

現代宇宙論とeVダークマター(DM)



殷文 (Yin Wen, 都立大)

@東京女子大セミナー
2026/10/15

現代宇宙論とeVダークマター(DM)



殷文 (Yin Wen, 都立大)

@東京女子大セミナー
2026/10/15

プラン

★—前半—

- ・1.素粒子物理、初期宇宙とダークマター(DM)

★—後半—

- ・2.eV DM 理論
- ・3.eV DM 探索
- ・4.まとめ

注意：自然単位系を使います。

- エネルギーの単位として **eV, keV, MeV, GeV, TeV** などを使います

$$1\text{eV} = 10^{-3}\text{keV} = 10^{-6}\text{MeV} = 10^{-9}\text{GeV} = 10^{-12}\text{TeV}$$

- アインシュタインの有名な式 **$E = mc^2$** は前提とします

$$1\text{GeV} \sim \text{中性子質量}c^2 \sim \text{陽子質量}c^2 \sim 2000 \times \text{電子質量}c^2$$

- 光速 **c**, ボルツマン定数 **k_B** は **1** にします. 温度と質量はエネルギーの次元

1. 素粒子物理、初期宇宙とダークマター —究極の物理法則を求めて—



1. 素粒子物理、初期宇宙とダークマター —究極の物理法則を求めて—

Q：なぜ素粒子なのに、宇宙？

Q：なぜ究極の物理法則か？

1. 素粒子物理、初期宇宙とダークマター —究極の物理法則を求めて—

Q：なぜ素粒子なのに、宇宙？

最もミクロ

最もマクロ

Q：なぜ究極の物理法則か？

1. 素粒子物理、初期宇宙とダークマター —究極の物理法則を求めて—

Q：なぜ素粒子なのに、宇宙？

最もミクロ

最もマクロ

Q：なぜ究極の物理法則か？

後で答えます。

電子

質量

$9.109\,383\,701\,5(28) \times 10^{-31} \text{ kg}$
 $5.485\,799\,090\,65(16) \times 10^{-4} \text{ Da}$
 $[1822.888\,486\,209(53)]^{-1} \text{ Da}$
 $0.510\,998\,950\,00(15) \text{ MeV}/c^2$

微細構造定数 fine-structure constant

記号	α
値	$7.297\,352\,564\,3(11) \times 10^{-3}$ [1]

スピン

$\frac{1}{2} \hbar$

Q：なぜ電子の質量、
結合、スピンなどは皆
同じなの？

A：電子は宇宙全体に広がる「場」の揺らぎ。
質量や結合は「場」の性質。

$$\Psi(\vec{x}, t)$$

場とは時間空間座標の関数として定義される物理量

*特殊相対論と量子力学が同時に成立する要請から場の量子論が導ける。

“The Theory of Quantum Field”, by S. Weinberg

A：電子は宇宙全体に広がる「場」の揺らぎ。
質量や結合は「場」の性質。

$$\Psi(\vec{x}, t)$$

場とは時間空間座標の関数として定義される物理量

素粒子物理学 ≠ 小さい粒子の振る舞いのみを調べる学問

*特殊相対論と量子力学が同時に成立する要請から場の量子論が導ける。

“The Theory of Quantum Field”, by S. Weinberg

究極の物理法則に最も近い理論：素粒子標準理論

素粒子標準理論＝

場の量子論

＋

場(素粒子)の性質

Lagrangian

$$\begin{aligned}\frac{1}{\sqrt{-g}}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{2}M_{\text{Pl}}^2 R \\ & + i\bar{\Psi}\not{D}\Psi \\ & + D_{\mu}\Phi^{\dagger}D^{\mu}\Phi - V(\Phi) \\ & + \bar{\Psi}_L\hat{Y}\Phi\Psi_R + h.c.\end{aligned}$$

この式から、**粒子のふるまいや相互作用**が決まる。

素粒子(場)の登場人物とその性質

	第1世代	第2世代	第3世代	ゲージ粒子
クォーク (6種類)	u アップ	c チャーム	t トップ	g グルーオン (強い力)
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム	W[±], Z Wボソン, Zボソン (弱い力)
レプトン (6種類)	e 電子	μ ミュー粒子	τ タウ粒子	γ 光子 (電磁気力)
	ν_e 電子 ニュートリノ	ν_μ ミュー ニュートリノ	ν_τ タウ ニュートリノ	H ヒッグス粒子 ・重力子 (時空の揺らぎ)



素粒子標準理論は、広い意味で**計算可能な部分でほとんどの現象**を説明できる。



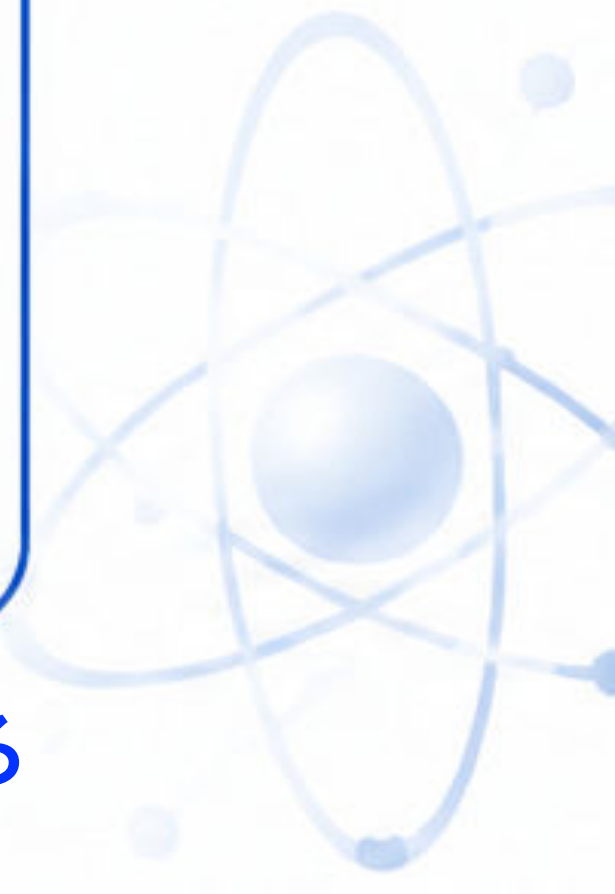
現代の科学では

根源的物理法則 $\approx$ 素粒子の性質

- 例えば、光子 スピン 1, 質量 0

➡ 電気、磁気の**全て**が導かれる

Weinberg, “Quantum Theory of Fields I”, Sec. 5.9に証明がある



現代の科学では

根源的物理法則 $\approx$ 素粒子の性質

- 例えば, **光子** スピン 1, 質量 0
 グラビトン スピン 2, 質量 0

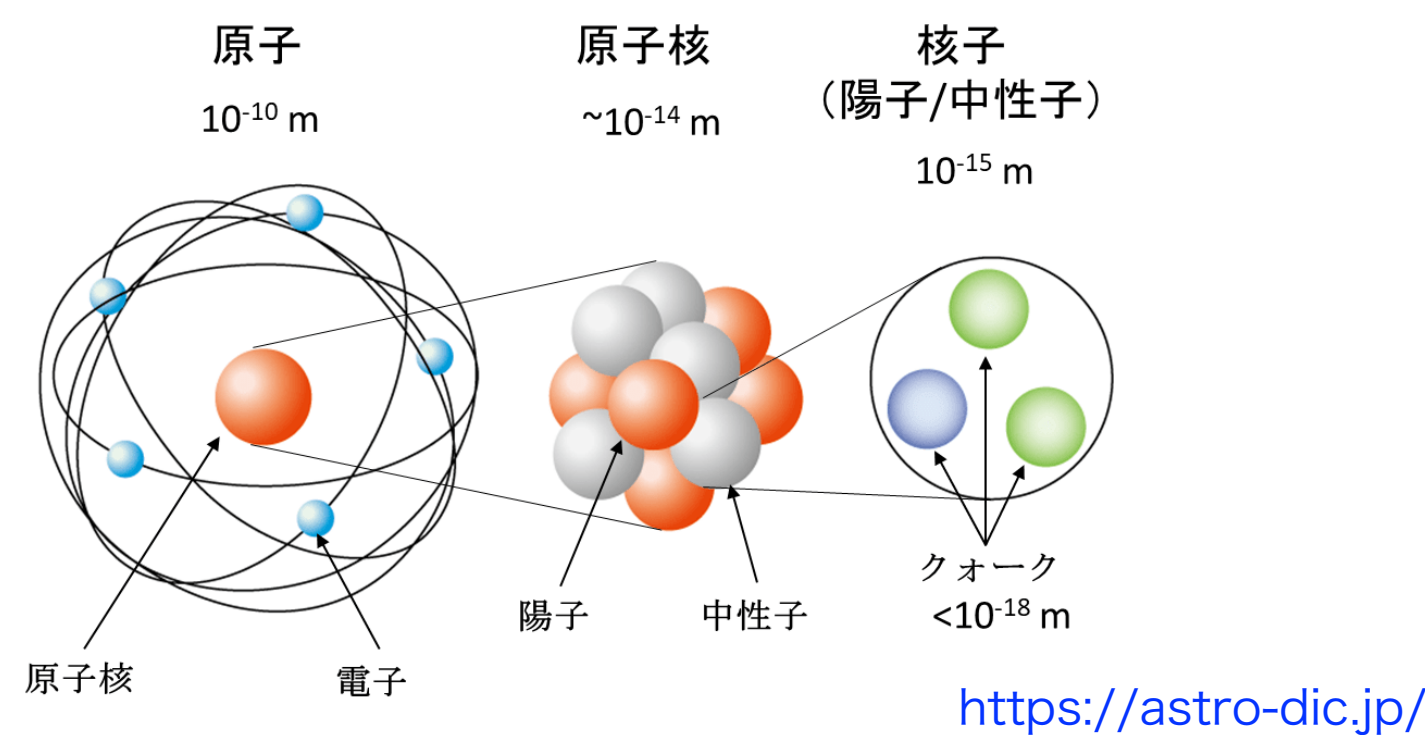
➡ 電気、磁気の**全て**が導かれる

重力の全て (UV completionは分かってないけど)

Weinberg, “Quantum Theory of Fields I”, Sec. 5.9に証明がある

素粒子標準理論はだいたい全て説明する

物質の超微視的構造を説明

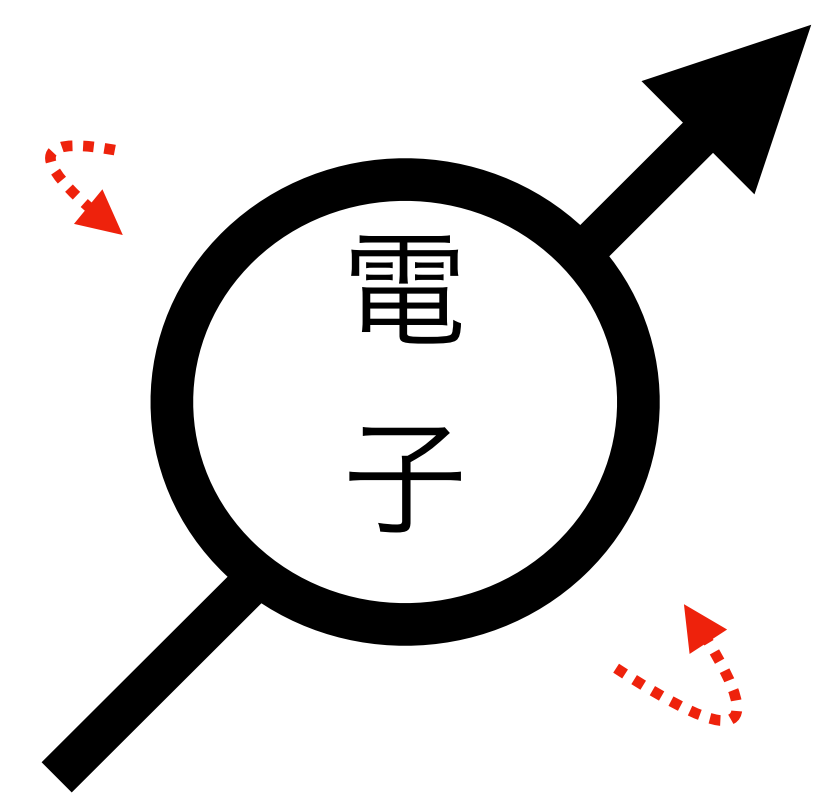


高エネルギー反応を説明



超精密に説明: e.g.

電子の磁気モーメントを10桁以上の精度で説明



$2.0023193043615 \pm 6 \times 10^{-13}$ (PDG, 2022)
 $2.0023193043605 \pm 2 \times 10^{-13}$ (標準理論予測)
see Morel et al Nature 2020; Aoyama, et al 2019
see also Cs based prediction, Parker et al, Science 2019

微妙なずれは新粒子によるもの? Endo, WY, 1906.08768

さまざまな疑問を解決
力とは

- 電磁気学
 - 弱い力
 - 強い力
- 統一

質量とは

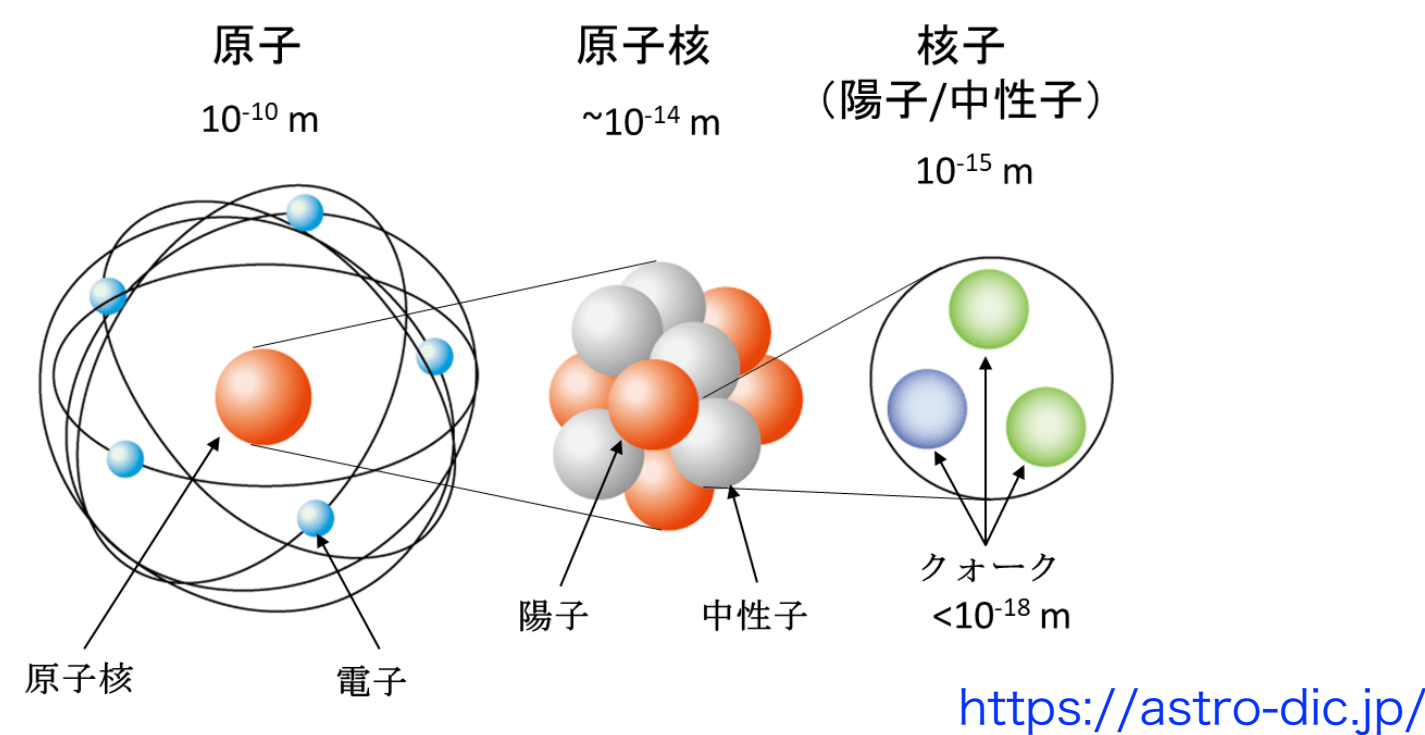
- 質量の起源 (ヒッグス場)

その他色々

- ニュートリノと電子などの統一

素粒子標準理論はだいたい全て説明する

物質の超微視的構造を説明



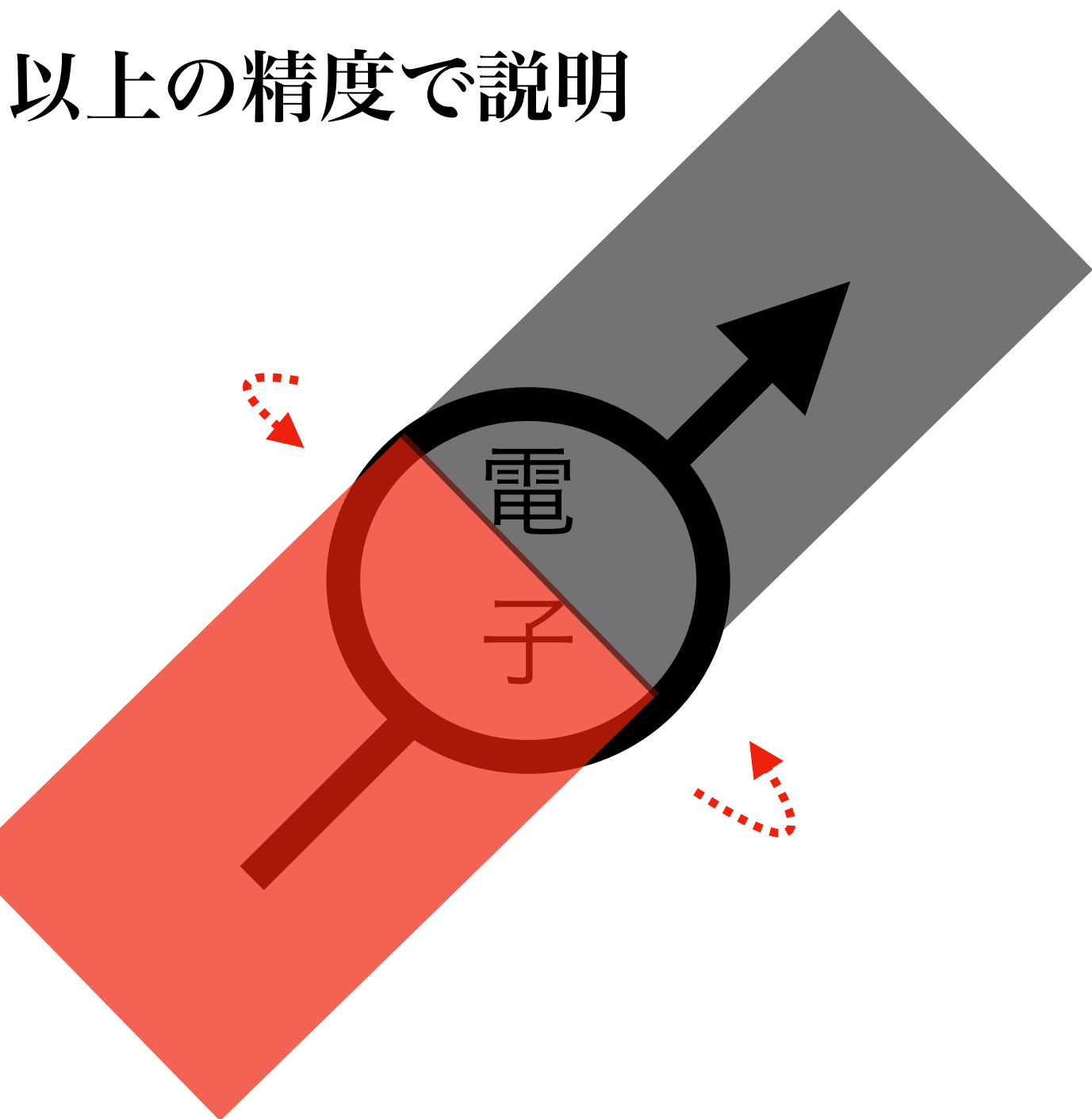
高エネルギー反応を説明



<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000013.000081184.html>

超精密に説明: e.g.

電子の磁気モーメントを 10桁
以上の精度で説明



$2.0023193043615 \pm 6 \times 10^{-13}$ (PDG, 2022)
 $2.0023193043605 \pm 2 \times 10^{-13}$ (標準理論予測)
see Morel et al Nature 2020; Aoyama, et al 2019
see also Cs based prediction, Parker et al, Science 2019

微妙なずれは新粒子によるもの? Endo, WY, 1906.08768

さまざまな疑問を解決

力とは

- ・ 電磁気学
 - ・ 弱い力
 - ・ 強い力
- } 統一

質量とは

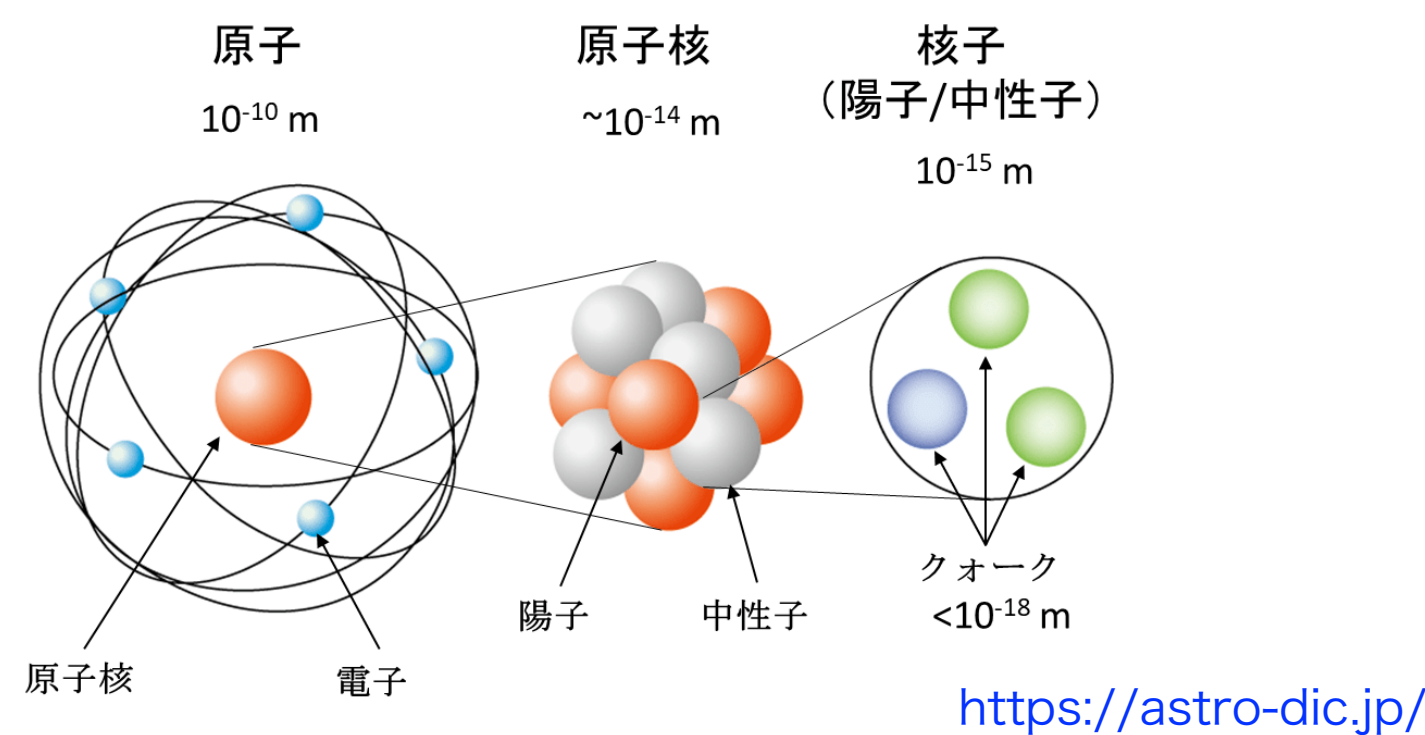
- ・ 質量の起源 (ヒッグス場)

その他色々

- ・ ニュートリノと電子などの統一

素粒子標準理論はだいたい全て説明する

物質の超微視的構造を説明



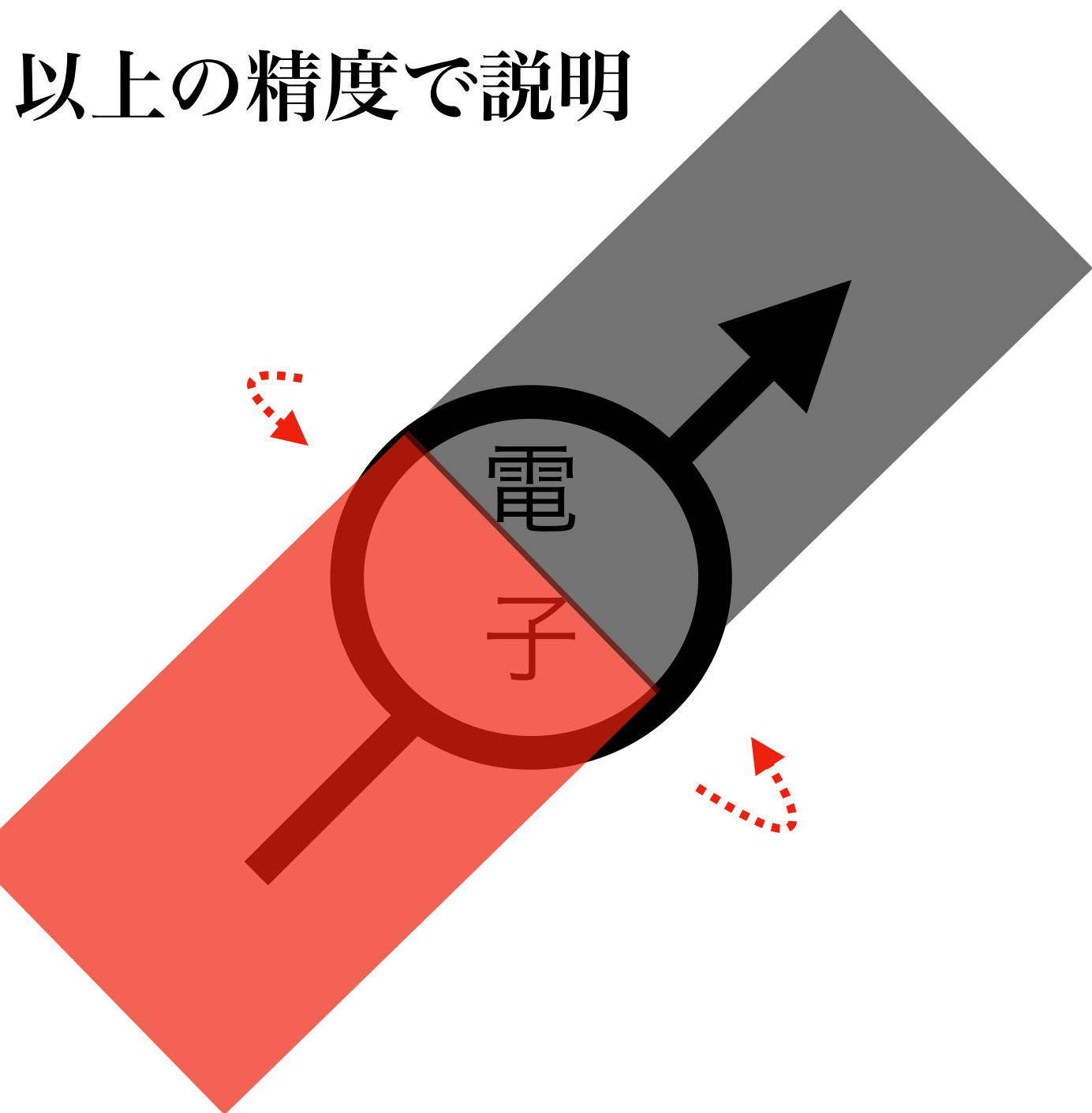
高エネルギー反応を説明



<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000013.000081184.html>

超精密に説明: e.g.

電子の磁気モーメントを 10桁
以上の精度で説明



$2.0023193043615 \pm 6 \times 10^{-13}$ (PDG, 2022)
 $2.0023193043605 \pm 2 \times 10^{-13}$ (標準理論予測)
see Morel et al Nature 2020; Aoyama, et al 2019
see also Cs based prediction, Parker et al, Science 2019

微妙なずれは新粒子によるもの? Endo, WY, 1906.08768

さまざまな疑問を解決

力とは

- ・ 電磁気学
 - ・ 弱い力
 - ・ 強い力
- } 統一

質量とは

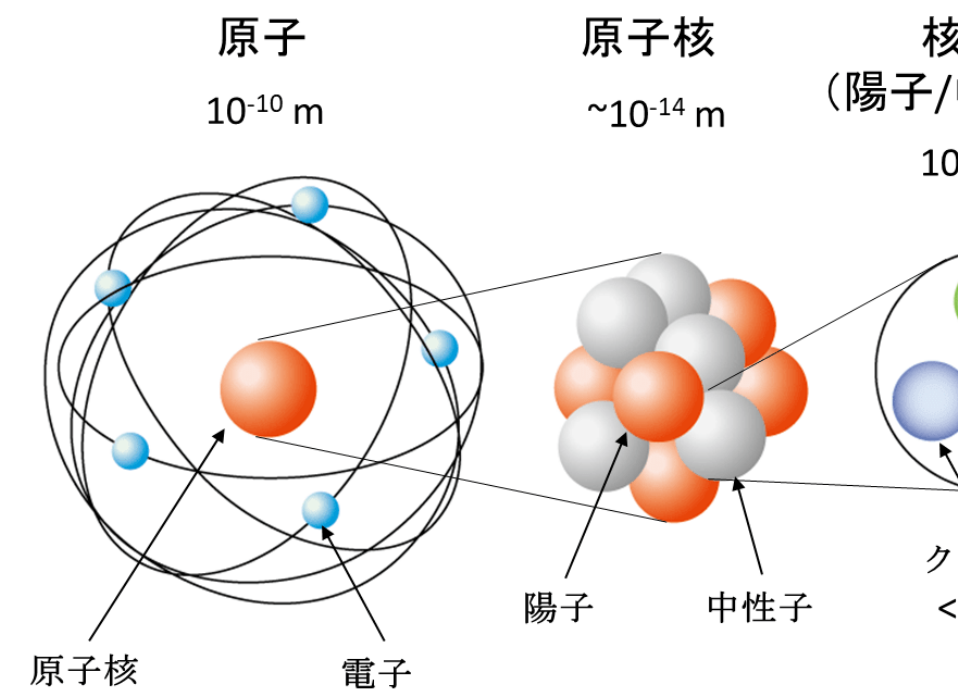
- ・ 質量の起源 (ヒッグス場)

その他色々

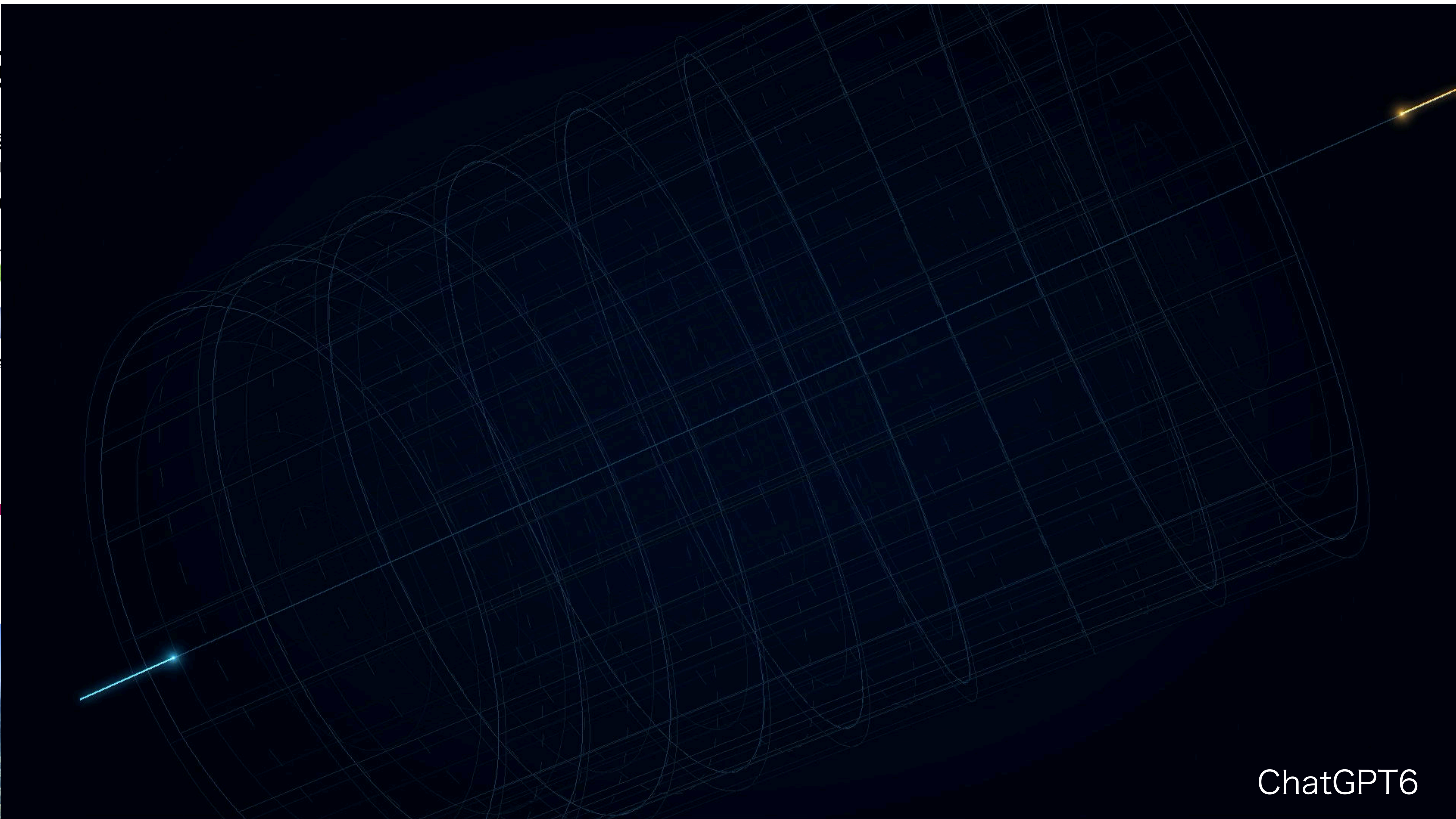
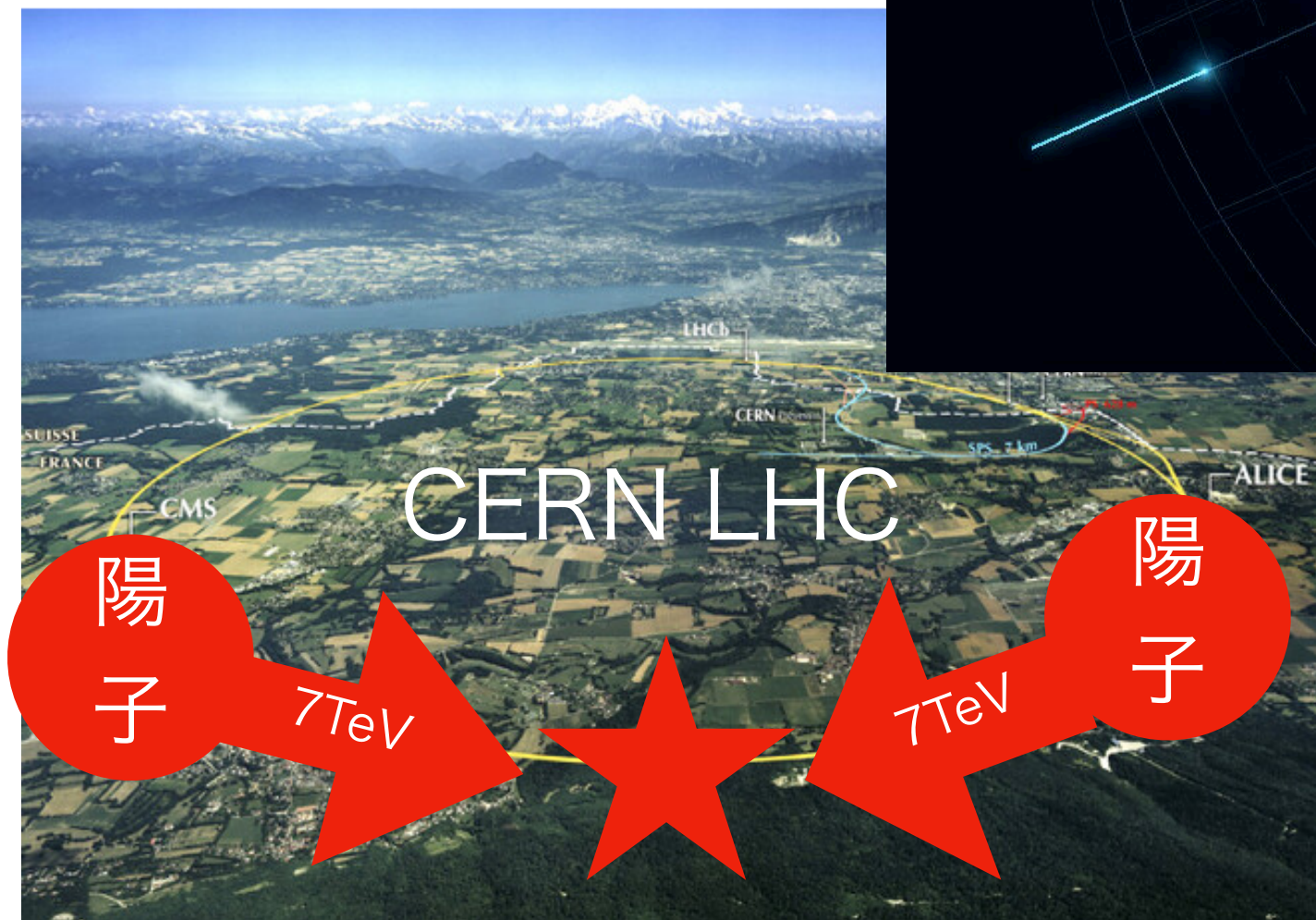
- ・ ニュートリノと電子などの統一

素粒子標準理論はだいたい全て説明する

物質の超微視的構造を



高エネルギー反応を説



を解決

統一

原（ヒッグス場）

その他色々

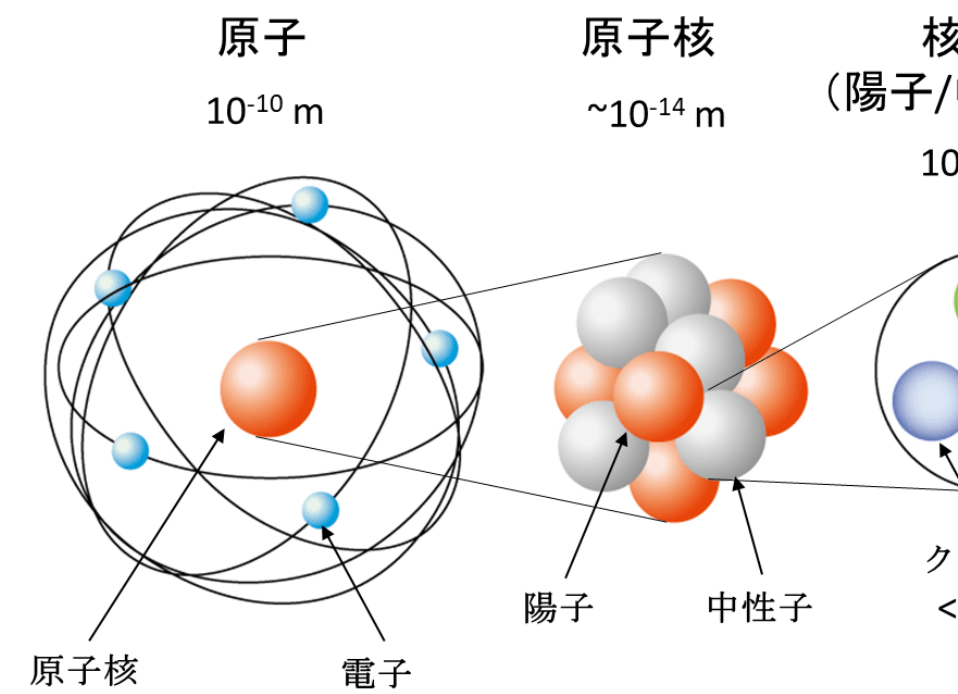
- ・ ニュートリノと電子などの統一

$2.0023193043615 \pm 6 \times 10^{-13}$ (PDG, 2022)
 $2.0023193043605 \pm 2 \times 10^{-13}$ (標準理論予測)
see Morel et al Nature 2020; Aoyama, et al 2019
see also Cs based prediction, Parker et al, Science 2019

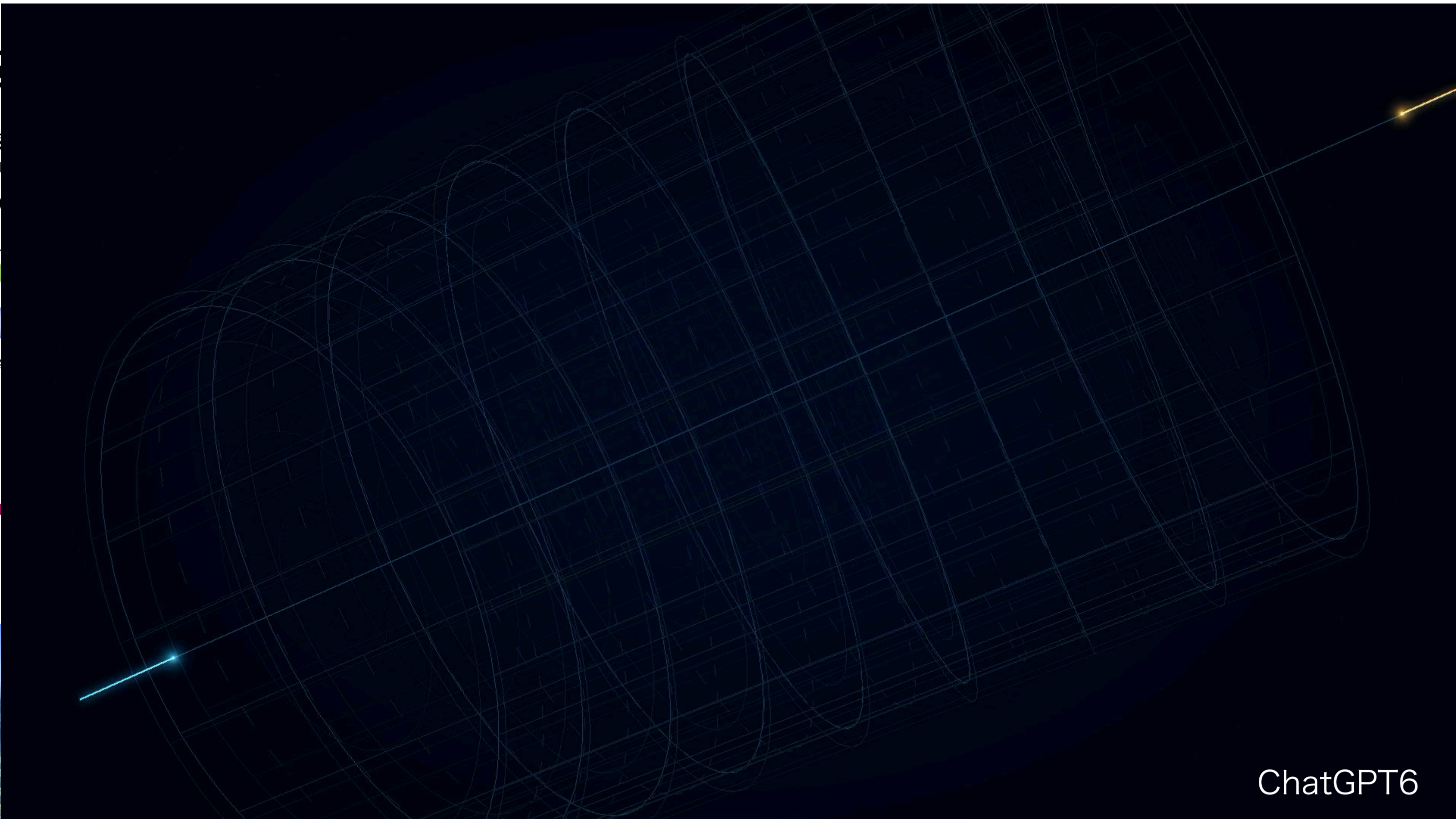
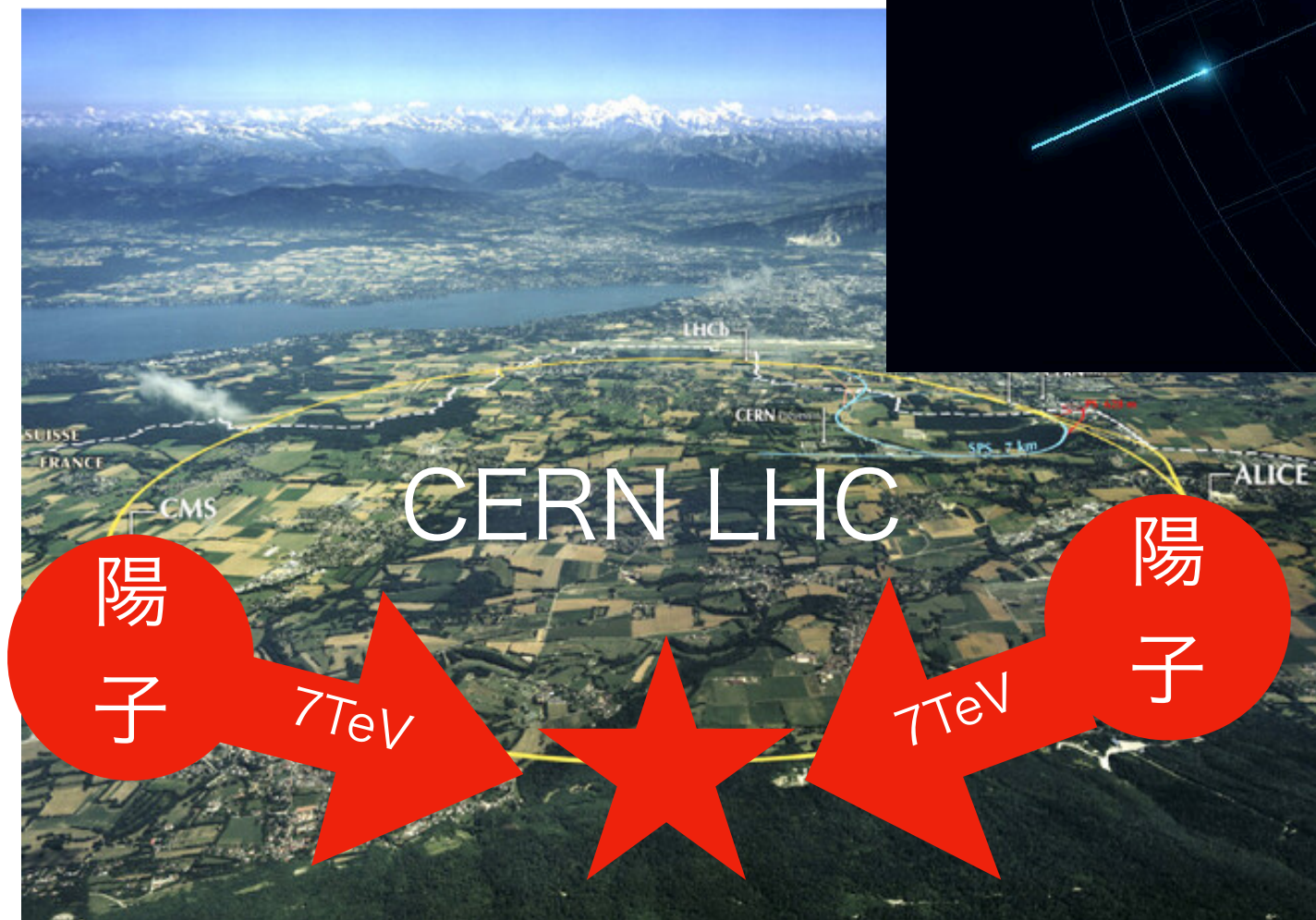
微妙なずれは新粒子によるもの? Endo, WY, 1906.08768

素粒子標準理論はだいたい全て説明する

物質の超微視的構造を



高エネルギー反応を説



を解決

統一

原（ヒッグス場）

その他色々

- ・ ニュートリノと電子などの統一

$2.0023193043615 \pm 6 \times 10^{-13}$ (PDG, 2022)
 $2.0023193043605 \pm 2 \times 10^{-13}$ (標準理論予測)
see Morel et al Nature 2020; Aoyama, et al 2019
see also Cs based prediction, Parker et al, Science 2019

微妙なずれは新粒子によるもの? Endo, WY, 1906.08768

Q：なぜ素粒子なのに、宇宙？

最もミクロ

最もマクロ

A1：素粒子＝「場」は宇宙空間全体にも過去
未来にも広がっているから。

素粒子の性質＝場の性質↔宇宙の進化予測

宇宙の歴史の記述(with 3つの仮定)

宇宙の歴史の記述(with 3つの仮定)

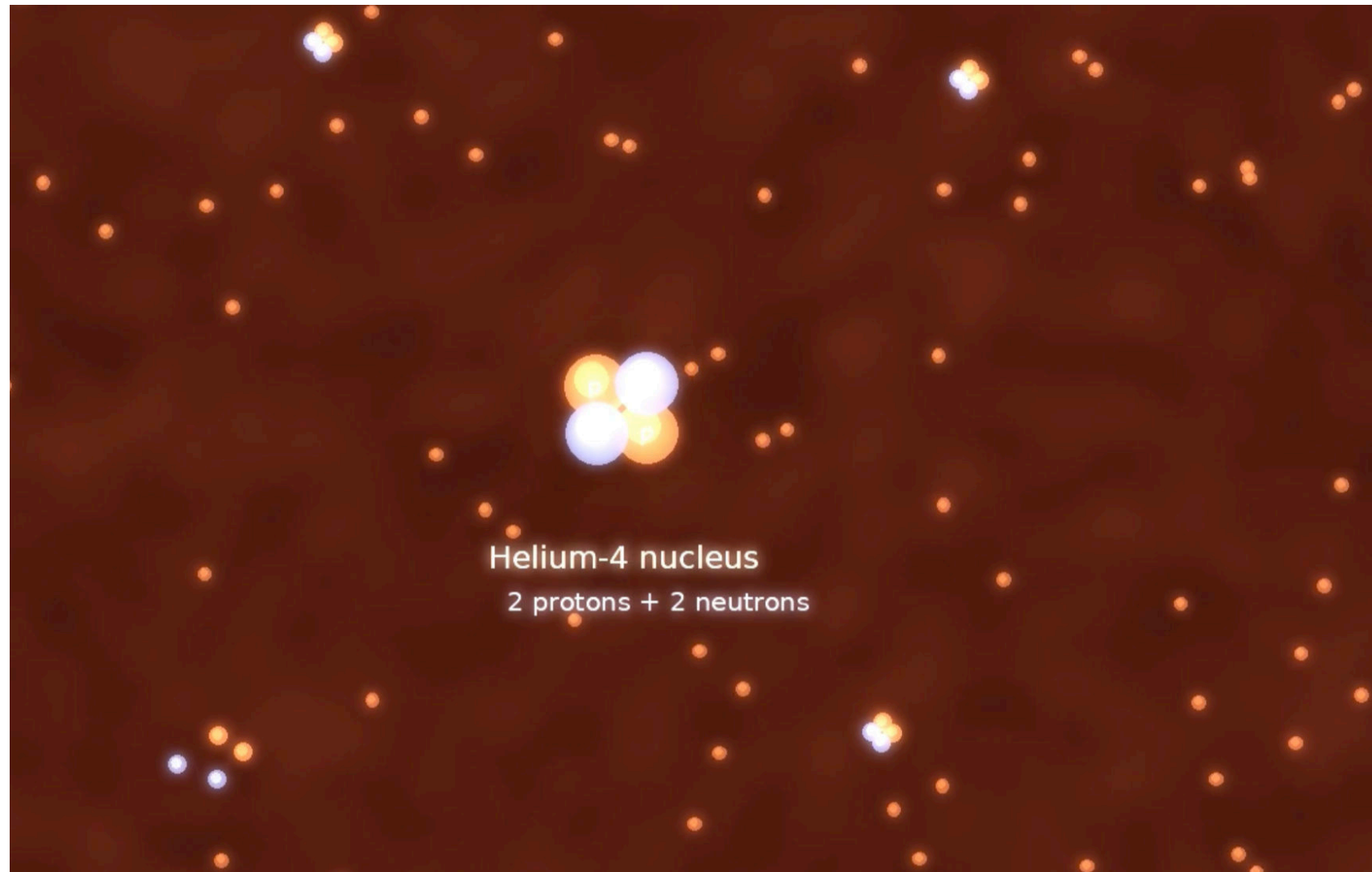
宇宙の歴史の記述(with 3つの仮定)

Q：なぜ素粒子なのに、宇宙？

A2：初期宇宙は素粒子の実験場

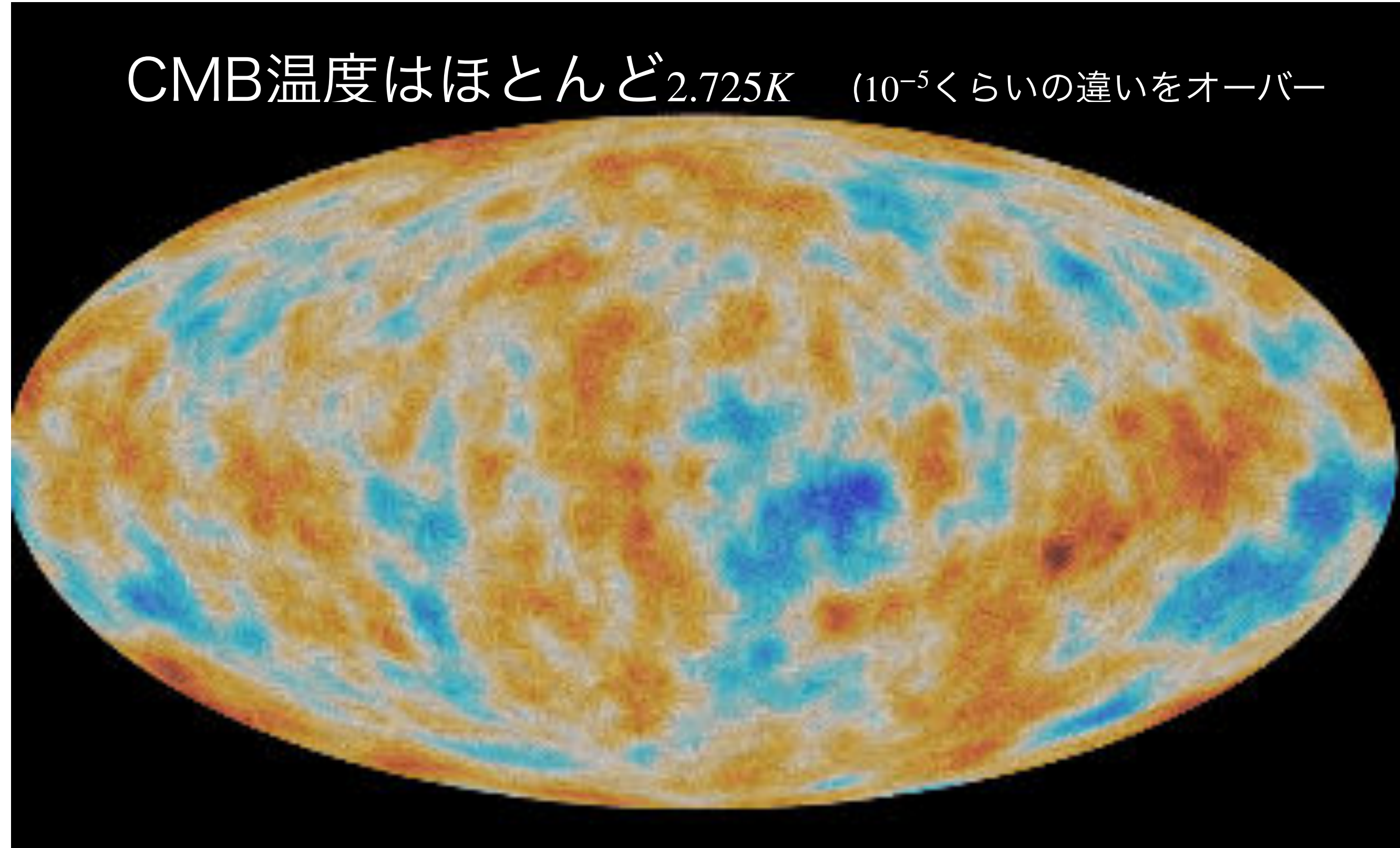
予言と検証

軽い元素の存在量予測 (BBN)



宇宙マイクロ波背景放射(CMB)のパワースペクトラム

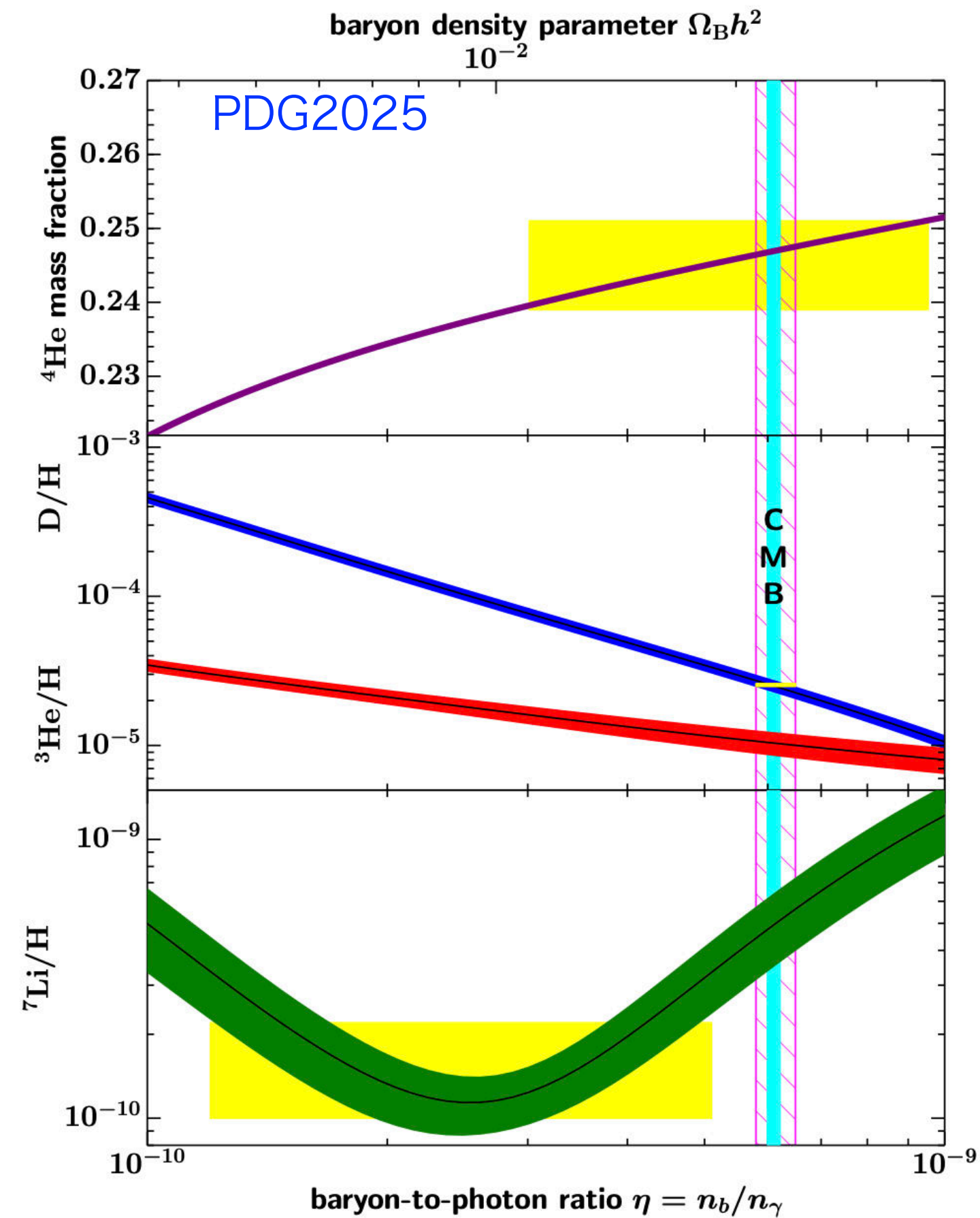
CMB温度はほとんど $2.725K$ (10^{-5} くらいの違いをオーバー



<https://www.esa.int/eseach?q=Polarisation>

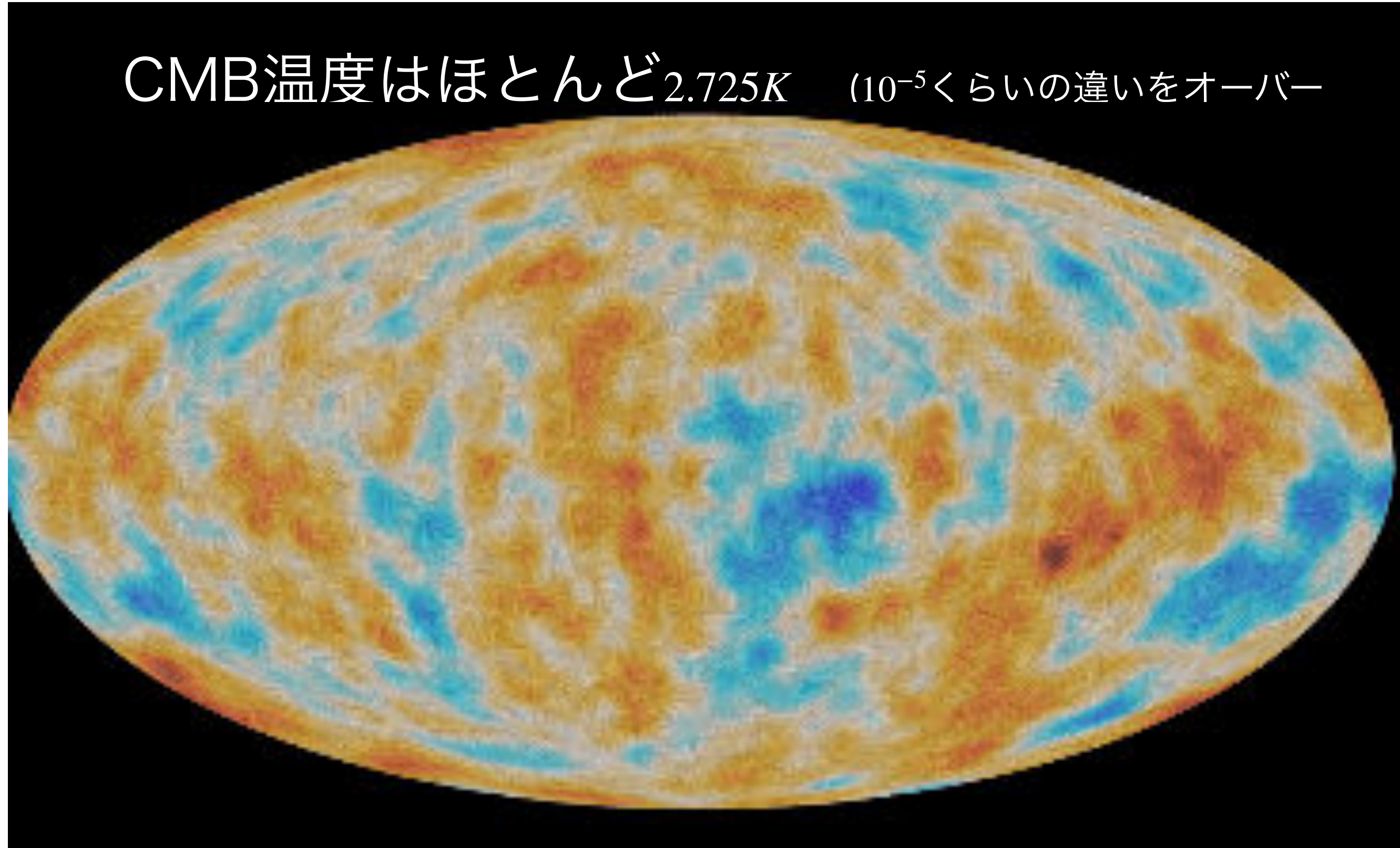
予言と検証

軽い元素の存在量予測 (BBN)



宇宙マイクロ波背景放射(CMB)のパワースペクトラム

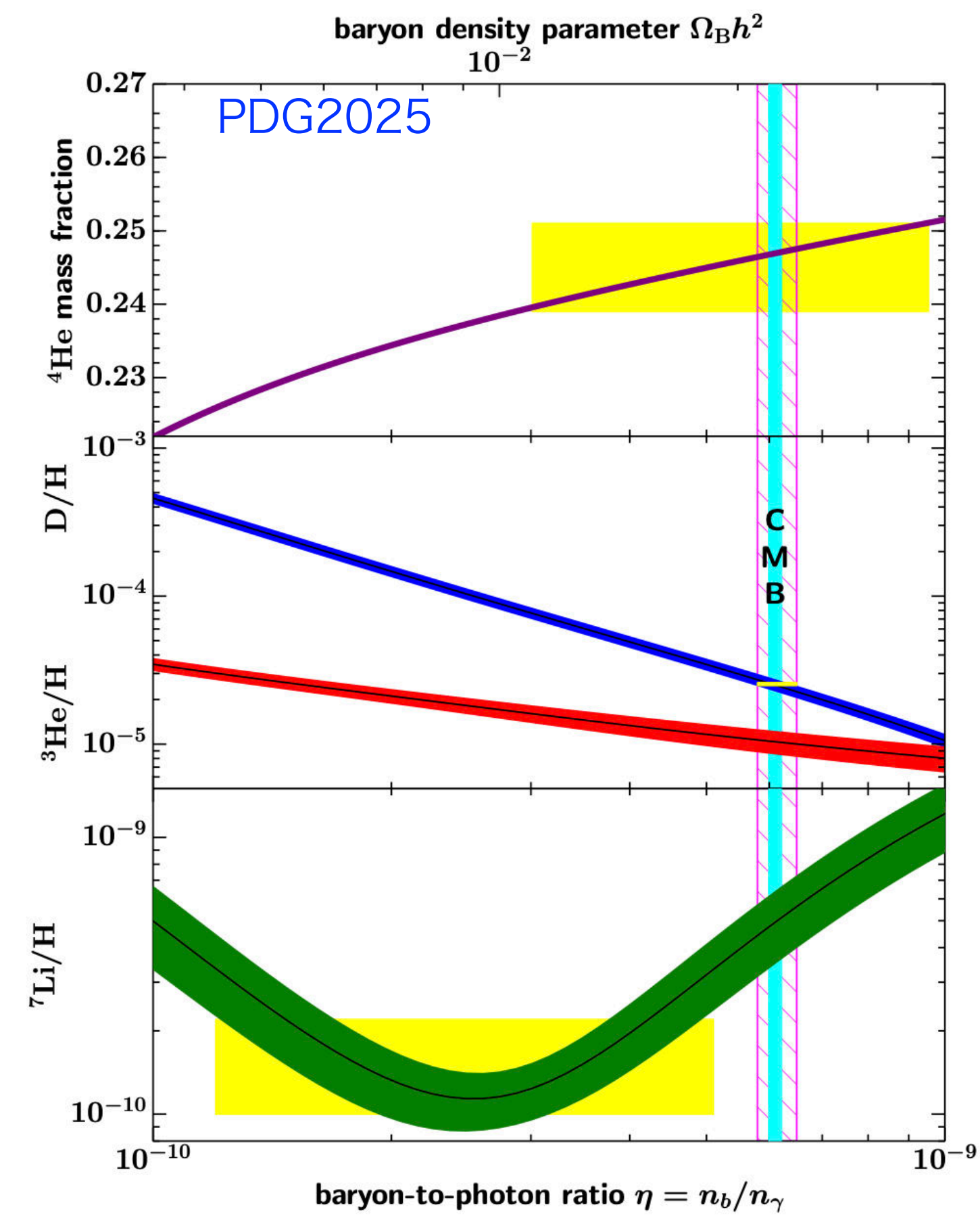
CMB温度はほとんど 2.725K (10^{-5} くらいの違いをオーバー)



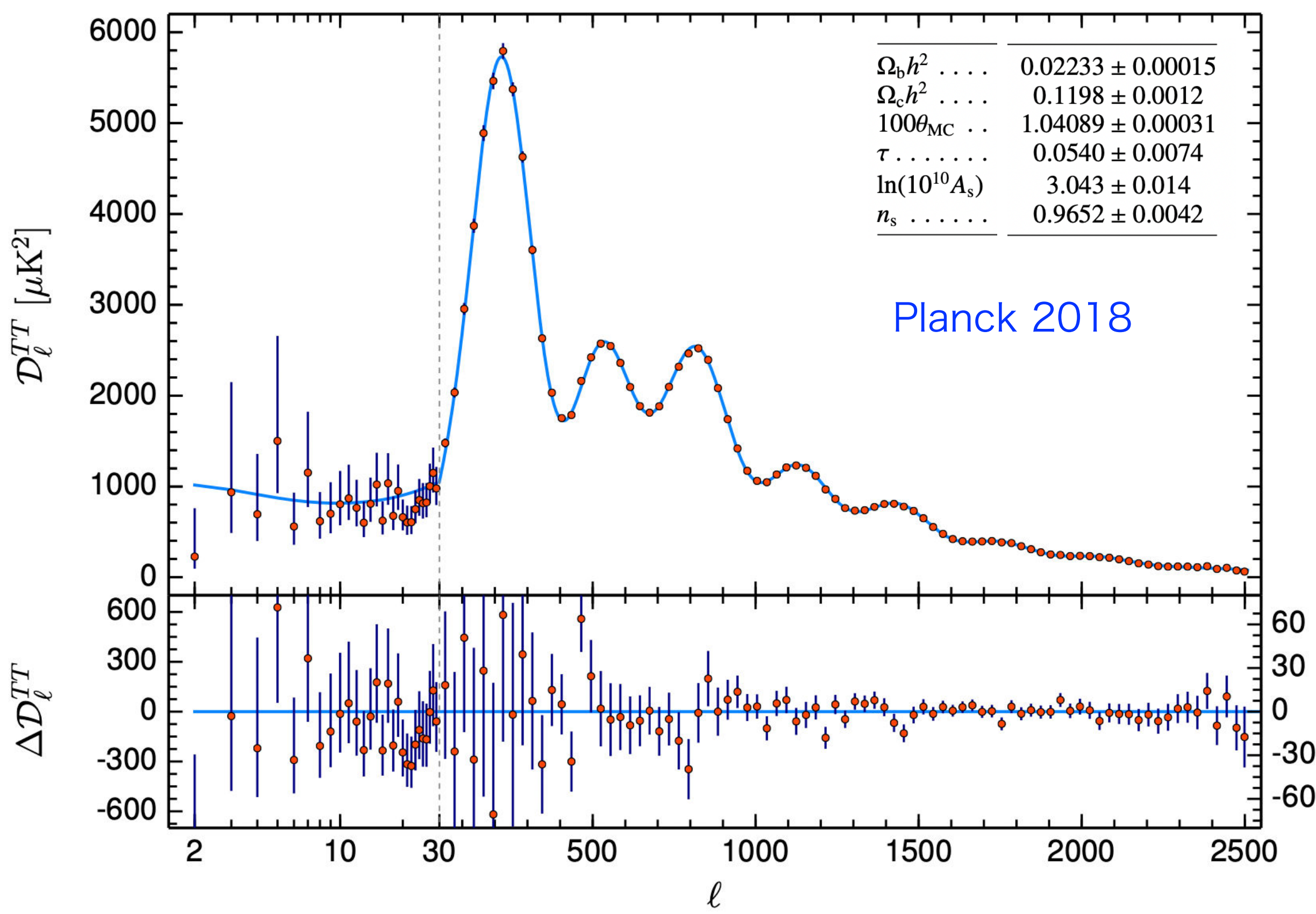
<https://www.esa.int/eseach?q=Polarisation>

予言と検証

軽い元素の存在量予測 (BBN)

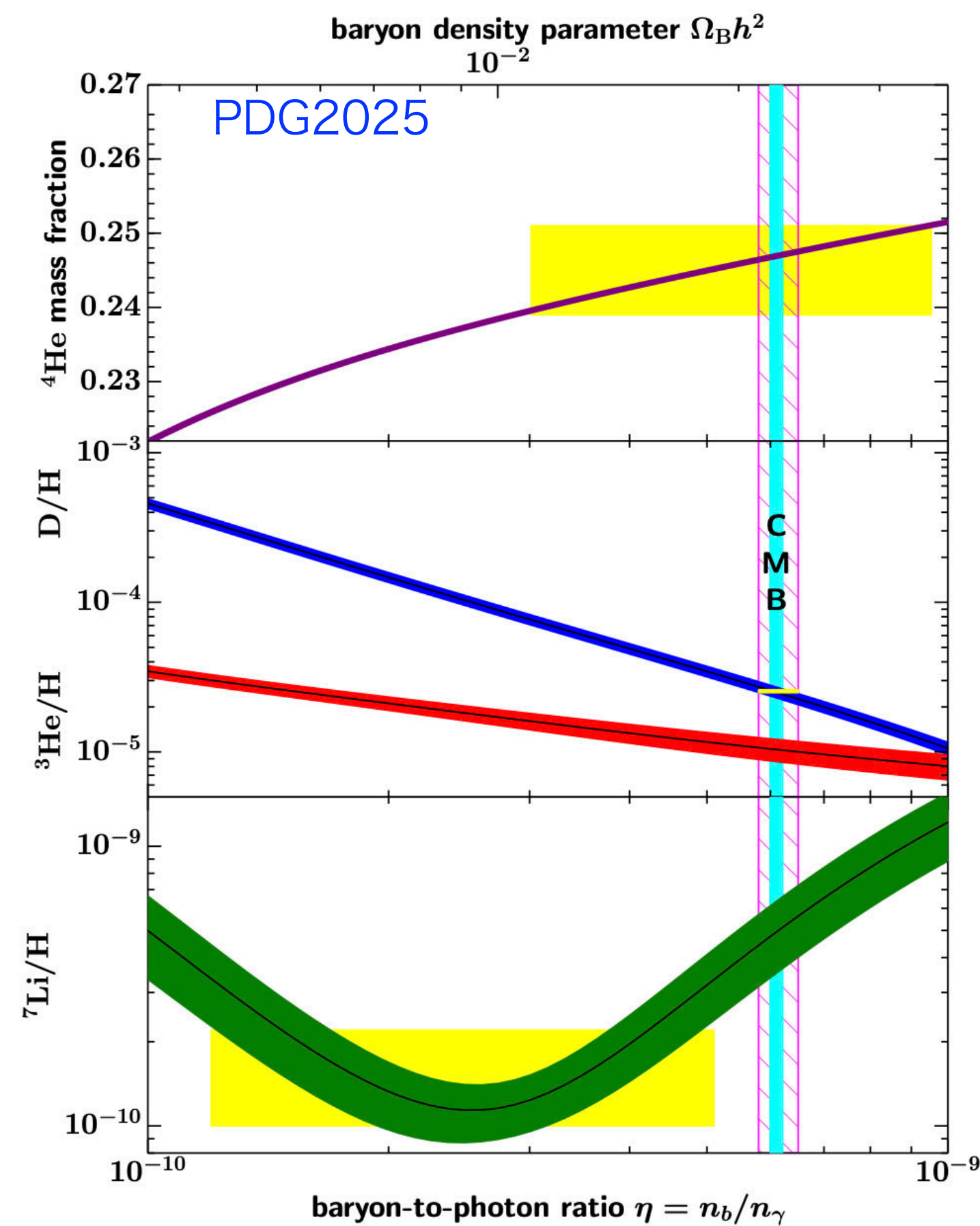


宇宙マイクロ波背景放射(CMB)のパワースペクトラム

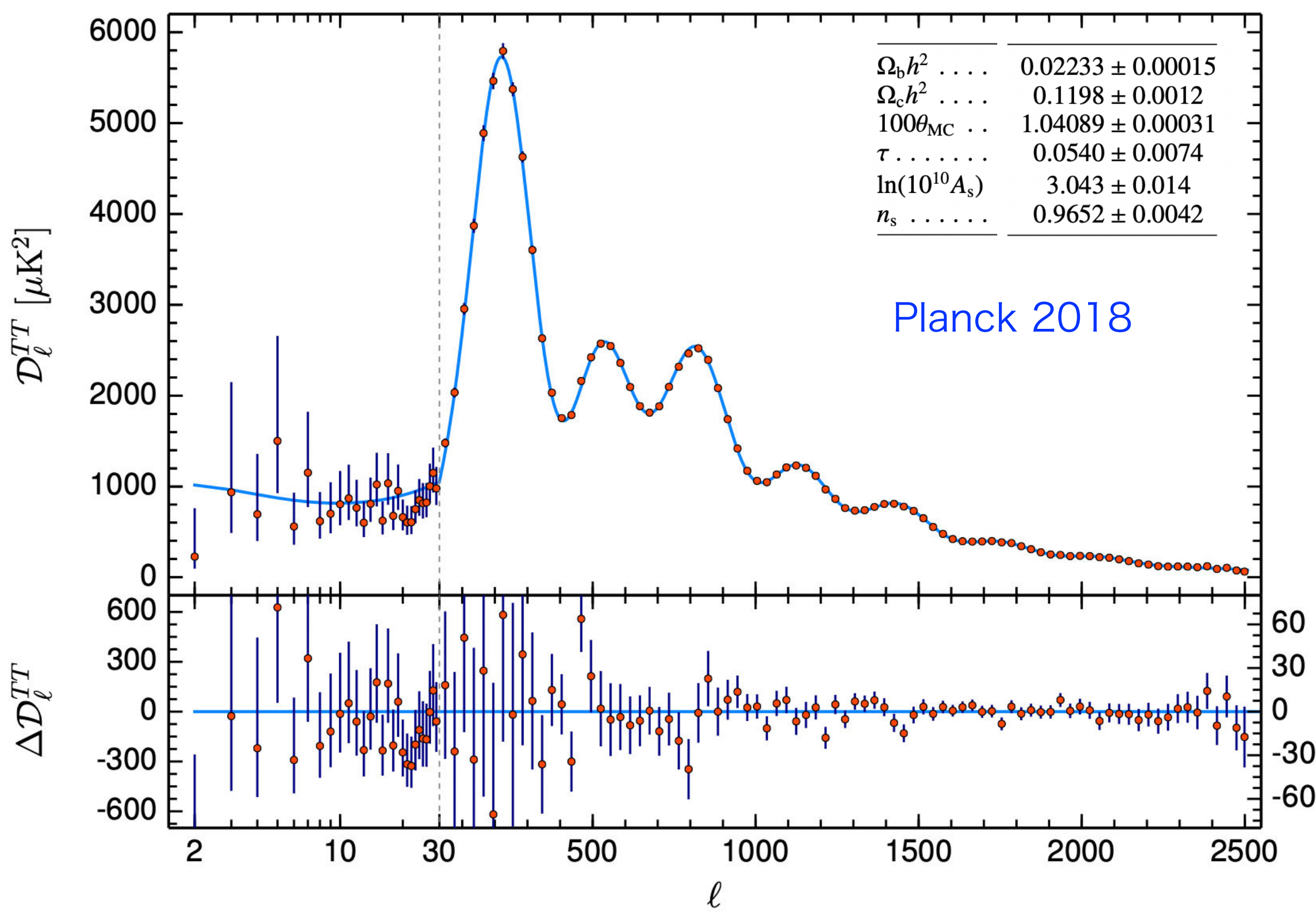


予言と検証

軽い元素の存在量予測 (BBN)



宇宙マイクロ波背景放射(CMB)のパワースペクトラム



ここまでの個人的感想：

時空を超えて成立している標準理論は究極的法則に近いと思う

素粒子標準理論を超えた新物理の強い示唆

現代宇宙論: 素粒子標準理論+3つの仮定

3つの仮定:

- ・インフレーション
- ・ダークマター
- ・物質反物質非対称性

また, 標準理論は

- ・ニュートリノ振動
- ・量子重力
- ・ダークエネルギーが小さいこと も説明できない。

素粒子標準理論を超えた新物理の強い示唆

現代宇宙論: 素粒子標準理論+3つの仮定

3つの仮定:

- ・インフレーション

- ・ダークマター

- ・物質反物質非対称性

今日のトピック

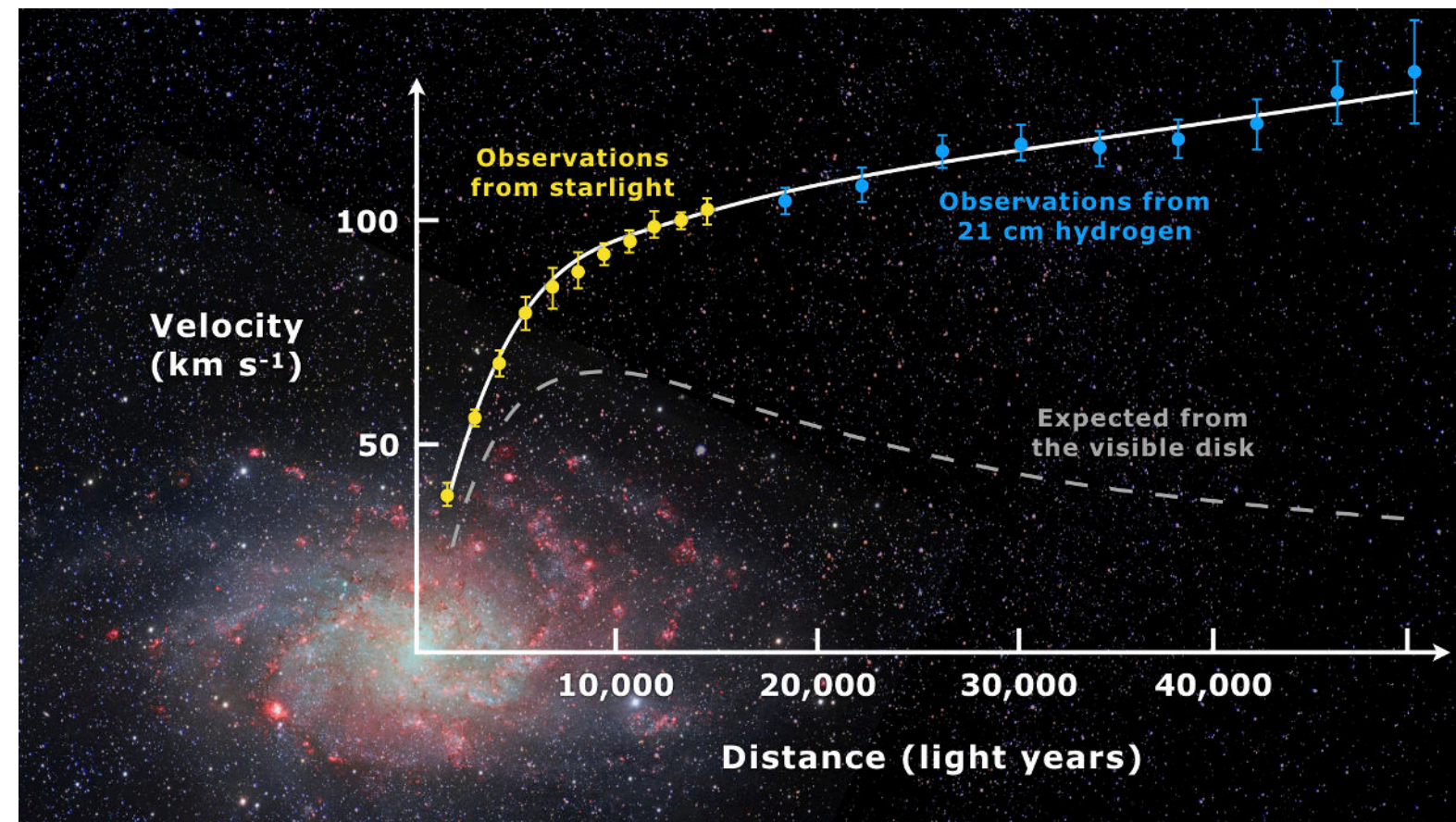
また、標準理論は

- ・ニュートリノ振動

- ・量子重力

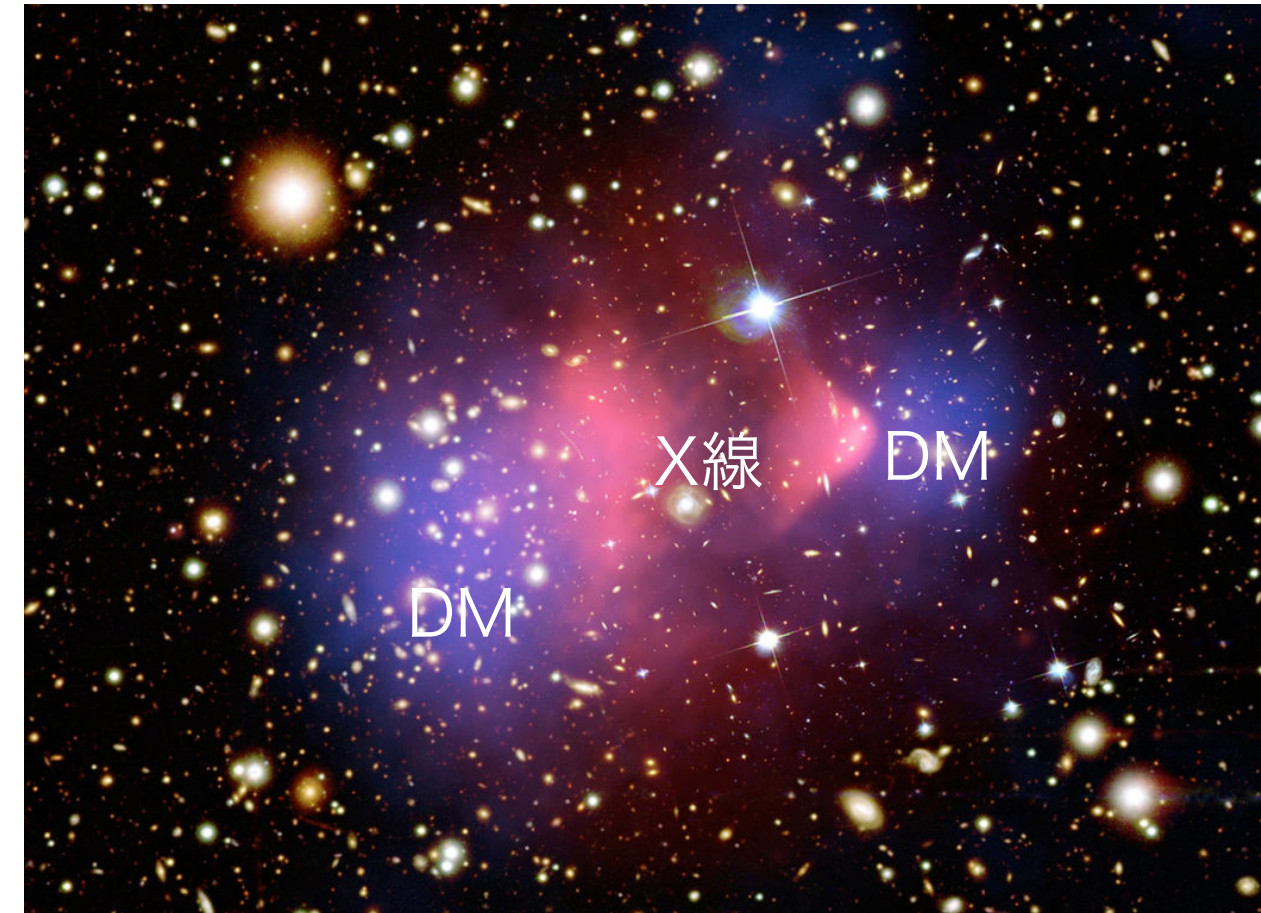
- ・ダークエネルギーが小さいことも説明できない。

・ダークマターの正体は約 1 世紀にわたる未解決問題（標準理論で説明不可能）



銀河回転曲線

[wikipedia](#)



銀河団衝突

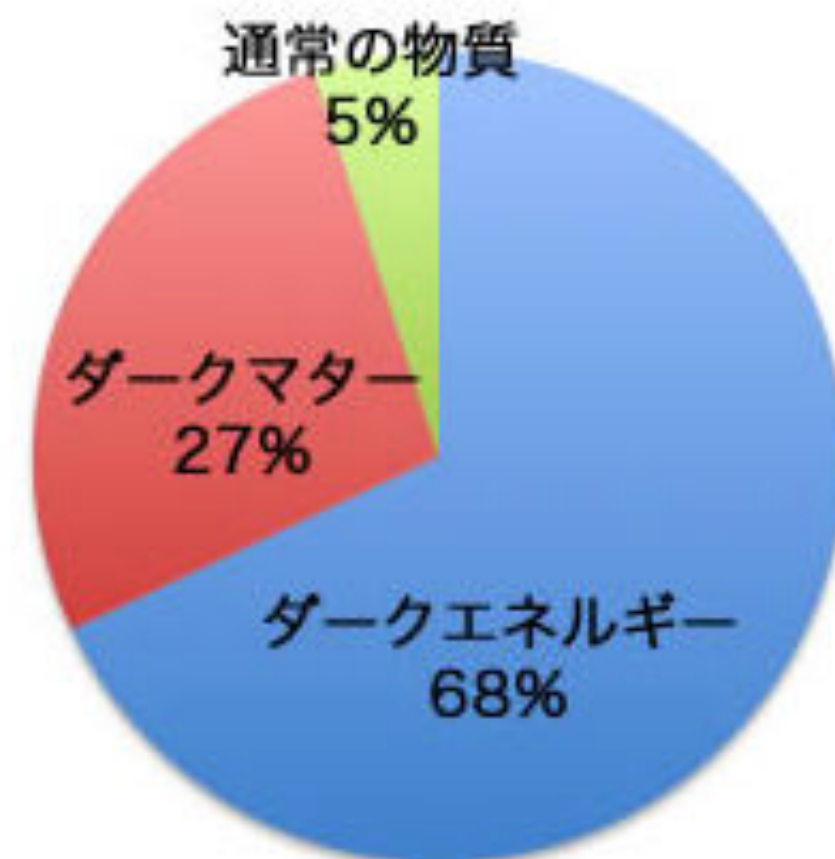
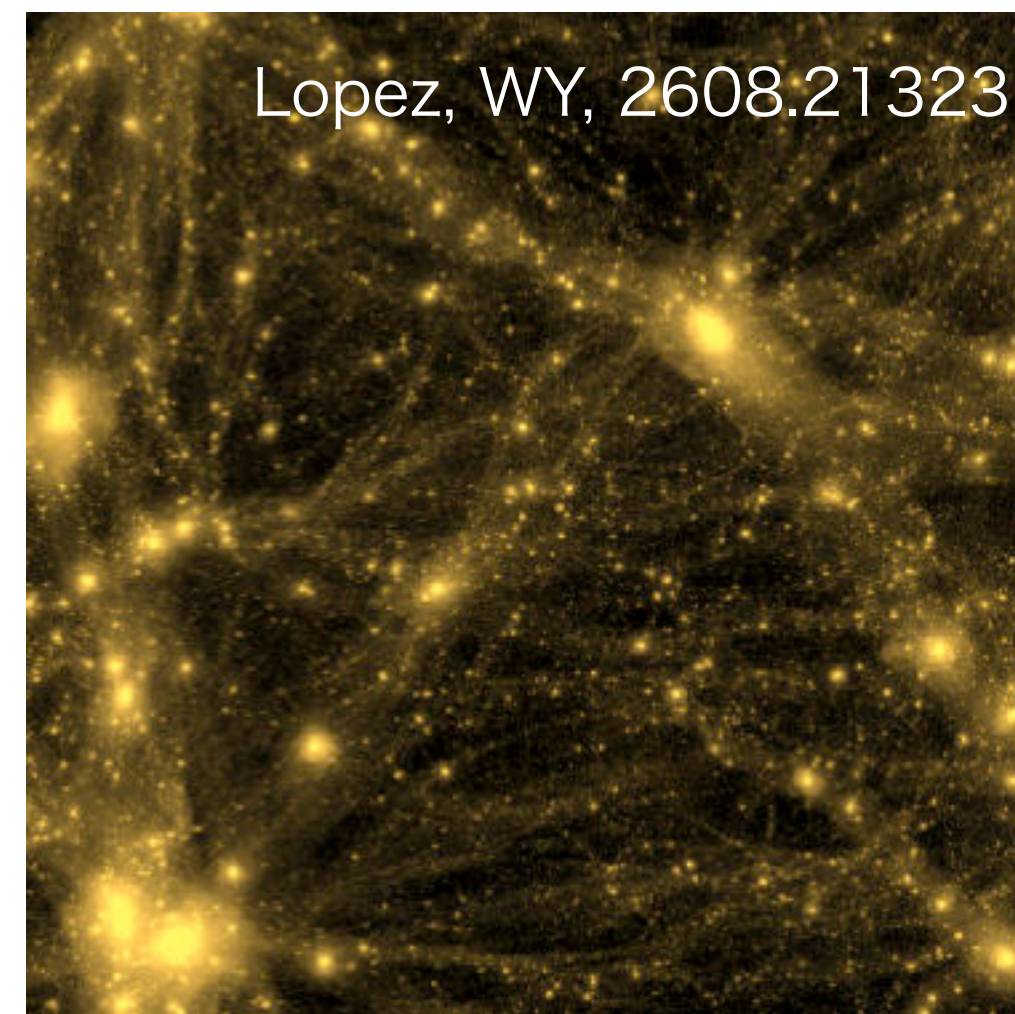


図1：宇宙の組成

宇宙マイクロ波背景放射

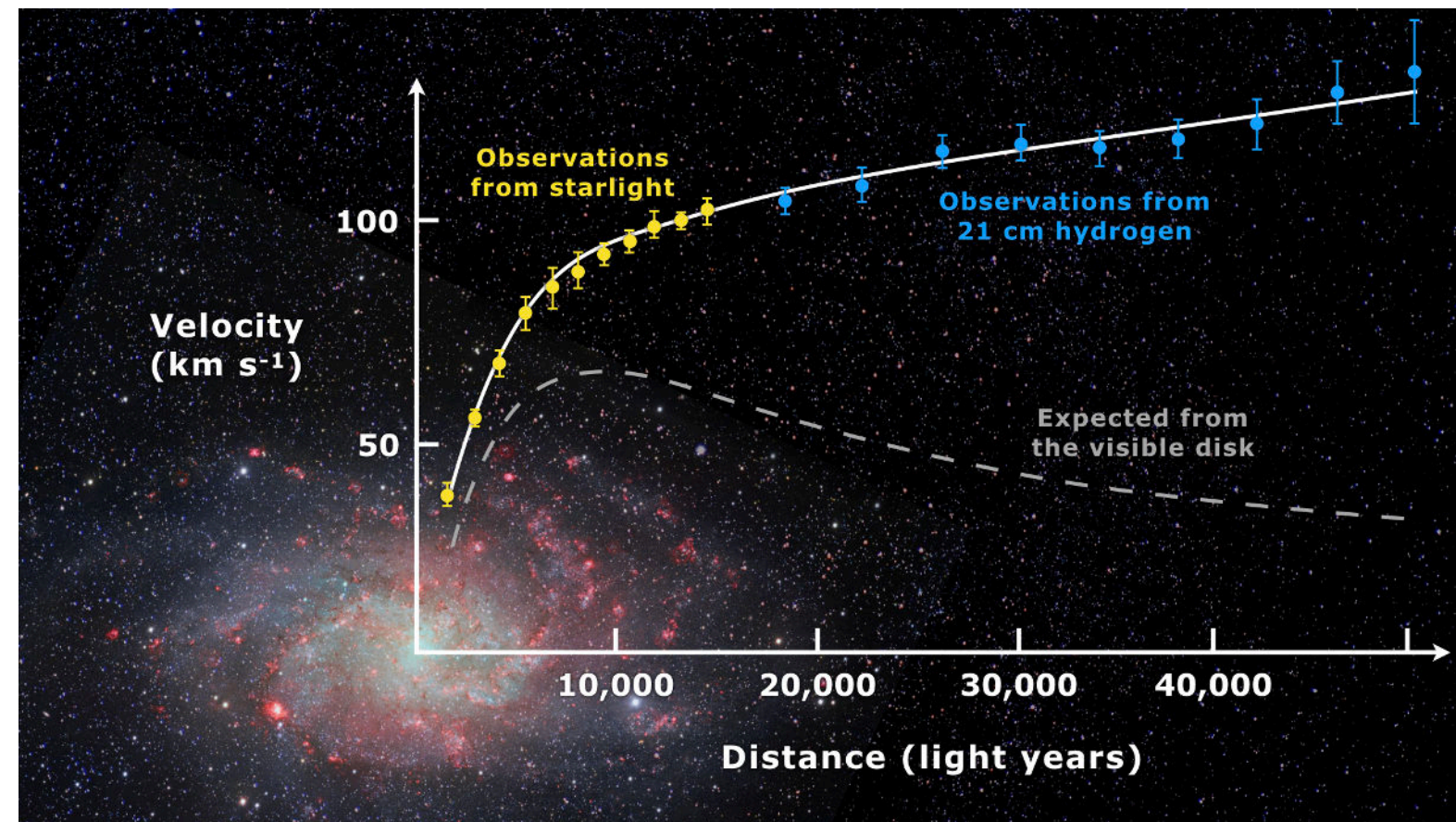


構造形成数値計算

・ダークマターの現代知識

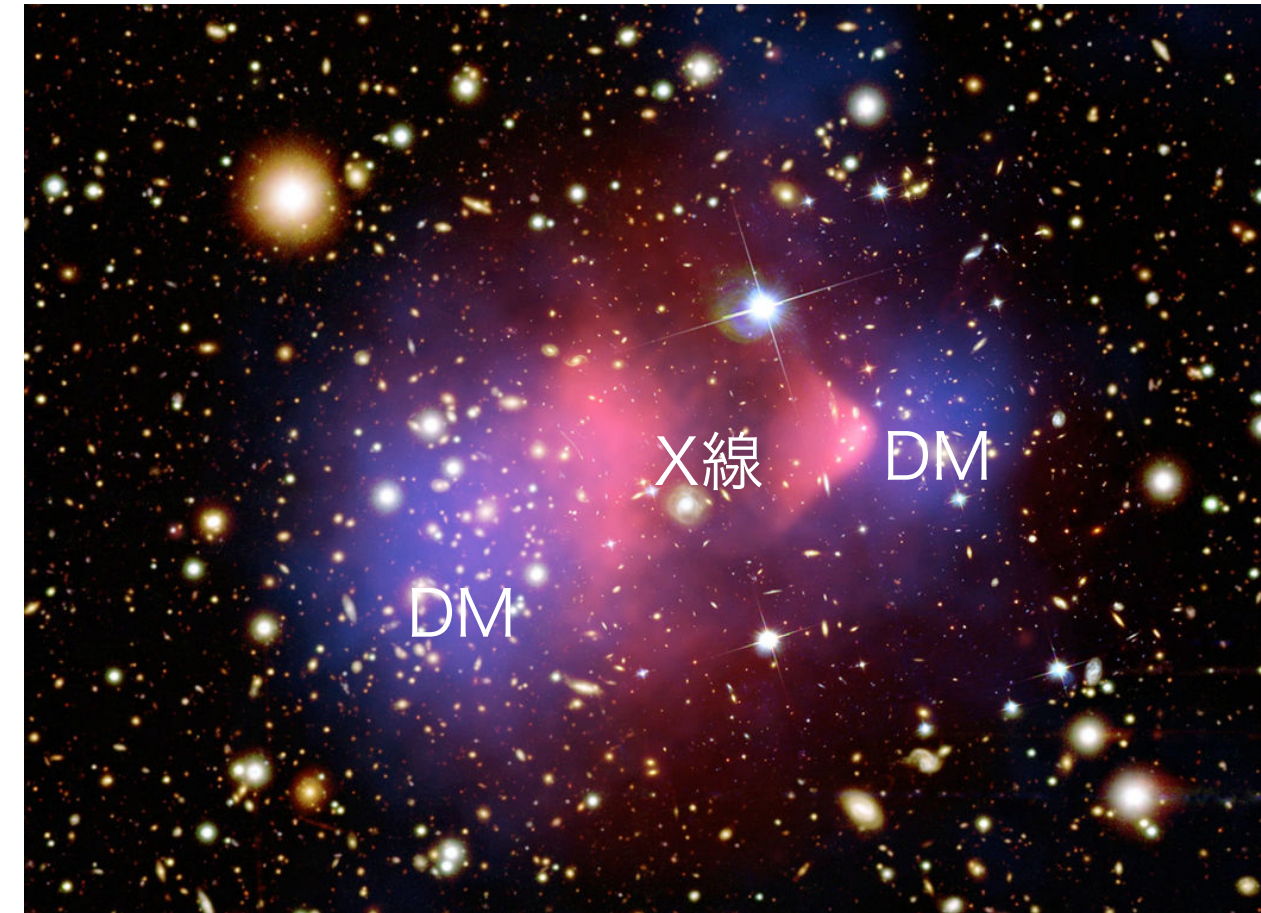
- ・ 寿命が極めて長い
- ・ 電荷を持たない
- ・ 冷たい
(ほぼ止まっている。)
- ・ 銀河の重力元
- ・ 存在量 ($\rho_{DM}/s \sim eV$)

・ダークマターの正体は約 1 世紀にわたる未解決問題（標準理論で説明不可能）



銀河回転曲線

[wikipedia](#)



銀河団衝突

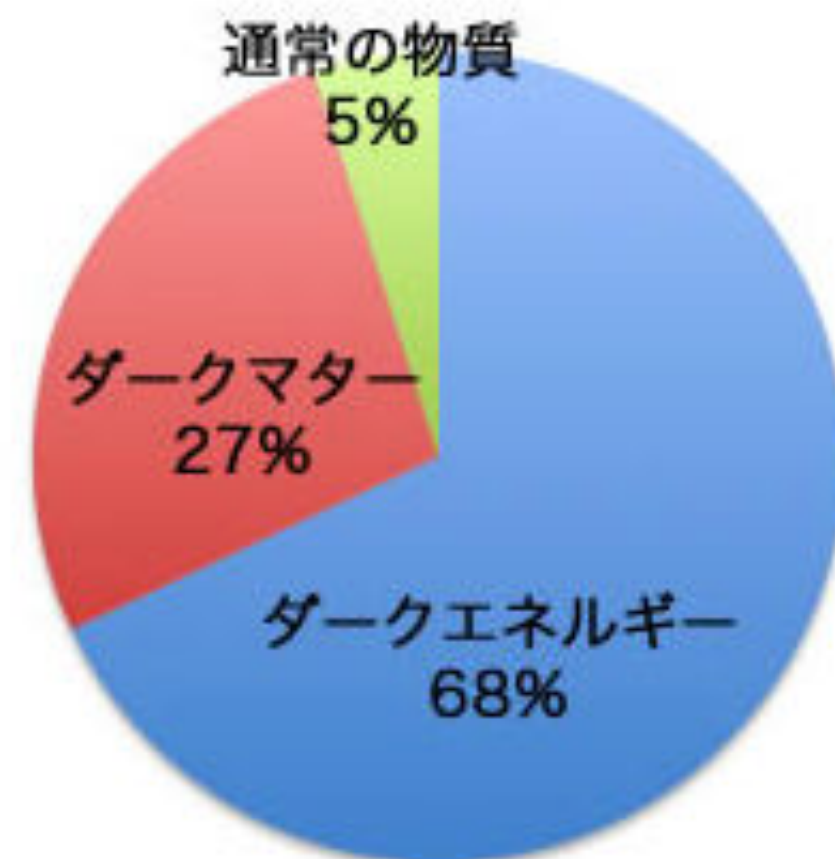
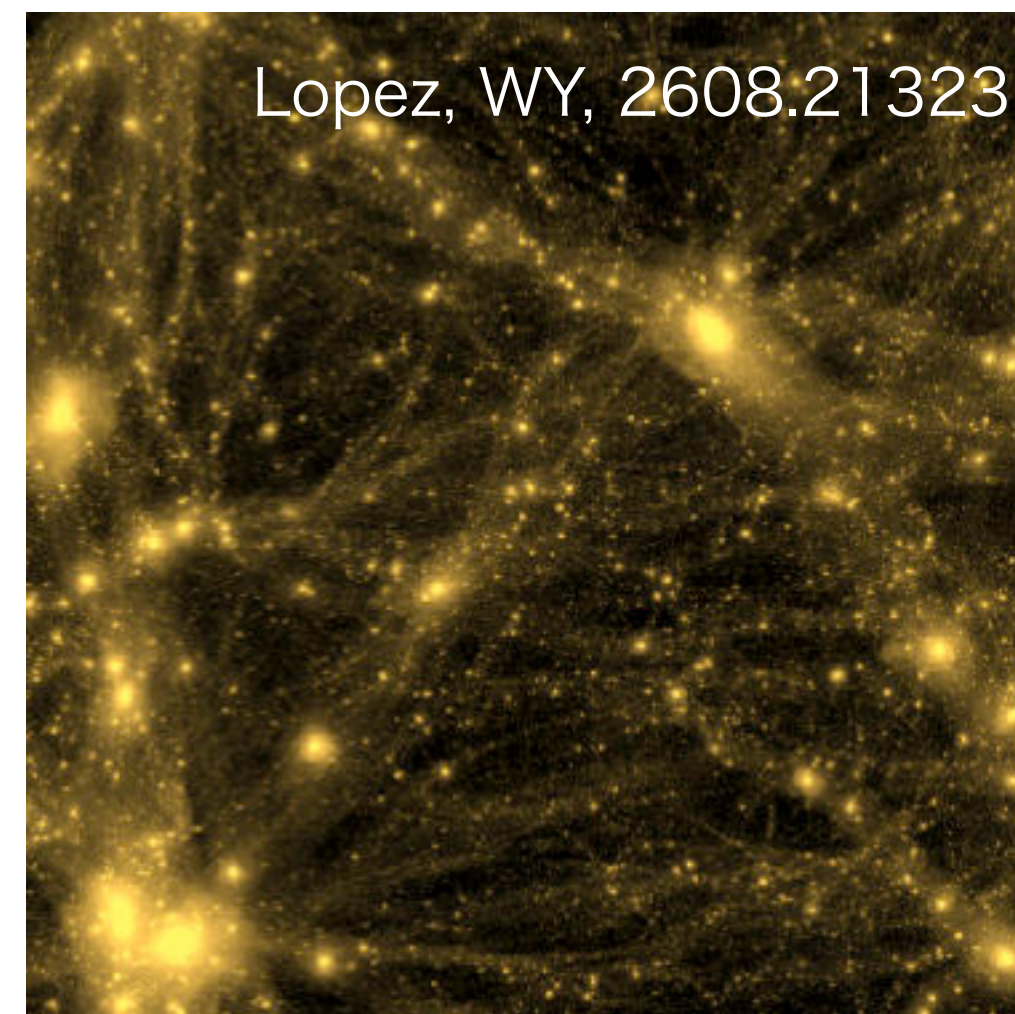


図1：宇宙の組成

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

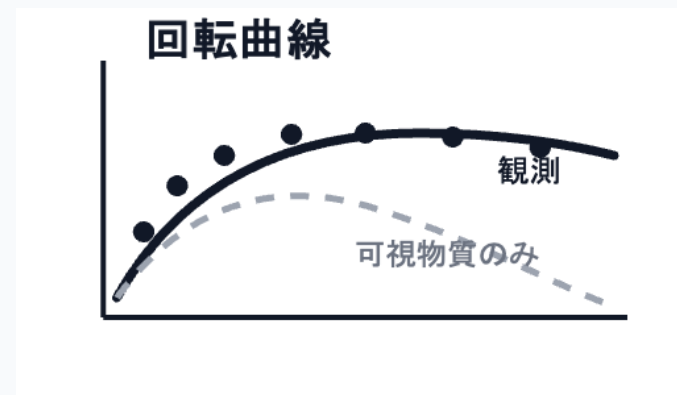
- ・ 寿命が極めて長い
- ・ 電荷を持たない
- ・ 冷たい
(ほぼ止まっている。)
- ・ 銀河の重力元
- ・ 存在量 ($\rho_{DM}/s \sim eV$)

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

Blumenthal et al 1984

1930s–1970s

重力的証拠



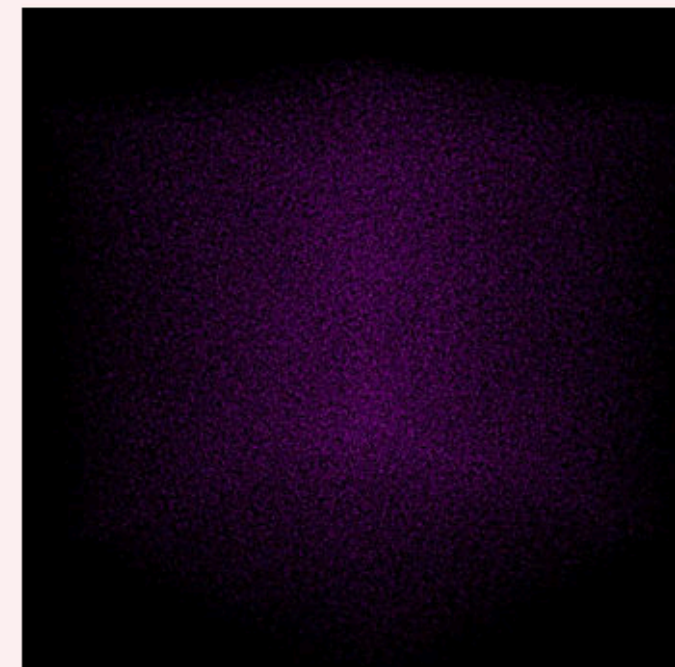
見える物質だけでは
説明できない質量



重力

1970s後半–80s前半

HDMが有力



速い粒子
小構造を消す

ν , Axion, ...

$m_{\text{DM}} \sim \text{eV}$

1984

HDM vs CDM



観測された銀河分布
と比較

HDMだけでは
不利に

パラダイム
シフト

1980s後半

CDMが主流へ



冷たい粒子
階層的成長

WIMP, Axion, ...

$m_{\text{DM}} \sim [\text{pc}^{-1}, M_{\odot}]$

1990s–現在

多面的探索



直接・間接
加速器・宇宙論

CDMパラダイムの
下で
候補を絞り込む

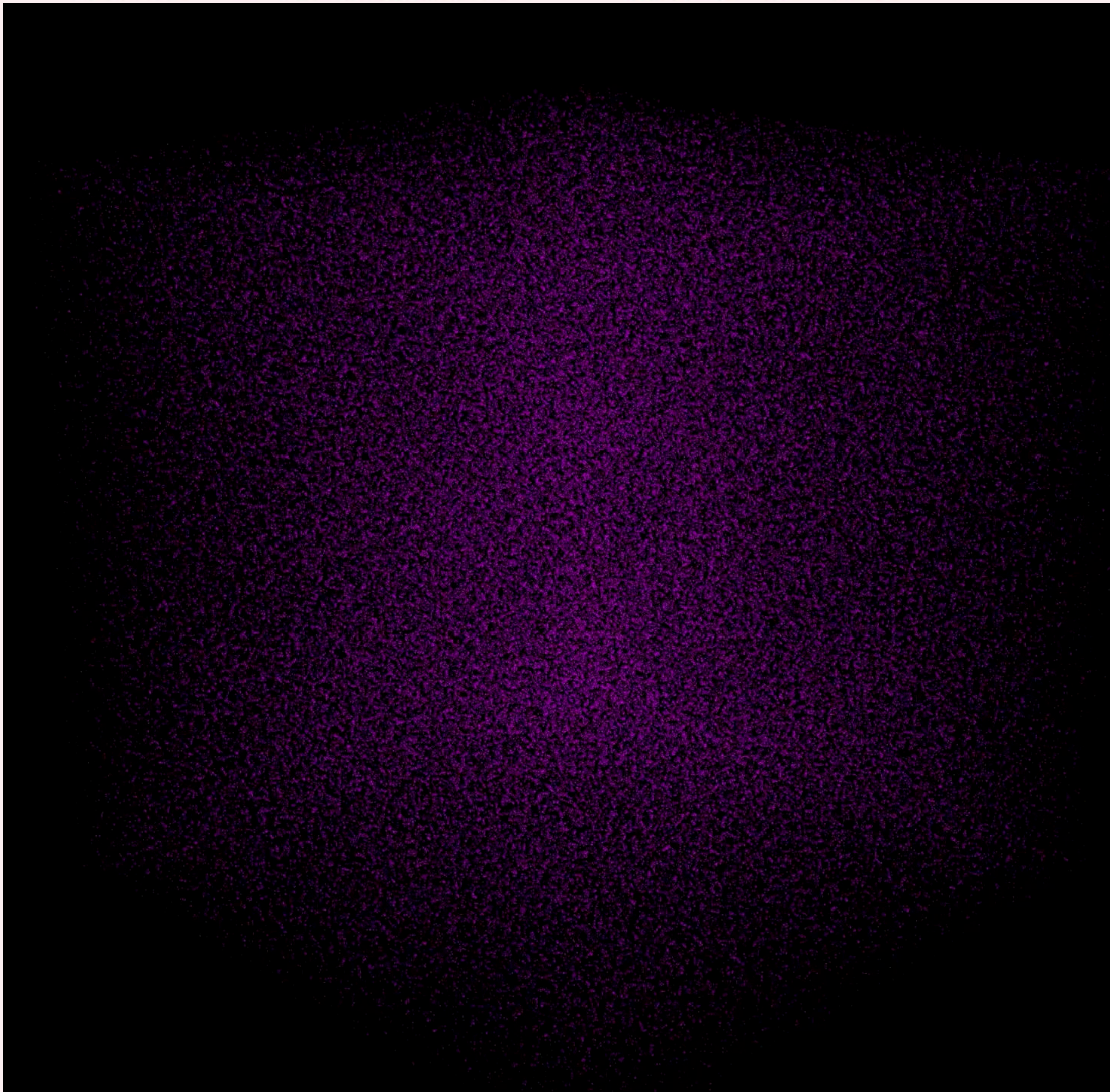
HDM : 速い粒子が大規模構造を作る



CDM : 遅い粒子が小構造から成長する

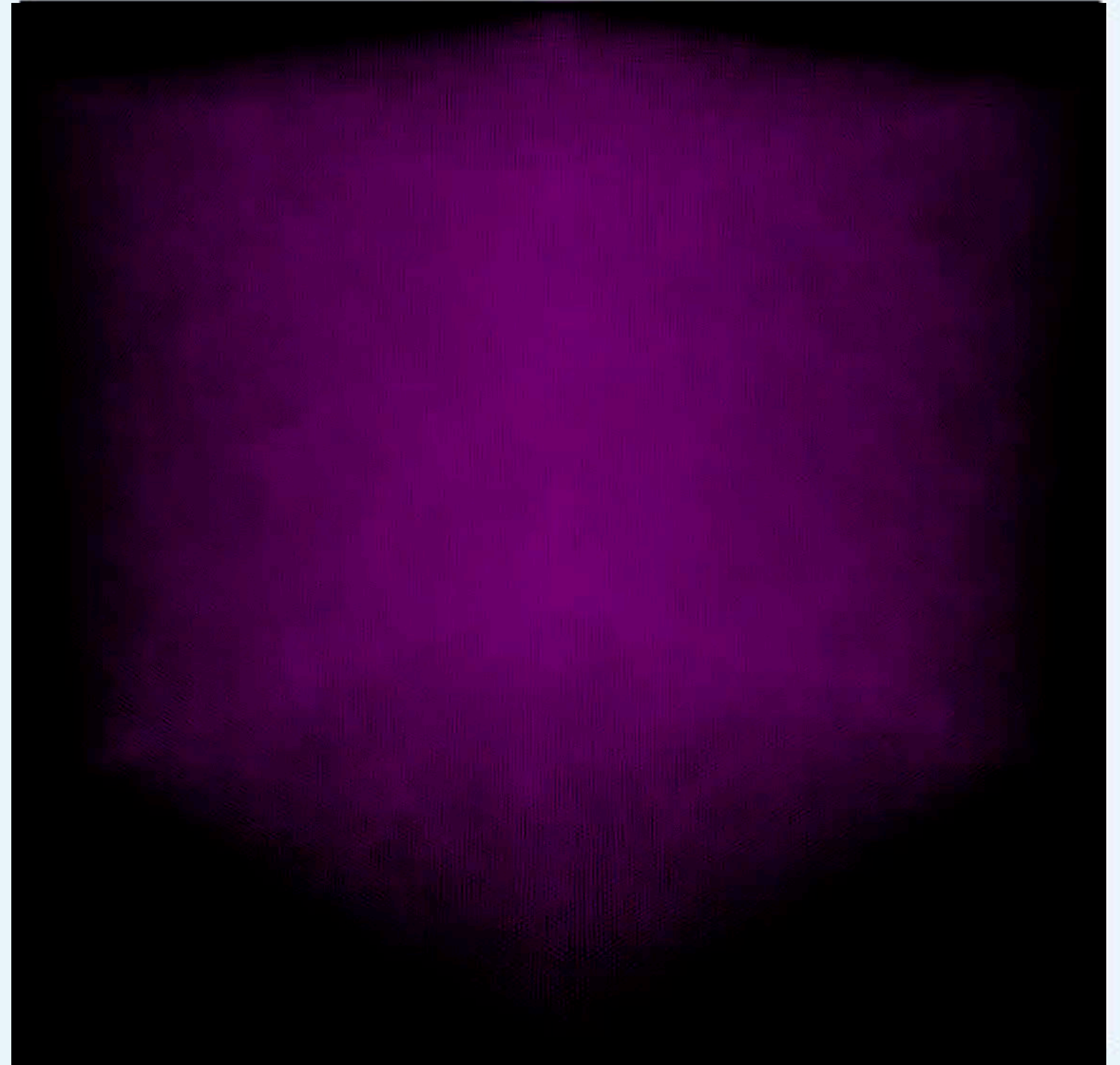
HDMが有力

500 Mpc/h



CDMが主流へ

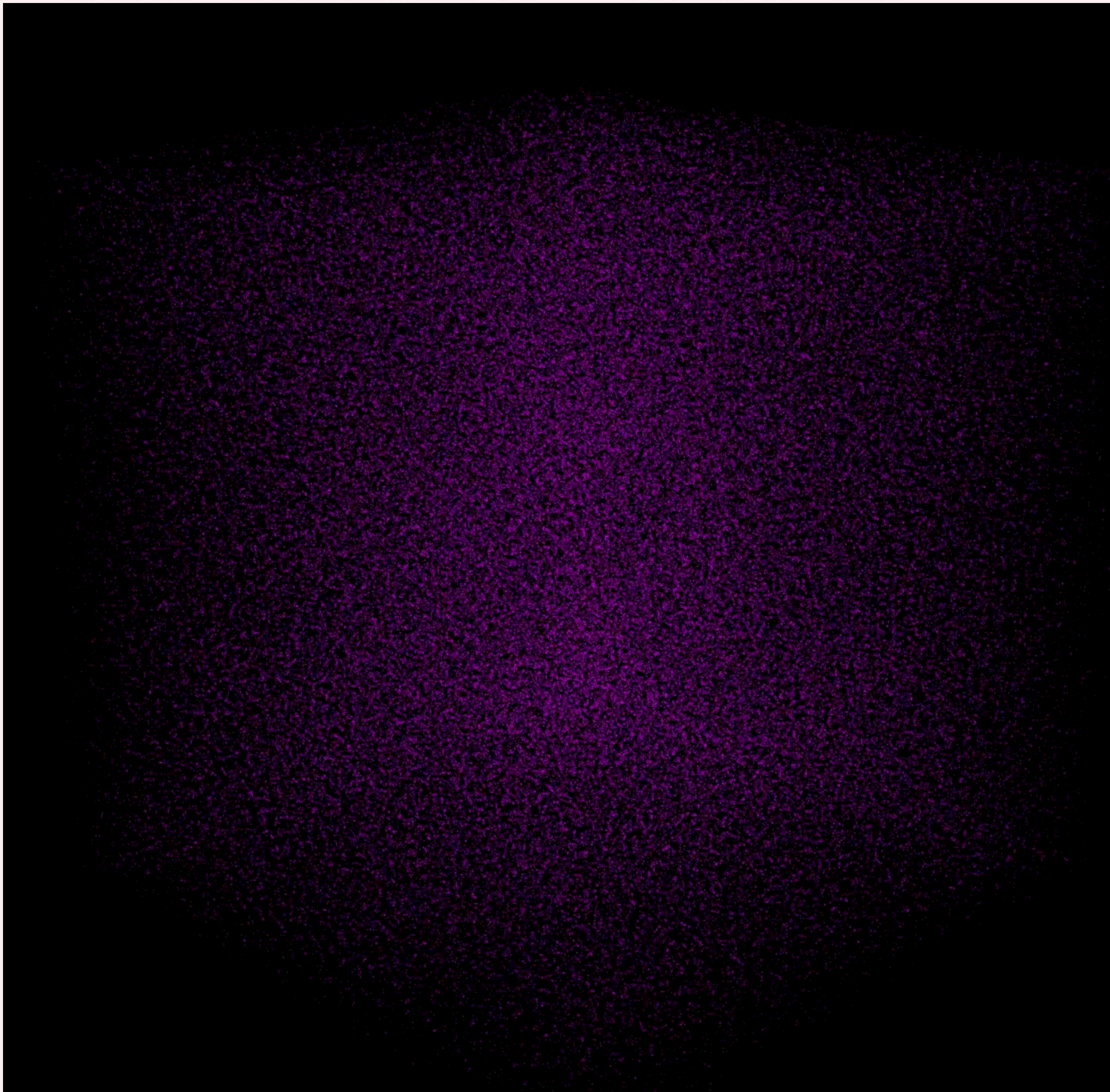
50 Mpc/h



CMBから得た初期インフラトン量子揺らぎ（を線形発展させたもの）を代入

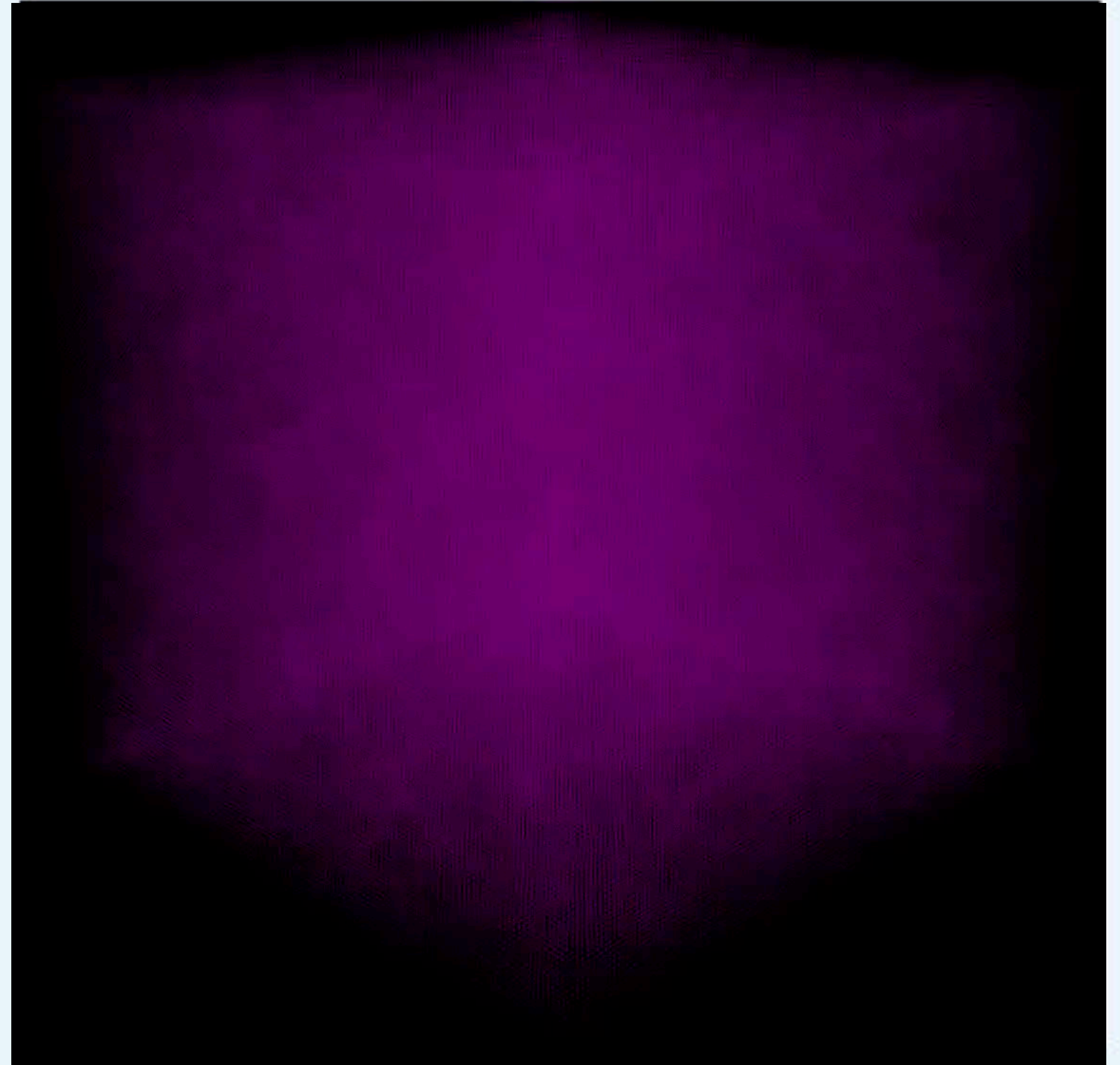
HDMが有力

500 Mpc/h



CDMが主流へ

50 Mpc/h



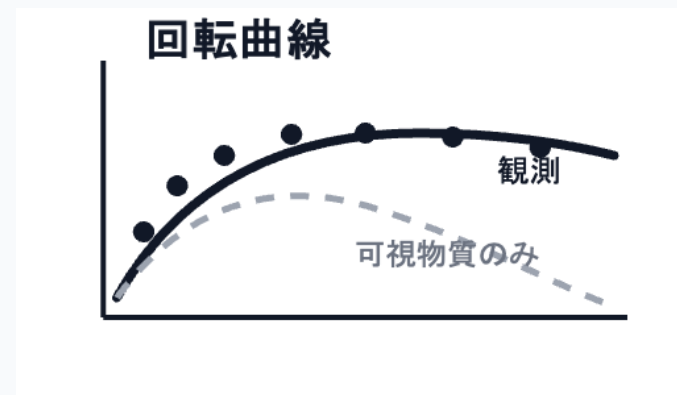
CMBから得た初期インフラトン量子揺らぎ（を線形発展させたもの）を代入

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

Blumenthal et al 1984

1930s–1970s

重力的証拠



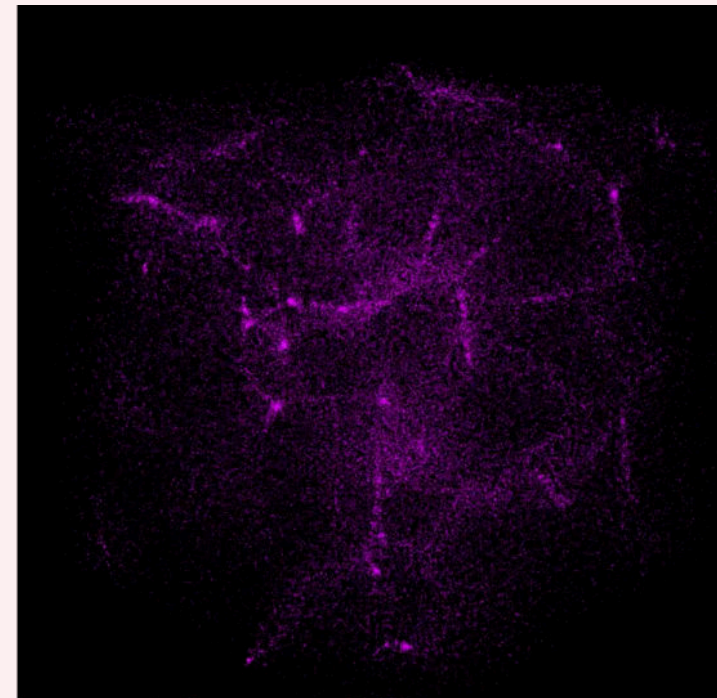
見える物質だけでは
説明できない質量



重力

1970s後半–80s前半

HDMが有力



速い粒子
小構造を消す

ν , Axion, ...

$m_{\text{DM}} \sim \text{eV}$

1984

HDM vs CDM



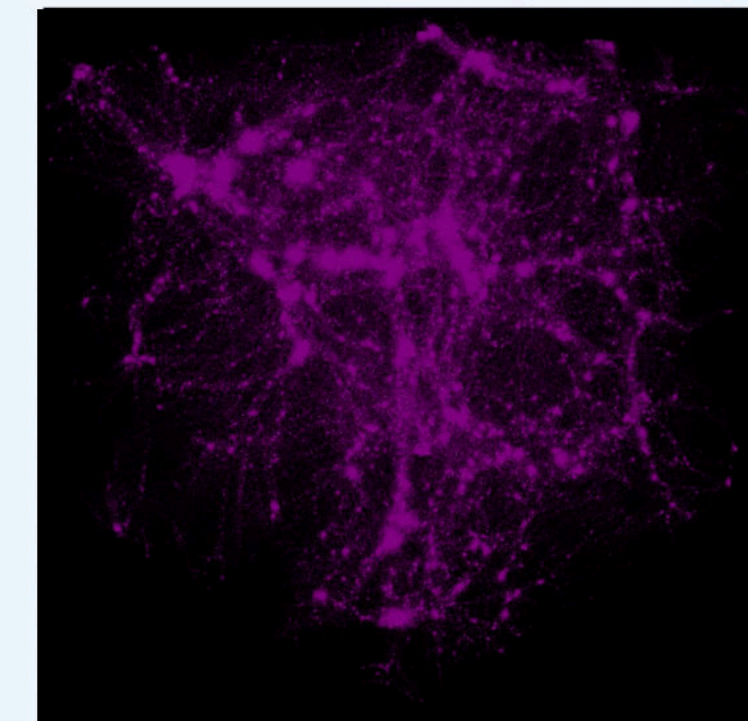
観測された銀河分布
と比較

HDMだけでは
不利に

パラダイム
シフト

1980s後半

CDMが主流へ



冷たい粒子
階層的成長

WIMP, Axion, ...

$m_{\text{DM}} \sim [\text{pc}^{-1}, M_{\odot}]$

1990s–現在

多面的探索



直接・間接
加速器・宇宙論

CDMパラダイムの
下で
候補を絞り込む

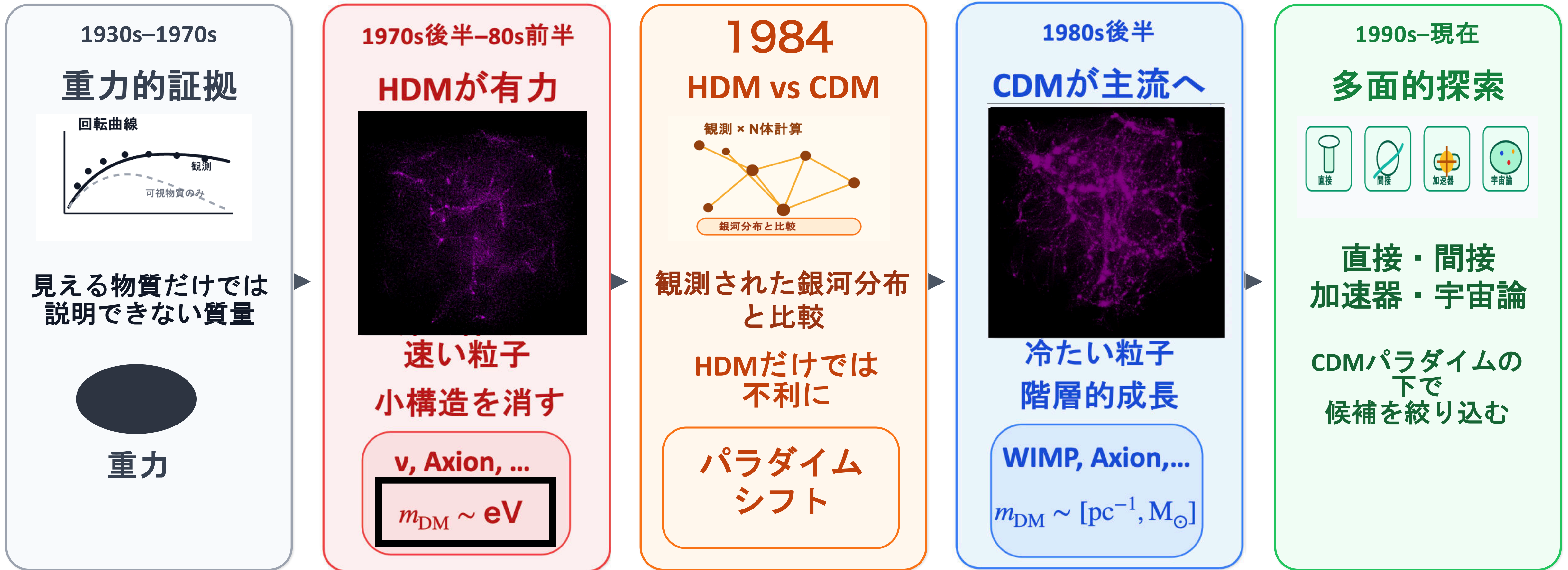
HDM : 速い粒子が大規模構造を作る



CDM : 遅い粒子が小構造から成長する

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

Blumenthal et al 1984



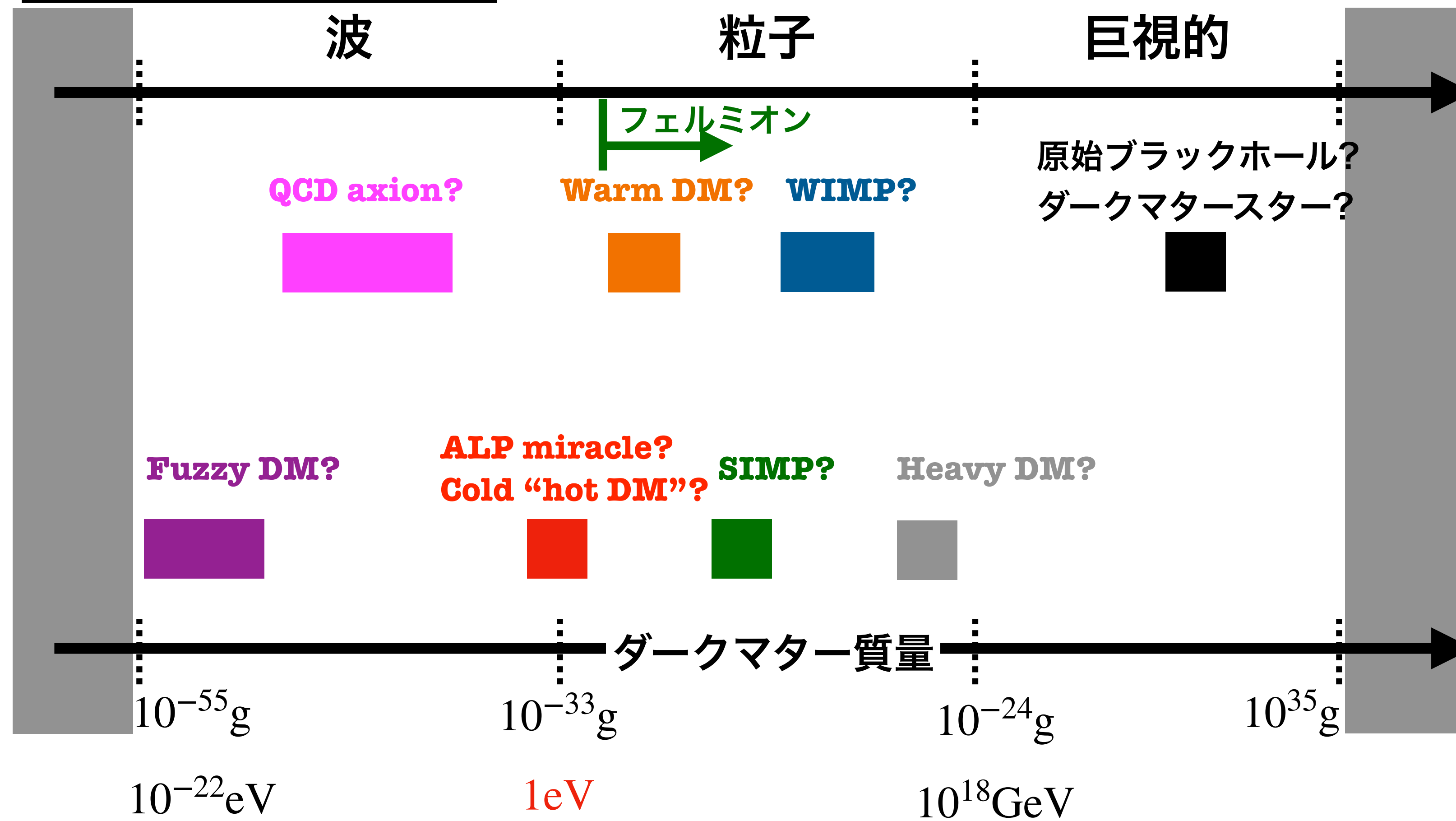
HDM : 速い粒子が大規模構造を作る

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。

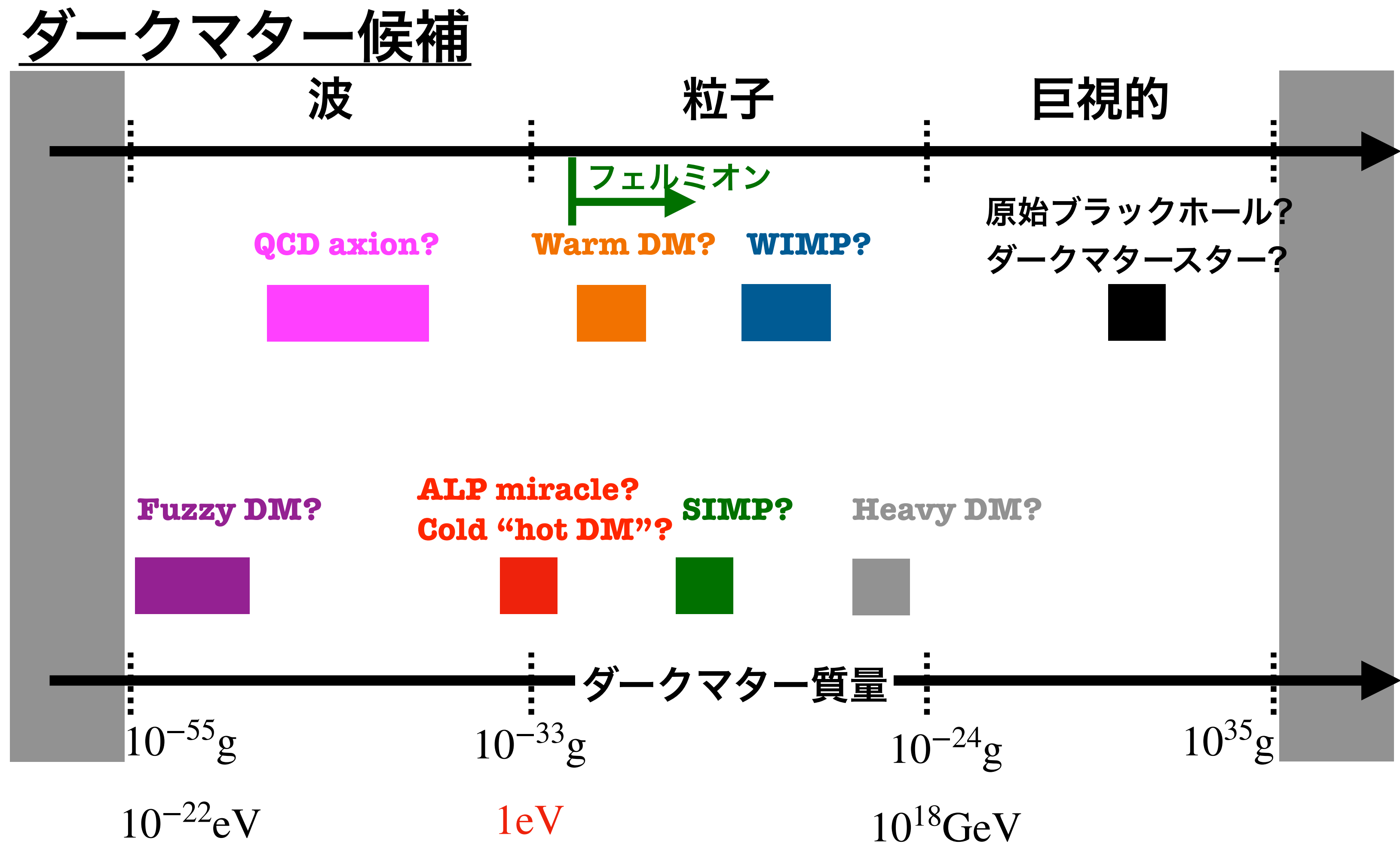
ダークマターの正体は何か？

ダークマター候補

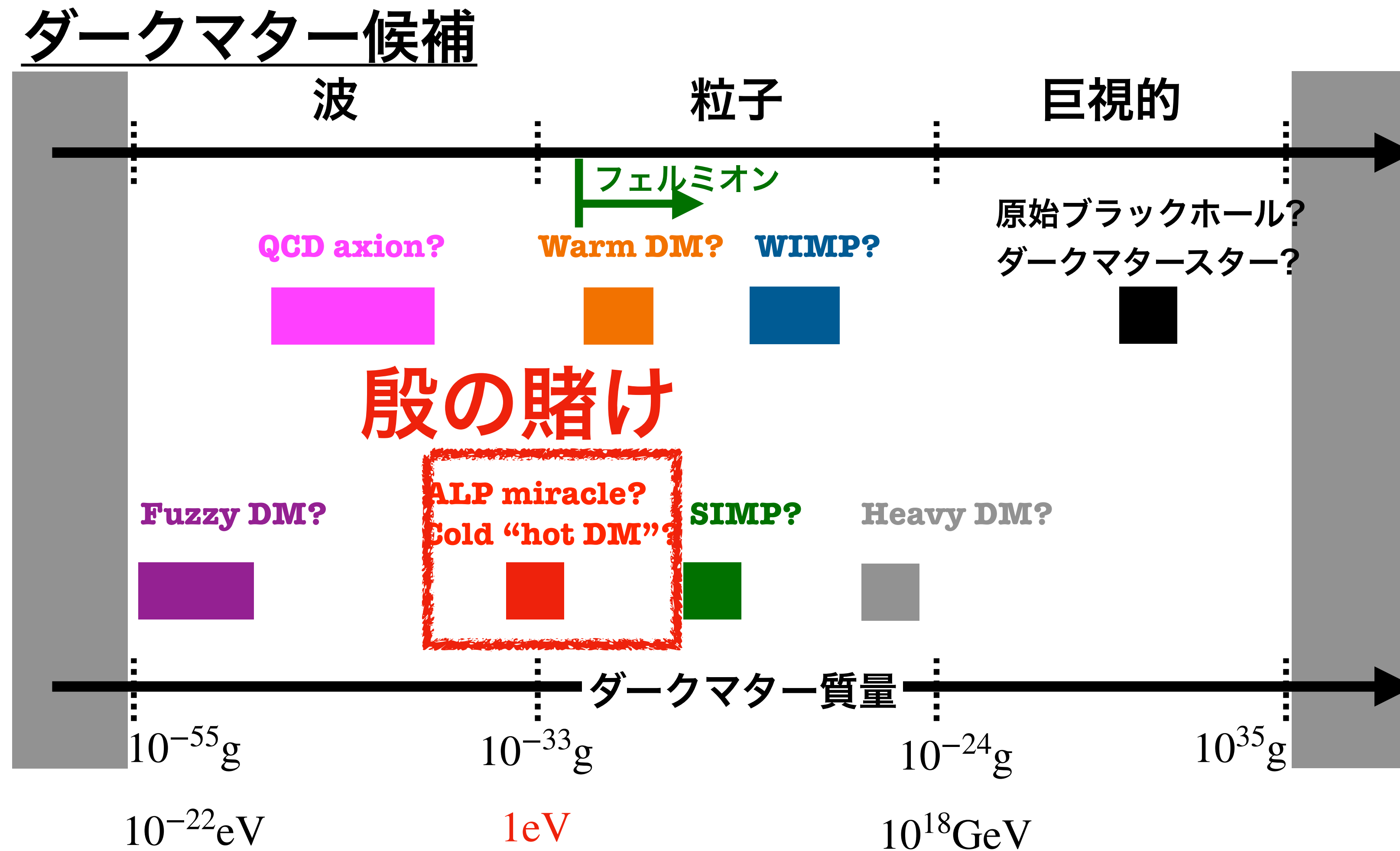


前半終了、質問＋休憩

ダークマターの正体は何か？



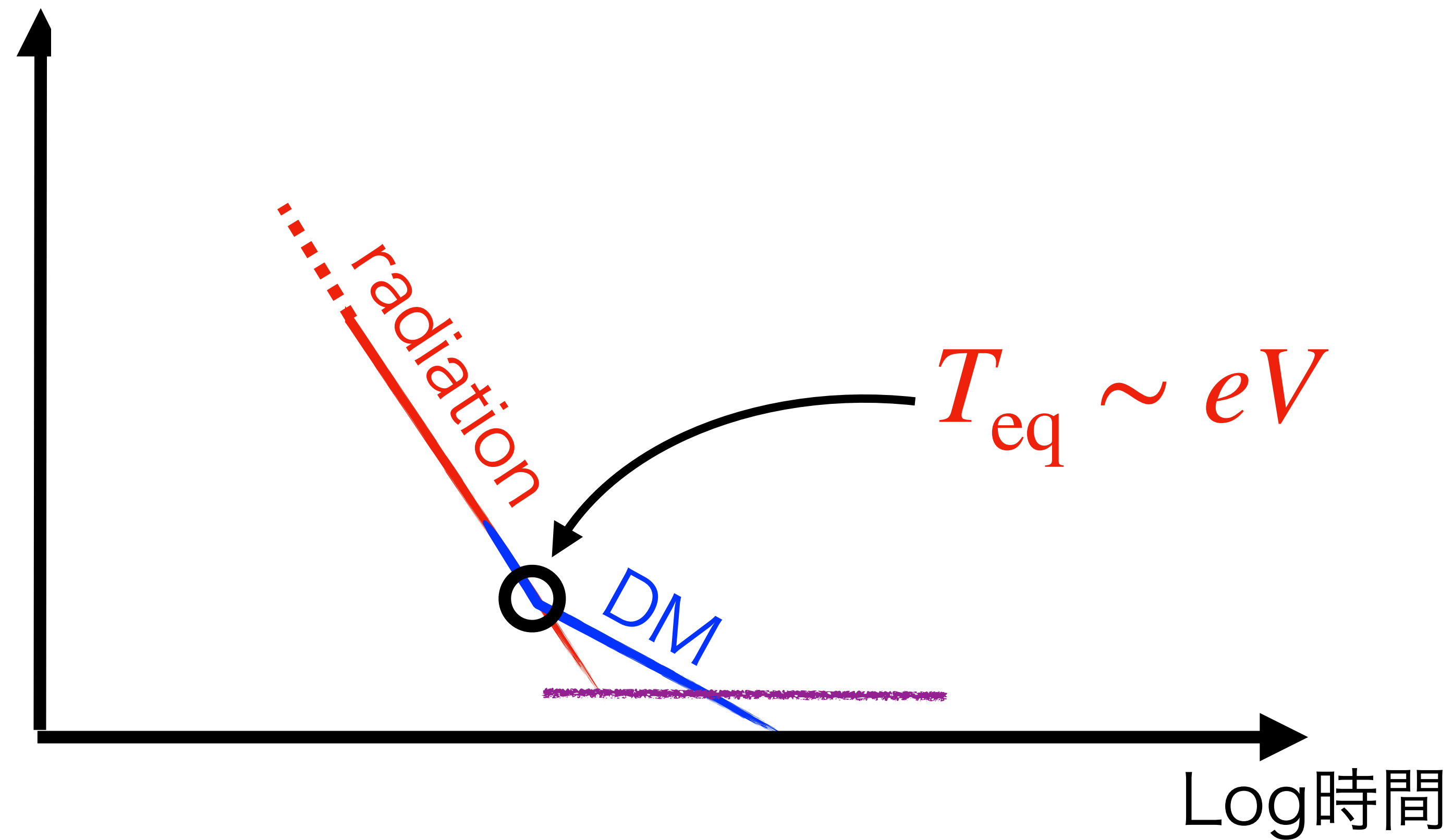
ダークマターの正体は何か？



why eV?

Hot DM

Log(宇宙のエネルギー密度), $\log(\rho)$

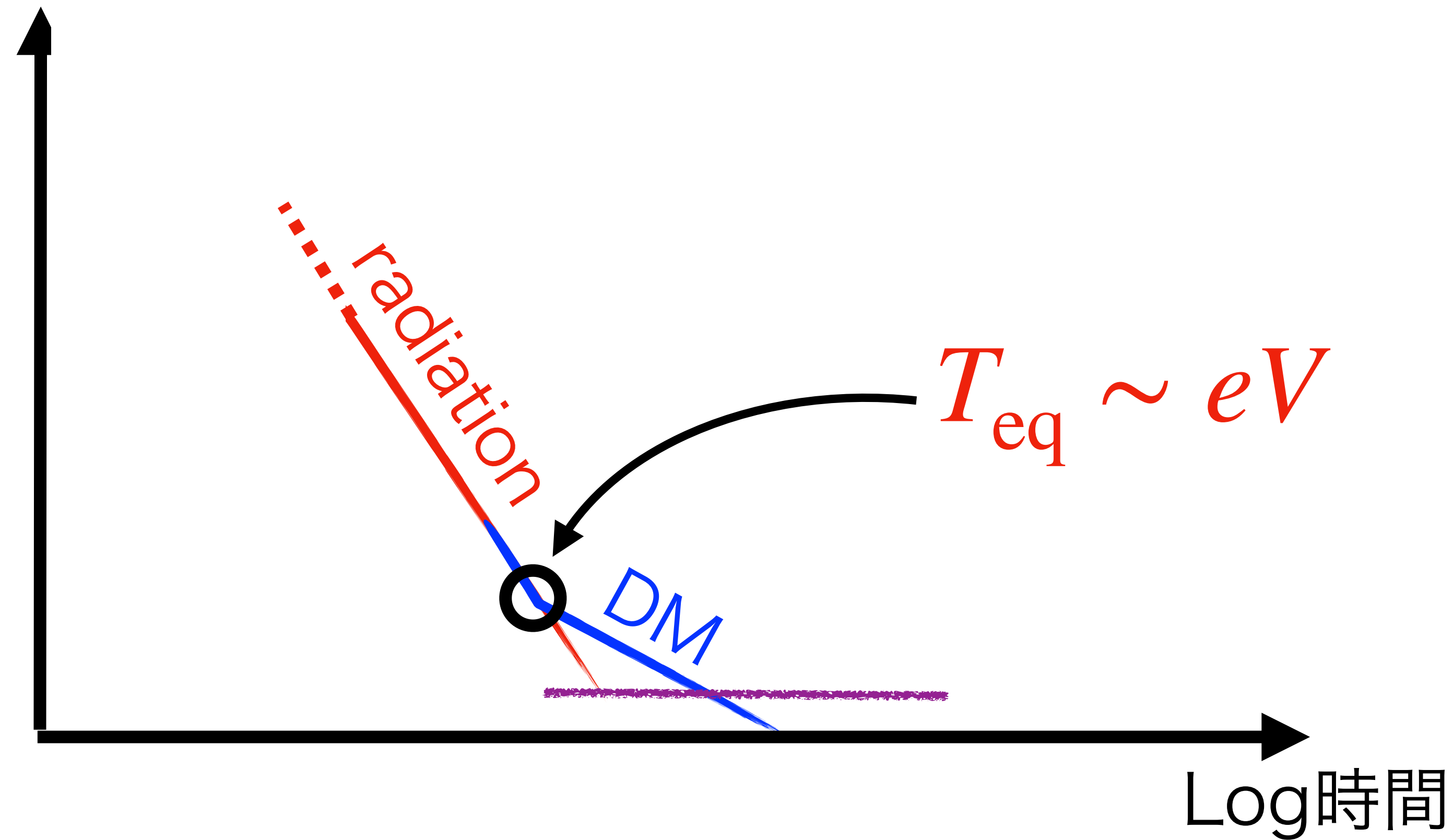


See also ALP miracle: Daido, Takahashi, WY, 1702.03284, 1710.11107

why eV?

Hot DM

Log(宇宙のエネルギー密度), $\log(\rho)$



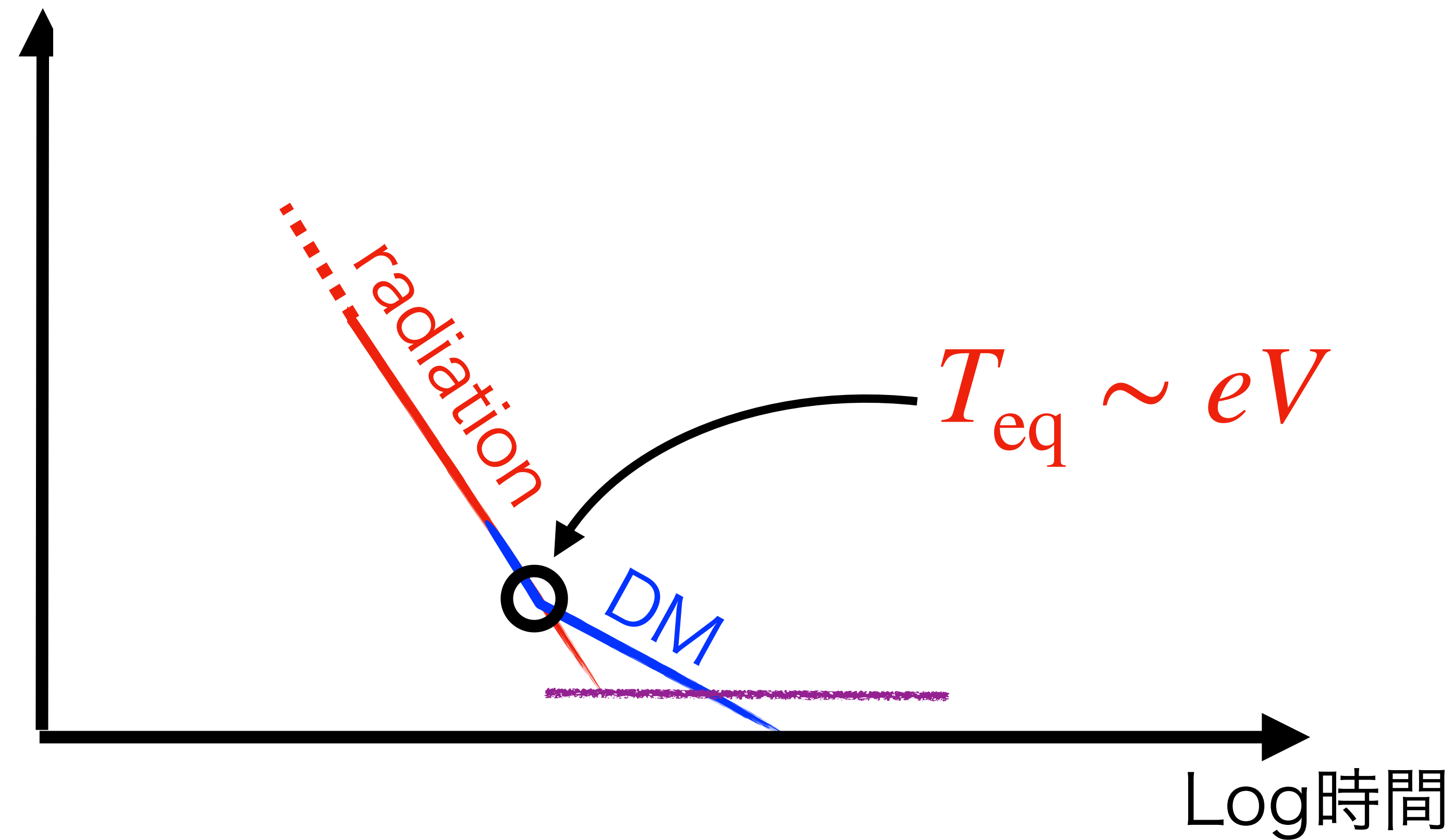
$$\text{If } n_{\text{DM}} \sim T^3,$$

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

why eV?

Hot DM

Log(宇宙のエネルギー密度), $\log(\rho)$



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

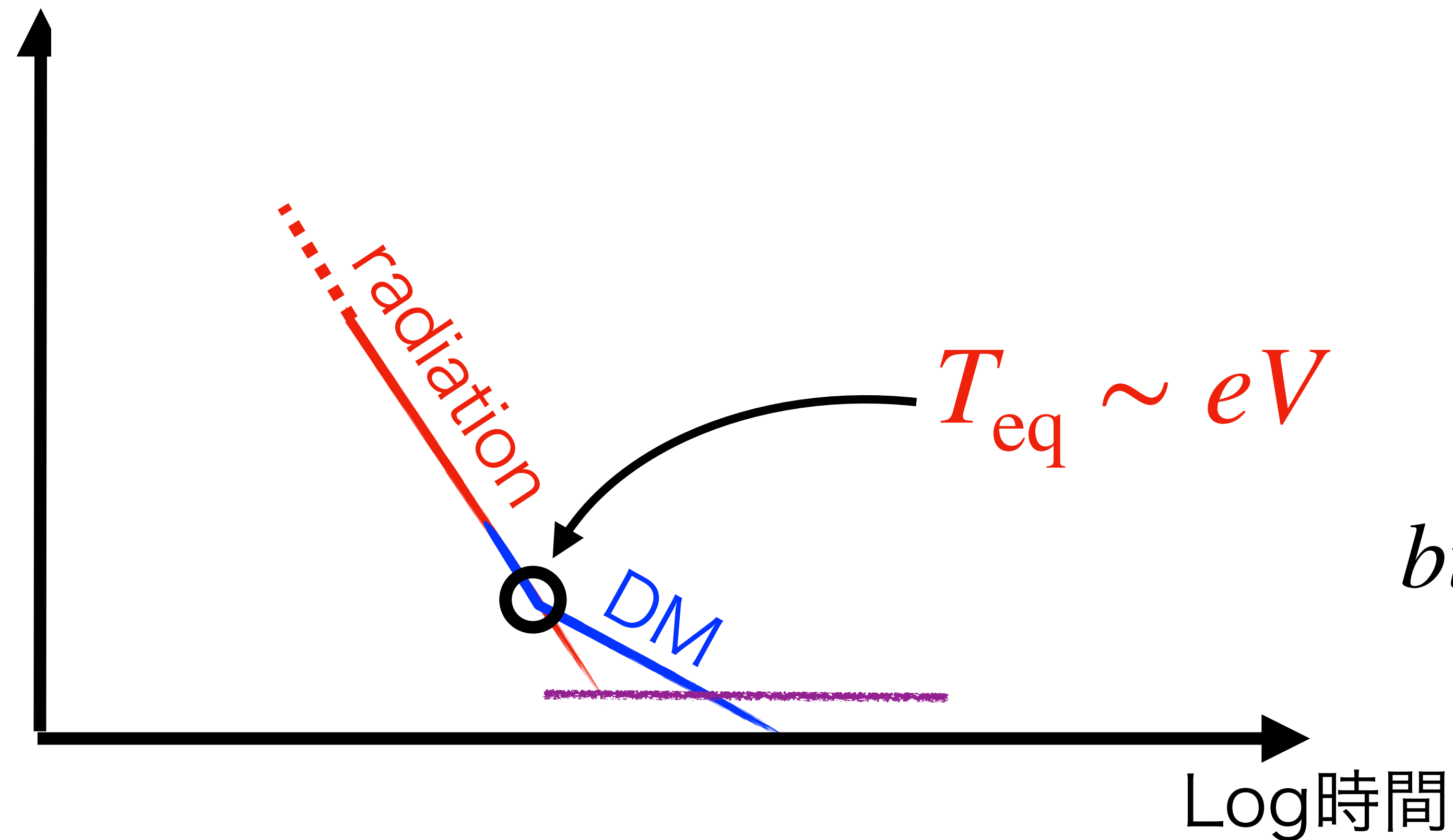
$$m_{\text{DM}} \sim T_{\text{eq}} \sim \text{eV}.$$

• **Attractor的予言**

why eV?

Hot DM

Log(宇宙のエネルギー密度), $\log(\rho)$



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

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

• **Attractor的予言**

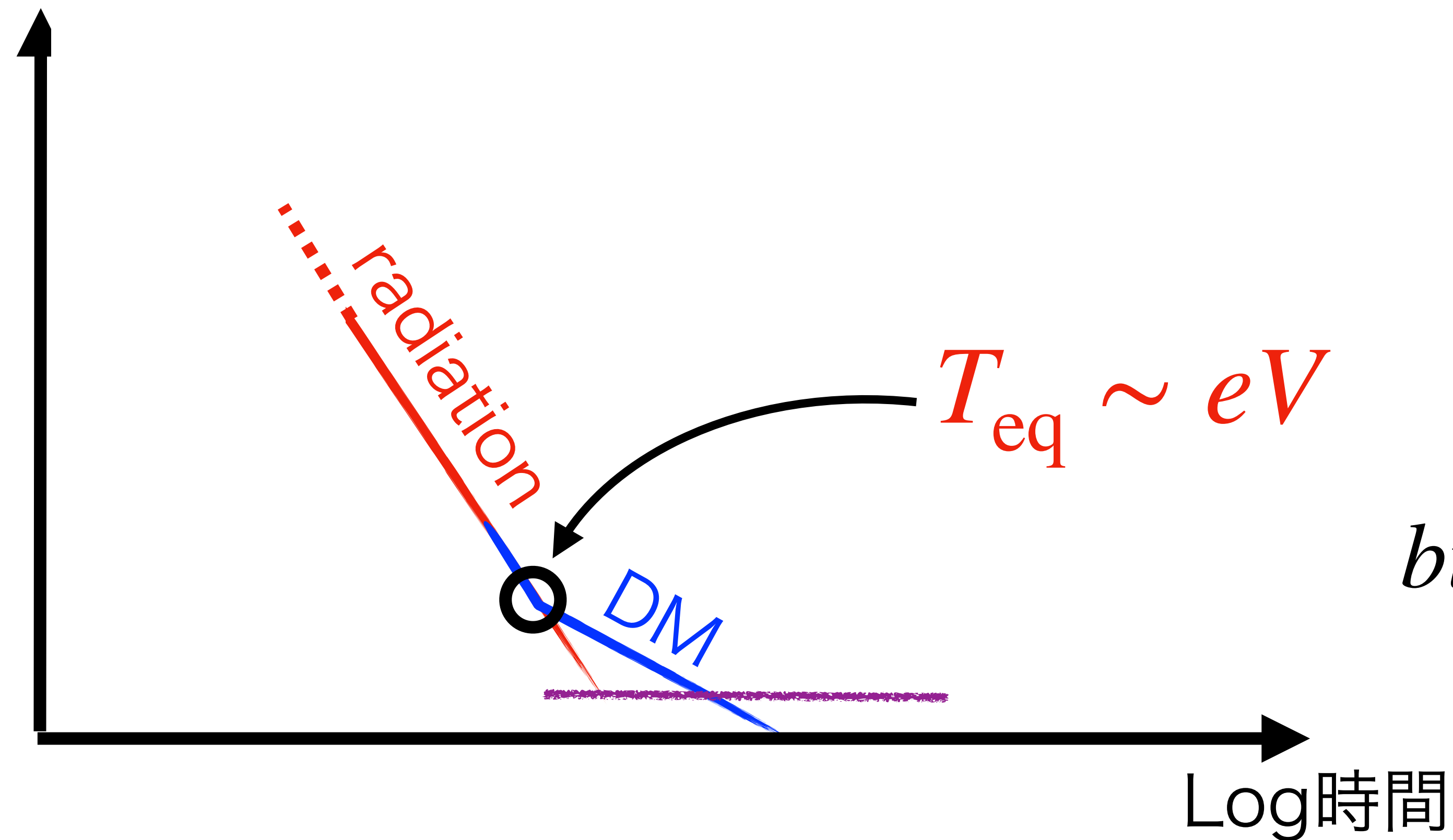
$$\text{but } v_{eq} \sim p_{\text{DM}}(T_{eq})/m_{\text{DM}} \sim 1$$

熱い。。。

why eV?

Hot DM

Log(宇宙のエネルギー密度), $\log(\rho)$



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

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

- **Attractor的予言**
- **本当?**

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

熱い。。。。

2. eV DM 理論

- 2-1. 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

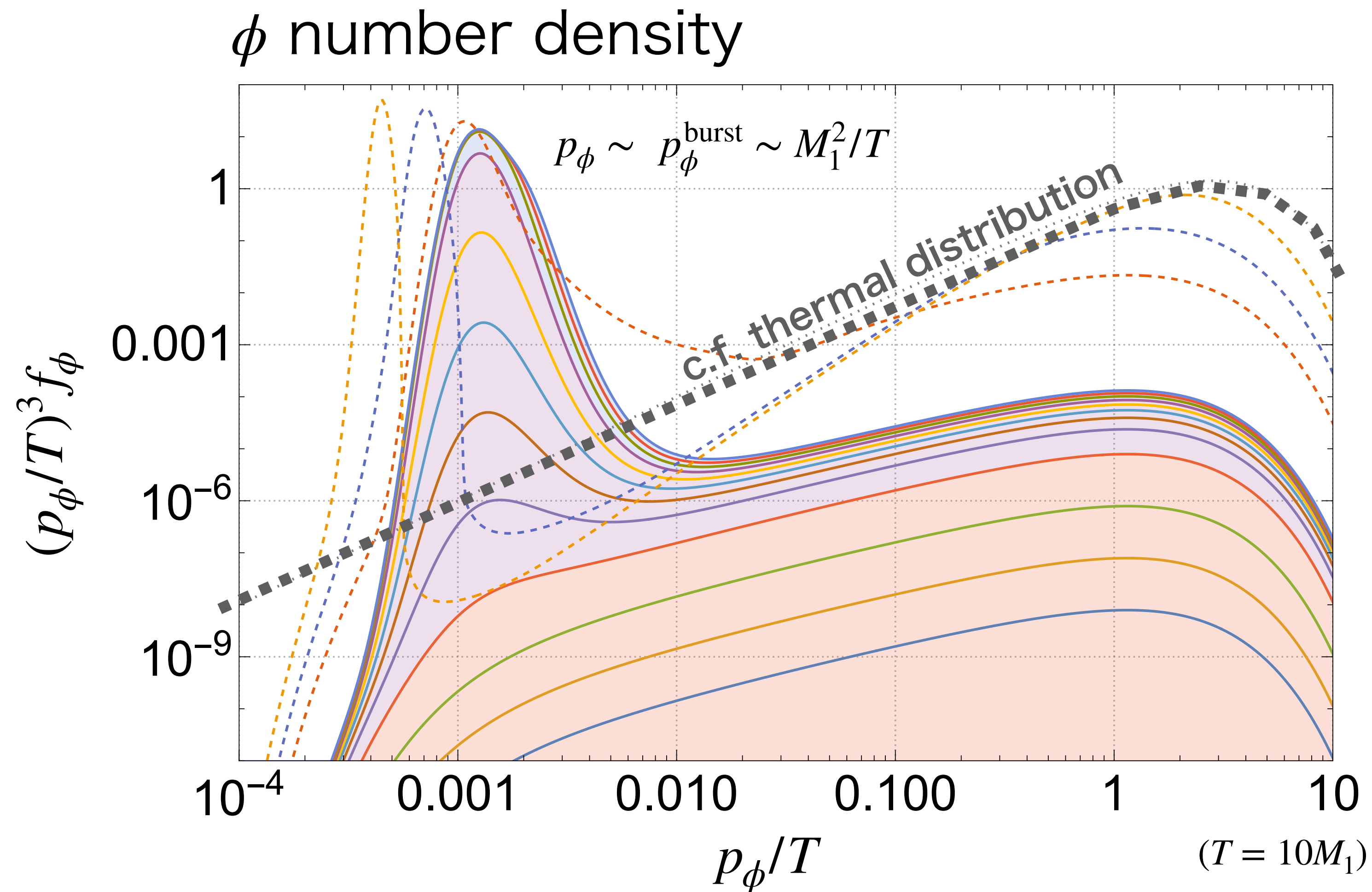
χ_1 mass : $M_1(\ll T)$

χ_2, ϕ : massless

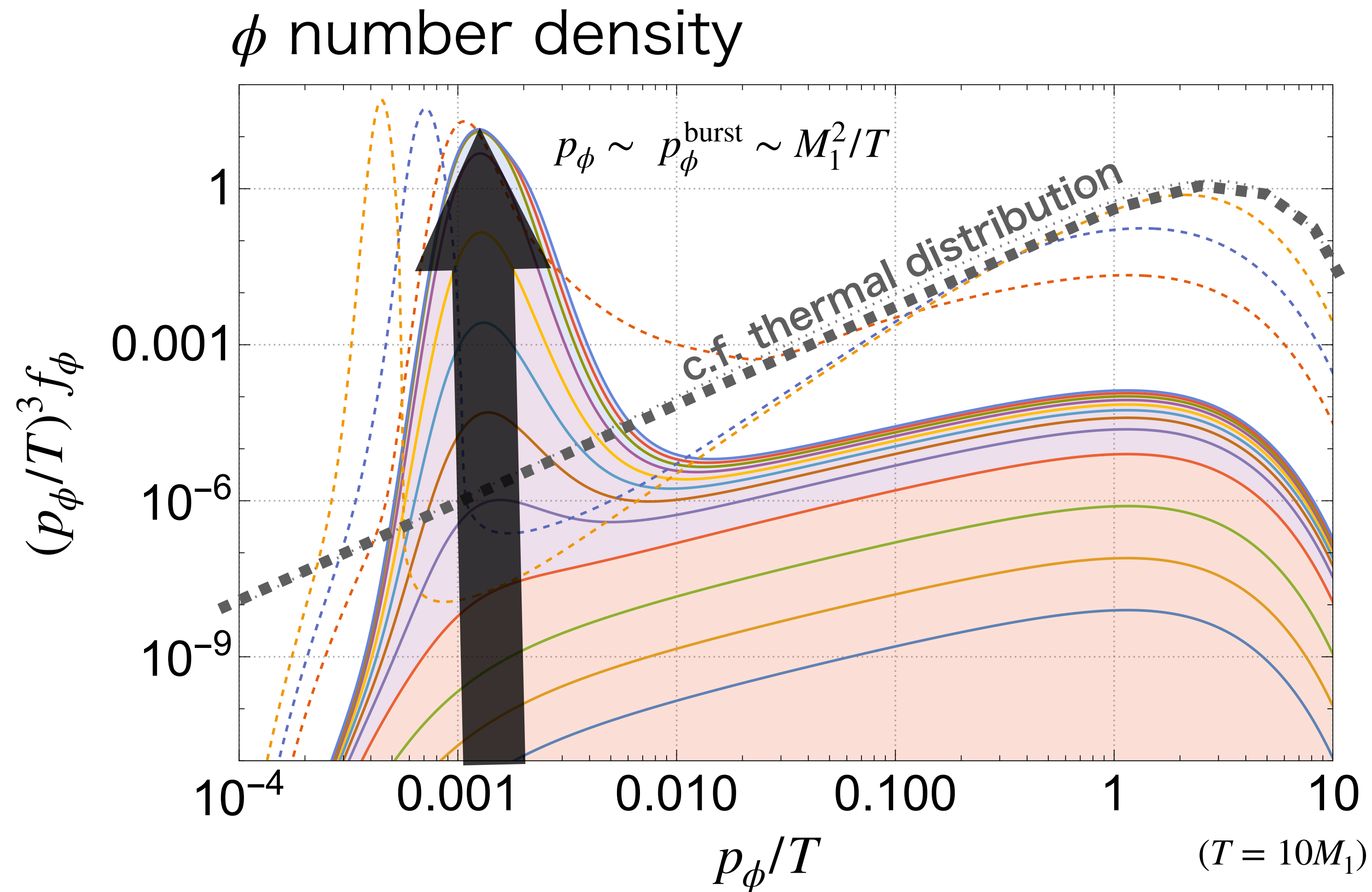
(Initial) conditions:

χ_1 is always thermalized, while χ_2 and ϕ are absent initially,
+ rotational invariance .

Burst production of DM ϕ turns out from Boltzmann eqs with bose enhancement.

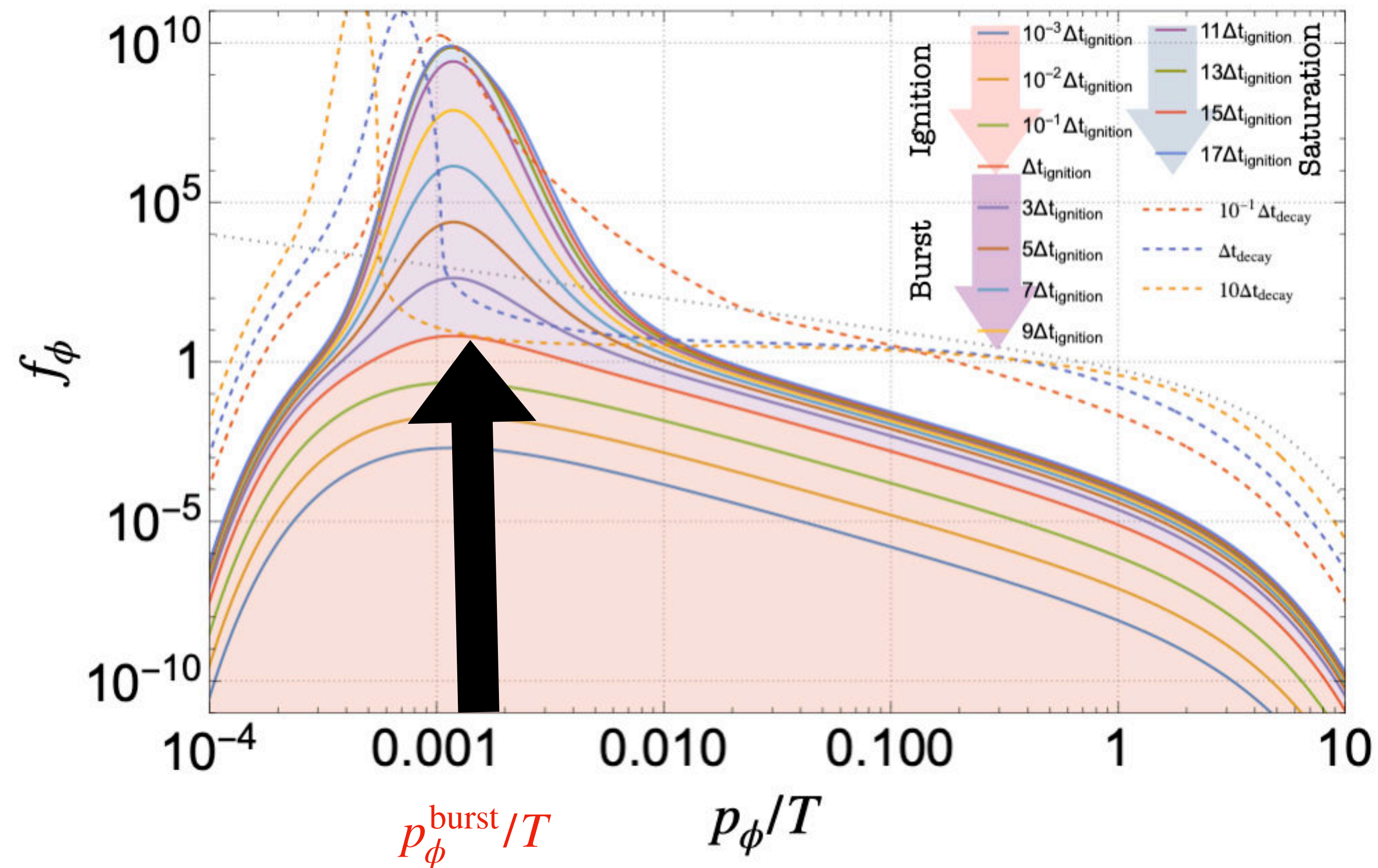


Burst production of DM ϕ turns out from Boltzmann eqs with bose enhancement.



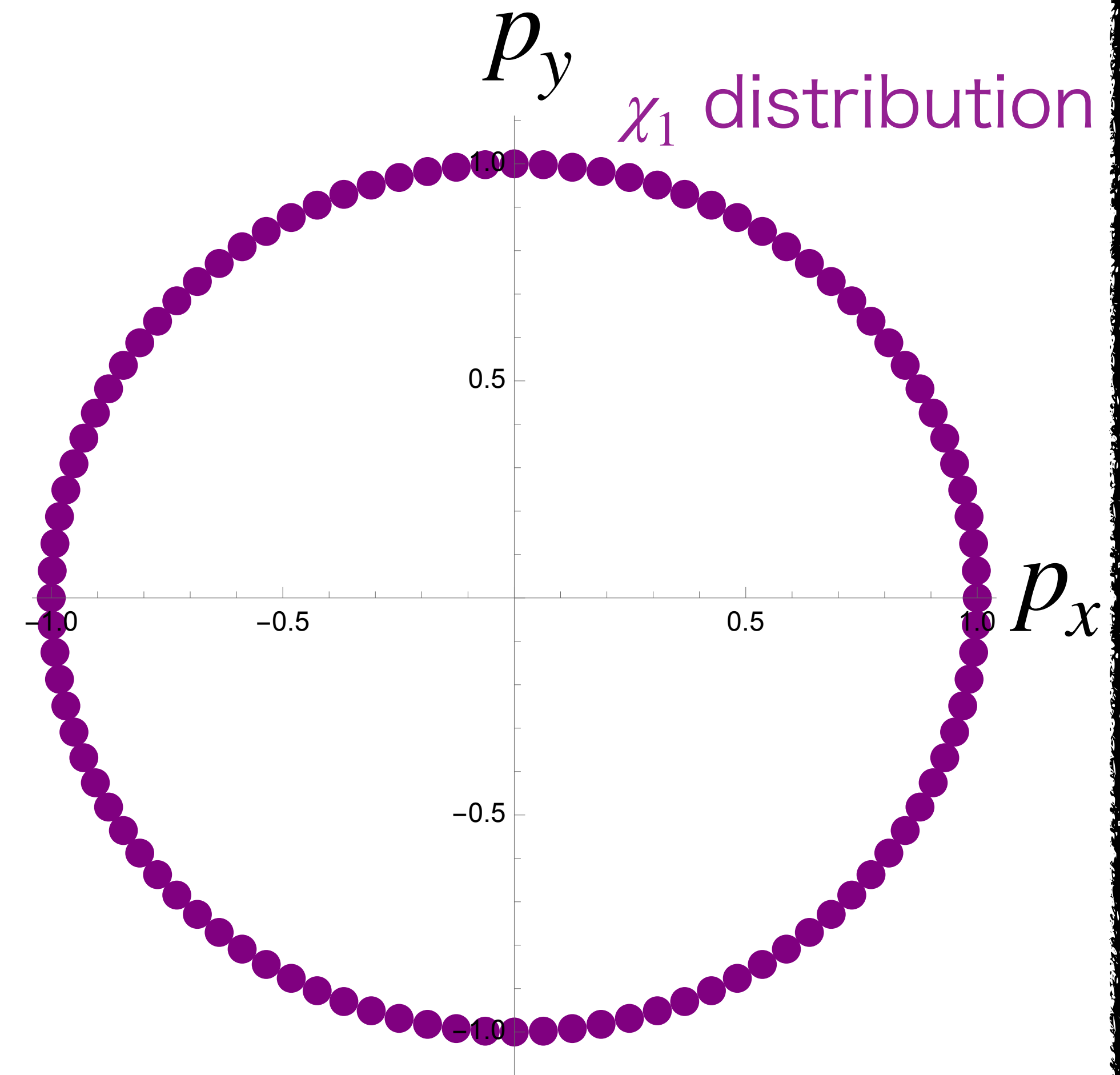
占有数の増加率は熱化より遥かに早い

Occupation number



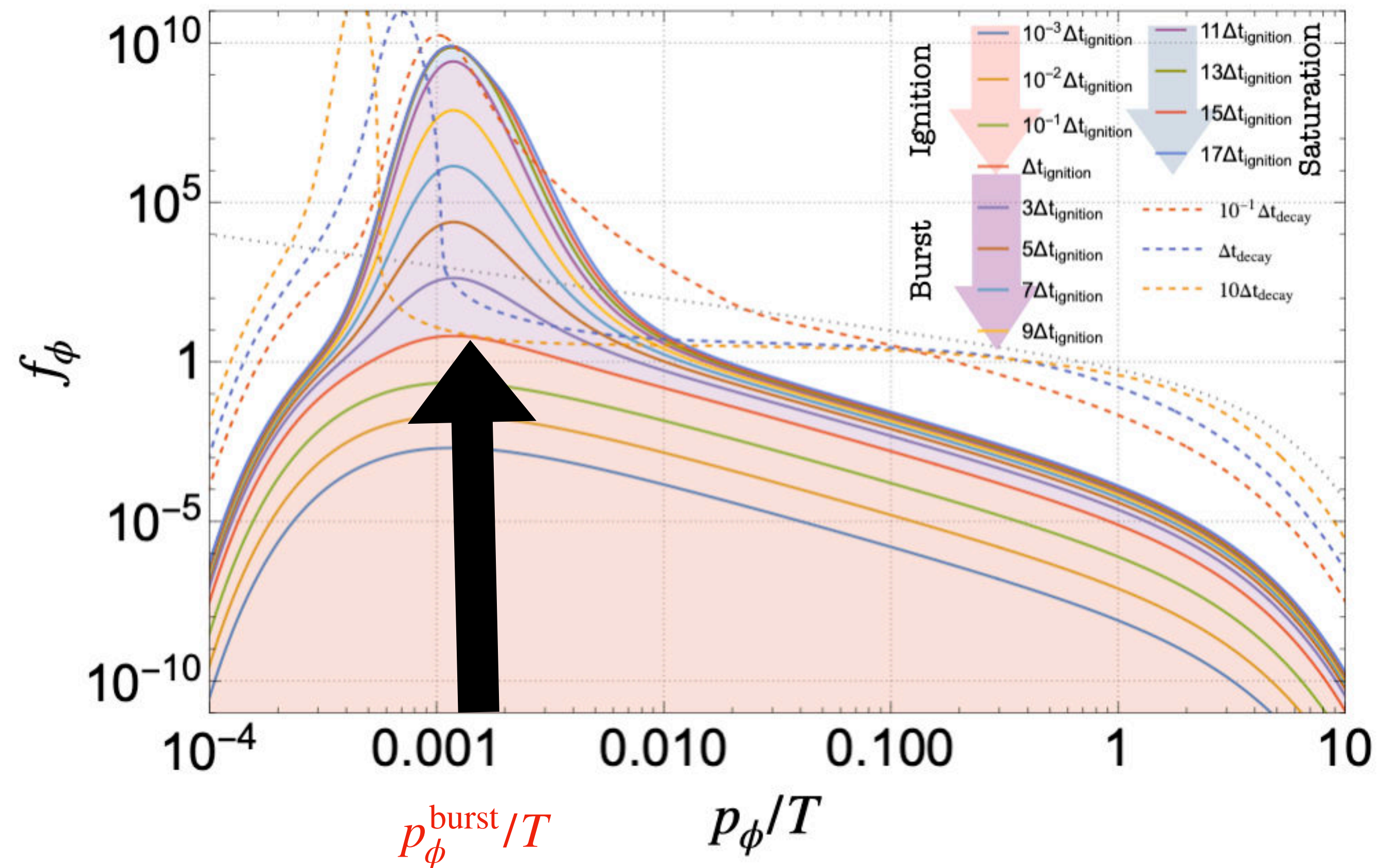
($T = 10M_1$)

Simplified model.



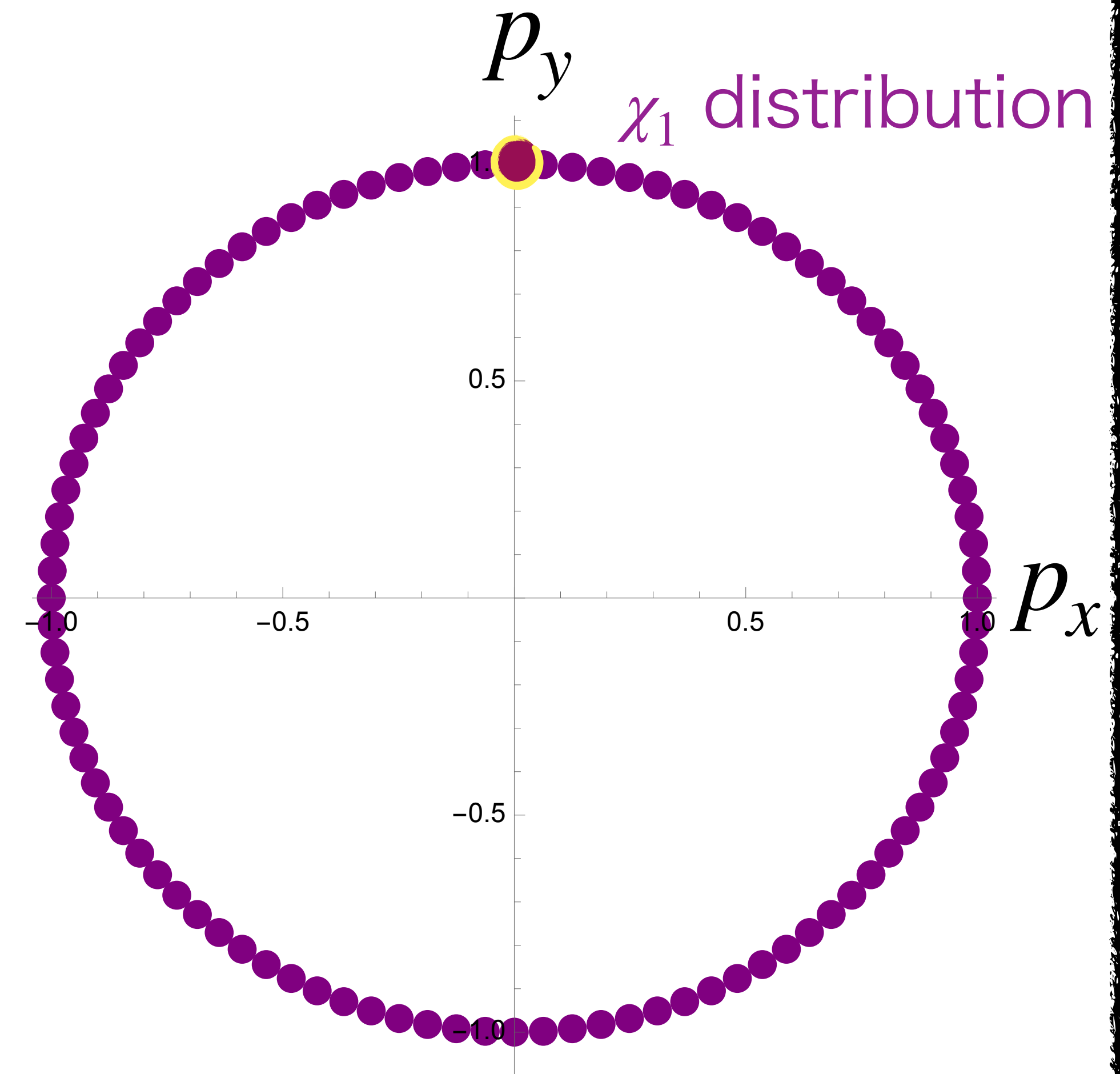
占有数の増加率は熱化より遥かに早い

Occupation number



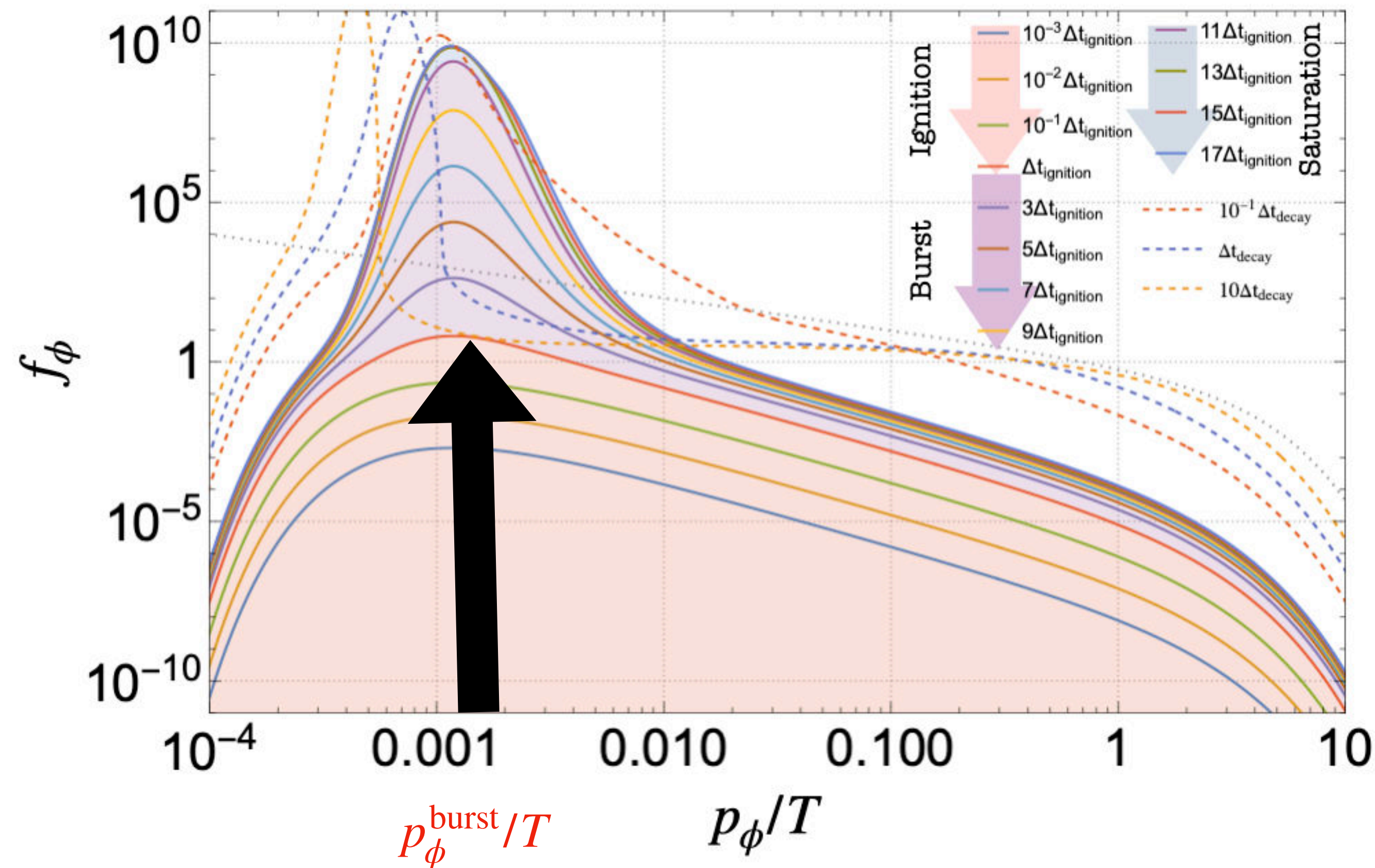
($T = 10M_1$)

Simplified model.



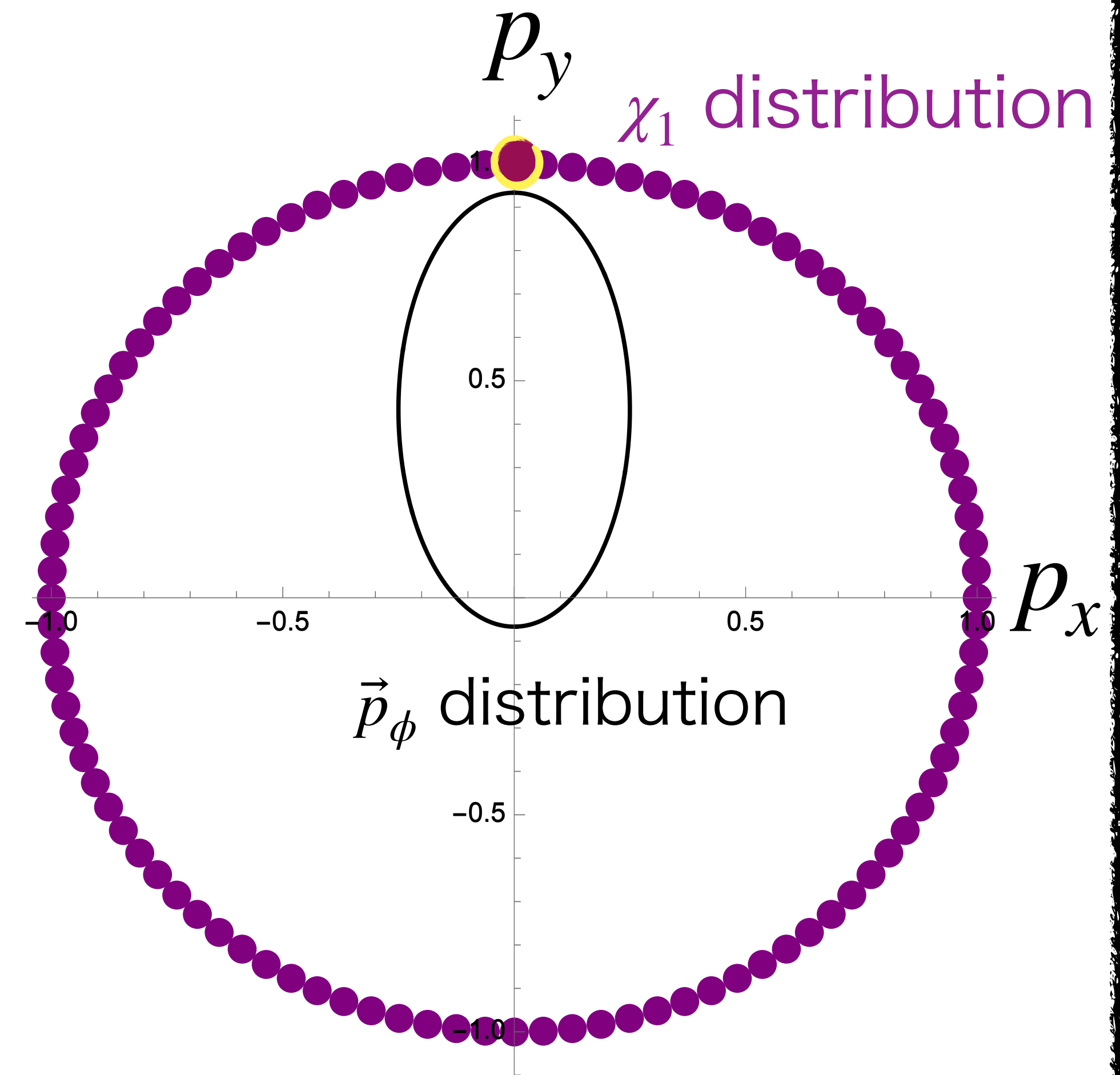
占有数の増加率は熱化より遥かに早い

Occupation number



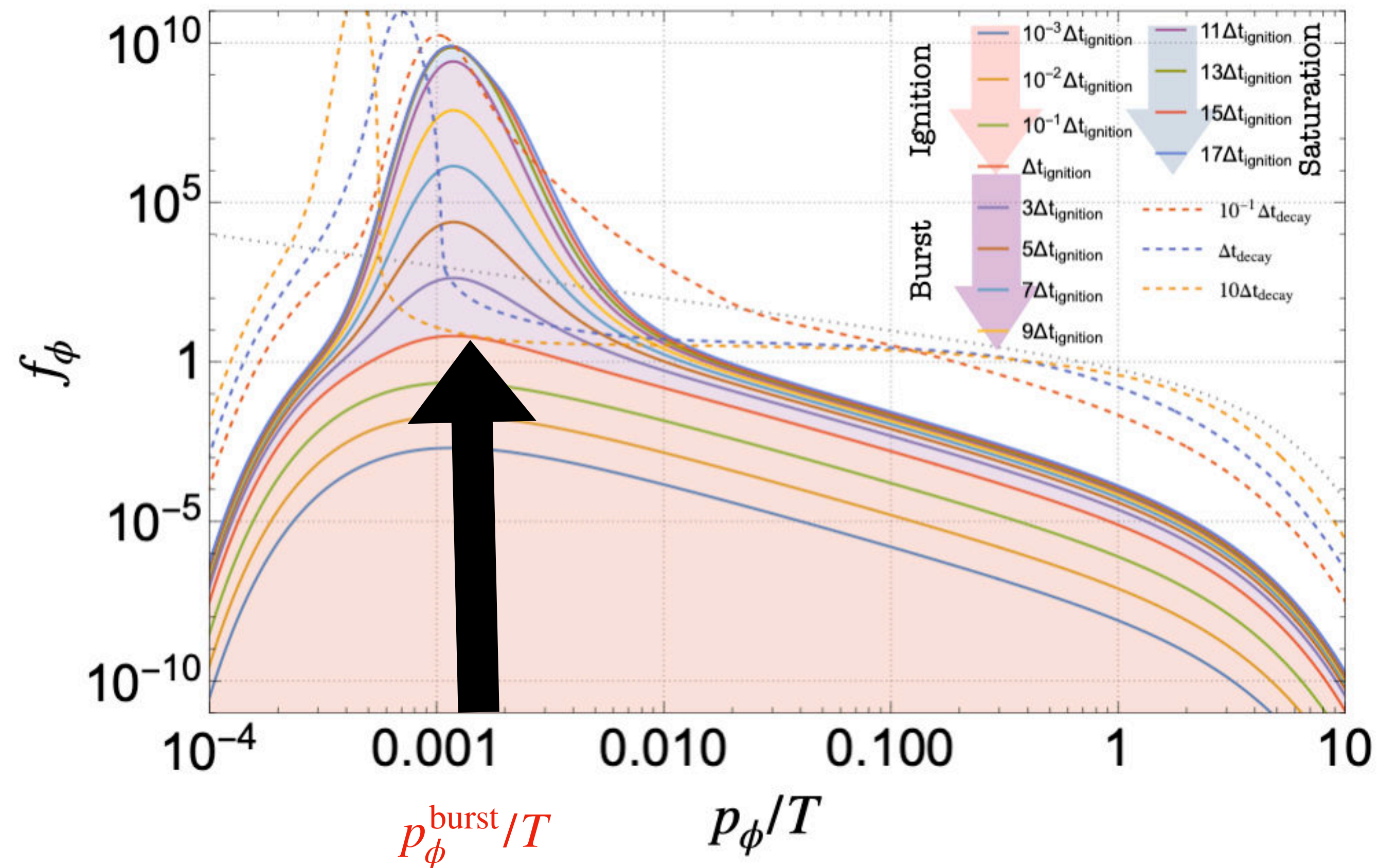
($T = 10M_1$)

Simplified model.



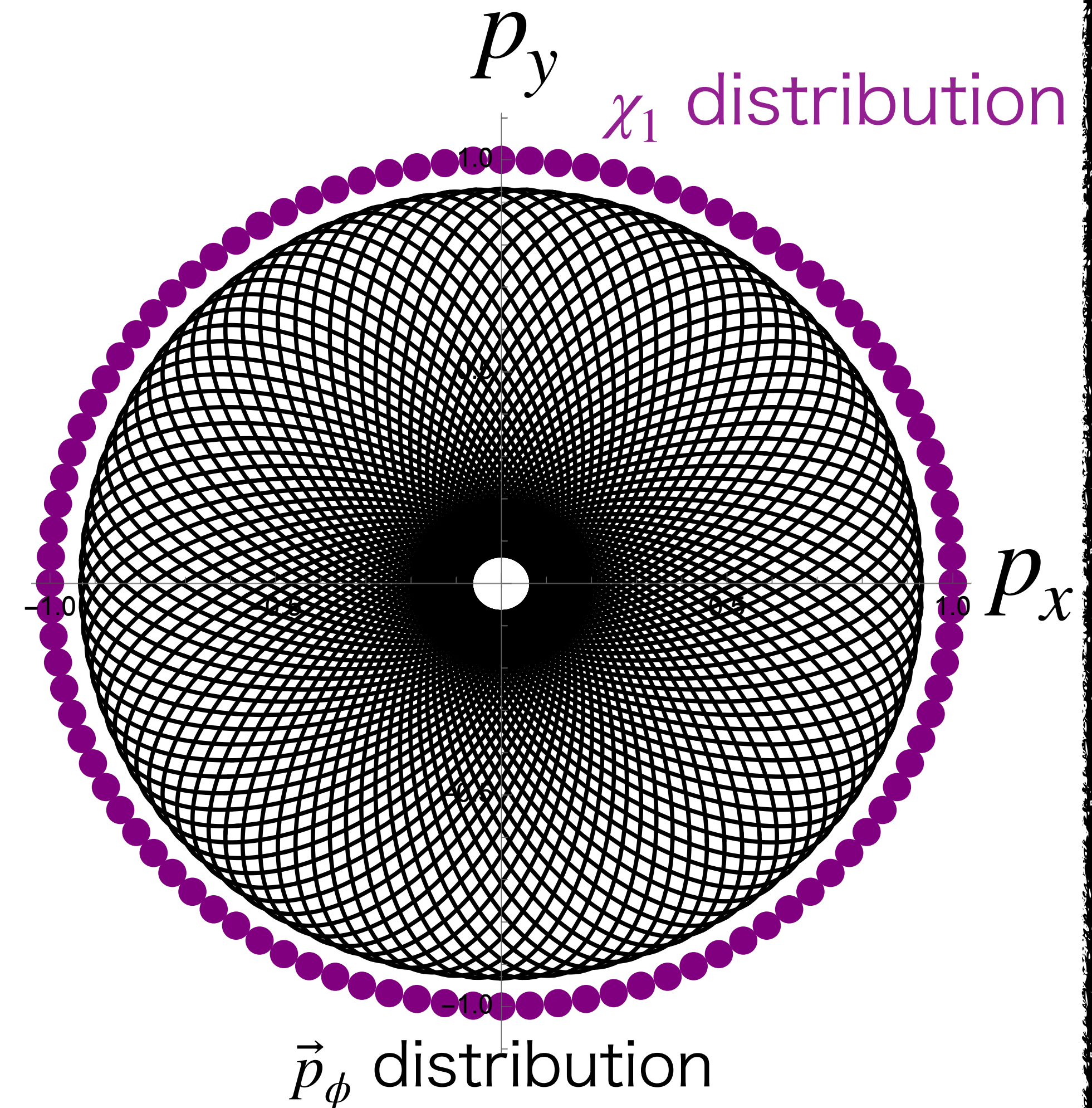
占有数の増加率は熱化より遥かに早い

Occupation number



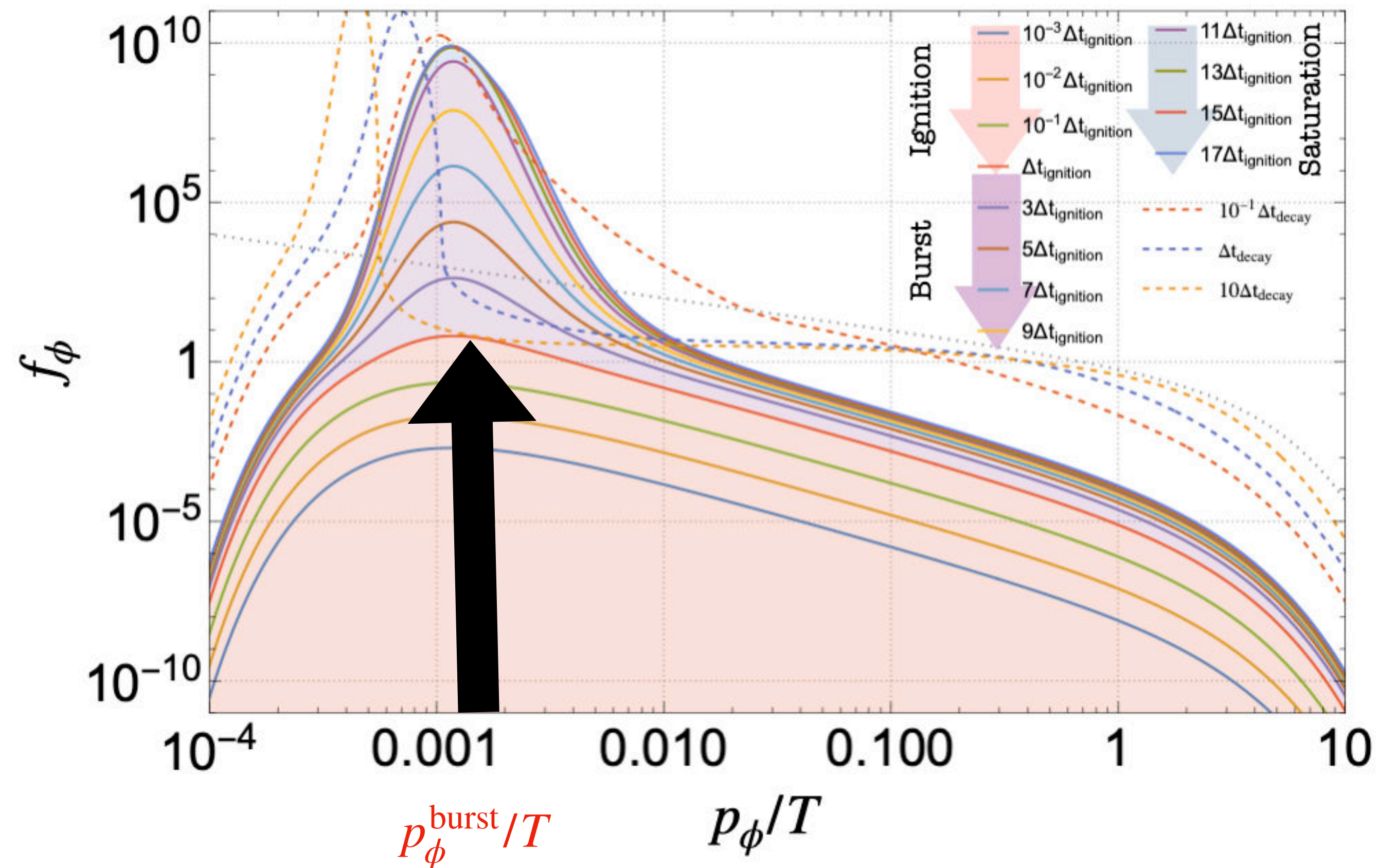
($T = 10M_1$)

Simplified model.



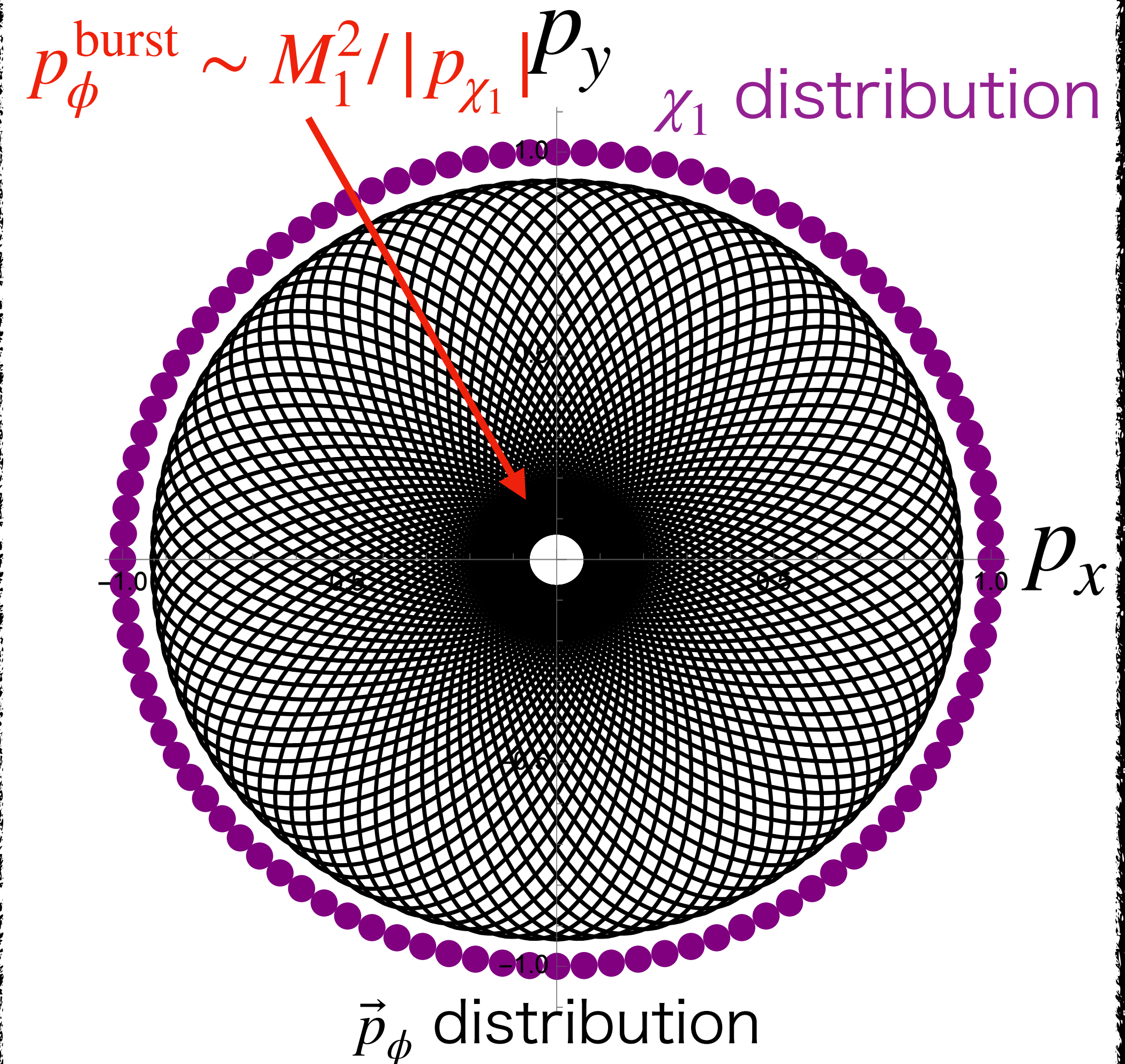
占有数の増加率は熱化より遥かに早い

Occupation number



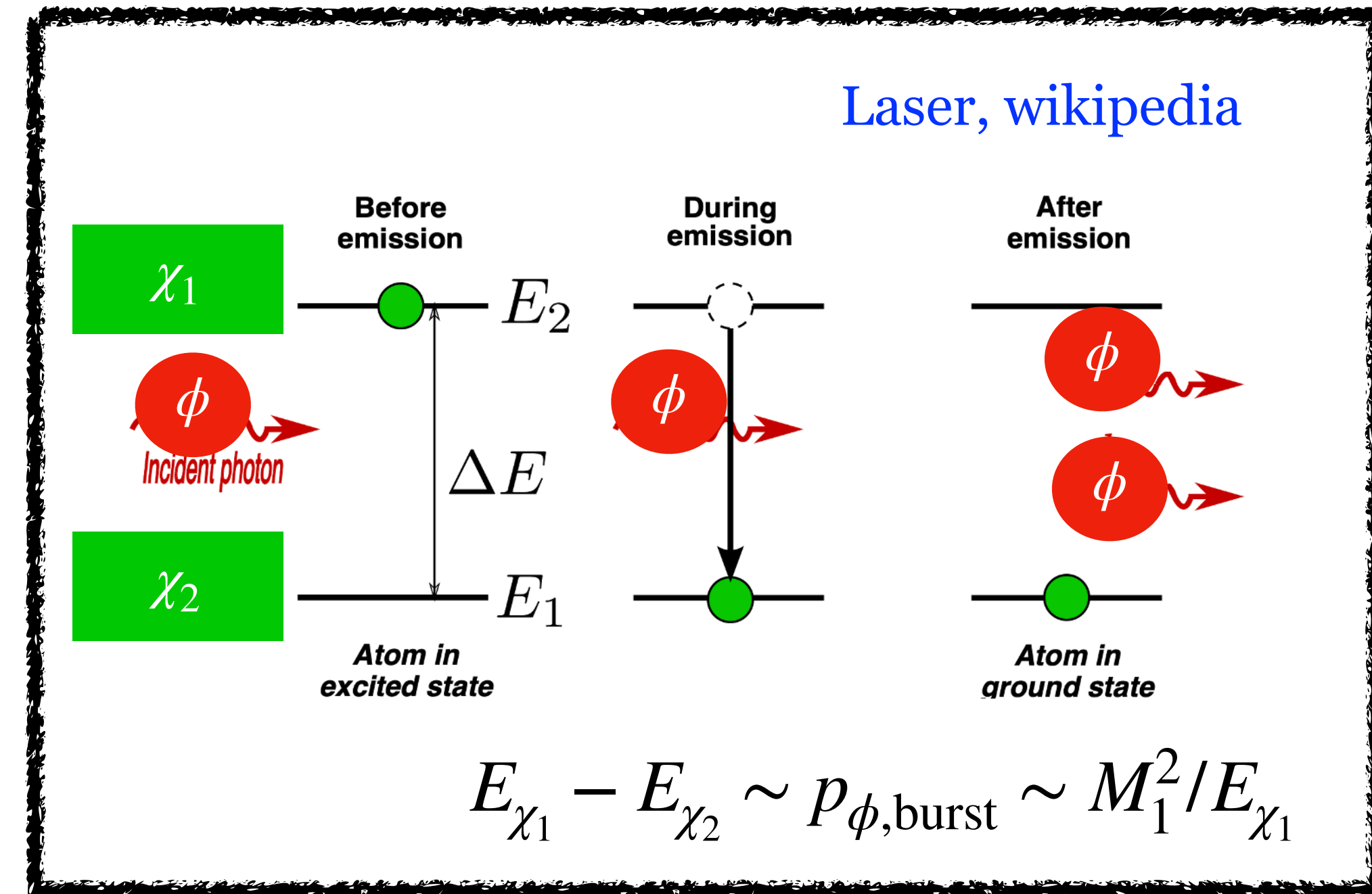
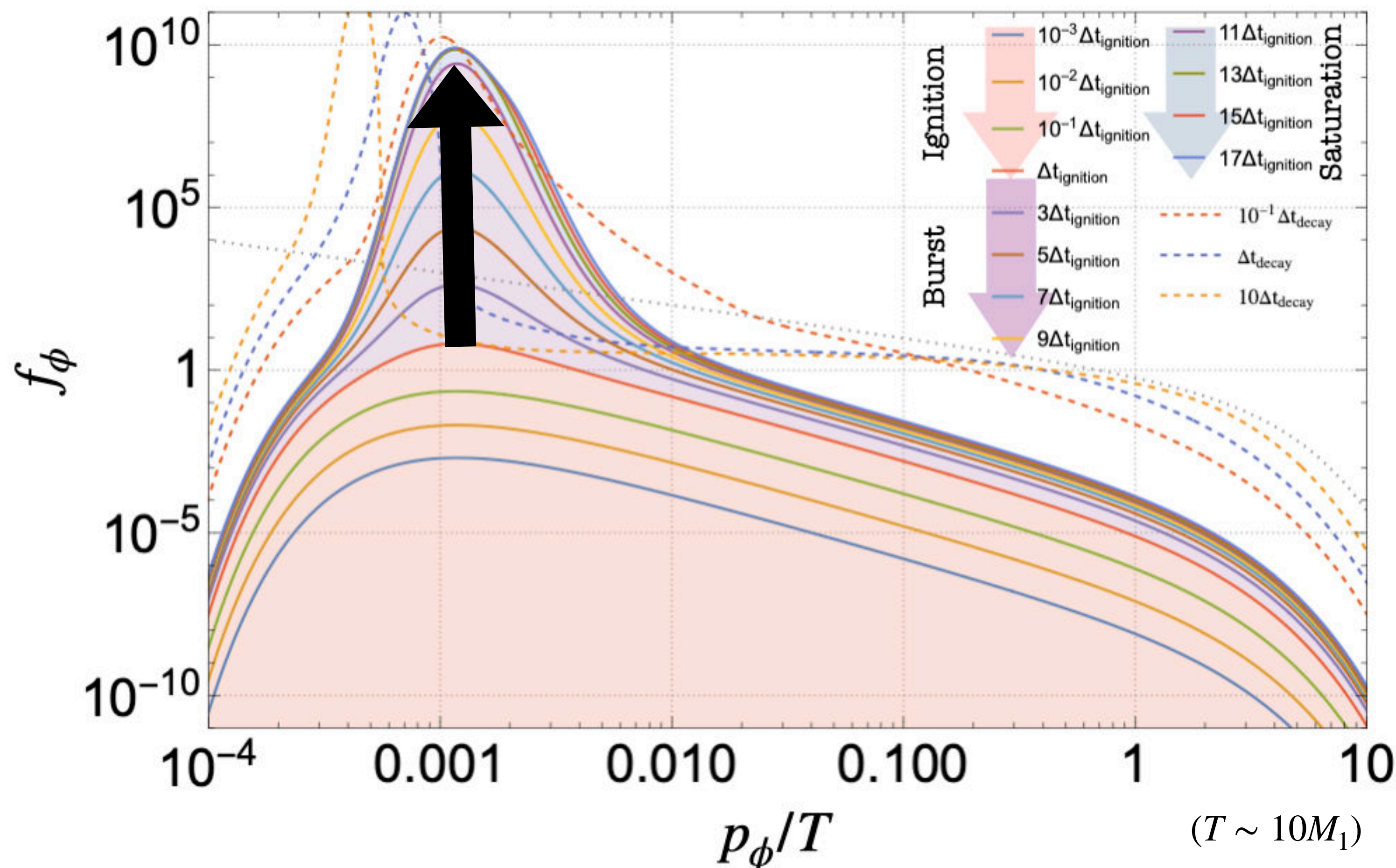
($T = 10M_1$)

Simplified model.



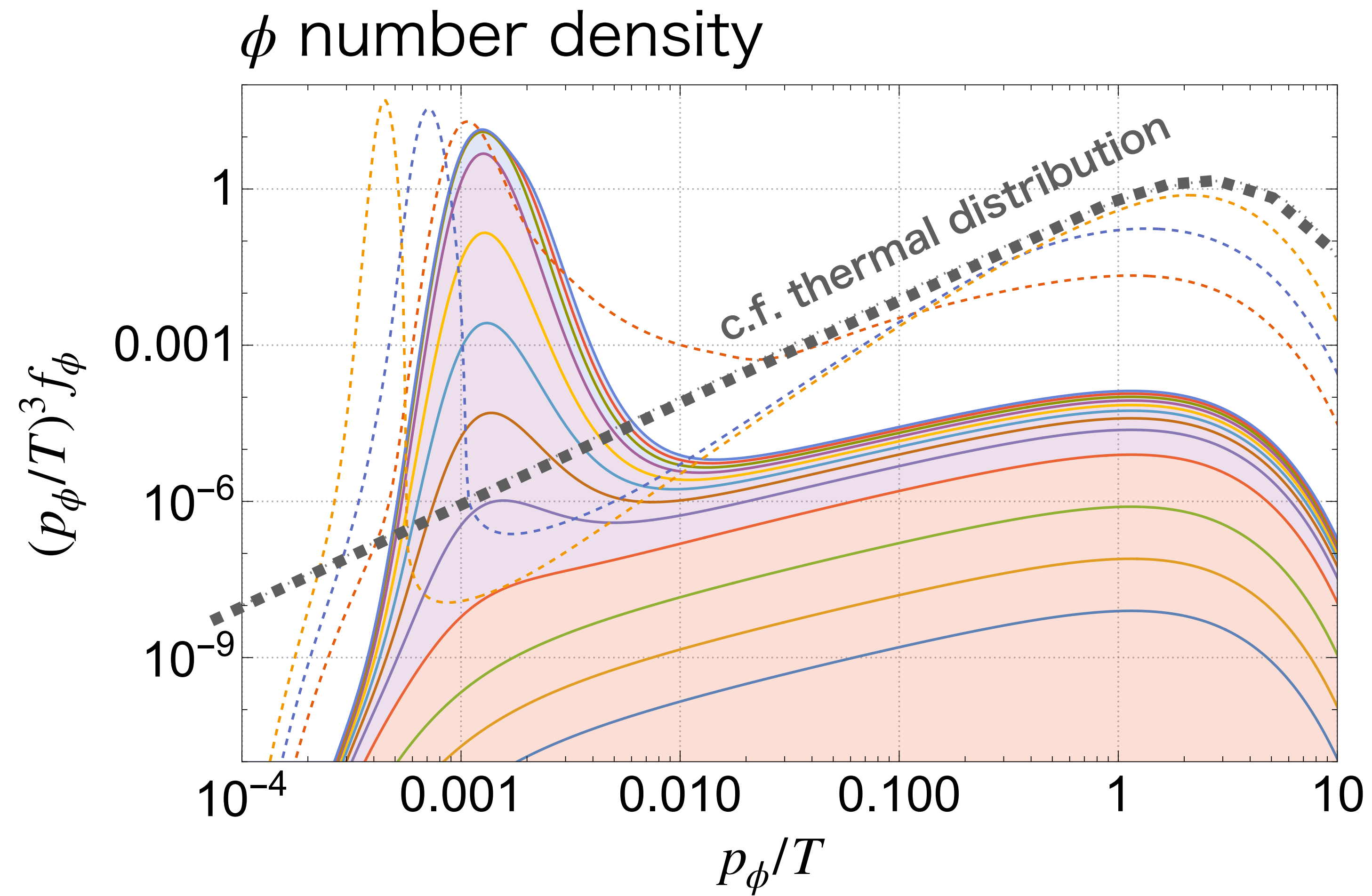
誘導放出

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



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

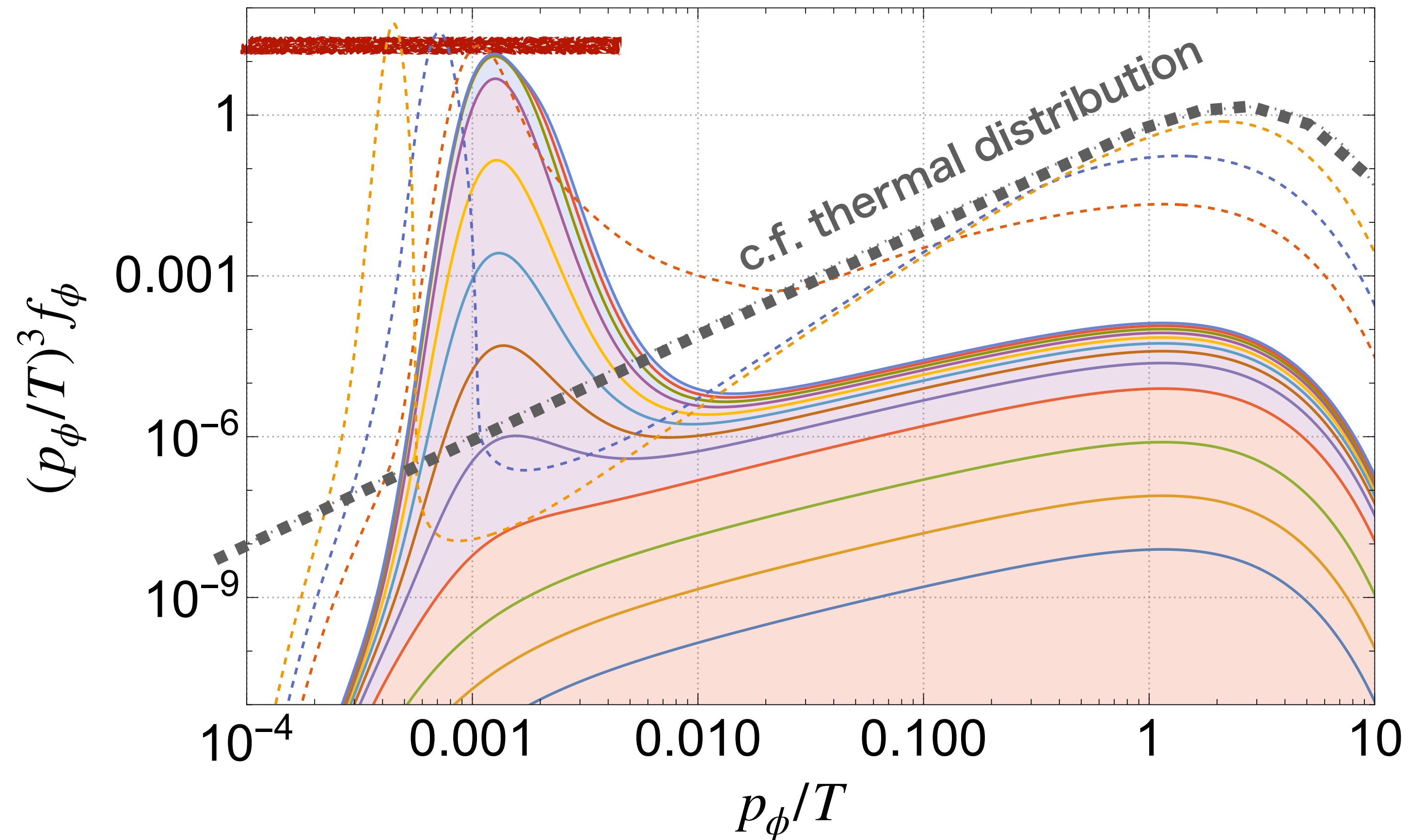
一気に指数増加し(準)平衡状態に達する



一気に指数増加し(準)平衡状態に達する

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

ϕ number density



Explaining abundance of DM gives

$$m_\phi = [1 - 1000] eV$$

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:

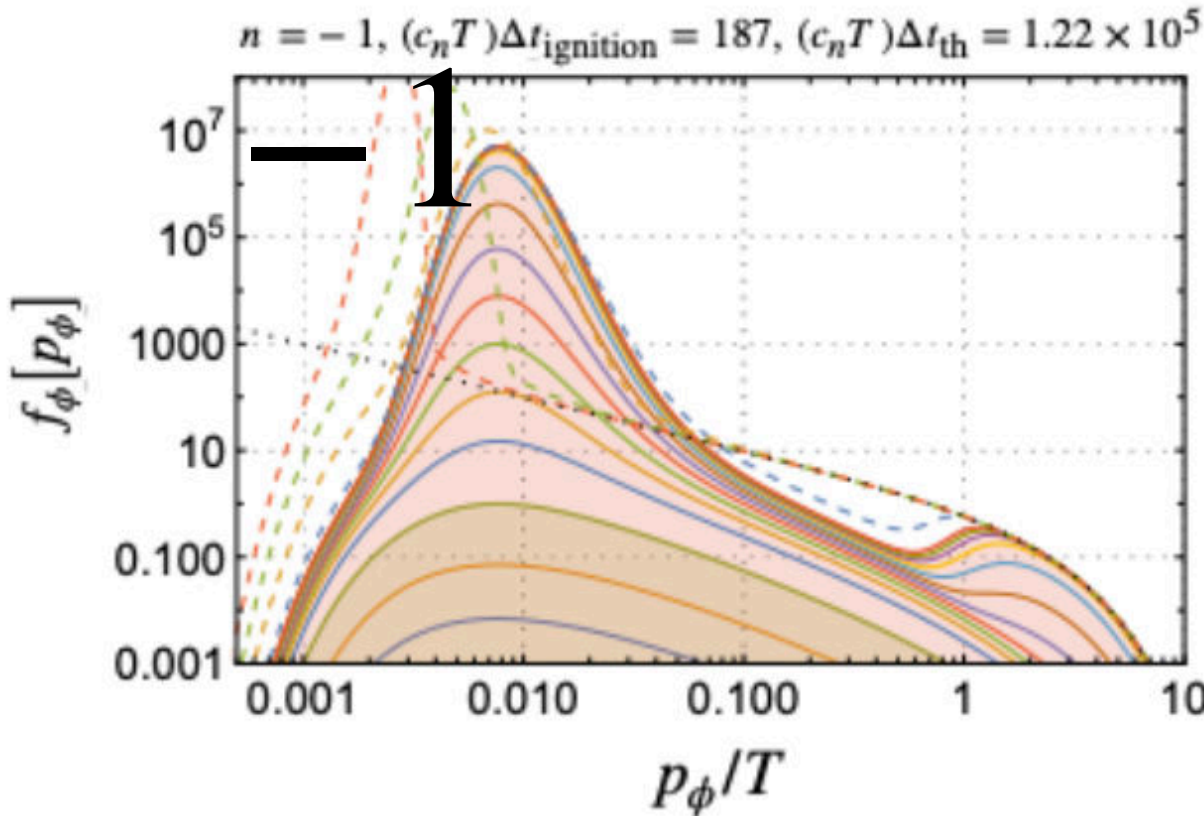
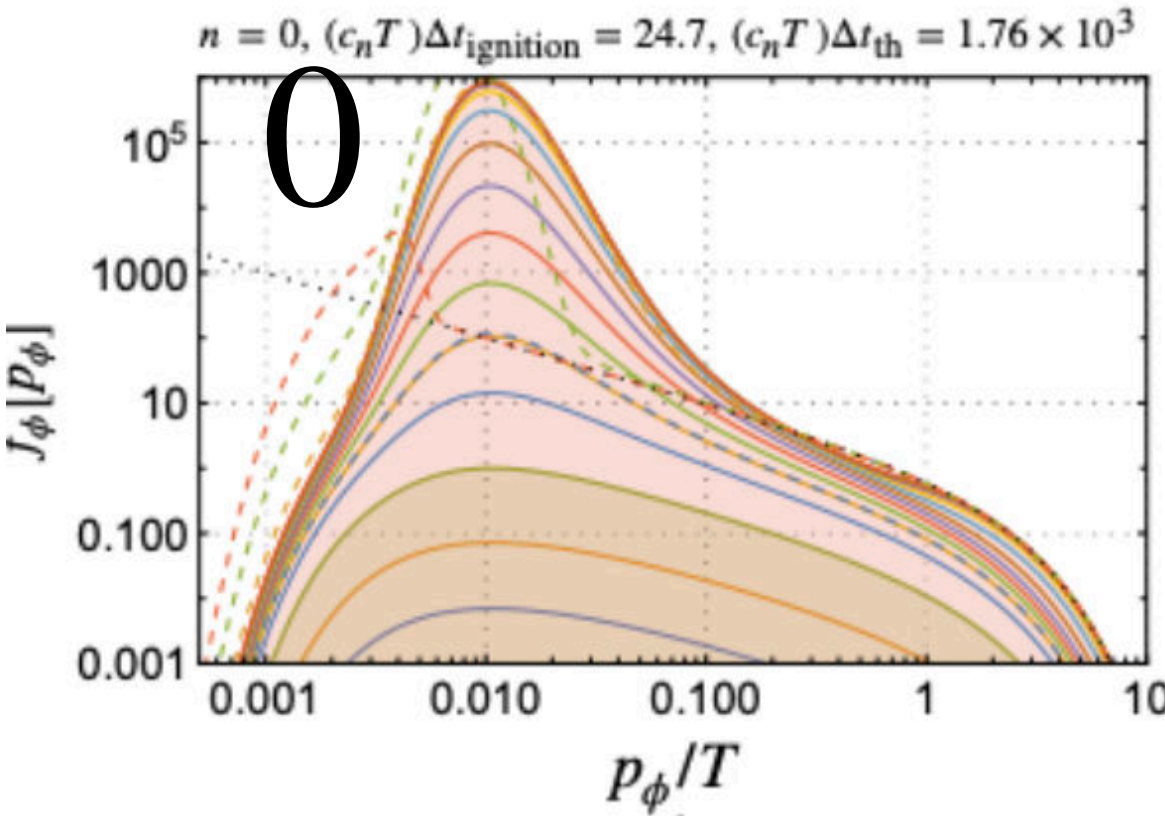
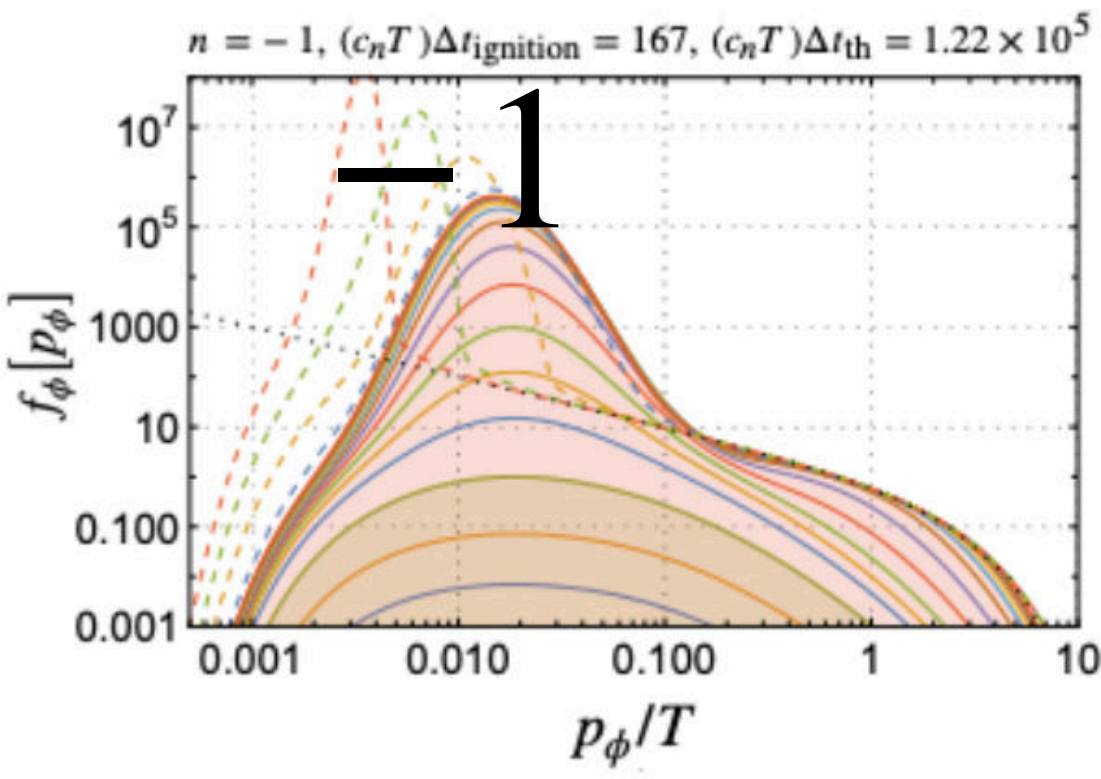
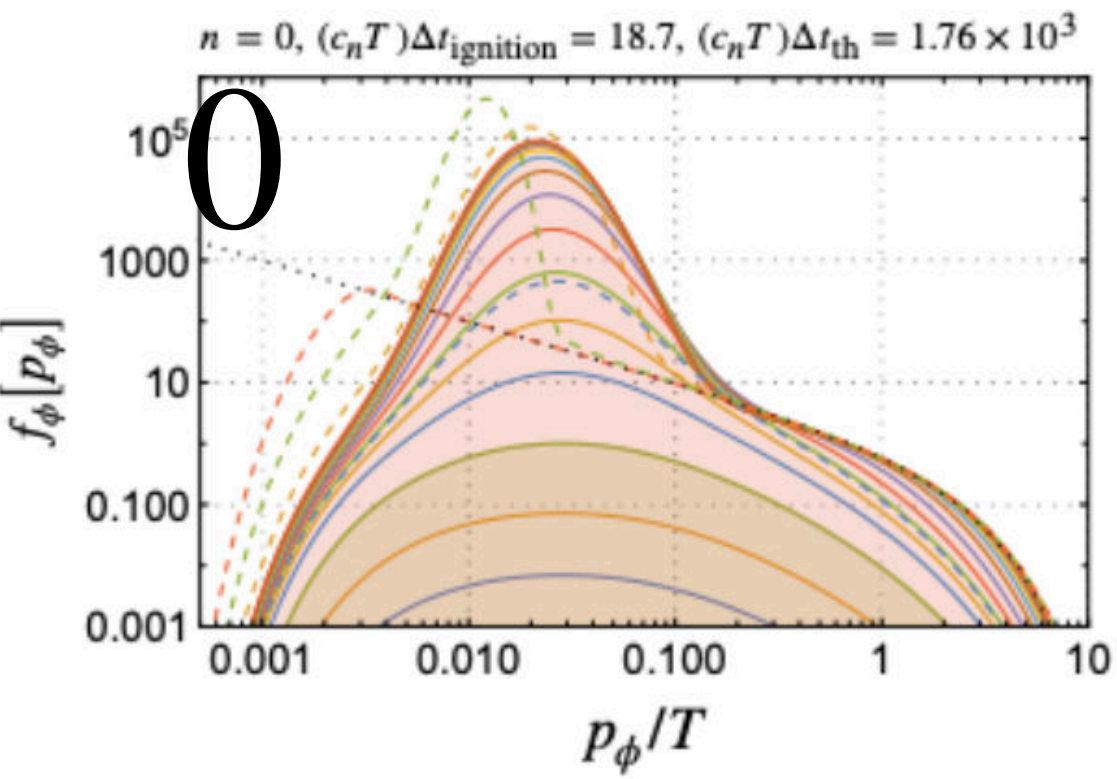
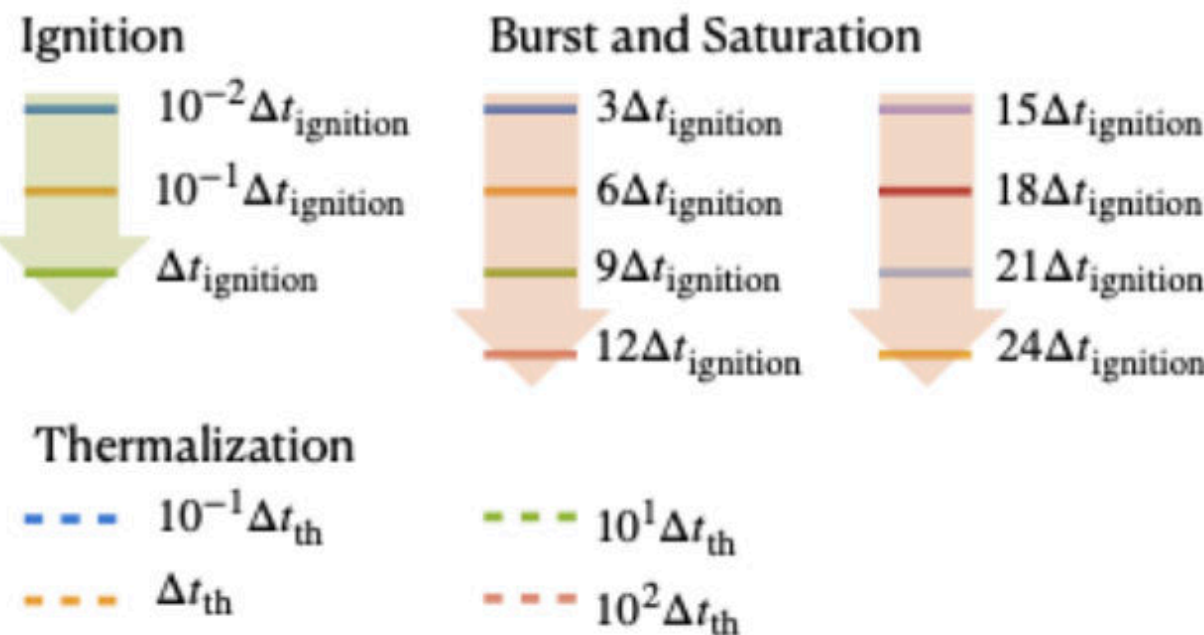
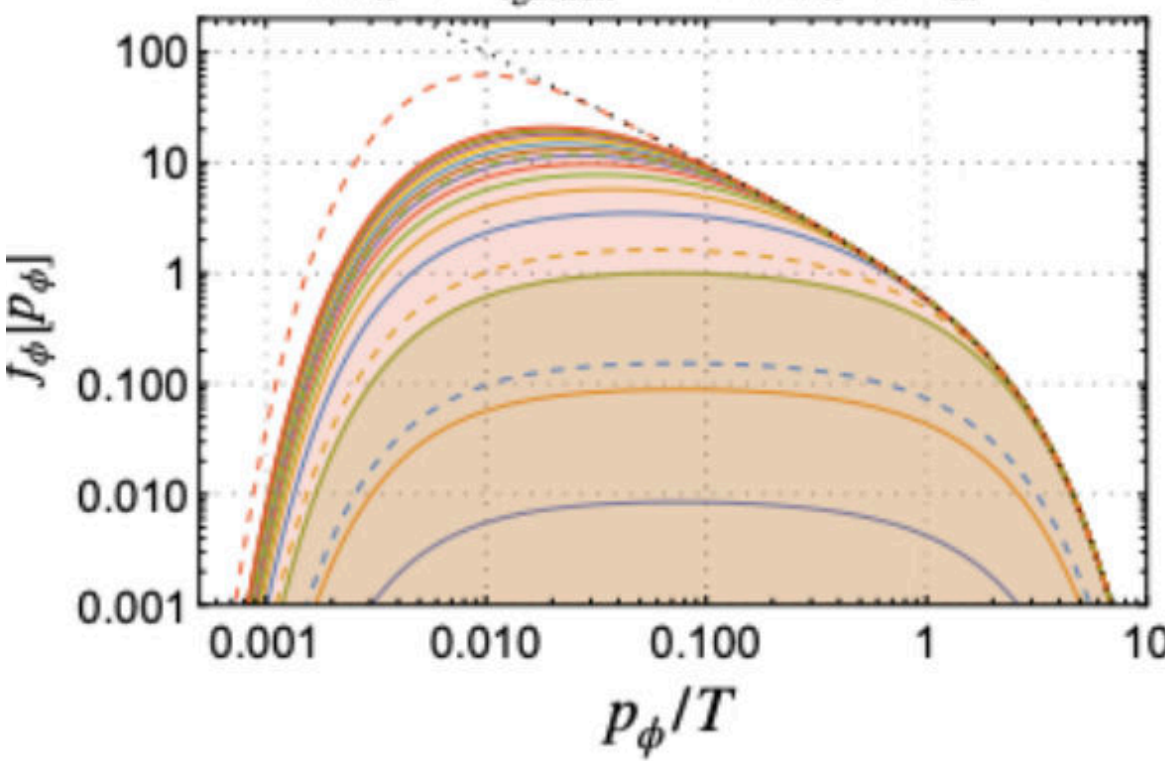
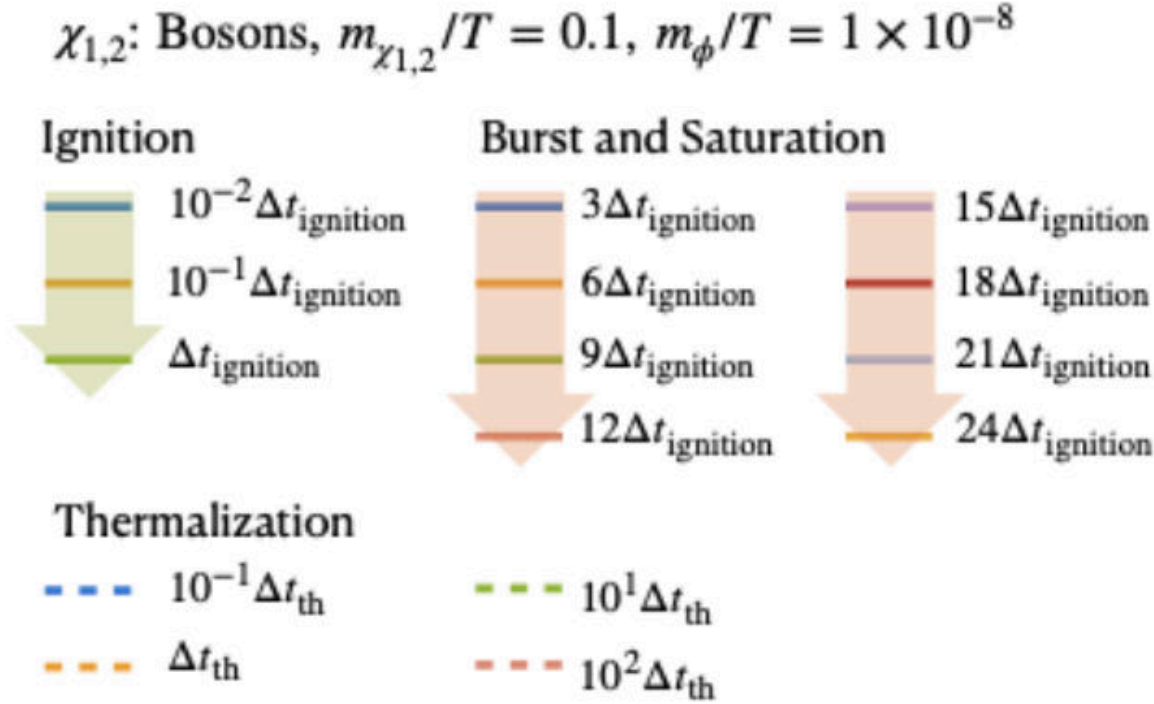
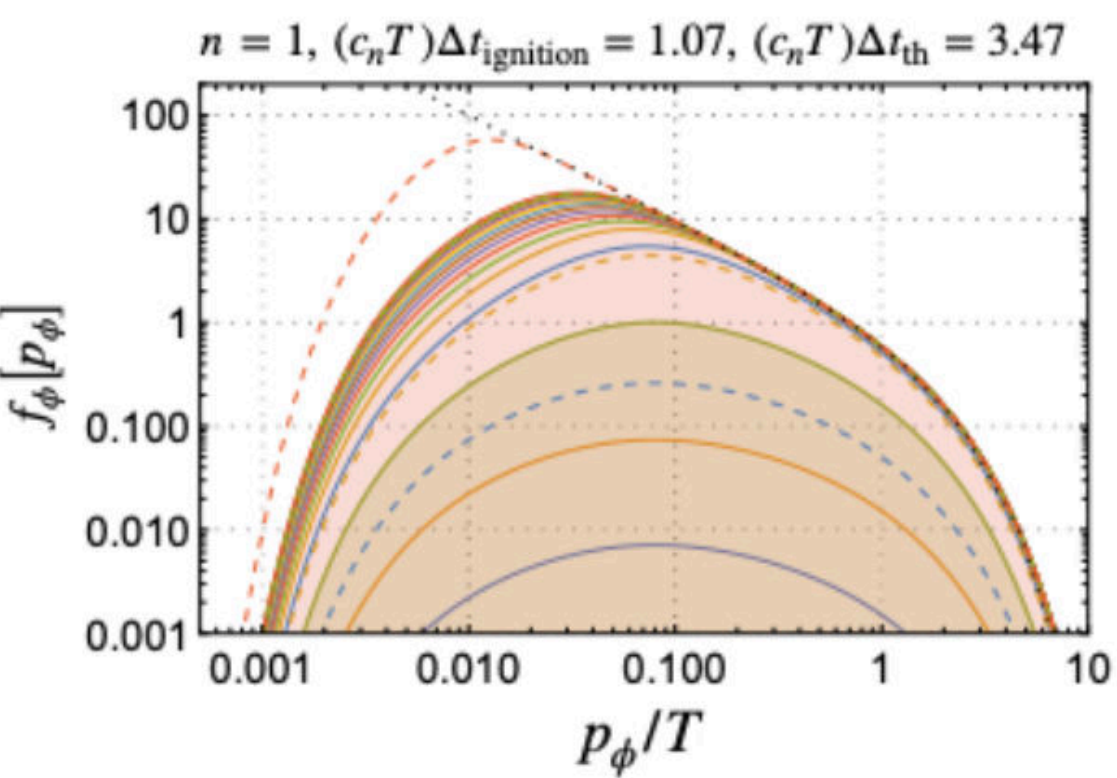
$n = 1$

$\chi : \text{Boson}$

$n = 1$

$\chi : \text{Fermion}$

$\chi_{1,2} : \text{Fermions}, m_{\chi_{1,2}}/T = 0.1, m_\phi/T = 1 \times 10^{-8}$



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

Sakurai, WY, 2410.18968

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

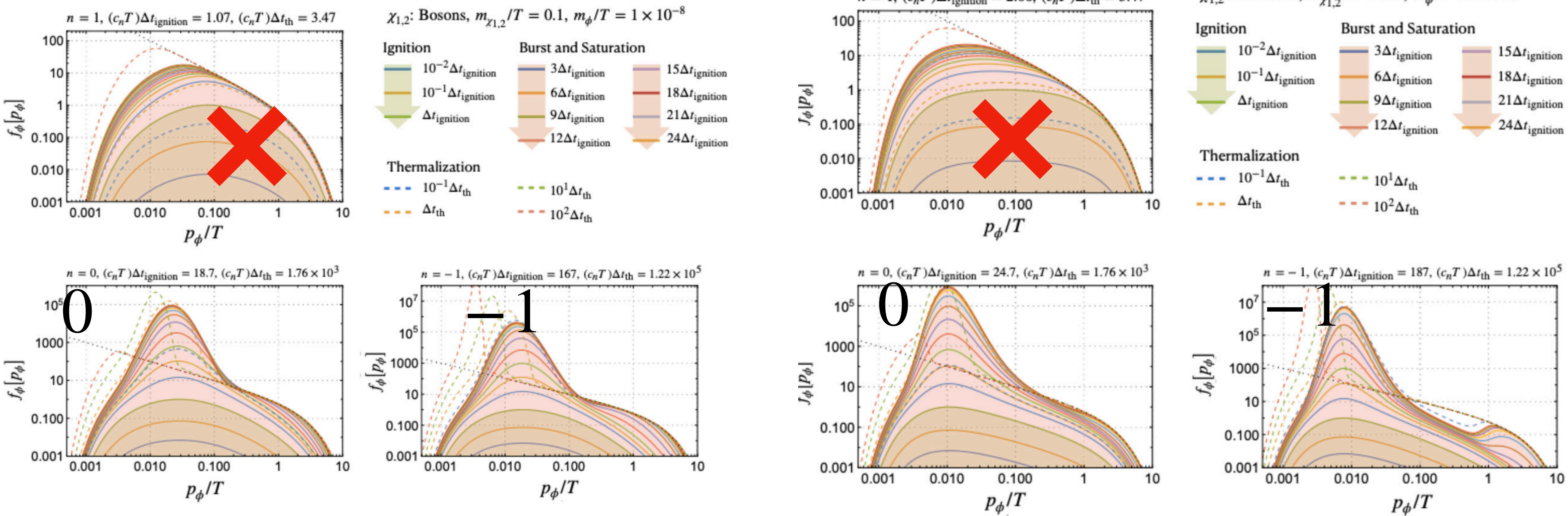
- Depending on the crosssection, Burst production happens:

$$n = 1$$

χ : *Boson*

$$n = 1$$

χ : *Fermion*



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

Sakurai, WY, 2410.18968

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

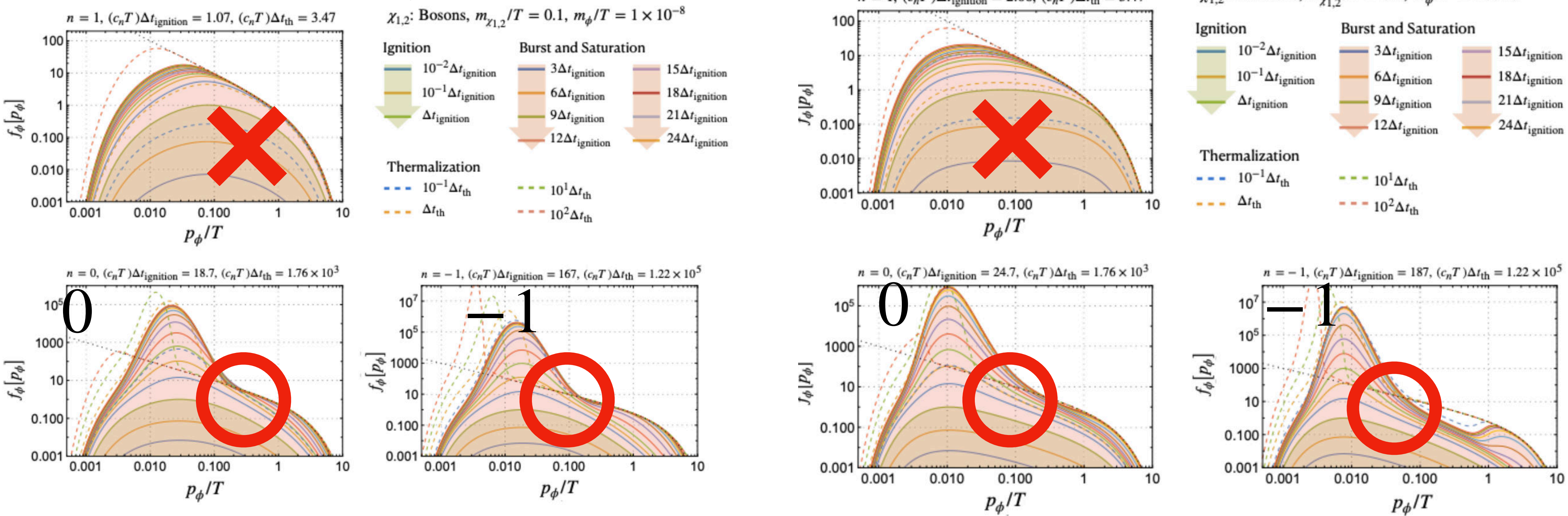
- Depending on the crosssection, Burst production happens:

$$n = 1$$

χ : *Boson*

$$n = 1$$

χ : *Fermion*



ここまでのメッセージ

- Bosonic DM熱生成において、誘導放出は一般的.
- **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

- Bosonic DM熱生成において、誘導放出は一般的.
- **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」

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

• 2-2. eV DMとバリオン-DM coincidence

WY, 2608.26709

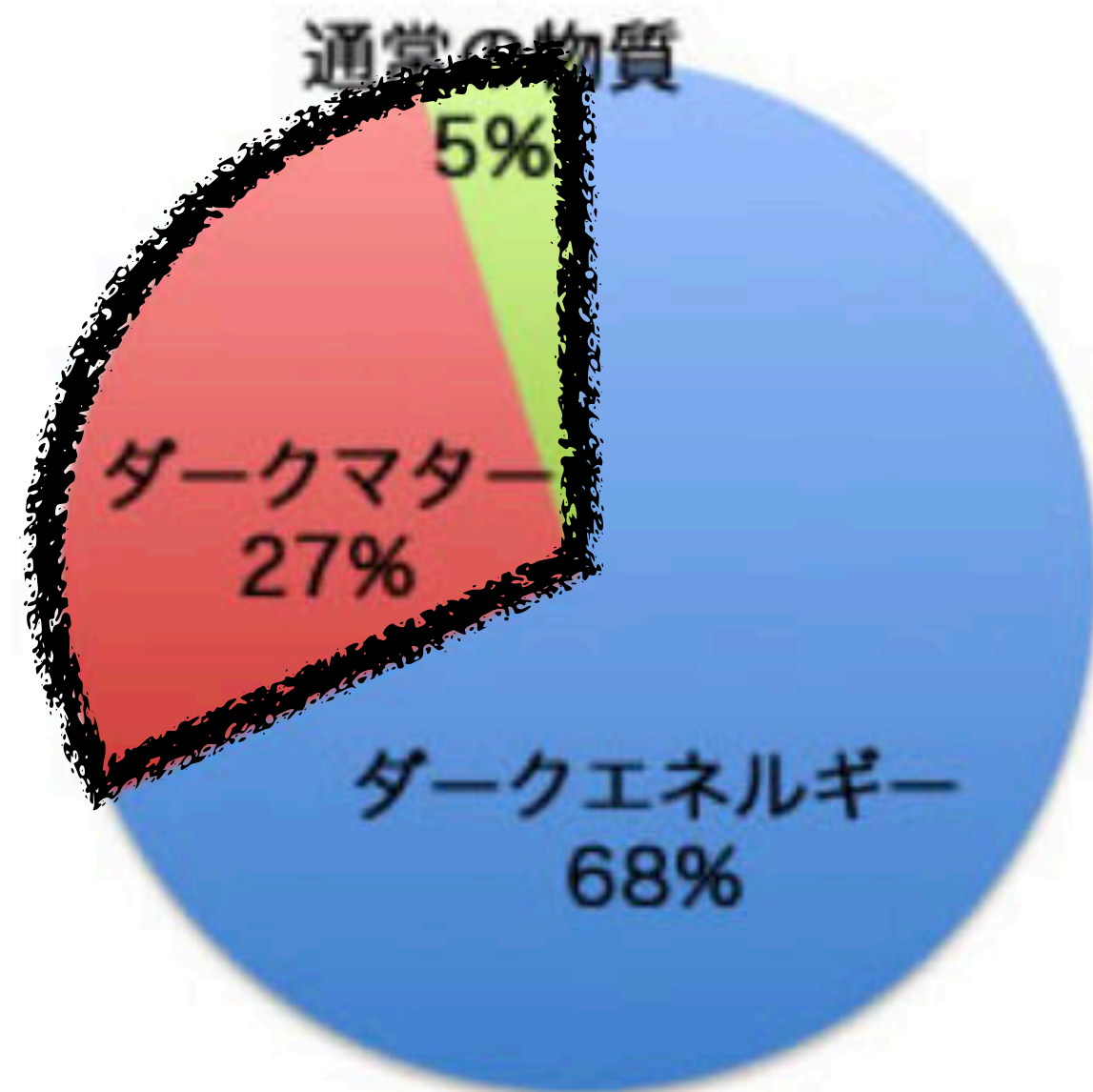


図1：宇宙の組成

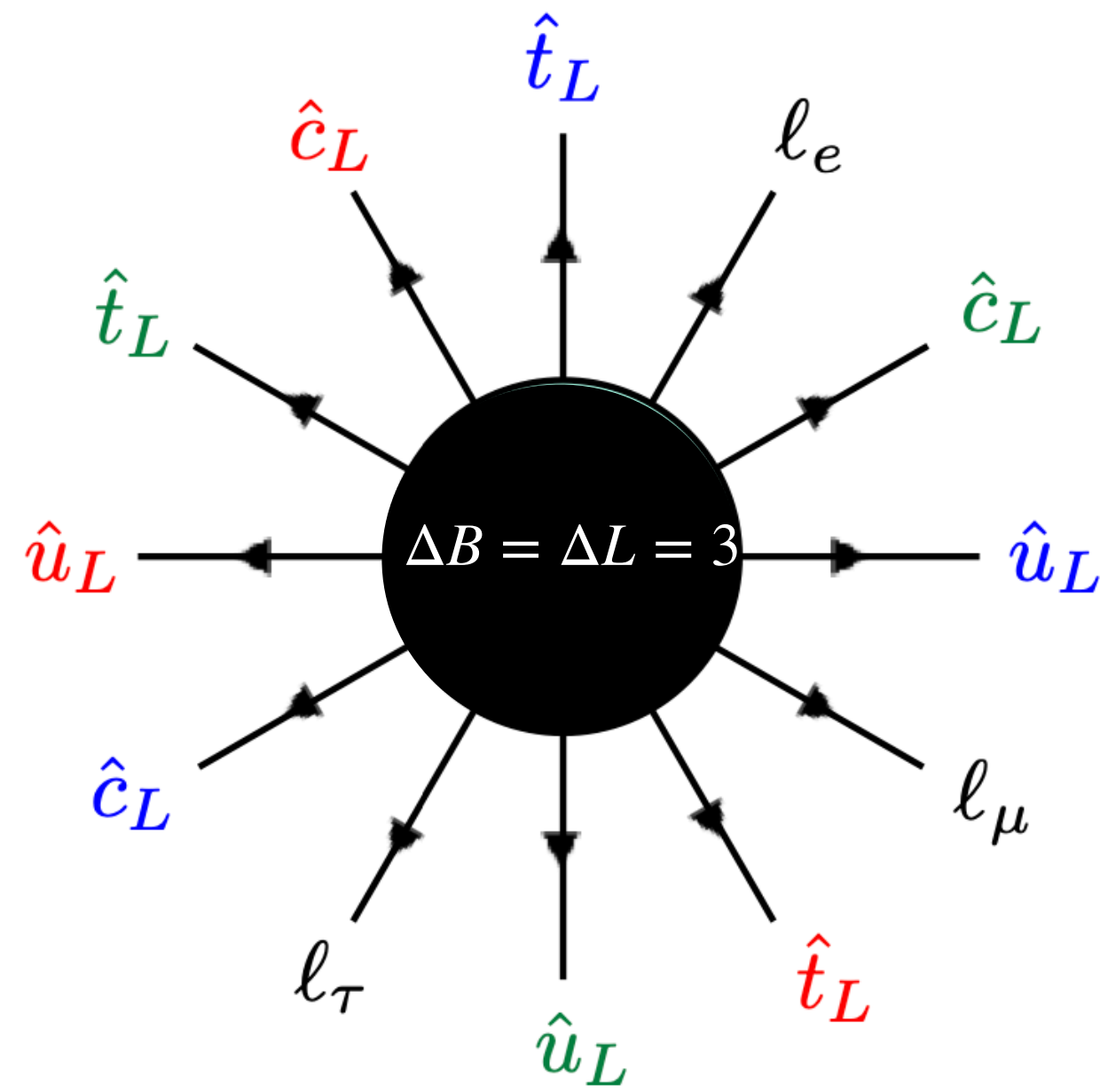
宇宙マイクロ波背景放射

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

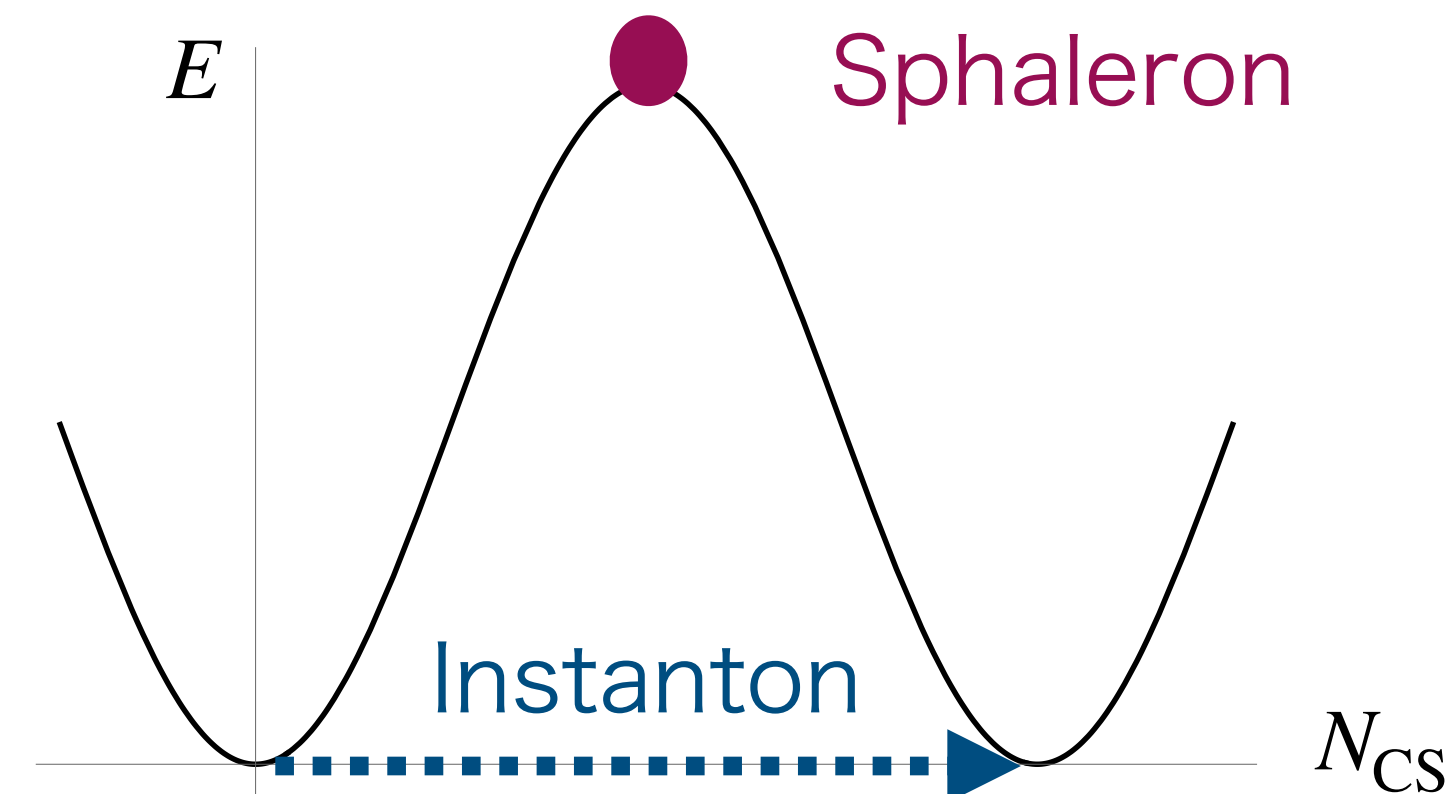
Planck collaboration, 2018

c.f. Asymmetric DM; Kaplan et al, 0901.4117

The only baryon number violating process in the SM is via anomaly. It is inefficient at low temperatures.



$$\Gamma_{Sphaleron} \sim 10^{-6} T (T \gtrsim 100 \text{ GeV})$$



$$\Gamma_{instanton} \propto \exp\left[-\frac{16\pi^2}{g_2^2}\right] \sim \exp[-O(100)] (T \ll 100 \text{ GeV})$$

$T \gg 100 \text{ GeV}$: Baryon数の破れ(物質反物質非対称の生成?)

$T \ll 100 \text{ GeV}$: Baryon数保存 $\rightarrow$ 化学ポテンシャル μ_B が定義可能

機構の一般論

- Baryonの化学ポテンシャル

$$\mu_B \big|_{T=100\text{GeV}} \sim eV!$$

充分条件：

機構の一般論

- Baryonの化学ポテンシャル

$$\mu_B \big|_{T=100\text{GeV}} \sim eV!$$

充分条件：

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

ならばcoincidence は説明される。

機構の一般論

- Baryonの化学ポテンシャル

$$\mu_B \big|_{T=100\text{GeV}} \sim eV!$$

充分条件：

$$\therefore \mu_B \sim m_{\text{DM}} \equiv \mu_{\text{DM}}$$

ならばcoincidence は説明される。

機構の一般論

- Baryonの化学ポテンシャル

$$\mu_B \big|_{T=100\text{GeV}} \sim eV!$$

充分条件：

$$\therefore \mu_B \sim m_{\text{DM}} \equiv \mu_{\text{DM}}$$

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 axion induced EW walls $\mu = m_a$

Vanvlasselaer, WY, 2604.20762

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

- Affleck-Dine-like spontaneous baryogenesis

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 $P = R e^{i\theta}$

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

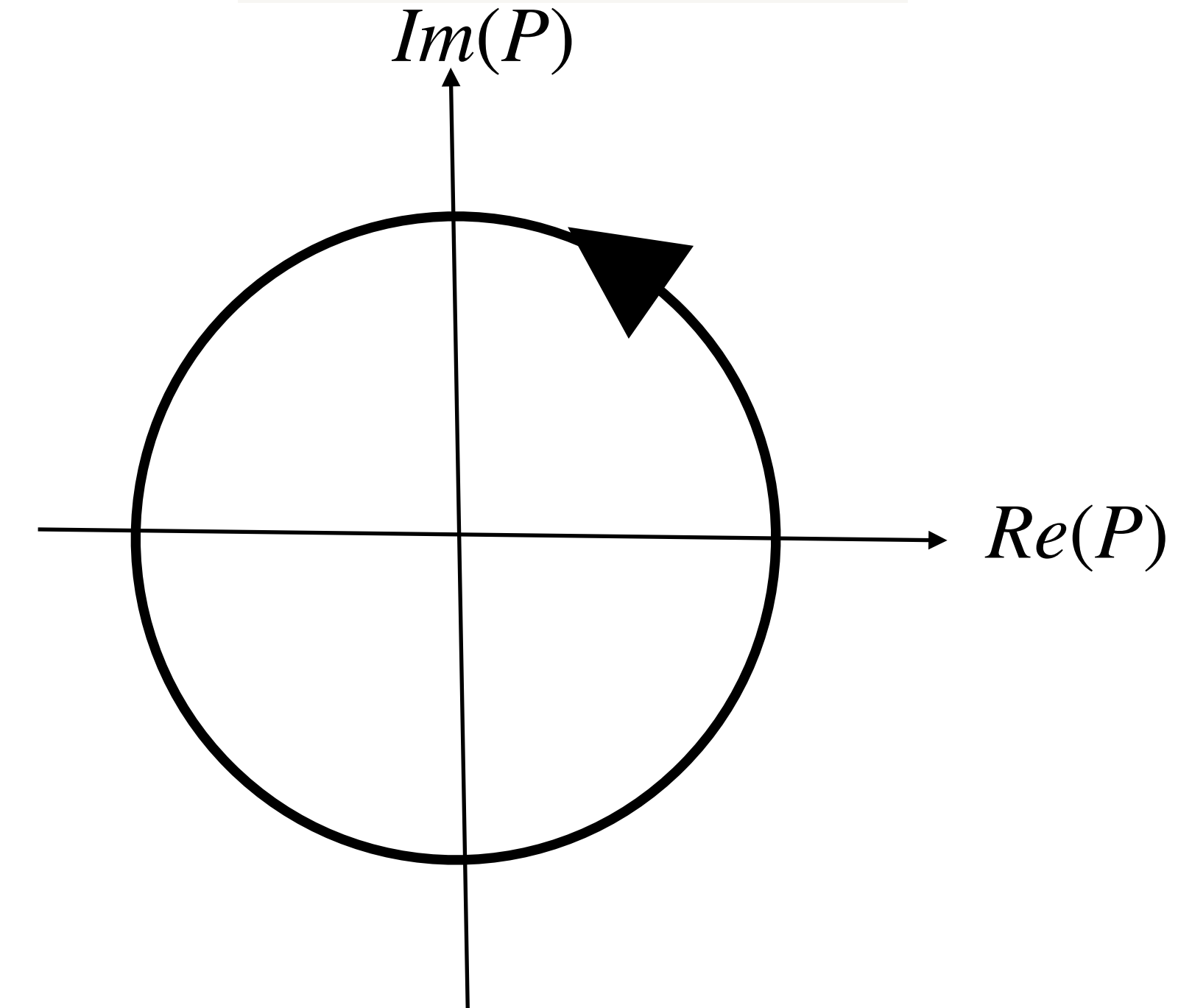
$$\rightarrow |\dot{\theta}| = m_R$$

Spontaneous baryogenesis

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

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

Affleck and Dine, 1985;



Cohen and Kaplan 1987;

模型構築

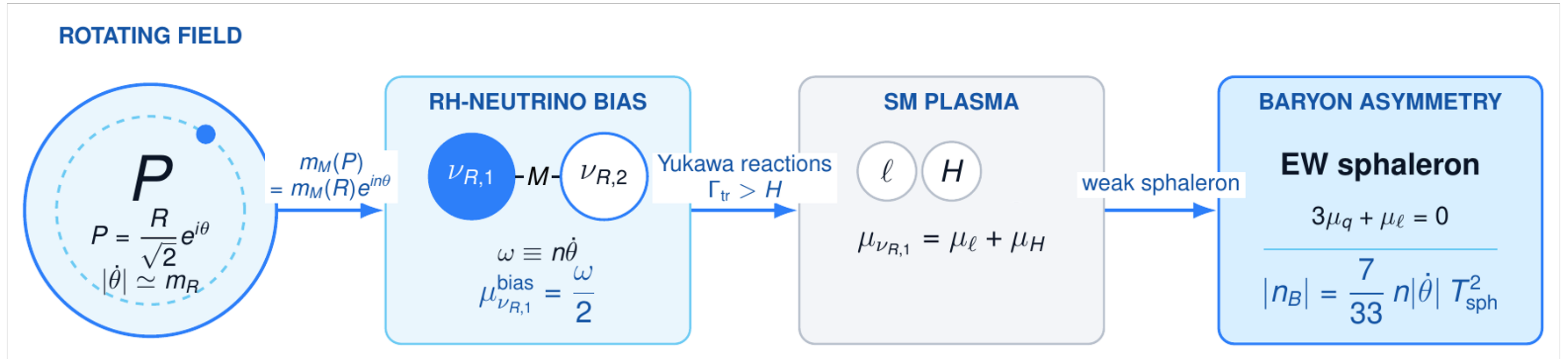
条件: R の熱ポテンシャル, CW補正 $\ll \dot{\theta}^2 R^2 \ll \rho_{HDM}$

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

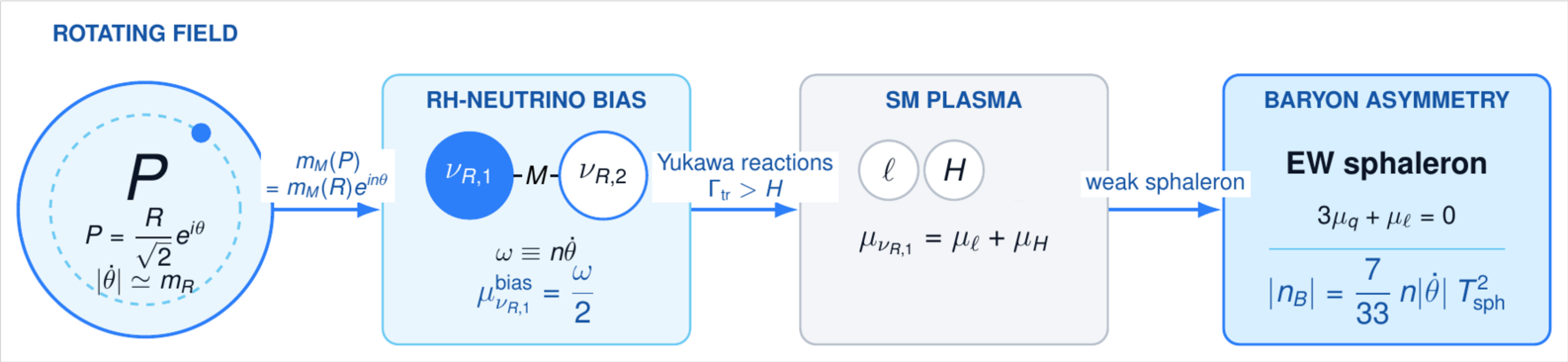
$$\mathcal{L} \supset -m_R^2 |P|^2 - y_{\alpha\nu} \overline{L}_\alpha \tilde{H} \nu_{R,1} - \frac{1}{2} y_P P^n \overline{\nu_{R,1}^c} \nu_{R,1} + \text{h.c.} \\ - M \nu_{R,1} \nu_{R,2} + \text{h.c.},$$

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

機構と条件



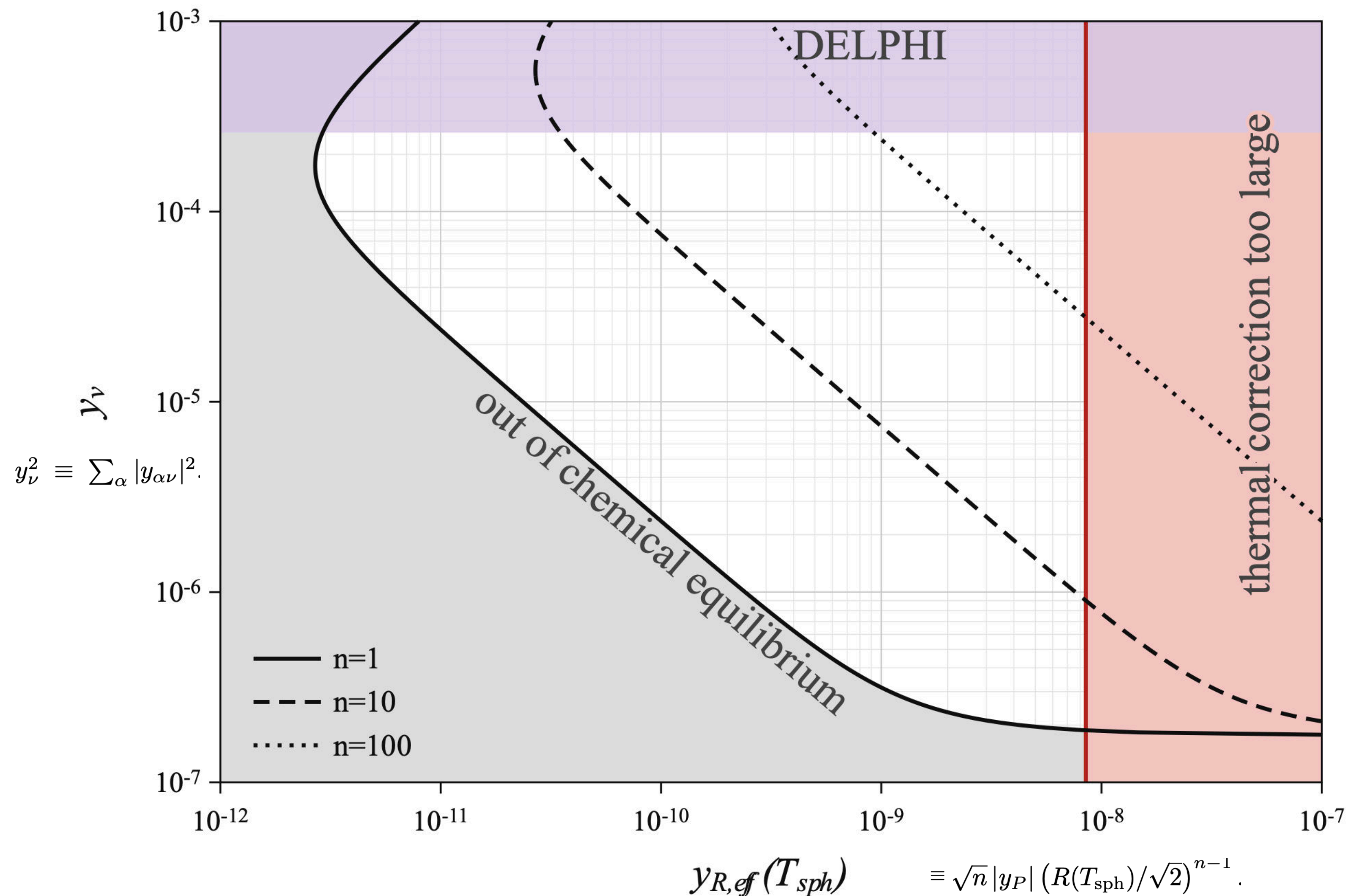
機構と条件



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

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

どっちも輻射補正で安定 [WY, 2412.17802](https://arxiv.org/abs/2412.17802)

ここまでのメッセージ

- μ DMで Ω_{DM}, Ω_B coincidenceを説明可能
- 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

- eV dark matterは特別

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

ここまでのメッセージ

- μ DMで Ω_{DM}, Ω_B coincidenceを説明可能

- eV dark matterは特別

背後にある「偶然」
• $T_{eq}^{SM} \sim eV$

• $\mu_B^{SM}[T = T_{sph}] \sim eV$

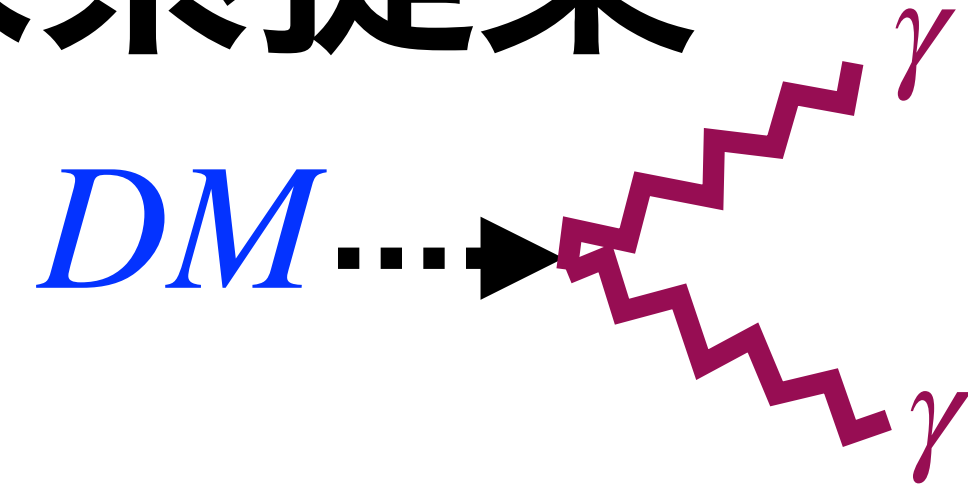
3. eV DM 探索

- 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

3. eV DM 探索

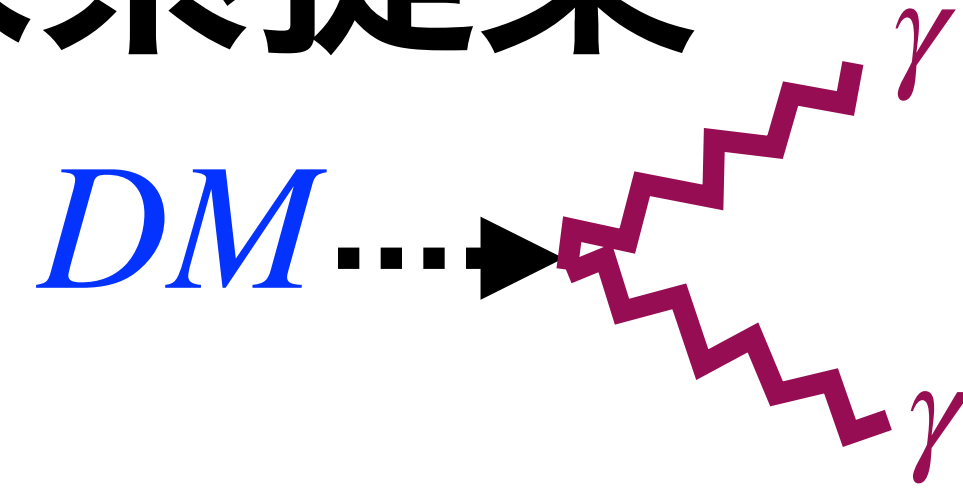
- eVDMは特にdecay を禁止する理由がないため自然に崩壊
 - > graviton, neutrino or photon

3-1. eV DM 探索提案



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

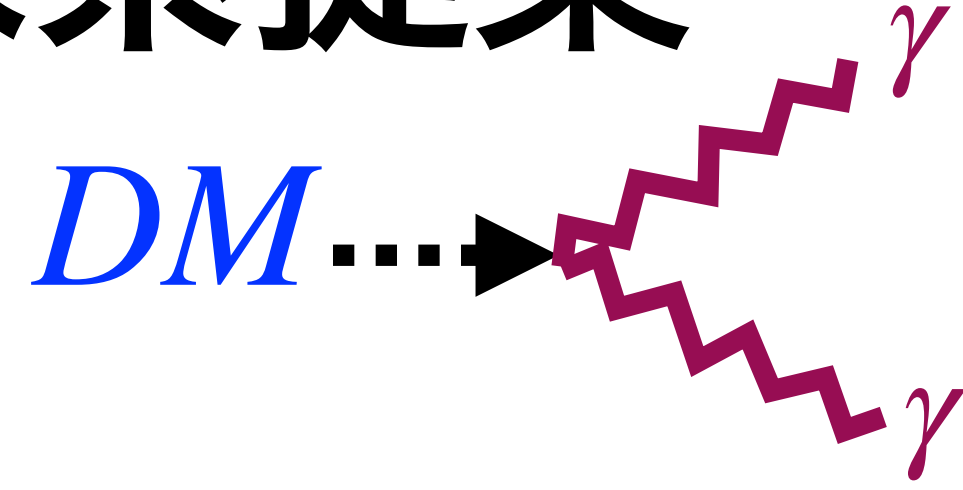
3-1. eV DM 探索提案



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

今、光の観測技術がやばい

3-1. eV DM 探索提案

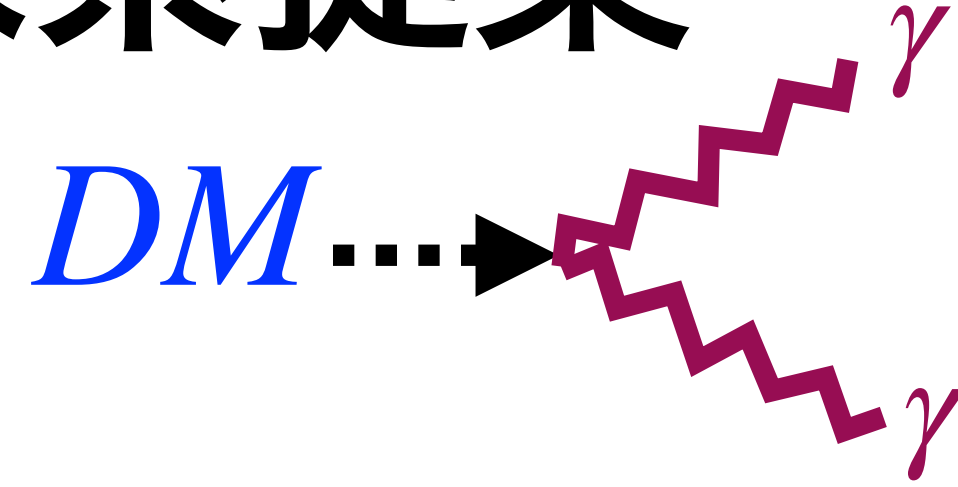


$$\lambda_{\gamma} \simeq \frac{2\pi}{1\text{eV}/2} \hbar c = \frac{2 \times 2\pi}{1\text{eV}} \times 0.2\text{eV}\mu\text{m} \sim 2.4\mu\text{m}$$

今、光の観測技術がやばい

eV DM、今が旬？

3-1. eV DM 探索提案



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

今、光の観測技術がやばい

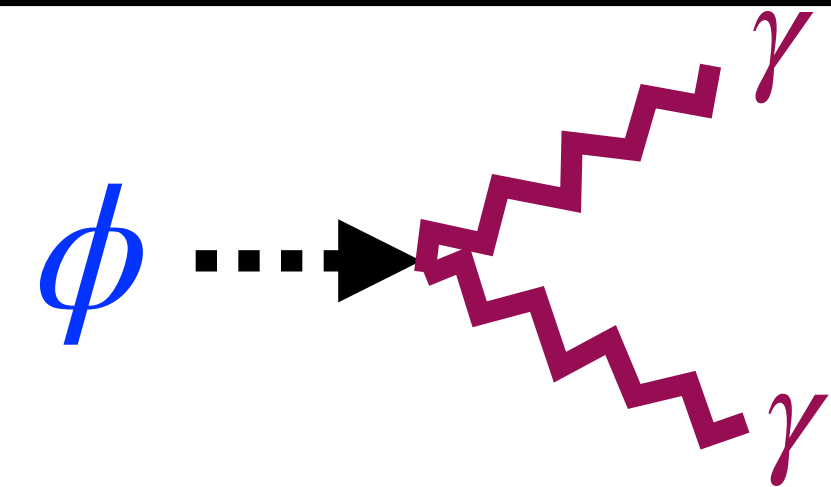
eV DM、今が旬？

今日は 近or中 赤外領域について

Difficulties of eV DM indirect detection

Significant background:

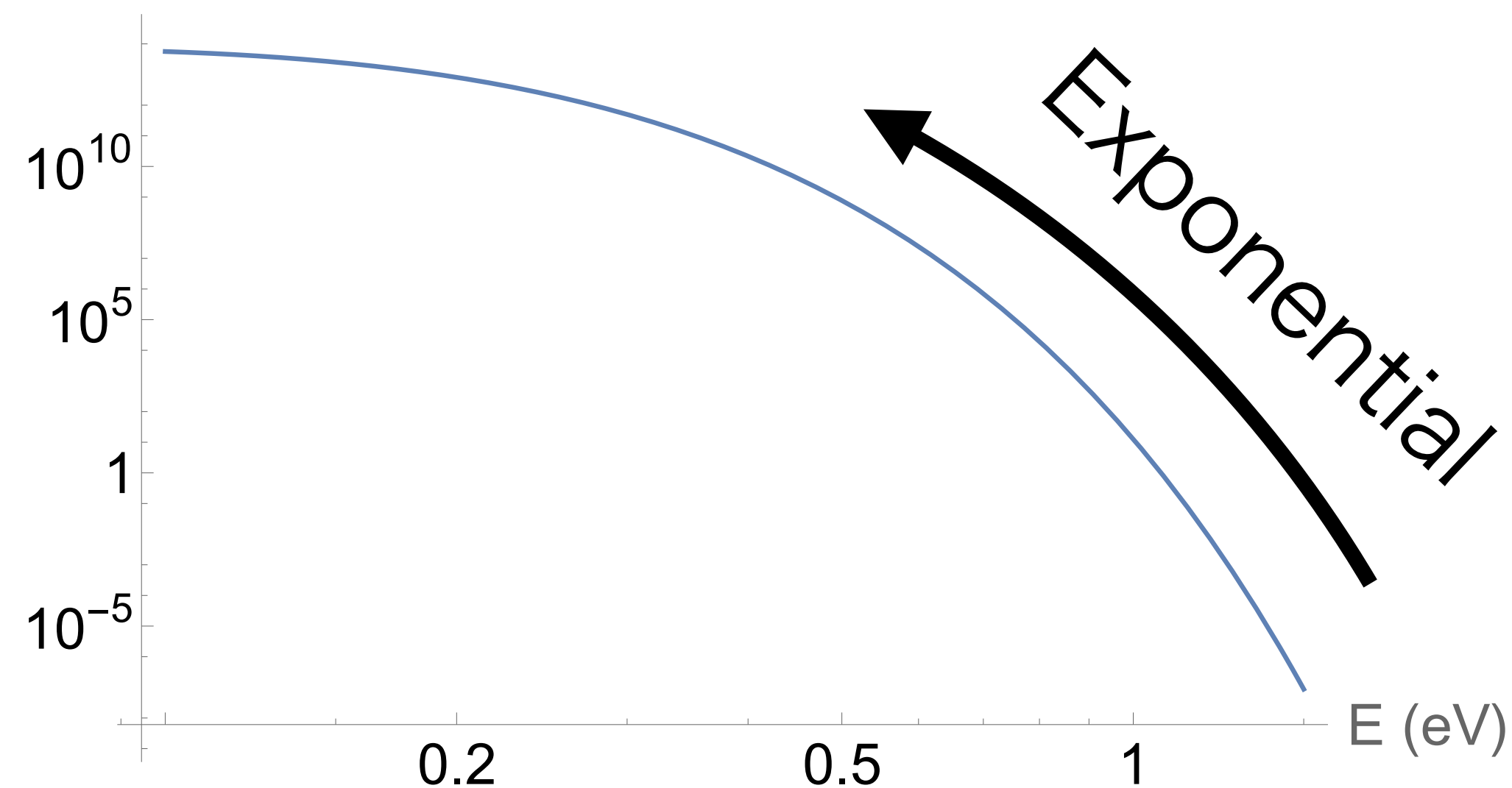
DM signal



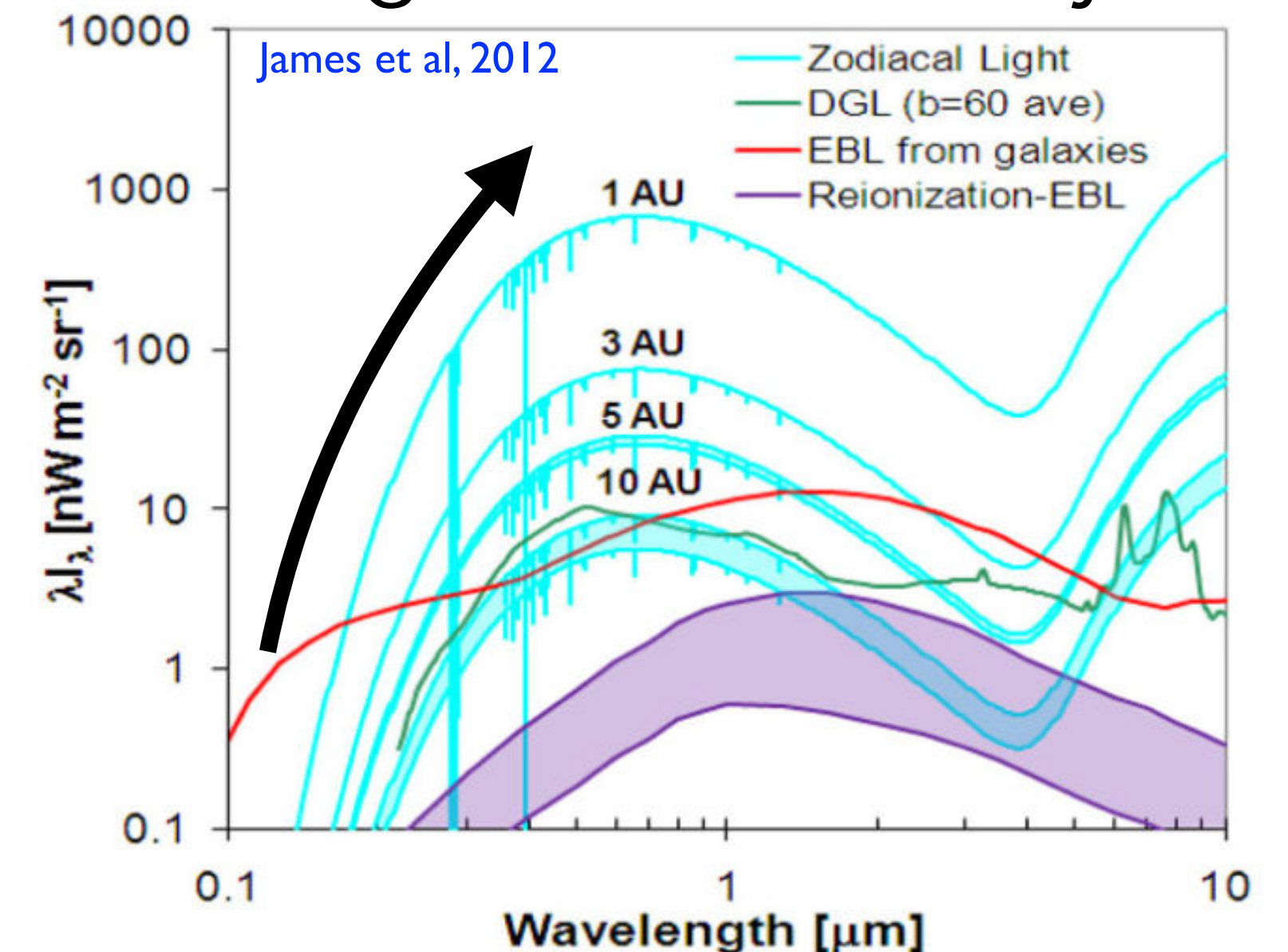
$$\lambda_\gamma \sim 1\mu m \frac{2\text{eV}}{m_\phi}$$

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

photon/(cm² sr s)



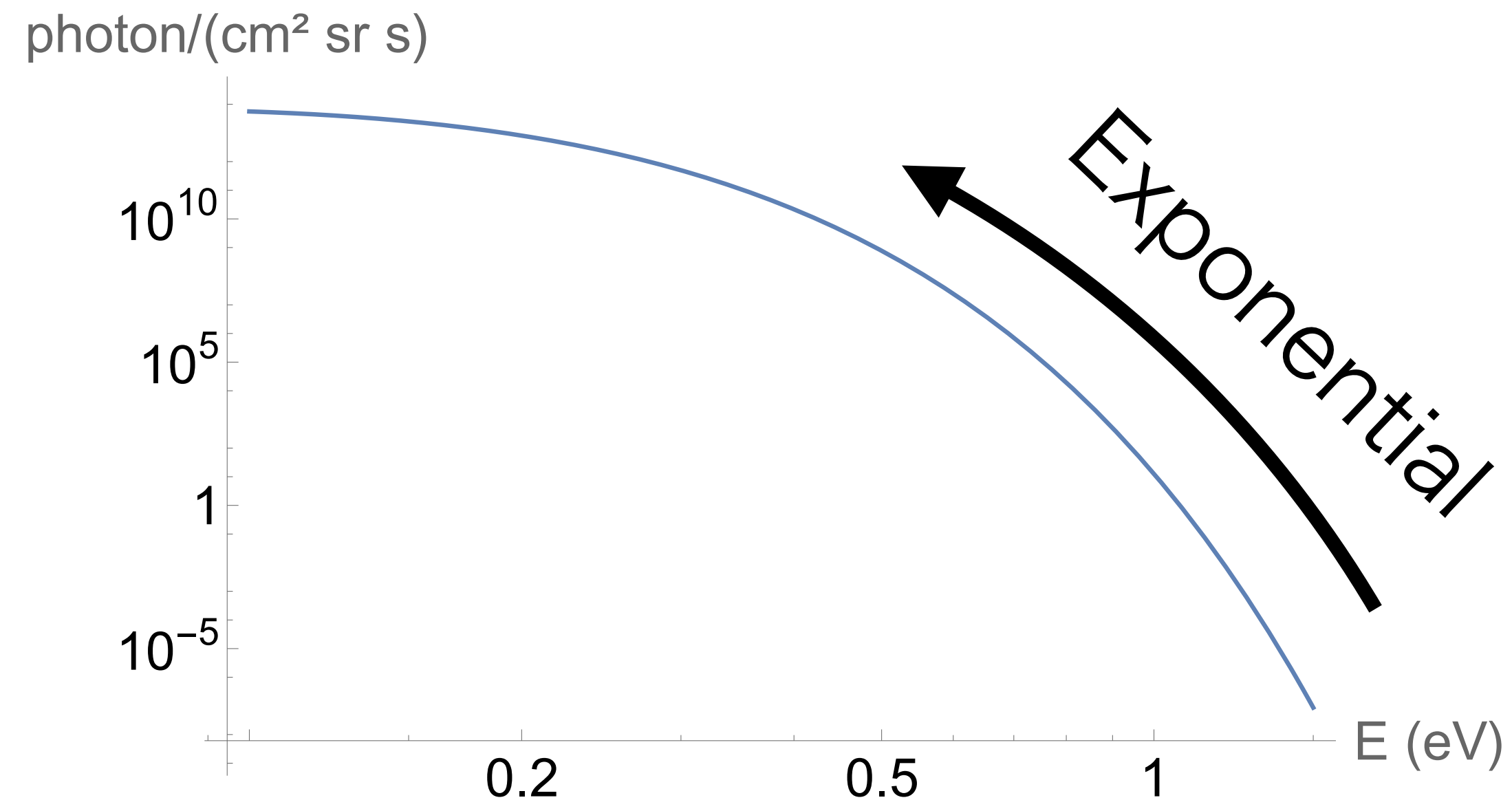
- Zodiacal light:
sun light scattered by dust



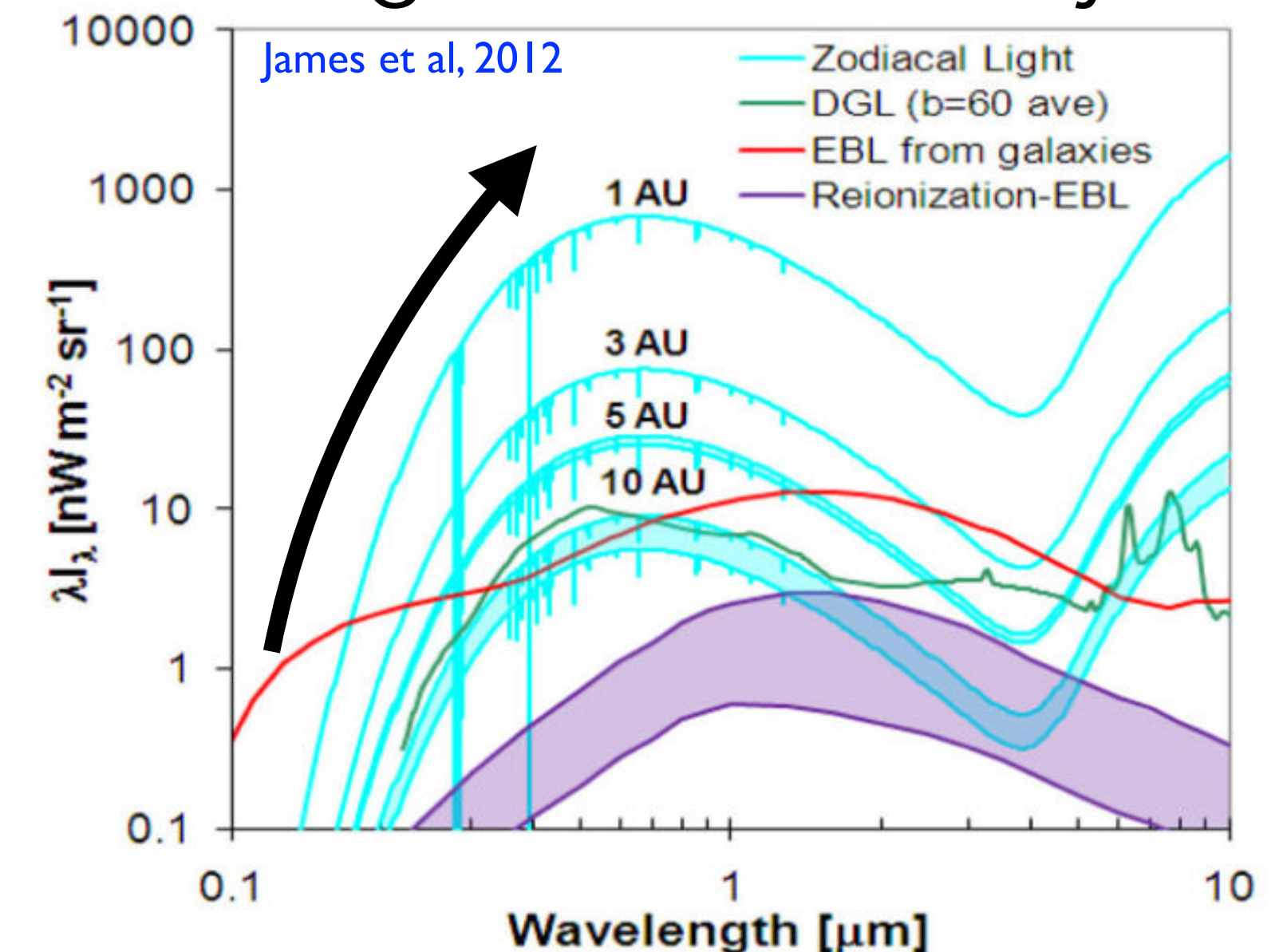
Difficulties of eV DM indirect detection

Significant background: Continuous spectra

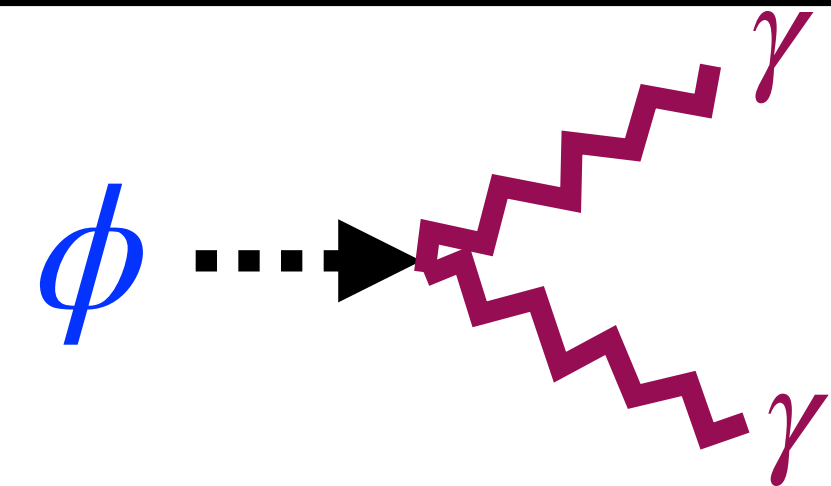
- Thermal radiation (T=290K)



- Zodiacal light: sun light scattered by dust



DM signal
Narrow-line ϕ

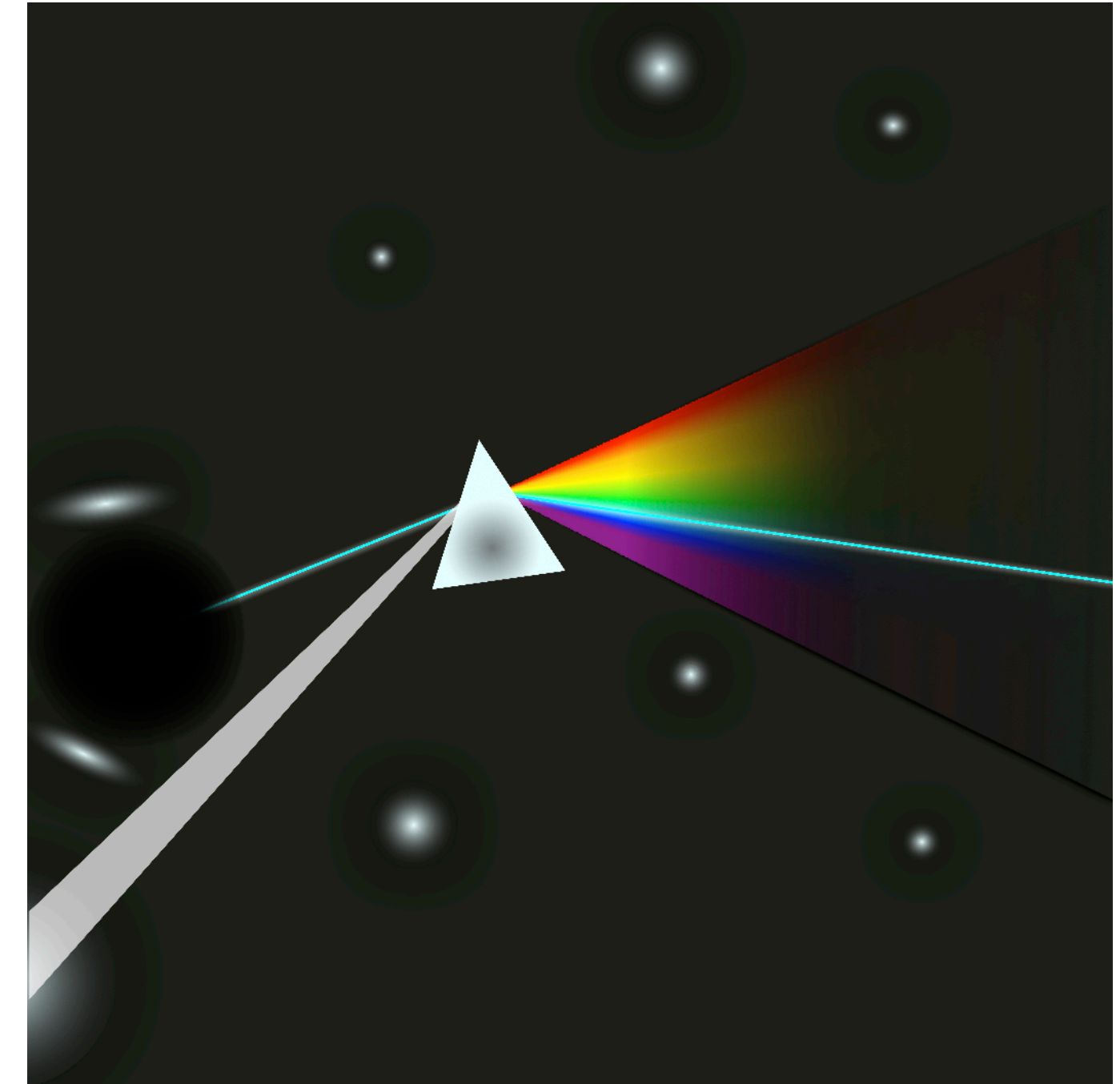
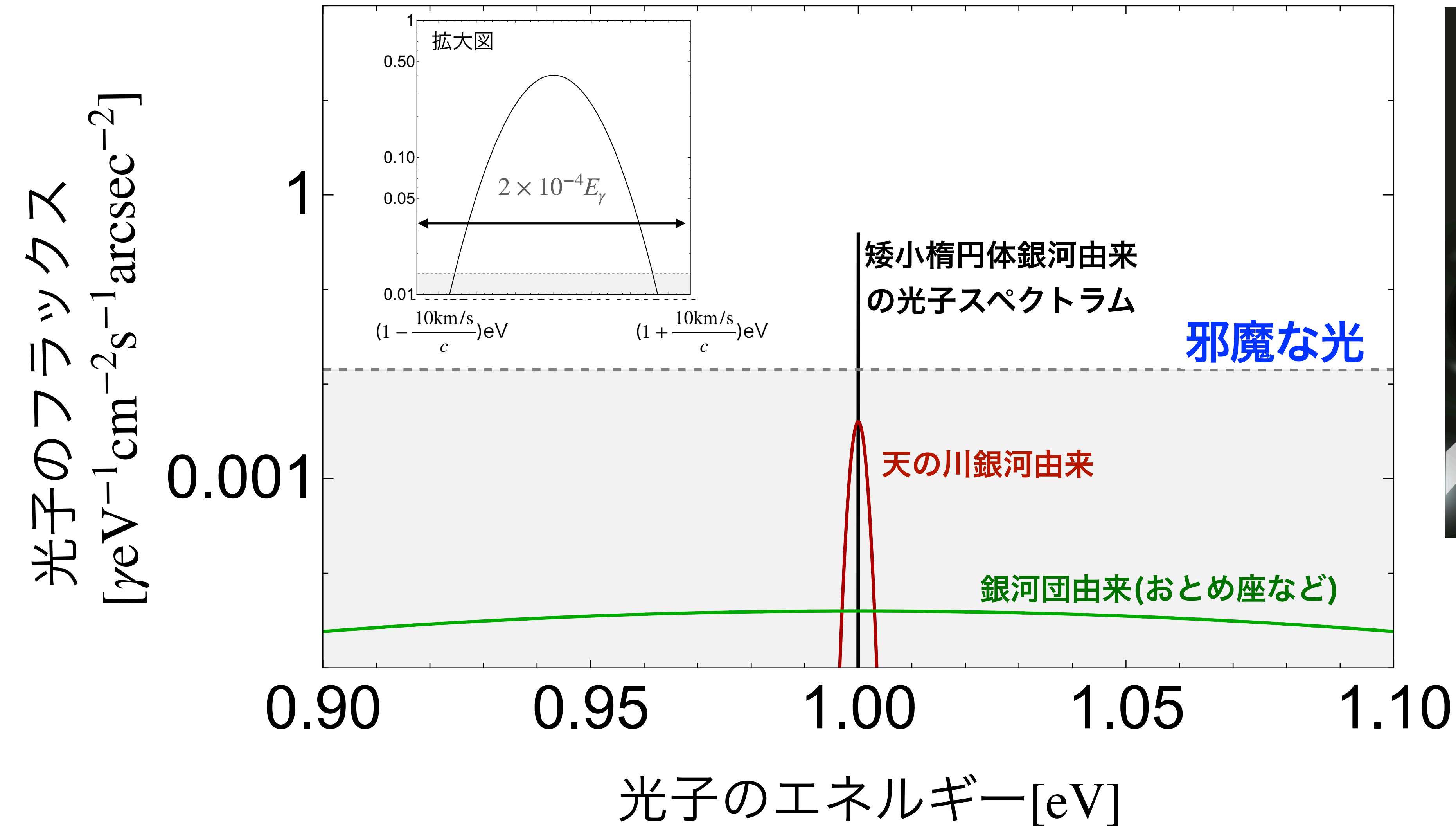


$$\lambda_\gamma \sim 1\mu m \frac{2\text{eV}}{m_\phi}$$

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,

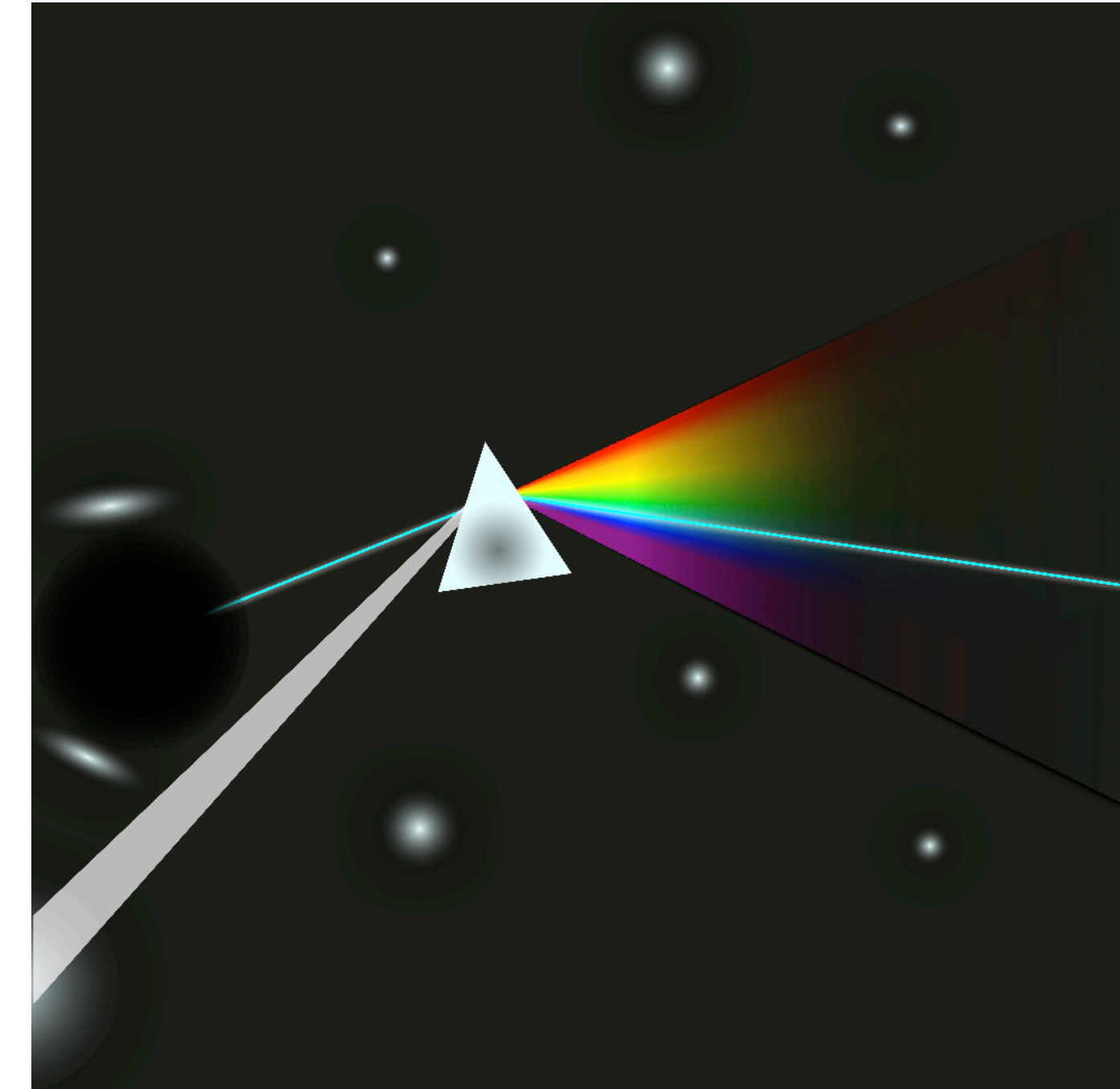
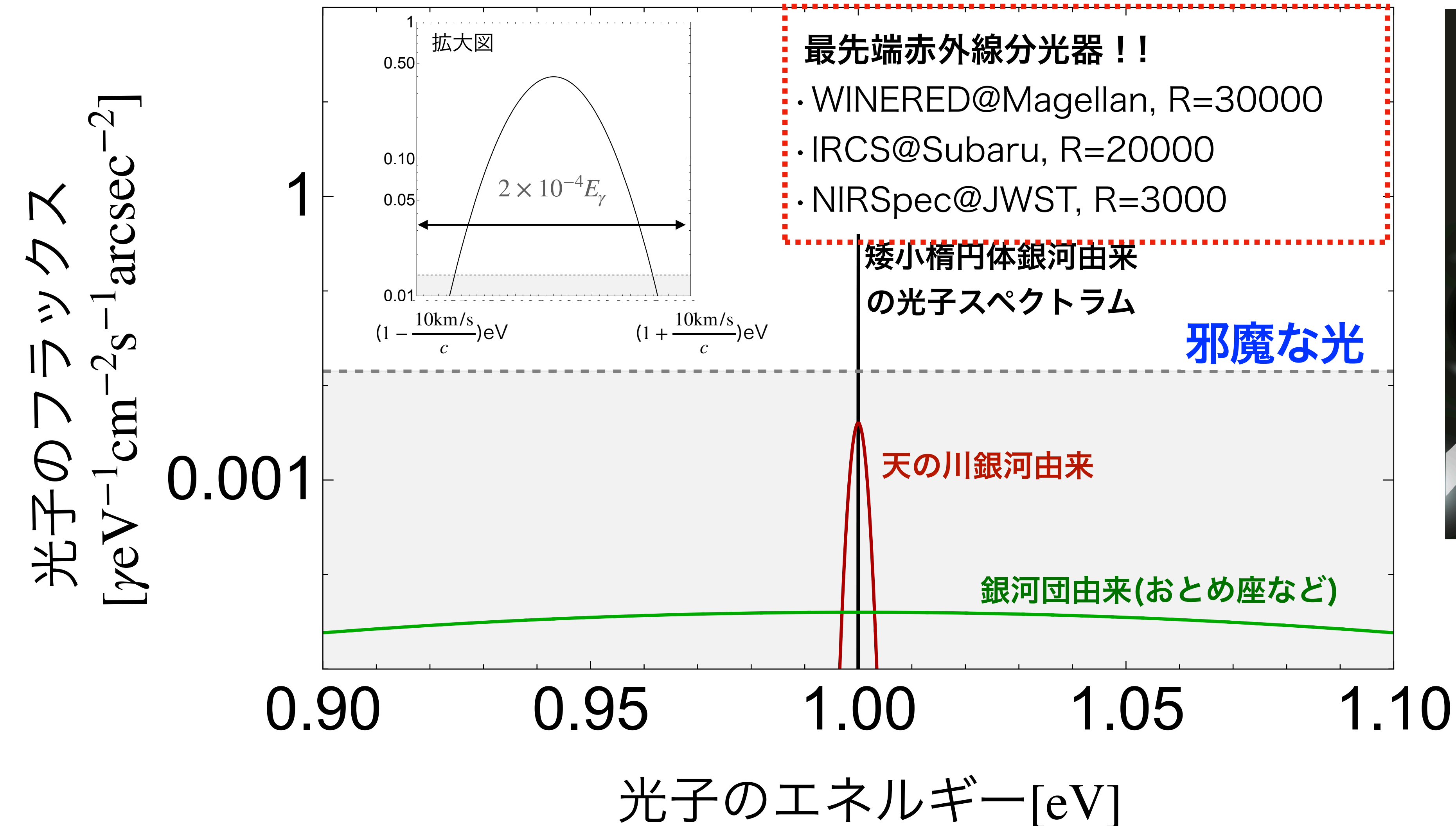
暗黒物質の質量 = 2eV, 光子結合 = 10^{-10}GeV^{-1}



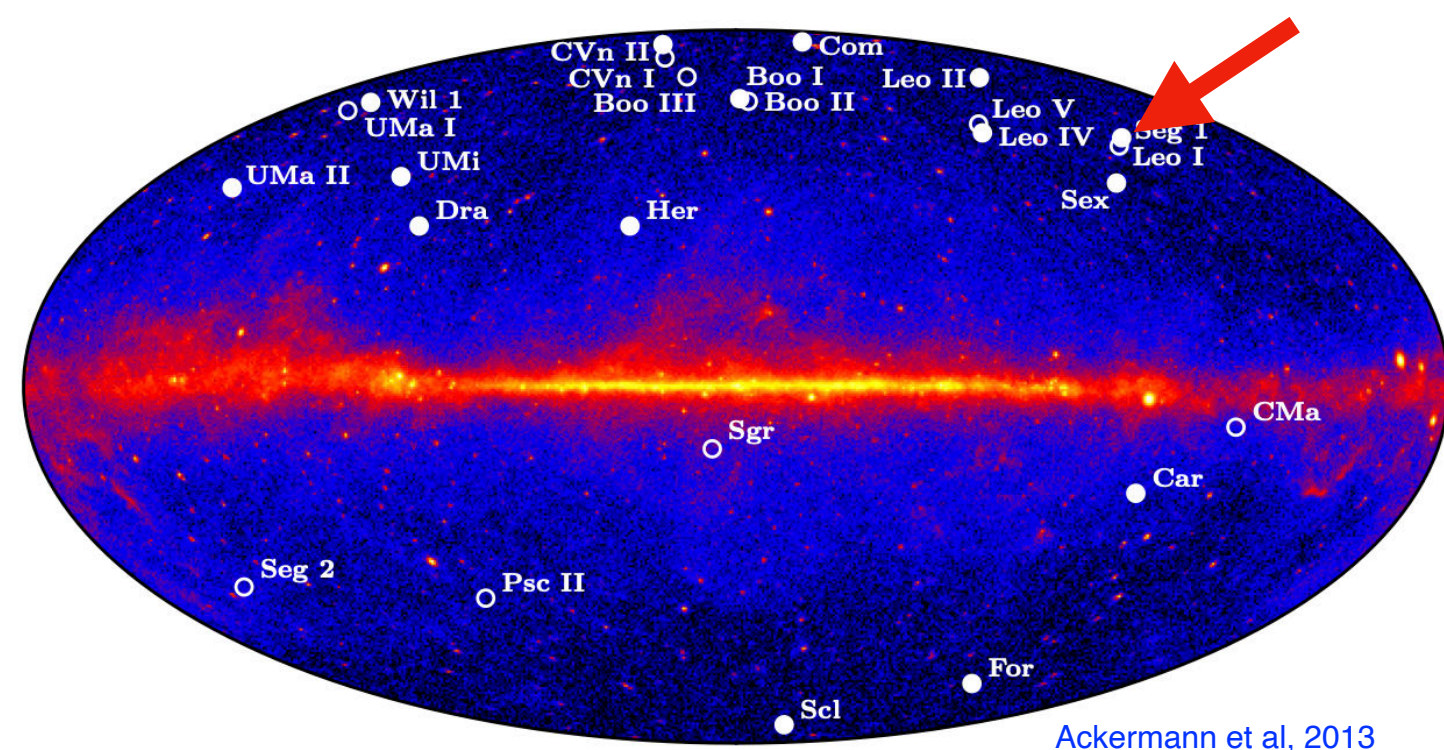
ダークマター由来の光は**狭線幅輝線**！超尖ってる。 十分な波長分解能があれば**邪魔な光**は無視できる。

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



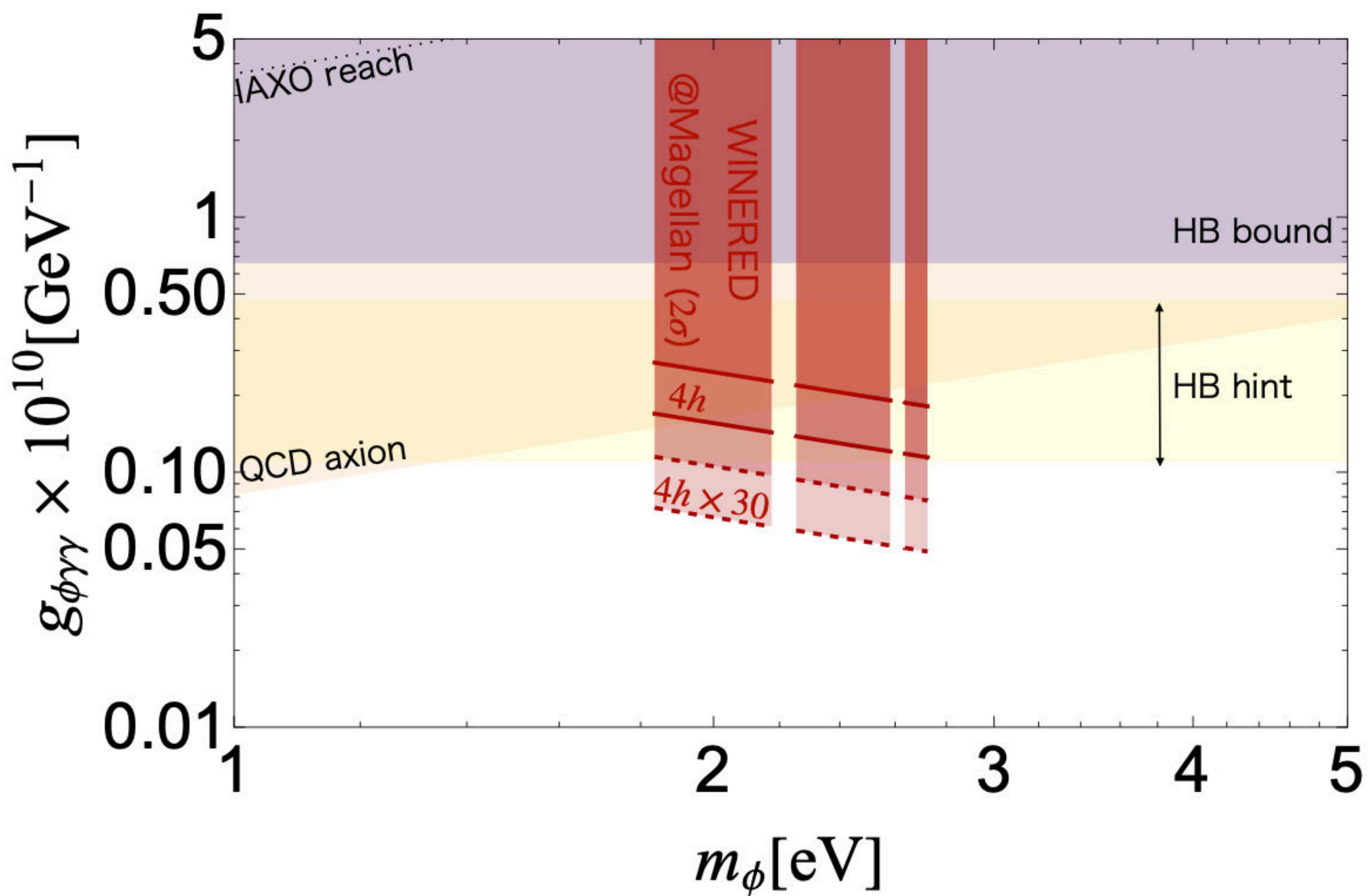
Ackermann et al, 2013

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

T. Bessho, Y. Ikeda, WY, 2208.05975

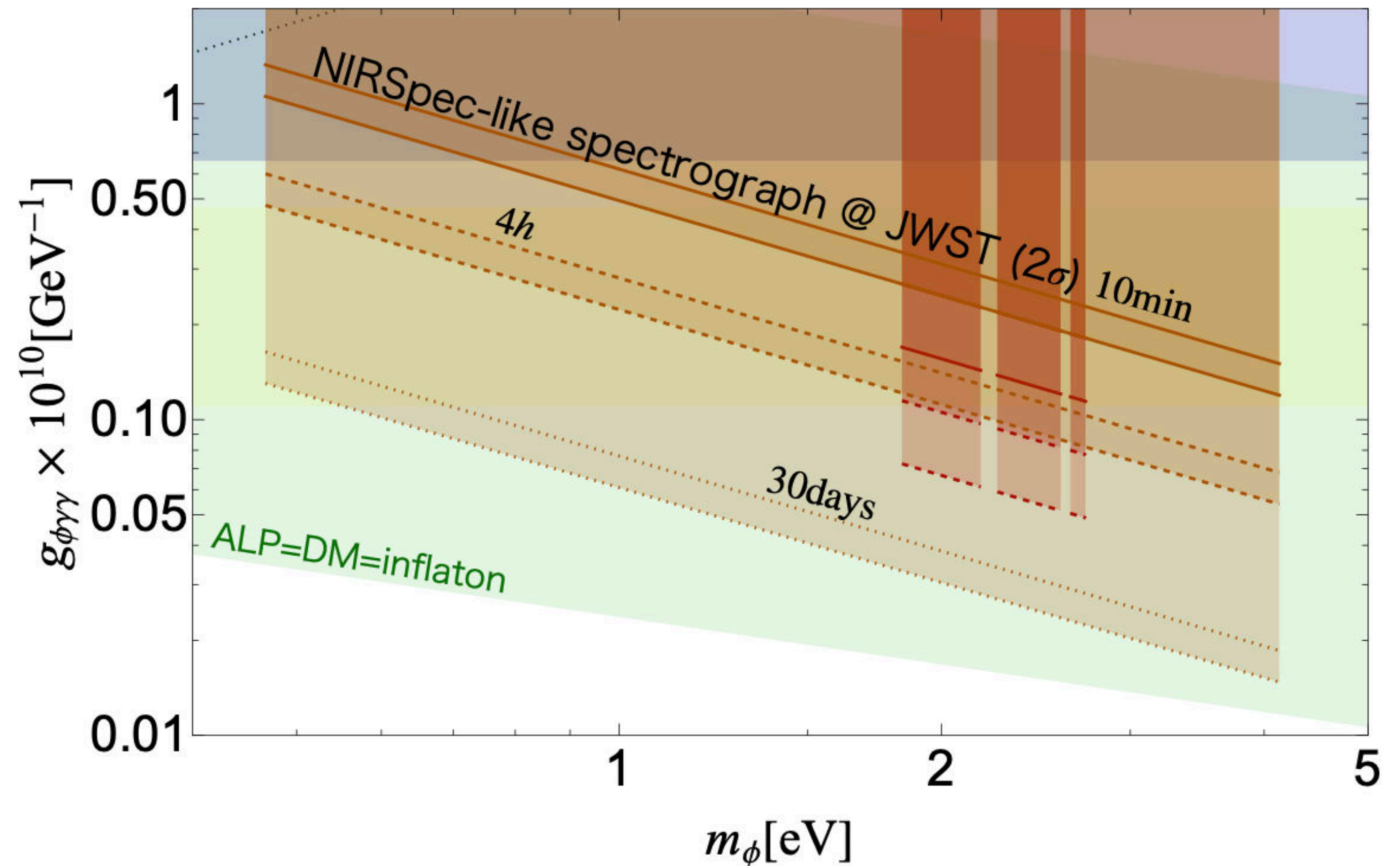


<https://www.cfa.harvard.edu>

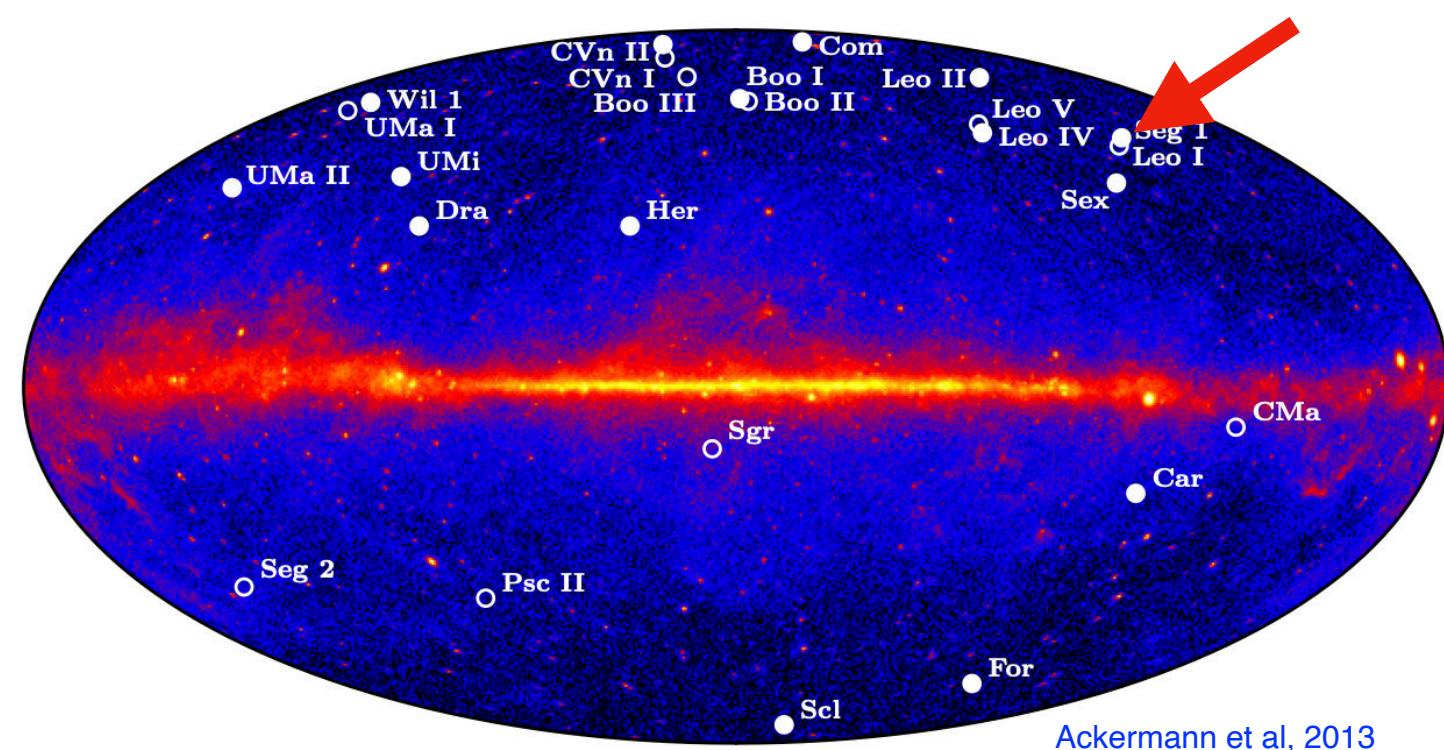


A false-color map of the sky showing the distribution of dwarf galaxies. The map is elliptical, with a bright horizontal band representing the Milky Way. Numerous dwarf galaxies are labeled with names like UMa I, UMi, Dra, Her, Com, Leo I, Leo II, Leo III, Leo IV, Leo V, Seg I, Seg 2, CMa, Car, For, Scl, Psc II, Sgr, and Seg 1. A red arrow points to Seg 1.

T. Bessho, Y. Ikeda, WY, 2208.05975



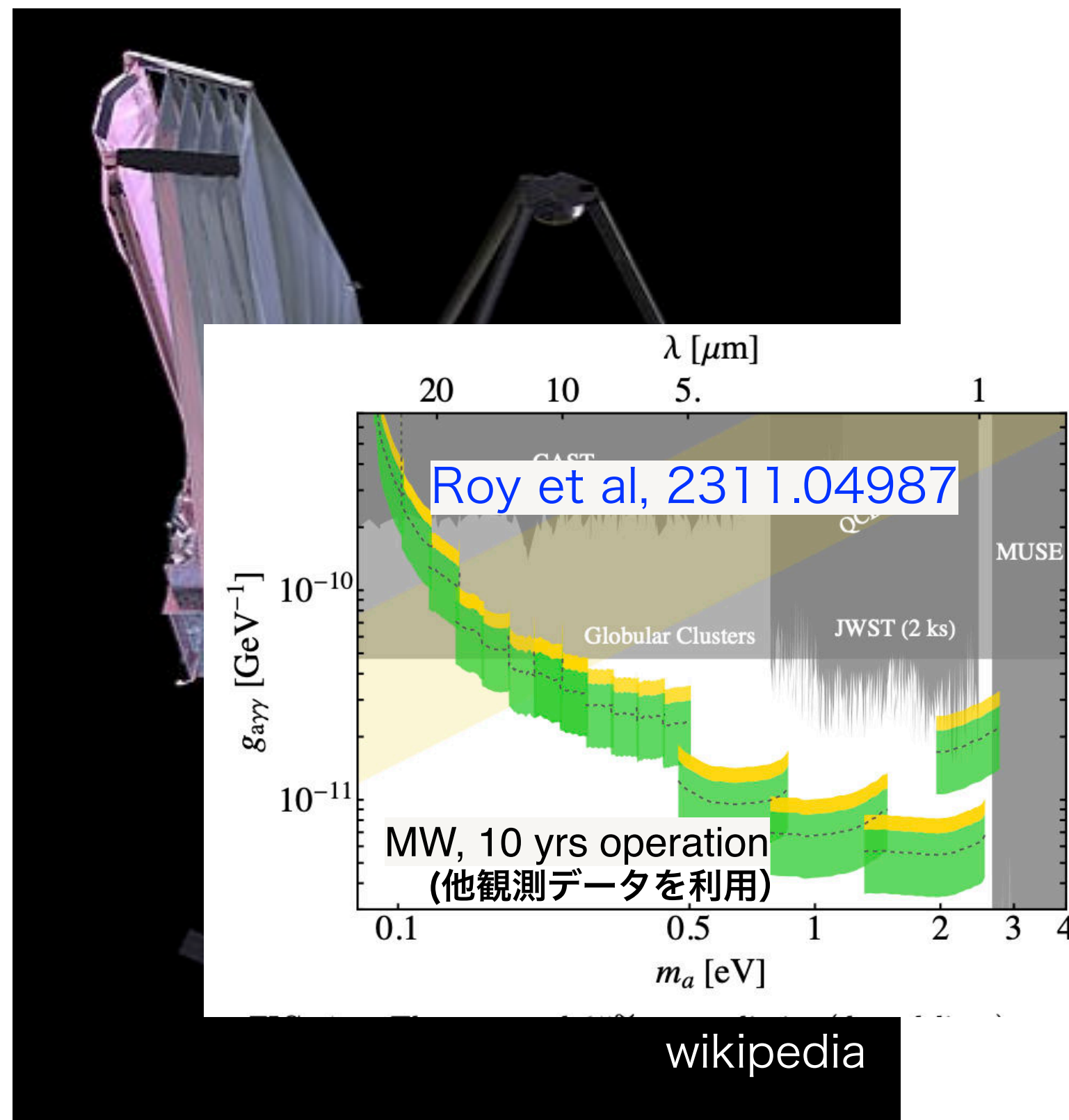
eV DM search with NIRSpec @ JWST



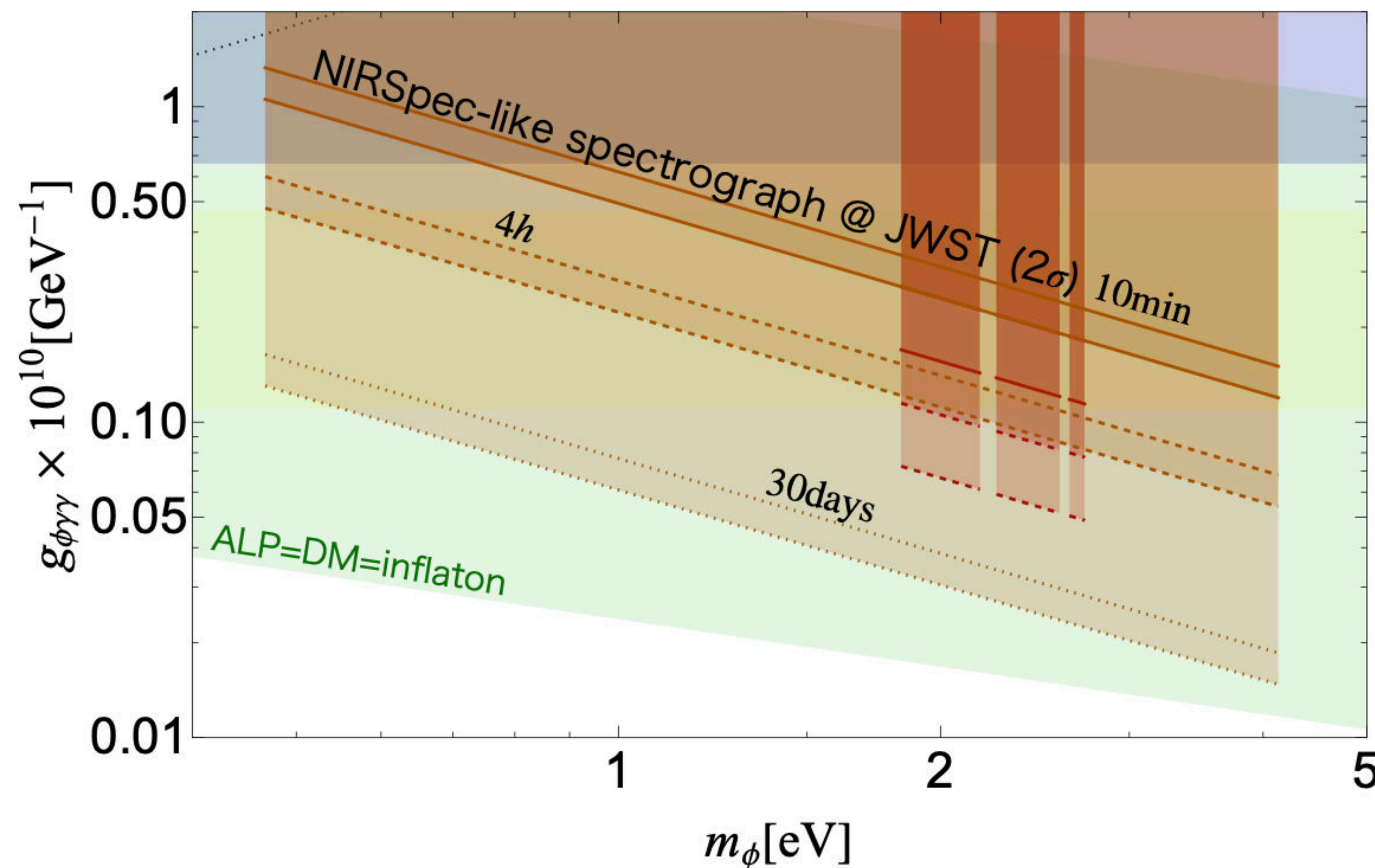
Ackermann et al, 2013

JWSTはR~3000だけど、大気の輻射がないから、強い。

T. Bessho, Y. Ikeda, WY, 2208.05975



wikipedia



• 3-2. Observations by WINERED and results

$$\frac{\partial^2 \Phi_{\gamma,i}}{\partial \Omega \partial E} \simeq \frac{\partial_\Omega D[s, \Omega]}{4\pi} \frac{\Gamma_\phi}{m_\phi} \times \underline{2\delta(E - \frac{m_\phi}{2}(1 - v_i))} \times \underline{\eta}$$

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

Estimated in
WY, Hayashi
2305.13415

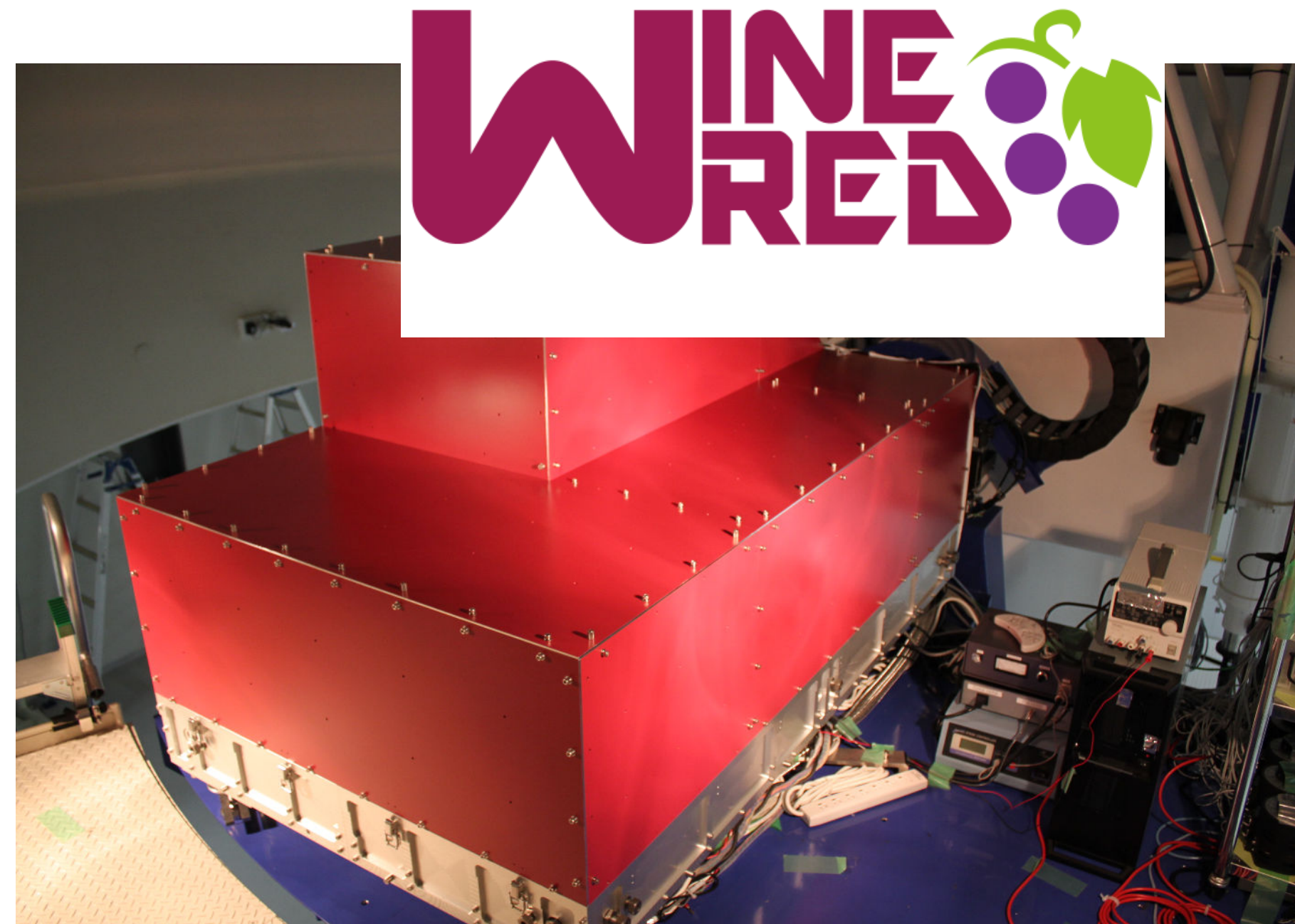
Measured in
WY, Ikeda, Bessho, Kobayashi
+WINERED team, 2402.07976



Information of decay rate Γ_ϕ

What we use: WINERED@ Magellan

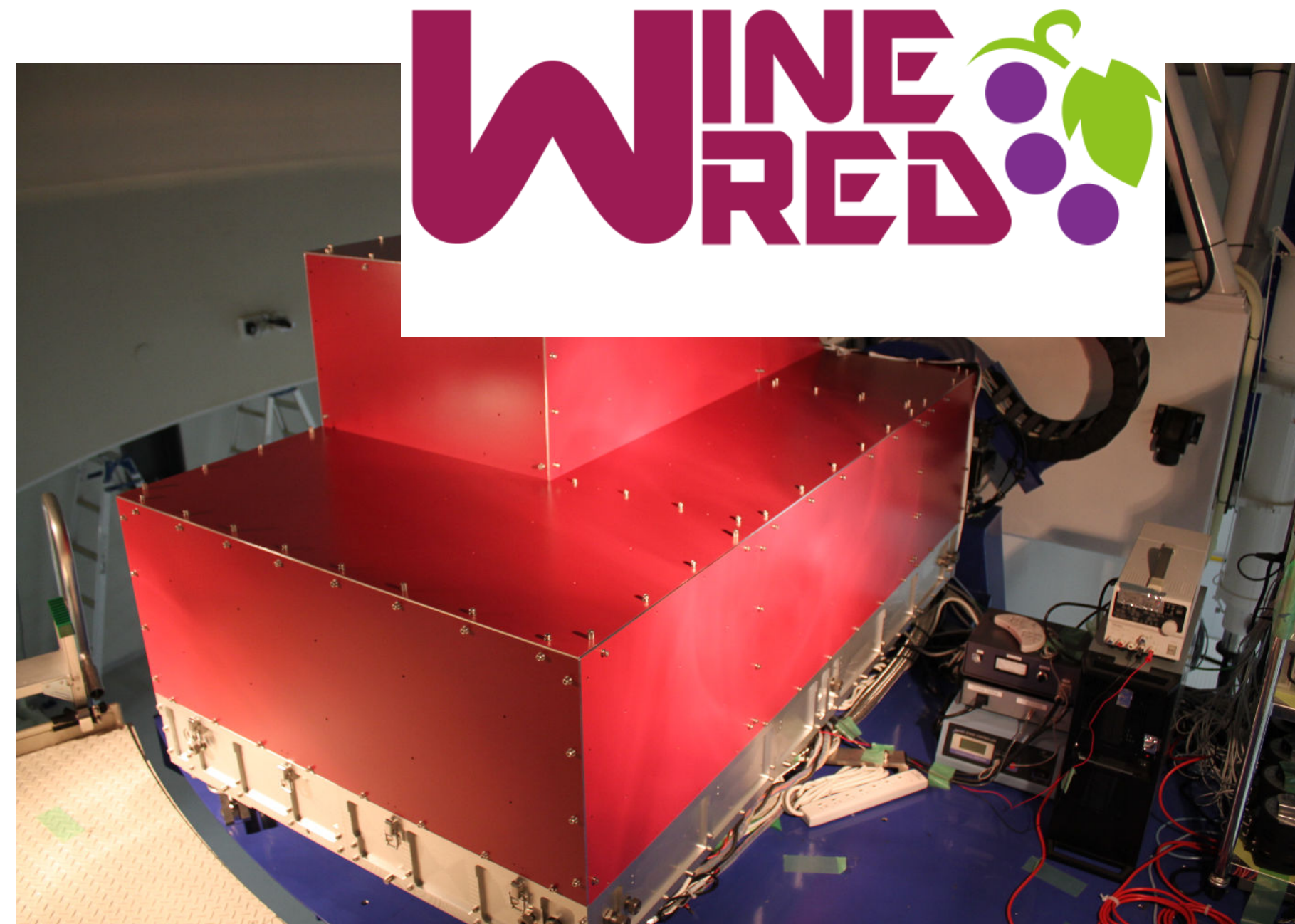
Magellan



Ikeda et al 2006

What we use: WINERED@ Magellan

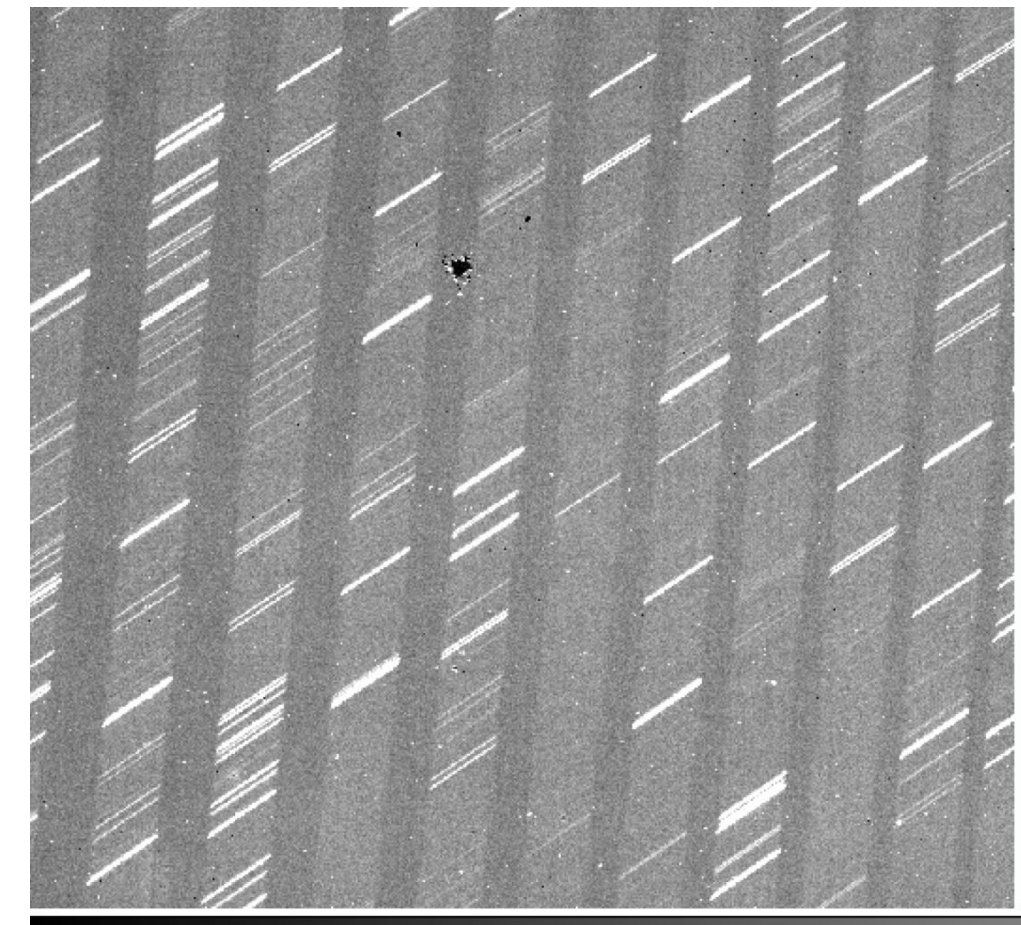
Magellan



Ikeda et al 2006

What we will obtain

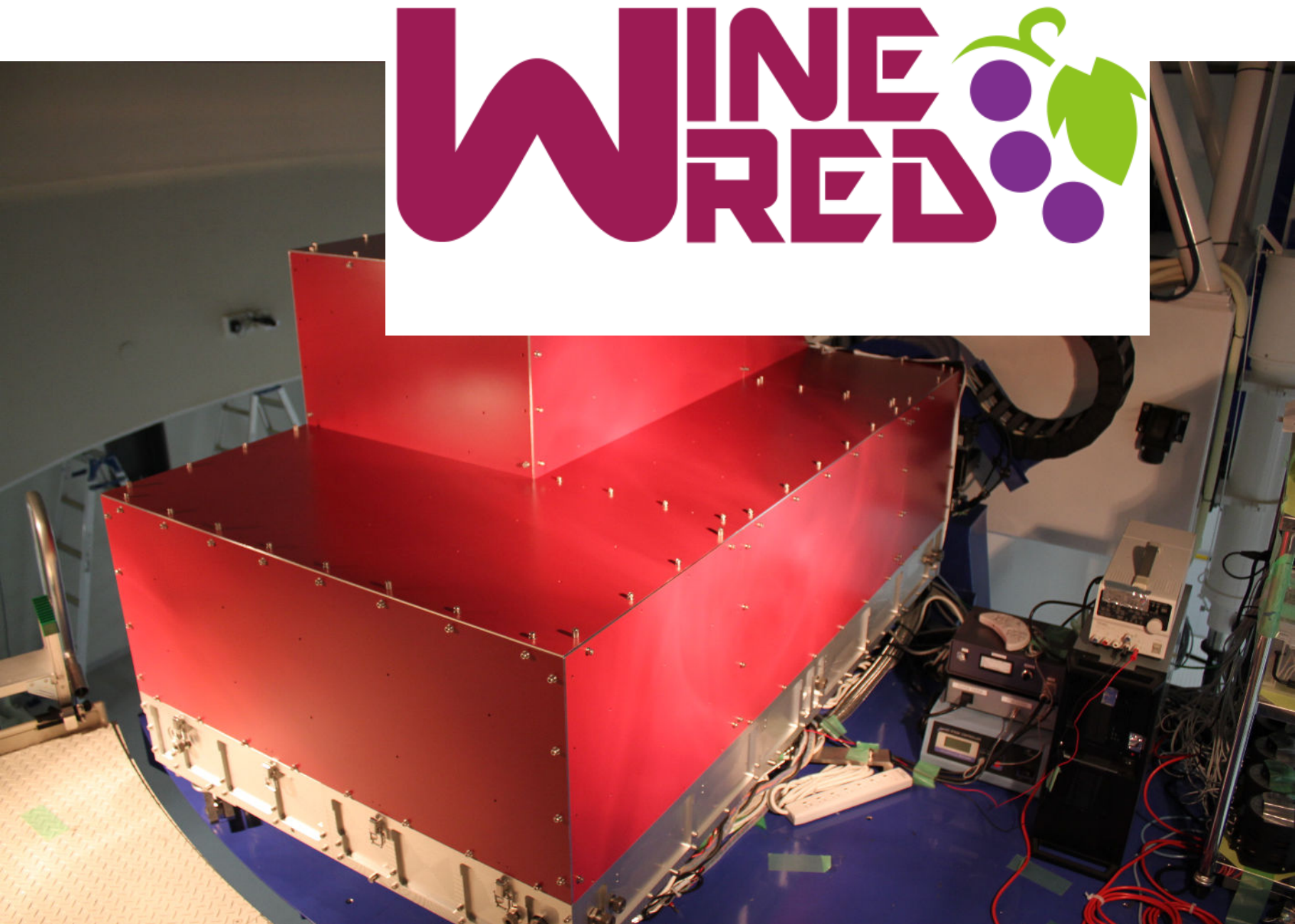
1st diffraction



2nd diffraction

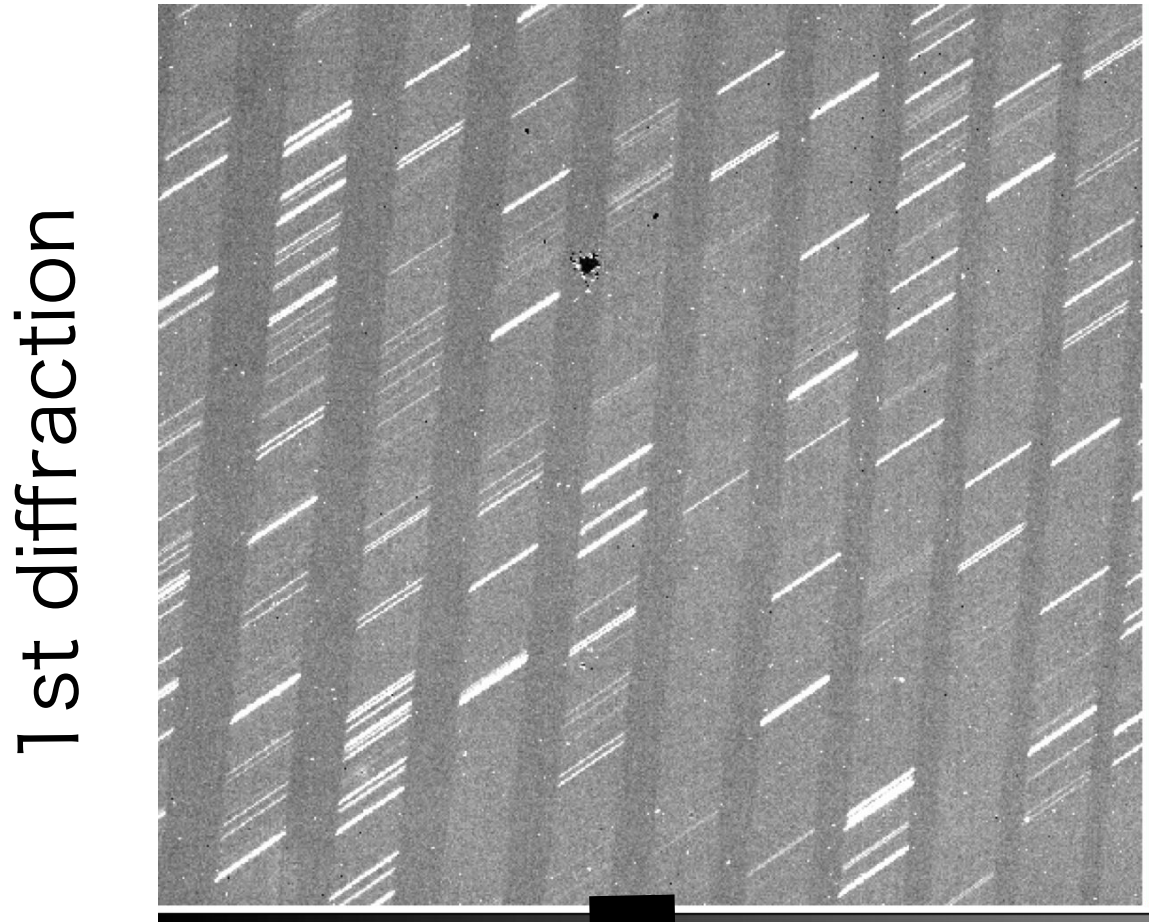
What we use: WINERED@ Magellan

Magellan

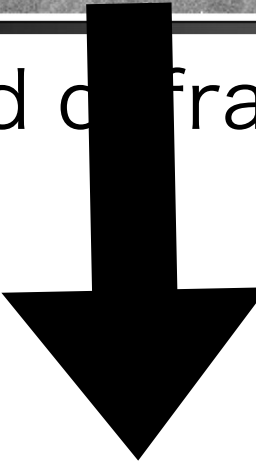


Ikeda et al 2006

What we will obtain

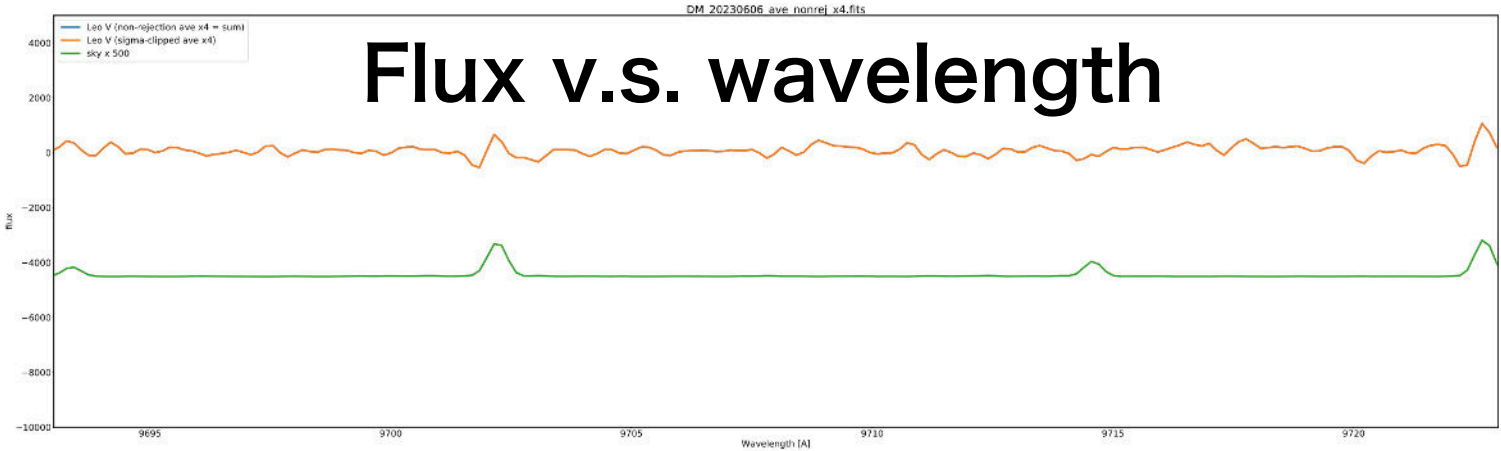


2nd diffraction



WARP

Hamano et al, 2024



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

Table. I. Obervation logs. Here, Regions 1, 2, and 3 are for Leo V, Tucana II, and Tucana II, respectively.
resolution. T_I denotes the total integration time. [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

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

Table. I. Obervation logs. Here, Regions 1, 2, and 3 are for Leo V, Tucana II, and Tucana II, respectively.
resolution. T_I denotes the total integration time. [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

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

Table. I. Obervation logs. Here, Regions 1, 2, and 3 are for Leo V, Tucana II, and Tucana II, respectively.
resolution. T_I denotes the total integration time. [Simbad](#), [Inger et al 0002110](#)

Target dSphs
For background subtraction.

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

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

Table. I. Obervation logs. Here, Regions 1, 2, and 3 are for Leo V, Tucana II, and Tucana II, respectively.
resolution. T_I denotes the total integration time. [Simbad](#), [Inger et al 0002110](#)

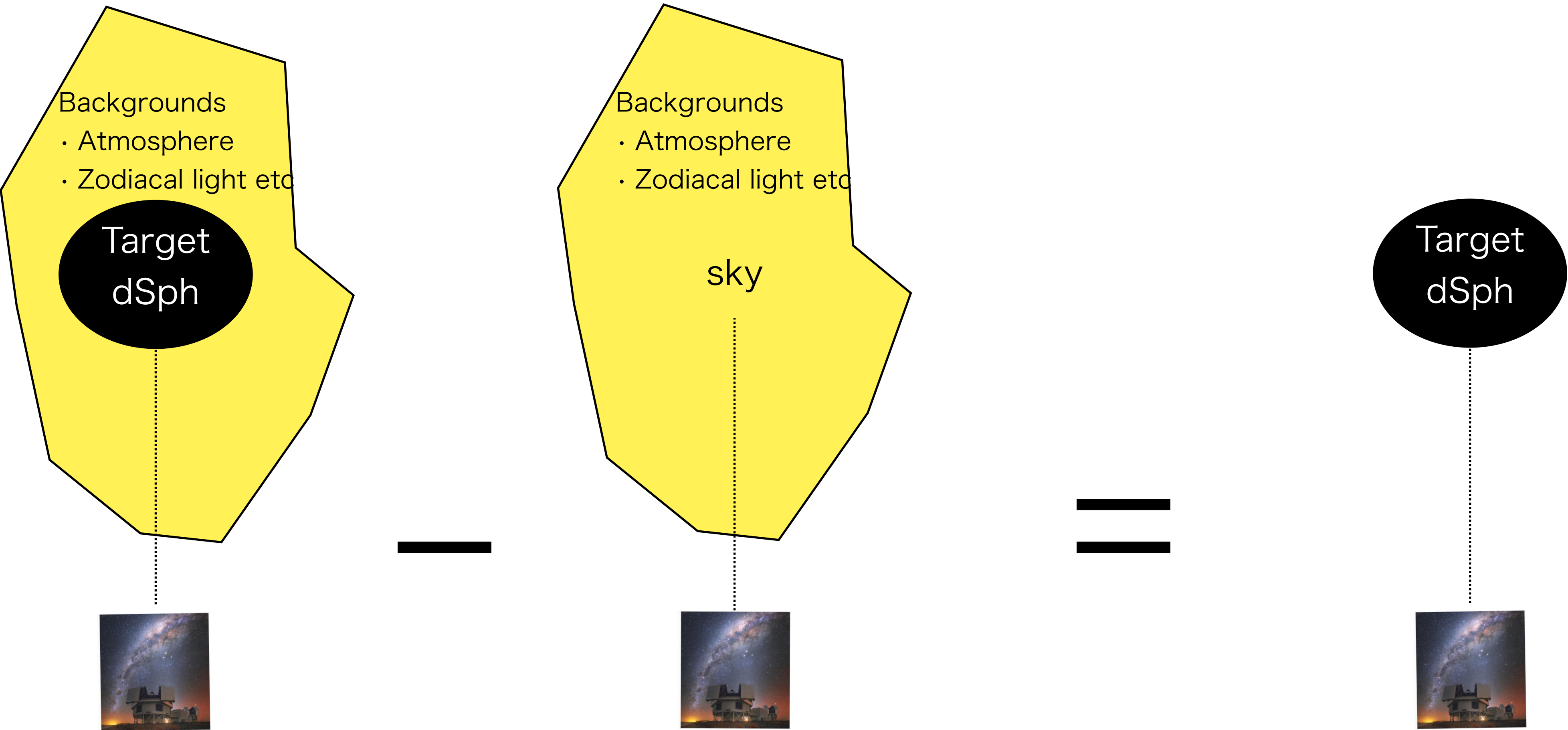
Target dSphs
For background subtraction.

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

For flux calibration and measuring
atmospheric transmittance.

Object-Sky-Object Nodding Observation

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

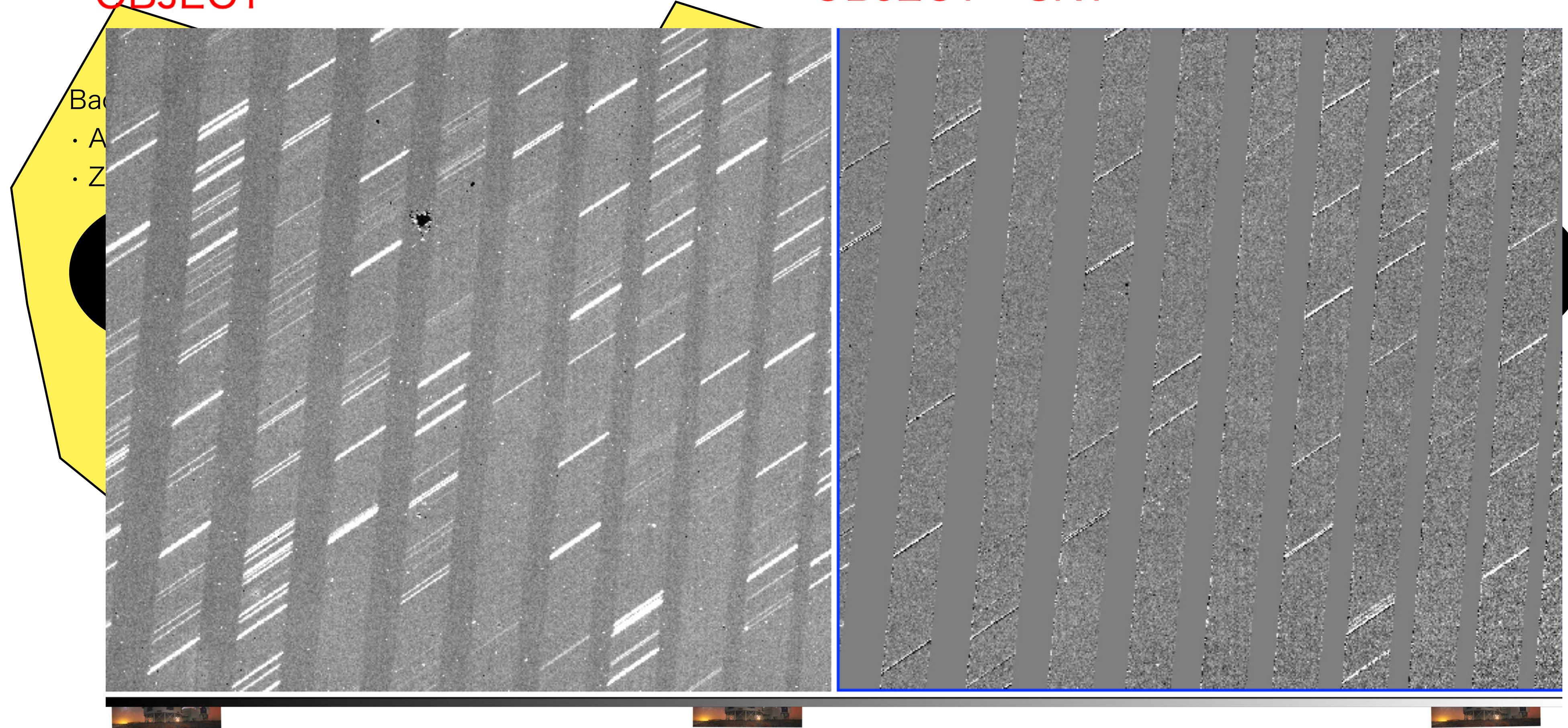


Object-Sky-Object Nodding Observation

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

OBJECT

OBJECT - SKY



A tiny wavelength shift was found when we performed the first observation. We take this effect into account in the data analysis. In the second observation, we reduced each exposure time to suppress this effect.

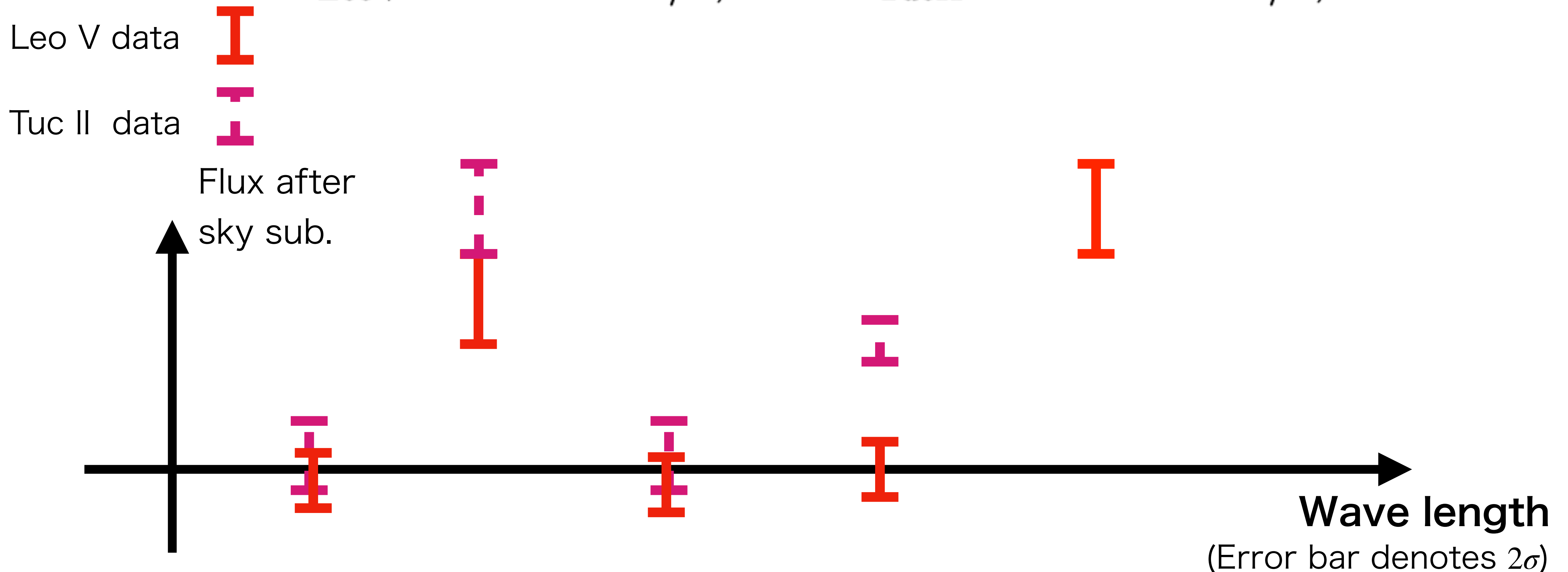
Analysis with Doppler Shift: Earth frame

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

Radial velocities of the dSphs are much larger than the resolution of WINERED

Simbad, Inger et al 0002110

$$v_{\text{LeoV}} \approx 173.3 \text{ km/s, and } v_{\text{TucII}} \approx -129.1 \text{ km/s,}$$



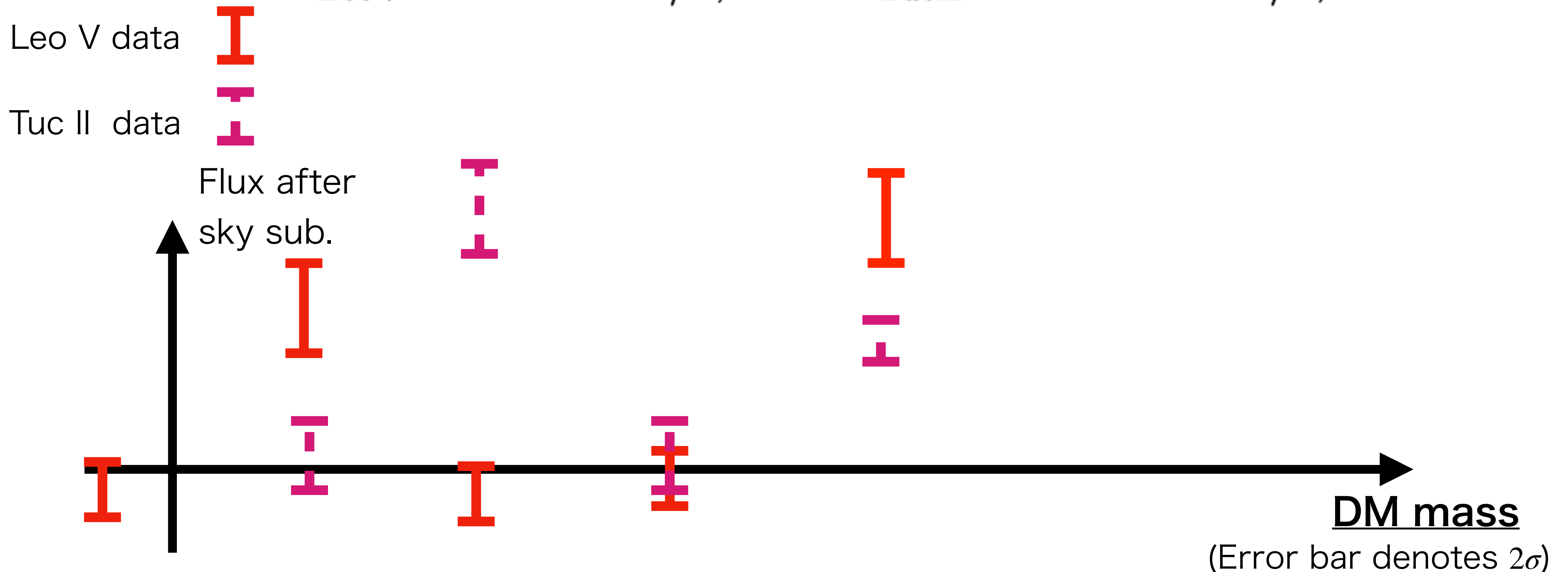
We move to dSphs' frames for DM limit.

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

Radial velocities of the dSphs are much larger than the resolution of WINERED

Simbad, Inger et al 0002110

$$v_{\text{LeoV}} \approx 173.3 \text{ km/s, and } v_{\text{TucII}} \approx -129.1 \text{ km/s,}$$



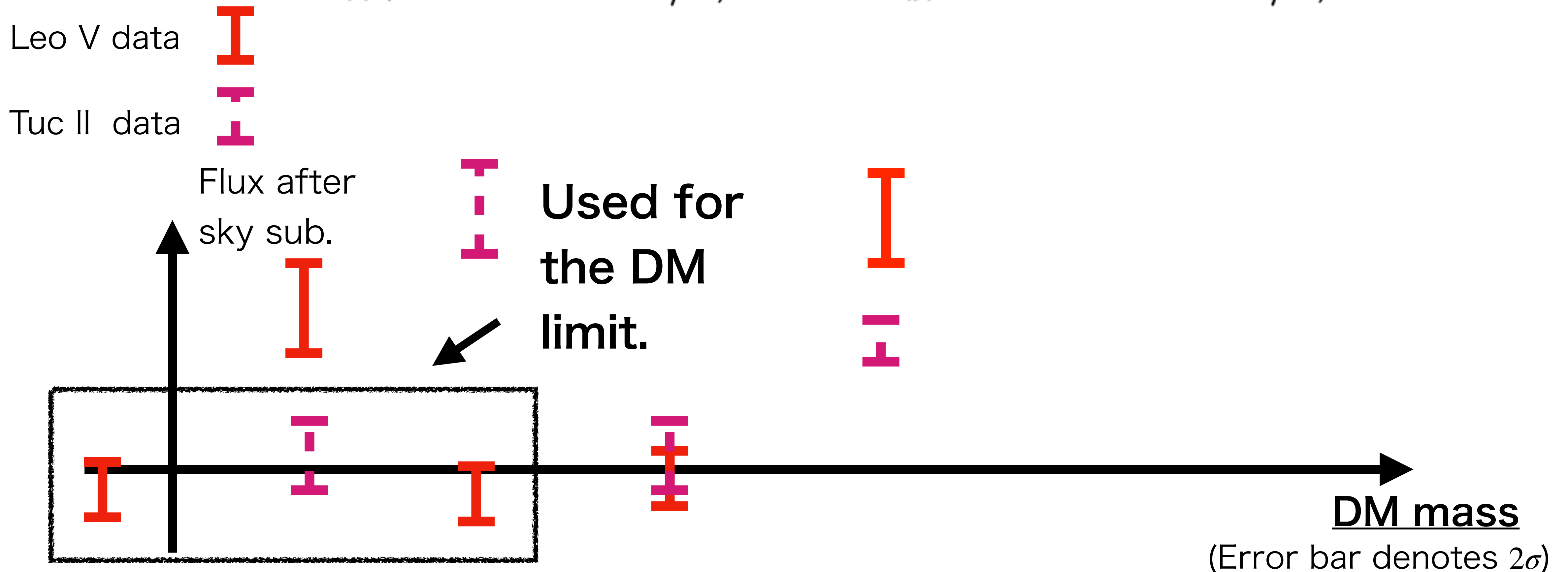
We move to dSphs' frames for DM limit.

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

Radial velocities of the dSphs are much larger than the resolution of WINERED

Simbad, Inger et al 0002110

$$v_{\text{LeoV}} \approx 173.3 \text{ km/s, and } v_{\text{TucII}} \approx -129.1 \text{ km/s,}$$



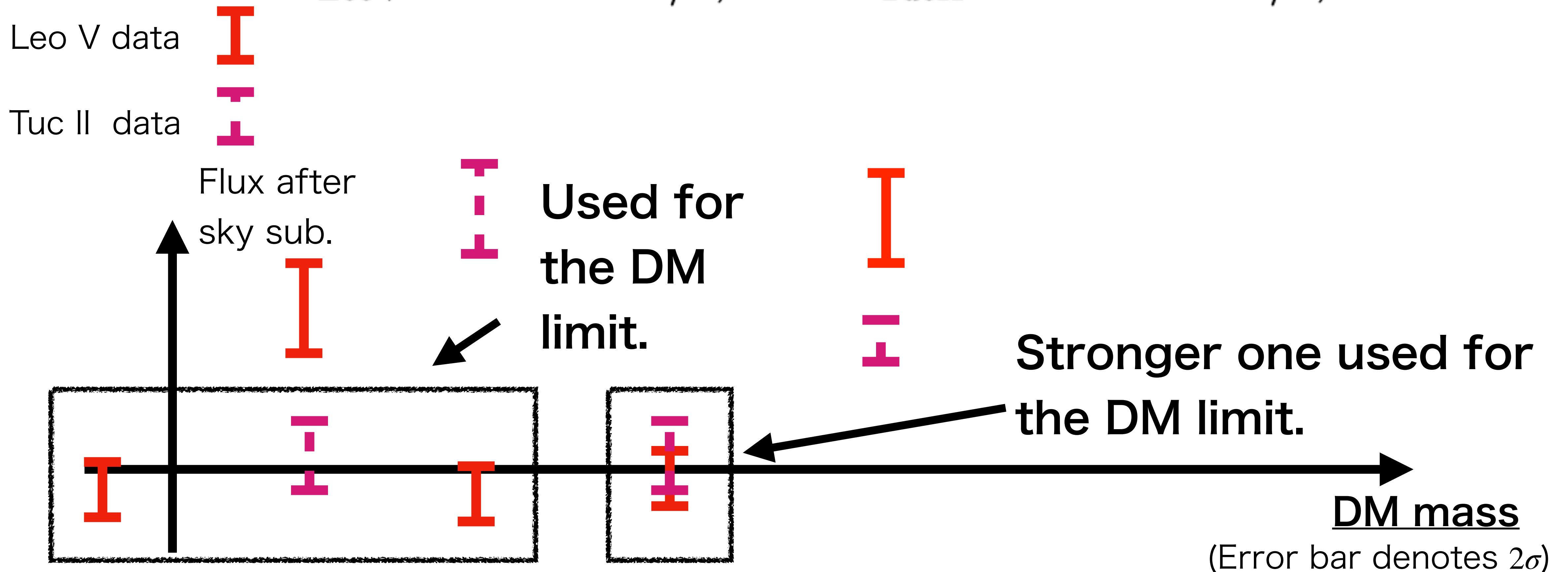
We move to dSphs' frames for DM limit.

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

Radial velocities of the dSphs are much larger than the resolution of WINERED

Simbad, Inger et al 0002110

$$v_{\text{LeoV}} \approx 173.3 \text{ km/s, and } v_{\text{TucII}} \approx -129.1 \text{ km/s,}$$



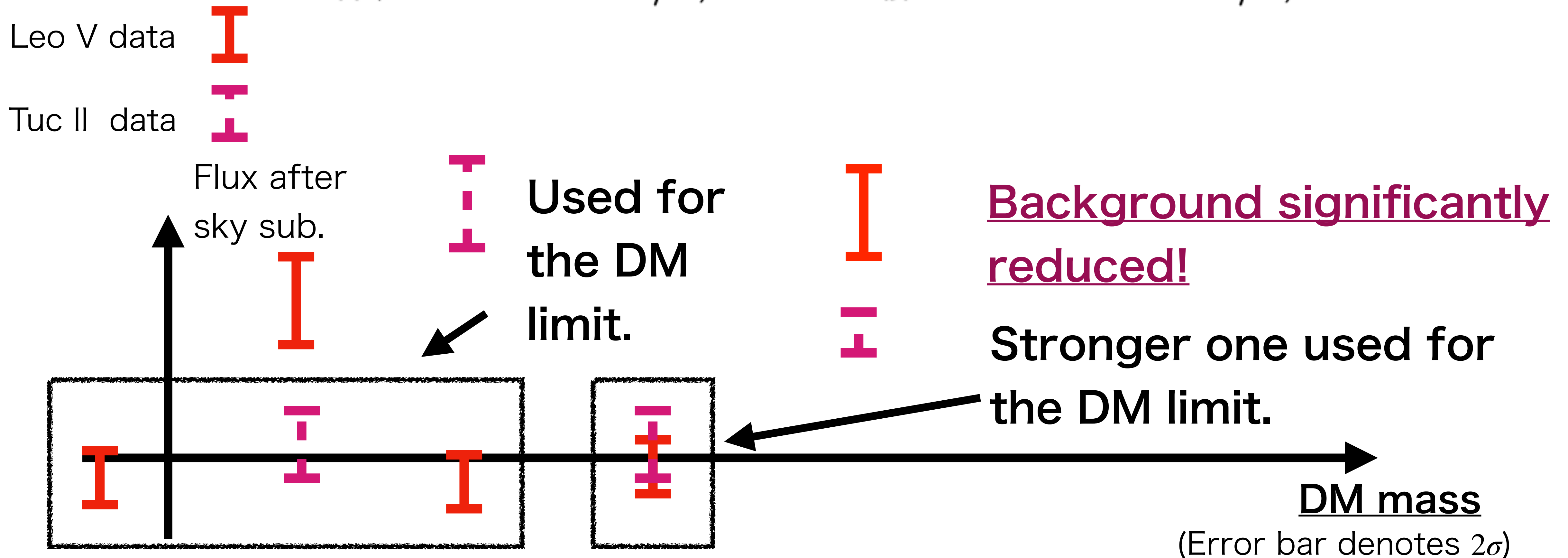
We move to dSphs' frames for DM limit.

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

Radial velocities of the dSphs are much larger than the resolution of WINERED

Simbad, Inger et al 0002110

$$v_{\text{LeoV}} \approx 173.3 \text{ km/s, and } v_{\text{TucII}} \approx -129.1 \text{ km/s,}$$



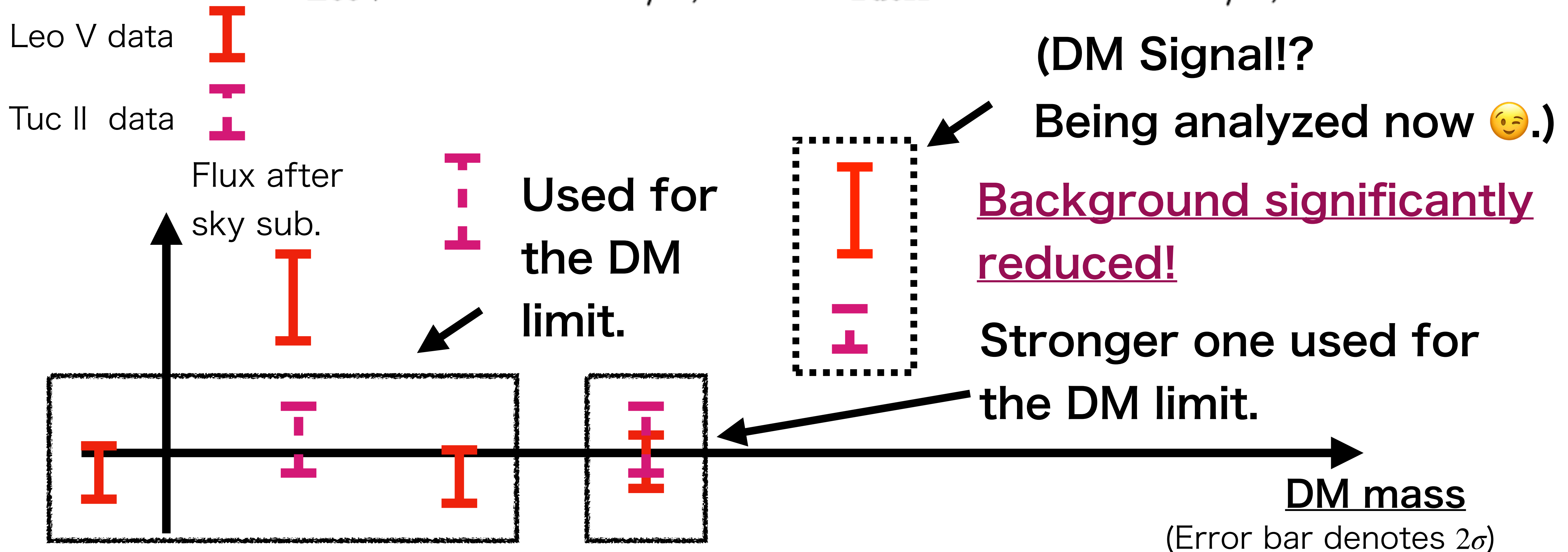
We move to dSphs' frames for DM limit.

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

Radial velocities of the dSphs are much larger than the resolution of WINERED

Simbad, Inger et al 0002110

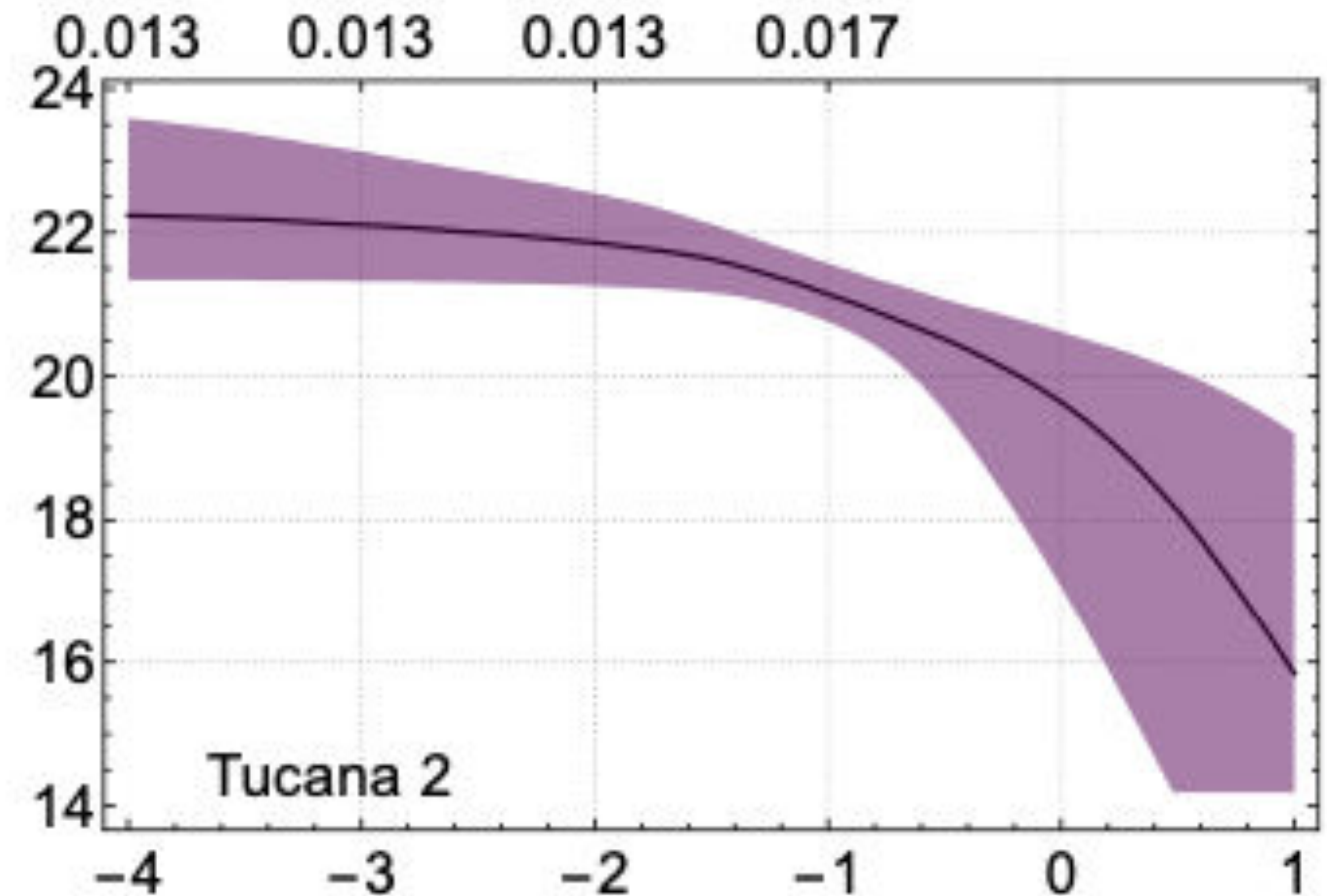
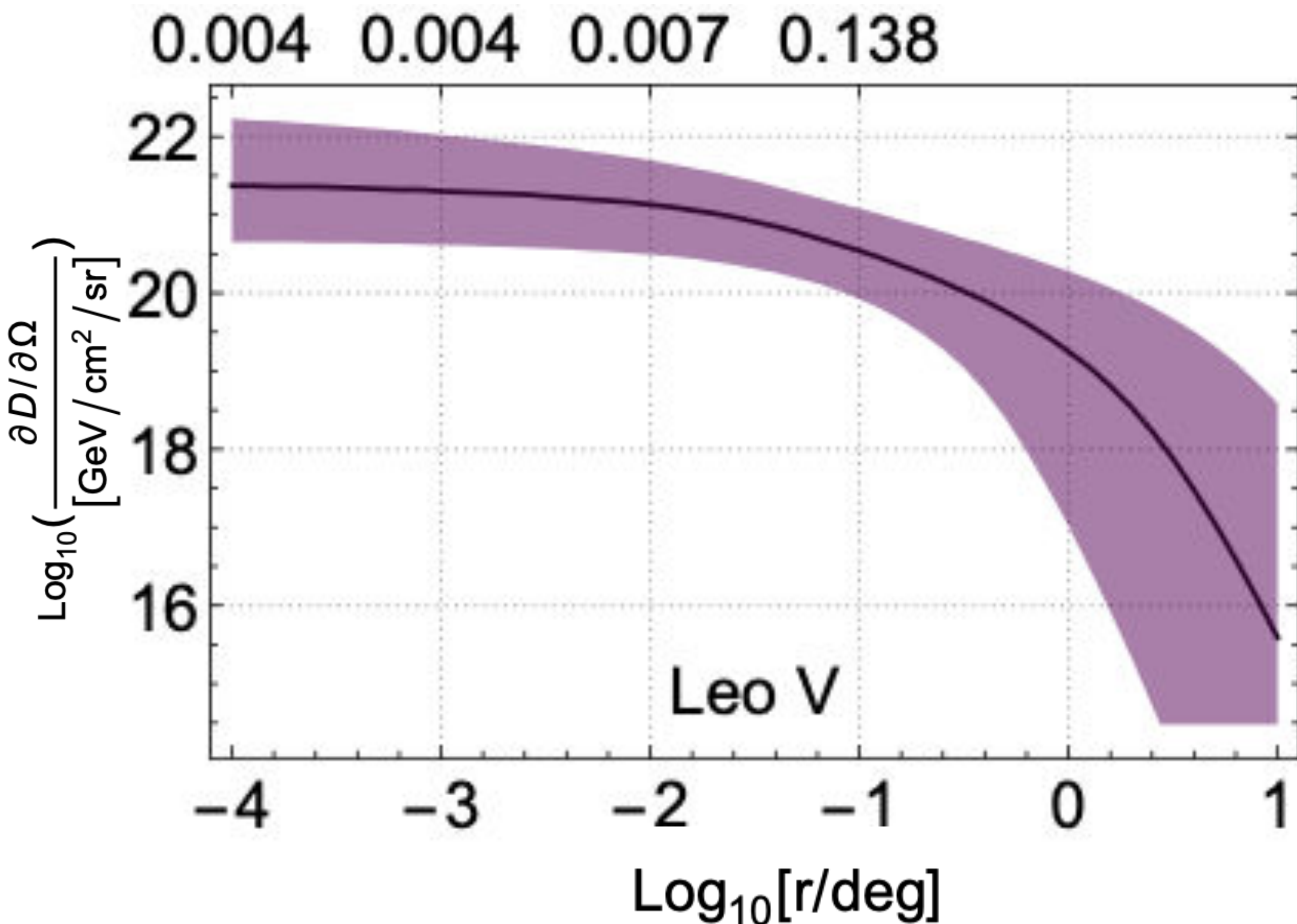
$$v_{\text{LeoV}} \approx 173.3 \text{ km/s, and } v_{\text{TucII}} \approx -129.1 \text{ km/s,}$$



We use differential D-factor of dSphs at around the center

This gives O(10) enhancement of flux compared with using typical value

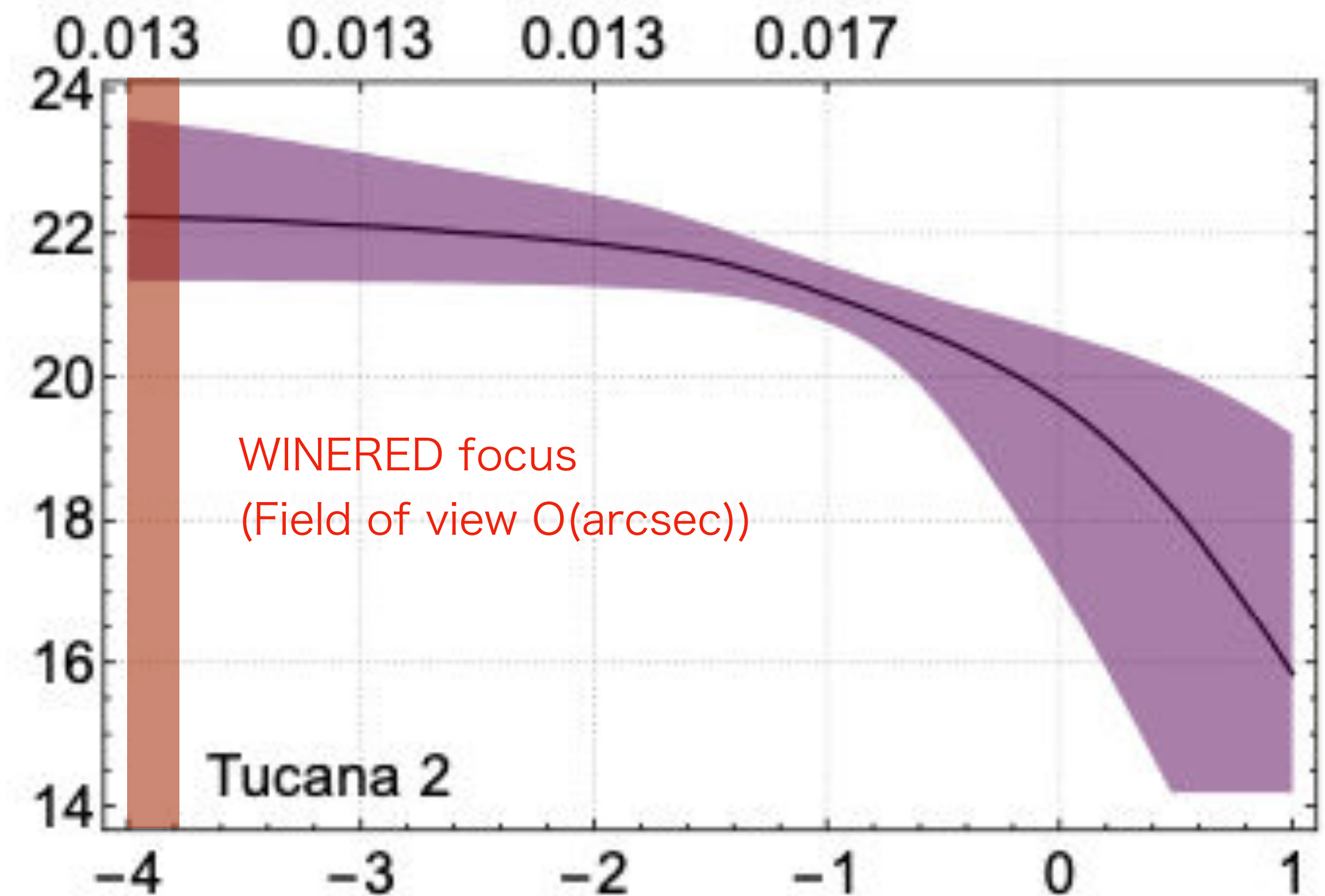
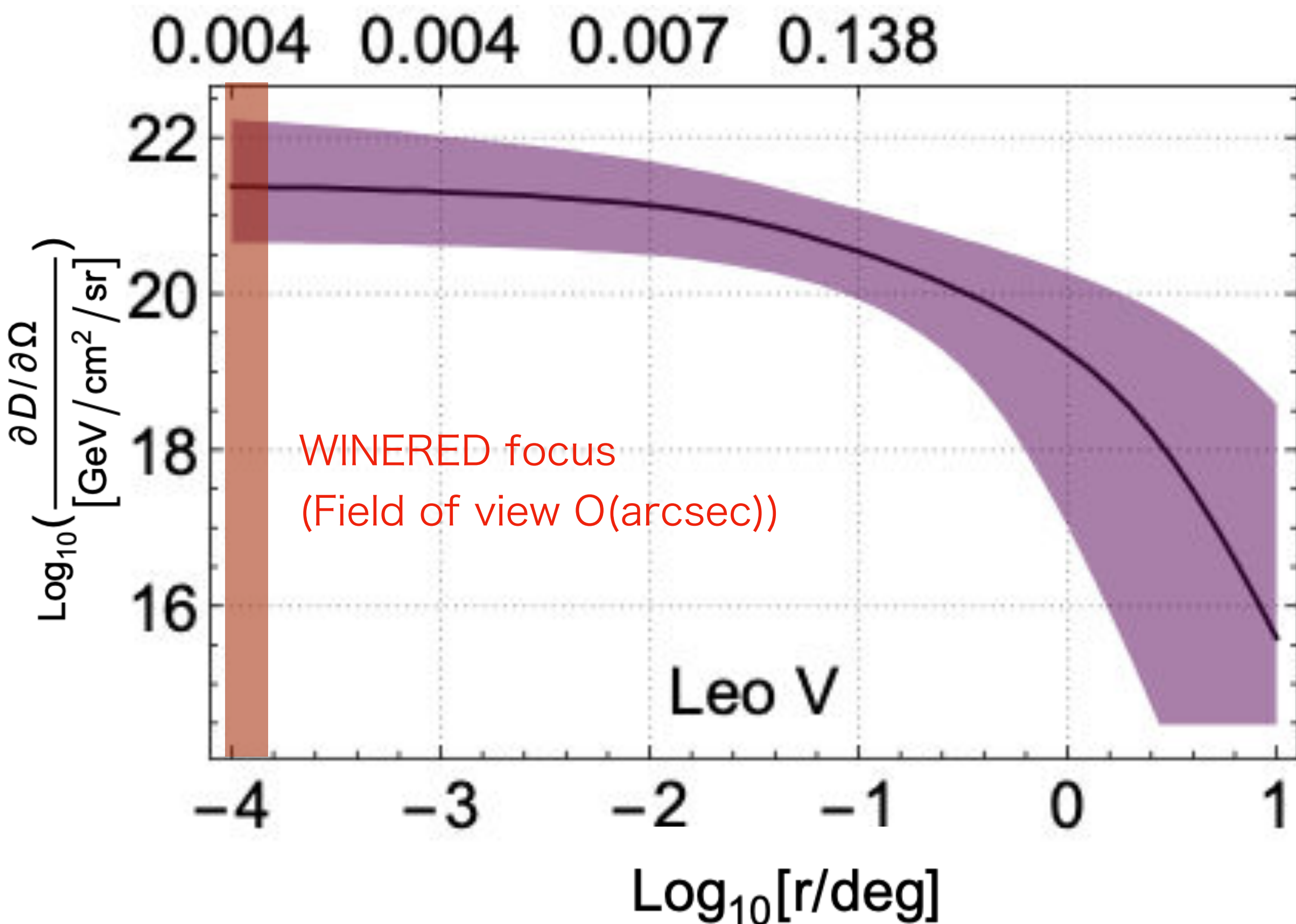
WY, Hayashi, 2305.13415
(See also Hayashi et al 2007.13780, 2206.02821)



We use differential D-factor of dSphs at around the center

This gives O(10) enhancement of flux compared with using typical value

WY, Hayashi, 2305.13415
(See also Hayashi et al 2007.13780, 2206.02821)



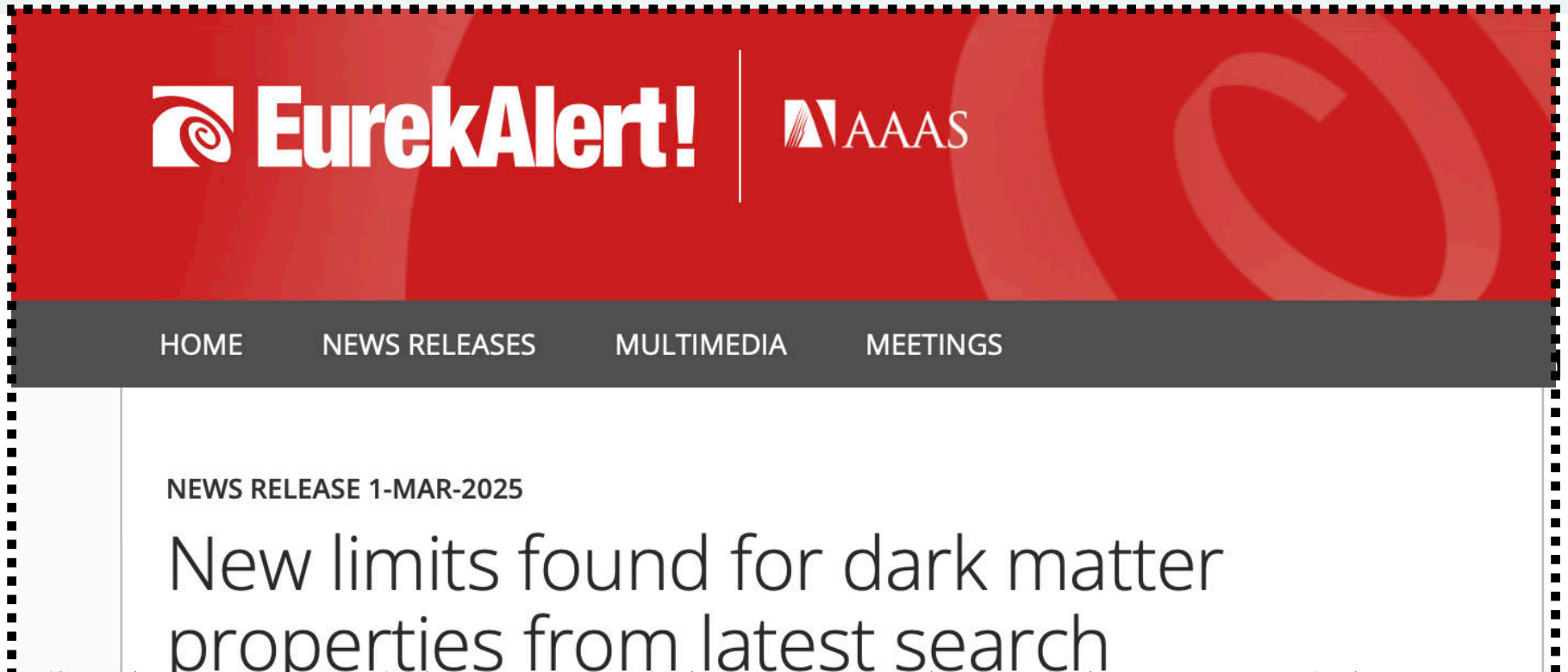
Experimental result: 4hrs obs by WINERED

2025.02.14

【研究発表】わずか4時間で寿命下限の世界最高感度更新! 高分散赤外線分光技術によるダークマター探索実験に成功

報道発表

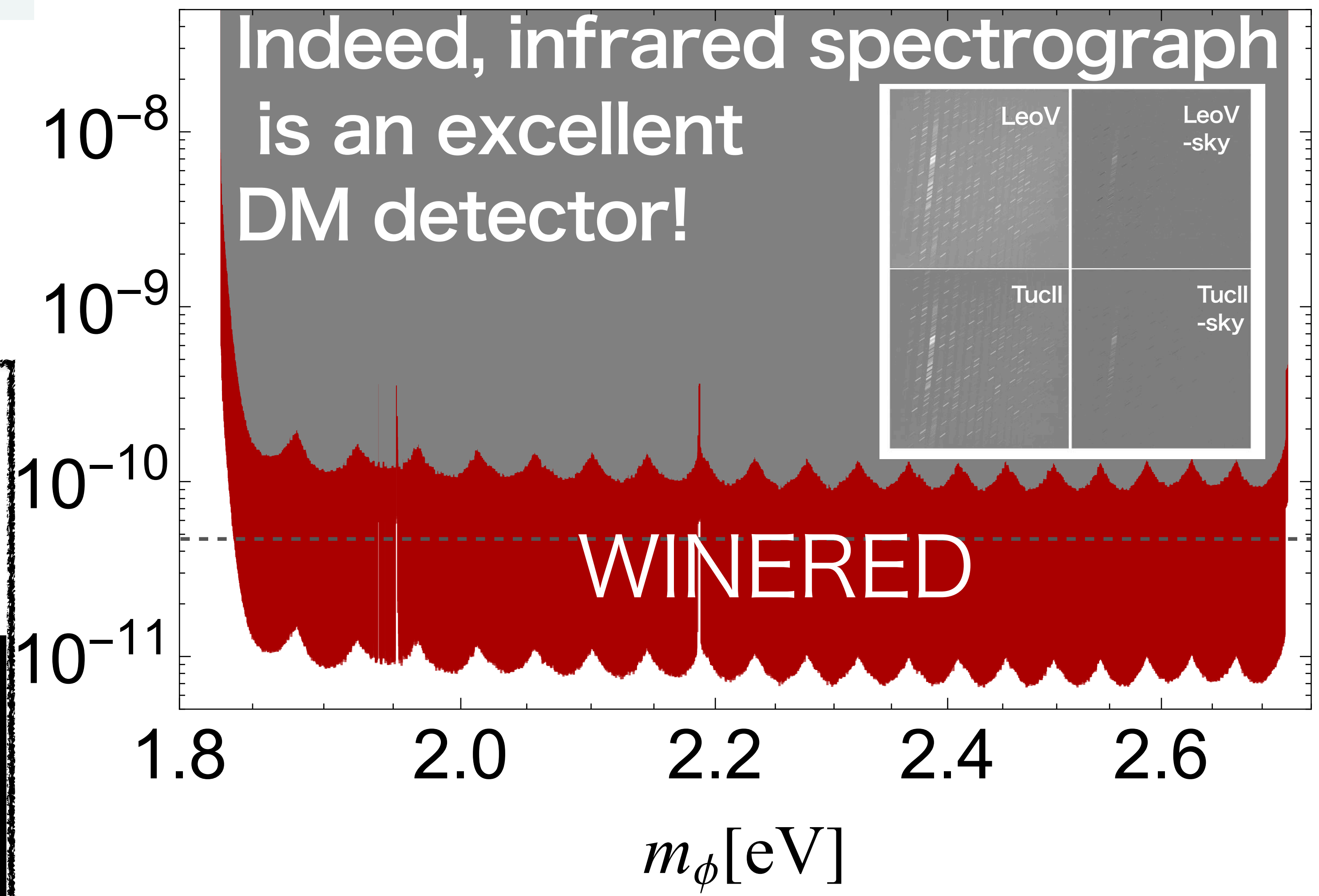
WY, Ikeda, Bessho, Kobayashi+WINERED team, 2402.07976



1~ 113 114 115 最新

ダークマターの寿命はとんでもなく長い? 高精度な近赤外分光器を用いた観測から明らかになった衝撃の事実とは

【研究って楽しい・ダークマター後編】わずか4時間で世界記録を作れた背後の工夫とは



The background of the slide is a deep space image showing a vast field of galaxies and stars. The galaxies are mostly yellowish-white, appearing as distant, glowing clouds. There are also several bright, blue-white stars scattered throughout the field. The overall color palette is dark blue and black, with the light from the galaxies and stars providing the primary illumination.

・3-2. eVダークマターの未来

・ -超高感度に向けて-

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かしい。競争率高い。
時間制限がシビア。
(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。



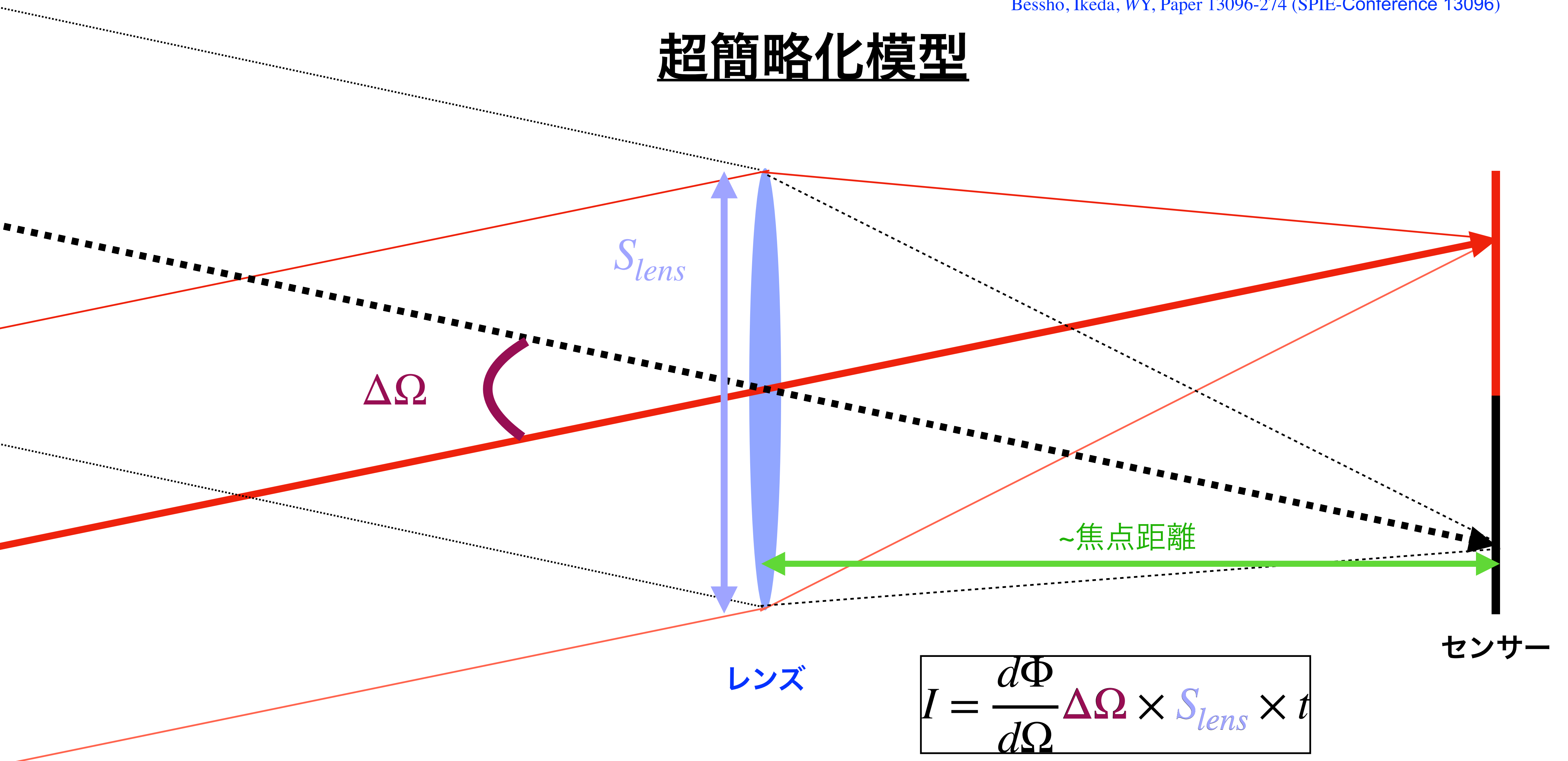
DRAGON BALL Z, A. Toriyama

eVダークマター特化分光器を開発しちゃえ!

• 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)

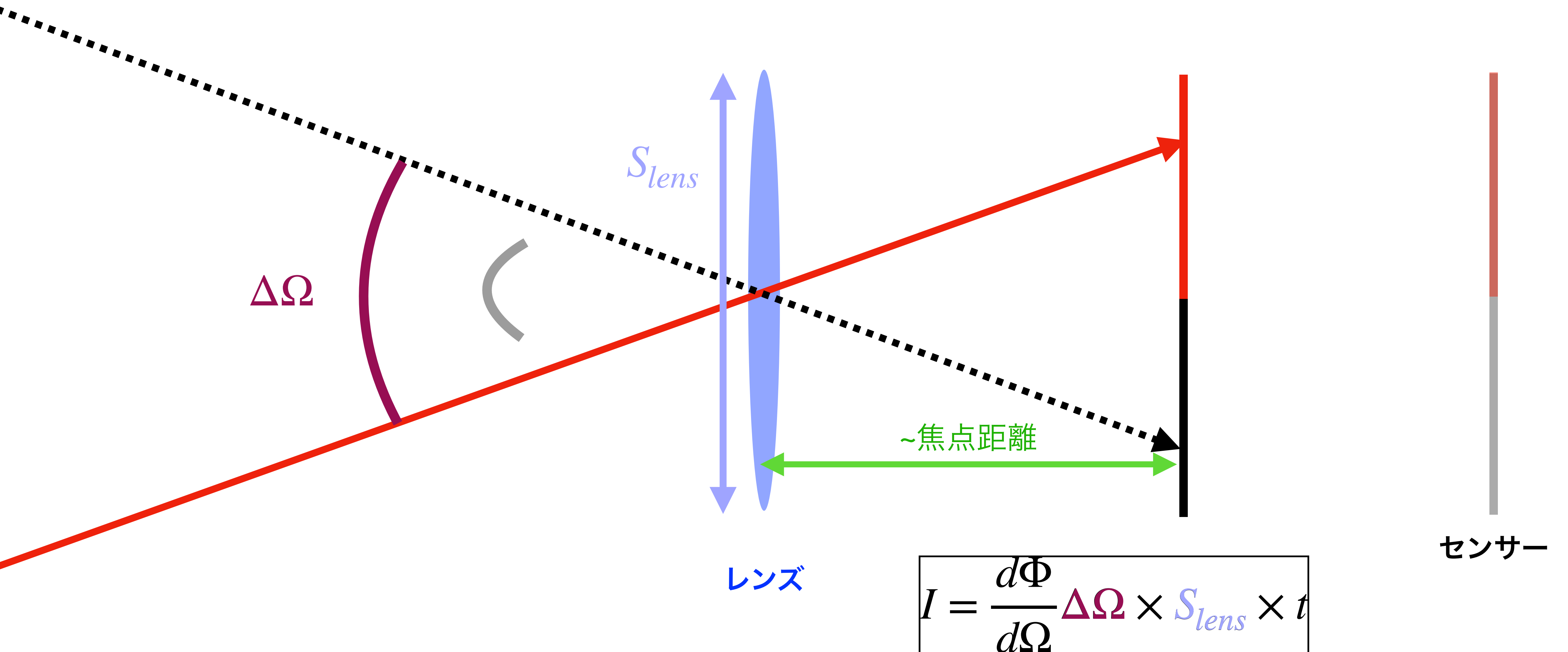
超簡略化模型



• 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)

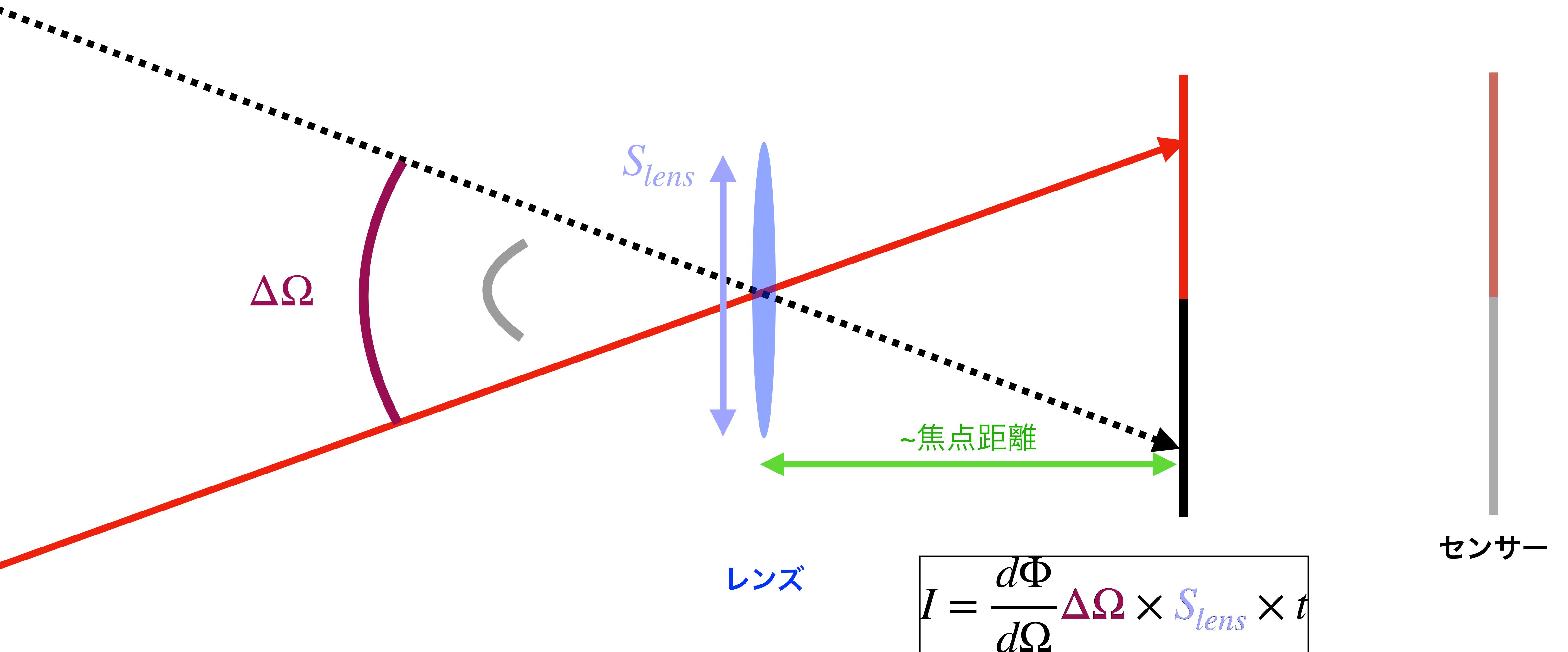
焦点距離 ↘ 空間分解能 ↘ 視野 ↗ ∴ 明るさ ↗ (光源の角度依存性がない場合)



• 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)

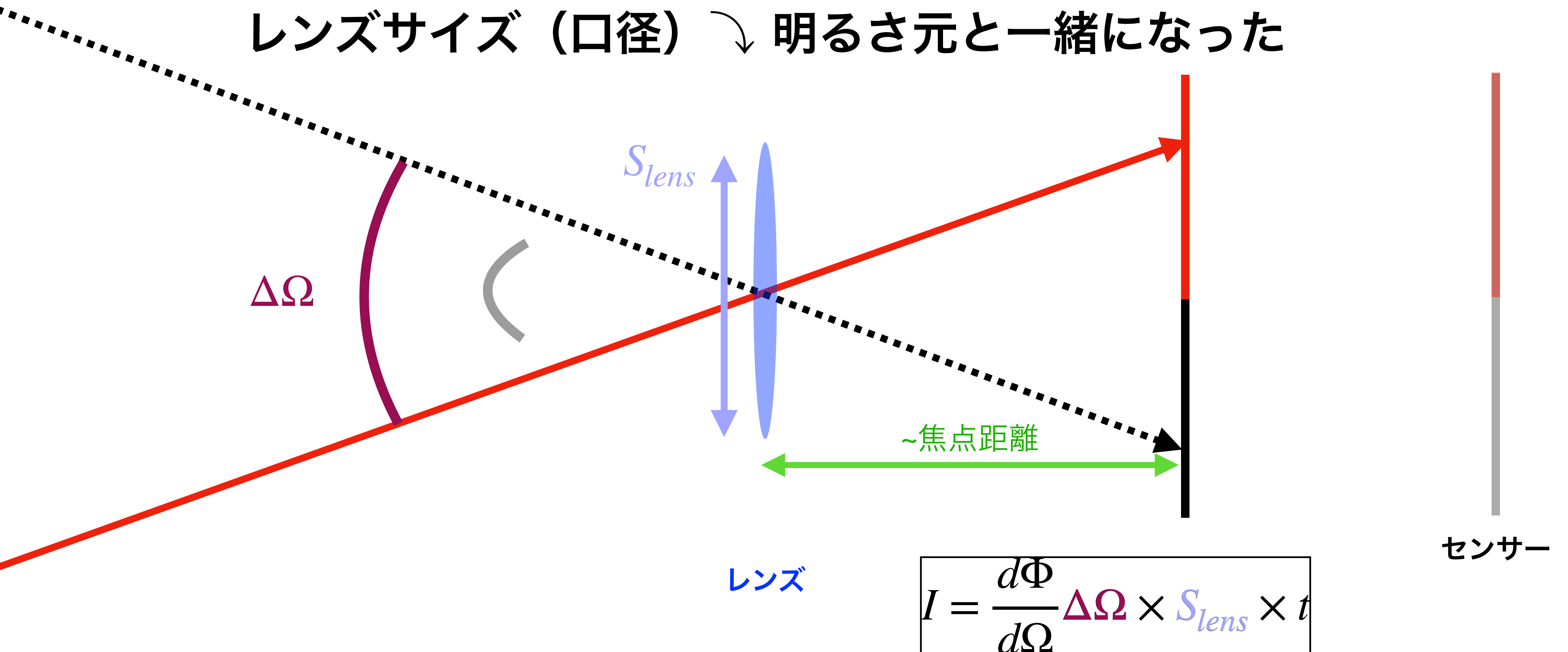


• 光学系の空間分解能と明るさと大きさ

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

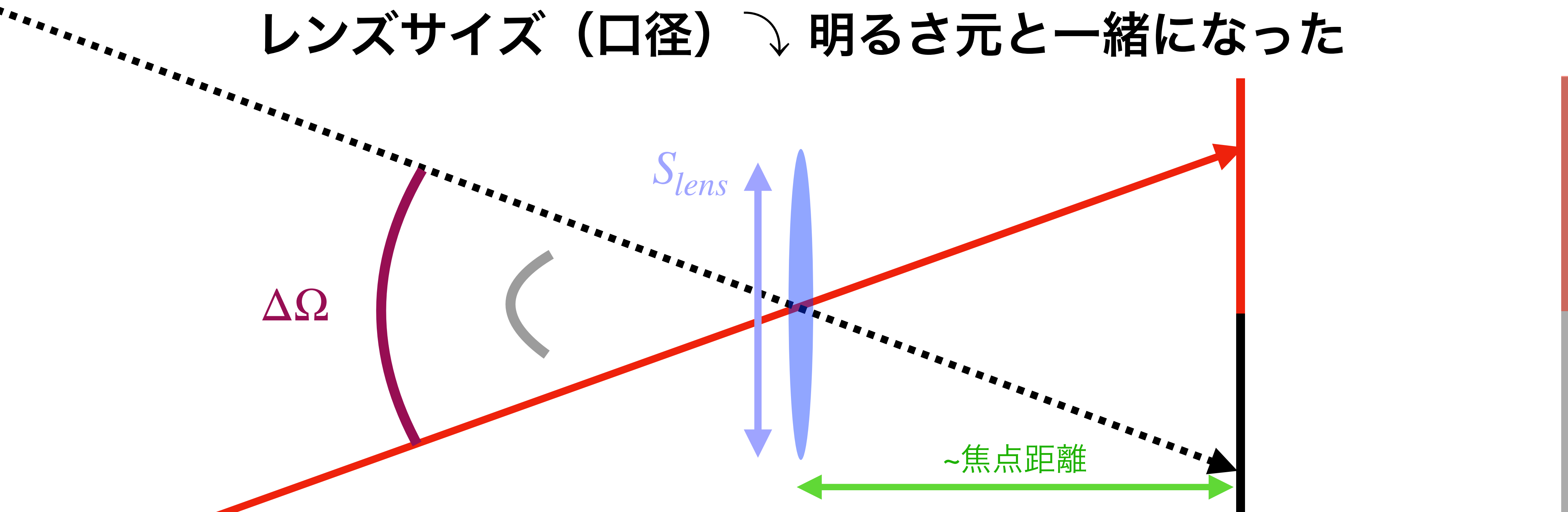


• 光学系の空間分解能と明るさと大きさ

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

焦点距離 ↘ 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



明るさが一緒のよりコンパクトな光学系ができた！！！！

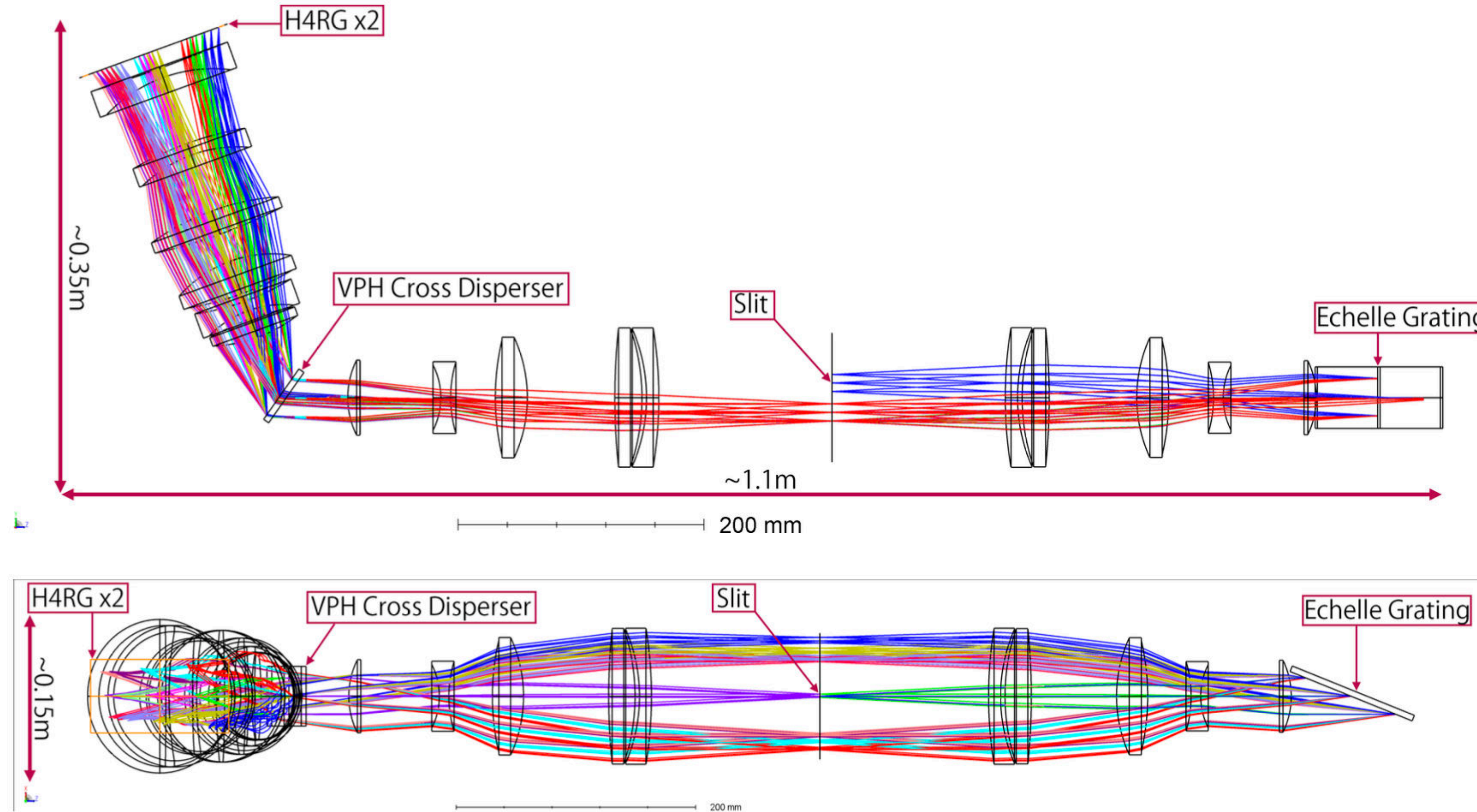
レンズ

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

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

赤外分光で探るeVダークマター第3形態

(ここからは広めないでください, 写真, SNS NG)

まとめ

- ・究極の物理法則の解明まであと少し。
宇宙論が重要。
- ・ダークマターの正体が鍵？ $\because T_{\text{eq}}^{\text{SM}} \sim \text{eV}$
般はeV DMと考えてる。 $\because \mu_B^{\text{SM}}[T = T_{\text{sph}}] \sim \text{eV}$
- ・赤外線分光が強い。
ダークマター探索特化の分光器を。