

Stern- und Planetenentstehung

- Sternentstehung
 - Stufen des Kollaps
 - Akkretionsscheiben
 - Ausflüsse
 - Verschiedene Sternmassen
- Planetenentstehung
 - Staubwachstum
 - Gesteins- und Gasplaneten



Ausgangspunkt: Dunkelwolken

Der eigentliche Sternentstehungsprozess
liegt im Verborgenen:

Sterne bilden sich in
dichten, kalten Staub-
und Molekülwolken



Wiederholung: hydrostat. Gleichgewicht

• Gleichgewicht zwischen Gravitation und thermischem Druck:

- Gravitationsdruck in homogener Kugel:

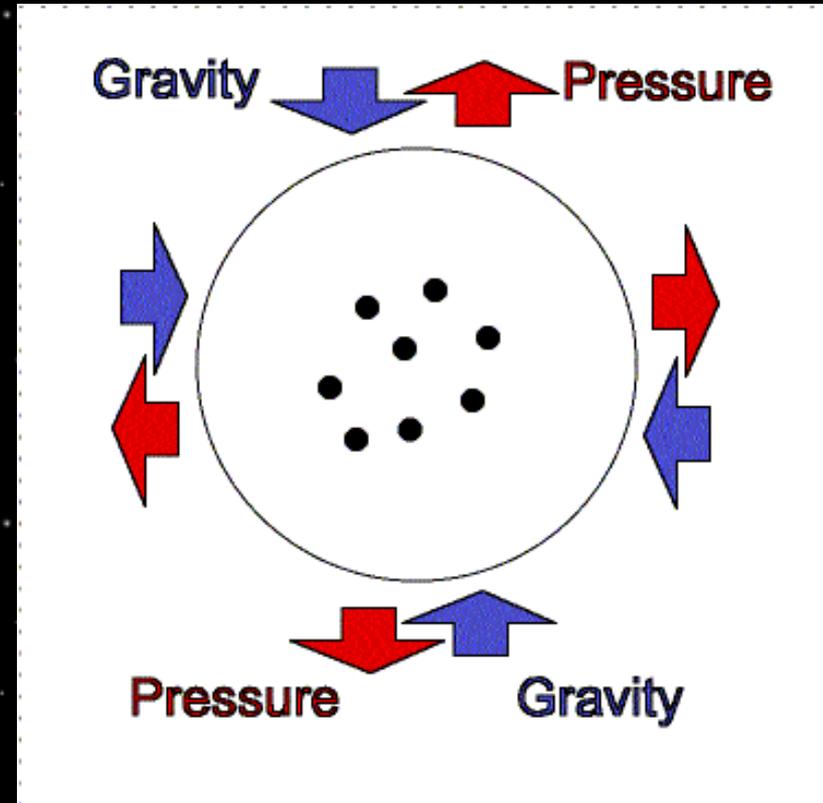
$$p = G \frac{2\pi}{3} \rho^2 r^2$$

ρ - Dichte, r - Kugelradius,
 G - Gravitationskonstante

- Thermischer Druck:

$$p = nk_B T = \frac{\rho}{\mu} k_B T$$

T - Gastemperatur, μ - Molekülmasse, k_B - Boltzmann-Konst



Hydrostat. Gleichgewicht

- Wenn der Radius r nur groß genug wird, "gewinnt" der Gravitationsdruck gegen den thermischen Druck
- Quantitative Beschreibung:

Jeans-Masse

$$M_J = \frac{\pi}{6} \left(\frac{\pi k_B}{G\mu} \right)^{3/2} \frac{T^{3/2}}{\rho^{1/2}}$$
$$\approx 2M_\odot \left(\frac{T}{10\text{K}} \right)^{3/2} / \left(\frac{n}{10^3\text{cm}^{-3}} \right)^{1/2}$$

- Wolken mit größerer Masse müssen unter ihrem Eigengewicht kollabieren!

Isothermer Kollaps

- Wolkenkollaps bei $M > M_J$
- Zeitskala (Frei-Fall-Zeit):

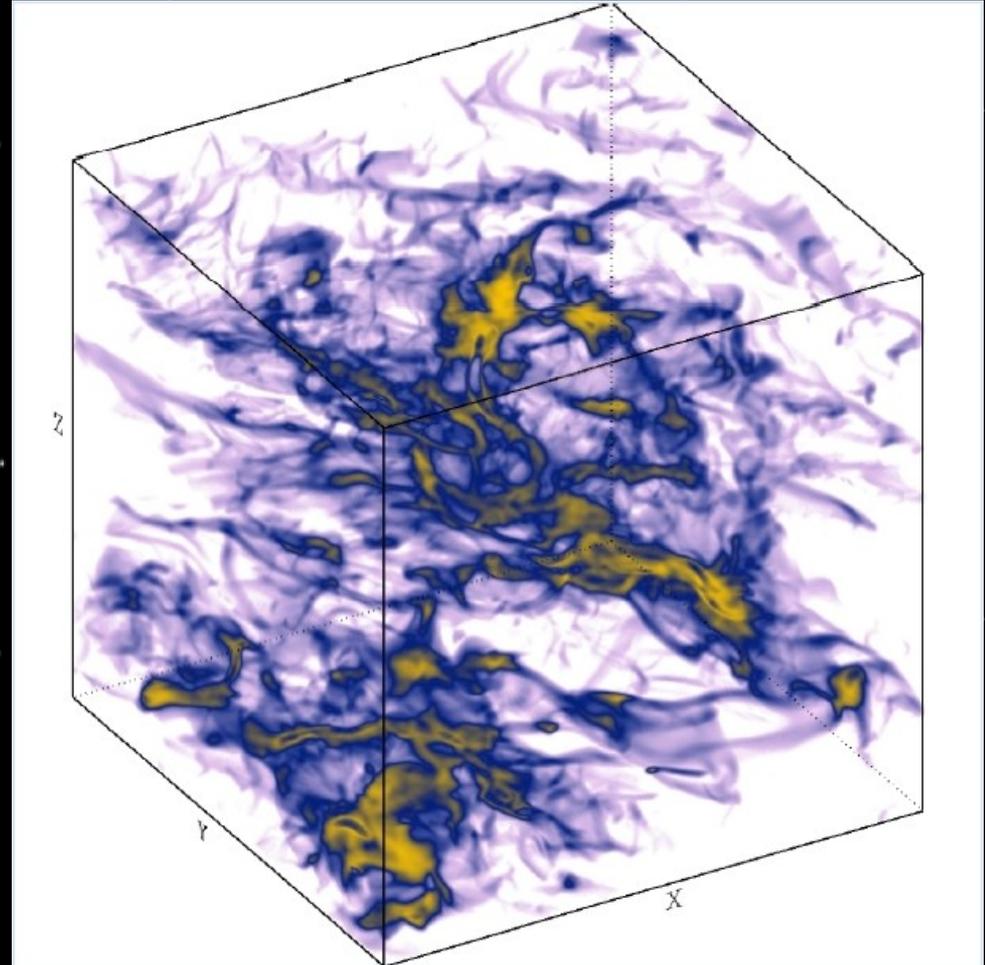
$$\tau_{ff} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}}$$

$$\approx 1.2 \text{ Mio a für } n = 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

- Alle Riesenmolekülwolken der Milchstraße müssten eigentlich unter ihrem Eigengewicht zusammenfallen
 - Ergibt Sternentstehungsrate: $10^6 \text{ } \odot/\text{a}$
 - Beobachtet: $2\text{-}3 \text{ } \odot/\text{a}$

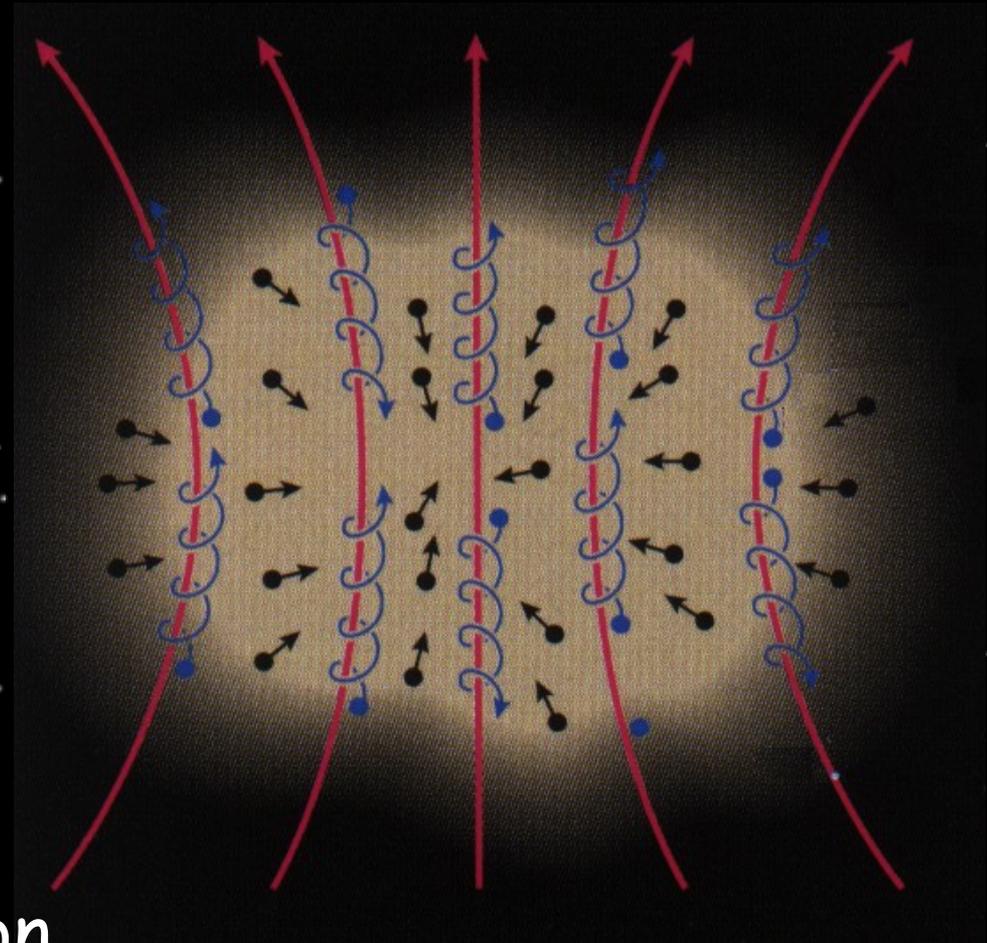
Erklärungen

- Turbulenz
 - Zusätzlicher turbulenter Druck
 - Lokale Stabilisierung
 - Kein Gleichgewicht

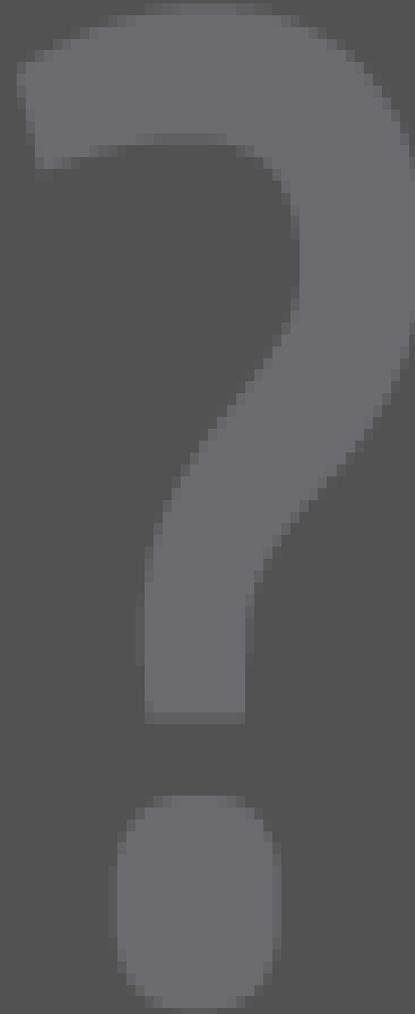


Erklärungen

- Magnetfelder
 - Geladene Teilchen ans Magnetfeld gekoppelt
 - "Reibung" zwischen geladenen und neutralen Teilchen
 - Ambipolare Diffusion



Tatsächlicher
• turbulenter
Kollaps



Der Kollaps: Ursachen und Wirkung

- Kollision von Wolken
 - Schockwellen
 - Turbulenzen
 - magnetische Instabilitäten
- Kondensation dichter Kerne
-
- Eigengravitation
 - Fragmentierung
- Kollaps dichter Klumpen
-
- potentielle Energie in Form der Gravitation
- 50% Heizung & 50% Strahlung
-
- Gravitation im Zentrum ($\sim 1/r^2$)
- das Zentrum kollabiert schneller
- mehr Energie wird frei
- das Zentrum wird heißer

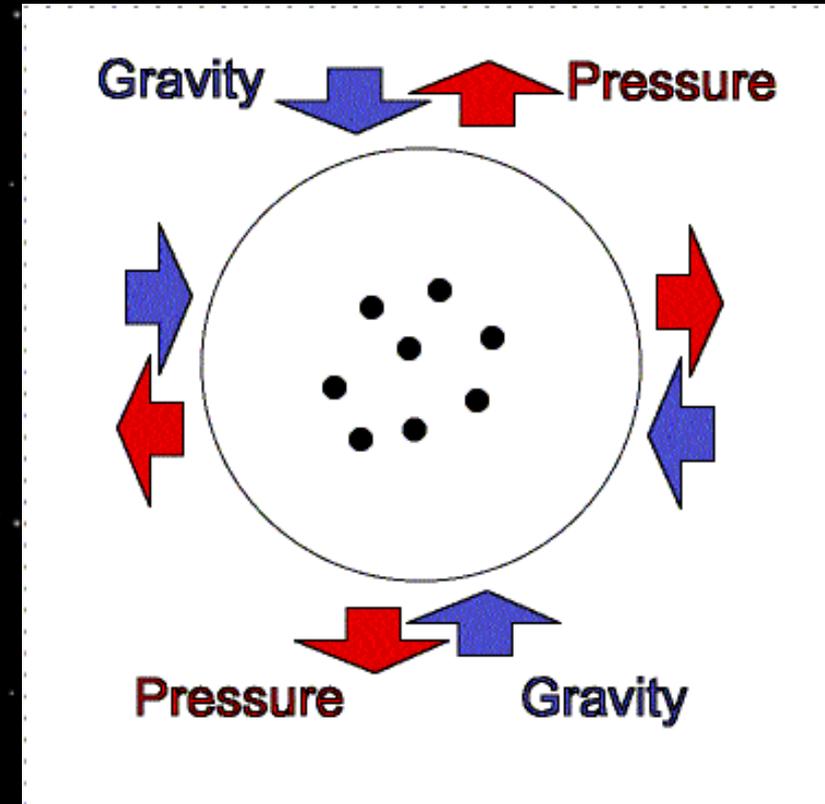
Adiabatischer Kollaps

- Kollaps setzt Energie frei
- Bei Dichten bis $n = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ kann Infrarotstrahlung ungehindert entweichen
 - Die Strahlung des interstellaren Staubes kühlt das Medium
 - Die Temperatur bleibt konstant
 - > **Isothermer Kollaps**
- Größere Dichten
 - Aufheizung des Kerns
 - > **Adiabatischer Kollaps**

Ausbildung eines hydrostatischen Kerns

• Gleichgewicht zwischen Gravitation und thermischem Druck:

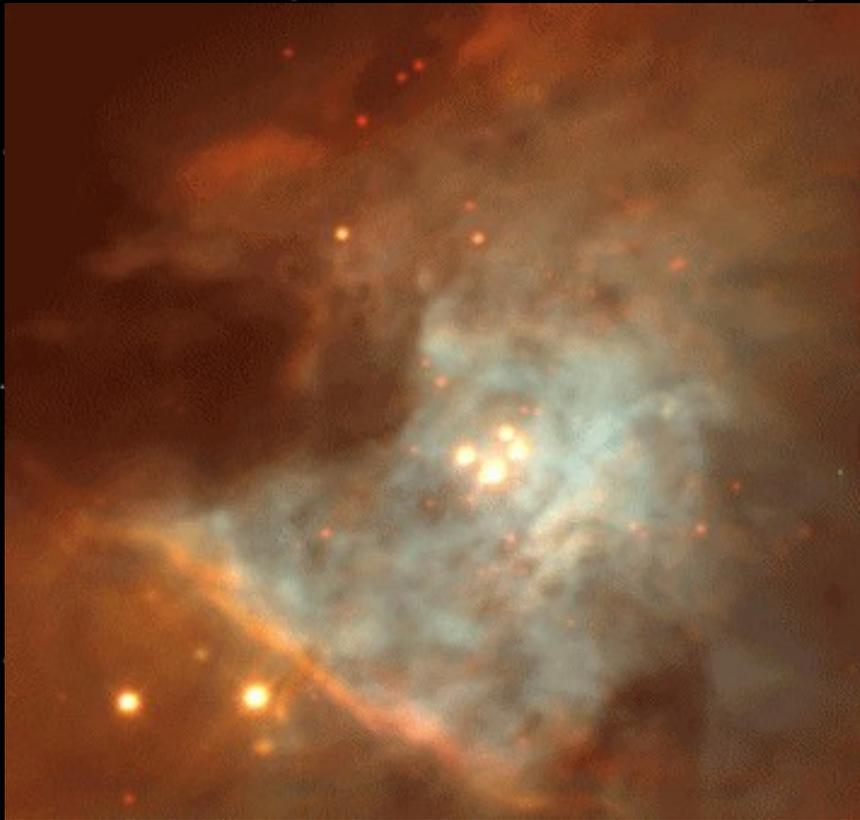
- Kontraktion setzt Energie frei
- Das Gas heizt sich auf
- Der thermische Druck steigt
- Der Kern stabilisiert sich



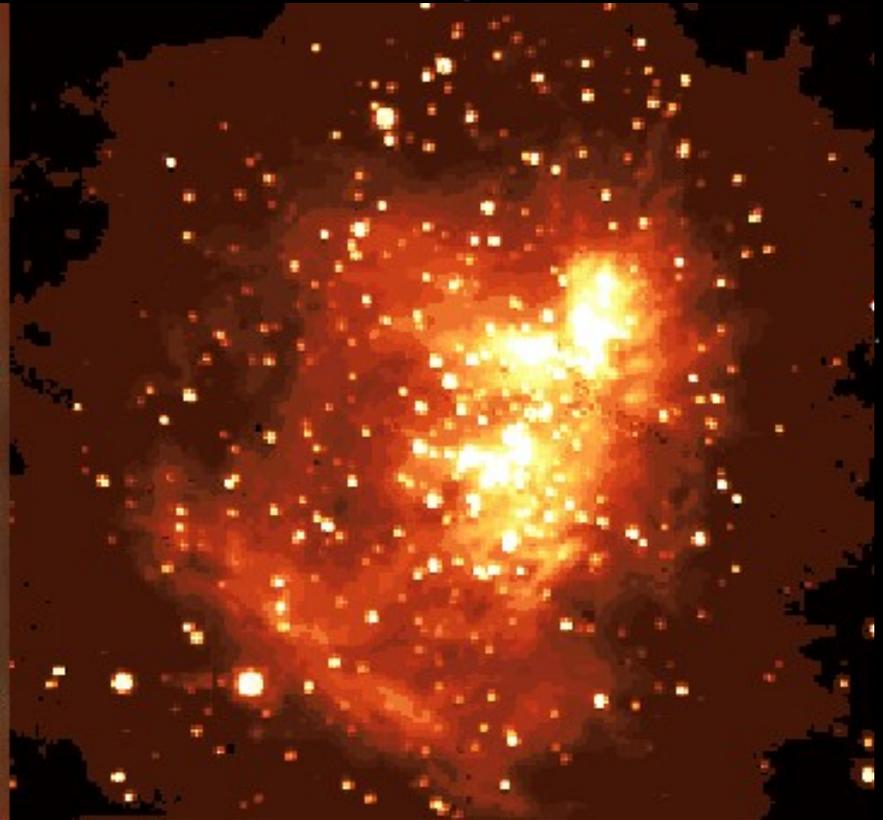
• Typische Parameter: $T=100\text{K}$, $R=2000\text{ AU}$

Protostellare Kerne

Der Kern emittiert Kontinuumstrahlung und charakteristische Linien im Infraroten und Radiobereich

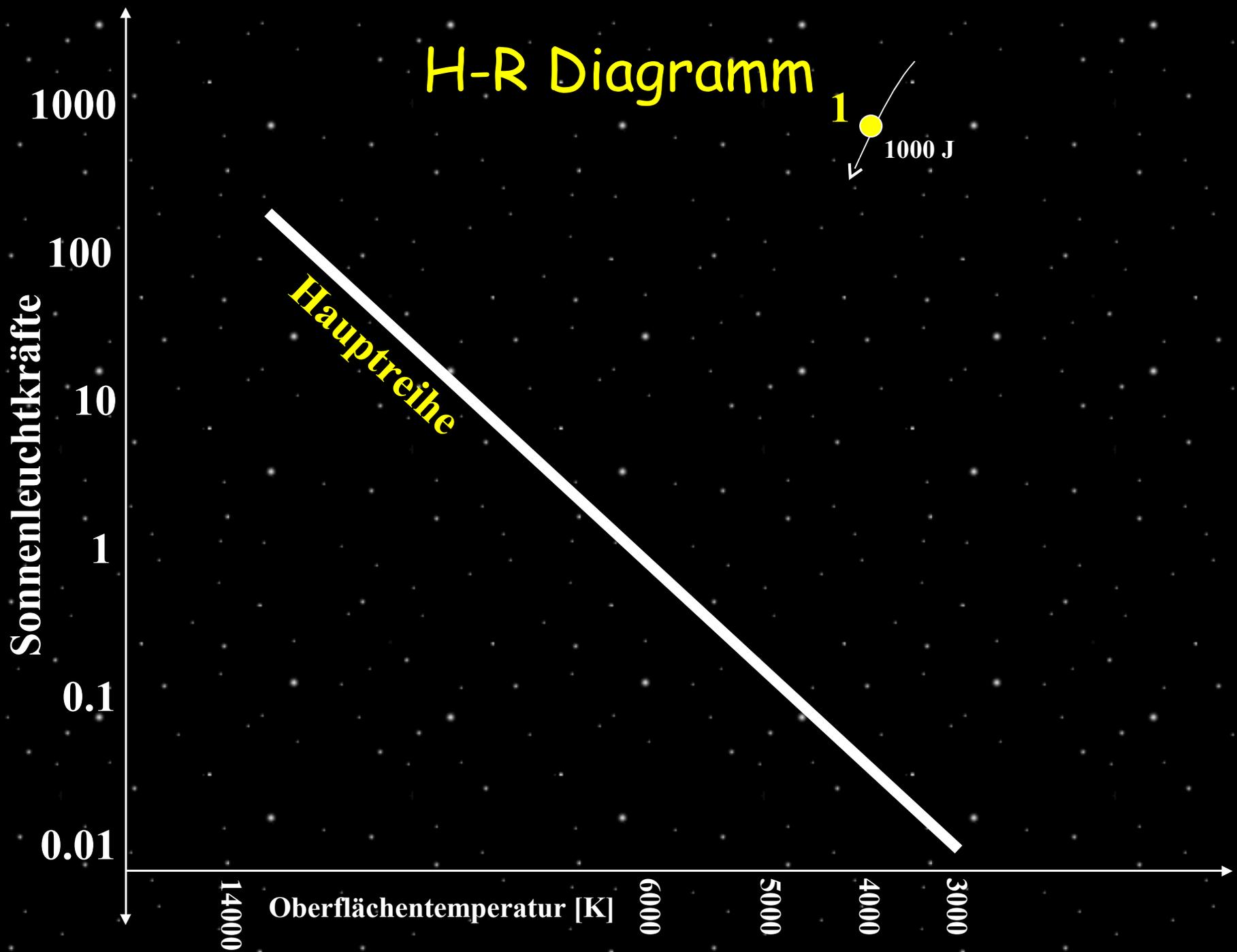


Orion Bar: Optisch



Infrarot

H-R Diagram



Sonnenleuchtkräfte

Oberflächentemperatur [K]

Hauptreihe

1

1000 J

2. Hydrostatischer Kern

- Der hydrostatische Kern bleibt > 100000 a stabil
- Energie wird langsam abgestrahlt
- Weitere Kontraktion und Aufheizung
- Bei $T > 1000\text{K}$ verdampft der Staub
 - Strahlung kann frei entweichen
 - Weiterer isothermer Kollaps
 - Bis zum 2. hydrostatischen Kern

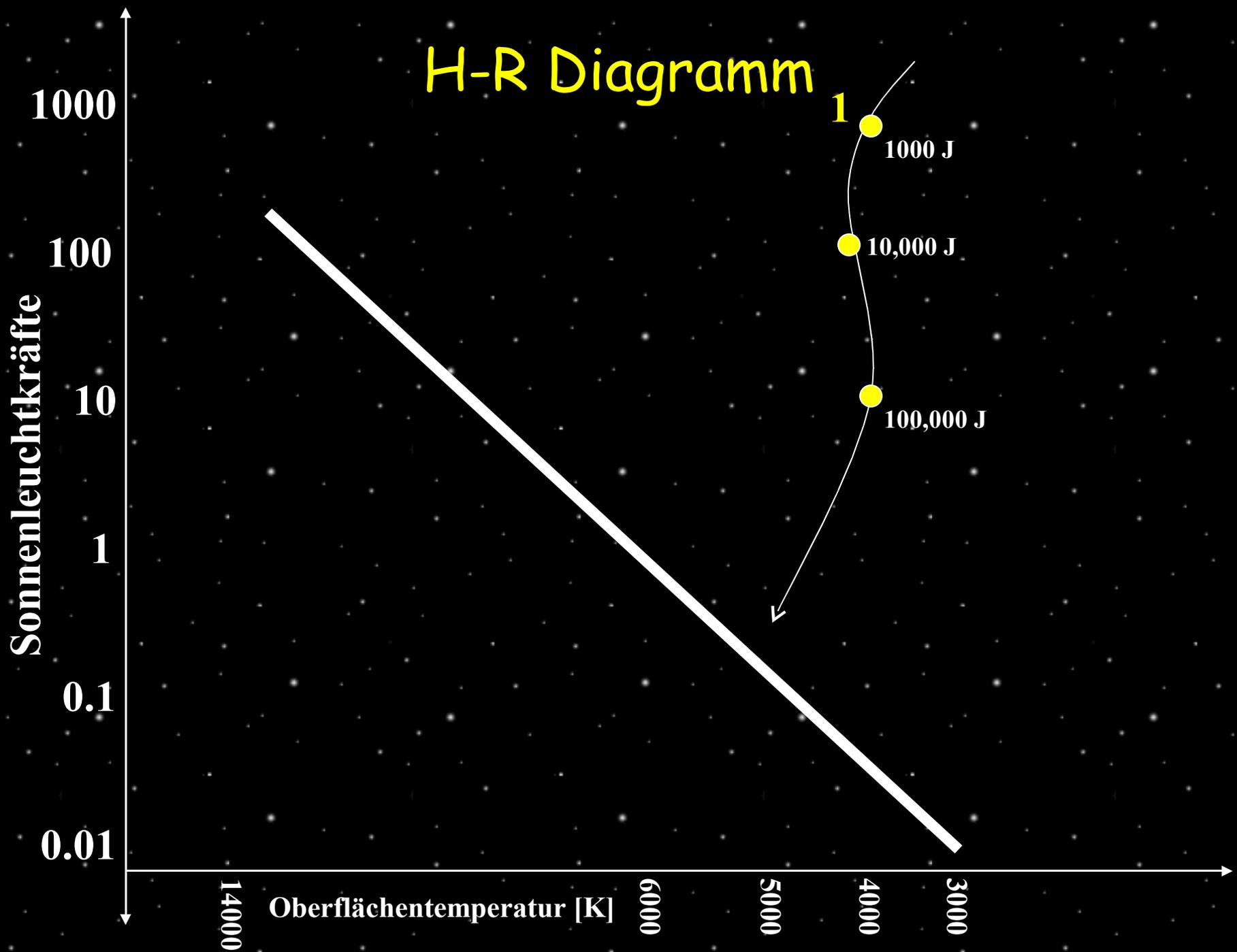
-> Protostern

Stufe 1: Der Protostern

•Alter:	1 - 1000 J
•Radius:	$\sim 50 R_{\odot}$
•T im Kern:	150,000 K
•T der Hülle:	3,500 K
•Energiequelle:	Gravitation

Der Protostern ist kühl, seine Farbe rot, aber er ist sehr groß und leuchtstark - der Stern erscheint im **Hertzsprung-Russell Diagramm** oben rechts.

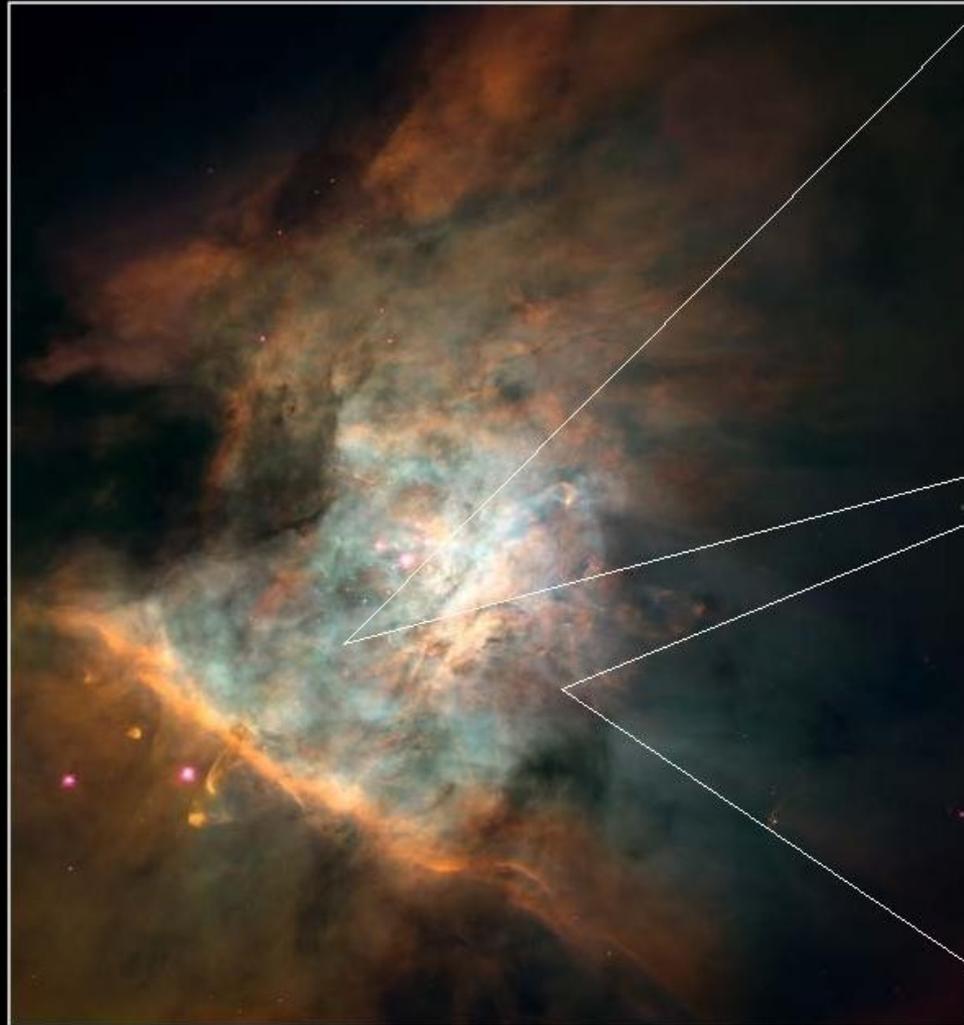
H-R Diagram



Das Drehimpulsproblem

- **Der Drehimpuls eines abgeschlossenen Systems ist konstant!**
 - Jede leichte Scherbewegungen in der Mutterwolke führt zu schneller Rotation.
 - Durch die Zentrifugalkraft entsteht eine abgeplattete Scheibe.
 - In der Scheibe wird Drehimpuls von innen nach außen transportiert.
- **Herausbildung einer rotierenden, nach außen aufgeweiteten Scheibe aus Gas und Staub.**
 - > Planetenentstehung

Protoplanetare Scheiben



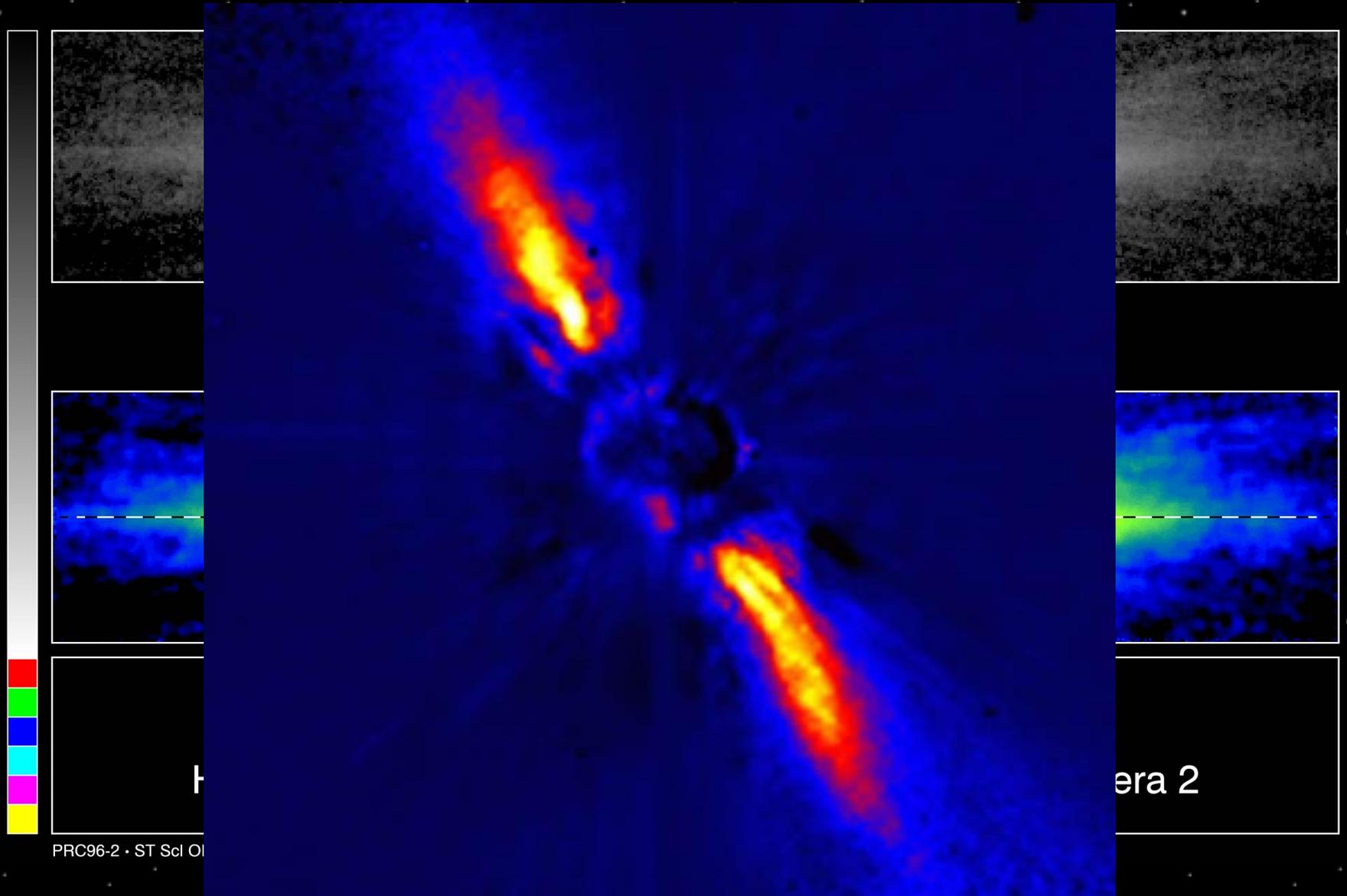
Orion Nebula Mosaic



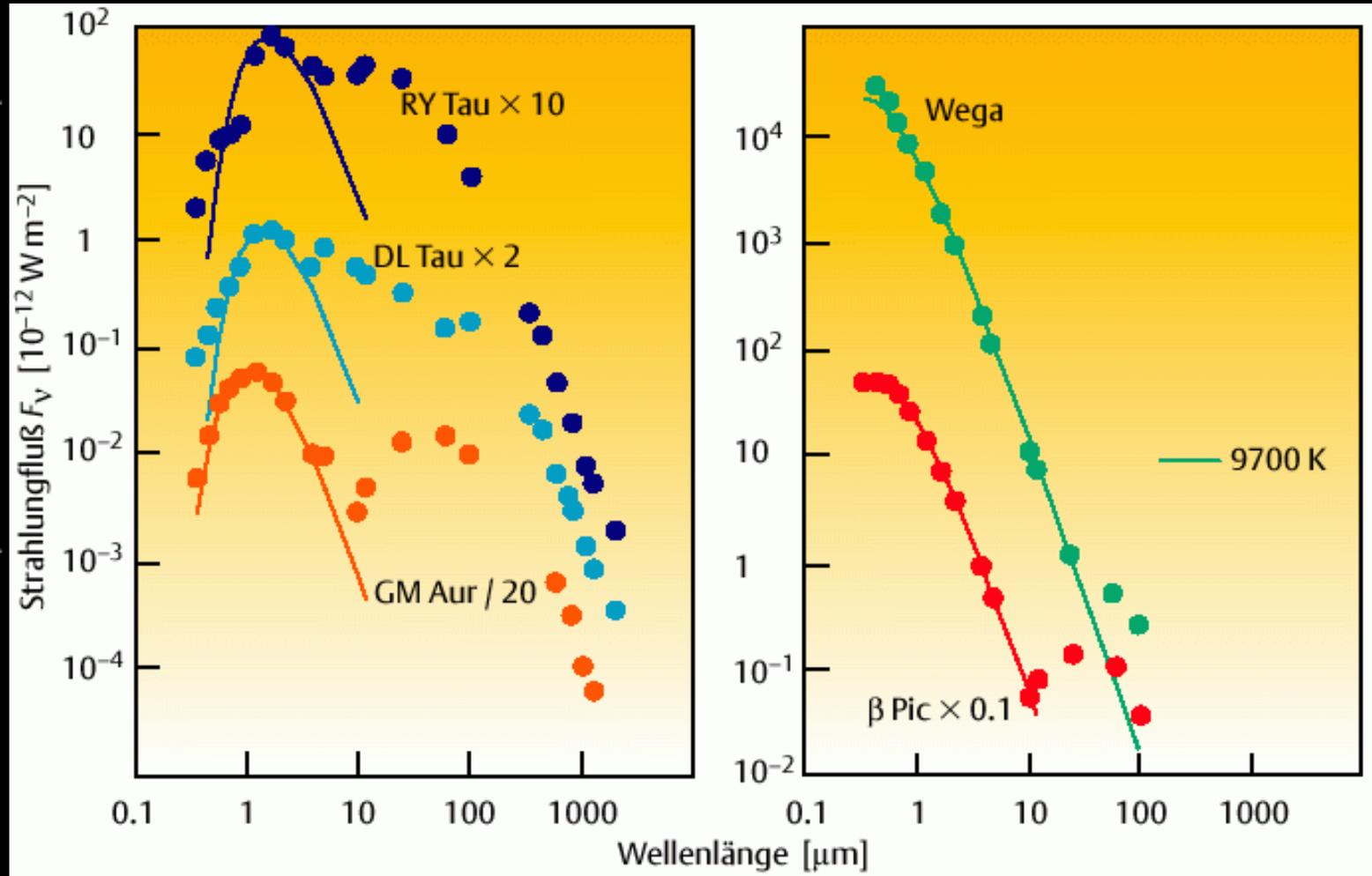
Protoplanetary Disks
Orion Nebula

Direkte Abbildung protoplanetarer Scheiben mit HST

Akkretionssscheiben

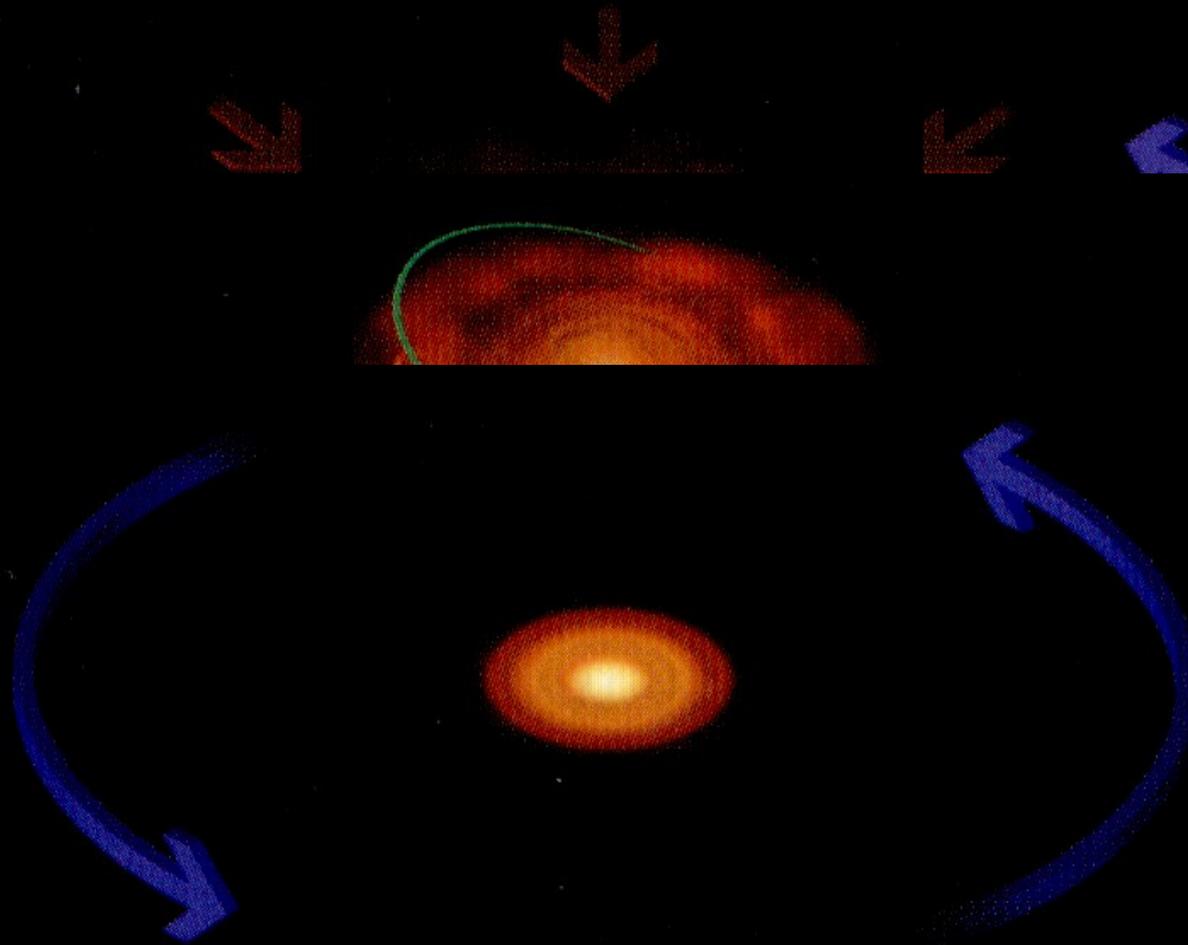


Indirekte Scheibenbeobachtung



Spektren junger Sterne mit Infrarotüberschuss

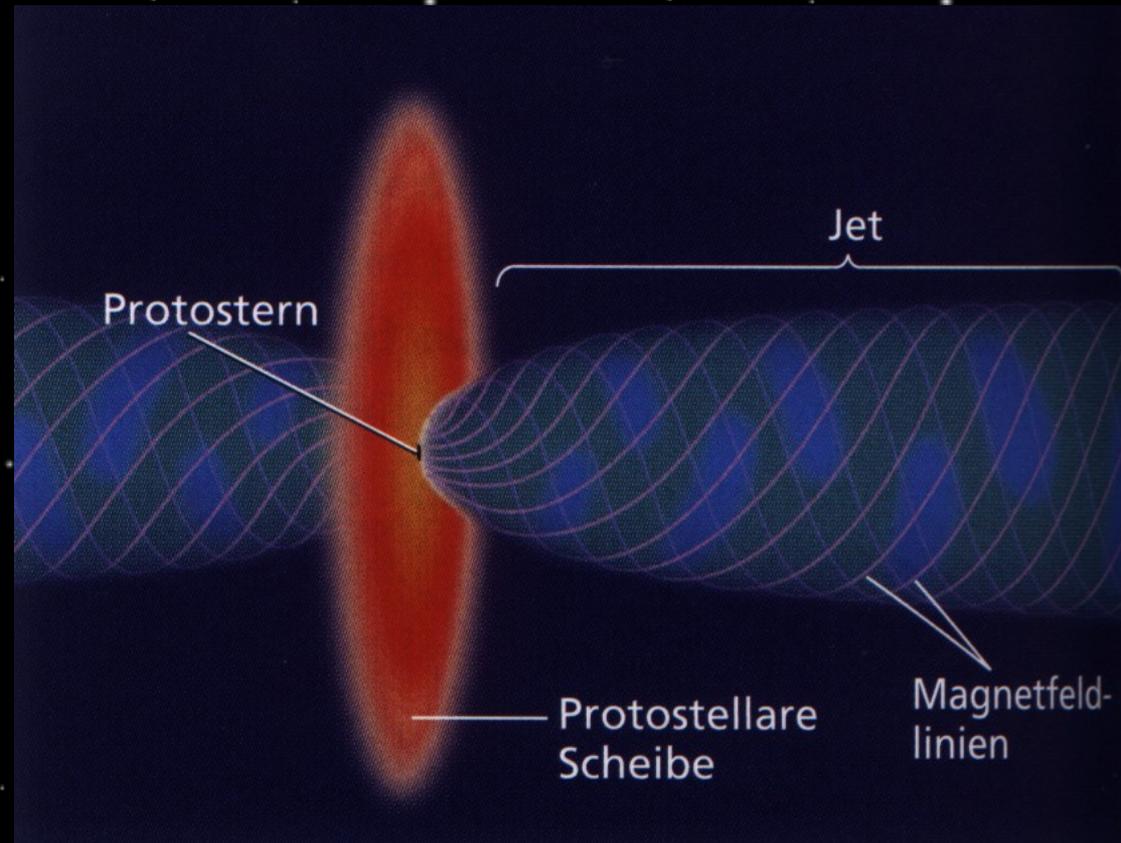
Zusammenfassung



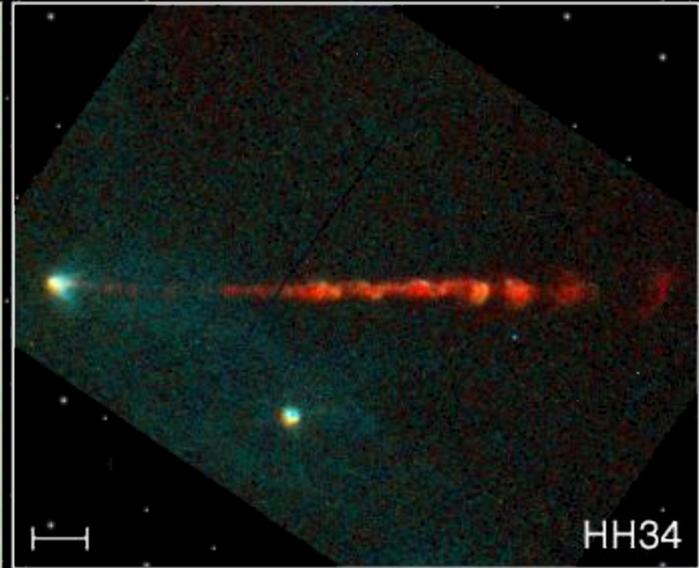
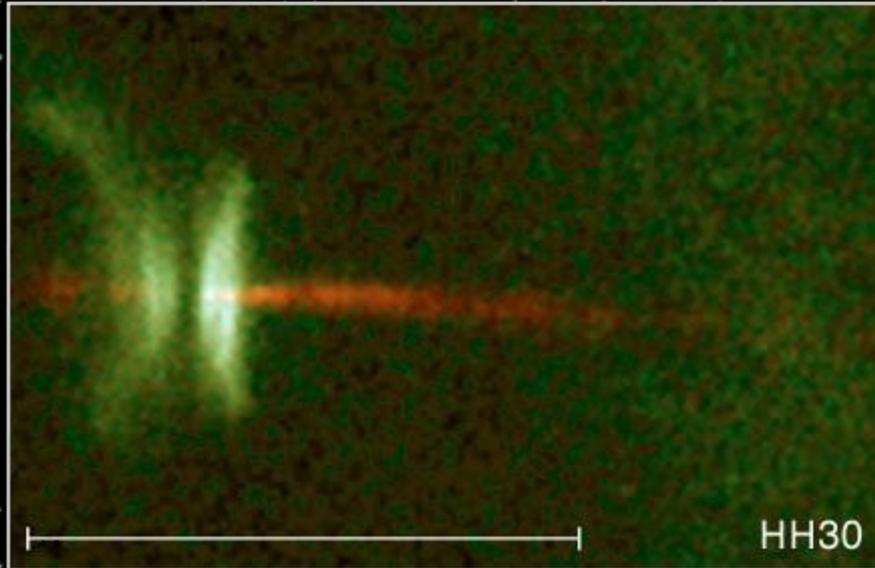
Das Ergebnis ist eine rotierende abgflachte Scheibe; ihre Masse ist in der Nähe des Zentrums konzentriert, ihre Temperatur ist im Zentrum am höchsten.

Jets

- Nebeneffekt der Akkretionsscheibe
 - Gebündelt und getrieben durch Magnetfelder und Strahlungsdruck wird ein Teil der einströmenden Masse entlang der Achse wieder ausgestoßen
 - 10-50%
 - Teil der Lösung des Drehimpulsproblems



Jets junger Sterne



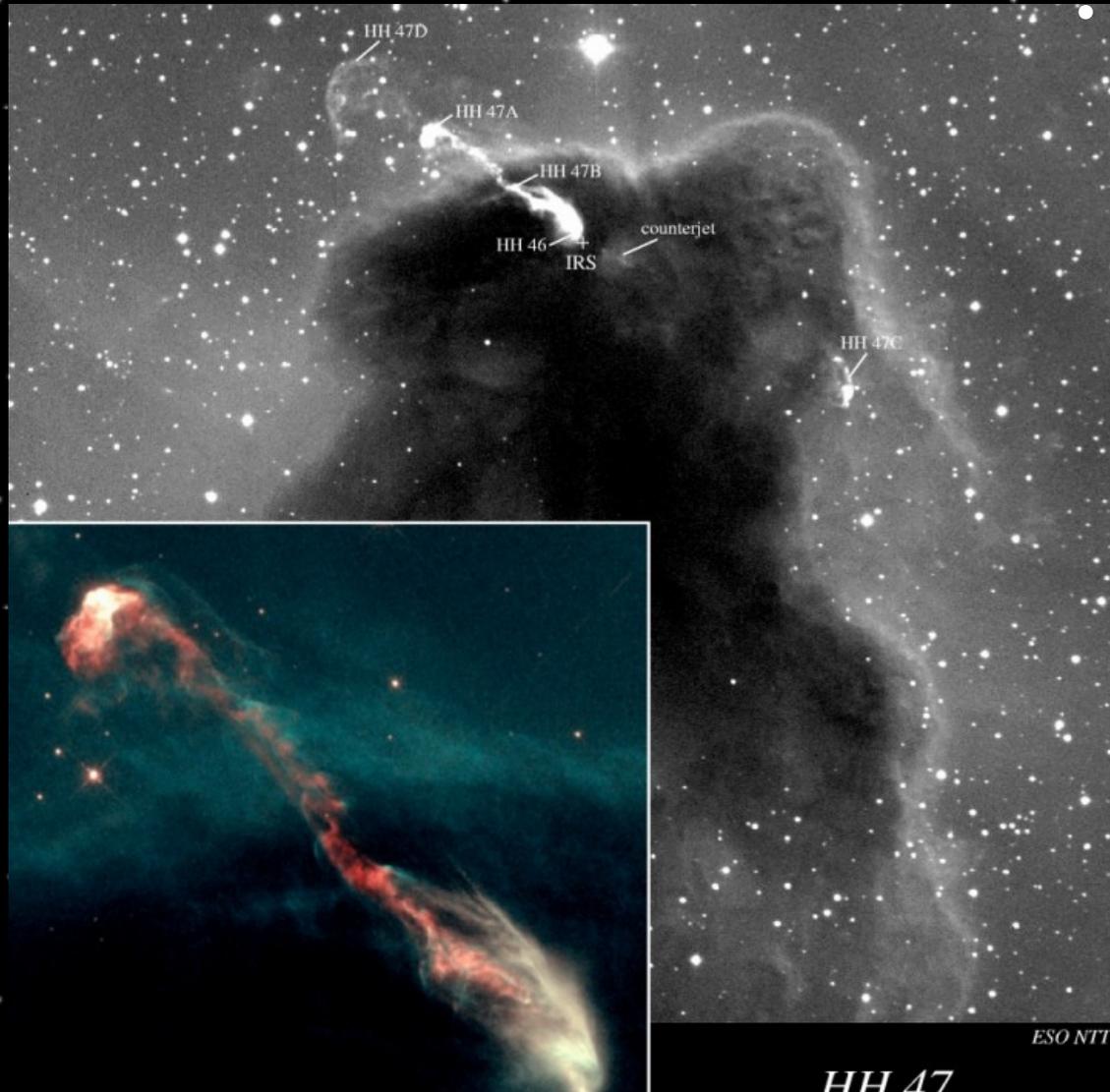
Jets from Young Stars

PRC95-24a · ST ScI OPO · June 6, 1995

C. Burrows (ST ScI), J. Hester (AZ State U.), J. Morse (ST ScI), NASA

HST · WFPC2

Herbig-Haro-Objekte



- Leuchtende "Klumpen" an den Stellen wo der jet auf dichteres Medium trifft

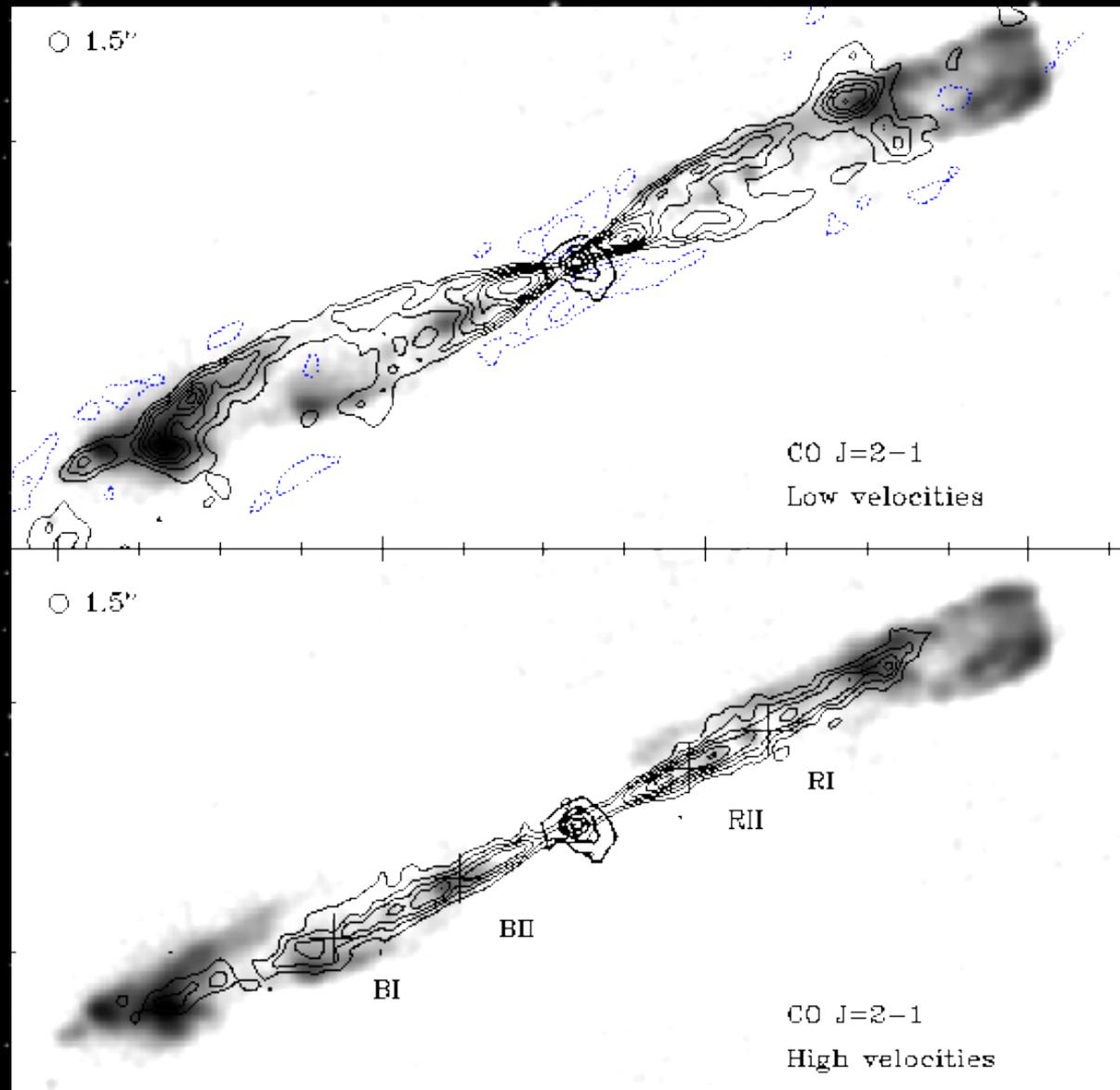
1950: Guillermo Haro & George Herbig

Herbig-Haro-Objekte

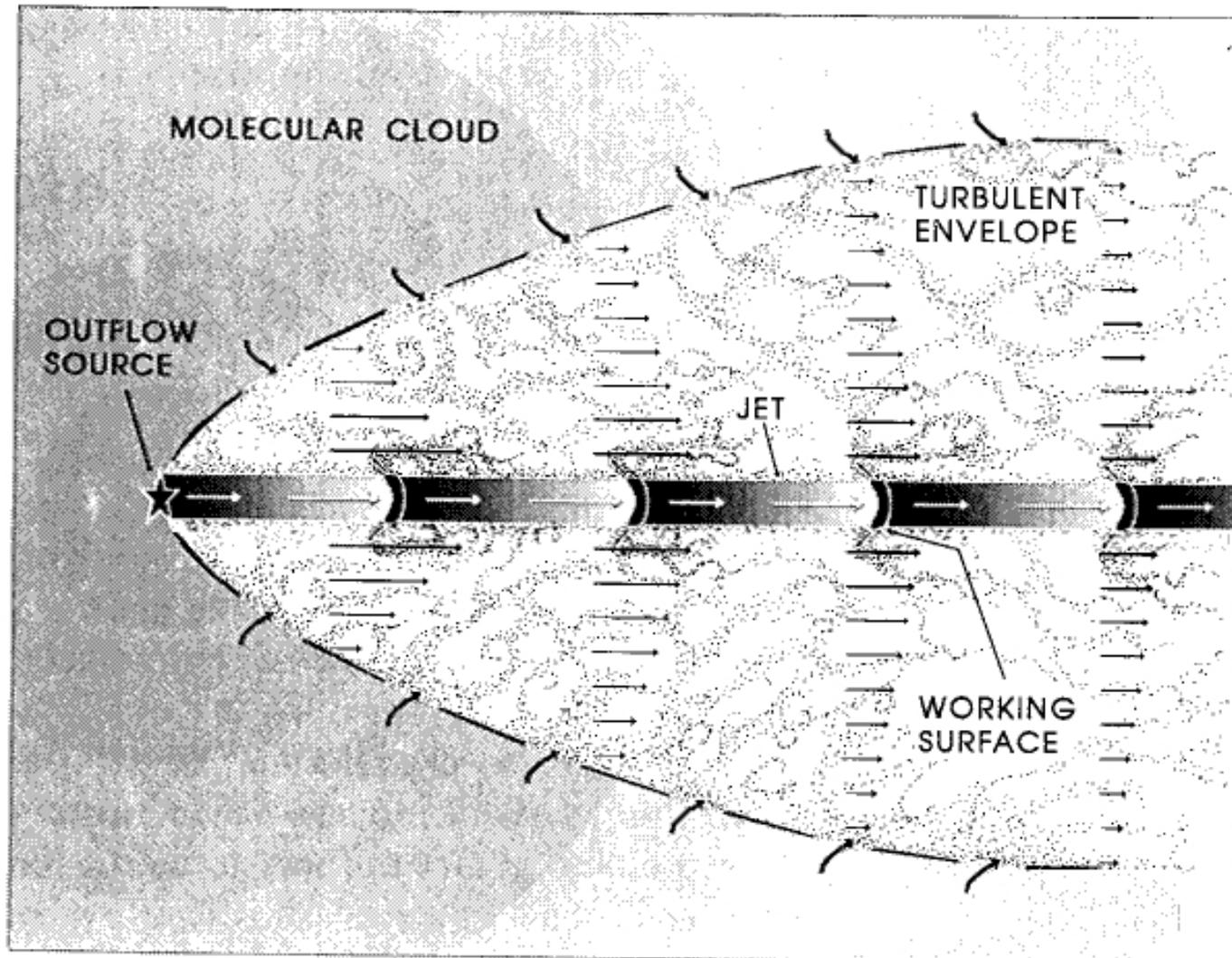


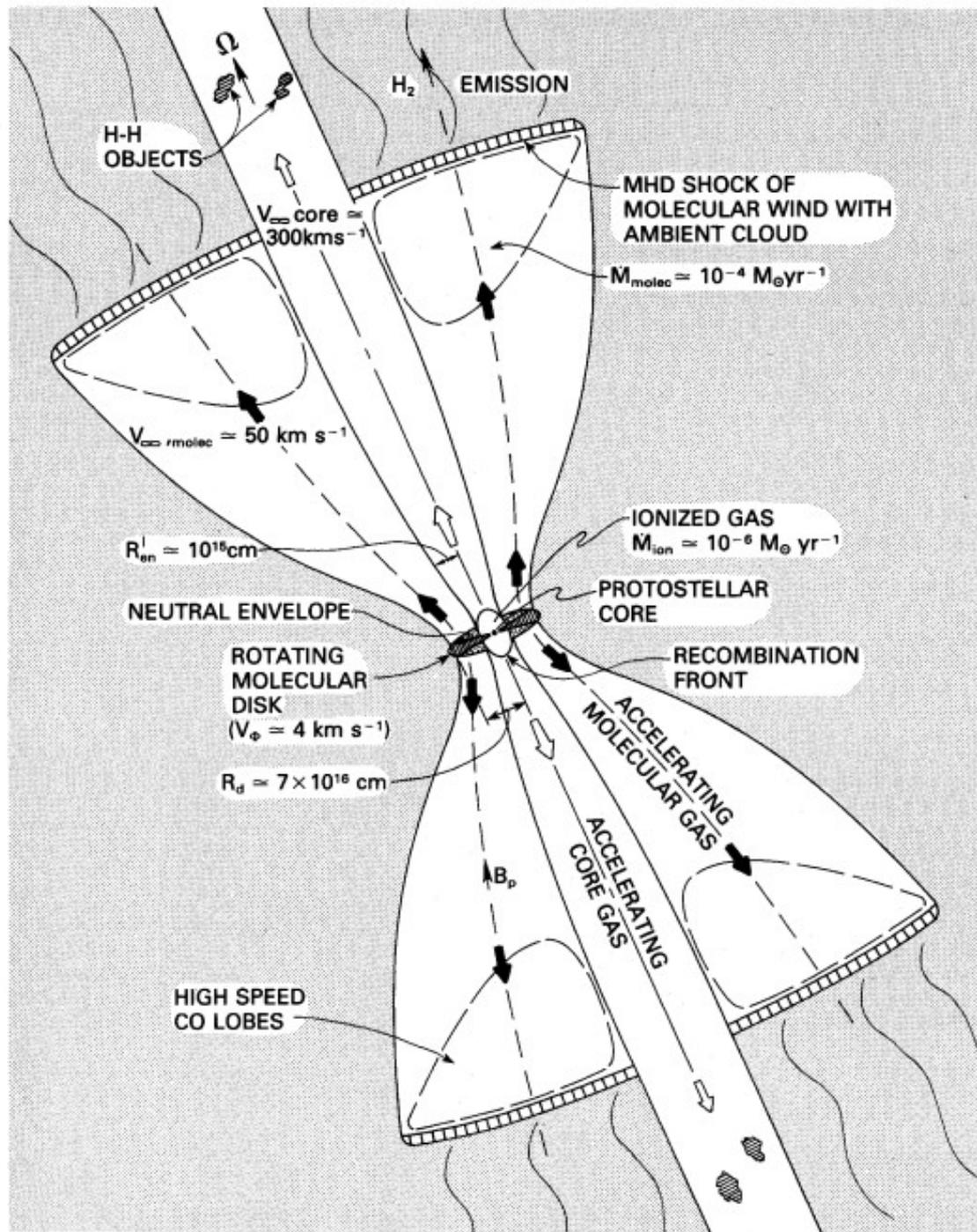
Protostar HH-34 in Orion (VLT KUEYEN + FO
ESO PR Photo 40b/99 (17 November 1999) © European S

Molekulare Ausflüsse



Molekulare Ausflüsse





Akkretionsscheiben und Jets



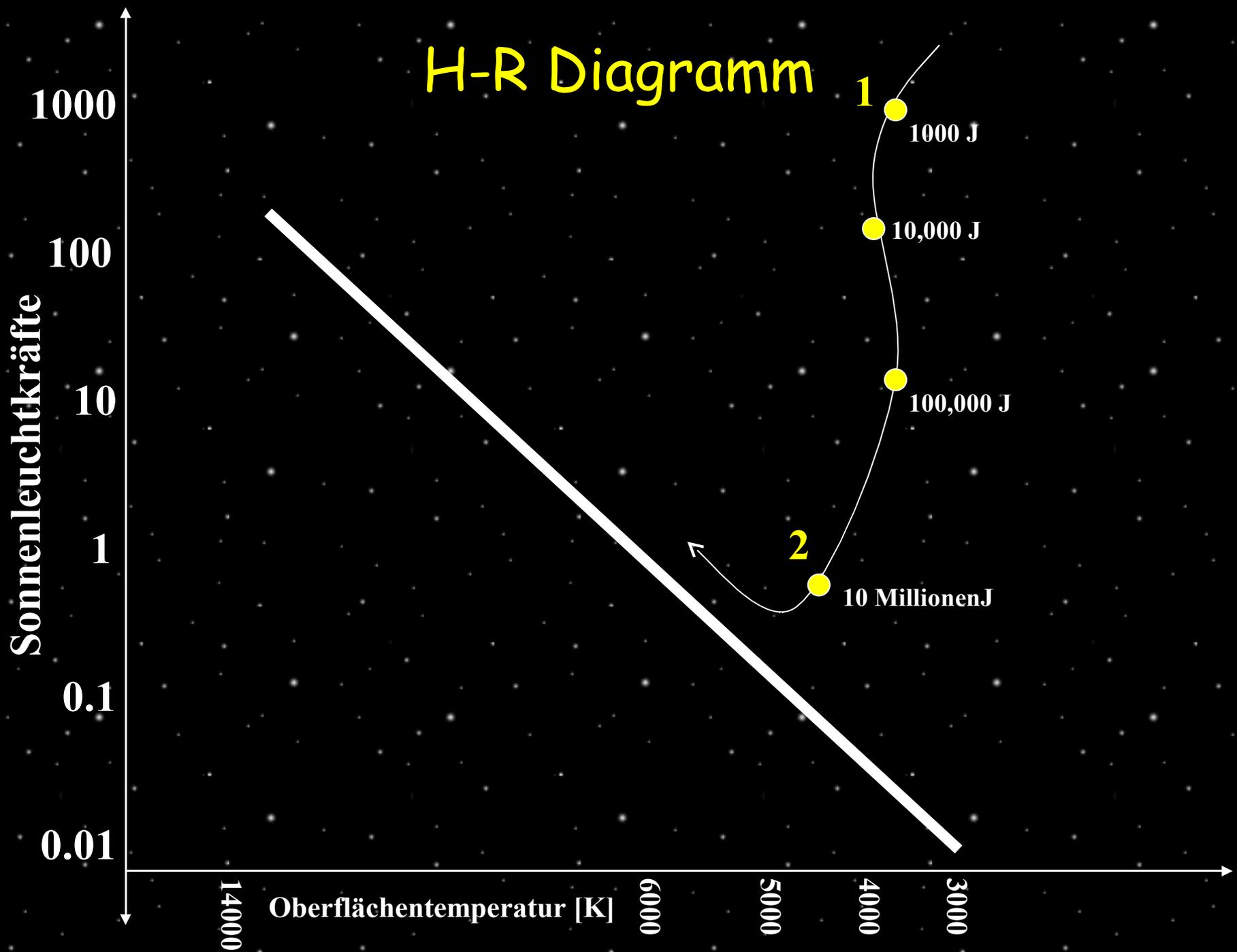
Visualisierung der Entwicklung einer
Akkretionsscheibe

Stufe 2: Der Vor-Hauptreihenstern

- Alter: 10 Millionen Jahre
- Radius: $\sim 1.3 R_{\odot}$
- T im Kern: 5,000,000 K
- T der Hülle: 4,500 K
- Energiequelle: p-p Reaktion (~ 10 Mrd. Jahre)
- Energieproduktion: 25 MeV

Der Stern wird heißer und nimmt an Leuchtkraft zu:
mit Akkretionsscheibe und Jets wandert er jetzt
über der HR nach oben links.

H-R Diagram



Sonnenleuchtkräfte

Oberflächentemperatur [K]

1000
100
10
1
0.1
0.01

14000 6000 5000 4000 3000

1
1000 J
10,000 J
100,000 J
10 Millionen J

Beobachtung: T-Tauri Sterne

- Der Stern liegt knapp *über* der Hauptreihe. Materie stürzt noch immer auf den Stern, Jets bilden sich aus.
- Akkretion ist über Röntgenstrahlung nachweisbar.



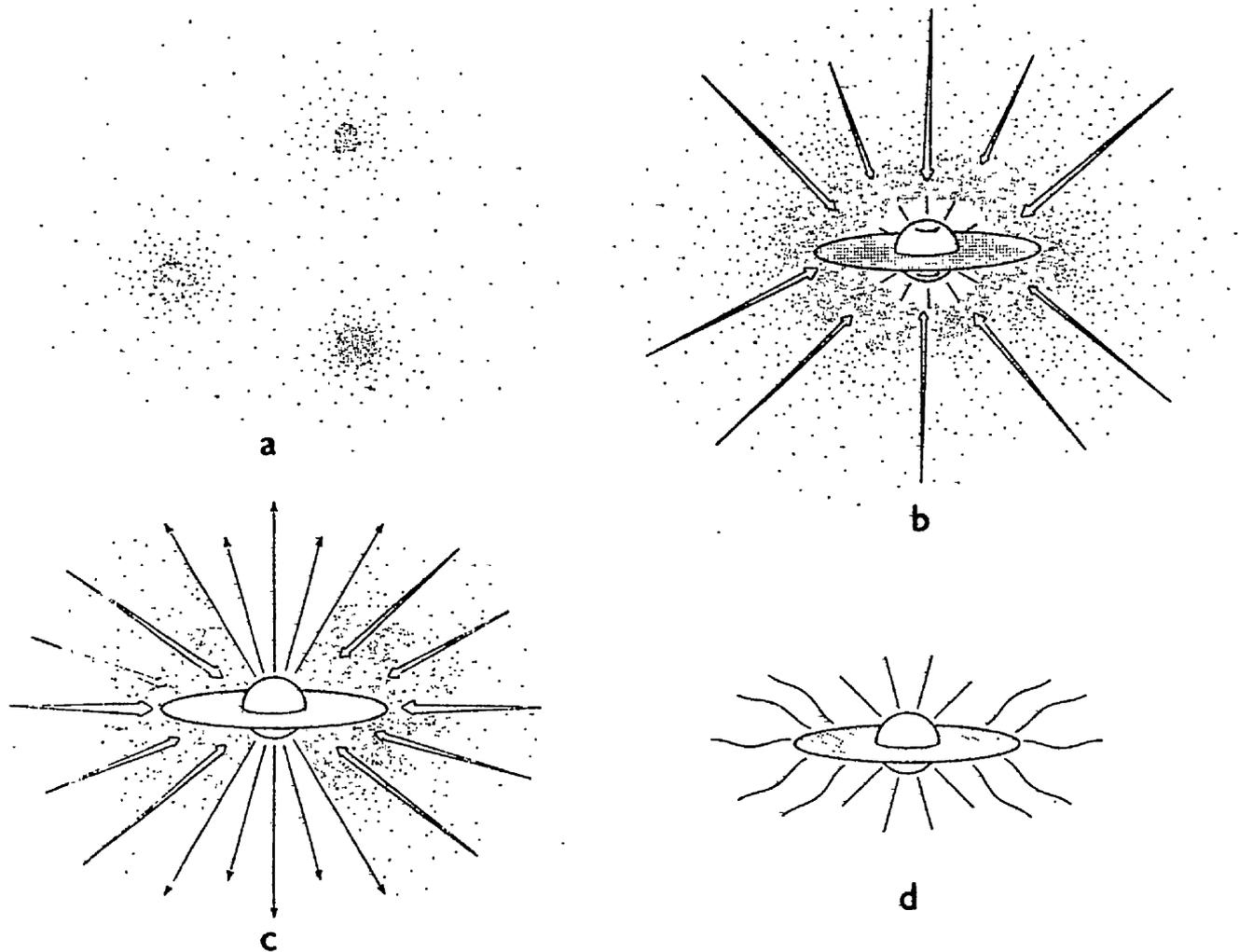


Figure 7 The four stages of star formation. (a) Cores form within molecular clouds as magnetic and turbulent support is lost through ambipolar diffusion. (b) A protostar with a surrounding nebular disk forms at the center of a cloud core collapsing from inside-out. (c) A stellar wind breaks out along the rotational axis of the system, creating a bipolar flow. (d) The infall terminates, revealing a newly formed star with a circumstellar disk.

Stufe 3: Der ZAMS Stern

Es dauert einige Millionen Jahre bis der Stern keine Masse mehr akkretiert und auf der Hauptreihe landet:

Zero-Age Main Sequence

- Alter: 25 Millionen Jahre
- Radius: $\sim 1 R_{\odot}$
- T im Kern: 12,000,000 K
- T der Hülle: 6,000 K
- Energiequelle: p-p Reaktion, CNO-Zyklus (ab 15 Millionen K)

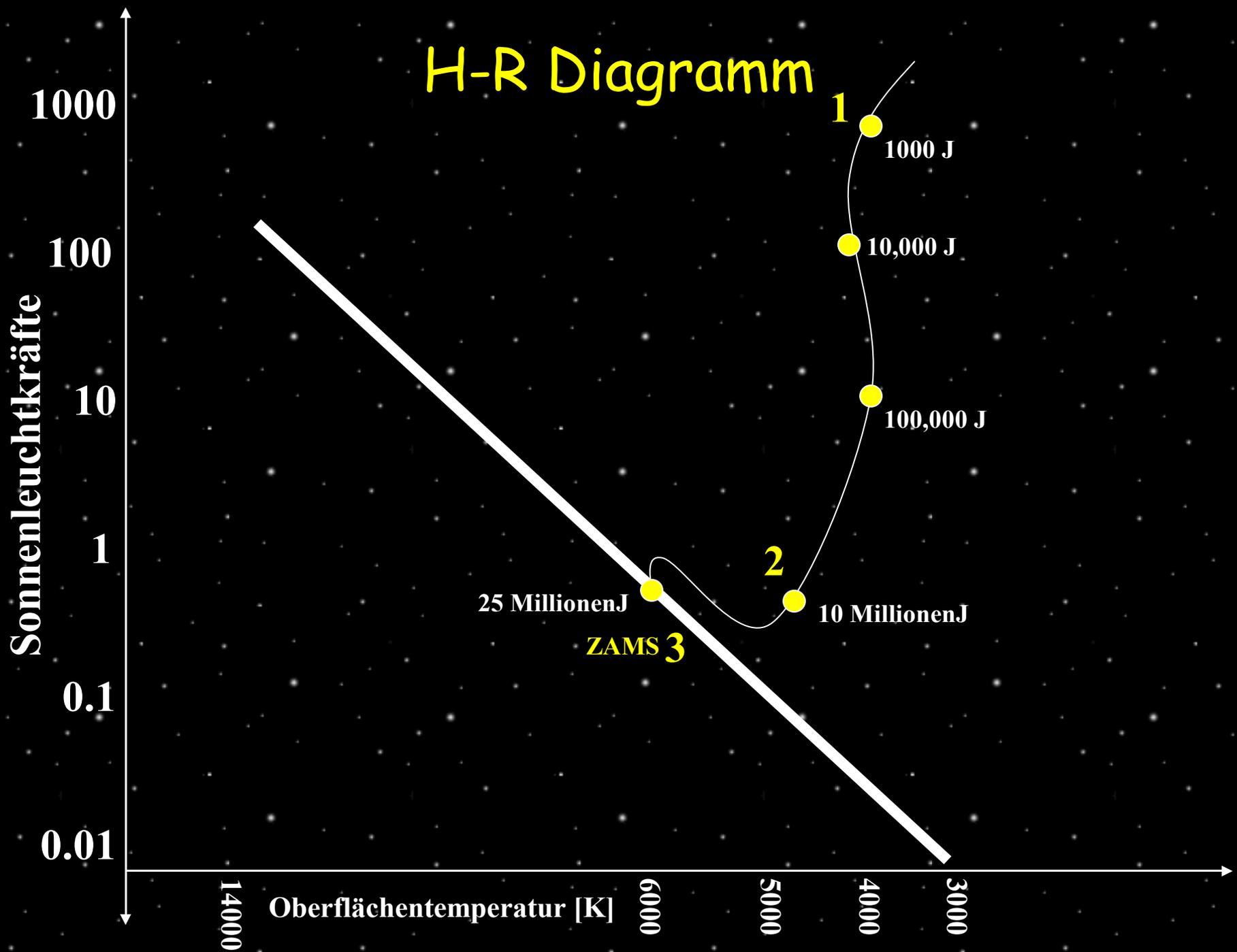
$$L \sim R^2 T^4$$

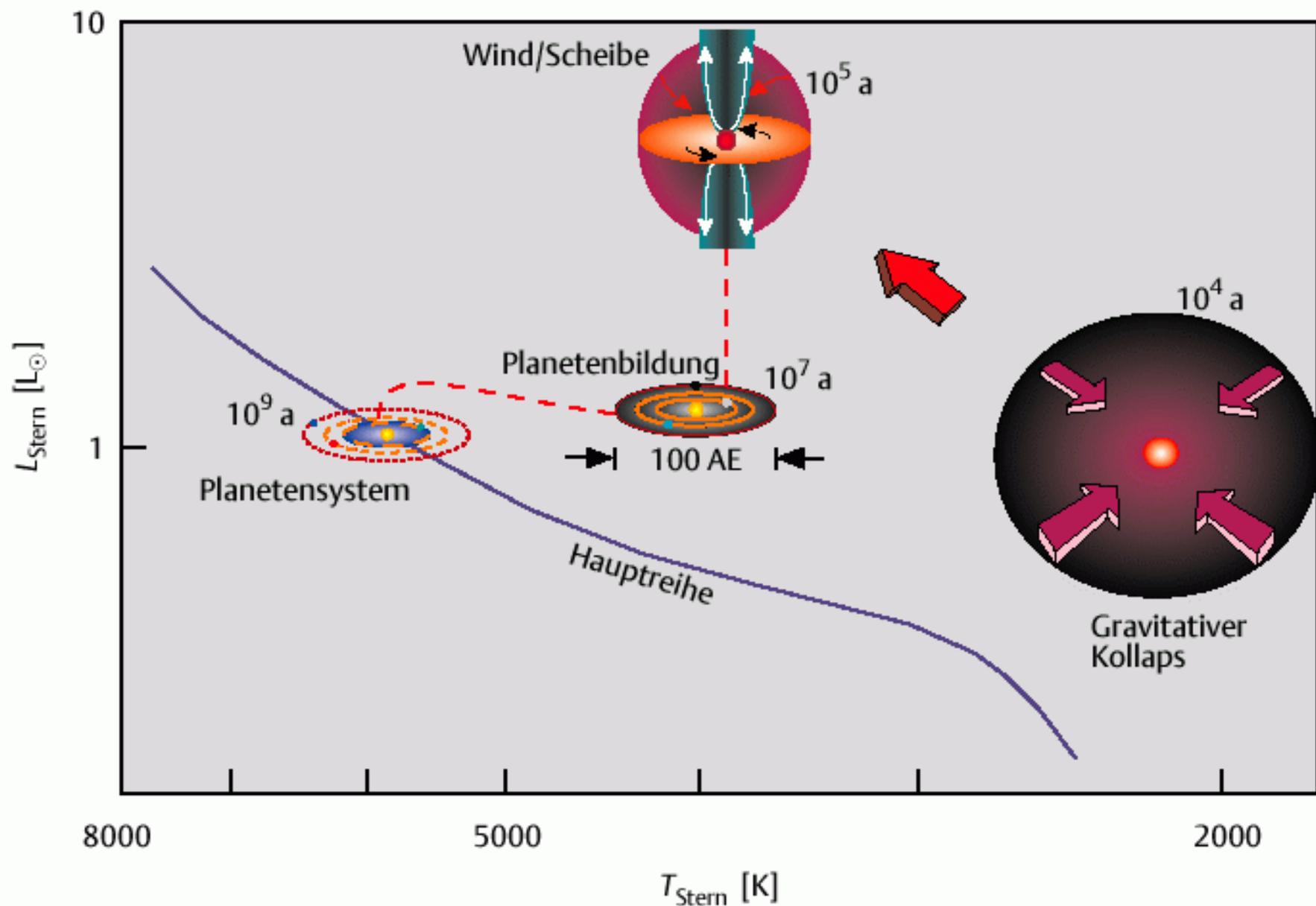
$$pV = nkT$$

H in He umzuwandeln (12%) ist der effektivste Fusionsprozess, die HR-Phase ist damit die längste Phase im Leben eines Sterns:

~ 10 Milliarden Jahre für einen Stern von einer Sonnemasse ($1 M_{\odot}$)

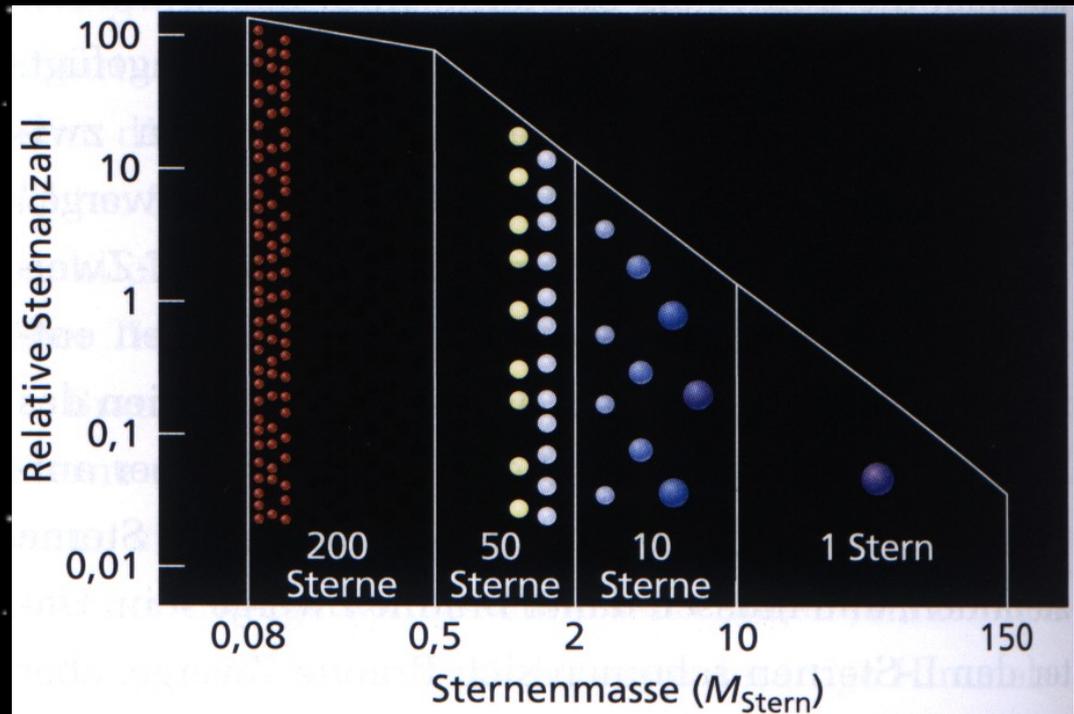
H-R Diagram





Entstehung von Sternen verschiedener Masse

- Sterne entstehen praktisch nie einzeln sondern in Haufen oder Gruppen
- Auf einen massereichen Stern kommen sehr viele massearme Sterne

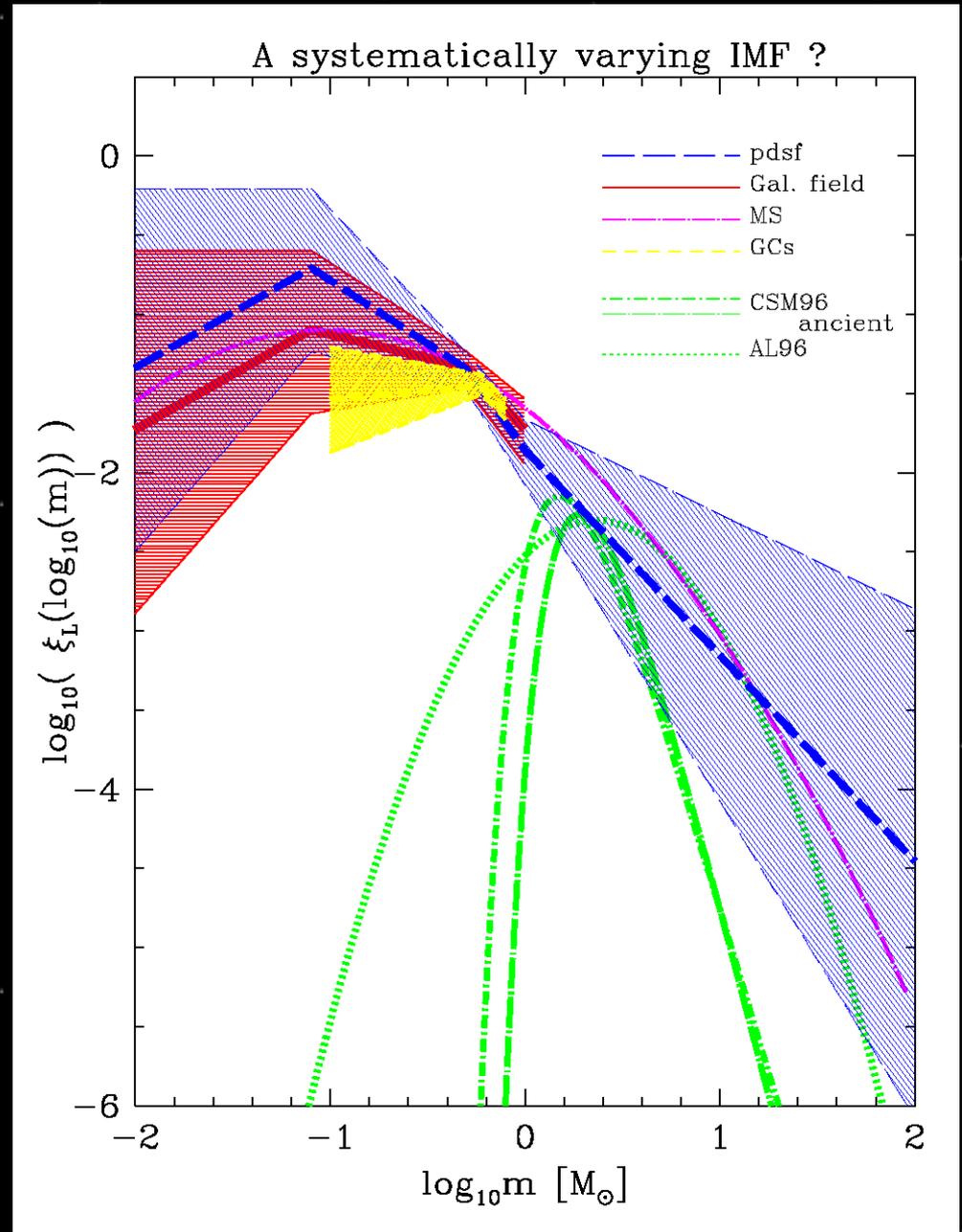


IMF

- Beschreibung der Anzahlverteilung durch die **Initial Mass Function**

- $\frac{dN}{dM} \propto M^{-2.3}$

- Unterhäufigkeit geringer Massen (Brown dwarf desert)



Das Russell-Vogt Theorem

$$M_* < 0.02 M_{\odot}$$

leichte Erwärmung durch Gravitationsdruck

$$0.02 < M_* < 0.085 M_{\odot}$$

Brauner Zwerg: $\sim 3,000,000\text{K}$ im

Kern, H-Brennen wird nie erreicht

$$0.085 < M_* < 0.4 M_{\odot}$$

masseärmste Sterne:

He-Brennen wird nie erreicht

$$0.4 < M_* < 3 M_{\odot}$$

massearme Sterne: $H \rightarrow He$ (p-p

Kette), $He \rightarrow C$ (Triple- α)

$$M_* > 3 M_{\odot}$$

massereiche Sterne: $H \rightarrow He$ (CNO

Kette), $He \rightarrow C$, $C \rightarrow Ne, Na, Mg, O$

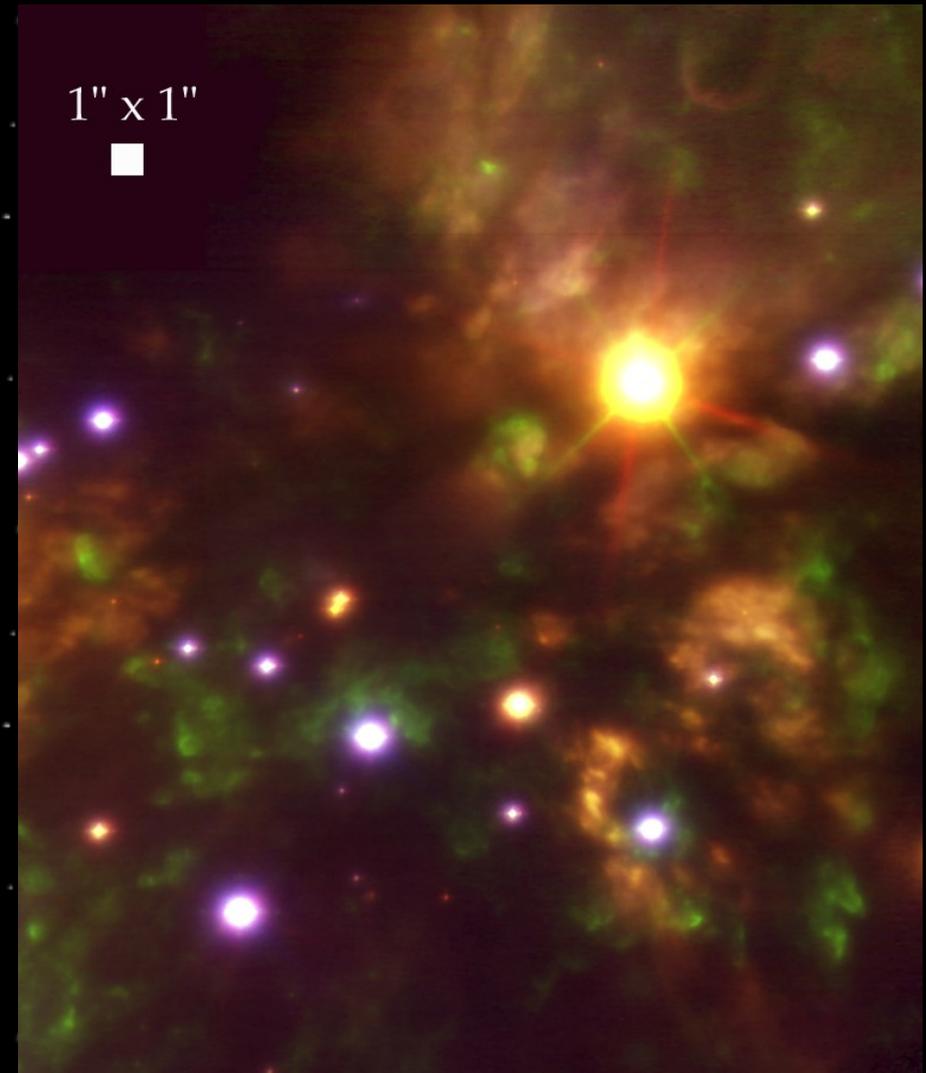
Braune Zwerge

Braune Zwerge lassen
sich in jungem Stadium
gut im Infrarotlicht
beobachten



Massereiche Sterne

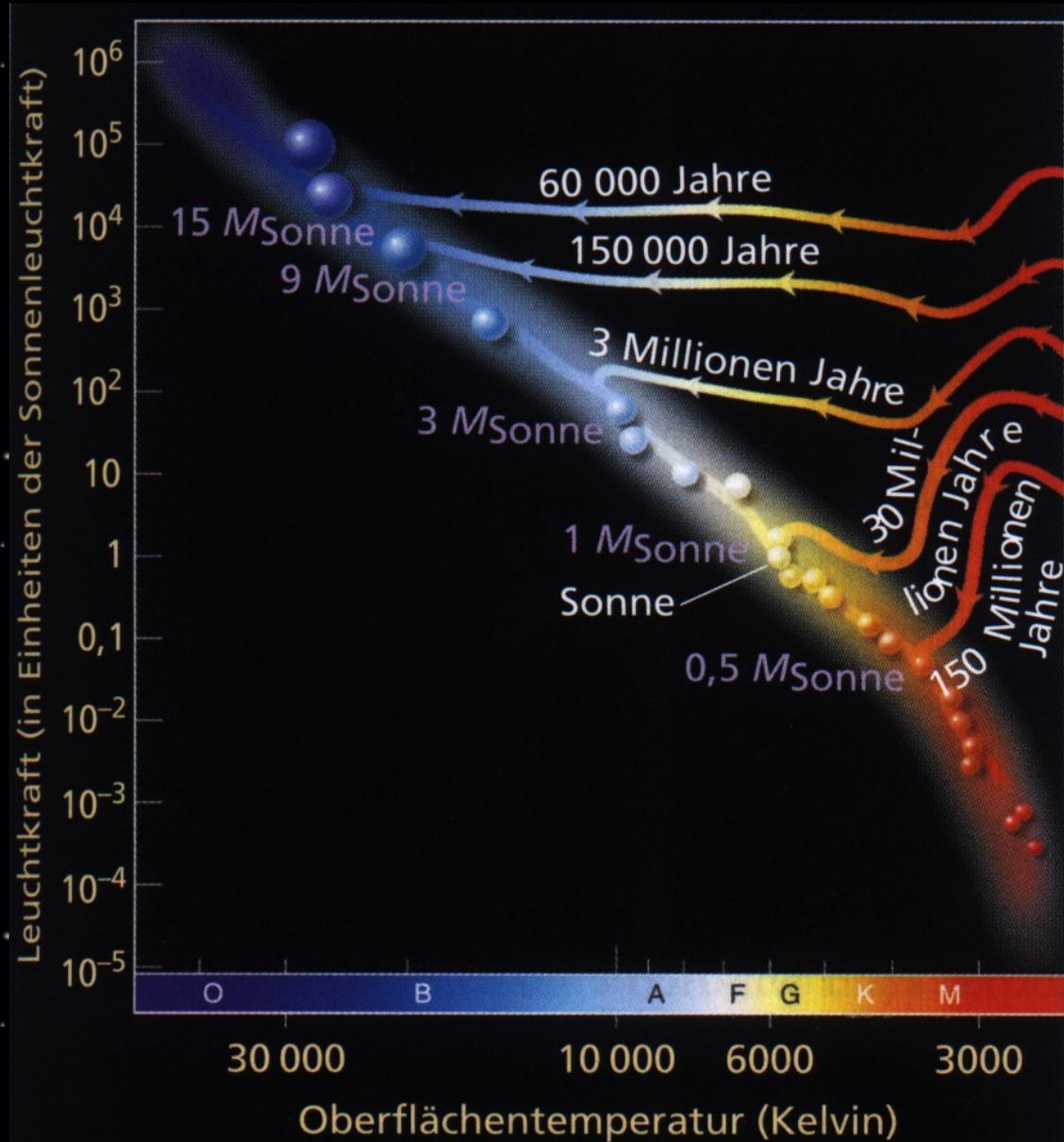
- Wasserstoffbrennen beginnt während der Stern noch tief in der Mutterwolke eingebettet ist
- Keine direkte Beobachtung der Akkretionsscheibe
- Strahlungsdruck beendet die Akkretion -> Natürliche Grenze der Sternenmasse
 - 50 - 150 M_{\odot}



Becklin-Neugebauer Objekt

Sterne verschiedener Masse

Wie die Sternentwicklung selbst, ist die Dauer der Sternentstehung auch durch die Masse bestimmt.



Planetenentstehung

- Ausgangspunkt: Protoplanetare Scheibe
 - 99% Gas, 1% Staub



**Edge-On Protoplanetary Disk
Orion Nebula**

PRC95-45c · ST ScI OPO · November 20, 1995

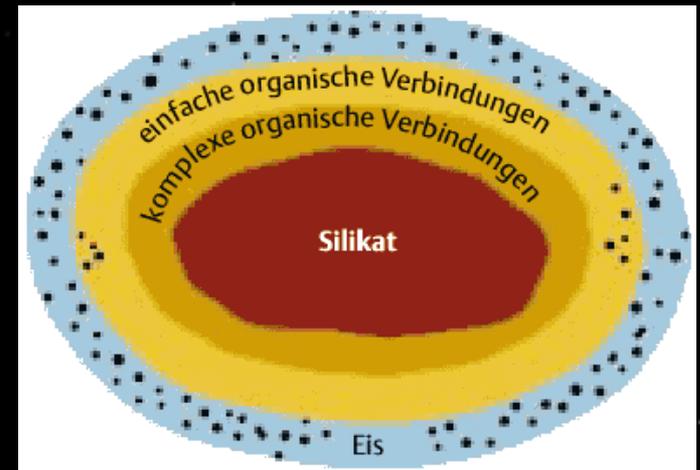
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA



HST · WFPC2

Planetentstehung

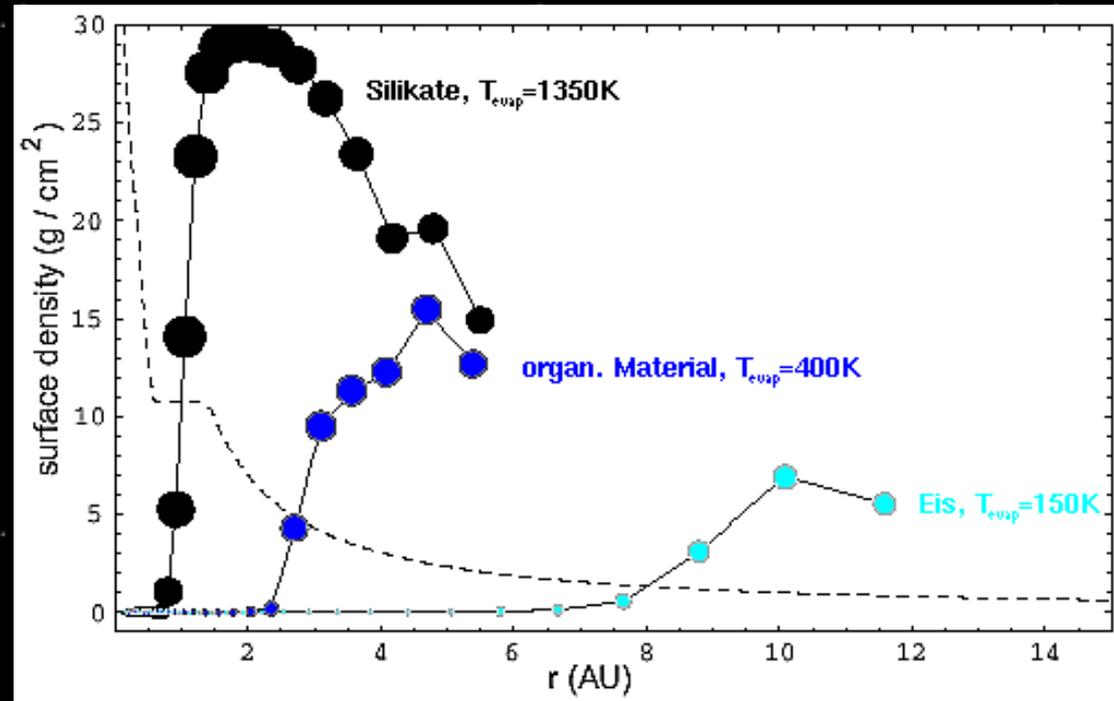
- Ausgangspunkt: Staub in dichten kalten Molekülwolken
 - Größe $\sim 0.1 \mu\text{m}$
 - Silikat- und Kohlenstoffteilchen mit organischem Mantel und Eishülle



- Koagulation

Die Schneegrenze

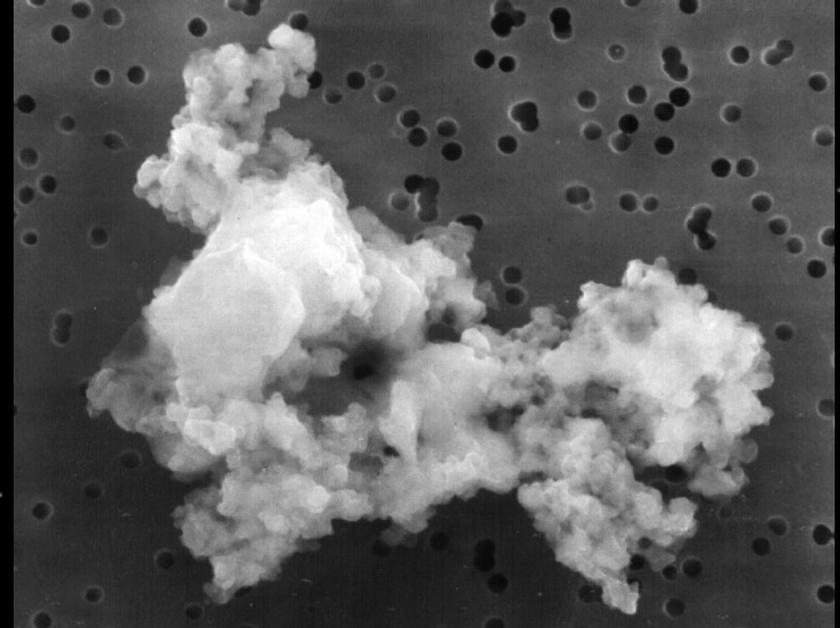
- Teilchen können in der Scheibe verdampfen und kondensieren



- Nahe am Zentralstern überleben nur Silikate als Staubteilchen. Jenseits der "**Schneegrenze**" kommt ein großer Anteil von Eis dazu (Kornet et al. 2001).

Wachstum von Staub

- 0.1 μm - 0.1 mm:
 - Koagulation durch turbulente Bewegungen
 - Fraktale Aggregate
- 0.1 mm - 1 m
 - Erhöhung der Teilchendichte durch Sedimentation in der Mittelebene
 - Langsamster Prozess: mehrere Ma
- 1 m - 10 km
 - Konzentration der Teilchen in Wirbeln
 - Herausbildung unregelmäßiger Planetesimale geringer Dichte

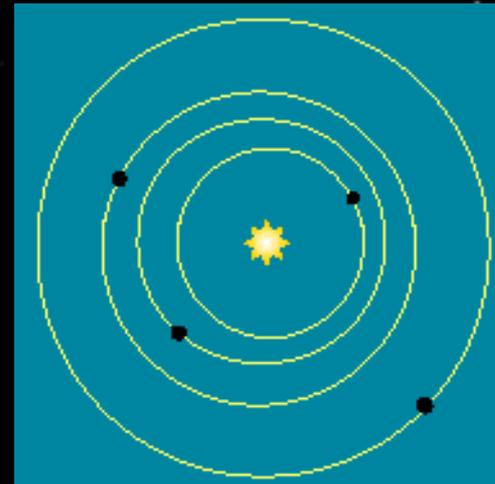
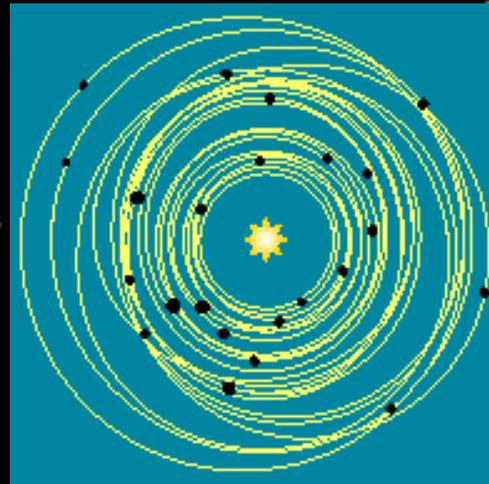
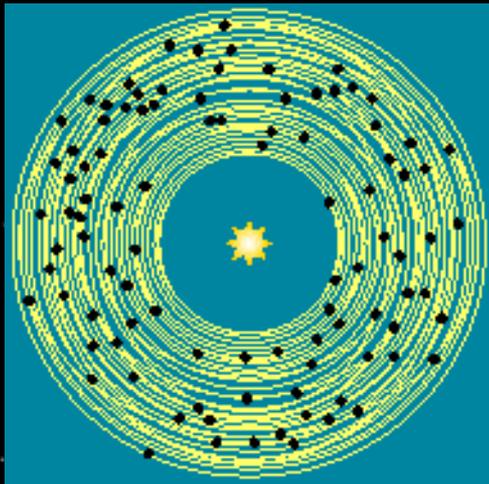


Planetenentstehung

- Kollision von Planetesimalen
 - Kreuzende Bahne führen zu Kollisionen
 - Gravitative Wechselwirkung
 - Zerstörung und Akkretion
 - Wachsen zu Planeten

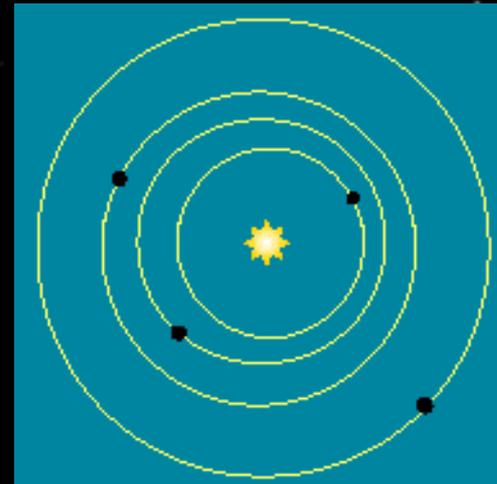
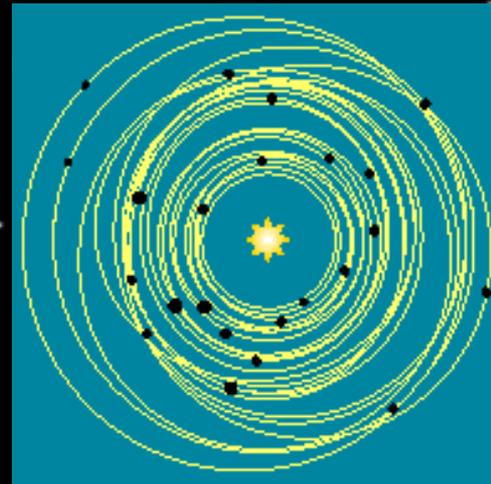
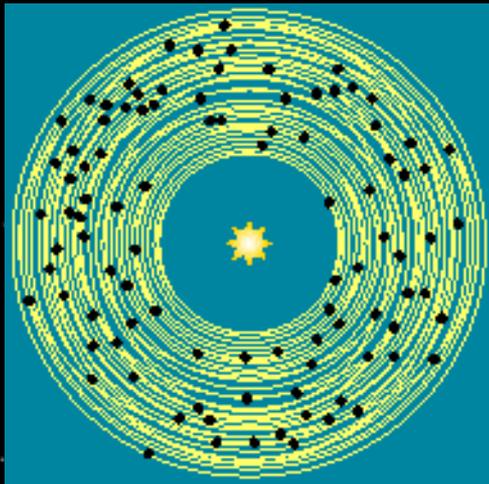


Asteroiden sind übriggebliebene Planetesimale



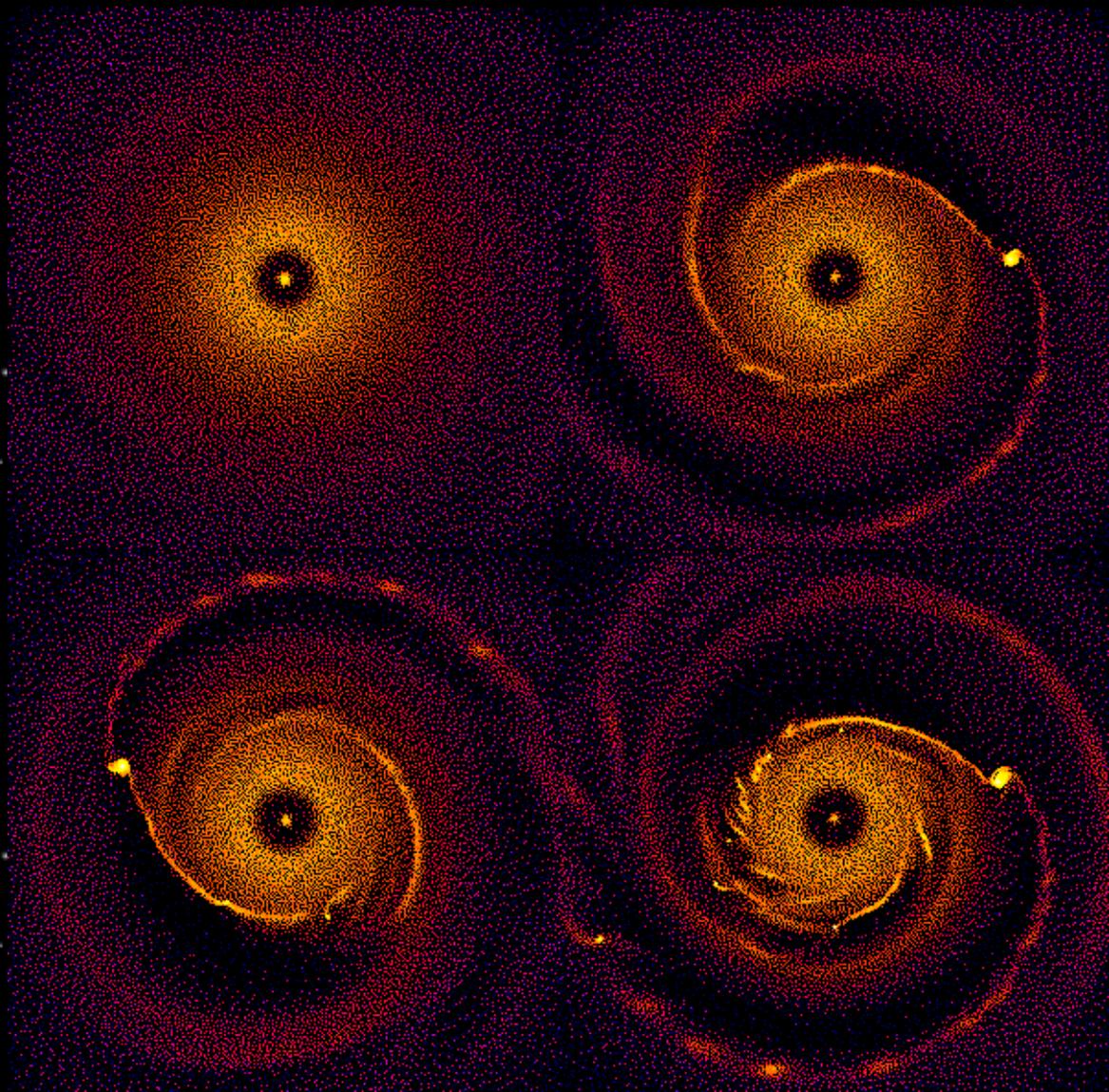
Planetenentstehung

- Zwischen 1 und 10 km wird die gravitative Anziehung zwischen den Planetesimalen dominant.
- Aus 10^{14} etwa km-großen Planetesimalen werden wenige Planeten.
- Schnelle Planetenentstehung nur jenseits der "Schneegrenze".



Planetenentstehung

- Protoplaneten indizieren Dichtestörungen in der Scheibe
- Andere Protoplaneten sammeln sich bevorzugt in Resonanzen
- Bei $M > 10$ Erdmassen kann der Planet auch Gas aufsammeln
→ Gasplaneten



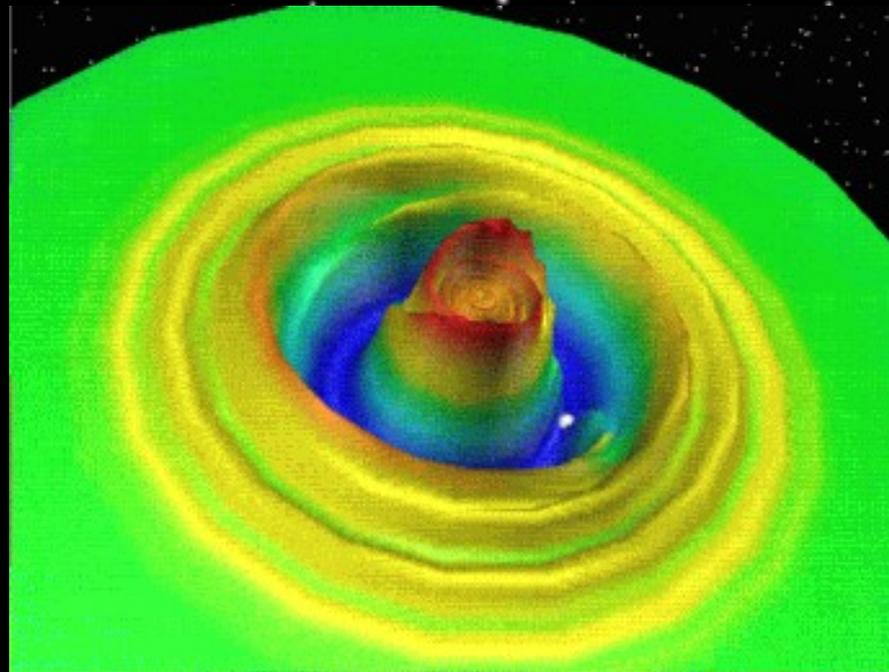
Planetenenstehung

- Der Planet "säubert" seine Umgebung und erzeugt eine "Lücke" in der Gas-/Staubscheibe



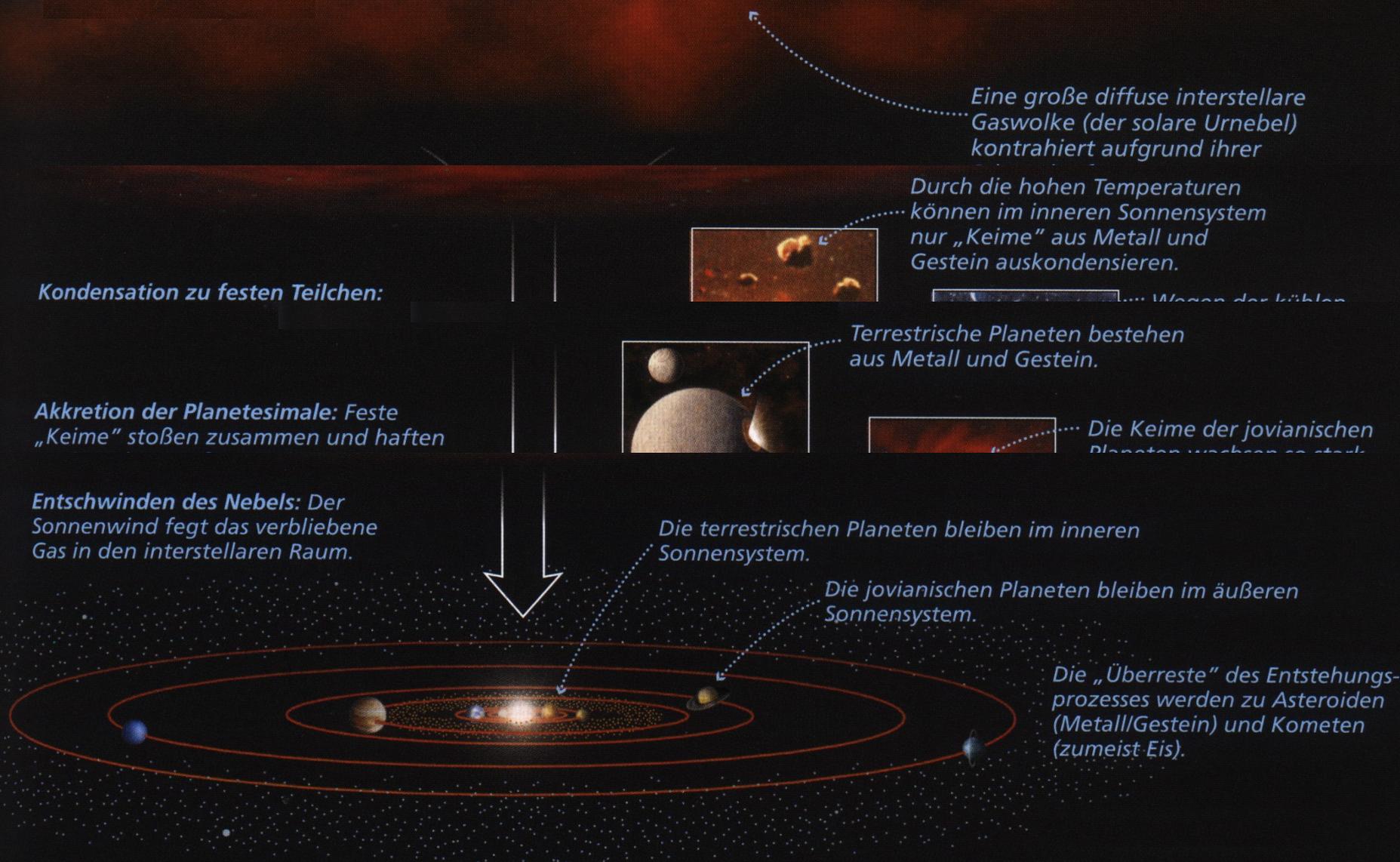
Planetenentstehung

- "Lücke" in der Gas-/Staubscheibe
 - Beendet Massestrom auf den Zentralstern



- Sollte mit zukünftigen Interferometern direkt beobachtbar sein

Zusammenfassung



Eine große diffuse interstellare Gaswolke (der solare Urnebel) kontrahiert aufgrund ihrer

Durch die hohen Temperaturen können im inneren Sonnensystem nur „Keime“ aus Metall und Gestein auskondensieren.

Kondensation zu festen Teilchen:



Terrestrische Planeten bestehen aus Metall und Gestein.



Akkretion der Planetesimale: Feste „Keime“ stoßen zusammen und haften

Die Keime der jovianischen Planeten wachsen so stark



Die terrestrischen Planeten bleiben im inneren Sonnensystem.

Die jovianischen Planeten bleiben im äußeren Sonnensystem.

Entschwinden des Nebels: Der Sonnenwind fegt das verbliebene Gas in den interstellaren Raum.

Die „Überreste“ des Entstehungsprozesses werden zu Asteroiden (Metall/Gestein) und Kometen (zumeist Eis).

