

eV ダークマター



TOKYO METROPOLITAN UNIVERSITY

東京都立大学

殷 文 (東京都立大学)

@2026/8/27, PPP2026

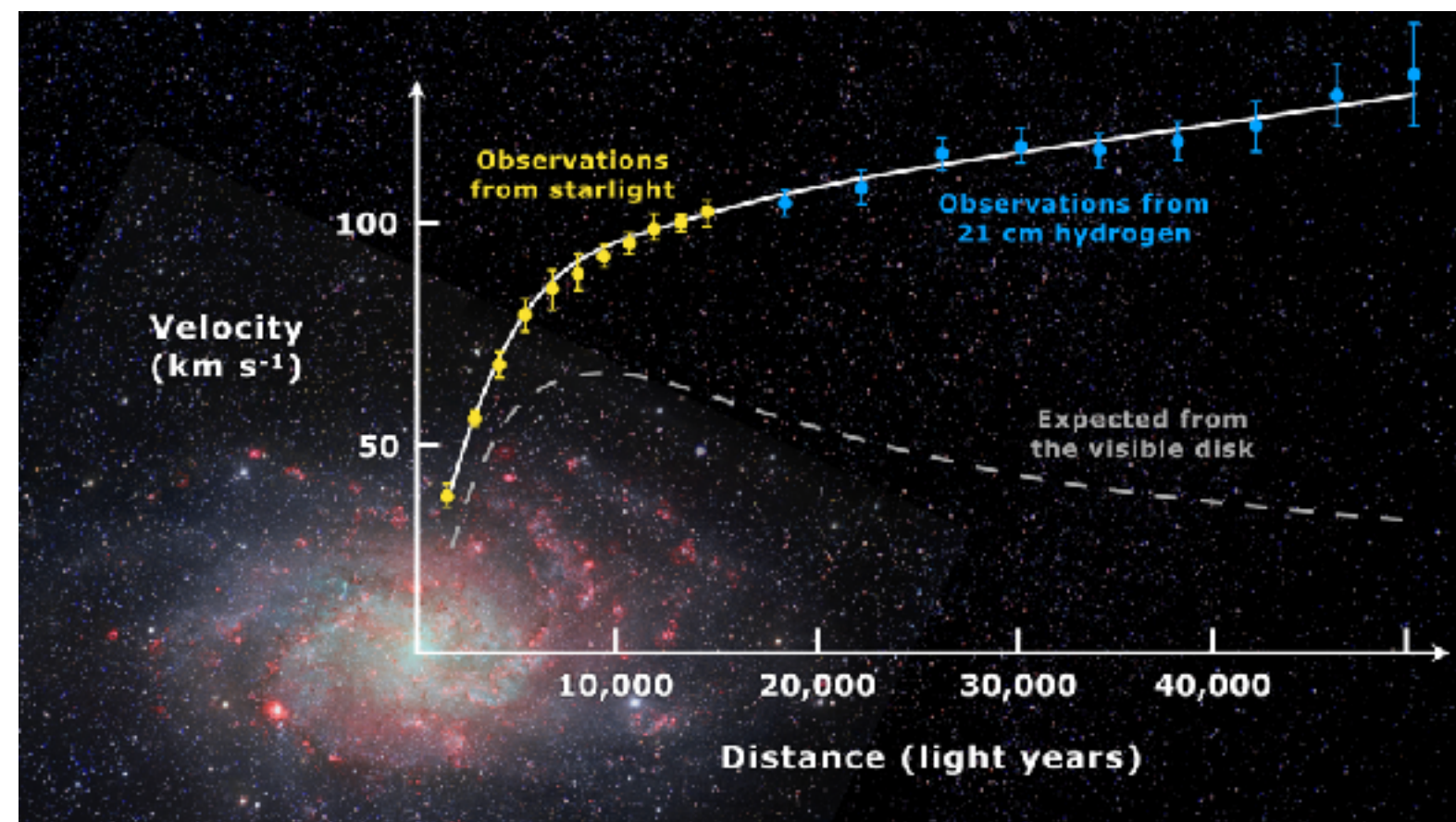
今日のプラン

- 1. ダークマター
- 2. eVダークマターの生成理論
- 3. eVダークマターとバリオン数
- 4. eVダークマターの探索
- 5. まとめ

A deep space image featuring a dense field of galaxies and stars. The background is a dark blue/black space filled with numerous small, distant galaxies and stars. Several bright, out-of-focus galaxies are visible, including a large, glowing yellowish-white one in the upper left and a bright blue one in the upper right. A prominent, bright pinkish-red nebula or galaxy core is located in the center-right. Faint, thin white lines crisscross the image, likely representing star trails or orbital paths.

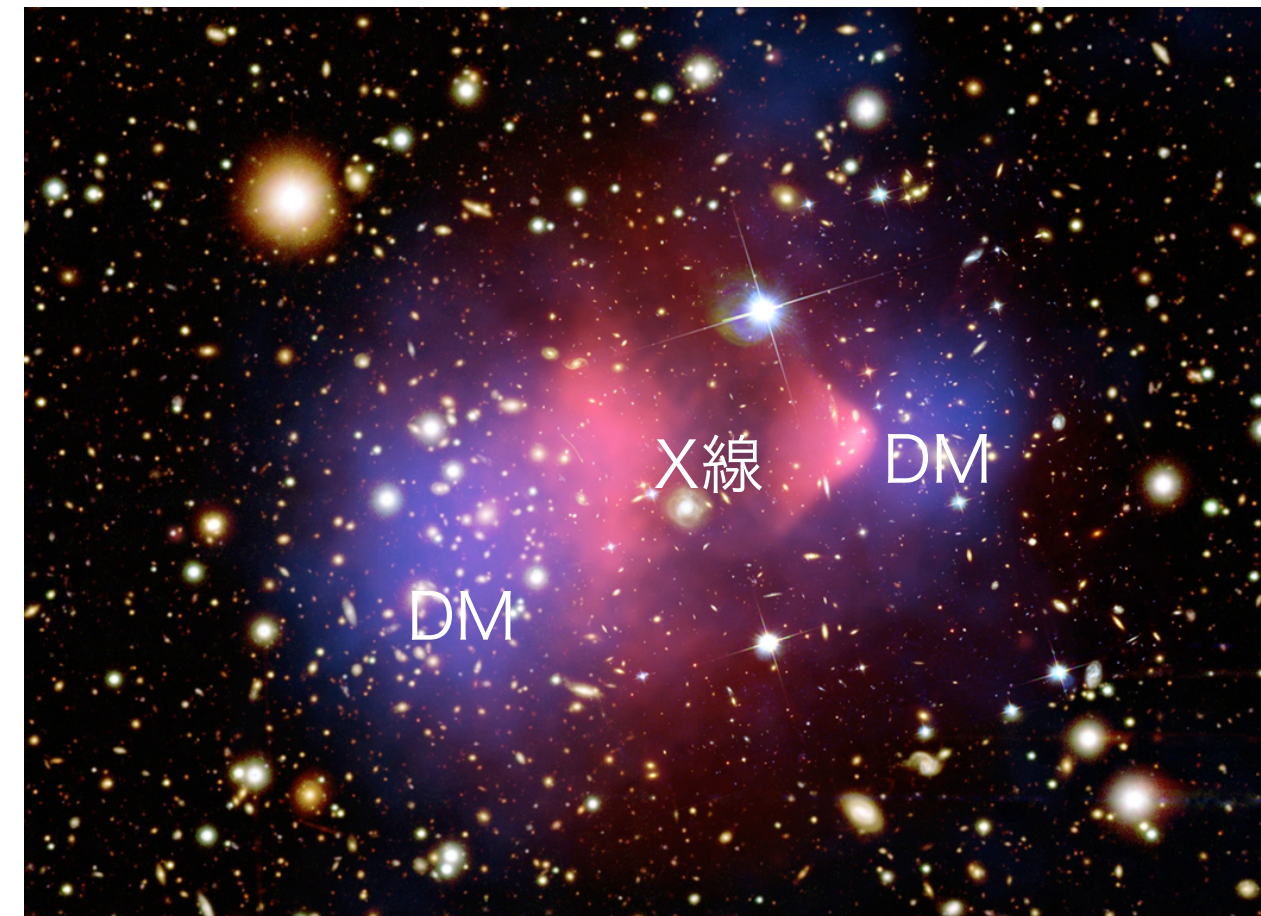
・1.ダークマター

・ダークマターの正体は約100年来の宇宙論、天文学、素粒子論の謎



銀河回転曲線

[wikipedia](#)



銀河団衝突

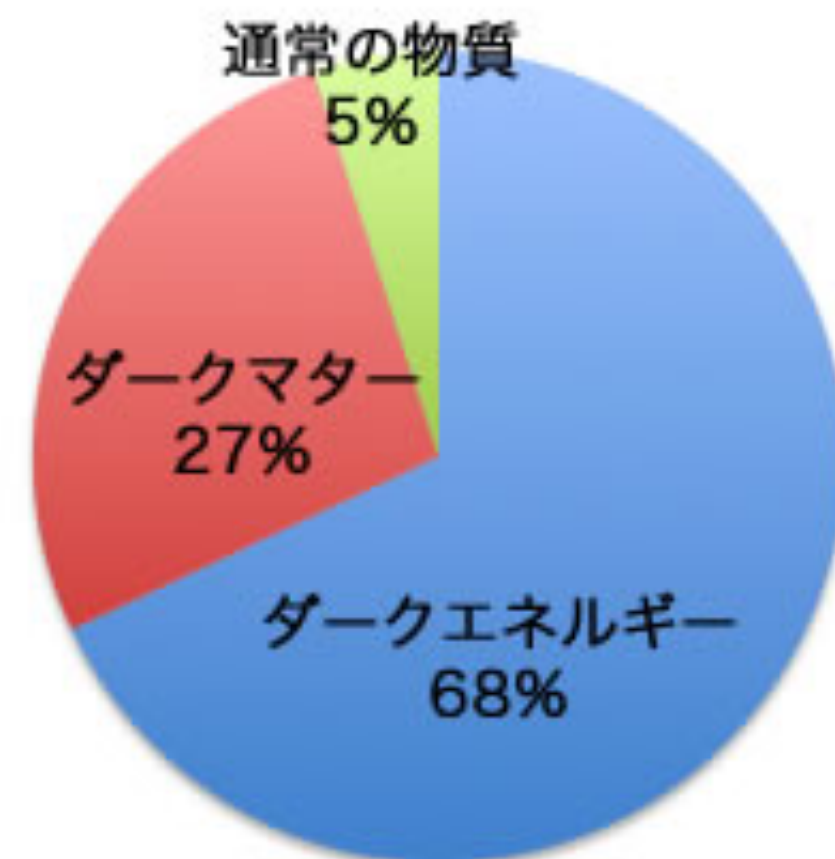
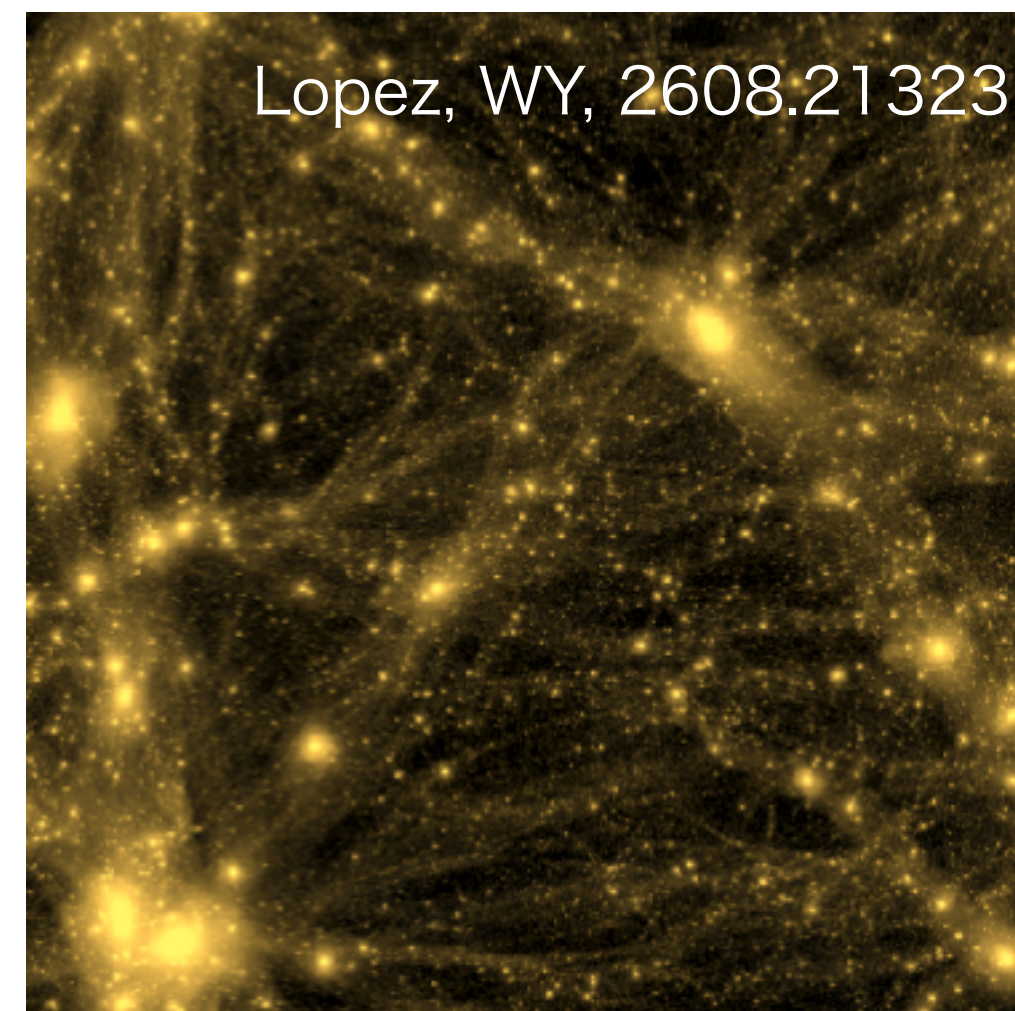


図1：宇宙の組成

宇宙マイクロ波背景放射



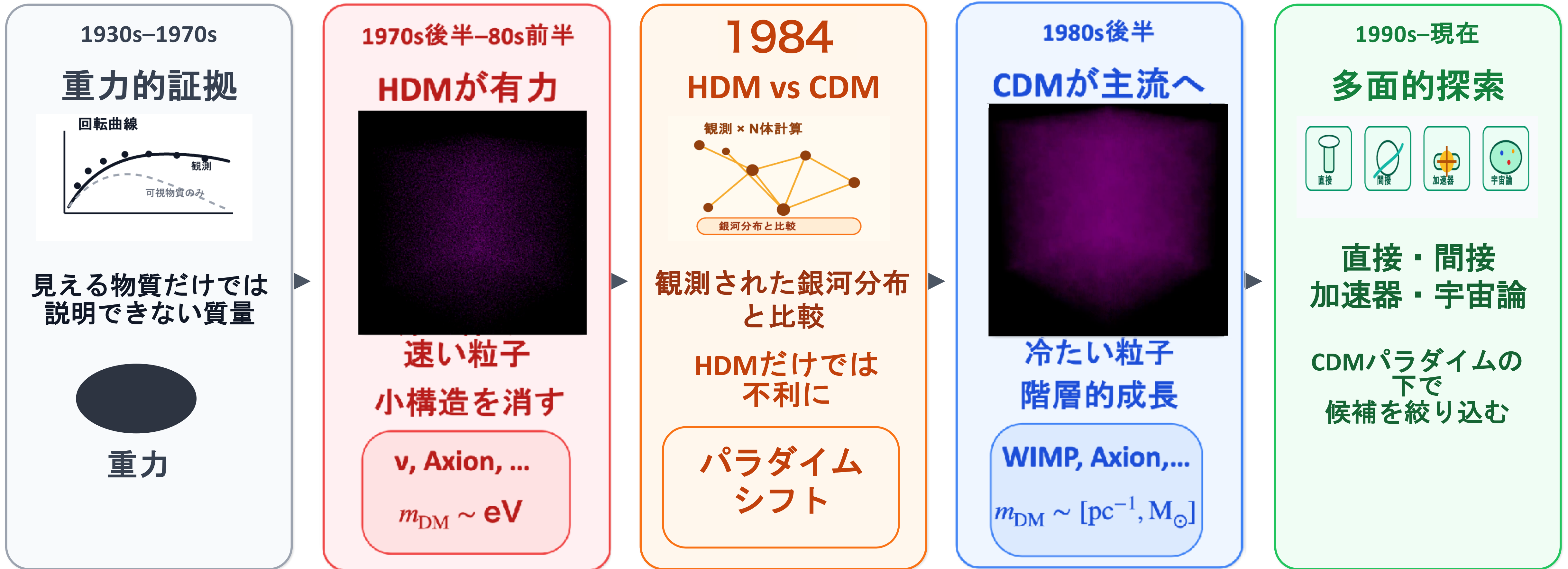
構造形成数値計算

・ダークマターの現代知識

- ・寿命が極めて長い
- ・電荷を持たない
- ・冷たい
(ほぼ止まっている。)
- ・銀河周りに局在する
- ・存在量 ($\rightarrow T_{\text{eq}} \sim 1\text{eV}$)

Hot Dark Matter(HDM) から Cold Dark Matter(CDM) へ

Blumenthal et al 1984



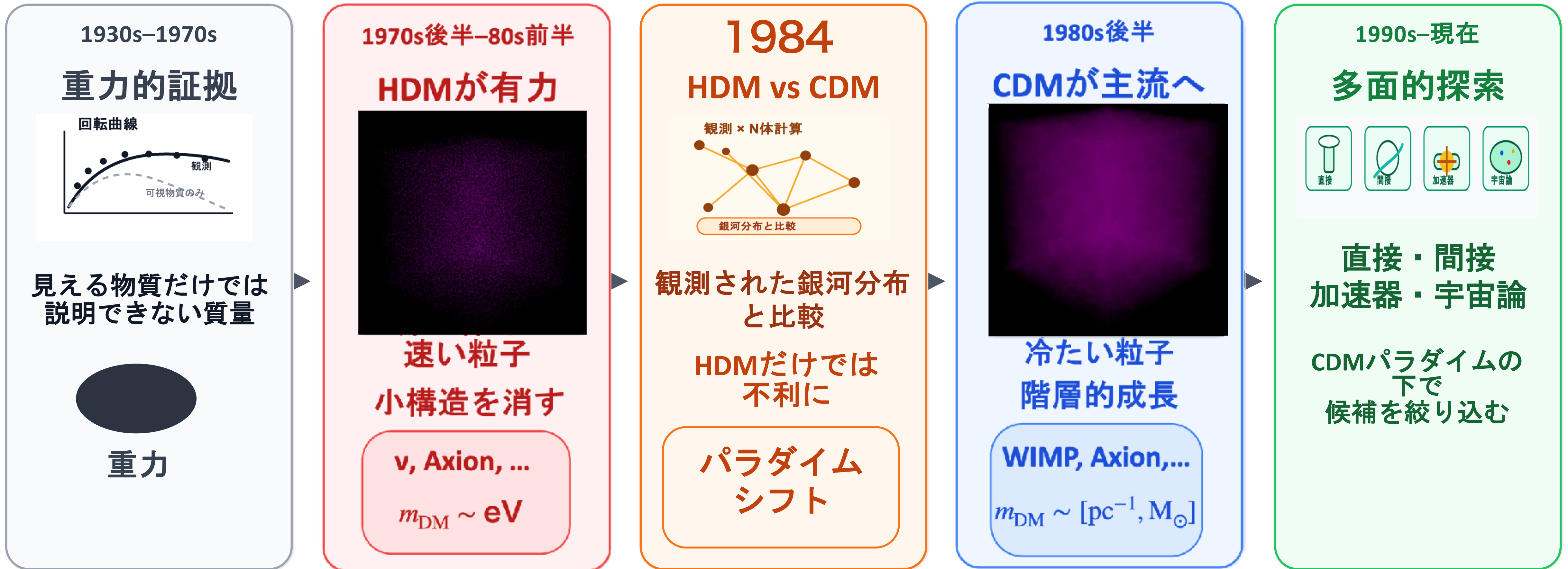
HDM : 速い粒子が大規模構造を作る

CDM : 遅い粒子が小構造から成長する

• eV scale dominant DM は1984以降あまり研究されなくなった。

Hot Dark Matter(HDM) から Cold Dark Matter(CDM) へ

Blumenthal et al 1984



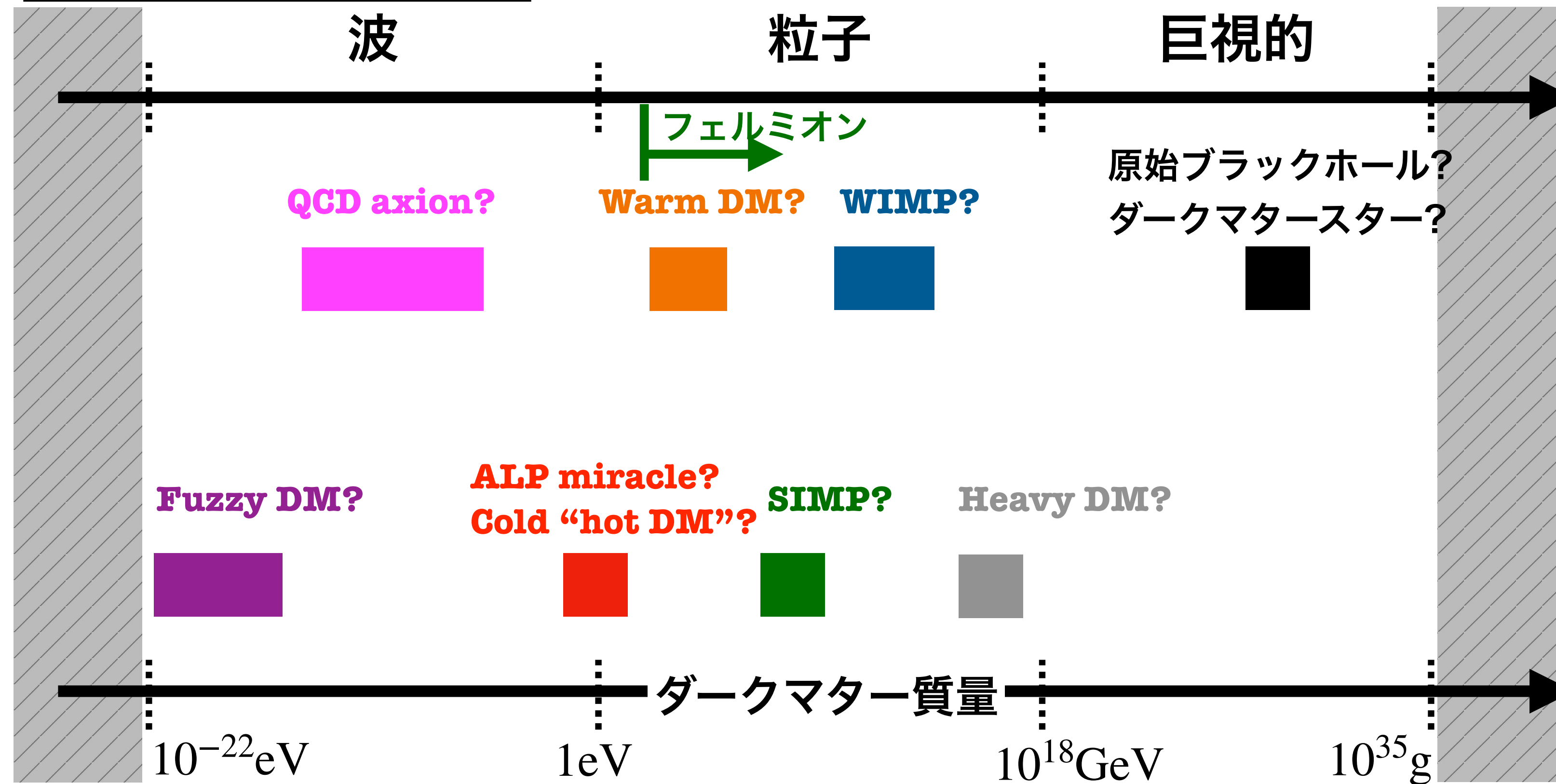
HDM : 速い粒子が大規模構造を作る

CDM : 遅い粒子が小構造から成長する

• eV scale dominant DM は1984以降あまり研究されなくなった。

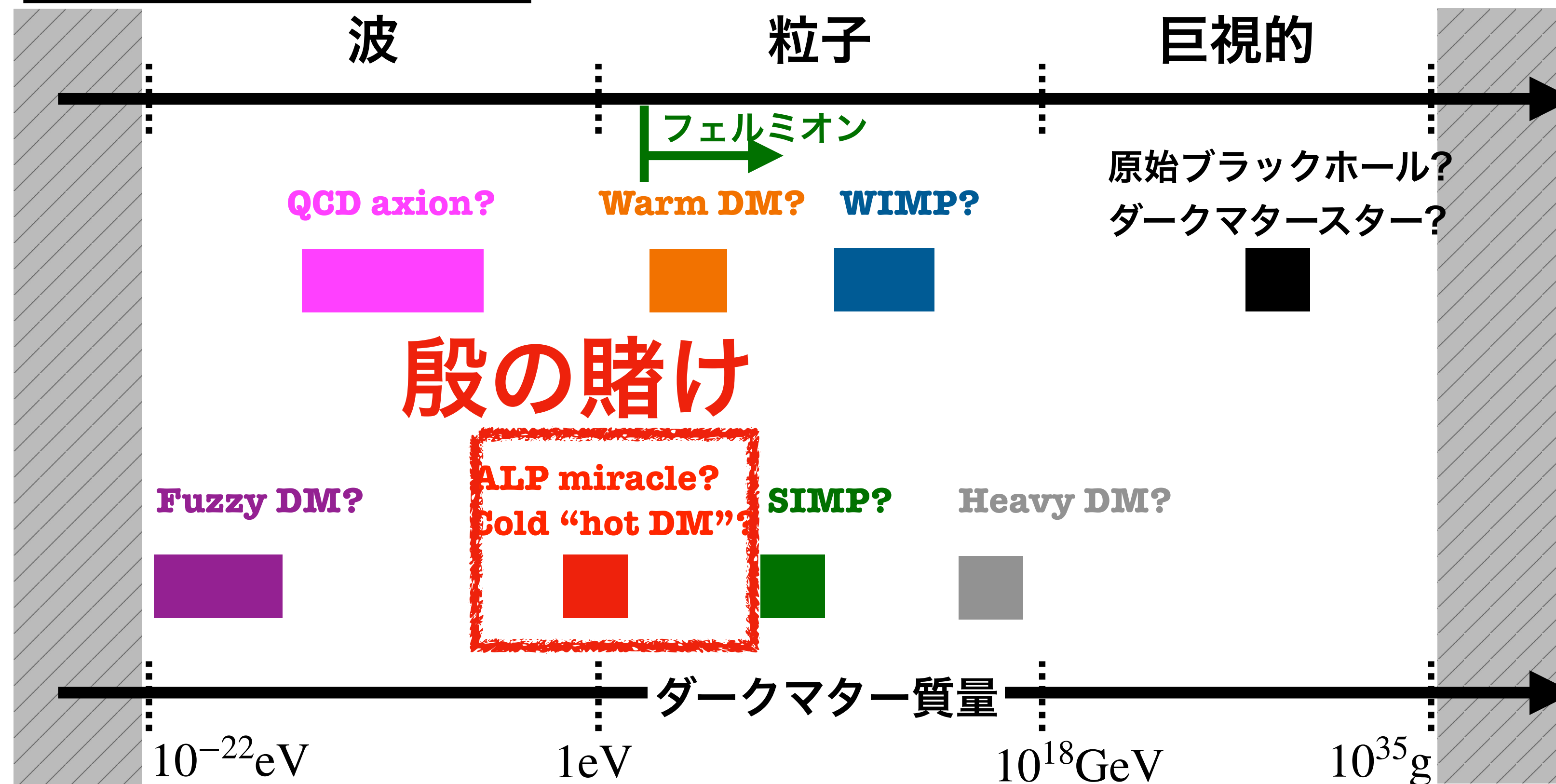
ダークマターの正体は何か？

ダークマター候補



ダークマターの正体は何か？

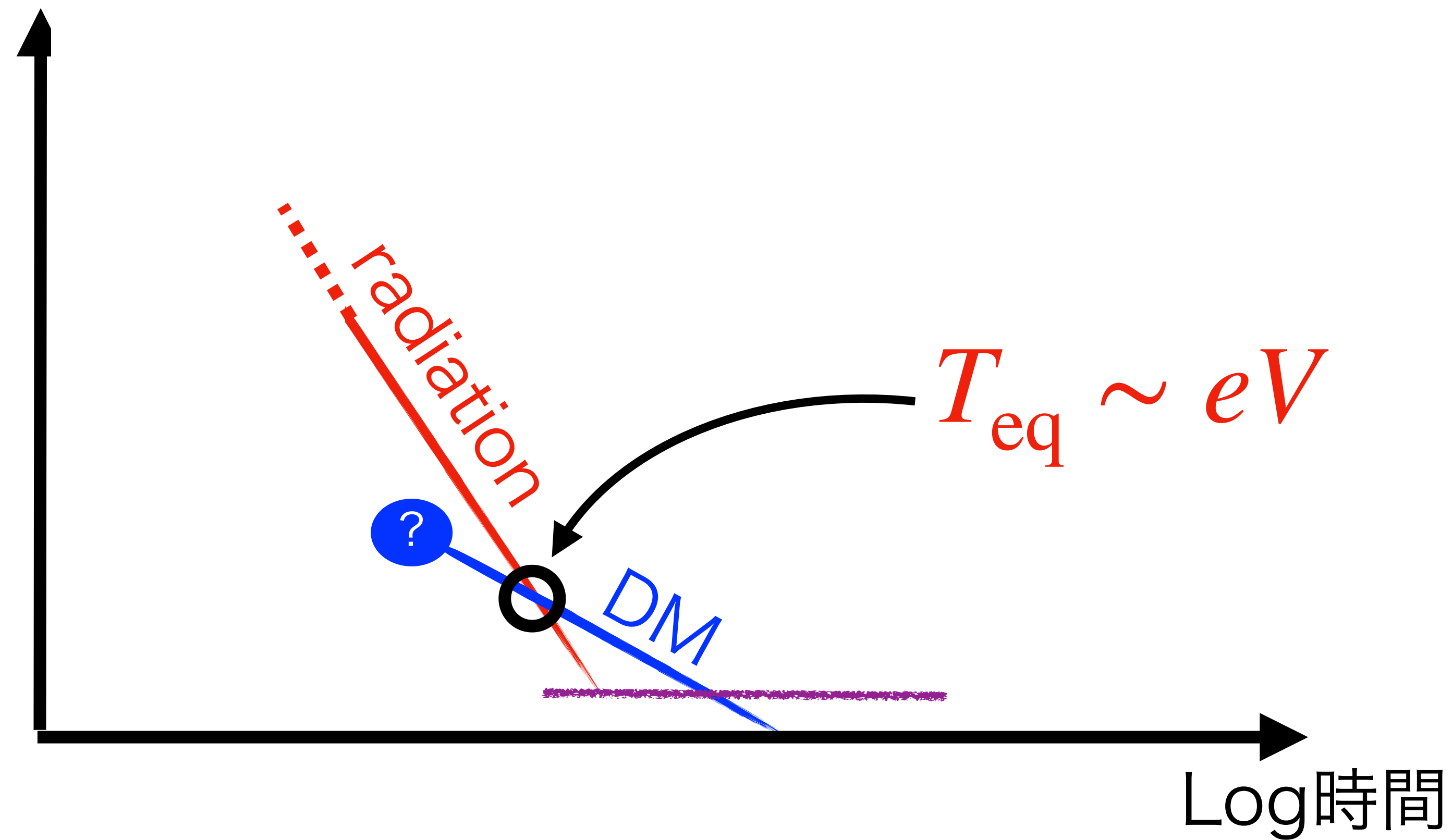
ダークマター候補



why eV?

Hot DM

Log(宇宙のエネルギー密度), $\log(\rho)$

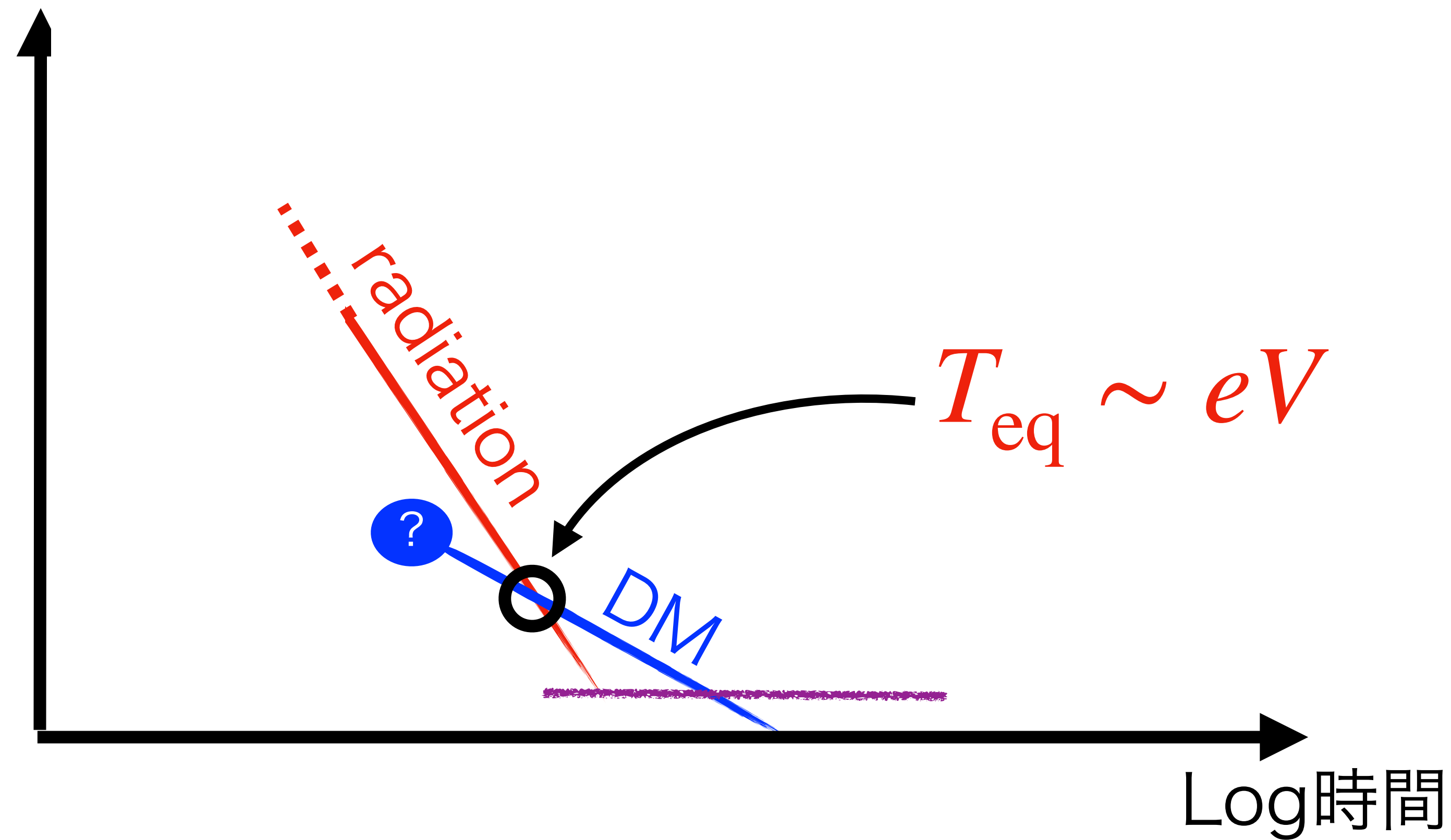


See also ALP miracle: Daido, Takahashi, WY, 1702.03284, 1710.11107

why eV?

Hot DM

Log(宇宙のエネルギー密度), $\log(\rho)$



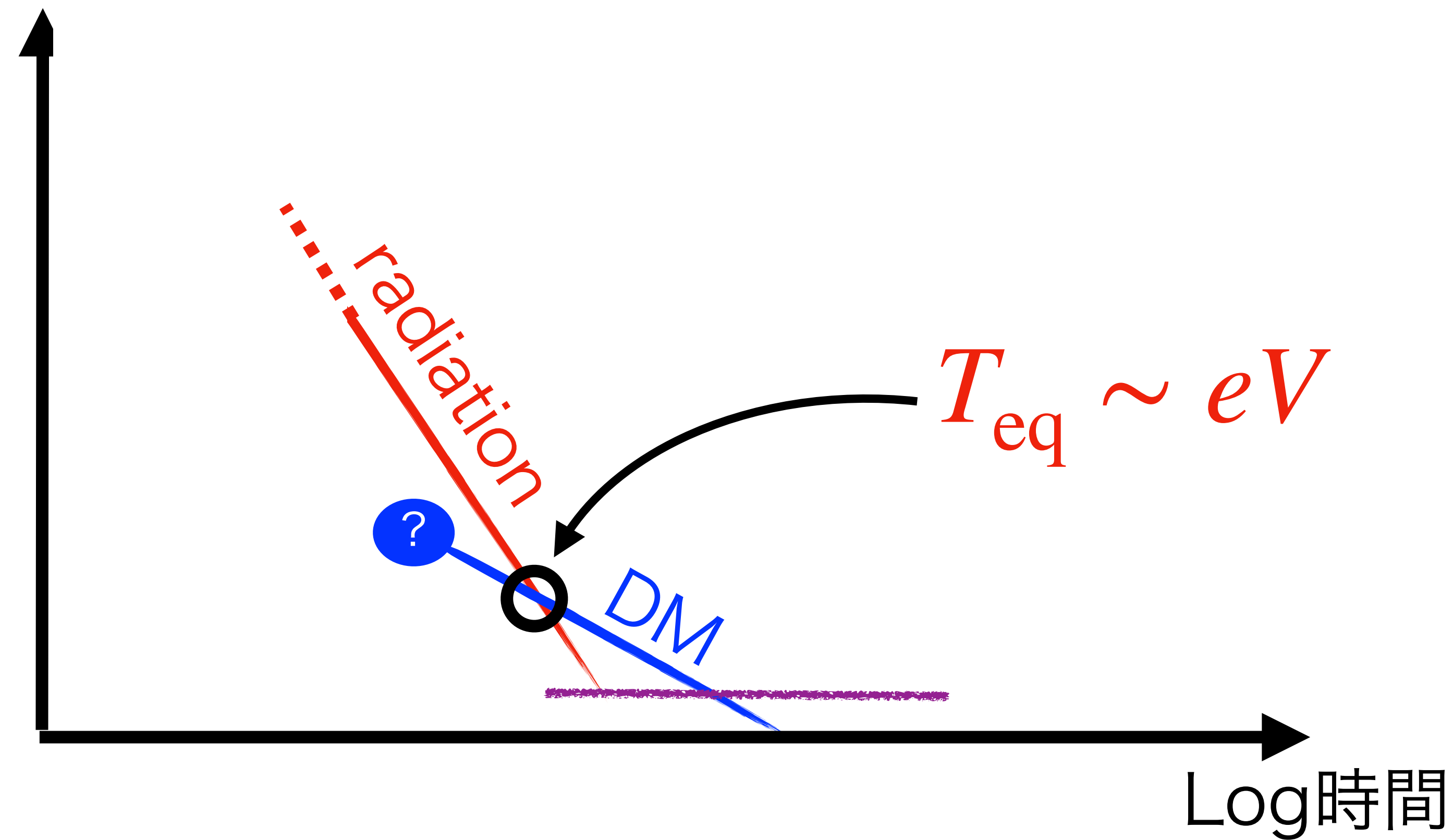
$$\text{If } n_{\text{DM}} \sim T^3,$$

$$m_{\text{DM}} \sim T_{\text{eq}} \sim \text{eV}.$$

why eV?

Hot DM

Log(宇宙のエネルギー密度), $\log(\rho)$



$$\text{If } n_{\text{DM}} \sim T^3,$$

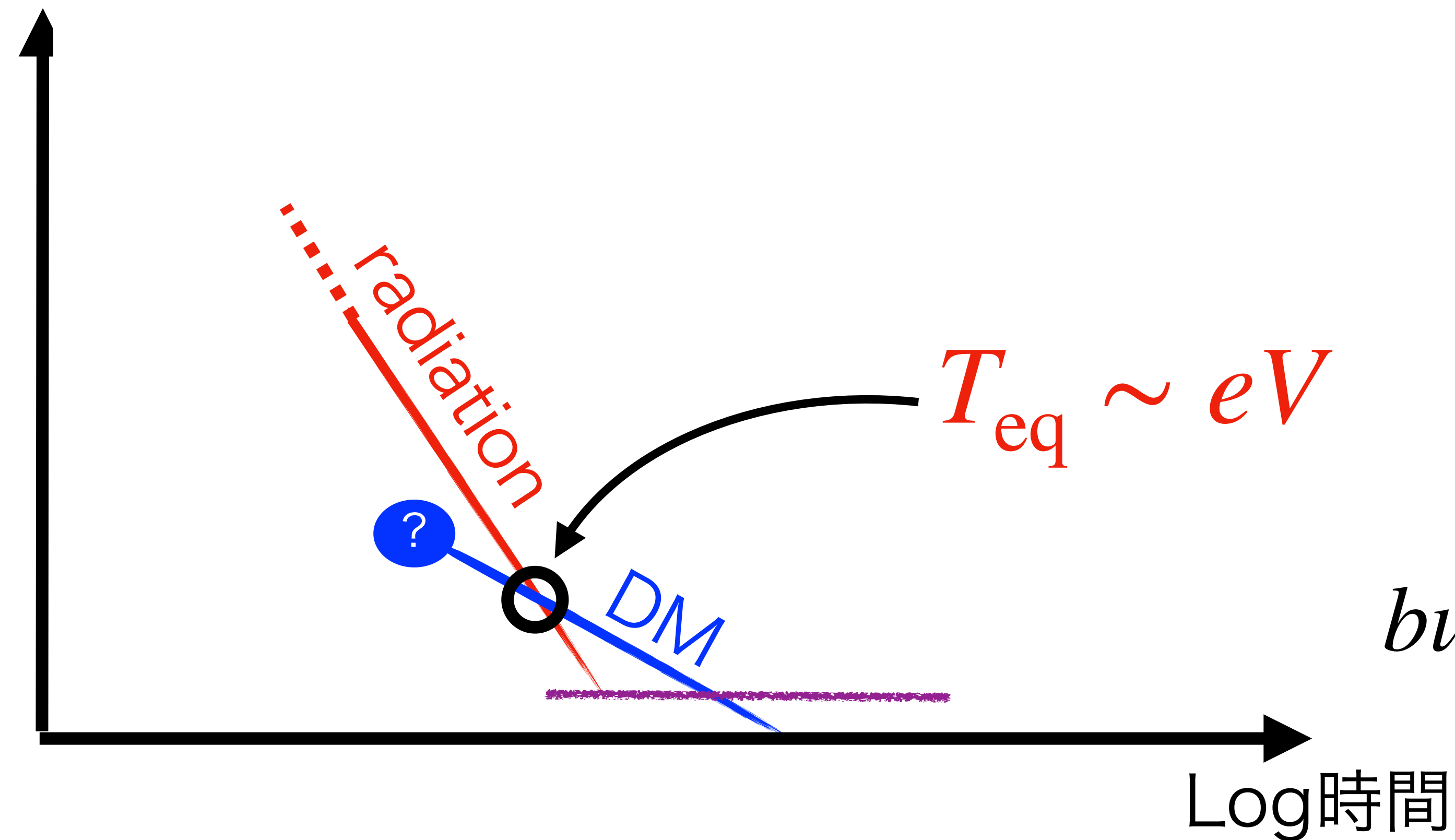
$$m_{\text{DM}} \sim T_{\text{eq}} \sim \text{eV}.$$

• **Attractor的予言**

why eV?

Hot DM

Log(宇宙のエネルギー密度), $\log(\rho)$



$$\text{If } n_{\text{DM}} \sim T^3,$$

$$m_{\text{DM}} \sim T_{\text{eq}} \sim \text{eV}.$$

• **Attractor的予言**

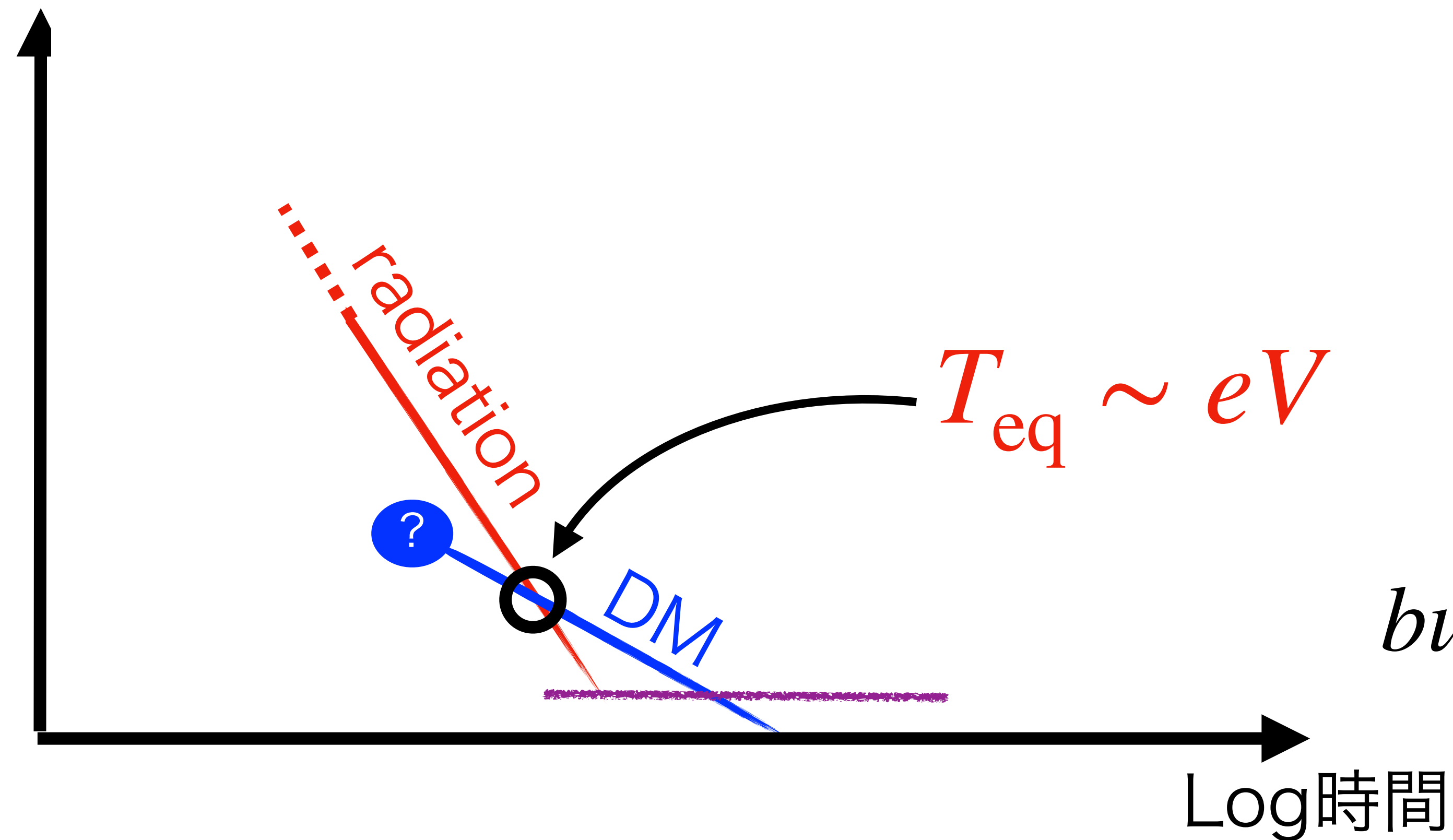
$$\text{but } v_{\text{eq}} \sim p_{\text{DM}}(T_{\text{eq}})/m_{\text{DM}} \sim 1$$

熱い。。。。

why eV?

Hot DM

Log(宇宙のエネルギー密度), $\log(\rho)$



$$\text{If } n_{\text{DM}} \sim T^3,$$

$$m_{\text{DM}} \sim T_{\text{eq}} \sim \text{eV}.$$

- Attractor的予言
- 本当?

$$\text{but } v_{\text{eq}} \sim p_{\text{DM}}(T_{\text{eq}})/m_{\text{DM}} \sim 1$$

熱い。。。。

- **2. Thermal production of eV dark matter, coldly**

WY, 2301.08735

Sakurai, WY, 2410.18968

$$n_{\text{DM}} \sim T^3, \rightarrow m_{\text{DM}} \sim \text{eV}$$

$$\underline{P_{\text{DM}} \ll T, \rightarrow v_{\text{DM}}(T \sim \text{eV}) \ll 1}$$

Keyword: bose enhancement, stimulated emission

Setup:

$$\chi_1 \leftrightarrow \chi_2 \phi(\text{DM}) .$$

WY 2301.08735

χ_1 mass : $M_1 (\ll T)$

χ_2, ϕ : massless

Equations:

$$\frac{\partial f_i[p_i, t]}{\partial t} - p_i H \frac{\partial f_i[p_i, t]}{\partial p_i} = C^i[p_i, t],$$

$$C^\phi = \frac{1}{2E_\phi g_\phi} \sum \int d\Pi_{\chi_1} d\Pi_{\chi_2}$$

$$(2\pi)^4 \delta^4(p_{\chi_1} - p_\phi - p_{\chi_2}) \times |\mathcal{M}_{\chi_1 \rightarrow \chi_2 \phi}|^2 \\ \times S(f_{\chi_1}[p_{\chi_1}], f_{\chi_2}[p_{\chi_2}], f_\phi[p_\phi])$$

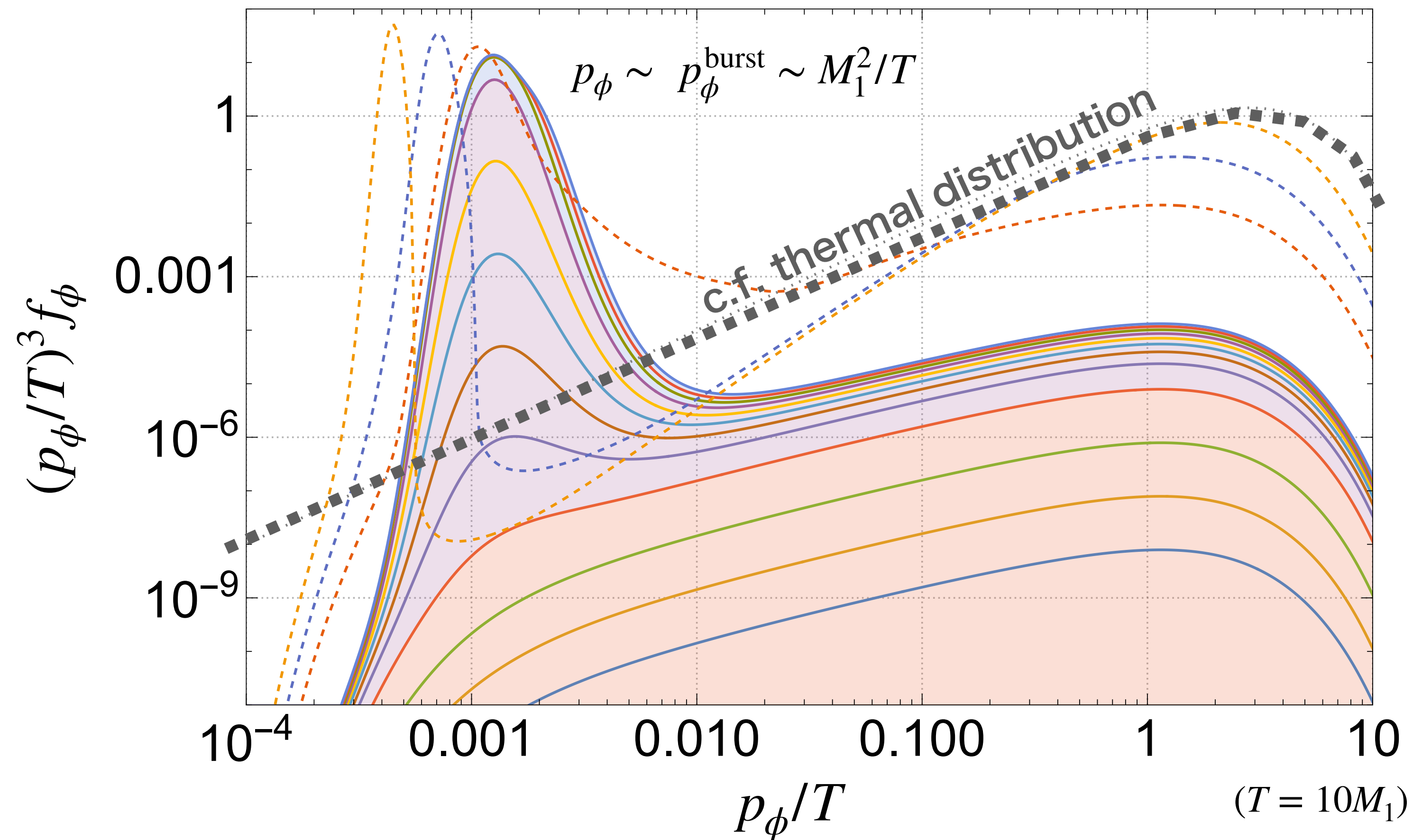
$$S \equiv f_{\chi_1}[p_{\chi_1}](1 \pm f_{\chi_2}[p_{\chi_2}])(1 + f_\phi[p_\phi]) \\ - (1 \pm f_{\chi_1}[p_{\chi_1}])f_\phi[p_\phi]f_{\chi_2}[p_{\chi_2}]$$

(Initial) conditions:

χ_1 is always thermalized, while χ_2 and ϕ are absent initially,
+ rotational invariance . $H = 0$ for a while .

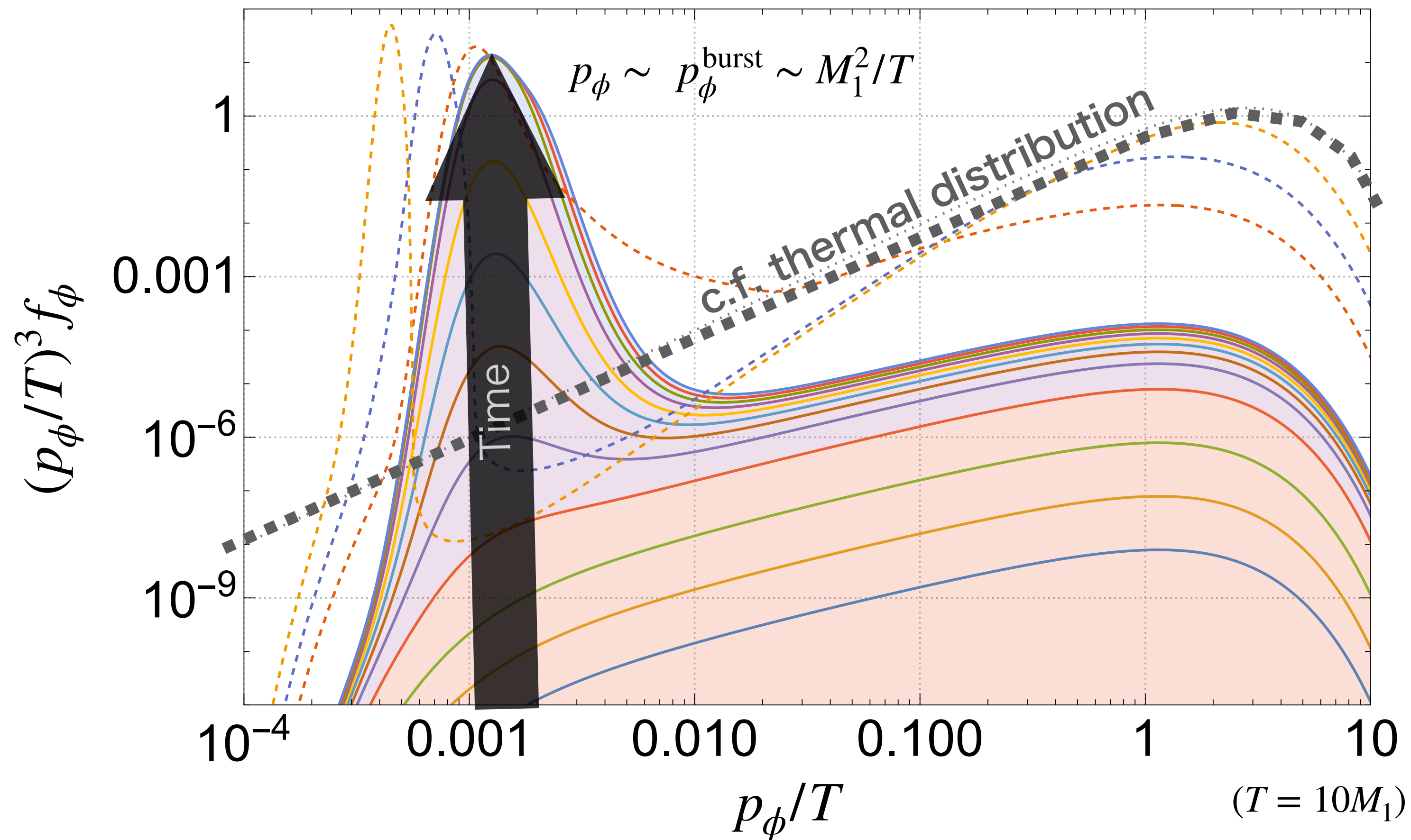
Burst production of DM ϕ turns out thanks to bose enhancement.

ϕ number density



Burst production of DM ϕ turns out thanks to bose enhancement.

ϕ number density

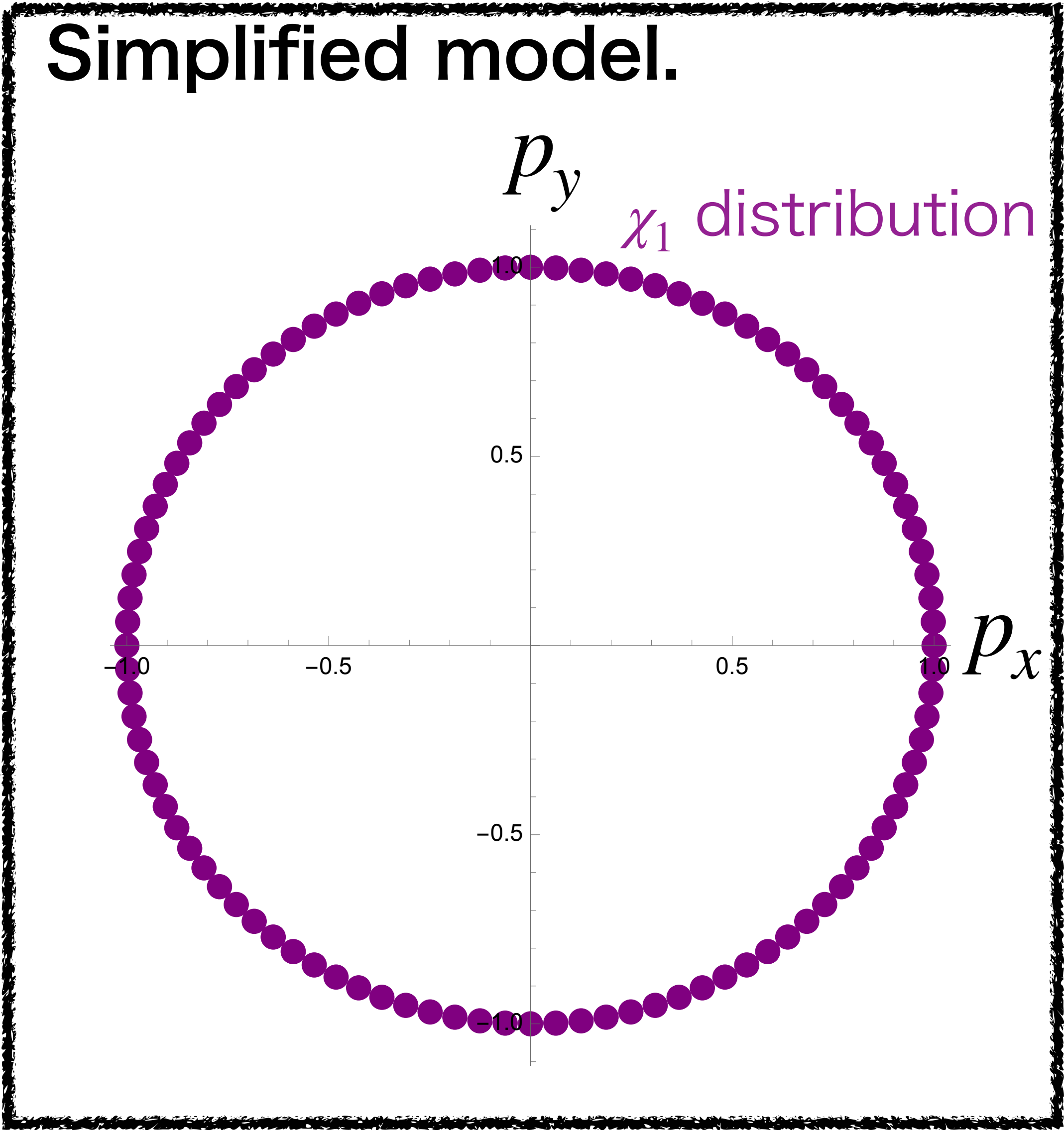
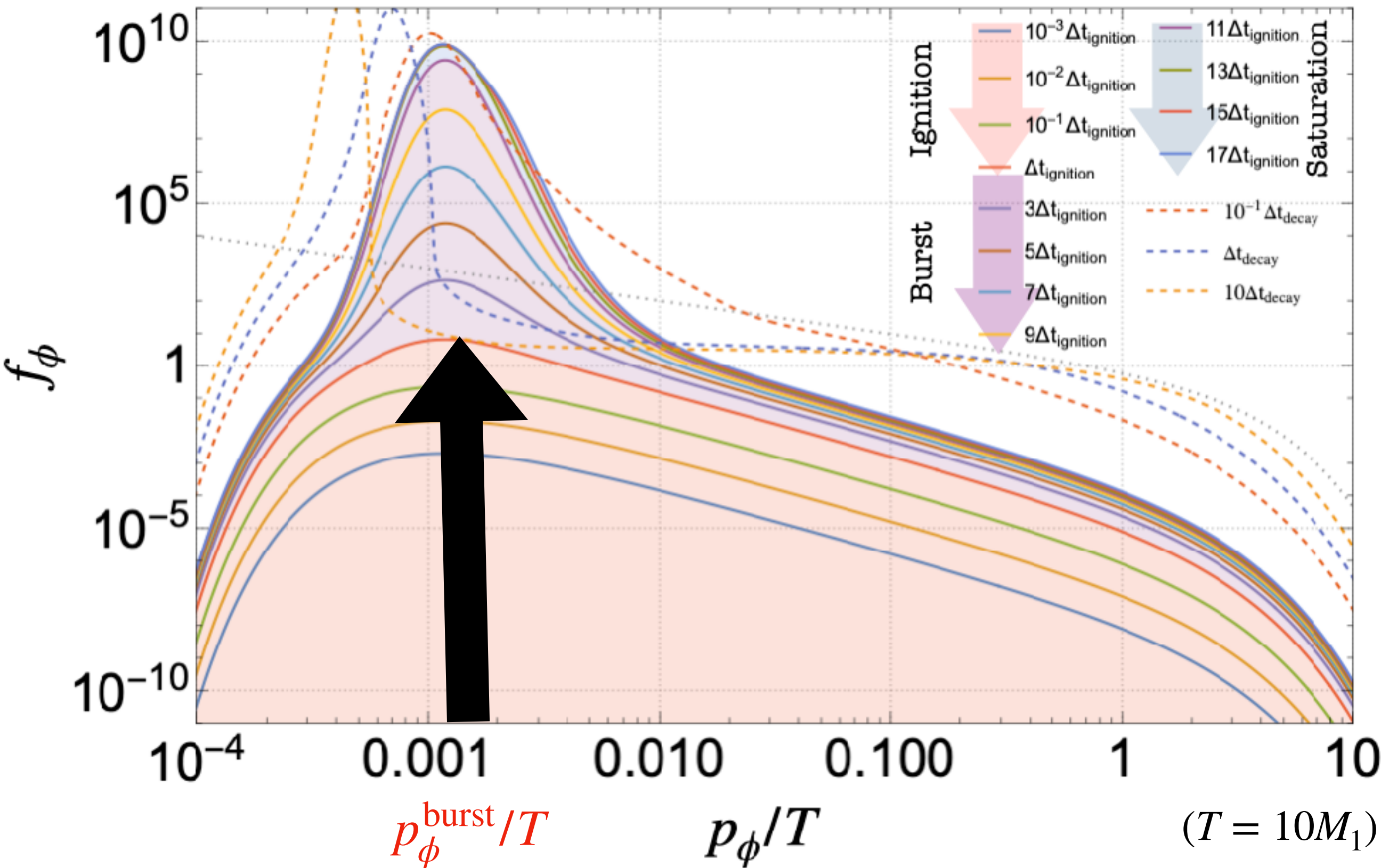


占有数の増加率は熱化より遥かに早い

$$\Delta t_{\text{ignition}}^{-1} \sim \frac{T^4}{M_1^4} \times \left(\frac{M_1}{T} \Gamma_{\text{decay}}^{(\text{proper})} \right)$$

熱化率

Occupation number

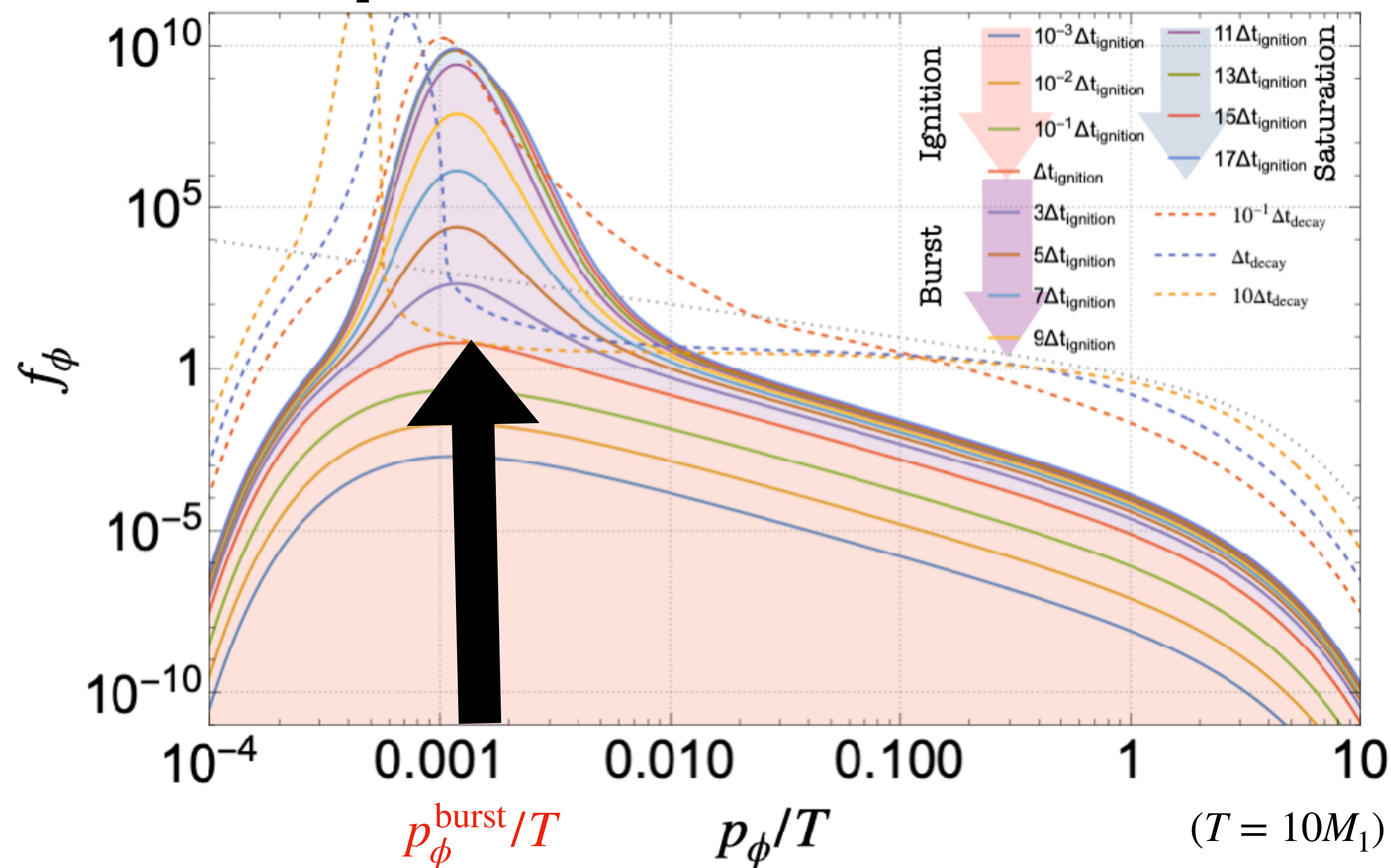


占有数の増加率は熱化より遥かに早い

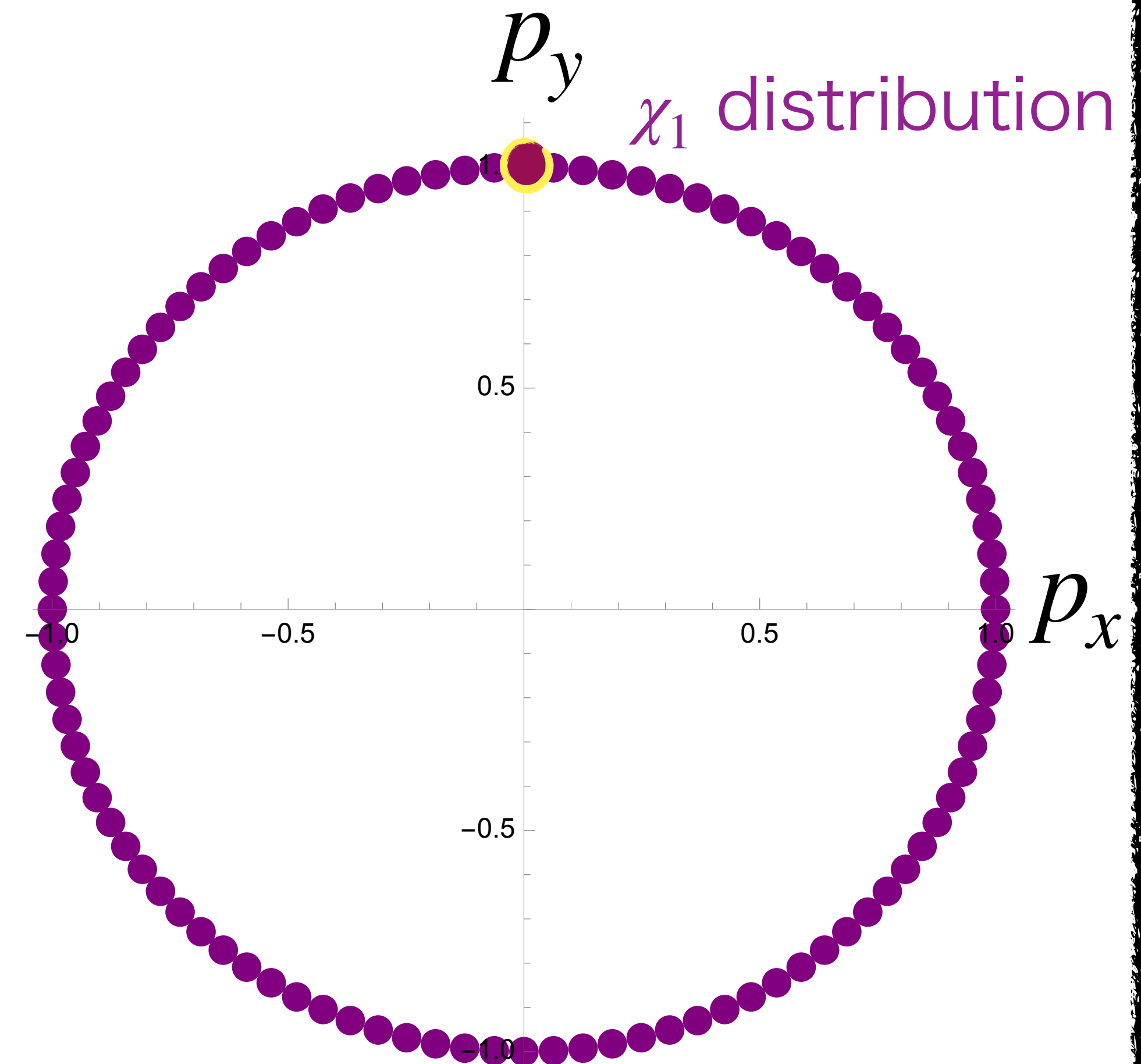
$$\Delta t_{\text{ignition}}^{-1} \sim \frac{T^4}{M_1^4} \times \left(\frac{M_1}{T} \Gamma_{\text{decay}}^{(\text{proper})} \right)$$

熱化率

Occupation number



Simplified model.

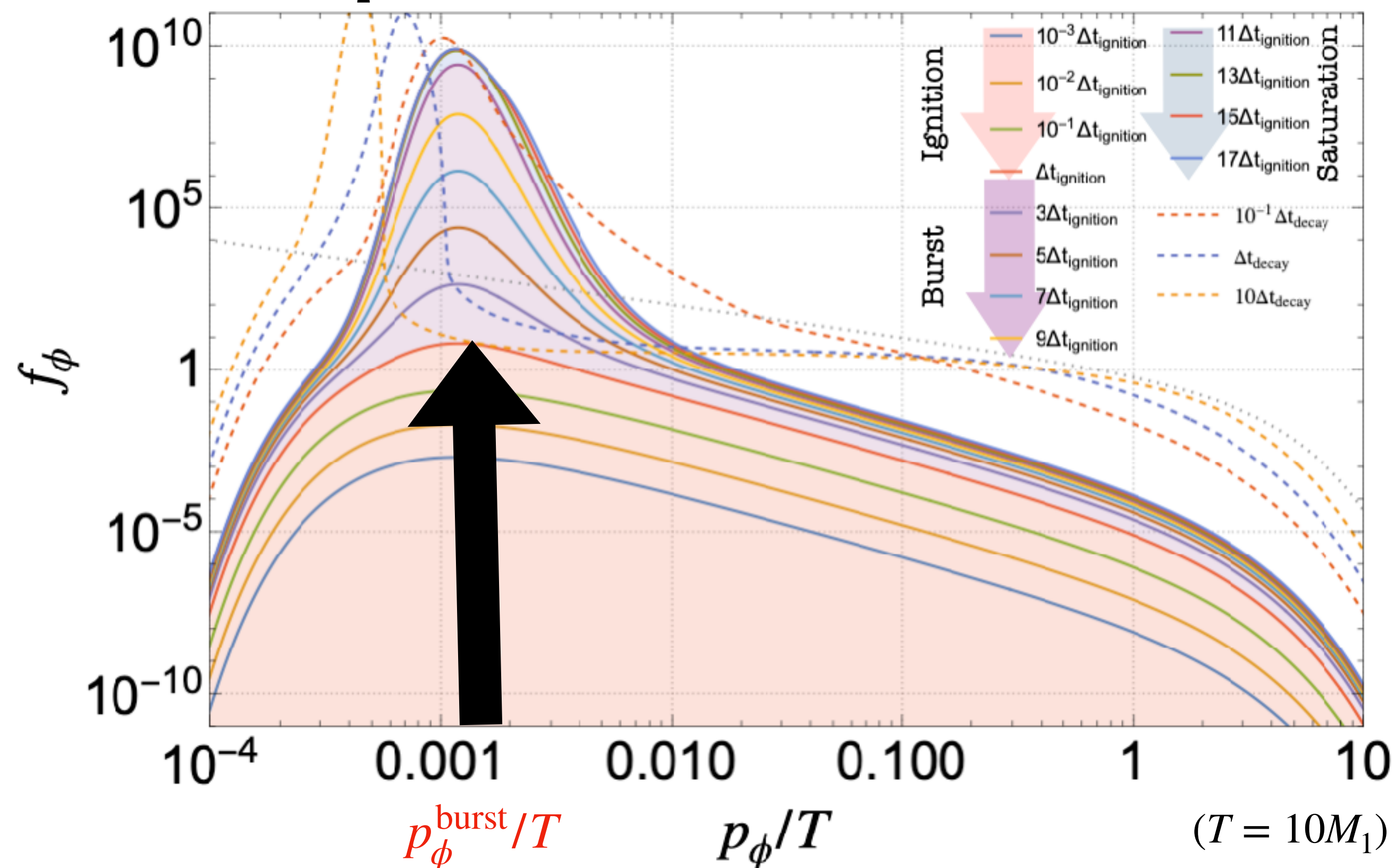


占有数の増加率は熱化より遥かに早い

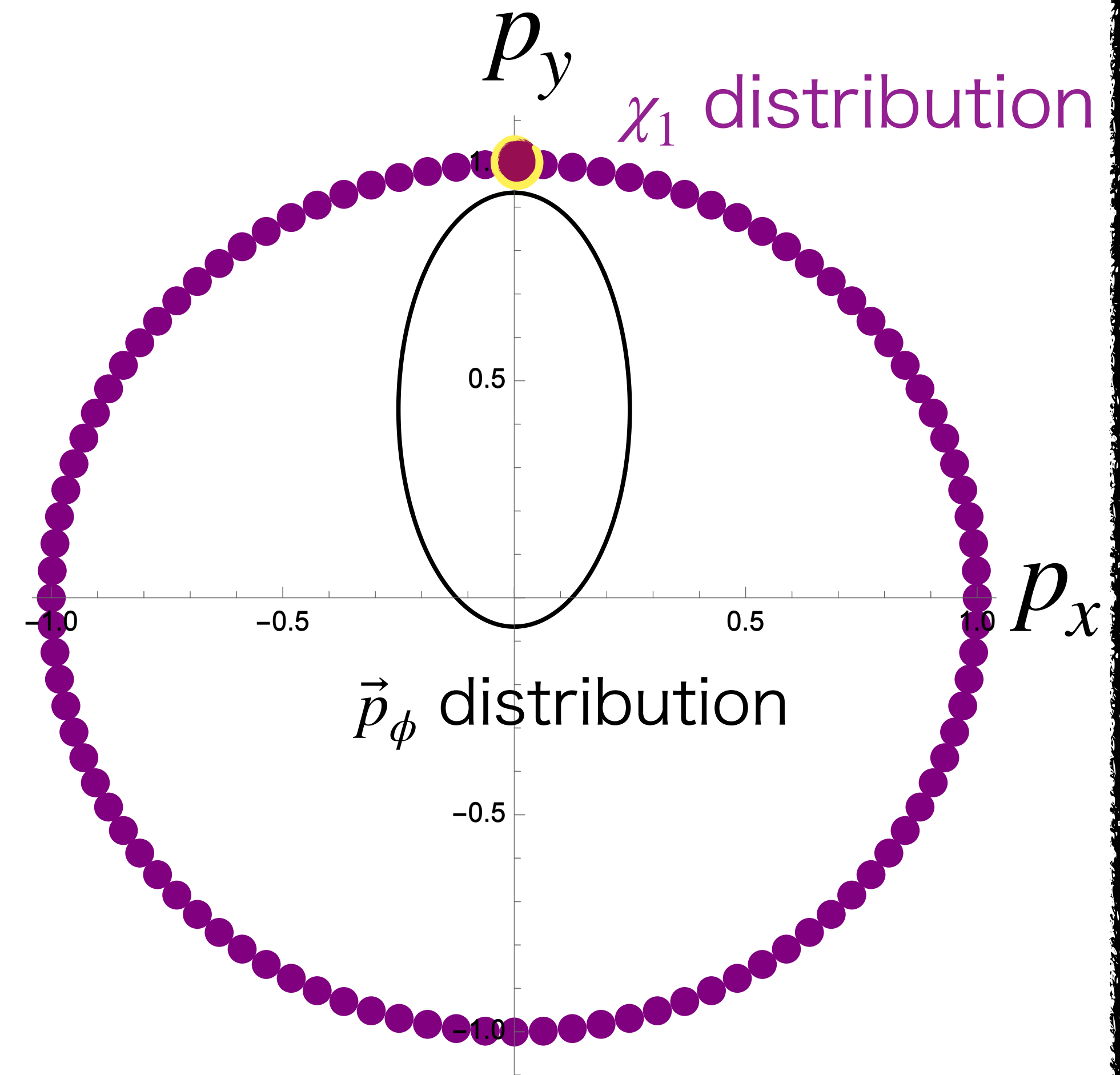
$$\Delta t_{\text{ignition}}^{-1} \sim \frac{T^4}{M_1^4} \times \left(\frac{M_1}{T} \Gamma_{\text{decay}}^{(\text{proper})} \right)$$

熱化率

Occupation number



Simplified model.

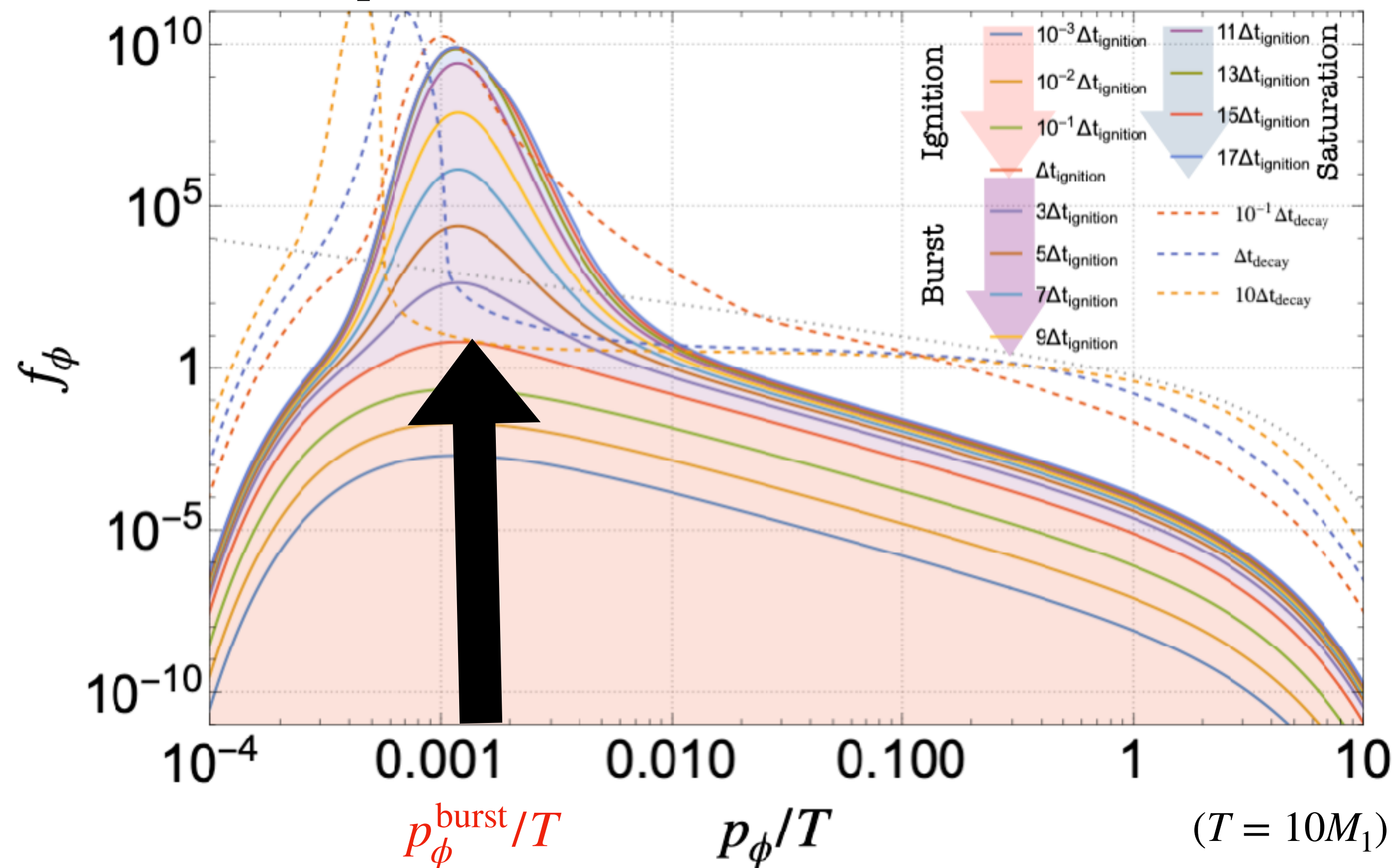


占有数の増加率は熱化より遥かに早い

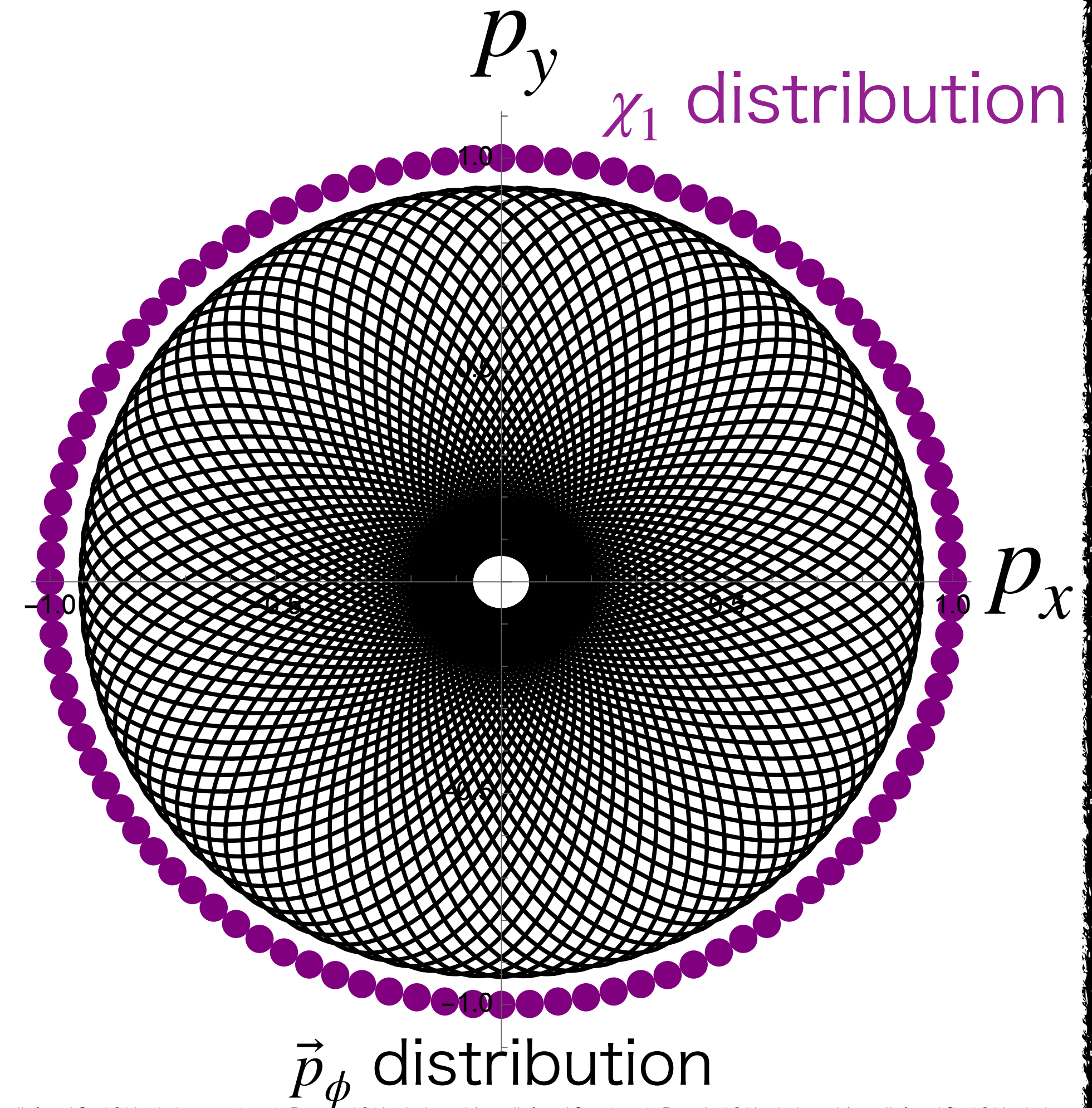
$$\Delta t_{\text{ignition}}^{-1} \sim \frac{T^4}{M_1^4} \times \left(\frac{M_1}{T} \Gamma_{\text{decay}}^{(\text{proper})} \right)$$

熱化率

Occupation number



Simplified model.

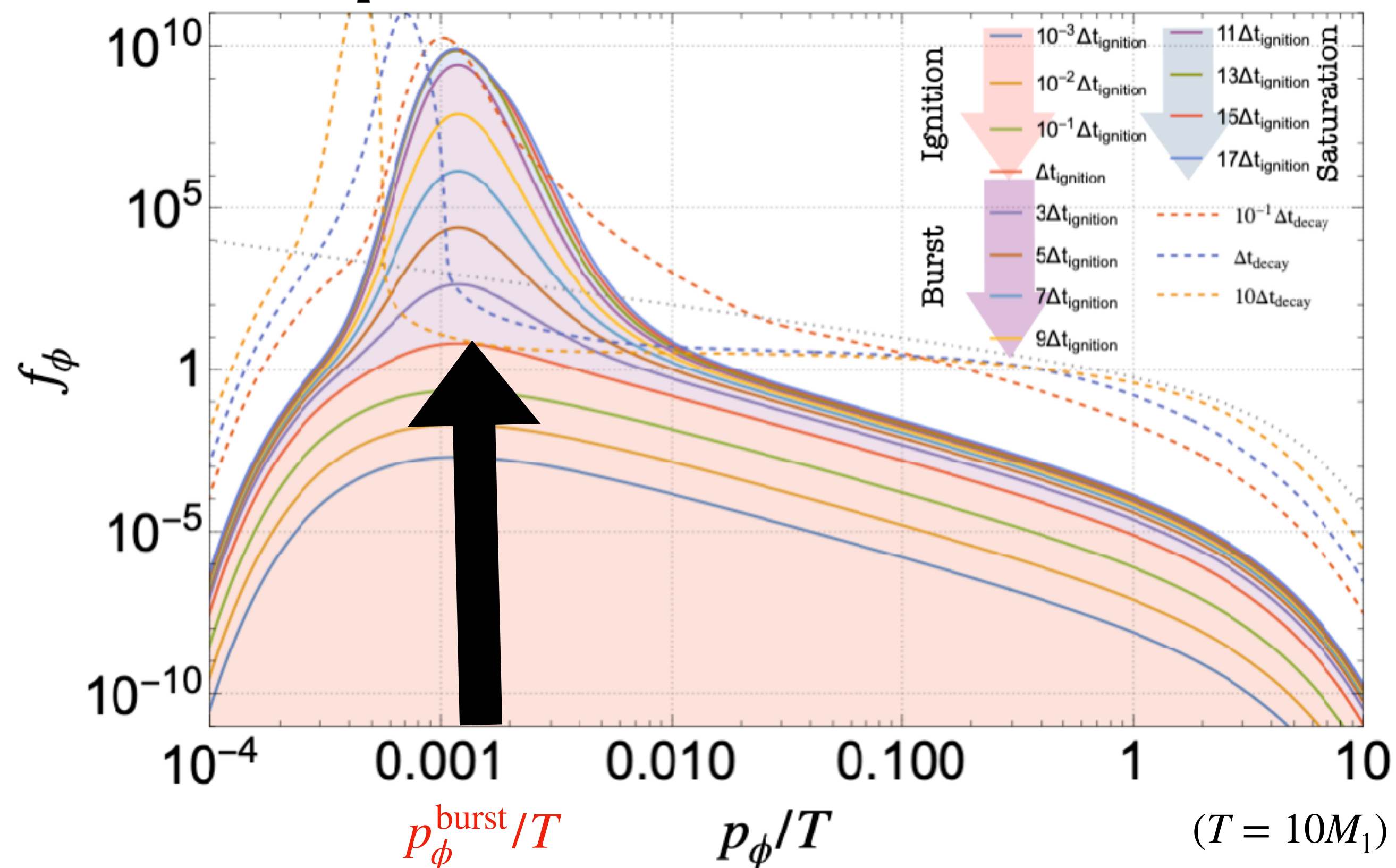


占有数の増加率は熱化より遥かに早い

$$\Delta t_{\text{ignition}}^{-1} \sim \frac{T^4}{M_1^4} \times \left(\frac{M_1}{T} \Gamma_{\text{decay}}^{(\text{proper})} \right)$$

熱化率

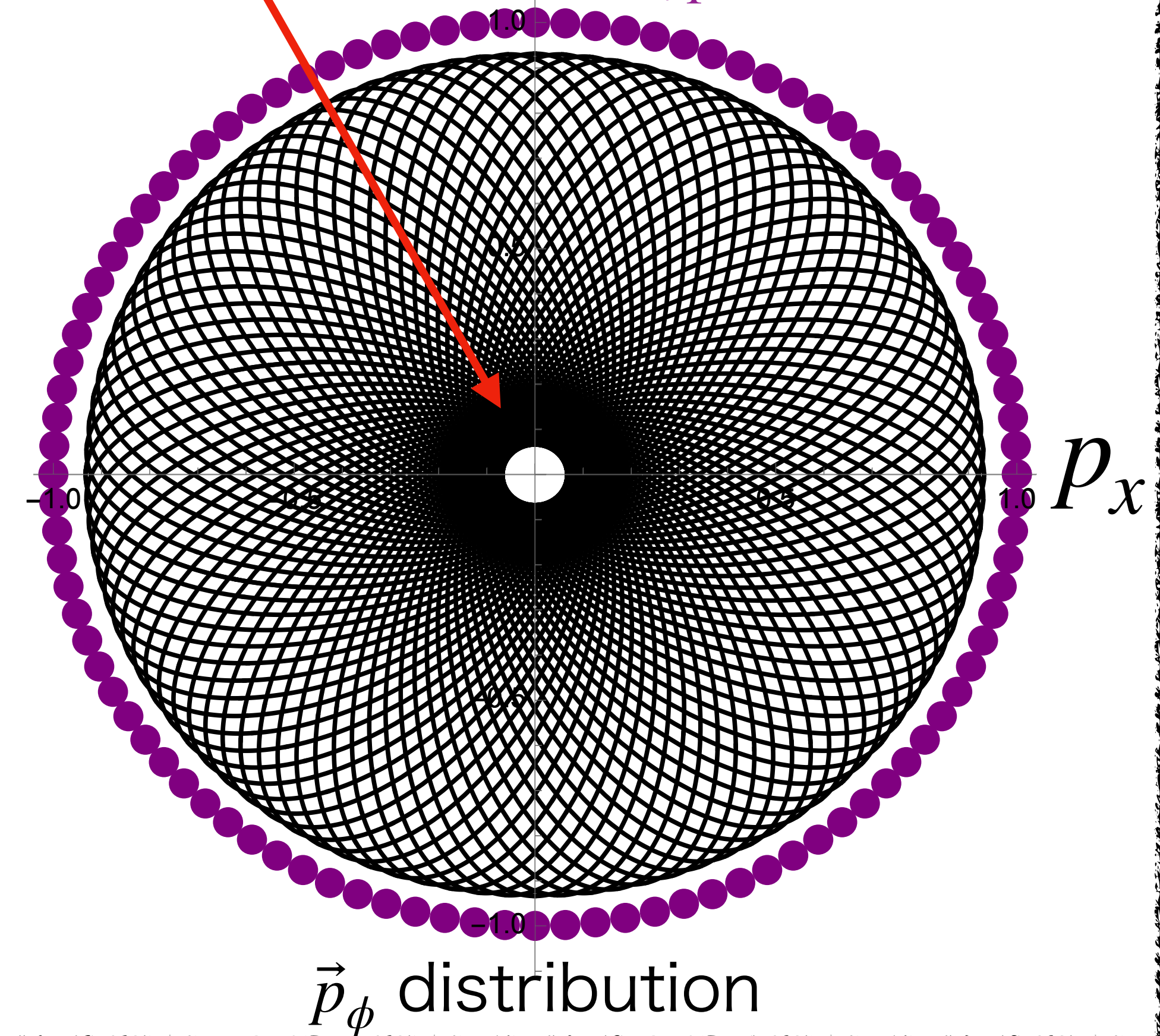
Occupation number



Simplified model.

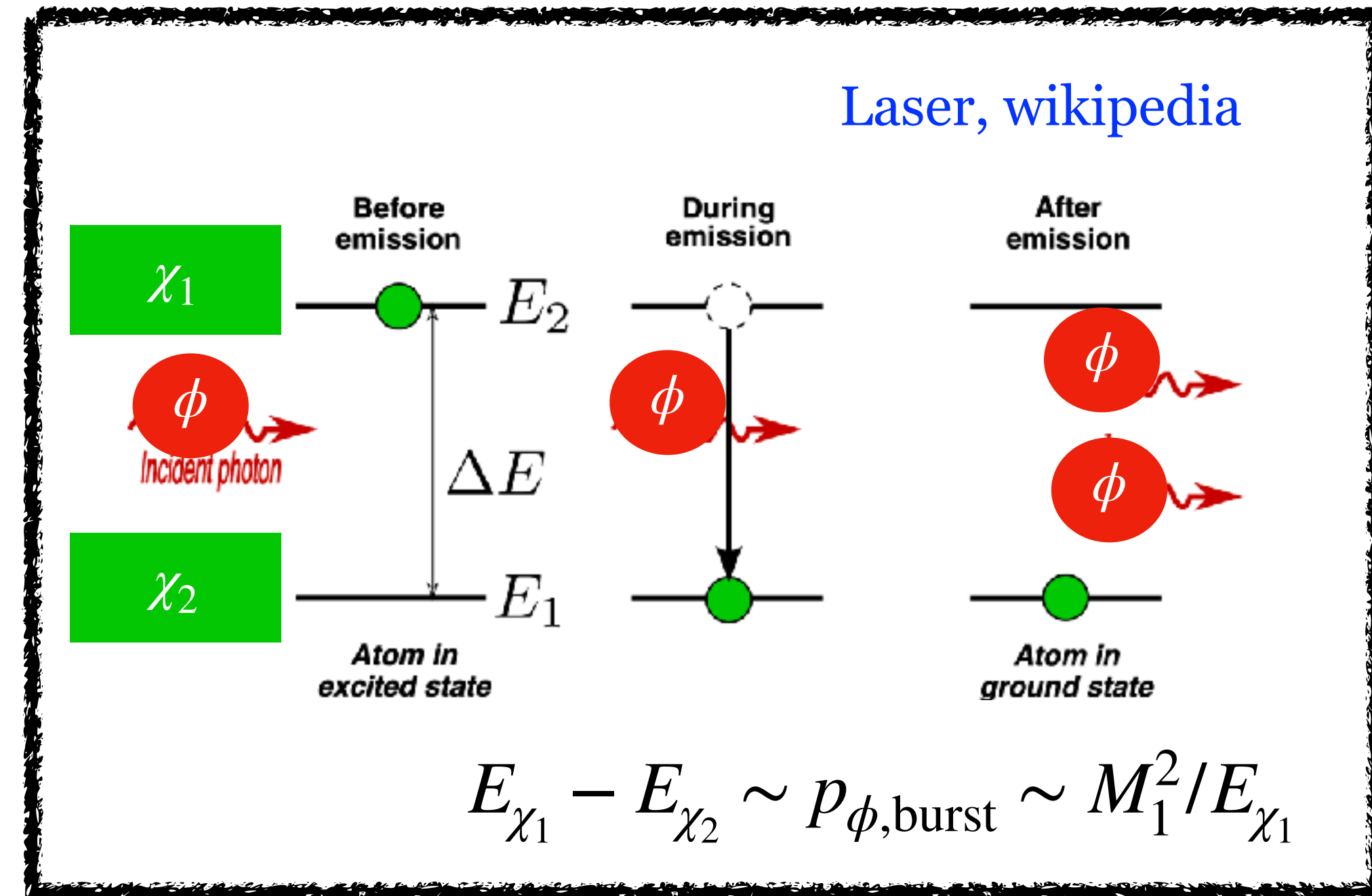
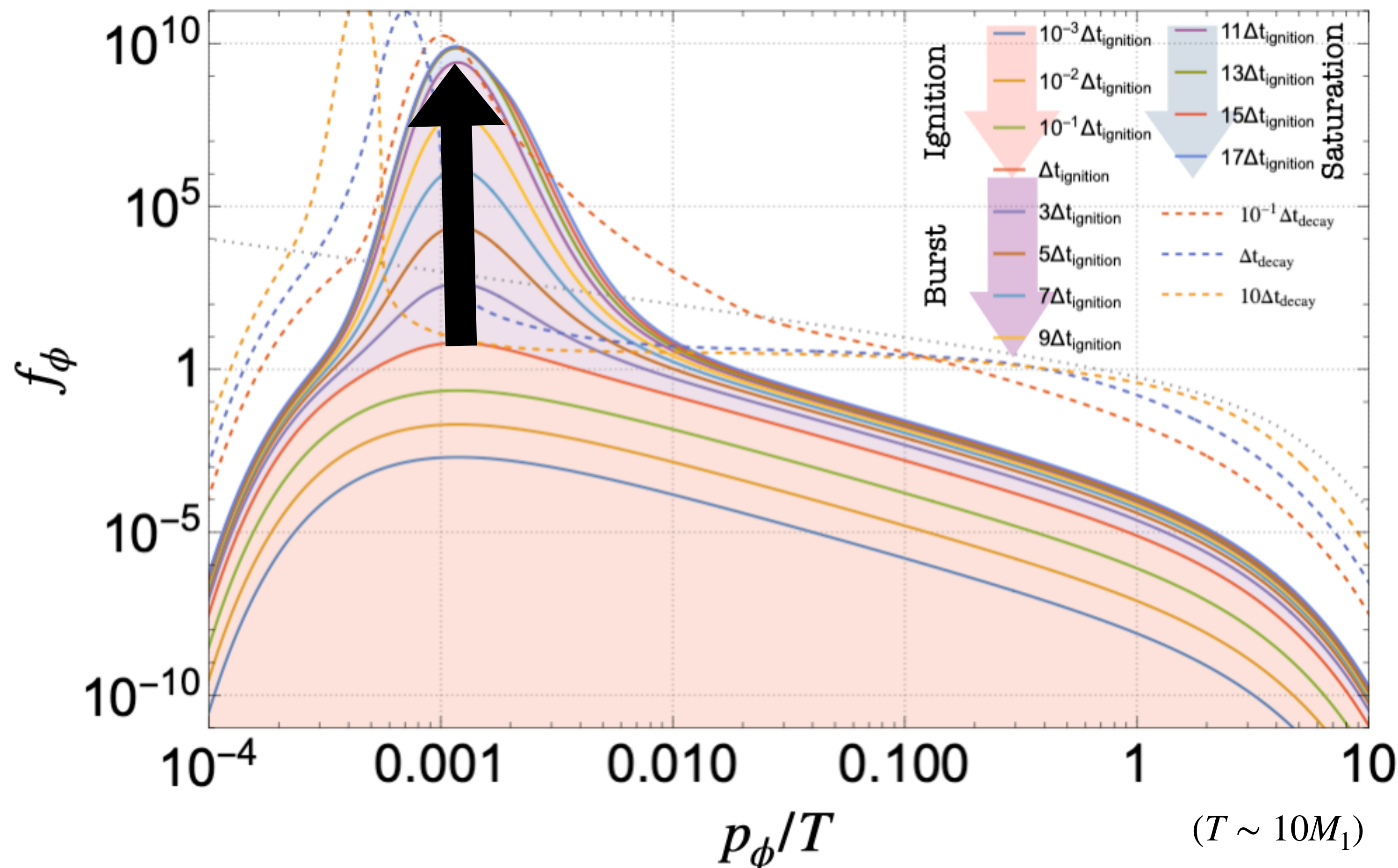
$$p_{\phi}^{\text{burst}} \sim M_1^2 / |p_{\chi_1}| p_y$$

χ_1 distribution



誘導放出

p_ϕ^{burst} modes grow exponentially due to Bose enhancement. c.f. laser.



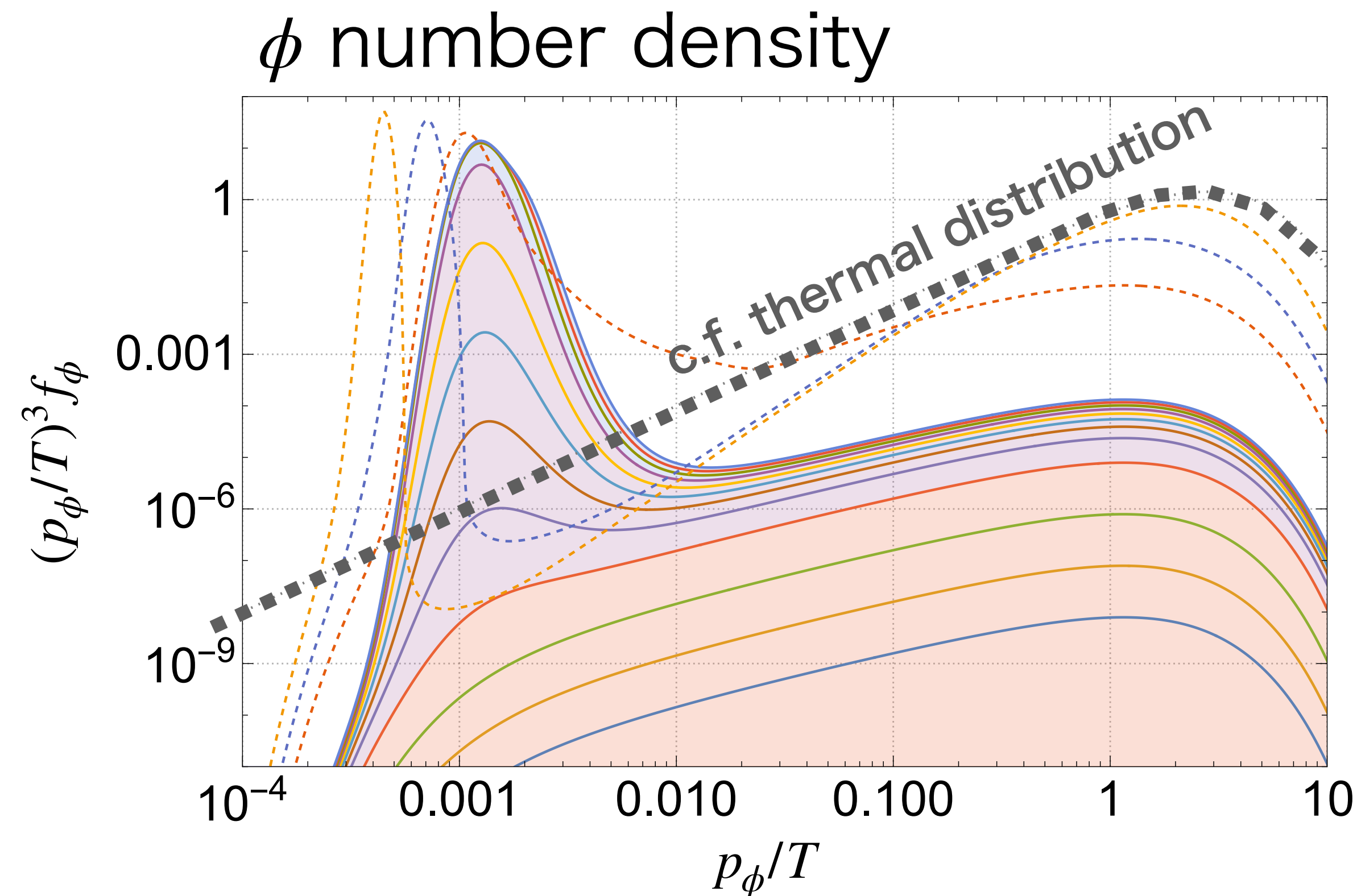
$$f_\phi[p_\phi \sim p_\phi^{\text{burst}}] \sim \exp[t/\Delta t_{\text{ignition}}]$$

一気に指数増加し(準)平衡状態に達する

$$S \propto f_\phi(p_\phi^{\text{burst}})(f_{\chi_1}(p \sim T) - f_{\chi_2}(p \sim T))$$

The number density of χ_2 at $p_{\chi_2} \sim T$ is $g_{\chi_2} T^3$. Since

$\dot{n}_{\chi_2} = \dot{n}_\phi$ in $\chi_1 \leftrightarrow \chi_2 \phi$, we have $n_\phi = n_{\chi_2}$.



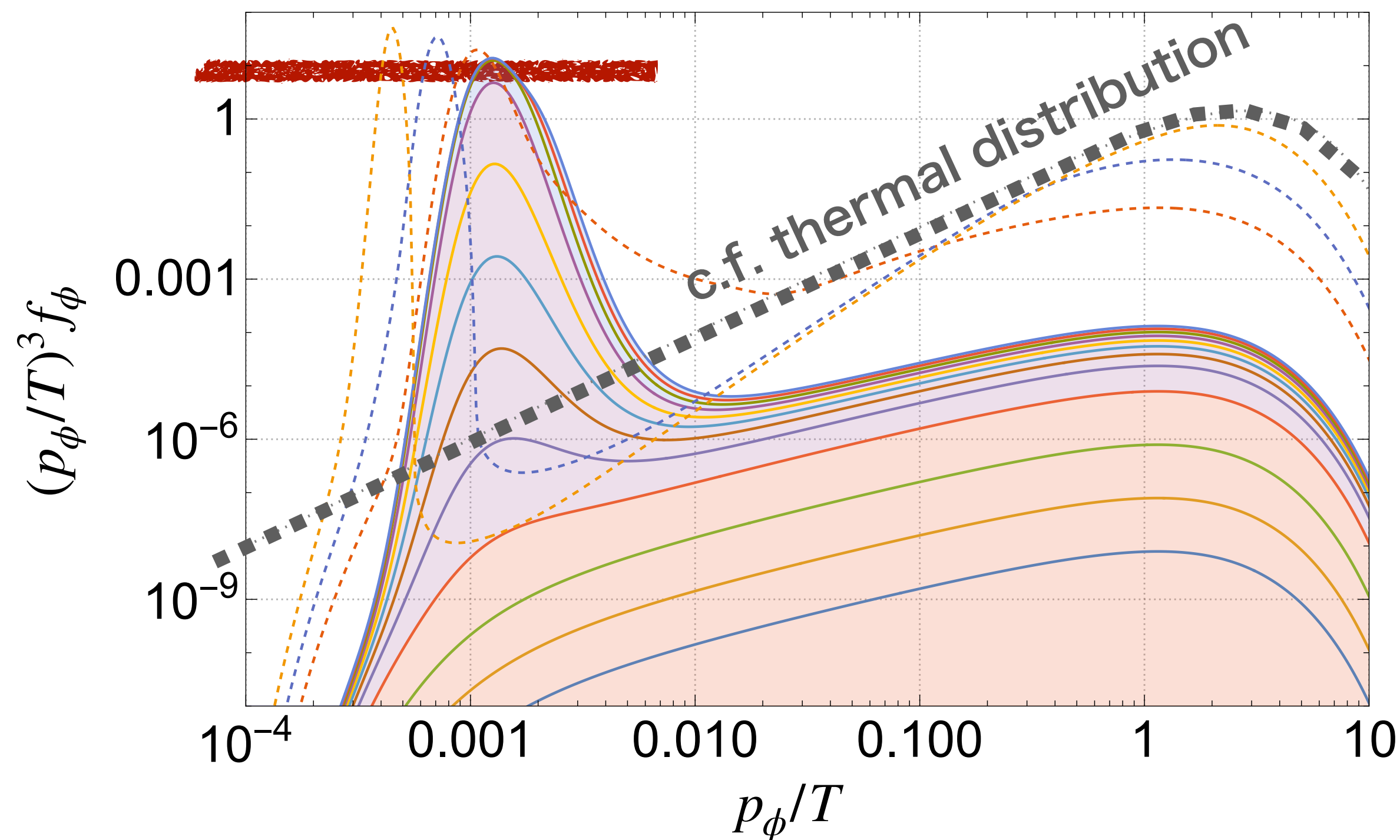
一気に指数増加し(準)平衡状態に達する

$$S \propto f_\phi(p_\phi^{\text{burst}})(f_{\chi_1}(p \sim T) - f_{\chi_2}(p \sim T))$$

The number density of χ_2 at $p_{\chi_2} \sim T$ is $g_{\chi_2}T^3$. Since

$\dot{n}_{\chi_2} = \dot{n}_\phi$ in $\chi_1 \leftrightarrow \chi_2\phi$, we have $n_\phi = n_{\chi_2}$.

$n_\phi \sim g_{\chi_2}T^3, p_\phi \sim M_1^2/T$, which is cold



もし $T = T_p$ で

$$\left(\frac{M_1}{T_{\text{prod}}} \Gamma_{\text{decay}}^{(\text{proper})} \right) \ll H \ll 1/\Delta t_{\text{ignition}},$$

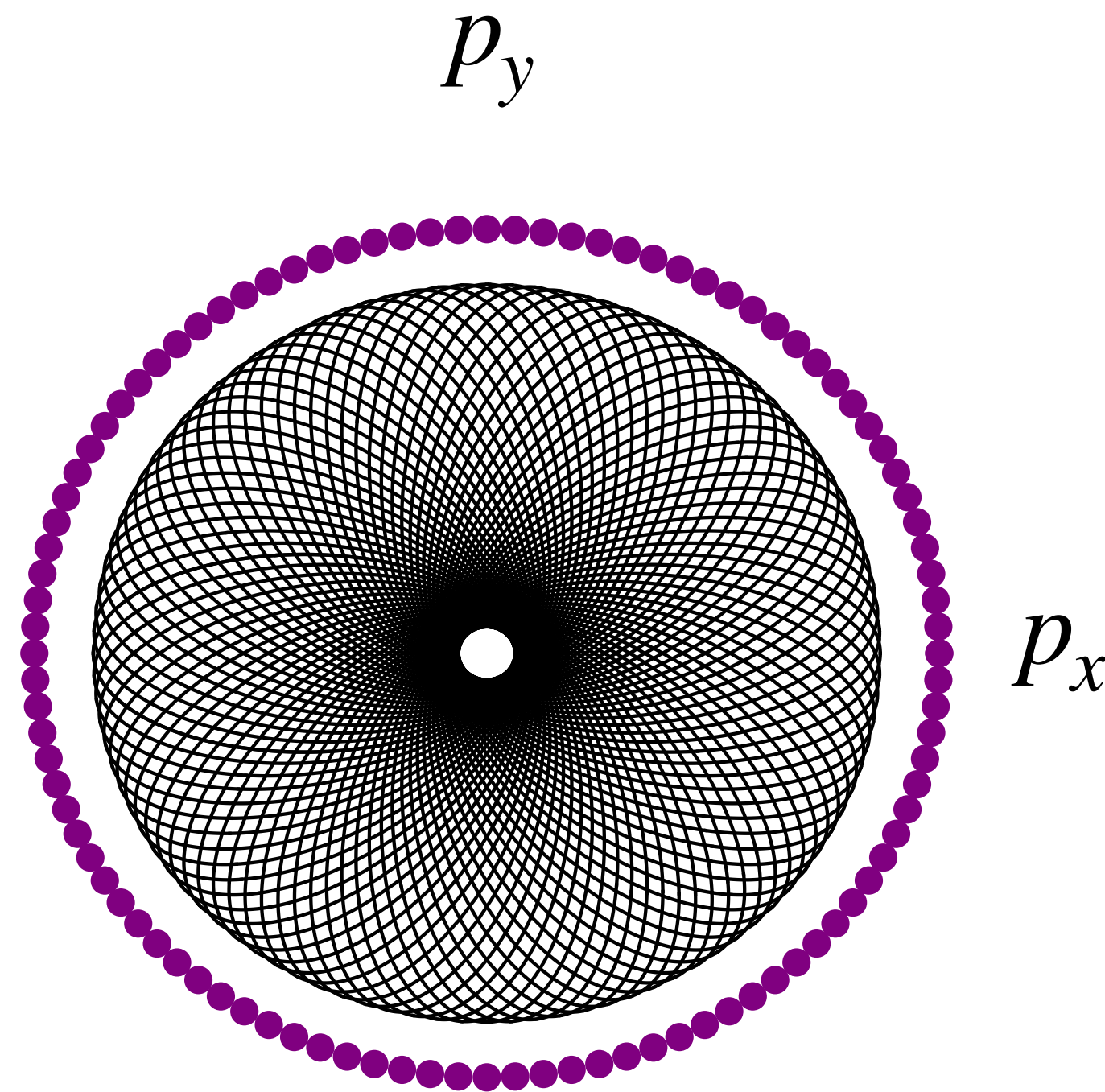
宇宙膨張でそのままDM

Simplified model.

$$T \propto a^{-1}$$

$$p_{\phi}^{\text{DM}} \propto a^{-1}$$

$$p_{\phi}^{\text{burst}} \sim M_1^2/T \propto a$$



もし $T = T_p$ で

$$\left(\frac{M_1}{T_{\text{prod}}} \Gamma_{\text{decay}}^{(\text{proper})} \right) \ll H \ll 1/\Delta t_{\text{ignition}},$$

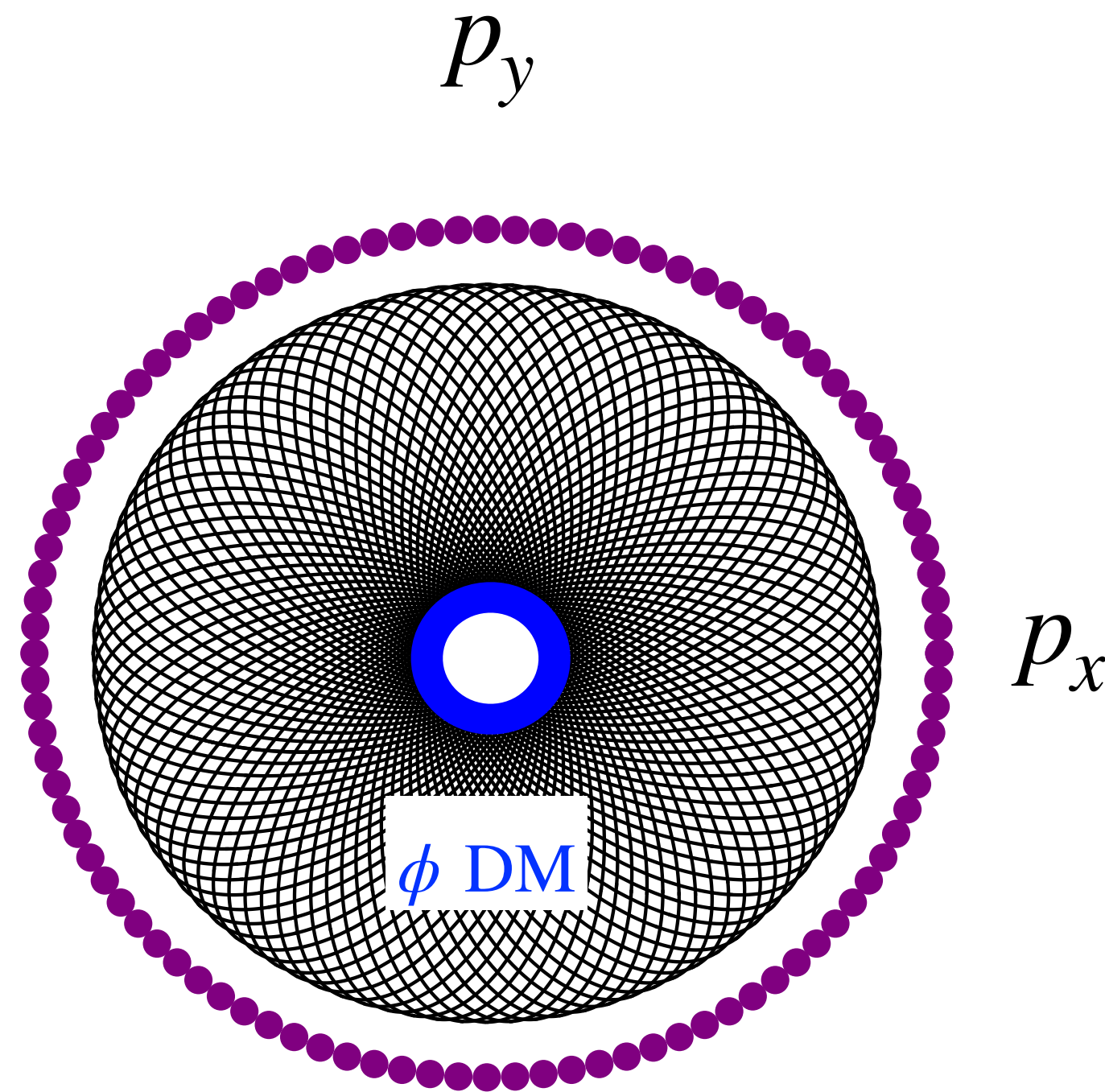
宇宙膨張でそのままDM

Simplified model.

$$T \propto a^{-1}$$

$$p_{\phi}^{\text{DM}} \propto a^{-1}$$

$$p_{\phi}^{\text{burst}} \sim M_1^2/T \propto a$$



もし $T = T_p$ で

$$\left(\frac{M_1}{T_{\text{prod}}} \Gamma_{\text{decay}}^{(\text{proper})} \right) \ll H \ll 1/\Delta t_{\text{ignition}},$$

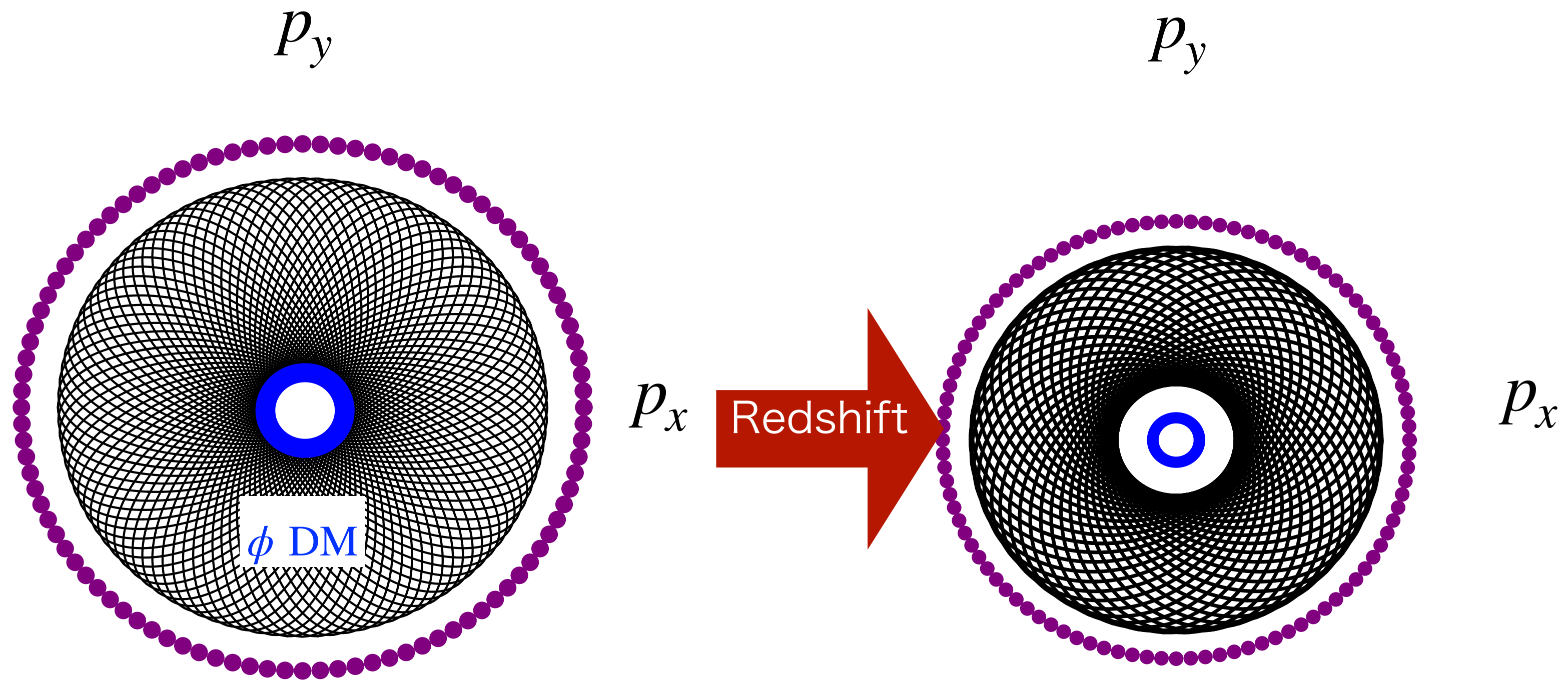
宇宙膨張でそのままDM

Simplified model.

$$T \propto a^{-1}$$

$$p_{\phi}^{\text{DM}} \propto a^{-1}$$

$$p_{\phi}^{\text{burst}} \sim M_1^2/T \propto a$$



Explaining abundance of DM gives

$$m_\phi = 50\text{eV} \frac{4}{g_{\chi_2}} \frac{g_{\star,s}[T_p]}{100} = [1 - 1000]\text{eV}$$

Coldness (Lyman α bound $L_{\text{FS}} < 0.06\text{Mpc}$) requires

$$\frac{M_1}{T_{\text{prod}}} \lesssim 0.02 \left(\frac{g_{s\star}[T_{\text{prod}}]}{100} \right)^{1/6} \sqrt{\frac{m_\phi}{\text{eV}}}.$$

How about 2 to 2, e.g. $\chi\chi \rightarrow \phi\phi$?

Sakurai, WY, 2410.18968

$$\sigma \propto \frac{s^n}{E_{\chi_1} E_{\chi_2}}$$

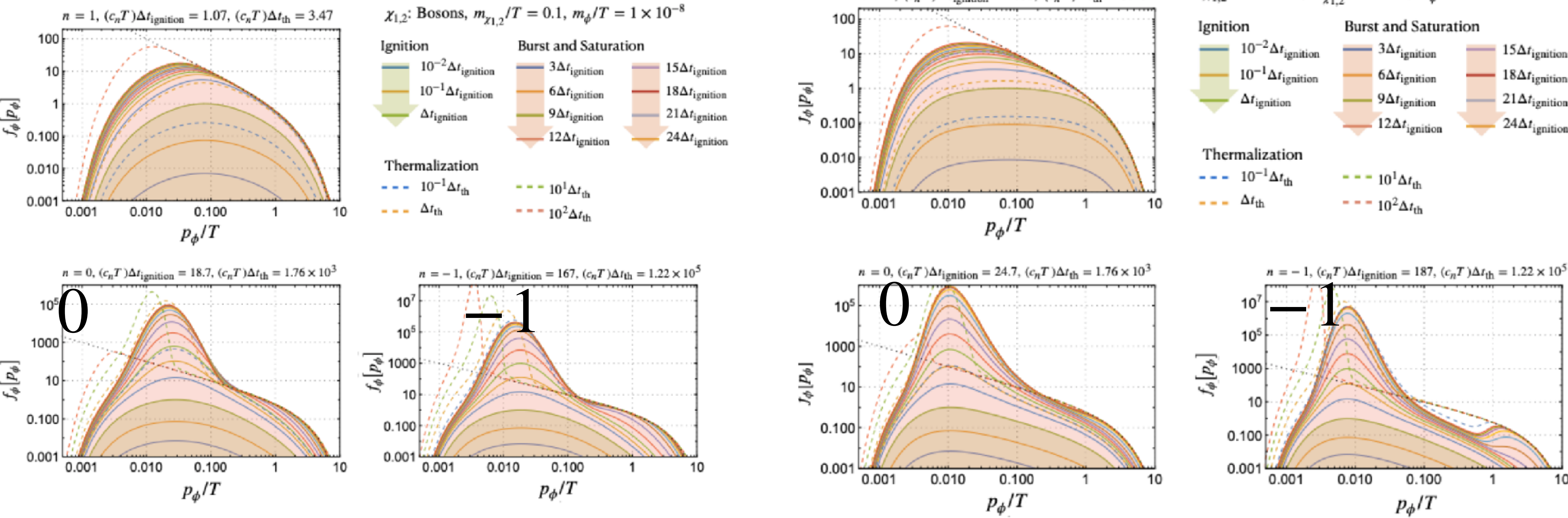
- Depending on the crosssection, Burst production happens:

$n = 1$

$\chi : \text{Boson}$

$n = 1$

$\chi : \text{Fermion}$



How about 2 to 2, e.g. $\chi\chi \rightarrow \phi\phi$?

Sakurai, WY, 2410.18968

$$\sigma \propto \frac{s^n}{E_{\chi_1} E_{\chi_2}}$$

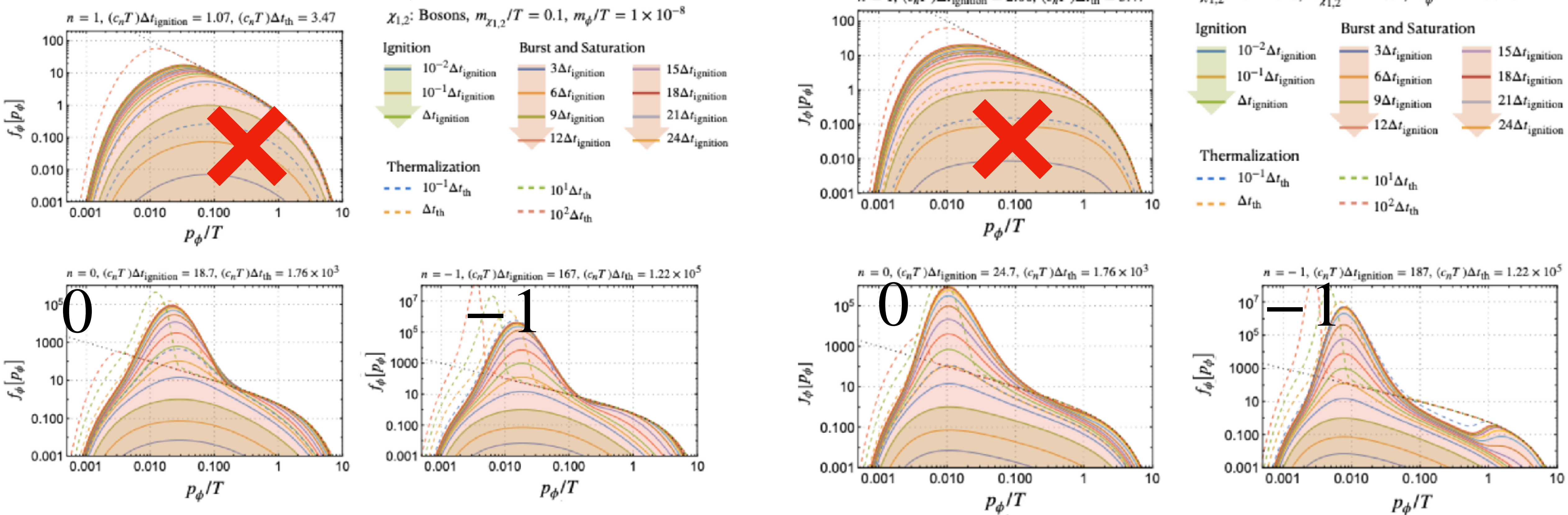
- Depending on the crosssection, Burst production happens:

$$n = 1$$

χ : *Boson*

$$n = 1$$

χ : *Fermion*



How about 2 to 2, e.g. $\chi\chi \rightarrow \phi\phi$?

Sakurai, WY, 2410.18968

$$\sigma \propto \frac{s^n}{E_{\chi_1} E_{\chi_2}}$$

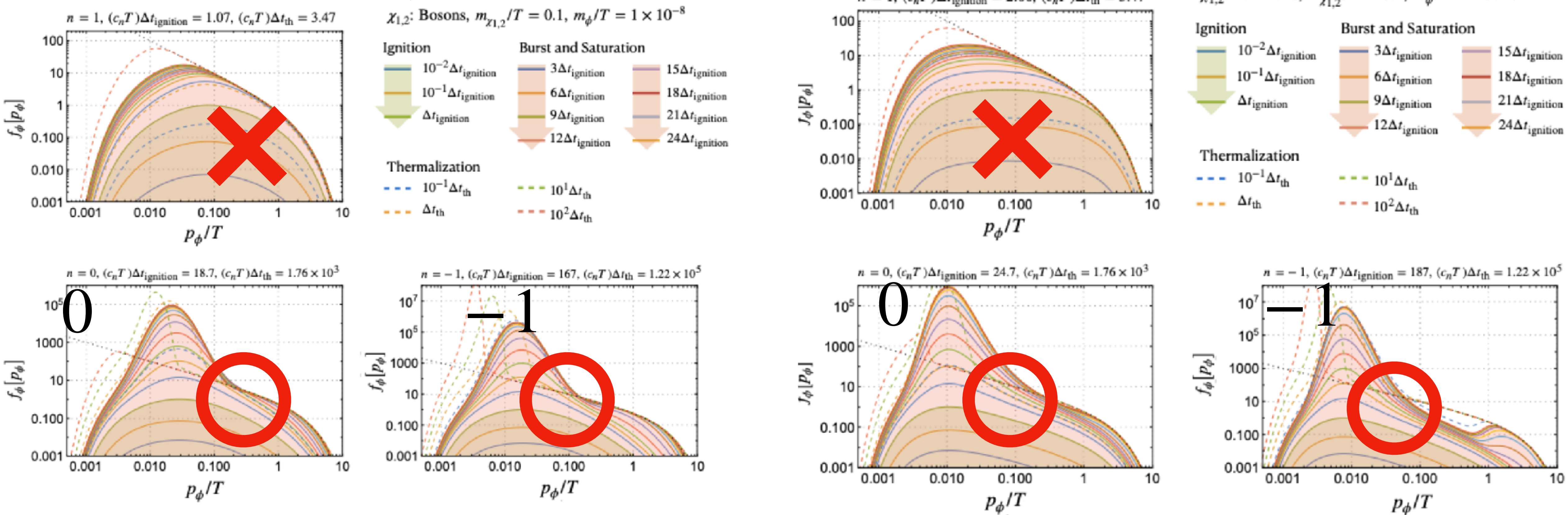
- Depending on the crosssection, Burst production happens:

$$n = 1$$

χ : *Boson*

$$n = 1$$

χ : *Fermion*



ここまでのメッセージ

- 誘導放出は一般的.
- Freeze in とかでボゾン作る時は、気をつけないといけない。iginitionに達したらeV DM.
- **Attractor的予言** $\rho_{\text{DM}} \sim m_{\text{DM}} T^3$
- **eV dark matterは特別**

ここまでのメッセージ

- ・誘導放出は一般的.
- ・Freeze in とかでボゾン作る時は、気をつけないといけない。iginitionに達したらeV DM.
- ・Attractor的予言 $\rho_{\text{DM}} \sim m_{\text{DM}} T^3$
- ・eV dark matterは特別 背後にある「偶然」
 $\therefore T_{\text{eq}}^{\text{SM}} \sim \text{eV}$

• 3. eVダークマターとバリオン-DM coincidence

WY, 2608.26709

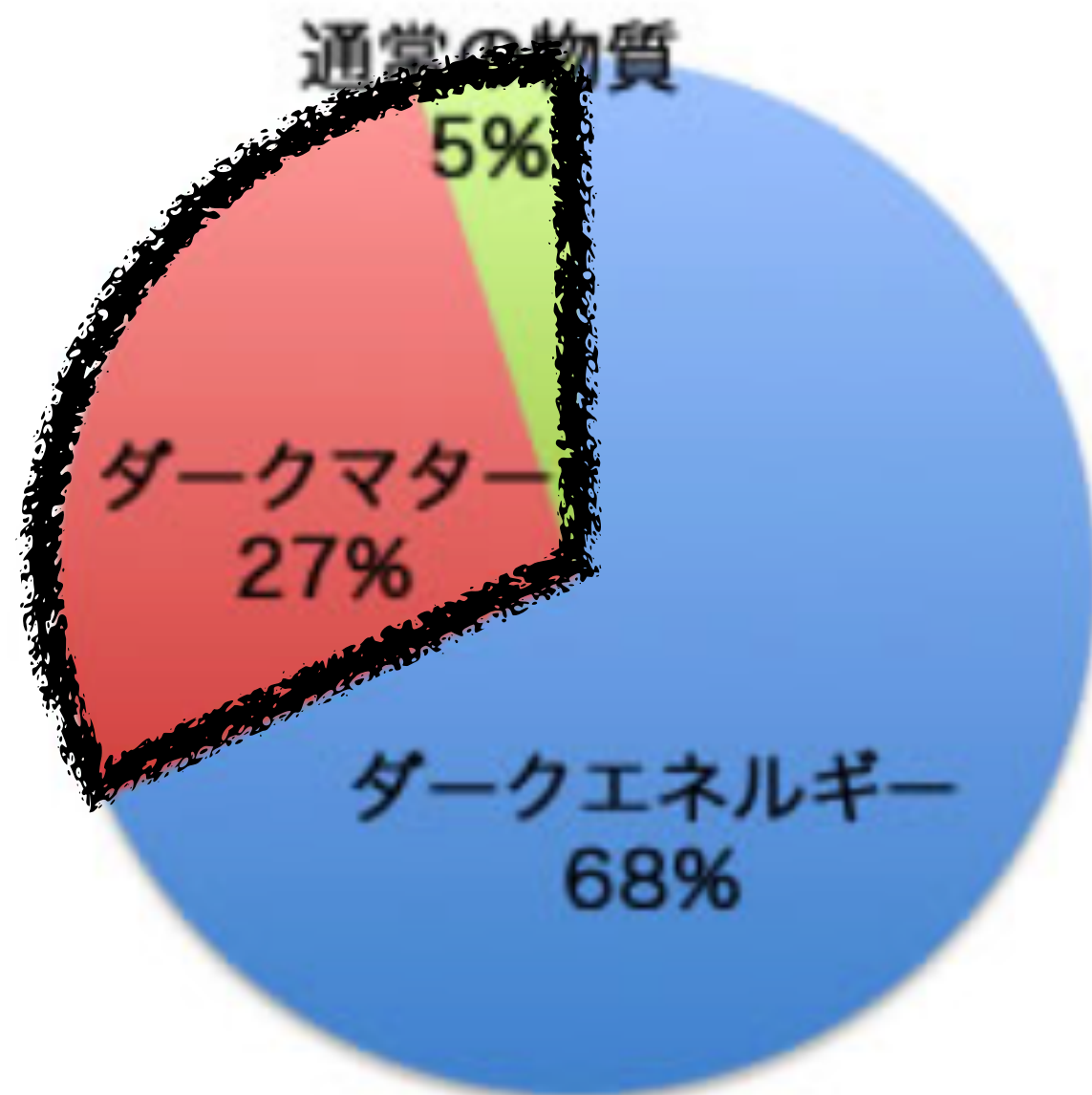


図1：宇宙の組成

宇宙マイクロ波背景放射

$$\frac{\Omega_{\text{DM}}}{\Omega_b} \simeq 5.36 \pm 0.07.$$

Planck collaboration, 2018

機構の一般論

- Baryon asymmetry at soon after sphaleron decoupling $\rho_B/s \sim 10^{-4} \mu_B |_{T=T_{\text{sph}}}$
- Attractor的予言 $\rho_{\text{DM}}/s \sim 10^{-3} m_{\text{DM}}$

機構の一般論

- Baryon asymmetry at soon after sphaleron decoupling $\rho_B/s \sim 10^{-4} \mu_B |_{T=T_{\text{sph}}}$

- Attractor的予言 $\rho_{\text{DM}}/s \sim 10^{-3} m_{\text{DM}}$

$$\mu_B \sim m_{\text{DM}},$$

ならばcoincidence は説明される。

機構の一般論

- Baryon asymmetry at soon after sphaleron decoupling $\rho_B/s \sim 10^{-4} \mu_B |_{T=T_{\text{sph}}}$

- Attractor的予言 $\rho_{\text{DM}}/s \sim 10^{-3} m_{\text{DM}}$

$$\mu_B \sim m_{\text{DM}}, \text{ i.e. } \mu_{\text{DM}}$$

ならばcoincidence は説明される。

機構の一般論

- Baryon asymmetry at soon after sphaleron decoupling $\rho_B/s \sim 10^{-4} \mu_B |_{T=T_{\text{sph}}}$

- Attractor的予言 $\rho_{\text{DM}}/s \sim 10^{-3} m_{\text{DM}}$

$$\mu_B \sim m_{\text{DM}}, \text{ i.e. } \mu_{\text{DM}}$$

ならばcoincidence は説明される。• 存在するの？

μ DMのシナリオあります。

- Spontaneous baryogenesis by ALP induced EW

walls: $\mu = \gamma_w v_w m_a$ (if $\gamma_w v_w m_a < 10^{-6} T_{\text{sph}}$) [Vanvlasselaer, WY, 2604.20762](#)

ただし、wall collapseで出来るALPをなんとかする必要がある
(できます)

- Affleck-Dine-like spontaneous baryogenesis

[Affleck and Dine 1985](#); [Cohen and Kaplan 1987](#);
[Takahashi, Yamaguchi 0308173](#); [Chiba, Takahashi, Yamaguchi 0304102](#)
and Majoron type [Li:2001st](#), [Kusenko:2014lra](#), [Kusenko:2014uta](#), [Ibe:2015nfa](#)

今日の例

- 他？ 誰か簡単な例を知っていたら、議論しましょう！

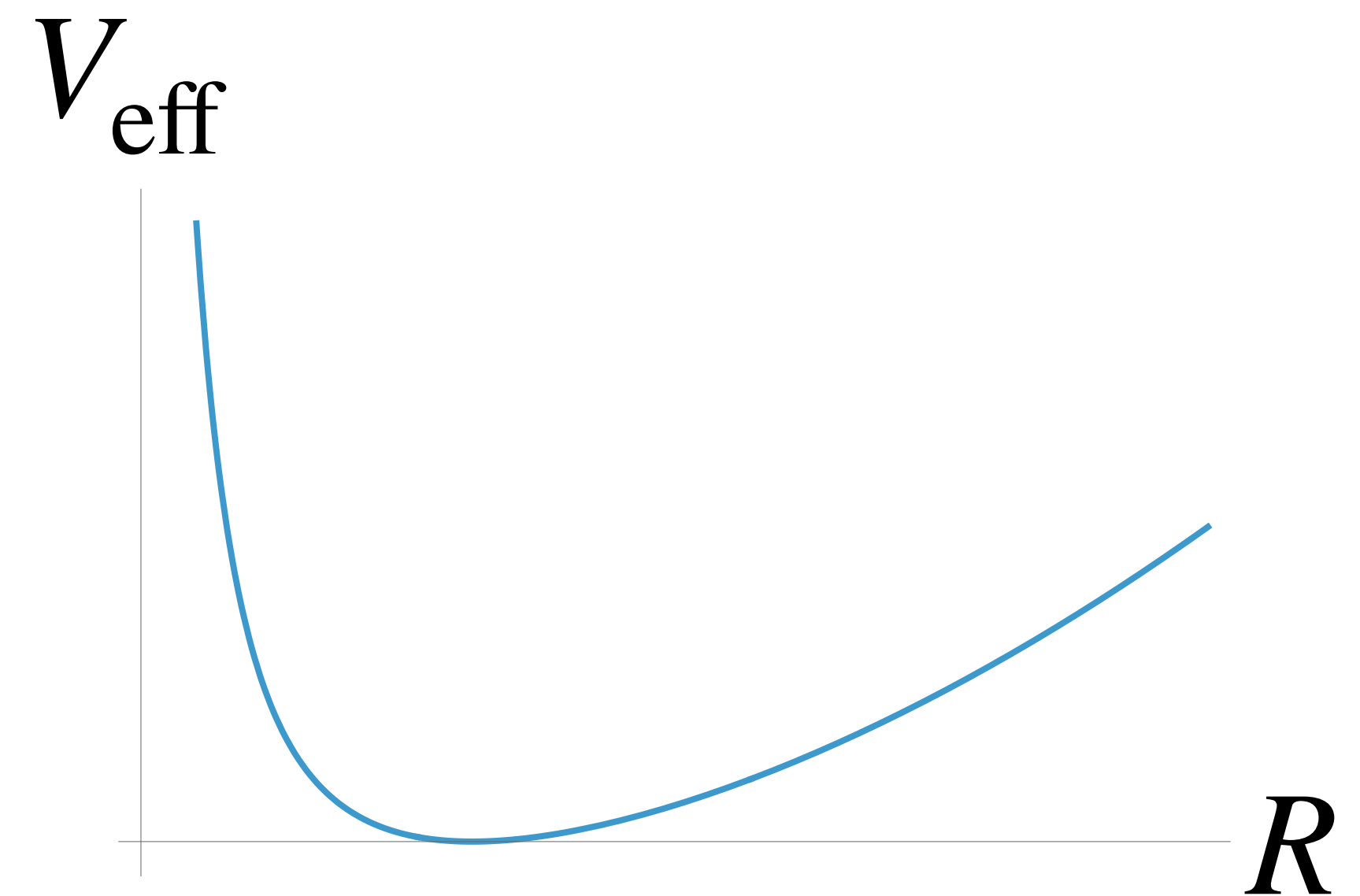
Affleck-Dine 型ダイナミックス $P = R e^{i\theta}$ [Affleck and Dine, 1985;](#)

$$V = m_R^2 |P|^2 \quad a^3 R^2 \dot{\theta} = \text{const}$$

$$\ddot{R} + 3H\dot{R} - R\dot{\theta}^2 + m_R^2 R = 0.$$

$$\rightarrow |\dot{\theta}| = m_R$$

Spontaneous baryogenesis



[Cohen and Kaplan 1987;](#)

$$\mu \sim |\dot{\theta}| = m_R$$

Affleck-Dine 場 = (Cold)HDMでcoincidence 説明!?

模型構築

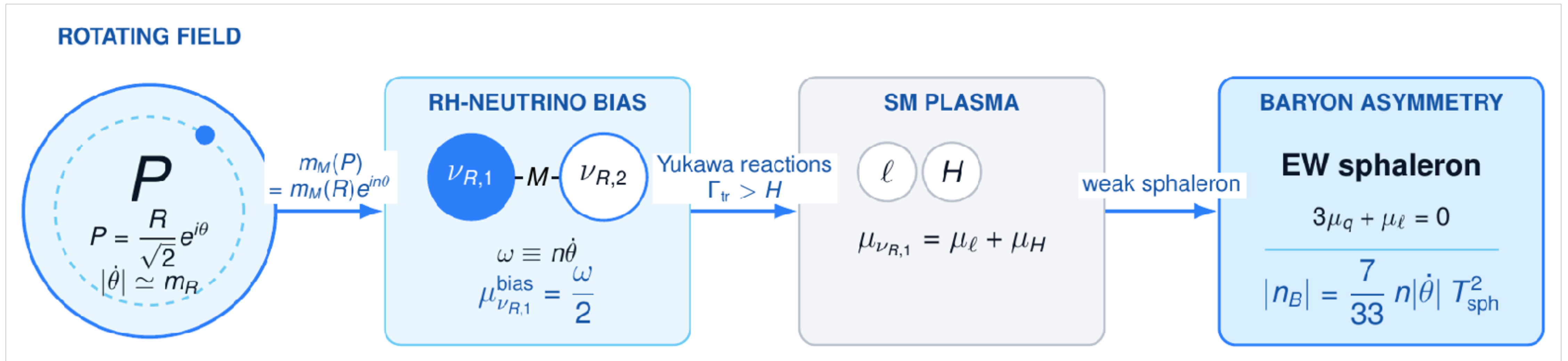
条件: R の熱ポテンシャル, CW 補正 $\ll \dot{\theta}^2 R^2 \ll \rho_{HDM}$

シーソー模型, [Yanagida 79; Gell-Mann, et al 79; Minkowski, 77; Glashow, 80; Mohapatra and Senjanovic, 80](#)
[Yanagida, Fukugita, 86](#)

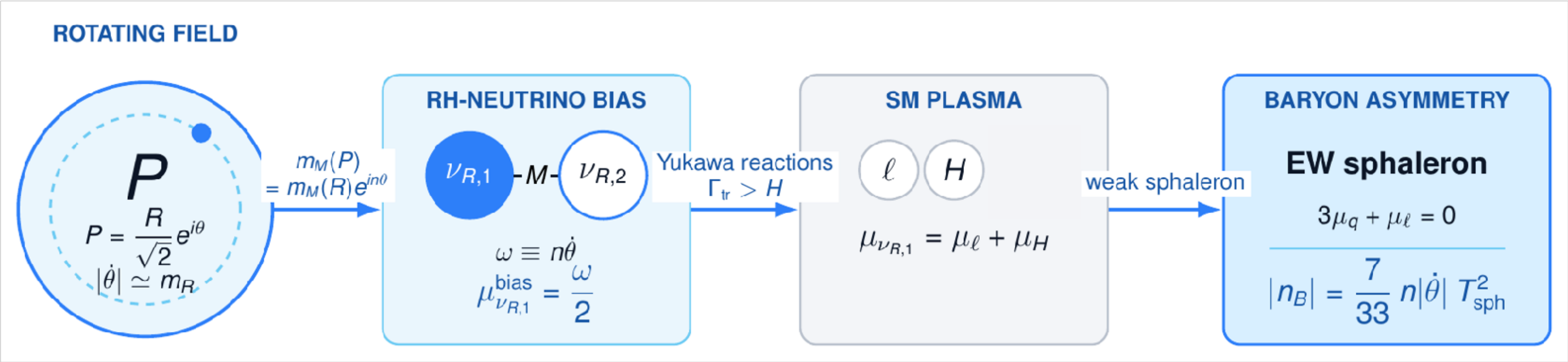
$$\mathcal{L} \supset -m_R^2 |P|^2 - y_{\alpha\nu} \overline{L}_\alpha \tilde{H} \nu_{R,1} - \frac{1}{2} y_P P^n \overline{\nu_{R,1}^c} \nu_{R,1} + \text{h.c.} \\ - M \nu_{R,1} \nu_{R,2} + \text{h.c.},$$

- 他の右巻き結合・質量は十分小さい. 近似的L対称性.
- $\uparrow$ ニュートリノ質量説明可能

機構と条件

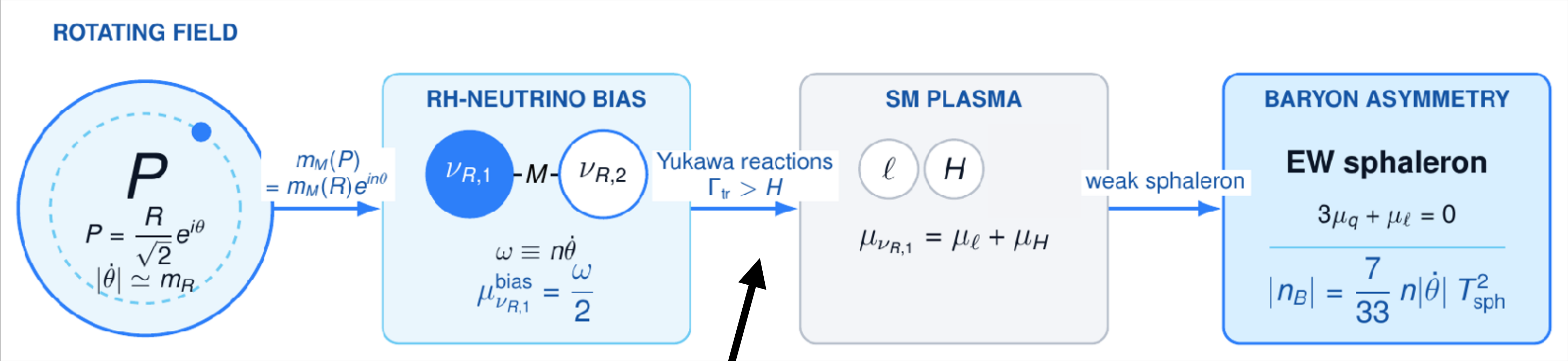


機構と条件



アトラクター: $\frac{\Omega_X}{\Omega_b} \simeq 5.40 \, g_{\chi_2} \frac{11}{n g_{*s}^{-1}(T_{\text{sph}}) g_{*s}(T_p)} \left(\frac{T_{\text{sph}}}{131.7 \text{ GeV}} \right) \left(\frac{0.94 \text{ GeV}}{m_N} \right).$

機構と条件



化学平衡

$$\Gamma_h^{\text{QKE}} = \frac{\Delta E^2 D}{2(D^2 + \delta_h^2)} + \mathcal{O}\left(\frac{\Delta E^4}{D^3}\right),$$
$$\Gamma_{\text{tr}} \equiv \min_{h=\pm} \Gamma_h^{\text{QKE}}, \quad \Gamma_{\text{tr}}(T_{\text{sph}}) > H(T_{\text{sph}}).$$

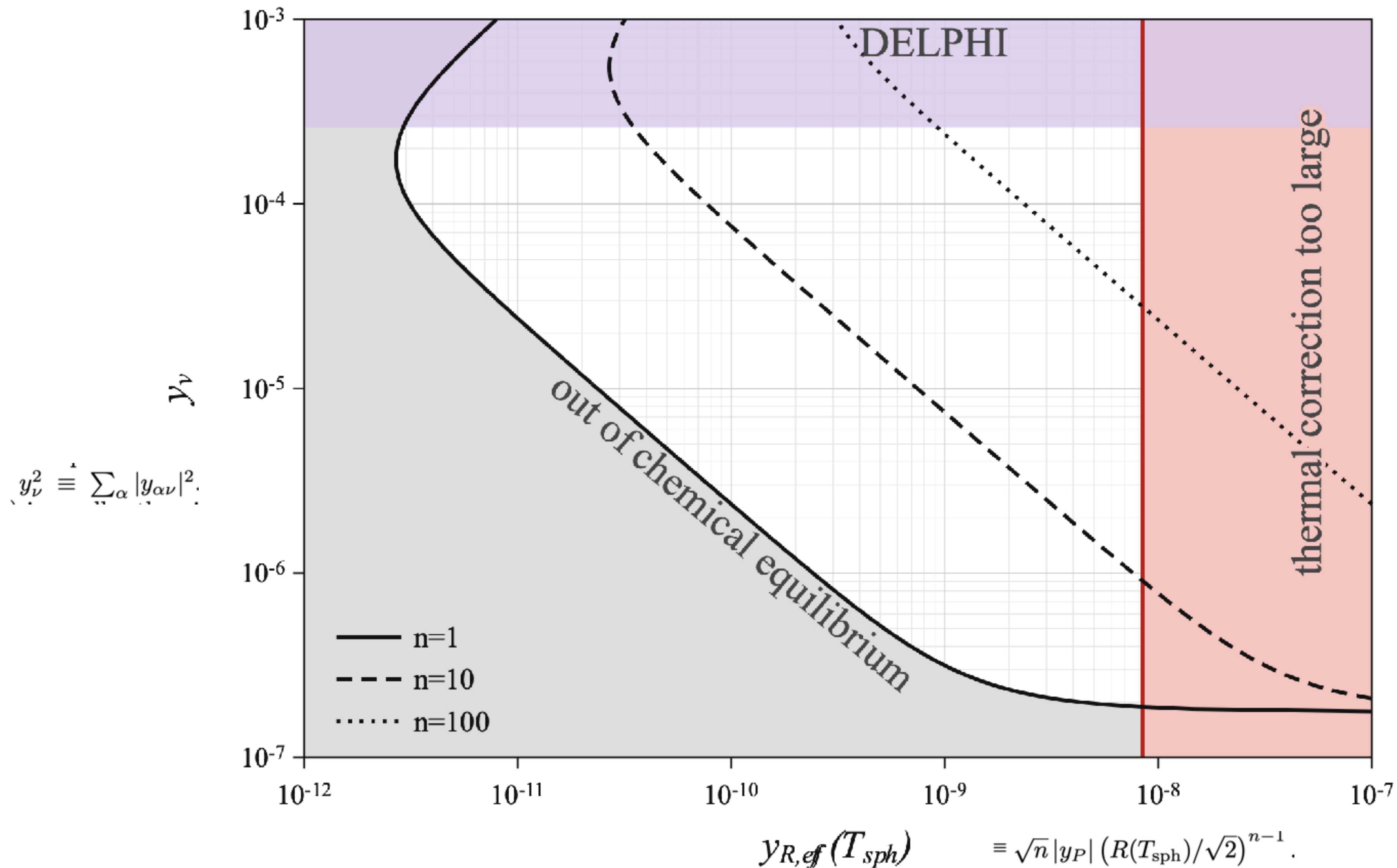
$$D \equiv \frac{\gamma_{\text{av}} y_\nu^2 T}{2}, \quad \Delta E \equiv \frac{M m_M(T)}{\bar{E}},$$
$$\delta_h \equiv \frac{y_\nu^2 T^2}{8\bar{E}} - \hbar n \dot{\theta} + \frac{m_M(T)^2}{2\bar{E}}.$$

where $\bar{E} \equiv 18\zeta(3)T/\pi^2 \simeq 2.19T$ and $\gamma_{\text{av}} \simeq 0.012$.

アトラクター: $\frac{\Omega_X}{\Omega_b} \simeq 5.40 \, g_{\chi_2} \frac{11}{n g_{*s}^{-1}(T_{\text{sph}}) g_{*s}(T_p)} \left(\frac{T_{\text{sph}}}{131.7 \, \text{GeV}} \right) \left(\frac{0.94 \, \text{GeV}}{m_N} \right).$

パラメータ領域は広い

$M = 10\text{GeV}, R(T = 100\text{GeV}) = 10^4\text{GeV}$ の場合



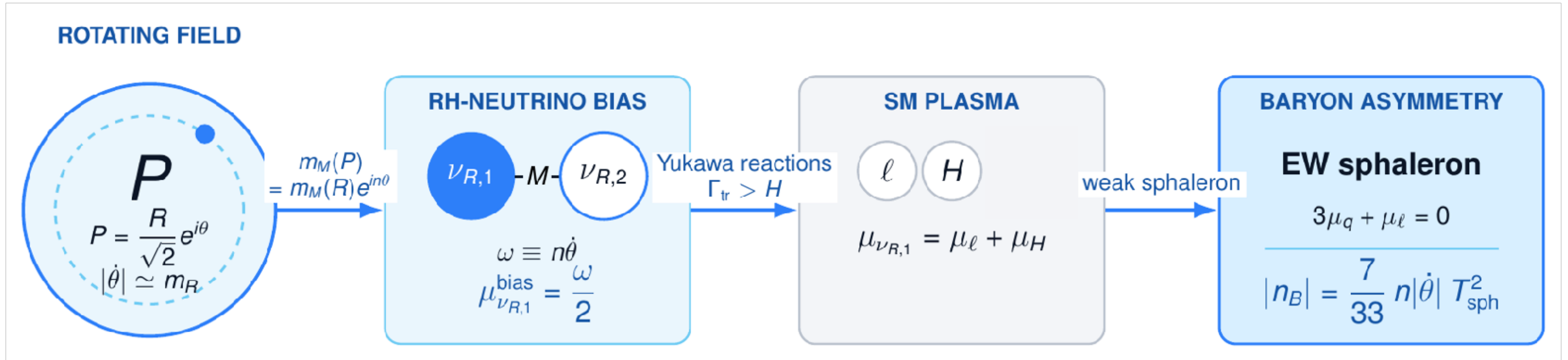
弱結合 PのUV completion:

— pNGBs, e.g. $SU(2) \rightarrow U(1)$

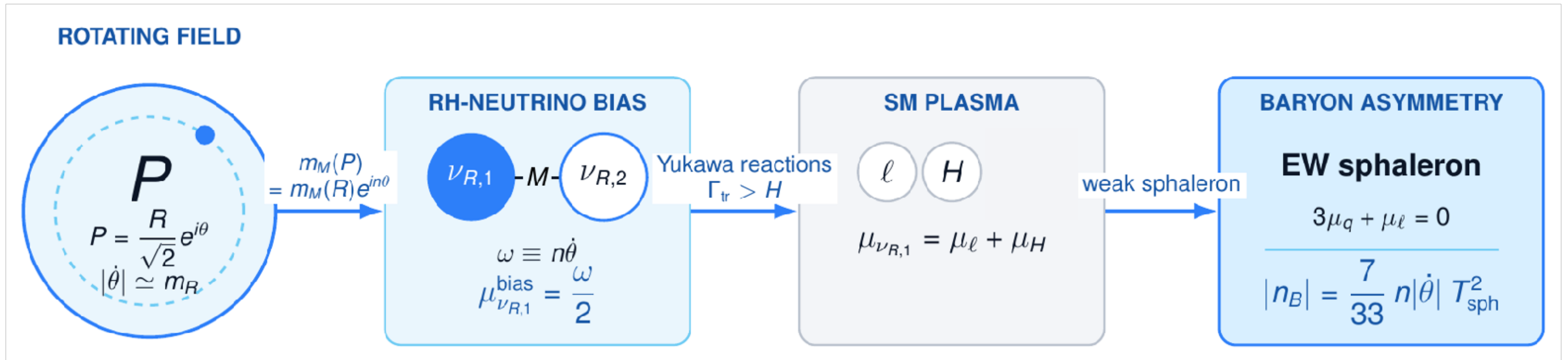
— Feebly coupled Higgs

どちらも輻射補正で安定 [WY, 2412.17802](https://arxiv.org/abs/2412.17802)

機構と条件

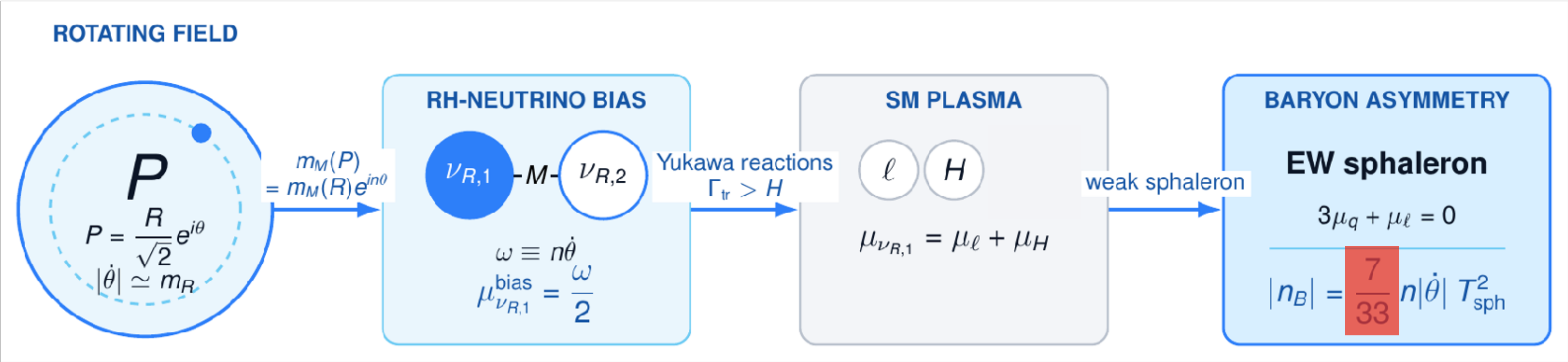


機構と条件



アトラクター:
$$\frac{\Omega_X}{\Omega_b} \simeq 5.40 g_{\chi_2} \frac{11}{n g_{*s}^{-1}(T_{\text{sph}}) g_{*s}(T_p)} \left(\frac{T_{\text{sph}}}{131.7 \text{ GeV}} \right) \left(\frac{0.94 \text{ GeV}}{m_N} \right).$$

機構と条件



簡単な模型だけど、ちょっと不自然。。。
+ スカラー3個で繰り込み可能模型にできるけど。

アトラクター:
$$\frac{\Omega_X}{\Omega_b} \simeq 5.40 \, g_{\chi_2} \frac{11}{n g_{*s}^{-1}(T_{\text{sph}}) g_{*s}(T_p)} \left(\frac{T_{\text{sph}}}{131.7 \text{ GeV}} \right) \left(\frac{0.94 \text{ GeV}}{m_N} \right).$$

ここまでのメッセージ

- μ DMで Ω_{DM}, Ω_B coincidenceを説明可能
- 一つの実現例の模型で、 Ω_{DM}/Ω_B がfactor 10だけズレた。
 1. ちょうど良くなるような模型の拡張。
 2. ちょっとアトラクターからずればいいのかにしない。
 3. もっと自然な模型があるけど見つかってない。
- **eV dark matterは特別**

ここまでのメッセージ

- μ DMで Ω_{DM}, Ω_B coincidenceを説明可能
- 一つの実現例の模型で、 Ω_{DM}/Ω_B がfactor 10だけズレた。
 1. ちょうど良くなるような模型の拡張。
 2. ちょっとアトラクターからずればいいのかにしない。
 3. もっと自然な模型があるけど見つかってない。

• eV dark matterは特別

背後にある「偶然」
∴ $T_{eq}^{SM} \sim \text{eV}$

ここまでのメッセージ

- μ DMで Ω_{DM}, Ω_B coincidenceを説明可能
- 一つの実現例の模型で、 Ω_{DM}/Ω_B がfactor 10だけズレた。
 1. ちょうど良くなるような模型の拡張。
 2. ちょっとアトラクターからずればいいのか気にしない。
 3. もっと自然な模型があるけど見つかってない。

• eV dark matterは特別

背後にある「偶然」

$$\because T_{eq}^{SM} \sim \text{eV}$$

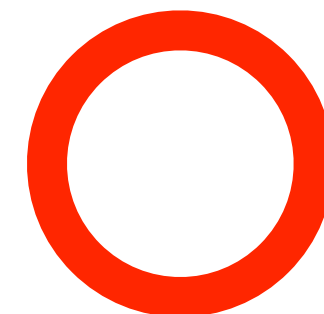
$$\because \mu_B^{SM}[T = T_{\text{sph}}] \sim \text{eV}$$

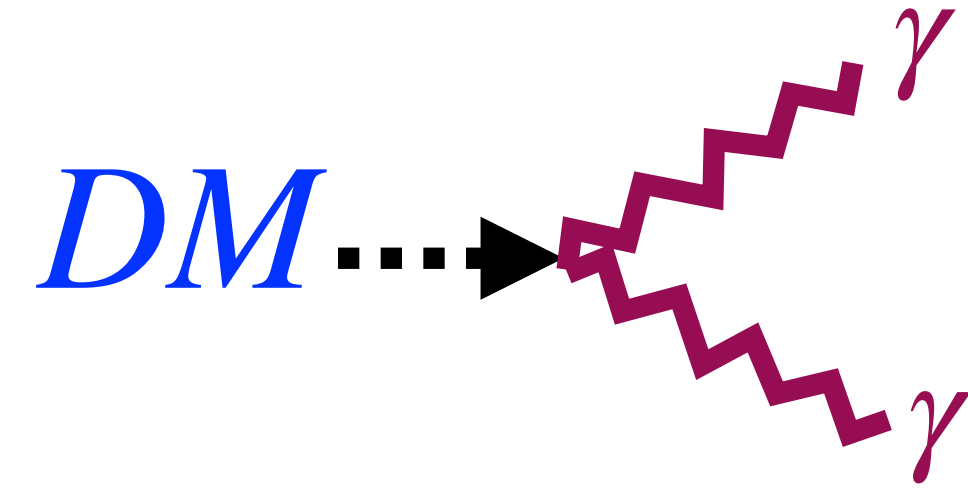
4. eV ダークマターの実験的探索

- eVDMは特にdecay を禁止する理由がないため自然に崩壊
-> graviton, neutrino or photon

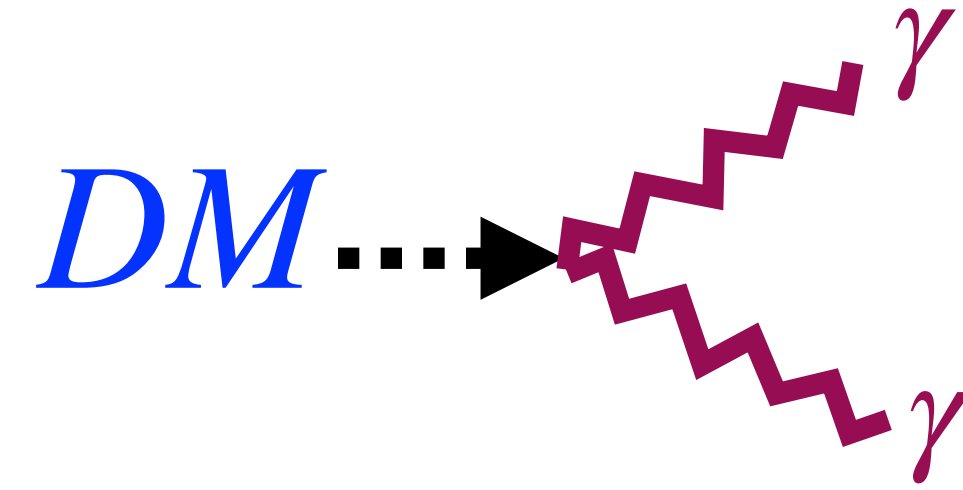
4. eV ダークマターの実験的探索

- eVDMは特にdecay を禁止する理由がないため自然に崩壊
-> graviton, neutrino or photon



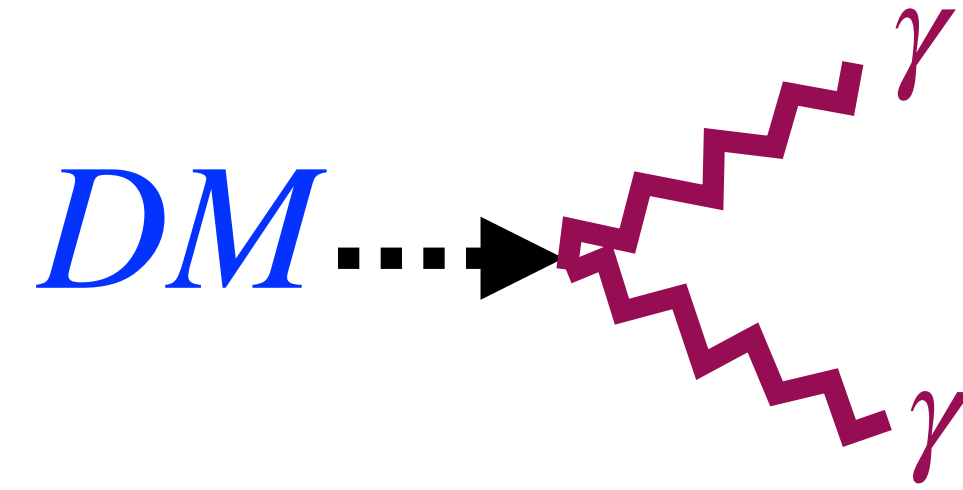


$$\lambda_{\gamma} \simeq \frac{2\pi}{1\text{eV}/2} \hbar c = \frac{2 \times 2\pi}{1\text{eV}} \times 0.2\text{eV}\mu m \sim 2.4\mu m$$



$$\lambda_{\gamma} \simeq \frac{2\pi}{1\text{eV}/2} \hbar c = \frac{2 \times 2\pi}{1\text{eV}} \times 0.2\text{eV}\mu\text{m} \sim 2.4\mu\text{m}$$

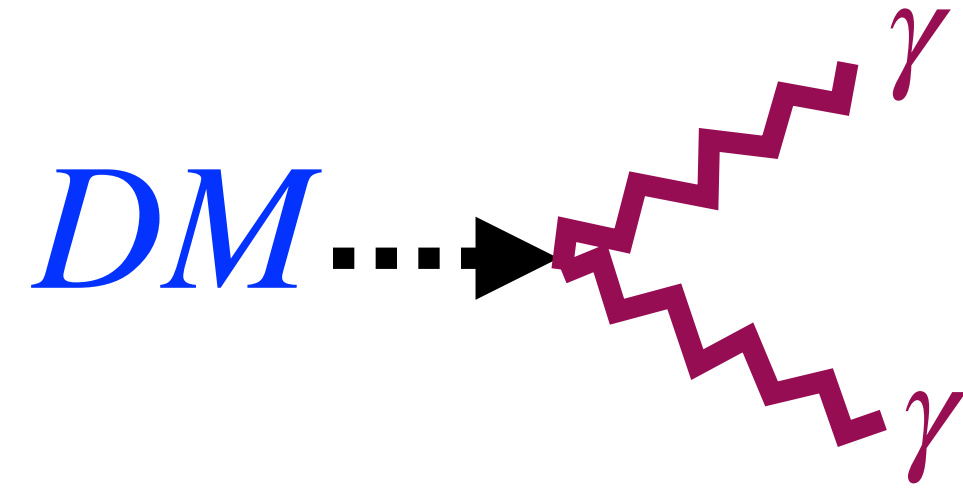
今、光の観測技術がやばい



$$\lambda_{\gamma} \simeq \frac{2\pi}{1\text{eV}/2} \hbar c = \frac{2 \times 2\pi}{1\text{eV}} \times 0.2\text{eV}\mu\text{m} \sim 2.4\mu\text{m}$$

今、光の観測技術がやばい

eV DM、今が旬？



$$\lambda_{\gamma} \simeq \frac{2\pi}{1\text{eV}/2} \hbar c = \frac{2 \times 2\pi}{1\text{eV}} \times 0.2\text{eV}\mu\text{m} \sim 2.4\mu\text{m}$$

今、光の観測技術がやばい

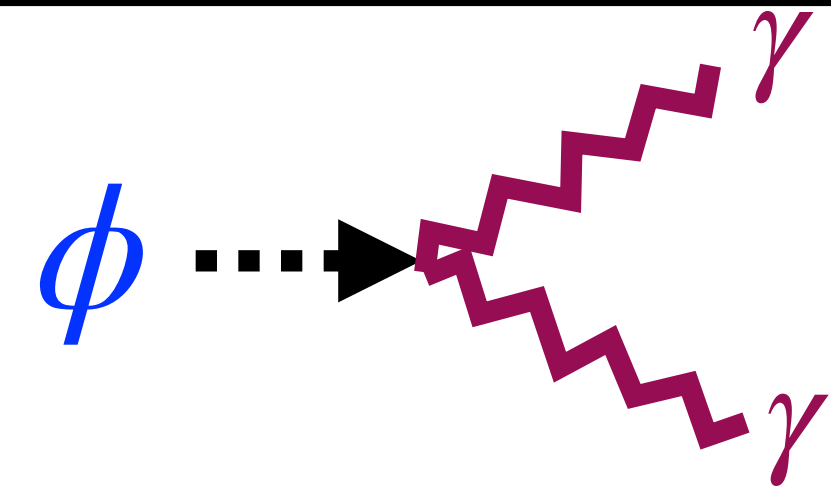
eV DM、今が旬？

今日は 近or中 赤外領域について

Difficulties of eV DM indirect detection

Significant background:

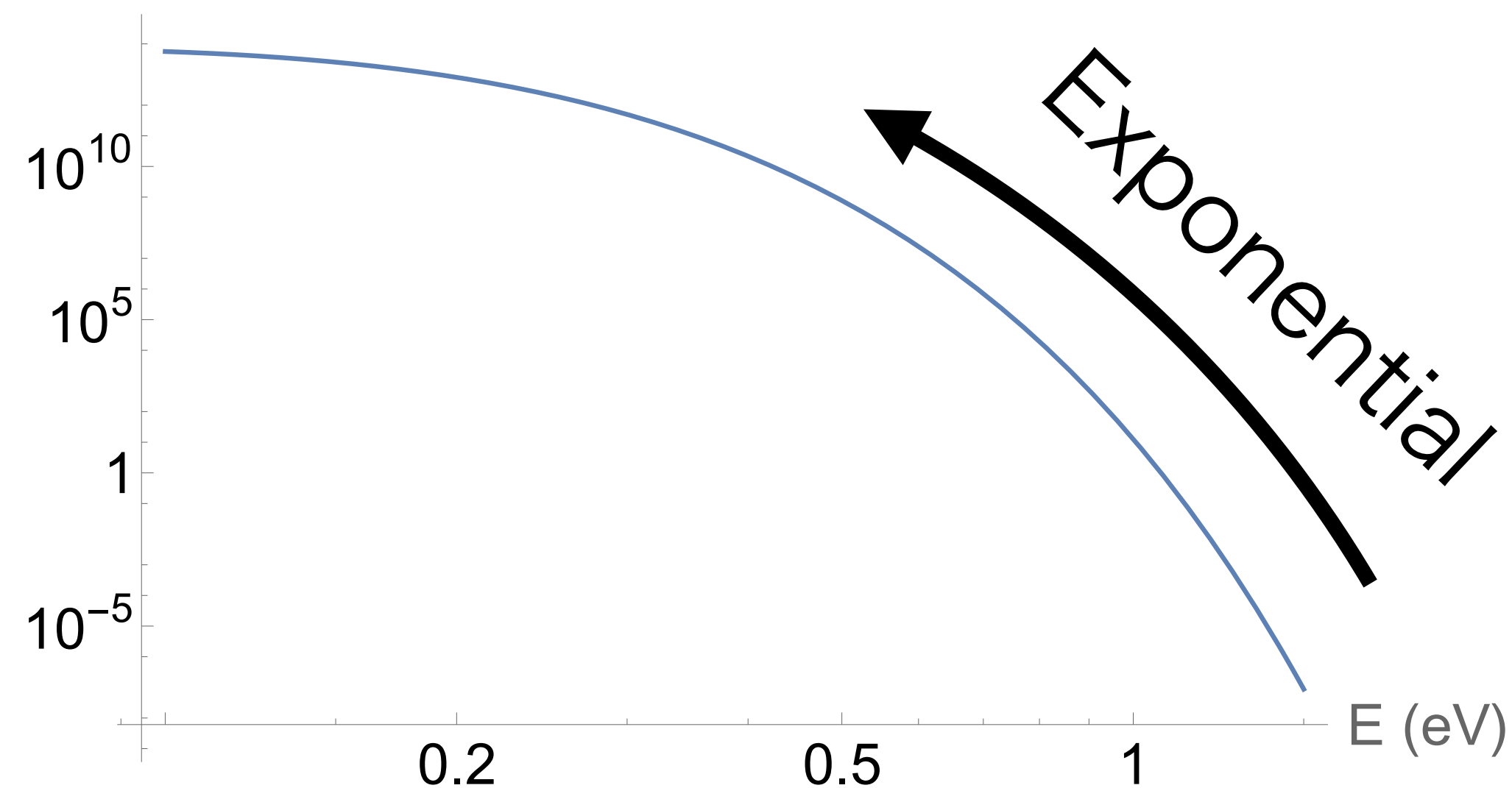
DM signal



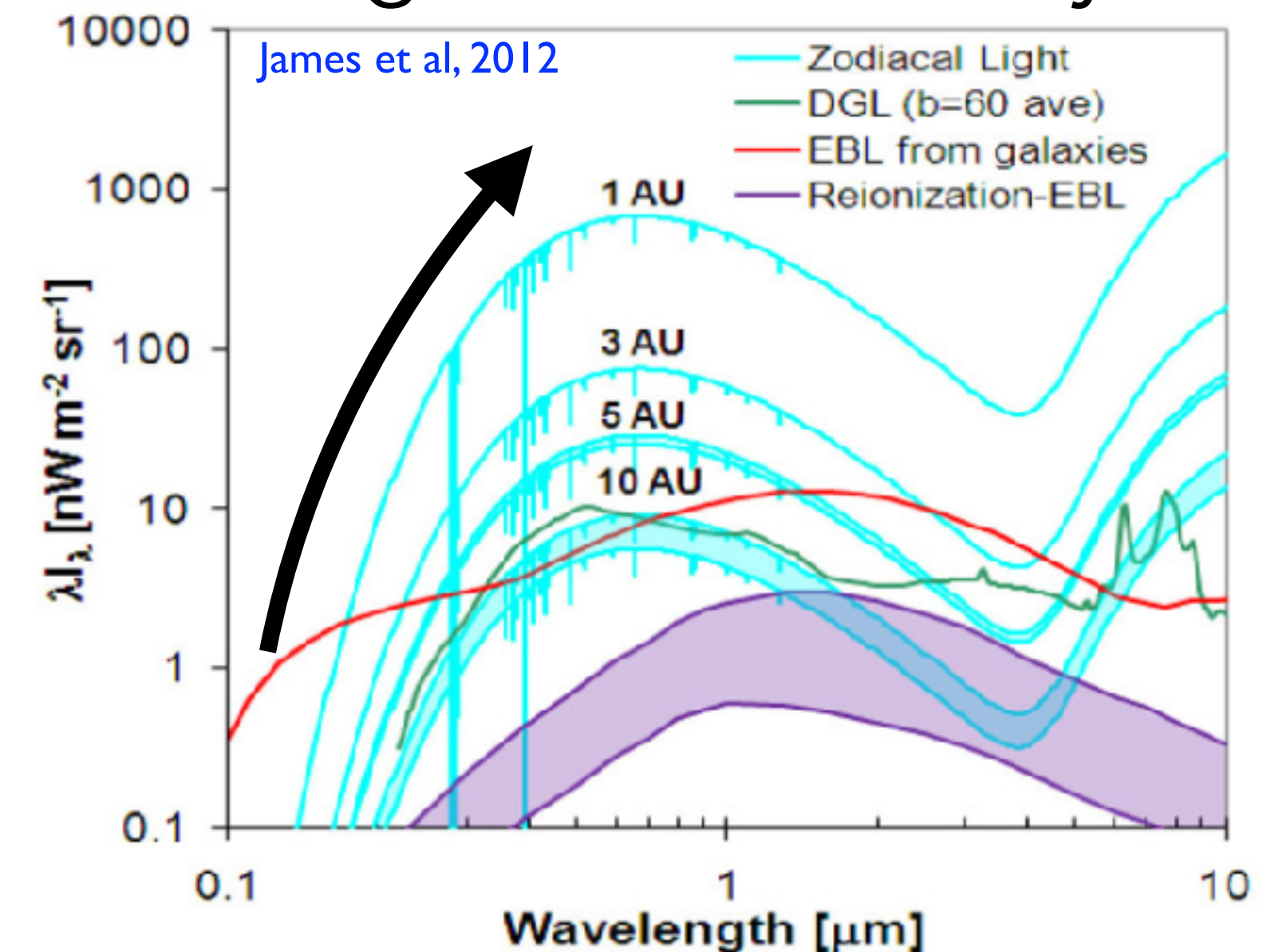
$$\lambda_\gamma \sim 1\mu m \frac{2\text{eV}}{m_\phi}$$

- Thermal radiation($T=290\text{K}$)

photon/(cm² sr s)



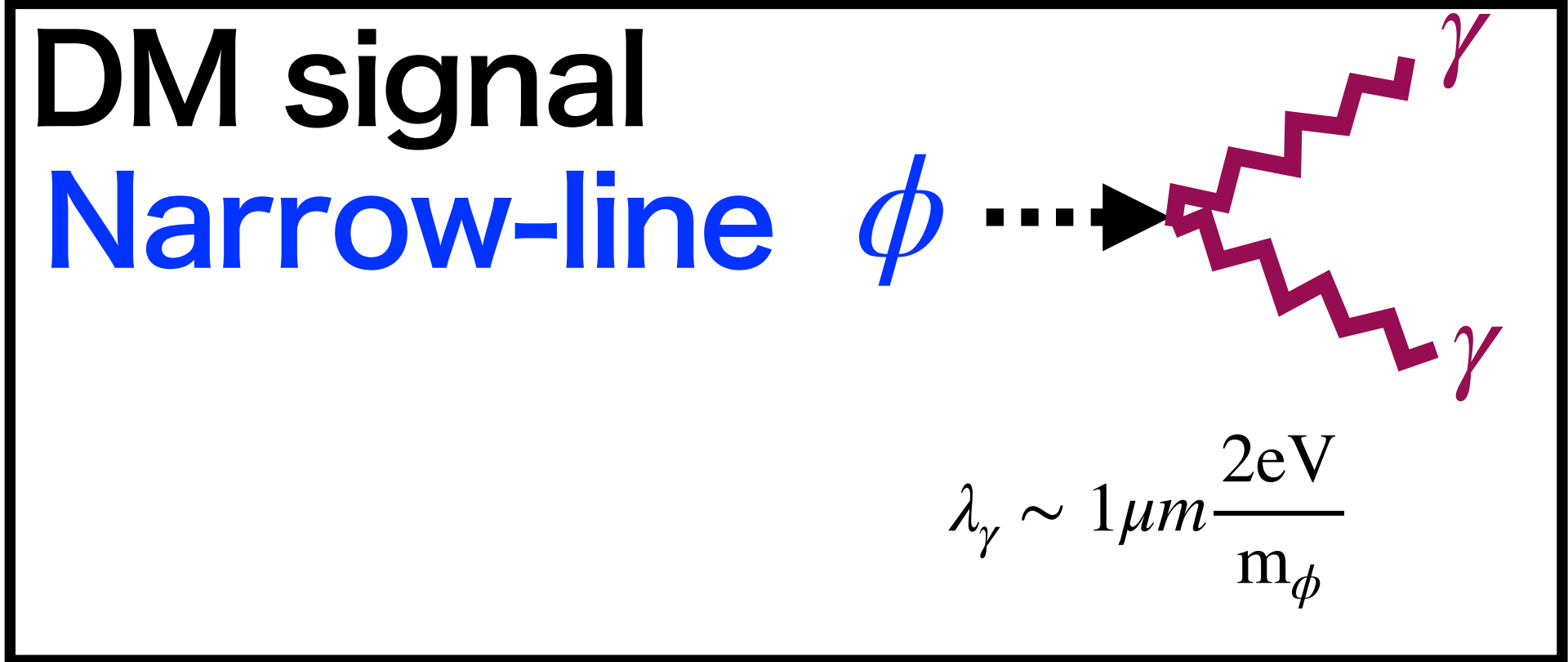
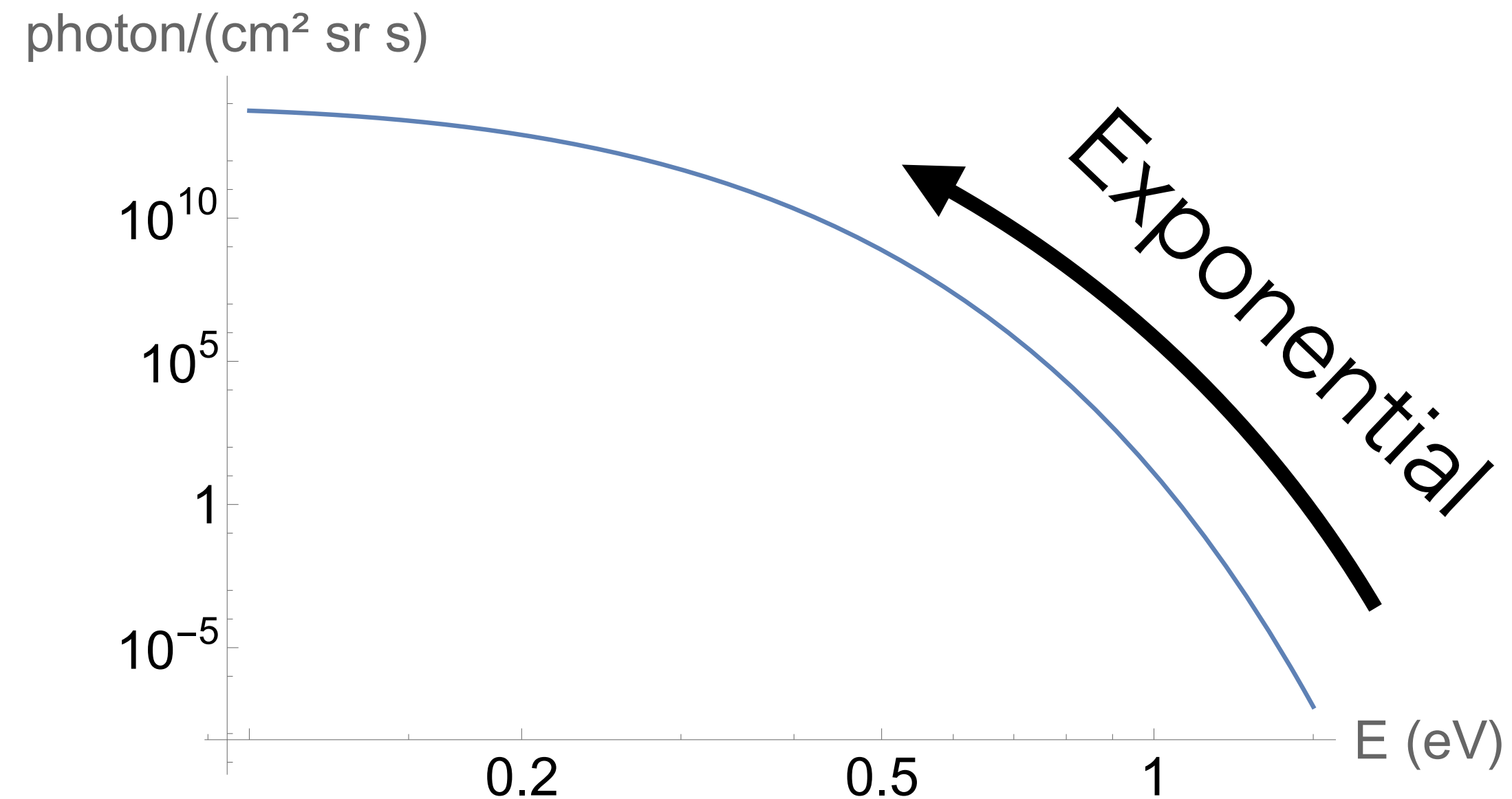
- Zodiacal light:
sun light scattered by dust



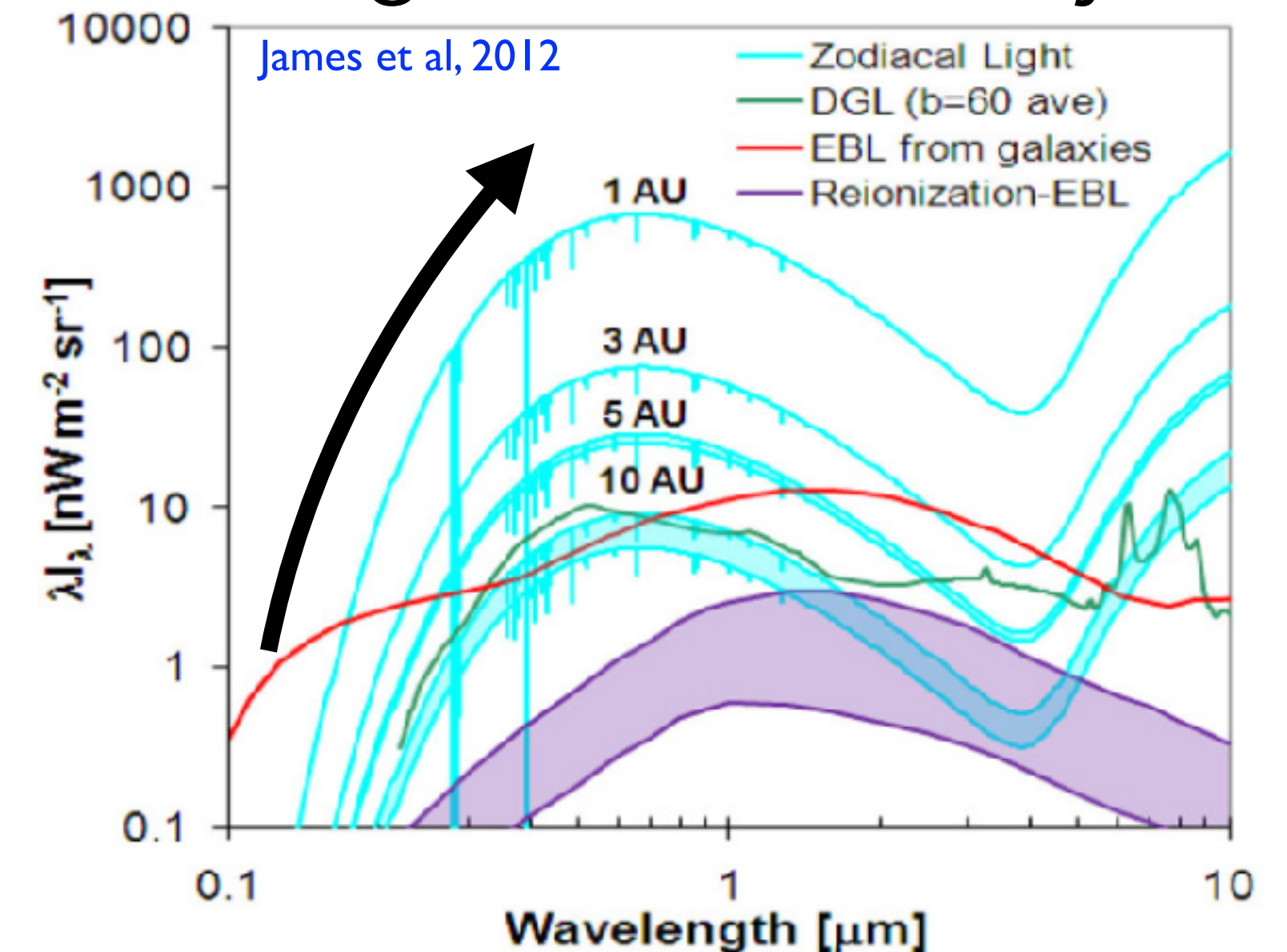
Difficulties of eV DM indirect detection

Significant background: Continuous spectra

- Thermal radiation (T=290K)



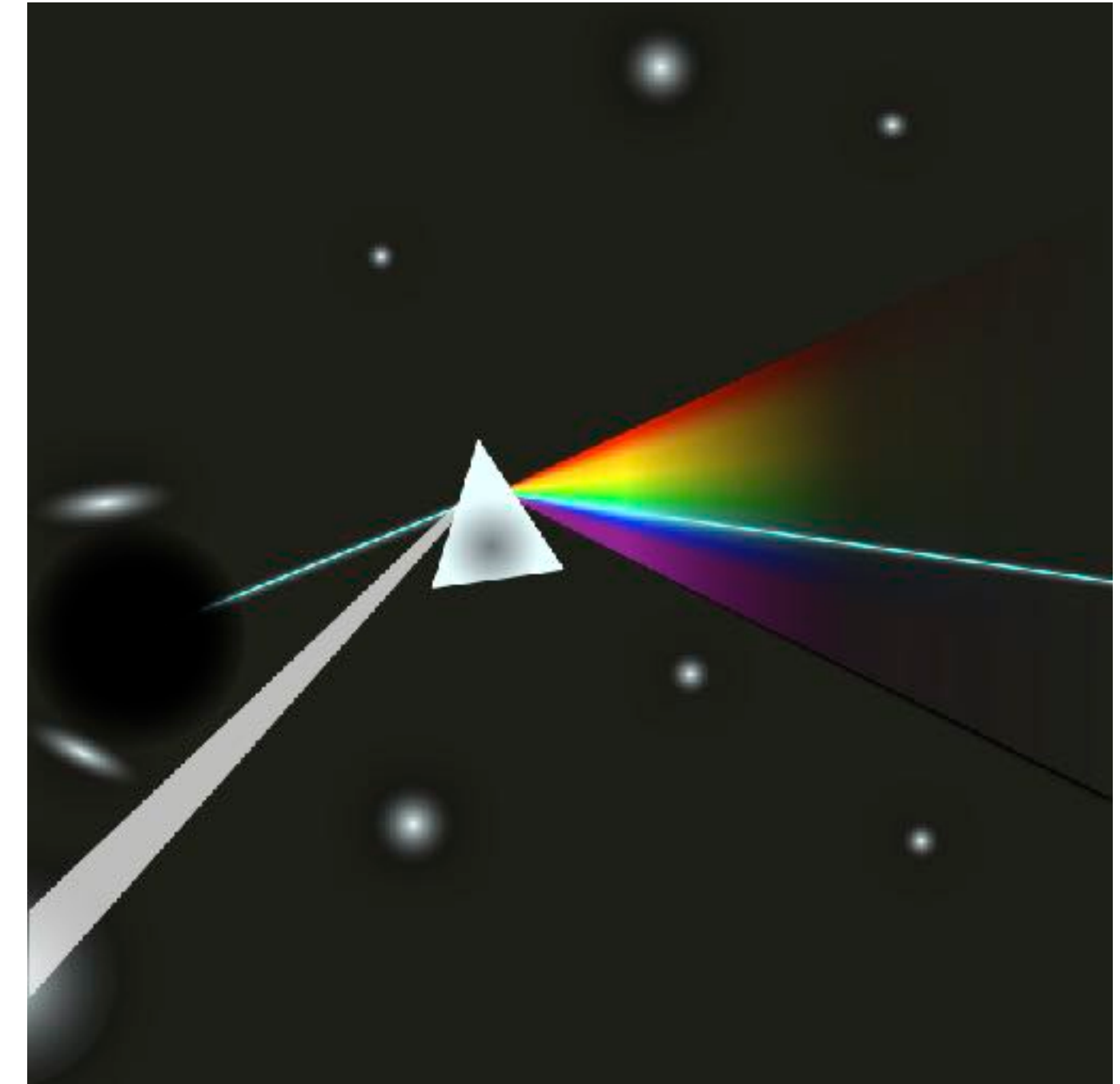
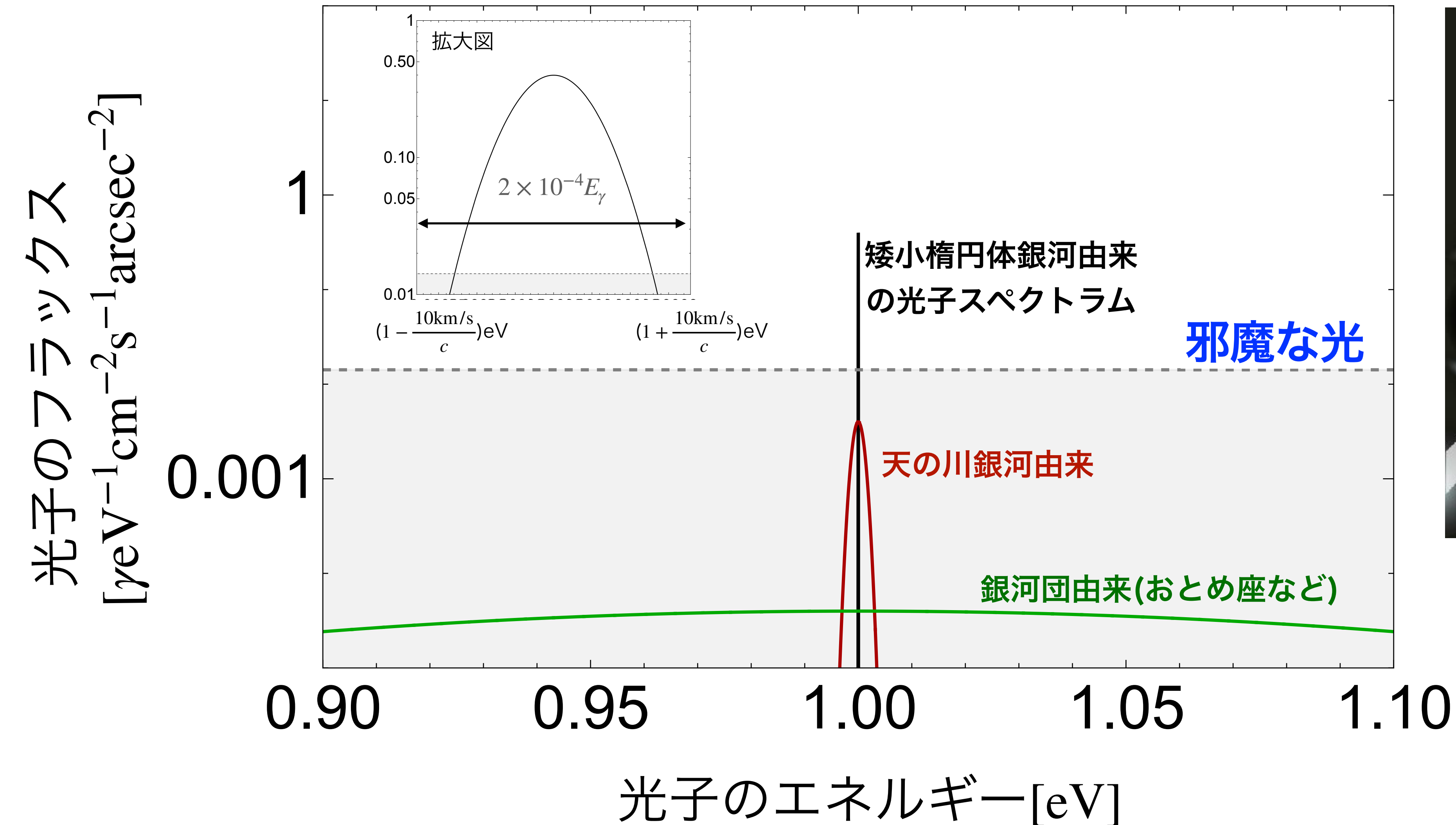
- Zodiacal light:
sun light scattered by dust



ダークマター由来の光は**狭線幅輝線**！超尖ってる。 十分な波長分解能があれば**邪魔な光**は無視できる。

T. Bessho, Y. Ikeda, WY, Phys.Rev.D 106 (2022) 9, 095025,

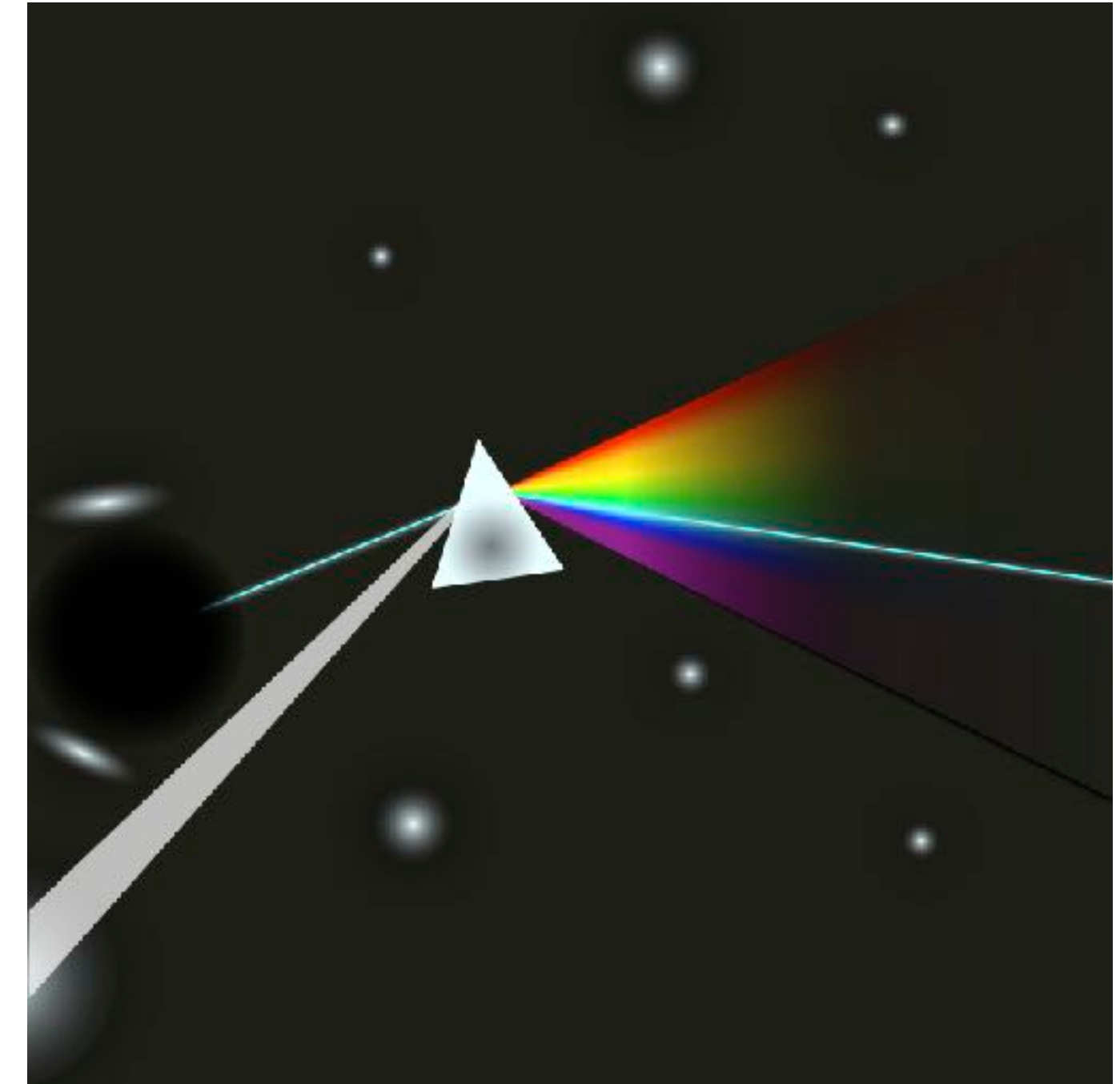
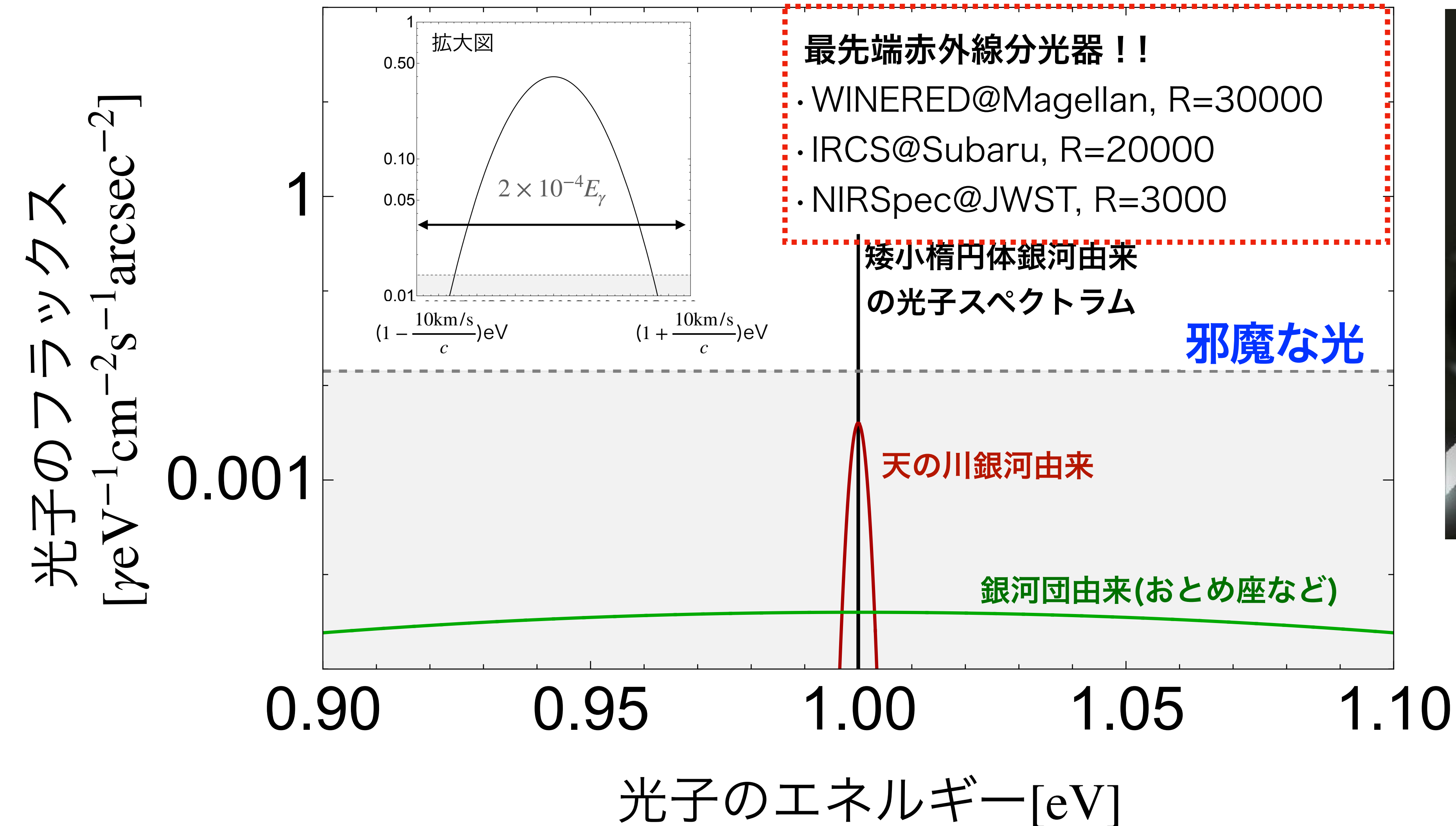
暗黒物質の質量 = 2eV, 光子結合 = 10^{-10}GeV^{-1}



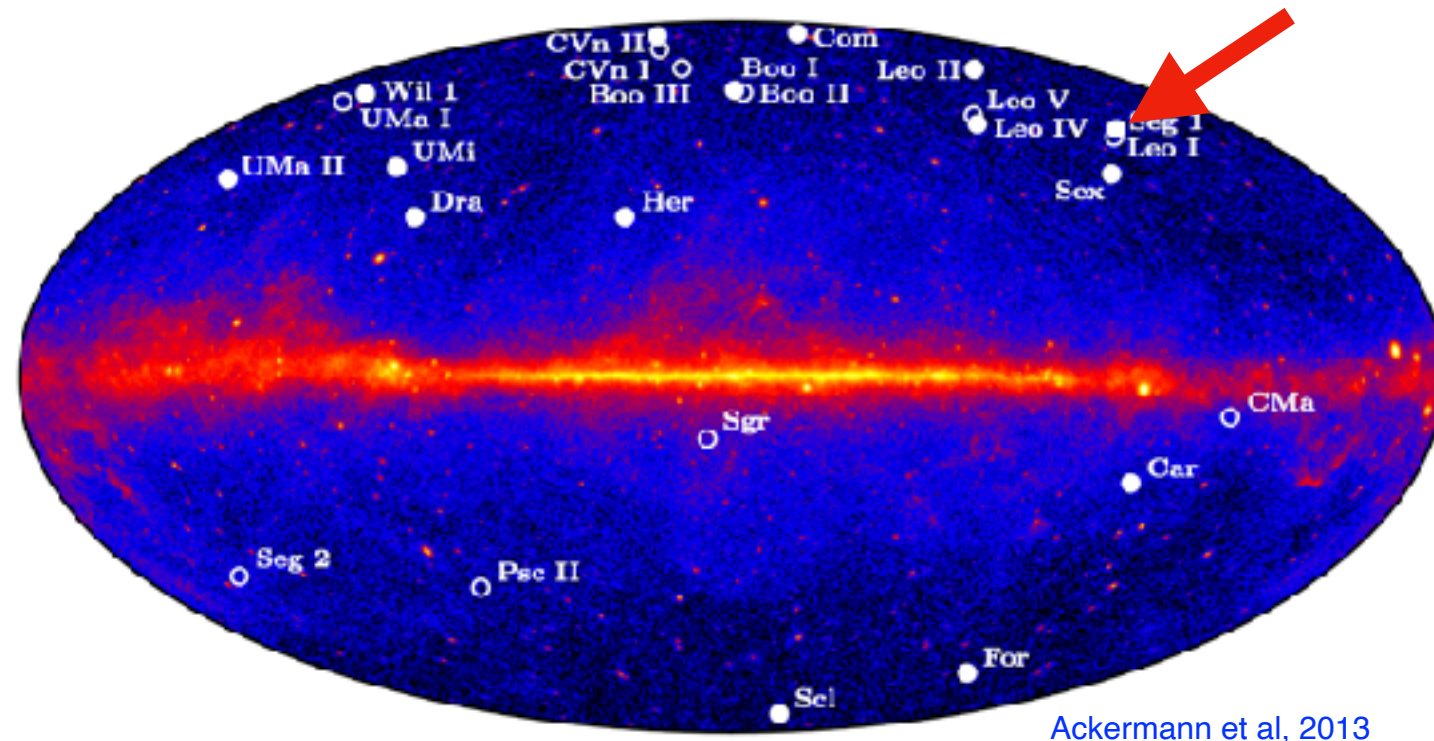
ダークマター由来の光は**狭線幅輝線**！超尖ってる。 十分な波長分解能があれば**邪魔な光**は無視できる。

T. Bessho, Y. Ikeda, WY, Phys.Rev.D 106 (2022) 9, 095025,

暗黒物質の質量 = 2eV, 光子結合 = 10^{-10}GeV^{-1}



eV DM search with WINERED @ Magellan



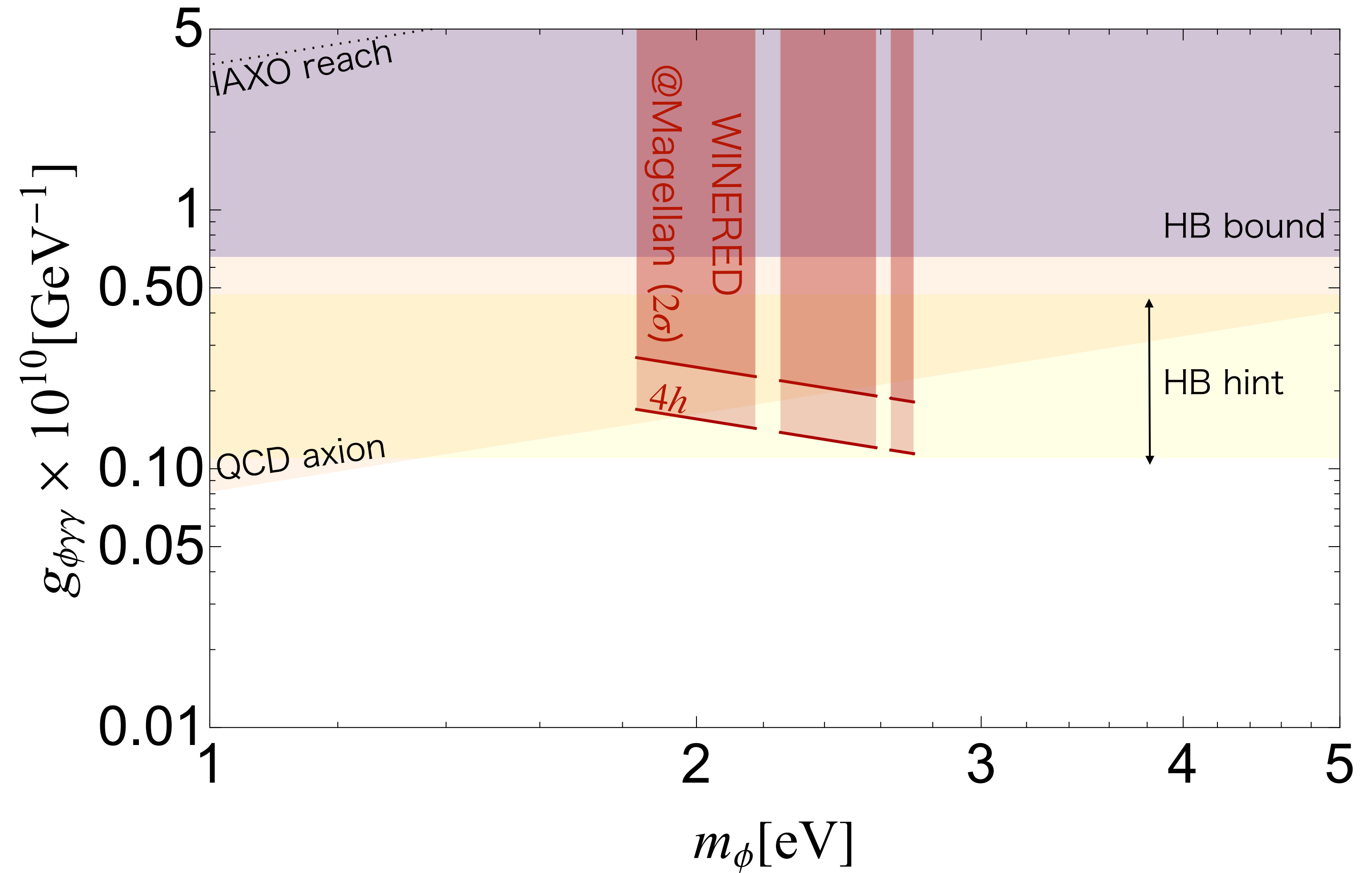
Ackermann et al, 2013



<https://www.cfa.harvard.edu>

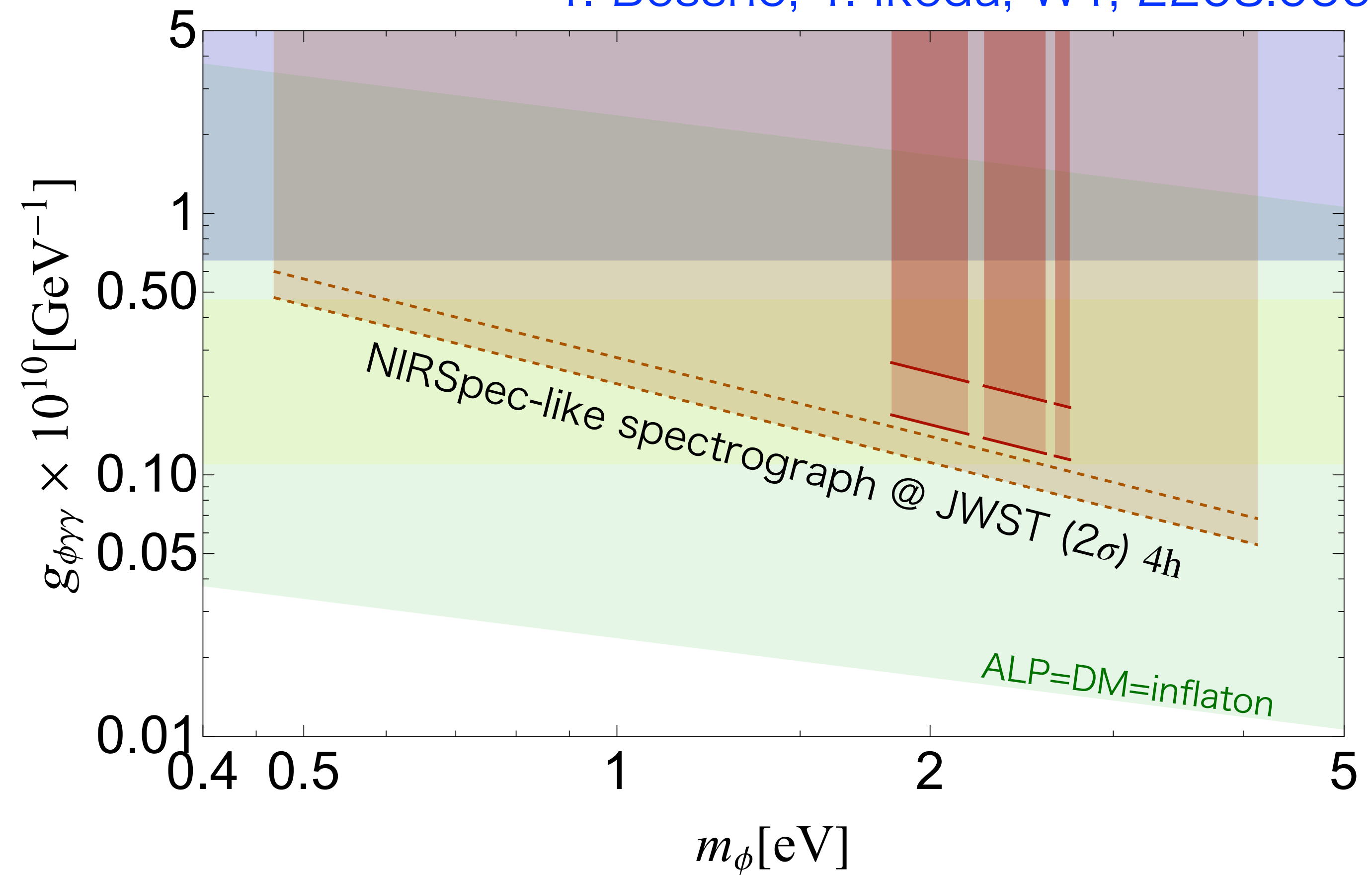
$$R \sim \lambda / \delta\lambda \sim 30000, \text{ on Earth}$$

T. Bessho, Y. Ikeda, WY, 2208.05975



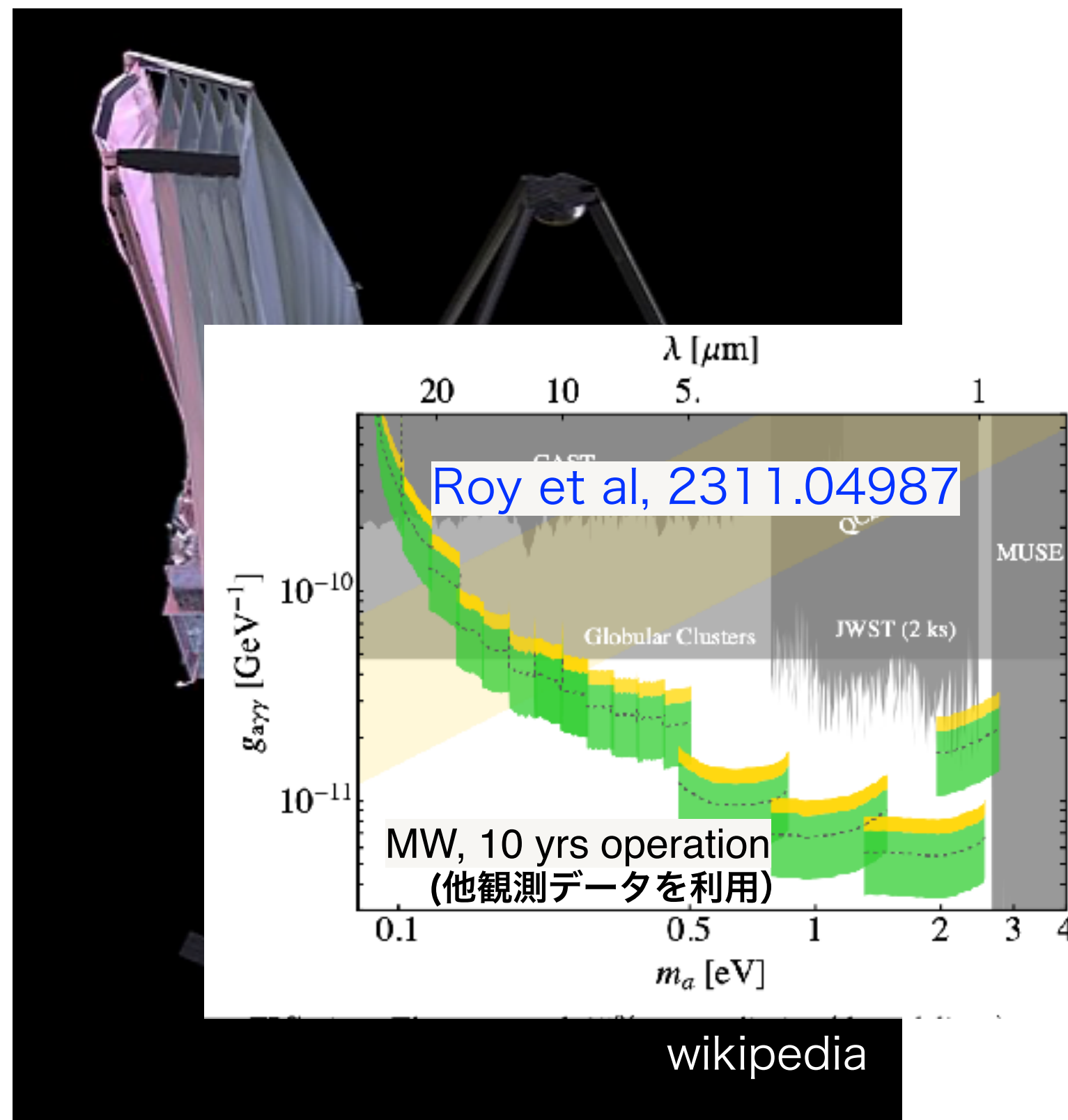
Ackermann et al. 2013

T. Bessho, Y. Ikeda, WY, 2208.05975



A deep-field astronomical image of a galaxy cluster, likely the Coma cluster, showing a dense field of galaxies. A prominent red arrow points to a specific galaxy labeled 'Seg 1'. Other labeled galaxies include Wil 1, UMa I, UMa II, UMi, Dra, Her, Com, CVn II, CVn I, Boo III, Boo I, Eri II, Leo II, Leo V, Leo IV, Leo I, Seg 2, CMa, Car, For, Scl, and Psc II. The image is credited to Ackermann et al. 2013.

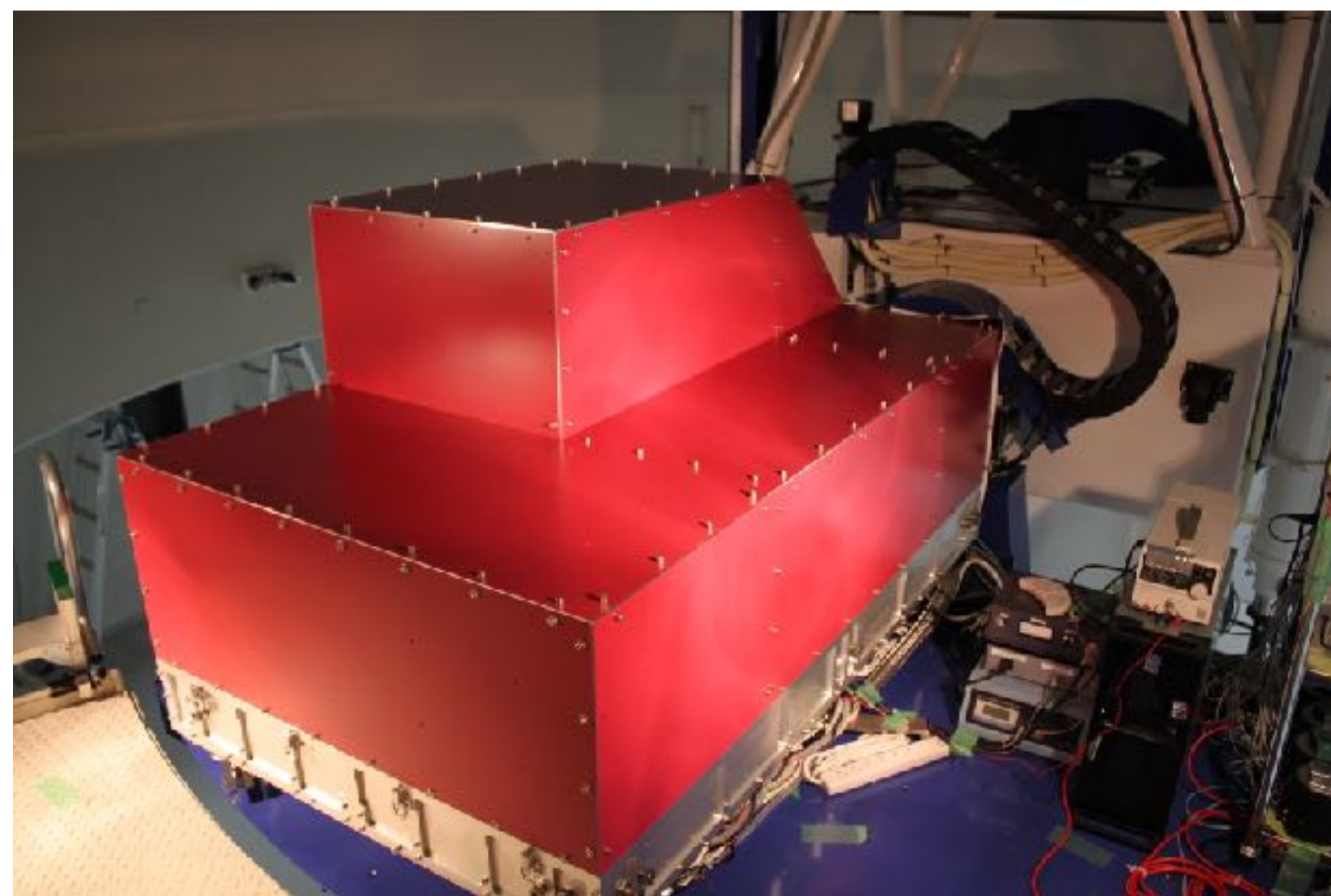
T. Bessho, Y. Ikeda, WY, 2208.05975



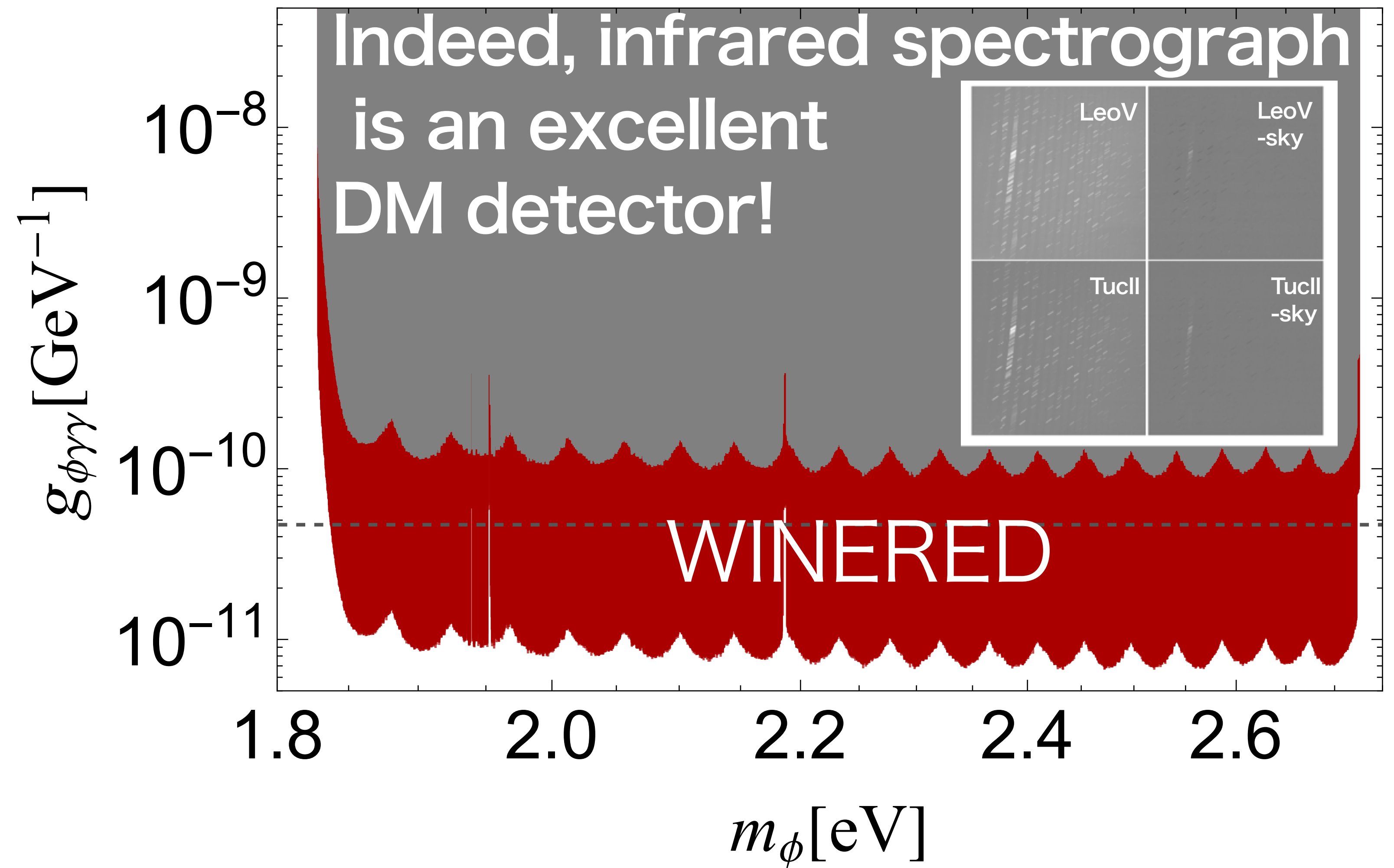
Experimental result: 4hrs obs by WINERED



WY, Ikeda, Bessho, Kobayashi+WINERED team, 2402.07976

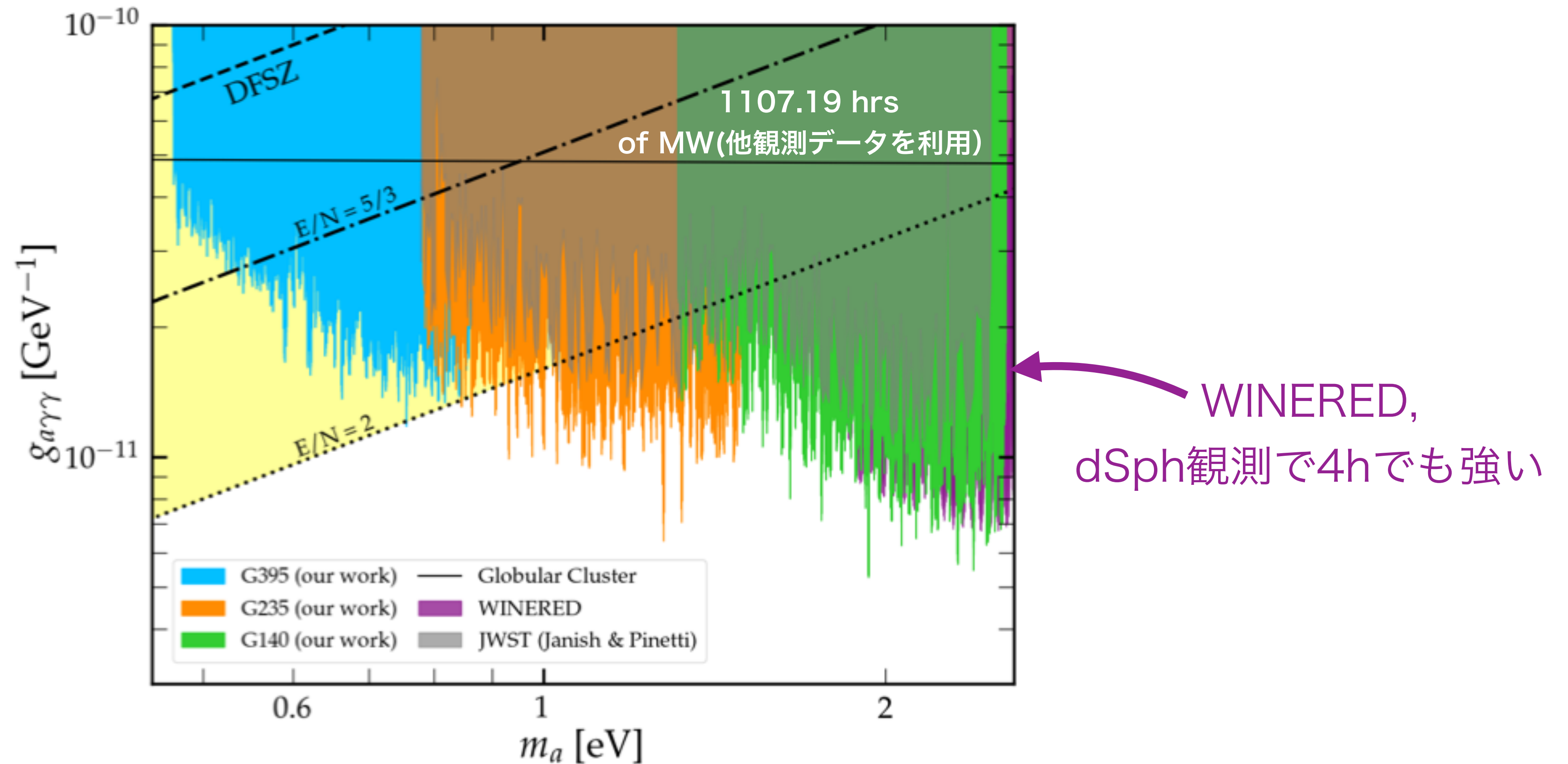


Ikeda et al 2006



JWSTでの応用もなされ, WINEREDと compara結果

Saha et al, [2503.14582](#)



注意: 同様な観測でより強いlimitは指摘されているが、他の結果・感度と矛盾している理由の一つは、
signal flux 4桁以上落ちうる星間吸収が考慮されていないから(see Ikeda, Bessho, WY 2208.05975)。

A deep space image showing a vast field of galaxies and stars. The background is dark blue and black, filled with numerous small, distant galaxies and bright, out-of-focus stars. A prominent bright star with a blue-white core and a pinkish-red nebula is visible in the upper right. The text is centered in the middle of the image.

・eVダークマターの未来
-超絶感度に向けて-

ダークマター高分散分光観測の弱点

- ・これ以上は結構むずい。競争率高い。

時間制限がえぐい

(c.f. 4時間の観測 v.s. WIMP search $O(1)$ 年)

- ・どうする？

赤外分光によるダークマター探索はまだ本気じゃない。

- ・既存の高分散分光器（の望遠鏡）は恒星の物理が主要目的で、超高い**空間分解能** $O(0.1)\text{arcsec}$ **とか**を持つ。
- ・ダークマターは銀河中に広がっているので、**空間分解能**いらないが、**広い視野、波長coverage**が欲しい。
- ・改良の余地がある。
- ・空間分解能、波長分解能、波長域。光学系のサイズと相関。



DRAGON BALL Z, A. Toriyama

赤外分光によるダークマター探索はまだ本気じゃない。

- ・既存の高分散分光器（の望遠鏡）は恒星の物理が主要目的で、超高い**空間分解能** $O(0.1)\text{arcsec}$ とかを持つ。
- ・ダークマターは銀河中に広がっているので、**空間分解能**いらないが、**広い視野、波長coverage**が欲しい。
- ・改良の余地がある。
- ・空間分解能、波長分解能、波長域。光学系のサイズと相関。



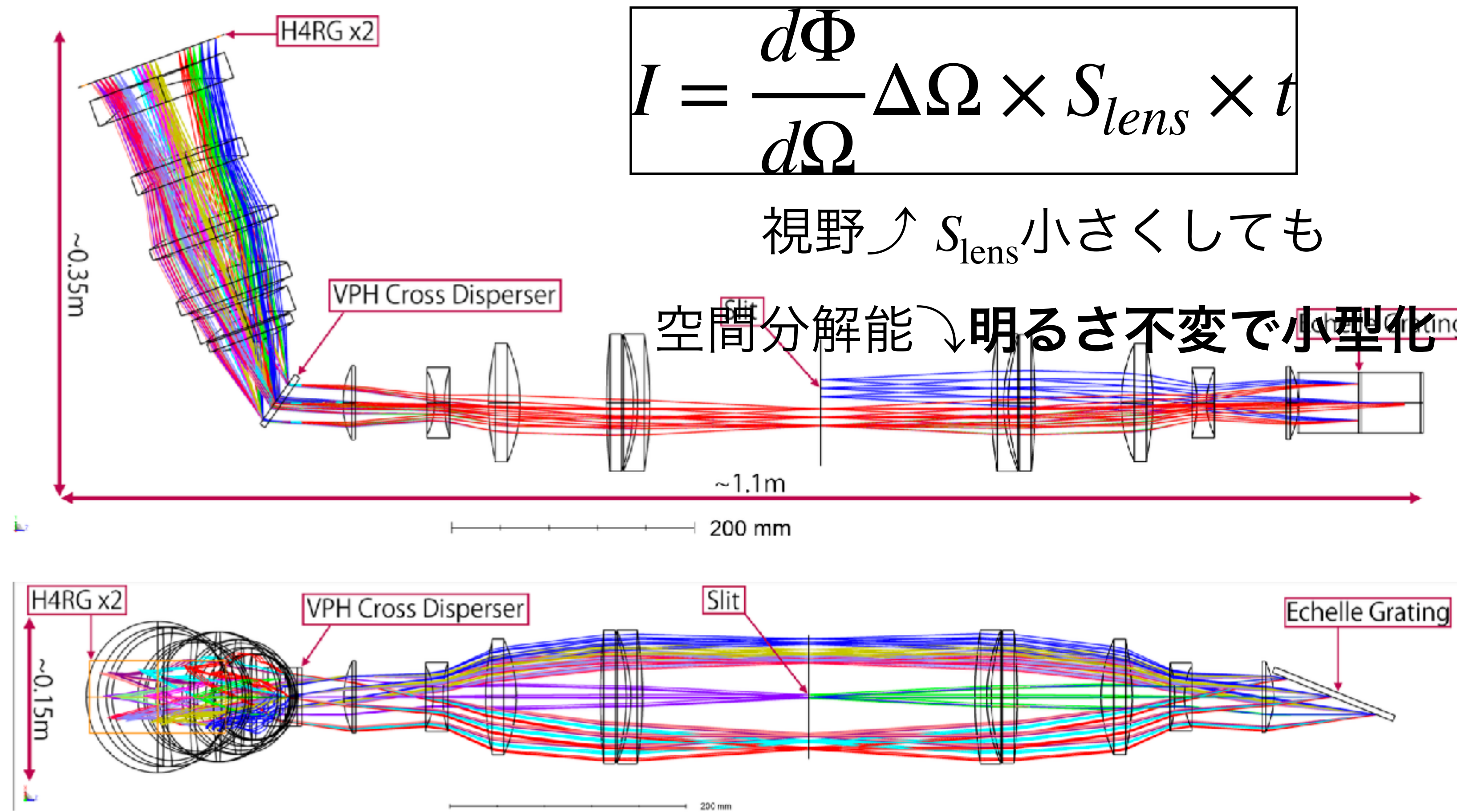
DRAGON BALL Z, A. Toriyama

eVダークマター特化分光器を開発しちゃえ!

Dark Matter Quest Spectrograph(DMQS)

Bessho, Ikeda, WY, Paper 13096-274 (SPIE-Conference 13096)

<1m 口径の望遠鏡に搭載可能なダークマター特化型高分散分光器の設計
0.8 mを仮定



C.f. 最先端天文望遠鏡
マゼラン6.5m口径
JWST6.5m口径
すばる8.3m口径
TMT30m口径 (将来)

使われなくなった
小口径望遠鏡で
DM観測！

Figure 3. The top and front views of the optical layout of the high-resolution mode of the DMQS

まとめ eVダークマターの過去・今・未来

- ・**過去:** eVダークマターは一時期HDMとして主流だった。
- ・**今:** eVダークマターはうまくいくことがあるし、見つけたら、バリオン数の起源やcoincidenceの謎もわかるかも。
[WY, 2608.26709](#)
- ・**未来:** ダークマター専用赤外線分光器の検証力は絶大、素粒子物理のステージを宇宙空間へ!

Back up

What we have observed

Based on proposals “eV-Dark Matter search with WINERED”, Jun 2023, PI. WY Co-I. Ikeda, Bessho
“eV-Dark Matter search with WINERED”, Nov 2023, PI. WY Co-I. Ikeda, Bessho
WY, Ikeda, Bessho, Kobayashi+WINERED team, 2402.07976

Simbad, Inger et al 0002110

Object name	Object type	RA(J2000)	DEC(J2000)	Obs. date	J_m	R	T_I (sec)
Leo V	dSph	11:31:09.6	+02:13:12	2023.06.06	—	28,000	3600
Tucana II	dSph	22:51:55.1	-58:34:08	2023.11.02	—	28,000	4200
Sky region 1	—	11:31:56.97	+02:09:19	2023.06.06	—	28,000	1800
Sky region 2	—	22:51:06.5	-57:28:46	2023.11.02	—	28,000	1200
Sky region 3	—	22:38:08.1	-58:24:39	2023.11.02	—	28,000	1200
HD134936	A0V	15:14:41.4	-52:35:42	2023.06.06	9.44	28,000	90

- Object-sky-object nodding observation
- Doppler shift analysis

What we have observed

Based on proposals “eV-Dark Matter search with WINERED”, Jun 2023, PI. WY Co-I. Ikeda, Bessho
“eV-Dark Matter search with WINERED”, Nov 2023, PI. WY Co-I. Ikeda, Bessho
WY, Ikeda, Bessho, Kobayashi+WINERED team, 2402.07976

Simbad, Inger et al 0002110

Target dSphs

Object name	Object type	RA(J2000)	DEC(J2000)	Obs. date	J_m	R	T_I (sec)
Leo V	dSph	11:31:09.6	+02:13:12	2023.06.06	—	28,000	3600
Tucana II	dSph	22:51:55.1	-58:34:08	2023.11.02	—	28,000	4200
Sky region 1	—	11:31:56.97	+02:09:19	2023.06.06	—	28,000	1800
Sky region 2	—	22:51:06.5	-57:28:46	2023.11.02	—	28,000	1200
Sky region 3	—	22:38:08.1	-58:24:39	2023.11.02	—	28,000	1200
HD134936	A0V	15:14:41.4	-52:35:42	2023.06.06	9.44	28,000	90

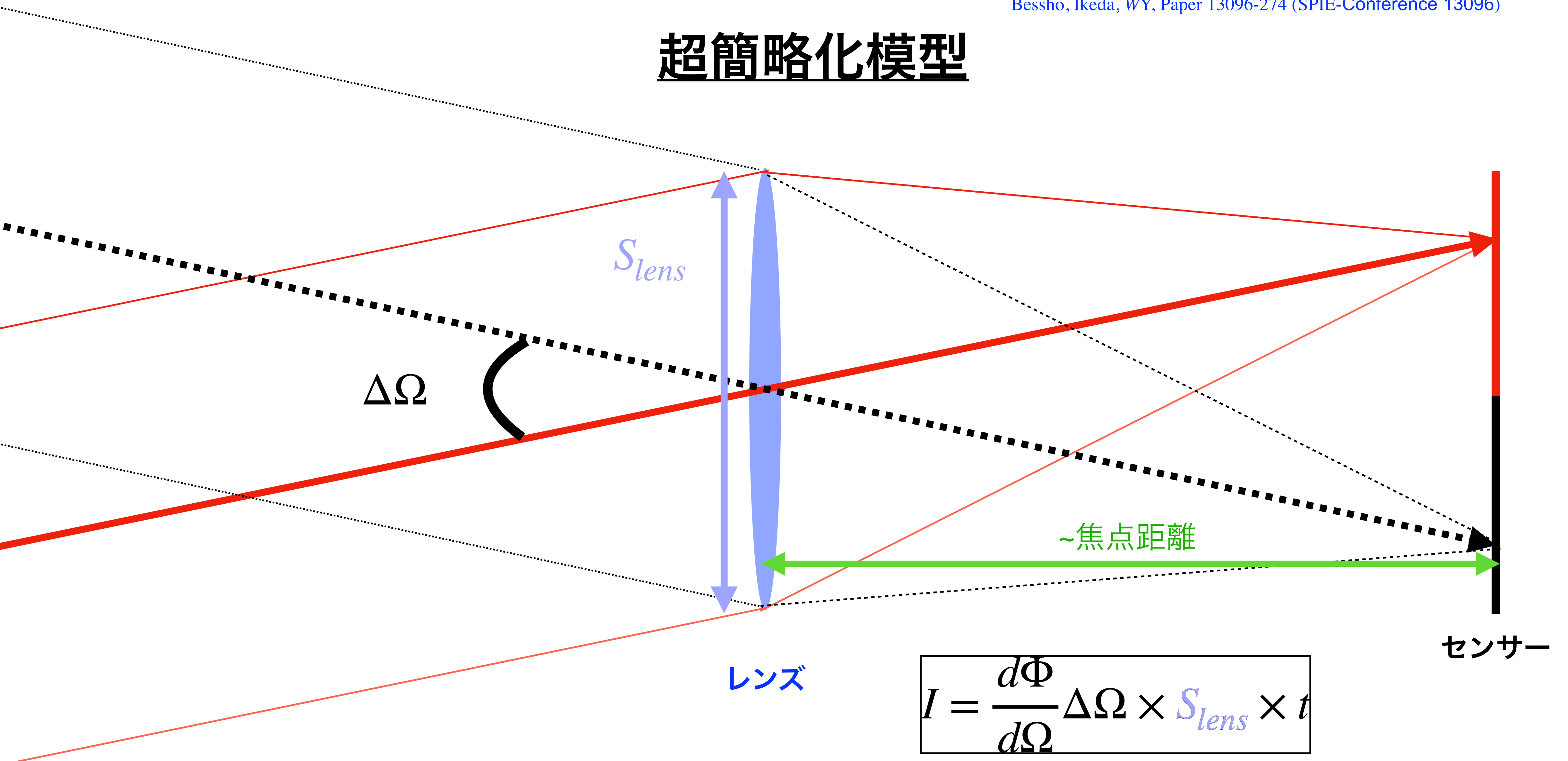
- Object-sky-object nodding observation
- Doppler shift analysis

background subtraction

• 光学系の空間分解能と明るさと大きさ

Bessho, Ikeda, WY, Paper 13096-274 (SPIE-Conference 13096)

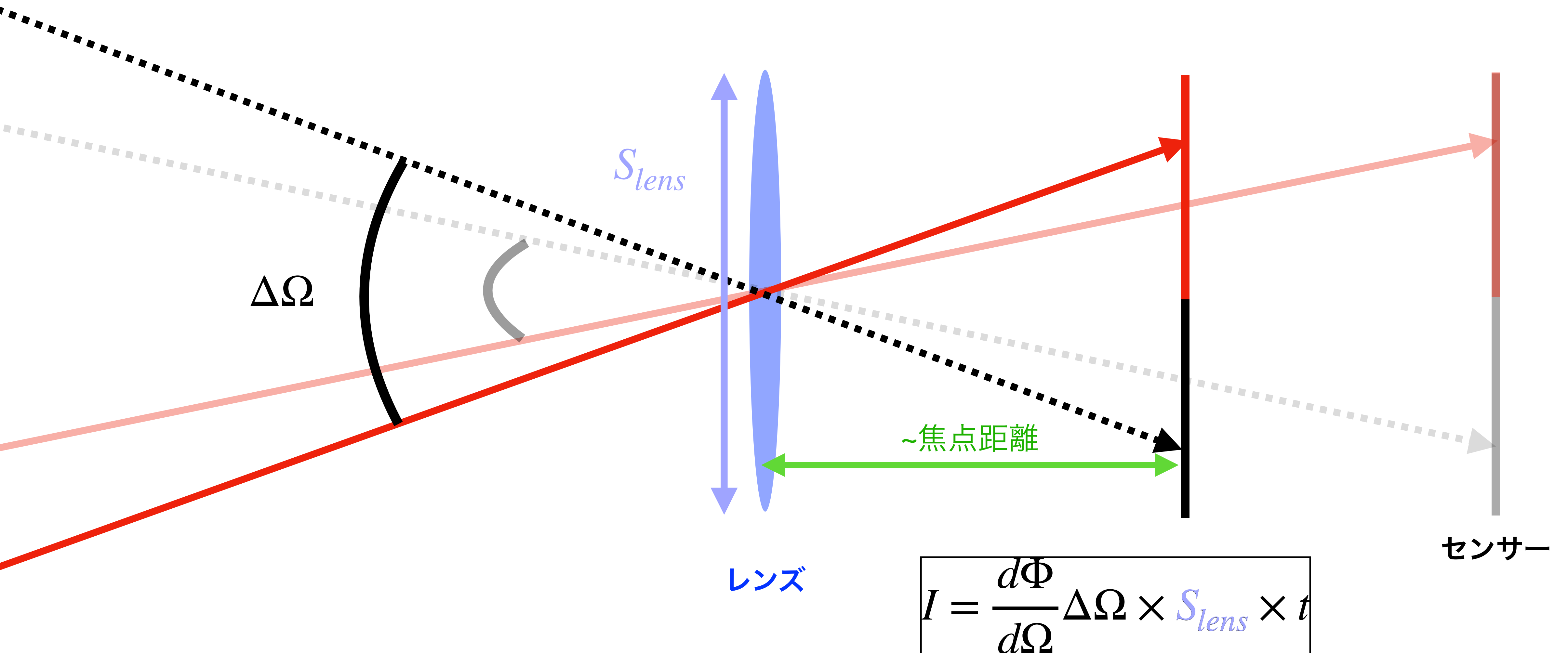
超簡略化模型



• 光学系の空間分解能と明るさと大きさ

Bessho, Ikeda, WY, Paper 13096-274 (SPIE-Conference 13096)

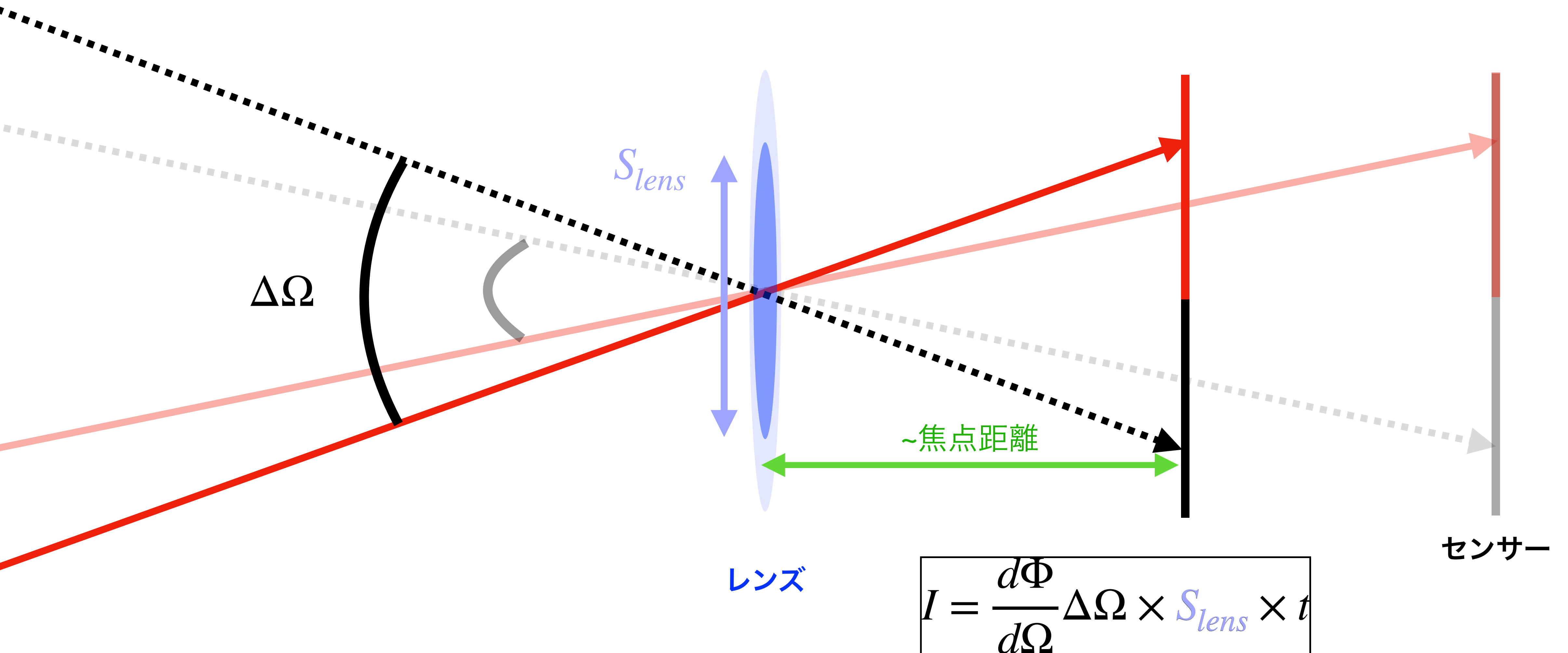
焦点距離 ↘ 空間分解能 ↘ 視野 ↗ ∴ 明るさ ↗ (光源の角度依存性がない場合)



• 光学系の空間分解能と明るさと大きさ

Bessho, Ikeda, WY, Paper 13096-274 (SPIE-Conference 13096)

焦点距離 ↘ 空間分解能 ↘ 視野 ↗ ∴ 明るさ ↗ (光源の角度依存性がない場合)

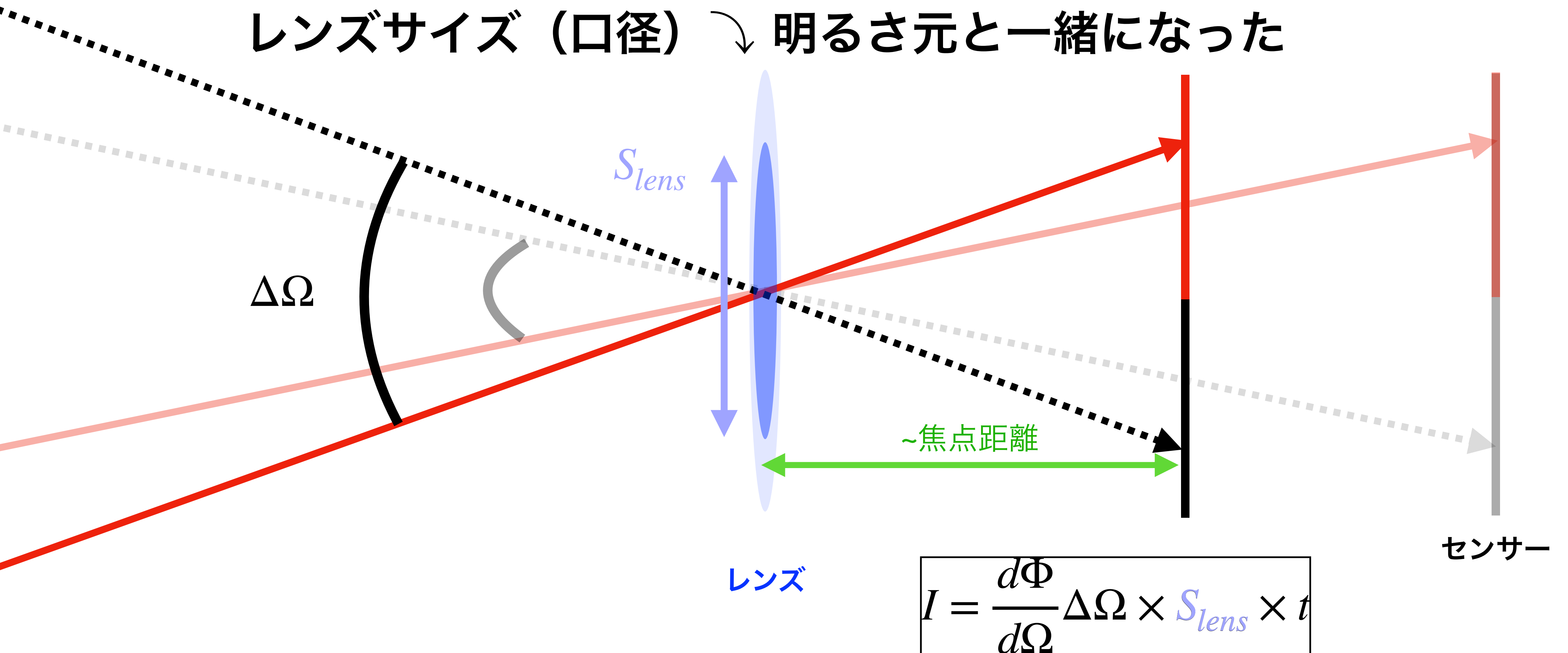


• 光学系の空間分解能と明るさと大きさ

Bessho, Ikeda, WY, Paper 13096-274 (SPIE-Conference 13096)

焦点距離 ↘ 空間分解能 ↘ 視野 ↗ : 明るさ ↗ (光源の角度依存性がない場合)

レンズサイズ (口径) ↘ 明るさ元と一緒にになった

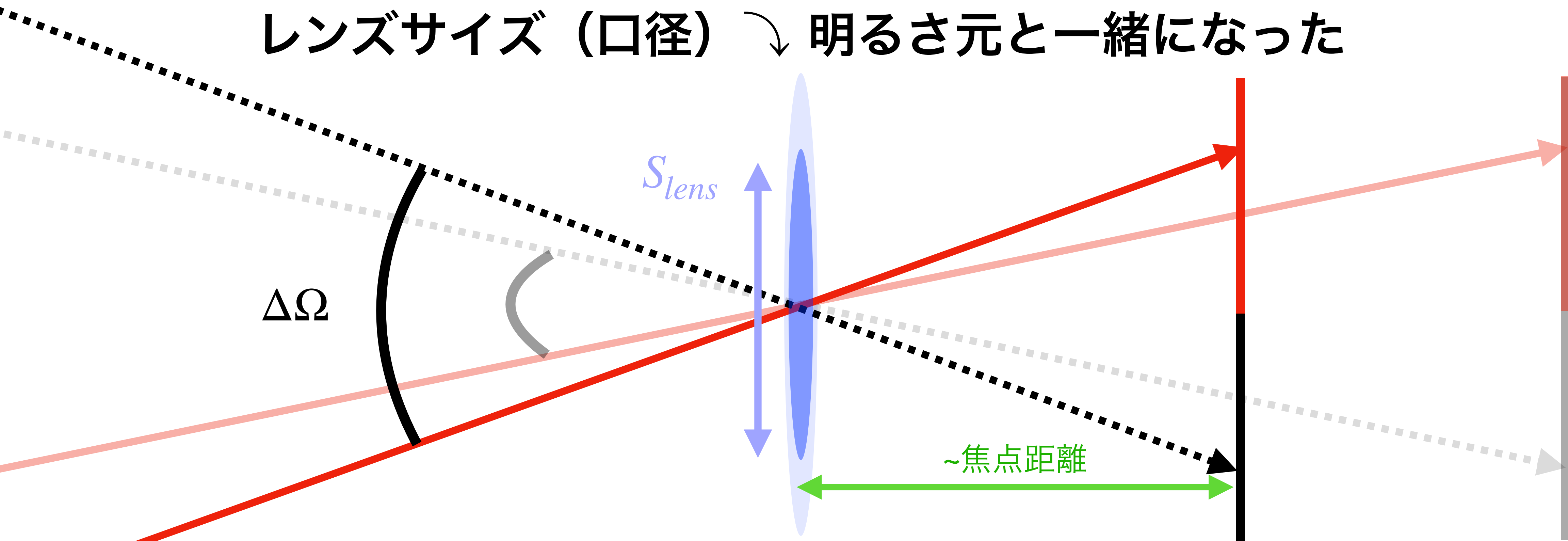


• 光学系の空間分解能と明るさと大きさ

Bessho, Ikeda, WY, Paper 13096-274 (SPIE-Conference 13096)

焦点距離 $\searrow$ 空間分解能 $\searrow$ 視野 $\nearrow$: 明るさ $\nearrow$ (光源の角度依存性がない場合)

レンズサイズ (口径) $\searrow$ 明るさ元と一緒にになった

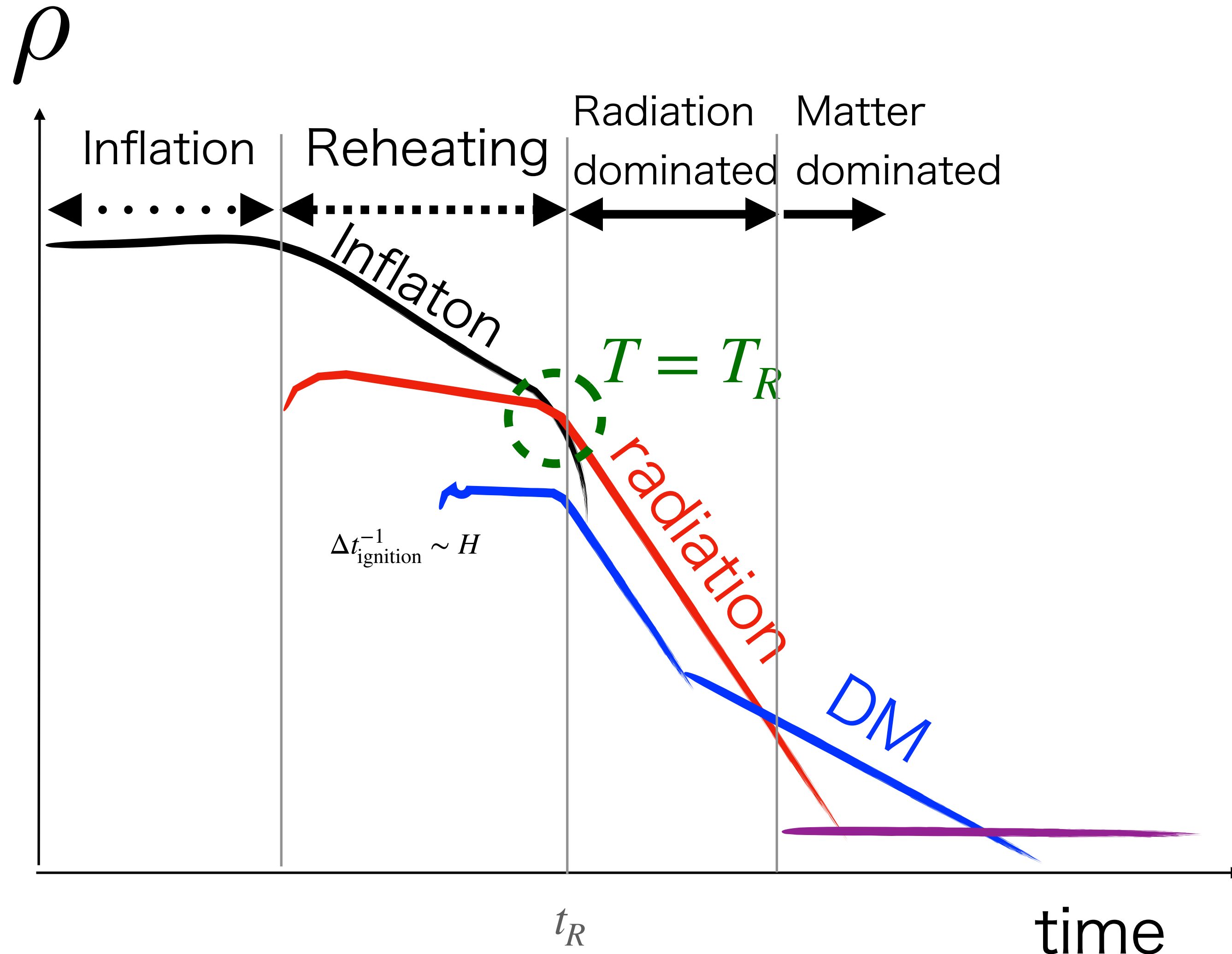


明るさが一緒のよりコンパクトな光学系ができた！！！！

$$I = \frac{1}{d\Omega} \Delta\Omega \times S_{lens} \times t$$

Burst Production during Reheating.

$$\Delta t_{\text{ignition}}^{-1} \sim \frac{T^4}{M_1^4} \times \left(\frac{M_1}{T} \Gamma_{\text{decay}}^{(\text{proper})} \right)$$



• Radiation dominated era:

$$\Delta t_{\text{ignition}}^{-1} \propto a^{-3} \quad \text{v.s.} \quad H \propto a^{-2}$$

• Reheating era:

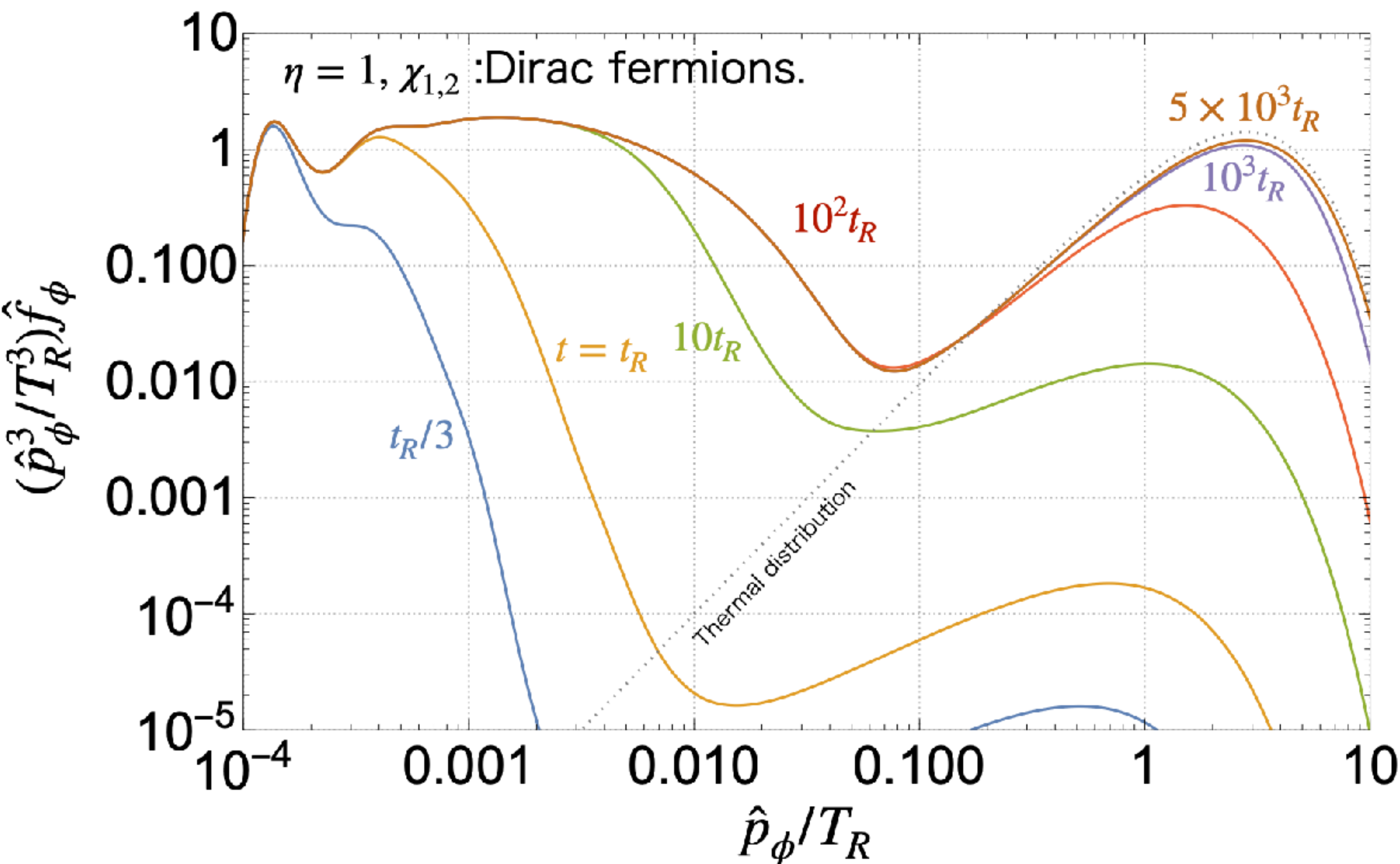
$$\Delta t_{\text{ignition}}^{-1} \propto a^{-9/8} \quad \text{v.s.} \quad H \propto a^{-3/2}$$

• The stage 3, saturation, is reached at the **end of reheating** because $f_{\chi_2}(T)$ is no more diluted.

Alternatively, DM can be burst produced during χ_1 thermalization (i.e. χ_1 is not always thermalized).

Burst Production during Reheating.

$$\Delta t_{\text{ignition}}^{-1} \sim \frac{T^4}{M_1^4} \times \left(\frac{M_1}{T} \Gamma_{\text{decay}}^{(\text{proper})} \right)$$



• Radiation dominated era:

$$\Delta t_{\text{ignition}}^{-1} \propto a^{-3} \quad \text{v.s.} \quad H \propto a^{-2}$$

• Reheating era:

$$\Delta t_{\text{ignition}}^{-1} \propto a^{-9/8} \quad \text{v.s.} \quad H \propto a^{-3/2}$$

• The stage 3, saturation, is reached at the **end of reheating** because $f_{\chi_2}(T)$ is no more diluted.

Alternatively, DM can be burst produced during χ_1 thermalization (i.e. χ_1 is not always thermalized).

Comment: the difference between usual hot DM and burst production with $\chi_1 \leftrightarrow \phi\chi_2$

Usual Hot DM scenario

$$\cdot \left(\frac{T}{M_1}\right)^3 \Gamma_{\chi_1 \rightarrow \chi_2 \phi}^{(\text{proper})} > \frac{M_1}{T} \Gamma_{\chi_1 \rightarrow \chi_2 \phi}^{(\text{proper})} > H \text{ at } T = T_R$$

$$\cdot n_\phi \sim g_\phi T^3 \text{ from } \textbf{thermal equilibrium}$$

=> **eV mass** for DM abundance

• Comoving momentum is

$$p_{\text{comoving}} \sim a_{\text{prod}} T_{\text{prod}}$$

=> **hot**

Burst production

$$\cdot \left(\frac{T}{M_1}\right)^3 \Gamma_{\chi_1 \rightarrow \chi_2 \phi}^{(\text{proper})} > H > \frac{M_1}{T} \Gamma_{\chi_1 \rightarrow \chi_2 \phi}^{(\text{proper})} \text{ at } T = T_R$$

$$\cdot n_\phi \sim g_{\chi_2} T^3 \text{ from } \textbf{quasi-equilibrium} \text{ of}$$

bose-enhancement dynamics

=> **eV mass** for DM abundance

• Comoving momentum is

$$p_{\text{comoving}} \sim a_{\text{prod}} M_1^2 / T_{\text{prod}}$$

=> **cold**