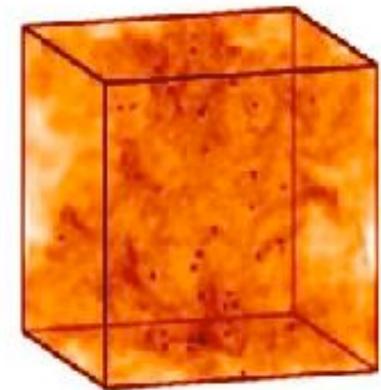
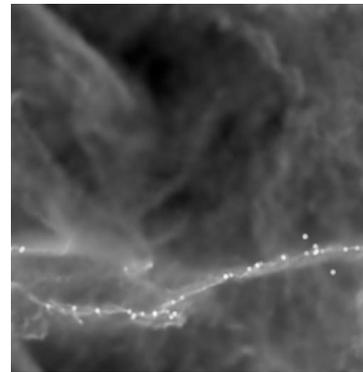
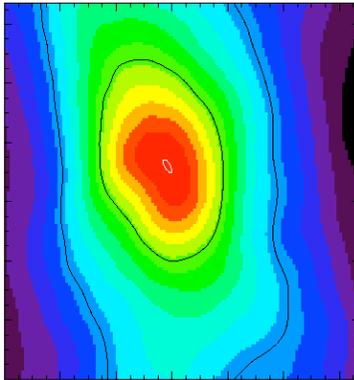


# Die turbulente Geburt der Sterne



**Ralf Klessen**

Astrophysikalisches Institut Potsdam  
Emmy-Noether-Forschungsgruppe (DFG)



# Übersicht

WAS?

- Was sind Sterne?

WO und WANN?

- Wo und wann bilden sich Sterne?

WIE?

- Wie beobachtet man Sternbildung?

- Wie bilden sich Sterne?

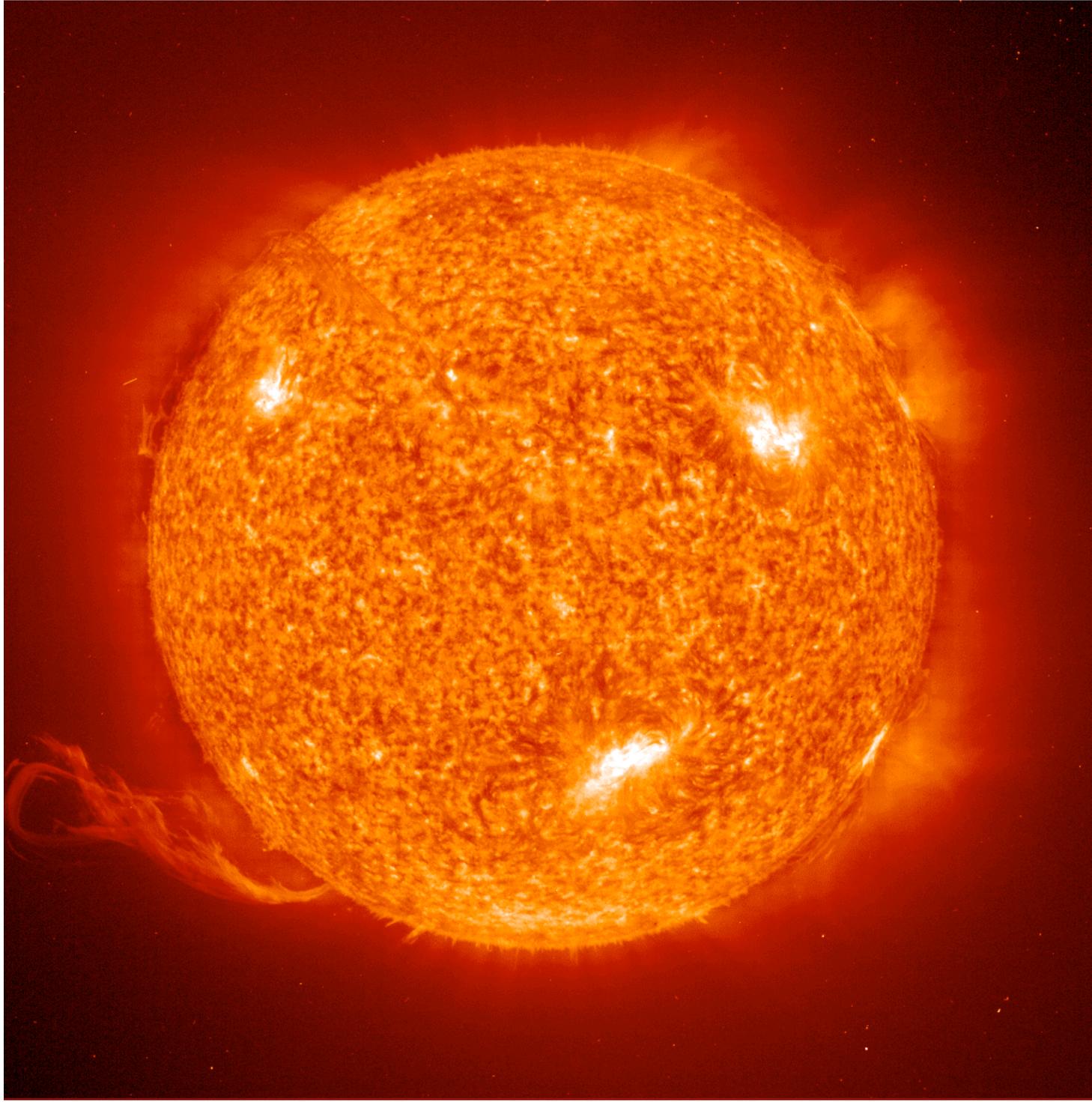


Theorie der turbulenten  
Sternentstehung

Phänomenologie  
Theorie

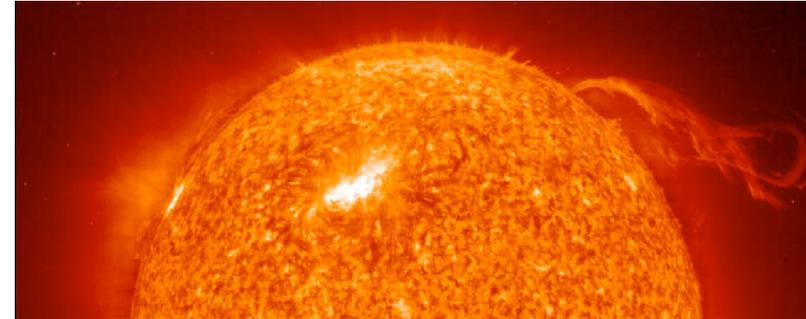
WAS?

Unsere Sonne



# Sterne: die Sonne

Eigenschaften der Sterne  
(Stellare Zustandsgrößen):



## Unsere Sonne ☉ als Referenzstern

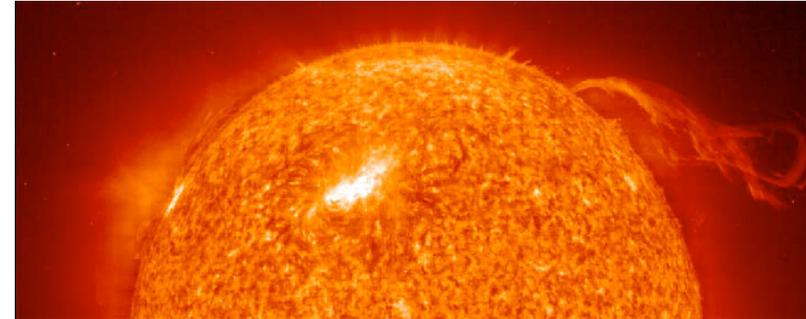
|                      |                      |                           |
|----------------------|----------------------|---------------------------|
| Radius               | $R_{\odot}$          | 696 000 km                |
| Masse                | $M_{\odot}$          | $1,989 \times 10^{30}$ kg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

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

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

# Sterne: die Sonne

Eigenschaften der Sterne  
(Stellare Zustandsgrößen):



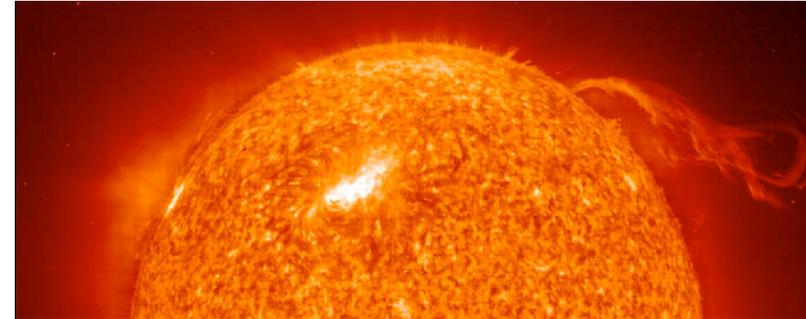
**Unsere Sonne  $\odot$  als Referenzstern**

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

in cgs Einheiten

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

# Sterne: 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?

# UDF: SE bei hoher Rotverschiebung



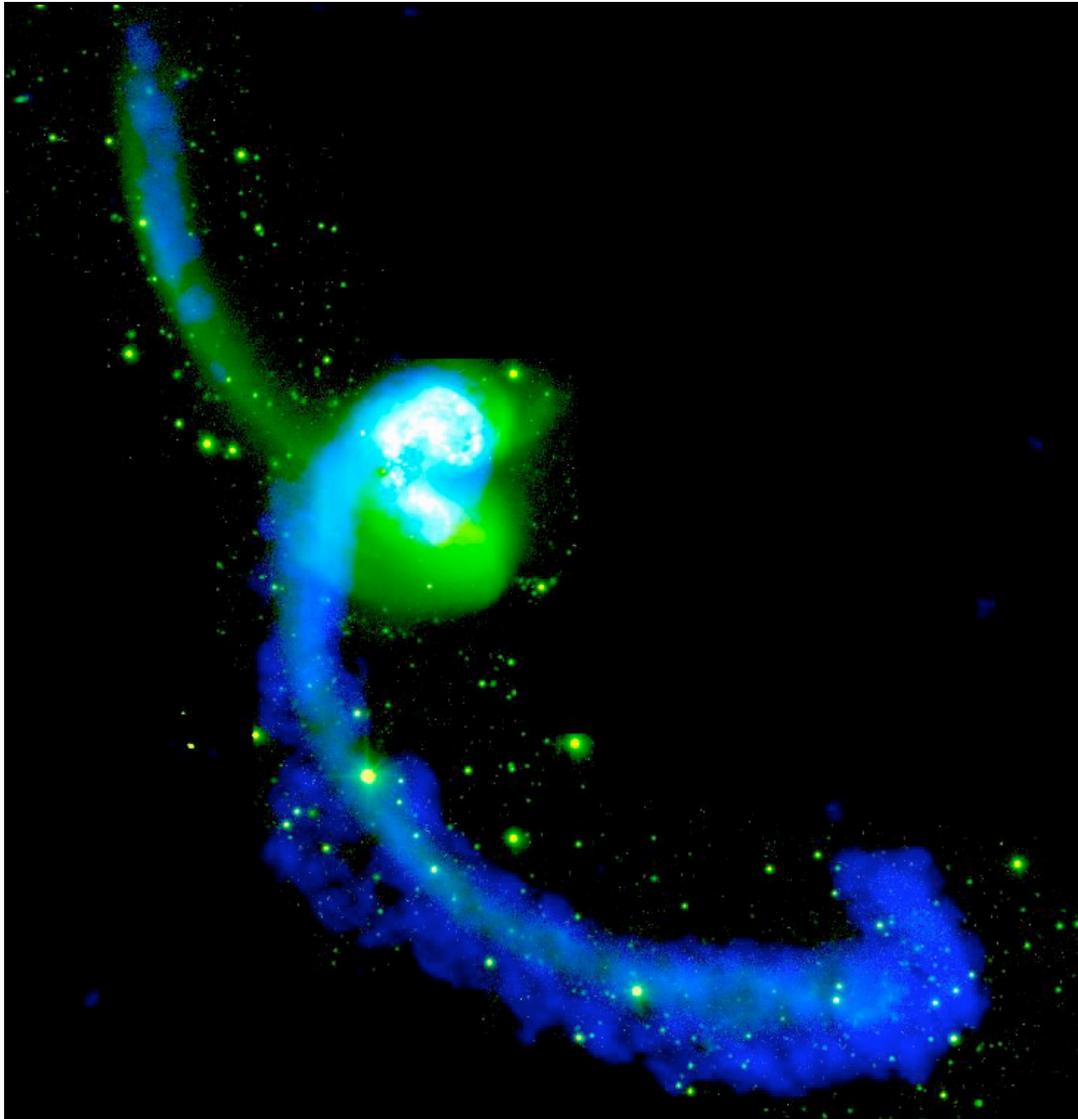
Sternbildung  
beginnt **früh**

(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



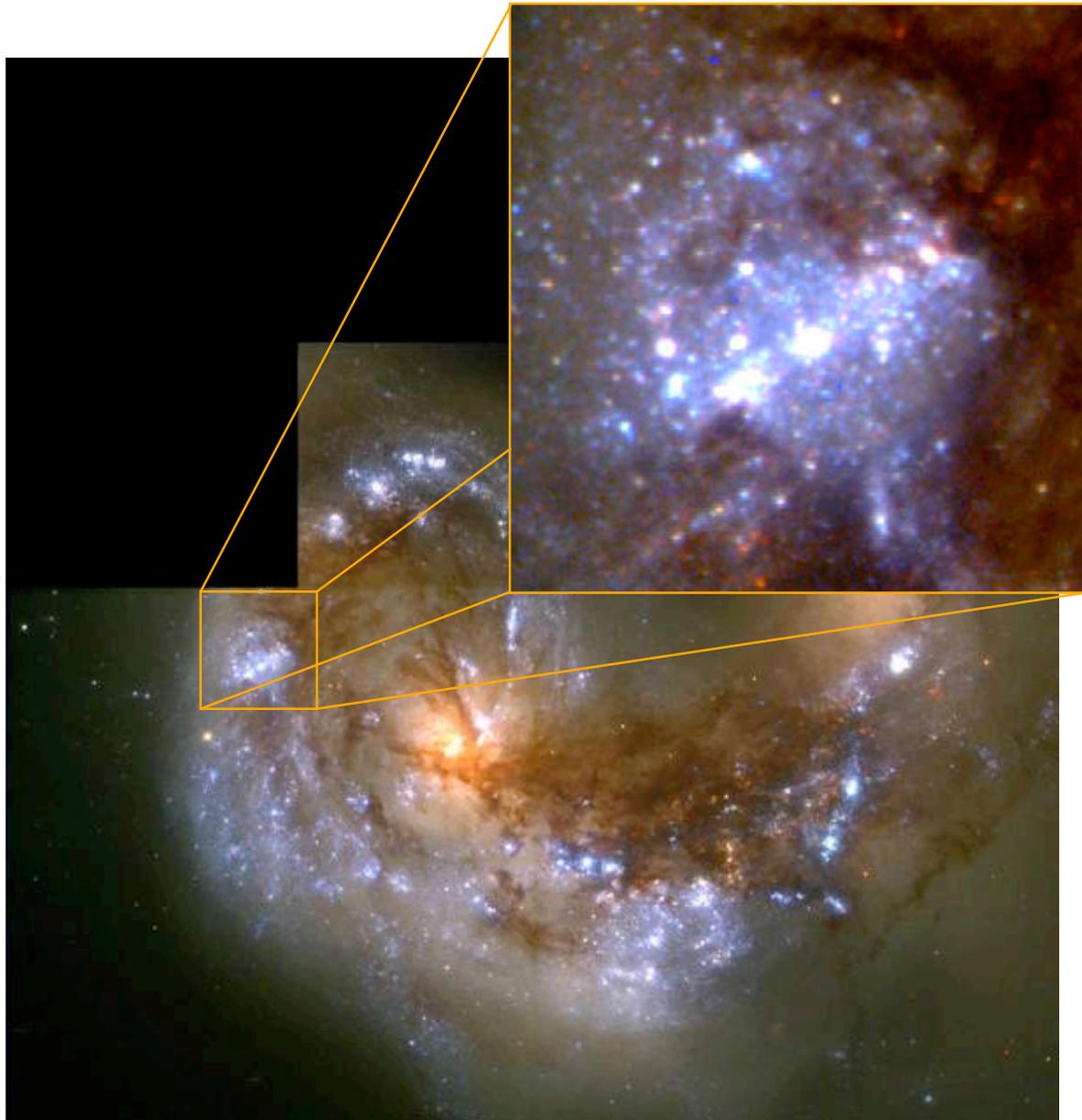
## Antennae Galaxie

- *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)

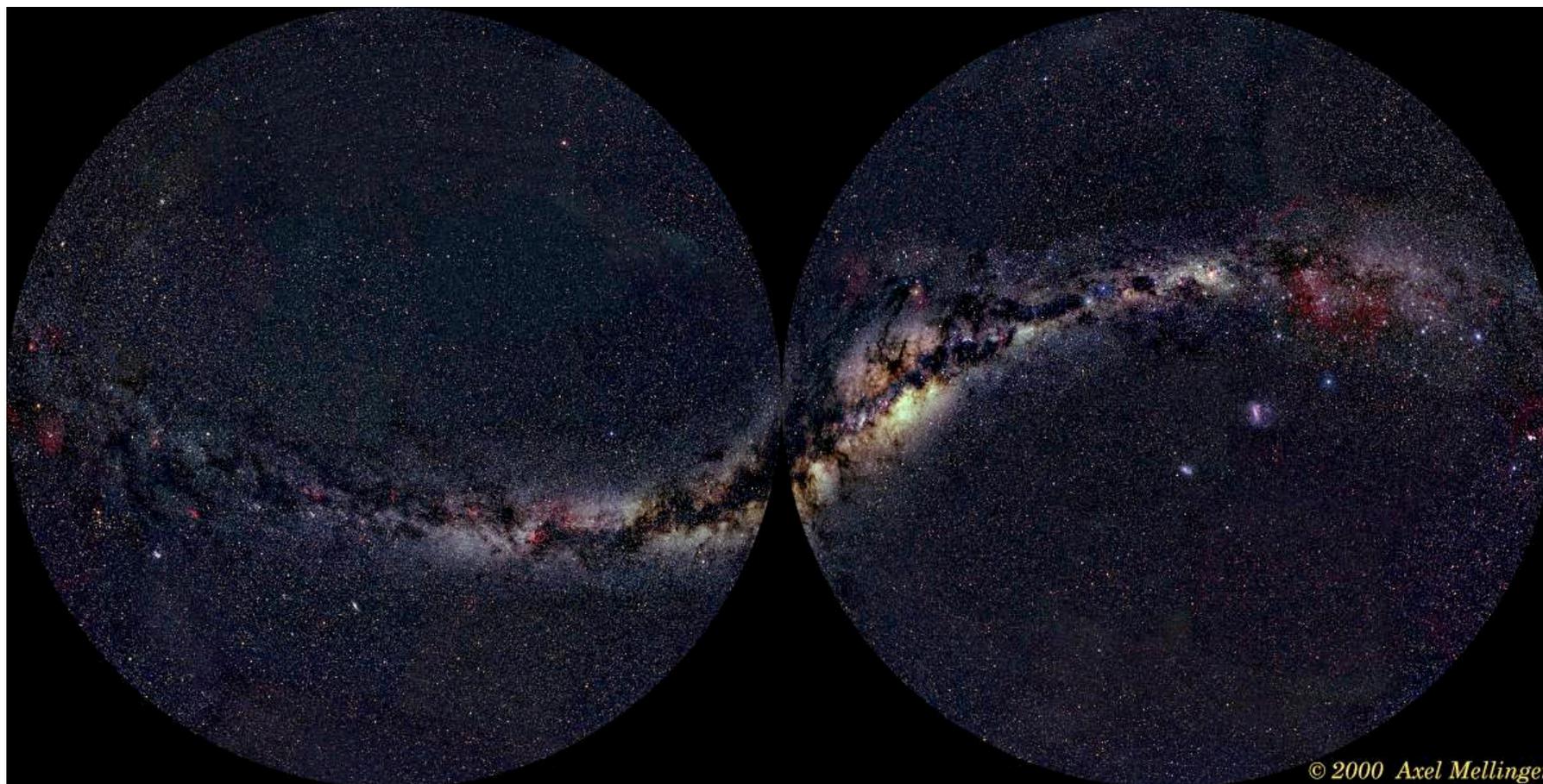
## NGC4622

- 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.

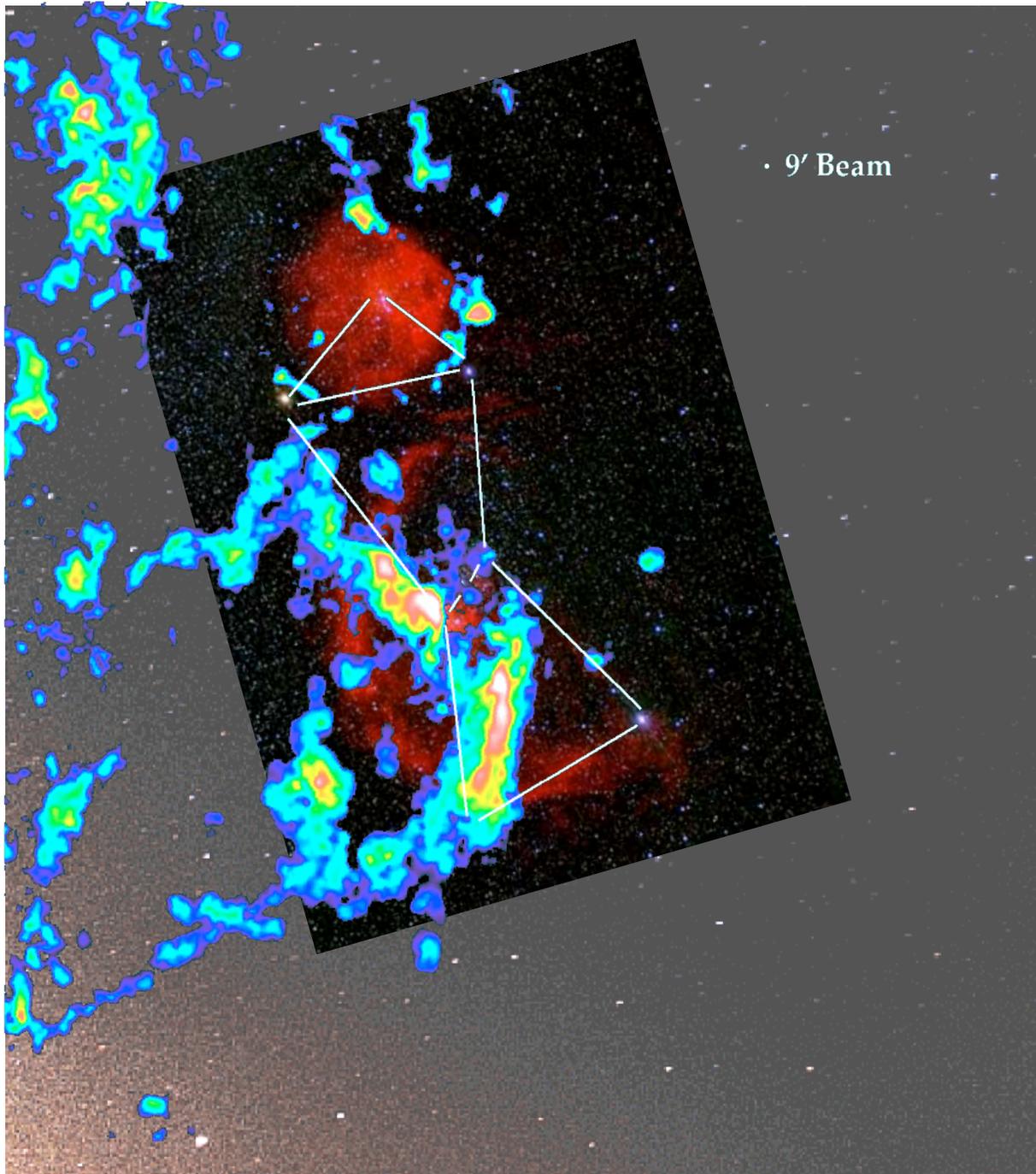


The Sombrero Galaxy — M104  HUBBLESITE.org

# 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.

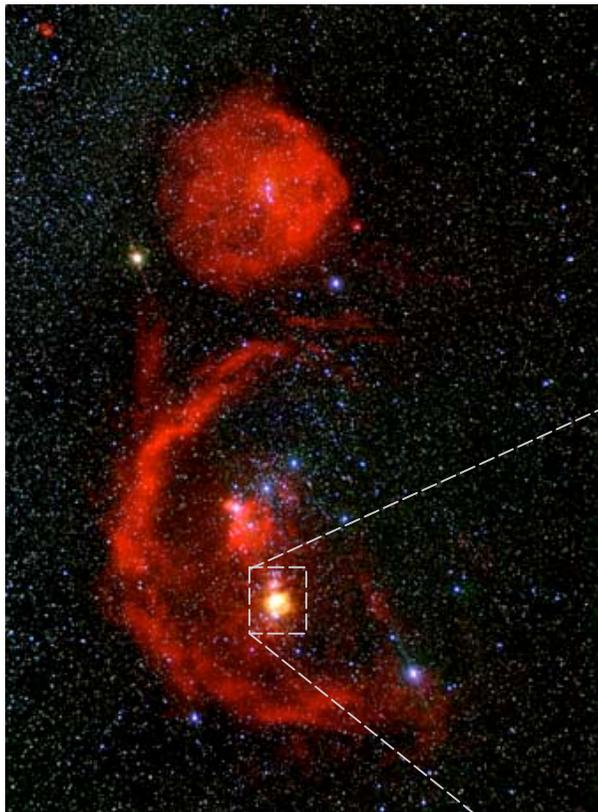


# Stern- entstehung in Orion

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

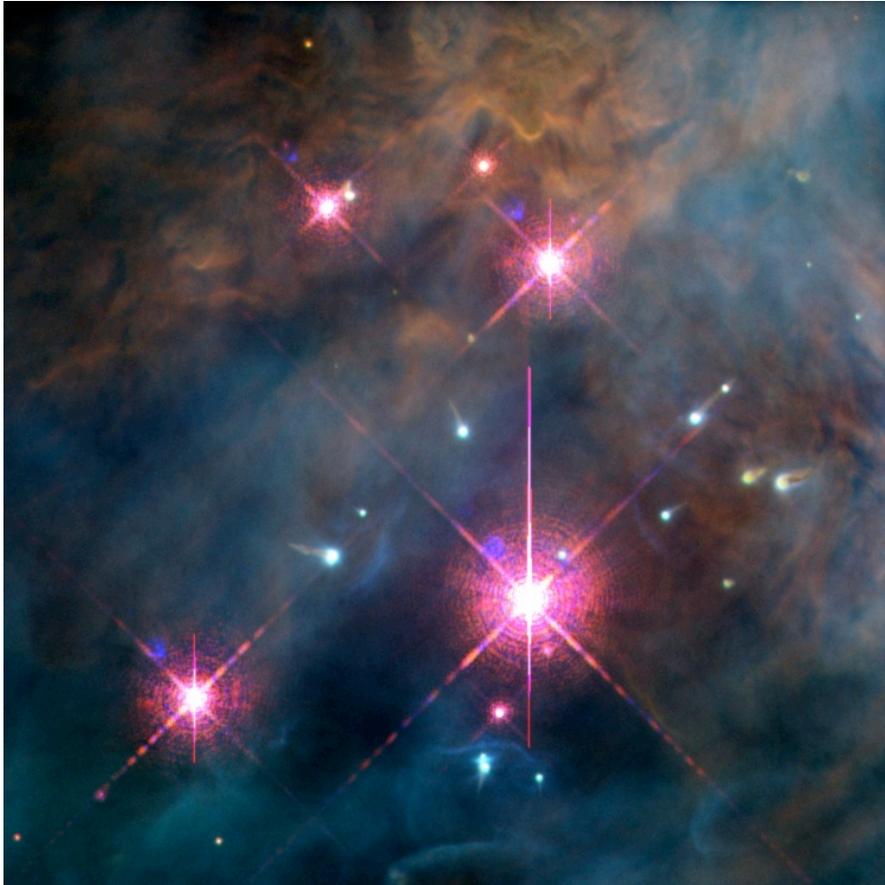


## Trapez- haufen (Detail)

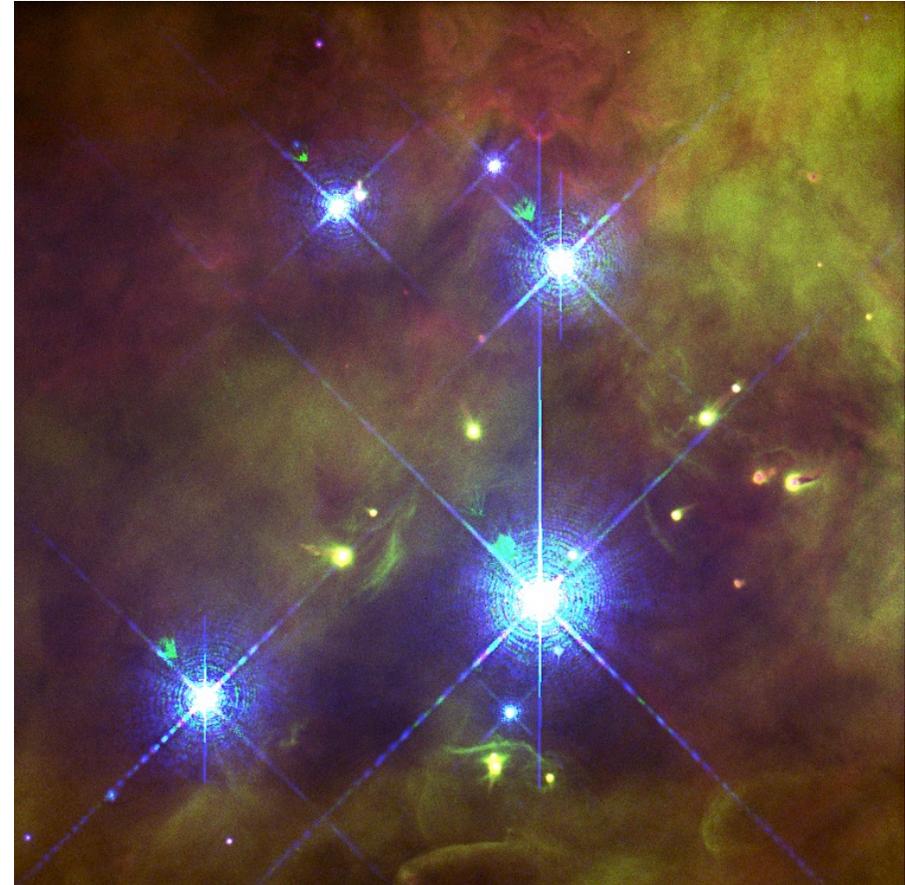
- Sterne ent-  
stehen in  
**Haufen**
- Sterne ent-  
stehen in  
**Molekül-  
wolken**
- **Rückkopp-  
lungseffekte**  
sind wichtig

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

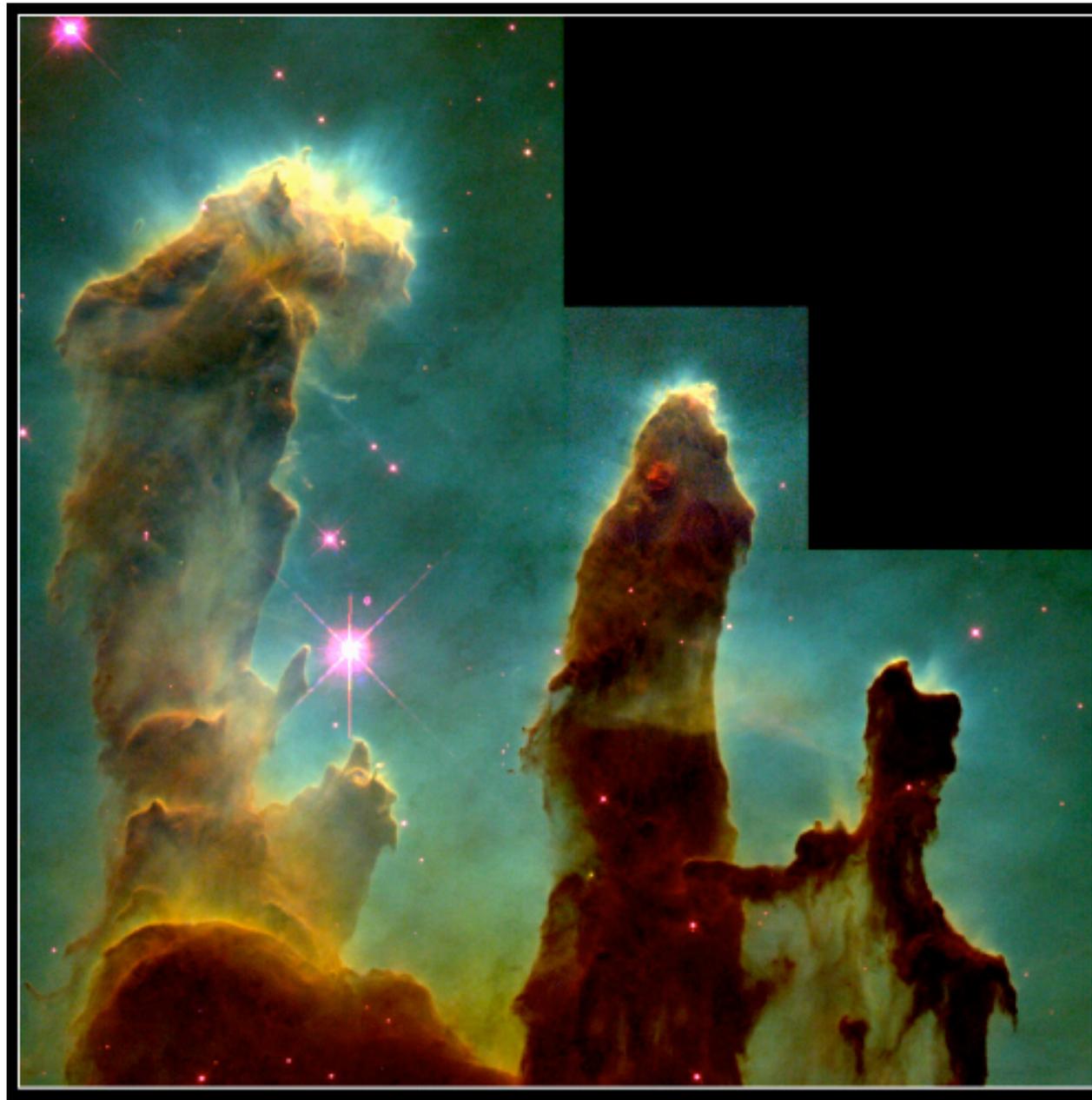
# Trapezhaufen: Zentralgebiet



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



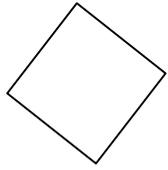
**Proplyds:** Verdampfende ``protoplanetare`` Scheiben um junge massearme Protosterne



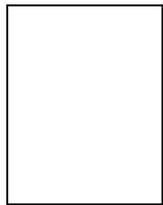
HST Aufnahme

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

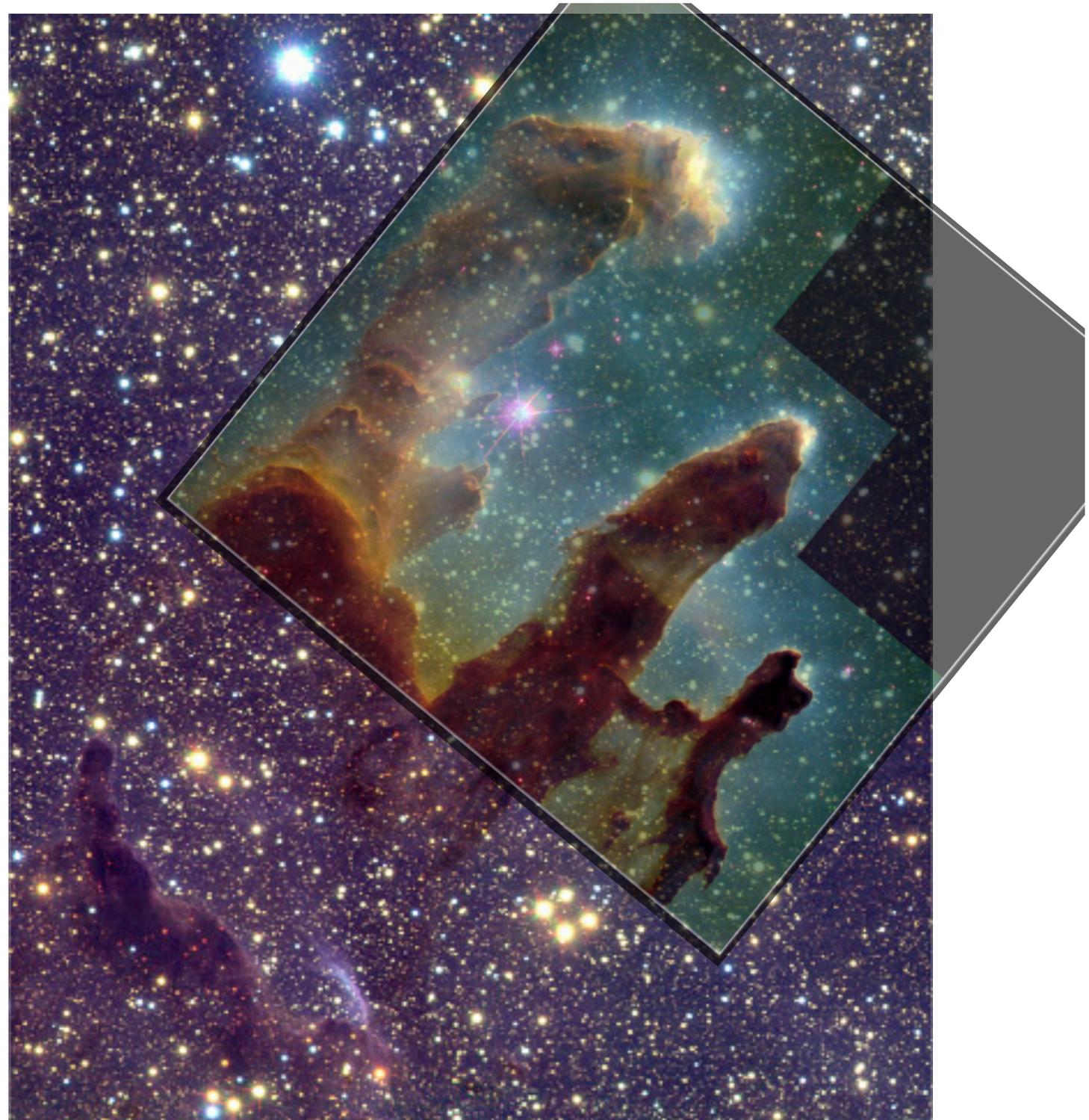
Klassen: DPG - Augsburg 30.03.2006

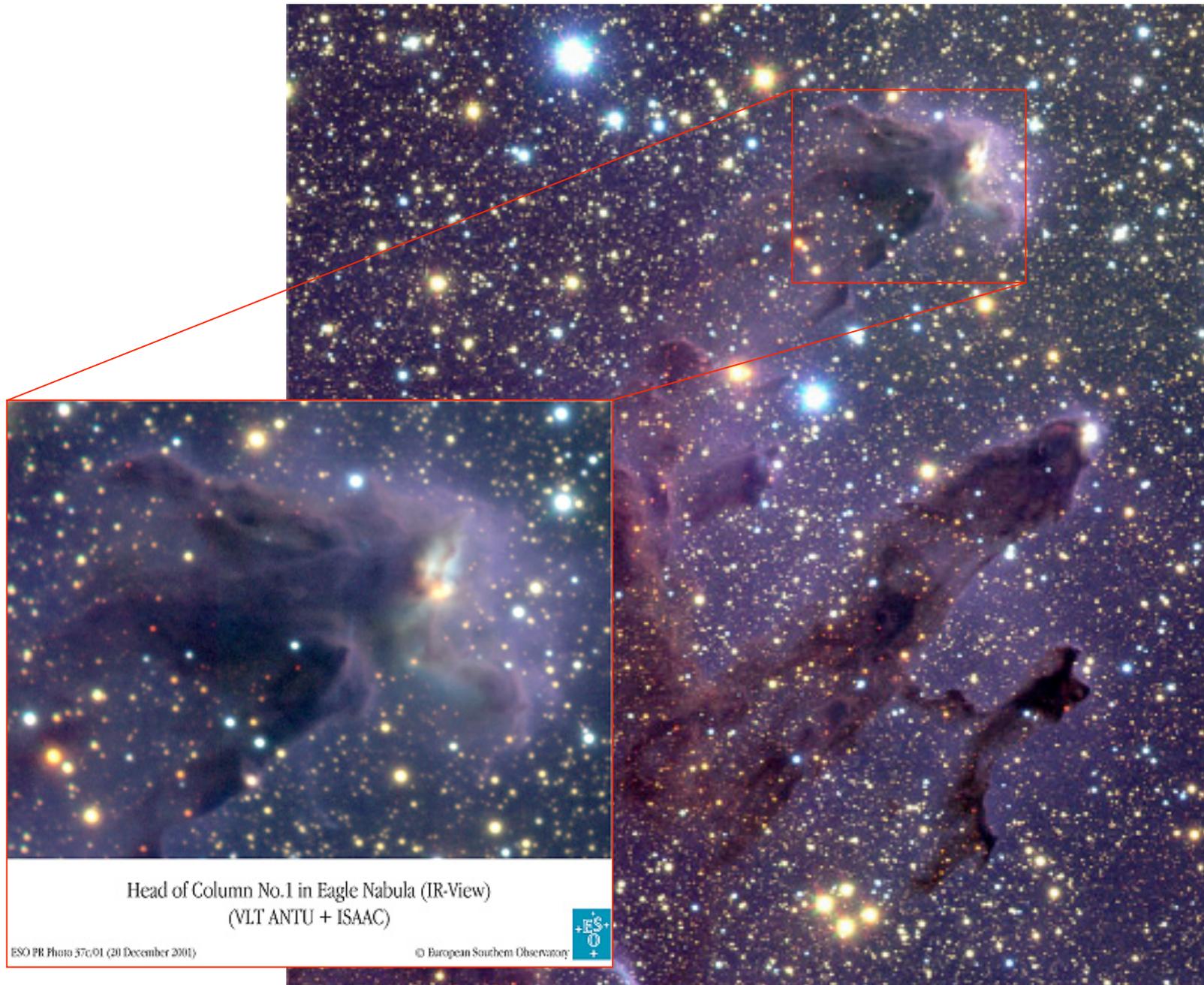


Aufnahme im  
optischen  
Wellenlängen-  
bereich



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....

Abbildung: ESO/VLT



IR Aufnahme mit dem ESO-VLT

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

Abbildung: ESO/VLT

30.03.2006

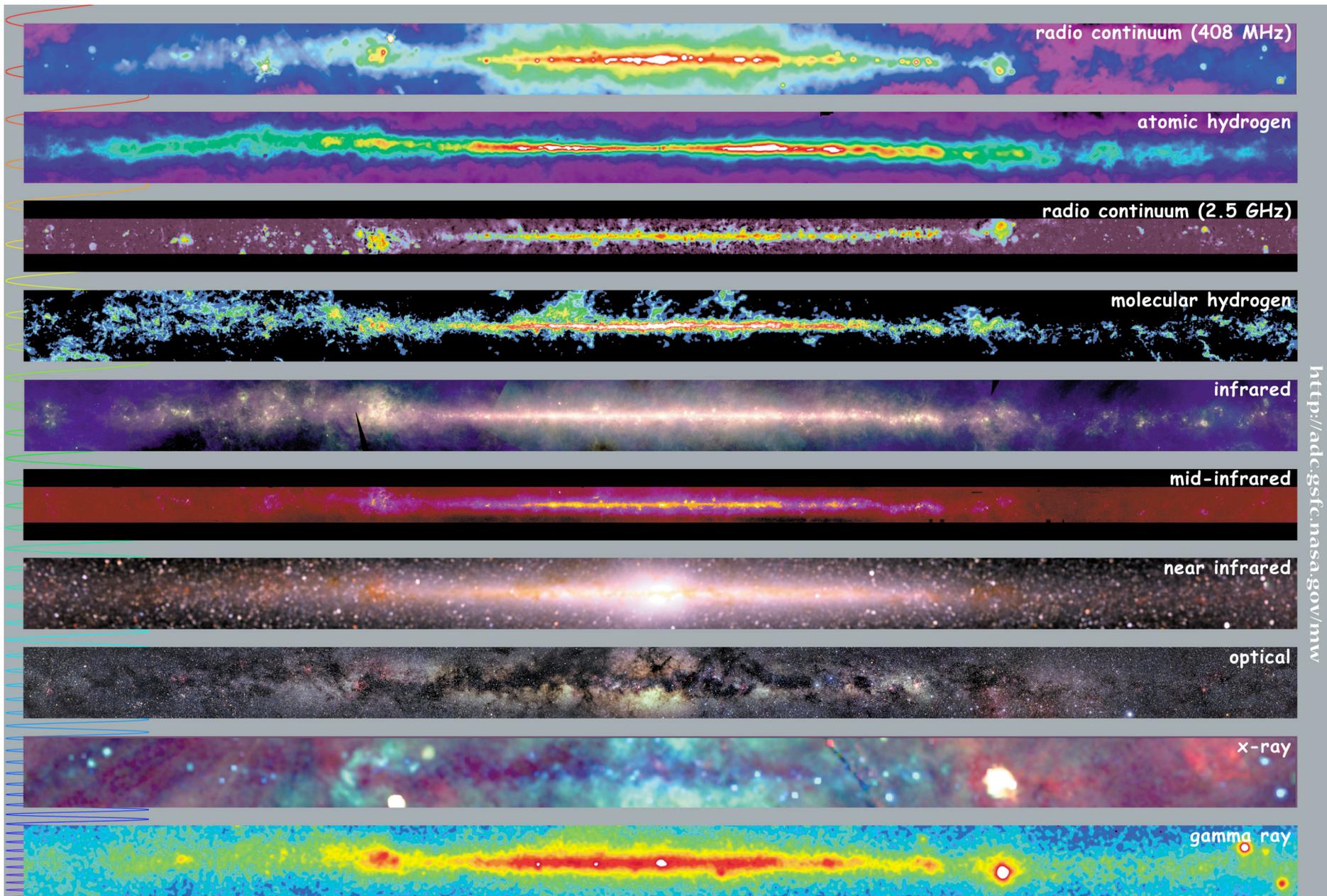
WIE?

# Wie beobachtet man SE?

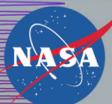
Unterschiedliche Wellenlängen liefern unterschiedliche Informationen.

→ 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:

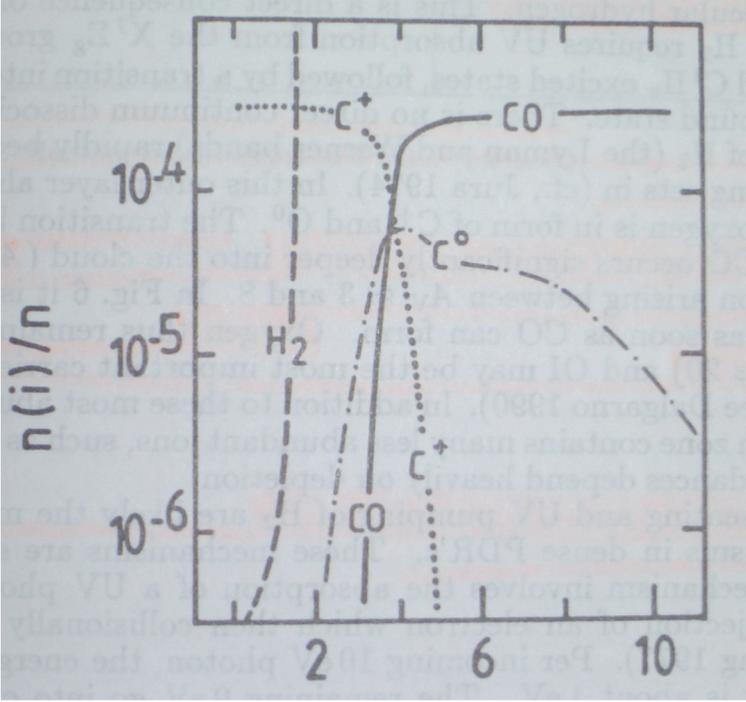
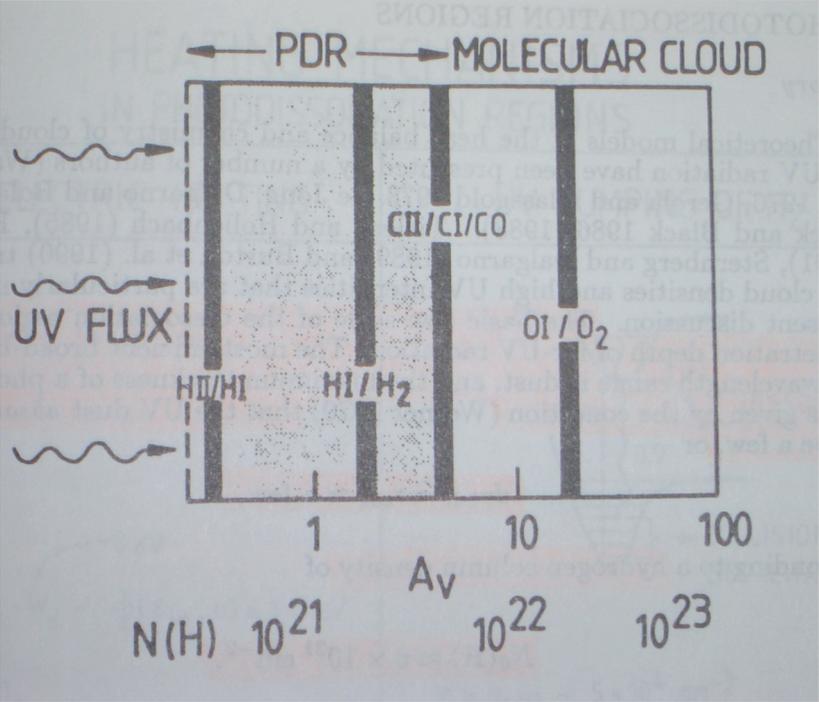
*Ionisierter atomarer Wasserstoff* HII ( $H^+$ )  
*Neutraler atomarer Wasserstoff* HI ( $H$ )  
*Molekularer Wasserstoff*  $H_2$

 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.

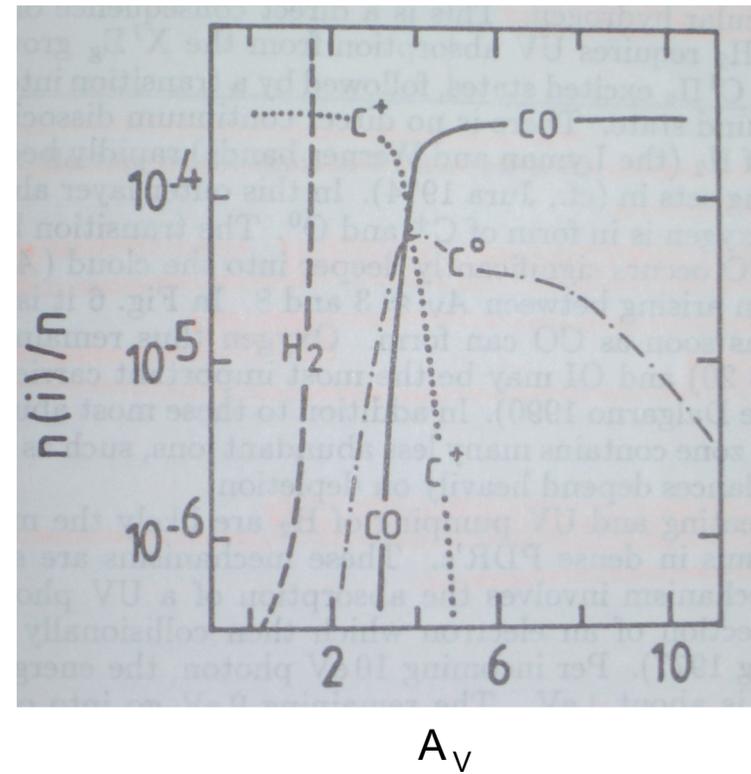
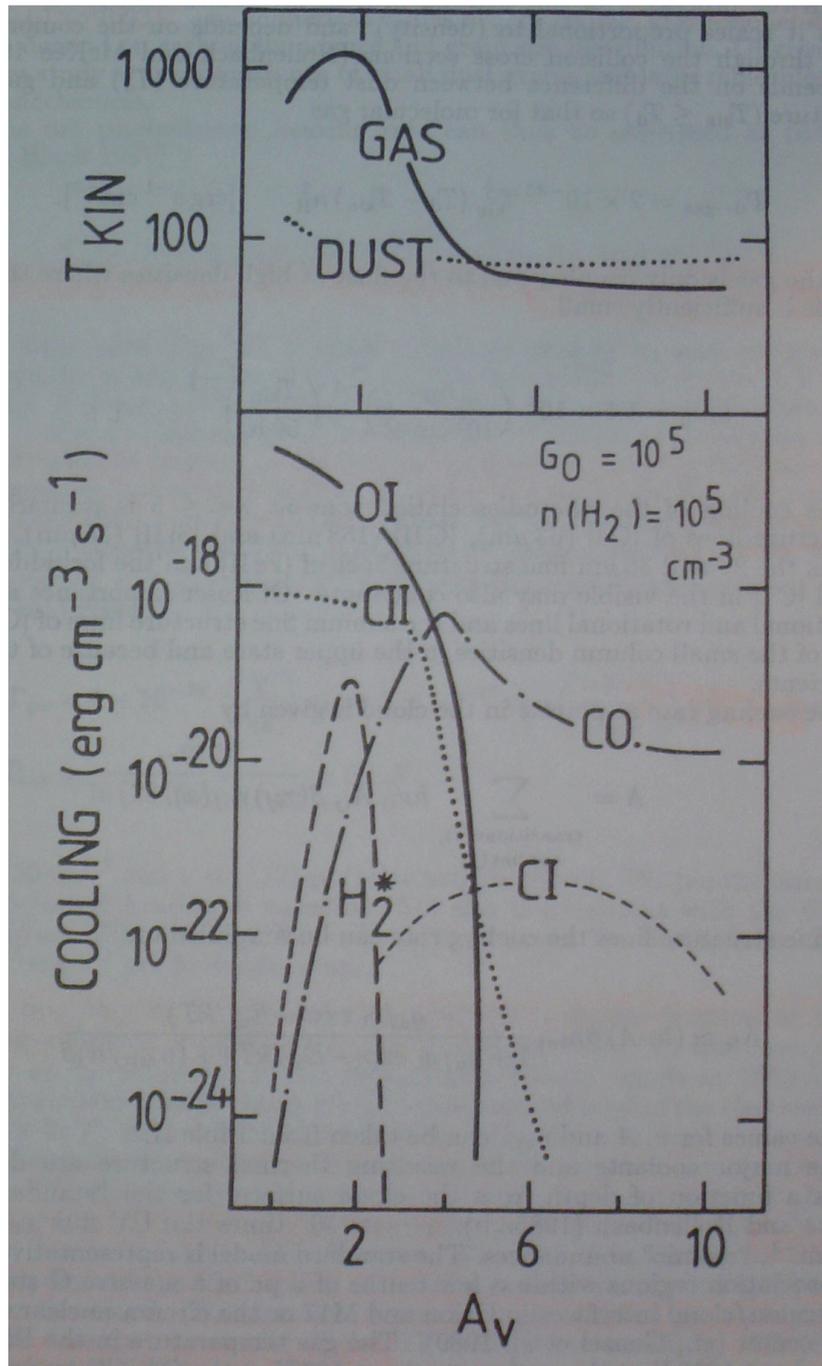
Der größte Teil (ca. 80%) des ISM machen HI und HII-Gebiete niedriger Dichte aus.  $H_2$  befindet sich in *Molekülwolken*, die oft von HII-Gebiete hoher Dichte begleitet werden. In der Milchstraße entstehen Sterne immer in Molekülwolken!

# Phasen der ISM



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

Abbildungen aus Genzel (1990)

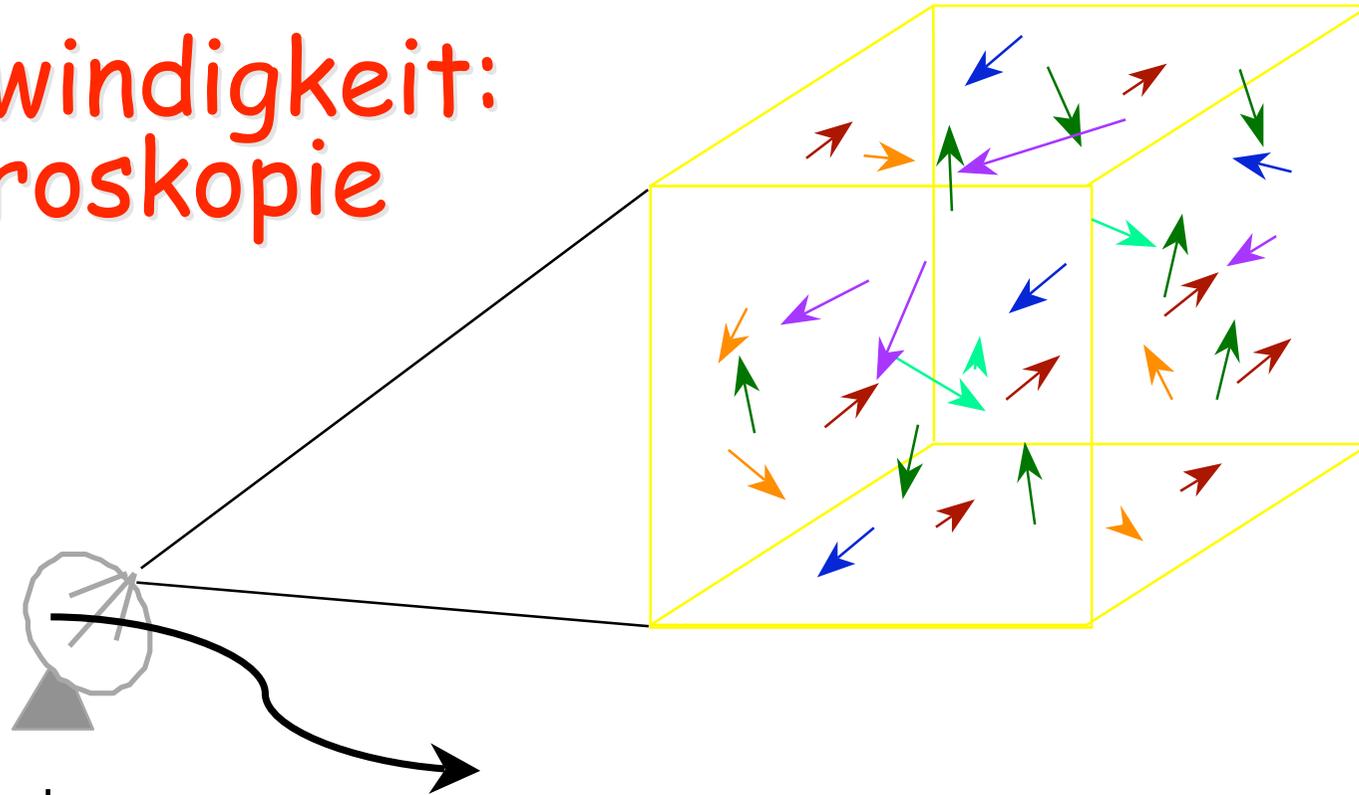


$A_V$  bezeichnet die Extinktion, dh. die Abschwächung der einfallenden Strahlung.

# 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 Doppler-Verschiebung der Linie

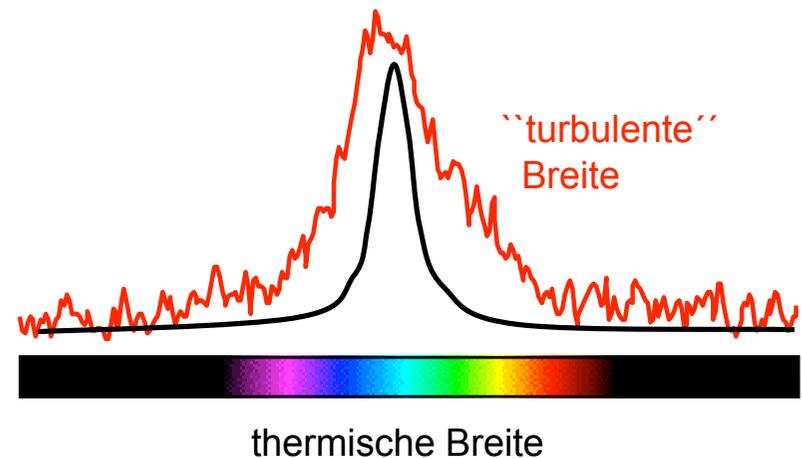
# Geschwindigkeit: Spektroskopie



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°

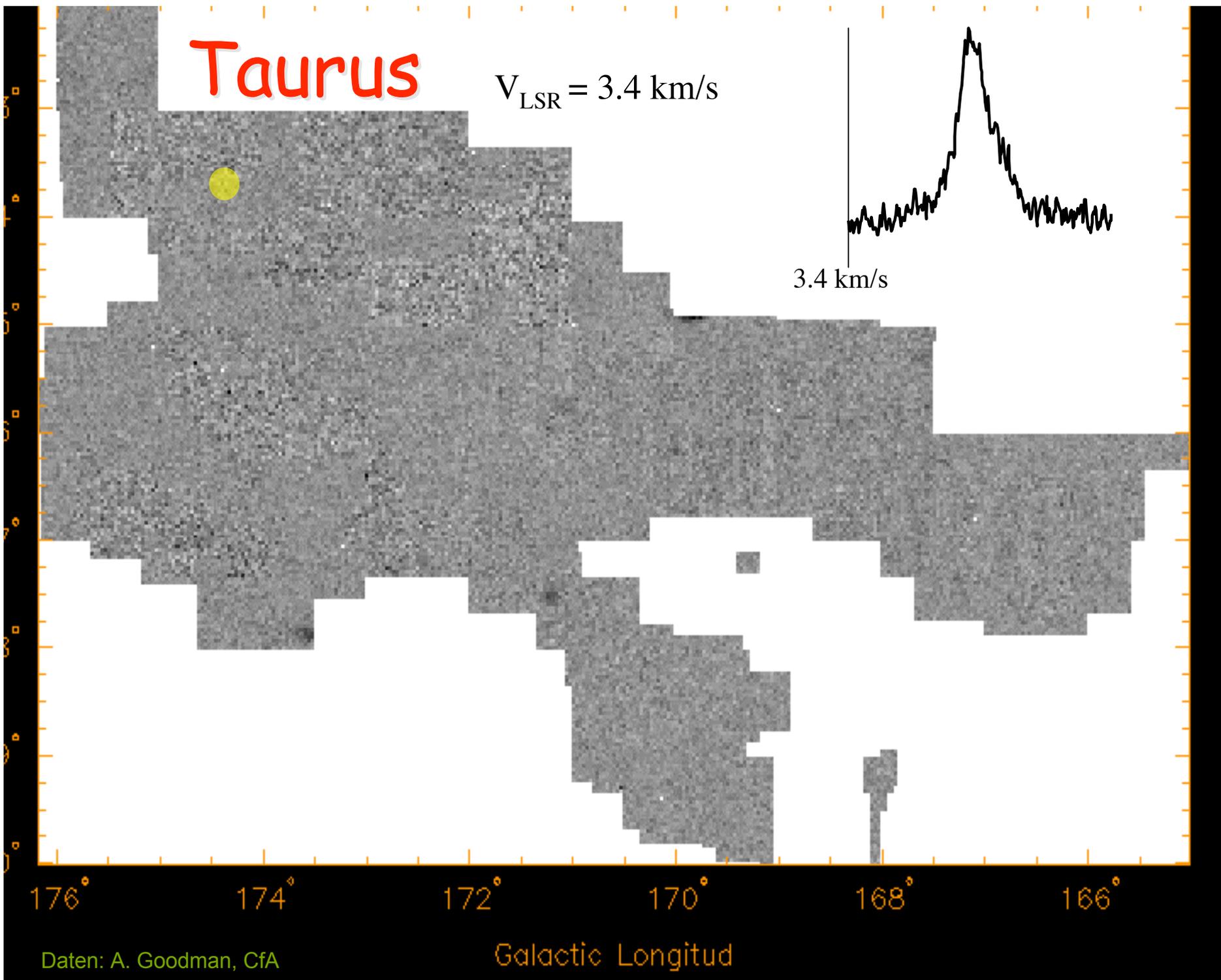
170°

168°

166°

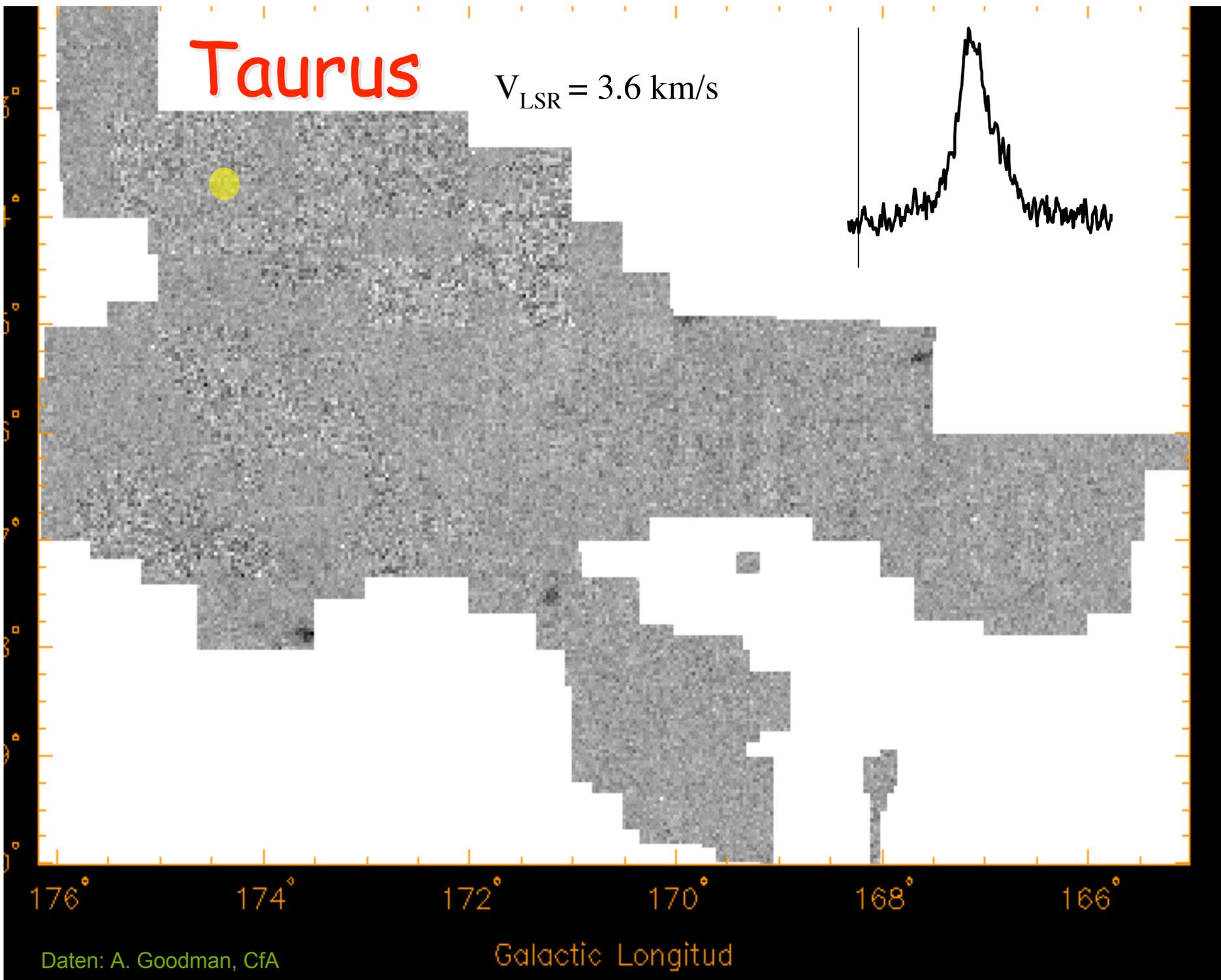
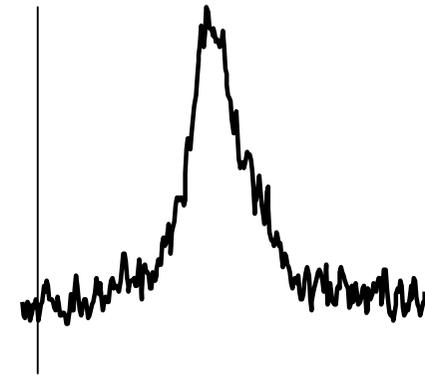
Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud



# Taurus

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



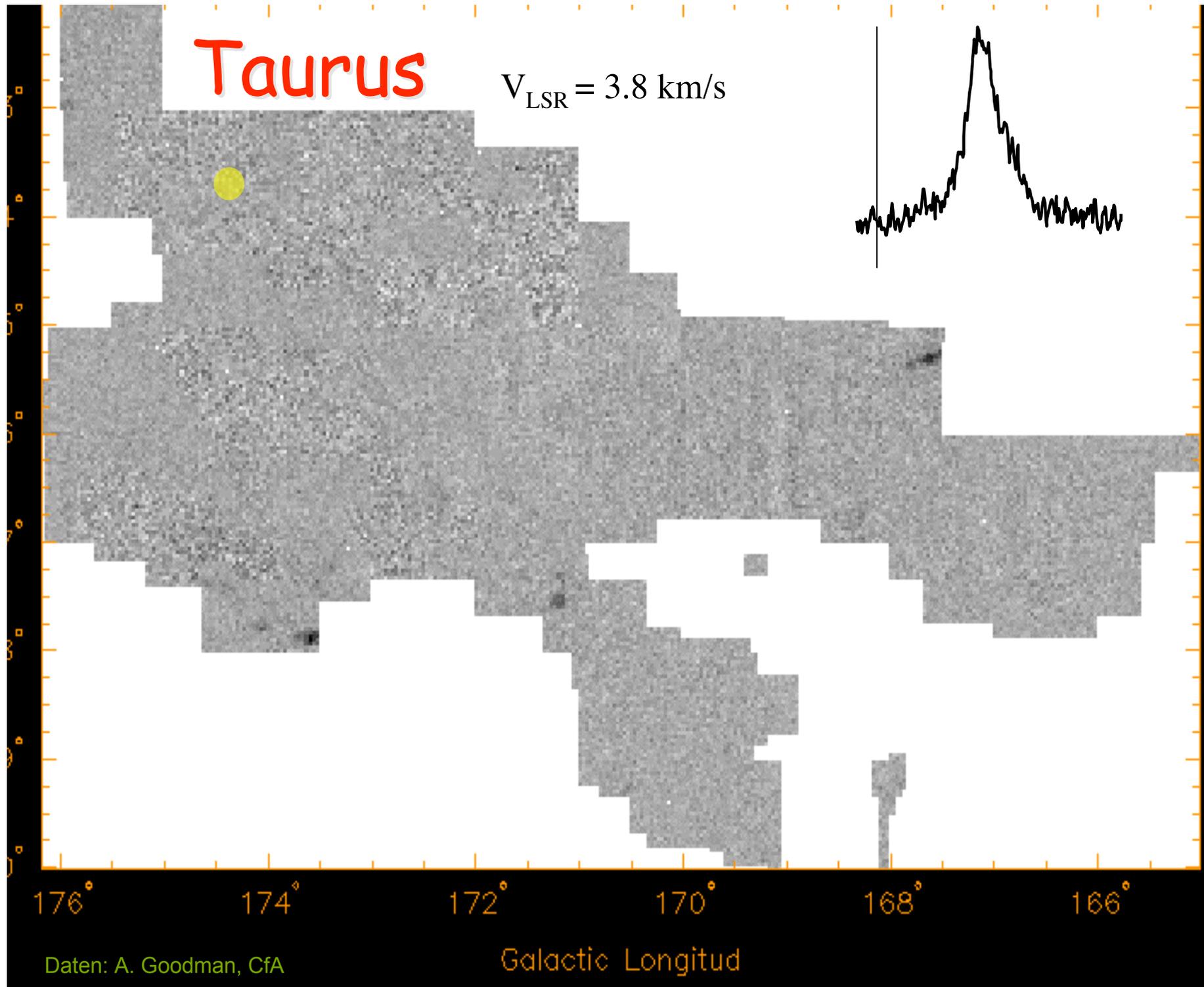
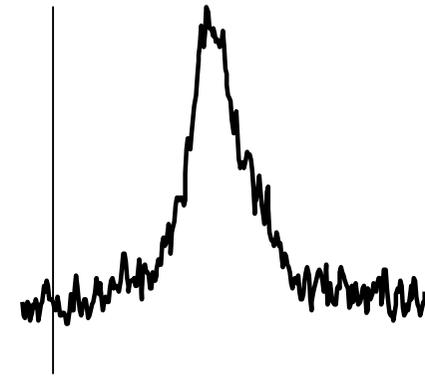
176° 174° 172° 170° 168° 166°

Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

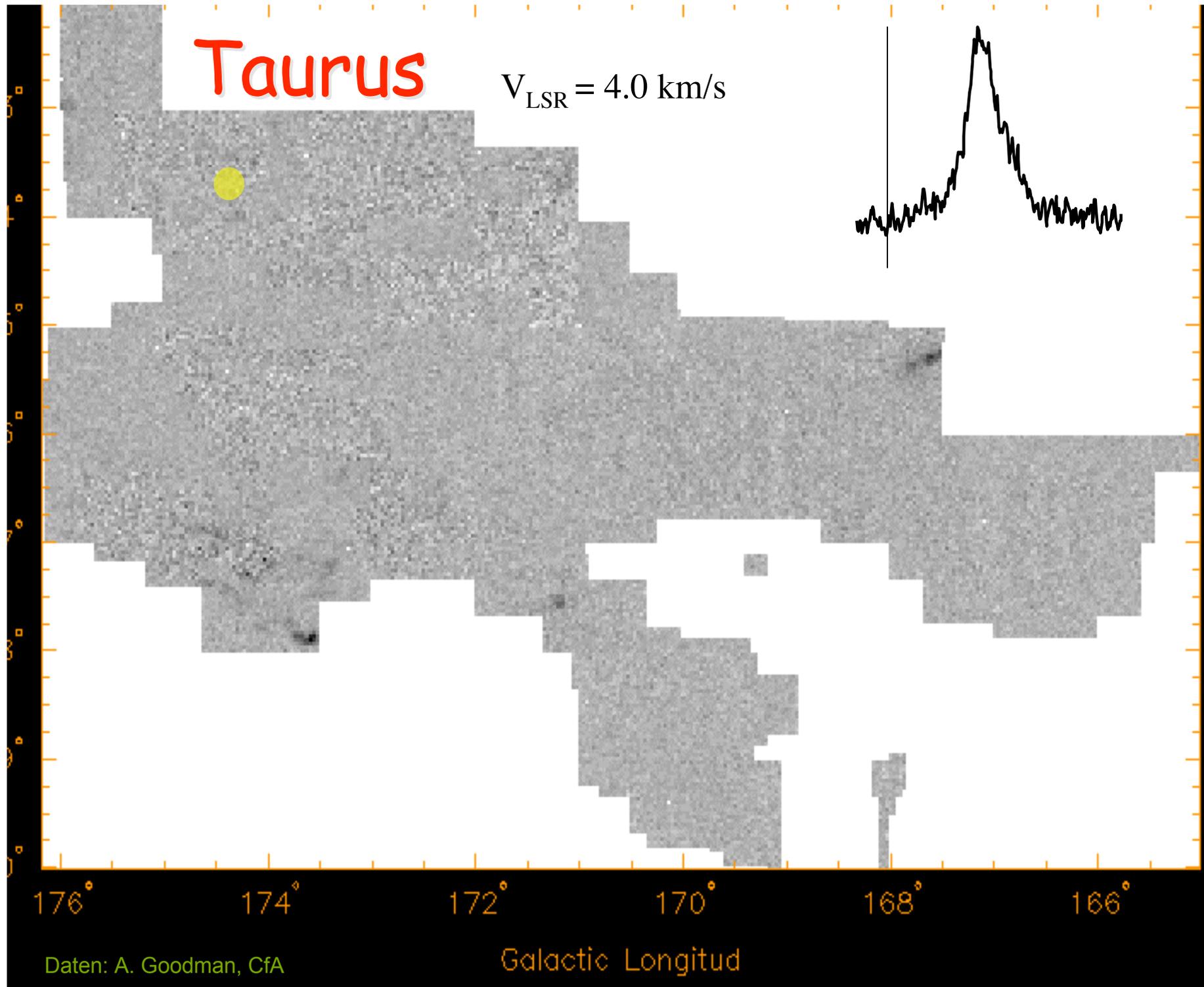
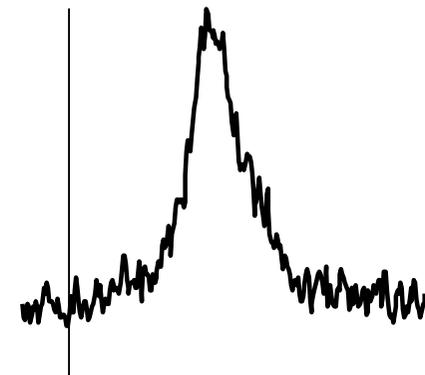


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

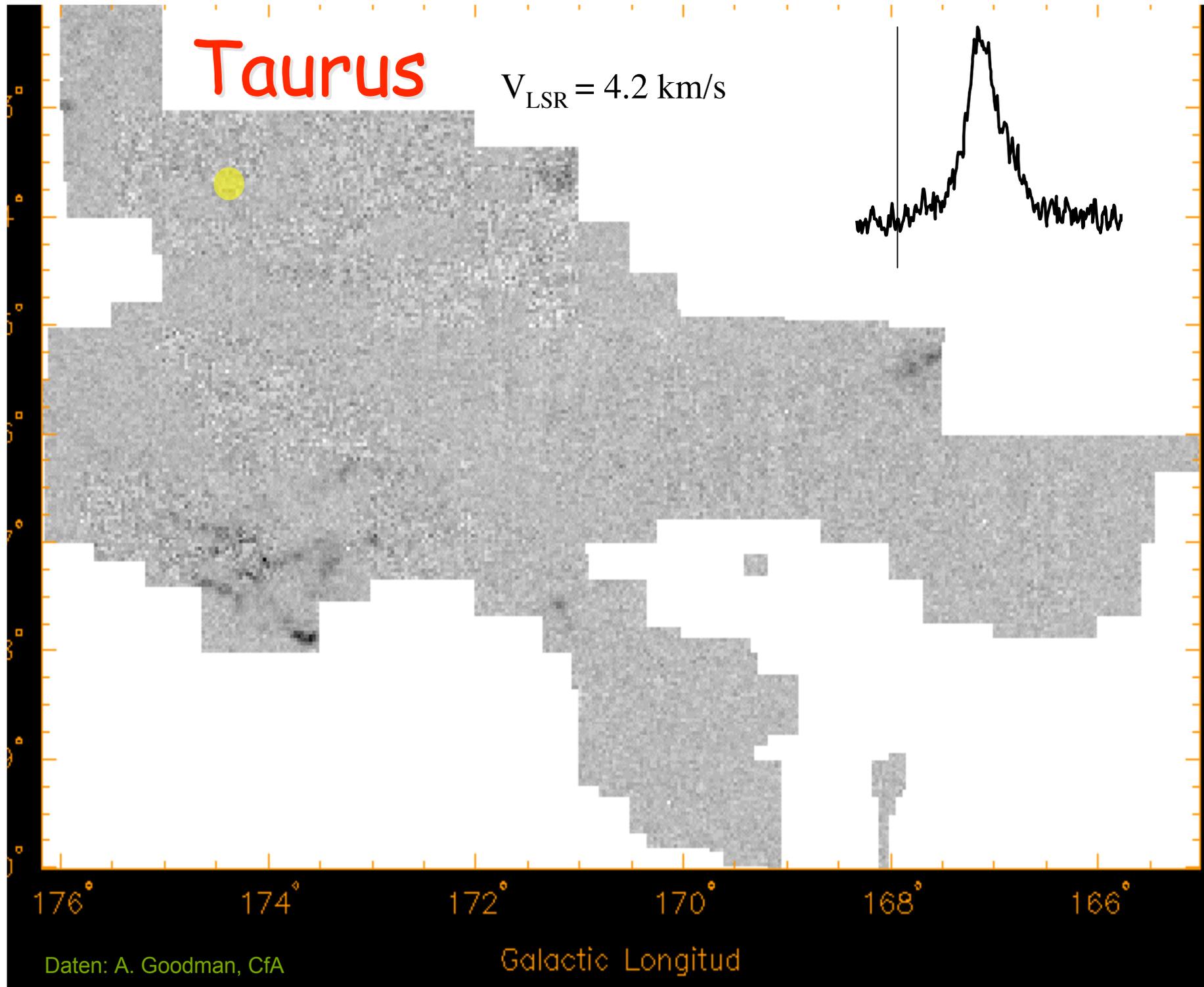
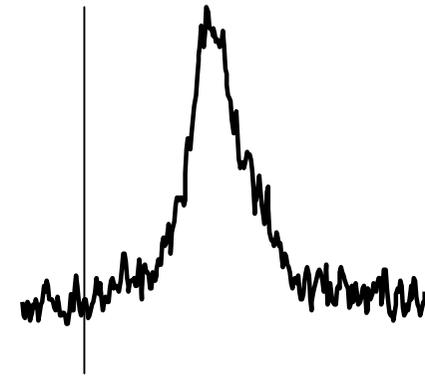


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

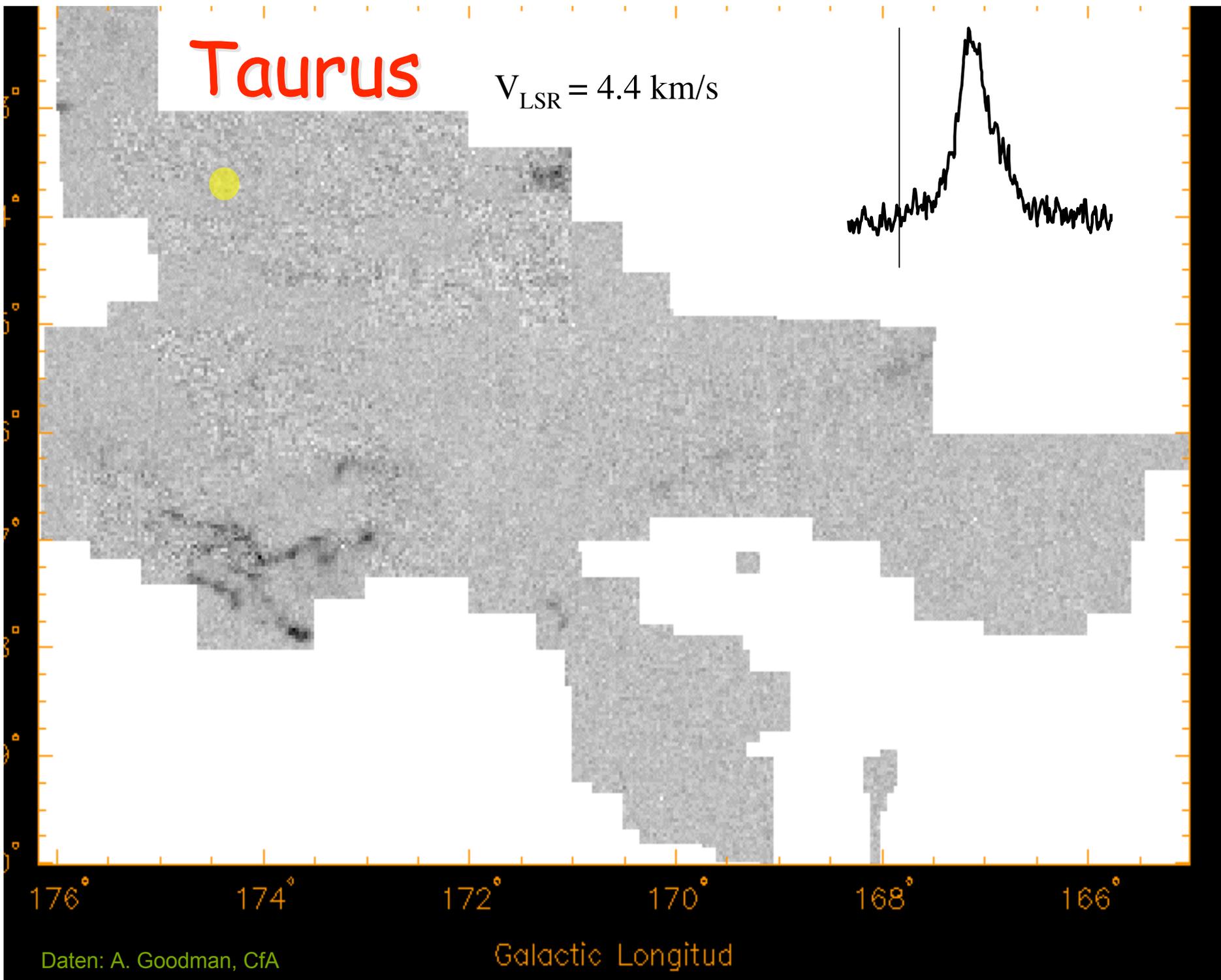
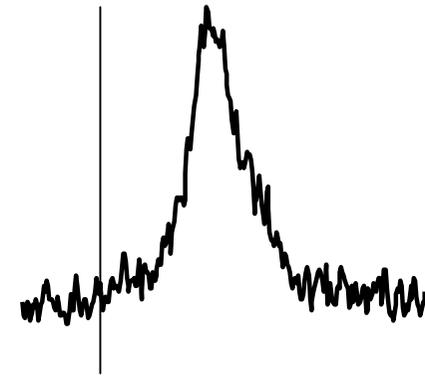


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

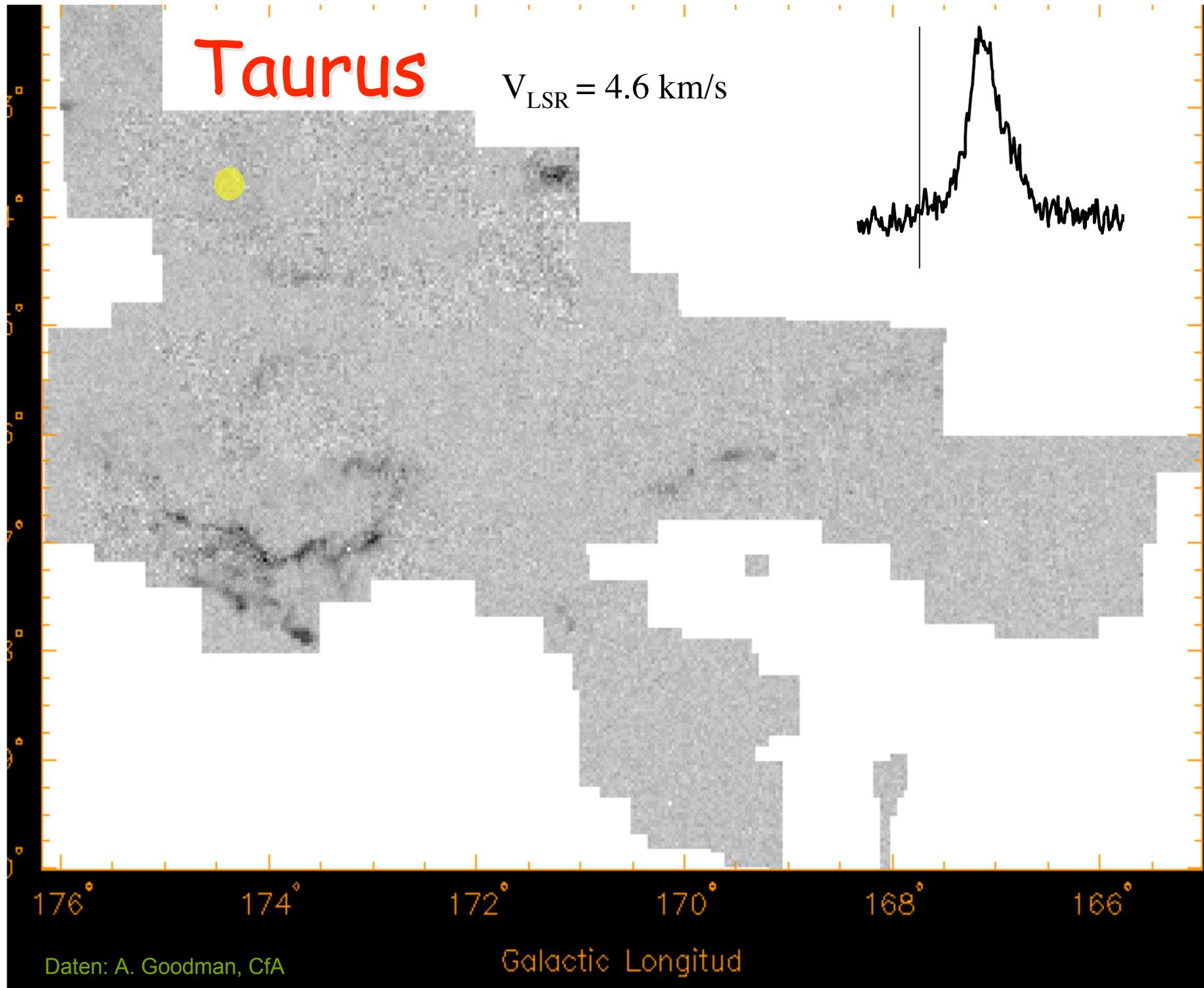
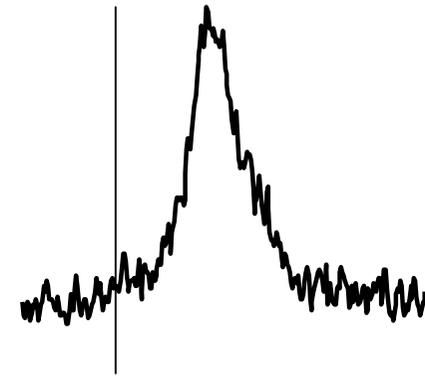


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

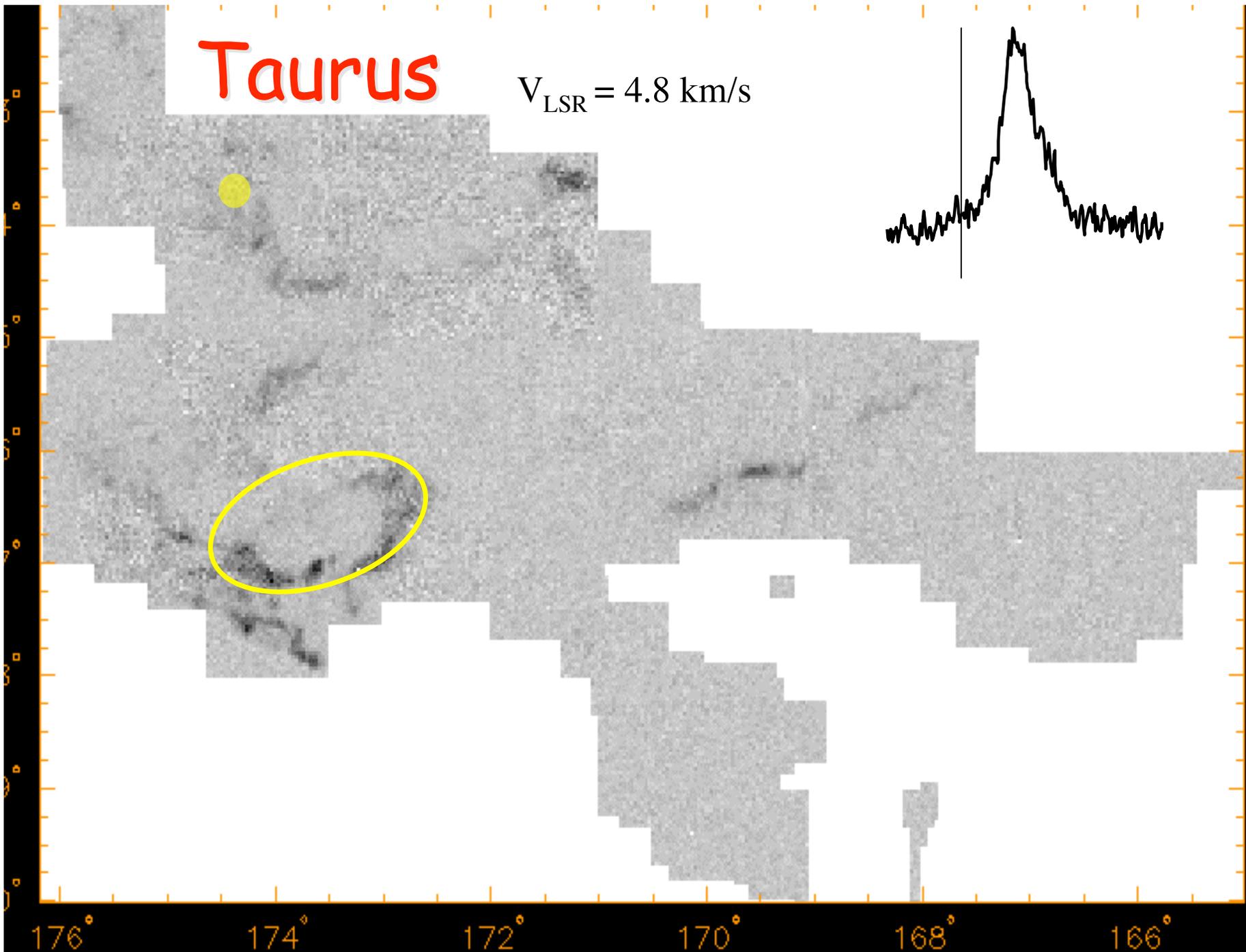
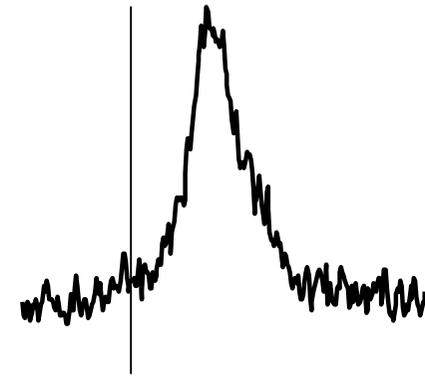


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

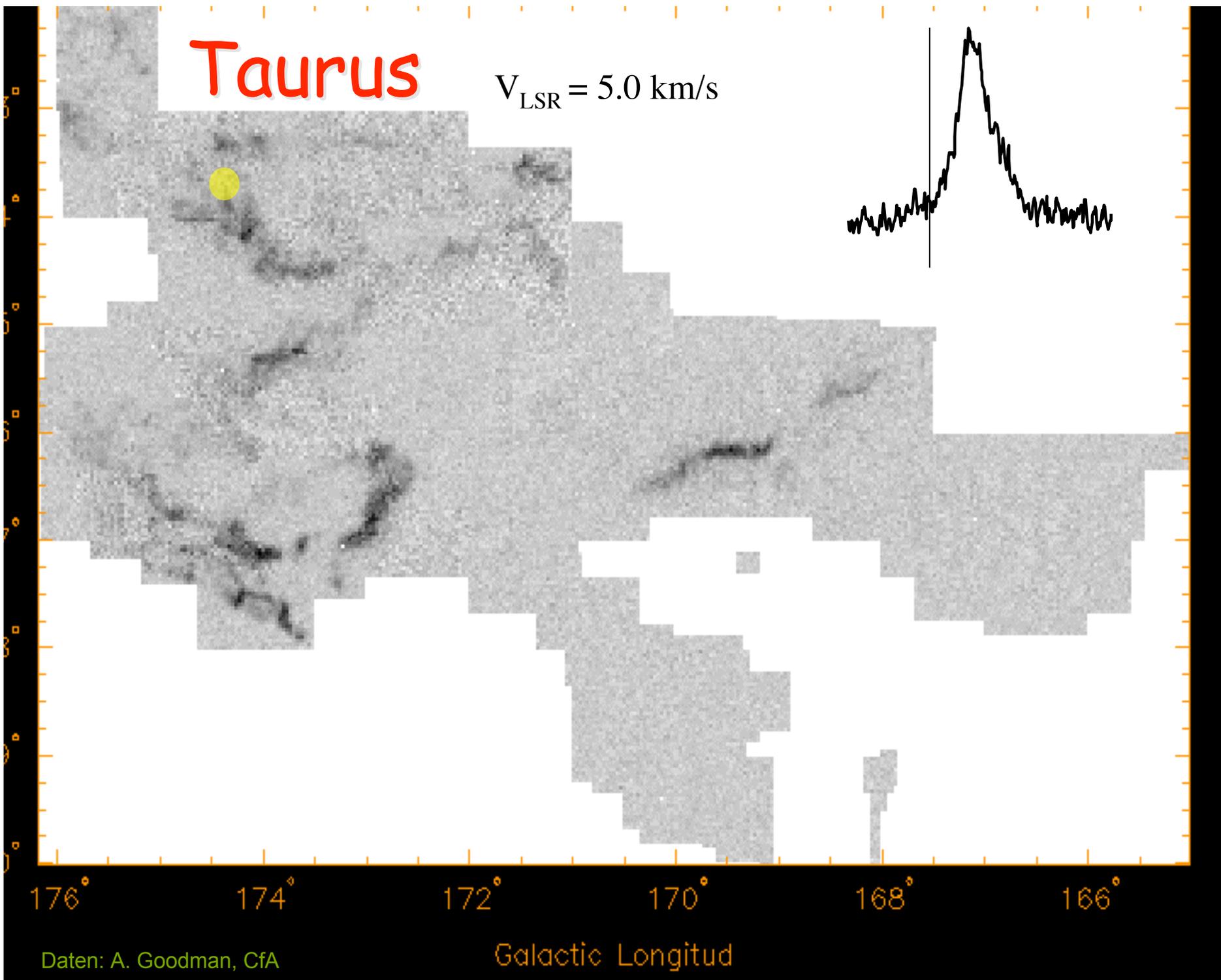
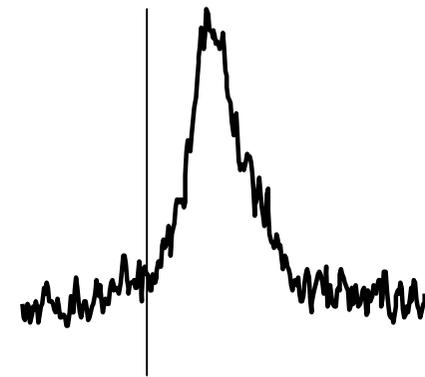


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

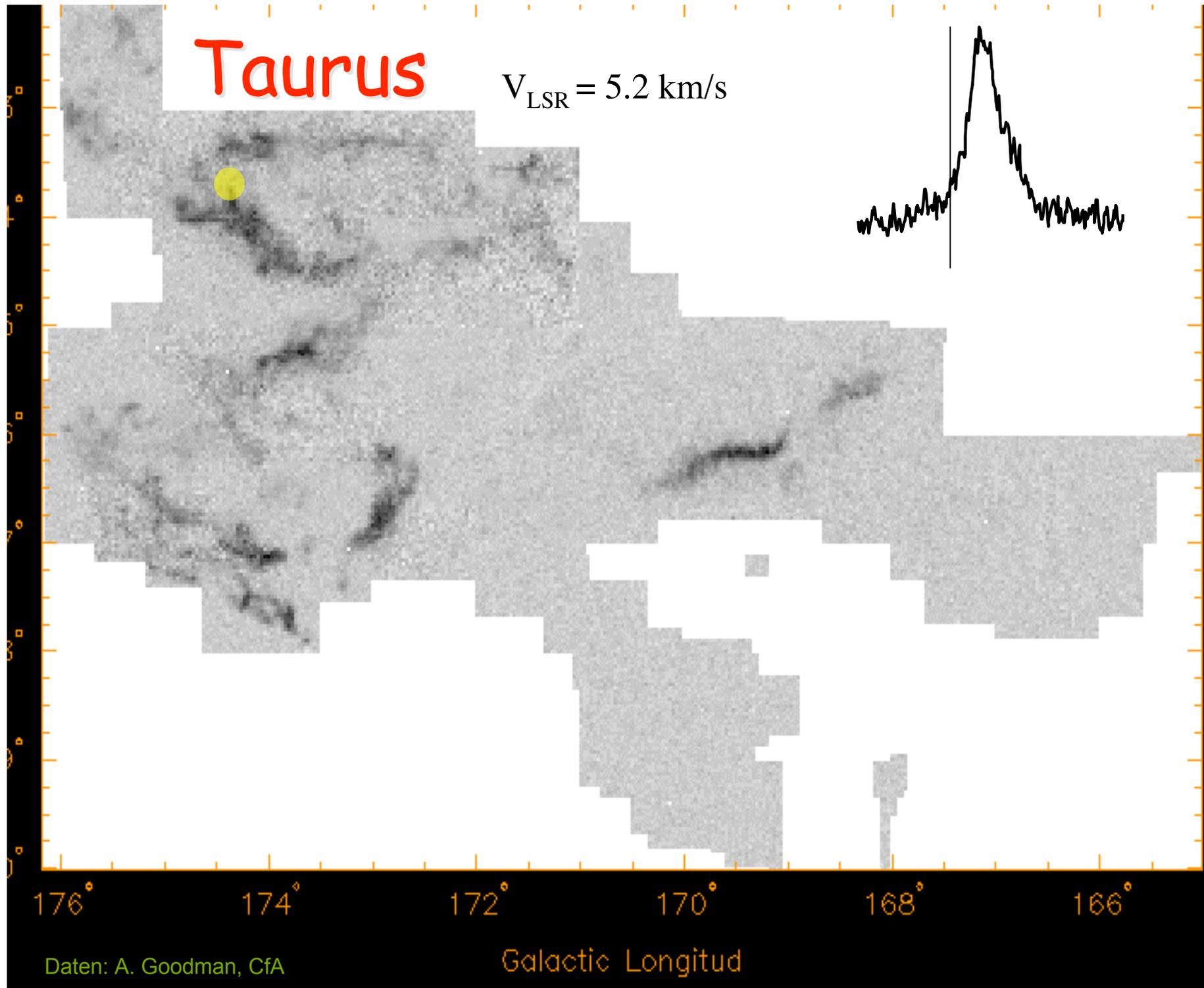
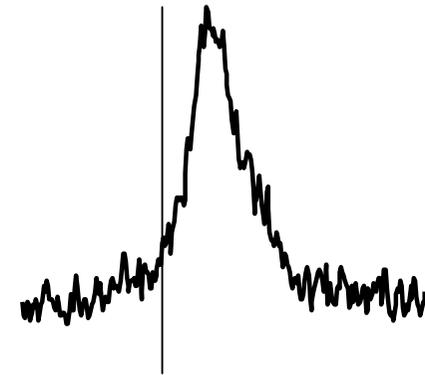


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

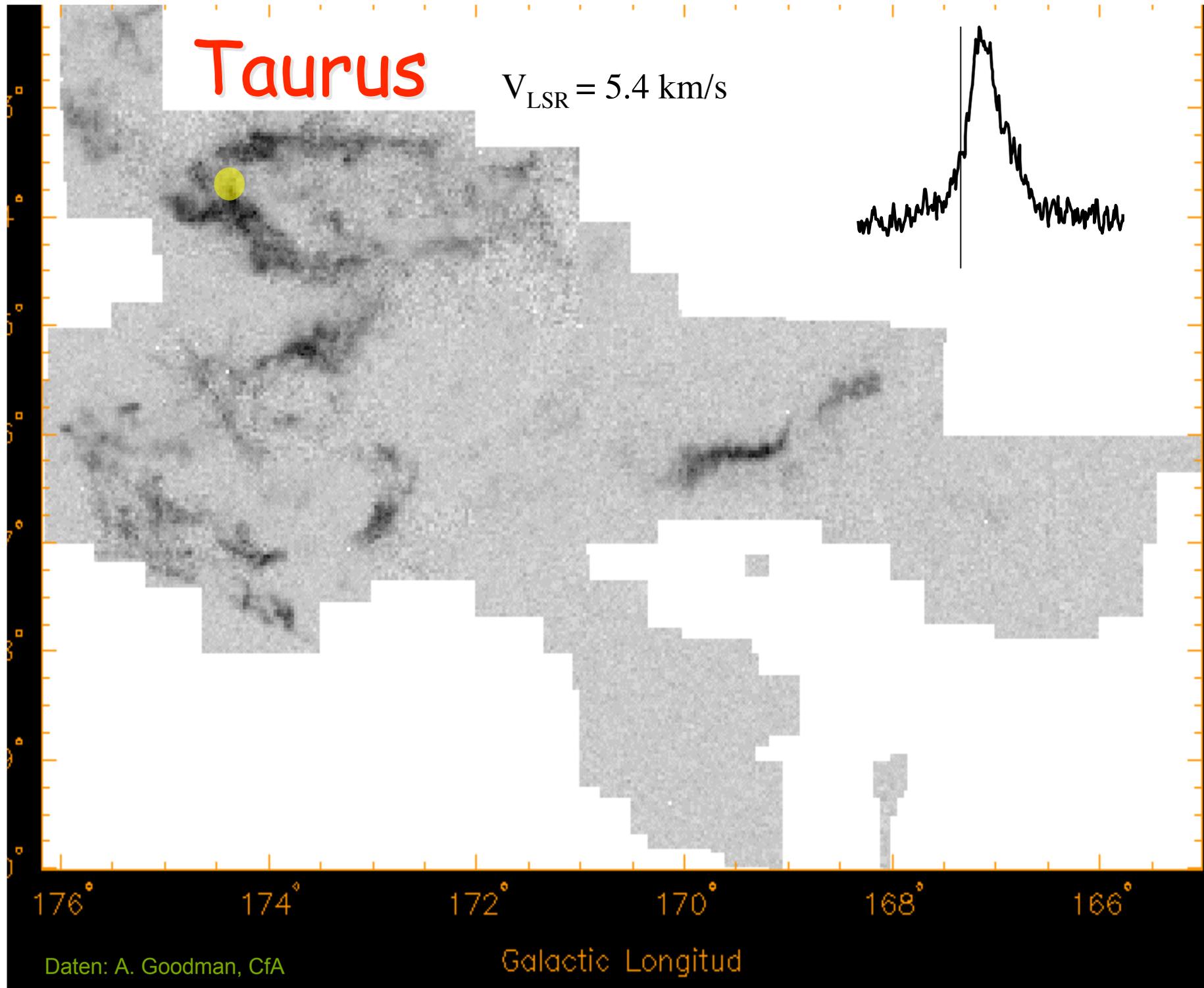
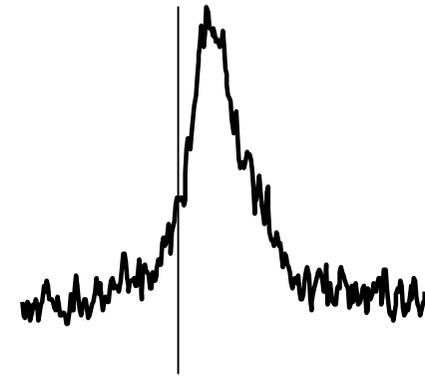


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

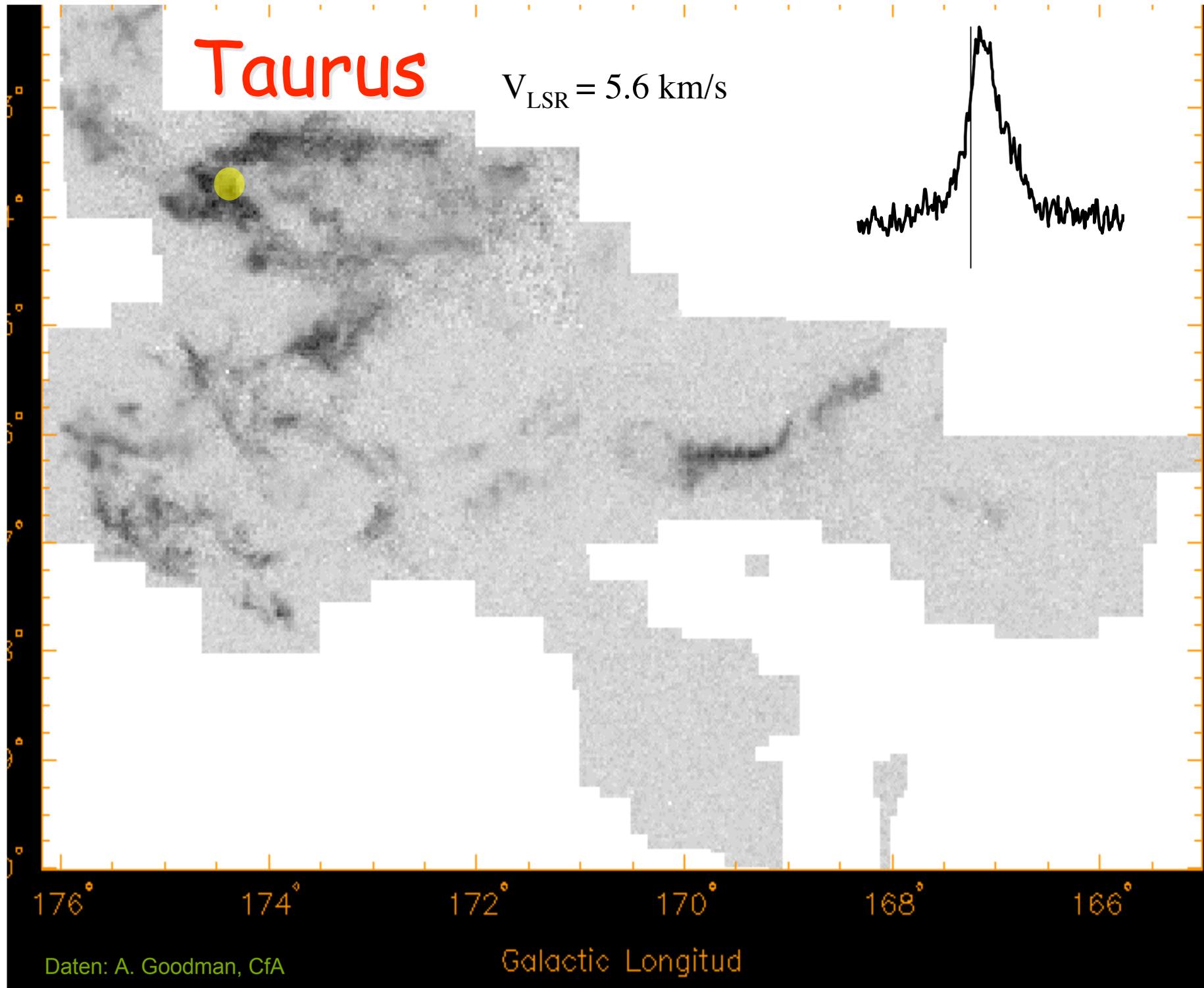
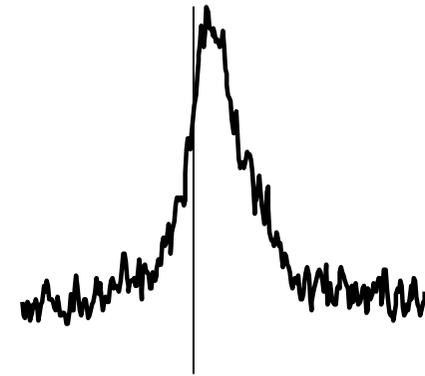


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

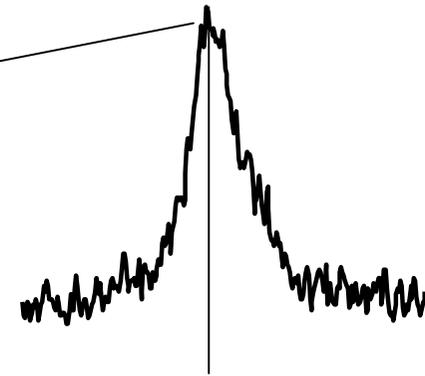


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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



176°

174°

172°

170°

168°

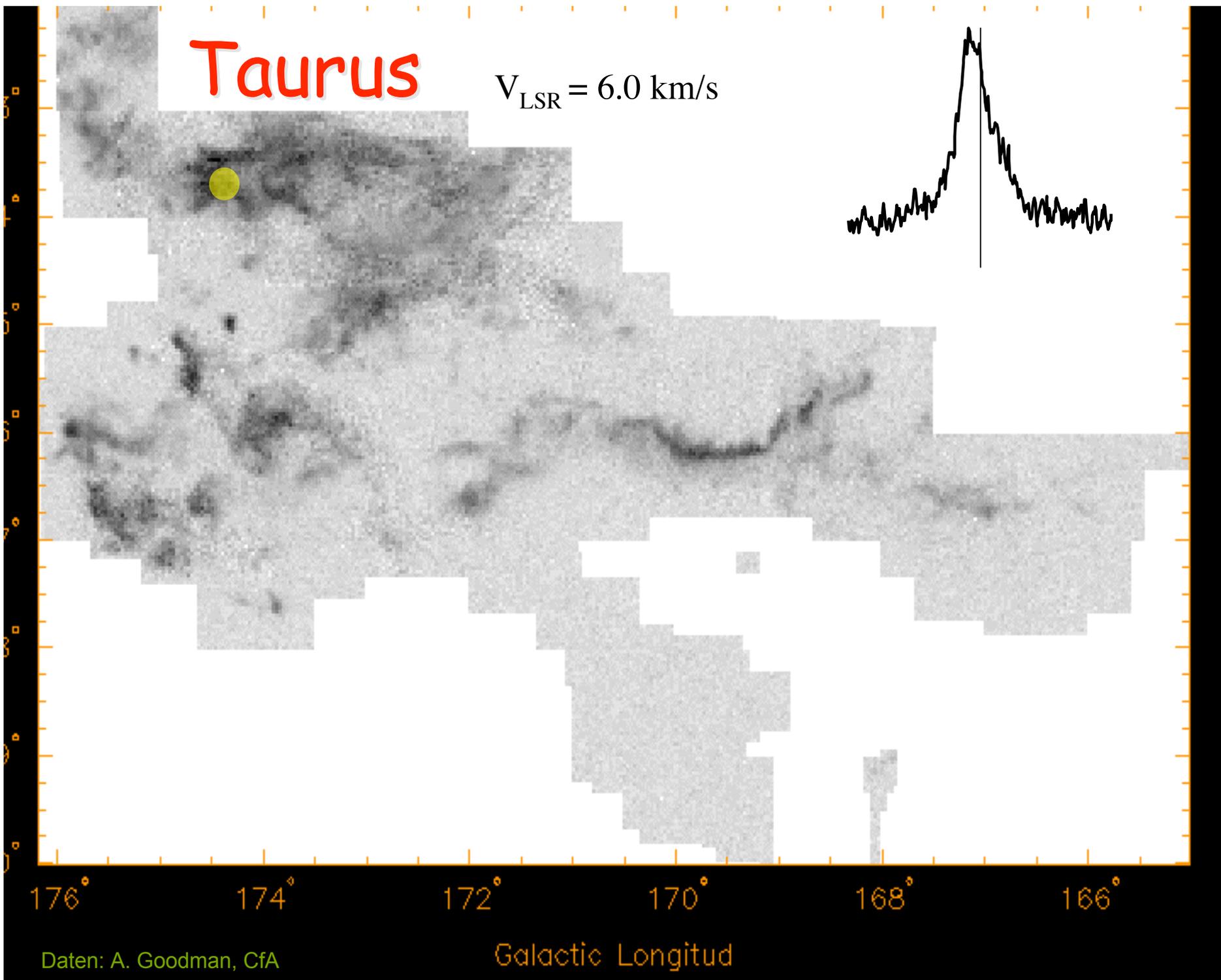
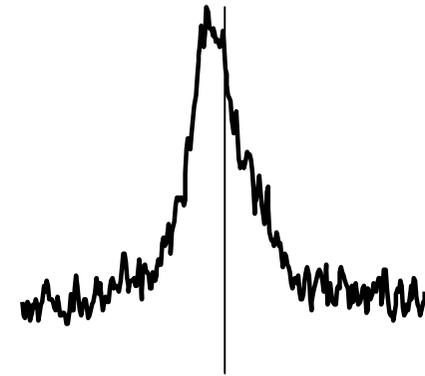
166°

Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

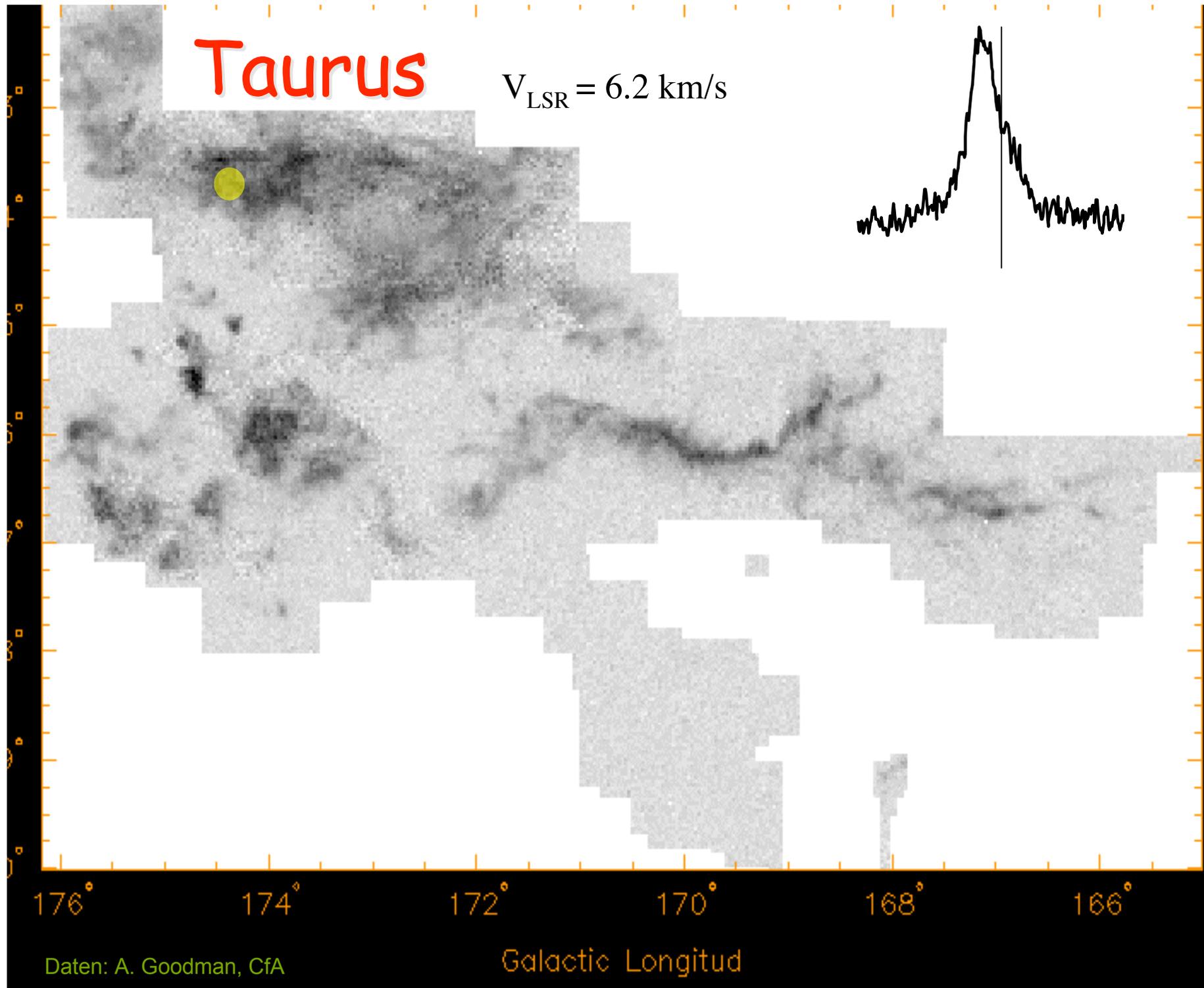
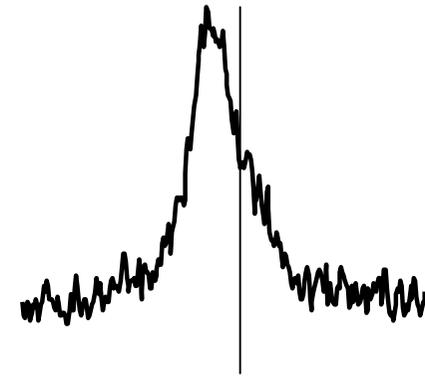


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

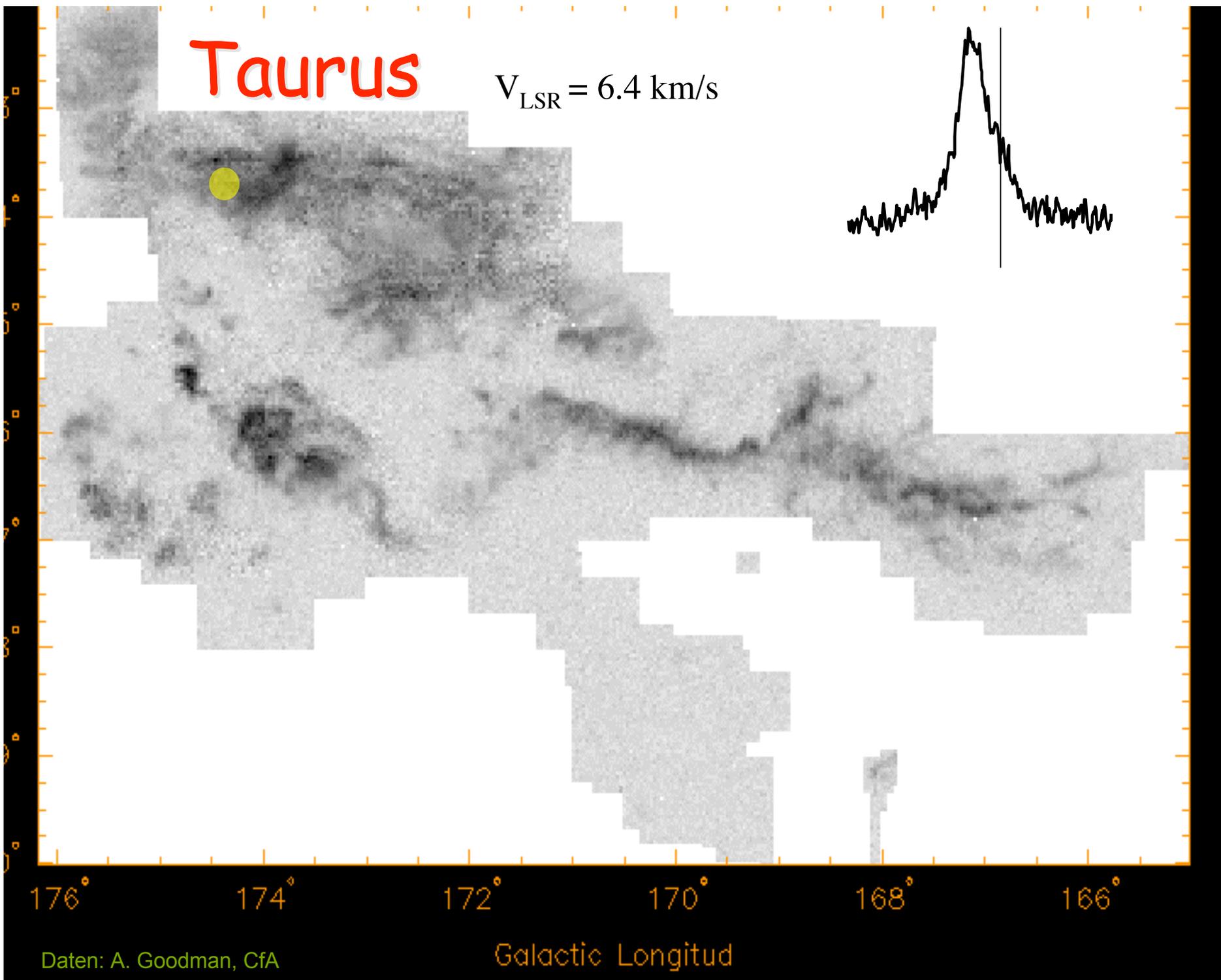
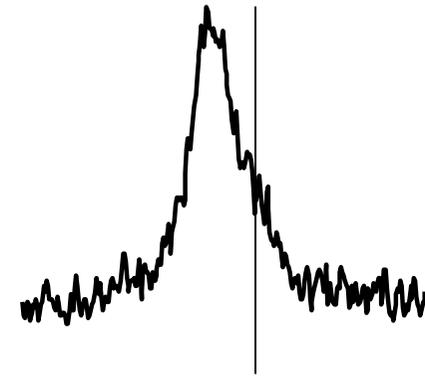


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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



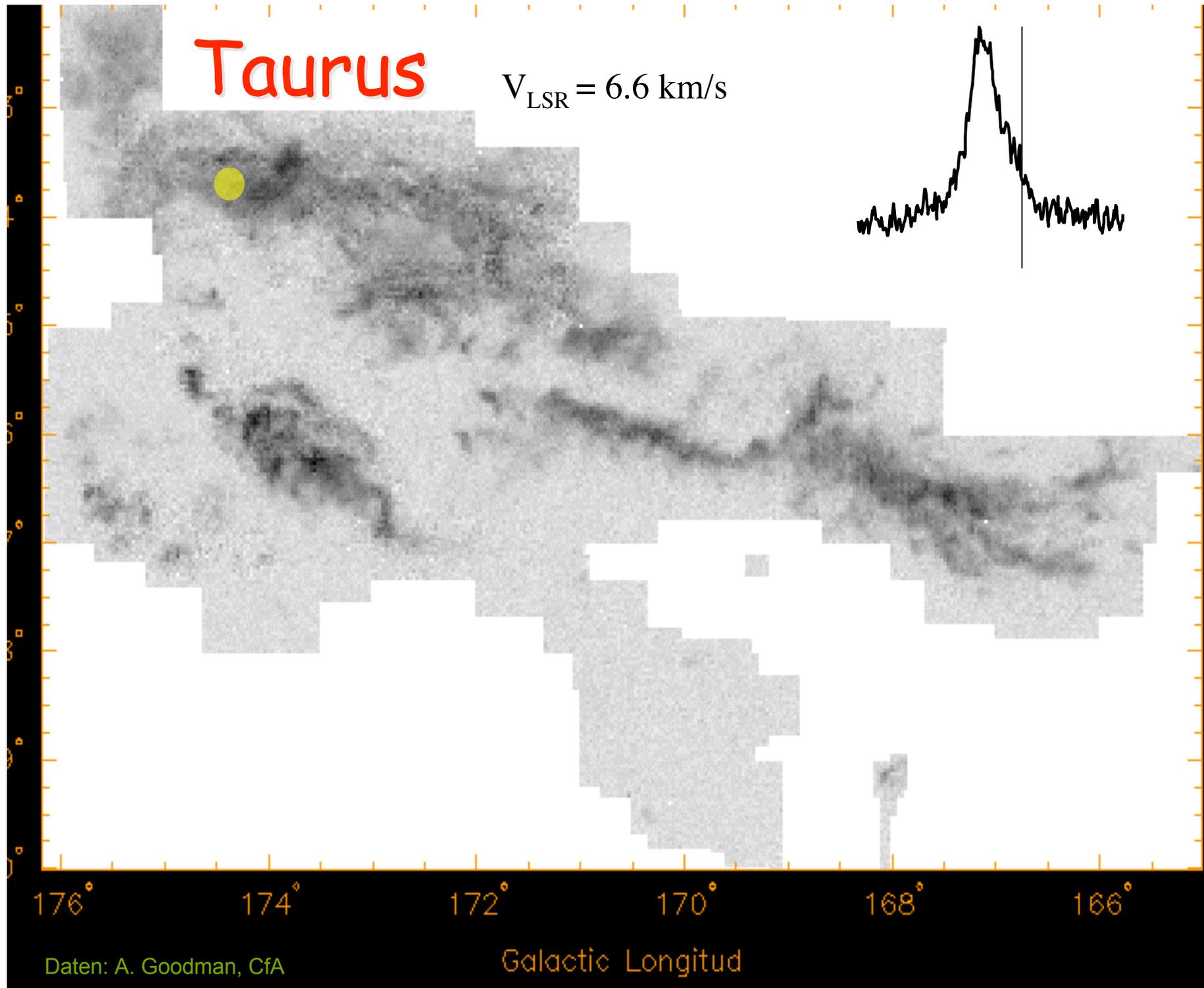
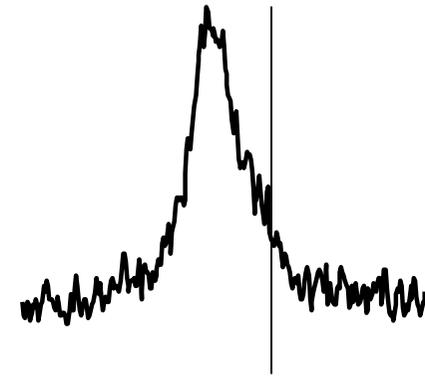
176° 174° 172° 170° 168° 166°

Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

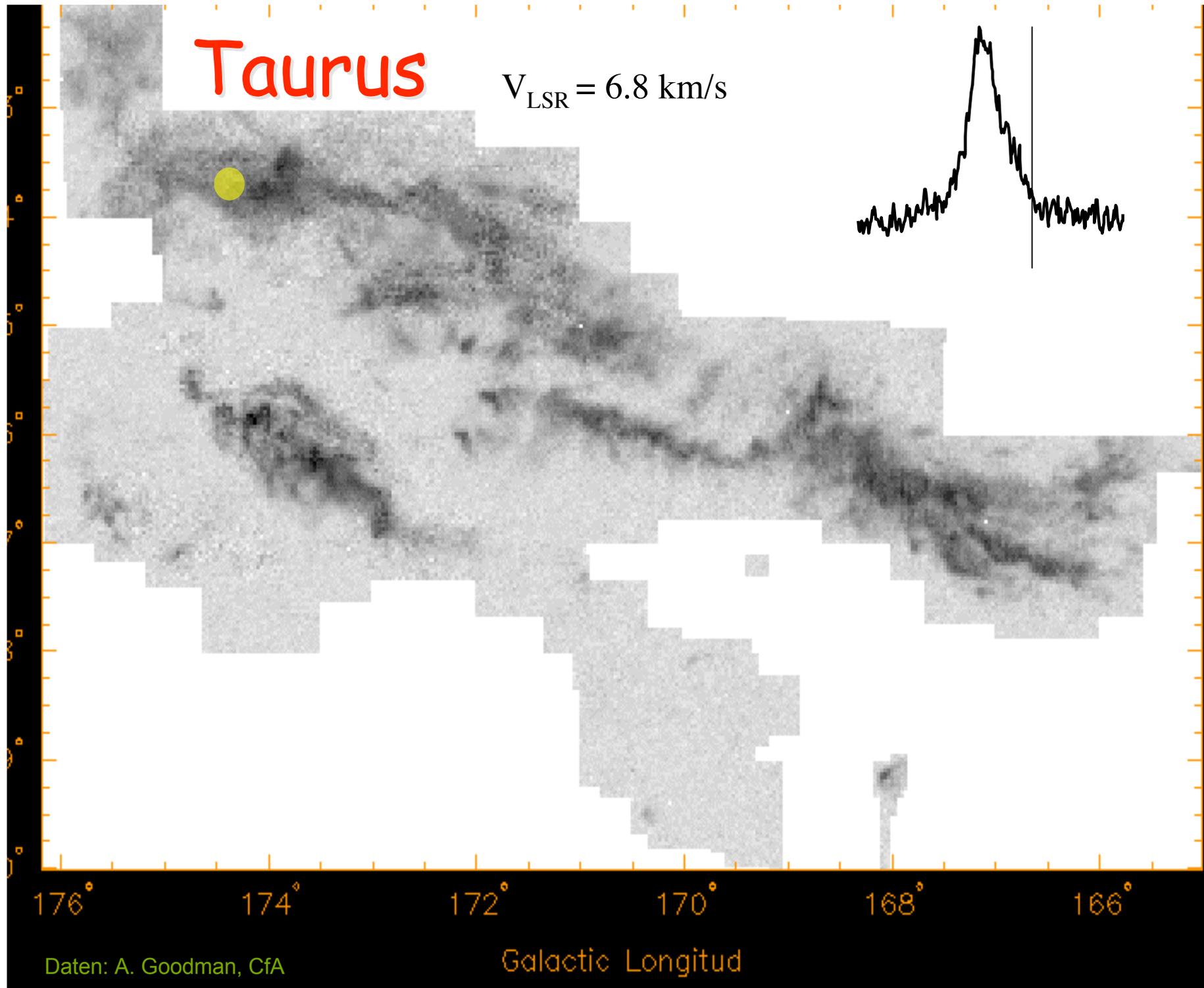
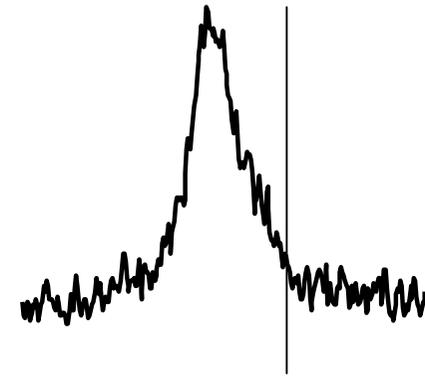


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

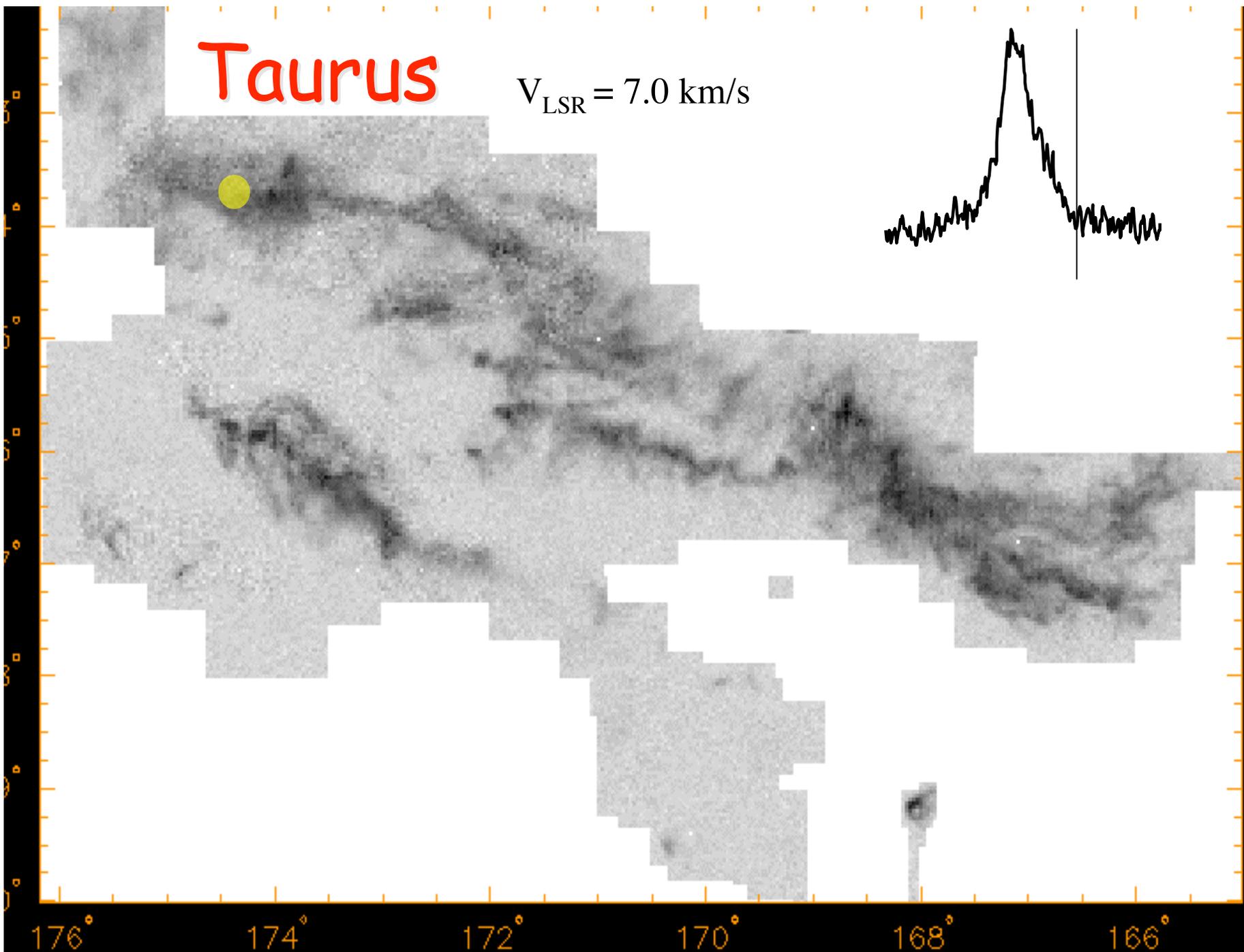
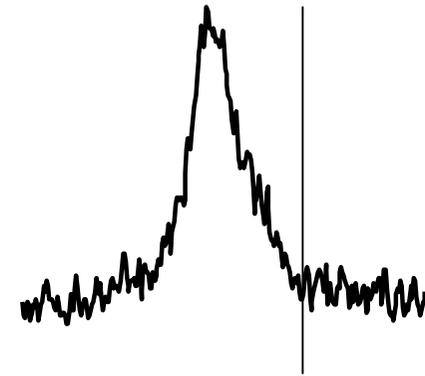


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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



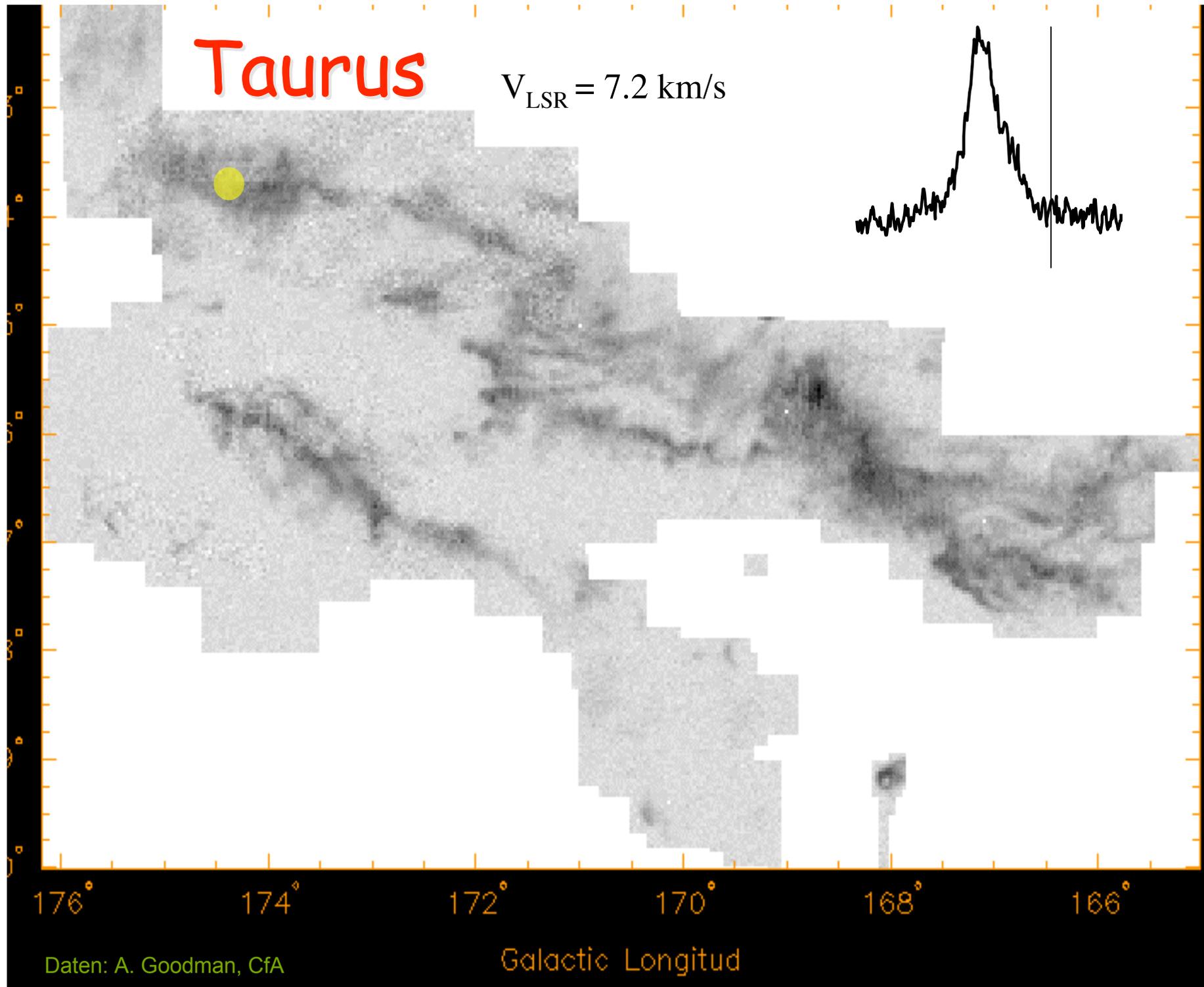
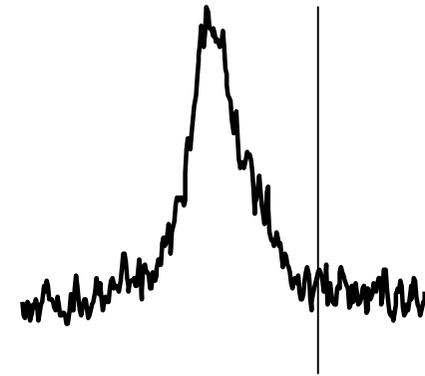
176° 174° 172° 170° 168° 166°

Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

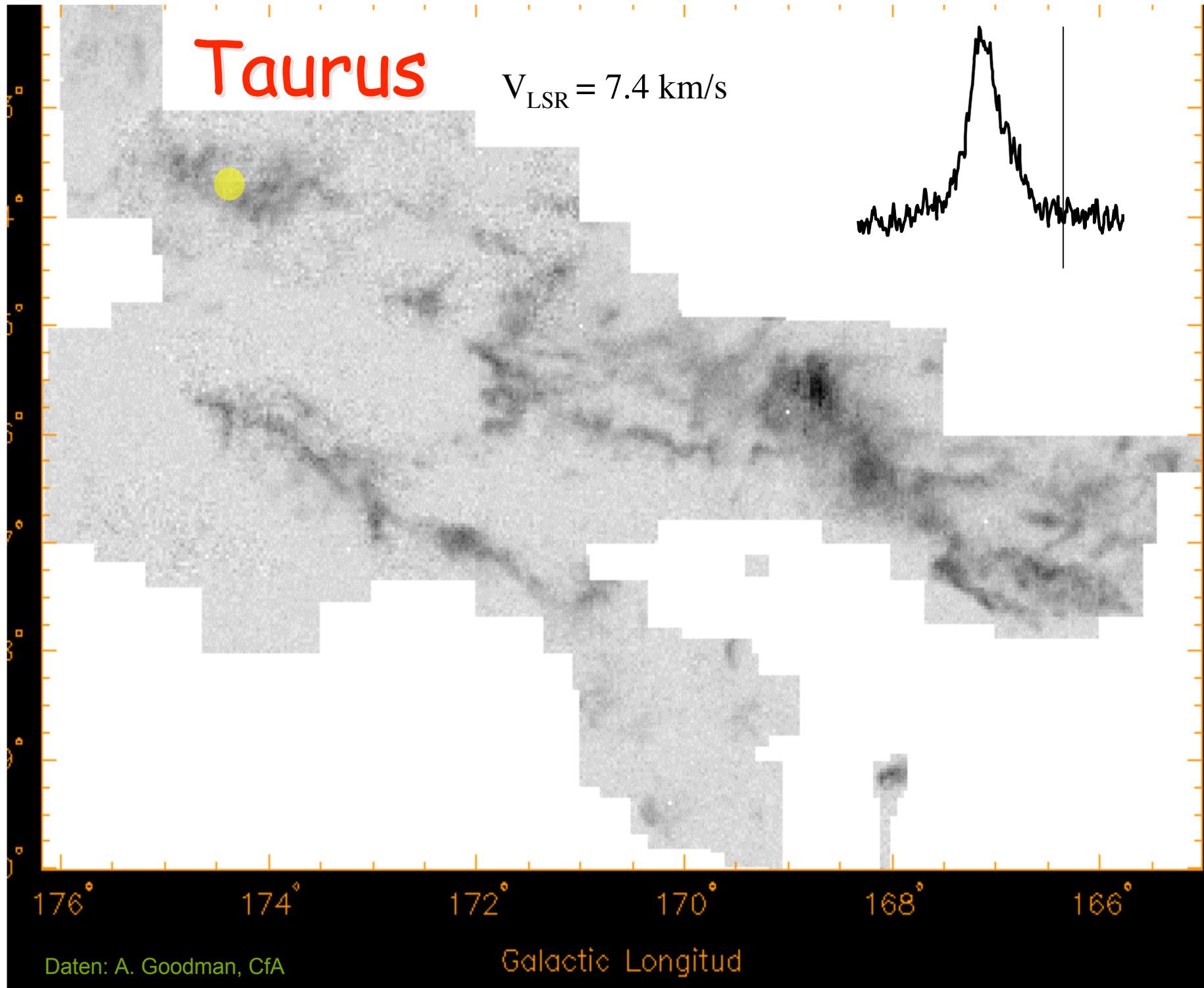
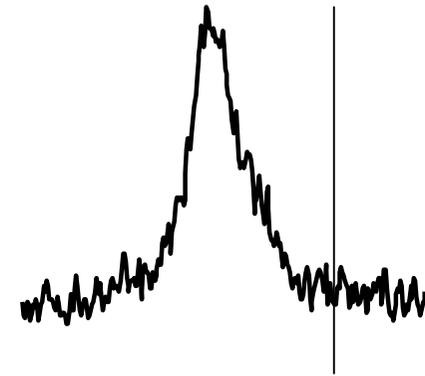


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

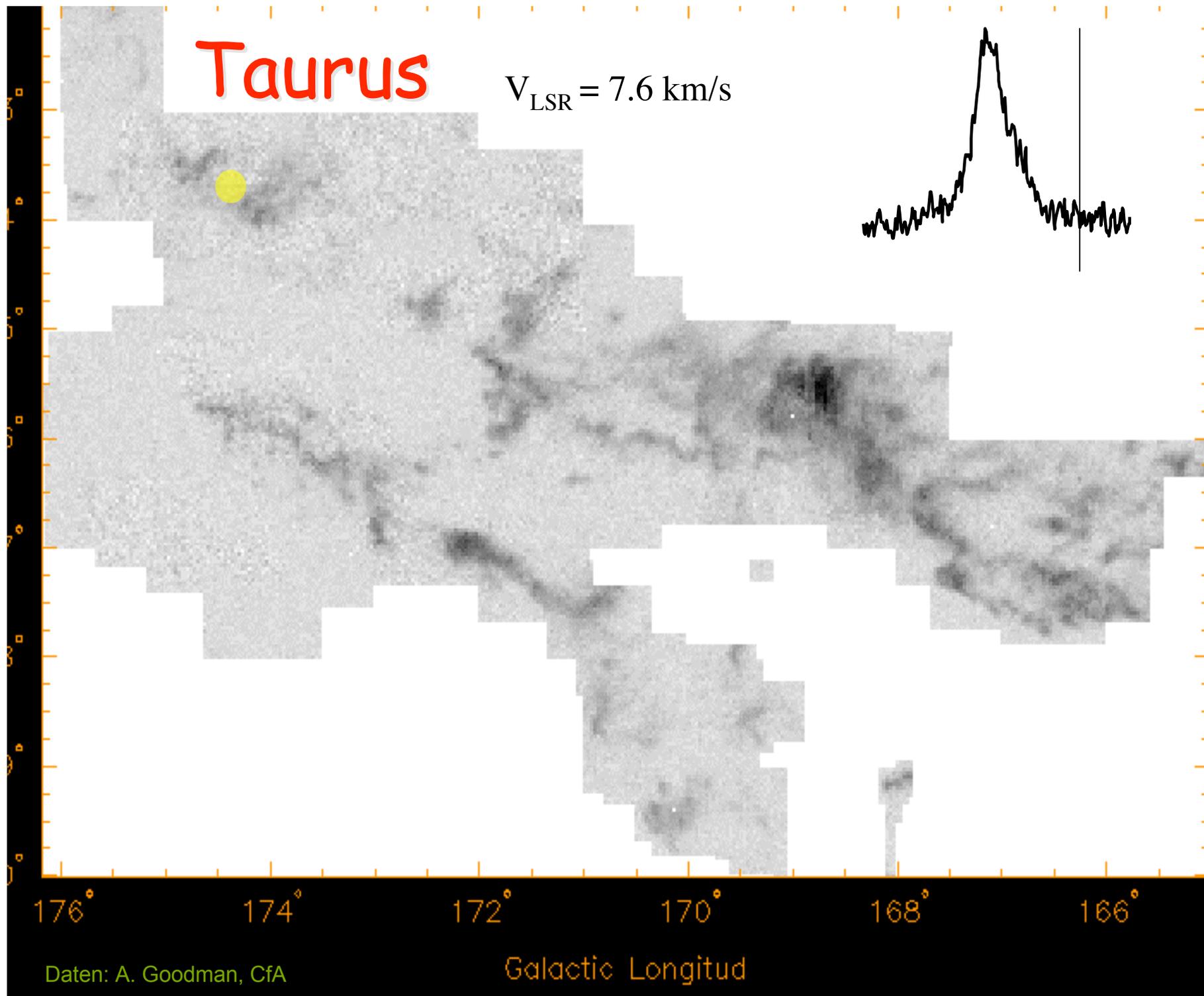
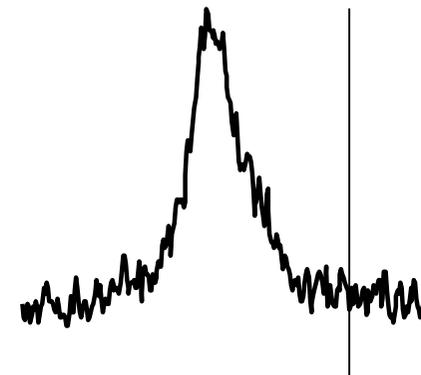


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

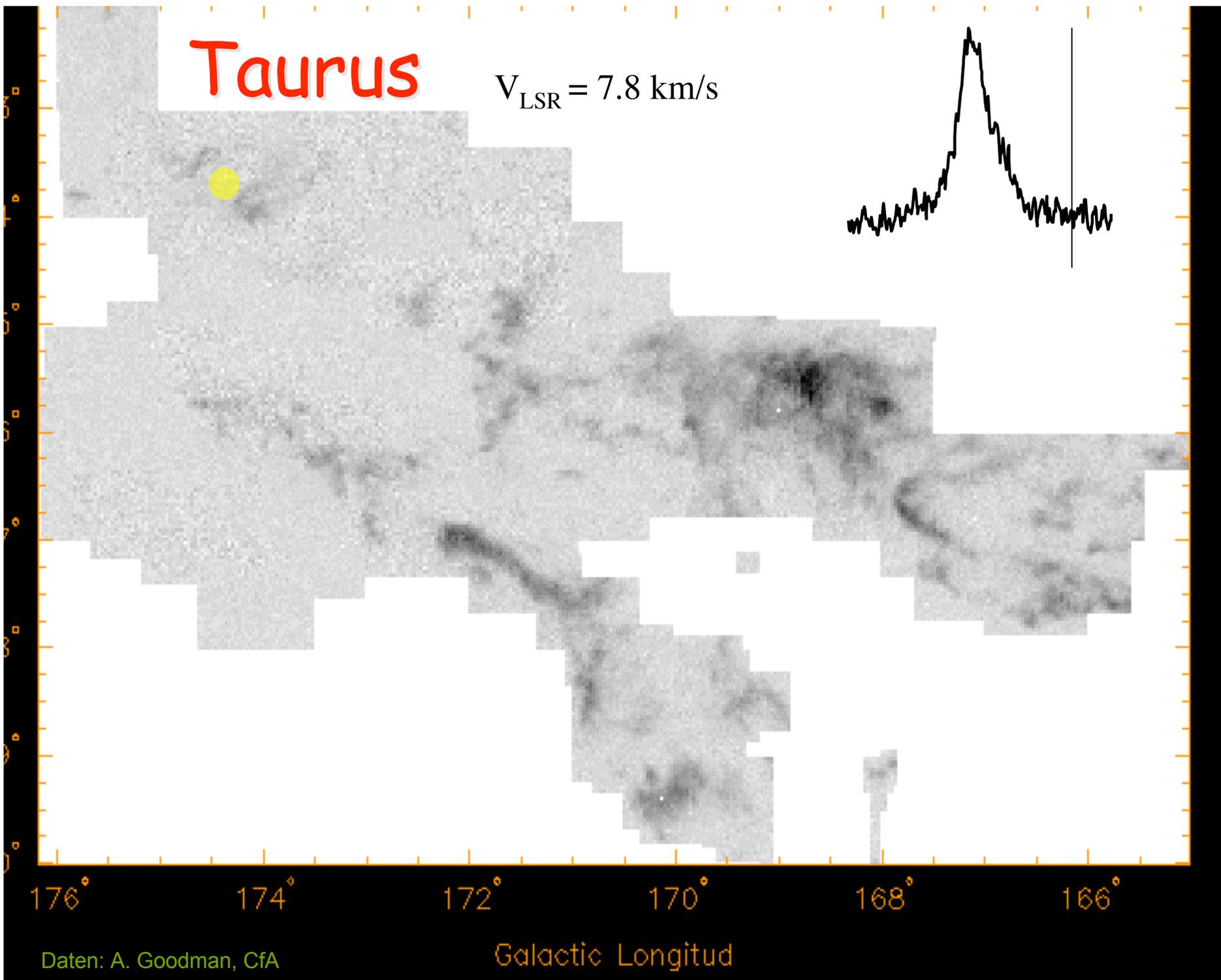
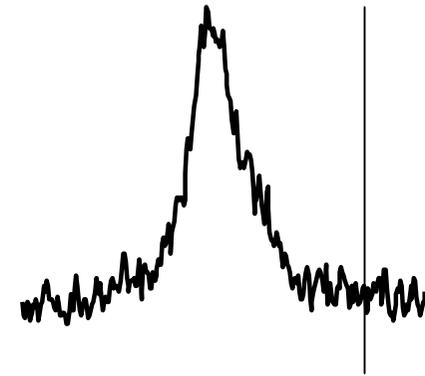


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

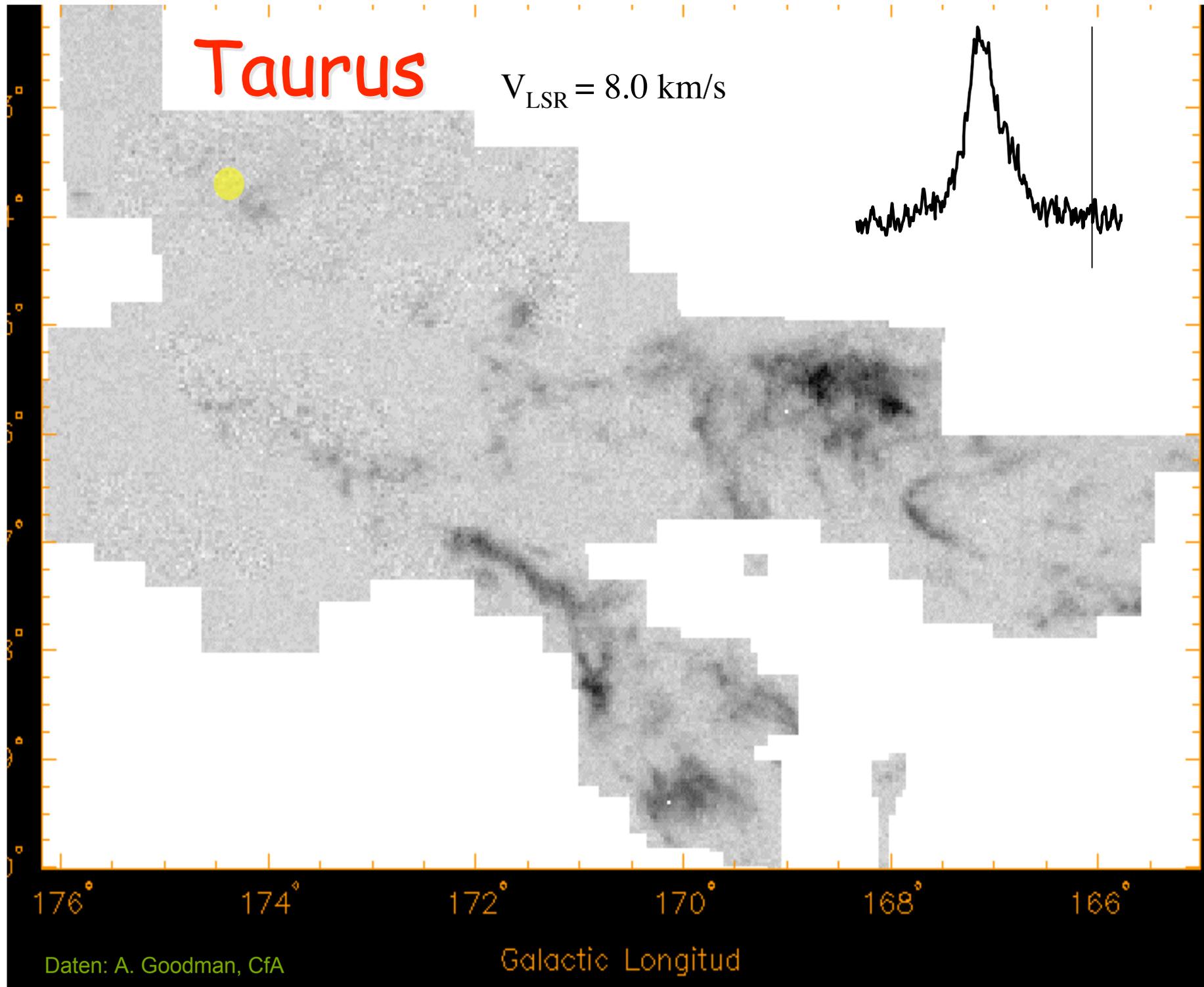
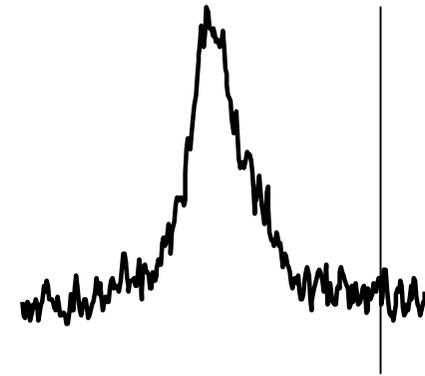


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

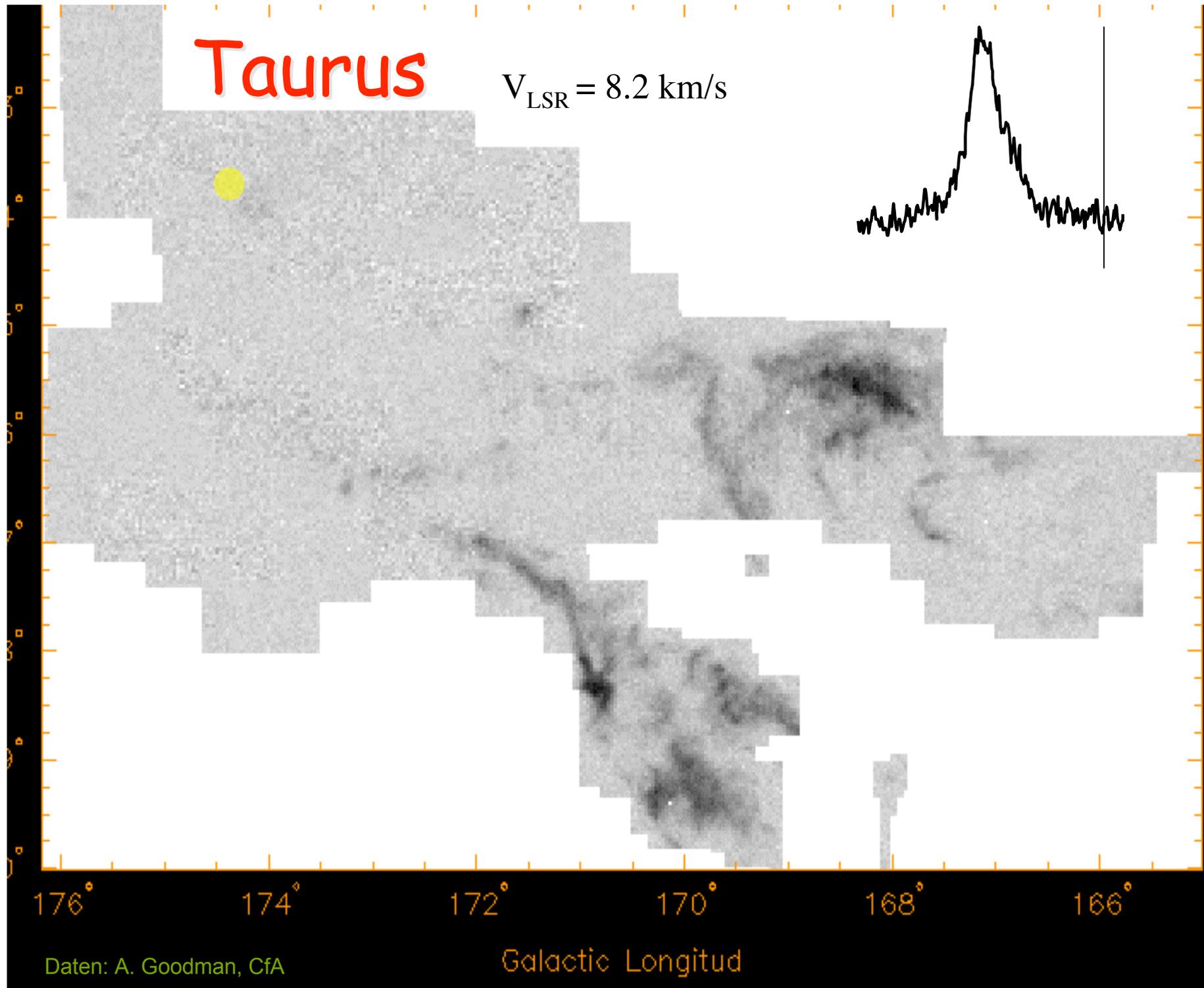
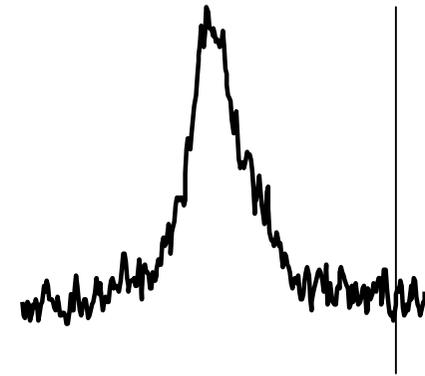


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

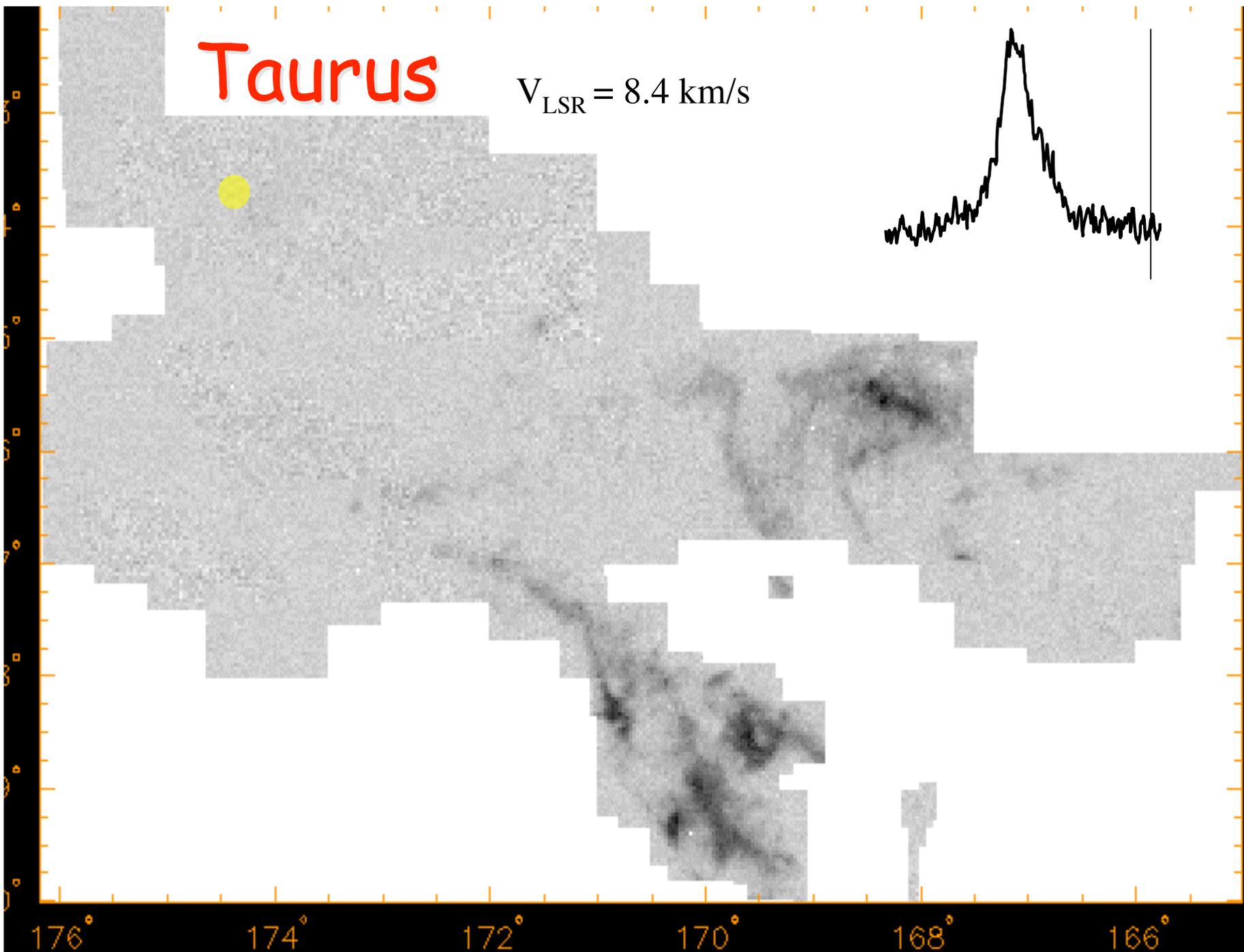
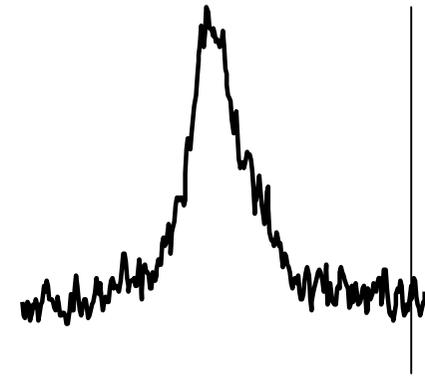


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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



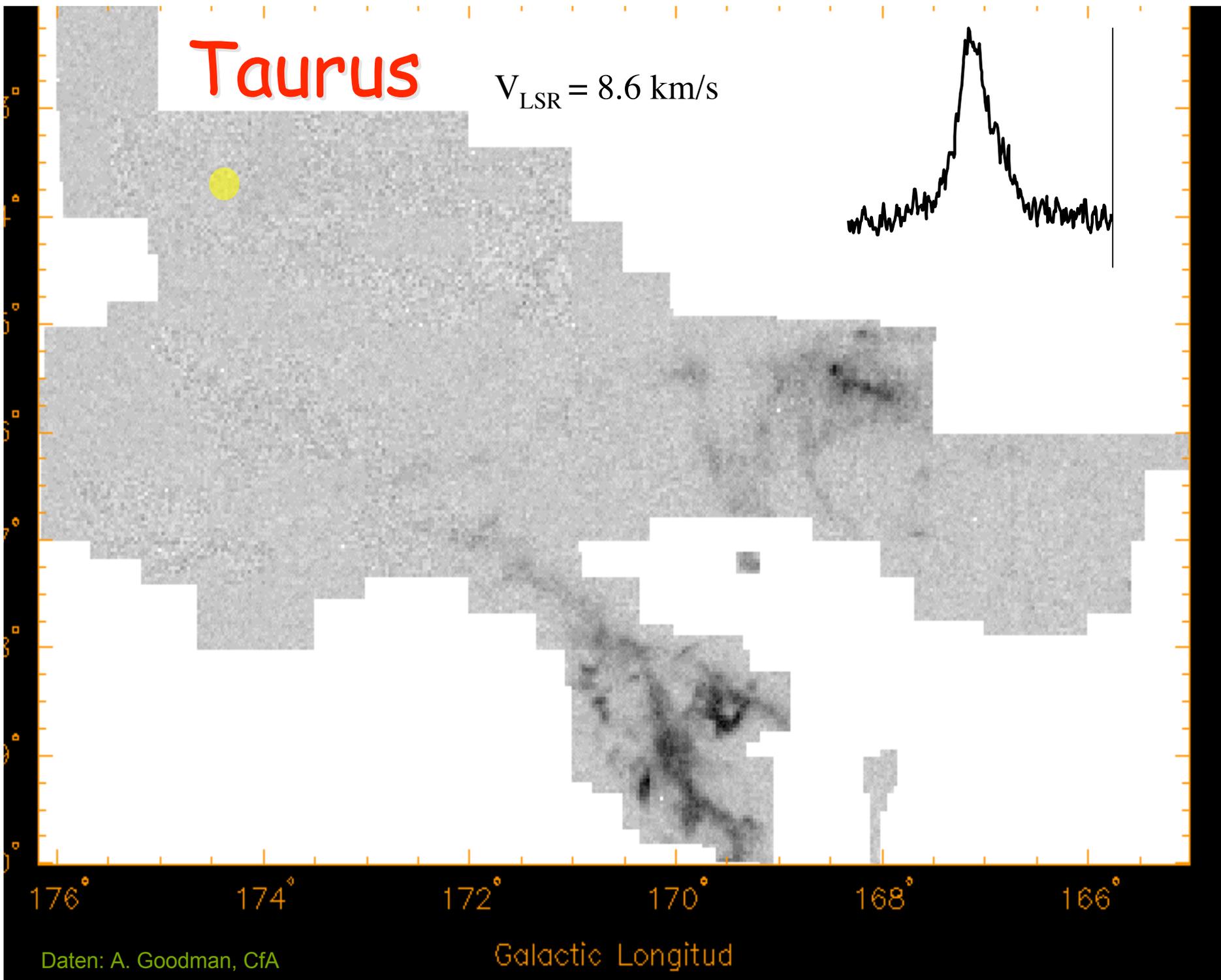
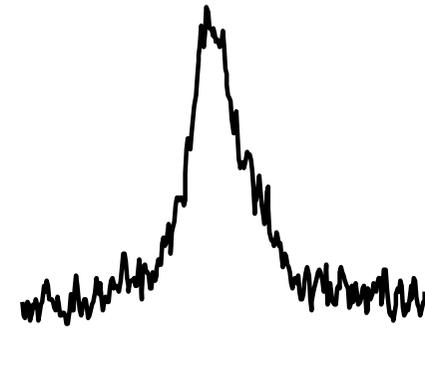
176° 174° 172° 170° 168° 166°

Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

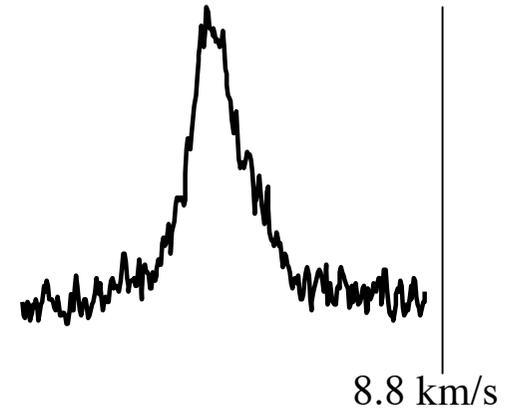


Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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



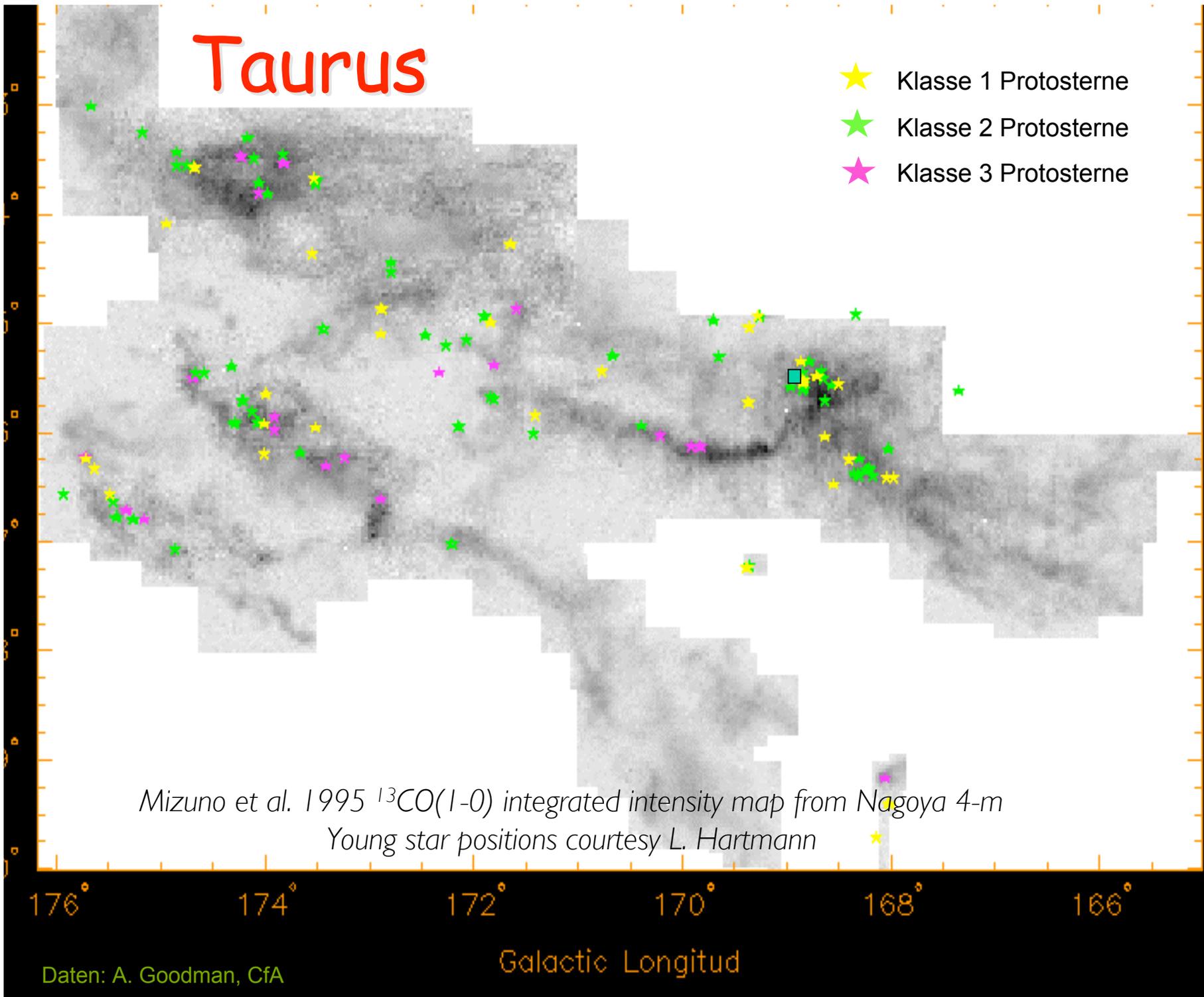
176° 174° 172° 170° 168° 166°

Daten: A. Goodman, CfA

Galactic Longitud

# Taurus

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

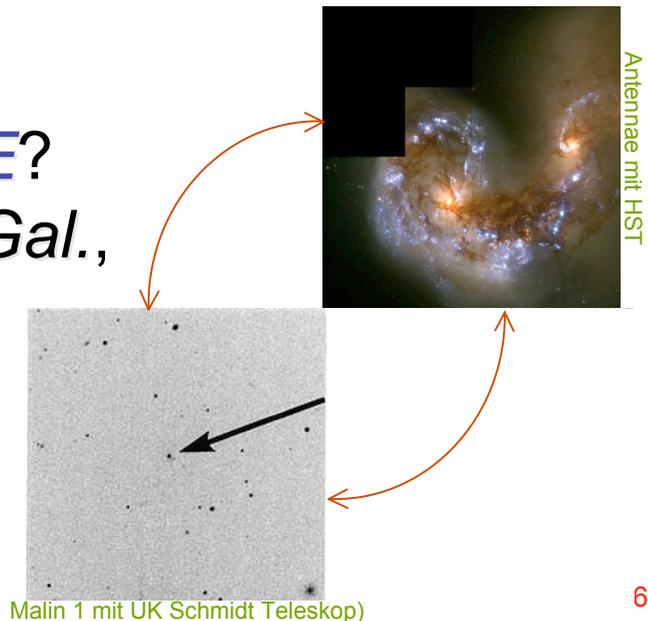


WIE?

# 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*

# Eigenschaften der Turbulenz

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

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

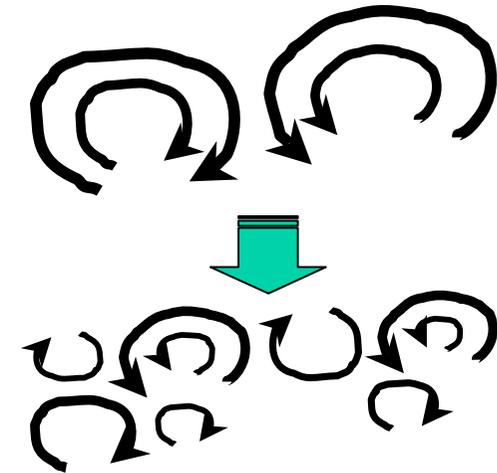
$V$  = typical velocity on scale  $L$ ,  $\nu$  = viscosity,  $\text{Re} > 1000$

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

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

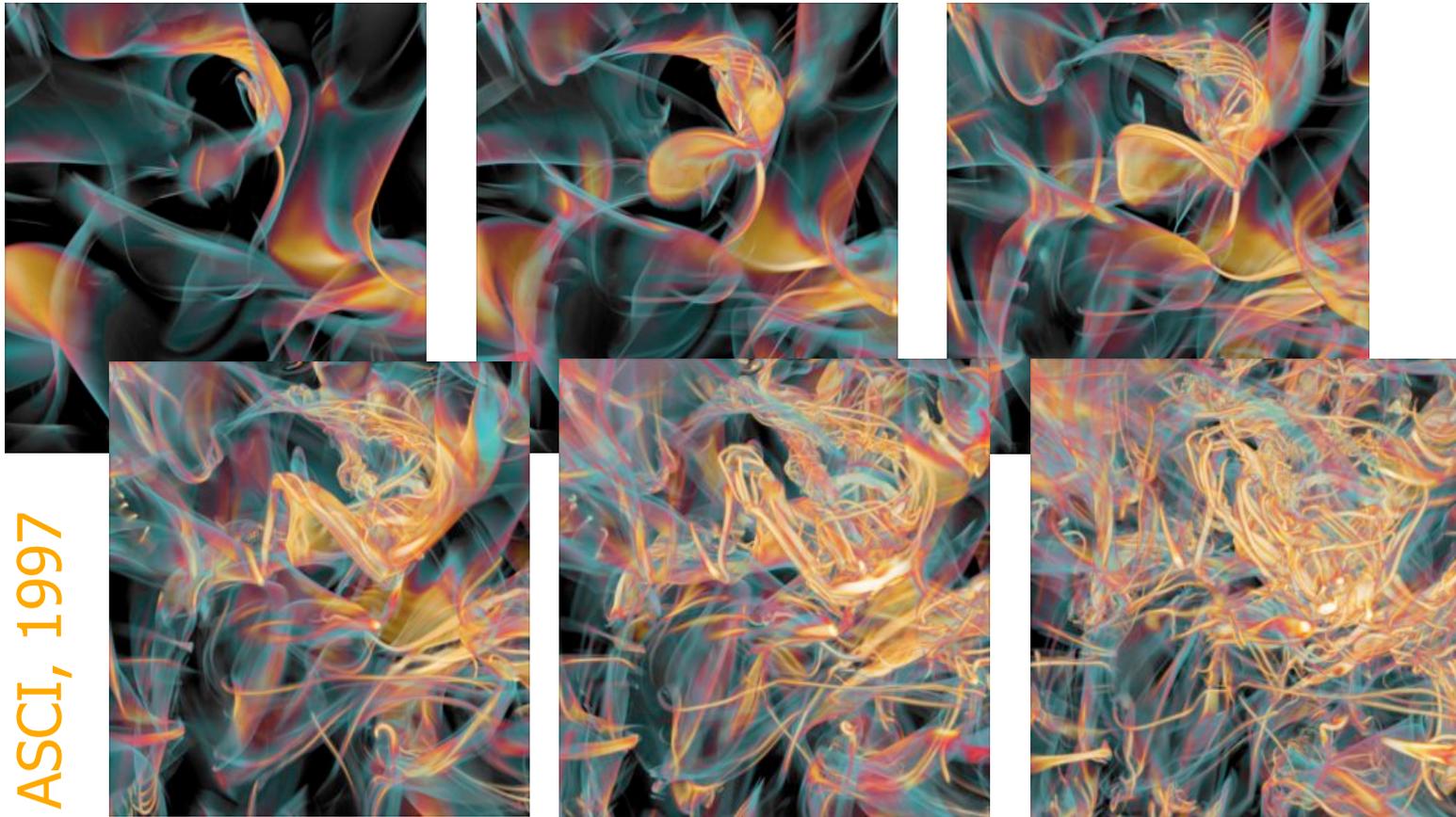
z.B. Landau & Lifschitz, Chandrasekhar, Taylor, etc.)

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



# Vortex-Bildung

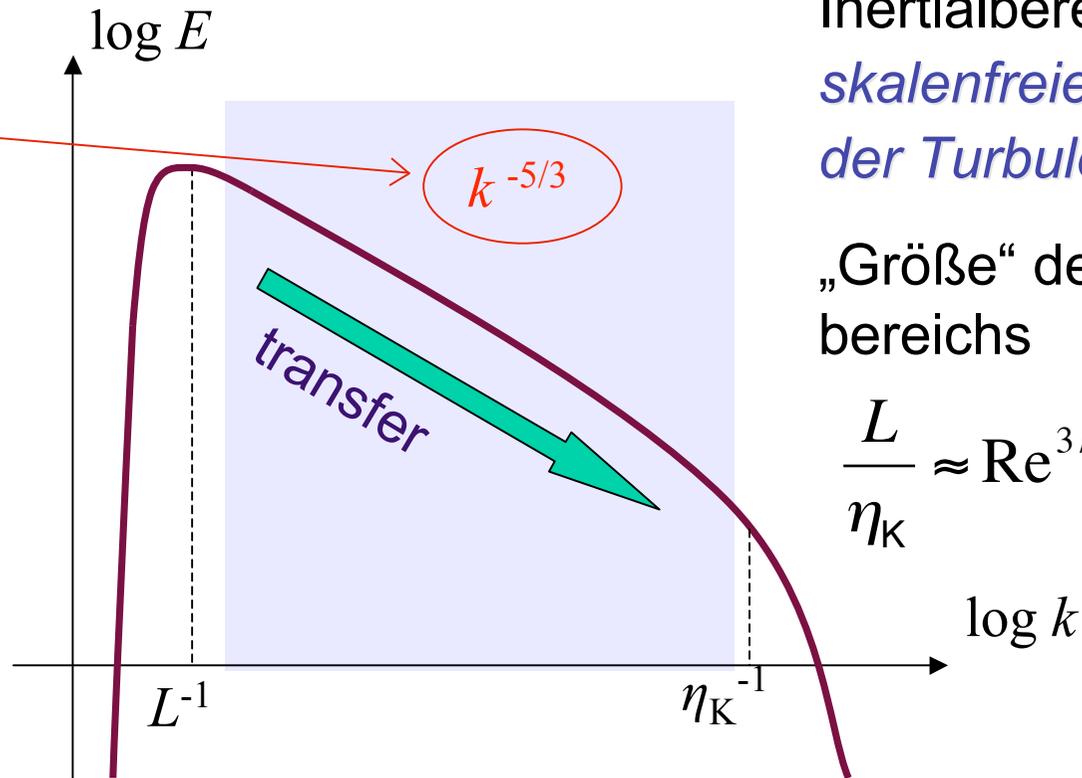
Porter et al.  
ASCI, 1997



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

# Turbulente Kaskade

Kolmogorov (1941) Theorie  
der inkompressiblen Turbulenz



Inertialbereich:  
*skalenfreies Verhalten  
der Turbulenz*

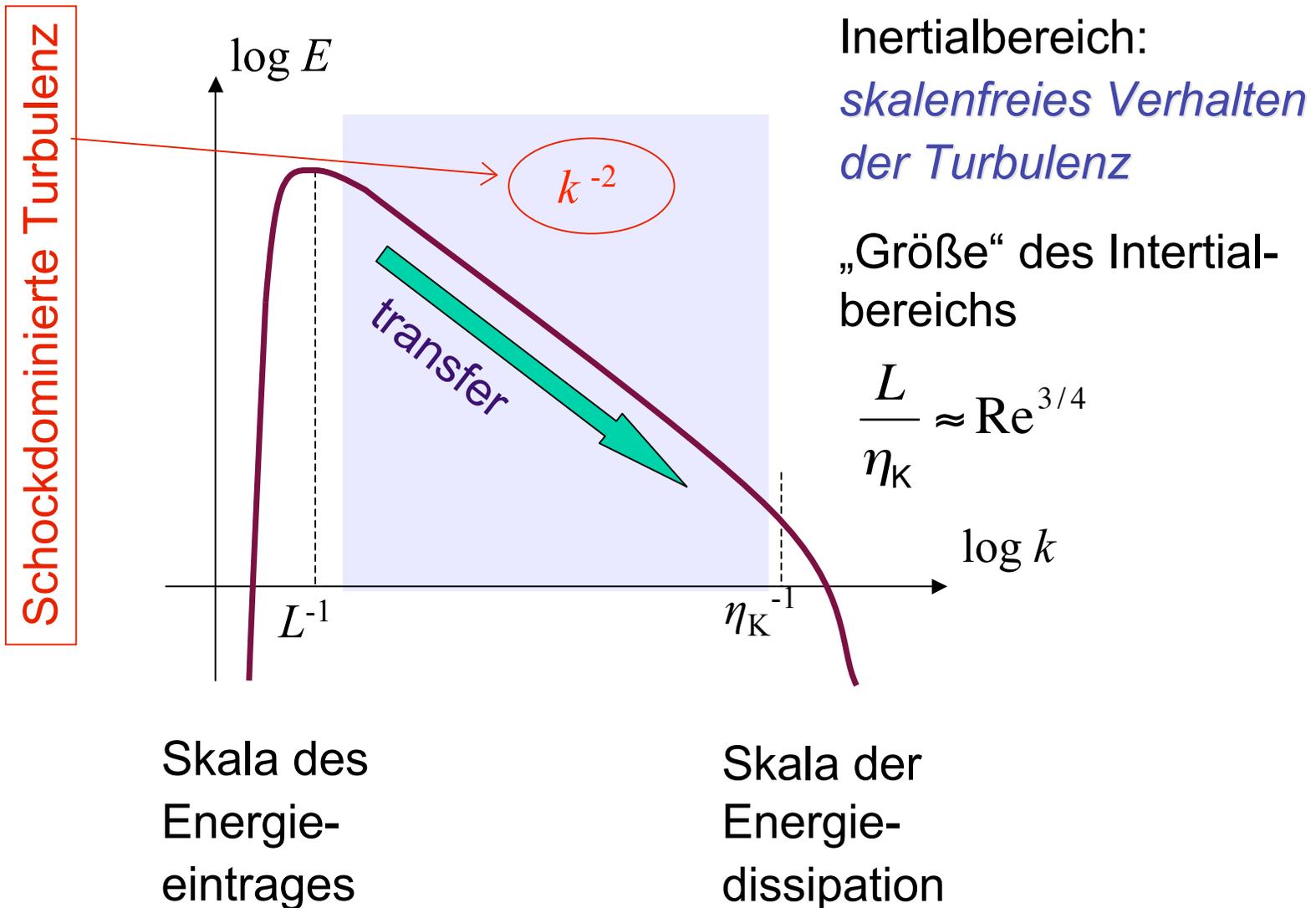
„Größe“ des Inertial-  
bereichs

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

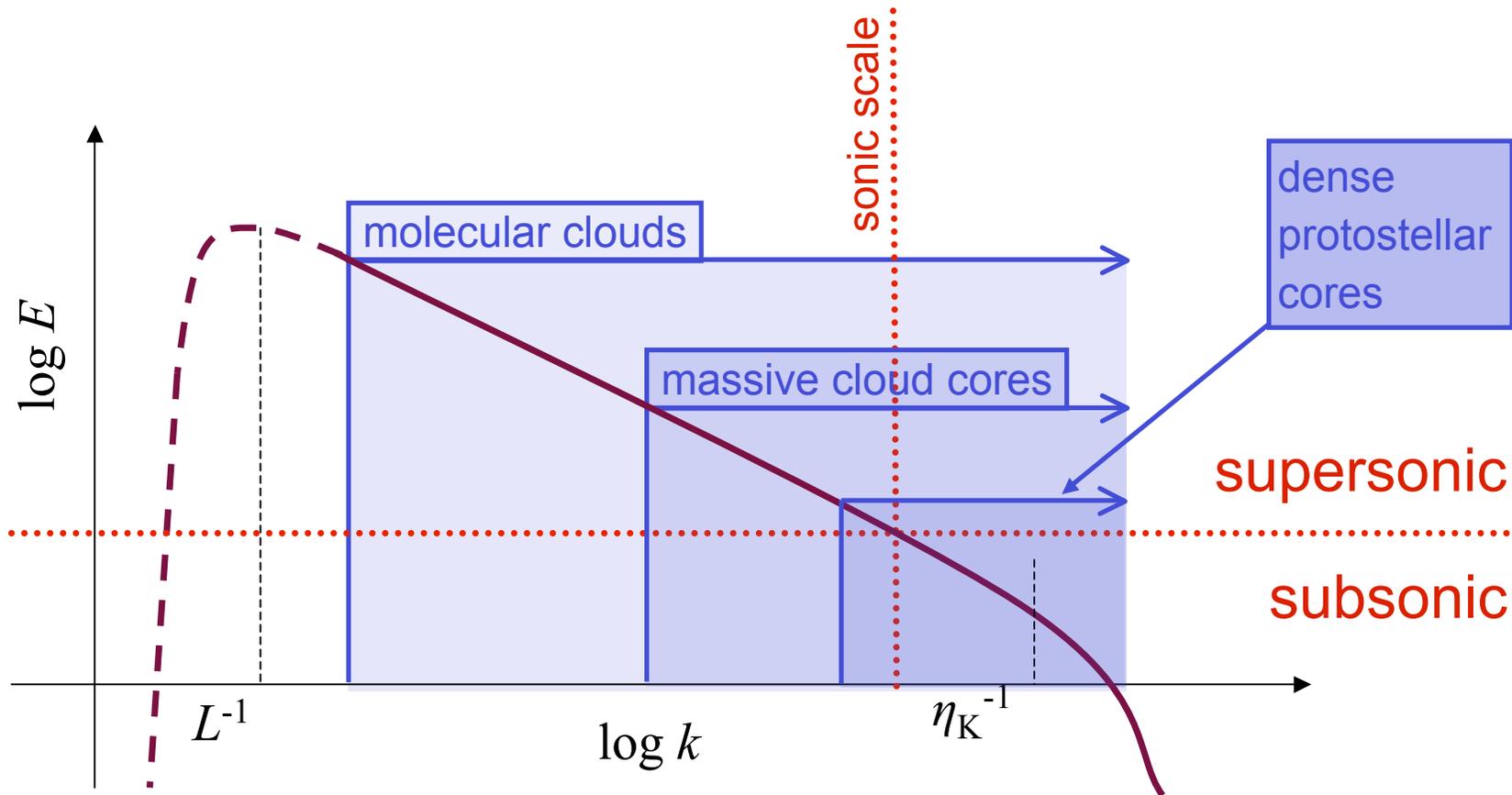
Skala des  
Energie-  
eintrages

Skala der  
Energie-  
dissipation

# Turbulente Kaskade



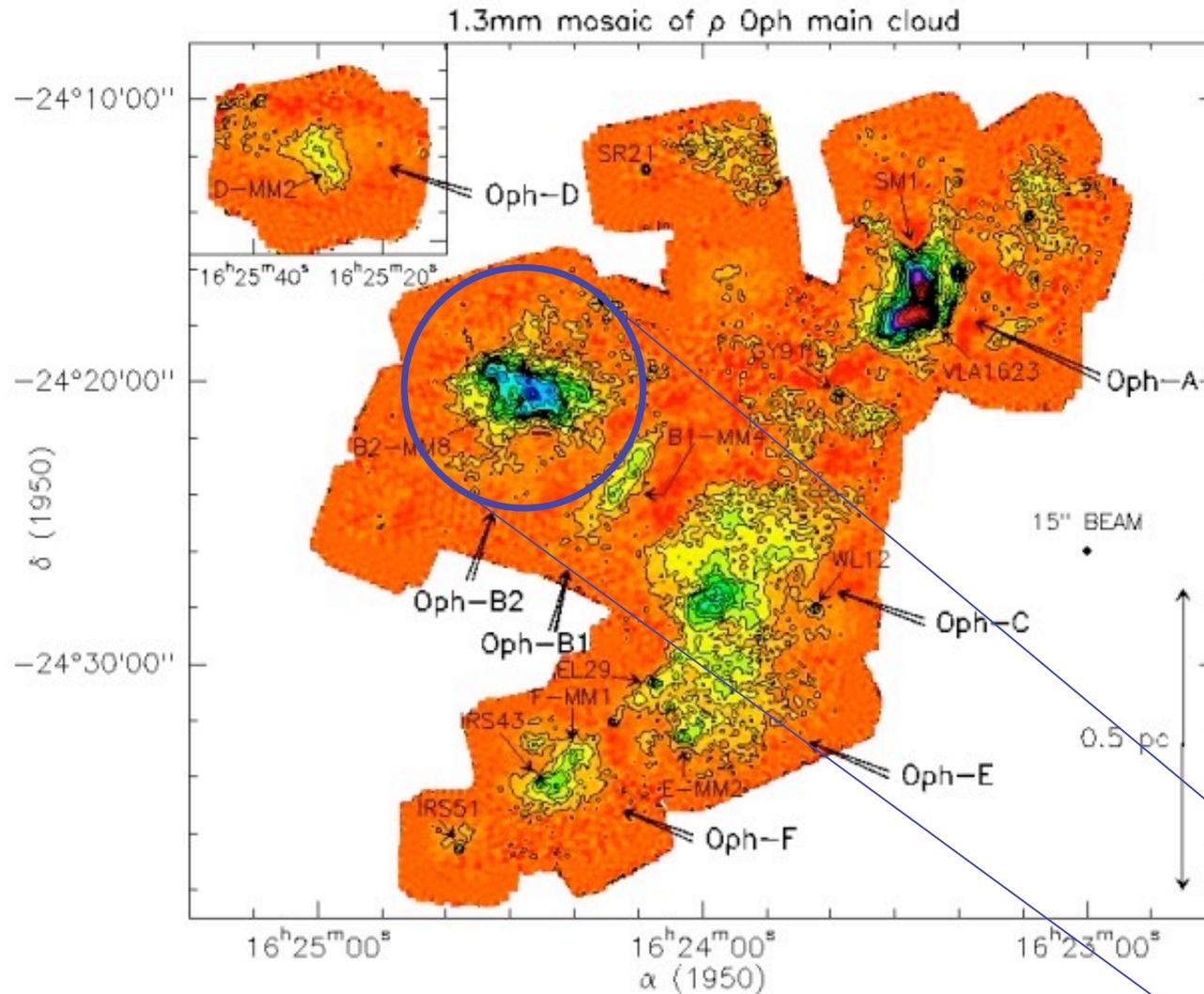
# Turbulente Kaskade in der ISM



Energiequelle & Skala  
UNBEKANNT  
(Supernovae, stellare  
Winde, Jets, MRI,  
Spirale Dichtewellen?)

Dissipationsskala  
weitgehend UNBEKANNT  
(ambipolare Diffusion,  
molekulare Diffusion?)

# Dichtestruktur von MW



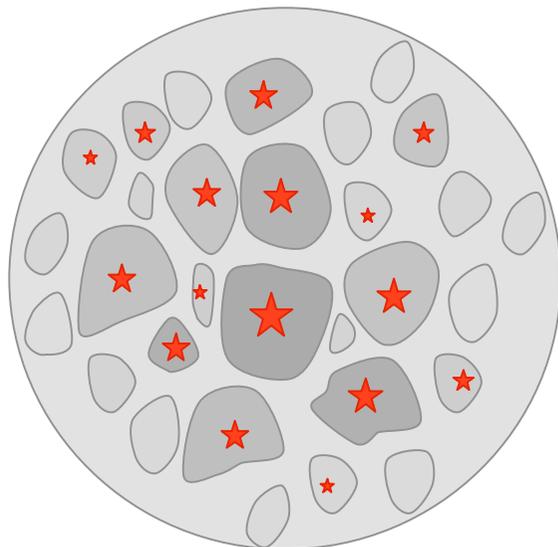
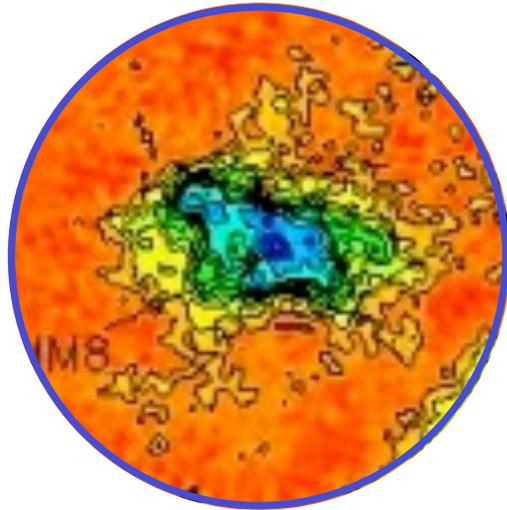
(Motte, André, & Neri 1998)

Molekülwolken sind hochgradig inhomogen.

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

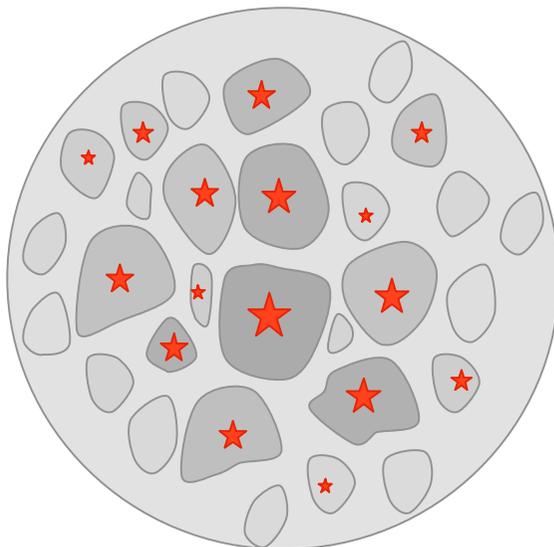
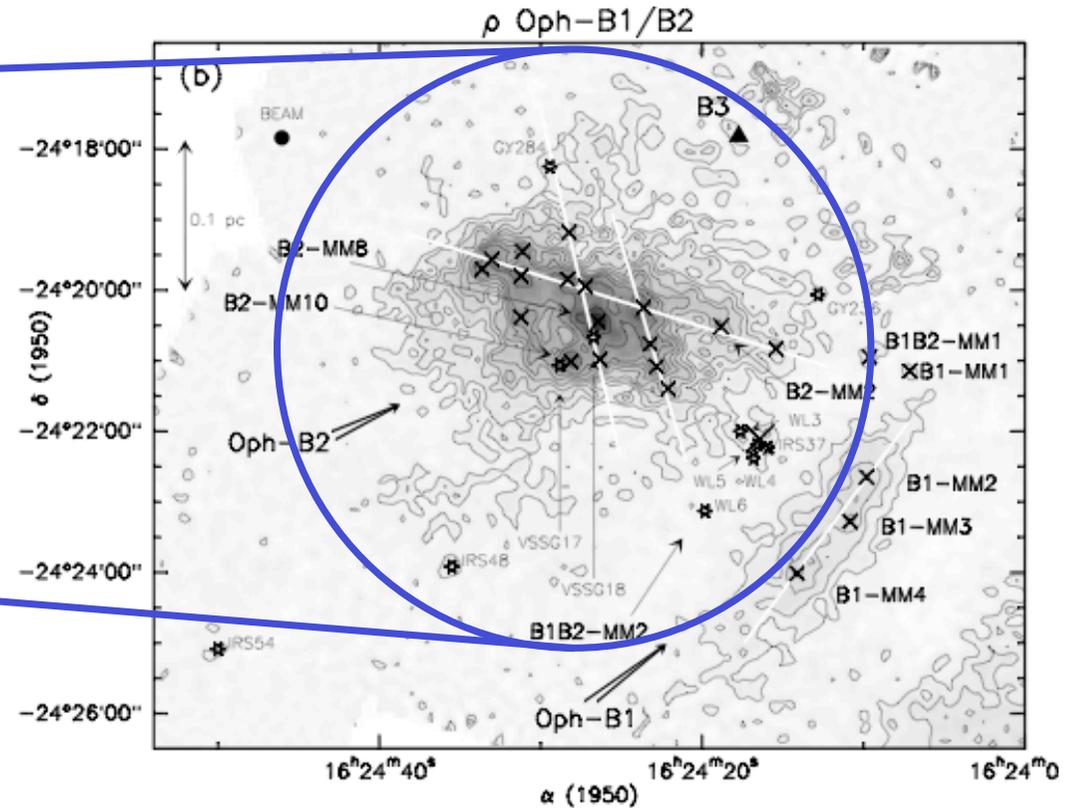
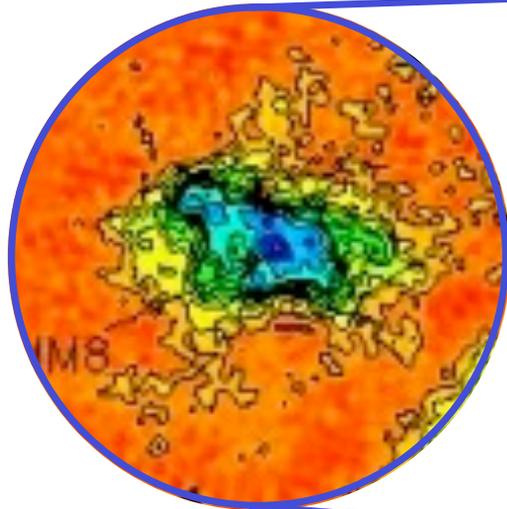
$\rho$ -Ophiuchus in Staubemission

# 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.*

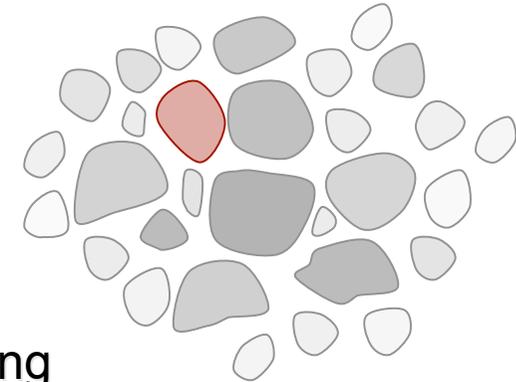
# Entwicklung von Wolkenkernen



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

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

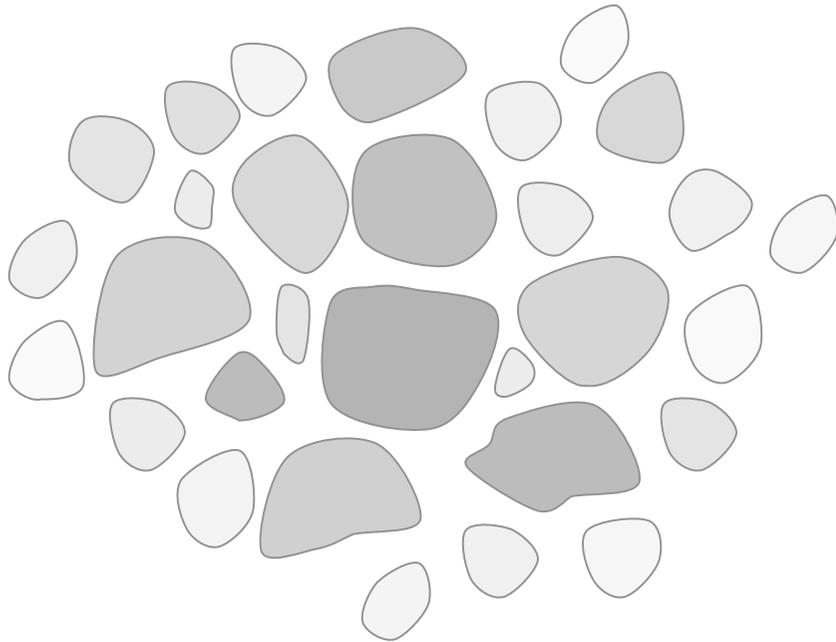
# Entwicklung von Wolkenkernen



- 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 ( $E_{\text{pot}} \approx E_B$ )  
(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*

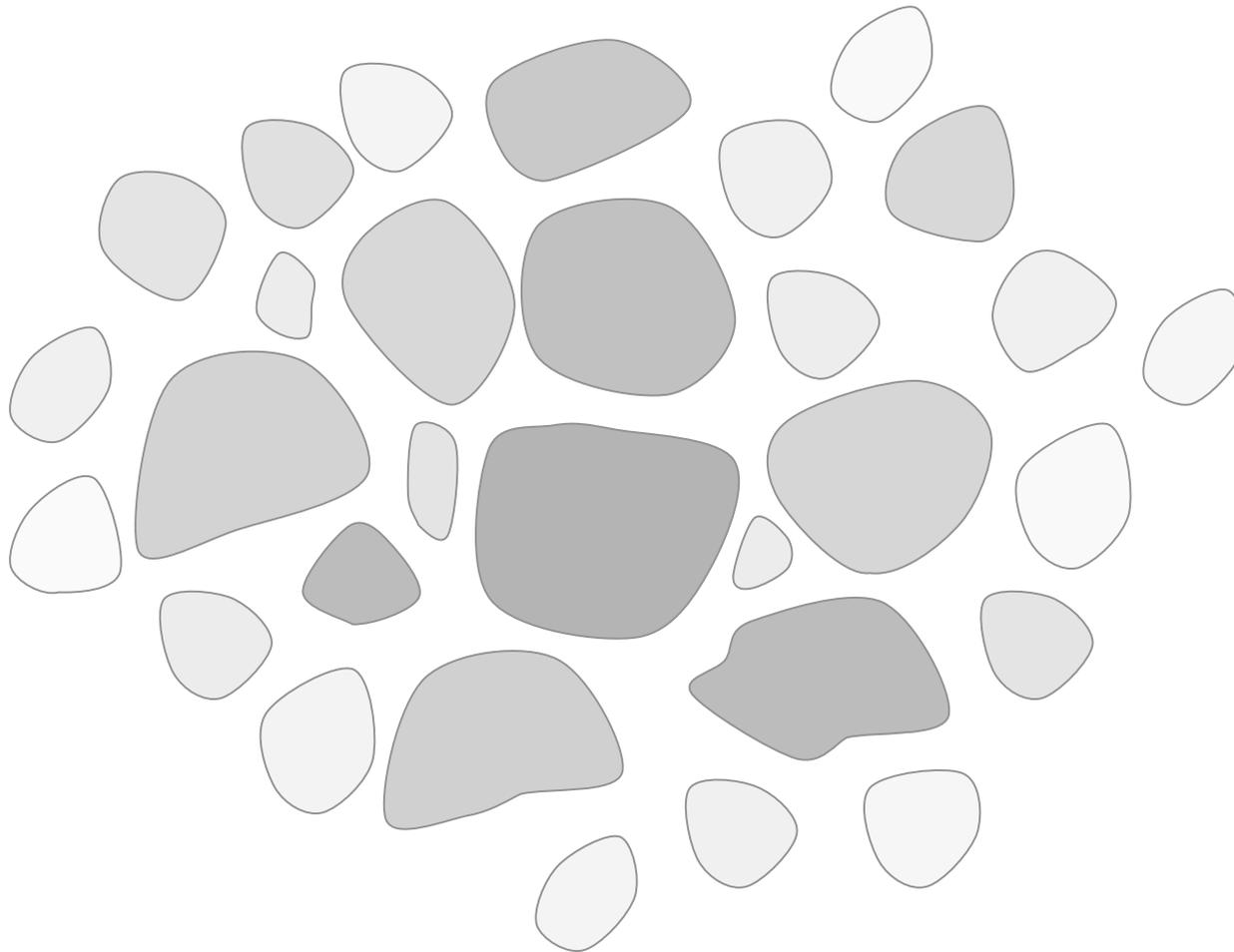
(2) Turbulenz zerfällt, dh. Gravitation dominiert:  $\alpha = E_{\text{kin}} / |E_{\text{pot}}| < 1$

--> *globale Kontraktion*

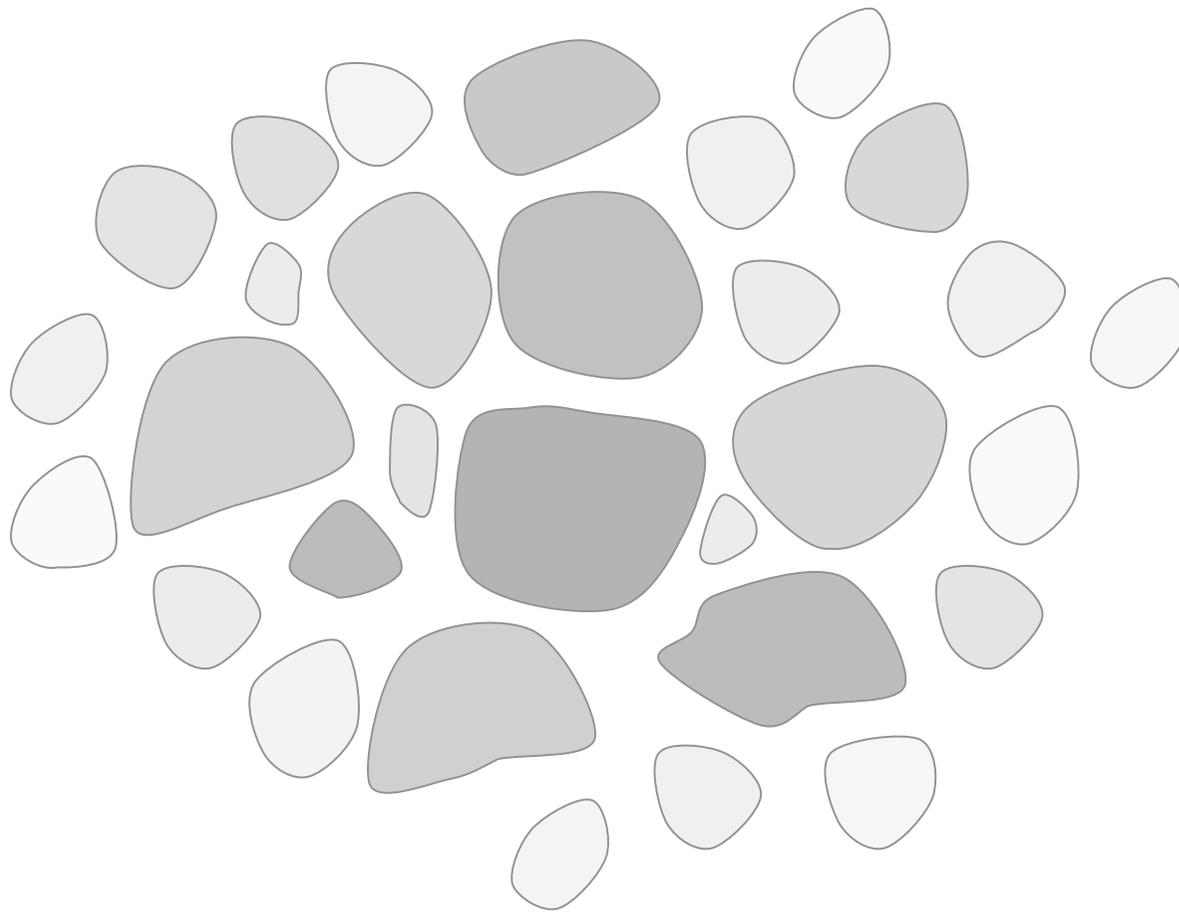
--> Kerne *wechselwirken* während sie kollabieren

--> *Kompetitives Wachstum*

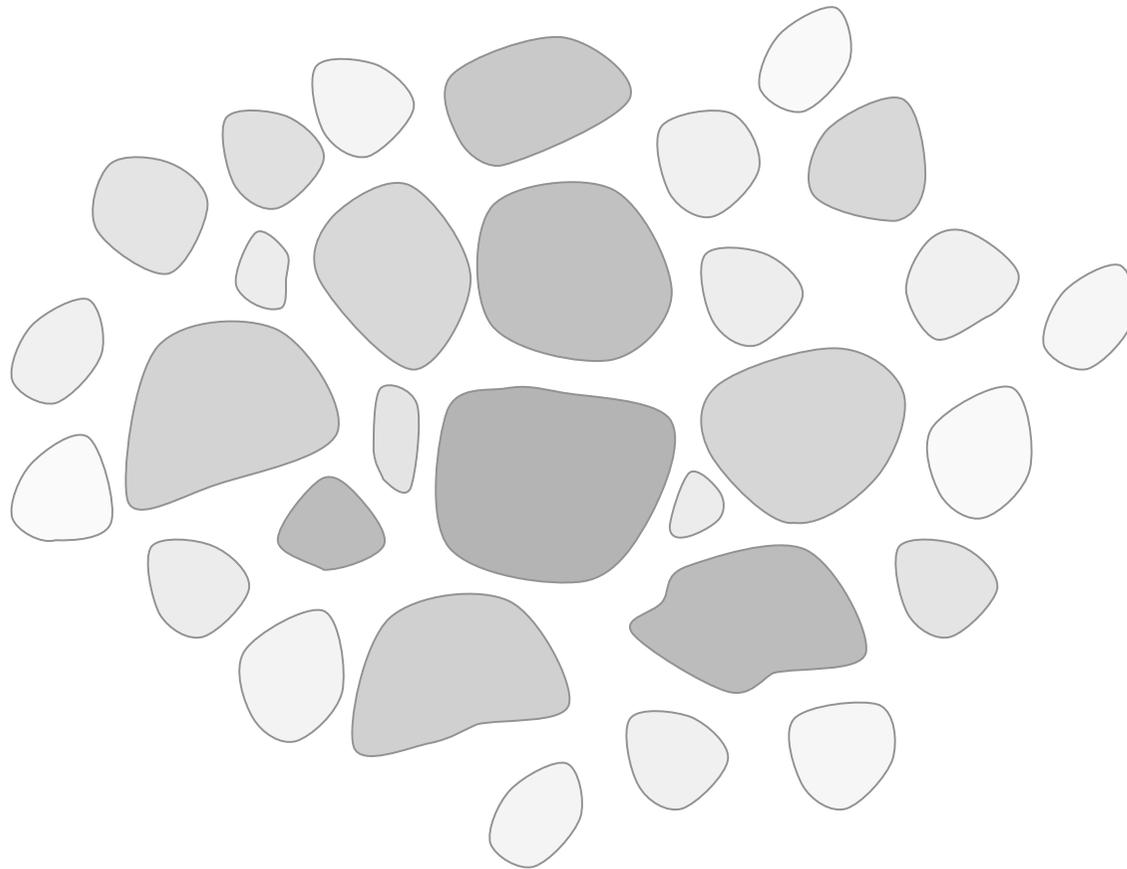
--> *dichter Haufen, enthält masse- reiche Sterne*



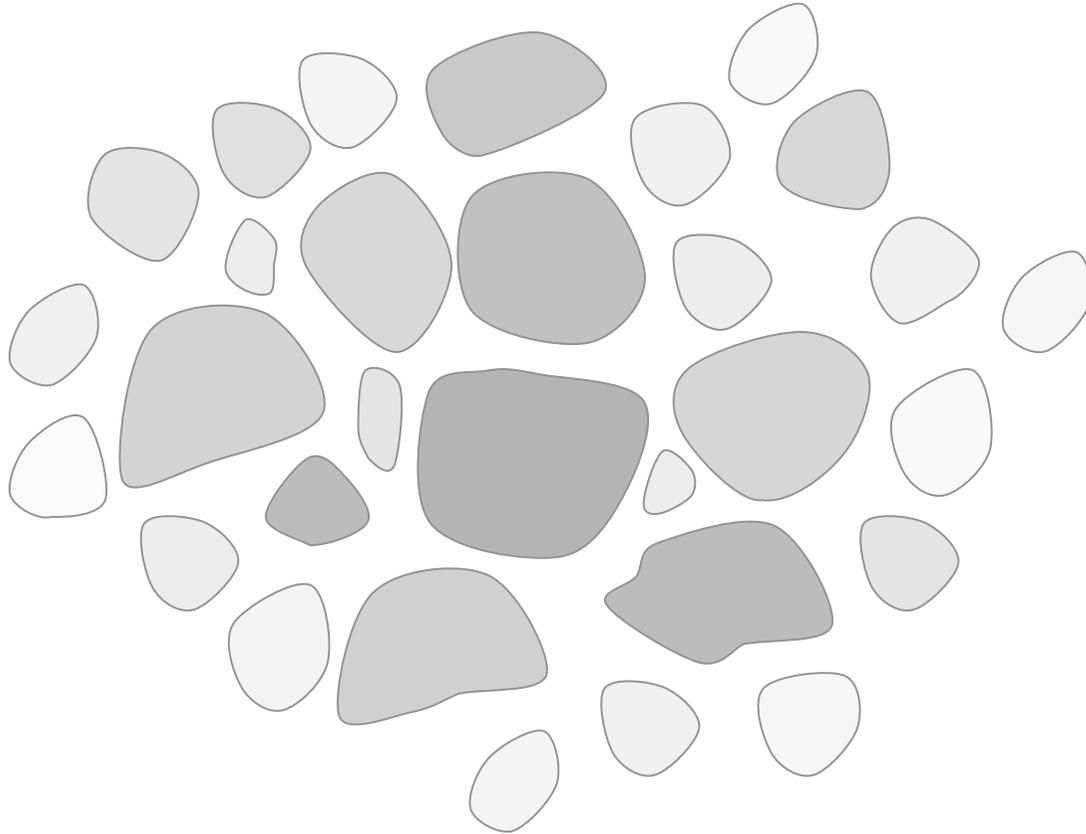
Turbulenz erzeugt Hierarchie von Klumpen



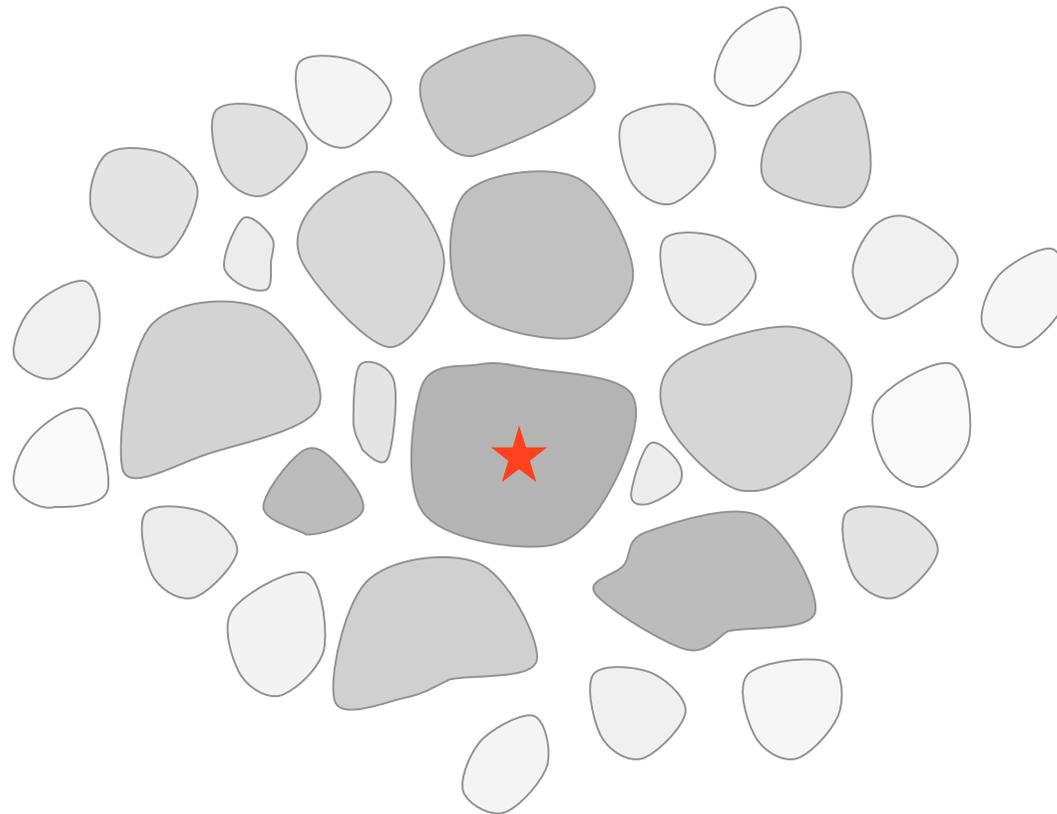
Turbulenz dissipiert, Kontraktion setzt ein



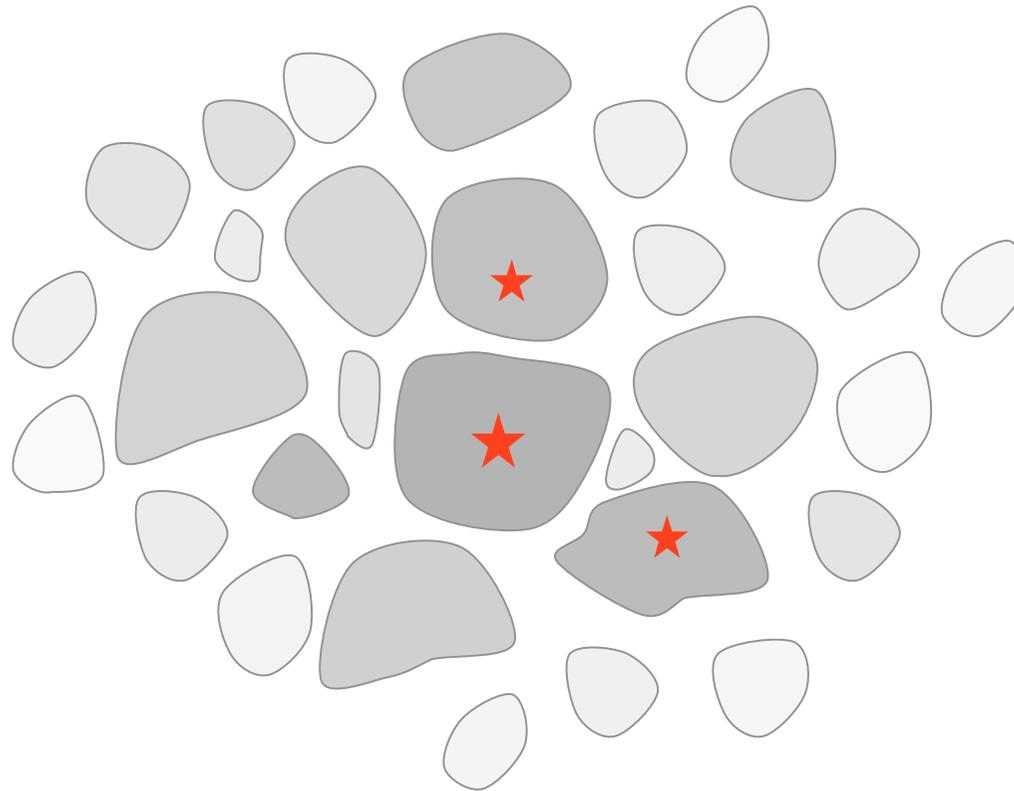
Turbulenz dissipiert, Kontraktion setzt ein



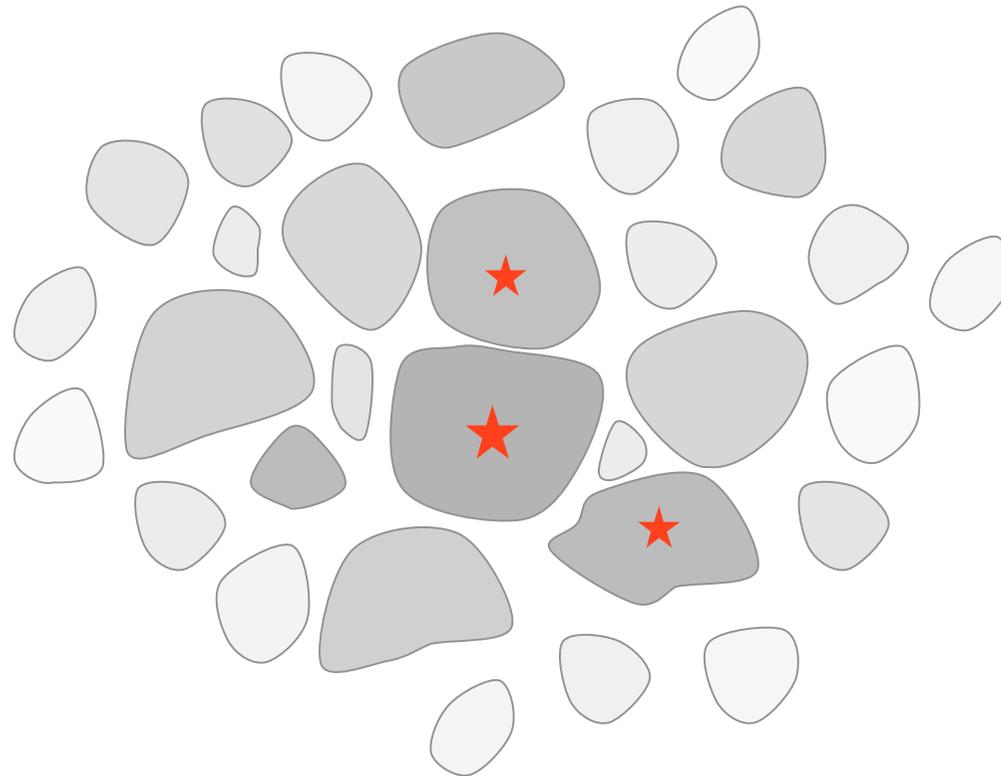
während Region kontrahiert können einzelne Klumpen kollabieren und Sterne bilden



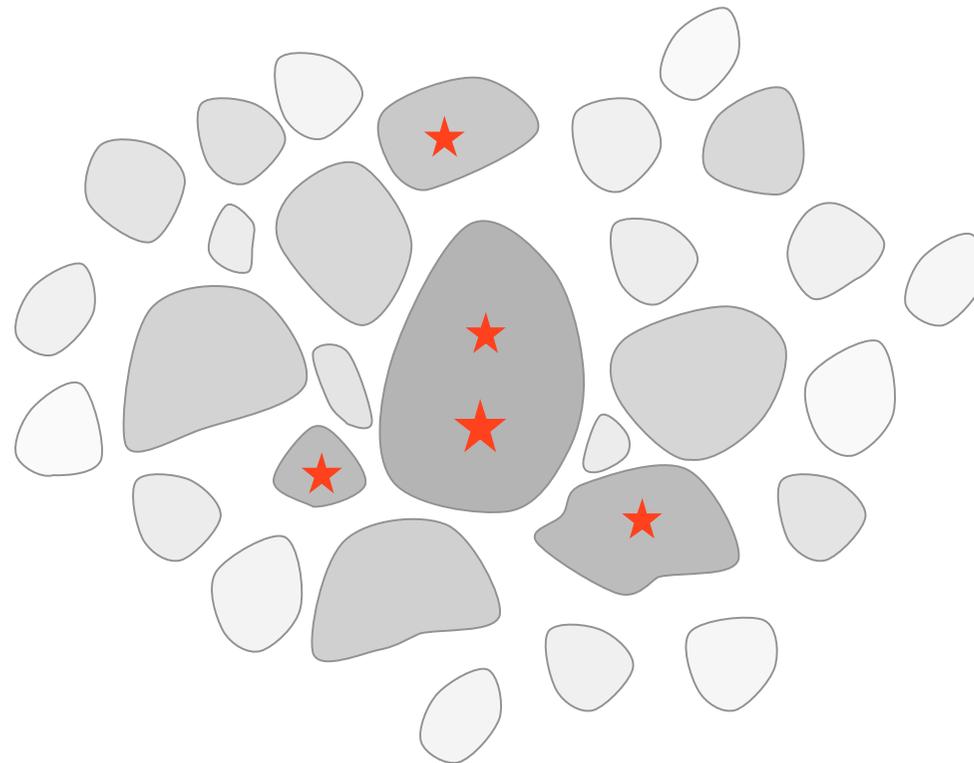
während Region kontrahiert können einzelne Klumpen kollabieren und Sterne bilden



einzelne Klumpen kollabieren und bilden Sterne

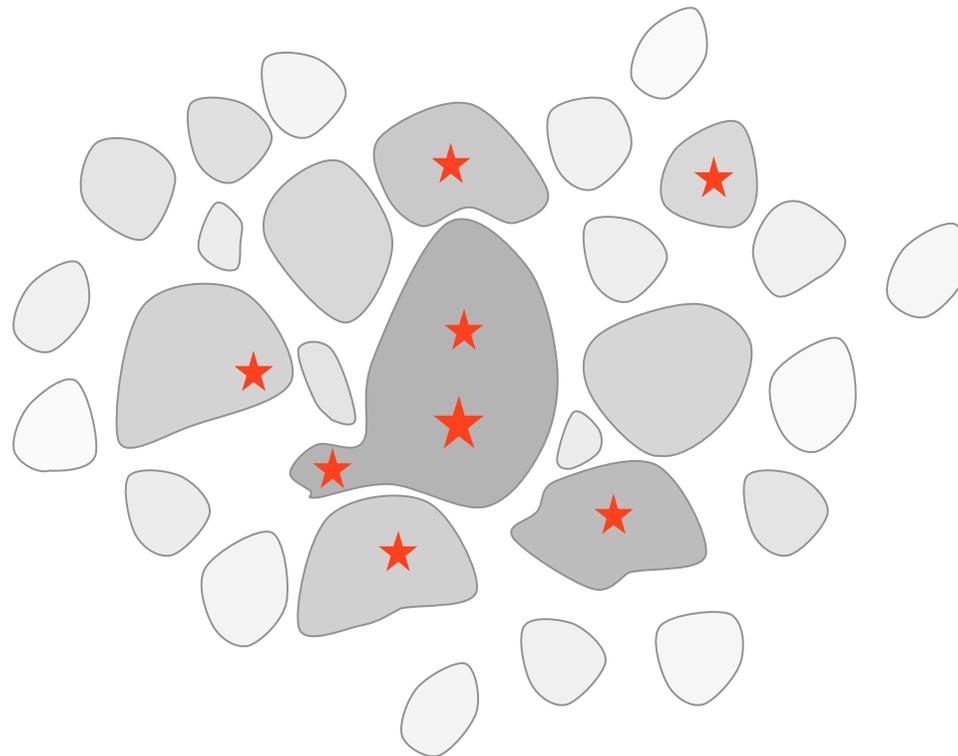


einzelne Klumpen kollabieren und bilden Sterne

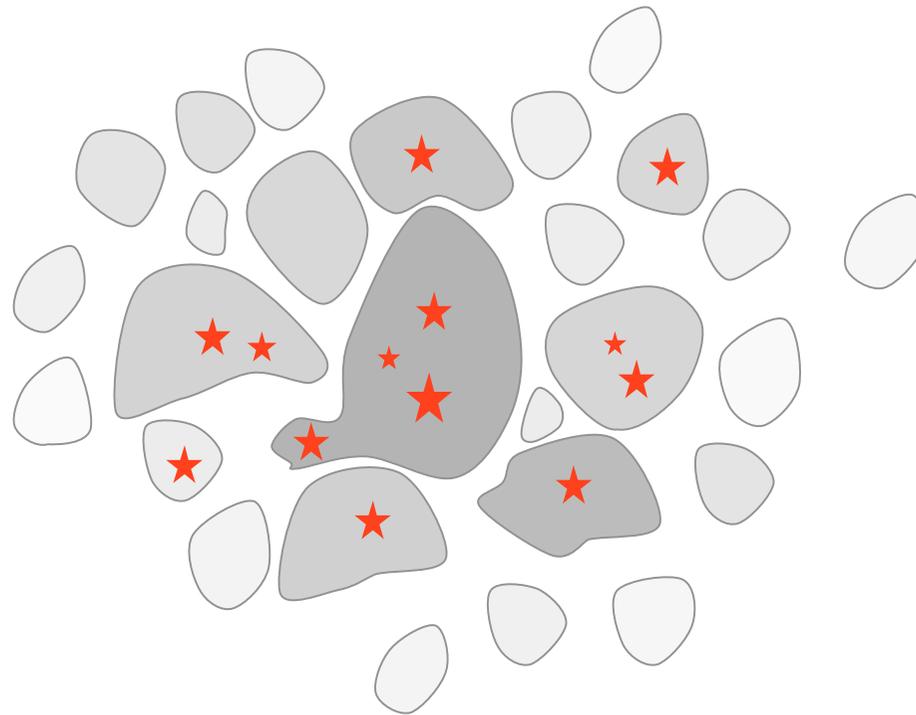


$$\alpha = E_{\text{kin}} / |E_{\text{pot}}| < 1$$

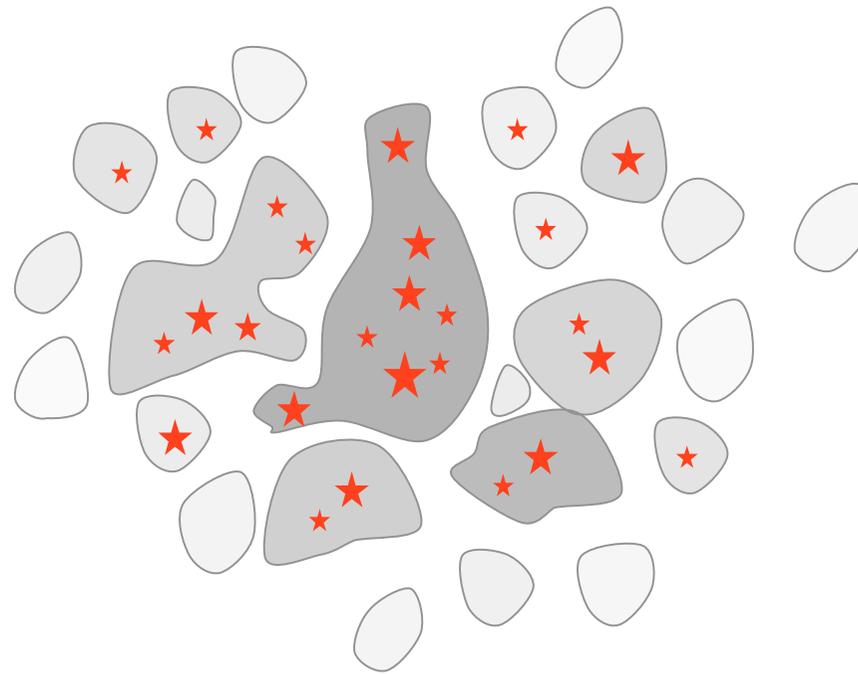
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



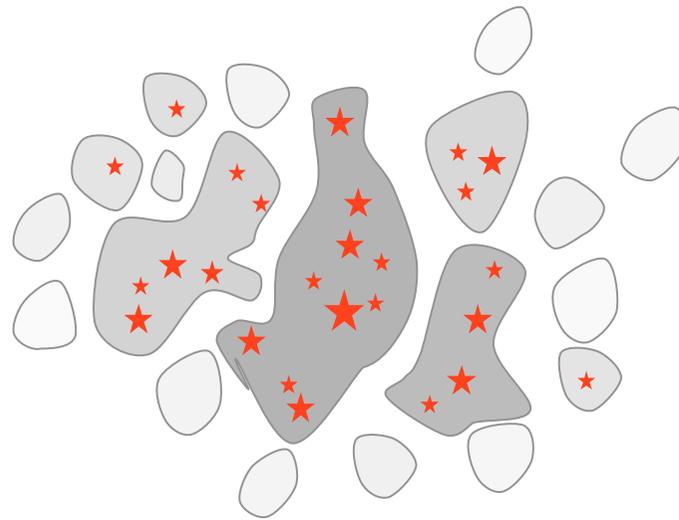
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



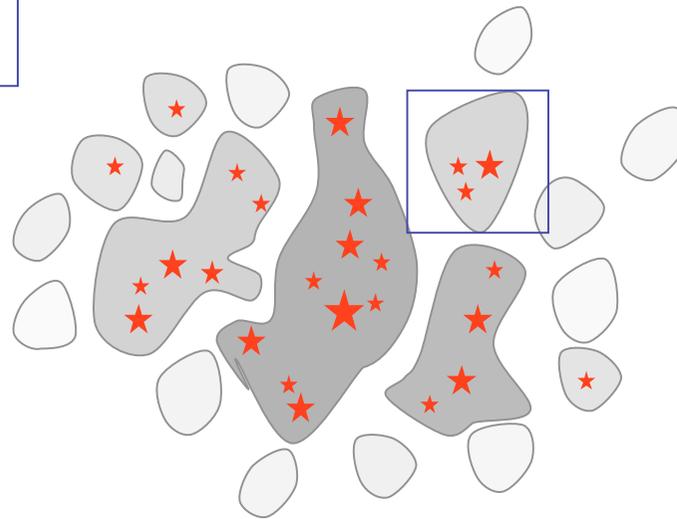
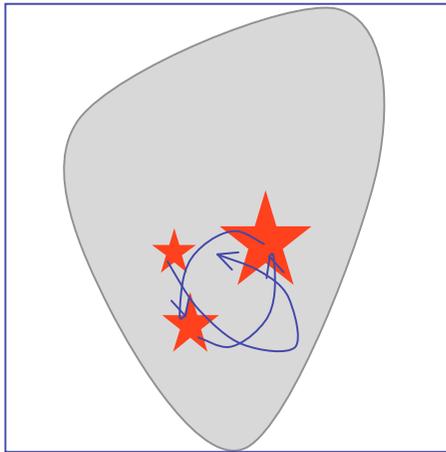
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



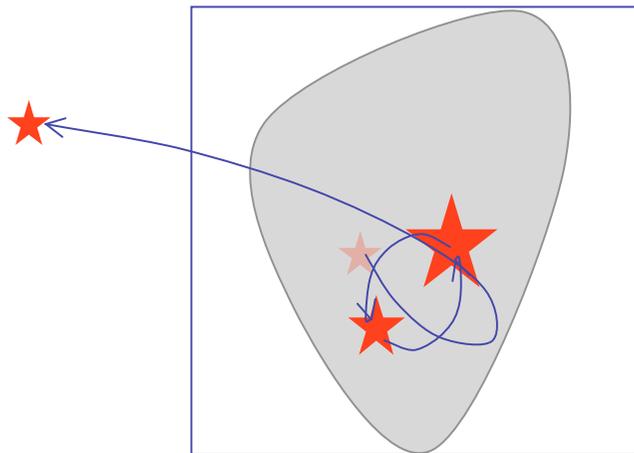
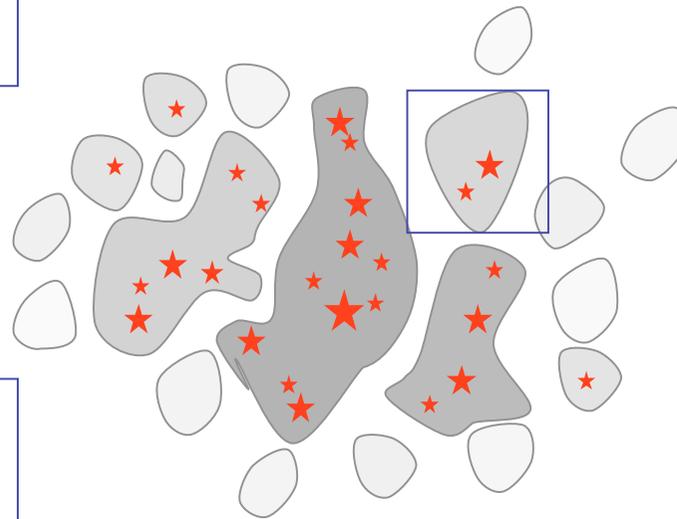
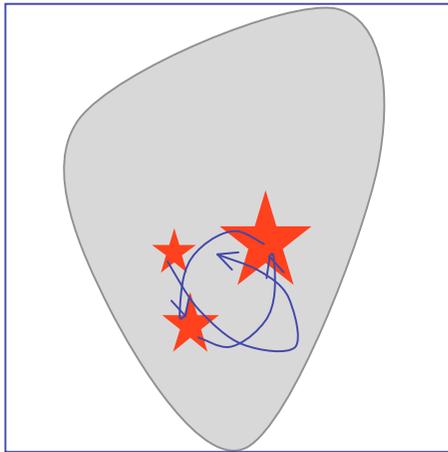
Im *dichten Haufen* wird kompetitives Wachstum wichtig



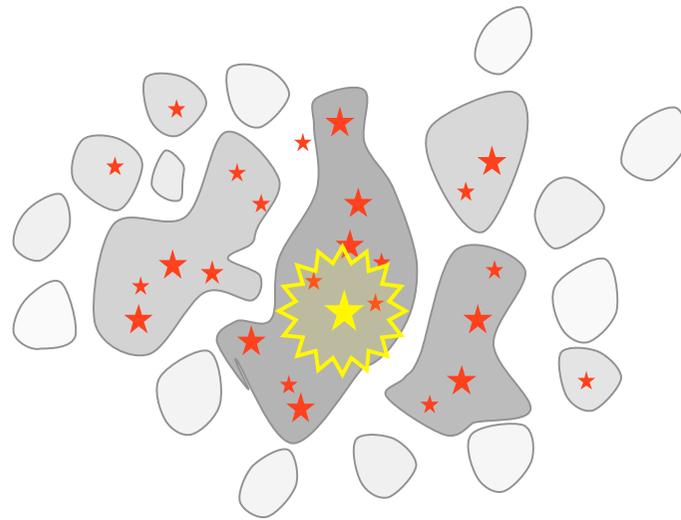
Im *dichten Haufen* wird kompetitives Wachstum wichtig



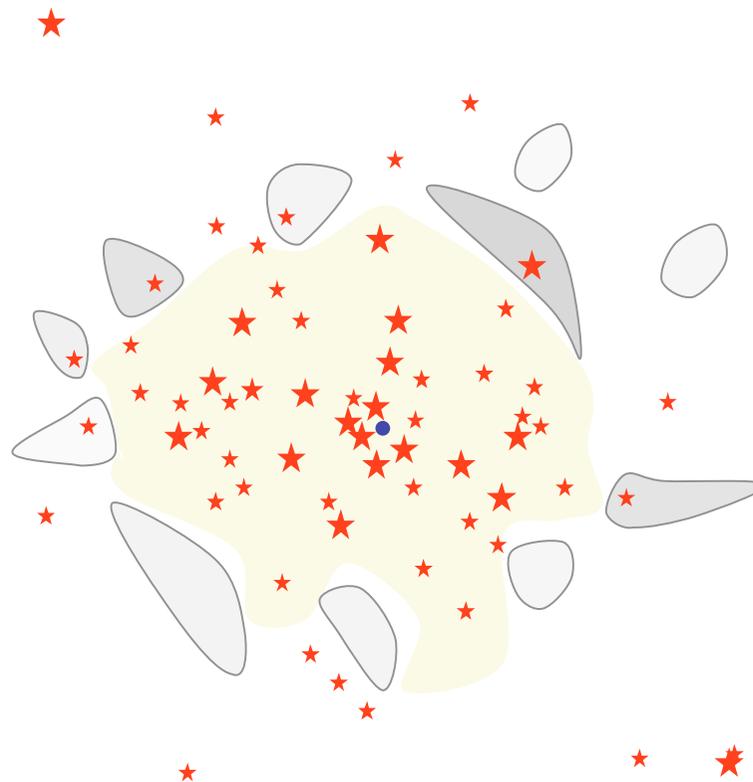
Im *dichten Haufen* beeinflussen stellardynamische Prozesse das Wachstum



massearme Objekte können herausgeschleudert werden --> Ende der Akkretion



Feedback beendet die Sternbildung



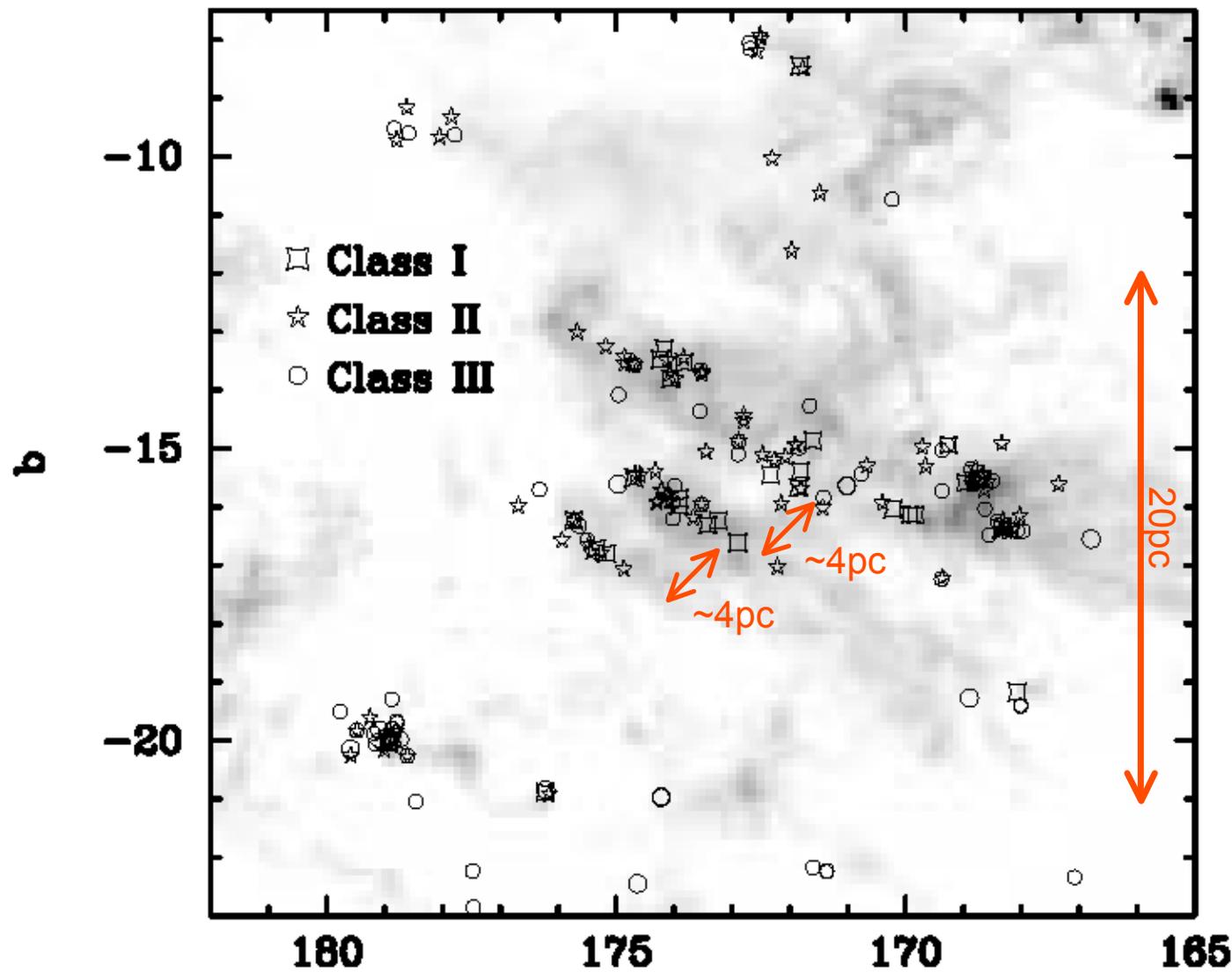
Resultat: *Sternhaufen*, evtl. umgeben von H<sub>II</sub>-Region

# Vorhersagen

# Vorhersagen

- *globale Eigenschaften* (statistische Eigenschaften)
  - Sternentstehungseffizienz und Zeitskalen
  - stellare Massenfunktion -- IMF
  - Dynamische Eigenschaften junger Sternhaufen
  - Statistik selbstgrav., turbulenter Systeme (pdf's,  $\Delta$ -var., Korrelat.)
  - chemische Mischungseigenschaften, Transport
- *lokale Eigenschaften* (Parameter einzelner Objekte)
  - Eigenschaften von Wolkenkernen (Dichteprofil, Lebensdauer, ...)
  - Wachstumsraten & Akkretion ( $dM/dt$  vs.  $t$ ,  $j$  vs.  $t$ )
  - Doppelsterneigenschaften (Exzentrizität, Massenverhältnis, ...)
  - spektrale Energieverteilung von Protosternen
  - Vorhauptreihenentwicklung:  $T_{\text{bol}}-L_{\text{bol}}$  Tracks

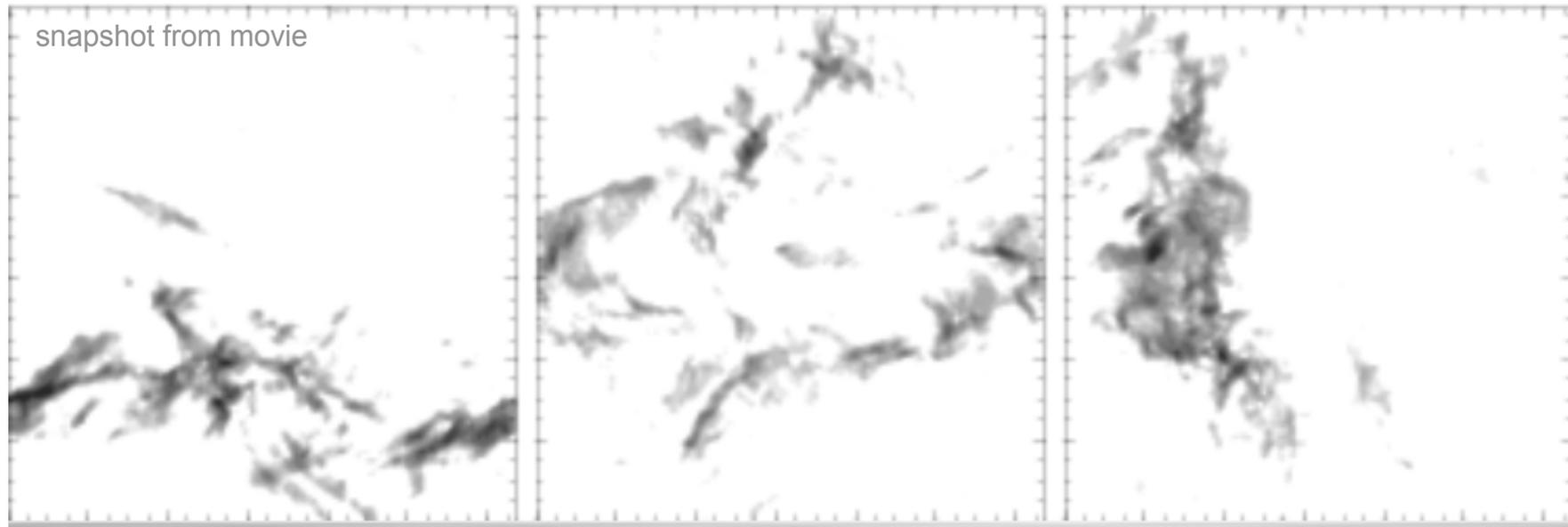
Beispiel



# Taurus Wolke

Sternbildende  
Filamente in  
der *Taurus*  
Molekülwolke

(from Hartmann 2002, ApJ)

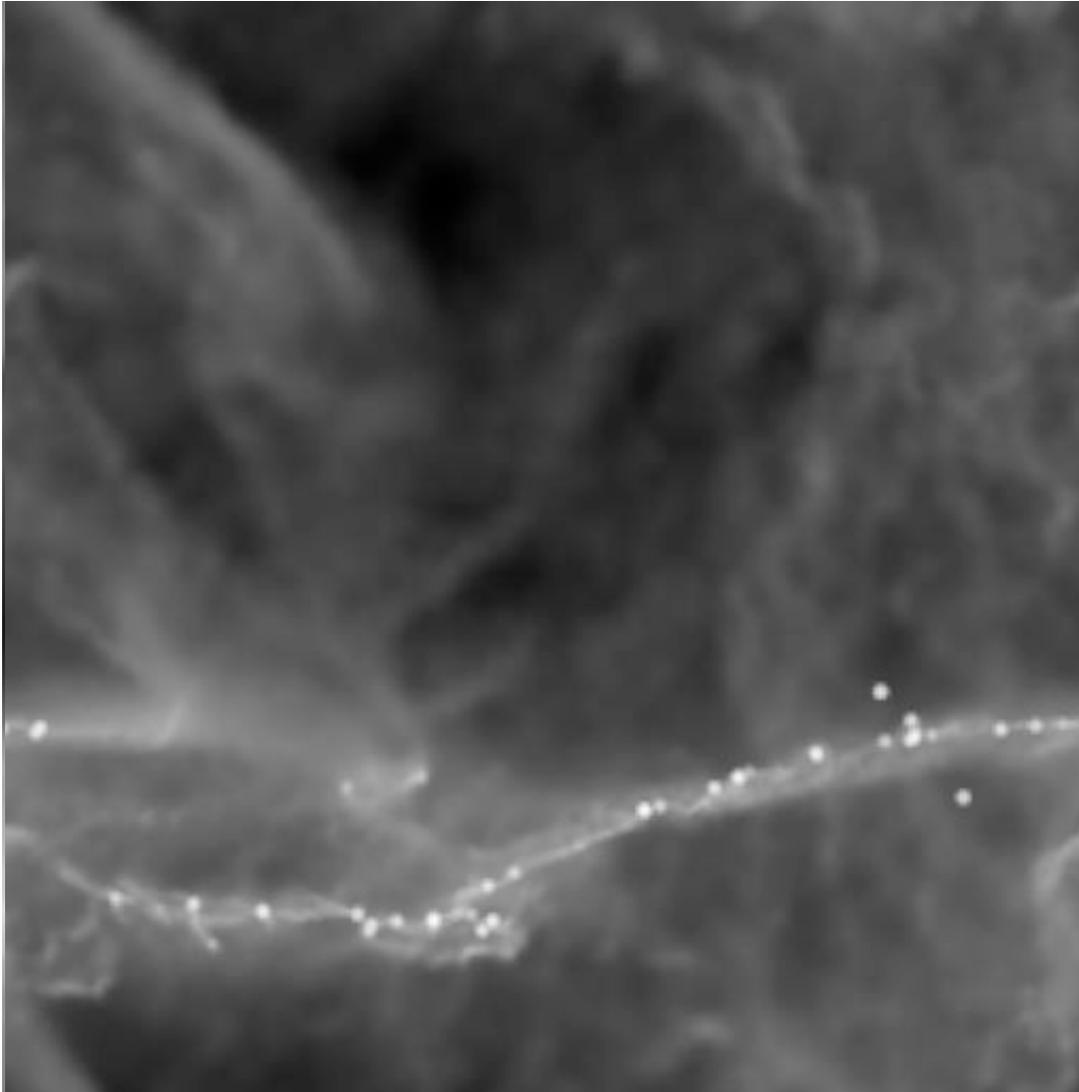


# Numerisches Model der gravoturbulenten Fragmentation

(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



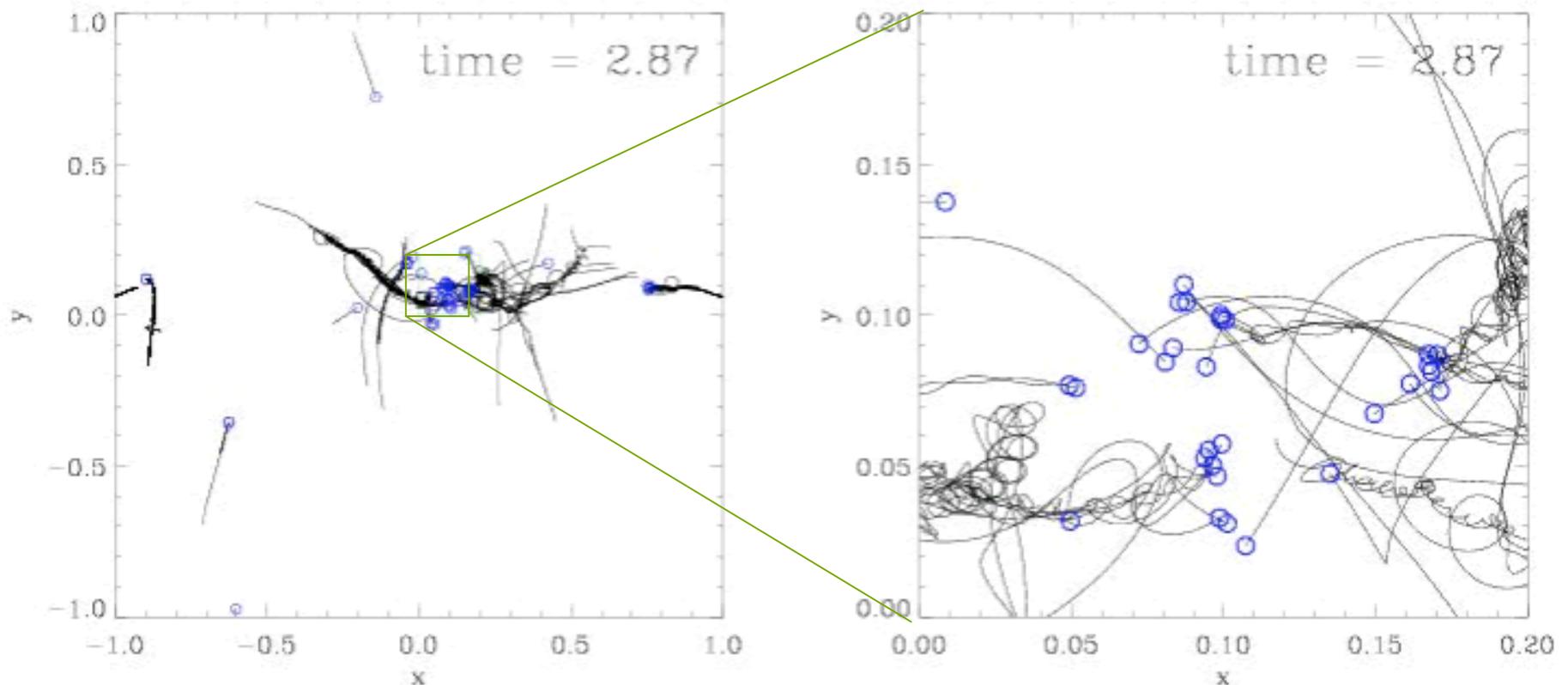
Turbulenz erzeugt  
die Dichtestruktur

Gravitation wählt die  
dichtesten Gebiete  
aus.

Diese verdichten  
sich & bilden Sterne.

# Bildung von Sternhaufen

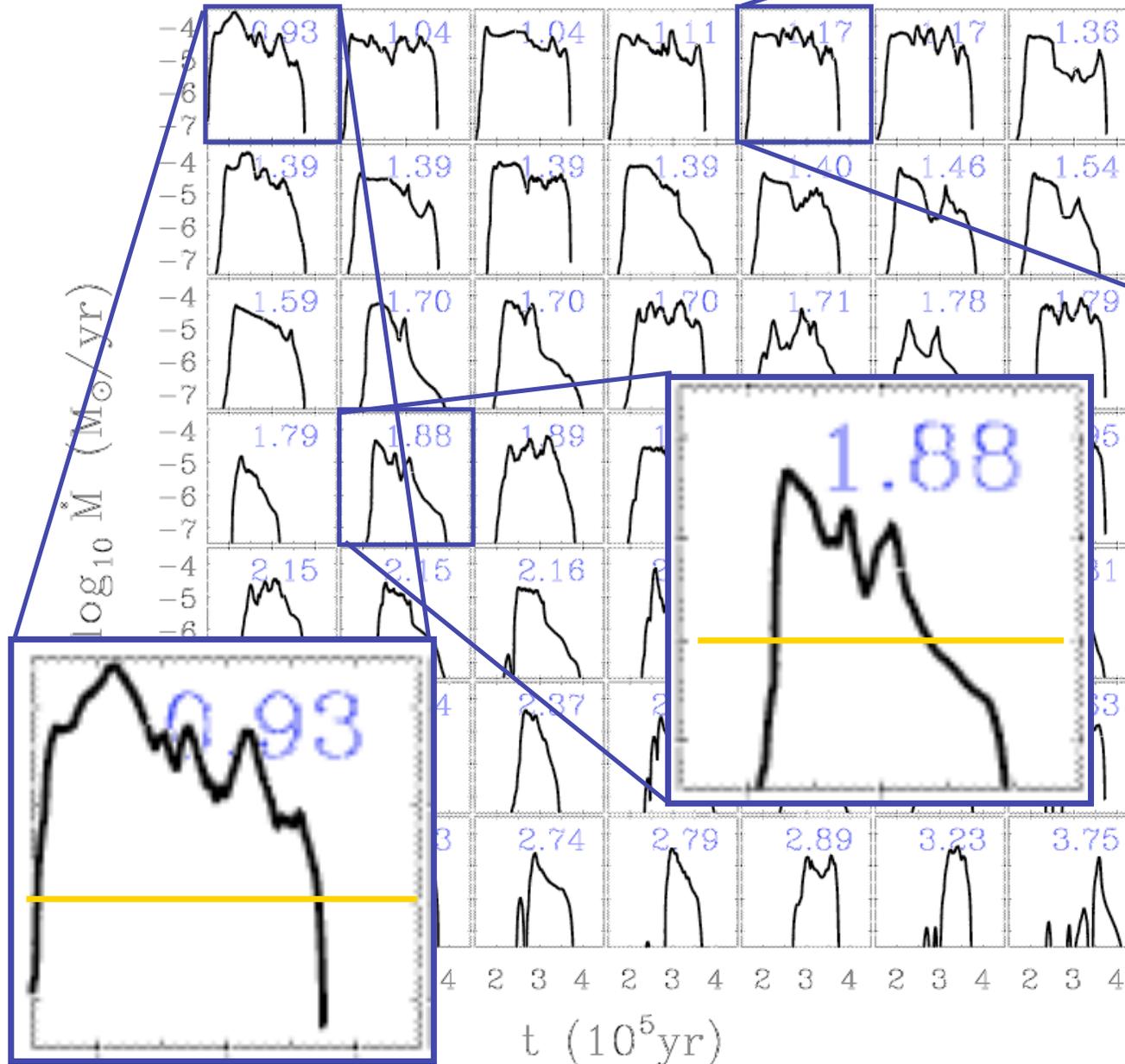
Fast alle Sterne entstehen in Haufen → *Sternbildung = Haufenbildung*



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

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

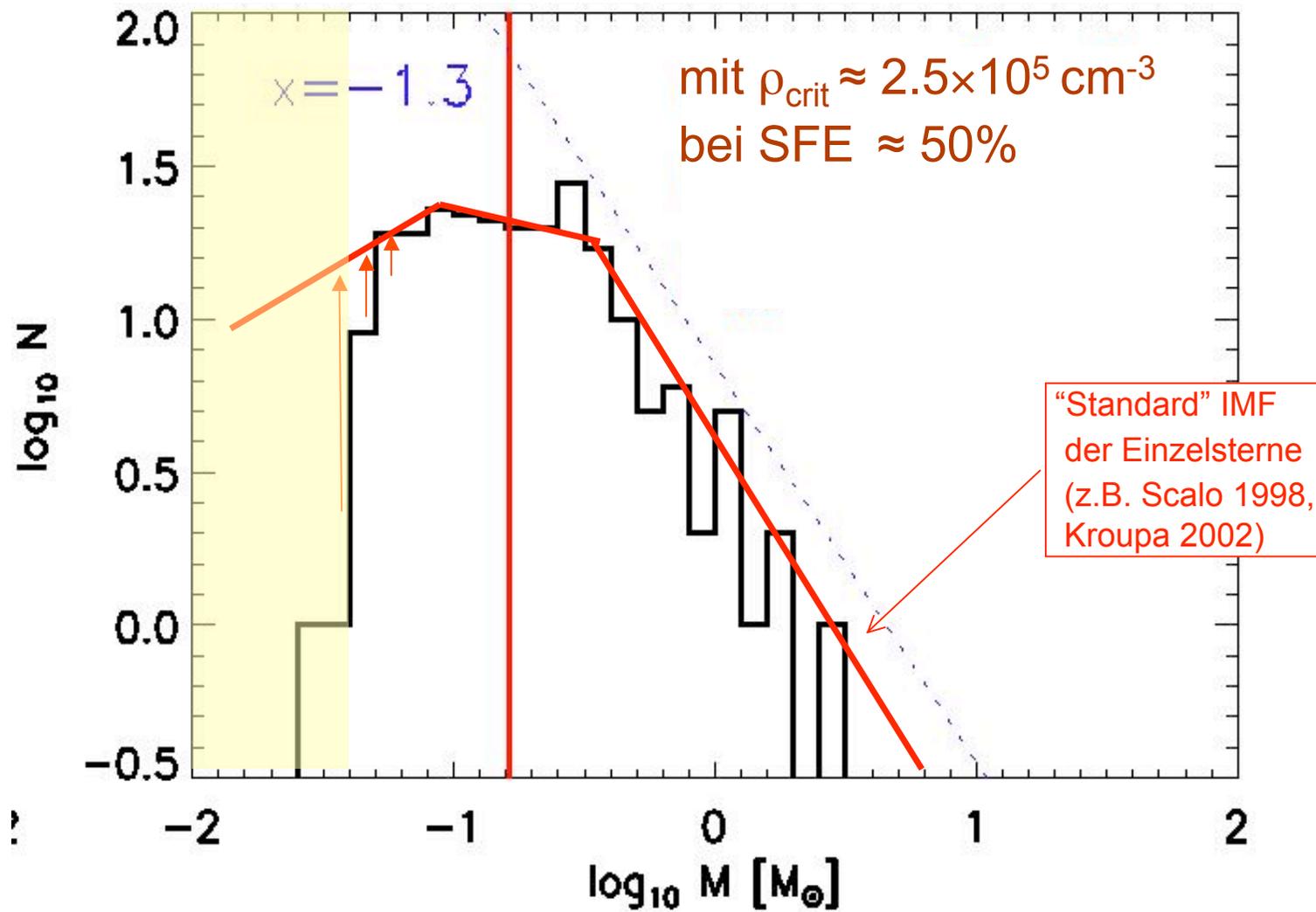
# Akkretionsraten in H



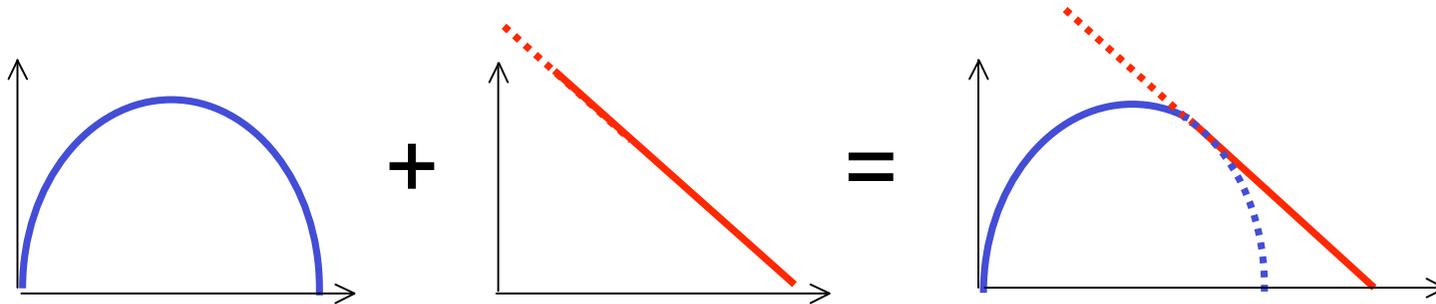
Massenakkretionsraten sind stark *zeitabhängig* und von *Haufenumgebung* beeinflusst.

(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*

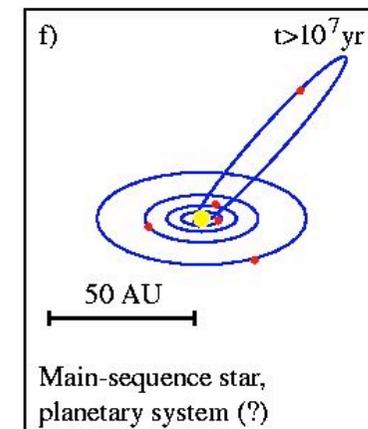
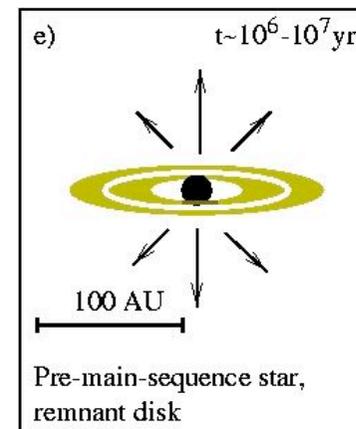
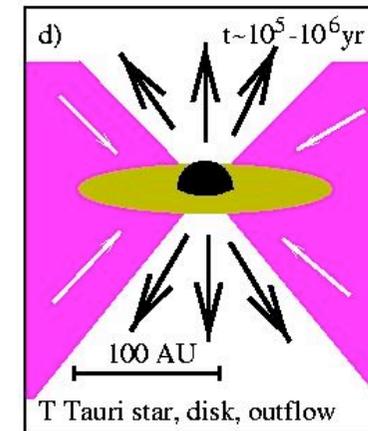
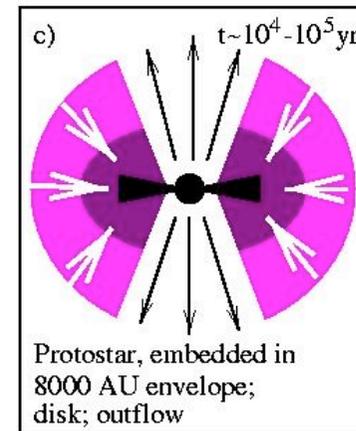
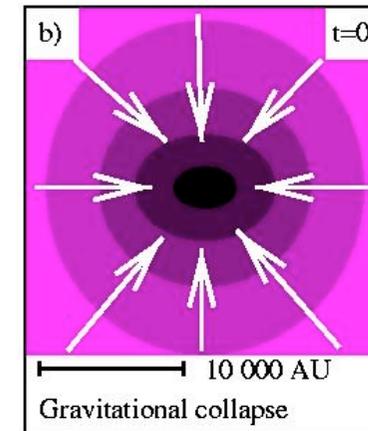
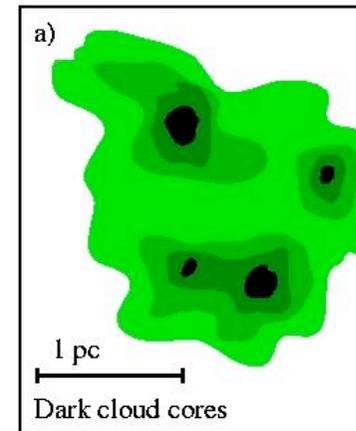
# Sterne & Planeten

# 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?

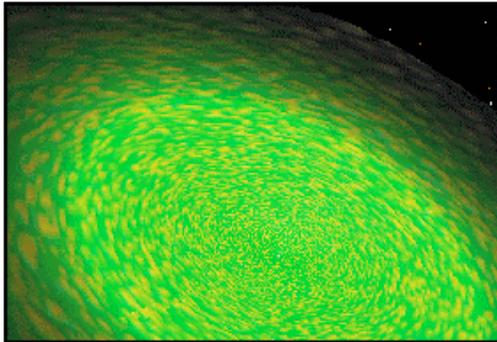
# Stadien der Sternbildung

- 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)

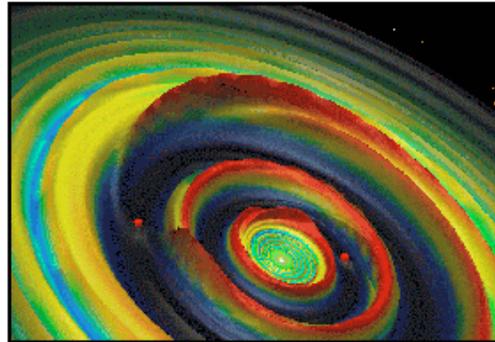


# Planeten- bildung (Sonnensystem)

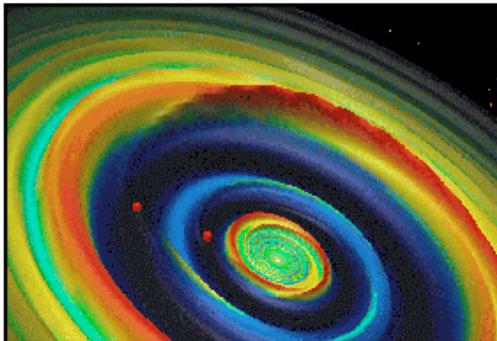
I. Initial Disk



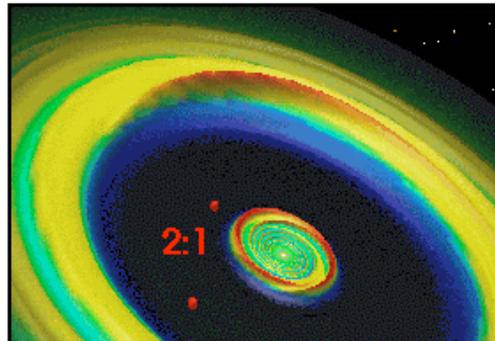
II. Gap Formation



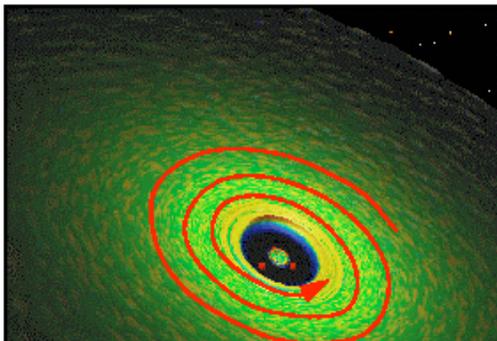
III. Gas Ring Dissipation



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*

# Zusammenfassung

# Sternentstehung

- Sterne entstehen in *überschall-turbulenten Molekülwolken*.
- Interstellare Turbulenz zerfällt rasch  $\longrightarrow$  *Energieeintrag*, oder *SE Zeitskala  $\approx \tau_{ff}$*   $\longleftarrow$  **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.*  $\longrightarrow$  *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!!!**

# 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  $\sigma$ -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!