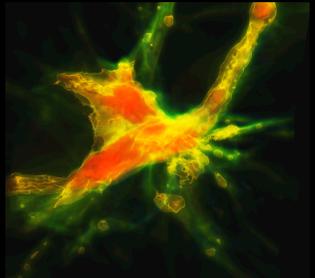
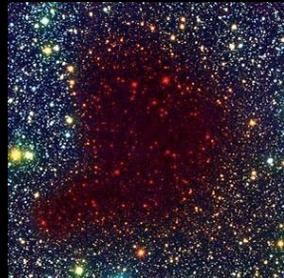
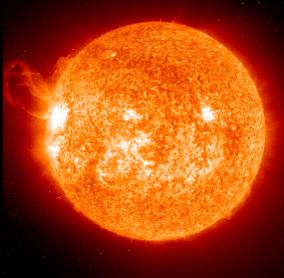


Die turbulente Geburt der Sterne



Ralf Klessen

Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg
Institut für Theoretische Astrophysik



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

BEISPIELE

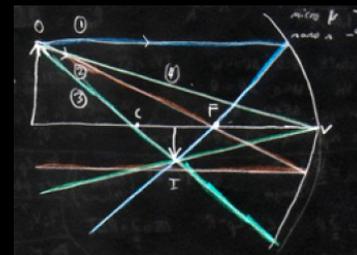
- Stellare Massenfunktion

Phänomenologie

Theorie

Übersicht

- Astronomische Skalen
- Sterne
- Phänomenologie der Sternbildung
- Theoretische Ansätze



Astronomische Skalen



1 m

100 m





1 km



10 km

Kreiskarte Baden-Württemberg 1:1 200 000



100 km

1000 km



10.000 km

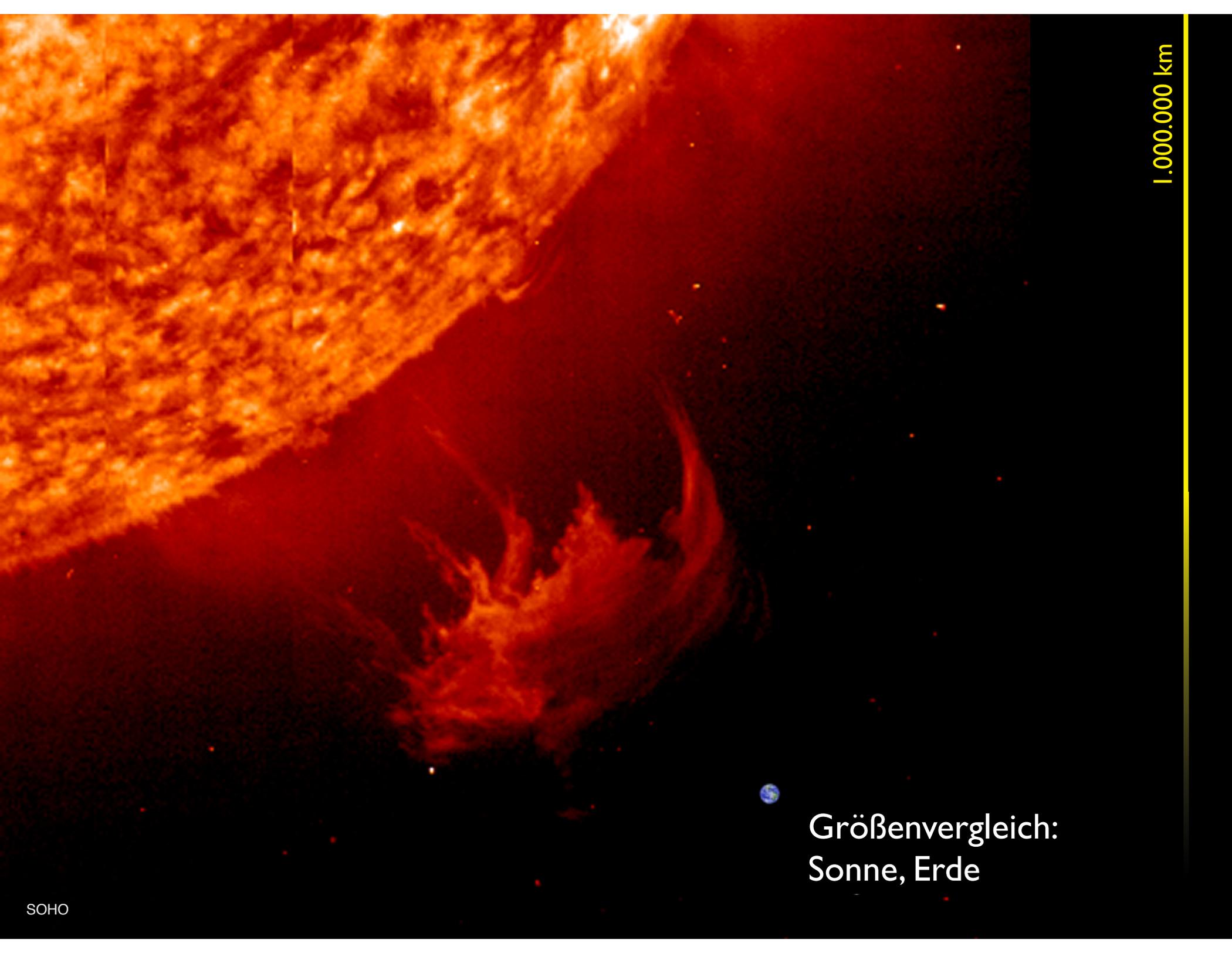


Rotating Earth as seen from Galileo
Spacecraft (during first flyby in late 1990)

100.000 km



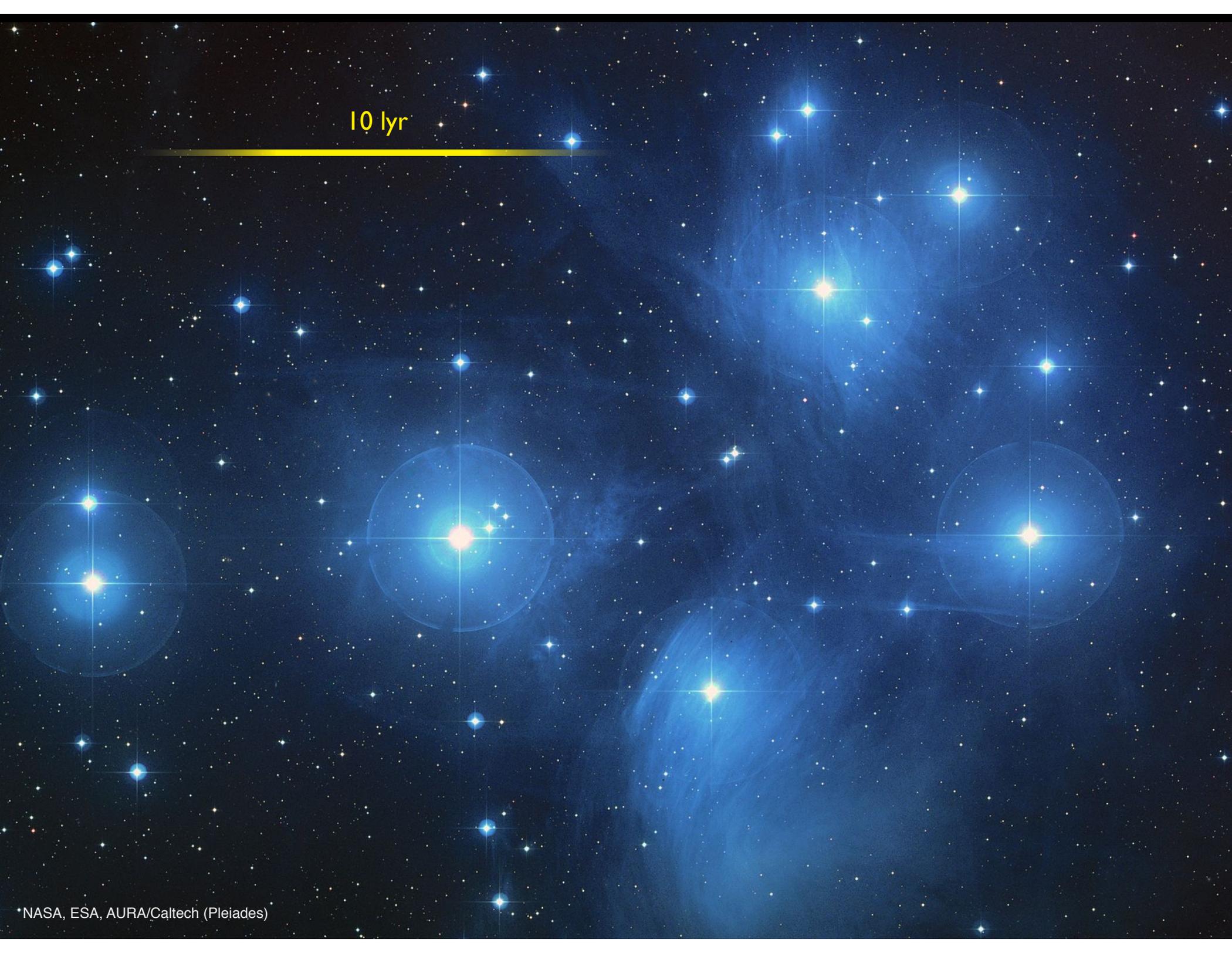
Moon and distant Earth from China's Chang'e-5 T1 lunar test flight)

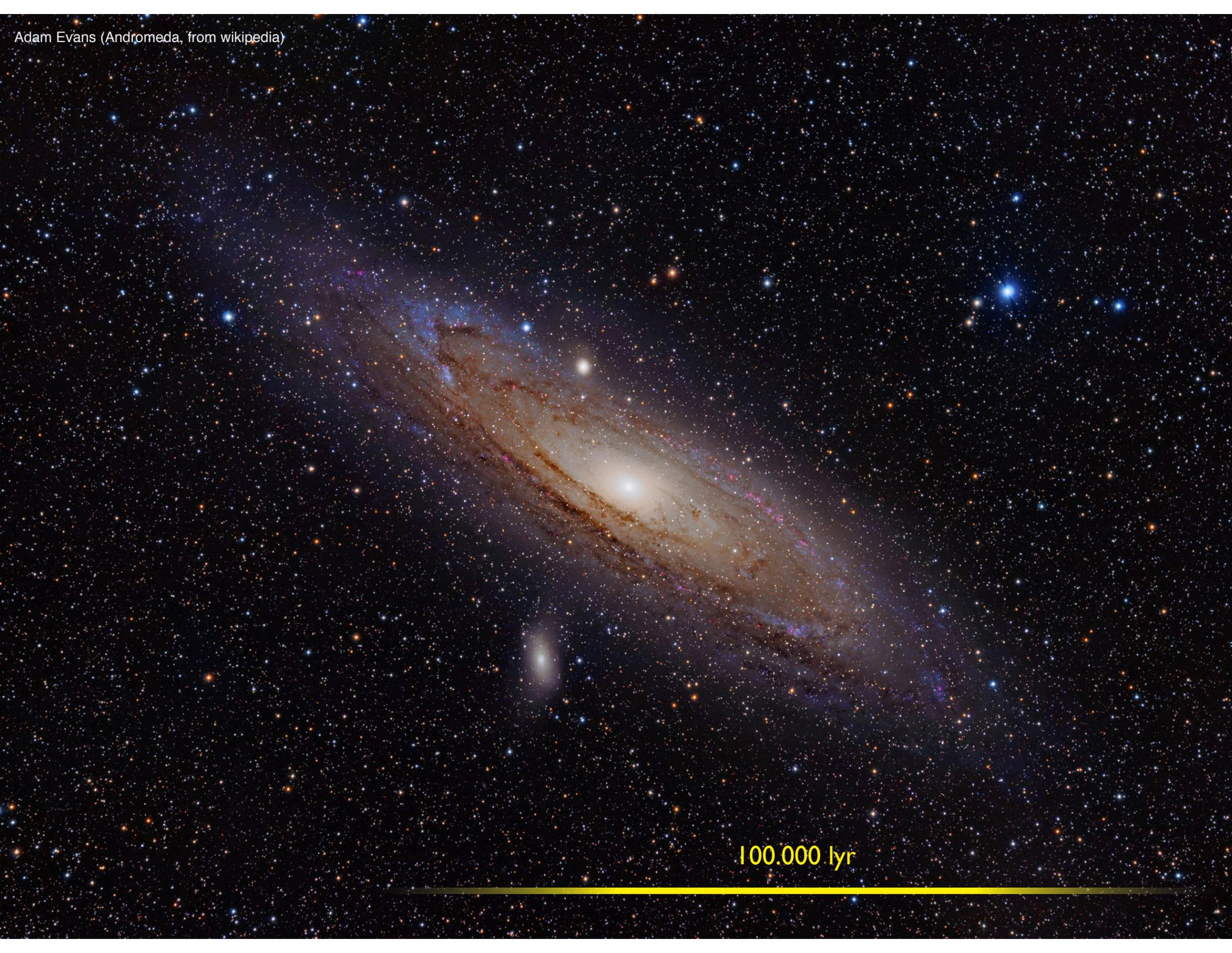


1.000.000 km

Größenvergleich:
Sonne, Erde

10 lyr



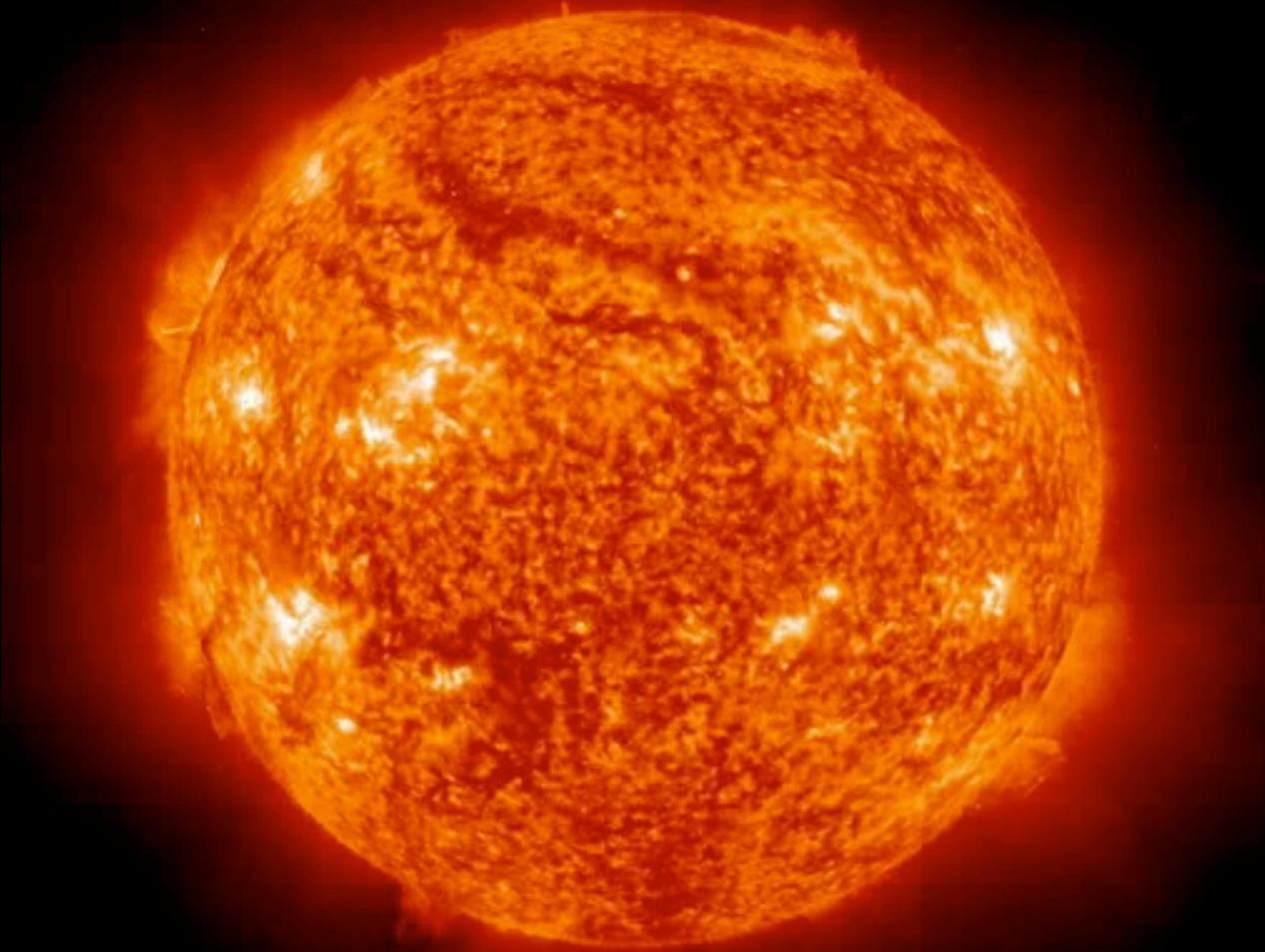


100.000 lyr



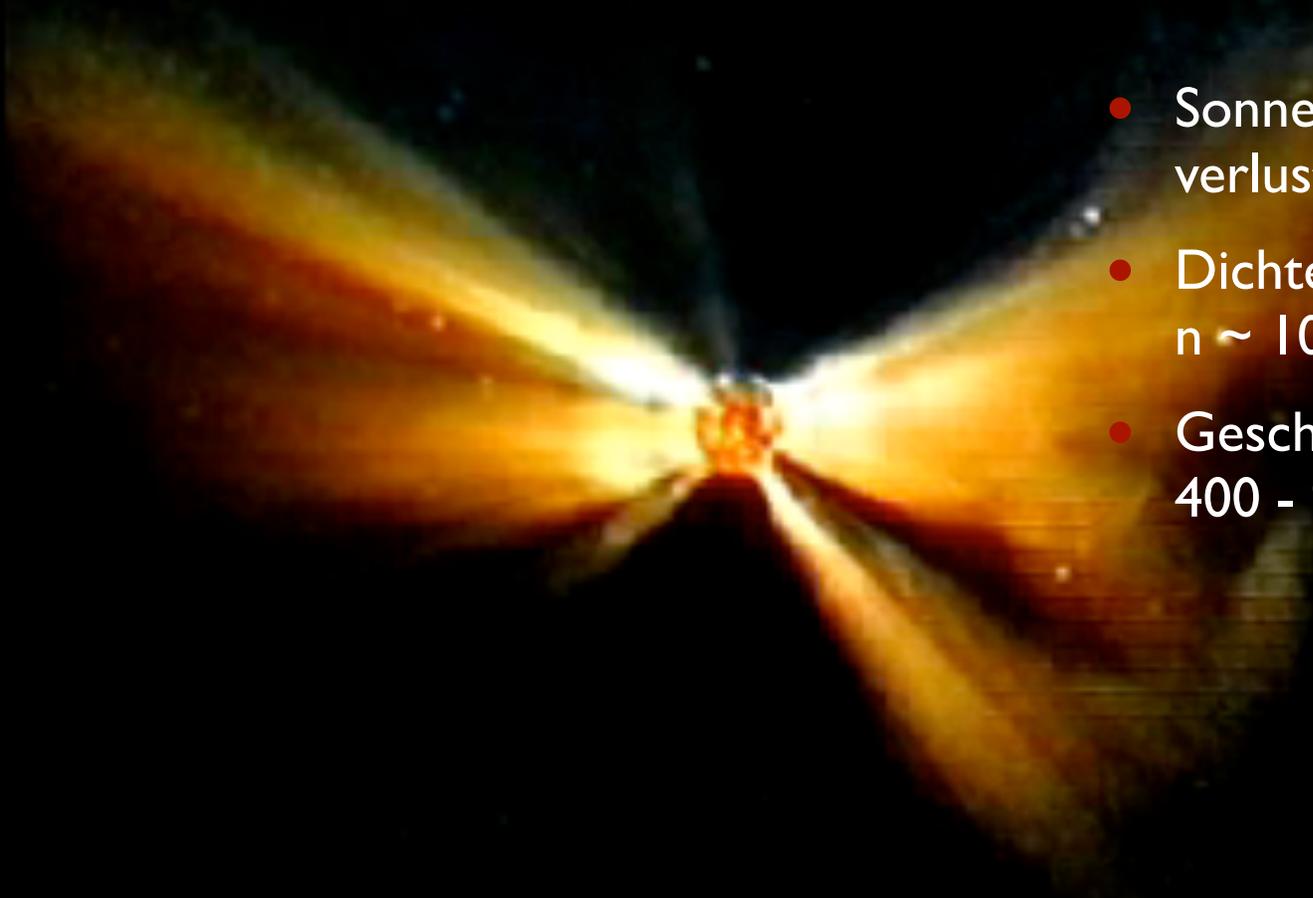
Sterne

Unsere Sonne zeigt Phasen starker Aktivität



- Sonnenwind: Massenverlust von $\sim 10^9$ kg/s
- Dichte in Erdnähe $n \sim 10^6$ Teilchen cm^{-3}
- Geschwindigkeit 400 - 900 km s^{-1}

Unsere Sonne zeigt Phasen starker Aktivität



- Sonnenwind: Massenverlust von $\sim 10^9$ kg/s
- Dichte in Erdnähe $n \sim 10^6$ Teilchen cm^{-3}
- Geschwindigkeit $400 - 900$ km s^{-1}

Unsere Sonne zeigt Phasen starker Aktivität

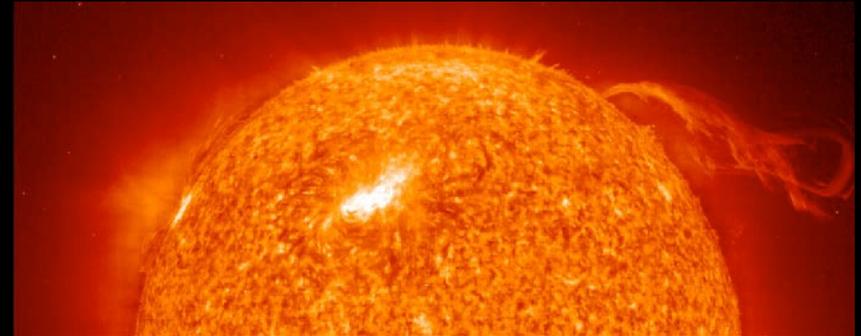


- Sonnenwind erzeugt Polarlichter in Erdatmosphäre
- rot: Stickstoff
- grün: Sauerstoff

Sterne: die Sonne

Eigenschaften der Sterne
(Stellare Zustandsgrößen):

Unsere Sonne ☉ als Referenzstern



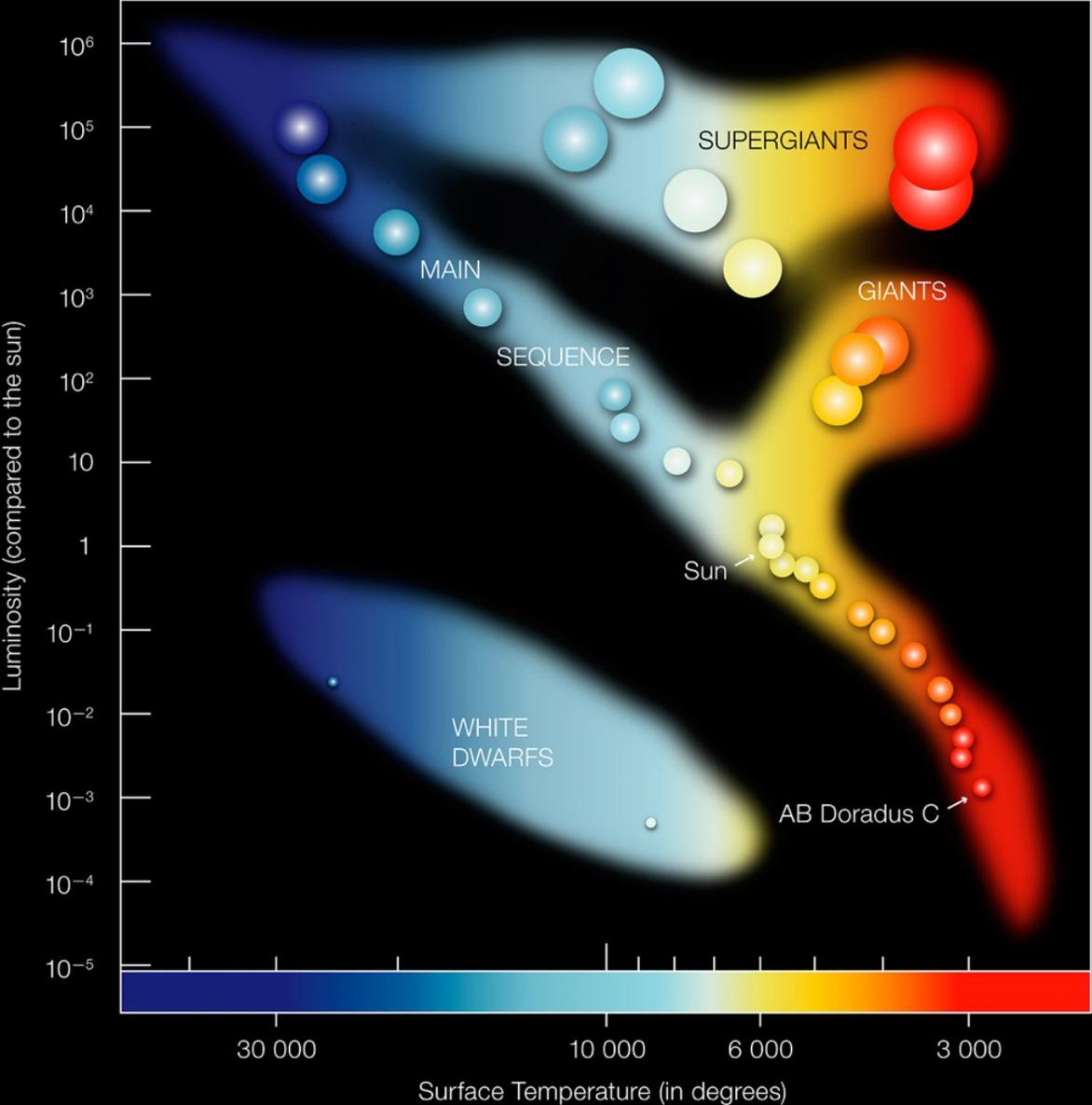
Radius	R_{\odot}	696 000 km
Masse	M_{\odot}	$1,989 \times 10^{30}$ kg
Leuchtkraft	L_{\odot}	$3,86 \times 10^{26}$ W
effektive Temperatur T_{eff}	5800 K	(Oberfläche)
Zentraltemperatur	T_{zentral}	15×10^6 K
Alter	t_{\odot}	4.5×10^9 a

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: systematische Einteilung

Helligkeit / Leuchtkraft



Hertzsprung-Russell Diagramm

Farbe / Temperatur

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

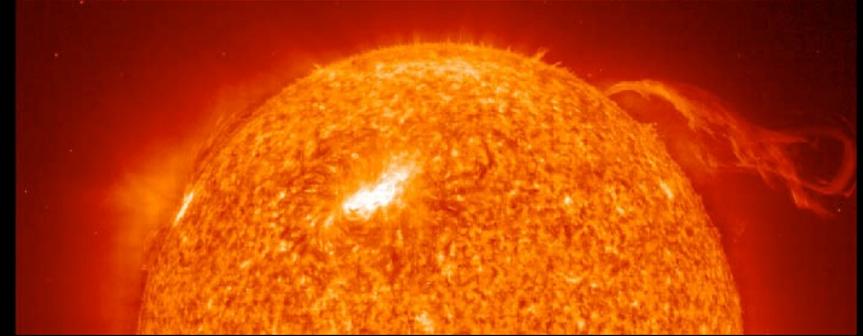
$$n^* \approx 10^4 \text{ pc}^{-3}$$

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

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: $\approx 2 M_{\odot} / \text{Jahr}$

Skalen:

Milchstraße

$$\varnothing \approx 30 \text{ kpc} \approx 10^{21} \text{ m} \approx 100.000 \text{ Lichtjahre}$$

Sonnensystem (Pluto-Bahn)

$$\varnothing \approx 80 \text{ AU} \approx 10^{13} \text{ m} \approx 11 \text{ Lichtstunden}$$

Erdbahn

$$\varnothing \approx 2 \text{ AU} \approx 3 \times 10^{11} \text{ m} \approx 17 \text{ Lichtminuten}$$

Sonnendurchmesser

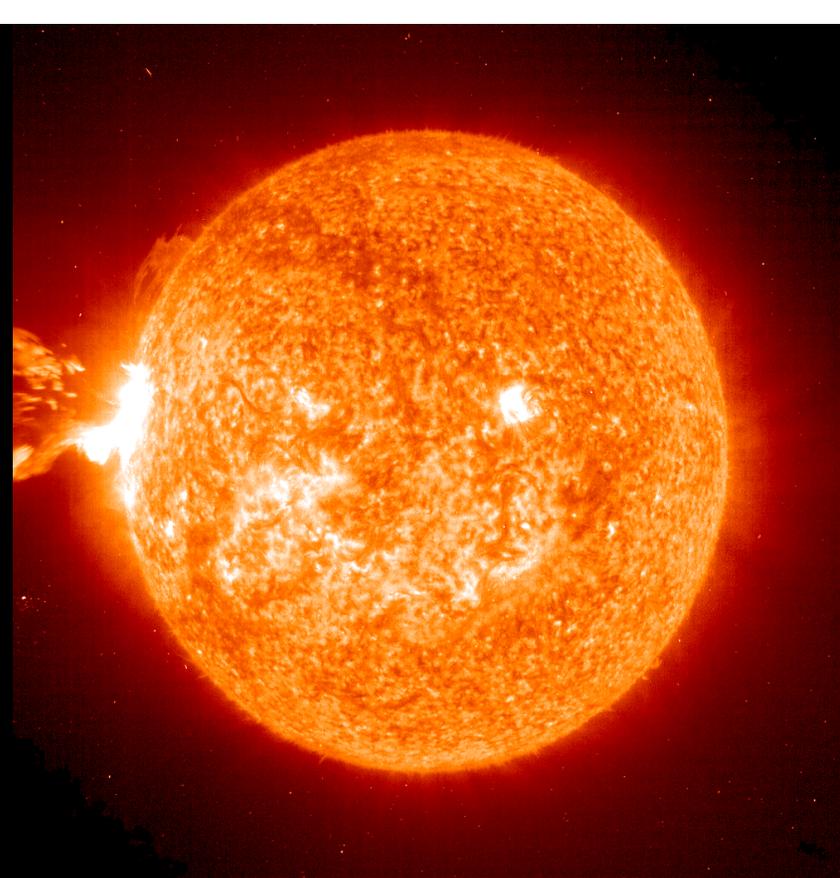
$$\varnothing \approx 1,4 \times 10^9 \text{ m}$$

Erddurchmesser

$$\varnothing \approx 1,3 \times 10^7 \text{ m}$$



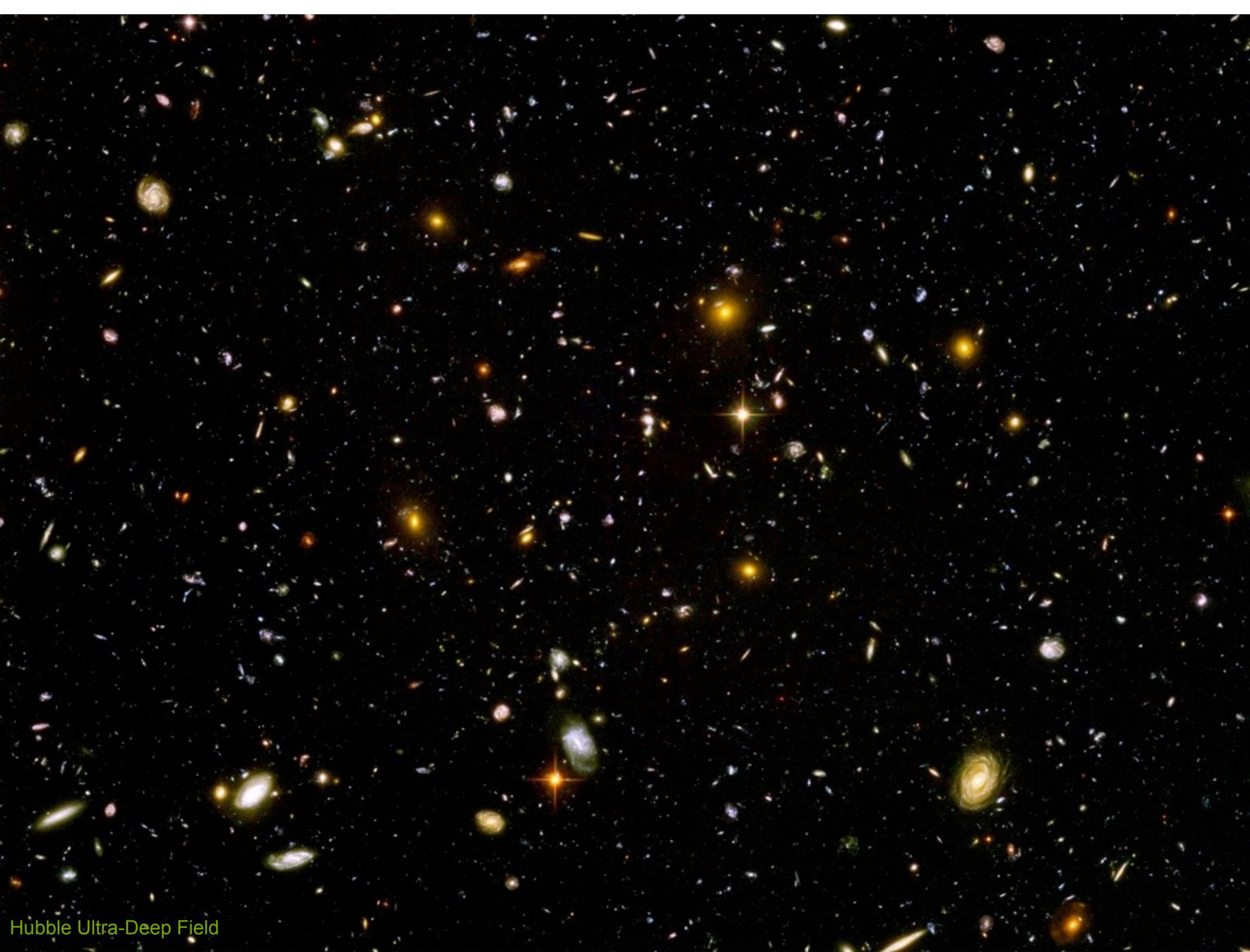
?



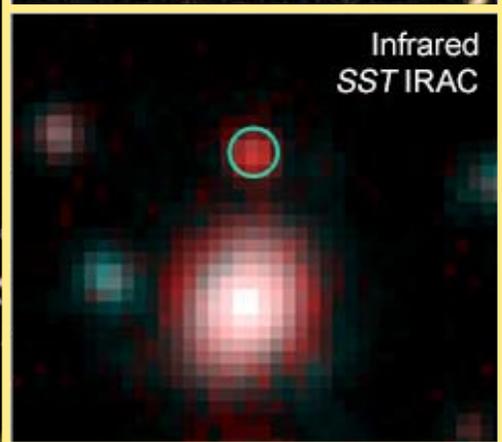
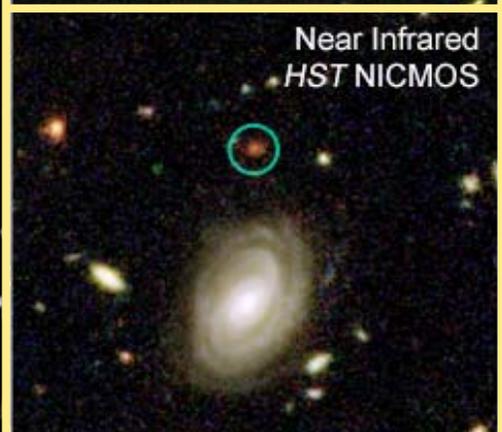
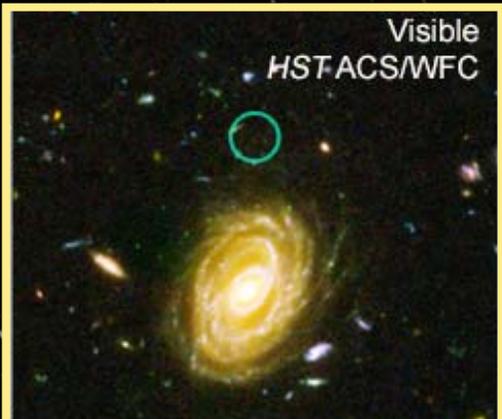
Sternentstehung

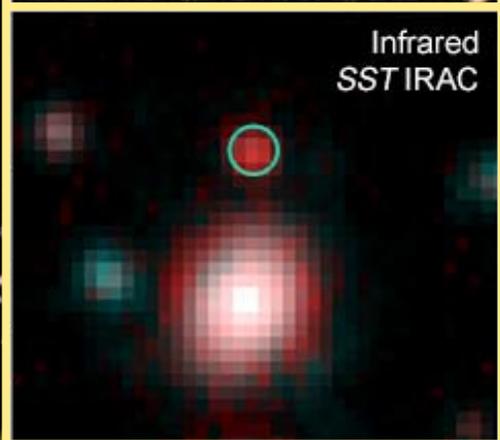
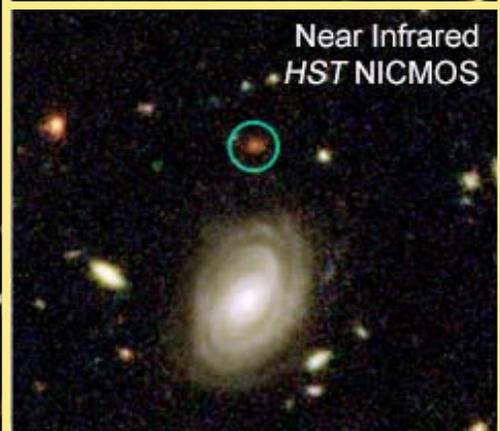
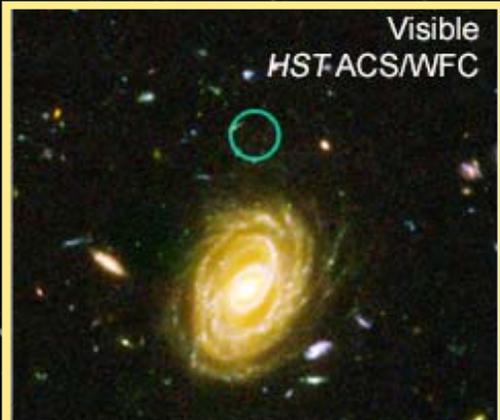
Fragen

- Wo und wann entstehen Sterne?
- Wie kann man Sternentstehung beobachten?
- Welche physikalischen Prozesse regulieren die Geburt der Sterne?



Hubble Ultra-Deep Field



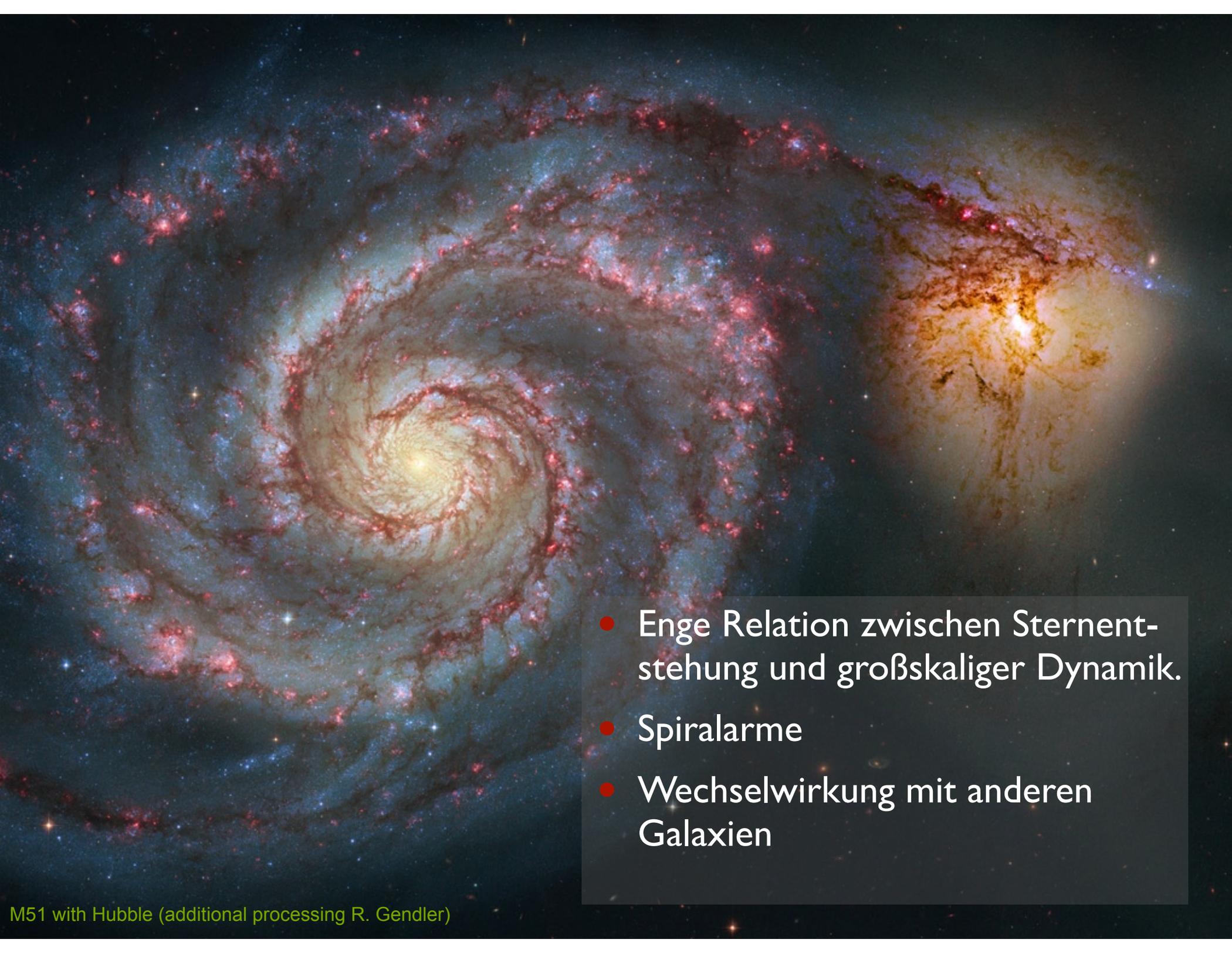


- Sternentstehung setzt fast unmittelbar nach dem Urknall ein.
- Sterne bilden sich in Galaxien.
- Die ersten Sterne sehen wir nicht, aber vielleicht die zweiten.





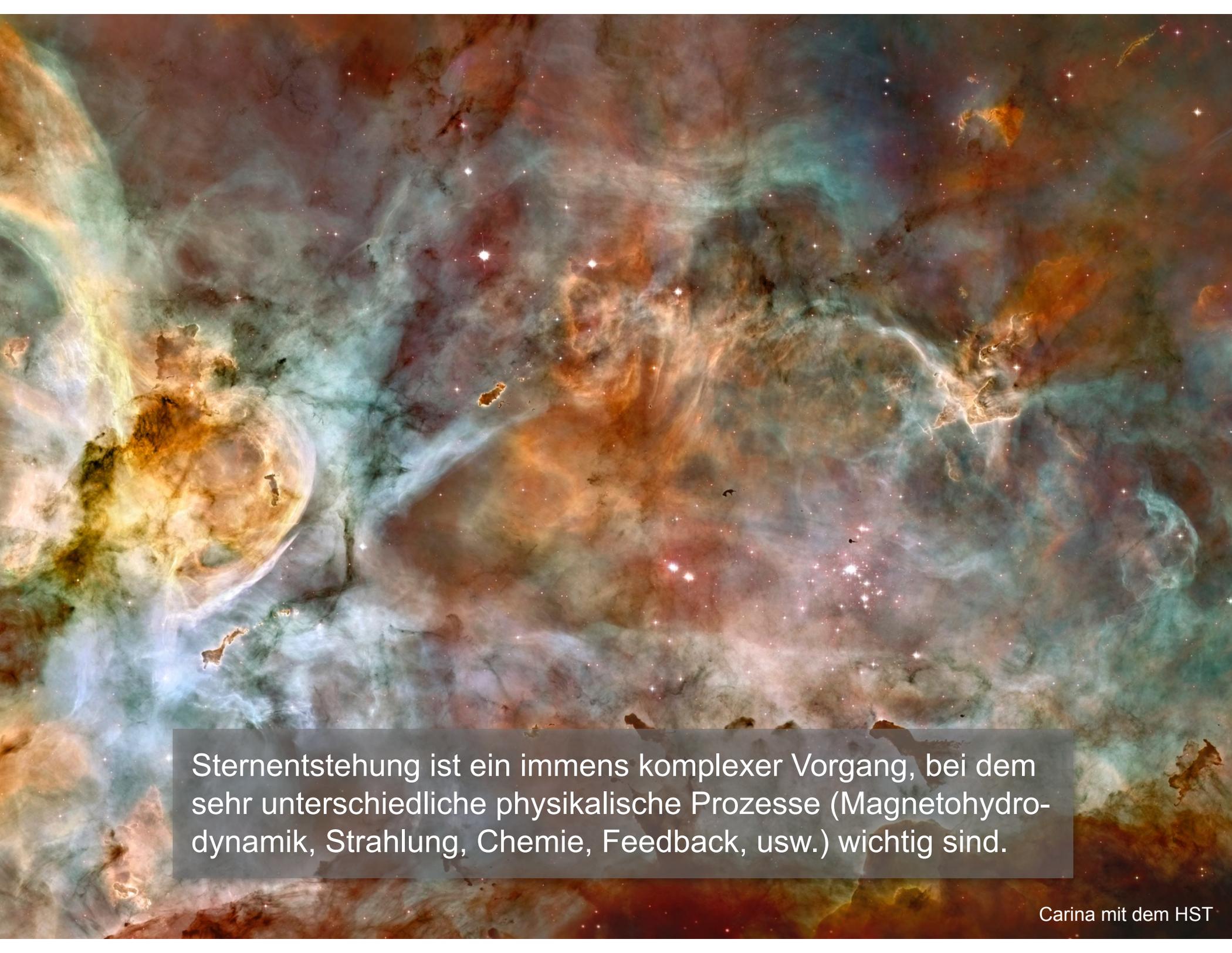
M51 with Hubble (additional processing R. Gendler)



- Enge Relation zwischen Sternentstehung und großskaliger Dynamik.
- Spiralarme
- Wechselwirkung mit anderen Galaxien



Carina mit dem HST



Sternentstehung ist ein immens komplexer Vorgang, bei dem sehr unterschiedliche physikalische Prozesse (Magnetohydrodynamik, Strahlung, Chemie, Feedback, usw.) wichtig sind.

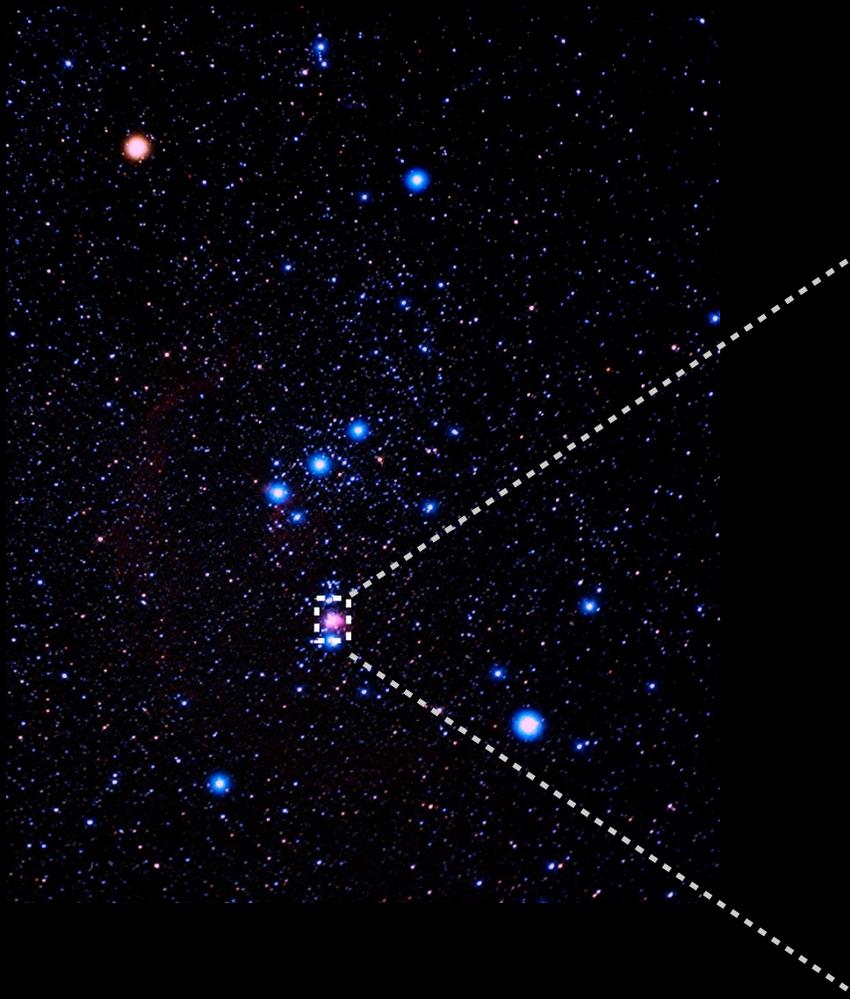


HH 901/902 in Carina mit dem HST

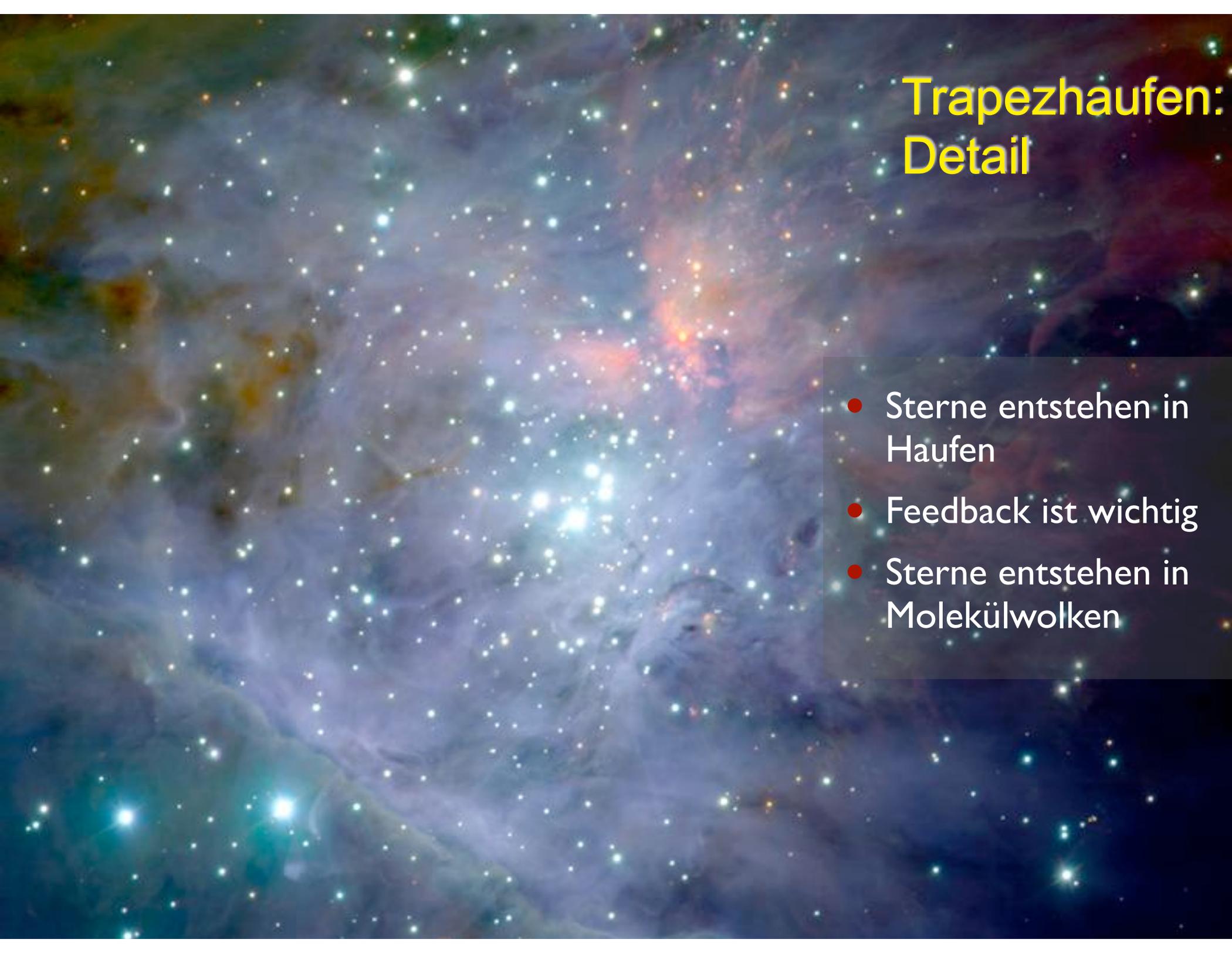
Lokales SE Gebiet: Trapezhaufen in Orion

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



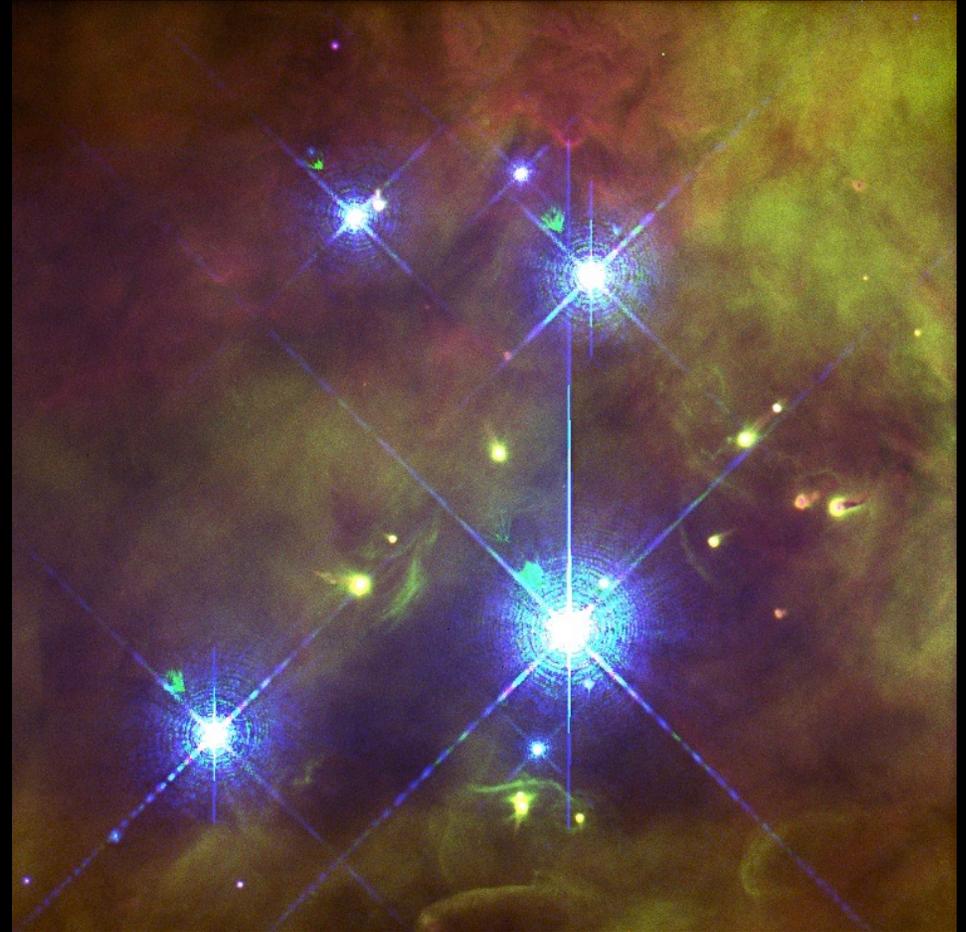
Trapezhaufen: Detail

- Sterne entstehen in Haufen
- Feedback ist wichtig
- Sterne entstehen in Molekülwolken

Trapezhaufen: Zentralgebiet

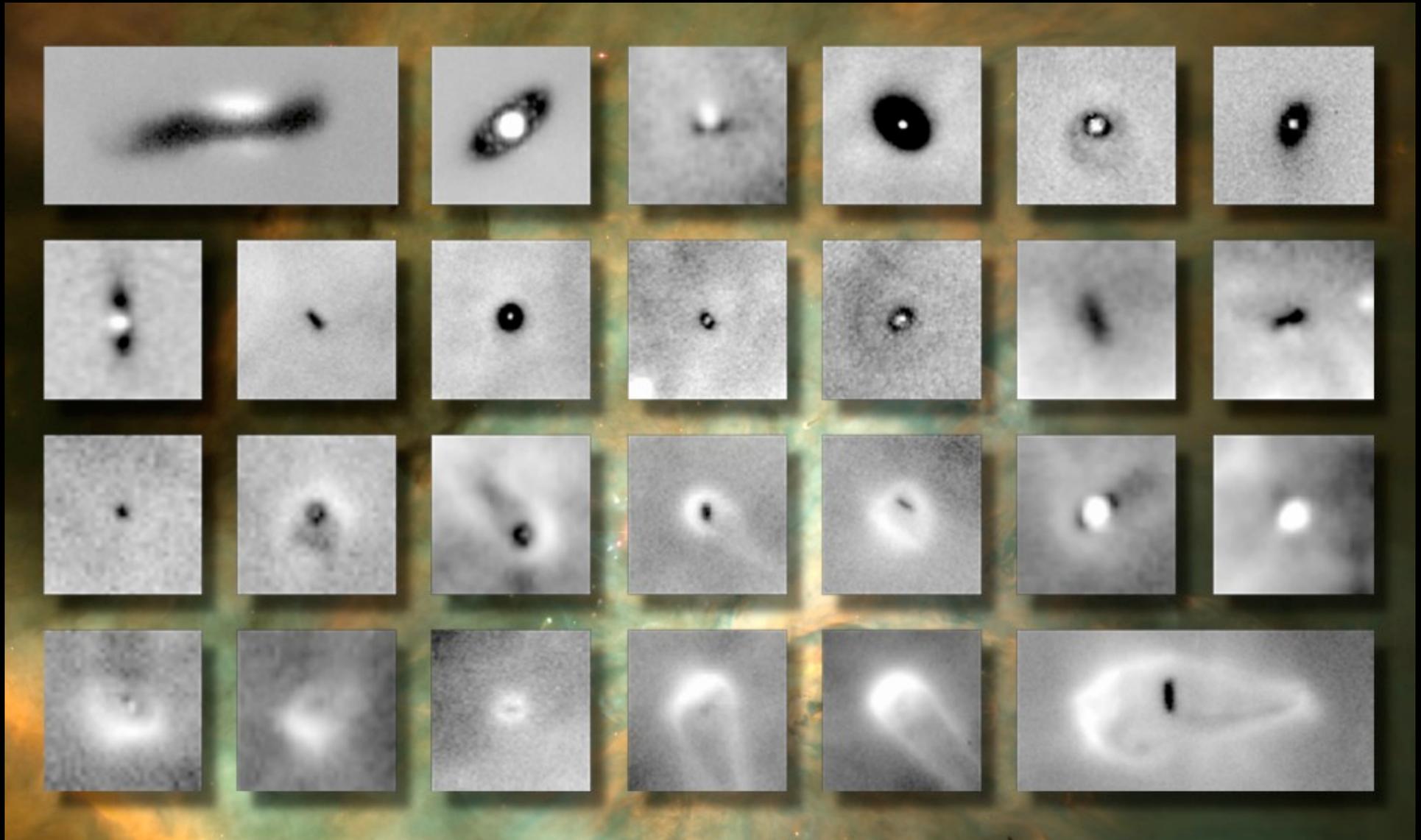


Der Großteil der ionisierenden Strahlung kommt vom Zentralstern **Theta 1C Orionis**



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)



Film vom American Museum of Natural History, San Diego Supercomputing Center, NASA,ESA

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

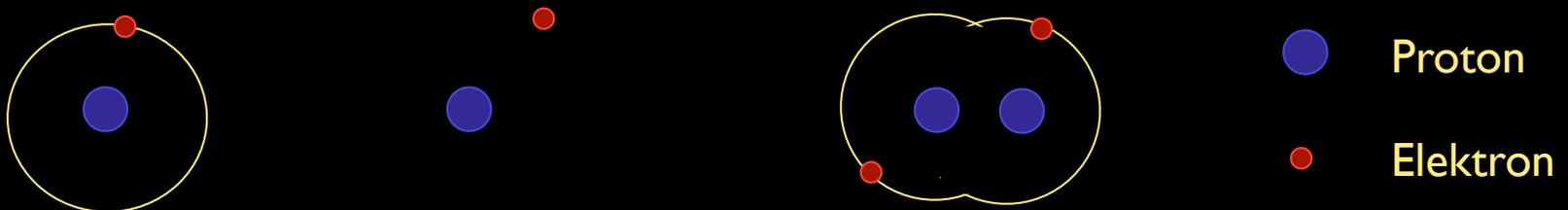
Die Dominanz von Wasserstoff legt eine Klassifizierung der Regionen des ISM gemäß des Zustands von H nahe:

Ionisierter atomarer Wasserstoff HII (H^+)
Neutraler atomarer Wasserstoff HI (H)
Molekularer Wasserstoff H₂



Die jeweiligen Regionen bestehen nahezu zu 100% aus der entsprechenden Komponente, wobei, die Grenzgebiete zwischen HII, H und H₂ sehr dünn sind.

Der größte Teil (ca. 80%) des ISM machen HI und HII-Gebiete niedriger Dichte aus. H₂ befindet sich in *Molekülwolken*, die oft von HII-Gebiete hoher Dichte begleitet werden. In der Milchstraße entstehen Sterne immer in Molekülwolken!



Phasen der ISM

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

Ionisierter atomarer Wasserstoff $\text{HII (H}^+)$
Neutraler atomarer Wasserstoff HI (H)
Molekularer Wasserstoff H_2



Ionisation
Phasenübergang



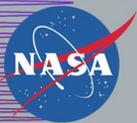
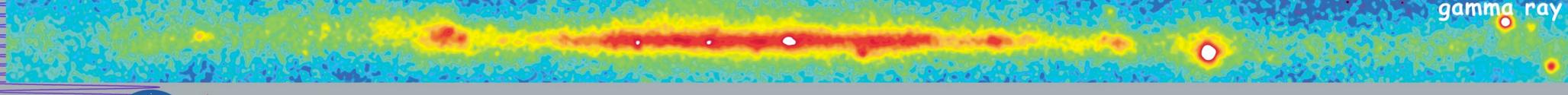
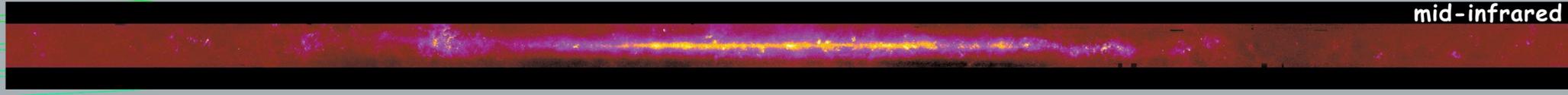
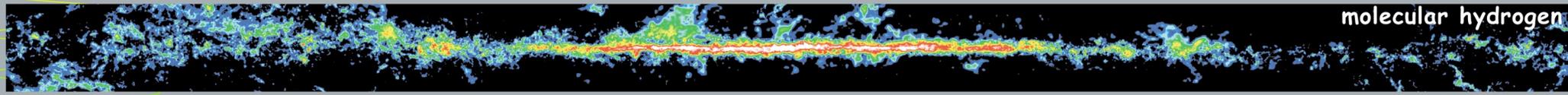
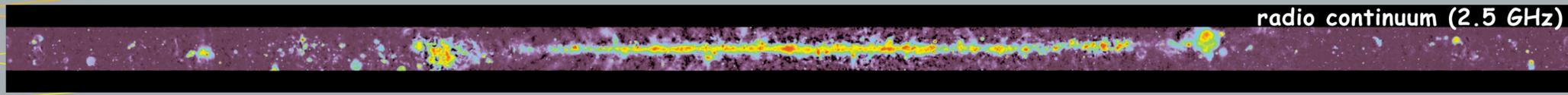
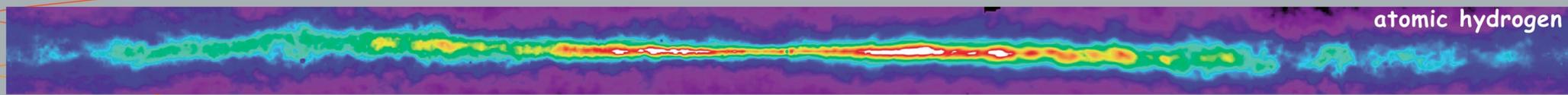
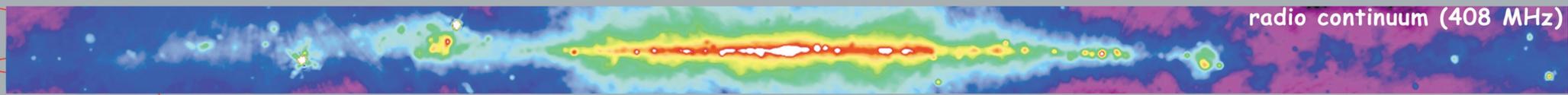
NGC 3324 (Hubble, NASA/ESA)

Wie beobachtet man SE?

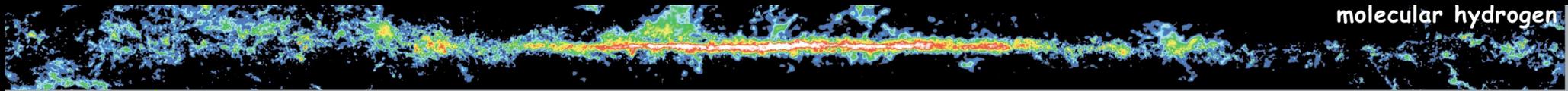
Unterschiedliche Wellenlängen liefern unterschiedliche Informationen.

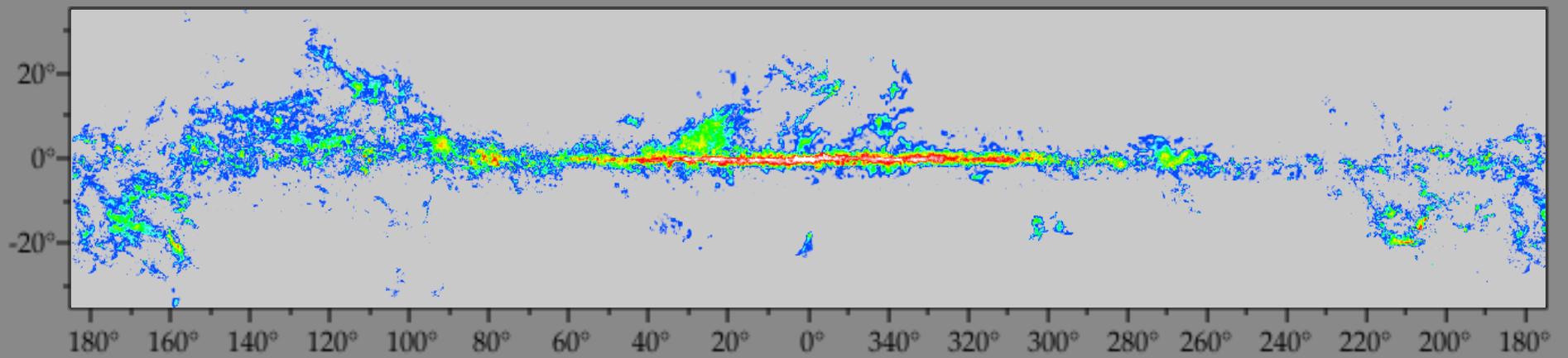
--> Astronomen beobachten das gesamte elektromagnetische Spektrum

- **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)

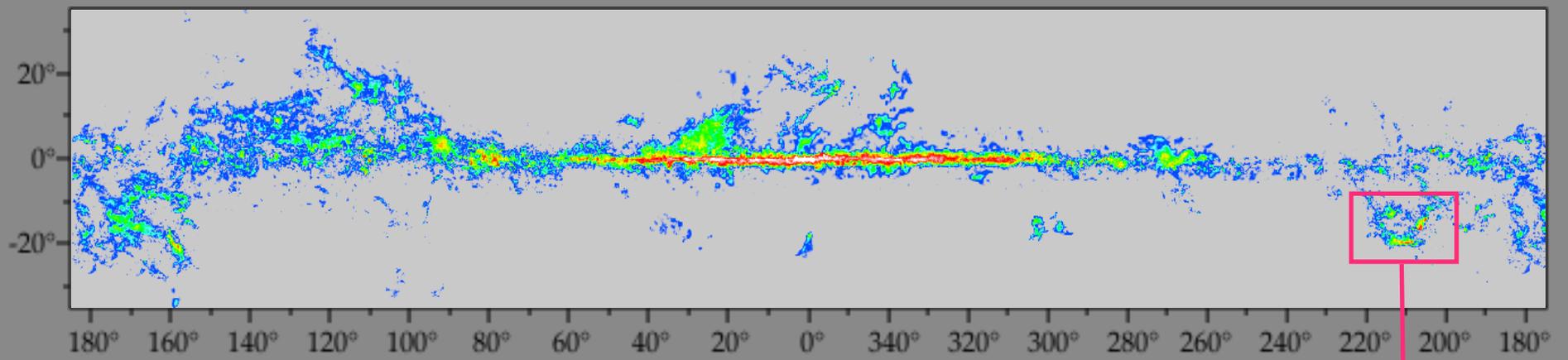


Multiwavelength Milky Way

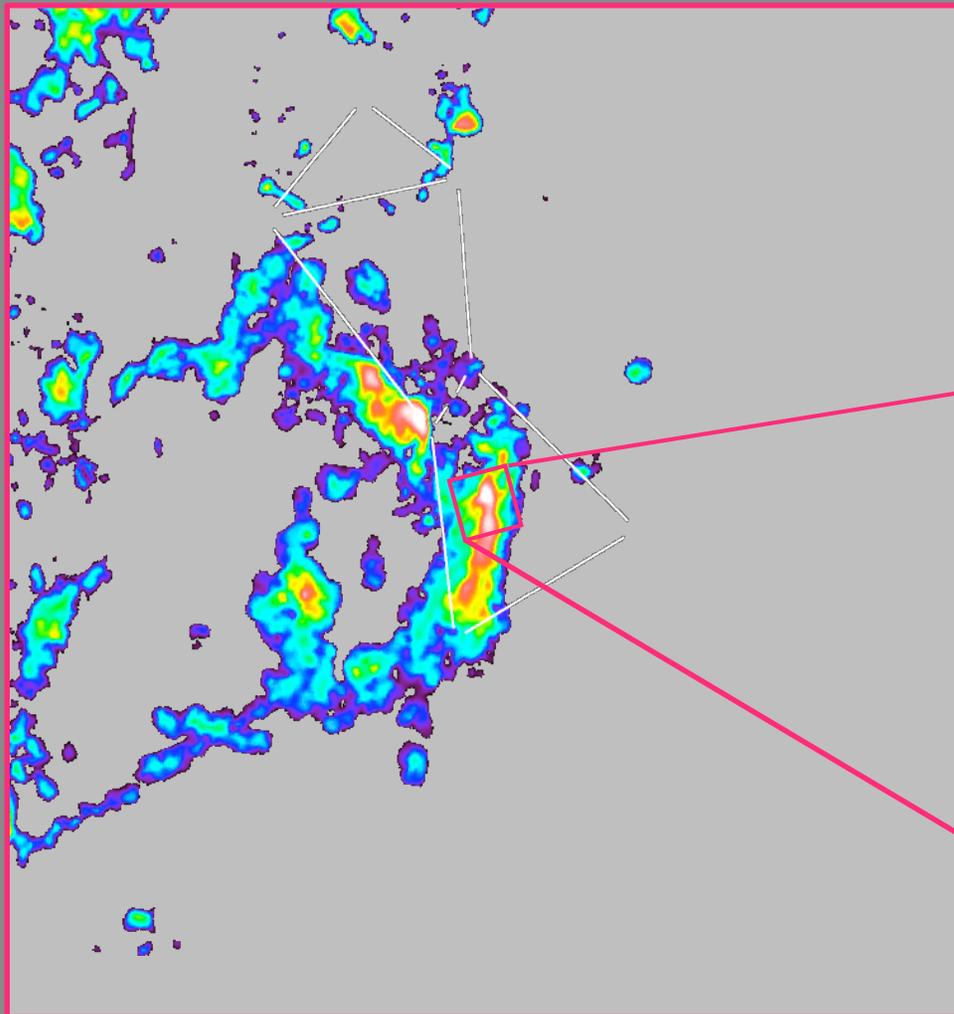




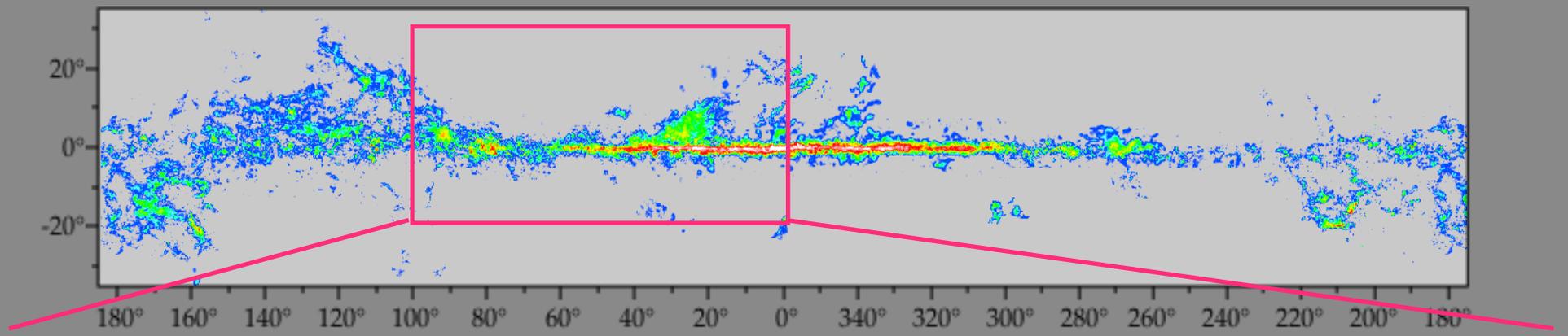
Verteilung des Molekularen
Wasserstoffgases in der Milchstraße

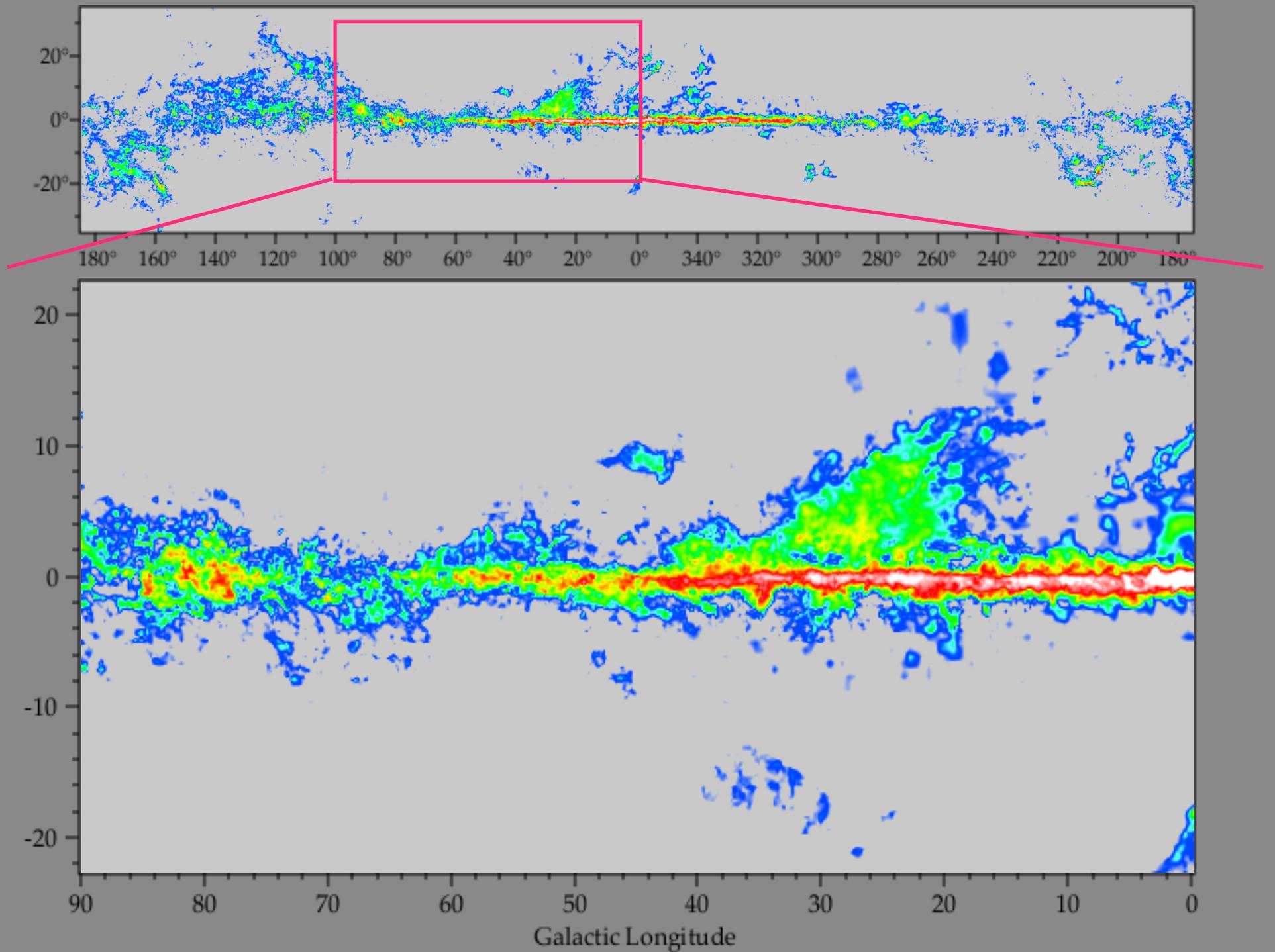


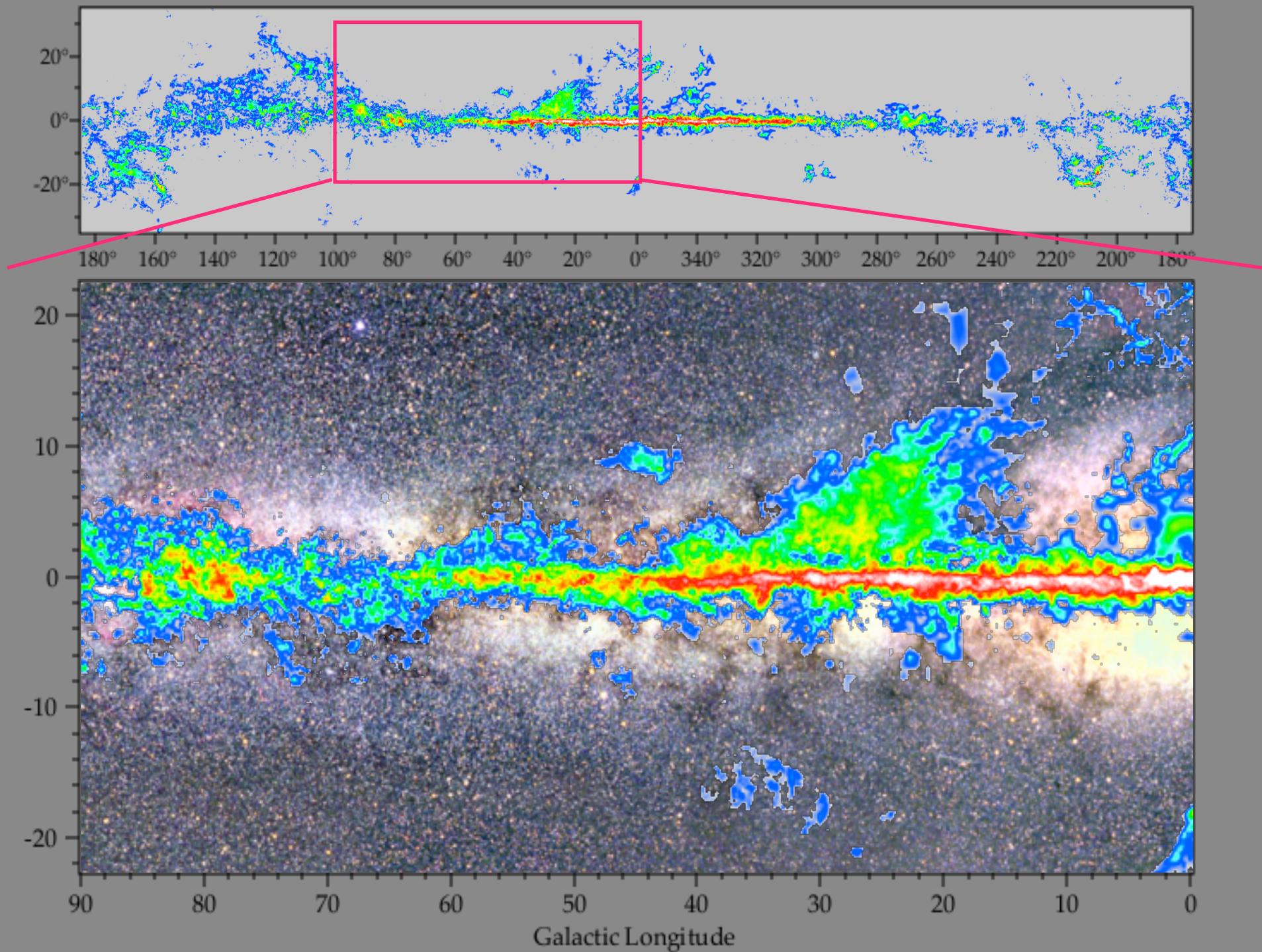
Orion

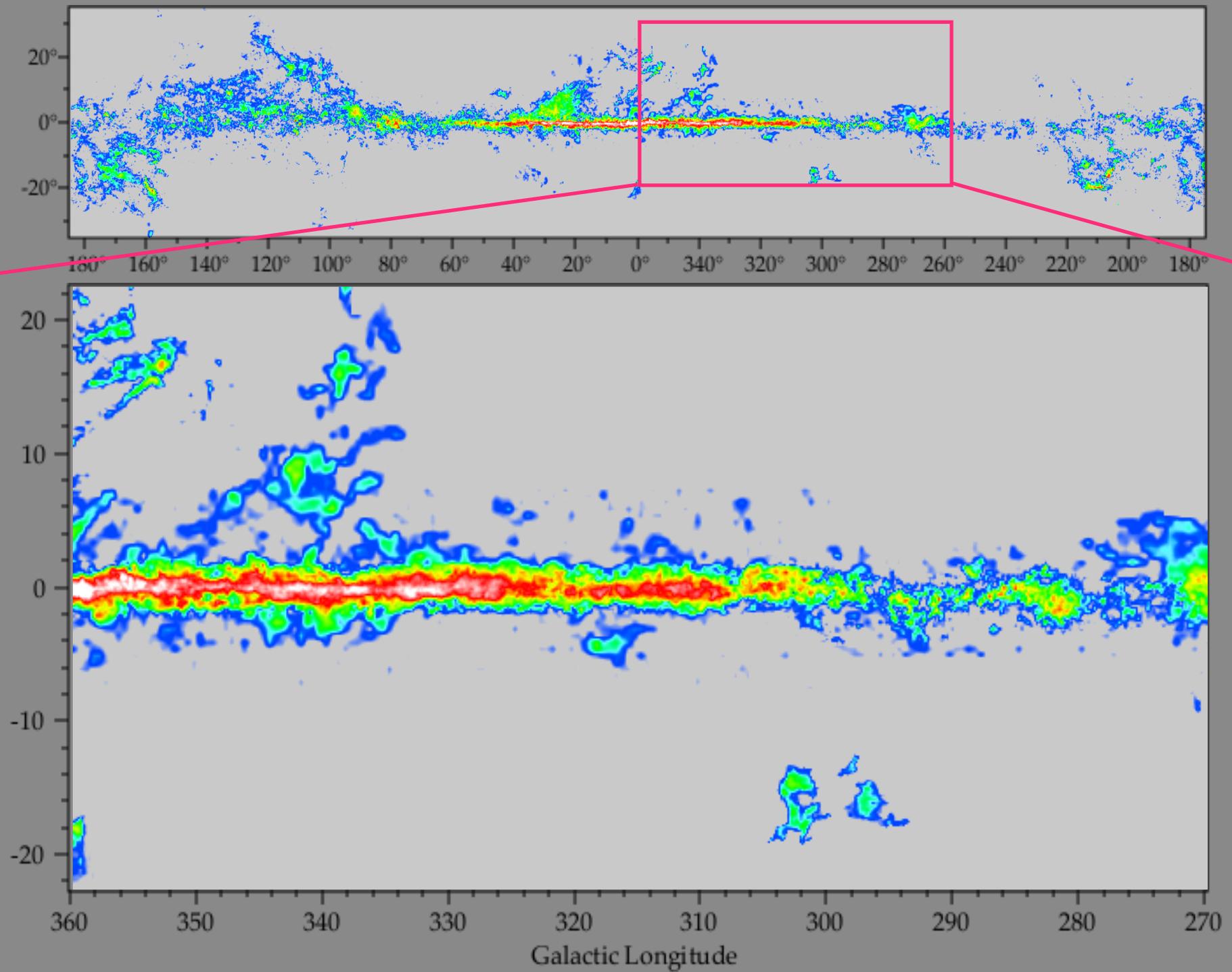


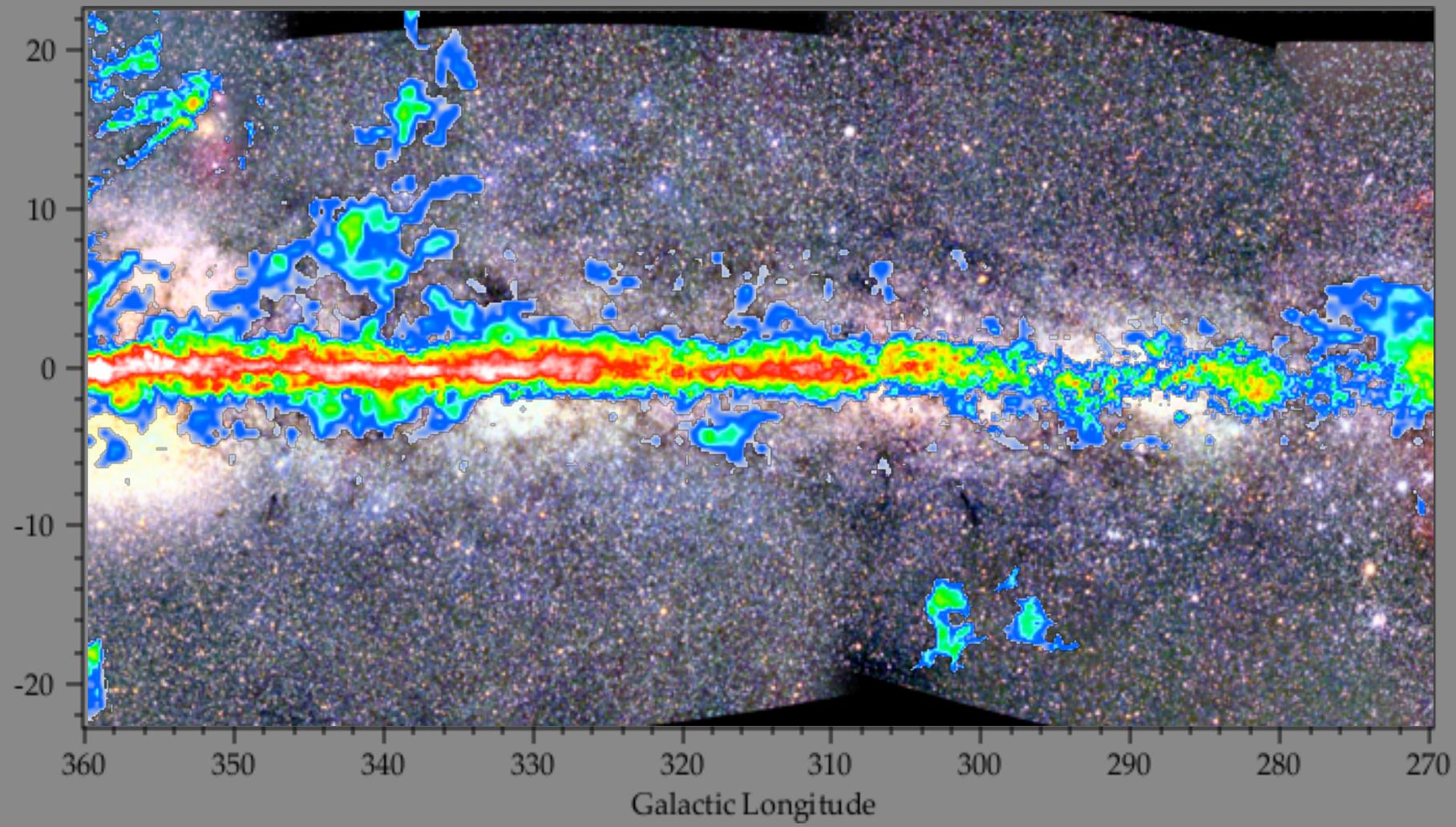
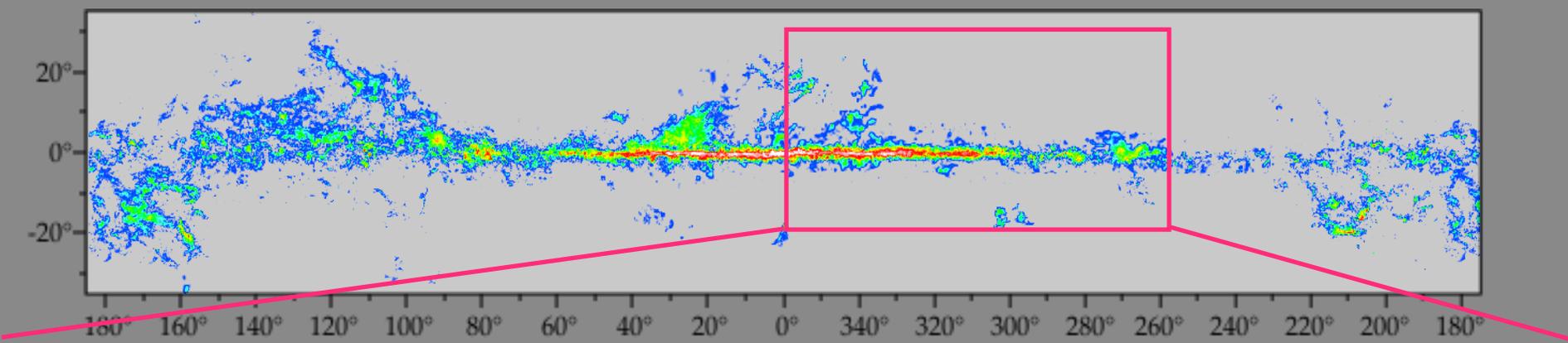
Orion Nebula Cluster (ESO, VLT, M. McCaughrean)

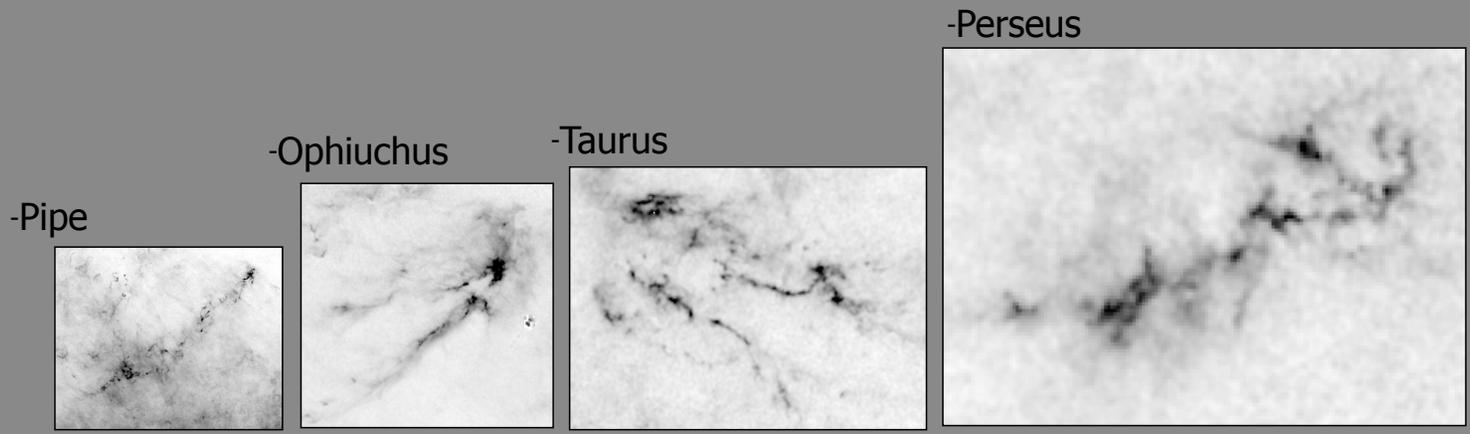




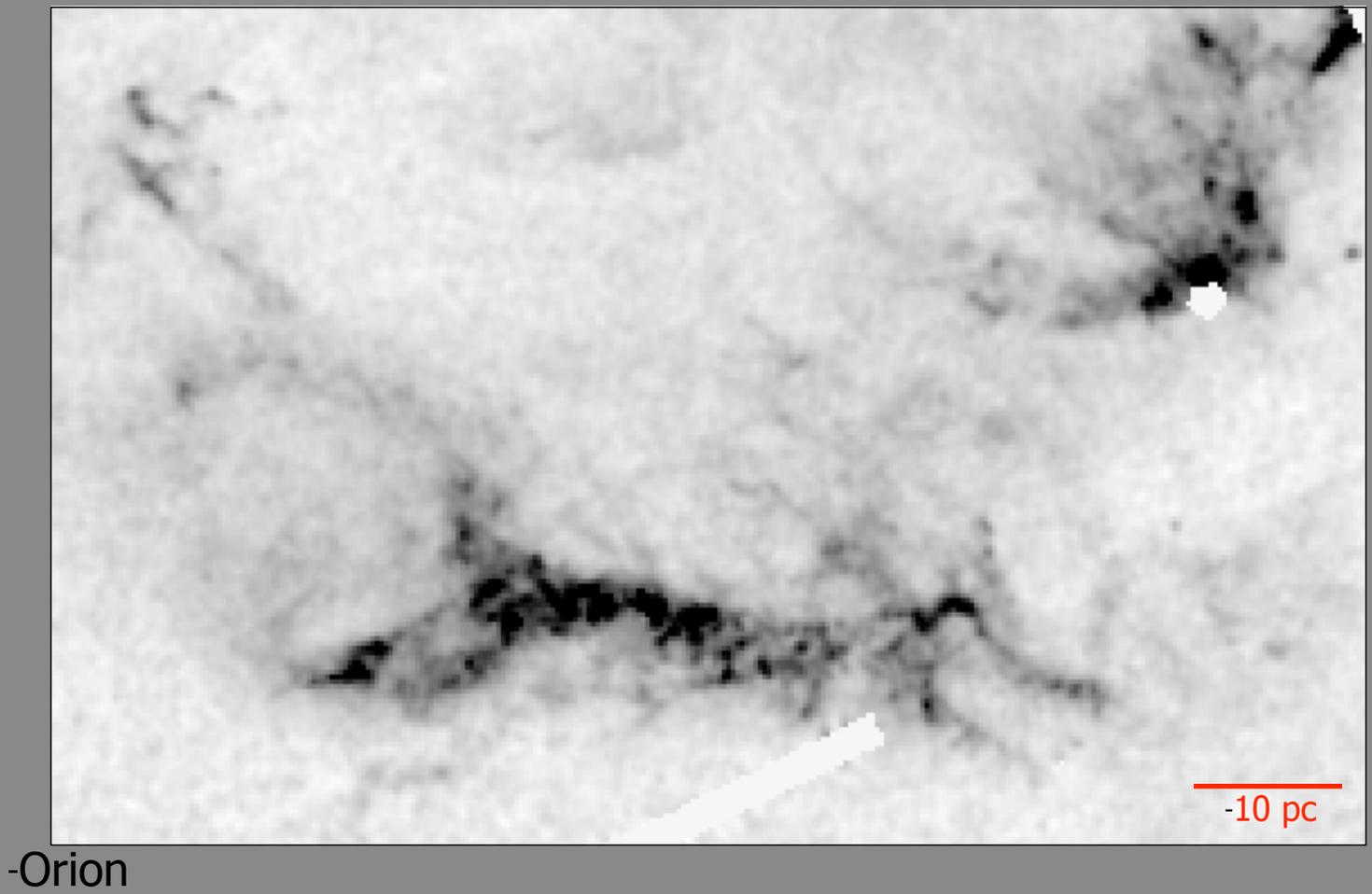






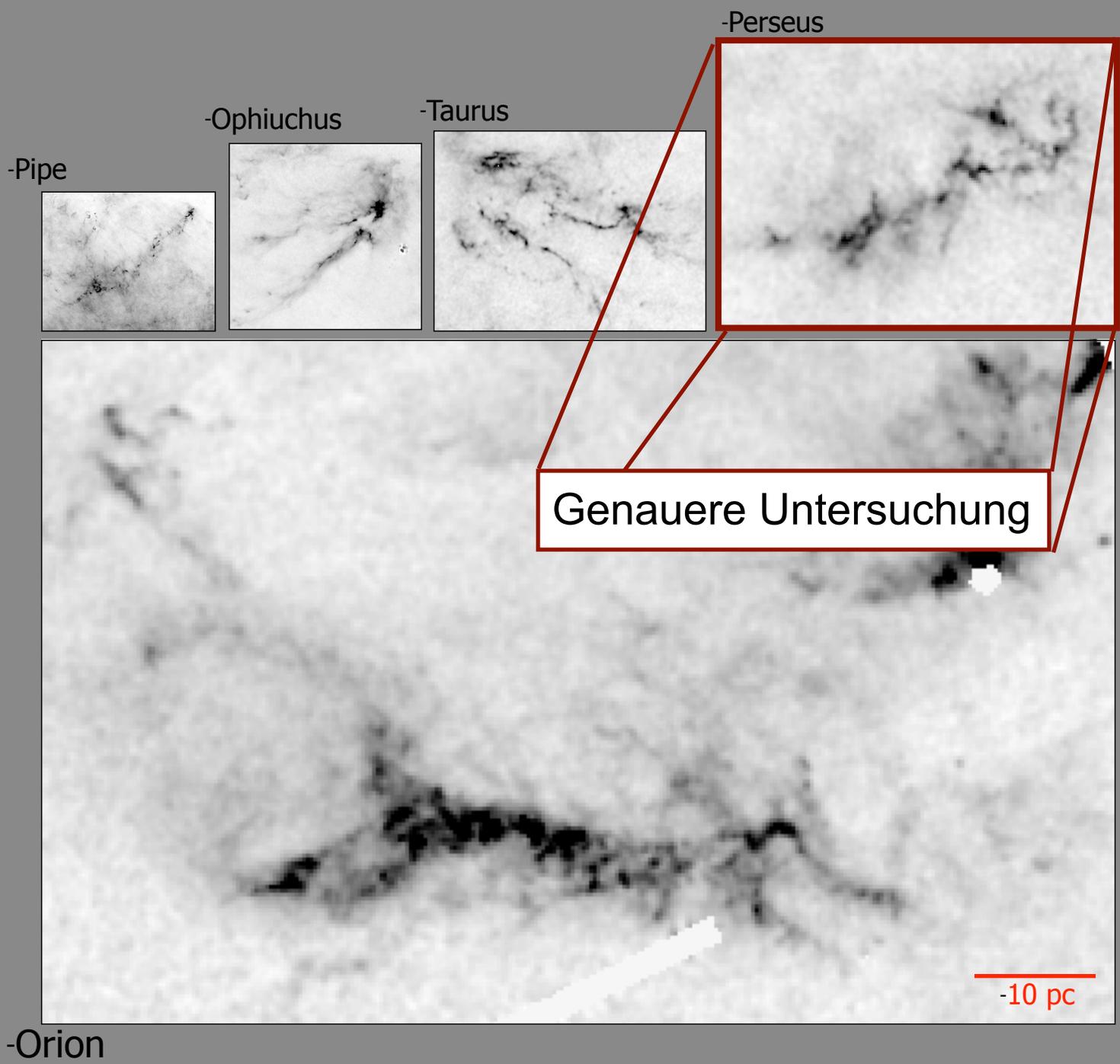


scales to same scale



(from A. Goodman)

scales to same scale



(from A. Goodman)

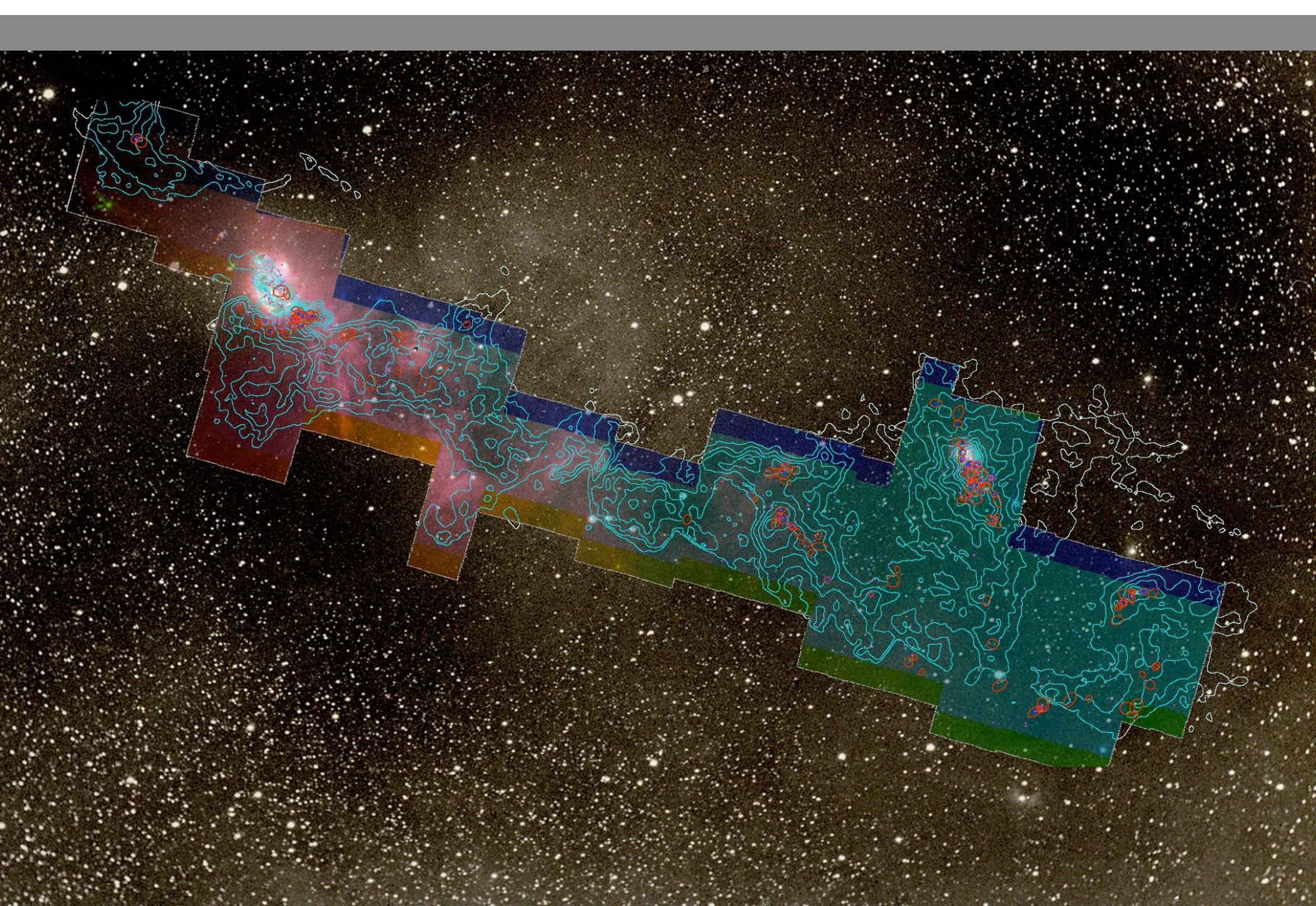
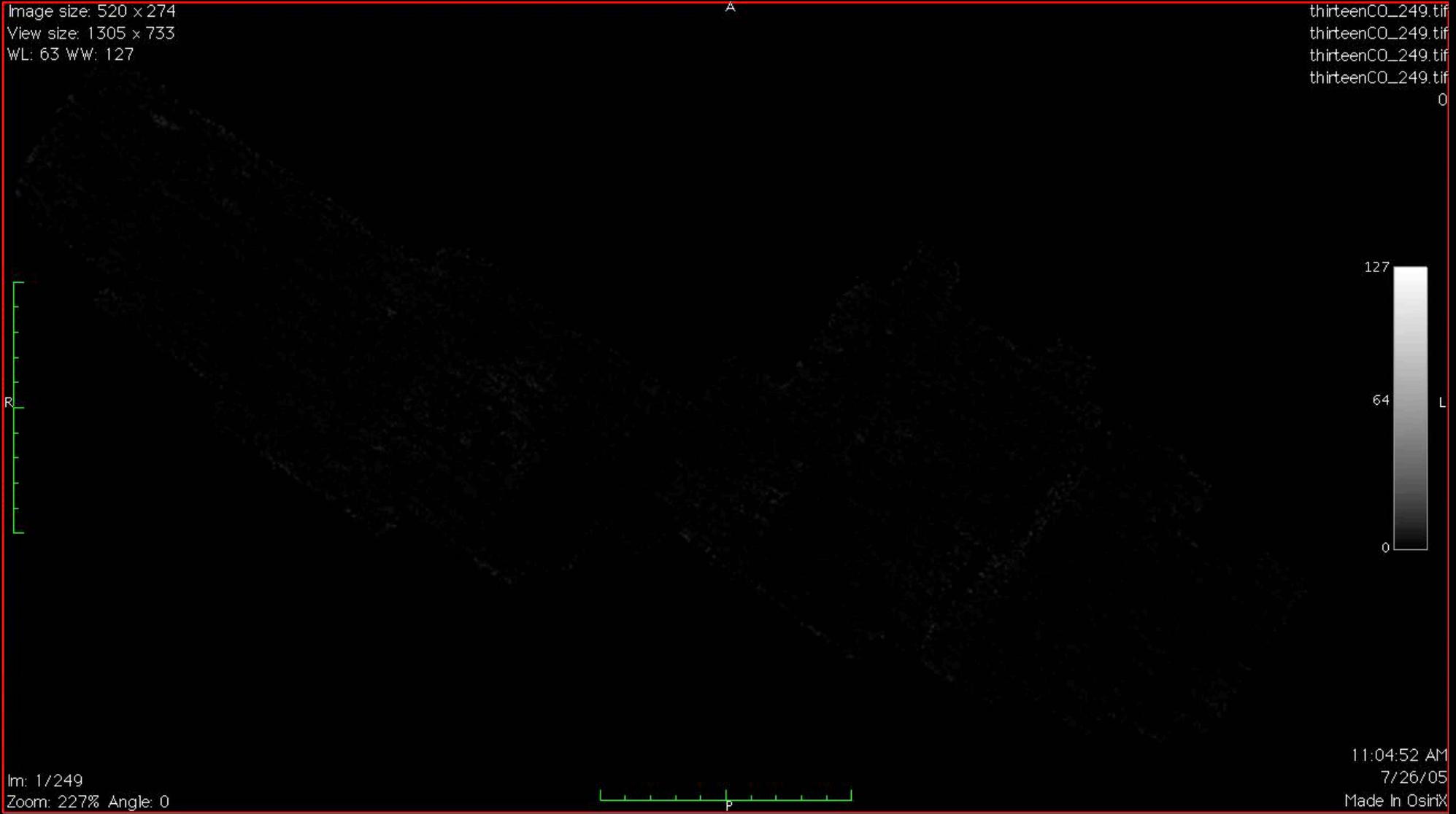


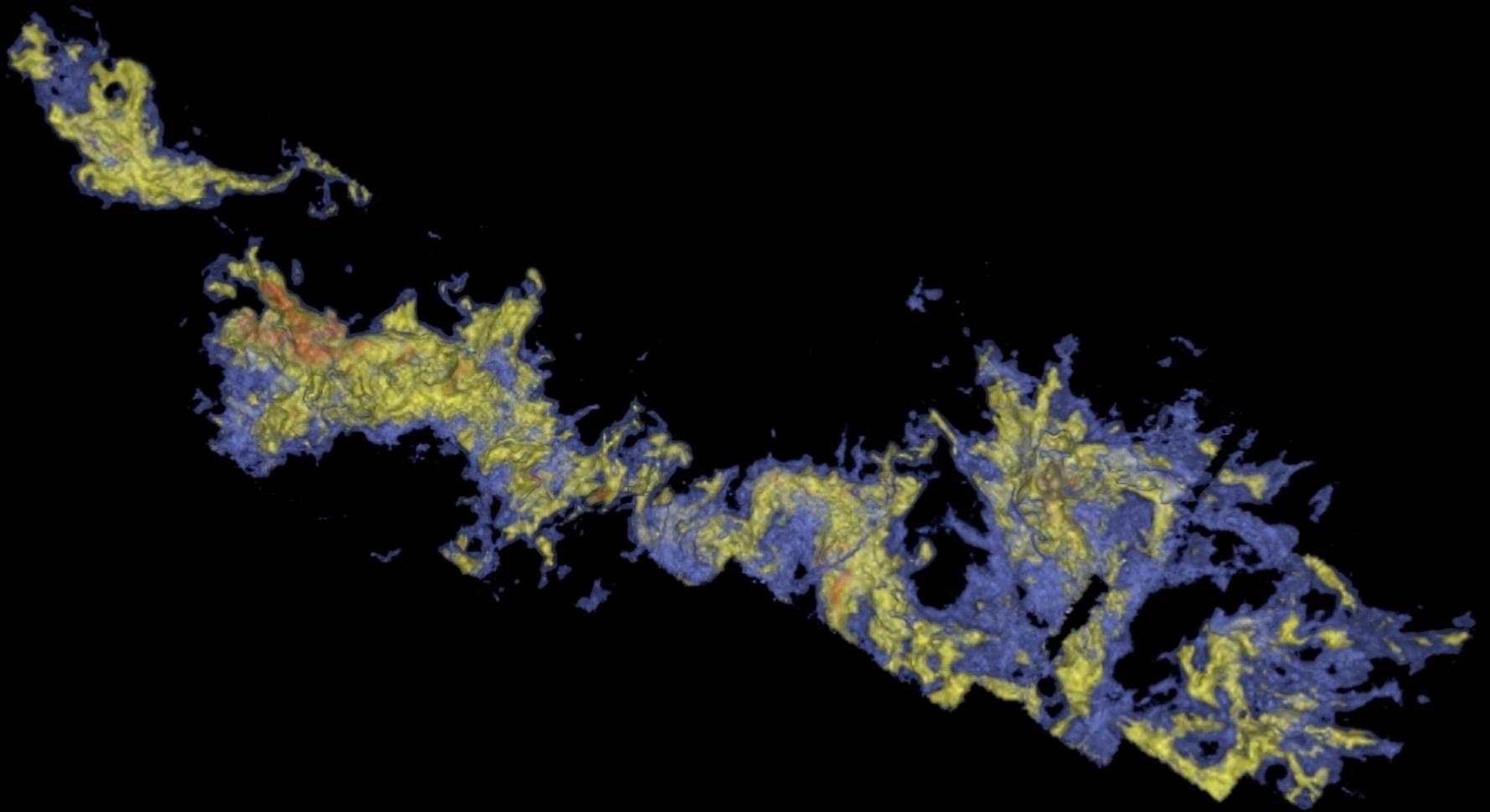
Bild von Alyssa Goodman: COMPLETE survey

Image size: 520 x 274
View size: 1305 x 733
WL: 63 WW: 127

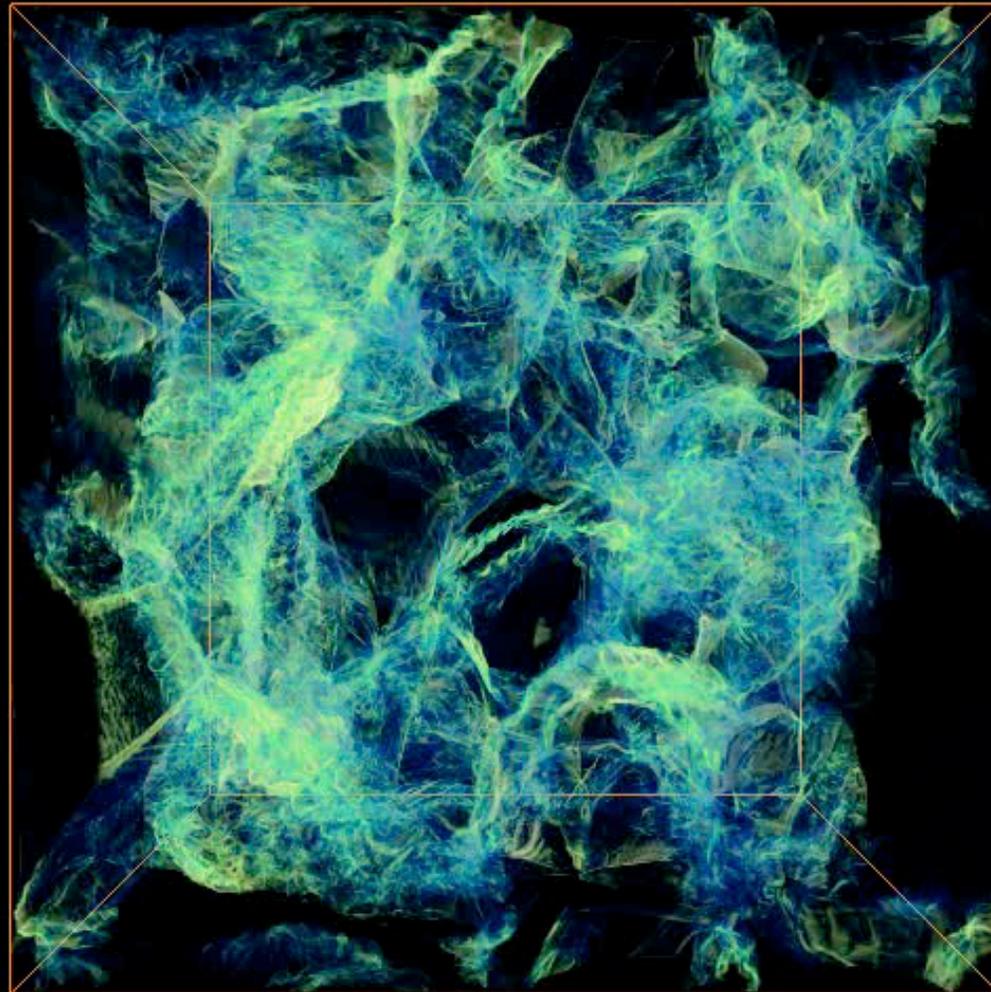
thirteenCO_249.tif
thirteenCO_249.tif
thirteenCO_249.tif
thirteenCO_249.tif
0



Geschwindigkeitsverteilung in Perseus



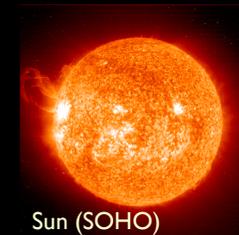
Perseus Molekülwolke (Bild vom COMPLETE Survey)



Computermodell der interstellaren Turbulenz (Wolfram Schmidt, Göttingen)

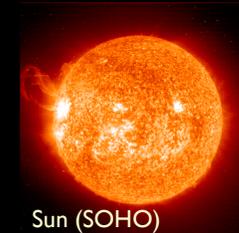
Einige theoretische
Überlegungen

decrease in spatial scale / increase in density 



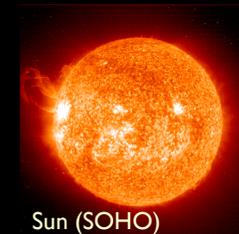
- Dichte
 - Dichte der ISM: einige Teilchen / cm^3
 - Dichte in Molekülwolken: einige 100 Teilchen / cm^3
 - Dichte der Sonne: 1.4 g/cm^3
- Räumliche Ausdehnung
 - Größe einer Molekülwolke: einige 10 parsec
 - Größe eines jungen Sternhaufens: $\sim 1 \text{ pc}$
 - Durchmesser der Sonne: $1.4 \times 10^8 \text{ m}$

decrease in spatial scale / increase in density



- **Komprimierende Kraft**
 - Die einzige Kraft, die diese Verdichtung bewirken kann ist die **GRAVITATION**.
- **Nach außen gerichtete Kräfte**
 - Es gibt verschiedene Prozesse, die der Gravitation entgegenwirken.
 - **GASDRUCK**
 - **TURBULENZ**
 - **MAGNETFELDER**
 - **STRAHLUNGSDRUCK**

decrease in spatial scale / increase in density



- **Komprimierende Kraft**
 - Die einzige Kraft, die diese Verdichtung bewirken kann ist die **GRAVITATION**.
- **Nach außen gerichtete Kräfte**
 - Es gibt verschiedene Prozesse, die der Gravitation entgegenwirken.
 - **GASDRUCK**
 - **TURBULENZ**
 - **MAGNETFELDER**
 - **STRAHLUNGSDRUCK**

Die Theorie der Sternentstehung muss dies alles berücksichtigen.

Erste dynamische Ansätze

- *Jeans (1902)*: Wechselspiel von Eigengravitation und thermischem Druck
- Stabilität einer homogenen Sphäre gegen gravitativen Kollaps
- Dispersionsrelation:
$$\omega^2 = c^2 k^2 - 4\pi G \rho$$
- Instabilität wenn $\omega^2 < 0$
- Minimale Masse $M_{\text{Jeans}} \propto \rho^{-1/2} T^{3/2}$



Sir James Jeans, 1877 - 1946

Erste dynamische Ansätze

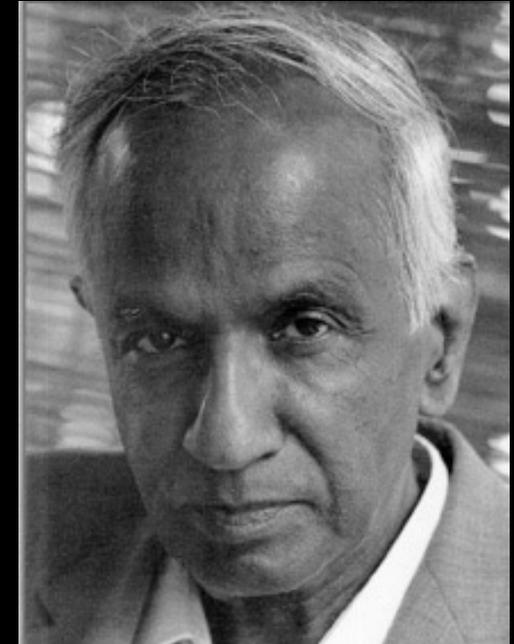
- *Jeans (1902)*: Wechselspiel von Eigengravitation und thermischem Druck
- Stabilität einer homogenen Sphäre gegen gravitativen Kollaps
- Konkurrenz zwischen Druckgradienten und Schwerekraft
- Minimale Masse $M_{\text{Jeans}} \propto \rho^{-1/2} T^{3/2}$
 - je größer die Dichte und je geringer die Temperatur, desto kleinere Objekte können kollabieren



Sir James Jeans, 1877 - 1946

Berücksichtigung der ISM Turbulenz

- von Weizsäcker (1943, 1951) und Chandrasekhar (1951): Konzept der **MIKROTURBULENZ**
- GRUNDANNAHME: Trennung der Skalen von Dynamik und Turbulenz
 $l_{\text{turb}} \ll l_{\text{dyn}}$
- Turbulenz bestimmt effektive Schallgeschwindigkeit und effektive Temperatur
- Größere effektive Jeans-Masse \rightarrow mehr Stabilität
- ABER: (1) *Turbulenz hängt von Skala ab*
(2) *Überschallturbulenz* $\rightarrow \sigma_{\text{rms}}^2 \gg c^2$



S. Chandrasekhar, 1910 - 1995

Realität ist komplizierter!

Einfluss von Magnetfeldern im ISM

- *Mestel & Spitzer (1956)*: Magnetfelder können Kollaps aufhalten!!!

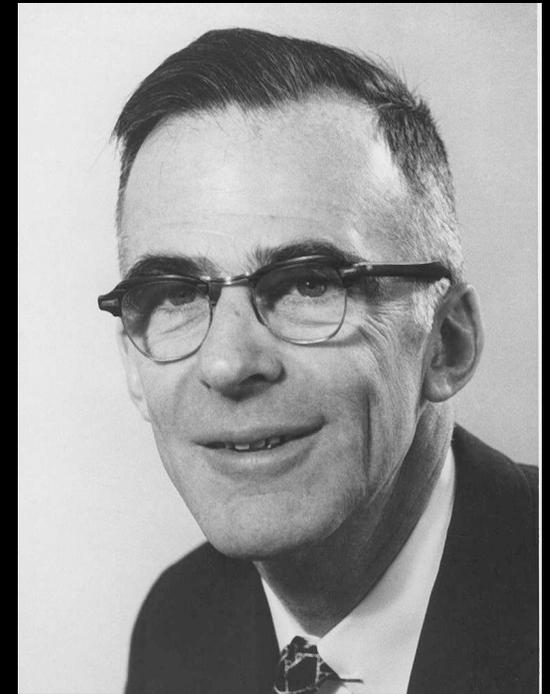
- Kritische Feldstärke und kritische Masse

$$M_{cr} = \frac{5^{3/2}}{48\pi^2} \frac{B^3}{G^{3/2} \rho^2}$$

- Kritisches Masse-zu Magnetfluss-Verhältnis (Mouschovias & Spitzer 1976)

$$\left[\frac{M}{\Phi} \right]_{cr} = \frac{\xi}{3\pi} \left[\frac{5}{G} \right]^{1/2}$$

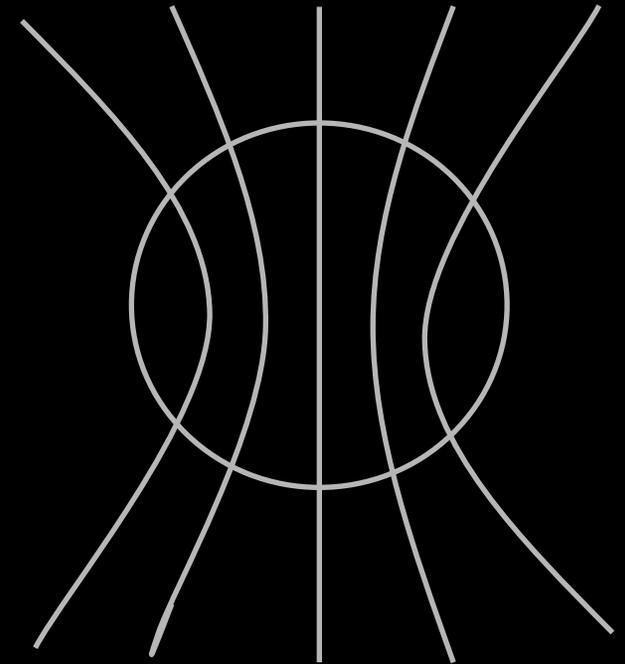
- Ambipolare Diffusion initiiert den Kollaps



Lyman Spitzer, Jr., 1914 - 1997

Einfluss von Magnetfeldern im ISM

- *Mestel & Spitzer (1956)*: Magnetfelder können Kollaps aufhalten!!!
 - Es gibt eine kritische Feldstärke, die den Kollaps aufhalten kann.
 - Magnetfelder “mögen” nicht verbogen und zusammengedrückt werden.
 - Deshalb ist die magnetische Grenzmasse größer als die Jeans-Masse.



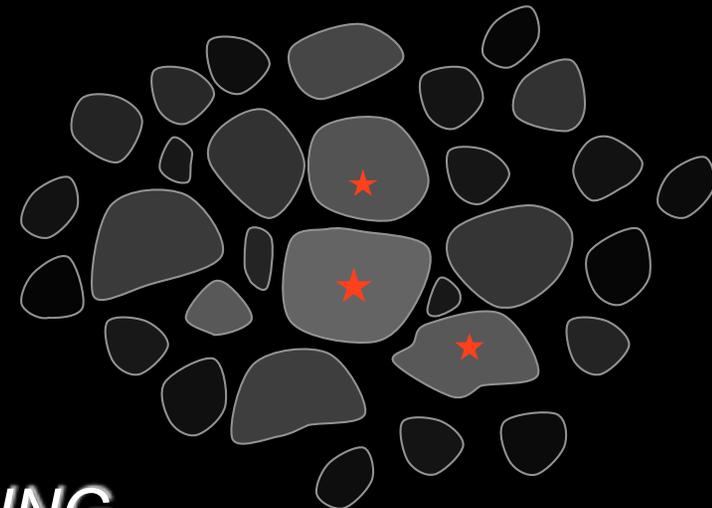
magnetisierter Gasball

Moderne Theorie der Sternentstehung

- *GRUNDANNAHME*
 - Sternenstehung wird durch das Wechselspiel aus Schwerkraft (treibt System in Kollaps!) und interstellarer Turbulenz, Magnetfeldern, und Gasdruck (versuchen Kollaps zu verhindern!) gesteuert.
 - Turbulenz wirkt in doppelter Hinsicht
 - Auf großen Skalen erschwert sie die Kontraktion
 - auf kleinen Skalen initiiert sie den Kollaps

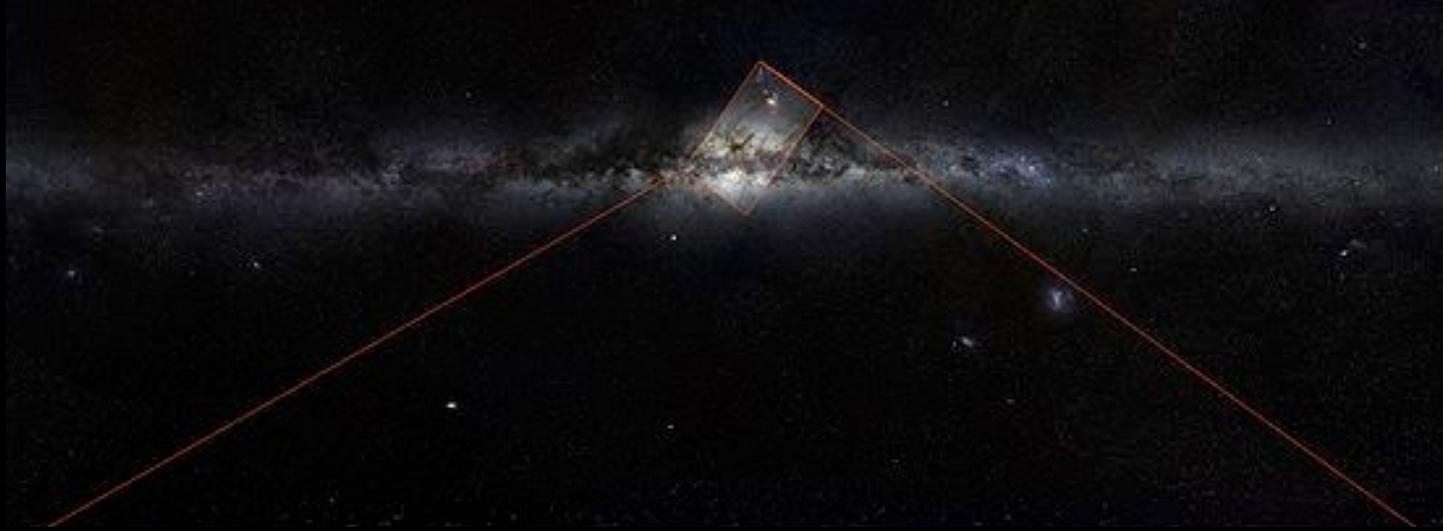
Moderne Theorie der Sternentstehung

- *Wie soll das gehen?*
 - Überschallturbulenz erzeugt große Dichtekontraste
 $\delta\rho/\rho \propto \mathcal{M}^2$ (\mathcal{M} ist the Machzahl: $\mathcal{M} = \sigma/c_s$)
 - Kritische Masse für Kollapse skaliert wie $M_{\text{Jeans}} \propto \rho^{-1/2}$
 - Abhängig vom turbulenten Energiespektrum können lokale Dichtefluktuationen kollabieren und einzelne Sterne erzeugen.
 - Turbulenz erzeugt Dichteschwankungen, Gravitation selektiert für Sternentstehung
 - **GRAVOTURBULENTE STERNBILDUNG**



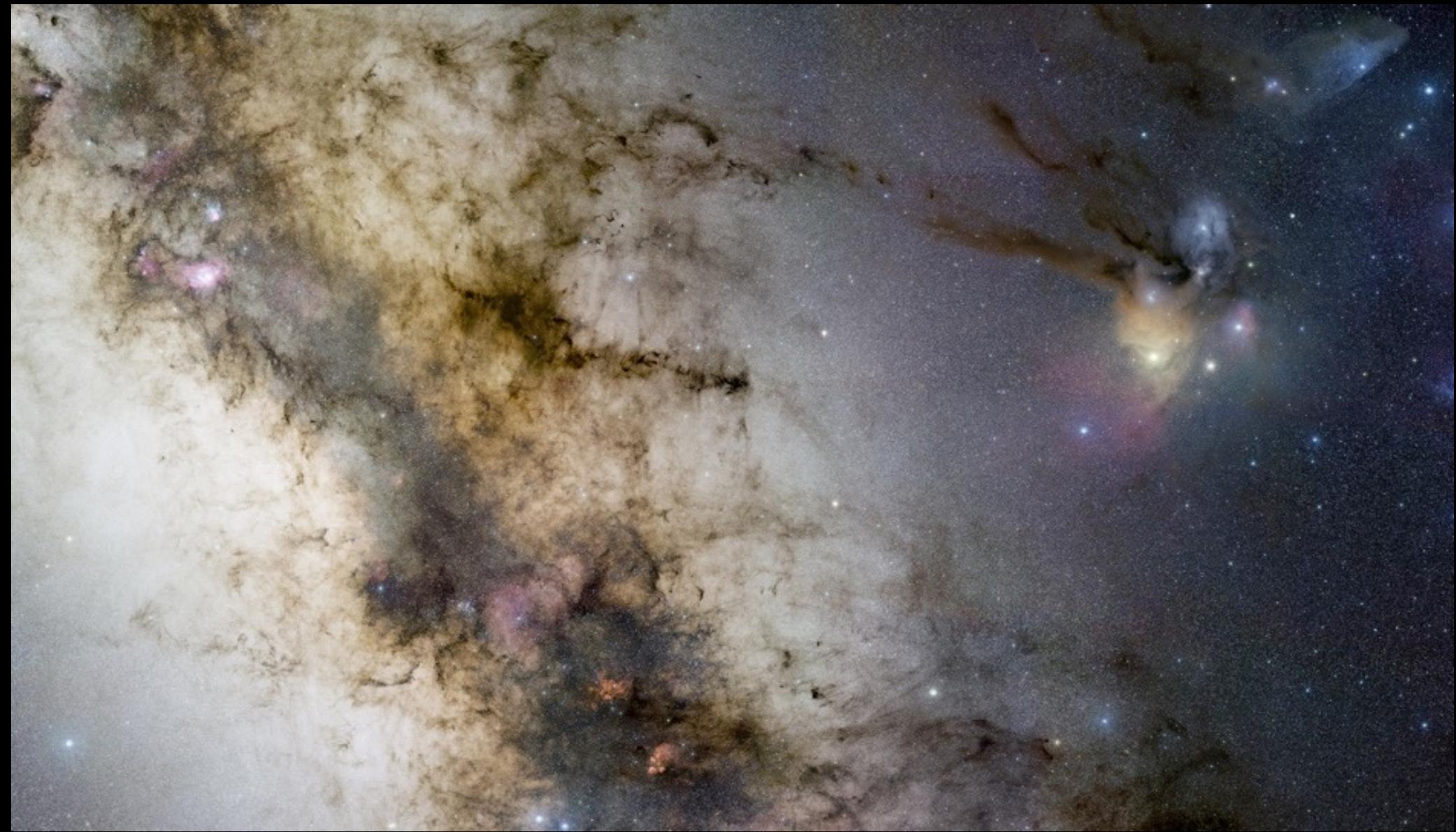
Anwendung

Blick in Richtung galaktisches Zentrum

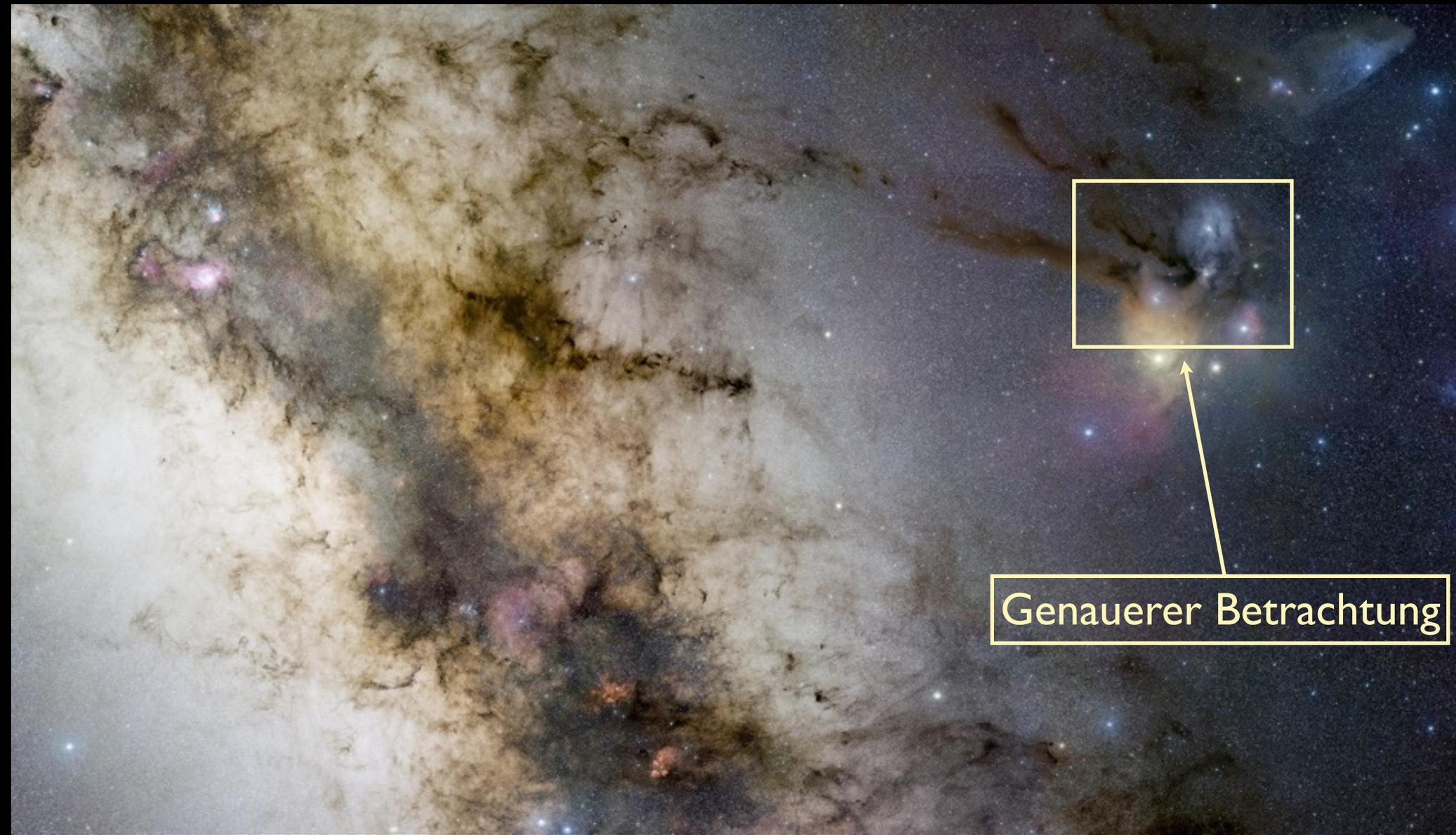


Milky way starscape taken from Paranal.(ESO)



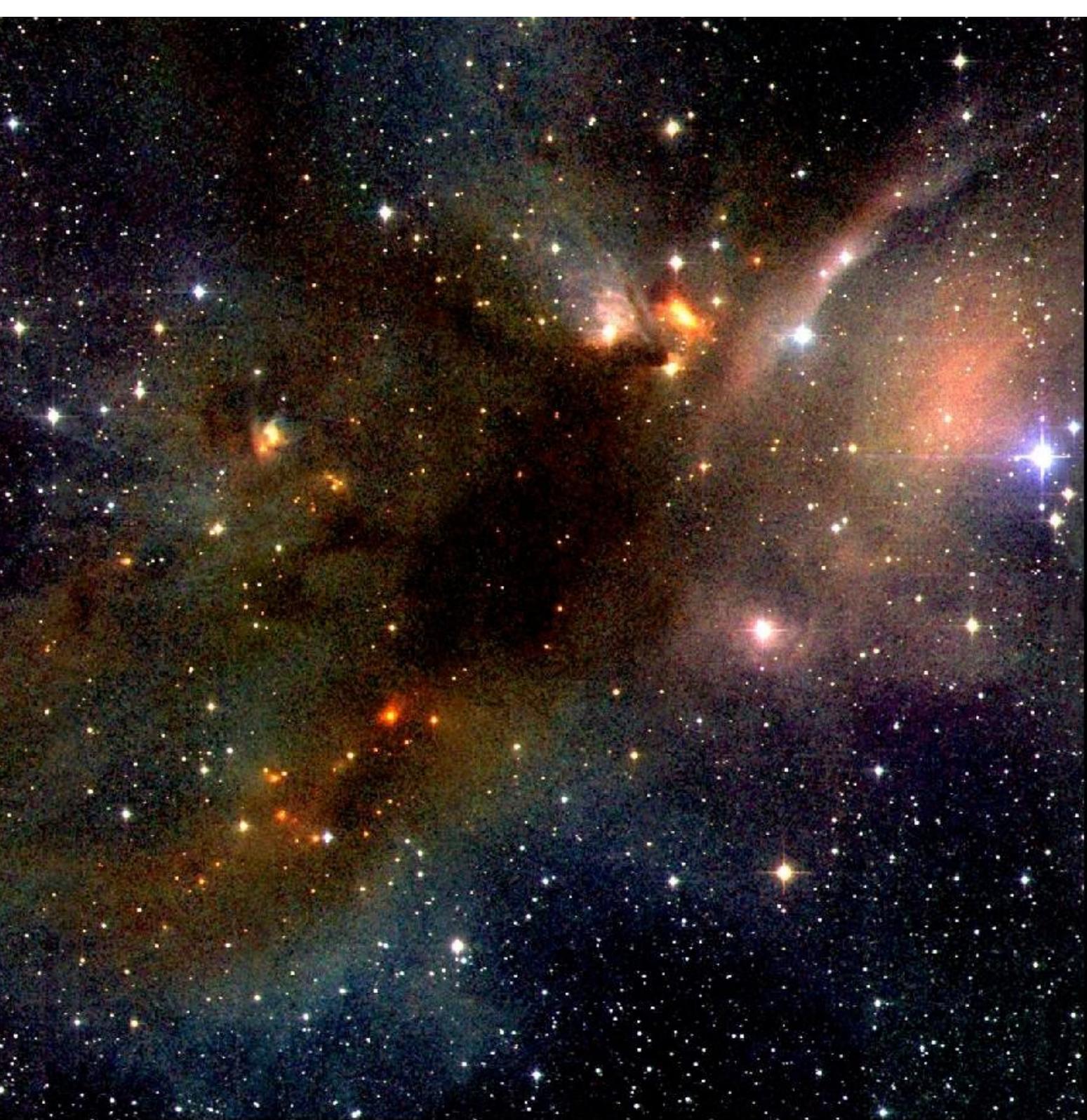


Milky way starscape taken from Paranal.(ESO)



Genauerer Betrachtung

Milky way starscape taken from Paranal.(ESO)

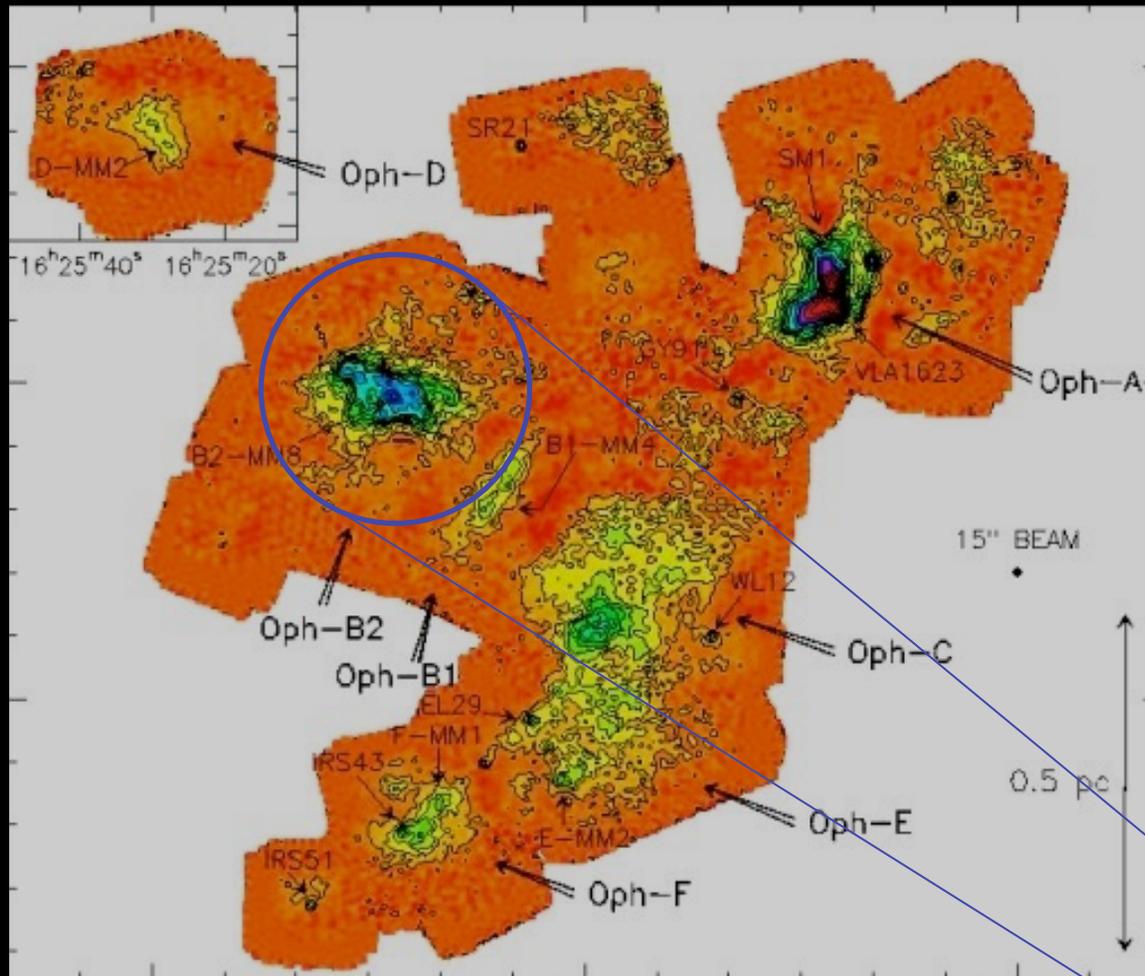


Sternent- stehungs- gebiet ρ -Oph im IR

Manche Dunkelwolken
(Molekülwolken) sind
so dicht, dass man
selbst im Infraroten
nicht „hinein“ sieht.

Man muss bei sub-mm
und Radio-wellenlängen
beobachten.

Dichtestruktur von Molekülwolken



Molekülwolken sind hochgradig inhomogen.

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

ρ -Ophiuchus in Staubemission

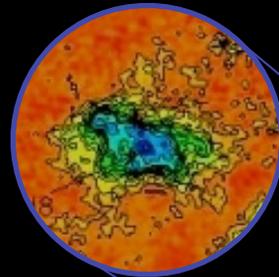
genauere Betrachtung

Dichtestruktur von Molekülwolken

Molekülwolken sind hochgradig inhomogen.

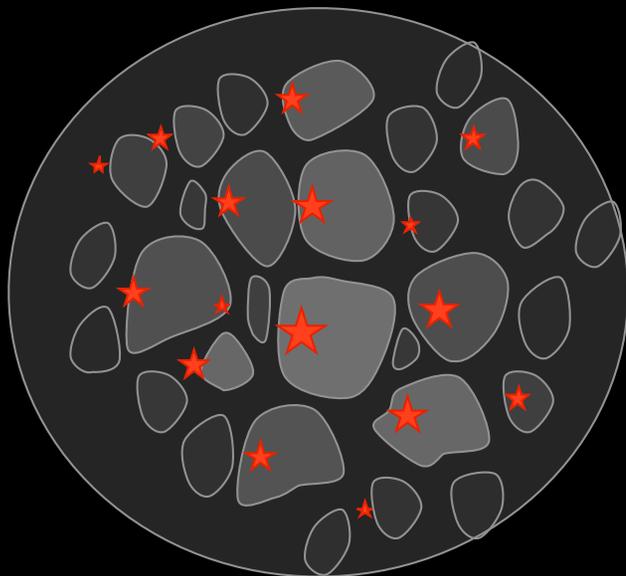
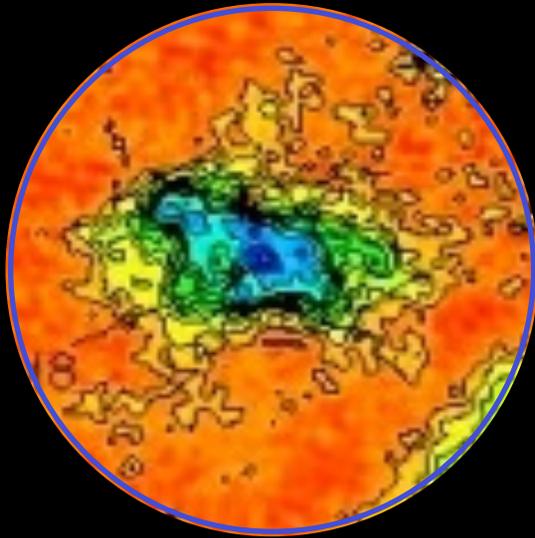
Sterne bilden sich in den dichtesten und kältesten Teilen der Wolke.

ρ -Ophiuchus in
Staubemission



noch genauere
Betrachtung

Entwicklung von Wolkenkernen



FRAGE:

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

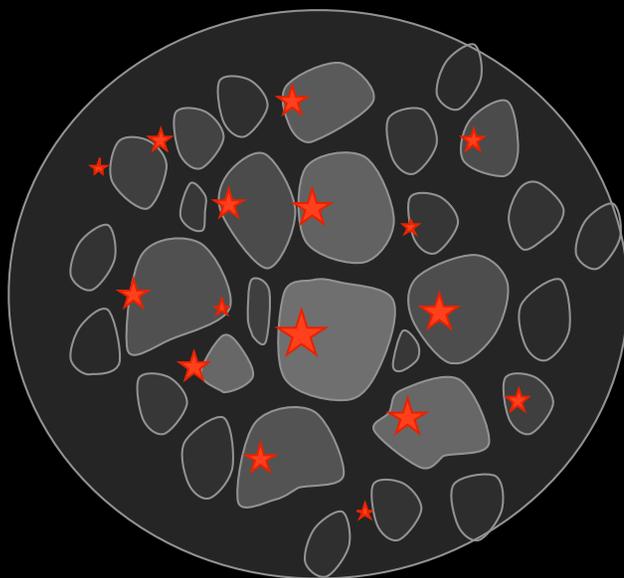
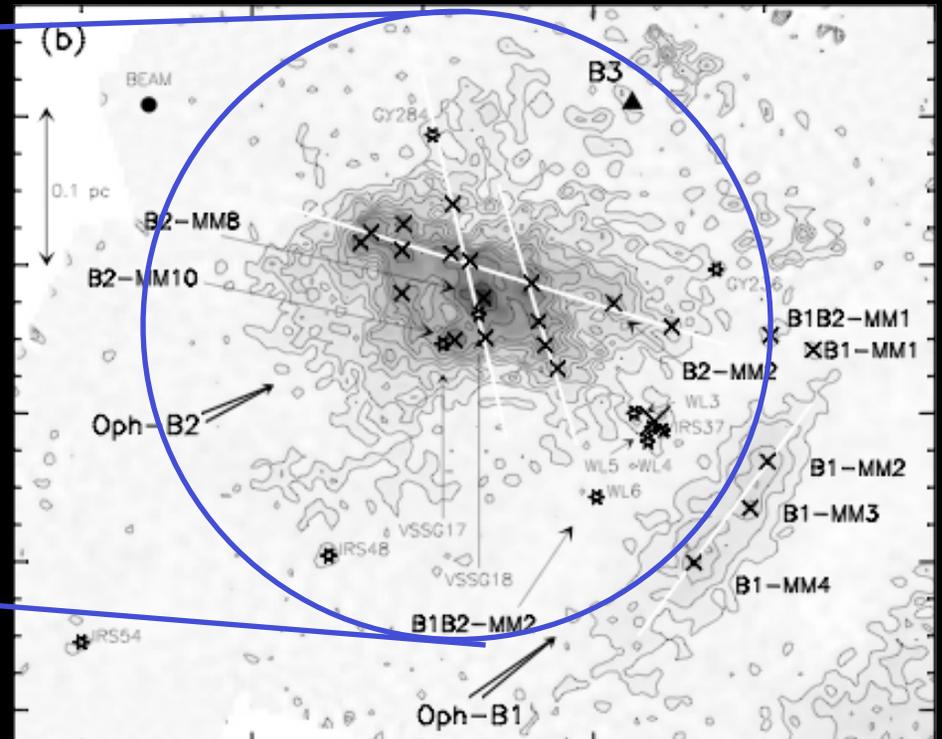
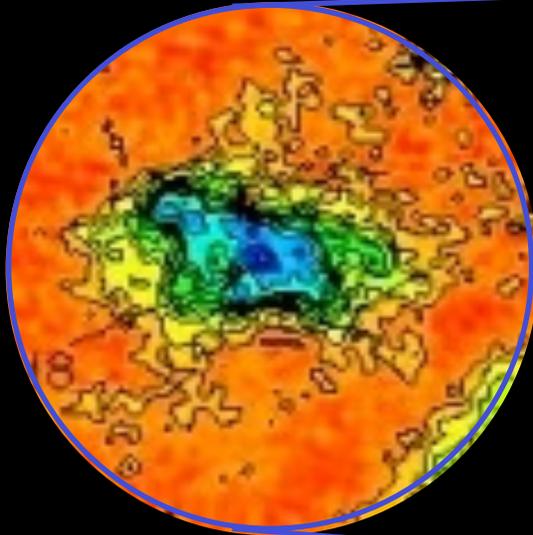
ÜBERLEGUNG

- 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*

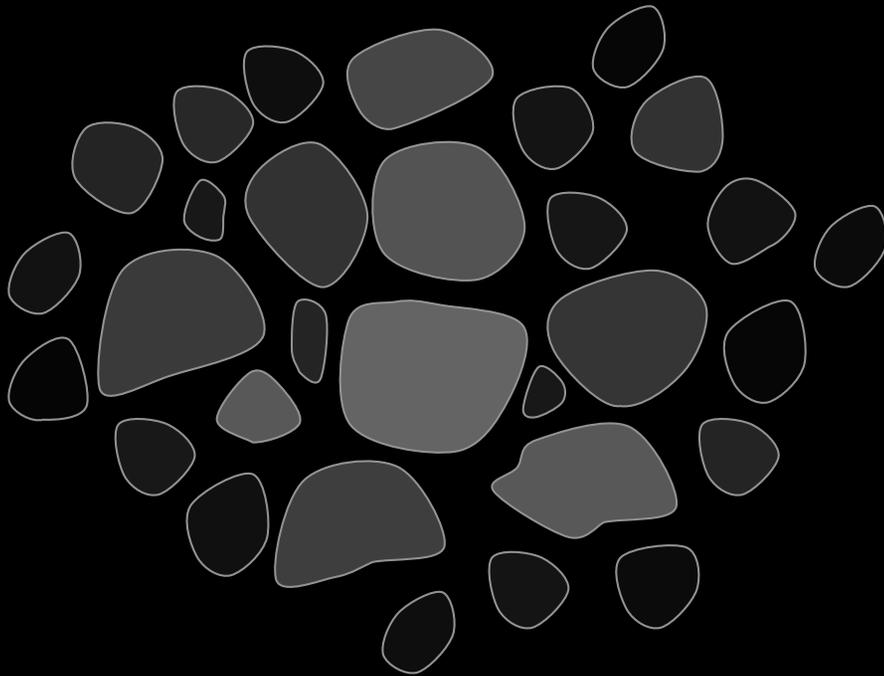
Entwicklung von Wolkenkernen



Beispiel ρ -Oph B1/B2: Kern enthält mehrere protostellare Objekte ("starless" cores are denoted by x, cores with embedded protostars by ☆)

Entwicklung von Wolkenkernen

Was passiert bei mehreren
(wechselwirkenden)
Kernen?



Zwei Extremfälle:

(1) Turbulenz dominiert Energiebudget:

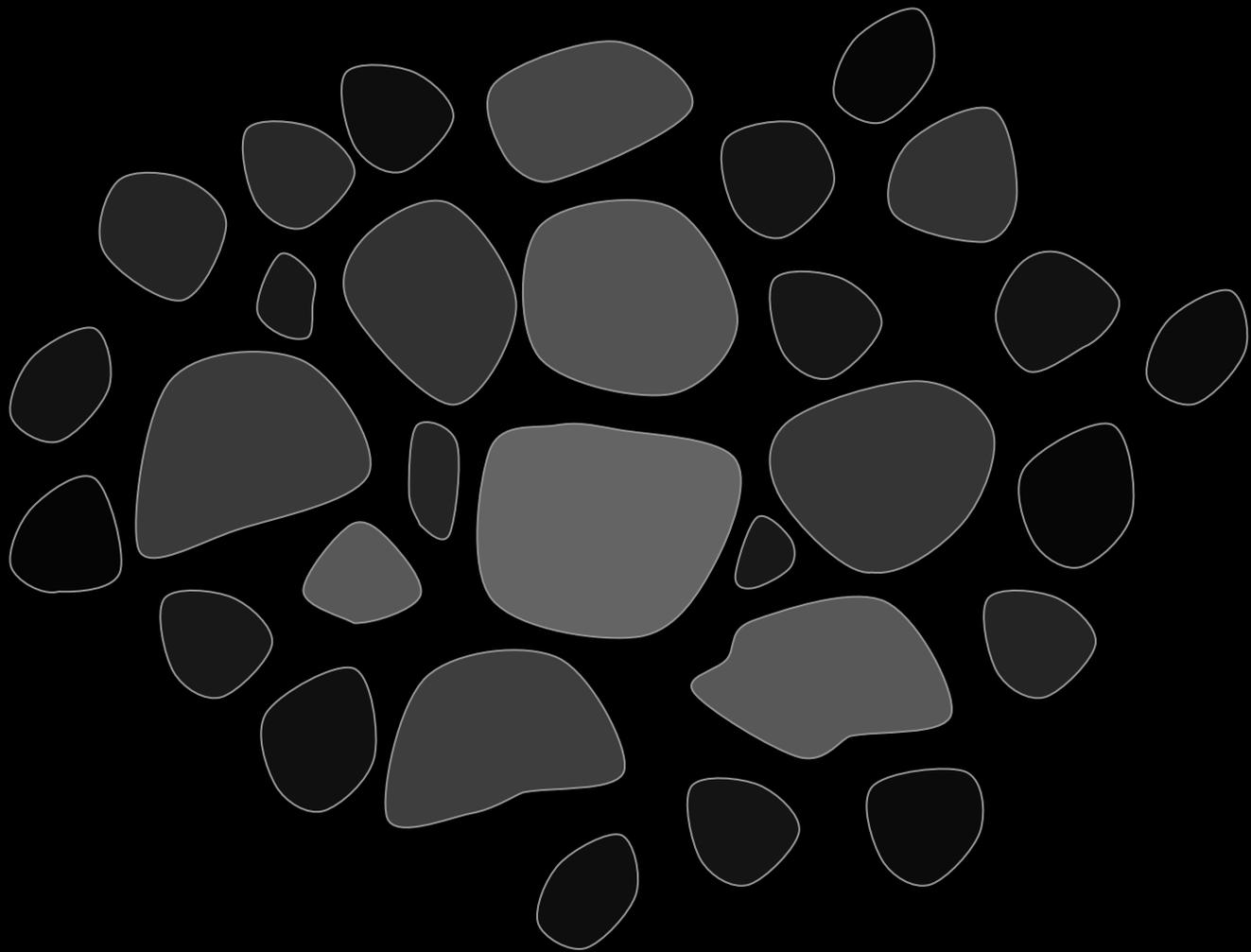
$$\alpha = E_{\text{kin}} / |E_{\text{pot}}| > 1$$

- > keine Wechselwirkung der Kerne untereinander
- > *Stellarer Massenzuwachs* bestimmt durch *isolierten Kollaps*
- > *loser Haufen massearmer Sterne*

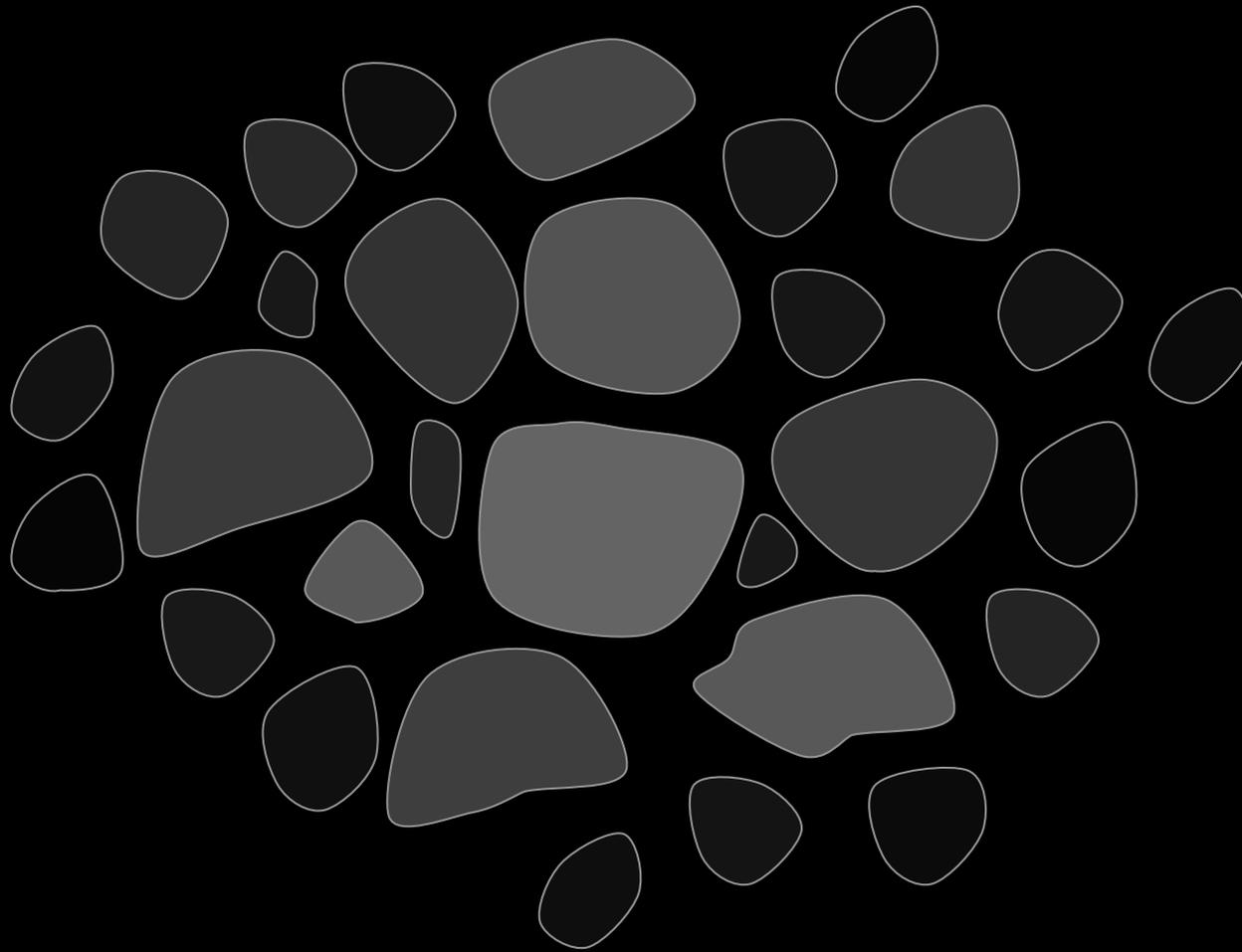
(2) Turbulenz zerfällt, dh. **Gravitation**

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

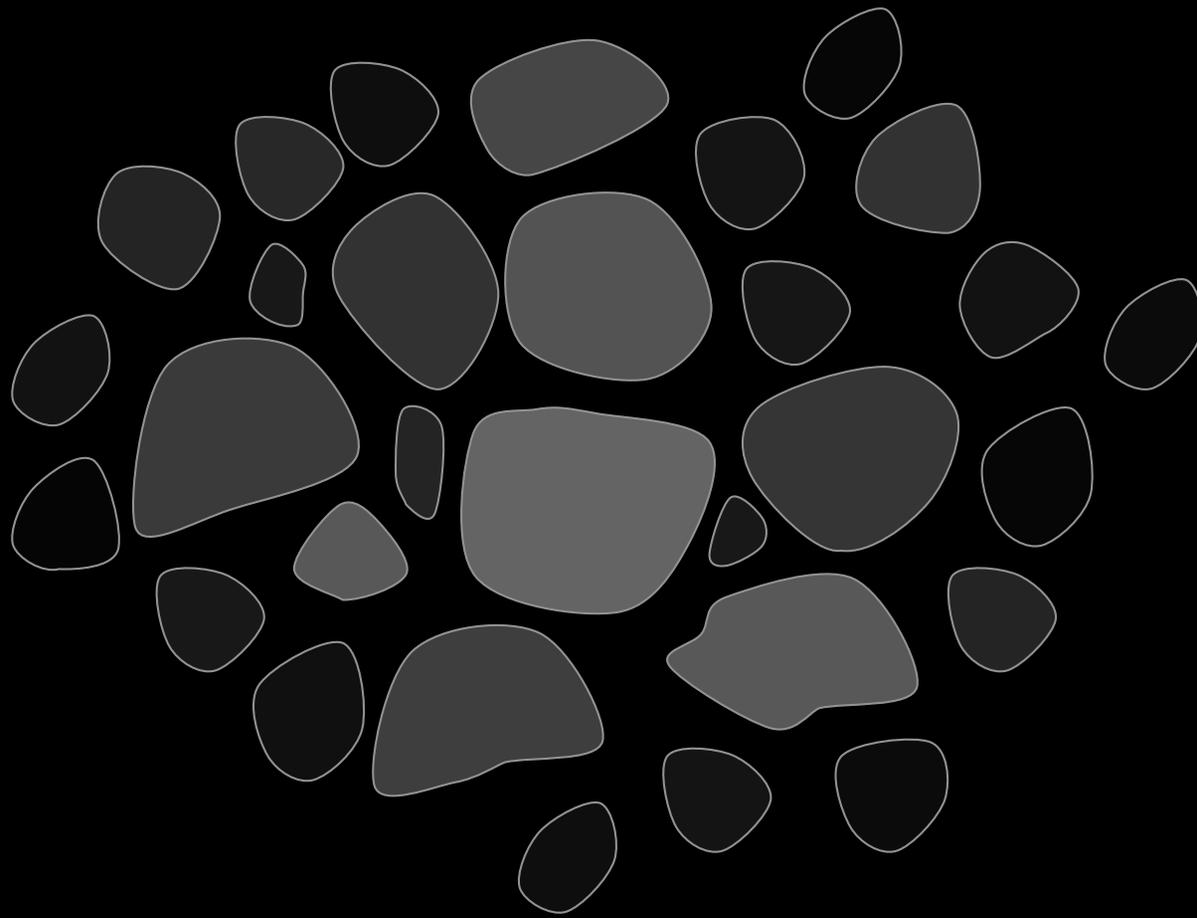
- > *globale Kontraktion*
- > Kerne *wechselwirken* während sie kollabieren
- > *Kompetitives Wachstum*
- > *dichter Haufen, enthält masse- reiche Sterne*



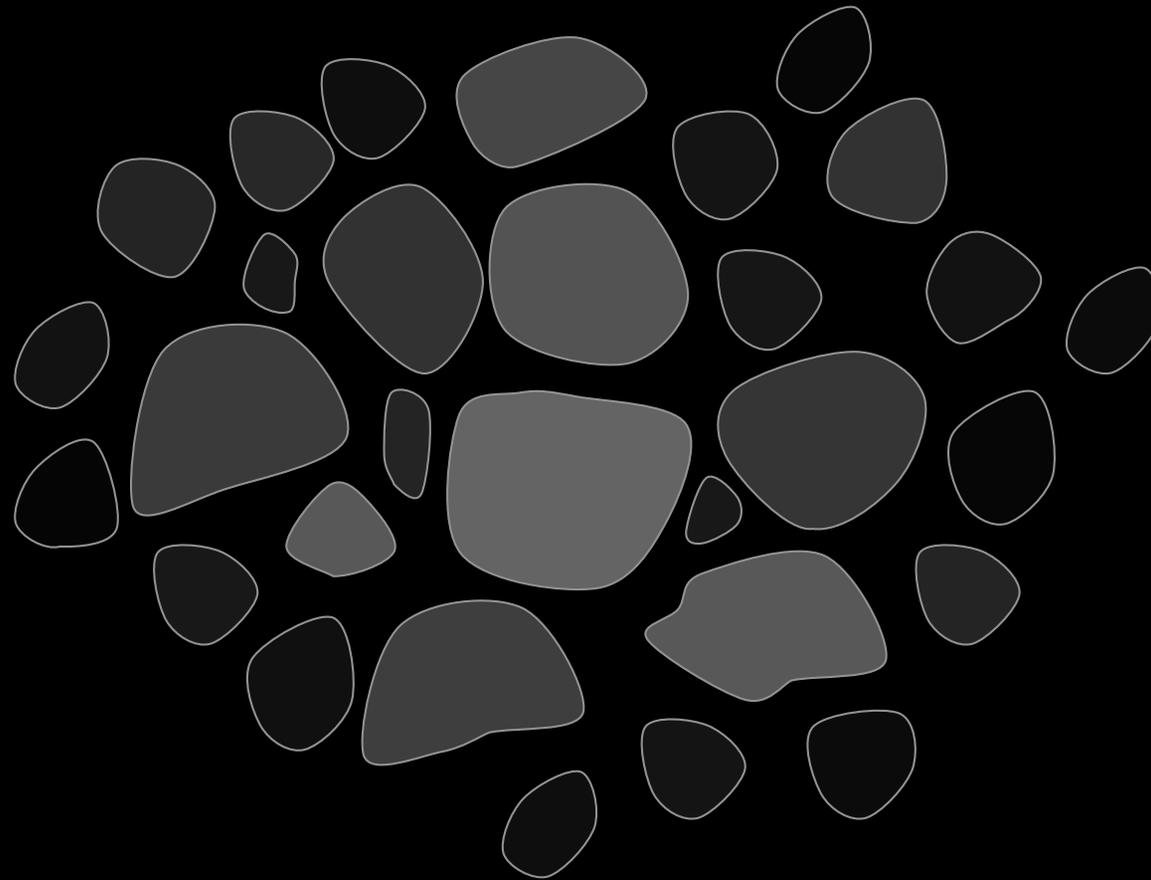
Turbulenz erzeugt Hierarchie von Klumpen



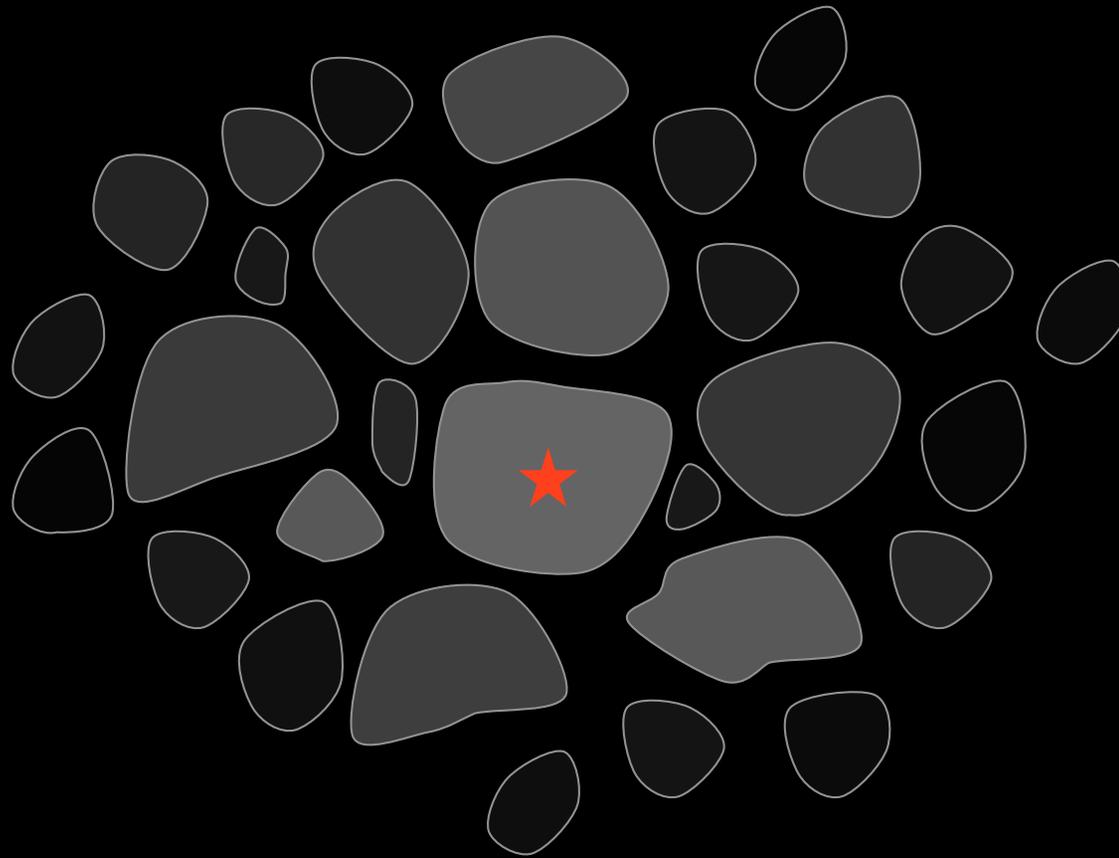
Turbulenz dissipiert, Kontraktion setzt ein



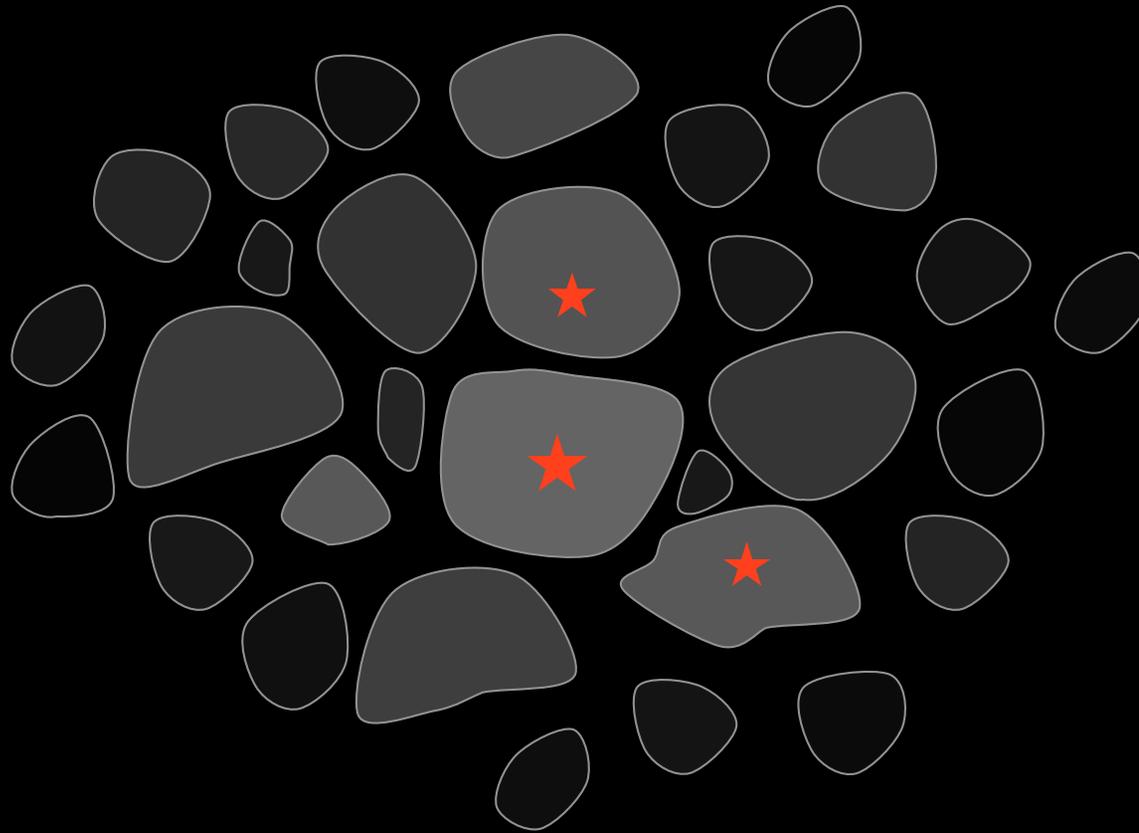
Turbulenz dissipiert, Kontraktion setzt ein



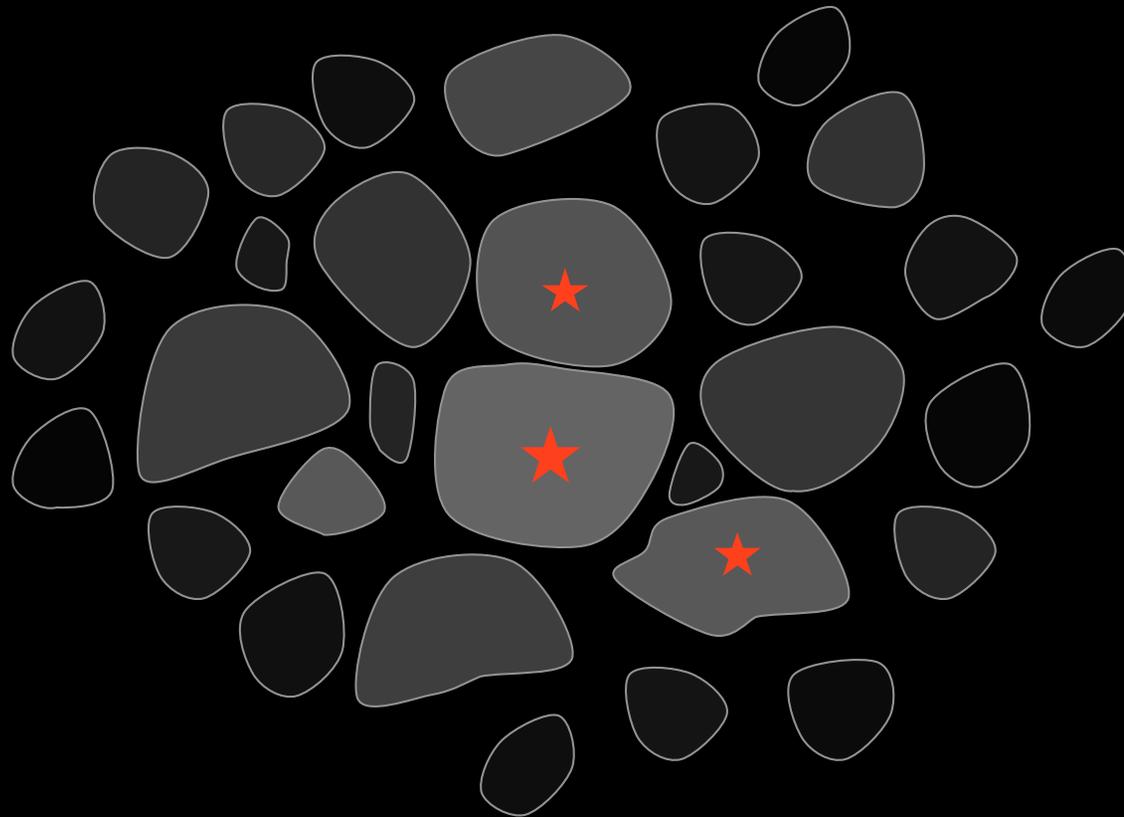
während Region kontrahiert können einzelne Klumpen kollabieren und Sterne bilden



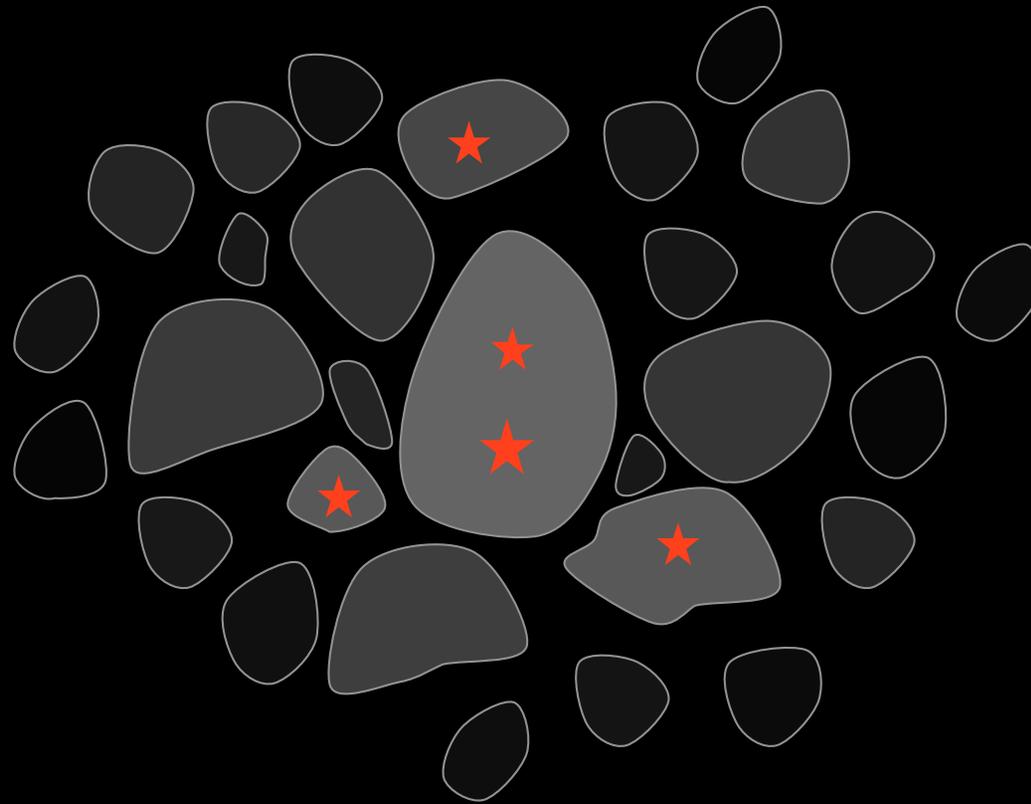
während Region kontrahiert können einzelne Klumpen kollabieren und Sterne bilden



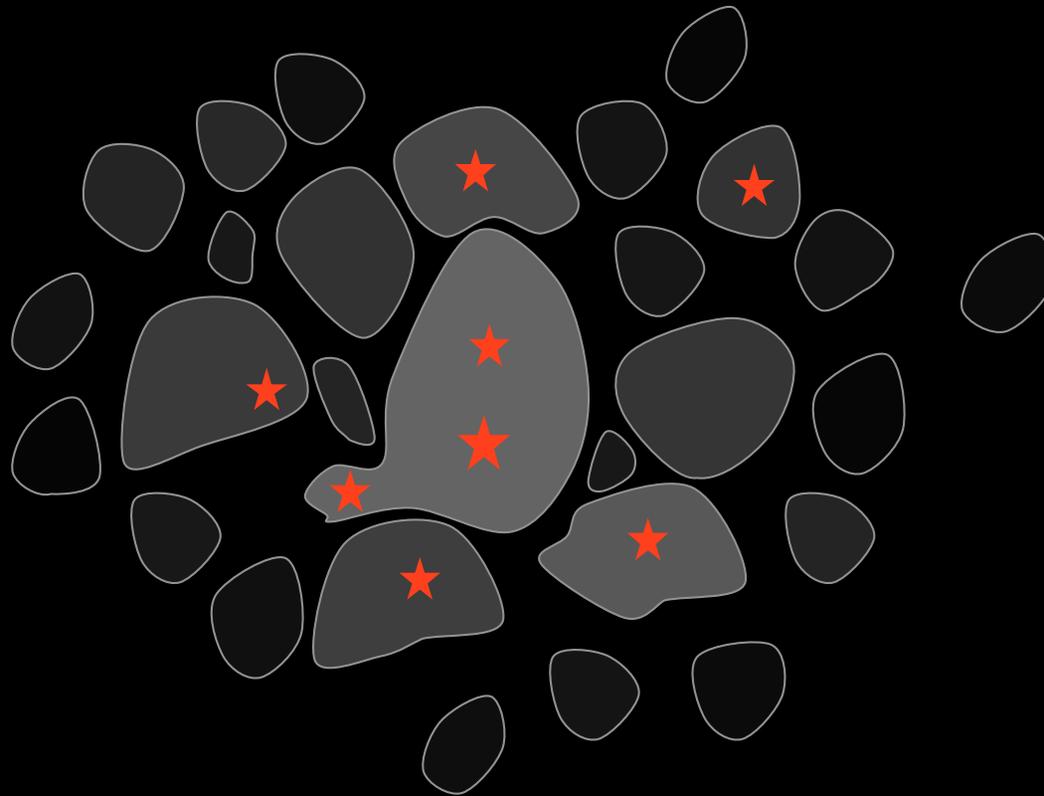
einzelne Klumpen kollabieren und bilden Sterne



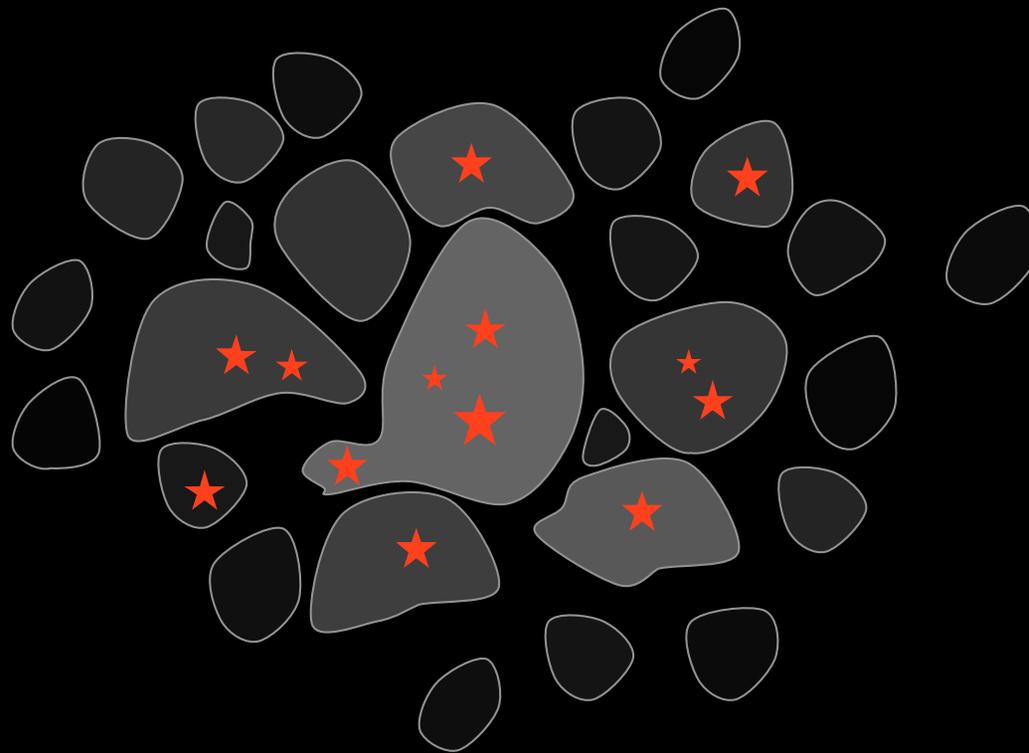
einzelne Klumpen kollabieren und bilden Sterne



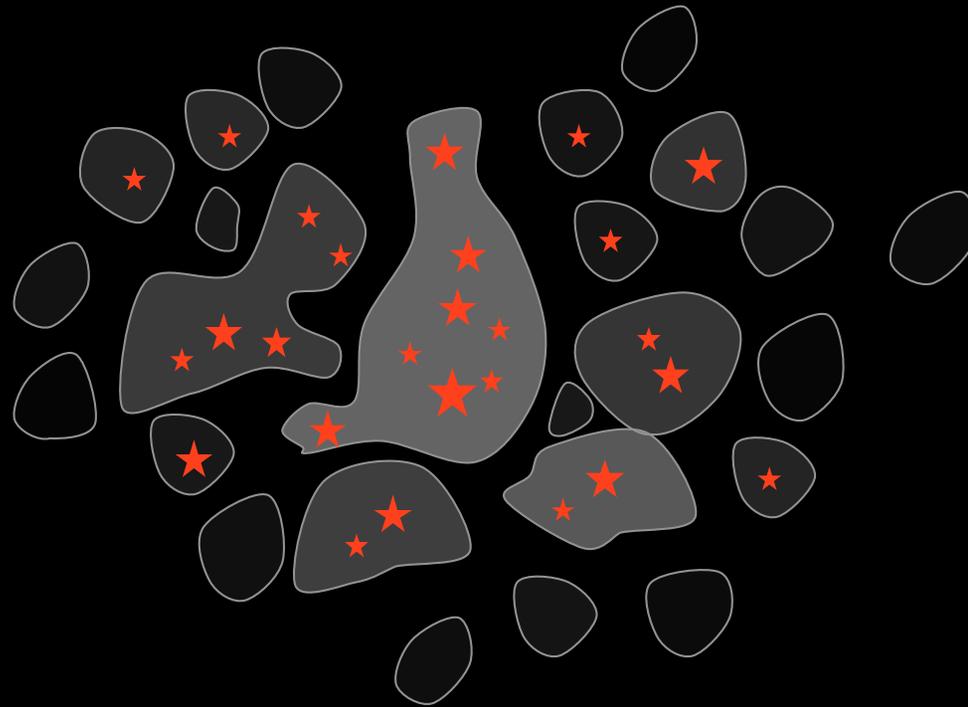
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



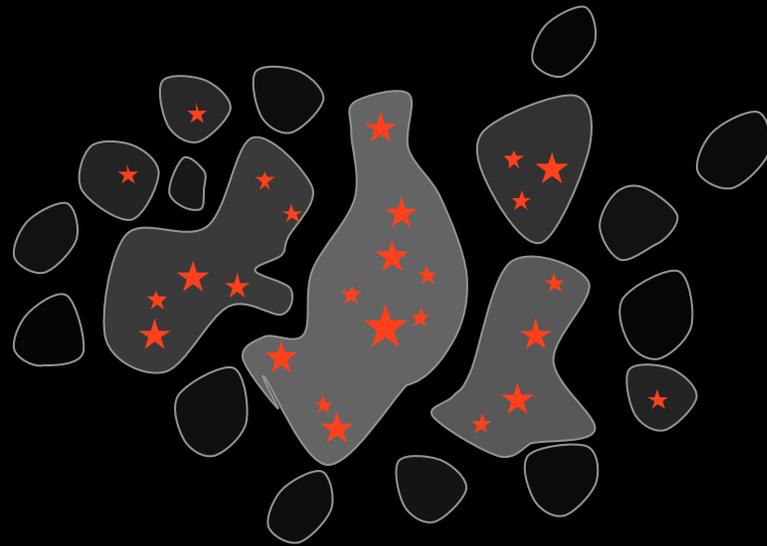
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



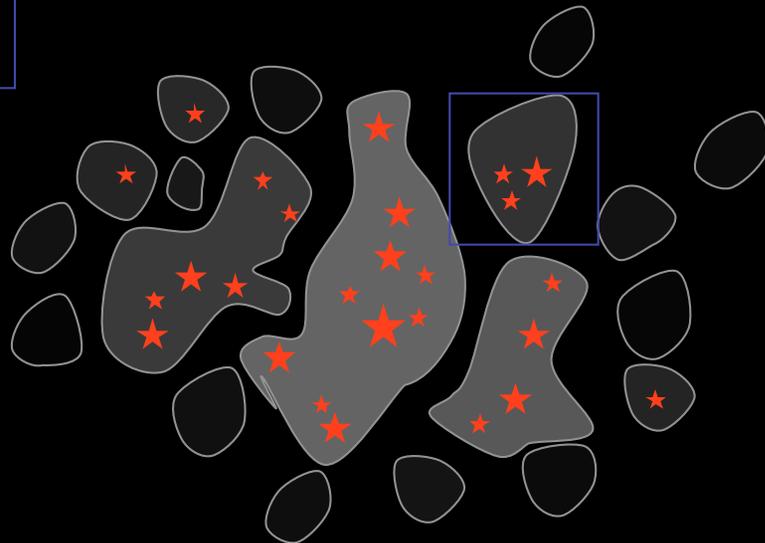
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



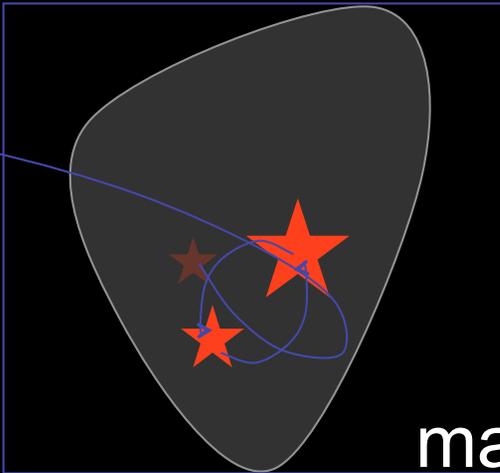
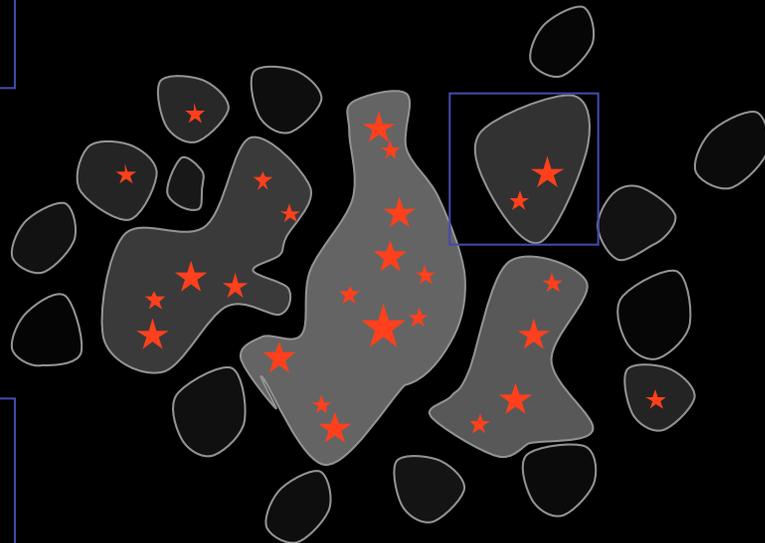
Im *dichten Haufen* wird kompetitives Wachstum wichtig



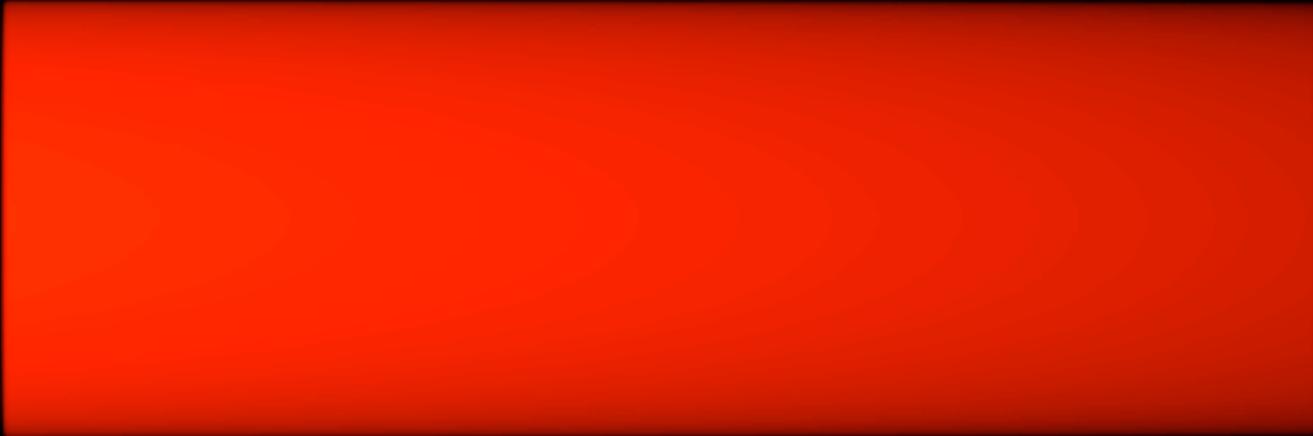
Im *dichten Haufen* wird kompetitives Wachstum wichtig

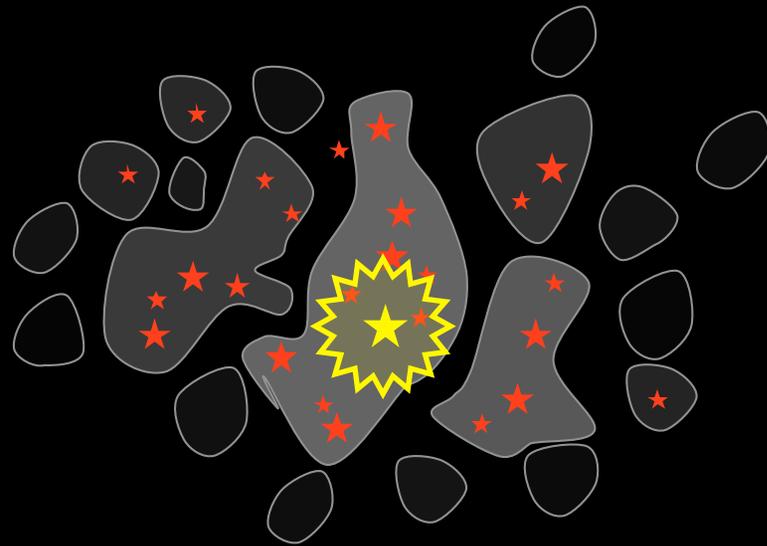


Im *dichten Haufen* beeinflussen stellardynamische Prozesse das Wachstum

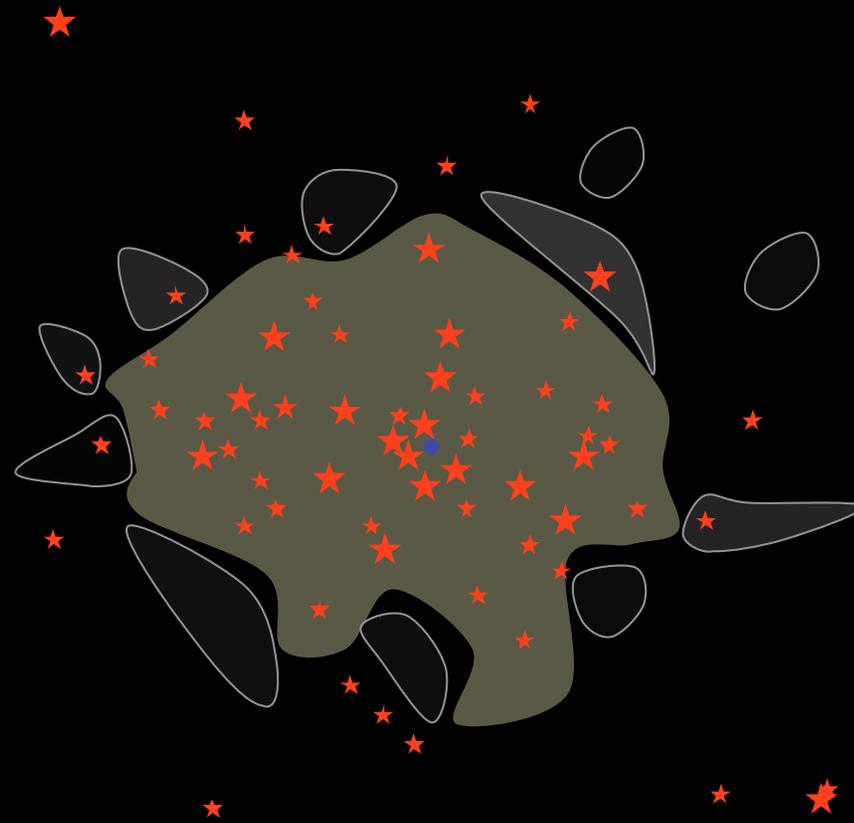


massearme Objekte können heraus geschleudert werden --> Ende der Akkretion





Feedback beendet die Sternbildung

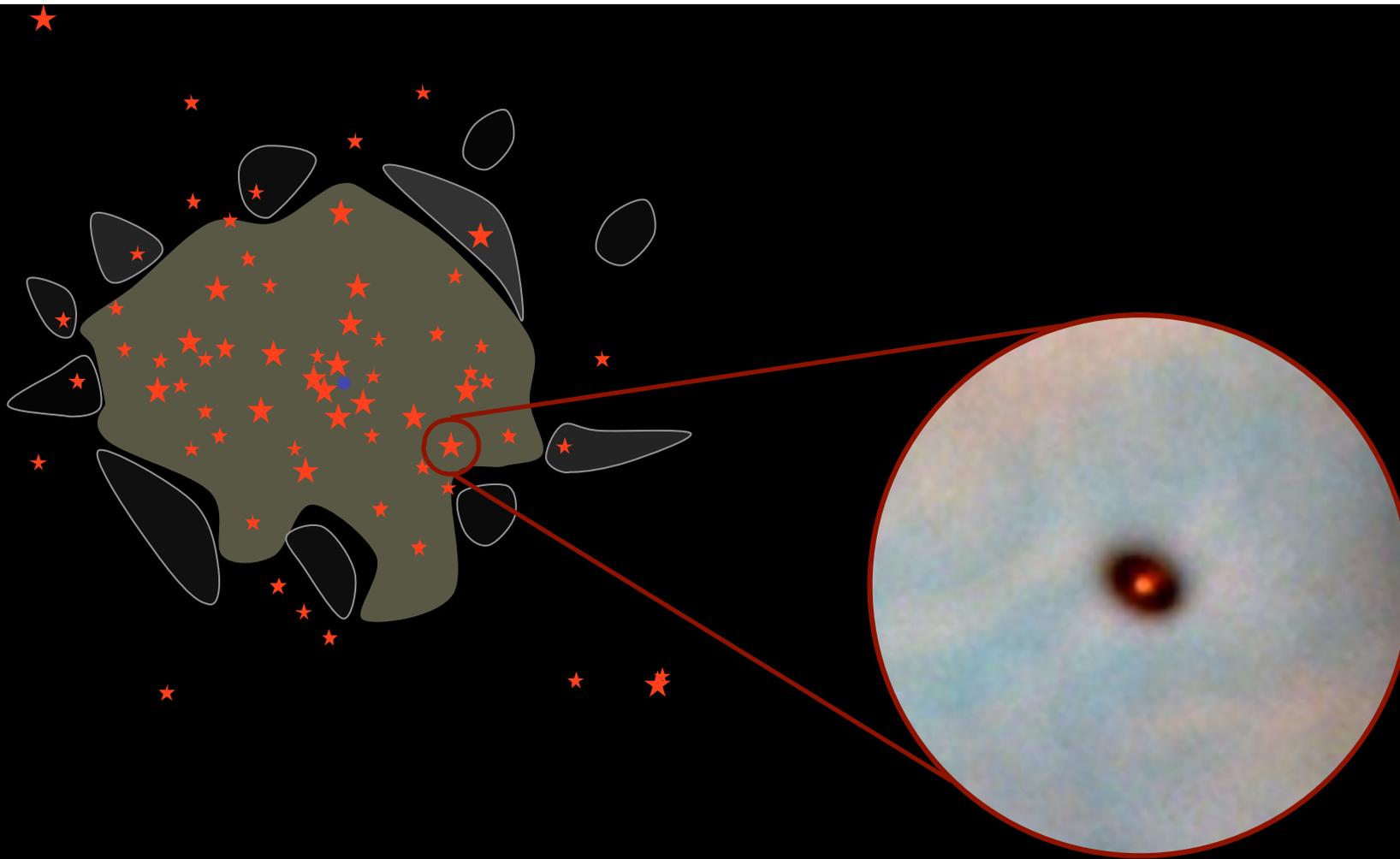


Resultat: *Sternhaufen*, evtl. umgeben von H_{II}-Region

mehrere massereiche Sterne

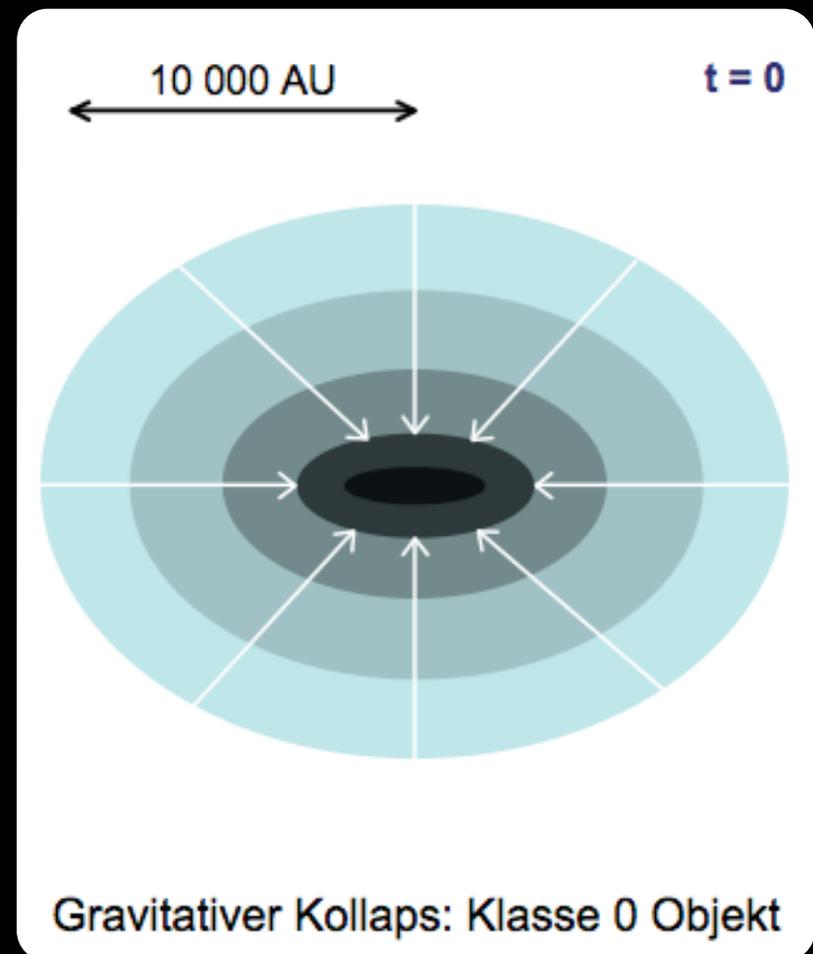
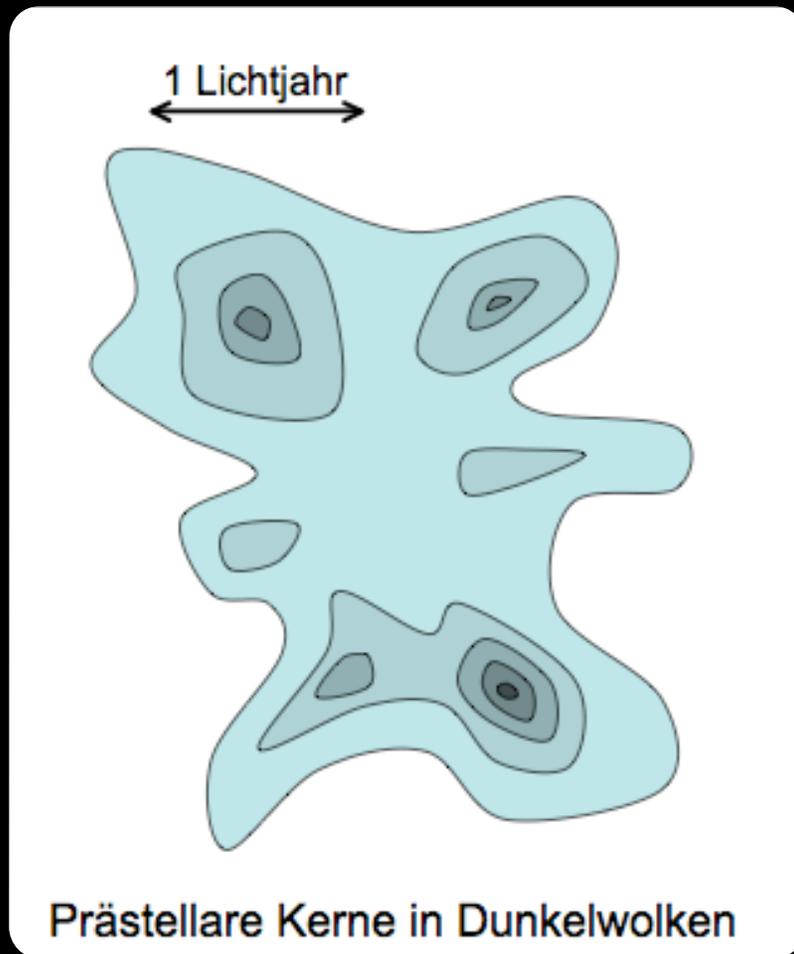


NGC 602 in der Großen Magellanschen Wolke: Hubble Heritage Image

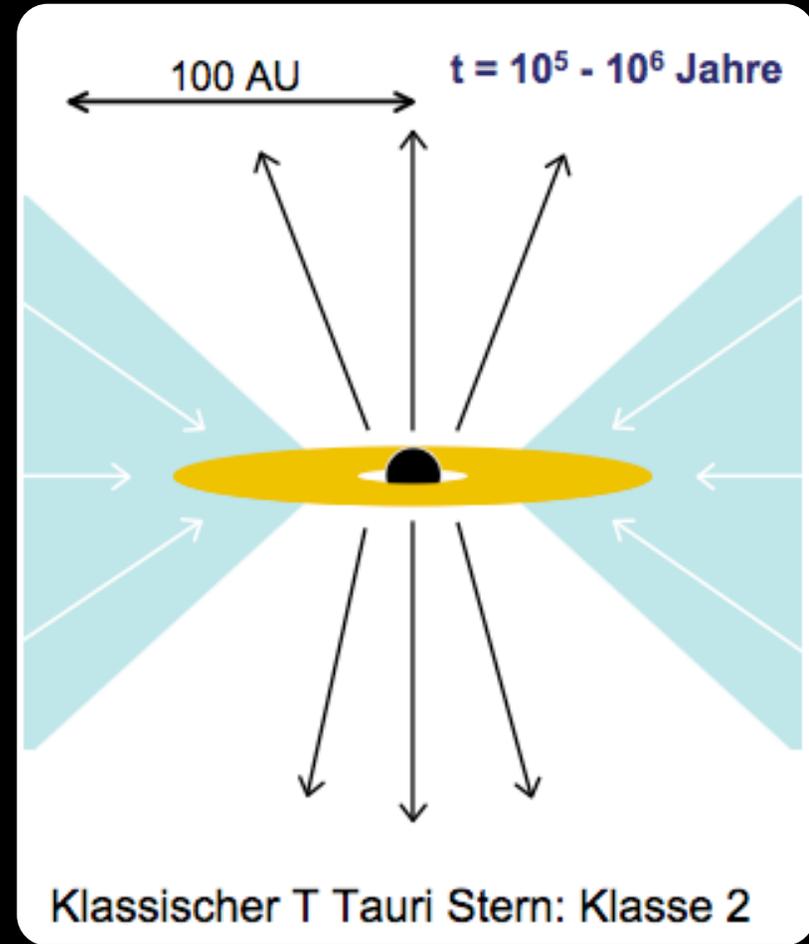
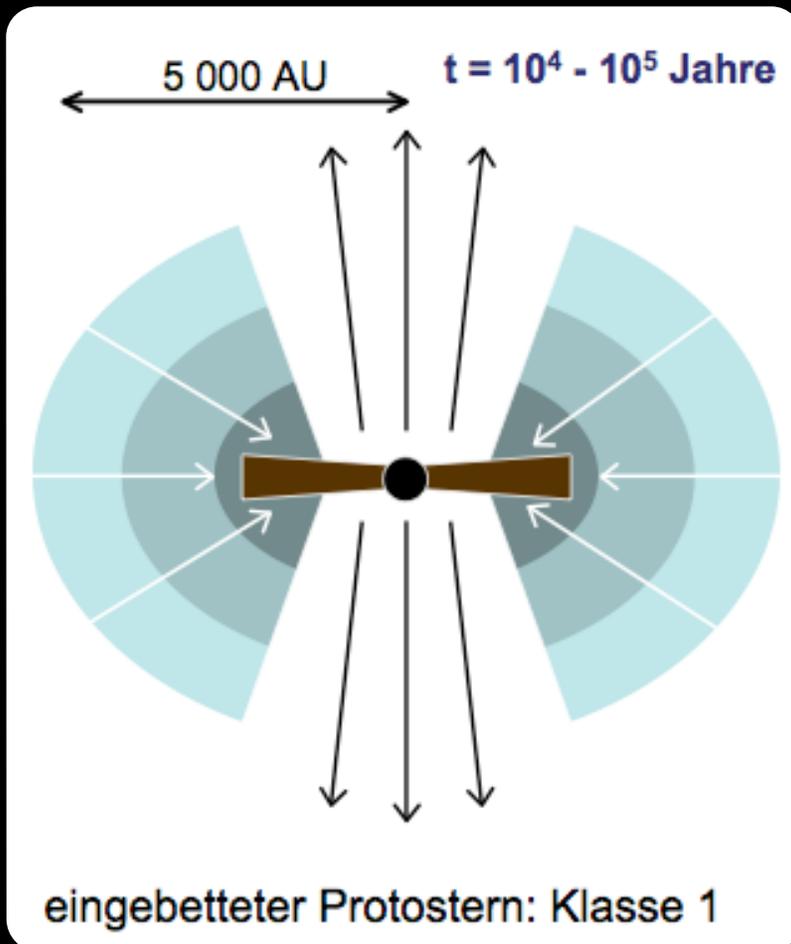


Wie ist die Entwicklung vom
Protostern zum Stern?

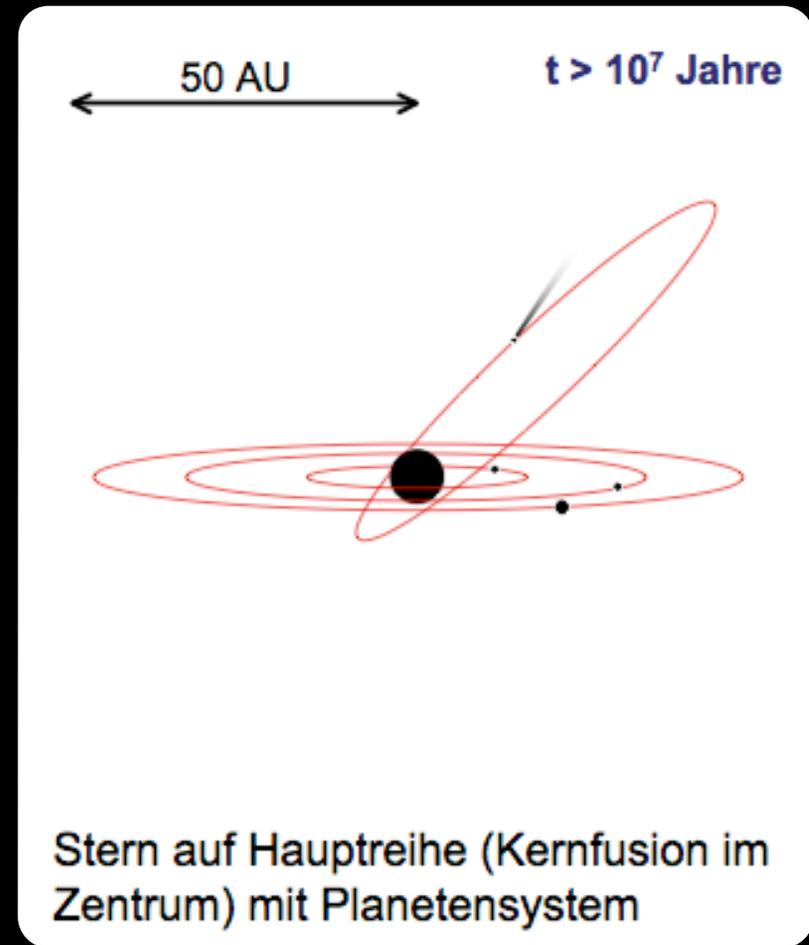
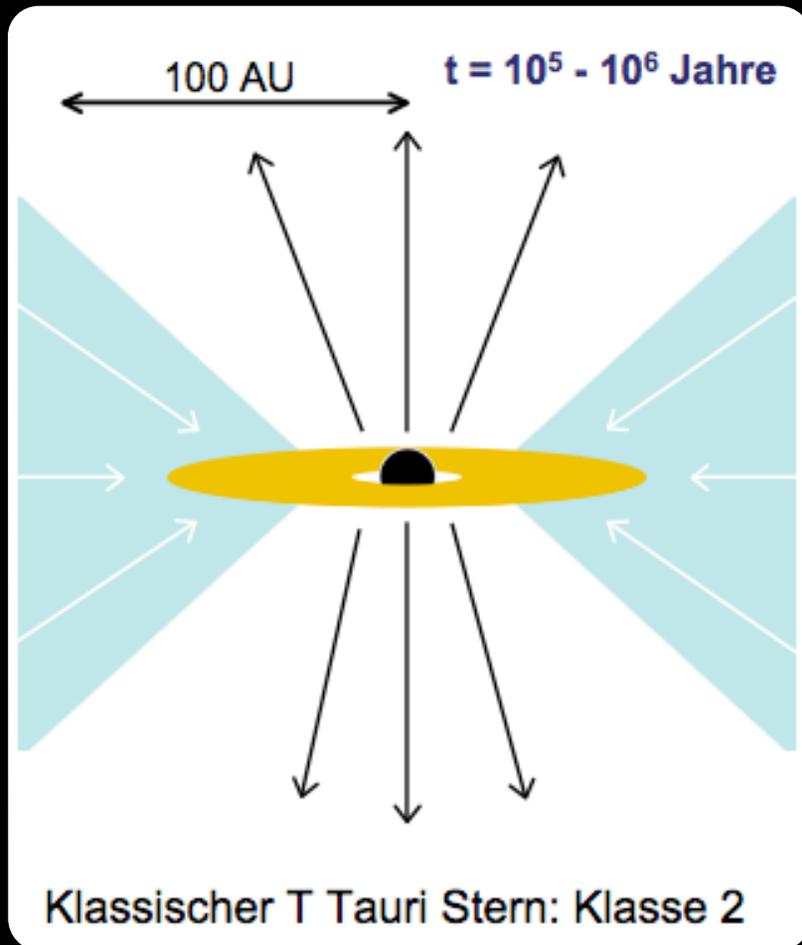
Stadien der Sternbildung 1



Stadien der Sternbildung 2



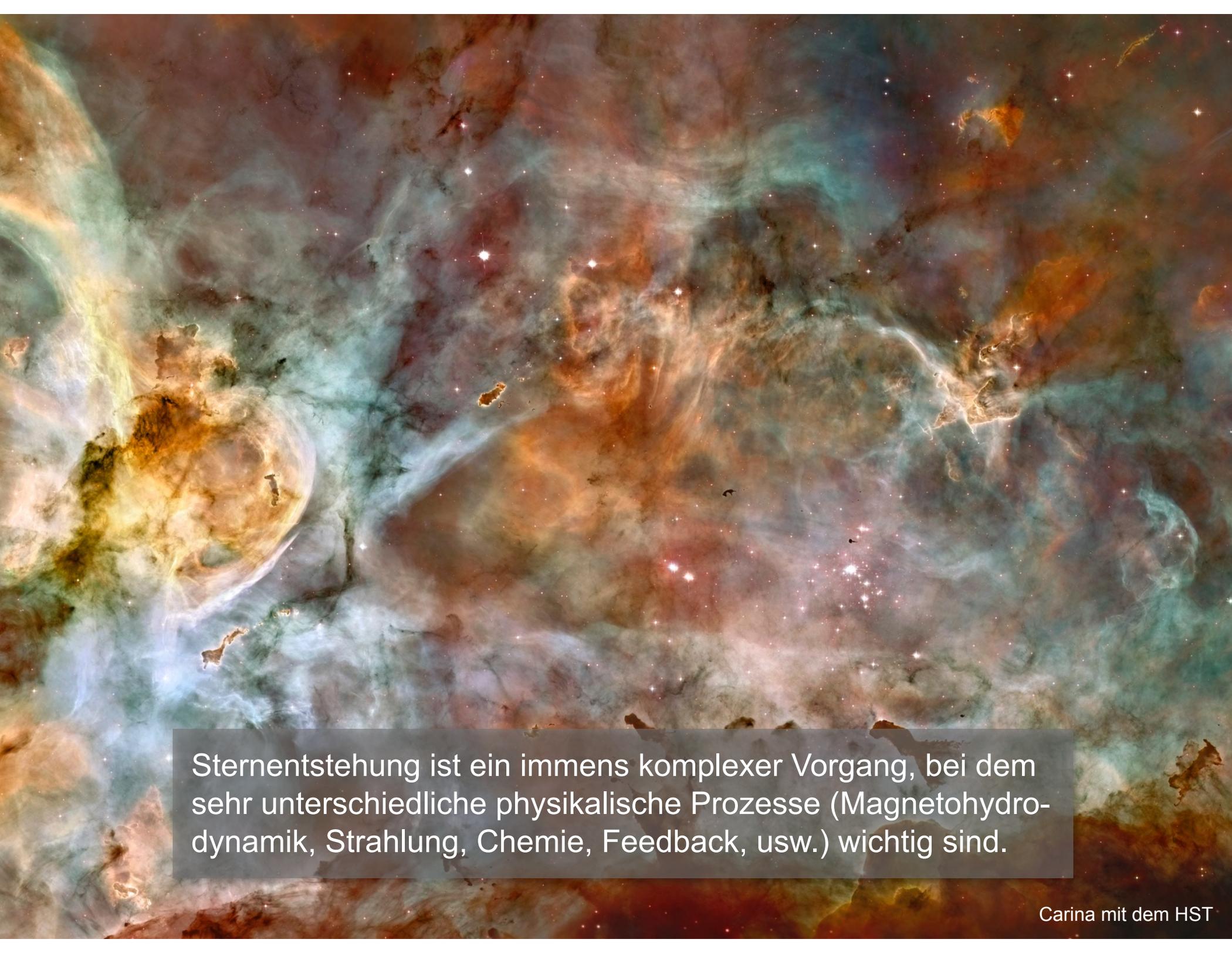
Stadien der Sternbildung 3



Zusammenfassung

Zusammenfassung

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



Sternentstehung ist ein immens komplexer Vorgang, bei dem sehr unterschiedliche physikalische Prozesse (Magnetohydrodynamik, Strahlung, Chemie, Feedback, usw.) wichtig sind.

DANKKE