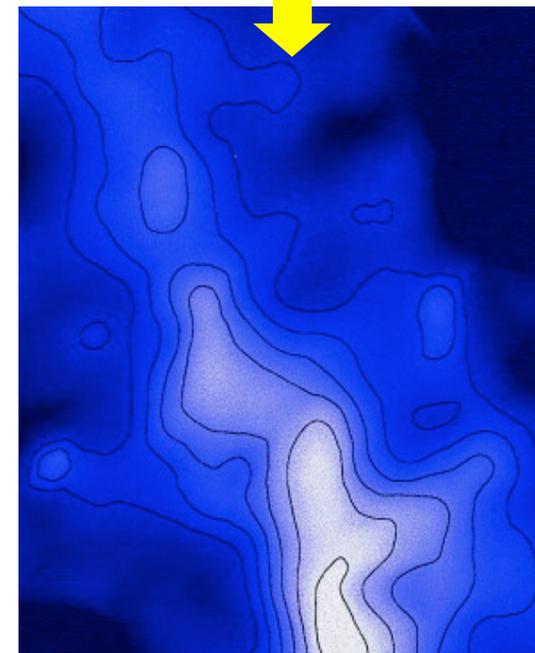
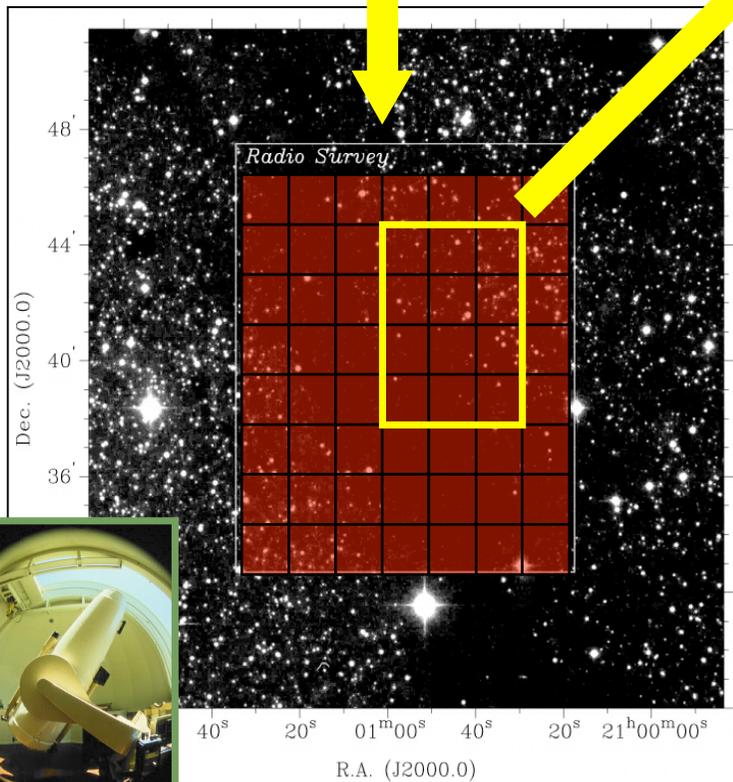
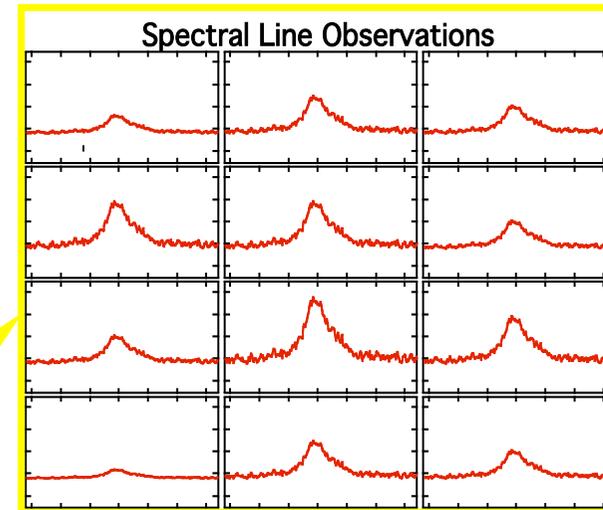
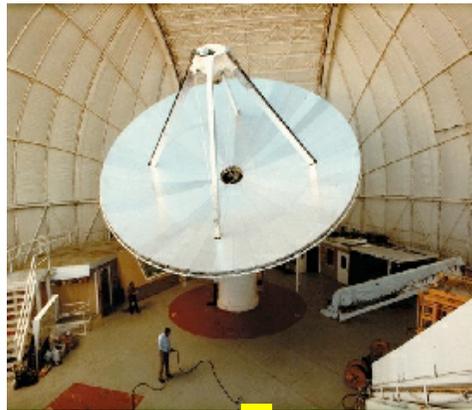
Teleskop +
Spektrometer

Doppler -Verschiebung

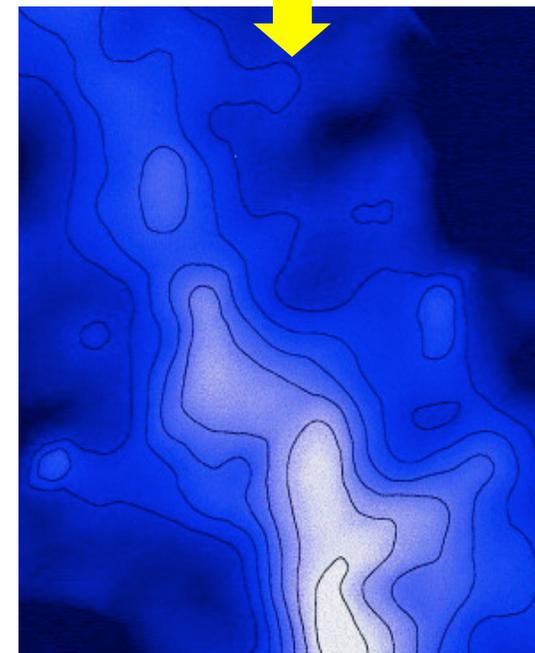
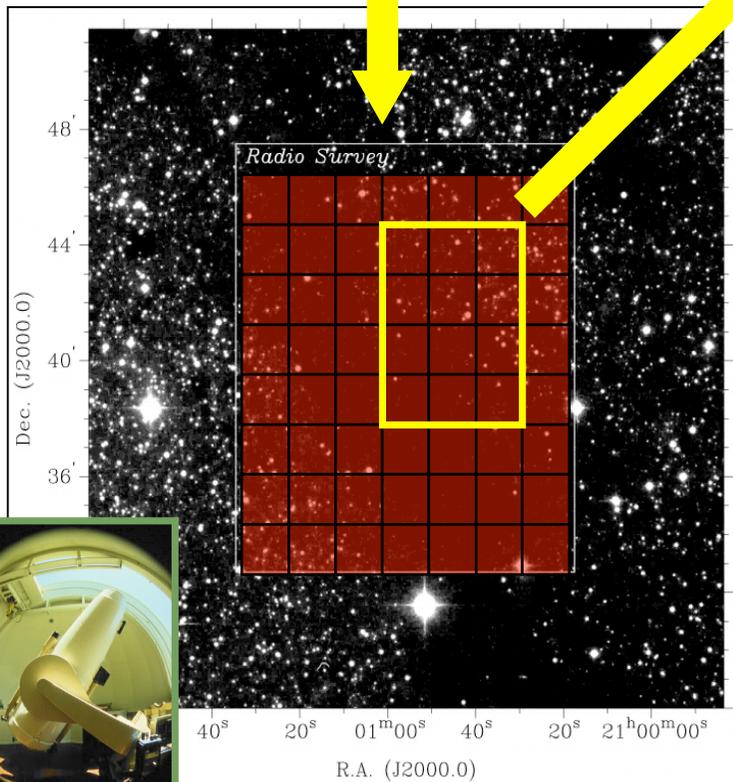
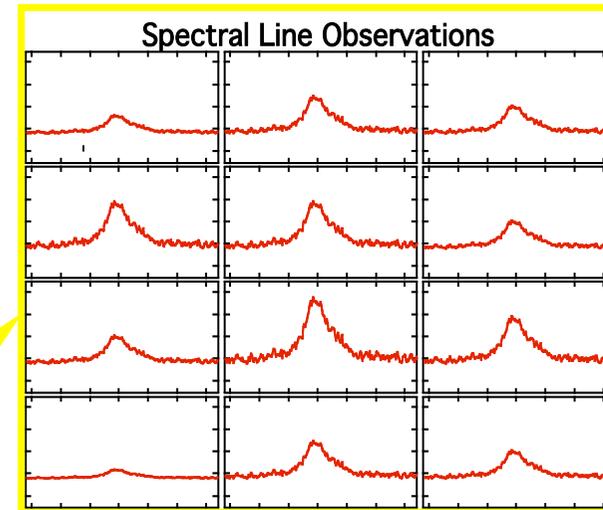
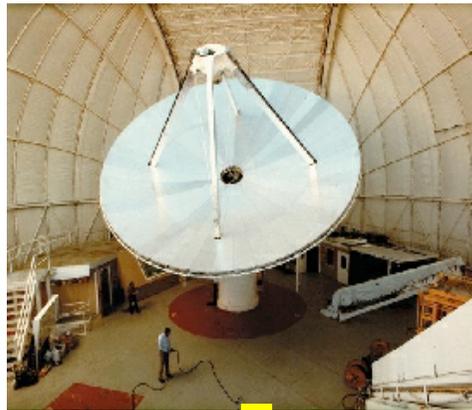
*Überschallturbulenz da beobachtete
Linienbreite größer als thermische
Breite!!!*



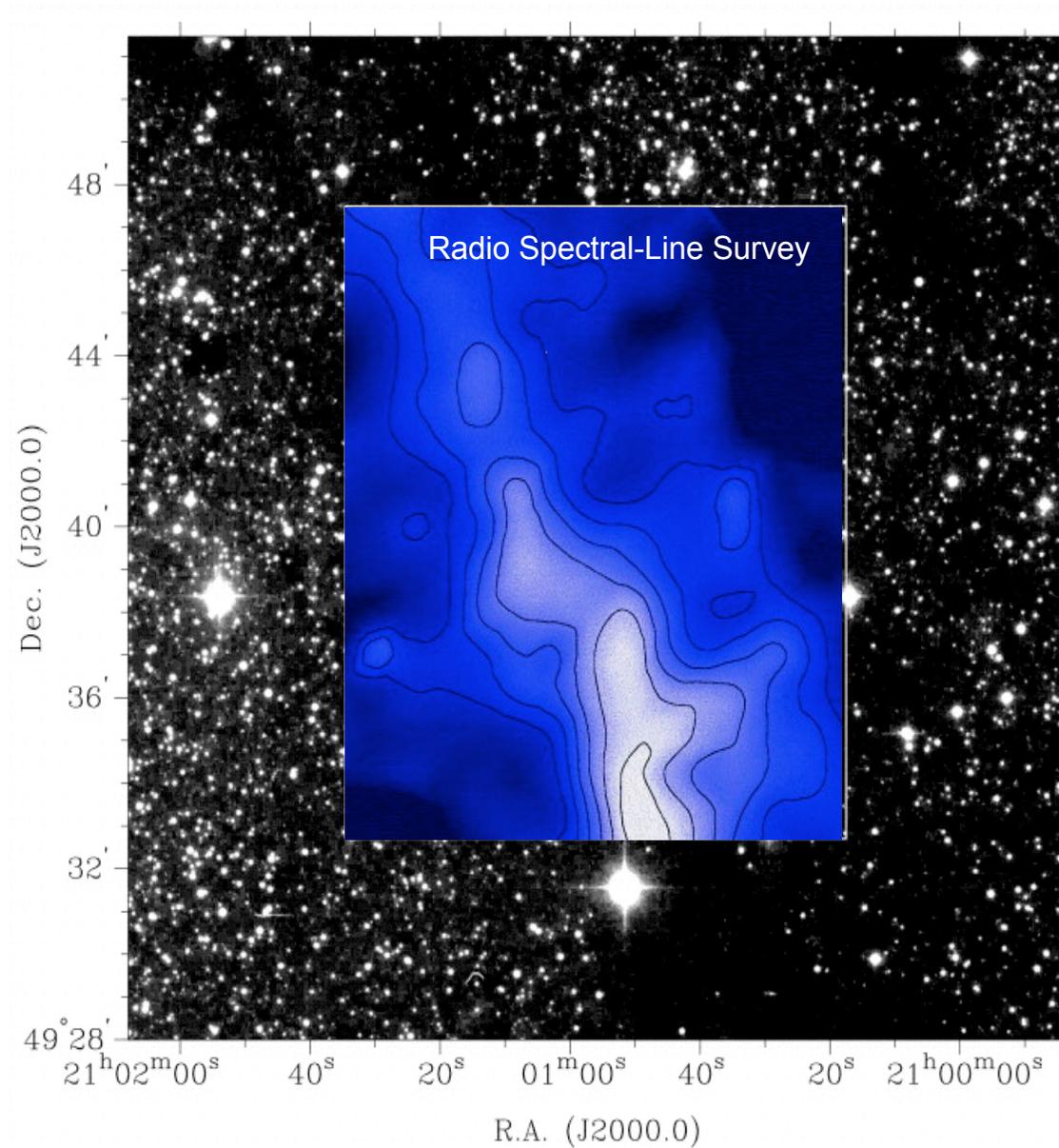
Radiobeobachtungen von Molekülwolken



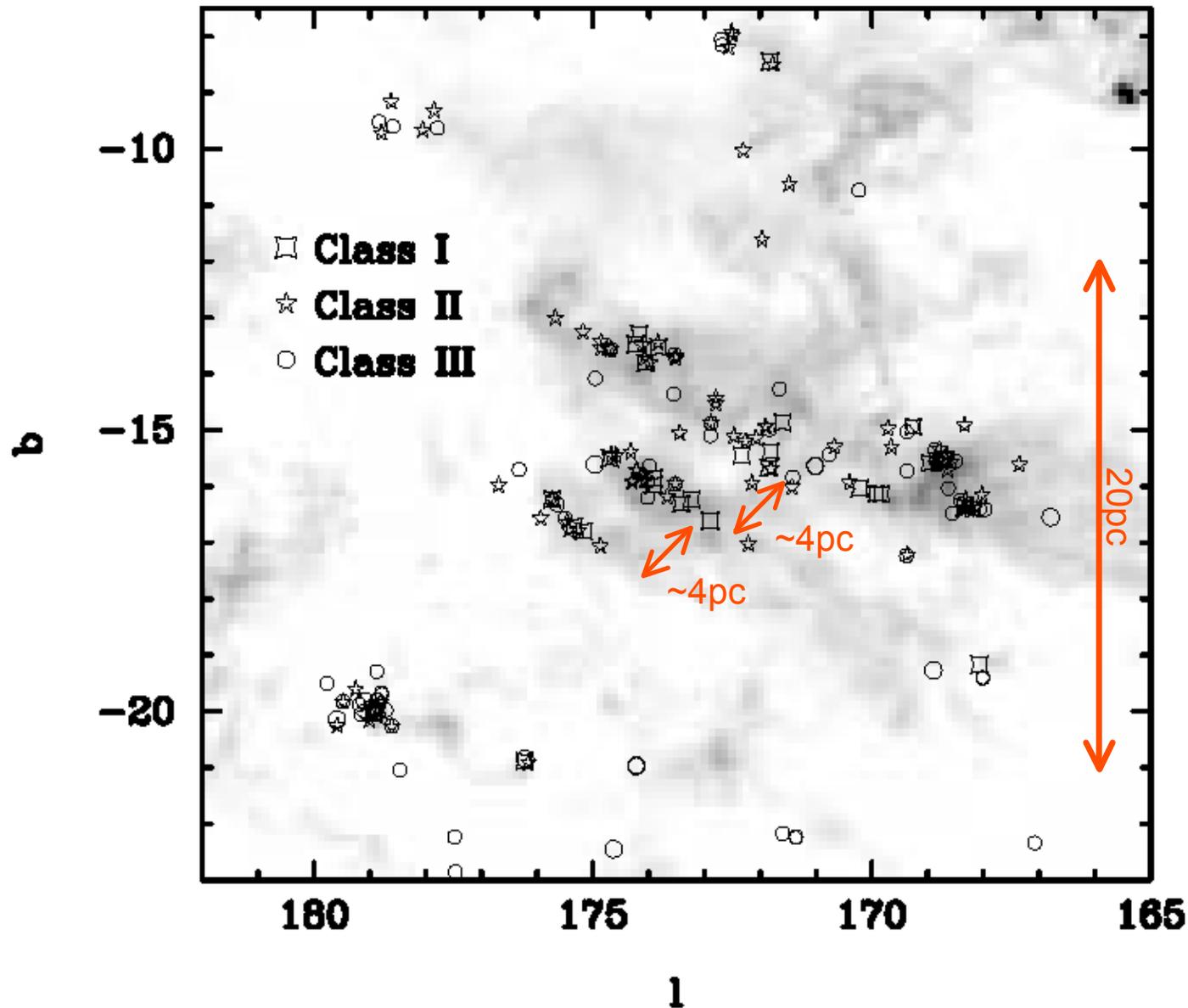
Radiobeobachtungen von Molekülwolken



Radiobeobachtungen von Molekülwolken



Beispiel: Taurus Wolke



Sternbildende
Filamente in
der *Taurus*
Molekülwolke

(aus Hartmann 2002)

Klassen: Die turbulente Geburt der Sterne

Taurus

$V_{\text{LSR}} = 3.4$
km/s

3.4 km/s

176°

174°

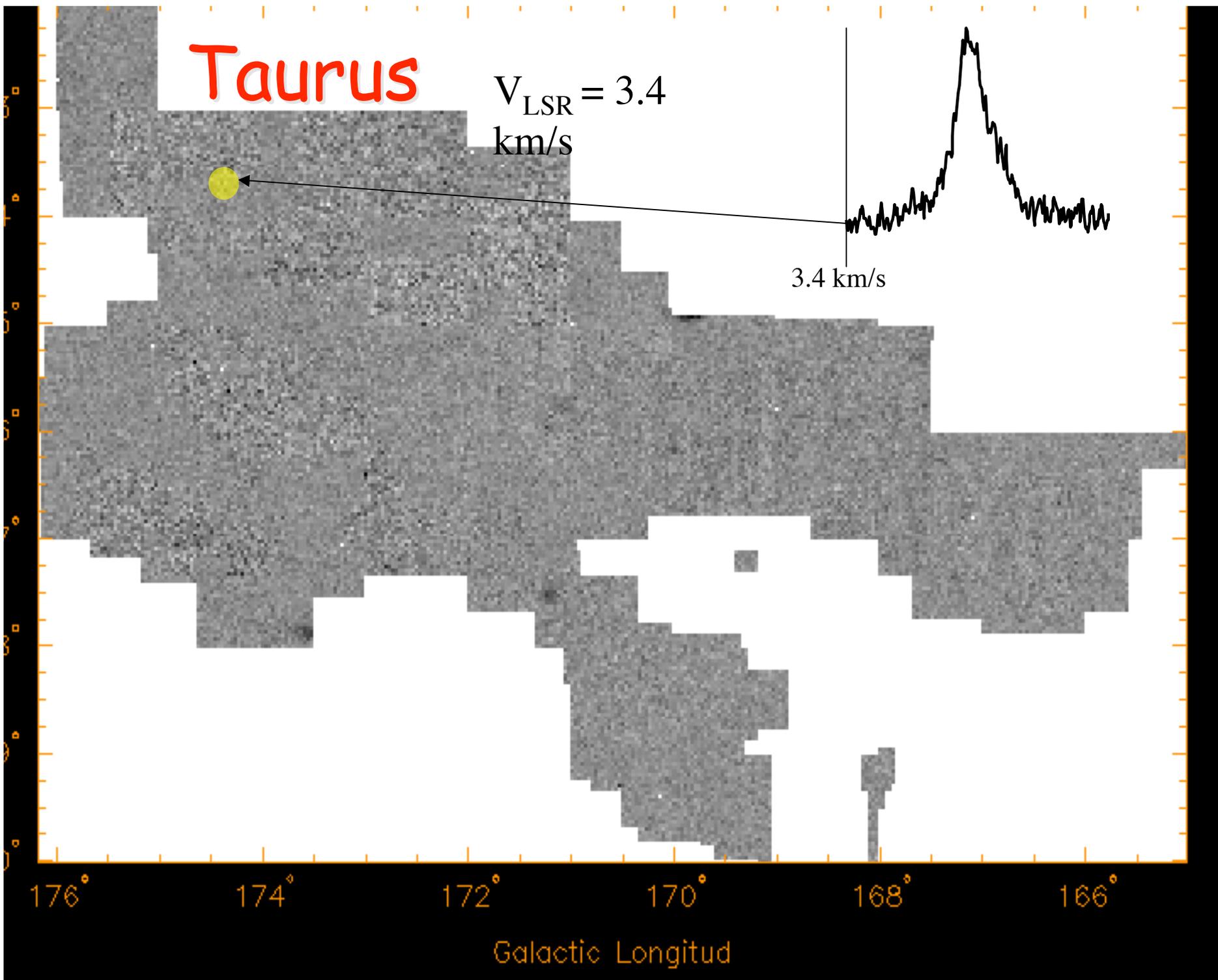
172°

170°

168°

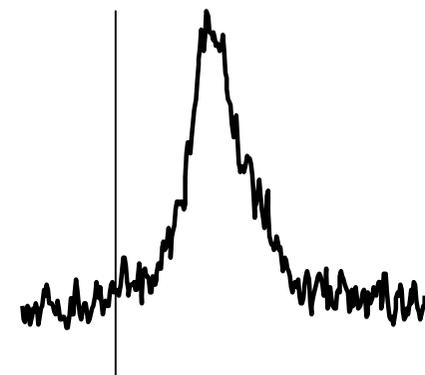
166°

Galactic Longitud



Taurus

$V_{\text{LSR}} = 4.6$
km/s



176°

174°

172°

170°

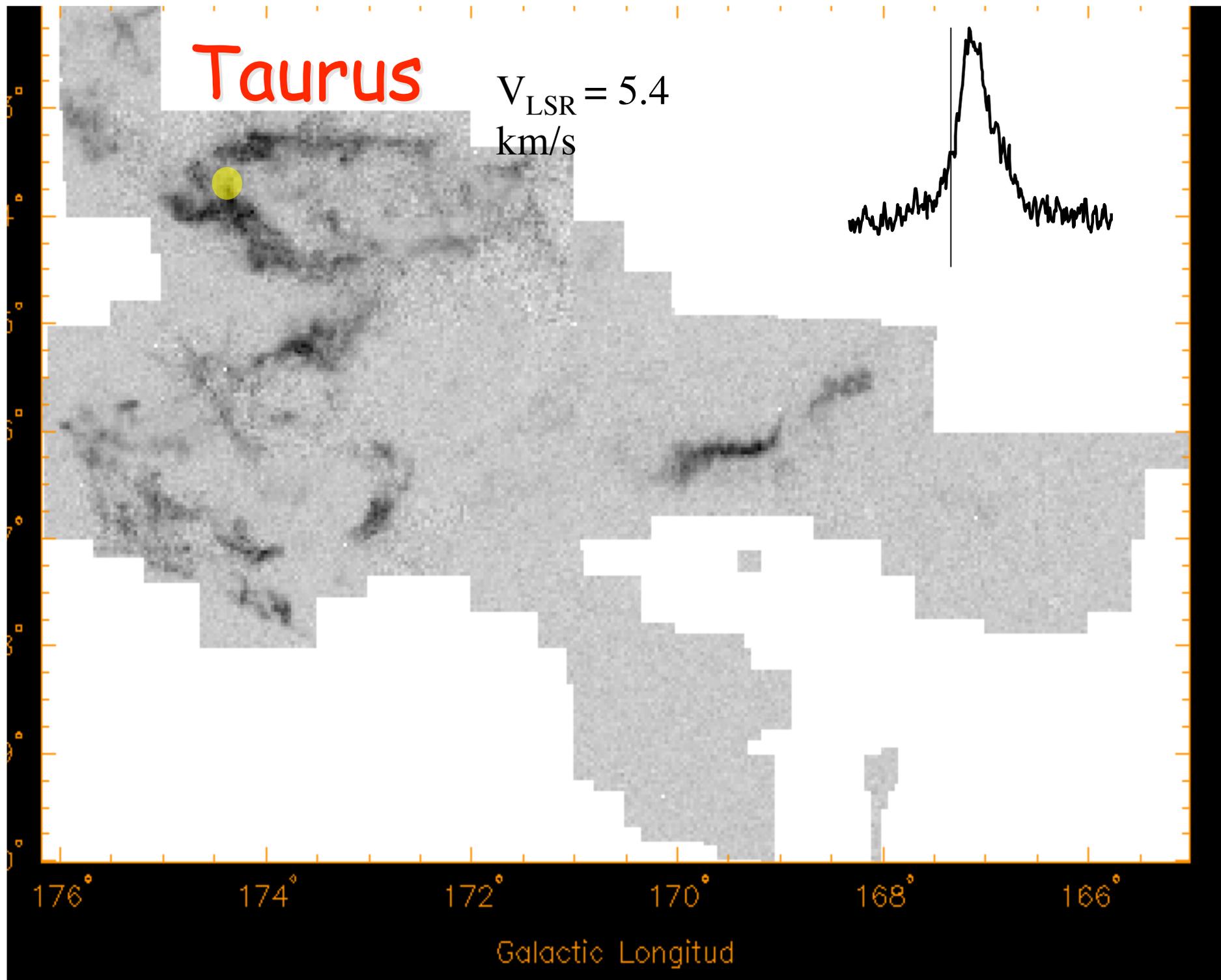
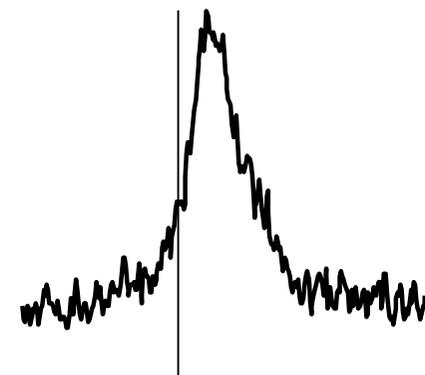
168°

166°

Galactic Longitud

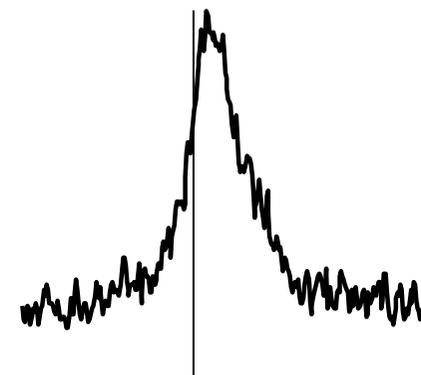
Taurus

$V_{\text{LSR}} = 5.4$
km/s



Taurus

$V_{\text{LSR}} = 5.6$
km/s

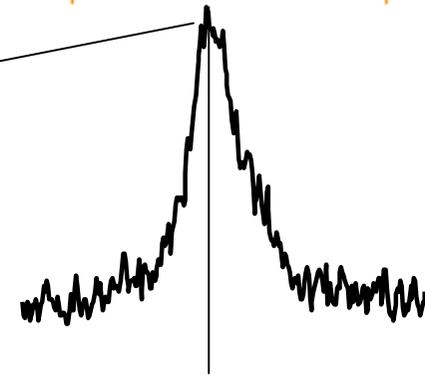


176° 174° 172° 170° 168° 166°

Galactic Longitud

Taurus

$V_{\text{LSR}} = 5.8$
km/s



176°

174°

172°

170°

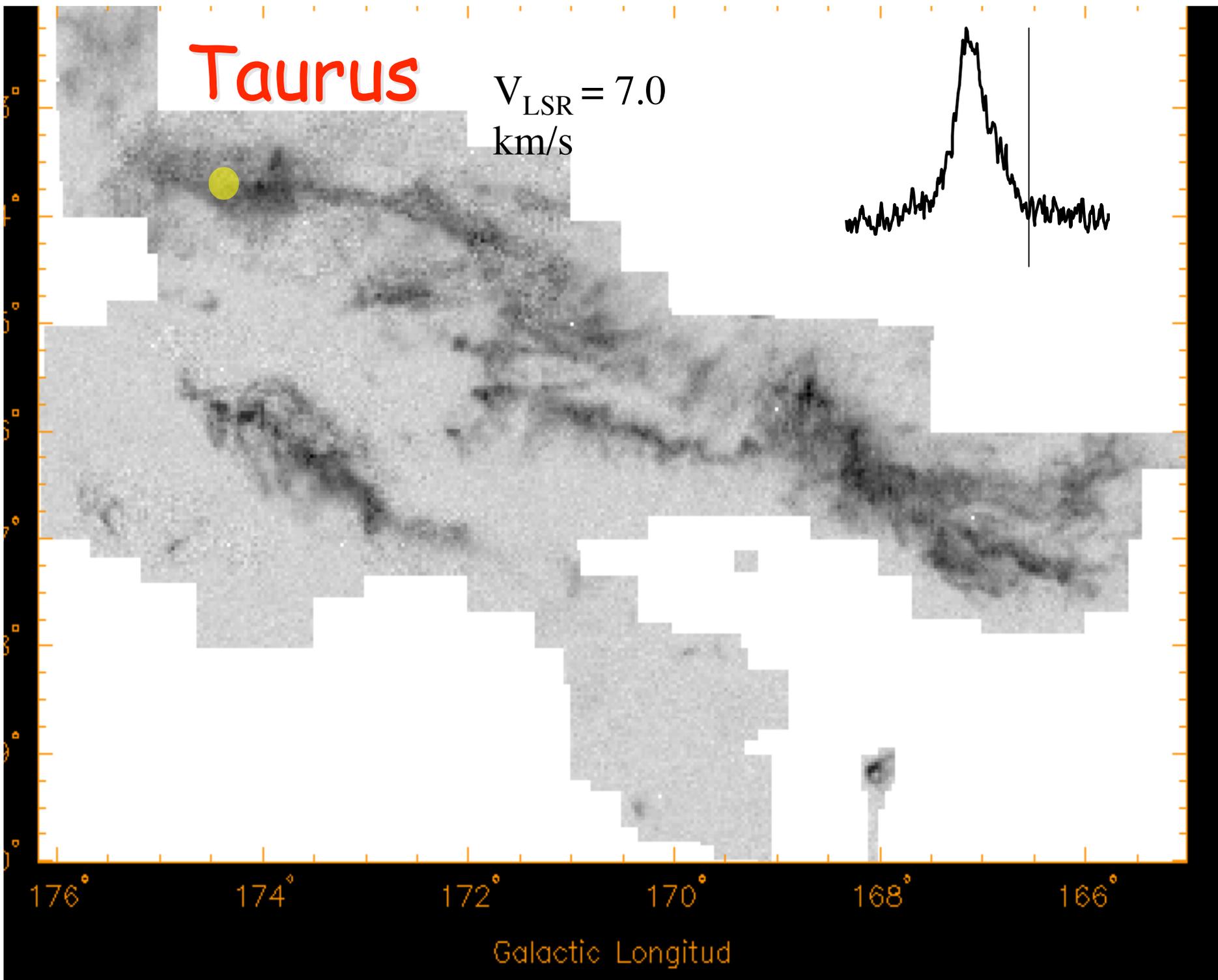
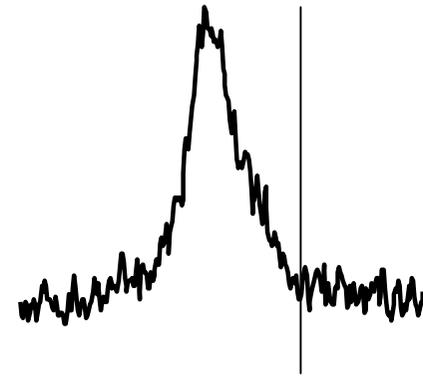
168°

166°

Galactic Longitud

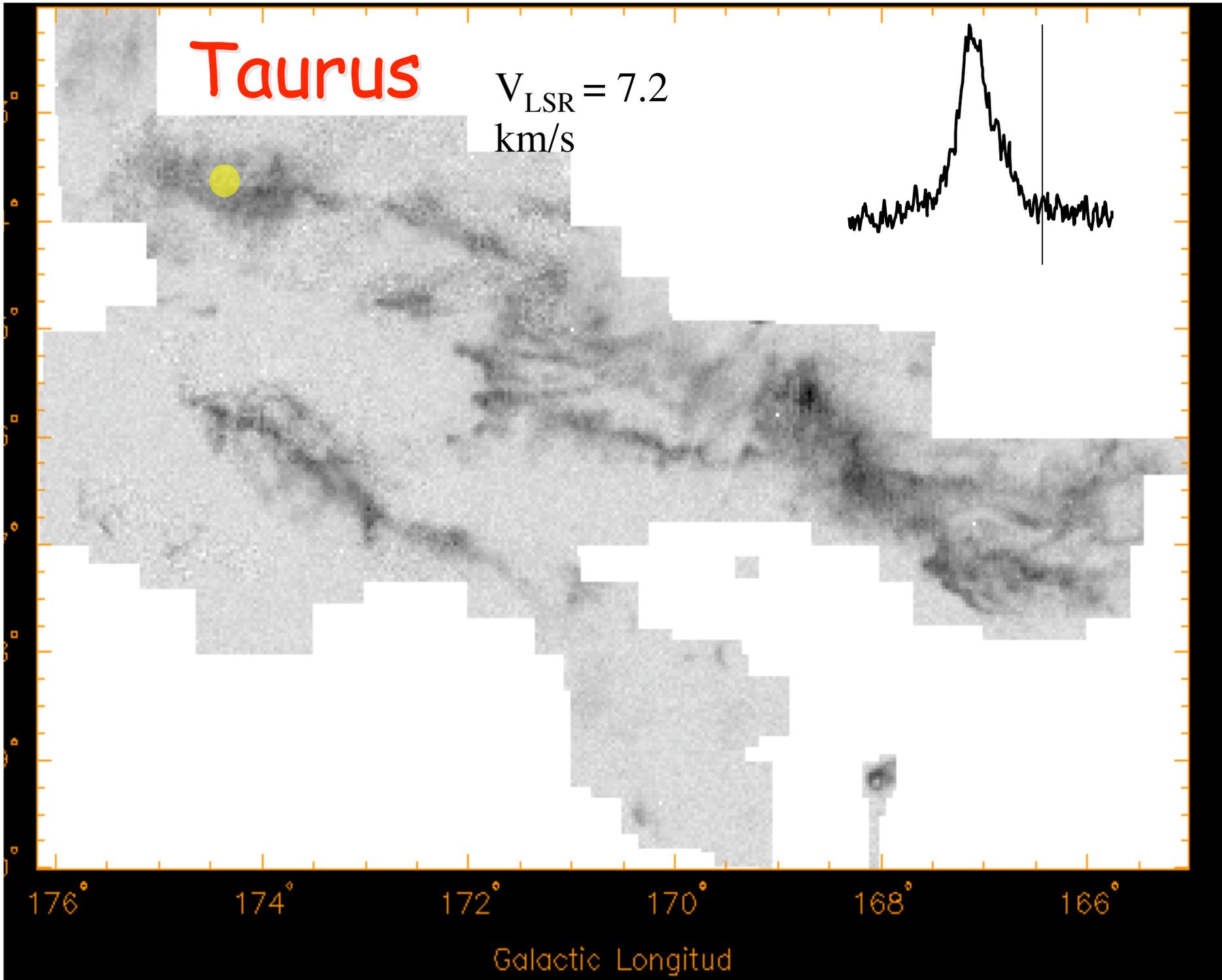
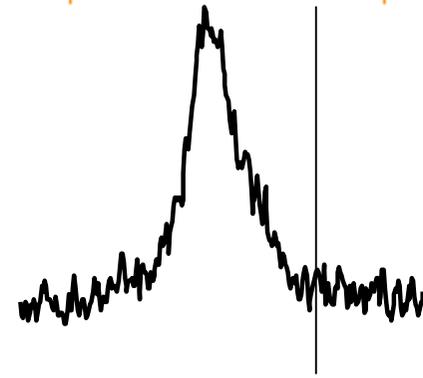
Taurus

$V_{\text{LSR}} = 7.0$
km/s



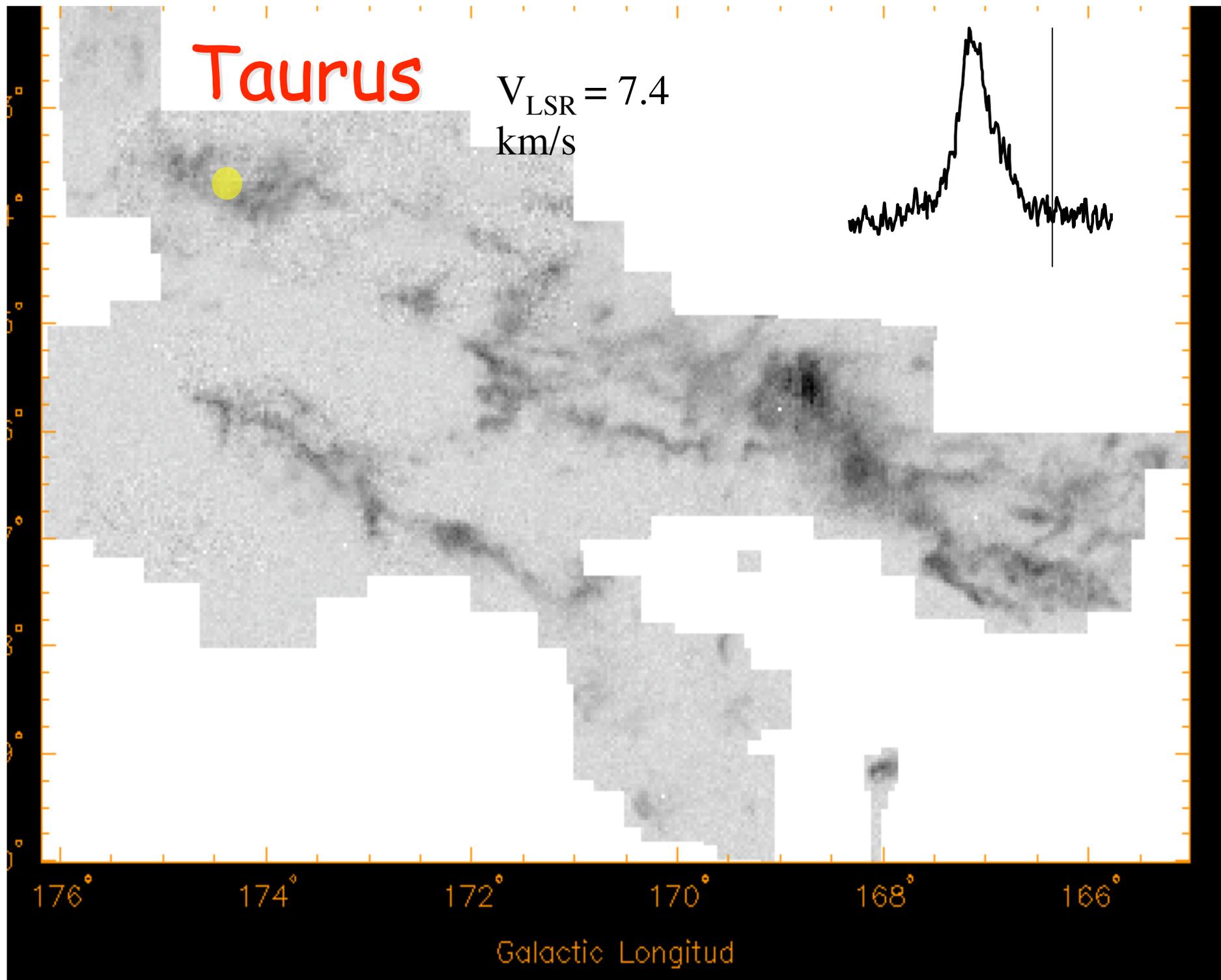
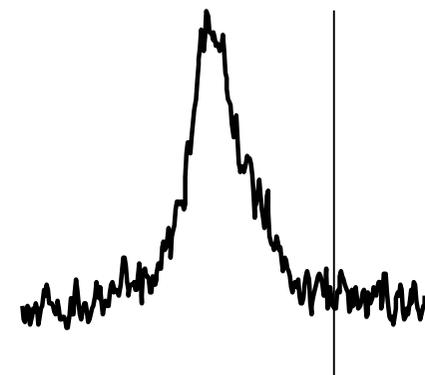
Taurus

$V_{\text{LSR}} = 7.2$
km/s



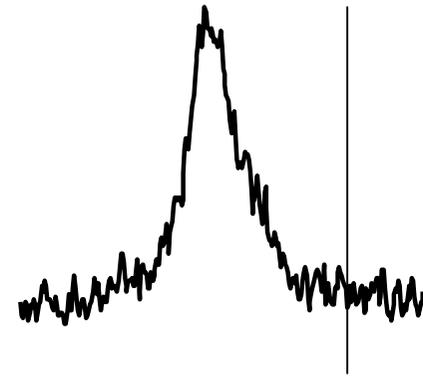
Taurus

$V_{\text{LSR}} = 7.4$
km/s



Taurus

$V_{\text{LSR}} = 7.6$
km/s



176°

174°

172°

170°

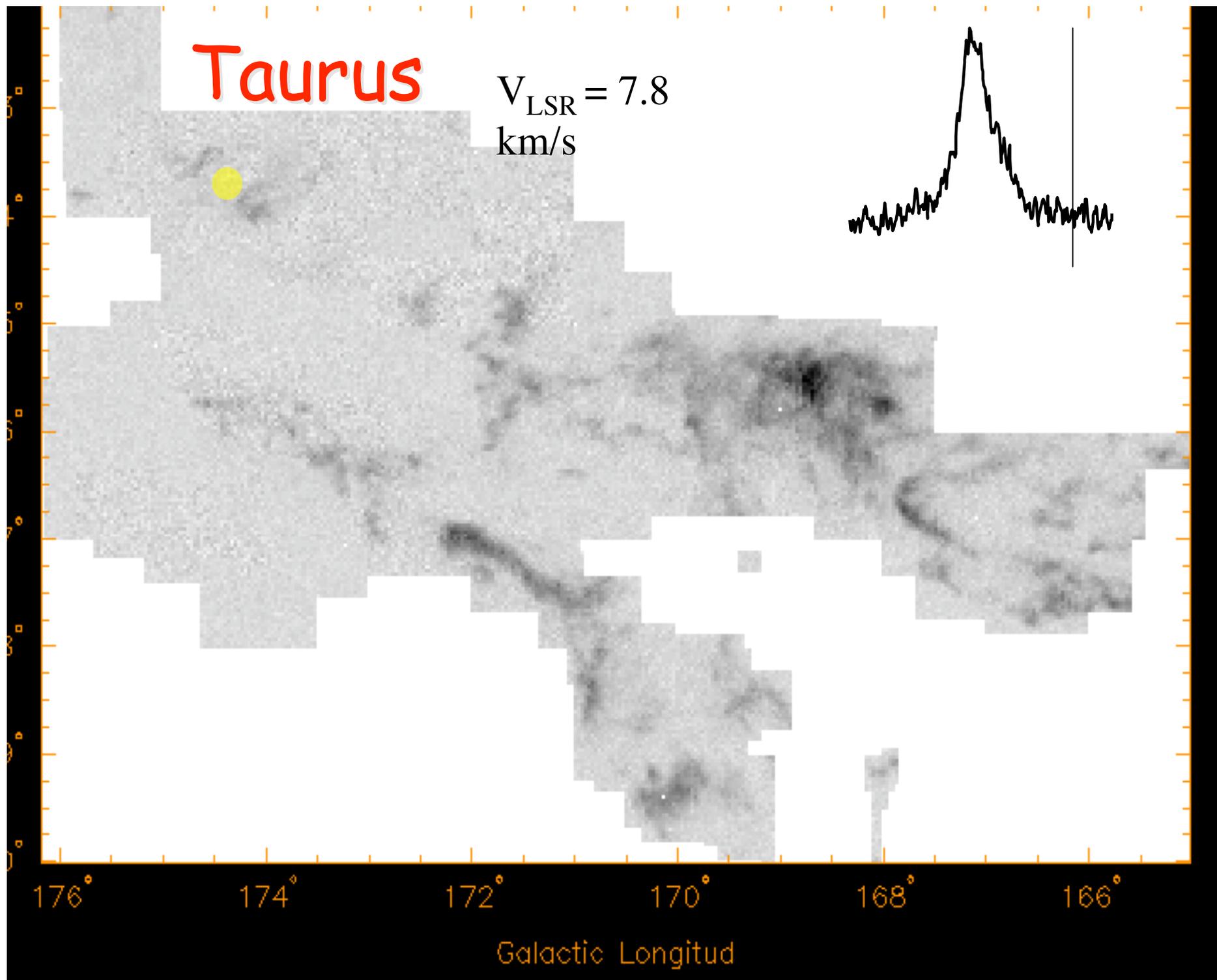
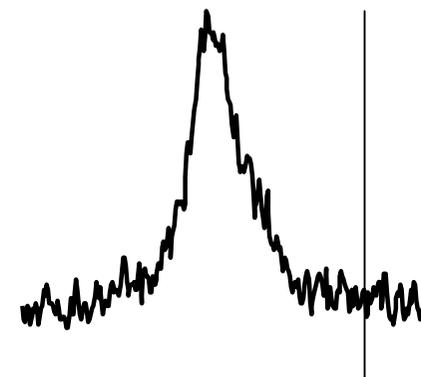
168°

166°

Galactic Longitud

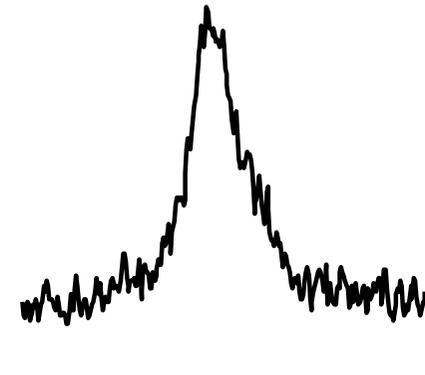
Taurus

$V_{\text{LSR}} = 7.8$
km/s



Taurus

$V_{\text{LSR}} = 8.6$
km/s



176°

174°

172°

170°

168°

166°

Galactic Longitude

Taurus

Größe der Karte im nächsten Dia

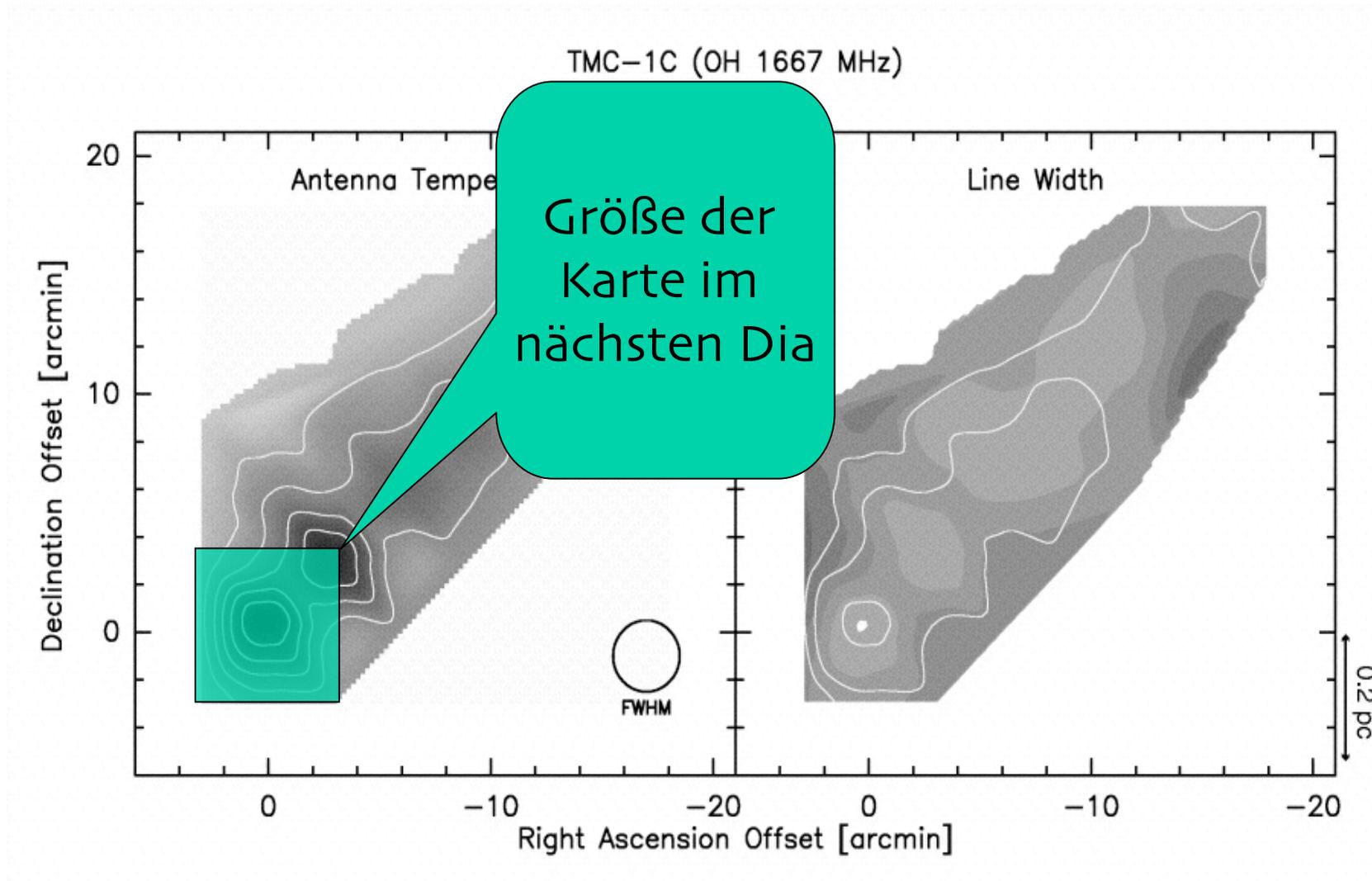
- ★ Klasse 1 Protosterne
- ★ Klasse 2 Protosterne
- ★ Klasse 3 Protosterne

Mizuno et al. 1995 $^{13}\text{CO}(1-0)$ integrated intensity map from Nagoya 4-m
Young star positions courtesy L. Hartmann

176° 174° 172° 170° 168° 166°

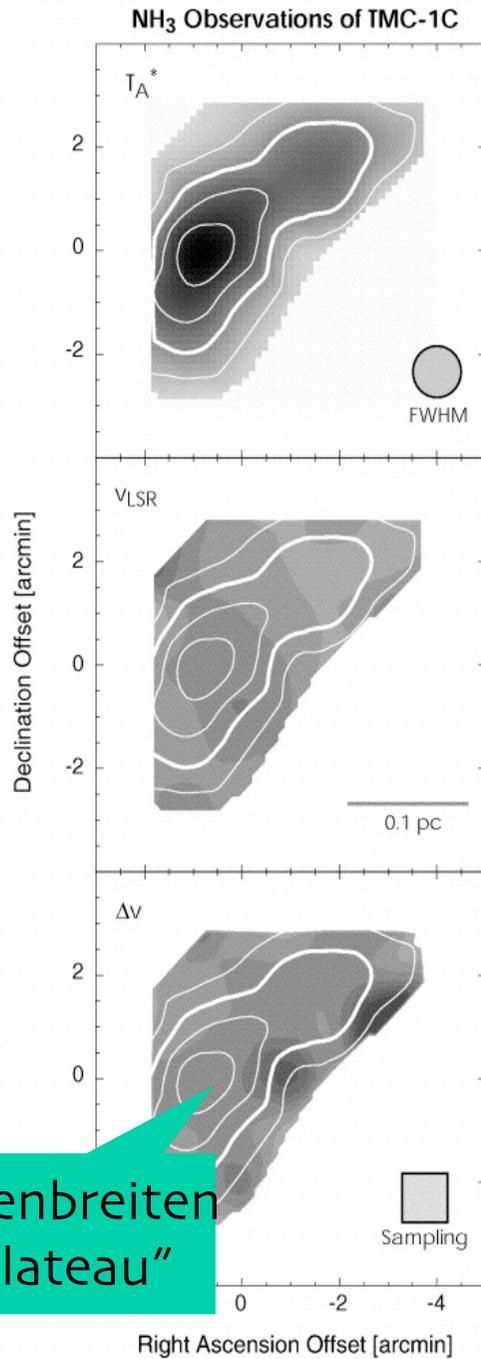
Galactic Longitud

"Kohärente" Dichte Gasklumpen: Inseln der Ruhe in einem Meer aus Turbulenz

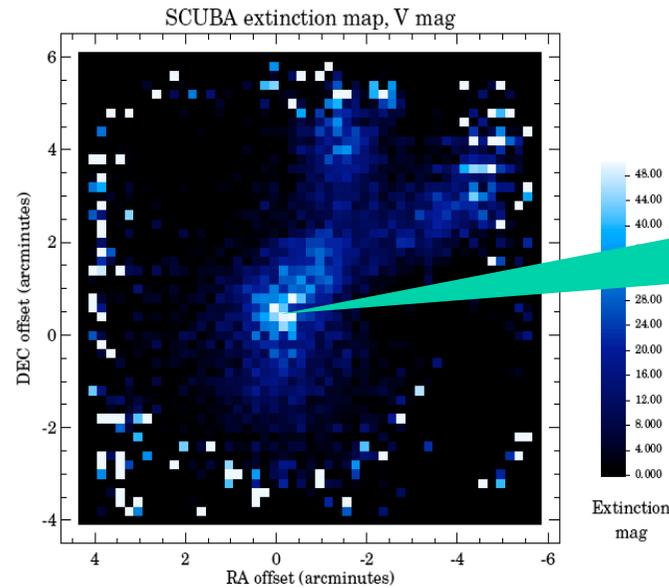


Goodman, Barranco, Wilner & Heyer 1998

"Kohärente" Dichte Gasklumpen

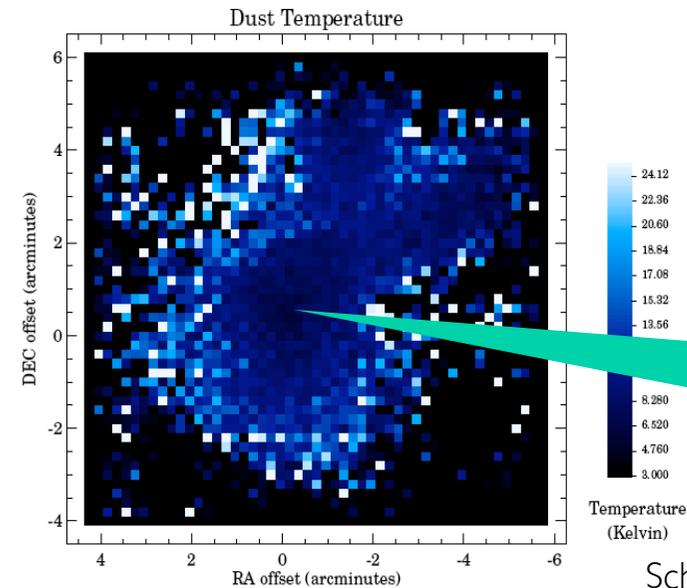


Linienbreiten
"Plateau"



Peak
 $N_{H_2} \sim 5 \times 10^{22}$

kohärente Kerne \approx
prästellare Kerne \approx
unmittelbare Vor-
stufe der Sternbildung



Low internal
 $T \sim 6$ K

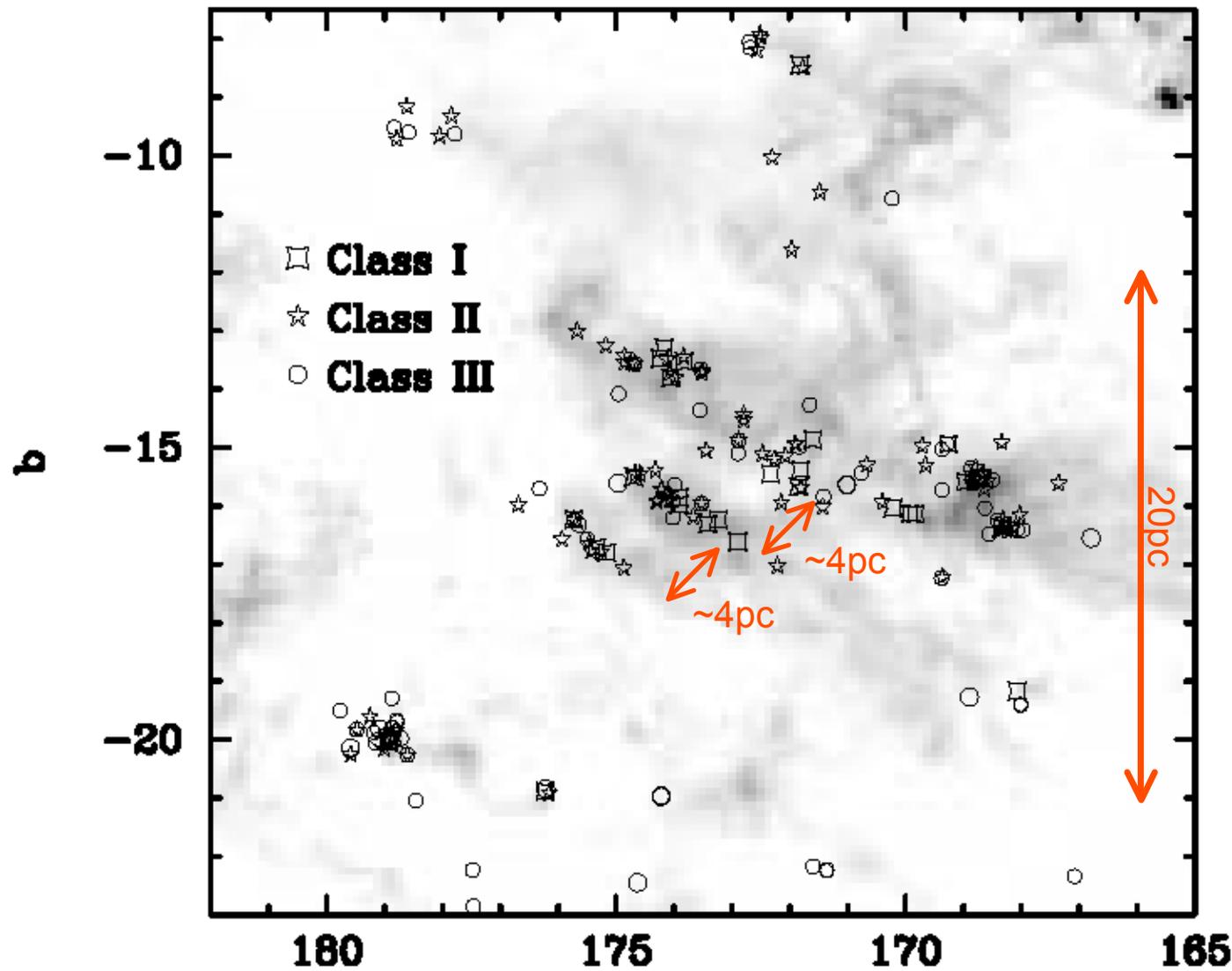
Schnee & Goodman 2003

Barranco & Goodman 1998

Klassen: Die turbulente Geburt der Sterne

Molekülwolken

- MW's sind *massereich* ($M_{\text{cloud}} = 10^3 \dots 10^6 M_{\odot} \leftrightarrow M_{\text{Jeans}} = 1 \dots 100 M_{\odot}$)
- MW's sind *kalt* ($T_{\text{cloud}} = 10 \dots 20 \text{ K}$)
- MW's sind *transient* (Lebensdauer \approx einige 10^6 Jahre \approx dynamische Zeitskala)
 - MW entstehen in konvergenten großskaligen Strömungen
 - MW-Struktur durch *Überschallturbulenz* bestimmt
(Dichte- und Geschwindigkeitsfeld von großskaligen Moden dominiert)
- Energiebilanz: *Turbulente Energie*
 \approx potentielle Energie $>$ magnetische Energie
- *ABER*: Turbulenz *dissipiert* schnell (Zerfallszeit $<$ dynamische Zeit)
→ Energieeintrag notwendig
- Typische *Sternentstehungseffizienz* $\sim 5\%$

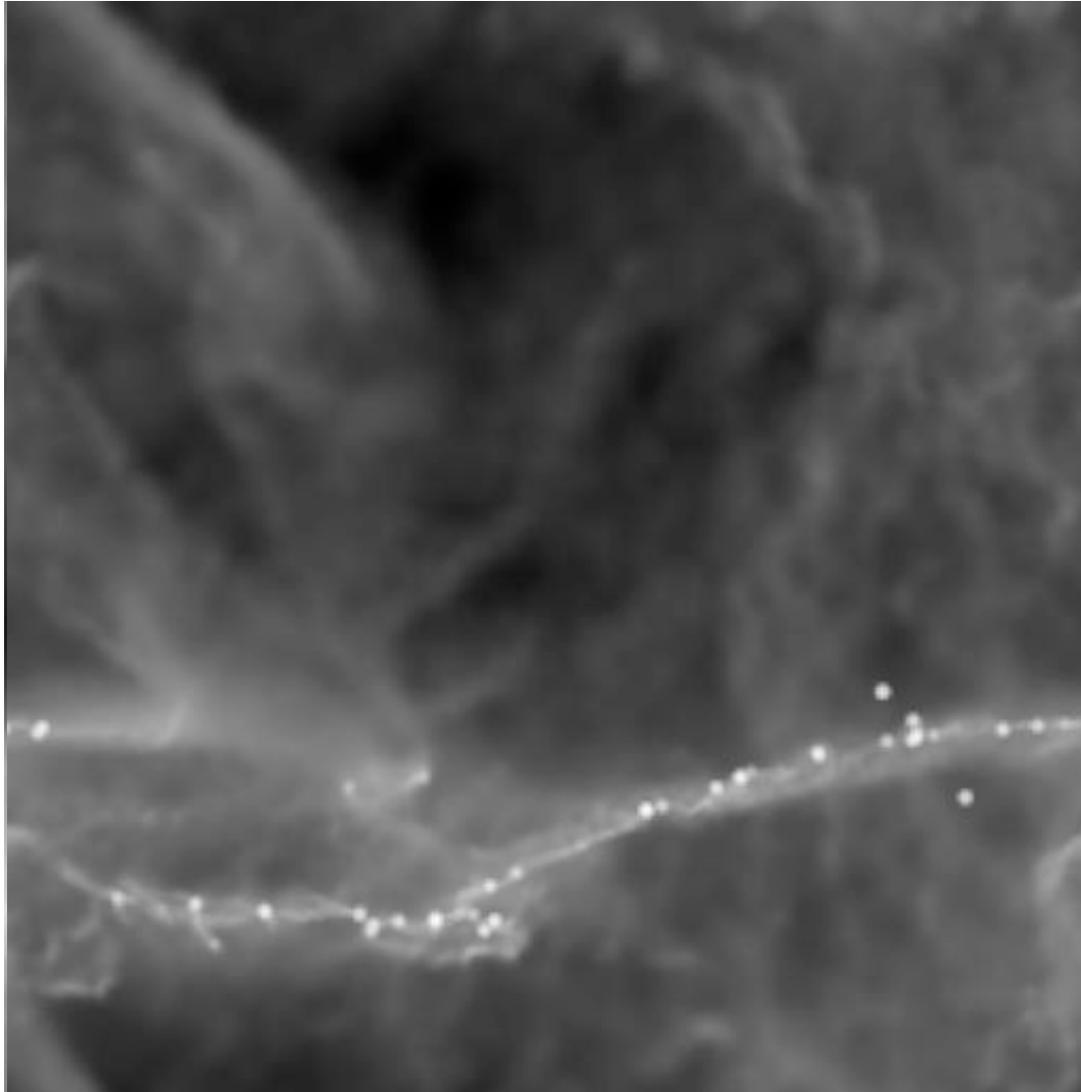


Taurus Wolke

Sternbildende
 Filamente in
 der *Taurus*
 Molekülwolke

(from Hartmann 2002, ApJ)

Gravoturbulente Fragmentation



Turbulenz erzeugt
die Dichtestruktur

Gravitation wählt die
dichtesten Gebiete
aus.

Diese verdichten
sich & bilden Sterne.

Was können wir lernen?

- *Globale Eigenschaften* (statistische Betrachtung)
 - Sternentstehungseffizienz & Zeitskalen
 - Stellare Massenfunktion (IMF)
 - Dynamik junger Sternhaufen
 - Statistische Beschreibung von Überschallturbulenz (PDF's, Δ -Var.)
 - Mischungseigenschaften von Überschallturbulenz (wichtig für die chemische Entwicklung der Milchstraße)
- *Lokale Eigenschaften* (Studium von Einzelobjekten)
 - Eigenschaften protostellarer Gasklumpen (z.B. Form, radiales Dichteprofil, Geschwindigkeitsfeld)
 - Akkretionsgeschichte einzelner Protosterne (dM/dt vs. t , j vs. t)
 - Doppelsterne (Exzentrizitäten, Massenverhältnisse, usw.)
 - SED's von Protosternen, PMS Entwicklungsreihen

Was können wir lernen?

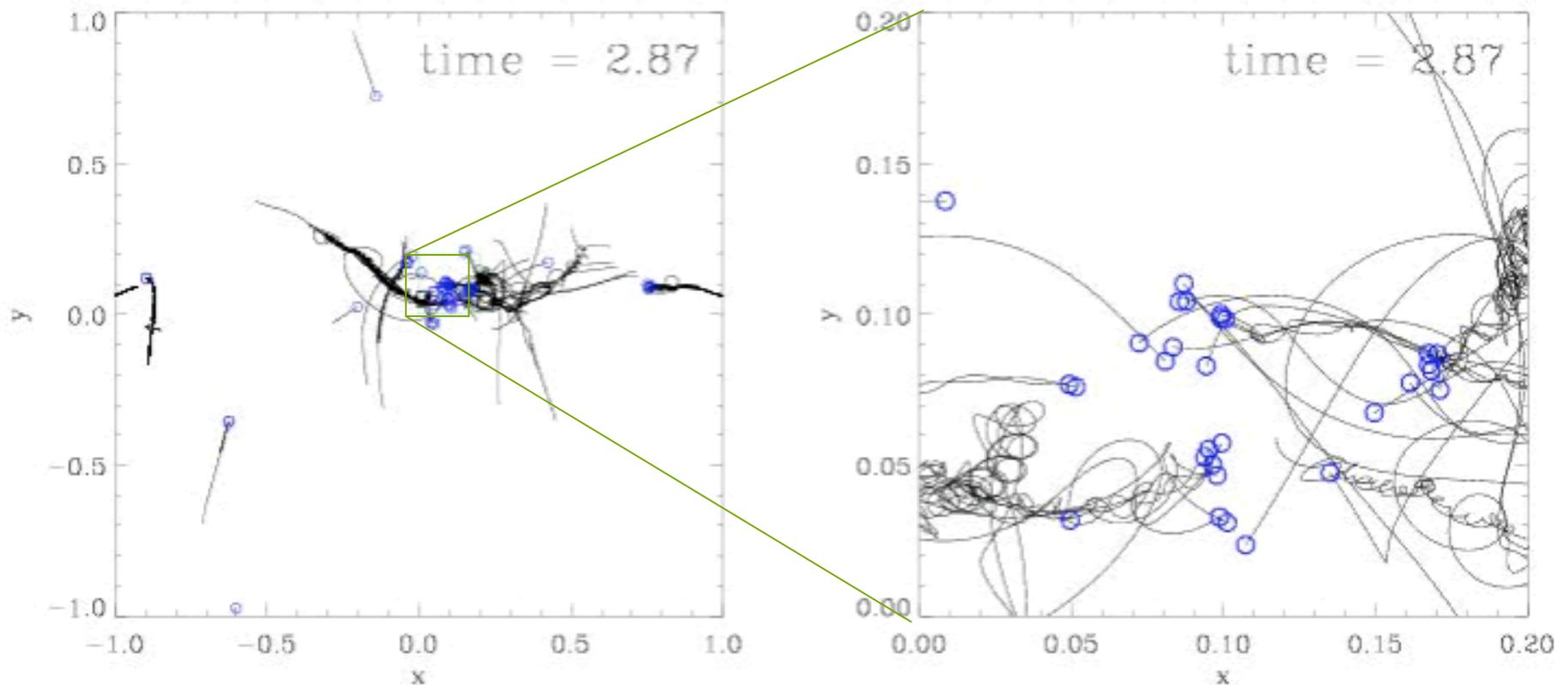
- *Globale Eigenschaften (statistische Betrachtung)*
 - Sternentstehungseffizienz & Zeitskalen
 - **Stellare Massenfunktion (IMF)**
 - Dynamik junger Sternhaufen
 - Statistische Beschreibung von Überschallturbulenz (PDF's, Δ -Var.)
 - Mischungseigenschaften von Überschallturbulenz (wichtig für die chemische Entwicklung der Milchstraße)
- *Lokale Eigenschaften (Studium von Einzelobjekten)*
 - Eigenschaften protostellarer Gasklumpen (z.B. Form, radiales Dichteprofil, Geschwindigkeitsfeld)
 - Akkretionsgeschichte einzelner Protosterne (dM/dt vs. t , j vs. t)
 - Doppelsterne (Exzentrizitäten, Massenverhältnisse, usw.)
 - SED's von Protosternen, PMS Entwicklungsreihen

Was können wir lernen?

- *Globale Eigenschaften (statistische Betrachtung)*
 - Sternentstehungseffizienz & Zeitskalen
 - **Stellare Massenfunktion (IMF)**
 - **Dynamik junger Sternhaufen**
 - Statistische Beschreibung von Überschallturbulenz (PDF's, Δ -Var.)
 - Mischungseigenschaften von Überschallturbulenz (wichtig für die chemische Entwicklung der Milchstraße)
- *Lokale Eigenschaften (Studium von Einzelobjekten)*
 - Eigenschaften protostellarer Gasklumpen (z.B. Form, radiales Dichteprofil, Geschwindigkeitsfeld)
 - Akkretionsgeschichte einzelner Protosterne (dM/dt vs. t , j vs. t)
 - Doppelsterne (Exzentrizitäten, Massenverhältnisse, usw.)
 - SED's von Protosternen, PMS Entwicklungsreihen

Bildung von Sternhaufen

Fast alle Sterne entstehen in Haufen → *Sternbildung = Haufenbildung*

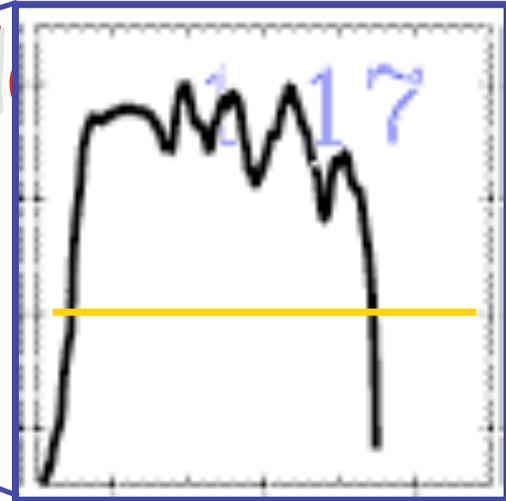
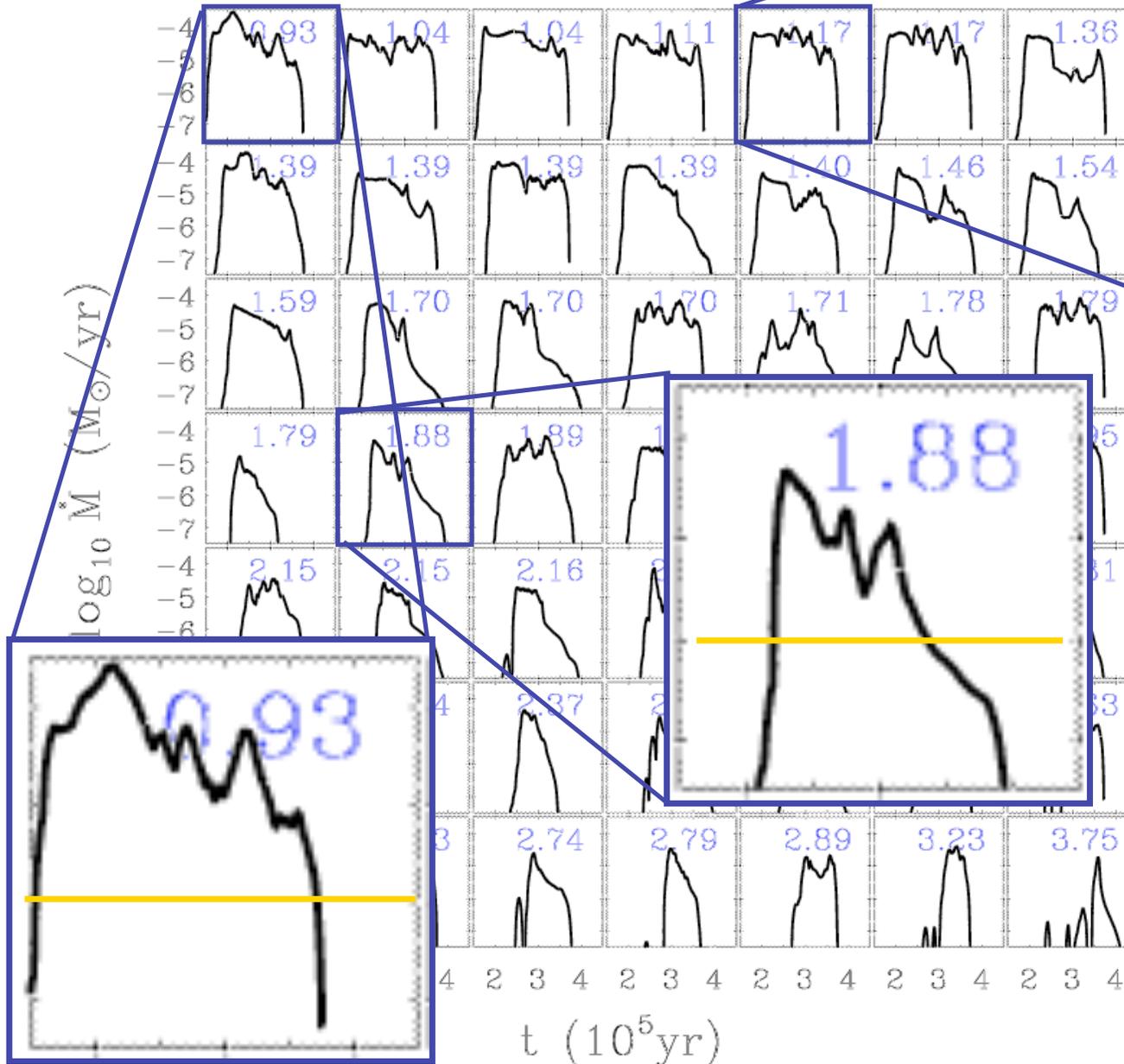


Trajektorien von Protosternen in jungen, dichten, und noch eingebetteten Haufen

(aus Klessen & Burkert 2000, ApJS, 128, 287)

Klessen: Die turbulente Geburt der Sterne

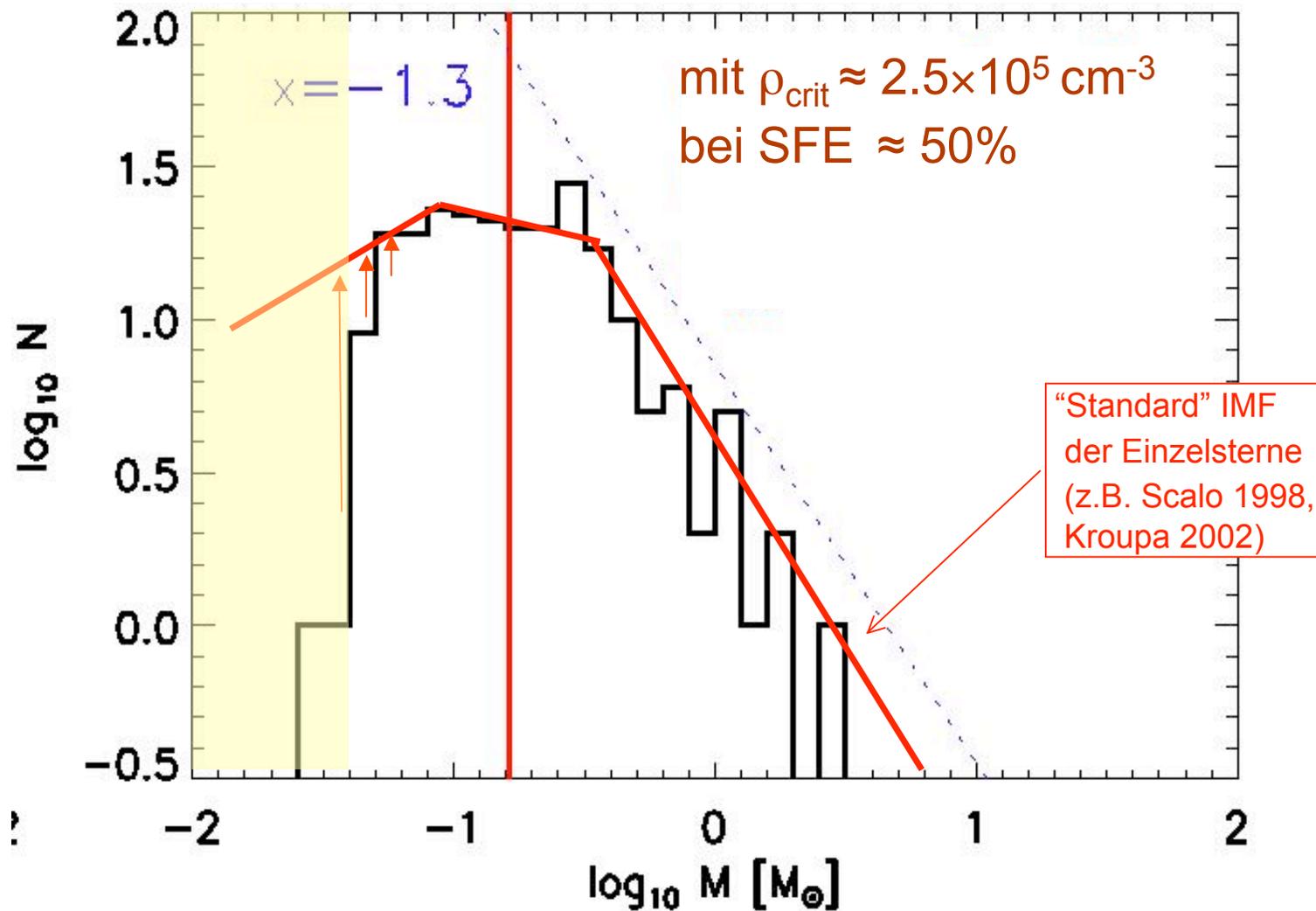
Akkretionsraten in H



Massen-
akkretionsraten
sind stark
zeitabhängig
und von *Haufen-
umgebung*
beeinflusst.

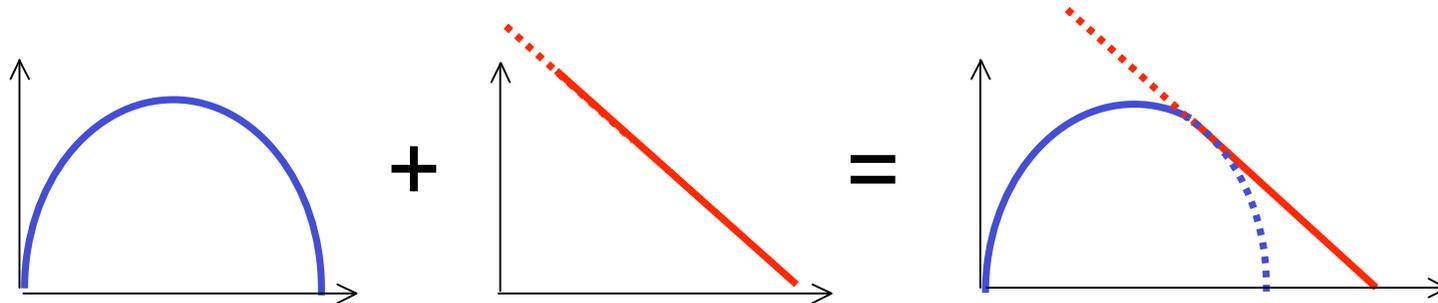
(Klessen 2001, ApJ, 550, L77;
oder Schmeja & Klessen,
2004, A&A, 419, 405)

Massenspektrum



(Jappsen, Klessen, Larson, Li, Mac Low, 2004, A&A eingereicht)

Plausibilitätsüberlegung...



- Überschallturbulenz ist skalenfreier Prozess

→ führt zu *POTENZGESETZ*

- *Aber es gilt auch:* Turbulenz & Fragmentation sind hochgradig stochastische Prozesse → Zentraler Grenzwertsatz

→ *GAUSS VERTEILUNG*

Sterne & Planeten

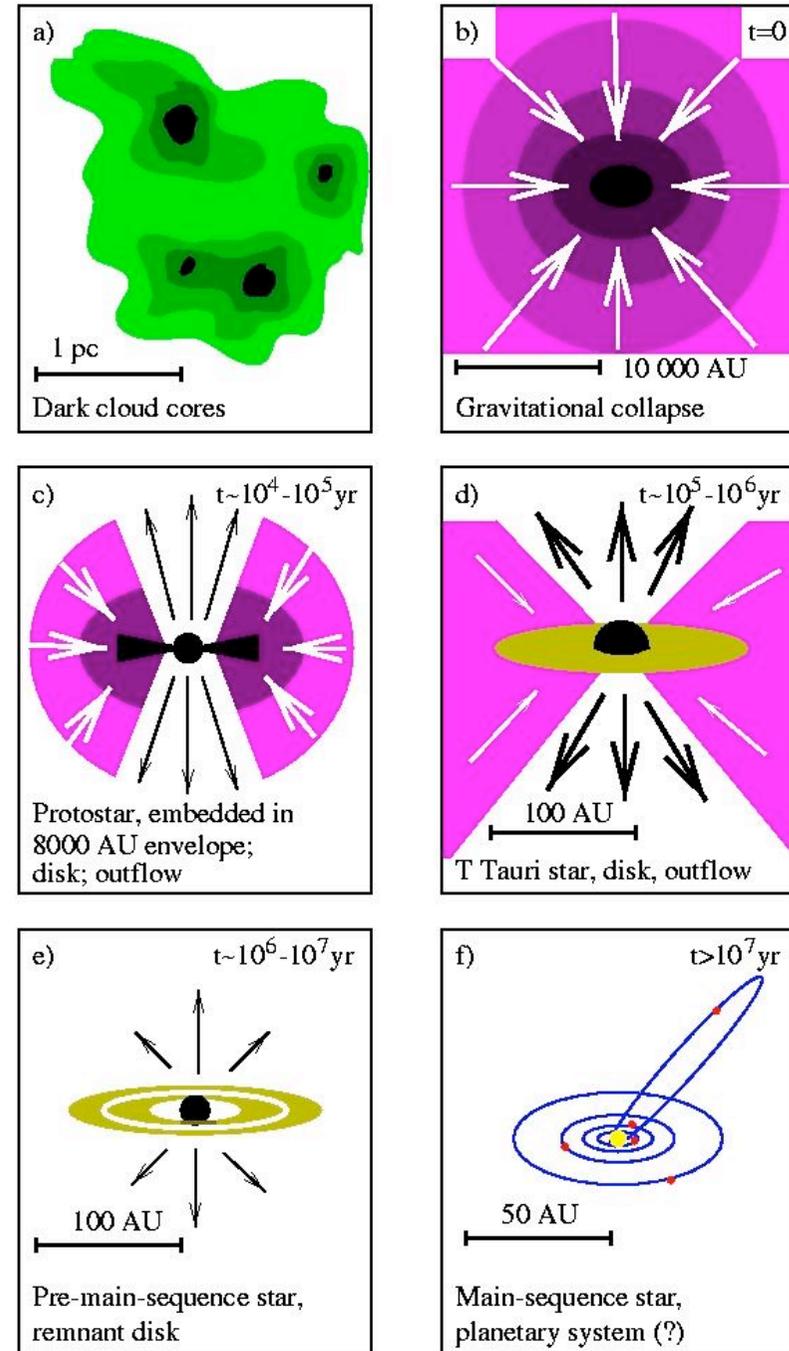
WIE geht's weiter...

... auf kleinsten Skalen?

- Wie ist die weitere Entwicklung des jungen Protosterns hin zur Hauptreihe?
- Stabilität der protostellaren Scheibe
 - Gravitative Instabilität und Fragmentation:
 - Doppel- und Mehrfachsysteme
 - Braune Zwerge? Gasplaneten?
- Wie bilden sich Planeten?

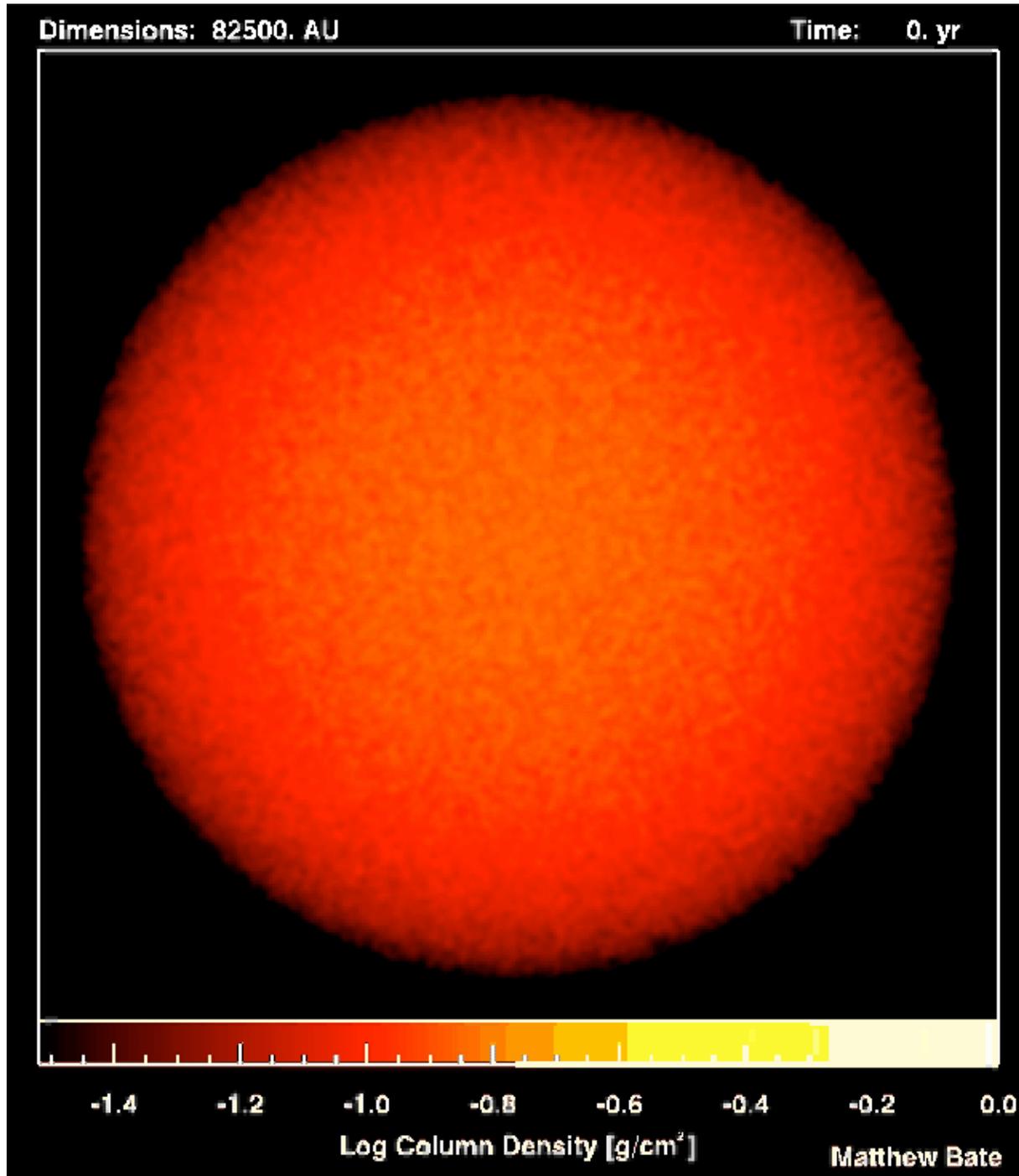
Gravitativer Kollaps und Sternbildung

Die Sequenz der Sternbildung



Hogerheijde 1998, after Shu et al. 1987

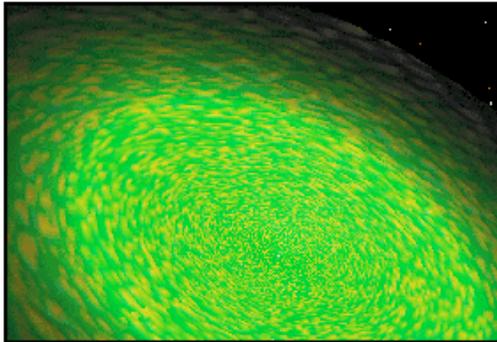
Entstehung eines Sternhaufens



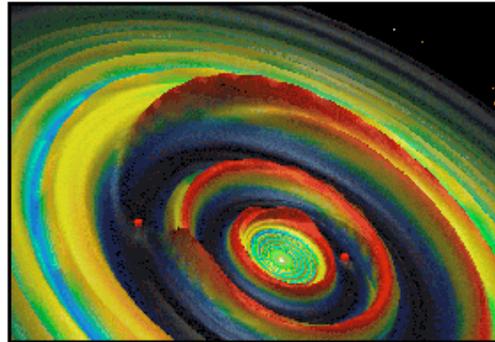
Entwicklung eines turbulenten Molekülwolkengebietes mit Masse $30 M_{\odot}$. Turbulenz dissipiert, und Kollaps setzt ein: Es bilden sich Sterne!

Planeten- bildung (Sonnensystem)

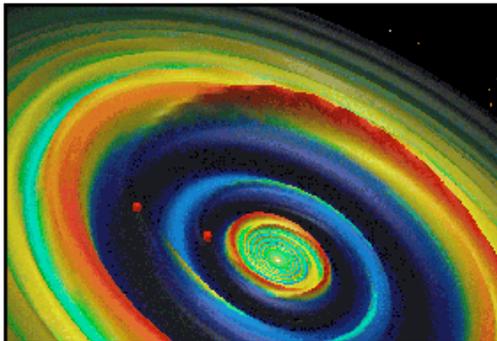
I. Initial Disk



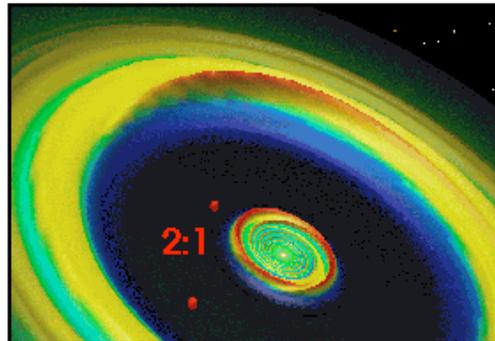
II. Gap Formation



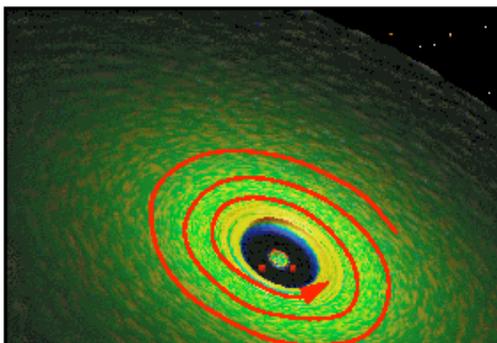
III. Gas Ring Dissipation



IV. Resonant Configuration



V. Inward Migration



VI. Disk Evaporation

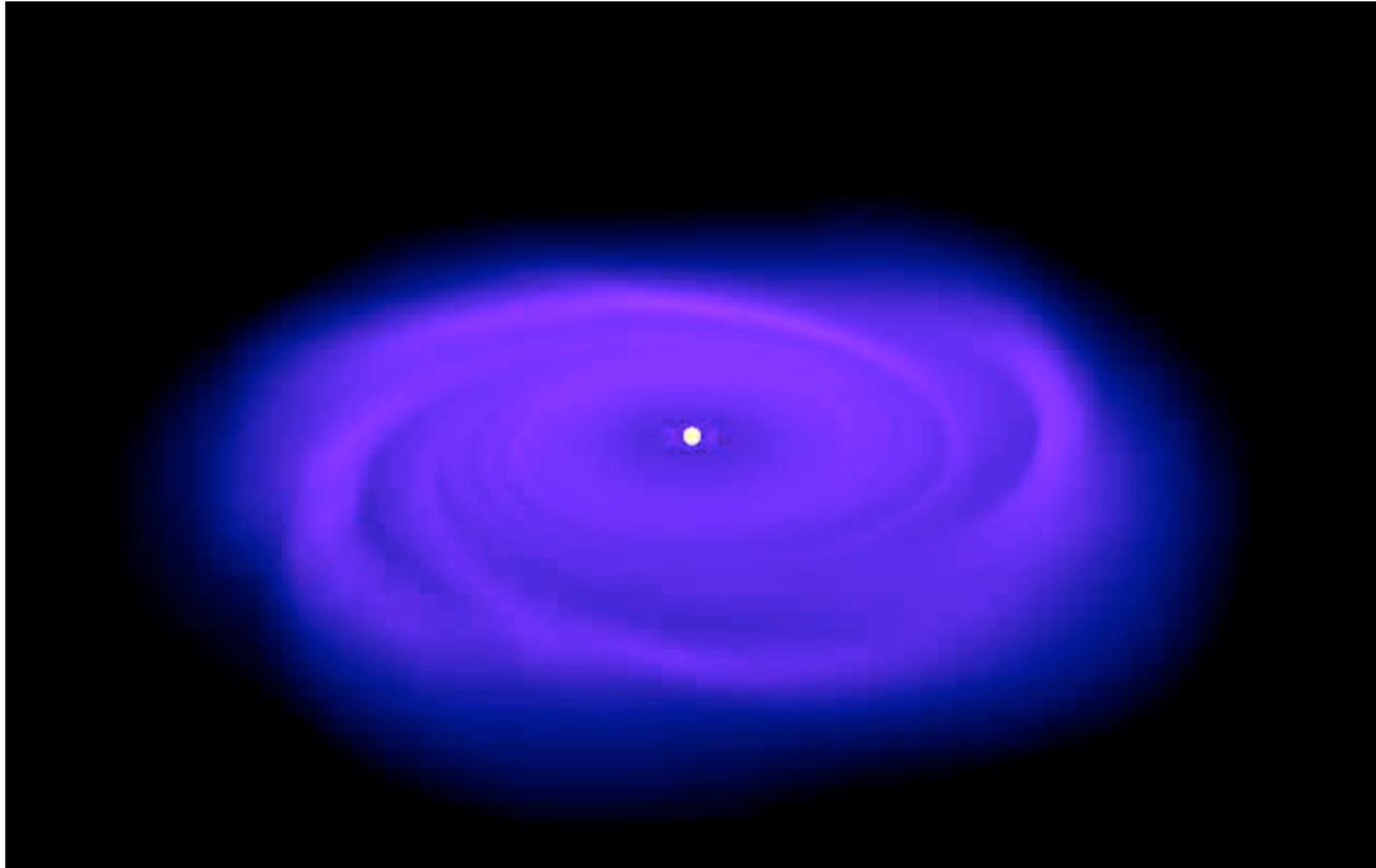


*In den Endphasen der proto-
stellaren Scheibenentwicklung*

- Koagulation von Staubteilchen → Bildung von Planetesimalen
 - Kollision der Planetesimalen → Runaway Growth von Protoplaneten (*terrestrische Planeten*)
 - Sobald Mindestmasse erreicht → Runaway Gasakkretion und Gap Öffnung (*Jupiter-ähnliche*)
 - Evtl. Migration nach innen aufgrund von Drehimpulsverteilung
 - Prozesse nicht im Detail verstanden
- Schließlich: Scheibe dissipiert → Planetensystem wird sichtbar*

Stabilität protostellarer Scheiben

- Bildung massereicher Gasplaneten? Relevanz für Exoplaneten?



(Film von Lucio Mayer, Zürich)

Entwicklung einer isolierten, gravitativ instabilen
Scheibe in Endphase der Sternbildung
(dh. $M_{\text{scheibe}} \approx 0.01 M_{\text{stern}}$)

Zusammenfassung

SE auf kleinen Skalen

- Sterne entstehen in *überschall-turbulenten Molekülwolken*.
- Interstellare Turbulenz zerfällt rasch —
→ *Energieeintrag*, oder *SE Zeitskala* \approx
 τ_{ff} ← **BEIDES !!!**
- *Protosterne bilden sich durch gravoturbulent Fragmentation*
(lokaler Kollaps schockkomprimierten Gases, B-Felder modifizieren Effizienz des Prozesses nicht wesentlich)
- *Fast alle Sterne bilden sich in Haufen.*
→ *Wechselwirkung in der Hauptakkretionsphase*
- SE *Zeitskala* und *räumliche Verteilung* der Sterne bestimmt durch Eigenschaften der ISM Turbulenz
(*isolierte SE* vs. *SE in Haufen*)
- Stellares Massenspektrum durch Umwelteinfluß bestimmt (keine Selbstregulierung).
(auch massive Sterne können sich durch Kollaps bilden)

SE ist stochastischer Prozeß!!!

SE in der Milchstraße

- Alle Sterne der Milchstraße bilden sich in Molekülwolken
- → *SE auf großen Skalen* = *Bildung von Molekülwolken*
- MW bilden sich in den Stagnationspunkten von konvergenten großskaligen Flüssen (notwendig $\sim 0.5 \text{kpc}^3$ Gas) → hohe Dichte → verstärkte Kühlung → schnelle Bildung von H_2 & gravitative Instabilität → lokaler Kollaps und Sternentstehung
- *MW Auflösung vs. Bildung* – durch dieselben Prozesse? (ISM Turbulenz, oder interne Rückkopplung: UV, Winde, Supernovae)
- Externe Störungen *erhöhen* lokal Wahrscheinlichkeit der MW Bildung (z.B. in Spiralarmen, Galaxienwechselwirkungen, usw.)
- MW Bildung *bestimmt* vom Wechselspiel von *Gravitation, Kühlung and Heizung, und Überschallturbulenz*
- **Wichtige Frage:** Was treibt die interstellare Turbulenz?
 - in Milchstraße: wahrscheinlich Supernovae
 - in LSB's: vielleicht Magnetorotationsinstabilität? Gaseinfall?

SE auf großen Skalen

- *Star Burst*: Gravitation überwiegt Turbulenz auf großen Skalen (häufig: System gestört durch Wechselwirkungen oder globale Instabilitäten)
- Normale *Spiralgalaxie*: Gravitation und Turbulenz im Gleichgewicht → Kollaps nur lokal (geringe SE Rate)
- *LSB Galaxie*: ISM Turbulenz dominiert über Gravitation (Turbulenz erzeugt von MRI oder Gaseinfall?)
- Theorie der turbulenten Sternentstehung:
 - ist kompatibel mit beobachteten Überschallströmungen in MW
 - erklärt Spektrum von SE Moden: isoliert → Sternhaufen
 - erklärt die stark unterschiedlichen SE Raten in Starburst-Galaxien, ``normalen`` Spiralen, und LSB's
 - Energieeintrag durch SN auf großen Skalen (MRI in LSB's?)

Ausblick

- Komplettes Bild: *Verbinde die (lokale) Sternentstehung mit der globalen dynamischen Entwicklung der Galaxie!*
 - Wie *beeinflussen* globale Prozesse die SE auf kleinen Skalen? Deren Summe wiederum ergibt die *globale* SE-Geschichte der Galaxie
- Und umgekehrt: *Wie beeinflusst SE auf kleinen Skalen die globalen Eigenschaften der Milchstraße?*
 - Was treibt Turbulenz im interstellaren Medium?
 - Welche *Mischungseigenschaften* hat ISM Turbulenz → wichtig für das Verständnis der chemischen Entwicklung der Milchstraße
 - Was sind typische σ -Werte? Wie *schnell* lösen sich offene Haufen in der galaktischen Scheibe auf? 90% aller Feldsterne wurden in Haufen geboren. → Welche Vorhersagen kann man machen diese Population?
- *Sterne und Sternhaufen sind die fundamentalen Bausteine der Galaxien*

Danke!

Übersicht

