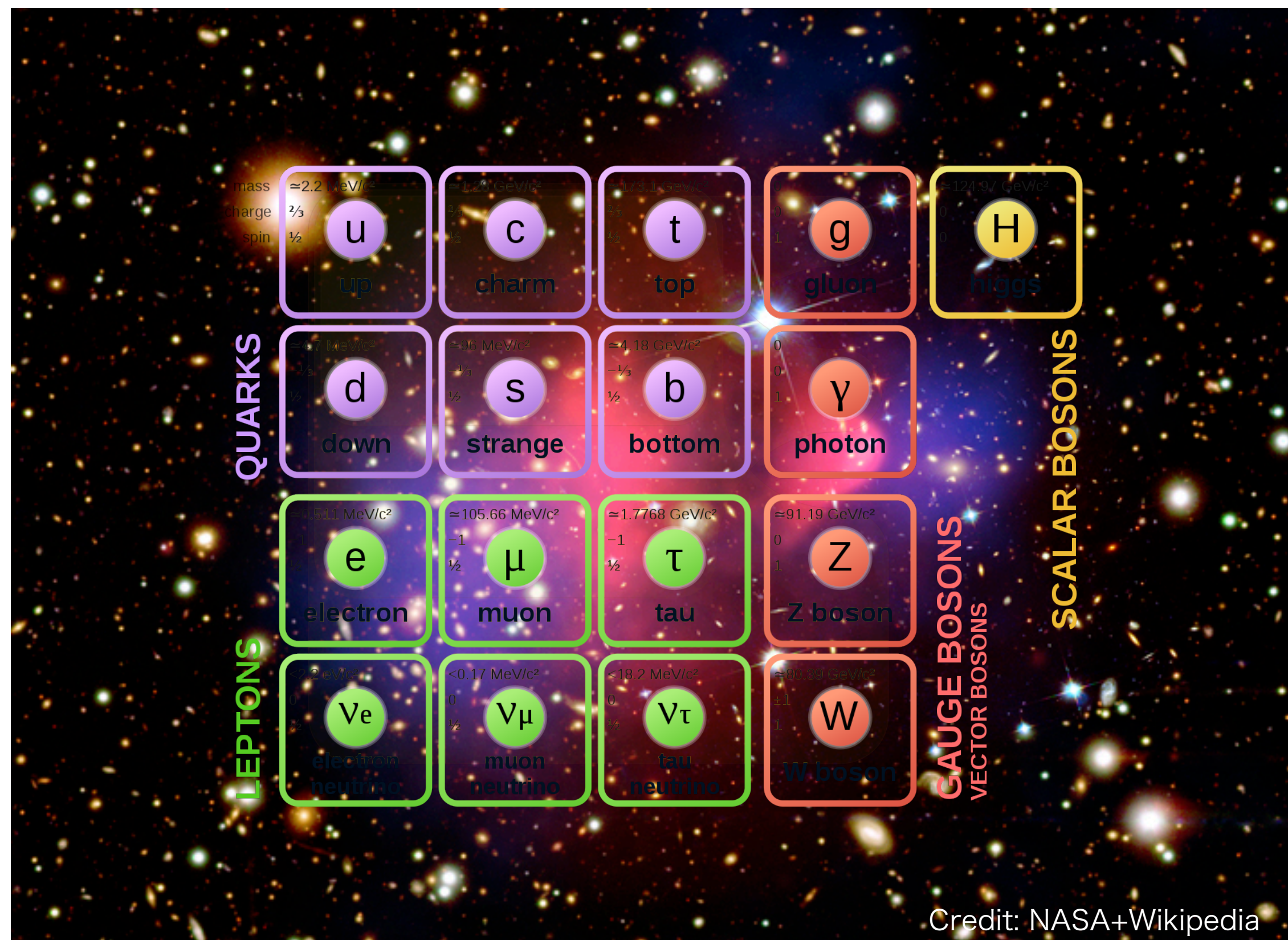


eV ダークマターの過去・今・未来



東京女子大学



TOKYO METROPOLITAN UNIVERSITY

東京都立大学

殷文 (素粒子理論研究室)

@2024/7/19, 東京女子大セミナー

今日のプラン

- 1. 素粒子理論とは
- 2. eVダークマターの過去, -ダークマターとは何か-
- 3. eVダークマターの今, -理論と実験-
- 4. eVダークマターの未来, -超絶感度に向けて-
- 5. まとめ

注意点：単位について

- エネルギーの単位としてeV, keV, MeV, GeV, TeVなどを使うことがあります

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

- $E = mc^2$ は前提とします

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

- 光速はcは1とすることがあります、 $c = 1$.

$$1\text{GeV} \sim \text{中性子質量} \sim 2000 \times \text{電子質量}$$

• 1. 素粒子理論とは

	I	II	III		
質量 電荷 スピン	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u アップ	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c チャーム	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t トップ	0 0 1 g グルーオン	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H ヒッグス粒子
クォーク	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d ダウン	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s ストレンジ	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b ボトム	0 0 1 γ 光子	スカラー粒子
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e 電子	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ ミュー粒子	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ タウ粒子	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Zボソン	
レプトン	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e 電子ニュートリノ	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ ミューニュートリノ	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ タウニュートリノ	$\approx 80.433 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W Wボソン	ゲージ粒子 ベクトル粒子

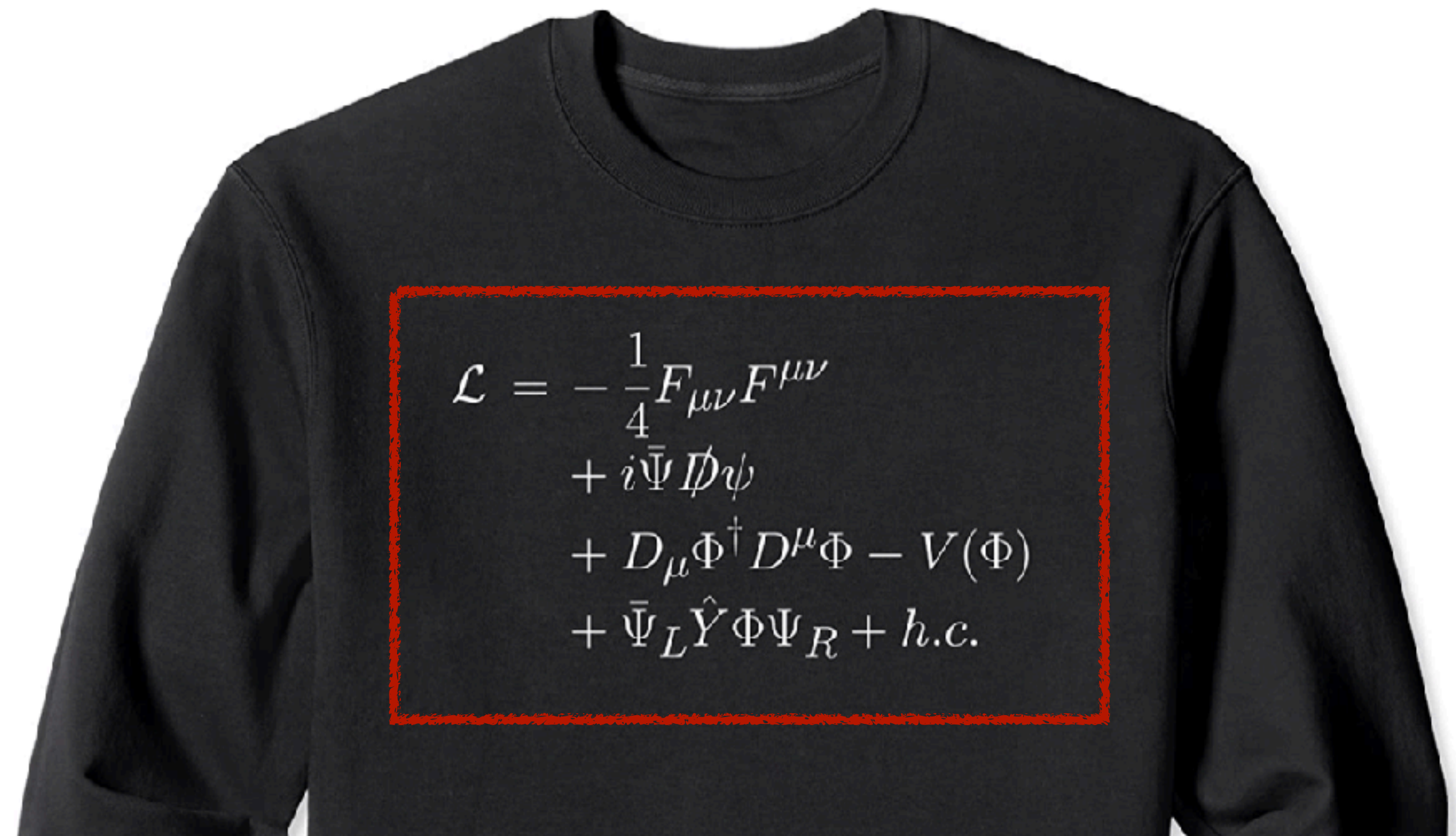
素粒子理論：素粒子の性質(質量、スピン、結合)=根本法則

素粒子標準模型=

素粒子(最もミクロな粒子)の性質 + 場の量子論 (量子力学+特殊相対性理論)

	mass charge spin ≈2.2 MeV/c ² 2/3 1/2 u up	≈1.28 GeV/c ² 2/3 1/2 c charm	≈173.1 GeV/c ² 2/3 1/2 t top	0 0 1 g gluon	≈124.97 GeV/c ² 0 0 H higgs
QUARKS	≈4.7 MeV/c ² -1/3 1/2 d down	≈96 MeV/c ² -1/3 1/2 s strange	≈4.18 GeV/c ² -1/3 1/2 b bottom	0 0 1 γ photon	
	≈0.511 MeV/c ² -1 1/2 e electron	≈105.66 MeV/c ² -1 1/2 μ muon	≈1.7768 GeV/c ² -1 1/2 τ tau	≈91.19 GeV/c ² 0 1 Z Z boson	
LEPTONS	<2.2 eV/c ² 0 1/2 ν_e electron neutrino	<0.17 MeV/c ² 0 1/2 ν_μ muon neutrino	<18.2 MeV/c ² 0 1/2 ν_τ tau neutrino	≈80.39 GeV/c ² ±1 1 W W boson	
				GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS	SCALAR BOSONS

Wikipedia



<https://www.amazon.co.jp/物理数学量子粒子天文学-ラグランジアン時空場の量子論標準模型-トレーナー/dp/B08X3SZS22>

素粒子理論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。

標準模型素粒子の紹介-素粒子は回る

スピン

(固有角運動量)

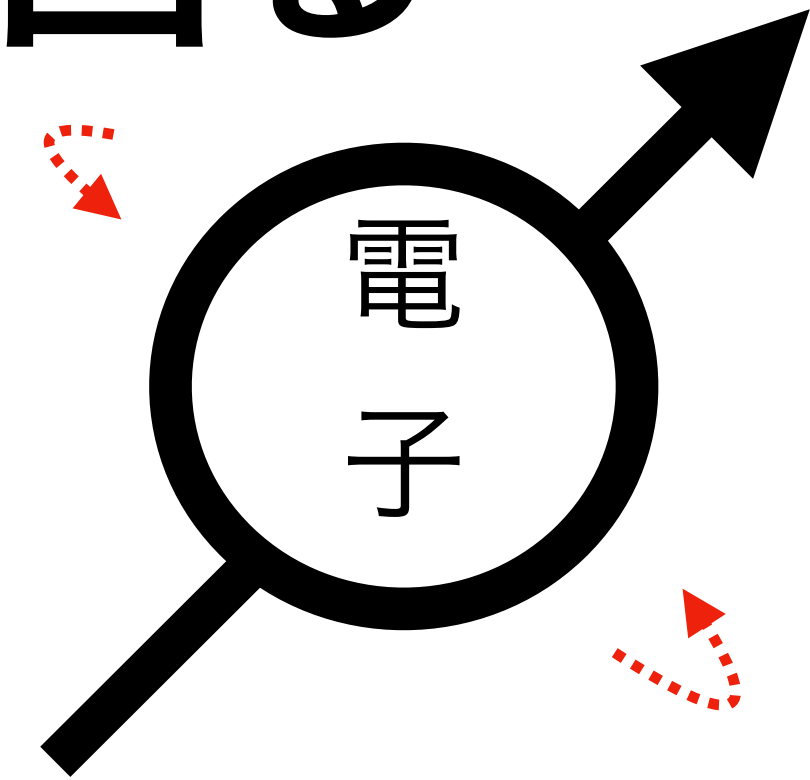
世代

1/2,

1,

0

	I	II	III		
質量	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
電荷	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
スピン	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u アップ	c チャーム	t トップ	g グルーオン	H ヒッグス粒子
クォーク	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム	γ 光子	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e 電子	μ ミュー粒子	τ タウ粒子	Z Zボソン	
ニュートリノ	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.433 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	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	W Wボソン	



スピン半整数: フェルミオン
 同じ状態に複数存在できない。
 (パウリの排他率)

スピン 整数: ボゾン
 同じ状態にたくさんいられる。
 なんならいたい。
 (ボーズ増幅)

質量、結合も固有性質。

標準模型素粒子の紹介-素粒子は回る

スピン

(固有角運動量)

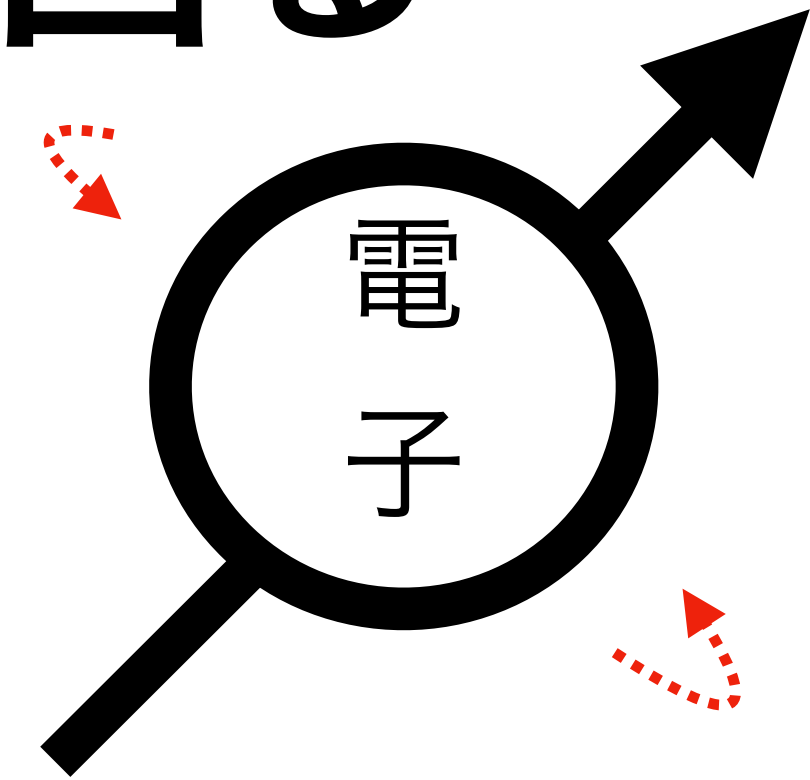
世代

1/2,

1,

0

	I	II	III		
質量	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
電荷	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
スピン	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u アップ	c チャーム	t トップ	g 強い力	H ヒッグス粒子
クォーク	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム	γ 光子	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e 電子	μ ミュー粒子	τ タウ粒子	Z Zボソン	
ニュートリノ	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.433 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	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	W Wボソン	



スピン半整数: フェルミオン
 同じ状態に複数存在できない。
 (パウリの排他率)

スピン 整数: ボゾン
 同じ状態にたくさんいられる。
 なんならいたい。
 (ボーズ増幅)

質量、結合も固有性質。

標準模型素粒子の紹介-素粒子は回る

スピン

(固有角運動量)

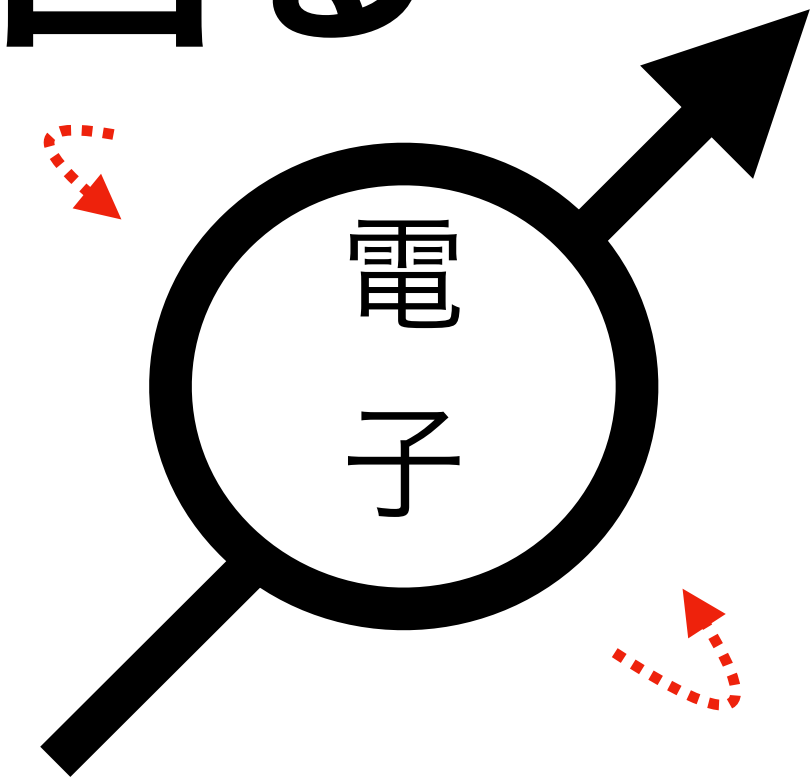
世代

1/2,

1,

0

	I	II	III		
質量	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
電荷	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
スピン	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u アップ	c チャーム	t トップ	g 強い力	H ヒッグス粒子
クォーク	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム	γ 電磁気	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e 電子	μ ミュー粒子	τ タウ粒子	Z Zボソン	
ニュートリノ	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.433 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	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	W Wボソン	



スピン半整数: フェルミオン
 同じ状態に複数存在できない。
 (パウリの排他率)

スピン 整数: ボゾン
 同じ状態にたくさんいられる。
 なんならいたい。
 (ボーズ増幅)

質量、結合も固有性質。

標準模型素粒子の紹介-素粒子は回る

スピン

(固有角運動量)

世代

1/2,

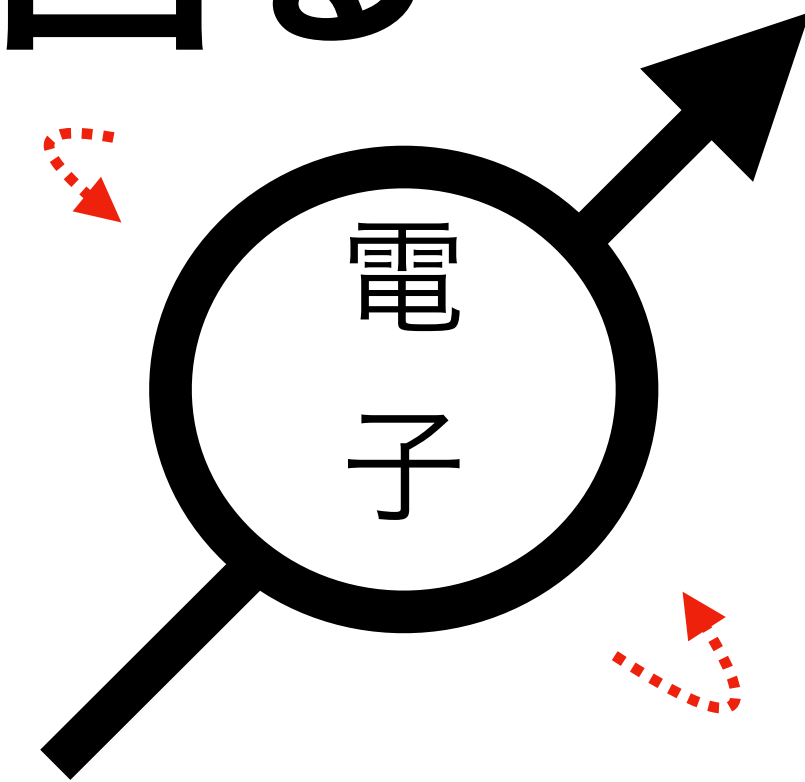
1,

0

	I	II	III		
質量	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
電荷	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
スピン	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u アップ	c チャーム	t トップ	g 強い力	H ヒッグス粒子
クォーク	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム	γ 電磁気	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e 電子	μ ミュー粒子	τ タウ粒子	Z 弱い力	
ニュートリノ	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.433 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	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	W 弱い力	

スカラー粒子

ゲージ粒子
ベクトル粒子



スピン半整数: フェルミオン
同じ状態に複数存在できない。
(パウリの排他率)

スピン 整数: ボゾン
同じ状態にたくさんいられる。
なんならいたい。
(ボーズ増幅)

質量、結合も固有性質。

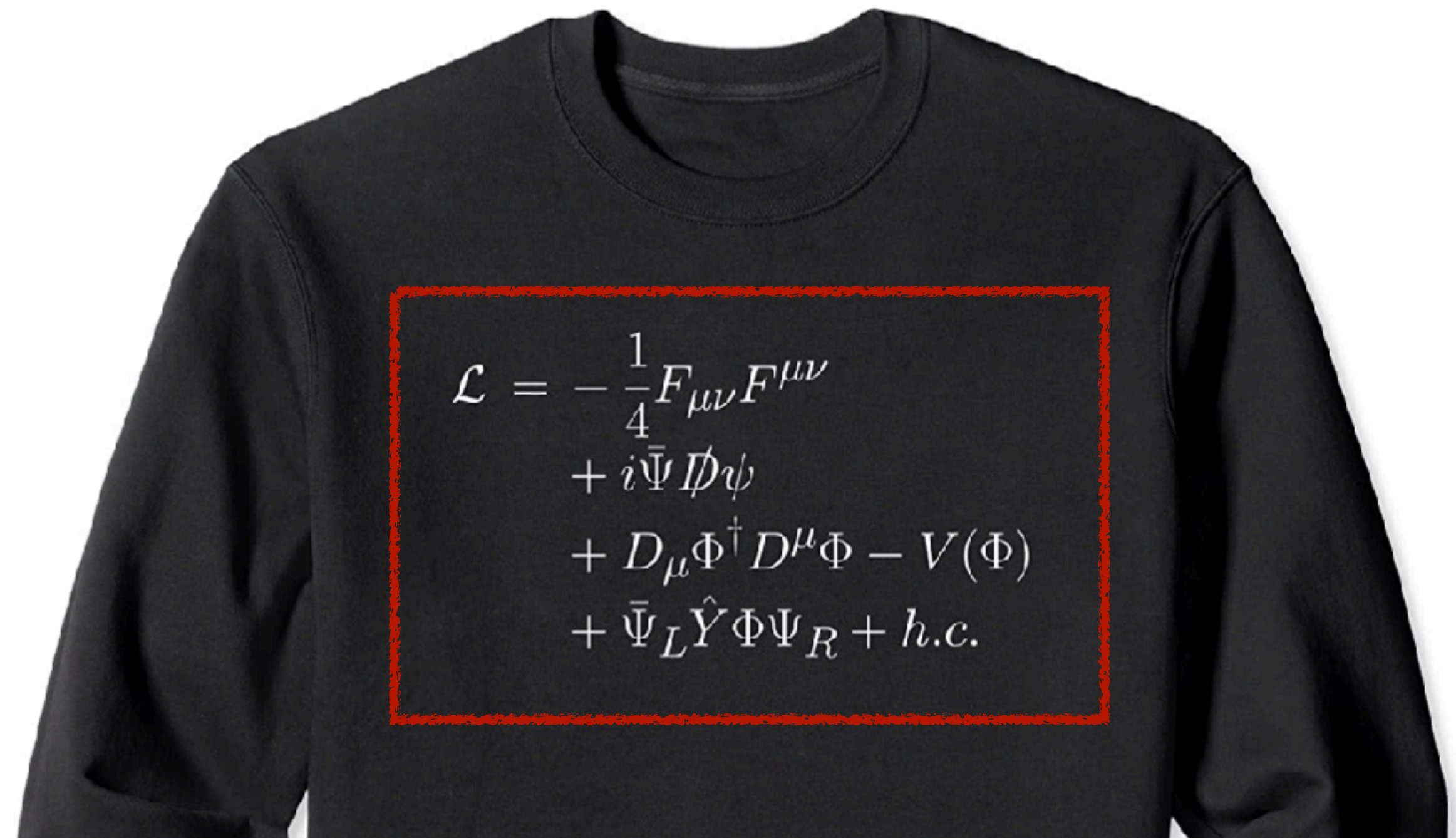
素粒子理論：素粒子の性質(質量、スピン、結合)=根本法則

素粒子標準模型=

素粒子(最もミクロな粒子)の性質 + 場の量子論 (量子力学+特殊相対性理論)

	mass $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ charge $2/3$ spin $1/2$ u up	mass $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ charge $2/3$ spin $1/2$ c charm	mass $\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ charge $2/3$ spin $1/2$ t top	mass 0 charge 0 spin 1 g gluon	mass $\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ charge 0 spin 0 H higgs
LEPTONS	mass $\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ charge $-1/3$ spin $1/2$ d down	mass $\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ charge $-1/3$ spin $1/2$ s strange	mass $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ charge $-1/3$ spin $1/2$ b bottom	mass 0 charge 0 spin 1 γ photon	SCALAR BOSONS
	mass $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $1/2$ e electron	mass $\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $1/2$ μ muon	mass $\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ charge -1 spin $1/2$ τ tau	mass $\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ charge 0 spin 1 Z Z boson	
	mass $< 2.2 \text{ eV}/c^2$ charge 0 spin $1/2$ ν_e electron neutrino	mass $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $1/2$ ν_μ muon neutrino	mass $< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $1/2$ ν_τ tau neutrino	mass $\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ charge ± 1 spin 1 W W boson	

Wikipedia



<https://www.amazon.co.jp/物理数学量子粒子天文学-ラグランジアン時空場の量子論標準模型-トレーナー/dp/B08X3SZS22>

素粒子理論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

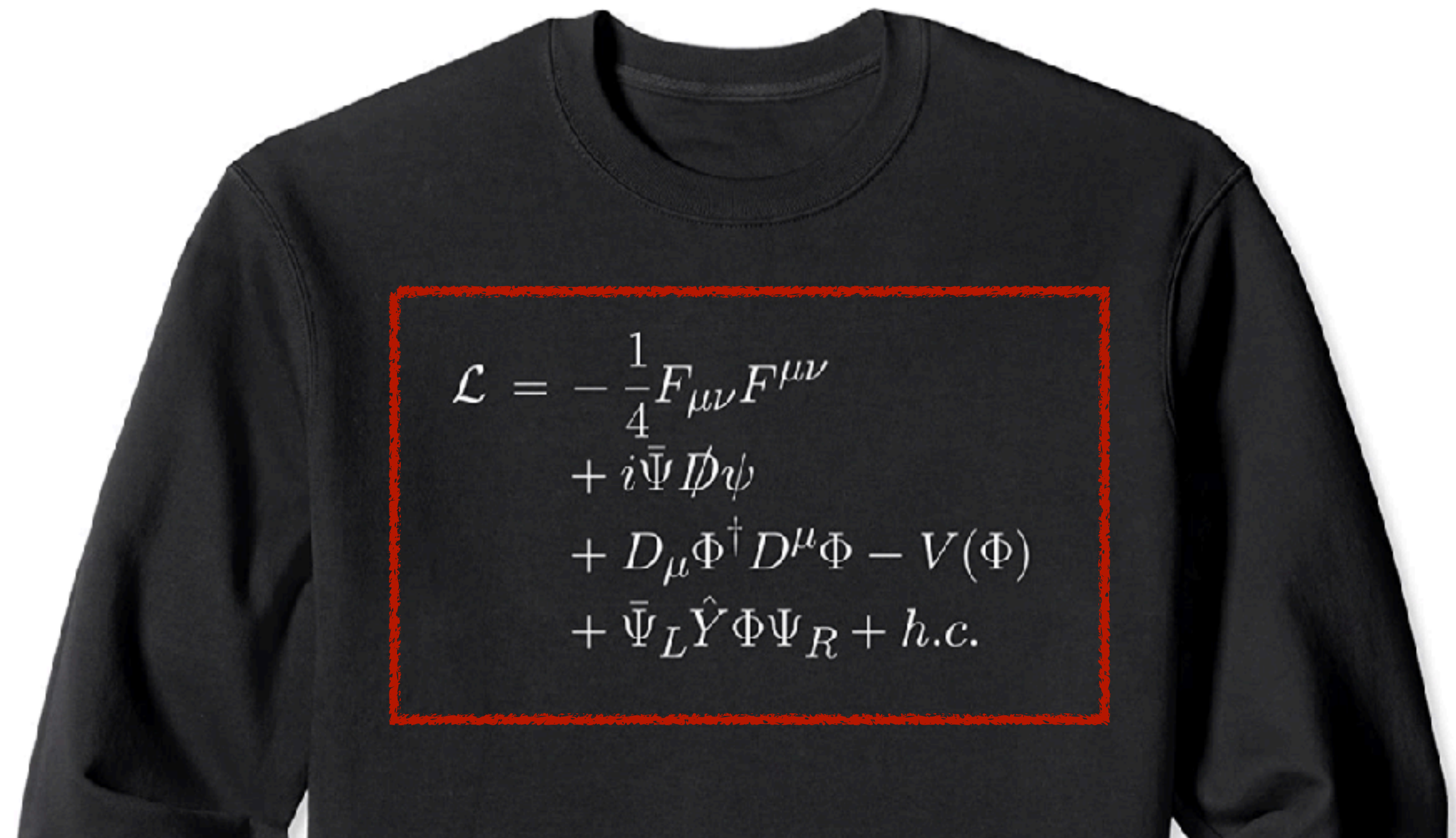
素粒子理論：素粒子の性質(質量、スピン、結合)=根本法則

素粒子標準模型=

素粒子(最もミクロな粒子)の性質 + 場の量子論 (量子力学+特殊相対性理論)

	mass $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ charge $2/3$ spin $1/2$ u up	mass $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ charge $2/3$ spin $1/2$ c charm	mass $\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ charge $2/3$ spin $1/2$ t top	mass 0 charge 0 spin 1 g gluon	mass $\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ charge 0 spin 0 H higgs
LEPTONS	mass $\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ charge $-1/3$ spin $1/2$ d down	mass $\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ charge $-1/3$ spin $1/2$ s strange	mass $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ charge $-1/3$ spin $1/2$ b bottom	mass 0 charge 0 spin 1 γ photon	SCALAR BOSONS
	mass $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $1/2$ e electron	mass $\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $1/2$ μ muon	mass $\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ charge -1 spin $1/2$ τ tau	mass $\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ charge 0 spin 1 Z Z boson	
	mass $< 2.2 \text{ eV}/c^2$ charge 0 spin $1/2$ ν_e electron neutrino	mass $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $1/2$ ν_μ muon neutrino	mass $< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $1/2$ ν_τ tau neutrino	mass $\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ charge ± 1 spin 1 W W boson	

Wikipedia



<https://www.amazon.co.jp/物理数学量子粒子天文学-ラグランジアン時空場の量子論標準模型-トレーナー/dp/B08X3SZS22>

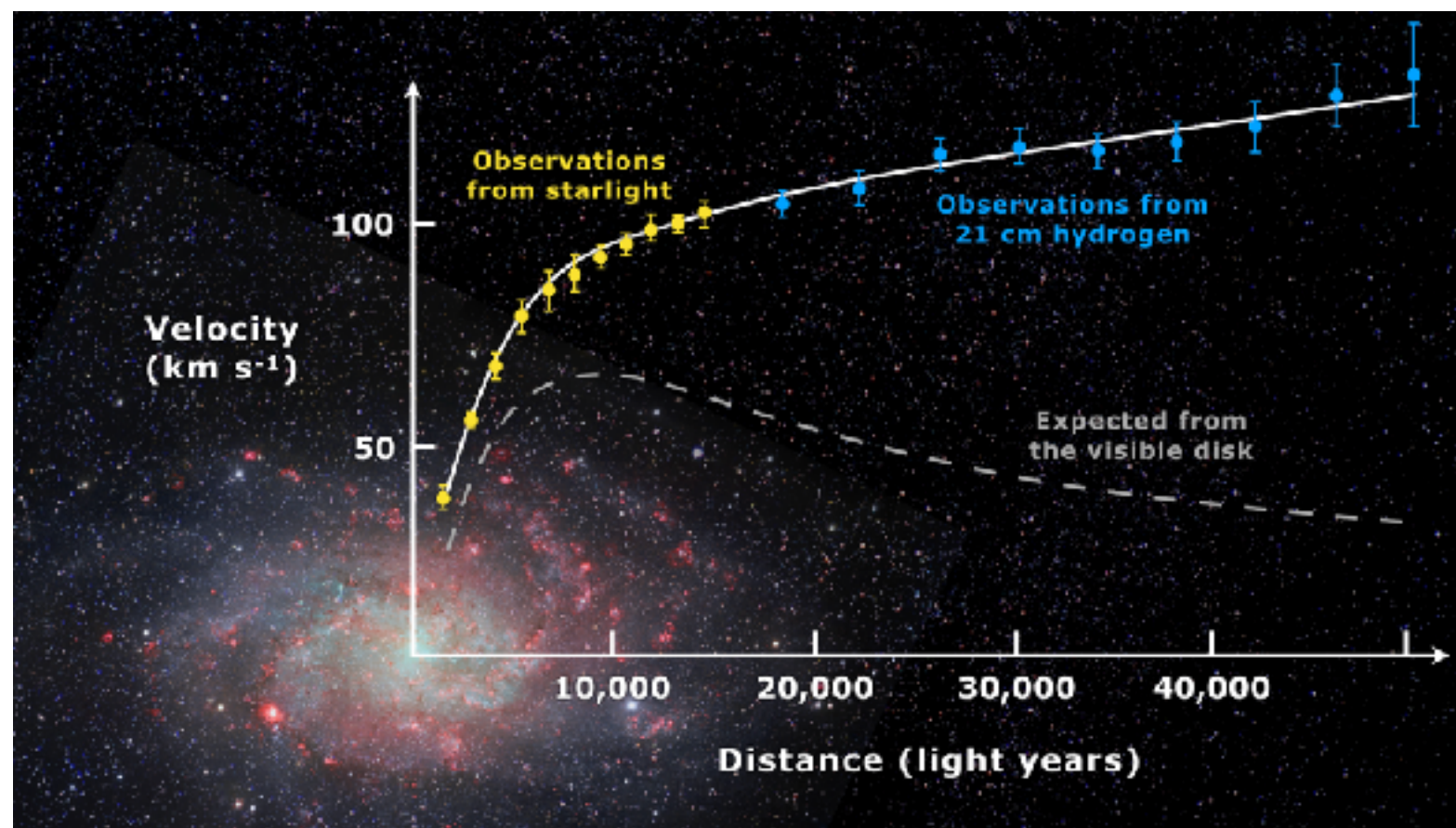
素粒子理論広い意味で計算可能な部分でほとんどの現象を説明できるが、少数の説明できないものがある。



• 2. eVダークマターの過去

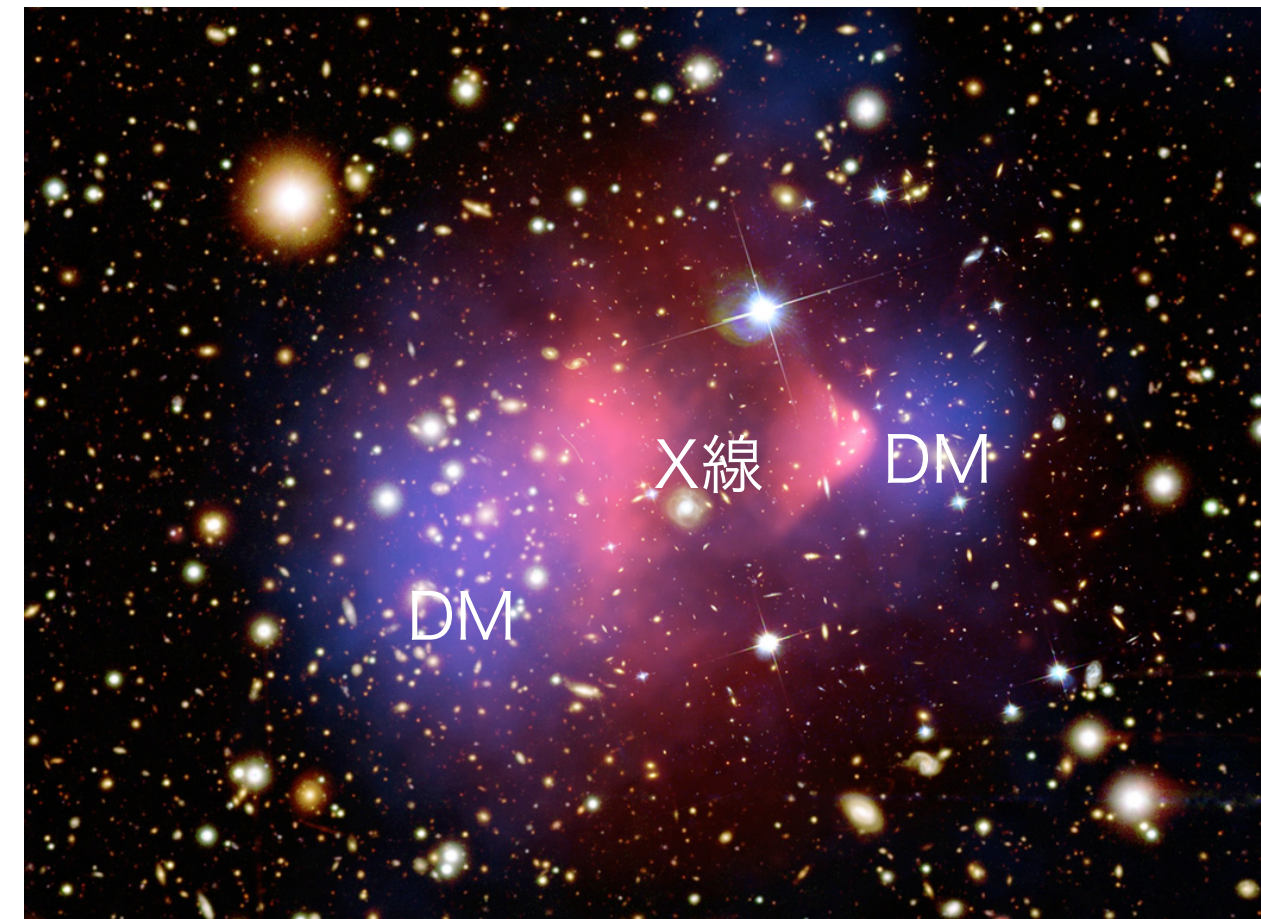
-ダークマターとは何か？-

・ダークマターの正体は90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

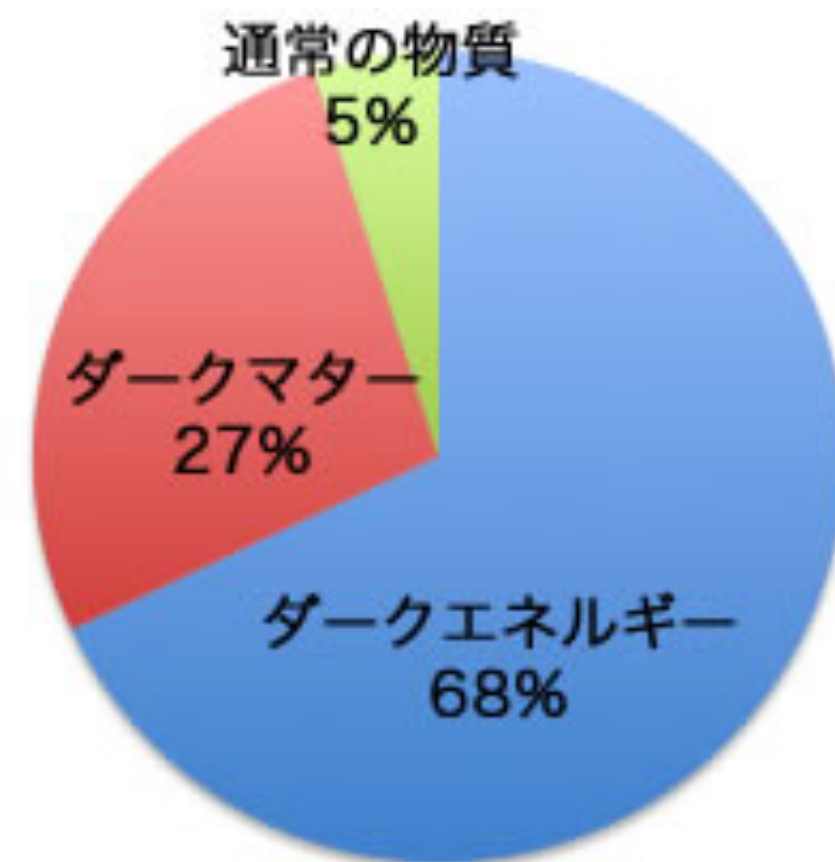
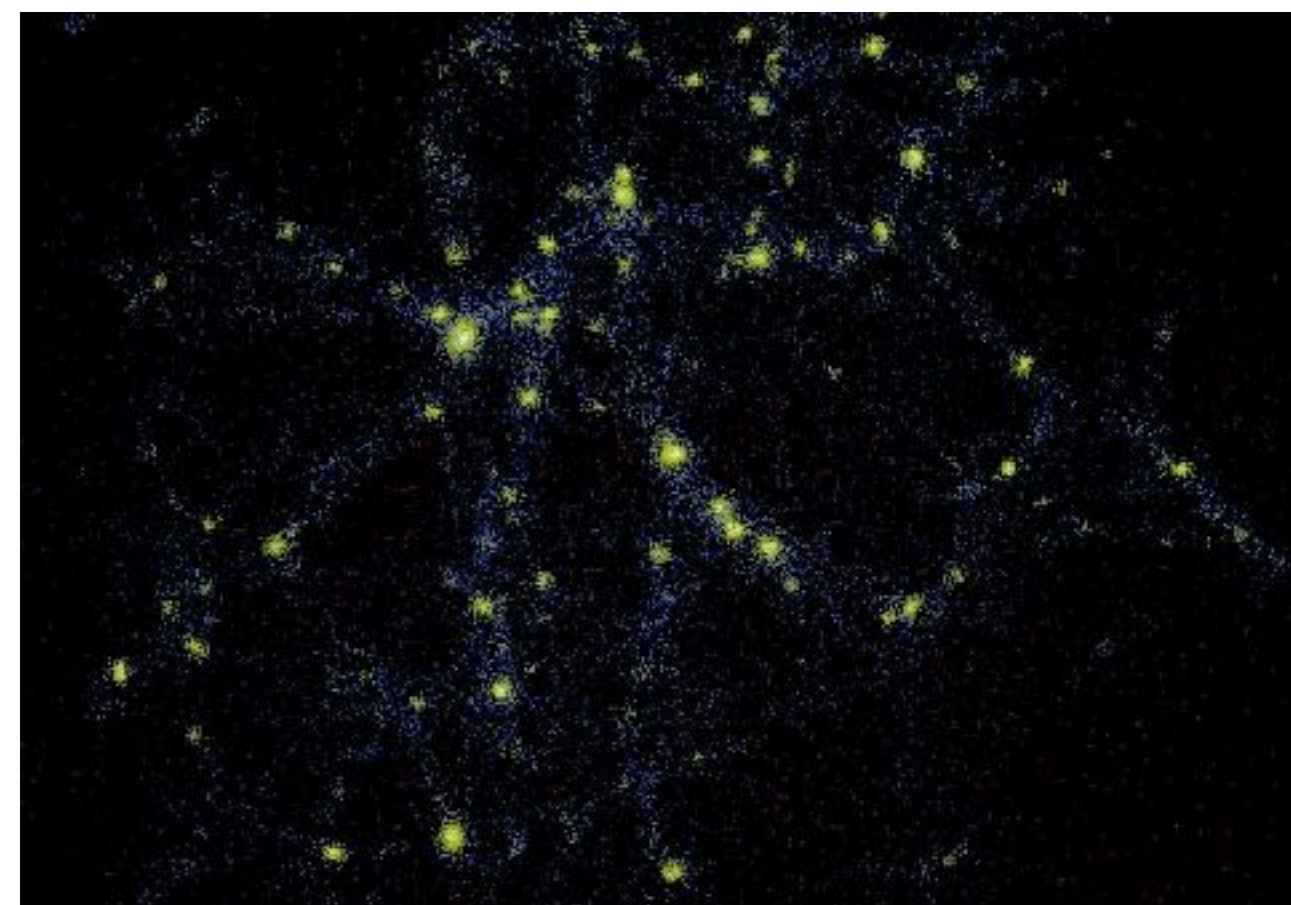


図1：宇宙の組成

宇宙マイクロ波背景放射

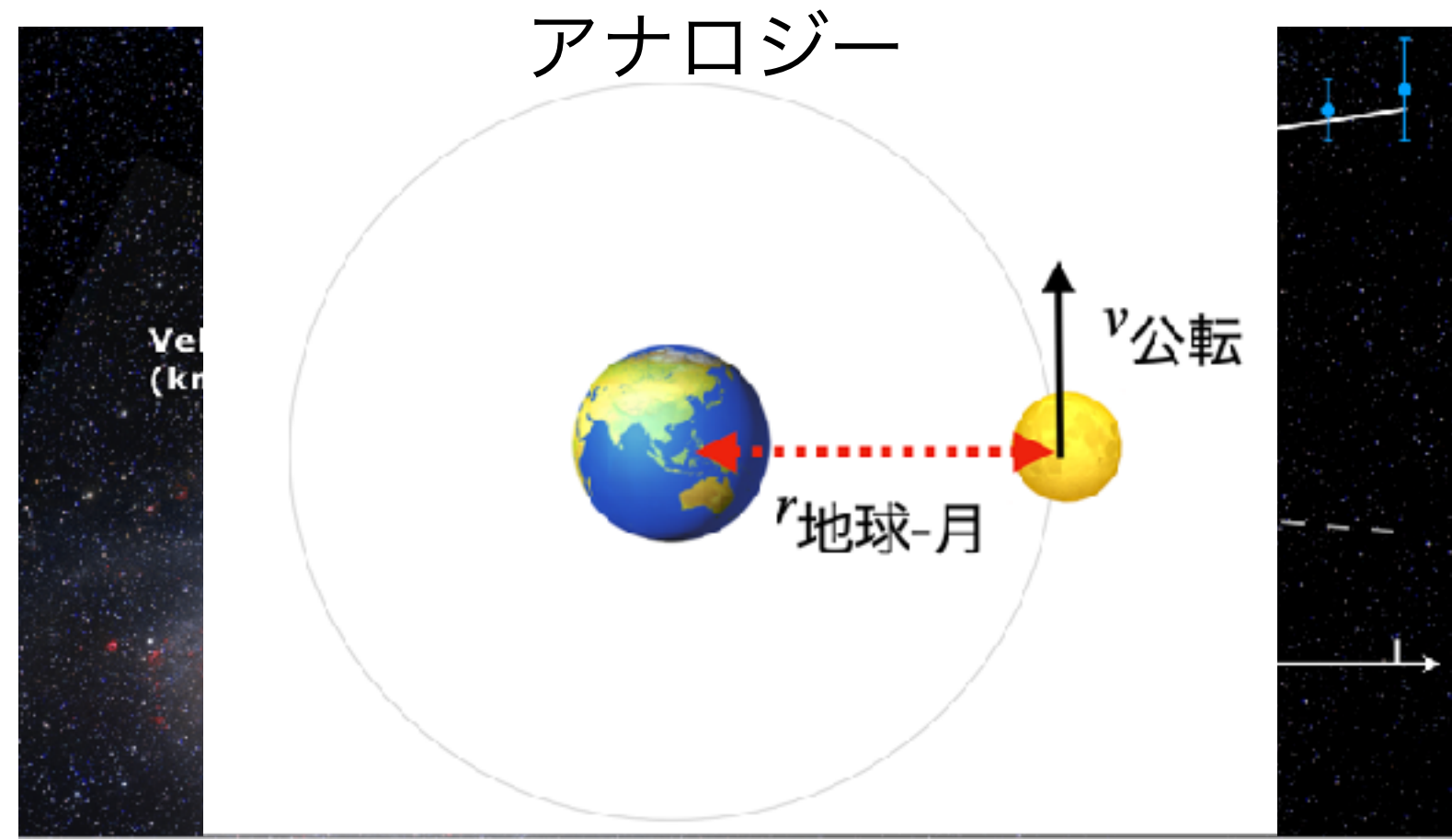


構造形成数値計算

・ダークマターの現代知識

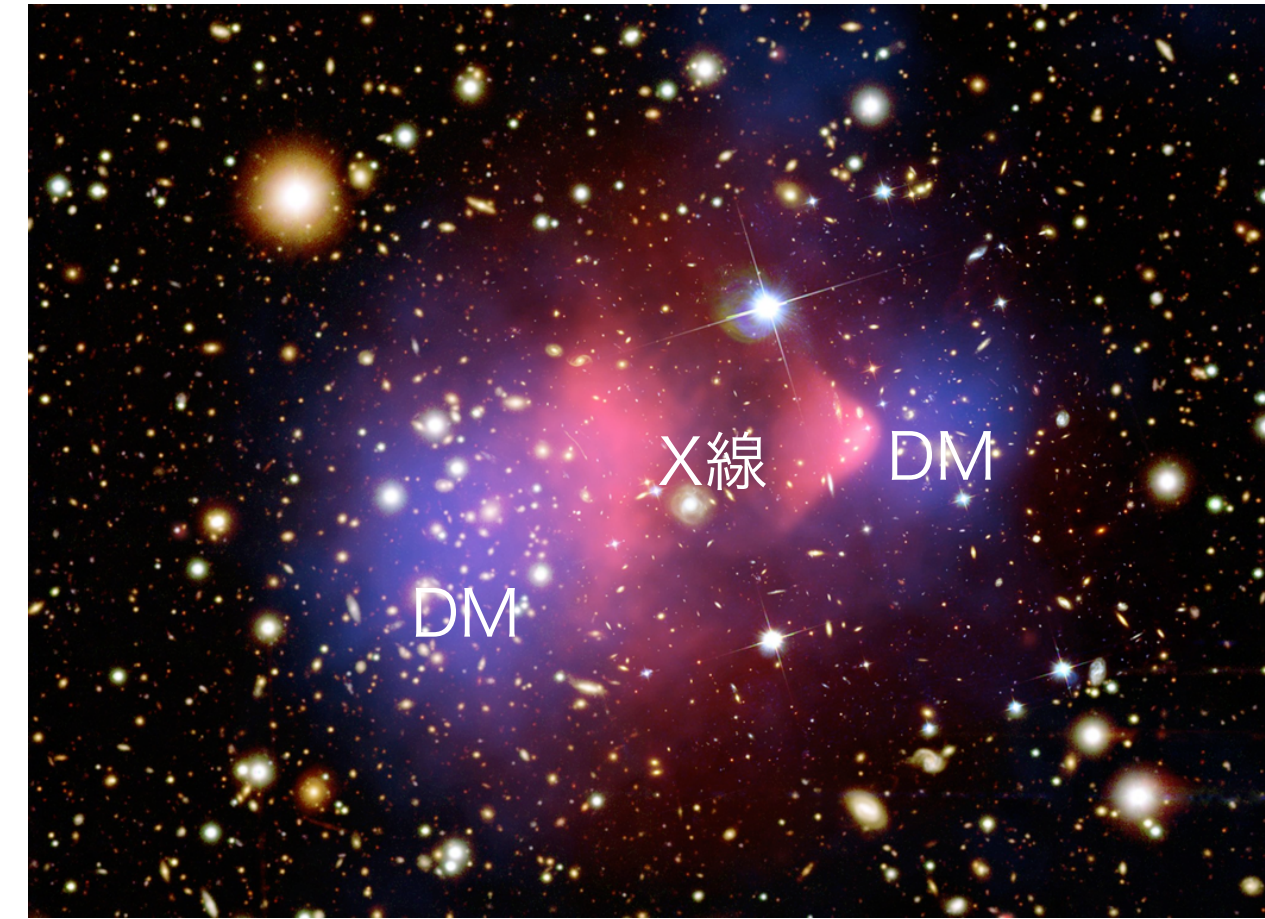
- ・ 寿命が極めて長い
- ・ 電荷を持たない
- ・ 冷たい
(ほぼ止まっている。)
- ・ 銀河周りに局在する
- ・ 存在量 ($\rightarrow T_{\text{eq}} \sim 1\text{eV}$)

・ダークマターの正体は90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

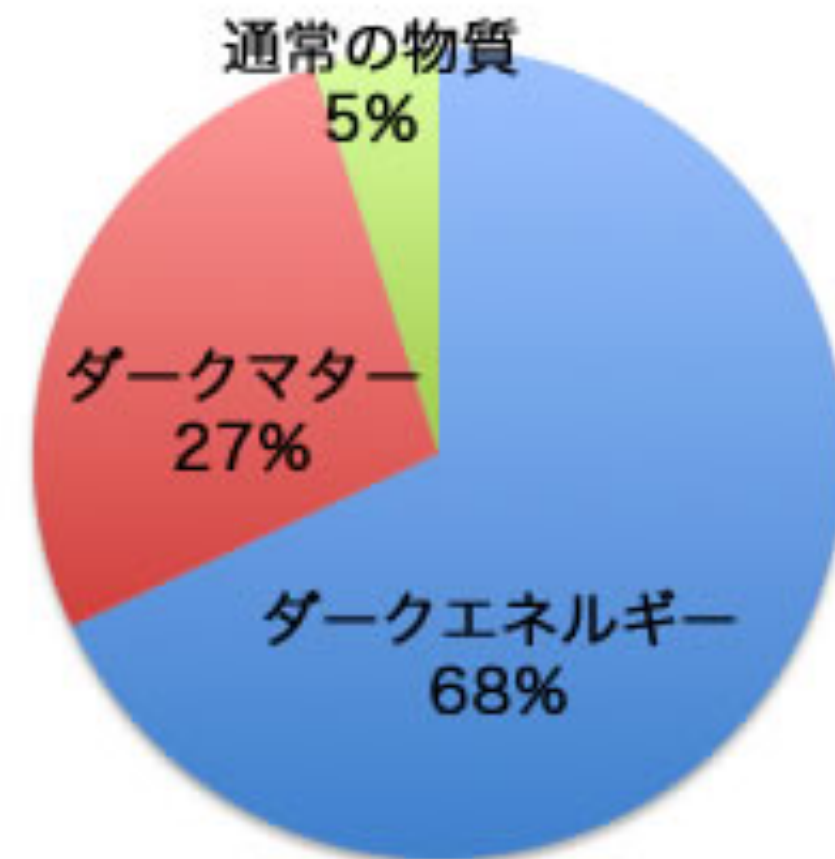
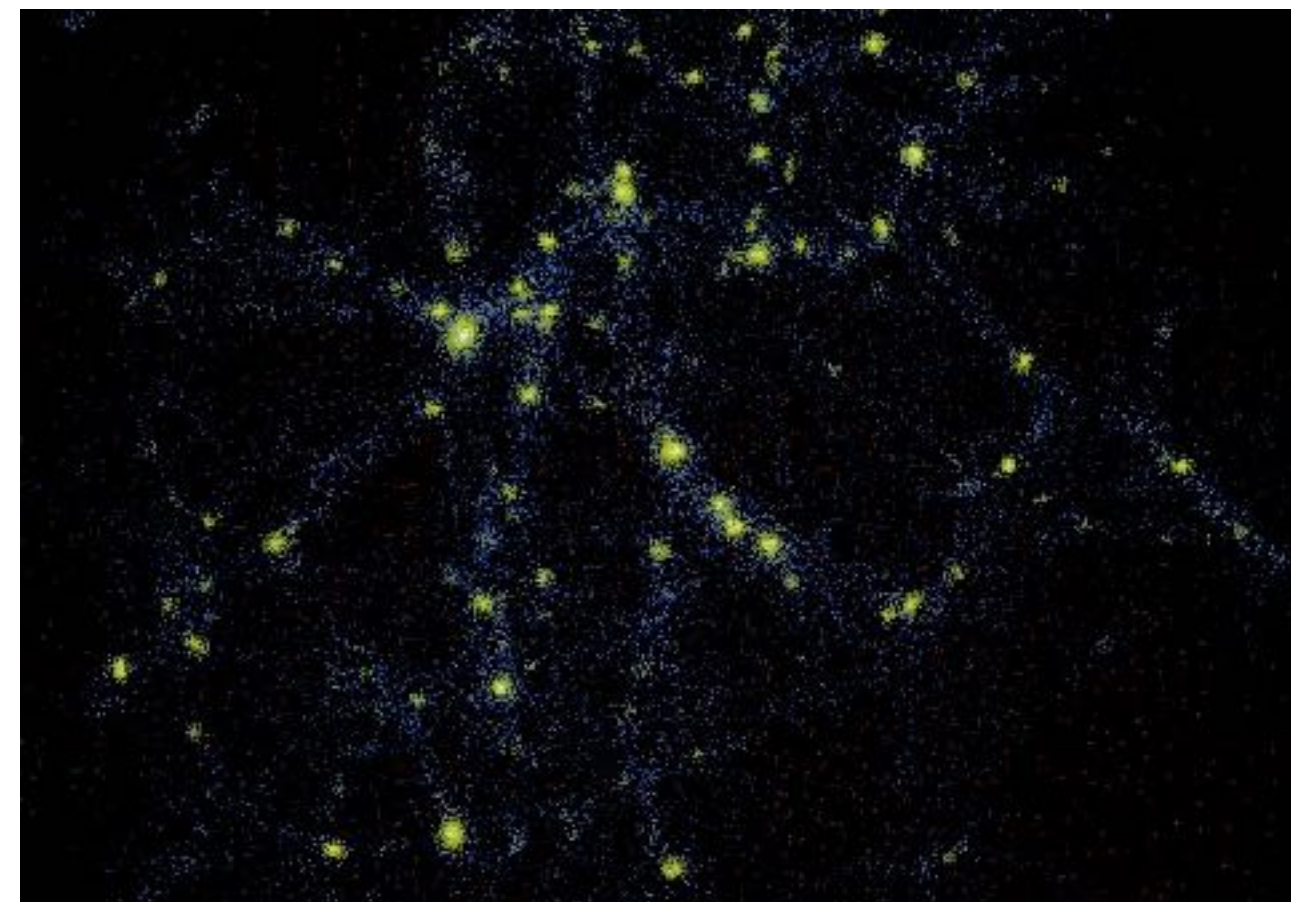


図1：宇宙の組成

宇宙マイクロ波背景放射

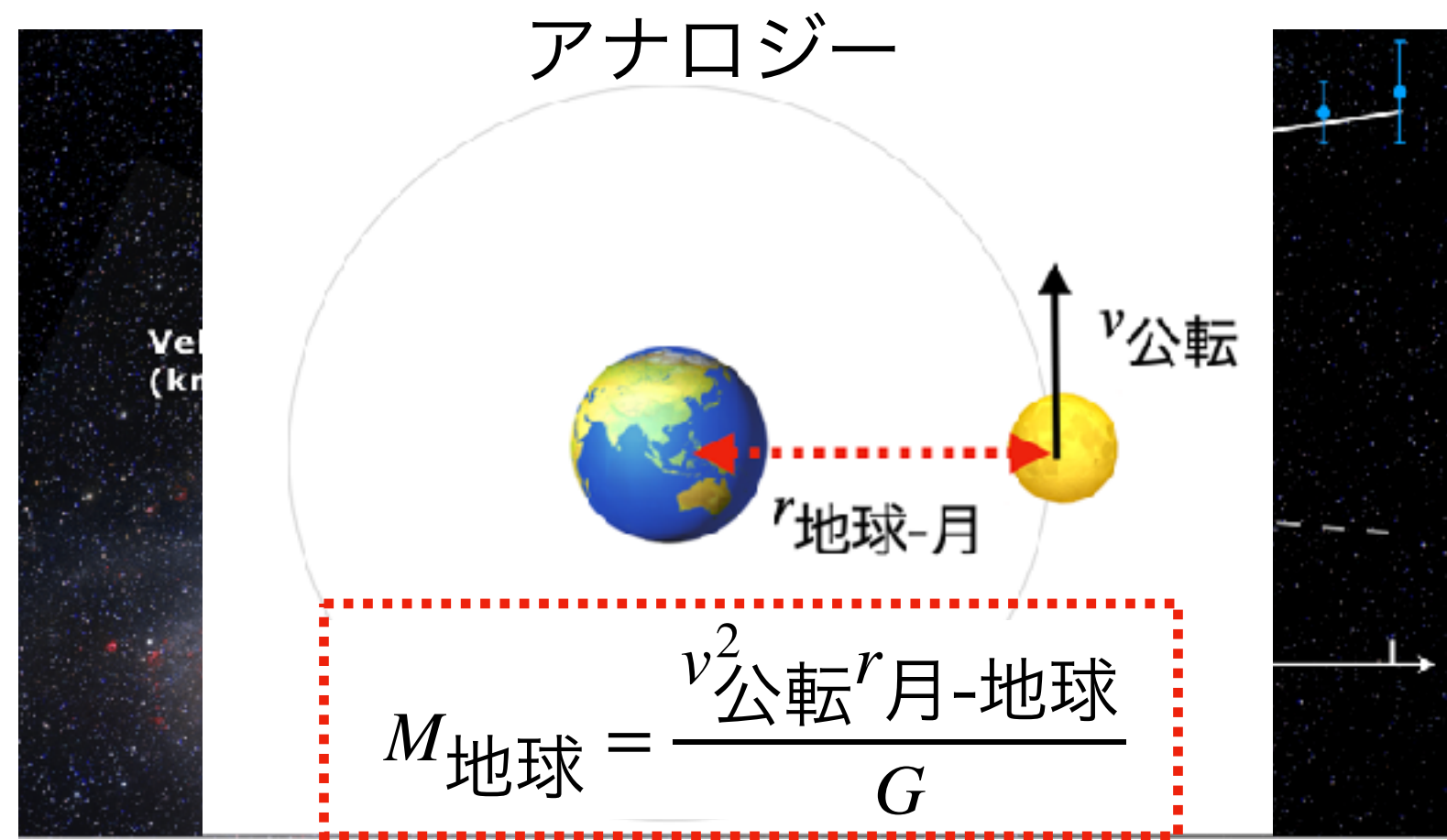


構造形成数値計算

・ダークマターの現代知識

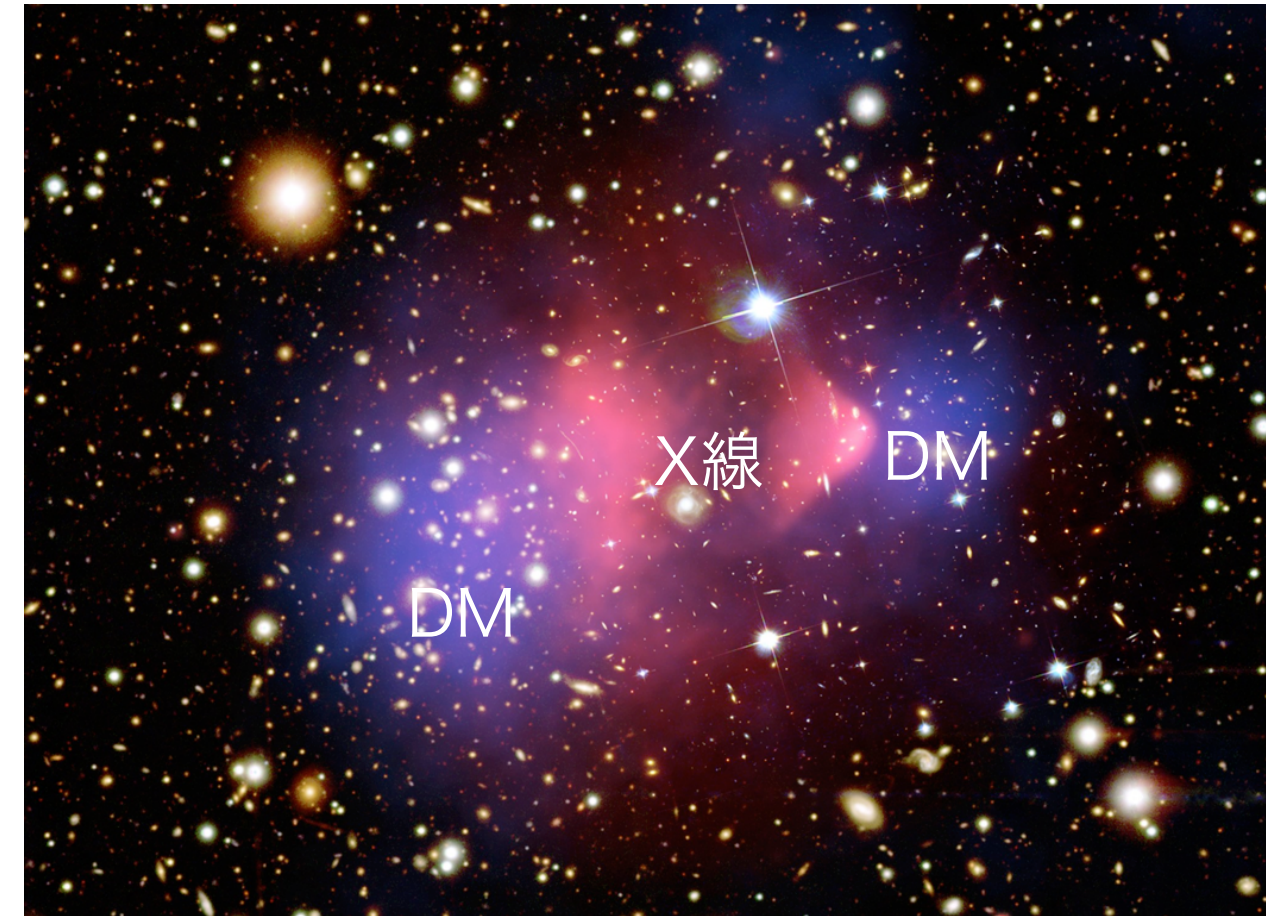
- ・ 寿命が極めて長い
- ・ 電荷を持たない
- ・ 冷たい
(ほぼ止まっている。)
- ・ 銀河周りに局在する
- ・ 存在量 ($\rightarrow T_{\text{eq}} \sim 1\text{eV}$)

・ダークマターの正体は90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

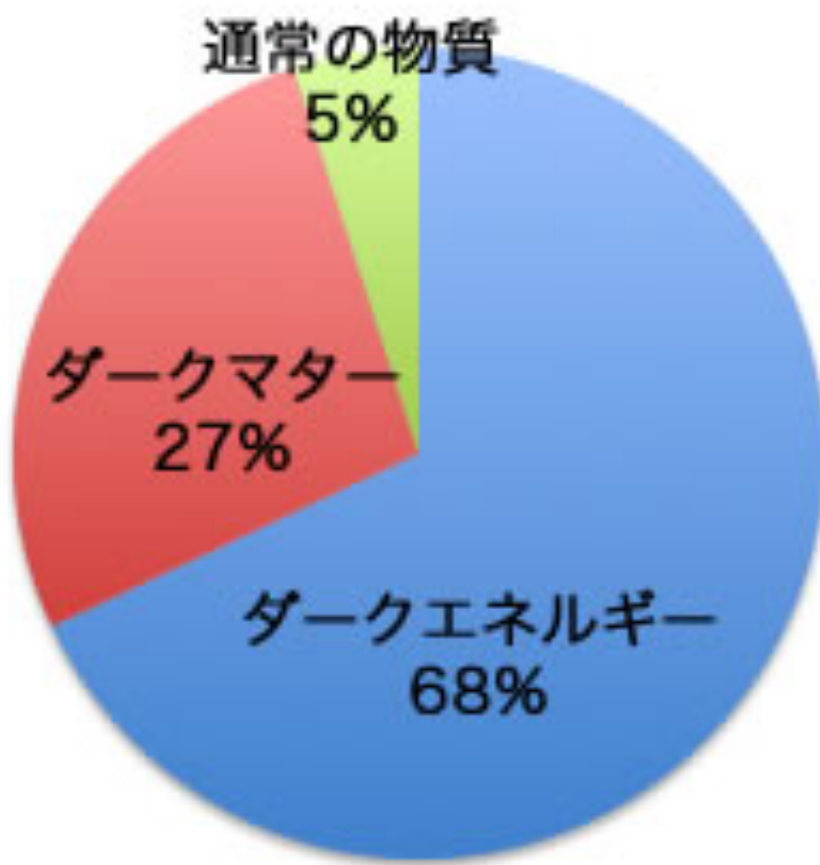
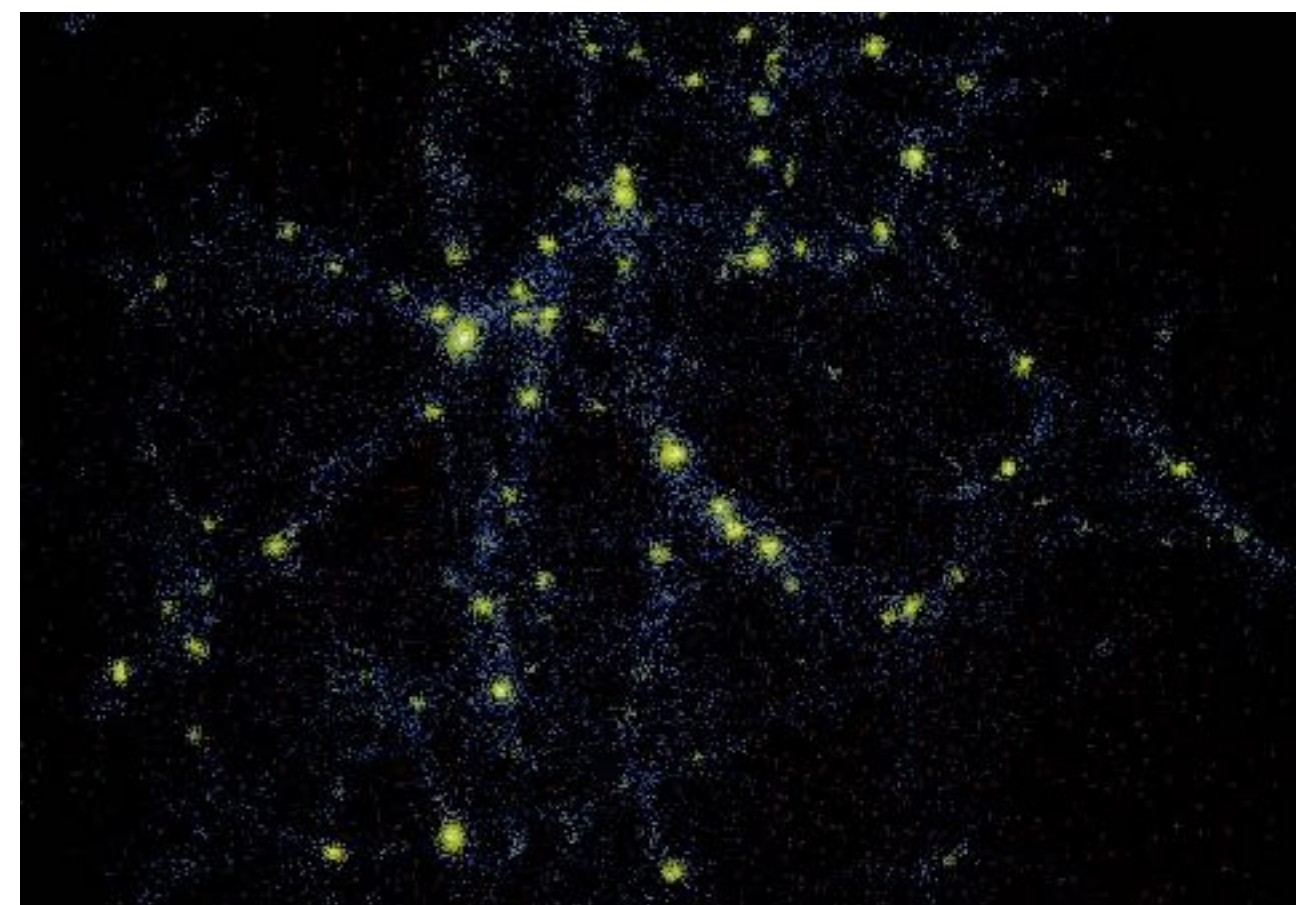


図1：宇宙の組成

宇宙マイクロ波背景放射

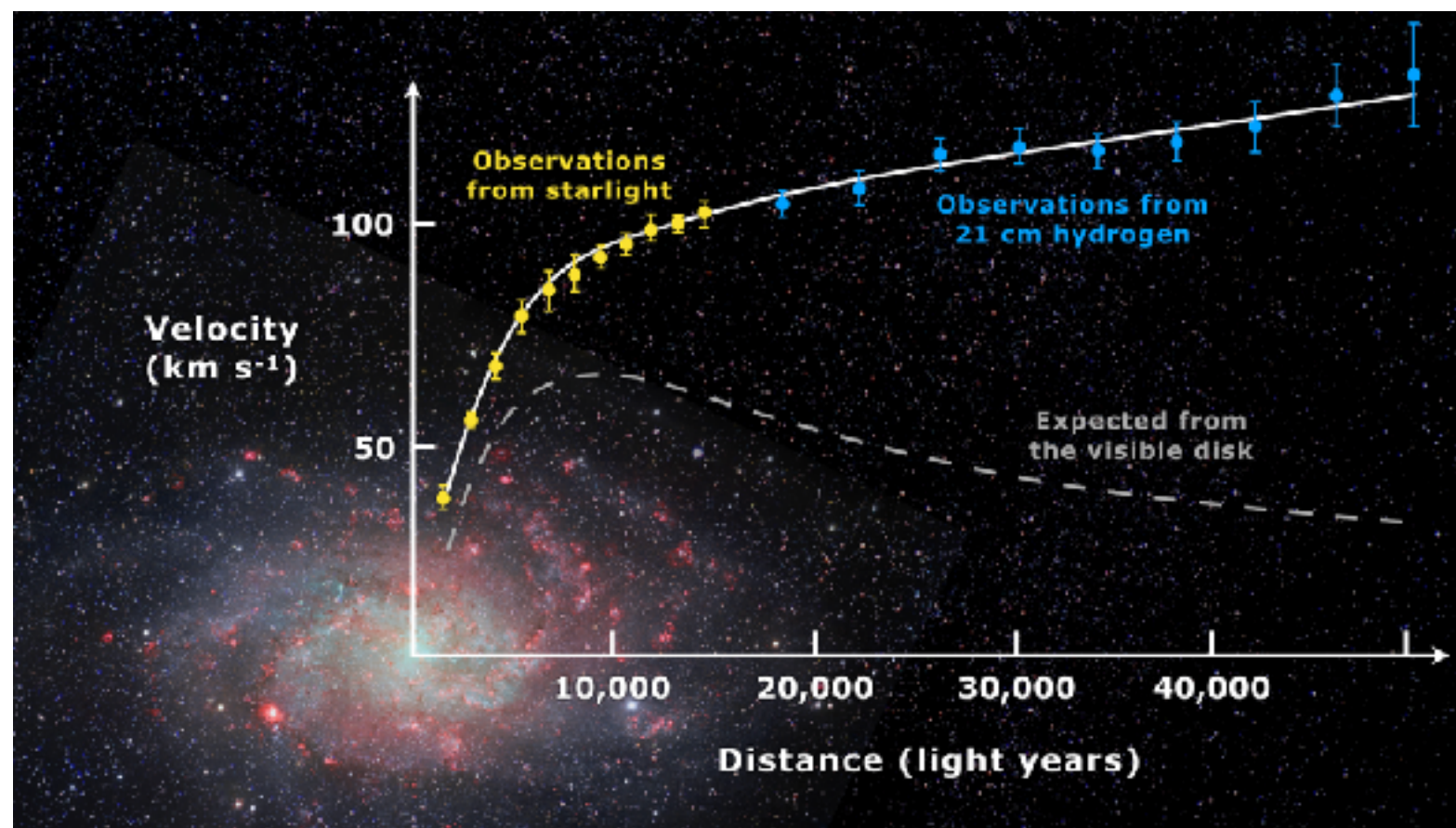


構造形成数値計算

・ダークマターの現代知識

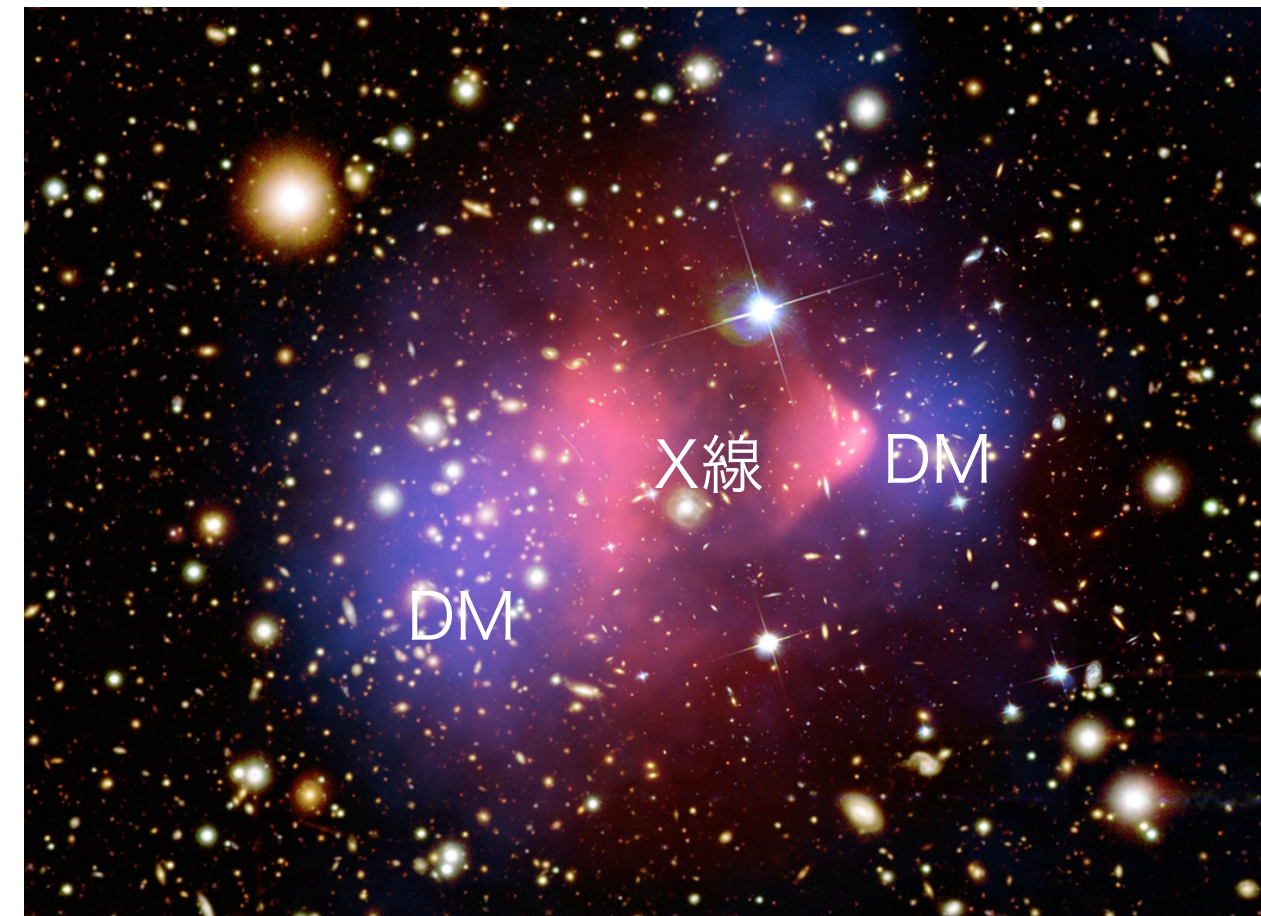
- ・ 寿命が極めて長い
- ・ 電荷を持たない
- ・ 冷たい
(ほぼ止まっている。)
- ・ 銀河周りに局在する
- ・ 存在量 ($\rightarrow T_{\text{eq}} \sim 1\text{eV}$)

・ダークマターの正体は90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

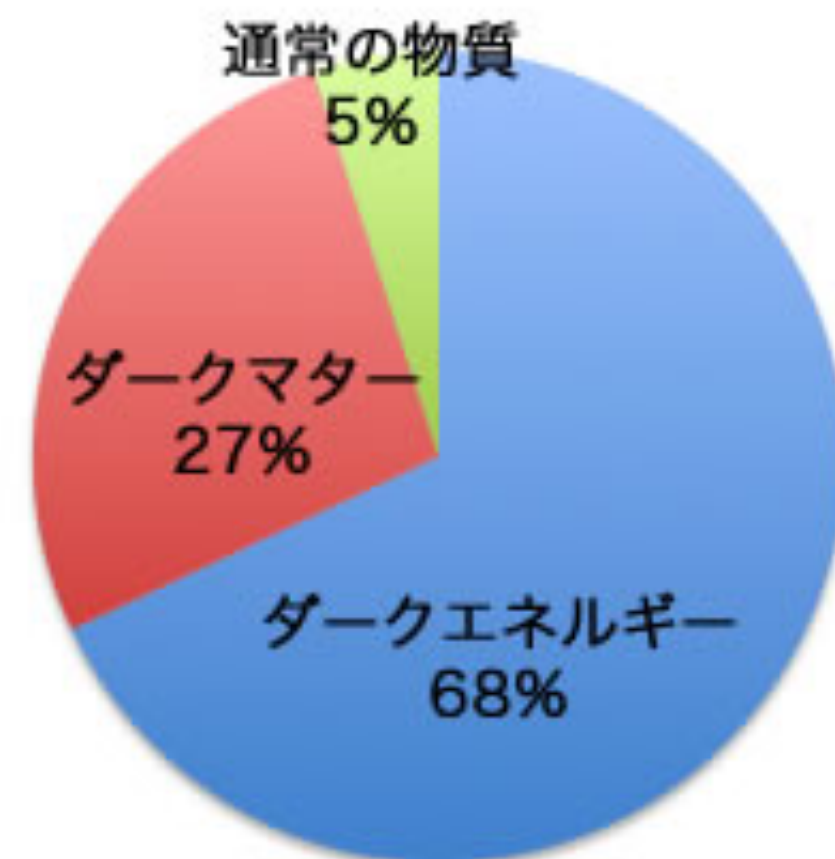
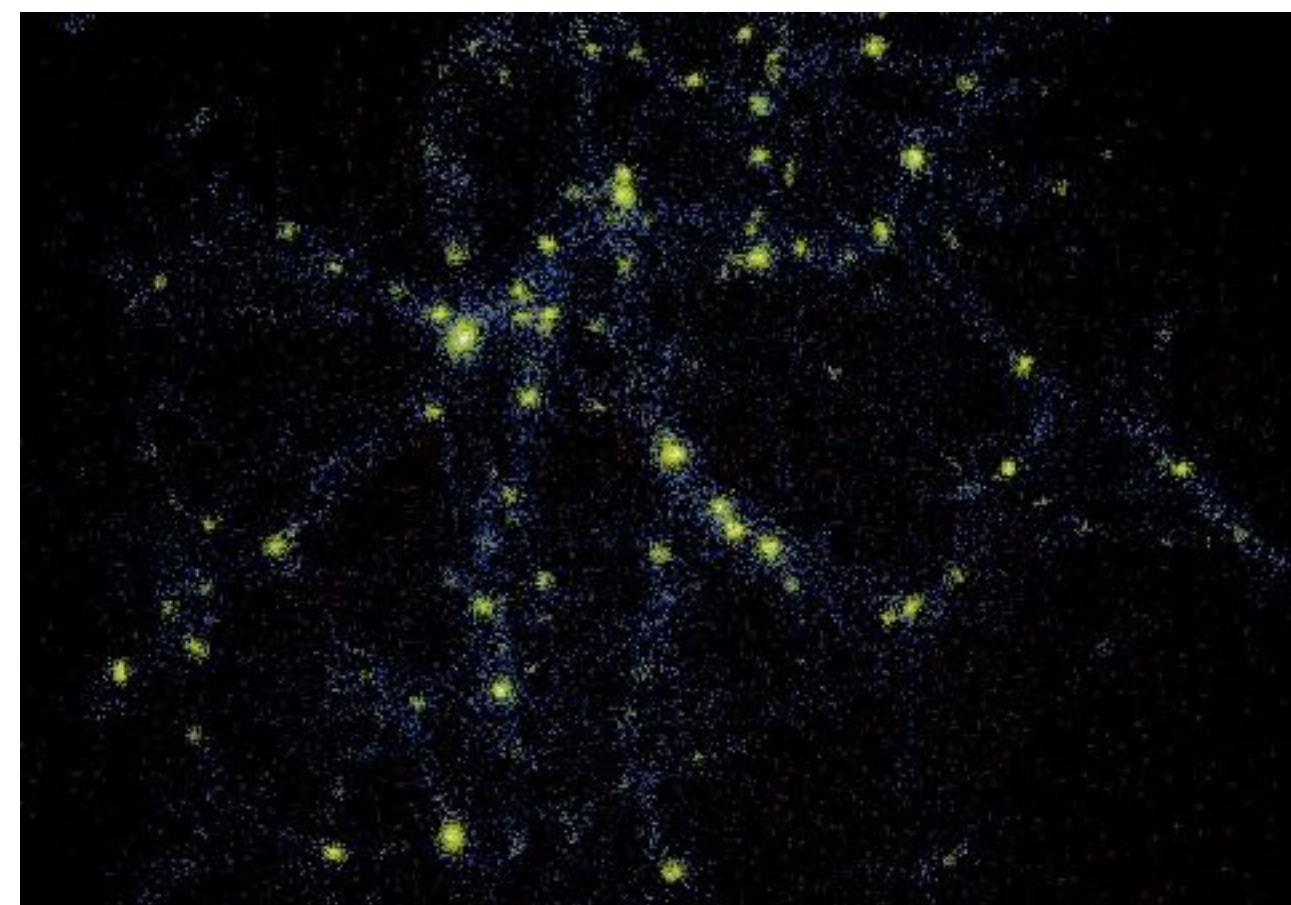


図1：宇宙の組成

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 ($\rightarrow T_{\text{eq}} \sim 1\text{eV}$)

Q: ダークマターは標準模型の素粒子か？

	I	II	III		
質量	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
電荷	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
スピン	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u アップ	c チャーム	t トップ	g グルーオン	H ヒッグス粒子
クォーク	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム	γ 光子	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e 電子	μ ミュー粒子	τ タウ粒子	Z Zボソン	
レプトン	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.433 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	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	W Wボソン	
					ゲージ粒子 ベクトル粒子

・ダークマターについての現代知識

- ・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

(標準模型ではない) ニュートリノの質量の存在も明らかになっているが、話の都合上認めて進める。

— 2015年ノーベル物理学賞参照

Q: ダークマターは標準模型の素粒子か？

	I	II	III		
質量	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
電荷	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
スピン	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
アップ	u	c	t	g	H
ダウン	d	s	b	光子	
電子	e	μ	τ	Z	
ニュートリノ	ν_e	ν_μ	ν_τ	W	

電荷を持っている、相互作用しすぎる、寿命が短い

スカラー粒子

ゲージ粒子

バクテリル粒子

・ダークマターについての現代知識

- ・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

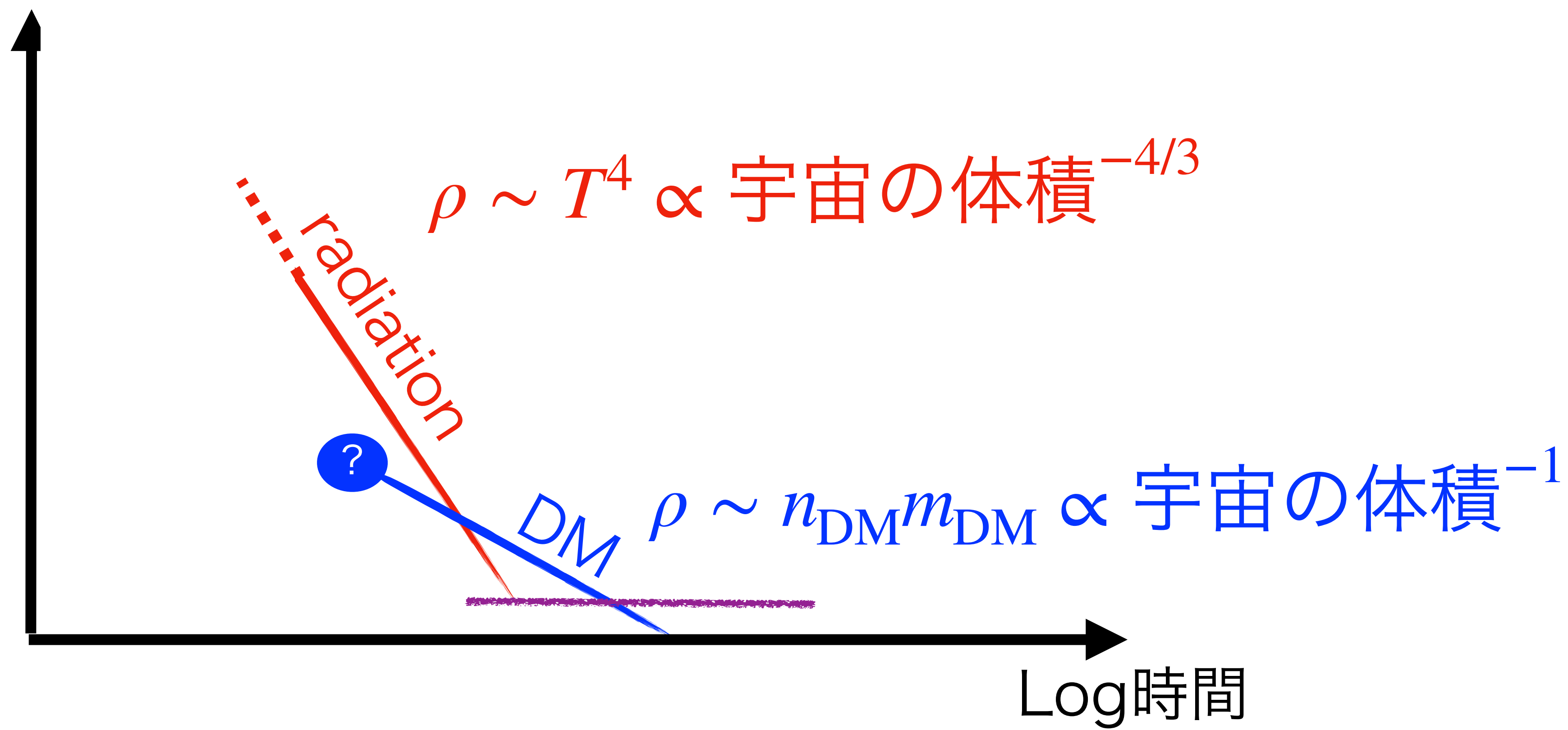
(標準模型ではない) ニュートリノの質量の存在も明らかになっているが、話の都合上認めて進める。

— 2015年ノーベル物理学賞参照

「存在量の説明」

以下の時間依存性を持つDM成分はどのようにできたのか？

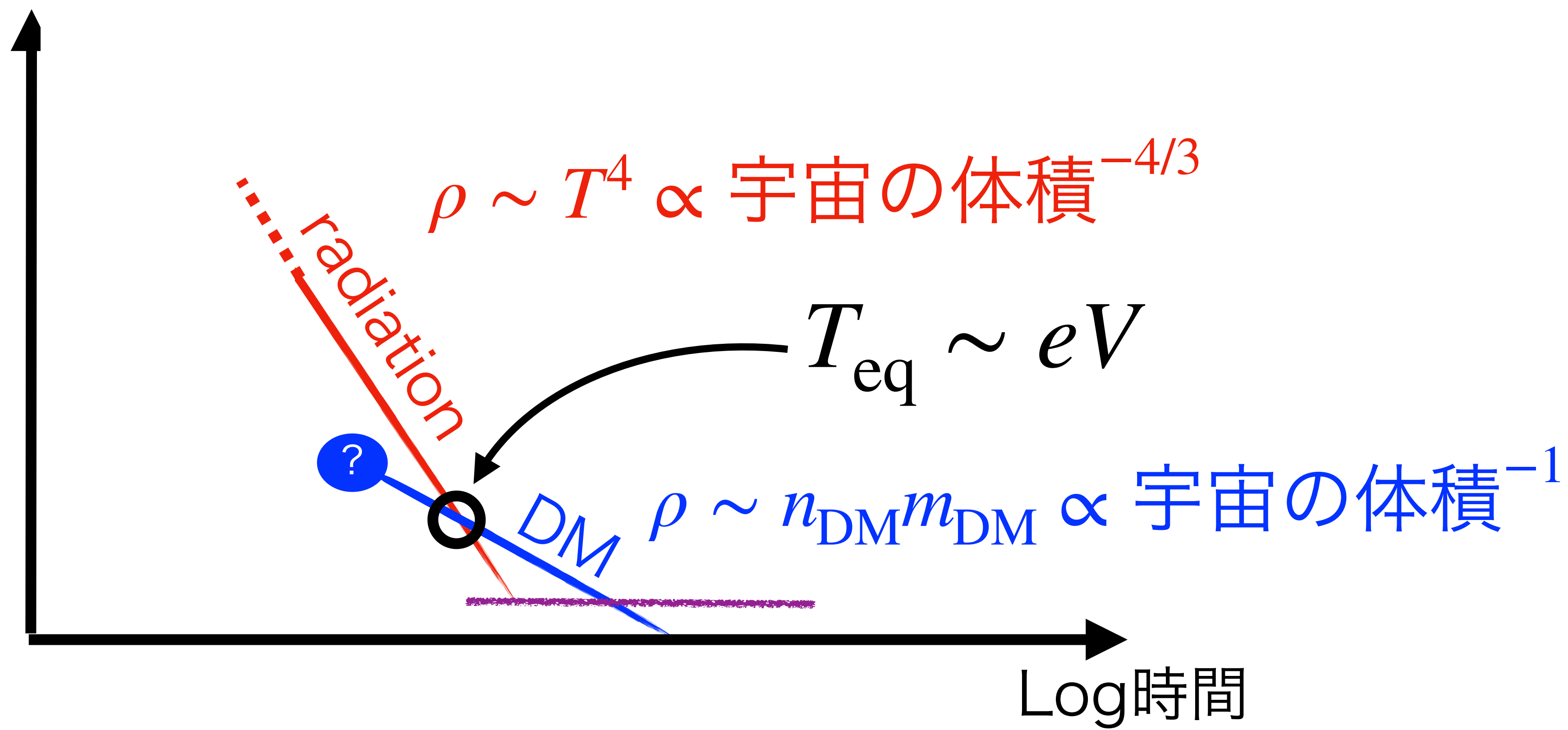
Log(宇宙のエネルギー密度), $\log(\rho)$



「存在量の説明」

以下の時間依存性を持つDM成分はどのようにできたのか？

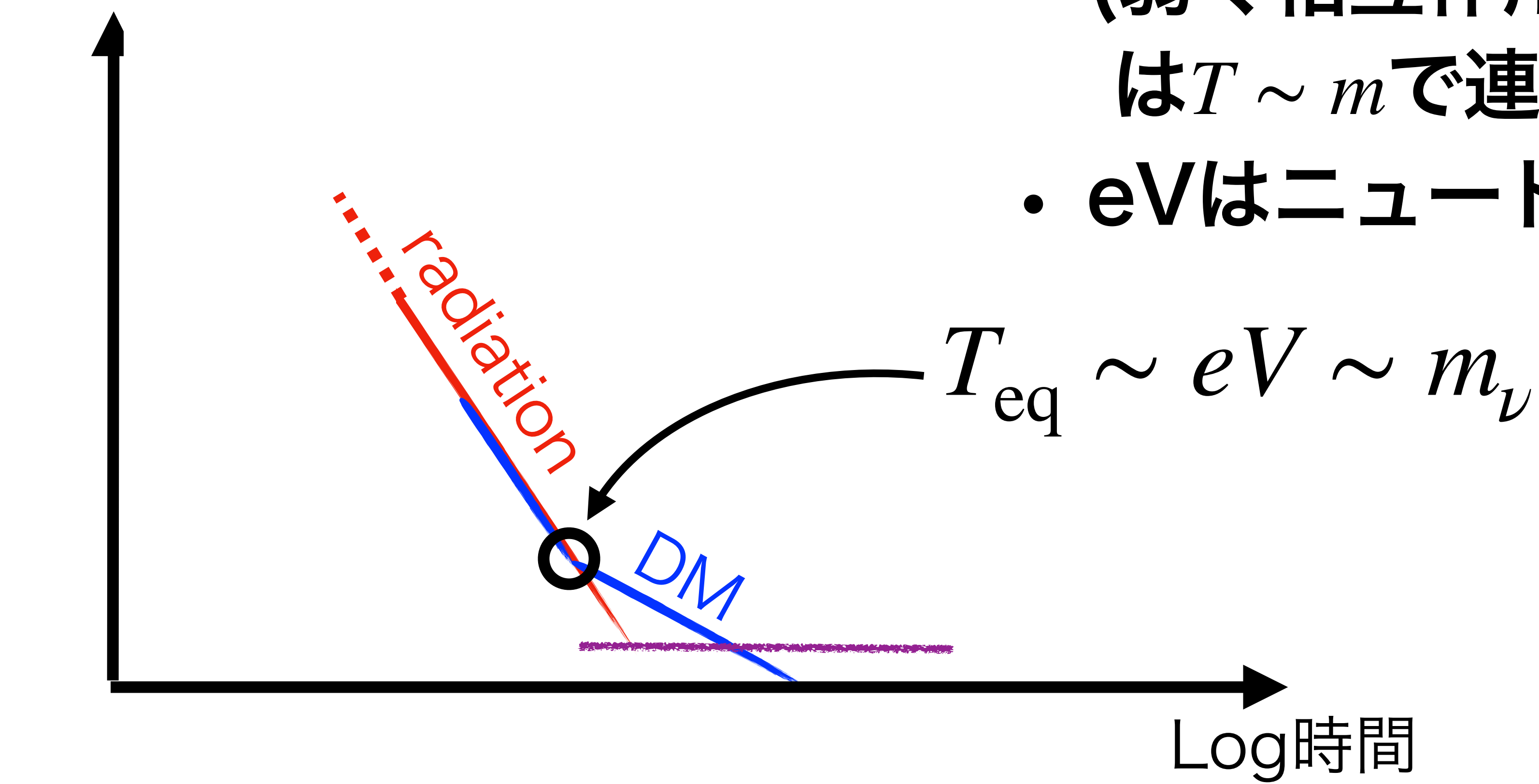
Log(宇宙のエネルギー密度), $\log(\rho)$



「存在量の説明」

以下の時間依存性を持つDM成分はどのようにできたのか？ ニュートリノ行けそう！？

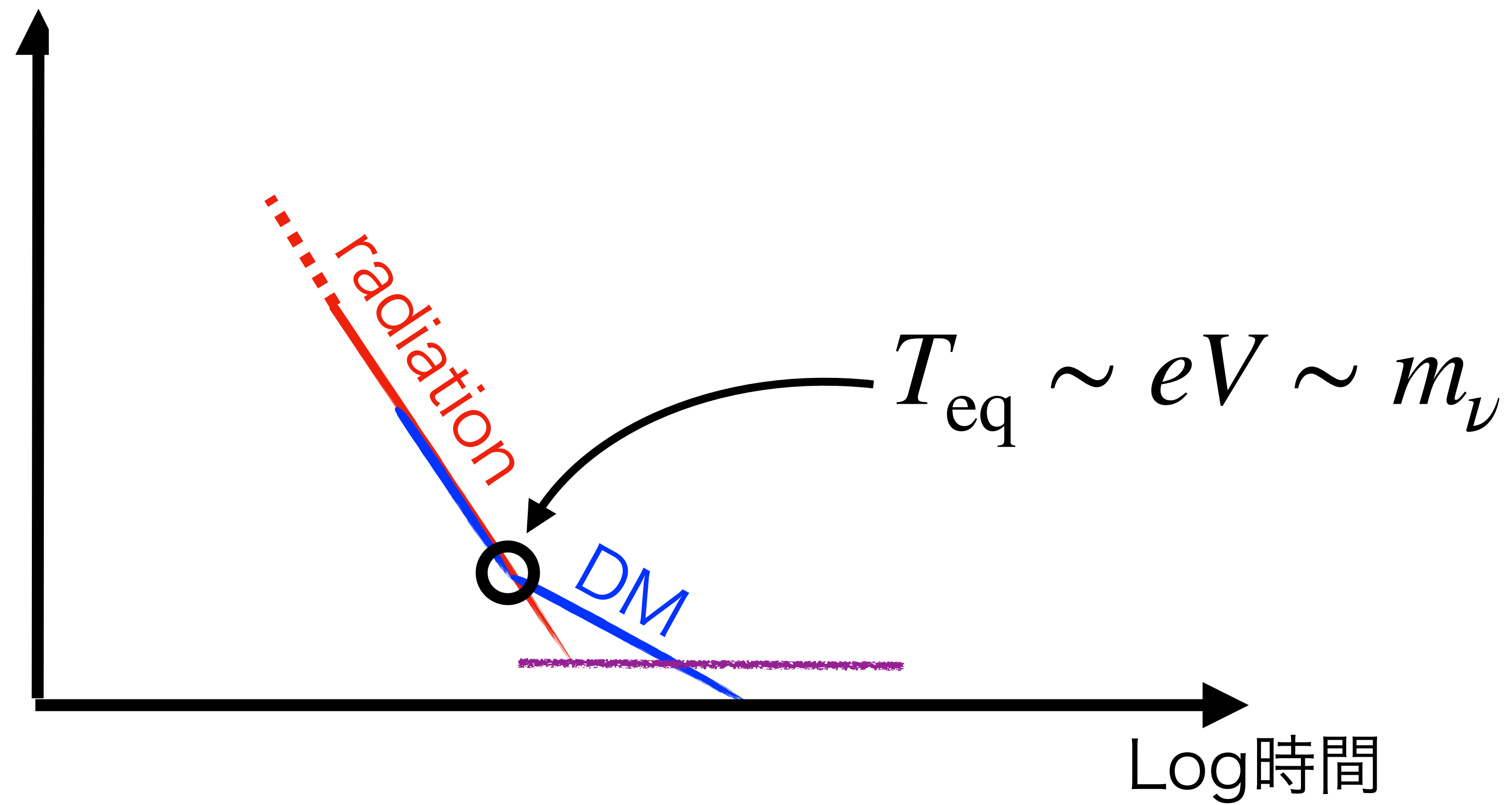
Log(宇宙のエネルギー密度), $\log(\rho)$



- (弱く相互作用する) Radiation は $T \sim m$ で連続的に matter になる。
- eV はニュートリノ質量付近。

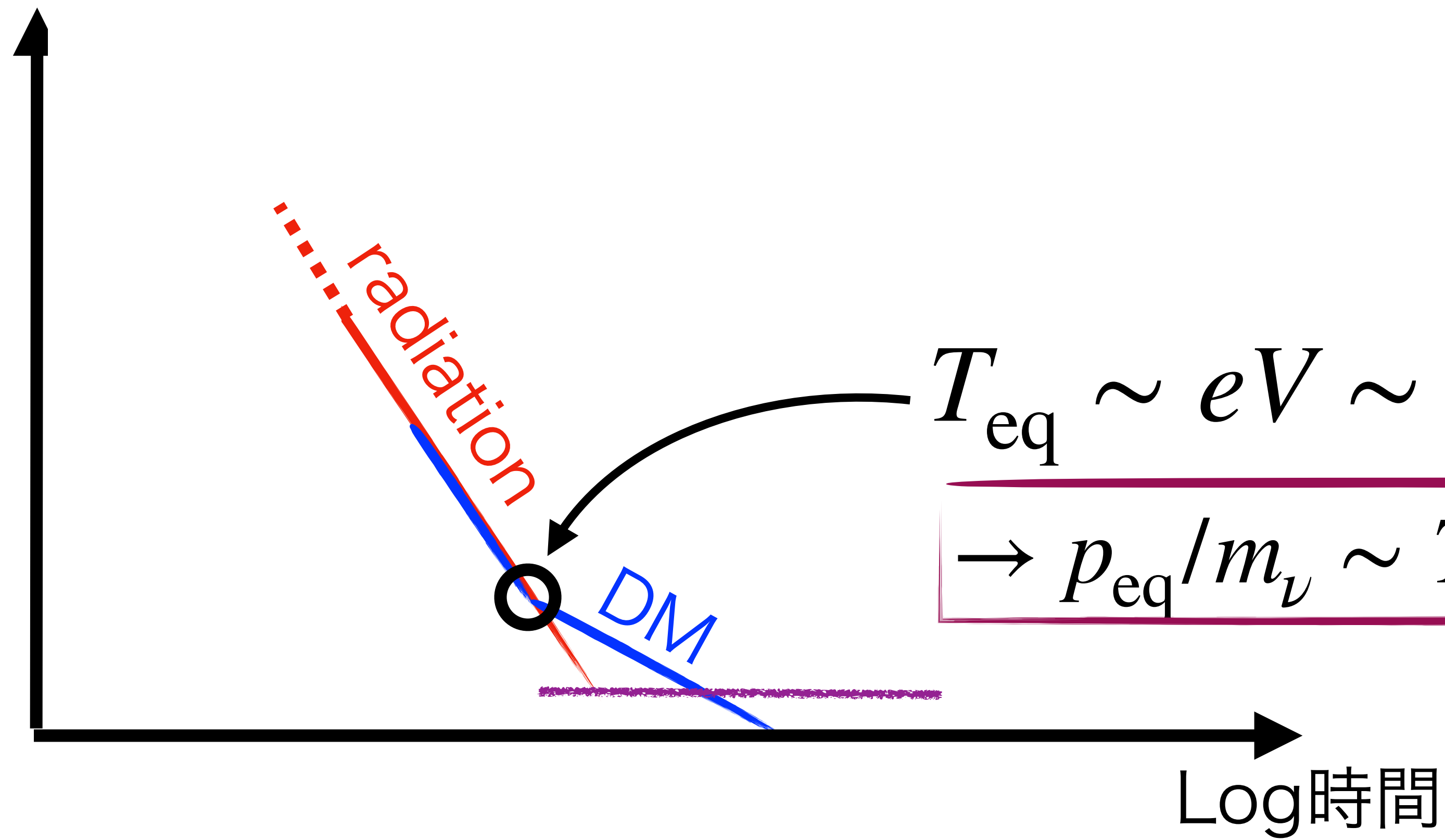
ニュートリノは熱い

Log(宇宙のエネルギー密度), $\log(\rho)$



ニュートリノは熱い

Log(宇宙のエネルギー密度), $\log(\rho)$

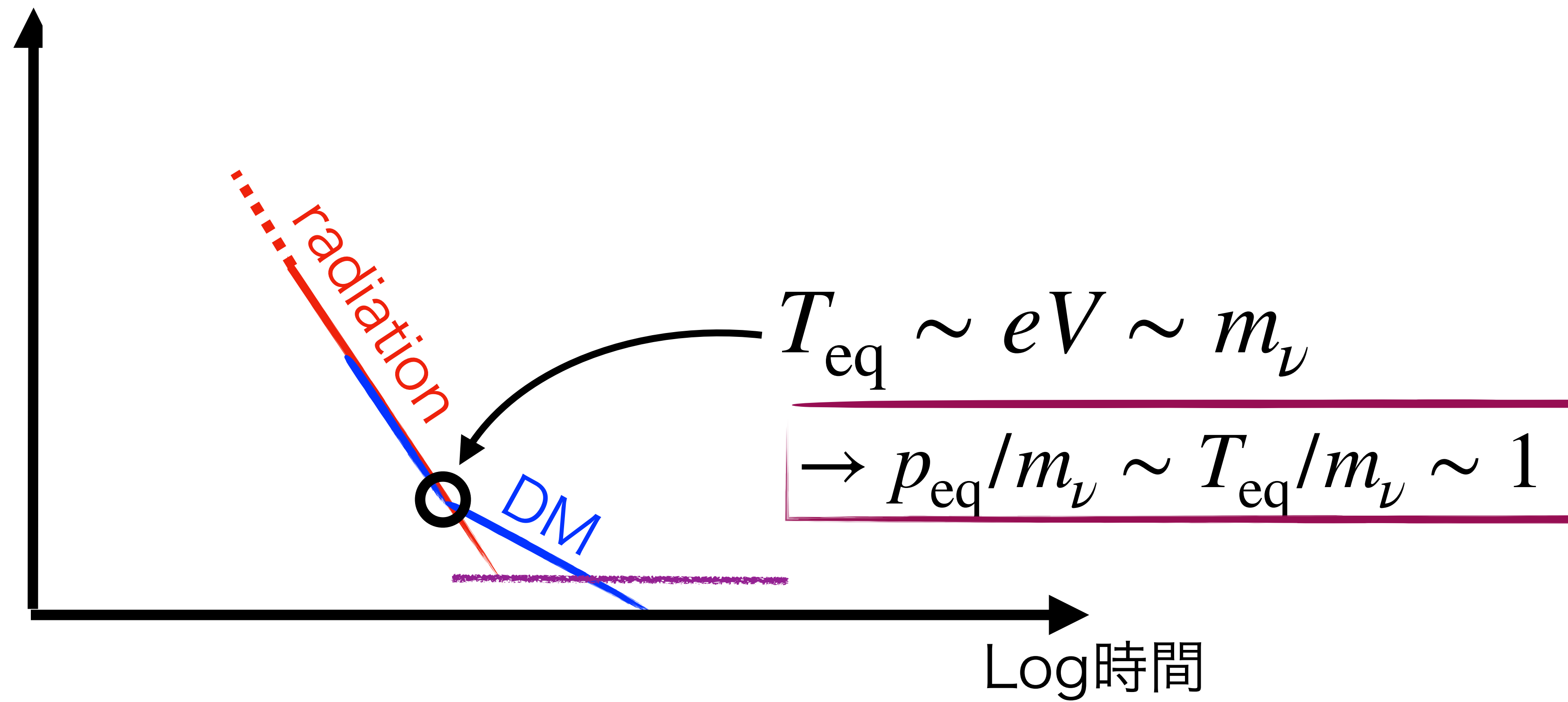


ニュートリノは熱い

- ・**ホットダークマター**は40年前のパラダイム。

$n_{\text{DM}} \sim T^3, m_{\text{DM}} \sim eV$, 候補: ニュートリノ, アクシオンなど

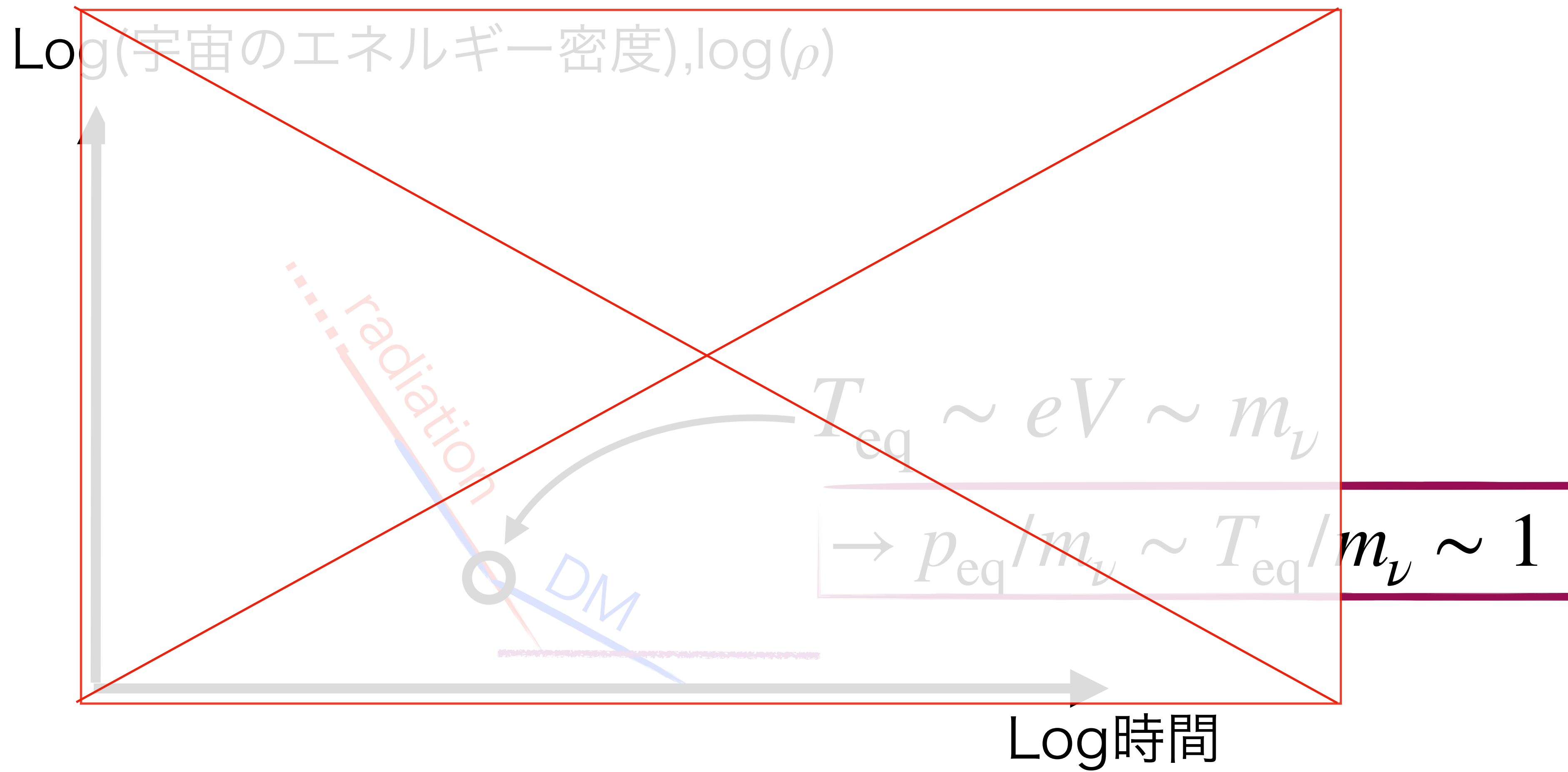
Log(宇宙のエネルギー密度), $\log(\rho)$



ニュートリノは熱い

- ・ **ホットダークマター**は40年前のパラダイム。

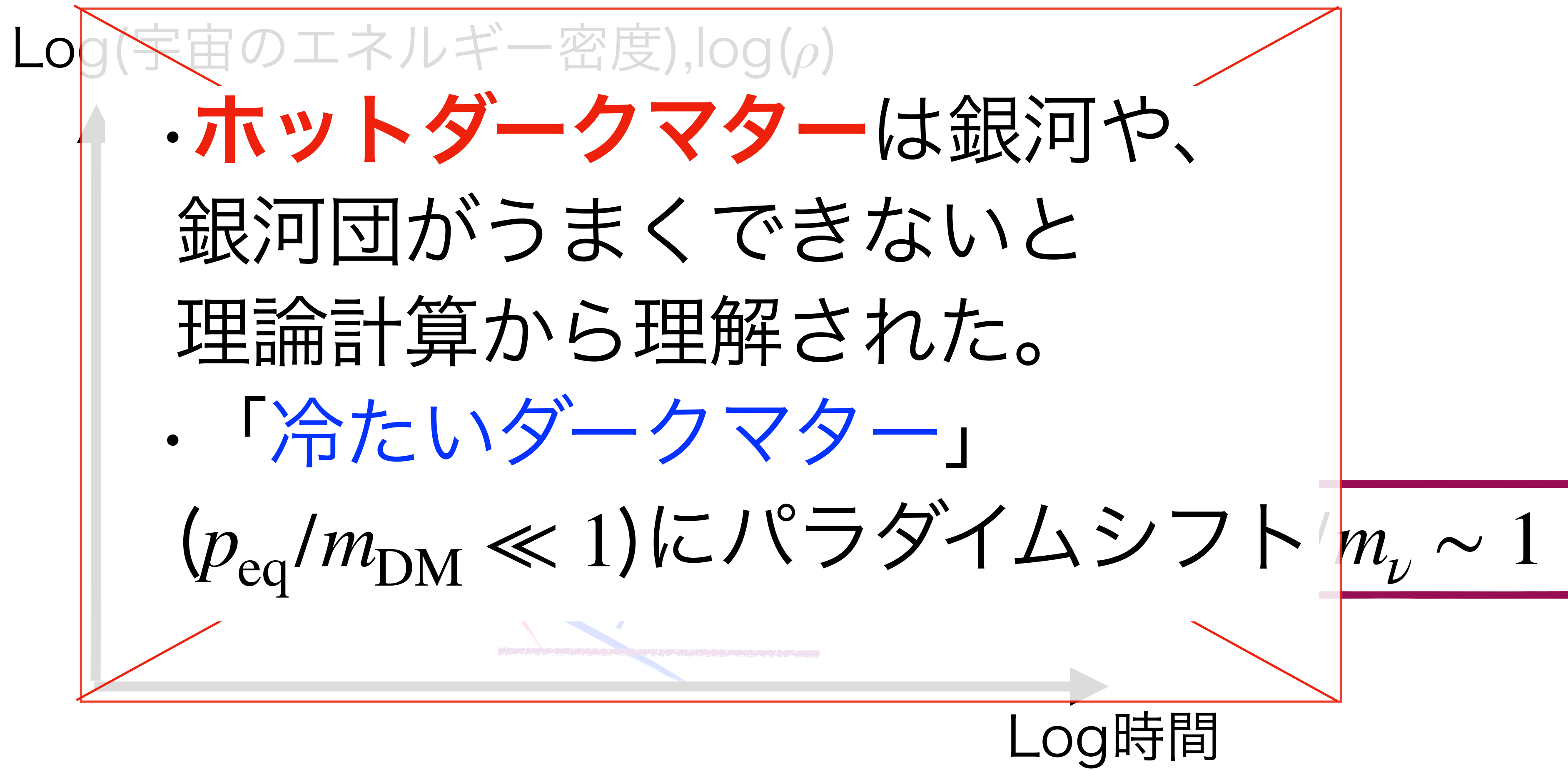
$n_{\text{DM}} \sim T^3, m_{\text{DM}} \sim eV$, 候補: ニュートリノ, アクシオンなど



ニュートリノは熱い

- ・ **ホットダークマター**は40年前のパラダイム。

$n_{\text{DM}} \sim T^3, m_{\text{DM}} \sim eV$, 候補: ニュートリノ, アクシオンなど

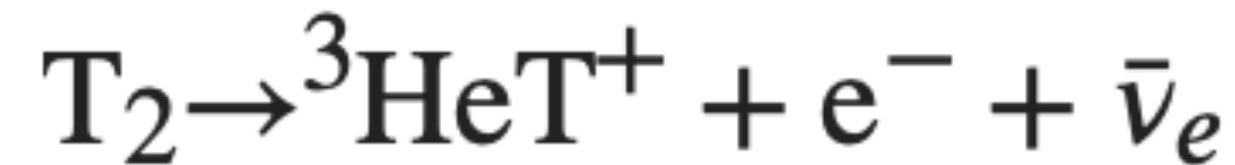


Q: ダークマターはニュートリノ？ 完全にNo

∴熱すぎる(ホットダークマター)+

ニュートリノの素粒子論的性質

-トリチウム分子崩壊からの制限



The KATRIN Collaboration. 2022

ニュートリノ質量 $\lesssim 1\text{eV}$

-ニュートリノを伴わないdouble β 崩壊

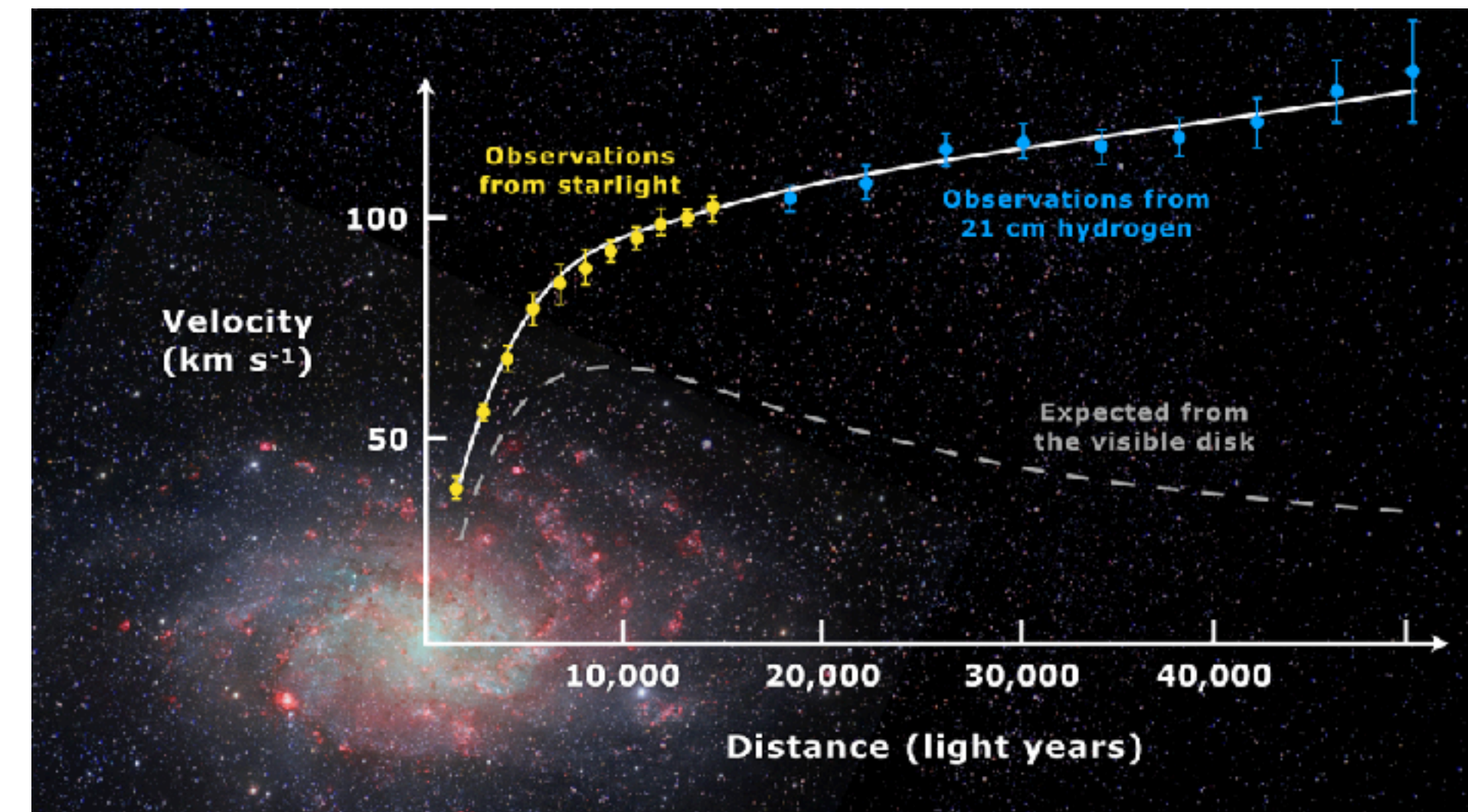
KamLAND-Zen Collaboration,
Phys.Rev.Lett. 130 (2023) 5, 051801

(マヨラナ)ニュートリノ質量 $\lesssim 0.1\text{eV}$

ニュートリノ質量 $\lesssim 1\text{eV}$

背理法:ダークマターであることを仮定すると

パウリの排他率



∴銀河中心付近に十分な量、詰め込むことができない。

(Tremaine & Gunn 1979).

ニュートリノ質量 $\gtrsim 100\text{eV}$

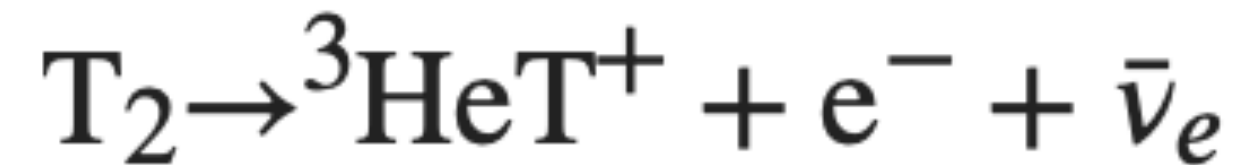
一般的なフェルミオンダークマターの質量制限でもある。

Q: ダークマターはニュートリノ？ 完全にNo

∴熱すぎる(ホットダークマター)+

ニュートリノの素粒子論的性質

-トリチウム分子崩壊からの制限



The KATRIN Collaboration. 2022

ニュートリノ質量 $\lesssim 1\text{eV}$

-ニュートリノを伴わないdouble β 崩壊

KamLAND-Zen Collaboration,
Phys.Rev.Lett. 130 (2023) 5, 051801

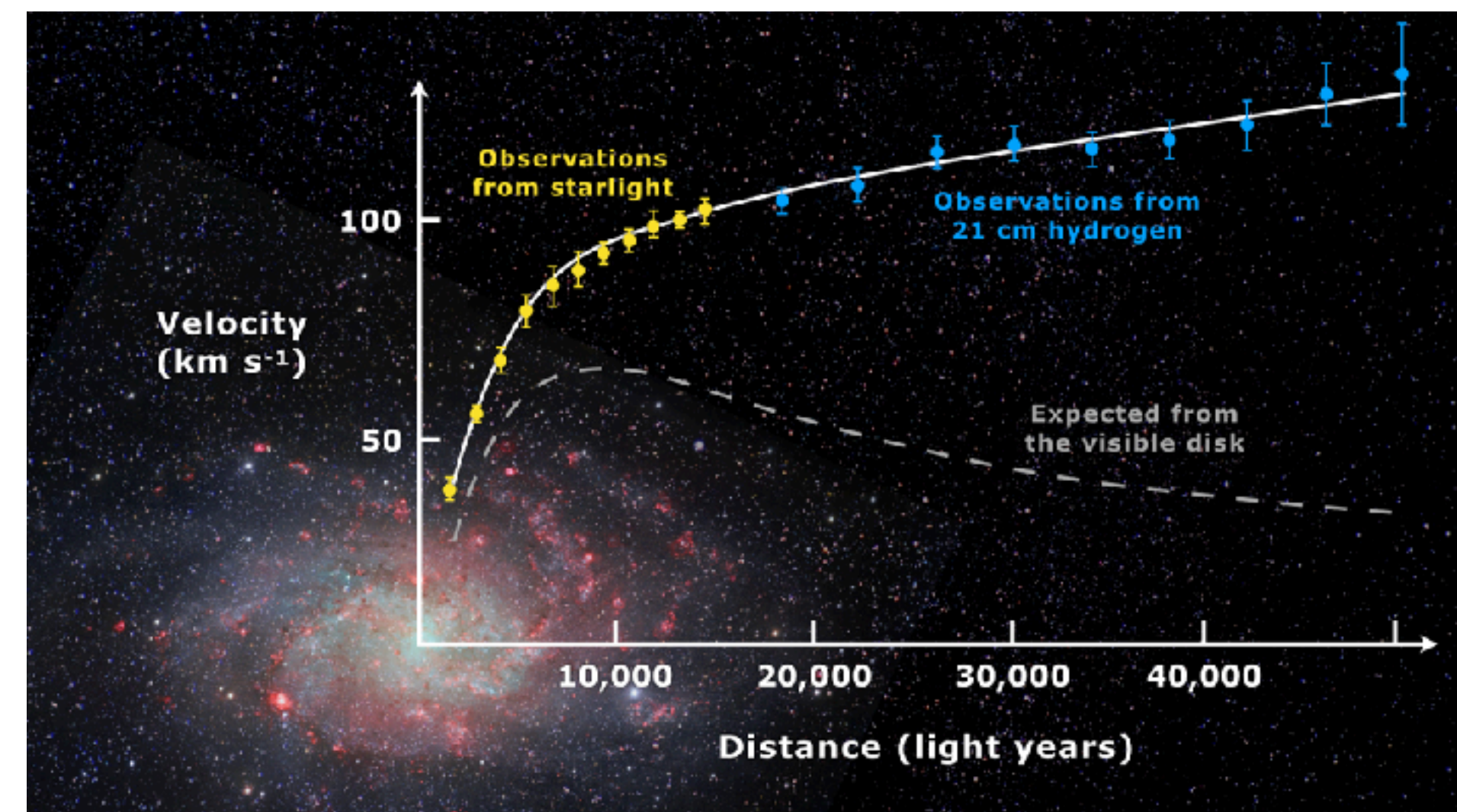
(マヨラナ)ニュートリノ質量 $\lesssim 0.1\text{eV}$

ニュートリノ質量 $\lesssim 1\text{eV}$

矛盾

背理法:ダークマターであることを仮定すると

パウリの排他率



∴銀河中心付近に十分な量、詰め込むことができない。

(Tremaine & Gunn 1979).

ニュートリノ質量 $\gtrsim 100\text{eV}$

一般的なフェルミオンダークマターの質量制限でもある。

Q: ダークマターは標準模型の素粒子か? No

	I	II	III	
質量	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0
電荷	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
スピン	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ	g グルーオン
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム	γ 光子
レプトン	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$
	-1	-1	-1	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e 電子	μ ミュー粒子	τ タウ粒子	Z Zボソン
	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.433 \text{ GeV}/c^2$
	0	0	0	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	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	W Wボソン

電荷を持っている,
相互作用しすぎる,
寿命が短い

- 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

素粒子標準模型はダークマターを含まない。

ダークマターは新物理法則。

Q: ダークマターは標準模型の素粒子か？ No

	I	II	III		
質量	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
電荷	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
スピン	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u アップ	c チャーム	t トップ	g グルーオン	H ヒッグス粒子
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム	γ 光子	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e 電子	μ ミュー粒子	τ タウ粒子	Z Zボソン	
	$< 1.0 \text{ eV}$	$< 0.7 \text{ eV}$	$< 1.2 \text{ eV}$	$\approx 80.433 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e ニュートリノ	ν_μ ニュートリノ	ν_τ ニュートリノ	W Wボソン	

電荷を持っている,
相互作用しすぎる,
寿命が短い

- 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

素粒子、宇宙論、天文学
を統合すると棄却
 T_{eq} で放射であると理解された。

ゲージ粒子
ベクトル粒子

素粒子標準模型はダークマターを含まない。

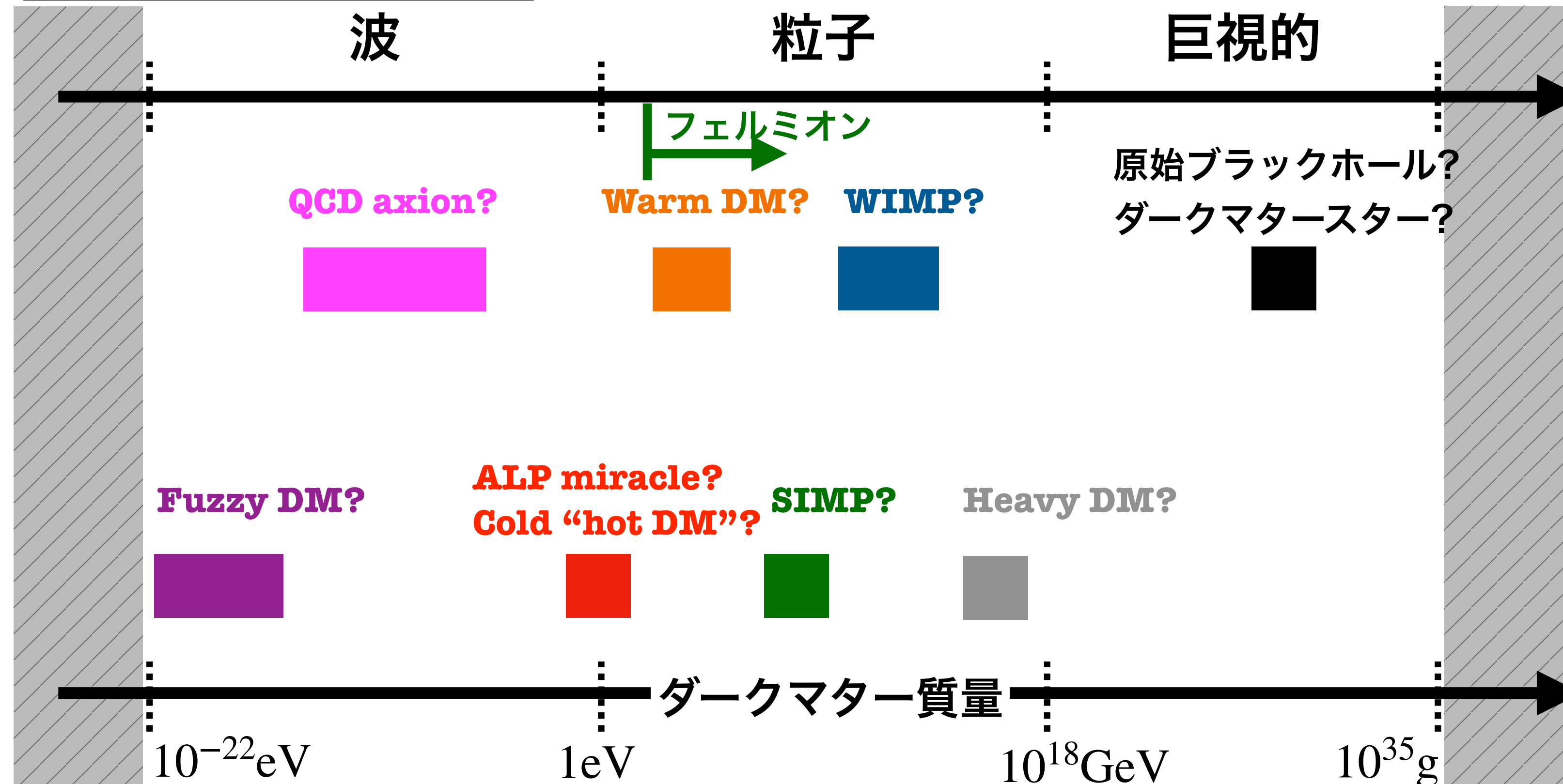
ダークマターは新物理法則。

・ 3. eVダークマターの今

-理論と実験-

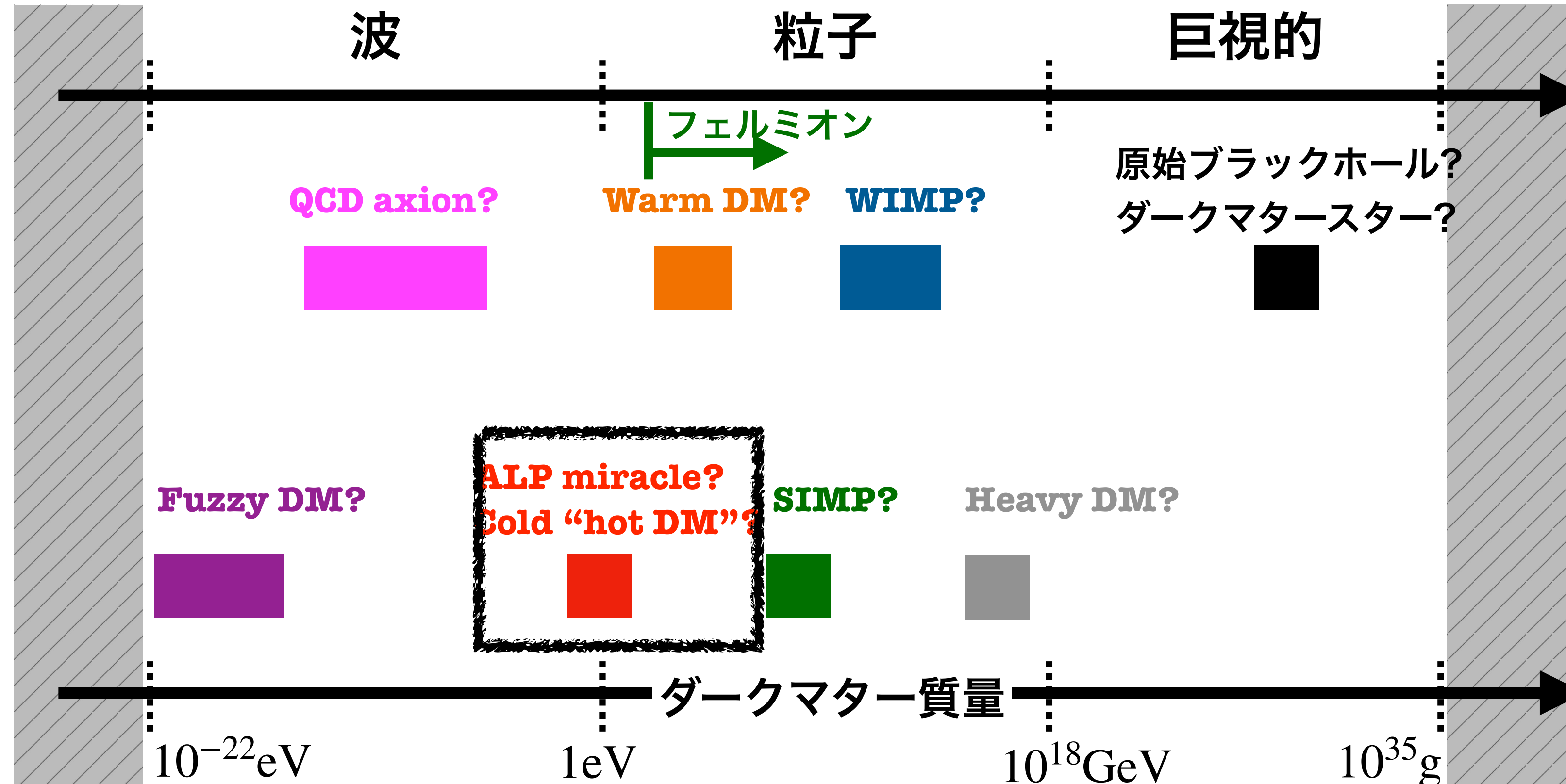
ダークマターの正体は、未だ素粒子宇宙論天文学の謎。
 パラダイムであったeVダークマターは候補の一つに
 成り下がった。

ダークマター候補



ダークマターの正体は、未だ素粒子宇宙論天文学の謎。
 パラダイムであったeVダークマターは候補の一つに
 成り下がった。

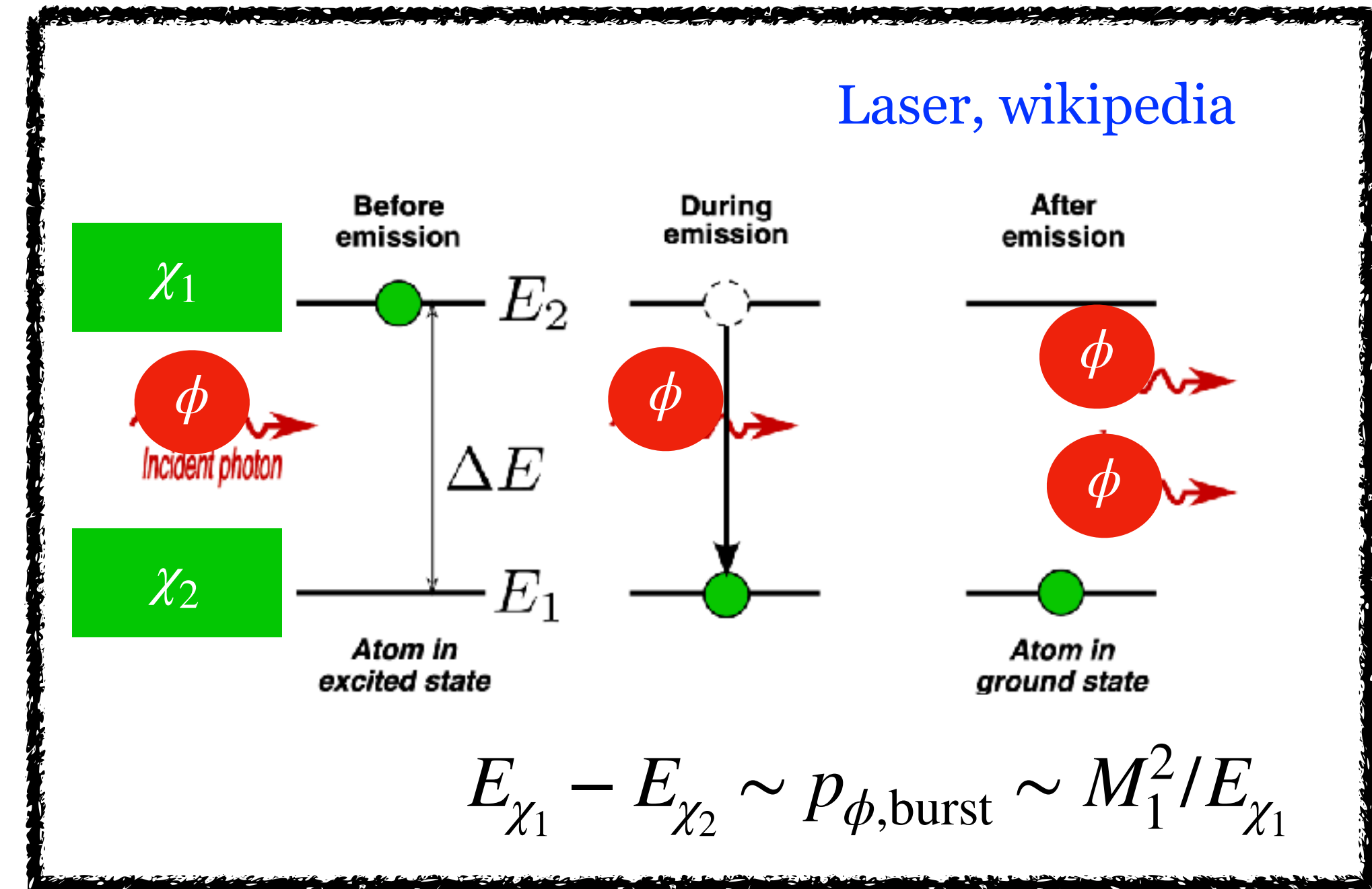
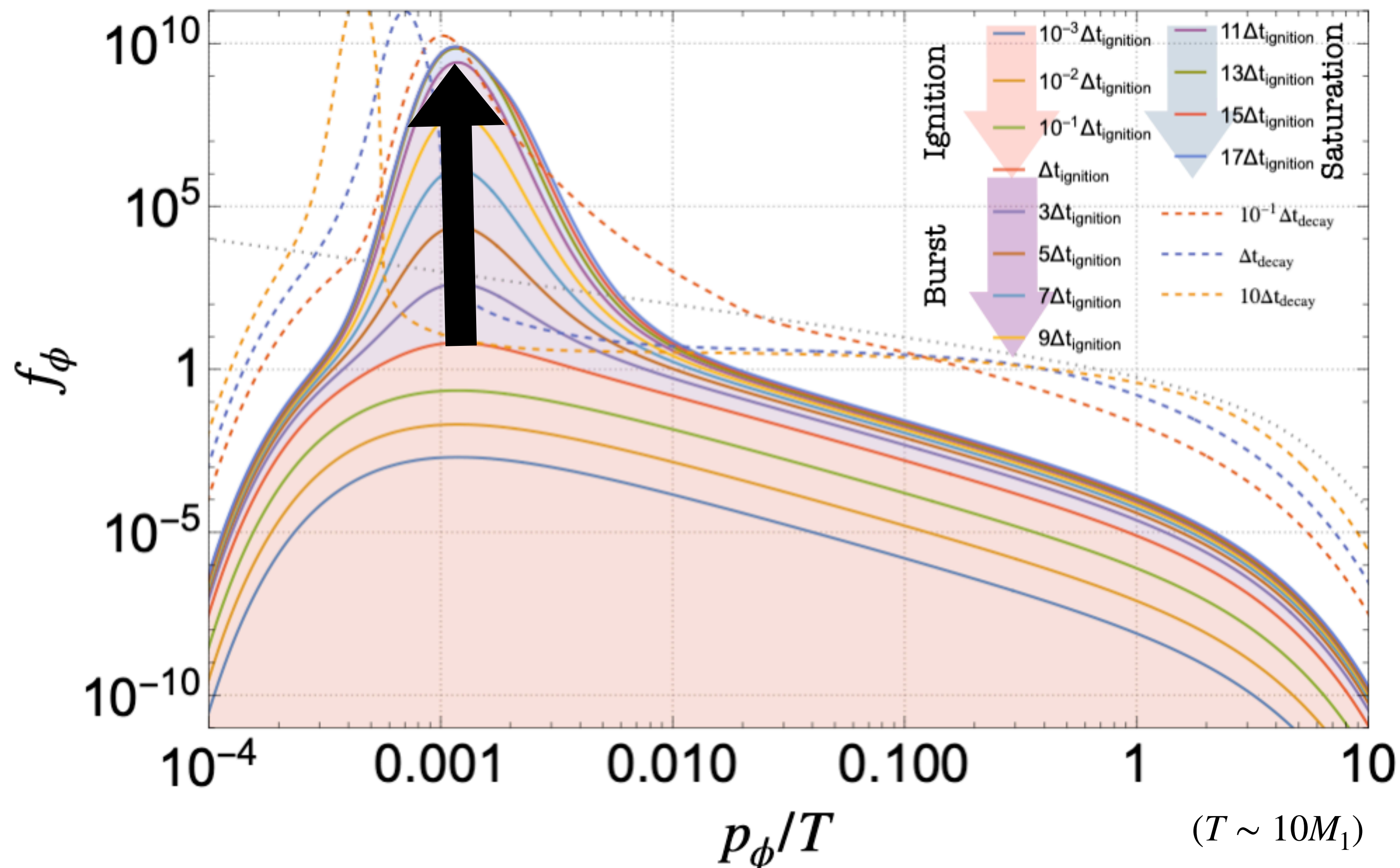
ダークマター候補



eV ダークマターの理論的候補1: 冷たいホットダークマター

WY, 2301.08735

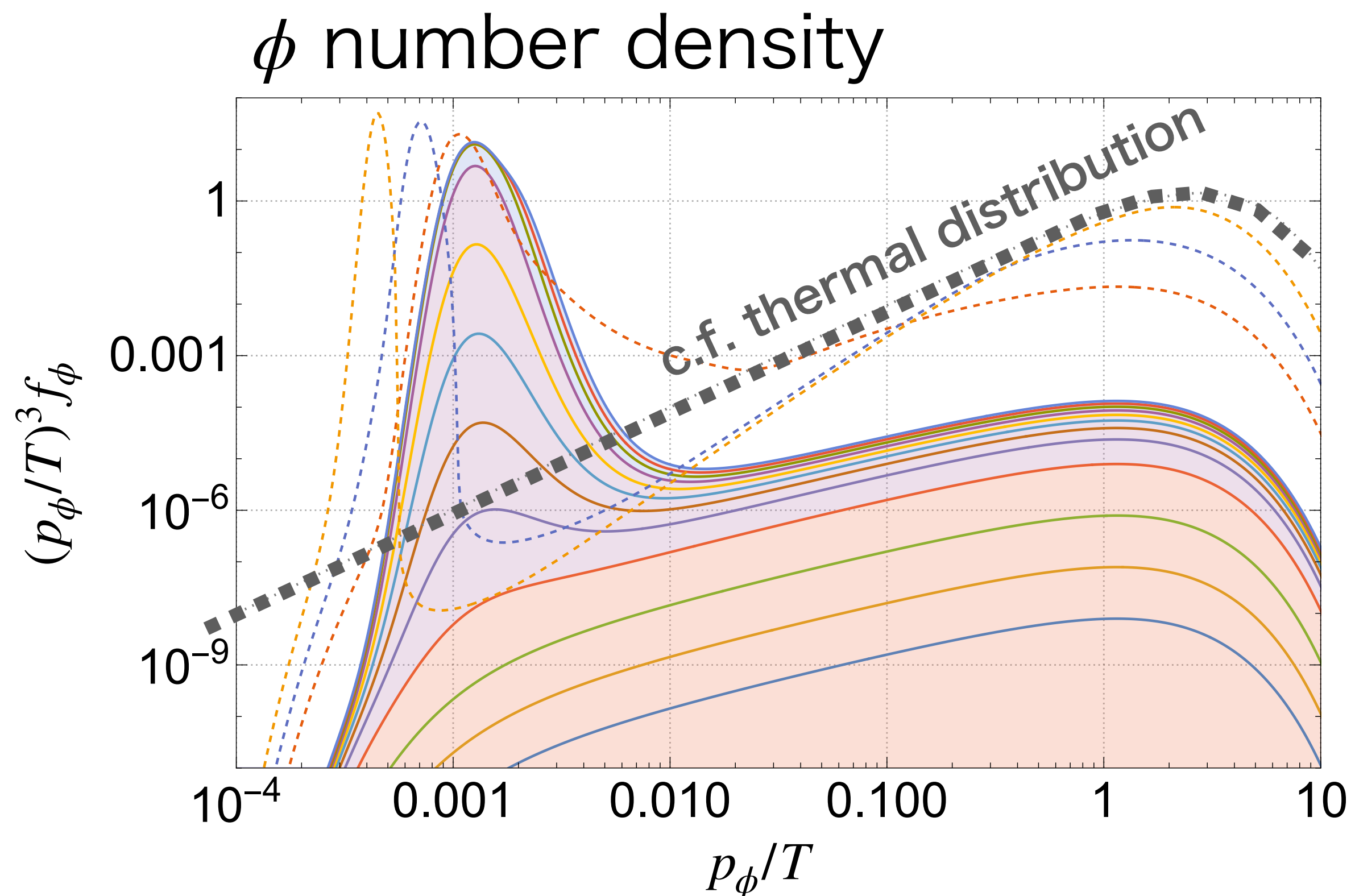
ボーズ増幅が効く生成には、小さい運動量が作られる。c.f. laser.



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

すぐに「準平衡状態」に達する。c.f. laser.

- **ホットダークマター**と同じ模型で若干弱く相互作用する場合にこの現象が起こる。

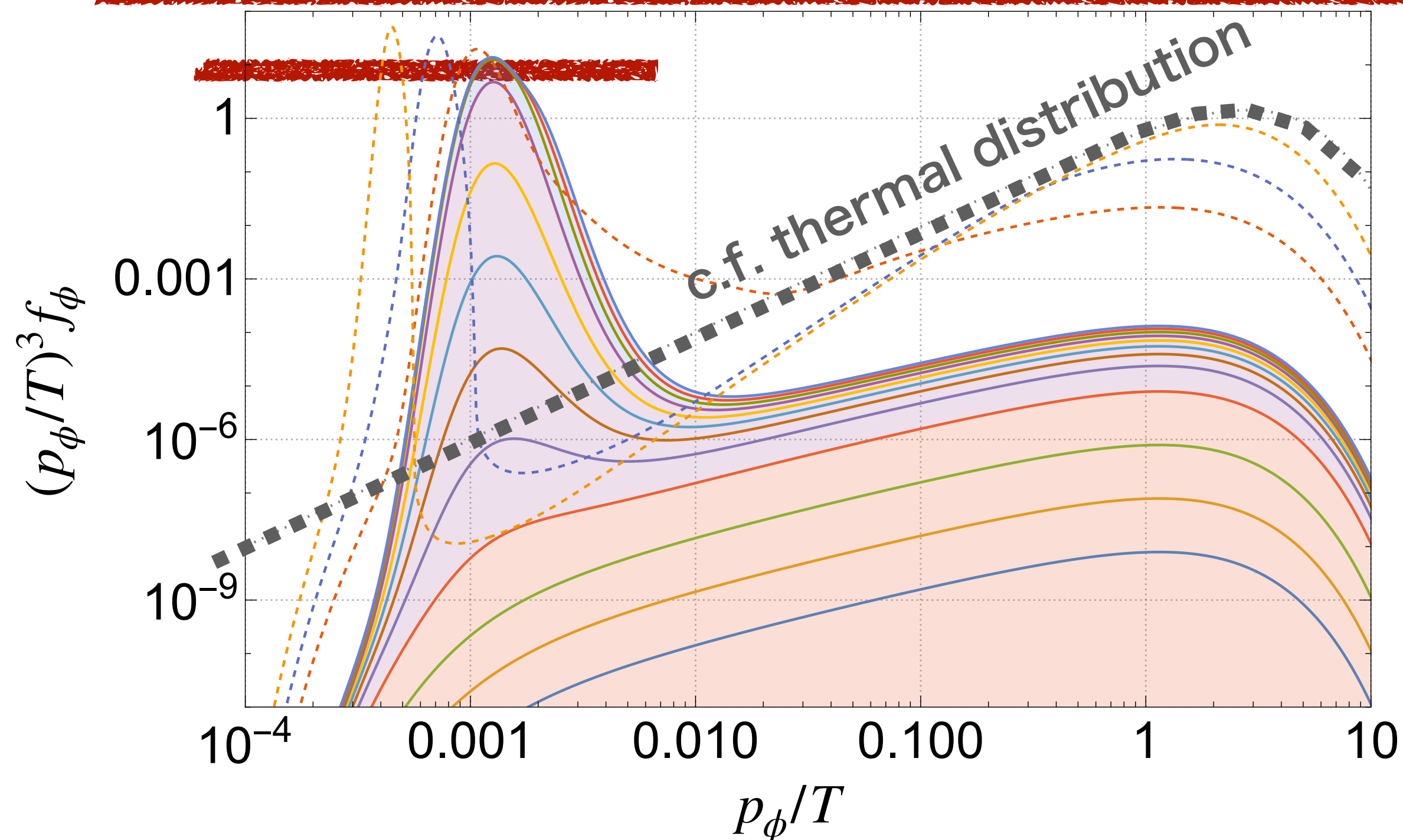


- $n_{\text{DM}} \sim T^3$.
- $\therefore T_{\text{eq}} \sim eV \rightarrow m_{\text{DM}} \sim eV$
- **ただし、冷たい。**

すぐに「準平衡状態」に達する。c.f. laser.

- **ホットダークマター**と同じ模型で若干弱く相互作用する場合にこの現象が起こる。

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



- $n_{\text{DM}} \sim T^3$.
- $\therefore T_{\text{eq}} \sim eV \rightarrow m_{\text{DM}} \sim eV$
- **ただし、冷たい。**

ニュートリノはやっぱりだめだけど、
eVアクシオンなどボゾン**はホットダークマ
ター**と同じセットアップでも、**冷たくなる!**

eVダークマターまだ有望?

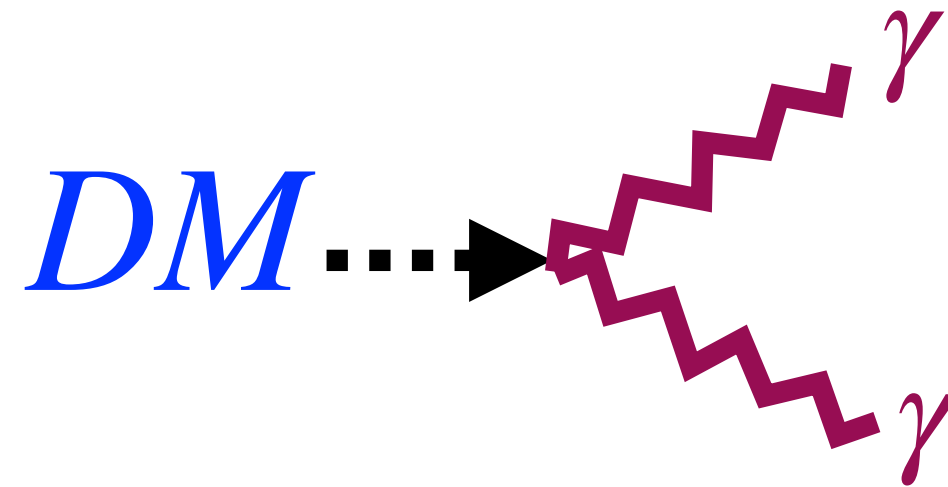
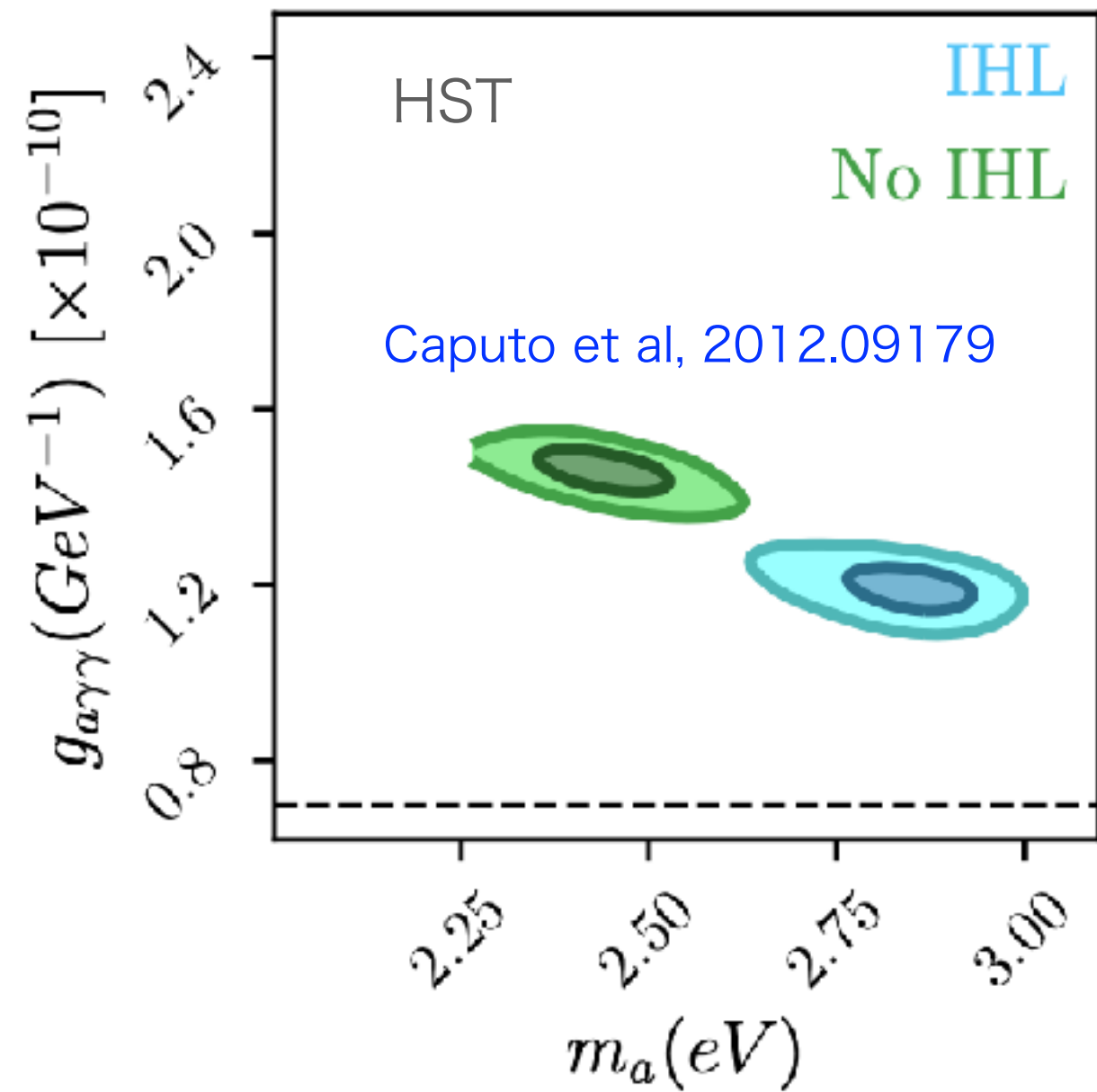
eV ダークマターの実験的探索

eV-ダークマターの観測的背景:

非等方銀河系外背景光(EBL)

データの解析はeV DMを示唆した。

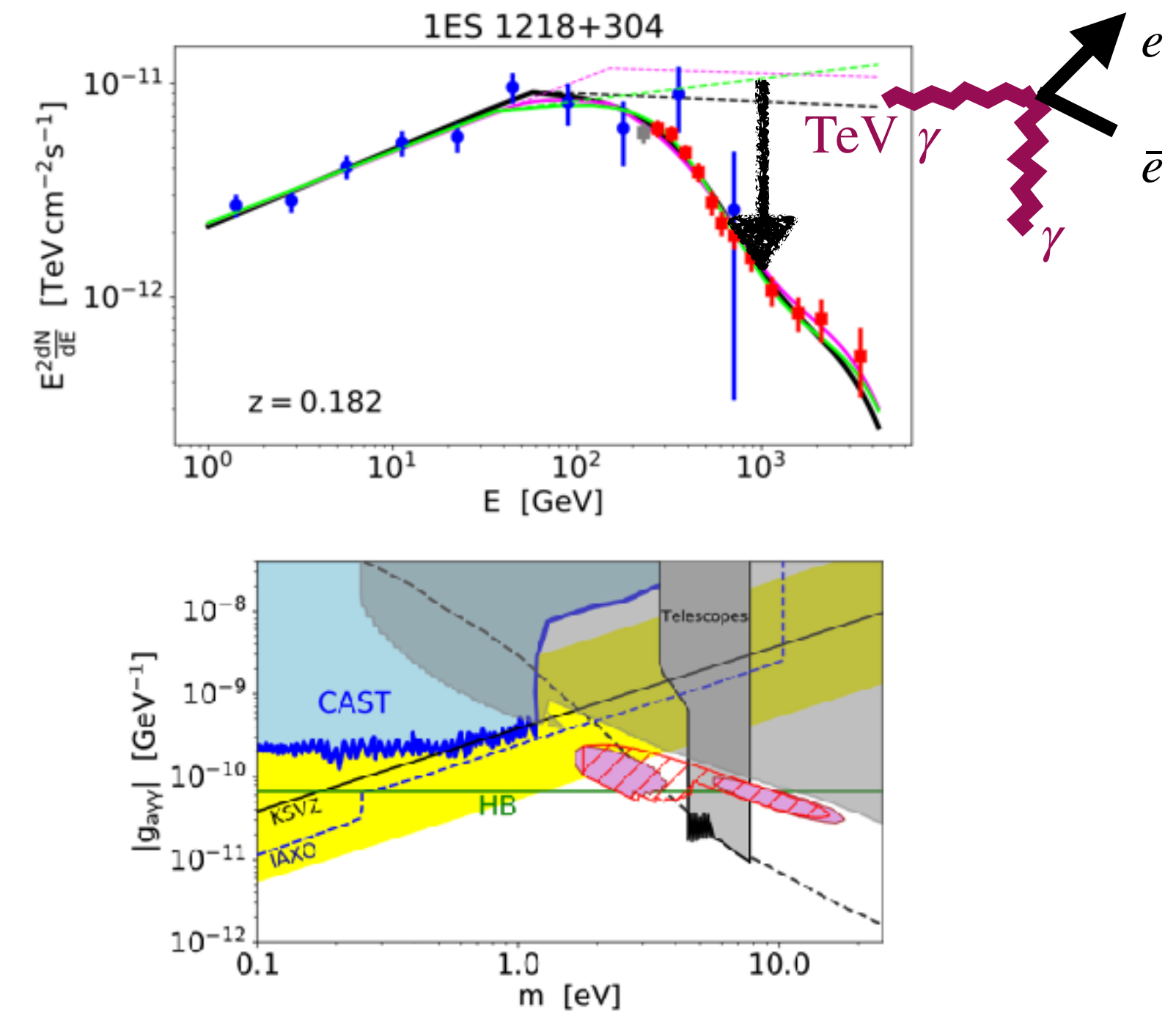
Gong et al 1511.01577



質量 $\sim 1\text{eV}$,
光子結合 $\sim 10^{-10}\text{GeV}^{-1}$,

TeV γ 線スペクトラムデータは
等方EBLを余分に作るeV DM
を示唆した。

Korochkin, et al,
1911.13291



水平分岐星の冷却異常から軽い粒子が
示唆されている。

Ayala et al 1406.6053

質量 $< 1\text{keV}$, 光子結合 $\sim 10^{-10}\text{GeV}^{-1}$,

理論があって、観測ヒントもあって、

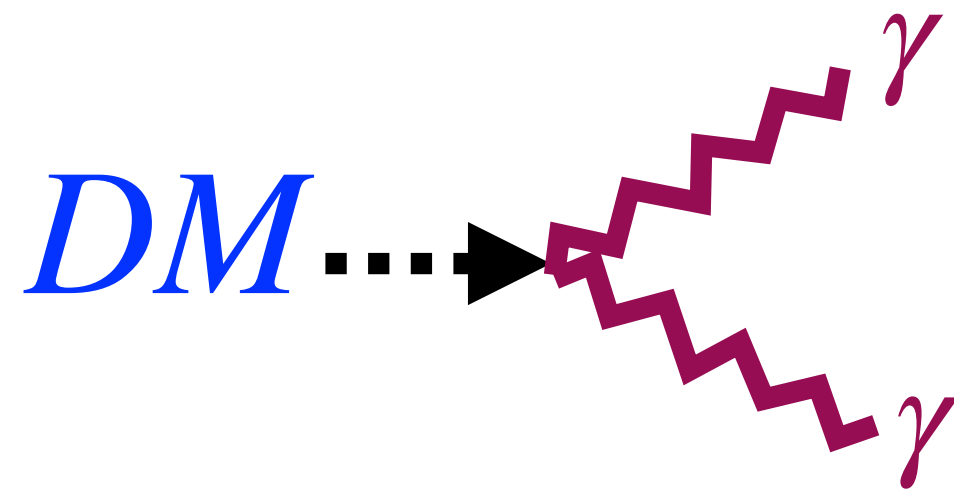
結構有望じゃね？

理論があって、観測ヒントもあって、

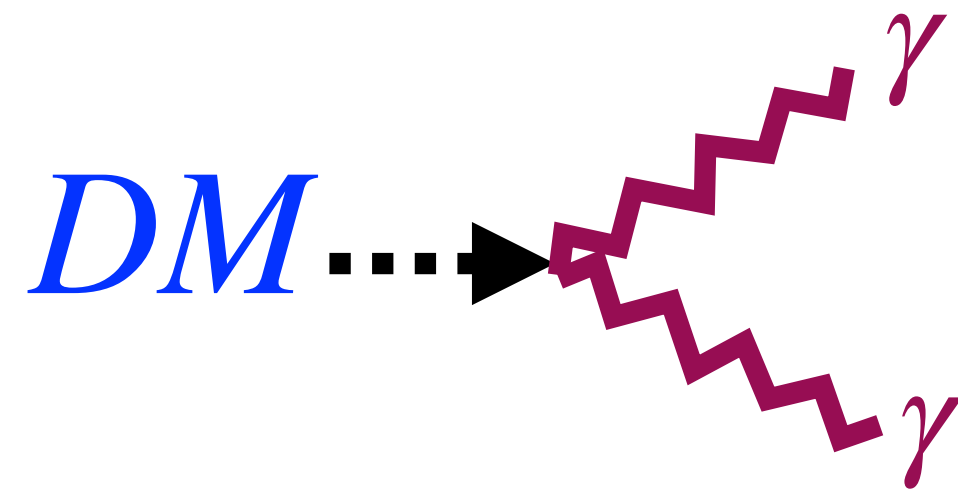
結構有望じゃね？

残念ながら、40年のブランクで、

eVダークマター特化実験はあまりない。🙄

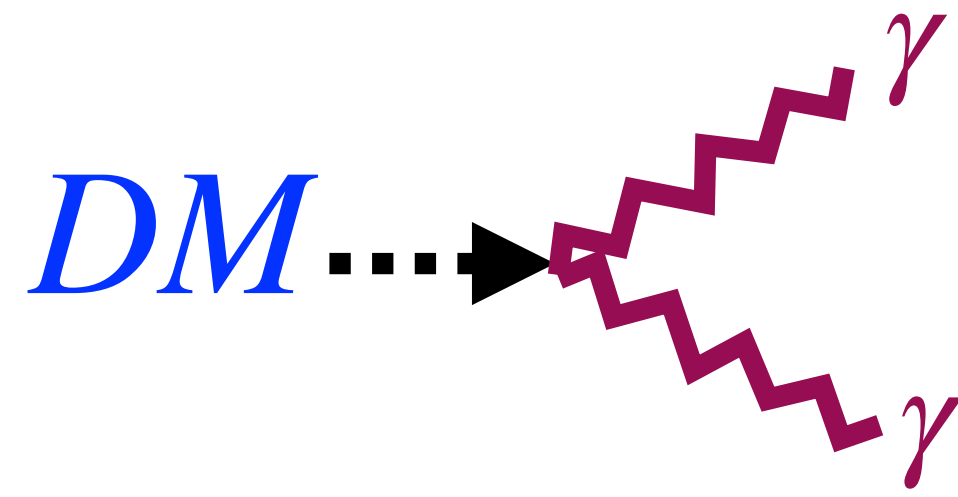


$$\lambda_\gamma \simeq \frac{2\pi}{1\text{eV}/2} \hbar c = \frac{2 \times 2\pi}{1\text{eV}} \times 0.2\text{eV}\mu\text{m} \sim 2.4\mu\text{m}$$



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

赤外線や。今観測技術革新がやばいやつ。

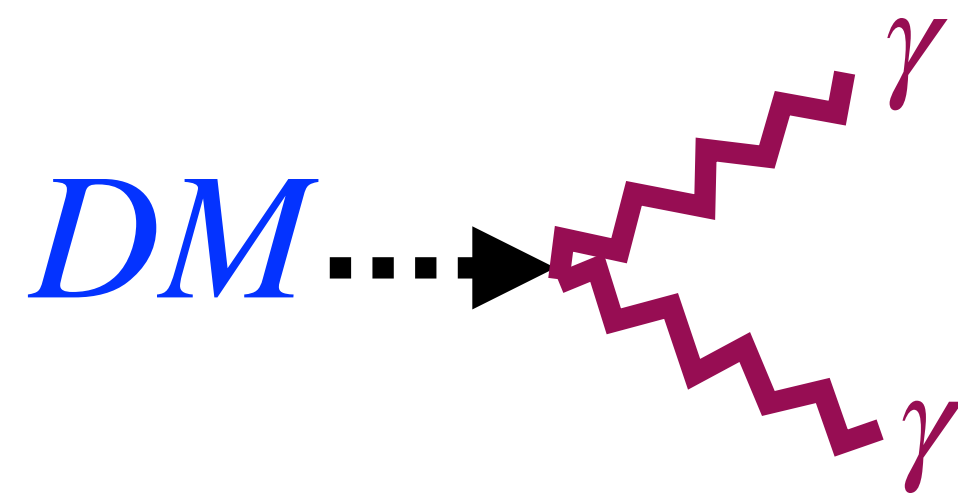


$$\lambda_\gamma \simeq \frac{2\pi}{1\text{eV}/2} \hbar c = \frac{2 \times 2\pi}{1\text{eV}} \times 0.2\text{eV}\mu\text{m} \sim 2.4\mu\text{m}$$

赤外線や。今観測技術革新がやばいやつ。

eVダークマター、今が旬？

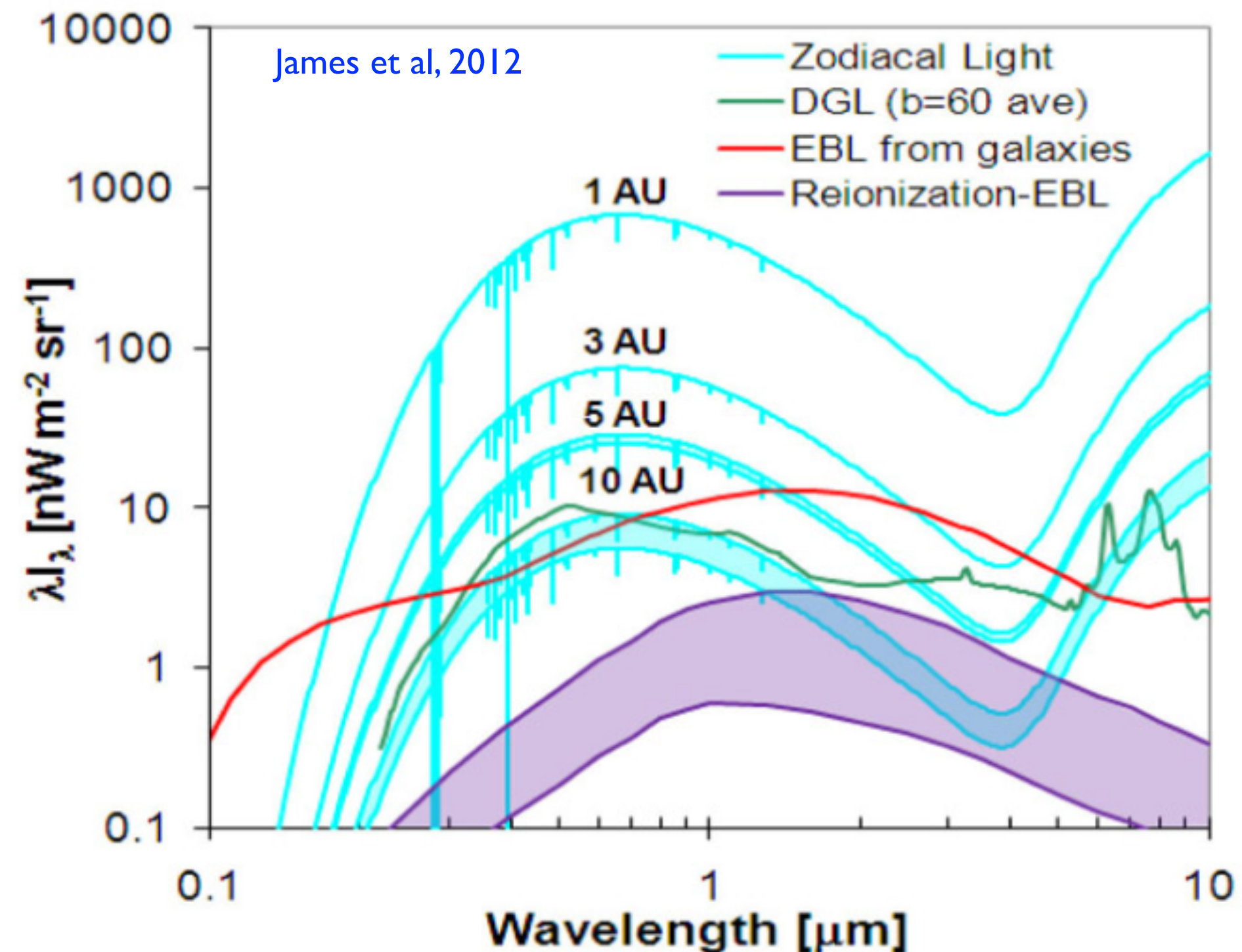
難しさ：バックグラウンドが多め。 いけるのか？



$$E_\gamma \simeq m_{\text{DM}}c^2/2 \sim eV \sim hc/\mu\text{m}:$$

(近)赤外線輝線

∴冷たい、銀河周りの存在量がわかっている。

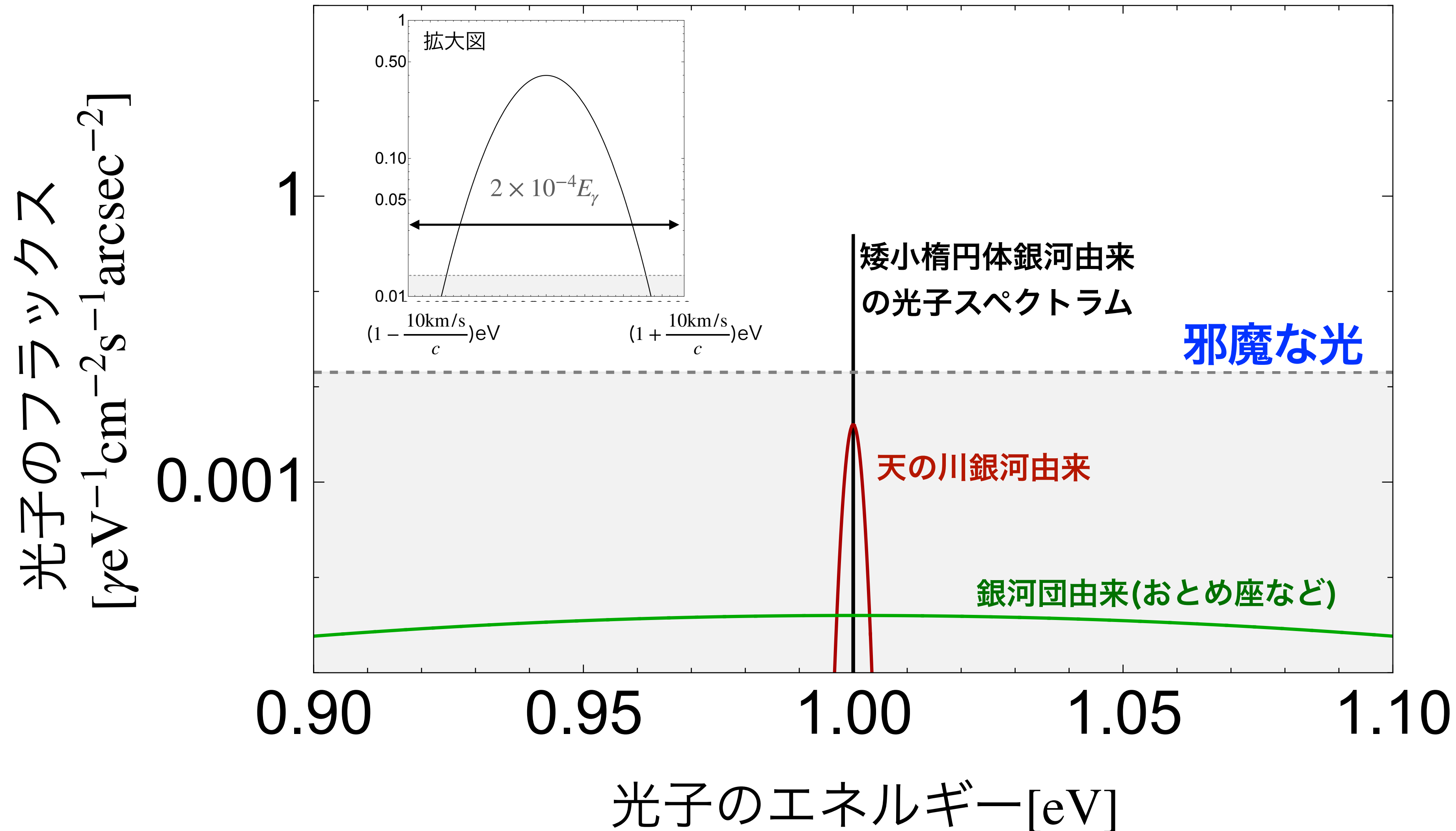


- 銀河まわりから**(近)赤外線狭線幅輝線**を探ることで発見可能。
- 従来では、黄道光、熱輻射などのバックグラウンドが著しいため、探索は困難。

ダークマター由来の光は**狭線幅輝線だ！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,

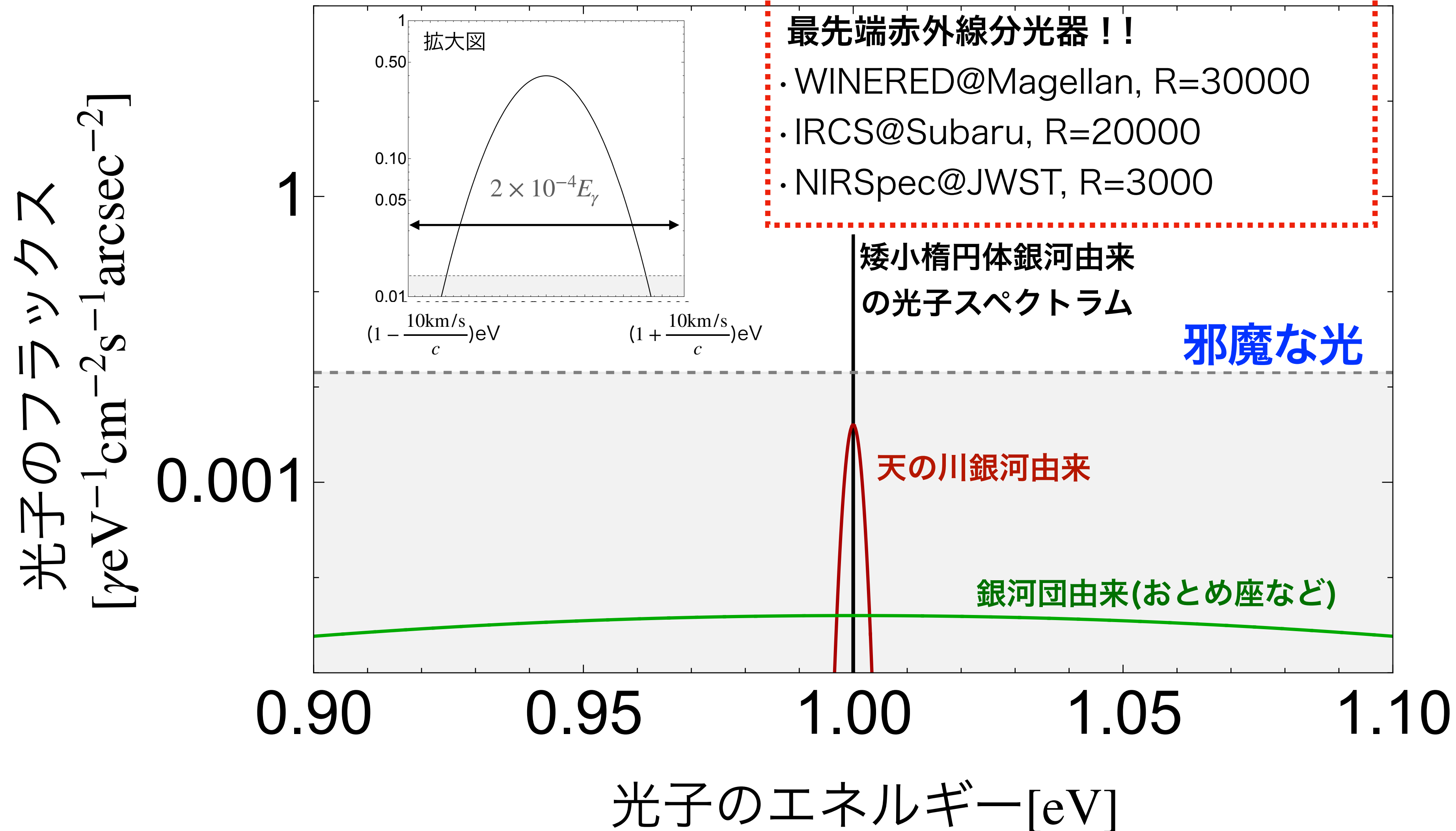
暗黒物質の質量 = 2eV, 光子結合 = 10^{-10}GeV^{-1}



ダークマター由来の光は**狭線幅輝線だ！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,

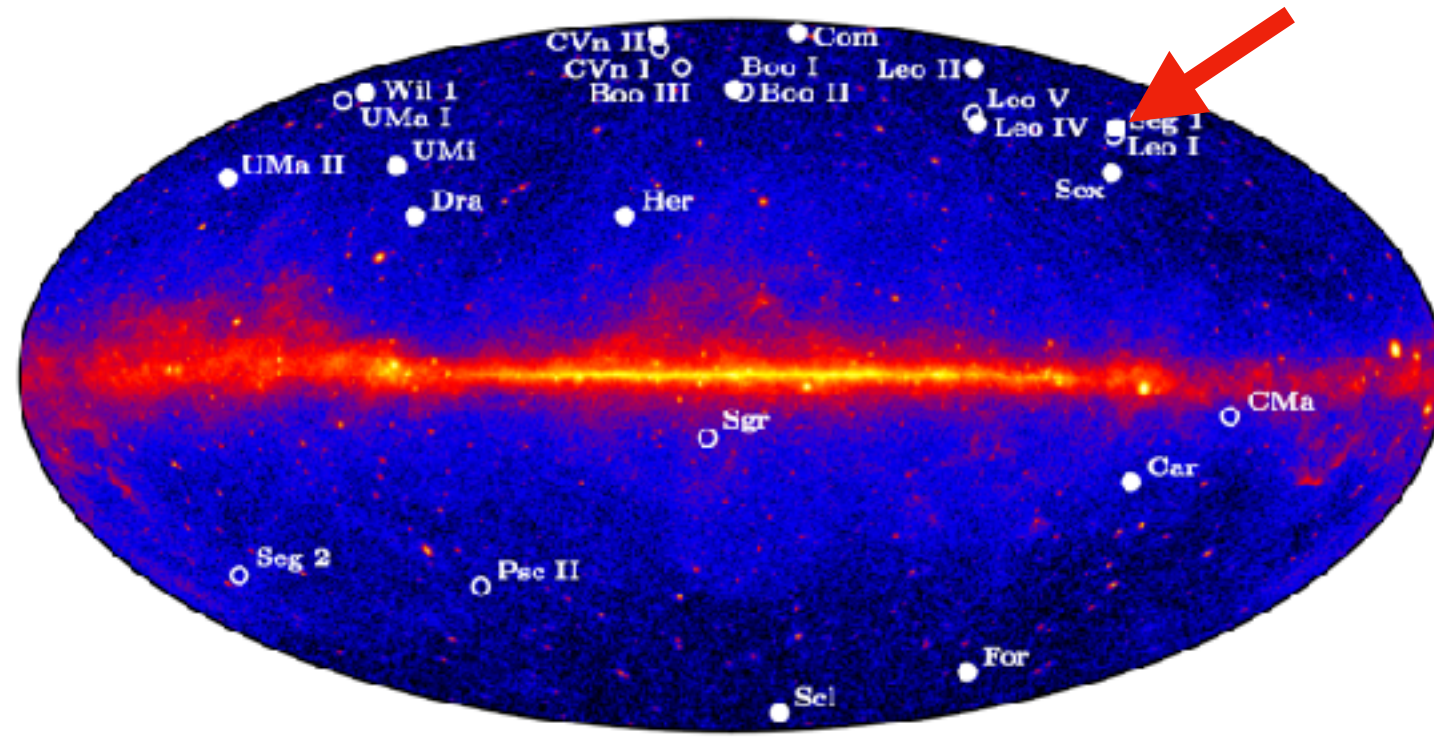
暗黒物質の質量 = 2eV, 光子結合 = 10^{-10}GeV^{-1}



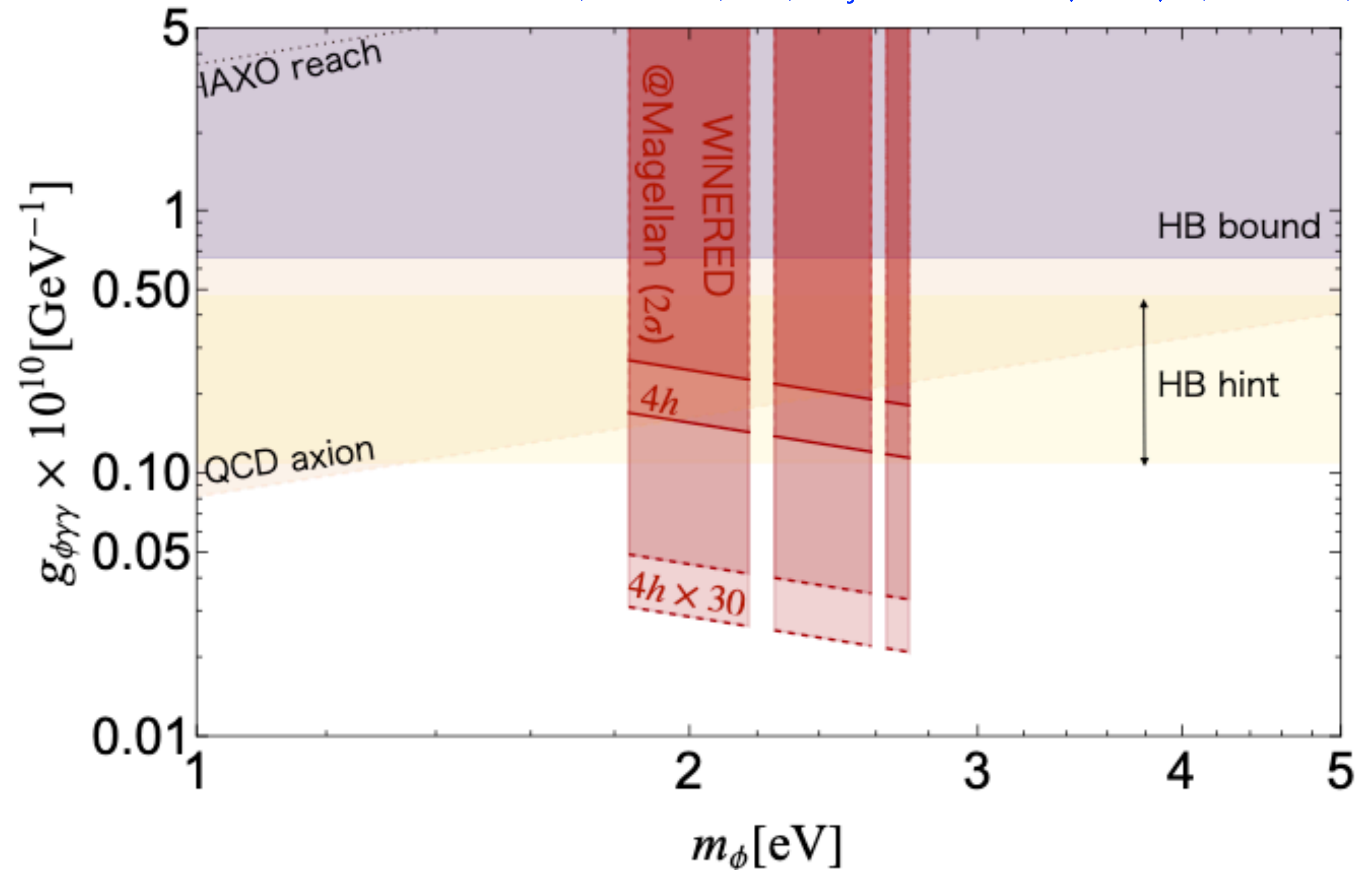
eV DM search with WINERED @ Magellan

高分解能を持つ最先端赤外線分光器は
絶好のeVダークマター検出器

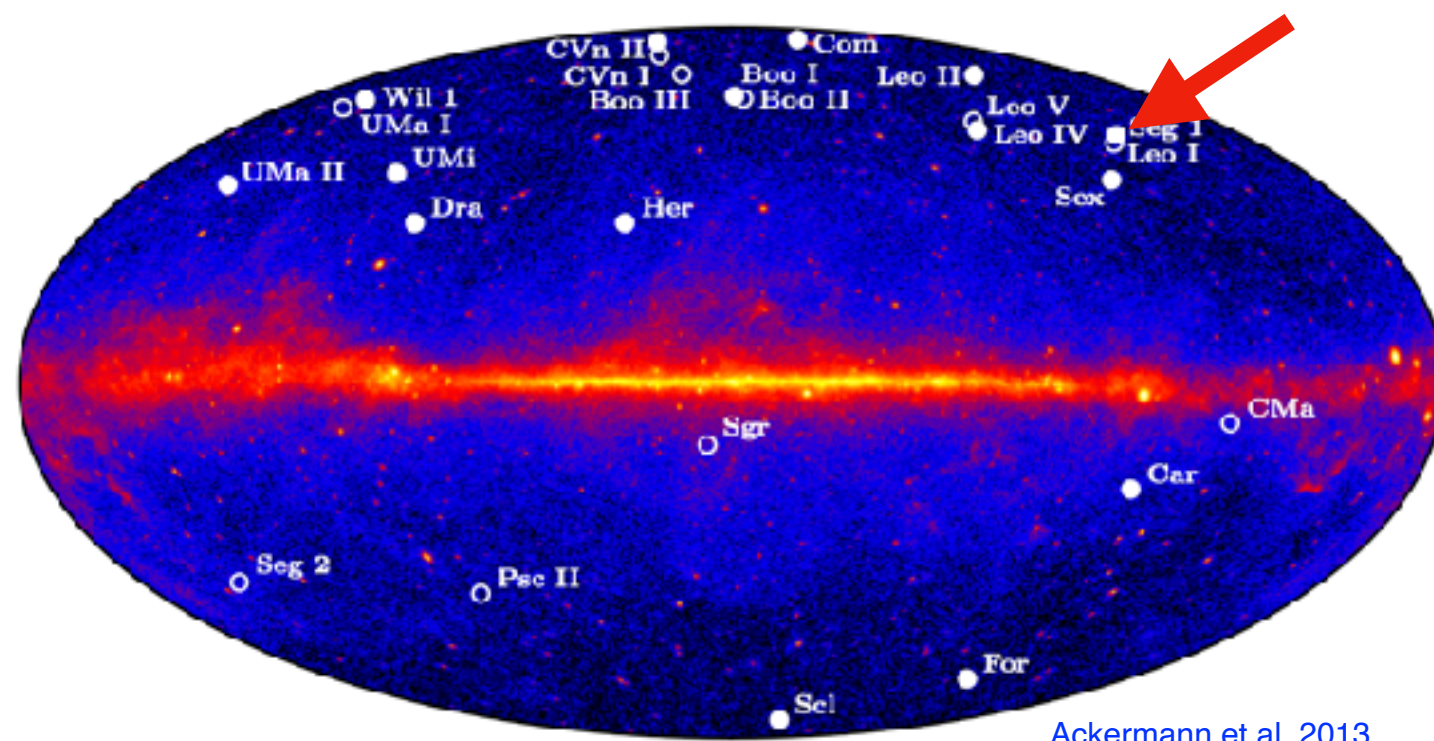
T. Bessho, Y. Ikeda, WY, Phys.Rev.D 106 (2022) 9, 095025,



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

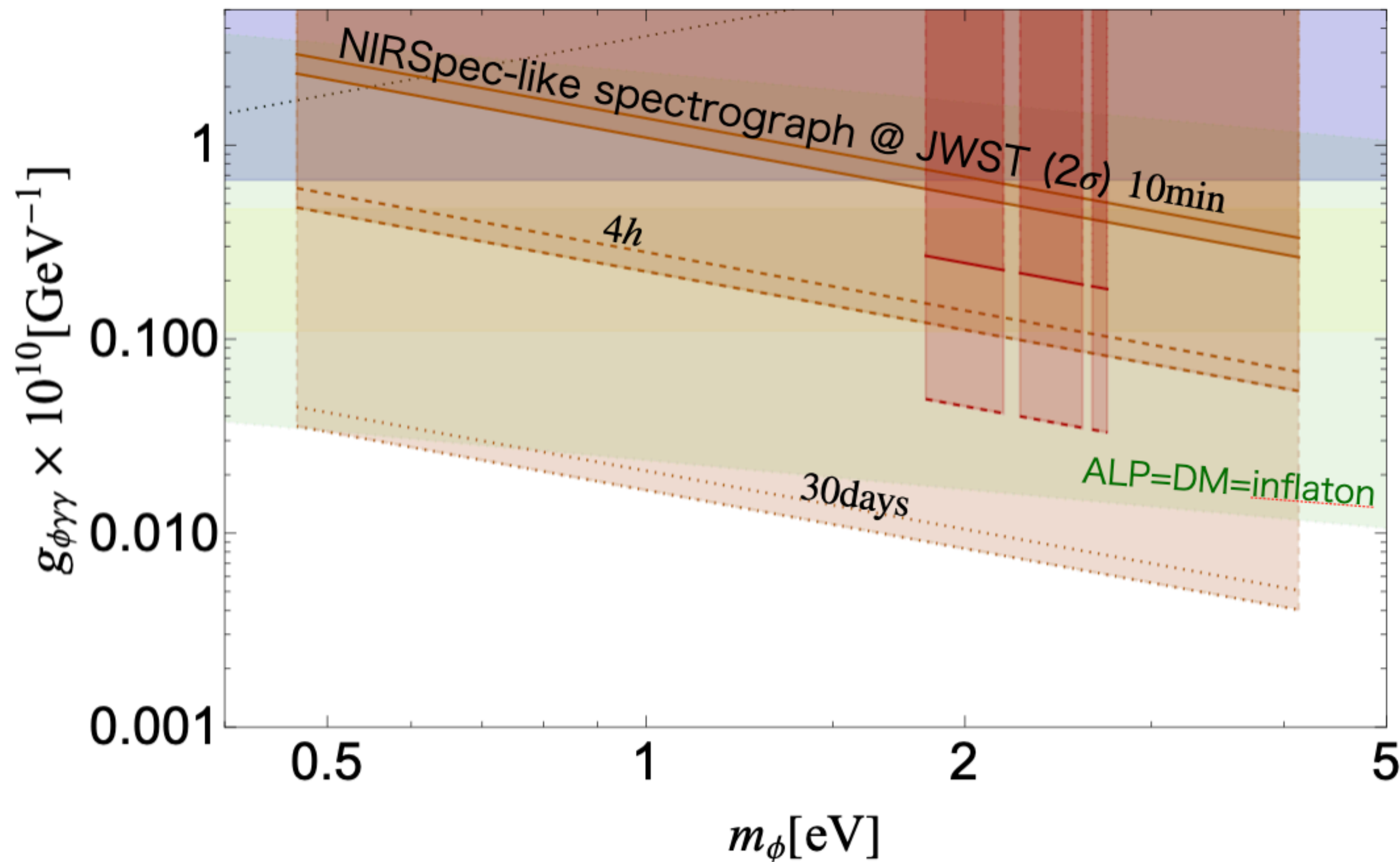
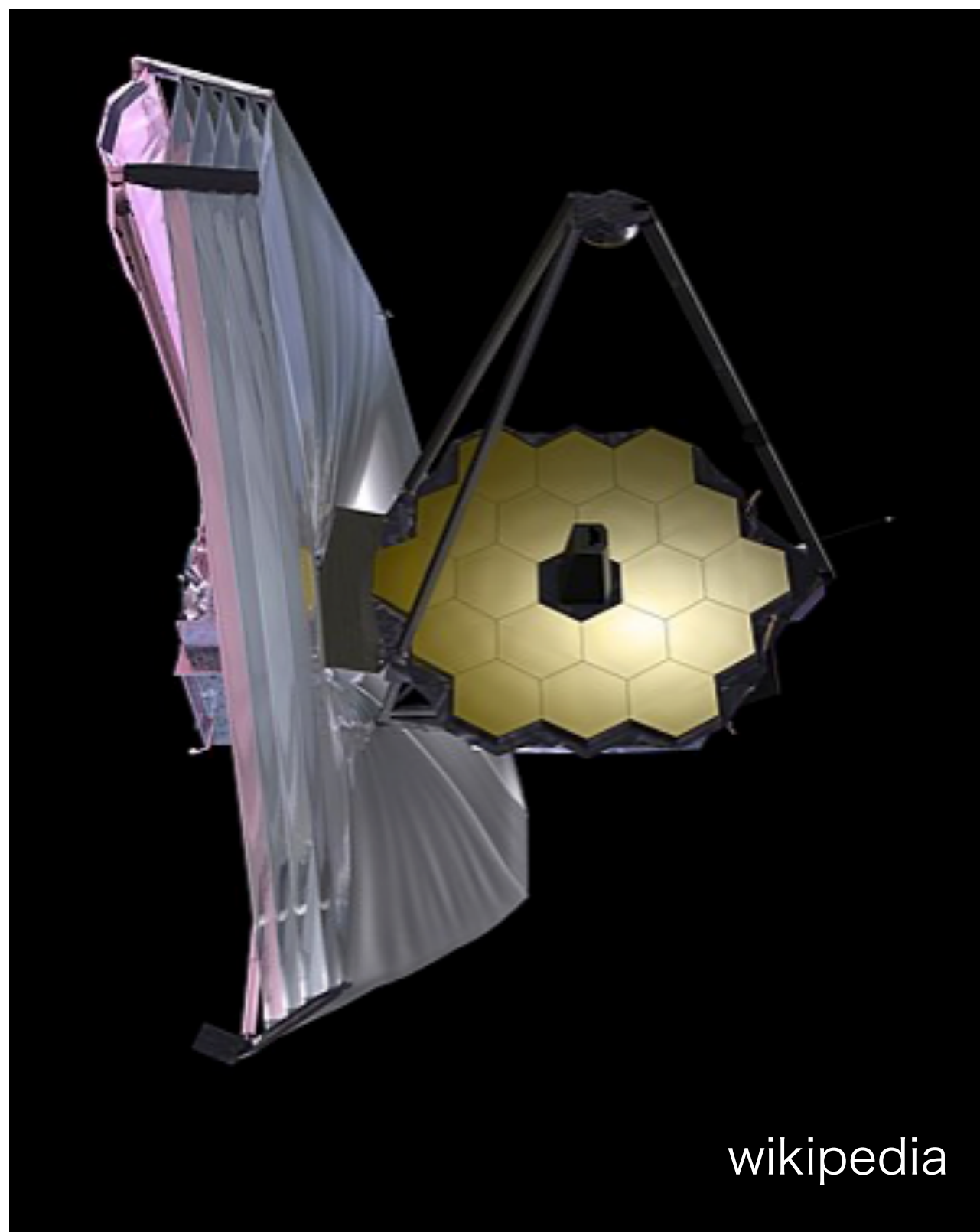


eV DM search with NIRSpec @ JWST



JWSTはR~3000だけど、大気の輻射がないから、強い。

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



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. Observation 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

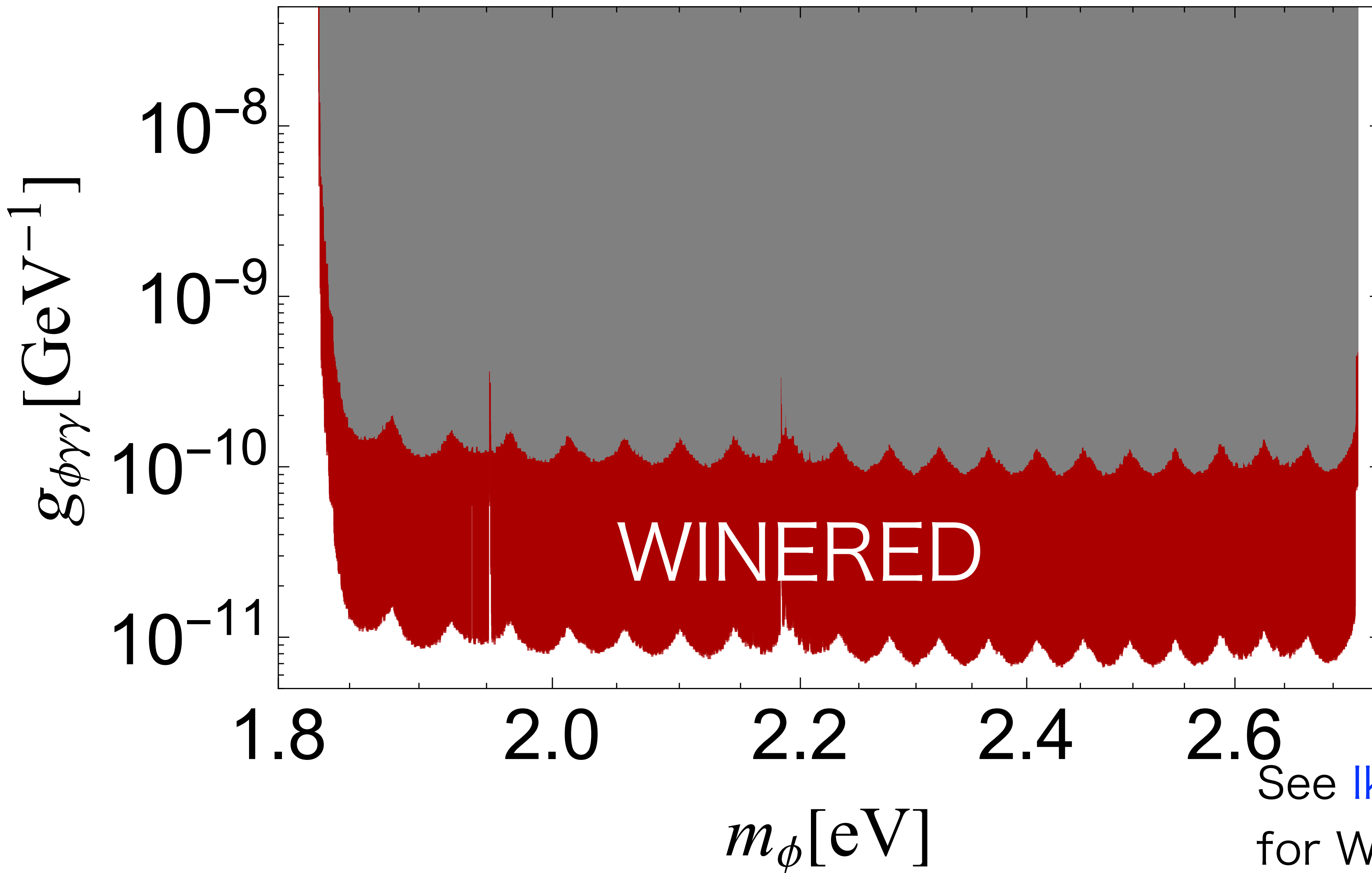
Table. I. Observation logs. Here, Regions 1, 2, and 3 are for Leo V, Tucana II, and Tucana II, respectively. resolution. T_I denotes the total integration time. [Simbad](#), [Inger et al 0002110](#)

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

Result: 4時間の観測で世界記録でした。

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



ダークマターっ
ぽいデータも
あったので、
再観測計画中

See [Ikeda et al. 2022PASP..134a5004I](#)
for WINERED



• 4. 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**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**いらなない。
- 改良の余地がある。



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**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**いらなない。
- 改良の余地がある。



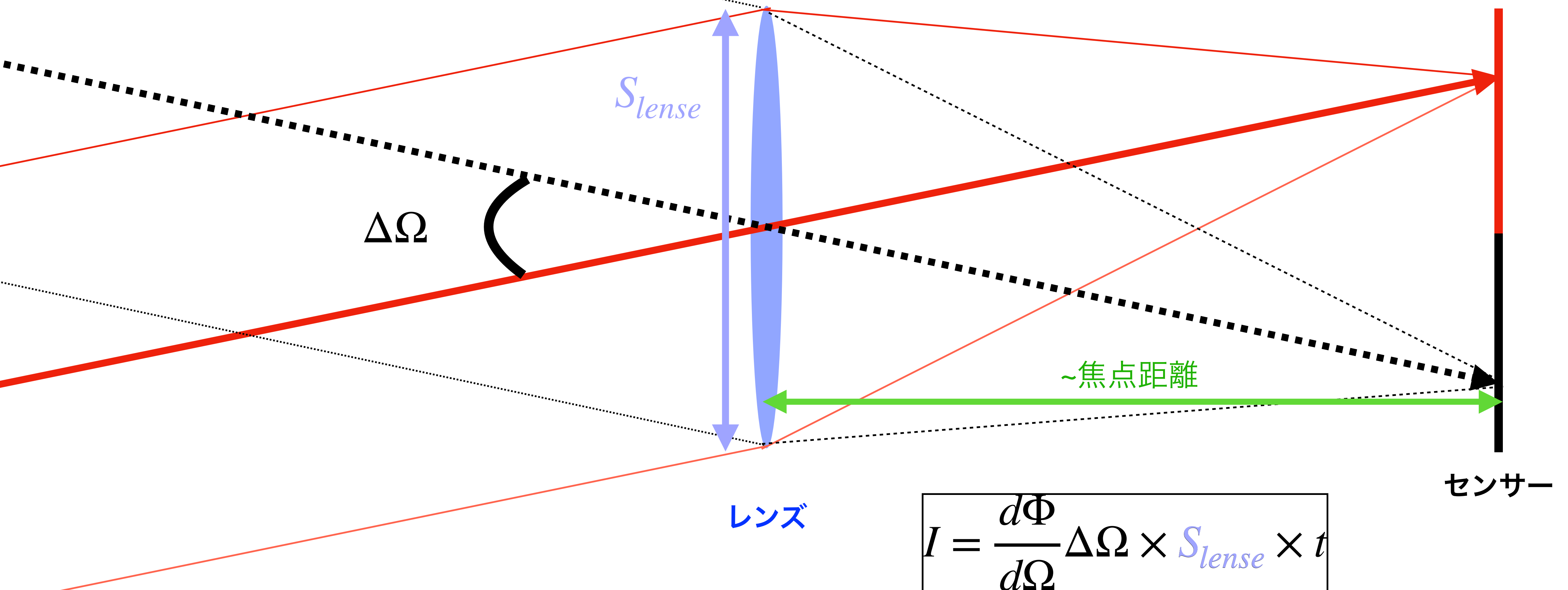
DRAGON BALL Z, A. Toriyama

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

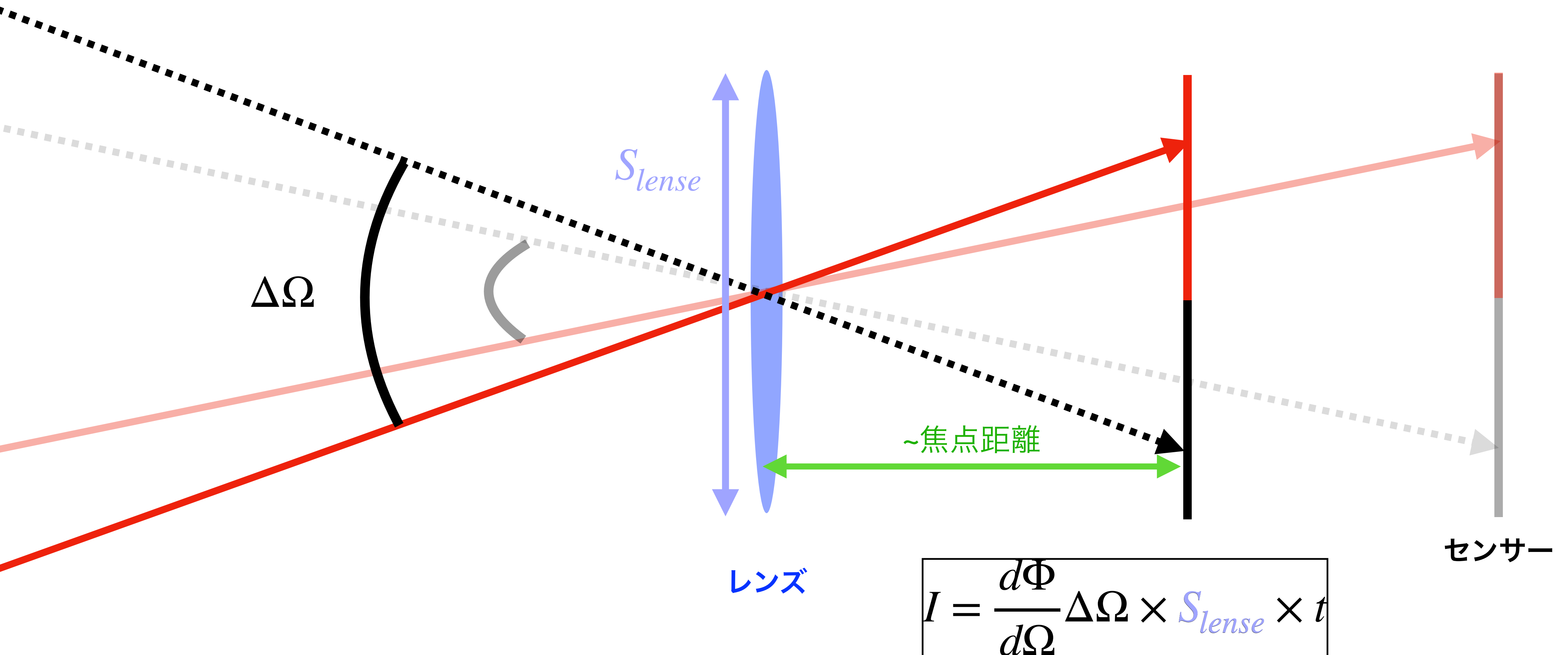


$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \Delta\Omega \times S_{lense} \times t$$

• 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)

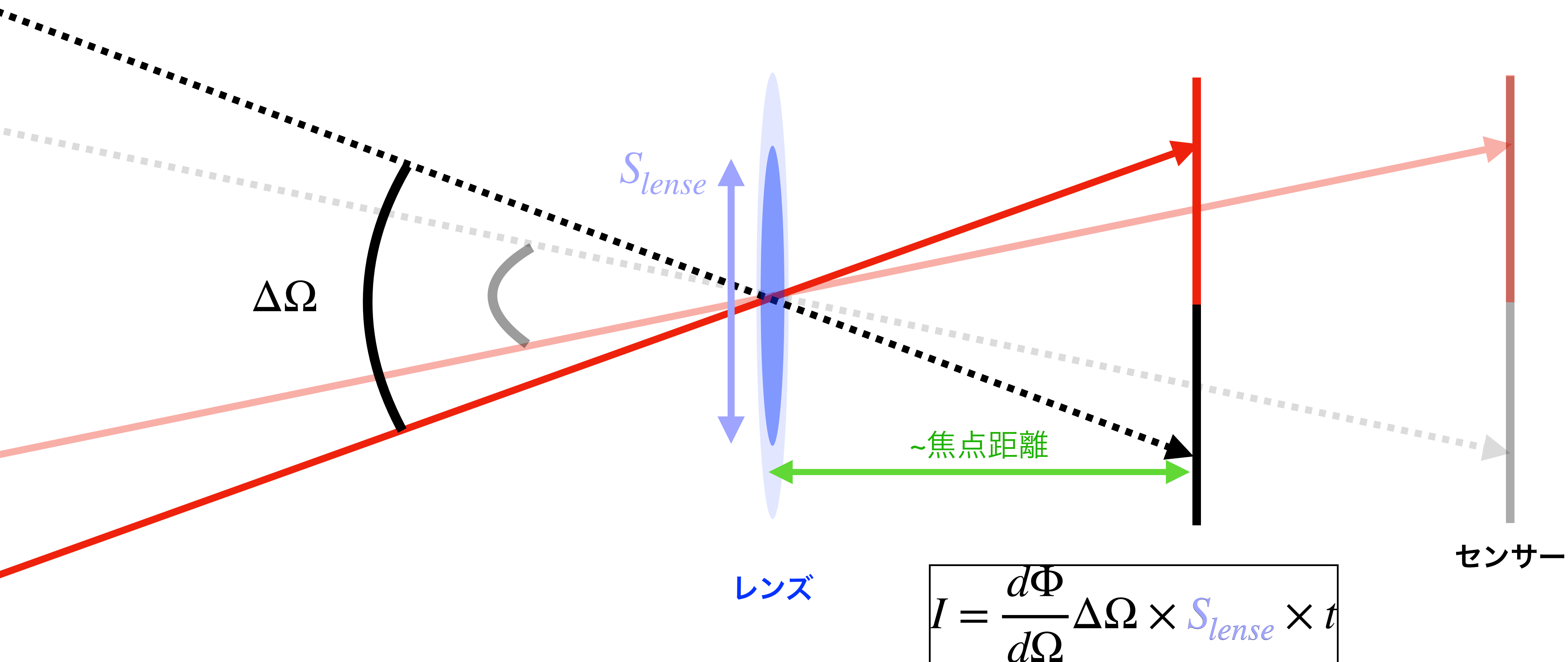
焦点距離 ↘ 空間分解能 ↘ 視野 ↗ : 明るさ ↗ (光源の角度依存性がない場合)



• 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)

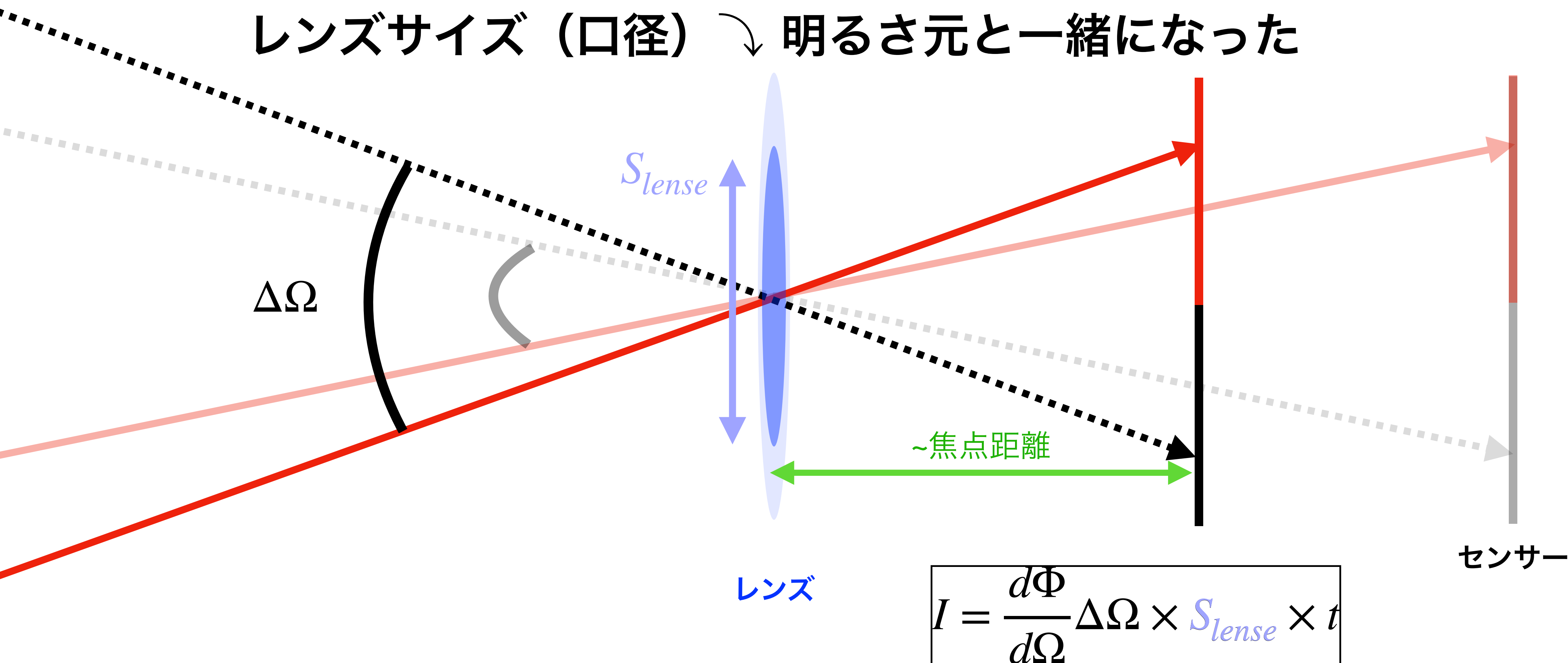


• 光学系の空間分解能と明るさと大きさ

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



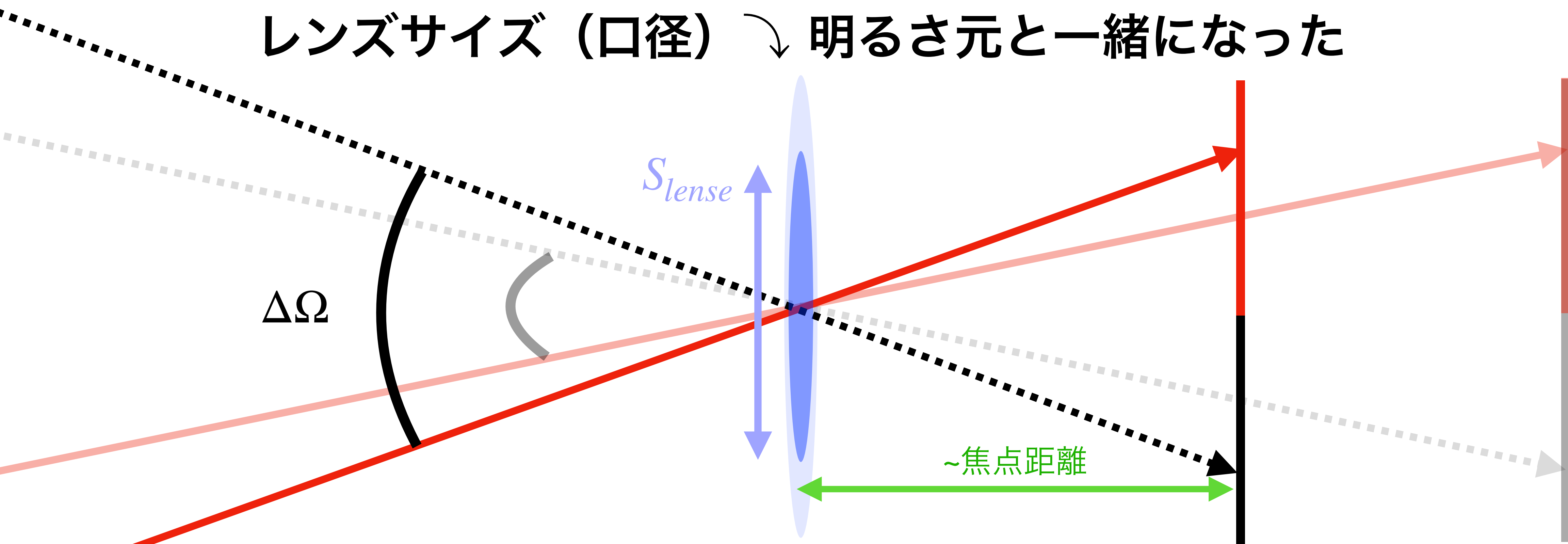
$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \Delta\Omega \times S_{lense} \times t$$

• 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！！！！

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

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

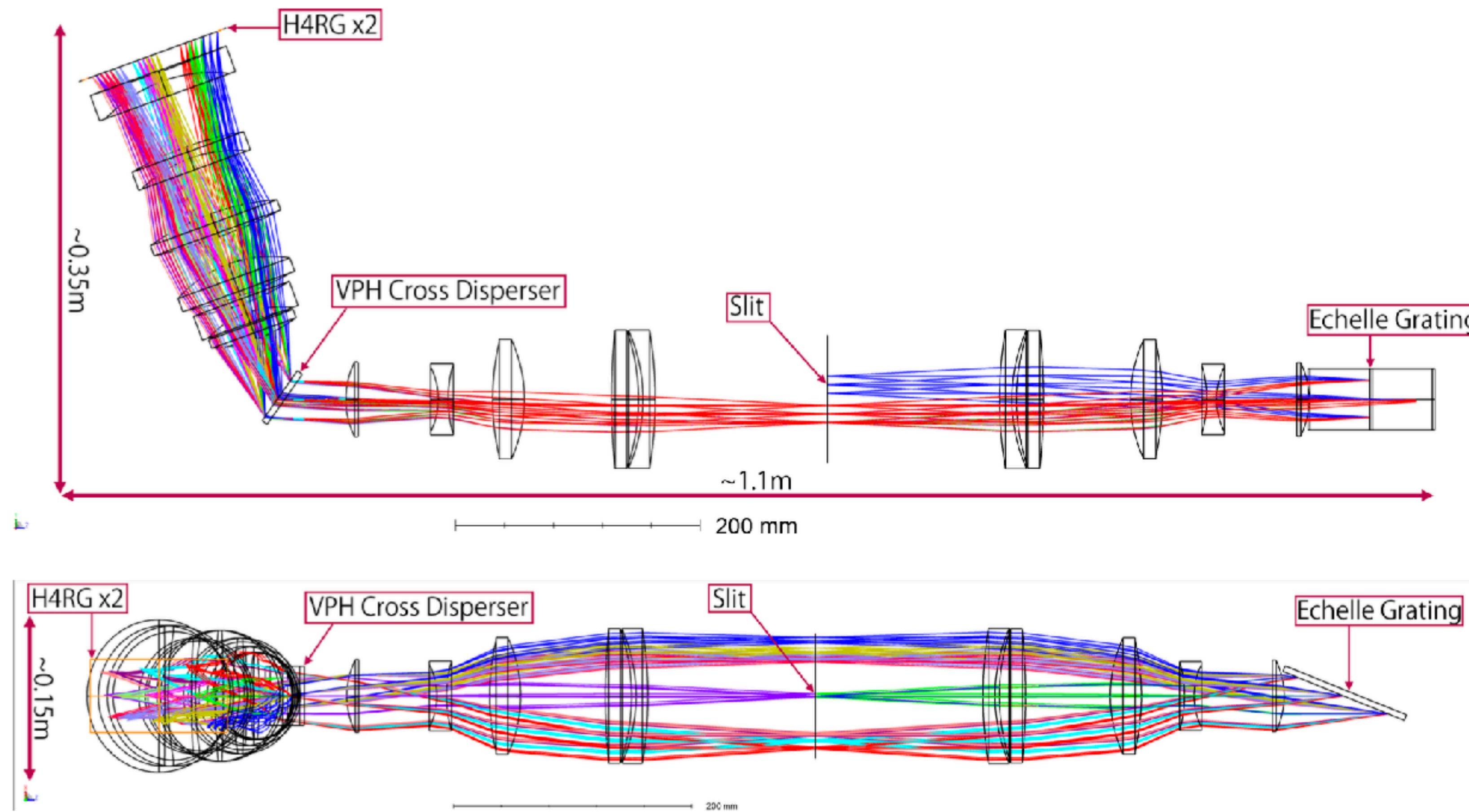


Figure 3. The top and front views of the optical layout of the high-resolution mode of the DMQS

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)

最先端ではなく
なってしまった
すべての小口径
望遠鏡へ：
ダークマター観
測しましょ！

赤外分光で探るeVダークマター—最終形態



最強のeVダークマター検出器へ
次世代の素粒子物理のステージは宇宙！



最強のeVダークマター検出器へ

次世代の素粒子物理のステージは宇宙！

- 大気の輻射の影響超少ない。
- 高分散分光器を（プライベート）小型衛星に載せる ∴dark matter 専用ならば小型化可能
- 世界初の宇宙高分散分光器 $R=O(10000)$
(SPICAの無念を晴らす。JWST $R=3000$.)
- ダークマター感度は桁上がる。
- 天文学観測に応用可能。

まとめ eVダークマターの過去・今・未来

- **過去:** eVダークマターは主流だった。(ニュートリノだと思われていた)
- **今:** 過去ほど考えられなくなった。冷たいホットダークマターや実験的ヒントがあるので結構いい(と思う)。赤外線分光探索最強。
- **未来:** ダークマター専用赤外線分光器で完全検証、次世代素粒子物理のステージは宇宙。

Back up