

# **Constraints on 7 keV Freeze-in DM: Phase Space Distributions & Ly-a forest constraints**

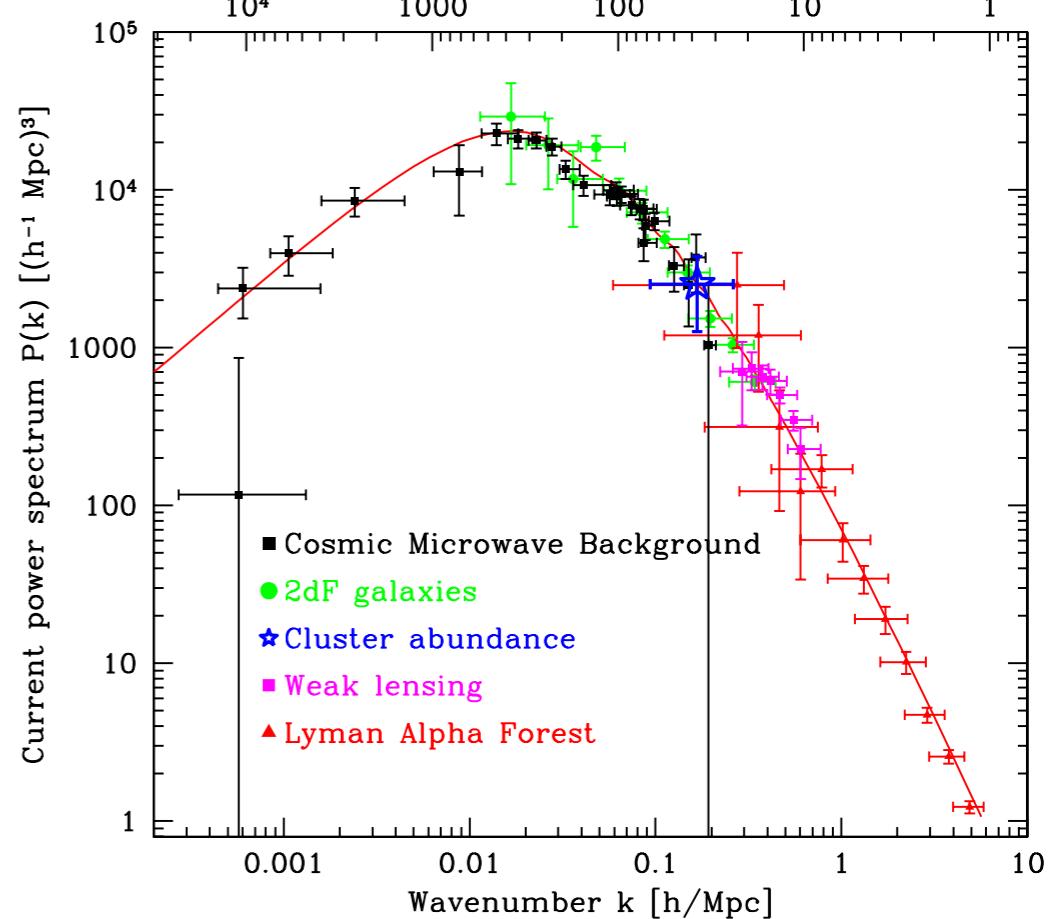
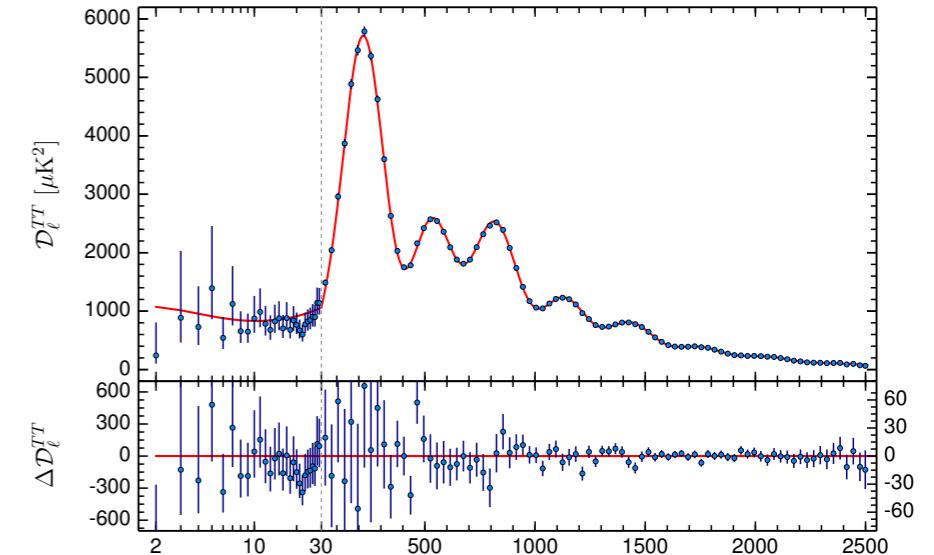
Keisuke Yanagi (Univ. of Tokyo)

K. J. Bae, A. Kamada, S. P. Liew, K. Y.  
arXiv: 1707.02077, 1707.06418

# ダークマターの証拠

様々なスケールでダークマターの存在が示唆されている

- 銀河の回転曲線
- 銀河団の質量問題
- CMB パワースペクトル
- 物質密度のパワースペクトル
- Bullet cluster
- ...



非相対論的、非バリオンの物質により様々なスケールの現象を説明できる！

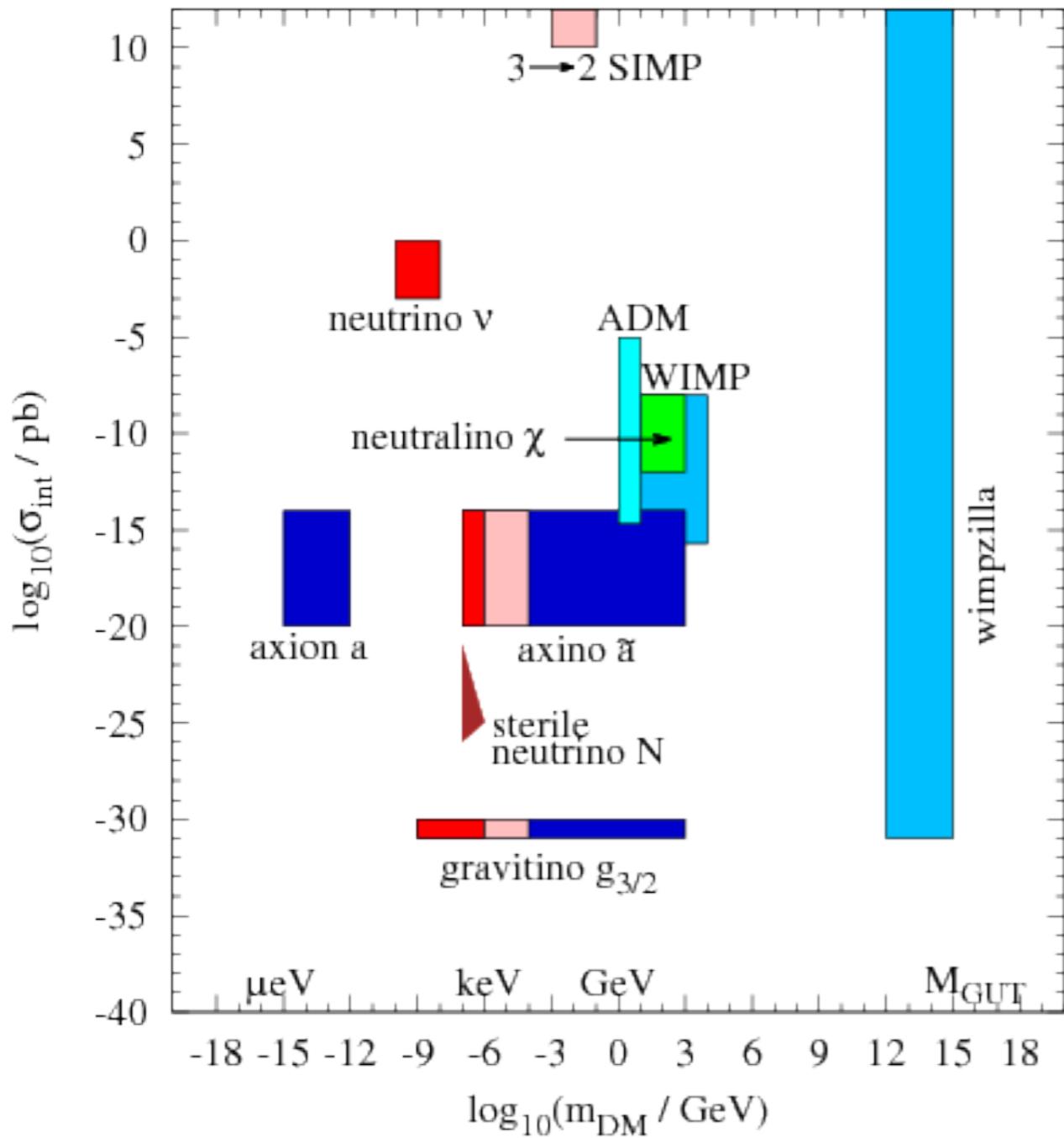
**Cold Dark Matter (CDM) paradigm**

# ダークマターの性質

- ▶ 電気的中性
- ▶ (準)安定 (寿命>宇宙年齢)
- ▶ 宇宙のエネルギー密度の約20%を占める
- ▶ 標準模型粒子、またダークマター同士の相互作用は弱い

しかし、未だに暗黒物質の質量や重力以外の相互作用の有無など、  
基本的な性質は殆どわかっていない

# ダークマターの質量はどれくらい軽くてよいか？



- ▶ 100 GeV以下のWIMP DMはindirect searchで除外（逃れる方法はある）
- ▶ では他のクラスのDM候補では？
- ▶ Axino, sterile neutrino, or gravitino DM はだいたいkeVまで下がってもよい
- ▶ しかし、keV DM は宇宙の構造形成から強い制限がつく

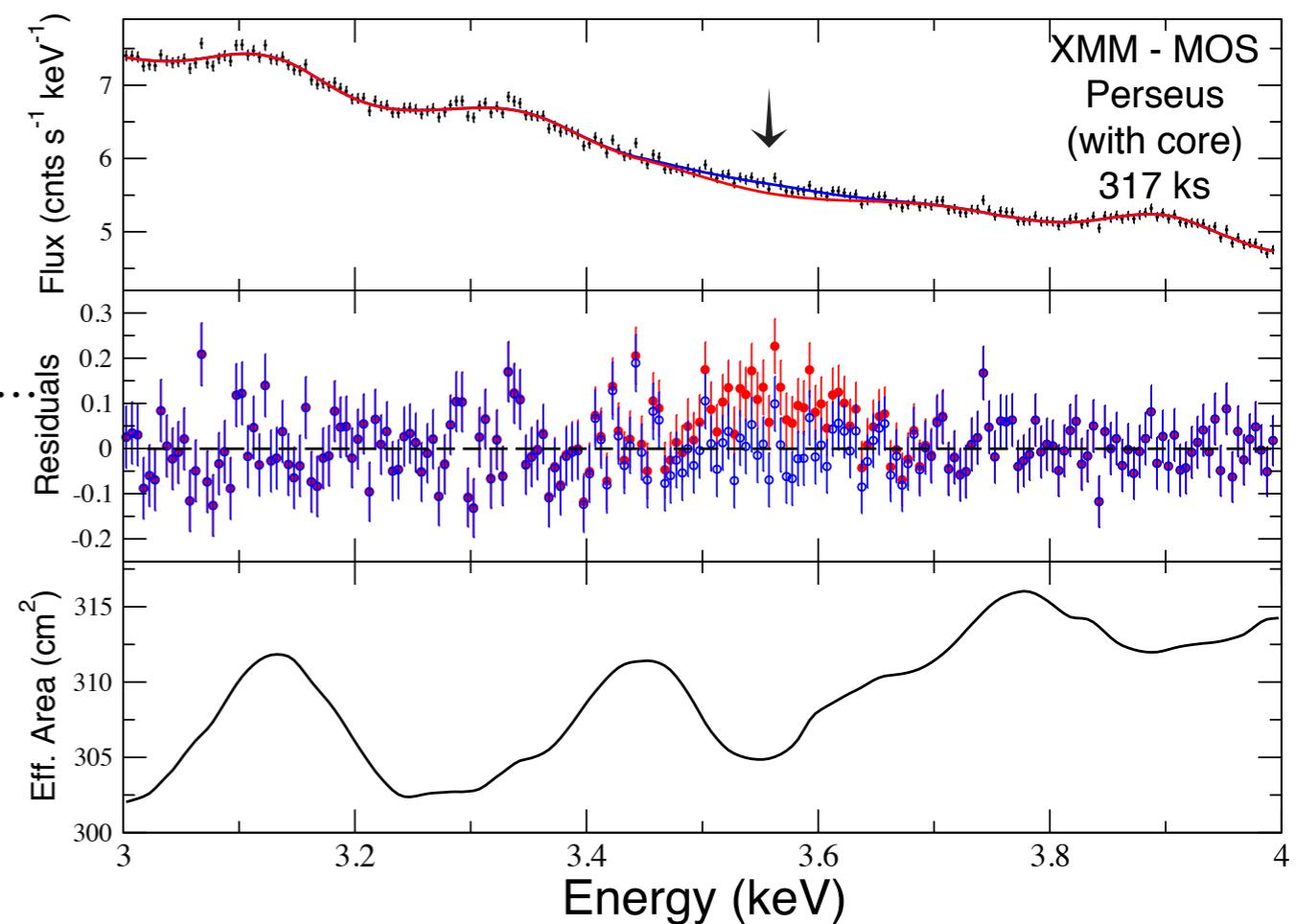
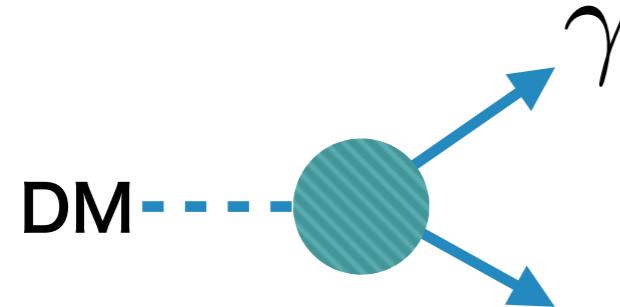
[H. Baer, et.al. (2014)]

# 3.5 keV X-ray excess?

keV DM を考える観測的なモチベーション

- ▶ Rare decay of 7 keV DM?

From Perseus galaxy cluster, Andromeda galaxy...



これまで 7 keV sterile neutrino が宇宙の構造形成と整合するかについてはよく研究されてきた

- ▶ Resonant production [A. Schneider (2016)]
- ▶ Produced by 2-body decay of a heavy particle [Konig, Merle, Totzauer (2016)]

我々は **Freeze-in** というメカニズムで作られる 7 keV の DM 一般に対して、(7 keV axino を例として) 構造形成からくる制限を調べる

# Outline

1. 宇宙論
2. 構造形成とダークマター
3. SUSY DFSZ モデル
4. Freeze-in production of DM
5. Freeze-in DMの、運動量分布とmatter power spectrum
6. Ly-alphaの制限を逃れる方法

# Outline

1. 宇宙論

2. 構造形成とダークマター

3. SUSY DFSZ モデル

4. Freeze-in production of DM

5. Freeze-in DMの、運動量分布とmatter power spectrum

6. Ly-alphaの制限を逃れる方法

# Cosmology: 一様等方宇宙

Einstein Eq. (for  $\Lambda=0$ )

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{1}{M_{pl}^2}T_{\mu\nu}$$

一様等方宇宙では(空間曲率は  $k=0$ とする)

$$ds^2 = -dt^2 + a(t)^2 d\vec{x}^2 \quad T_0^0 = -\rho \quad T_i^0 = 0 \quad T_j^i = P\delta_j^i$$

$$\rightarrow H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{1}{3M_{pl}^2}\rho \quad 2\frac{\ddot{a}}{a} + H^2 = -\frac{1}{M_{pl}^2}P$$

この二式から保存則が出る

$$\frac{d\rho}{dt} + 3H(\rho + P) = 0$$

- ▶ 相対論的粒子 ( $P=\rho/3$ )  $\frac{d}{dt}(\rho a^4) = 0 \quad E = p \propto 1/a$  赤方偏移

$$\rightarrow \dot{a} \propto a^{-1} \quad a \propto t^{1/2} \quad (\text{Radiation domination})$$

- ▶ 非相対論的粒子 ( $P=0$ )  $\frac{d}{dt}(\rho a^3) = 0 \quad \rho = m \times n$

$$\rightarrow \dot{a} \propto a^{-1/2} \quad a \propto t^{2/3} \quad (\text{Matter domination})$$

# エントロピー保存

膨張宇宙ではエントロピーが重要

保存則は次のように書き直せる

$$\frac{d}{dt} (\rho a^3) + P \frac{d}{dt} a^3 = 0$$

粒子の反応率  $\gg$  宇宙の膨張率  $H$  の場合には準静的である（各時刻で熱平衡にある）ので

$$dU = TdS - PdV + \sum_i \mu_i dN_i$$

単位共動体積あたり  $V = a^3$   $U = \rho a^3$

$$\frac{dS}{dt} = - \sum_i \frac{\mu_i}{T} \frac{dN_i}{dt}$$

エントロピーが保存するのは次の場合

▶ それぞれの粒子数が一定  $dN_i/dt = 0$  (free-streaming particle)

▶ 化学平衡  $\sum_i \mu_i dN_i = 0$  (SM粒子の消滅)

# エントロピー密度

熱力学から化学ポテンシャルが小さいときには

$$S = \frac{U + PV}{T}$$

エントロピー密度  $s = S/V$  を定義すると

$$s = \frac{\rho + P}{T}$$

- ▶ 相対論的粒子では  $\rho \propto T^4$
- ▶ 非相対論的粒子では  $\rho = mn \propto m(mT)^{3/2}e^{-m/T}$

非相対論的粒子は Boltzmann suppression があるため, エントロピーは相対論的粒子の寄与で決まる

光子のエントロピー密度を基準にして有効自由度  $g_*$  を使って書くのが普通

$$s = \frac{2\pi^2}{45} g_*(T) T^3$$

1 for boson  
7/8 for fermion

# Outline

1. 宇宙論

2. 構造形成とダークマター

3. SUSY DFSZ モデル

4. Freeze-in production of DM

5. Freeze-in DMの、運動量分布とmatter power spectrum

6. Ly-alphaの制限を逃れる方法

# 物質密度のパワースペクトル(matter power spectrum)

物質の密度分布の非一様性を定量化する指標

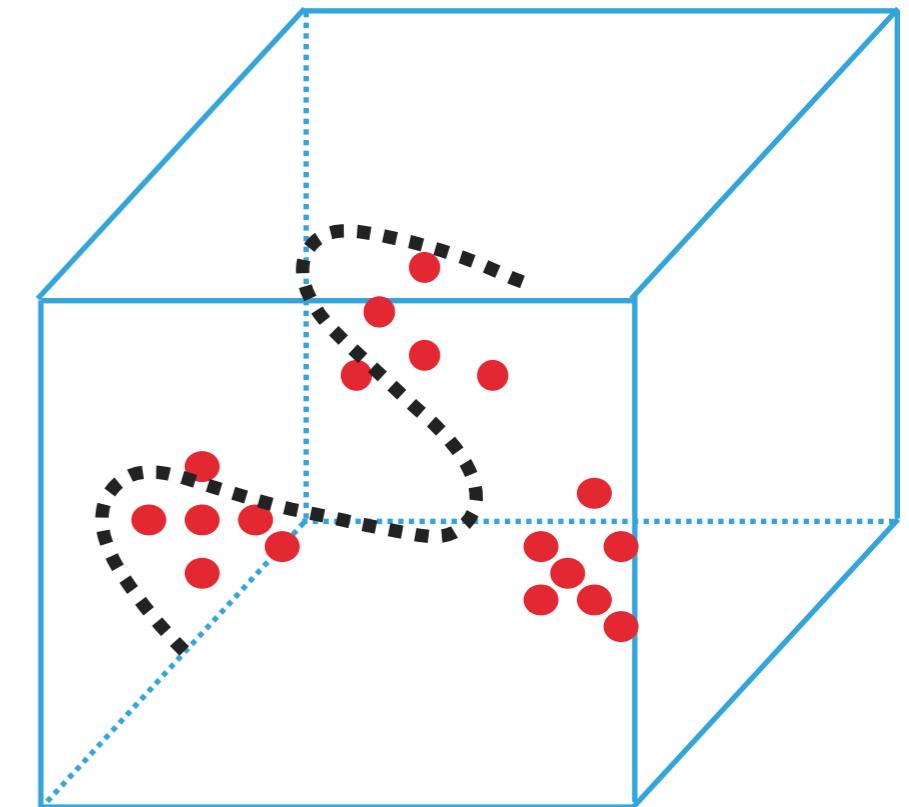
簡単の場合として同質量の物質（星）が非一様に分布している箱（宇宙）を考えてみる  
数を数えると平均のエネルギー密度とそこからのズレが計算できる

$$\rho(\vec{x}, t_0) = \bar{\rho}(t_0) + \delta\rho(\vec{x}, t_0) \quad \delta(\vec{x}, t_0) \equiv \frac{\delta\rho(\vec{x}, t_0)}{\bar{\rho}(t_0)}$$

密度ゆらぎの相関関数（平均は箱全体での平均）

$$\langle \delta(\vec{x})\delta(\vec{x} + \vec{r}) \rangle = f(|\vec{r}|)$$

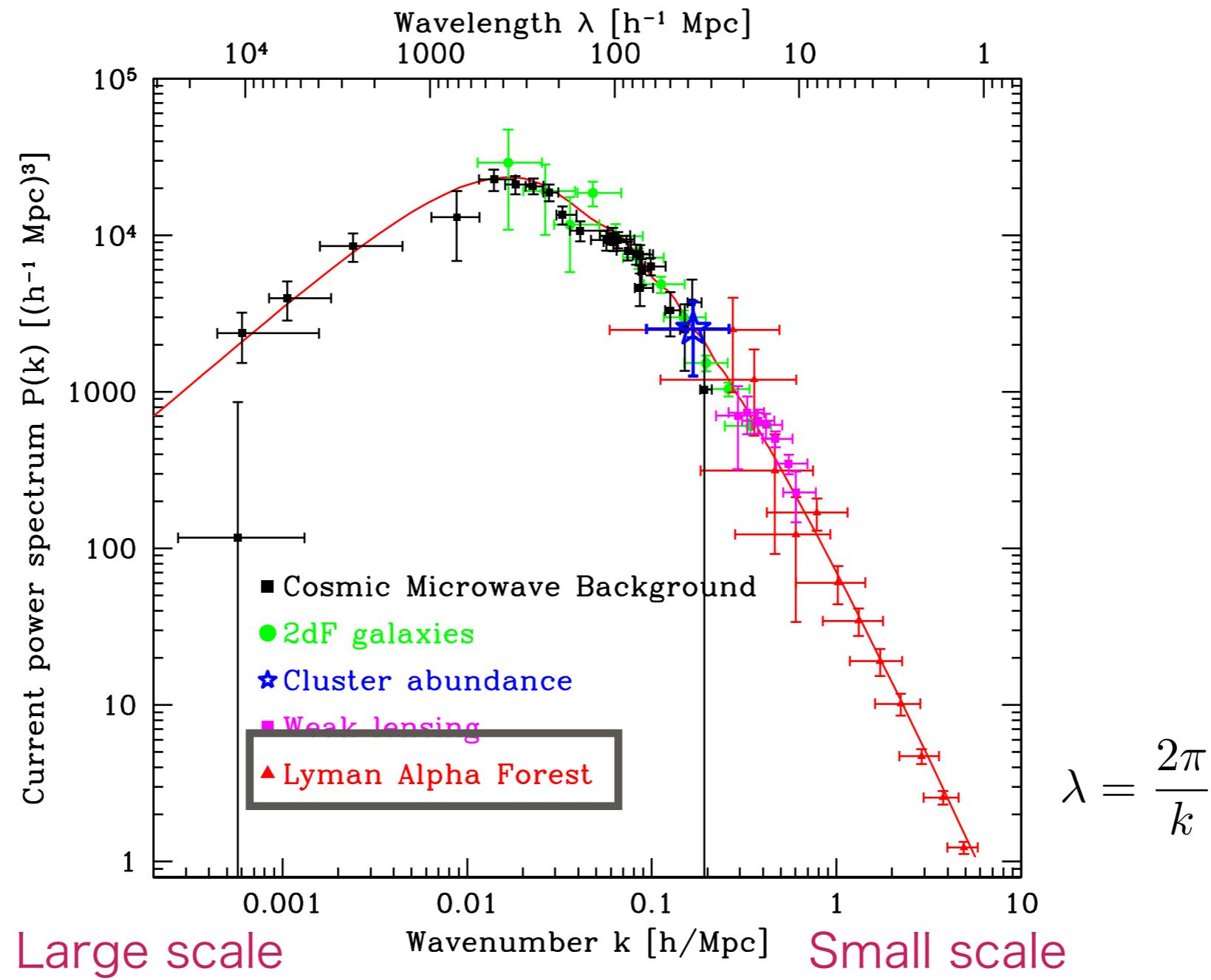
フーリエ変換が**matter power spectrum** と呼ばれる  
波長 $\lambda = 2\pi/k$  のスケールのゆらぎの大きさを表す



$$P(k) = \int \frac{d^3 k}{(2\pi)^3} \langle \delta(\vec{x})\delta(\vec{y}) \rangle e^{i\vec{k}\cdot(\vec{x}-\vec{y})}$$

# Matter power spectrum の観測

- 現在最も小スケールのスペクトルはLyman-alpha forest によって決まっている

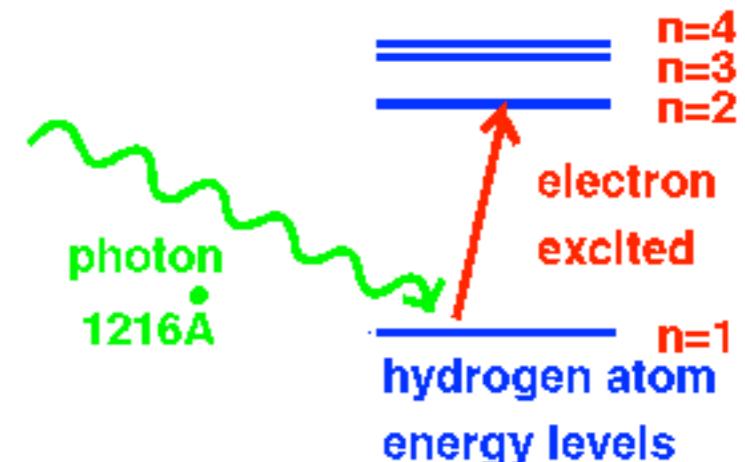


[M. Tegmark & M. Zaldarriaga (2002)]

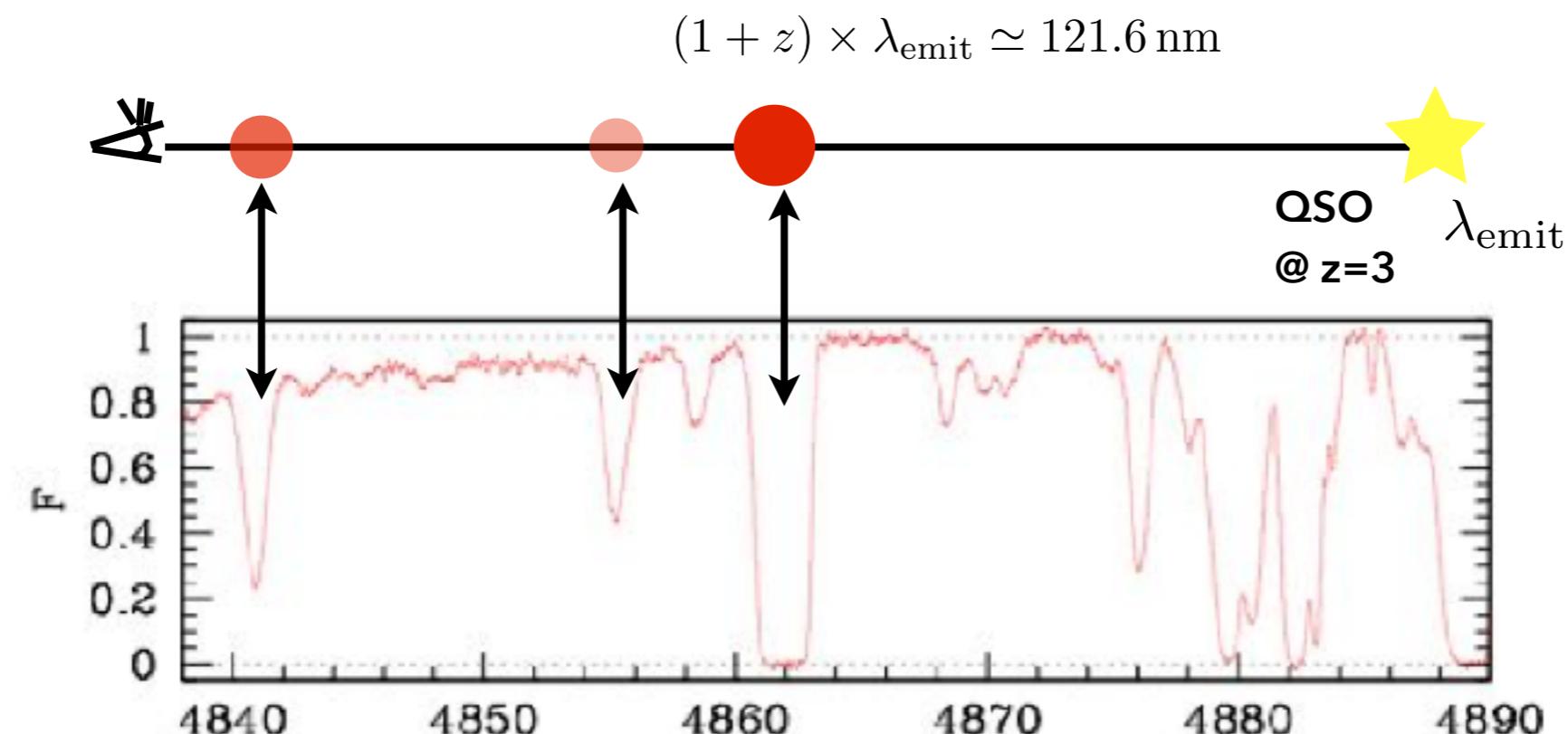
# Lyman-alpha forest とは？

Ly-alpha 遷移: 水素分子の  $n = 2$  と  $n = 1$  の間の遷移

波長 121.6 nm の光子が吸収される



- ▶ 星間ガス中の中性水素の Ly-alpha 遷移によって、遠方の天体から出た光子は吸収される
- ▶ 光子の波長は赤方偏移するので、複数の吸収線(forest)が見える
- ▶ 吸収の度合いで水素の密度分布がわかる → matter power spectrum



# 宇宙論的摂動論

Ly-alpha forest で見られたような非一様性を理論（一般相対論）から計算したい

初期宇宙で（インフラトンのゆらぎにより）一様等方宇宙からの小さなズレが作られ、それが重力によって現在まで成長したと考える

ゆらぎが大きくなるごく最近の宇宙までは、線形摂動論が使える

$$ds^2 = -(1 + 2\Phi)dt^2 + a^2(1 + 2\Psi)d\vec{x}^2 \rightarrow R_\nu^\mu = \bar{R}_\nu^\mu + \delta R_\nu^\mu$$

$$T_0^0 = -(\bar{\rho} + \delta\rho) \quad T_i^0 = (\bar{\rho} + \bar{P})v_i \quad T_j^i = (\bar{P} + \delta P)\delta_j^i + \Sigma_j^i$$

AINSHU TAYIN 方程式に代入して一次の項だけを残す

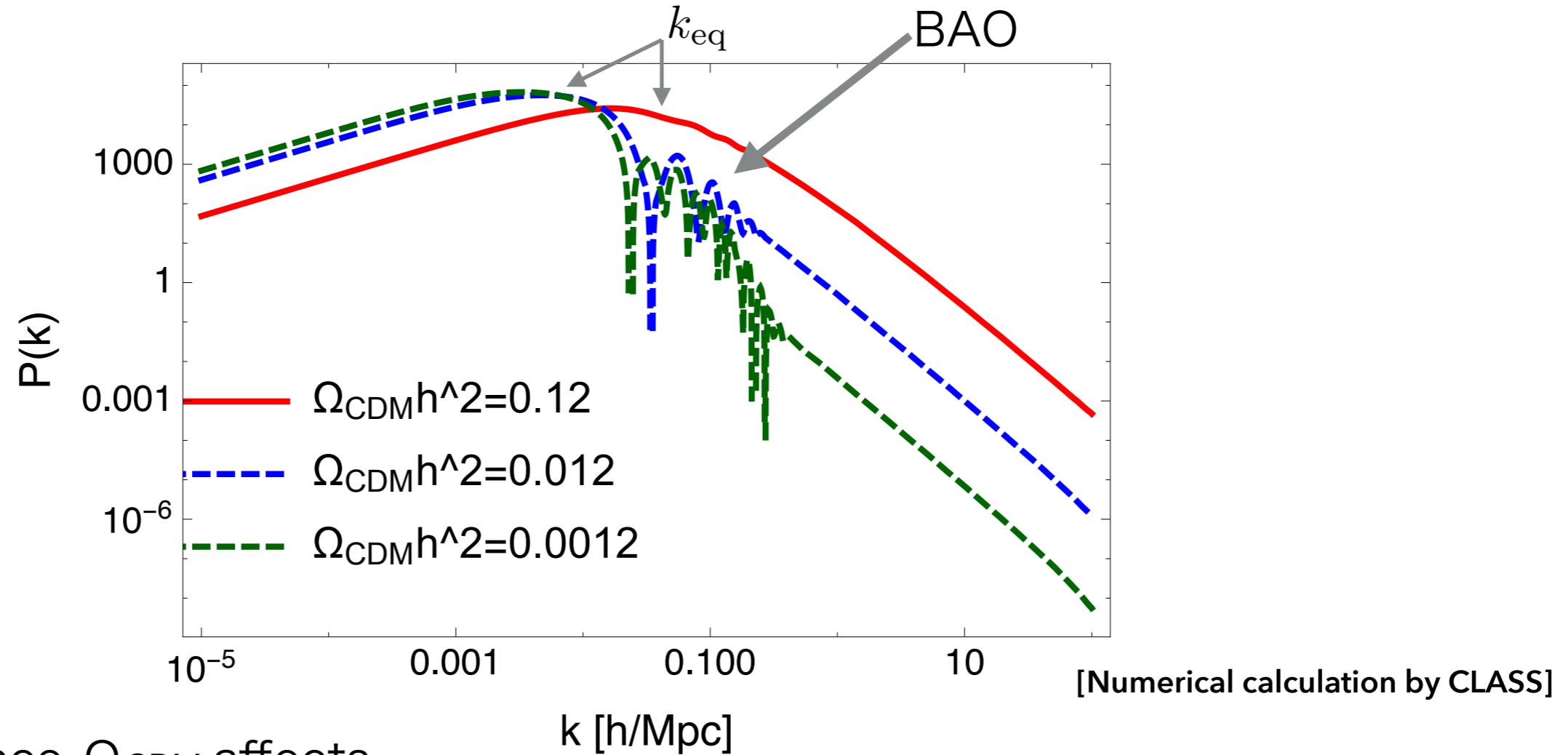
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{1}{M_{pl}^2}T_{\mu\nu} \rightarrow \text{(そこそこ複雑な) 連立線形微分方程式}$$

Boltzmann code (CAMB, CLASS...)を使うと簡単に数値解が得られる

各フーリエモードについての解 ( $\delta\rho(k, t_0)$  など)

CMBやmatter power spectrum などが計算可能！

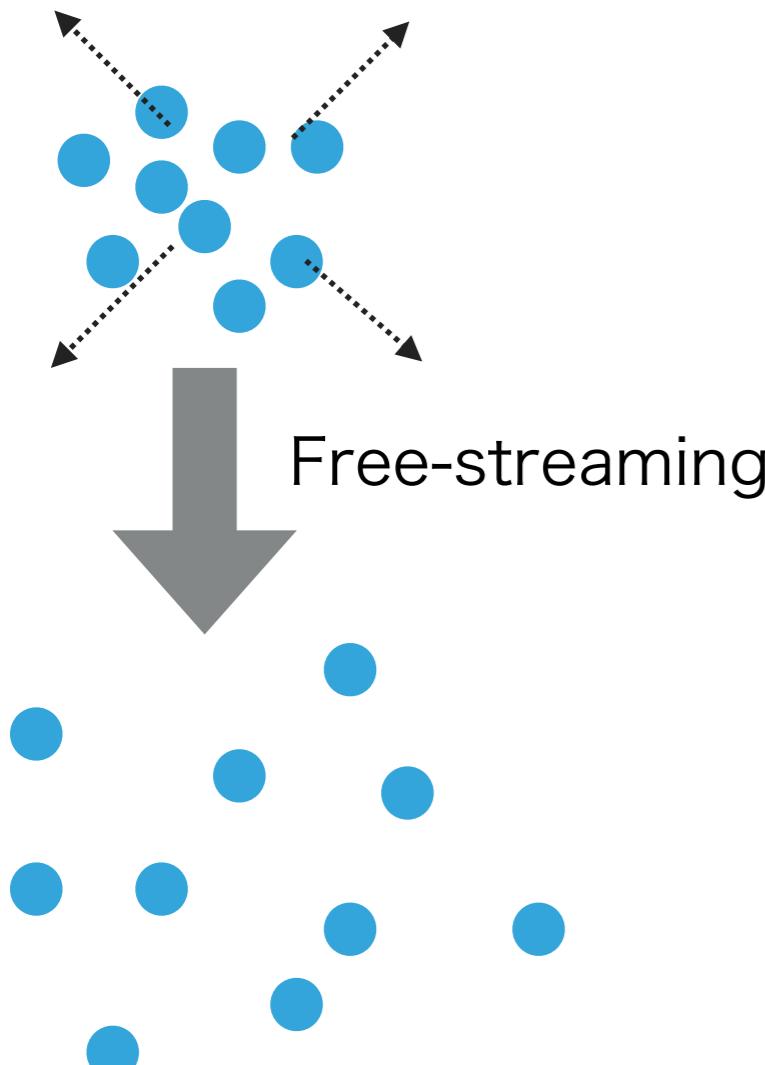
# ダークマターはmatter power spectrum にどう効くか



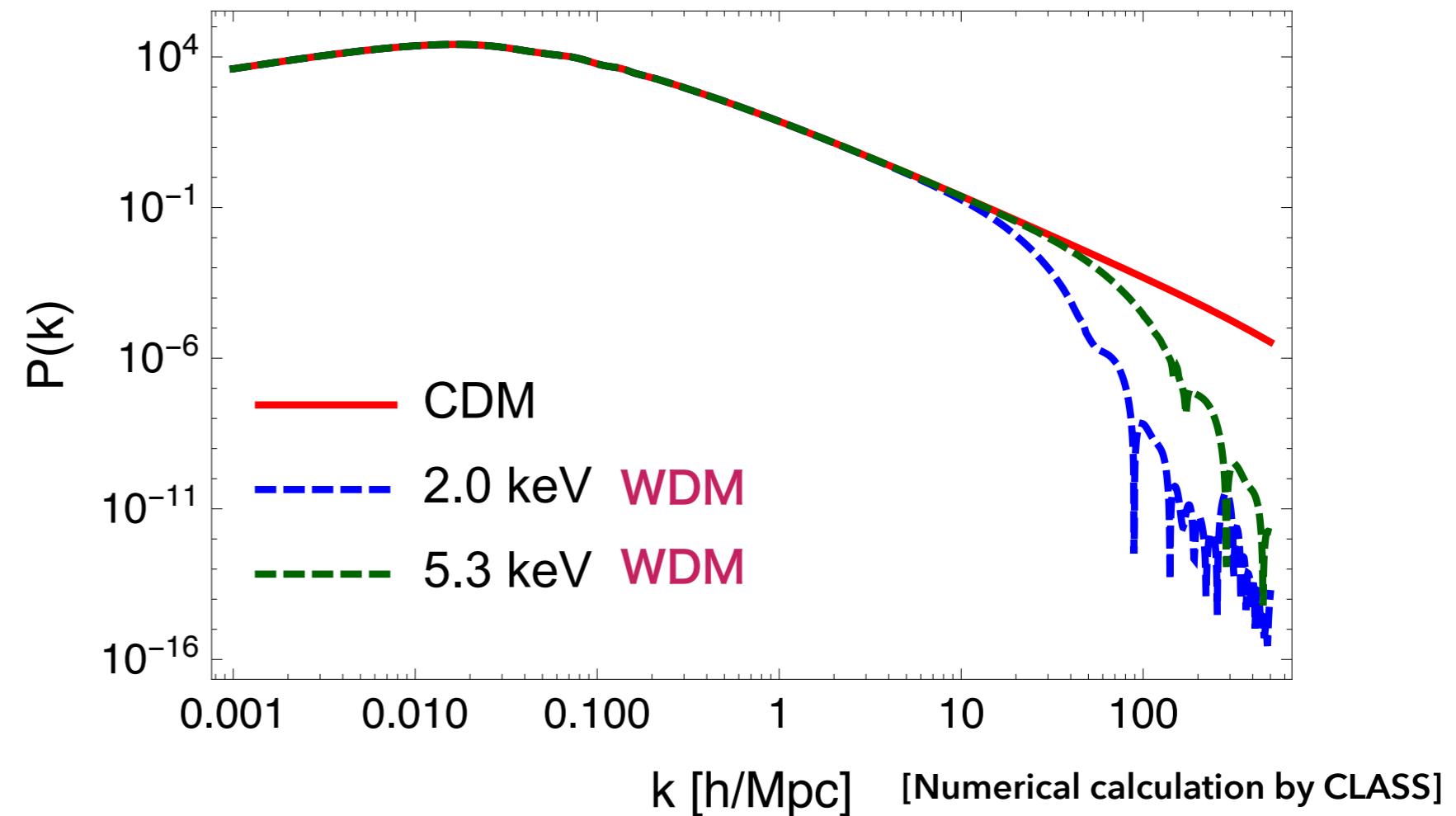
$$\Omega_i = \frac{\rho_i(t_0)}{\rho_c}$$
$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 3H_0^2 M_{pl}^2$$

# ダークマターがColdでなかったら？

CDMのpower spectrumはダークマターの速度がゼロであると仮定して得られる  
DMが無視できない速度を持つと、赤方偏移して非相対論的になるまで自由に拡散できる  
keV 程度の質量の場合**warm dark matter (WDM)**と呼ばれる



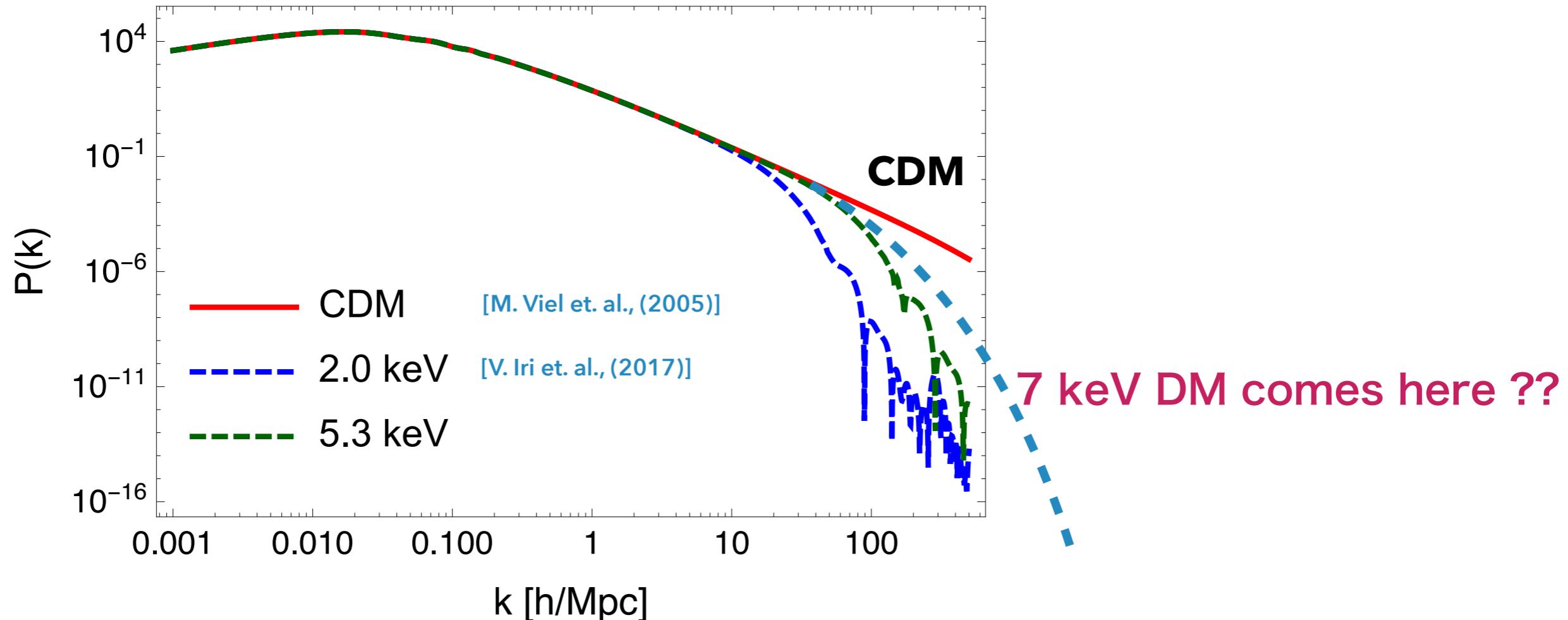
Free-streamingによって小スケールの構造が消える



# Warm Dark Matter & Ly-alpha constraints

WDMが構造を消しすぎると現在観測されている宇宙の構造が説明できない

Ly-alpha の観測からWDMの質量には、  $m_{\text{WDM}} > 5.3 \text{ keV}$  という制限がついている



- ▶ 我々は7 keV DMが観測と整合するかを知りたかった
- ▶ 5.3 keVが下限なので大丈夫そう？

# Ly-alphaの制限“ $m_{\text{WDM}} > \text{*** keV}$ ”の意味

- “ $m_{\text{WDM}} > 5.3 \text{ keV}$ ”のような制限はスピン1/2の熱的残存粒子についている

$$n_{\text{WDM}} = 2 \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} \frac{1}{e^{p/T} + 1} \propto T^3 \quad \Omega_{\text{WDM}} = \frac{m_{\text{WDM}} n_{\text{WDM}}}{\rho_c}$$

- WDMが  $s = \frac{2\pi^2}{45} g_*^{\text{WDM}} T^3$  の時に脱結合したとすると **WDM 残存量は2 parameters ( $m_{\text{WDM}}, T_{\text{WDM}}$ ) で決まる**

$$\Omega_{\text{WDM}} h^2 = \left( \frac{m_{\text{WDM}}}{94 \text{eV}} \right) \left( \frac{T_{\text{WDM}}}{T_\nu} \right)^3 = 7.5 \left( \frac{m_{\text{WDM}}}{7 \text{keV}} \right) \left( \frac{106.75}{g_*^{\text{WDM}}} \right)$$

- 各 $m_{\text{WDM}}$ に対して  $\Omega_{\text{WDM}} h^2 = 0.12$ となるように温度 $T_{\text{WDM}}$ を決め、matter power spectrum を計算し、Ly-alphaの観測と比較すると



$m_{\text{WDM}} > 2.0 \text{ keV}$	[M. Viel et. al., (2005)]
$m_{\text{WDM}} > 3.3 \text{ keV}$	[M. Viel et. al., (2013)]
$m_{\text{WDM}} > 4.09 \text{ keV}$	[J. Baur et. al., (2016)]
$m_{\text{WDM}} > 5.3 \text{ keV}$	[V. Iri et. al., (2017)]

# Ly-alphaの制限を他のDMモデルにも適用したい

- ▶ Axinoのような7 keV Freeze-in DMを考える際には温度と運動量分布の違いに注意

	conventional WDM (Ly-alpha constraints)	7 keV axino (Freeze-in)
$f_{\text{DM}}(p, t)$	Fermi-Dirac	<b>Non-thermal</b>
$g_*$	<b>~7000 (realistic?)</b>	106.75 (SM d.o.f)

$$\Omega_{\text{WDM}} h^2 = \left( \frac{m_{\text{WDM}}}{94 \text{eV}} \right) \left( \frac{T_{\text{WDM}}}{T_\nu} \right)^3 = 7.5 \left( \frac{m_{\text{WDM}}}{7 \text{keV}} \right) \left( \frac{106.75}{g_*^{\text{WDM}}} \right)$$

- ▶  $P(k)$  は  $m_{\text{DM}}$ ,  $f_{\text{DM}}(p, t)$ ,  $T_{\text{DM}}$  を決めると一つに決まる

# WDMの温度

$t_1$  @  $T \simeq T_{\text{dec}}$  WDM が脱結合

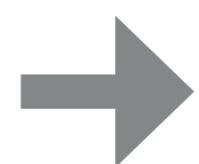
$$s_1 = \frac{2\pi^2}{45} \left( g_*^{\text{WDM}} + \frac{7}{8} \cdot 2 \right) T_1^3$$

Assume spin 1/2

$t_2$  しだいにSM粒子は消滅して光子、電子陽電子、ニュートリノが残る

$$s_2 = \frac{2\pi^2}{45} \left( 2 + \frac{7}{8} \cdot 4 + \frac{7}{8} \cdot 6 \right) T_2^3 + \frac{2\pi^2}{45} \cdot \frac{7}{8} \cdot 2 \cdot T_{\text{WDM},2}^3$$

- ▶ エントロピー保存  $s_1 a(t_1)^3 = s_2 a(t_2)^2$
- ▶ WDM free-streaming  $a(t_1)T_1 = a(t_2)T_{\text{WDM},2}$



$$T_{\text{WDM}} = T_\nu \left( \frac{10.75}{g_*^{\text{WDM}}} \right)^{1/3}$$

$$T_\nu = T_\gamma \left( \frac{4}{11} \right)^{1/3}$$

WDMがトップ・クォークの対消滅前に脱結合する場合  $g_*^{\text{WDM}} = 106.75$   
 $g^* \sim 7000$ は大量の新粒子/エントロピー生成を仮定する必要アリ

# Ly-alphaの制限を他のDMモデルにも適用したい

- ▶ Axinoのような7 keV Freeze-in DMを考える際には温度と運動量分布の違いに注意

conventional WDM (Ly-alpha constraints)	7 keV axino (Freeze-in)
$f_{\text{DM}}(p, t)$	Fermi-Dirac
$g_*$	$\sim 7000$ <b>(realistic?)</b>

$$\Omega_{\text{WDM}} h^2 = \left(\frac{m_{\text{WDM}}}{94\text{eV}}\right) \left(\frac{T_{\text{WDM}}}{T_\nu}\right)^3 = 7.5 \left(\frac{m_{\text{WDM}}}{7\text{keV}}\right) \left(\frac{106.75}{g_*^{\text{WDM}}}\right)$$
$$T_{\text{DM}} = \left(\frac{g_*(T)}{g_*(T_{\text{dec}})}\right)^{1/3} T$$

- ▶  $P(k)$  は  $m_{\text{DM}}$ ,  $f_{\text{DM}}(p, t)$ ,  $T_{\text{DM}}$  を決めると一つに決まる
- ▶ Axino のような熱的残存粒子ではないDMを考える際には単純に7 keV と 5.3 keV を比較してはいけない
- ▶ Ly-alpha の制限は最近O(1)で厳しくなっているのでより正確な制限が知りたい

**Matter power spectrum を直接比較するべき!**

# Outline

1. 宇宙論

2. 構造形成とダークマター

3. SUSY DFSZ axion モデル

4. Freeze-in production of DM

5. Freeze-in DMの、運動量分布とmatter power spectrum

6. Ly-alphaの制限を逃れる方法

# Axino in SUSY DFSZ model

## ► SUSY + PQ

- Motivated by EW naturalness and strong CP problems

- Superpotential

$$W_{\text{DFSZ}} = \frac{y_0}{M_*} X^2 H_u H_d \quad + (\text{PQ SSB sector})$$

**PQ= -1, +1, +1**

- After SSB of PQ symmetry,  $X$  generates axion superfield

$$X = \frac{v_{\text{PQ}}}{\sqrt{2}} e^{A/v_{\text{PQ}}} \quad A = \frac{s + ia}{\sqrt{2}} + \sqrt{2}\theta \tilde{a} + \theta^2 F_A$$

**saxion**      **axion**      **axino (7 keV)**

- 7 keV LSP axino is possible in some models

[e.g., Goto & Yamaguchi (1992); E. J. Chun & A. Lukas (1995)]

## ► Couplings are generated:

- $v_{\text{PQ}} \gtrsim 10^9 \text{ GeV}$      $M_* \sim 10^{16} \text{ GeV}$

- $\mu$  term:  $\mu \sim \frac{y_0 v_{\text{PQ}}^2}{2M_*}$

- Axino-Higgs-Higgsino interaction:  $\frac{2\mu}{v_{\text{PQ}}} \sim 10^{-8}$

**R-parity = -1, -1, 1**

$$\mathcal{L} \sim \frac{2\mu}{v_{\text{PQ}}} \tilde{a} \tilde{H} H$$

# R-parity violating decay of axino

- ▶ Bilinear R-parity violation is introduced

$$W_{\text{bRPV}} = \frac{y'_i}{M_*^2} X^3 L_i H_u \simeq \mu'_i \left(1 + \frac{3A}{v_{\text{PQ}}}\right) L_i H_u, \quad \mu'_i \sim \mu \frac{v_{\text{PQ}}}{M_*}$$

**PQ= -1, +2, +1**

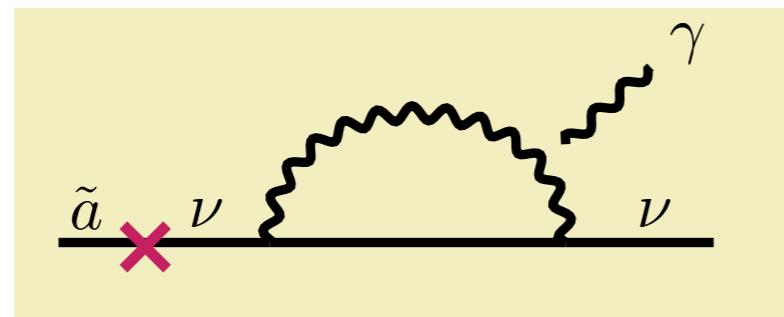
- ▶ After EWSB, bRPV induces **axino-neutrino mixing**

$$|\theta| \simeq \frac{\mu' v_u}{m_{\tilde{a}} v_{\text{PQ}}} \simeq 10^{-5} \left(\frac{\mu'}{4 \text{ MeV}}\right) \left(\frac{7 \text{ keV}}{m_{\tilde{a}}}\right) \left(\frac{10^{10} \text{ GeV}}{v_{\text{PQ}}}\right)$$

**R-parity = 1, -1**

$$\mathcal{L} \sim \frac{\mu' v_u}{v_{\text{PQ}}} \nu \tilde{a}$$

- ▶ Axino decays as a sterile neutrino



$\sin^2 2\theta \sim 10^{-10}$  explains 3.5 keV excess!

- ▶ Other options

- bRPV in KSVZ model → Light Bino ( $\sim 10$  GeV) or small  $v_{\text{PQ}}$  ( $\sim 10^8$  GeV) required
- sfermion 1-loop in trilinear RPV → Light stau ( $\sim 100$  GeV) required

# Outline

1. 宇宙論

2. 構造形成とダークマター

3. SUSY DFSZ モデル

4. Freeze-in production of DM

5. Freeze-in DMの、運動量分布とmatter power spectrum

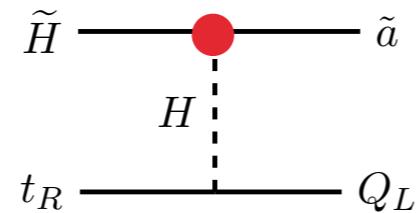
6. Ly-alphaの制限を逃れる方法

# Freeze-in

Axinoの他の粒子との結合は非常に弱い

$$\frac{\mu}{f_a} \sim 10^{-10} - 10^{-8}$$

例として散乱による生成・消滅の反応率を見積もってみる



$$\langle\sigma v\rangle \sim \left(\frac{\mu}{f_a}\right)^2 \frac{1}{T^2}$$

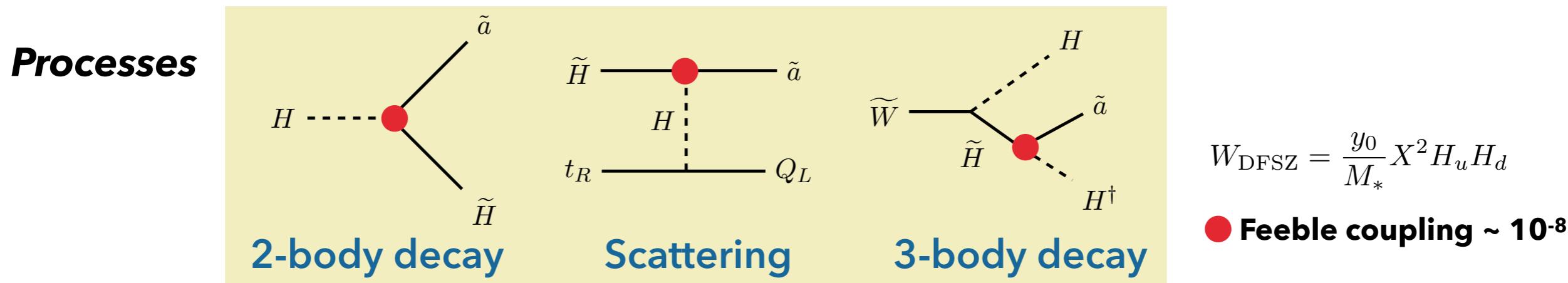
- ▶ 生成率  $\Gamma^+ = \langle\sigma v\rangle n_{\tilde{H}} n_t a^3 \sim \left(\frac{\mu}{f_a}\right)^2 T$  axino以外は相対論的で熱平衡にある
  - ▶ 消滅率  $\Gamma^- = \langle\sigma v\rangle n_{\tilde{a}} n_t a^3 \sim \left(\frac{\mu}{f_a}\right)^2 \frac{n_{\tilde{a}}}{T^2} \ll \Gamma^+$
- $\rightarrow \frac{\Gamma^+}{H} \sim \left(\frac{\mu}{f_a}\right)^2 \frac{M_{pl}}{T} \sim 10^{-16} \frac{10^{18} \text{ GeV}}{10^3 \text{ GeV}} \ll 1$

## Freeze-in

- ✓ 低温になるほど粒子生成が促進され、親粒子が非相対論的になる前  $T \sim \mu$  が最大
- ✓ しかし生成率は常に宇宙膨張より小さいので、 $n_{\tilde{a}}$  は非常に小さいままで、axinoは熱平衡に入らない

# Freeze-in production of axino

- Axinoはこのようなfreeze-inにより熱プラズマから少しづつ生成される
- 逆の消滅反応は効かない



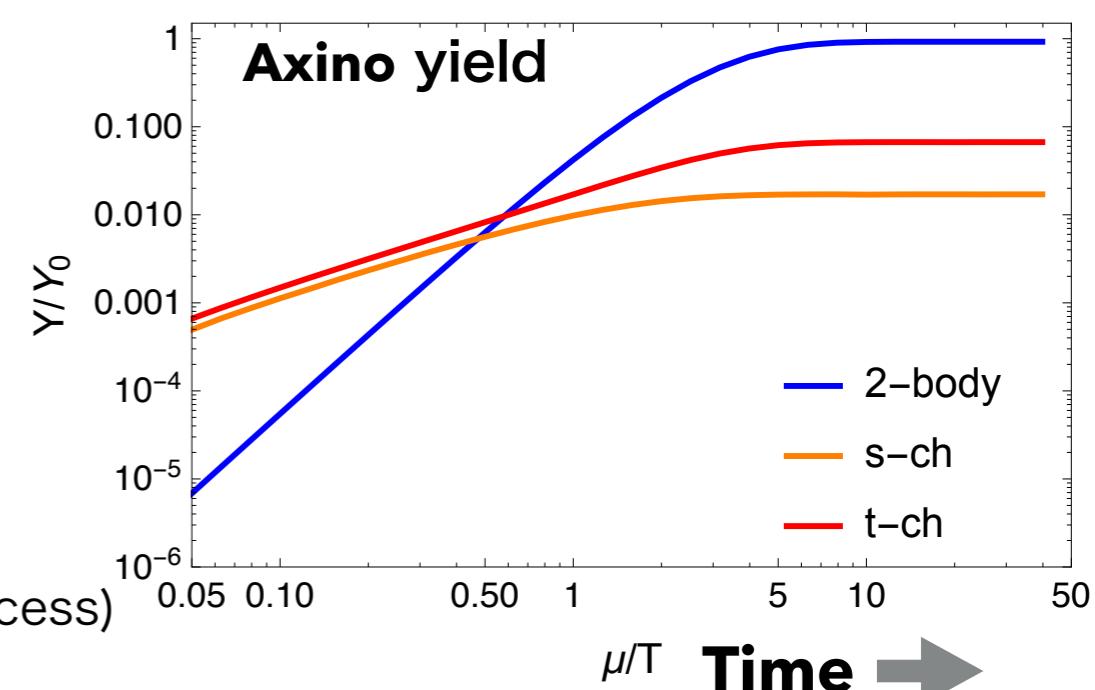
- 例として散乱のボルツマン方程式を書くと

$$\dot{n}_{\tilde{a}} + 3Hn_{\tilde{a}} = \langle \sigma v \rangle n_1 n_2 \sim T^4 \quad \langle \sigma v \rangle \sim 1/T^2$$

- 粒子生成は低温がdominant

$$Y_0 = \frac{n_0}{s_0} = \int_0^{t_0} dt \frac{\langle \sigma v \rangle n_1 n_2}{s} \propto \int_m^{T_R} dT M_{pl} \frac{T^4}{T^6} \sim \frac{M_{Pl}}{m}$$

(m=μ for Higgsino process)



→ NLSPからの生成がdominant

# 運動量分布とボルツマン方程式

- ▶ Matter power spectrumのためには運動量分布  $f_{\tilde{a}}(t, p)$  が必要
- ▶ Fullのボルツマン方程式を計算する必要がある
- ▶ Axinoは生成後は熱平衡にならず分布は単純に赤方偏移する

## Boltzmann Eq.

$$\frac{df_{\tilde{a}}(t, p)}{dt} = \frac{\partial f_{\tilde{a}}(t, p)}{\partial t} - \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} p \frac{\partial f_{\tilde{a}}(t, p)}{\partial p} = \frac{1}{E_{\tilde{a}}} C(t, p)$$

**Collision term** neglect axino density  $f_{\tilde{a}} \simeq 0$

$$\begin{aligned} \frac{g_{\tilde{a}}}{E_{\tilde{a}}} C_{1+2+\dots+\tilde{a}+3+4+\dots}(t, p_{\tilde{a}}) &= \frac{1}{2E_{\tilde{a}}} \int \prod_{I \neq \tilde{a}} \frac{d^3 p_I}{(2\pi)^3 2E_I} (2\pi)^4 \delta^4(\hat{p}_1 + \hat{p}_2 + \dots - \hat{p}_{\tilde{a}} - \hat{p}_3 - \hat{p}_4 - \dots) \\ &\times \sum_{\text{spin}} |\mathcal{M}_{1+2+\dots+\tilde{a}+3+4+\dots}|^2 f_1 f_2 \dots (1 \mp f_3)(1 \mp f_4) \dots \end{aligned}$$

- ▶ ボルツマン方程式を（赤方偏移を適切に考慮して）積分すると運動量分布が得られる

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

# Collision term の簡約

我々は様々なcollision term を計算に便利な形に書き直した

- ▶ 2-to-2 scattering

$$\frac{g_{\tilde{a}}}{E_{\tilde{a}}} C_{1+2 \rightarrow \tilde{a}+3}(t, p_{\tilde{a}}) = \pm \frac{T}{512\pi^3 p_{\tilde{a}} E_{\tilde{a}}} e^{-E_{\tilde{a}}/T} \int ds \frac{1}{\sqrt{s} p_{3\tilde{a}}} \ln \left( \frac{1 \pm e^{-E_3^-(s)/T}}{1 \pm e^{-E_3^+(s)/T}} \right) \int dt \sum_{\text{spin}} |\mathcal{M}_{1+2 \rightarrow \tilde{a}+3}|^2,$$

- ▶ 3-body decay

$$\frac{g_{\tilde{a}}}{E_{\tilde{a}}} C_{1 \rightarrow \tilde{a}+2+3}(t, p_{\tilde{a}}) = \pm \frac{T}{512\pi^3 p_{\tilde{a}} E_{\tilde{a}}} \int dm_{23}^2 \frac{1}{\sqrt{m_{23}^2} \tilde{p}_{1\tilde{a}}} \ln \left( \frac{1 \pm e^{-E_1^-(m_{23}^2)/T}}{1 \pm e^{-E_1^+(m_{23}^2)/T}} \right) \int dm_{2\tilde{a}}^2 \sum_{\text{spin}} |\mathcal{M}_{1 \rightarrow \tilde{a}+2+3}|^2,$$

ローレンツ不変な形式で書かれているので、matrix element と簡単なkinematicsを計算すれば直ちに運動量分布がわかる

# Outline

1. 宇宙論

2. 構造形成とダークマター

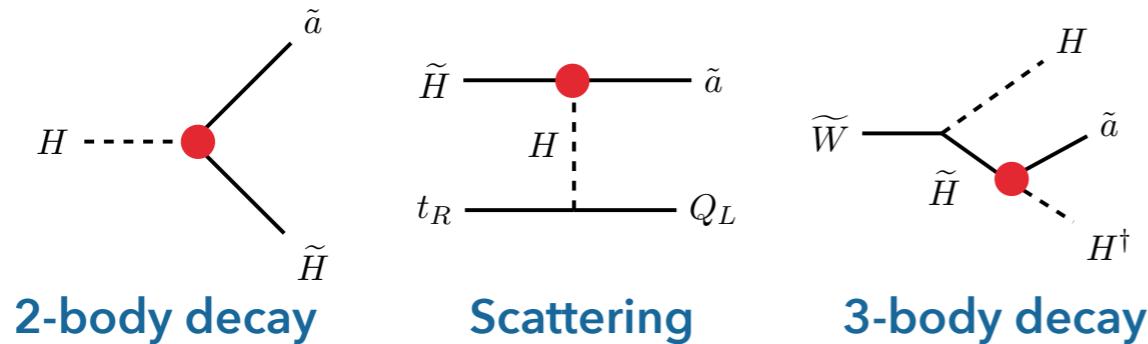
3. SUSY DFSZ モデル

4. Freeze-in production of DM

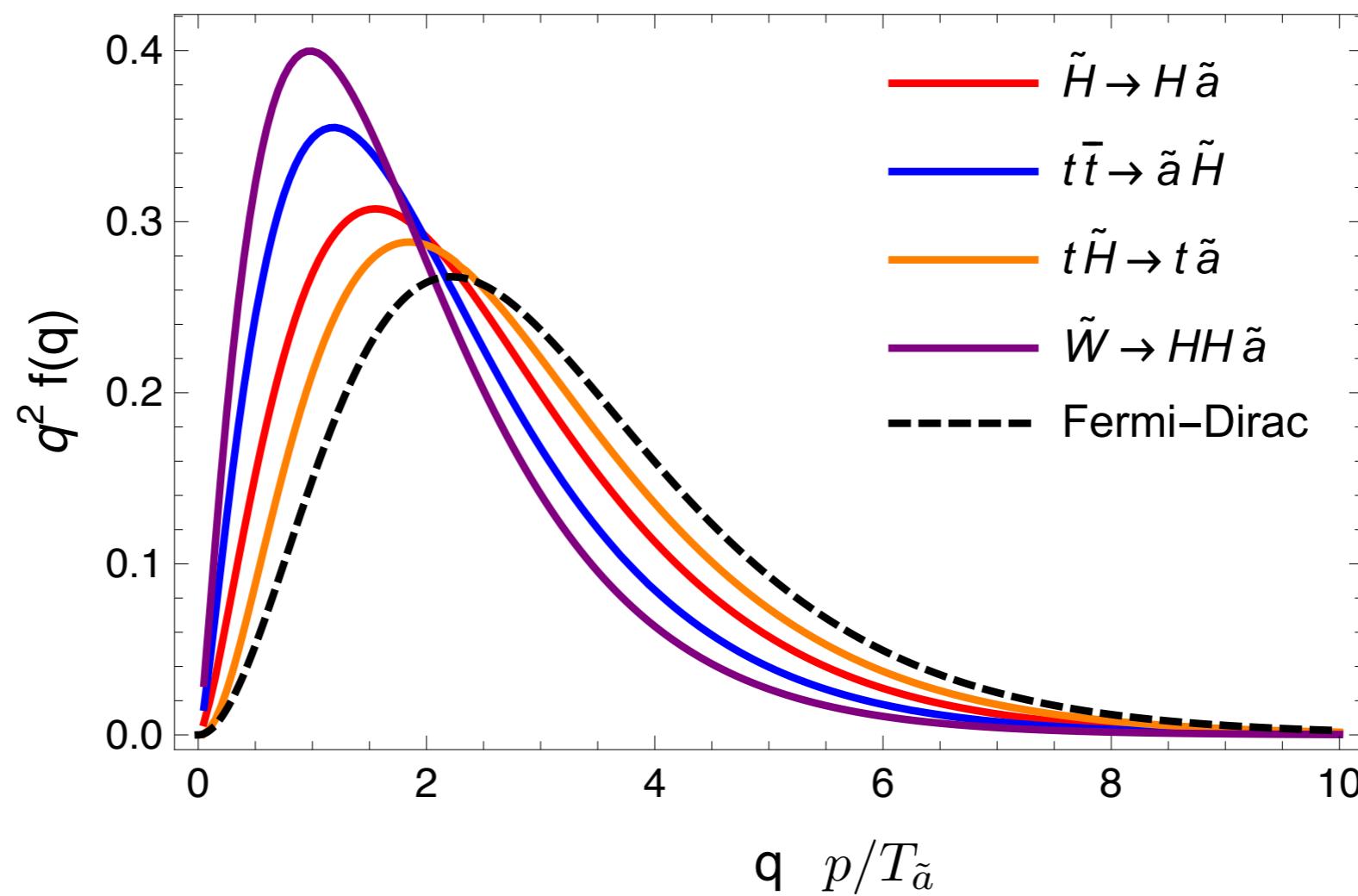
5. Freeze-in DMの、運動量分布とmatter power spectrum

6. Ly-alphaの制限を逃れる方法

# Axino の運動量分布：生成過程への依存性



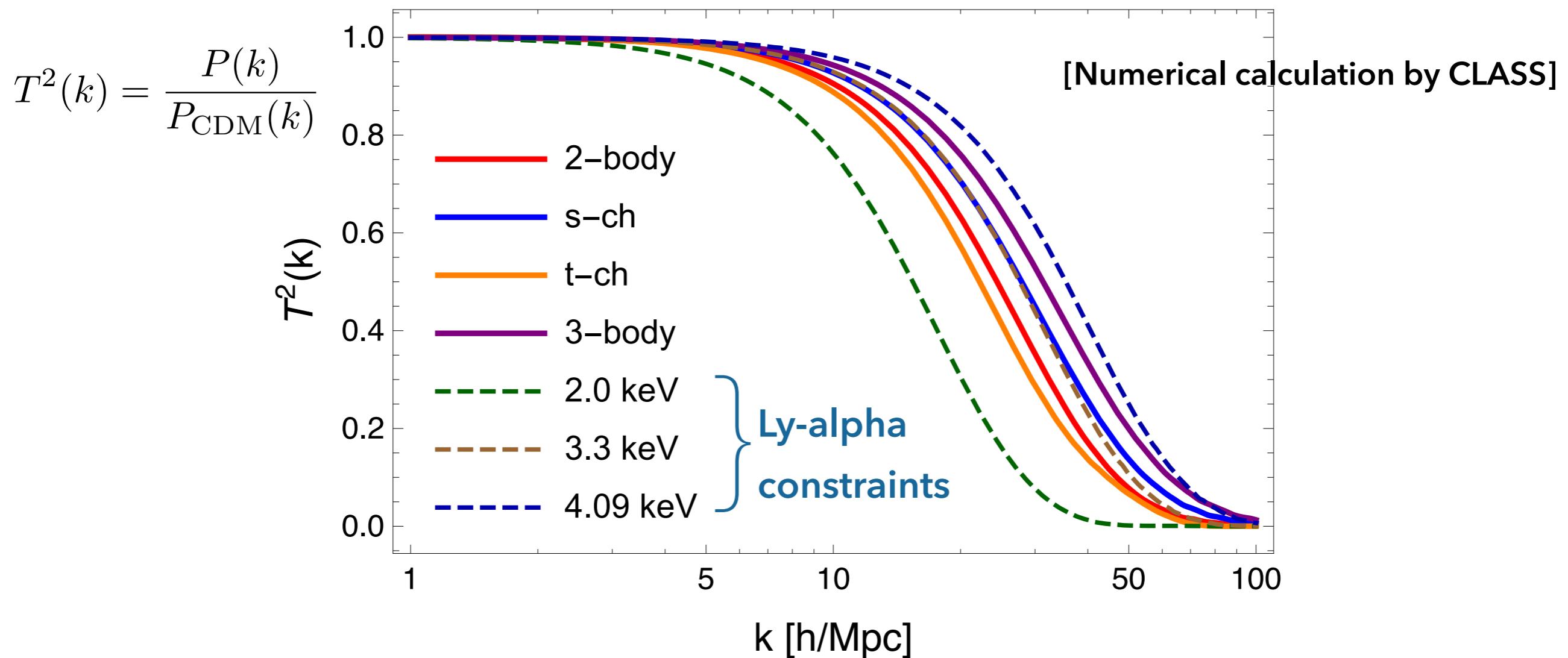
$$T_{\tilde{a}} = \left( \frac{s(T)}{s(T_{\text{dec}})} \right)^{1/3} T_{\text{dec}} = \left( \frac{g_*(T)}{g_*(T_{\text{dec}})} \right)^{1/3} T$$
$$\propto 1/a$$



- ▶ 分布は熱的でなくなり、生成過程に依存した形を取る
- ▶ Fermi-Dirac 分布より cold な分布になる

# Matter power spectrum: 生成過程への依存性

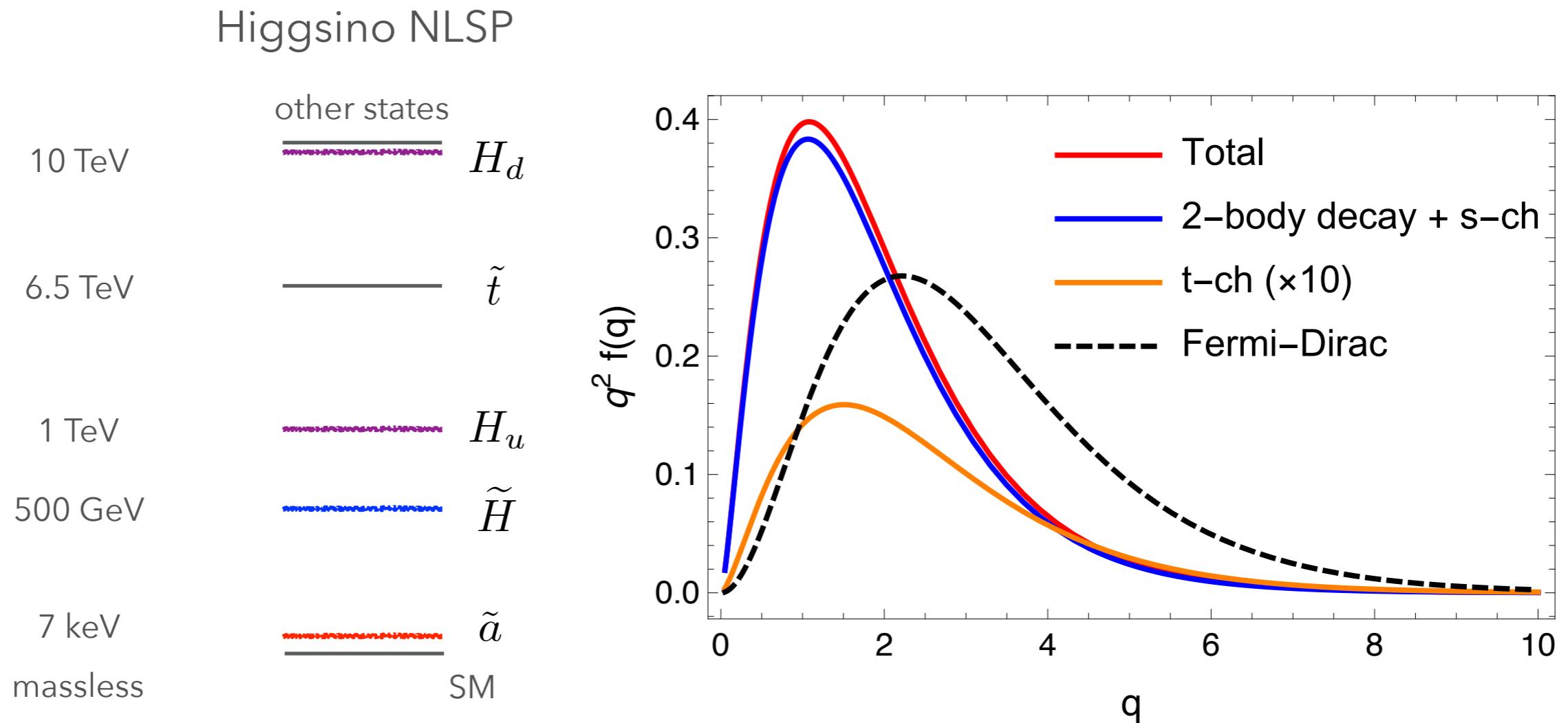
- ▶ 先程の運動量分布を Boltzmann code に input して計算
- ▶ Freeze-in は十分高い温度で起きたとし、 axino 温度は  $g_*(T_{\text{dec}}) = 106.75$  の温度から単に赤方偏移した



- ▶ 最も cold な 3-body decay からできた 7 keV axino も  $m_{\text{WDM}} > 4.09 \text{ keV}$  に disfavorされる

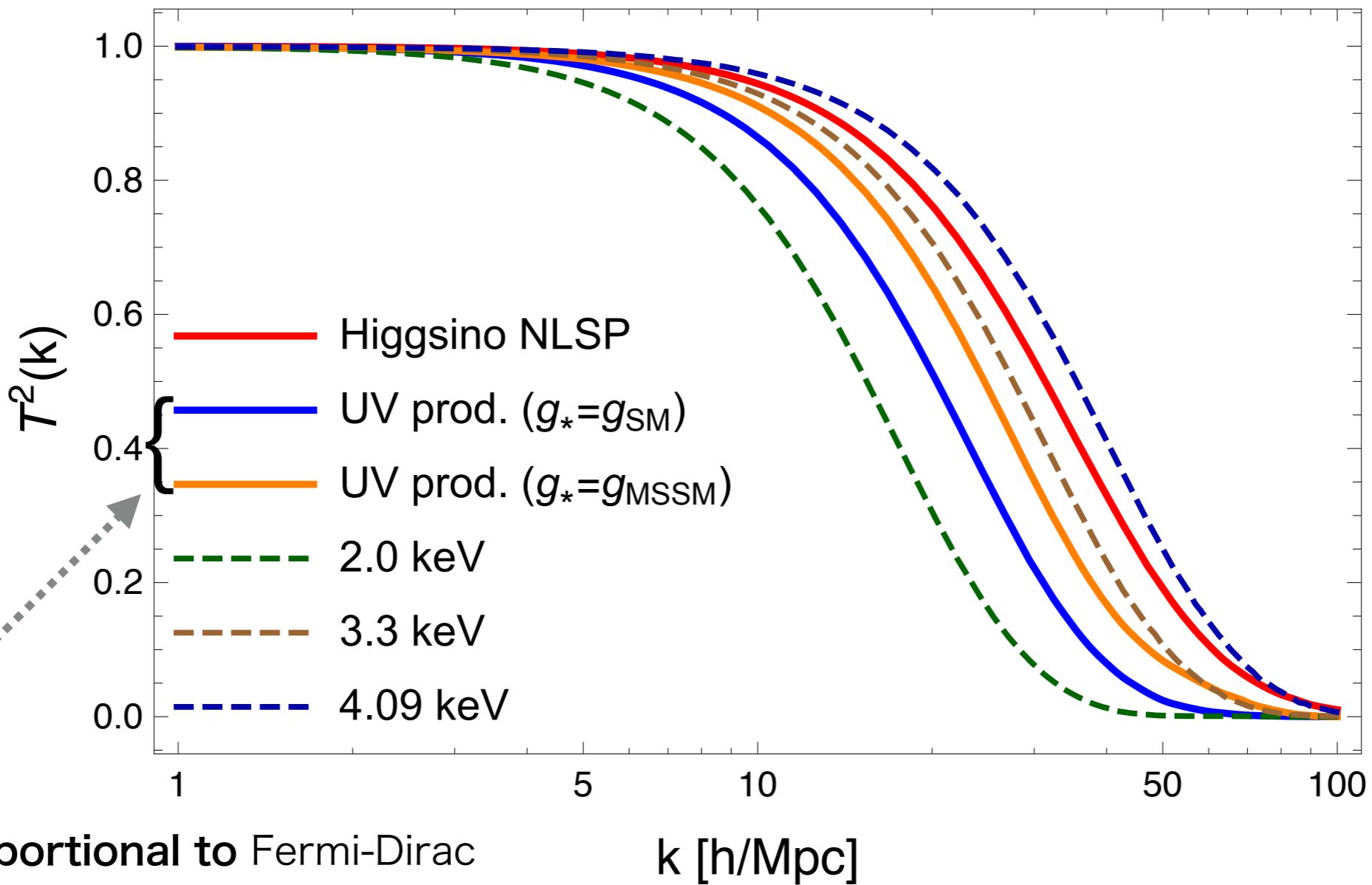
# Axino運動量分布：a realistic model

- ▶ Realistic なモデルではaxino の運動量分布は各過程からの重ね合わせ
- ▶ 先程のLy-alphaとのtensionを確かめるためbenchmark point を考える



Dominant production channel is  $H \rightarrow \tilde{H} + \tilde{a}$

# Matter power spectrum: a realistic model



distribution **proportional to** Fermi-Dirac  
(for comparison)

- benchmark pointは $m_{\text{WD}} > 4.09 \text{ keV}$ の制限とtensionがある
- mass スペクトルに強く依存するわけではないので一般に7 keV axino は厳しい

# Outline

1. 宇宙論

2. 構造形成とダークマター

3. SUSY DFSZ モデル

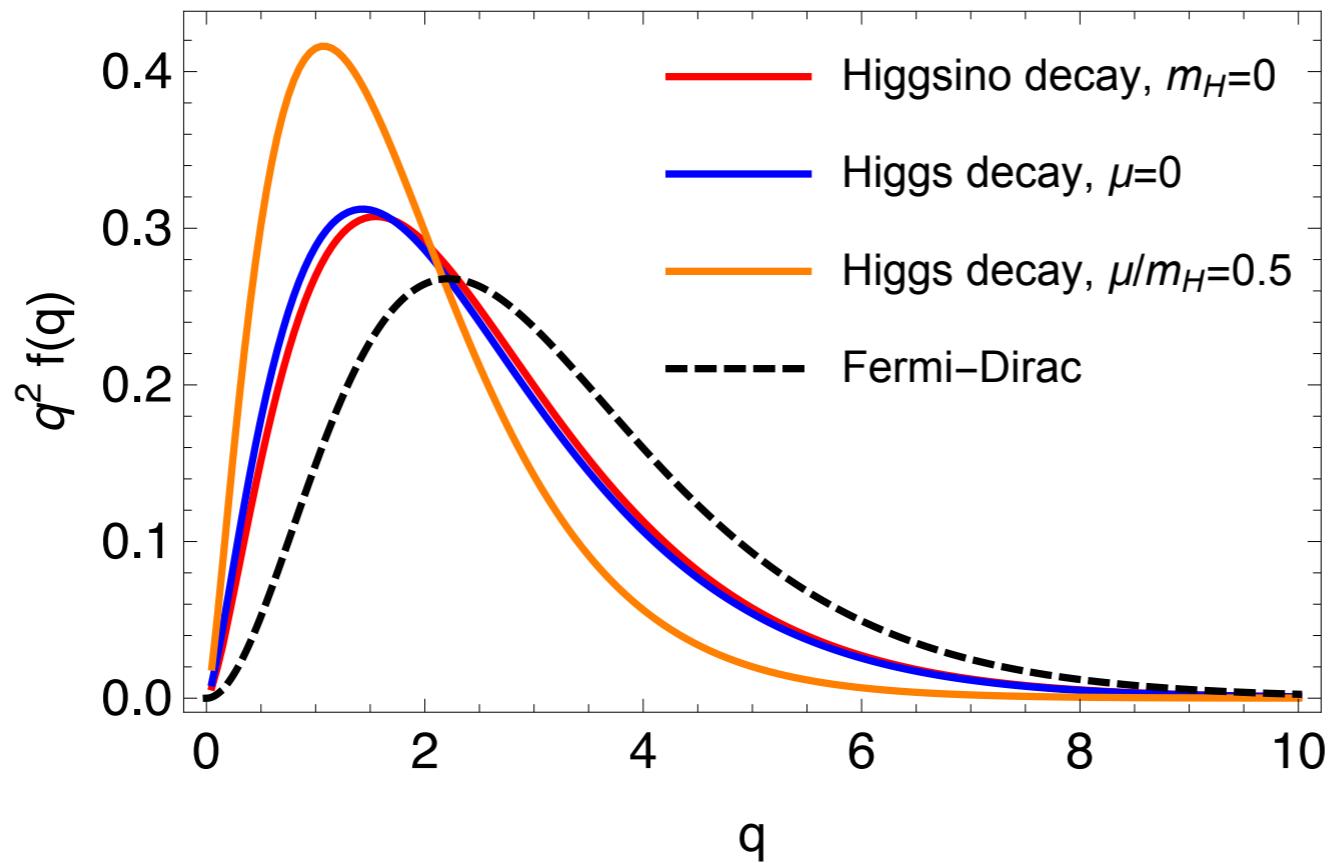
4. Freeze-in production of DM

5. Freeze-in DMの、運動量分布とmatter power spectrum

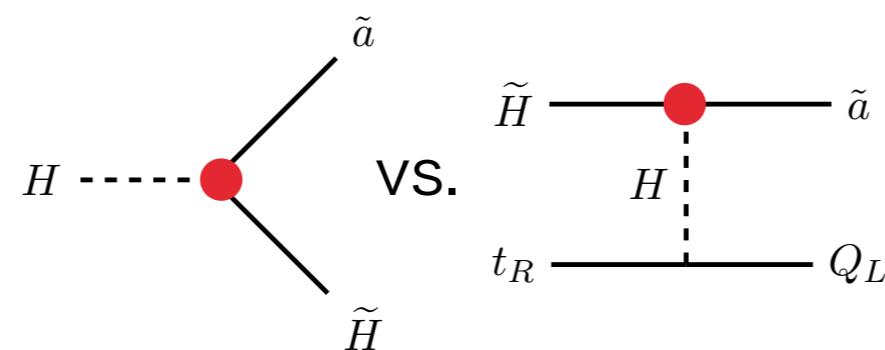
6. Ly-alphaの制限を逃れる方法

# How to evade Ly-alpha constraint?

## - Mass degeneracy



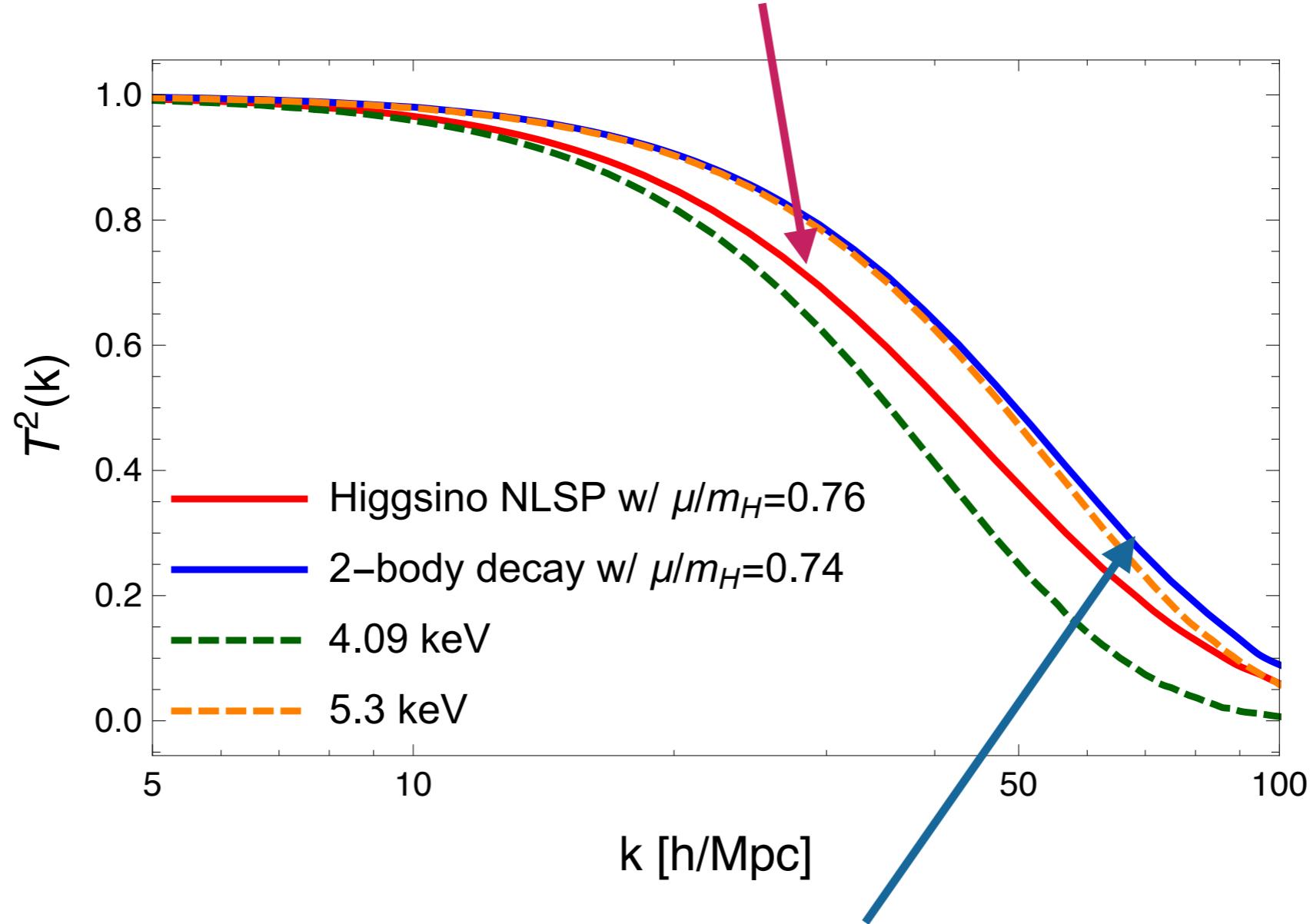
- ▶ 崩壊元の粒子と崩壊先の粒子の質量差が小さくなると、分布はcoldになる
- ▶ しかし縮退が強くなると生成量が **scattering > 2-body decay** となる



# How to evade Ly-alpha constraint?

## - Mass degeneracy

Realistic axino models w/ Higgsino NLSP cannot become colder than this line



If only 2-body decay exists,  $m_{\text{WDM}} > 5.3 \text{ keV}$  can be evaded

# How to evade Ly-alpha constraint?

## - Entropy production

もう一つの方法はaxinoの温度を下げるこ

$$\frac{dS}{dt} = - \sum_i \frac{\mu_i}{T} \frac{dN_i}{dt}$$

エントロピーの保存は非平衡過程があると成り立たない

axinoが生成された後に、SM粒子だけにエントロピー生成が起きたとする

するとaxinoの温度は相対的に下がる

$$\Delta = \frac{s_f}{s_i}$$

$$T_{\tilde{a}} \rightarrow T_{\tilde{a}} \Delta^{-1/3}$$

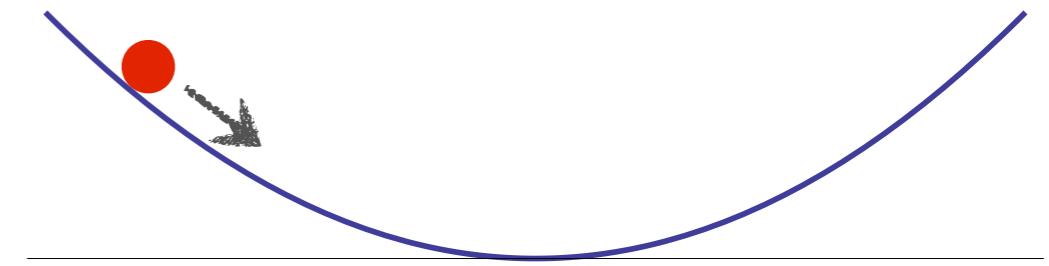
特に化学平衡から外れた粒子のlate timeでの崩壊はエントロピーを生成する

# How to evade Ly-alpha constraint?

## - Entropy production

- ▶ SUSY axion モデルではsaxionがcoherent oscillationで作られる

$$Y_s^{\text{CO}} \simeq 1.9 \times 10^{-6} \left( \frac{\text{GeV}}{m_s} \right) \left( \frac{\min[T_R, T_s]}{10^7 \text{GeV}} \right) \left( \frac{s_0}{10^{12} \text{GeV}} \right)^2$$

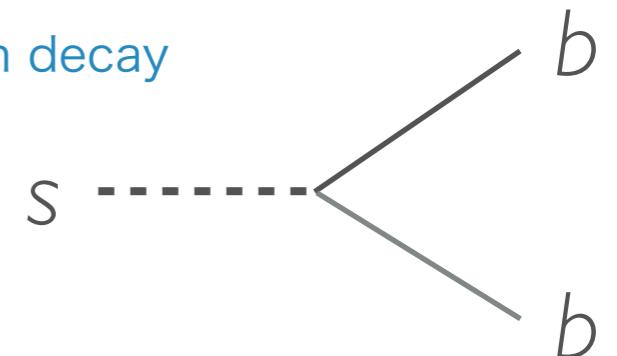


- ▶ saxion domination

$$T_e^s = \frac{4}{3} m_s Y_s^{\text{CO}} \simeq 2.5 \times 10^2 \text{GeV} \left( \frac{\min[T_R, T_s]}{10^7 \text{GeV}} \right) \left( \frac{s_0}{10^{16} \text{GeV}} \right)^2$$

- ▶ その後、 axino 生成の後にsaxionがSM粒子に崩壊する

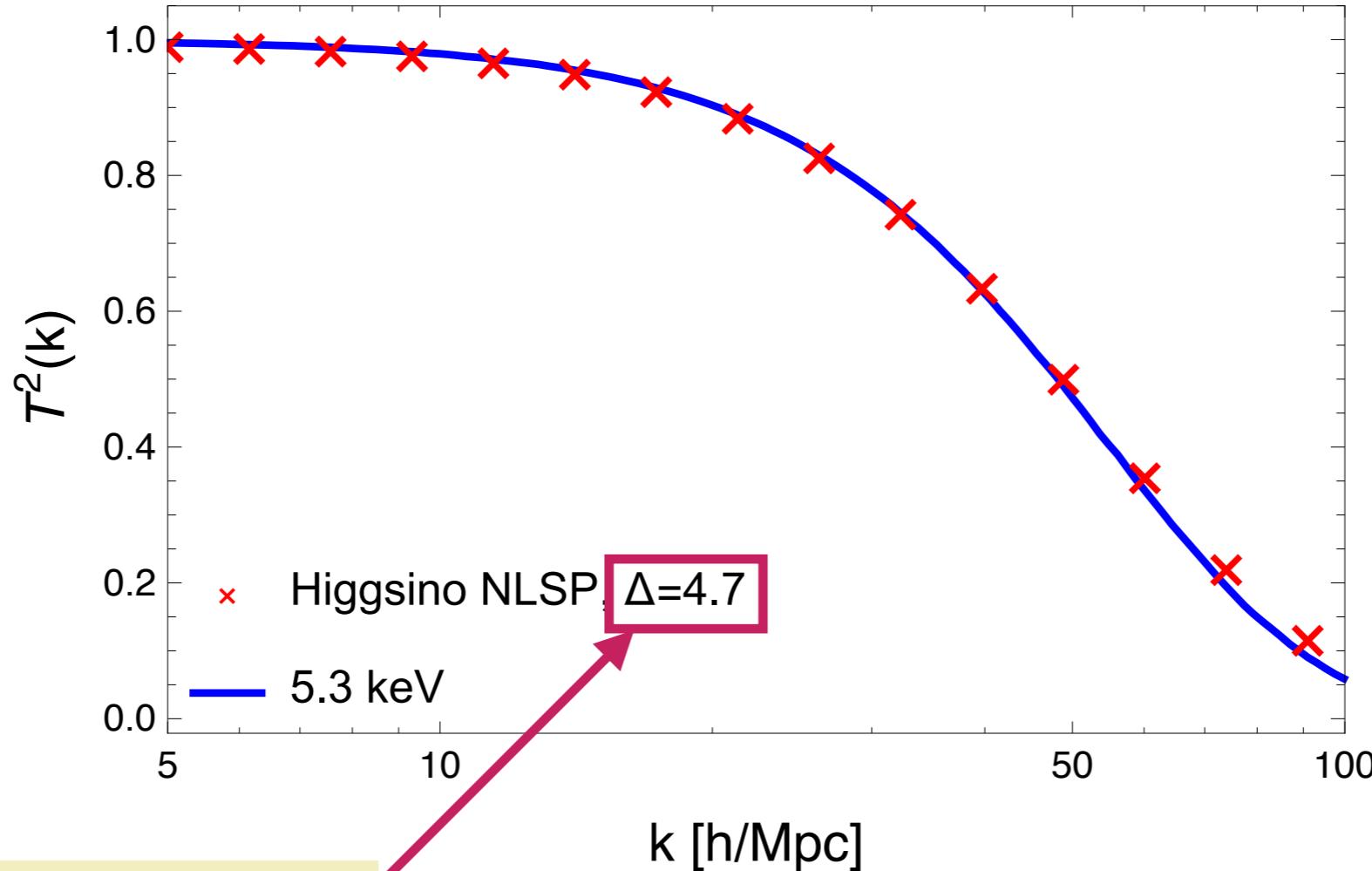
- エントロピー生成  $\Delta = \frac{s_f}{s_i} \simeq \frac{T_e^s}{T_D^s}$  Temperature after saxion decay
- Axino 温度が下がる  $T_{\tilde{a}} \rightarrow T_{\tilde{a}} \Delta^{-1/3}$



# How to evade Ly-alpha constraint?

## - Entropy production

- With  $\Delta=4.7$ , the strongest Ly-alpha constraint  $m_{\text{WDM}} > 5.3 \text{ keV}$  is evaded!



$v_{\text{PQ}} = 2.5 \times 10^{10} \text{ GeV}$   
 $m_s \simeq 110 \text{ GeV}$   
 $T_D^s \simeq 53 \text{ GeV}$

$k$  [h/Mpc]

DM残存量もちゃんと説明できる！

$$\Omega_{\tilde{a}} h^2 \simeq 0.1 \left( \frac{4.7}{\Delta} \right) \left( \frac{2.5 \times 10^{10} \text{ GeV}}{v_{\text{PQ}}} \right) \left( \frac{m_{\tilde{a}}}{7 \text{ keV}} \right)$$

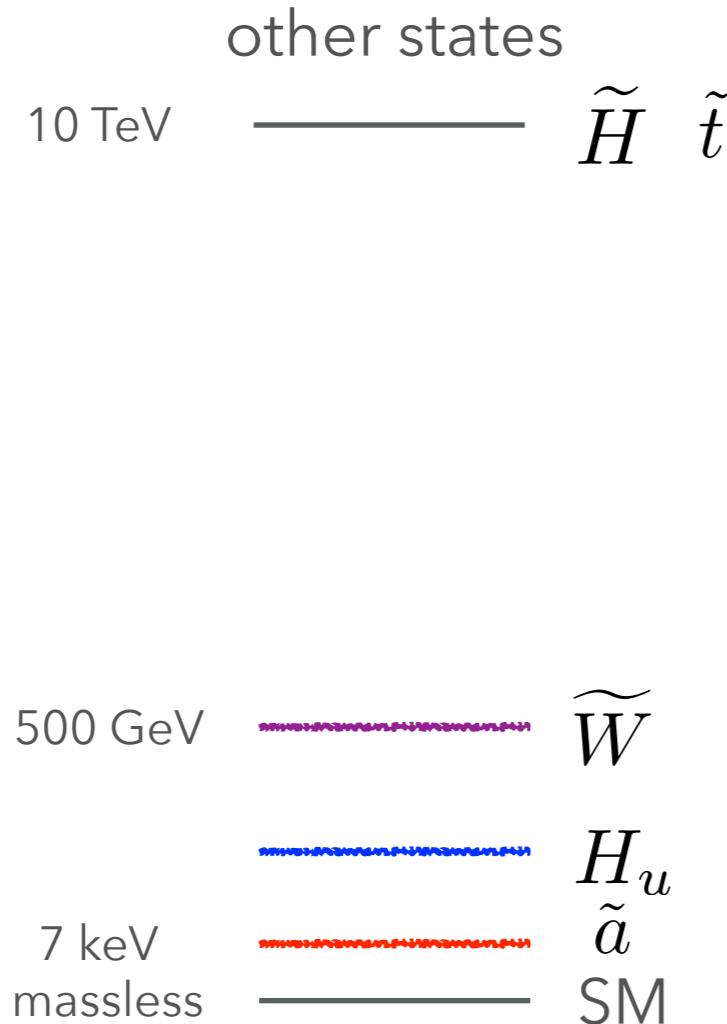
# Summary

- ▶ 3.5 keVのX線excess にmotivate された7 keV DMモデルはLy-alphaの観測ときちんと比較しなければならない
- ▶ そのためにはaxinoの運動量分布をちゃんと計算する必要がある
- ▶ 7 keV axinoは（そしておそらく他の多くの7keV freeze-in DMも）Ly-alphaの制限 $m_{\text{WDM}} > 5.3 \text{ keV}$ , 4.09 keVとtensionがある
- ▶ SUSY axion modelではsaxionからのエントロピー生成によってこの制限を逃れることができる!

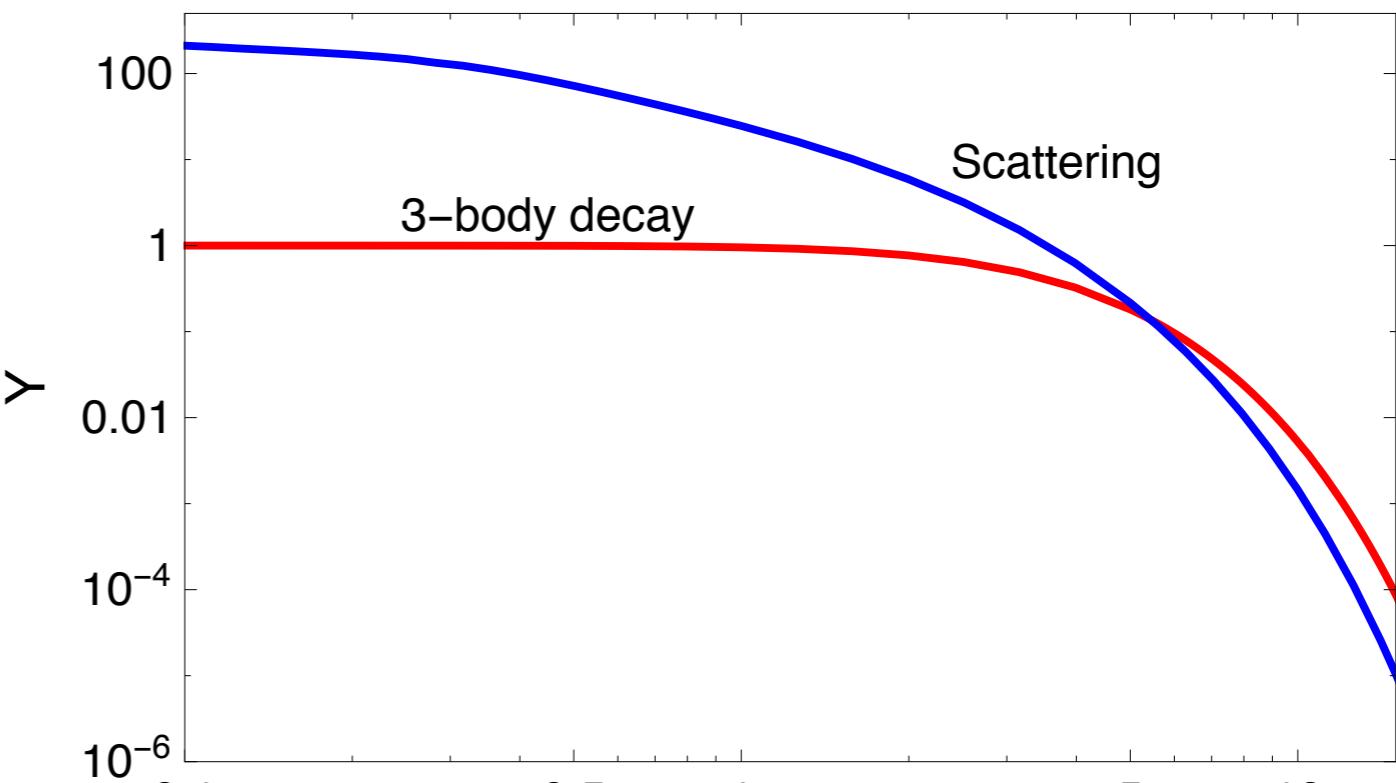
# Backup

# Another benchmark

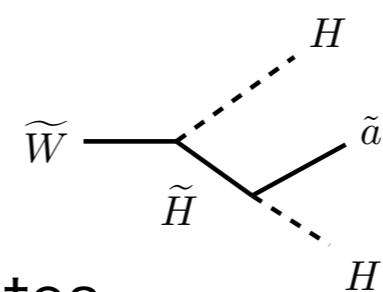
Wino NLSP



3-body decay vs. scattering



$M_2/T_R$



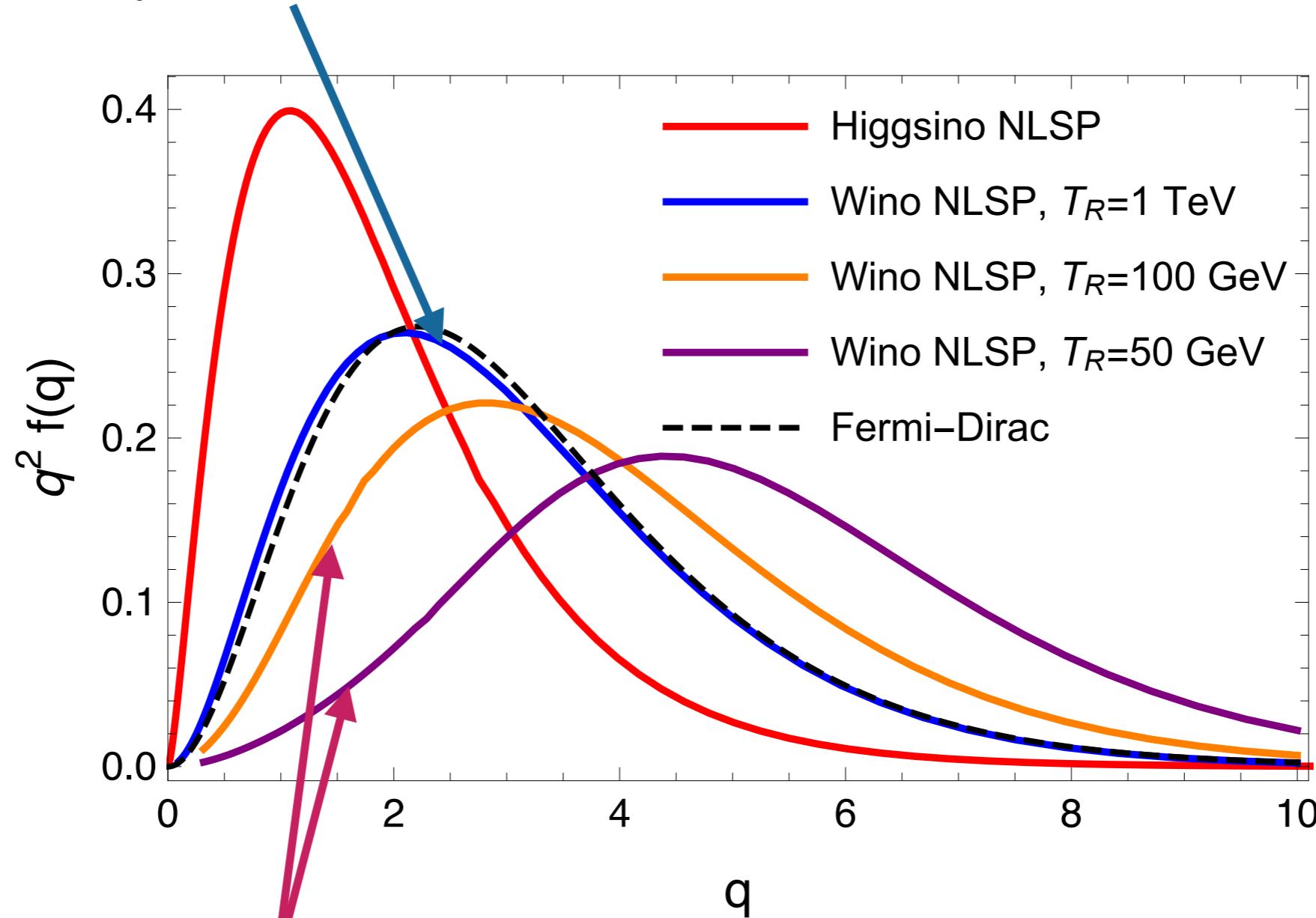
= dim. 5

→ efficient at UV

- ▶  $T_R > M_2$  : 2-to-2 scattering dominates
- ▶  $T_R < M_2/5$  : Wino 3-body decay dominates

# Another benchmark

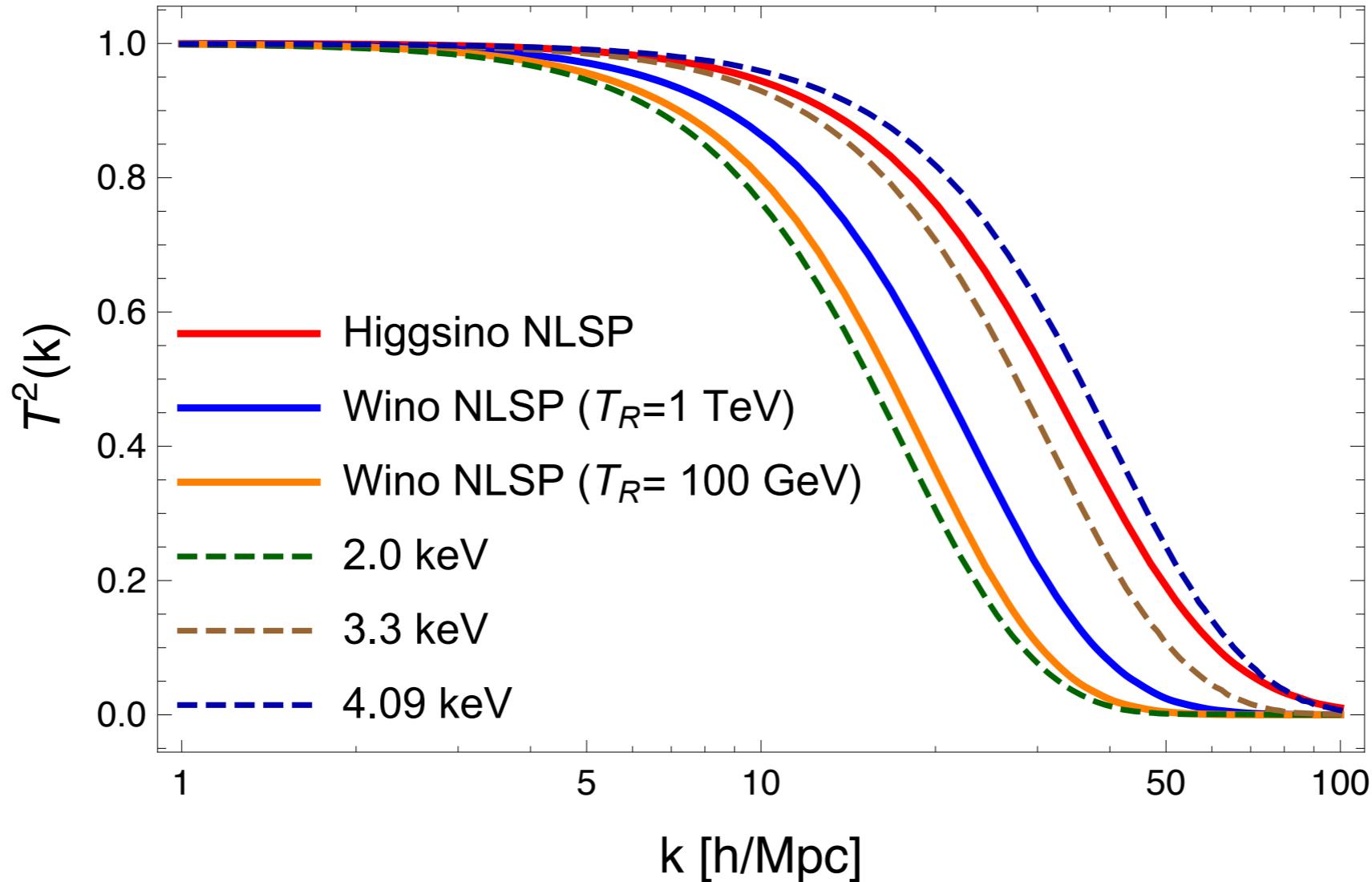
UV production produces thermal-like distribution



3-body decay dominant, but **hotter** than thermal one

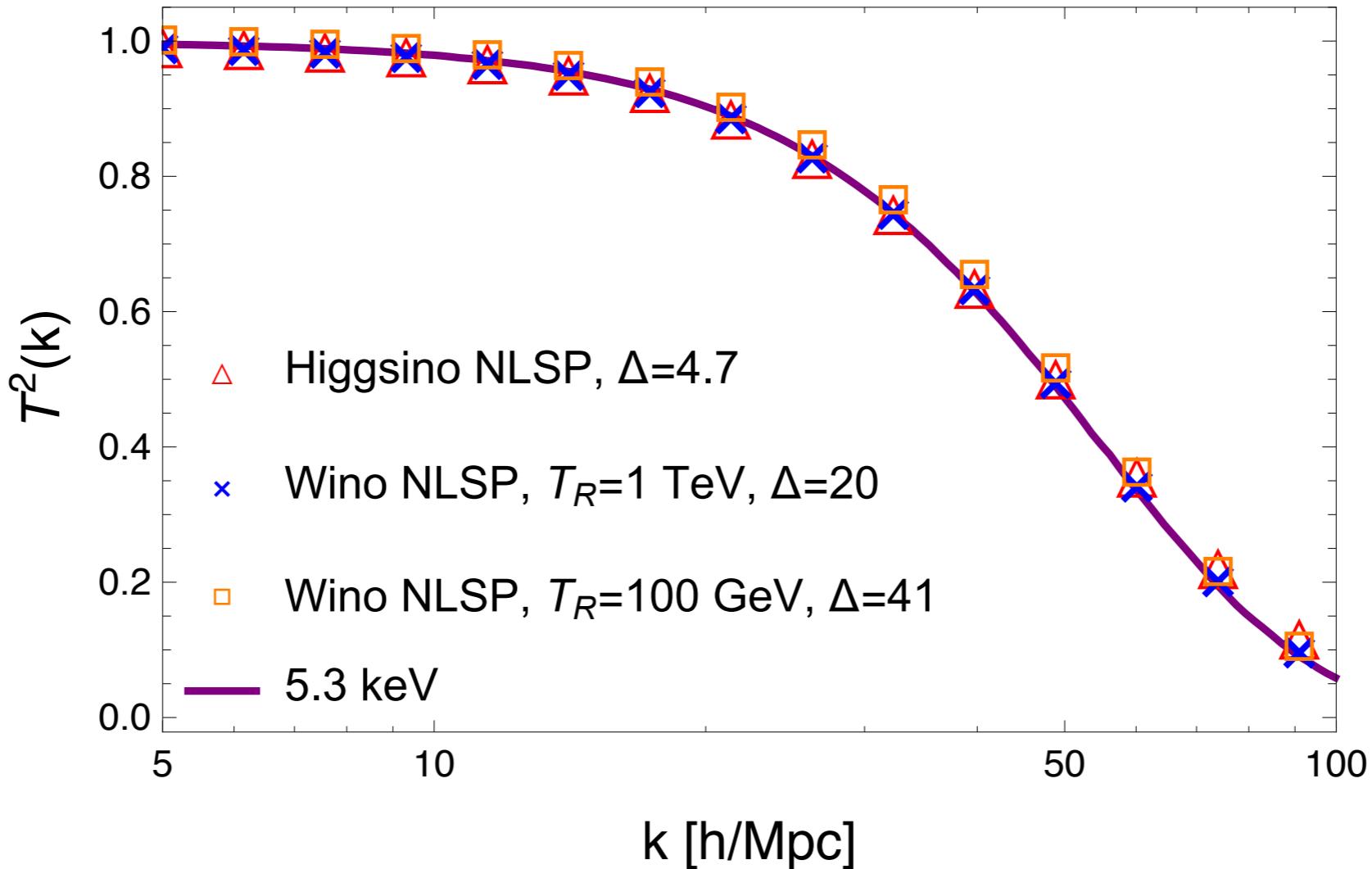
$T_R < M_2/5$  implies axino energy ( $\sim M_2/3$ ) is larger than temperature

# Another benchmark



- ▶ Wino NLSP cases are disfavored by  $m_{\text{WDM}} > 3.3 \text{ keV}$

# Another benchmark



- ▶ Saxion decay alleviates the tension
  - ▶ But  $\Delta$  is large and difficult to realize without spoiling BBN
- $T_e^s \sim 2.5 - 25$  MeV (saxion domination)

- ▶ 110 GeV saxion decay into SM fermion pair, and dominantly into  $bb$
- ▶ Because it comes from mixing with Higgs, decay rate is proportional to yukawa
- ▶ Anomaly term for gluon comes from MSSM quark (squark) loop, so it is not proportional to reheating temperature unless it is below squark or gluino mass