

Einfuehrung in die Astron. & Astrophysik I

Wintersemester 2013/2014: Henrik Beuther & Christian Fendt

17.10 Einfuehrung: Ueberblick und Geschichte (H.B.)

24.10 Koordinatensys., Sternpositionen, Erde/Mond (C.F.)

31.10 Teleskope und Instrumentierung (H.B.)

07.11 Strahlung, Strahlungstransport (C.F.)

14.11 Planetensystem(e) und Keplergesetze (H.B.)

21.11 Sonne & Sterne, Typen, Klassifikationen, HR-Diagramm (C.F.)

28.11 Interstellare Materie: Chemie und Materiekreislauf (H.B.)

05.12 Sternentstehung, Akkretionsscheiben und Jets (H.B.)

12.12 Sternaufbau und Sternentwicklung: Hauptreihe (C.F.)

19.12 Sternaufbau und Sternentwicklung: Endstadien (C.F.)

26.12 und 02.01 –

09.01 Mehrfachsysteme und Sternhaufen, Dynamik (C.F.)

16.01 Exoplaneten und Astrobiologie (H.B.)

23.01 Die Milchstrasse (H.B.)

30.01 Zusammenfassung (C.F. & H.B.)

06.02 Pruefung (C.F. & H.B.)



Themen heute

Einfuehrung zur Sternentstehung

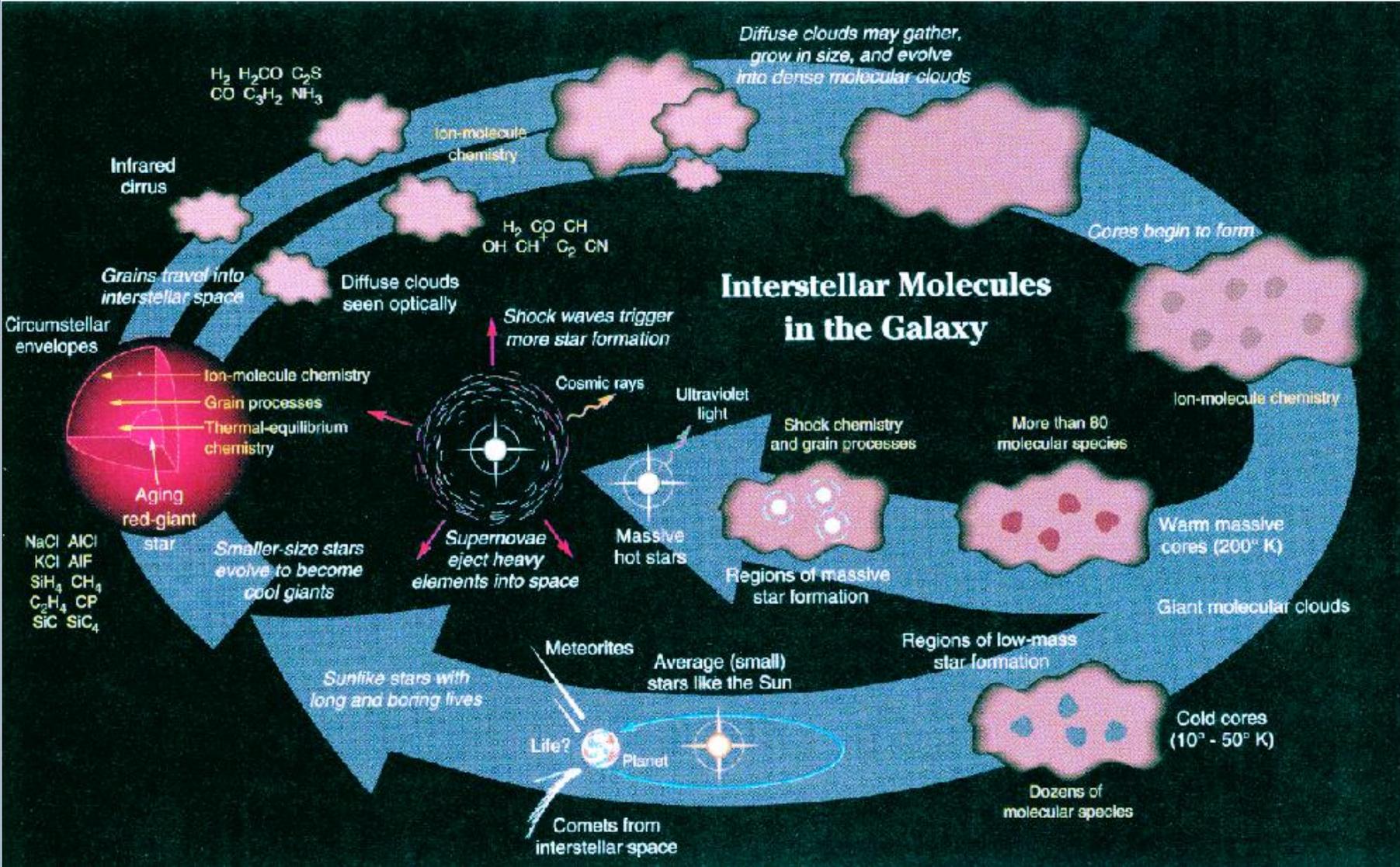
Wolkenstabilitaet

Kollaps, Entwicklung des Protosterns und Vor-
hauptreihenentwicklung

Akkretionsscheiben und Jets

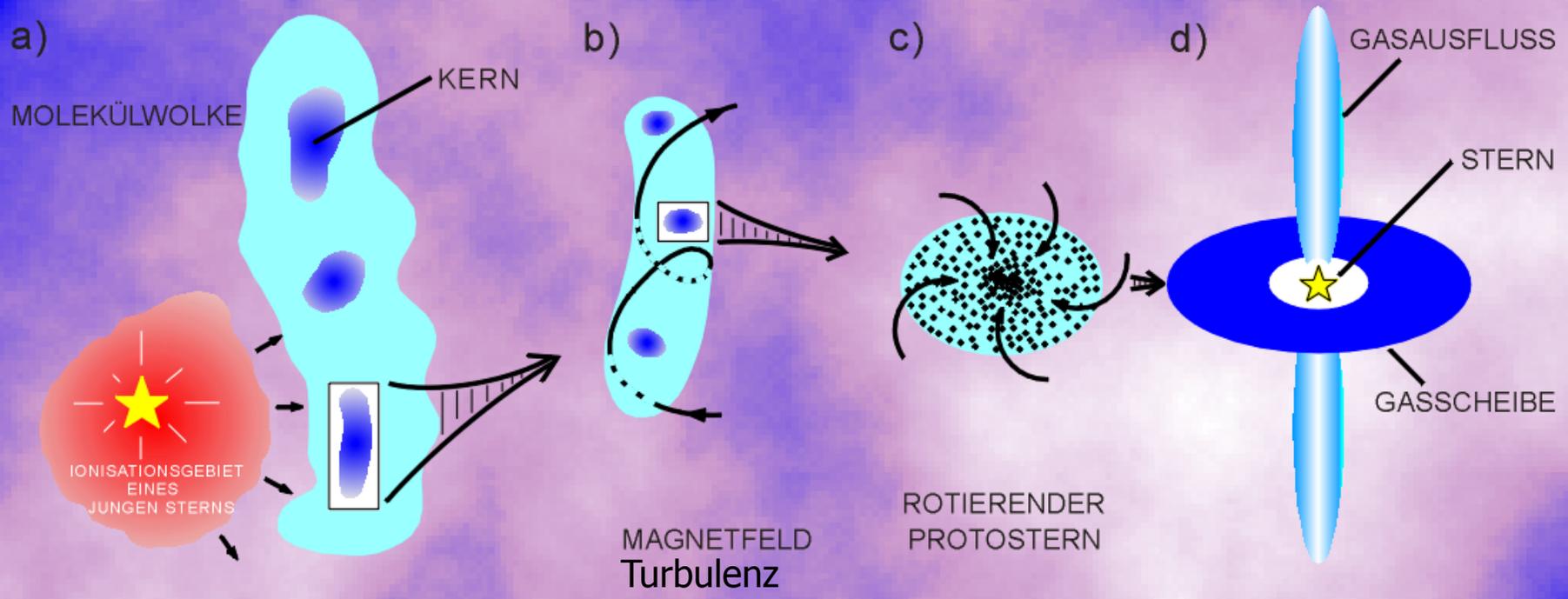
Literatur: Stahler & Palla: The Formation of Stars, Wiley, 2004

Der kosmische Zyklus



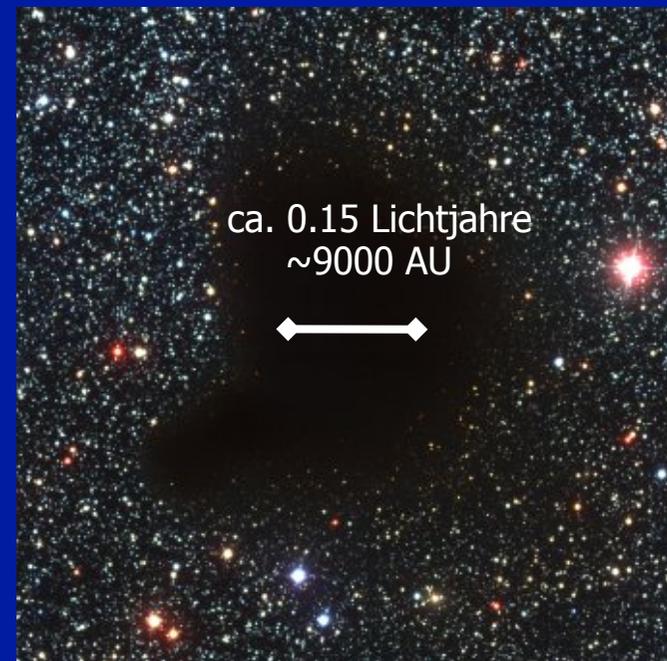
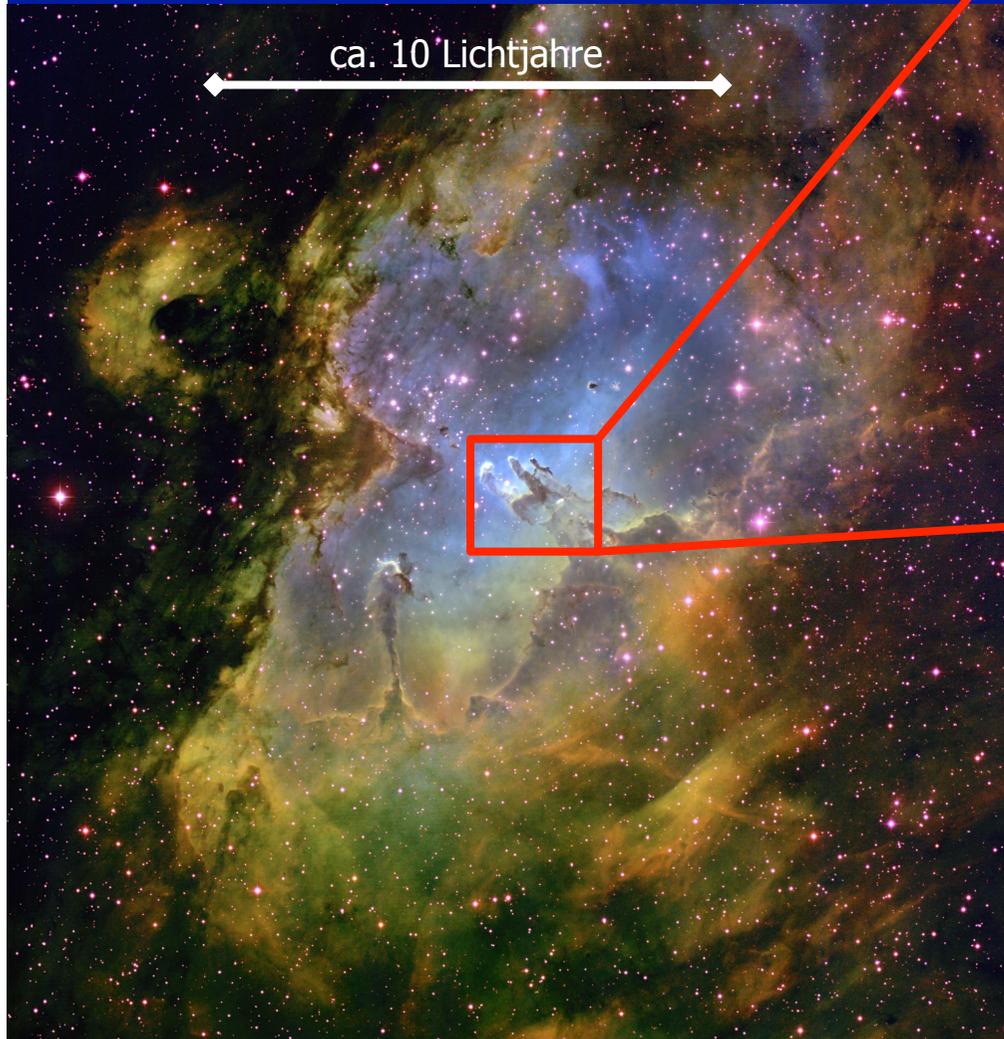
Sternentstehungsparadigma

DIE ENTWICKLUNGSTUFEN DER STERNENTSTEHUNG



Zeitskalen: Hauptakkretionsphase ca. 500 000 Jahre
Vorhauptreihenentwicklung ca. einige Mio Jahre

Molekülwolkenkalen



Sternentstehungseffizienz nur ein paar Prozent

Themen heute

Einfuehrung zur Sternentstehung

Wolkenstabilitaet

Kollaps, Entwicklung des Protosterns und Vor-
hauptreihenentwicklung

Akkretionsscheiben und Jets

Hydrostatisches Gleichgewicht

Drei Gleichungen regeln das Gleichgewicht einer isothermen Gaskugel

Hydrostatisches Gleichgewicht: $-1/\rho \text{ grad}(P) - \text{grad}(\Phi_g) = 0$

Mit dem idealen Gasdruck: $P = \rho a^2$ (a: Schallgeschwindigkeit)

Und dem Gravitationspotential Φ_g in der Poissongl.: $\text{grad}^2(\Phi_g) = 4\pi G\rho$

Im Falle einer spaerischen Dichteverteilung und nach numerischer Integration erhaelt man ein Dichteprofil $\rho \sim 1/r^2$

Wenn das Dichteverhaeltnis zwischen Zentrum und Aussen ρ_c/ρ_0 einen kritischen Wert uebersteigt (>14.1), sind die Wolkenkerne gravitativ instabil und kollabieren.

→ Bonnor-Ebert Masse (1955): $M_{BE} \sim a^3/(\rho_0^{1/2}G^{3/2})$ (a: Schallgeschwindigkeit)

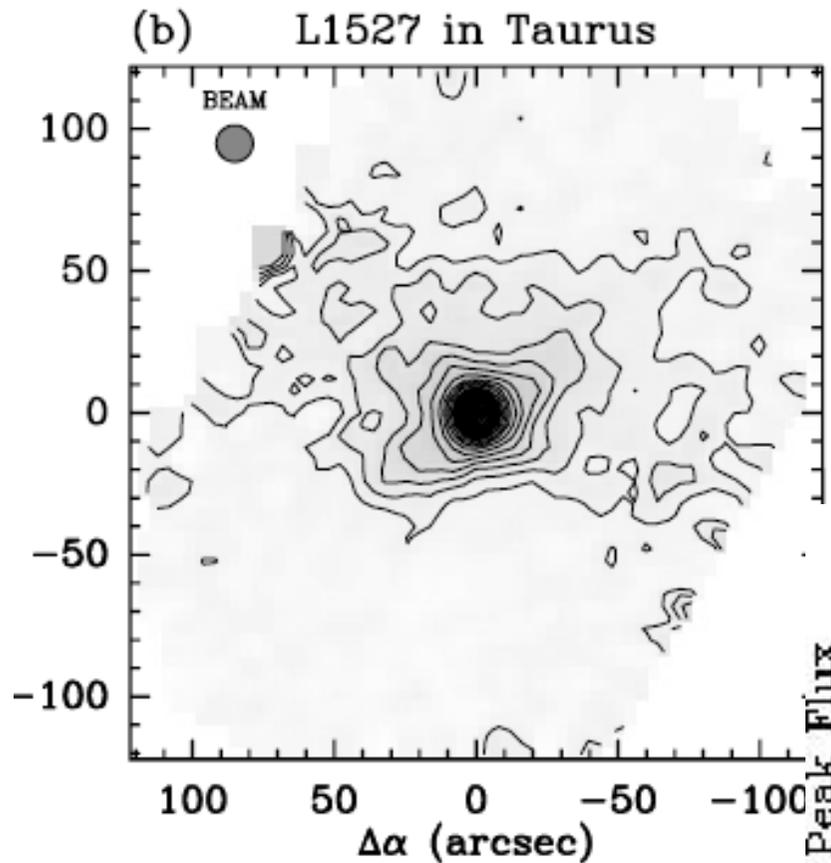
Hydrostatisches Gleichgewicht

Hydrostatisches Gleichgewicht einer isothermen Gaskugel

$$-1/\rho \text{ grad}(P) - \text{grad}(\Phi_g) = 0$$

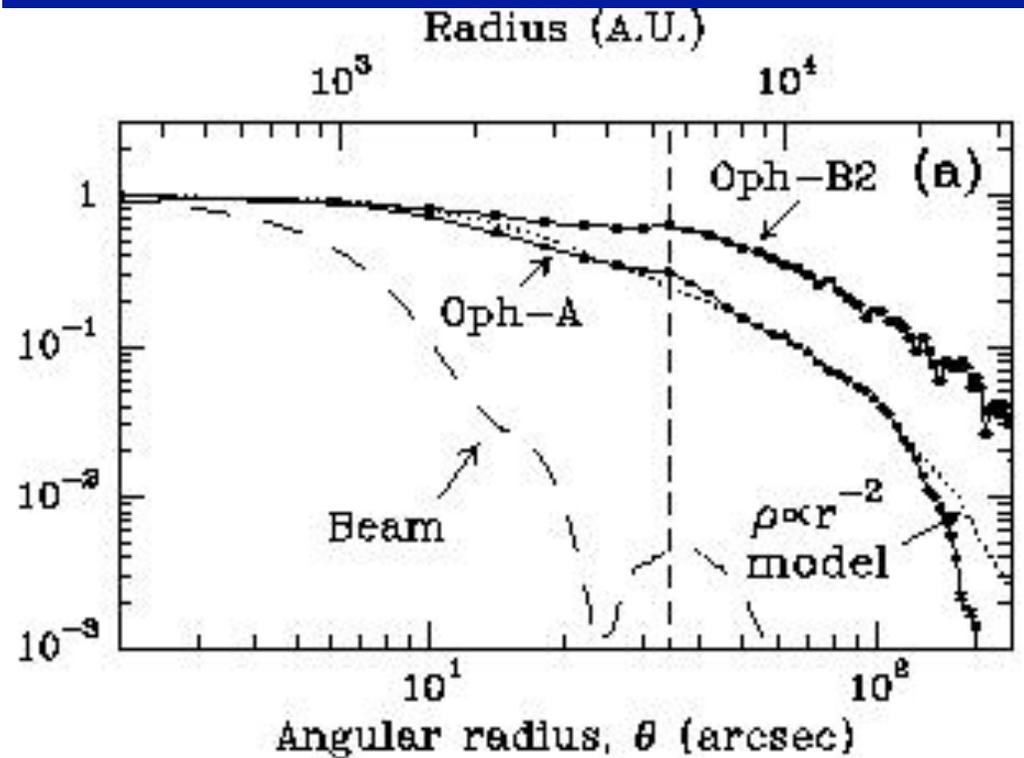
$$\rho a^2$$

Φ_g in der Poissongl.: $\text{grad}^2(\Phi_g) = 4\pi G\rho$



Wenn das Dichteverhältnis
kritischen Wert uebersteigt
gravitativ instabil und kollabiert

→ Bonnor-Ebert Masse (1951)



Hydrostatisches Gleichgewicht

Drei Gleichungen regeln das Gleichgewicht einer isothermen Gaskugel

Hydrostatisches Gleichgewicht: $-1/\rho \text{ grad}(P) - \text{grad}(\Phi_g) = 0$

Mit dem idealen Gasdruck: $P = \rho a^2$

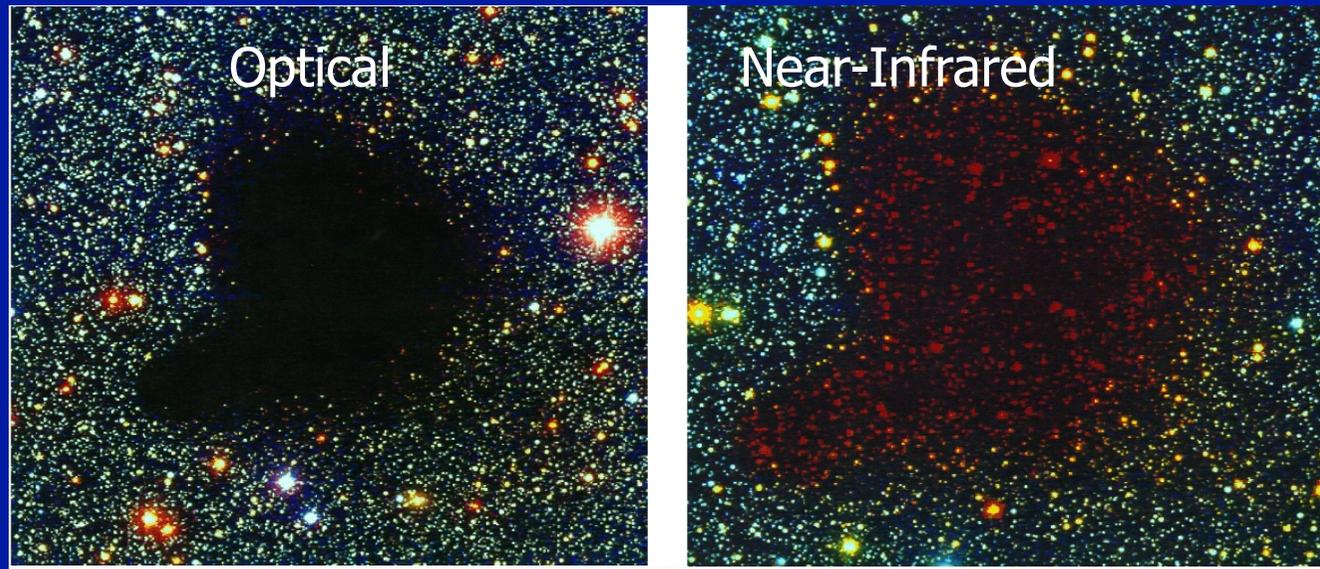
Und dem Gravitationspotential Φ_g in der Poissongl.: $\text{grad}^2(\Phi_g) = 4\pi G\rho$

Im Falle einer spaerischen Dichteverteilung und nach numerischer Integration erhaelt man ein Dichteprofil $\rho \sim 1/r^2$

Wenn das Dichteverhaeltnis zwischen Zentrum und Aussen ρ_c/ρ_0 einen kritischen Wert uebersteigt (>14.1), sind die Wolkenkerne gravitativ instabil und kollabieren.

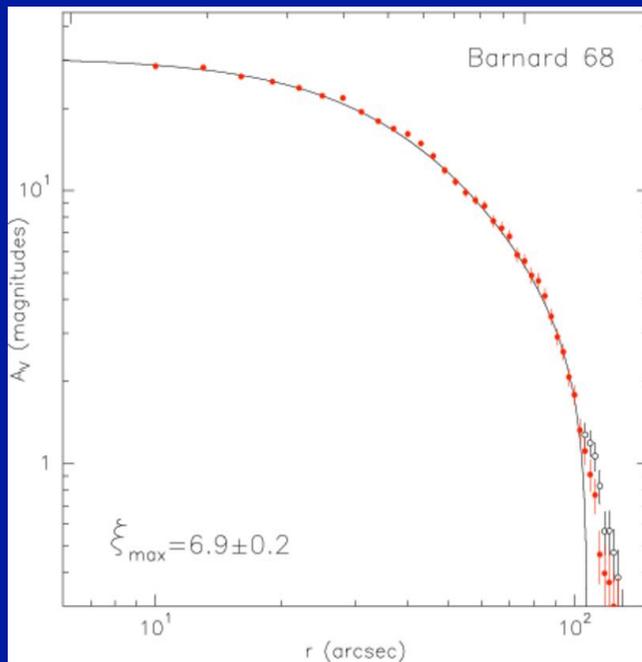
→ Bonnor-Ebert Masse (1955): $M_{BE} \sim a^3/(\rho_0^{1/2}G^{3/2})$ (a: Schallgeschwindigkeit)

Gravitative Stabilitaet: Der Fall B68



ρ_c/ρ_0 ist nur marginal ueber 14

→ B68 ist entweder gravitativ stabil oder an der Grenze zum Kollaps.



Jeans-Analyse

Unabhängig von der räumlichen Konfiguration kam Jeans Anfang des 20. Jahrhunderts zu einem ähnlichen Ergebnis bei der Analyse von Wellenausbreitung in einer Gaswolke.

Die resultierenden Jeans-Längen λ_J und Jeans-Massen M_J , oberhalb derer Molekülwolken gravitativ instabil werden und kollabieren, sind:

a_t : Schallgeschw.

$$\lambda_J = (\pi a_t^2 / (G \rho_0))^{1/2} = 0.19 \text{ pc } (T / (10 \text{ K}))^{1/2} (n_{\text{H}_2} / (10^4 \text{ cm}^{-3}))^{-1/2}$$

$$M_J = a_t^3 / (\rho_0^{1/2} G^{3/2}) = 1.0 M_{\text{sun}} (T / (10 \text{ K}))^{3/2} (n_{\text{H}_2} / (10^4 \text{ cm}^{-3}))^{-1/2}$$

→ Werte darueber lassen die Wolken kollabieren. Im Umkehrschluss koennen sehr kleine und massearme Wolken leichter stabil bleiben.

Beispiel: Eine grosse Moelkuelwolke mit $T=10\text{K}$ und $n_{\text{H}_2}=10^3\text{cm}^{-3}$

$$\rightarrow M_J = 3.2 M_{\text{sun}}$$

Um Groessenordnungen zu niedrig.

→ Andere Stabilisierungsquellen notwendig, z.B. Magnetfelder oder Turbulenz

Anwendungen des Virialtheorems I

Wenn alle Kraefte zu schwach sind um W auszugleichen

$$1/2 (\delta^2 I / \delta t^2) = W \sim Gm^2/r$$

Naehert man weiter $I = mr^2$, erhaelt man die Freifallzeit zu

$$t_{ff} \sim \text{sqrt}(r^3/Gm)$$

Naehert man die Dichte via $\rho = m/r^3$, erhaelt man

$$t_{ff} \sim (G\rho)^{-1/2}$$

Oder exakter fuer eine druckfreie 3D homogene Kugel

$$t_{ff} = (3\pi/32G\rho)^{1/2}$$

Fuer eine grosse Molekuelwolke erhaelt man:

$$t_{ff} \sim 7 \cdot 10^6 \text{ yr } (m/10^5 M_{\text{sun}})^{-1/2} (R/25 \text{ pc})^{3/2}$$

(R: Radius
m: Masse)

Fuer einen dichten Kern mit $\rho \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ist t_{ff} ungefaehr 10^5 yr .

Aber global kollabierende Wolken nicht beobachtet → Andere Kraefte

Anwendungen des Virialtheorems II

Wenn eine Wolke im Kraeftegleichgewicht ist, aendert sich das Traegheitsmoment kaum. $\rightarrow 1/2 (\delta^2 I / \delta t^2) = 0$

$$2T + 2U + W + M = 0$$

Dies nennt sich **Virialgleichgewicht**.
Welche Kraft kann W am besten ausgleichen?

Thermische Energie: Naehert man U mit $U \sim 3/2 N k_B T$

$$\begin{aligned} U/|W| &\sim 3/2 N k_B T (Gm^2/R)^{-1} \\ &= 3 \cdot 10^{-3} (m/10^5 M_{\text{sun}})^{-1} (R/25 \text{pc}) (T/15 \text{K}) \end{aligned}$$

--> Thermischer Druck alleine kann Wolken nicht stabil halten!

Magnetische Energie: Naehert man M mit $M \sim B^2 r^3 / 6$

$$\begin{aligned} M/|W| &\sim B^2 r^3 / 6 (Gm^2/R)^{-1} \\ &= 0.3 (B/20 \mu\text{G})^2 (R/25 \text{pc})^4 (m/10^5 M_{\text{sun}})^{-2} \end{aligned}$$

--> Magnetische Energie scheint wichtig fuer Wolkenstabilitaet!

Anwendungen des Virialtheorems III

Der letzte Term in $2T + 2U + W + M = 0$ ist die kinetische Energie T

$$\begin{aligned} T/|W| &\sim 1/2 m \Delta v^2 (Gm^2/R)^{-1} \\ &= 0.5 (\Delta v/4\text{km/s}) (M/10^5 M_{\text{sun}})^{-1} (R/25\text{pc}) \end{aligned}$$

In der kuerzesten Form lautet das Virialtheorem $2T = -W$.

→ typische Wolken mit Δv ein paar km/ in ungefaehrem Virialgleichgewicht
→ Turbulente Energie sehr hoch!

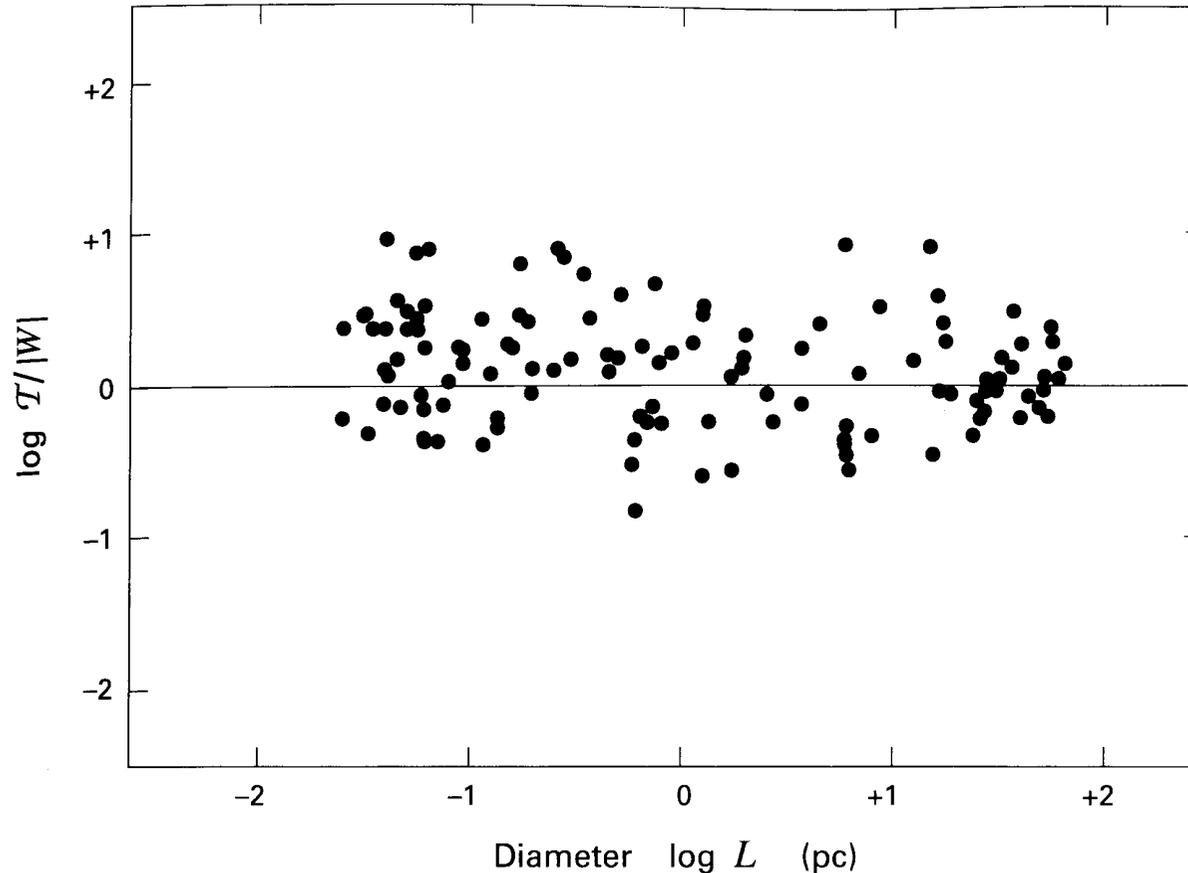
Umgekehrt lassen sich damit Relationen zwischen beobachteter Linienbreite und Wolkenmasse herleiten:

$$\begin{aligned} 2T &= 2 * (1/2 m \Delta v^2) = -W = Gm^2/r \\ \rightarrow \text{Virialgeschwindigkeit: } v_{\text{vir}} &= (Gm/r)^{1/2} \\ \rightarrow \text{oder Virialmasse: } m_{\text{vir}} &= v^2 r / G \end{aligned}$$

Anwendungen des Virialtheorems III

Der letzte

ergie T



25pc)

In c

→ typische V

ngewicht

Umgekehr

Linien-

$$2T = 2 * (1/2 m \Delta v^2) = -W = Gm^2/r$$

→ Virialgeschwindigkeit: $v_{\text{vir}} = (Gm/r)^{1/2}$

→ oder Virialmasse: $m_{\text{vir}} = v^2 r / G$

Themen heute

Einfuehrung zur Sternentstehung

Wolkenstabilitaet

Kollaps, Entwicklung des Protosterns und Vor-
hauptreihenentwicklung

Akkretionsscheiben und Jets

Ambipolare Diffusion

- Magnetfelder koppeln an das ionisierte Gas, dieses wiederum durch Stoesse an das neutrale Gas.

- Perfekte Kopplung:
→ $B r^2$ konstant

- Kern mit $1M_{\text{Sonne}}$
 $r=14000\text{AU}$, $B=30\mu\text{G}$

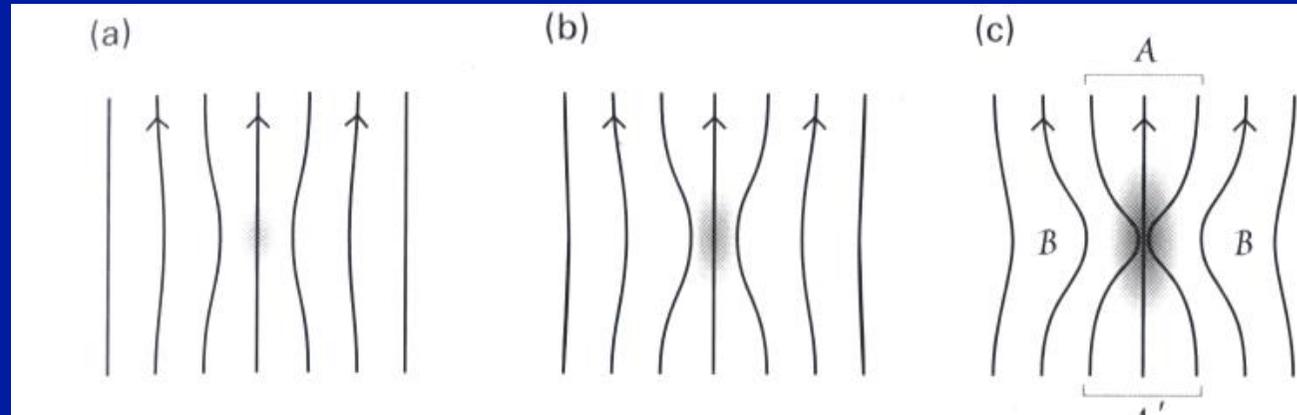
→ protostellare Magnetfeldern von $\sim 10^7\text{G}$ (mit protostellarem Radius $\sim 5R_{\text{Sonne}}$)
!!! Viel zu hoch und nicht beobachtet!!!

→ Neutrales und ionisiertes Gas koennen teilweise entkoppeln, so dass neutrales Gas durch Magnetfeld hindurchdiffundieren und leichter kollabieren kann.

(L: Laenge)

Ambipolare Zeitskala: $t_{\text{ad}} \approx 3 \times 10^6 \text{yr} (n_{\text{H}_2}/10^4 \text{cm}^{-3})^{3/2} (B/30\mu\text{G})^{-2} (L/0.1\text{pc})^2$

Diese Zeitskala erscheint sehr lang, und es ist immer noch Thema der aktuellen Forschung, ob ambipolare Diffusion wichtig fuer Stabilitaet ist, oder ob nicht doch Turbulenz dominiert.

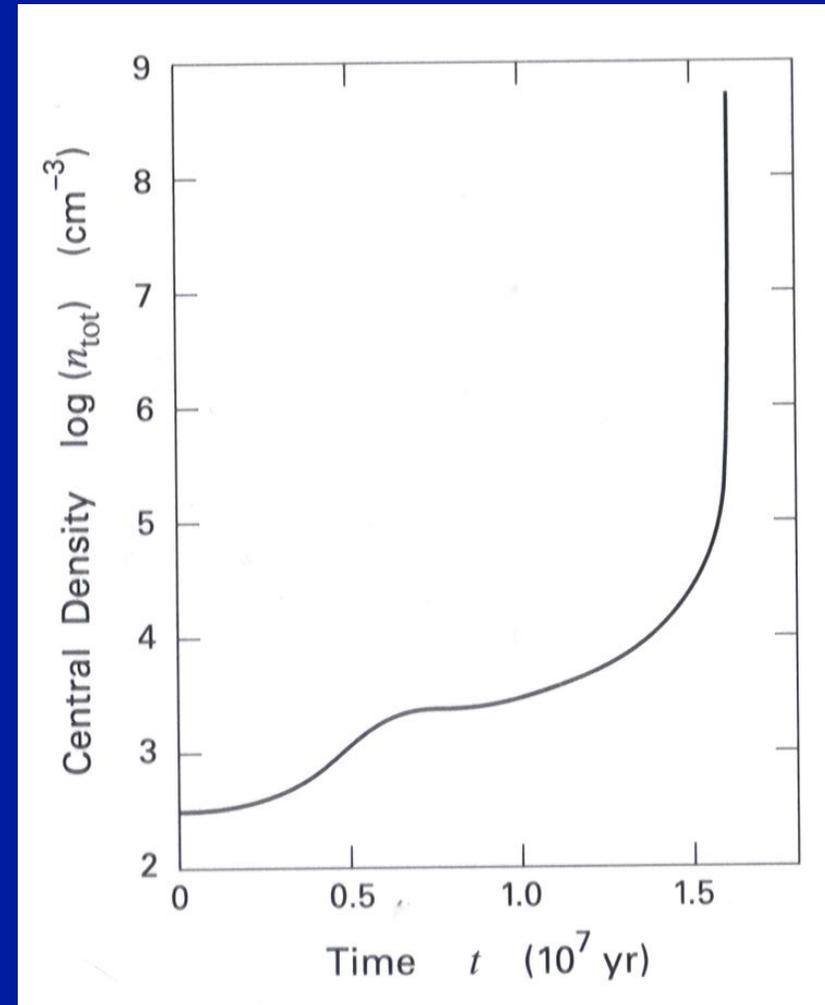


Kollaps und Entstehung des Protosterns I

- Wenn Stabilität eines Wolkenkerns nicht mehr gewährleistet ist, beginnt eigentlicher Kollaps und Entstehung des Sterns:

Erster Schritt: Kollaps quasi im freien Fall:

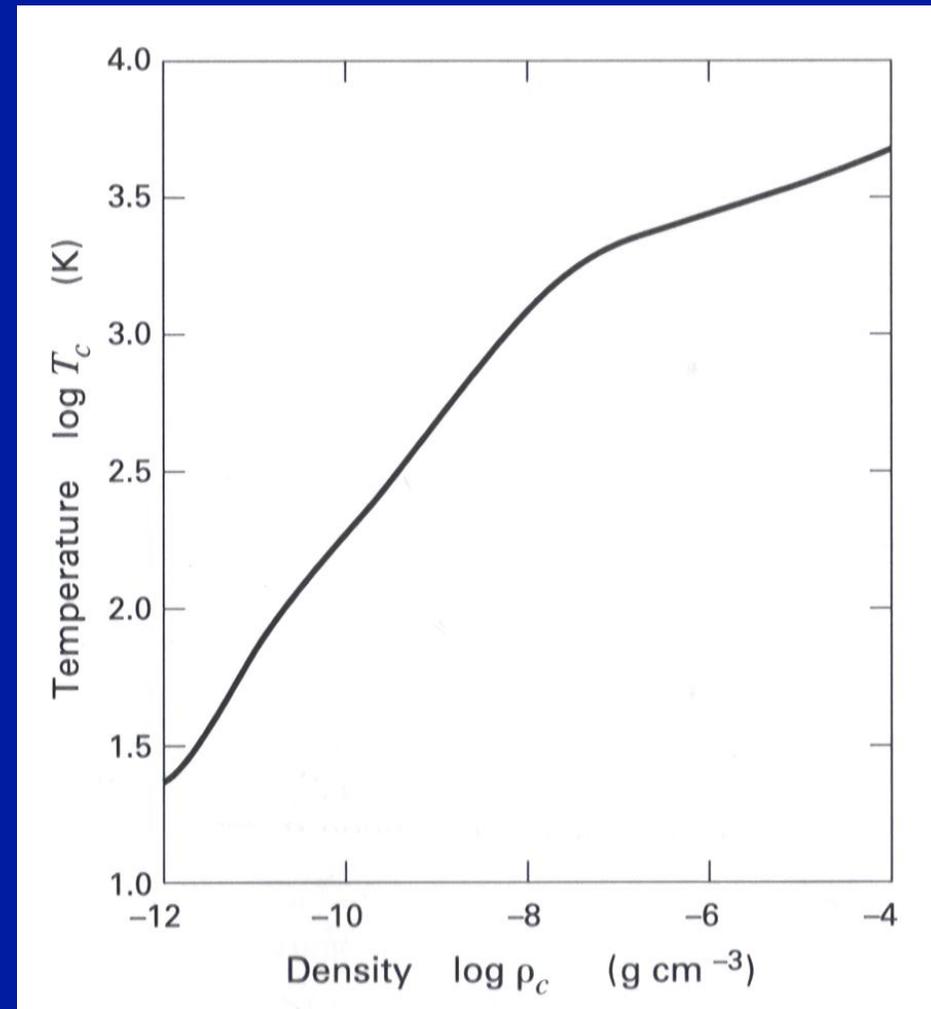
- Solange Wolke optisch dünn
→ Strahlung entweicht → T konstant.
- Nach Freifallzeit von $\sim 10^5$ Jahren wird Zentrum optisch dick.
 - T und P steigen
 - erster Kollaps stoppt, Gleichgewicht zwischen P und Gravitation
- Sogenannter erster Kern bestehend hauptsächlich aus H_2 .
- Radius dieses Kern \sim Jupiterbahn, allerdings nur Promille der Gesamtmasse.



Kollaps und Entstehung des Protosterns I

Zweiter Schritt: Materie faellt weiter auf Kern bis Protostern entsteht:

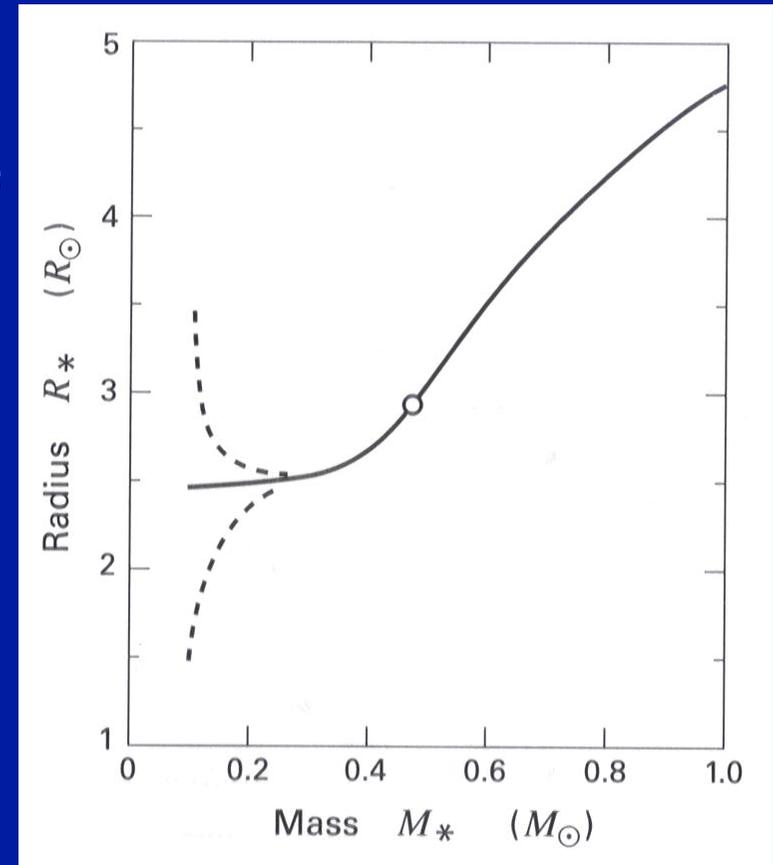
- T steigt auf $\sim 2000\text{K}$
→ H_2 dissoziiert zu H ,
- Energie in Dissoziation
→ T und P steigen nur geringfuegig.
→ Kern kollabiert weiter bis alles H_2 dissoziiert ist
→ dann steigen T und P wieder
→ Kollaps stoppt und eigentlicher Protostern hat sich gebildet. Groesse \sim einige R_{sonne}



Kollaps und Entstehung des Protosterns II

Dritter Schritt: Protostellare Entwicklung:

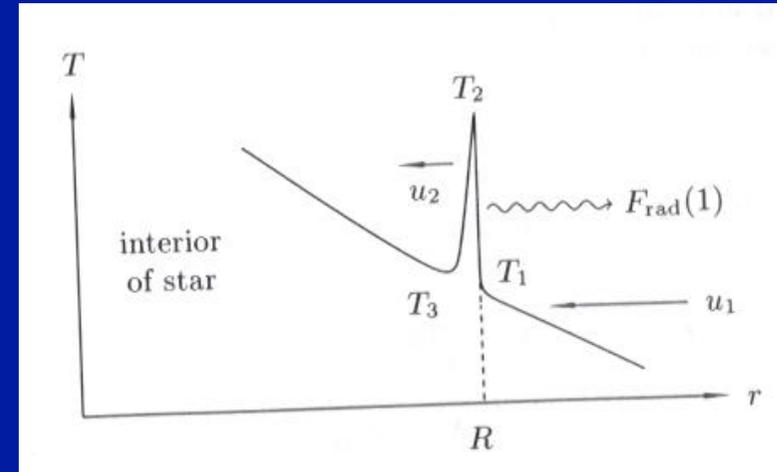
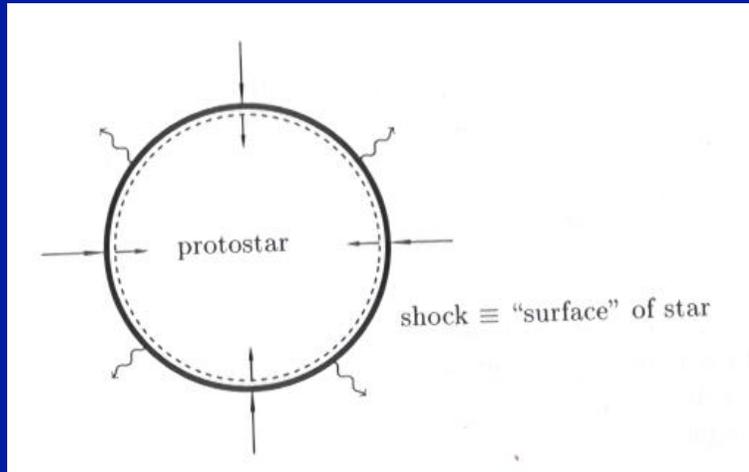
- Kern trotz steigender T nicht sichtbar, Huelle absorbiert alle Strahlung \rightarrow waermer
- Spaetestens in dieser Phase bilden sich Akkretionsscheiben und Jets.
- Huelle entleert sich mehr und mehr und wird schliesslich optisch duenn.
 \rightarrow Kern wird sichtbar und erscheint als Vorhauptreihenstern (T Tauri Stern) im Hertzsprung-Russel Diagramm.



Def. Protostern: Ein Objekt, dass den Grossteil seiner Leuchtkraft aus dem Akkretionsschock gewinnt (Phasen 2 und 3).

Def. Vorhauptreihenstern: Anschliessende Phase, in der das zentrale Objekt seine Leuchtkraft groesstenteils aus gravitativer Kontraktion produziert.

Akkretionsschock, Akkretionsleuchtkraft und Rate



Einfallende Gas \rightarrow Aufprall auf Protostern \rightarrow Bremsung \rightarrow Leuchtkraft L_{Ak}

\rightarrow Gravitationspotential kann mir GM_*/R genaeuert werden
(mit M_* und R_* der Masse und Radius des Protosterns)

\rightarrow Akkretionsleuchtkraft = Potential x Akkretionsrate:

$$L_{Ak} = \dot{M} GM_*/R_*$$

$$= 61 L_{sun} (\dot{M}/10^{-5} M_{sun}/yr) (M_*/1 M_{sun}) (R_*/5 R_{sun})^{-1}$$

Fuer isotherme Kugeln ohne Magnetfeld: $\dot{M} = \partial M_r / \partial t = \sim a_t^3 / G$

Fuer Schallgeschwindigkeit $a=0.2\text{km/s}$ bei $T=10\text{K}$ $\rightarrow \dot{M} \sim 10^{-5} M_{sonne}/yr$

Vorhauptreihenstern

Def. Protostern: Ein Objekt, das den Grossteil seiner Leuchtkraft aus dem Akkretionsschock gewinnt (Phasen 2 und 3).

Def. Vorhauptreihenstern: Anschliessende Phase, in der das zentrale Objekt seine Leuchtkraft grösstenteils aus gravitativer Kontraktion produziert.

Quasi-hydrostatische Phase:

- Dynamische Phase beendet → quasi-statische Kelvin-Helmholtz-Kontraktion:

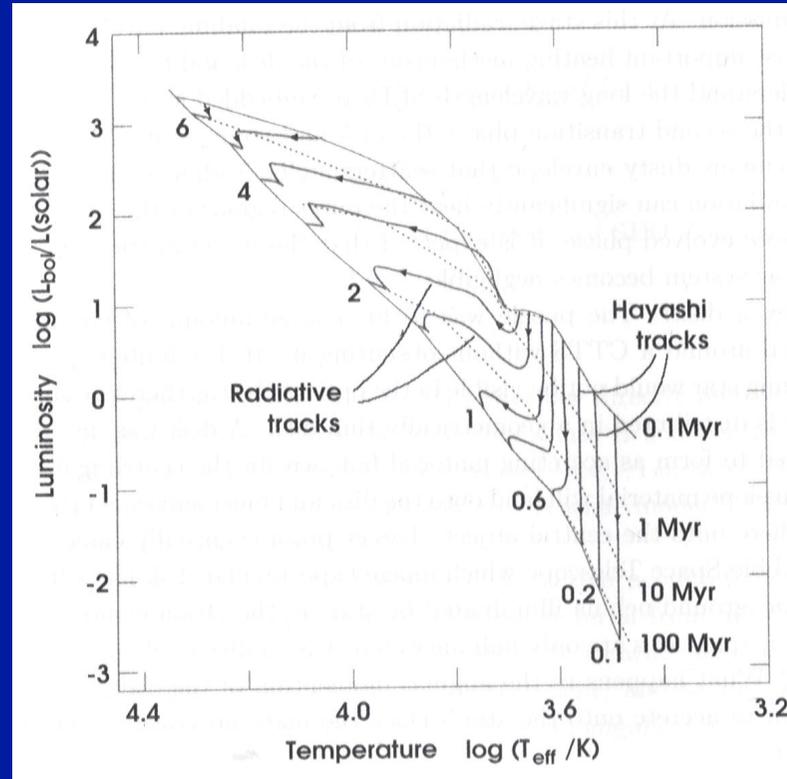
Virialtheorem: $2T = -W = GM^2/R$ → wird in Leuchtkraft umgewandelt

$$\rightarrow t_{KH} = E/L = (GM^2/R)/L = 3 \times 10^7 \text{yr} (M/1M_{\text{Sonne}})^2 (R/1R_{\text{Sonne}})^{-1} (L/1L_{\text{Sonne}})^{-1}$$

→ Endet wenn Zentraltemperatur zum H-Brennen erreicht ist ($\sim 10^7\text{K}$)

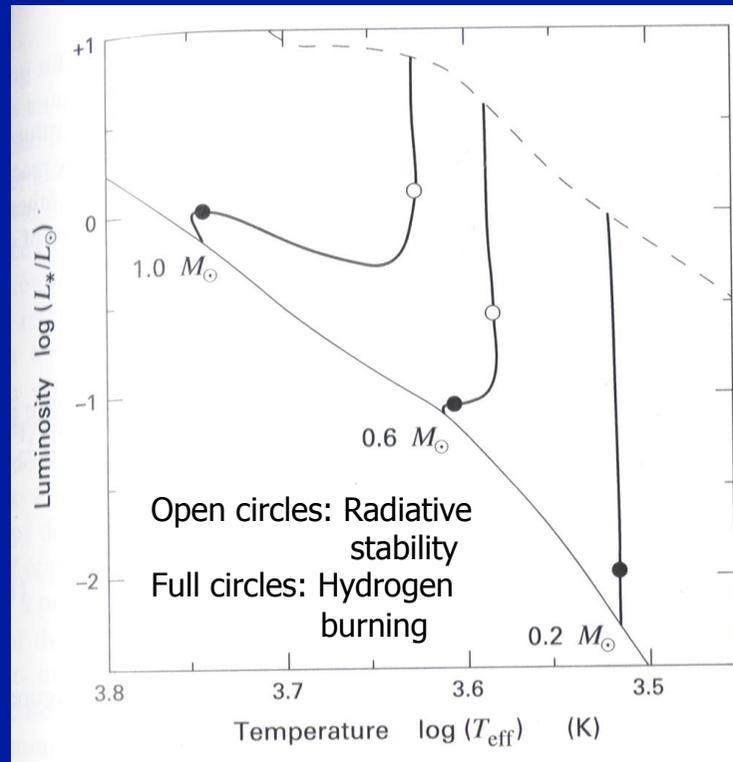
→ Stern ist geboren!

Hertzsprung Russel (HR) Diagramm I



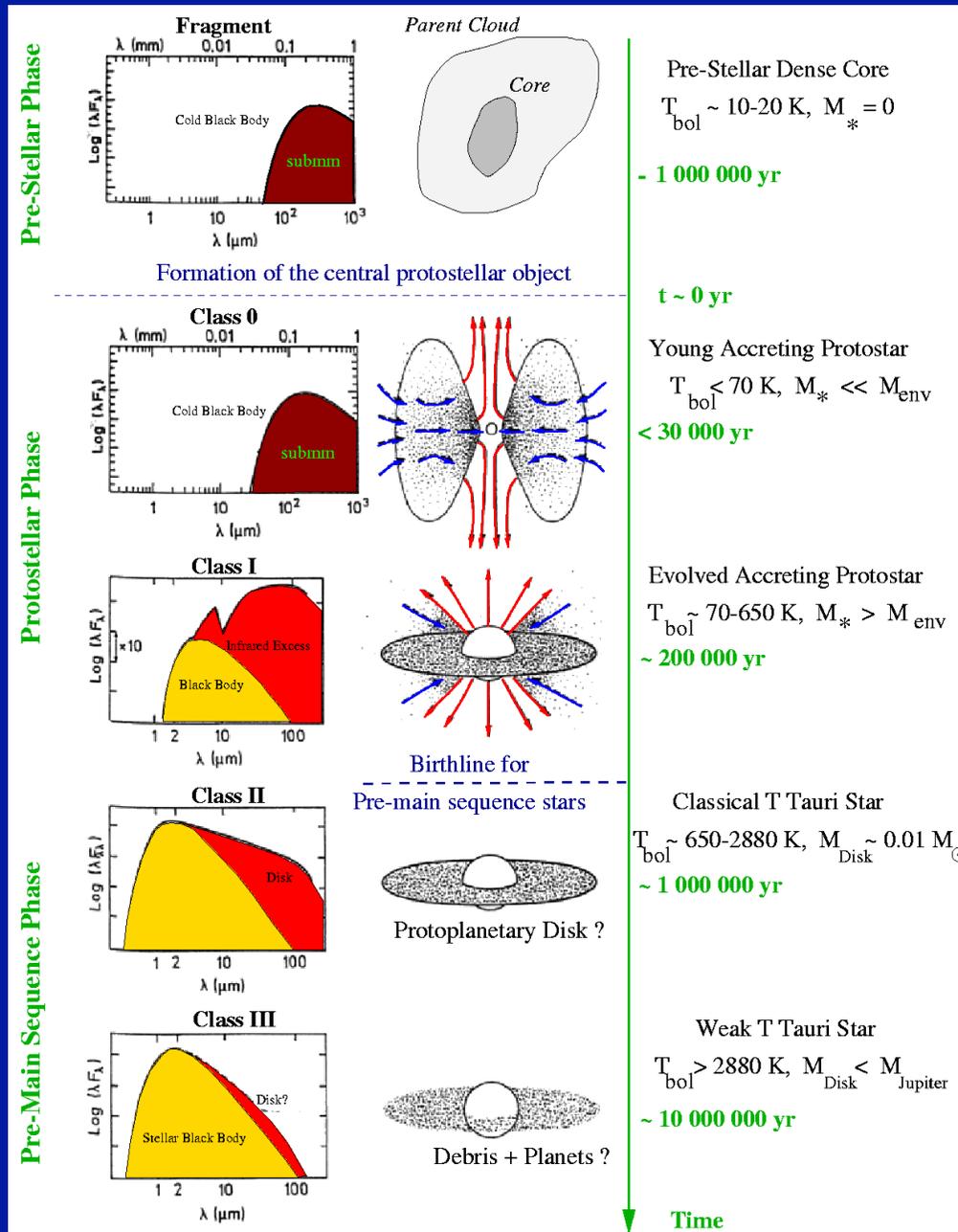
- Die "Birthline" wurde zuerst aus der Beobachtung als der Ort identifiziert, an dem Sterne das erste Mal im HR Diagramm sichtbar werden.
- Theoretisch kann man die "Birthline" definieren als den Zeitpunkt, an dem die Hauptakretionsphase beendet ist, und die Leuchtkraft aus Kontraktion gewonnen wird → Start der Vorhauptreihenentwicklung

Hertzsprung Russel (HR) Diagramm II



- Konvektive massearme Sterne kontrahieren dann, Oberflaechen T bleibt gleich
→ Da $L \sim AT^4$ (A: Oberflaeche) nimmt L ab. → Hayashi Tracks.
- Wenn Konvektion Energie nicht mehr transportieren kann, werden sie strahlungsdominiert → horizontale Strahlungstracks
→ T steigt bis Kernfusion bei $\sim 10^7$ K → Hauptreihe ZAMS

Beobachtbare spektrale Energieverteilung (SED)



Themen heute

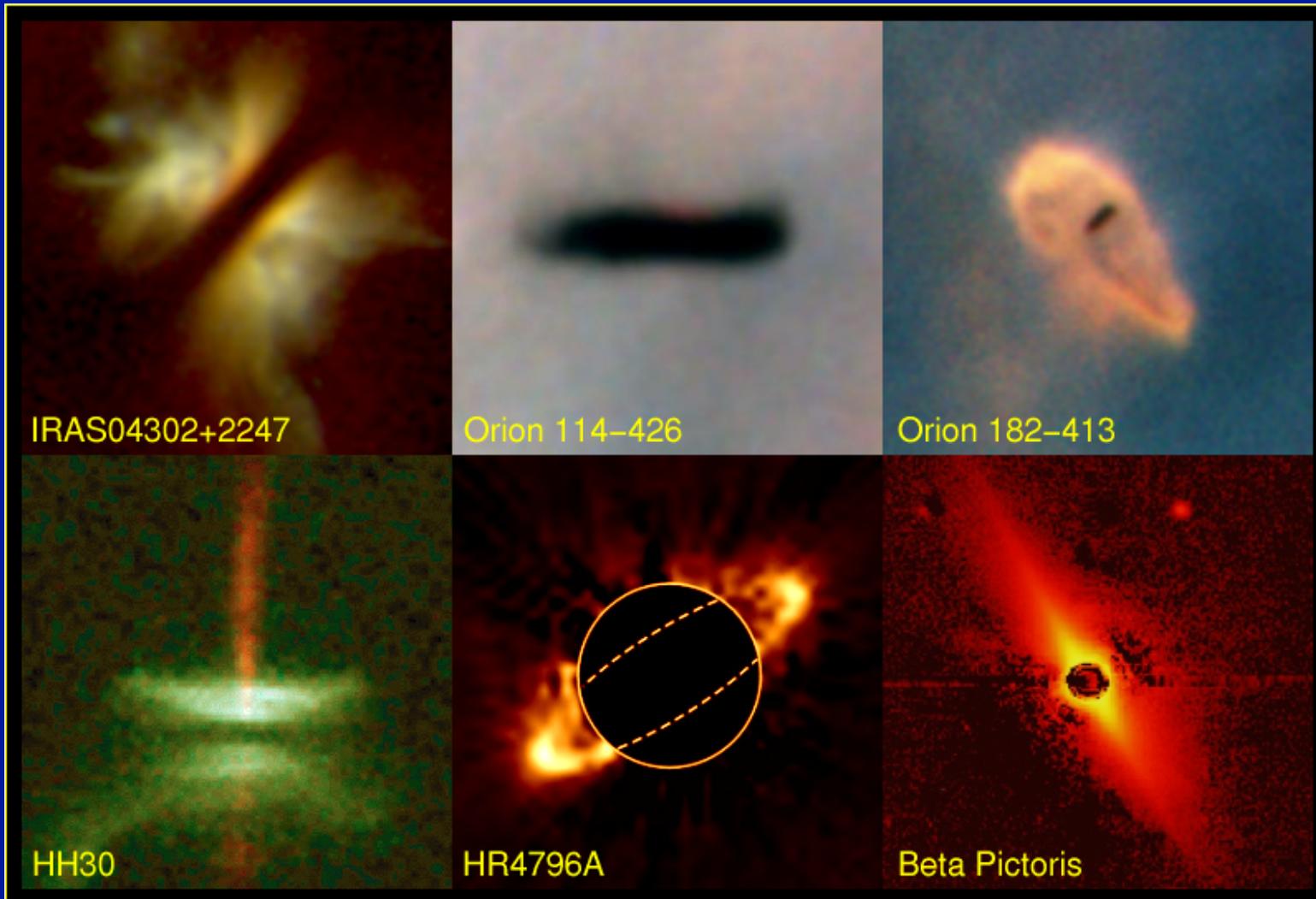
Einfuehrung zur Sternentstehung

Wolkenstabilitaet

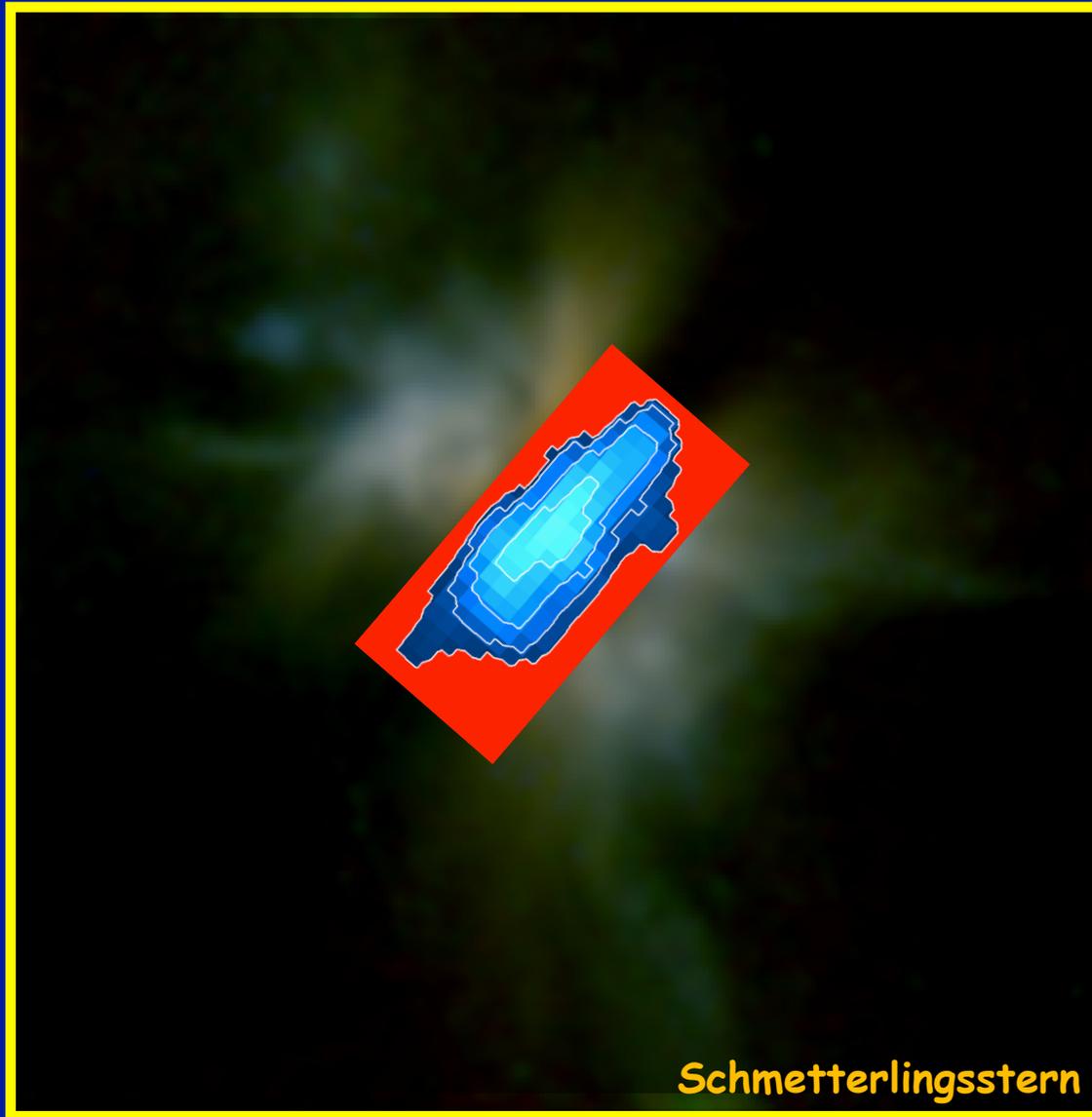
Kollaps, Entwicklung des Protosterns und Vor-
hauptreihenentwicklung

Akkretionsscheiben und Jets

Optisch beobachtete Scheiben

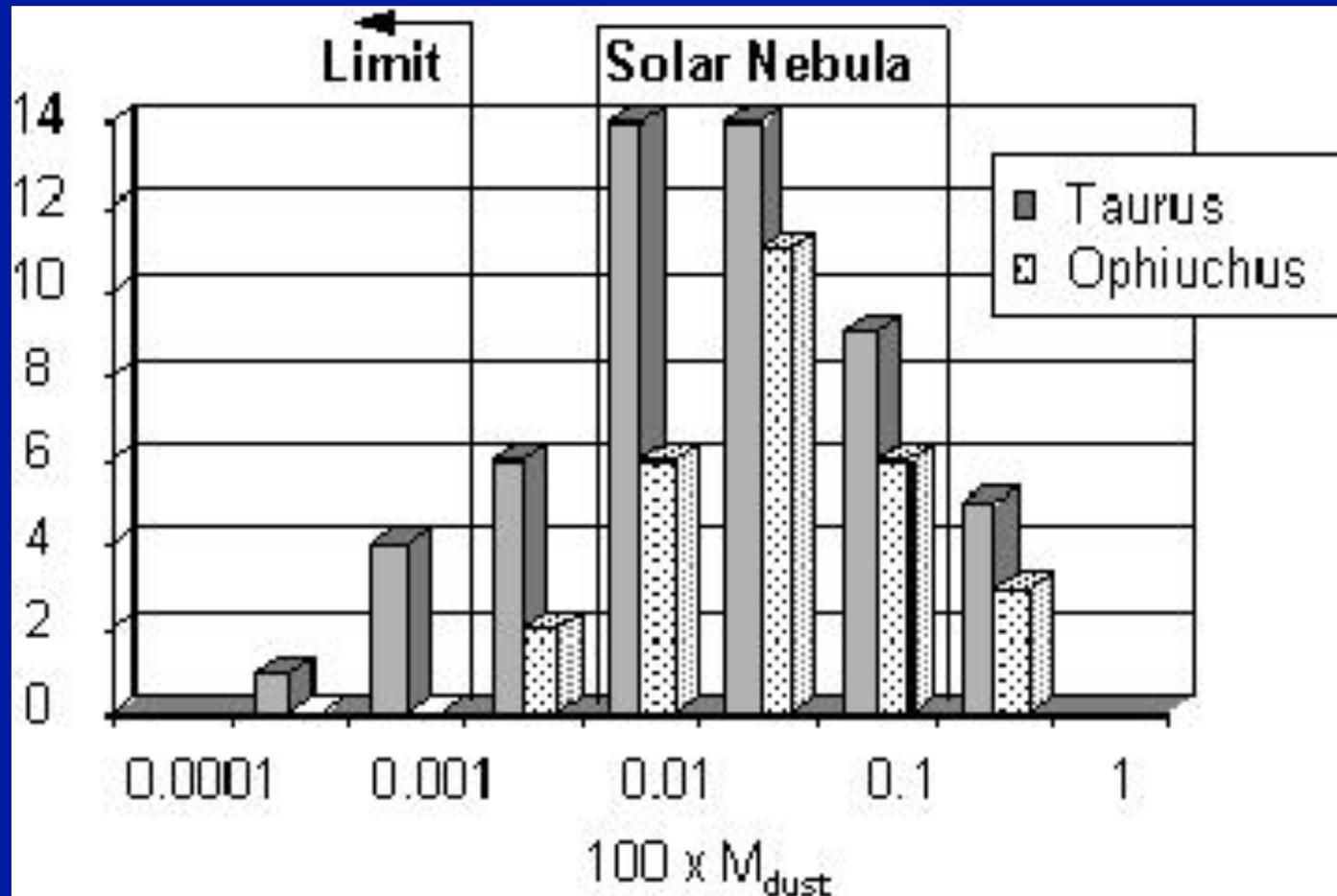


Der Schmetterlingsstern



Wolf et al. 2003

Scheibenmassen

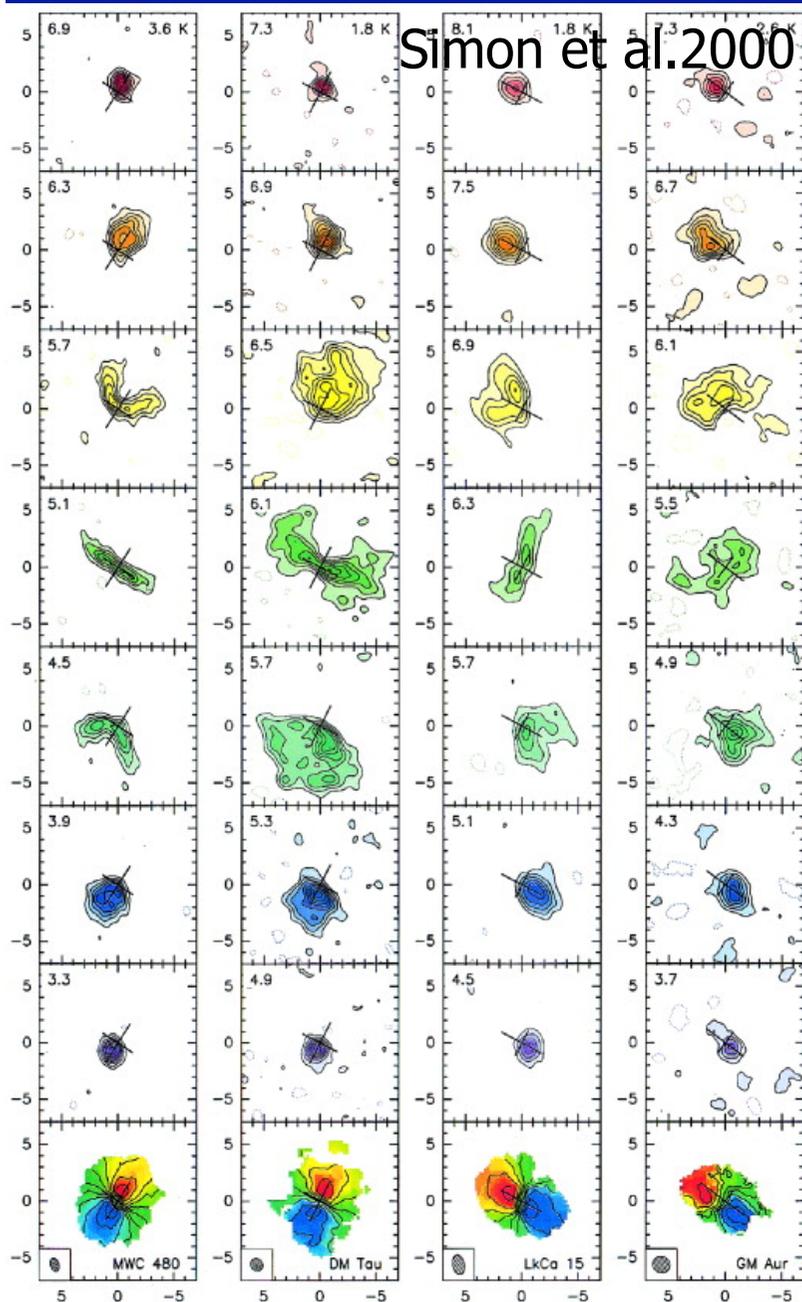


- Modelle des jungen Sonnensystems brauchen Scheibenmassen zwischen 0.01 und $0.1 M_{\text{Sonne}}$

→ Typische Scheibensysteme haben genug Masse um Planeten zu formen.

Beckwith et al. 1990, Andre et al. 1994

Keplersche Scheibendynamik

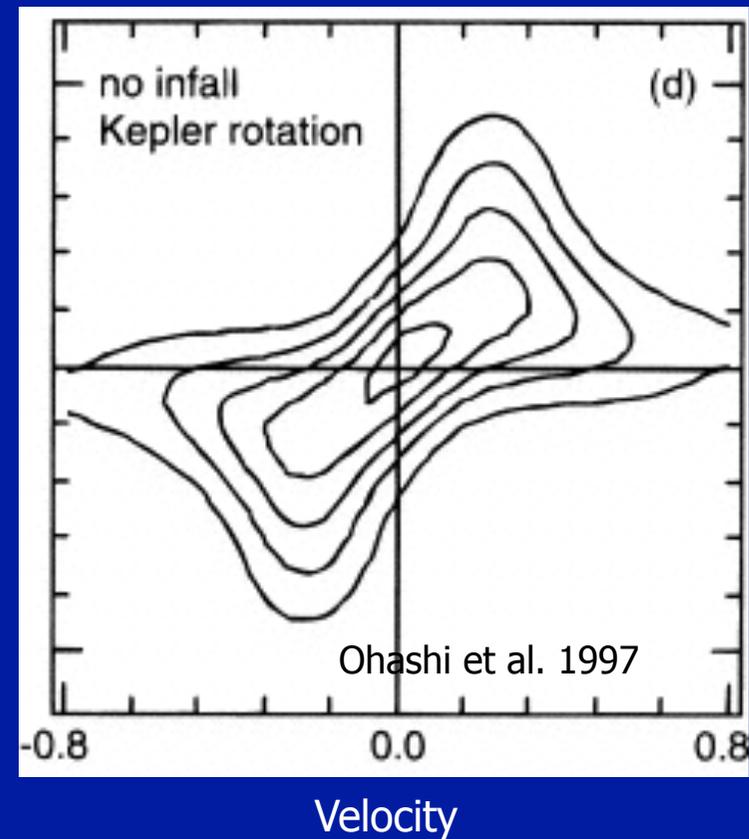


Fuer eine keplersche Scheibe sollte Zentri-
fugalkraft gleich Gravitationskraft sein:

$$F_{\text{Zen}} = mv^2/r = F_{\text{Grav}} = Gm_*m/r^2$$

$$\rightarrow v = (Gm_*/r)^{1/2}$$

Offset

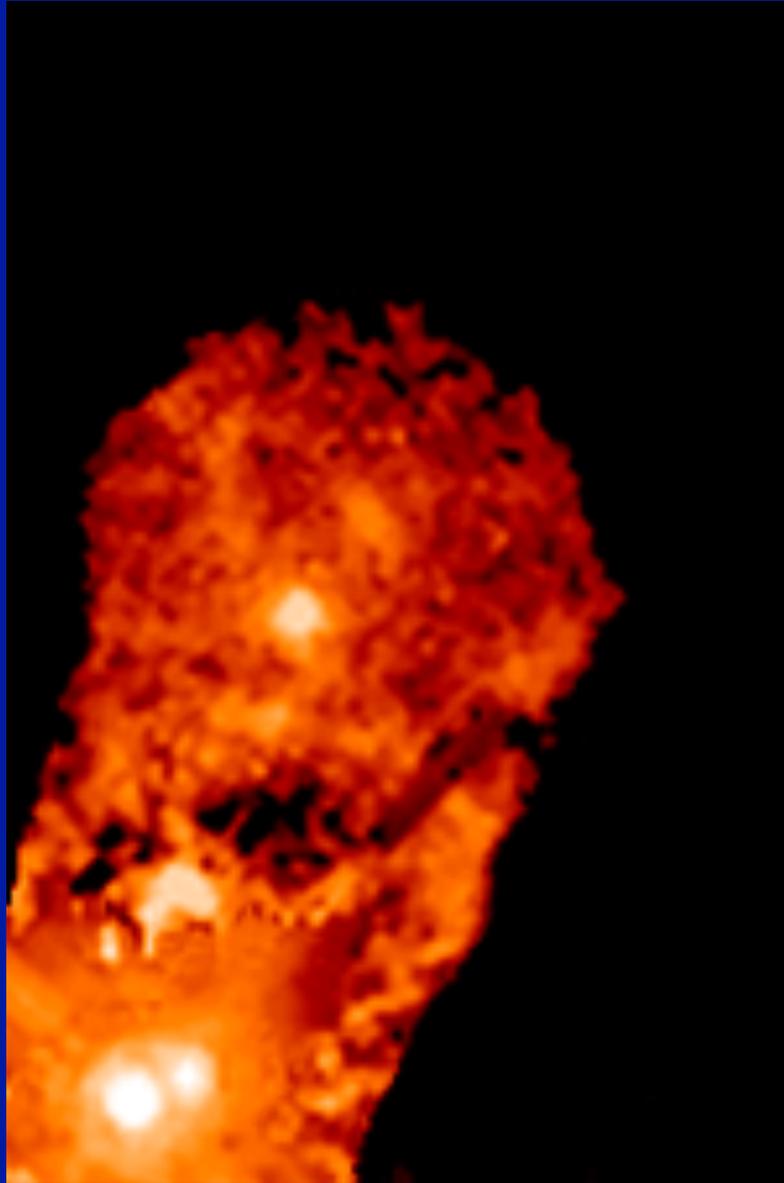




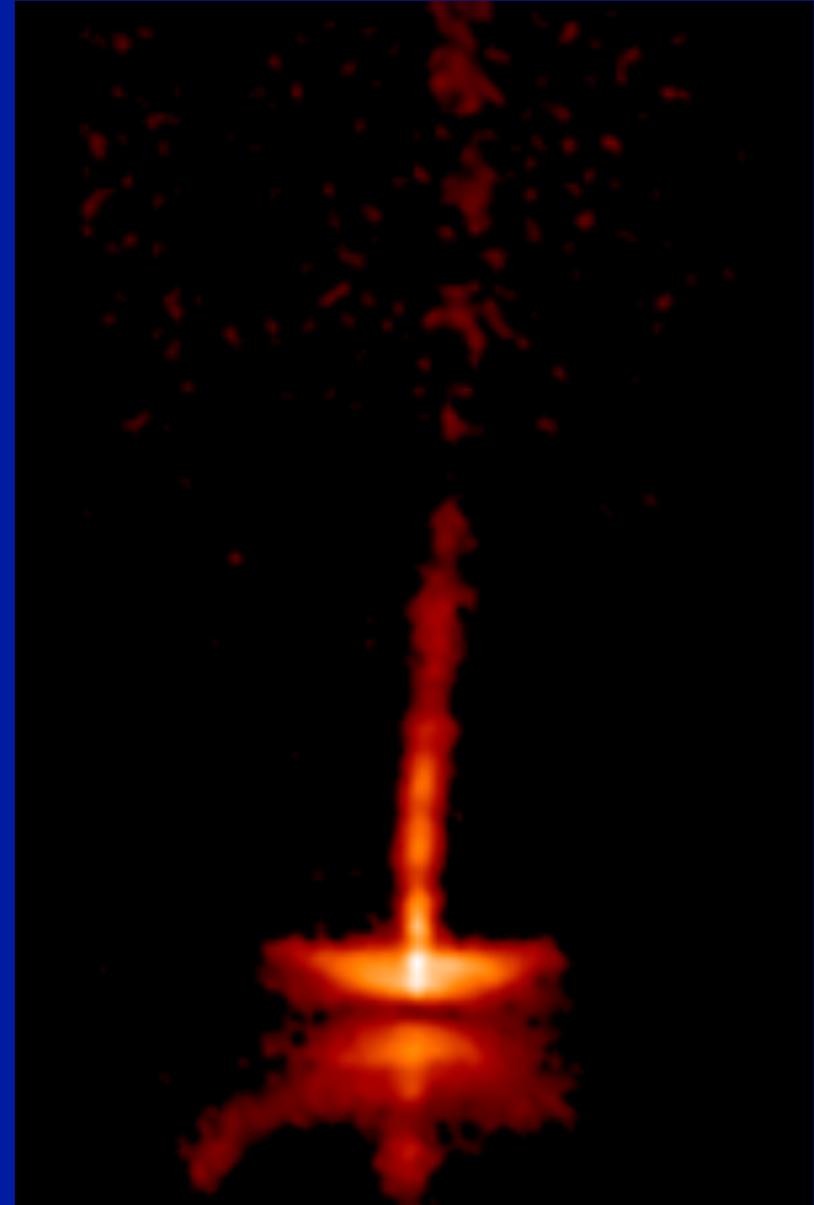
Die Ausstroemung in HH212

Eigenbewegungen von Jets

XZ Tauri



HH30



Zusammenfassung

- Sternentstehung muss viele räumliche Größenordnungen überwinden.
- Sternentstehungsrate sehr niedrig.
- Analyse des hydrostatischen Gleichgewichts gibt Grenzmassen, oberhalb derer Wolkenkerne kollabieren können (Bonner-Ebert Masse).
- Jeans-Analyse gibt ähnliche Ergebnisse.
- Aber Wolken oberhalb Grenzmassen "stabil". → Stabilität muss anderweitig geleistet werden, z.B. durch Magnetfelder und/oder Turbulenz.
- Virialanalyse erlaubt Abschätzungen.
- Kollaps zum Protostern.
- Weitere Entwicklung der Vorhauptreihenphase.
- Akretionsscheiben und Jets.

Einfuehrung in die Astron. & Astrophysik I

Wintersemester 2013/2014: Henrik Beuther & Christian Fendt

17.10 *Einfuehrung: Ueberblick und Geschichte (H.B.)*

24.10 *Koordinatensys., Sternpositionen, Erde/Mond (C.F.)*

31.10 *Teleskope und Instrumentierung (H.B.)*

07.11 *Strahlung, Strahlungstransport (C.F.)*

14.11 *Planetensystem(e) und Keplergesetze (H.B.)*

21.11 *Sonne & Sterne, Typen, Klassifikationen, HR-Diagramm (C.F.)*

28.11 *Interstellare Materie: Chemie und Materiekreislauf (H.B.)*

05.12 *Sternentstehung, Akkretionsscheiben und Jets (H.B.)*

12.12 *Sternaufbau und Sternentwicklung: Hauptreihe (C.F.)*

19.12 *Sternaufbau und Sternentwicklung: Endstadien (C.F.)*

26.12 und 02.01 –

09.01 *Mehrfachsysteme und Sternhaufen, Dynamik (C.F.)*

16.01 *Exoplaneten und Astrobiologie (H.B.)*

23.01 *Die Milchstrasse (H.B.)*

30.01 *Zusammenfassung (C.F. & H.B.)*

06.02 *Pruefung (C.F. & H.B.)*