

ダスト光学特性の基づく 原始惑星系円盤の観測解釈

田崎 亮 (東北大学)

基研研究会「原始惑星系円盤」

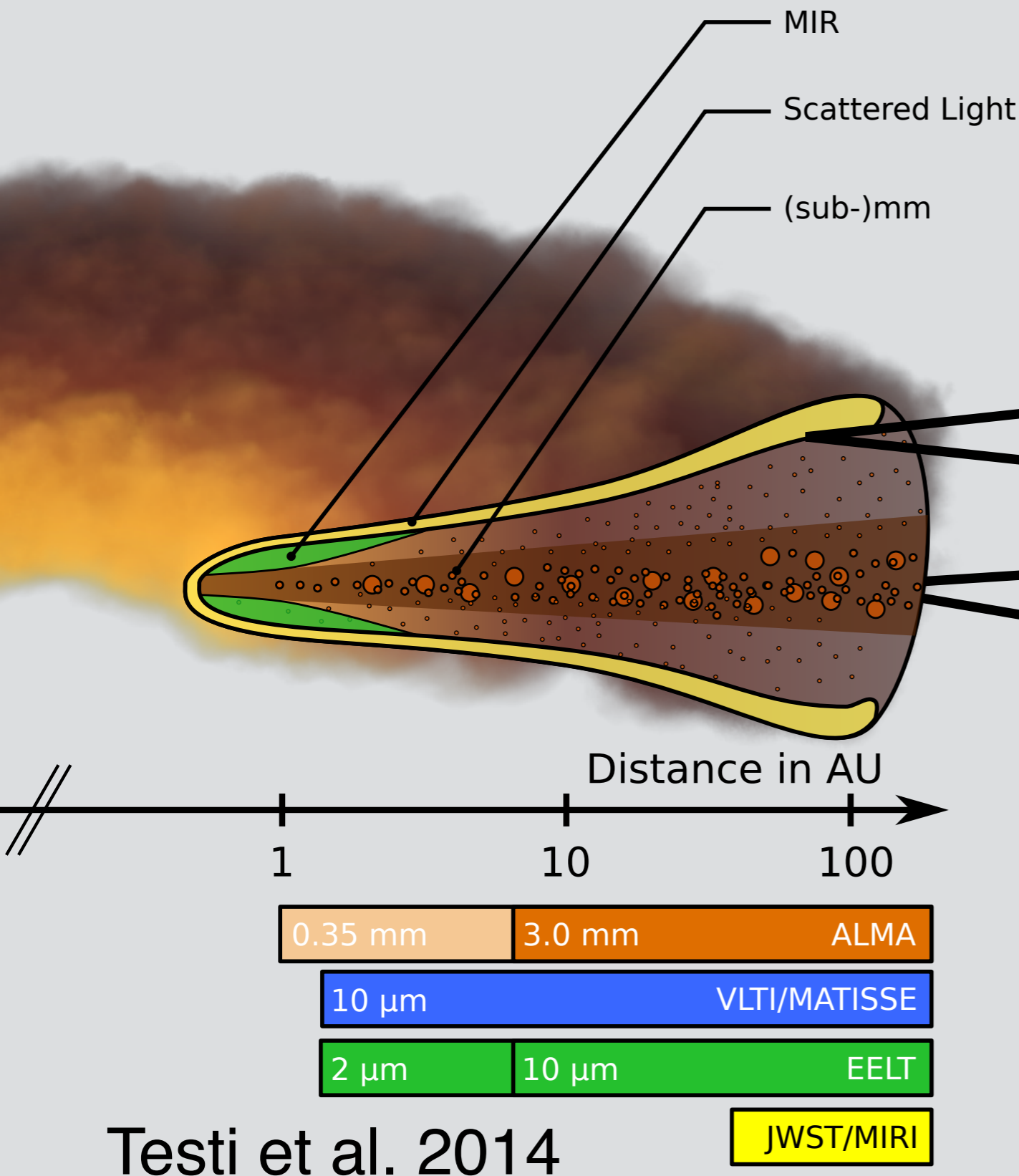
2017年7月11日-13日 京都大学 基礎物理学研究所

微惑星形成過程

- ダスト (μm) から 微惑星 ($\sim 1\text{...}10\text{ km}$)の成長過程は未解明
 - ダストの落下問題
 - 衝突破壊問題
 - 跳ね返りの問題 などなど
- 微惑星への成長モードは？
 - 直接合体成長? (porous growth?)
 - 不安定性?

観測的に円盤中のダスト成長に対して制約を与えることは、微惑星形成過程を理解する上で重要

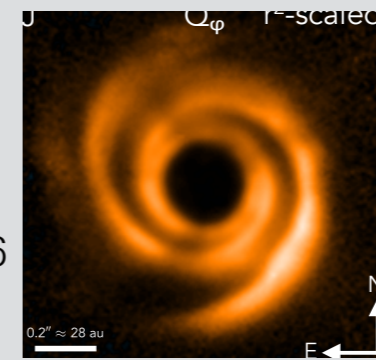
Observation of protoplanetary disks



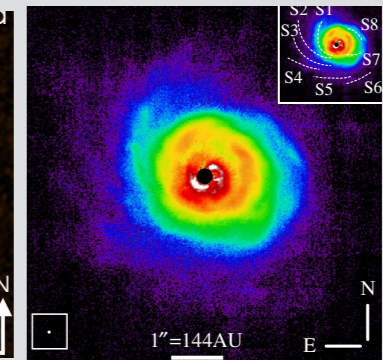
可視光/近赤外線観測

- ・星からの光をダスト($\sim\mu\text{m}$)が散乱
- ・円盤表層をトレース

Stolker et al. 2016

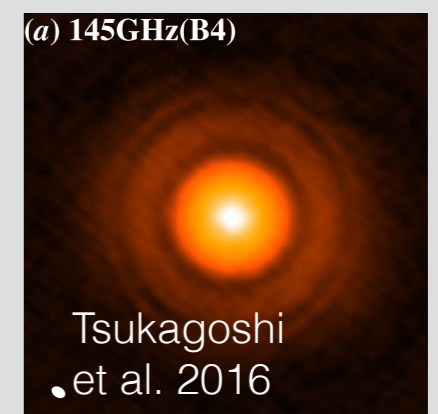
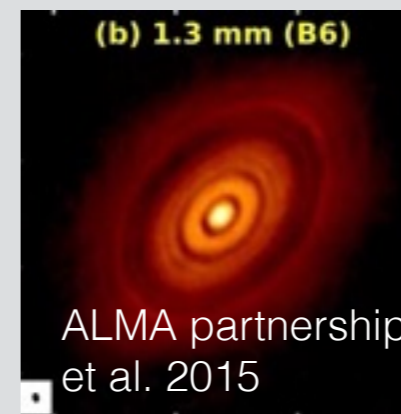


Hashimoto et al. 2011



ミリ・サブミリ波

- ・ダスト($\sim\text{mm}$)からの熱放射
- ・円盤赤道面をトレース



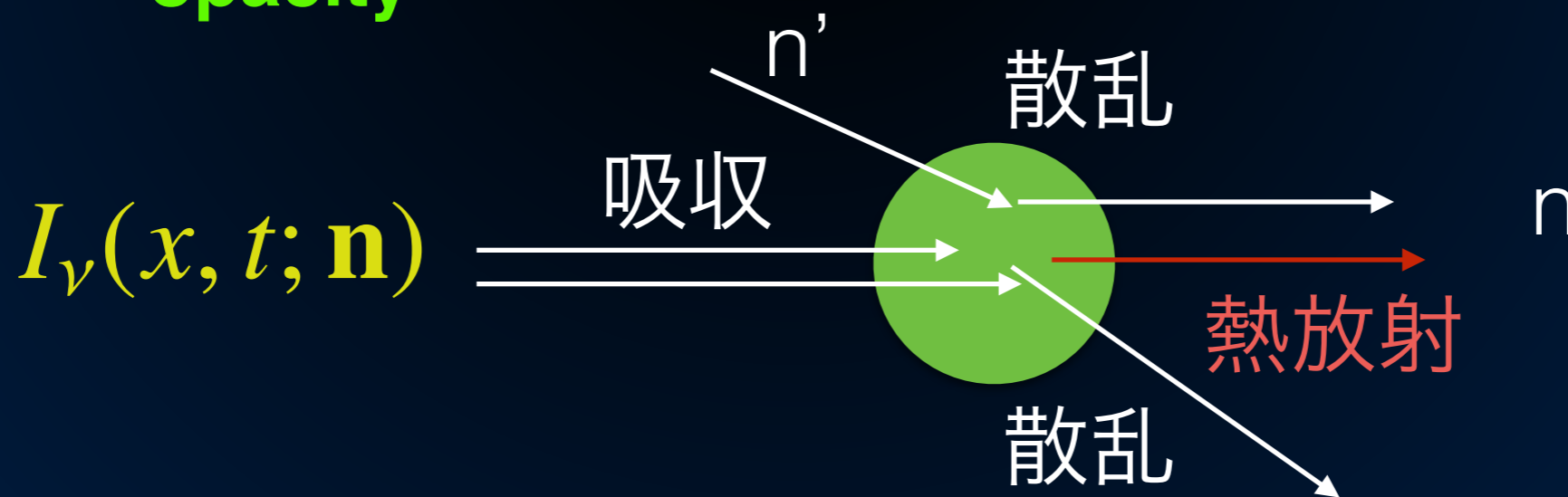
輻射輸送とダスト光学特性

輻射輸送方程式

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_\nu(x, t; \mathbf{n})}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \nabla I_\nu(x, t; \mathbf{n}) =$$

$$\left[\underbrace{\kappa_{\text{abs},\nu} \rho B_\nu}_{\text{熱放射}} + \underbrace{\kappa_{\text{sca},\nu} \rho \int I_\nu(x, t; \mathbf{n}') \phi_\nu(\mathbf{n}, \mathbf{n}') d\Omega}_{\text{n'からnへの散乱}} \right] - \underbrace{(\kappa_{\text{abs},\nu} + \kappa_{\text{sca},\nu}) I_\nu(x, t; \mathbf{n})}_{\text{減光 (吸収+散乱)}}$$

absorption/scattering opacity phase function extinction opacity



観測量(Intensity)からダスト光学特性：逆問題

アウトライン

第1部：赤外線の散乱と偏光

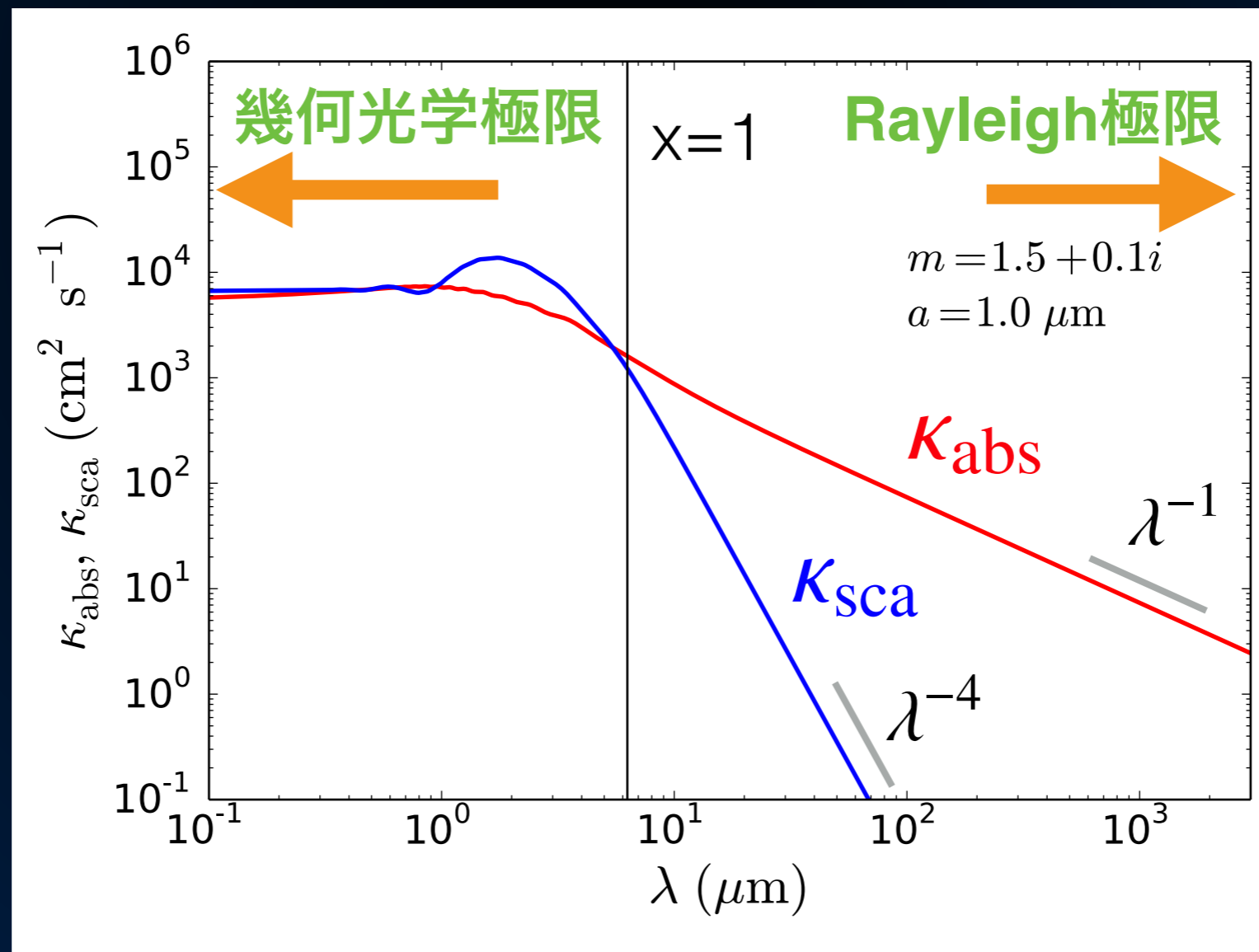
第2部：ミリ波の吸収と散乱

第3部：ミリ波偏光

第1部：赤外線の散乱と偏光

Dust opacity (single size): Mie理論

- ☑ Mie理論: 一様球の光学特性を与える厳密解
- ☑ パラメータは2つ: サイズ・パラメーター $x = \frac{2\pi a}{\lambda}$
複素屈折率 $m(\lambda) = n + ik$
- ☑ ダストのopacity (cm^2 per gram of dust) (屈折率の波長依存性を無視)

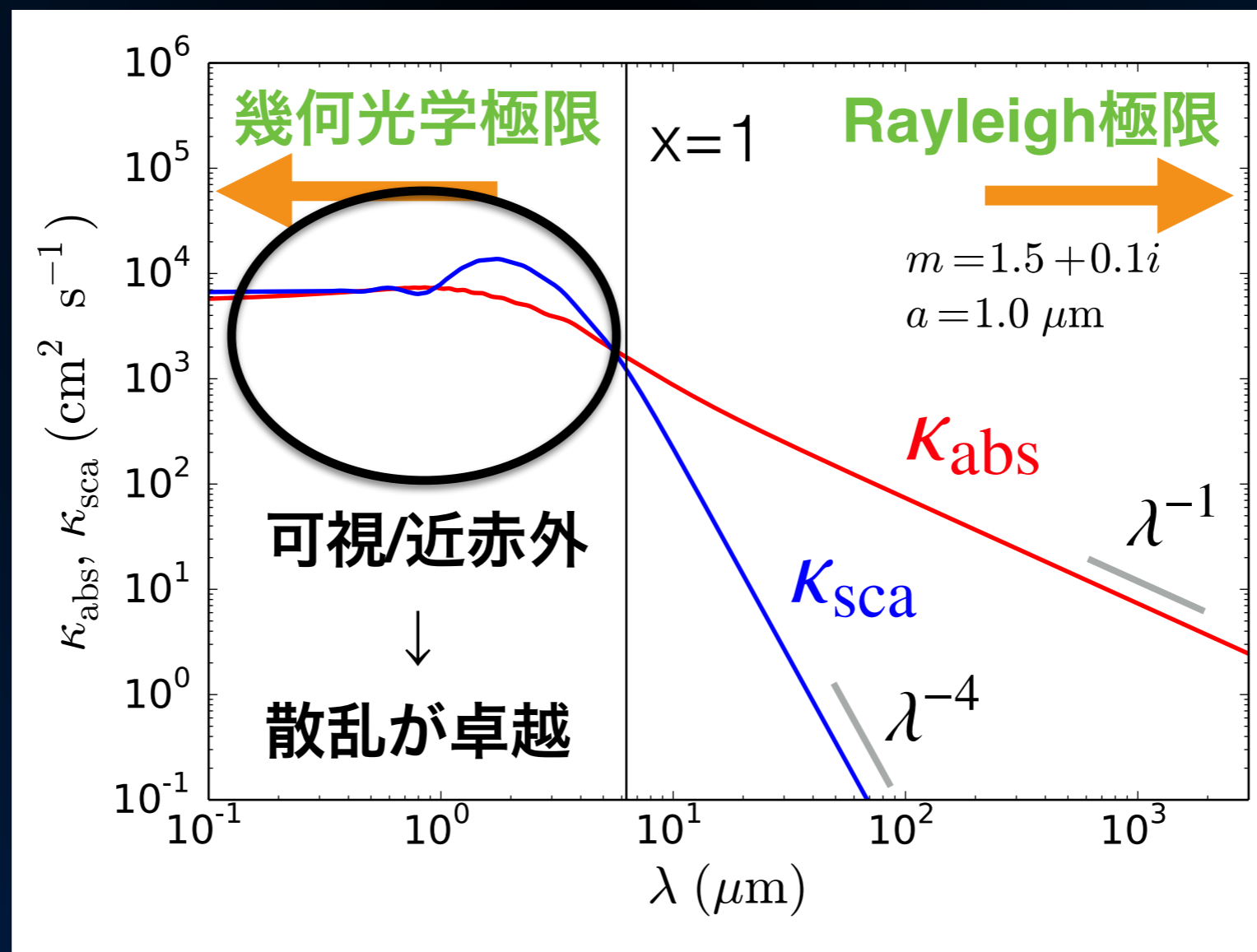


Dust opacity (single size): Mie理論

☑ Mie理論: 一様球の光学特性を与える厳密解

☑ パラメータは2つ: サイズ・パラメーター $x = \frac{2\pi a}{\lambda}$
複素屈折率 $m(\lambda) = n + ik$

☑ ダストのopacity (cm^2 per gram of dust) (屈折率の波長依存性を無視)



円盤散乱光の明るさは？

- ☑ 円盤のアルベド $\sim \beta\omega$ (e.g., Inoue et al. 2008)

grazing angle

$$\beta = \frac{dH_{\tau=1}}{dr} - \frac{H_{\tau=1}}{r} \sim \frac{H_p}{r}$$

(典型的には, $H_{\tau=1}/H_p \sim \text{a few}$ 程度)

single scattering albedo

$$\omega = \frac{K_{\text{sca}}}{K_{\text{abs}} + K_{\text{sca}}} \rightarrow 0.5 \quad (x \gg 1)$$

ダスト半径が波長より大きい時 ($x \gg 1$),



$$\omega_{\text{disk}} \sim \beta\omega \sim 0.1 \times 0.5 \sim 0.05 \quad (\text{at } r=100 \text{ au, flare up})$$

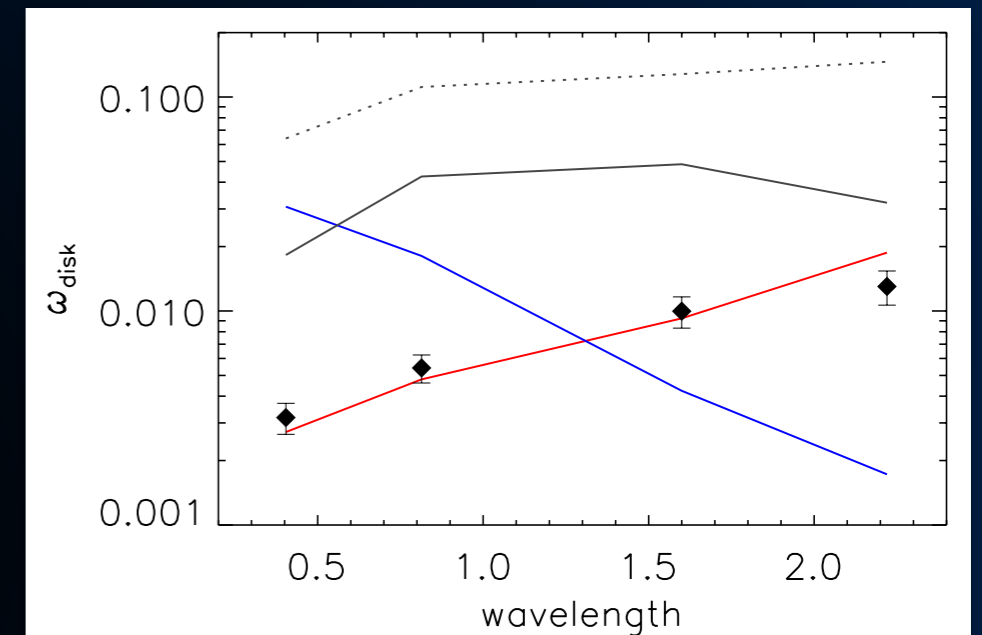
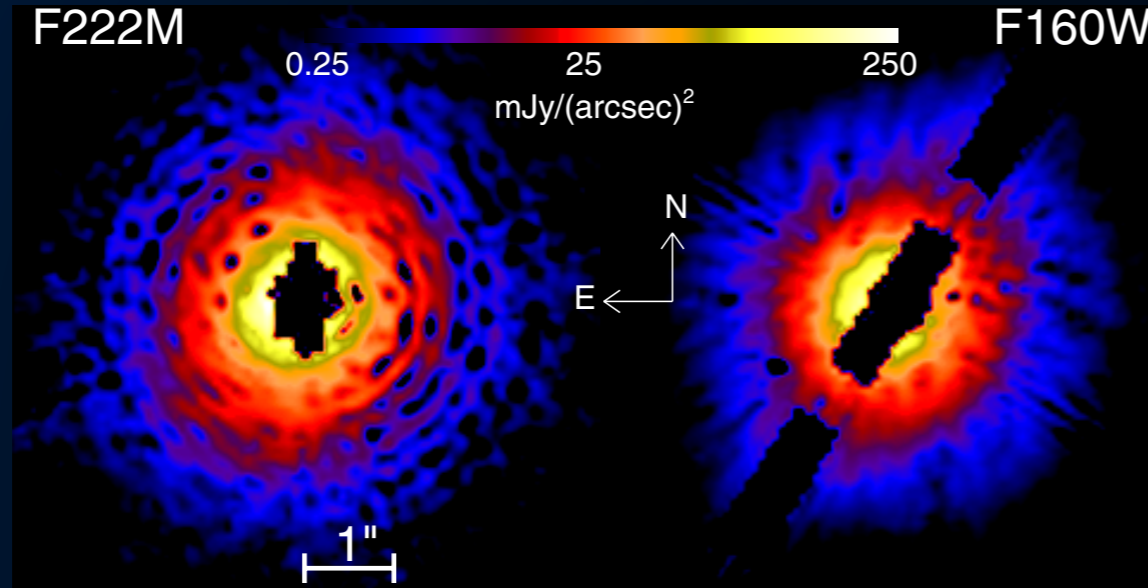
非常に単純には、円盤由来の散乱光の明るさは、
中心星の光の数% - 10%程度と見積もられる



Red & Faint disk problem

Mulders et al. 2013

- ☑ HD 100546からの散乱光は暗く(アルベド $\lesssim 0.01$), 赤い!

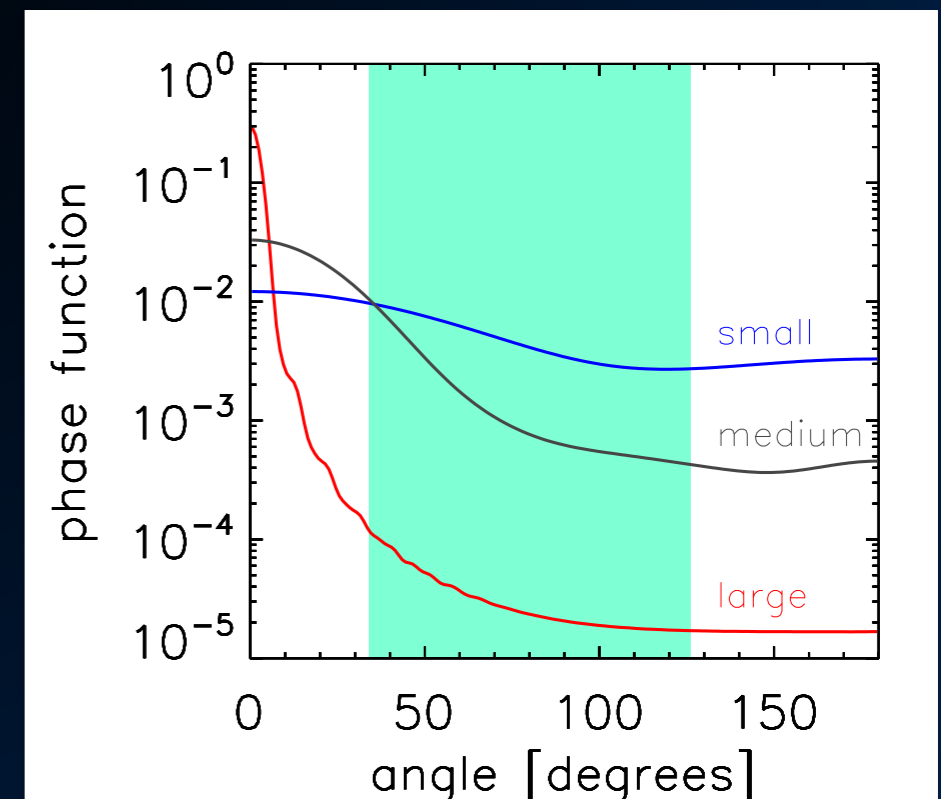


- ☑ 暗く, 赤い散乱光は $x > 1$ のダストで説明可
前方散乱は正味の散乱にはならない

$$\omega = \frac{K_{sca}}{K_{abs} + K_{sca}}$$

前方散乱込みで定義される

散乱を考える際は, phase functionも重要!

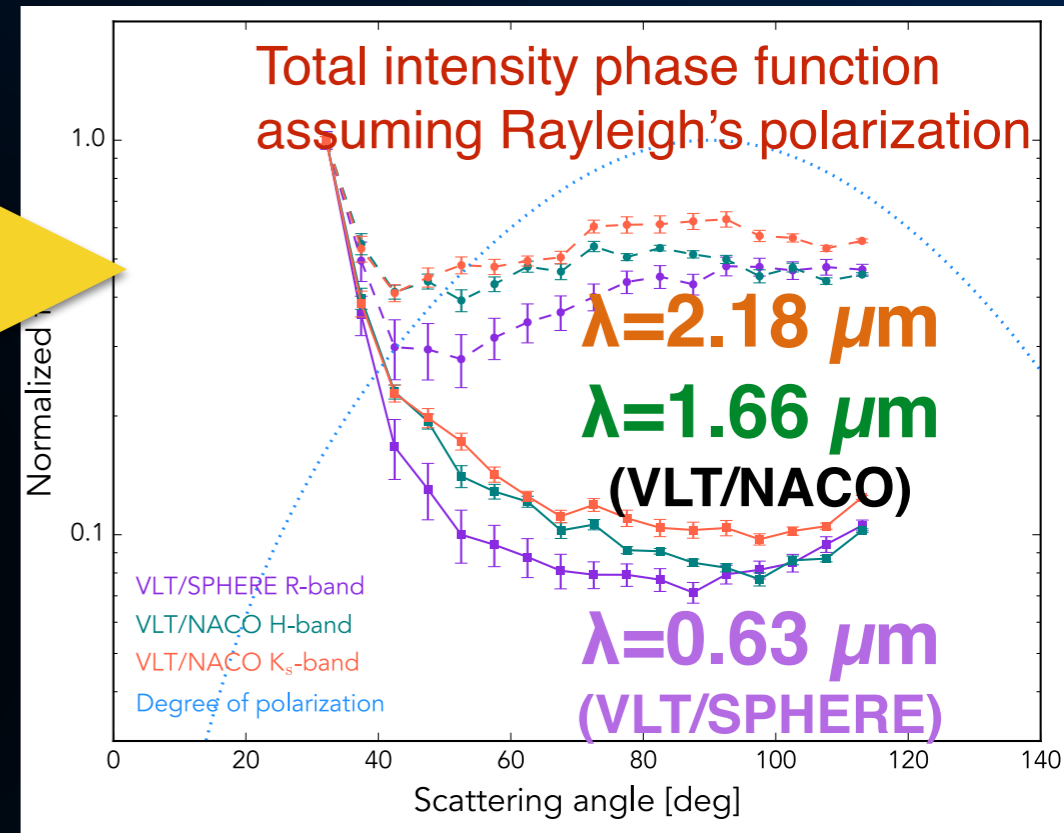
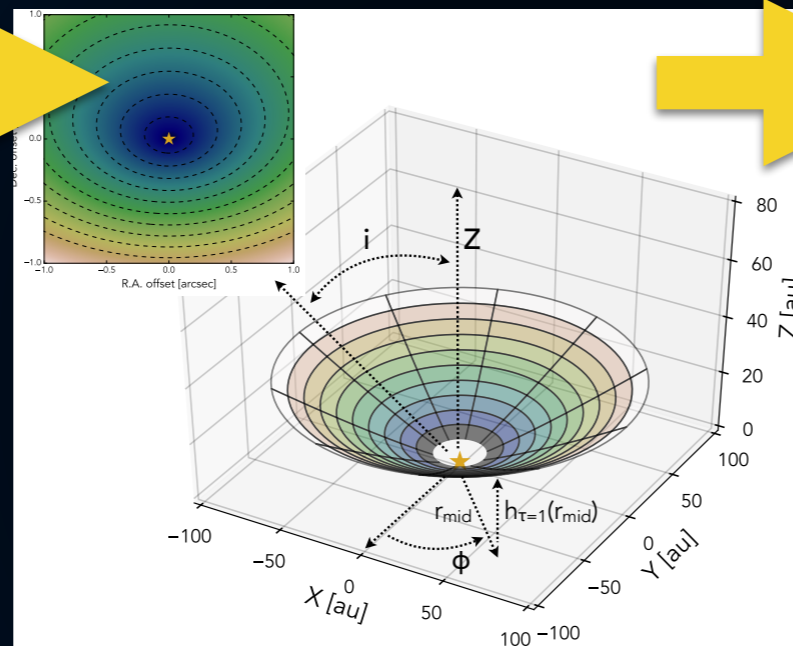
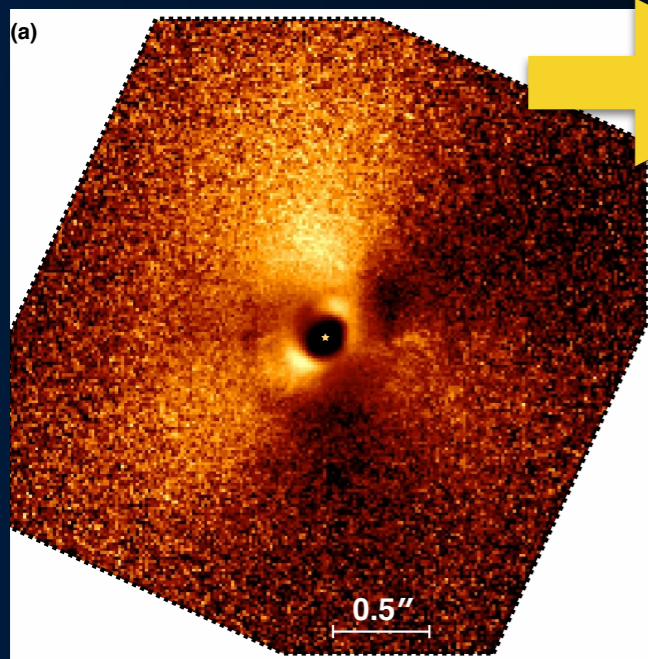


HD 100546表層のダスト

- ☑ VLT/SPHEREの観測を元にphase function

VLT/SPHERE
Polarized Intensity
(Garufi et al. 2016)

Flaring geometry mapping
(Stolker et al. 2016)



- ☑ $H_{\tau=1} \sim 1.9 H_p$ (at 100 au) に数 μm サイズのダストが存在 (Stolker+16)
- ☑ コンパクトダストが巻き上がると思うと, 乱流強度 $\alpha > 0.2$ (Mulders+13)
→ Aerodynamic supportで表層まで巻き上がった**fluffy aggregate**?

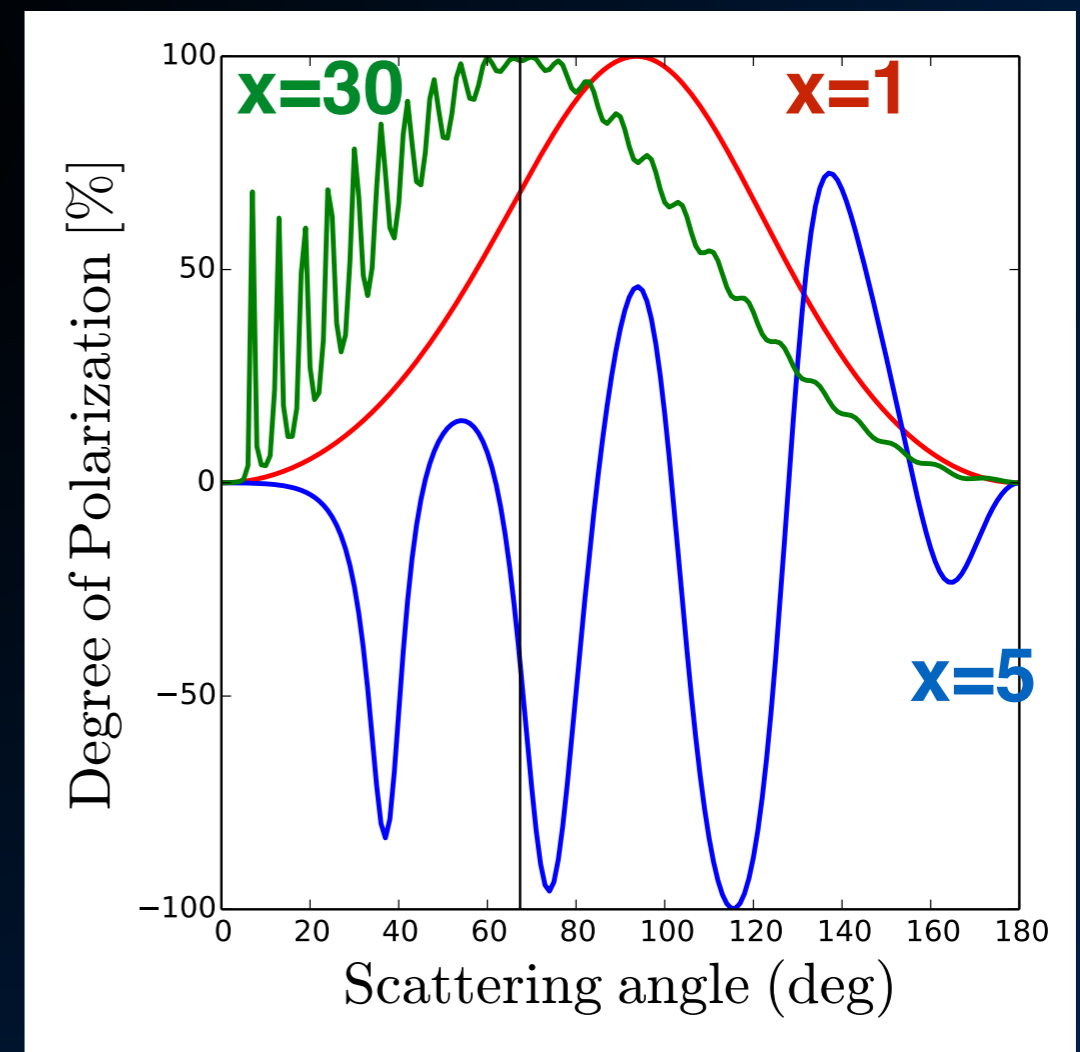
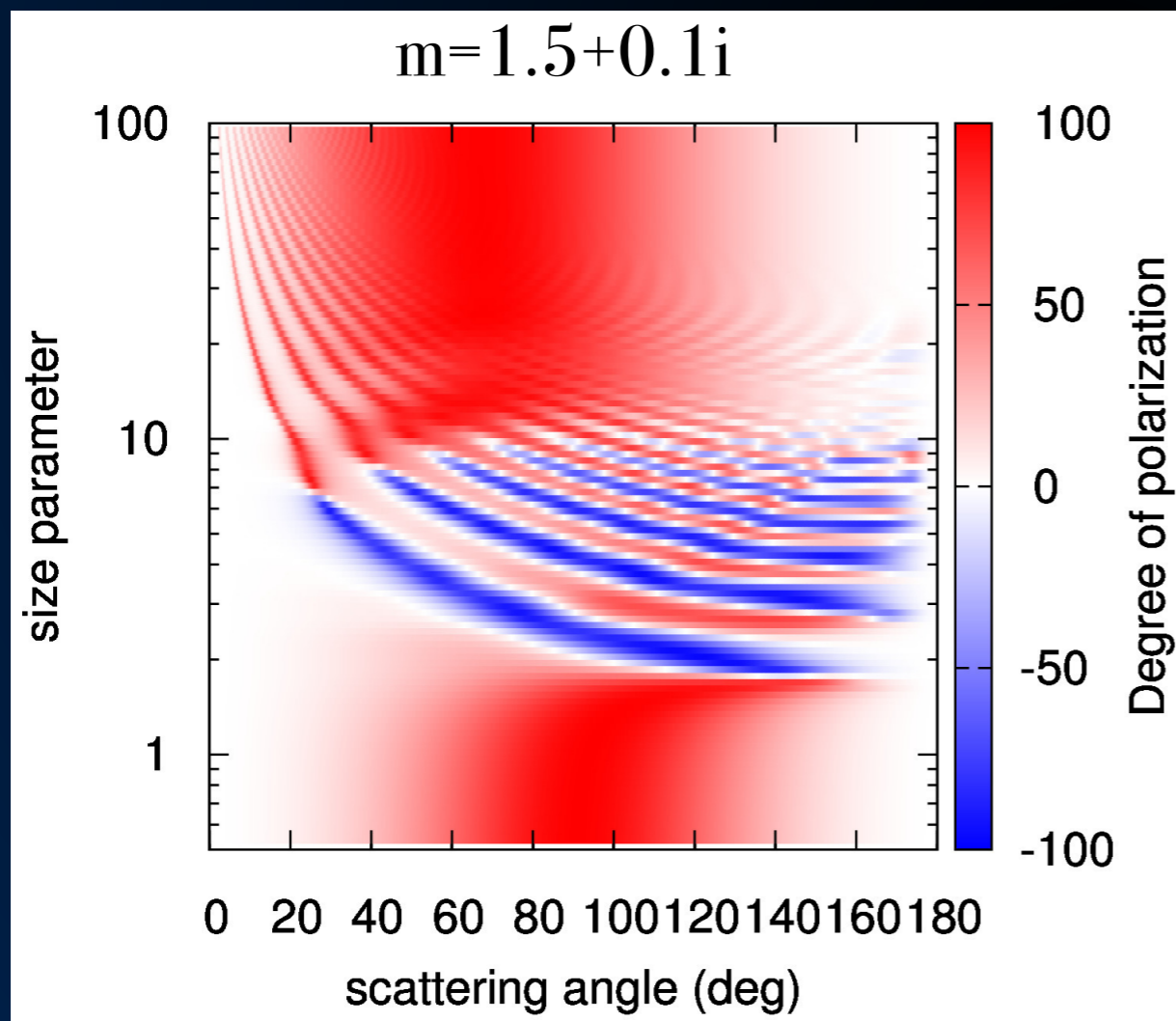
Further constraints? → Polarization!

Scattering polarization (single size): Mie理論

散乱角, サイズパラメータ(x), 複素屈折率(m)によって変化

- $x \ll 1$: Rayleigh散乱 (散乱角90度で完全偏光)
- $x \sim 1$: 多重散乱&干渉による複雑な偏光パターン
- $x \gg 1$: Brewster角で完全偏光 (幾何光学極限)

↓ Brewster angle



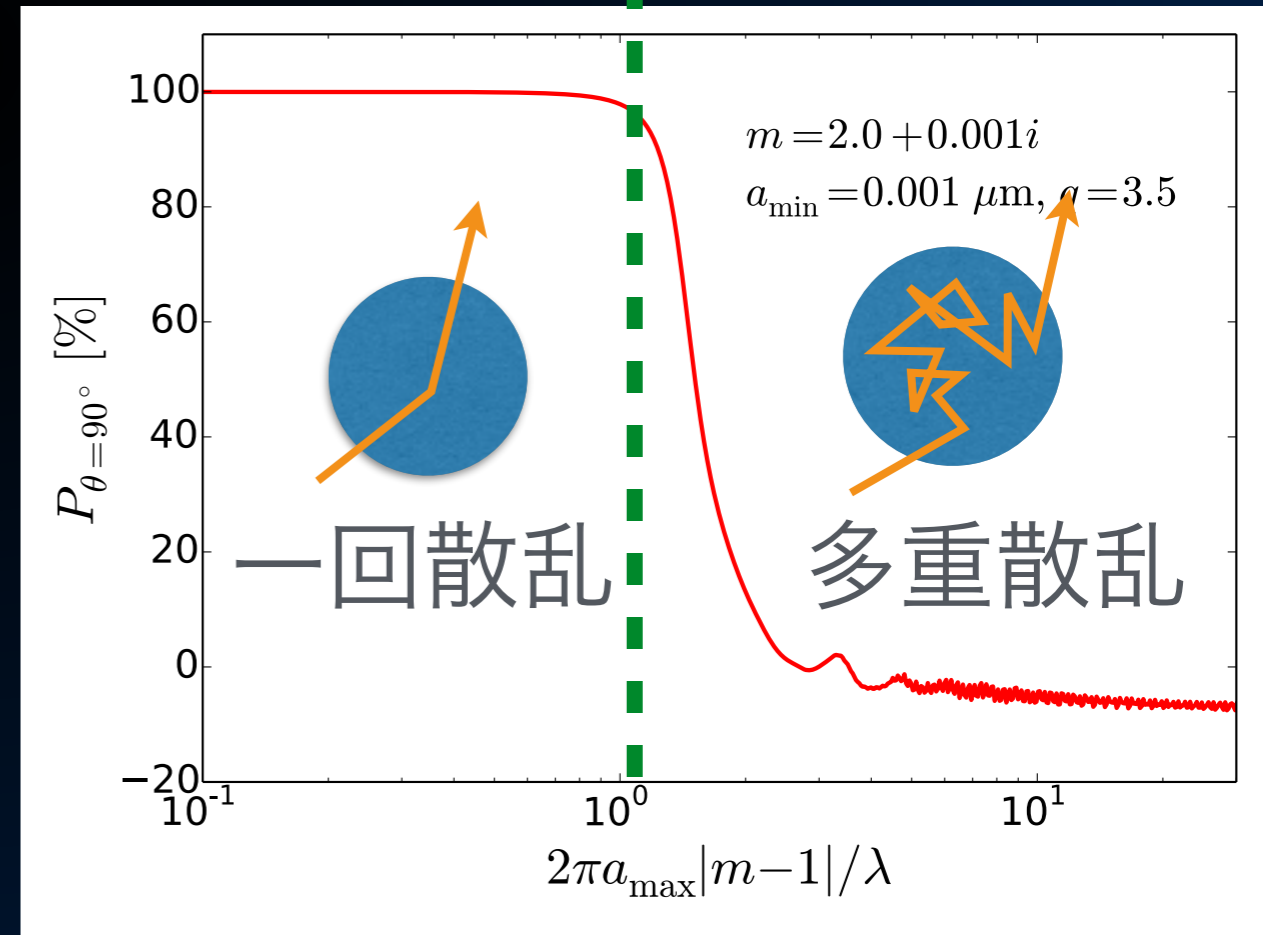
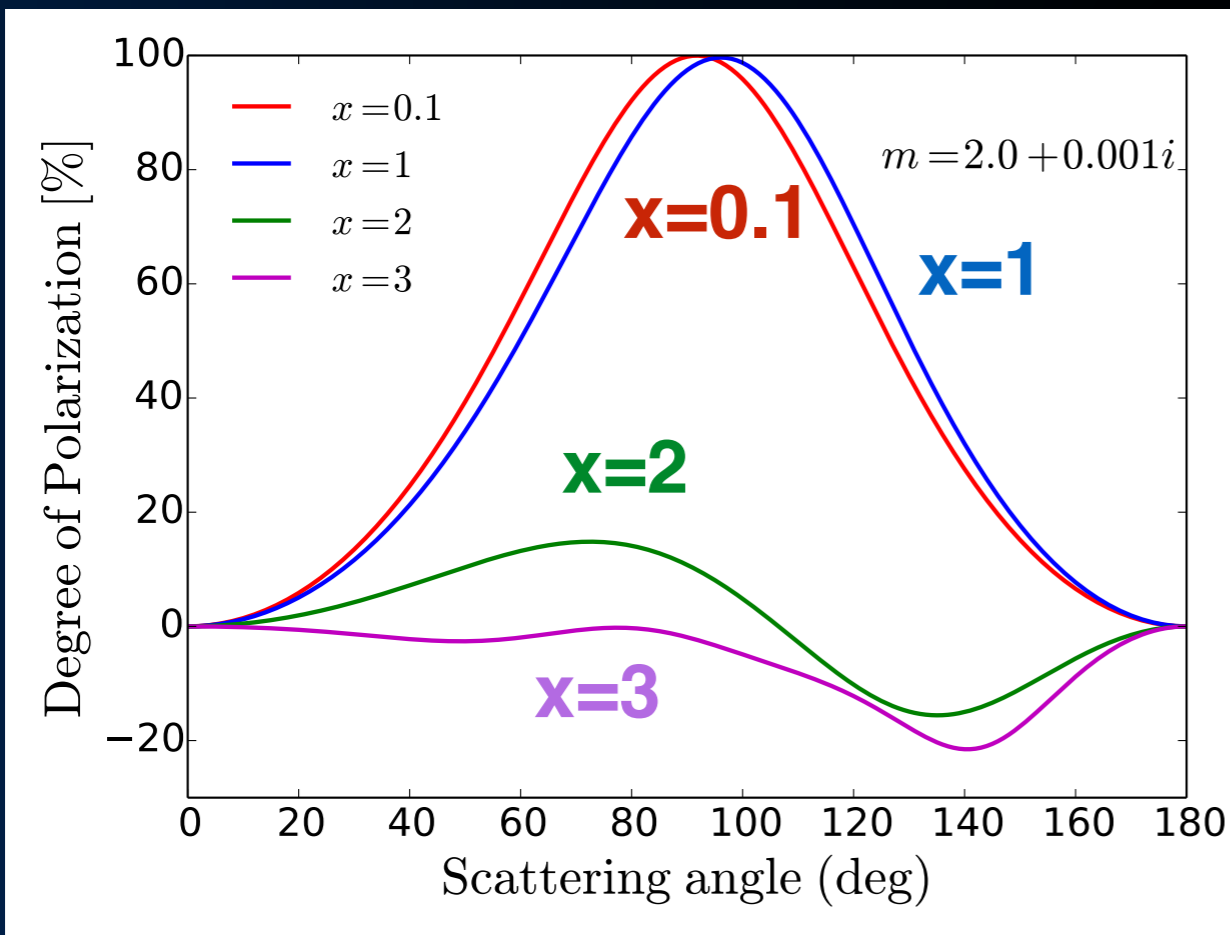
Scattering polarization: Distribution of Spheres

☑ 一様球サイズ分布で平均 $n(a)da \propto a^q da$ $a_{\min} = 0.001 \mu\text{m}$ $q = 3.5$

☑ $x|m-1| > 1$ で多重散乱が効き始め、急速に偏光度は下がる (**not $x > 1$!**)

注) 幾何光学域($x > 1$)でも粒子が透明($|m-1| \ll 1$)であれば、

一回散乱が良い近似 → 一回散乱の場合は、高い偏光度!



Scattering polarization: Porous dust aggregate

fluffy aggregate (df=1.9)

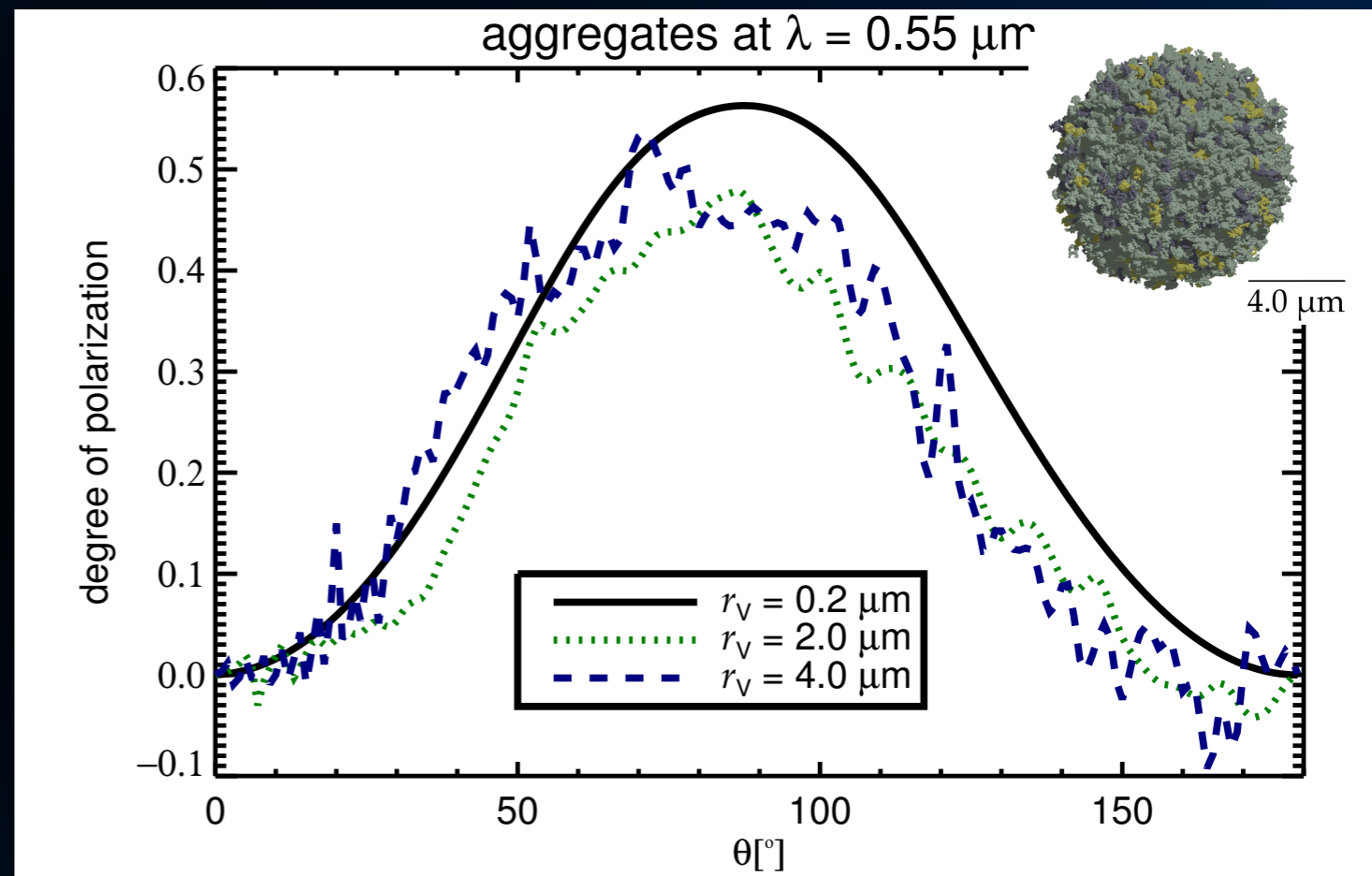
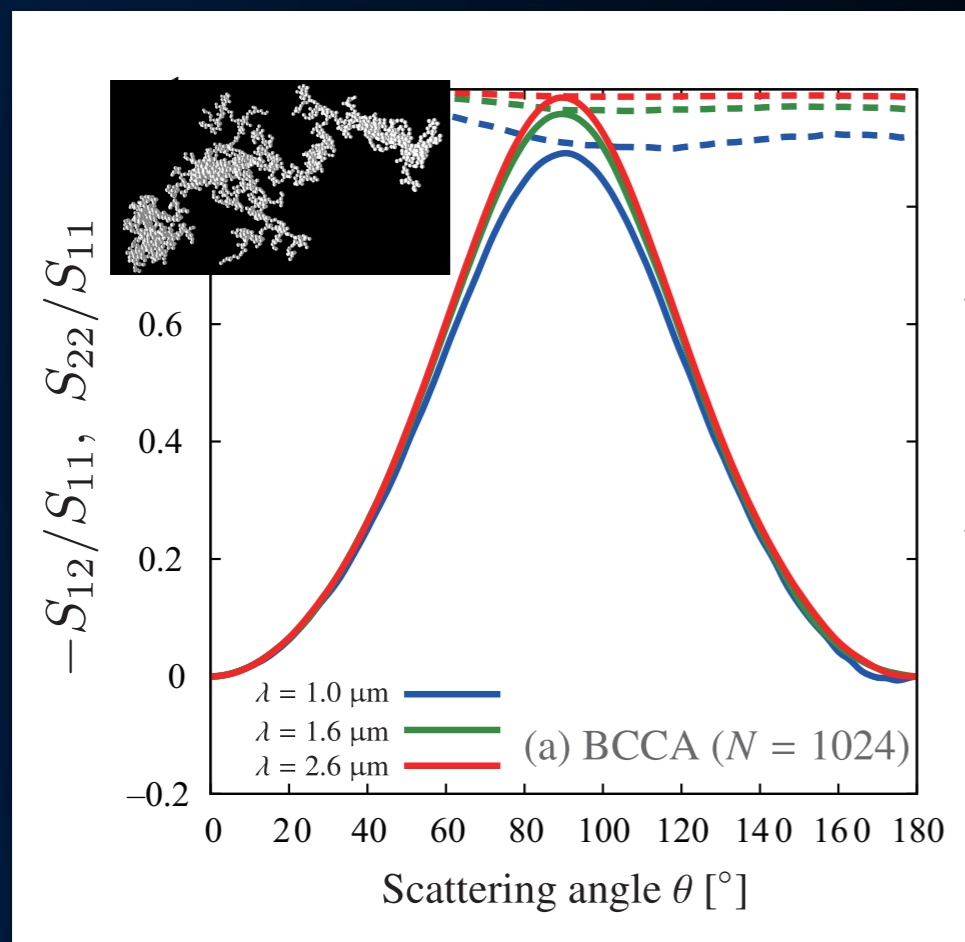
$X \sim 23$, $P(\theta=90^\circ) \sim 80\%$

RT et al. 2016

compact aggregate (df~3)

$X \sim 45$, $P(\theta=90^\circ) \sim 40\%$

Min et al. 2016



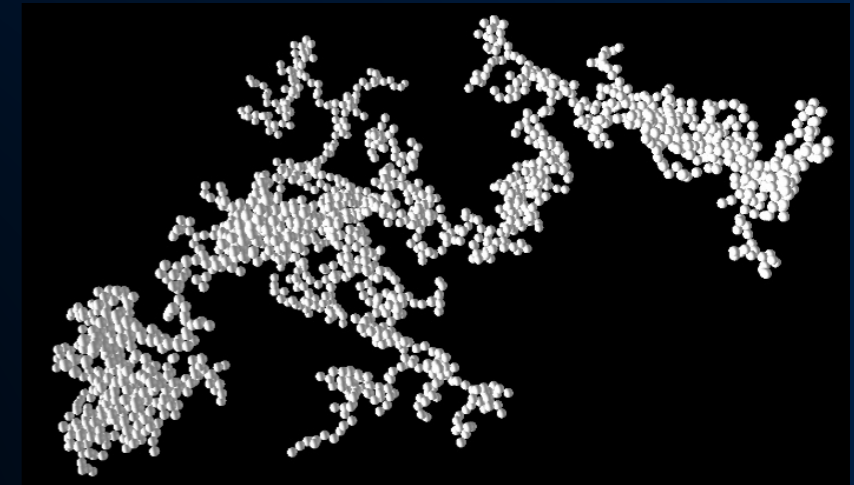
Porous aggregates ($X \gg 1$)の偏光特性

- 密度一様球よりも高い偏光度
- 空隙が大きいほど、高い偏光度
- Bell-shaped profile

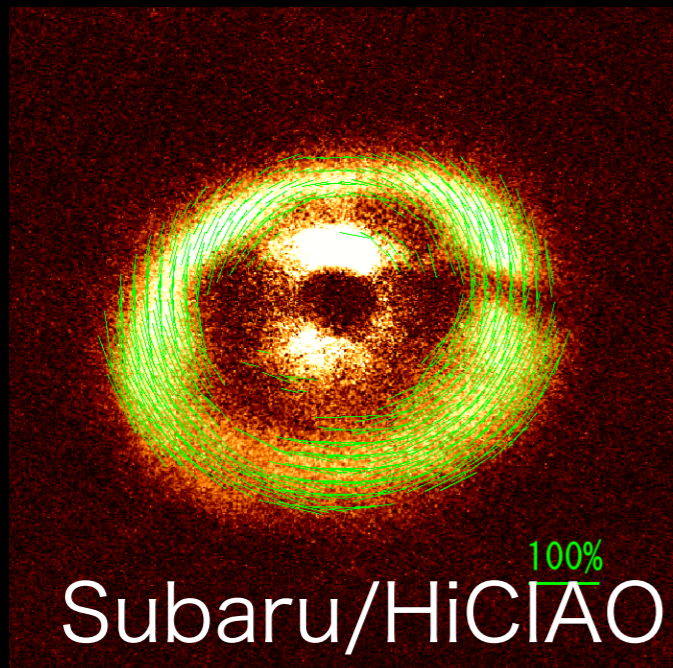
Radiative transfer with porous dust aggregates

GG Tau Circumbinary disk:

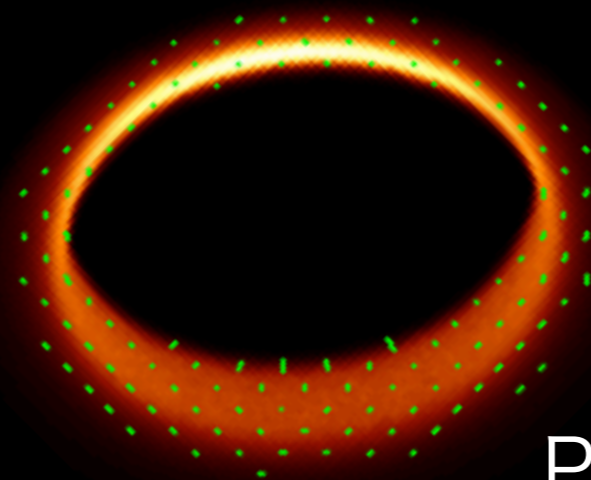
- ☑ 前方散乱と高い偏光度が共存
- ☑ 低密度アグリゲイトで再現可能！



Observation
(Itoh et al. 2014)

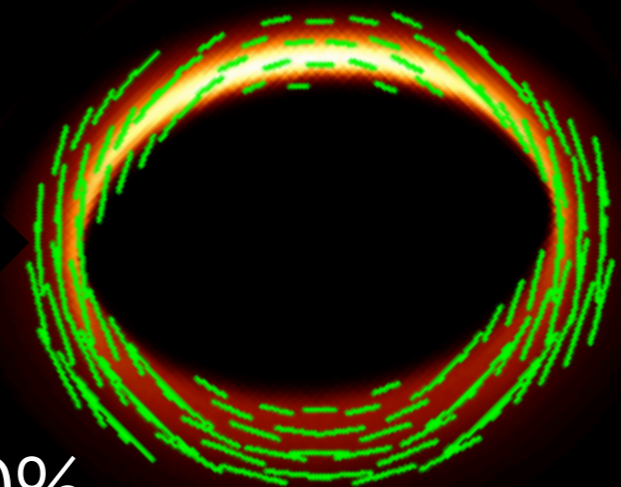


コンパクトダスト
($a_{\text{max}}=1.5\mu\text{m}$, $p=3.5$,
silicate)



P=50%

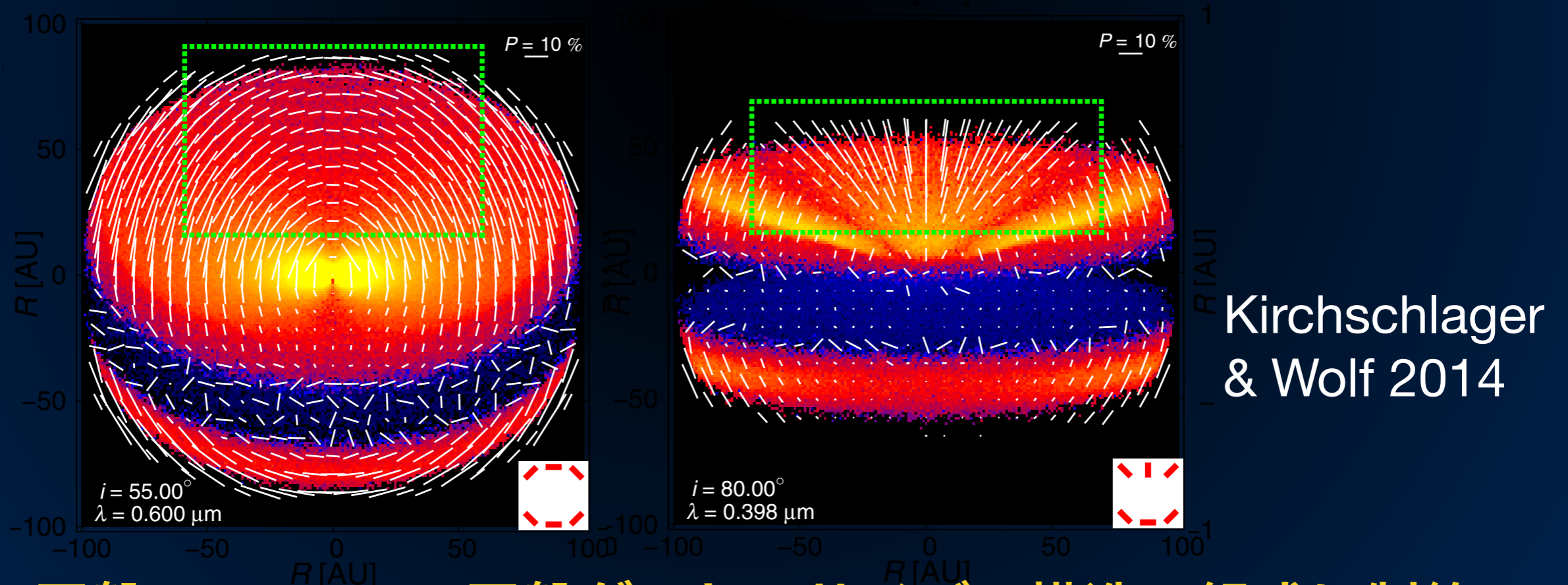
低密度アグリゲイト
($R_g=0.4\mu\text{m}$, $R_o=0.01\mu\text{m}$)



RT et al. in prep.

Radiative transfer with porous dust aggregates

- ☑ Negative Polarization Branch (NPB)による偏光ベクトルの反転
 - **Compact aggregates**はしばしば後方散乱域で偏光度が負になる
 - ← 後方散乱の際, $P < 0$ のモードが選択的に干渉して強められる
(Weak localization effect; Mishchenko et al. 2009)
 - NPBは彗星や小惑星表面のダストで実際に観測されている



円盤でのNPB → 円盤ダストのサイズ・構造・組成に制約

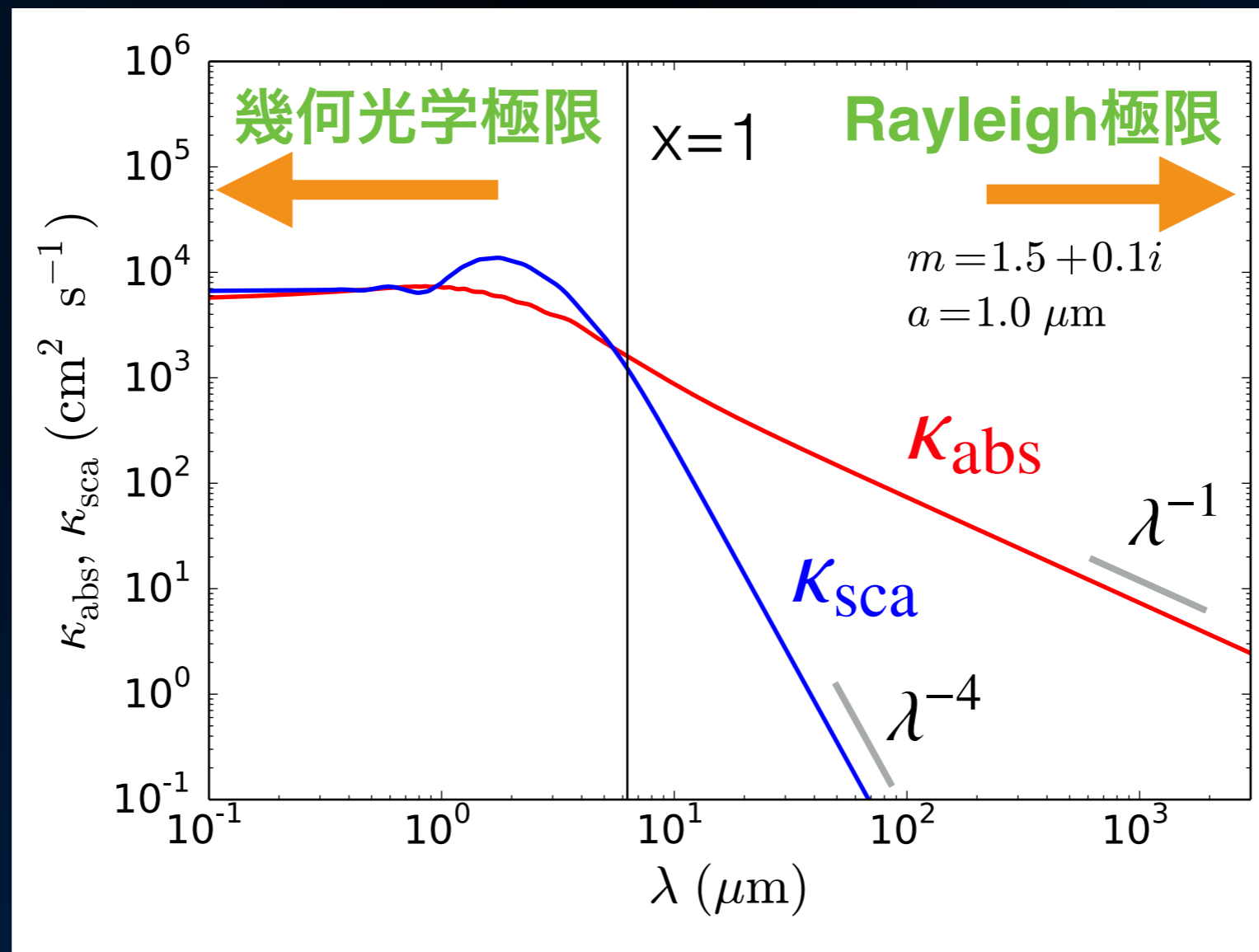
第2部：ミリ波の吸収と散乱

Dust opacity (single size): Mie理論

☑ Mie理論: 一様球の光学特性を与える厳密解

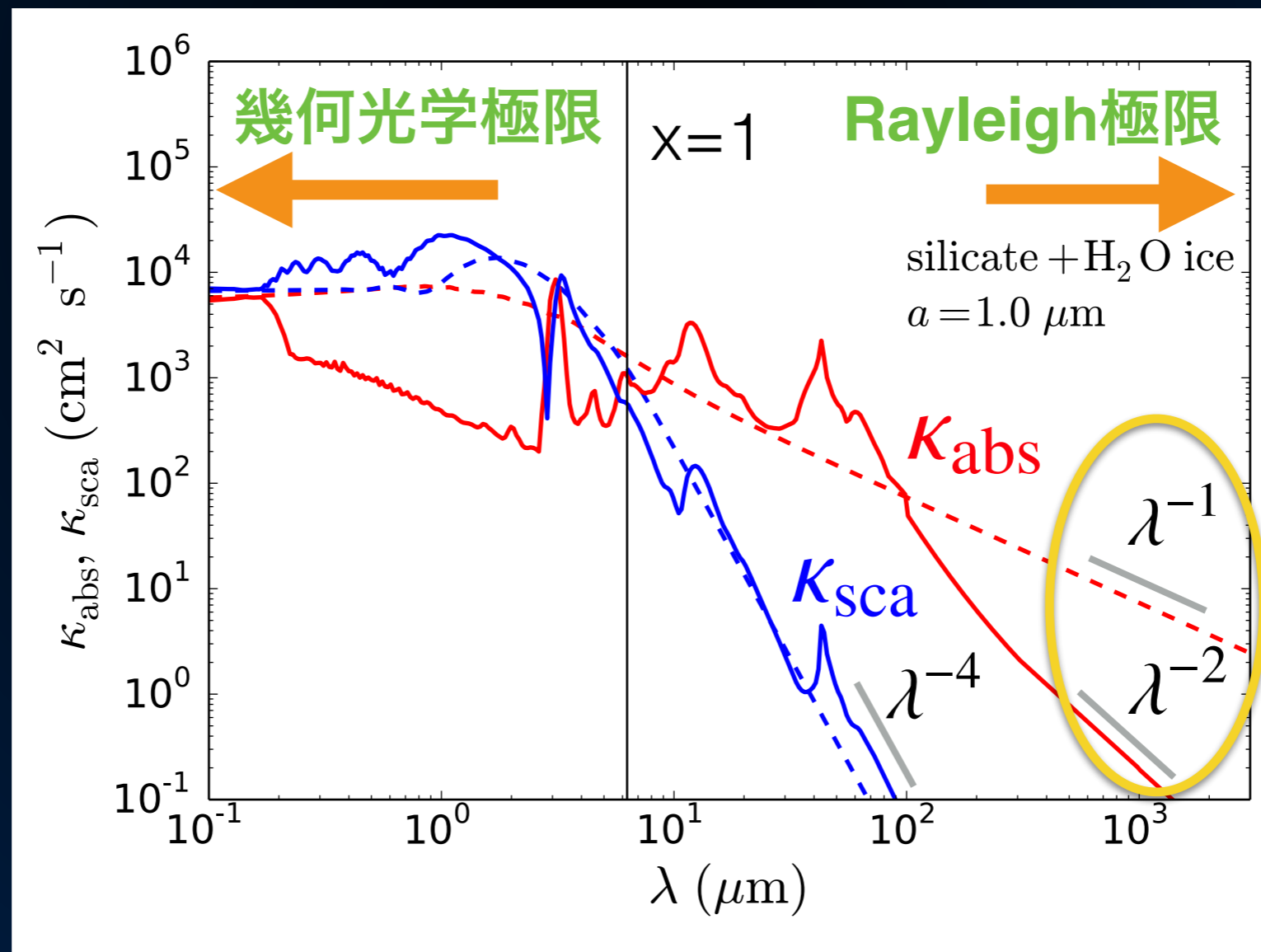
☑ パラメータは2つ: サイズ・パラメーター $x = \frac{2\pi a}{\lambda}$
複素屈折率 $m(\lambda) = n + ik$

☑ ダストのopacity (cm^2 per gram of dust) (屈折率の波長依存性を無視)



Dust opacity (single size): Mie理論

- ☑ Mie理論: 一様球の光学特性を与える厳密解
- ☑ パラメータは2つ: サイズ・パラメーター $x = \frac{2\pi a}{\lambda}$
複素屈折率 $m(\lambda) = n + ik$
- ☑ ダストのopacity (cm^2 per gram of dust) (~~屈折率の波長依存性を無視~~)



Opacity index

$$\kappa_{\text{abs}} \propto \lambda^{-\beta}$$

ダストによるミリ波吸収の物理

☑ $\beta_s := \beta$ in Rayleigh limit ($x \ll 1$)

(a) 結晶質の絶縁体 (結晶質silicate/H₂O iceなど)

$$\beta_s = 2$$

赤外線振動共鳴のdamping wingによる吸収 (Lorentz model)

(b) 導体/半導体 (graphiteなど)

自由電子によるエネルギー散逸 (Drude model)

$$\beta_s = 2$$

(c) 非晶質の絶縁体 (非晶質silicate/H₂O iceなど)

モデル化は発展途上, 主に室内実験で調べられている (e.g., Coupeaud+12')

性質) ・ 結晶質よりも大きな吸収係数

・ 温度依存性がある



No unique β

非晶質ダストによる吸収モデル: *see e.g., Meny et al. 2007*

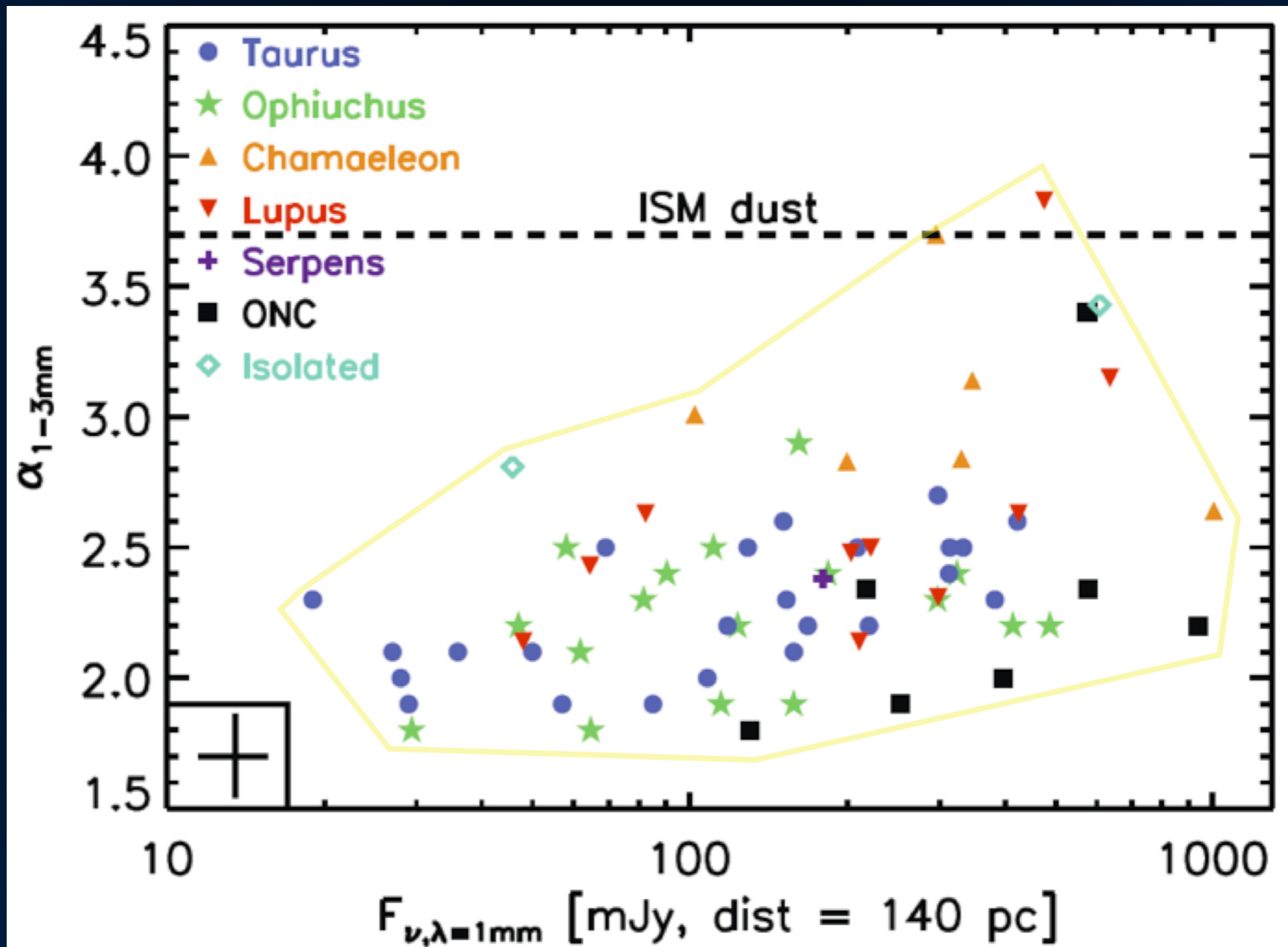
☑ 星間ダスト ($a_{\max} \sim 0.1 \mu\text{m} \ll \text{mm波}$)

- 分子ガスが卓越するline of sightで $\beta=1.66$

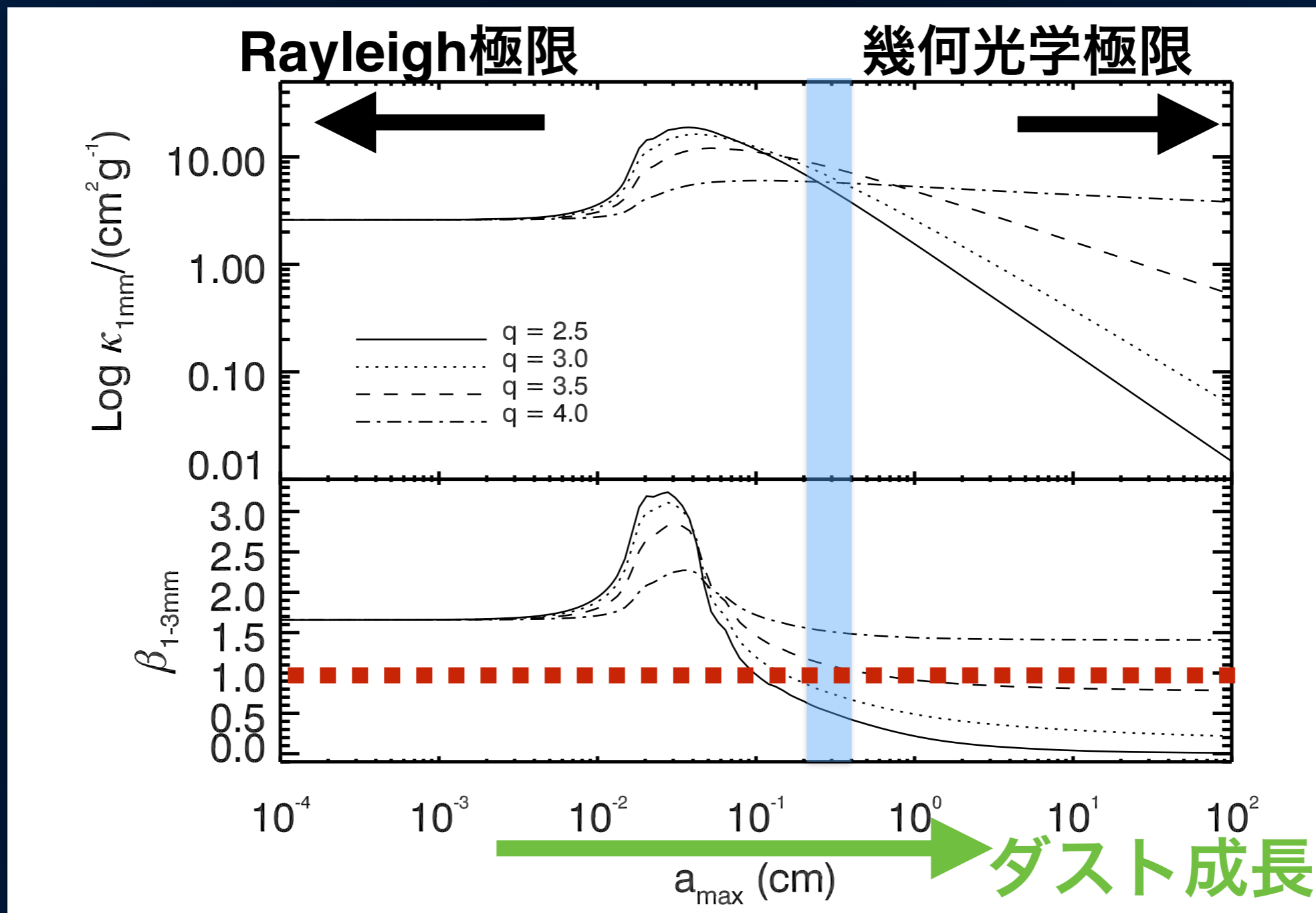
(Planck Collaboration Int. XIV, 2014, A&A, 564, A45)

円盤でのOpacity index β

$$\alpha = 2 + \beta$$



ダストの成長とopacity進化 (compact grain)



Ricci et al. 2010

Draine (2006): $a_{\text{max}} \gg 3\text{mm}$, $n(a)da \propto a^{-q}da$ ($3 < q < 4$)

$\beta(\lambda=1\text{mm}) \sim (q-3)\beta_s$ (β_s : Rayleigh極限でのopacity index)

$\beta_s \sim 1.7$ (ISM-value), $q=3.5$ の時, $\beta(\lambda=1\text{mm}) \sim 0.9$

$\beta \sim 1$ の粒子の正体：compact vs porous

Kataoka et al. 2014

- mass-to-area ratioが一定 (fractal dim.=2)

→ $a \cdot f = \text{const}$ で吸収opacityは縮退

(f : volume filling factor)

例) $af = 1\text{mm}$ の場合

$f = 1$ (compact), $a = 1\text{ mm}$

$f = 10^{-4}$ (fluffy), $a = 10\text{ m}$

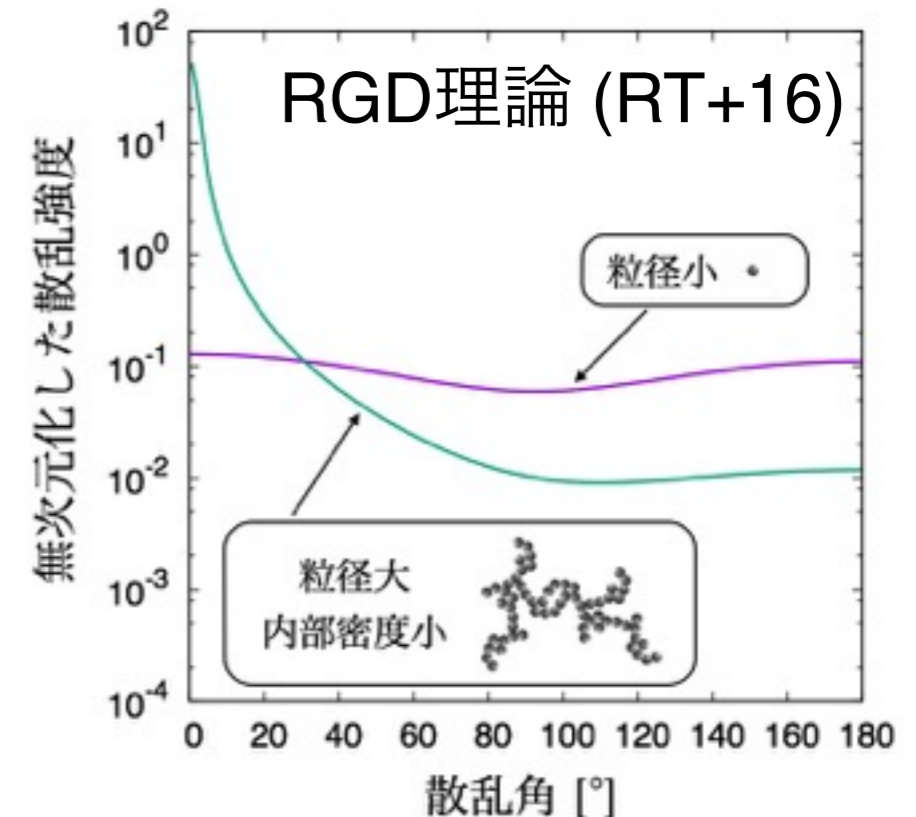
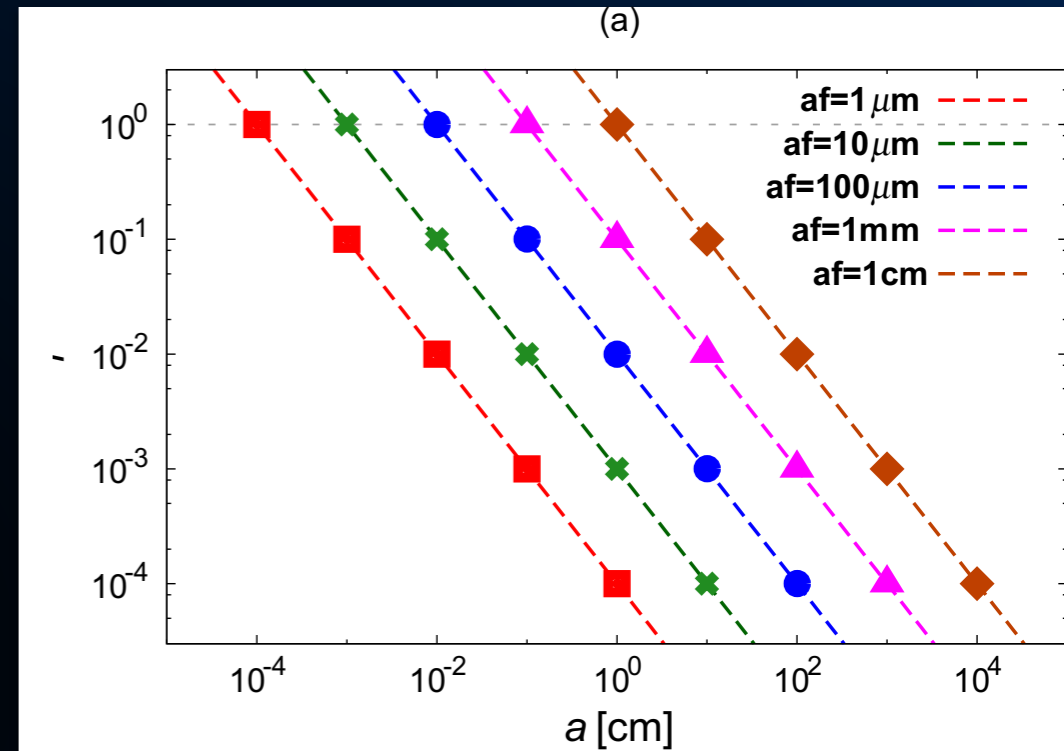
熱放射の性質では区別できない！

- 散乱は縮退しない！ (RT et al. 2017)

散乱の場合, 集合したモノマー同士が干渉

→ $af = \text{const}$ の縮退は発生しない

縮退を解く鍵は散乱にあり？



ミリ波散乱を用いたダストサイズ測定

Kataoka et al. 2015

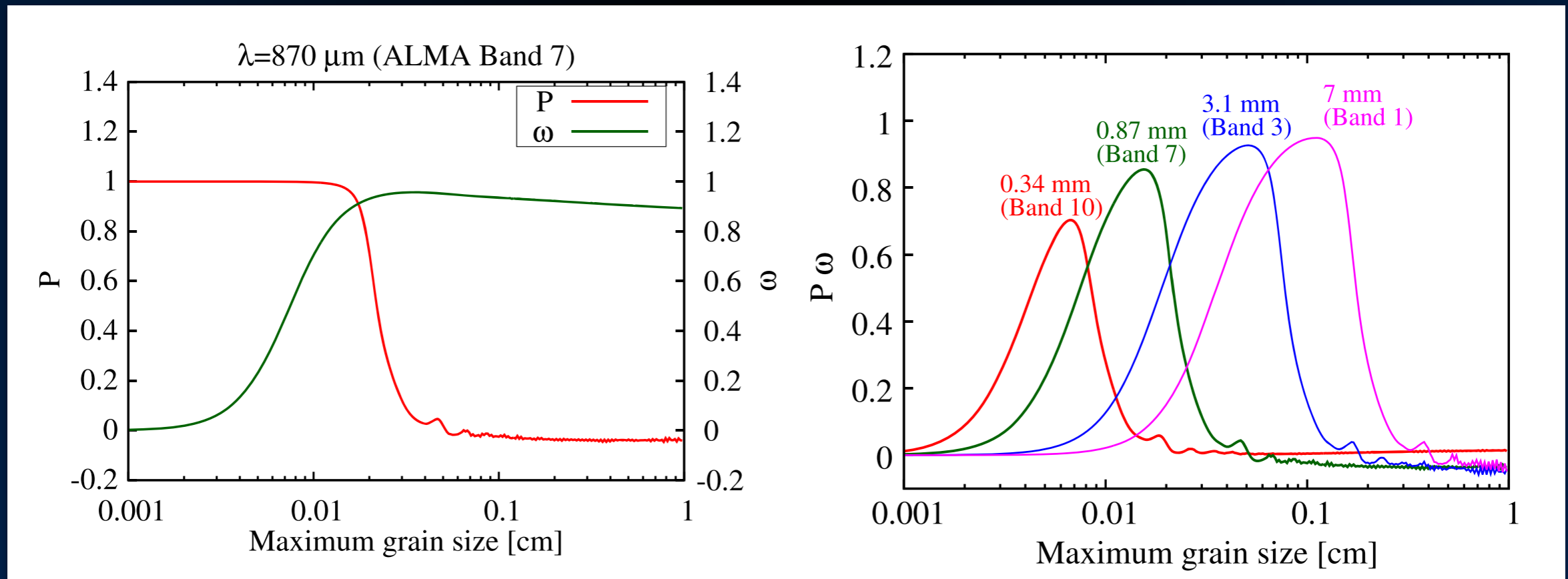
- $x > 1$ (ダスト半径 $>$ 波長/ 2π)でアルベド ω が上がる
- $x > \sim 1$ 偏光度 P が急速に下がる (コンパクトダストの性質)



$P\omega$ (\sim 偏光強度) は $x \sim 1$ でpeakを持つ関数

観測波長 λ_{obs} で偏波が受ければ, $a_{\text{max}} \sim \lambda_{\text{obs}}/2\pi$

(Porous aggregateの場合, サイズの下限值がわかる: $a_{\text{max}} > \lambda_{\text{obs}}/2\pi$)



第3部：ミリ波偏光

ミリ波偏光の起源

ダスト整列

or/and

ダスト散乱

整列した扁平ダストからの
偏光した熱放射

非等方な輻射場を散乱したこと
による偏光 (ダストは球でも良い)

e.g., RT, Lazarian & Nomura 2017

e.g., Kataoka et al. 2015

(A), (B) Grain alignment

Axis of grain alignment

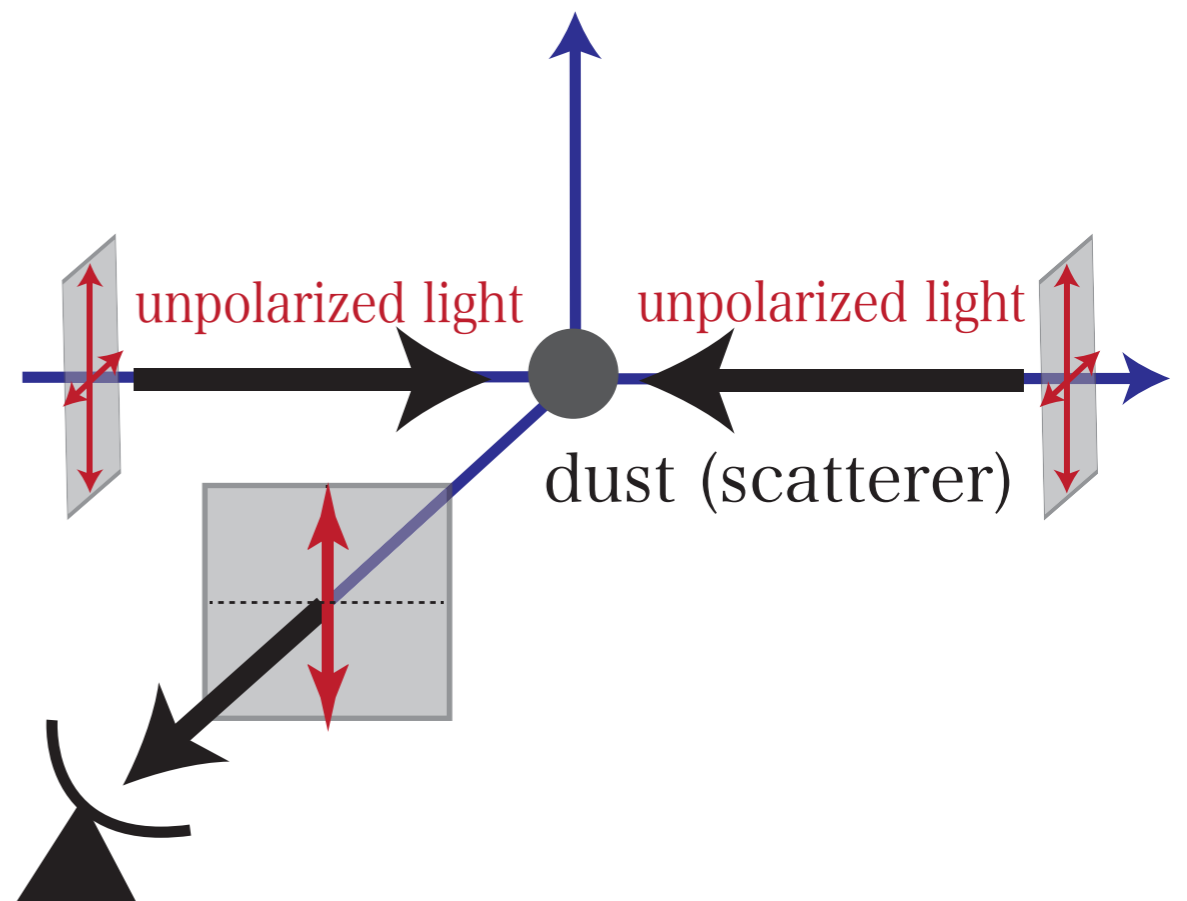
Magnetic field

or radiative flux



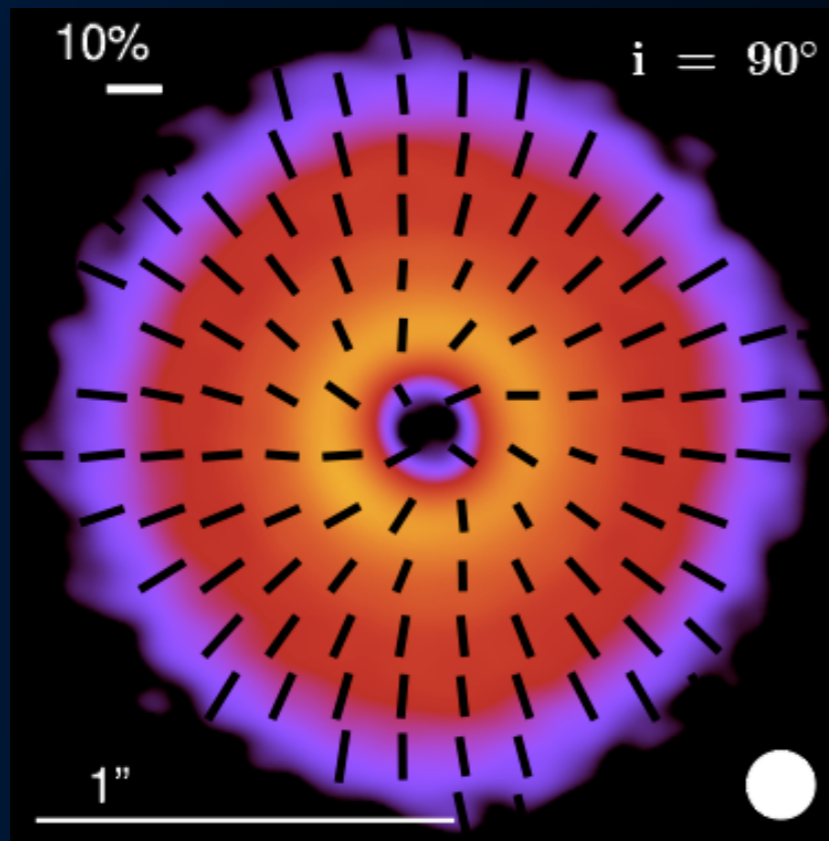
Oblate grains

(C) Scattering

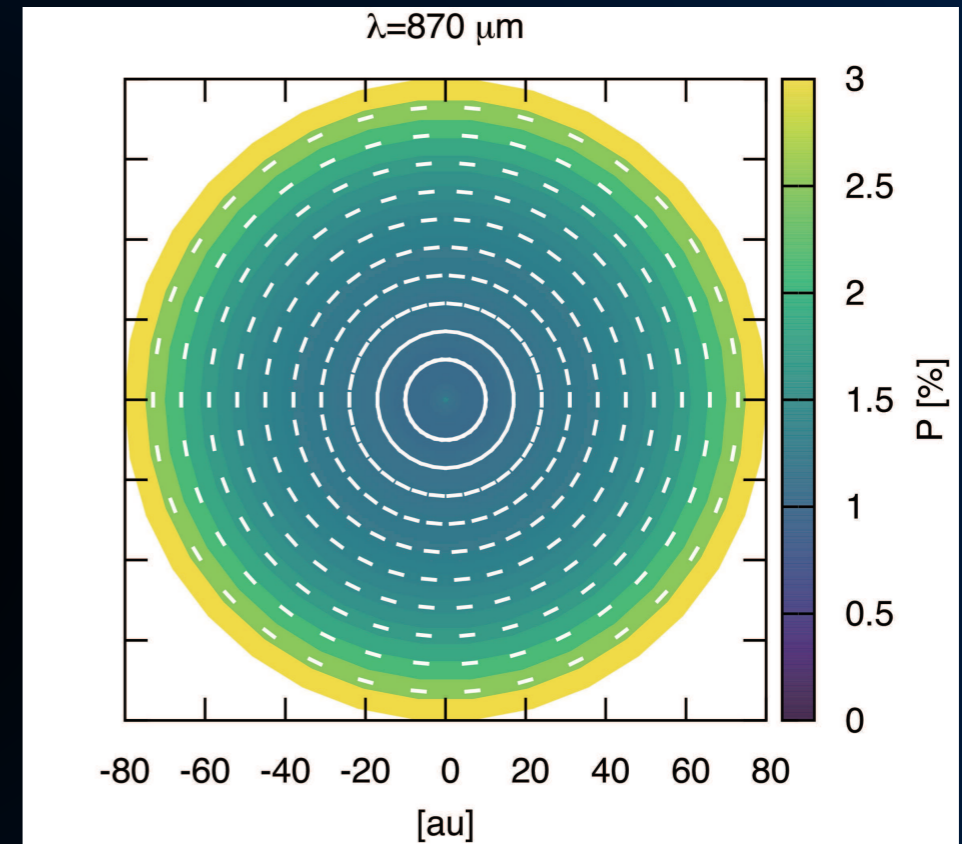


ダスト整列による円盤ミリ波偏光

Bertrang et al. 2016
(トロイダル磁場整列を仮定)



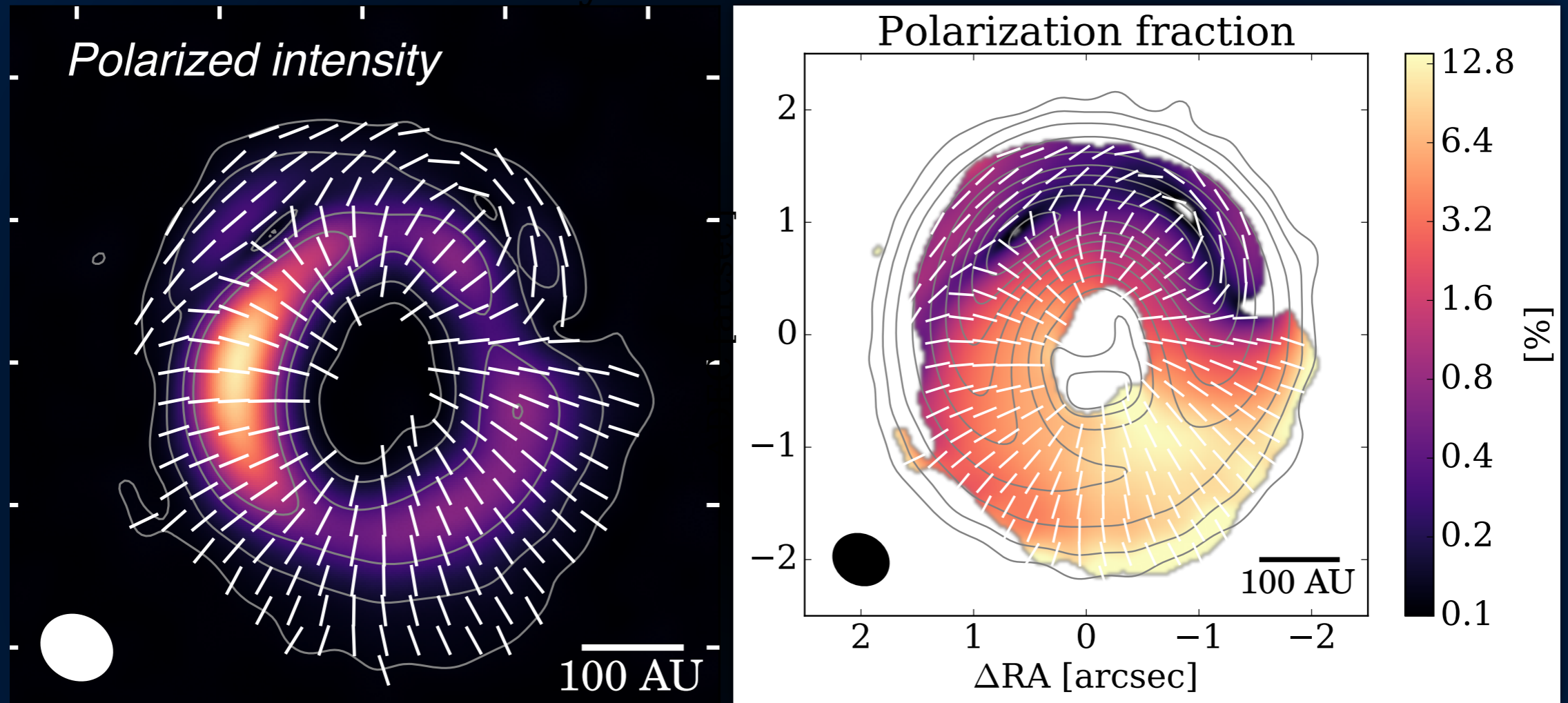
RT, Lazarian & Nomura 2017
(整列理論と整合的に計算)



RT, Lazarian & Nomura 2017の主な主張

- 従来は磁場整列を仮定した結果、動経方向の偏光ベクトル
- (サブ)ミリ波の偏光ベクトルは輻射fluxの向きに垂直に出る
→ **方位角方向の偏光ベクトル**
- **ALMAで観測される偏光ベクトルは磁場とは無関係**

HD 142527からの偏波 (Kataoka+2016)

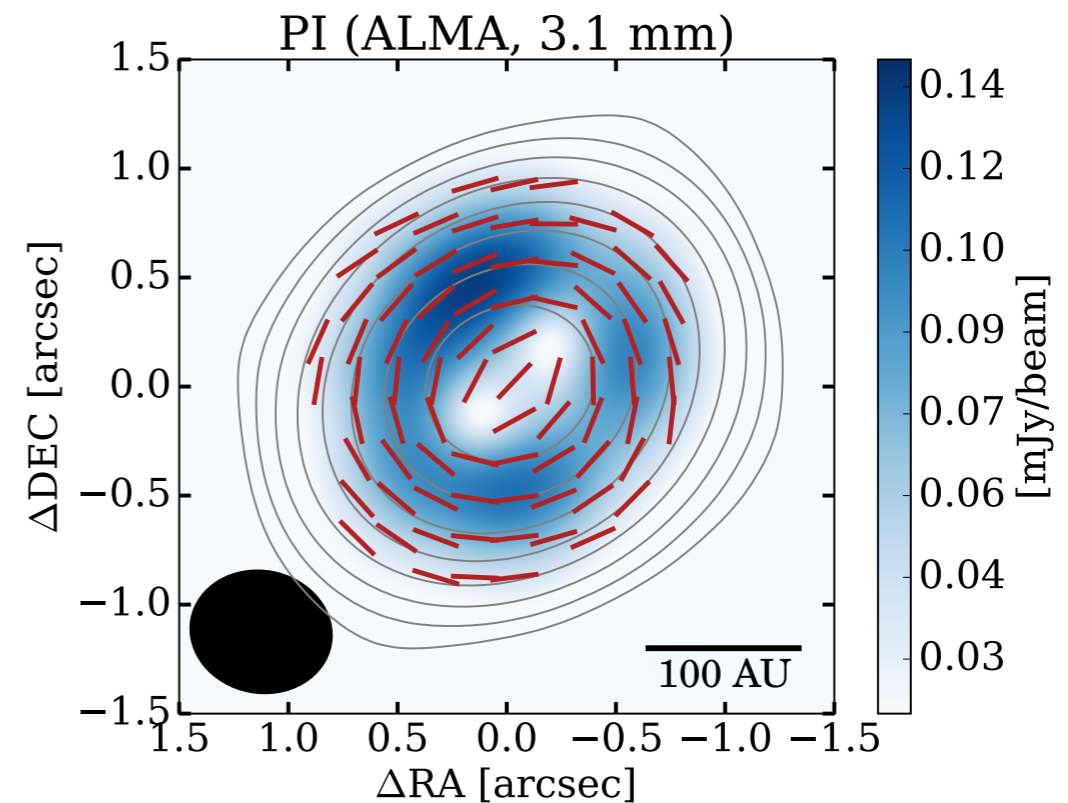
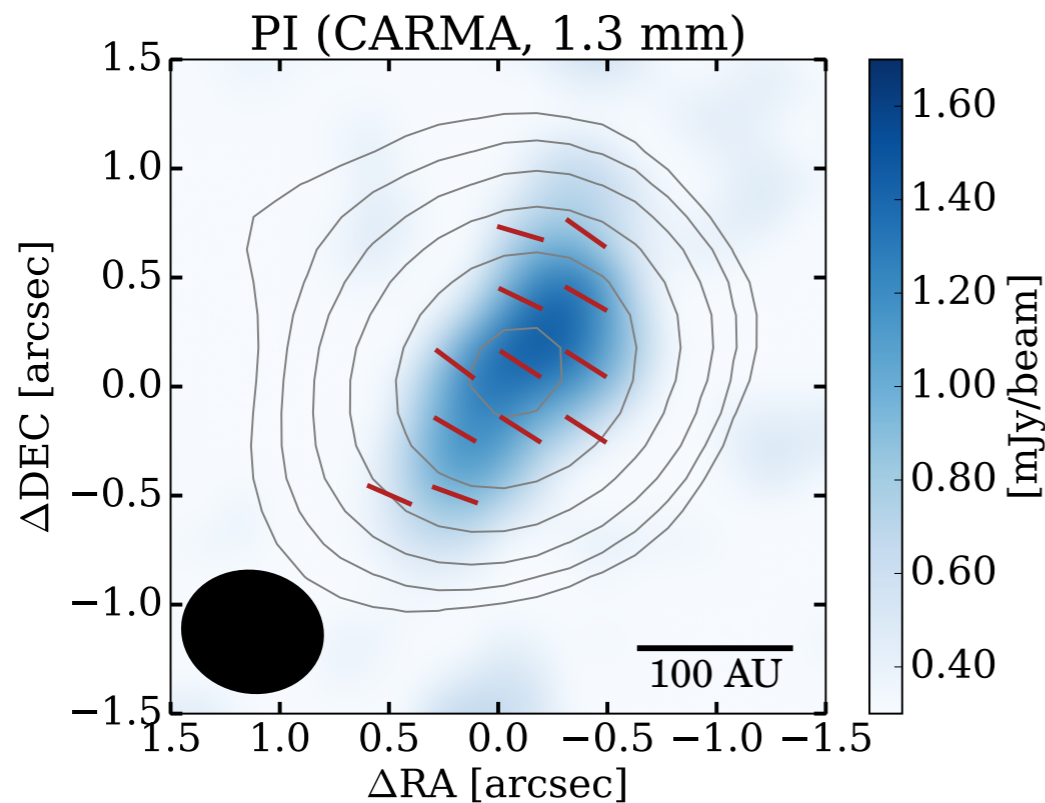


- 偏光ベクトルが北側で90度flipしている → 磁場整列では困難か
- 偏光ベクトルの向きは散乱偏光と整合的
(方位角方向にflux gradientがあれば, 輻射整列でも説明可能か)
- 偏波が散乱由来であるすると、ダスト半径は $140 \mu\text{m}$

HL Tauからの偏波 (Kataoka+2017)

$\lambda = 1.3 \text{ mm}$

$\lambda = 3.1 \text{ mm}$



散乱偏光と整合的

(Inclination effectで偏光ベクトル

は円盤短軸と並行になる see, e.g., Yang et al. 2016)

輻射整列理論と整合的

円盤赤道面でのダスト半径： β vs. 散乱偏光

a few mm
(β から予測されるサイズ)

粒径 \sim a few $10^2 \mu\text{m}$
(散乱偏光から予測されるサイズ)

HD 142527

$\lambda=870 \mu\text{m}$ の偏光の起源は？
整列偏光？ Porousダストによる散乱？

$\beta \sim 1$ の理由は？

HL Tau

$\lambda=1.3\text{mm}$ と 3.1mm の偏光の
波長依存性をどう説明するか？
(Porousダストの散乱で説明するのは難しい)

$\beta \sim 1$ の理由は？
薄い円盤の起源は？
Low alpha-value?

中間赤外線線の偏光なら、磁場に対する整列が見える？

Larmor歳差のtimescale:

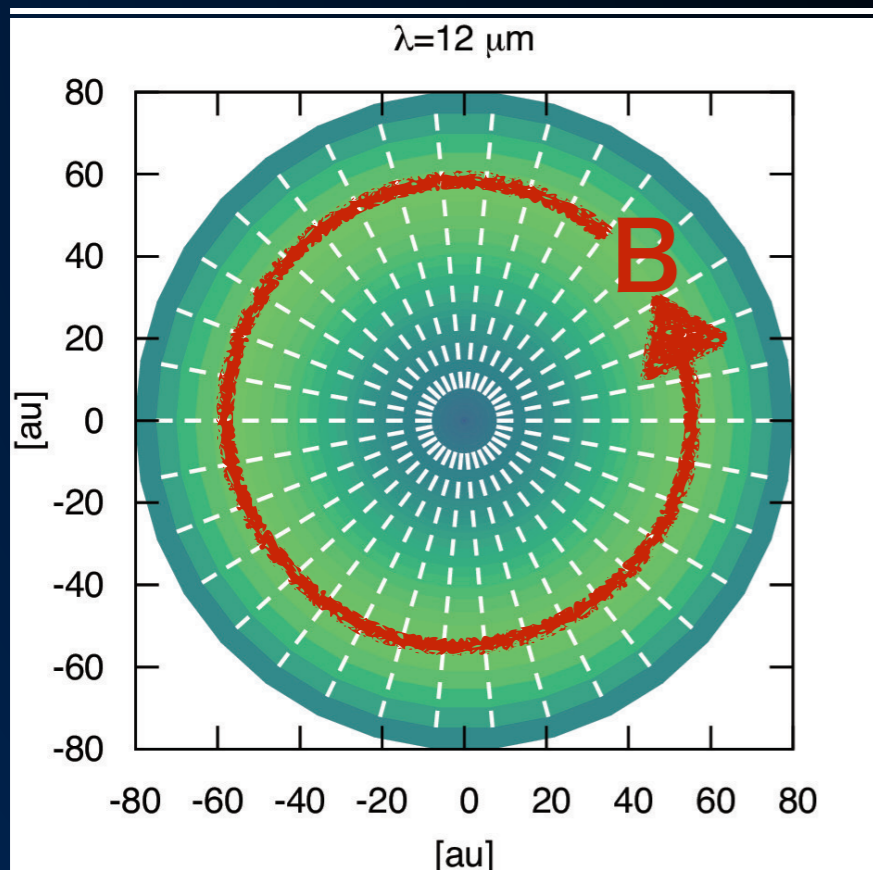
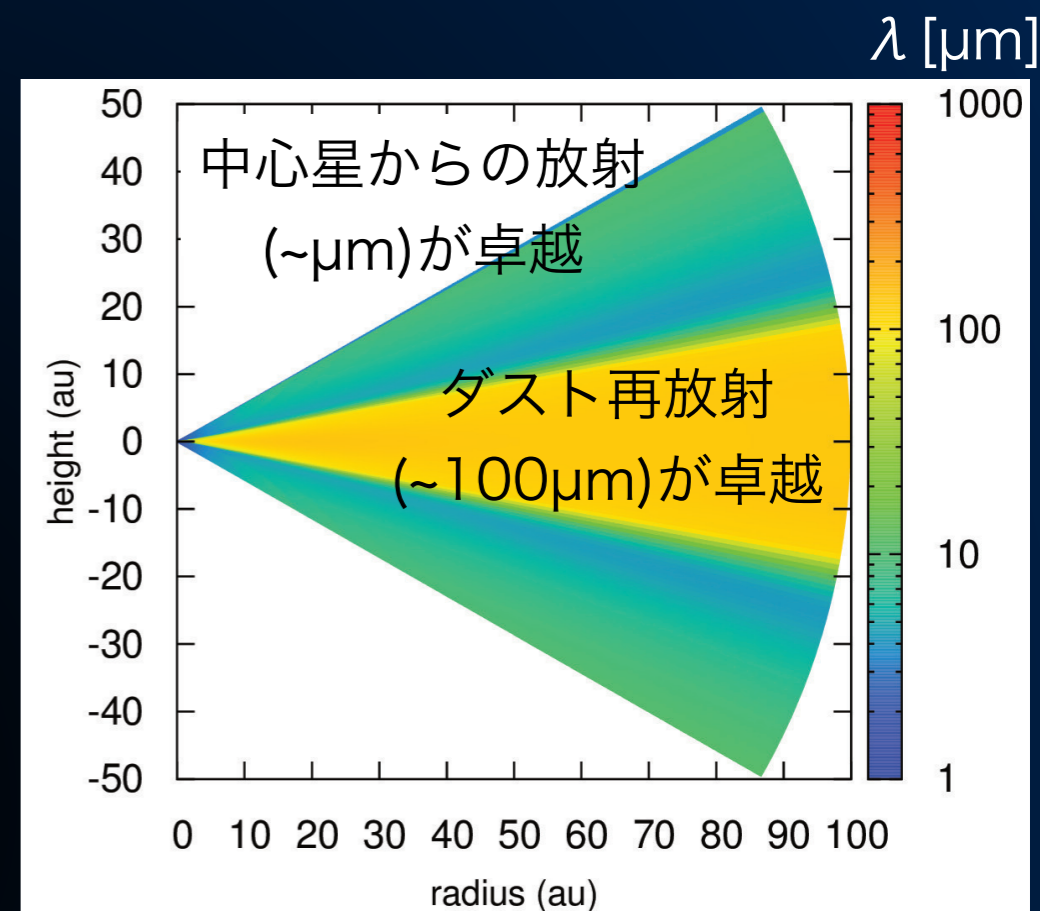
$$t_{\text{Larmor}} \approx 1.3 \text{ yr } \rho_s \hat{s}^{-2/3} a_{-5}^2 \hat{B}^{-1} \hat{\chi}^{-1}$$

粒径

整列可能なダスト半径 \sim 輻射場の波長/ 2π

円盤表層は磁場整列に有利！

(表層はさらに低ガス密度)



- ・円盤表層をトレースするMIRでの円盤偏光
- ・ダストが磁場に対して整列する可能性あり
(但し、磁場強度やダストの磁気感受率に依る)

円盤表層部の磁場線の構造は、
中間赤外線($\lambda \sim 10 \mu\text{m}$)の偏光撮像
で観測される可能性がある

Summary

- **円盤の赤外線撮像観測**

- ダストのサイズは散乱光の色やアルベドに現れる
 - 強い前方散乱(大きなダスト)は円盤をより暗く・赤くする
- ダストの内部構造(porosity)の情報は偏光度・偏光ベクトルに現れる

- **円盤ミリ波撮像観測**

- opacity slope $\beta \sim 1$ はダスト半径がmmサイズと考えられてきた
 - 散乱opacityは無視できない可能性が高い
 - Intensityには, ダストのアルベドの情報が含まれている可能性あり

- **円盤ミリ波偏光撮像観測**

- ミリ波偏光の起源は、散乱と輻射整列
- 散乱偏光とopacity slopeのそれぞれで求まるダスト半径の整合性については今後, 詳細に調べていく必要がある