

暗黒物質模型の解析で ニューラルネットワークを使った話

柳圭祐

東京大学 素粒子理論研究室 D3

Based on Bae, Jinno, Kamada, KY [arXiv: 1906.09141]

自己紹介

- 柳圭祐 (@yana_phys)
- 素粒子現象論の研究をしています
 - 標準模型を超える物理模型の探索
 - 実際の実験や観測に関わる量を計算する
- Particle astrophysics 的な研究が多いです
 - 中性子星を使った新物理探索(D論のテーマ)
 - 暗黒物質と宇宙の構造形成

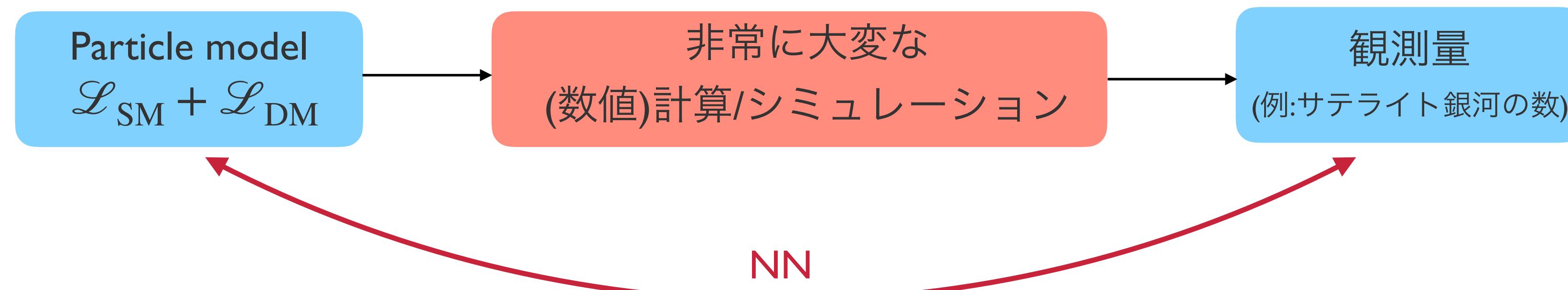
自己紹介

- 柳圭祐 (@yana_phys)
- 素粒子現象論の研究をしています
 - 標準模型を超える物理模型の探索
 - 実際の実験や観測に関わる量を計算する
- Particle astrophysics 的な研究が多いです
 - 中性子星を使った新物理探索(D論のテーマ)
 - 暗黒物質と宇宙の構造形成

ここで機械学習を使った話をします

Overview

- 軽い暗黒物質 ($m \sim \text{keV}$): 宇宙の構造形成からモデルに強い制限がつく
 - 軽すぎると密度の偏りがならされてしまい、観測された構造が作れない (hot/warm dark matter になる)
→ 質量に下限
- そのようなモデルの解析は非常に大変



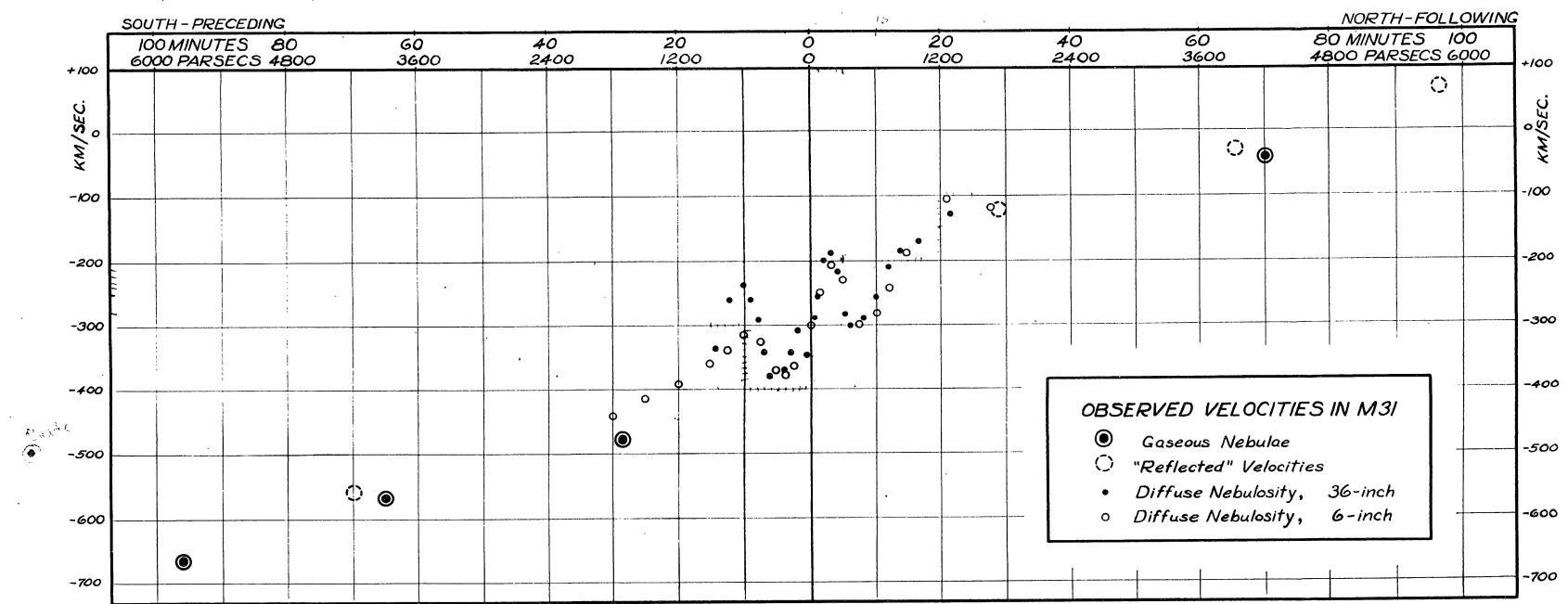
- 後の人々(主に将来の自分達)の解析に便利なように、ここの関係をNNでフィットして与える [Our work]

機械学習の応用としては too trivial...

暗黒物質

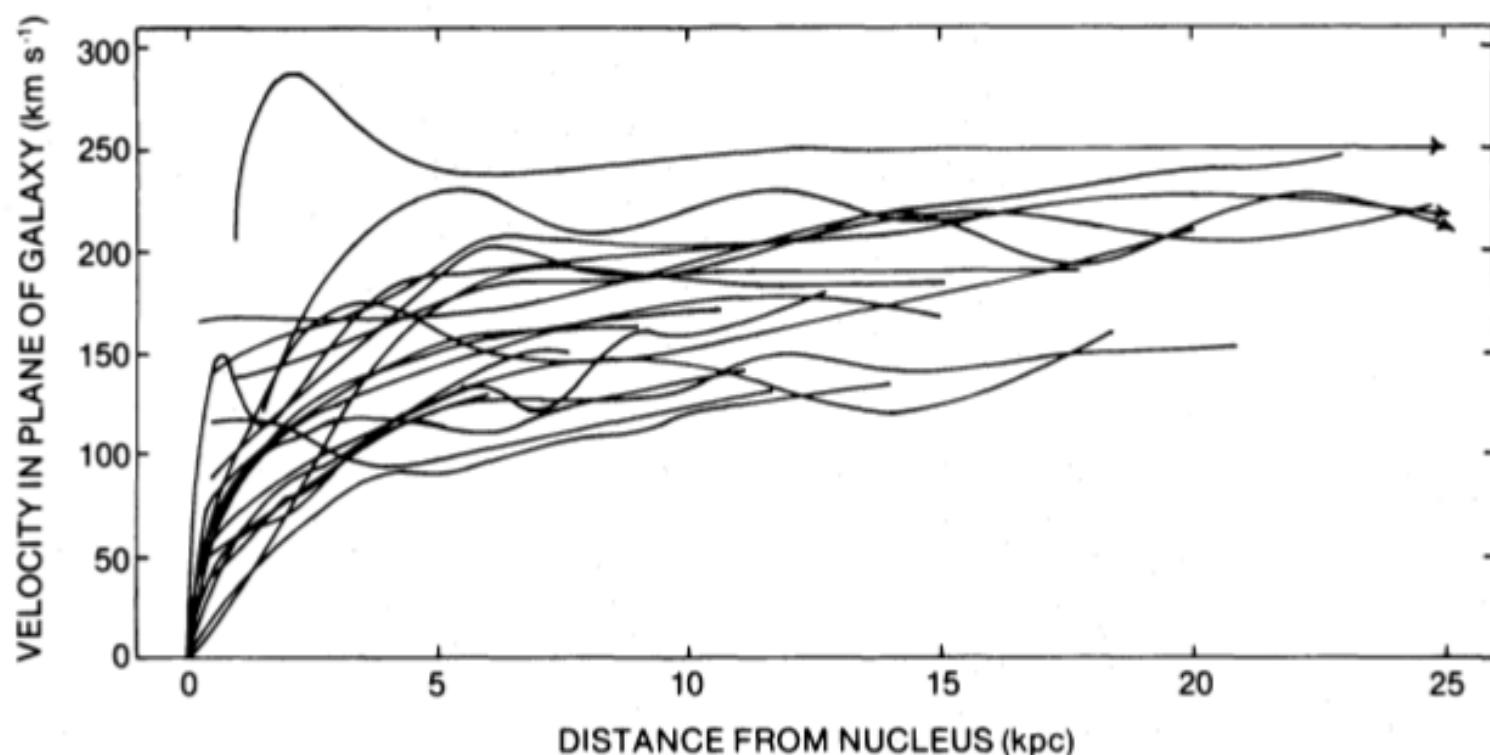
- 様々な観測的証拠から、暗黒物質の存在が示されている

- 銀河団の質量と光度 [Zwicky (1937)]
- 銀河の回転曲線
- 重力レンズ
- CMB



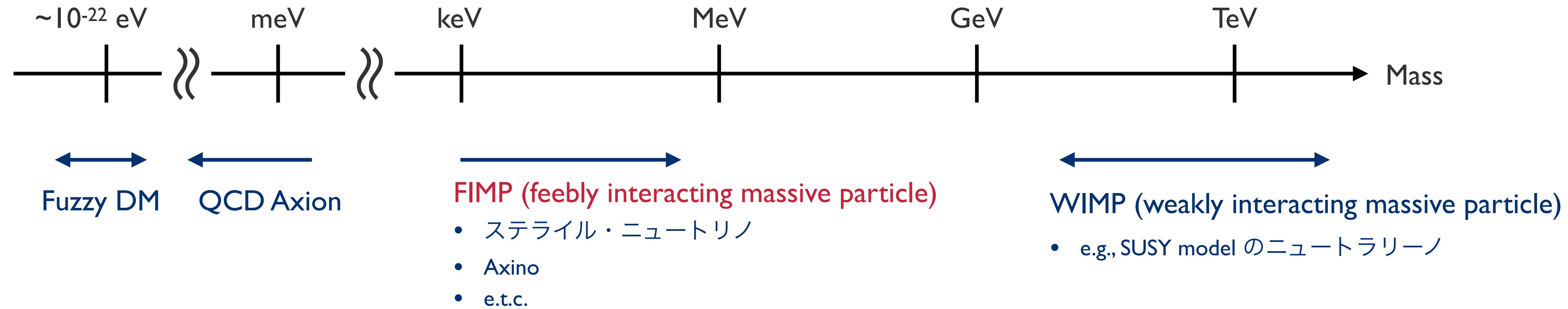
アンドロメダ銀河 [Babcock (1939)]

- DMに求められる性質
 - 電気的に中性
 - 安定（寿命 >> 宇宙年齢）
 - 観測された宇宙の大規模構造を再現できる

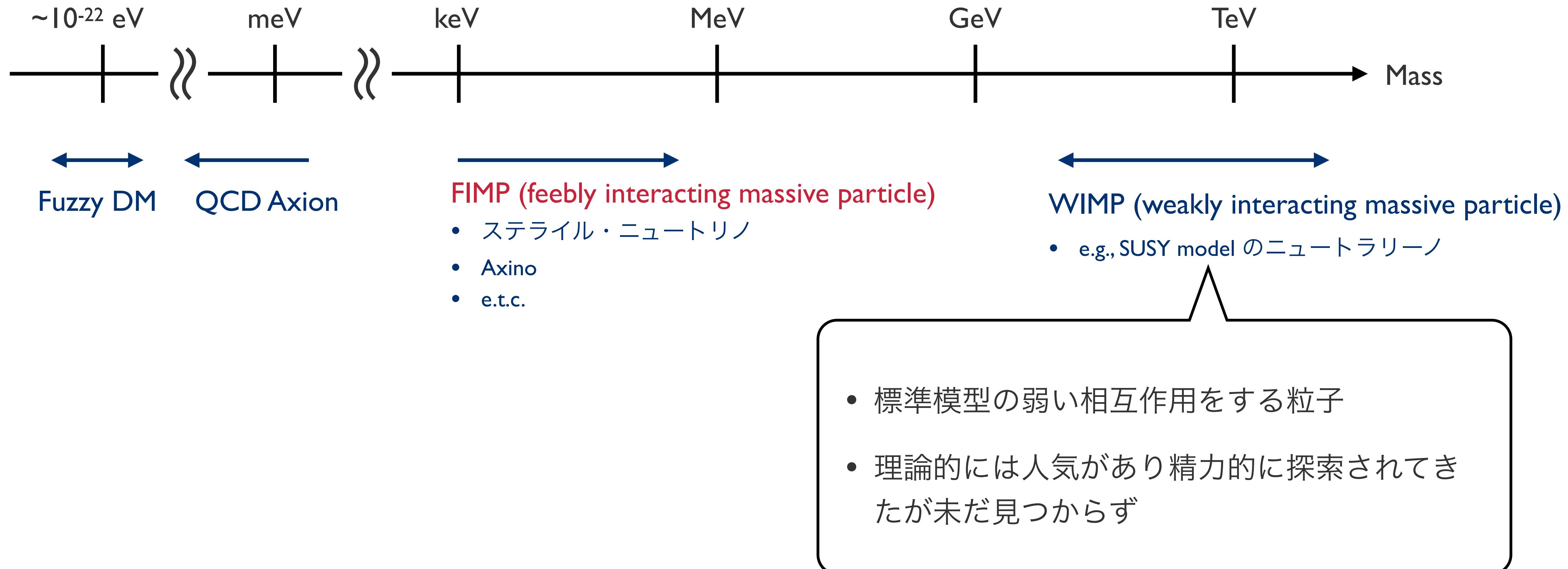


[Rubin, Ford., Thonnard (1980)]

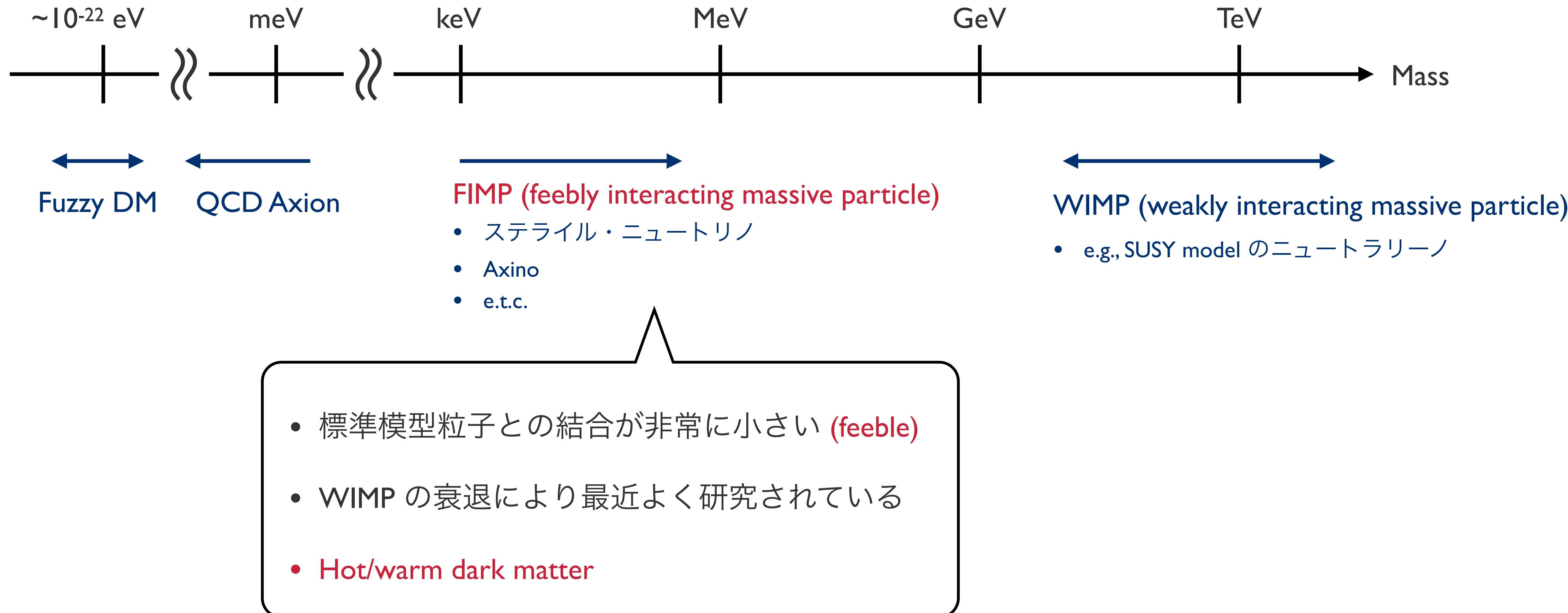
FIMP DM



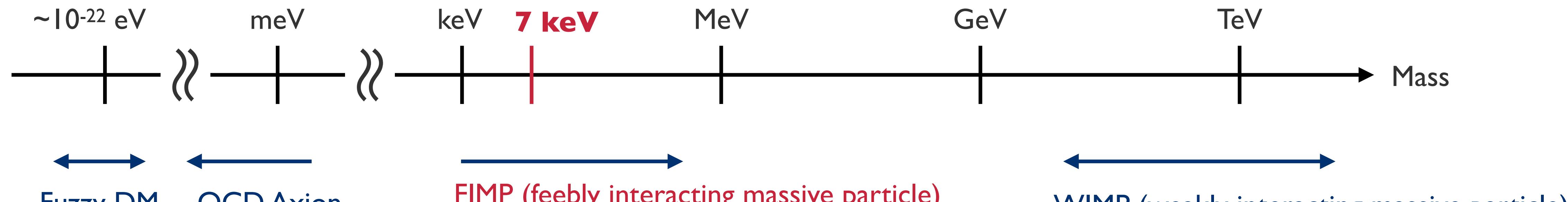
FIMP DM



FIMP DM



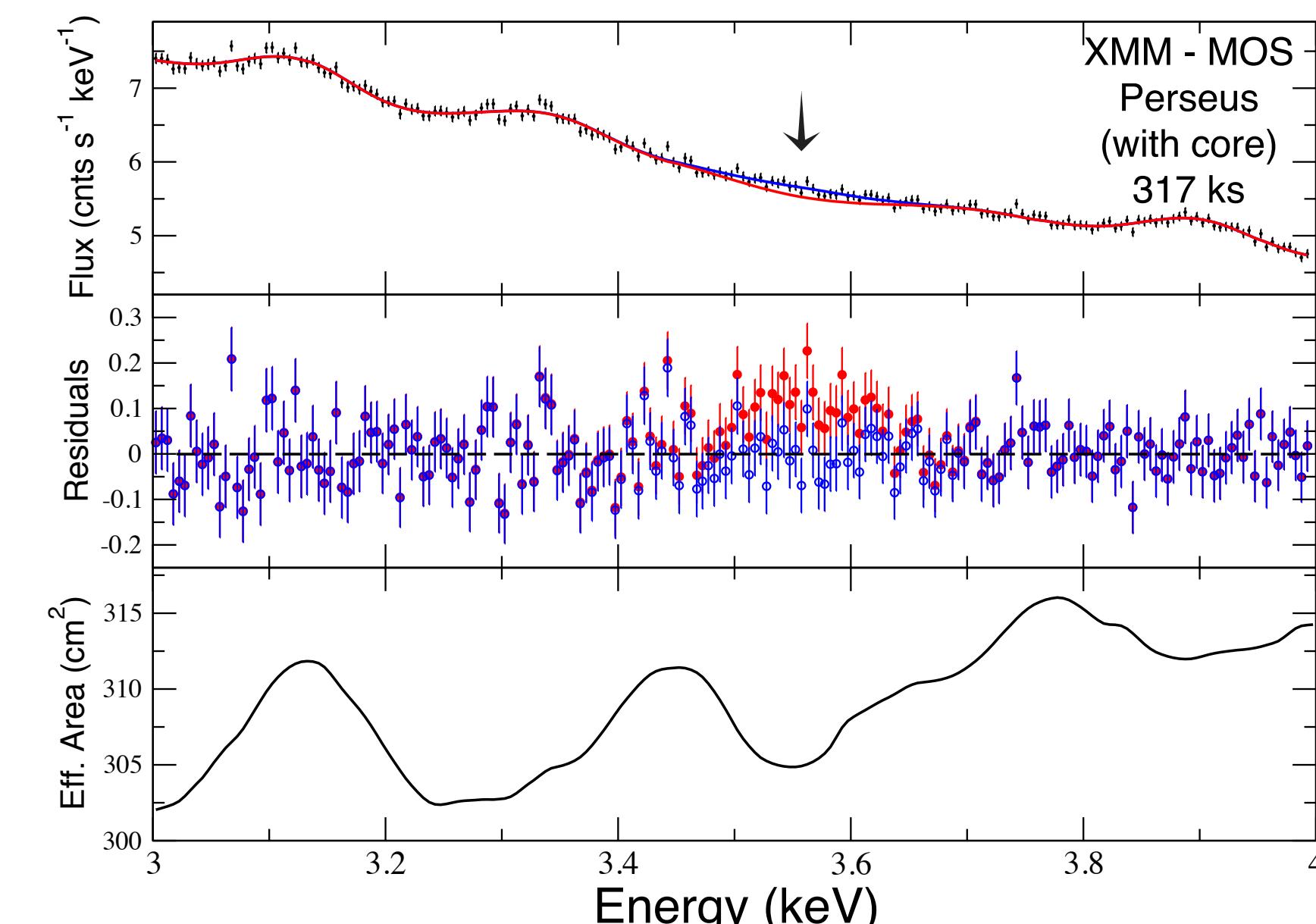
FIMP DM



X線観測からのヒント？

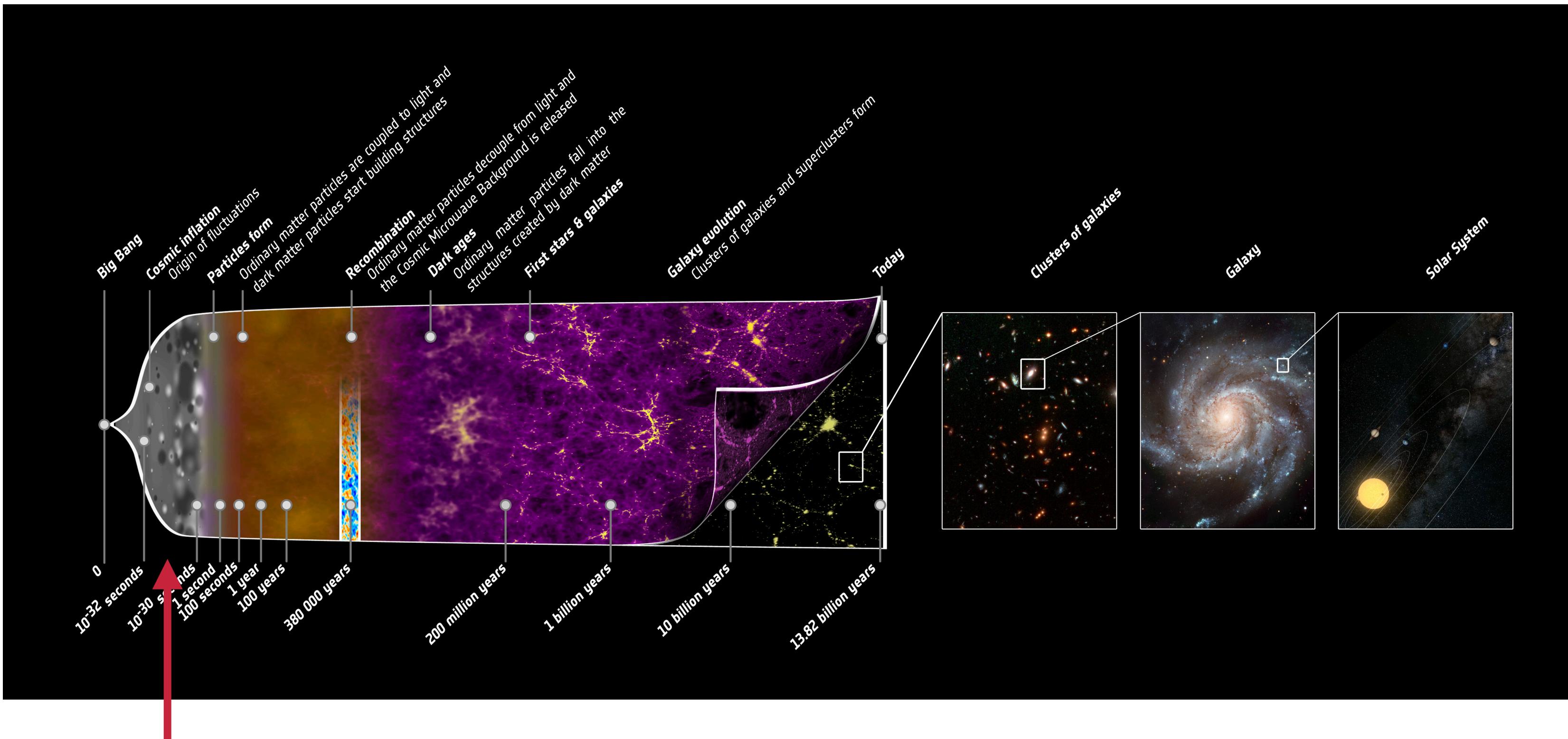
3.5 keV 付近に excess \rightarrow decay of 7 keV DM??

- keV 付近でのDMモデルへの制限をきちんと調べる必要がある
- この領域は宇宙の構造形成と矛盾しないかが重要



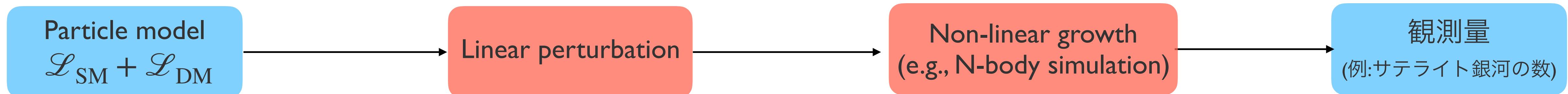
宇宙の構造形成

初期宇宙の微小な密度揺らぎが重力によって成長して現在の構造を作る

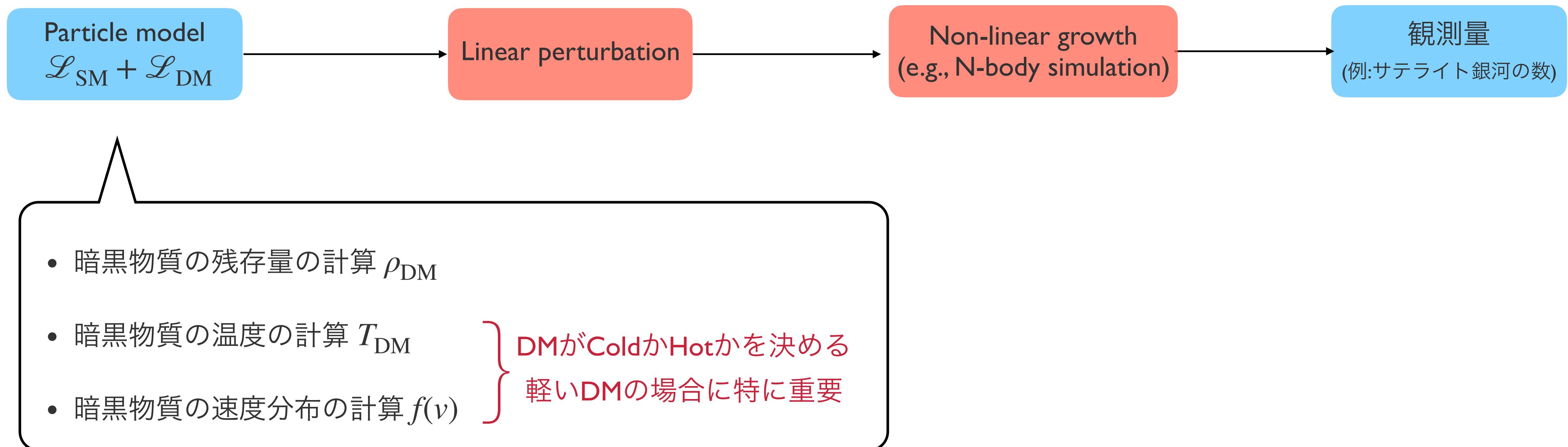


DM production

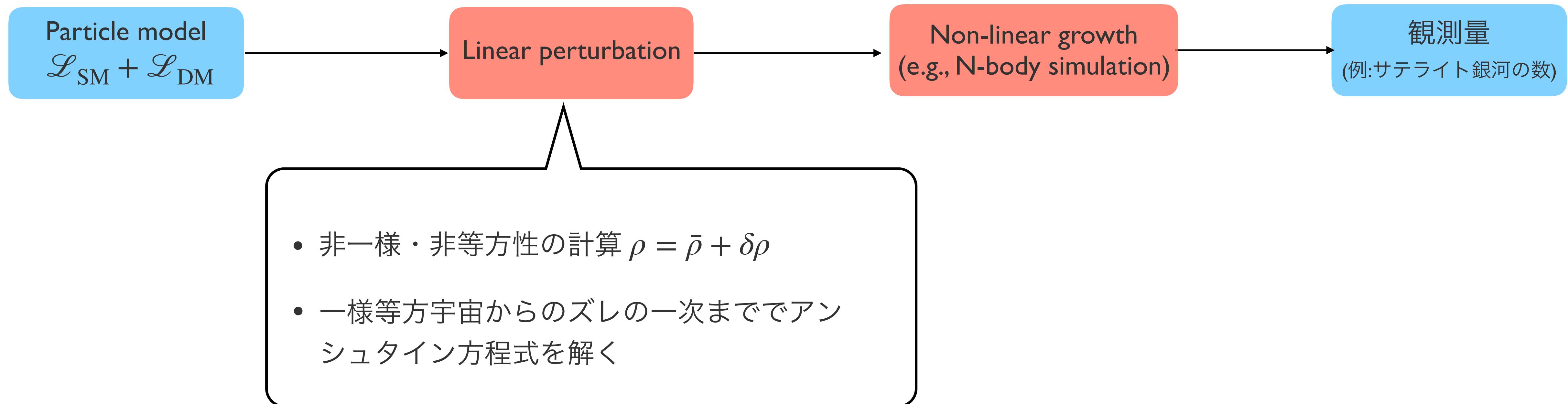
宇宙の構造形成の計算



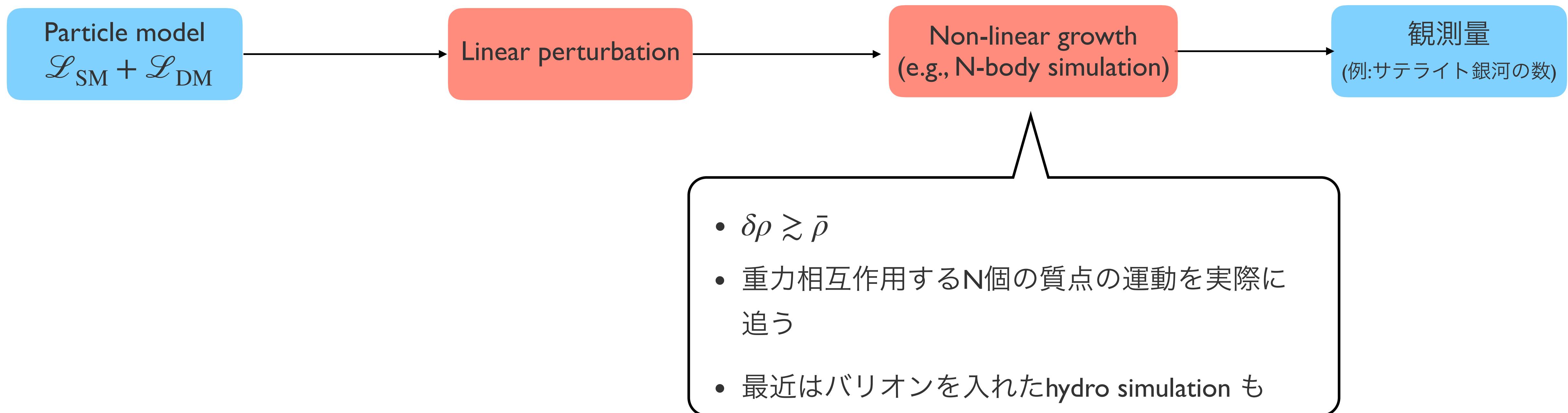
宇宙の構造形成の計算



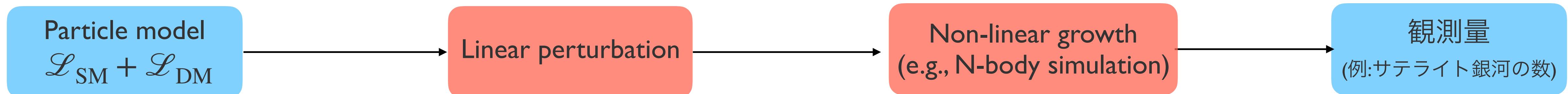
宇宙の構造形成の計算



宇宙の構造形成の計算



宇宙の構造形成の計算

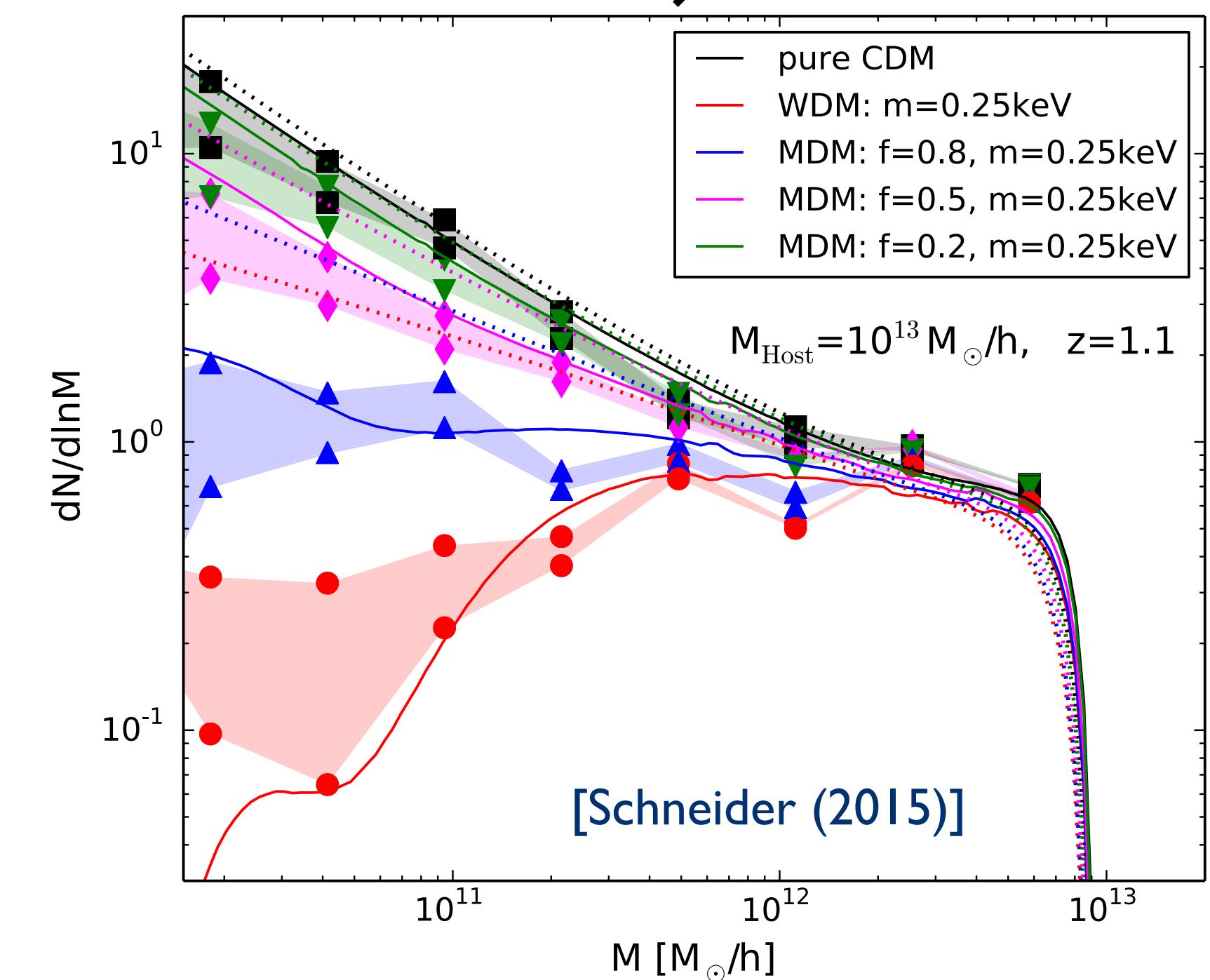


- 天の川銀河内の観測されたサテライト銀河の数: $N_{\text{sat}} \simeq 63$
天の川銀河内にいるより小さい銀河

[Murgia et al. (2017)]

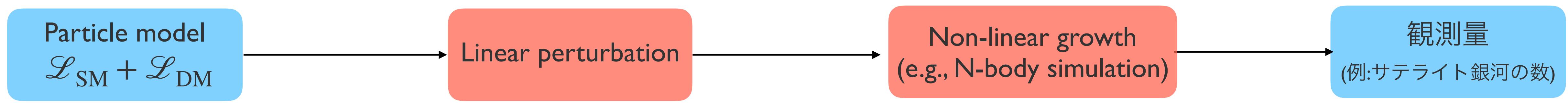
- 軽い暗黒物質はfree-streaming により小規模な構造を減らしてしまう

$\rightarrow N_{\text{sat}} \ll 63$ を予言するような理論は棄却



この一連の計算は大変

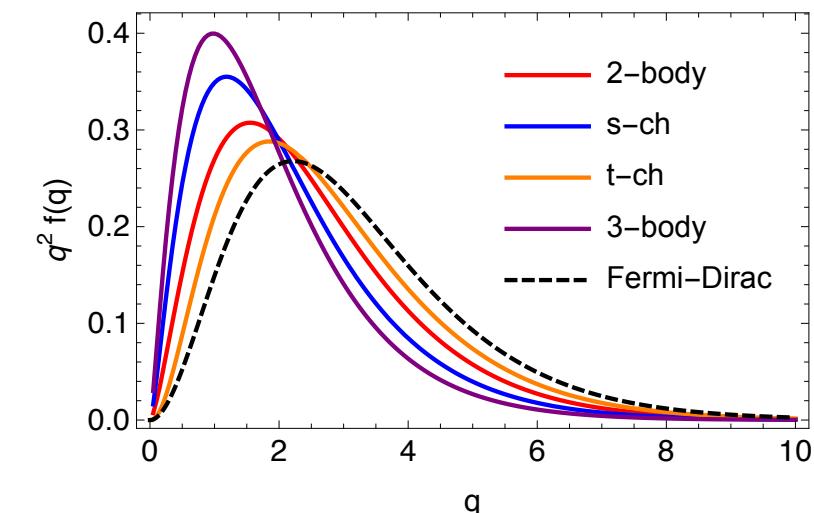
典型的な現象論研究：観測やシミュレーションがアップデートされたら \mathcal{L}_{DM} のパラメータ空間全体を調べ直す
 →毎回この一連の計算をやり直すのは辛い...



- DMの速度分布→ボルツマン方程式の積分

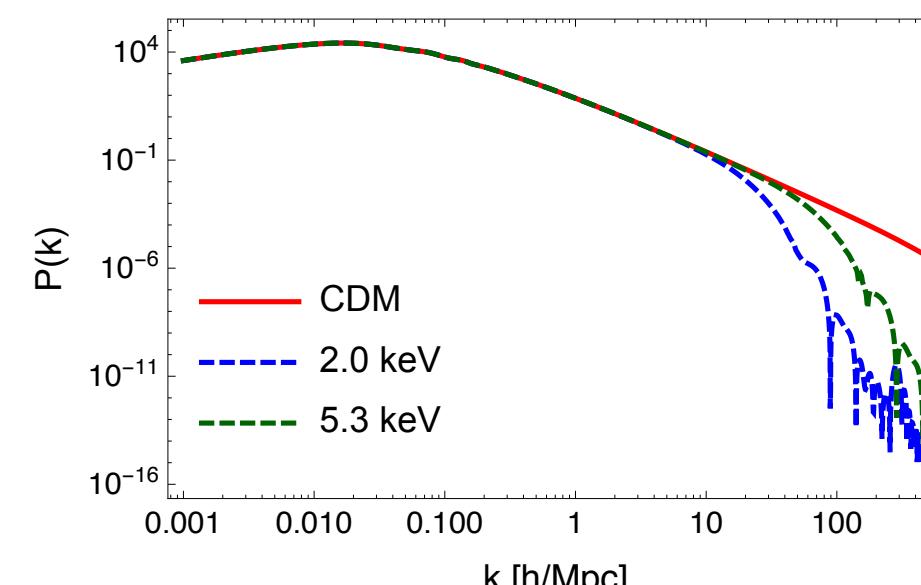
$$f_{\text{DM}}(t_f, p) = \int_{t_i}^{t_f} dt \frac{1}{E_{\text{DM}}} C \left(t, \frac{a(t_f)}{a(t)} p \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{g_{\text{DM}}}{E_{\text{DM}}} C(t, p_{\text{DM}}) &= \frac{1}{2E_{\text{DM}}} \int \prod_{i \neq \text{DM}} \frac{d^3 p_i}{(2\pi)^3 2E_i} (2\pi)^4 \delta^4(P_i - P_f) \\ &\times \sum_{\text{spin}} |\mathcal{M}|^2 f_1 f_2 \dots (1 \mp f_3) (1 \mp f_4) \dots \end{aligned}$$



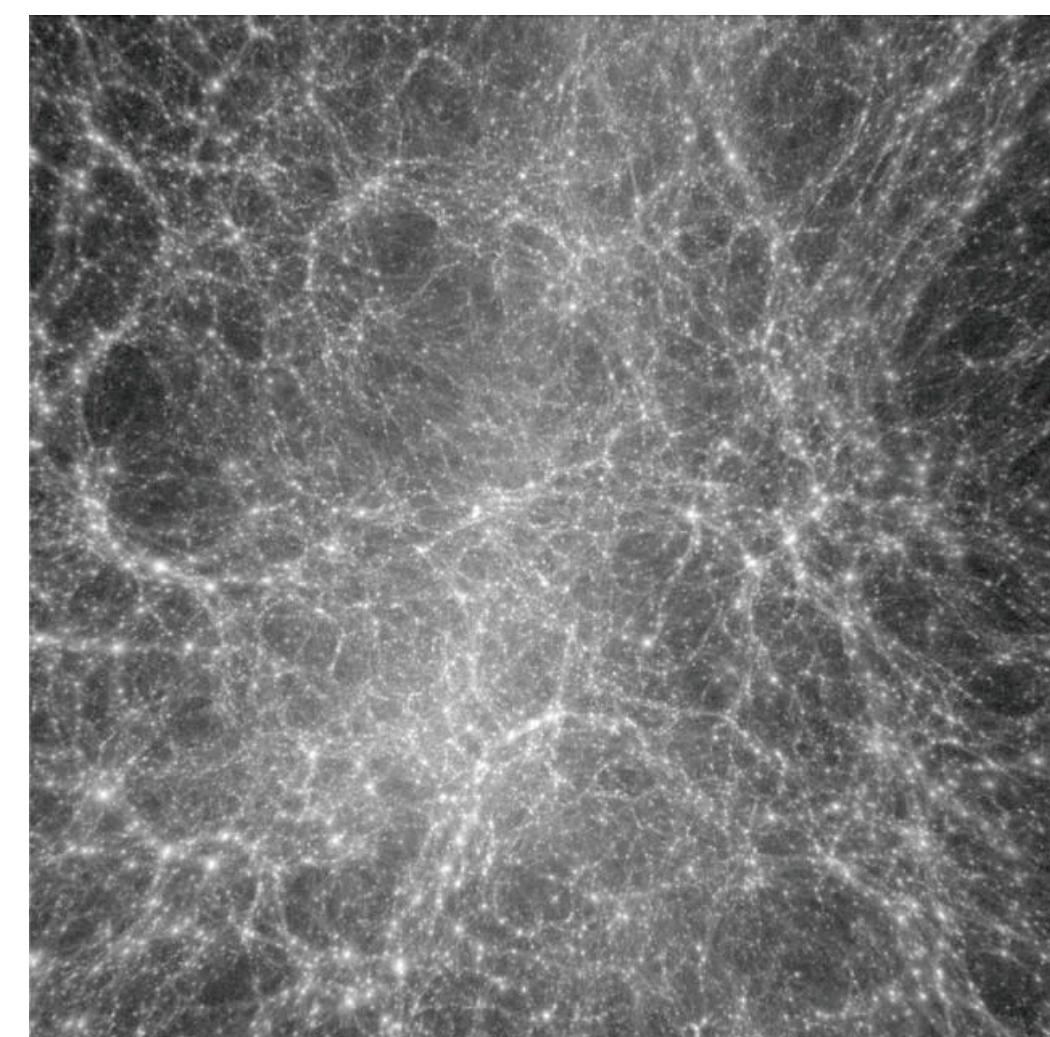
- アインシュタイン方程式を線形近似で解く
 → Linear matter power spectrum

$$\begin{aligned} k^2 \eta - \frac{1}{2} \frac{\dot{a}}{a} h &= 4\pi G a^2 \delta T_0^0 (\text{Syn}), \\ k^2 \dot{\eta} &= 4\pi G a^2 (\bar{\rho} + \bar{P}) \theta (\text{Syn}), \\ \ddot{h} + 2 \frac{\dot{a}}{a} \dot{h} - 2k^2 \eta &= -8\pi G a^2 \delta T_i^i (\text{Syn}), \\ \ddot{h} + 6\ddot{\eta} + 2 \frac{\dot{a}}{a} (\dot{h} + 6\dot{\eta}) - 2k^2 \eta &= -24\pi G a^2 (\bar{\rho} + \bar{P}) \sigma (\text{Syn}). \end{aligned}$$

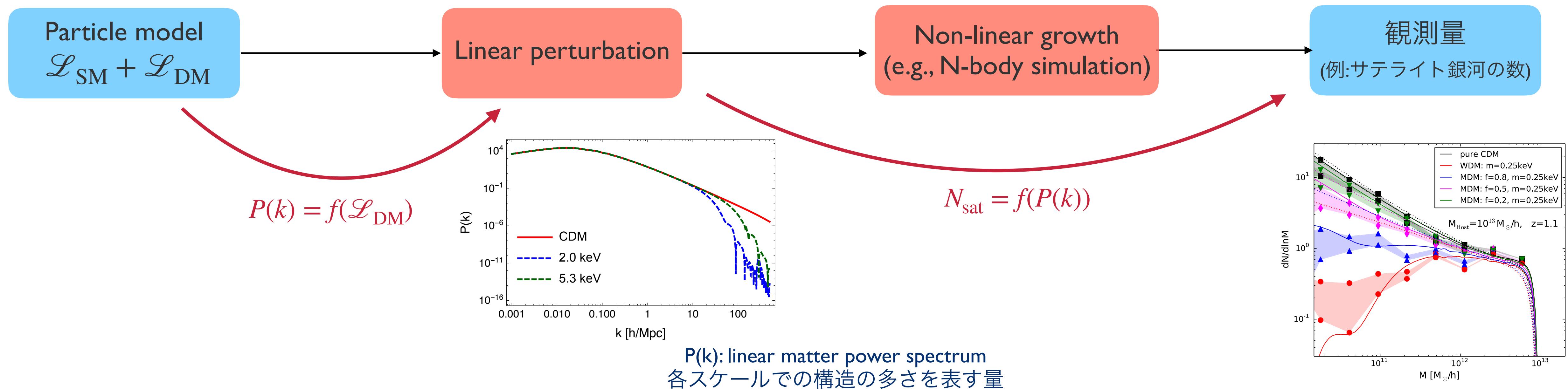


- N-body simulation

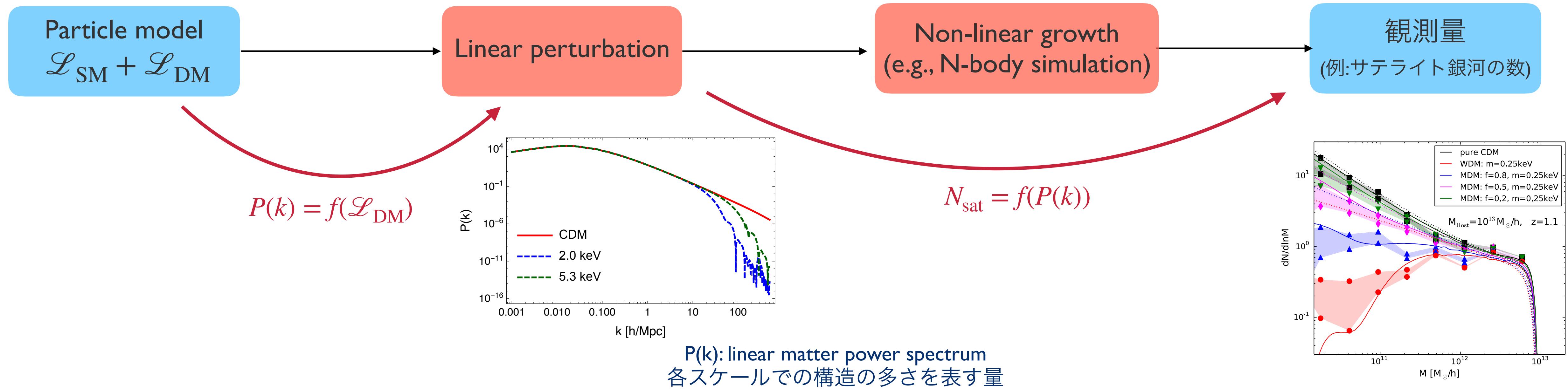
たくさんの時間と計算資源が必要



NNでフィッティング関数を与えよう



NNでフィッティング関数を与えよう



- Pros:
 - 複数の変数間の非線形な関係を簡単に表現できる (フィッティング公式を explicit に考える必要がない)
 - 計算の(途中)結果をNNで共有することで、将来の観測等のアップデートに楽に対応できる
 - インプット・アウトプットパラメータの数を増やしても、共有すべきデータはそんなに増えない
- Cons:
 - NNの訓練のために、上の一連の計算を一回はやる必要がある (従来の手法が不要になるわけではない)

実際にやったこと

一般的なFIMP DM モデルとして、DMが熱浴粒子の崩壊と散乱で作られる場合を考えた

$$\mathcal{L}_{\text{F.I.}} = -y_\chi \phi \bar{\Psi} \chi - y_f \phi \bar{f} f + \text{h.c.}$$

DM

対応する具体的なモデルの例

- χ = ステライル・ニュートリノ
- χ = Axino in DFSZ SUSY model

正規の手続きで訓練データを作る → Hidden layer 二つの (shallow) neural network を訓練

Model Parameters

$$(m_\chi, m_\Psi/m_\phi, y_f, \Delta)$$

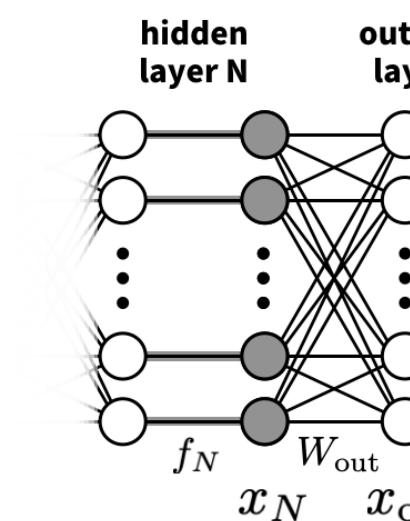
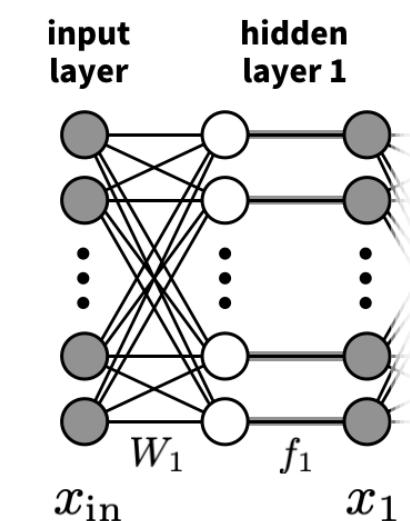
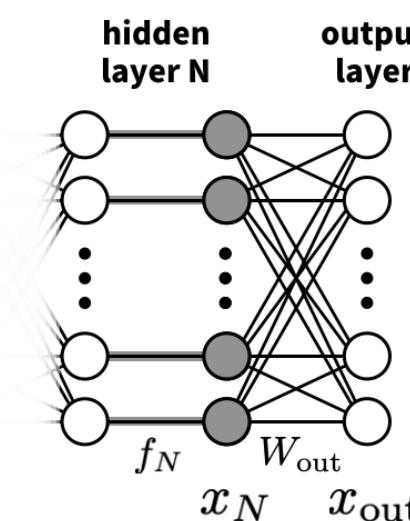
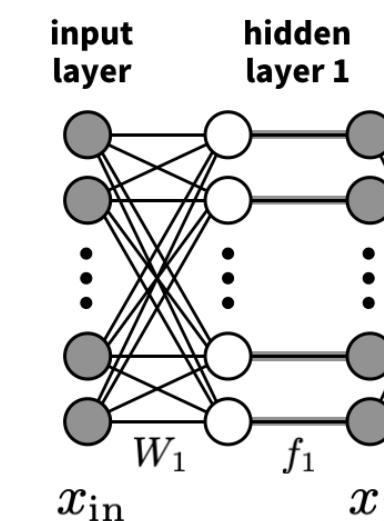
Transfer function をパラメトライズ

$$(\alpha, \beta, \gamma)$$

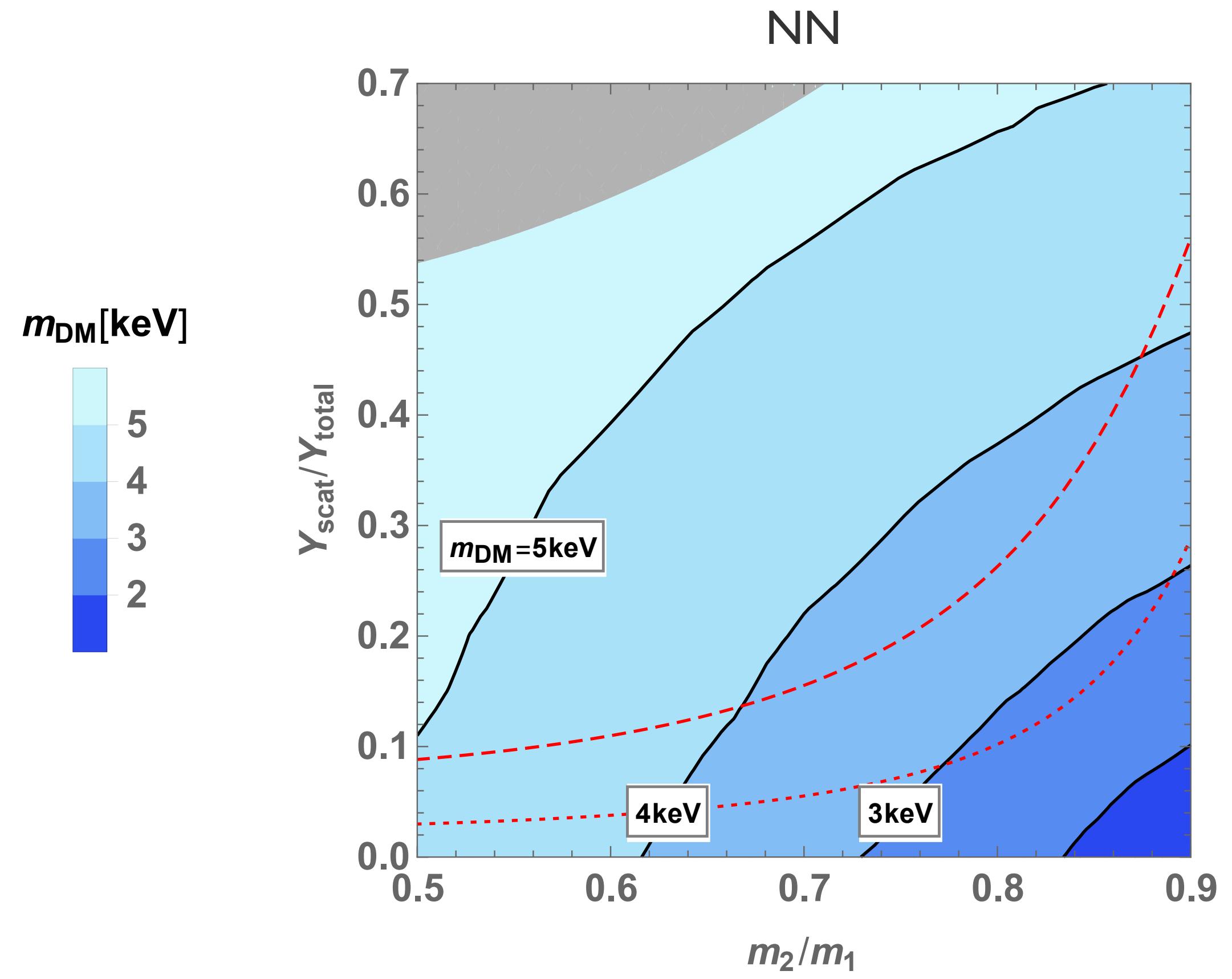
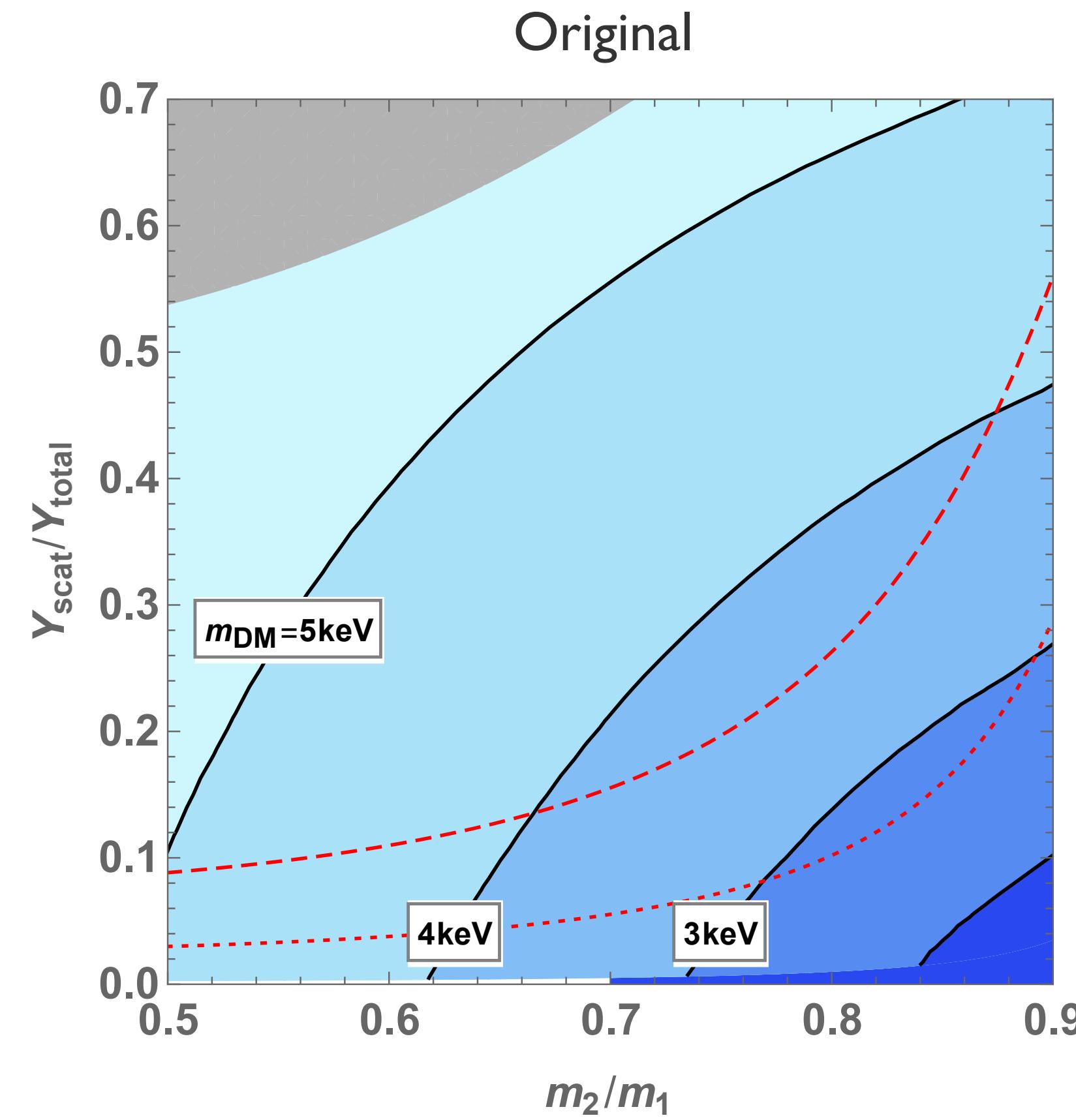
$$T^2(k) = \frac{P(k)}{P_{\text{CDM}}(k)} \sim (1 + (ak)^\beta)^{2\gamma}$$

サテライト銀河の数

$$N_{\text{sat}}$$



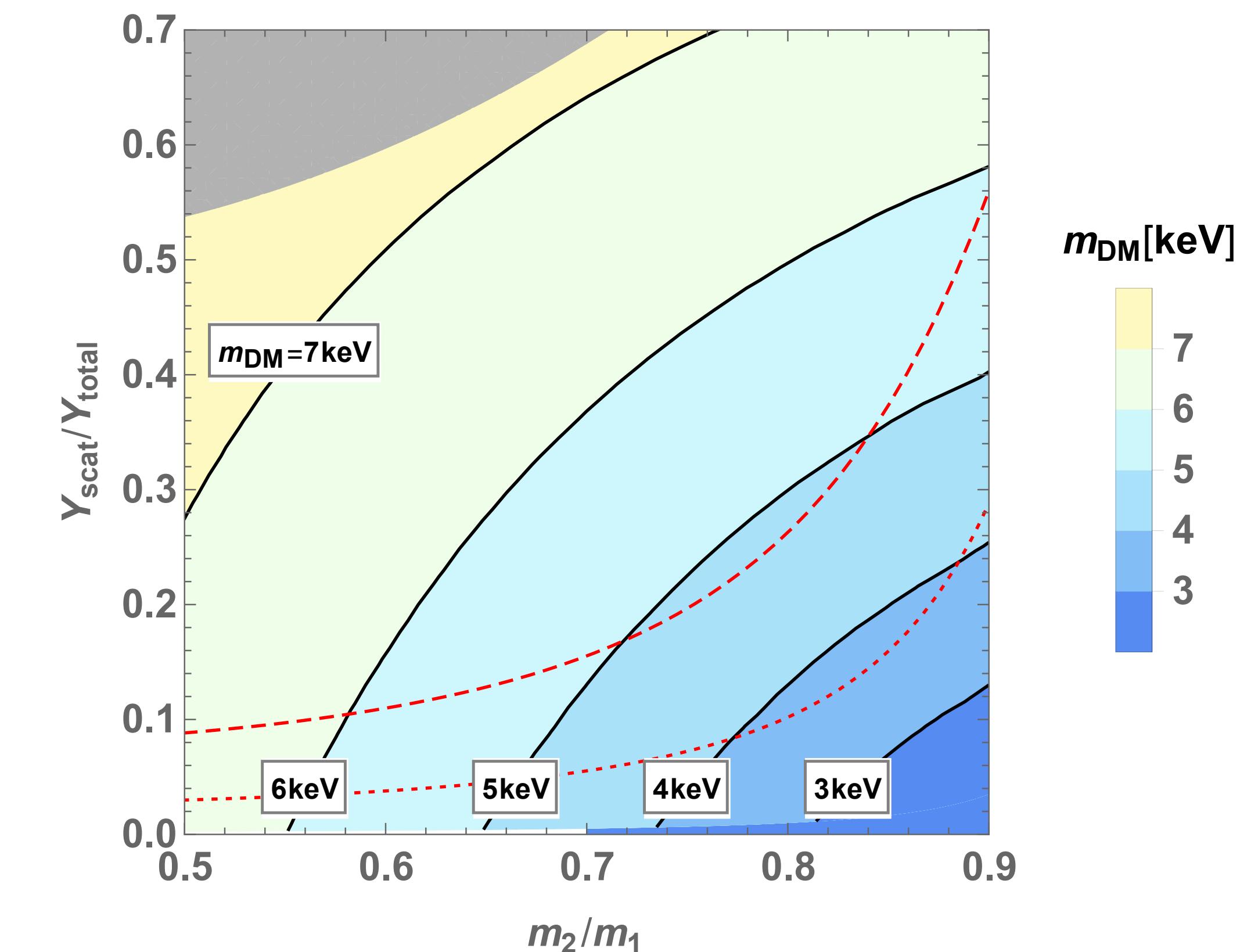
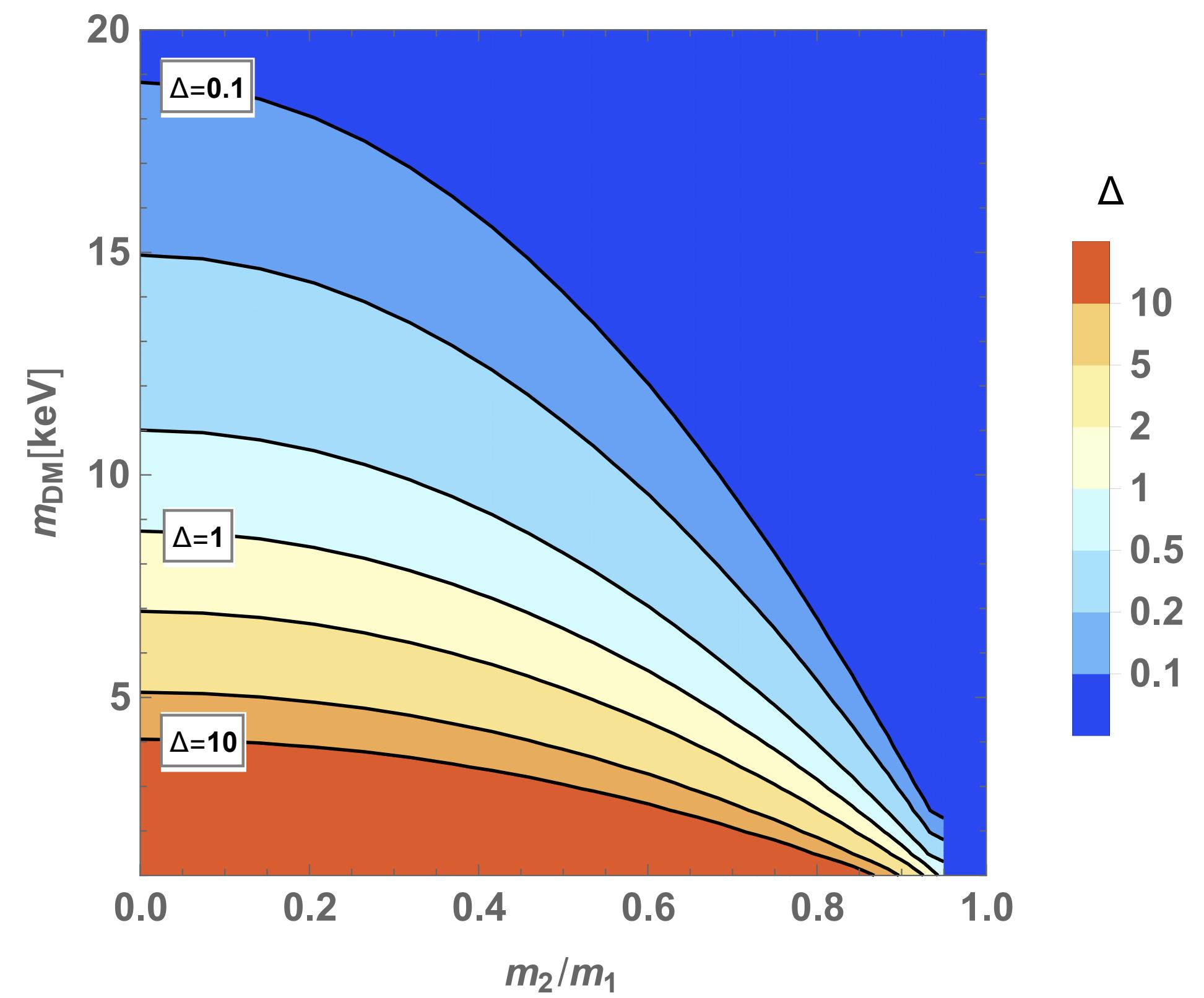
比較



mDM contour の左上では $N_{\text{sat}} < N_{\text{sat}}^{\text{obs}} = 63 \rightarrow \text{excluded}$

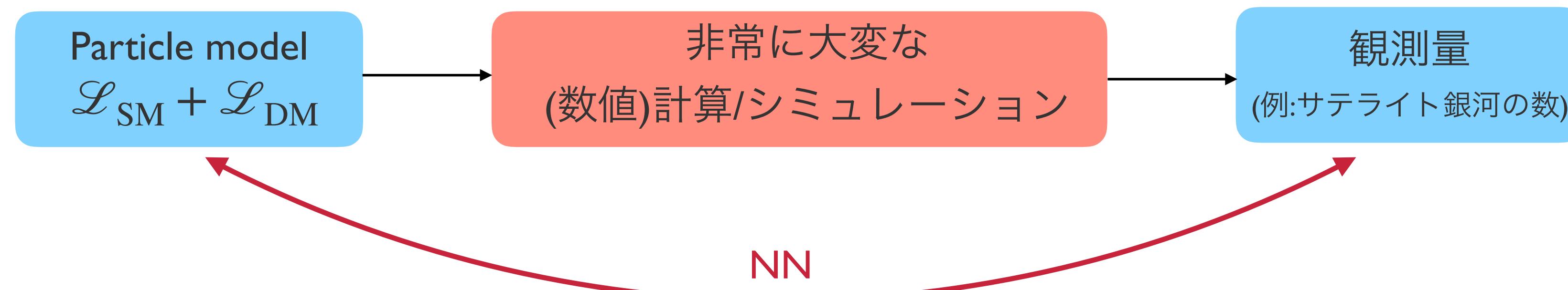
7 keV FIMP DM は生きているか？

- Lyman-alpha forest のデータを使うとさらに強い制限がつく
- 7 keV FIMP DM が観測と矛盾しないのは特別な場合のみ（親粒子達の質量が縮退・エントロピー生成 Δ がある場合）



まとめ

- 軽い暗黒物質 ($m \sim \text{keV}$): 宇宙の構造形成からモデルに強い制限がつく
 - 軽すぎると密度の偏りがならされてしまい、観測された構造が作れない (hot/warm dark matter になる)
→ 質量に下限
- そのようなモデルの解析は非常に大変



- 後の人々(主に将来の自分達)の解析に便利なように、こここの関係をNNでフィットして与える [Our work]