

老いた原始惑星系円盤でダストは成長しているか
～ ALMA望遠鏡の2波長サーベイから ～

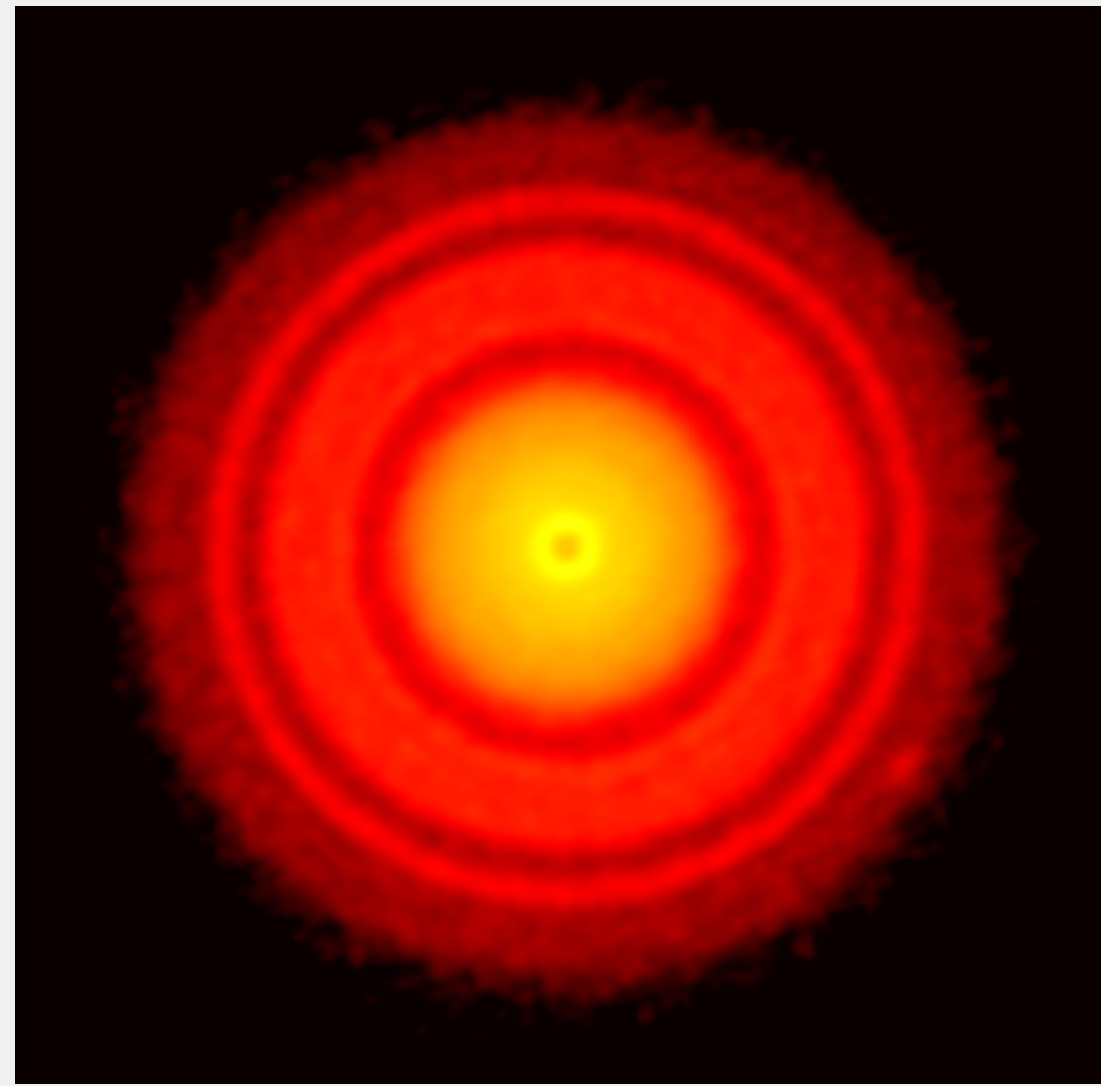
2023.9.1

京都大学理学部

尾藤太宇

指導教員: 片岡章雅

惑星ができるまで



Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), Tsukagoshi et al.

星間雲収縮 $\sim 10^6$ years



ダスト成長 $10^5\sim 6$ y



微惑星形成 $10^5\sim 6$ y



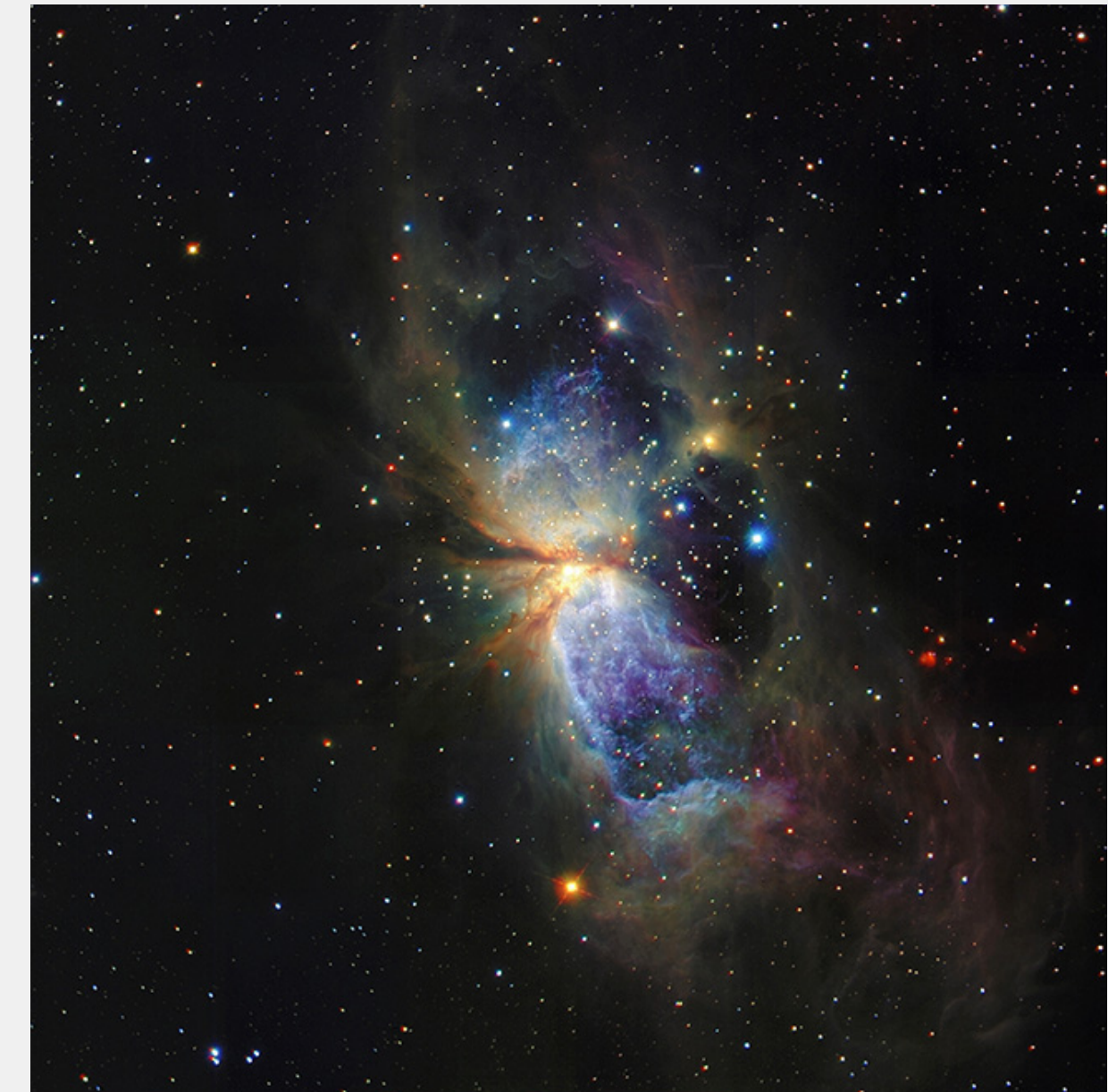
原始惑星形成 $10^6\sim 7$ y



岩石惑星形成・ガス捕獲 $10^6\sim 7$ y



円盤ガスの散逸 $10^7\sim 8$ y



Credit: NAOJ



credit: NASA, Wendy Stenzel

ダストの成長と時間スケール



μm から mm 程度のダストの成長の理論では、

- ・衝突しても破壊によって成長できない
- ・成長するとガス抵抗によって中心星へ落ちてしまうなどの問題がある。

↓

惑星系形成の各段階でダストがどれほどのサイズかを観測的に制限することは重要

今回観測したのはUpper Scorpius領域の円盤
年齢は $5\sim 10\times 10^6$ years^[1]
(ダスト成長の後期にあると考えられている)

[1] N. Miret-Roig et al.(2022)

ダストサイズをどのように測るか



ダスト・原始惑星系円盤はミリ波で明るいので、ALMAで観測する

- ・ダストサイズによって F_ν の周波数依存性が異なる。
- ・ALMAで同じ天体を複数のBandで観測することで、異なる波長でのフラックスが分かる。
→ダストサイズを導ける！

$$F_\nu \propto \nu^\alpha$$

α : spectral index

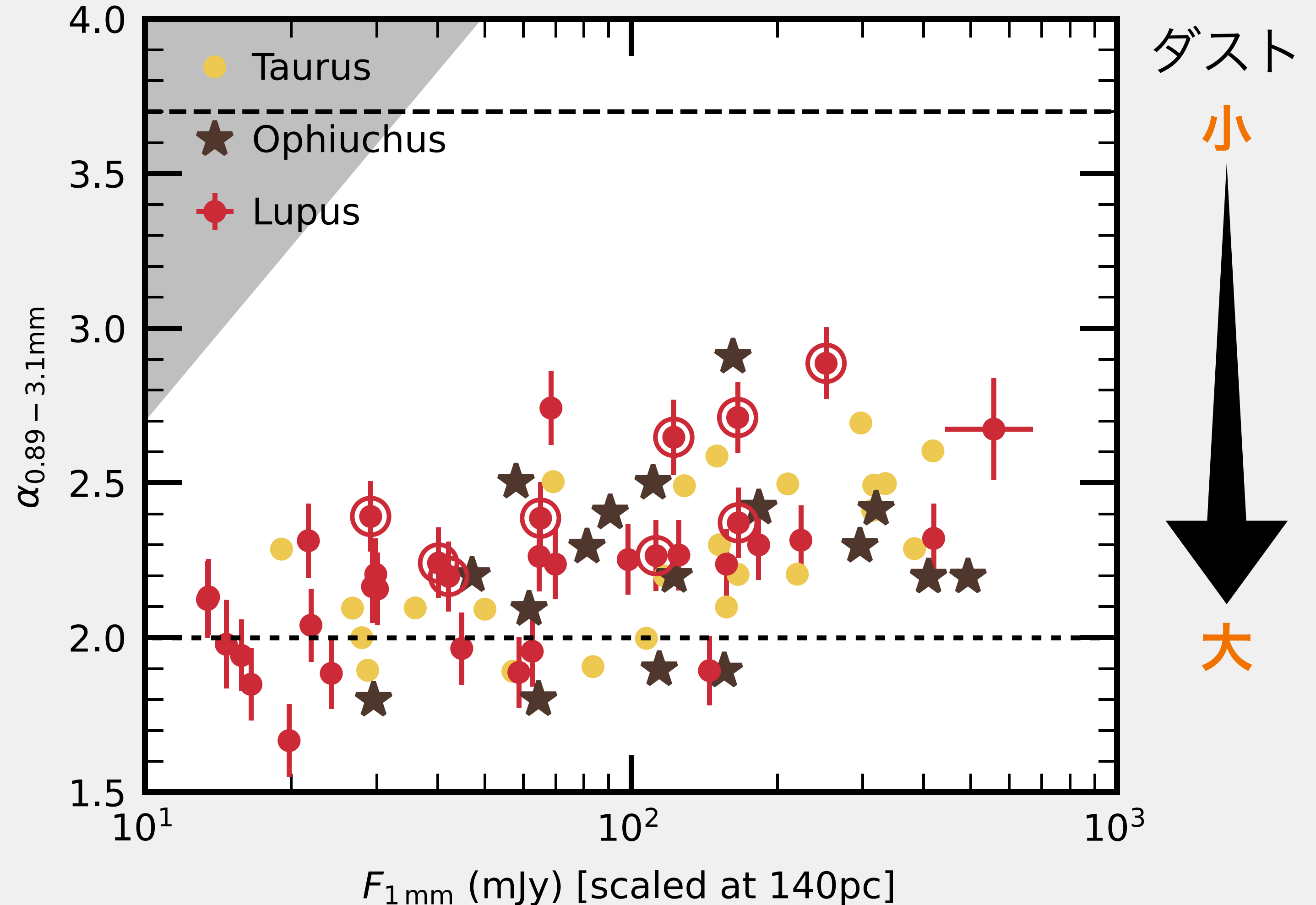
ある波長帯、例えば1 mmと3 mmの間では、フラックス密度は波長のべき乗になっているとみなせる。

→2つのBandで観測すれば ν 依存性を表す α が求まる

α が小さいほどダストが大きい

先行研究 若い領域ではダストが成長

- Taurus, Ophiuchus, Lupus領域の円盤で、Band 3 (2.9 mm) とBand 7 (0.88 mm)から、 α を求めた研究がある。 [3]
- Upper Scoに比べて若い ($1\sim 3\times 10^6$ years^[4]) (Upper Scoは $5\sim 10\times 10^6$ years)
- 若い領域では、ダストが成長していることが示唆された。(最大サイズ1 mm以上)
- より老いた領域であるUpper Scoではどんな図になるか？

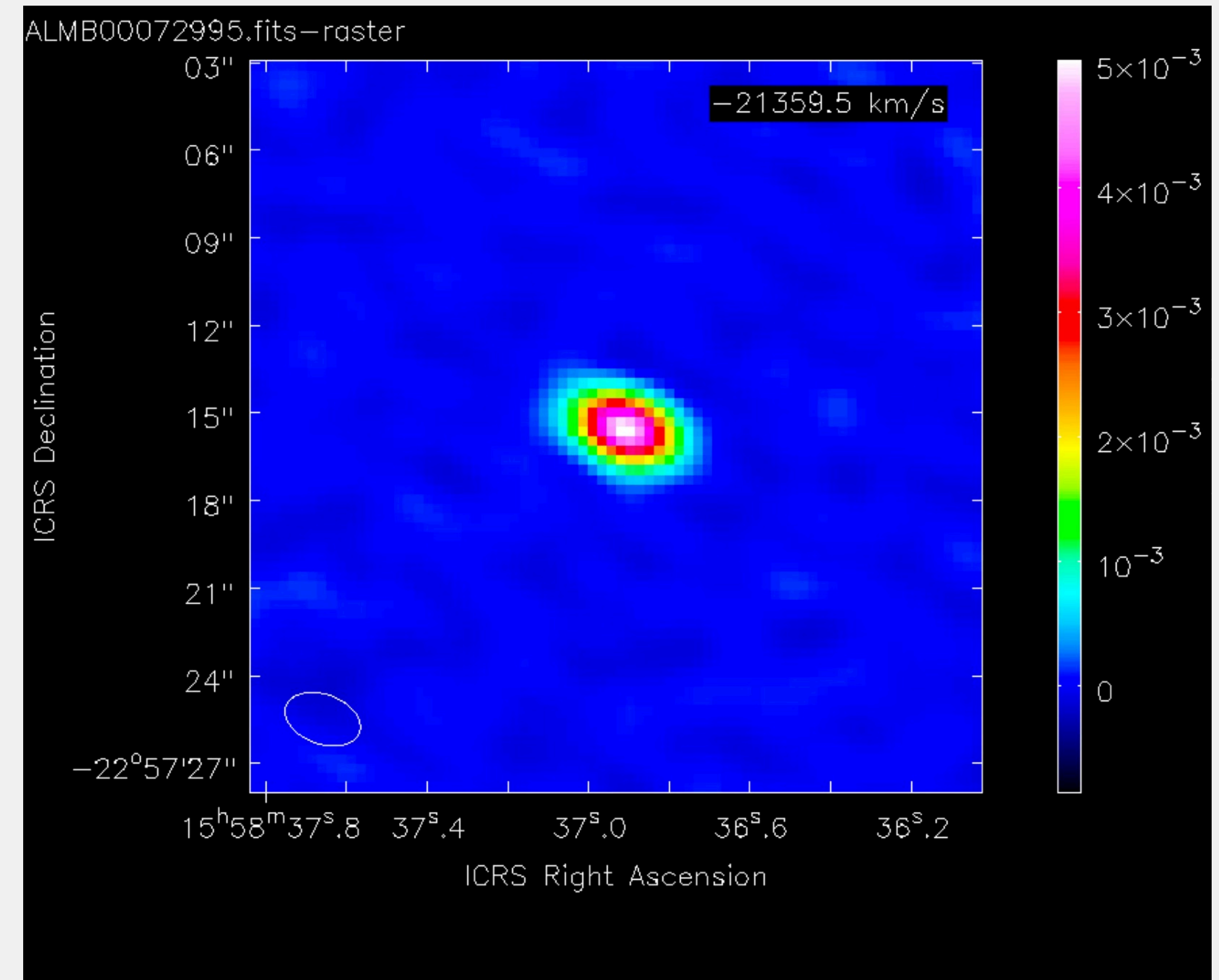


使用したデータ

2. Methods

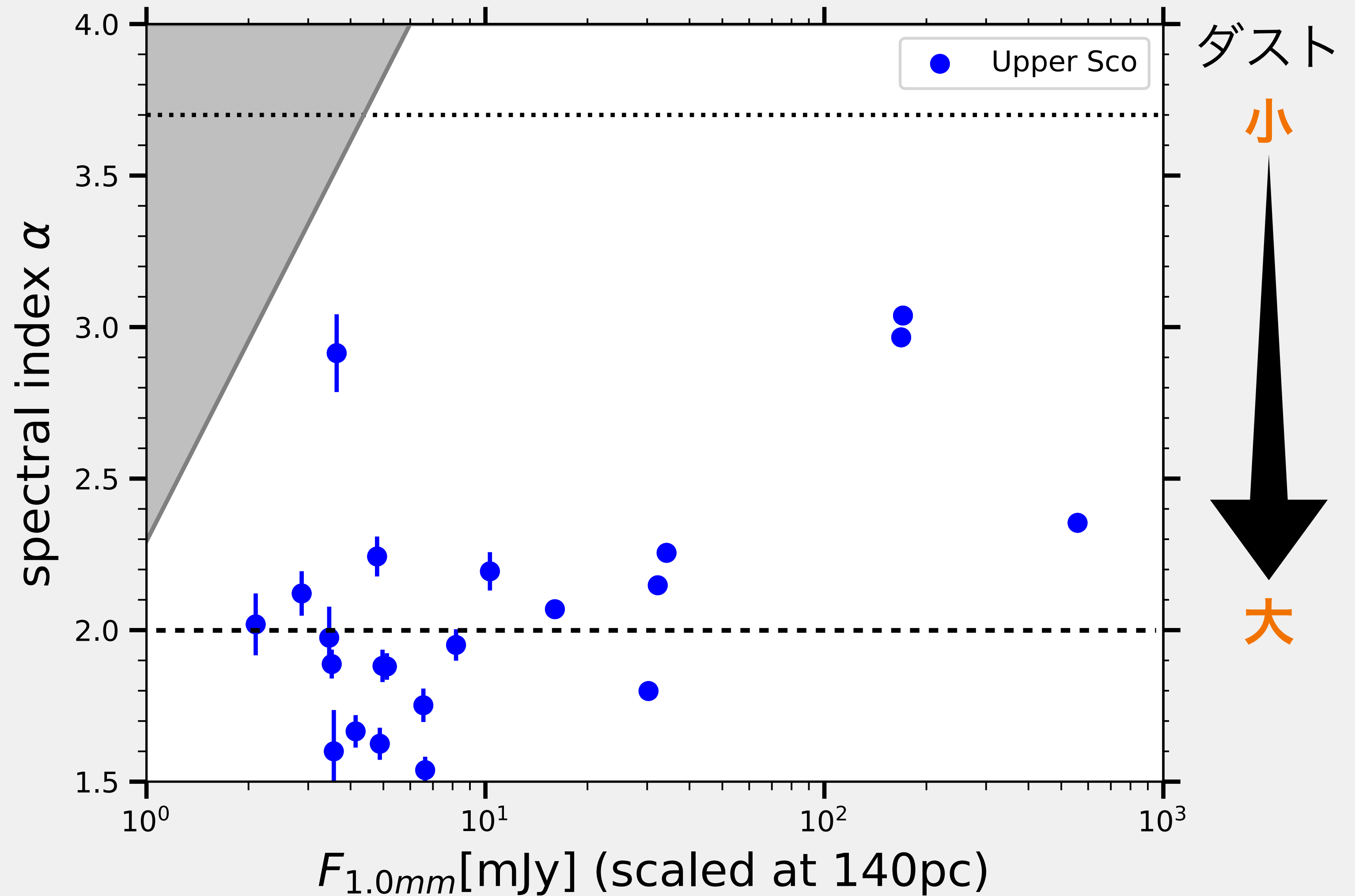


- Band 7のデータはBarenfeld et al. (2016)による。当時見つけていたのUpper ScoのClass II円盤を全て観測。(75天体)
- Band 7 (0.88mm)で最も明るかった24天体が、Band 3 (2.9mm)でも観測されている。(Project Code 2015.1.00819.S)
- JVOからBand 3の画像データを取得して解析した。



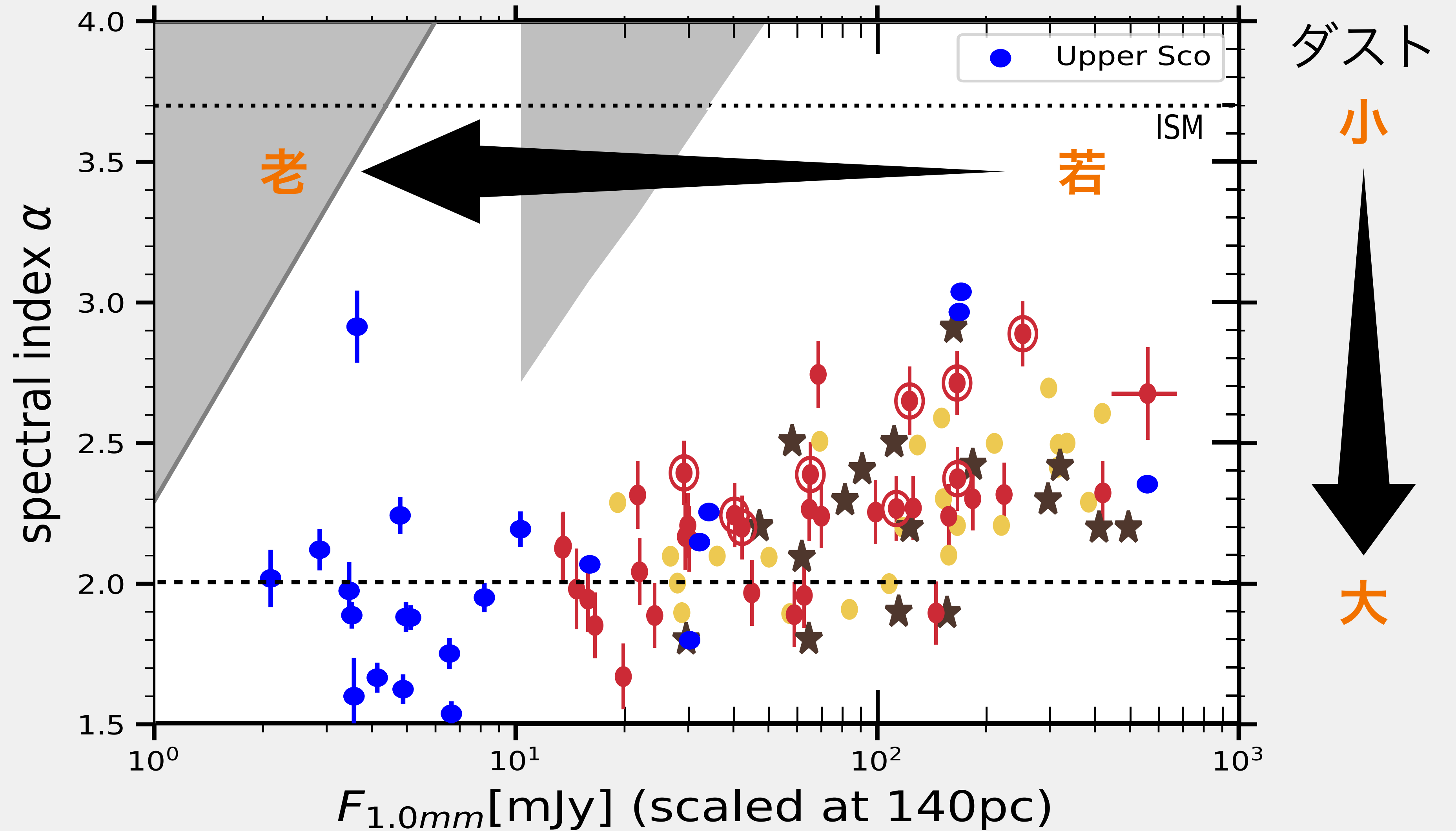
結果：Upper Scoのspectral index

- 全体的に右上がり
- $\alpha \sim 2$ の天体が多い
- 2を下回っているものも



他の領域の天体との比較

Upper Scoは他の領域よりも暗く、 α が小さい
→ダストが成長？





spectral index α の低下がダストの成長であると述べてきたが、これは光学的に薄いことを仮定した場合である。実際は円盤は進化と共に質量を減らし、構造が変わっていく。

→ダストの成長以外にも α の低下の要因があるのでは？

円盤の簡単なモデルを作り、 α -Fluxのグラフを考察した。

モデルの概要



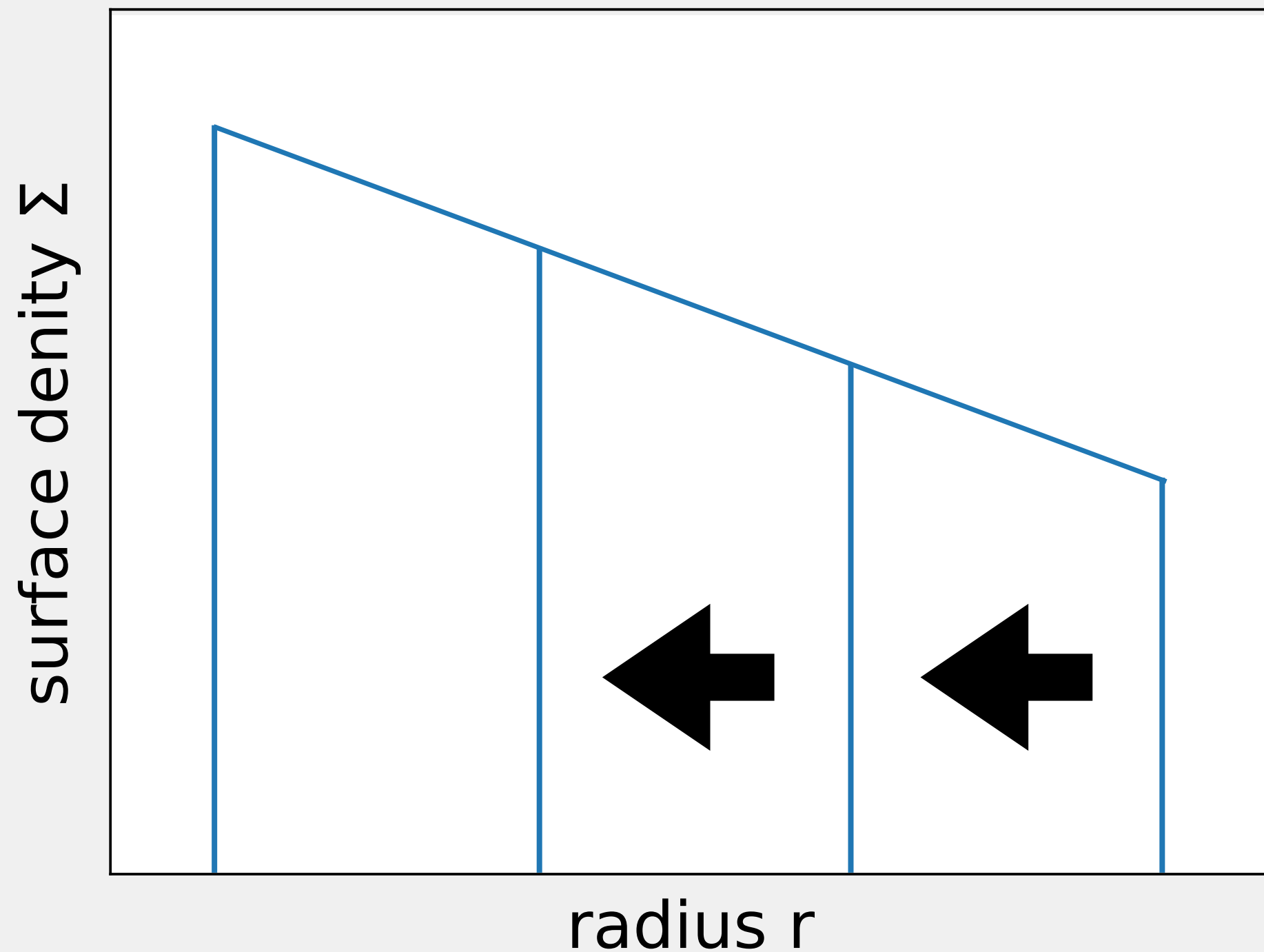
明るく α が大きい天体を基準にとり、各パラメータを設定した。その後、次のいずれかの方法で質量を減らし、円盤の進化をモデル化した。

ダストのサイズに関するパラメータ β を変えて、 $\beta = 0, 0.7, 1.7$ の場合を図に表した。

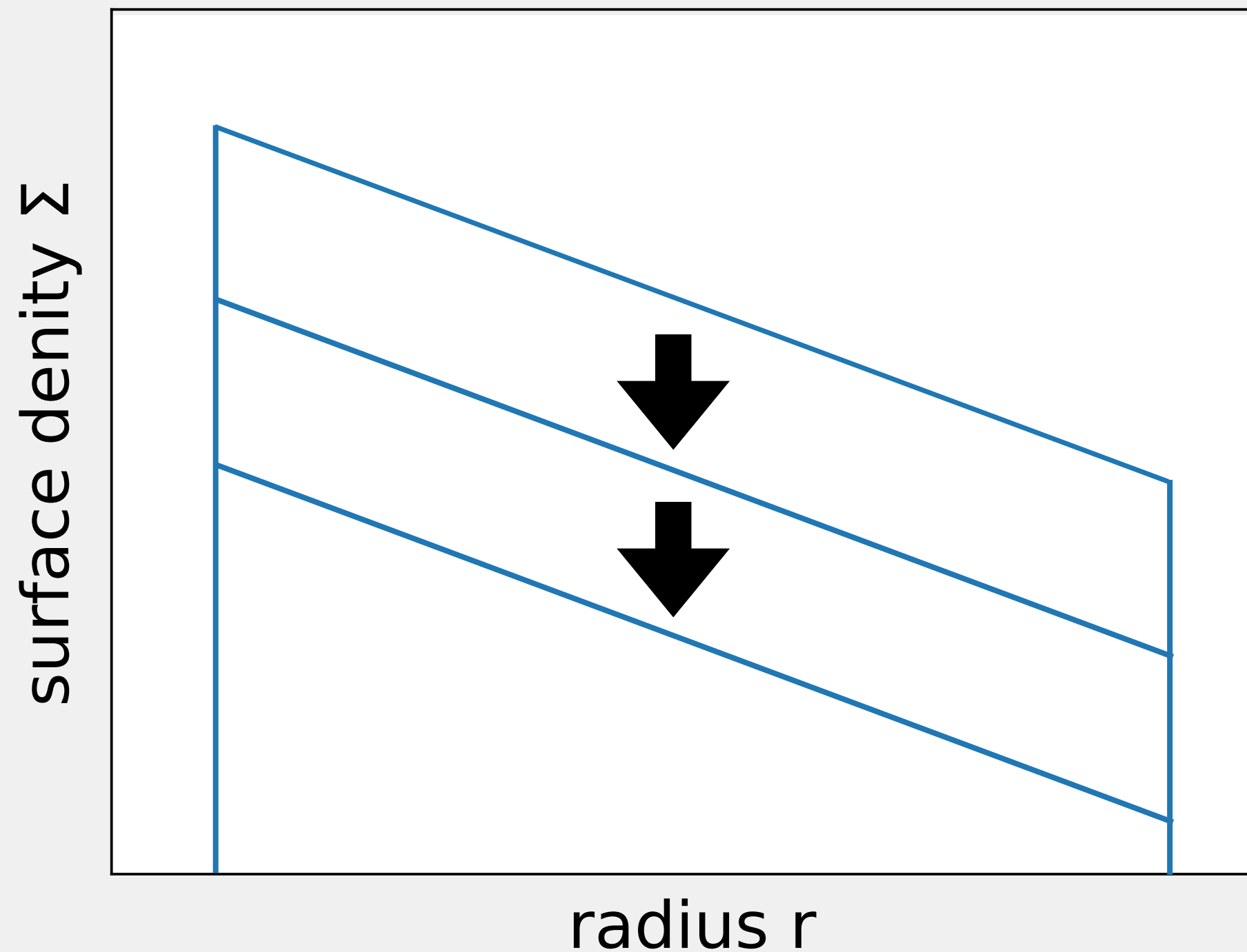
$$\kappa_\nu \propto \nu^\beta$$

κ_ν : 吸収opacity

Case1: 円盤の半径を小さくする



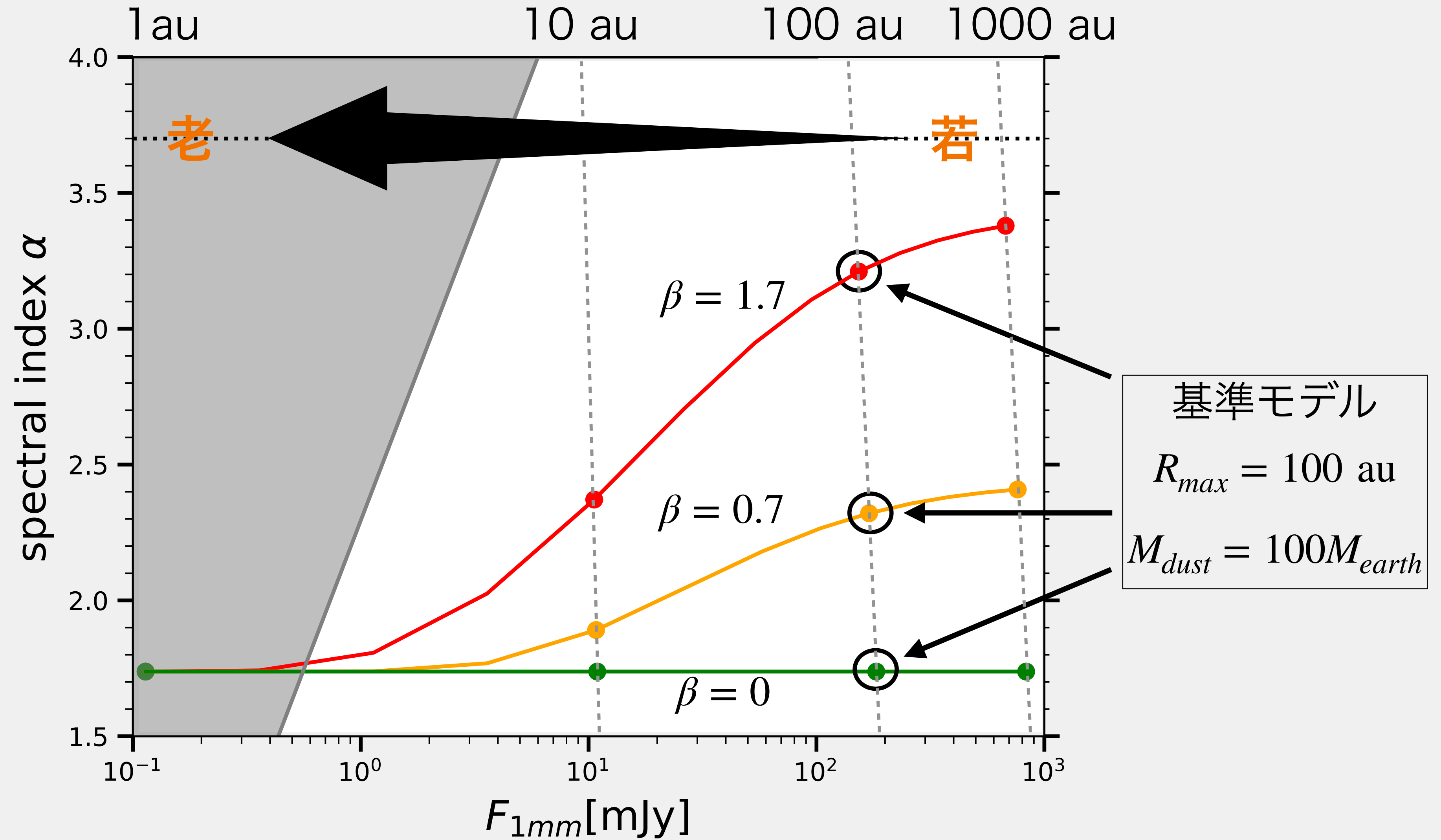
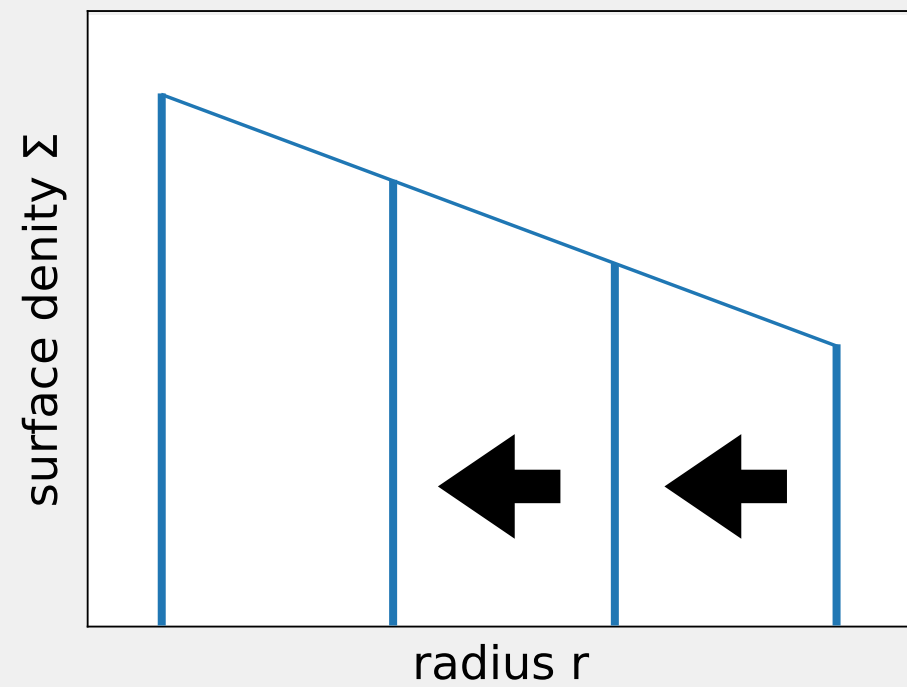
Case2: 面密度を一様に小さくする



モデルの詳細：
 $\Sigma \propto r^{-1.5}$
 $T = 20K$
 $\kappa_{0.88mm} = 3.1 cm^2/g$
基準モデル：
 $R_{max} = 100au$
 $M_{dust} = 100M_{earth}$

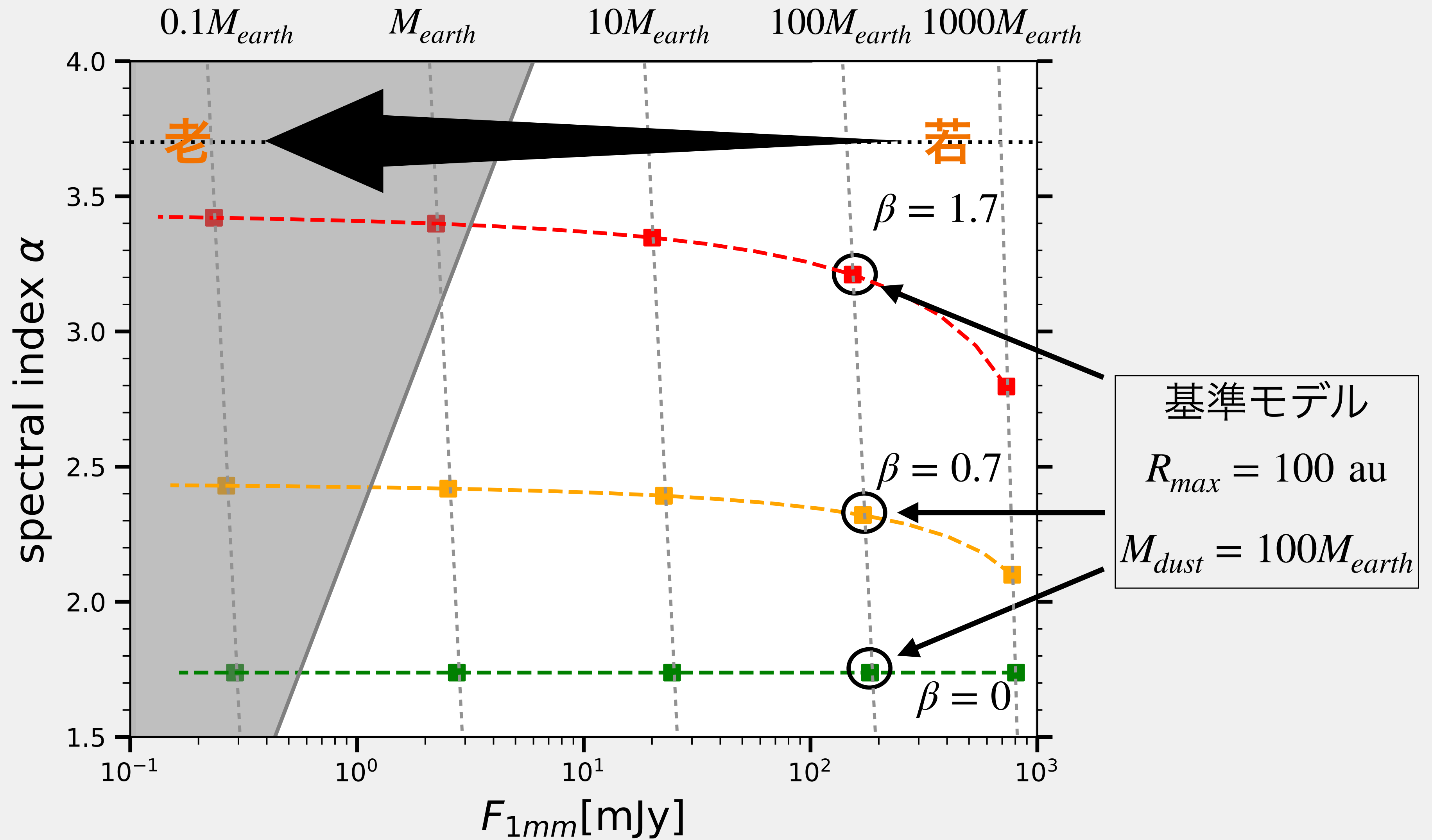
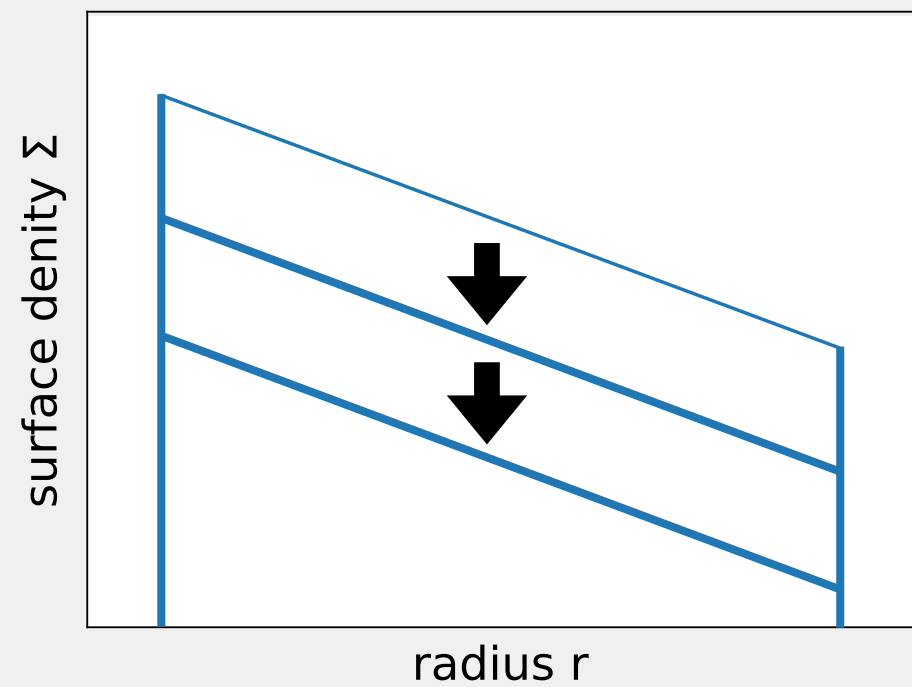
結果： α -Flux図 (変数: R_{max})

Case 1 : 半径を変える



結果： α -Flux図 (変数: M_{dust})

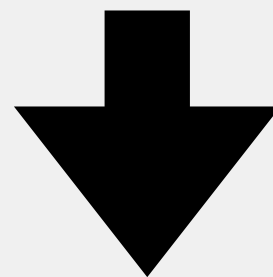
Case2：面密度を変える



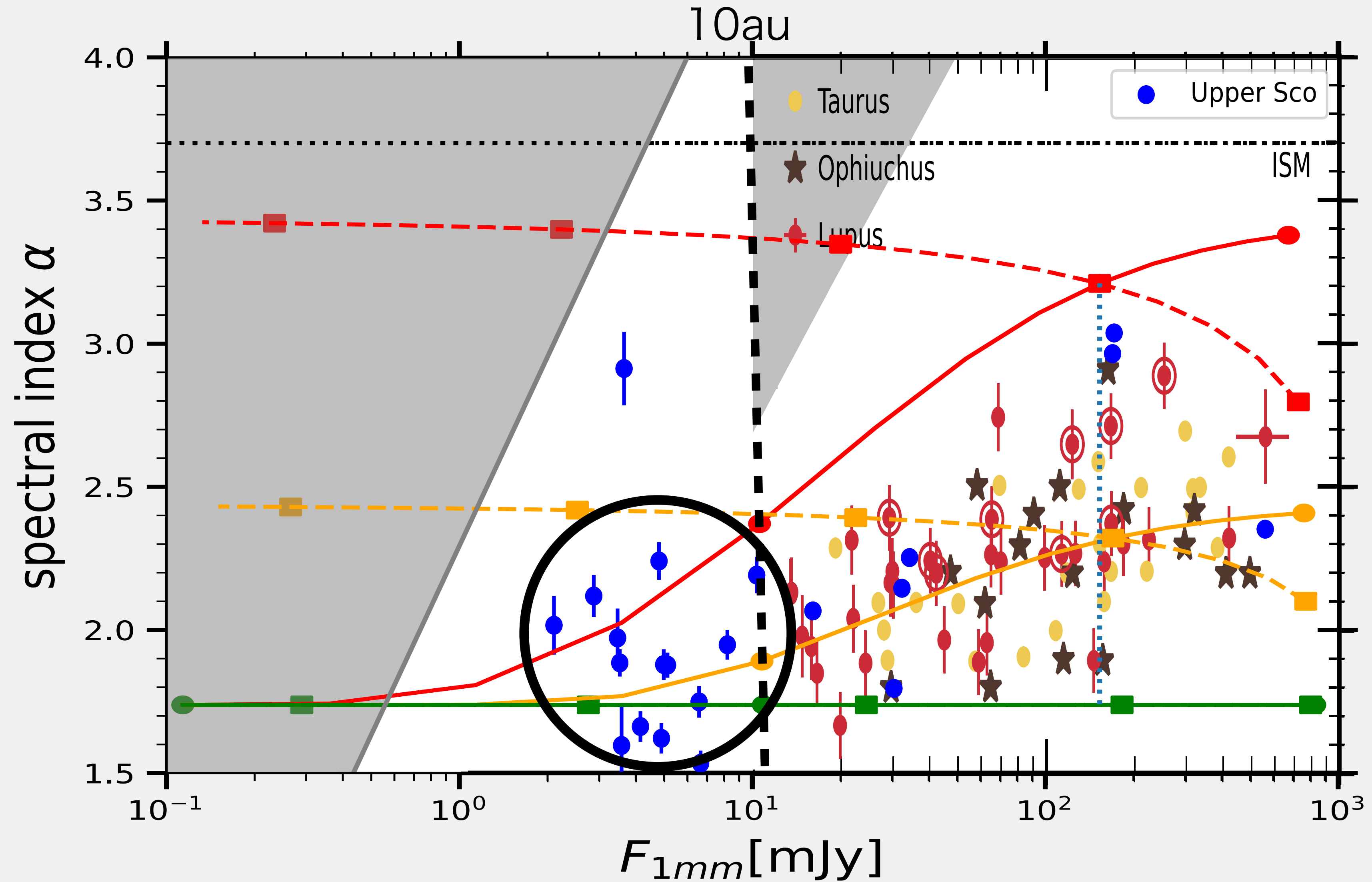
観測結果との比較



全体的なトレンドとして、
黄色の実線に沿っている
ように見える
→ α の低下の要因はダスト
の成長でなく半径の減少？



円盤の半径の観測によって
ダストの成長を確かめる
ことができる





1. Upper Scorpius領域の原始惑星系円盤について、ALMAのBand 3の観測データを解析し、Band 7のデータと組み合わせてスペクトルインデックス α を求めた
 - $F_{1\text{mm}} \sim 5 \text{ mJy}$, $\alpha \sim 2$ の付近に集中していた
 - より若い他領域の天体に比べて、暗く、 α が小さかった
2. 原始惑星系円盤のモデルを作り、 α の低下の要因を考察した
 - 円盤が50auより大きければ、ダストは1mmよりさらに成長していると考えられる

展望：

Upper Scoのより暗い天体でもBand3の観測を行い、 α -Fluxの関係を得る

円盤の空間分解できる観測(0.2秒角程度)を行い、半径を得る

→モデルと照らしてダストサイズが特定できる

参考文献

1. N. Miret-Roig, P. A. B. Galli, J. Olivares, H. Bouy, J. Alves, and D. Barrado, 2022, A&A 667, A163
2. L. Ricci, L. Testi, A. Natta, R. Neri, S. Cabrit, and G. J. Herczeg, 2010, A&A 512, A15
3. M. Tazzari , L. Testi, A. Natta, J. P. Williams, M. Ansdell, J. M. Carpenter, S. Facchini, G. Guidi, M. Hogherheijde, C. F. Manara, A. Miotello and N. van der Marel., 2021, MNRAS, 506, 5117
4. J. M. Alcalá, C. F. Manara, A. Natta, A. Frasca, L. Testi, B. Nisini, B. Stelzer, J. P. Williams, S. Antonucci, K. Biazzo, E. Covino1, M. Esposito, F. Getman, and E. Rigliaco, 2017 A&A, 600, A20
5. Planck Collaboration : N. Aghanim et al., 2016, A&A 596, A109
6. Scott A. Barenfeld , John M. Carpenter , Luca Ricci , and Andrea Isella, 2016, AJ, 847, 142

ここから補足資料

フラックスの周波数依存性

- 輻射輸送方程式 $\frac{dI_\nu}{ds} = \alpha_\nu I_\nu + j_\nu$ の解は (I_ν : 放射強度, s : 幾何長, α_ν : 吸収係数, j_ν : 放射率)

$$I_\nu(\tau_\nu) = (1 - e^{-\tau_\nu})B_\nu + I_{\nu,0}e^{-\tau_\nu} \text{ と書ける。 } (d\tau_\nu = \alpha_\nu ds : \text{ 光学的厚み, } S_\nu = \frac{j_\nu}{\alpha_\nu} : \text{ 源泉関数, } B_\nu : \text{ プランク関数})$$

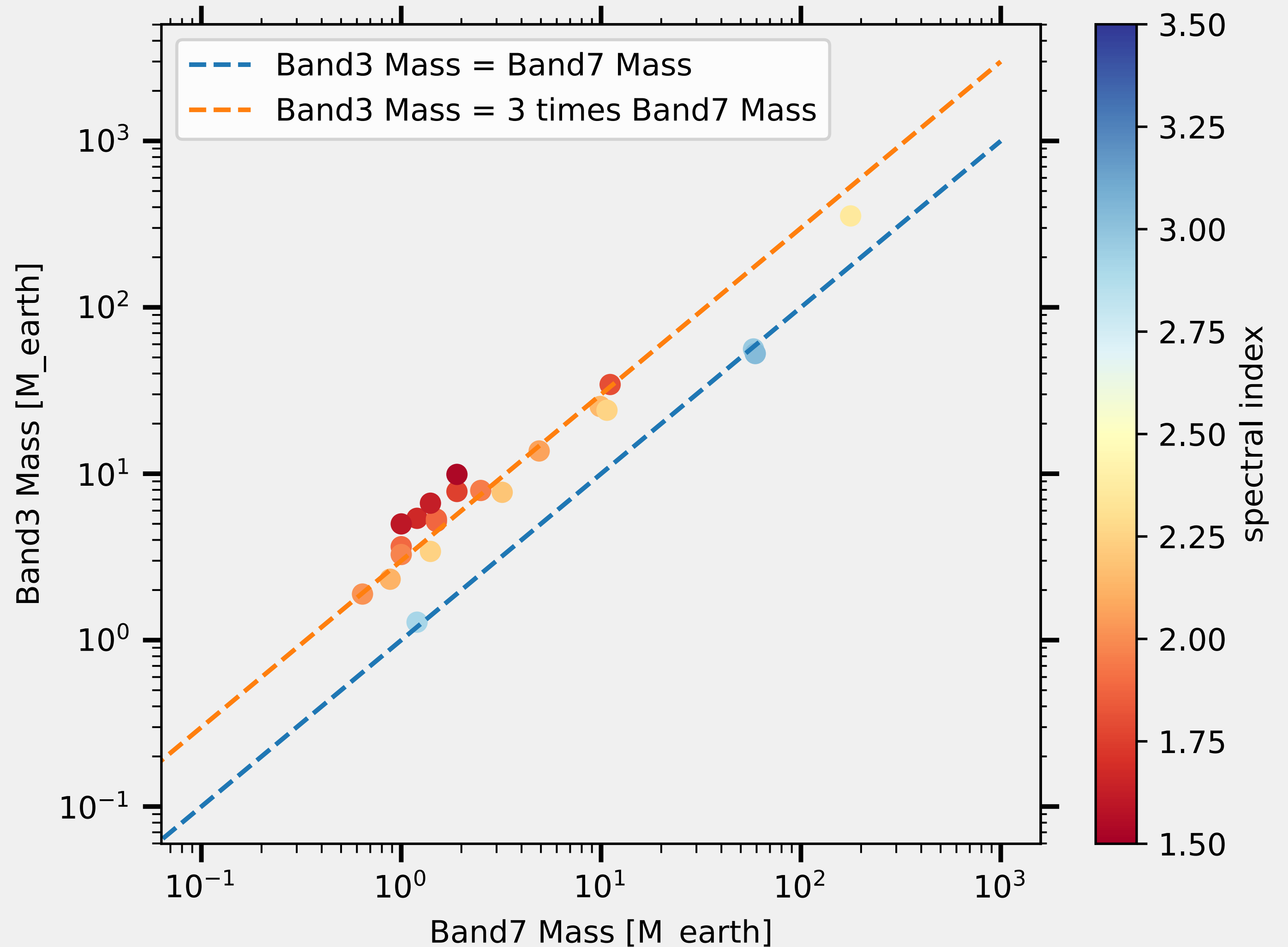
- 背景光 $I_{\nu,0}$ がないとすると、右辺第2項は消えて、 τ_ν が大きい時と小さい時に分けて考えると

$$I_\nu = \tau_\nu B_\nu \text{ (at } \tau_\nu \ll 1), \quad I_\nu = B_\nu \text{ (at } \tau_\nu \gg 1)$$

- 低温である場合を考えると、Rayleigh-Jeansの法則から $B_\nu \propto \nu^2$
- $\tau_\nu = \kappa_{abs} \Sigma_{dust}$ であり、 τ_ν の ν 依存性は吸収opacity κ_{abs} で定まる。
- κ_{abs} の ν 依存性は先行研究^[2]から分かっており、これがダストサイズによって変化する。

Band 7とBand 3からみた質量の違い

- 光学的に薄い場合は、フラックス密度からダスト質量が見積もれる。
- Band 7でよく質量が見積もられているが、Band 3に比べて内側の光学的に厚い領域が大きく、質量を過小評価してしまうと考えられる。
- Upper Scoの明るい天体についてBand3からも質量を算出し、Band7の質量[]と比較した。



円盤の大きさを調べるには

- 140pc離れた天体で、30auの空間分解能で見ると、
およそ $30/140 = 0.21$ 秒角の角度分解能で見なければならない。
- 今回使用したデータが、各天体のビームサイズがおよそ3秒角で、
1天体あたり約9分のIntegration time
→円盤が140au程度であるとする、0.21秒角の分解能で見ると、
単純に計算すると1天体あたり70時間程度の時間が必要

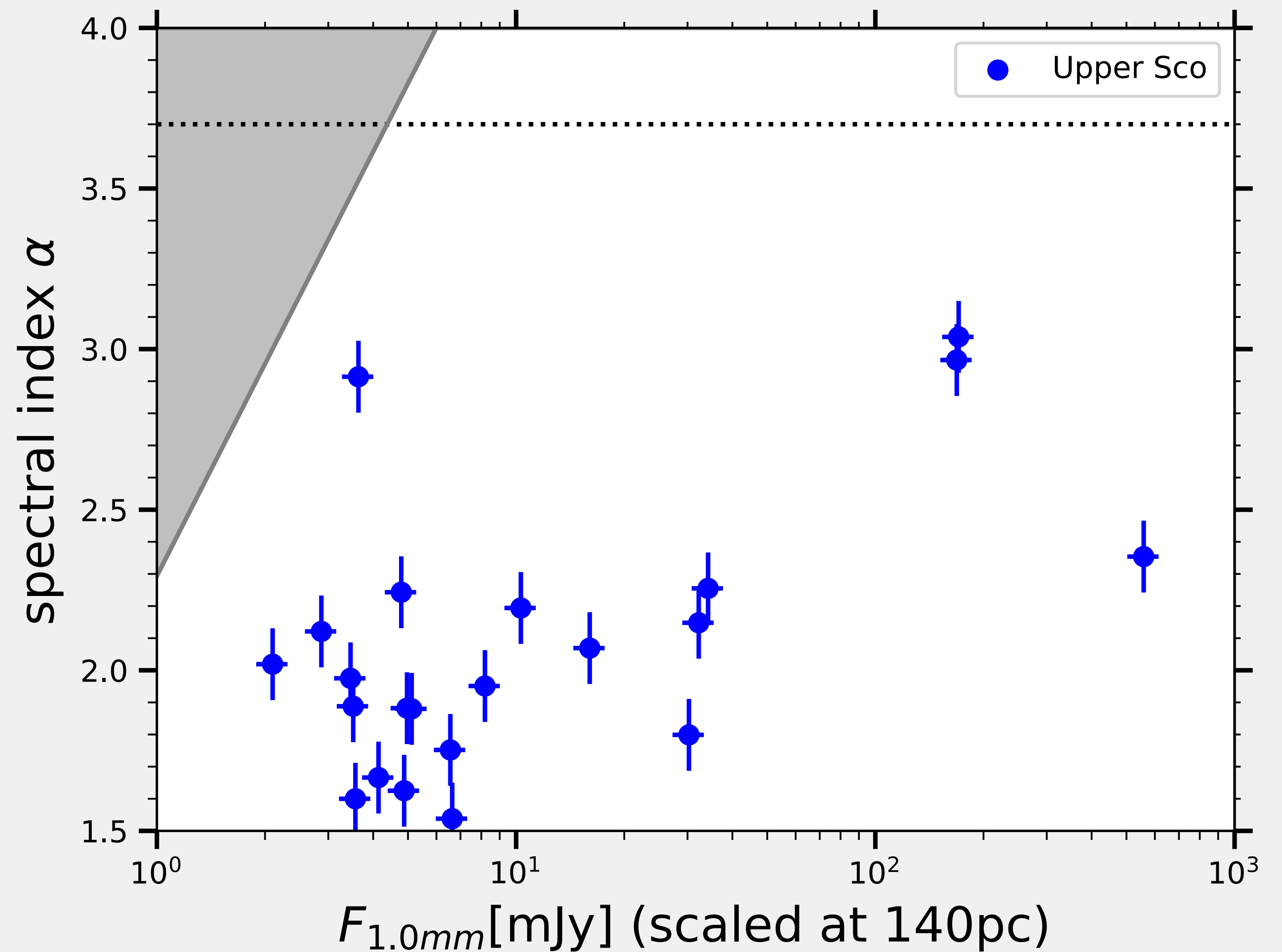
Fluxの絶対誤差

ALMAの観測にはフラックスに誤差が含まれている

Band 7 (0.88mm)では10%

Band 3 (2.9mm)では5%

これを考慮すると、 α -Fluxの図は右のようになる



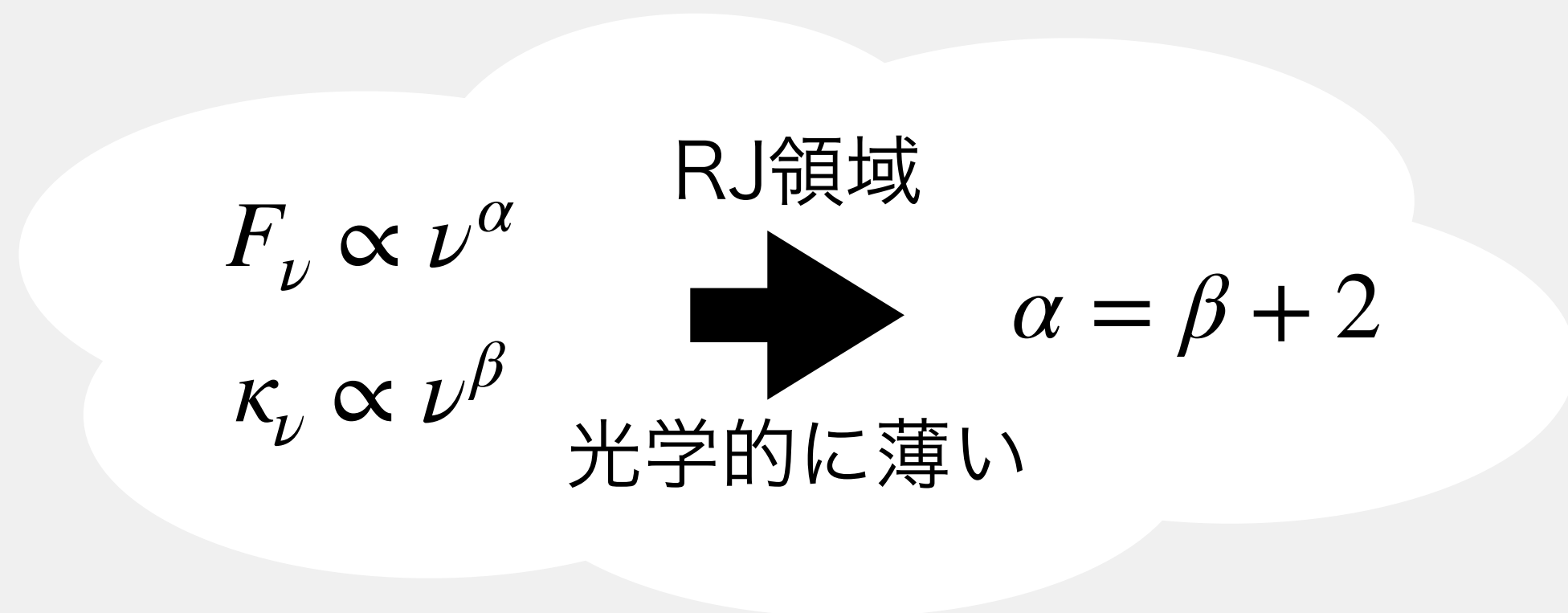
ダストサイズをどのように測るか

輻射輸送方程式から、 $F_\nu \propto \kappa_\nu B_\nu$

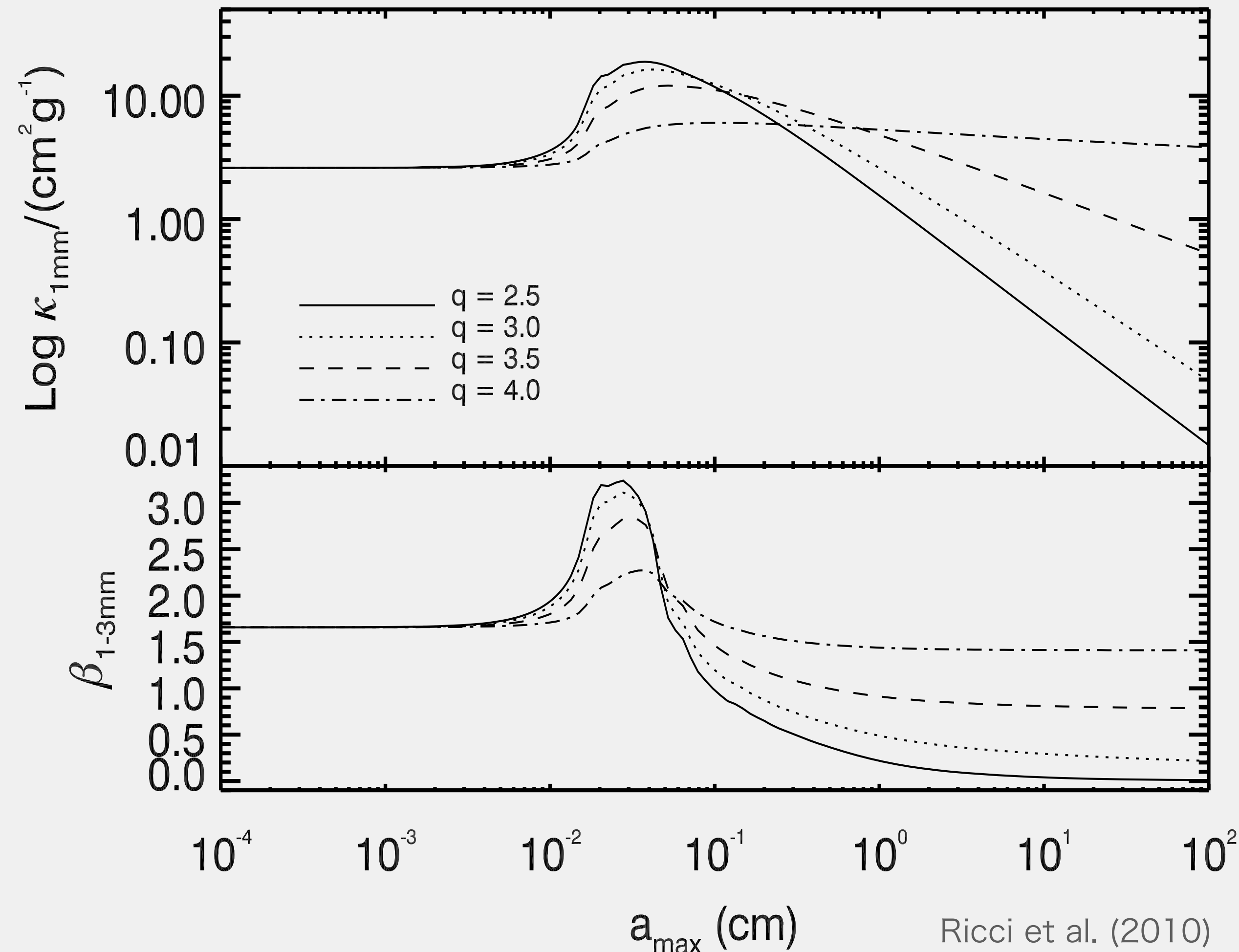
B_ν はダストサイズには依存しない

κ_ν がダストサイズに依存する

(吸収opacity)



(光学的に厚いと、 κ の寄与はなくなる)



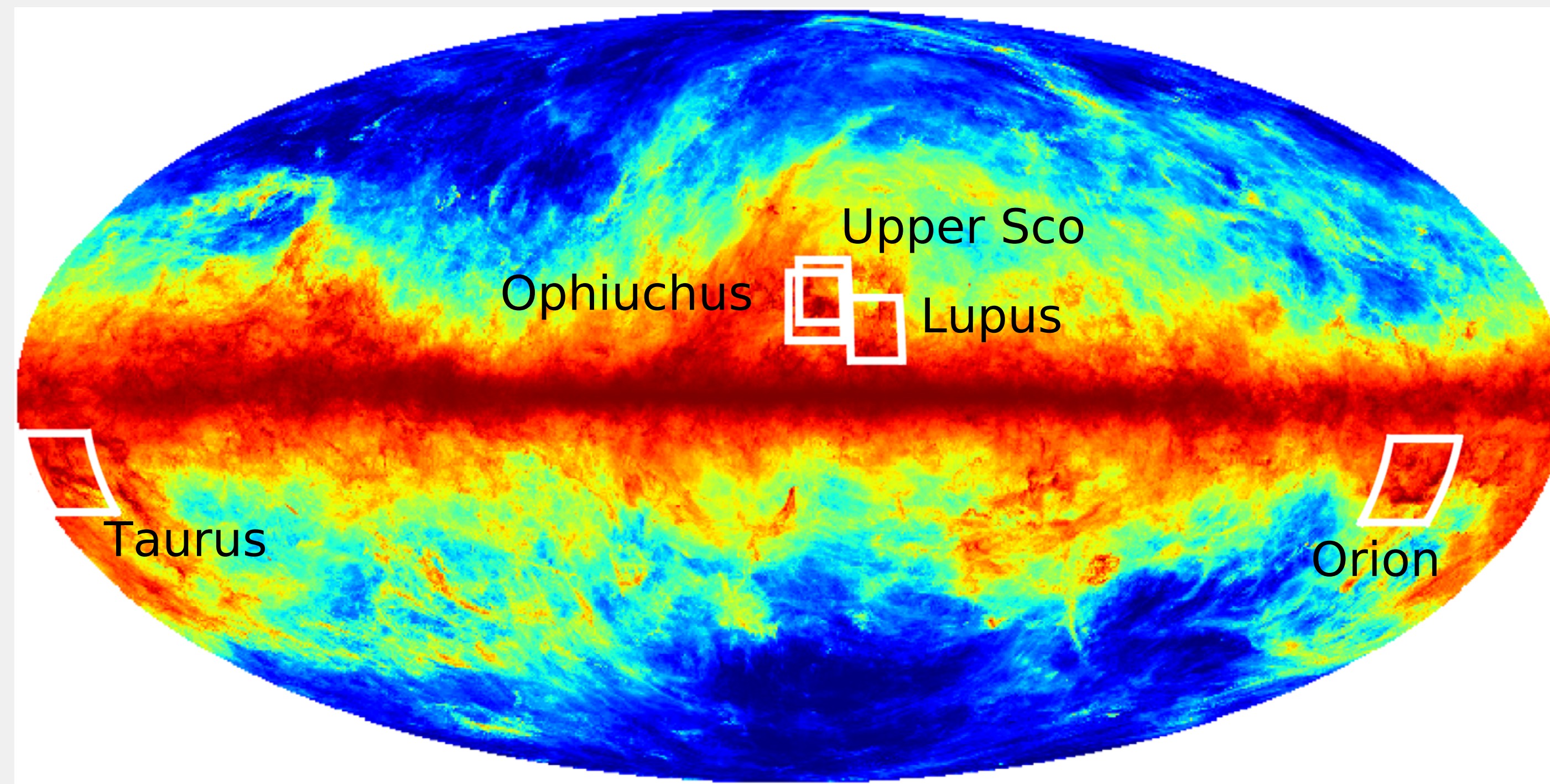
先行研究



- Taurus, Ophiuchus, Lupusについて同じBand (Band3,7)で α を求めた研究がある。 [3]
- これらはUpper Scoに比べて若い ($1\sim 3\times 10^6$ year^[4])

[3] Tazzari et al. (2021)

[4] J.M.Alcala et al. (2017)



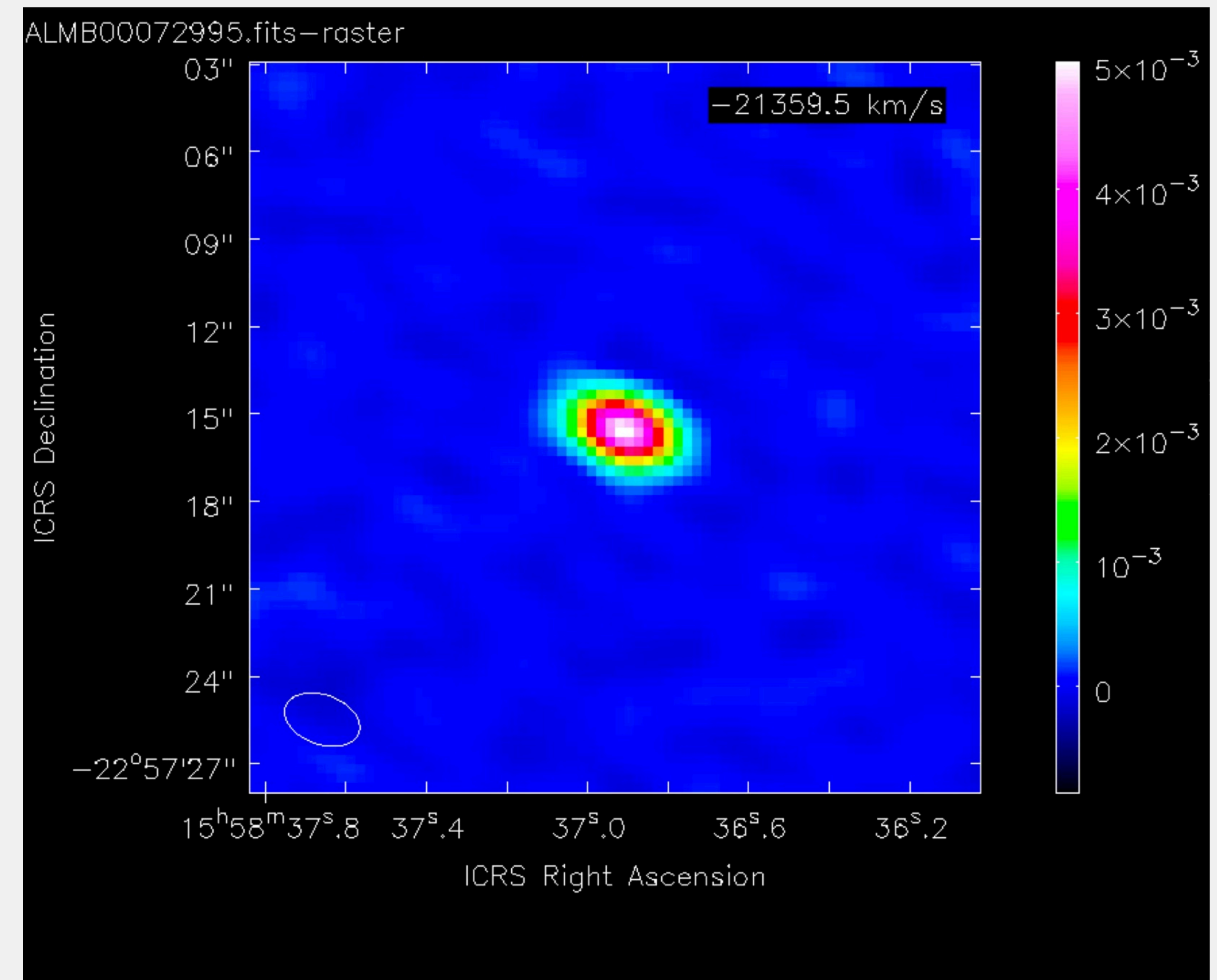
Planck Collaboration (2016)

データの解析方法

2. Methods



- JVO(Japanese Virtual Observatory)のALMAの fits archiveから Project Code 2015.1.00819.S のファイルを取得
(Upper ScorpiusのBand 3の観測)
(4つのスペクトルウィンドウを結合したもの)
- CASAのviewerから円盤のFlux Densityと、標準偏差を計測
- Barenfeld et al.(2016)のBand 7のデータと組み合わせ、スペクトルインデックスを算出



観測結果との比較

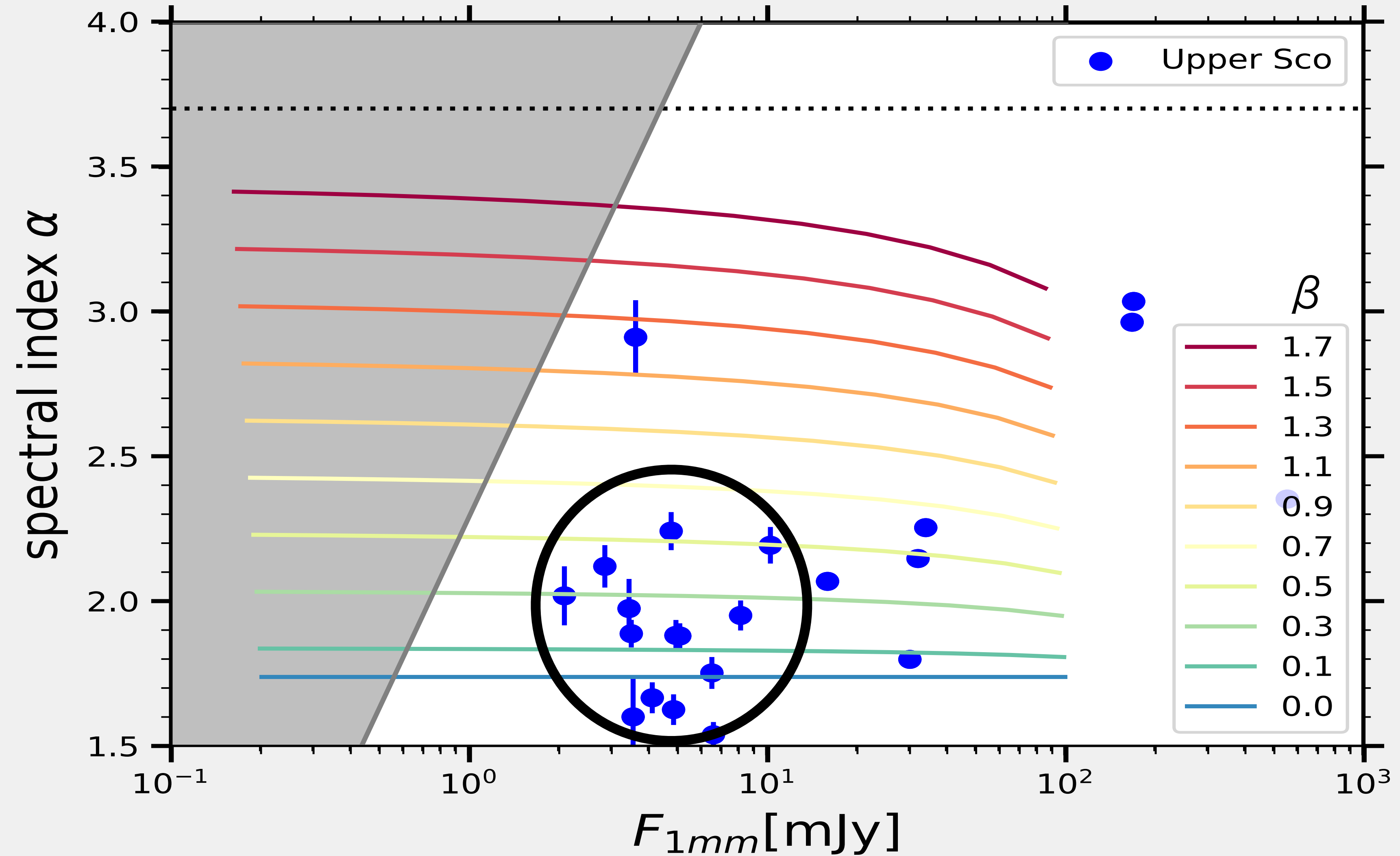


円盤の半径は小さくても
数10auはあるはず。

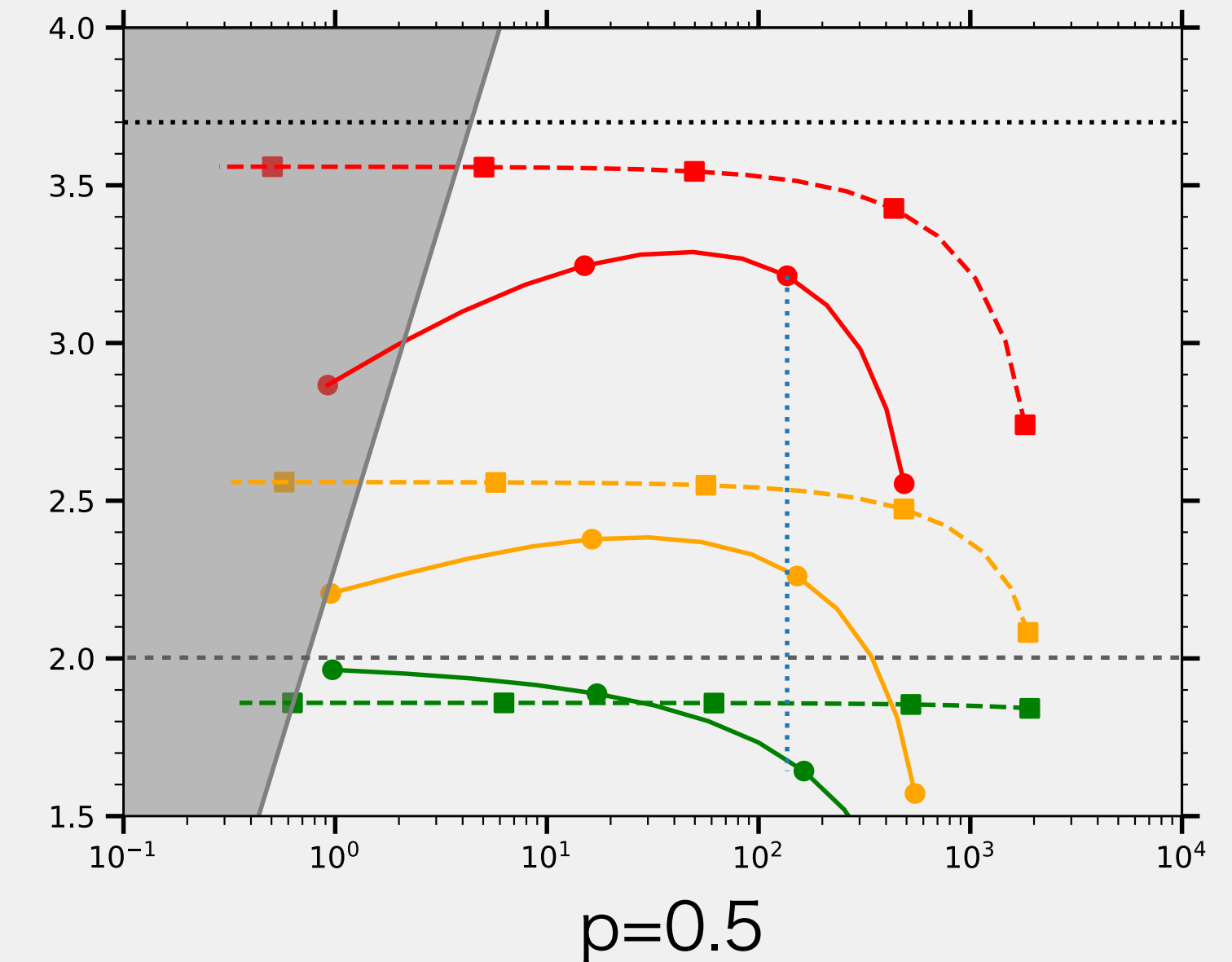
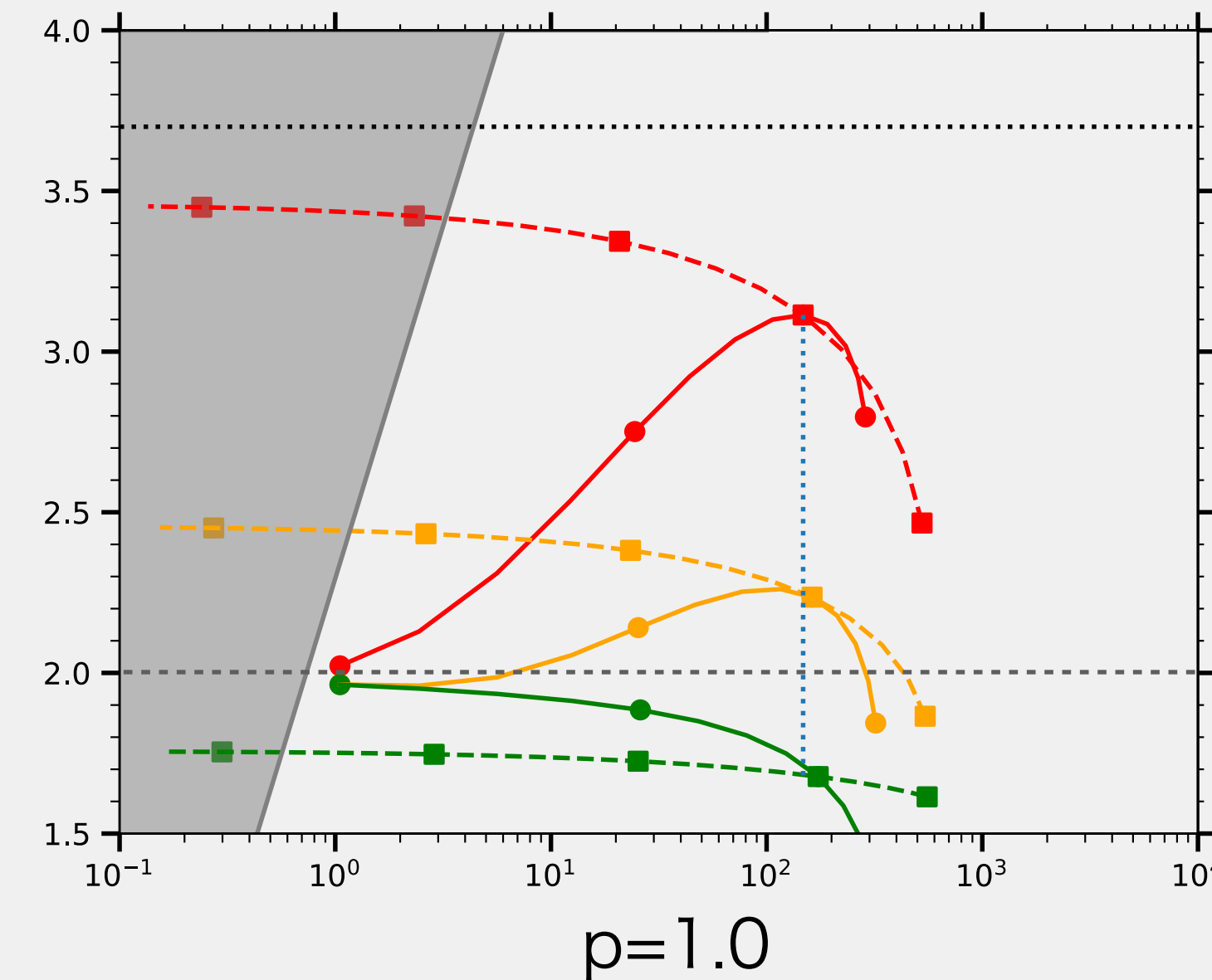
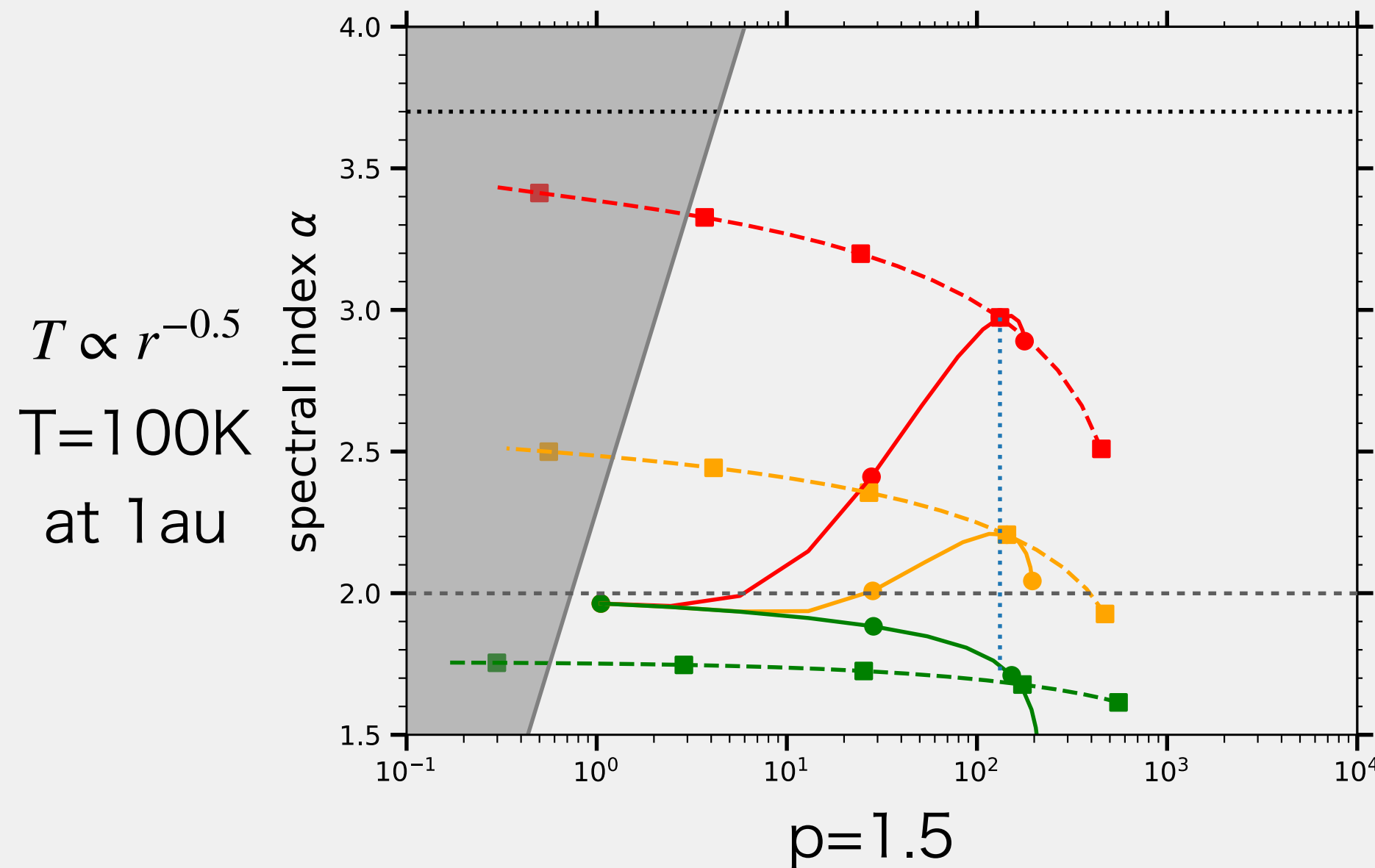
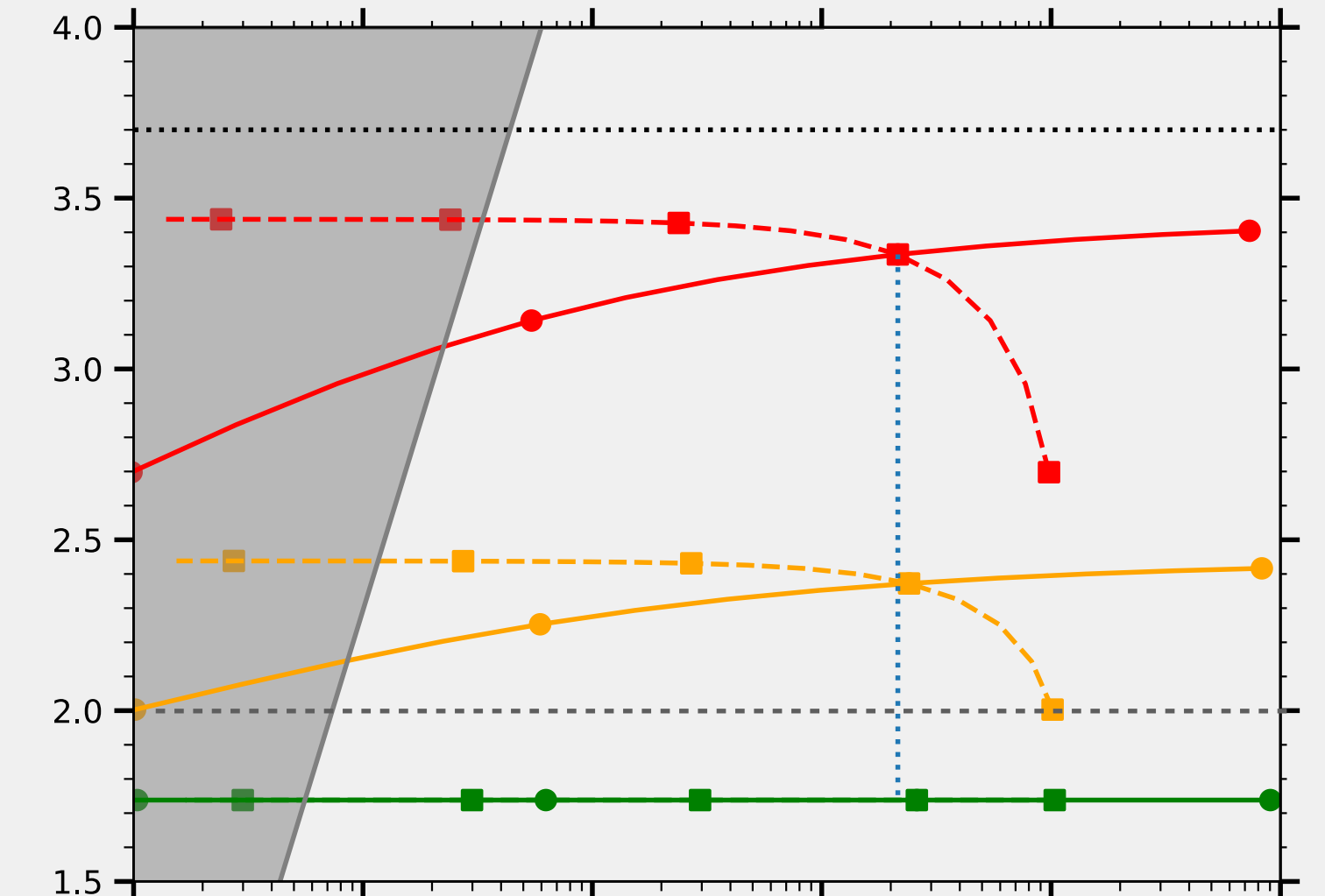
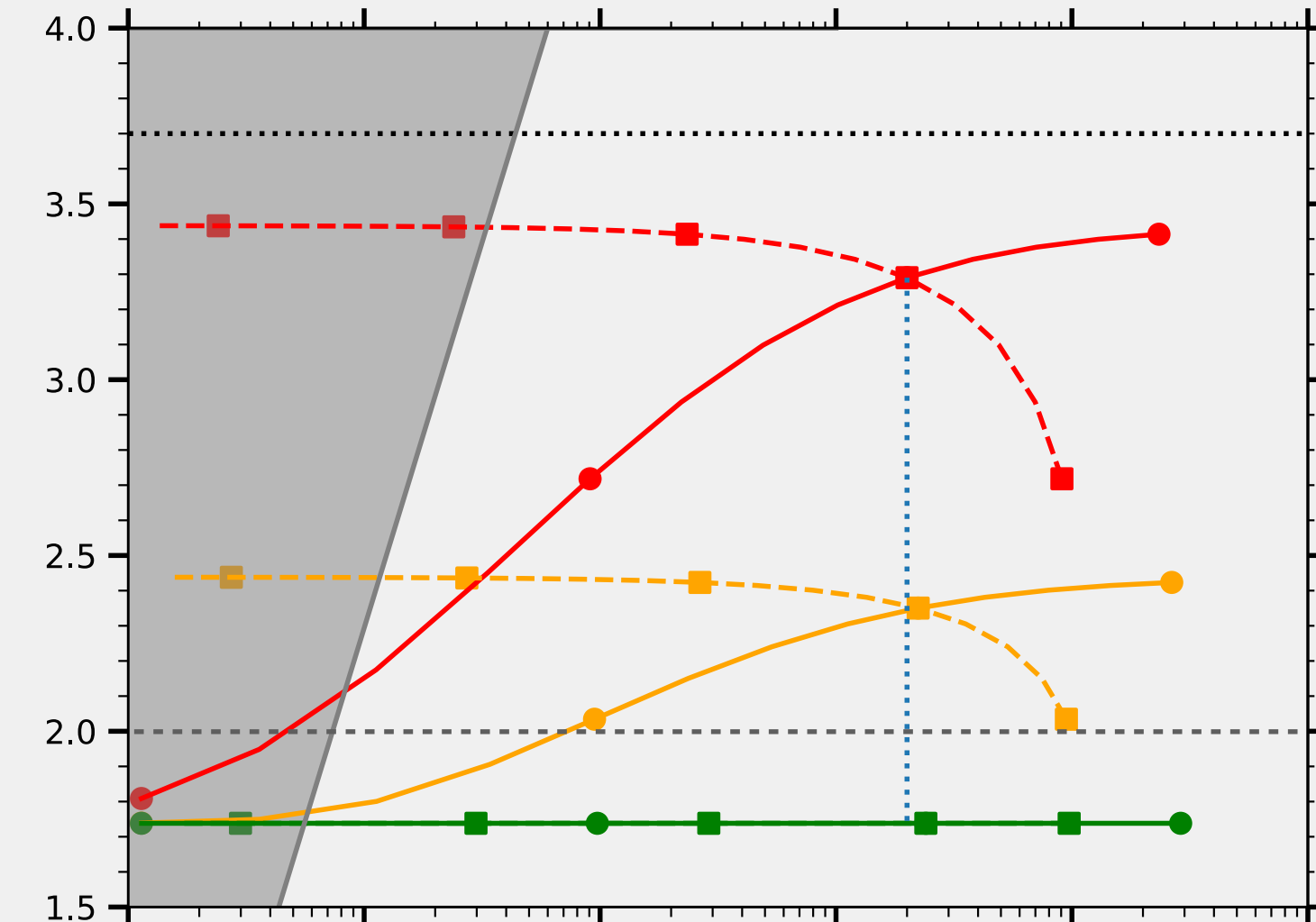
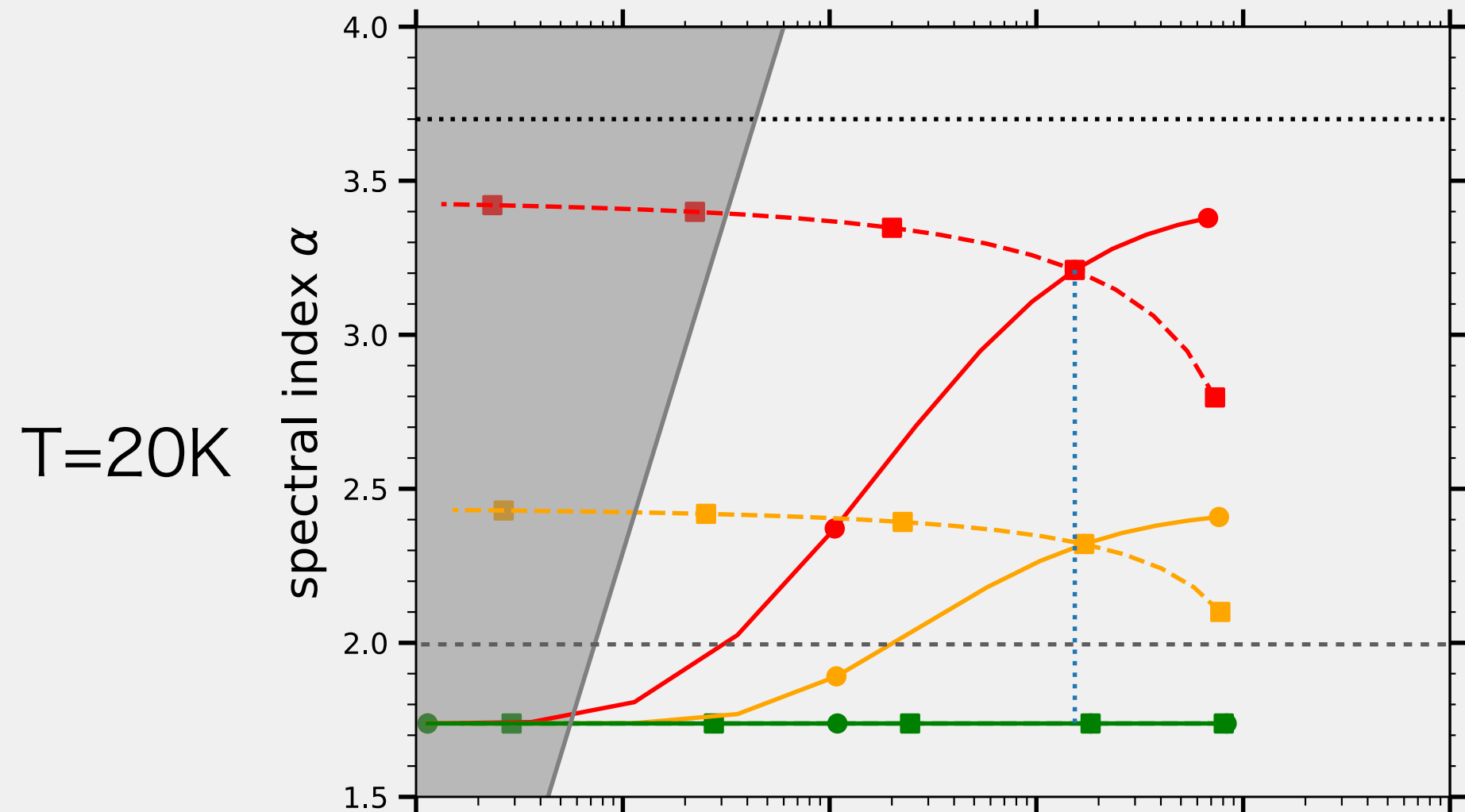
円盤の半径が50auであ
ると仮定して、面密度の
低下のみを考える。



β が非常に小さい
→ダストの成長



モデルの α -Flux図



散乱による α の低下



散乱のモデル結果を貼る
特にRmaxが小さくなる時に効いてくるだろうが、
円盤の大きさが数十auならそこまではさがらず、
 $\alpha < 2$ を説明した上で、ダストが成長しているという結論にもっていけるだろう