



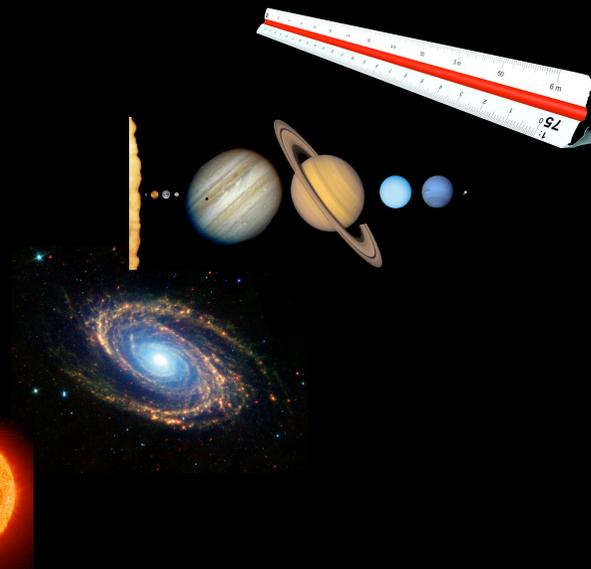
Entstehung der Sterne

Ralf Klessen

Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg

Übersicht

- Astronomische Skalen
- Sonne und Planeten
- Sternhaufen & Milchstraße
- Sternentstehung
- Teleskope



Astronomische Skalen



l m

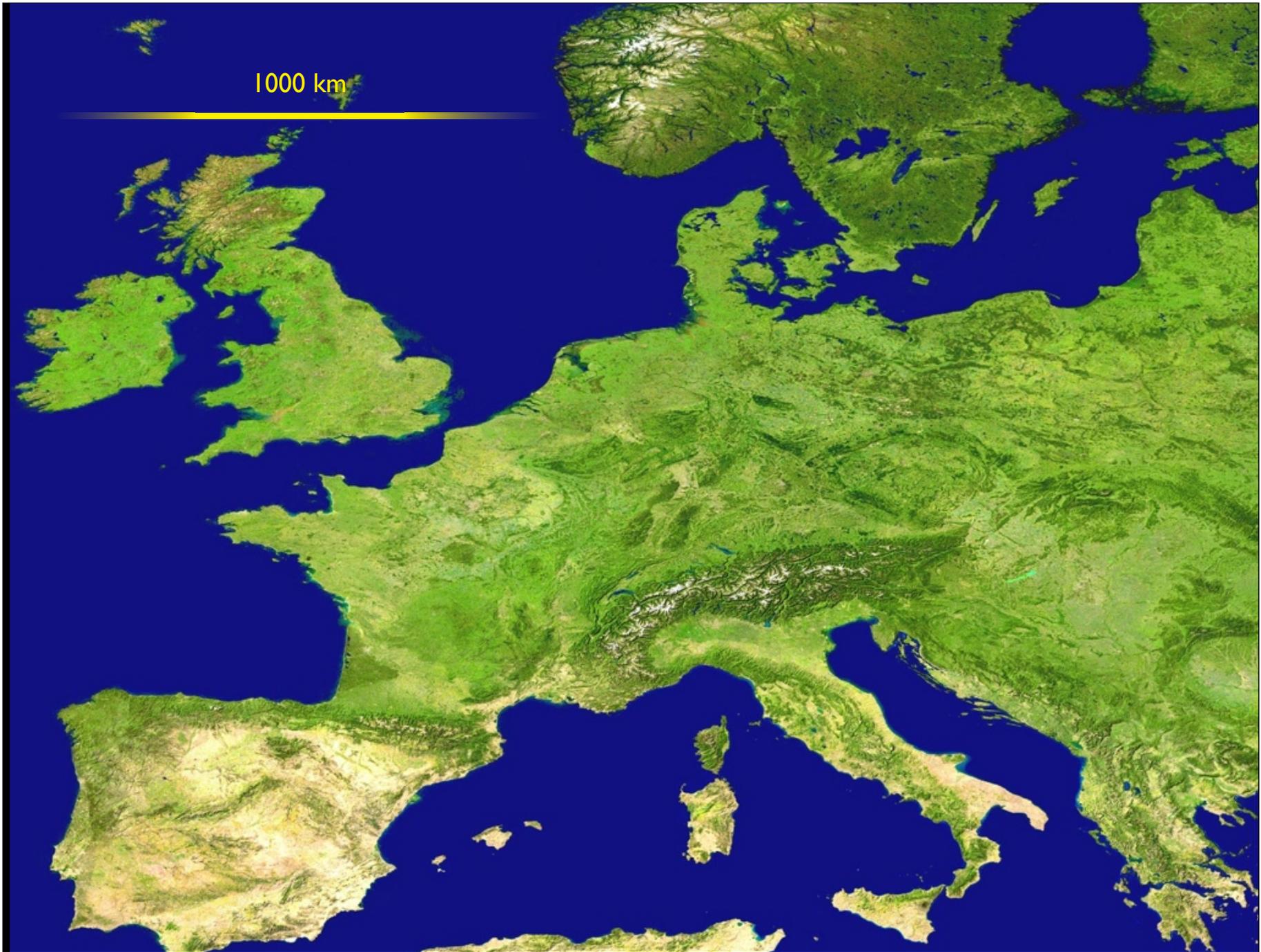
10 m



100 m







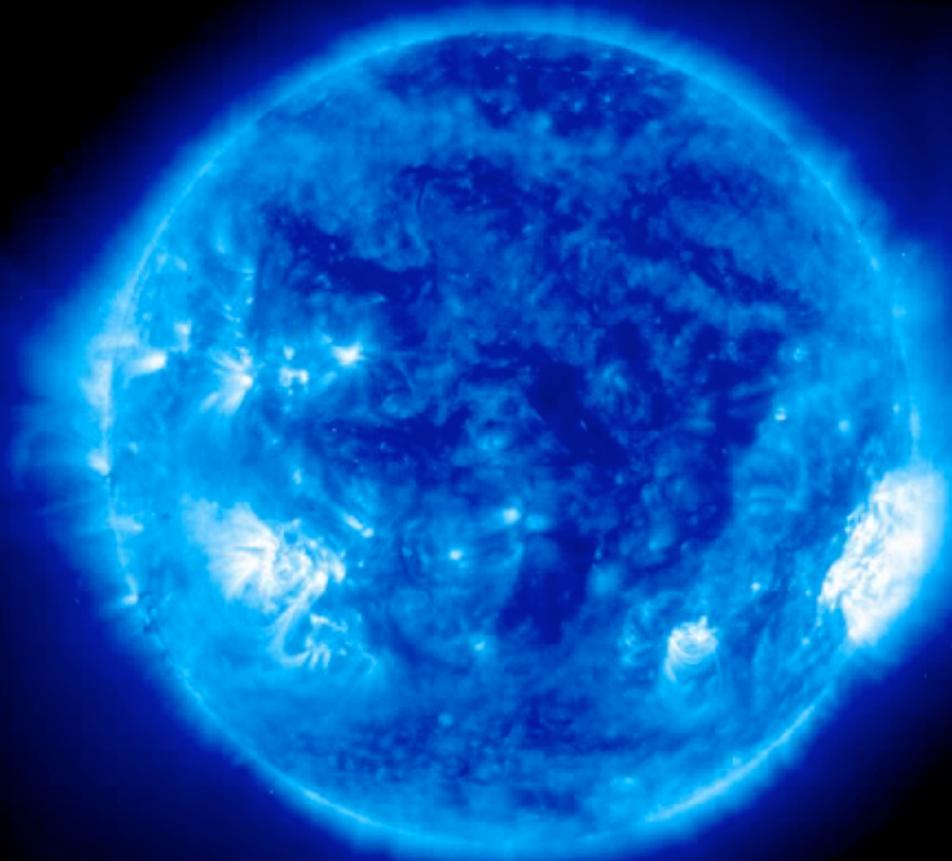
10.000 km



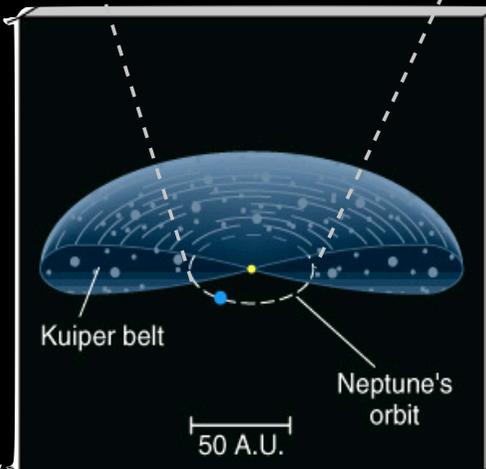
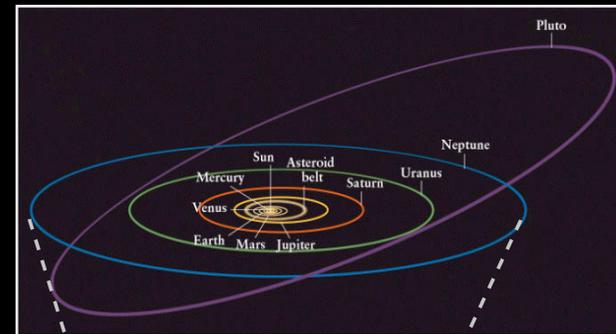
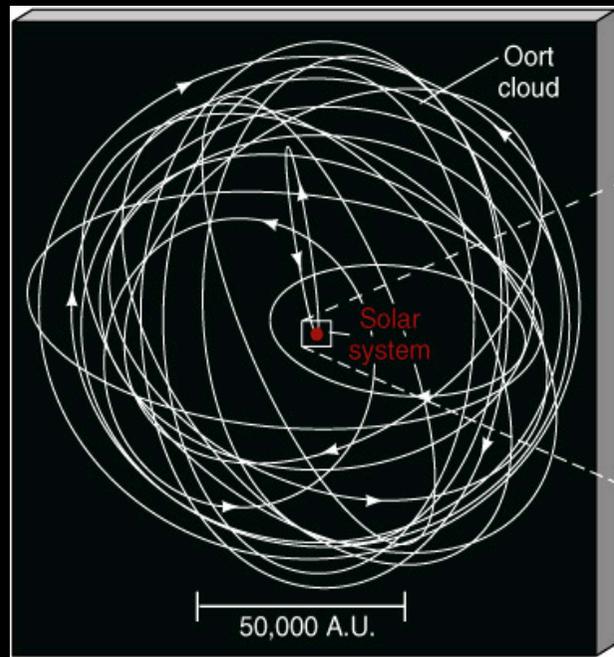


1.000.000 km

2003/08/12 13:00

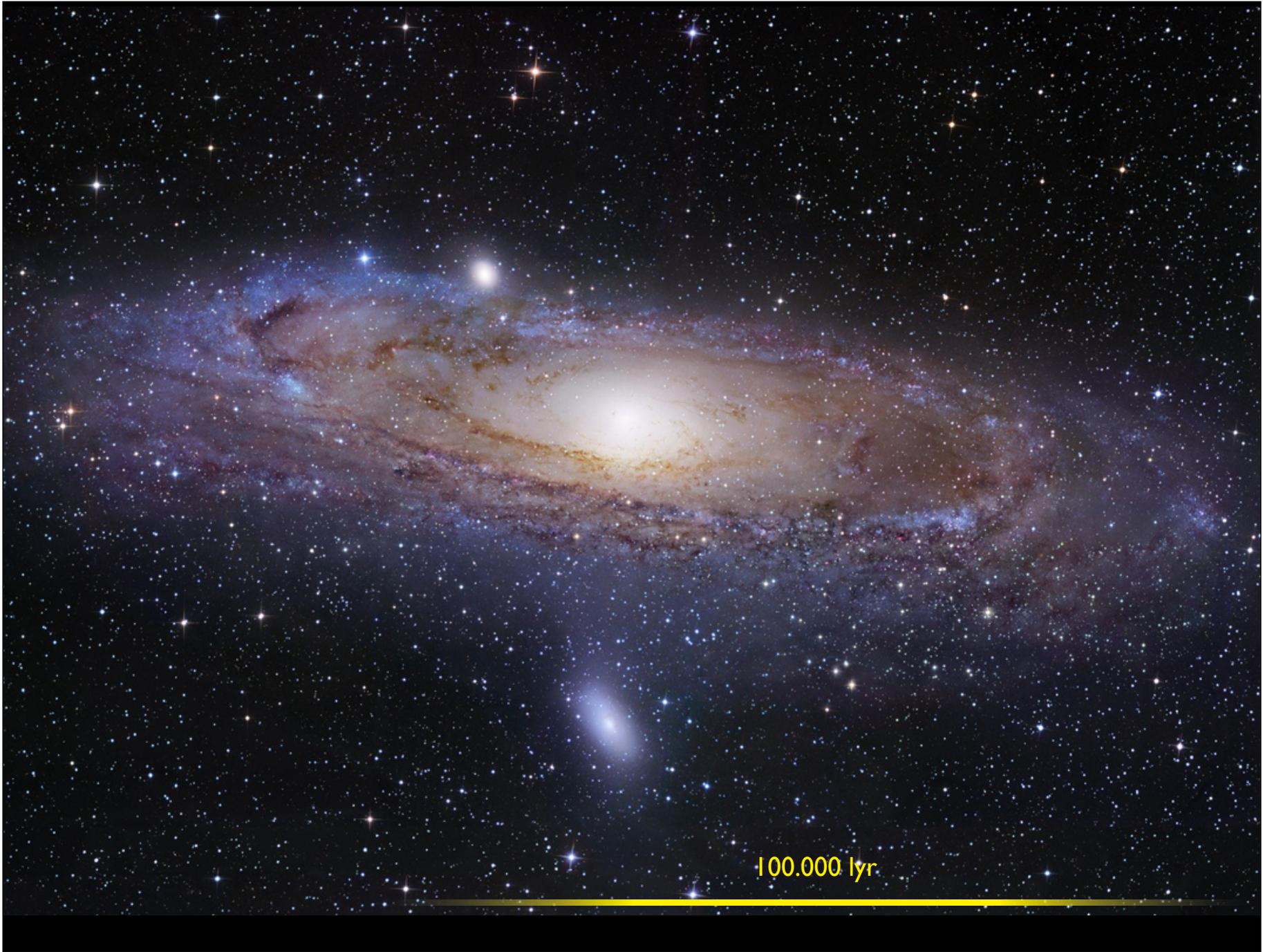


10.000.000.000.000 km

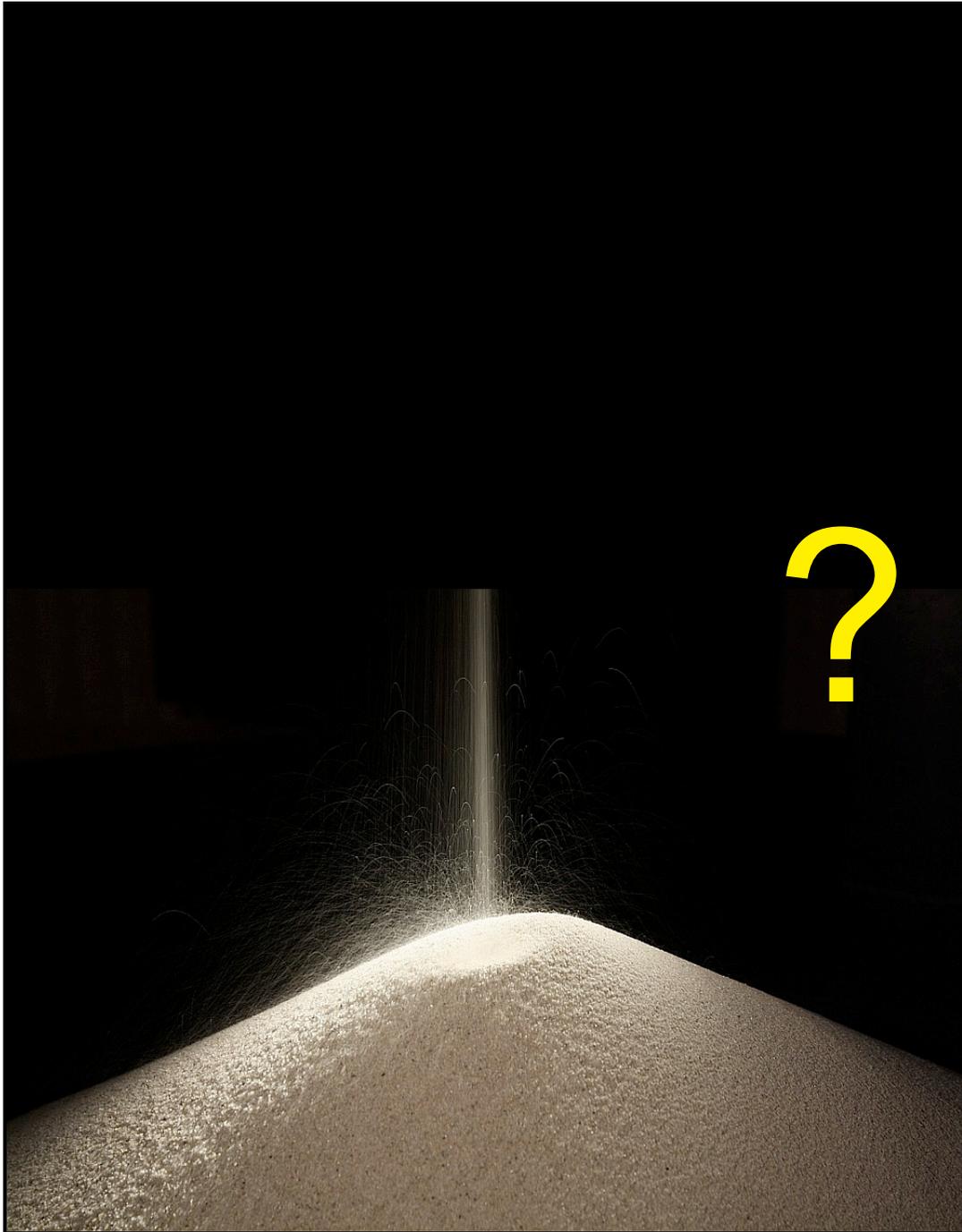


10 lyr

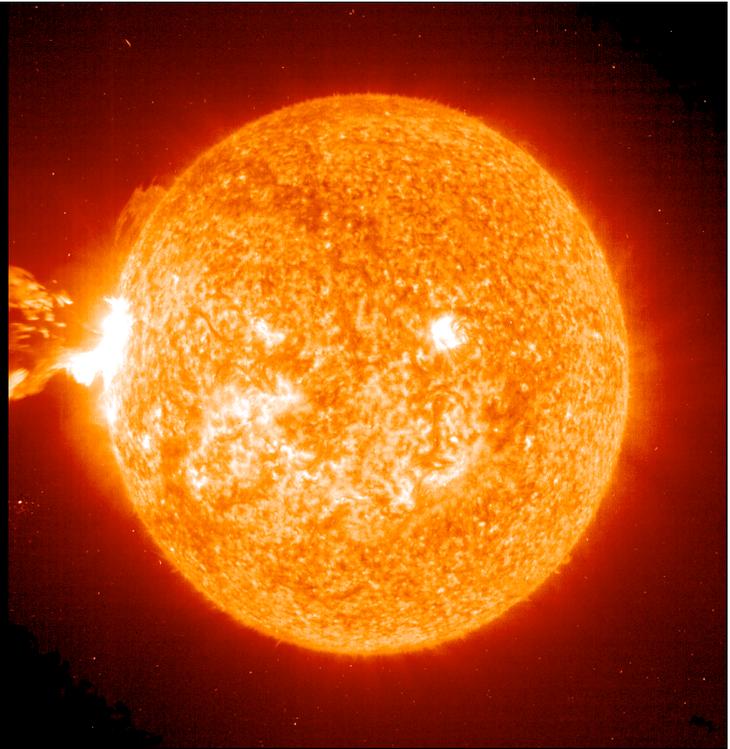




100.000 lyr

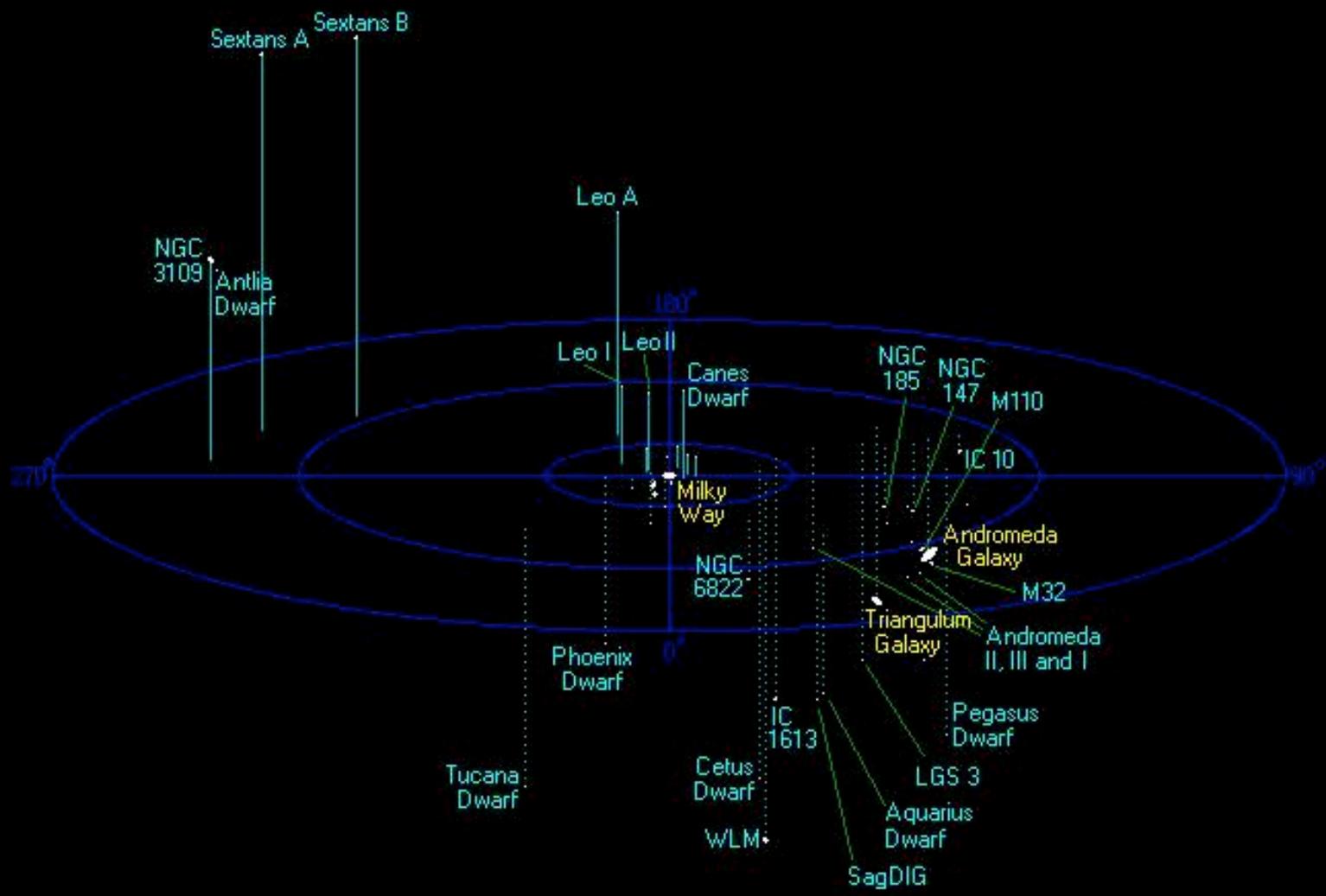


?

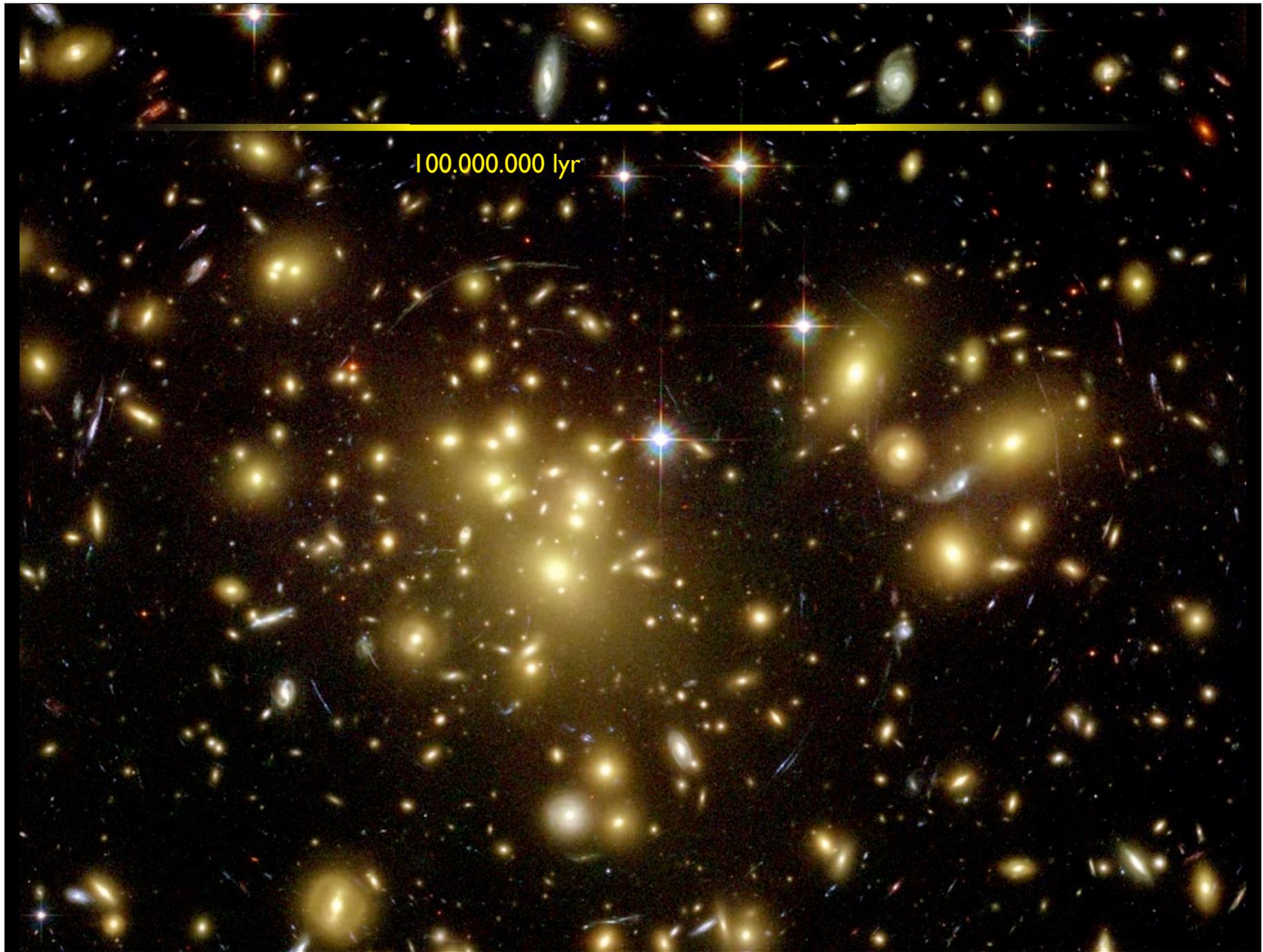


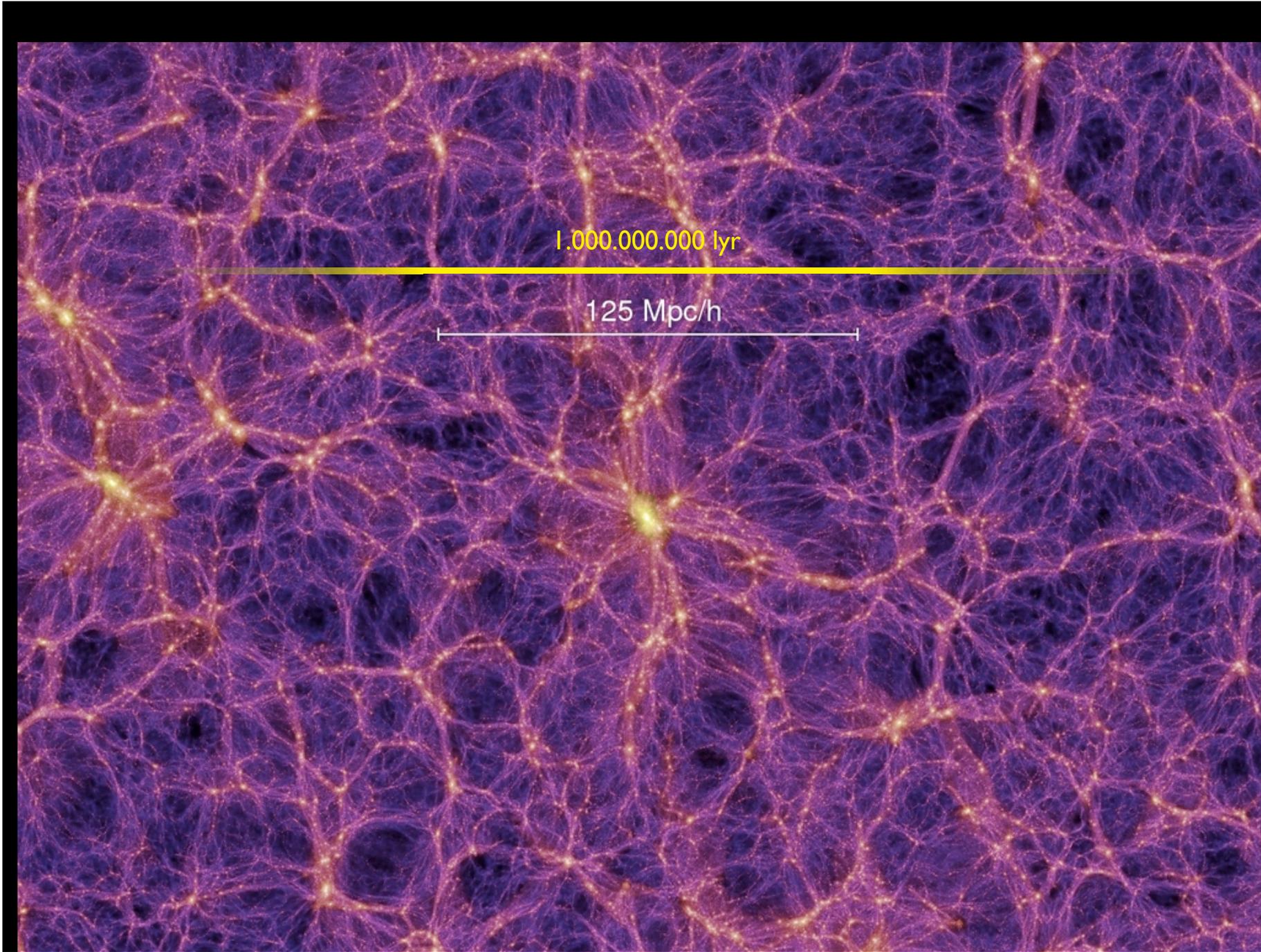
1.000.000 lyr



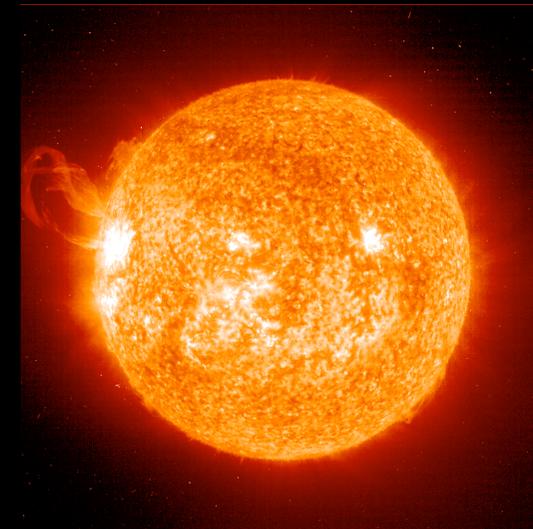
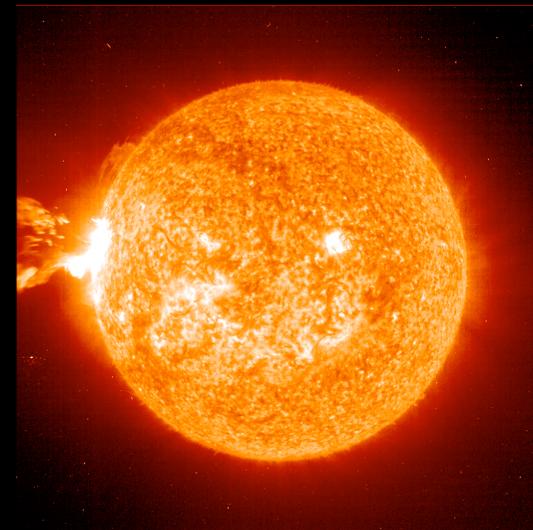
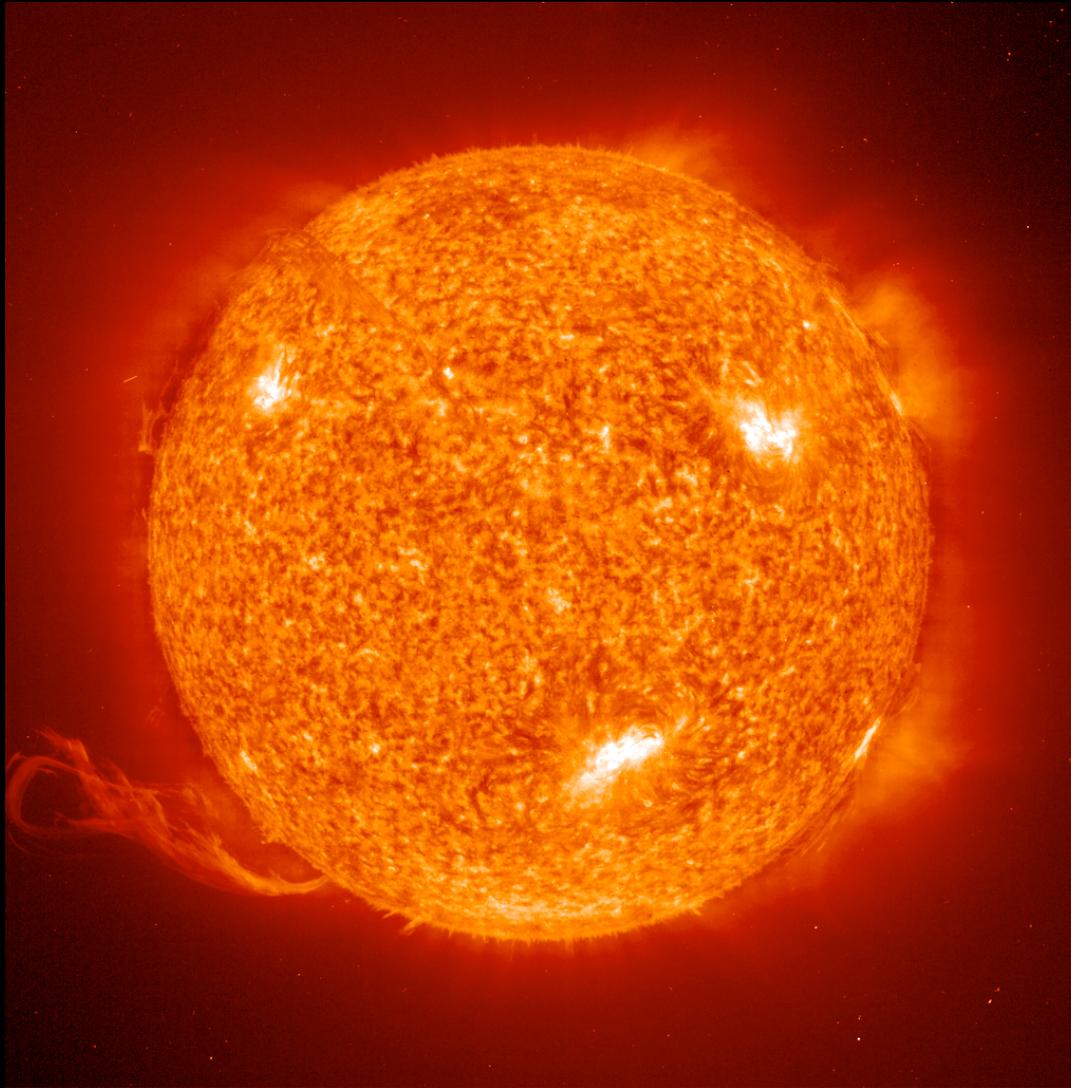


10,000,000 lyr

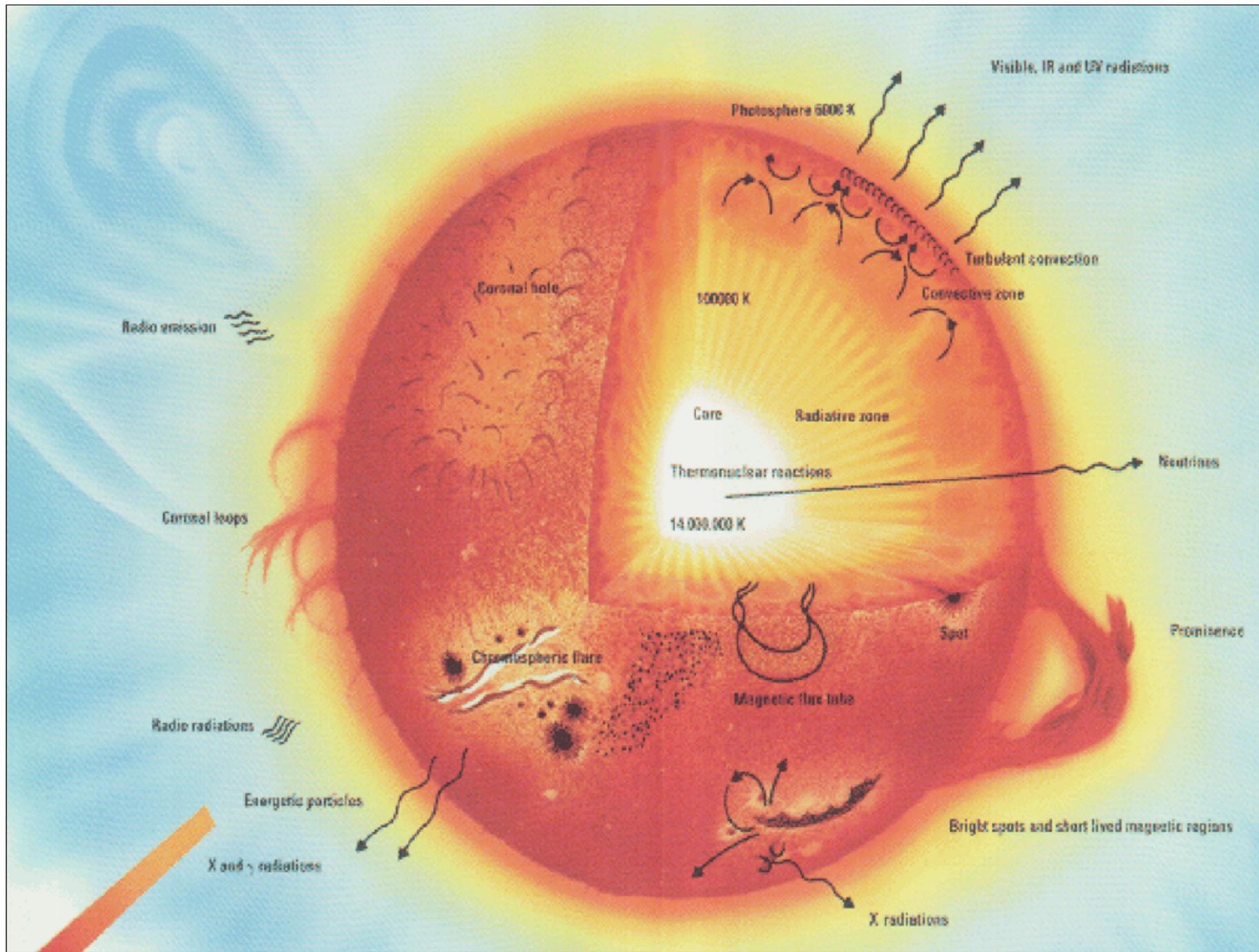


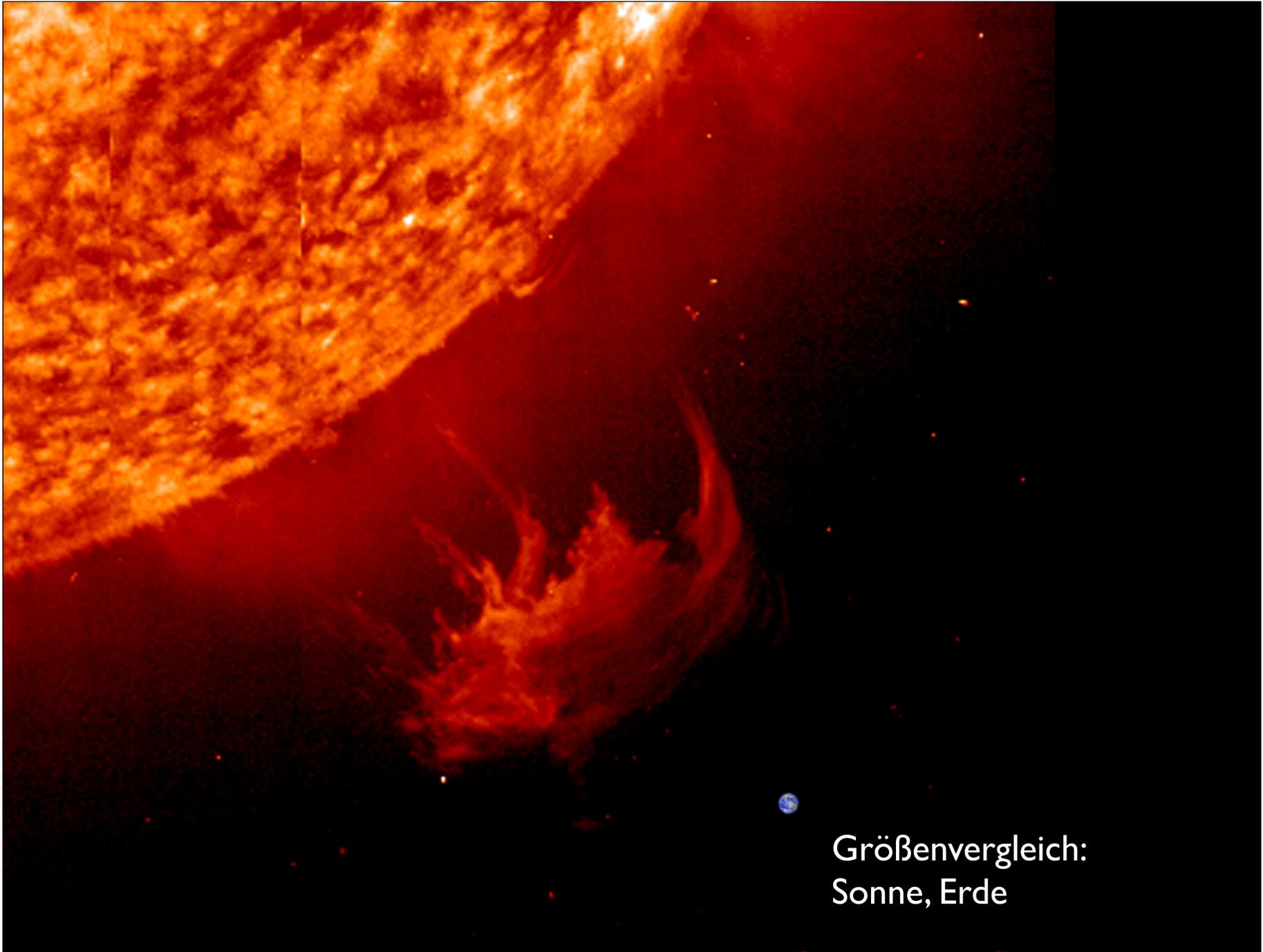


Sonne und Planeten



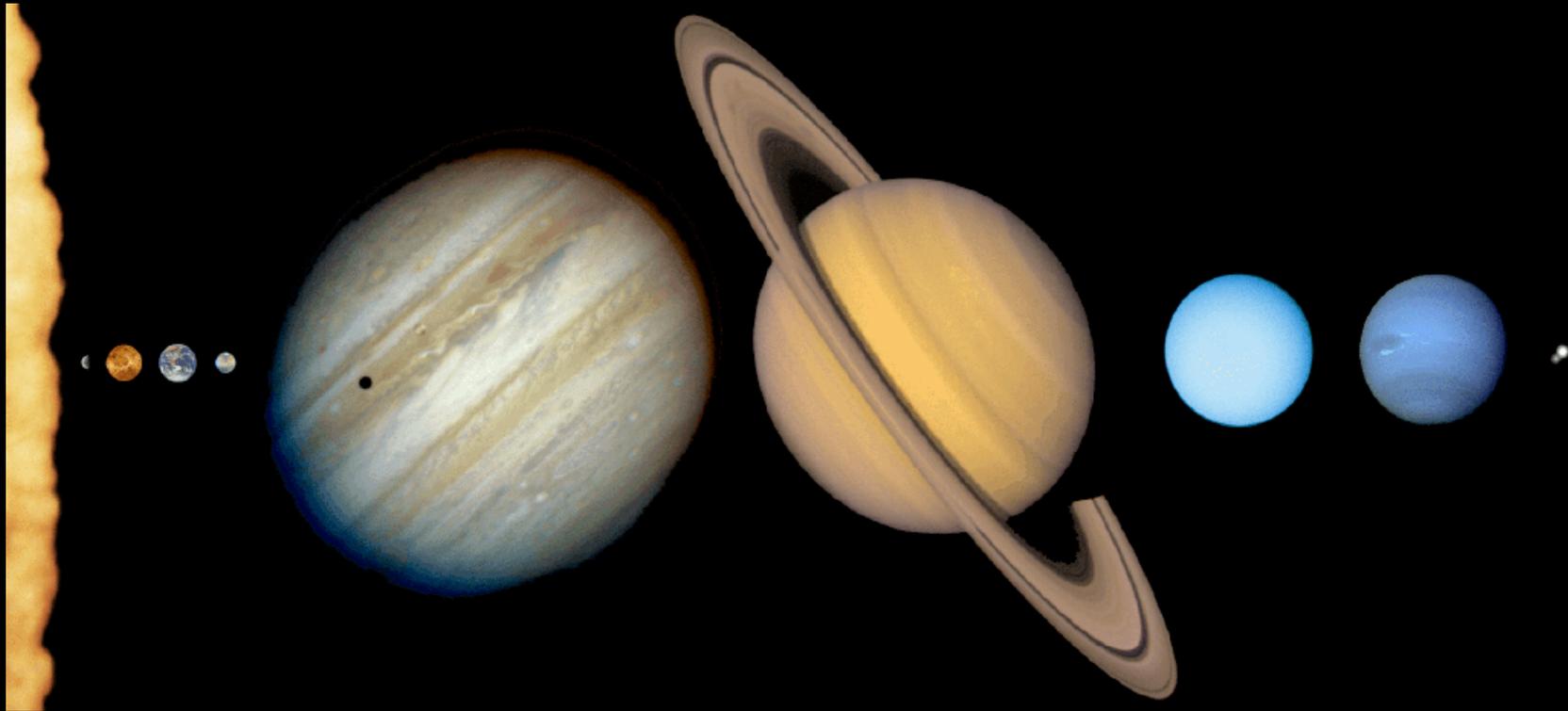
Unsere Sonne in verschiedenen Aktivitätsphasen





Größenvergleich:
Sonne, Erde

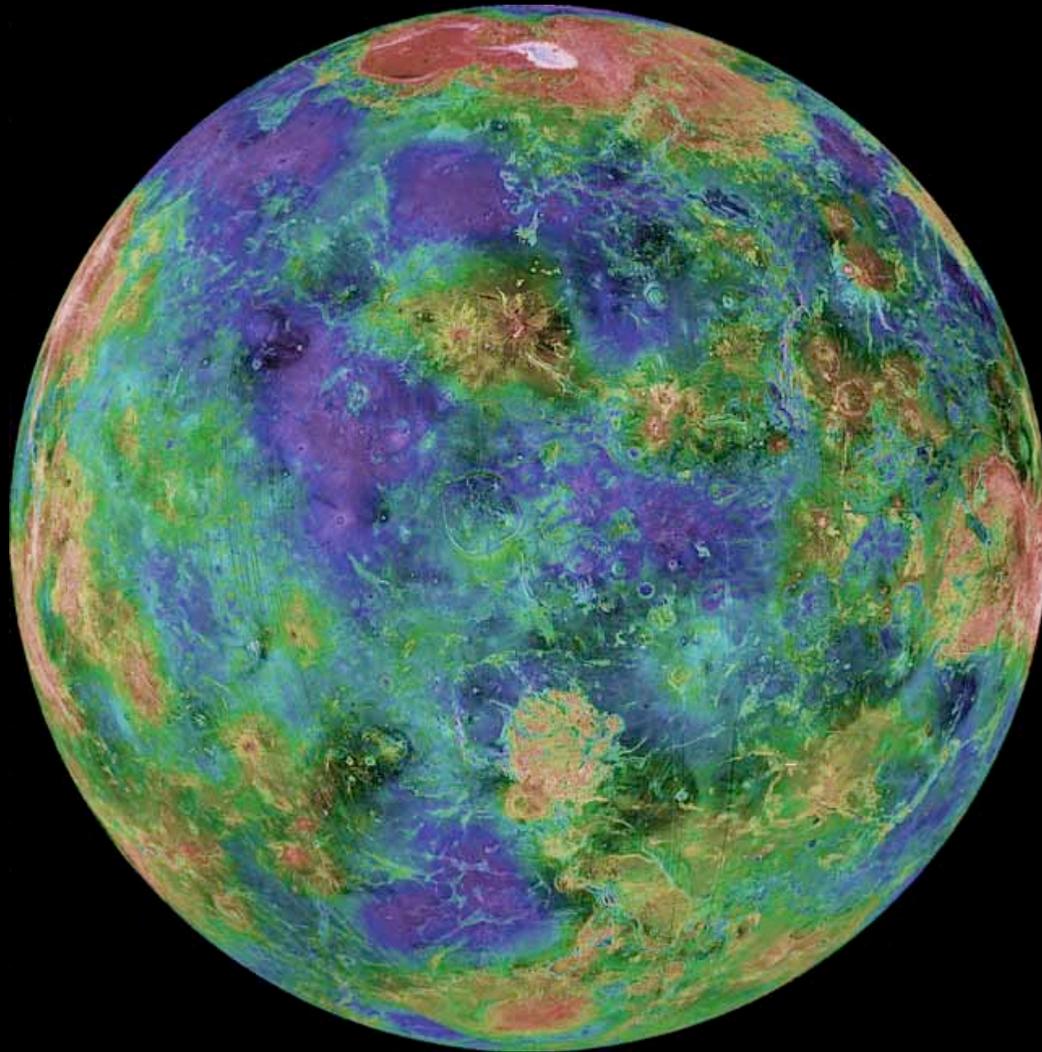
Größenvergleich





Merkur

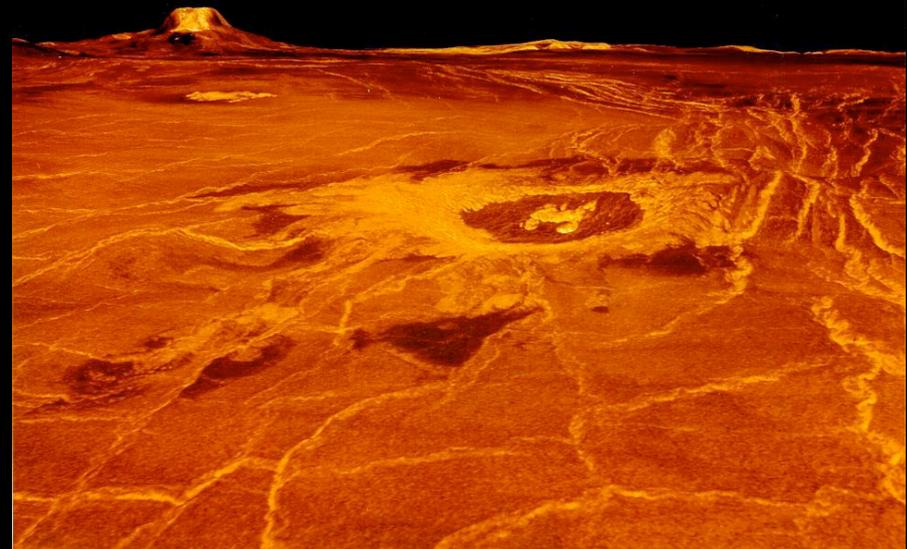
- Merkur ist der innerste Planet.
- Sein Durchmesser ist etwa $\frac{1}{3}$ des der Erde.



Venus

- Venus ist der zweite Planet.
- Sie ist etwa gleich groß wie die Erde.

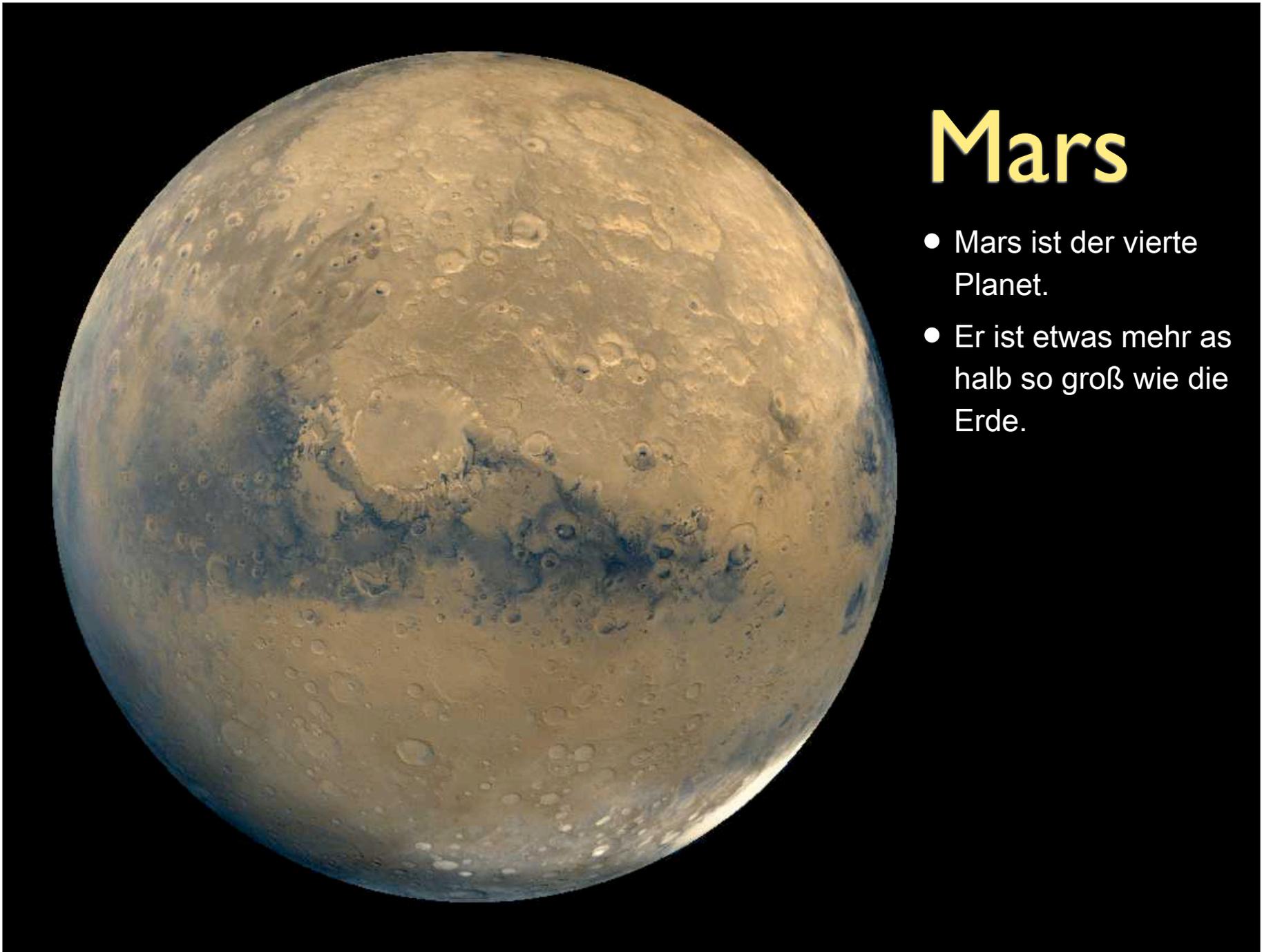
Venus





Erde

- Die Erde ist der dritte Planet.
- Sie hat einen Durchmesser von 12.000 km.



Mars

- Mars ist der vierte Planet.
- Er ist etwas mehr als halb so groß wie die Erde.





der größte Berg
im Sonnensystem:
Olympus Mons

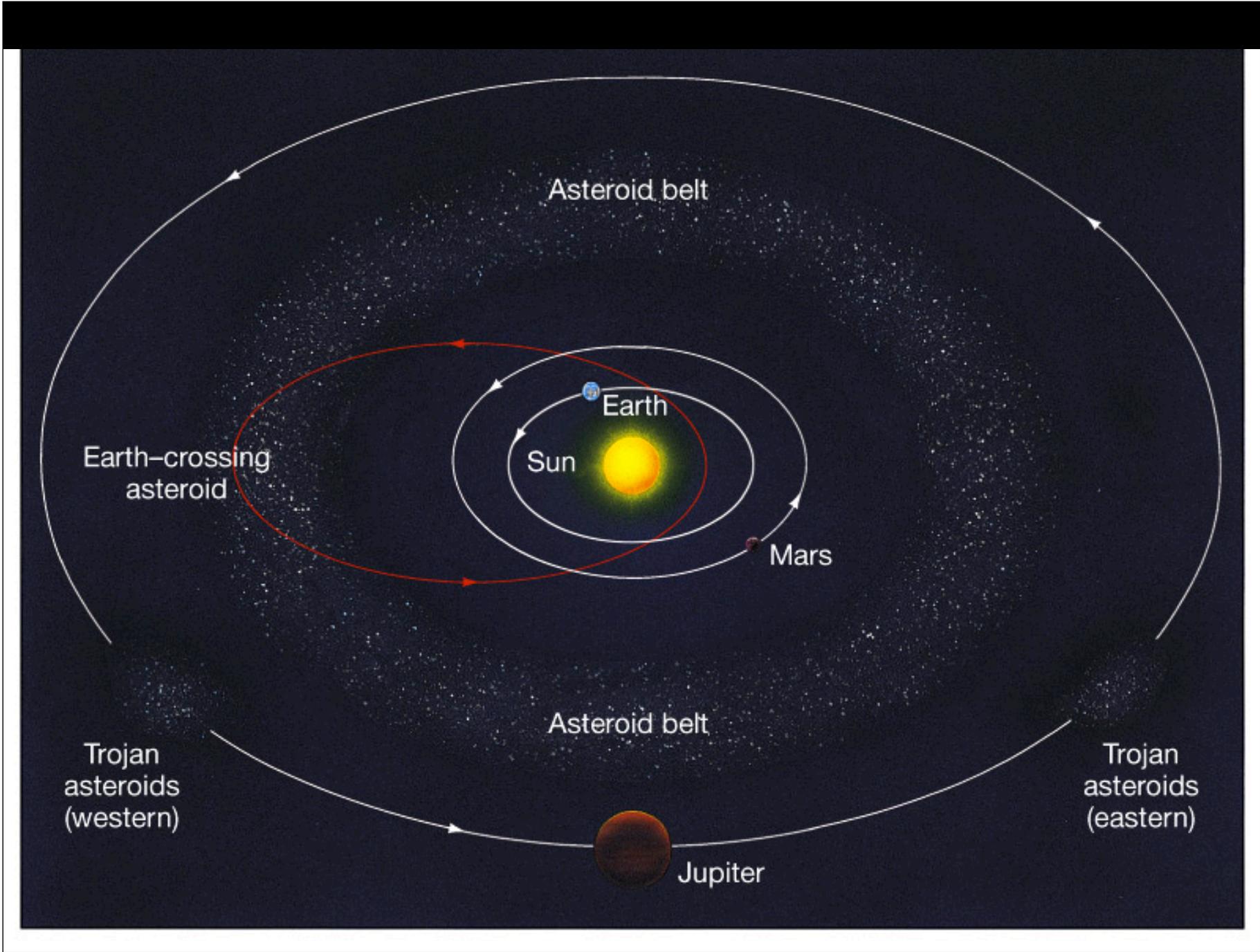


inselartige Strukturen

Netzwerk von Tälern







Asteroiden



Gaspra

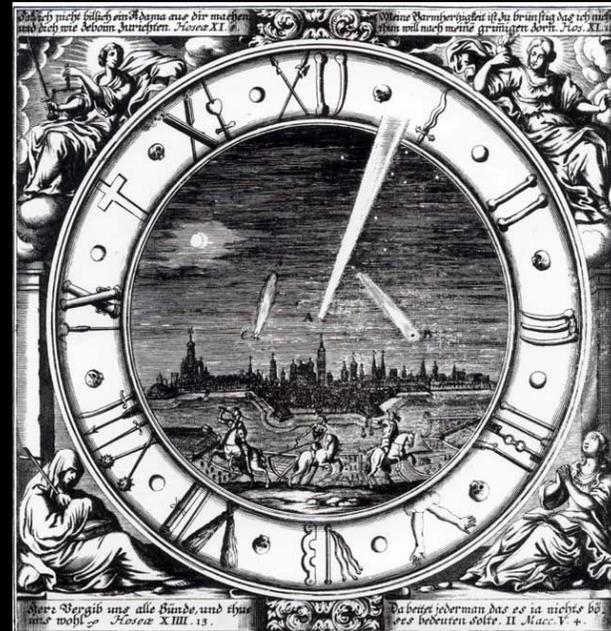


Ida



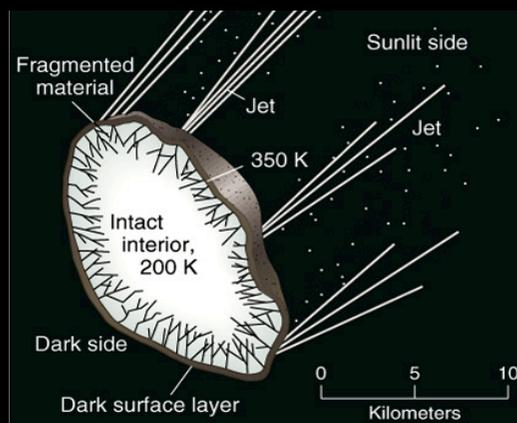
Mathilda

Kometen





Kometenkerne



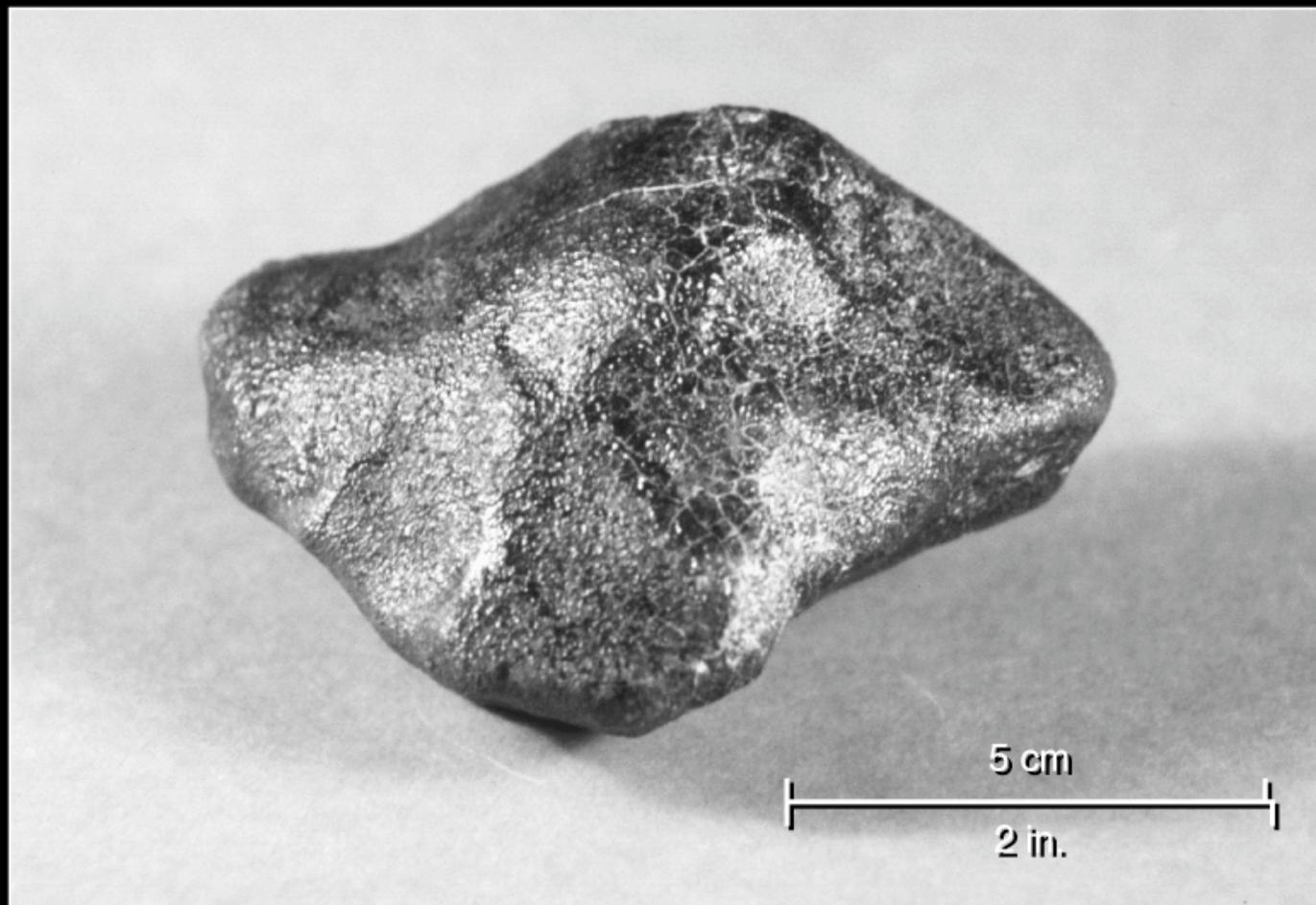
- Kometen sind “schmutzige Schneebälle”
- sobald sie in Sonnennähe kommen fangen sie an zu “schmelzen” / verdampfen
- dieser Dampf bildet den Kometenschweif



**Barringer Crater in
Arizona in den USA**



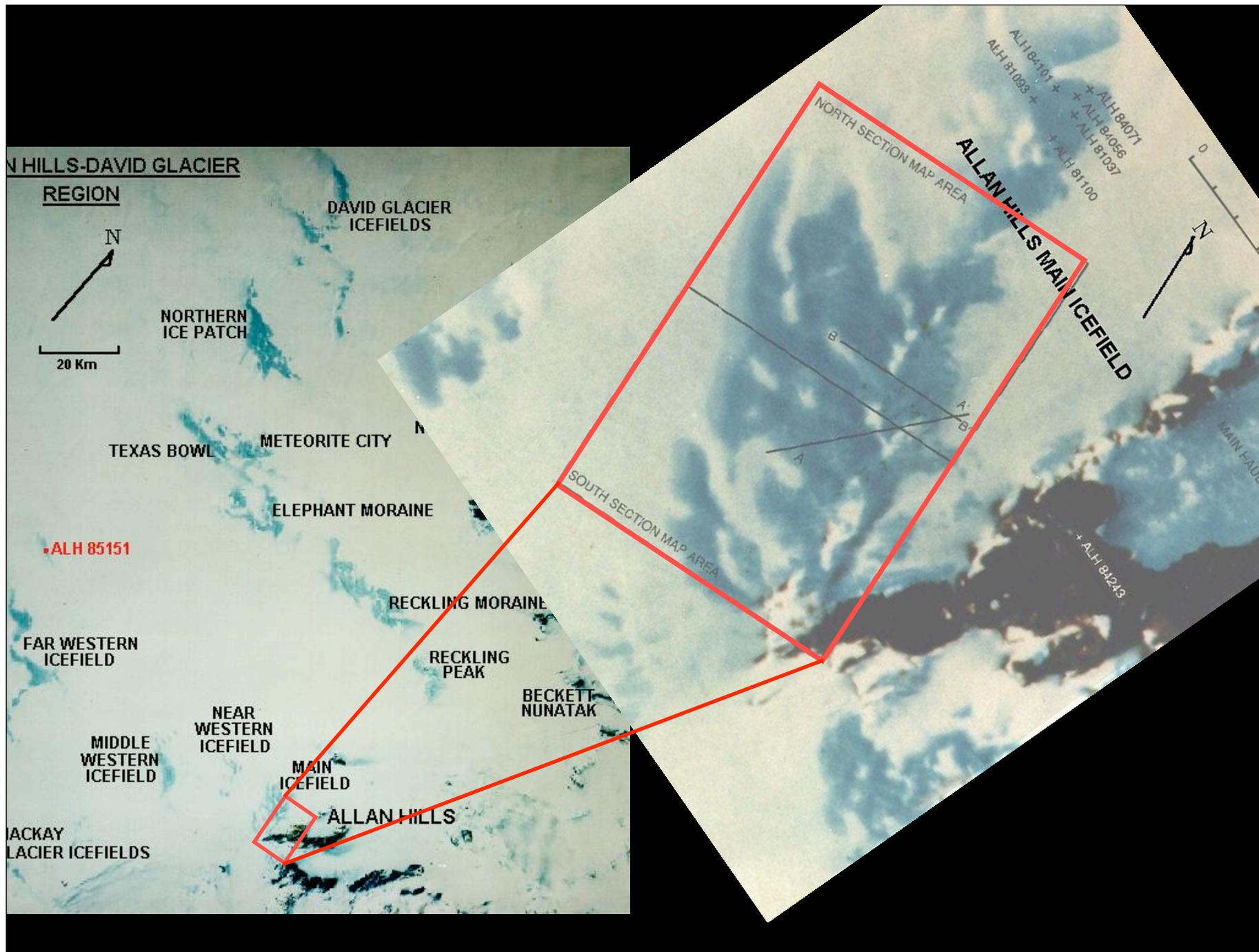
Der Manicouagan
See in Eastern
Ontario in
Kanada.



Meteroite · Fragment of Vesta

Lab Photograph · Russel Kempton, New England Meteoritical Services

PRC95-20B · ST Sci OPO · April 19, 1995 · B. Zellner (GA Southern Univ.), NASA



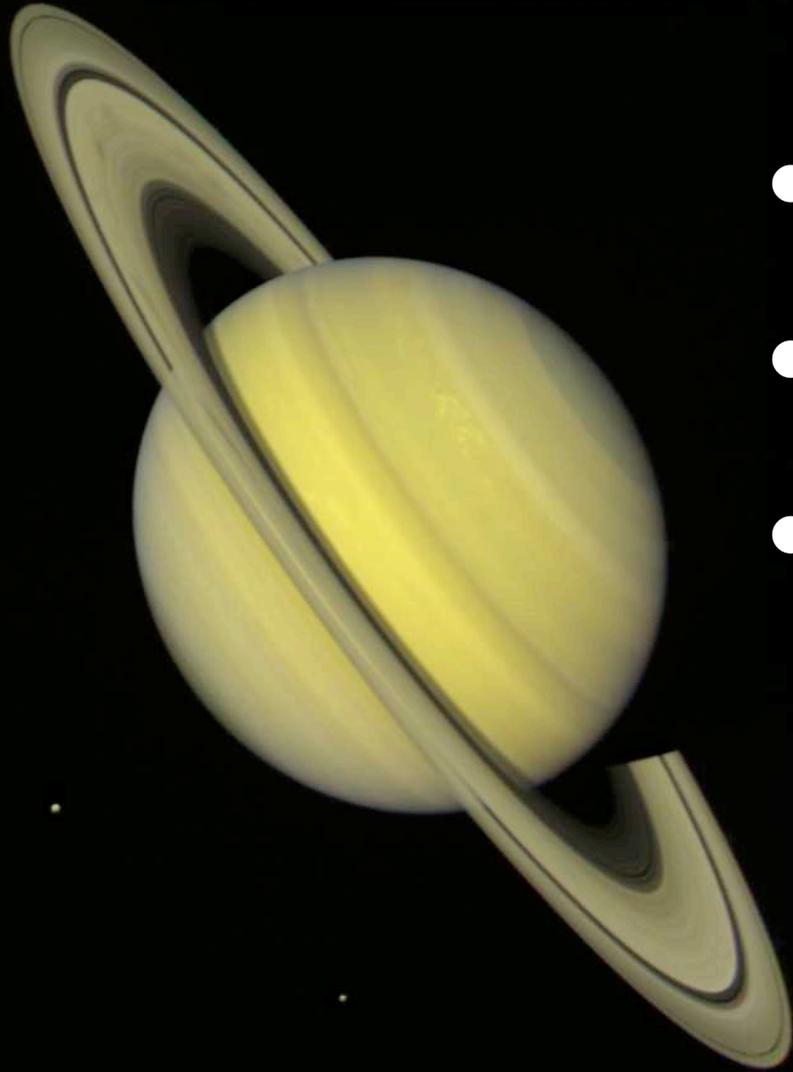


Jupiter



- Größter Planet des Sonnensystems
- Ist etwa 10x größer als die Erde.
- Ist etwa 10x kleiner als die Sonne.

Saturn



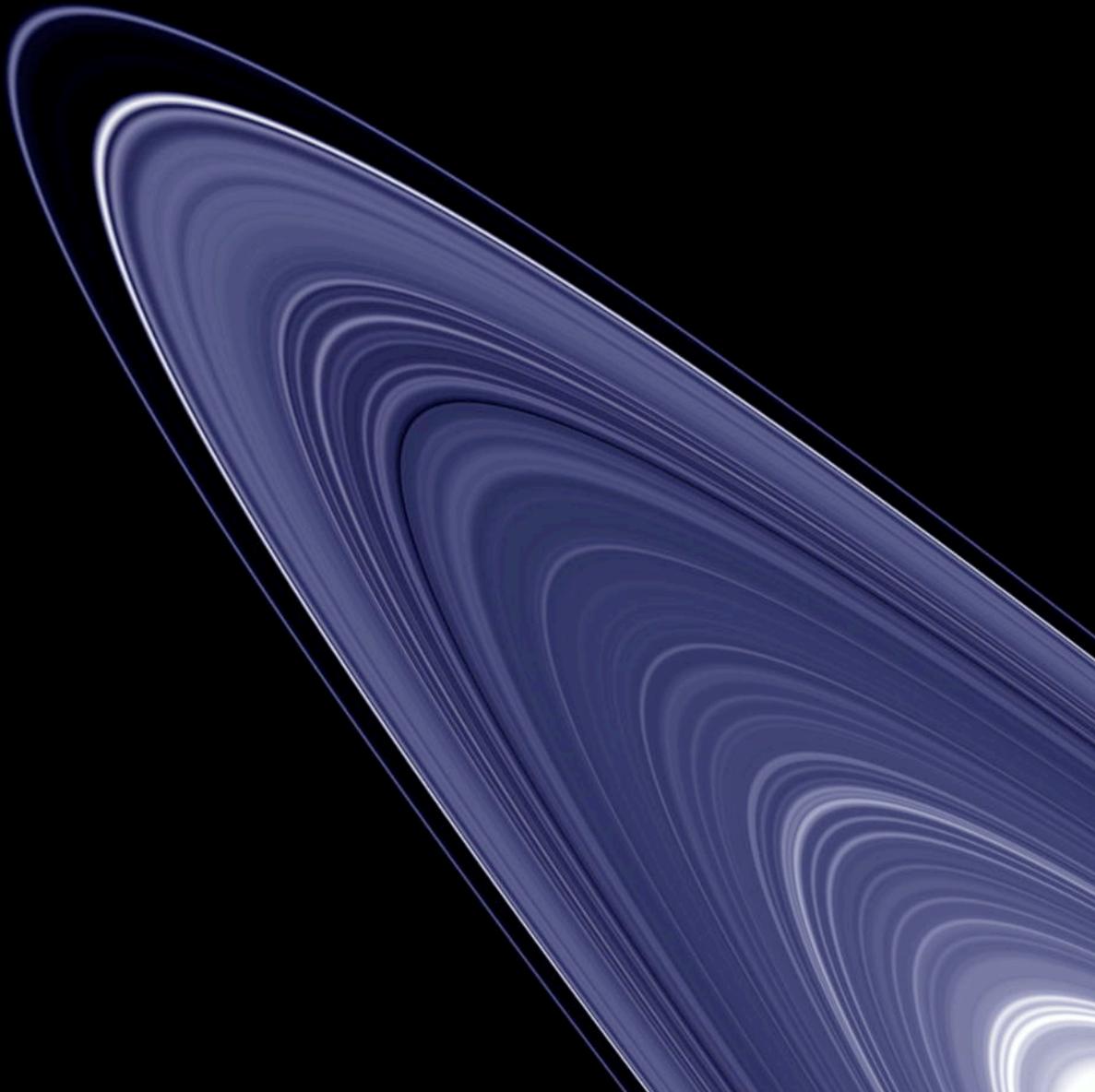
- Zweitgrößter Planet des Sonnensystems
- Ist etwas kleiner als Jupiter.
- Hat ausgeprägteste Ringstruktur



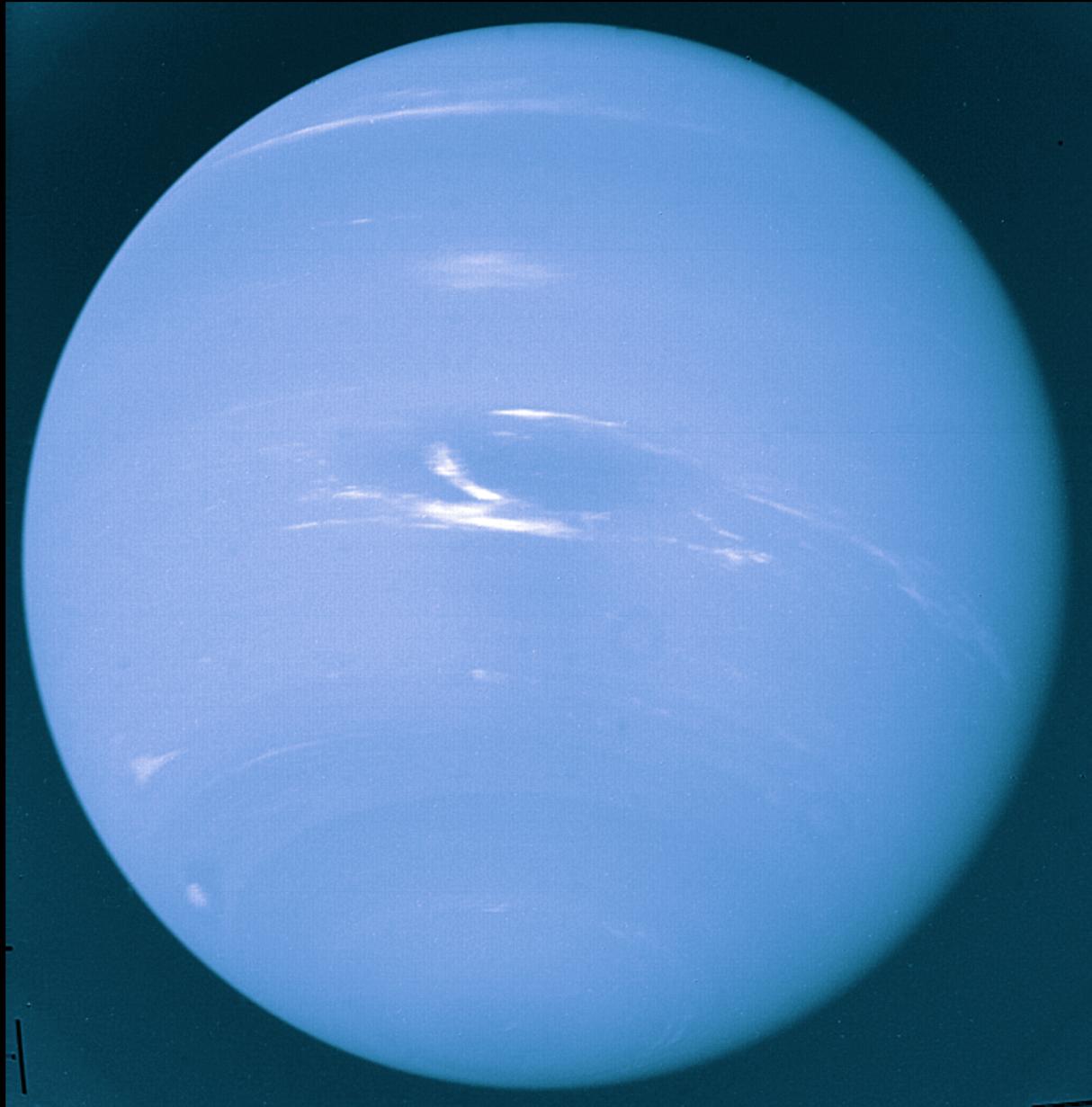
Uranus

Uranus

© Copyright Calvin J. Hamilton



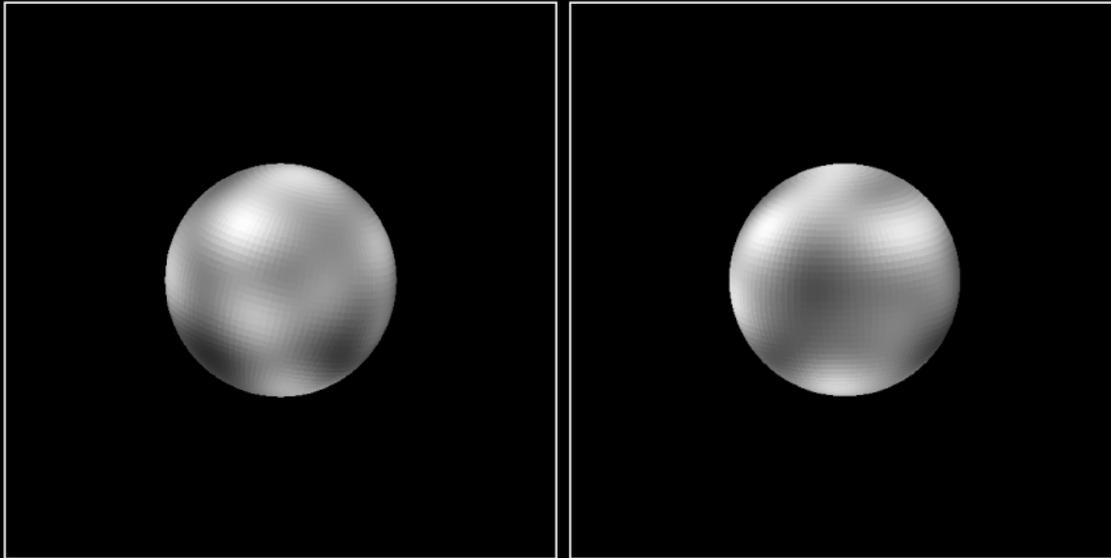
Alle
Gasplaneten
haben Ringe.
Das gilt auch
für Uranus.



Neptun

Pluto

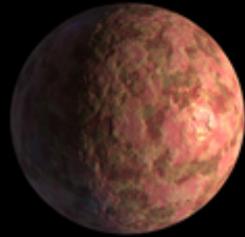
Seit einigen Jahren ist Pluto kein Planet mehr, sondern ein Zwergplanet. Es gibt viele andere Zwergplaneten.



Pluto

PRC96-09a · ST ScI OPO · March 7, 1996 · A. Stern (SwRI), M. Buie (Lowell), NASA, ESA

HST · FOC



Sedna
800-1100 miles
in diameter



Quaoar
(800 miles)



Pluto
(1400 miles)



Moon
(2100 miles)



Earth
(8000 miles)

Sternhaufen

Plejaden



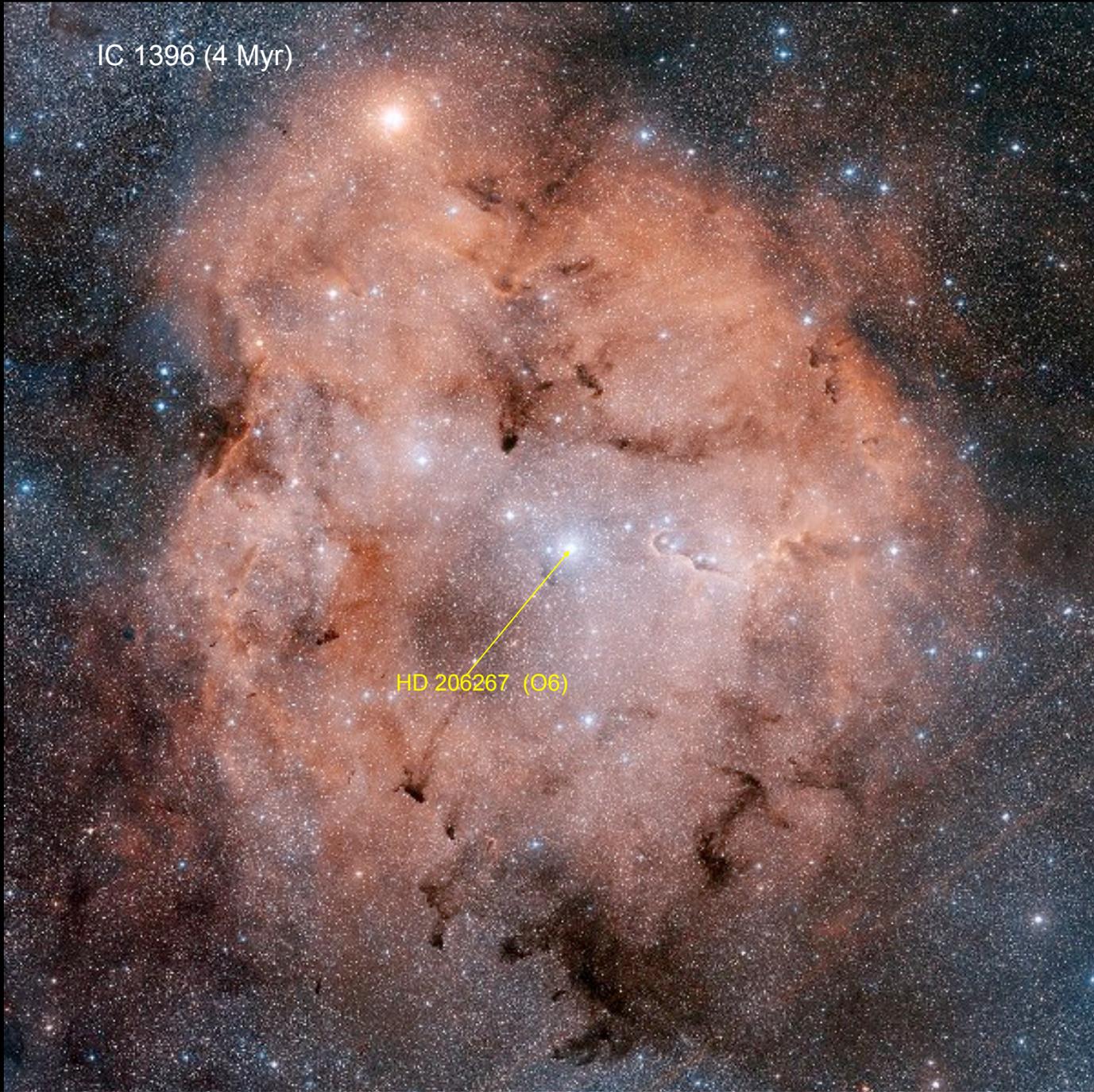
Orion-Nebel



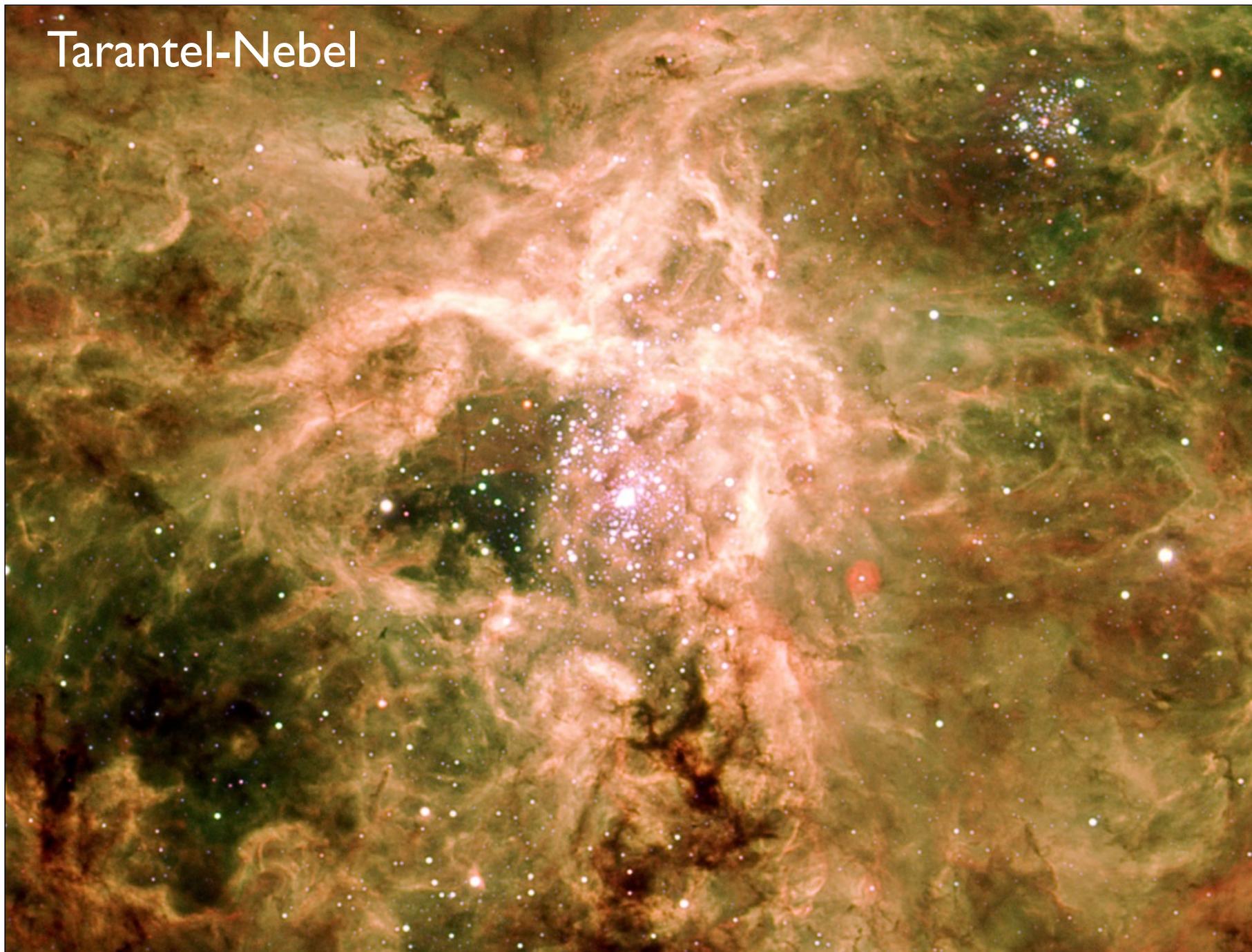
IC 1396 (4 Myr)

HD 206267 (O6)

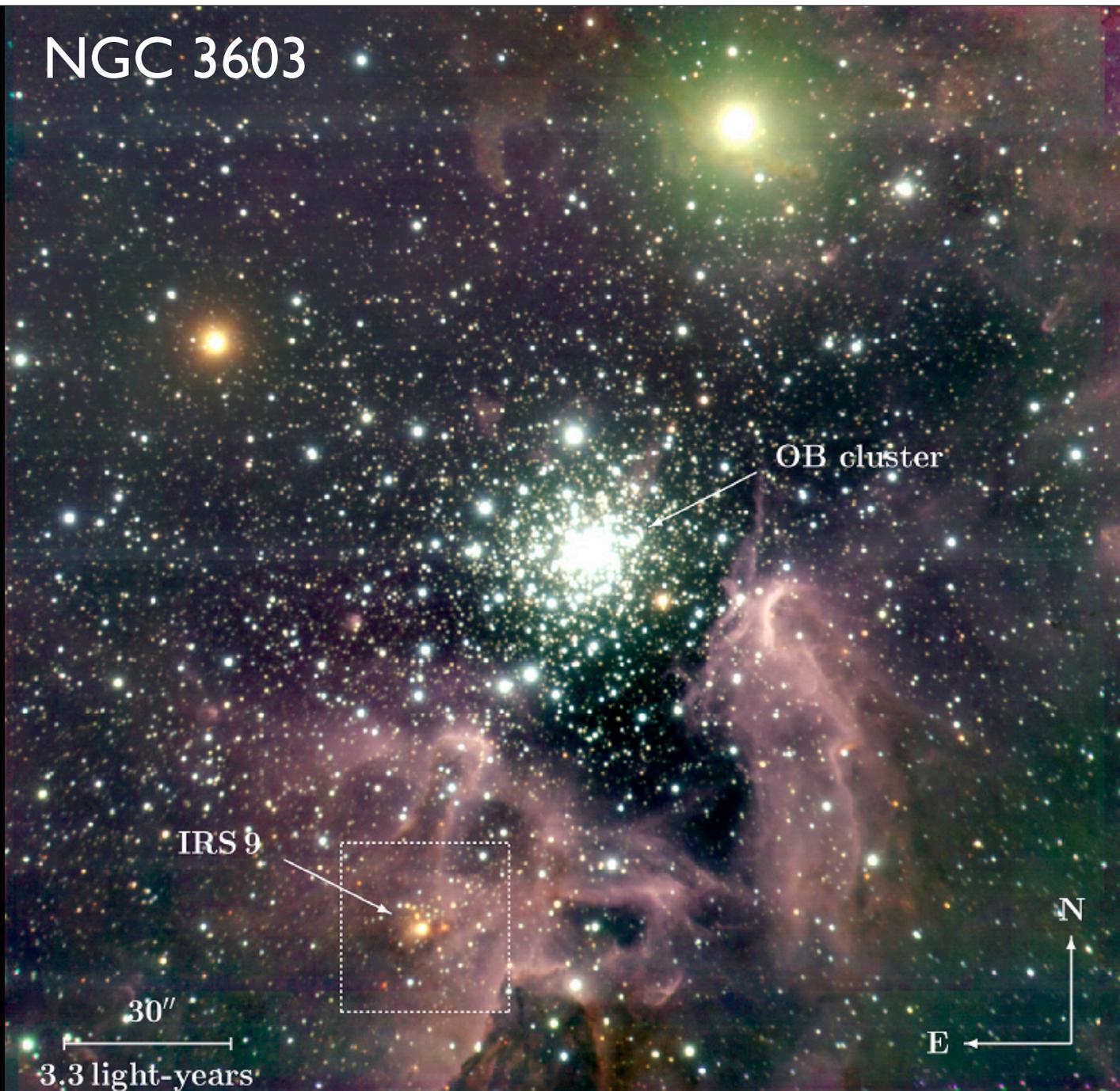
ein massereicher Stern



Tarantel-Nebel



NGC 3603



Kugelsternhaufen 47 Tuc



Galaxien

Milchstraße

- Die Milchstraße ist unsere Heimatgalaxie.
- Sie besteht aus Dunkler Materie, Sternen, und Gas.
- Das Licht braucht 100.000 Jahre von einem Ende zum anderen.
- Die Milchstraße hat etwa 100.000.000.000 Sterne.



The Milky Way as seen from Death Valley (Wikipedia)



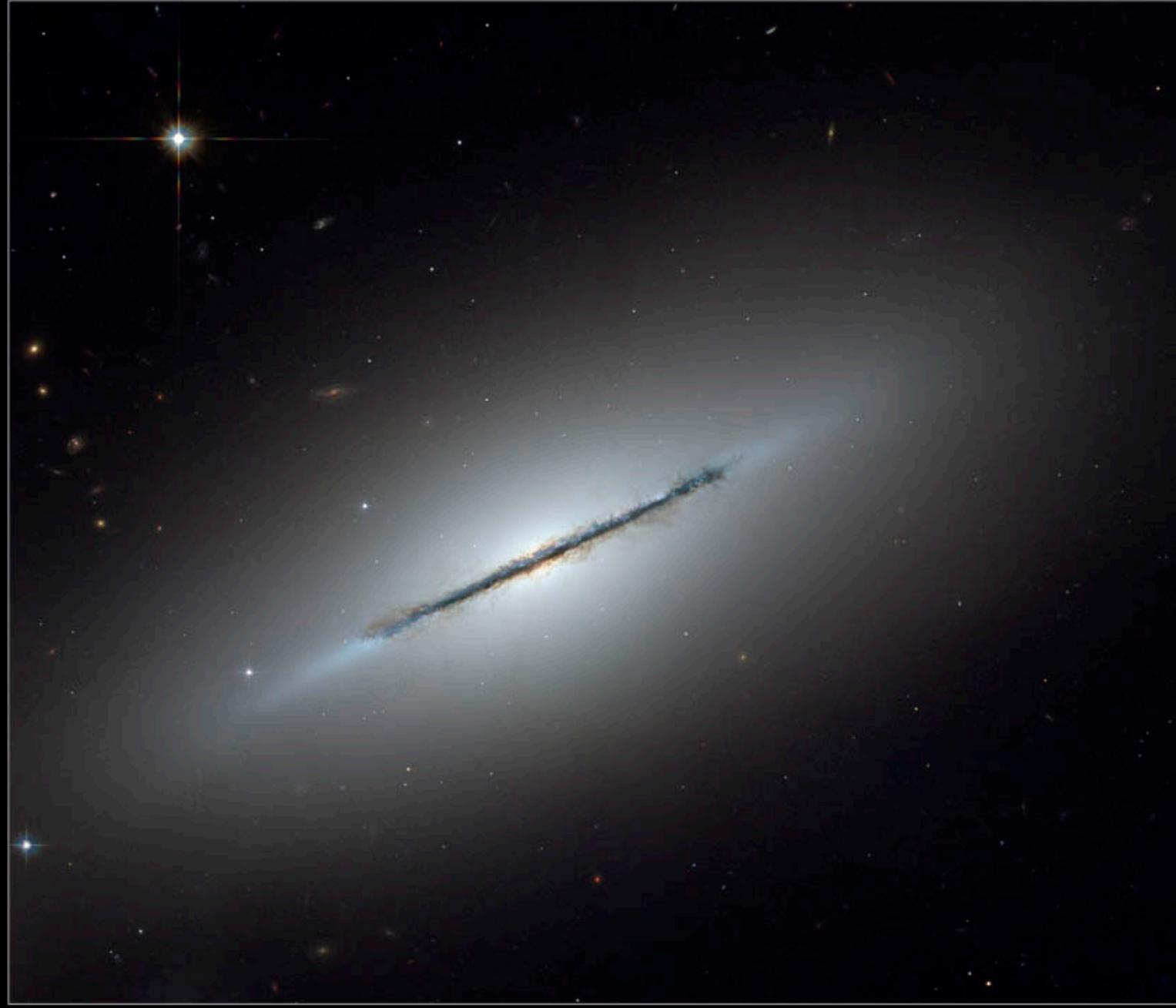


The Sombrero Galaxy — M104

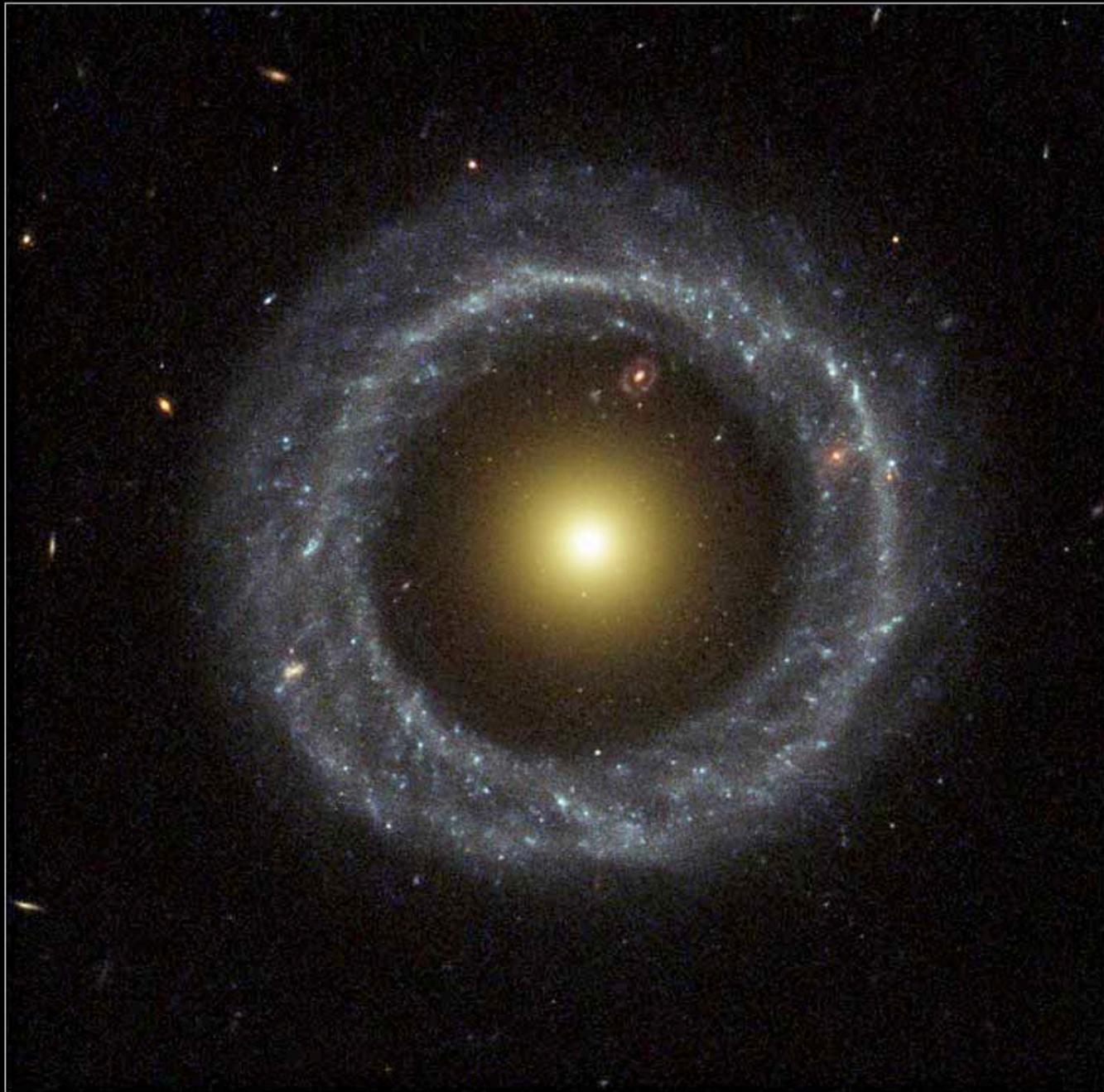


HUBBLESITE.org

Edge-On Lenticular Galaxy NGC 5866







NGC 6050

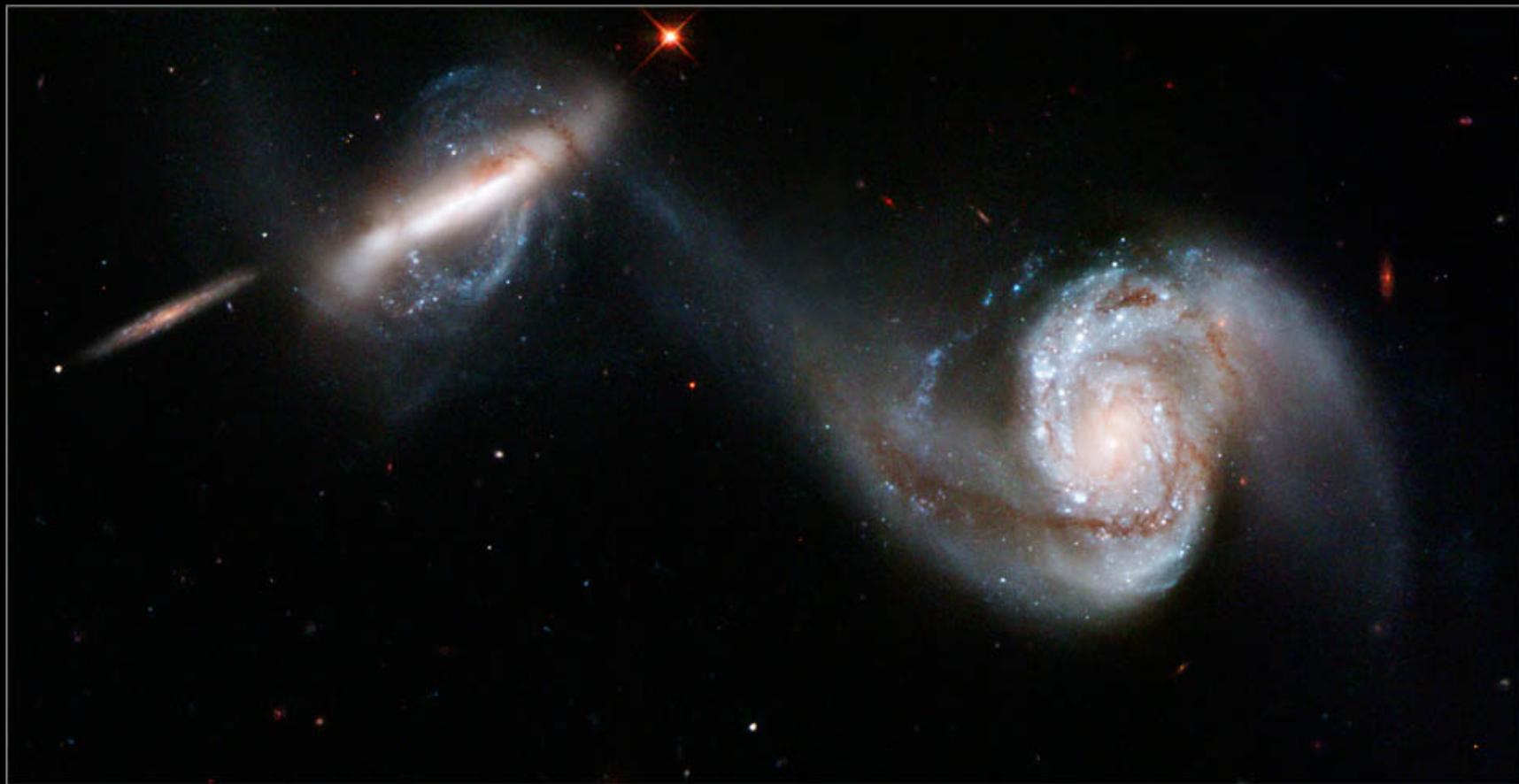


Arp 148



Hubble
Heritage

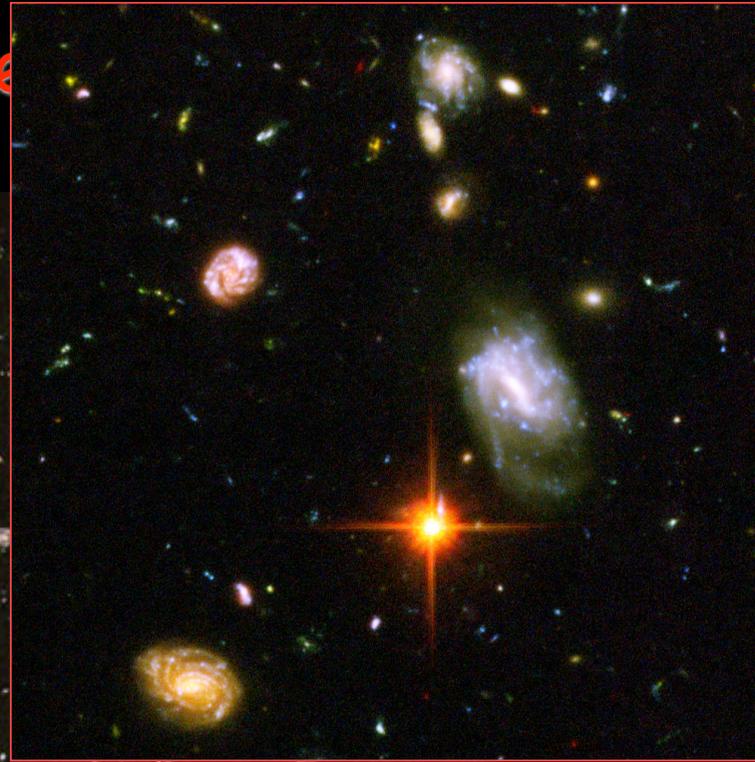
Interacting Galaxies • Arp 87



Sternentstehung

Fragen

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



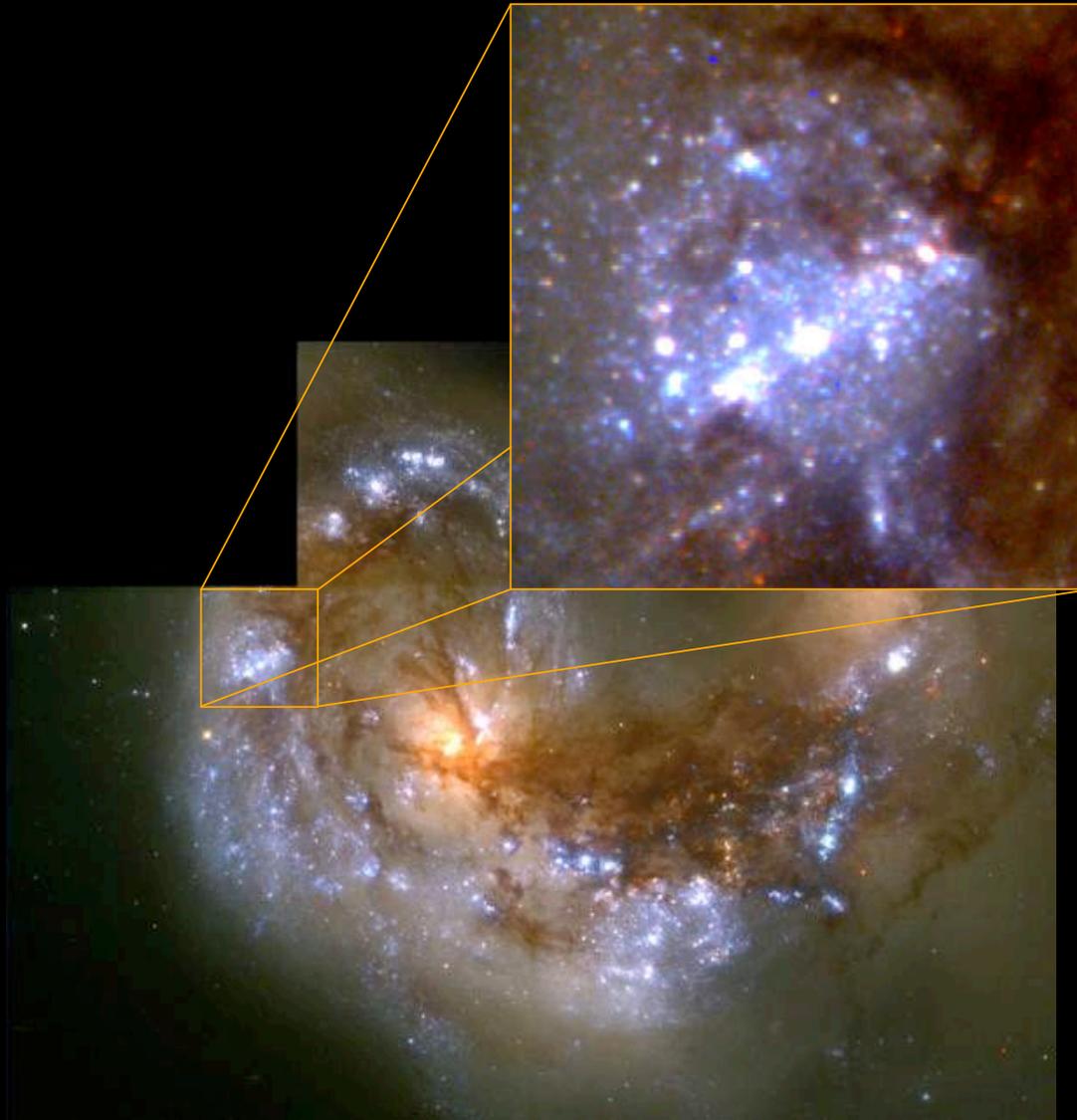
(Ausschnitt aus dem Hubble Ultra-Deep Field, von HST Webseite)

Antennae Galaxie

(Antennae Galaxie: Chandra Webpage)

Sternentstehung in wechselwirkenden Galaxien

(HST: Whitmore & Schweizer 1997)



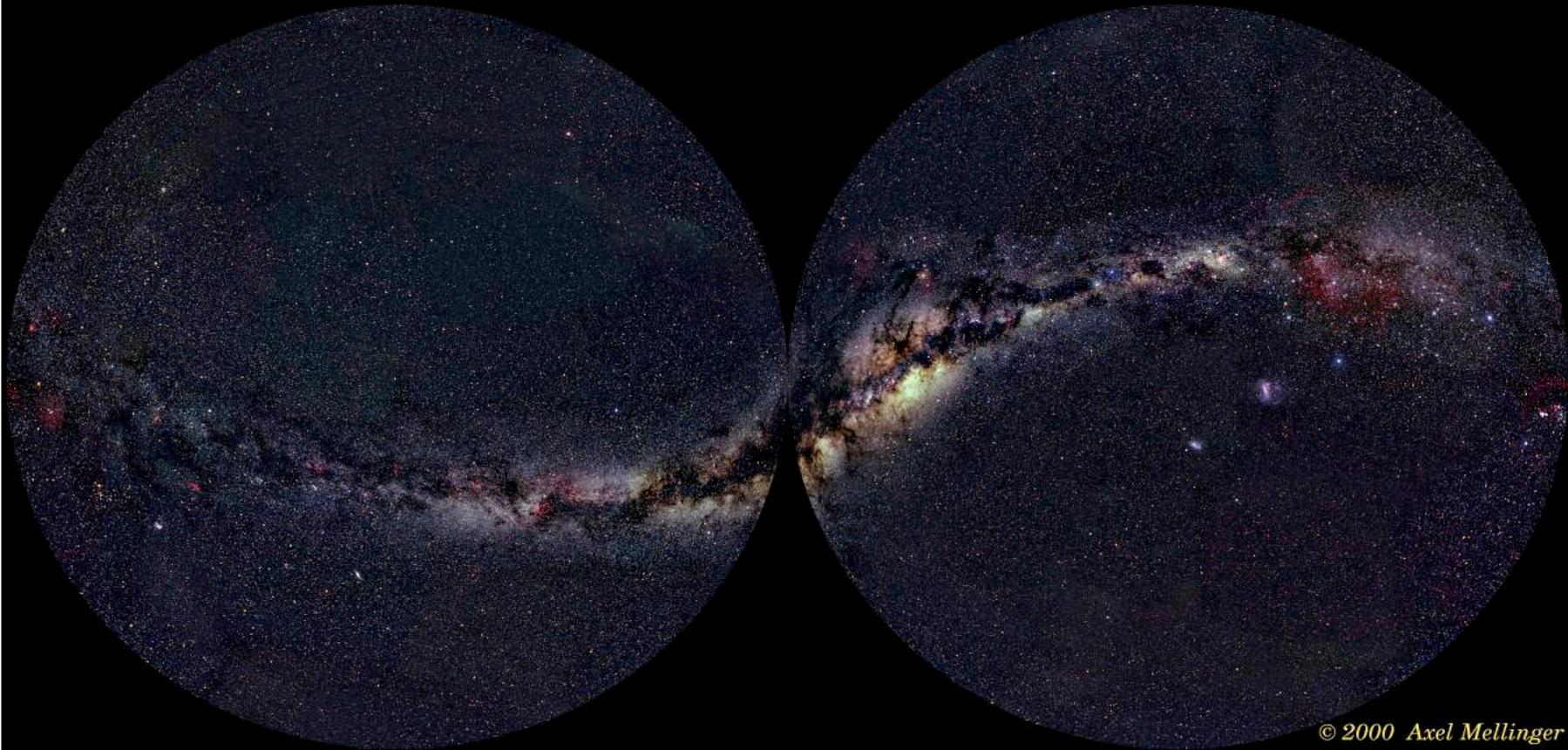
Antennae Galaxie

- 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:



Sternentstehung in der Milchstraße



© 2000 Axel Mellinger

Am Nachthimmel sieht man **Dunkelwolken** und **Sterne**:
Die hellsten Sterne sind *massereich* und daher *jung*.

Blick in Richtung galaktisches Zentrum



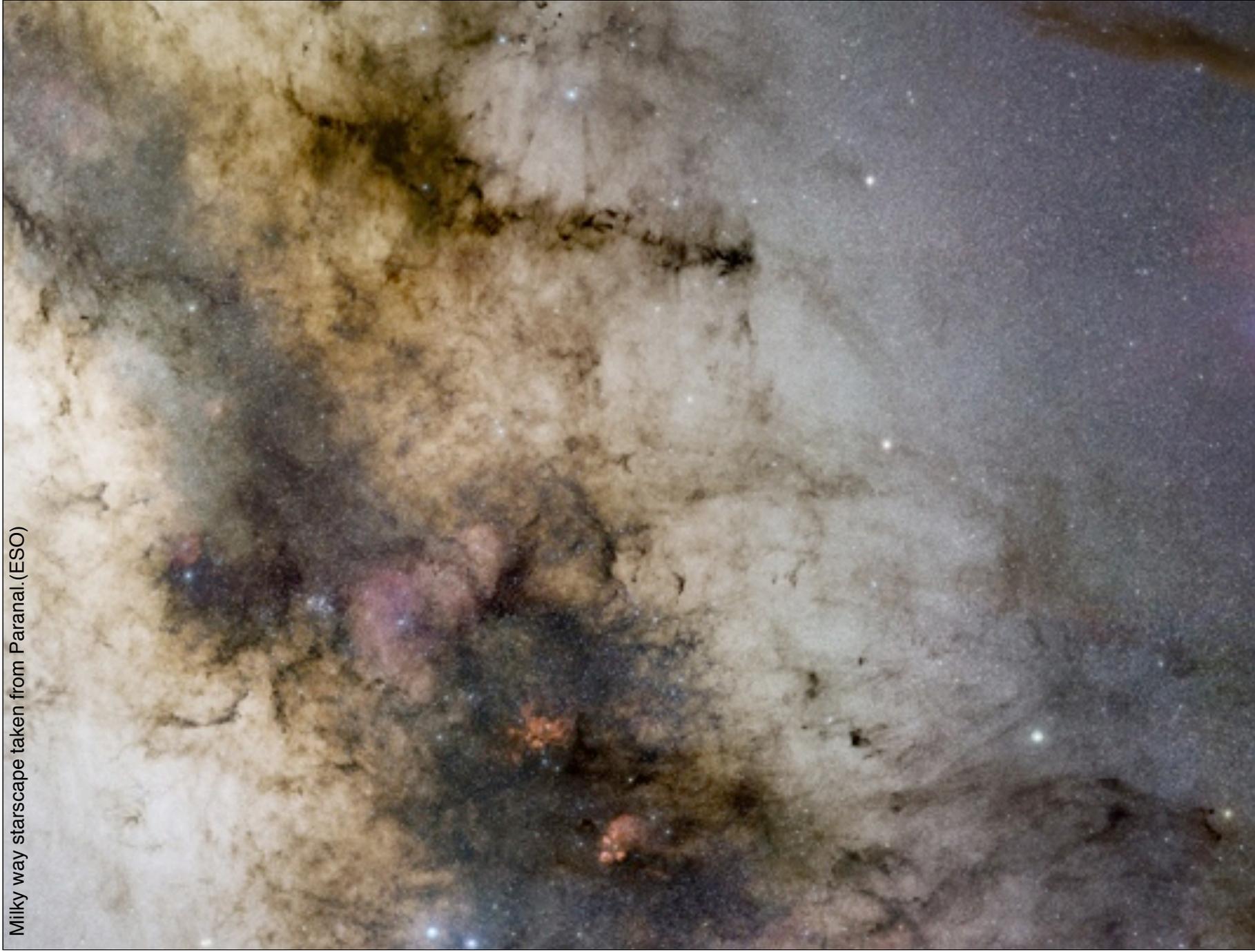
Milky way starscape taken from Paranal. (ESO)





Milky way starscape taken from Paranal.(ESO)

Milky way starscape taken from Paranal (ESO)

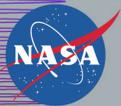
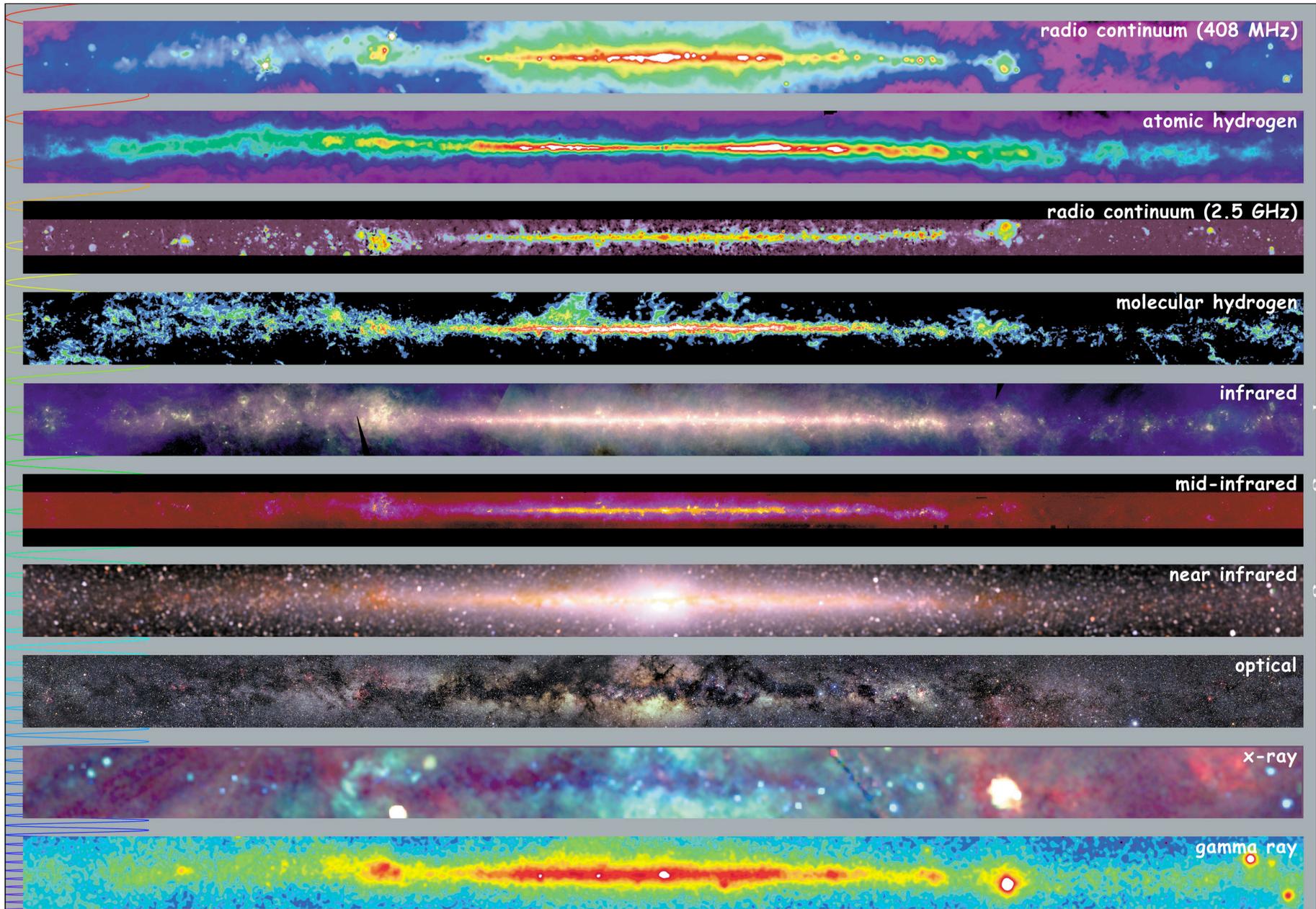


Wie beobachtet man SE?

Unterschiedliche Wellenlängen liefern unterschiedliche Informationen.

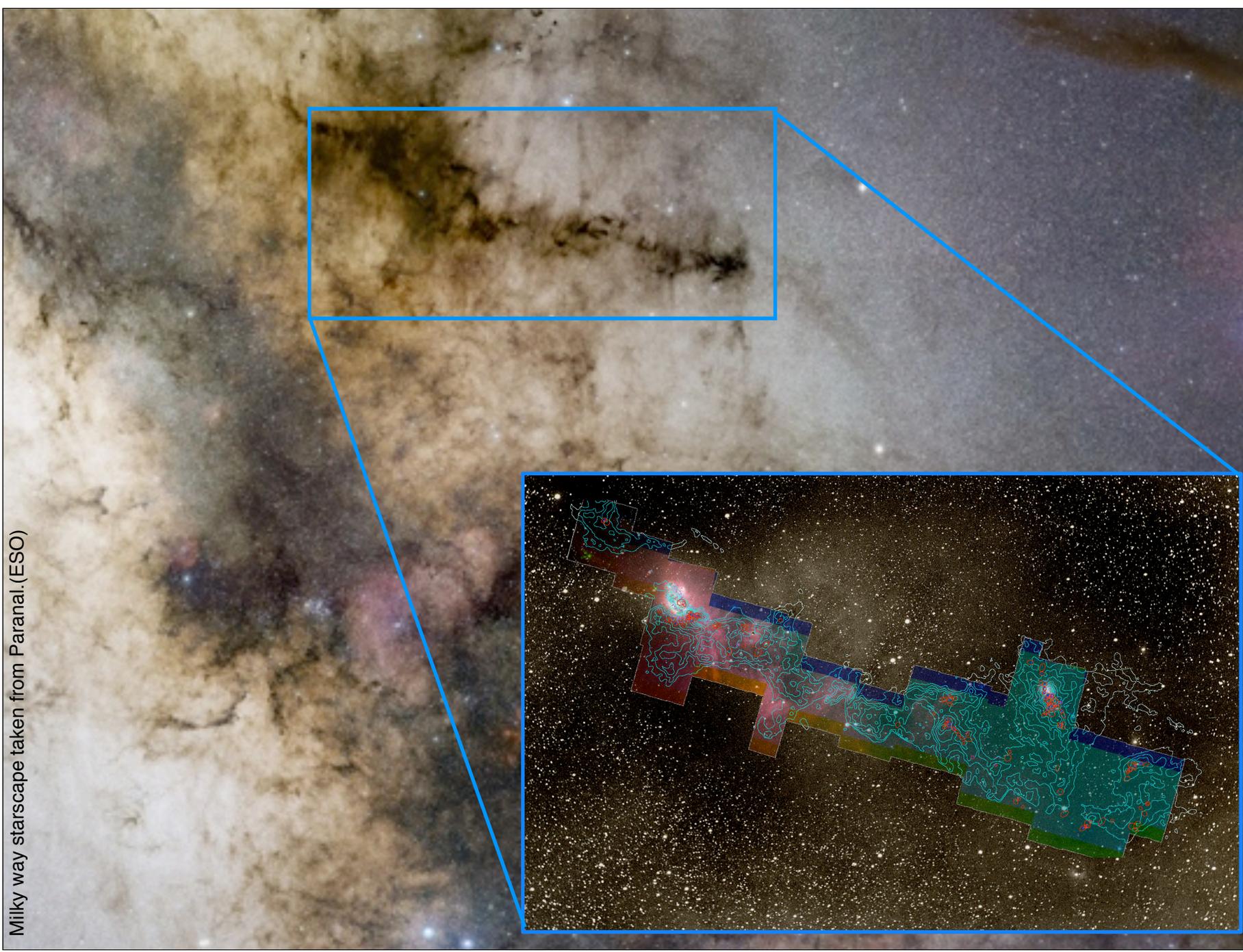
--> Astronomen beobachten das gesamte elektromagnetische Spektrum

- **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)



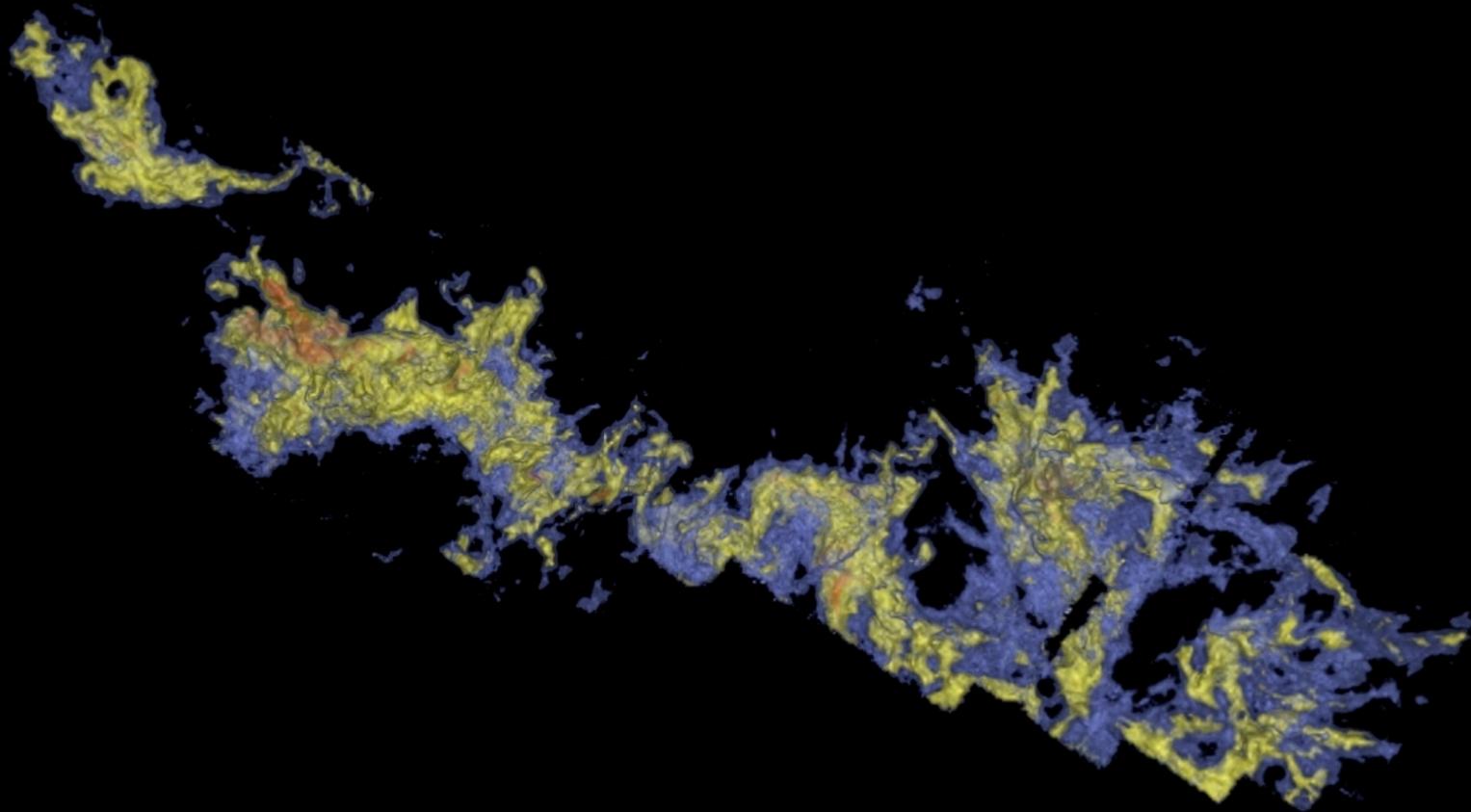
Multiwavelength Milky Way

Milky way starscape taken from Paranal (ESO)

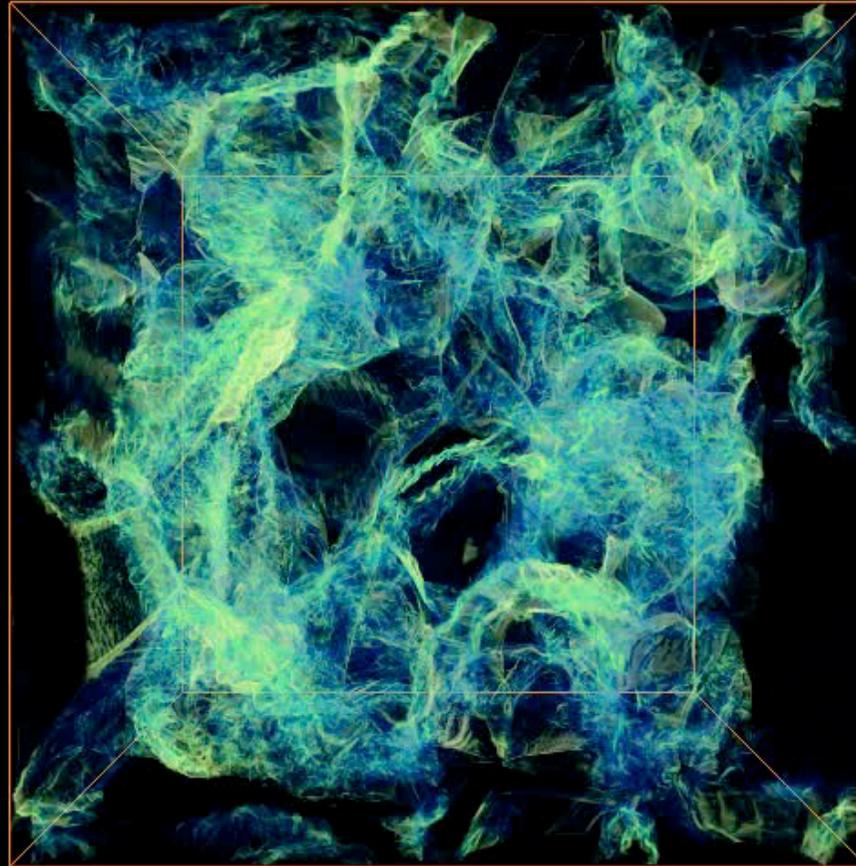


Milky way starscape taken from Paranal (ESO)





Perseus Molekülwolke (Bild vom COMPLETE Survey)



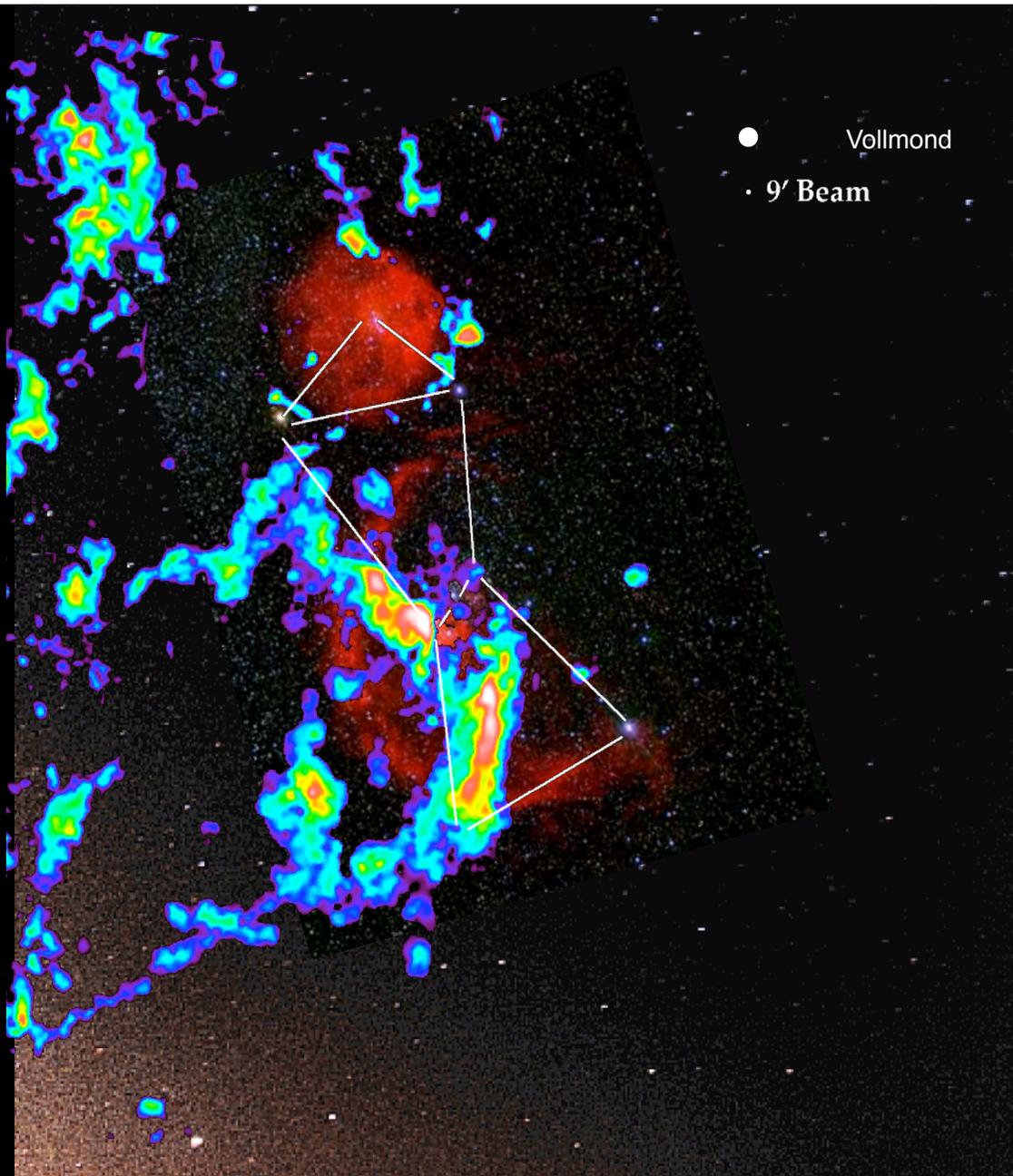
Computermodel der interstellaren Turbulenz



● Vollmond

**Stern-
entstehung
in der Sonnen-
umgebung:**

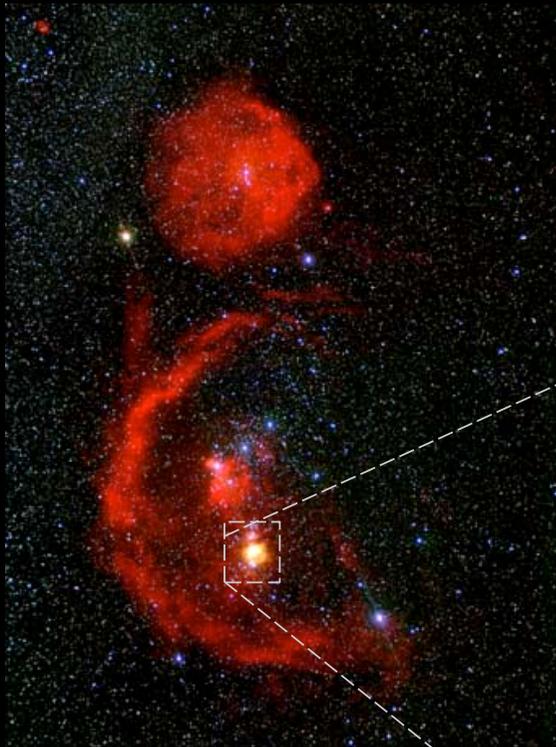
**im Sternbild
Orion**



**Stern-
entstehung
in der Sonnen-
umgebung:**

**im Sternbild
Orion**

Lokales SE Gebiet: Trapezhaufen in Orion



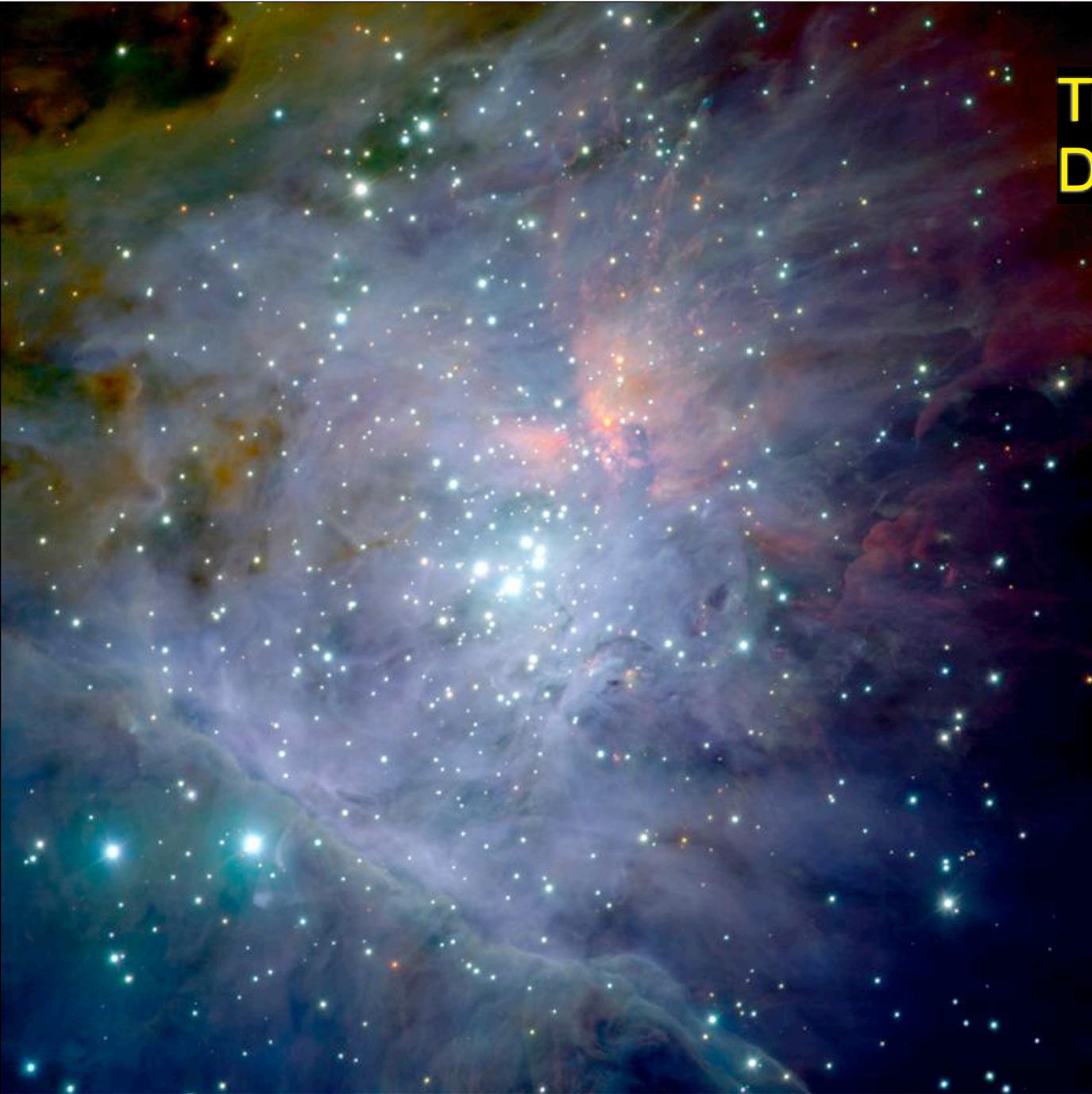
Sternbild Orion

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



Trapezhaufen: Detail

Sterne entstehen
in Haufen

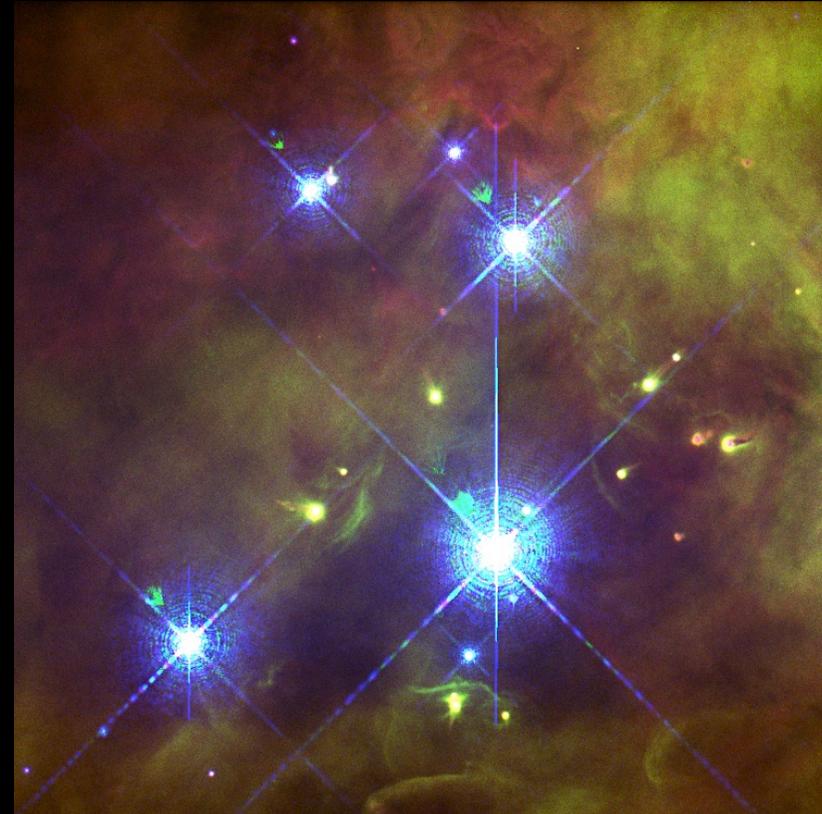
Feedback ist
wichtig

Sterne entstehen
in Molekülwolken

Trapezhaufen: Zentralgebiet



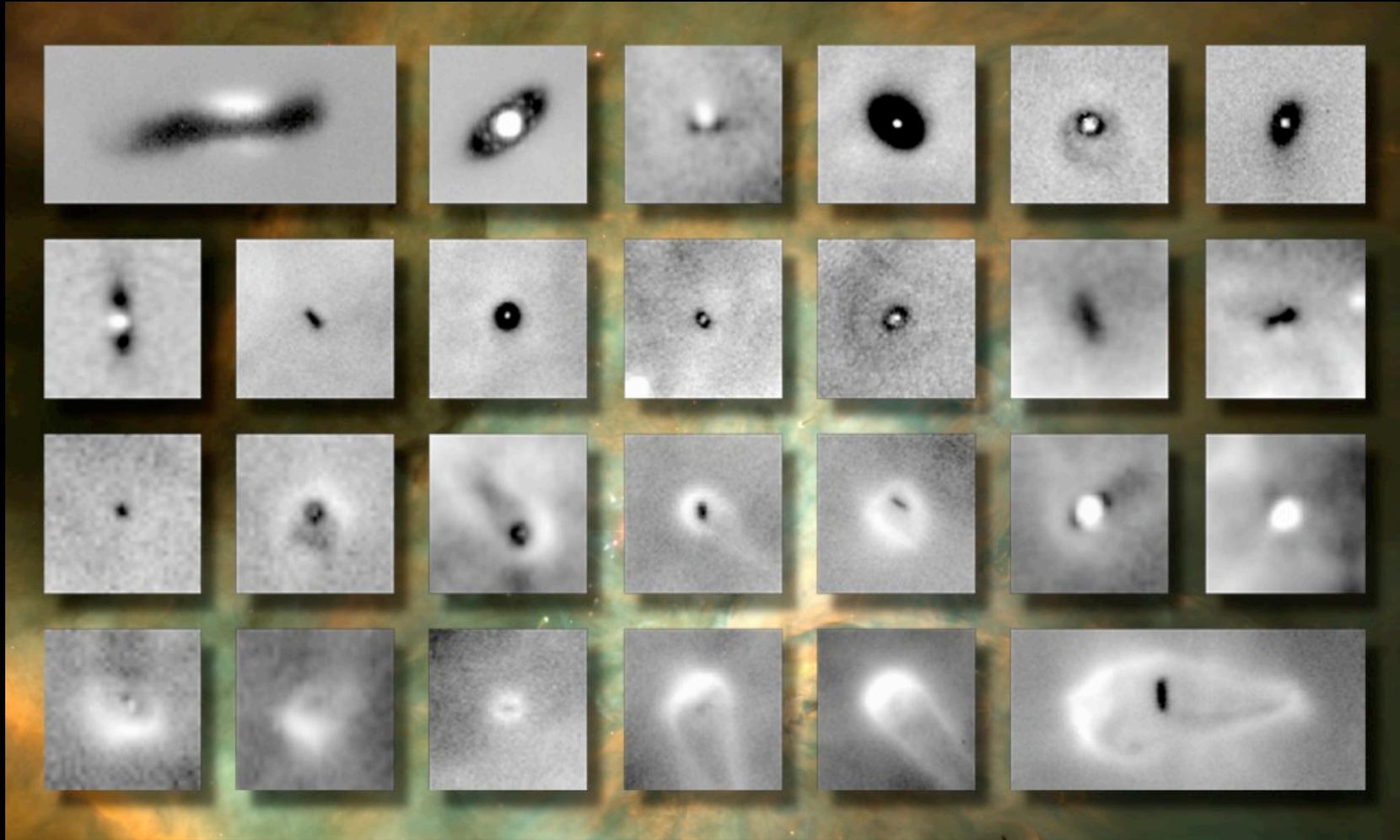
Der Großteil der ionisierenden Strahlung kommt vom Zentralstern **$\theta 1C$ Orionis**



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

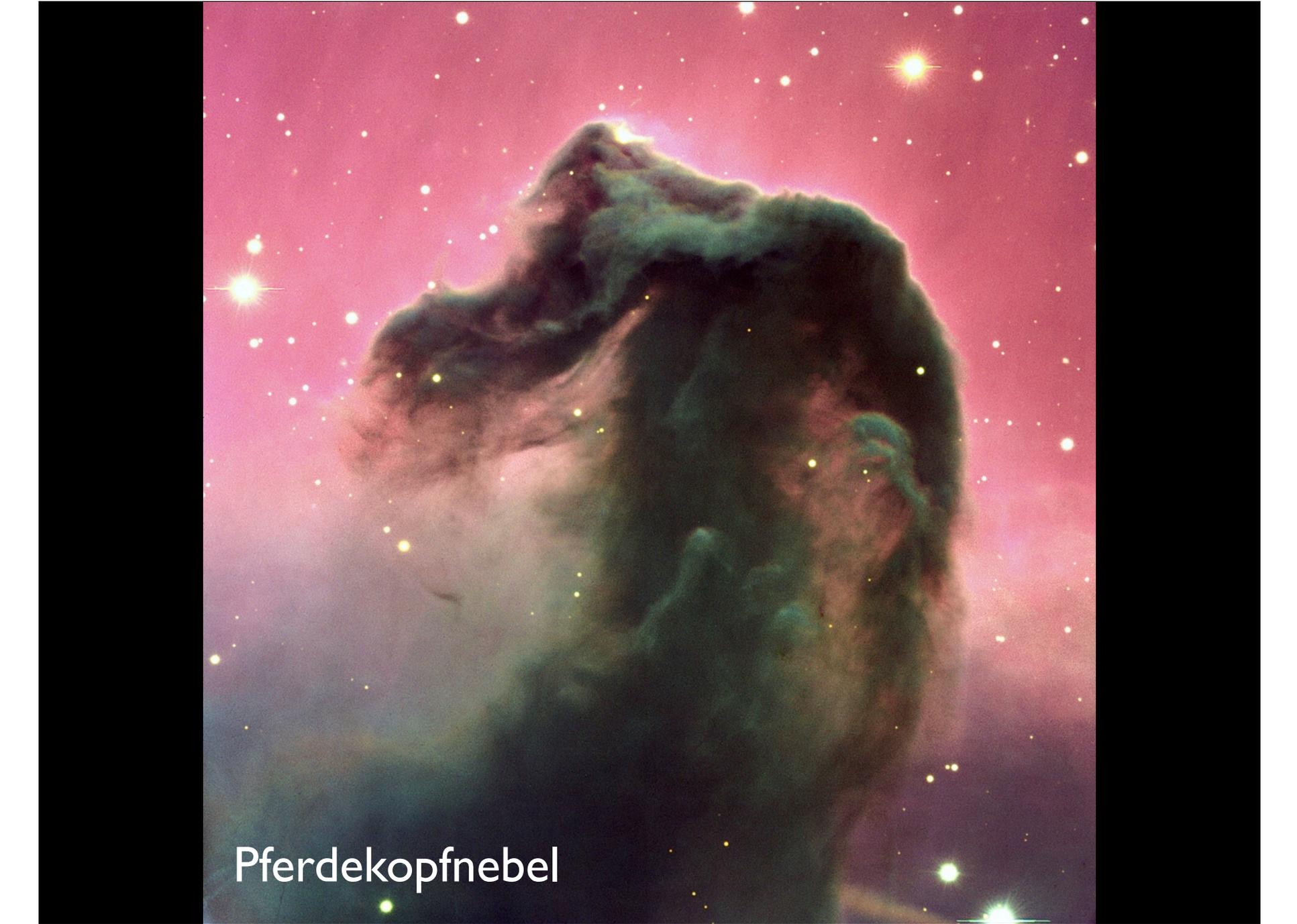
(Abbildung Doug Johnstone et al.)

Weitere Details: Siluett-Scheiben in Orion

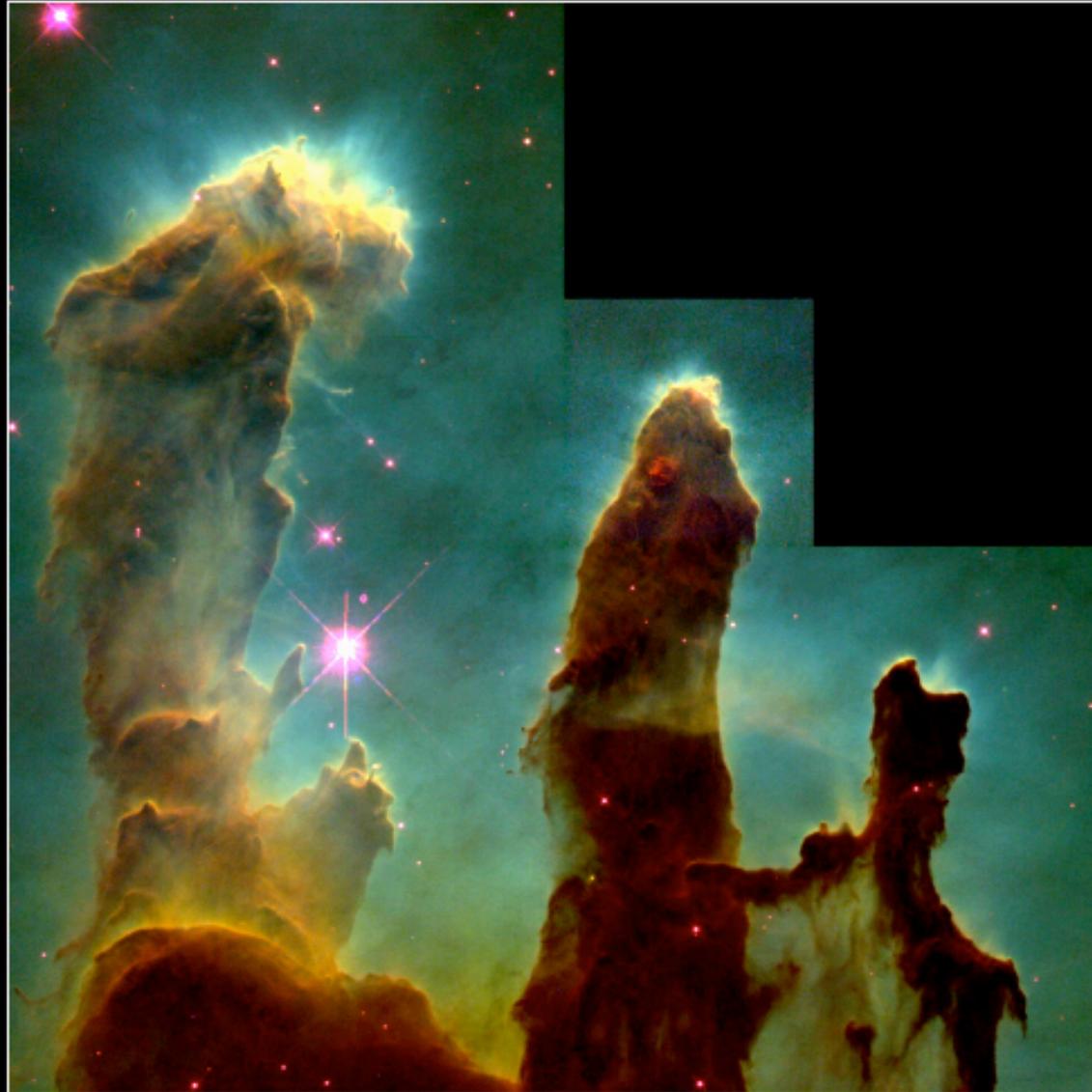


Protostellare Scheiben schatten die Photodissoziationsregion im Hintergrund ab. Jedes Bild ist 750 AU x 750 AU groß.

(Daten von Mark McCaughrean)



Pferdekopfnebel



HST Aufnahme

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

Aufnahme im
Infraroten.





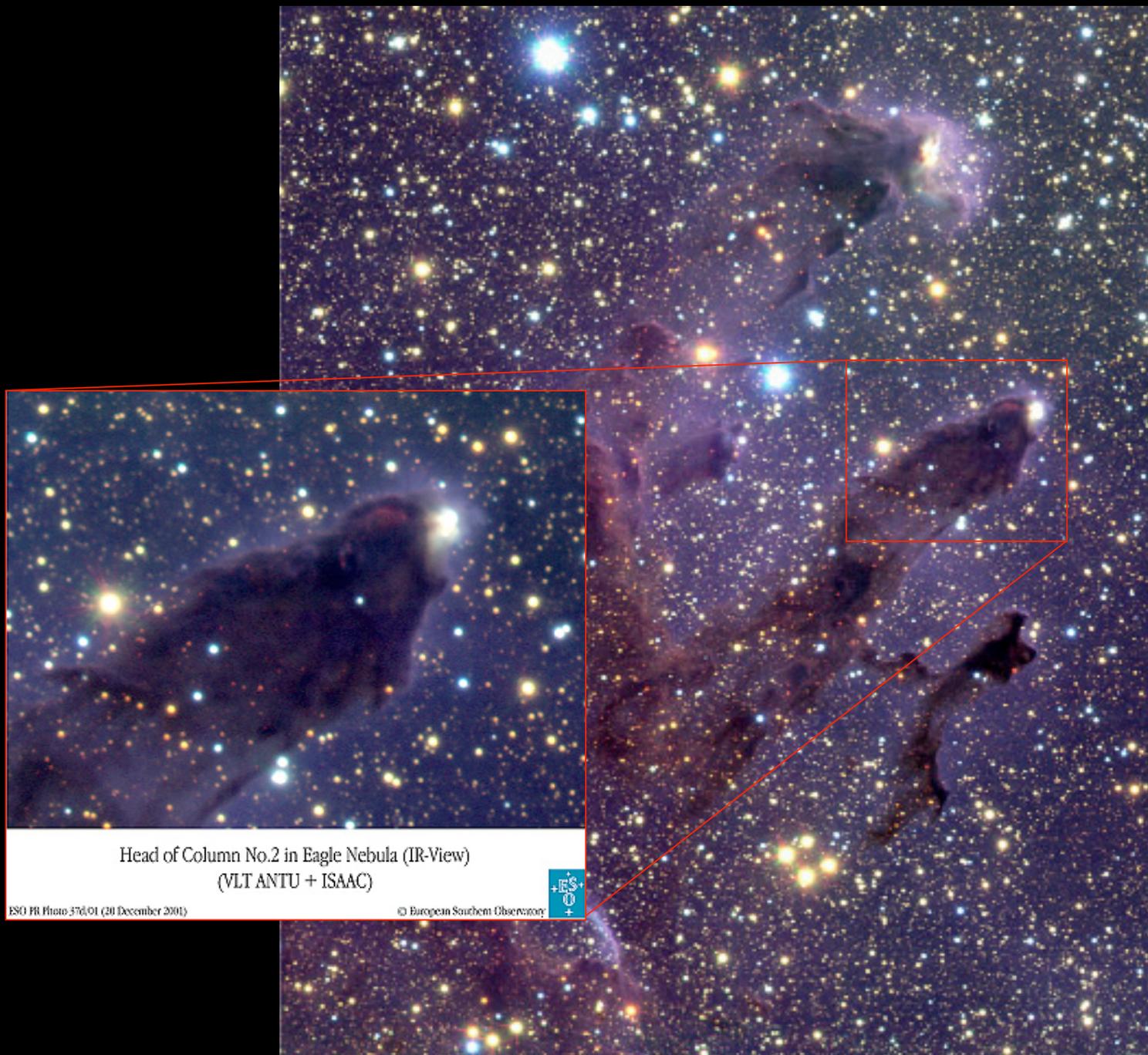
Head of Column No.1 in Eagle Nebula (IR-View)
(VLT ANTU + ISAAC)

ESO PR Photo 37c/01 (30 December 2001)

© European Southern Observatory



IR Aufnahme mit dem ESO-VLT



Head of Column No.2 in Eagle Nebula (IR-View)
(VLT ANTU + ISAAC)

ESO PR Photo 37b/01 (20 December 2001)

© European Southern Observatory



IR Aufnahme mit dem ESO-VLT

Kurzes theoretisches Intermezzo

Erste dynamische Ansätze

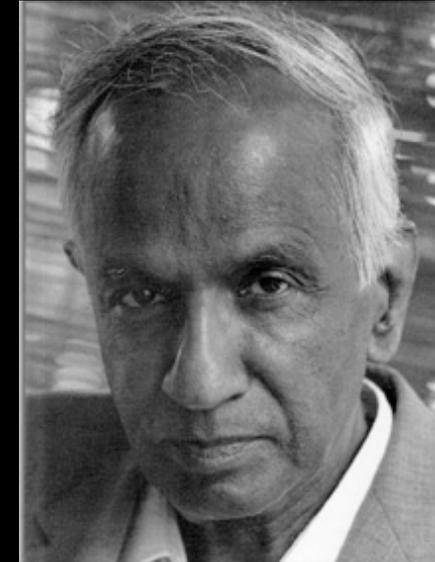
- *Jeans (1902)*: Wechselspiel von Eigengravitation und thermischem Druck
 - Stabilität einer homogenen Sphäre gegen gravitativen Kollaps
 - Konkurrenz zwischen Druckgradienten und Schwerkraft
 - Minimale Masse $M_{\text{Jeans}} \propto \rho^{-1/2} T^{3/2}$
 - je größer die Dichte und je geringer die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

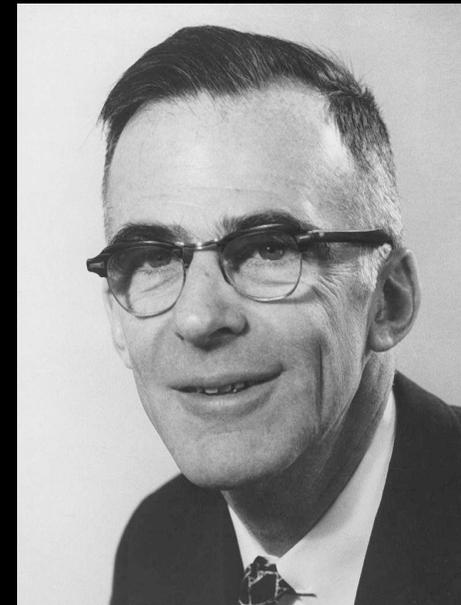
Realität ist komplizierter!

Einfluss von Magnetfeldern im ISM

- *Mestel & Spitzer (1956)*: Magnetfelder können Kollaps aufhalten!!!
 - Es gibt eine kritische Feldstärke, die den Kollaps aufhalten kann.
 - Entsprechend gibt es eine kritische Grenzmasse

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

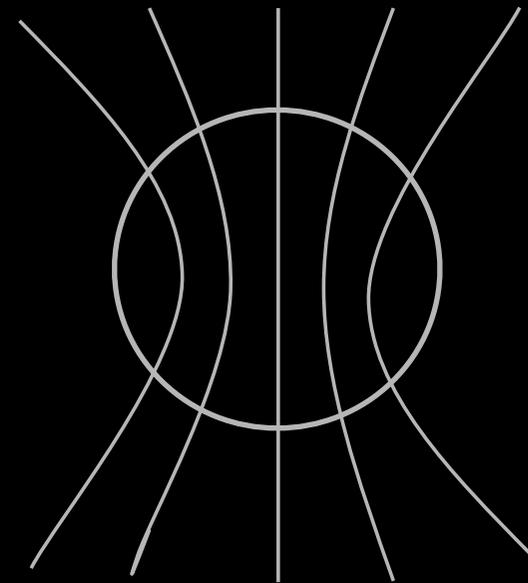
- Diese magnetische Grenzmasse ist größer als die Jeans-Masse



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



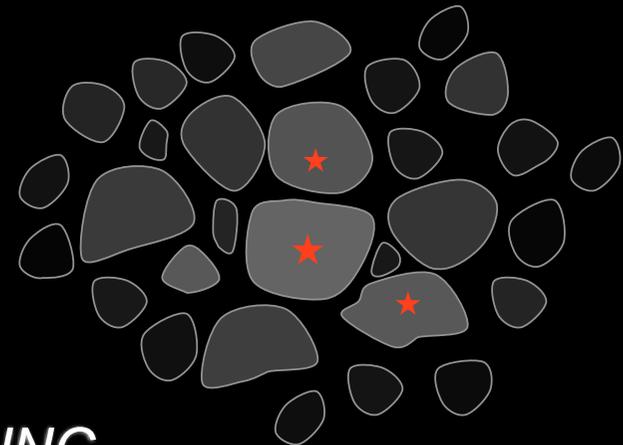
magnetisierter Gasball

Moderne Theorie der Sternentstehung

- *GRUNDANNAHME*
 - Sternentstehung 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

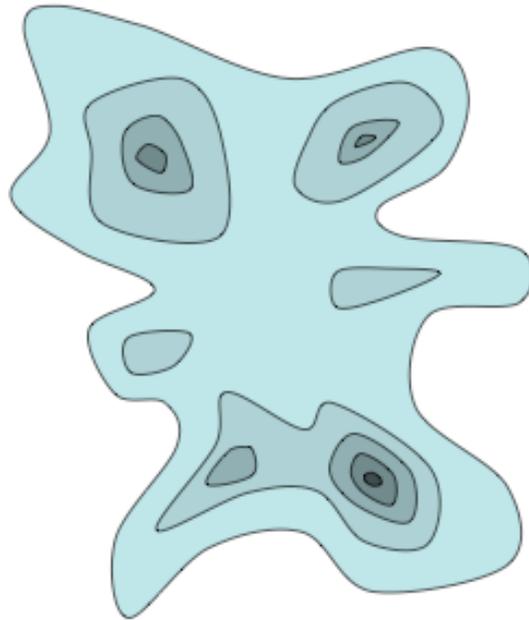
Moderne Theorie der Sternentstehung

- *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**



Stadien der Sternbildung 1

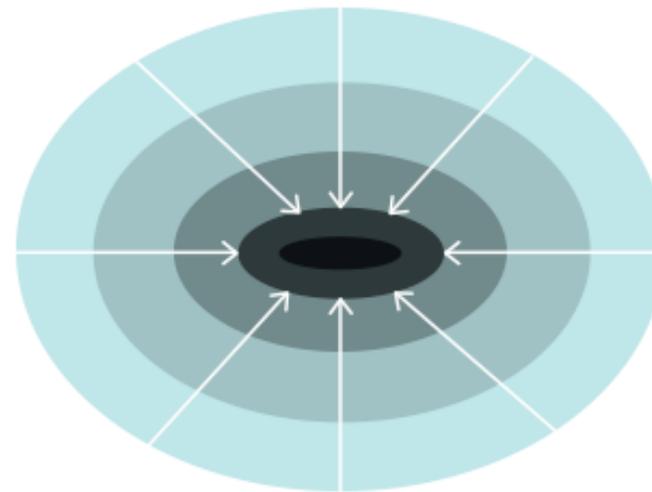
1 Lichtjahr



Prästellare Kerne in Dunkelwolken

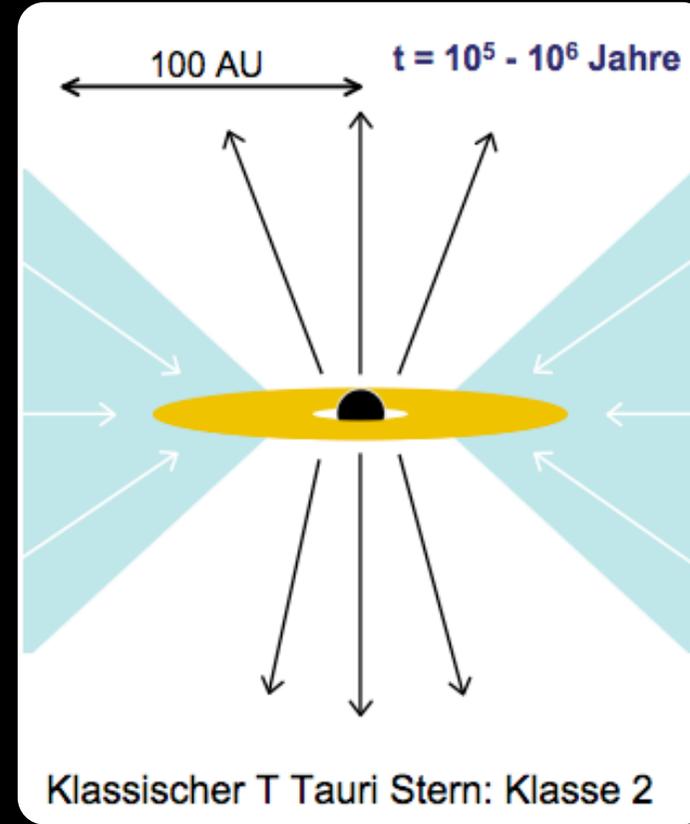
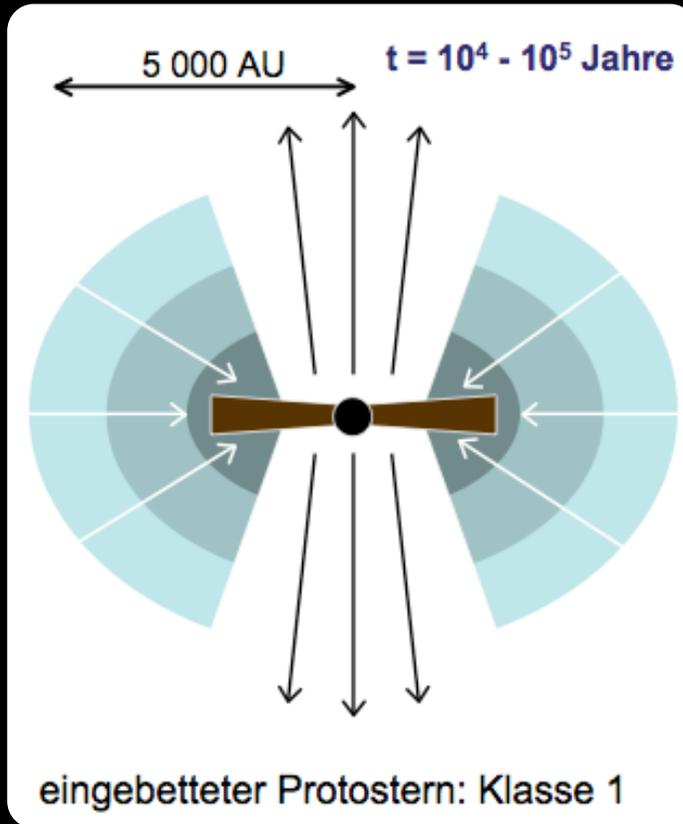
10 000 AU

t = 0

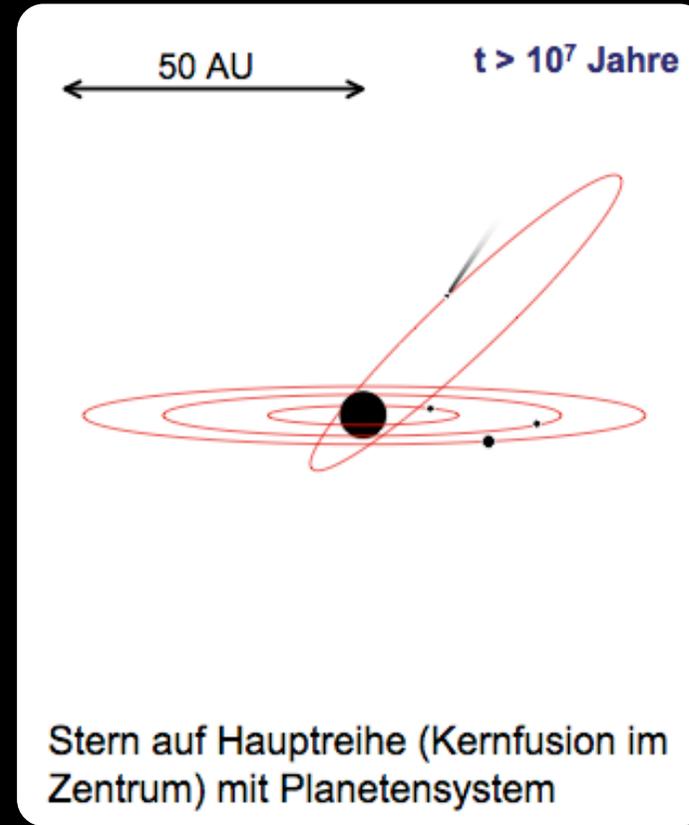
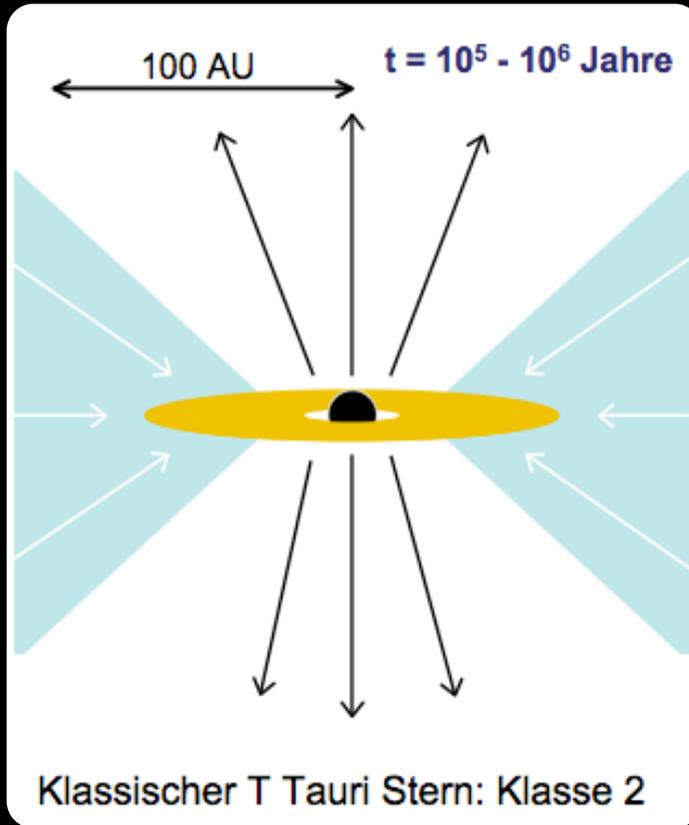


Gravitativer Kollaps: Klasse 0 Objekt

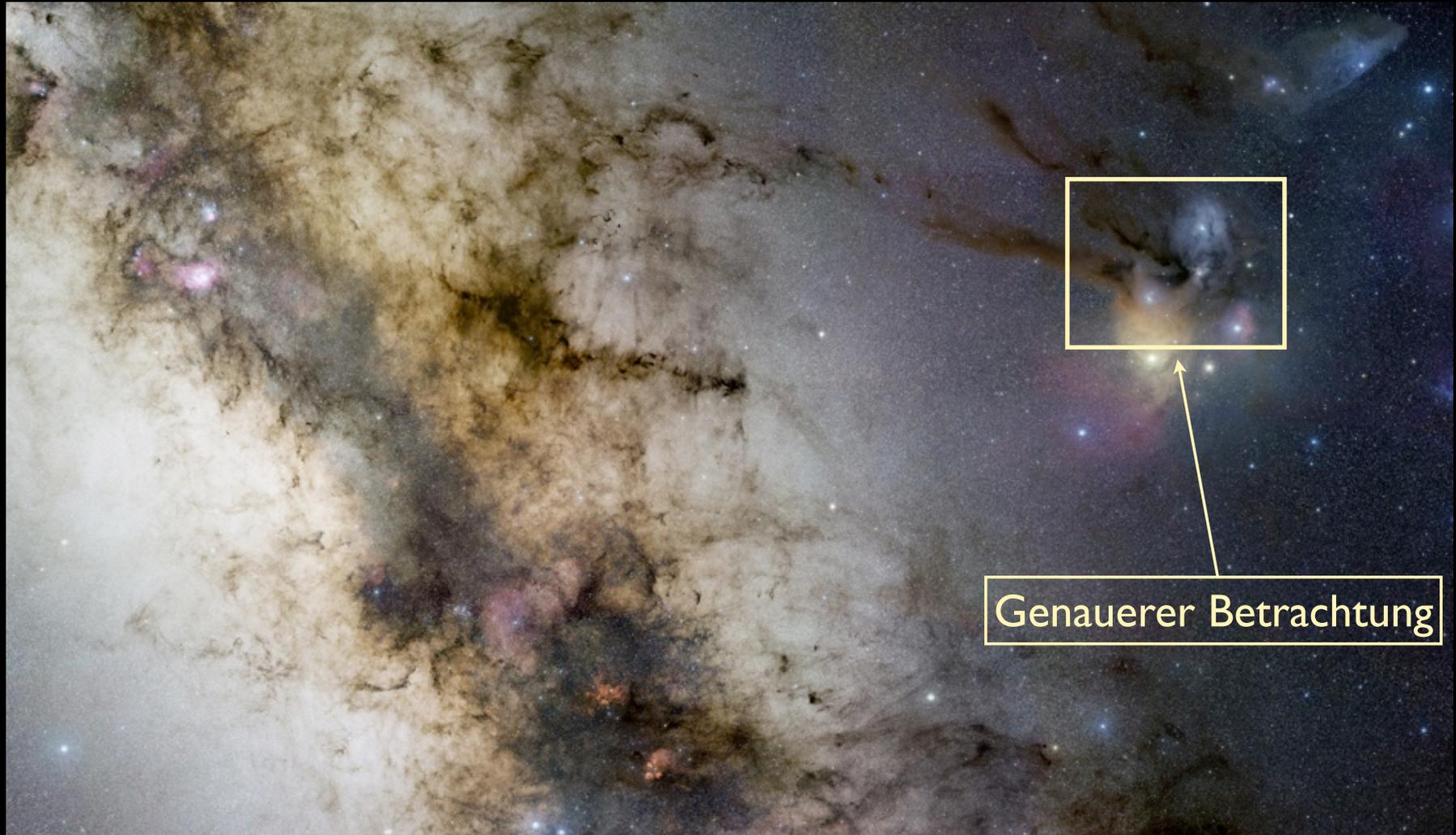
Stadien der Sternbildung 2



Stadien der Sternbildung 3

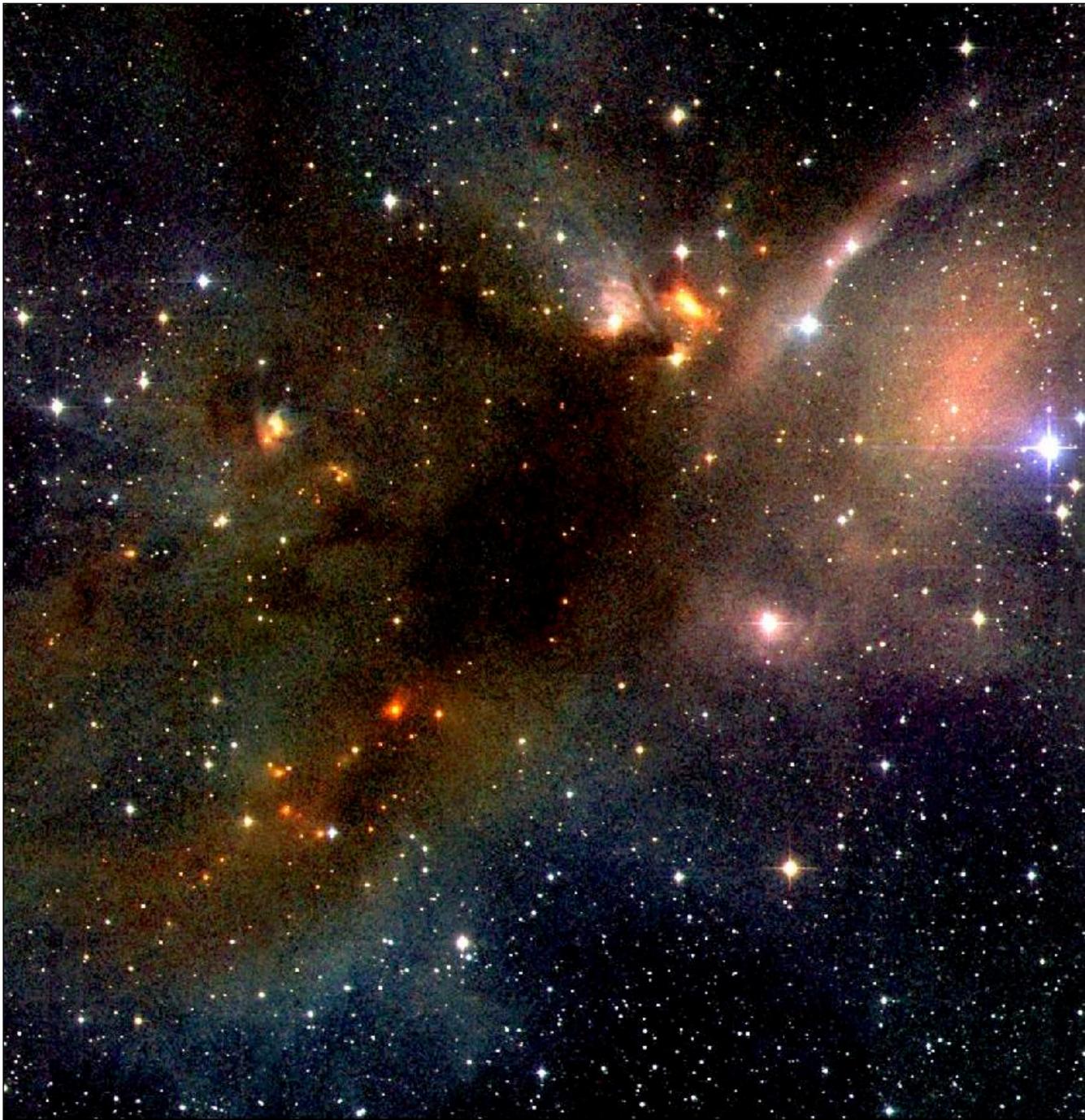


Anwendung



Genauerer Betrachtung

Milky way starscape taken from Paranal.(ESO)

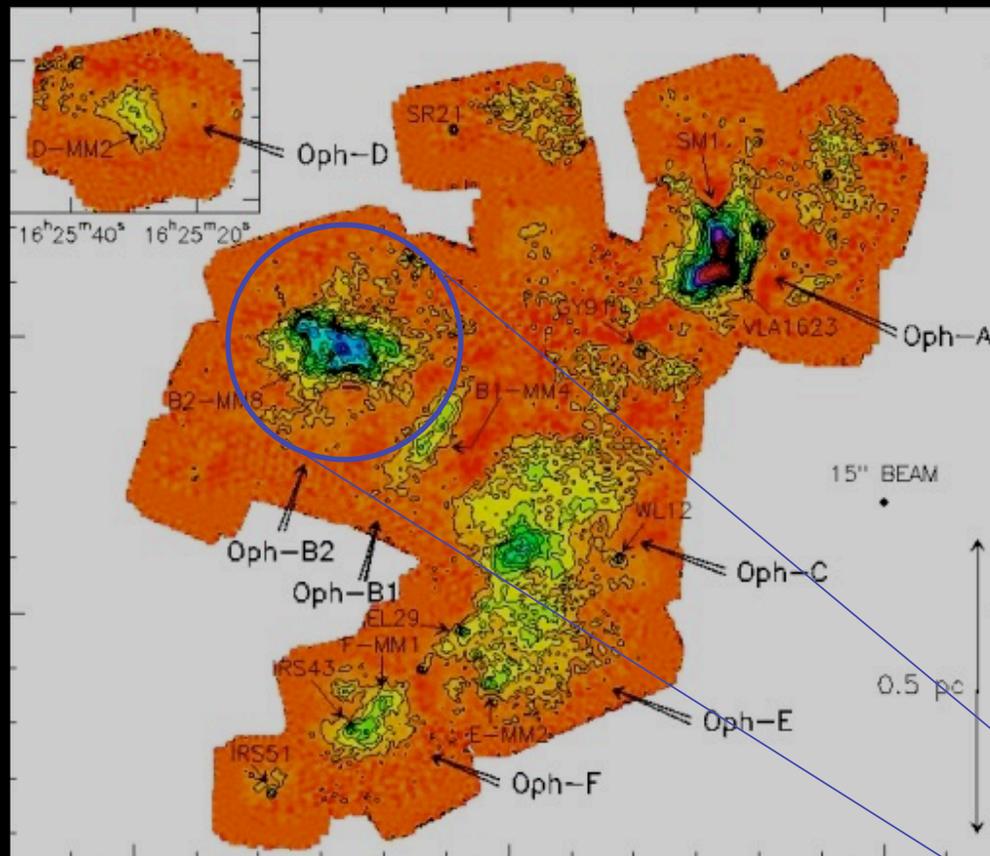


Sternent- stehungs- gebiet ρ -Oph im IR

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

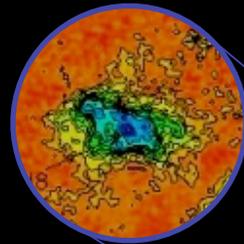
genauere Betrachtung

Dichtestruktur von Molekülwolken

Molekülwolken sind hochgradig inhomogen.

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

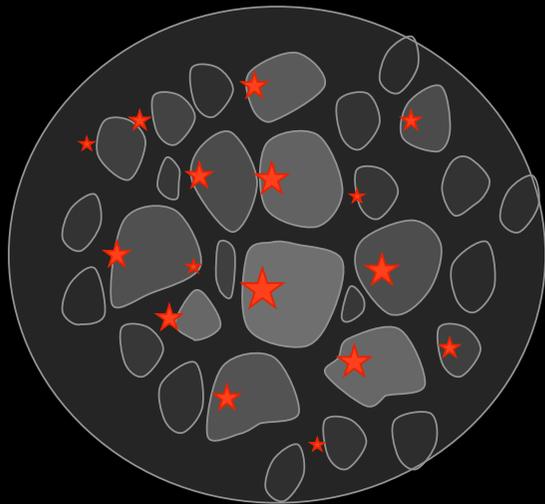
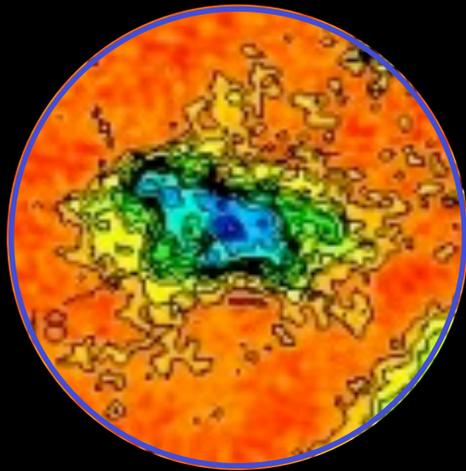
ρ -Ophiuchus in Staubemission



noch genauere
Betrachtung

(Motte, André, & Neri 1998)

Entwicklung von Wolkenkernen



FRAGE:

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

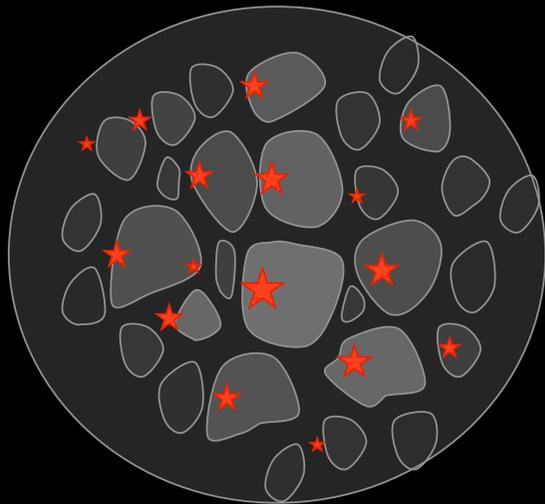
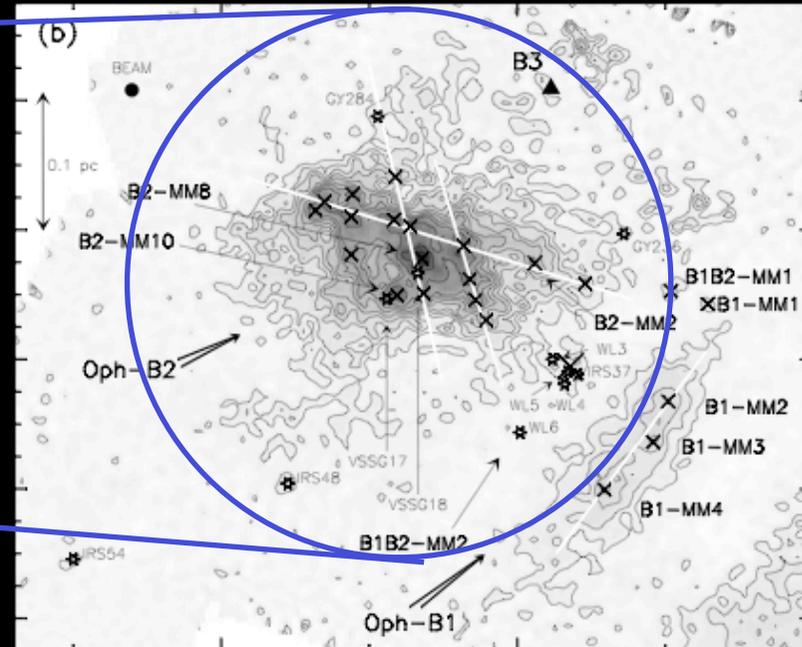
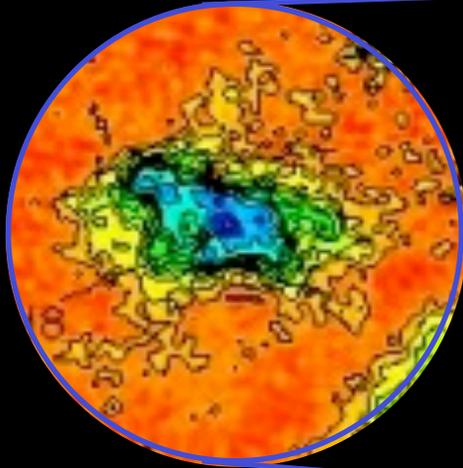
ÜBERLEGUNG

- 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*

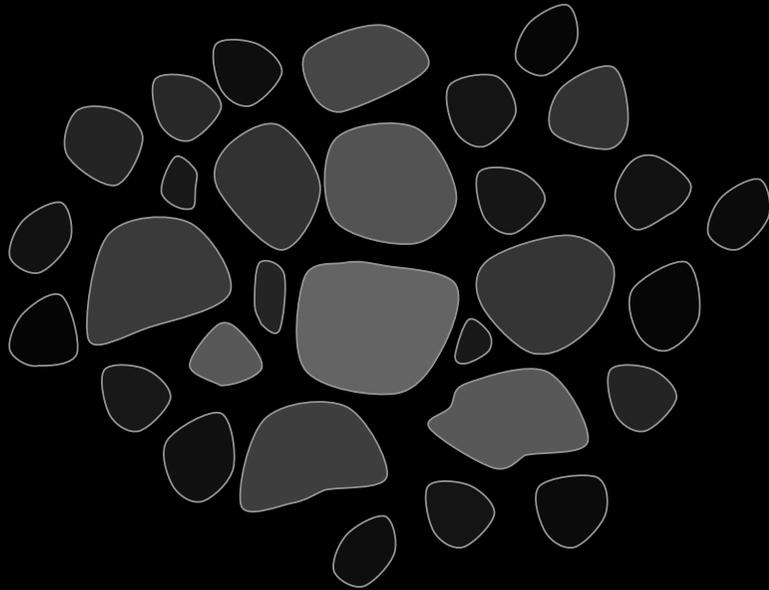
Entwicklung von Wolkenkernen



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

Entwicklung von Wolkenkernen

Was passiert bei mehreren
(wechselwirkenden)
Kernen?



Zwei Extremfälle:

(1) Turbulenz dominiert Energiebudget:

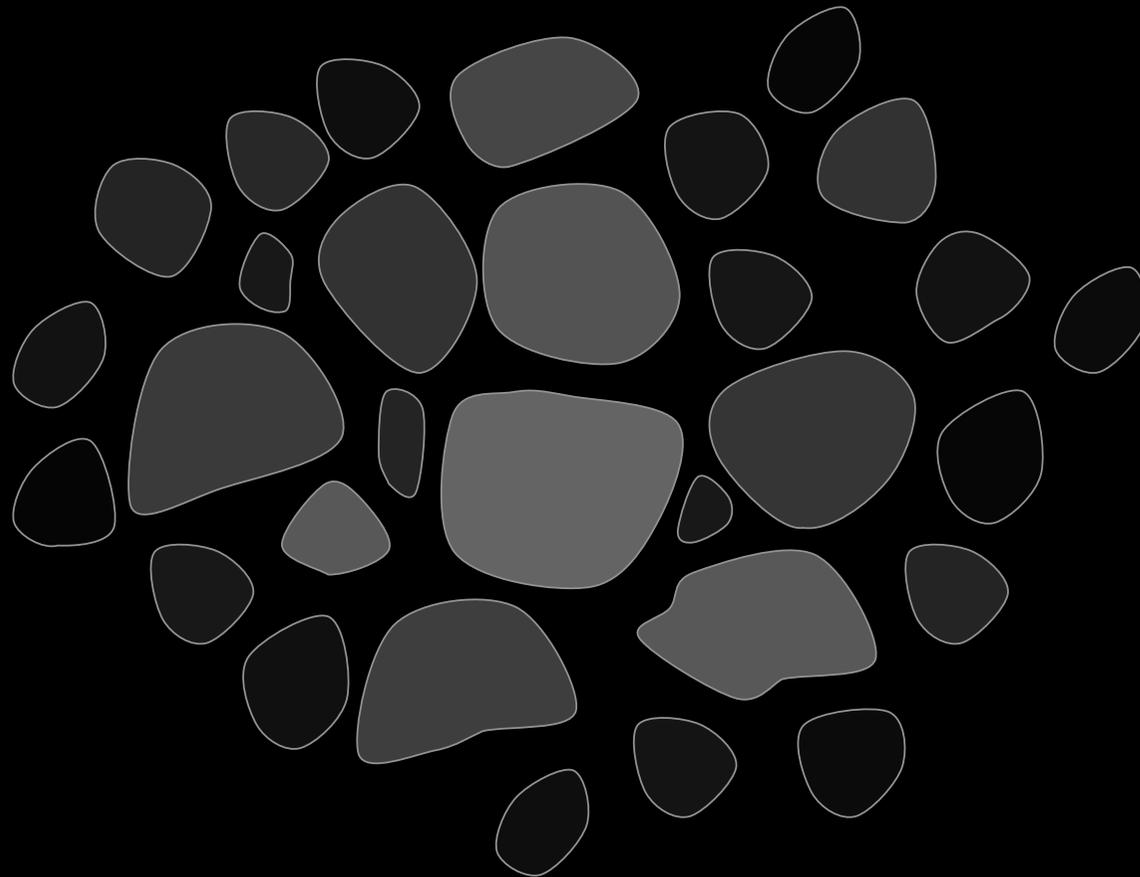
$$\alpha = E_{\text{kin}} / |E_{\text{pot}}| > 1$$

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

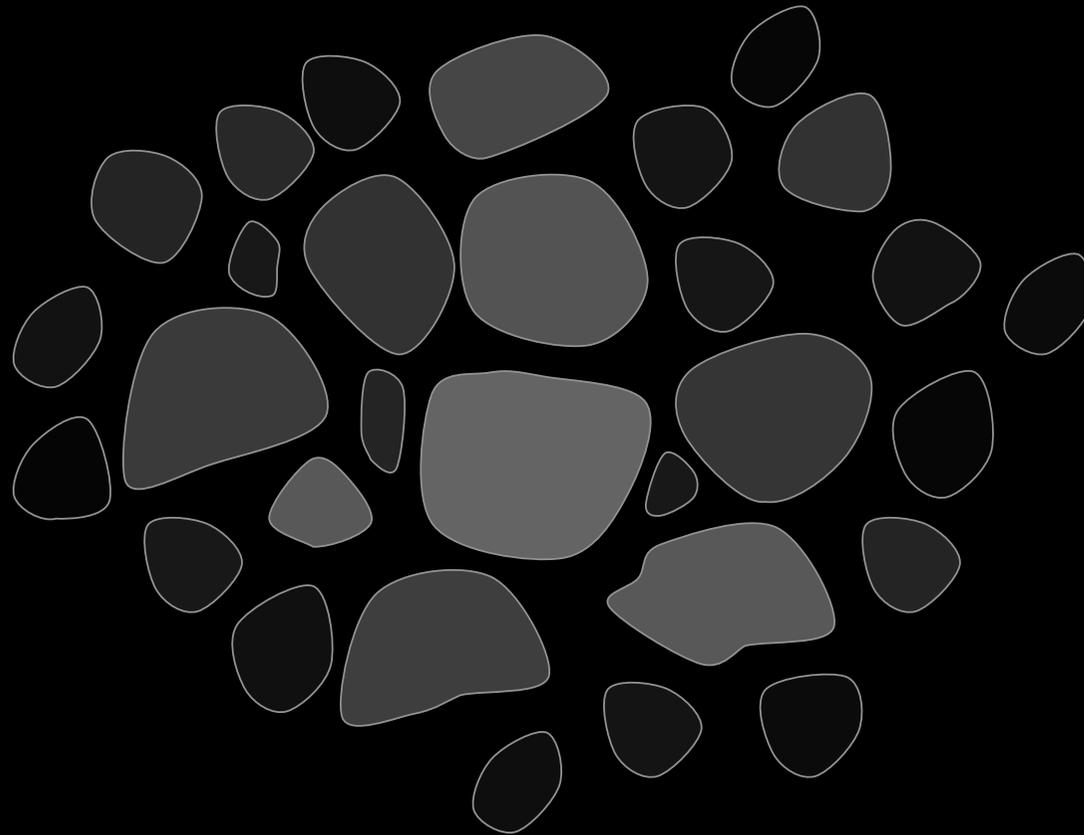
(2) Turbulenz zerfällt, dh. Gravitation

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

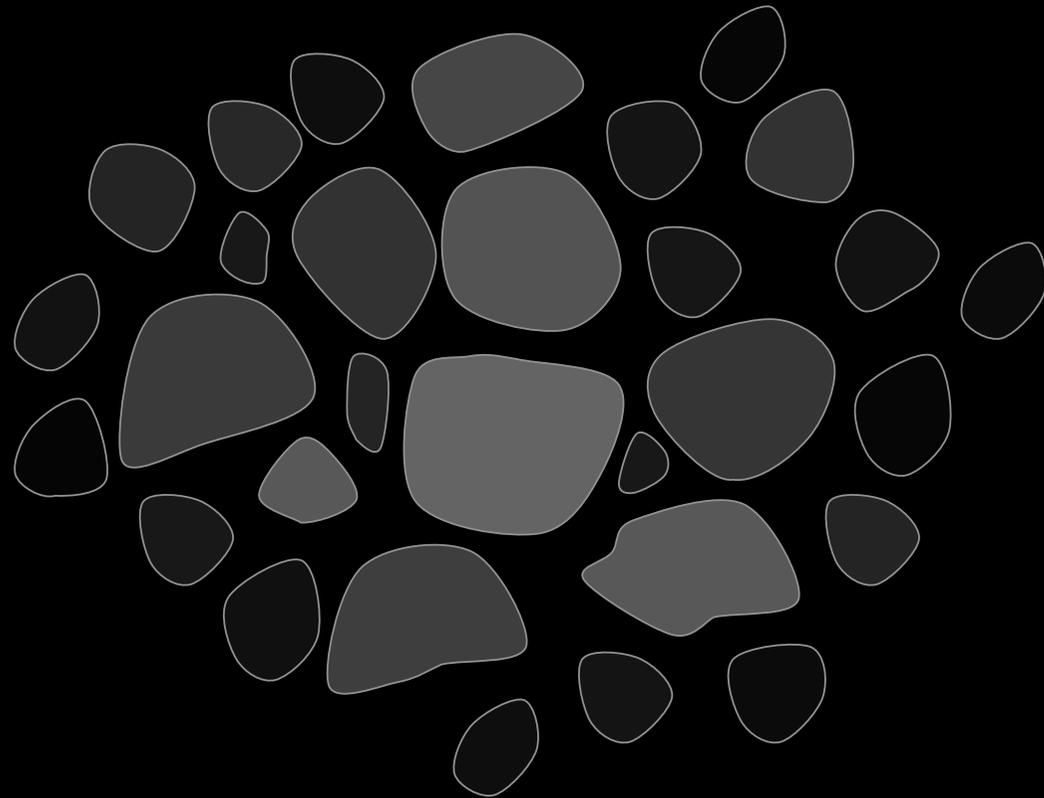
- > *globale Kontraktion*
- > Kerne *wechselwirken* während sie kollabieren
- > *Kompetitives Wachstum*
- > *dichter Haufen, enthält masse- reiche Sterne*



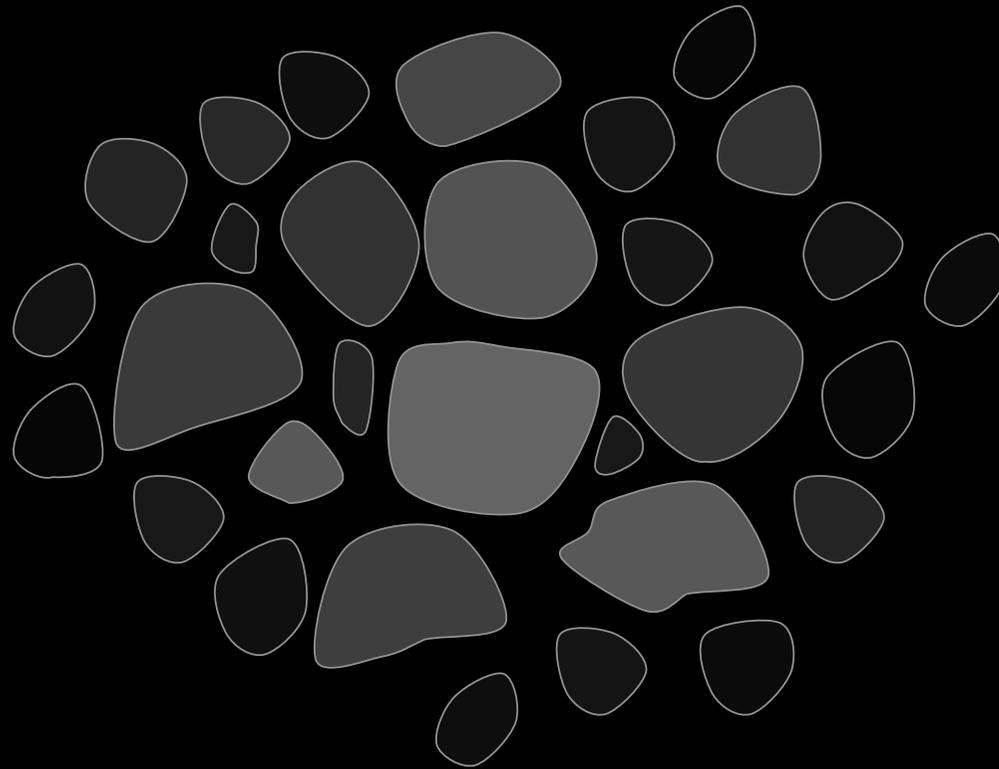
Turbulenz erzeugt Hierarchie von Klumpen



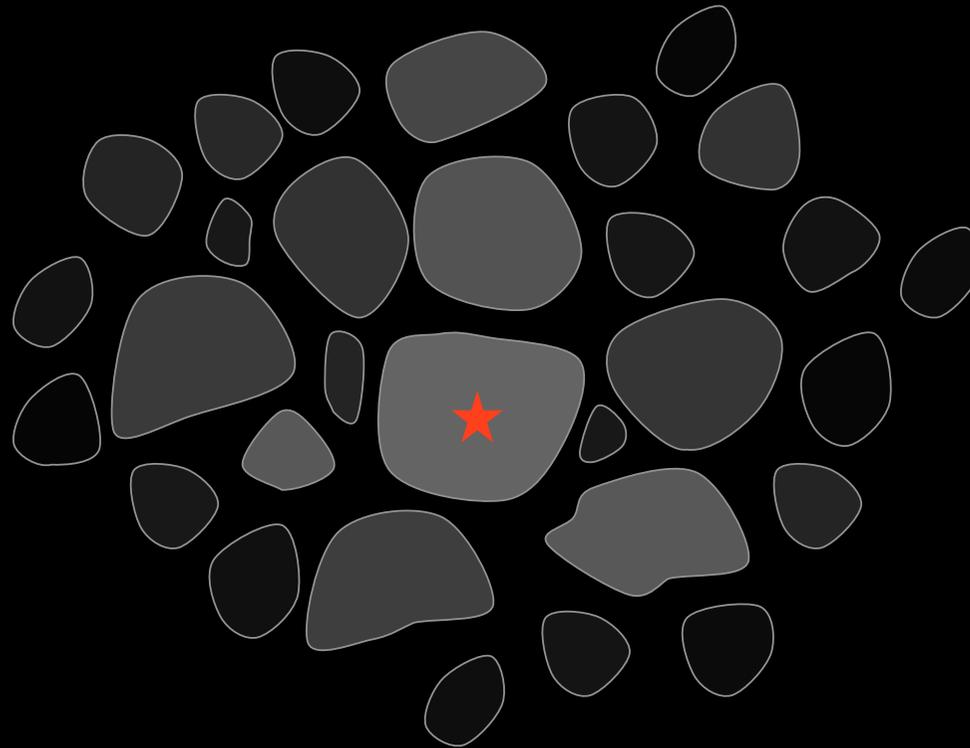
Turbulenz dissipiert, Kontraktion setzt ein



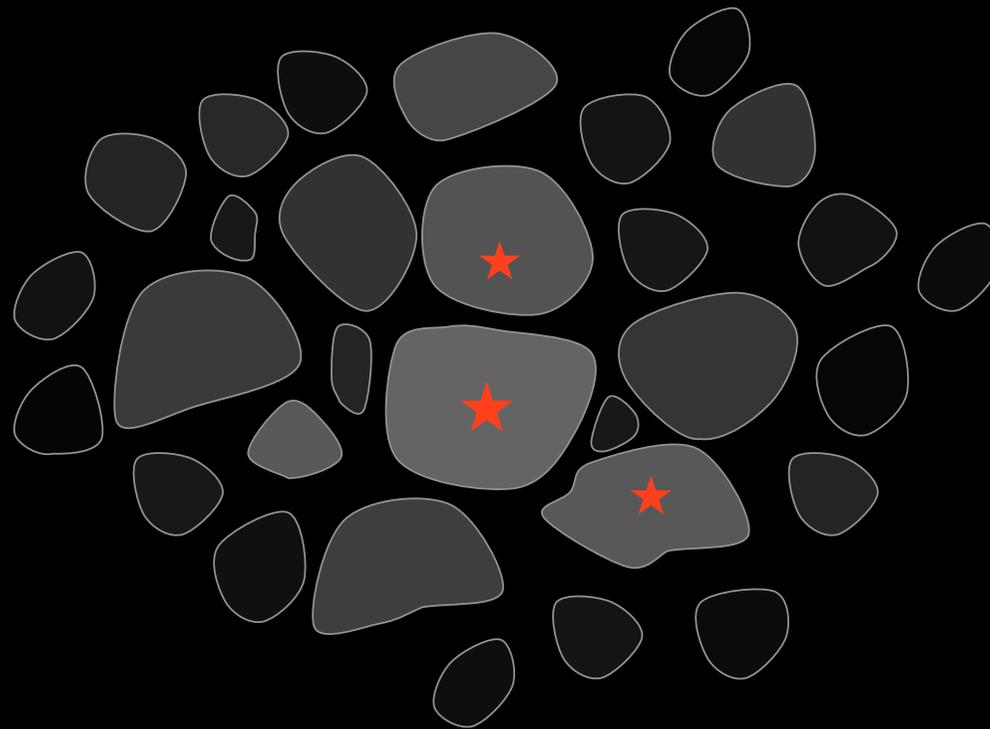
Turbulenz dissipiert, Kontraktion setzt ein



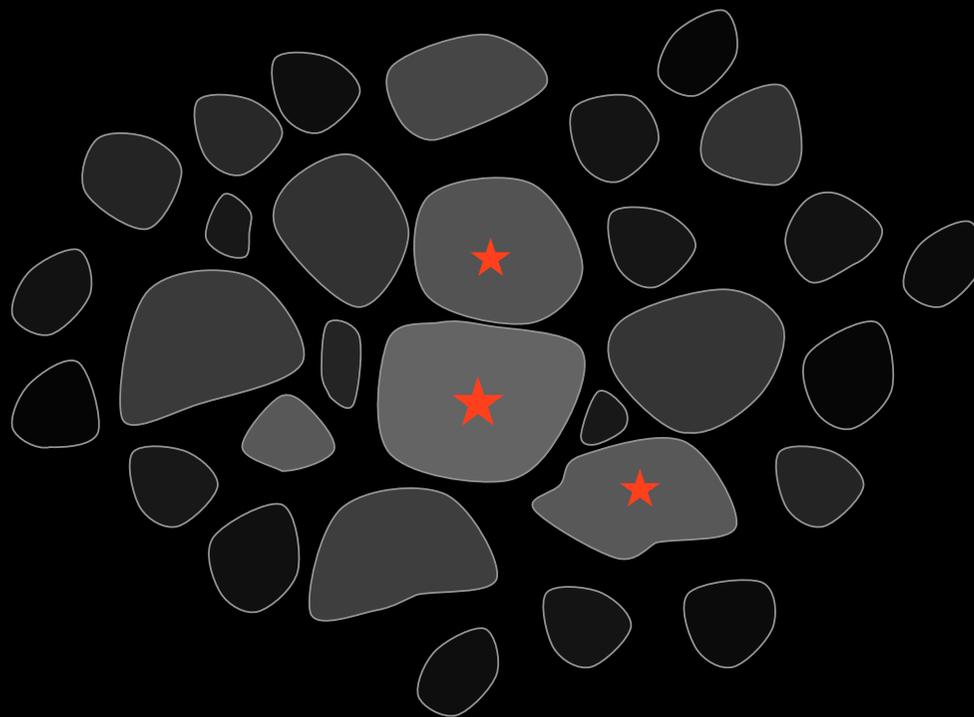
während Region kontrahiert können einzelne Klumpen kollabieren und Sterne bilden



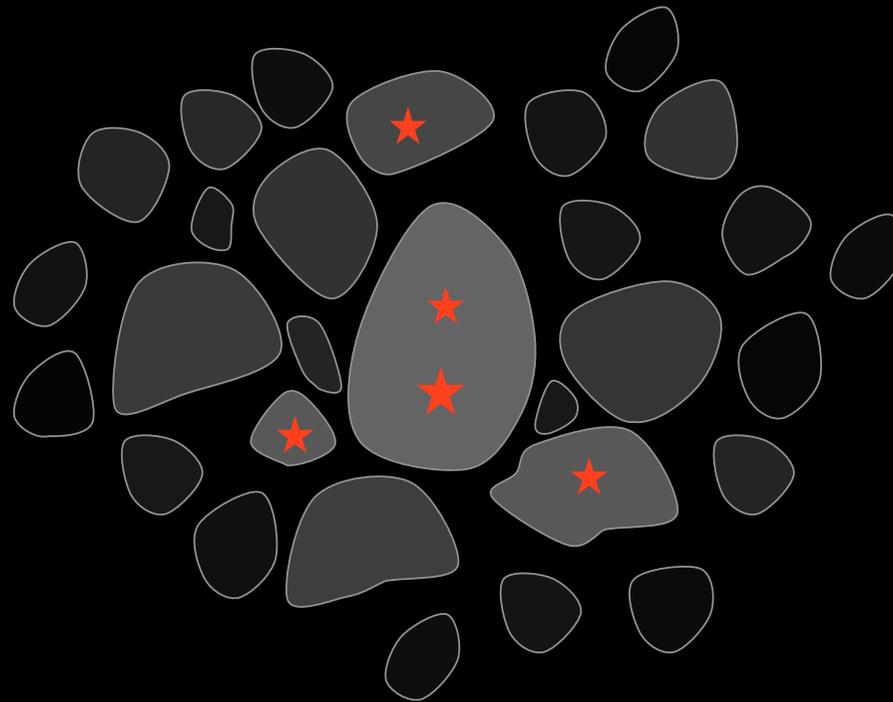
während Region kontrahiert können einzelne Klumpen kollabieren und Sterne bilden



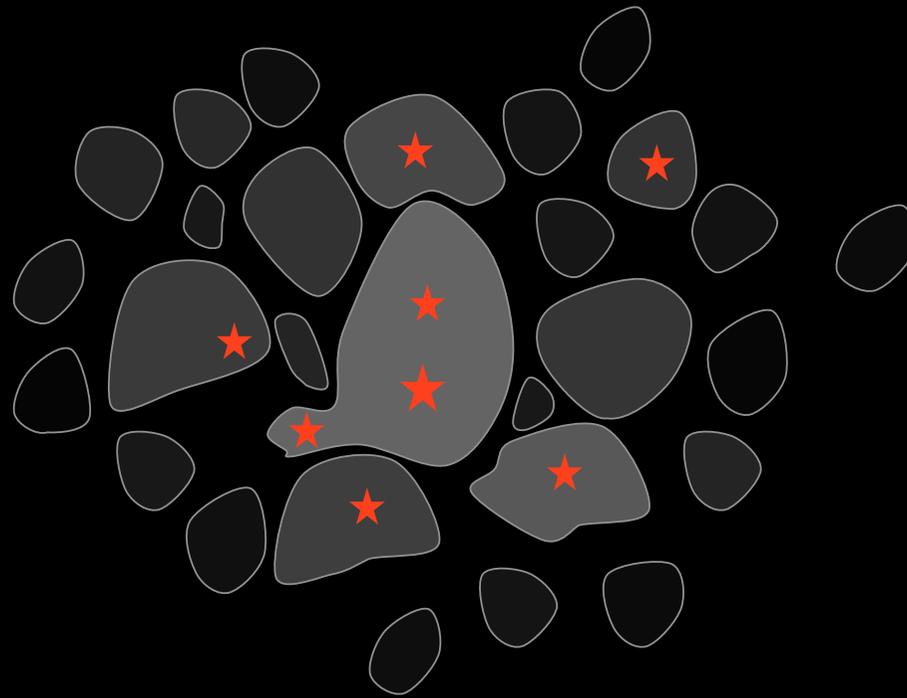
einzelne Klumpen kollabieren und bilden Sterne



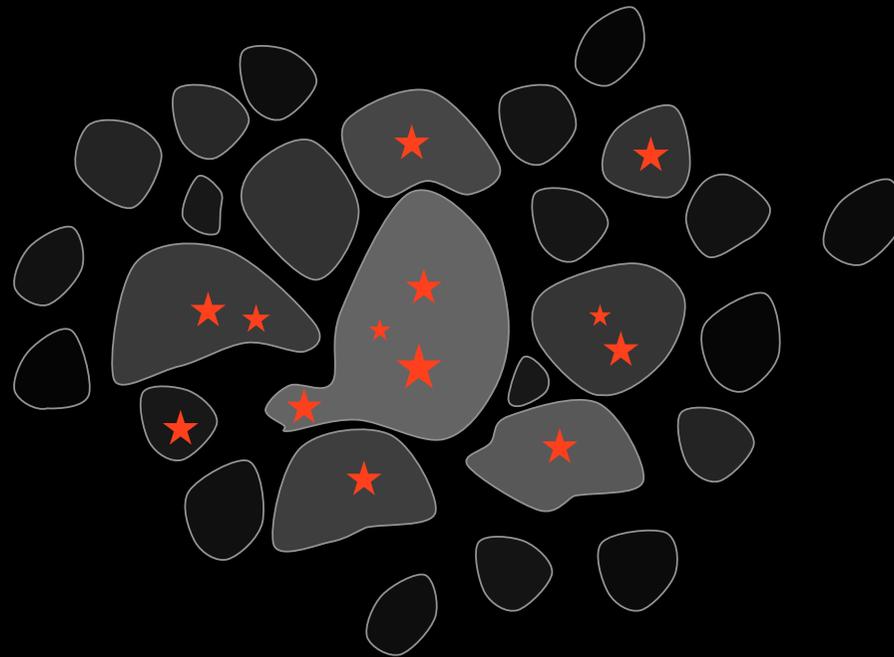
einzelne Klumpen kollabieren und bilden Sterne



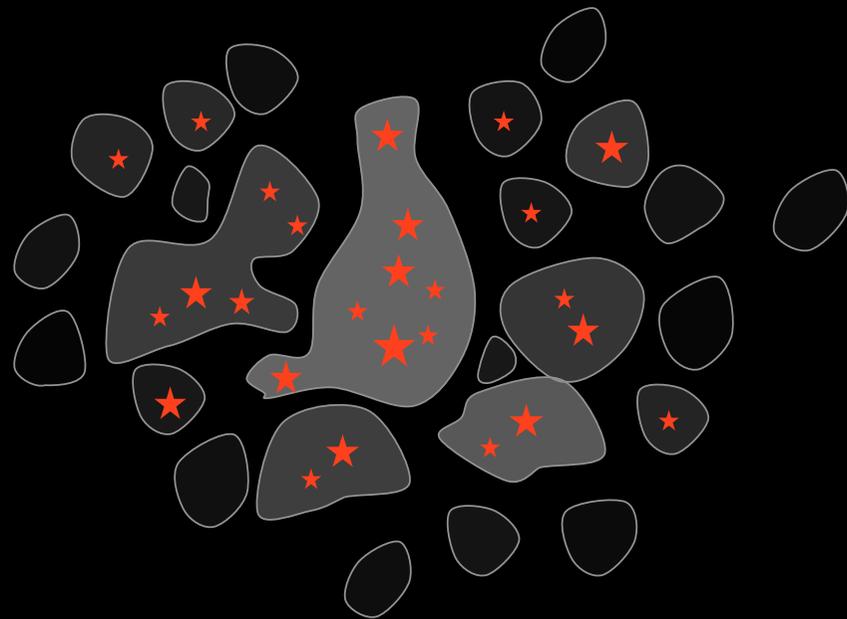
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



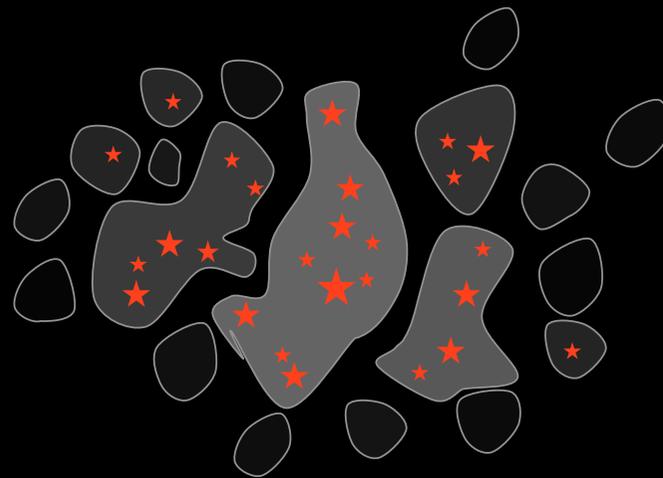
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



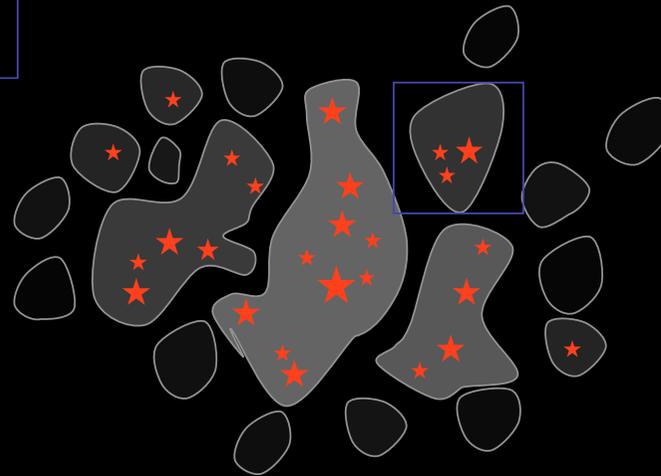
Im *dichten Haufen* können Klumpen verschmelzen während sie kollabieren --> sie enthalten nun mehrere Protosterne



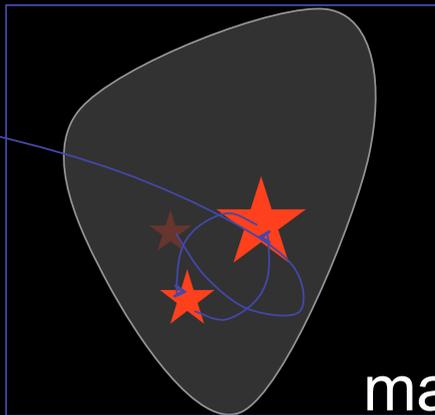
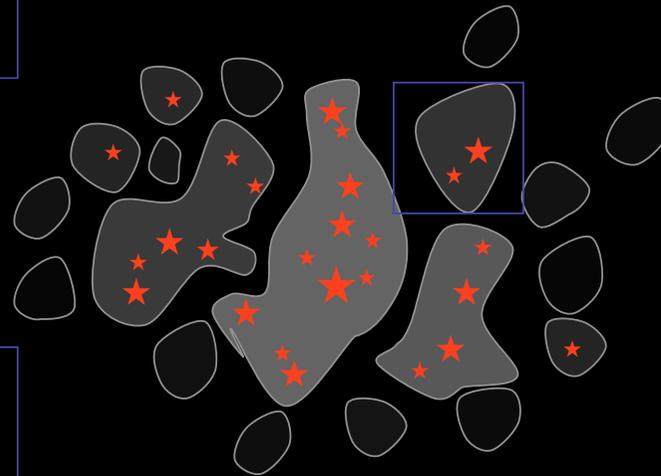
Im *dichten Haufen* wird kompetitives Wachstum wichtig



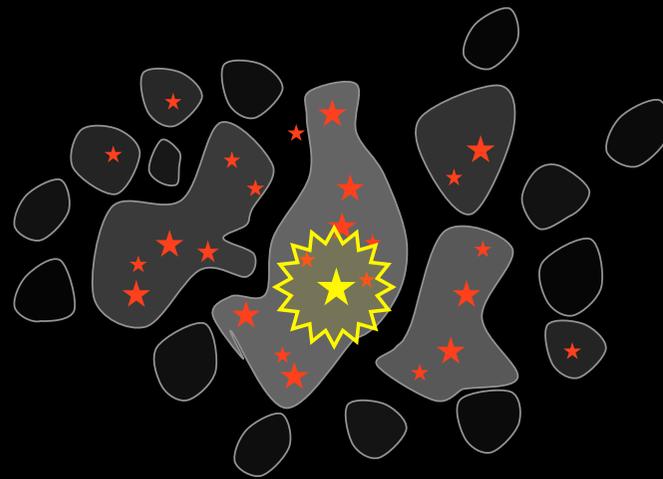
Im *dichten Haufen* wird kompetitives Wachstum wichtig



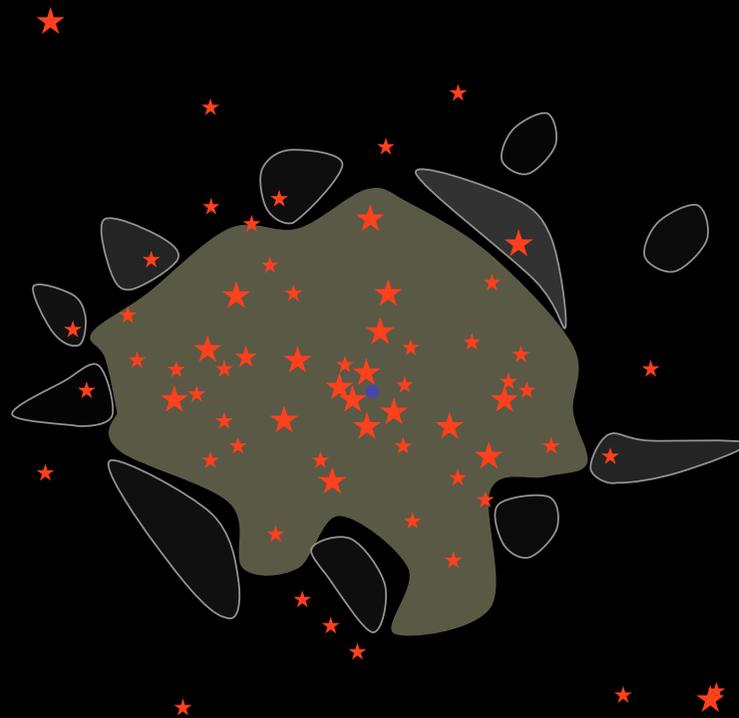
Im *dichten Haufen* beeinflussen stellardynamische Prozesse das Wachstum



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



Feedback beendet die Sternbildung

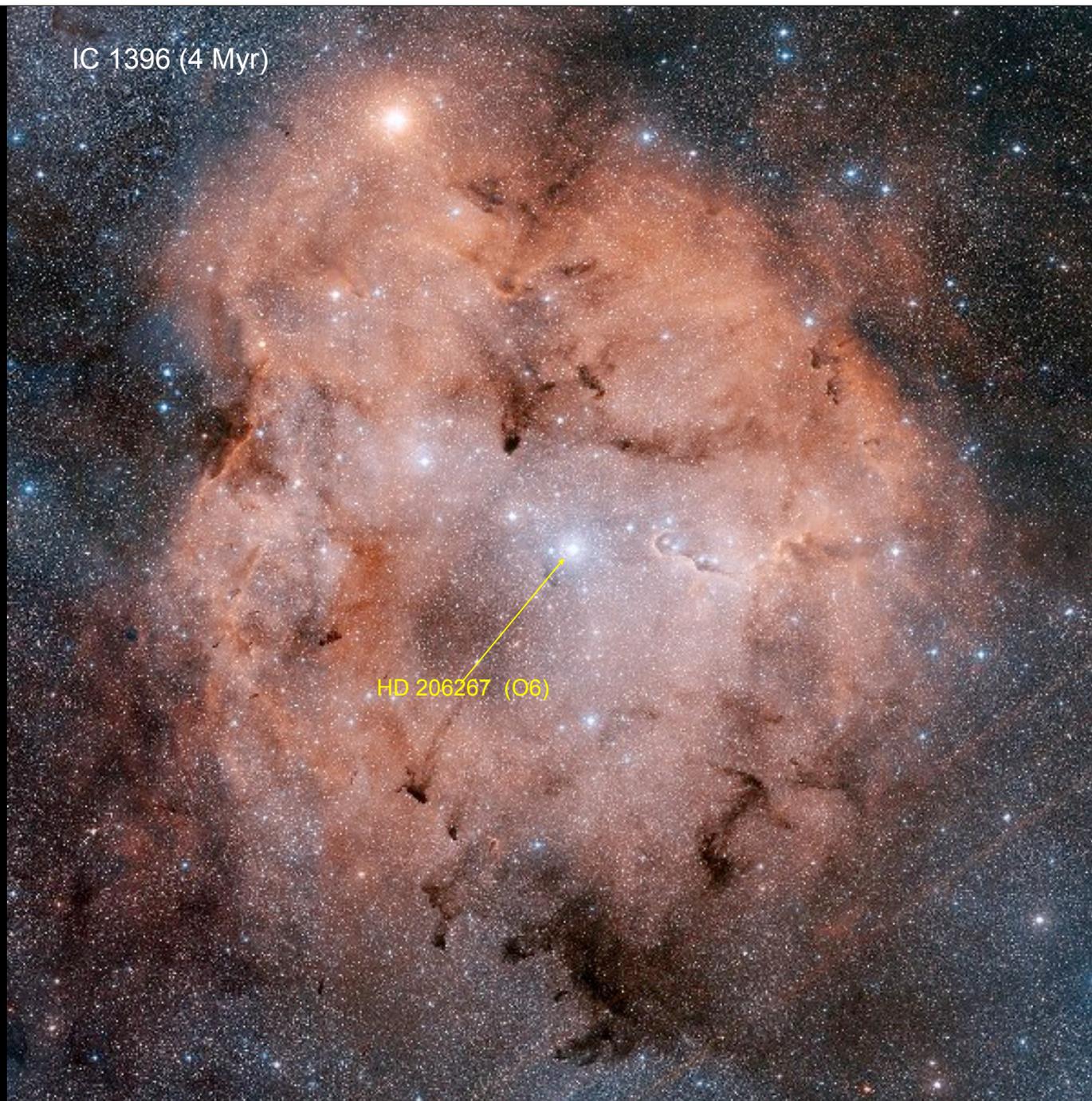


Resultat: *Sternhaufen*, evtl. umgeben von H_{II}-Region

IC 1396 (4 Myr)

HD 206267 (O6)

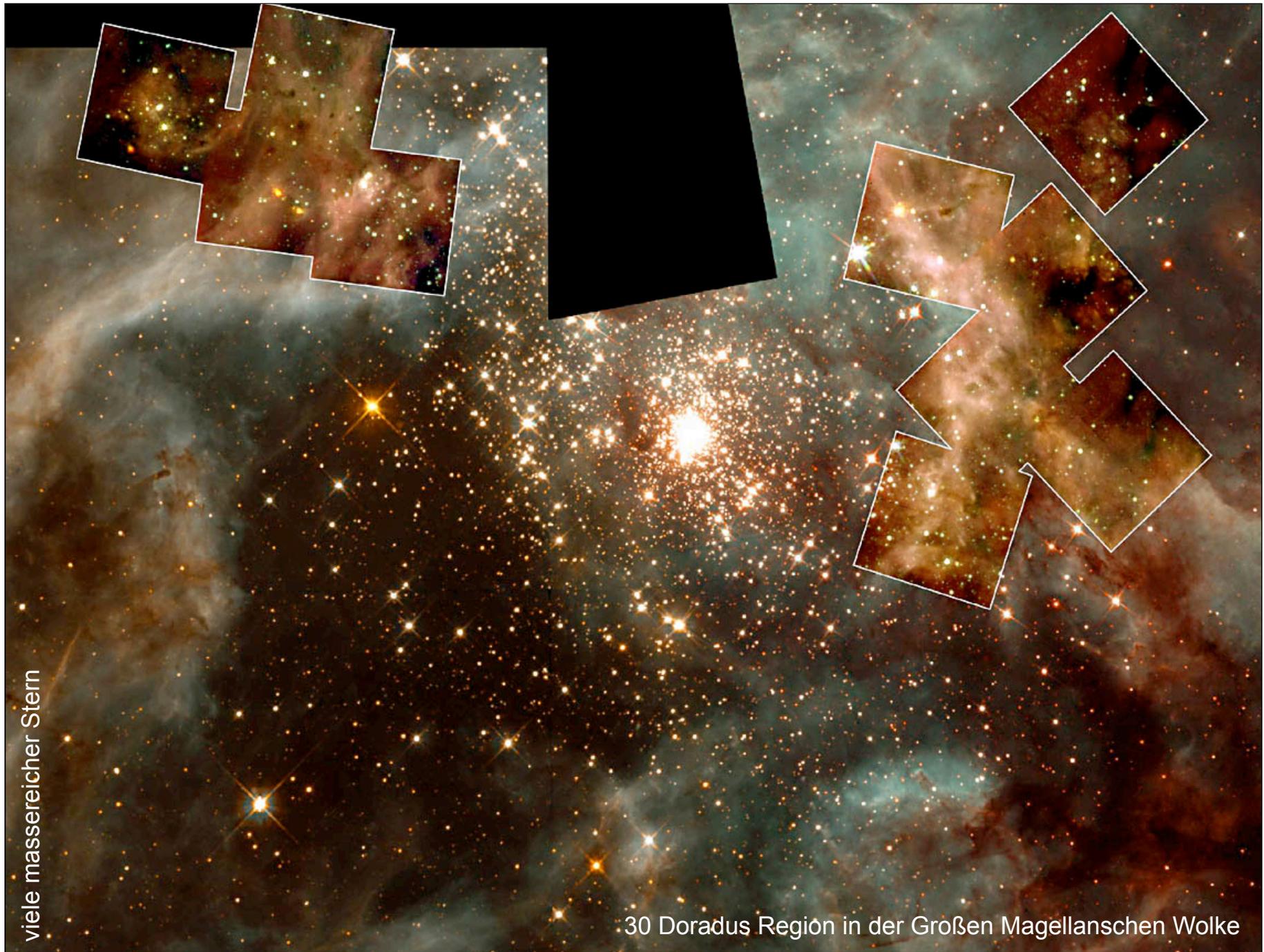
ein massereicher Stern



mehrere massereiche Sterne



NGC 602 in der Großen Magellanschen Wolke: Hubble Heritage Image



viele massereicher Stern

30 Doradus Region in der Großen Magellanschen Wolke

Zusammenfassung

Zusammenfassung

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

DANKKE