

Interstellare Materie

- Nebel
- Interstellares Medium
 - Staub
 - Extinktion
 - Emission
 - Gas
 - Radioastronomie
- Interplanetarer Staub
- Intergalaktisches Gas



Interstellare Nebel

- 1781 Charles Messier:
Katalog von "Nebeln"
- 1900-1920:
Identifikation mit
interstellarem
Material (nur 6 der
Messier-Nebel)



Interstellare Nebel

- Reflexionsnebel
 - Streuung von Sternenlicht

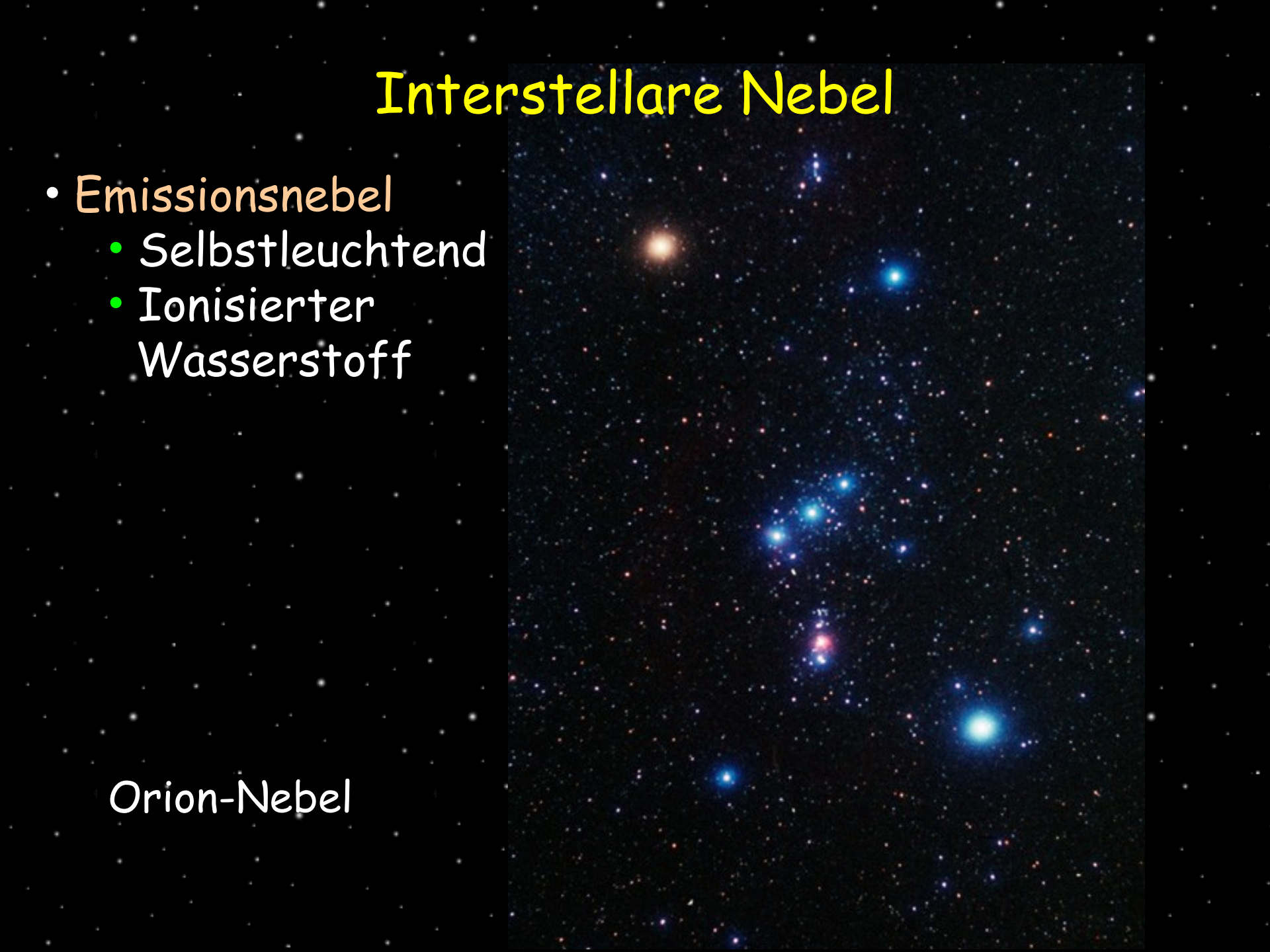


Plejaden

Interstellare Nebel

- Emissionsnebel
 - Selbstleuchtend
 - Ionisierter Wasserstoff

Orion-Nebel



Interstellare Nebel

- Emissionsnebel
 - Selbstleuchtend
 - Ionisierter Wasserstoff



Orion-Nebel

Interstellare Nebel

- Dunkelwolken



Interstellarer Staub

- Unmöglich direkt zu beobachten
- Ableitung der Eigenschaften aus 4 Beobachtungsgrößen
 - Extinktion des Sternenlichts
 - Streuung des Sternenlichts
 - Polarisation
 - Thermische Emission
- Vergleich der beobachteten Spektren mit Labordaten
 - Terrestrische Analogmaterialien

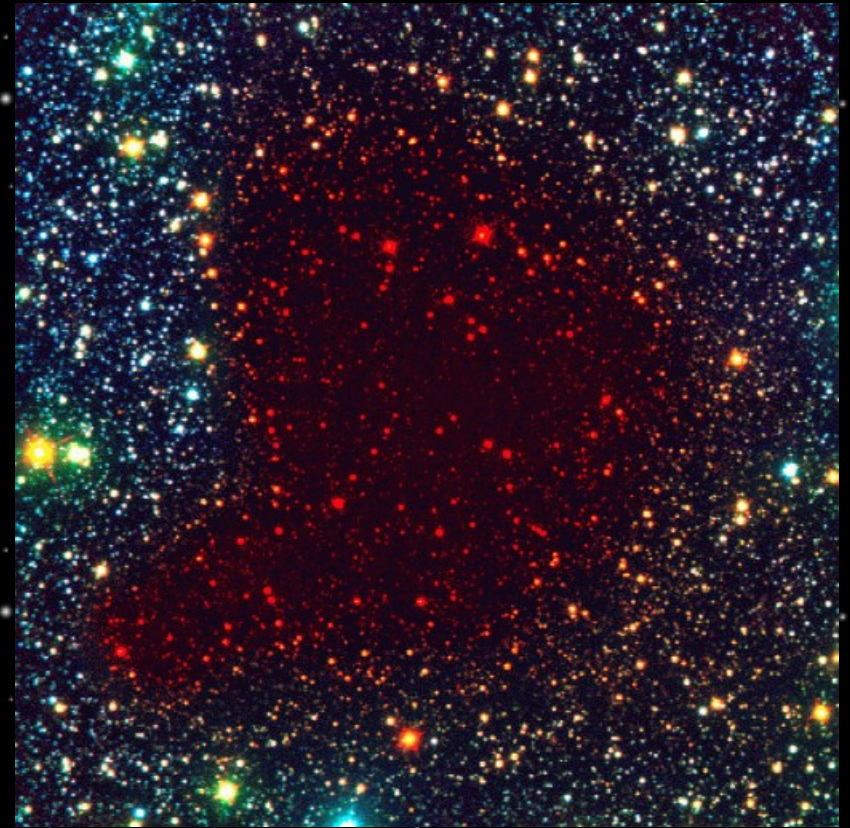


Interstellare Extinktion

- Extinktion immer gleichzeitig Verrötung



B68 Dunkelwolke: VIS



470, 870, 2200nm

Interstellare Extinktion

- Quantitative Beschreibung:

- Wellenlängenabhängige Extinktion

$$A_{\lambda} = M^{*,\lambda,observed} - M^{*,\lambda,abs}$$

- Normierung immer auf $\lambda=550\text{nm}$ (V-Filter):

A_V - visuelle Extinktion

- Verrötung:

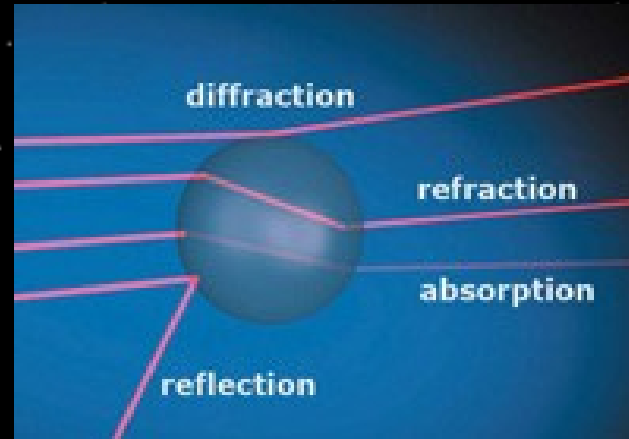
$$R = \frac{A_B - A_V}{A_V}$$

B=Blaufilter,
 $\lambda=350\text{nm}$

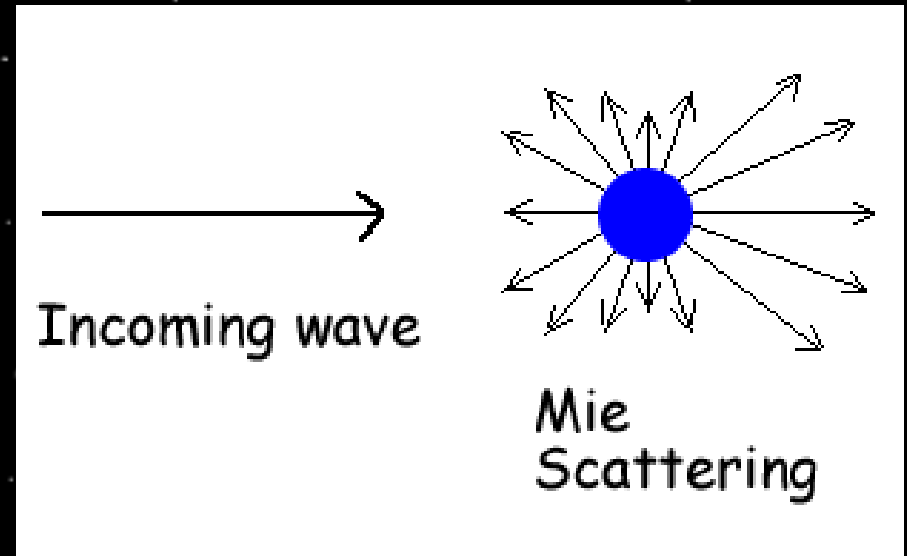
- Typischer Wert in diffusen Wolken: $R=3.1$.

Interstellare Extinktion

- Quantitative Erklärung: **Mie-Theorie**



Lichtsteuerung
= Lösung der Maxwell-
Gleichungen für Kugel
mit Brechungs- und
Absorptionsindex

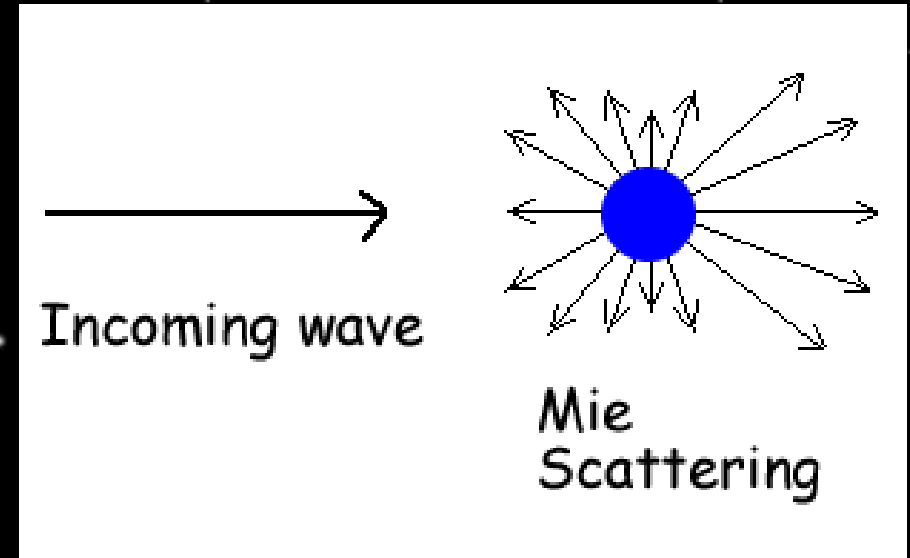


Interstellare Extinktion

- Quantitative Erklärung: **Mie-Theorie**

Teilchenquerschnitt für

- Streuung C_{sca}
- Absorption C_{abs}
- Extinktion $C_{ext} = C_{abs} + C_{sca}$
- Albedo = Streuvermögen
 $= C_{sca} / C_{ext}$



Spezialfall: Teilchen klein gegen die Wellenlänge

- Rayleigh-Streuung
 - Teilchen wirken als elektrische Dipole

Interstellare Extinktion

- Rayleigh-Streuung

$$C_{ext} = 8\pi^2 \frac{r^3}{\lambda} \operatorname{Im} \left(\frac{1 - m^2}{2 + m^2} \right)$$

$$C_{sca} = \frac{1024\pi^5}{3} \frac{r^6}{\lambda^4} \left| \frac{1 - m^2}{2 + m^2} \right|^2$$

- Eigenschaften

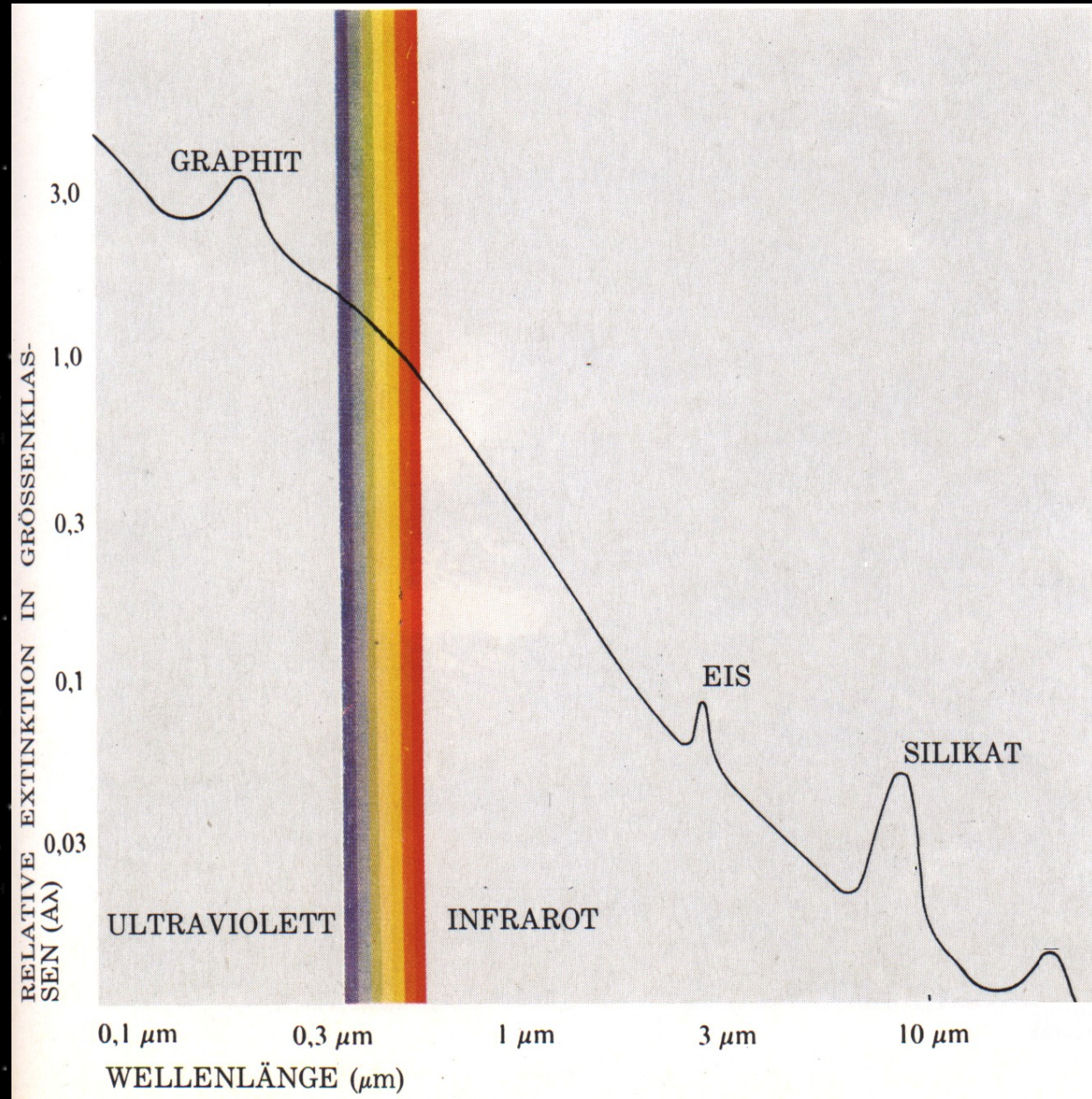
- Extinktion proportional zum Volumen



- Bei langen Wellenlängen zählt nur noch Absorption
- Himmelsblau, roter Sonnenuntergang

Interstellararer Staub

- Extinktions-
spektrum:
 - Größen-
verteilung
 - Zusammen-
setzung

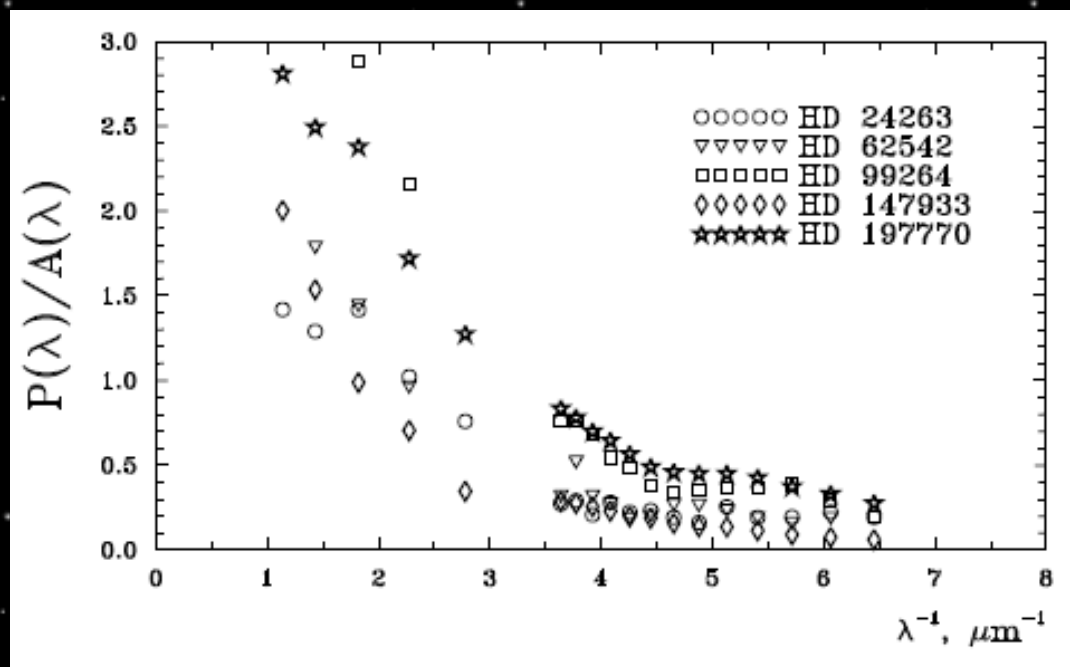


Polarisation

- Lineare Polarisation des Sternenlichtes durch "dichroitische Extinktion"
= am Magnetfeld ausgerichtete längliche Staubteilchen

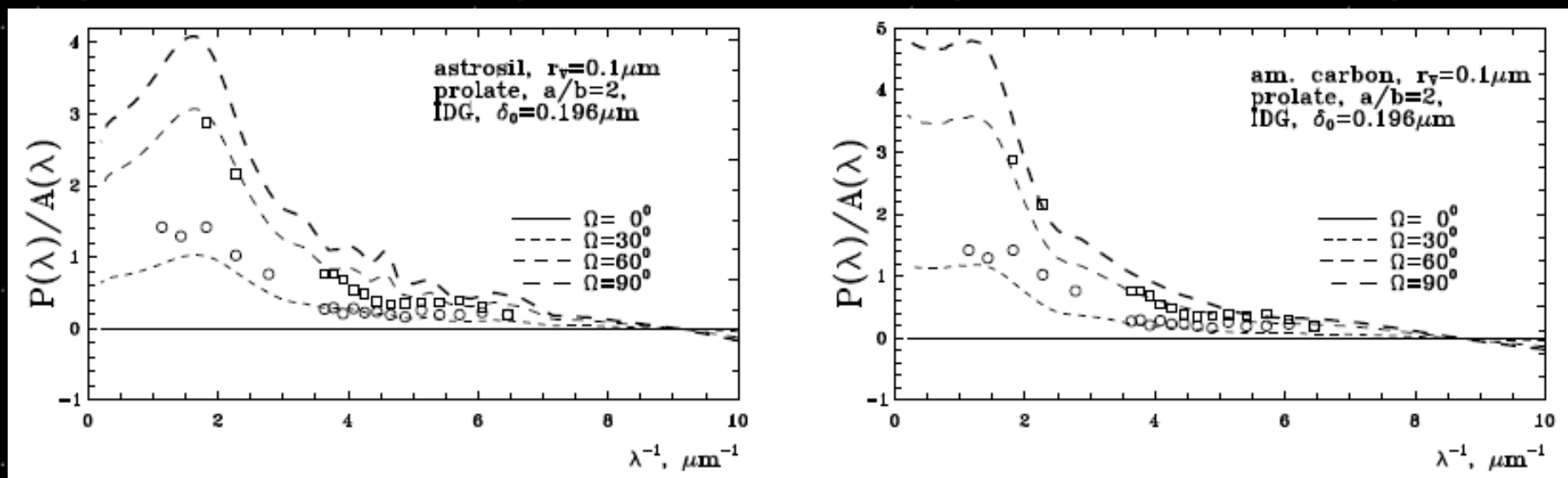
- Polarisationsgrad:
wenige Prozent

- Maximum der Polarisation bei 545nm



Polarisation

- Zusammen mit Extinktion Maß für Teilchengröße

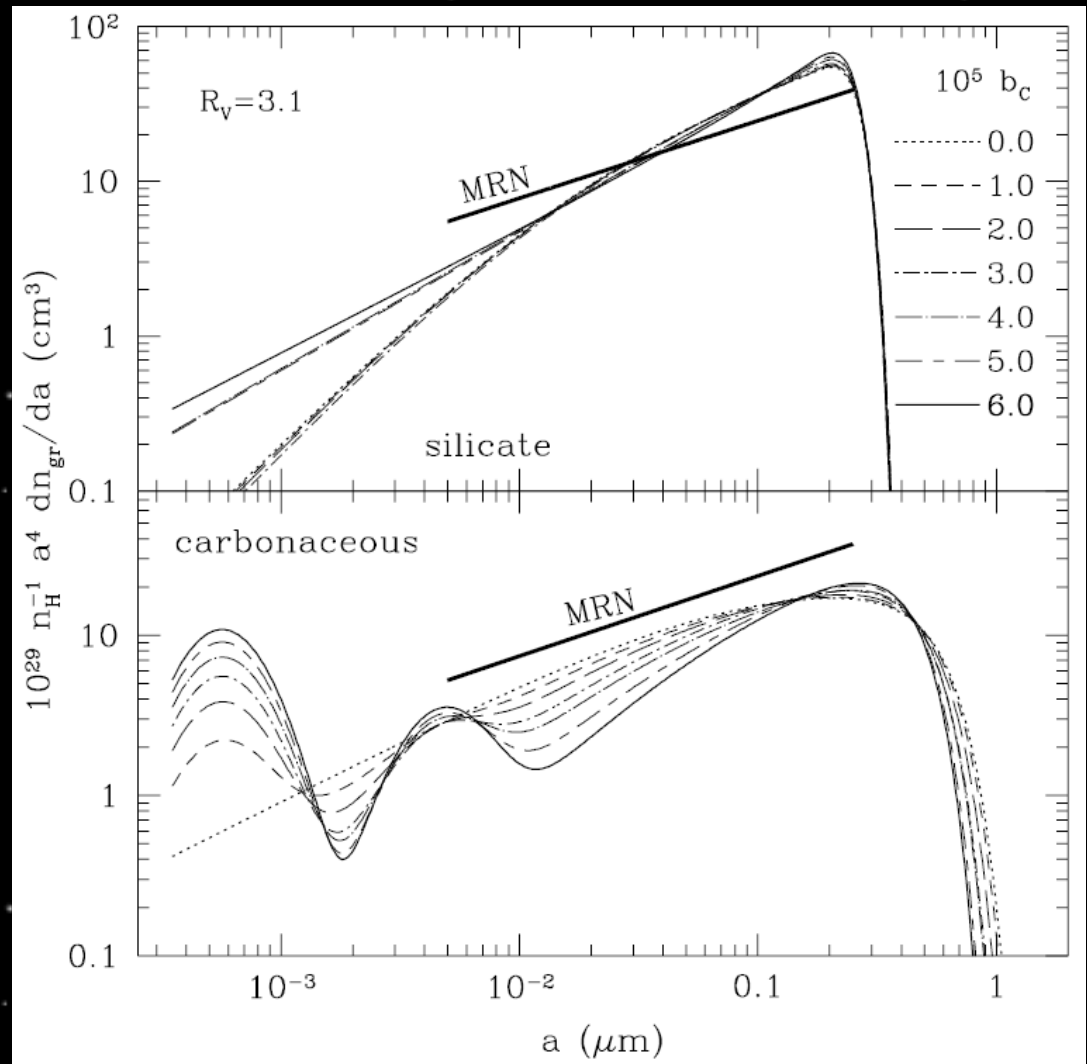


Fit des Polarisationsspektrums mit Teilchengrößen von $\sim 0.1\mu\text{m}$

Größenverteilung

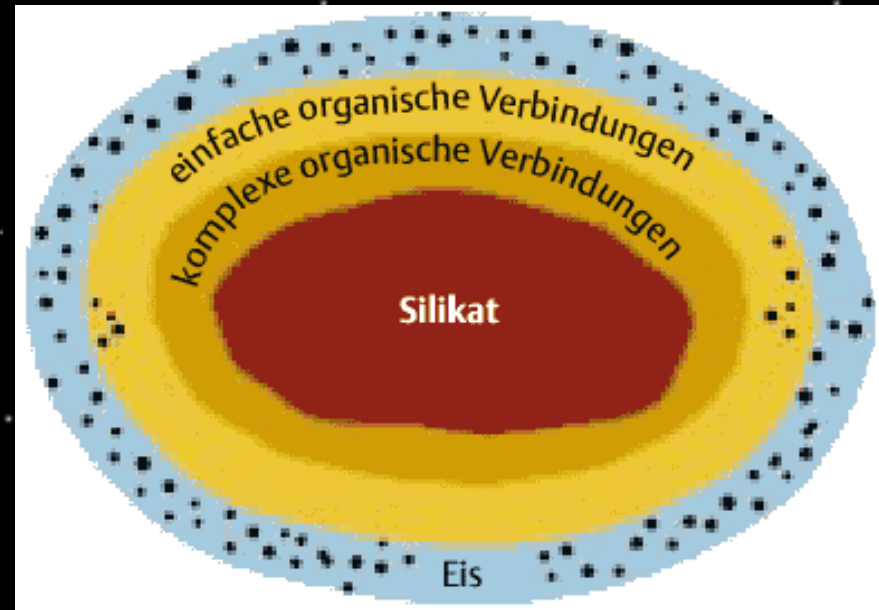
- Typische Größe:
0.1 μm
- Spektrum von
wenigen < 1 nm bis
einige hundert nm

Größenverteilung
des Staubvolumens



Zusammensetzung

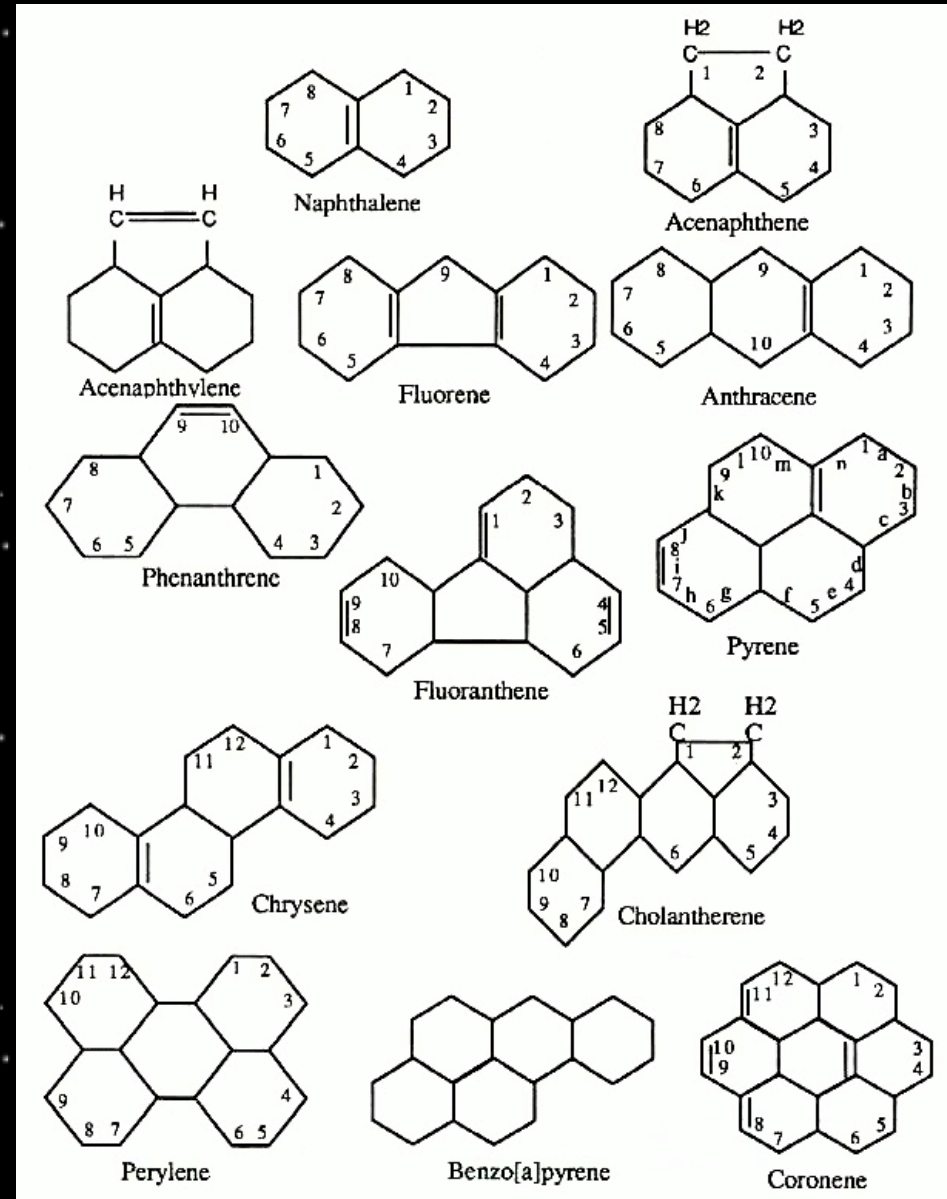
- 4 Komponenten:
 - Silikate
 - Kohlenstoff (teils amorph teils graphitisch)
 - Eismantel
 - PAHs



Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe

Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)

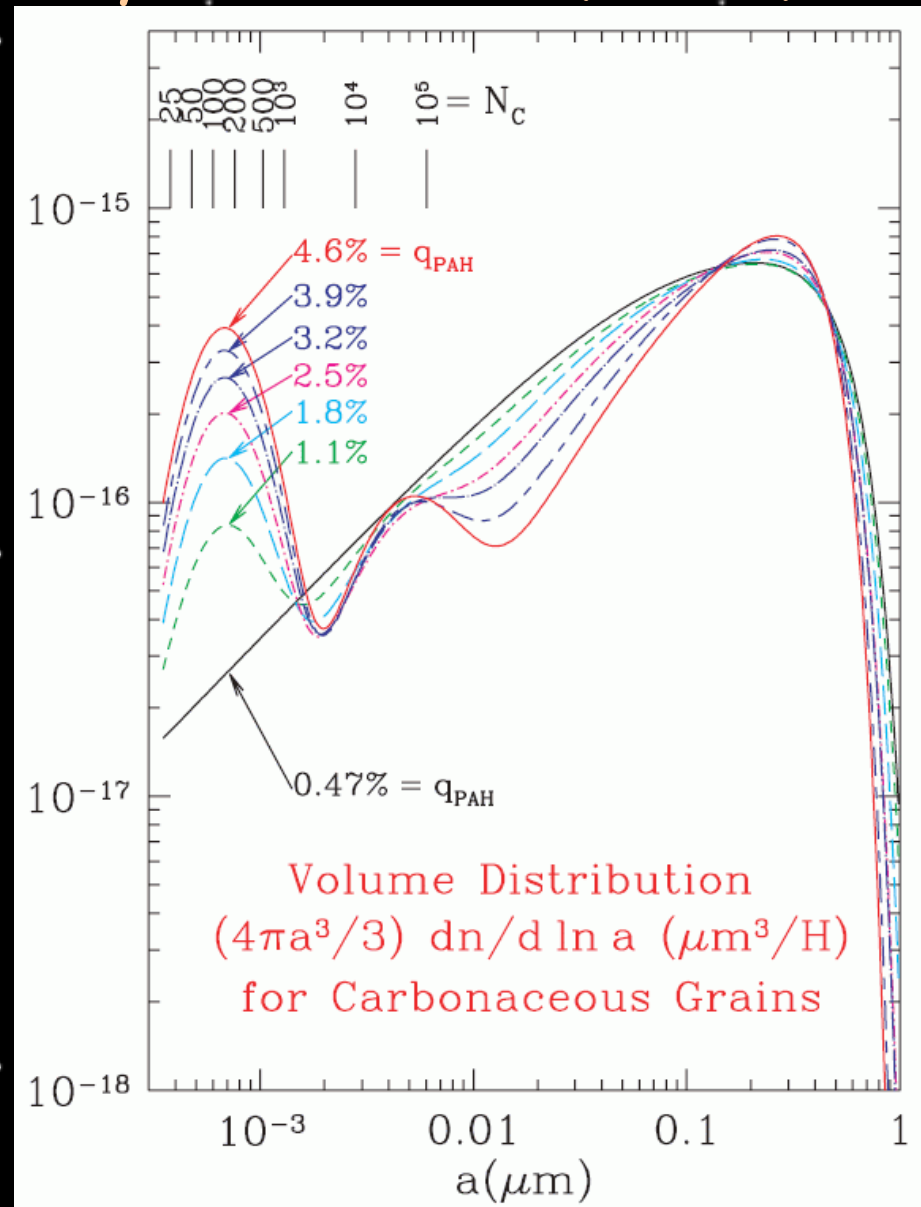
- Makromoleküle bzw. Mini-Staubteilchen
- 10-500 C-Atome
 - Häufung bei ~50 und ~500 C-Atomen
- Graphitkonfiguration



Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe

Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)

- Makromoleküle bzw. Mini-Staubteilchen
- 10-500 C-Atome
 - Häufung bei ~50 und ~500 C-Atomen
- Graphitkonfiguration



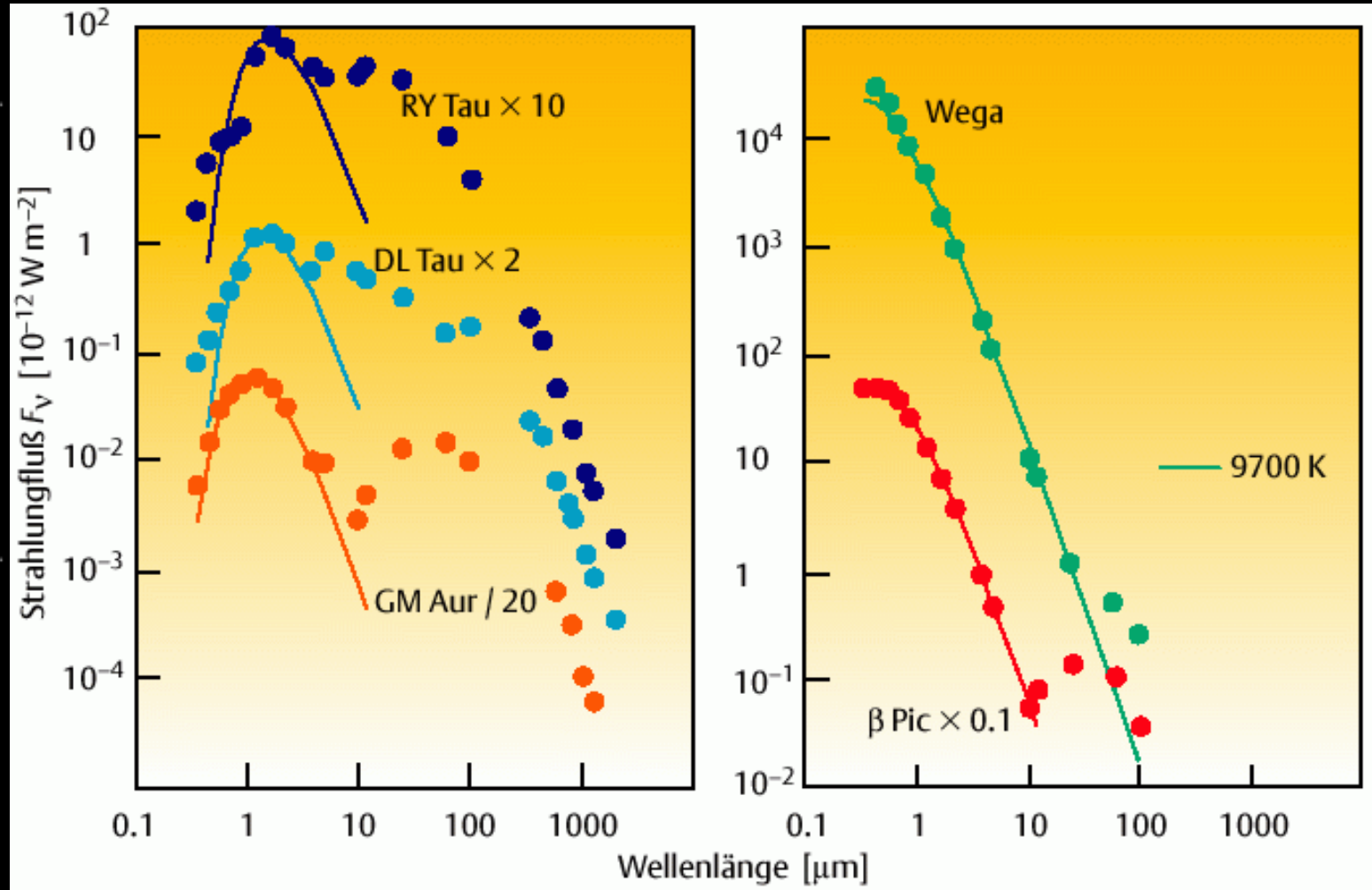
Staubemission

- Wie jeder Körper strahlt der Staub mit einem Spektrum das seiner Temperatur entspricht.
- Staubtemperatur aus Gleichgewicht von absorbiertes und emittierter Strahlung:

$$\int J_* C_{abs}(\lambda) d\lambda = \int B(\lambda, T_{dust}) C_{abs} d\lambda$$

- Typische Temperatur:
 - diffuse Wolken: 30K -> Emission: 100 μ m
 - dichte Wolken: 10K -> Emission: 300 μ m
 - Sternhüllen: 100-300K -> Emission: 10-30 μ m

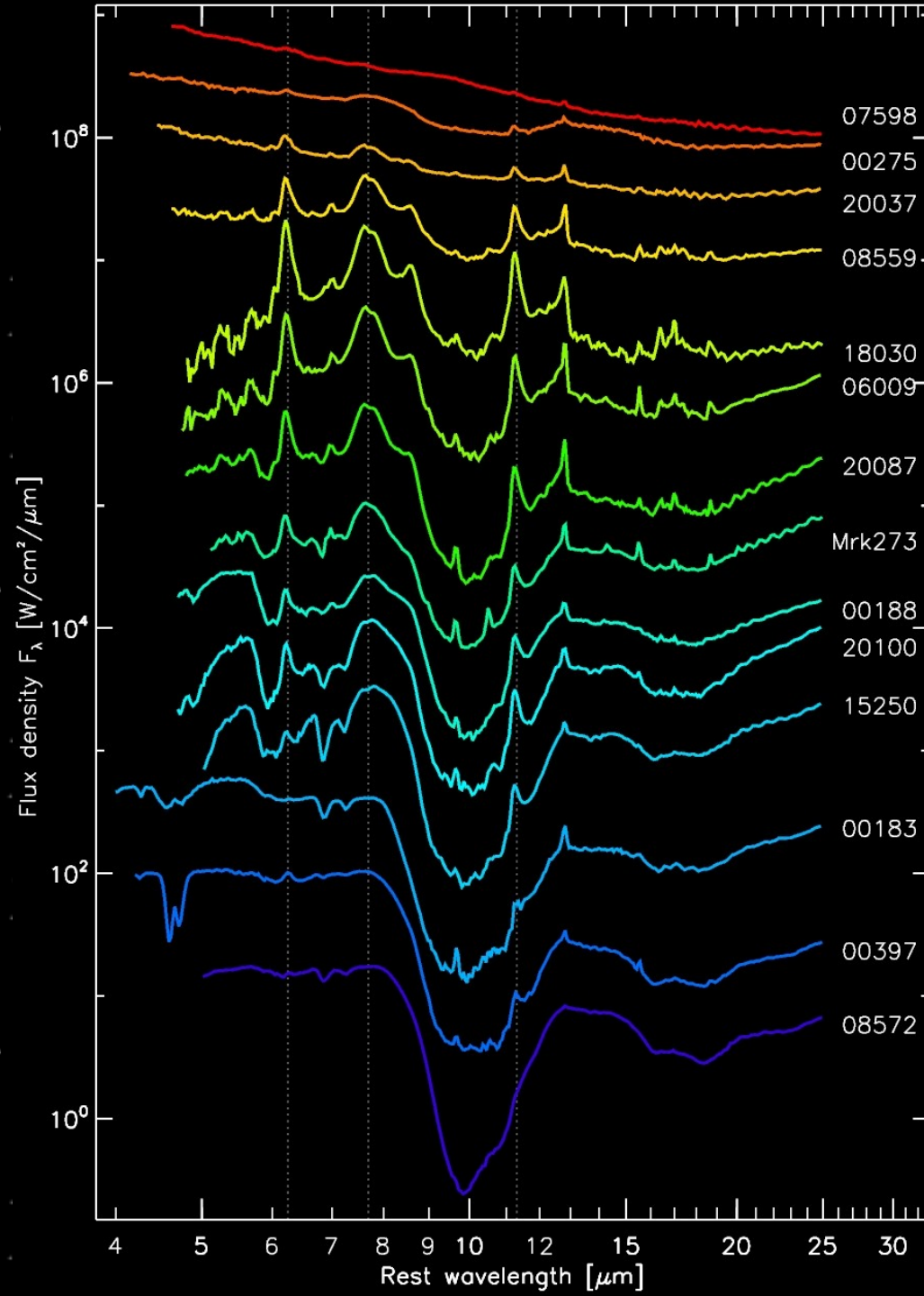
Staubemission



Spektren junger, noch tief im Staub eingebetter Sterne

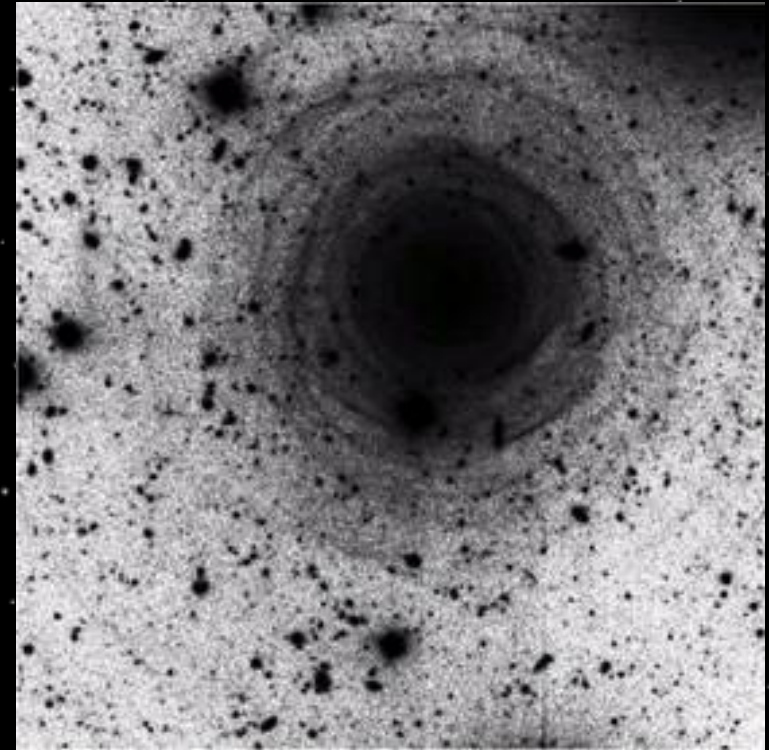
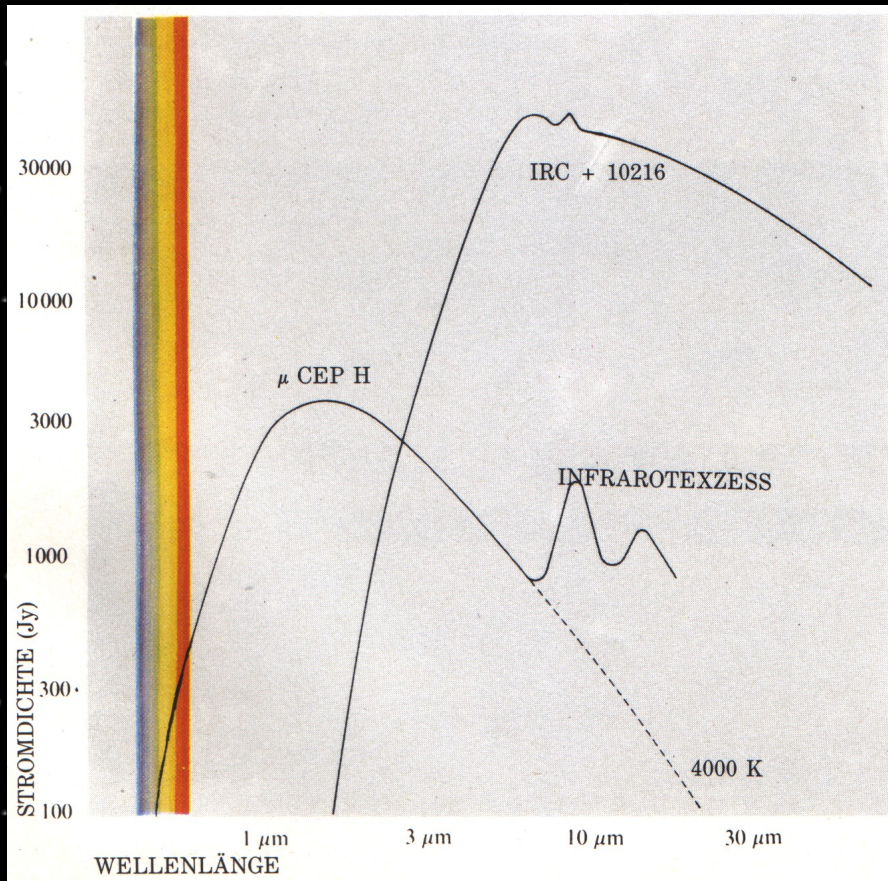
Infrarot-Spektren

- Mischung von Emission und Absorption



Staubentstehung

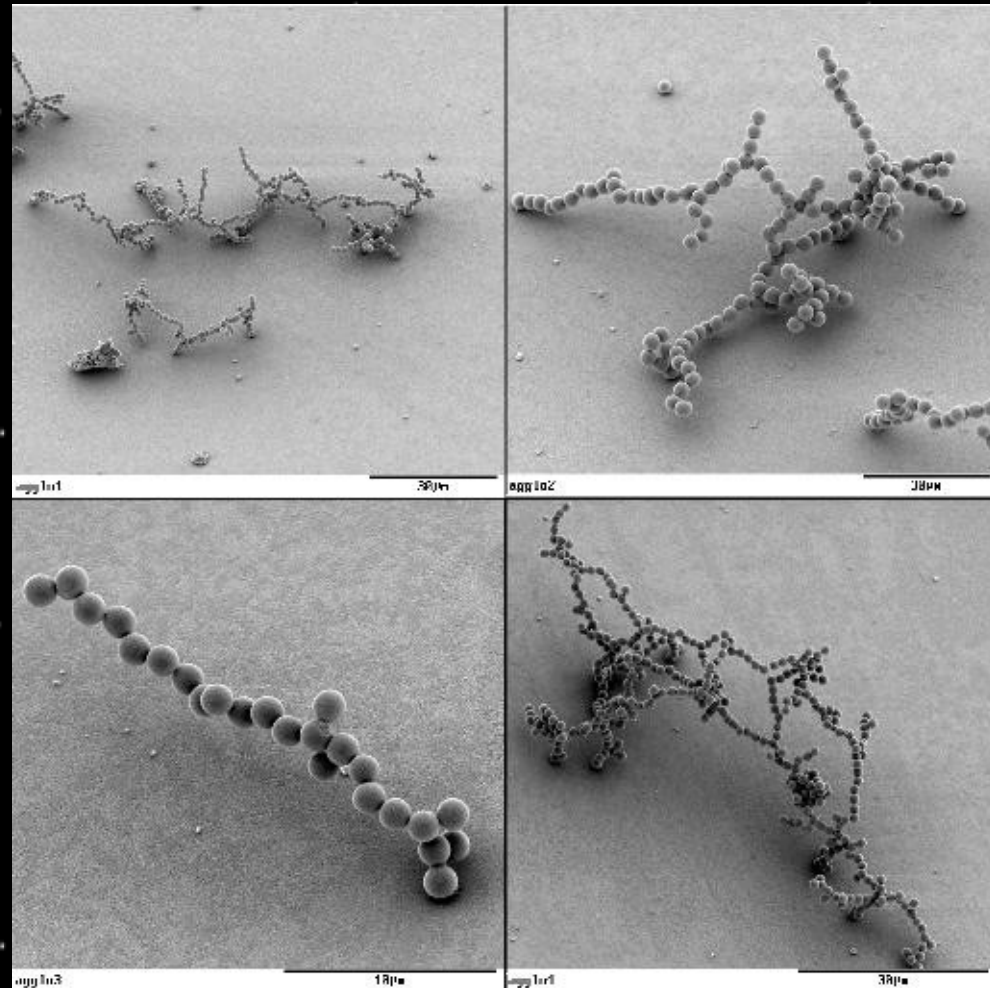
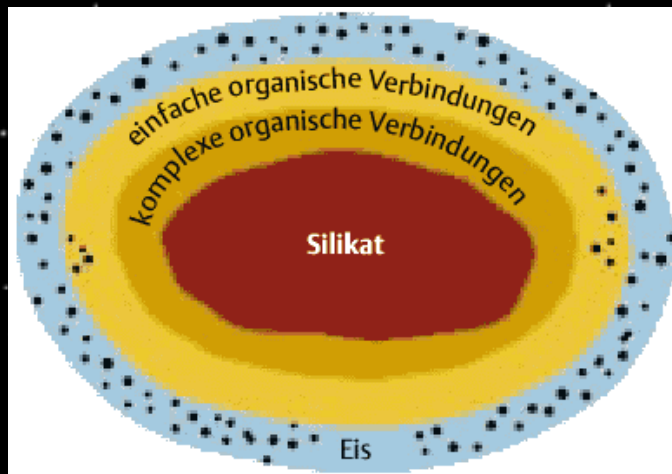
- Hüllen von Riesensternen:
 - Kondensation von Silikaten und amorphem Kohlenstoff



IRC 10216 (VLT)
 $T_{\text{surf}}=2000\text{K}$, $T_{\text{rad}}=600\text{K}$

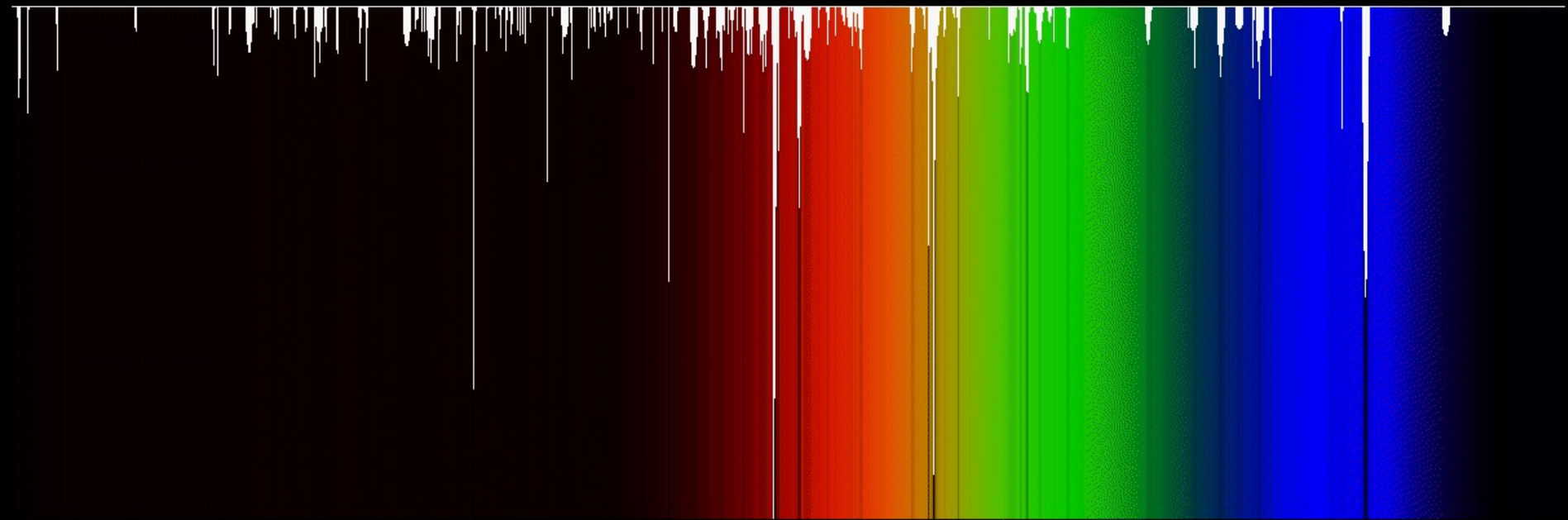
Staubentstehung

- Dichte kalte Molekülwolken
 - Koagulation
 - Aufwachsen von Eismänteln
 - Bildung organischer Mäntel



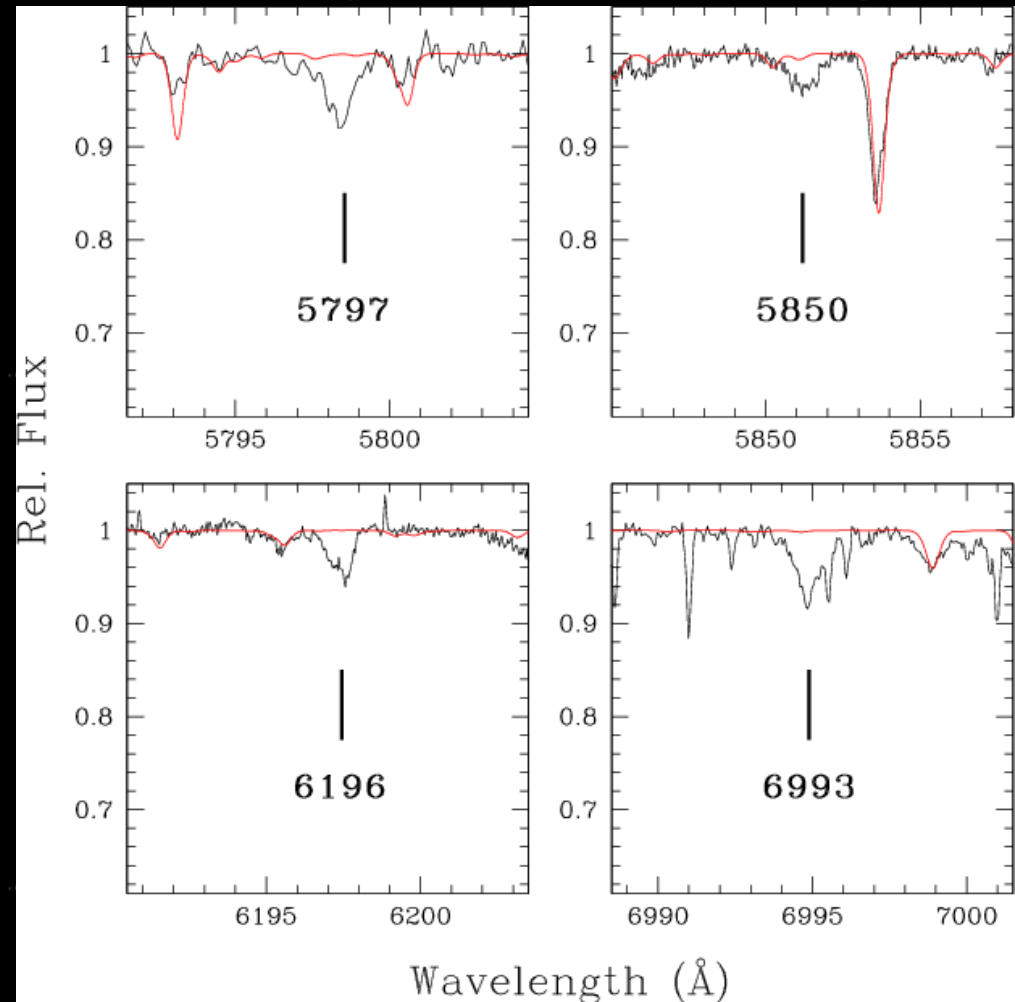
Diffuse interstellare Banden

- Am längsten ungelöstes astrophysikalisches Rätsel
 - Entdeckung um 1920
 - Immer noch keine vollständige Erklärung



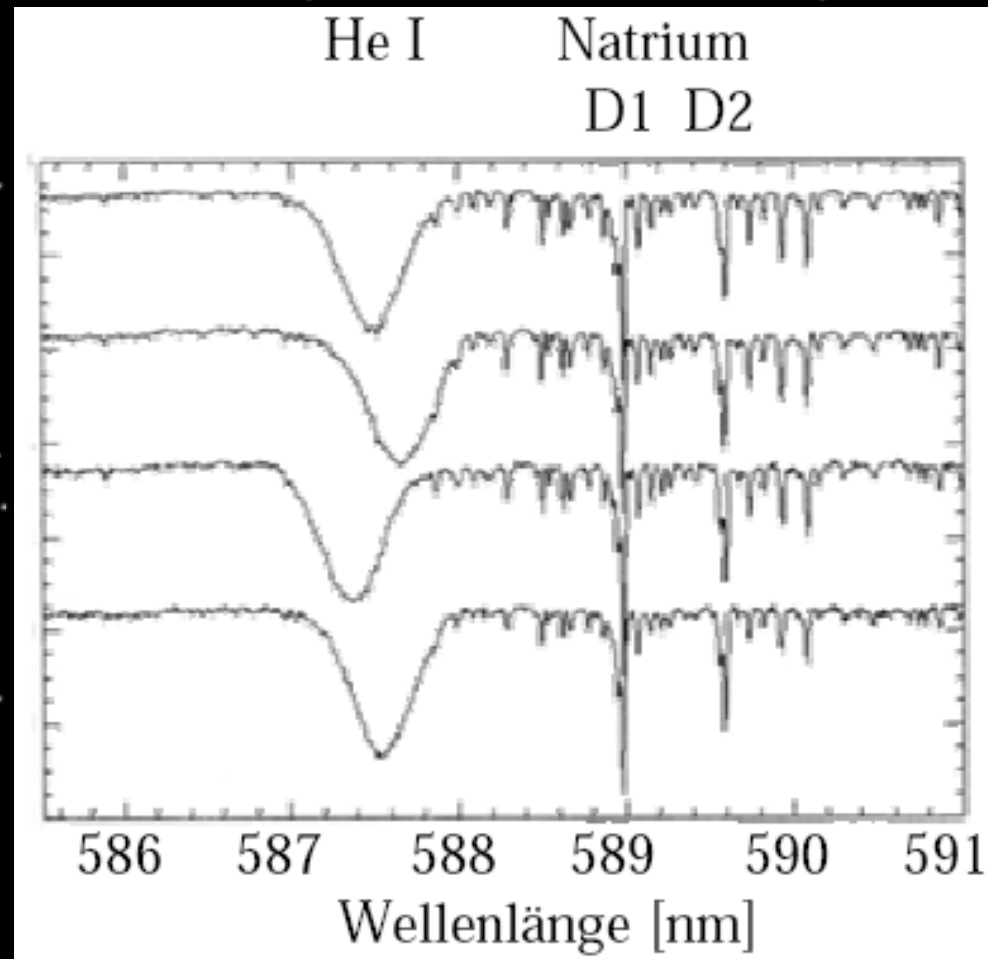
Diffuse interstellare Banden

- Breiter als Gaslinien und schmaler als Festkörperresonanzen
- Stärkste Linien bei 443, 624, 618 nm
- Relative Variation der Banden in verschiedenen Sichtlinien
- Wahrscheinliche Erklärung: **ionisierte PAHs**



Interstellares Gas

- Absorptionslinien im optischen Spektrum
- Identifikation anhand des charakteristischen "Fingerabdrucks"
- Typische Absorptionslinien: Na, Ca, K, Fe



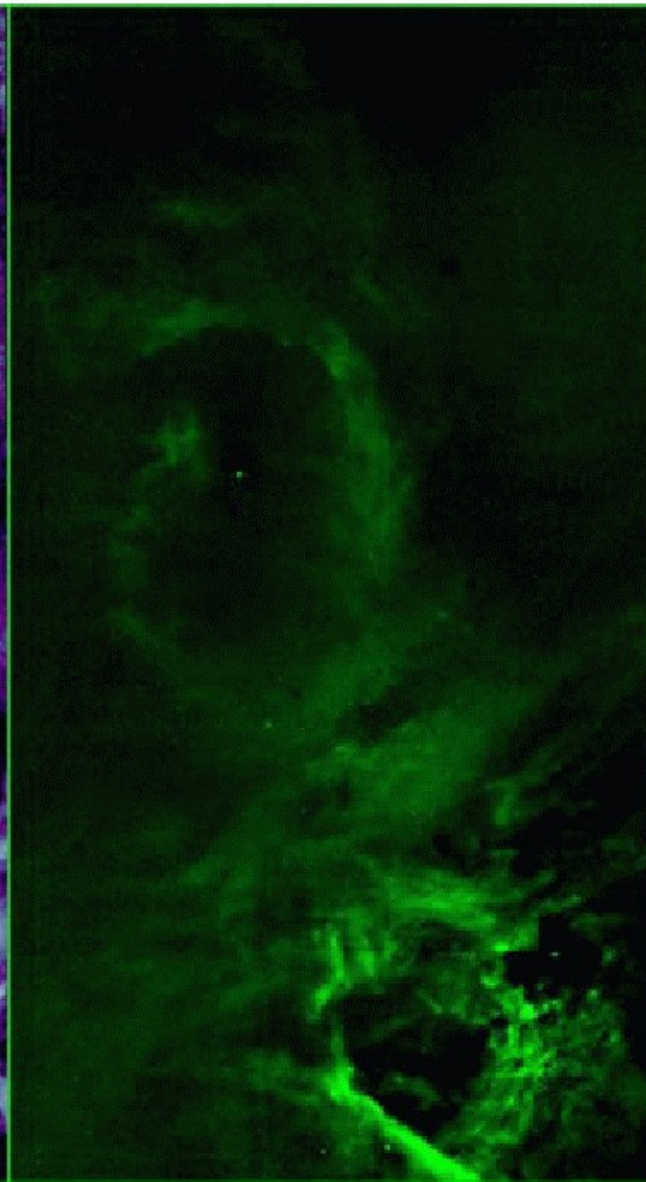
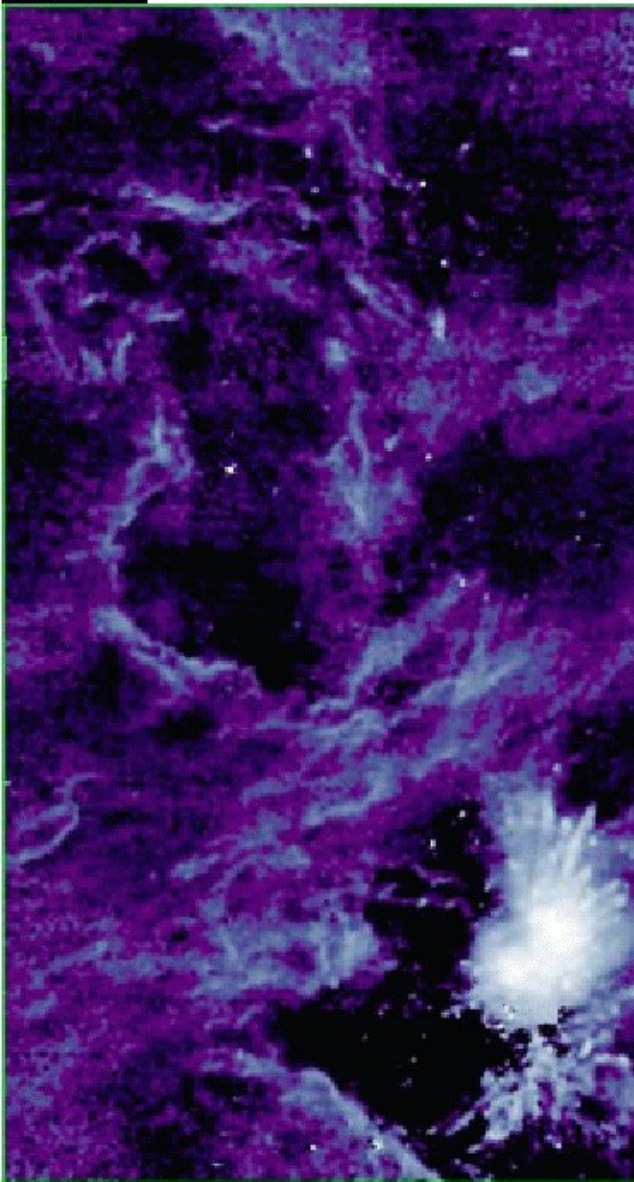
Spektrum von δ Ori zu verschiedenen Zeiten

Radiobeobachtung

- Detektion der Linienstrahlung im (sub)mm- und Radiobereich



Stars, Dust, and Gas in Orion



Interstellares Gas

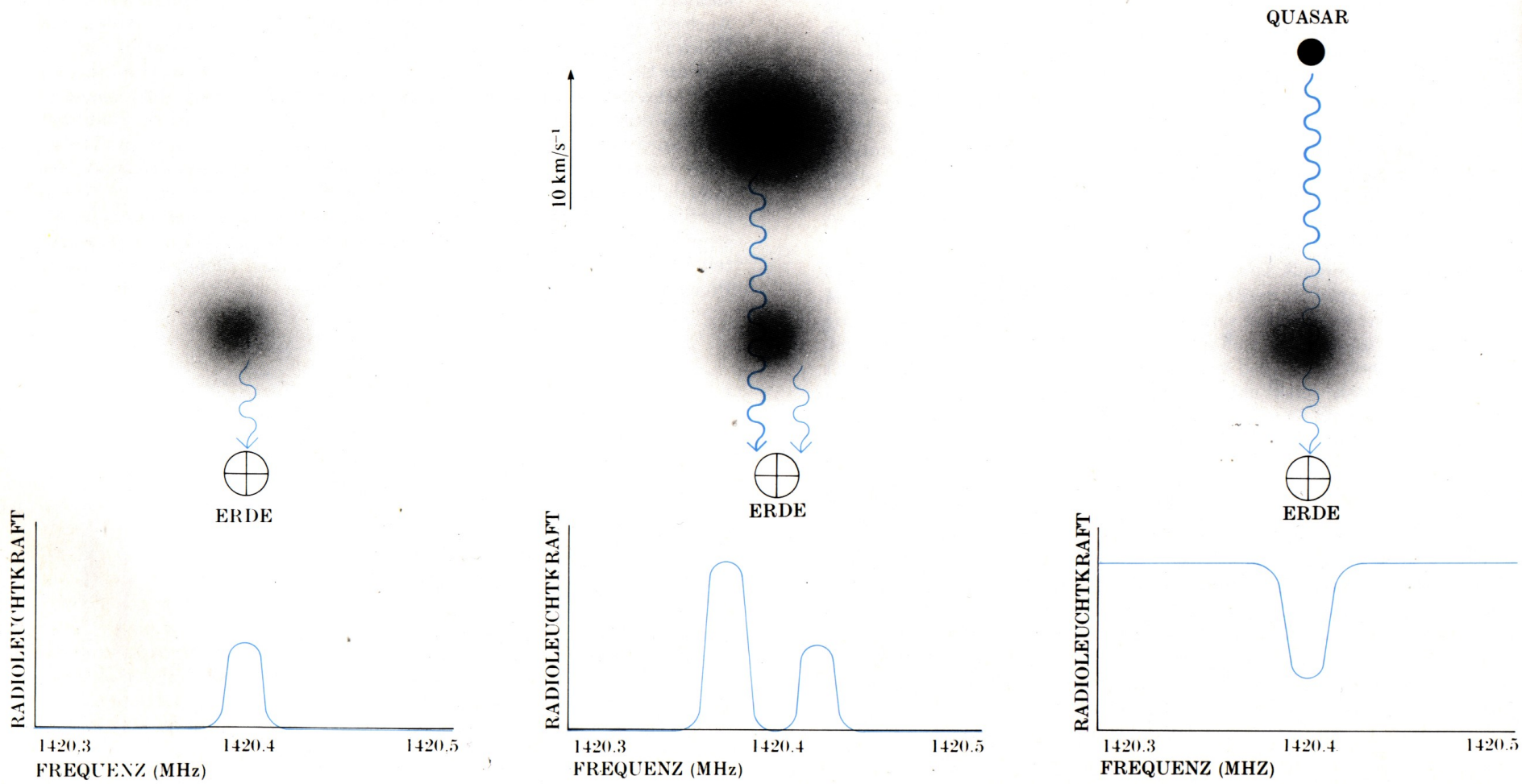
Anzahlhäufigkeit: ähnlich zur Sonnenphotosphäre

Atom	Häufigkeit	Gasphasenabreicherung
H	100	~ 0
He	7	0
C	0.04	0.5
O	0.07	0.1
N	0.009	~ 0
Al	0.0003	50

- Die Gasphase wird völlig vom Wasserstoff dominiert.
- Im Gas fehlende Elemente müssen im Staub sitzen.
- Staub/Gas-Verhältnis $\sim 1/100$
 - Aber: Staub dominiert Energiebilanz

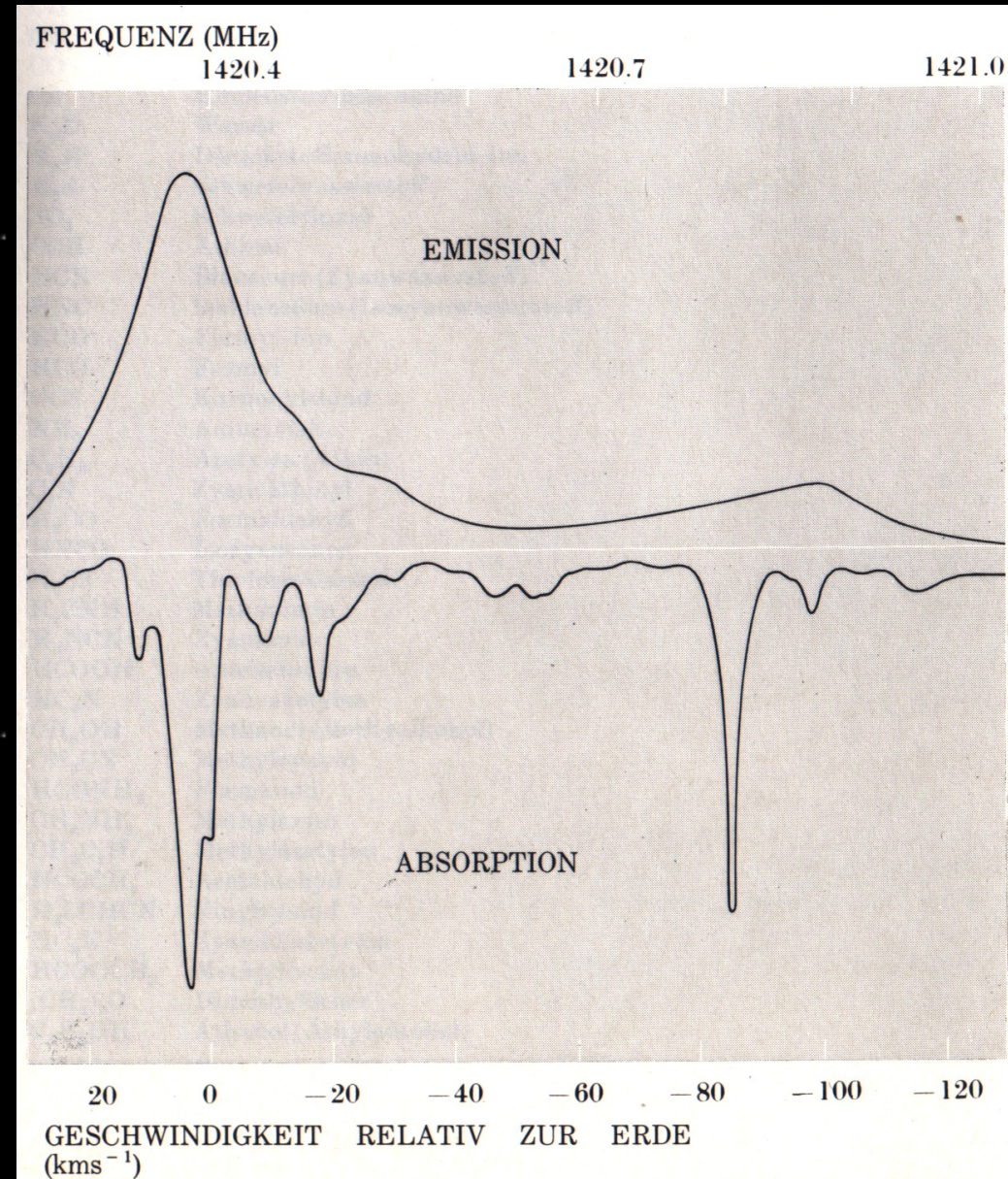
HI-Beobachtungen

- Dopplerverschiebung der Linie erlaubt Geschwindigkeitsmessungen



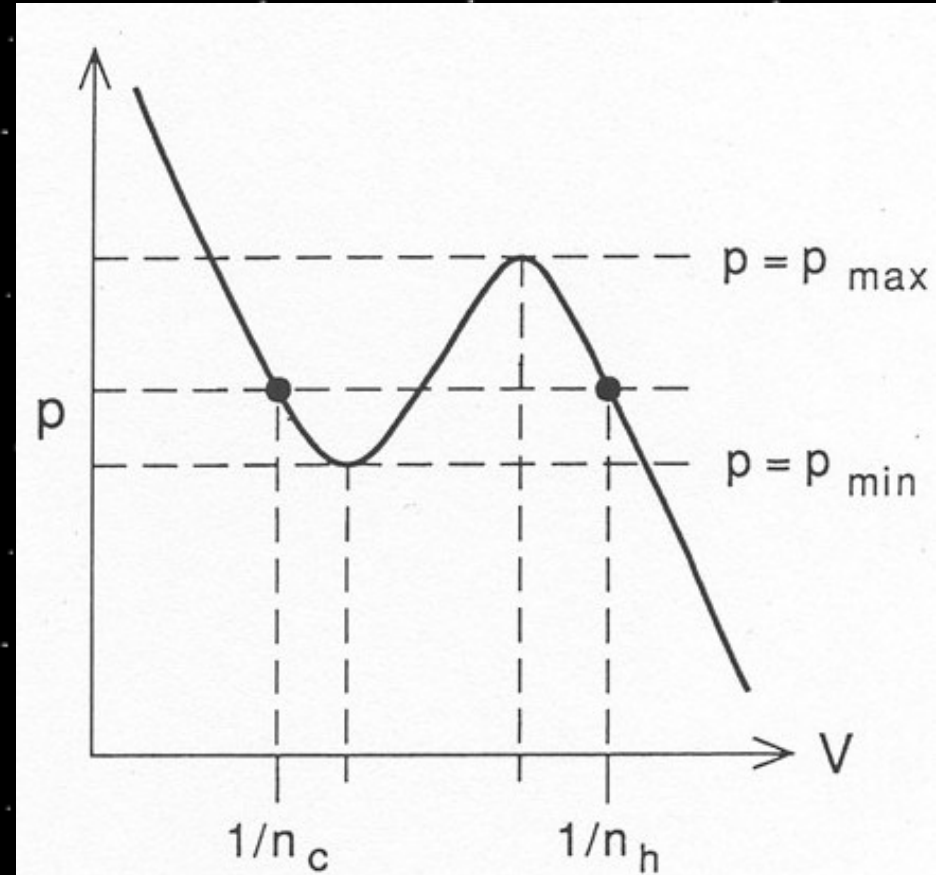
HI-Beobachtungen

- Heißes Gas hat viel breitere Geschwindigkeitsverteilung als kaltes Gas
- Getrennte Phasen des Gases
- Klar abgegrenzte Wolkenstrukturen



Phasen des ISM

- Thermische Instabilität:
Gas ist nur bei Dichten von 1 H-Atom/cm^3 oder oberhalb von $100 \text{ H-Atomen/cm}^3$ stabil



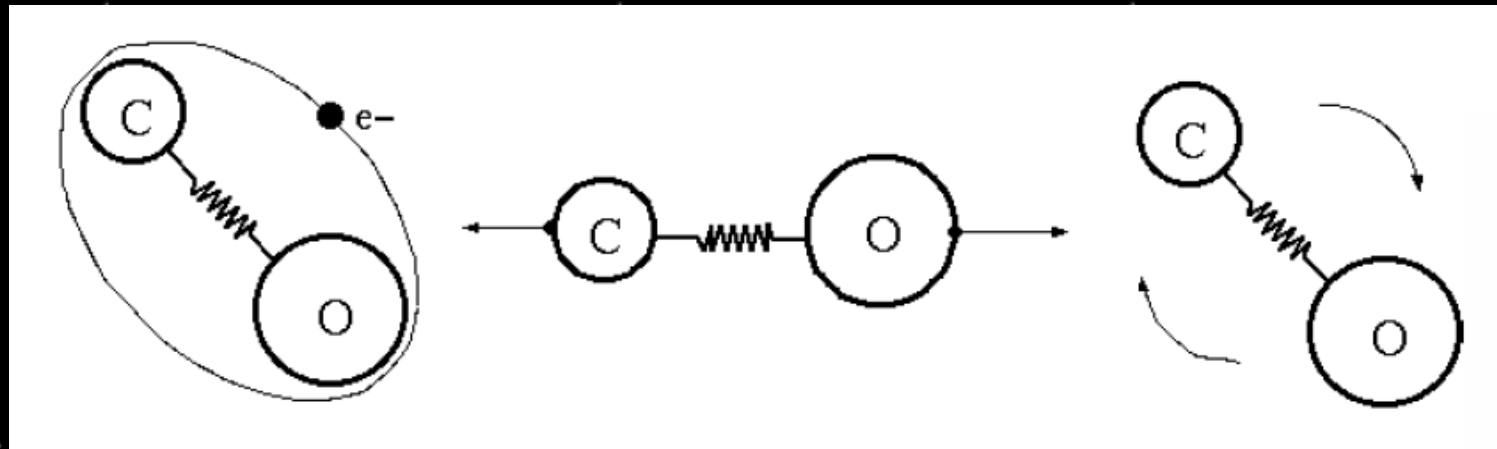
erklärt scharfe Wolkengrenzen

Phasen des ISM

- Ionisierter atomarer Wasserstoff HII (H^+)
 - Neutraler atomarer Wasserstoff HI (H)
 - Molekularer Wasserstoff H_2
-
- Die jeweiligen Regionen bestehen nahezu zu 100% aus der entsprechenden Komponente.
 - Die Grenzgebiete zwischen HII, H und H_2 sind sehr dünn.
 - Den größten Teil (ca. 80%) des ISM machen HI und HII-Gebiete niedriger Dichte aus.
 - H_2 befindet sich in Molekülwolken, die z.T. von HII-Gebieten hoher Dichte begleitet werden.

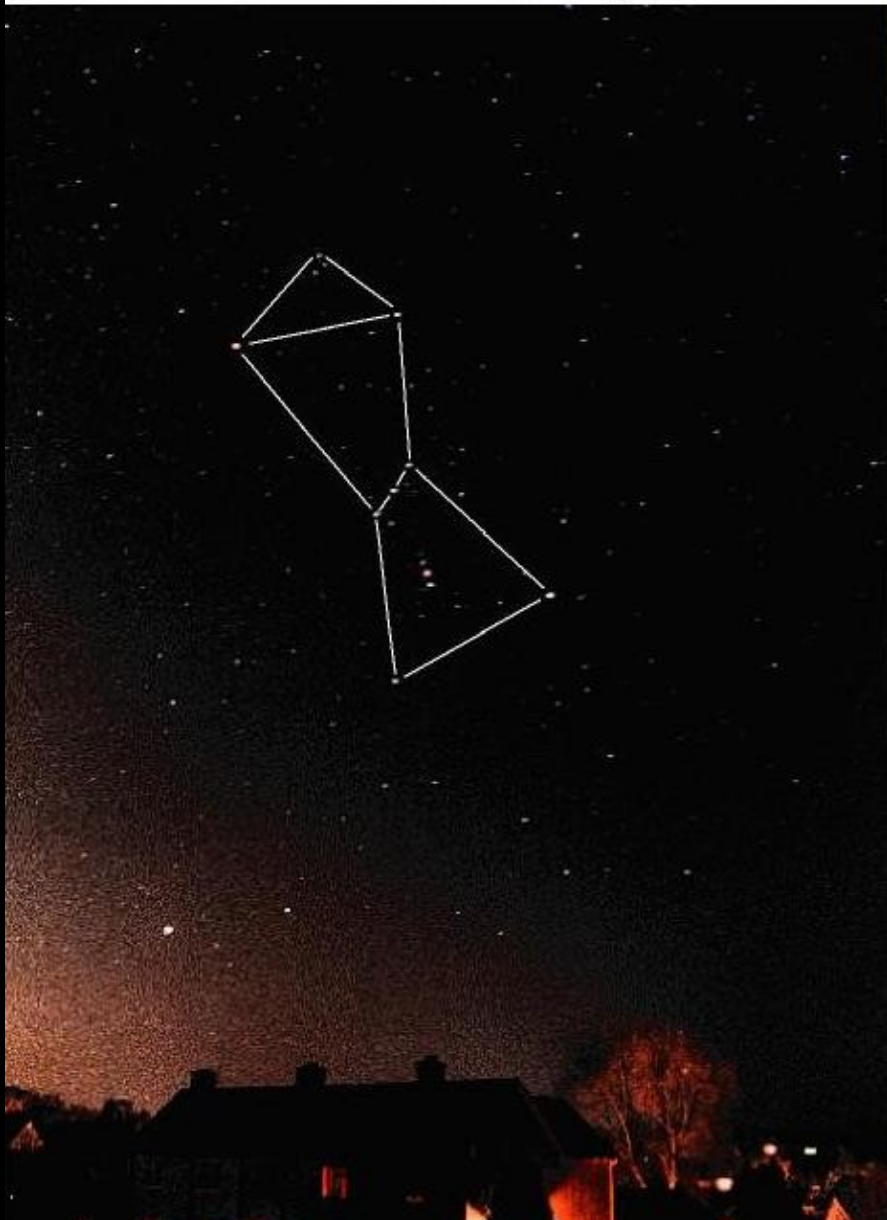
Molekülwolken

- Molekularer Wasserstoff hat kein permanentes Dipolmoment:
 - Keine Rotationsübergänge
 - Keine elektr. Dipol-Vibrationsübergänge
 - Nur heißes H_2 sichtbar durch Quadrupolübergänge
- CO als Sonde des molekularen Gases
 - $N(CO)/N(H_2) \sim 8 \times 10^{-5}$

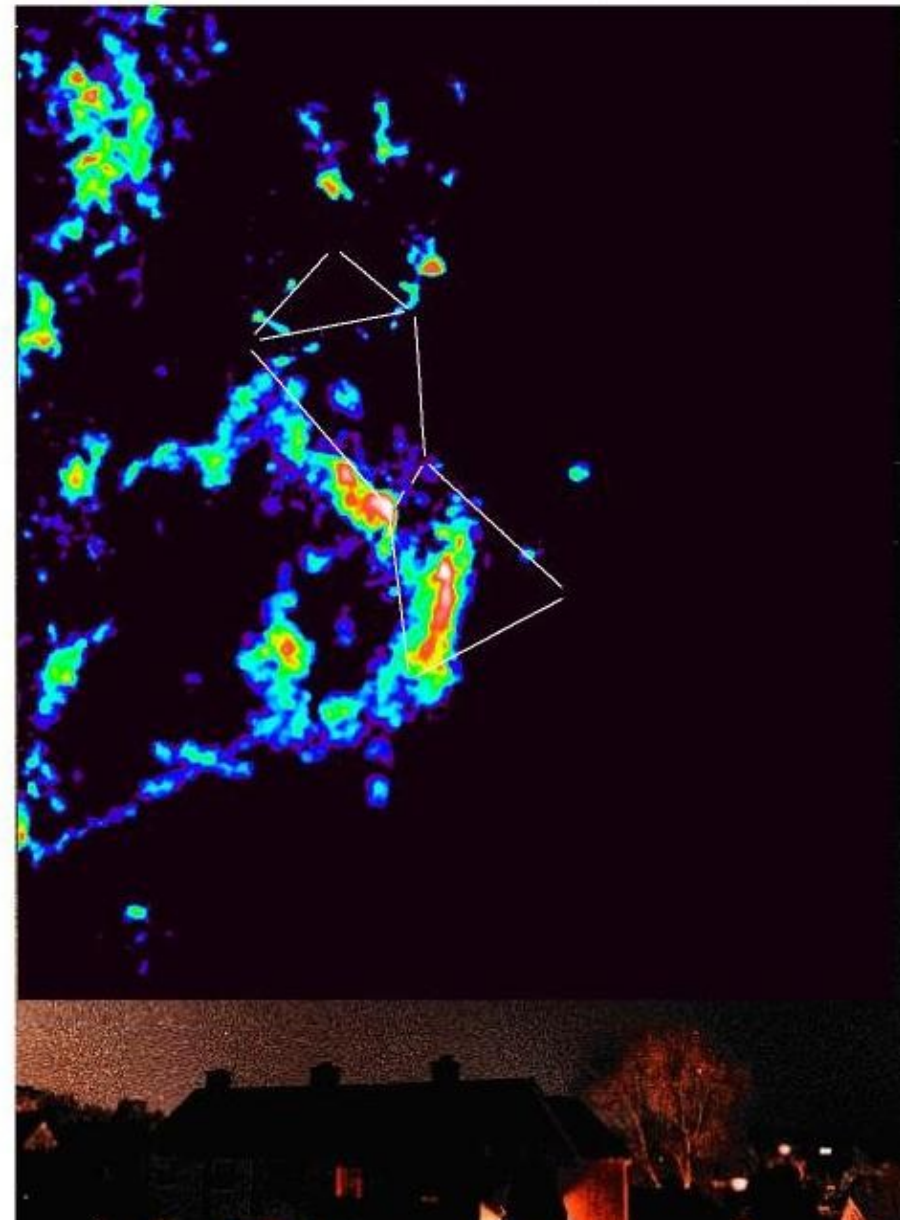


Beobachtungen

Orion Constellation: As you see it

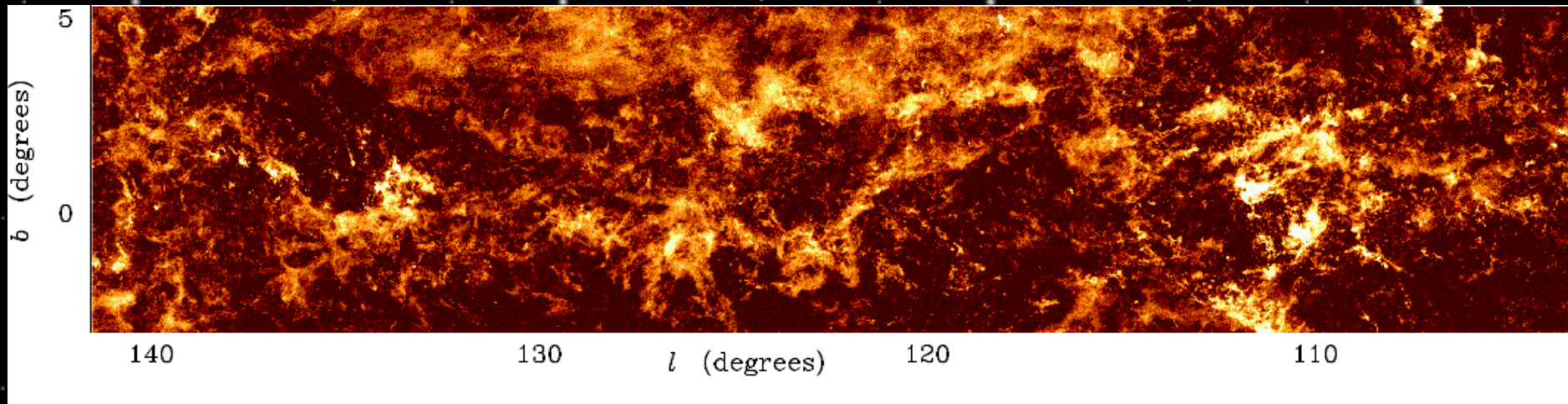


Orion Constellation: As 1.2 m sees it



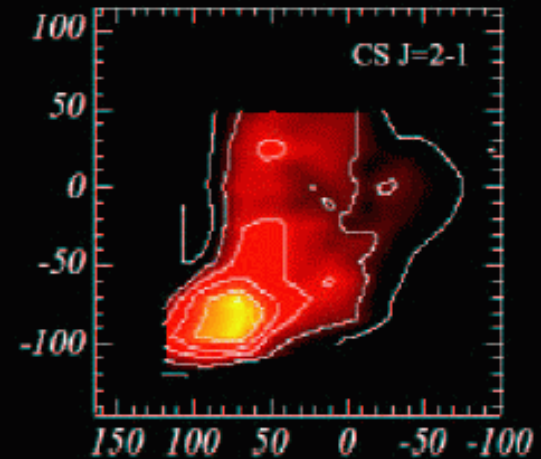
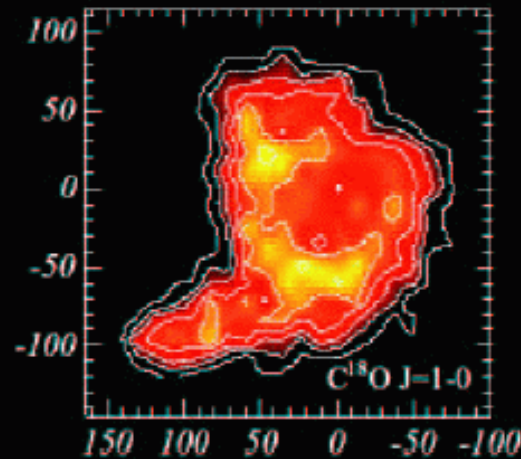
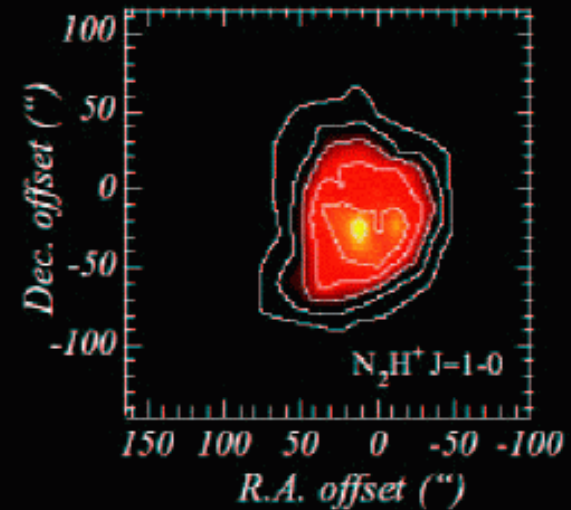
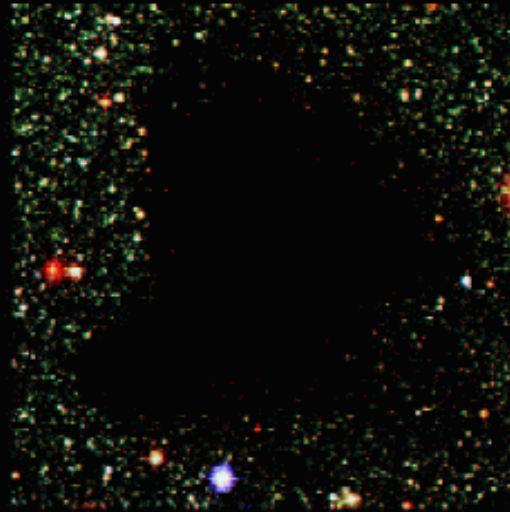
Molekülwolken

- Molekulares Gas ist sehr inhomogen verteilt
- Turbulente Wolkenstrukturen



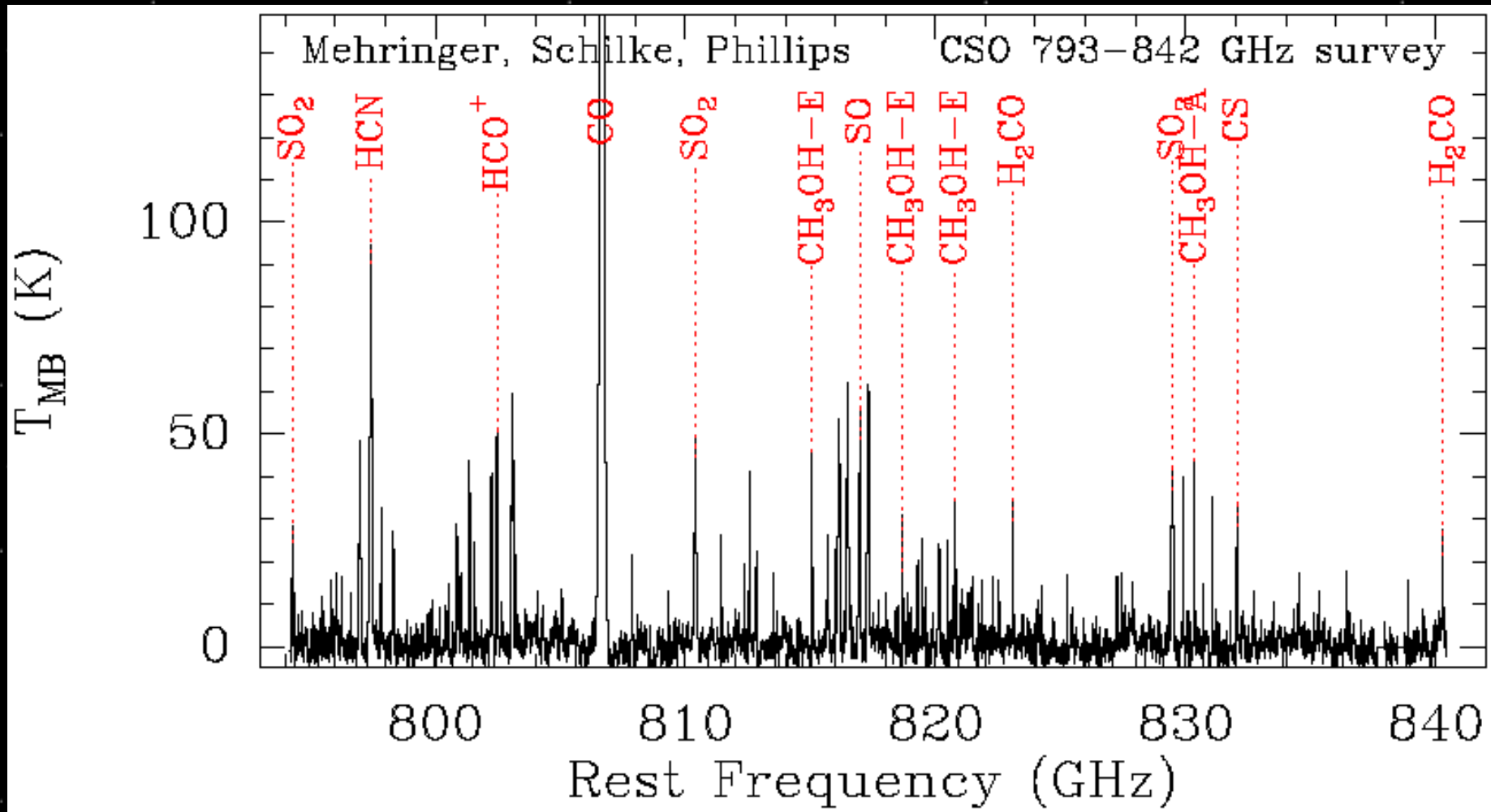
Molekülwolken

- Interstellare Moleküle



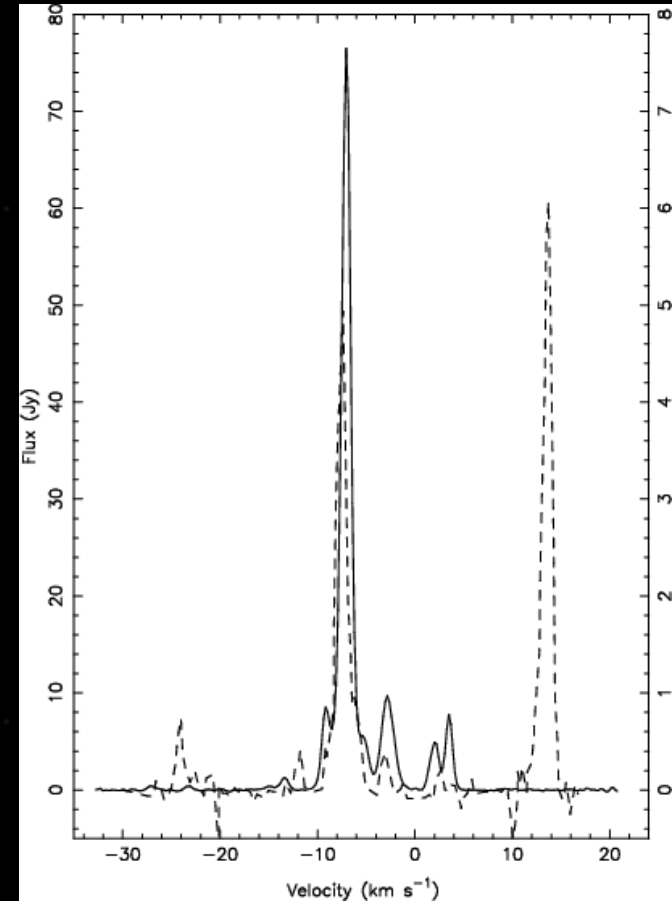
Molekülwolken

- Interstellare Moleküle



Maser

- Extrem scharfe Linien beobachtet
- OH, H₂O, SiO, CH₃OH
- Aus kleinen Regionen in der Nähe von Sternentstehungsgebieten



- Physik analog zu Laser im Optischen

S106 FIR

Class 0 source

Furuya et al. 2000,
ApJ, 542, L135

NMA
1000 AU
 $H^{13}CO^+$ (1-0)

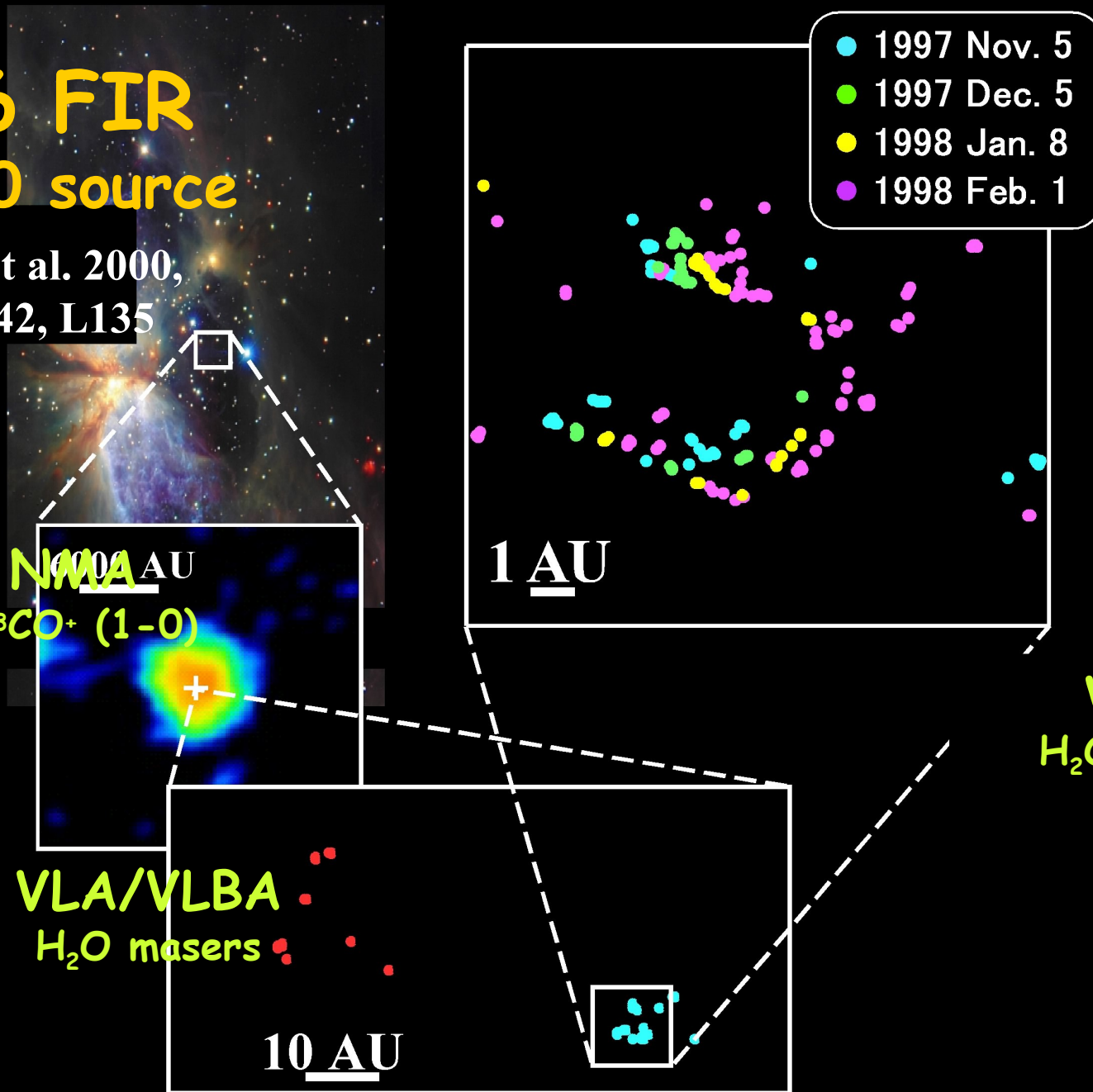
VLA/VLBA
 H_2O masers

10 AU

1 AU

- 1997 Nov. 5
- 1997 Dec. 5
- 1998 Jan. 8
- 1998 Feb. 1

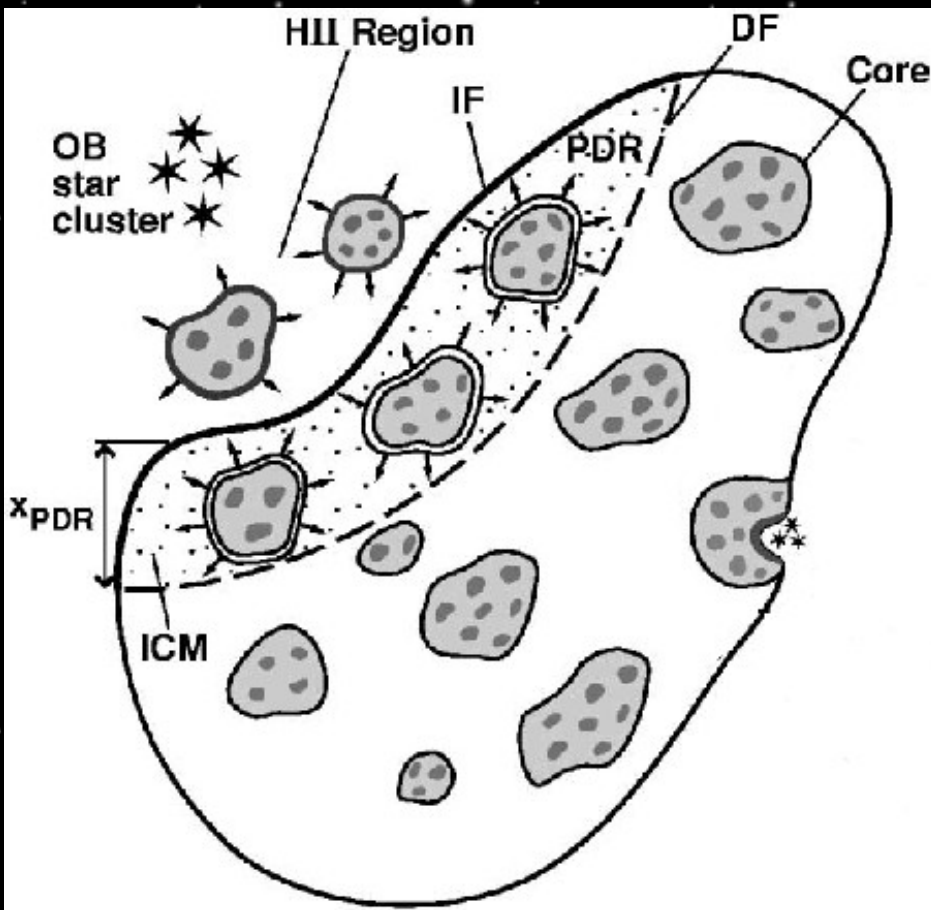
VLBA
 H_2O masers



Photodissoziationsregionen (PDRs)

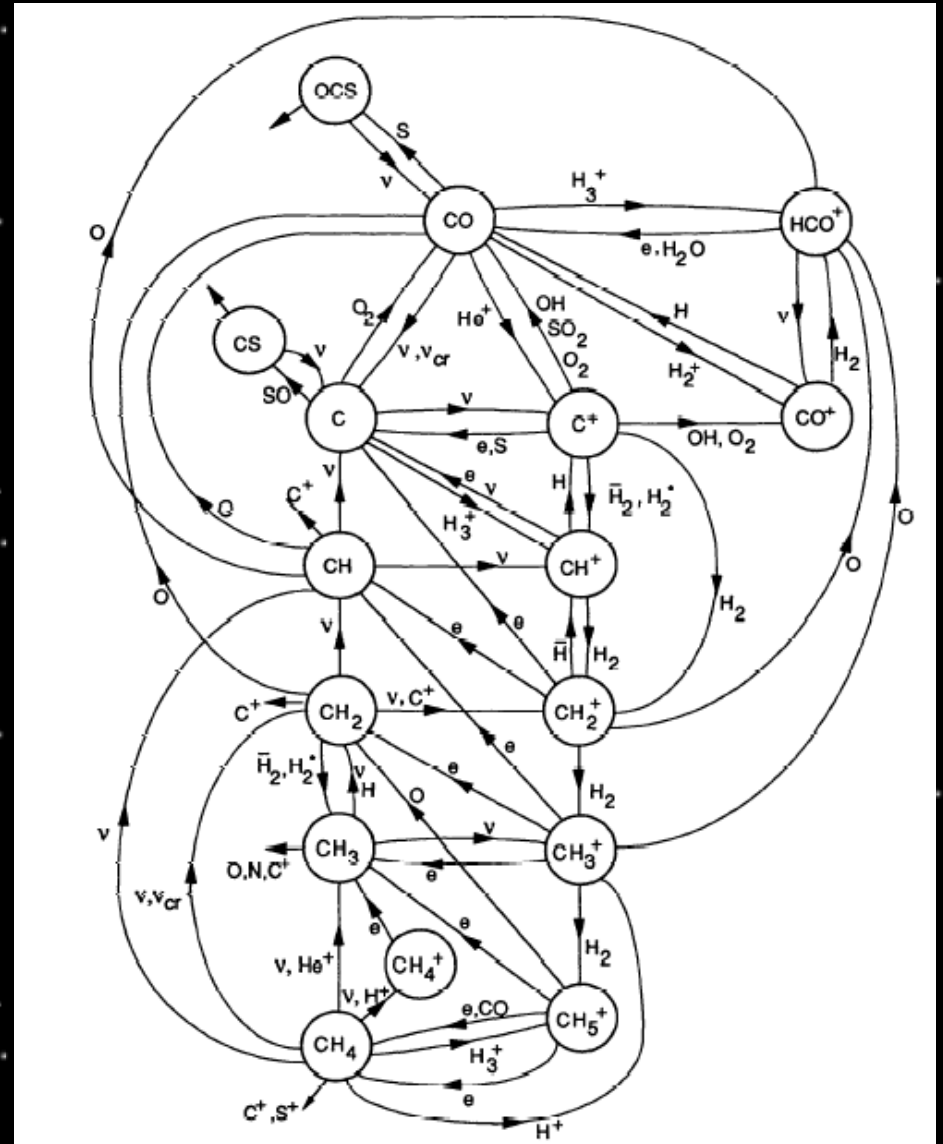
Das Chemielabor des Weltalls

- Bei Wellenlängen über 912\AA kann Strahlung H nicht mehr ionisieren, aber Moleküle dissoziieren.



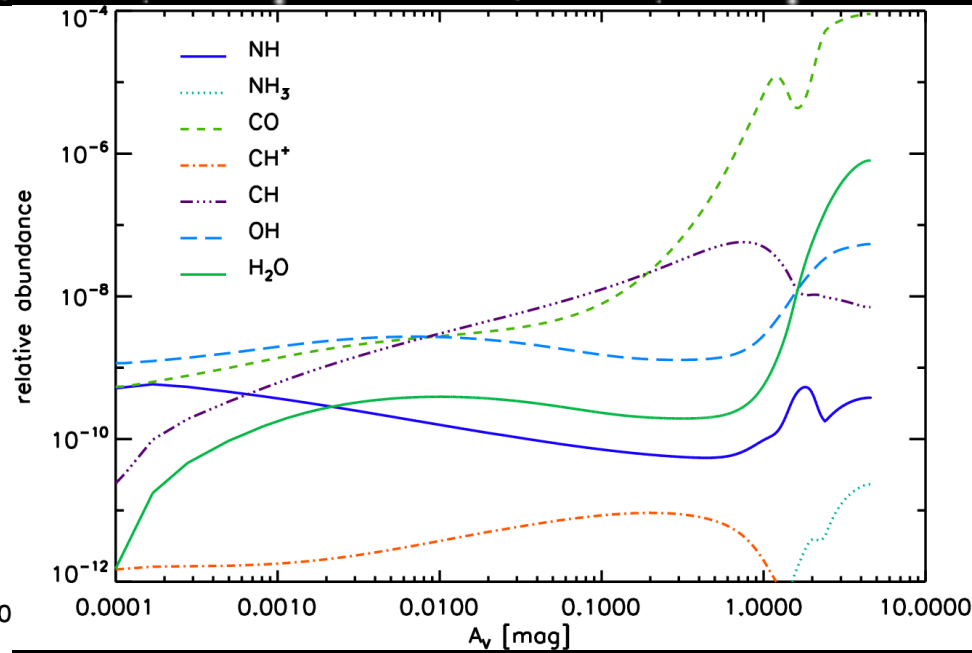
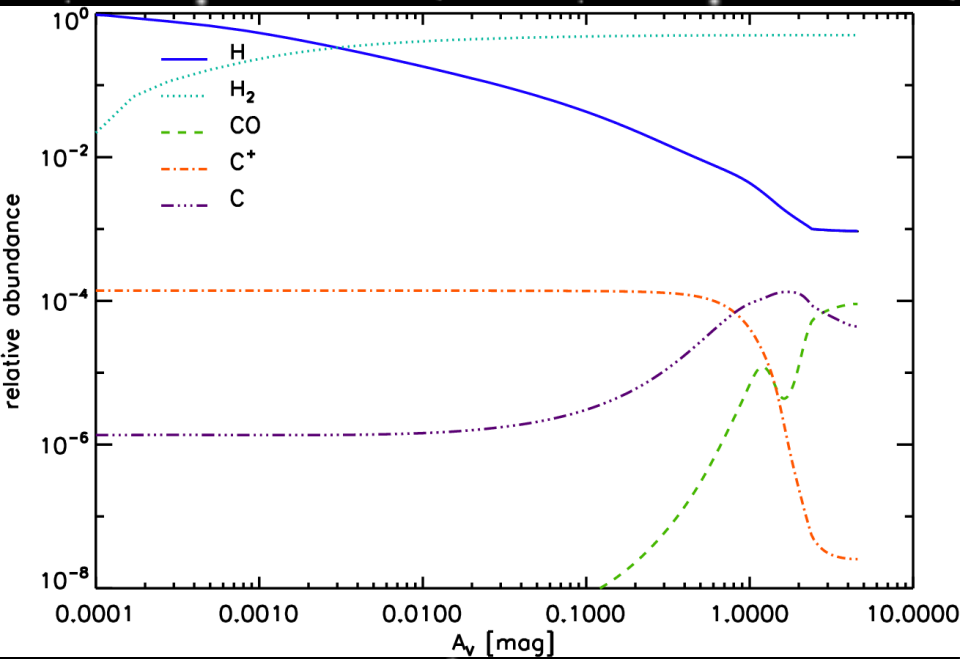
Photodissoziationsregionen (PDRs)

- Komplexes Netzwerk chemischer Reaktionen
- Bildung und Zerstörung interstellarere Moleküle



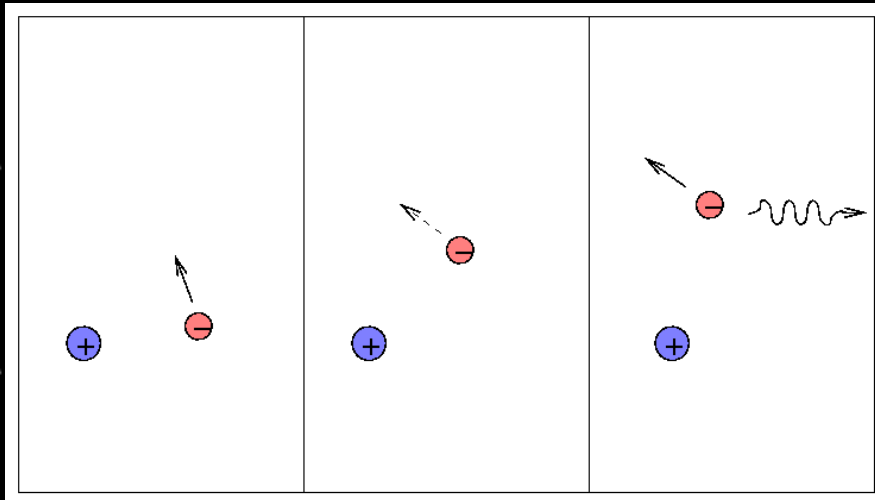
Photodissoziationsregionen (PDRs)

- Modellierung der Verteilung der verschiedenen Moleküle über die Tiefe einer PDR (Kölner PDR-Modell)

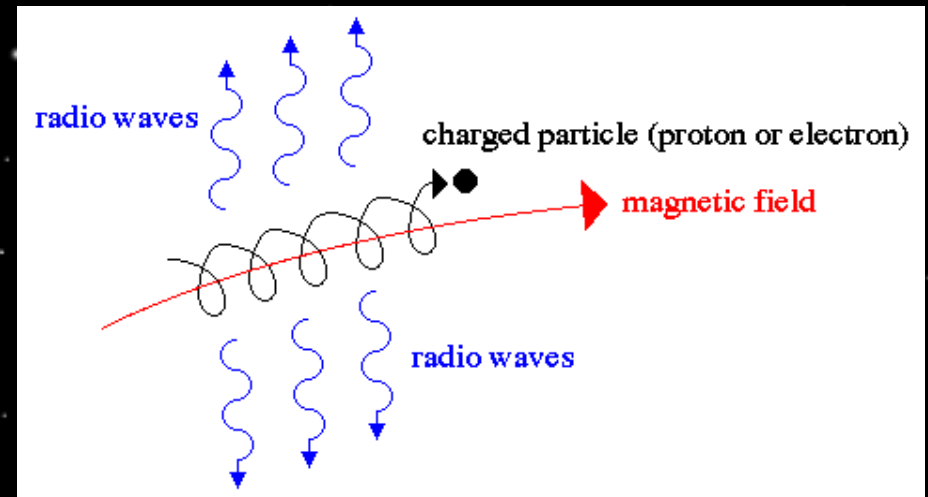


Ionisiertes Gas

- Heißes Elektronen- und Ionengas hat keine diskreten Linien, sondern strahlt im Radiokontinuum
- Strahlung beschleunigter Ladungsträger



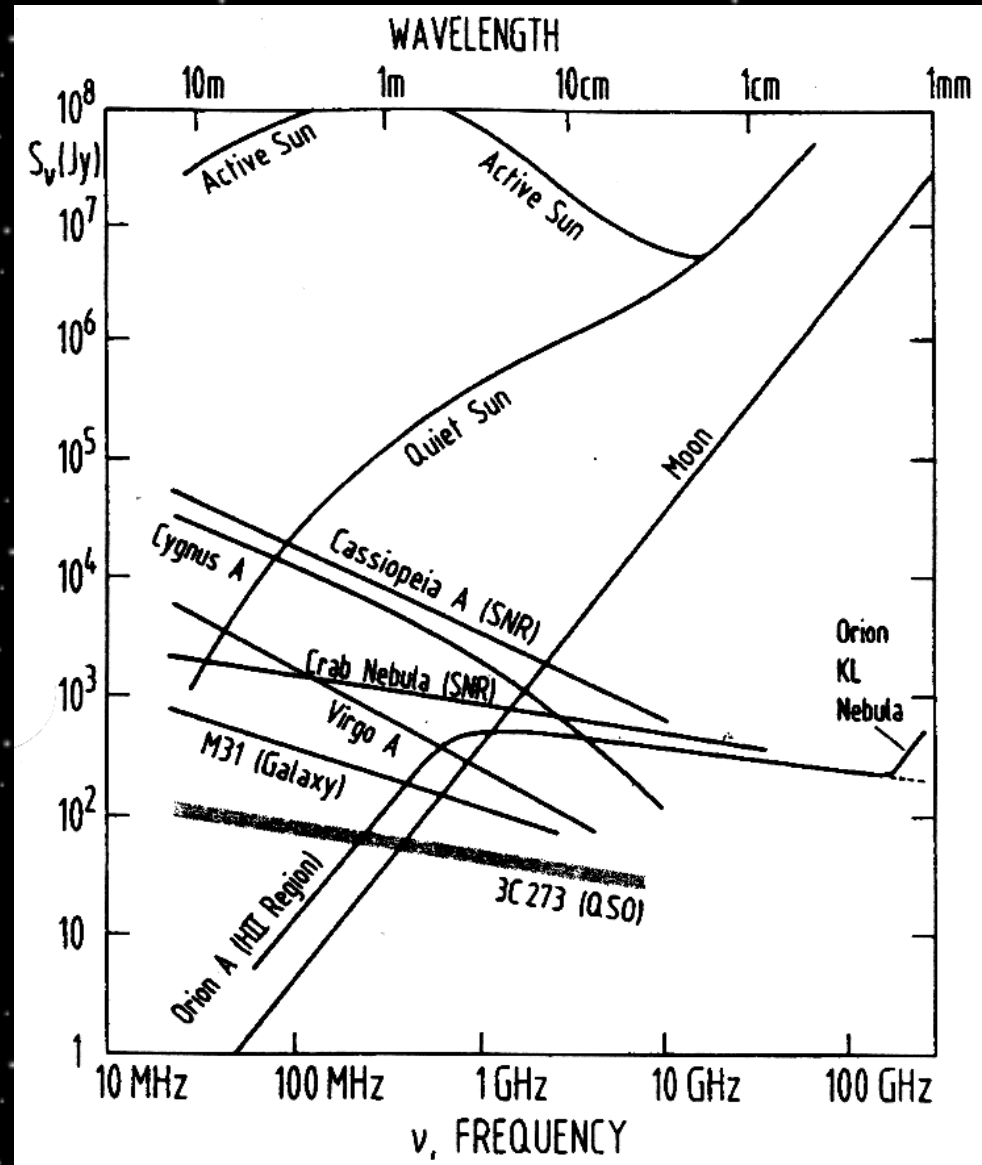
Frei-frei-Strahlung



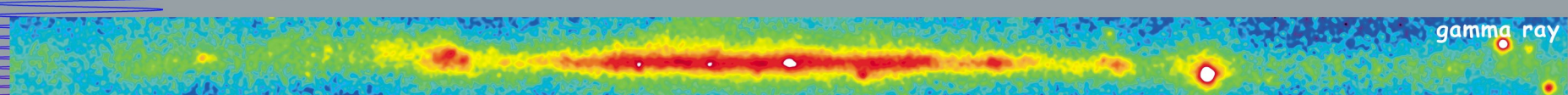
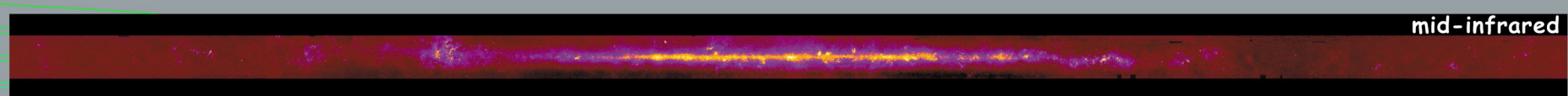
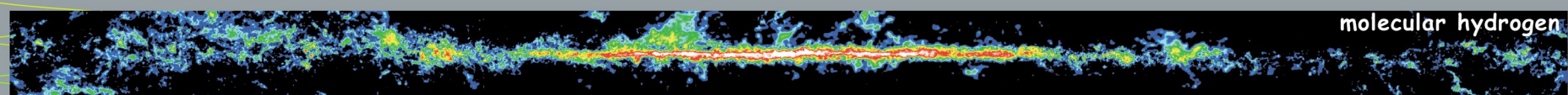
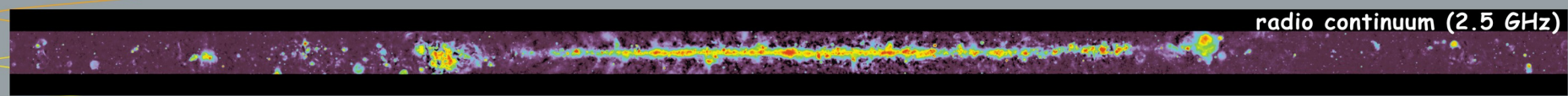
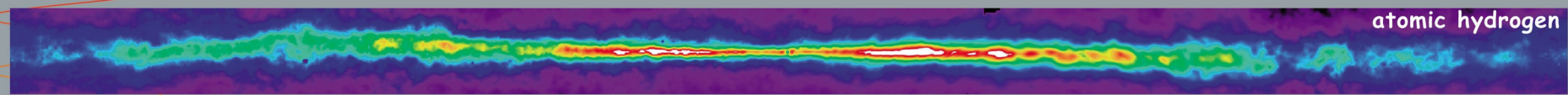
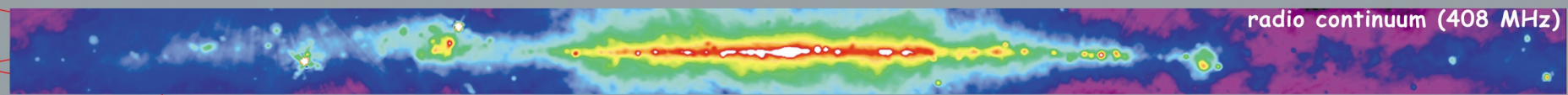
Synchrotronstrahlung

Radiobeobachtung

- Interstellares ionisiertes Gas zeigt ein charakteristisches Radiokontinuumspektrum

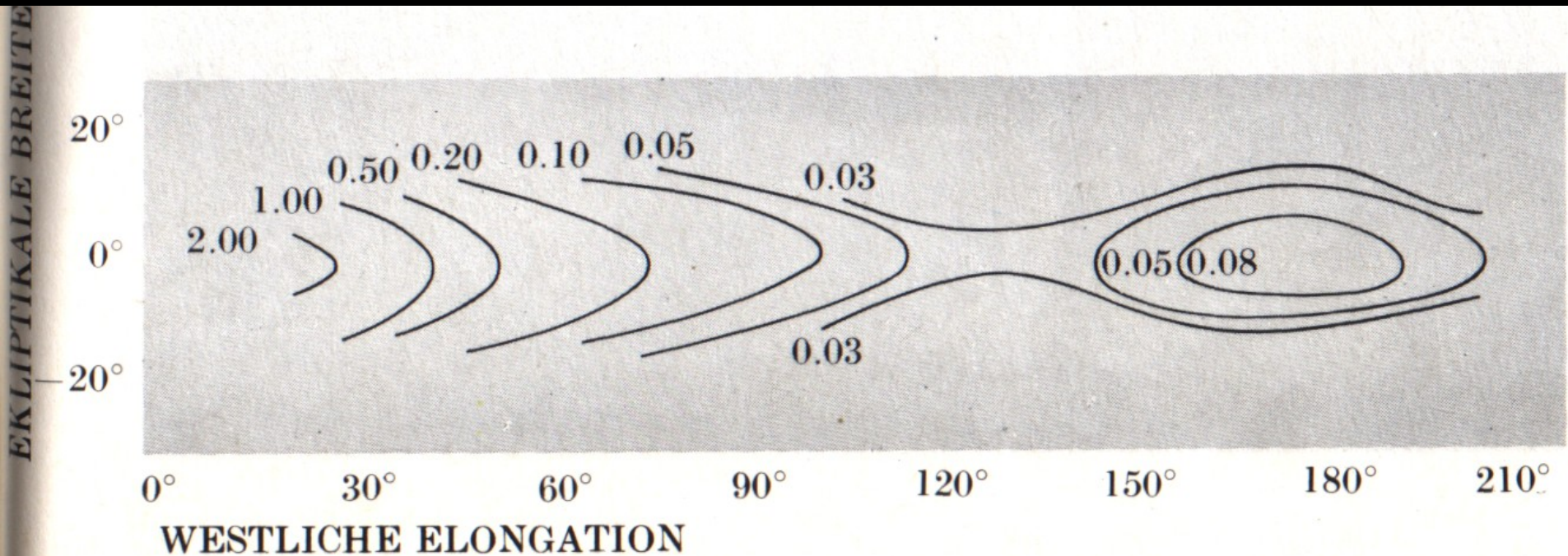


Beobachtungen



Interplanetarer Staub

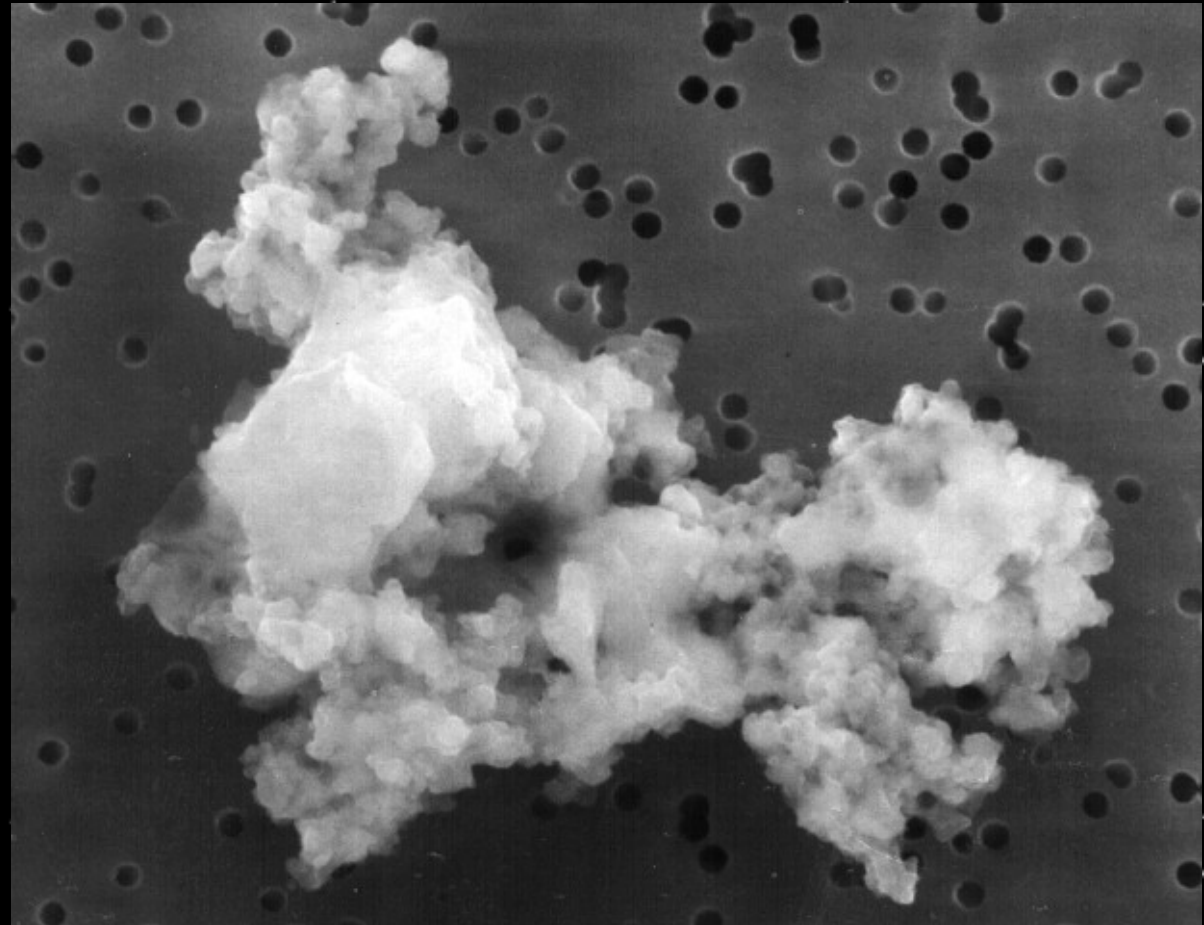
- Zodiakallicht
 - Schwaches helles Band entlang der Ekliptik



- Staub im Sonnensystem streut Sonnenlicht

Interplanetarer Staub

- Interplanetarer Staub kann in der Hochatmosphäre eingefangen werden.



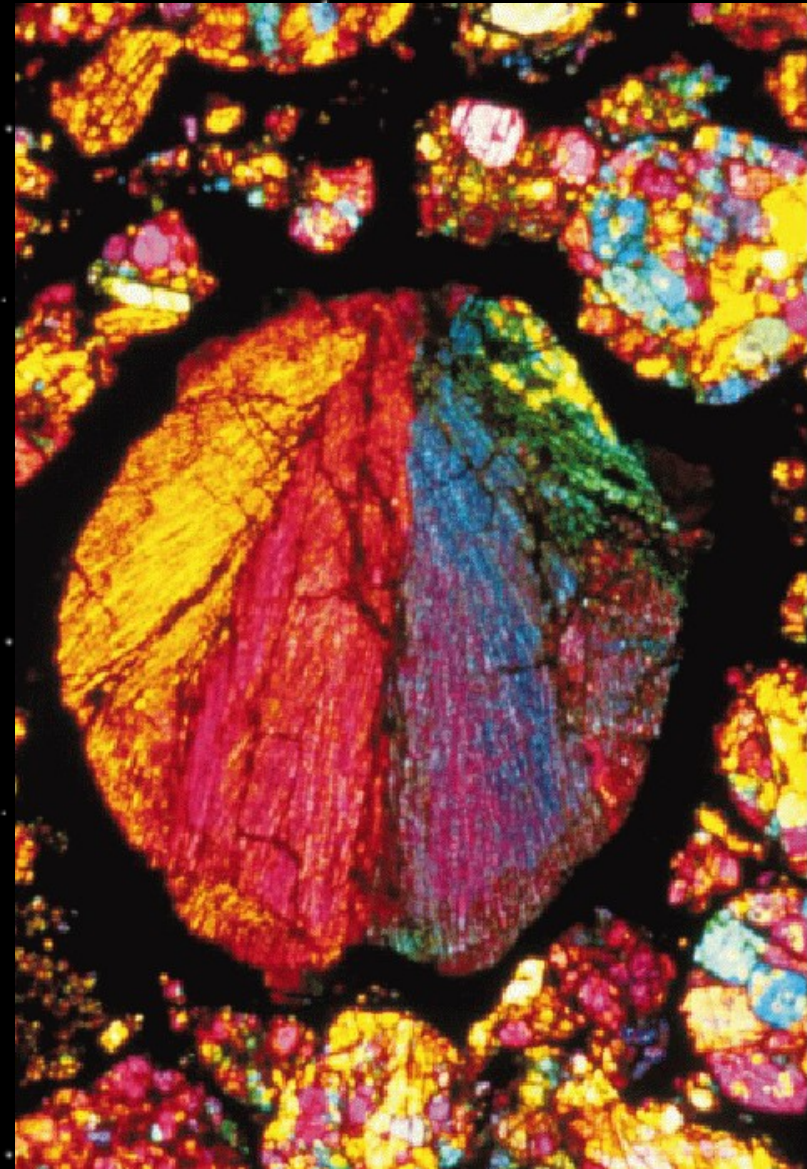
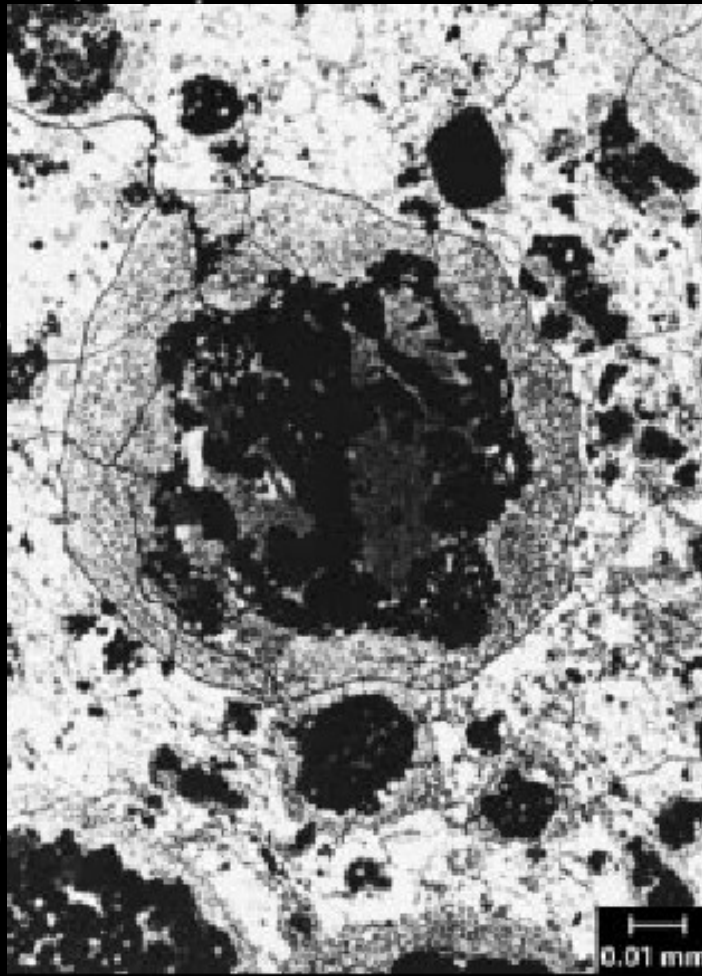
Kometenstaub

- Interplanetarer Staub wird aus Kometen und Asteroiden nachgeliefert



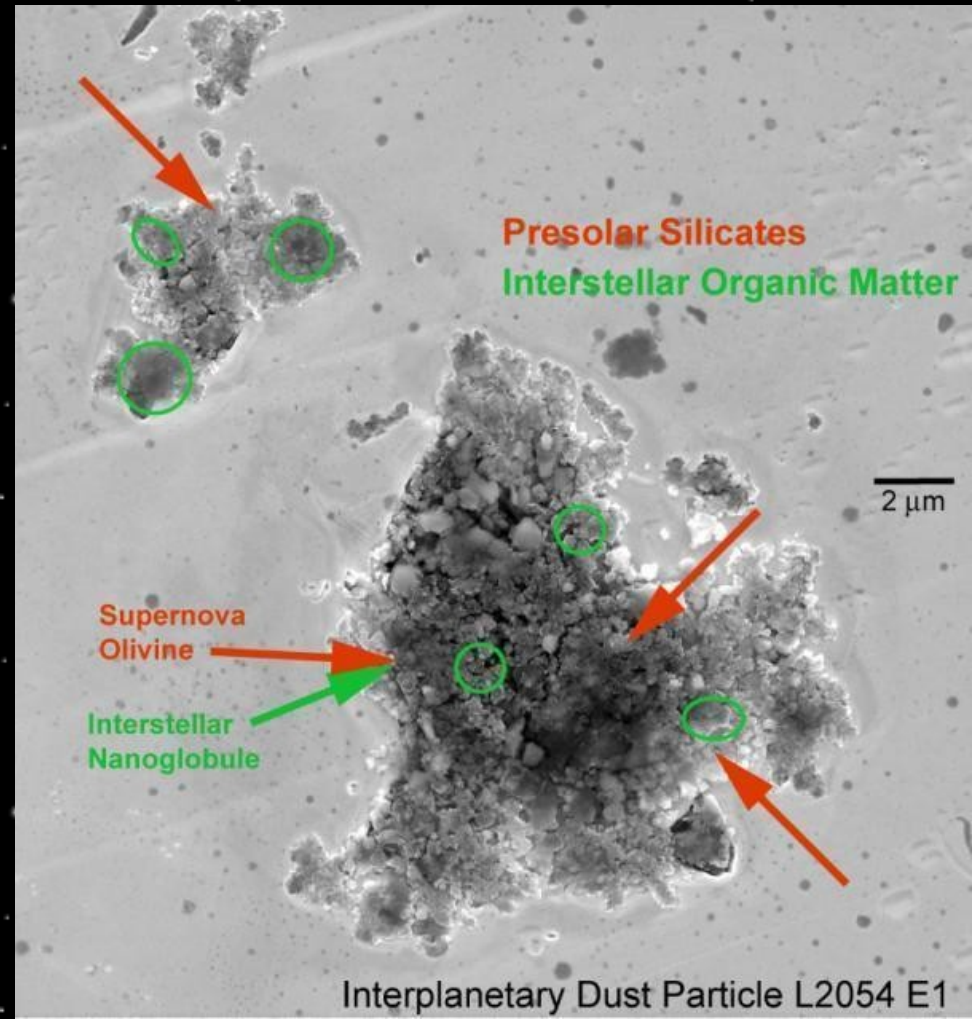
Kometenstaub

- Meteoritenschwärme aus Kometenmaterial



Kometenstaub

- Kometenmaterial hat Struktur des Staubes aus Entstehungsperiode des Sonnensystems erhalten
 - Repräsentiert interstellaren Staub

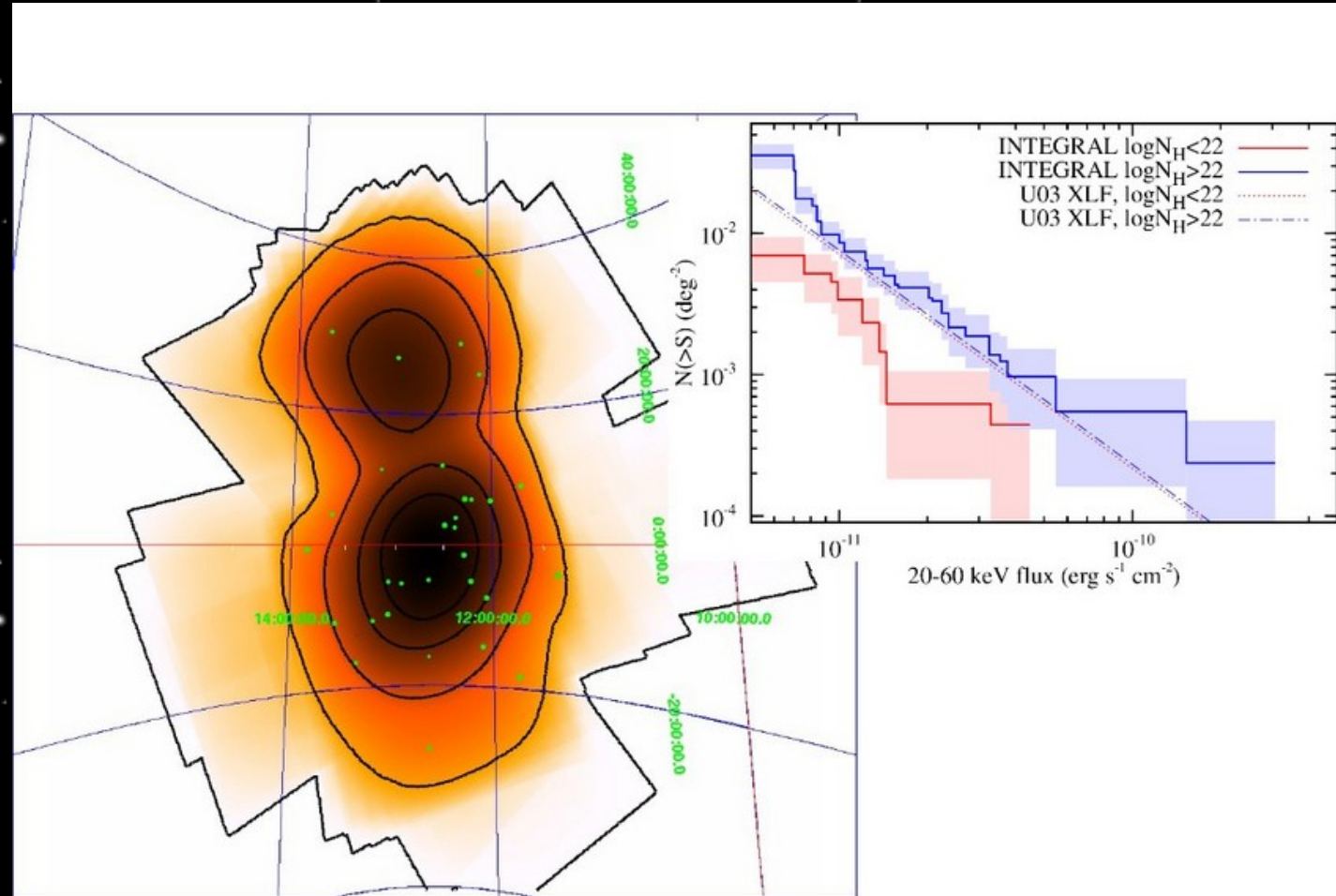


Intergalaktisches Medium

- Hochionisiertes Gas

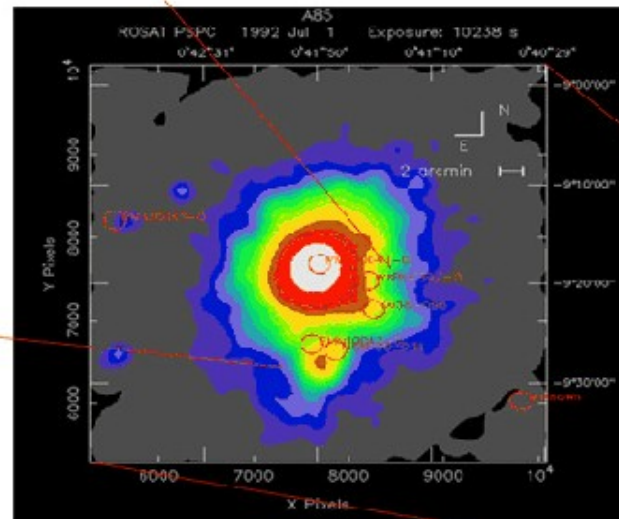
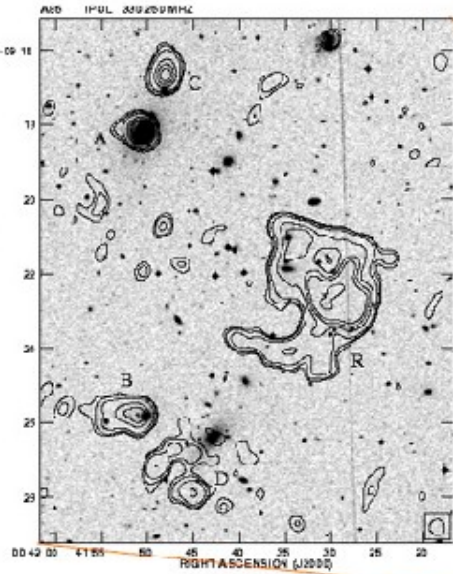
- $T > 1 \text{ Mio K}$

- Sehr weit verteilt



Intergalaktisches Medium

Beobachtung nur im Röntgenlicht
und in γ -Strahlung



3EG J0038-0949 / Abell 85
Egret image + BeppoSAX MECS contours

$0^{\text{h}}44^{\text{m}}53^{\text{s}}$ $0^{\text{h}}41^{\text{m}}41^{\text{s}}$ $0^{\text{h}}38^{\text{m}}28^{\text{s}}$ $0^{\text{h}}35^{\text{m}}16^{\text{s}}$

