

X. Diffuse Materie

• Interstellare Materie

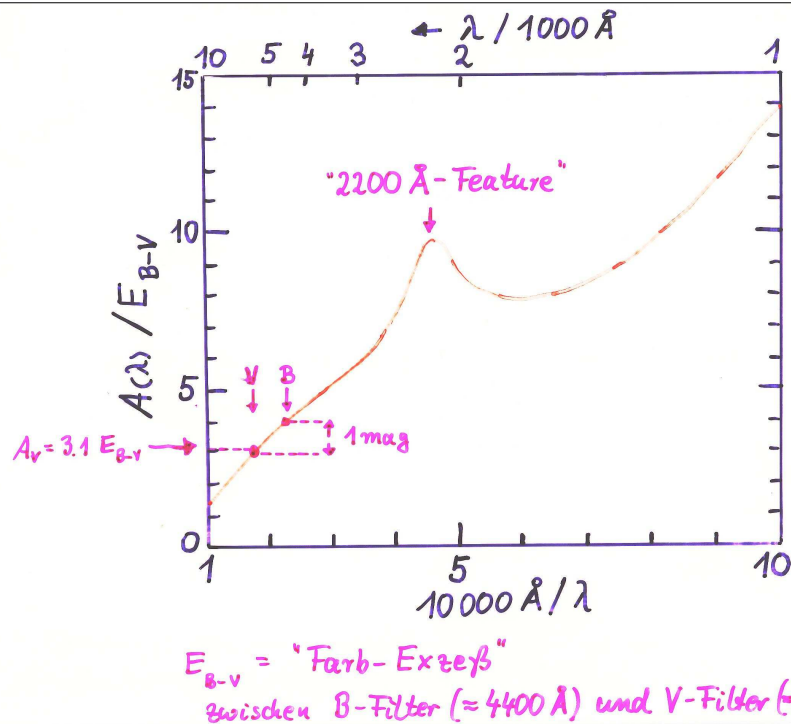
Typische Dichten (Sonnenumgebung):

Gas: 1 Atom pro cm^3
 Staub: $\ll 1$ Partikel pro m^3 > Massen $\approx 200:1$
 (d.h.: 100 pro km^3)
 ca. 10 % der Masse unserer Galaxis (unsicher!)

• Interstellare Absorption (= Extinktion)

z.B. von Sternlicht

Mittlere Extinktionskurve (z.B. nach Seaton, 1979):



Ursache der Extinktion: Staub

$$A(\lambda) \sim \lambda^{-1}$$

Theoretisch: $\sim \lambda^{-4}$ falls $\phi \ll \lambda$ (Rayleigh-Streuung)

$\sim \text{const.}$ falls $\phi \gg \lambda$

$\rightarrow \phi = 10^2 \dots 10^4 \text{ Å}$ (Zwischenbereich)
 sog. Mie-Streuung

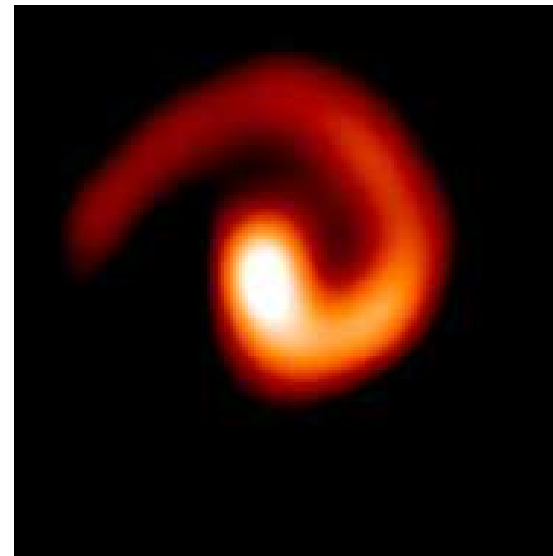
Feature bei 2200 Å: Ursache unbekannt

Beispiele:

Bereich	λ	$E_{B-V} = 0.1$ $A(\lambda)$	Faktor*	$E_{B-V} = 1$ $A(\lambda)$	Faktor*	$E_{B-V} = 10$ $A(\lambda)$	Faktor*
UV	1200 Å	1	2.5	10	10^4	100	10^{40}
	2200 Å						
visuell	5500 Å	0.31	1.3	3.1	17	31	$2.5 \cdot 10^{11}$
IR	10 μ	0.14	1.1	1.4	3.6	14	$4 \cdot 10^5$
Radio	20 cm	$0.7 \cdot 10^{-5}$	1	$0.7 \cdot 10^{-4}$	1	$0.7 \cdot 10^3$	1

In der Sonnenumgebung gilt grob: $E_{B-V} \approx 0.1 \text{ mag pro } 1000 \text{ pc}$

Beispiel: Staubbildung durch kollidierende Sternwinde



Die meisten (?) massereichen Sterne stehen in engen Systemen (Umlaufzeiten von einigen Tagen)

Abb.: WR 104

Spinnrad ("pinwheel")

- Doppelstern: WC + B0
- IR-Emission (Staub)
- Doppelstern: WC + B0
- Spinnradmuster
- Spinnradmuster rotiert in 220 Tagen

Säulendichte des interstellaren Gases

n_s [Atome pro cm^2 auf dem Sehstrahl]

Korrelation mit Staub $\rightarrow$

bei $E_{B-V} = 1 \text{ mag} \rightarrow n_s \approx 4 \dots 6 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ Wasserstoff

Vergleiche oben: $E_{B-V} = 1 \text{ mag}$ entspricht $d \approx 10^4 \text{ pc} \Rightarrow 3 \cdot 10^{22} \text{ cm}$

$\rightarrow$ Anzahldichte $n = n_s / d \approx 0.2 \text{ Atome / cm}^3$

Wasserstoff: Interstellare Linien: Lyman-Serie (UV!)

• Lyman-Kontinuum:

Querschnitt an der Kante: $\sigma_m = 8 \cdot 10^{-18} \text{ cm}^2$

Opt. Tiefe $\tau = \kappa \cdot d = n \cdot \sigma_m \cdot d$

d.h. $\tau = 1$ schon bei $d = 6 \cdot 10^{13} \text{ cm} \approx 0.2 \text{ pc}$

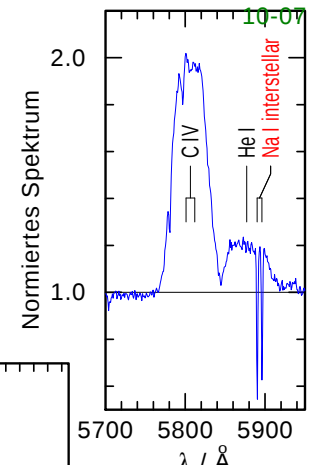
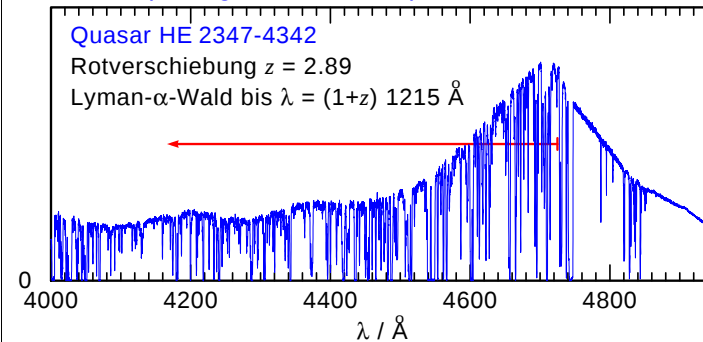
$\Rightarrow$ an der Lyman-Kante (und den Ly-Linien) ist der interstellare Raum (fast) undurchsichtig!

Interstellare Absorptionslinien

Abb. rechts: Interstellares Na I-Dublett im Spektrum eines Wolf-Rayet-Sterns (WR7) mit $E_{B-V} = 0.56 \text{ mag}$

Intergalaktisches Medium

- Extrem dünnes, *ionisiertes* Medium zwischen den Galaxien ($\sim 10^{-4}$ Atome pro cm^3)
- Enthält fast die Hälfte aller baryonischen Materie (heutiges Universum)



Im Licht weit entfernter Quellen: Ly α -Linie von neutralem H (Galaxien) bei verschiedenen z

Weitere interstellare Linien

- neutrale Atome z.B. Na I: Na D-Dublett
- Moleküle z.B. CN, CH ...
- ionisierte Atome z.B. Ca⁺

auch hohe Ionen bis C IV, N V, O VI, besonders auf intergalaktischen Sehstrahlen!

Linien stets sehr scharf; bei höchster spektraler Auflösung "Wald" mit verschiedenen Doppler-Verschiebungen $\rightarrow$ "Wolken" mit verschiedenen Radialgeschwindigkeiten (Galaktische Rotation + peculiäre Bewegung)

Interstellare Emission:

21cm-Linie des neutralen Wasserstoffs

- Hyperfeinstruktur-Übergang (Spin Kern/Elektron)
- hochgradig verboten: Lebensdauer $A_{\text{H I}}^{-1} = 10^7 \text{ Jahre!}$
- Bevölkert durch Stöße (Frequenz $\approx 100 \text{ Jahre}$)
- $\sim$ nur Doppler-Verbreiterung
- fast die gesamte Galaxis (bis auf den Kern) optisch dünn

Emissionslinien von H II-Gebieten

- Heizung ($T \approx 10^4 \text{ K}$) durch UV-Photonen heißer Sterne $\rightarrow$ Ionisation des Wasserstoffs
- Rekombinationskaskade $\rightarrow$ Wasserstoff-Linien
- Stoßanregung metastabiler Niveaus von O II, O III, N II ...
 $\rightarrow$ "verbotene Linien" z.B. [O III] 4958.9/5006.8 Å ("Nebulium")

Komponenten der Interstellaren Materie (ISM):

Dunkelwolken

sichtbar z.B. vor dem Hintergrund der Milchstraße
(→ "Pferdekopfnebel", "Kohlensack", ...)

→ Extinktion durch Staub

auch erhöhte H-Dichte (21 cm - Emission)

Massen $10^1 \dots 10^4 M_\odot$, $T_{\text{Staub}} \approx 10 - 20 \text{ K}$

"Reflexionsnebel" (z.B. in Plejaden)

- Streuung des Lichts benachbarter Sterne
- Struktur + Polarisation: Ausrichtung länglicher Staub-Partikel in Magnetfeldern

Molekülwolken

Beobachtung: Radio-Emissionslinien (auch Maser!)
von unzähligen anorganischen (z.B. H_2O , NH_3 , ...) und organischen (z.B. Äthylalkohol!!) Molekülen

$T \approx 100 \text{ K}$, $M \leq 10^6 M_\odot$, $\rho \approx 10^2 \dots 10^3 m_H / \text{cm}^3$

HI-Gebiete

~ 90% der ISM; 21 cm - Emission; $T \approx 100 \text{ K}$

Ursache der meisten interstellaren Absorptionslinien

H II - Gebiete

= Emissionsnebel (siehe oben), angeregt von "heißen" Sternen

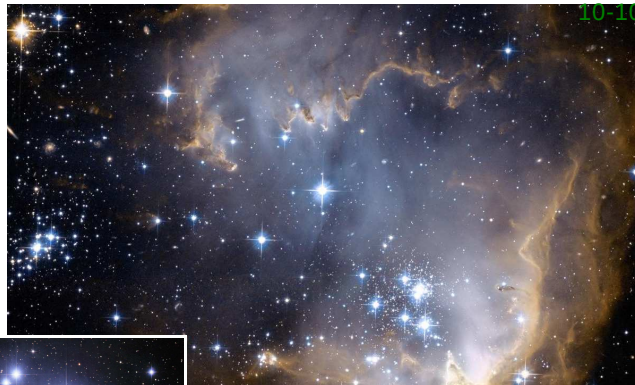
"Strömgren-Sphäre": Kugelvolumen um einen Stern, bis alle Lyman-Photonen zur H-Ionisation verbraucht sind.
z.B. um einen O5-Stern: > 100 pc Radius!

Koronales Plasma

$T \sim 10^6 \text{ K}$, $n_H = 0.01 \text{ cm}^{-3}$

Heizung durch Supernovae; Abkühlzeit > 10^7 Jahre

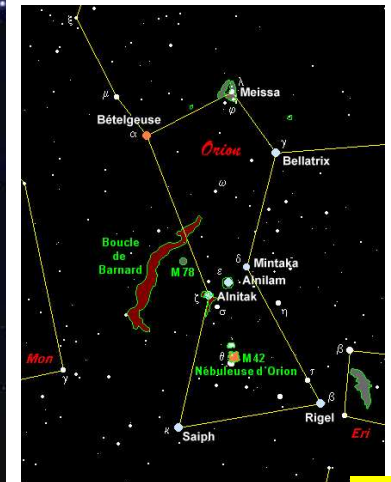
NGC 602: Haufen junger Sterne am Rande einer Molekülwolke in der Kleinen Magellanschen Wolke



Die Plejaden: offener Sternhaufen mit Reflexionsnebel

Orion-Nebel

Nahegelegenes Sternentstehungsgebiet mit komplexen Molekülwolken



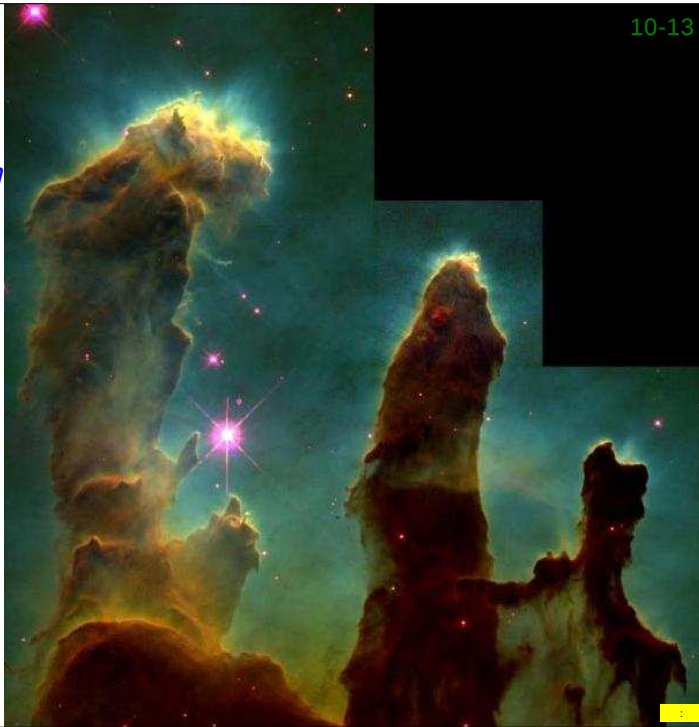
Adler-Nebel

Messier 16

Pillars of Creation
(HST)

- Sternentstehung aus kalten Wolken von Staub und Gas (Molekülwolken)

- Entfernung:
- 6000 Lichtjahre

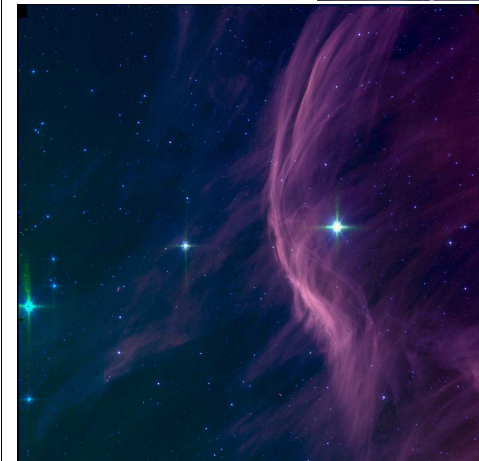


10-13

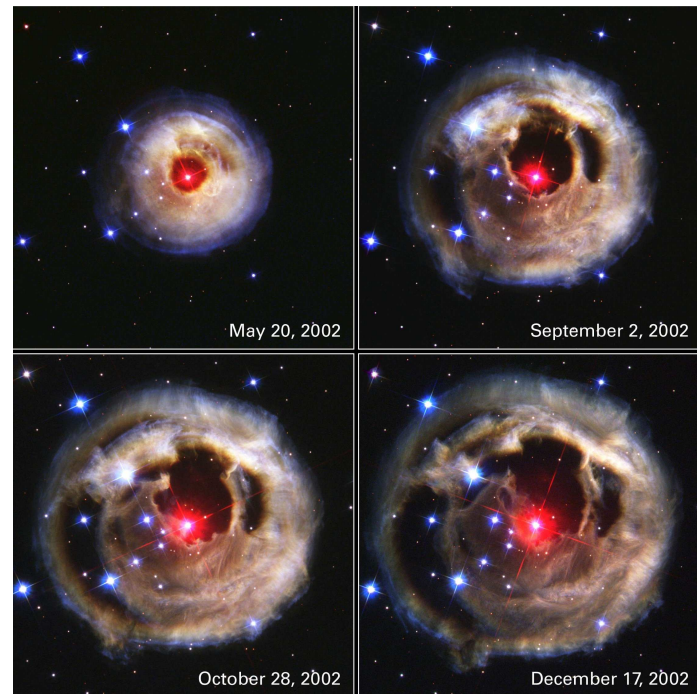
Rechts: NGC 7635
(Bubble Nebula):
Galaktische H II-
Region um heiße
Sterne



10-15



Links: ζ Ori: ein heller O-Stern
hoher Eigenbewegung, der
einen *Box shock* vor sich her
treibt (Falschfarben-Bild aus
Infrarot-Daten, L. Oskinova)



10-14

V848 Mon

Typ: K2V
Licht-Echos im
zirkumstellaren
Nebel nach
einem Ausbruch

• Zirkumstellare Materie

• Planetarische Nebel (PN) (engl.: Planetary Nebulae)

- Bezeichnung historisch
- $\approx$ hohlkugelförmige H II- Emissionsnebel
um Zentralstern (engl.: CPN = Central Star of PN)
typisch: $M = 0.6 M_{\odot}$, $T_{\text{eff}} = 30 \dots 150 \text{ kK}$ [Entwicklung s. IX.4]

- Nebel: $\phi \approx 10^4$ Astron. Einheiten (0.05 pc)

$$\begin{aligned} T &\approx 10^4 \text{ K} \\ \rho &\approx 10^6 \text{ Atome/cm}^3 \\ \text{Alter} &\approx 10^4 \text{ Jahre} \\ \text{Masse} &\approx 0.3 M_{\odot} \end{aligned}$$

- Expansion mit 20 ... 30 km/s
- Wechselwirkung mit ruhendem ISM (außen)
und "schnellem" (einige 1000 km/s) Sternwind innen
- Anzahl in der Galaxis: 50000 (geschätzt), ~ 1000 bekannt
Beispiel: Ringnebel in der Leier

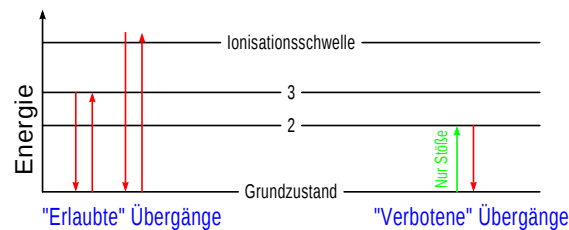
X.5

10-16

Wie funktioniert ein Planetarischer Nebel ?

10-17

- Die UV-Strahlung ($\lambda < 911 \text{ \AA}$) des Sterns wird im Nebel absorbiert
→ Aufheizung auf rund 10 000 K
- Photonen, die durch Rekombination oder Abregung in den Grundzustand entstehen, können den Nebel nicht verlassen (H-Linien und Ly-Kontinuum sind optisch dick)
- Abstrahlung ("Kühlung") nur in *verbotenen* Linien (z.B. von Sauerstoff) möglich, die (wegen sehr kleiner Oszillatorenstärke) optisch dünn sind
- Für die - ebenfalls unwahrscheinliche - Emission in solchen Linien steht wegen der geringen Dichte genügend Wartezeit zur Verfügung



- Planetarische Nebel wandeln so den Großteil der Sternstrahlung (nämlich das extreme UV) in Licht einiger charakteristischer Spektrallinien um

10-19

X.6

Kosmische Strahlung (Teilchen)

Protonen, schwere Kerne, Elektronen

Energie meist $\approx 10^9 \text{ eV}$, selten bis $10^{20} \text{ eV} \approx 10 \text{ Ws!}$

Energiedichte $\approx 10^{-12} \text{ erg/cm}^3$

entsprechend Temperatur von $\approx 3 \text{ K}$ ($u = \frac{4\sigma}{c} T^4$)

$\hat{=}$ selbe Größenordnung der Energiedichte von:

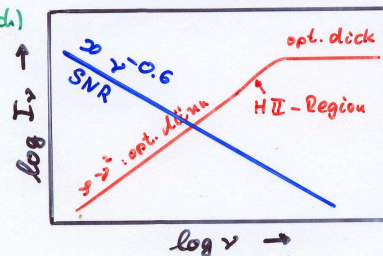
- galaktischem Magnetfeld ($10^{-5} \dots 10^{-4} \text{ gauss}$)
- gesamtem Sternlicht ("thermisch")
- kosmischer Mikrowellen-Hintergrund

10-18

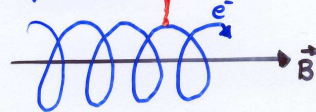
Supernova - Überreste [engl. SN remnants, SNR]

Nicht-thermisches (Radio-) Spektrum

(schematisch)



→ Synchrotron-Emission von (relativistischen) Elektronen im Magnetfeld?



- Irregulärer Typ: Pulsar als Energiequelle (relativ. Teilchen)
Beispiel: Krebs-Nebel [engl. Crab-N.] Supernova 1054 n. Chr.
- Regulärer Typ: Rest der Explosions-Bewegungsenergie
z. B. Schleier-Nebel [engl. Veil-N.]

10-20

Alter der kosmischen Teilchen $\approx 10^6$ Jahre

d.h. 1000 $\times$ Laufzeit durch die Galaxis

→ Speicherung durch das galakt. Magnetfeld!

→ Erzeugungsrate 1000 mal kleiner als therm. Strahlung

Ungefähres Druckgleichgewicht

ISM / Kosmische Strahlung / Galakt. Magnetfeld

Quelle der Kosmischen Strahlung:

elektromagnetische Beschleunigung in:

Supernova Remnants

Pulsaren

Röntgen doppelsternen

Bei höchsten Energien: keine Bindung im Galaktischen Magnetfeld → extragalaktische Quellen

(Quasare, aktive Galaxienkerne)