

Zur Astromineralogie zirkumstellaren Oxidstaubs

Defensio von Mag. rer. nat. Dr. phil. Thomas Posch

**Institut für Astronomie
Universität Wien
13. Dezember 2004**



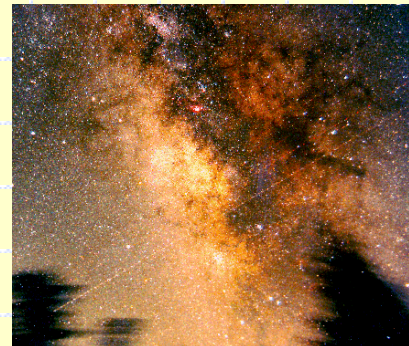
- I. Ein hochgradig unterbestimmtes Problem**
- II. Komplementärinformationen**
- III. Verwendete Methoden**
- IV. Ausgewählte Ergebnisse**
- V. Zukunftsperspektiven**

Wo begegnet uns kosmischer Staub?

- Auf der Erde: 100-1000t Staub “regnen” täglich auf die Erde herab (speziell am 13.12.2004)
- Interplanetarer Staub: bedingt *Zodiakallicht*
- Interstellarer Staub: Im visuellen Spektralbereich v.a. *extinguierend*
- Zirkumstellarer Staub: Ursprung der übrigen Staubpopulationen



< Zodiakallicht



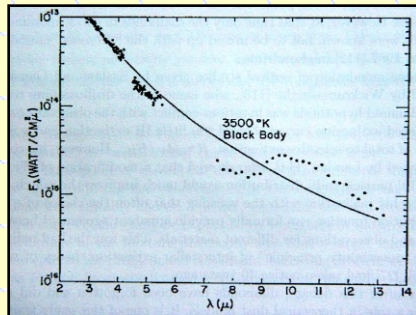
< Extinktion
des inter-
stellaren
Staubes



Astromineralogie auf der Basis von IR-Spektroskopie:

I. Ein hochgradig unterbestimmtes Problem

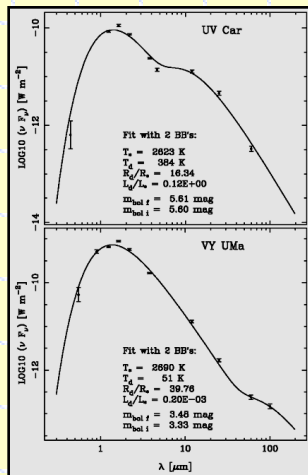
I. Ein hochgradig unterbestimmtes Problem



~1968: Erste IR-Spektren zirkumstellarer Hüllen
Informationsgehalt gering

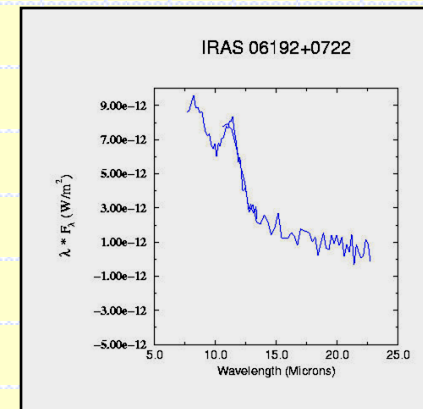
o Ceti, Gillet et al. (1968)

Ausnahme:
8-23μm-Bereich (IRAS)



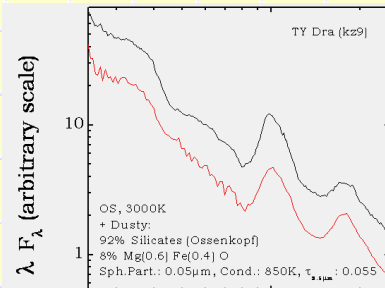
Noch in frühen 1990ern:
Weite Bereiche des IR
nur mittels Breitband-
Photometrie erfaßt

UV Car, VY UMa
Kerschbaum (1993)



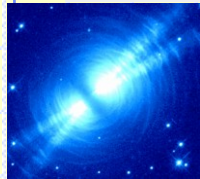
BN Mon aus IRAS Archiv
NB: 11μm SiC-Bande

I. Ein hochgradig unterbestimmtes Problem



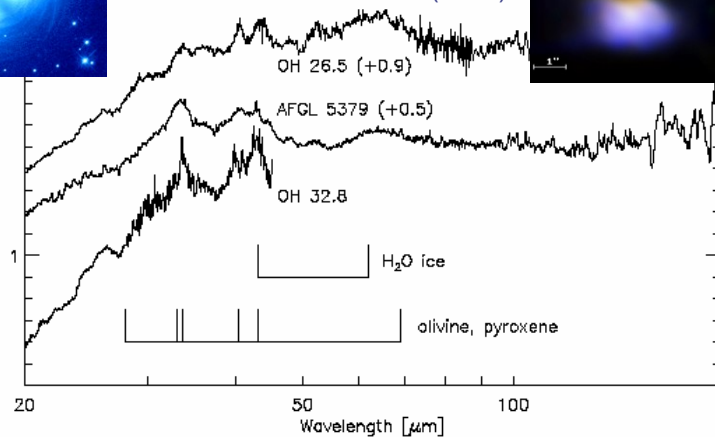
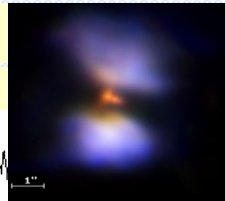
Beobachtungsseitiger Ausgangspunkt dieser Arbeit:

- ISO-Spektren
- Neue Ära der Astromineralogie



< Sahai et al. (1998)

"Frosty Leo" in I, J, H >
Roddier et al. (1993)

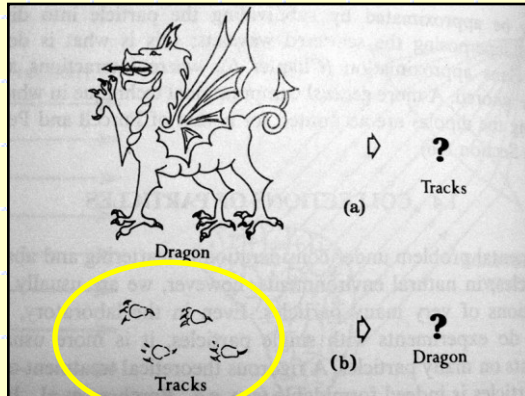


Sylvester et al. (1999)

⊕ Wichtige Einsicht:
⊖ Kristalliner Sternstaub
(Silikate, Karbonate, Karbide)

⊗ Lücke zu Beginn m. Projekts:
IR-Eigenschaften astrophysikalisch relevanter Oxide
(amorph wie auch kristallin)

Warum eigentlich “unterbestimmt”?



Bohren & Huffman (1983)

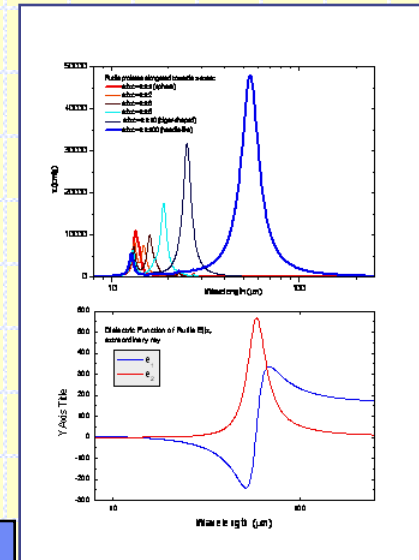
Bohren & Huffman (1983) bzgl. Kleinteilchenspektren:
“Find a dragon from its tracks”
tracks = SED kleiner fester Teilchen
dragon = Sternstaub
(oder sonstige
Population kleiner
Festkörperpartikel)

Zugrundeliegendes Problem:

Große Zahl von Parametern bestimmt
Spektrum des Systems Stern+Staubhülle:

z.B. $T(r)$, $\rho(r)$, $\chi(r)$, Gitterstruktur,
Partikelform, Partikelgröße,
Bildung v. Kern-Mantel-Teilchen

Was tun, wenn
allein schon TiO_2
so unterschiedliche
Banden erzeugen
kann?



TiO_2 , dielektr. Funktion & Emissivität

II. Komplementärinformationen

**(= nicht-spektroskopische Informationen
über die Natur kosmischer Staubteilchen)**

II. Komplementärinformationen: Übersicht

Wichtige Komplementärinformationen über Sternstaub liefern:

***A) Untersuchungen präsolarer Körner (PSGs) in Meteoriten**

Neue Ära mit NanoSIMS

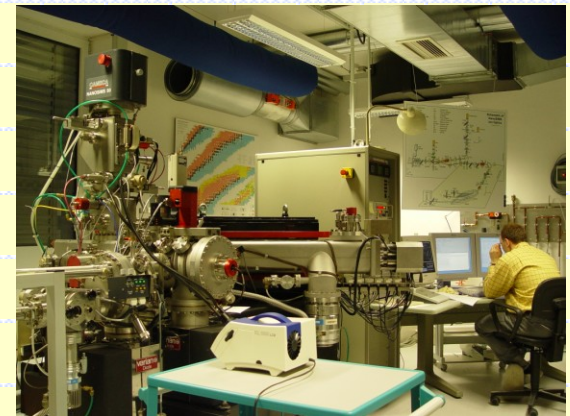
B) Element-Abreicherungsraten

Welche Elemente fehlen im interstellaren Gas?

C) Kosmische Elementhäufigkeiten

***D) Vorhergesagte Kondensationssequenzen**

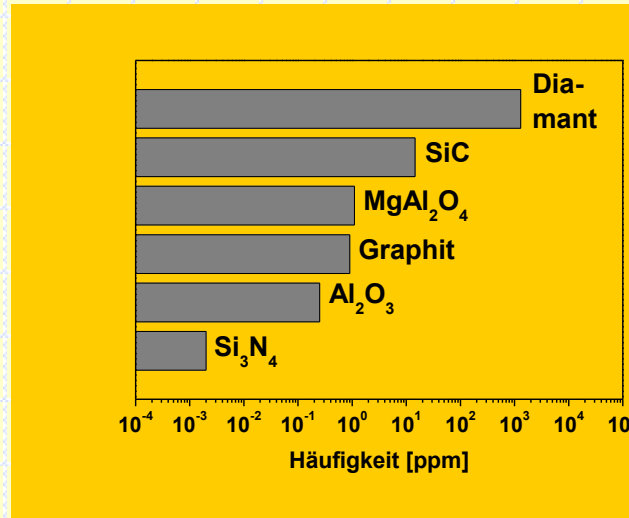
***Auf nachfolgenden Folien näher erläutert**



NanoSIMS, MPI f. Chemie,
Mainz, 22. 11. 04



II. Komplementärinformationen aus präsolaren Teilchen



Hoppe (2004)

^ Relative Häufigkeiten von
PSG-Spezies

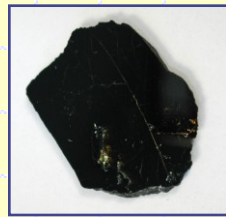
→ TiC in Graphit
< β-SiC-Tetraeder

Basisinformationen aus
PSGs:

- Sternstaub-Mineralogie
- Gitterstrukturen
- Teilchengrößen
- Teilchenformen

II. Information aus Staubkondensationssequenzen

Ebel & Grossman (2000):
Gleichgewichts-Rechnungen für Staubkondensation
(Minimierung der Gibbs-Energie) $\Rightarrow$ Sequenz (p-abhängig):

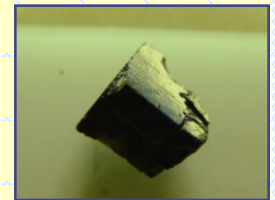


Korund $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [$\sim 1570\text{K}$ bei 10^{-6} bar]



Hibonit $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$ [$\sim 1480\text{K}$]

Perovskit CaTiO_3 [$\sim 1460\text{K}$]



Grossit CaAl_4O_7 [$\sim 1360\text{K}$]



Spinell MgAl_2O_4 [$\sim 1270\text{K}$]

(Silikate, teils im $<1000\text{K}$ -Bereich)

Hohe Kond.temperaturen
 $\Rightarrow$ besonders relevant
für relativ heiße
staubbildende
Objekte!

III. Verwendete Methoden

III. Verwendete Methoden

Physikalische u. mathematische Theorien mit besonderer Relevanz für Astromineralogie

Klassische Theorie der optischen Konstanten
nach H.A. Lorentz u.a.

(Gruppentheorie)

Mie-Theorie

(Erweiterungen der Mie-Theorie)

Strahlungstransporttheorie

(Kondensationstheorie)

Ziel:
Verständnis des Zusammenhangs:
Labormeißgrößen ↔ astronomische Meßgrößen

III. Verwendete Methoden

Voraussetzungen:

- ✓ Laboranaloge präpariert
- ✓ Analytik durchgeführt

Labor-Messungen und Rechnungen:

1a) Messe Reflektivität $R(n,k,\lambda) \Rightarrow n + i k(\lambda)$

1b) Messe Transmission $T(n,k,\lambda,F) \Rightarrow k(\lambda)$

2) Berechne $Q_{\text{abs}}(n,k,a,F,\lambda)$

a ... Teilchenhalbmesser
 B_λ ... Planck-Funktion
 $n(\lambda), k(\lambda)$... optische Konstanten
 F ... Teilchenform
 $Q_{\text{abs}}(n,k,a,\lambda)$:
Absorptionseffizienzfaktor
 $\langle T_d \rangle$: mittlere Staubtemperatur

Astronomische Beobachtungen

liefern im einfachsten Falle:

$$\sum_j Q'_{\text{abs},j}(n',k',a',F',\lambda) * B_\lambda(\langle T_d \rangle)$$

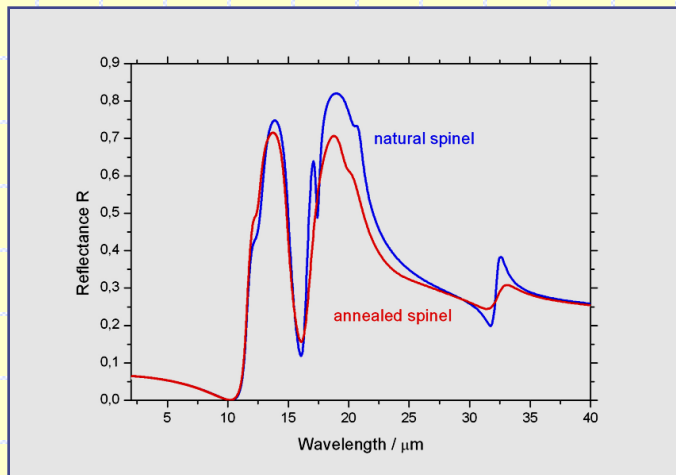
[genauer: Resultat von STR,
in welche $Q_{\text{abs},i}$ eingehen]

$\Rightarrow$ ermittle $Q'_{\text{abs},j}(n',k',a',F',\lambda)$

Der Vergleich
macht uns
(un)sicher

III. Verwendete Methoden: Laborspektroskopie

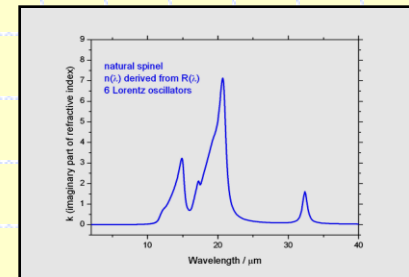
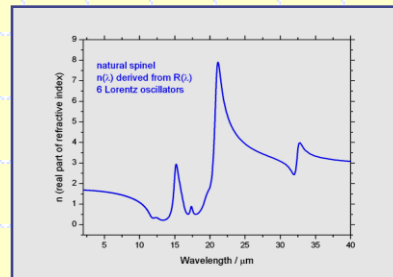
Bsp. eines gemessenen Reflexionsspektrums eines Mg-Al-Spinells:



Hitzebehandlung (1h @ 1223K) verändert das Kristallgitter von Spinell (partieller Platztausch Al ↔ Mg)

$$R = [(n-1)^2 + k^2] / [(n+1)^2 + k^2]$$

$$(n + i k)^2 = \epsilon$$



$$\epsilon = \epsilon_0 + \sum_j \Omega_j^2 / (\omega_j^2 - \omega^2 - i \gamma_j \omega)$$

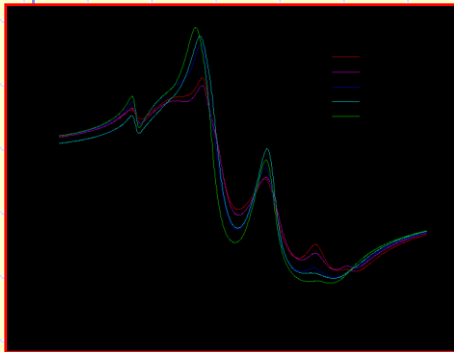
j	ω_j [1/cm]	Ω_j [1/cm]	γ_j [1/cm]
1	803.6	159.7	82.5
2	666.6	522.9	31.9
3	577.3	132.1	11.5
4	492.4	660.2	30.8
5	478.6	655.5	14.0
6	308.1	151.0	6.9



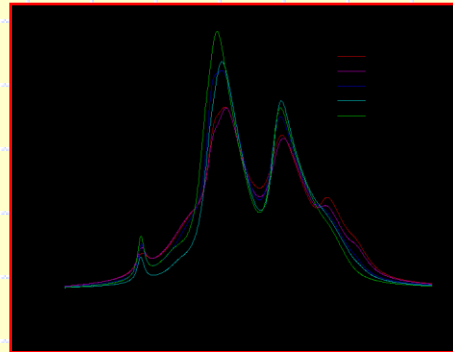
III. Verwendete Methoden: Berechnung von Absorptions- und Streueffizienzen

Maß für WW kleiner Teilchen mit el.-mag. Strahlung $Q_{\text{abs}}(\lambda)$, $Q_{\text{streu}}(\lambda)$

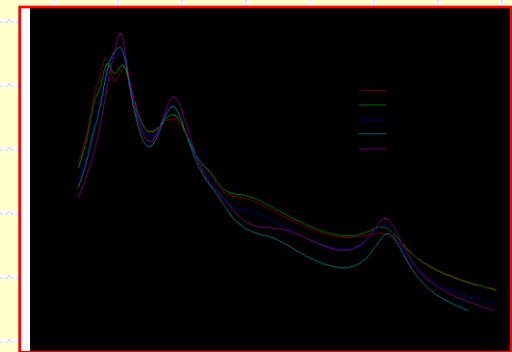
- folgen aus Mie-Theorie (unendliche Reihen für $Q_{\text{abs}}(\lambda)$ und $Q_{\text{streu}}(\lambda)$ für $a \cong \lambda$)
- entscheidend abhängig von Partikelform und Partikelgröße
- $Q_{\text{abs}}(\lambda)/a = 8 \pi / \lambda \cdot 6 n k / [(n^2 - k^2 + 2)^2 + 4 n^2 k^2]$ für sphärische Partikel mit $a \ll \lambda$
- Kugelresonanzen (Fröhlich-Moden) zentriert um $k^2 = 2$ (und $n \rightarrow 0$)
- (NB: keine notwendige Bedingung, aber, wenn erfüllt, starke Resonanz)



$n(\omega)$ für Spinelle
mit versch. Mg:Al-Verh.



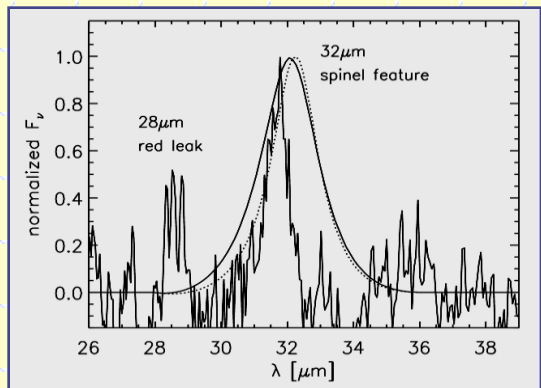
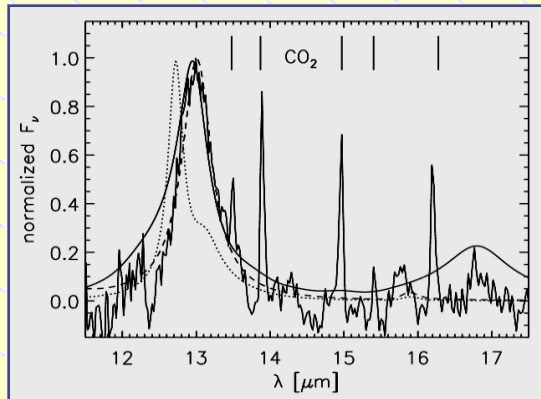
$k(\omega)$ für synth. Spinelle



$Q_{\text{abs}}(\lambda)$

IV. Ausgewählte Ergebnisse

IV. Ausgewählte Ergebnisse (1)



Leitfrage: $\exists$ Korrelation:

Im Labor gemessene Oxidbanden

$\leftrightarrow$ Staub-Banden in ISO-Spektren ?

Bsp.1: Emissionbanden bei 13, 17 & 32 μm :

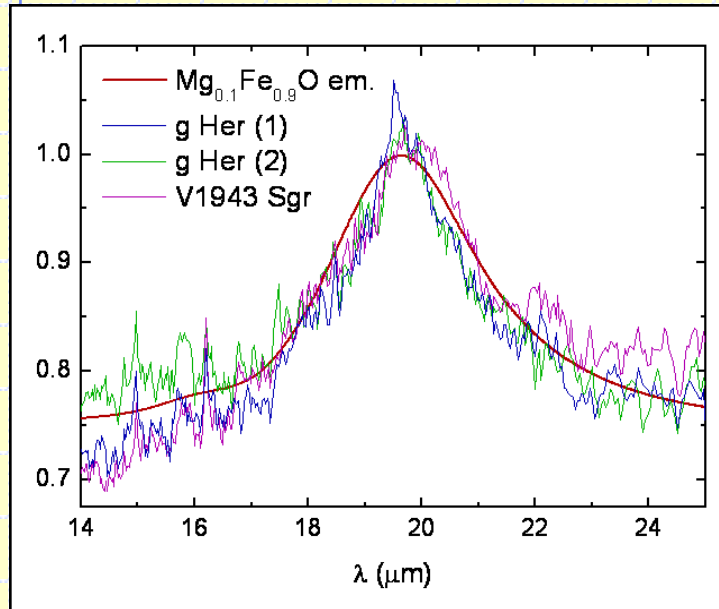
Wahrscheinlichster Urheber:

Spinell (MgAl_2O_4)

13 μm -Bande: lange Zeit $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$
zugeschrieben (links oben Linie "...")

Sekundärbanden bei 21 und 26 μm
nicht detektiert

IV. Ausgewählte Ergebnisse (2)

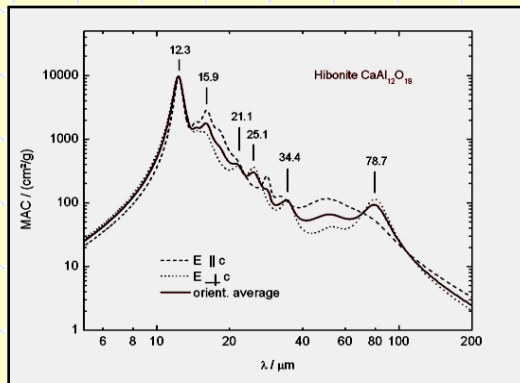
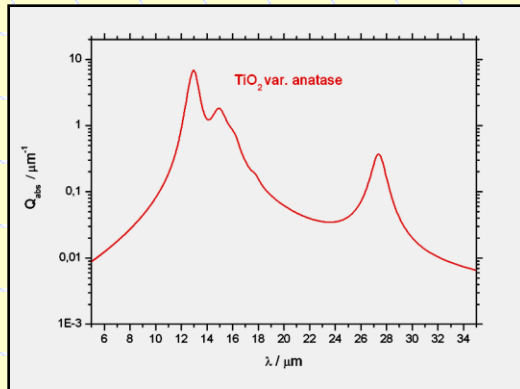


Die 19.5 μm -Emissionsbande:

- Erste Hinweise durch IRAS
- Hinreichend aufgelöst erst mit ISO (Posch et al. 2002)
- Beobachtet v.a. in Spektren semiregulärer Veränderlicher
- Kondensationstheorie unterstützt spektroskopische Evidenz für $\text{Mg}_x\text{Fe}_{1-x}\text{O}$ (mit $x \cong 0.1$)

^ ISO-SWS-Staubresiduum von g Her u. V1943 Sgr;
Staubemission von $\text{Mg}_{0.1}\text{Fe}_{0.9}\text{O}$

IV. Ausgewählte Ergebnisse (3)



^ Posch et al. 2003; Mutschke et al. 2002

Für zahlreiche Oxidspezies:
Optische Konstanten im Labor gemessen,
aber keine eindeutige astron. Identifikation

- TiO₂: Kondensationskeim in O-reichen CSEs.
- $n(\lambda)$ & $k(\lambda)$ aus $R(\lambda)$ abgeleitet
- CaAl₁₂O₁₉ u.a. Ca-Al-Oxide: viele IR-Banden zw. 12 und >70 μm . Korrelation mit astronomischen Spektren unklar
- Ähnlich: Ca-Ti-, Mg-Ti-, Fe-Ti-Oxide

IV. Ergebnisübersicht: Abgeleitete IR-Eigenschaften

<u>Staubspezies</u>	<u>Symmetrie</u>	<u>Q_{abs}-Maxima [µm]</u>	<u>Daten</u>
nat. TiO ₂ -Rutil	tetragonal	13.4, 23, 27.5	C-OC
nat. TiO ₂ -Anatas	tetragonal	13.0, 15.0, 27.5	R-OC
nat. TiO ₂ -Brookit	orthorhomb.	13.5, 18.5, 21.9, 26.9, 31.1, 33, 44.9, 53.3, 57.5	R-OC
Synth. Ti ₂ O ₃	trigonal	18.6, 20, 25.5, 28, 36	C-OC
nat. CaTiO ₃	orthorhomb.	14.1, 21.0, 23.8, 32.7, 33.5, 62.3	R-OC
synth. MgTiO ₃	trigonal	13.5, 17.2, 21.0, 23.7, 28.0, 35.2	T
synth. MgTi ₂ O ₅	orthorhomb.	15.4, 19.4, 24.9, 27.7, 33.2	T
synth. Mg ₂ TiO ₄	kubisch	16.2, 20.9, 22.7, 27.4, 35.2	T
nat. CaAl ₁₂ O ₁₉	tetragonal	13.3, 16.6, 25.4, 34.9, 79.8	R-OC
synth. CaAl ₄ O ₇	monoklin	10.9, 12.3, 13.4, 14.7, 15.2, 15.6, 17.4, 18.6, 22.6, 23.7, 25.7, 27.9, 30.7, 32.0, 34.9, 39.1, 44.0, 48.8, 52.8, 63.5, 73.6	T
nat. Mg _{1.02} Al _{1.93} O ₄	kubisch	13.3, 16.8, 17.5, 32.2	R-OC
ann. Mg _{1.02} Al _{1.93} O ₄	kubisch	13.1, 17.0, 32.3	R-OC
synth. Mg _{1.01} Al _{1.99} O ₄	kubisch	13.0, 16.9, 32.0	R-OC
synth. Mg _{0.94} Al _{2.04} O ₄	kubisch	13.0, 16.8, 32.3	R-OC
synth. Mg _{0.82} Al _{2.12} O ₄	kubisch	13.1, 16.8, 32.0	R-OC
synth. Mg _{0.73} Al _{2.17} O ₄	kubisch	12.1, 13.2, 16.8, 31.8	R-OC
synth. Mg _{0.53} Al _{2.31} O ₄	kubisch	12.0, 13.3, 16.8, 31.6	R-OC
synth. Mg _{0.43} Al _{2.38} O ₄	kubisch	11.9, 13.3, 16.8, 30.7	R-OC
synth. FeO	kubisch	19.9	C-OC
synth. Mg _{0.1} Fe _{0.9} O	kubisch	19.6	C-OC

C-OC ... Berechnung von Q_{abs} aus existierenden optischen Konstanten
R-OC ... Bestimmung der optischen Konstanten aus Reflexionsmessungen
T ... Transmissionsmessungen (liefern keine Vollständige Information über optische Konst.)

V. Zukunftsperspektiven

V. Zukunftsperspektiven (2005/06)

a) Messungen im Labor

- Fortsetzung klassischer IR-Spektroskopie (u.a. an Karbonaten)
- Besondere Berücksichtigung des FIR im Hinblick auf Herschel-PACS

b) Astronomische Beobachtungsdaten

- Gewinnung neuer Beobachtungsdaten (Spitzer; VLT-MIDI; VLT-VISIR)

c) Rechnungen

- Berechnung der Absorptionseffizienz von Clustern sphärischer Teilchen (mit A. C. Andersen, H. Mutschke)
- Verbesserte STR-Modelle (mit W. Nowotny, S. Höfner)



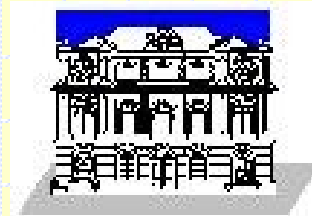
Calcit
 CaCO_3



Cluster sphärischer Partikel

Dank für vielfache Unterstützung 1998-2004 an:

**Anton Beran (IMP)
Gabriele Born (AIU)
Ernst A. Dorfi (IfA)
Johann Dorschner (AIU)
Dirk Fabian (AIU)
Vera Hammer (NHMW)
Ingrid Hodouš (IfA)
Josef Hron (IfA)
Cornelia Jäger (AIU)
Gero Kurat (NHMW)
Thomas Lebzelter (IfA)
Hans-Michael Maitzen (IfA)
Harald Mutschke (AIU)
Wilhelm Nöbauer (IfA)
Walter Nowotny (IfA)
Roland Ottensamer (IfA)
Hannes Richter (IfA)
Jürgen Weiprecht (AIU)**



bmvit

IV. Ergebnisse: Thesen (1)

1. Semireguläre Veränderliche sind anteilmäßig reicher an oxidischem Staub als Mira-Veränderliche.
2. Zu den bedeutendsten oxidischen Sternstaubkomponenten gehören Al-, Fe- und Mg-Oxide.
3. Aluminiumoxid liegt in zirkumstellaren Hüllen vorwiegend in der Form von amorphem Al_2O_3 vor.
4. Urheber der $13\mu\text{m}$ -Emissionsbande in zirkumstellaren Hüllen von AGB-Sternen ist eine Al-O-Streckschwingung, und zwar in MgAl_2O_4 , nicht in $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.
5. Spinell-Partikel produzieren weitere Emissionsbanden bei 16.8 und $32\mu\text{m}$. An diesen Positionen werden features in den Spektren zirkumstellarer Hüllen beobachtet.

IV. Ergebnisse: Thesen (2)

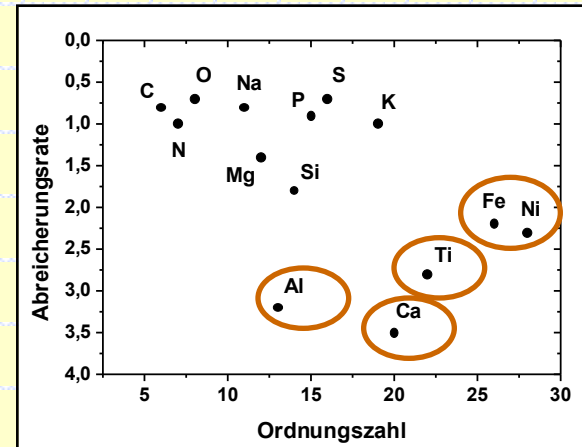
6. Zahlreiche Quellen der $13\mu\text{m}$ -Emission zeigen eine starke Emissionsbande bei $19.5\mu\text{m}$. Auch diese wird von einem Metalloxid hervorgerufen, und zwar von $(\text{Mg,Fe})\text{O}$.
7. Titanoxide scheiden als Urheber der 13- und $19.5\mu\text{m}$ -Banden aus. (Sie dienen aber wohl als Kondensationskeime in sauerstoffreichen zirkumstellaren Hüllen.)
8. Rechnerisch ermittelte Kondensationssequenzen und Untersuchungen an präsolaren Teilchen (PSGs) sind nötig, um die Vieldeutigkeit spektroskopischer Befunde zu reduzieren.
9. Neuere PSG-Studien unterstützen einige der Hauptergebnisse der vorliegenden Arbeit.
10. *Convergentia astronomiae et mineralogiae non negari potest.*

Erg. zu II.: Information aus Element-Abreicherungsraten

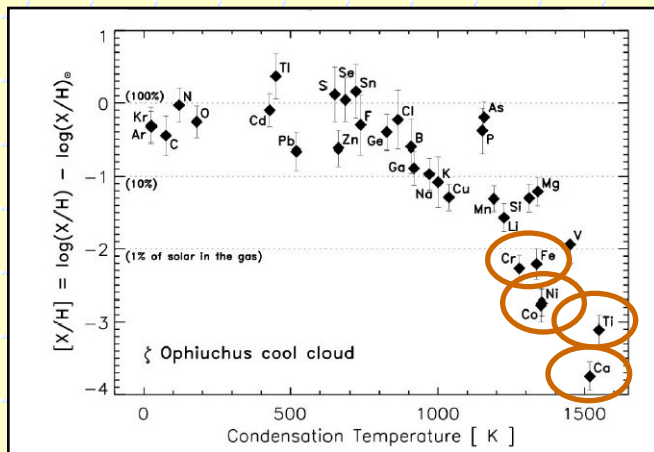
Interstellares Gas: Einige Elemente stark unterhäufig (im Verhältnis zu solaren Werten)

Um Faktoren > 100 unterhäufig:

Ca, Ti, Al,
Co, Ni, Cr, Fe



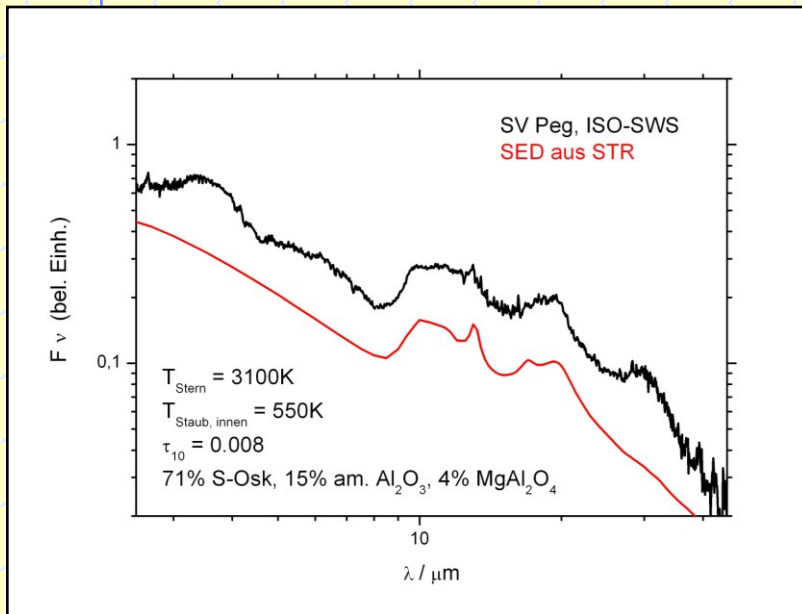
Abreicherungsrate
als f(Z)
(nach Salpeter
1977)



Warum die Unterhäufigkeit?
Phasenübergang gasförmig → fest
(besonders für Ca, Ti, Al, Fe, ...
⇒ Spektroskopiere deren Verbindungen!)

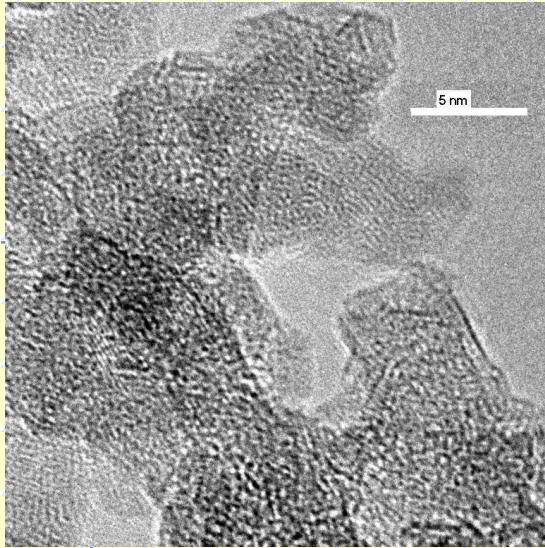
Abreicherungsrate als Funktion der Kondensations-
temperatur (Palme & Jones 2004)

Erg. zu III.: Beobachtungen & Modellrechnungen

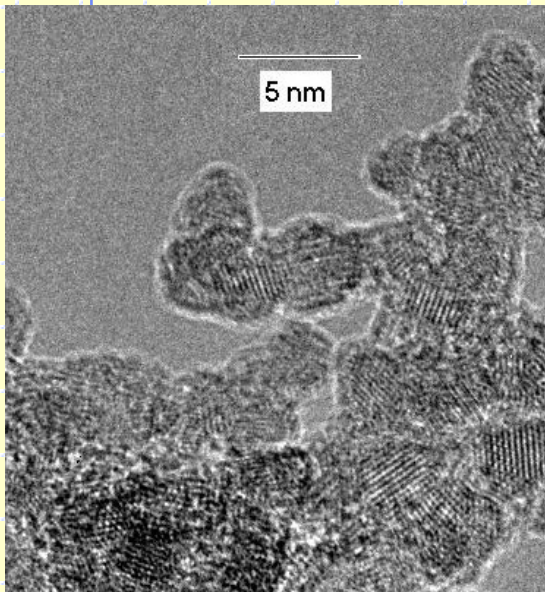


^ SV Peg ISO-SWS-Spektrum
& STR-Modell (DUSTY)

- ISO-Beobachtungen: durchgehende λ -Abdeckung von 2 bis 45 (200) μm
- Beobachtete SED rekonstruierbar mit STR-Rechnungen
- Benötige: Datenbank optischer Konstanten von Staubspezies
Modellspektren f. Photosphäre
- Limitationen: Unvollständigkeit der Datenbanken; S/N beobachteter Spektren

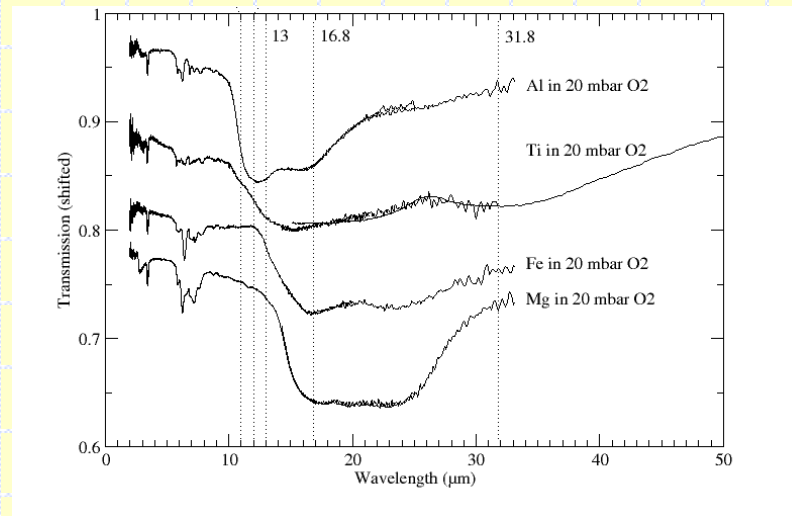


^ AlO_x



Erg. zu V.: Spektroskopie nach Kondensation aus der Gasphase

Idee: Statt Berechnung von C_{abs} aus den makroskopischen optischen Konstanten: Messung der Absorptivität von frisch kondensierten Partikeln. Partikelgrößen im Sub- μm -Bereich.



^ IR-Spektren von Al-, Ti-, Fe-, Mg-Oxiden aus Laser-Ablation
< TiO_x