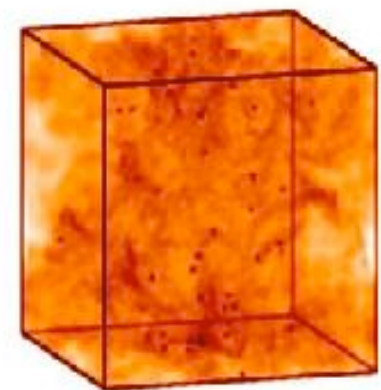
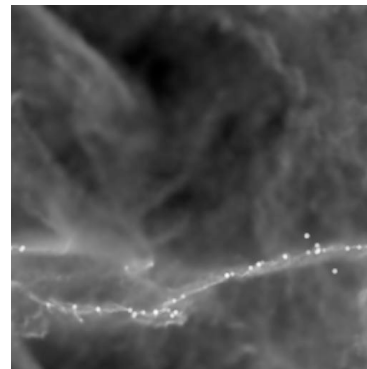
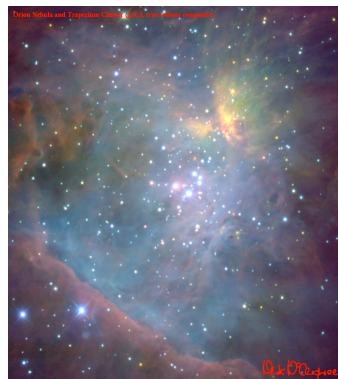
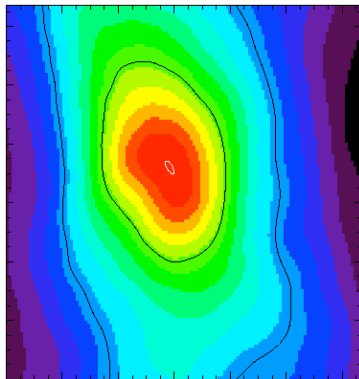


Sternentstehung



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?

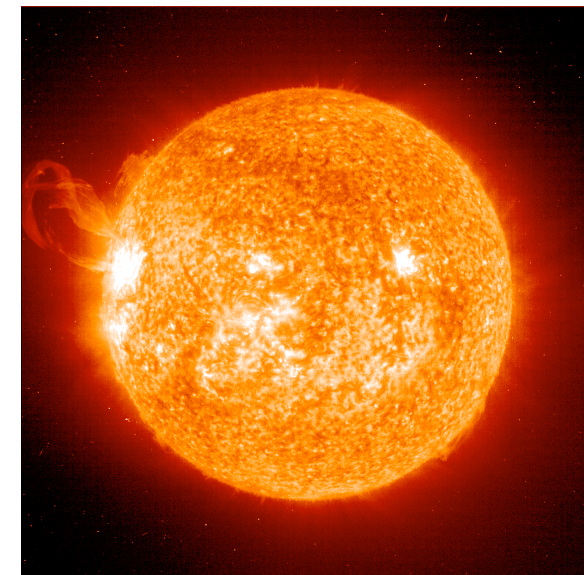
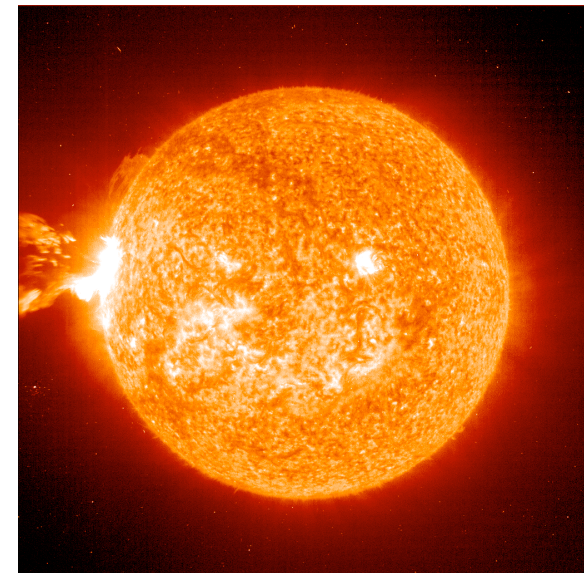
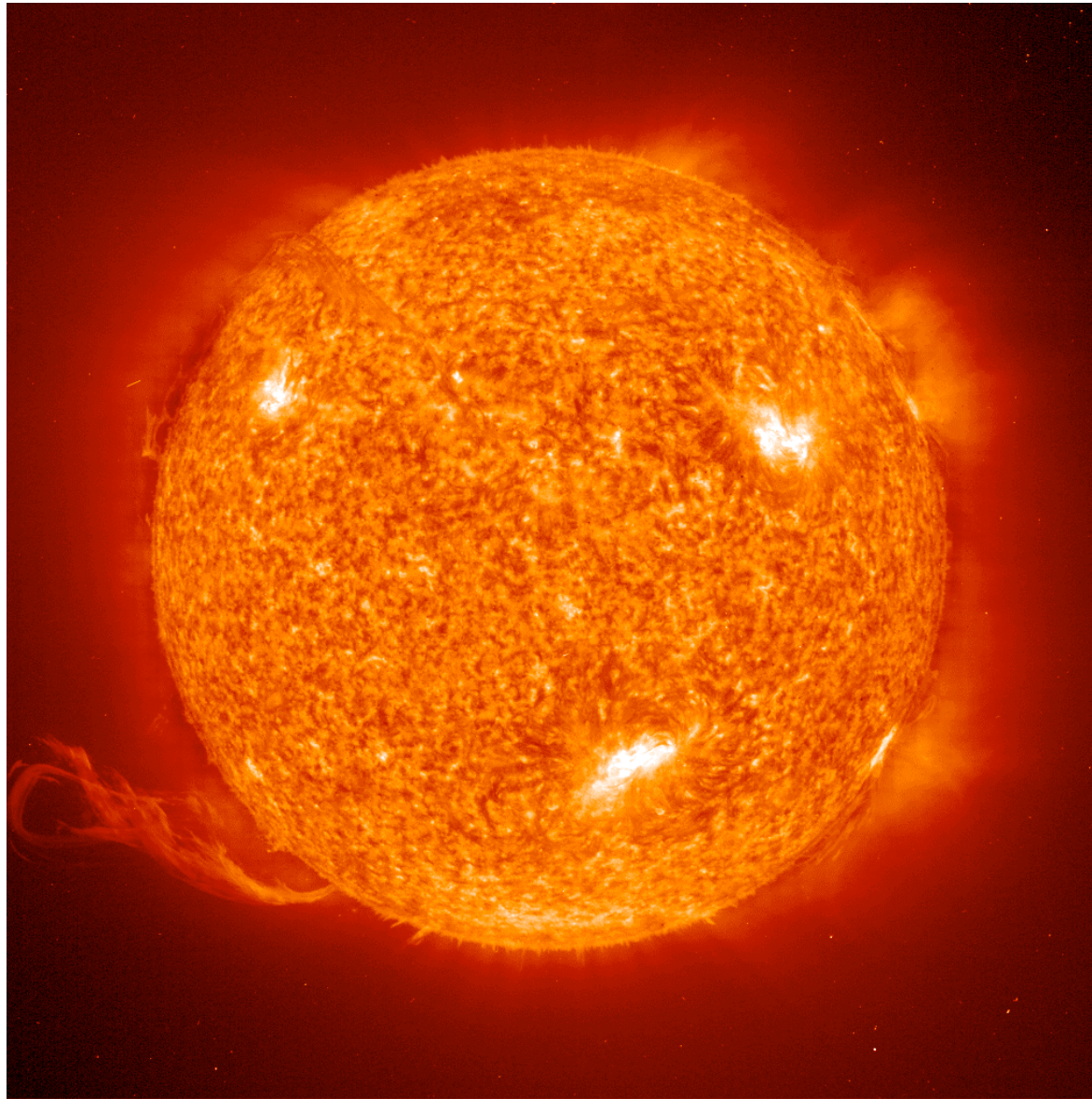
- Wie bilden sich Sterne?



Theorie der turbulenten
Sternentstehung

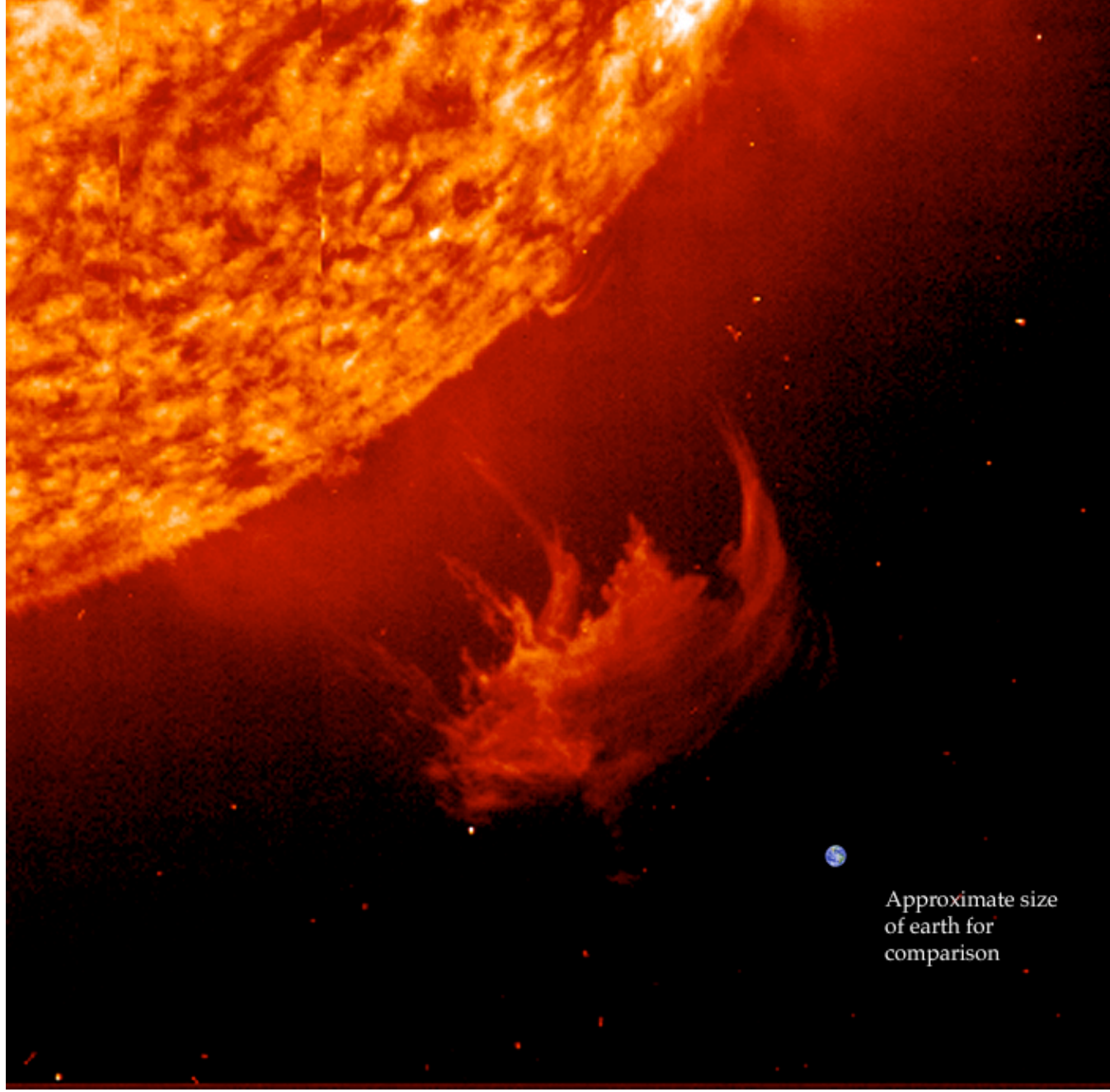
Phänomenologie
Theorie

WAS?



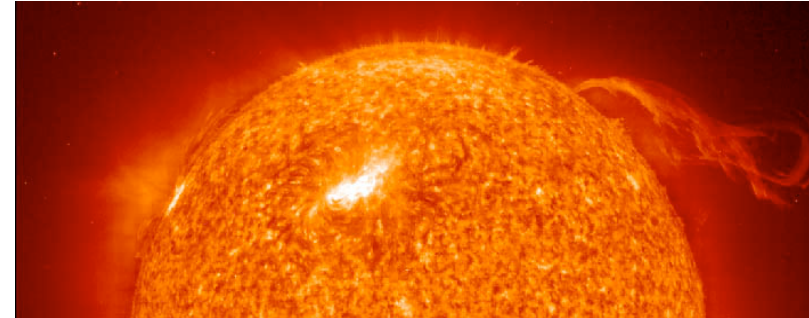
Unsere Sonne in verschiedenen Aktivitätsphasen

Größenvergleich: Sonne - Erde



Sterne: die Sonne

Eigenschaften der Sterne
(Stellare Zustandsgrößen):



Unsere Sonne ☉ als Referenzstern

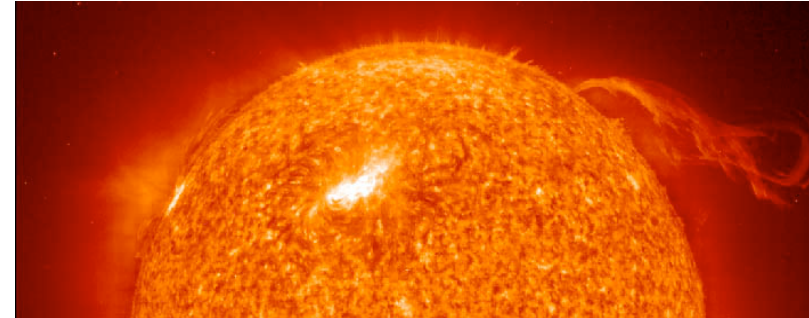
Radius	R_{\odot}	696 000 km
Masse	M_{\odot}	$1,989 \times 10^{30}$ kg
Leuchtkraft	L_{\odot}	$3,86 \times 10^{26}$ W
effektive Temperatur	T_{eff}	5800 K (Oberfläche)
Zentraltemperatur	T_{zentral}	15×10^6 K
Alter	t_{\odot}	4.5×10^9 a

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):



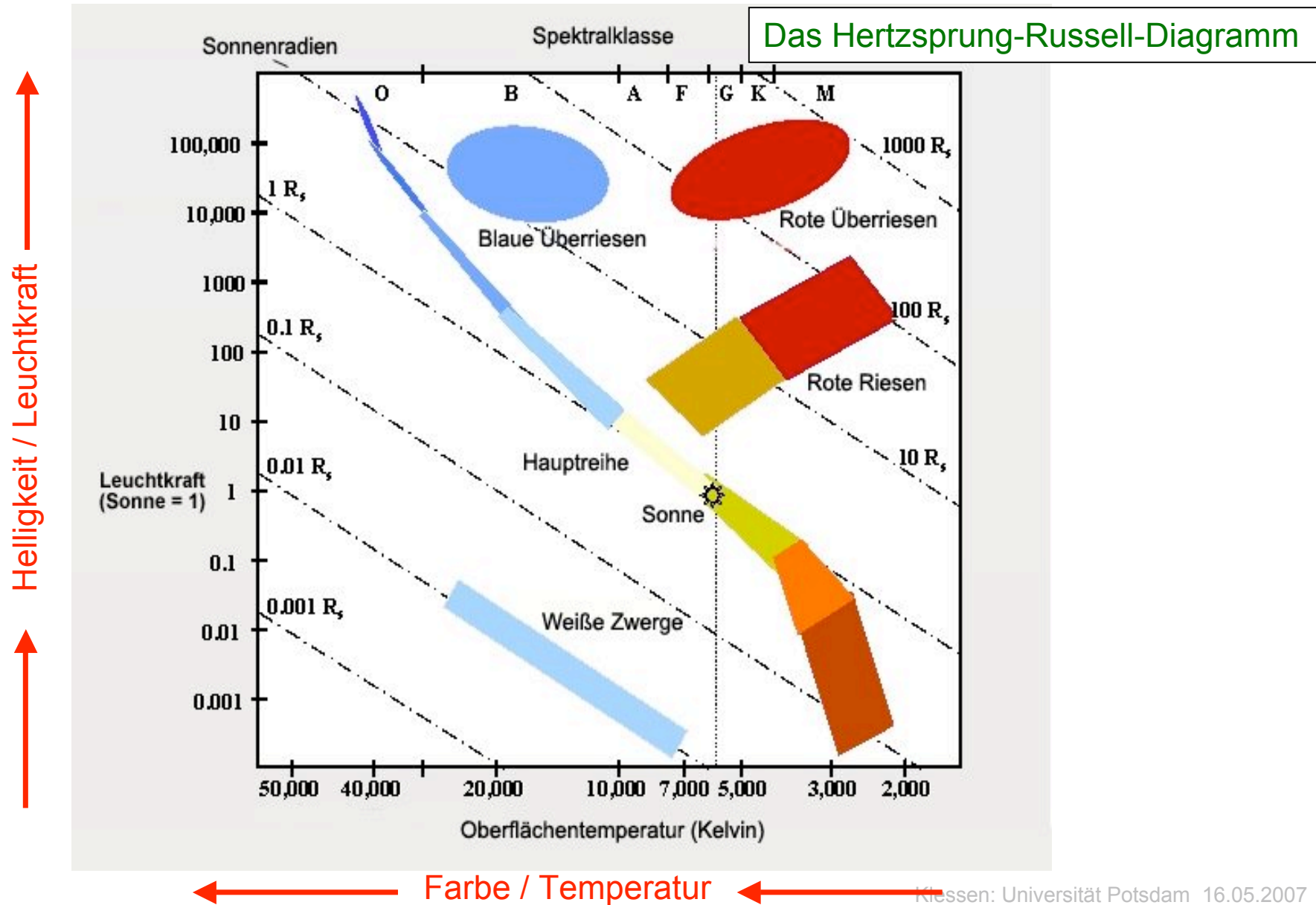
Unsere Sonne ☉ als Referenzstern

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

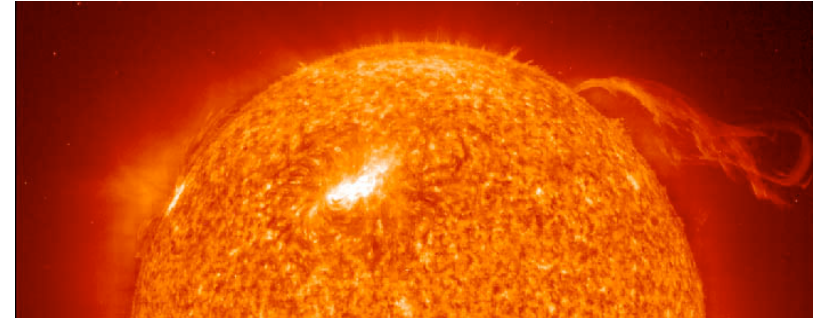
in cgs Einheiten

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

Sterne: Einteilung



Sterne: Statistische Charakteristika

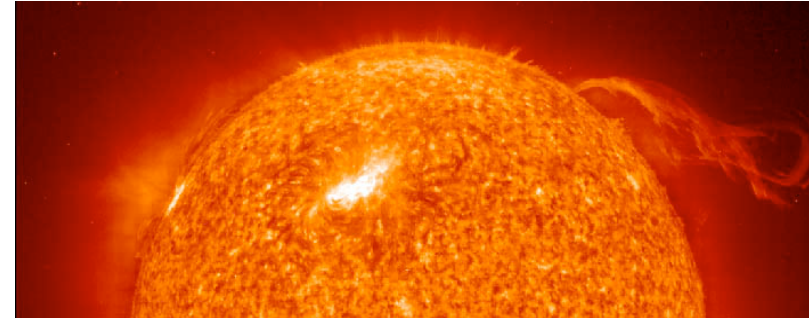


Sterndichte in der Sonnenumgebung $n_* \approx 0,05 \text{ pc}^{-3}$
Sterndichte im Orion-Trapezhaufen $n_* \approx 10^3 \text{ pc}^{-3}$
Sterndichte in Starburst-Regionen $n_* \approx 10^4 \text{ pc}^{-3}$

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

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

Sterne: Statistische Charakteristika



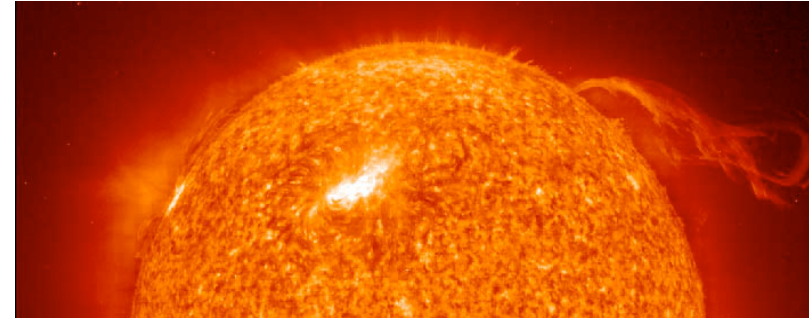
Sterndichte in der Sonnenumgebung $n_* \approx 0,05 \text{ pc}^{-3}$
Sterndichte im Orion-Trapezhaufen $n_* \approx 10^3 \text{ pc}^{-3}$
Sterndichte in Starburst-Regionen $n_* \approx 10^4 \text{ pc}^{-3}$

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

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

Sternentstehungsrate
war *größer* in der
jungen Galaxie

Sterne: Statistische Charakteristika



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

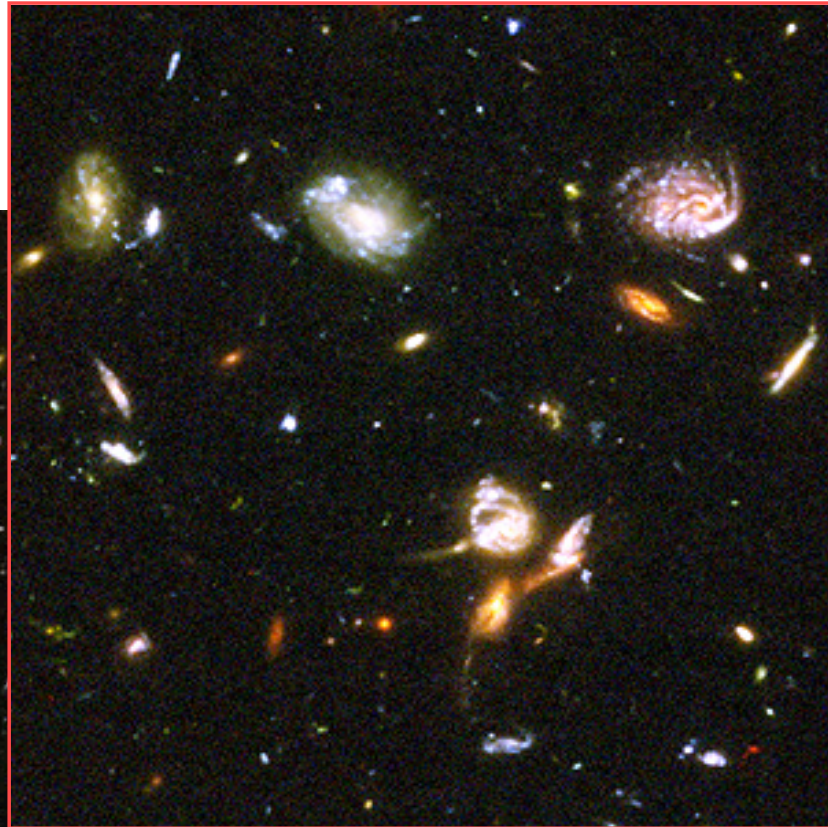
$$1 \text{ pc} = 3,086 \times 10^{18} \text{ cm}$$

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

Skalen:

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

WANN?
WO?



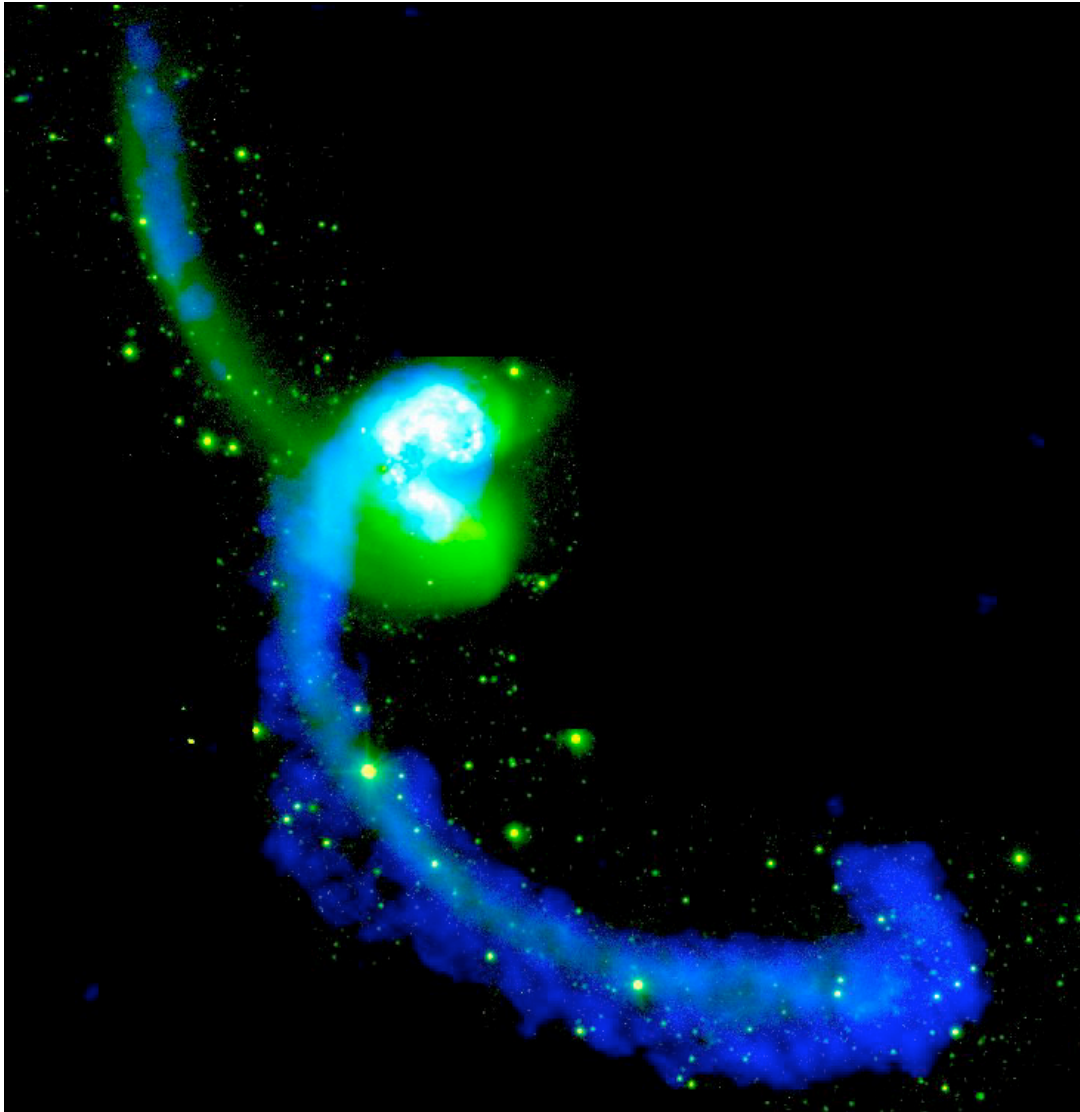
ng
üh

(weniger als 1Ga
nach dem Urknall)

Sterne
entstehen in
Galaxien und
Protogalaxien

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

Sternentstehung in wechselwirkenden Galaxien

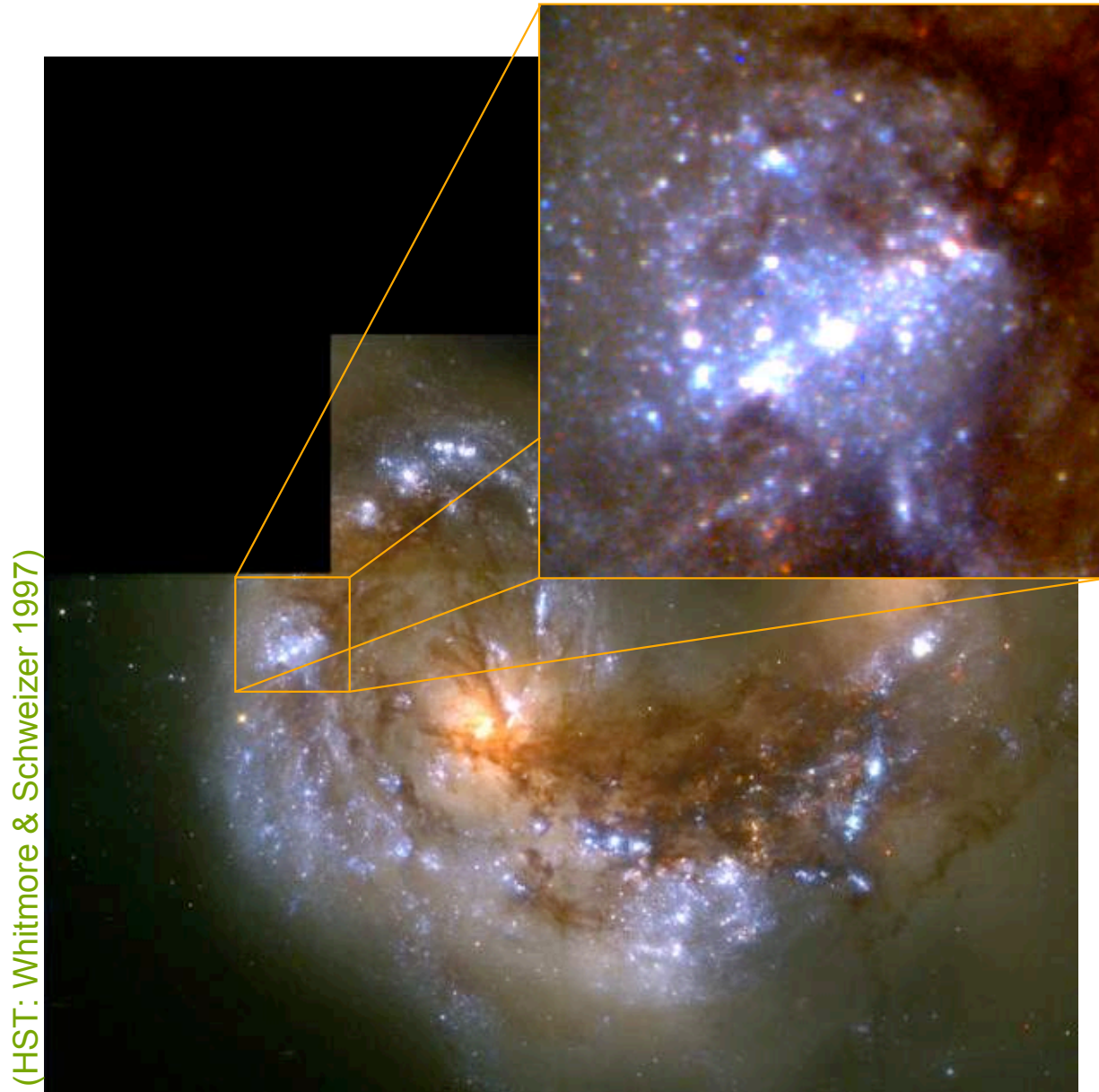


Antennae Galaxie

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

(Antennae Galaxie: Chandra Webpage)

Sternentstehung in wechselwirkenden Galaxien



(HST: Whitmore & Schweizer 1997)

Antennae Galaxie

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

Sternentstehung in "normalen" Galaxien:




(from the Hubble Heritage Team)

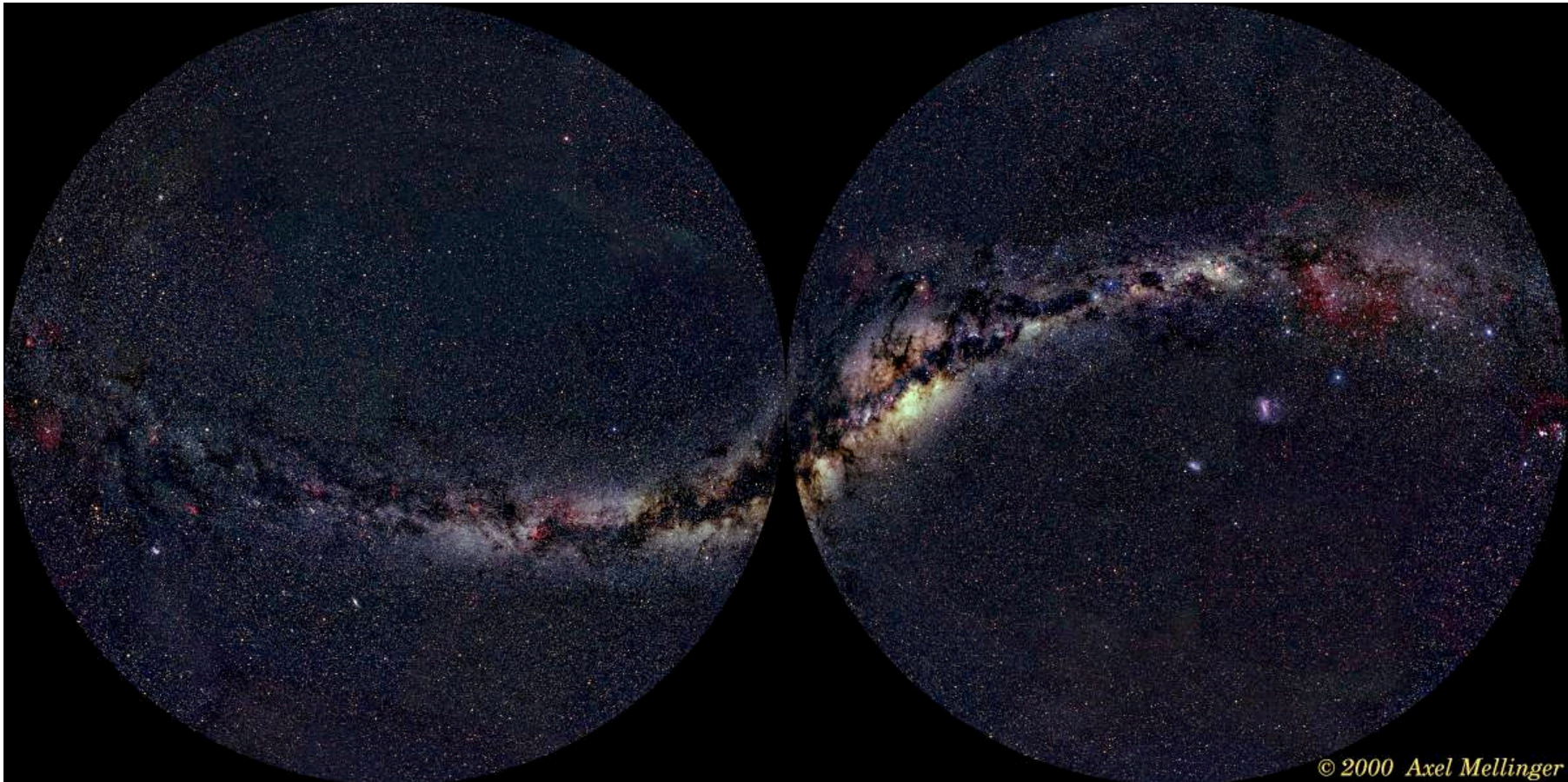
NGC4622

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

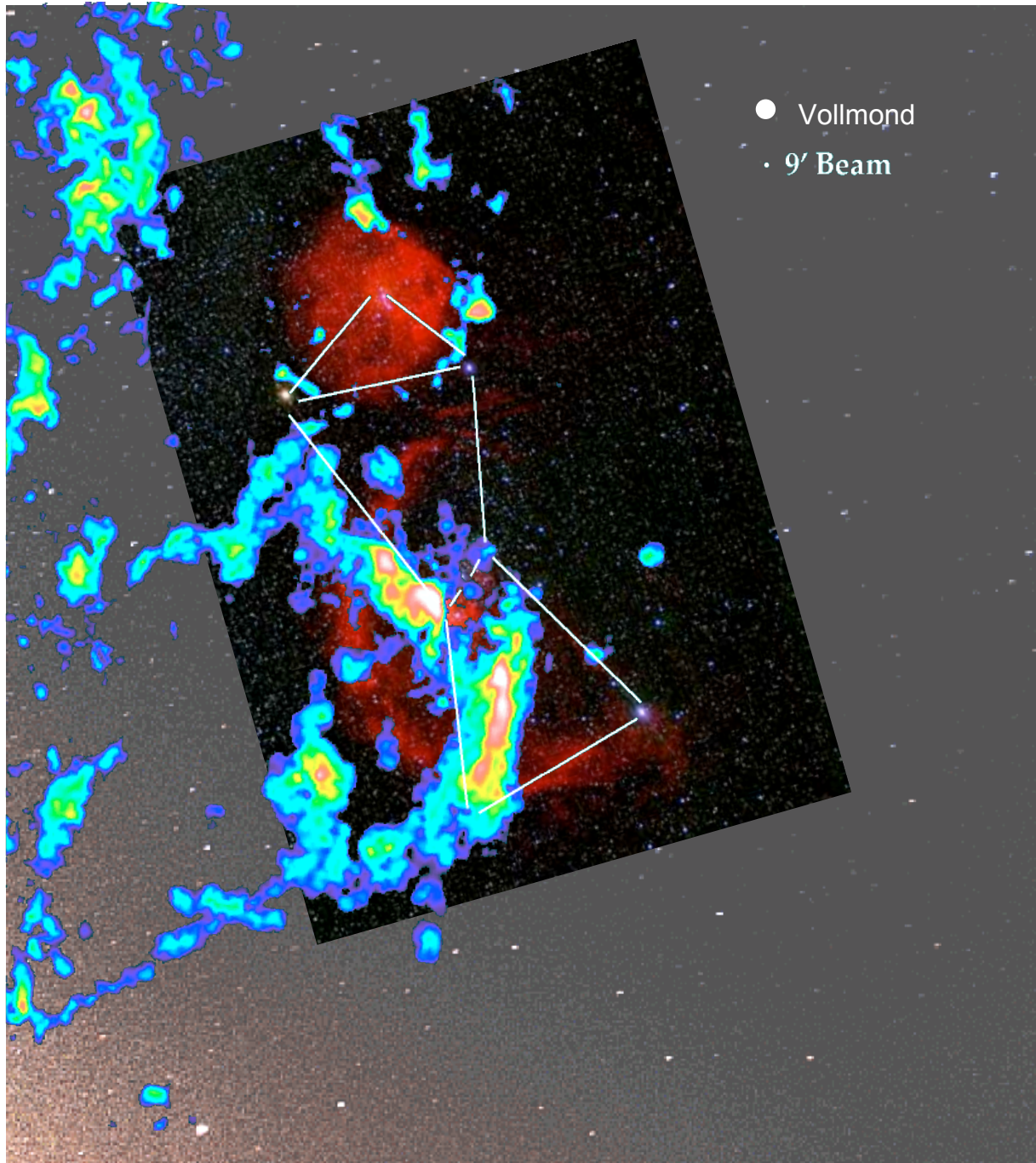


The Sombrero Galaxy — M104  HUBBLESITE.org

Sternentstehung in der Milchstraße



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

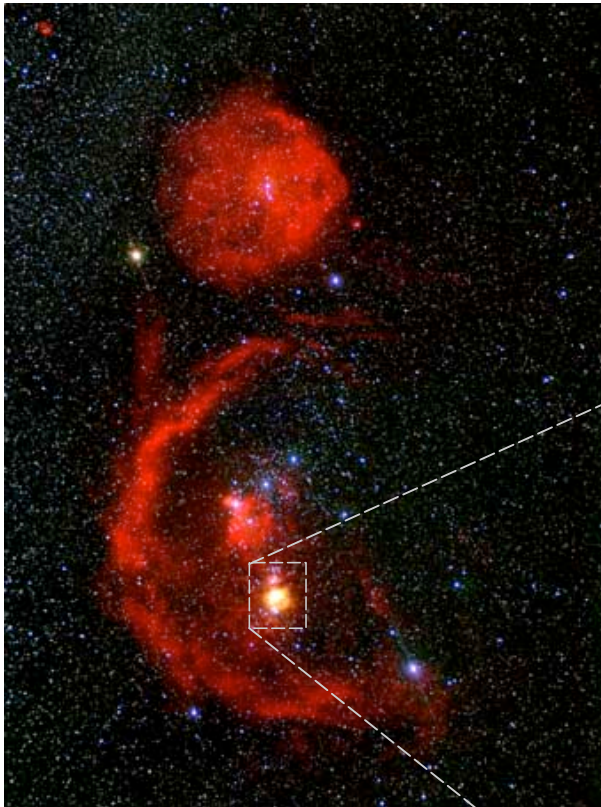


Stern- entstehung in Orion

Wir sehen

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

Lokales SE Gebiet: Trapezhaufen in Orion



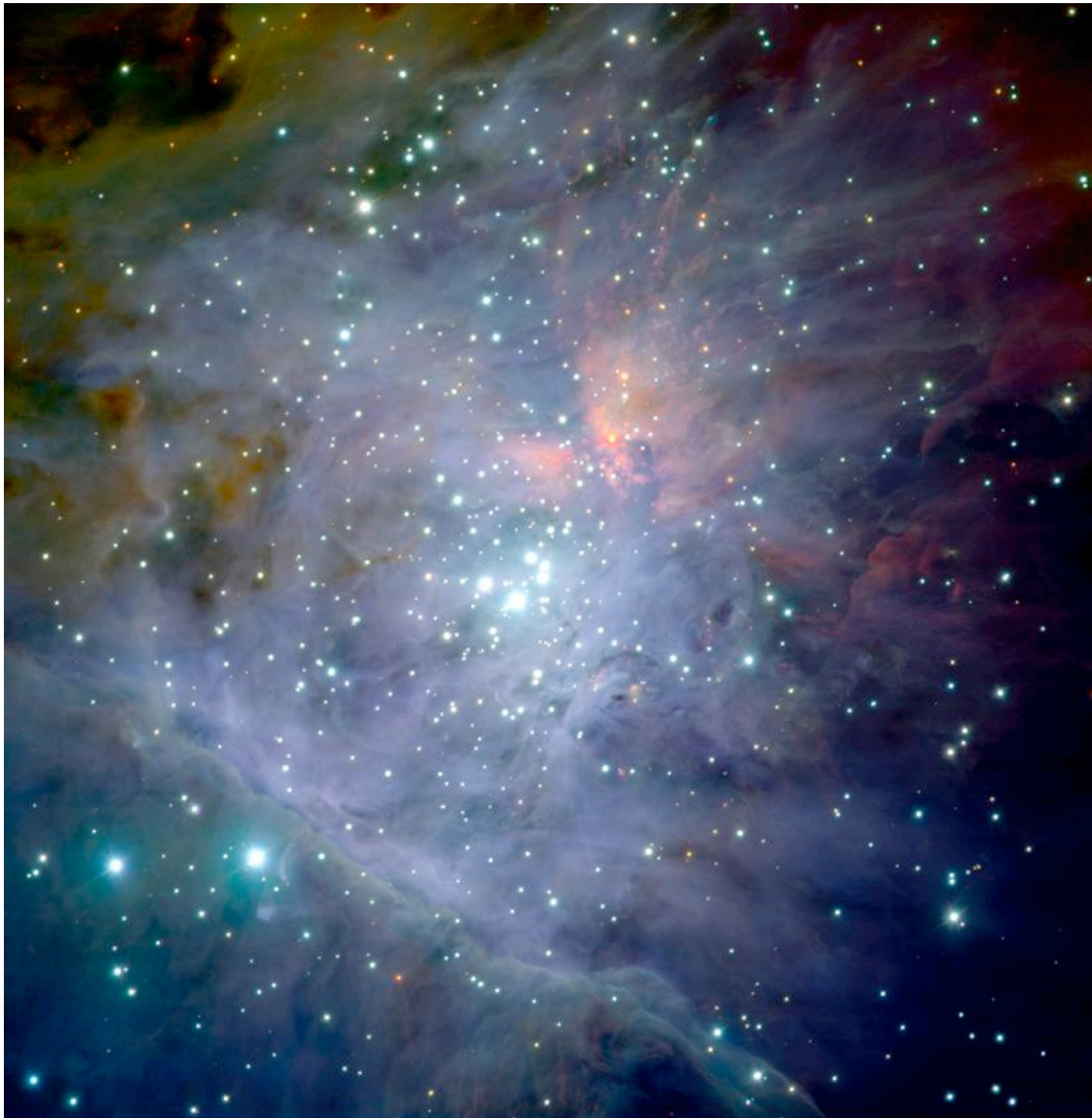
Sternbild Orion

Die Orionmolekülwolke ist die Geburtsstätte mehrerer junger Sternhaufen.

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



Trapezhaufen



Trapez- haufen (Detail)

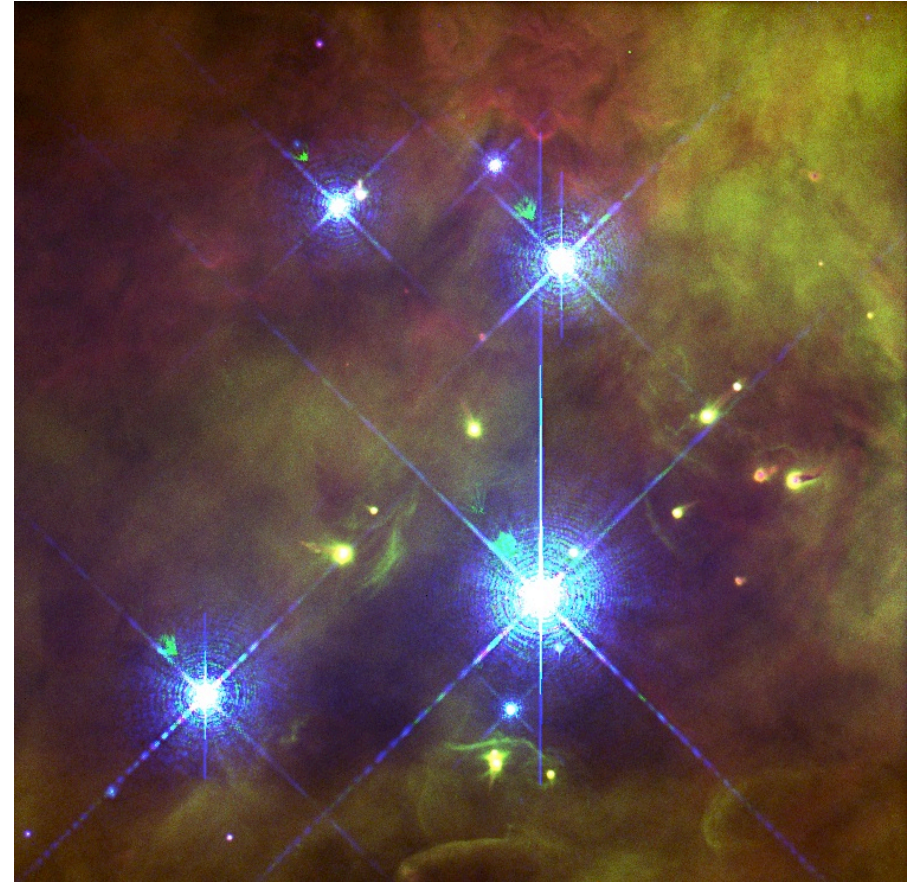
- Sterne ent-
stehen in
Haufen
- Sterne ent-
stehen in
**Molekül-
wolken**
- **Rückkopp-
lungseffekte**
sind wichtig

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

Trapezhaufen: Zentralgebiet

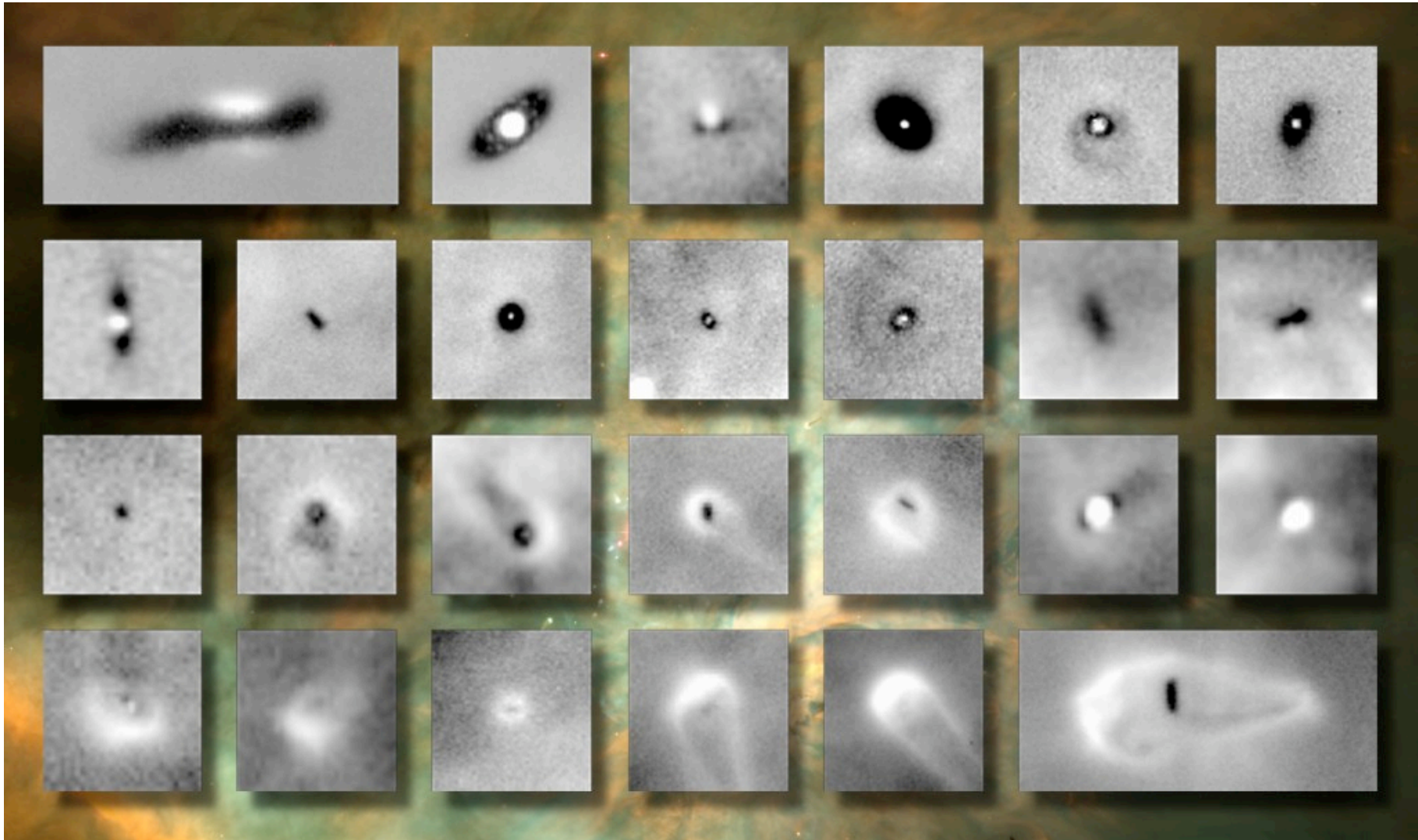


Der Großteil der ionisierenden Strahlung kommt vom Zentralstern **$\Theta 1C$ Orionis**



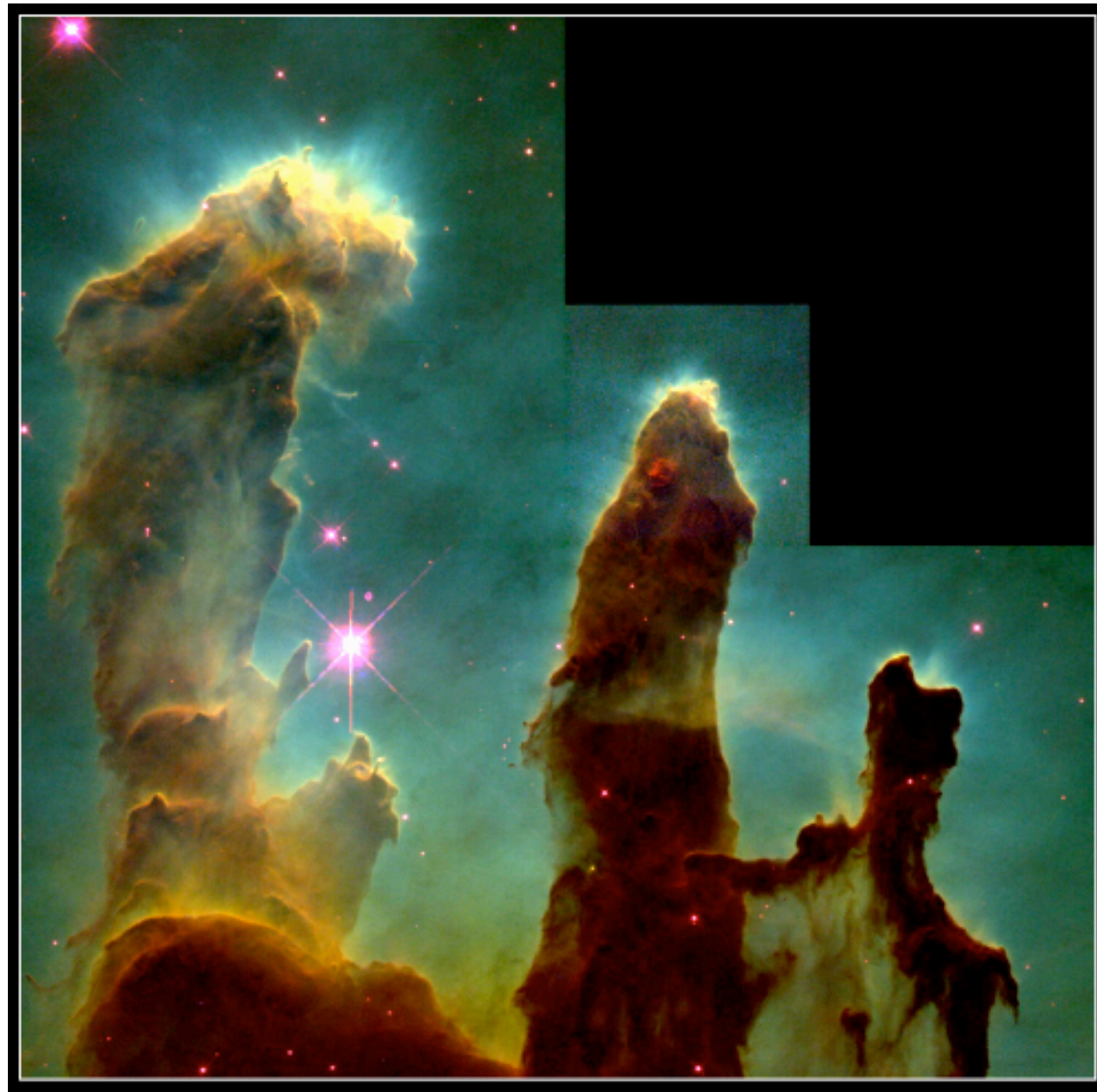
Proplyds: Verdampfende ``protoplanetare`` Scheiben um junge massearme Protosterne

Weitere Details: Siluett-Scheiben in Orion



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

(Daten von Mark McCaughrean)



HST Aufnahme

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

Aufnahme im
Infraroten.



(Andersen et al 2005)



IR Aufnahme mit dem ESO-VLT

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

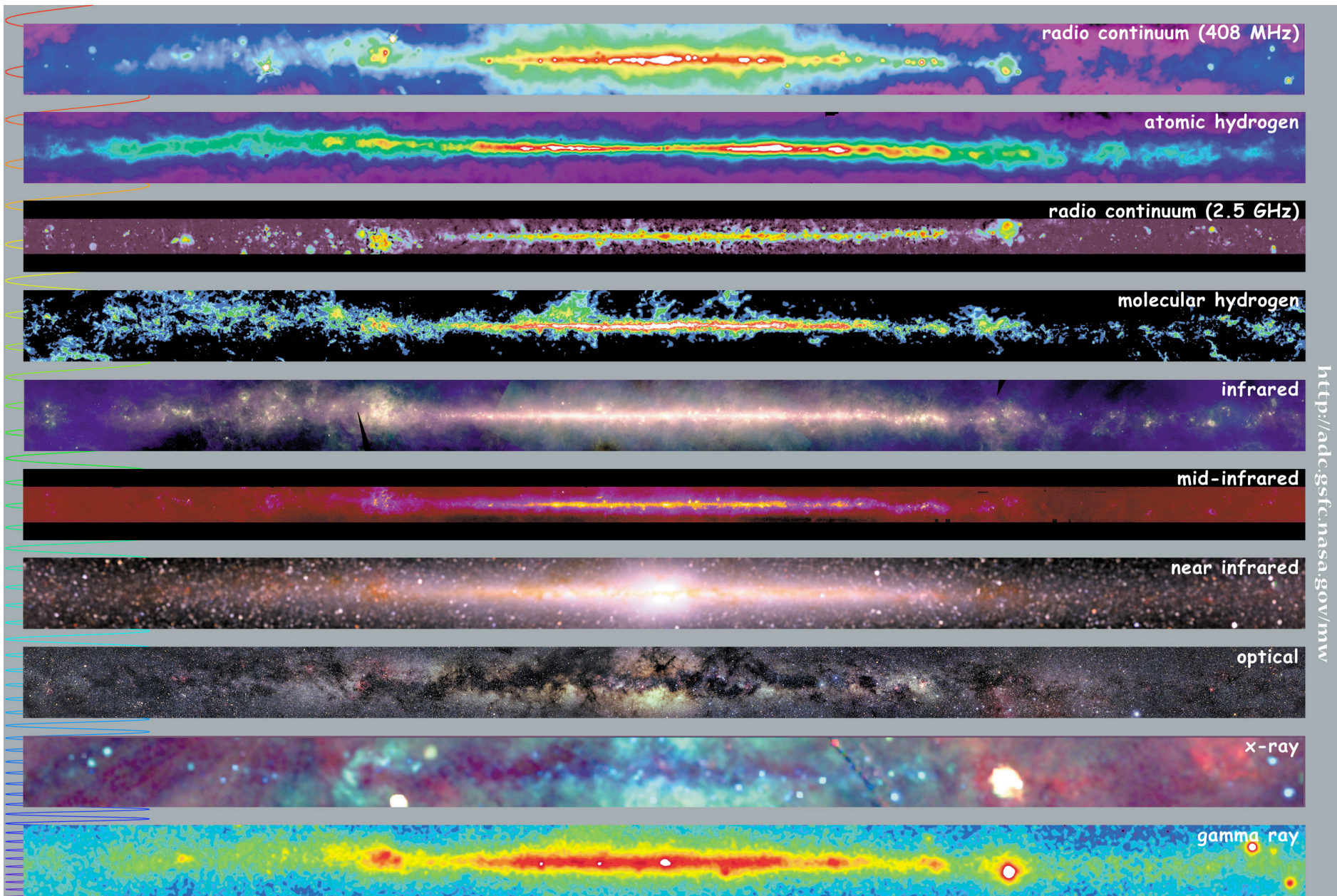
WIE?

Wie beobachtet man SE?

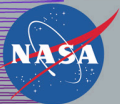
Unterschiedliche Wellenlängen liefern unterschiedliche Informationen.

→ Astronomen beobachten das gesamte elektromagnetische Spektrum

- **Radiostrahlung:** interstellares Gas
(Linienemission -> Geschwindigkeitsinformation)
- **sub-mm Bereich:** Staub (thermische Emission)
- **infrarot & optisch:** Sterne
- **Röntgen:** Sterne (Coronae), Supernovae Reste (sehr heißes Gas)
- **γ -Strahlung:** Supernovae Reste (radioaktiver Zerfall, z.B. ^{26}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.

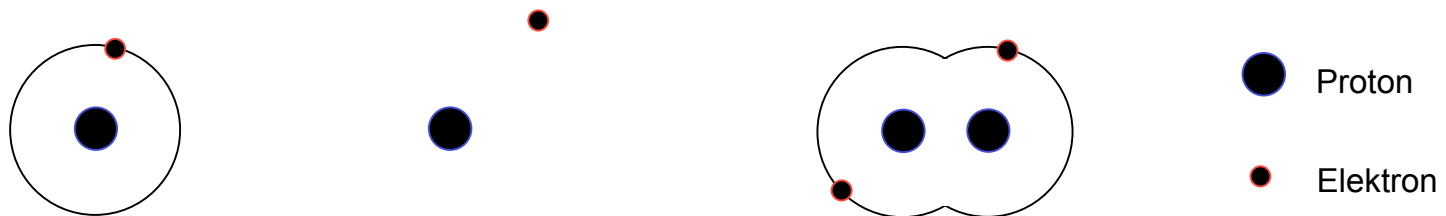
Phasen der ISM

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, H und H_2 sehr dünn sind.



Phasen der ISM

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

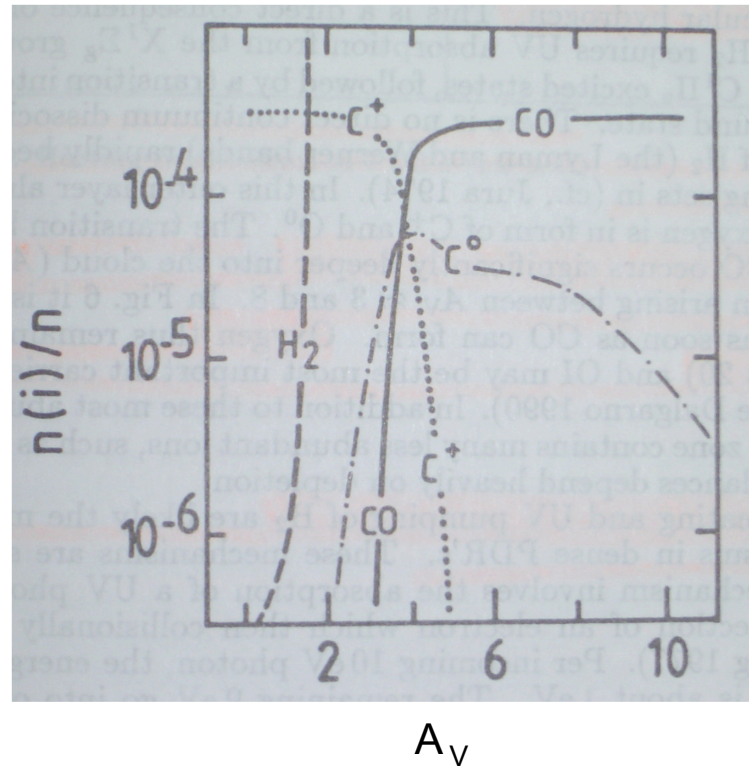
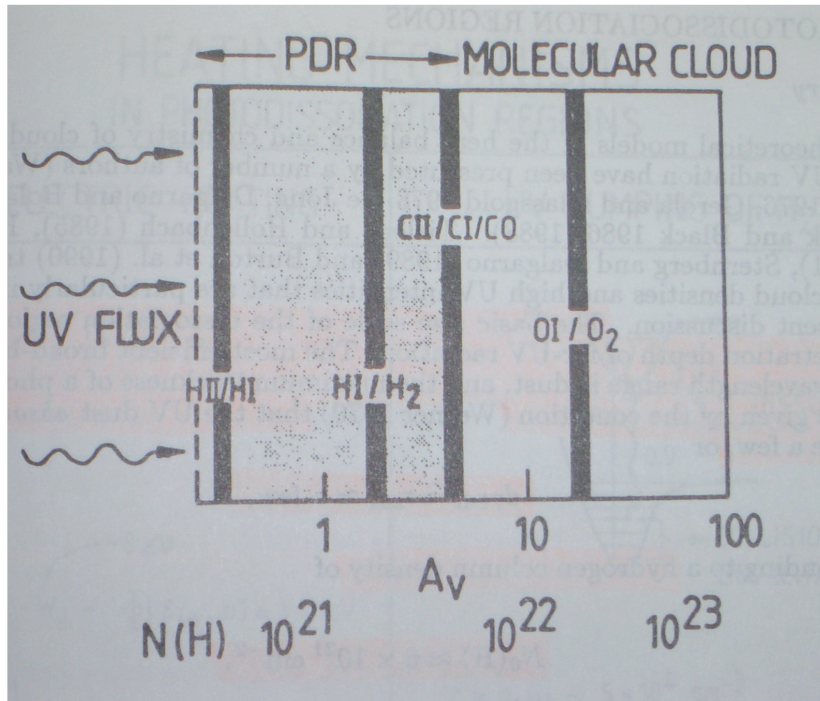
Ionisierter atomarer Wasserstoff HII (H^+)
Neutraler atomarer Wasserstoff HI (H)
Molekularer Wasserstoff H_2

 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!

Phasen der ISM



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, NH₃, CS, etc.)
(über 100 verschiedene Moleküle identifiziert)
- **ACHTUNG**: immer nur in **Projektion** (*PPV*) beobachtbar!
- Säulendichte aus Intensität der Emission
- Geschwindigkeiten entlang der Sichtlinie durch Doppler-Verschiebung der Linie

Taurus

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

3.4 km/s

176°

174°

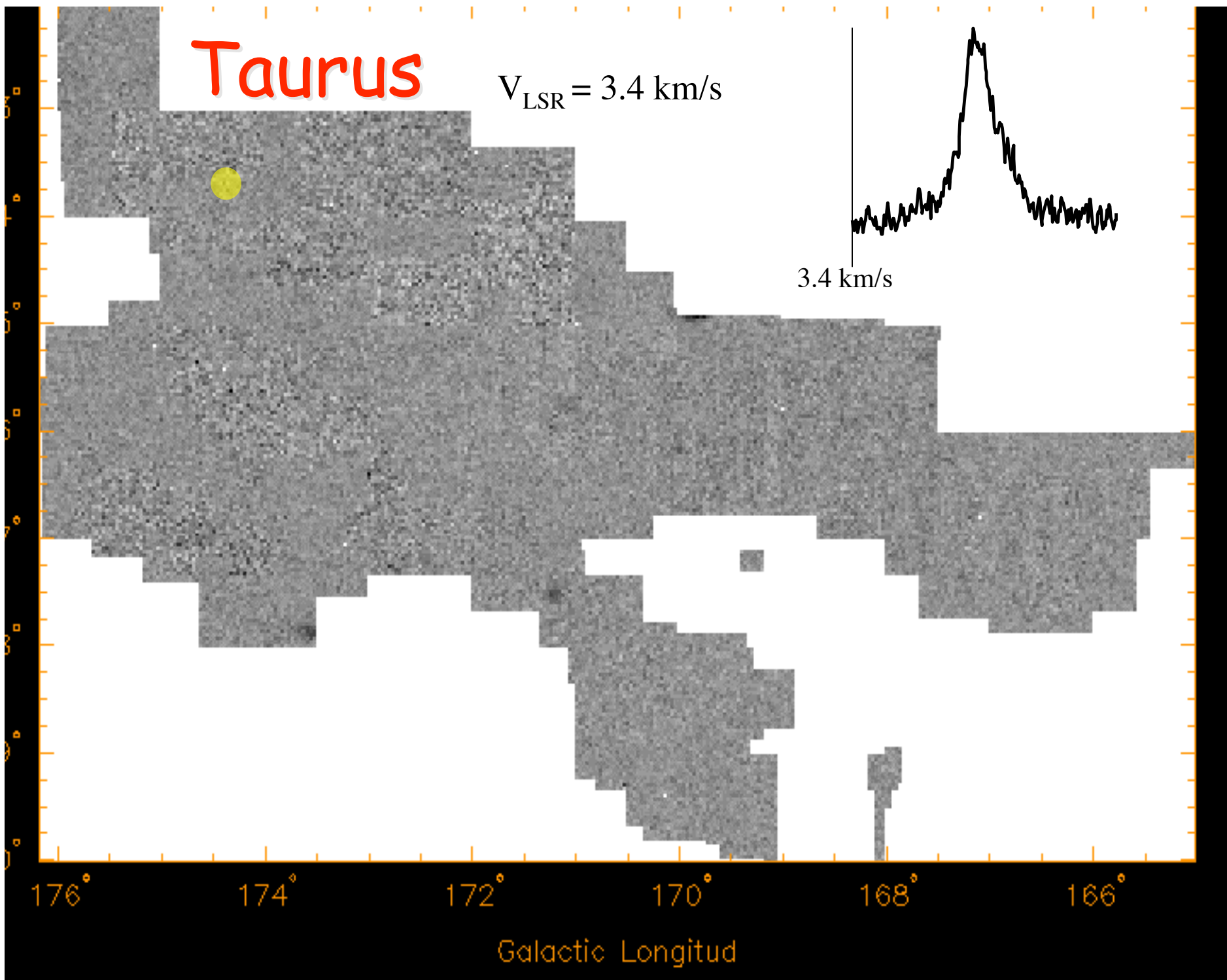
172°

170°

168°

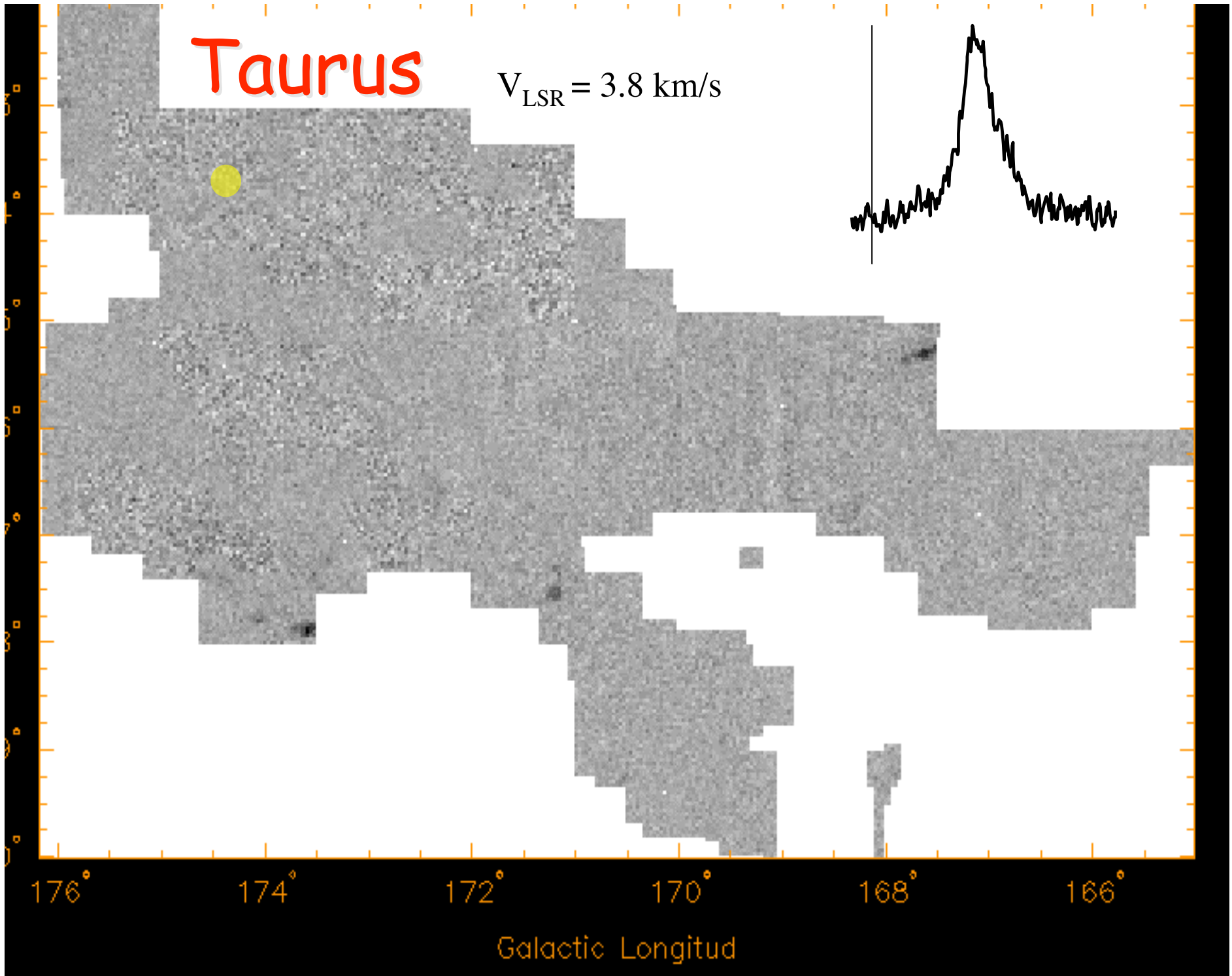
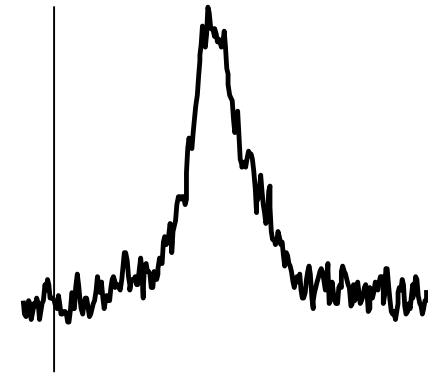
166°

Galactic Longitud



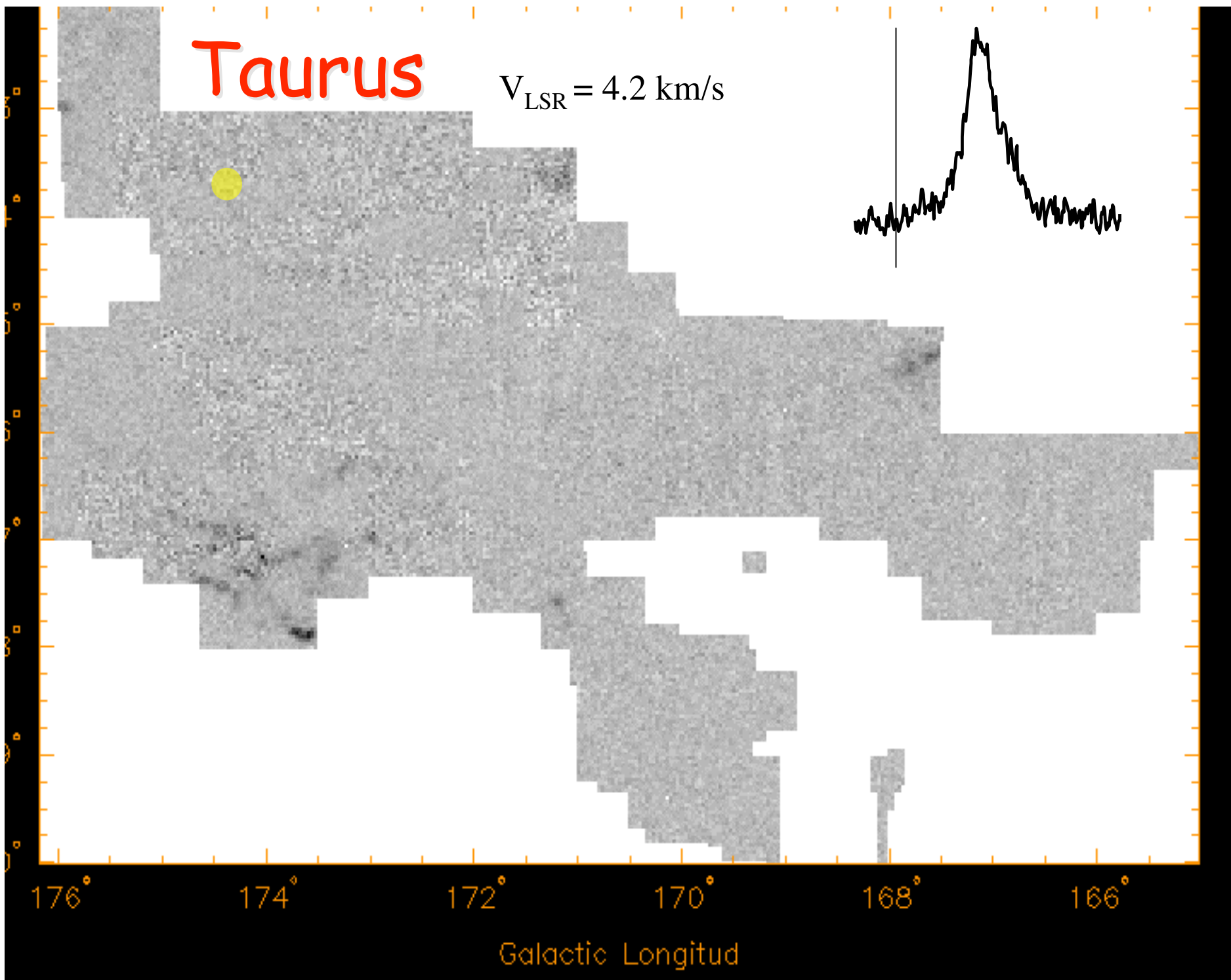
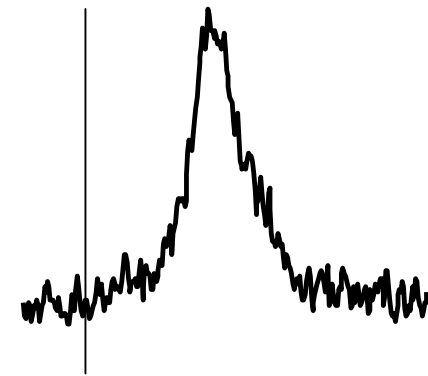
Taurus

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



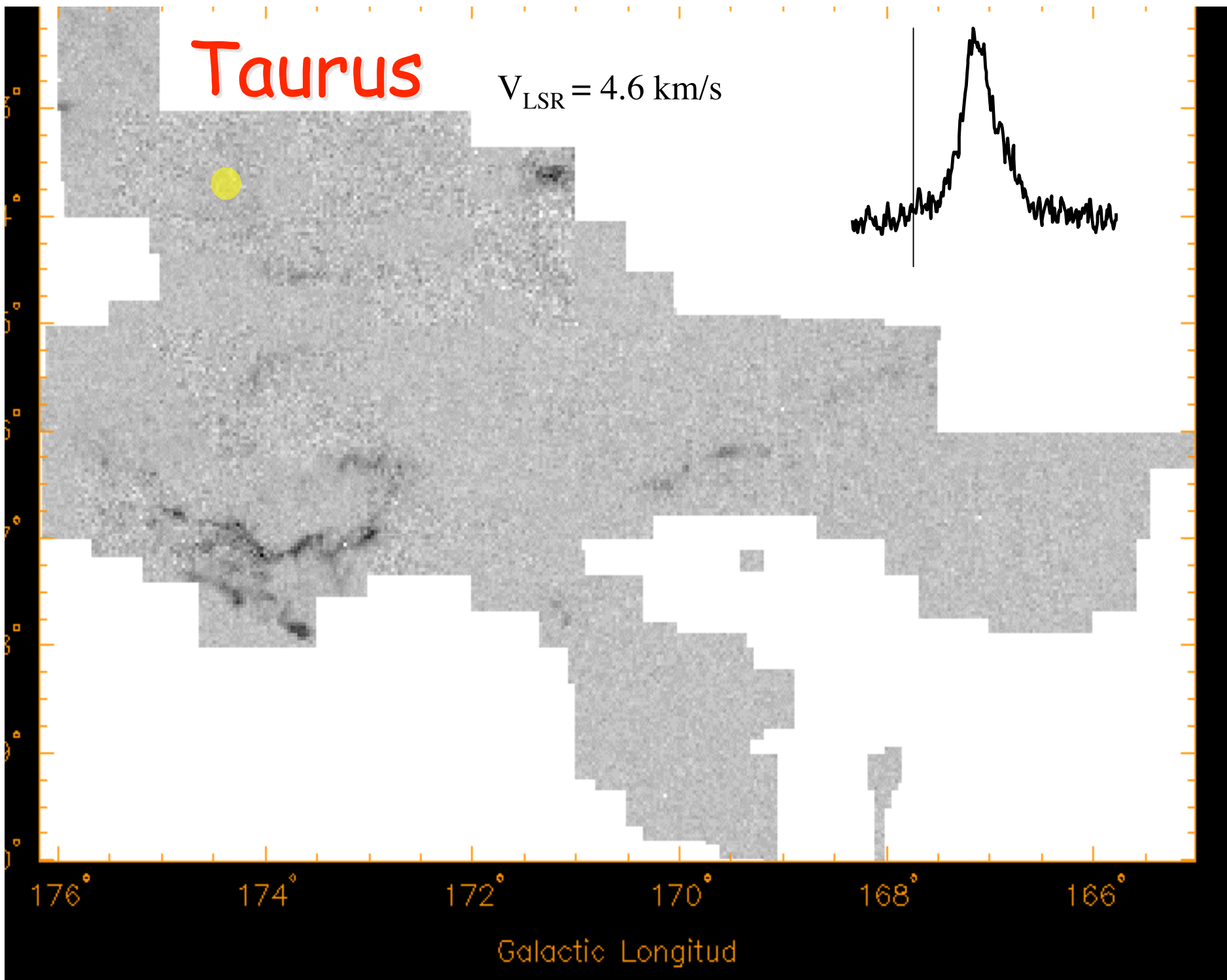
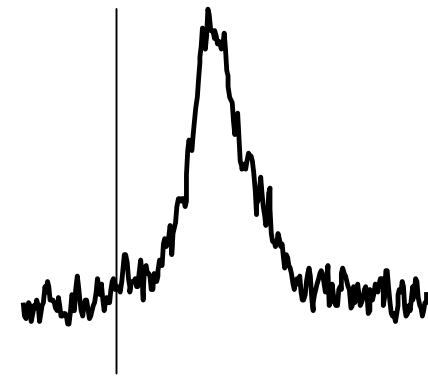
Taurus

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



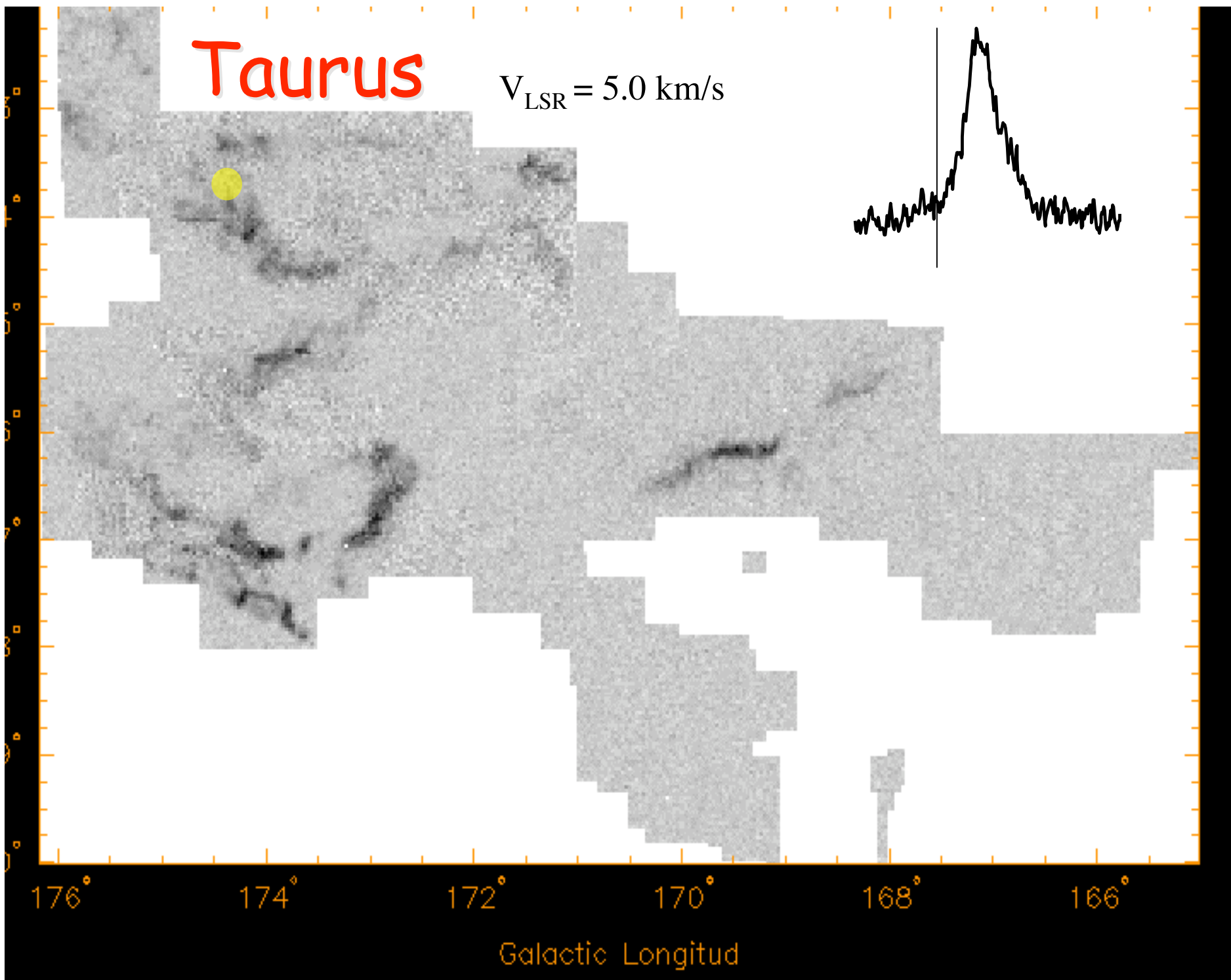
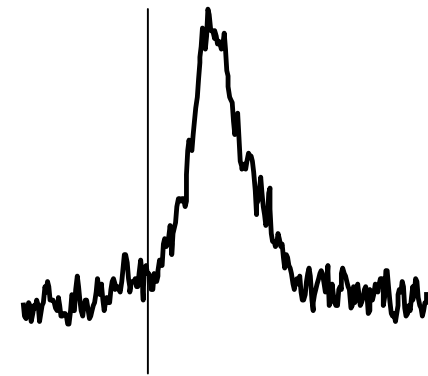
Taurus

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



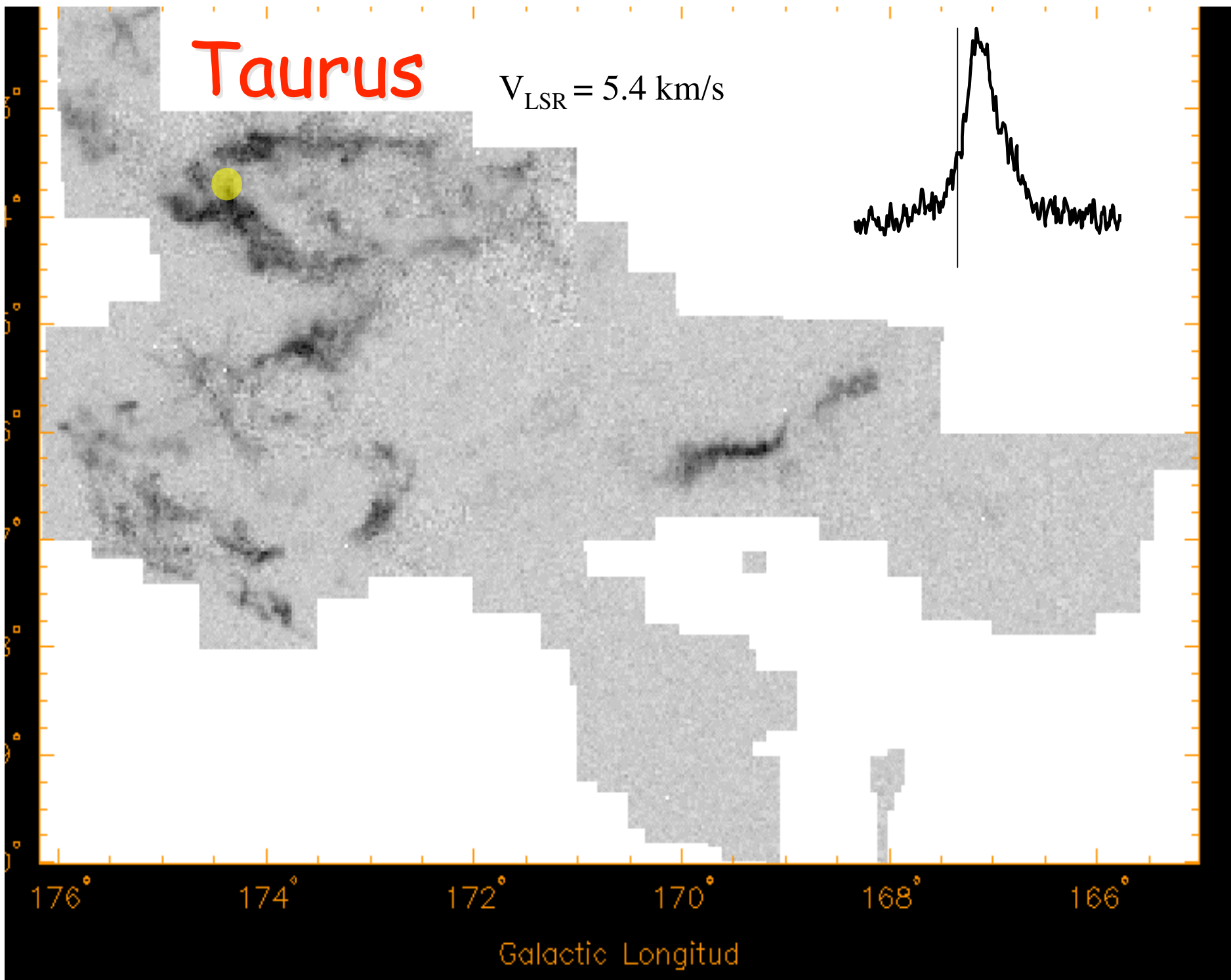
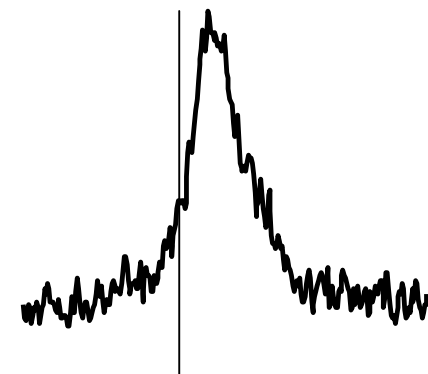
Taurus

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



Taurus

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

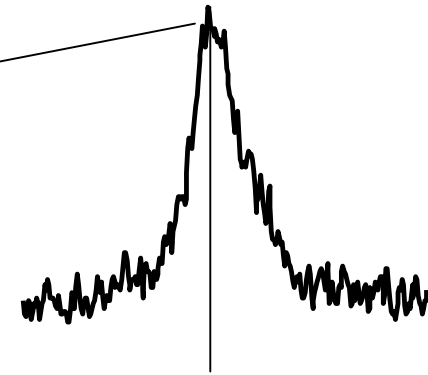


176° 174° 172° 170° 168° 166°

Galactic Longitud

Taurus

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



176°

174°

172°

170°

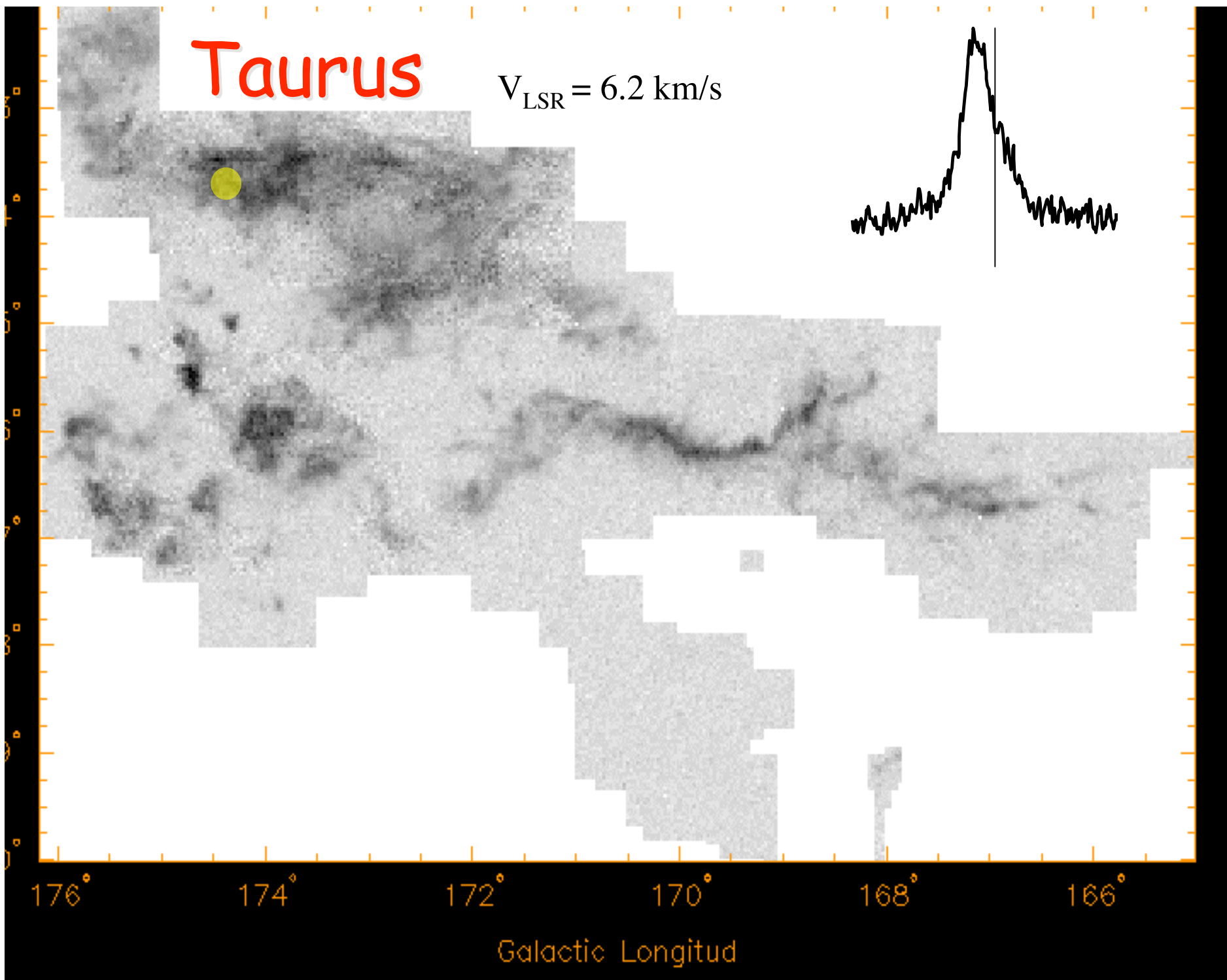
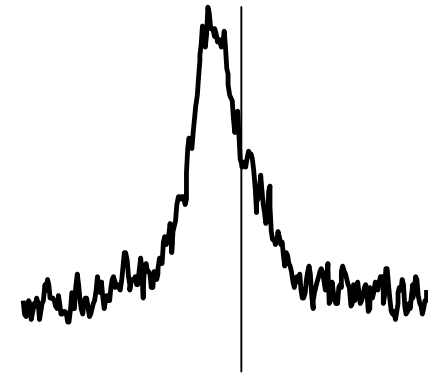
168°

166°

Galactic Longitud

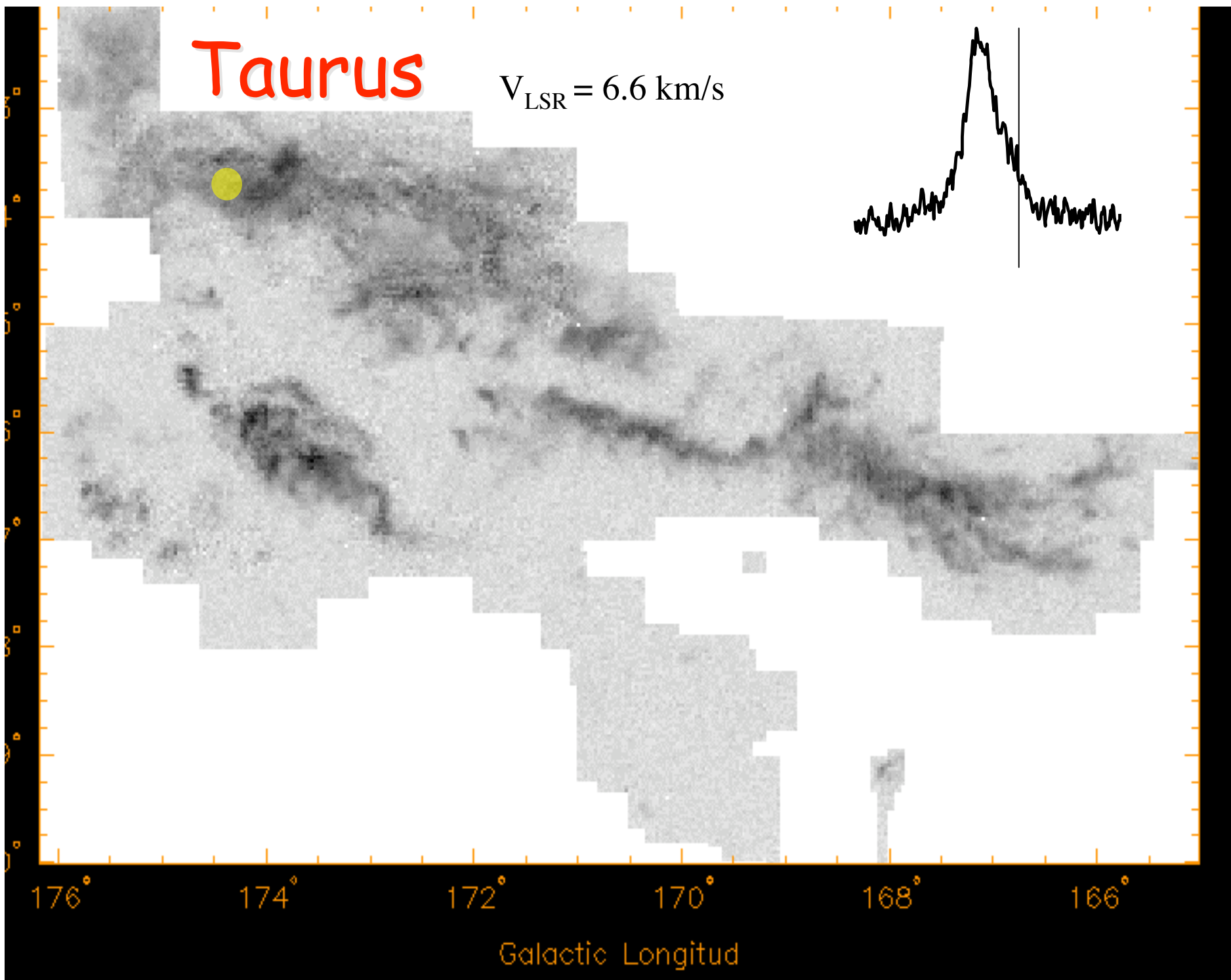
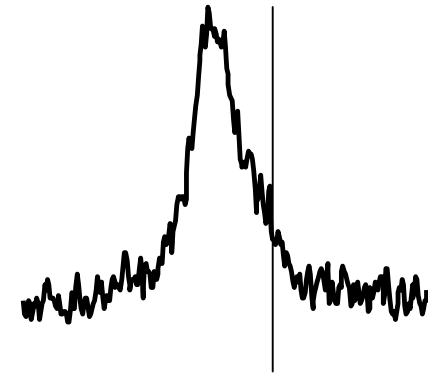
Taurus

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



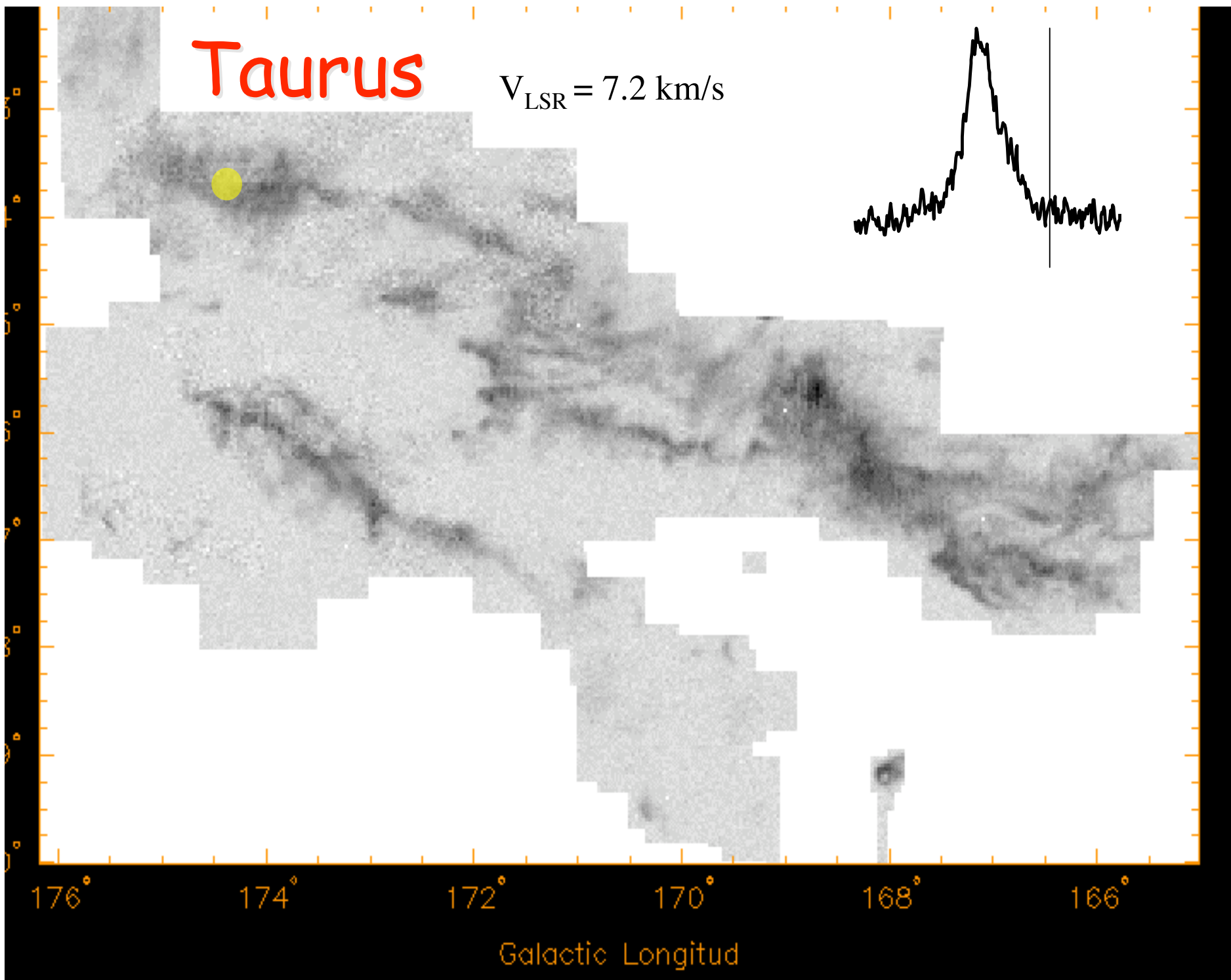
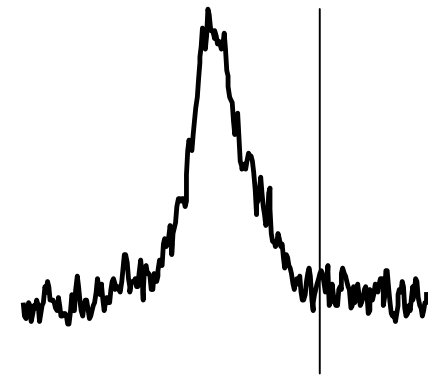
Taurus

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



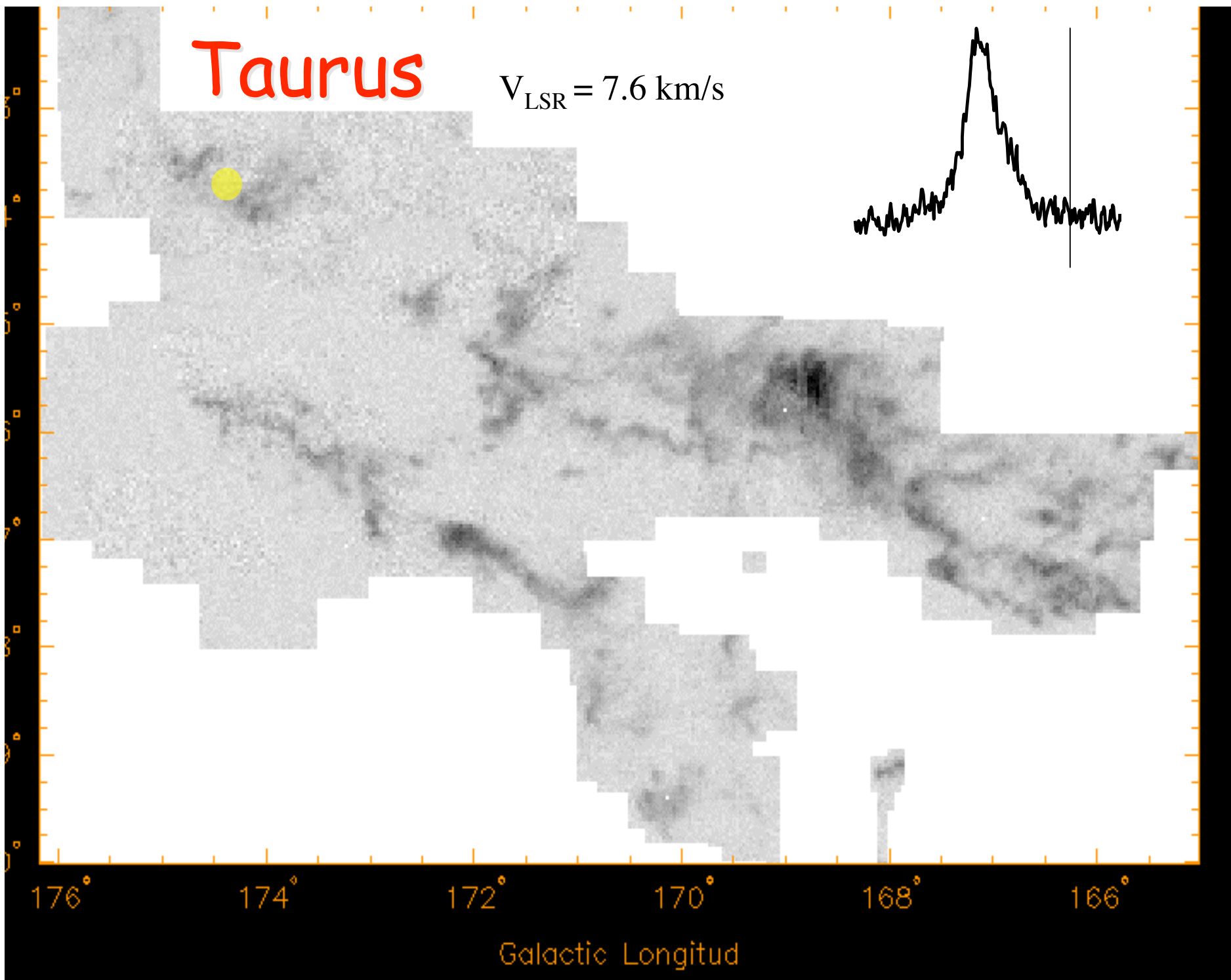
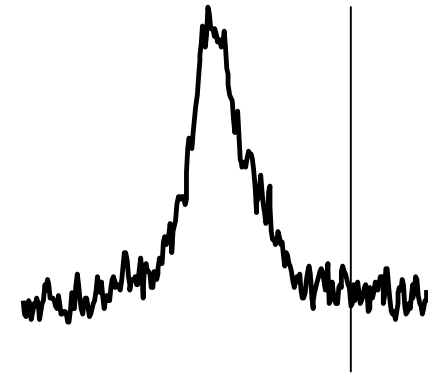
Taurus

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



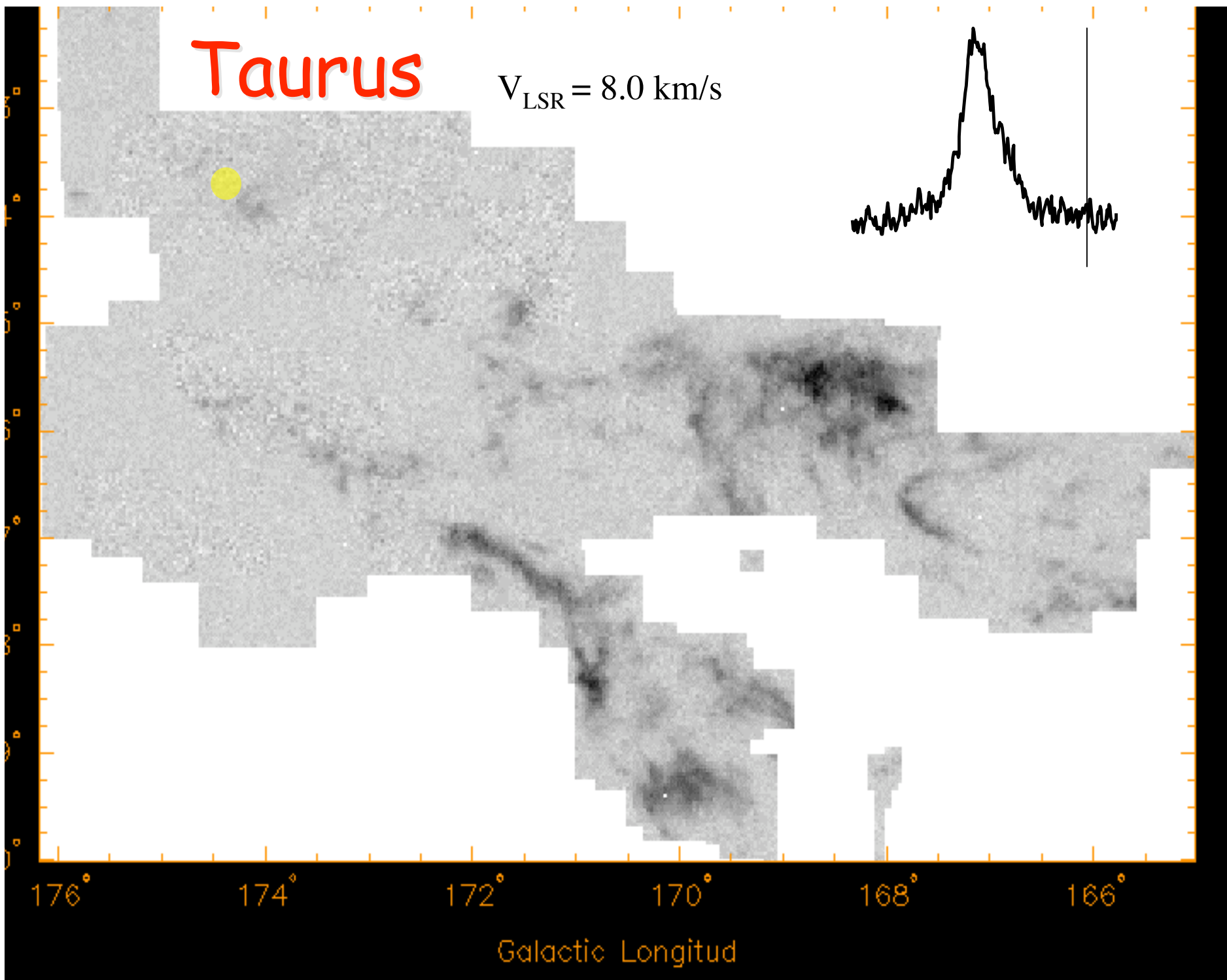
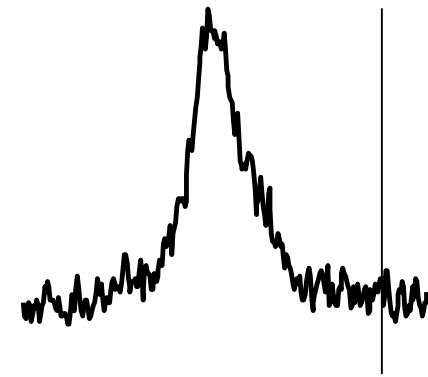
Taurus

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



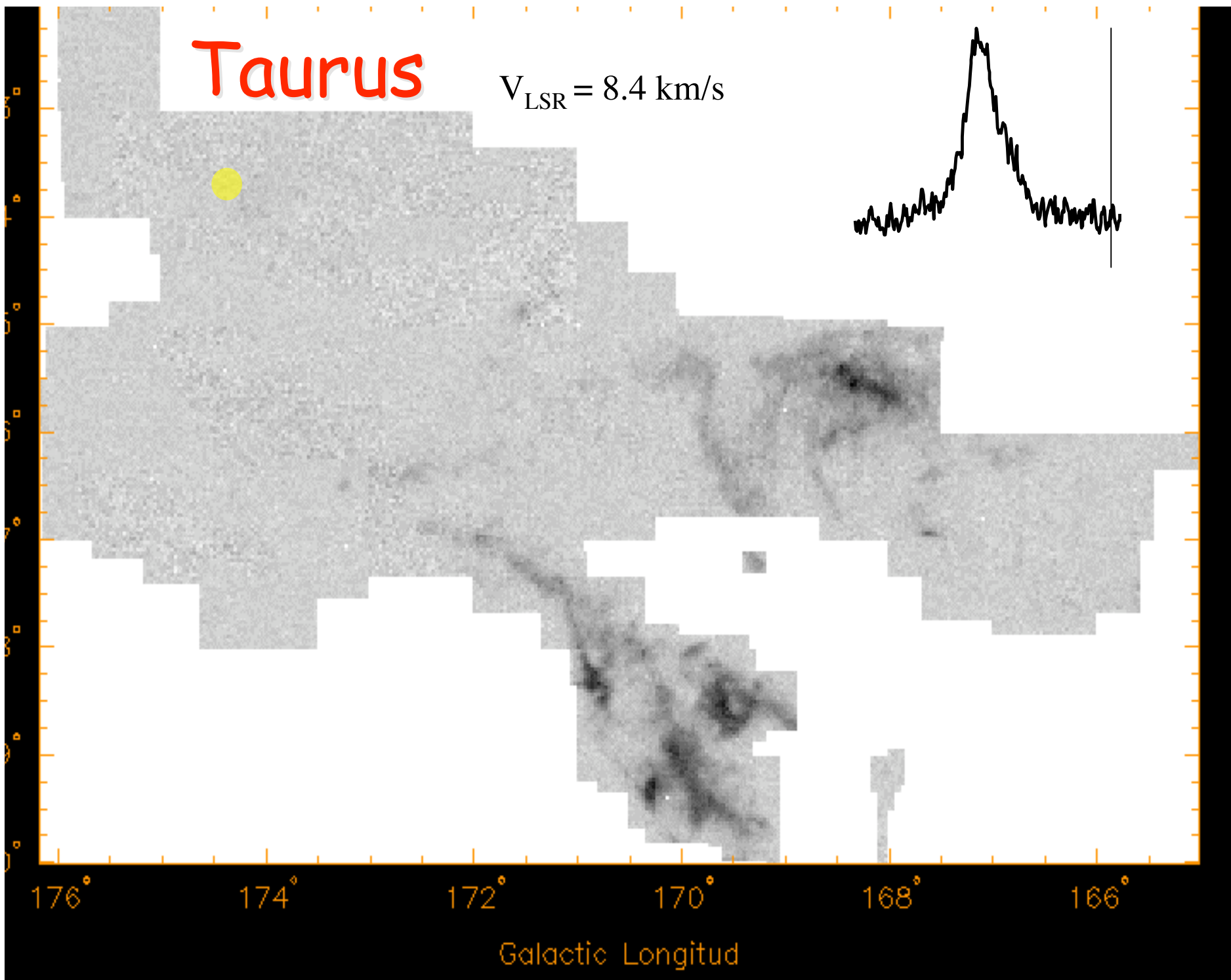
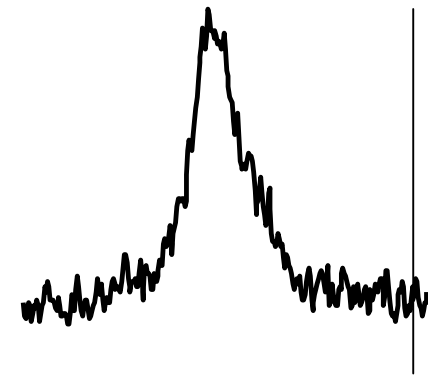
Taurus

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



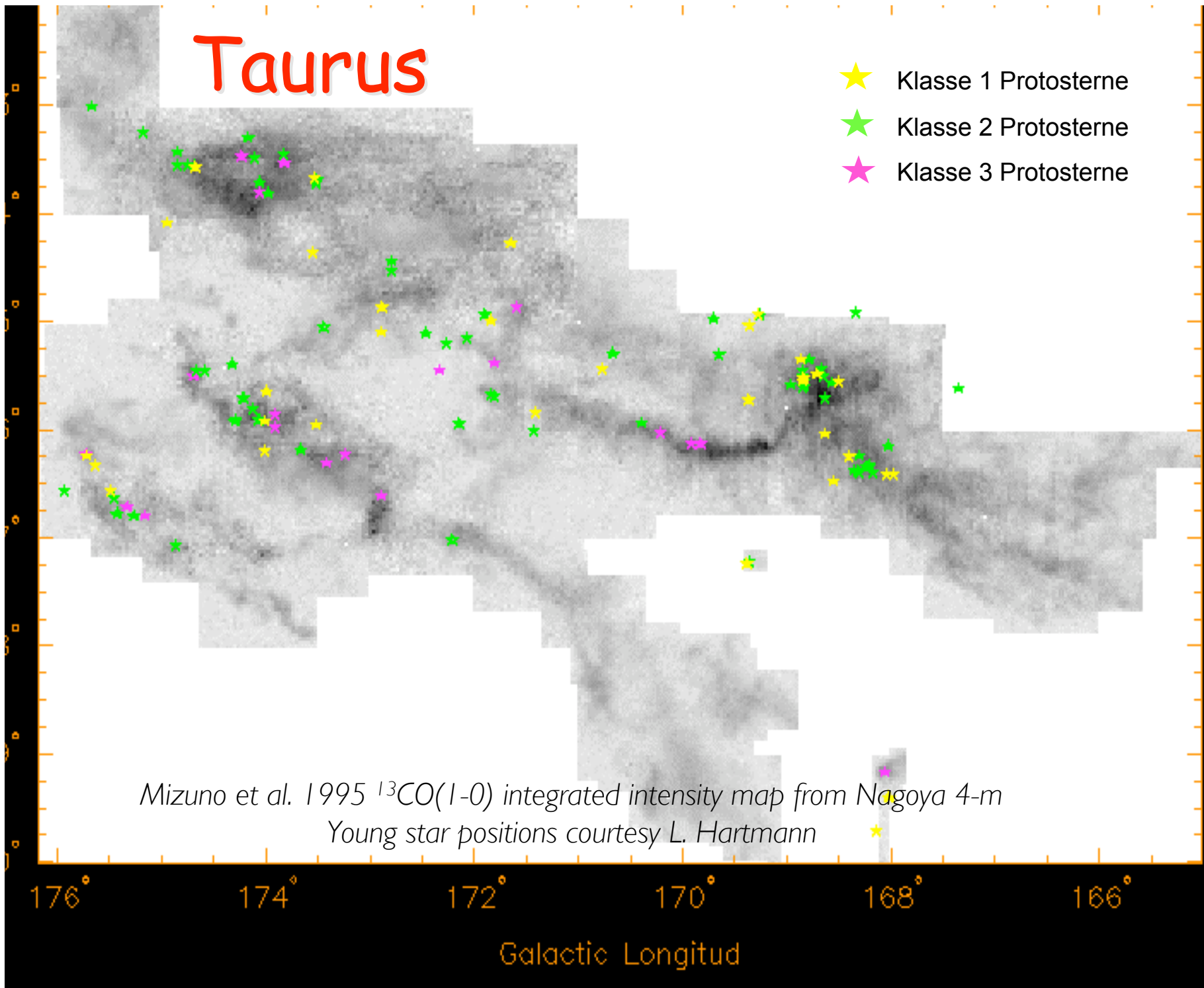
Taurus

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



Taurus

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

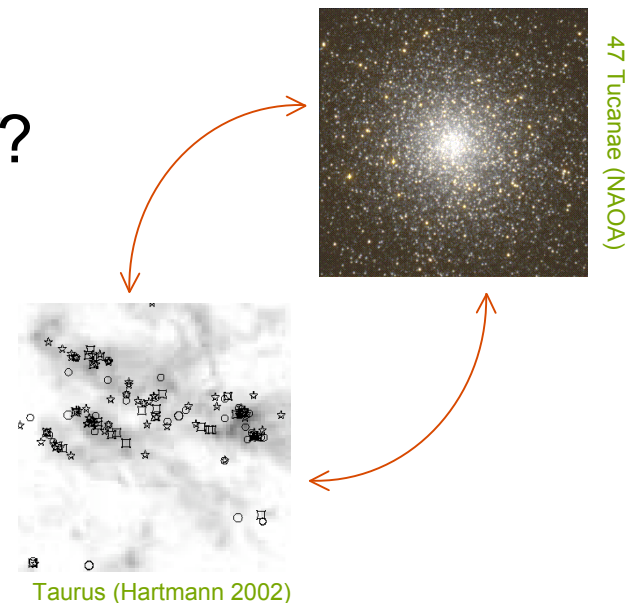


WIE?

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*?
(*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*

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*

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

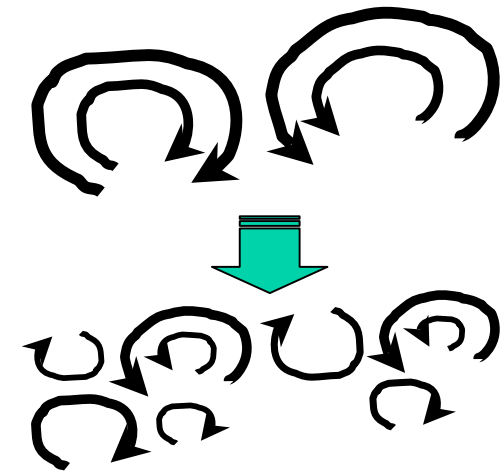
V = typical velocity on scale L , ν = viscosity, $\text{Re} > 1000$

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

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

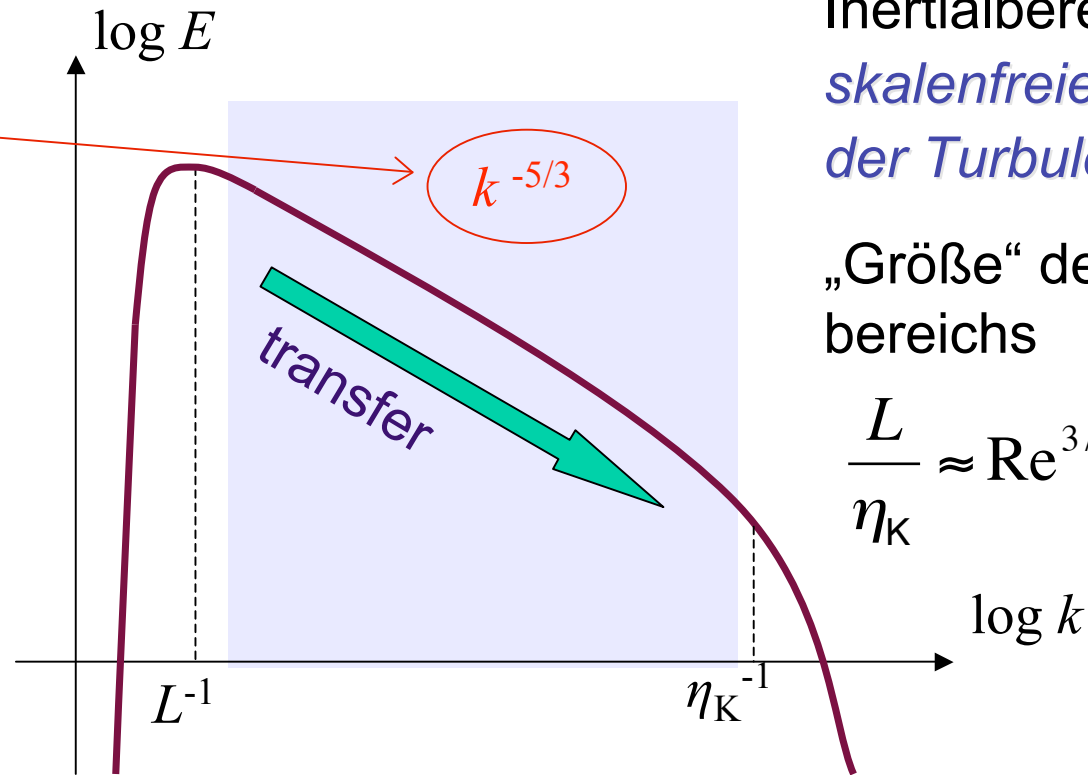
z.B. Landau & Lifschitz, Chandrasekhar, Taylor, etc.)

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



Turbulente Kaskade

Kolmogorov (1941) Theorie
der inkompressiblen Turbulenz



Inertialbereich:
*skalenfreies Verhalten
der Turbulenz*

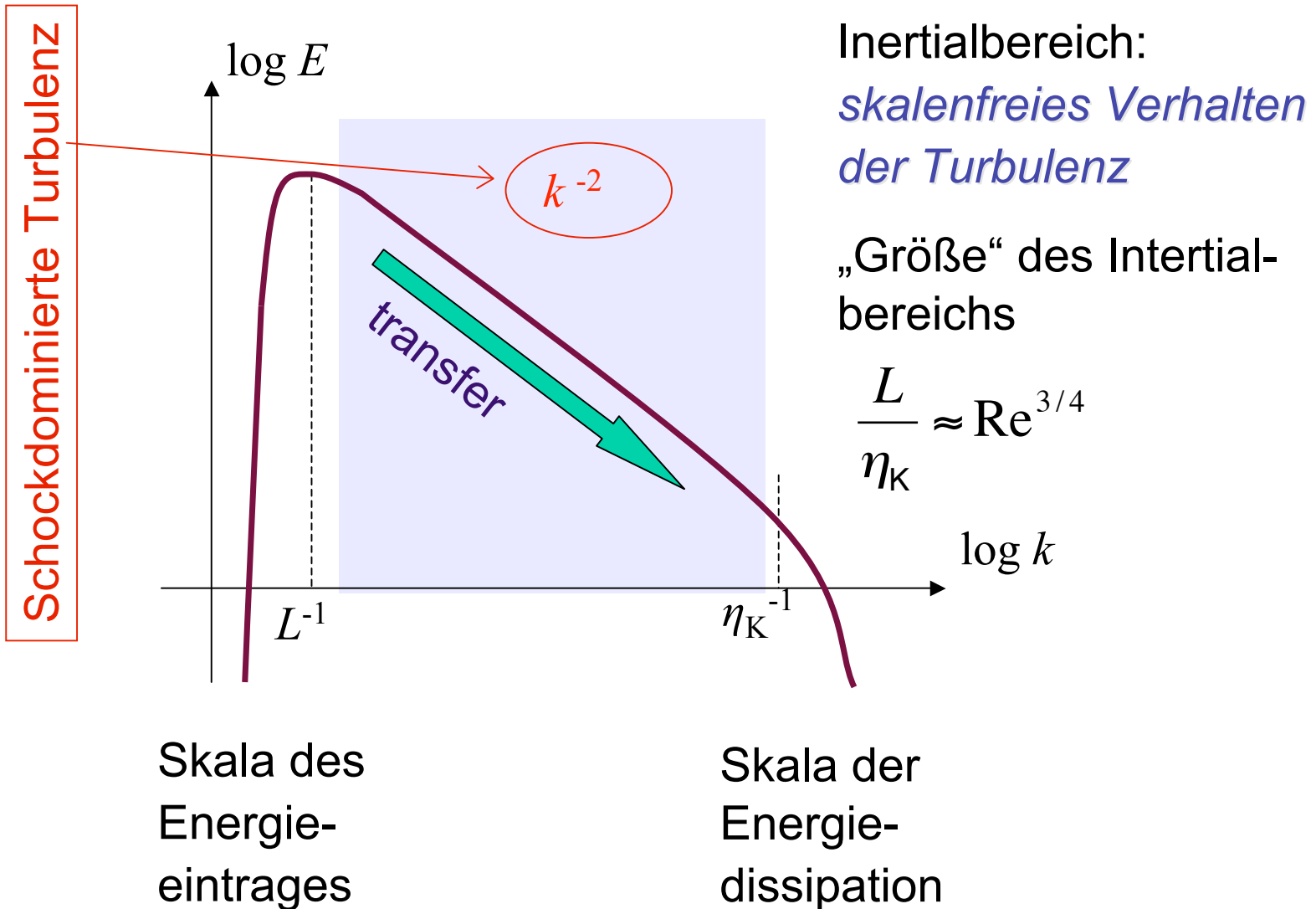
„Größe“ des Inertial-
bereichs

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

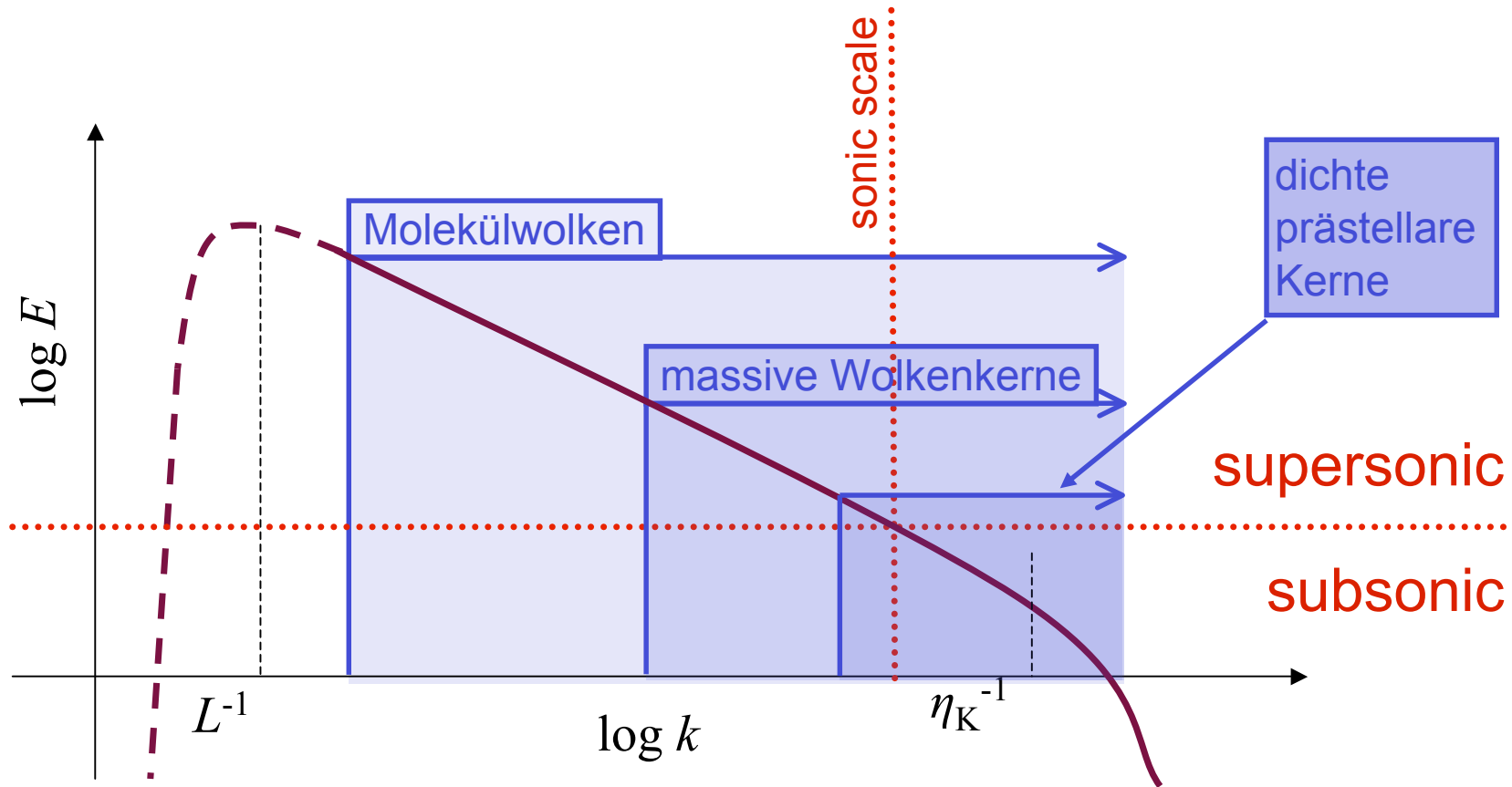
Skala des
Energie-
eintrages

Skala der
Energie-
dissipation

Turbulente Kaskade



Turbulente Kaskade in der ISM



Energiequelle & -skala
ist UNBEKANNT
(Supernovae, Winde,
Dichtewellen ?)

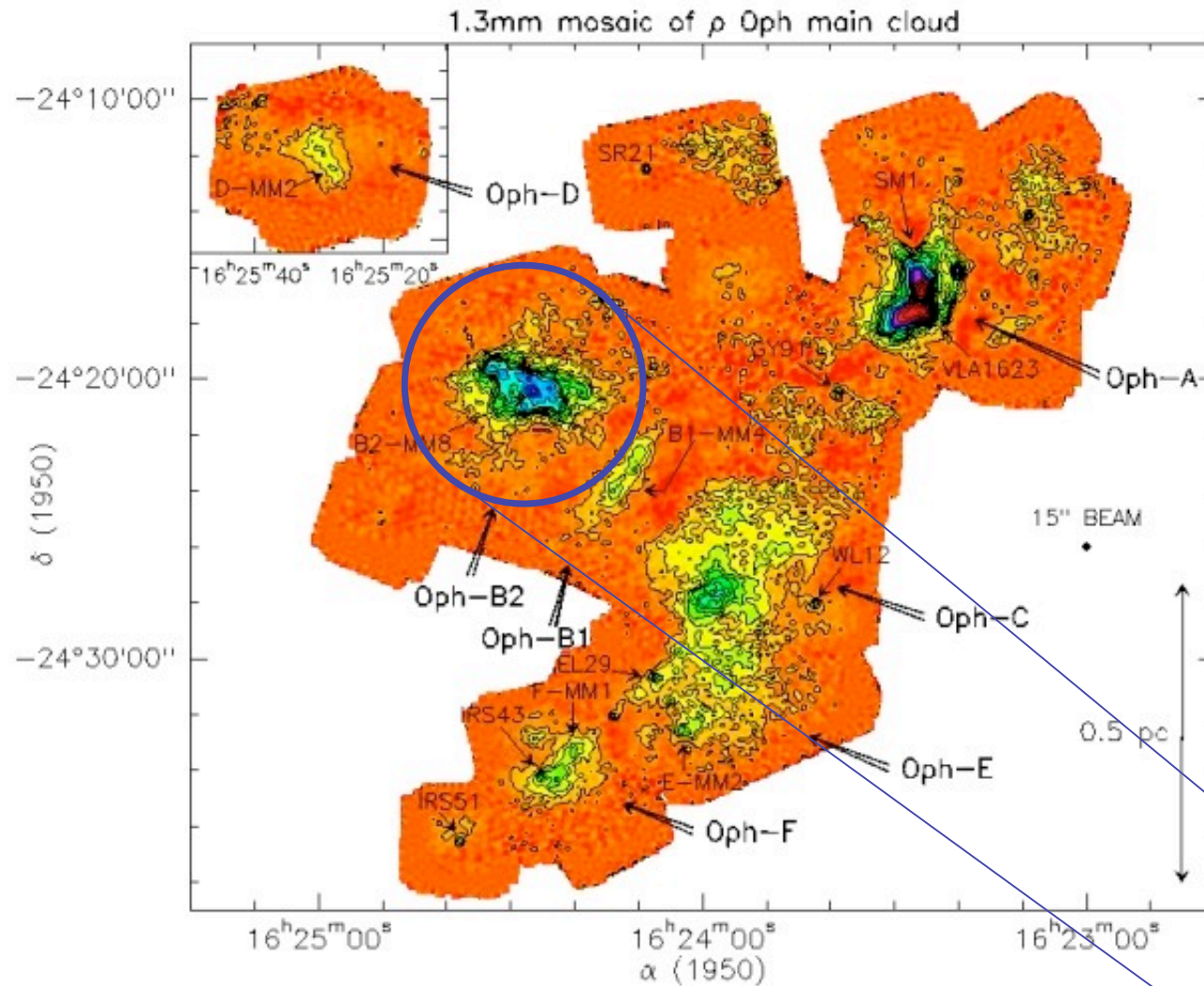
$$\sigma_{\text{rms}} \ll 1 \text{ km/s}$$

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

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

Dissipationsskala auch
unbekannt (ambipolare
Diffusion, molekulare
Diffusion?)

Dichtestruktur von MW



Molekülwolken sind hochgradig inhomogen.

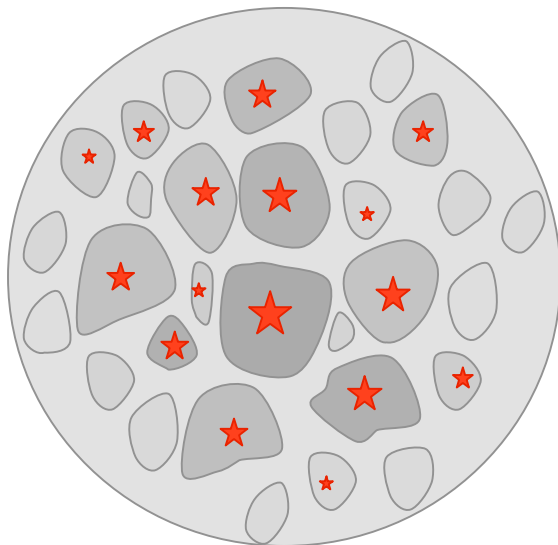
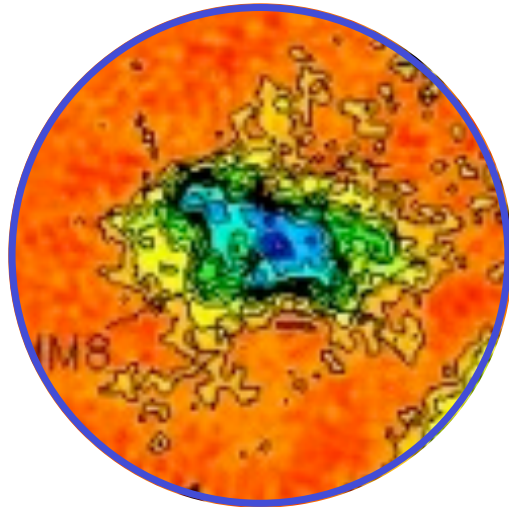
Sterne bilden sich in den dichtesten und kältesten Teilen der Wolke.

ρ -Ophiuchus in Staubemission

genauere Betrachtung

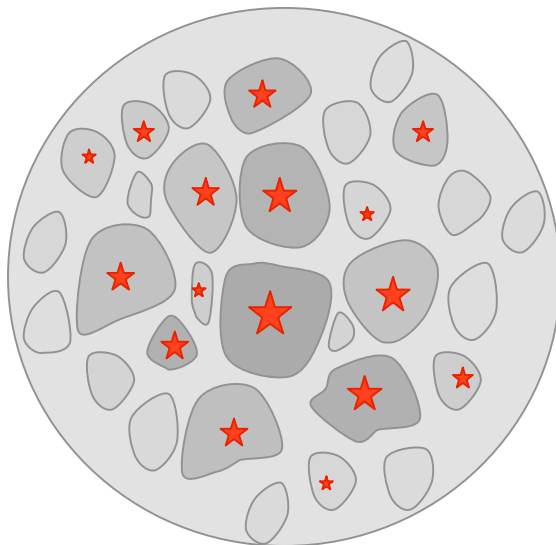
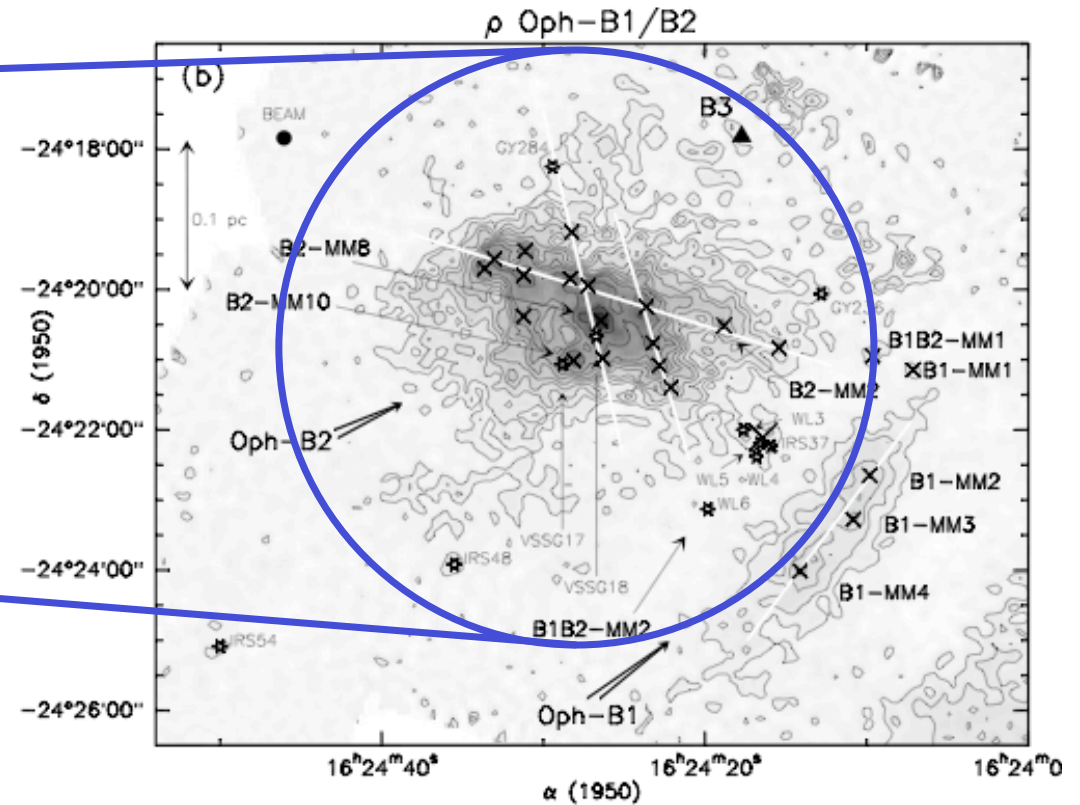
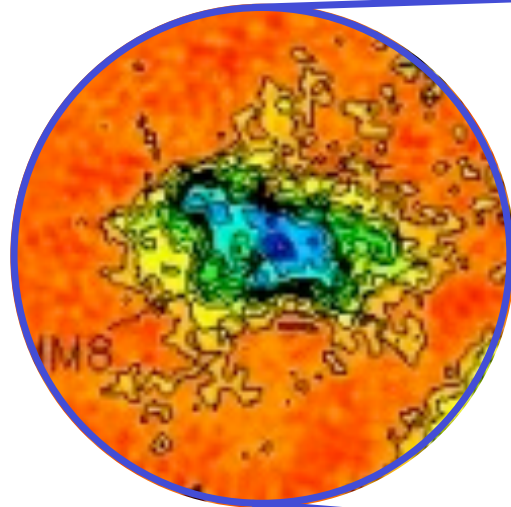
(Motte, André, & Neri 1998)

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.
- --> Vorhersage: *Kern fragmentiert und bildet Sternhaufen.*

Entwicklung von Wolkenkernen

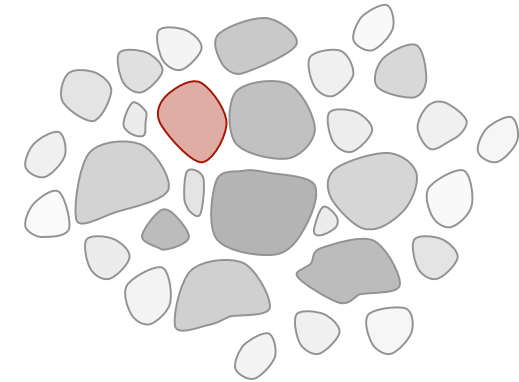
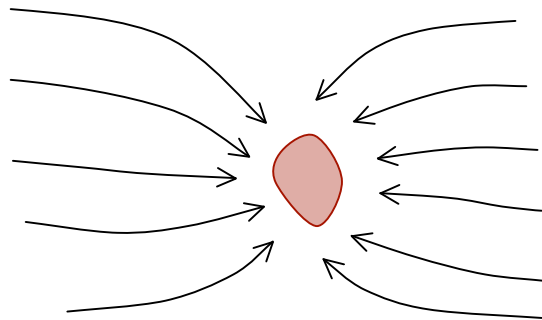


Beispiel ρ -Oph B1/B2: Kern enthält mehrere protostellare Objekte

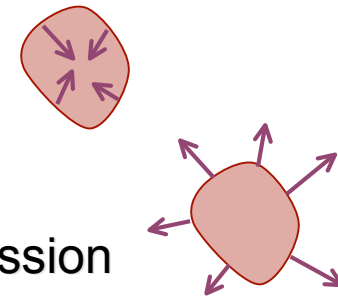
(“starless” cores are denoted by \times , cores with embedded protostars by \star)

Entwicklung von Wolkenkernen

- Protostellare Wolkenkerne bilden sich an *Stagnationspunkten* in *konvergenten turbulenten Strömungen*



- wenn $M > M_{\text{crit}} \propto \rho^{-1/2} T^{3/2}$: Kollaps & Sternbildung
- wenn $M < M_{\text{crit}} \propto \rho^{-1/2} T^{3/2}$: Reexpansion nach dem Ende der externen Kompression

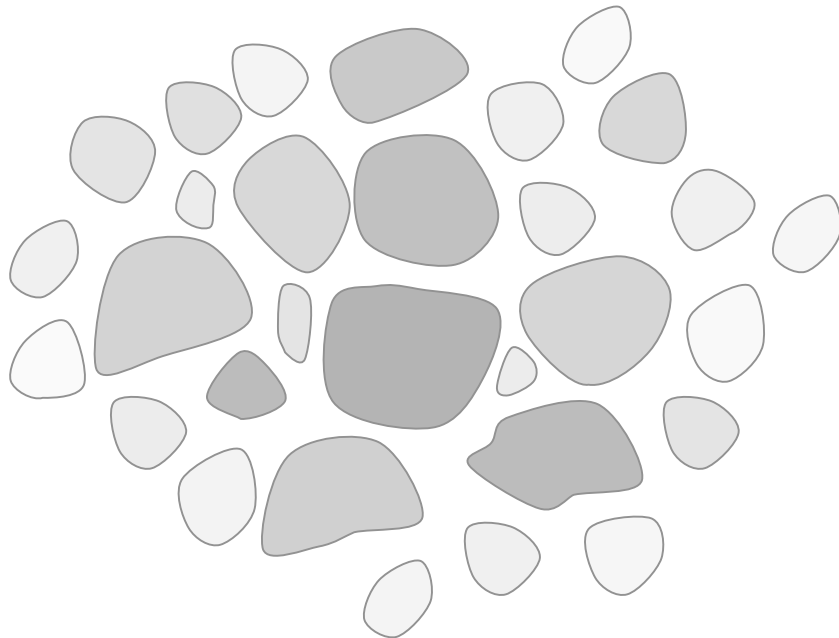


(e.g. Vazquez-Semadeni et al 2005)

- typische Zeitskalen: $t \approx 10^4 \dots 10^5$ Jahre

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**

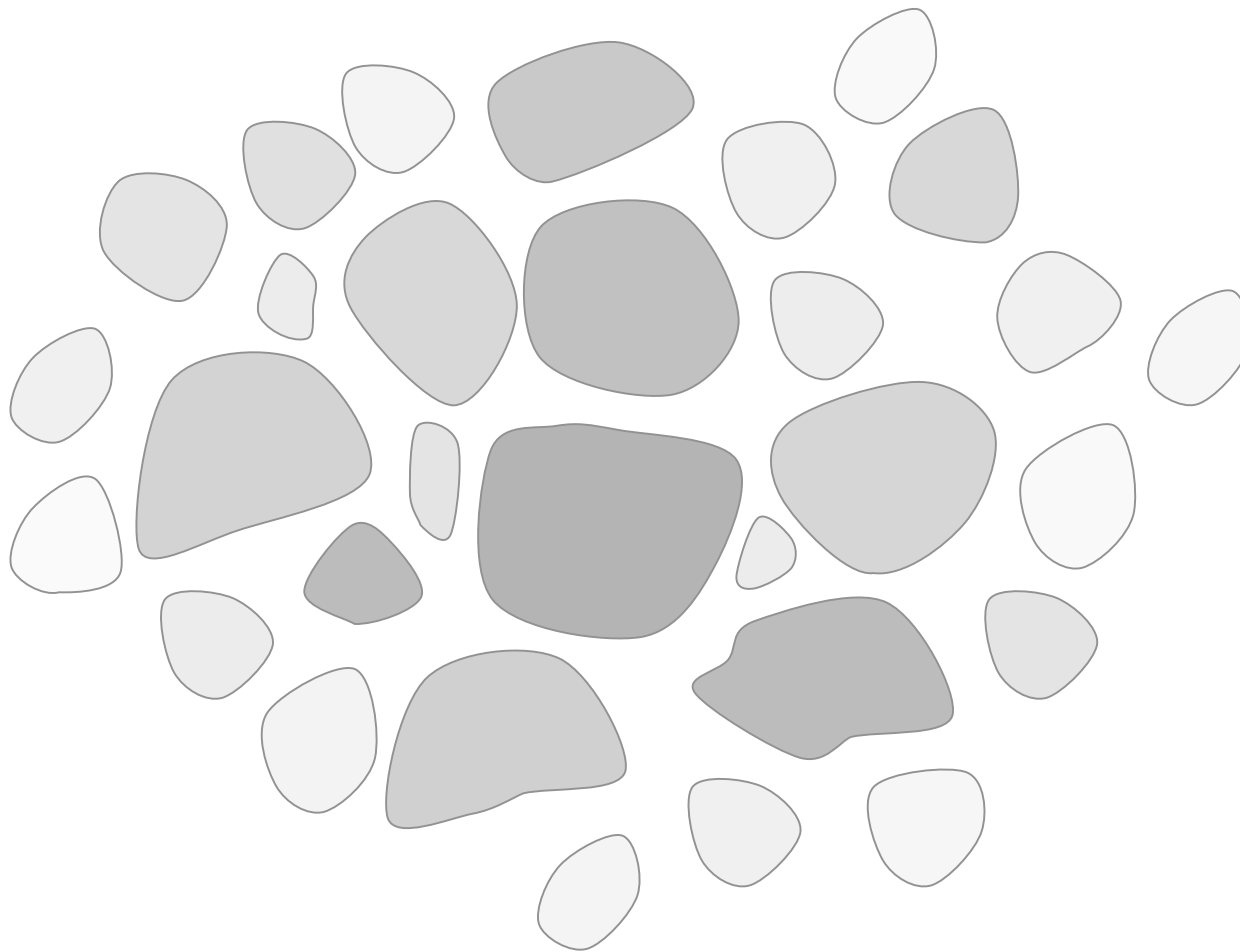
dominiert: $\alpha = E_{\text{kin}} / |E_{\text{pot}}| < 1$

--> *globale Kontraktion*

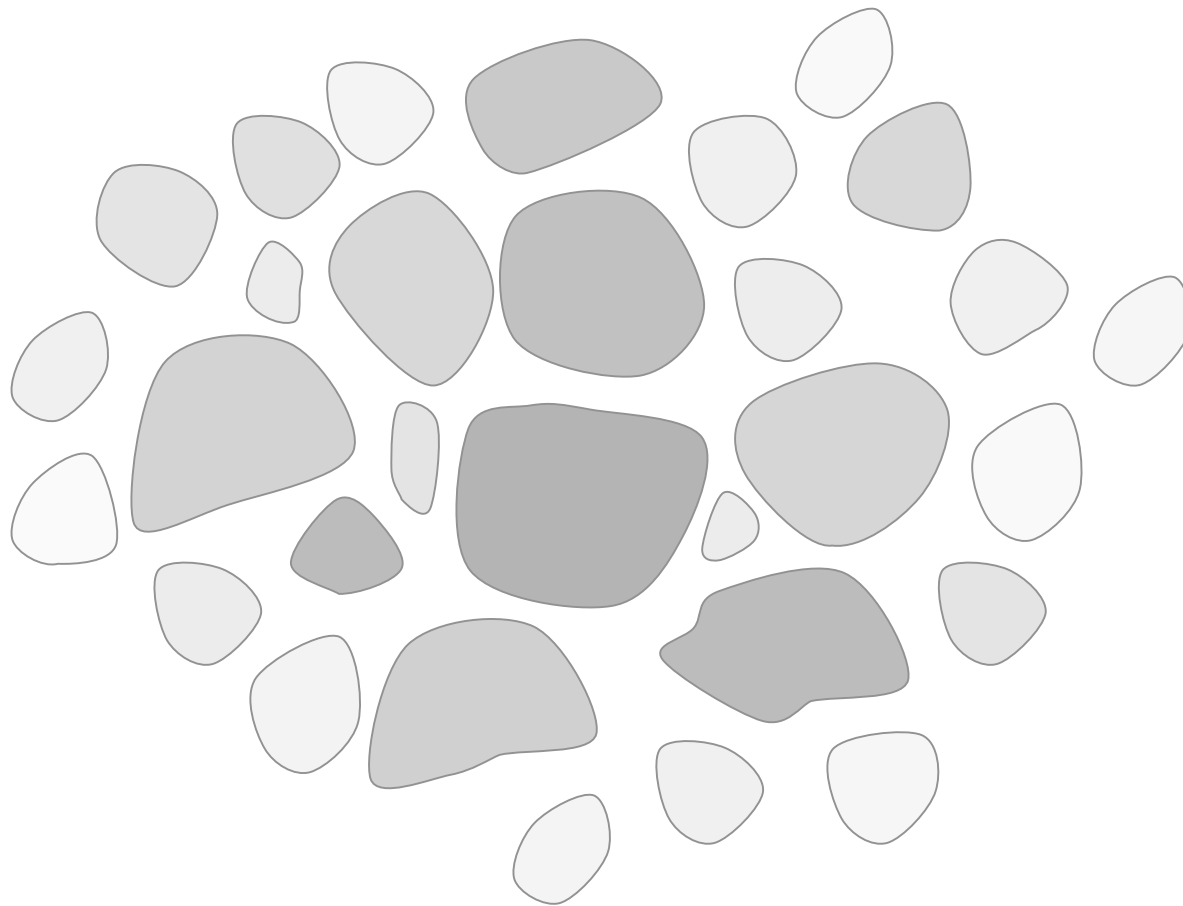
--> Kerne *wechselwirken* während sie kollabieren

--> *Kompetitives Wachstum*

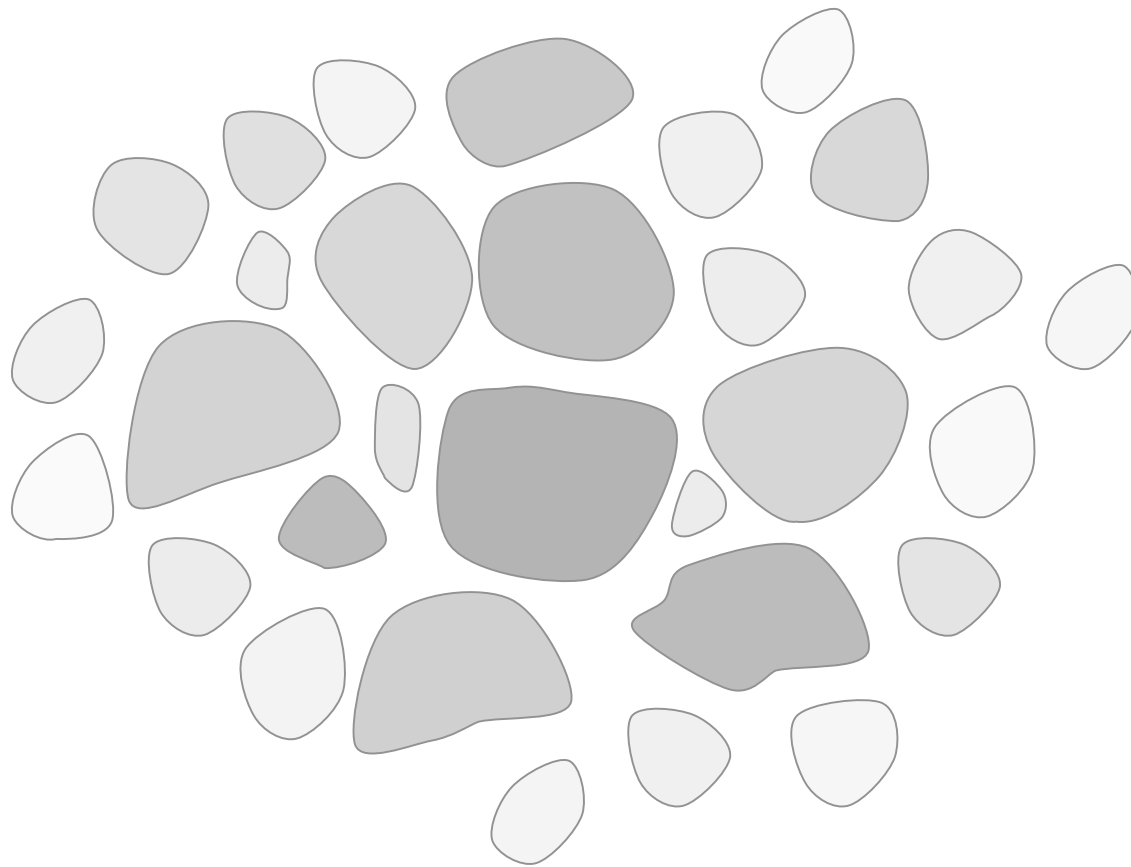
--> *dichter Haufen, enthält masse-
reiche Sterne*



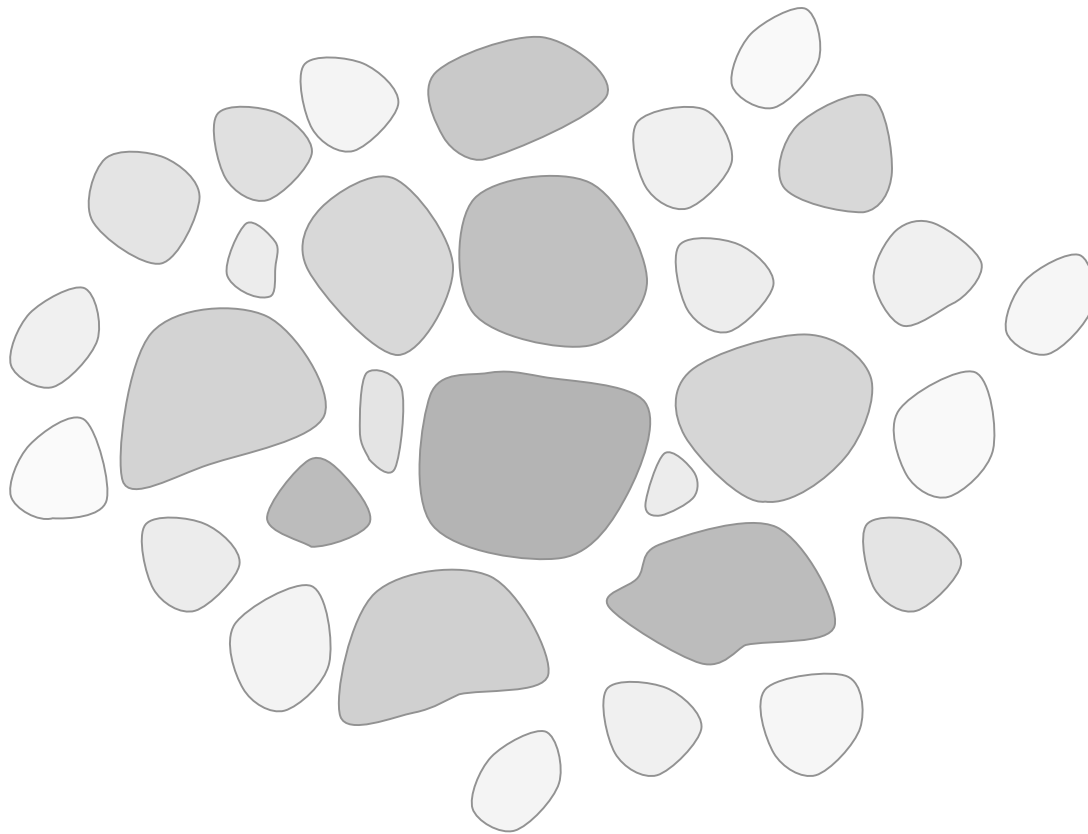
Turbulenz erzeugt Hierarchie von Klumpen



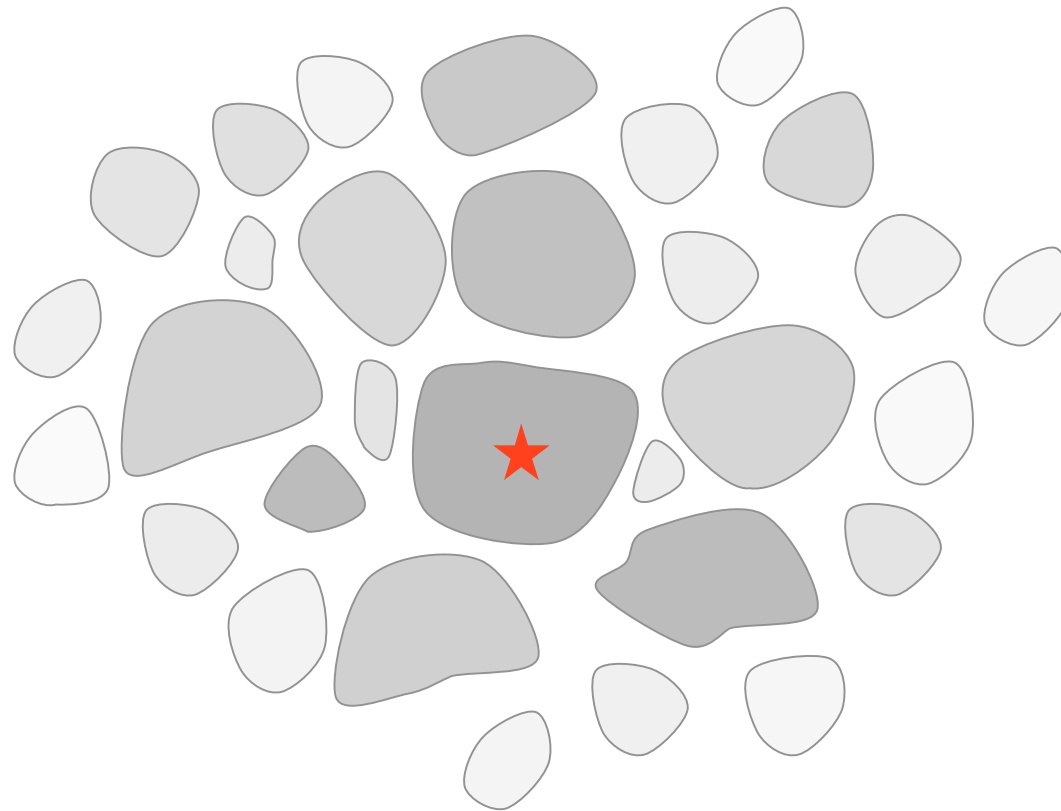
Turbulenz dissipiert, Kontraktion setzt ein



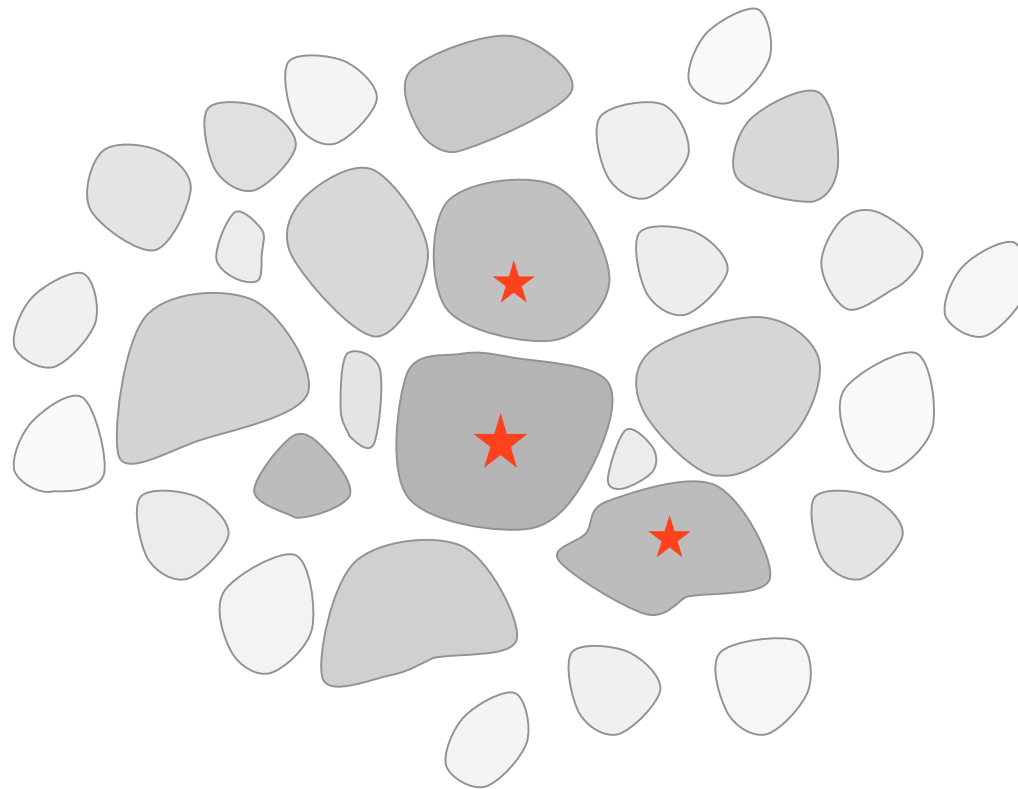
Turbulenz dissipiert, Kontraktion setzt ein



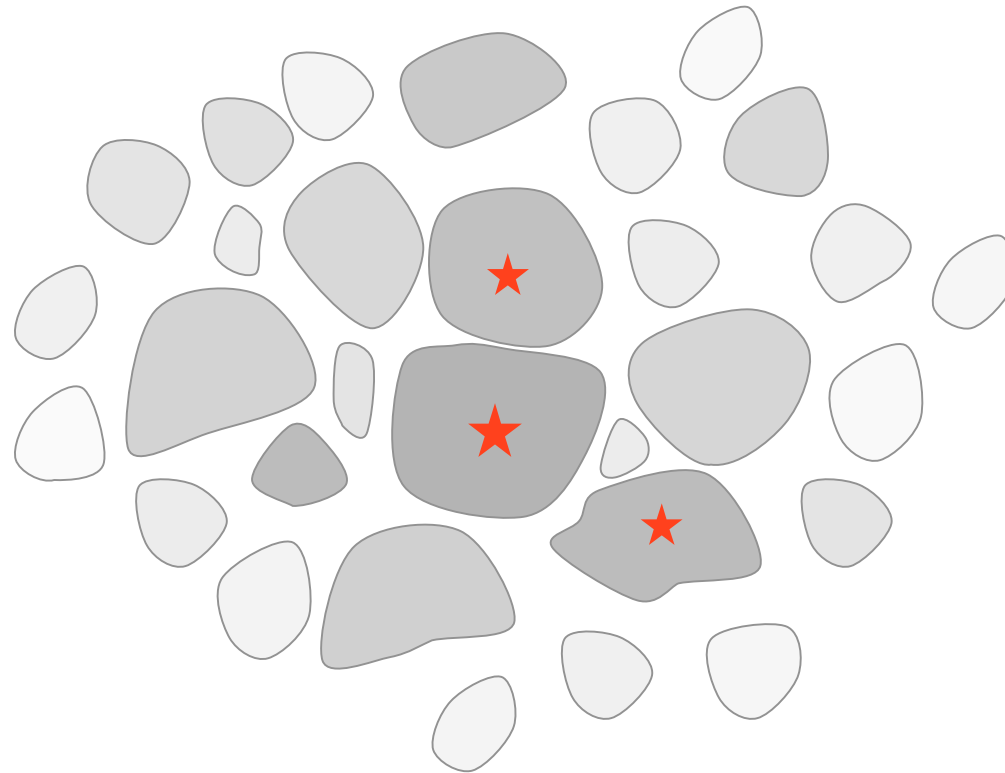
während Region kontrahiert können einzelne Klumpen kollabieren und Sterne bilden



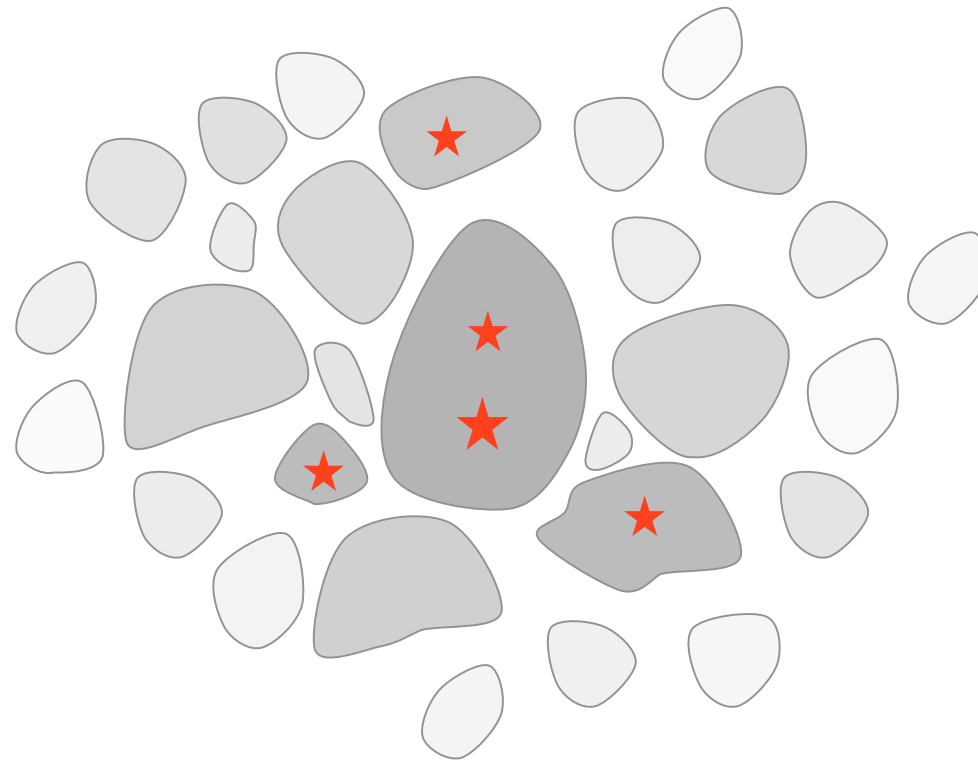
während Region kontrahiert können einzelne Klumpen kollabieren und Sterne bilden



einzelne Klumpen kollabieren und bilden Sterne

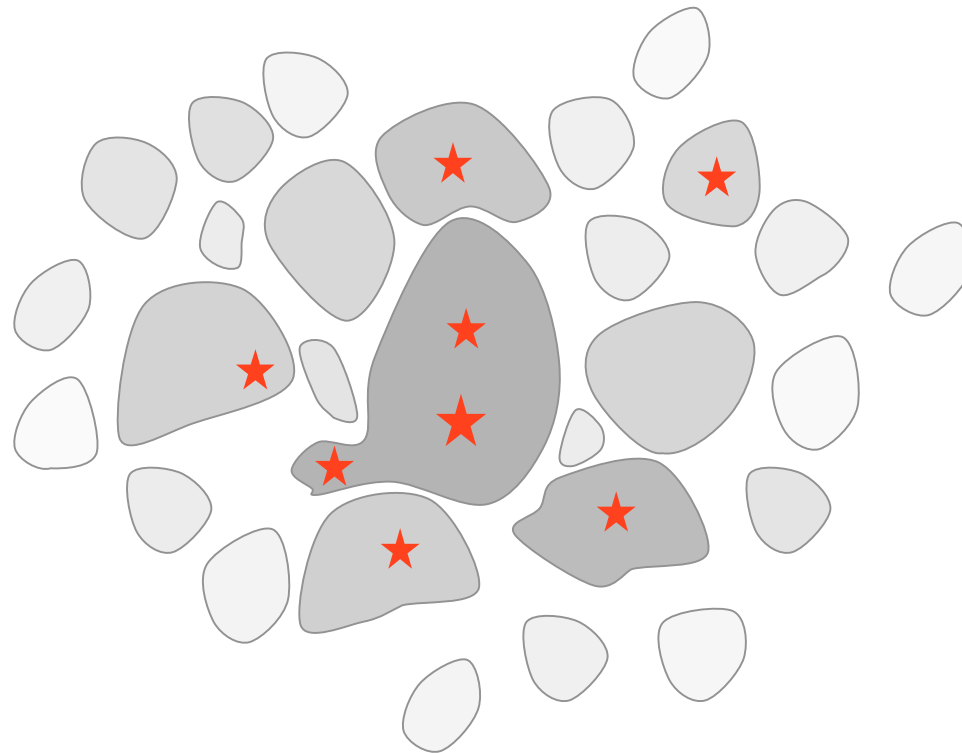


einzelne Klumpen kollabieren und bilden Sterne

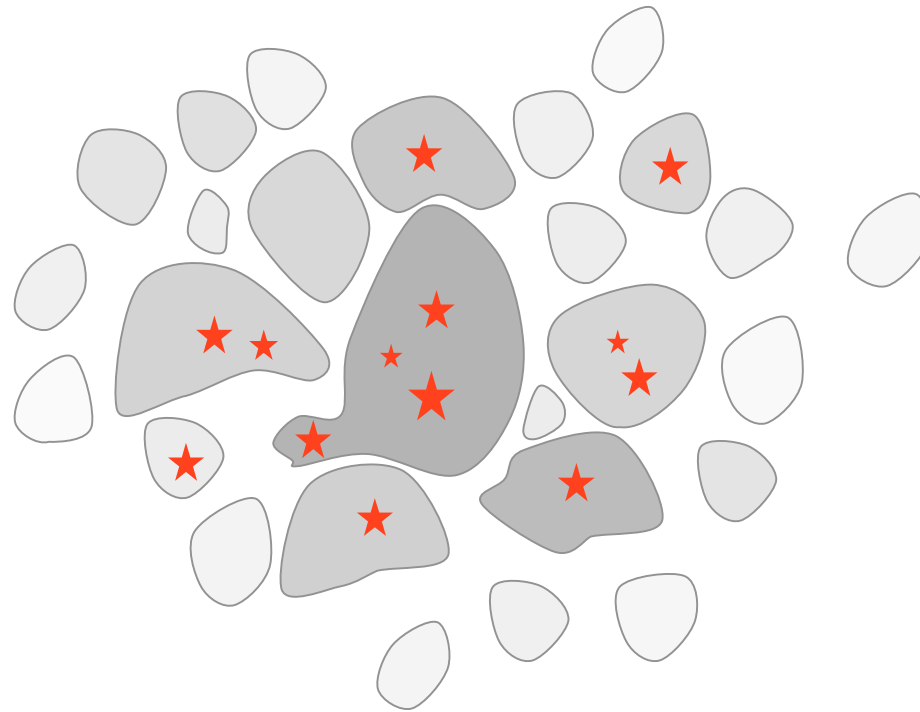


$$\alpha = E_{\text{kin}} / |E_{\text{pot}}| < 1$$

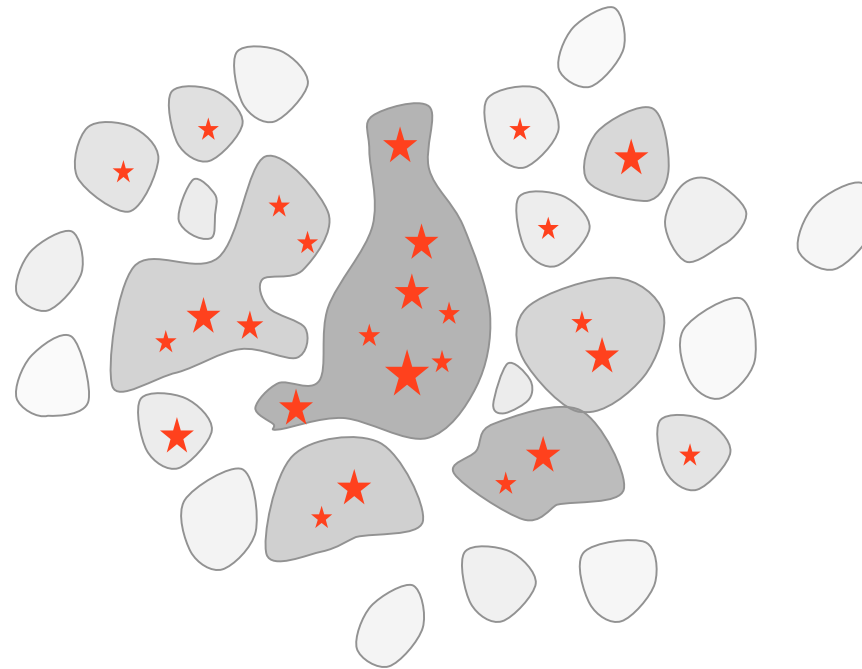
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



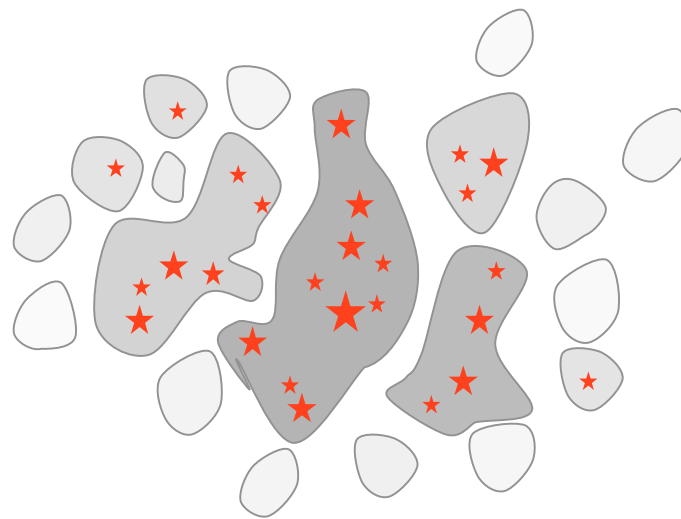
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



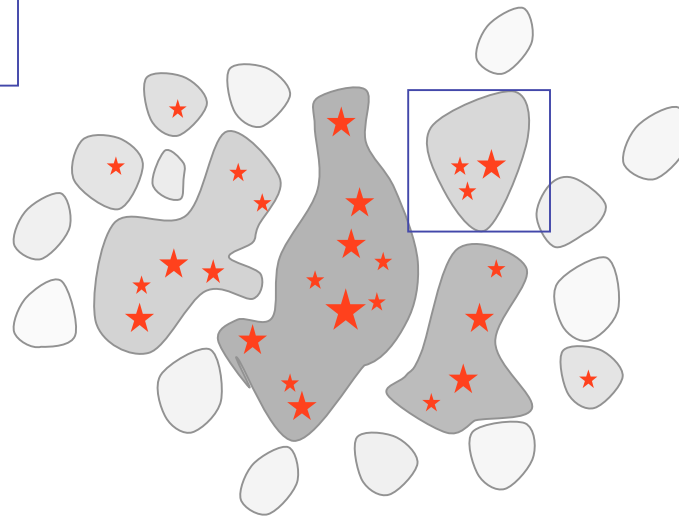
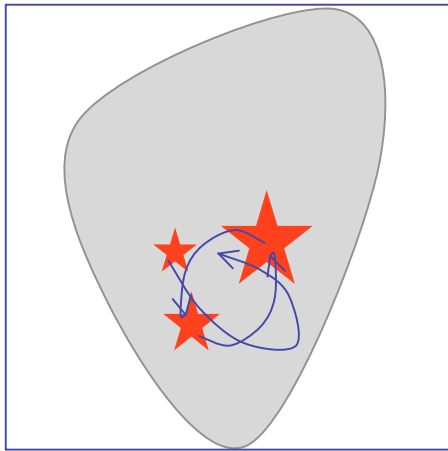
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



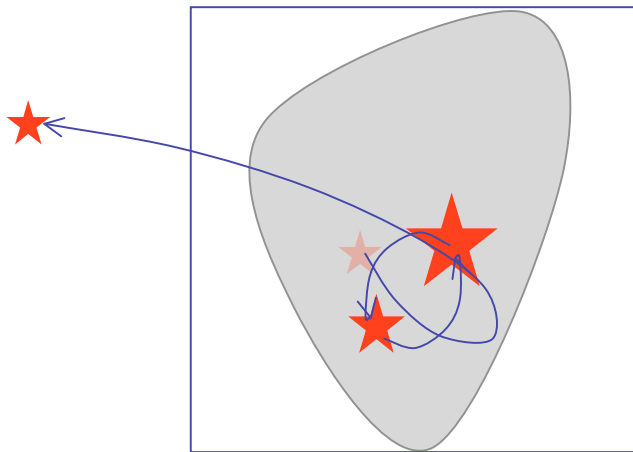
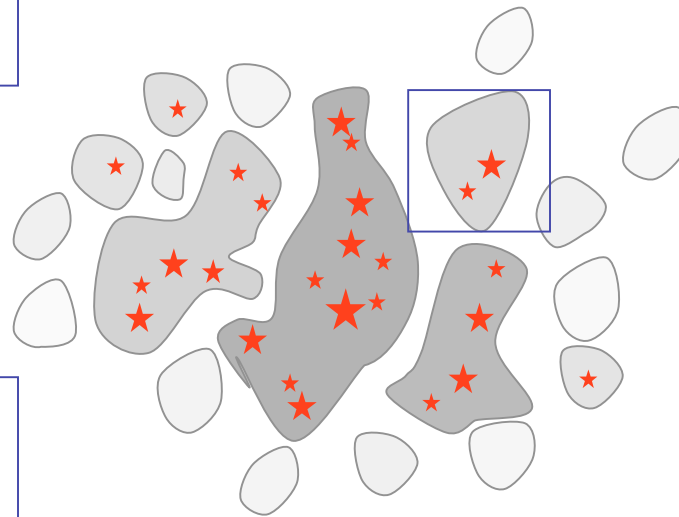
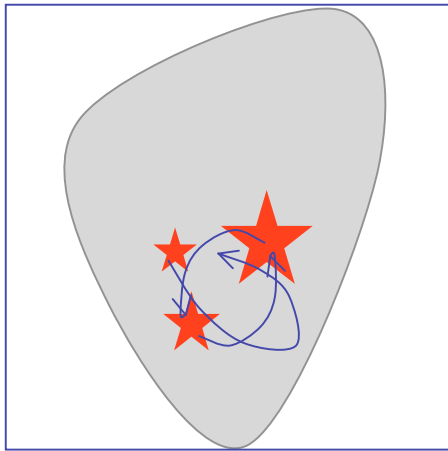
Im *dichten Haufen* wird kompetitives Wachstum wichtig



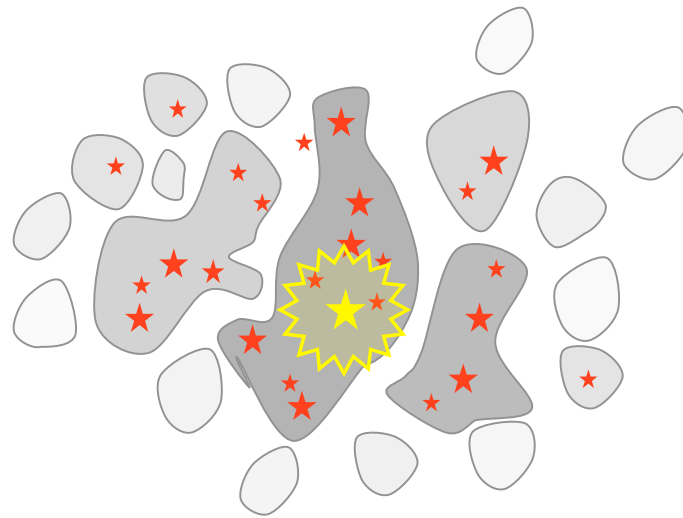
Im *dichten Haufen* wird kompetitives Wachstum wichtig



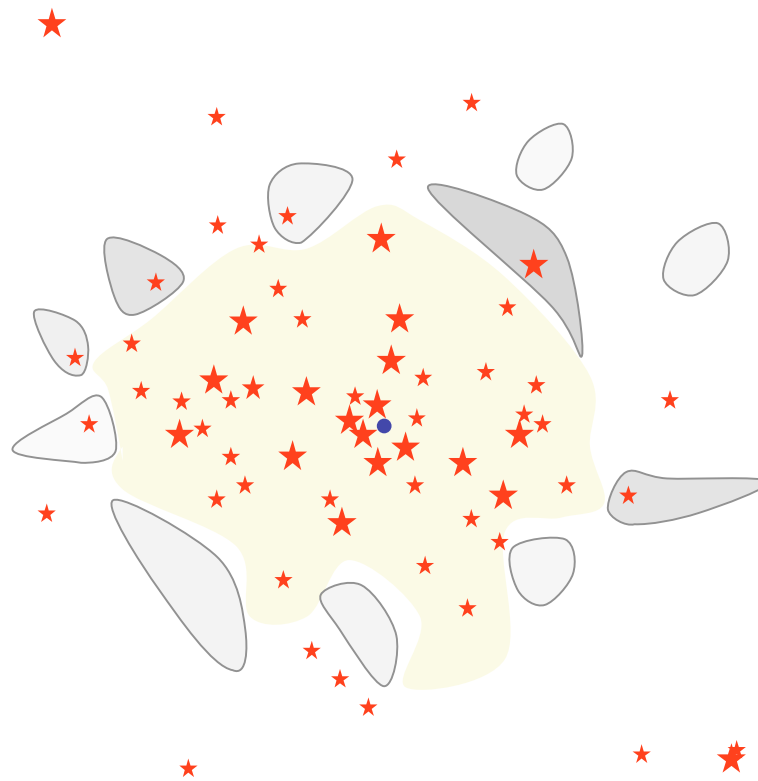
Im *dichten Haufen* beeinflussen stellardynamische Prozesse das Wachstum



massearme Objekte können herausgeschleudert werden --> Ende der Akkretion



Feedback beendet die Sternbildung



Resultat: *Sternhaufen*, evtl. umgeben von H_{II}-Region

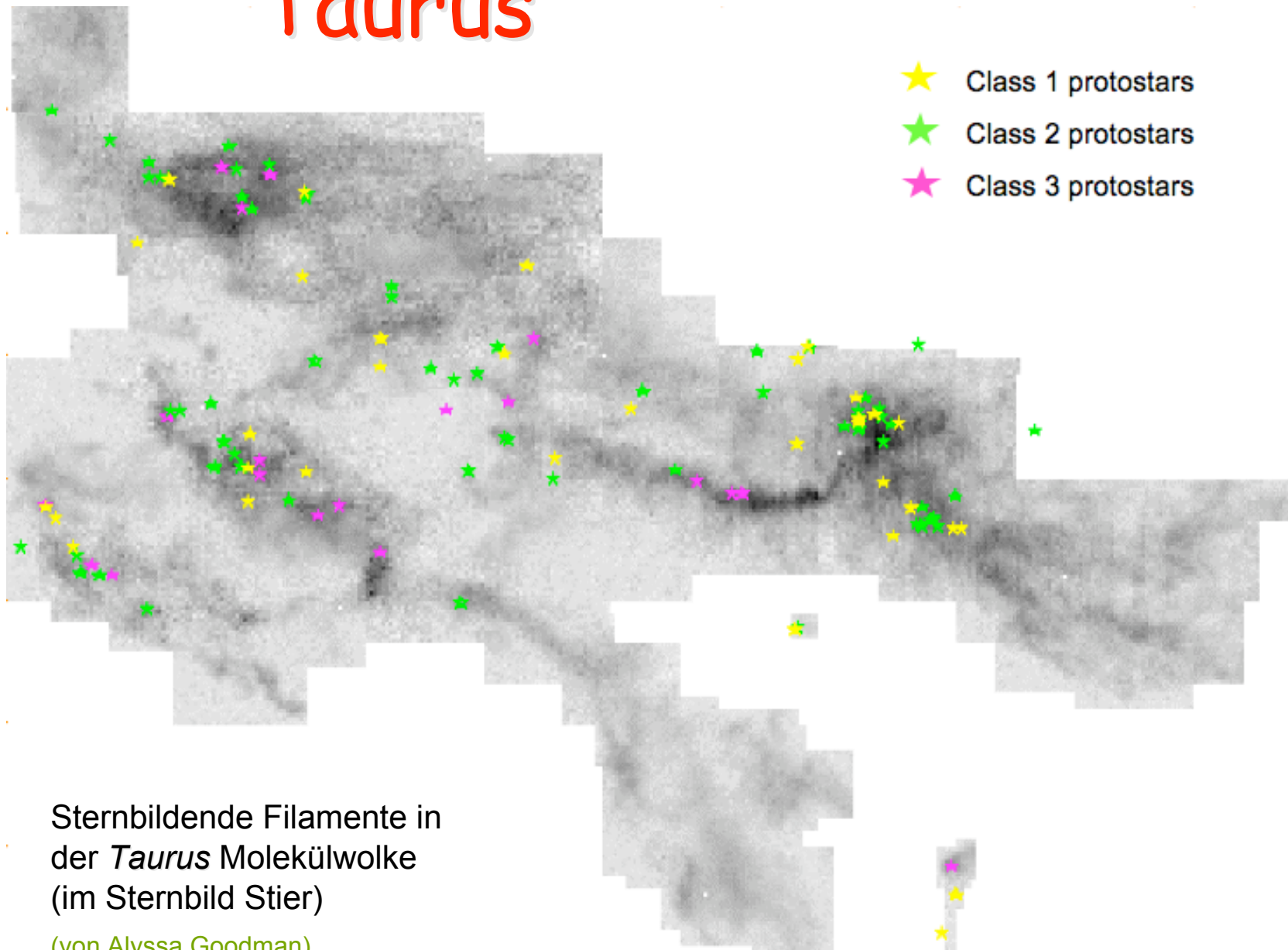
Vorhersagen

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

Beispiel

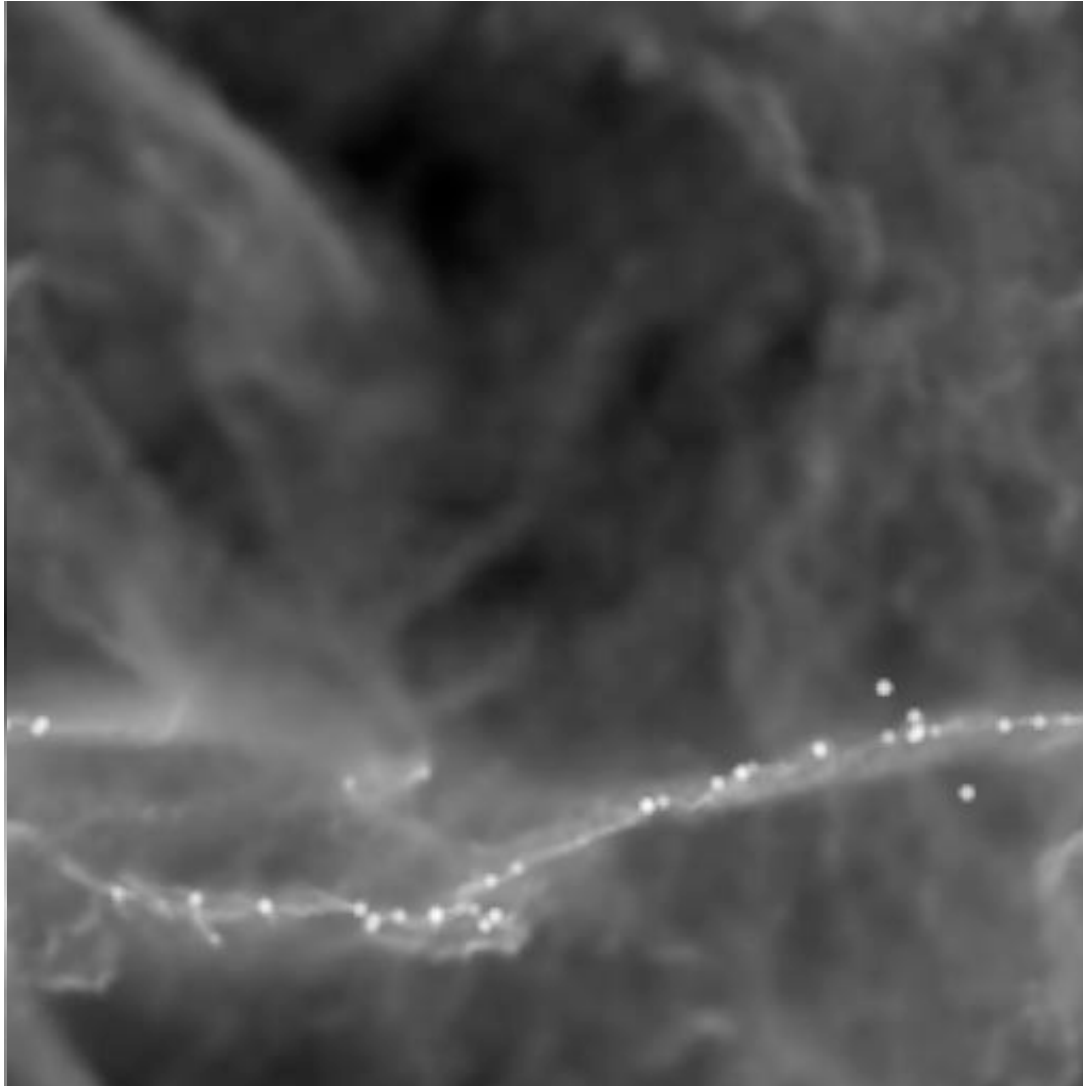
Taurus



Sternbildende Filamente in
der *Taurus* Molekülwolke
(im Sternbild Stier)

(von Alyssa Goodman)

Gravoturbulente Fragmentation



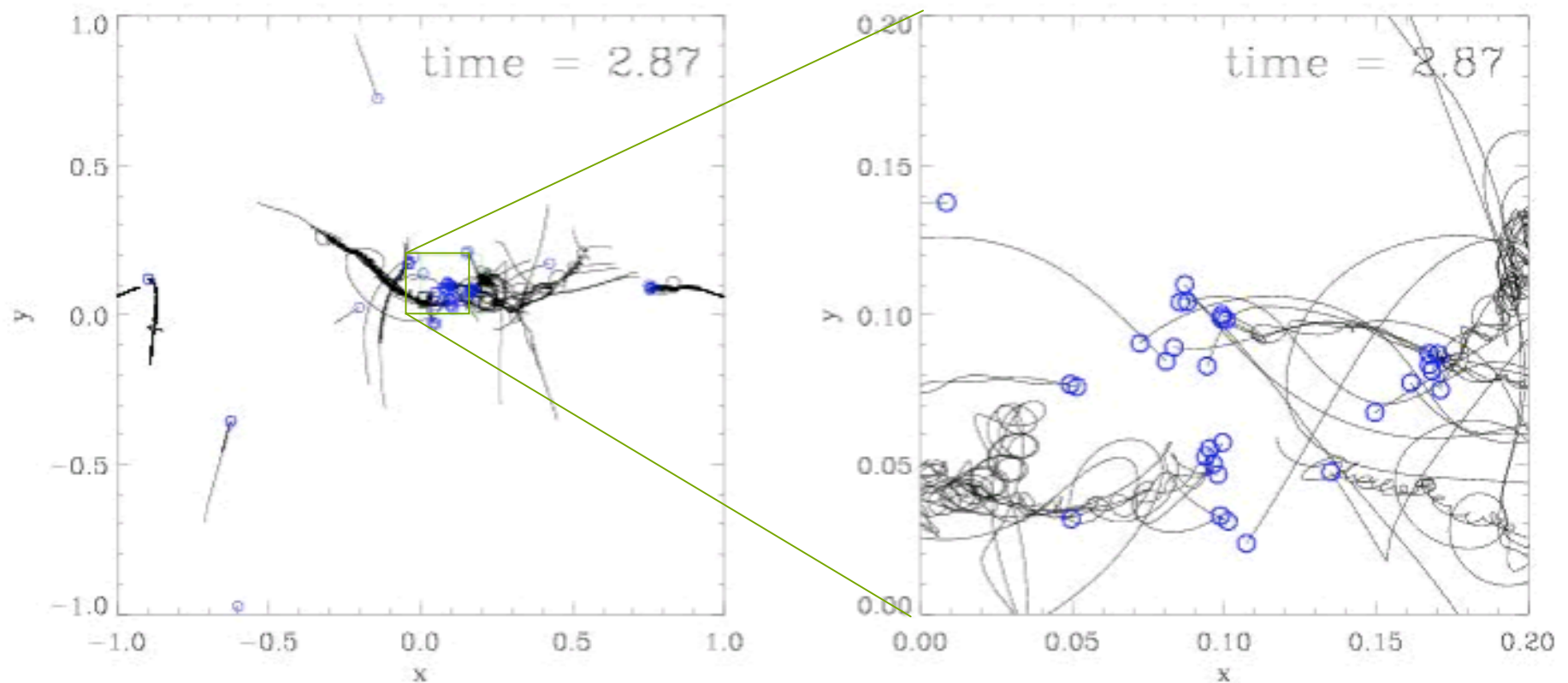
Turbulenz erzeugt
die Dichtestruktur

Gravitation wählt die
dichtesten Gebiete
aus.

Diese verdichten
sich & bilden Sterne.

Bildung von Sternhaufen

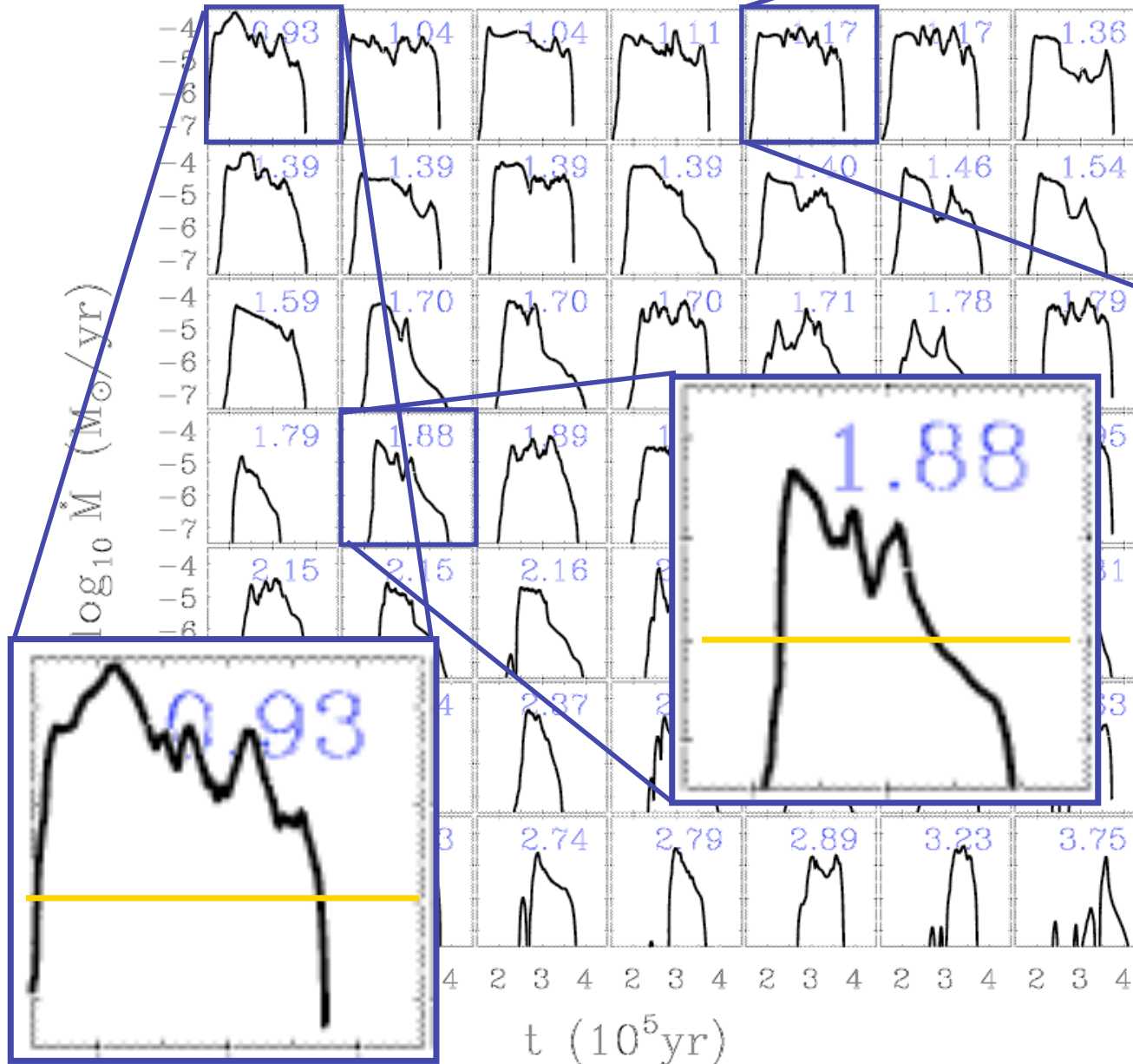
Fast alle Sterne bilden sich in Haufen - dynamische Prozesse wichtig



Trajectories of protostars in a nascent dense cluster created by gravoturbulent fragmentation

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

Akkretionsraten in H



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

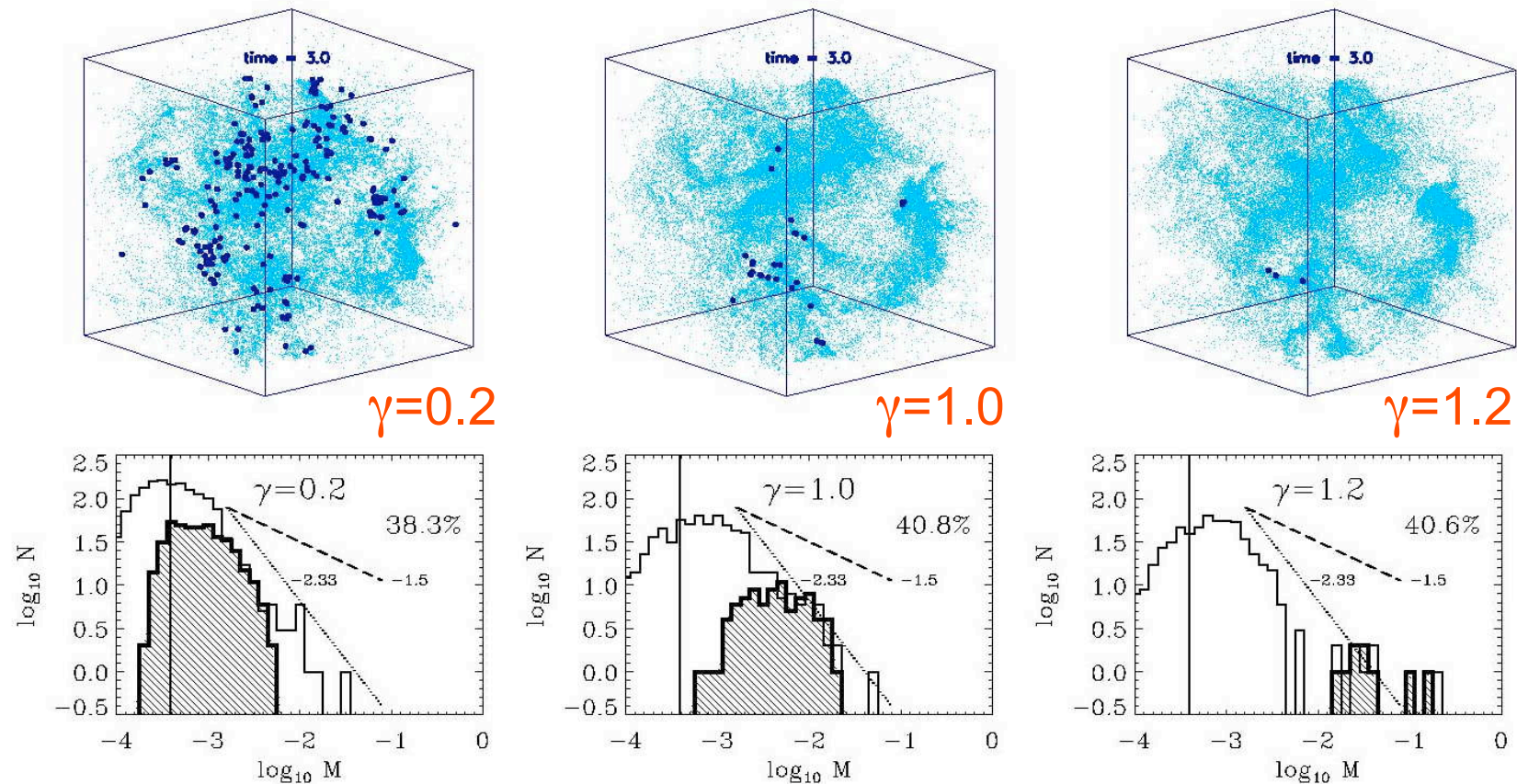
(Klessen 2001, ApJ, 550, L77;
oder Schmeja & Klessen,
2004, A&A, 419, 405)

Dependency on EOS

- degree of fragmentation depends on *EOS!*
- polytropic EOS: $p \propto \rho^\gamma$
- $\gamma < 1$: dense cluster of low-mass stars
- $\gamma > 1$: isolated high-mass stars

(see Li, Klessen, & Mac Low 2003, ApJ, 592, 975; also Kawachi & Hanawa 1998, Larson 2003)

Dependency on EOS



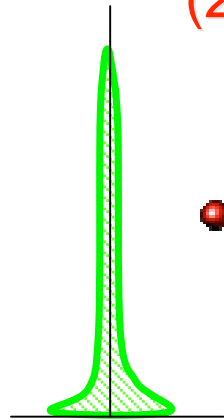
for $\gamma < 1$ fragmentation is enhanced \rightarrow *cluster of low-mass stars*
for $\gamma > 1$ it is suppressed \rightarrow formation of *isolated massive stars*

(from Li, Klessen, & Mac Low 2003, ApJ, 592, 975)

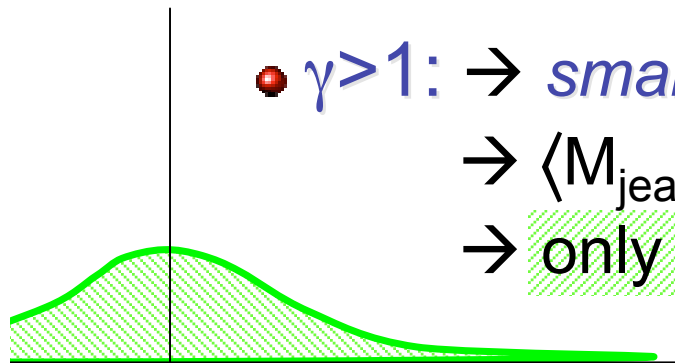
How does that work?

$$(1) \quad p \propto \rho^\gamma \quad \rightarrow \quad \rho \propto p^{1/\gamma}$$

$$(2) \quad M_{\text{jeans}} \propto \gamma^{3/2} \rho^{(3\gamma-4)/2}$$



- $\gamma < 1$: \rightarrow *large* density excursion for given pressure
 \rightarrow $\langle M_{\text{jeans}} \rangle$ becomes small
 \rightarrow number of fluctuations with $M > M_{\text{jeans}}$ is large



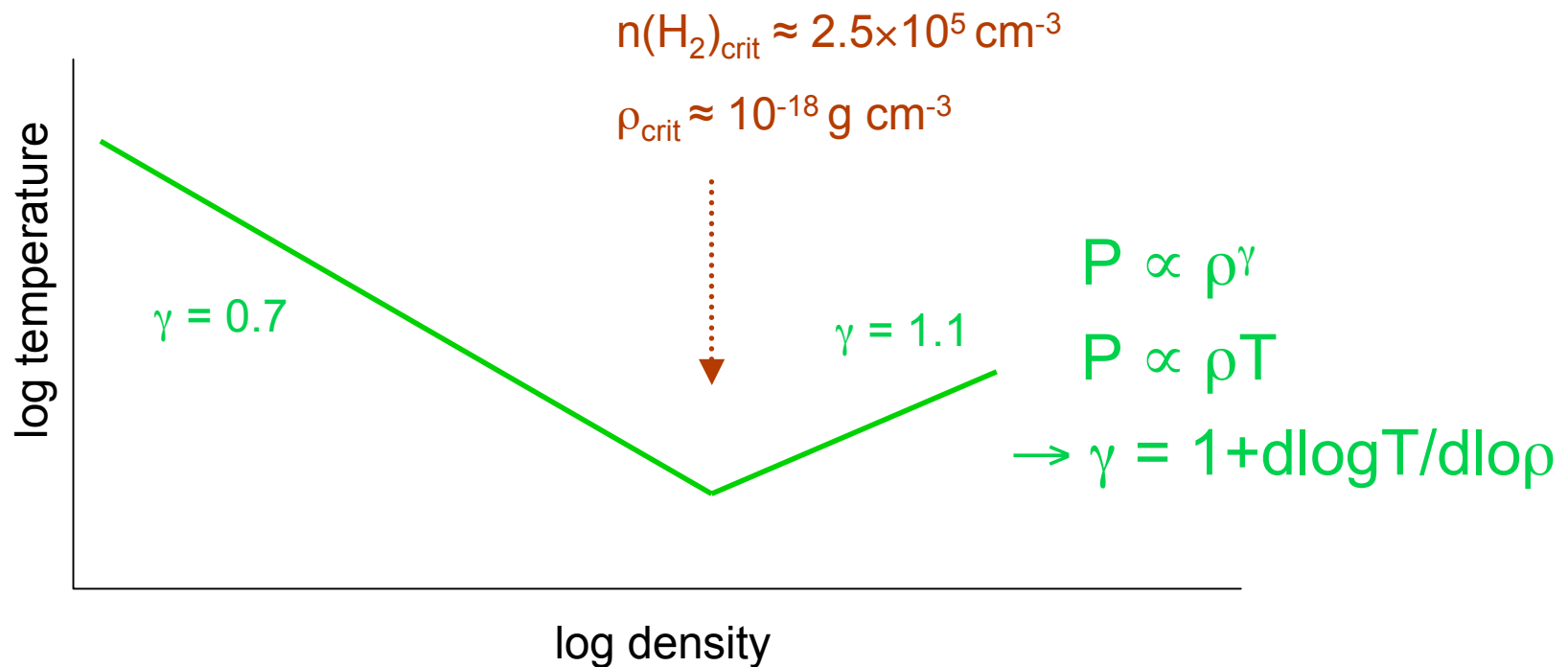
- $\gamma > 1$: \rightarrow *small* density excursion for given pressure
 \rightarrow $\langle M_{\text{jeans}} \rangle$ is large
 \rightarrow only few and massive clumps exceed M_{jeans}

Implications

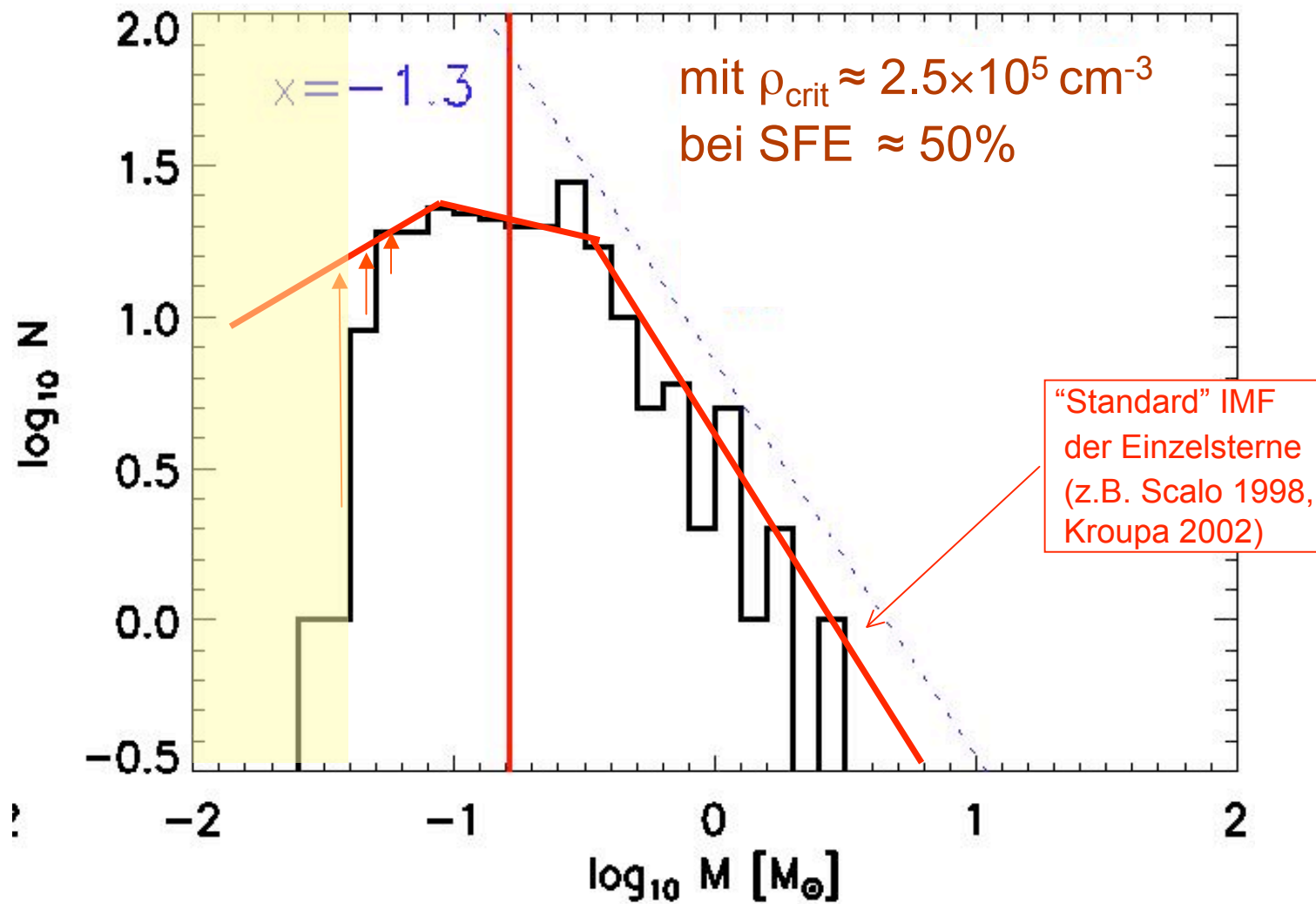
- degree of fragmentation depends on *EOS!*
- polytropic EOS: $p \propto \rho^\gamma$
- $\gamma < 1$: dense cluster of low-mass stars
- $\gamma > 1$: isolated high-mass stars
 - (see Li, Klessen, & Mac Low 2003, ApJ, 592, 975; Kawachi & Hanawa 1998; Larson 2003; also Jappsen, Klessen, Larson, Li, Mac Low, 2005, 435, 611)
- implications for extreme environmental conditions
 - expect Pop III stars to be massive and form in isolation
 - expect IMF variations in warm & dusty starburst regions
 - (Spaans & Silk 2005; Klessen, Spaans, & Jappsen 2005)
- Observational findings: isolated O stars in LMC (and M51)?
 - (Lamers et al. 2002, Massey 2002; see however, de Witt et al. 2005 for Galaxy)

More realistic EOS

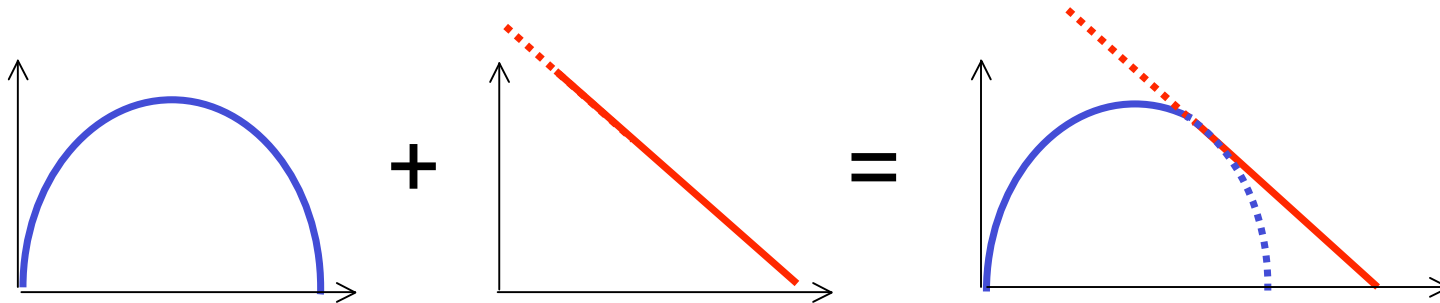
- But EOS depends on *chemical state*, on *balance* between *heating* and *cooling*



Massenspektrum



Plausibilitätsüberlegung...



- Überschallturbulenz ist skalenfreier Prozess

→ führt zu *POTENZGESETZ*

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

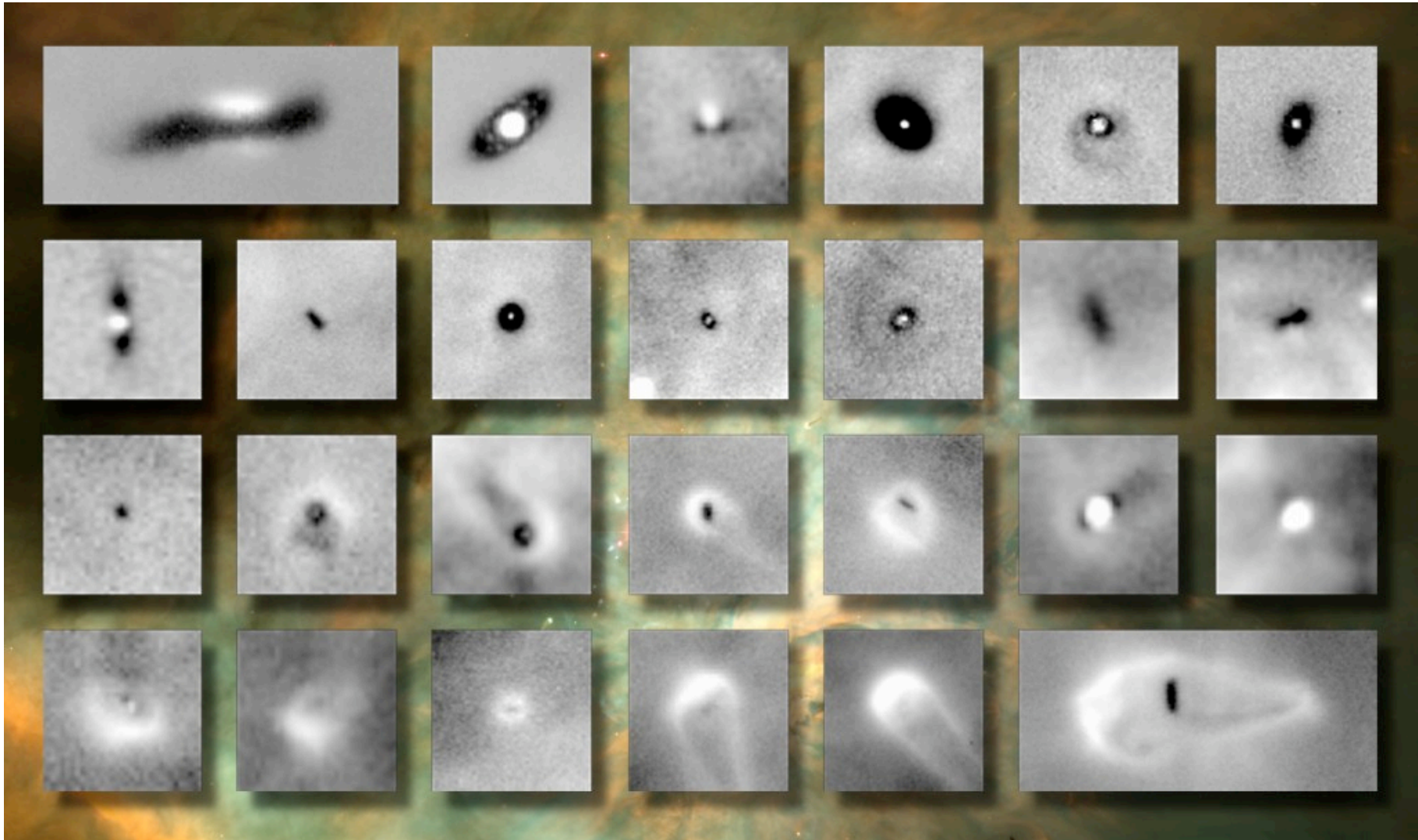
→ *GAUSS VERTEILUNG*

weitere Entwicklung

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?

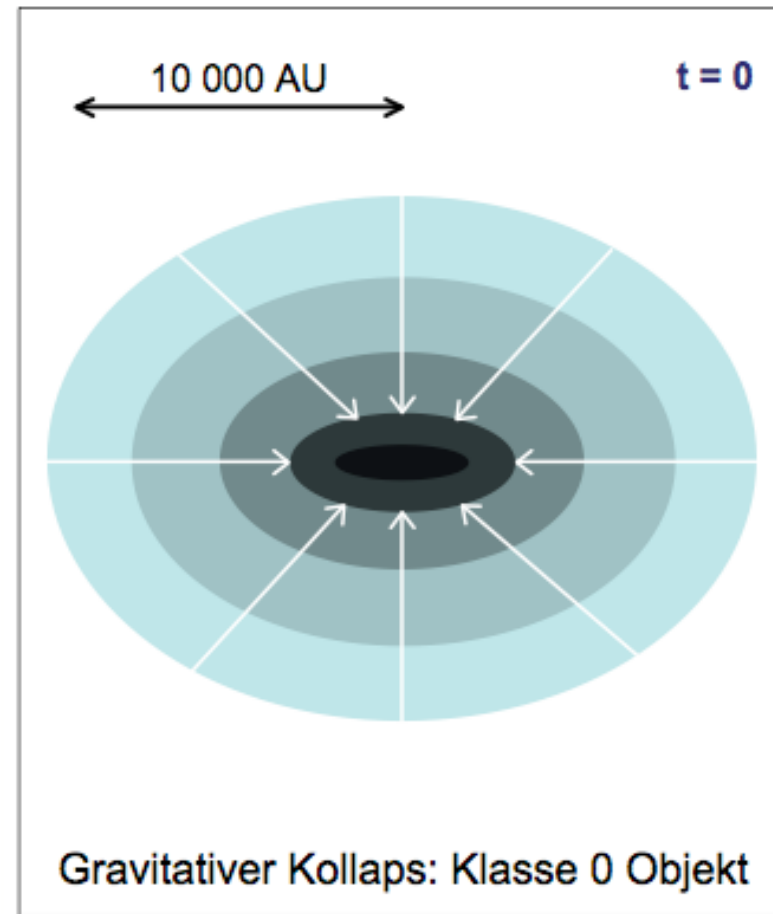
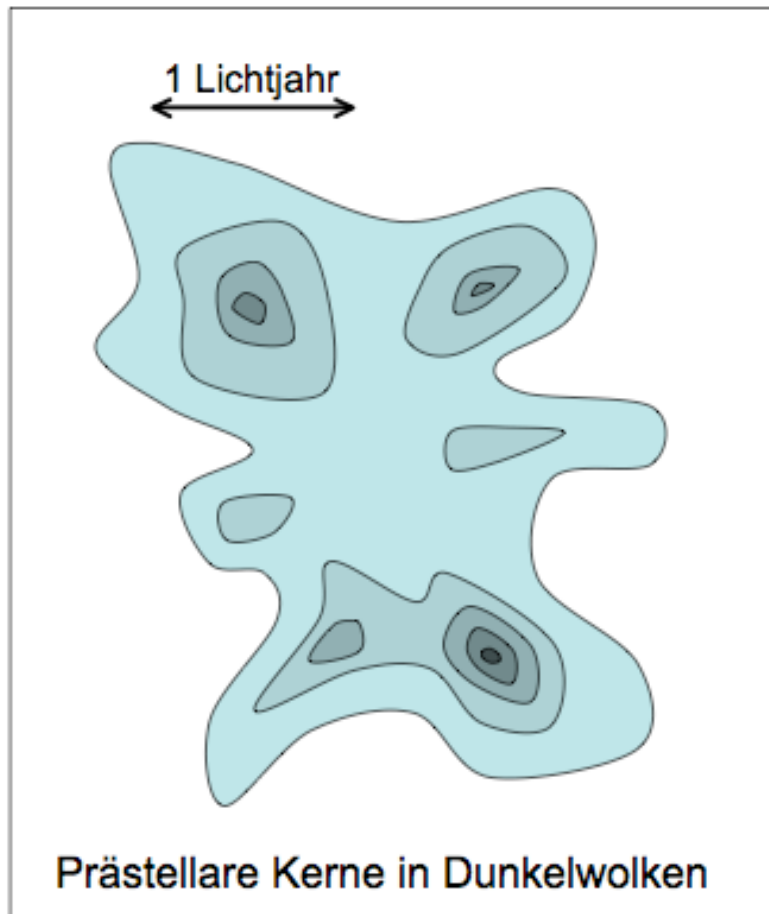
Weitere Details: Siluett-Scheiben in Orion



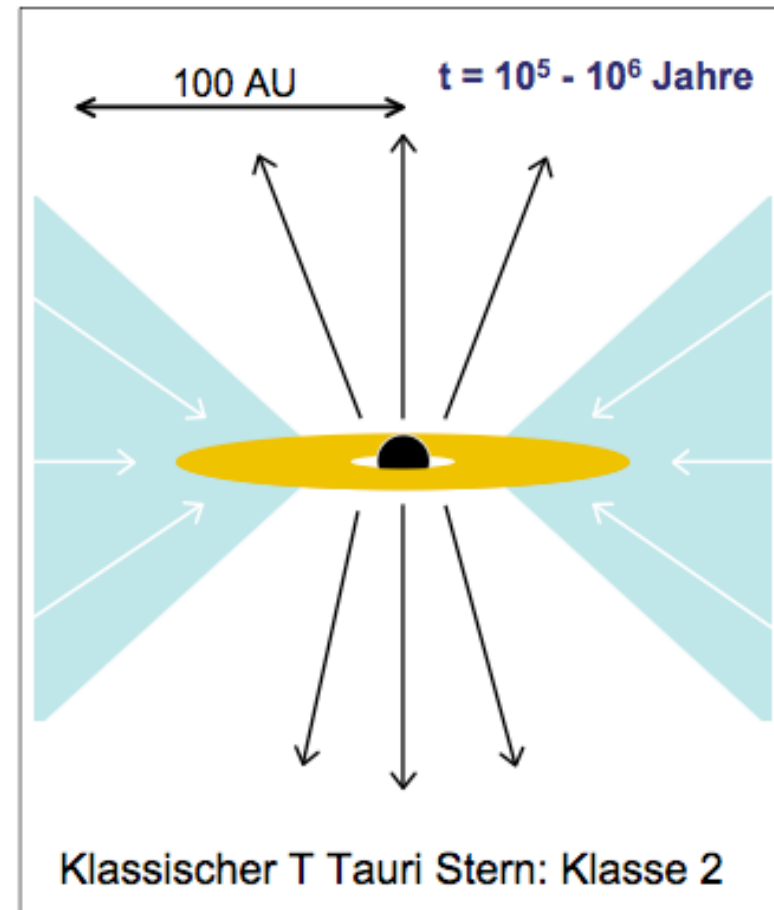
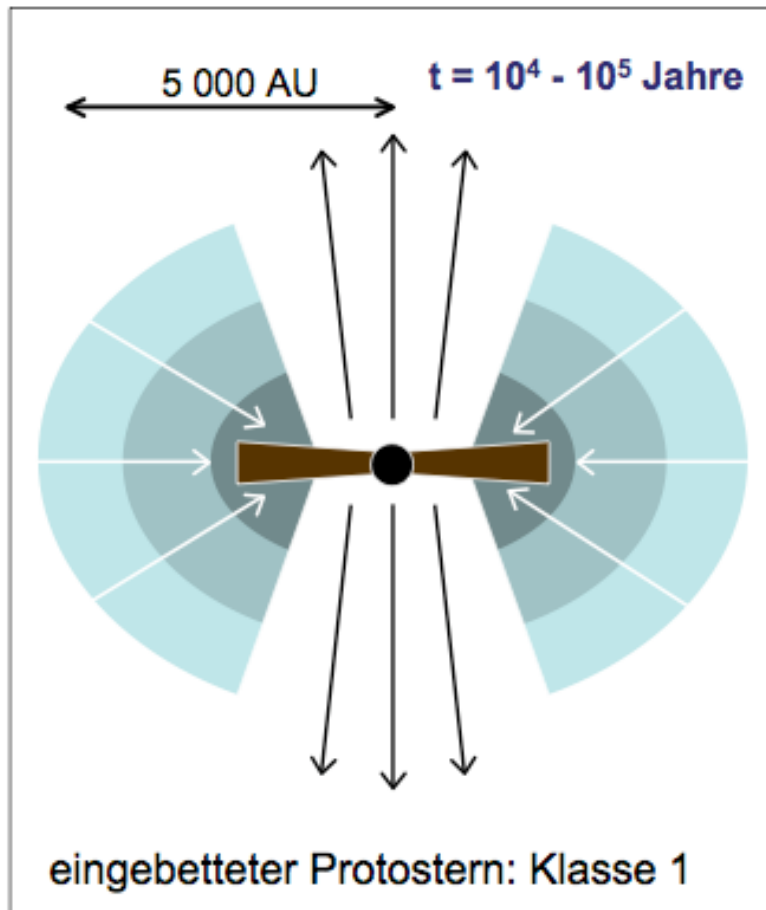
Protostellare Scheiben schatten die Photodissoziationsregion im Hintergrund ab. Jedes Bild ist 750 AU x 750 AU groß.

(Daten von Mark McCaughrean)

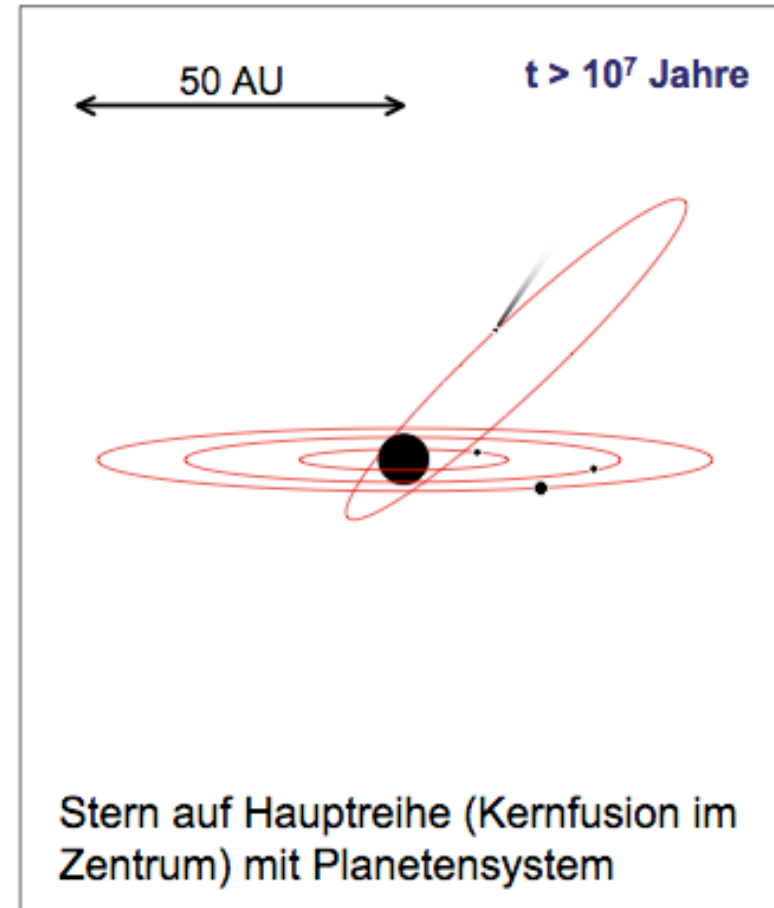
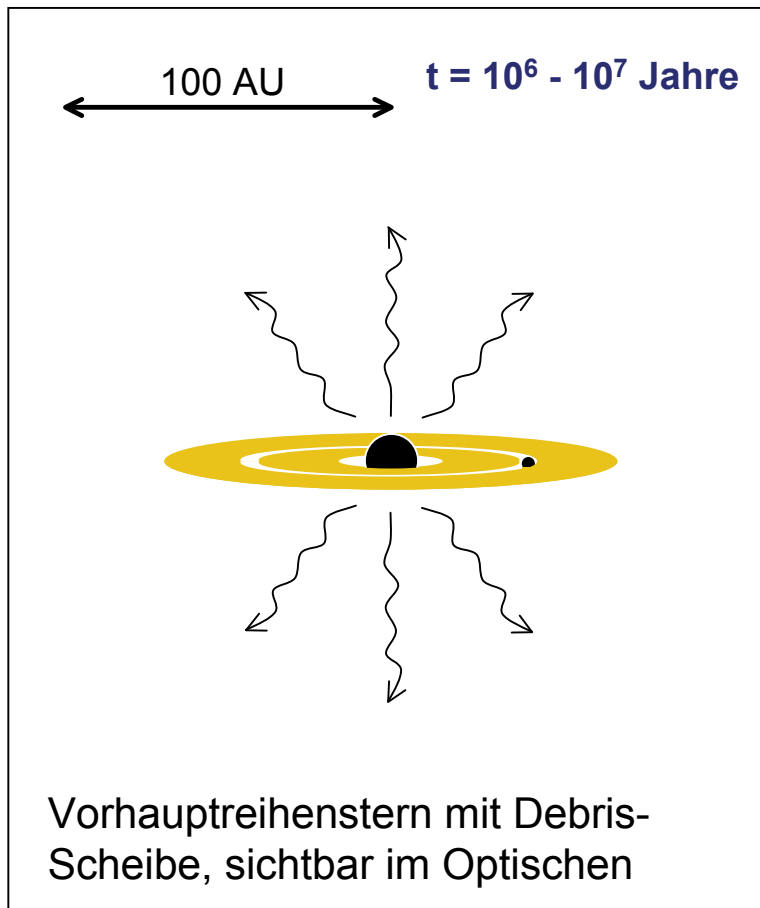
Stadien der Sternbildung 1



Stadien der Sternbildung 2



Stadien der Sternbildung 3



Zusammen- fassung

Sternentstehung

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

SE ist stochastischer Prozeß!!!

Ausblick

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

Danke!