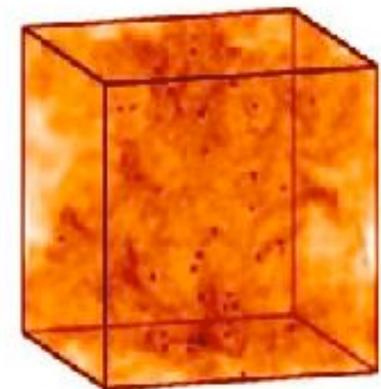
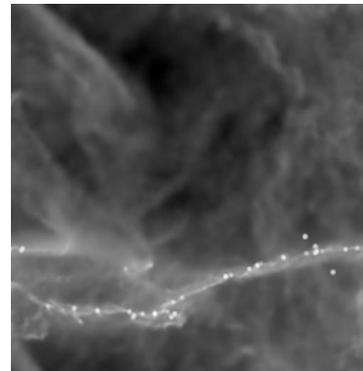
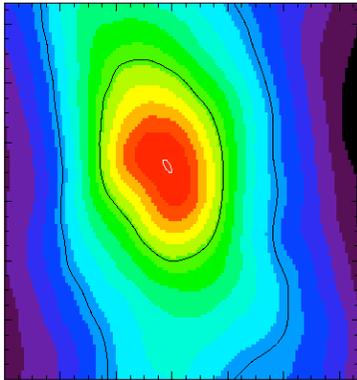


# Die turbulente Geburt der Sterne



**Ralf Klessen**

Zentrum für Astronomie Heidelberg



# Übersicht

WAS?

- Was sind Sterne?

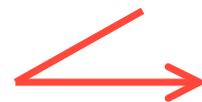
WO und WANN?

- Wo und wann bilden sich Sterne?

WIE?

- Wie beobachtet man Sternbildung?

- Wie bilden sich Sterne?

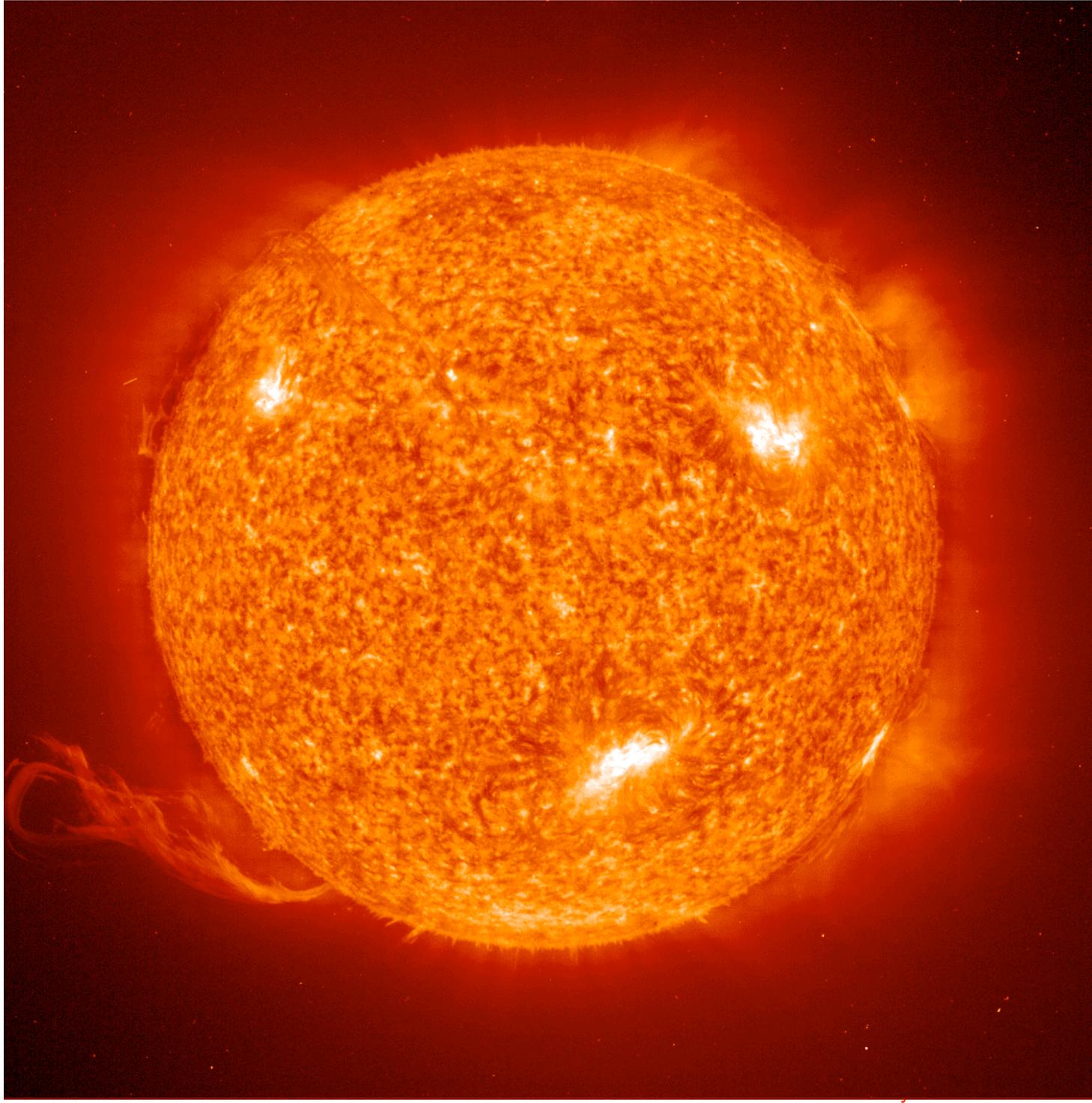


Theorie der turbulenten  
Sternentstehung

Phänomenologie  
Theorie

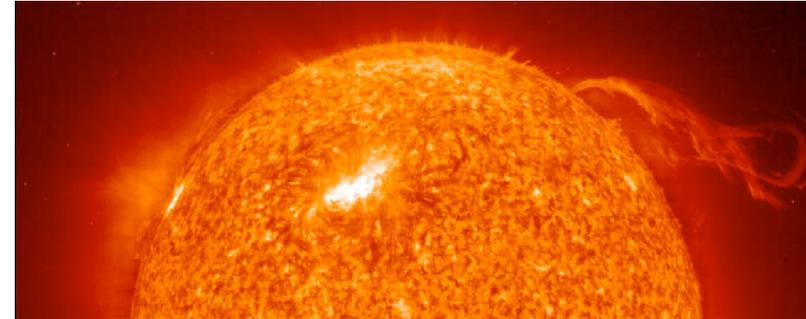
WAS?

Unsere Sonne



# Sterne: die Sonne

Eigenschaften der Sterne  
(Stellare Zustandsgrößen):



Unsere Sonne  $\odot$  als Referenzstern

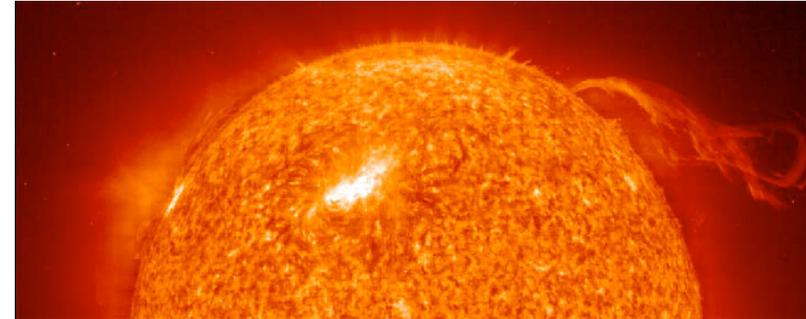
Radius	$R_{\odot}$	696 000 km
Masse	$M_{\odot}$	$1,989 \times 10^{30}$ kg
Leuchtkraft	$L_{\odot}$	$3,86 \times 10^{26}$ W
effektive Temperatur	$T_{\text{eff}}$	5800 K (Oberfläche)
Zentraltemperatur	$T_{\text{zentral}}$	$15 \times 10^6$ K
Alter	$t_{\odot}$	$4.5 \times 10^9$ a

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):



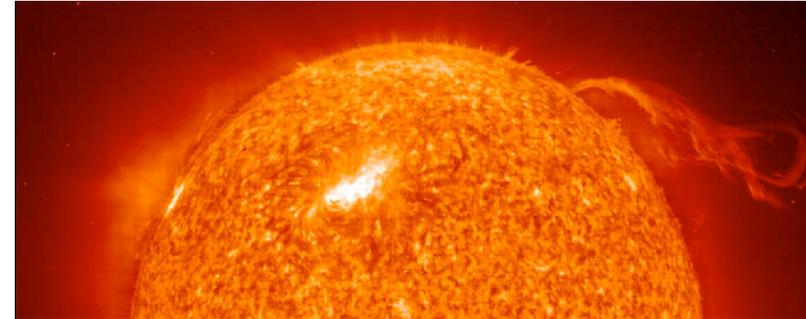
**Unsere Sonne ☉ als Referenzstern**

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: Statistische Charakteristika

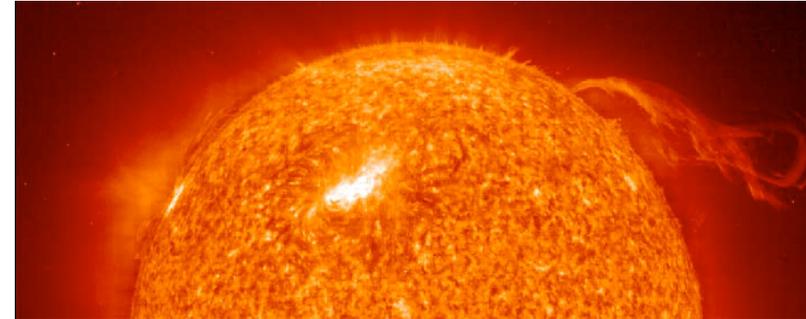


Sterndichte in der Sonnenumgebung  $n_* \approx 0,05 \text{ pc}^{-3}$   
Sterndichte im Orion-Trapezhaufen  $n_* \approx 10^3 \text{ pc}^{-3}$   
Sterndichte in Starburst-Regionen  $n_* \approx 10^4 \text{ pc}^{-3}$

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

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

# Sterne: Statistische Charakteristika



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  $n_* \approx 10^4 \text{ pc}^{-3}$

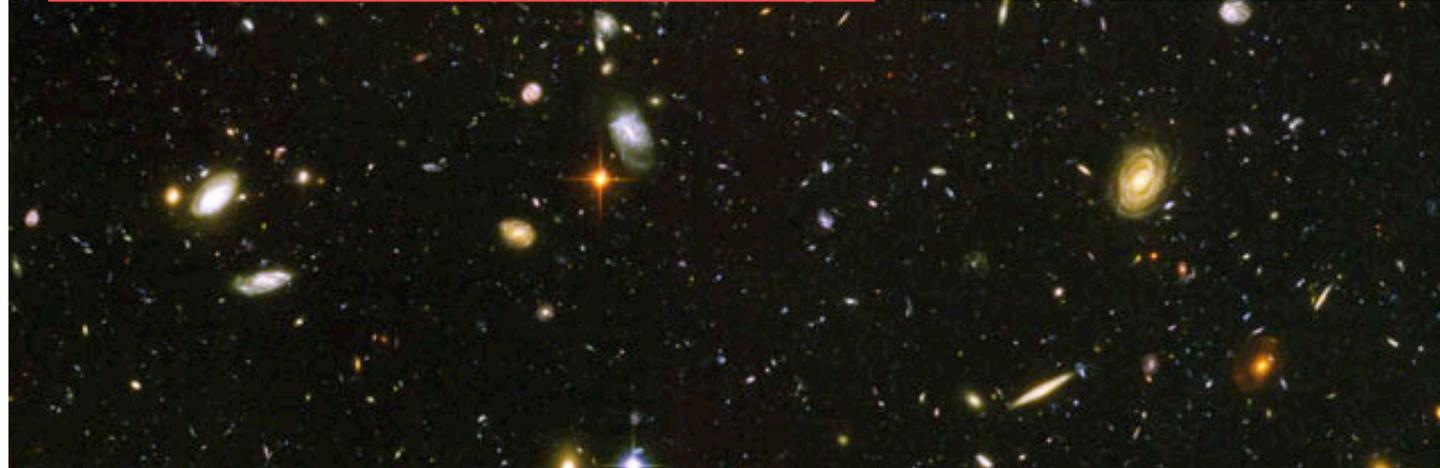
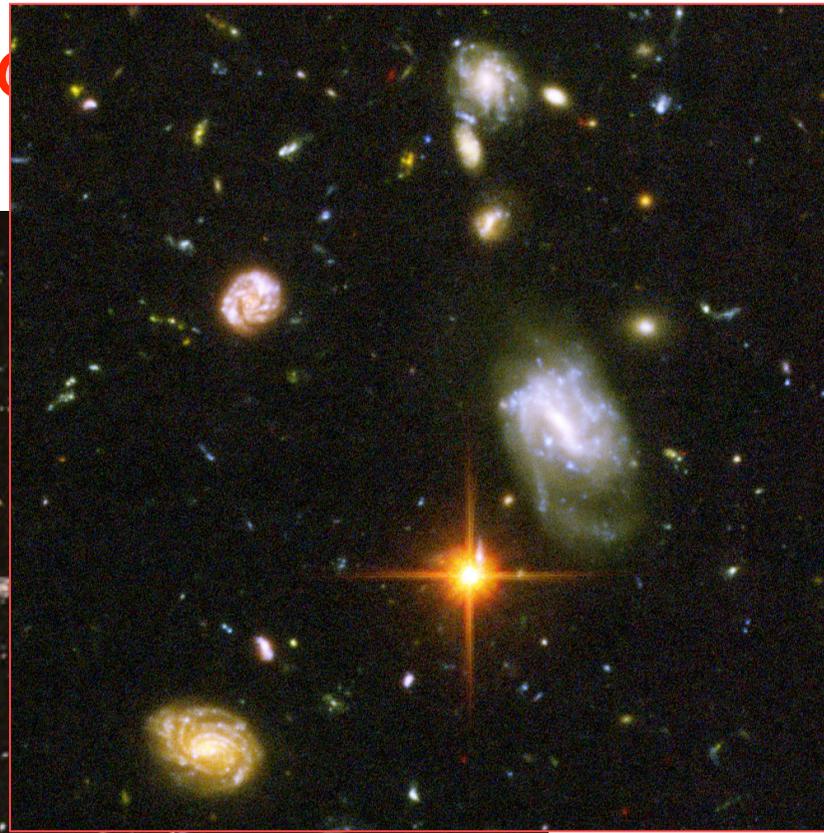
$$1 \text{ pc} = 3,086 \times 10^{18} \text{ cm}$$

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

## Skalen:

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

WANN?  
WO?



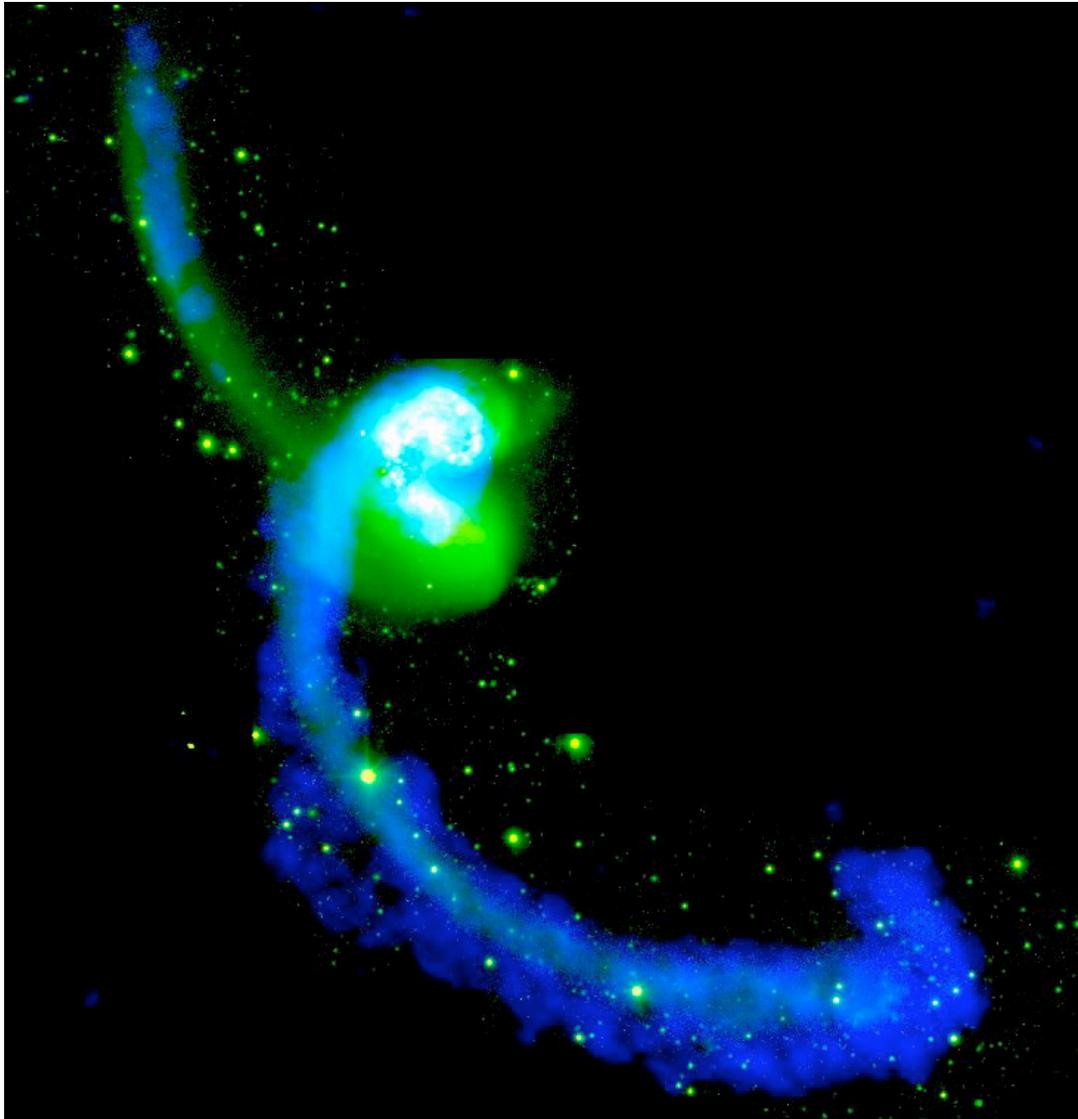
ng  
üh

(weniger als 1Ga  
nach dem Urknall)

Sterne  
entstehen in  
Galaxien und  
Protogalaxien

(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

(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)

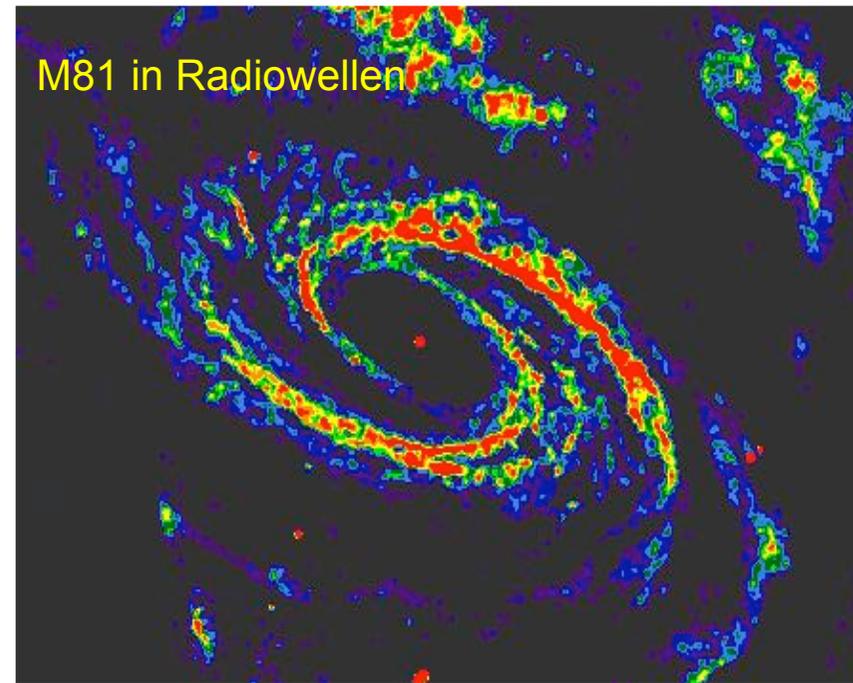
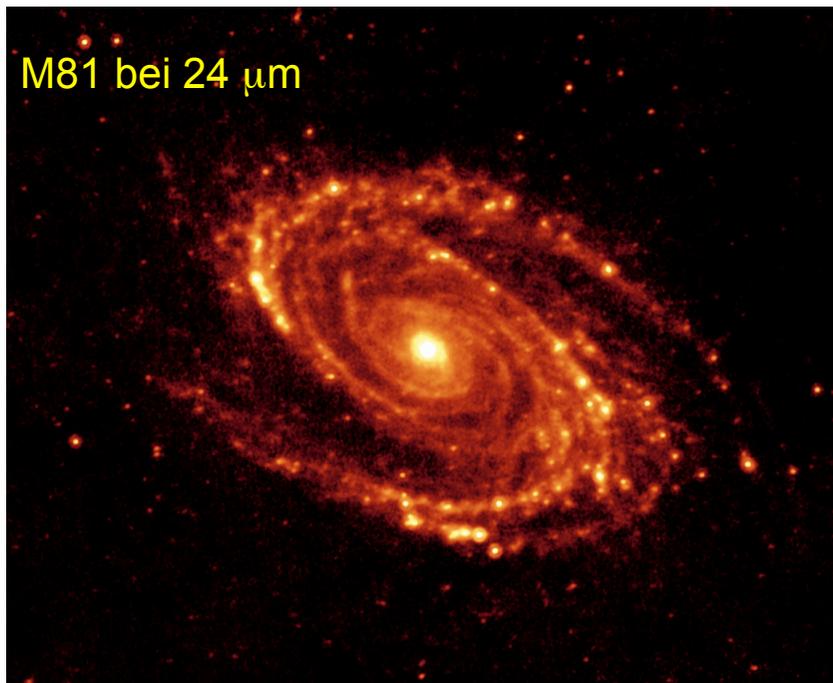
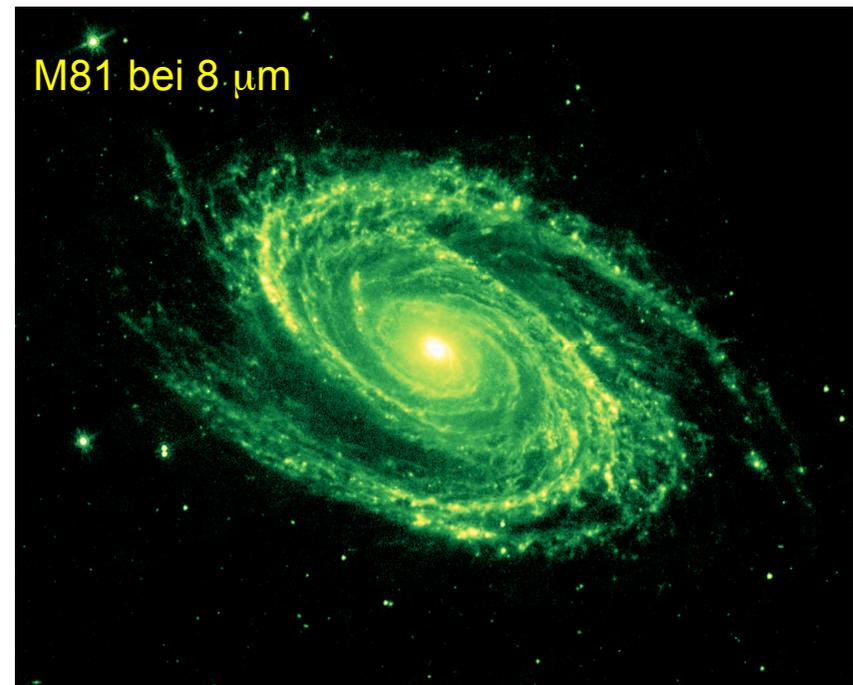
## NGC4622

- 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.

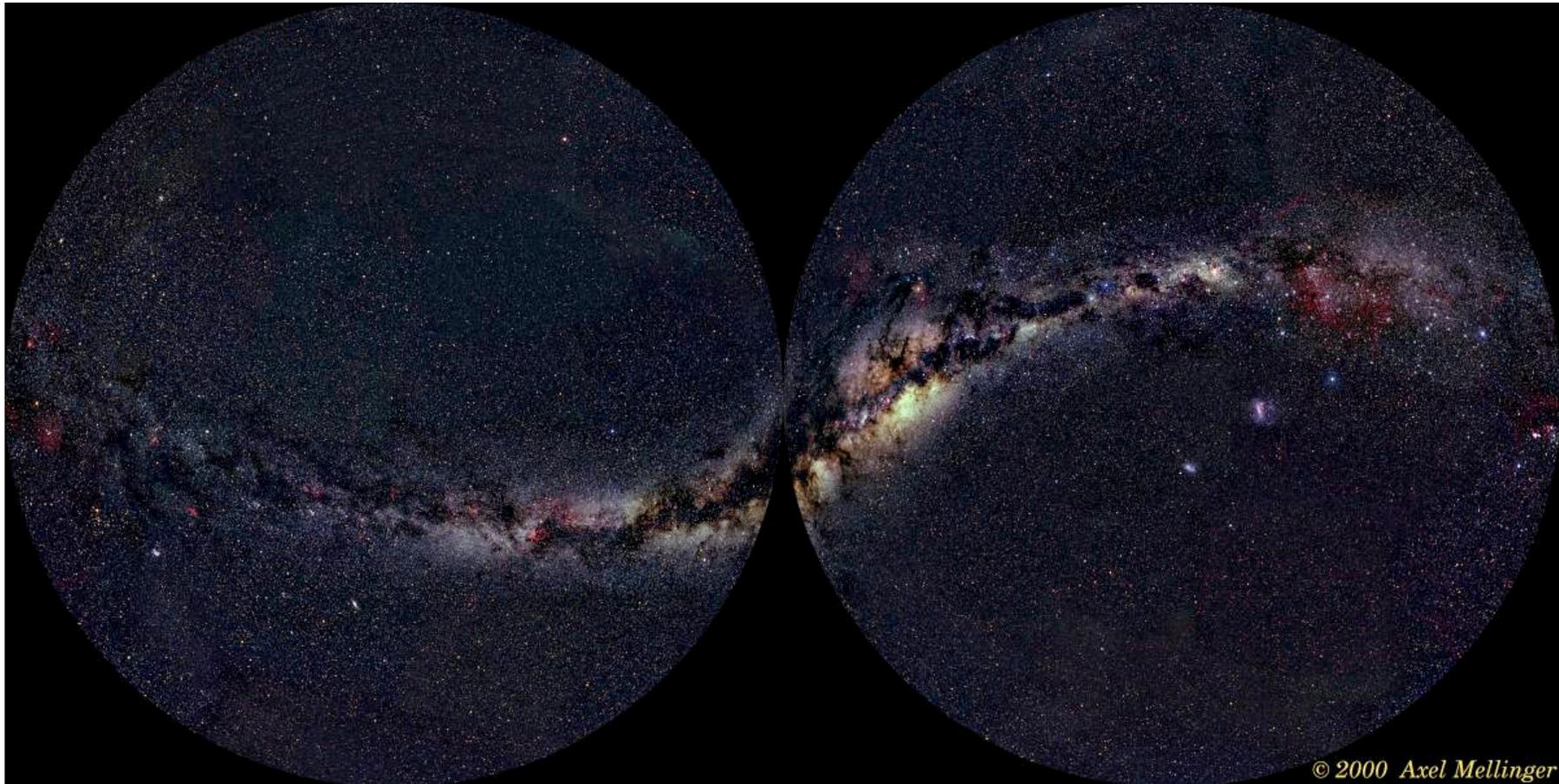


The Sombrero Galaxy — M104  HUBBLESITE.org

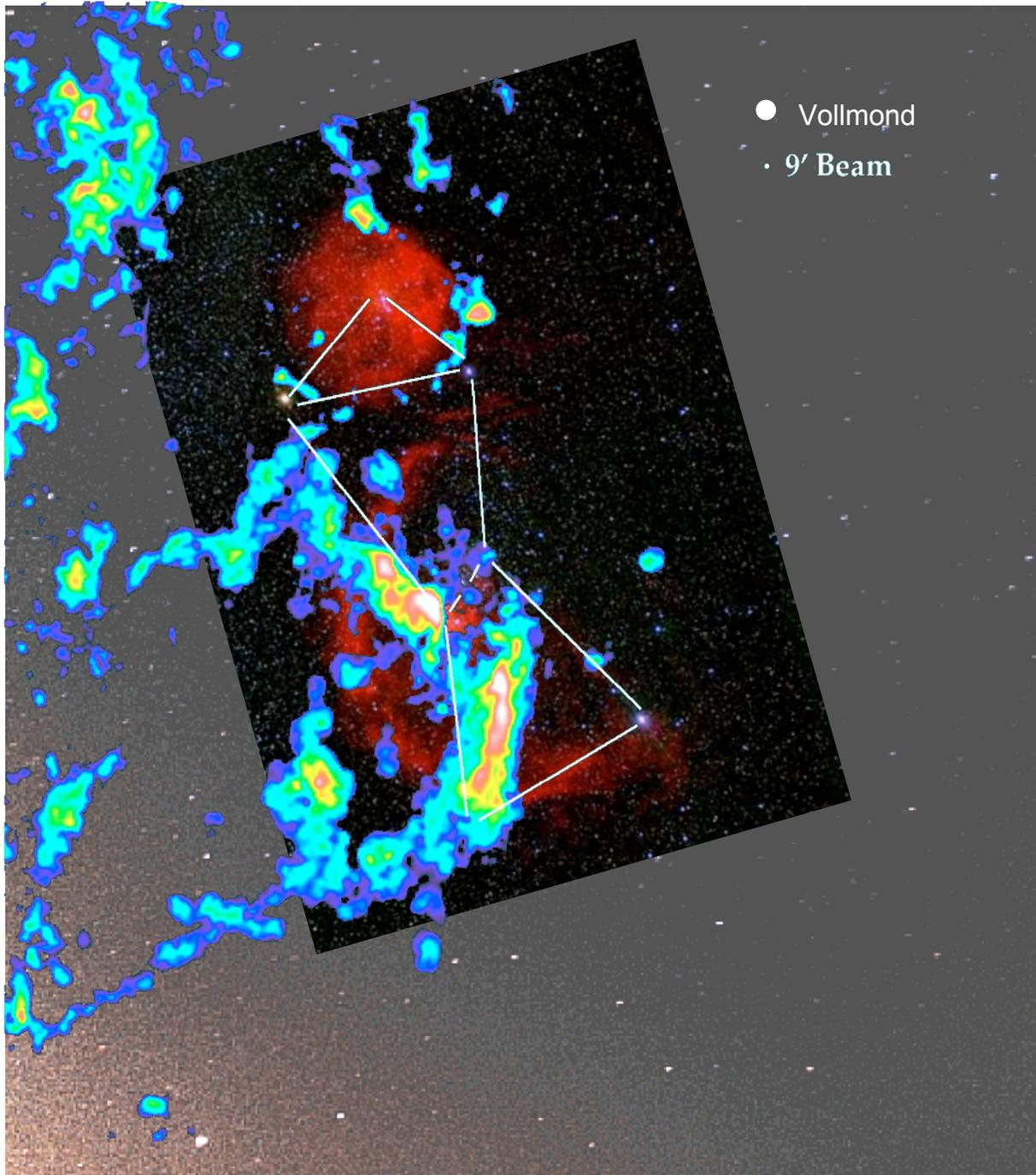
Zusammenhang zwischen Sternbildung und Gasverteilung am Beispiel von M81



# 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.

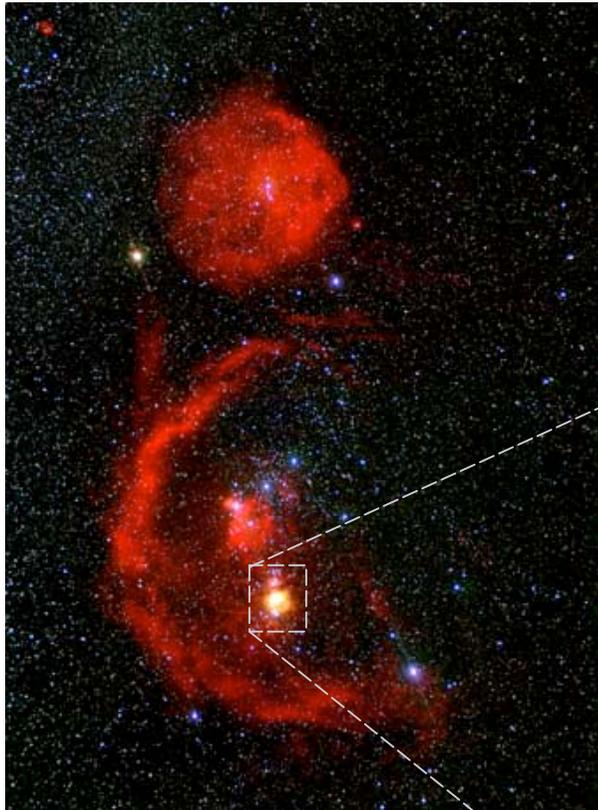


# Stern- entstehung in Orion

Wir sehen

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

# Lokales SE Gebiet: Trapezhaufen in Orion



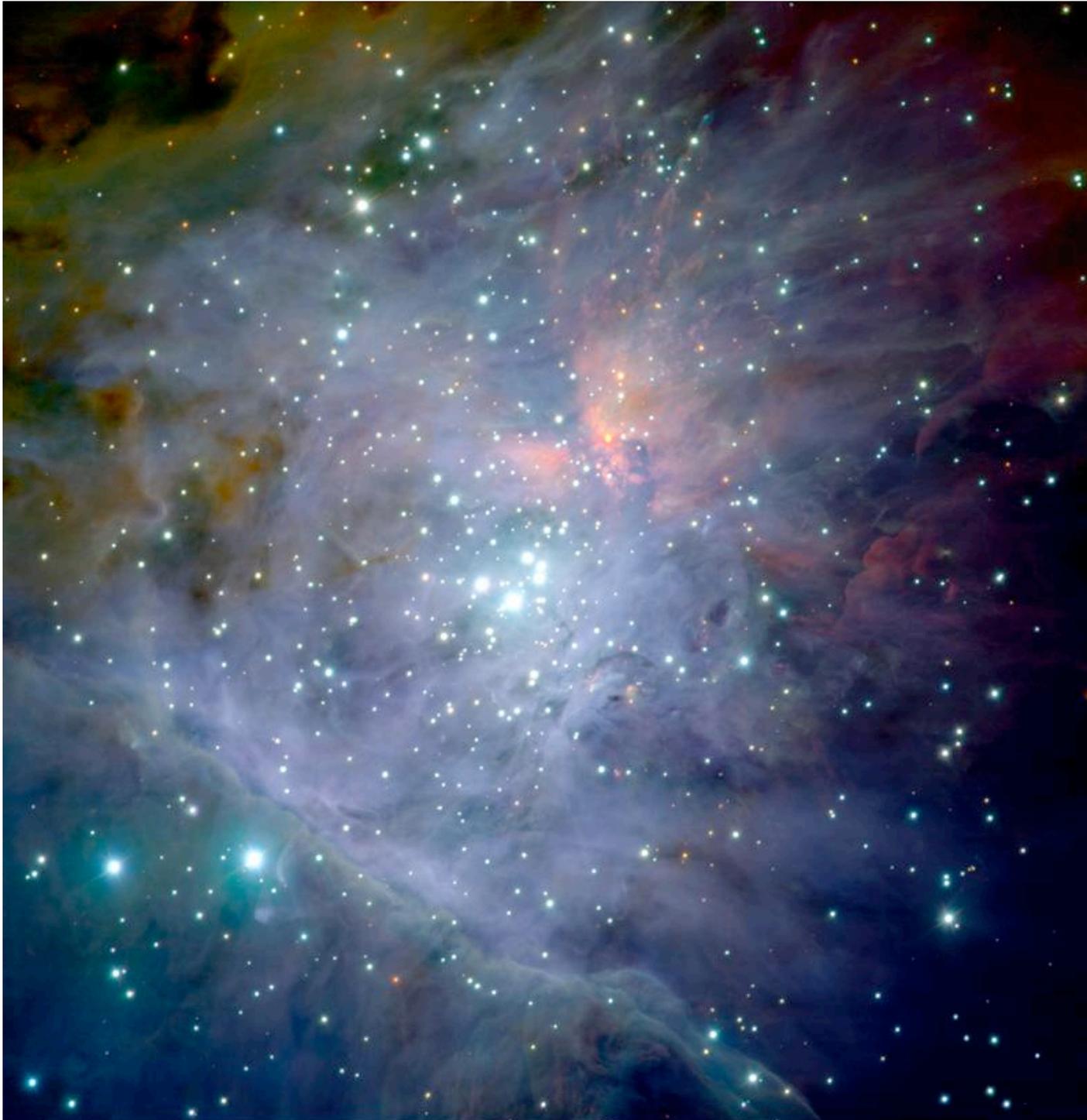
Sternbild Orion

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

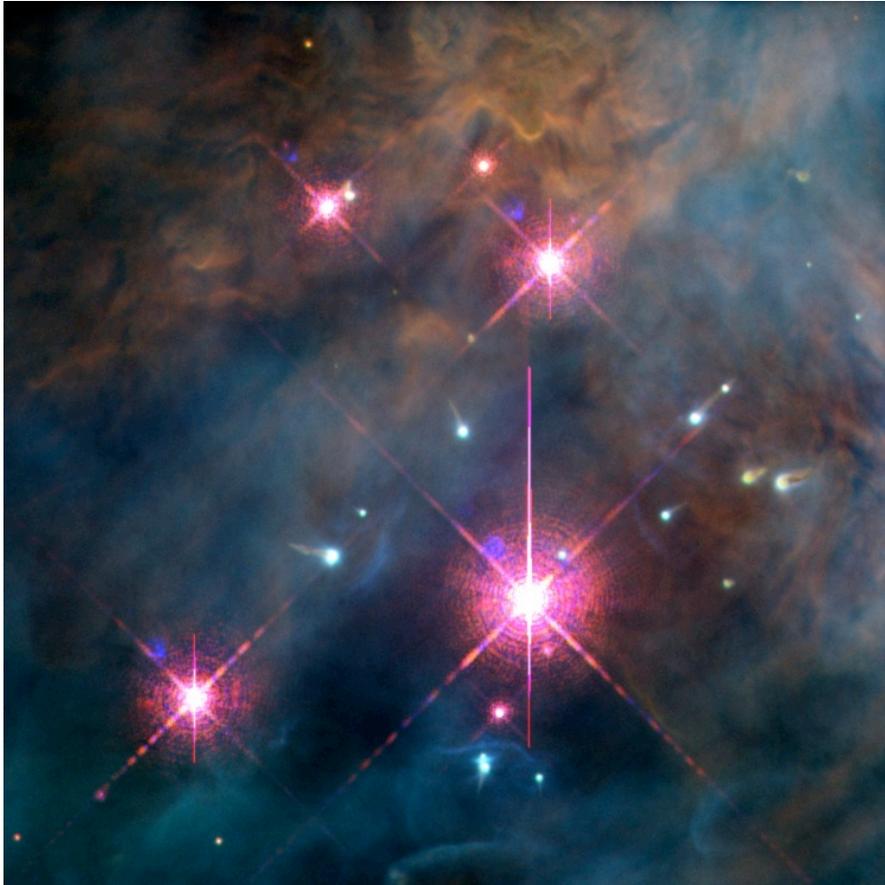


## Trapez- haufen (Detail)

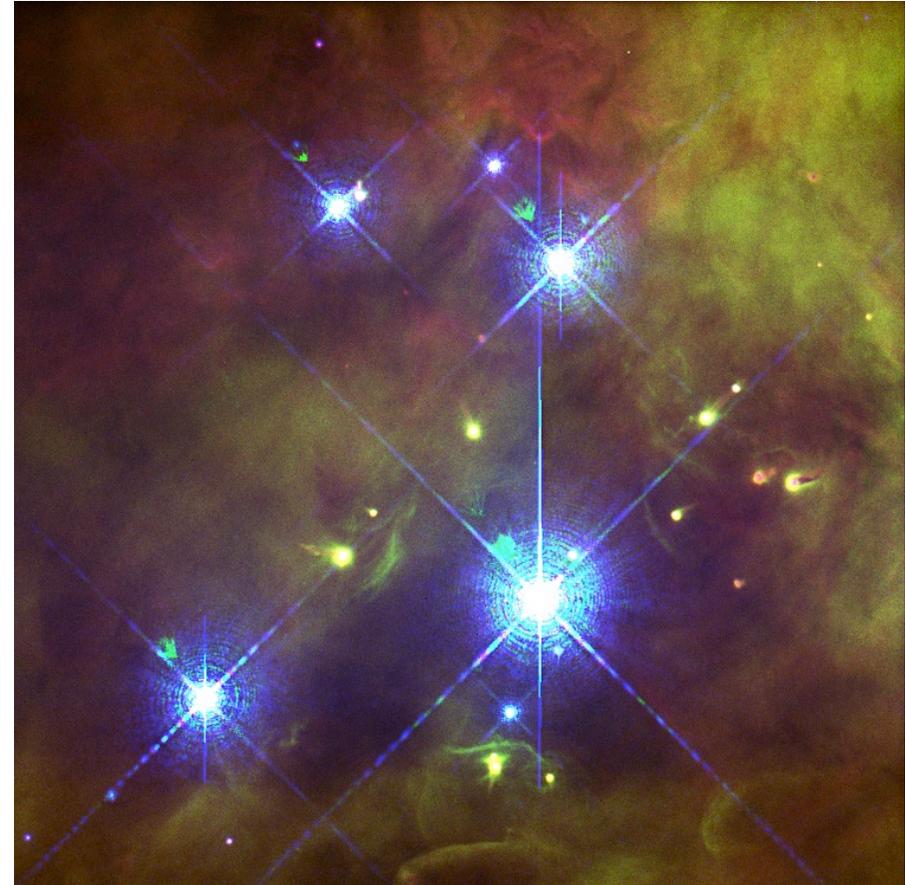
- Sterne ent-  
stehen in  
**Haufen**
- Sterne ent-  
stehen in  
**Molekül-  
wolken**
- **Rückkopp-  
lungseffekte**  
sind wichtig

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

# Trapezhaufen: Zentralgebiet

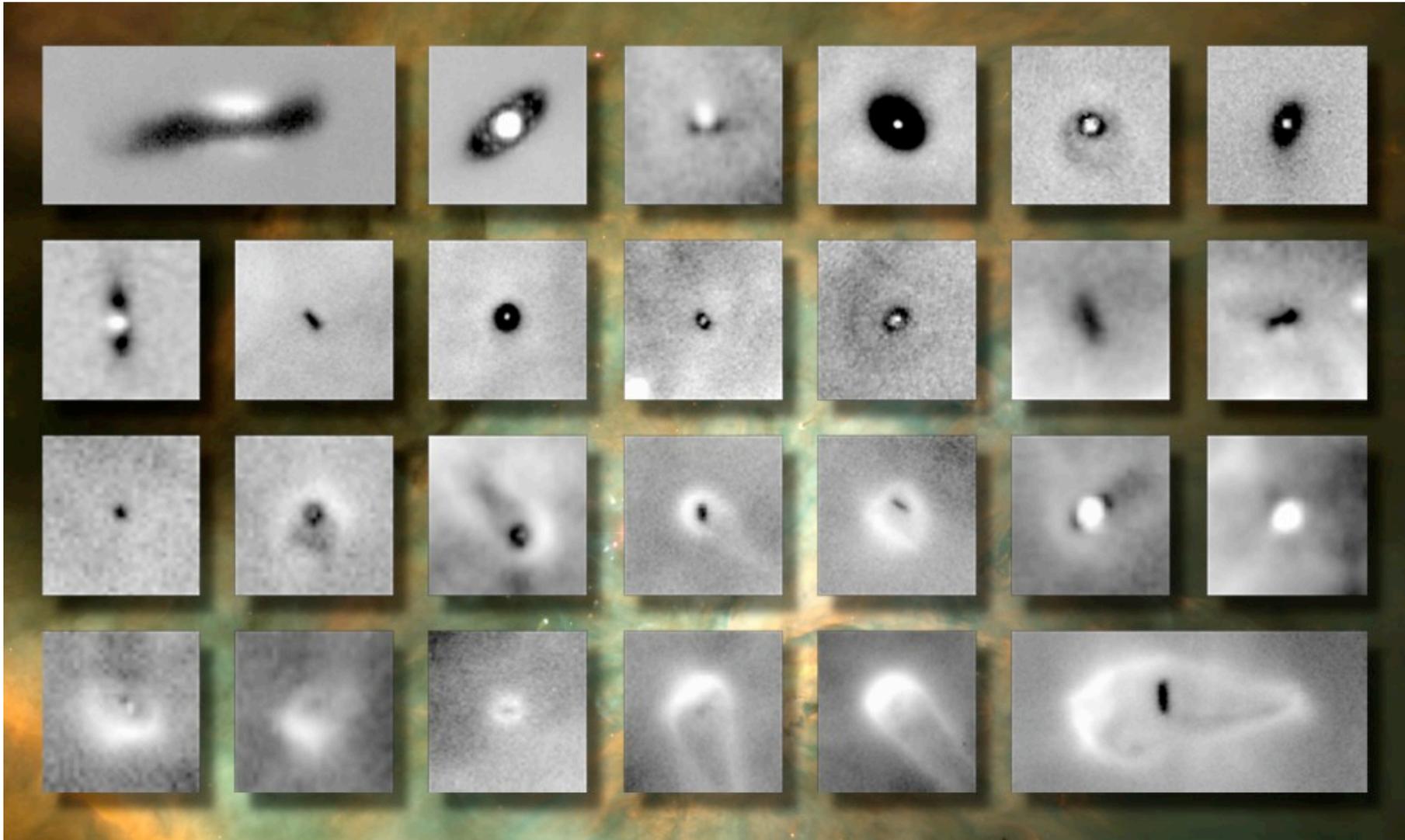


Der Großteil der ionisierenden Strahlung kommt vom Zentralstern  **$\theta$ 1C Orionis**



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

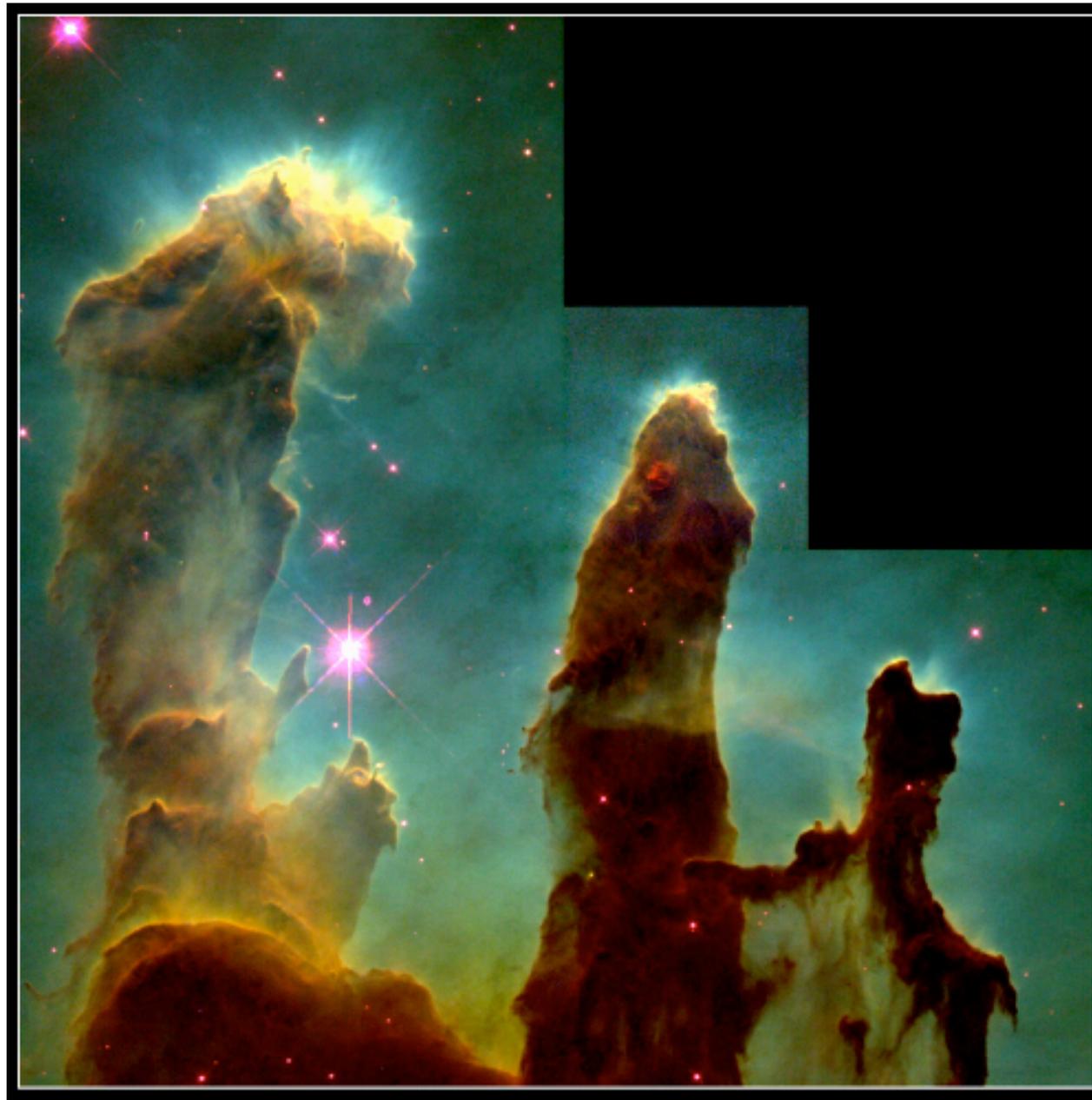
# Weitere Details: Siluett-Scheiben in Orion



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

(Daten von Mark McCaughrean)

Klassen: Physikalisches Kolloquium 28.04.2006



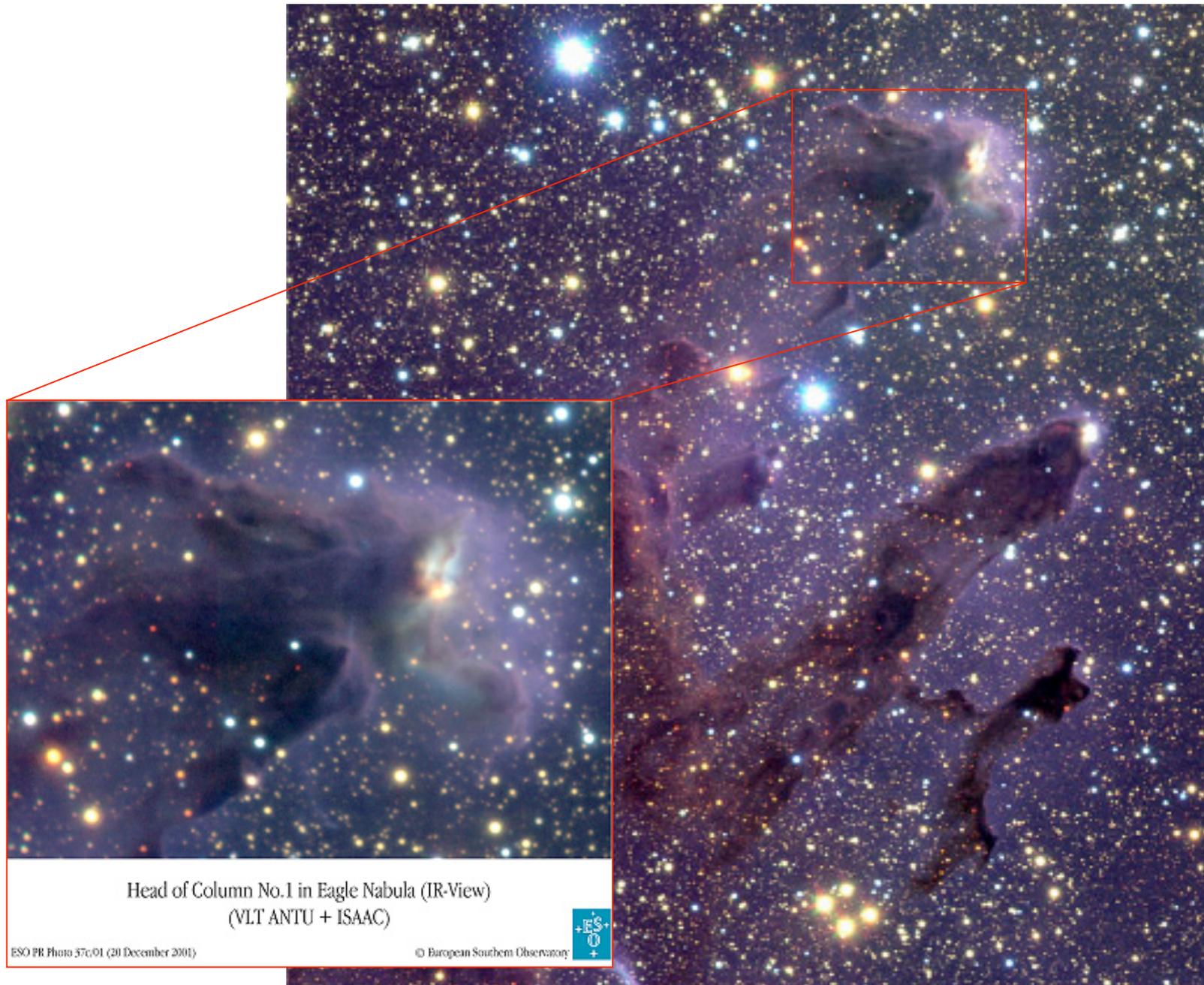
HST Aufnahme

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

Klassen: Physikalisches Kolloquium 28.04.2006

Aufnahme im  
Infraroten.





IR Aufnahme mit dem ESO-VLT

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



IR Aufnahme mit dem ESO-VLT

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

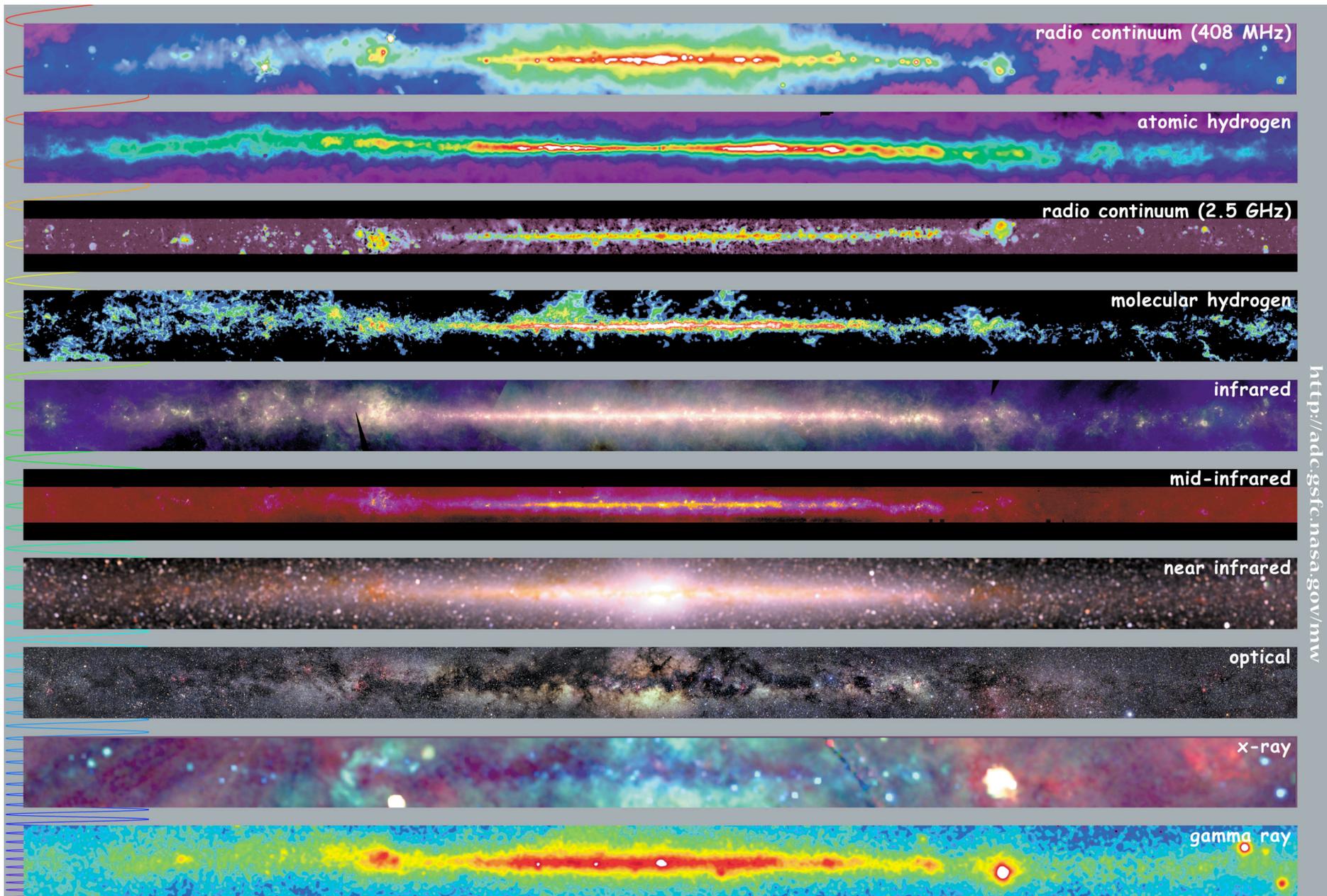
WIE?

# Wie beobachtet man SE?

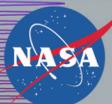
Unterschiedliche Wellenlängen liefern unterschiedliche Informationen.

→ Astronomen beobachten das gesamte elektromagnetische Spektrum

- **Radiostrahlung:** interstellares Gas  
(Linienemission -> Geschwindigkeitsinformation)
- **sub-mm Bereich:** Staub (thermische Emission)
- **infrarot & optisch:** Sterne
- **Röntgen:** Sterne (Coronae), Supernovae Reste (sehr heißes Gas)
- **$\gamma$ -Strahlung:** Supernovae Reste (radioaktiver Zerfall, z.B.  $^{26}\text{Al}$ ), kompakte Objekte, Verschmelzen von Neutronensternen (Gamma-Ray-Burst)



<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>



# Multiwavelength Milky Way

# Interstellare Materie: ISM

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.

# Phasen der ISM

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

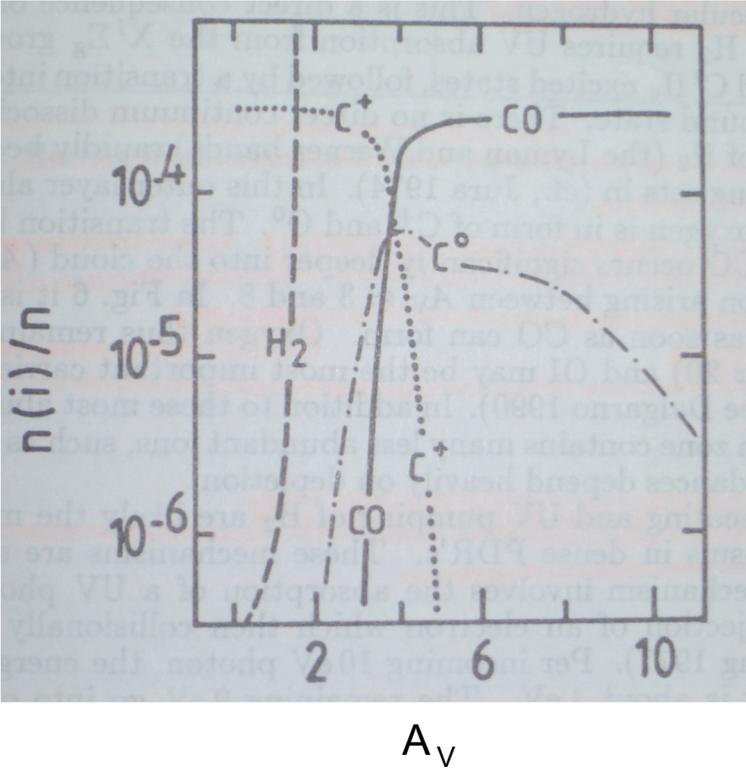
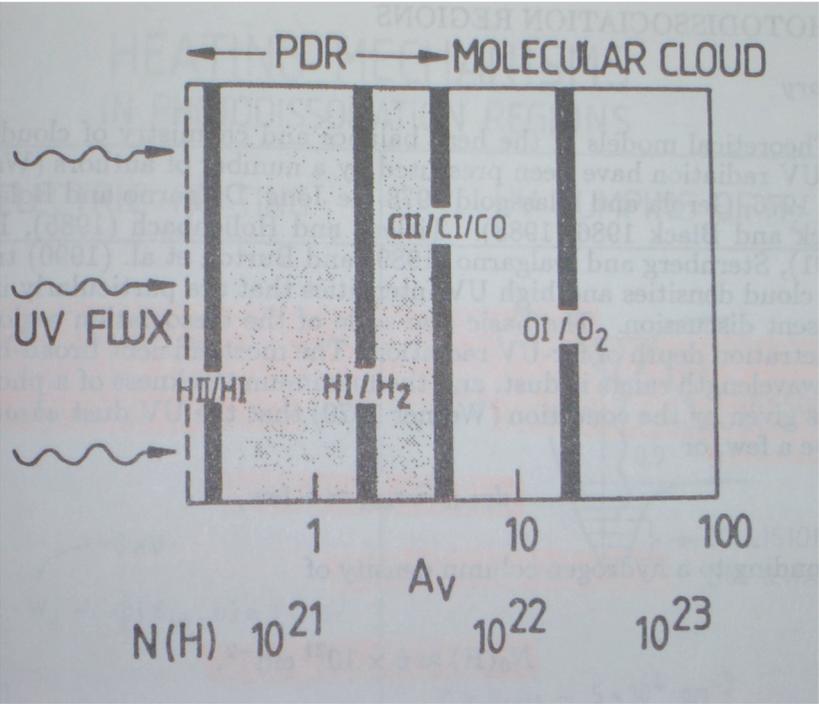
*Ionisierter atomarer Wasserstoff* HII ( $H^+$ )  
*Neutraler atomarer Wasserstoff* HI ( $H$ )  
*Molekularer Wasserstoff*  $H_2$

 Ionisation  
Phasenübergang

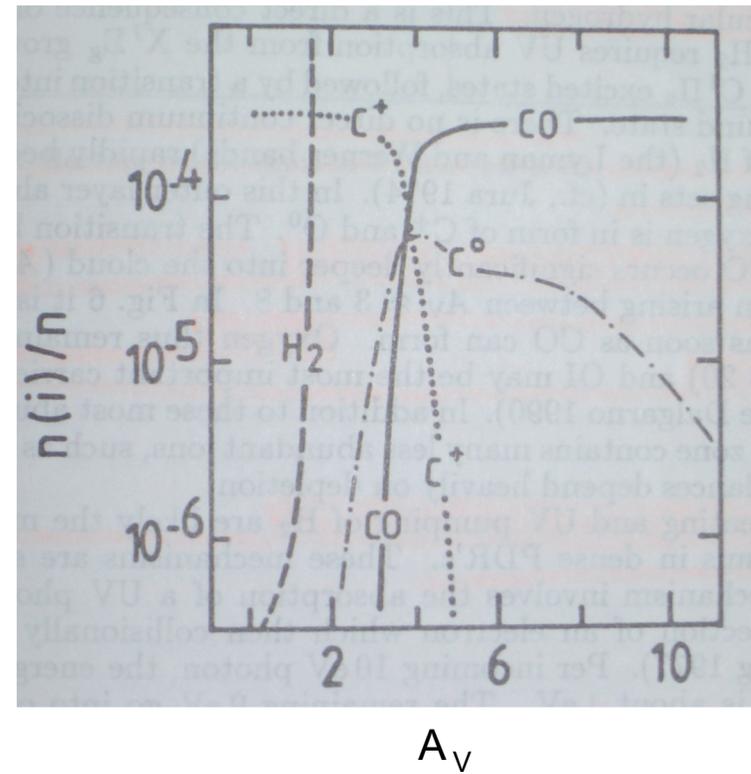
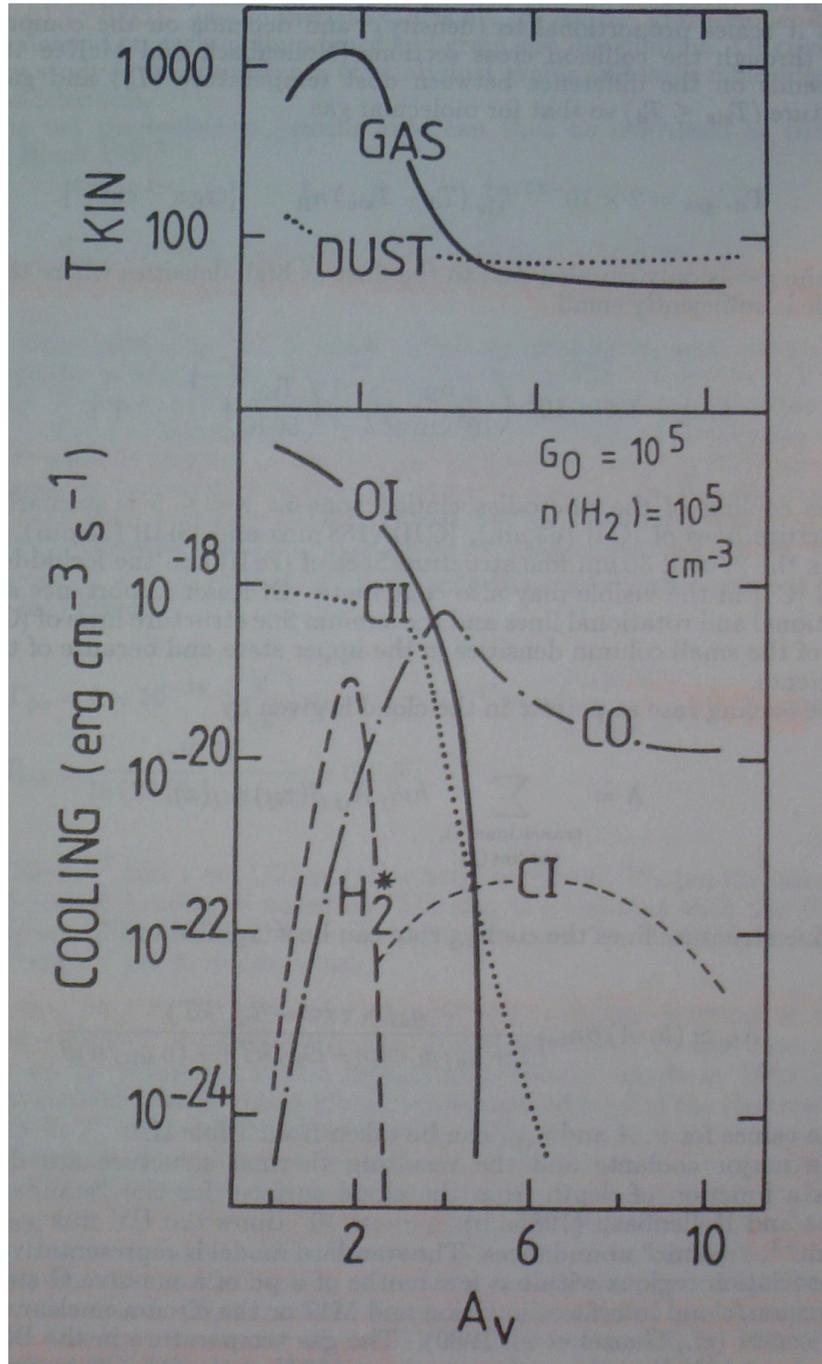
Die jeweiligen Regionen bestehen nahezu zu 100% aus der entsprechenden Komponente, wobei, die Grenzgebiete zwischen HII, HI und  $H_2$  sehr dünn sind.

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!

# Phasen der ISM



$A_V$  bezeichnet die Extinktion, dh. die Abschwächung der einfallenden Strahlung.

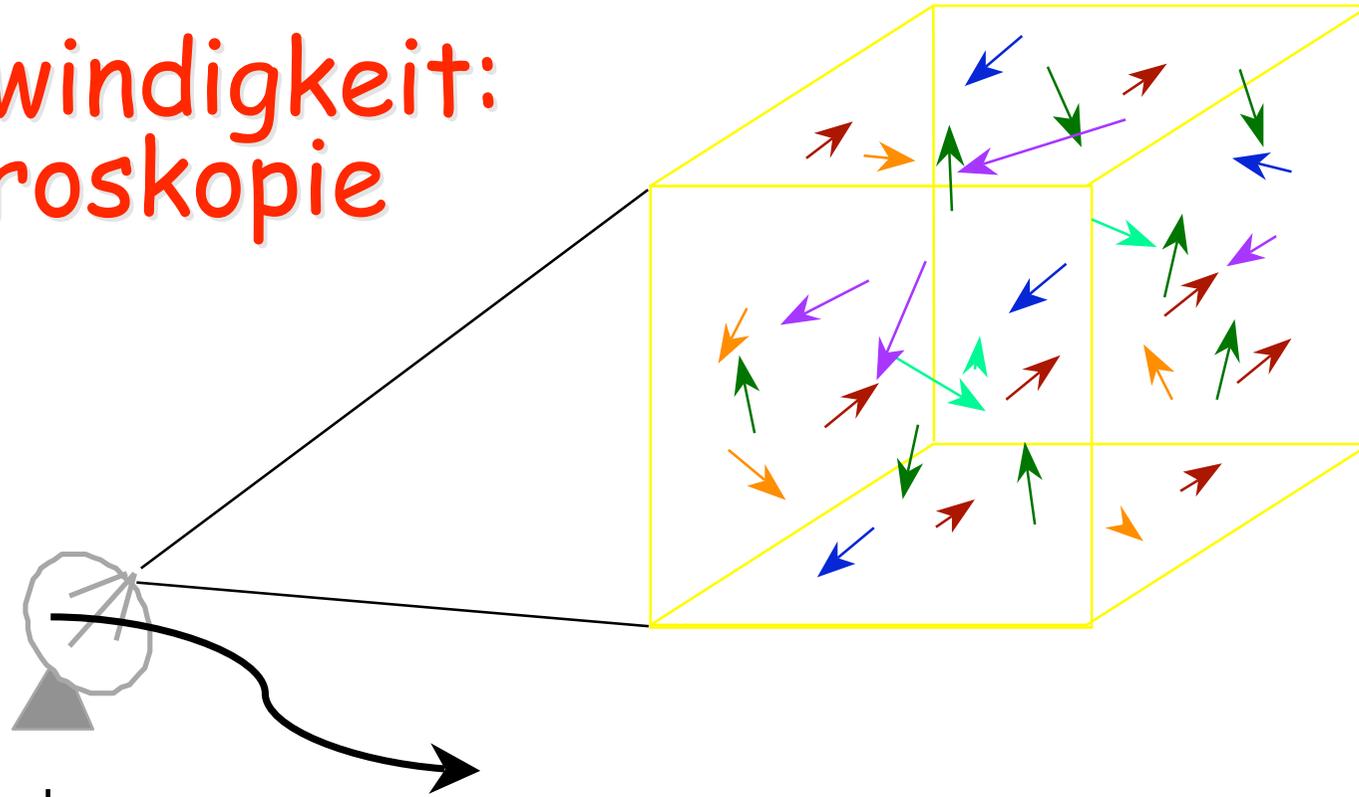


$A_V$  bezeichnet die Extinktion, dh. die Abschwächung der einfallenden Strahlung.

# ISM-Eigenschaften

- Verschiedene Phasen: am wichtigsten für Sternentstehung ist Molekularer Wasserstoff → **Molekülwolken**
- Wichtigste Wellenlängen: **IR und Radio-Strahlung**  
(Staubkontinuum und Moleküllinien: CO, NH<sub>3</sub>, CS, etc. )  
(über 100 verschiedene Moleküle identifiziert)
- **ACHTUNG**: immer nur in **Projektion** (*PPV*) beobachtbar!
- Säulendichte aus Intensität der Emission
- Geschwindigkeiten entlang der Sichtlinie durch Dopplerverschiebung der Linie

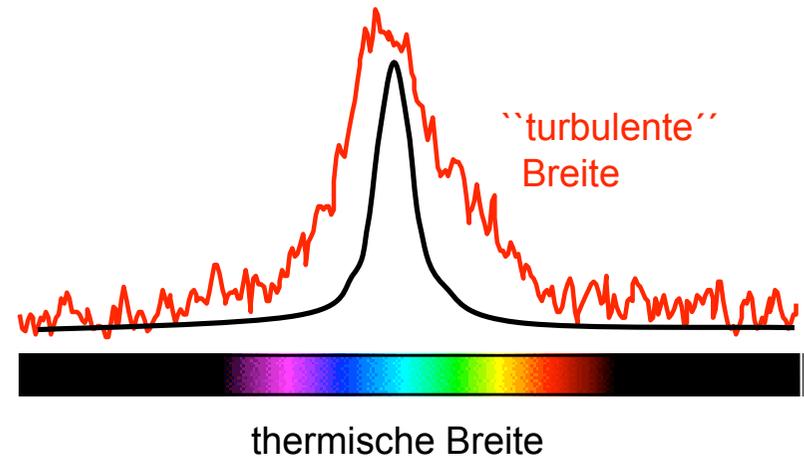
# Geschwindigkeit: Spektroskopie



Teleskop +  
Spektrometer

## Doppler -Verschiebung

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



# Taurus

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

3.4 km/s

176°

174°

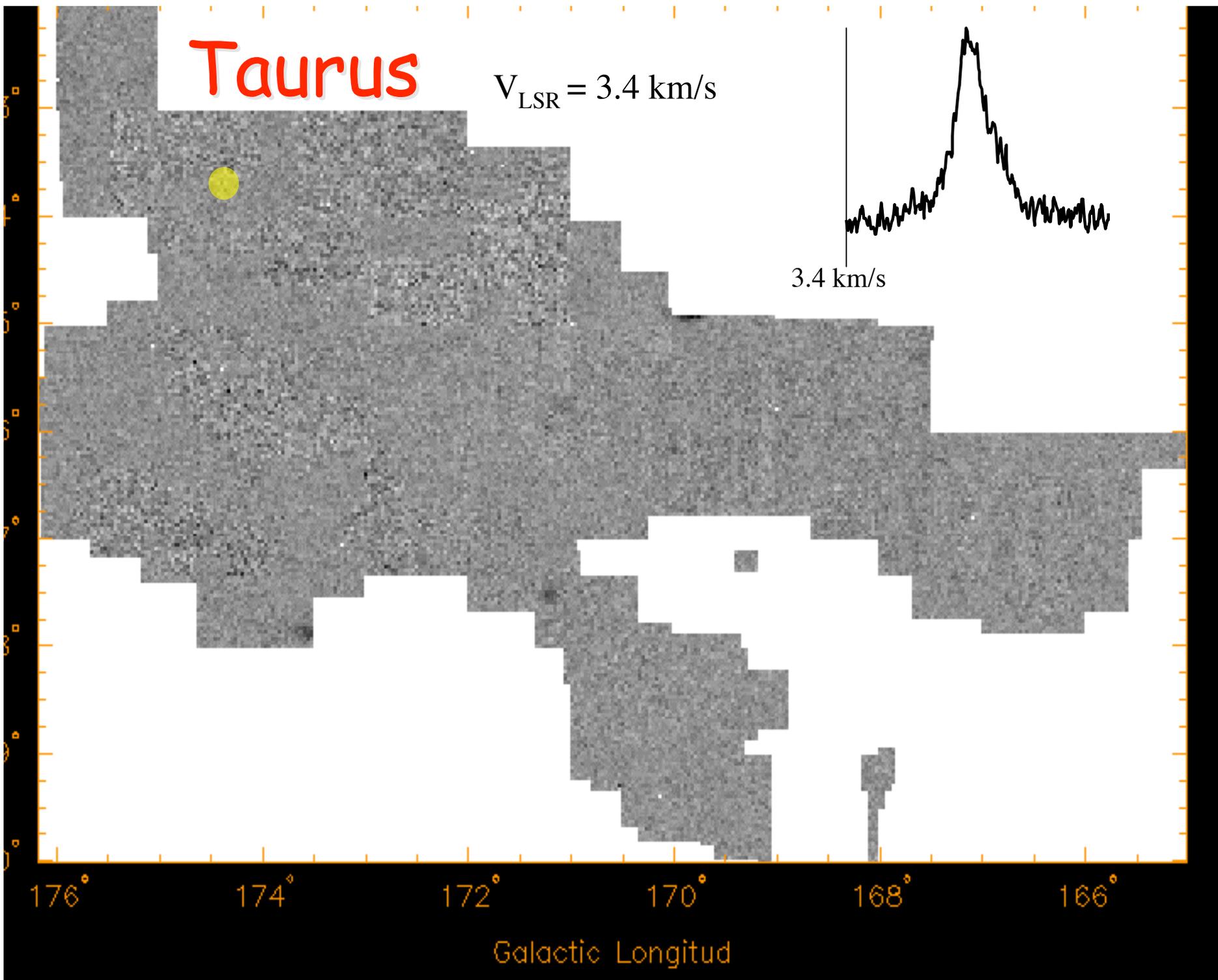
172°

170°

168°

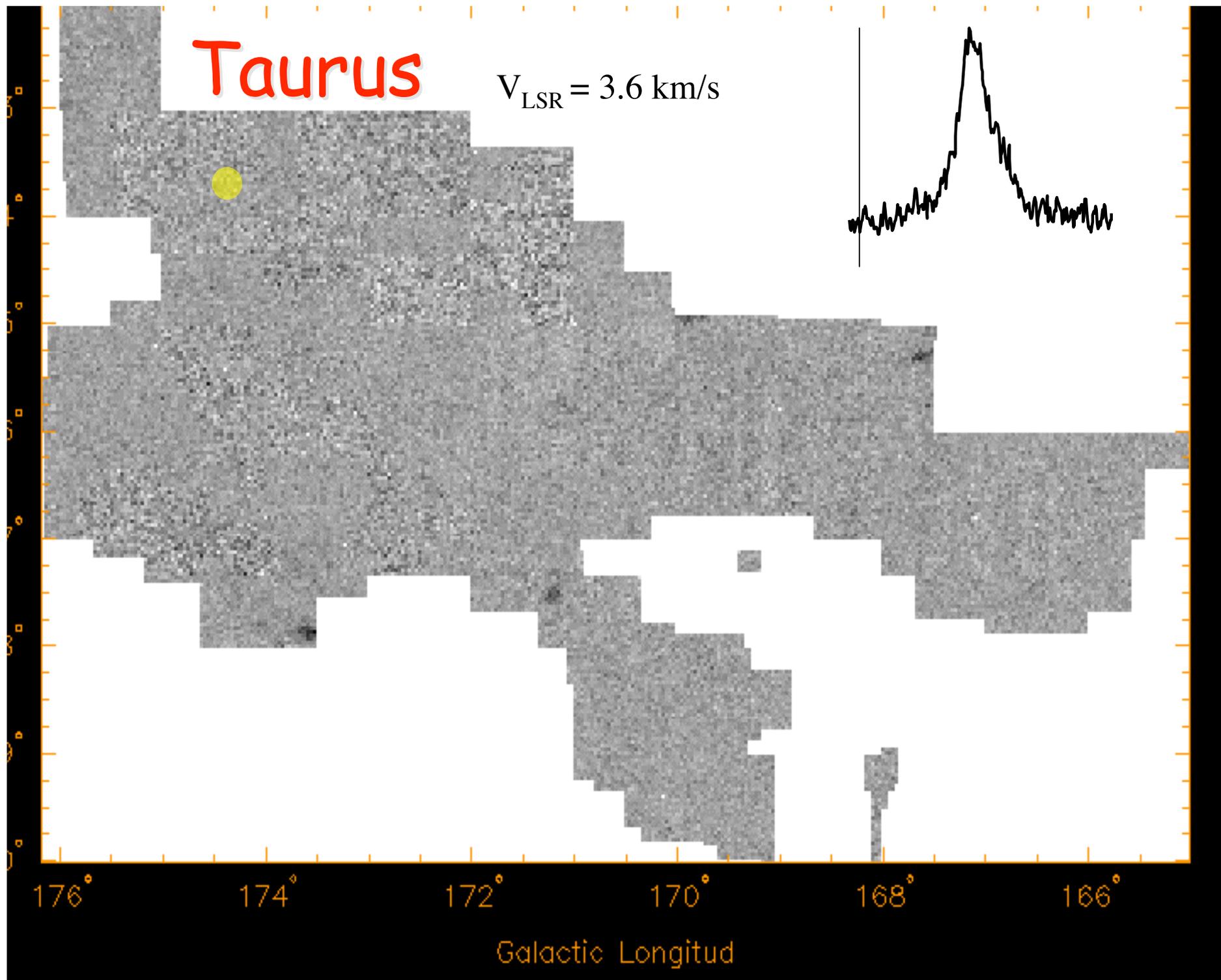
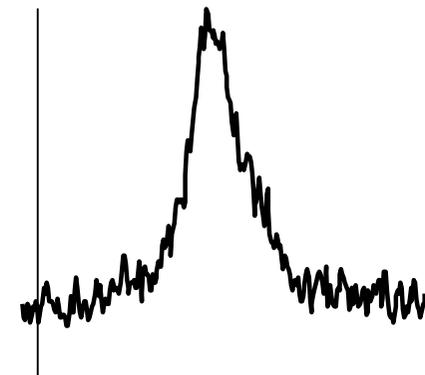
166°

Galactic Longitud



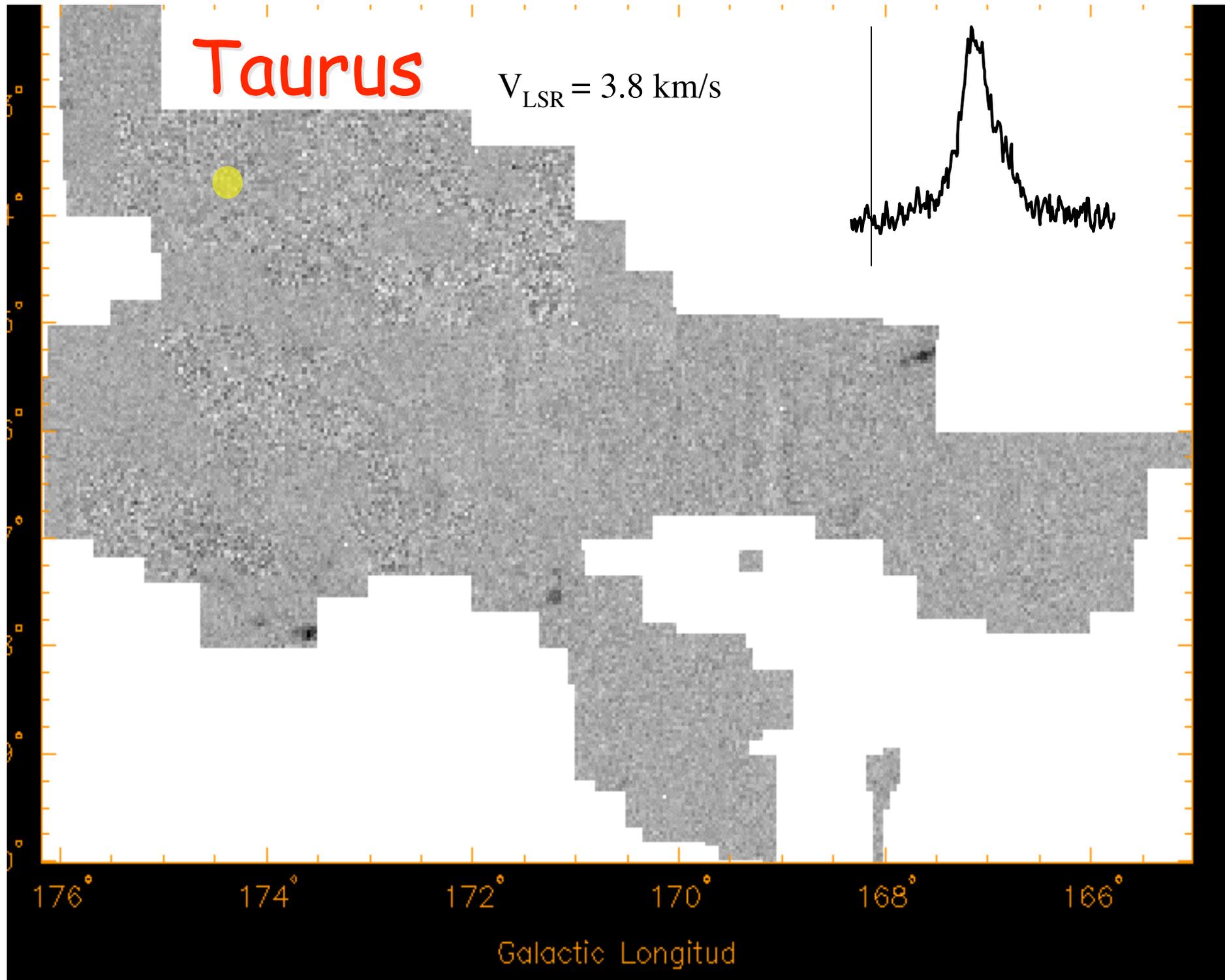
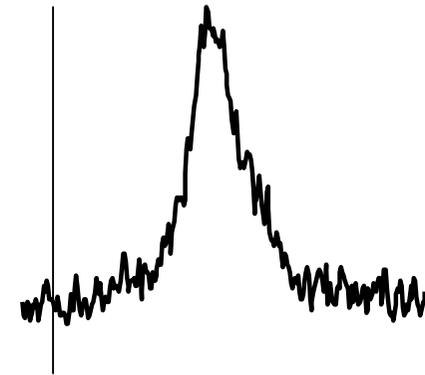
# Taurus

$V_{\text{LSR}} = 3.6 \text{ km/s}$



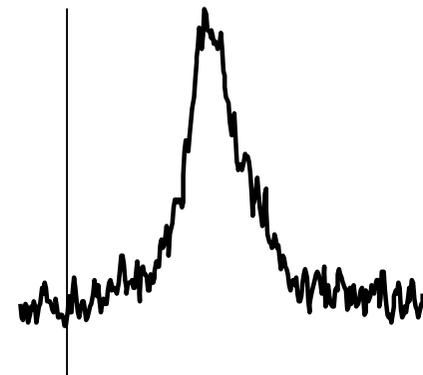
# Taurus

$V_{\text{LSR}} = 3.8 \text{ km/s}$



# Taurus

$V_{\text{LSR}} = 4.0 \text{ km/s}$



176°

174°

172°

170°

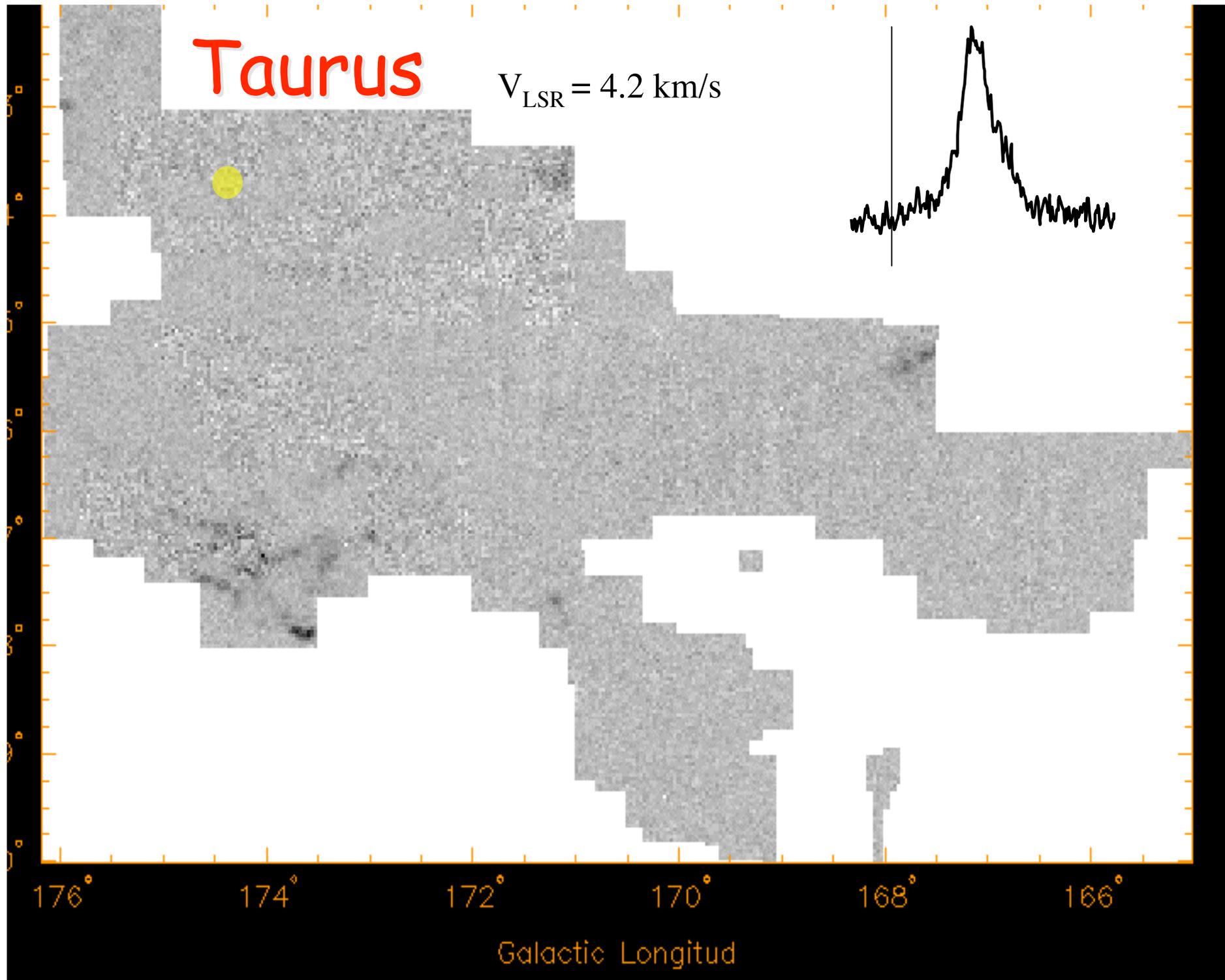
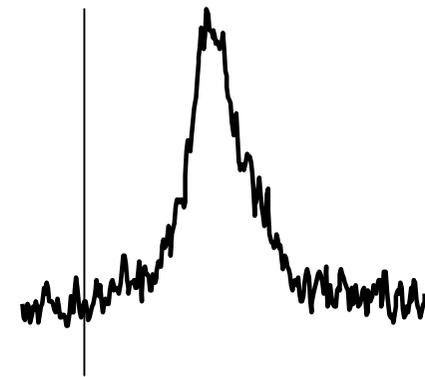
168°

166°

Galactic Longitud

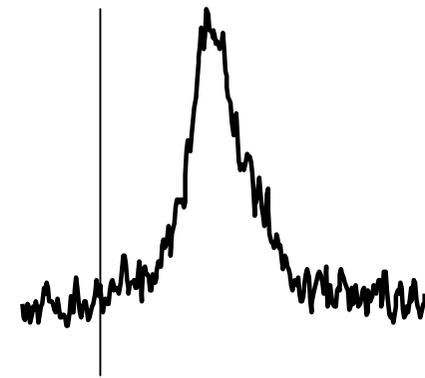
# Taurus

$V_{\text{LSR}} = 4.2 \text{ km/s}$



# Taurus

$V_{\text{LSR}} = 4.4 \text{ km/s}$



176°

174°

172°

170°

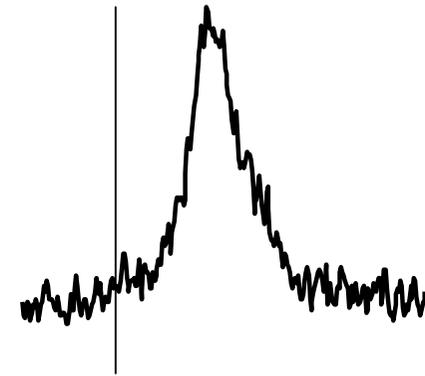
168°

166°

Galactic Longitud

# Taurus

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



176°

174°

172°

170°

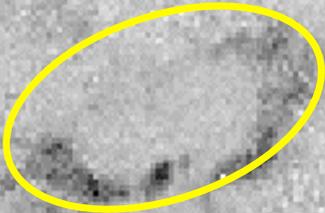
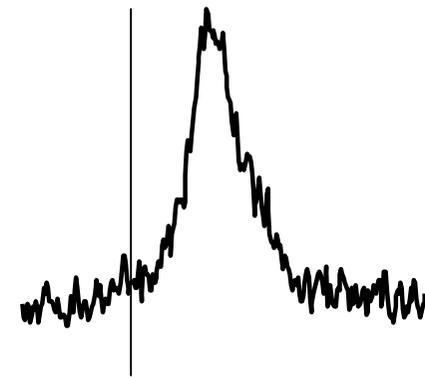
168°

166°

Galactic Longitud

# Taurus

$V_{\text{LSR}} = 4.8 \text{ km/s}$

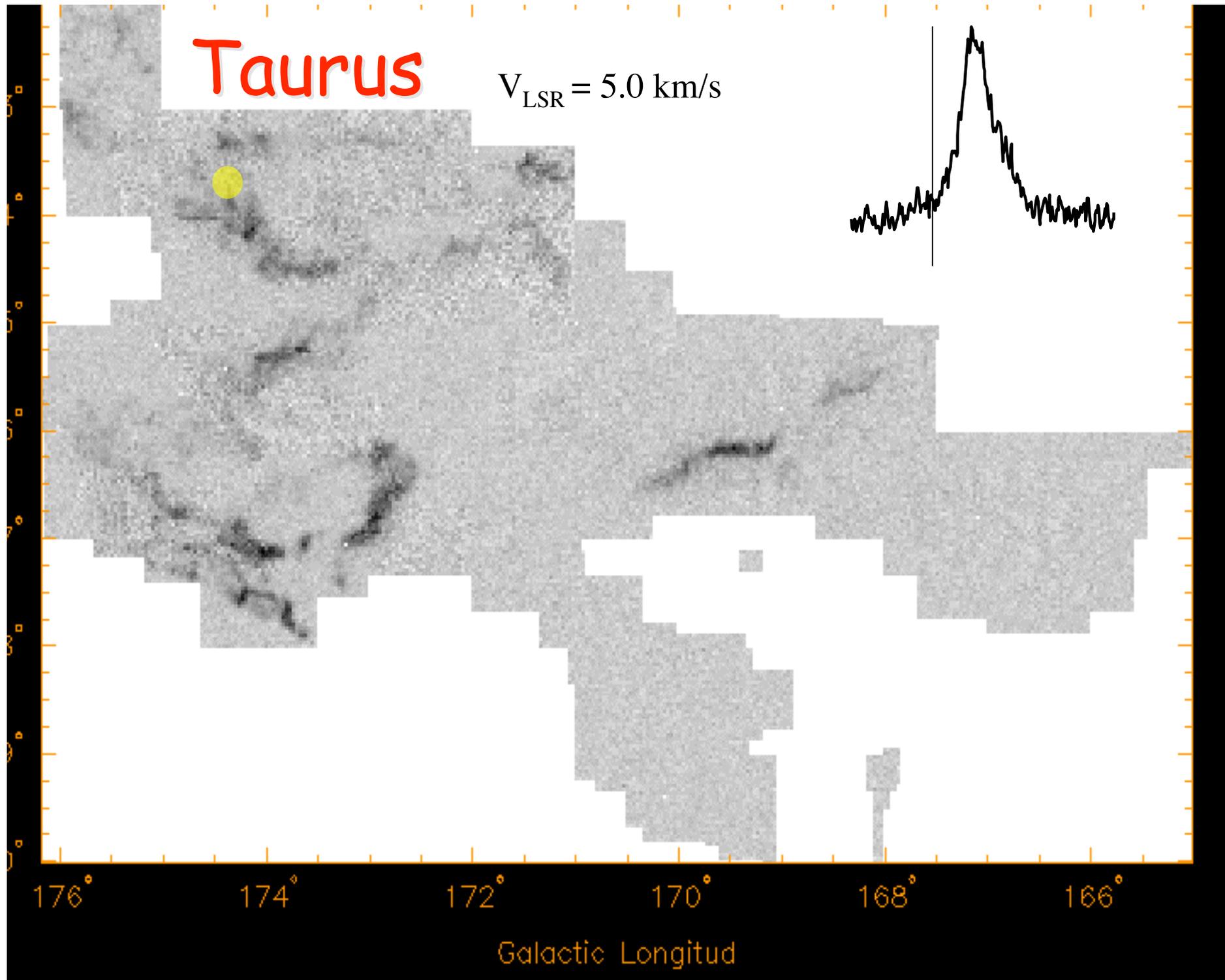
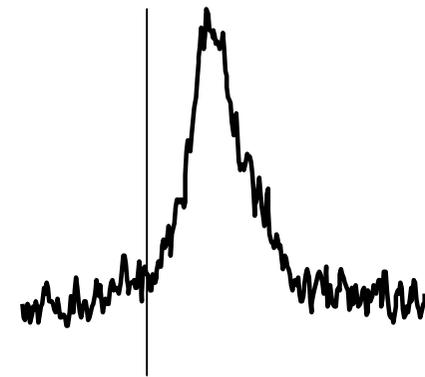


176° 174° 172° 170° 168° 166°

Galactic Longitud

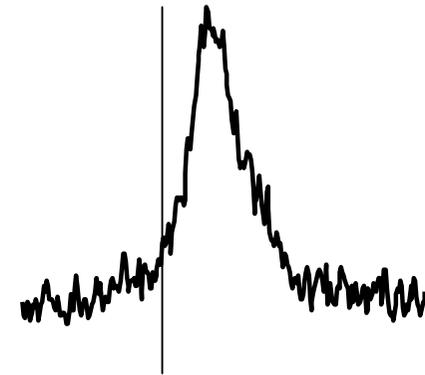
# Taurus

$V_{\text{LSR}} = 5.0 \text{ km/s}$



# Taurus

$V_{\text{LSR}} = 5.2 \text{ km/s}$



176°

174°

172°

170°

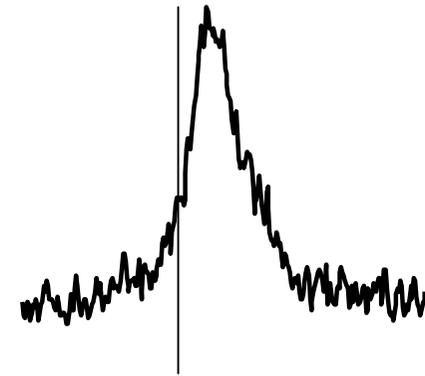
168°

166°

Galactic Longitud

# Taurus

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



176°

174°

172°

170°

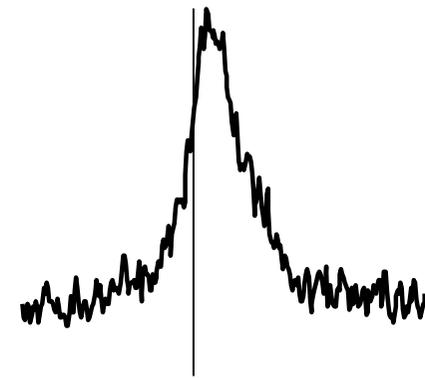
168°

166°

Galactic Longitud

# Taurus

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



176°

174°

172°

170°

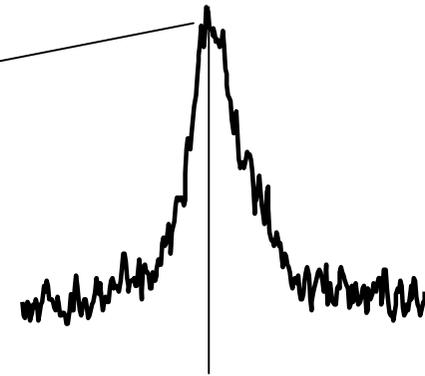
168°

166°

Galactic Longitud

# Taurus

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



176°

174°

172°

170°

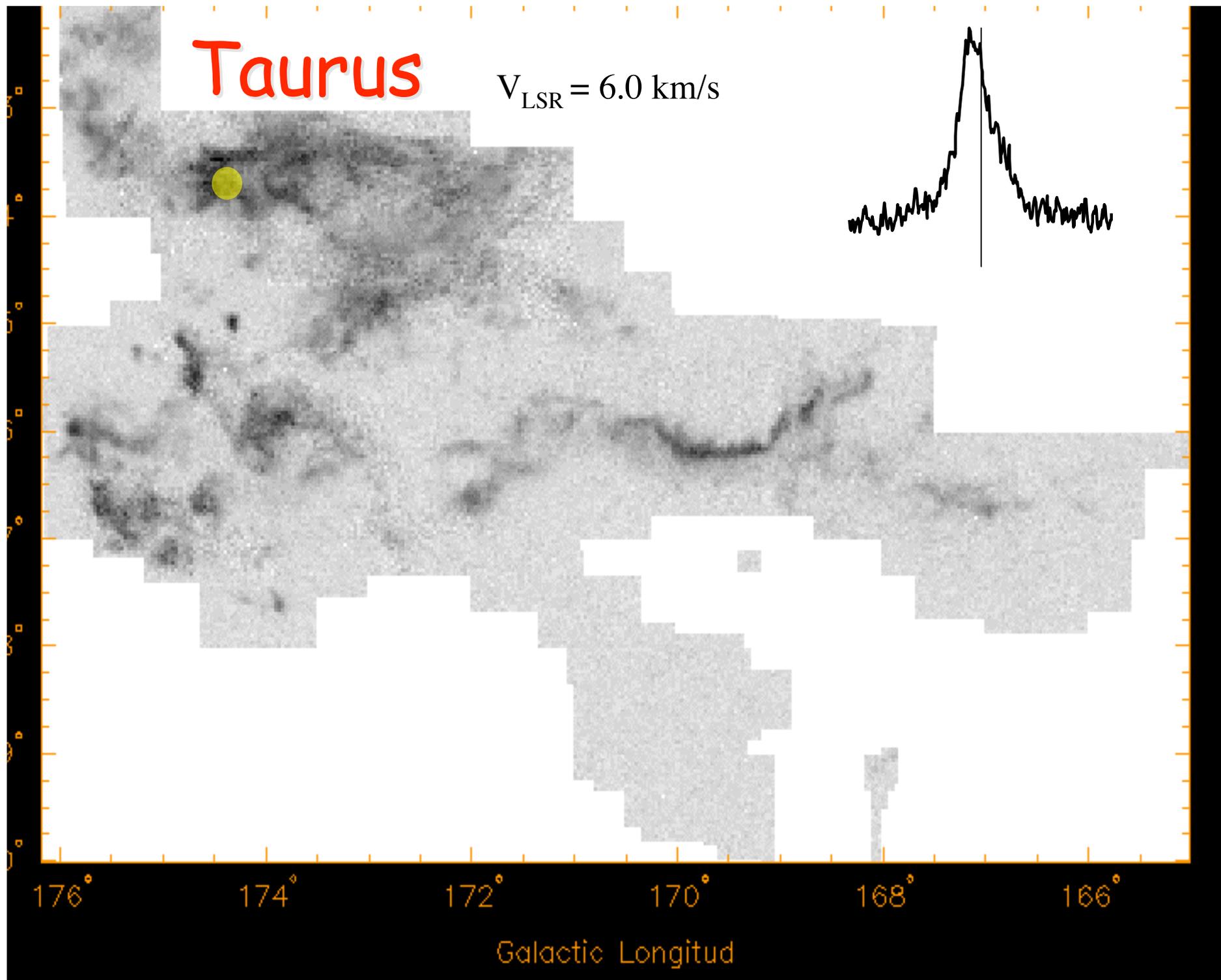
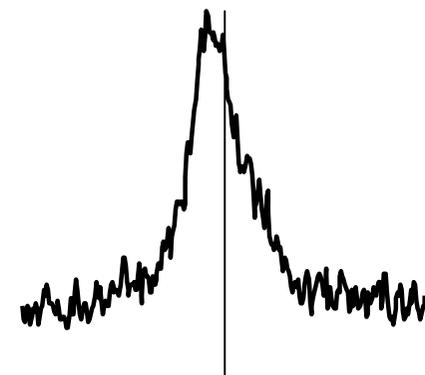
168°

166°

Galactic Longitud

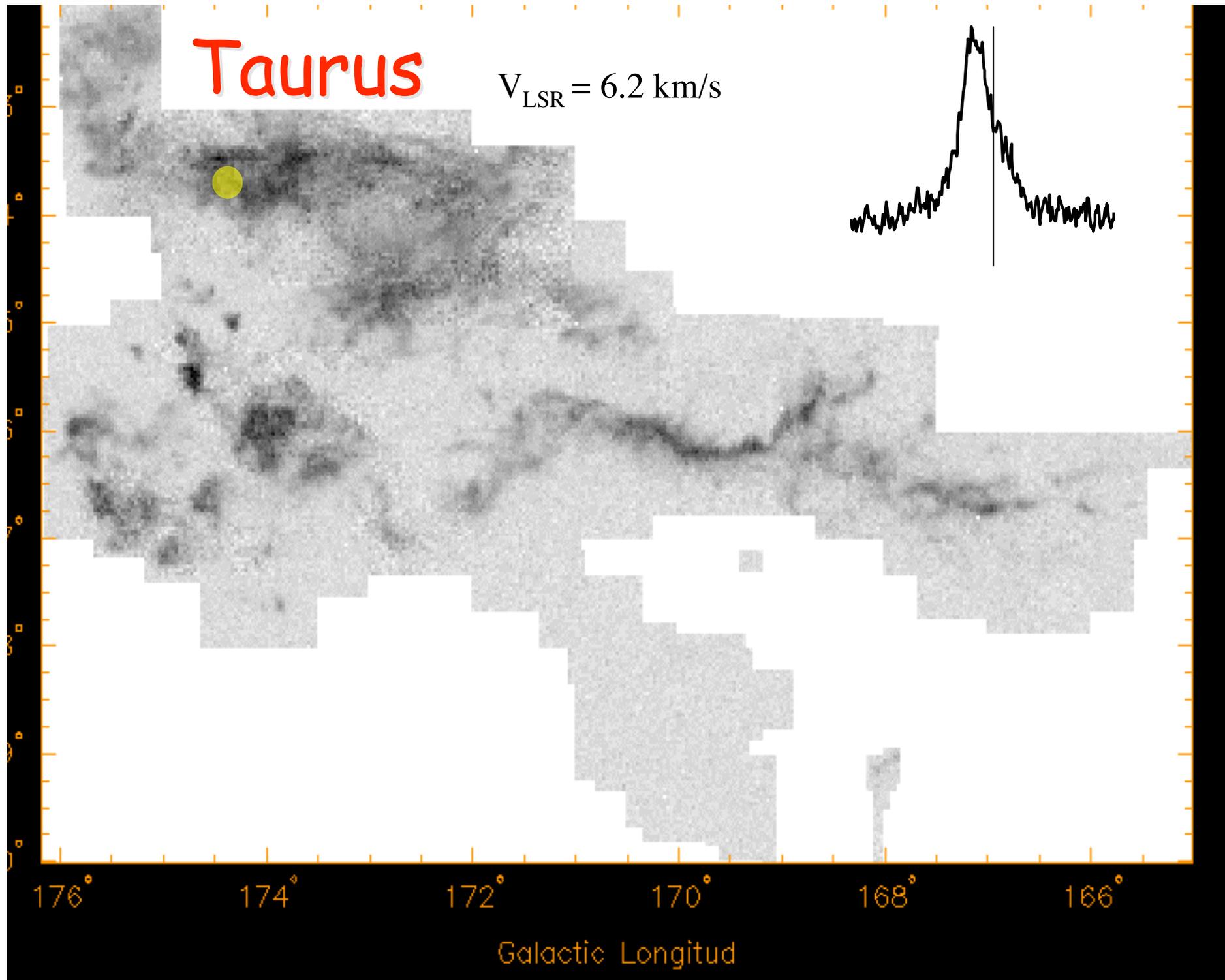
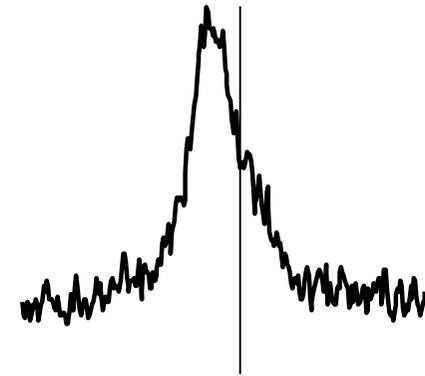
# Taurus

$V_{\text{LSR}} = 6.0 \text{ km/s}$



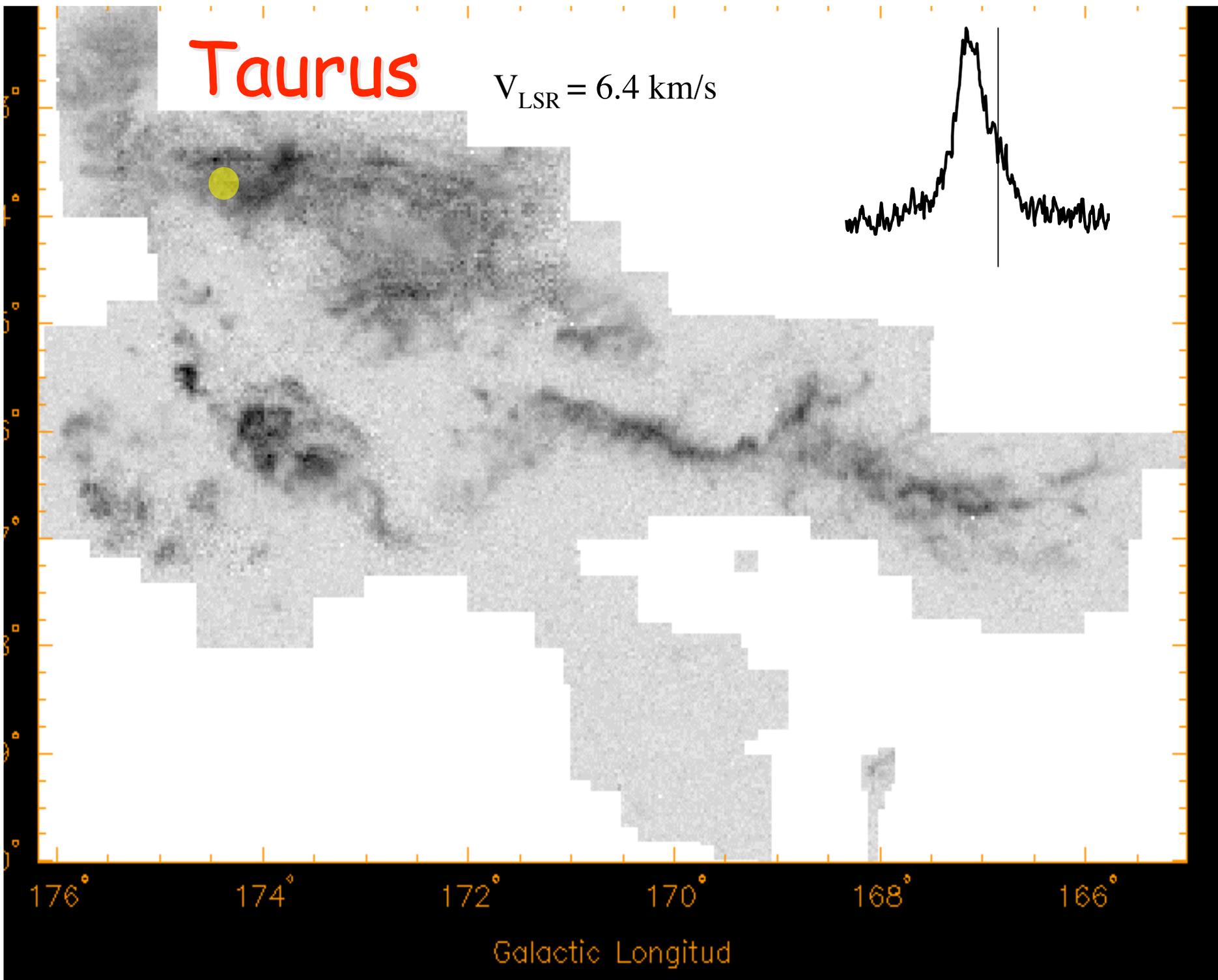
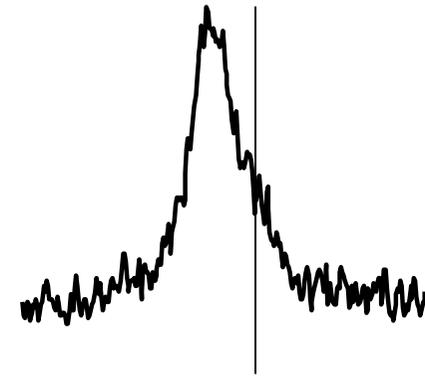
# Taurus

$V_{\text{LSR}} = 6.2 \text{ km/s}$



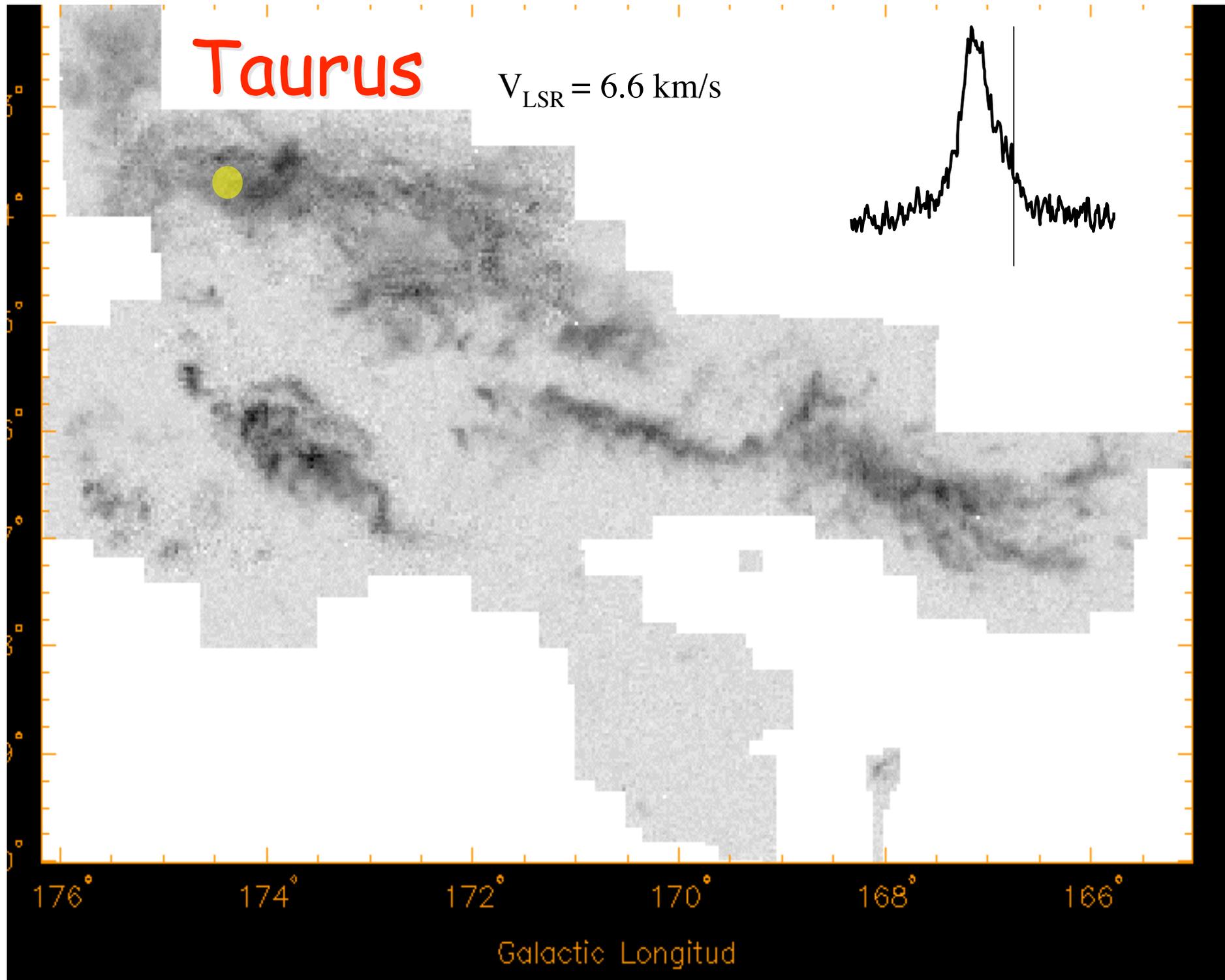
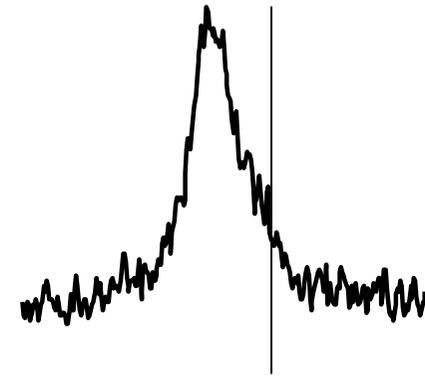
# Taurus

$V_{\text{LSR}} = 6.4 \text{ km/s}$



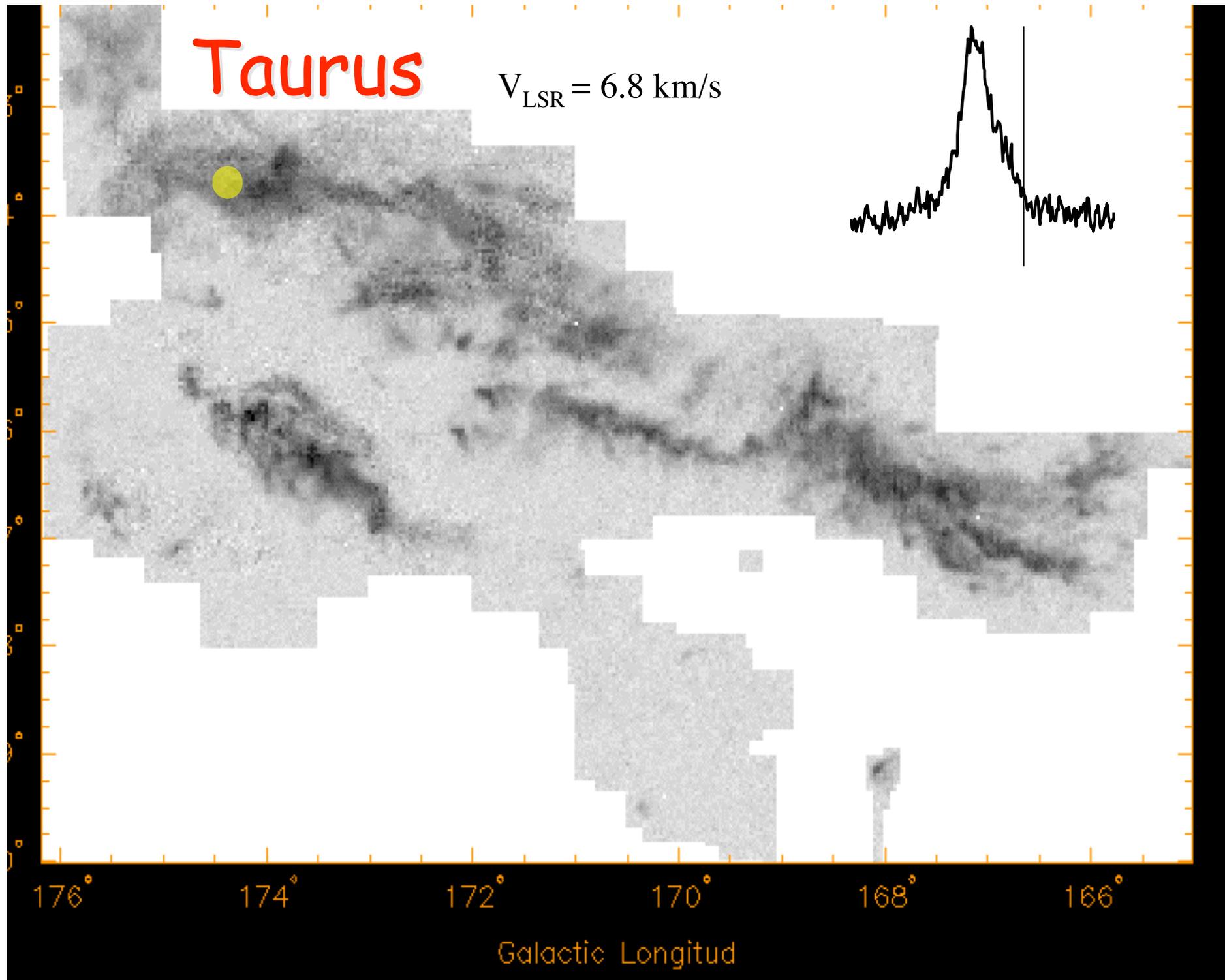
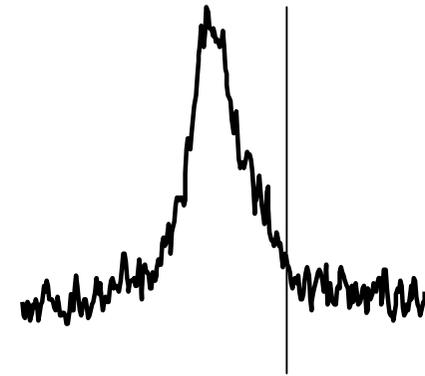
# Taurus

$V_{\text{LSR}} = 6.6 \text{ km/s}$



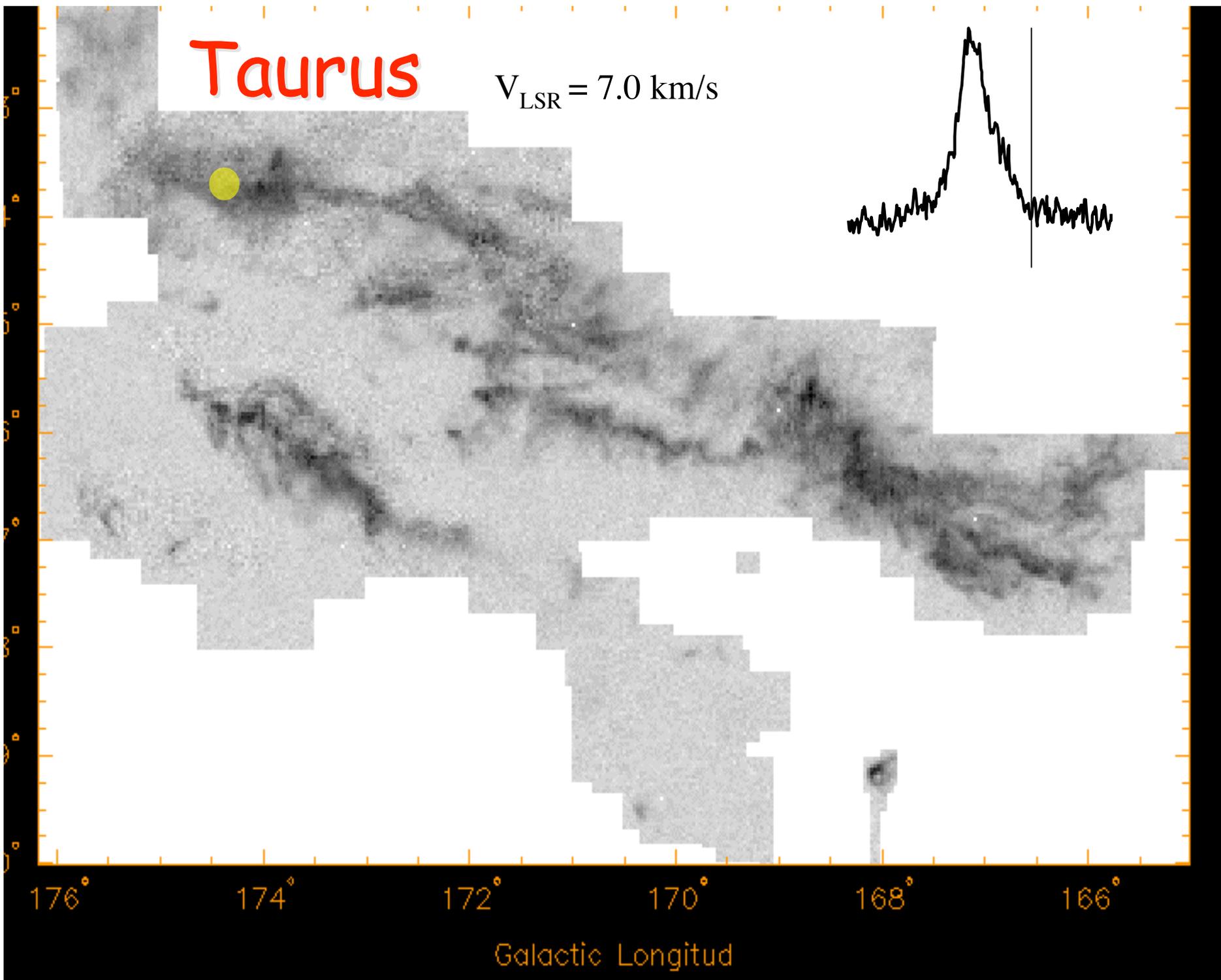
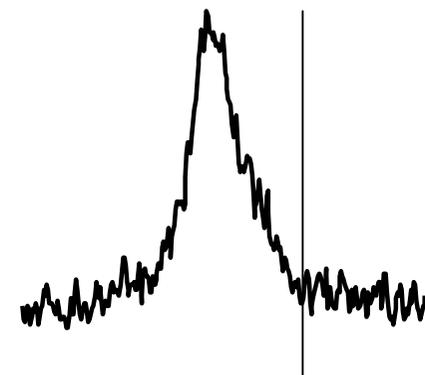
# Taurus

$V_{\text{LSR}} = 6.8 \text{ km/s}$



# Taurus

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



176°

174°

172°

170°

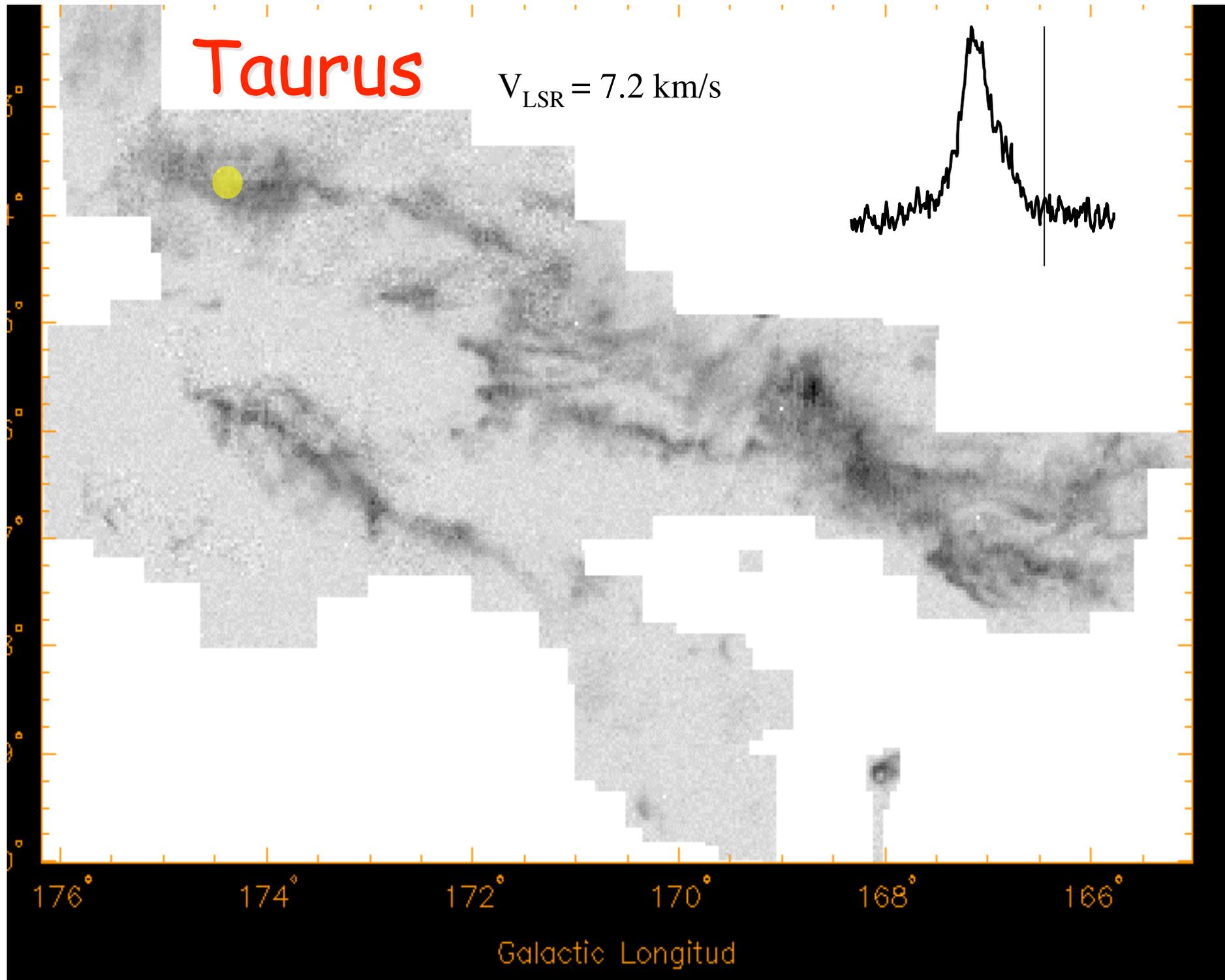
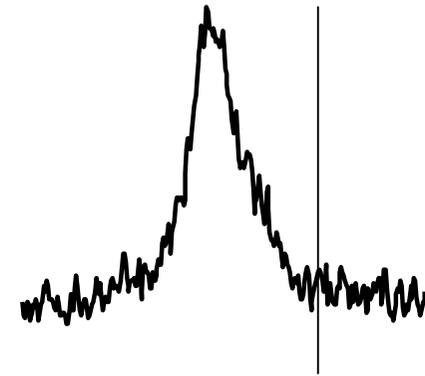
168°

166°

Galactic Longitud

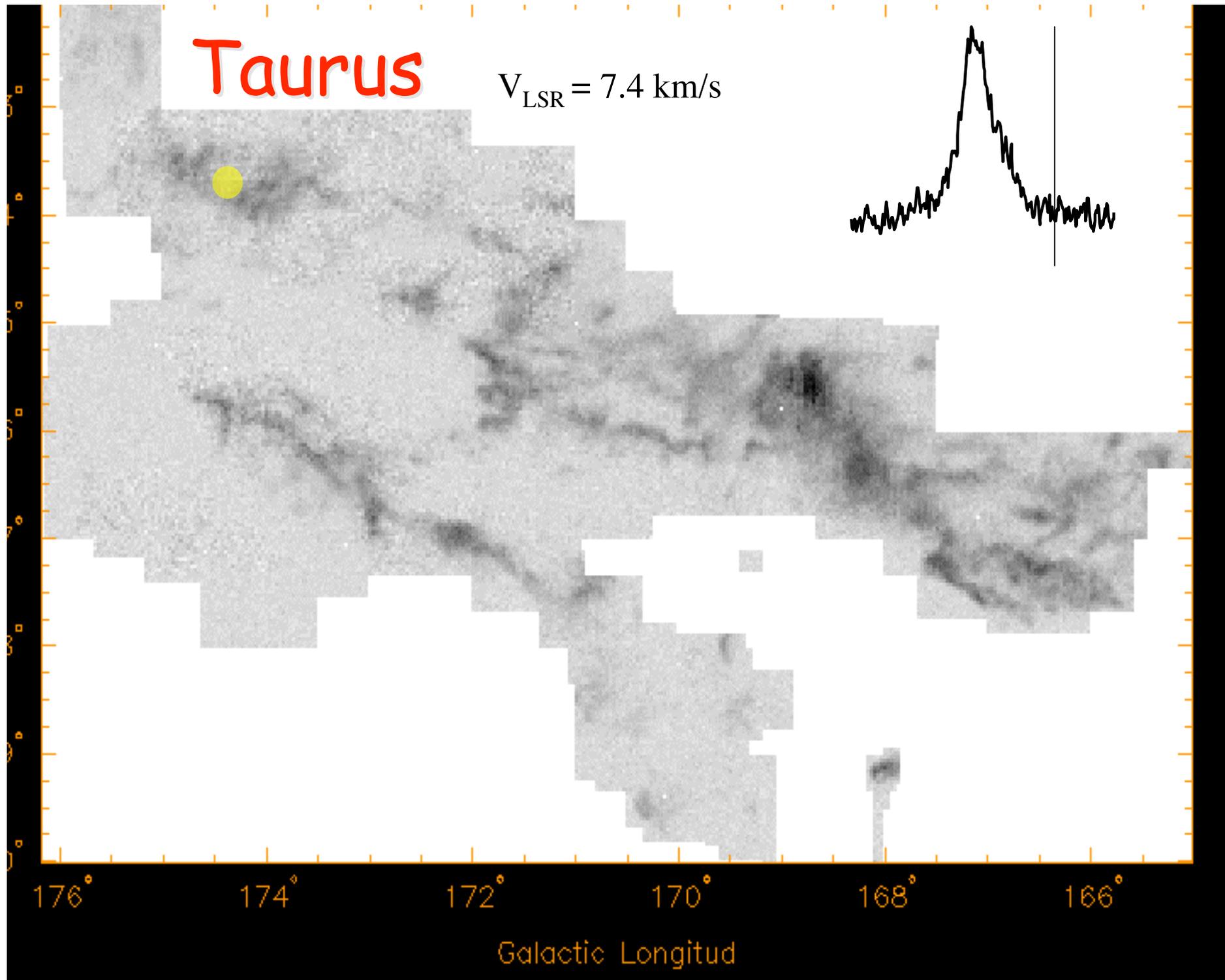
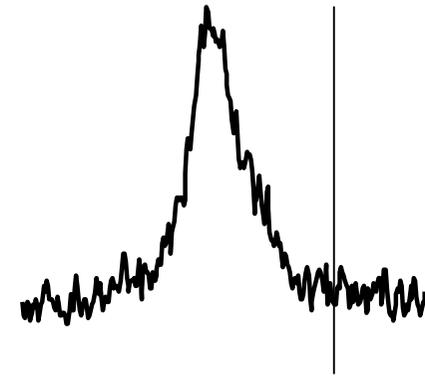
# Taurus

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



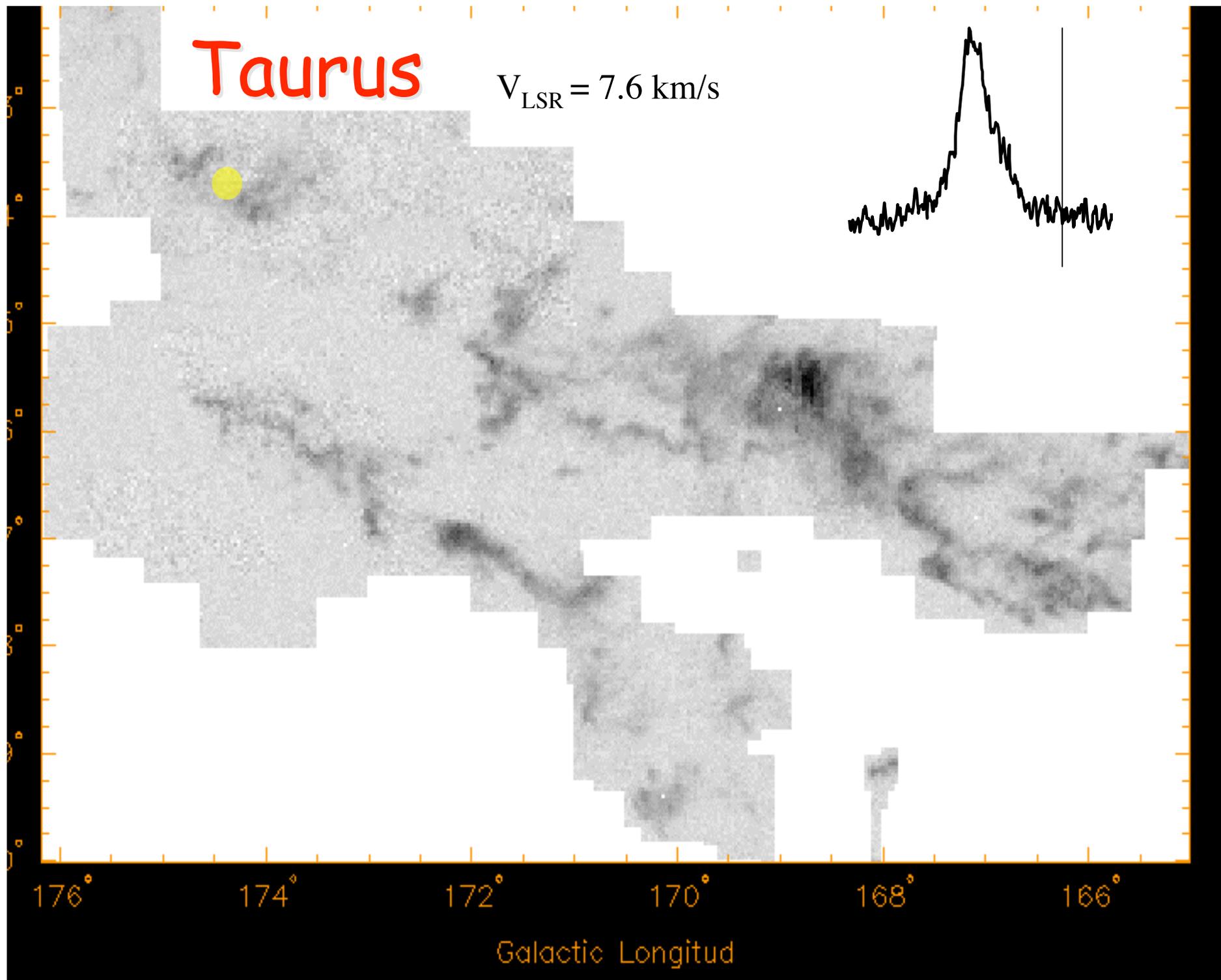
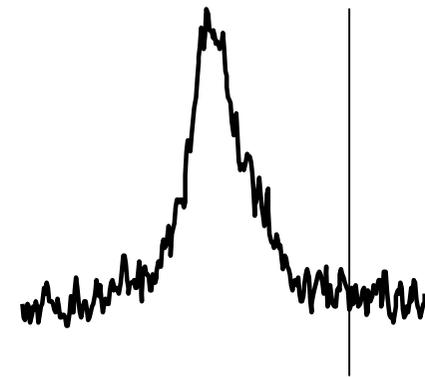
# Taurus

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



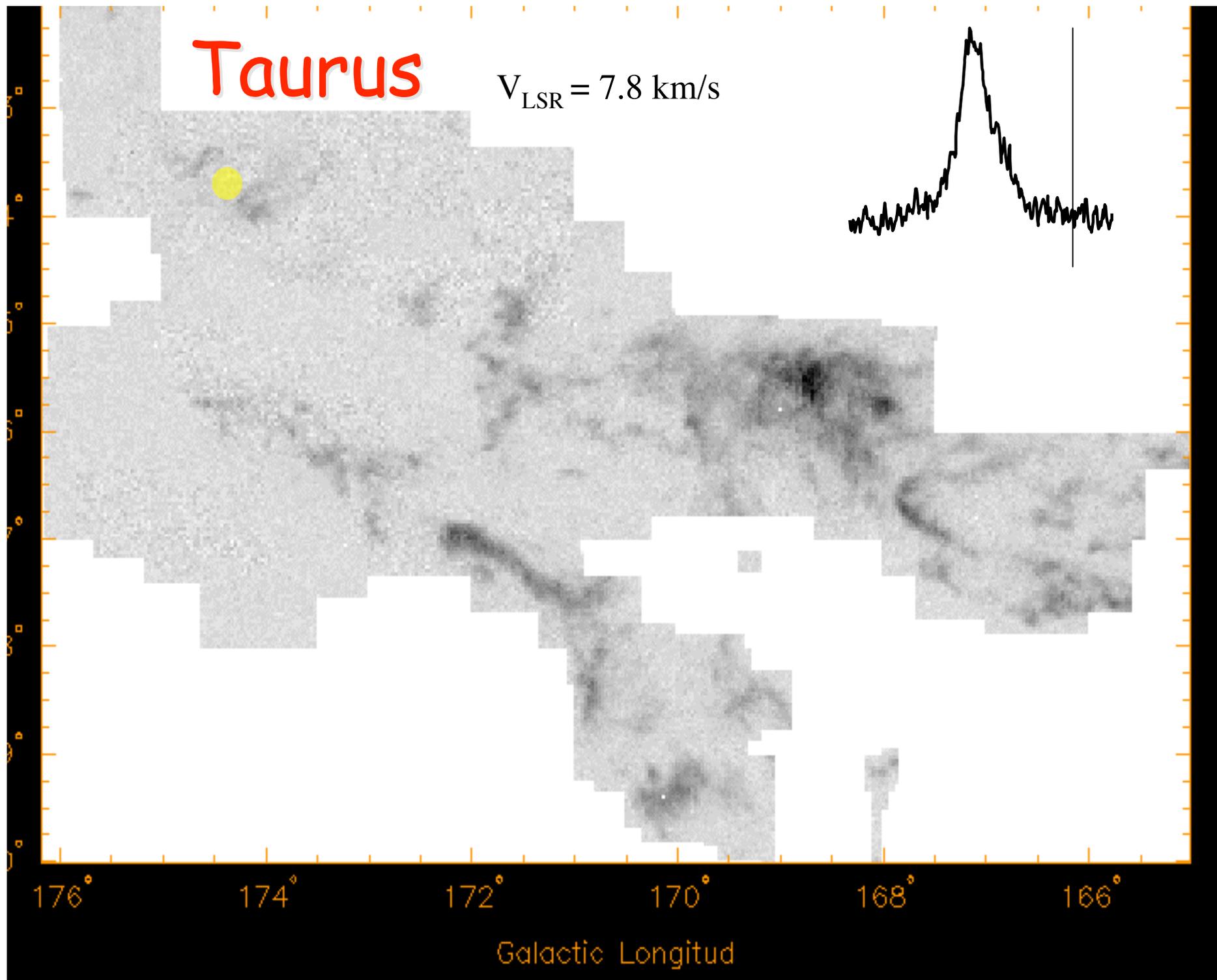
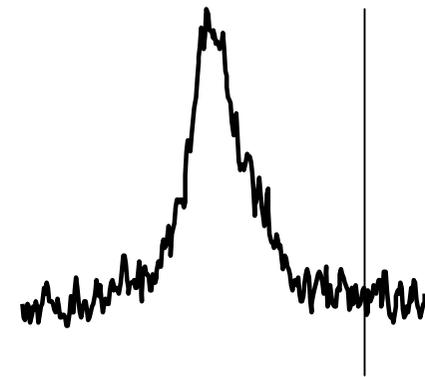
# Taurus

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



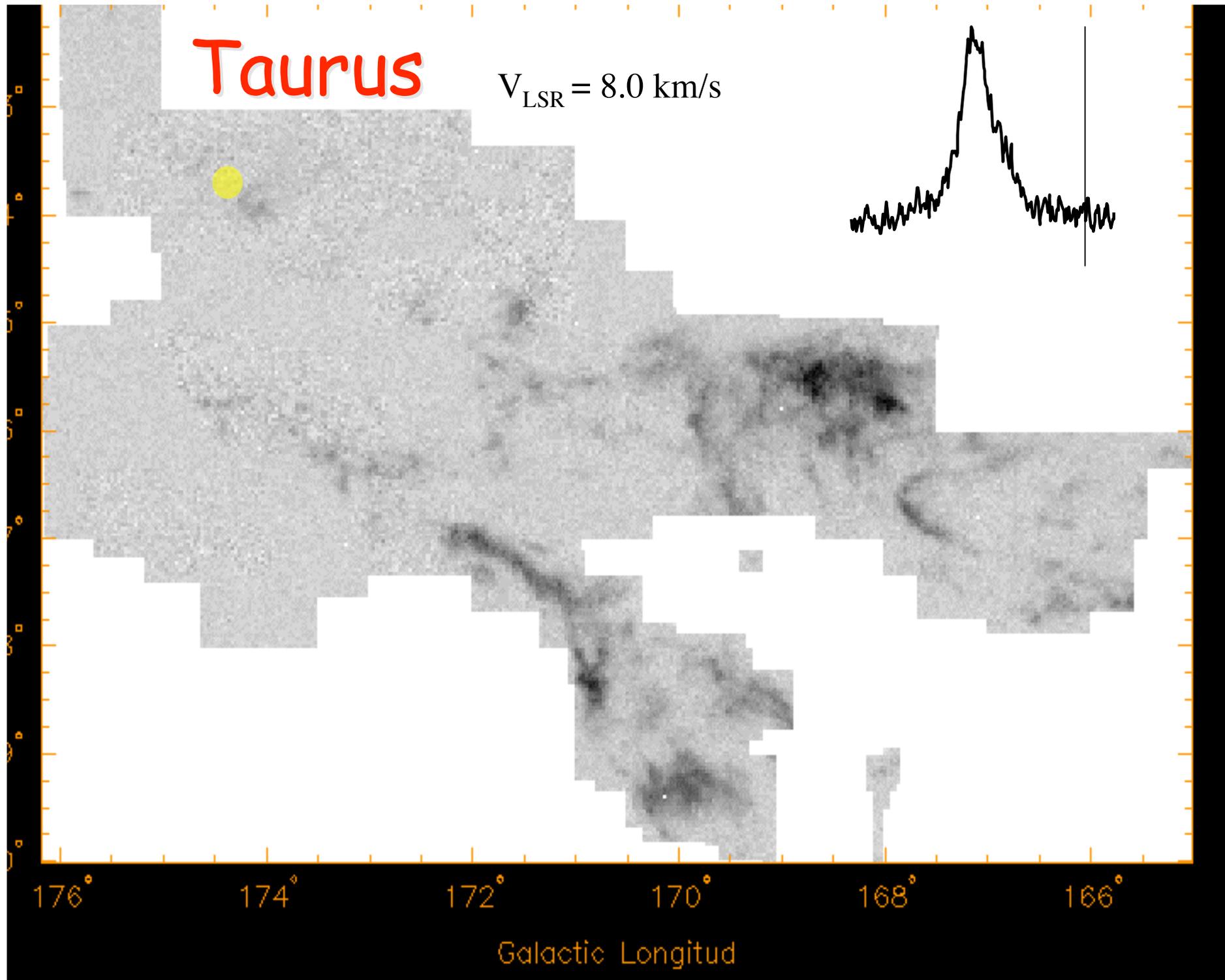
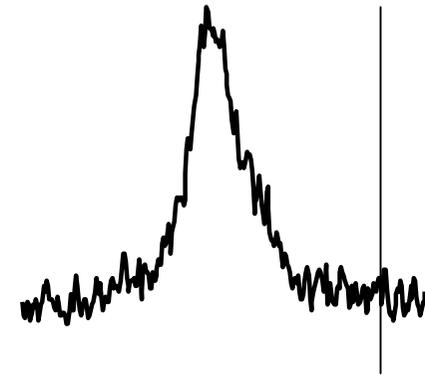
# Taurus

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



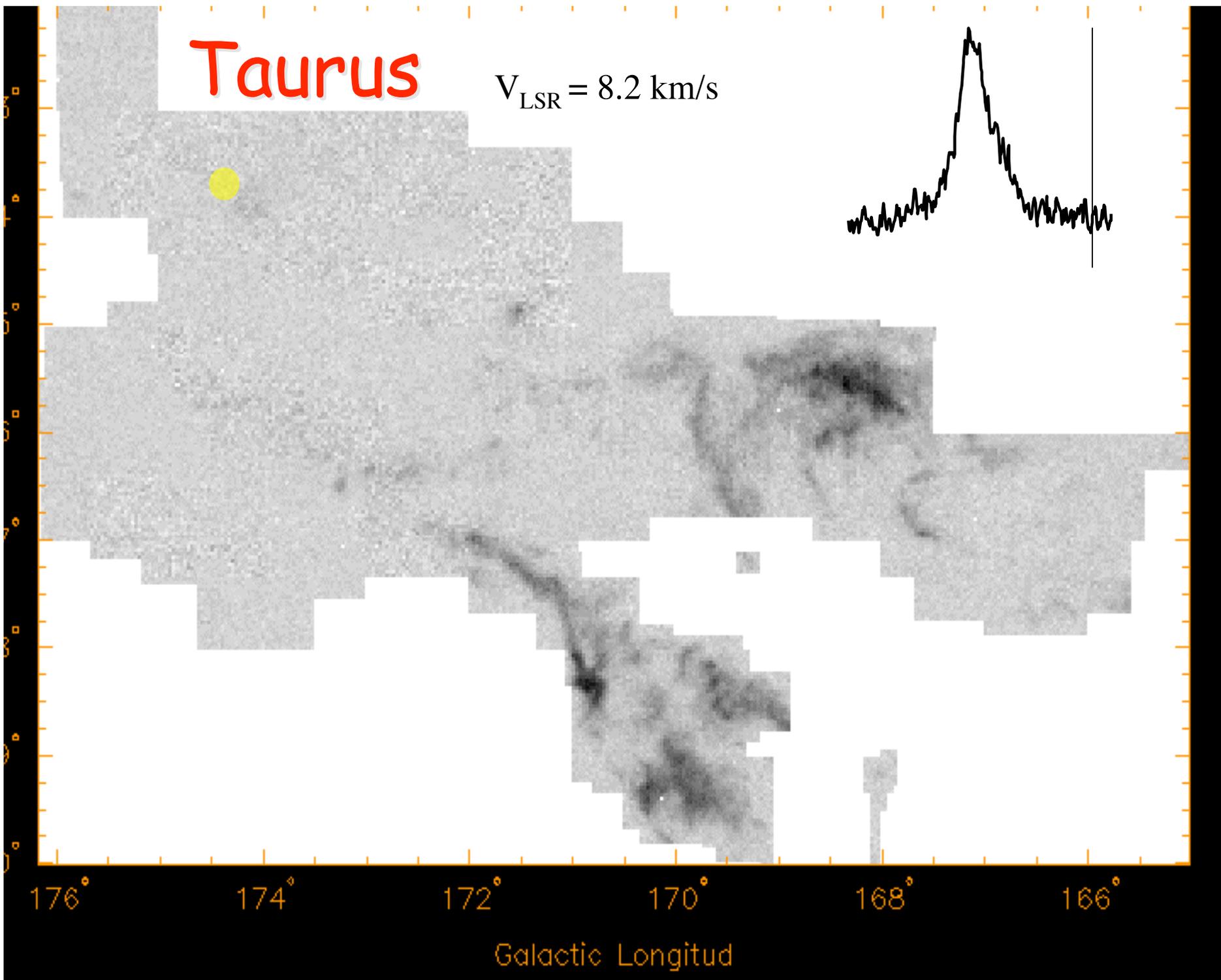
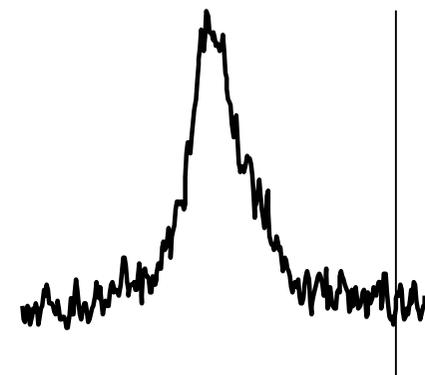
# Taurus

$V_{\text{LSR}} = 8.0 \text{ km/s}$



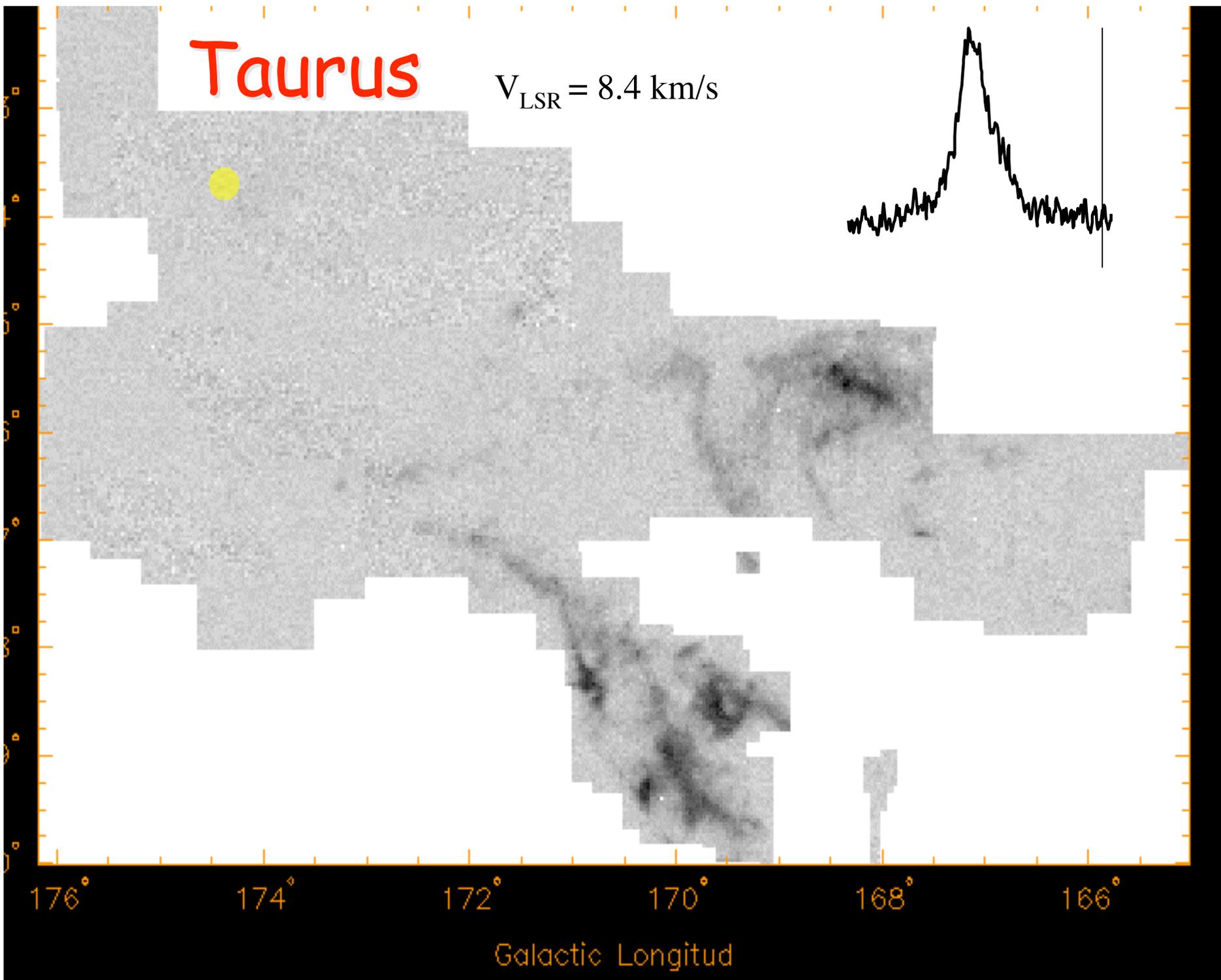
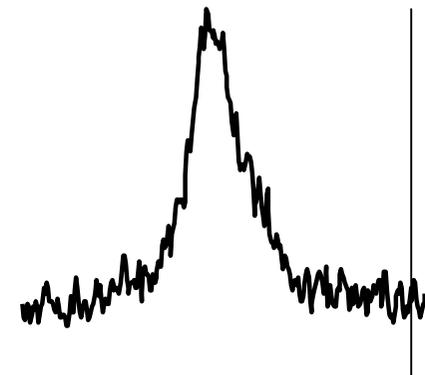
# Taurus

$V_{\text{LSR}} = 8.2 \text{ km/s}$



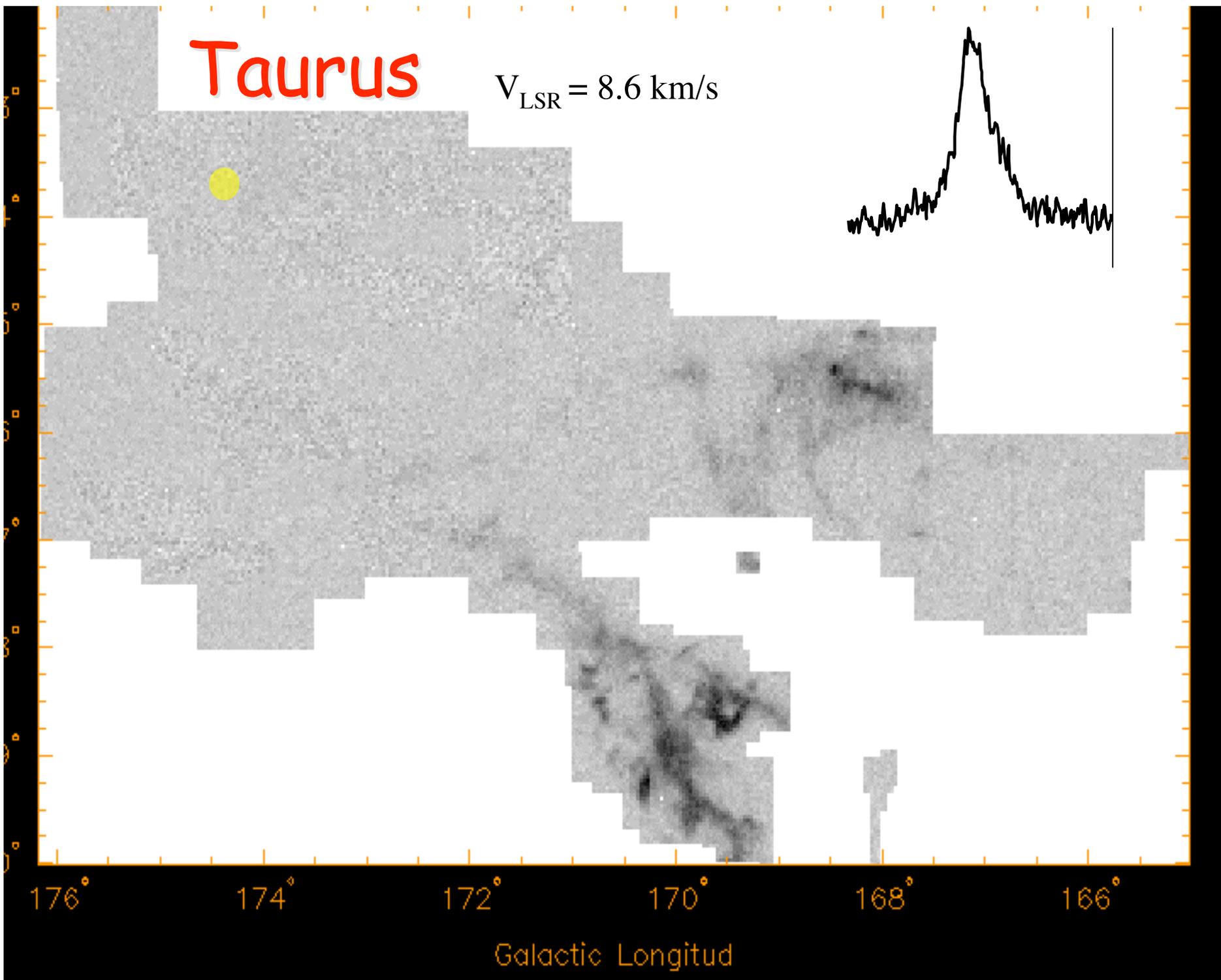
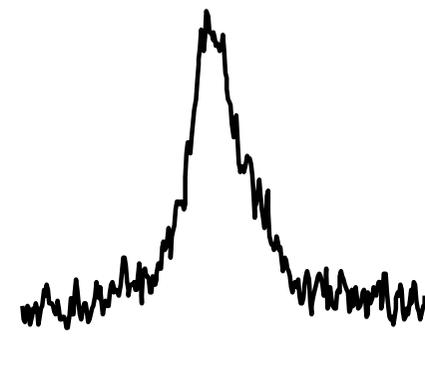
# Taurus

$V_{\text{LSR}} = 8.4 \text{ km/s}$



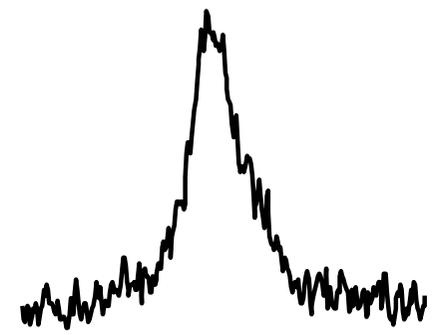
# Taurus

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



# Taurus

$V_{\text{LSR}} = 8.8 \text{ km/s}$



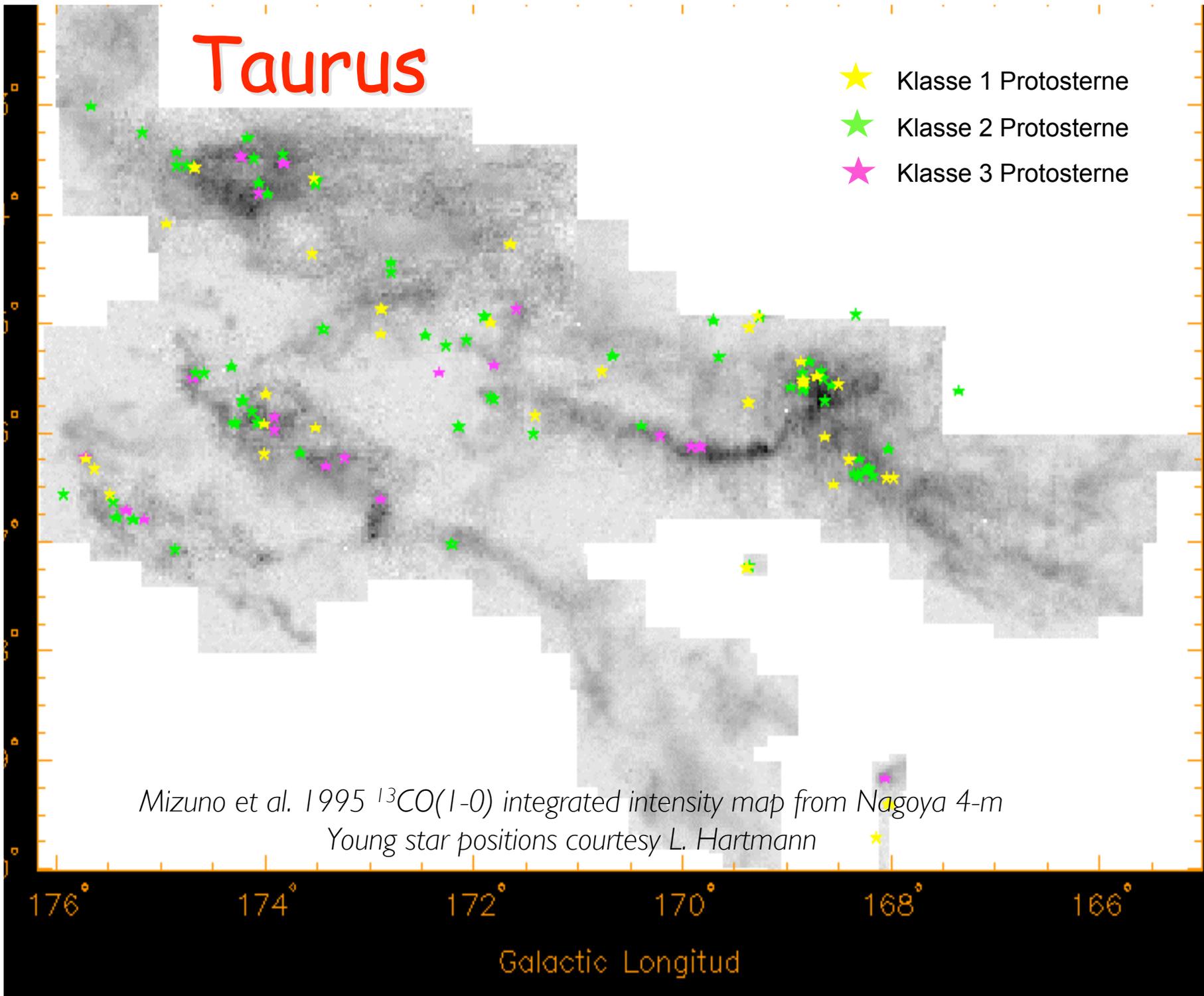
8.8 km/s

176° 174° 172° 170° 168° 166°

Galactic Longitud

# Taurus

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

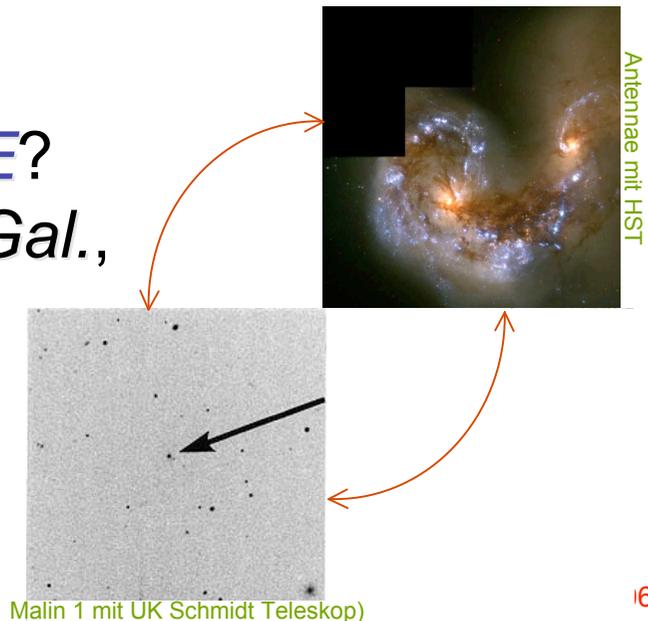


WIE?

# 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 ↔ normale Gal.,  
isolierte 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...

# 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*

# Was ist Turbulenz?

- **Formal:** Der Charakter einer Strömung ändert sich von laminar in turbulent wenn die Reynolds-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:

$$\sigma_{rms} > c_s$$

# Eigenschaften der Turbulenz

- Laminarer Fluss wird *turbulent* bei *großen* Reynolds Zahlen

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

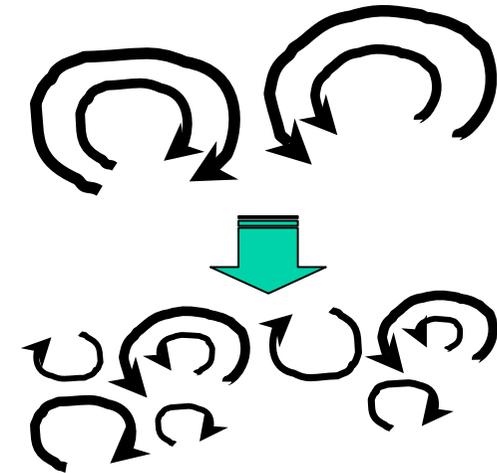
$V$  = typical velocity on scale  $L$ ,  $\nu$  = viscosity,  $\text{Re} > 1000$

- *vortex stretching* --> Turbulenz ist intrinsisch *anisotrop!*

(nur auf großen Skalen kann Homogenität & Isotropie gelten, in statistischem Sinn;

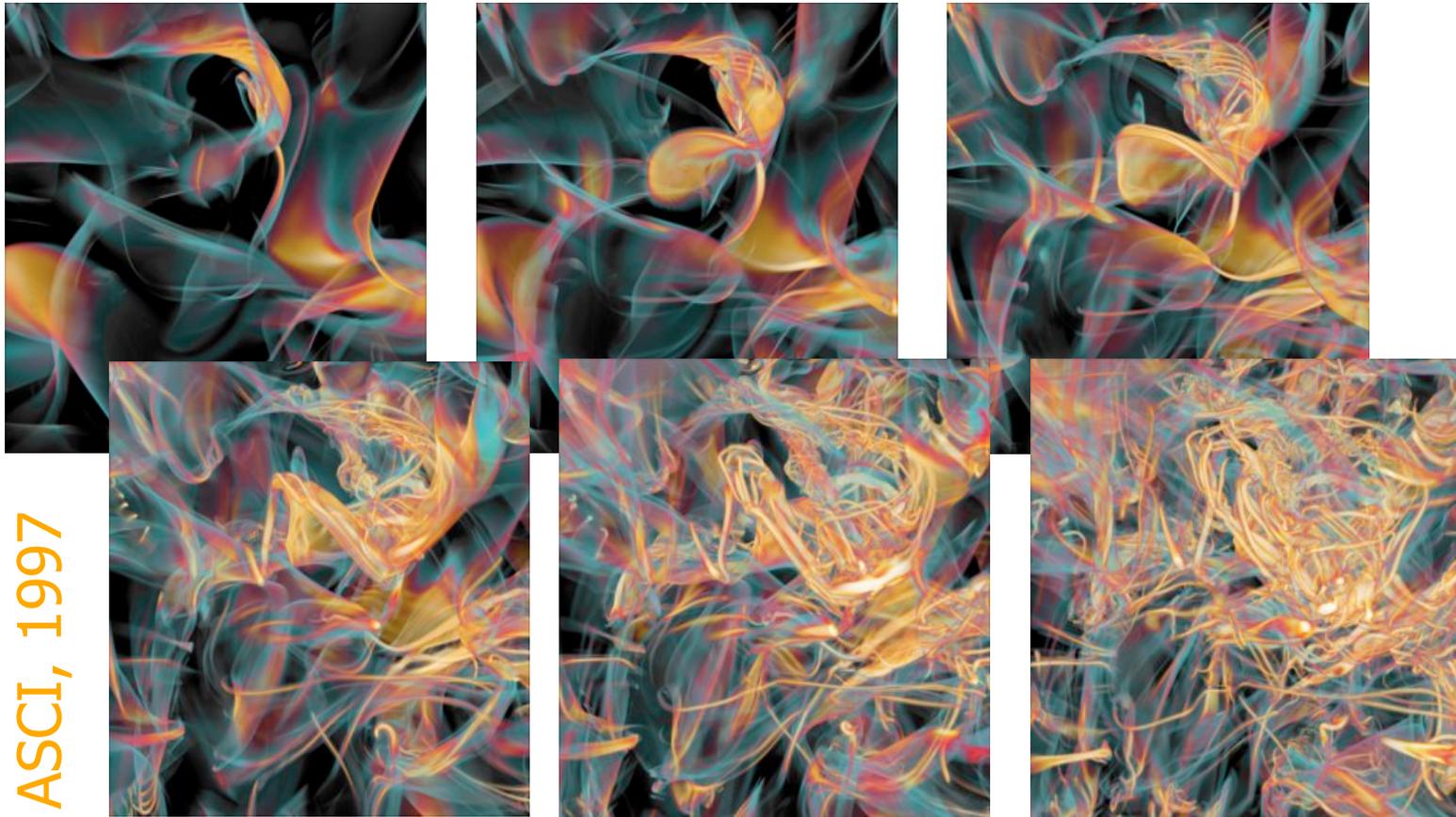
z.B. Landau & Lifschitz, Chandrasekhar, Taylor, etc.)

(ISM Turbulenz: Stöße & B-Feld erzeugen weitere Inhomogenitäten)



# Vortex-Bildung

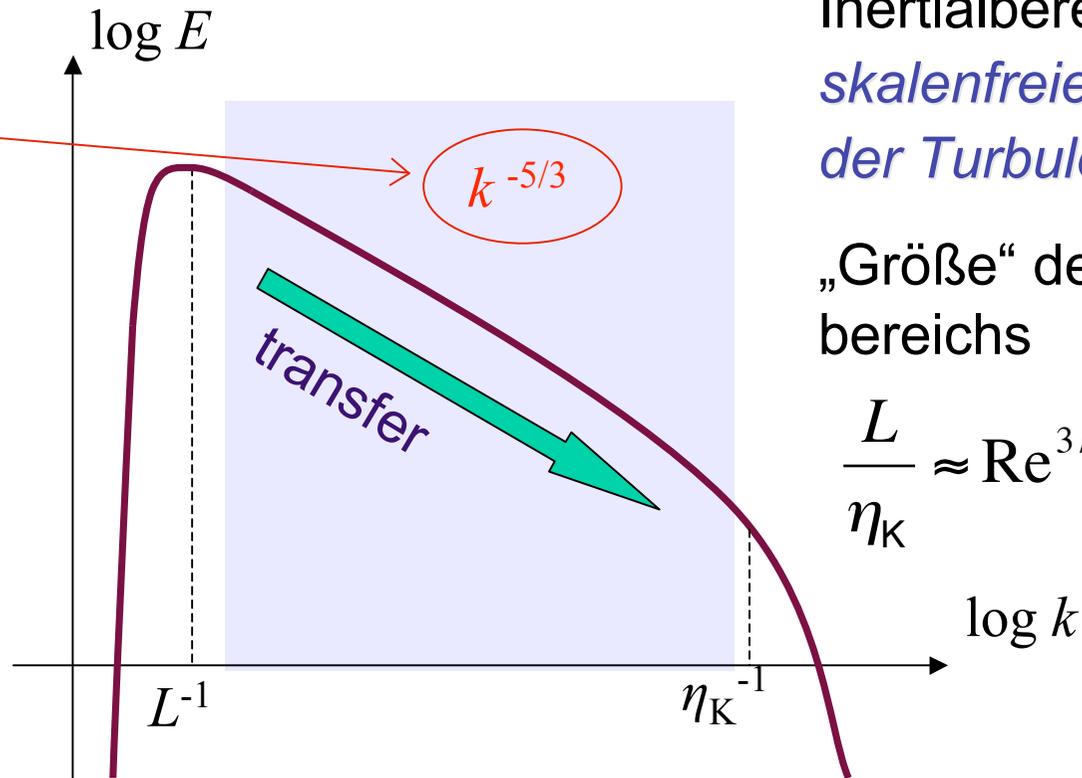
Porter et al.  
ASCI, 1997



Vortexröhren werden gestreckt und gefaltet in **3D**.

# Turbulente Kaskade

Kolmogorov (1941) Theorie  
der inkompressiblen Turbulenz



Inertialbereich:  
*skalenfreies Verhalten  
der Turbulenz*

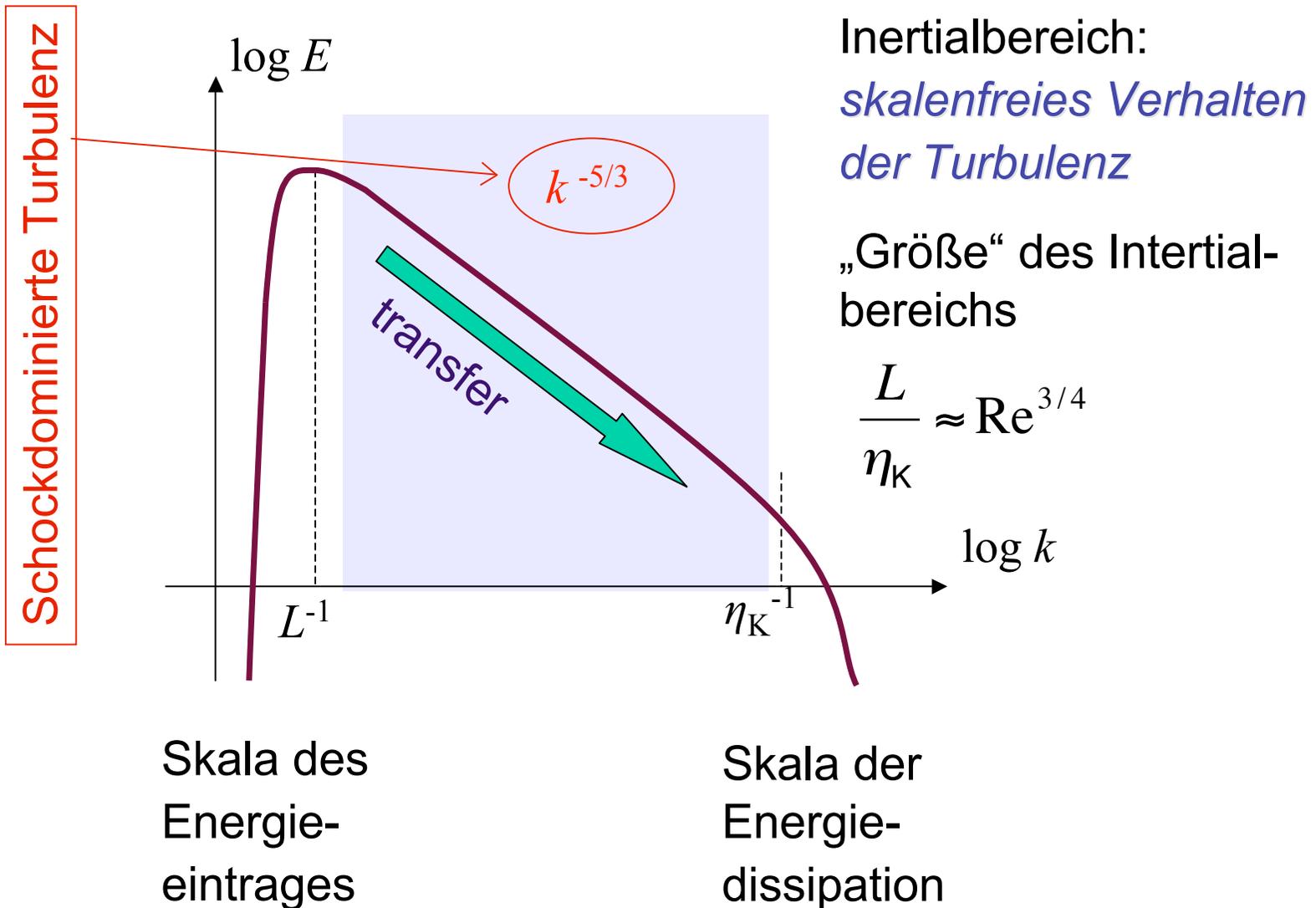
„Größe“ des Inertial-  
bereichs

$$\frac{L}{\eta_K} \approx \text{Re}^{3/4}$$

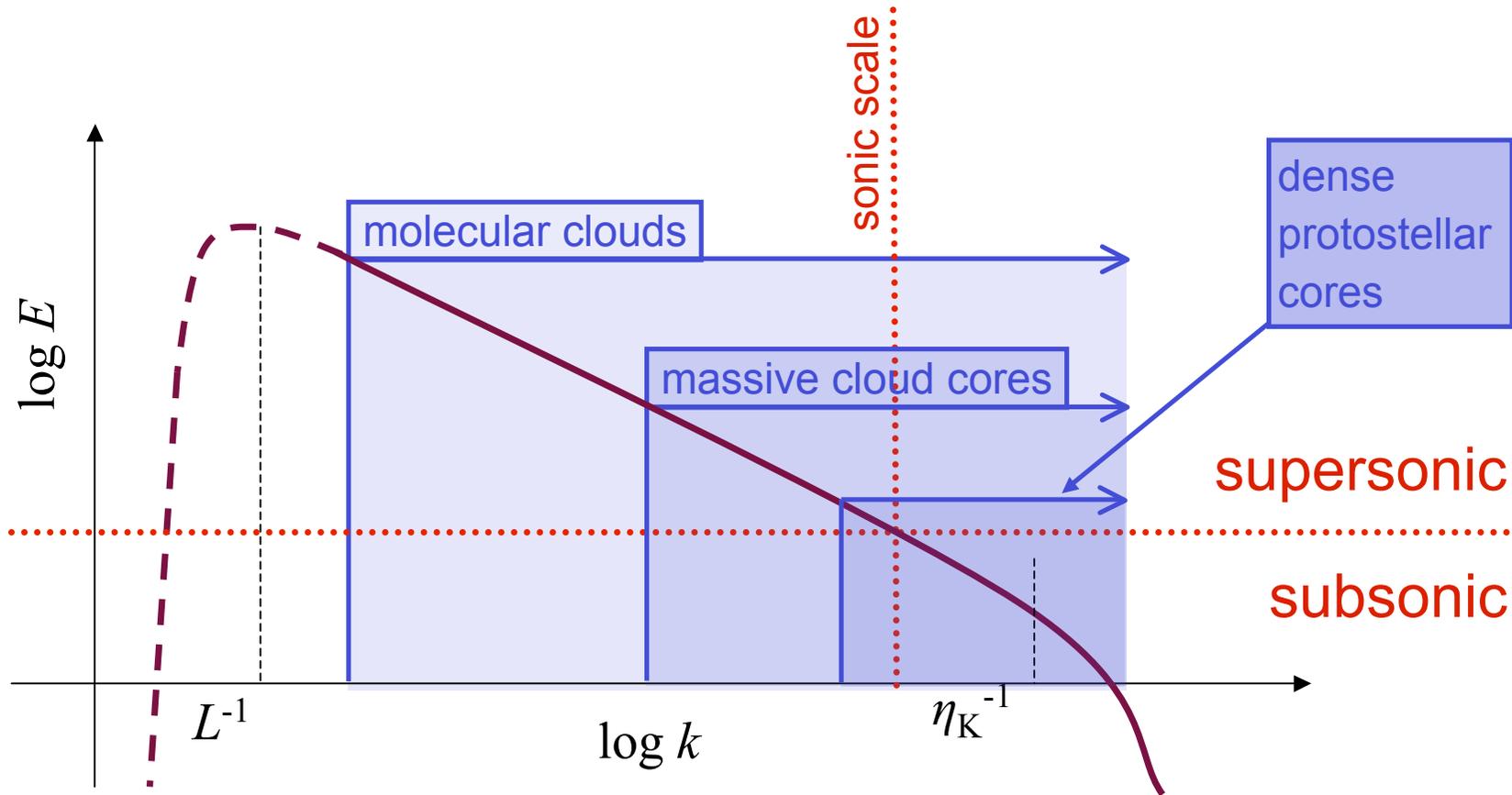
Skala des  
Energie-  
eintrages

Skala der  
Energie-  
dissipation

# Turbulente Kaskade



# Turbulente Kaskade in der ISM



energy source & scale  
*NOT known*  
 (supernovae, winds,  
 spiral density waves?)

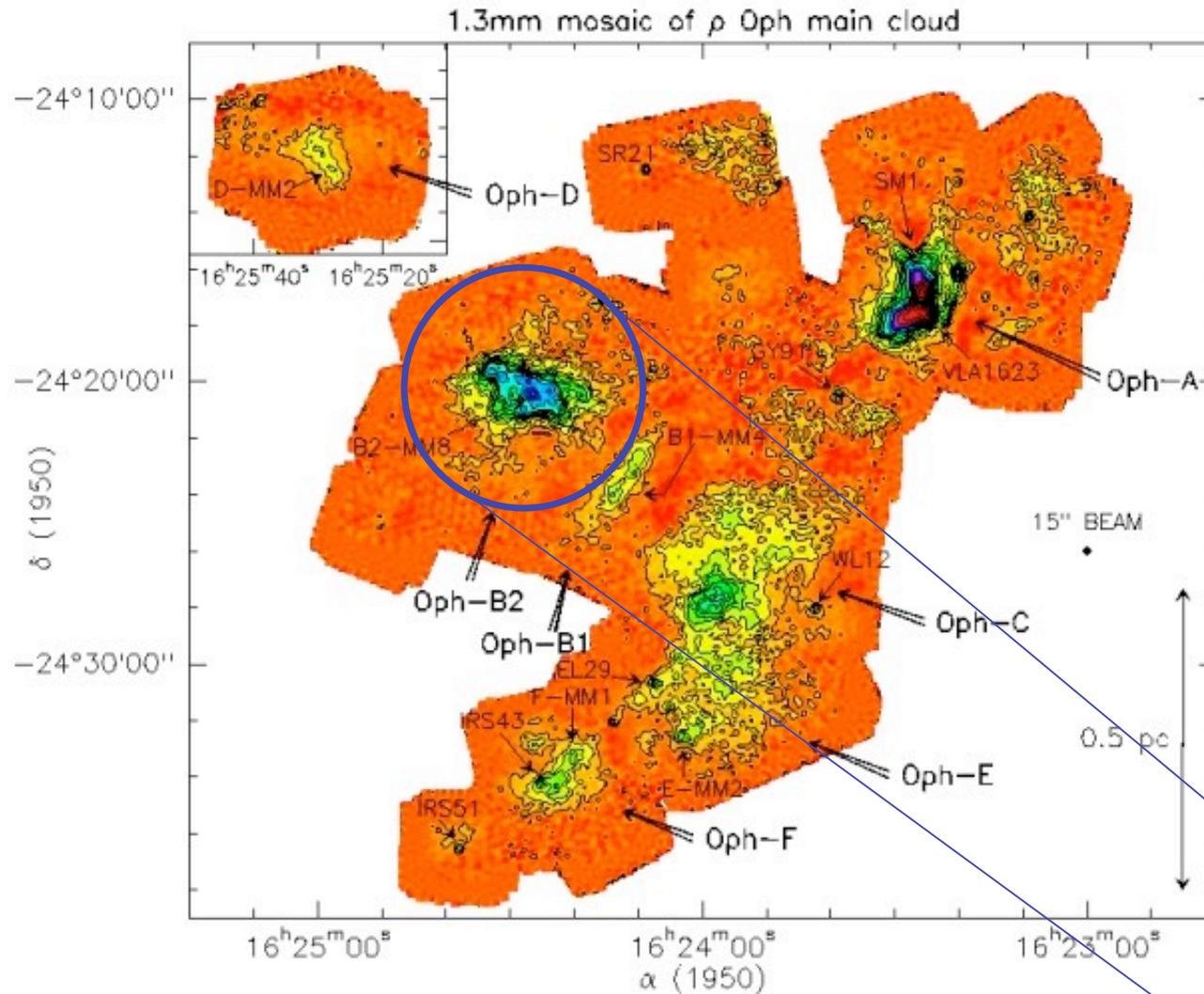
$$\sigma_{\text{rms}} \ll 1 \text{ km/s}$$

$$M_{\text{rms}} \leq 1$$

$$L \approx 0.1 \text{ pc}$$

dissipation scale not known  
 (ambipolar diffusion,  
 molecular diffusion?)

# Dichtestruktur von MW



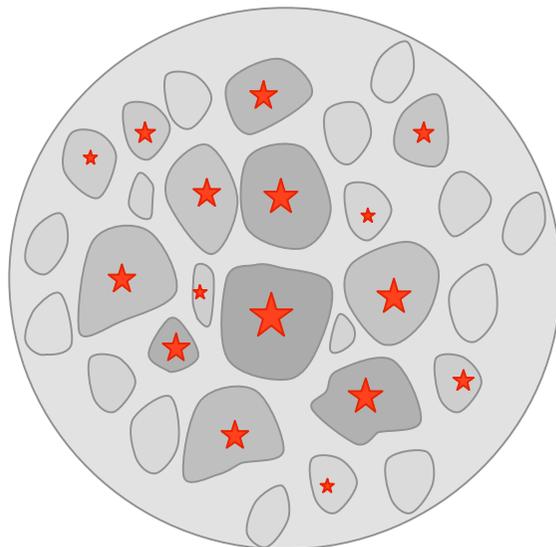
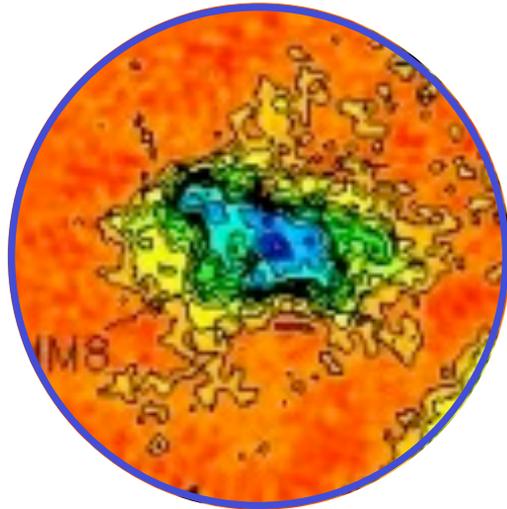
(Motte, André, & Neri 1998)

Molekülwolken sind hochgradig inhomogen.

Sterne bilden sich in den dichtesten und kältesten Teilen der Wolke.

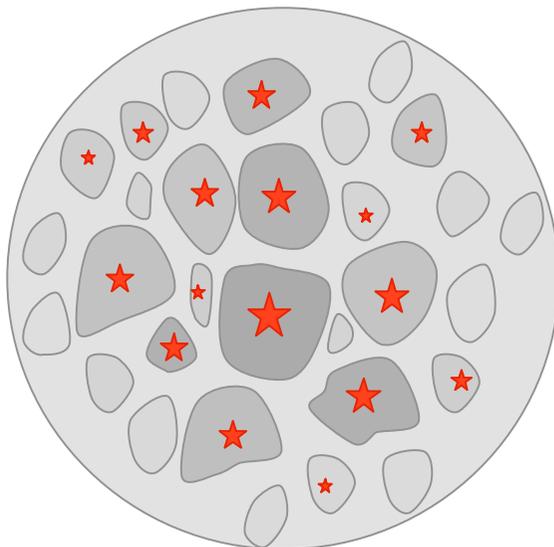
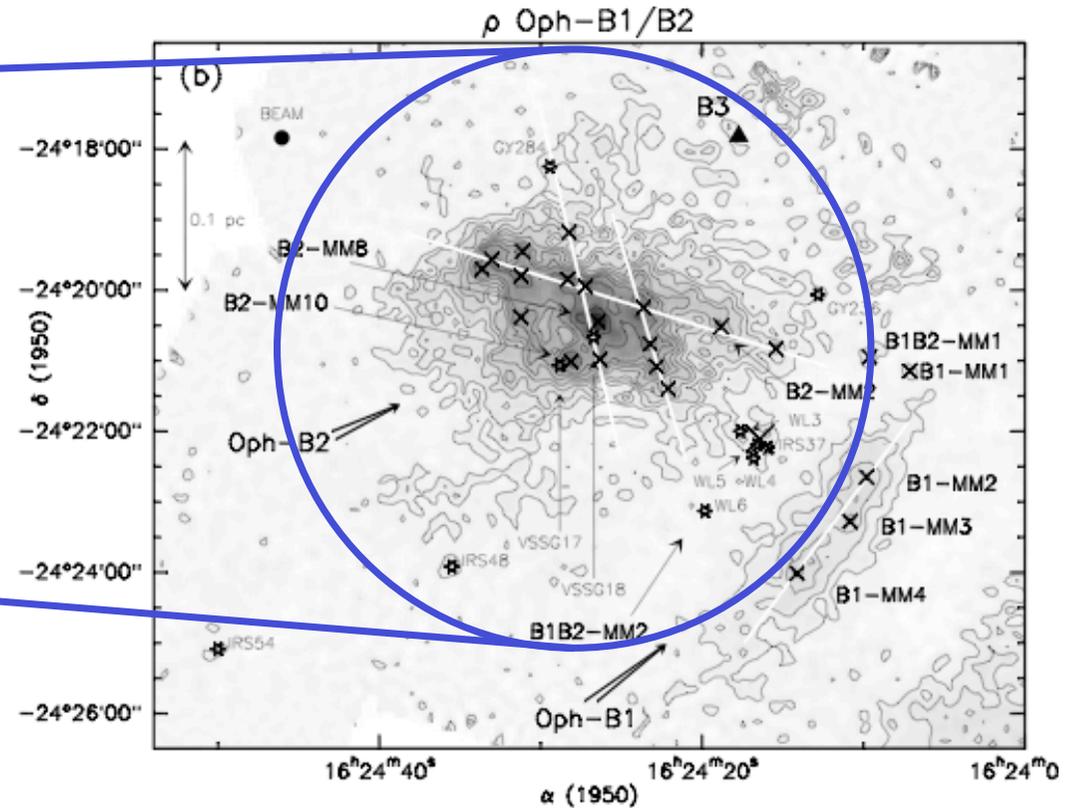
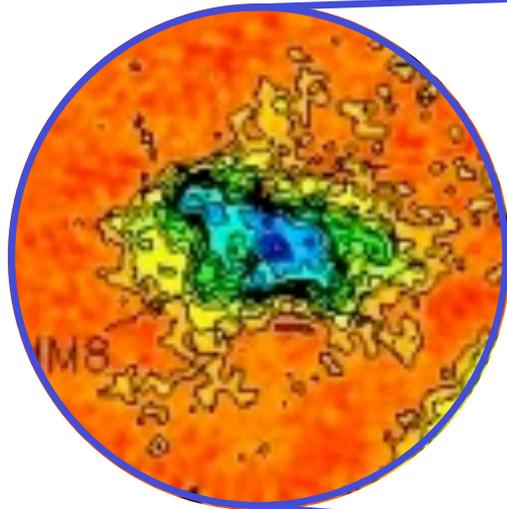
$\rho$ -Ophiuchus in Staubemission

# Entwicklung von Wolkenkernen



- **FRAGE:**  
Bildet sich ein einzelner massereicher Stern, oder ein Sternhaufen mit massearmen Sternen?
- Turbulente Kaskade „geht durch“  
Wolkenkern  
--> KEINE *Skalenseparation* möglich  
--> KEINE *effektive Schallgeschwindigkeit*
- Turbulenz ist überschallschnell!  
--> Erzeugt große Dichtekontraste:  
 $\delta\rho/\rho \approx M^2$   
--> mit typischerweise  $M \approx 10$  -->  $\delta\rho/\rho \approx 100!$
- Viele schock-induzierte Dichtefluktuationen sind gravitativ instabil und kollabieren.
- --> *Kern fragmentiert und bildet Sternhaufen.*

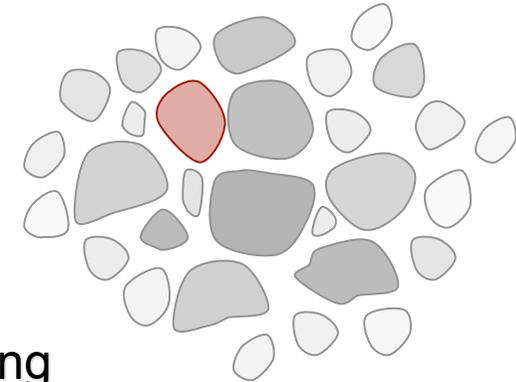
# Entwicklung von Wolkenkernen



Beispiel  $\rho$ -Oph B1/B2: Kern enthält mehrere protostellare Objekte

(“starless” cores are denoted by  $\times$ , cores with embedded protostars by  $\star$ )

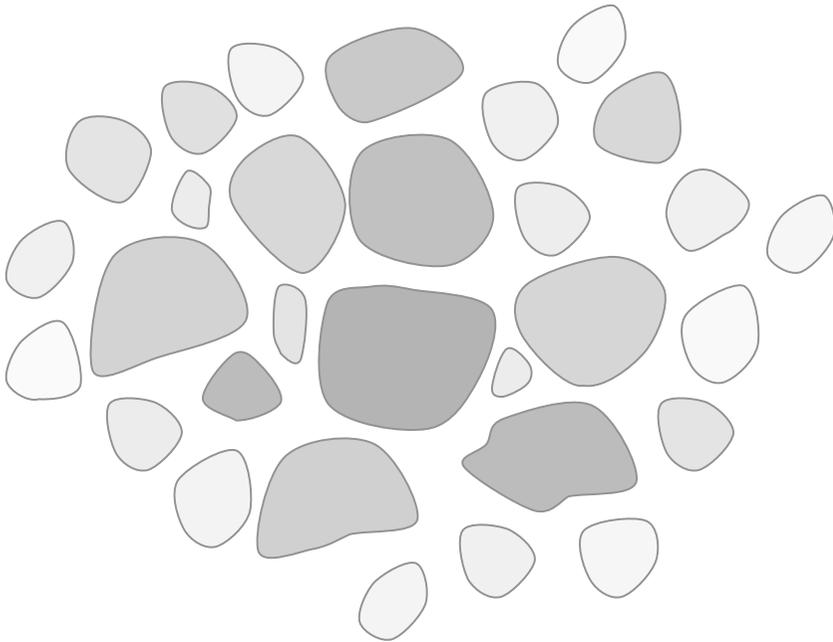
# Entwicklung von Wolkenkernen



- Protostellare Wolkenkerne bilden sich an *Stagnationspunkten* in *konvergenten turbulenten Strömungen*
- wenn  $M > M_{\text{Jeans}} \propto \rho^{-1/2} T^{3/2}$ : Kollaps & Sternbildung
- wenn  $M < M_{\text{Jeans}} \propto \rho^{-1/2} T^{3/2}$ : Reexpansion nach dem Ende der externen Kompression  
(e.g. Vazquez-Semadeni et al 2005)
- typische Zeitskalen:  $t \approx 10^4 \dots 10^5$  Jahre
- Da Zeitskala für turbulente ambipolaren Diffusion (ion-neutral drift) kurz --> Abschätzung gilt auch bei Berücksichtigung von Magnetfeldern, für „magnetisch kritische“ Kerne ( $E_{\text{pot}} \approx E_{\text{B}}$ )  
(e.g. Fatuzzo & Adams 2002, Heitsch et al. 2004)

# Entwicklung von Wolkenkernen

Was passiert bei mehreren  
(wechselwirkenden) Kernen?



Zwei Extremfälle:

(1) Turbulenz dominiert Energiebudget:

$$\alpha = E_{\text{kin}} / |E_{\text{pot}}| > 1$$

--> keine Wechselwirkung der Kerne untereinander

--> *Stellarer Massenzuwachs*

bestimmt durch *isolierten Kollaps*

--> *loser Haufen massearmer Sterne*

(2) Turbulenz zerfällt, dh. Gravitation

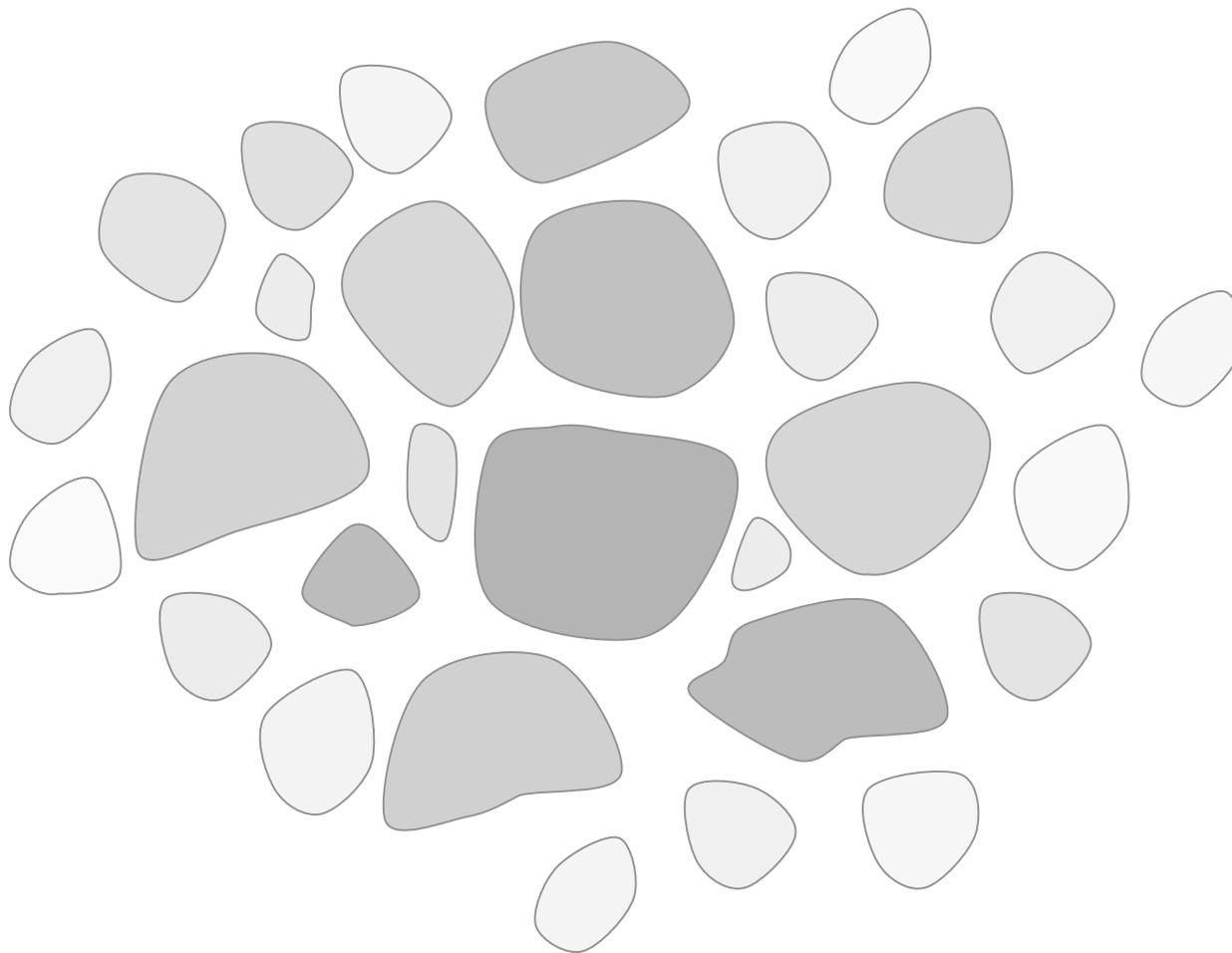
dominiert:  $\alpha = E_{\text{kin}} / |E_{\text{pot}}| < 1$

--> *globale Kontraktion*

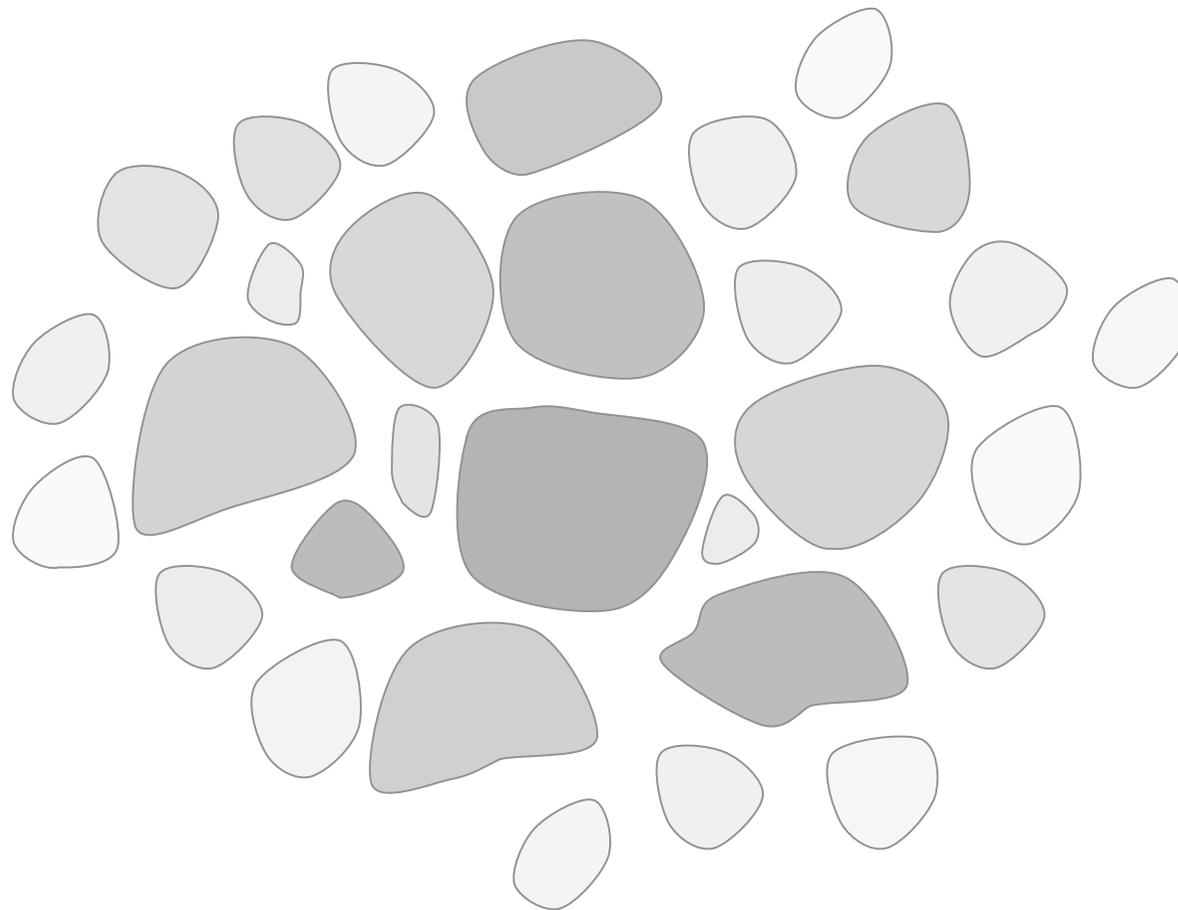
--> Kerne *wechselwirken* während sie kollabieren

--> *Kompetitives Wachstum*

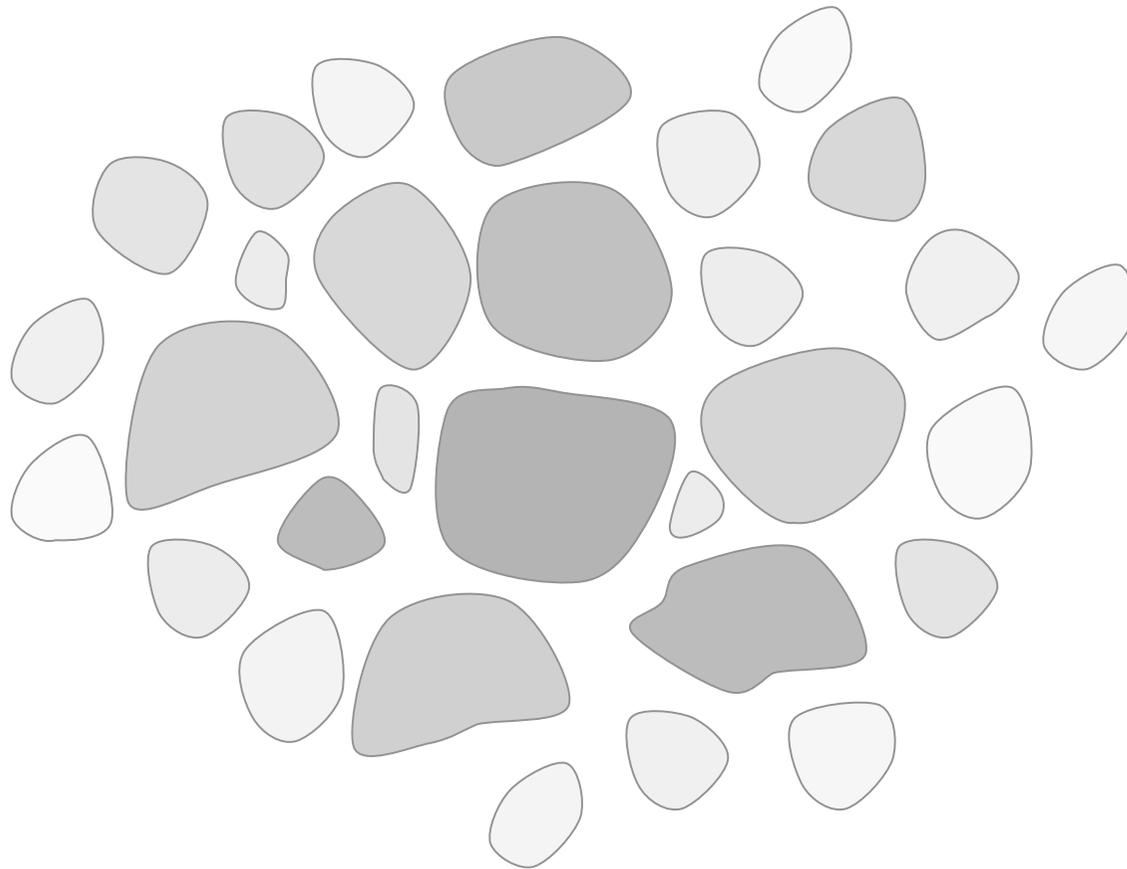
--> *dichter Haufen, enthält masse- reiche Sterne*



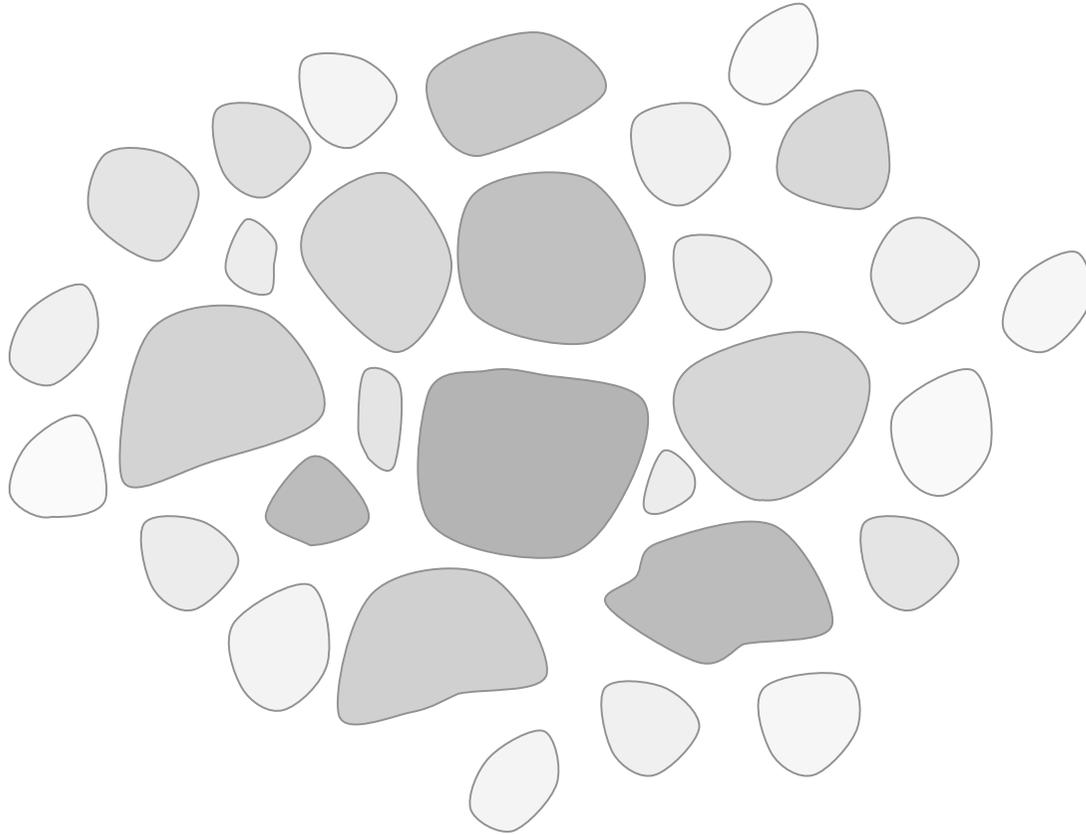
Turbulenz erzeugt Hierarchie von Klumpen



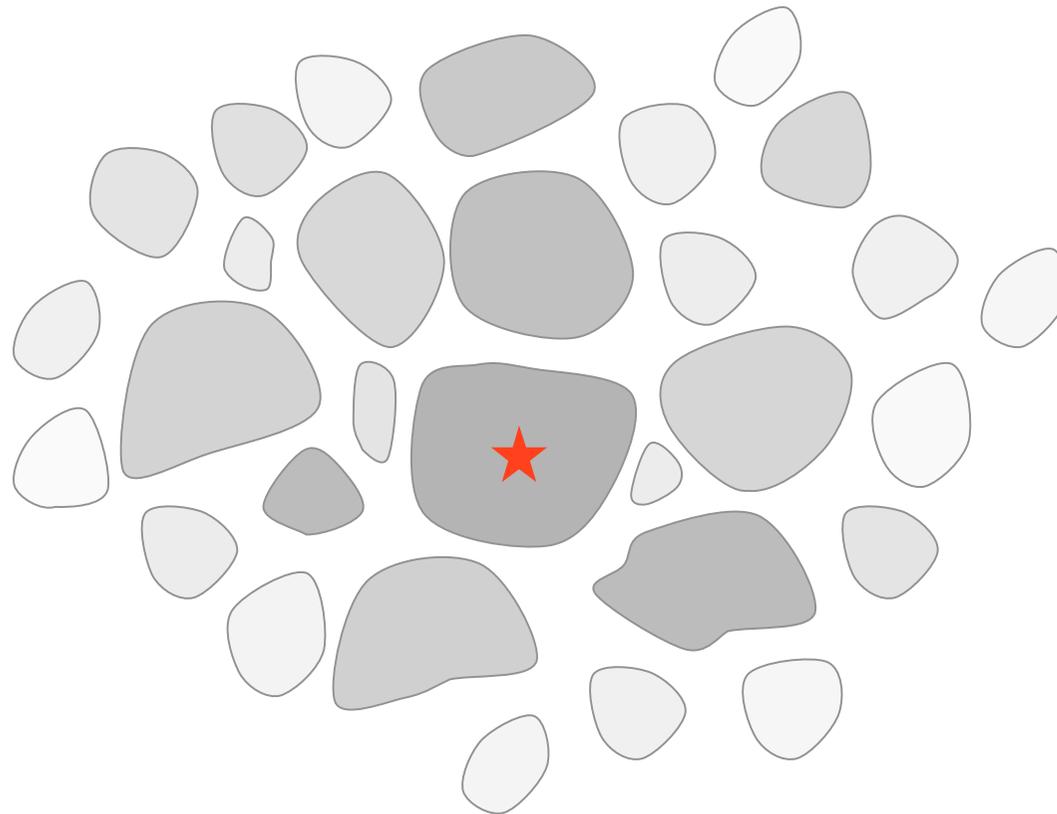
Turbulenz dissipiert, Kontraktion setzt ein



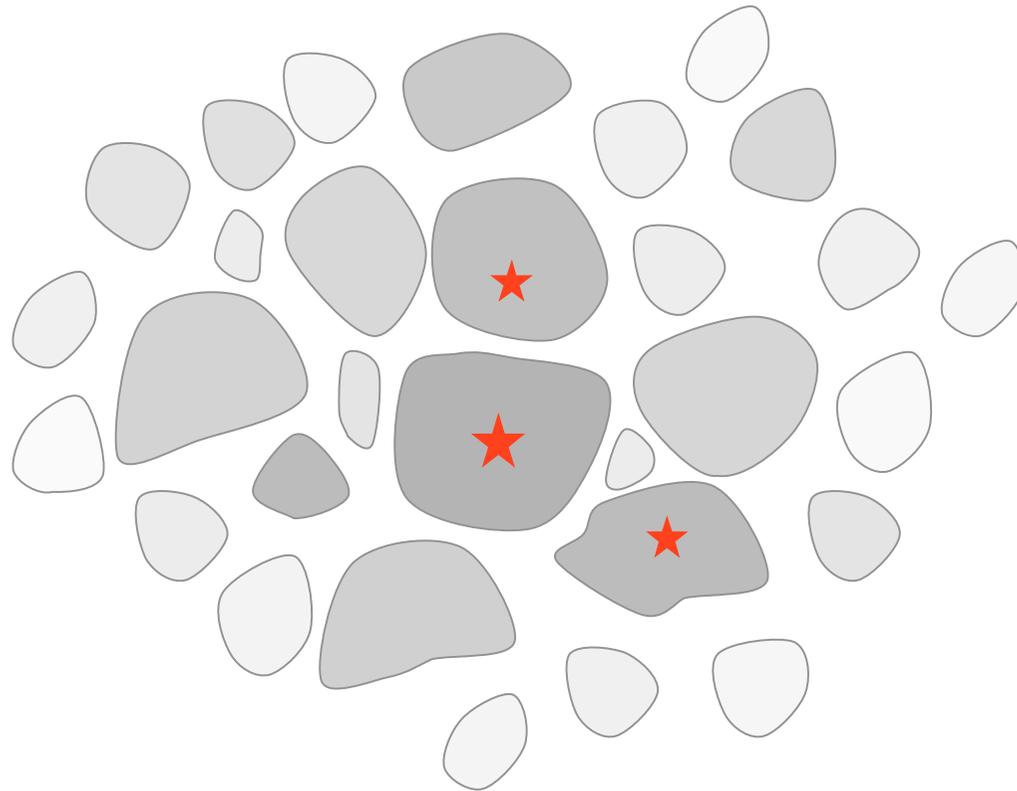
Turbulenz dissipiert, Kontraktion setzt ein



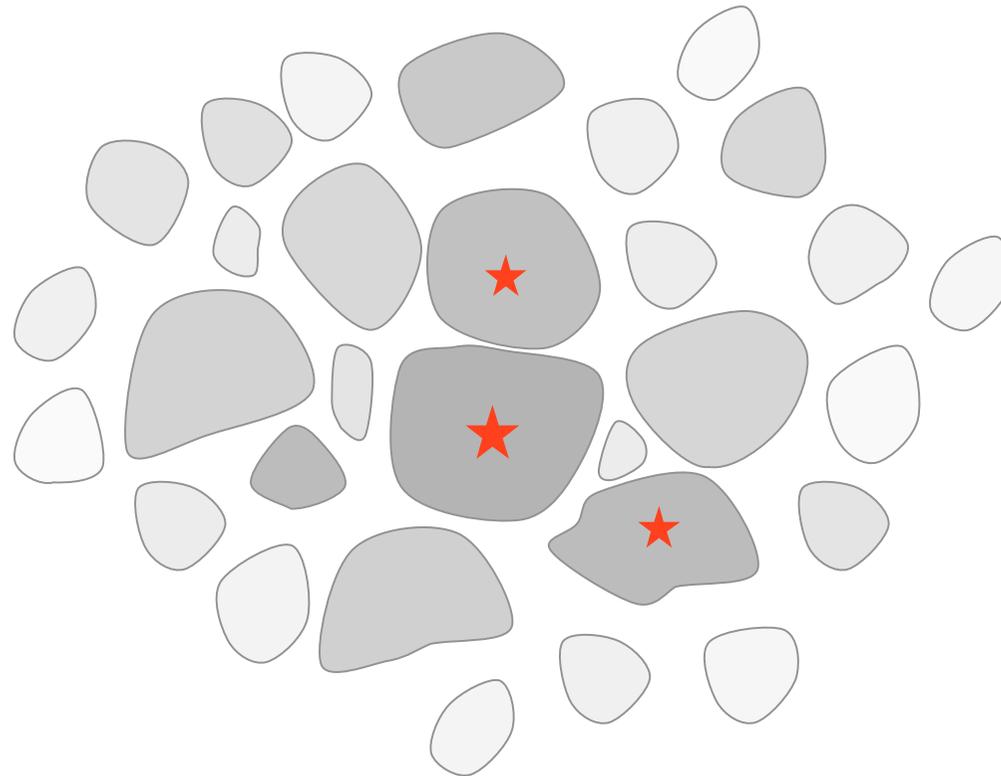
während Region kontrahiert können einzelne Klumpen kollabieren und Sterne bilden



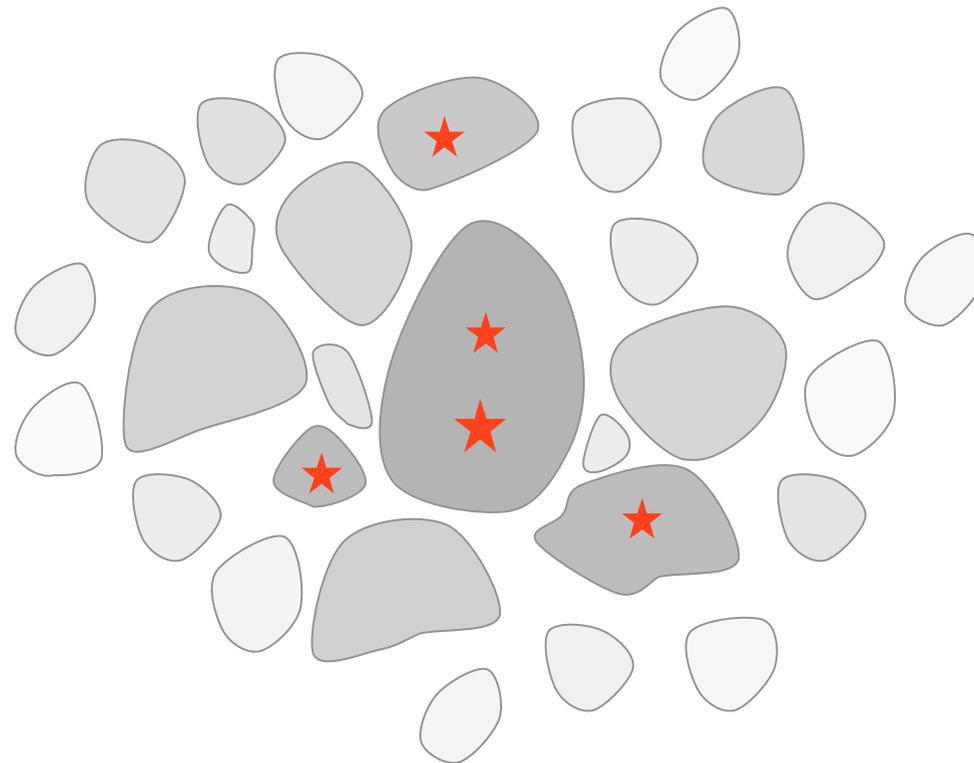
während Region kontrahiert können einzelne Klumpen kollabieren und Sterne bilden



einzelne Klumpen kollabieren und bilden Sterne

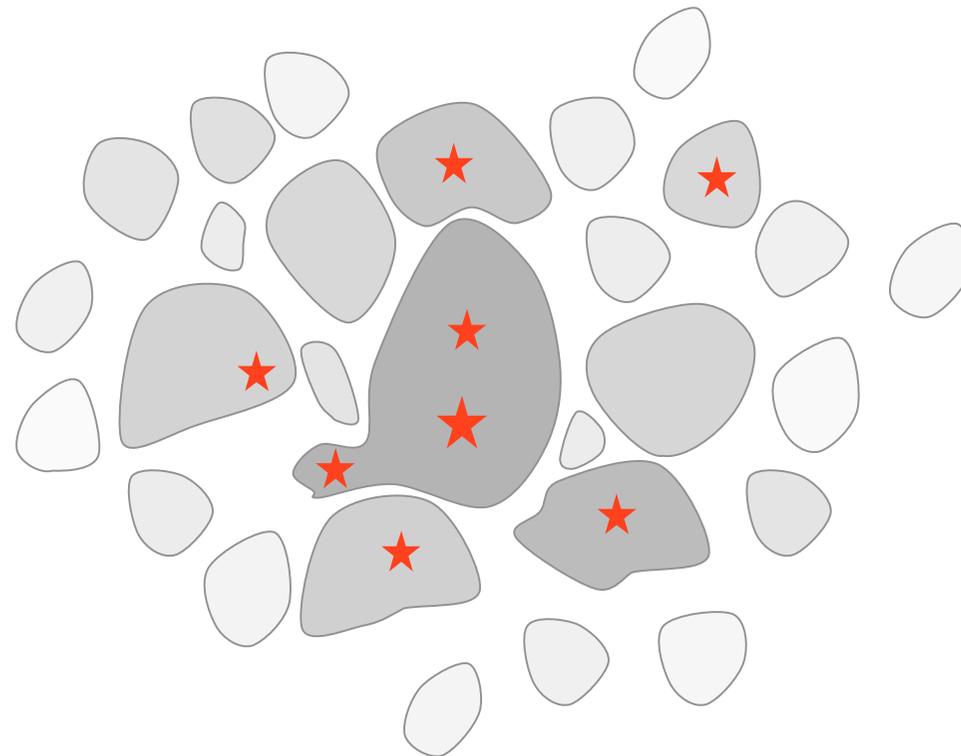


einzelne Klumpen kollabieren und bilden Sterne

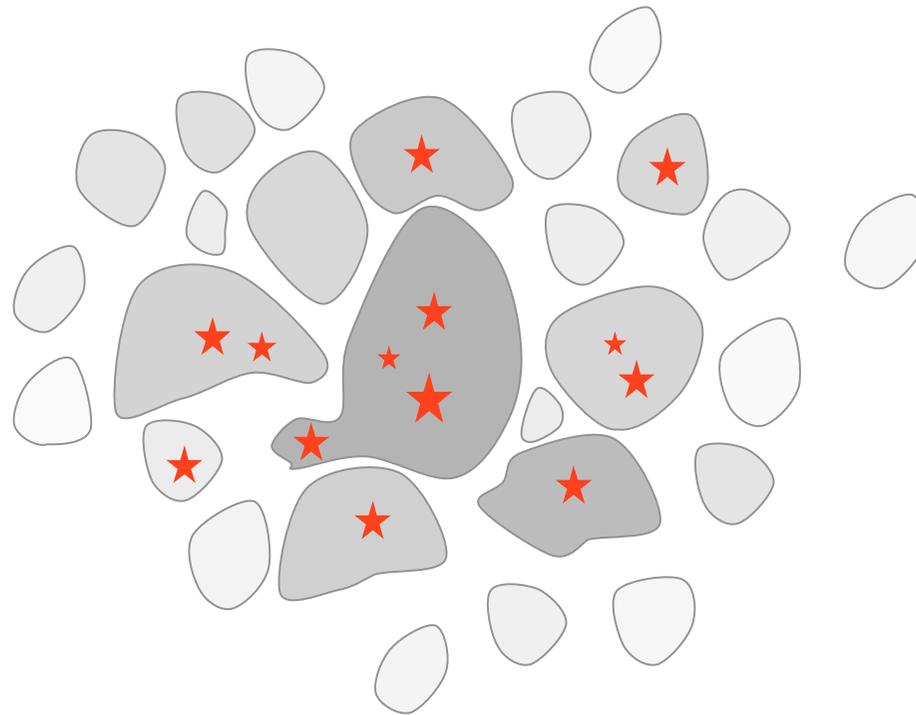


$$\alpha = E_{\text{kin}} / |E_{\text{pot}}| < 1$$

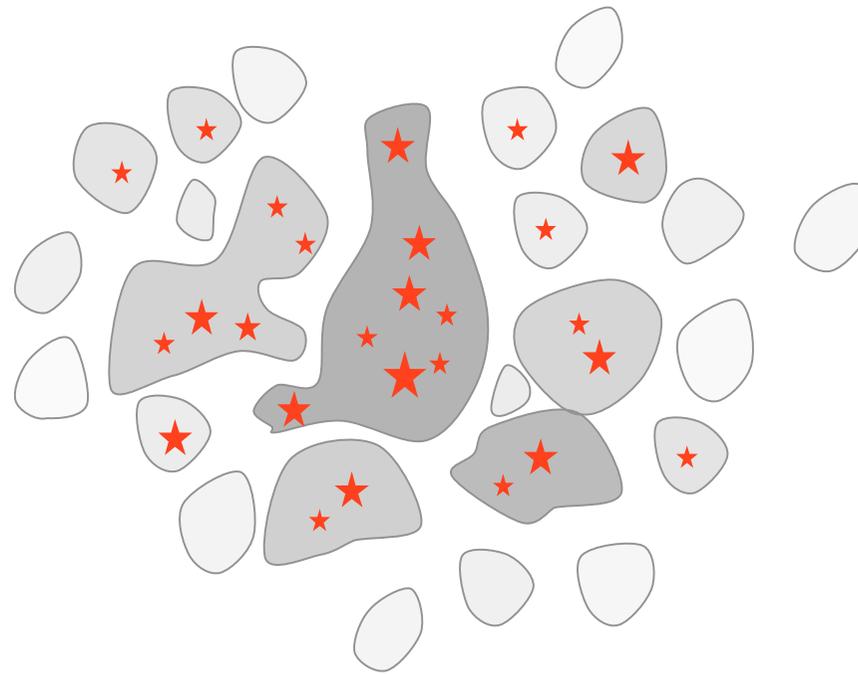
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



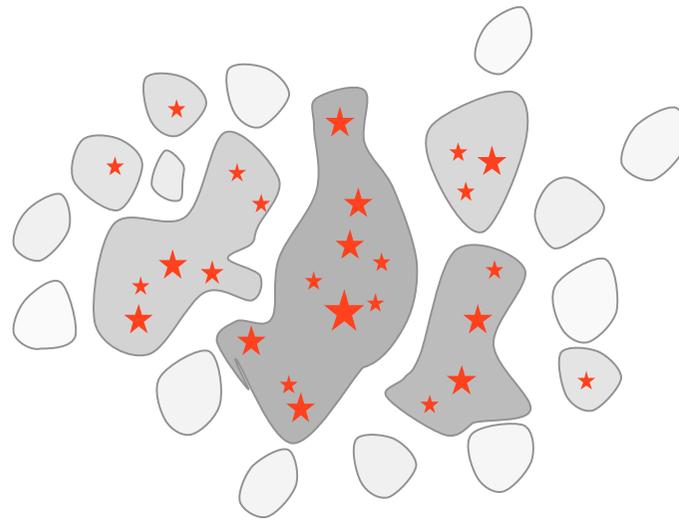
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



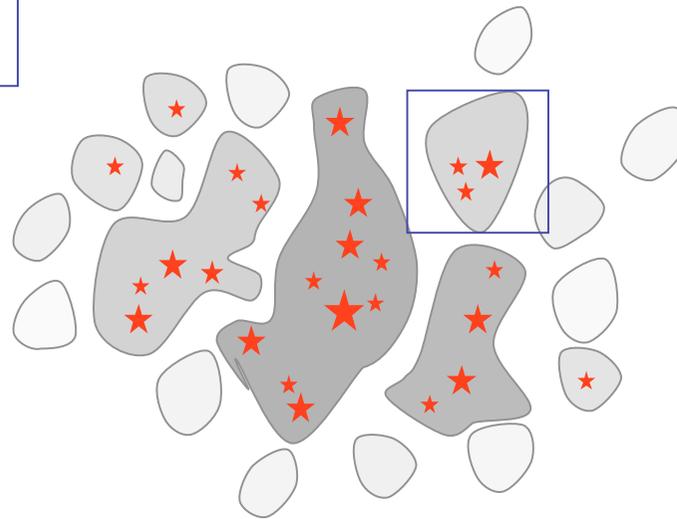
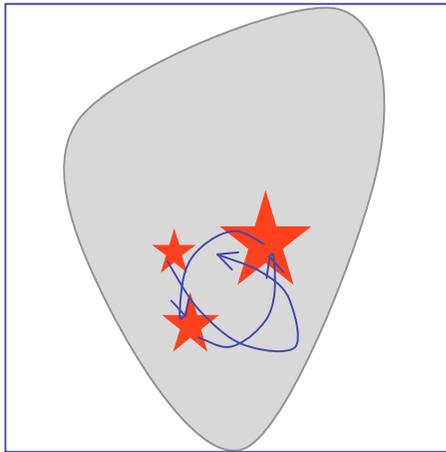
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



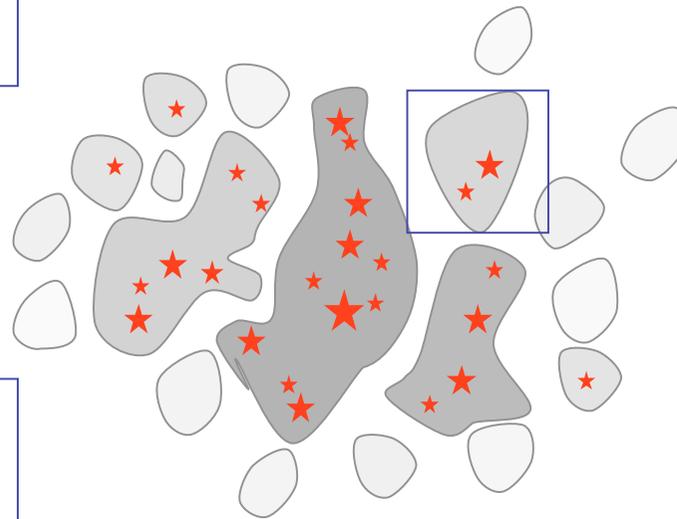
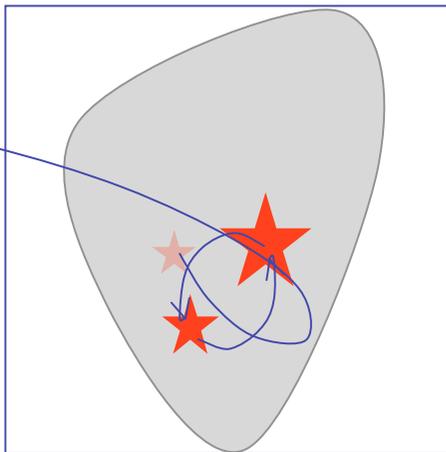
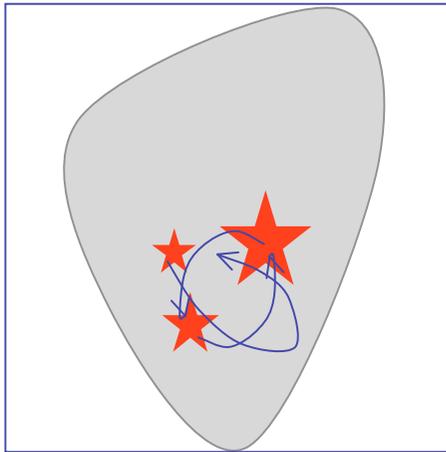
Im *dichten Haufen* wird kompetitives Wachstum wichtig



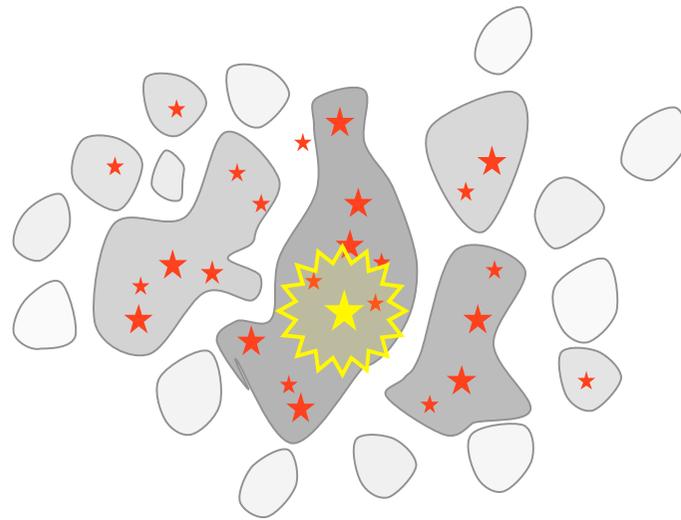
Im *dichten Haufen* wird kompetitives Wachstum wichtig



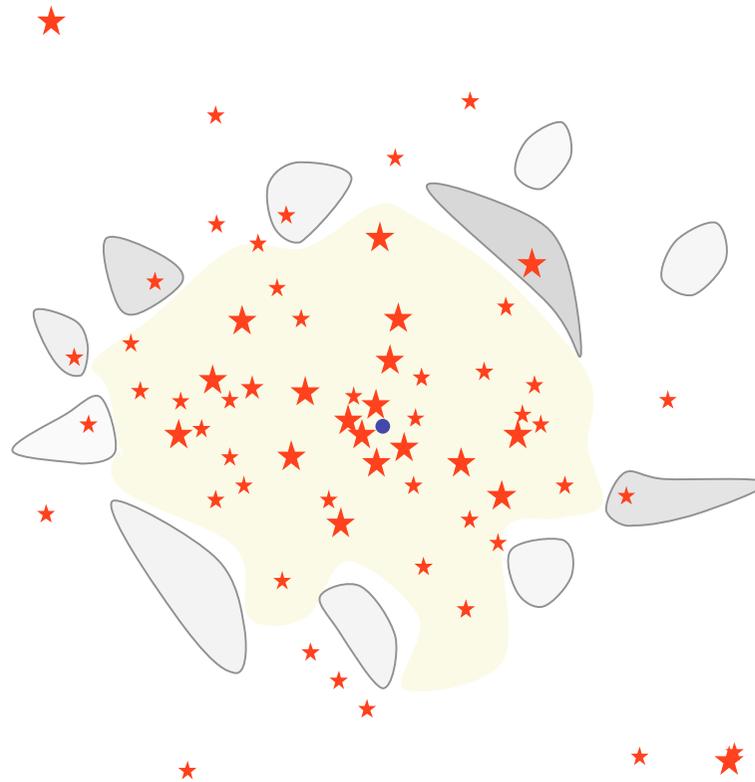
Im *dichten Haufen* beeinflussen stellardynamische Prozesse das Wachstum



massearme Objekte können herausgeschleudert werden --> Ende der Akkretion



Feedback beendet die Sternbildung



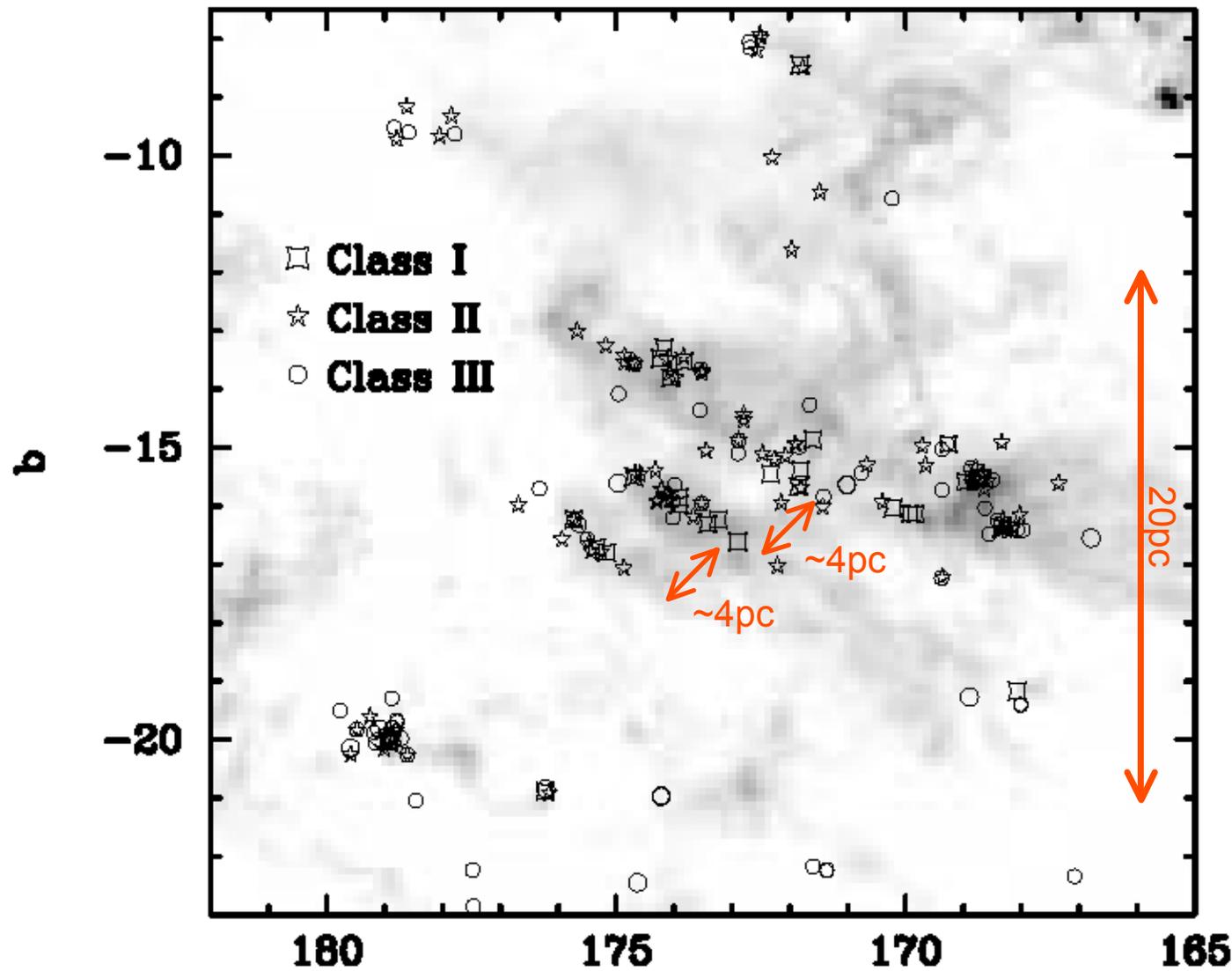
Resultat: *Sternhaufen*, evtl. umgeben von H<sub>II</sub>-Region

# Vorhersagen

# Was können wir lernen?

- *Globale Eigenschaften (statistische Betrachtung)*
  - Sternentstehungseffizienz & Zeitskalen
  - Stellare Massenfunktion (IMF)
  - Dynamik junger Sternhaufen
  - Statistische Beschreibung von Überschallturbulenz (PDF's,  $\Delta$ -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

# Beispiel



# Taurus Wolke

Sternbildende  
Filamente in  
der *Taurus*  
Molekülwolke

(from Hartmann 2002, ApJ)

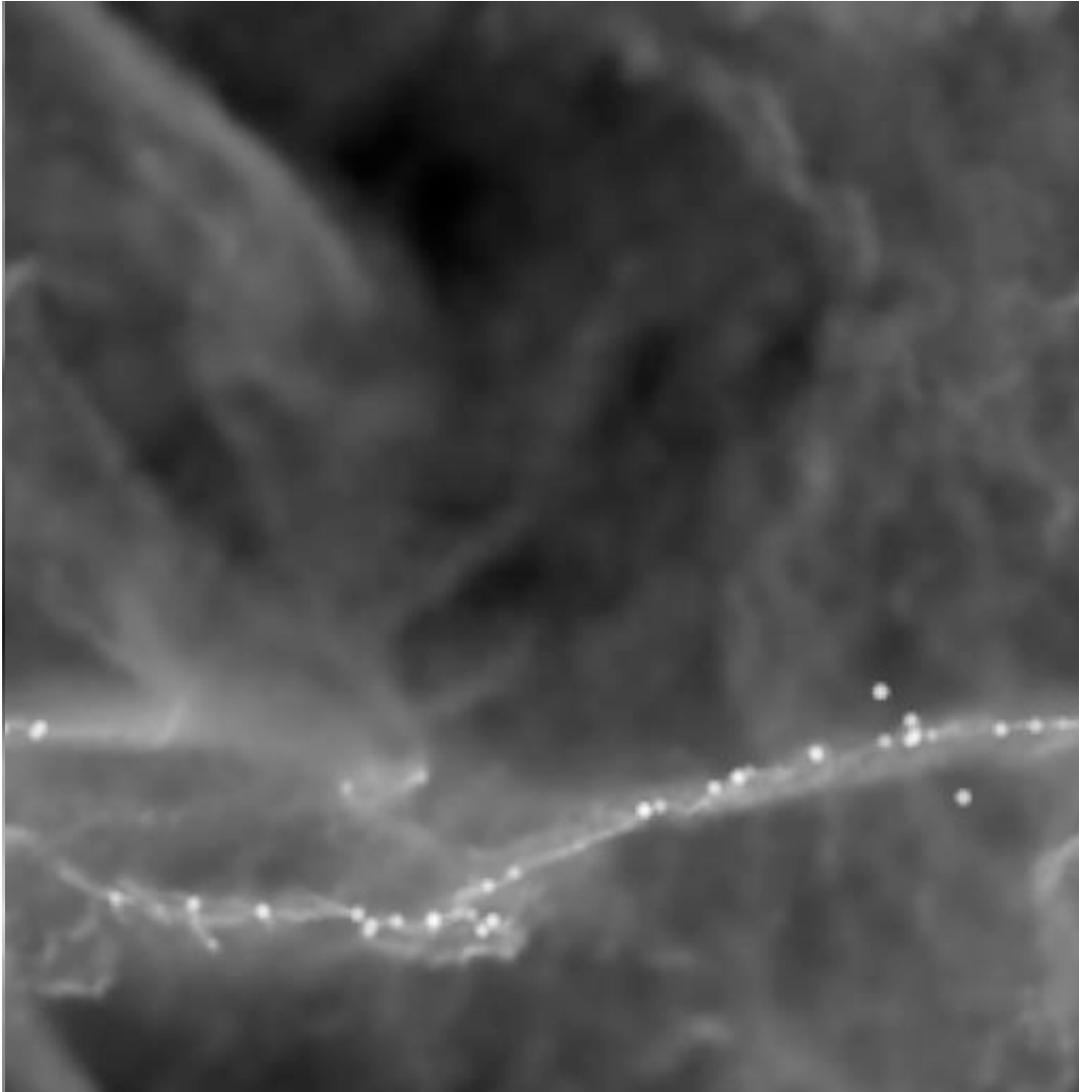


# Numerisches Model der gravoturbulenten Fragmentation

(ein Model für Sternentstehung in der Taurus Molekülwolke;  
aus Klessen & Ballesteros-Paredes, in Vorbereitung)

- SPH-Modellrechnungen zur dynamischen Entwicklung der Wolke ( $1.6 \times 10^6$  Teilchen)
- $1.6 \times 10^6$  SPH-Teilchen
- Turbulenz getrieben auf großen Skalen
- Machzahl  $\mathcal{M} = 6$
- Periodische Randbedingungen

# Gravoturbulente Fragmentation



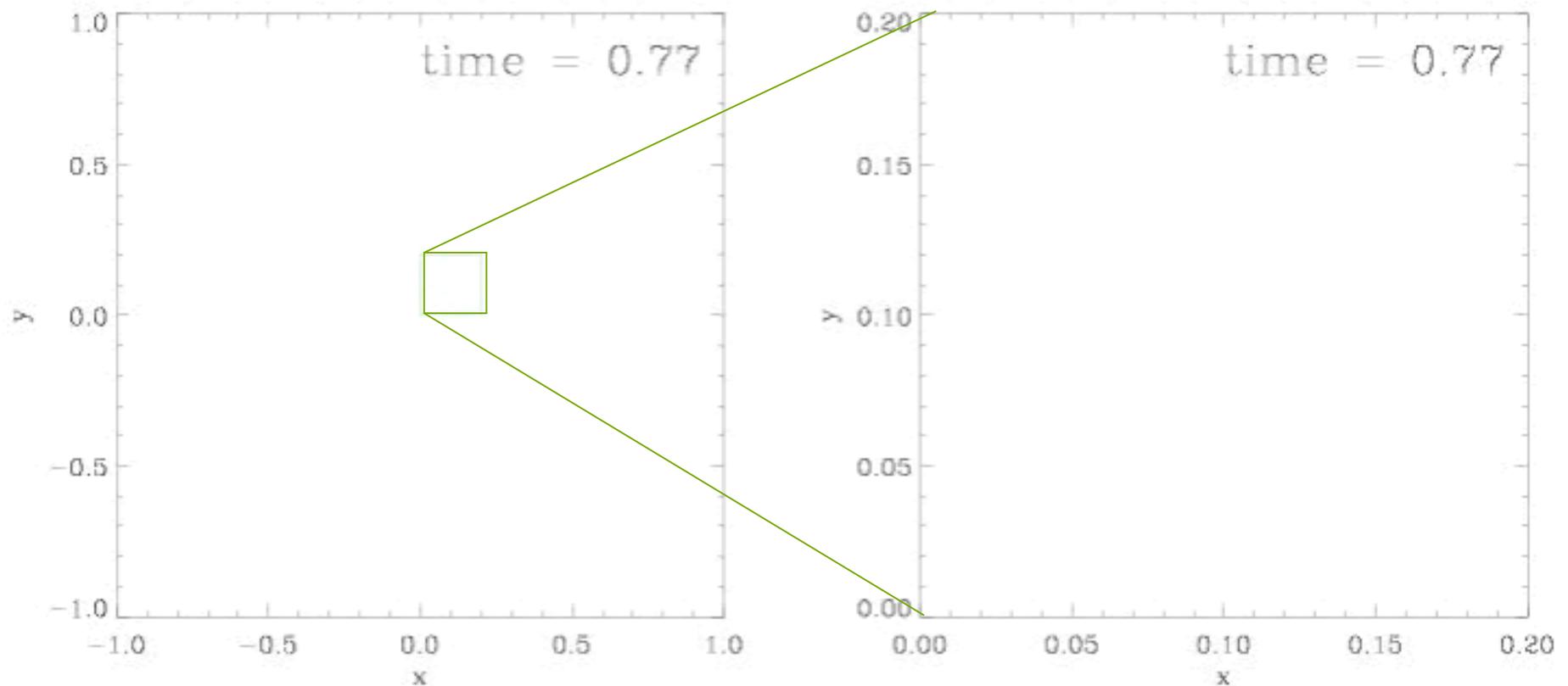
Turbulenz erzeugt  
die Dichtestruktur

Gravitation wählt die  
dichtesten Gebiete  
aus.

Diese verdichten  
sich & bilden Sterne.

# Bildung von Sternhaufen

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

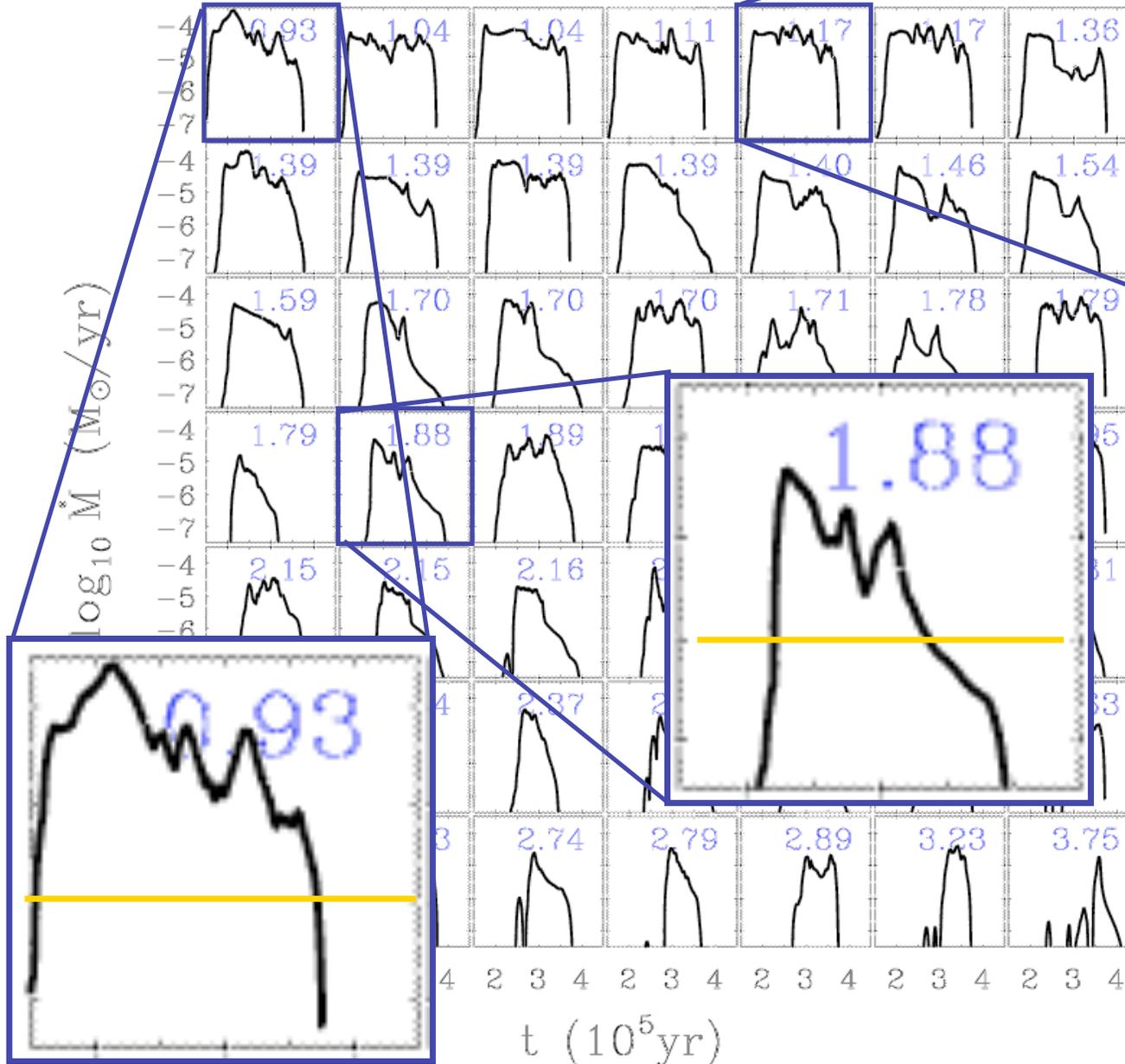


Trajektorien von Protosternen in jungen, dichten, und noch eingebetteten Haufen

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

Klessen: Physikalisches Kolloquium 28.04.2006

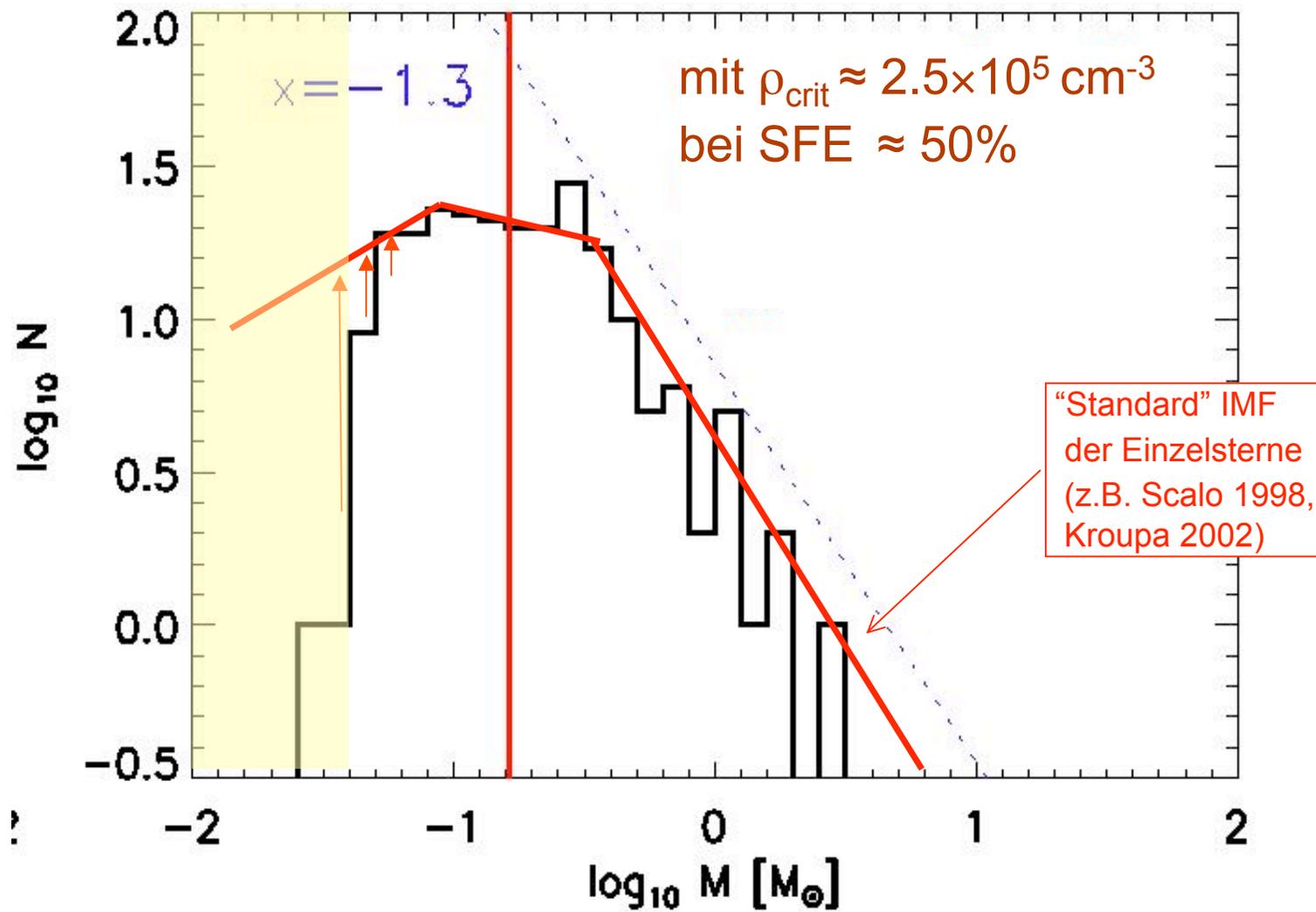
# Akkretionsraten in H



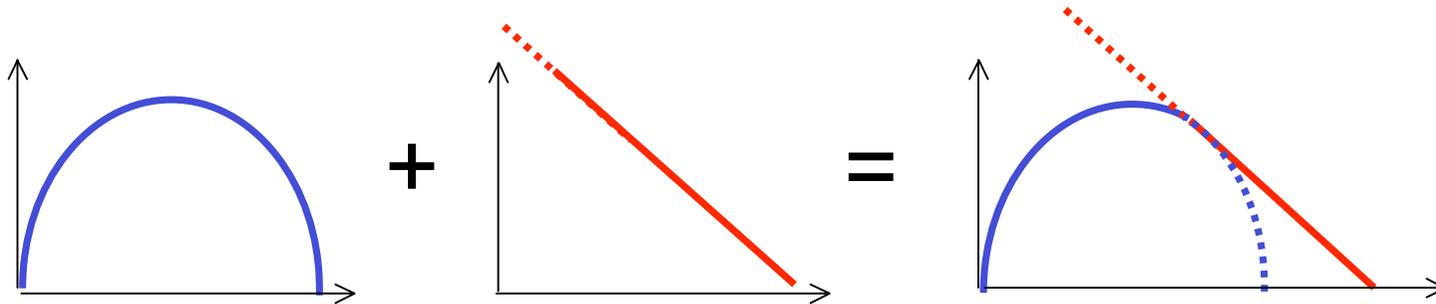
Massenakkretionsraten sind stark *zeitabhängig* und von *Haufenumgebung* beeinflusst.

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

# Massenspektrum



# Plausibilitätsüberlegung...



- Überschallturbulenz ist skalenfreier Prozess

→ führt zu *POTENZGESETZ*

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

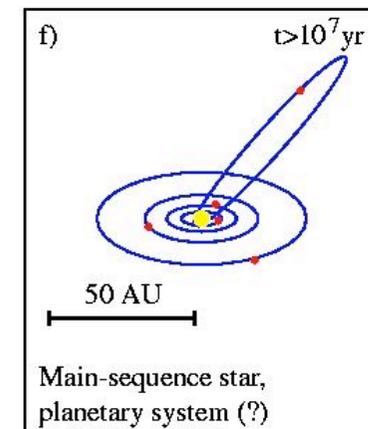
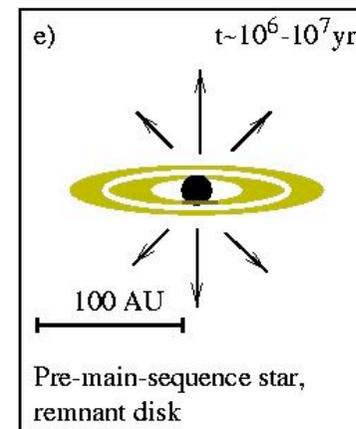
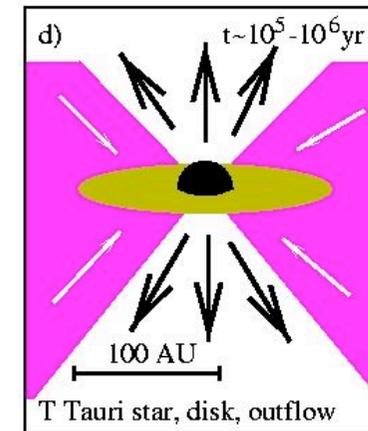
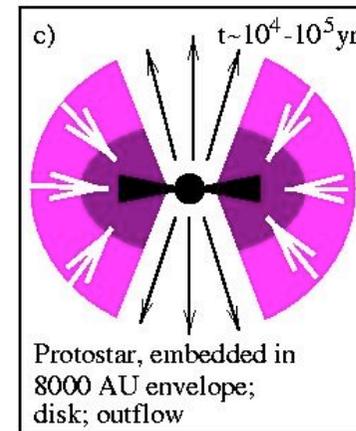
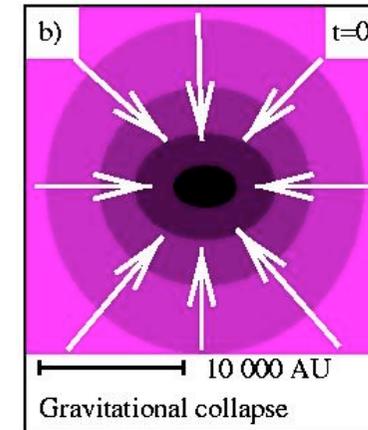
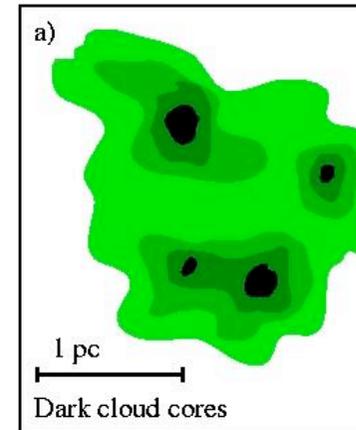
→ *GAUSS VERTEILUNG*

# 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?

# Stadien der Sternbildung

- Prästellare Kerne
- Klasse 0: Anfangskollapsphase
- Klasse 1: Aufbau der protostellaren Scheibe
- Klasse 2: Akkretion klingt aus
- Klassische Vorhauptreihenkontraktion
- Planetenbildung in der Restscheibe
- Stern auf Hauptreihe (evtl. mit Planetensystem)



# Zusammenfassung

# Zusammenfassung

- Sternbildung beginnt *früh* im Universum.
- Sterne bilden sich in *Galaxien*.
- In diesen Galaxien entstehen Sterne im *Inneren* von *Wolken* aus *molekularem Wasserstoff*.
- *Dichte* und *Geschwindigkeitsstruktur* dieser Wolken ist von *Überschallturbulenz* bestimmt
- Bereiche der Wolke werden gravitativ instabil. *Schwerkraft* dominiert über *Gasdruck*, *Magnetfeld*, und *Turbulenz*.
- Im gravitativen Kollaps steigt die *Dichte* um den Faktor  $10^{20}$ , *Ausdehnung* sinkt um Faktor  $10^7$ .
- Unsere *Sonne* ist *typischer* Stern:  $M_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$ ,  $\varnothing_{\odot} = 1,4 \times 10^7 \text{ km}$ ,  $T_{\odot} = 5800 \text{ K}$ .
- *Sternmassen* variieren vom 1/10 bis 100 Sonnenmassen.

Danke!