

Stellare Winde

Einführung

Thomas Rivinius

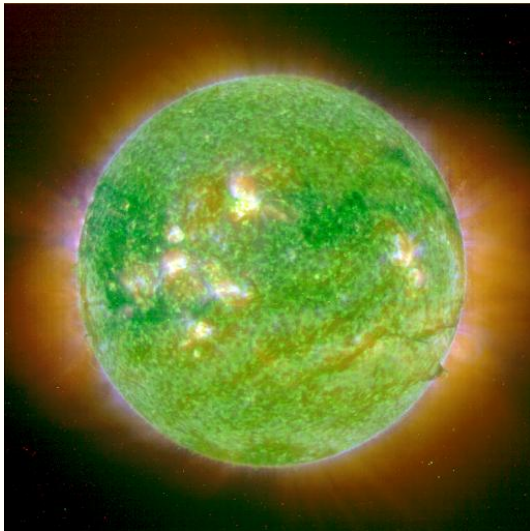
WS 2004/2005

Landessternwarte Heidelberg, Königstuhl

`T.Rivinius@lsw.uni-heidelberg.de`

Was sind stellare Winde

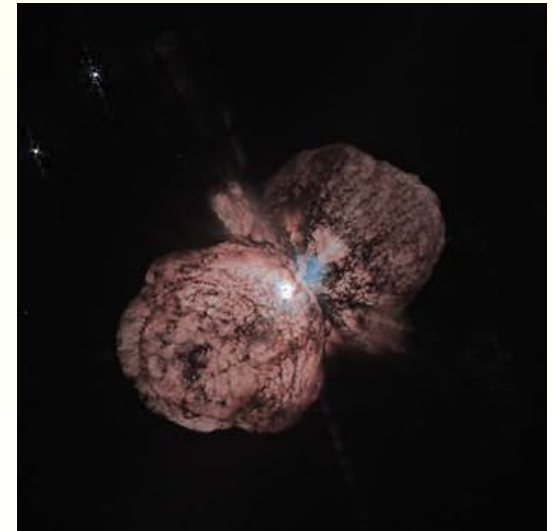
- Sterne emittieren nicht nur Strahlung, sondern auch Partikel
- Die Sonne verliert z.Zt. 10^{-14} Sonnenmassen pro Jahr ($\dot{M} \approx 10^{-14} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$). Sie wird aber nur ca. 10^{10} Jahre alt werden
 - Wichtig für die Erde (Polarlichter etc.), Bedeutung für die Sonne selbst eher gering
- Besonders bei Riesen und Überriesen aber oft $\dot{M} \approx 10^{-5} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$, in extremen Phasen sogar bis $\dot{M} \approx 10^{-1} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$
- Versorgt interstellares Medium mit Masse, Impuls, Energie (und trägt damit zur Bildung neuer Sterne bei)



SOHO-Kompositbild im EUV

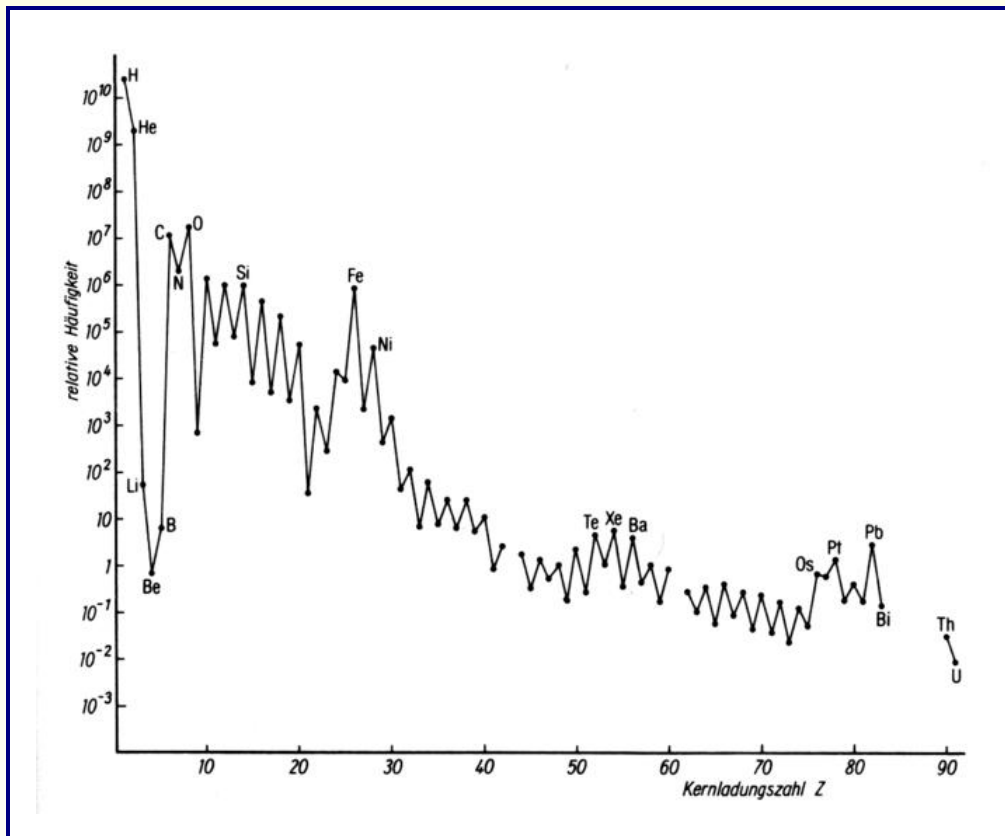


von www.spaceweather.com



HST-Bild

Die chemische Evolution des Universums



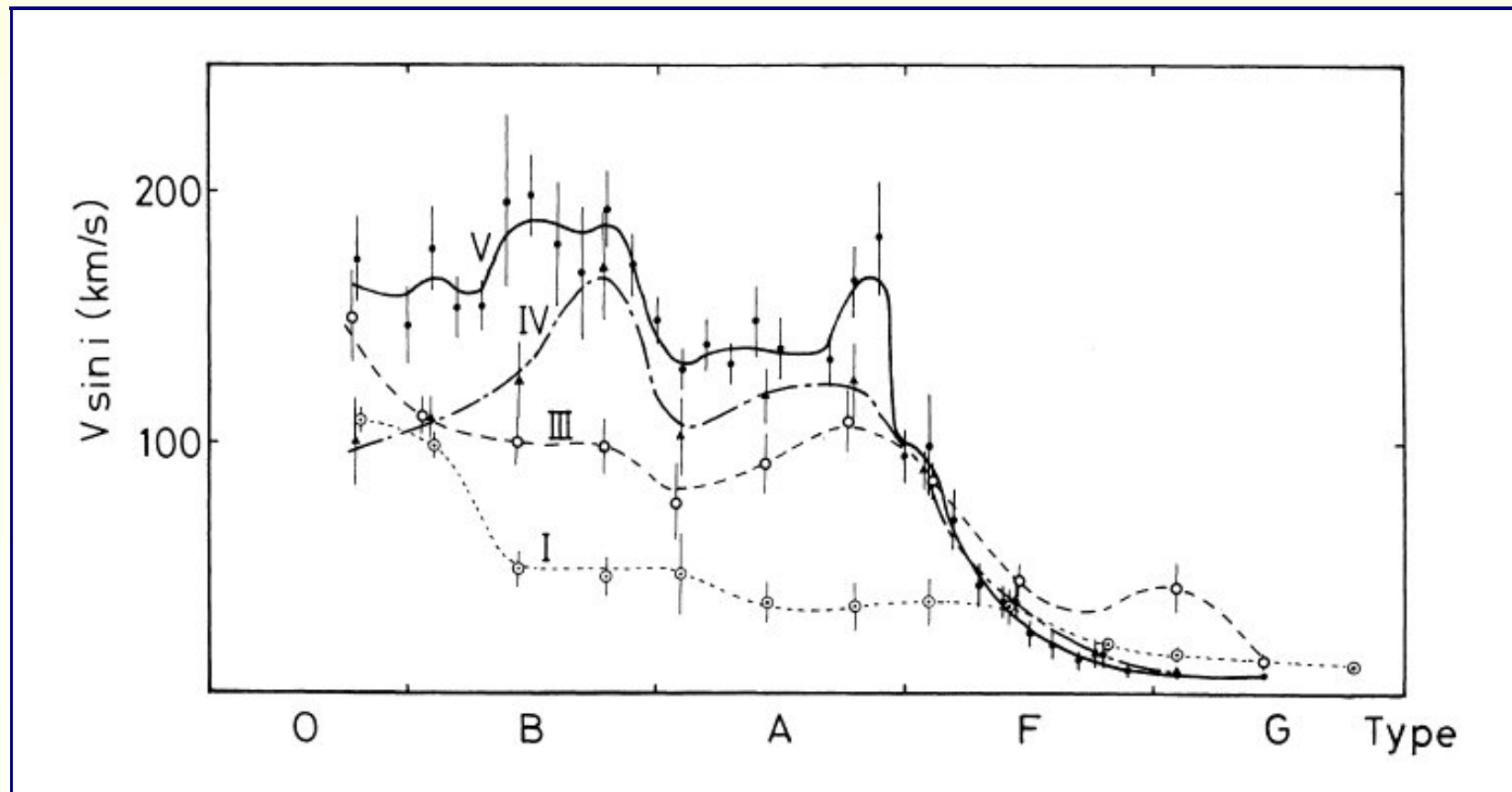
Häufigkeiten der Elemente

Aus: ABC Lexikon der Astronomie, Springer

- Im Urknall nur H, He, (Li), alle schweren Elemente aus Sternen
- C, N, O, Si, etc. bis Fe bei normalen Kernbrennen, schwerere Elemente durch Neutroneneinfang und β -Zerfall:
 - r-Prozeß (rapid) in Supernova-Explosionen
 - s-Prozeß (slow) während des He-Schalenbrennens massiver Sterne

Ohne stellare Winde wäre die chemische Anreicherung der interstellaren Gases völlig anders und langsamer verlaufen

Sternentstehung und Rotation

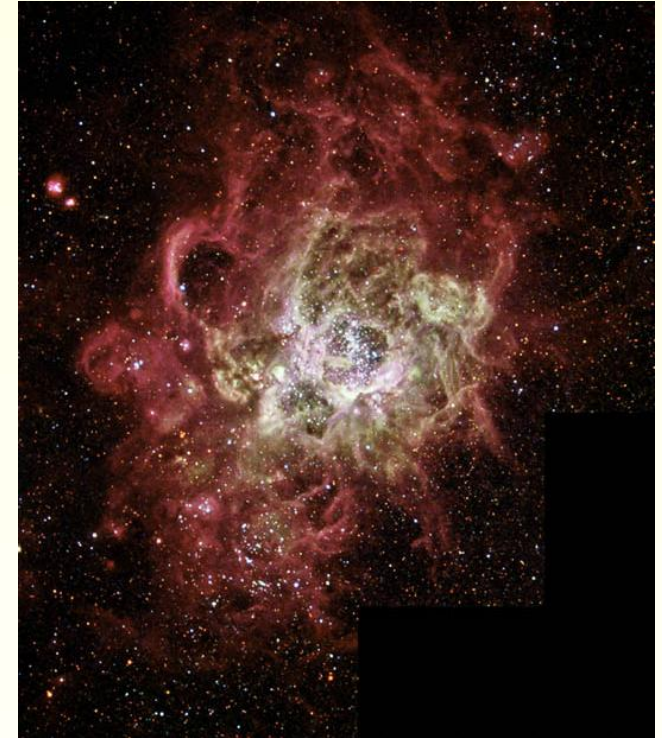


Aus: Fukuda, 1982, PASP 94, 271

- Drehimpulsabbau von Protosternen durch Massenverlust, dadurch weitere Kontraktion und Akkretion
- Wind bremst Rotation weiter (sehr effizient mit Magnetfeld), wichtig besonders für die weitere Entwicklung von O-Sternen

Sternentwicklung

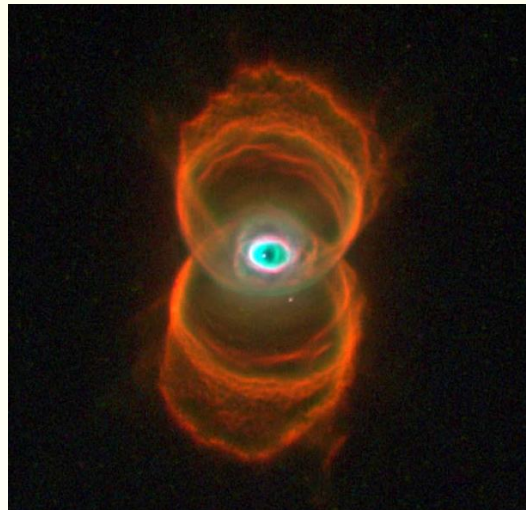
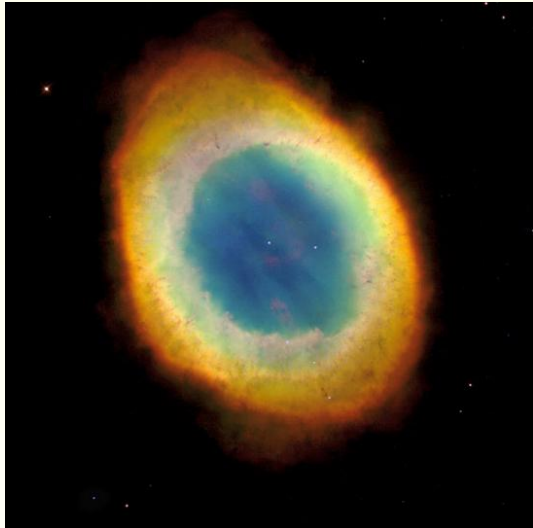
- Starker Massenverlust, dadurch Objekte mit $M_{\text{init}} \lesssim 8 M_{\odot}$ am Ende doch unter dem Chandrasekhar-Limit
- Entwicklung der Rotationsgeschwindigkeit von O-Sternen auf der Hauptreihe
- Nachhauptreihen-Entwicklung massiver Sterne von Wolf-Rayet und LBV-Phasen bestimmt
- Bei massiver gleichzeitiger Sternentstehung (Starbursts) vereinen die Einzelsterne ihren Wind
 - Die einzelnen stellaren Winde und Supernovaexplosionen können sich zu sich zu einem “Superwind” vereinen (galaktische Winde)



Starburstregion in unserer Nachbargalaxie M33 mit mehr als 200 massereichen Sternen von bis zu $120 M_{\odot}$, *Bild: ESO-VLT*

Planetarische Nebel

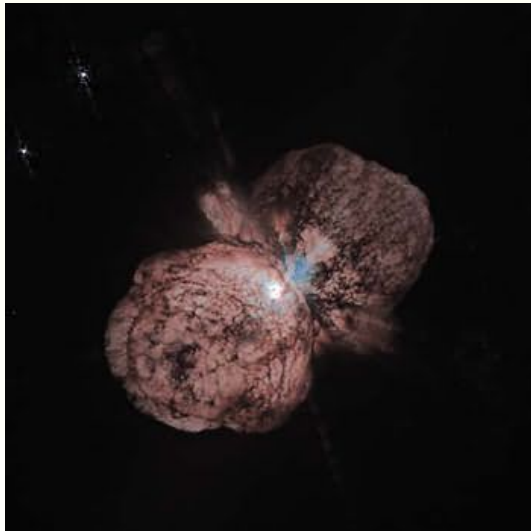
- Planetarische Nebel entstehen durch das Zusammenspiel verschieden schneller Winde
- Zusätzlich spielen Magnetfelder, Rotation und mögliche Doppelsternbegleiter eine Rolle



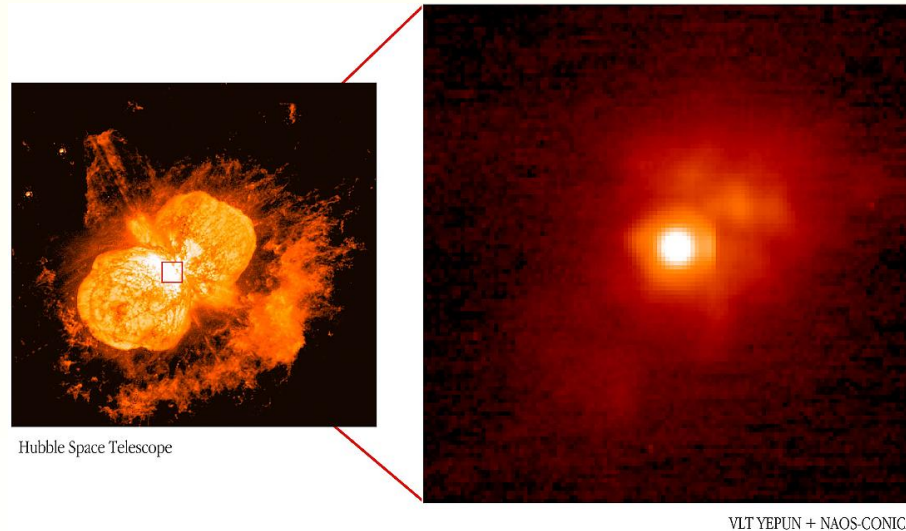
HST-Bilder. Nur der Ringnebel, ganz links, ist in etwa natürlichen Farben abgebildet

Der extreme Stern η Carinae

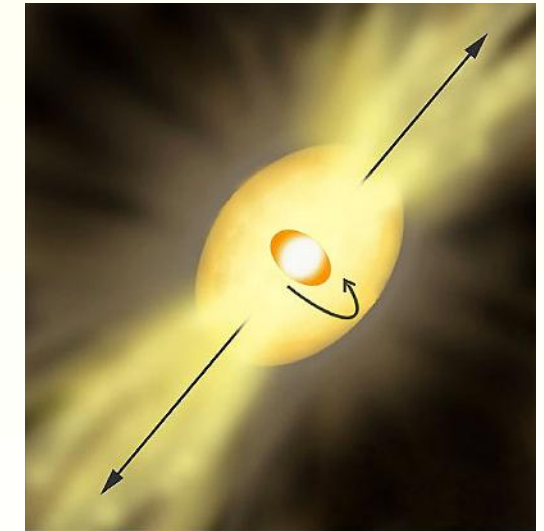
- Der Leuchtkräftige Blaue Veränderliche η Car verlor während eines gigantischen Ausbruchs um 1840 innerhalb von 20 Jahre etwa $10 M_{\odot}$, also $0.5 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$. Dabei entstand der Homunkulus-Nebel
- Die für den Ausbruch notwendige Energieleistung übersteigt die Eddingtonleuchtkraft bei weitem
- Gegenwärtig ist der Massenverlust immer noch etwa $\dot{M} \approx 10^{-3} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$. Die eigenartige Konzentration des Windes über den stellaren Polen ist eine Folge der schnellen Rotation



HST-Bild



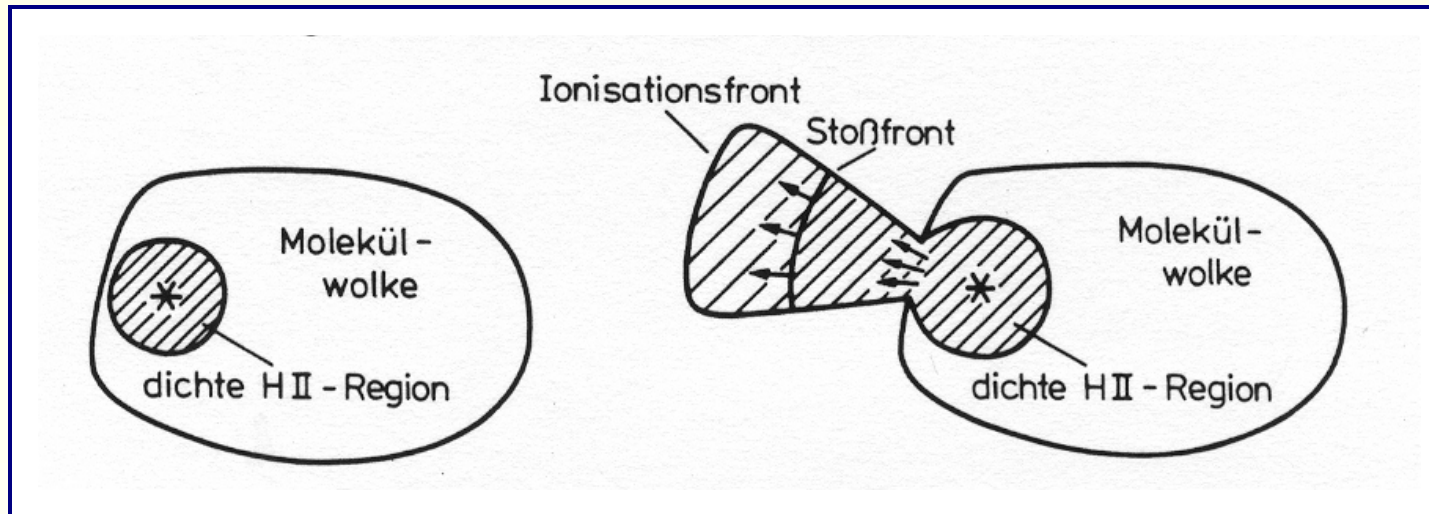
ESO-VLT-Bild im Infrarot



ESO-Press release 31/03

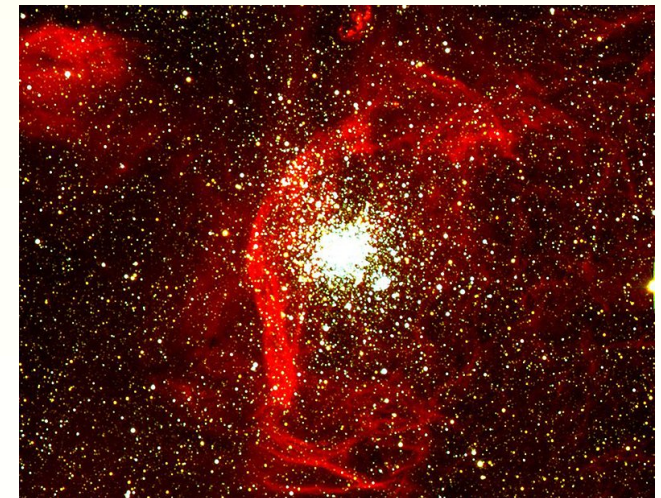
Wechselwirkung mit dem interstellaren Medium

- Winde können aus dichteren Umgebungen im Champagnereffekt ausbrechen



Aus: Scheffler, Elsässer: *Bau und Physik der Galaxis*

- Die Schockfronten der Winde stoßen selbst wieder Sternentstehung an (sequential star formation), und können so auch lawinenartige Sternentstehung auslösen, die Starbursts



ESO-VLT

Literatur und Quellen

● Bücher und Artikel

- Lamers & Cassinelli, “Introduction to Stellar Winds”, 1999 Cambridge Univ. Press, ISBN 0 521 59565 7
- De Greve, Blomme, Hensberge (Hrsg.), 1997, “Stellar Atmospheres: Theory and Observations”, Springer, Lecture Notes in Physics 497, ISBN 3 540 63477 0
- Owocki, “Radiatively Driven Stellar Winds from Hot Stars” in der *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics* (auch online, http://www.bartol.udel.edu/~owocki/preprints/encyc_hsw.pdf)

● Online-Material

- <http://www.peripatus.gen.nz/Astronomy/SteWin.html> und links
- <http://www.usm.uni-muenchen.de/people/puls/Puls.html>
- <http://www.lsw.uni-heidelberg.de/triviniu/vorlesung>

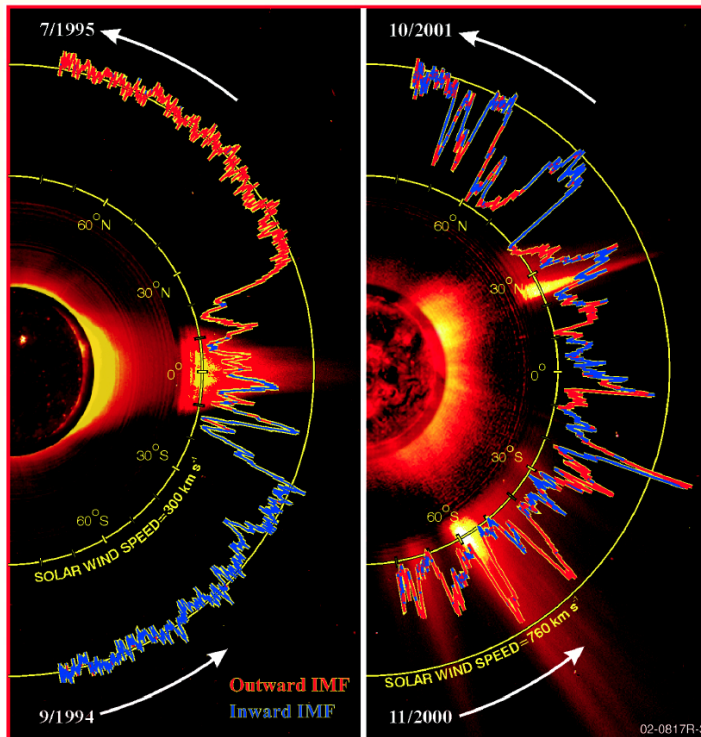
● Originalliteratur ist oft frei erhältlich beim Astrophysical Data System ADS:

- http://esoads.eso.org/abstract_service.html (und Mirror-Sites)

Typen von Sternwinden: Koronawinde I

- Der Sonnenwind ist ein koronarer Wind, engl. auch *pressure driven wind*
 - Im wesentlichen der Versuch der Sonne, ein hydrostatisches Gleichgewicht zu erreichen
 - Typische Geschwindigkeiten um 400 bis 800 km s^{-1} abhängig vom Magnetfeld, bei einer Massenverlustrate um $10^{-14} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$

Im Fleckenminimum...

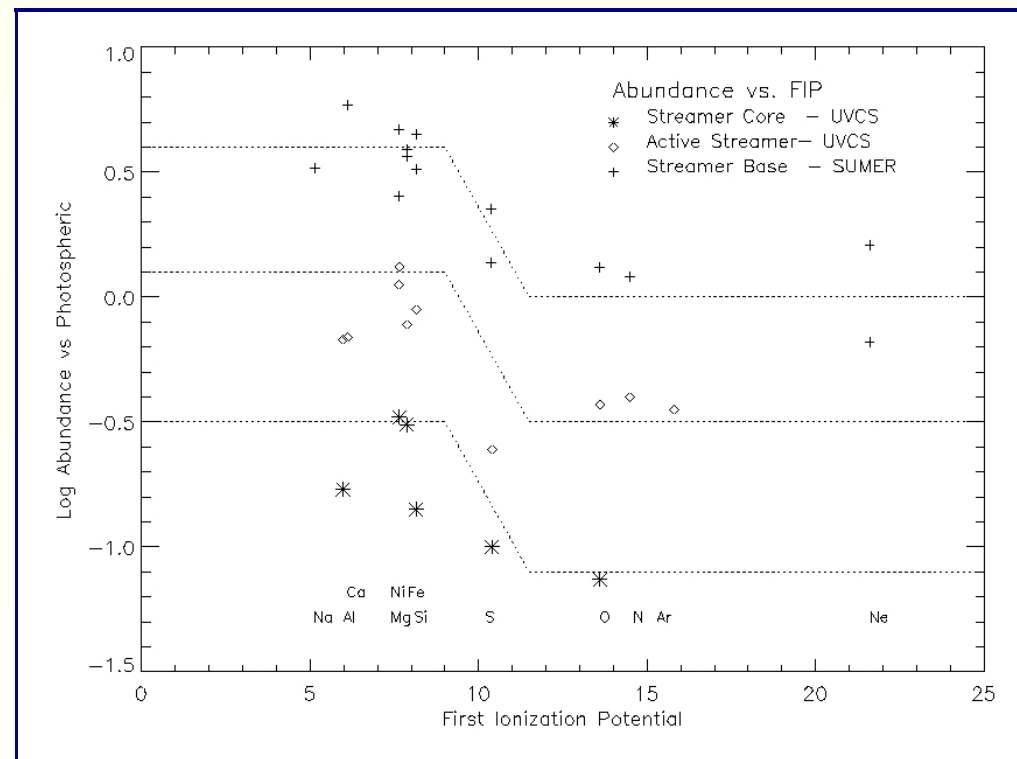


...und Maximum

Ulysses-Daten, Southwest Research Institute

Typen von Sternwinden: Koronawinde II

- Typische Röntgenemission bei Hauptreihensternen vom Typ A7 und später, bei entwickelten Sternen bei etwas späteren Typen. Bei größerer Leuchtkraft Übergang zu pulsations- und staubgetriebenen Winden, bei heißere Sternen keine Koronae
- Die Winde sind fraktioniert, d.h. ihre chemische Zusammensetzung unterscheidet sich von der der Photosphäre. Elemente mit niedrigem Ionisationspotential ($\lesssim 10$ eV First Ionization Potential, FIP-Effekt) sind bis zu 6-fach angereichert



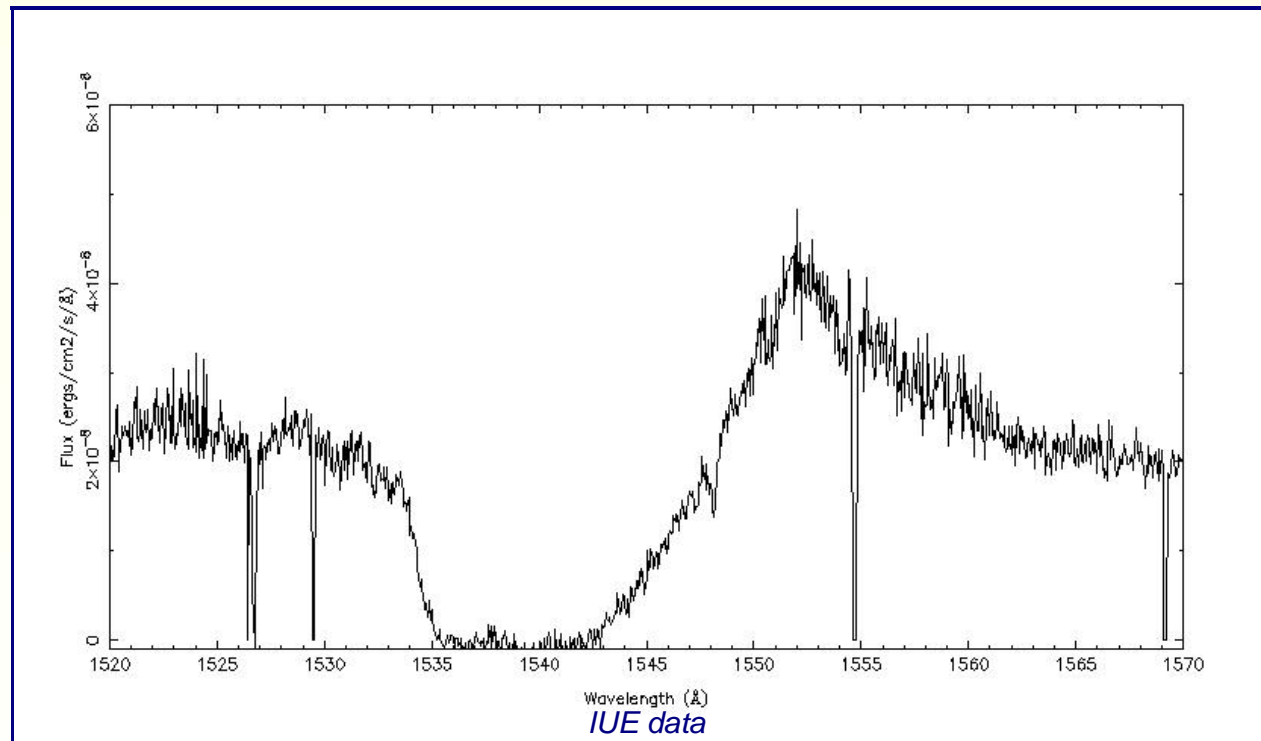
von soi.stanford.edu

Typen von Sternwinden: Strahlungsgetriebene Winde I

- Winde heißer Sterne, der Spektraltypen O, B und A aller Leuchtkraftklassen, sowie möglicherweise noch frühe F-Überriesen
- Außerdem noch entwickelte Objekte wie Wolf-Rayet-Sterne, heiße Unterzwerge und die Zentralsterne planetarischer Nebel in frühen Stadien
 - Strahlung des Sterns im ultravioletten Bereich des Spektrums überträgt Impuls in das Gas durch Streuung in spektralen Resonanzlinien und treibt dadurch den Wind an (engl. *line driven wind*)
 - Beschleunigung wirkt nur selektiv auf Ionen einzelner Spezies; die reißen das umgebende Gas durch Kollisionen mit, die chemische Zusammensetzung des Windes ist die der Photosphäre
 - Die Winde erreichen einige tausend km s^{-1} in O und Wolf-Rayet-Sternen, und einige hundert km s^{-1} in B-Überriesen wie P Cygni
 - Massenverlustraten reichen von $10^{-8} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ bei Hauptreihensternen bis zu $10^{-4} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ bei Überriesen und Wolf-Rayet-Sternen

Typen von Sternwinden: Strahlungsgetriebene Winde II

- Physik dieser Winde ist vergleichsweise gut verstanden
- P Cygni Profil charakteristisch für Winde, besonders im UV-Bereich
- Winde sind intrinsisch instabil, es bilden sich von selbst Inhomogenitäten

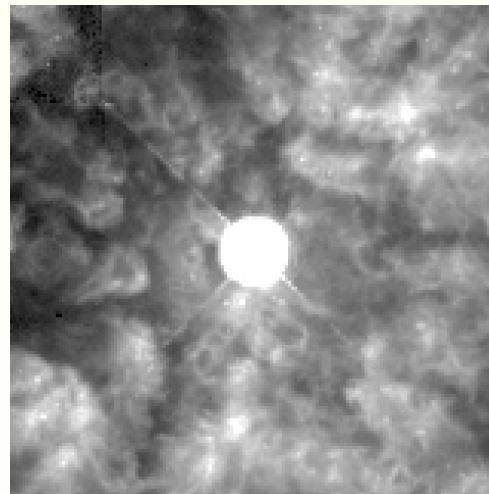


Typen von Sternwinden: Strahlungsgetriebene Winde III

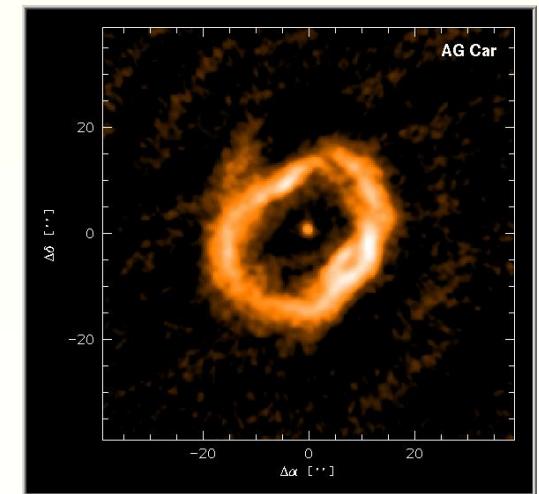
- Helle und leuchtkräftige Sterne, beobachterisch leicht zugänglich und daher gut untersucht
 - Massenverlustrate ist proportional zur Leuchtkraft
 - Heiße Überriesen als Einzelsterne auch gut in Nachbargalaxien beobachtbar, eignen sich daher zur Entfernungsbestimmung als Standardkerzen.
 - In den massiven Winden von Wolf-Rayet-Sternen muß jedes Photon sogar mehrfach streuen, um den beobachteten Wind anzutreiben
 - In den Super-Eddingtonphasen wie z.B. bei η Car wirkt der Strahlungsdruck möglicherweise sogar auf das Kontinuum



NGC 6888 um den Wolf-Rayet-Stern WR 136



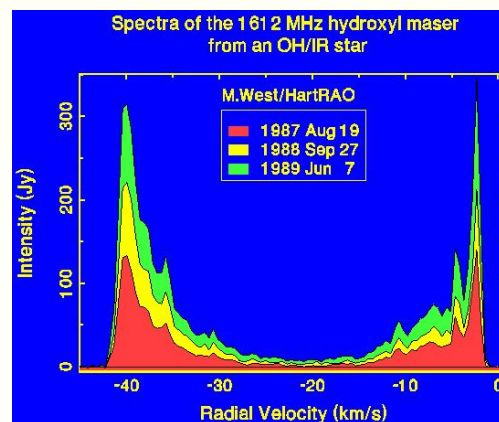
Strukturdetail im Wind um WR 124



Nebel um den LBV AG Car

Typen von Sternwinden: Staub- und Pulsationsgrieebene Winde I

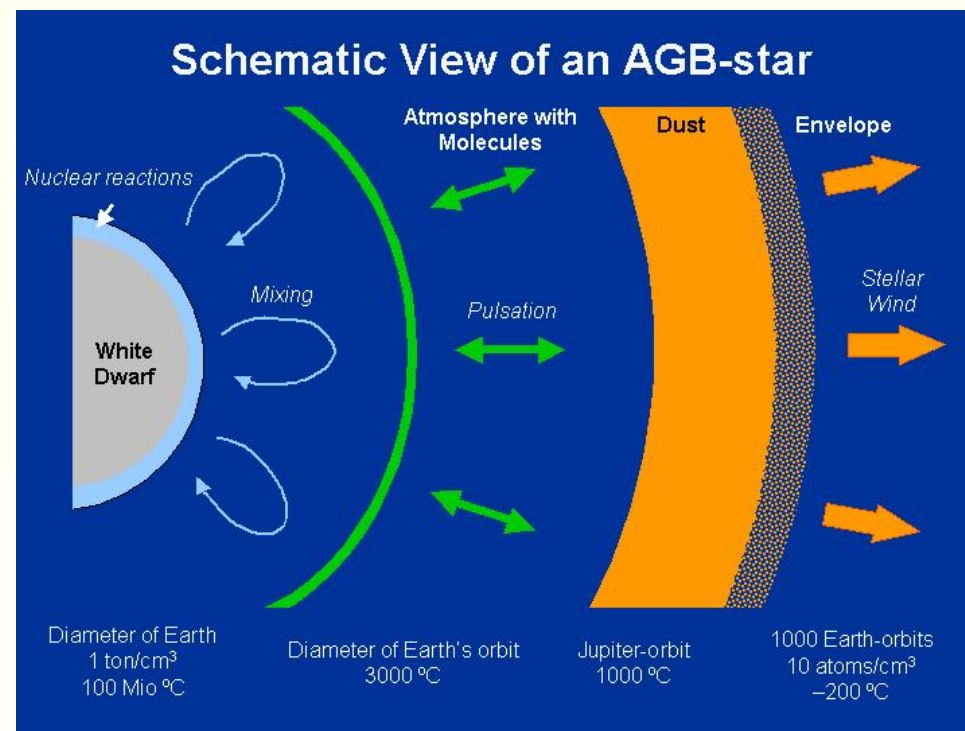
- Entwickelte kühle Sterne im asymptotischen Riesenast (AGB-Sterne) verlieren ihre äußeren Schichten
 - Das Licht des Sterns wird an Staubkörnern gestreut, die sich in der Umgebung des Sterns aus dem Material der Photosphäre (engl. *dust*, bzw. *continuum driven wind*)
 - Ähnlich wie bei den heißen Sternen reissen auch die Staubkörner den Rest des Gases durch Kollisionen mit sich, so dass der Elementgehalt photosphärisch ist, aber teilweise in chemisch gebundener Form
 - Die Winde sind langsam, nur einige zehn km s^{-1} , können aber massiv sein mit bis zu $\dot{M} \approx 10^{-4} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$. Maser-Emission kommt in charakteristischer Form vor



von www.hartrao.ac.za

Typen von Sternwinden: Staub- und Pulsationsgriechene Winde II

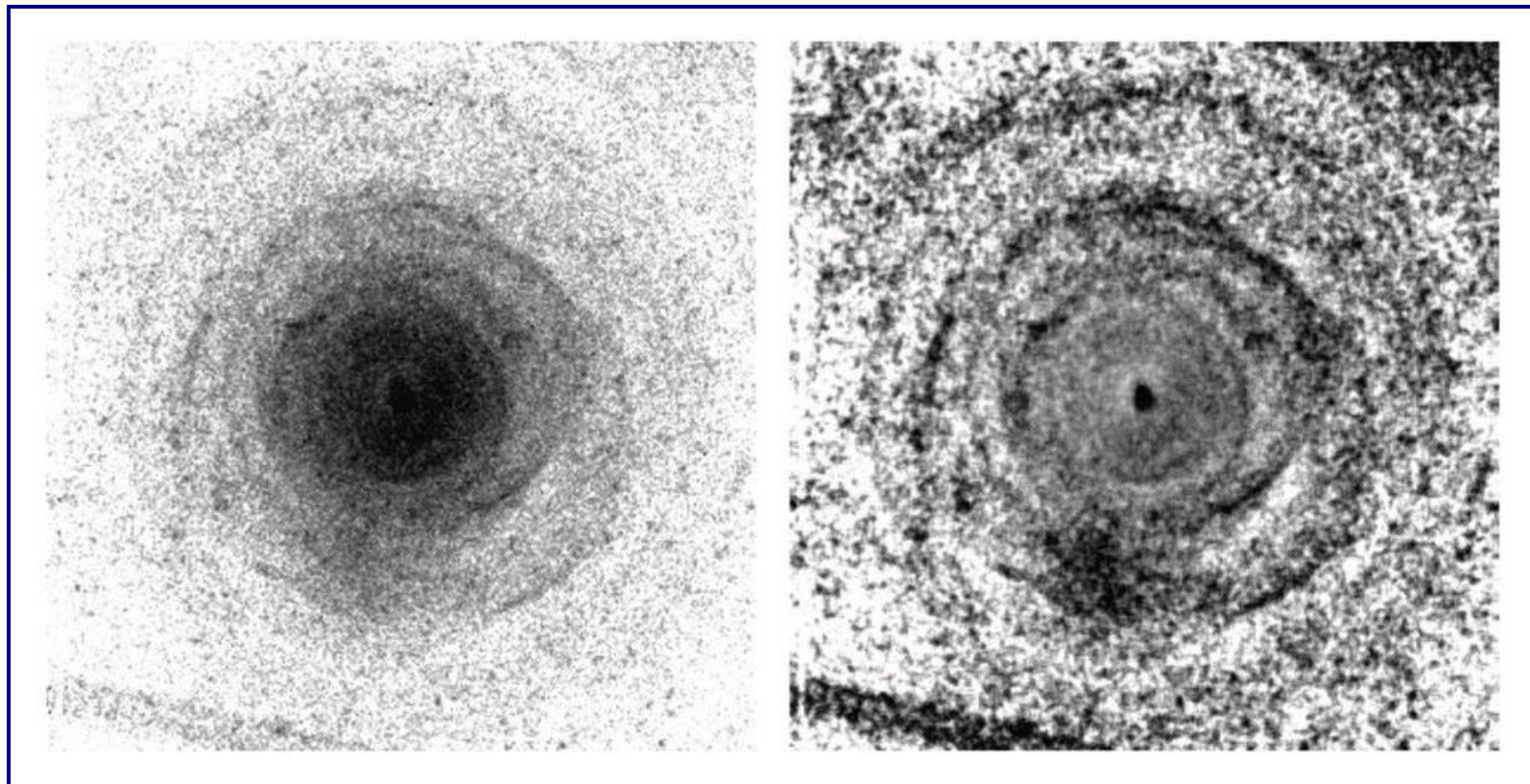
- Bildung von Staub in statischer Photosphäre nur mit geringer Rate
 - Ob Staub produziert wird, hängt von der Temperatur und dem Strahlungsfeld (UV-Anteil) ab. Pulsation ist entscheidend dafür, wieviel Staub produziert wird, da sie die Dichte im Staubentstehungsgebiet steuert
 - Ohne Pulsation wären die Massenverlustraten um Größenordnungen kleiner



von www.astro.univie.ac.at

Typen von Sternwinden: Staub- und Pulsationsgrieebene Winde III

- Der Wind bildet einen planetarischen Nebel, der Stern bleibt am Ende als weißer Zwerg zurück
- Einzelne Schalen durch Phasen größeren Massenverlustes deutlich zu sehen



Aus Mauron & Huggins, 1999, Astronomy and Astrophysics 349, 203

Zusammenfassung: Typen von Sternwinden

• Koronarer Sonnenwind

- Endgeschwindigkeiten um $v_\infty \approx 400 - 800 \text{ km s}^{-1} \approx v_{\text{esc}}$
- Geringer Massenverlust: $\dot{M} \approx 10^{-14} M_\odot \text{ yr}^{-1} \ll 1 M_\odot / t_{\text{evol}}$
- Wichtig für die Erde selbst und die Astrophysik als Prototyp eines Sternwindes

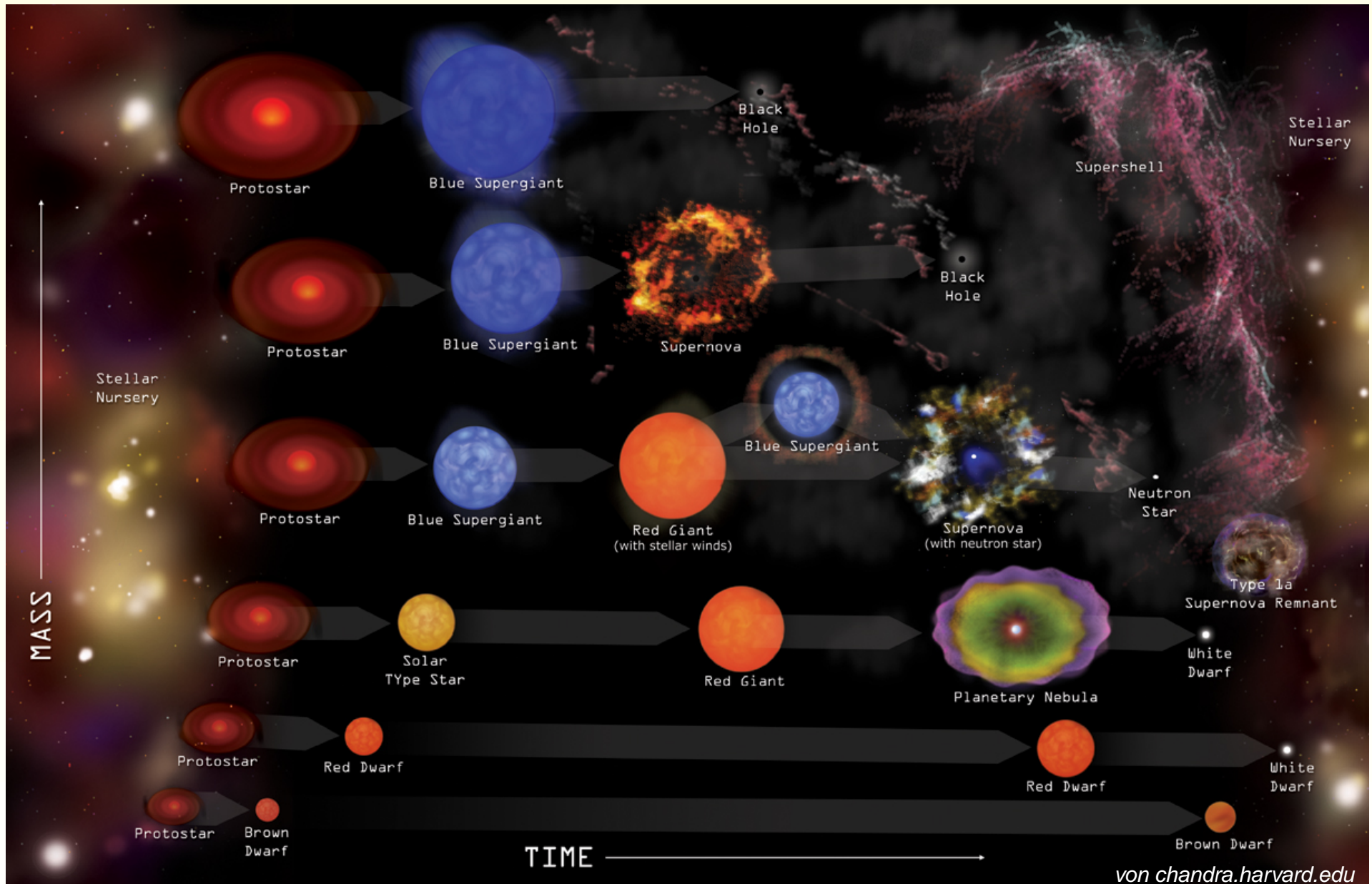
• Winde heißer Sterne

- $v_\infty \approx \sim 2 \dots 3 v_{\text{esc}} = 1000 - 3000 \text{ km s}^{-1}$, $\dot{M} = 10^{-8} \dots 10^{-4} M_\odot \text{ yr}^{-1}$
- Entwicklungswege dieser Sterne kritisch von \dot{M} abhängig, in extremen Phasen auch $\dot{M} \approx 10^{-1 \dots 0} M_\odot \text{ yr}^{-1}$

• Winde kühler Sterne

- $v_\infty \ll v_{\text{esc}} = 20 - 60 \text{ km s}^{-1}$, $\dot{M} = 10^{-8} \dots 10^{-4} M_\odot \text{ yr}^{-1}$
- Sterne mit $M_\star \lesssim 8 M_\odot$ zu Beginn werden dennoch weiße Zwerge mit $M_\star < 1 M_\odot$
 - ▮ verlieren bis zu $7 M_\odot$ als Wind

Entwicklungswege der Sterne und Winde



Was treibt einen Sternwind an?

- Dauernder Materiefluß aus den äußeren Schichten des Sterns
 - Masse entweicht aus dem stellaren Gravitationsfeld
 - Versorgt interstellares Medium mit Masse, Impuls, Energie (und trägt damit zur Bildung neuer Sterne bei)
- **Kernfragen für das theoretische Verständnis:**
 - Welche Kraft überwindet die Gravitation des Sterns und treibt den Wind an?
 - Was ist die Energiequelle für die notwendige potentielle und kinetische Energie?

Grundgleichungen der Kraft

- pro Masse, also als Beschleunigungen:

1. Gravitation

$$a_{\text{grav}} = \frac{GM_{\star}}{r^2}$$

2. Gradient des Gasdrucks

$$a_{\text{press}} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr}$$

3. Beschleunigung des Windes

$$a_{\text{inert}} = -\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{dv}{dr}$$

4. Treibende Kraft

$$a_{\text{x}} = ?$$

- Möglichkeiten: Strahlungsdruck, Druck durch Pulsation, Schall oder magnetisches Feld...

Grundgleichungen der Energie

- wiederum geteilt durch die Masse und in Einheiten der dazugehörenden Geschwindigkeiten:

1. Flucht aus dem Gravitationsfeld

$$\frac{E_{\text{grav}}}{m} = -\frac{GM_{\star}}{R_{\star}} \equiv -\frac{v_{\text{esc}}^2}{2}$$

2. Energie des Gases

$$\frac{E_{\text{press}}}{m} = -\frac{1}{\gamma - 1} \frac{P}{\rho} = \frac{3}{2} v_{\text{son}}^2$$

3. kinetische Energie

$$\frac{E_{\text{kin}}}{m} = \frac{v^2}{2} \rightarrow \frac{v_{\infty}^2}{2}$$

4. Energiequelle

$$E_{\text{x}} = Q_{\text{x}} + W_{\text{x}}$$

Heizung Arbeit

Hydrostatische, planare, isotherme Atmosphäre

Hydrostatisches Gleichgewicht: $0 = -a_{\text{grav}} - \frac{v_{\text{son}}^2}{P} \frac{dP}{dz}$ $a_{\text{grav}} \approx \frac{GM_{\star}}{R_{\star}^2} \approx \text{const.}$

$$z \equiv r - R_{\star}$$

Skalierung der Höhenstruktur: $\frac{P(z)}{P_0} = e^{-z/H}$

Skalenhöhe: $H = \frac{v_{\text{son}}^2}{a_{\text{grav}}} = \frac{v_{\text{son}}^2 R_{\star}^2}{GM_{\star}} = \frac{2v_{\text{son}}^2}{v_{\text{esc}}^2} R_{\star} \leq 0.001 R_{\star}$

Z.B. Sonnenphotosphäre: $v_{\text{son}} \approx 10 \text{ km s}^{-1} \ll v_{\text{esc}} = 620 \text{ km s}^{-1}$

$$H \approx 300 \text{ km} \ll R_{\odot} \approx 700\,000 \text{ km}$$

Hydrodynamische Gleichungen

Massenerhaltung:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} = 0$$

Impuls:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = \frac{GM_{\star}}{r^2} \hat{r} - \frac{\nabla P}{\rho} + \vec{a}_x$$

Innere Energie:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot e\vec{v} = -P\nabla \cdot \vec{v} - \nabla \cdot \vec{F}_{\text{cond}} + Q_x$$

Ideales Gas:

$$P = \rho v_{\text{son}}^2 = (\gamma - 1)e$$

Wärmeleitung:

$$\vec{F}_{\text{cond}} = K_0 T^{5/2} \nabla T$$

Stetig-sphärische Expansion

Massenverlustrate: $\frac{d(\rho v r^2)}{dr} = 0; \quad \dot{M} \equiv 4\pi r^2 \rho v = \text{const.}$

Impuls: $v \frac{dv}{dr} = -\frac{GM_\star}{r^2} - \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} + a_x$

Gesamtenergie für den Wind
 → “mechanische Leuchtkraft”:

$$\Delta \dot{E} = \dot{M} \left(\underbrace{\frac{v^2}{2}}_{\text{kinetisch}} + \underbrace{\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P}{\rho}}_{\text{innere}} - \underbrace{\frac{GM_\star}{r}}_{\text{gravit.}} \right)_{r_0}^r$$

$$= \int_{r_0}^r (\underbrace{\dot{M} a_x}_{\text{Arbeit}} + \underbrace{4\pi Q_x r'^2}_{\text{Heizung}}) dr' - \underbrace{(r'^2 F_{\text{cond}})_{r_0}^r}_{\text{Wärmeleitung}}$$

Notwendige Energie für den Wind

Schallgeschwindigkeit:

$$v_{\text{son}}^2 \equiv \frac{P}{\rho}$$

Fluchtgeschwindigkeit:

$$v_{\text{esc}}^2 \equiv \frac{2GM_{\star}}{r}$$

$$\frac{\Delta \dot{E}}{\dot{M}} = \left(\frac{v_{\infty}^2}{2} + \frac{\gamma v_{\text{son},\infty}^2}{\gamma - 1} \right) - \left(\frac{v_0^2}{2} + \frac{\gamma v_{\text{son},0}^2}{\gamma - 1} - \frac{v_{\text{esc},0}^2}{2} \right)$$

$$\approx \underbrace{\frac{v_{\infty}^2}{2}}_{\text{kinet.}} + \underbrace{\frac{v_{\text{esc},0}^2}{2}}_{\text{grav.}} = \int_{r_0}^{\infty} \left(a_x + 4\pi r'^2 \frac{Q_x}{\dot{M}} \right) dr' + \frac{4\pi (r_0^2 F_{\text{cond},0} - r_{\infty}^2 F_{\text{cond},\infty})}{\dot{M}}$$

kinet.

grav.

Arbeit

Heizung

Wärmeleitung

Benötigter Energiefluß

$$F_E \equiv \frac{\Delta \dot{E}}{4\pi R_\star^2} \approx \left(\frac{\dot{M}}{10^{-14}} \right) \left(\frac{M_\star}{M_\odot} \right) \left(\frac{R_\odot}{R_\star} \right)^3 \left(1 + \frac{v_\infty^2}{v_{\text{esc},0}^2} \right) 2.2 \times 10^4 \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2\text{s}}$$

Sonnenwind: $\dot{M} \approx 2 \times 10^{-14}$ $v_\infty \approx v_{\text{esc},0}$ $F_E \approx 1 - 5 \times 10^5 \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2\text{s}}$

$$F_\odot \equiv \frac{L_\odot}{4\pi R_\odot^2} \approx 6 \times 10^{10} \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2\text{s}}$$

Staubgetriebene Winde kühler Sterne

$$v_\infty \ll v_{\text{esc},0}$$

K5 III Stern: $\dot{M} \approx 1 \times 10^{-7}$ $M_\star \approx 16M_\odot$ $R_\star \approx 400R_\odot$ $F_E \approx 6 \times 10^4 \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2\text{s}}$

Mira: $\dot{M} \approx 2 \times 10^{-6}$ $M_\star \approx 1M_\odot$ $R_\star \approx 400R_\odot$ $F_E \approx 5 \times 10^4 \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2\text{s}}$

Strahlungsgetriebene Winde heißer Sterne

$$v_\infty \approx v_{\text{esc},0}$$

B1 Ia⁺ Stern: $\dot{M} \approx 7 \times 10^{-6}$ $M_\star \approx 30M_\odot$ $R_\star \approx 100R_\odot$ $F_E \approx 1 \times 10^9 \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2\text{s}}$

Inhalt I

• Der Sonnenwind

- Theorie: isotherme Parkersche Lösung, hydrostatische Schichtung der Sonnenatmosphäre, Skalenhöhen, Übergang in den Überschallbereich des Windes, Heizung der Korona
- Beobachtungen: Sondendaten z.B. von Ulysses und SOHO, Temperatur der Korona

• Winde heißer Sterne

- Beobachtungen: Ultraviolett und visuell: P Cygni-Profile von der Hauptreihe bis zu LBVs und Wolf-Rayet-Winden, Bestimmung von Massenverlustraten, Infrarotexzess, Variabilität: “Shells”, “Blobs”, “DACs”, und “Bananas”, Bistabilität der Endgeschwindigkeit
- Theorie: Sobolev-Näherung, CAK-Theorie des stetigen Windes, Instabilität des Winds und Propagation von Störungen, Wind-Leuchtkraft-Beziehung, Multiple scattering, Eddington-Limit und Super-Eddington Winde

Inhalt II

- **Winde kühler Sterne**

- Beobachtungen: OH-Maser, Infrarot- und Radioemission, Chemische Zusammensetzung des Staubes
- Theorie: Temperatur und Opazität, Modelle der Staubbildung durch Pulsation, Geschwindigkeits- und Dichtestruktur

- **Sternentwicklung und Massenverlust**

- Beobachtungen: Statistik der Wolf-Rayet-Sterne, chemische Zusammensetzung der Planetarischen Nebel und Supernovaüberreste
- Theorie: Bedeutung des Massenverlustes für den Entwicklungsweg des Sterns und die Entwicklung der Rotationsgeschwindigkeit

- **Exotische und verwandte Phänomene**

- Beobachtungen: Wind-Wind-Kollision in Doppelsternen, Jets
- Theorie: Alfvén- und Schallwellen als vorgeschlagenen Mechanismen