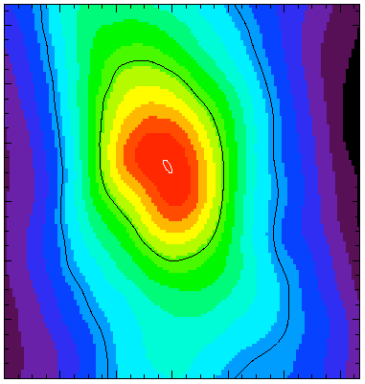
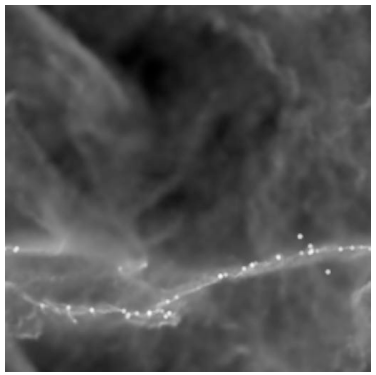
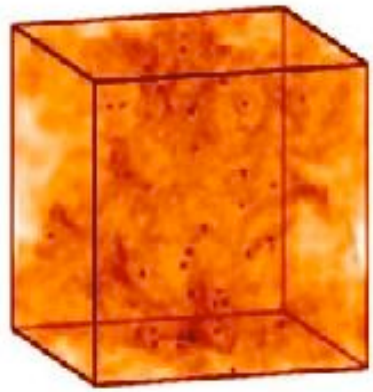
Die turbulente Geburt der Sterne



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?

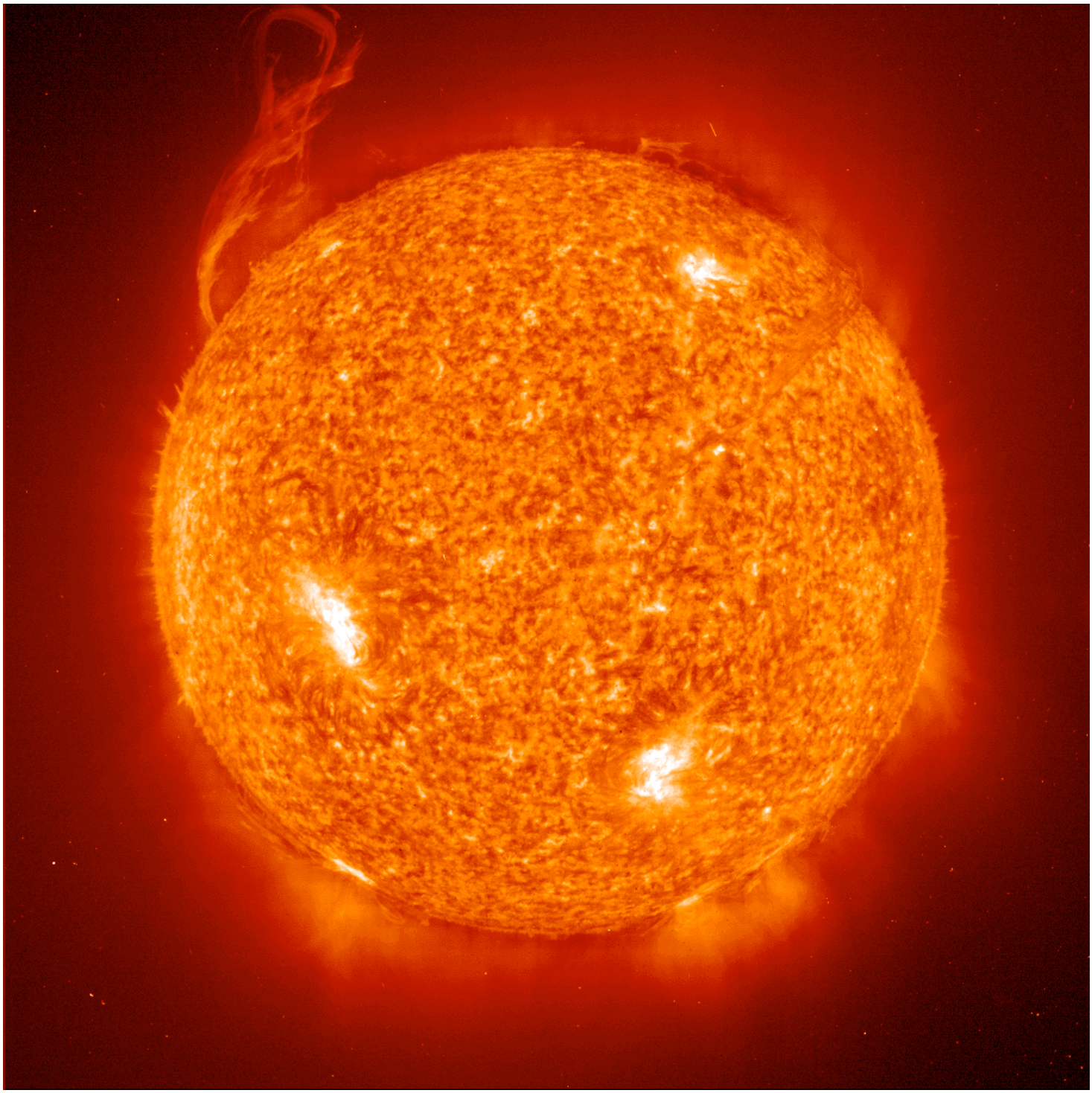
Theorie der turbulenten Sternentstehung

Phänomenologie

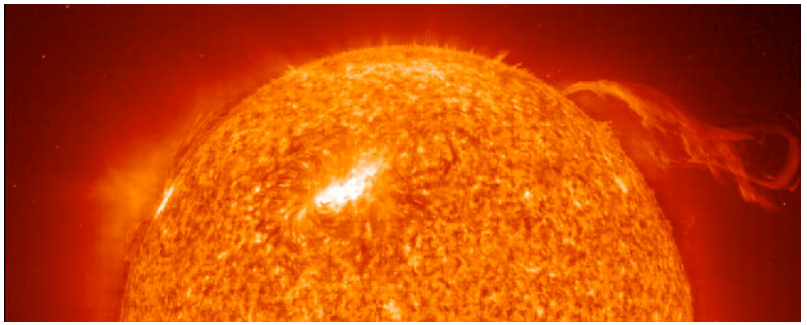
Theorie

WAS?

Unsere Sonne



Sterne: die Sonne



Eigenschaften der Sterne
(Stellare Zustandsgrößen):

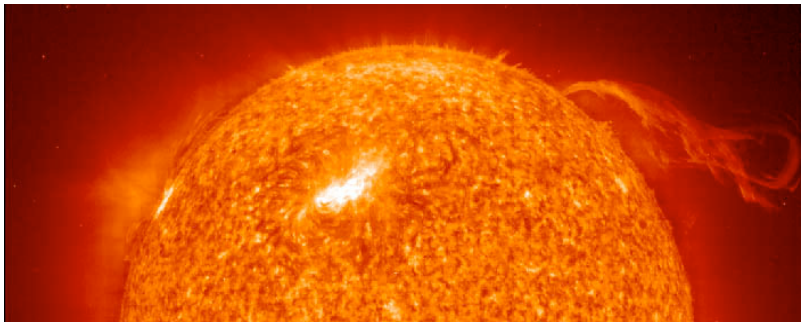
Unsere Sonne ⊙ als Referenzstern

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

auf der Erde:
Solarkonstante
1.37 kW/m^2

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

Sterne: die Sonne



Eigenschaften der Sterne
(Stellare Zustandsgrößen):

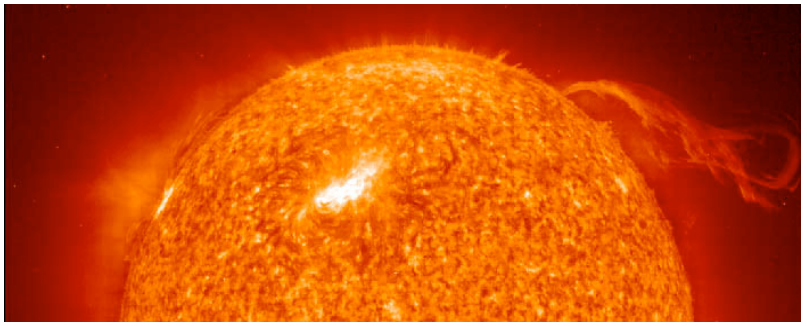
Unsere Sonne ⊙ als Referenzstern

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

in cgs Einheiten

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

Sterne: Statistische Charakeristika

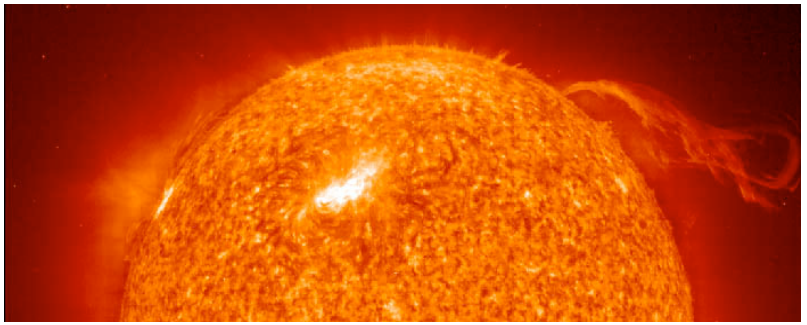


Sterndichte in der Sonnenumgebung $n_* \approx 0{,}05\ pc^{-3}$
Sterndichte im Orion-Trapezhaufen $n_* \approx 10^3\ pc^{-3}$
Sterndichte in Starburst-Regionen $n_* \approx 10^4\ pc^{-3}$

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

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

Sterne: Statistische Charakeristika



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

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

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

Skalen:

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

Astronomische Skalen

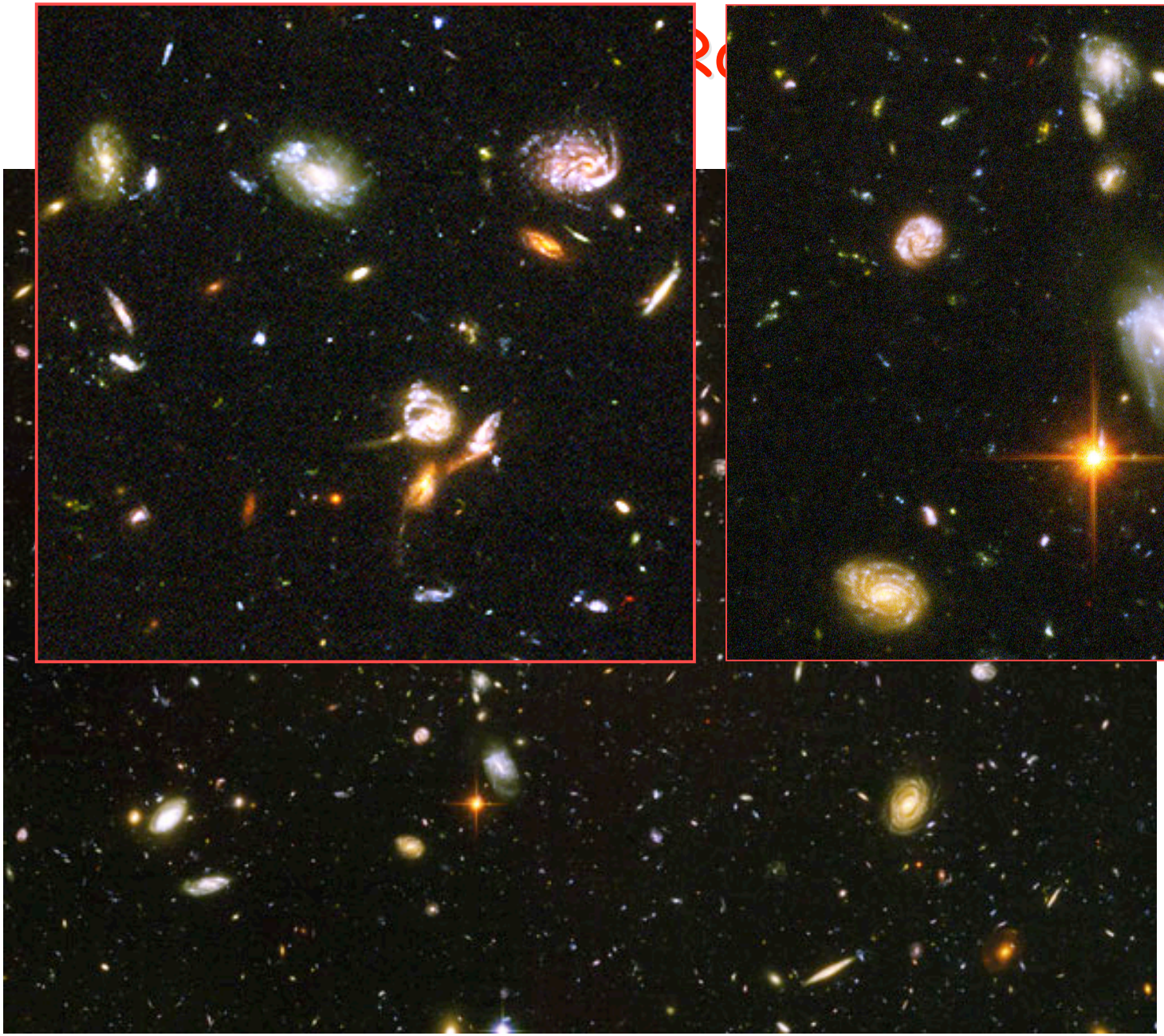
Länge	1 parsec	=	$3{,}086 \times 10^{18}$ cm ≈ 3,26 Lichtjahre
	1 AU	=	$1{,}50 \times 10^{13}$ cm ≈ 1/200.000 pc
Masse	1 $M_\odot$	=	$1{,}99 \times 10^{33}$ g
Zeit	1 Jahr	=	$3{,}15 \times 10^{7}$ s
Geschwindigkeit	1km/s	=	10^5 cm/s = 3.600 km/h

(Lichtgeschwindigkeit c = 3×10^{10} cm/s)

Beispiel 2:

Druck im Sonneninneren	$2{,}5 \times 10^{11}$ bar ≈ $7{,}8 \times 10^{25}$ Teilchen / cm^3 (130 g/cm^3)
Druck in Erdatmosphäre	1013 bar ≈ 2.5×10^{19} Teilchen / cm^3
technisch erzeugtes Ultrahochvakuum	10^{-9} bar ≈ 2.5×10^{7} Teilchen / cm^3
Sternbildendes Gas	10^3 – 10^4 Teilchen / cm^3
Interstellares Gas im Mittel	*einige* Teilchen / cm^3

WANN?
WO?



ng

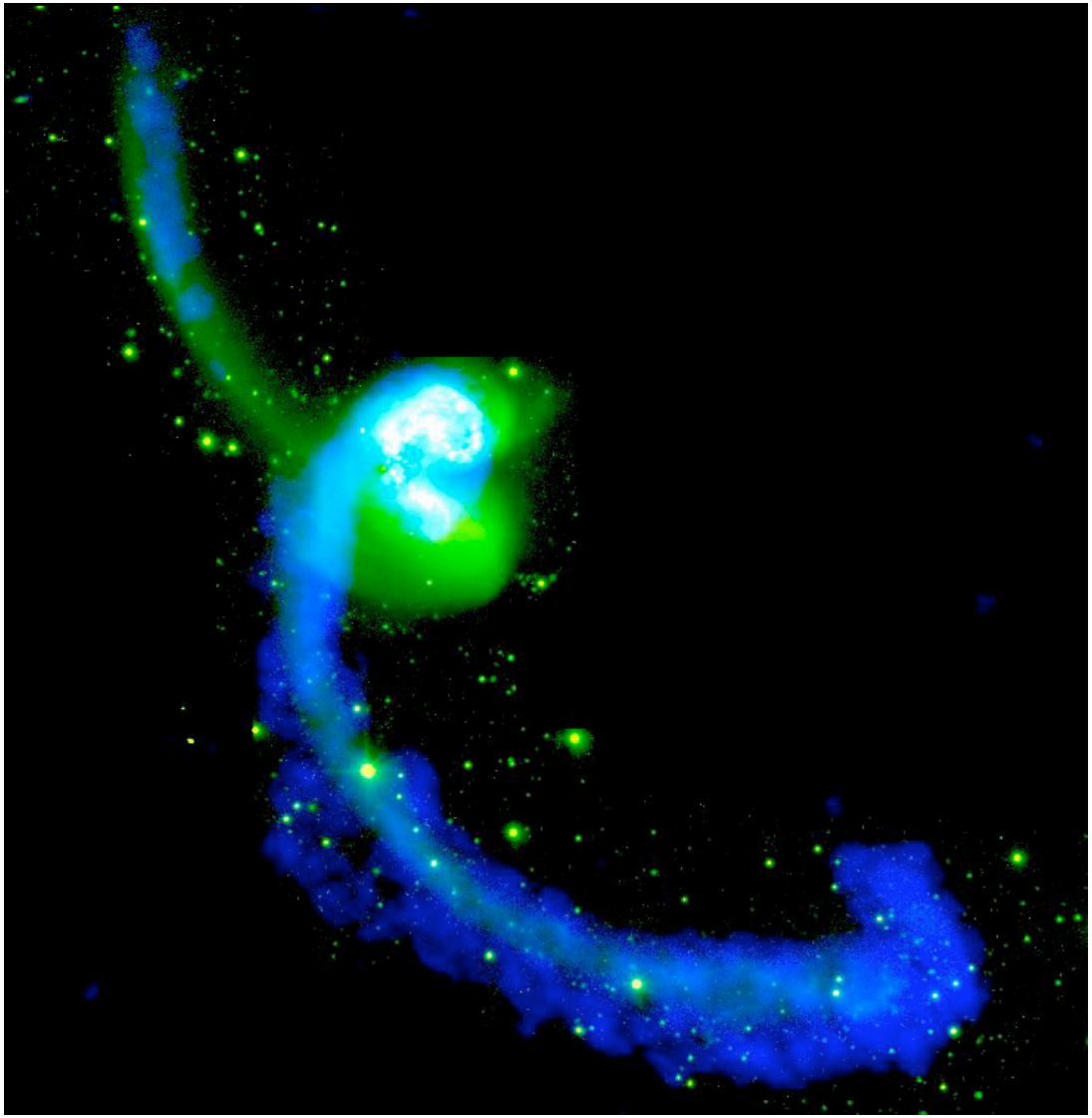
üh

(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

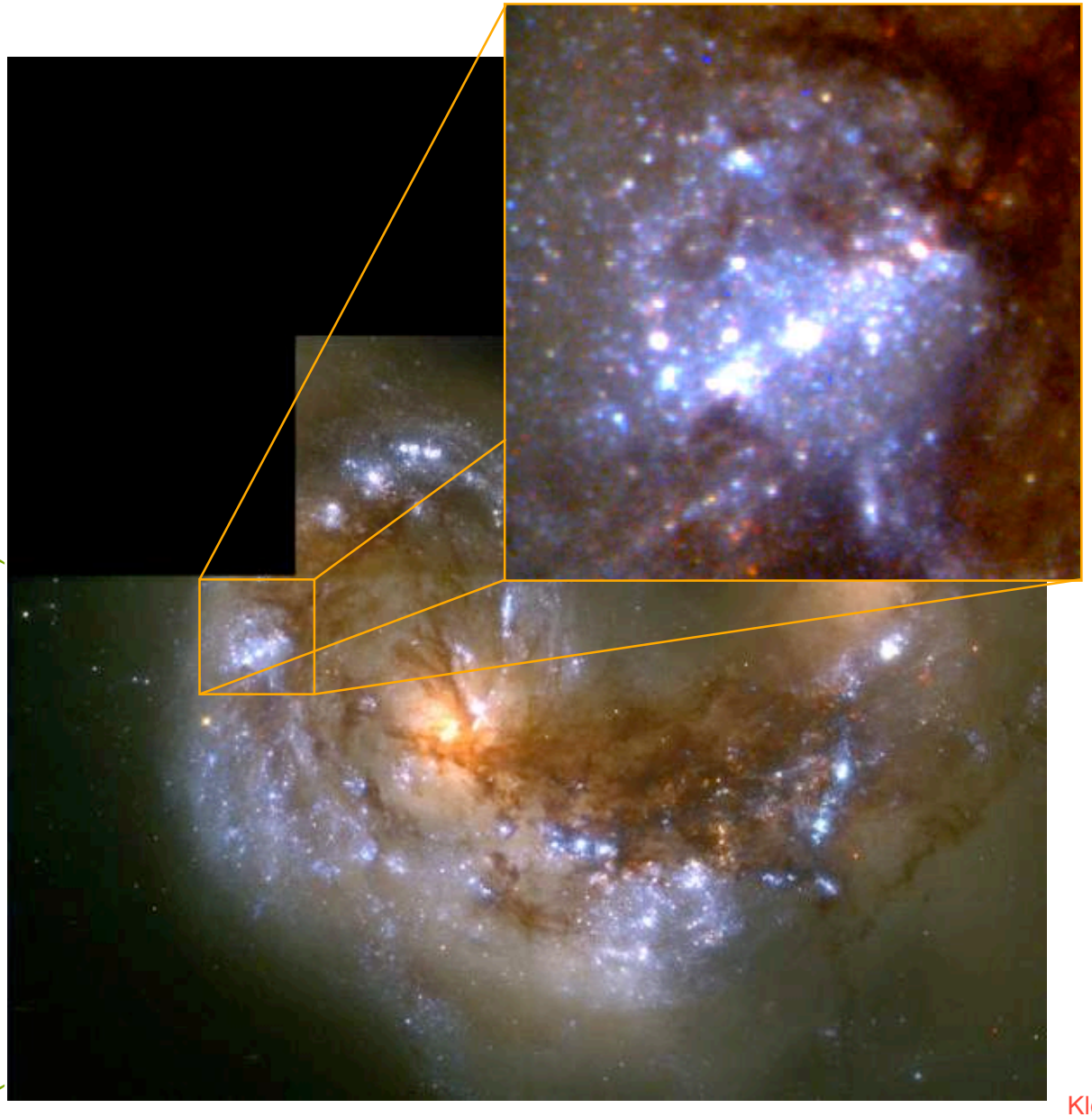


(Antennae Galaxie: Chandra Webpage)

Antennae Galaxie

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

Sternentstehung in wechselwirkenden Galaxien

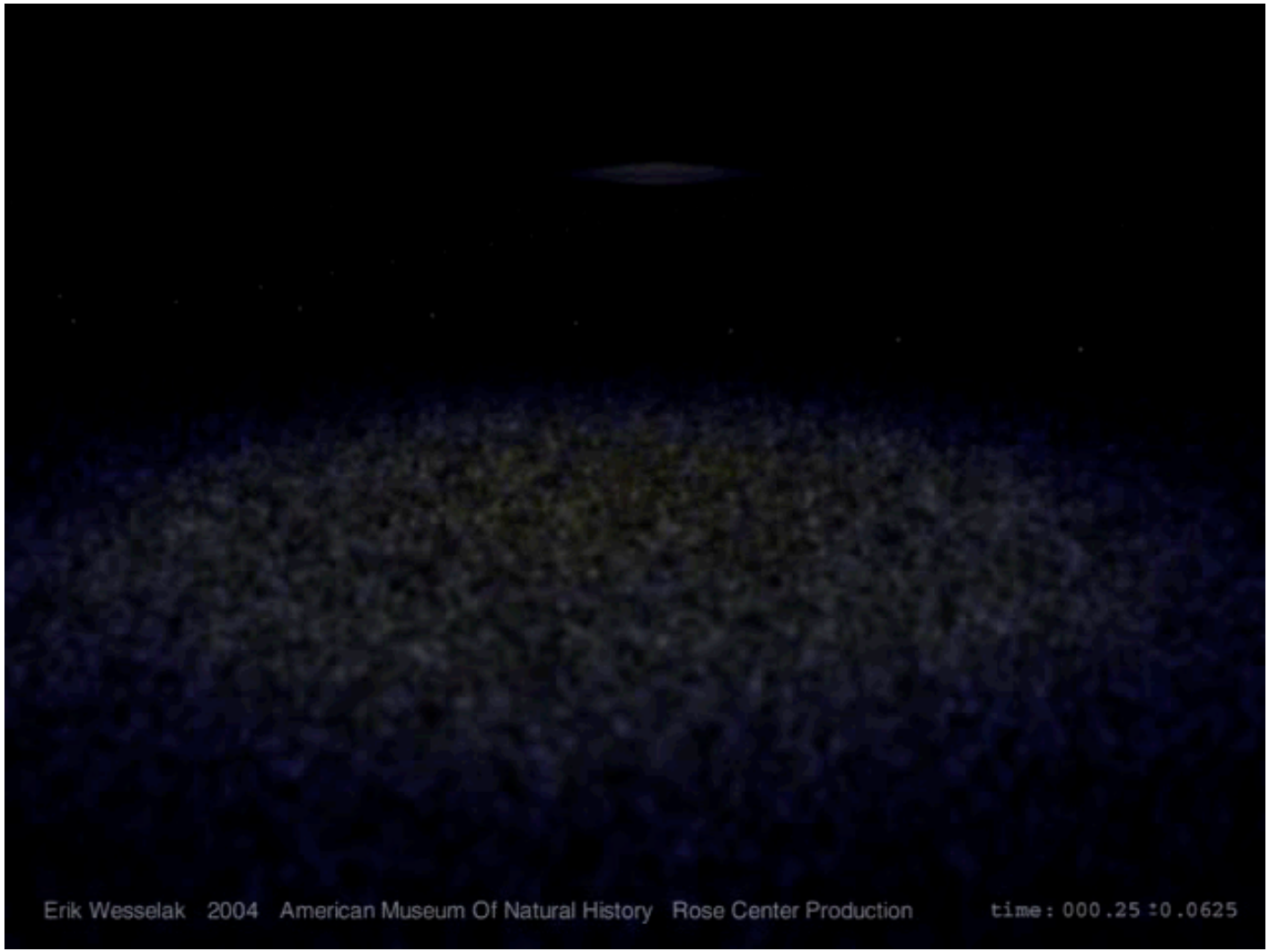


(HST: Whitmore & Schweizer 1997)

Antennae Galaxie

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

Galaxienkollision



Modell der Kollision der Milchstraße mit Andromeda (Yuexing Li, AMNH)

Sternentstehung in "normalen" Galaxien:

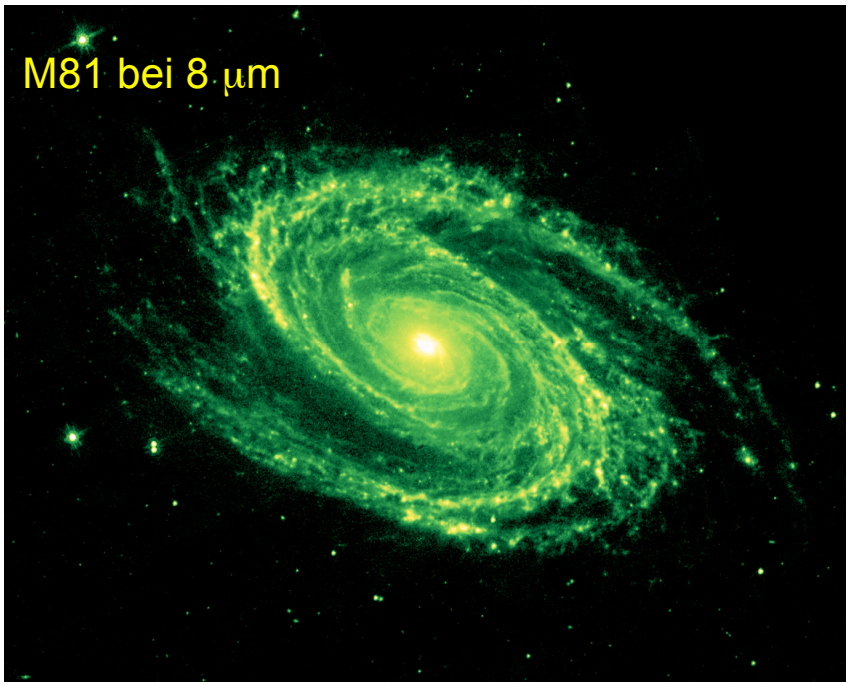
(from the Hubble Heritage Team)

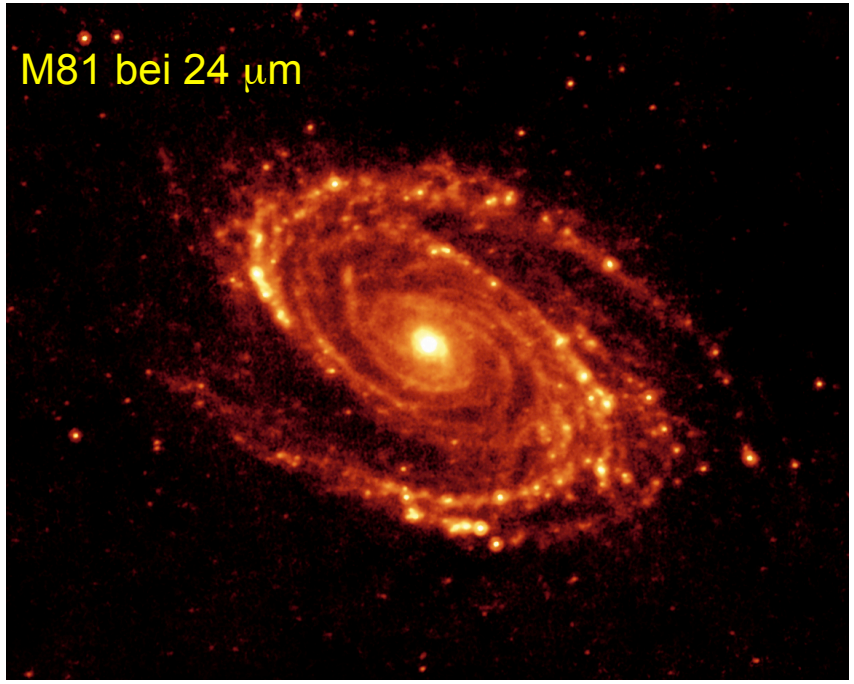
NGC4622

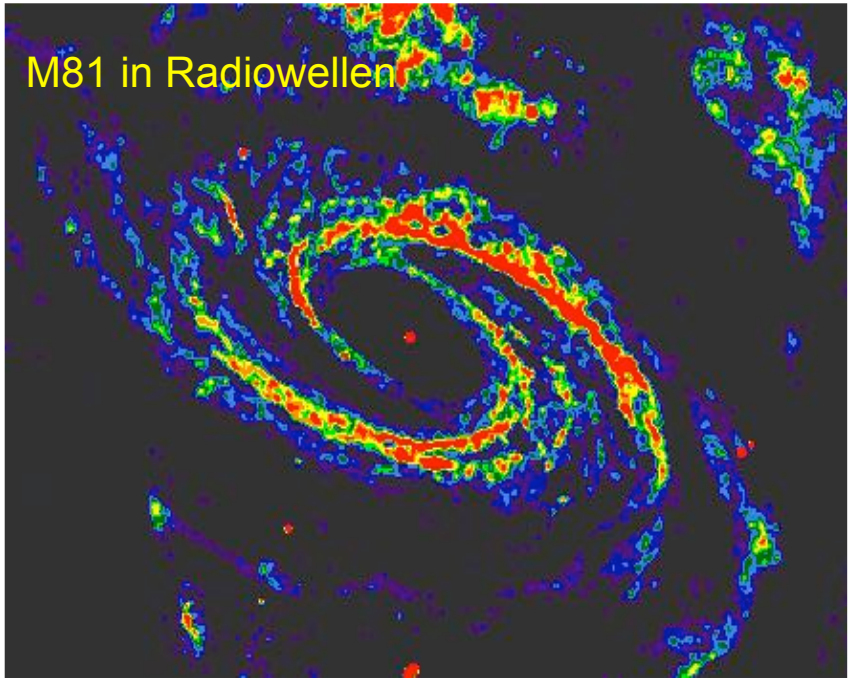
- Sternentstehung dauert bis *heute* an.
- Sternentstehung ist *immer* verbunden mit *Wolken aus Gas und Staub*.
- Staub- und Gasbänder findet man *häufig* (aber nicht immer) in Verbindung mit Spiralarmen
- Dasselbe gilt für die Sternentstehung.

The Sombrero Galaxy — M104
HUBBLESITE.org

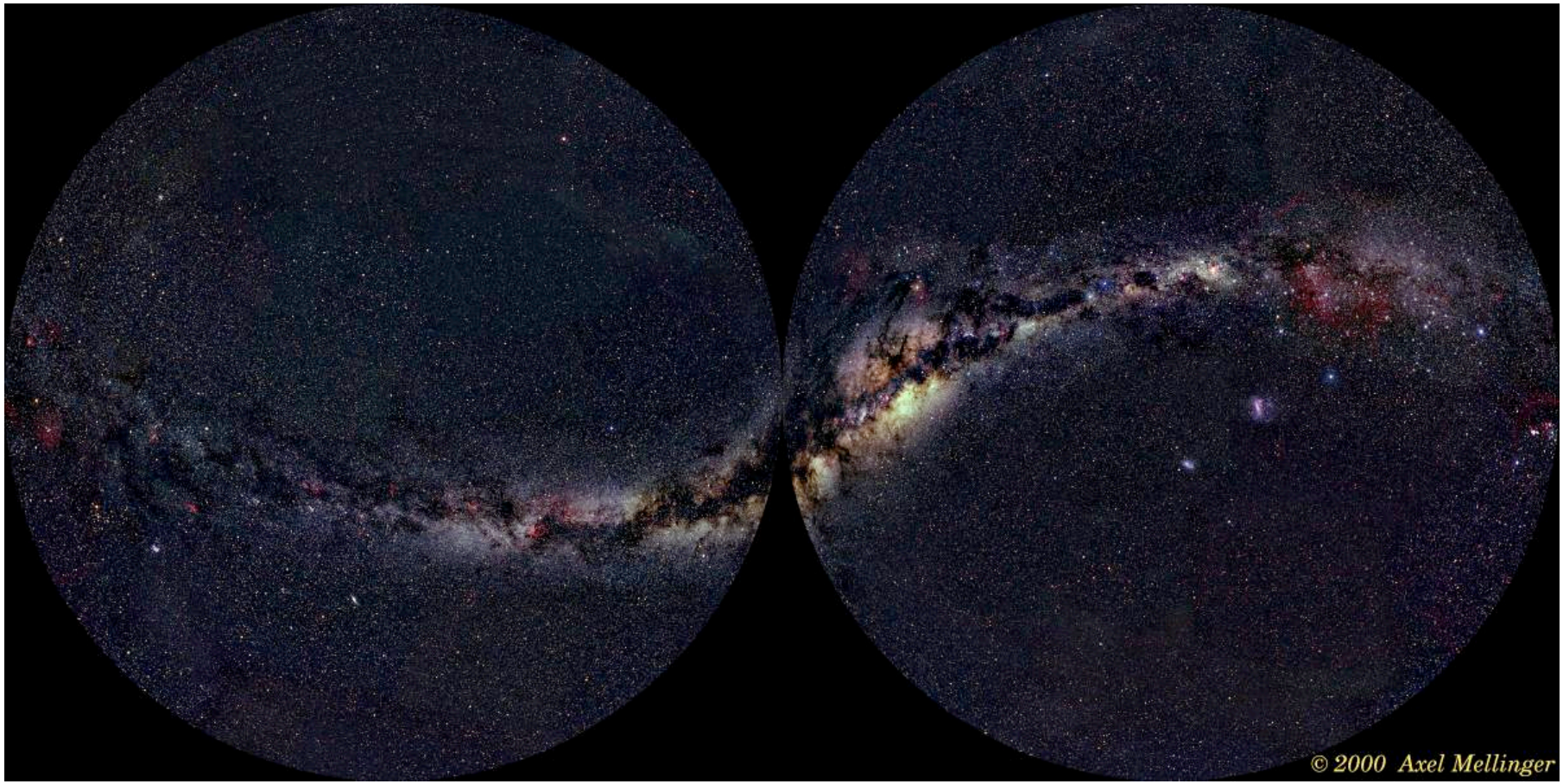
Zusammenhang zwischen Sternbildung und Gasverteilung am Beispiel von M81



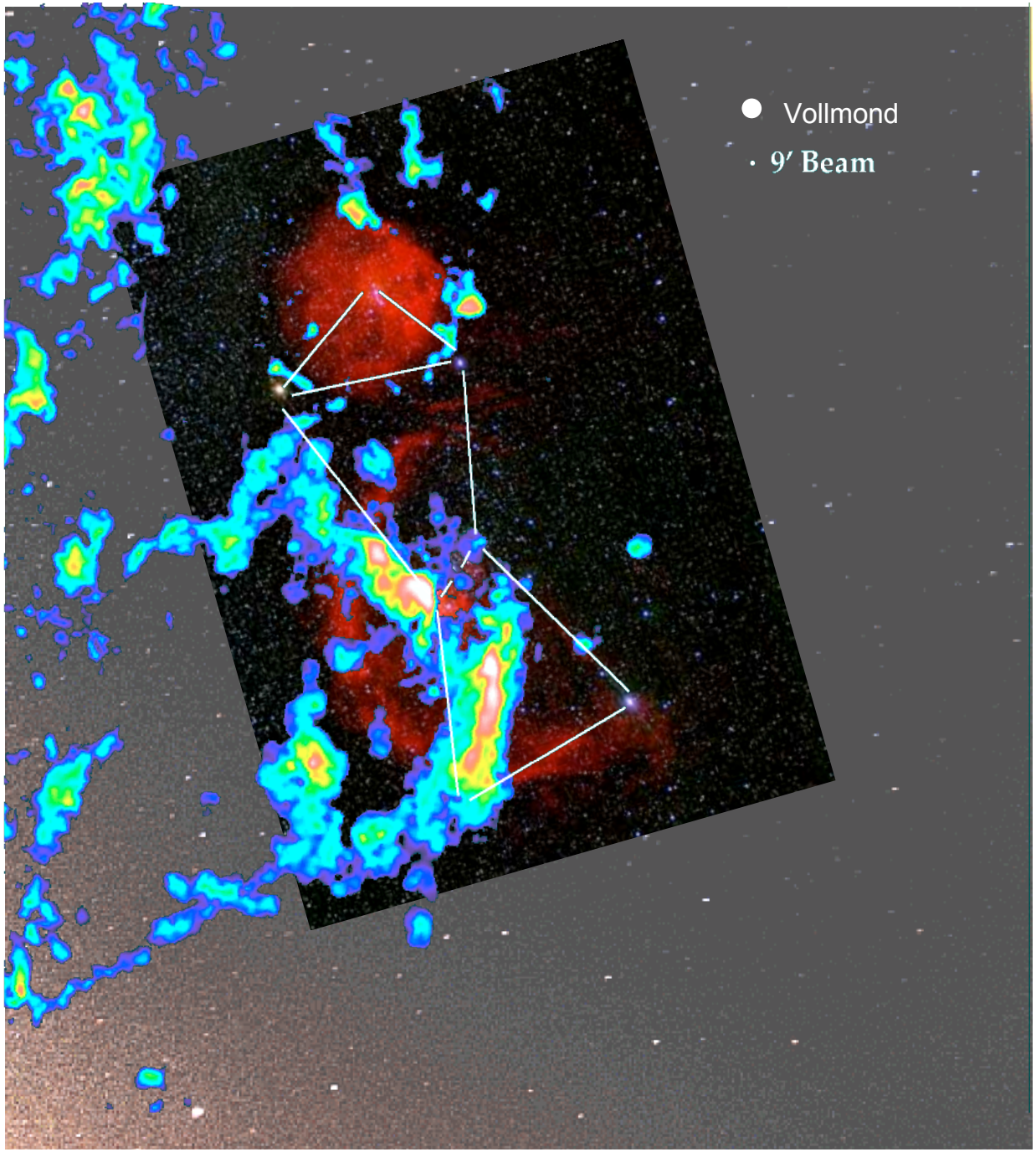




Sternentstehung in der Milchstraße



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.

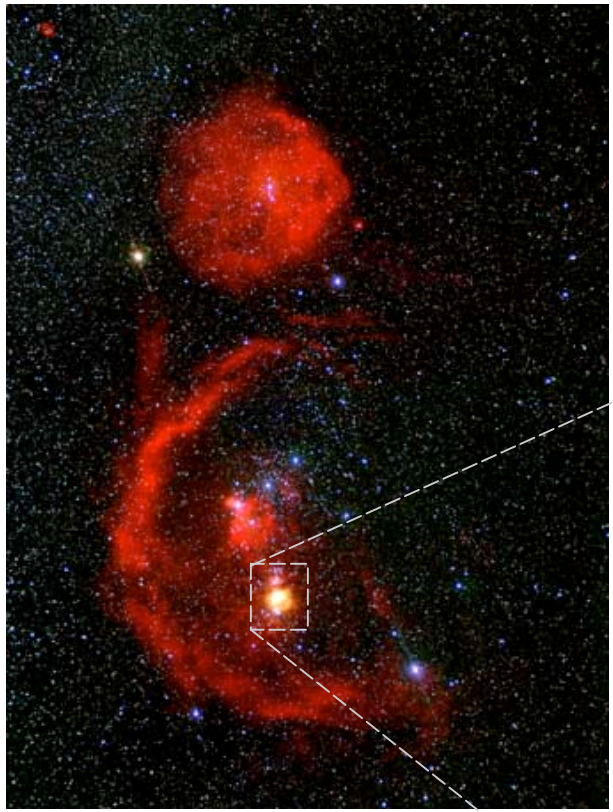


Stern-entstehung in Orion

Wir sehen

- *Sterne* (im sichtbaren Licht)
- Atomaren Wasserstoff (in Hα -- *rot*)
- Molekularen Wasserstoff H_2 (Radiostrahlung von Tracermolekül CO *farbcodiert*)

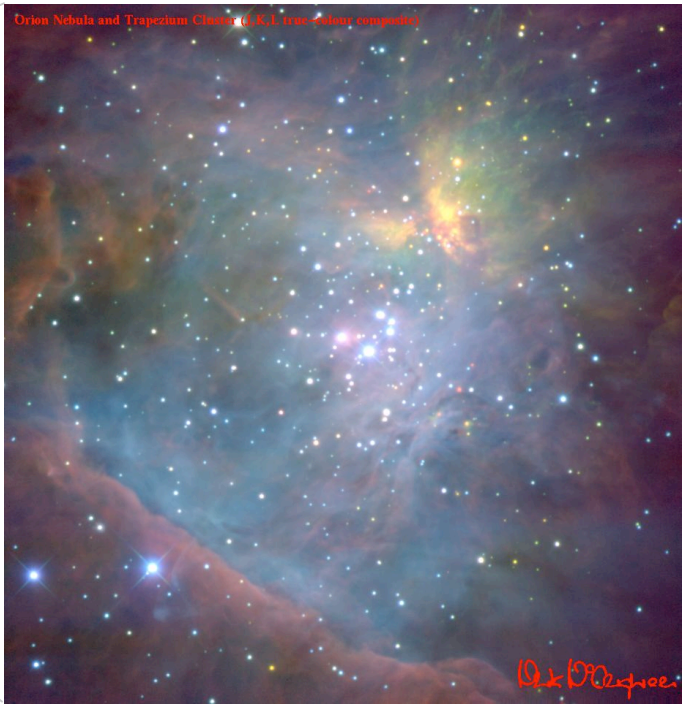
Lokales SE Gebiet: Trapezhaufen in Orion



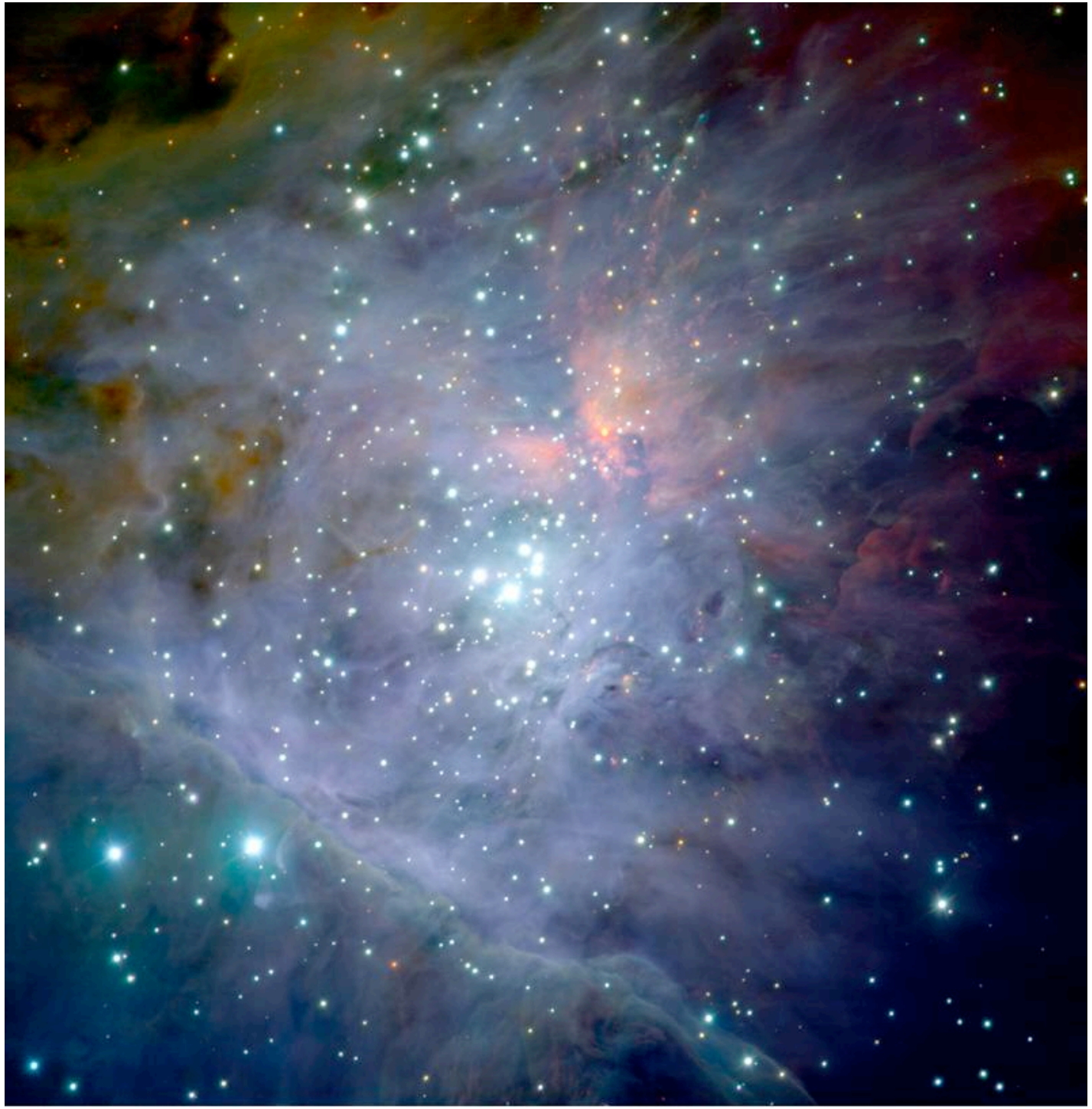
Sternbild Orion

Die Orionmolekülwolke ist die Geburtsstätte mehrer junger Sternhaufen.

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



Trapez-
haufen

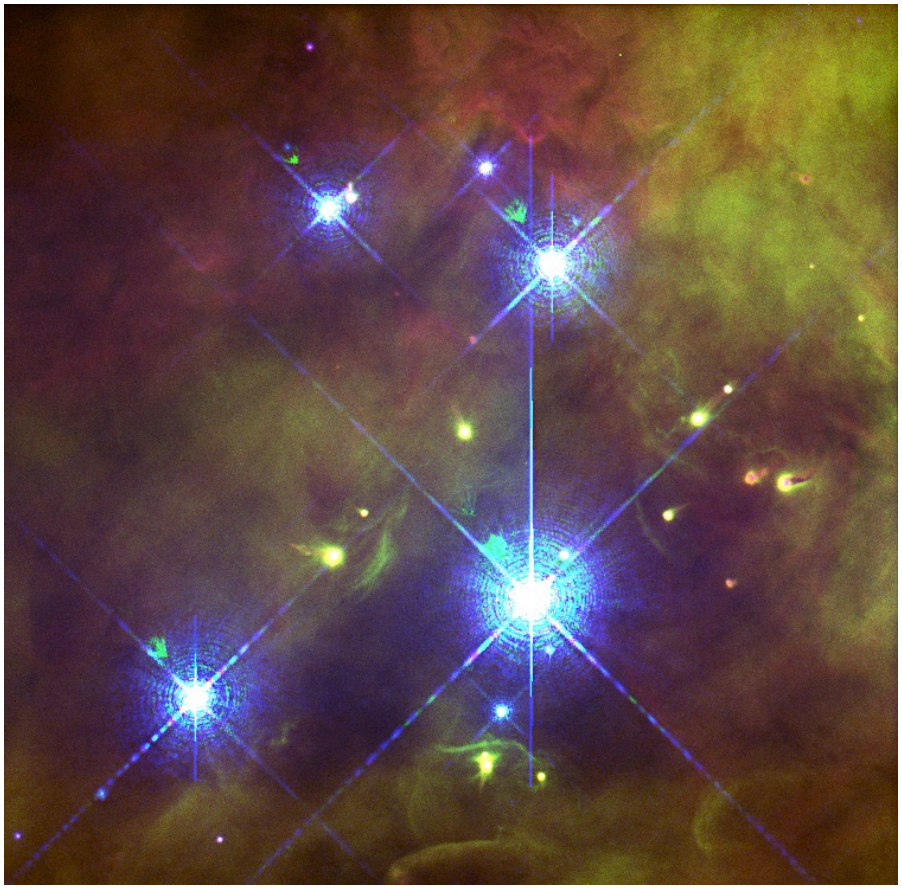


Trapez-haufen (Detail)

- Sterne entstehen in Haufen
- Sterne entstehen in Molekülwolken
- Rückkopplungseffekte sind wichtig

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

Trapezhaufen: Zentralgebiet

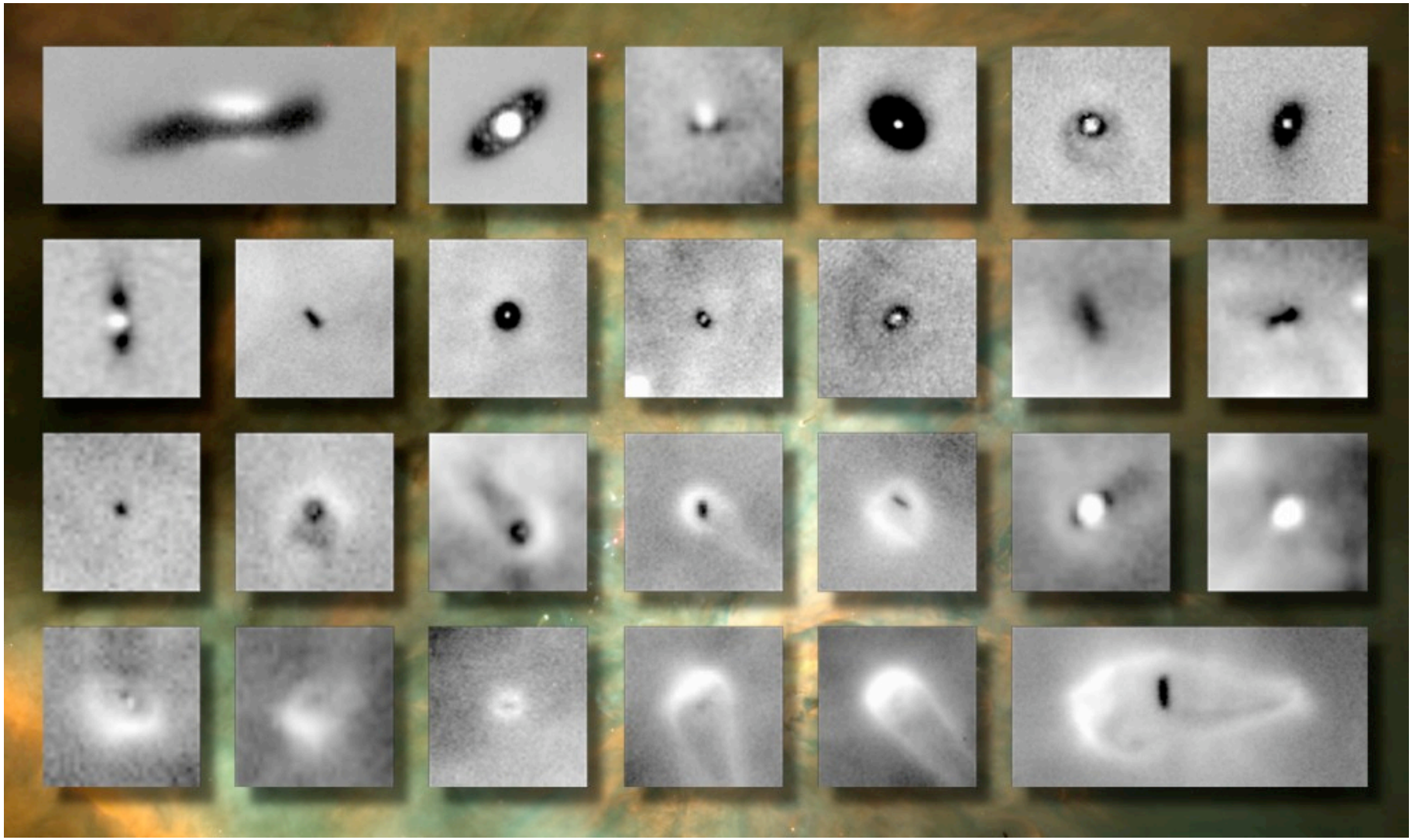


Der Großteil der ionisierenden Strahlung kommt vom Zentralstern **Θ1C Orionis**

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

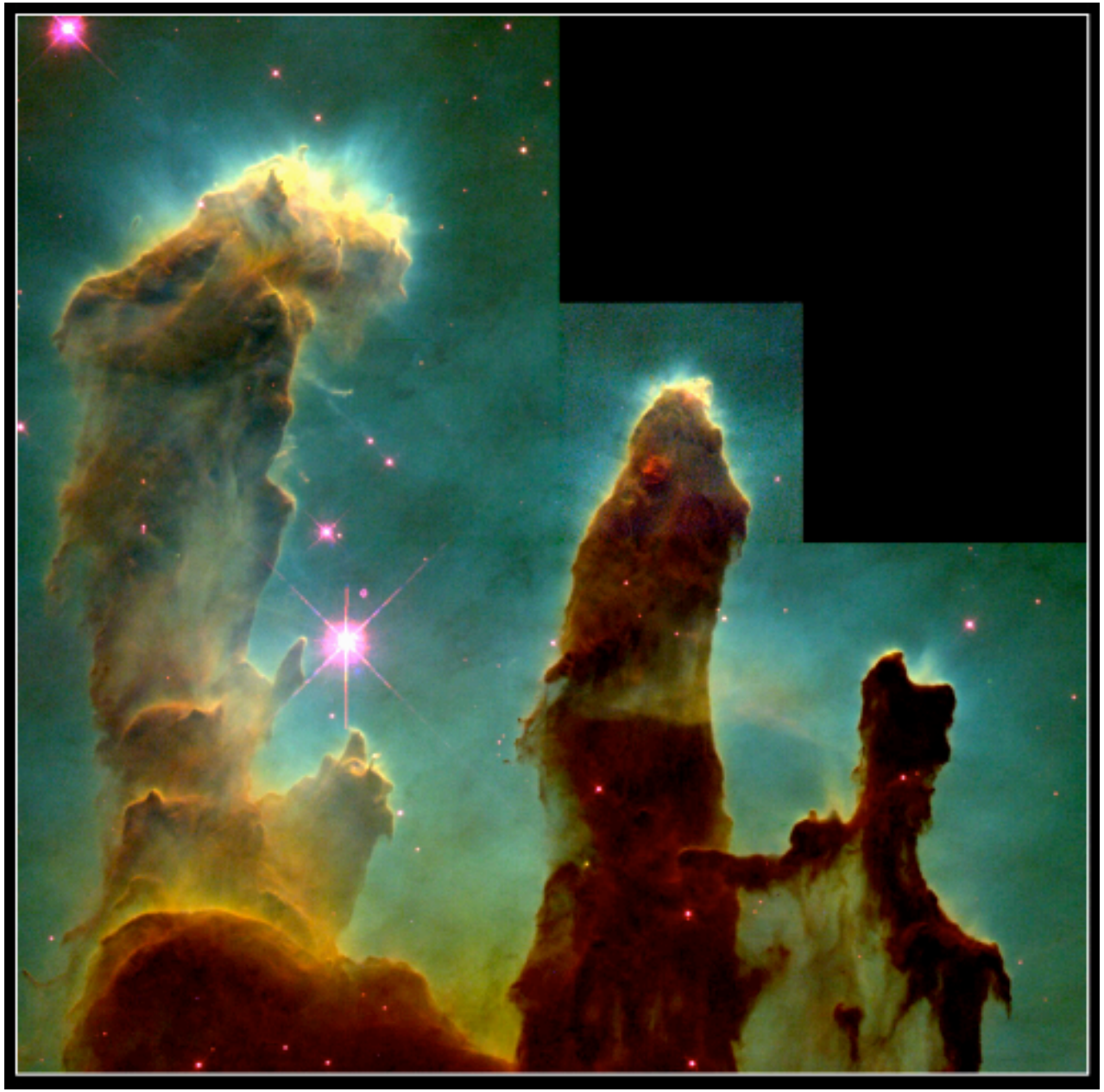
(Abbildung Doug Johnstone et al.)

Weitere Details: Siluett-Scheiben in Orion



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

(Daten von Mark McCaughrean)



HST Aufnahme

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

Aufnahme im Infraroten.

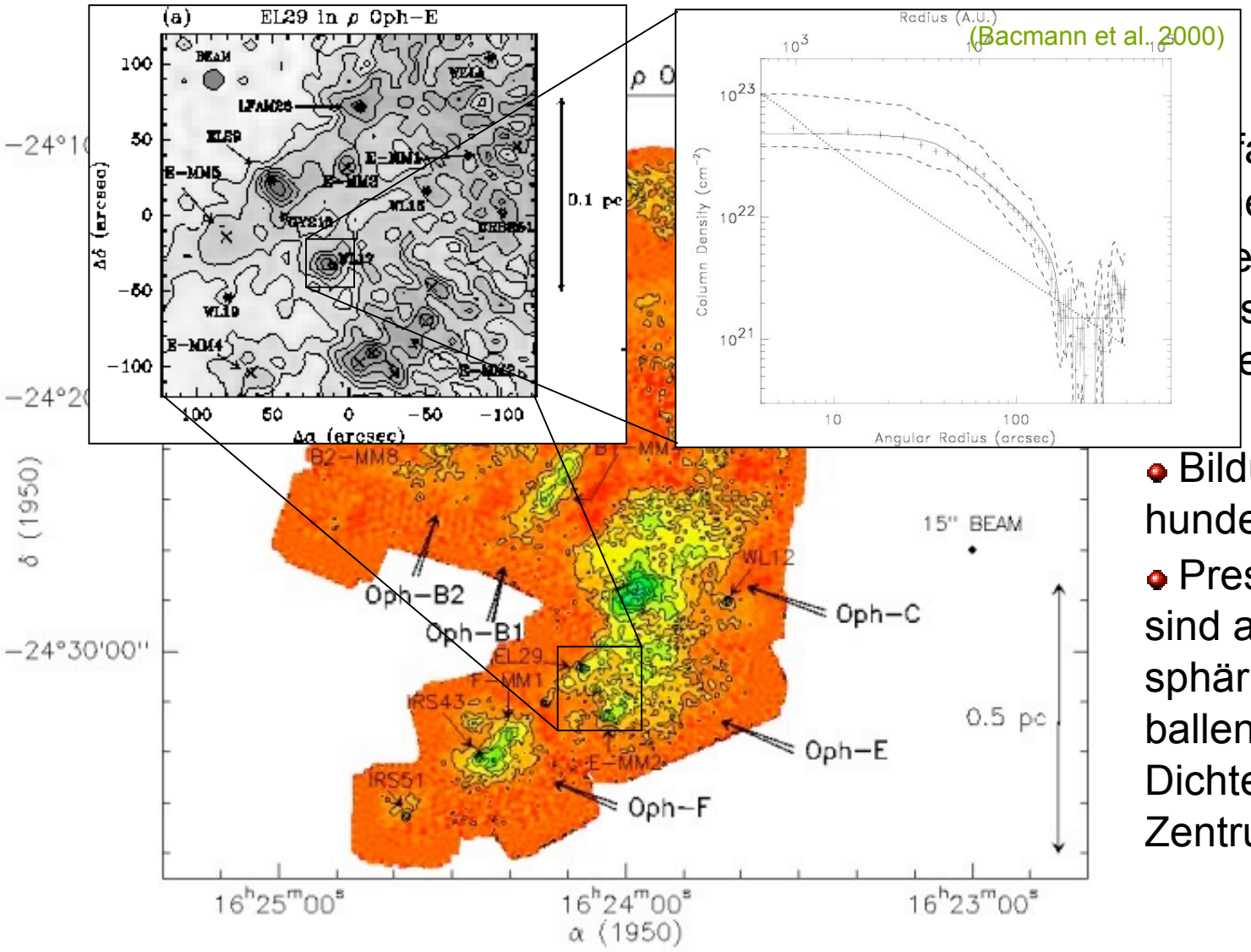
IR Aufnahme mit dem ESO-VLT

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….

ρ-Ophiuchus: Staubemission (sub-mm)



(Motte, André, & Neri 1998)

fangsphase
entstehung
existenz von
stellaren und
ellaren Objek-

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

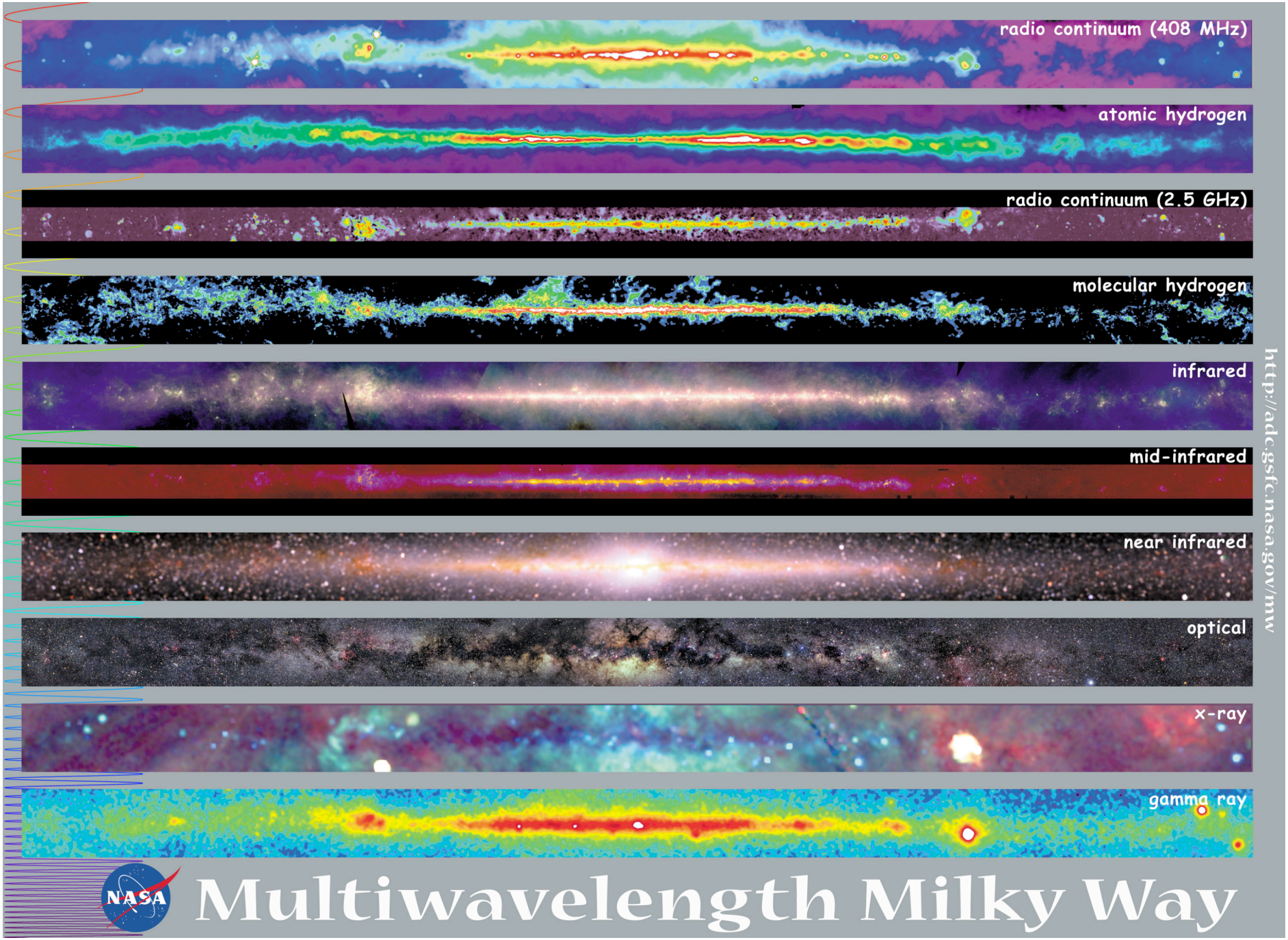
WIE?

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)
- γ-Strahlung: Supernovae Reste (radioaktiver Zerfall, z.B. ^{26}Al), kompakte Objekte, Verschmelzen von Neutronensternen (Gamma-Ray-Burst)


radio continuum (408 MHz)
atomic hydrogen
radio continuum (2.5 GHz)
molecular hydrogen
infrared
mid-infrared
near infrared
optical
x-ray
gamma ray
http://adc.gsfc.nasa.gov/mw
NASA
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	$_1H^2$	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

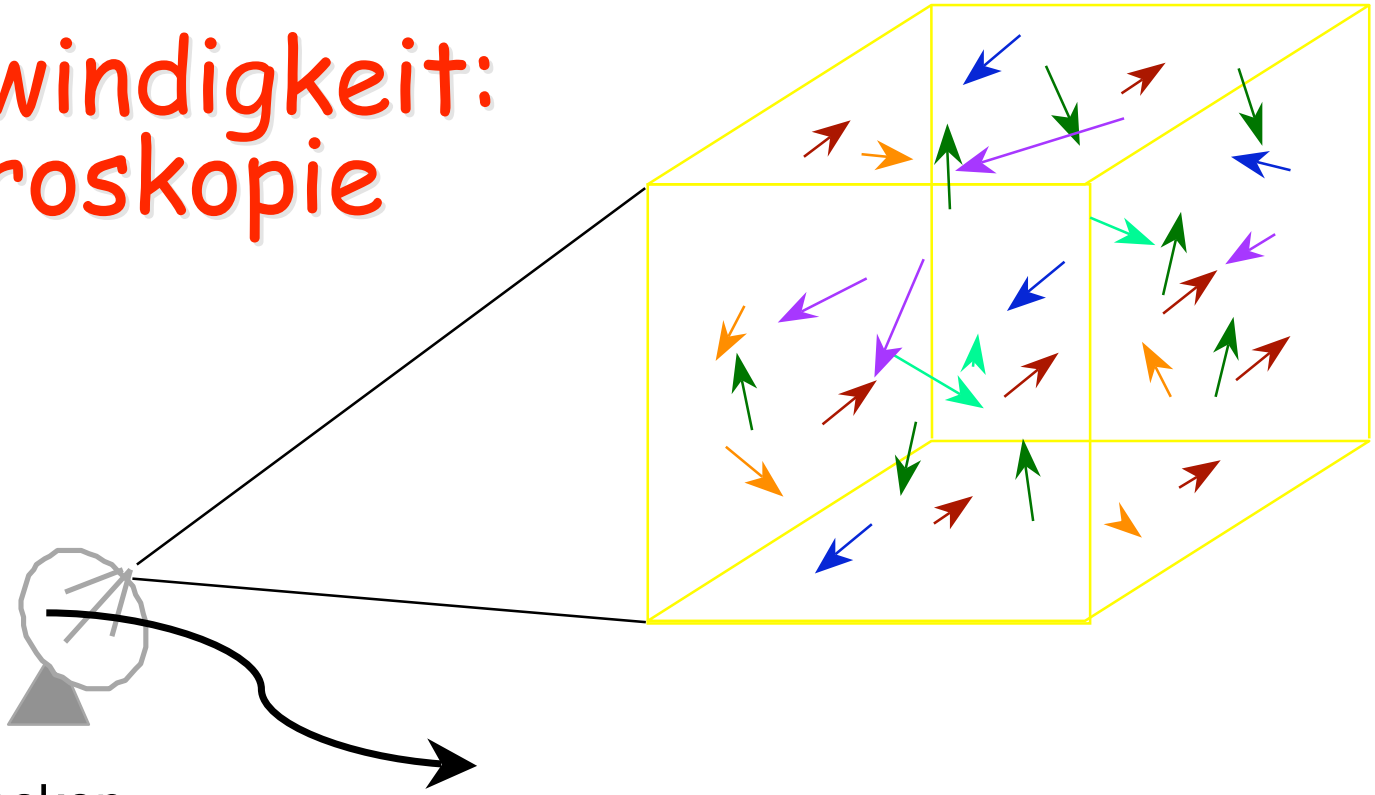
Die jeweiligen Regionen bestehen nahezu zu 100% aus der entsprechenden Komponente, wobei, die Grenzgebiete zwischen HII, H und H_2 sehr dünn sind.

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

ISM-Eigenschaften

- Verschiedene Phasen: am wichtigsten für Sternentstehung ist Molekularer Wasserstoff → **Molekülwolken**
- Wichtigste Wellenlängen: **IR und Radio-Strahlung** (Staubkontinuum und Molekülllinien: CO, NH_3, 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

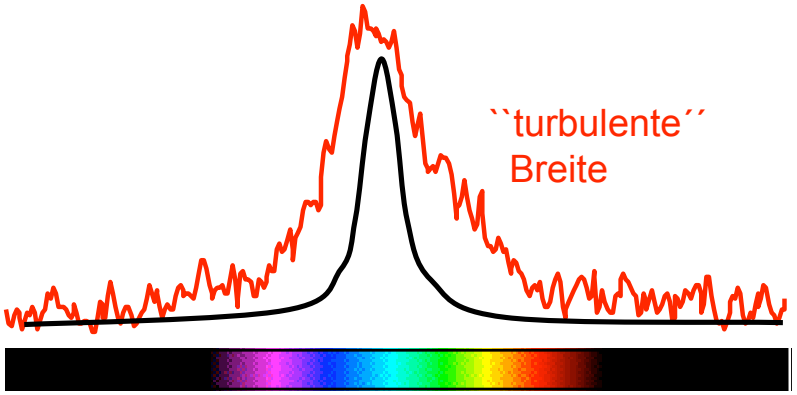
Geschwindigkeit: Spektroskopie



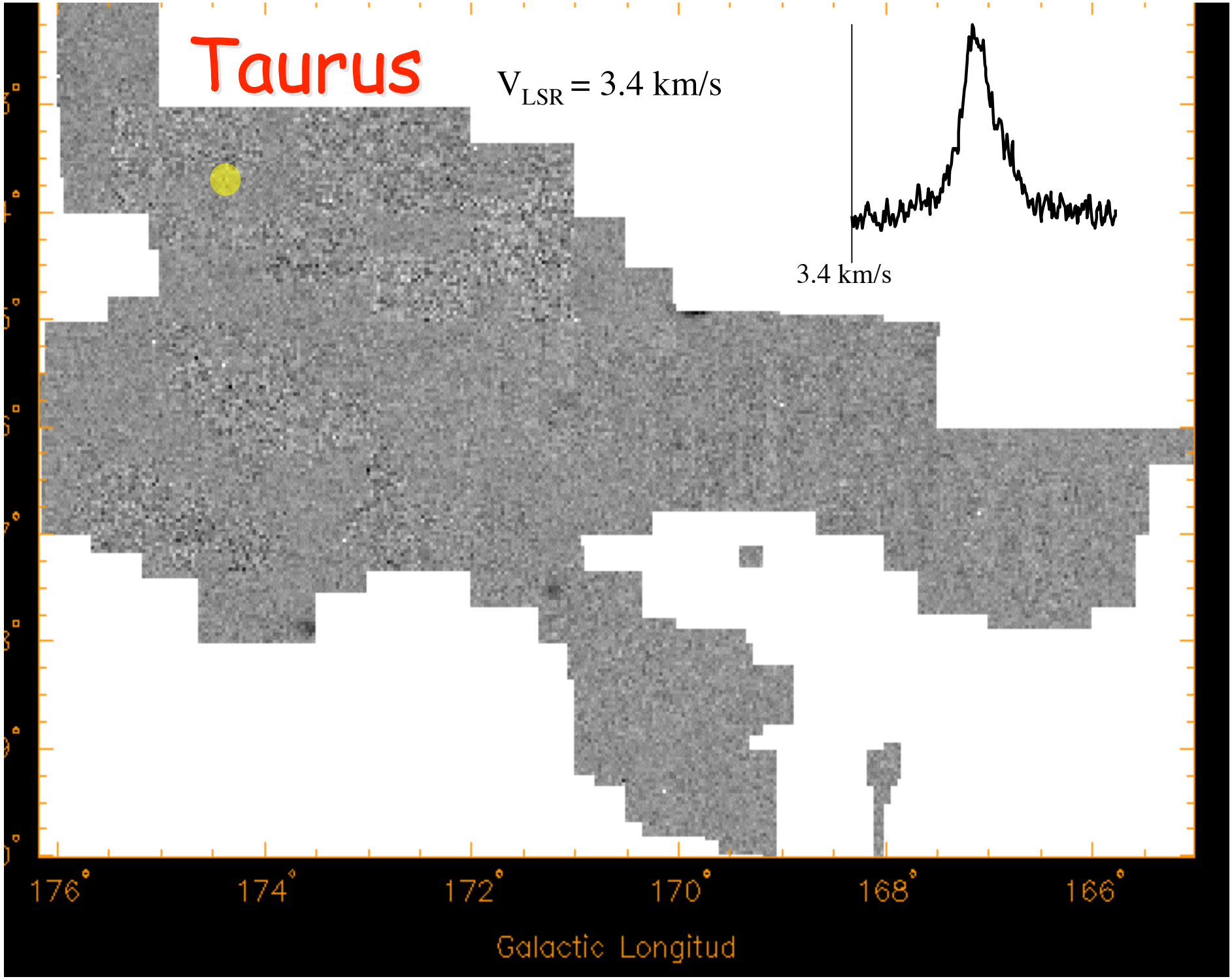
Teleskop +
Spektrometer

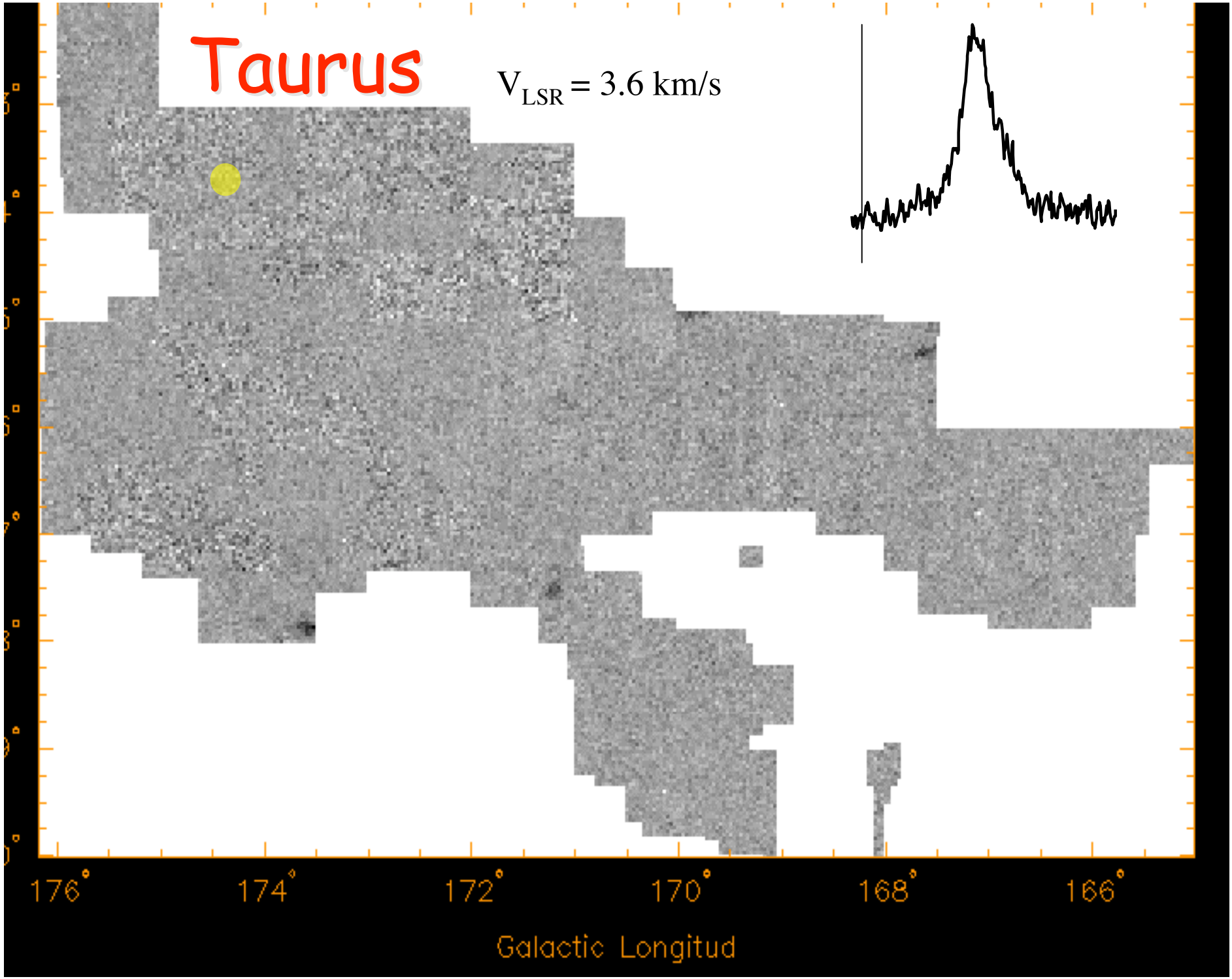
Doppler -Verschiebung

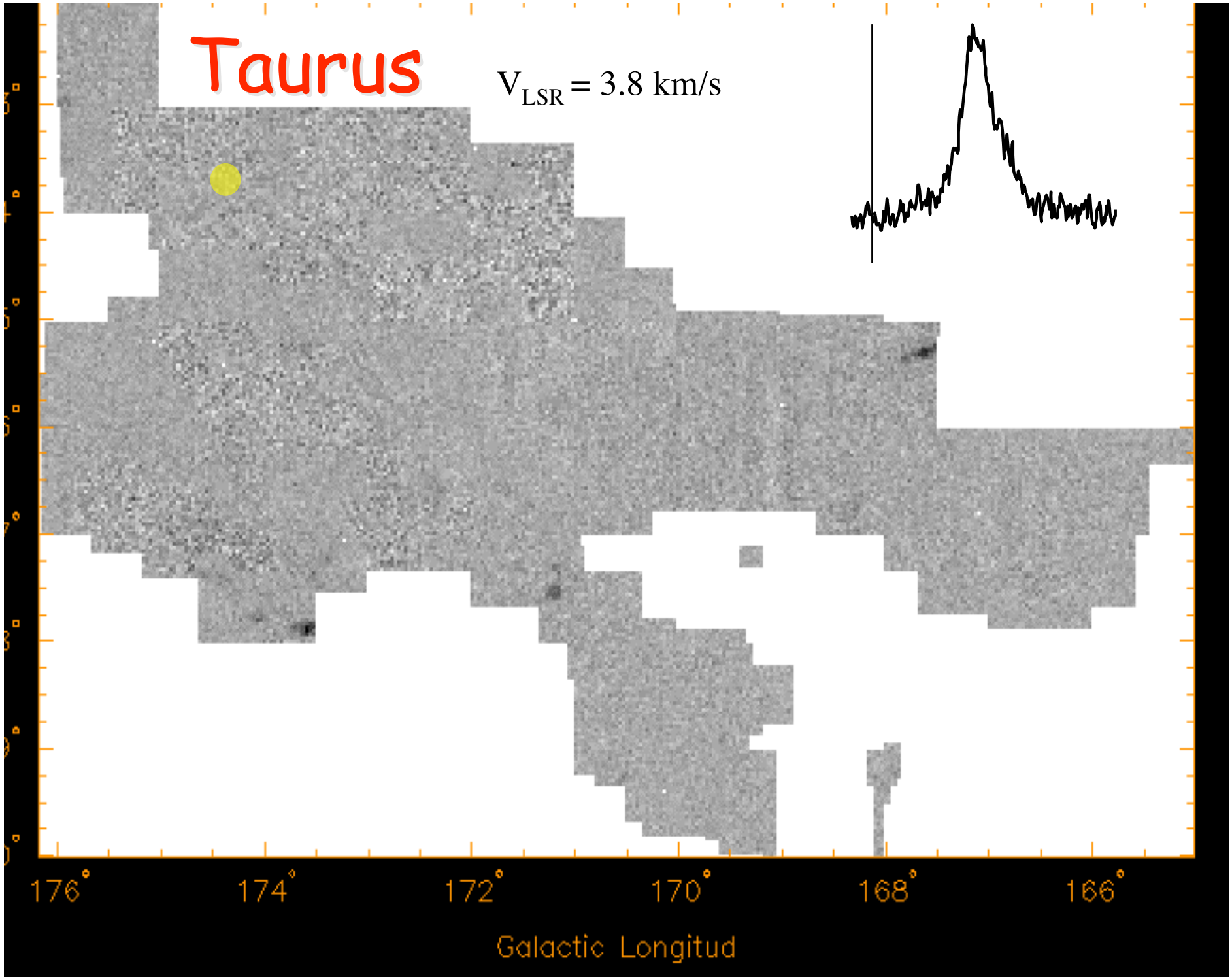
Überschallturbulenz da beobachtete Linienbreite größer als thermische Breite!!!

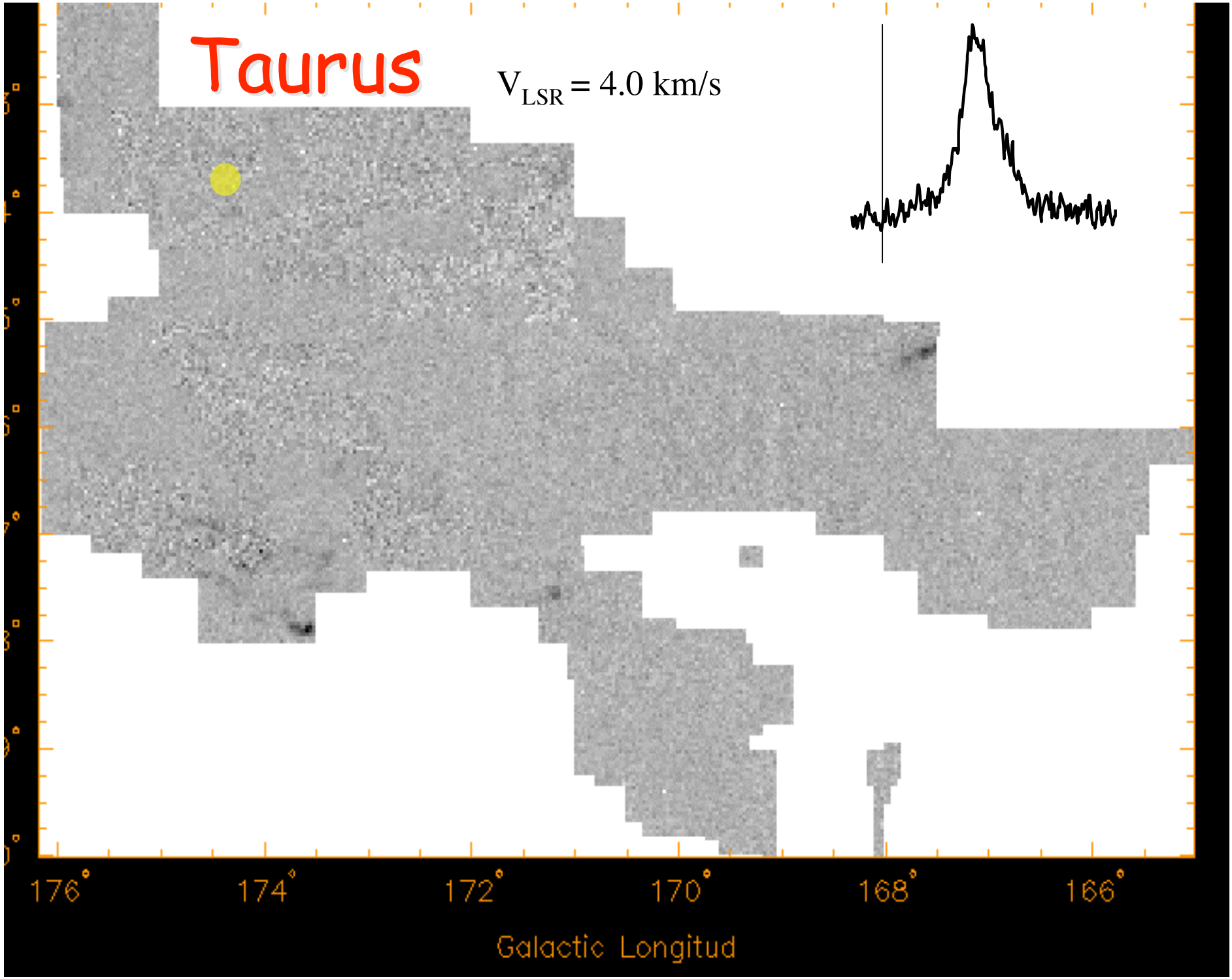


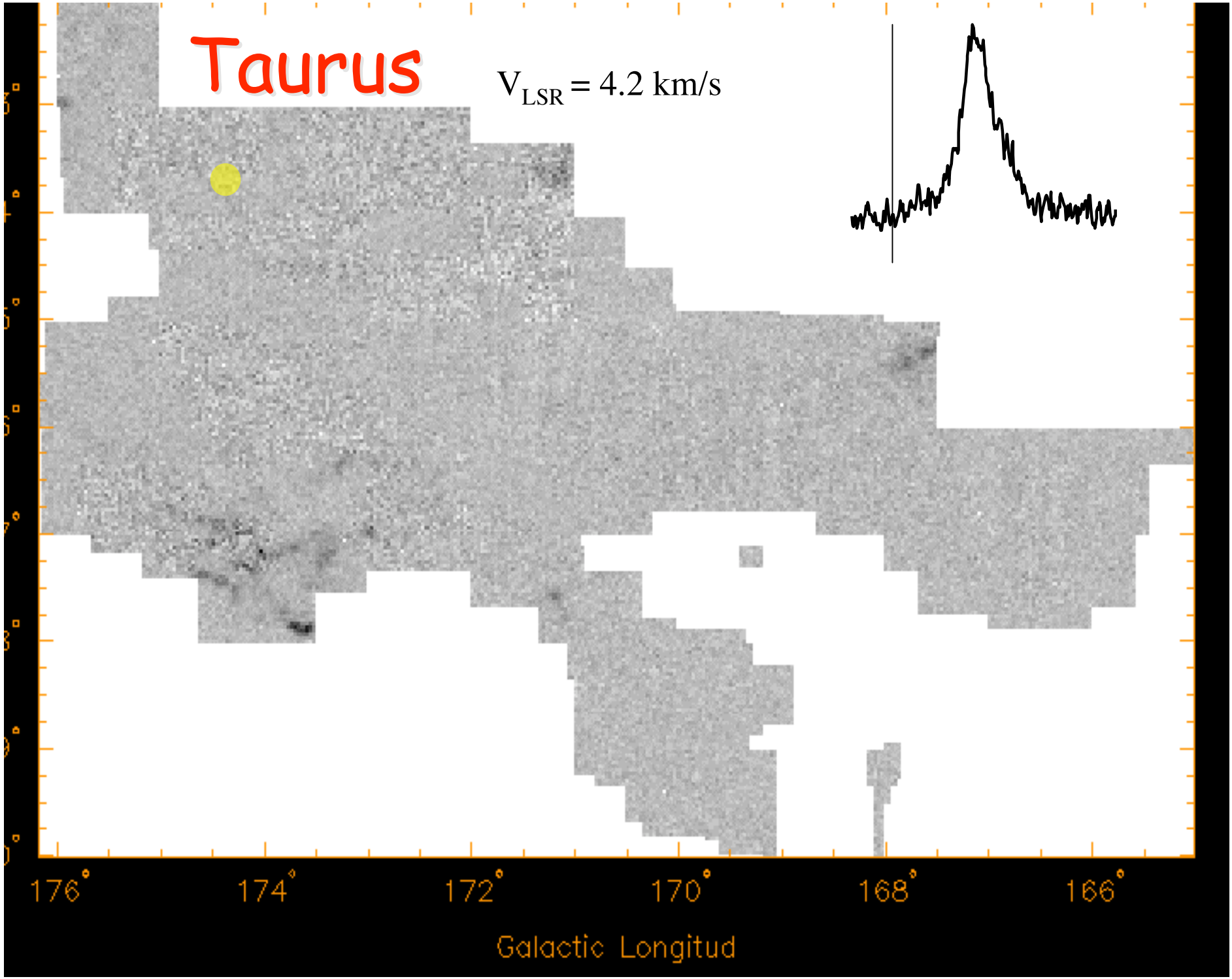
thermische Breite

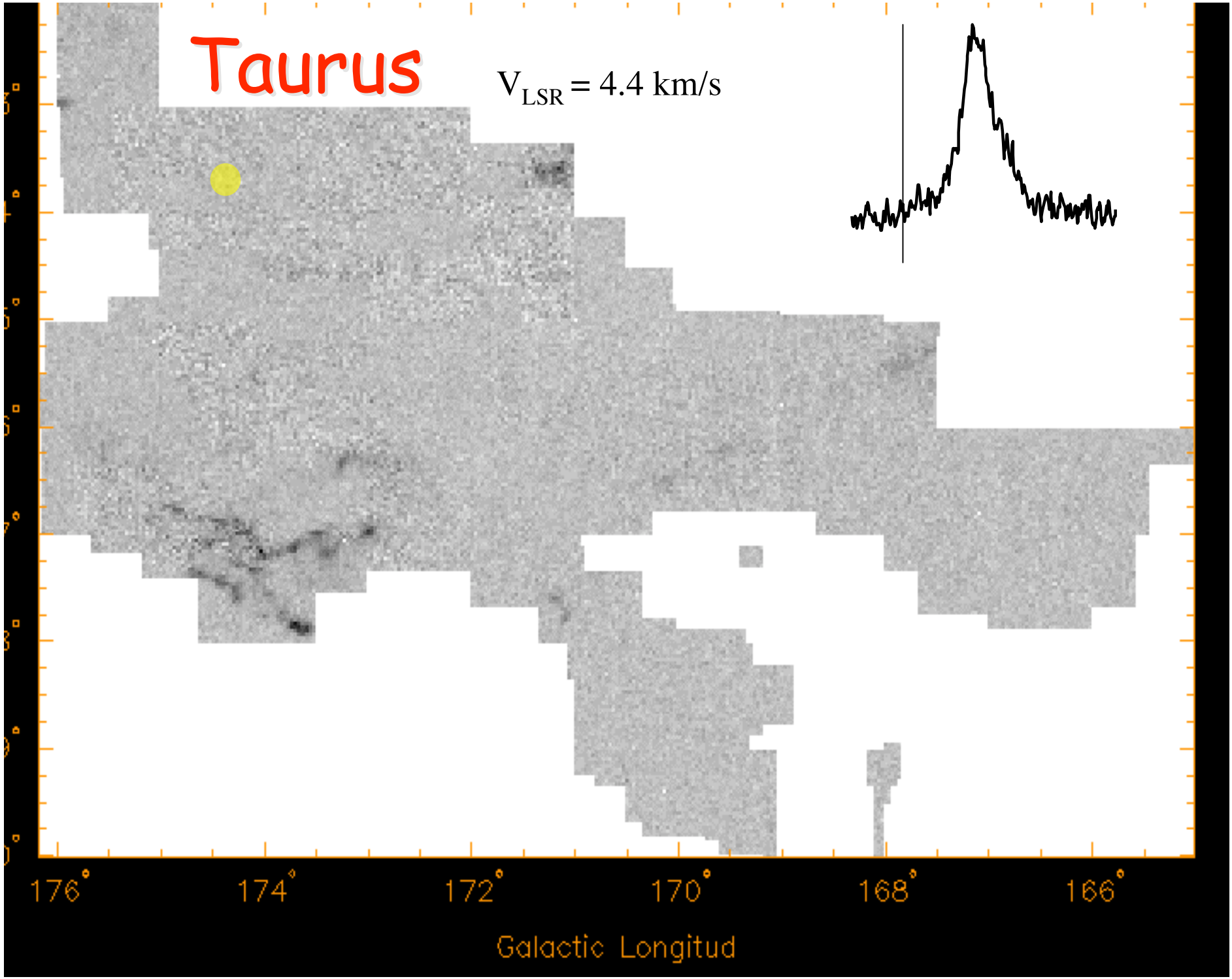

Taurus
V_{LSR} = 3.4 km/s
3.4 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

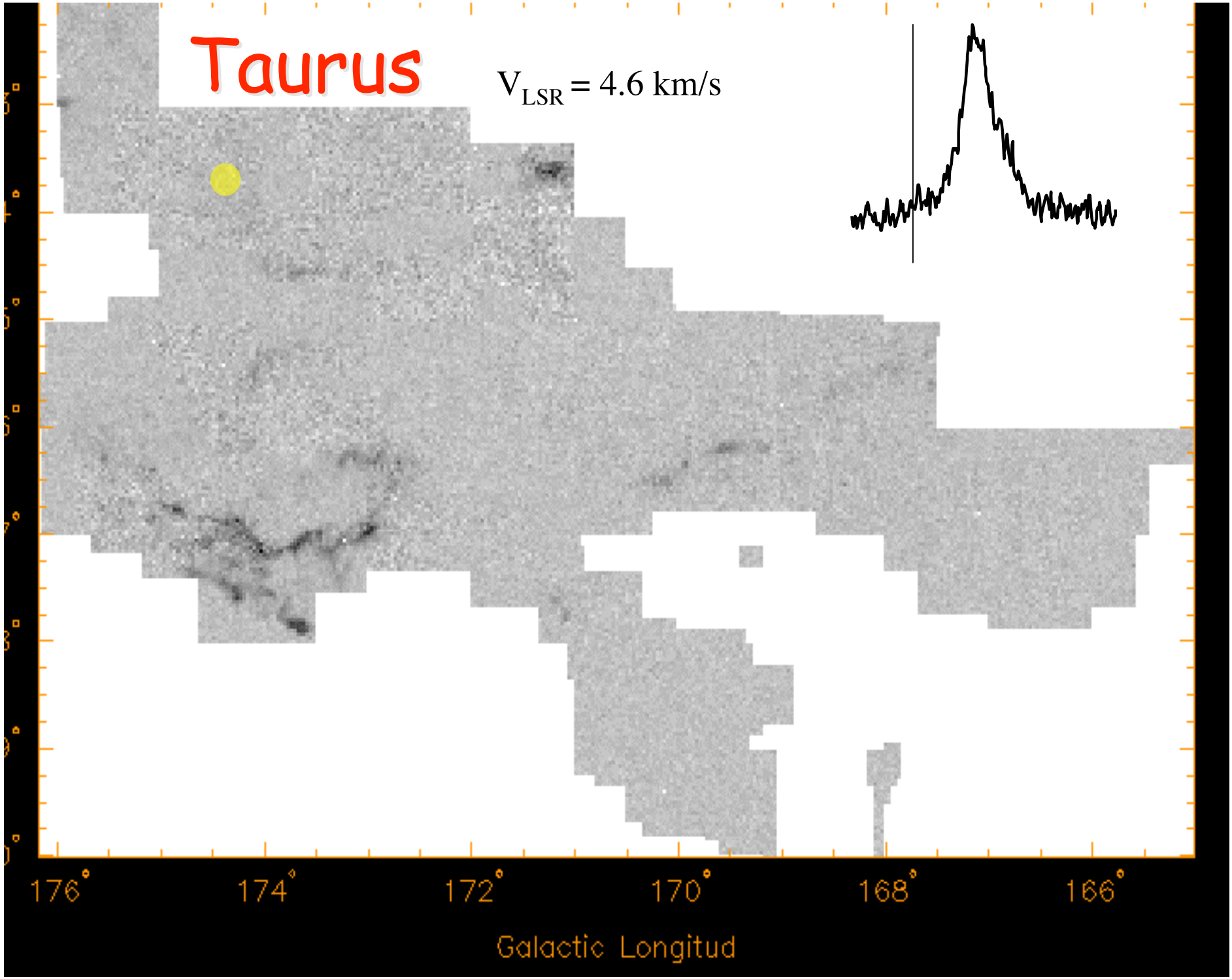

Taurus
V_{LSR} = 3.6 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

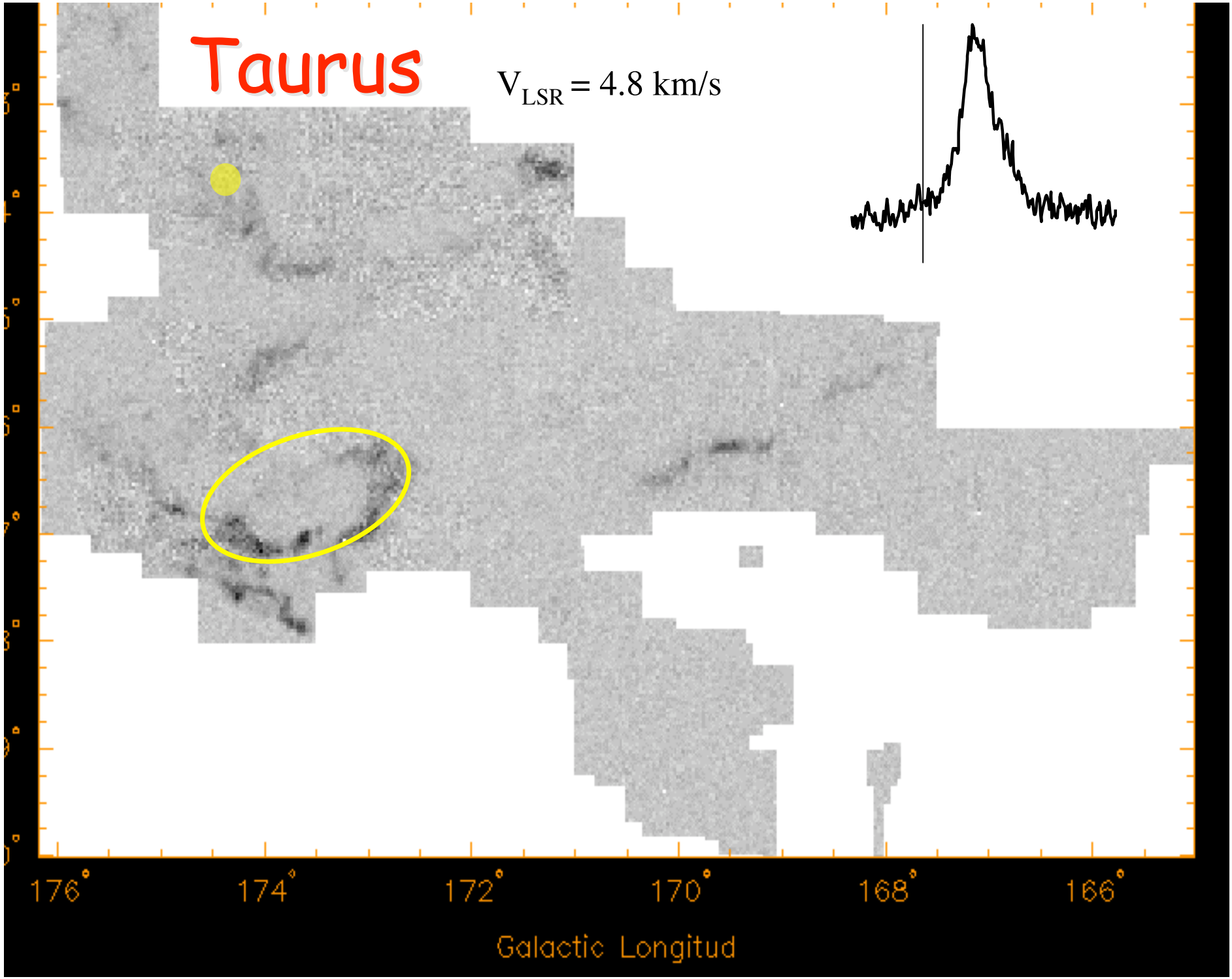

Taurus
V_{LSR} = 3.8 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

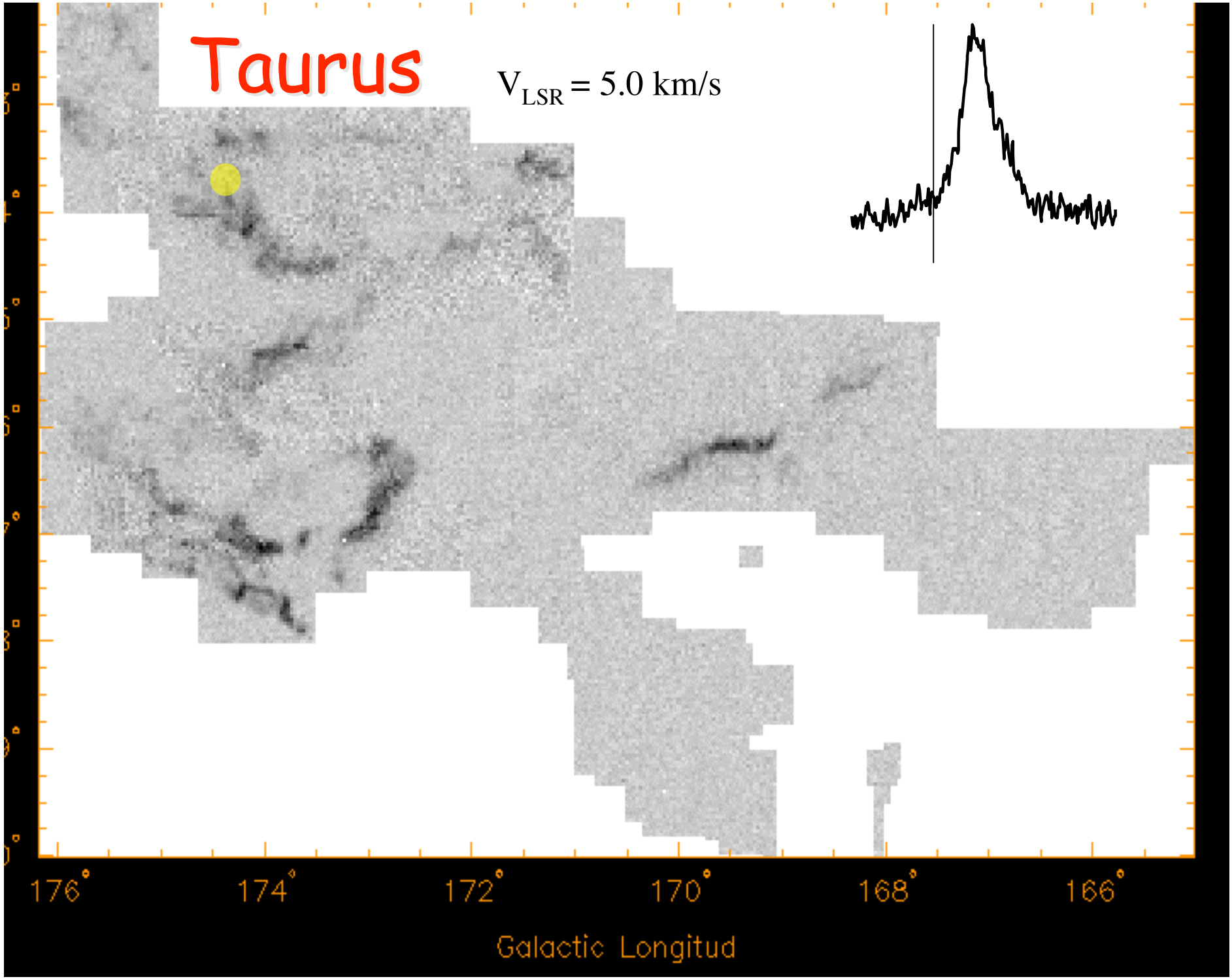

Taurus
V_{LSR} = 4.0 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

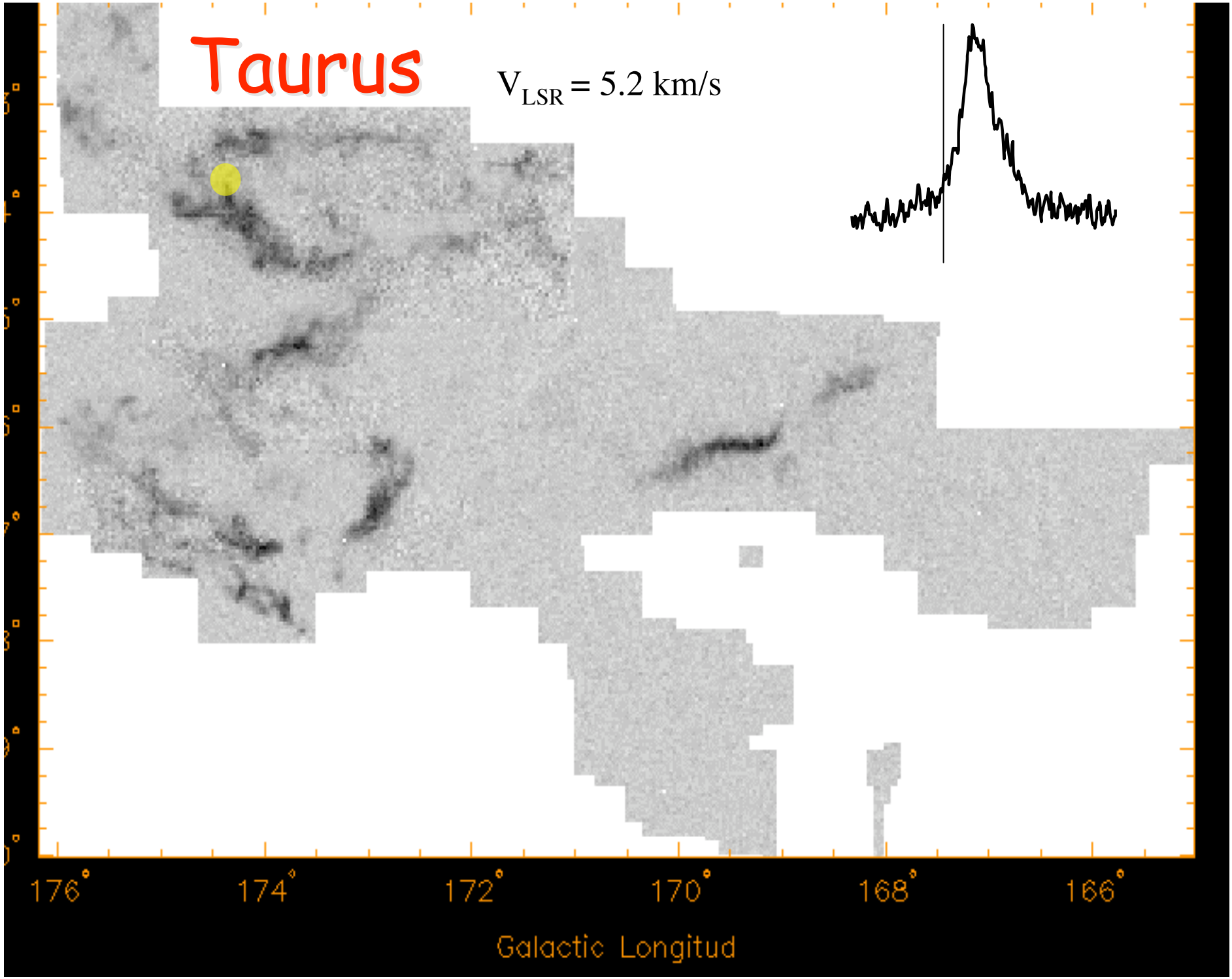

Taurus
V_{LSR} = 4.2 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

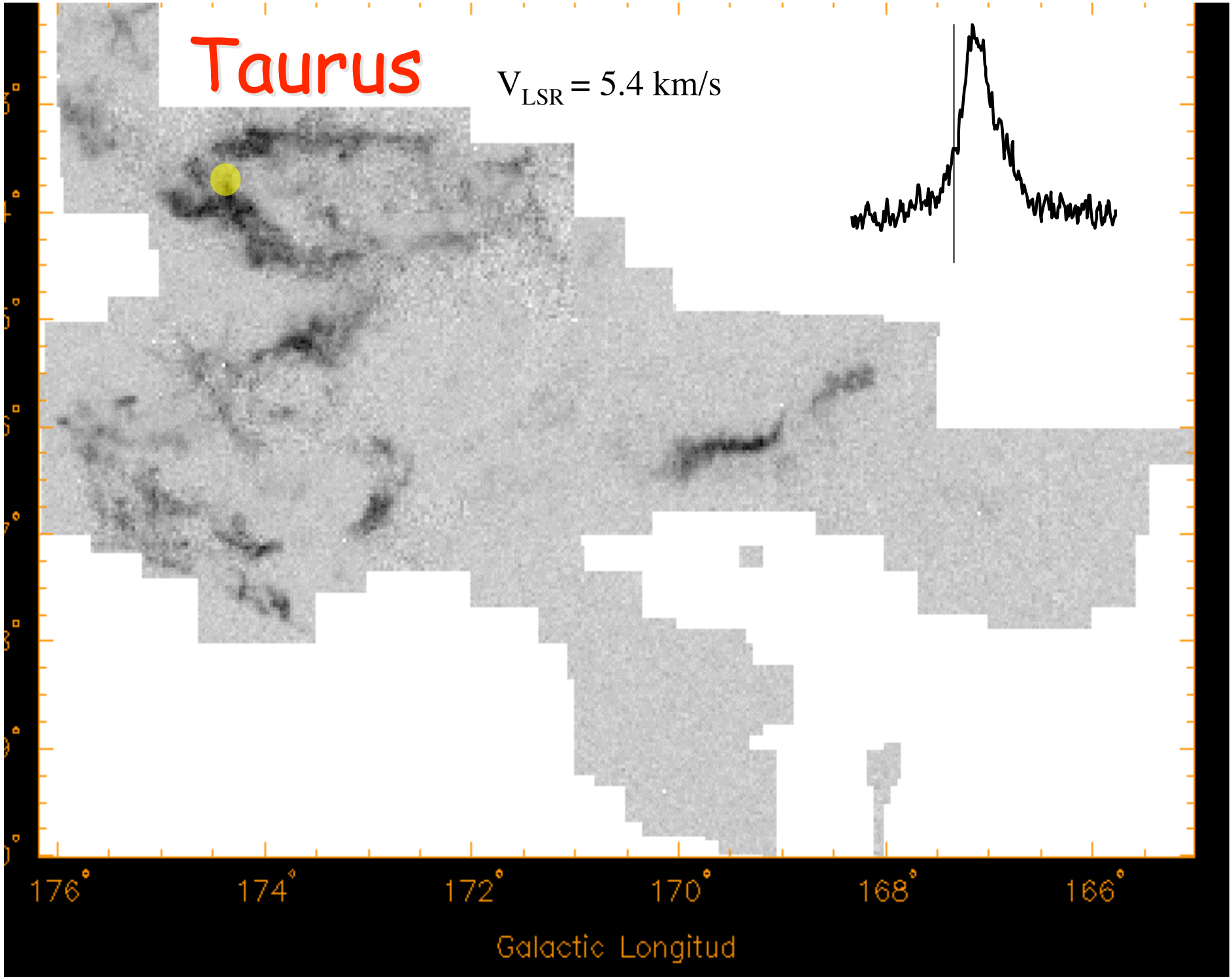

Taurus
V_{LSR} = 4.4 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

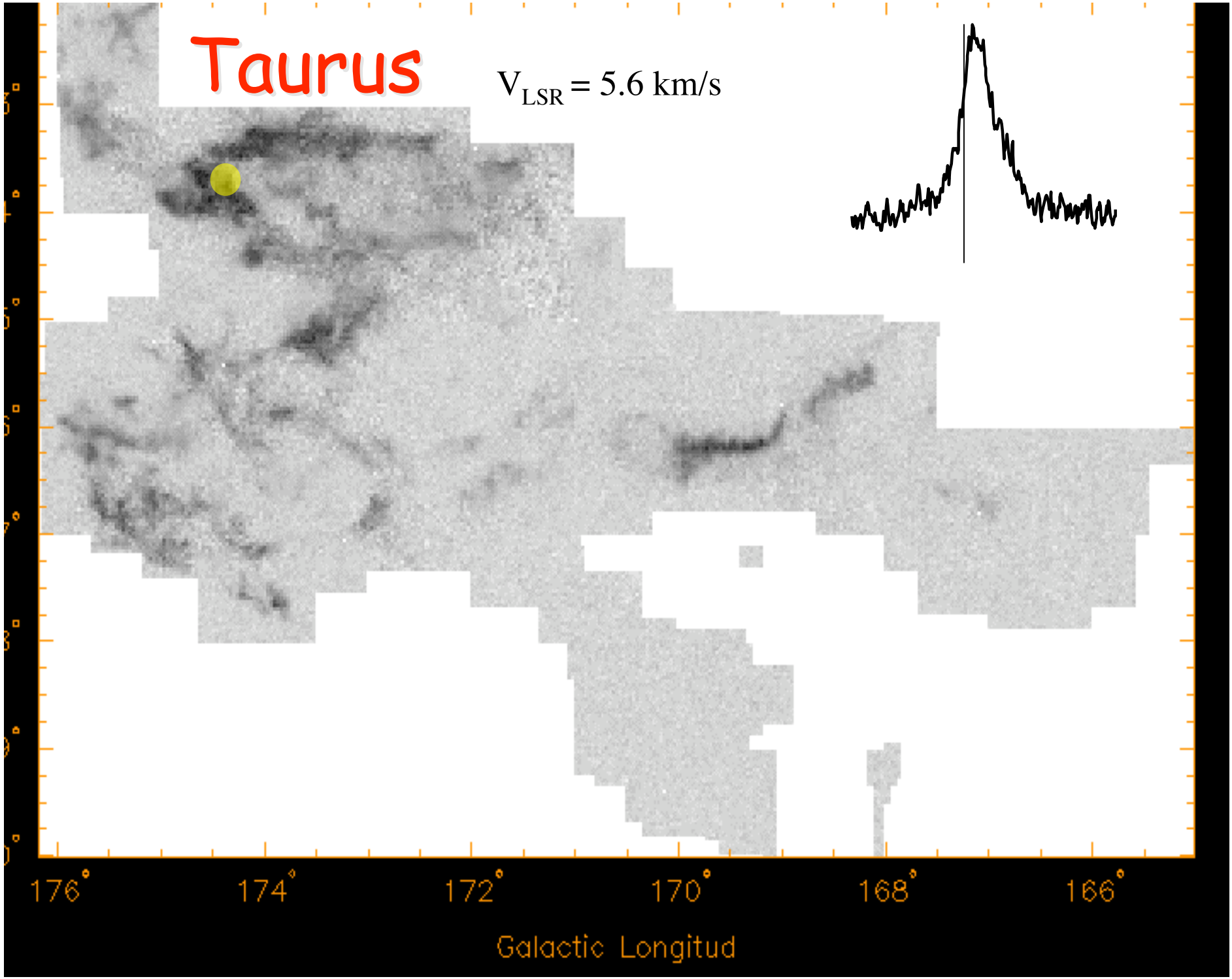

Taurus
V_{LSR} = 4.6 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

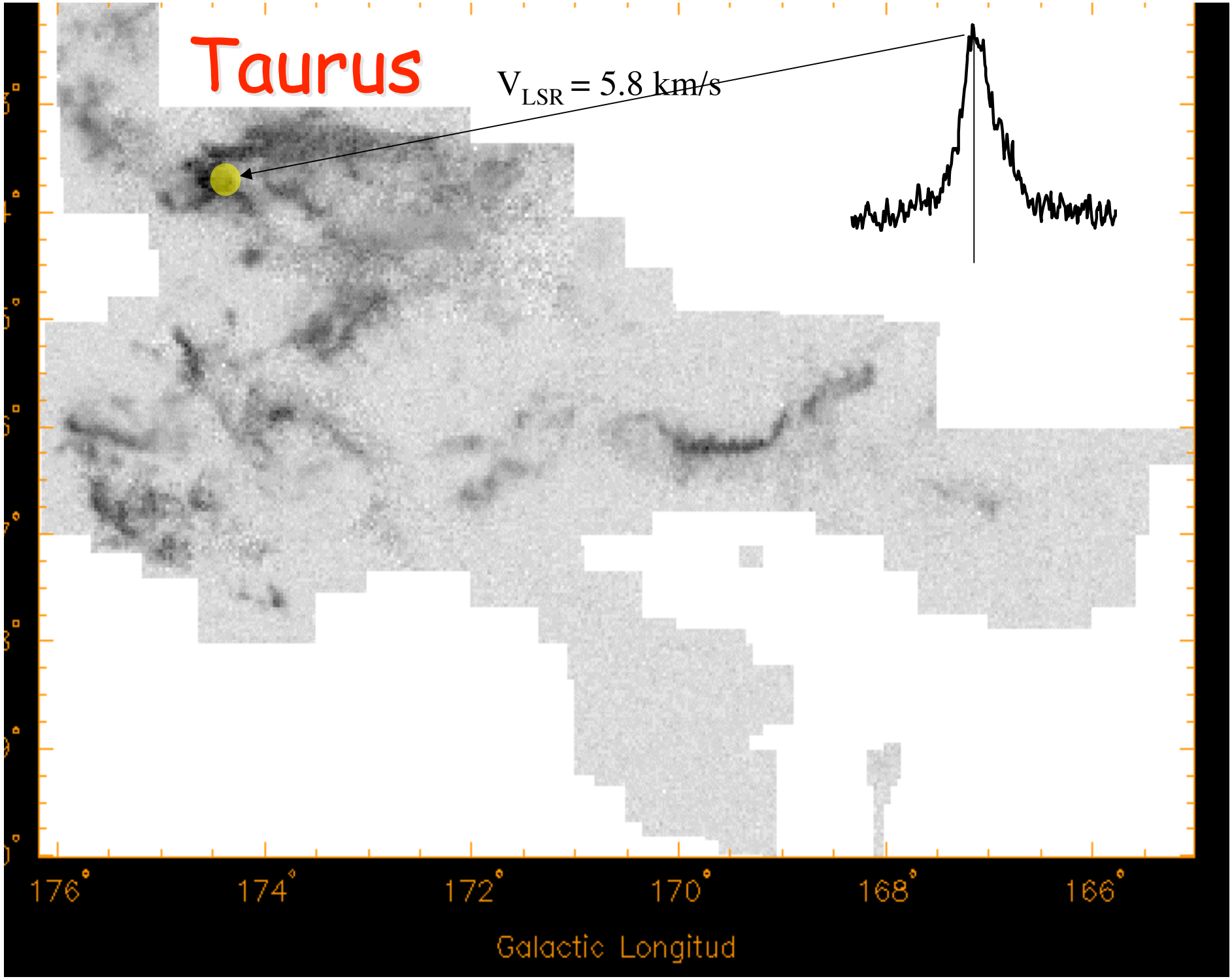

Taurus
V_{LSR} = 4.8 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

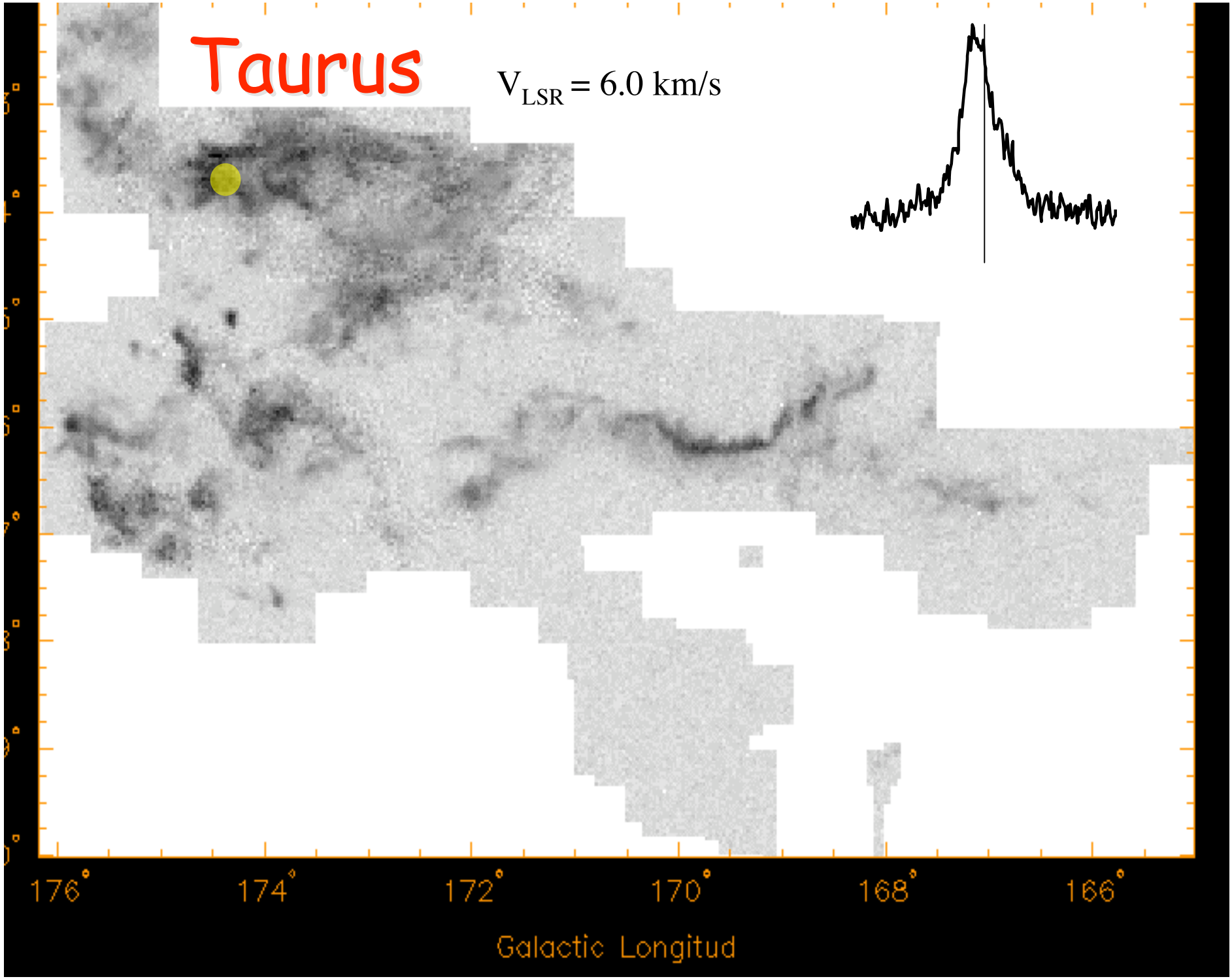

Taurus
V_{LSR} = 5.0 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

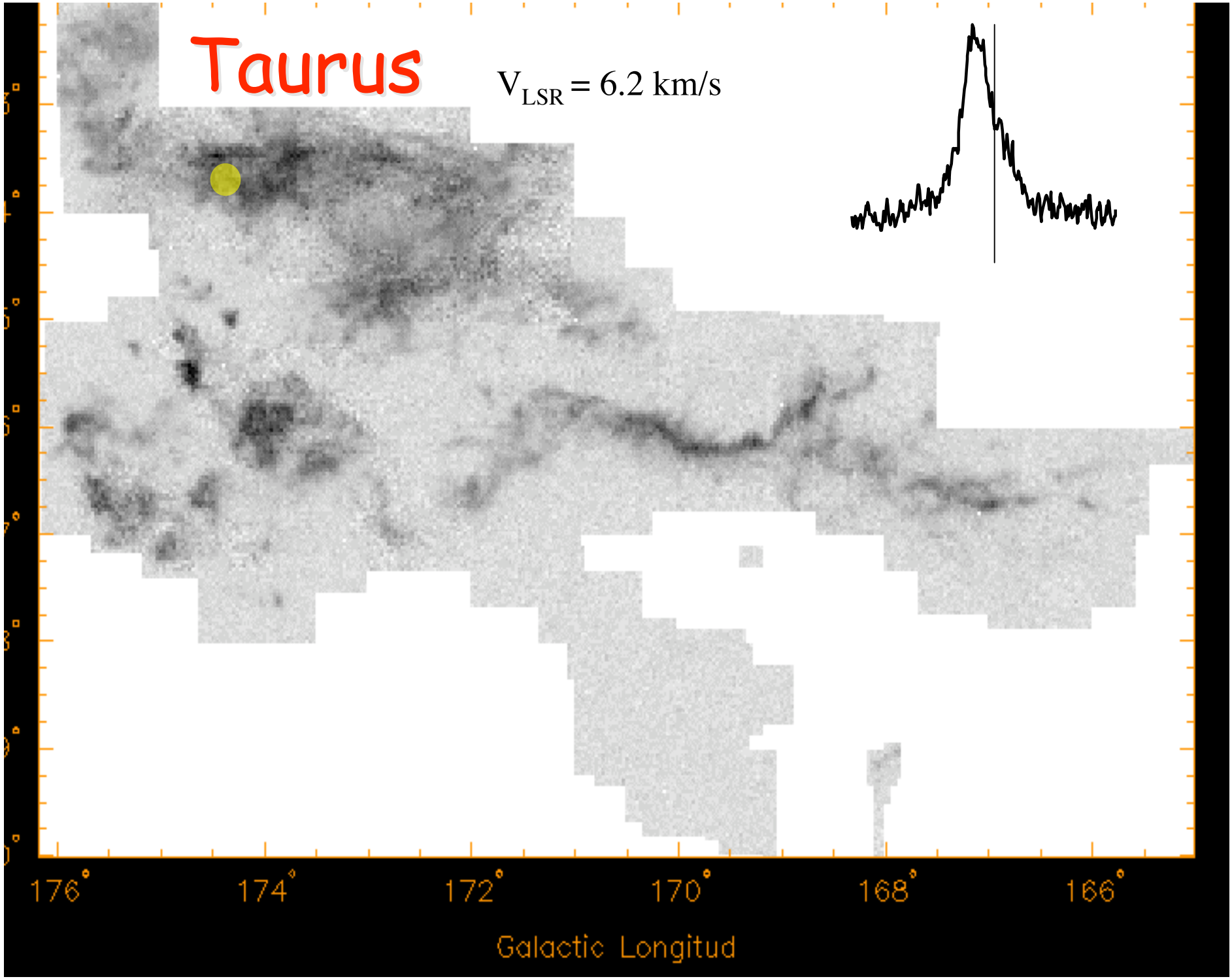

Taurus
V_{LSR} = 5.2 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

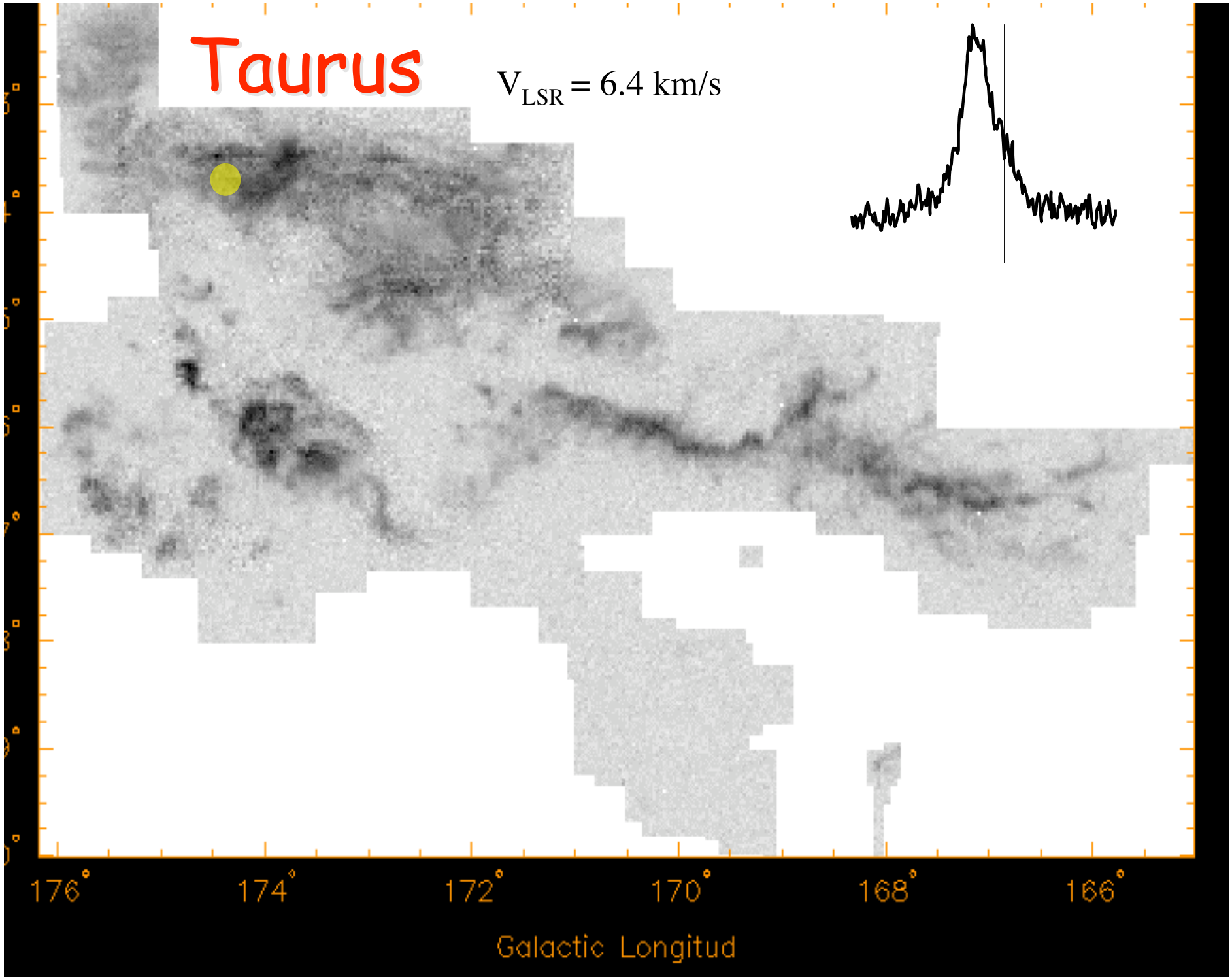

Taurus
V_{LSR} = 5.4 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

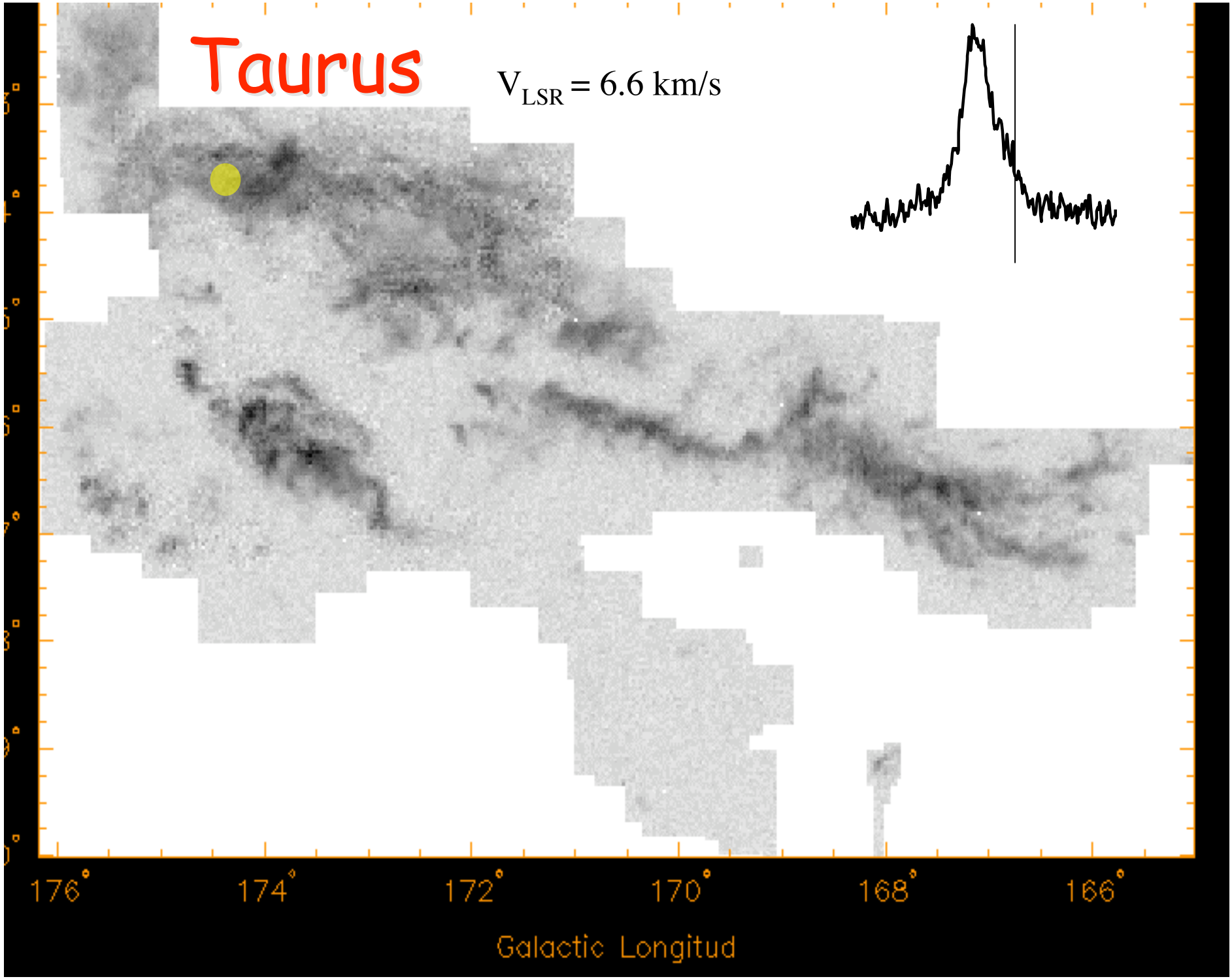

Taurus
V_{LSR} = 5.6 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

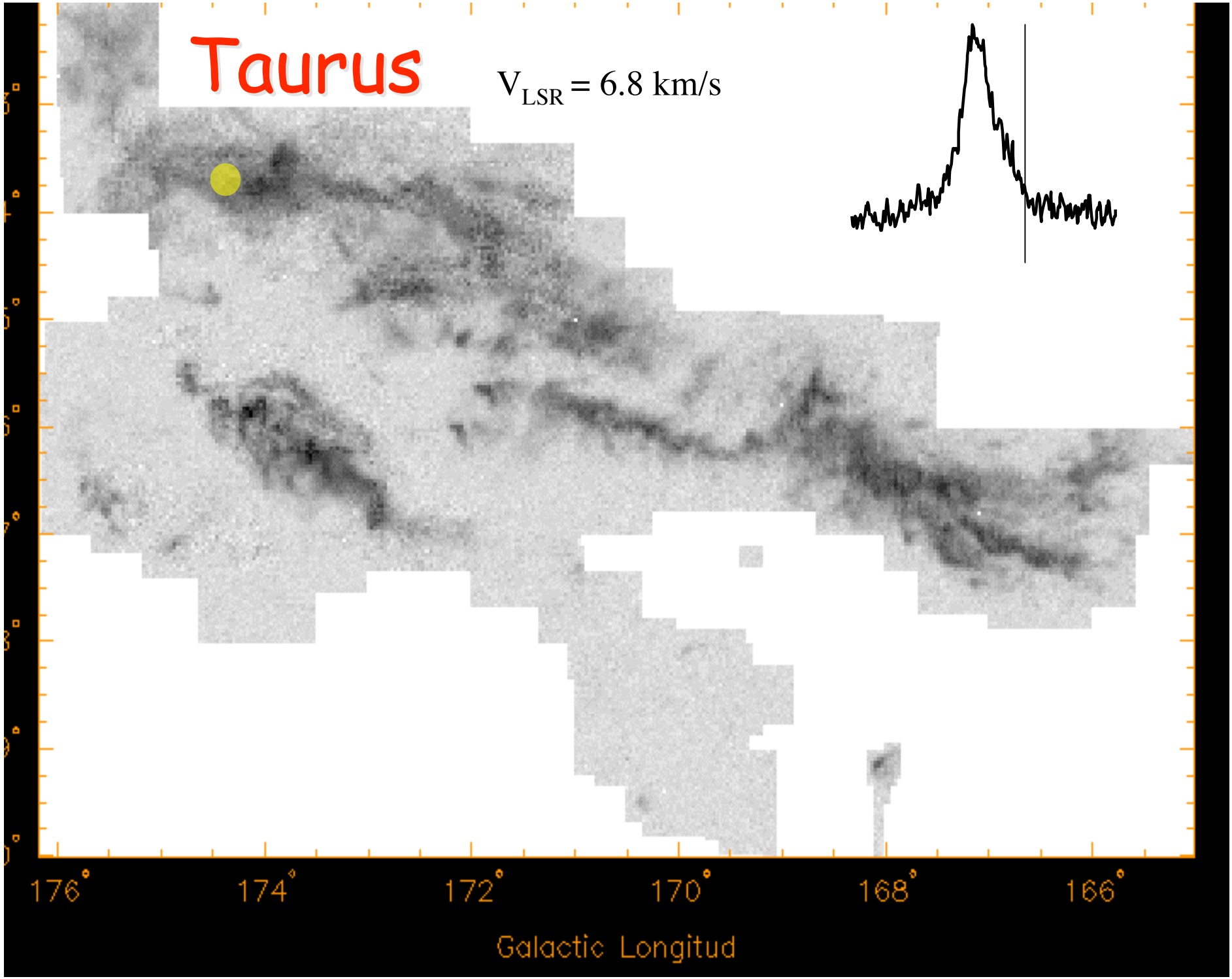

Taurus
V_{LSR} = 5.8 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

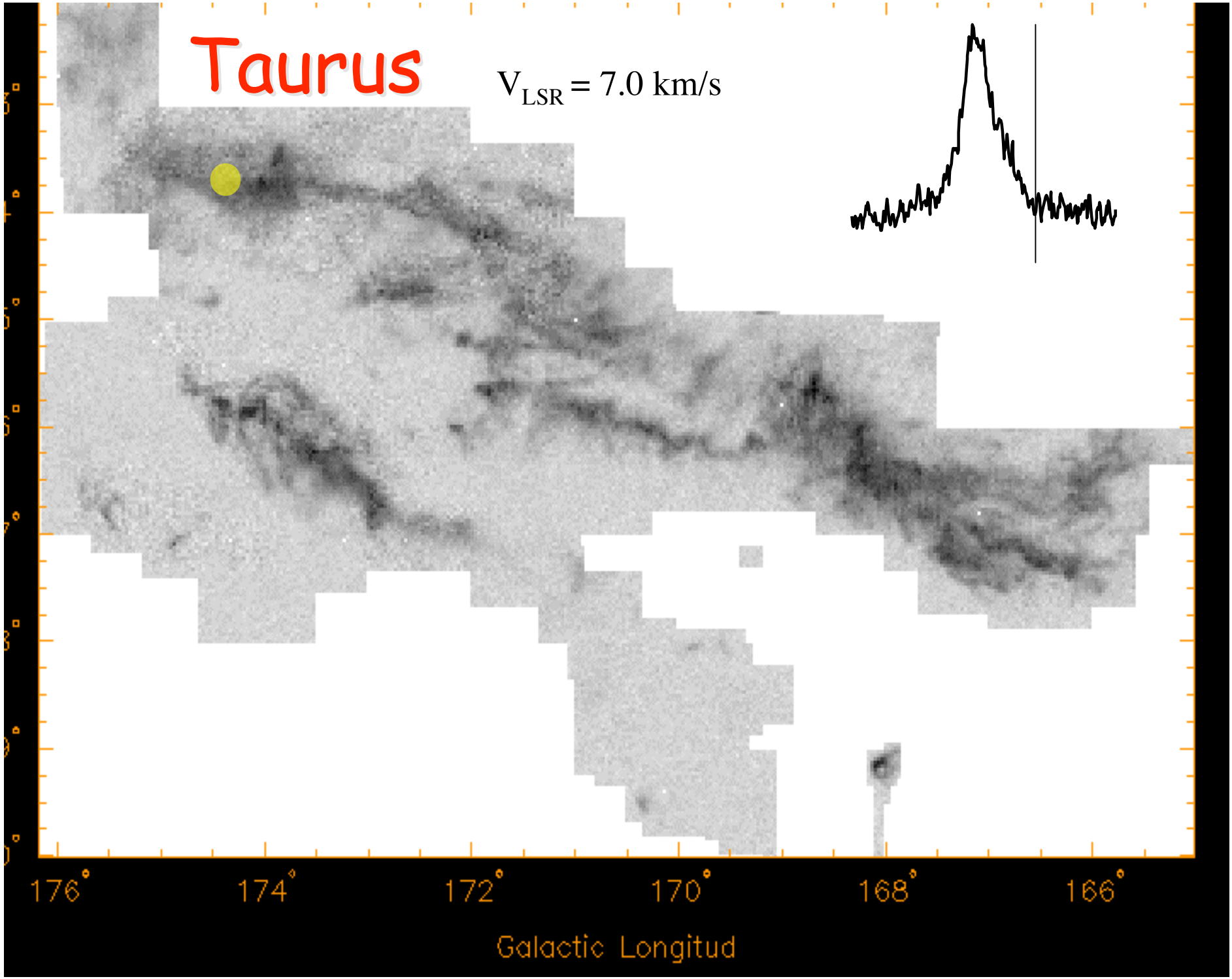

Taurus
V_{LSR} = 6.0 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

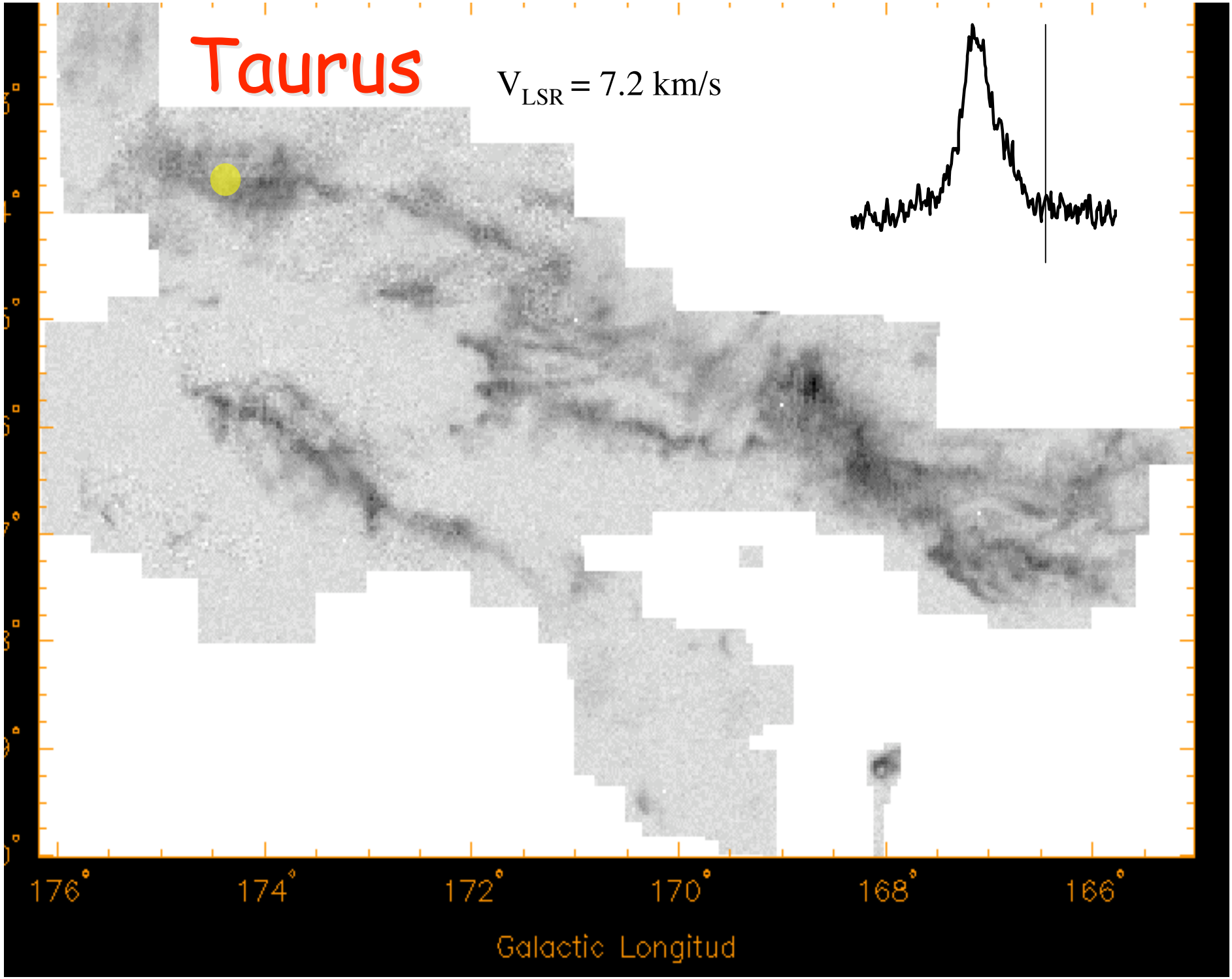

Taurus
V_{LSR} = 6.2 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

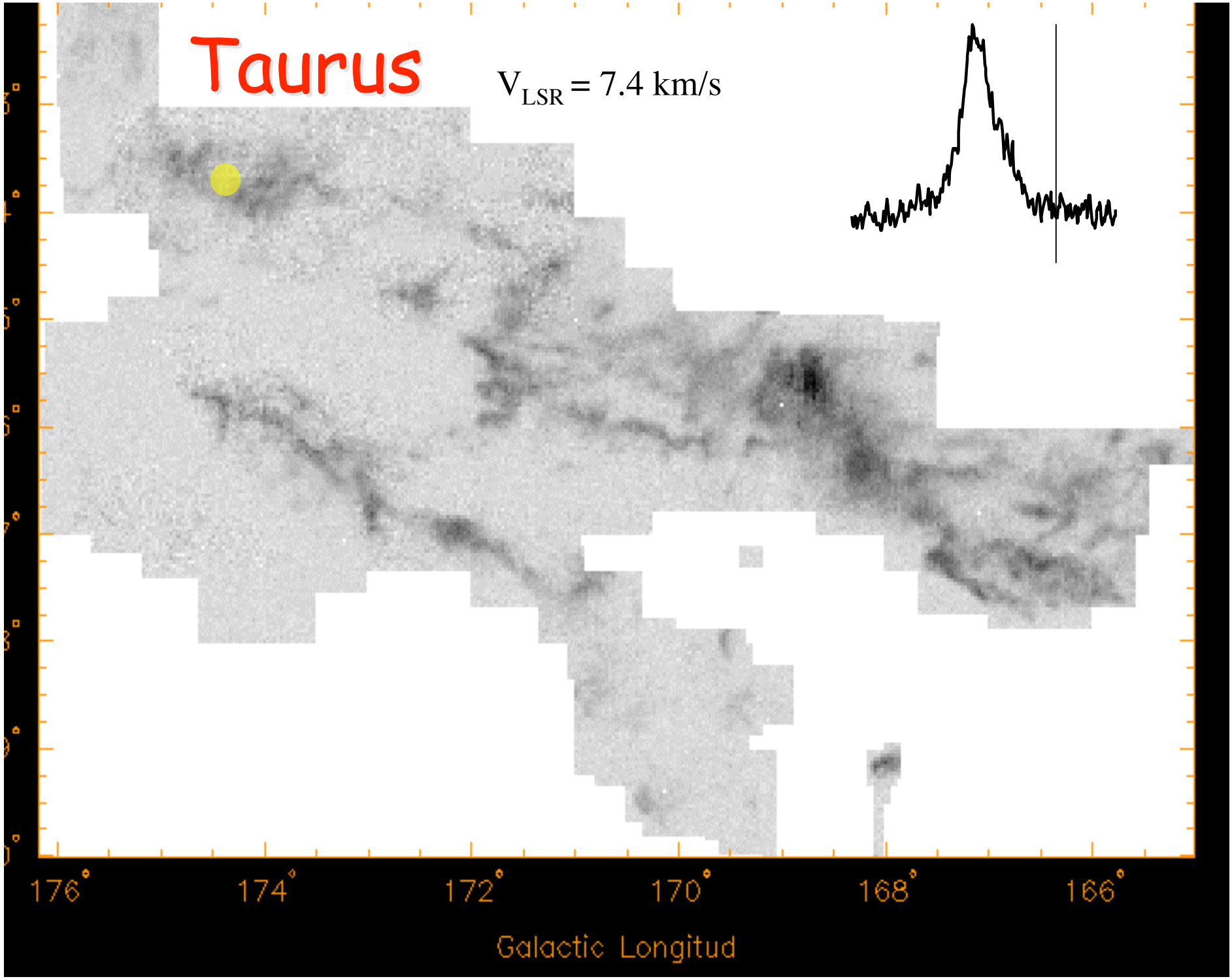

Taurus
V_{LSR} = 6.4 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

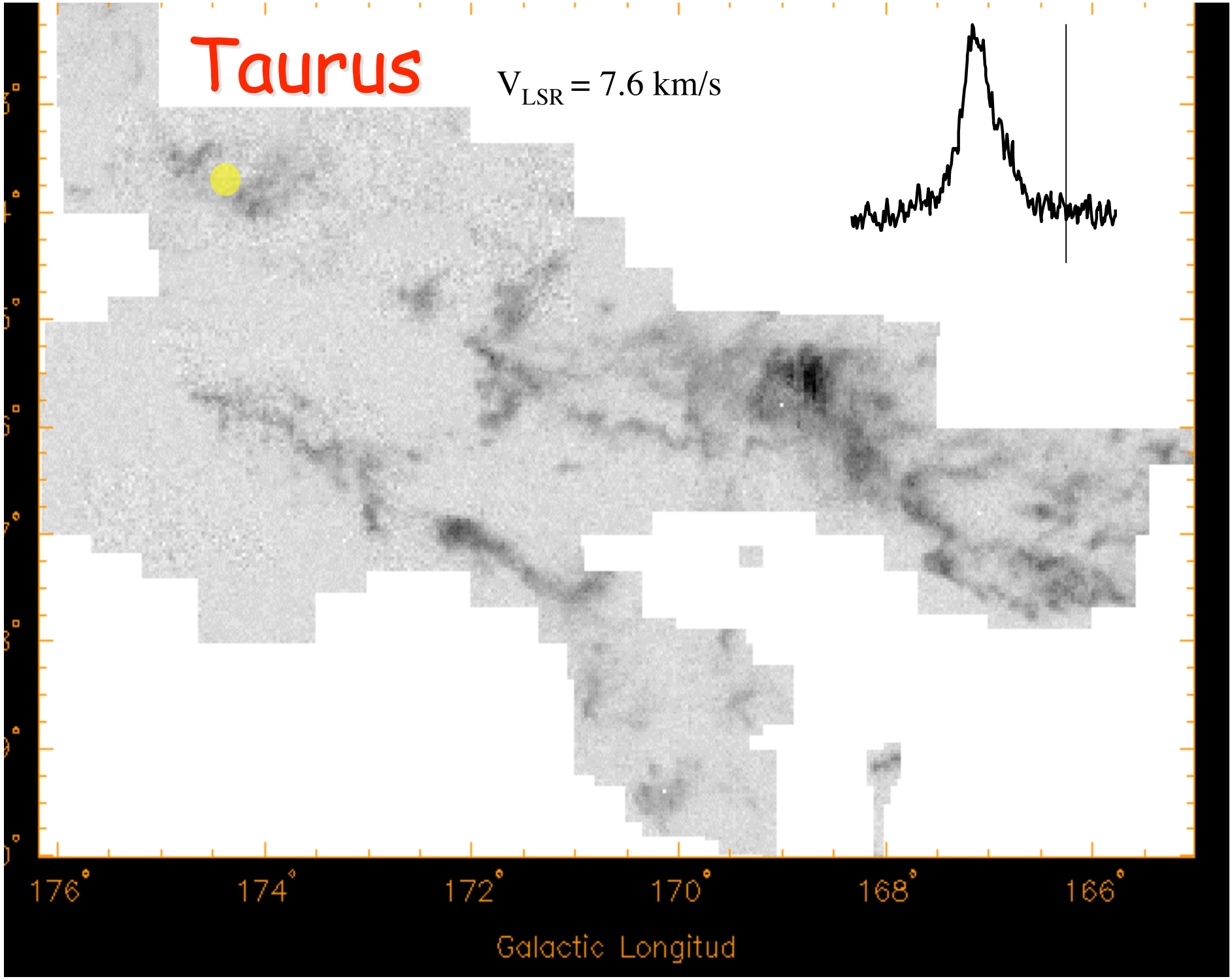

Taurus
V_{LSR} = 6.6 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

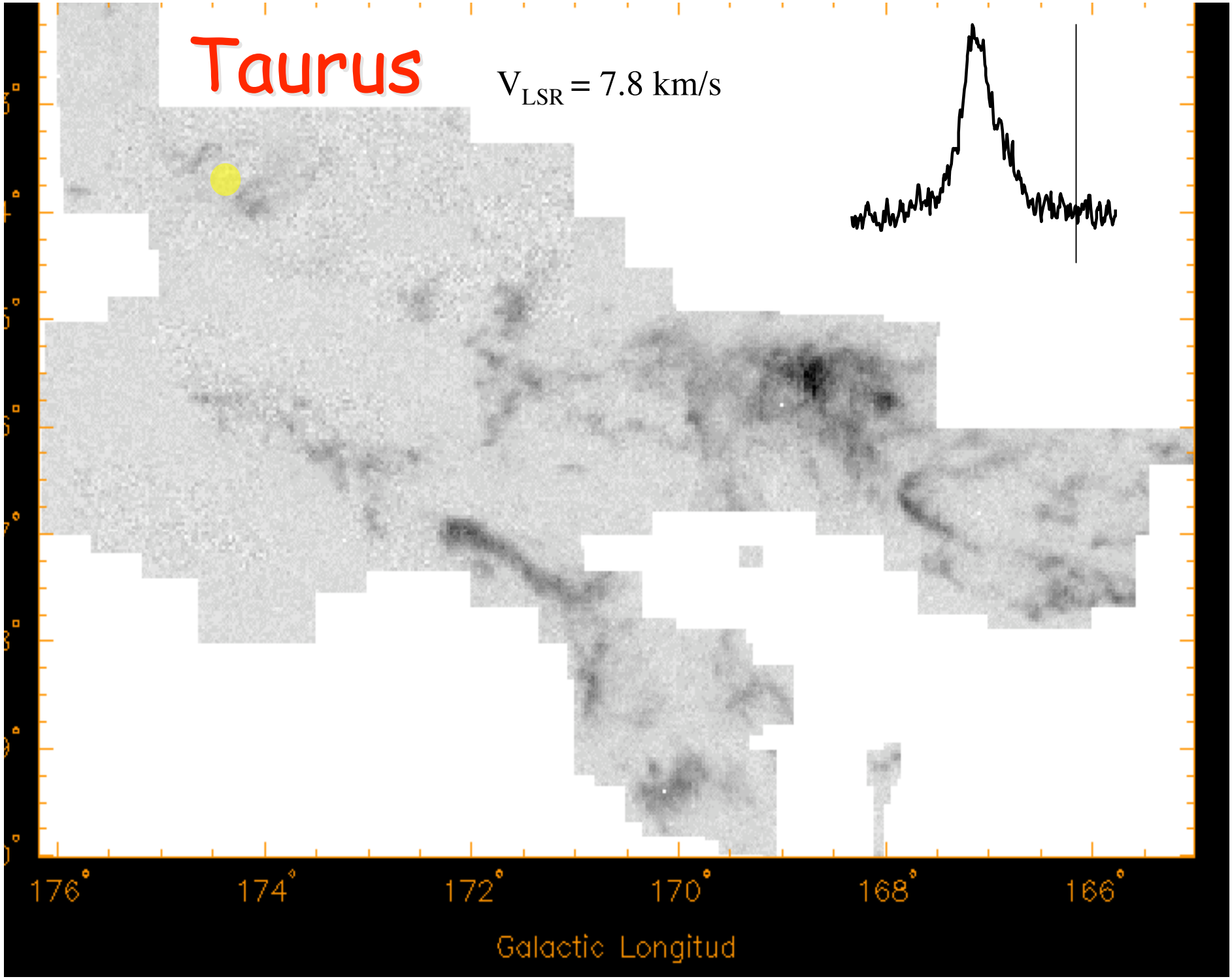

Taurus
V_{LSR} = 6.8 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

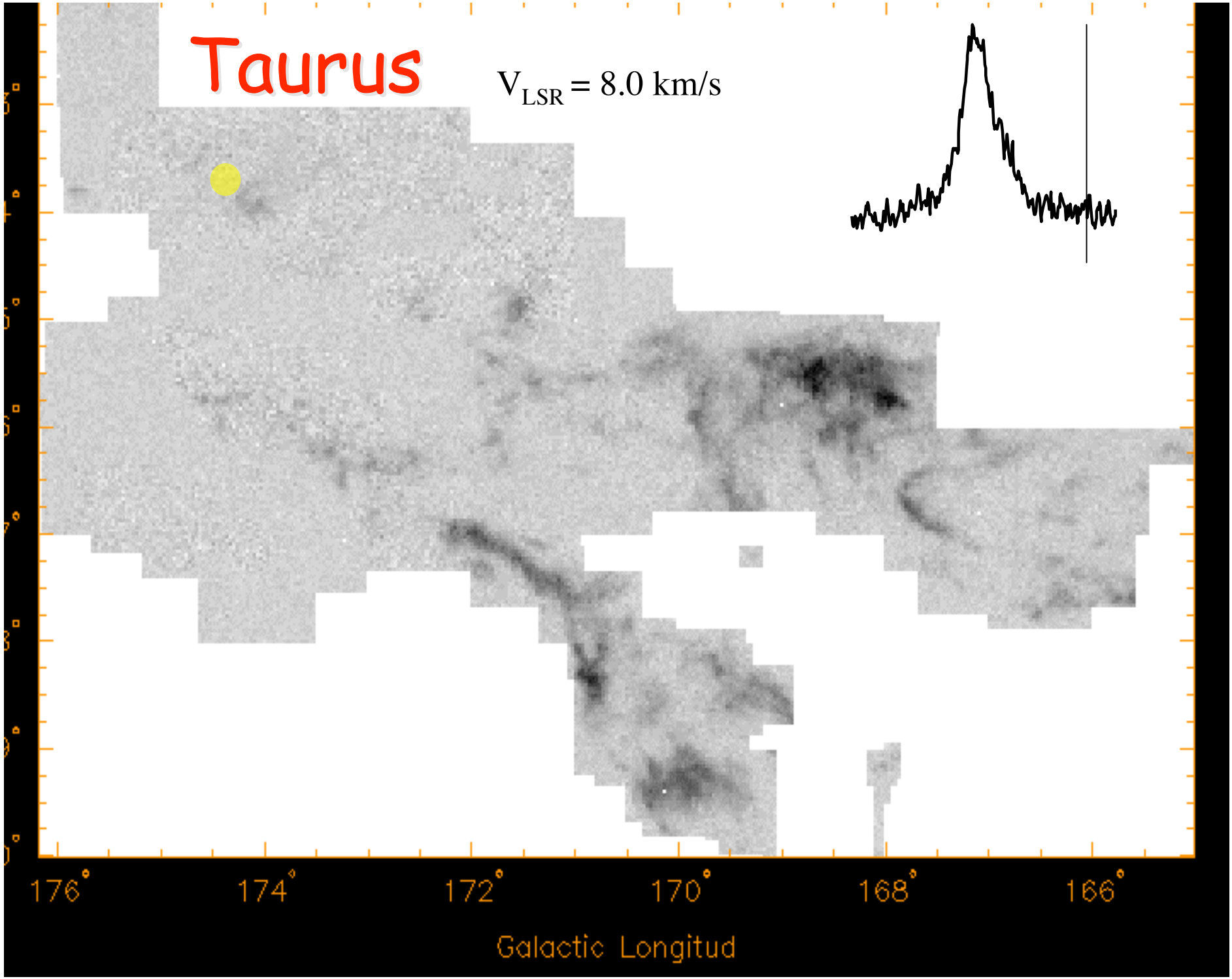

Taurus
V_{LSR} = 7.0 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

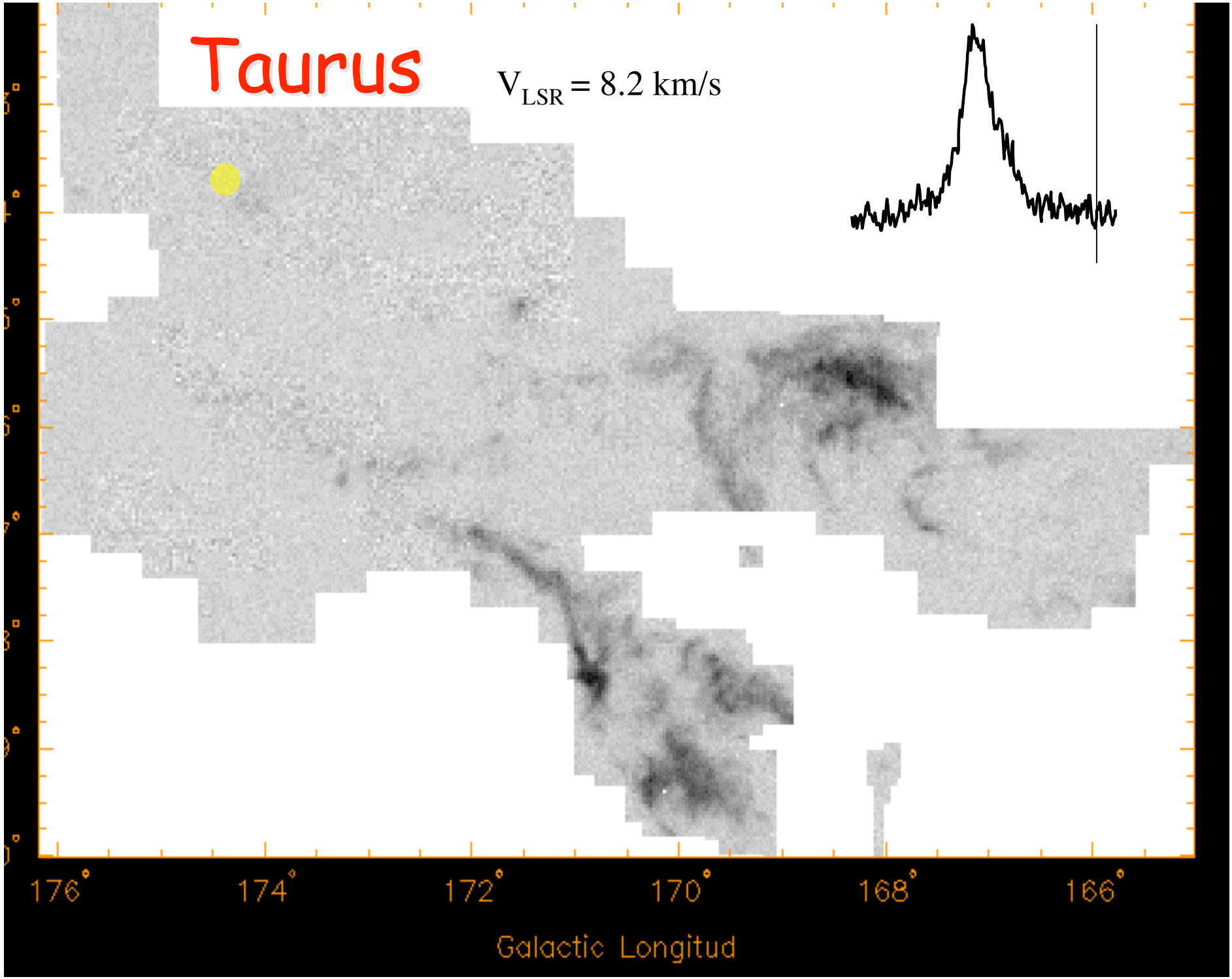

Taurus
V_{LSR} = 7.2 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

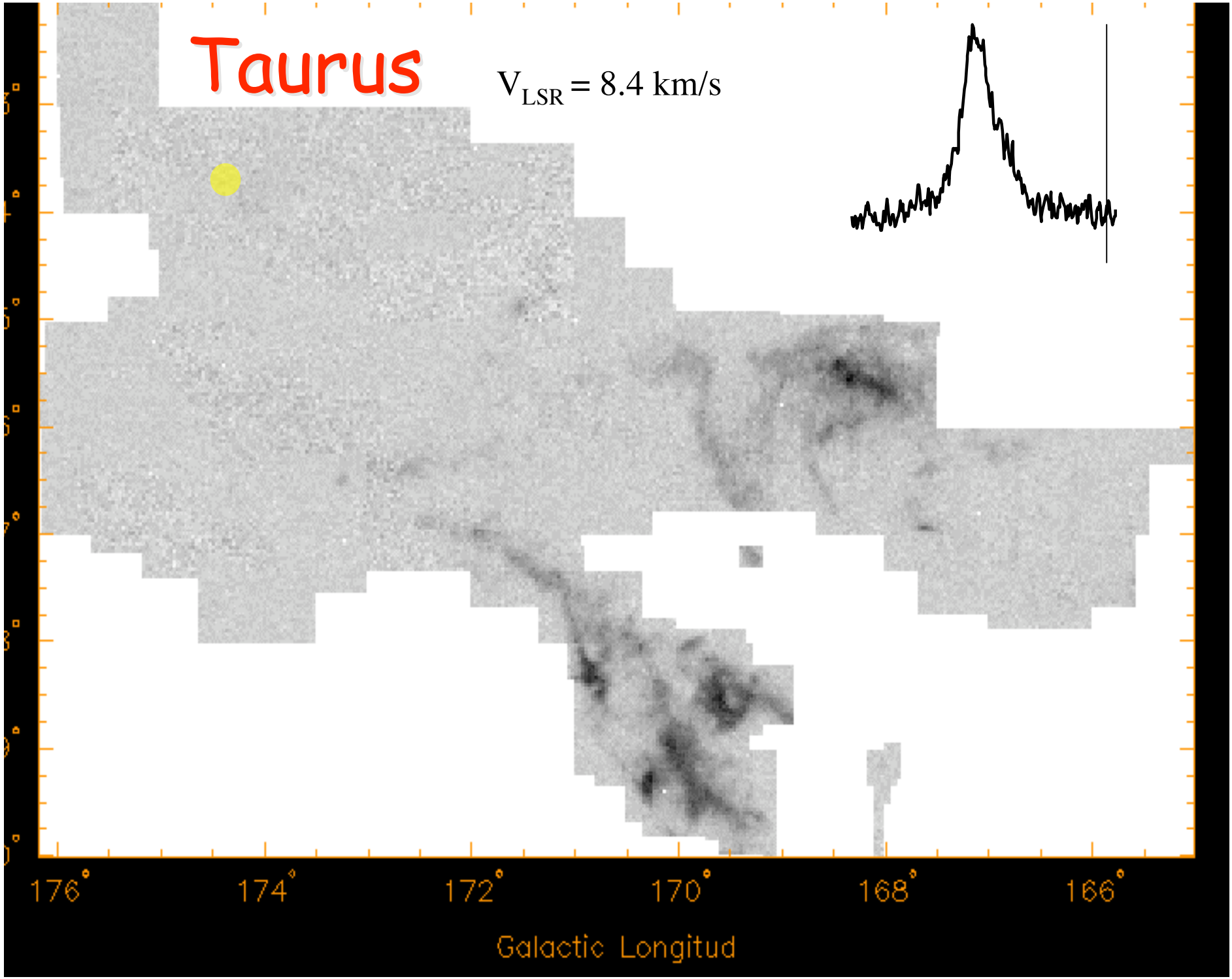

Taurus
V_{LSR} = 7.4 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

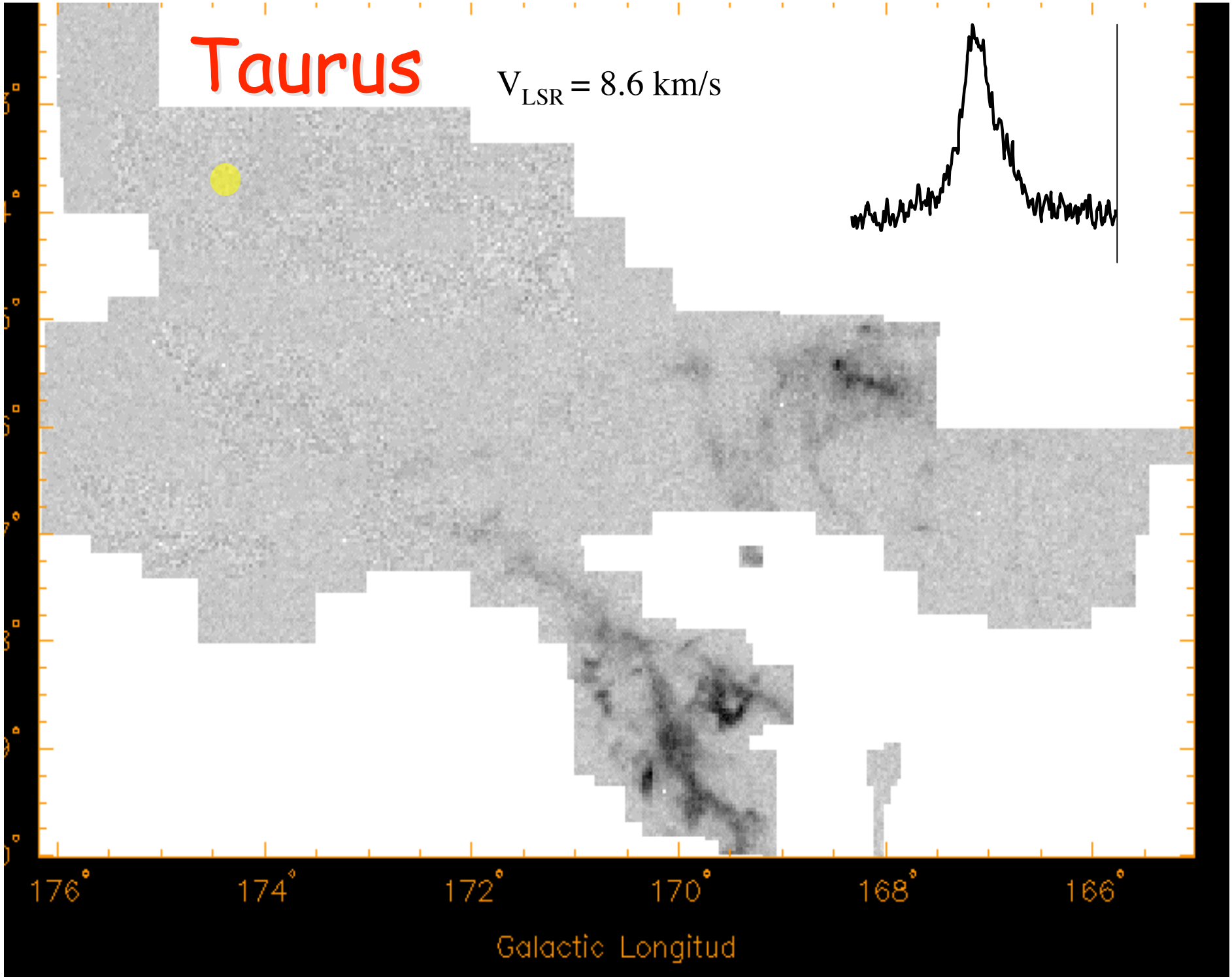

Taurus
V_{LSR} = 7.6 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

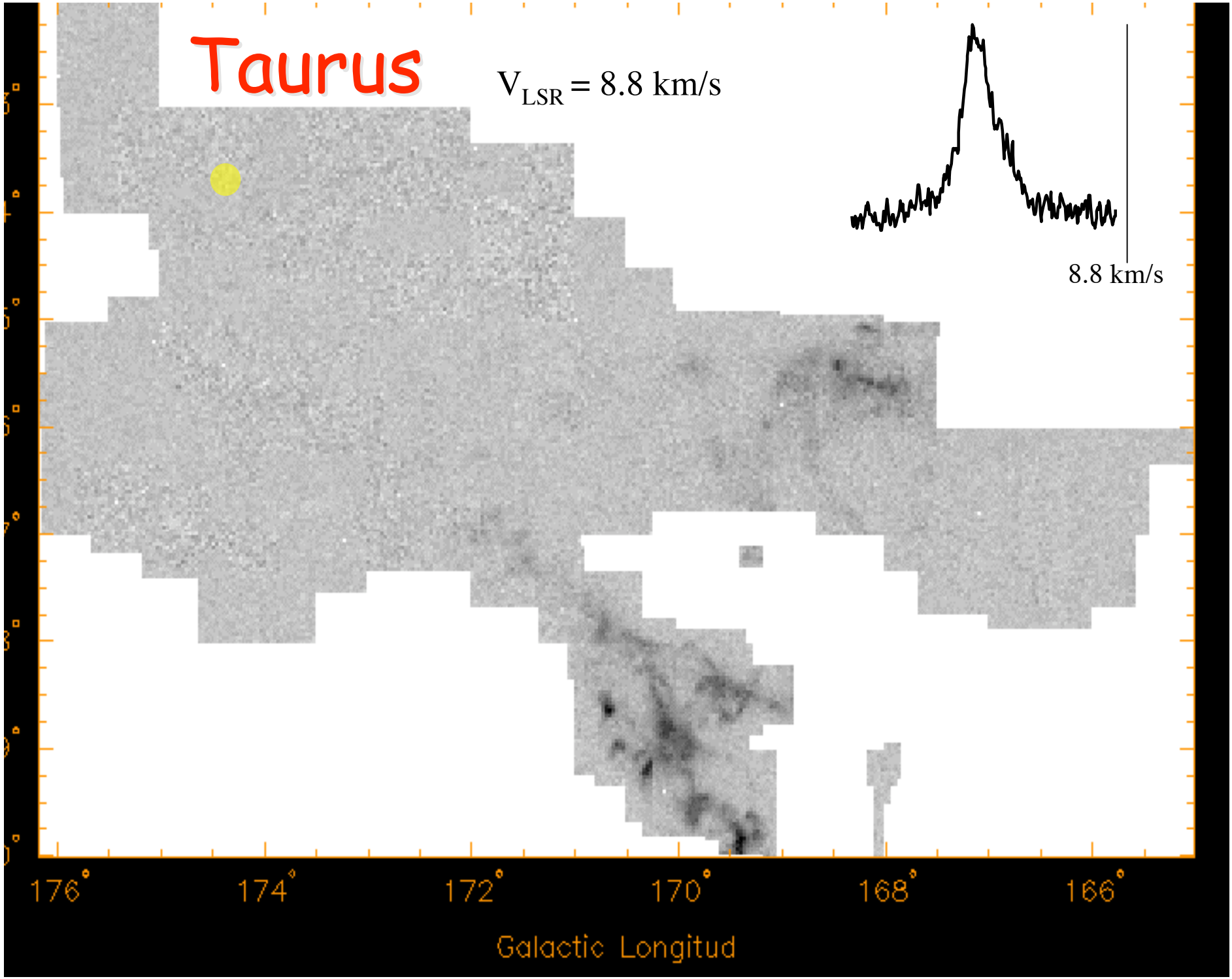

Taurus
V_{LSR} = 7.8 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud

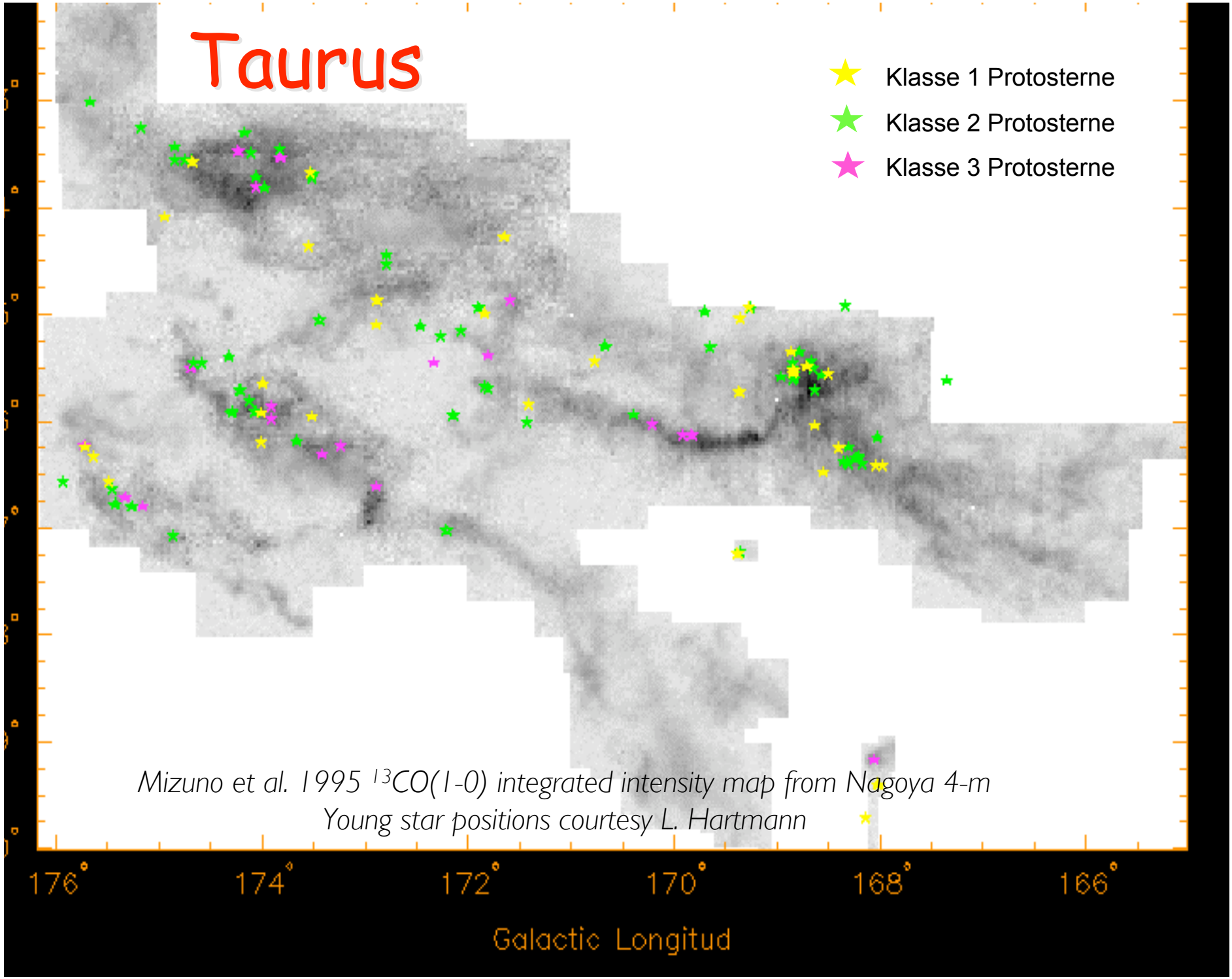

Taurus
V_{LSR} = 8.0 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud


Taurus
V_{LSR} = 8.2 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud


Taurus
V_{LSR} = 8.4 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud


Taurus
V_{LSR} = 8.6 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud


Taurus
V_{LSR} = 8.8 km/s
8.8 km/s
176°
174°
172°
170°
168°
166°
Galactic Longitud



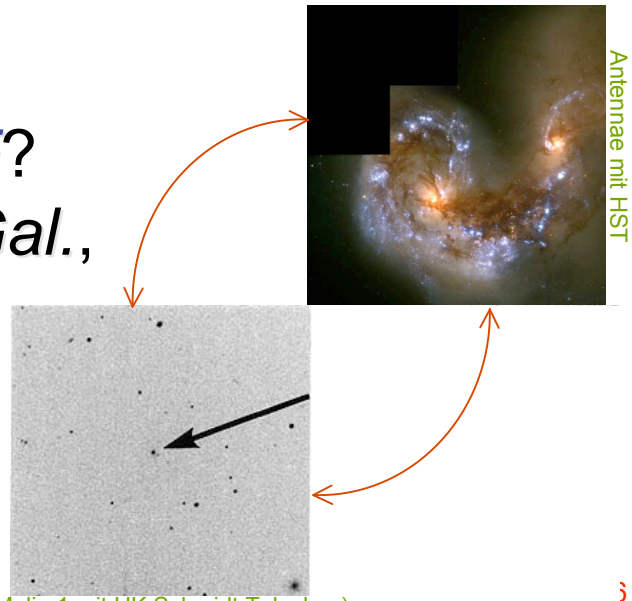
Mizuno et al. 1995 ^{13}CO(1-0) integrated intensity map from Nagoya 4-m
Young star positions courtesy L. Hartmann

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!***



Antennae mit HST

Malin 1 mit UK Schmidt Teleskop)

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*

(Weitere Details in Mac Low & Klessen, 2004, Rev. Mod. Phys., 76, 125-194)

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.

(Weitere Details in Mac Low & Klessen, 2004, Rev. Mod. Phys., 76, 125-194)

Im Detail...

Gravoturbulente Sternentstehung

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

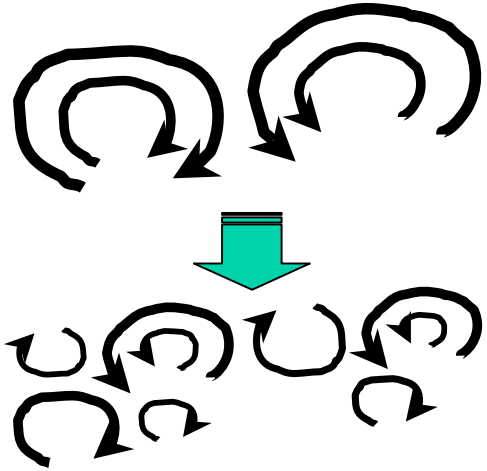
  ⟶ ***GRAVOTUBULENTE FRAGMENTATION***

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

(genaueres in Mac Low & Klessen, 2004, Rev. Mod. Phys., 76, 125-194)

Eigenschaften der Turbulenz

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



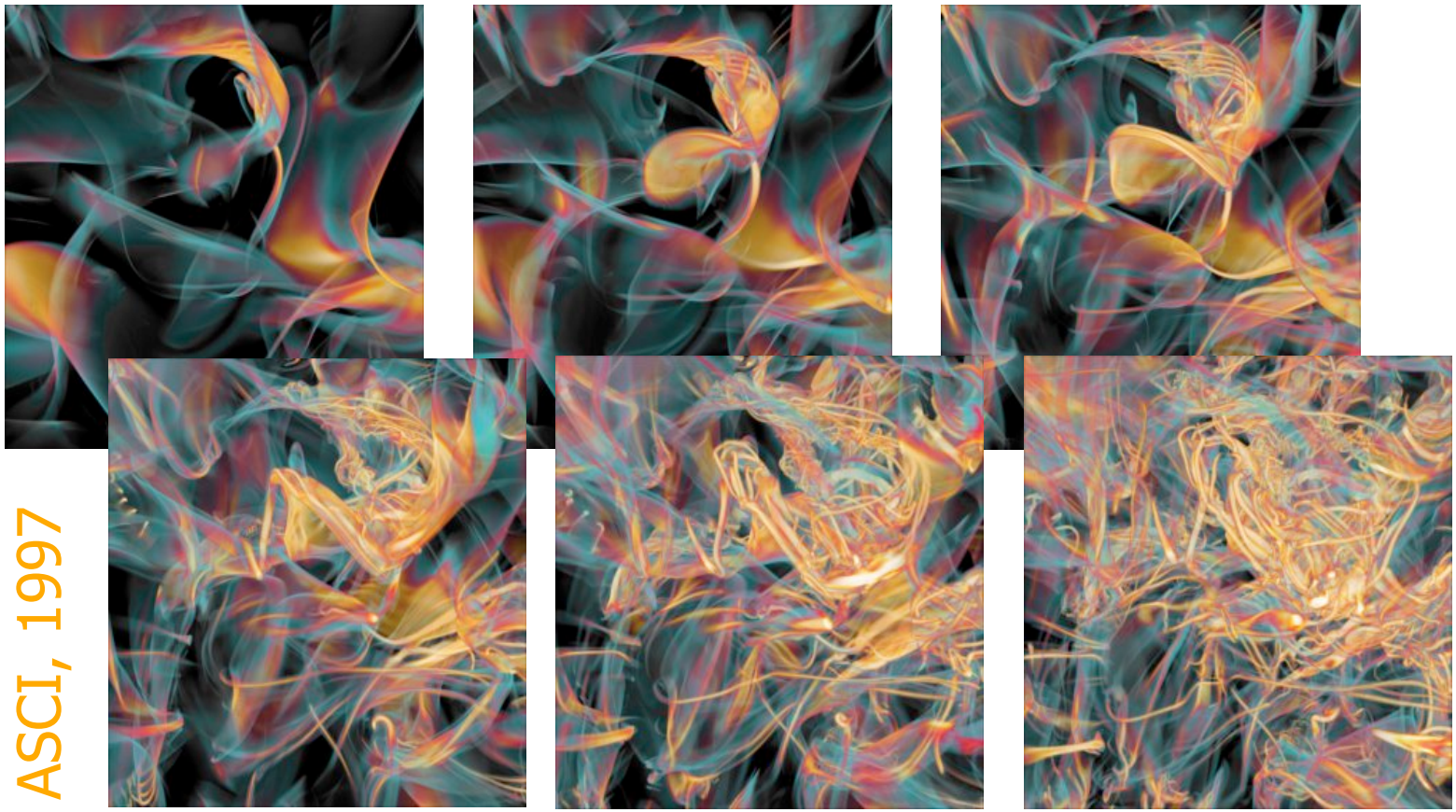
$$\mathrm{Re} = \frac{\text{Advektion}}{\text{Dissipation}} = \frac{VL}{\nu}$$

V= typical velocity on scale L, ν = viscosity, Re > 1000

- *vortex streching* --> 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

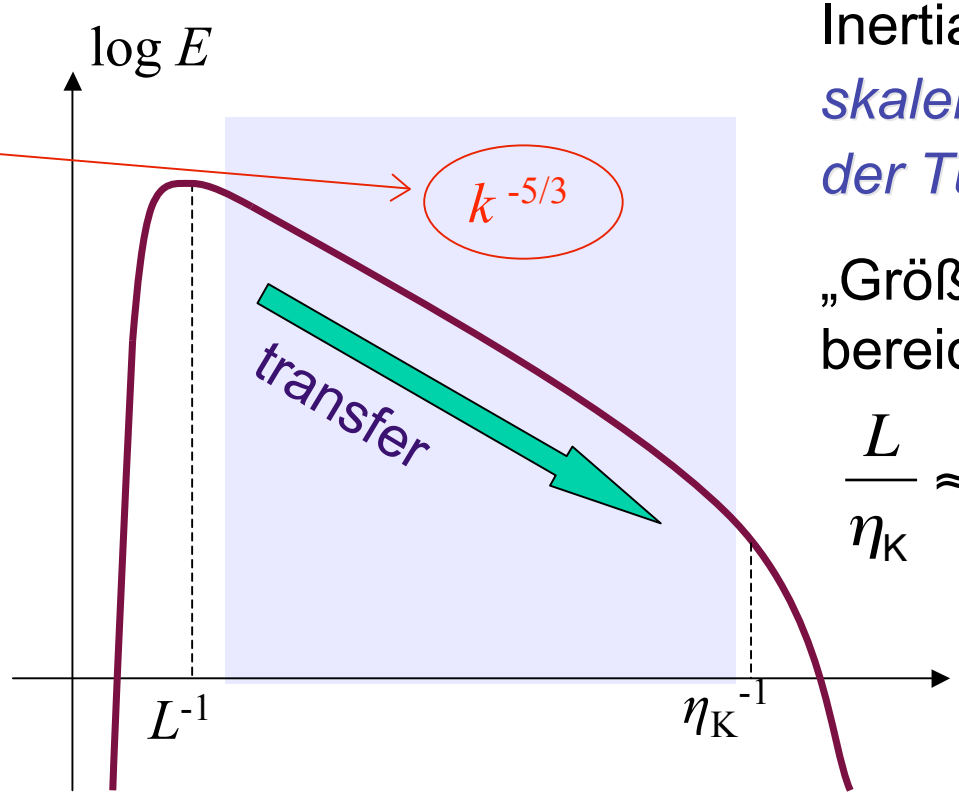


Porter et al.
ASCI, 1997

Vortexröhren werden gestreckt und gefaltet in 3D.

Turbulente Kaskade

Kolmogorov (1941) Theorie der inkompressiblen Turbulenz



Inertialbereich:
skalenfreies Verhalten der Turbulenz

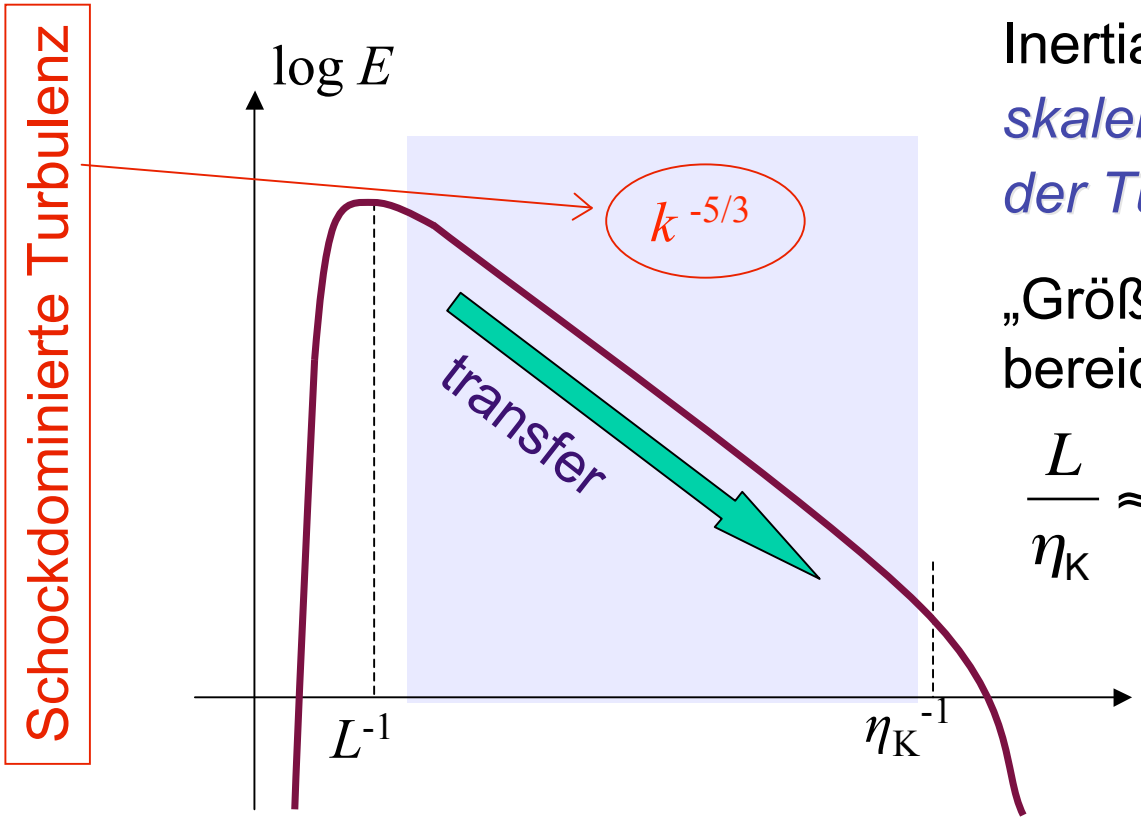
„Größe“ des Intertial-bereichs

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

Skala des Energie-eintrages

Skala der Energie-dissipation

Turbulente Kaskade



Inertialbereich:
skalenfreies Verhalten der Turbulenz

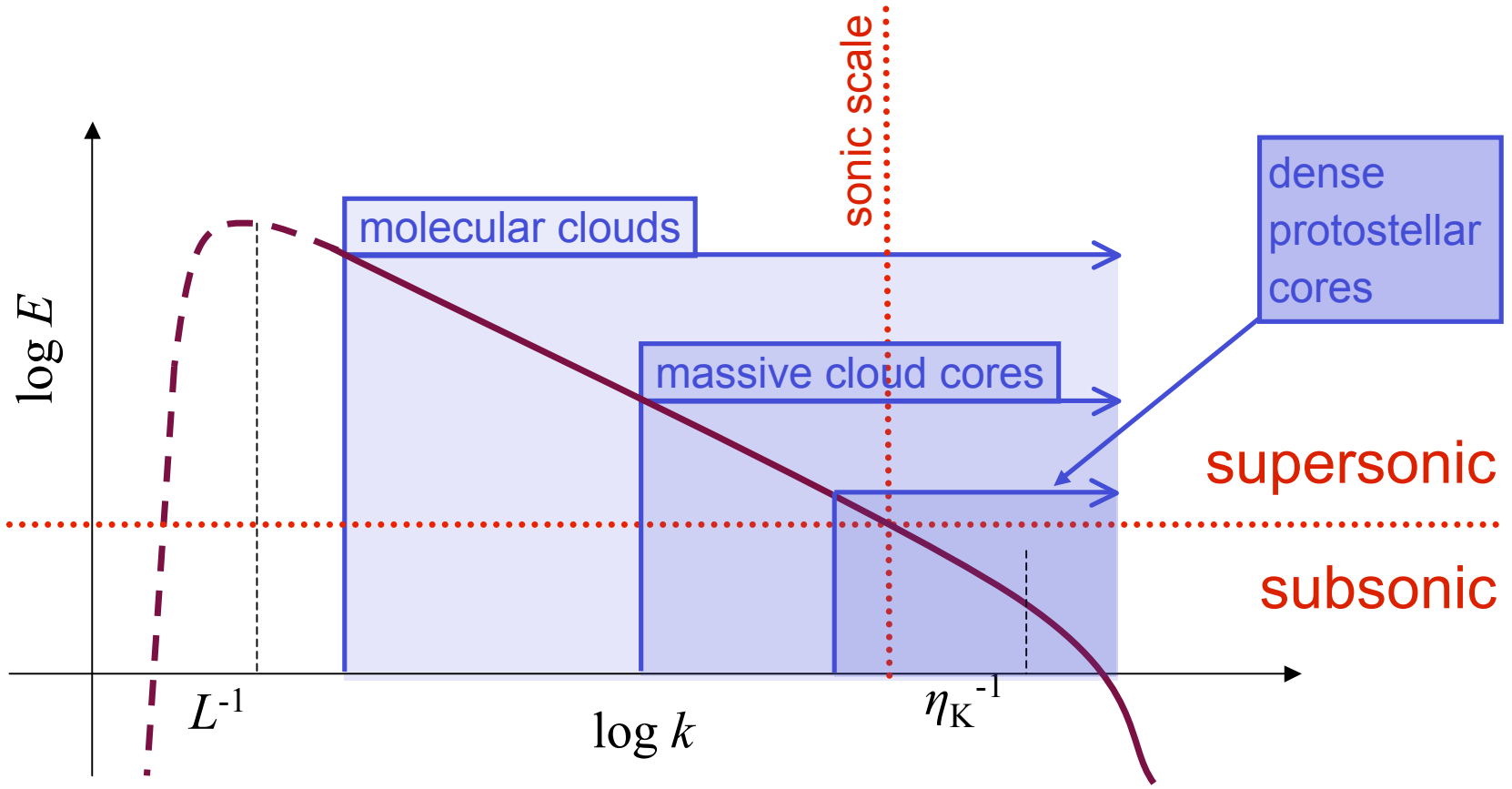
„Größe“ des Intertial-bereichs

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

Skala des Energie-eintrages

Skala der Energie-dissipation

Turbulente Kaskade in der ISM

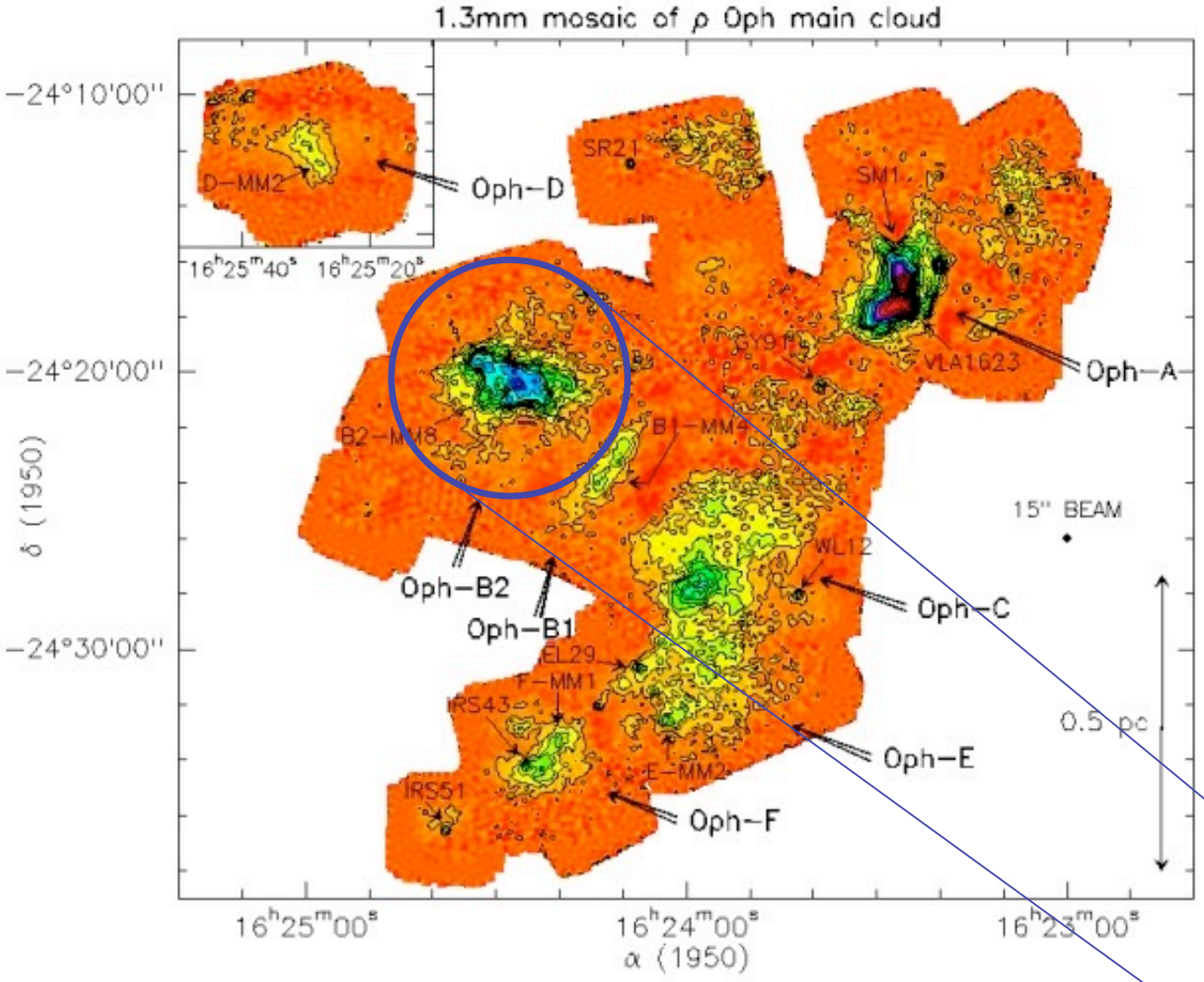


energy source & scale *NOT known* (supernovae, winds, spiral density waves?)

σ_{rms} << 1 km/s
$M_{rms} \leq 1$
L ≈ 0.1 pc

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

Dichtestruktur von MW



(Motte, André, & Neri 1998)

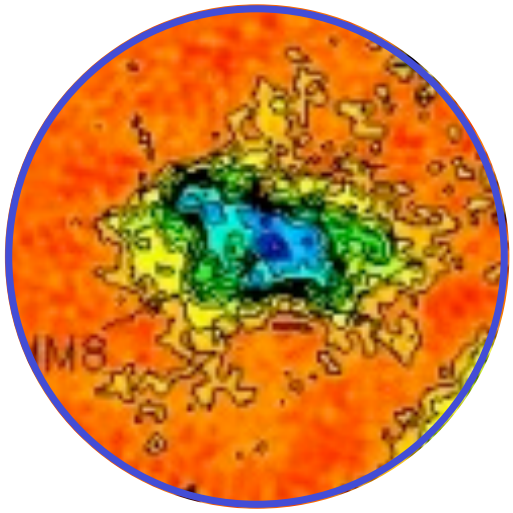
Molekülwolken sind hochgradig inhomogen.

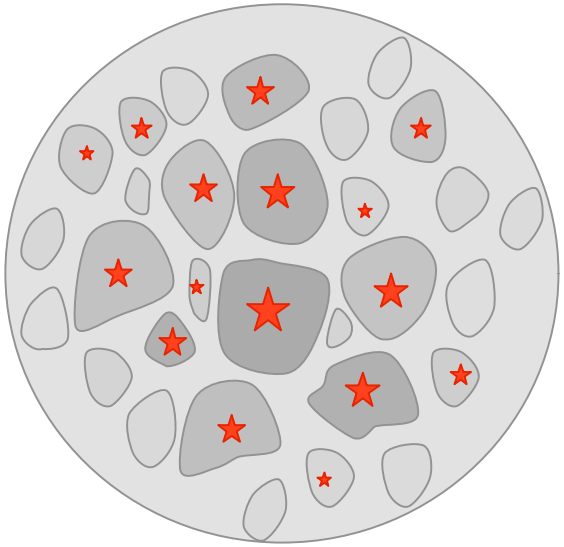
Sterne bilden sich in den dichtesten und kältesten Teilen der Wolke.

ρ-Ophiuchus in Staubemission

genauere Betrachtung

Entwicklung von Wolkenkernen

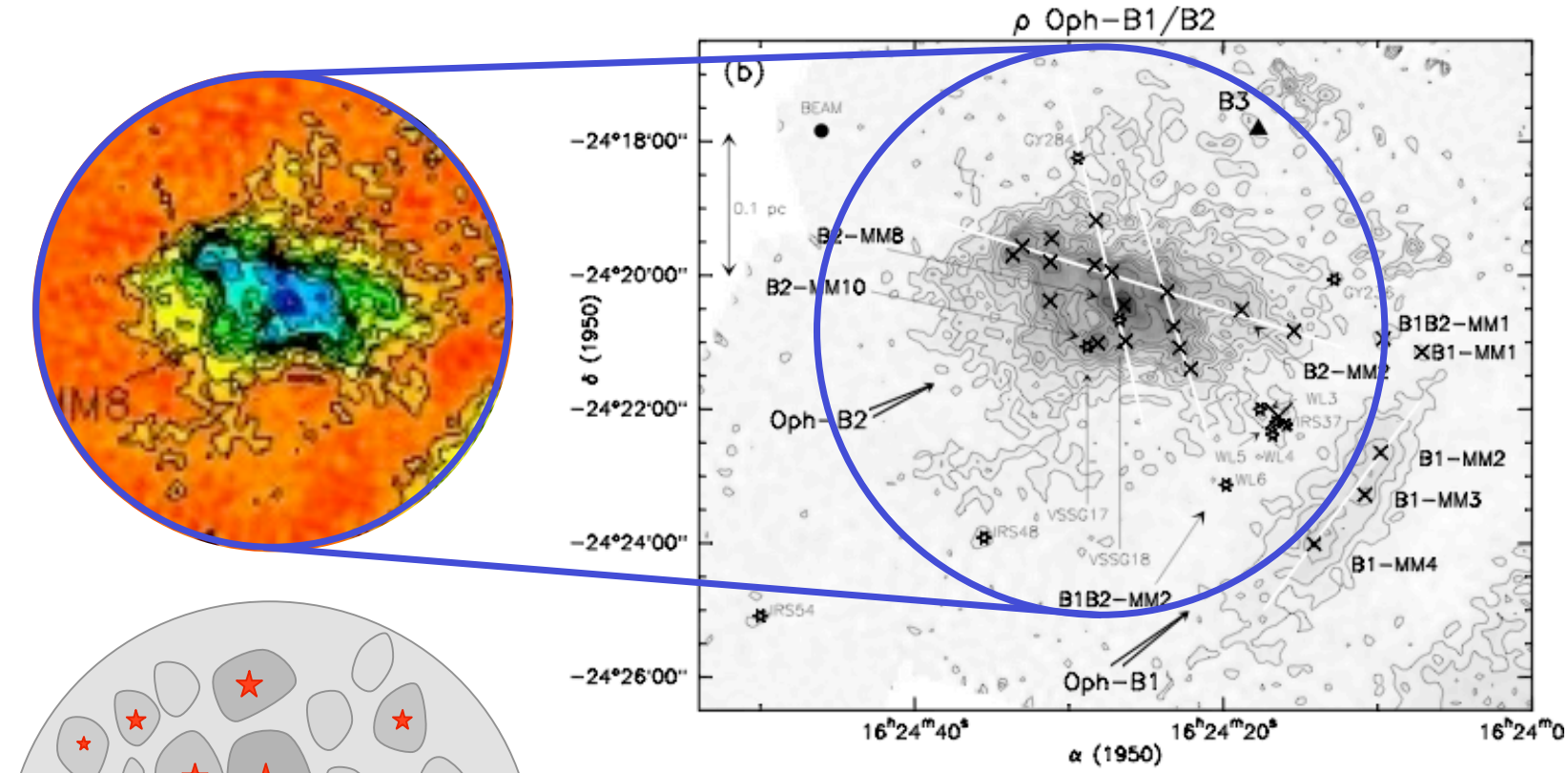


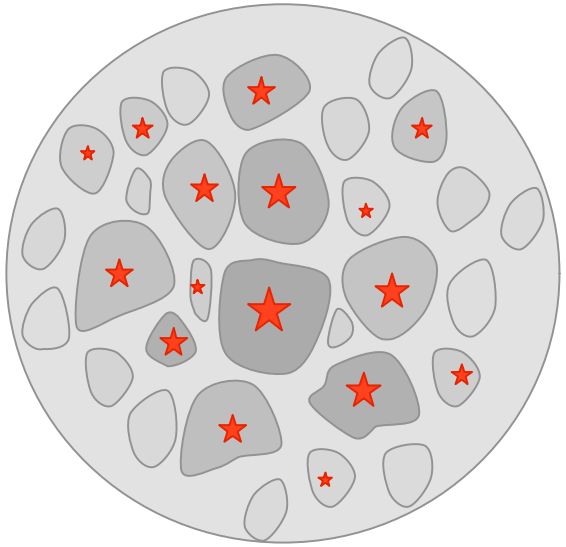


- *FRAGE*:
  Bildet sich ein einzelner massereicher Stern, oder ein Sternhaufen mit masse-armen Sternen?

- 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

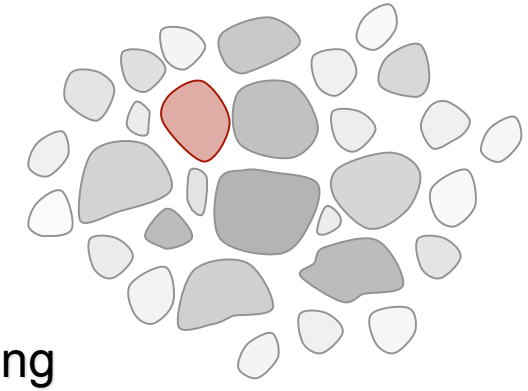




Beispiel ρ-Oph B1/B2: Kern enthält mehrere protostellare Objekte

(“starless” cores are denoted by ×, cores with embedded protostars by ☆)

Entwicklung von Wolkenkernen



- Protostellare Wolkenkerne bilden sich an *Stagnationspunkten* in *konvergenten turbulenten Strömungen*
- wenn $M > M_{Jeans} \propto \rho^{-1/2} T^{3/2}$: Kollaps & Sternbildung
- wenn $M < M_{Jeans} \propto \rho^{-1/2} T^{3/2}$: Reexpansion nach dem Ende der externen Kompression

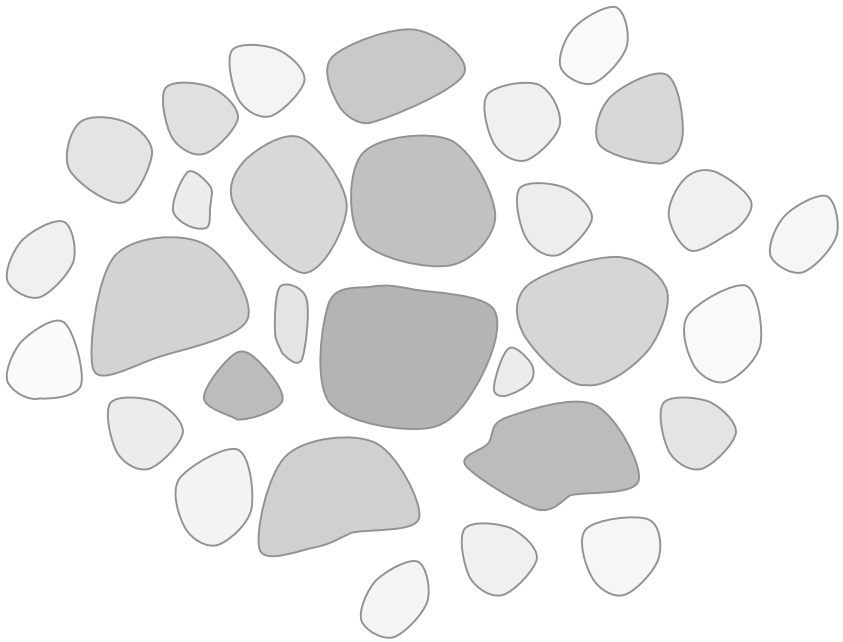
  (e.g. Vazquez-Semadeni et al 2005)

- typische Zeitskalen: $t \approx 10^4 \ldots 10^5$ Jahre
- Da Zeitskala für turbulente ambipolaren Diffusion (ion-neutral drift) kurz --> Abschätzung gilt auch bei Berücksichtigung von Magnetfeldern, für „magnetisch kritische“ Kerne ($E_{pot} \approx E_B$)

  (e.g. Fatuzzo & Adams 2002, Heitsch et al. 2004)

Entwicklung von Wolkenkernen

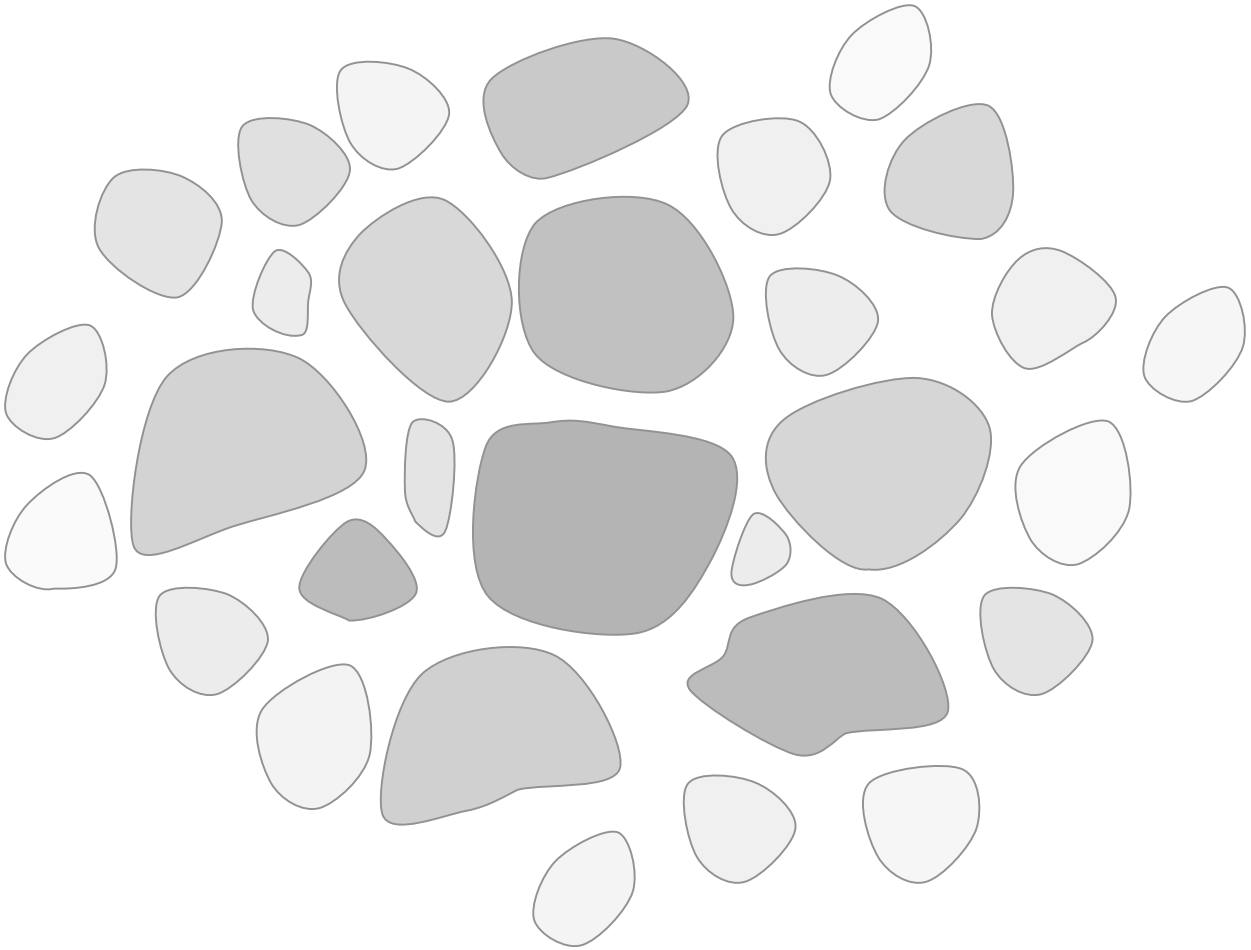
Was passiert bei mehreren (wechselwirkenden) Kernen?



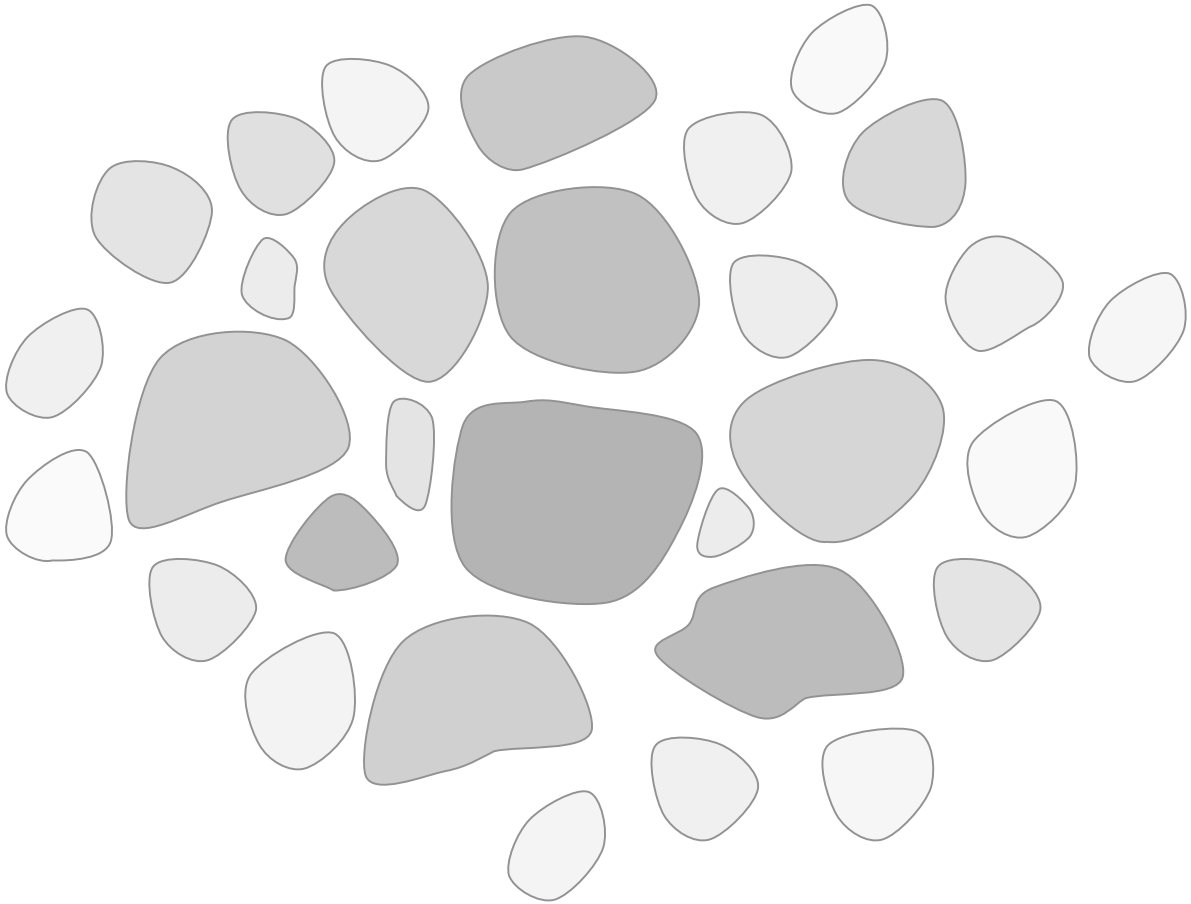
Zwei Extremfälle:

(1) Turbulenz dominiert Energiebudget:
$\alpha = E_{kin}/|E_{pot}| > 1$
--> keine Wechselwirkung der Kerne untereinander
--> *Stellarer Massenzuwachs* bestimmt durch *isolierten Kollaps*
--> *loser Haufen massearmer Sterne*

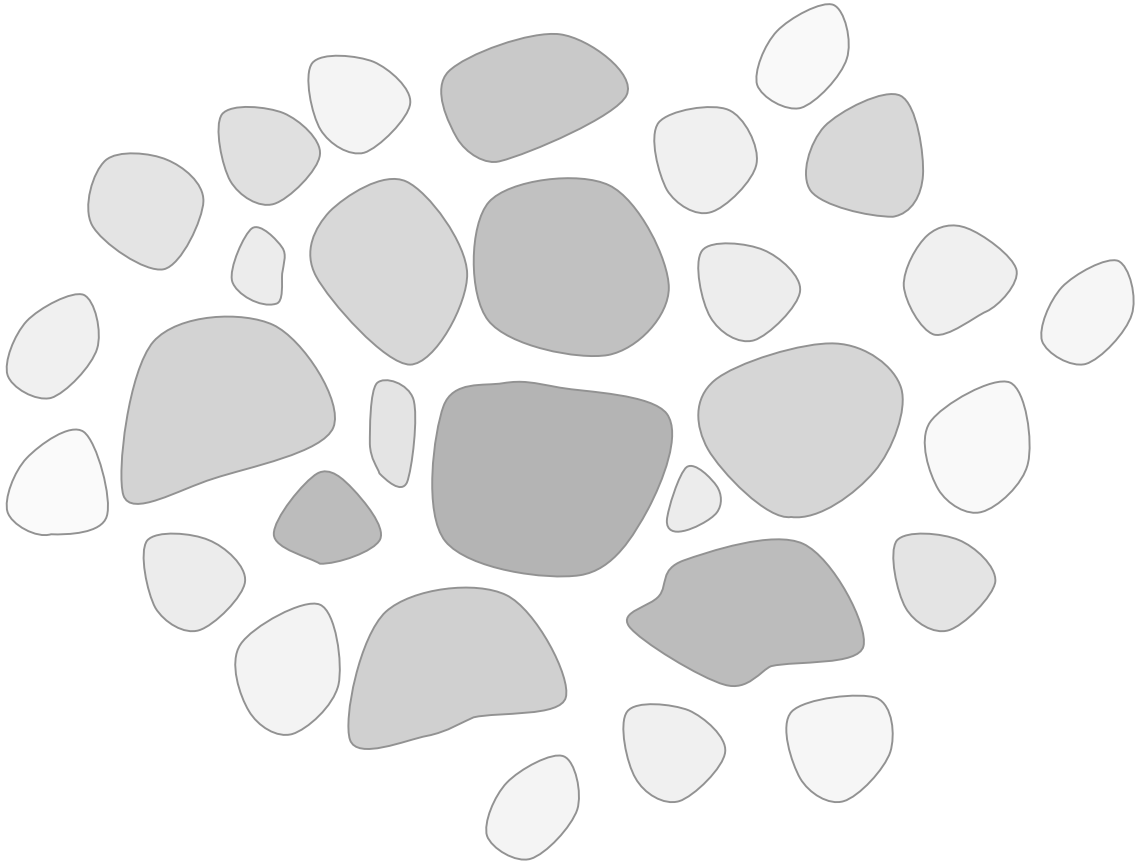
(2) Turbulenz zerfällt, dh. Gravitation dominiert: $\alpha = E_{kin}/|E_{pot}| < 1$
--> *globale Kontraktion*
--> Kerne *wechselwirken* während sie kollabieren
--> *Kompetitives Wachstum*
--> *dichter Haufen, enthält masse-reiche Sterne*



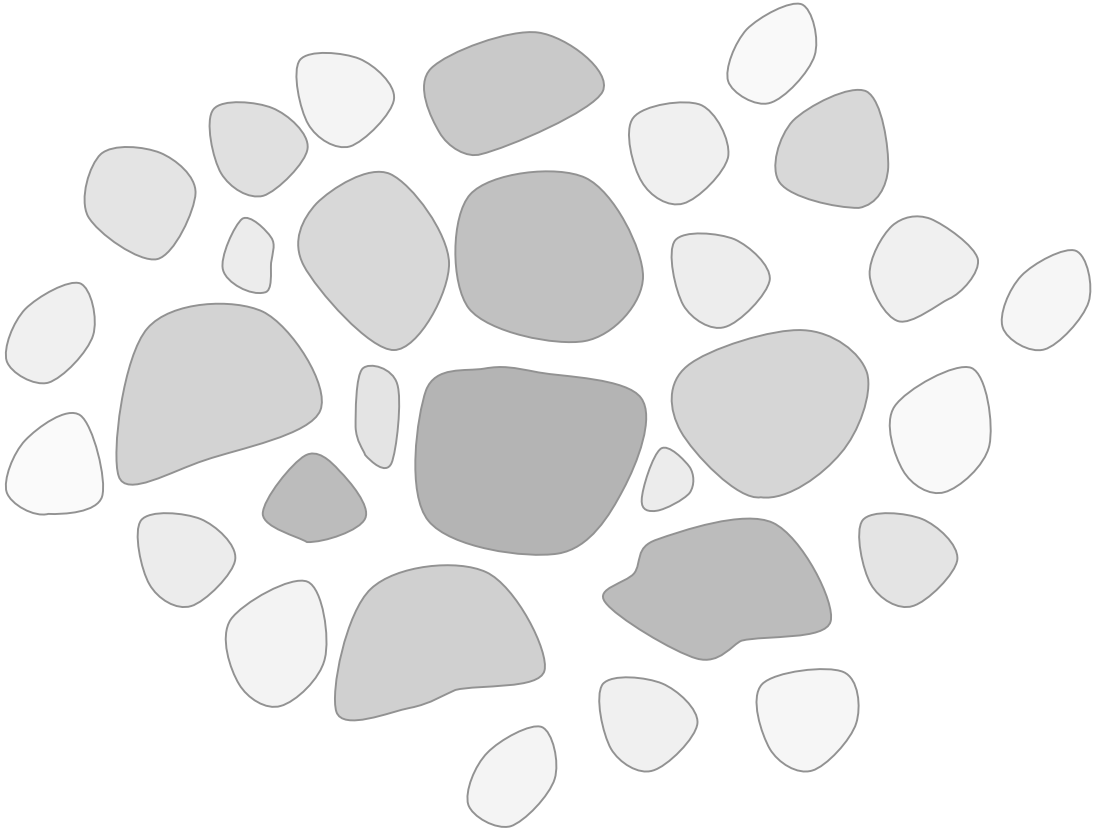
Turbulenz erzeugt Hierarchie von Klumpen



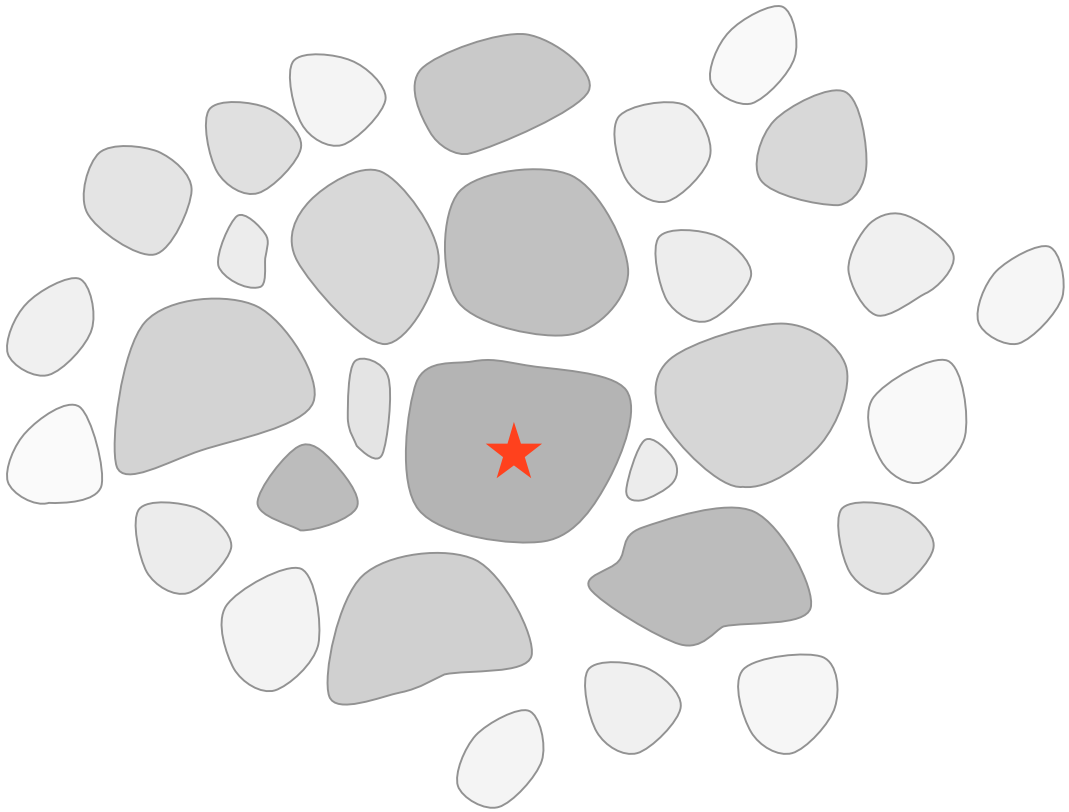
Turbulenz dissipiert, Kontraktion setzt ein



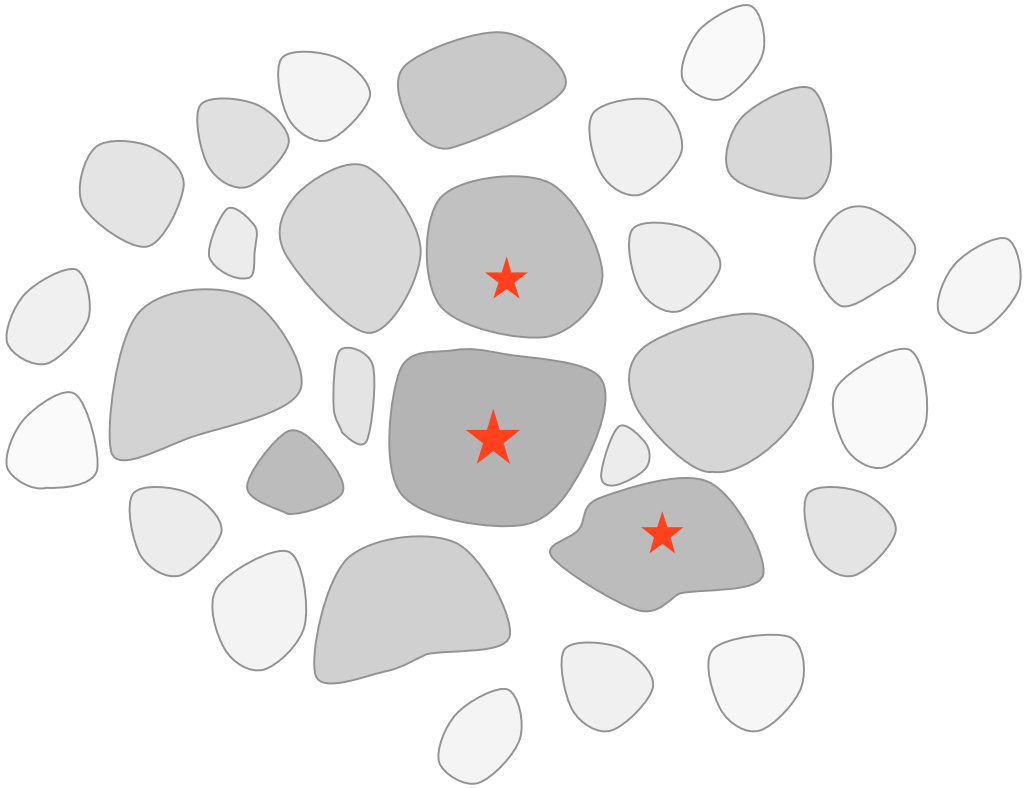
Turbulenz dissipiert, Kontraktion setzt ein



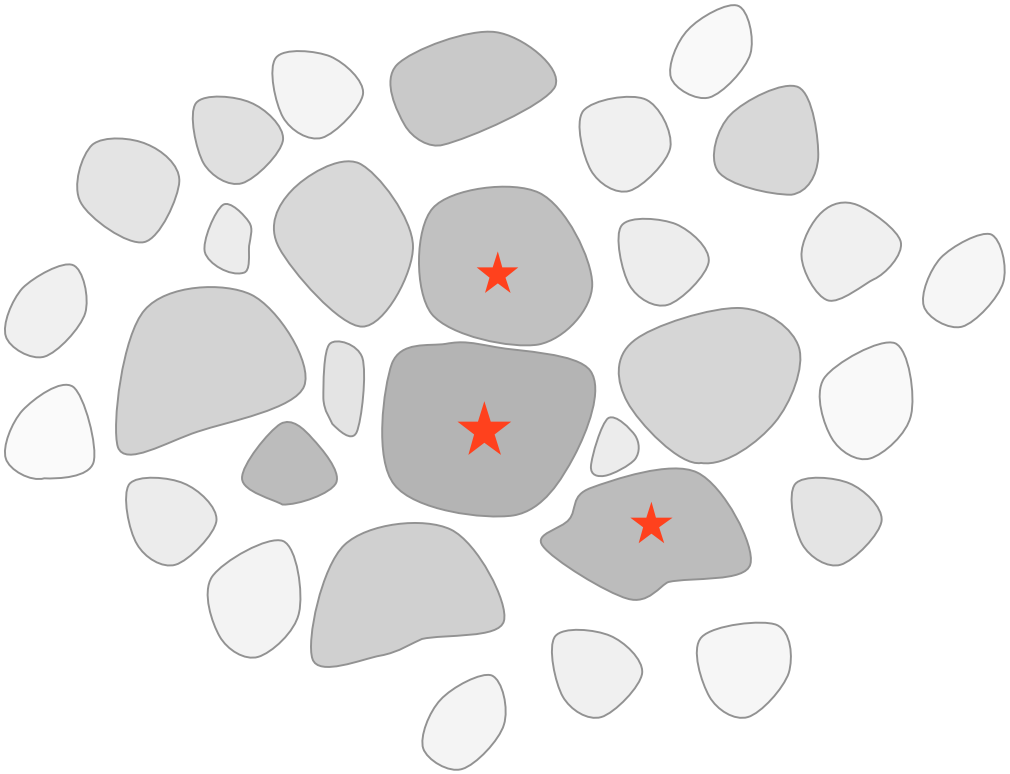
während Region kontrahiert können einzelne Klumpen kollabieren und Sterne bilden



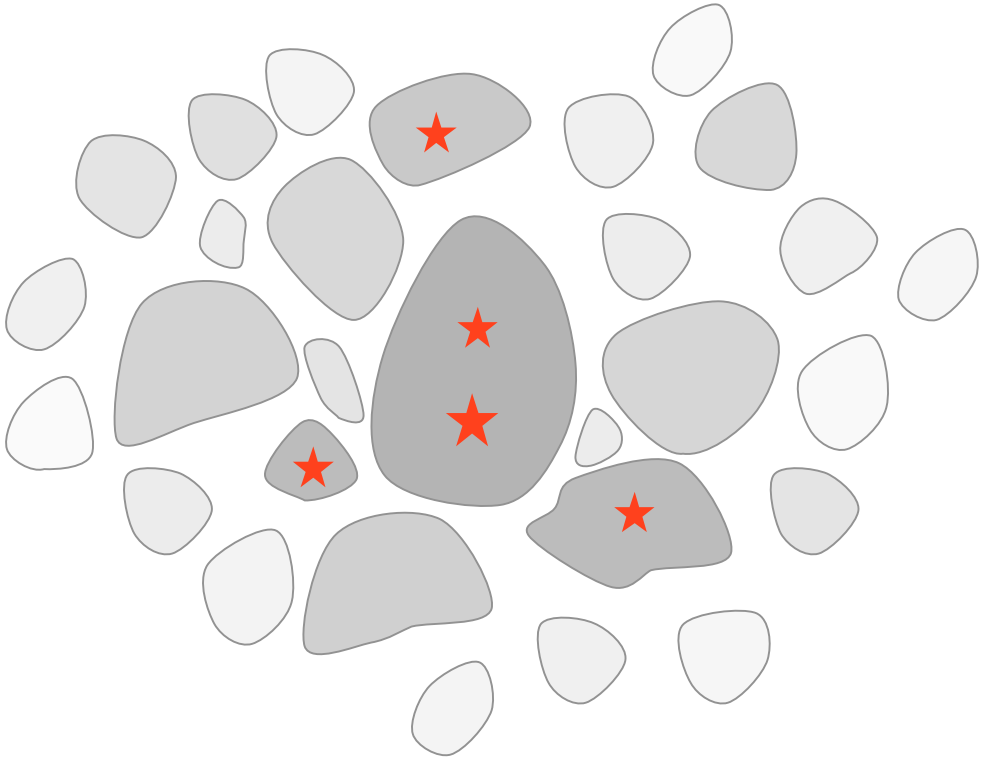
während Region kontrahiert können einzelne Klumpen kollabieren und Sterne bilden



einzelne Klumpen kollabieren und bilden Sterne

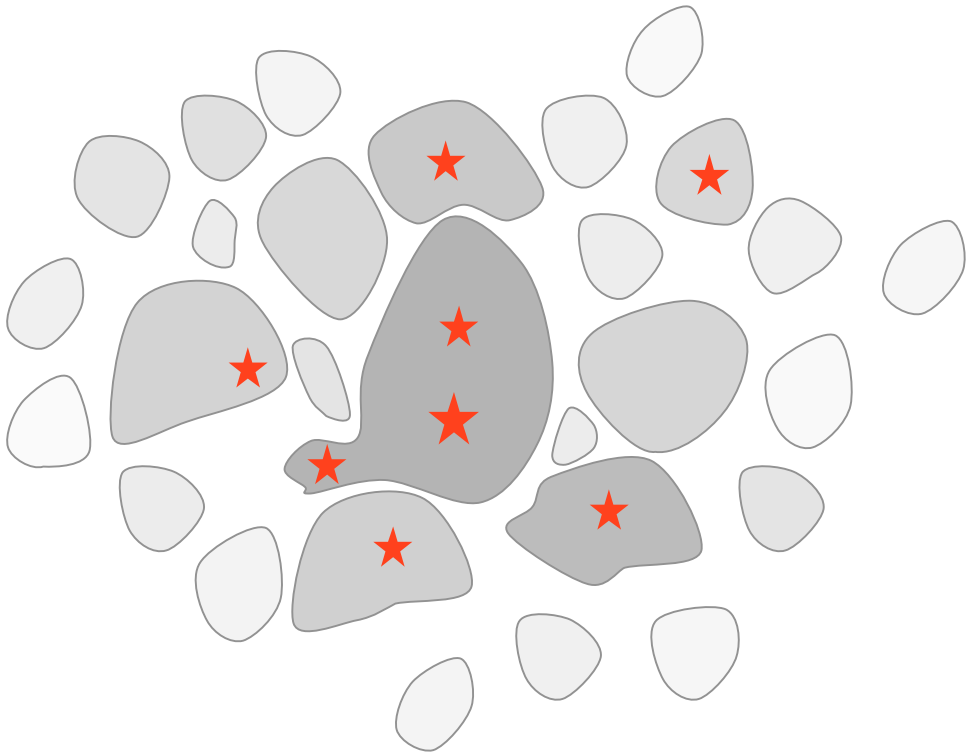


einzelne Klumpen kollabieren und bilden Sterne

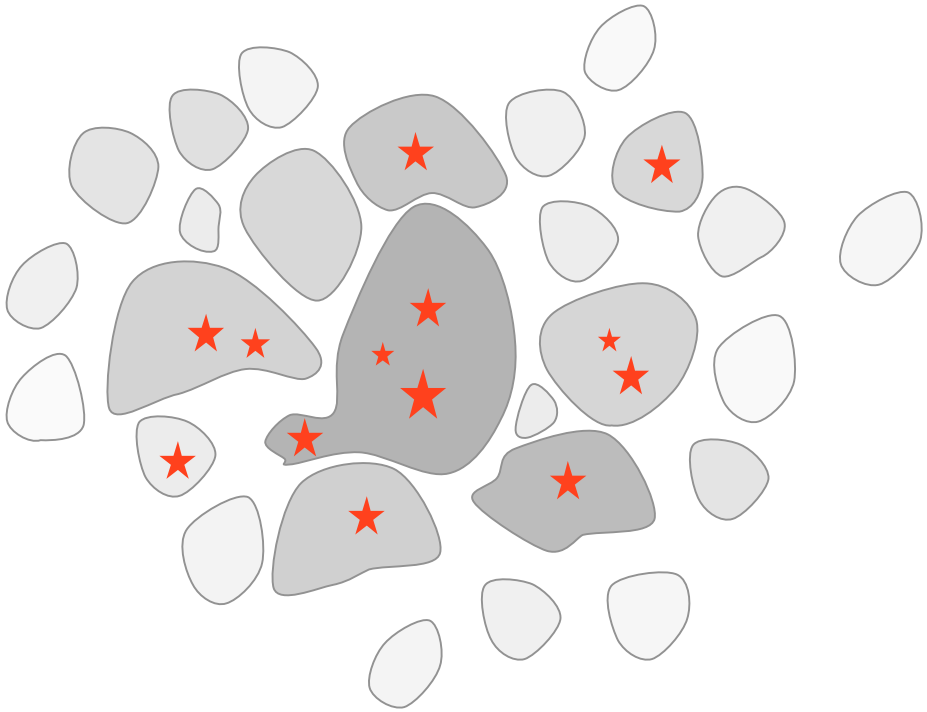


$\alpha = E_{kin}/|E_{pot}| < 1$

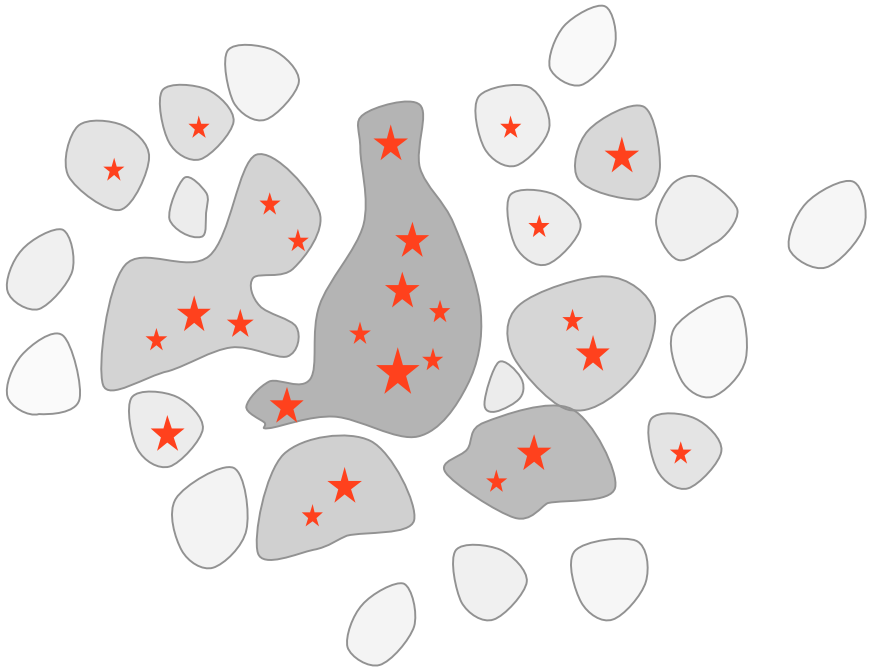
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



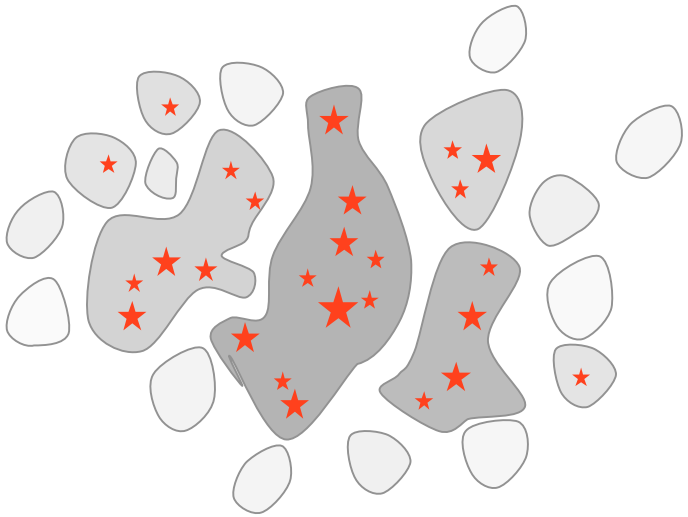
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



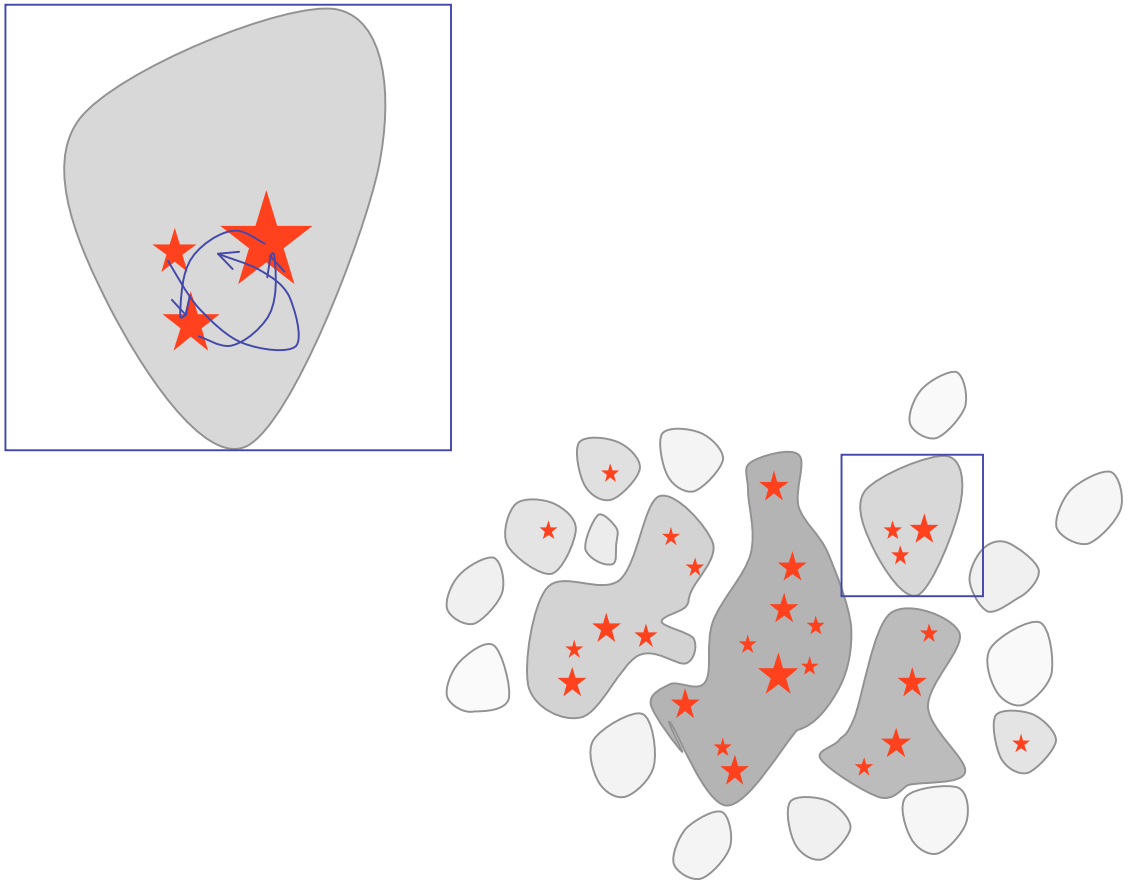
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



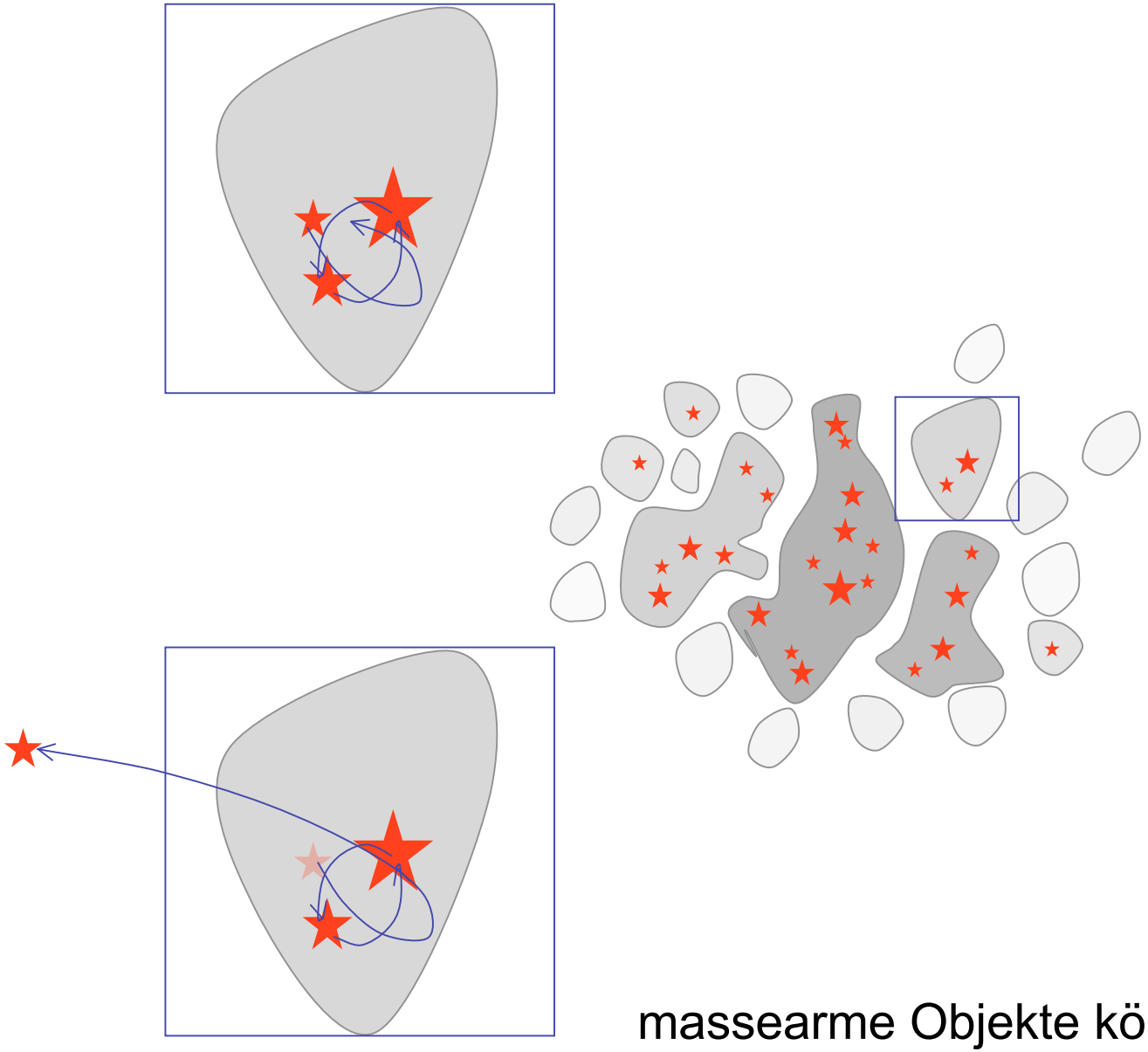
Im *dichten Haufen* wird kompetitives Wachstum wichtig



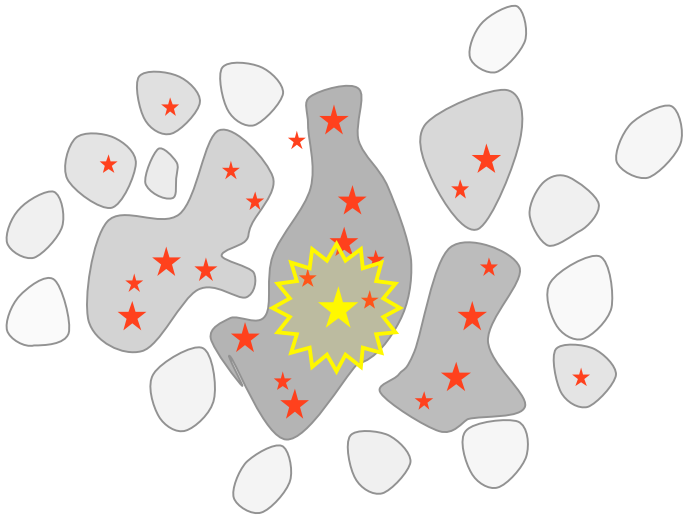
Im *dichten Haufen* wird kompetitives Wachstum wichtig



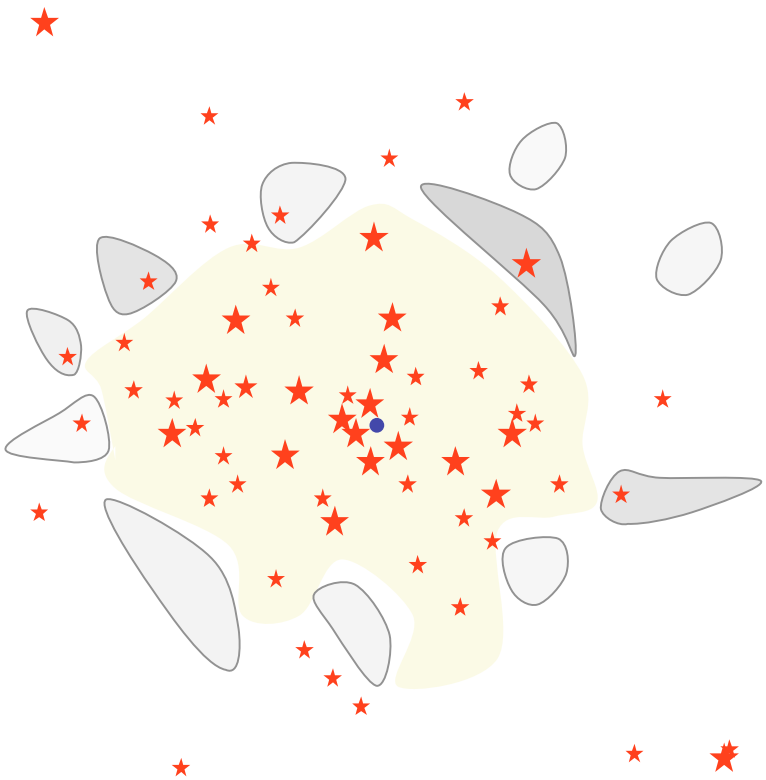
Im *dichten Haufen* beeinflussen stellardynamische Prozesse das Wachstum



massearme Objekte können herausgeschleudert werden --> Ende der Akkretion



Feedback beendet die Sternbildung



Resultat: *Sternhaufen*, evtl. umgeben von HII-Region

Vorhersagen

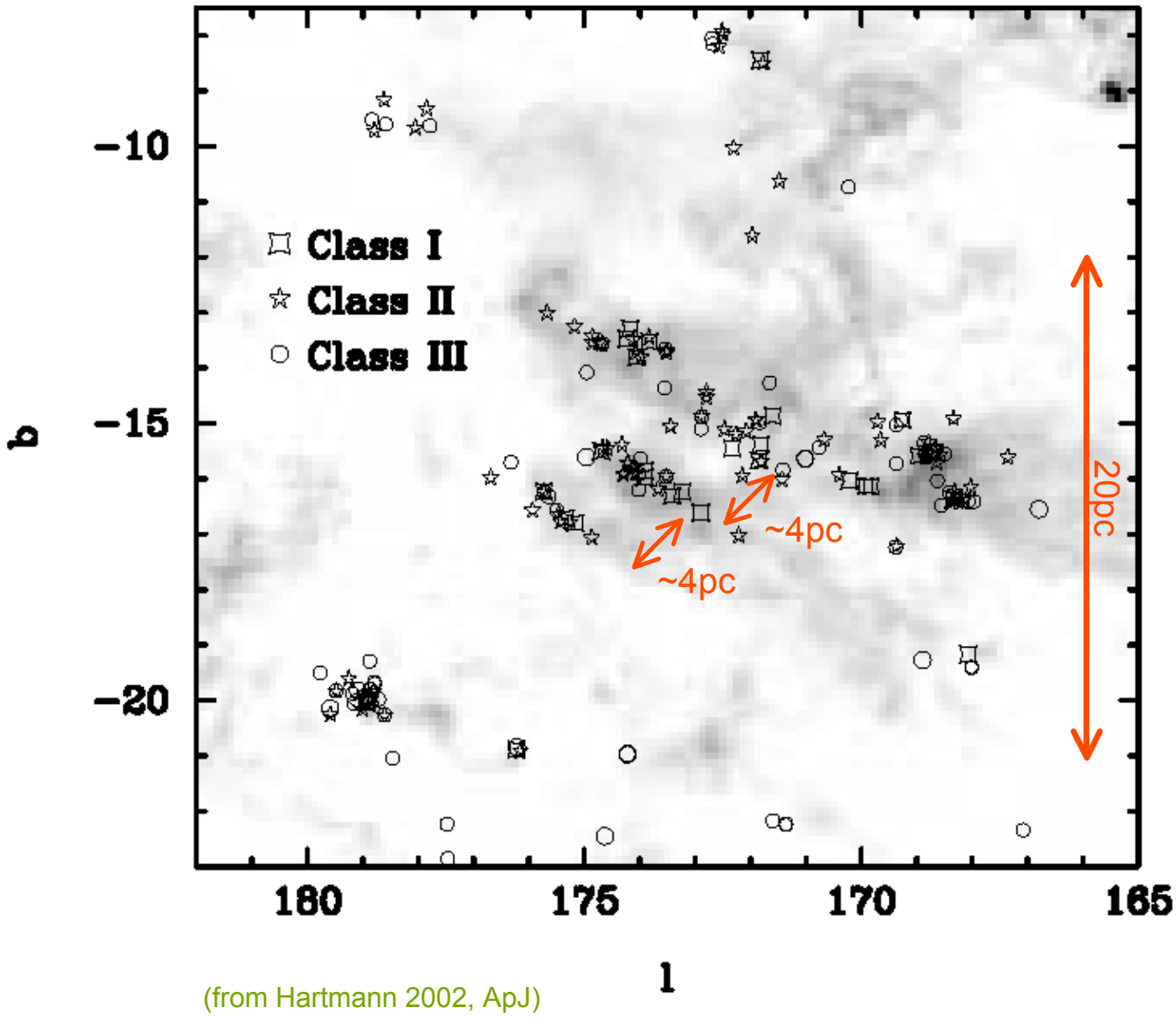
Was können wir lernen?

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

(genaueres in Mac Low & Klessen, 2004, Rev. Mod. Phys., 76, 125-194)

Beispiel

Taurus Wolke



(from Hartmann 2002, ApJ)

Sternbildende Filamente in der *Taurus* Molekülwolke

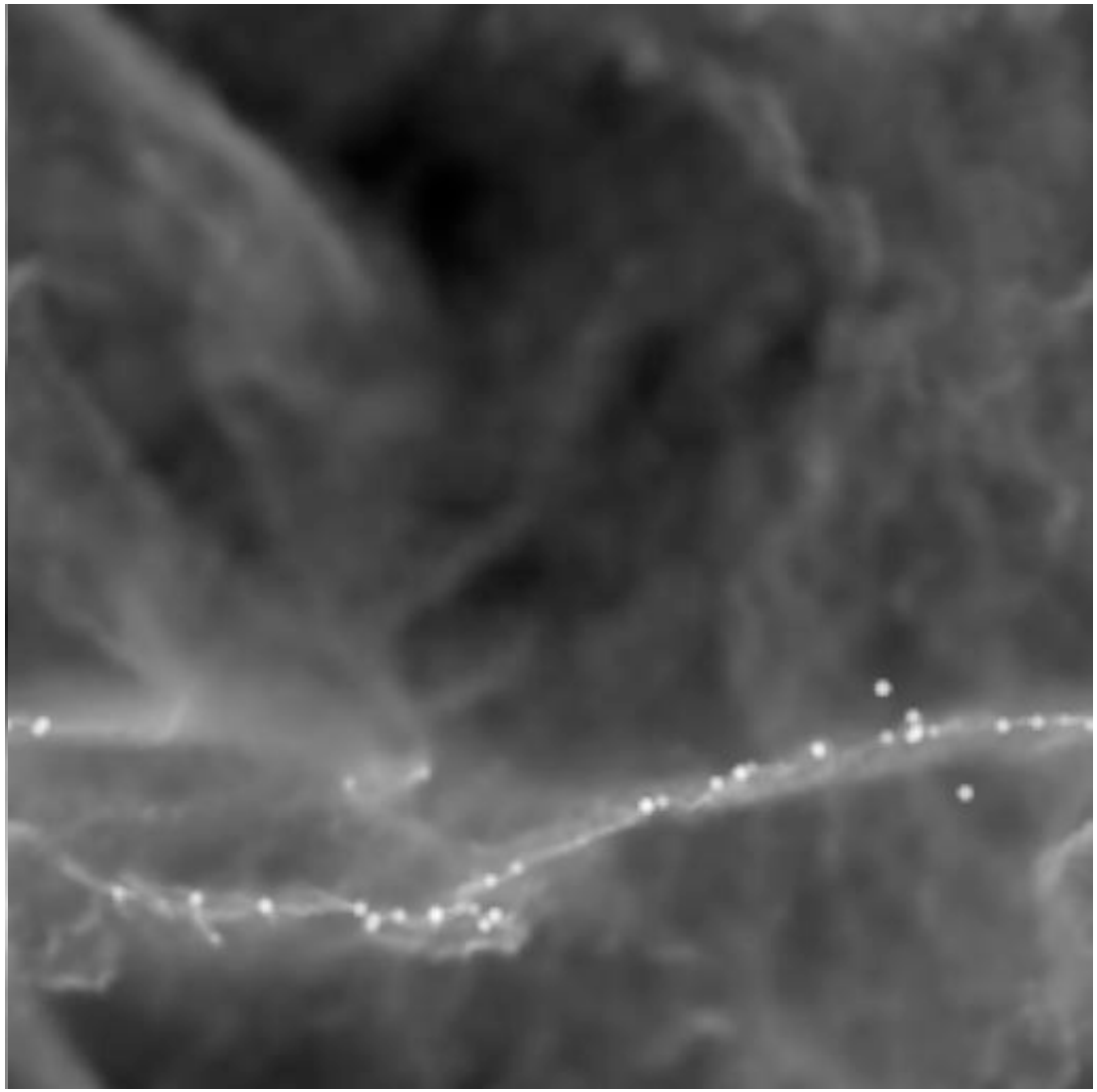
Numerisches Model der gravoturbulenten Fragmentation

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

- SPH-Modellrechnungen zur dynamischen Entwicklung der Wolke (1.6×10^6 Teilchen)

- 1.6×10^6 SPH-Teilchen
- Turbulenz getrieben auf großen Skalen
- Machzahl $\mathcal{M} = 6$
- Periodische Randbedingungen

Gravoturbulente Fragmentation



Turbulenz erzeugt die Dichtestruktur

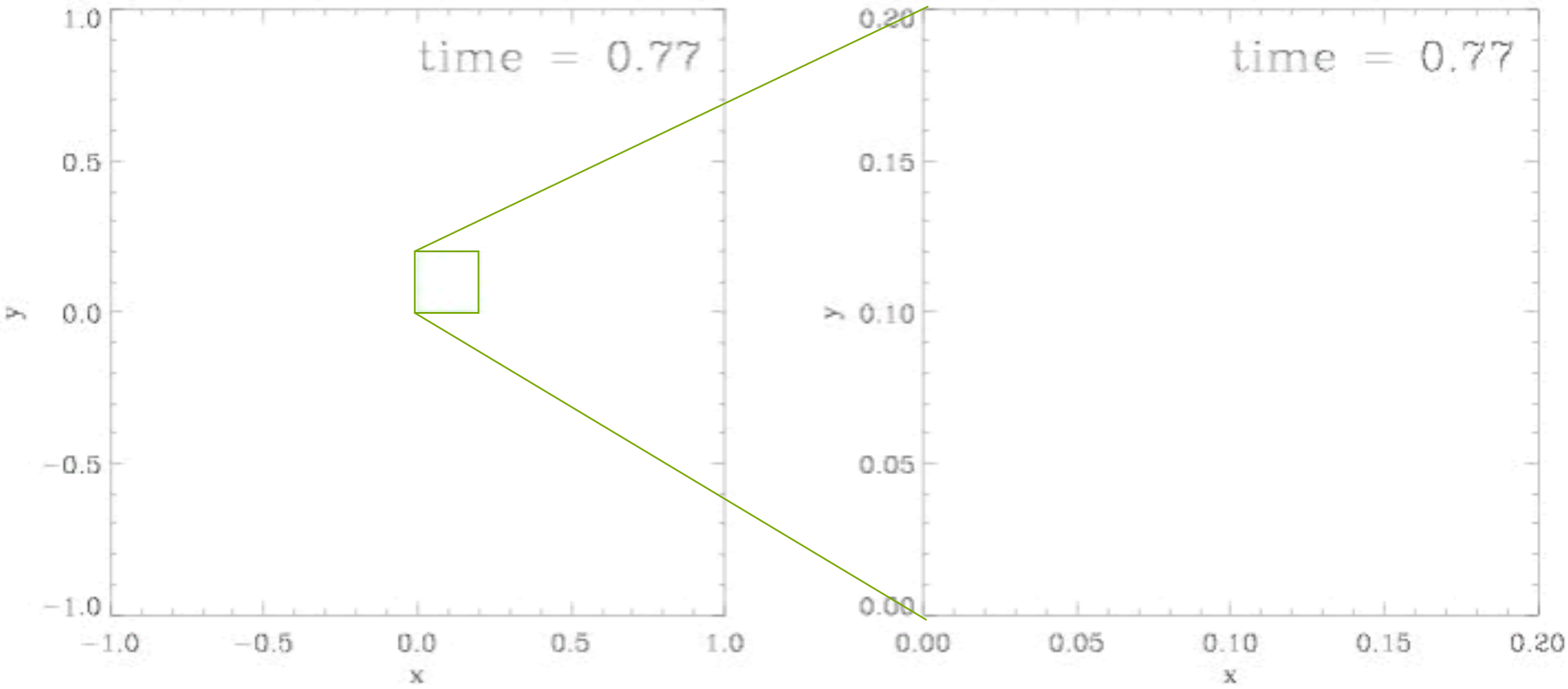
Gravitation wählt die dichtesten Gebiete aus.

Diese verdichten sich & bilden Sterne.

(Klessen & Ballesteros-Paredes, in Vorbereitung)

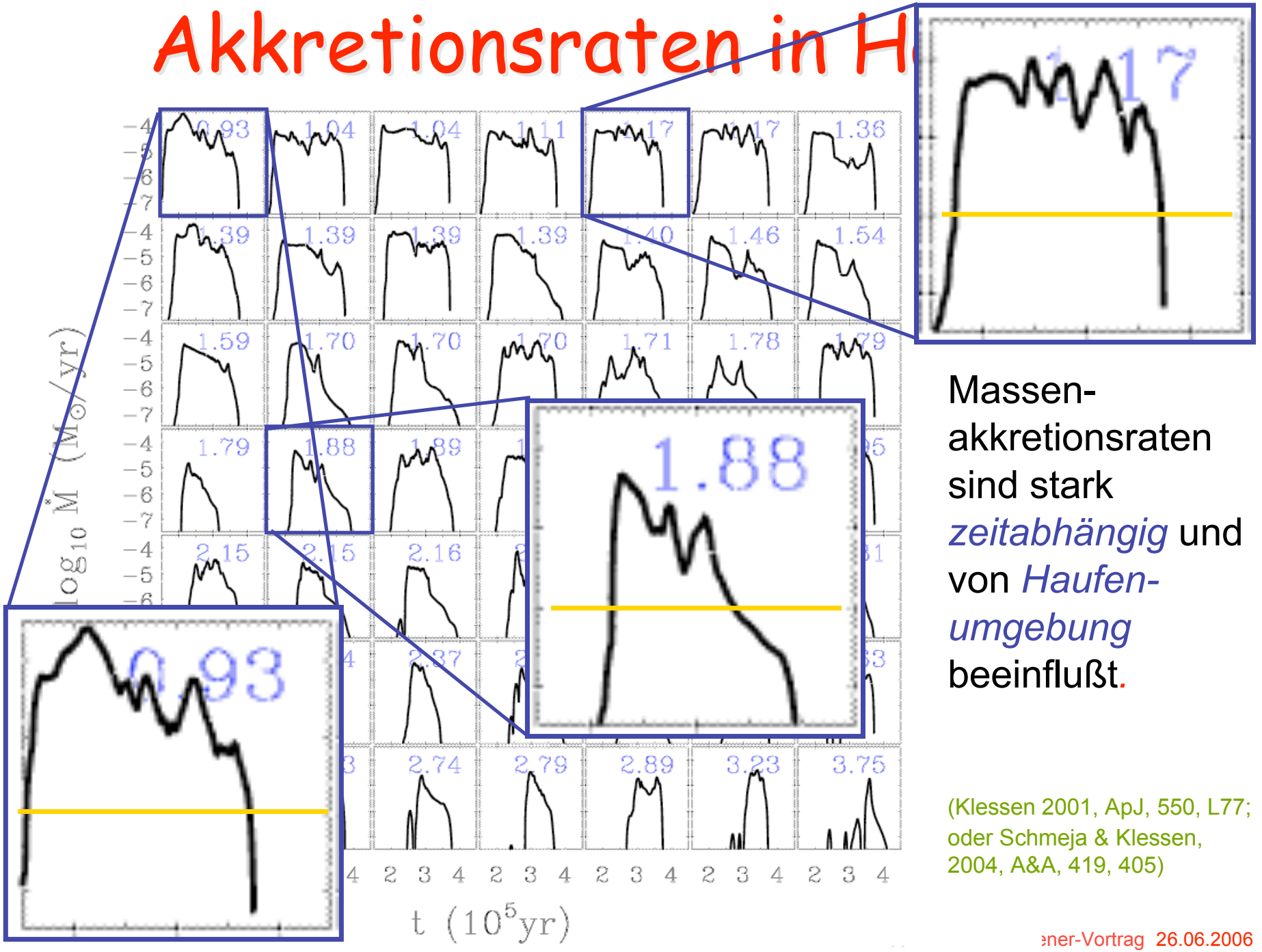
Bildung von Sternhaufen

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)

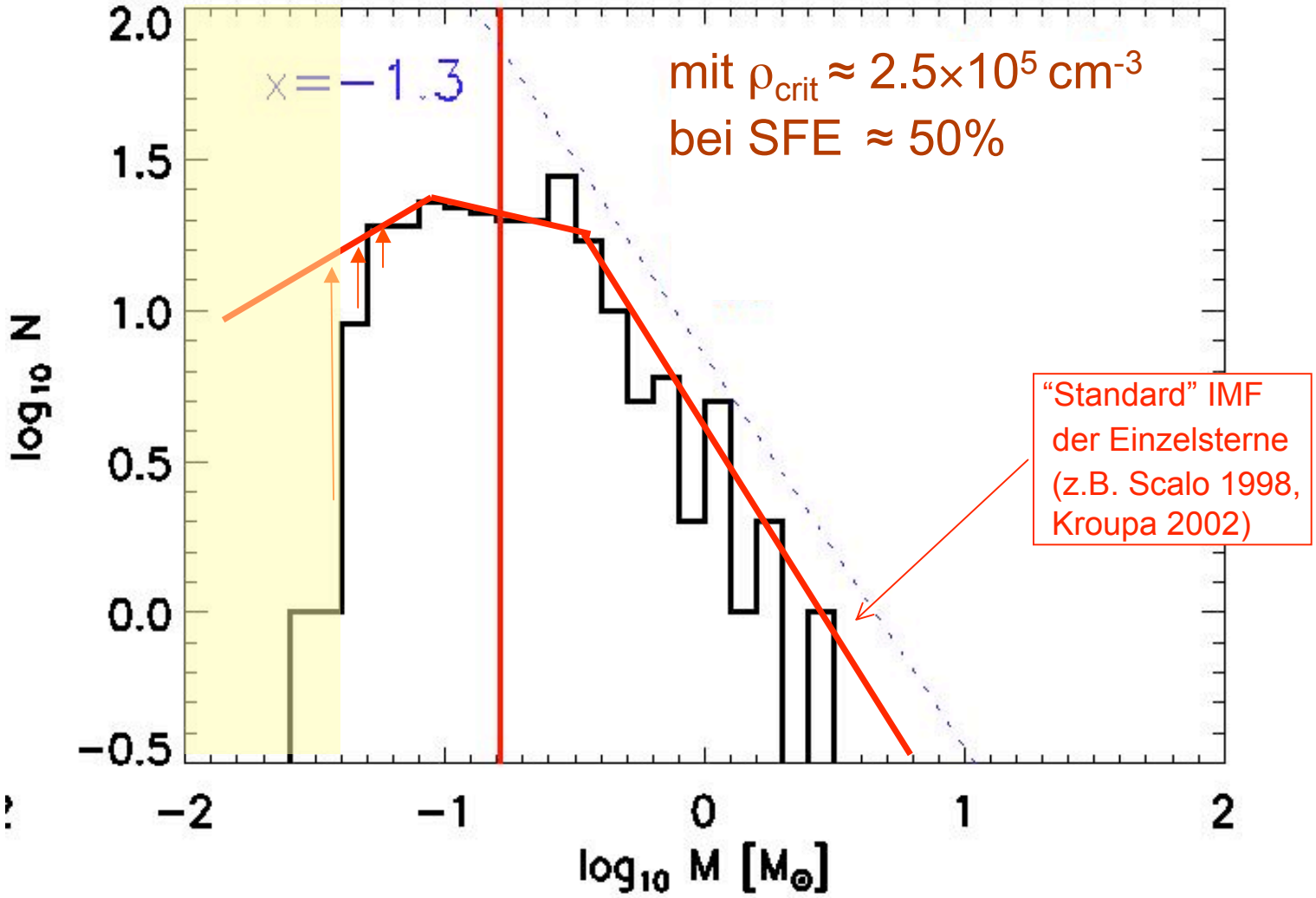
Akkretionsraten in H



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

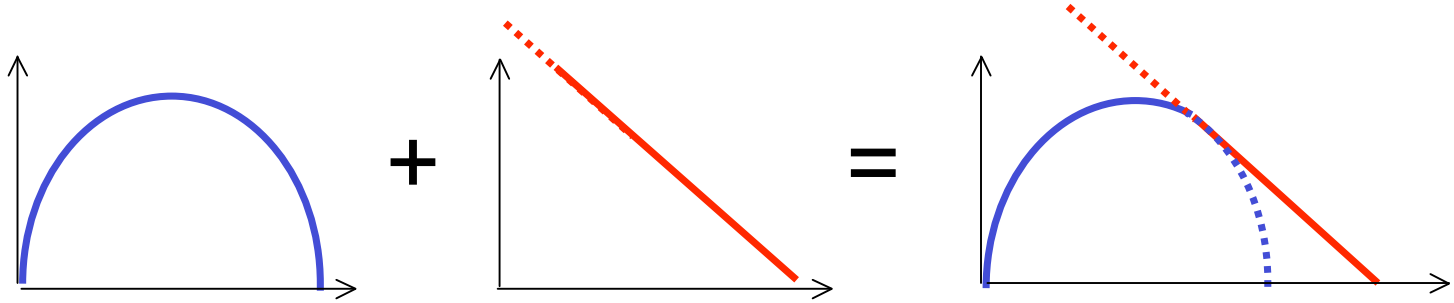
(Klessen 2001, ApJ, 550, L77; oder Schmeja & Klessen, 2004, A&A, 419, 405)

Massenspektrum



(Jappsen, Klessen, Larson, Li, Mac Low, 2005, A&A)

Plausibilitätsüberlegung...



- Überschallturbulenz ist skalenfreier Prozess

  → *führt zu POTENZGESETZ*

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

  → *GAUSS VERTEILUNG*

Sterne & Planeten

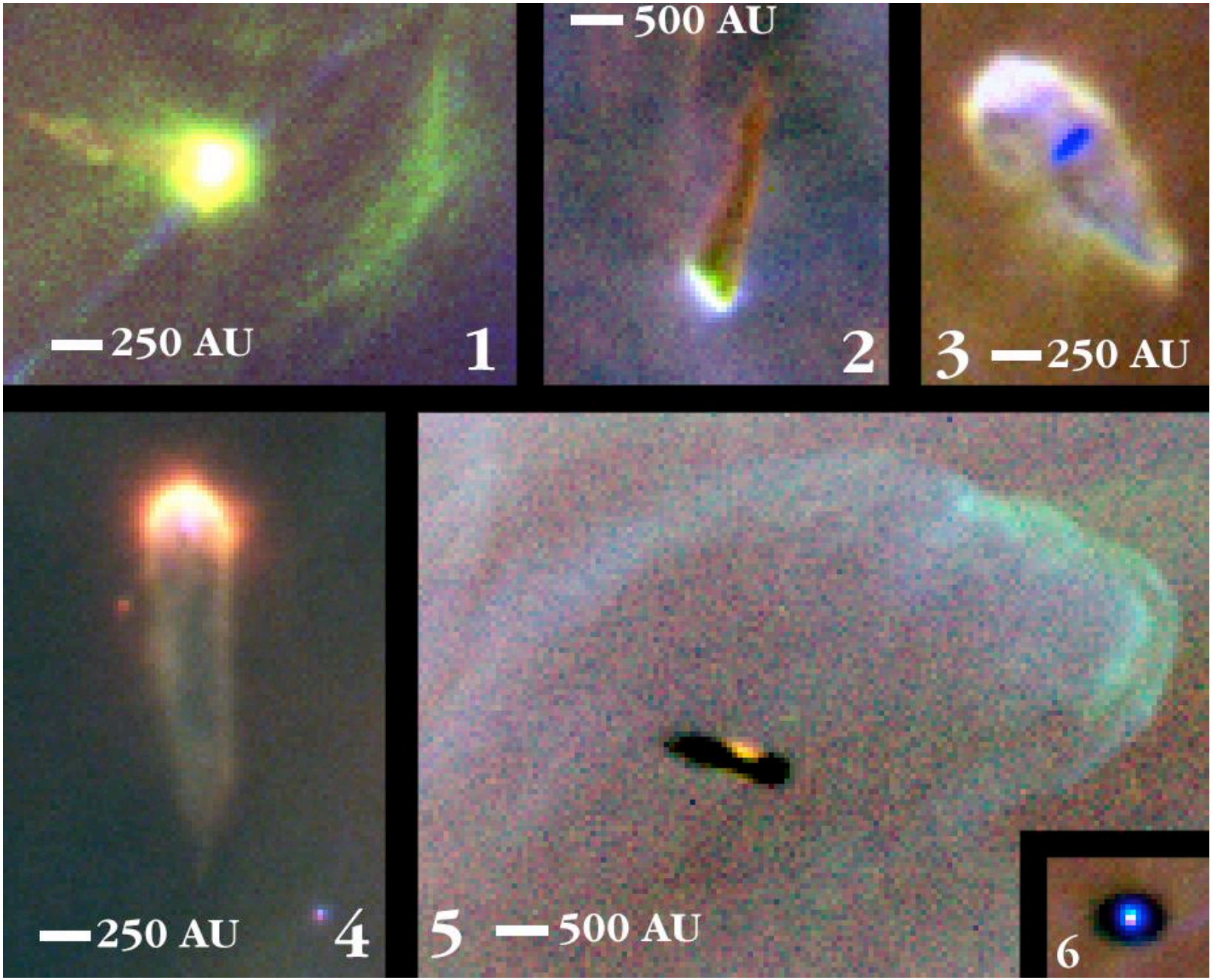
WIE geht´s weiter…
… auf kleinsten Skalen?

- Wie ist die weitere Entwicklung des jungen Protosterns hin zur Hauptreihe?
- Stabilität der protostellaren Scheibe

  Gravitative Instabilität und Fragmentation:

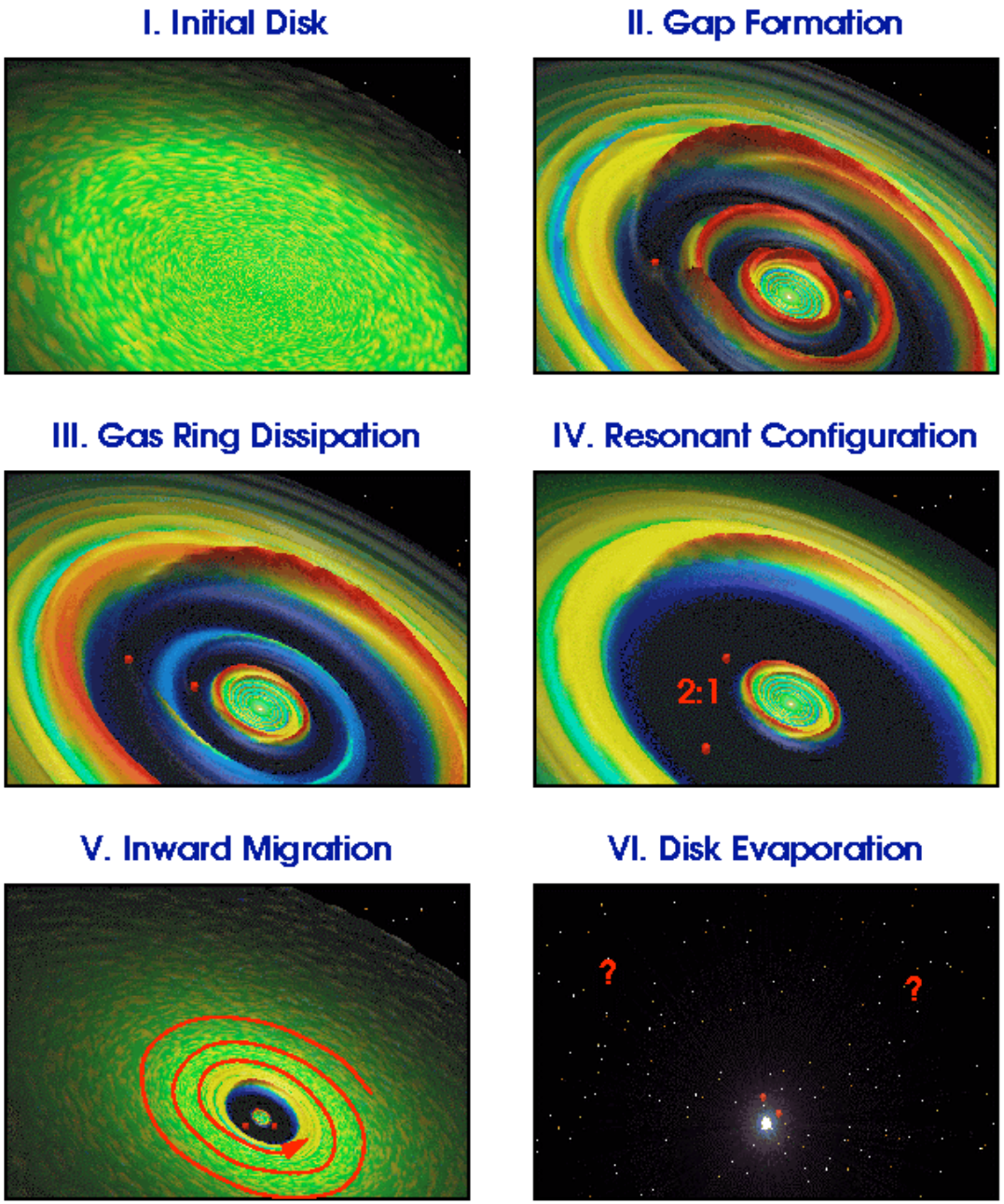
  → Doppel- und Mehrfachsysteme

  → Braune Zwerge? Gasplaneten?
- Wie bilden sich Planeten?



Proplyds in Orion (Johnstone et al.)

Planeten-bildung (Sonnensystem)



Bryden/Lin 2001

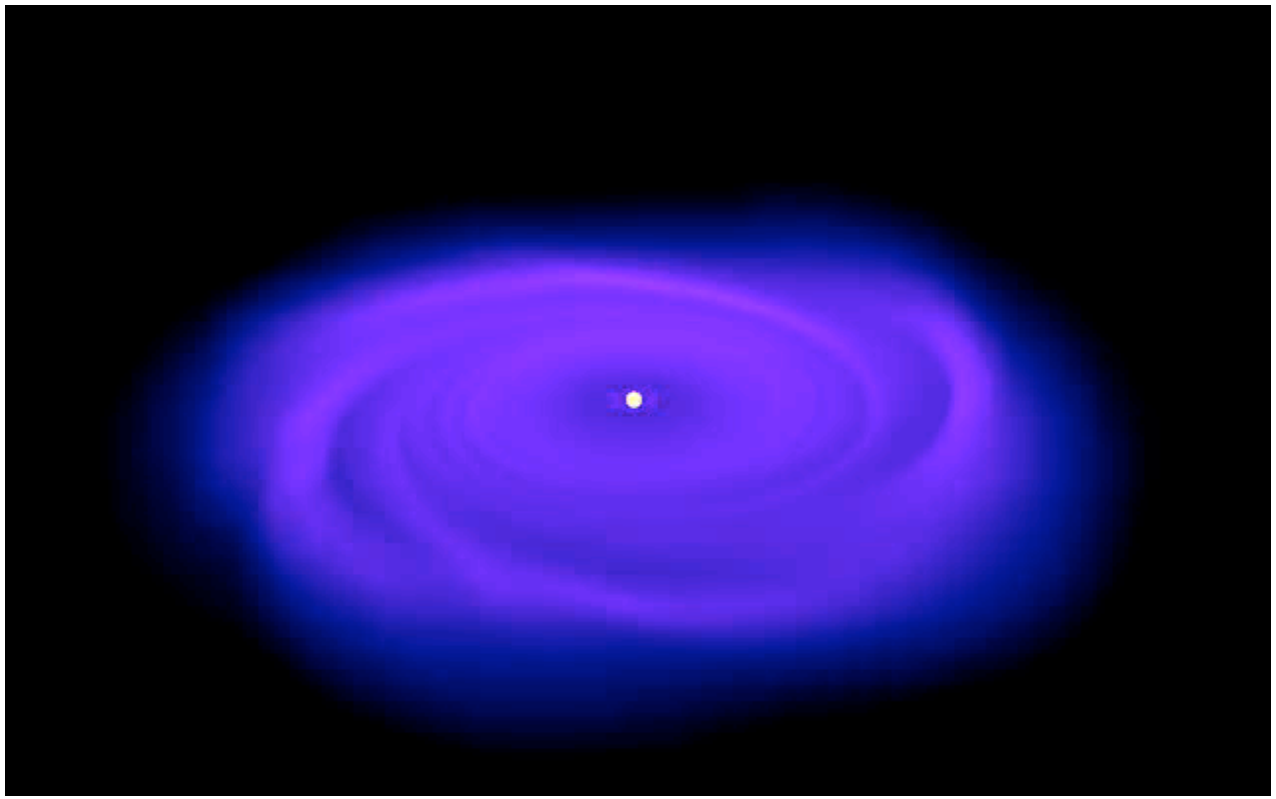
In den Endphasen der proto-stellaren Scheibenentwicklung

- Koagulation von Staubteilchen → Bildung von Planetesimalen
- Kollision der Plenetesimalen→ Runaway Growth von Protoplaneten *(terrestrische Planeten)*
- Sobald Mindestmasse erreicht → Runaway Gasakkretion und Gap Öffnung *(Jupiter-ähnliche)*
- Evtl. Migration nach innen auf-grund von Drehimpulsverteilung
- Prozesse nicht im Detail verstanden

Schließlich: Scheibe dissipiert→ Planetensystem wird sichtbar

Stabilität protostellarer Scheiben

- Bildung massereicher Gasplaneten? Relevanz für Exoplaneten?

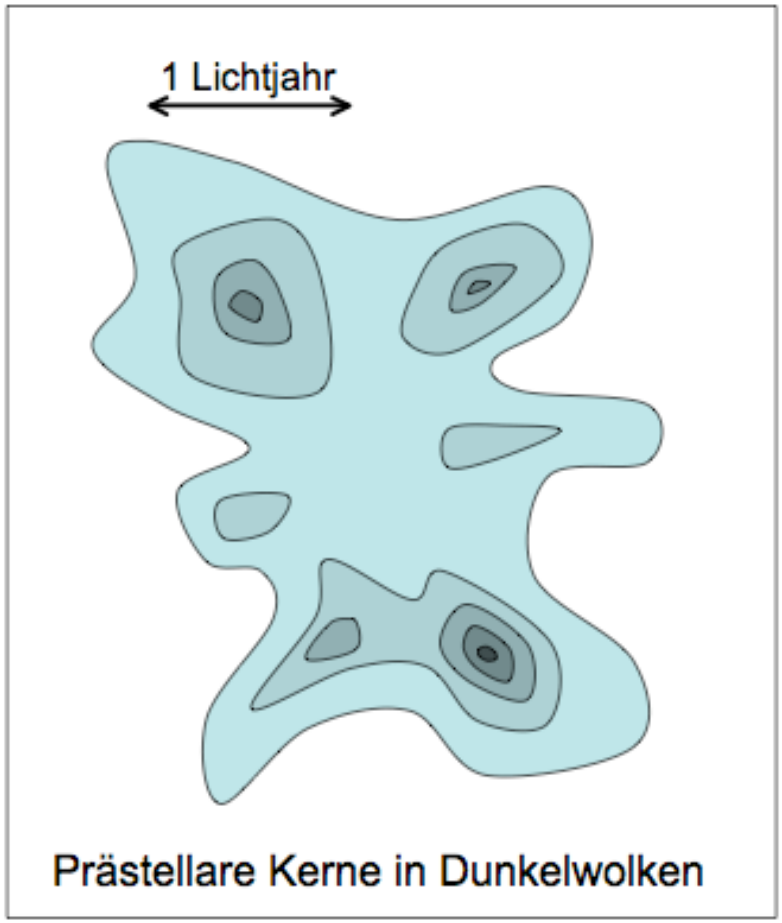


(Film von Lucio Mayer, Zürich)

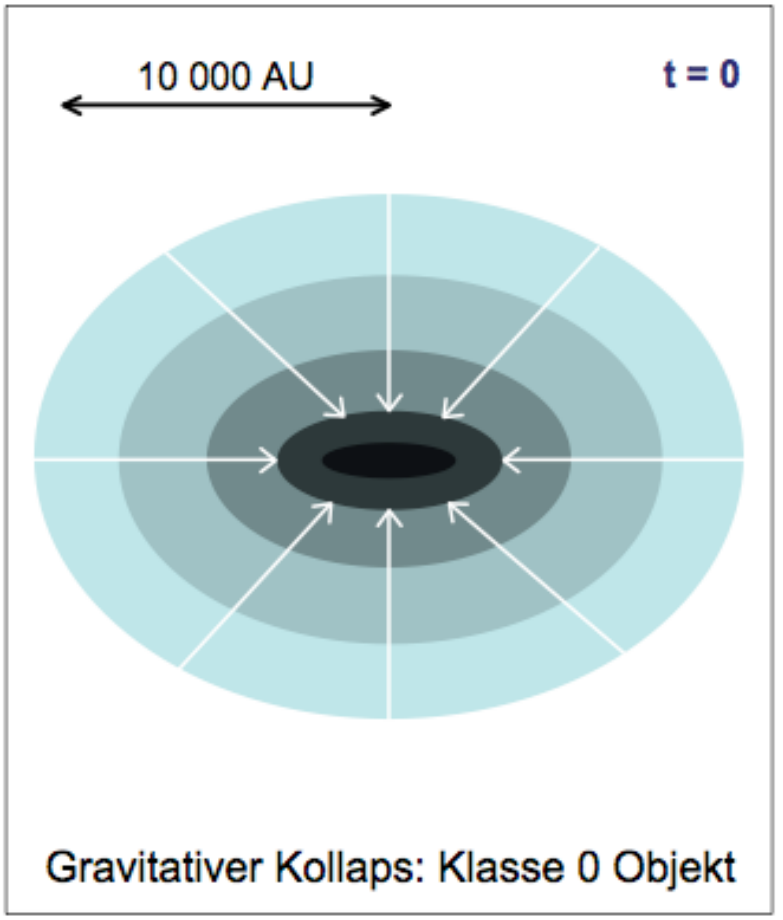
Entwicklung einer isolierten, gravitativ instabilen Scheibe in Endphase der Sternbildung
(dh. $M_{scheibe} \approx 0.01\ M_{stern}$)

Zusammen-
fassung

Stadien der Sternbildung 1

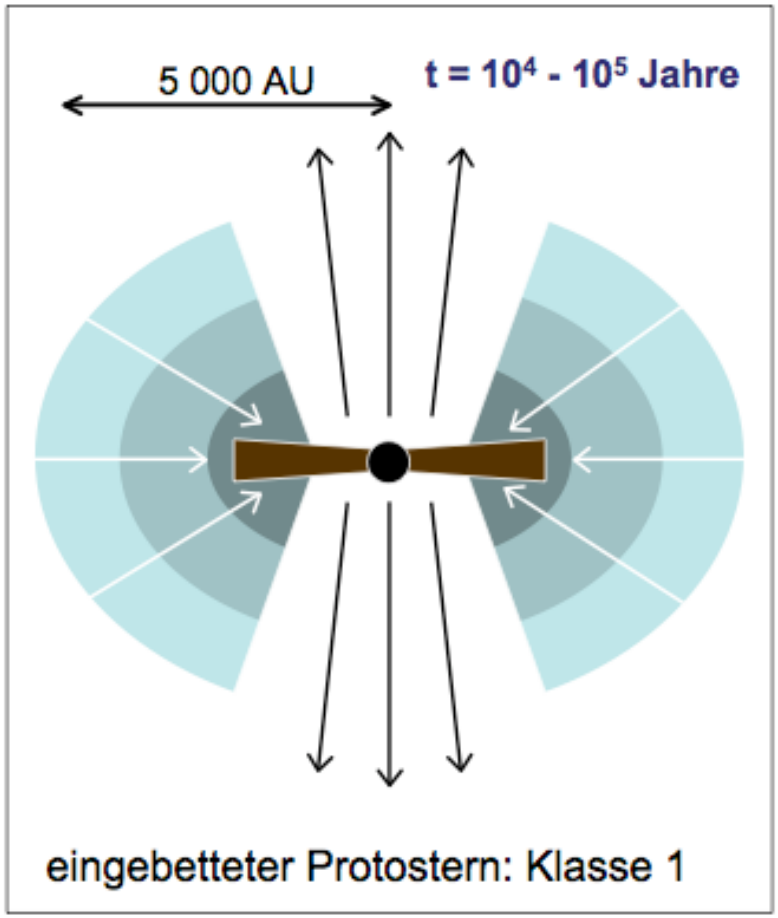


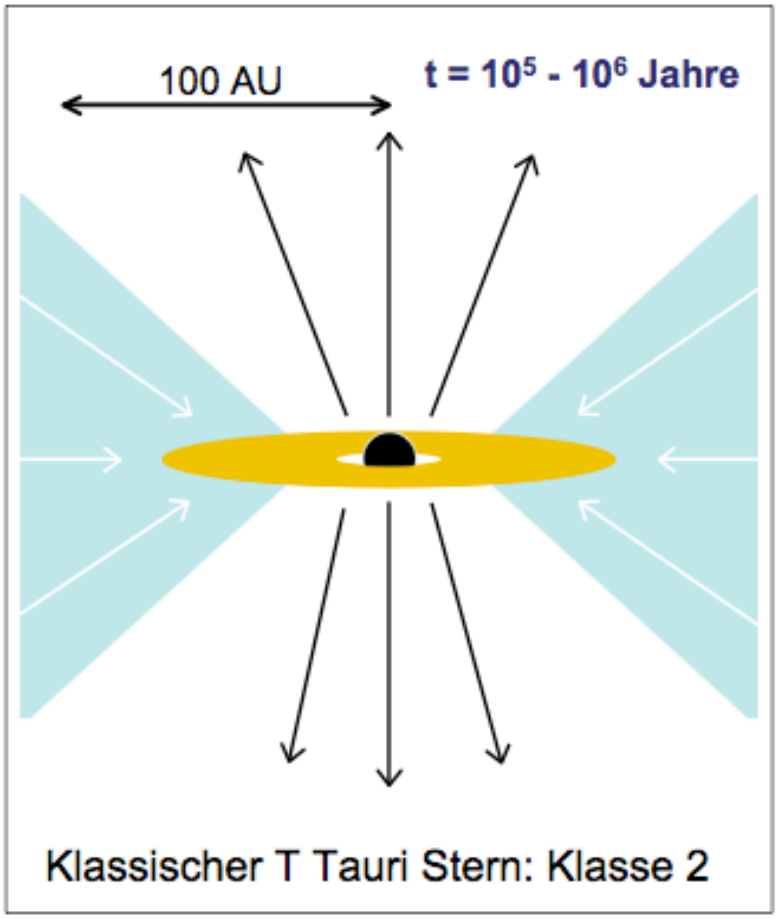
Prästellare Kerne in Dunkelwolken



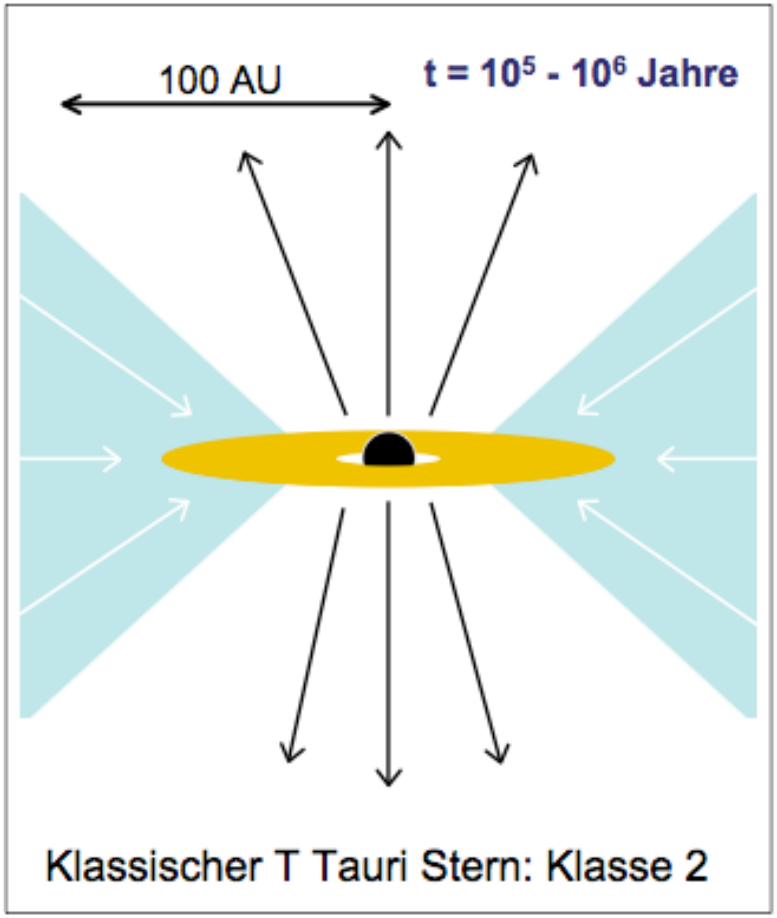
Gravitativer Kollaps: Klasse 0 Objekt

Stadien der Sternbildung 2

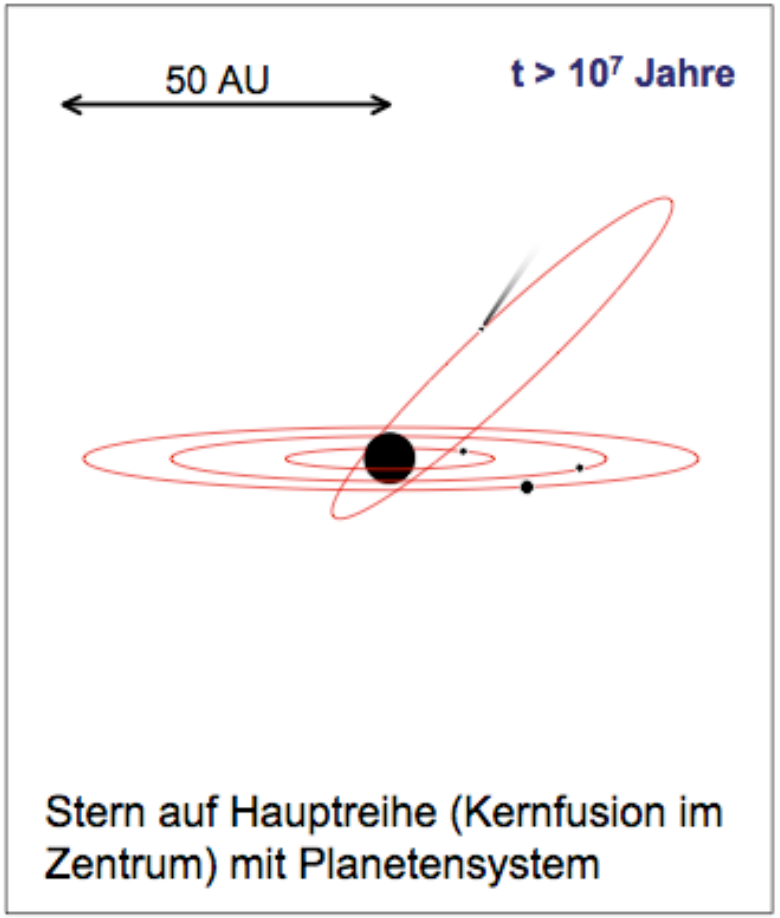




Stadien der Sternbildung 3



Klassischer T Tauri Stern: Klasse 2



Stern auf Hauptreihe (Kernfusion im Zentrum) mit Planetensystem

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}, *Ausdehung* sinkt um Faktor 10^{7}.
- Unsere *Sonne* ist *typischer* Stern: $M_\odot = 2\times10^{30}$ kg, $\varnothing_\odot = 1{,}4\times10^{7}$ km, $T_\odot = 5800$K.
- *Sternmassen* variieren vom 1/10 bis 100 Sonnenmassen.

Danke!