

- **Prolog**
 - Was sind Debris-Scheiben? Wieso Debris-Scheiben?
 - Physik von Debris-Scheiben
 - Beobachtung
 - Ein analytisches Modell
- **[A] Modellierung anhand hochwertiger Daten**
 - HD 107146 – Der Vorteil von Streulichtdaten
 - q^1 Eri & HD 207129 – Aufgelöste Daten im fernen Infrarot
 - Steile spektrale Energieverteilung – Ein Spezialfall
- **[B] Simulation von Strukturen und deren Beobachtbarkeit**
 - Planet-Scheibe-Wechselwirkung – Modellierung & Ergebnisse
 - Simulation von Beobachtungen
 - Anwendung auf neue Beobachtungen
- **Zusammenfassung & Ausblick**

Prolog – Was sind Debris-Scheiben?

- **Optisch dünne** Staubscheiben um **ältere** Sterne (Hauptreihensterne), **nahezu gasfrei**
- Staub nicht primordial (**Zeitskalen**), Entstehung durch Kollisionen größerer Objekte
- Üblicherweise Ausdehnungen bis einige 100 AE Radius, **innere Löcher** von einigen 10 AE

Prolog – Wieso Debris-Scheiben?

- Kollidierende Objekte: Planetesimale (**Planetenentstehung**)
- Dynamik von Staub beeinflusst durch **Wechselwirkung mit Planeten**
- Staub: große Oberfläche \implies **beobachtbar**
- Analogie zum Sonnensystem

Strahlungsprozesse

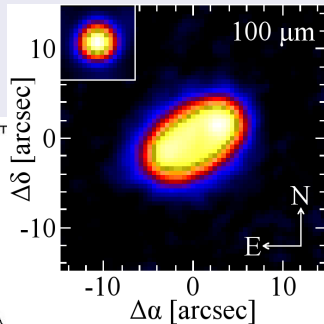
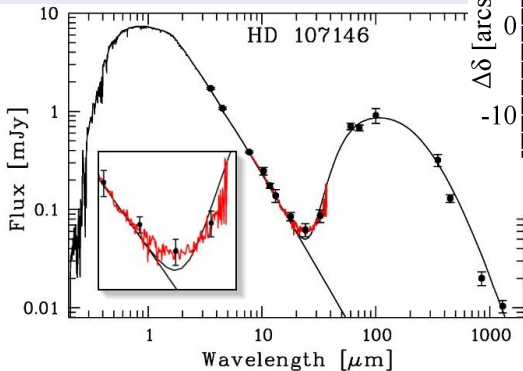
- Absorption/Reemission von Sternstrahlung
- Streuung von Sternstrahlung (winkelabhängig)
- Annahmen: optisch dünn, thermisches Gleichgewicht mit Sternstrahlung

Dynamische Prozesse

- Gravitation des Sterns \longleftrightarrow Strahlungsdruck: **Blow-out size**
- Poynting-Robertson-Effekt: Entfernen kleiner Körner
- Kollisionen: Zerkleinern von Staub, ideal: $dn(a) \propto a^{-3.5} da$ (Dohnany 1969)

Thermische Reemission

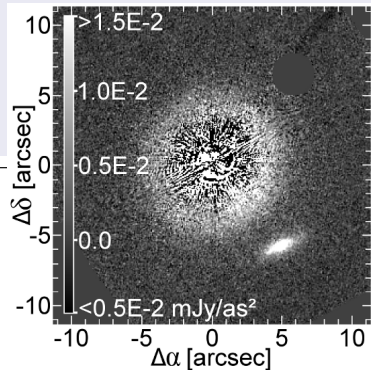
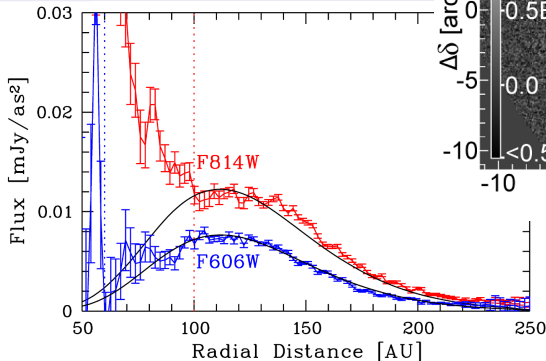
- + Staub kalt \Rightarrow Infrarotexzess
- Geringe räumliche Auflösung (große λ)
- Atmosphäre \Rightarrow Weltraumteleskope



- + Spektroskopie möglich
- + Interferometrie: höhere räumliche Auflösung

Gestreute Sternstrahlung

- Scheibe optisch dünn, sehr leuchtschwach
- Hoher Kontrast Stern – Scheibe
- + Hohe Räumliche Auflösung



± Durch kleinste (μm)
Körner dominiert,
Streuasymmetrie

Prolog – Ein analytisches Modell

Radiale Staubverteilung

Rotationssymmetrie

$\sigma(r) \propto r^{-\alpha}$ (Oberflächendichte)

Innerer, äußerer Radius R_{in} , R_{out}

Korngrößenverteilung

$dn(a) \propto a^{-\gamma} da$

Untere, obere Korngröße a_{min} , a_{max}

Manchmal: $a_{\text{min}} = a_{\text{blow}}$

Staubzusammensetzung

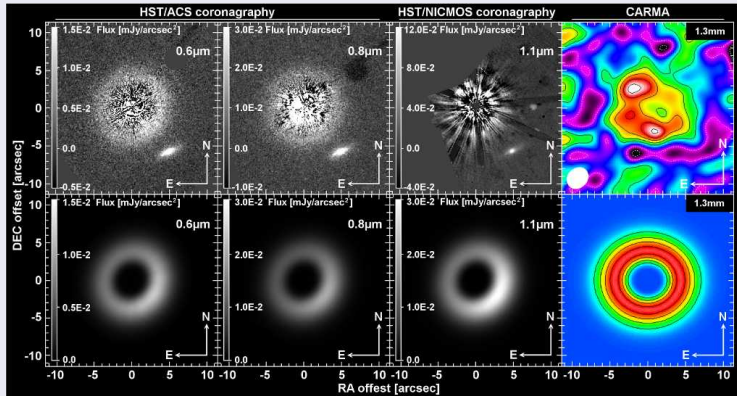
Oft astronomisches Silikat
(Draine 1987, Draine 2003)

Optische Eigenschaften: Mie Streuung
(sphärische, kompakte Körner)

[A] Modellierung anhand hochwertiger Daten (1):

HD 107146 – Der Vorteil von Streulichtdaten

Ausgangspunkt



Bekannt:

$d = 28.5 \text{ pc}$

$i = 25^\circ$

Spektralklasse: G2 V

Alter $\sim 100 \text{ Myr}$

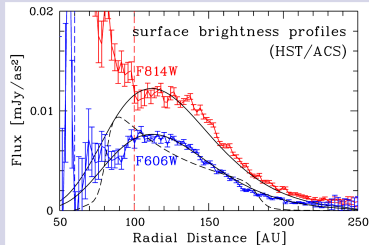
$L_\star = 1.1 L_\odot$

$T_{\text{eff}} = 5850 \text{ K}$

Modellierung

Daten im Streulicht, \sim Draufsicht

Räumliche Verteilung



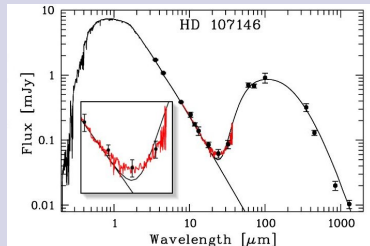
Alternative zu Potenzgesetz:

$$\sigma(r) \propto \left(\frac{r-s}{r_p-s} \right)^\alpha \cdot \exp \left[\alpha \left(1 - \frac{r-s}{r_p-s} \right) \right]$$

- Parameterraum: 3 + 2 statt 5 Dimensionen
- Fit generell gut, aber Probleme mit Spitzerspektrum

Korngrößenverteilung

Standardansatz: $n(a) \propto a^{-\gamma}$, a_{\min} , $a_{\max} = 1 \text{ mm}$, Astronomisches Silikat



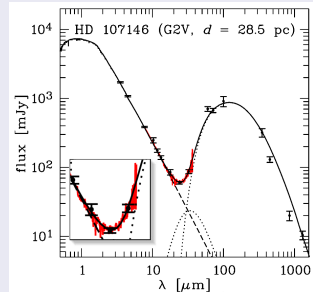
Ergebnisse

Allgemein:

- Breite Scheibe (~ 50 AE ... ~ 230 AE)
- Max. Oberflächendichte bei ~ 130 AE
- Große untere Korngröße ($> 2 \mu\text{m}$)
- Staubmasse $\sim 6 \times 10^{-7} M_{\odot}$

Spitzerspektrum:

- Modifikation: $a_{\text{min}} > 3 \mu\text{m}$
- Zusätzliche Staubkomponente, wenige AE vom Stern

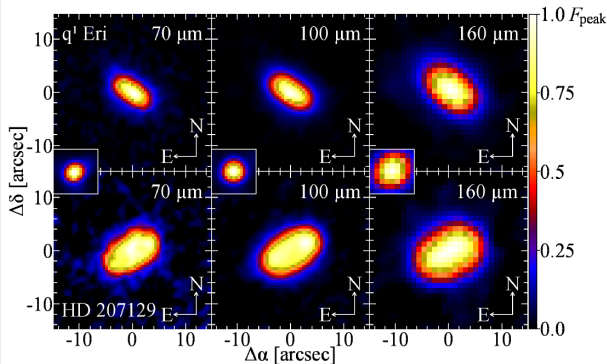


[A] Modellierung anhand hochwertiger Daten (2):

q¹ Eri & HD 207129 – Aufgelöste
Daten im fernen Infrarot

Aufgelöste Scheiben von Herschel

Herschel/PACS Bilder



oben: q¹ Eridani
unten: HD 207129

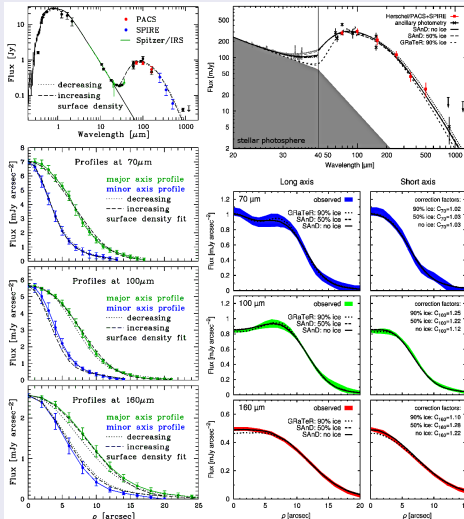
Systeme

q¹ Eri: F8 V, $L_{\star} = 1.57 L_{\odot}$, $d = 17.4$ pc, Alter: $\sim 0.3 \dots 6.3$ Gyr

HD 207129: G2 V, $L_{\star} = 1.26 L_{\odot}$, $d = 16.0$ pc, Alter: $\sim 1.5 \dots 3.2$ Gyr

Aufgelöste Scheiben von Herschel

Simultane Modellierung aller Daten (Potenzgesetze)



Ergebnisse: q^1 Eri

2 Lösungen:

(1) $r \sim 60 \text{ AE} \dots \infty$

α **positiv**

(2) $r \sim 5 \text{ AE} \dots 180 \text{ AE}$

α **negativ**

andere Parameter "gutartig"

Ergebnisse: HD 207129

• $r \sim 60 \text{ AE} \dots 200 \text{ AE}$

• α **negativ**

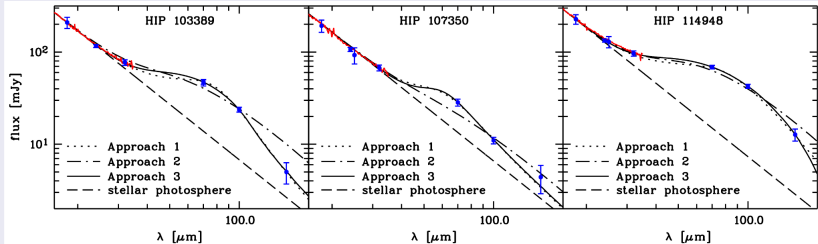
• a_{min} einige μm

• $\gamma \approx 4.0$

[A] Modellierung anhand hochwertiger Daten (3):

Steile spektrale Energieverteilung –
Ein Spezialfall

Ergebnisse



- Steile Korngrößenverteilung (*Ansatz 1*) oder kleine obere Korngröße (*Ansatz 2*)
- Standardlösung ($\gamma = 3.5$, großes a_{\max}) schlechter fit (*Ansatz 3*)
- $r \sim 30$ AE
- $a \sim 10 \mu\text{m}$

[B] Simulation von Strukturen und deren Beobachtbarkeit (2):

Planet-Scheibe-Wechselwirkung –
Strukturen & Beobachtbarkeit

Planet-Scheibe-Wechselwirkung

Anfangsbedingungen der Vielteilchensimulationen

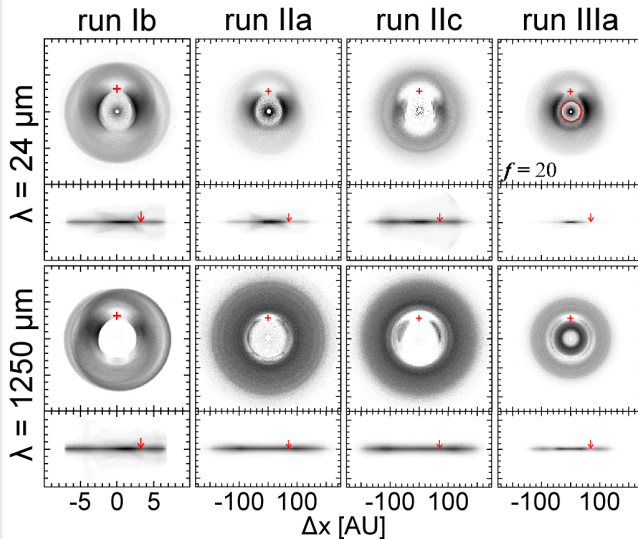
Allgemein

- Stern: Sonne
- 1 Planet
- 1 Staubring / Staubscheibe
- Planet & Scheibe koplanar

Parameter

Run	r_{in} [AE]	r_{out} [AE]	α	M_{pl} [M_{J}]	a_{pl} [AE]	e_{pl}	t_{max} [Myr]
Ia	5.0	5.5	0.0	1.0	5.0	0.0	50
Ib	5.0	5.5	0.0	1.0	3.15	0.0	50
Ic	50.0	55.0	0.0	1.0	50.0	0.0	50
Id	50.0	55.0	0.0	1.0	31.5	0.0	50
IIa	70.0	250.0	0.5	0.5	70.0	0.0	100
IIb	70.0	250.0	0.5	1.0	70.0	0.0	100
IIc	70.0	250.0	0.5	5.0	70.0	0.0	100
IId	70.0	250.0	0.5	1.0	70.0	0.1	100
IIIa	35.0	210.0	0.5	0.5	70.0	0.0	100
IIIb	35.0	210.0	0.5	1.0	70.0	0.0	100
IIIc	35.0	210.0	0.5	5.0	70.0	0.0	100
IIId	35.0	210.0	0.5	1.0	70.0	0.1	100

Simulierte Strukturen

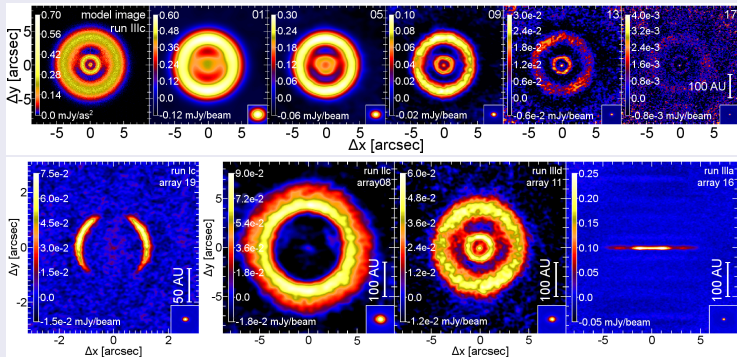


Beobachtung: ALMA

- Ansatz:**
- Fluss, Entfernung skalieren auf bekannte Debris-Scheiben (HD 107146, HD 105, ϵ Eri)
 - Simulationen: Gute, aber realistische Bedingungen, $\lambda_c = 1250\mu\text{m}$, optimale Konfiguration suchen

Beobachtung: ALMA

- Ansatz:**
- Fluss, Entfernung skalieren auf bekannte Debris-Scheiben (HD 107146, HD 105, ϵ Eri)
 - Simulationen: Gute, aber realistische Bedingungen, $\lambda_c = 1250\mu\text{m}$, optimale Konfiguration suchen

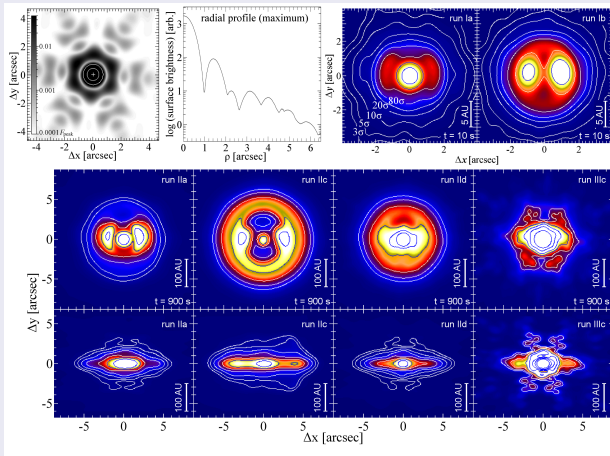


Beobachtung: JWST

- Ansatz:**
- Fluss, Entfernung skalieren auf bekannte Debris-Scheiben (HD 107146, ϵ Eri)
 - Bild (ohne Stern) falten mit PSF ($\lambda = 25 \mu\text{m}$) \implies Sensitivität, Auflösung
 - PSF skalieren auf Stern, Vergleich mit vorigem Bild \implies PSF Subtraktion

Beobachtung: JWST

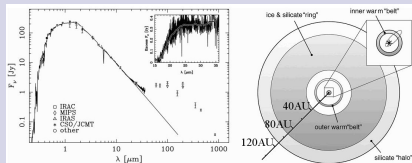
- Ansatz:**
- Fluss, Entfernung skalieren auf bekannte Debris-Scheiben (HD 107146, ϵ Eri)
 - Bild (ohne Stern) falten mit PSF ($\lambda = 25 \mu\text{m}$) \Rightarrow Sensitivität, Auflösung
 - PSF skalieren auf Stern, Vergleich mit vorigem Bild \Rightarrow PSF Subtraktion



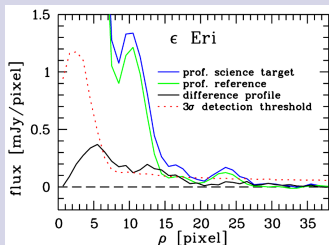
Planet-Scheibe-Wechselwirkung

Anwendung auf neue Beobachtungen

VLT/VISIR: ϵ Eri

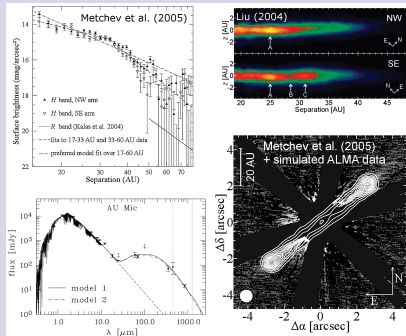


Backman et al. (2009, modifiziert)



VISIR Profil im Q band ($\lambda_c = 18.72 \mu\text{m}$)

ALMA Early Science: AU Mic



2 arrays, 4 Bänder angeboten

⇒ (Sub)millimeter Beobachtungen in 2 Bändern ($\lambda_c = 450 \mu\text{m}$, $1250 \mu\text{m}$) mit (fast) gleicher räumlicher Auflösung & SNR

- 3 räumlich aufgelöste Scheiben modelliert – immer neue, unerwartete Ergebnisse
- Vor allem räumliche Staubverteilung komplex \implies Planetensysteme?
- SED Modellierung: Sehr ungewöhnliche Scheiben, neue Klasse?
- Simulation von Planet-Scheibe-Wechselwirkung führt zu deutlichen Strukturen
- Beobachtbar mit ALMA & JWST, Kombination führt zu besten Einschränkungen an Systeme
- Neue, erfolgreiche Beobachtungen durchgeführt/vorbereitet

Danke!

Thermodynamisches Gleichgewicht

$$W_{\lambda}^{\text{abs}} = L_{\lambda,\star} Q_{\lambda}^{\text{abs}}(a) \pi a^2 / 4\pi r^2 ; \quad W_{\lambda}^{\text{emi}} = 4\pi a^2 Q_{\lambda}^{\text{abs}}(a) B_{\lambda}(T_g)$$

$$r(T) : \int_0^{\infty} W_{\lambda}^{\text{abs}} d\lambda = \int_0^{\infty} W_{\lambda}^{\text{emi}} d\lambda$$

Einfachstreuung (optisch dünn), Sternstrahlung unpolarisiert

$$W_{\lambda,\theta}^{\text{sca}} d\theta = L_{\lambda,\star} Q_{\lambda}^{\text{sca}}(a) S_{11}(\theta) \pi a^2 / 4\pi r^2 d\theta$$

Zusatzfolie: Physik von Debris-Scheiben (2)

Dynamik dominiert von Gravitation, Strahlung des Sterns

Strahlungsdruck, Poynting-Robertson-Effekt:

$$\beta = \frac{|\mathbf{F}_R|}{|\mathbf{F}_G|} \quad (\propto 1/a \text{ für große Körner})$$

$\beta \geq 0.5$: “Blow-out”

$$t_{\text{PR}} [\text{yr}] \approx \frac{400}{\beta} \left(\frac{M_\star}{M_\odot} \right)^{-1} \left(\frac{r_0}{\text{AE}} \right)^2 \quad (\text{Gustafson 1994})$$

Stauberzeugung durch Kollisionen

$$t_{\text{coll}} \approx \frac{1}{\tau \omega} \quad (\text{Backman \& Paresce 1993})$$

Gleichgewichtskaskade

Potenzgesetz $dn(a) \propto n(a)^{-3.5} da$ (Dohnanyi 1969)

Werkzeuge dieser Arbeit: Analytische, dynamische Modellierung

<u>debris</u>	<u>SAnD</u>	<u>modust*</u>
Analytische Modelle	Analytische Modelle	Vielteilchen-simulationen
Bilder in Streulicht & Reemission	Bilder & SED in Reemission	Planet-Scheibe-Wechselwirkung
Hohe Genauigkeit	Sehr effizientes Fitten	MODIM: Bilder & SED

* Rodmann (2006), verfügbar durch Kollaboration mit Jens Rodmann

$$n(r) \propto \left(\frac{r-s}{r_p-s} \right)^\alpha \cdot \exp \left[\alpha \left(1 - \frac{r-s}{r_p-s} \right) \right]$$

Parameter	Fit	Unsicherheit (1σ)
α_1	7.0	6.2 ... 7.6
r_p [AU]	120.3	119.8 ... 120.7
s [AU]	25	21.0 ... 33.0
a_{\min} [μm]	2.5	2.0 ... 3.0
a_{\max} [μm]	1000.0	(fixed)
γ	3.6	3.5 ... 3.7
M_{F606W} [M_\odot]	6.2×10^{-7}	—
M_{F814W} [M_\odot]	6.5×10^{-7}	—
M_{F110W} [M_\odot]	8.5×10^{-7}	—
M_{CARMA} [M_\odot]	6.7×10^{-7}	—
M_{SED} [M_\odot]	4.4×10^{-7}	—

Zusatzfolie: HD 107146 Ergebnisse (innere Scheibe)

Parameter	Fit	Unsicherheit (1σ)
$R_{\text{in}}^{\text{add}}$ [AU]	0.2	0.2 ... 0.6
$R_{\text{out}}^{\text{add}}$ [AU]	42.2	6.0 ... 250
α^{add}	0.8	-2.1 ... 1.1
$a_{\text{min}}^{\text{add}}$ [μm]	3.3	0.8 ... 4.4
γ^{add}	10.0	3.6 ... 10.0
M^{add} [M_{\odot}]	3.6×10^{-11}	—

Zusatzfolie: q¹ Eri, HD 207129 Ergebnisse

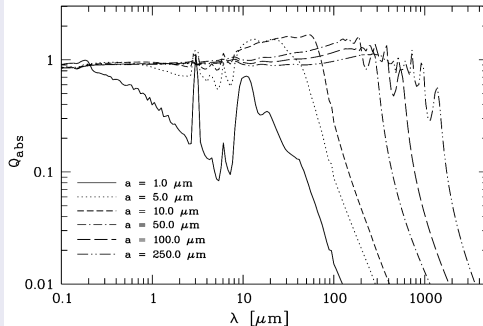
Parameter	q ¹ Eri		HD 207129
	Modell 1	Modell 2	
r_{in} [AU]	$3.9^{+4.1}_{-0.9}$	$53.2^{+27.9}_{-1.0}$	$57.3^{+39.4}_{-17.0}$
r_{out} [AU]	$183.5^{+16.5}_{-22.4}$	600 ⁽²⁾	$193.6^{+71.2}_{-30.7}$
α	$-1.2^{+0.2}_{-0.5}$	$1.8^{+0.7}_{-0.7}$	$-2.2^{+2.7}_{-2.0}$
a_{min} [μm]	$1.8^{+0.8}_{-0.7}$	$1.0^{+0.2}_{-0.8}$	$2.8^{+3.8}_{-1.3}$
γ	$3.5^{+0.1}_{-0.2}$	$3.4^{+0.2}_{-0.1}$	$3.8^{+0.4}_{-0.5}$
M_{dust} [M_{\odot}]	8.7×10^{-8}	1.2×10^{-7}	2.2×10^{-8}
$V_{\text{ice}}/(V)$ [%]	50^{+0}_{-50}	50^{+0}_{-50}	50^{+0}_{-50}
i [°]	$82.2^{+2.3}_{-10.7}$	$85.4^{+4.6}_{-1.1}$	$56.6^{+9.8}_{-7.1}$
χ^2_{red}	1.24	1.60	0.77

Spektralindex

$$\Delta = \frac{\partial \log F_\nu}{\partial \log \nu} ; \quad \Delta_{\nu_1, \nu_2} = \frac{\log F_{\nu_2} - \log F_{\nu_1}}{\log \nu_2 - \log \nu_1}$$

Schwarzkörper: $\Delta \leq 2$

Verhalten des Absorptionsindex (Astronomisches Silikat)



$$W_\lambda^{\text{emi}}(a) \propto Q_\lambda^{\text{abs}}(a) \cdot B_\lambda(T_g)$$

- Bruch zwischen $70 \mu\text{m}$ und $160 \mu\text{m}$
 $\Rightarrow a \sim 5 \mu\text{m}$
... $50 \mu\text{m}$
- Bruch nicht "verschmiert"
 \Rightarrow schmale Ringe

Zusatzfolie: Eigenschaften, Spektralindex steile SEDs

Object	HIP 103389	HIP 107350	HIP 114948
d [pc]	22.0	17.9	20.5
Spectral type	F7 V	G0 V	F7 V
L [L_{\odot}]	2.03	1.09	1.87
T_{eff} [K]	6257	5952	6240
Age [Myr]	250	330	250

Object	HIP 103389	HIP 107350	HIP 114948
$\Delta_{70/100}$	1.94 ± 0.32	2.66 ± 0.45	1.35 ± 0.26
$\Delta_{100/160}$	3.31 ± 0.69	1.95 ± 0.88	2.57 ± 0.44
$\Delta_{70/160}$	2.72 ± 0.39	2.25 ± 0.53	2.04 ± 0.22

Zusatzfolie: Ergebnisse steile SEDs

HIP103389						
	Ansatz 1		Ansatz 2		Ansatz 3	
	Silikat	Silikat + Eis	Silikat	Silikat + Eis	Silikat	Silikat + Eis
R_{in} [AU]	18.2 [7.9 – 24.5]	20.9 [8.0 – 26.6]	11.9 [4.2 – 16.0]	13.6 [4.4 – 19.1]	42.3 [12.9 – 63.3]	22.5 [8.6 – 43.0]
R_{out} [AU]	20.0 [16.3 – 65.1]	20.9 [17.3 – 77.3]	12.0 [8.8 – 37.4]	13.6 [10.2 – 38.5]	46.0 [21.3 – 138.5]	22.5 [17.9 – 110.9]
α	0.0 (fixed)	0.0 (fixed)	0.0 (fixed)	0.0 (fixed)	0.0 (fixed)	0.0 (fixed)
a_{min} [μ m]	9.5 [7.8 – 10.4]	12.8 [10.7 – 13.6]	6.1 [2.8 – 9.8]	6.6 [2.6 – 12.0]	4.2 [3.1 – 7.8]	9.3 [3.7 – 14.9]
a_{max} [μ m]	1000.0 (fixed)	1000.0 (fixed)	1000.0 (fixed)	1000.0 (fixed)	14.3 [12.7 – 18.1]	22.7 [14.3 – 28.5]
γ	7.4 [6.3 – 10.0]	9.0 [6.5 – 10.0]	3.5 (fixed)	3.5 (fixed)	3.5 (fixed)	3.5 (fixed)
M_{disk} [M_{\odot}]	3.89 e-11	3.87 e-11	1.41 e-10	1.21 e-10	1.46 e-10	4.35 e-11
χ_{red}	0.816	0.776	10.277	8.488	0.628	0.760
HIP107350						
	Approach 2		Approach 3		Approach 4	
	silicate	silicate + ice	silicate	silicate + ice	silicate	silicate + ice
R_{in} [AU]	29.1 [7.9 – 47.2]	30.6 [5.6 – 44.1]	9.6 [3.0 – 15.6]	10.9 [3.0 – 16.5]	37.1 [4.3 – 54.4]	35.2 [7.2 – 54.2]
R_{out} [AU]	31.3 [13.9 – 113.9]	32.3 [16.0 – 138.5]	9.6 [5.8 – 33.0]	11.0 [9.1 – 35.7]	37.4 [19.2 – 187.5]	35.2 [17.4 – 145.3]
α	0.0 (fixed)	0.0 (fixed)	0.0 (fixed)	0.0 (fixed)	0.0 (fixed)	0.0 (fixed)
a_{min} [μ m]	6.9 [2.7 – 10.9]	8.2 [3.6 – 10.7]	5.7 [4.8 – 11.0]	5.8 [4.9 – 11.7]	7.8 [1.6 – 10.4]	9.6 [2.2 – 13.5]
a_{max} [μ m]	1000.0 (fixed)	1000.0 (fixed)	1000.0 (fixed)	1000.0 (fixed)	7.8 [6.3 – 13.3]	9.6 [6.4 – 17.4]
γ	10.0 [6.0 – 10.0]	10.0 [5.9 – 10.0]	3.5 (fixed)	3.5 (fixed)	3.5 (fixed)	3.5 (fixed)
M_{disk} [M_{\odot}]	3.33 e-11	2.79 e-11	3.16 e-11	2.73 e-11	4.64 e-11	3.25 e-11
χ_{red}	1.652	1.568	4.229	3.869	1.528	1.488
HIP114948						
	Approach 2		Approach 3		Approach 4	
	silicate	silicate + ice	silicate	silicate + ice	silicate	silicate + ice
R_{in} [AU]	12.8 [7.1 – 13.7]	13.5 [7.8 – 14.9]	12.7 [5.5 – 16.6]	14.0 [7.9 – 19.1]	32.5 [9.0 – 40.1]	13.3 [8.4 – 14.5]
R_{out} [AU]	12.8 [12.1 – 23.2]	13.8 [12.9 – 24.9]	12.7 [10.5 – 25.6]	14.1 [11.0 – 30.8]	34.5 [26.9 – 81.4]	13.8 [12.9 – 22.9]
α	0.0 (fixed)	0.0 (fixed)	0.0 (fixed)	0.0 (fixed)	0.0 (fixed)	0.0 (fixed)
a_{min} [μ m]	9.6 [8.9 – 10.2]	12.9 [11.9 – 13.8]	6.4 [3.8 – 9.9]	7.4 [3.0 – 11.7]	3.2 [2.6 – 4.6]	11.8 [10.7 – 13.1]
a_{max} [μ m]	1000.0 (fixed)	1000.0 (fixed)	1000.0 (fixed)	1000.0 (fixed)	24.2 [10.0 – 27.3]	43.8 [10.0 – 53.2]
γ	4.7 [4.4 – 5.2]	4.7 [4.4 – 5.1]	3.5 (fixed)	3.5 (fixed)	3.5 (fixed)	3.5 (fixed)
M_{disk} [M_{\odot}]	6.57 e-11	6.48 e-11	2.65 e-10	2.21 e-10	1.78 e-10	4.85 e-11
χ_{red}	0.284	0.232	3.291	2.333	0.132	0.232

Vorbereitende Sensitivitätsstudie für ALMA

- Verschiedene einfache Modelle von Debris-Scheiben um “Sonne”
- Beobachtung simuliert mit ALMA (verschiedene Bänder, Konfigurationen)
- Optimale (realistische) Beobachtungsbedingungen, CASA ALMA simulator

⇒ Schlussfolgerungen:

- Optimales Band: Band 6 ($\lambda_c = 1250 \mu\text{m}$)
- Kurze baselines, räumliche Auflösung \sim Strukturen
- Ausgedehnte Scheiben ($r > \text{wenige } 10 \text{ AU}$, $d < 100 \text{ pc}$) gut auflösbar

Zusatzfolie: ALMA – Sensitivität (Simulationen)

Einfaches Modell

Räumliche Verteilung:

$$\sigma(r) \propto r^{0.0}, r_{\text{out}} = 1.1 r_{\text{in}}$$

$$r_{\text{in}} = 5 \text{ AE}, 50 \text{ AE}, 100 \text{ AE}$$

Öffnungswinkel: 10°

Korngrößenverteilung:

$$dn(a) \propto a^{-3.5} da$$

$$a_{\text{min}} = 0.45 \mu\text{m}, a_{\text{max}} = 2 \text{ mm}$$

Stern:

Sonne (Schwarzkörper,
 $1.0 L_\odot, 5778 \text{ K}$)

Entfernung:

Logarithmisch verteilt: 10 pc ... 100 pc

Inklination: $0^\circ, 90^\circ$

(Simulierte) Beobachtungen

ALMA:

Verschiedene Konfigurationen, $B_{\text{min}} = 15 \text{ m} \dots 79 \text{ m}$, $B_{\text{max}} = 161 \text{ m} \dots 14.5 \text{ km}$

$\lambda_c = 350 \mu\text{m}, 950 \mu\text{m}, 1250 \mu\text{m}, 1600 \mu\text{m}$ (Bänder 10, 7, 6, 5)

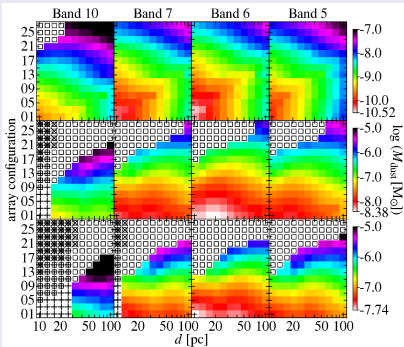
$\Rightarrow \delta_{\text{min}} = 0.005'' \dots 2.05'', \delta_{\text{max}} = 0.9'' \dots 22.0''$

Sehr gute (aber realistische) Bedingungen, 8 h Beobachtungszeit

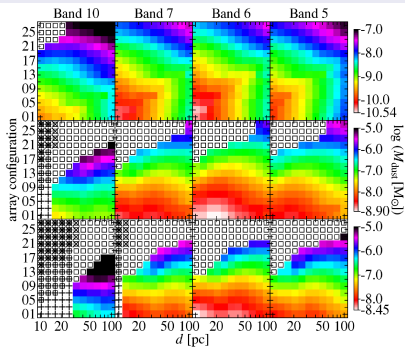
Zusatzfolie: ALMA – Sensitivität (Ergebnisse)

Ergebnisse

Draufsicht ($i = 0^\circ$)



Seitenansicht ($i = 90^\circ$)



Zusatzfolie: Strukturen mit Hubble

