

# ニュートリノ観測実験 JUNOを用いた暗黒物質の探索

K.Akita, G.Lambiase, MN, M.Yamaguchi (JCAP 10 (2022) 097, [arXiv: 2206.06755])

お茶の水女子大学 修士2年 新穂みちる

2022/11/24 東京女子大学 理論物理学研究室セミナー

# 簡単な自己紹介

- 新穂みちる（にいぼみちる）
  - 千葉県出身
  - 所属：お茶大(M2)
  - 研究拠点：東工大・山口研究室



# 今日のお話：暗黒物質探索について

- 暗黒物質(DM)について（4年生へ）
  - そもそもDMって？
  - どんな性質？
  - 検出するには？
- どのくらいの感度で検出可能？（M2へ）
  - 一つの目安：熱残存DMへの制限
- 研究のお話（先生方へ）

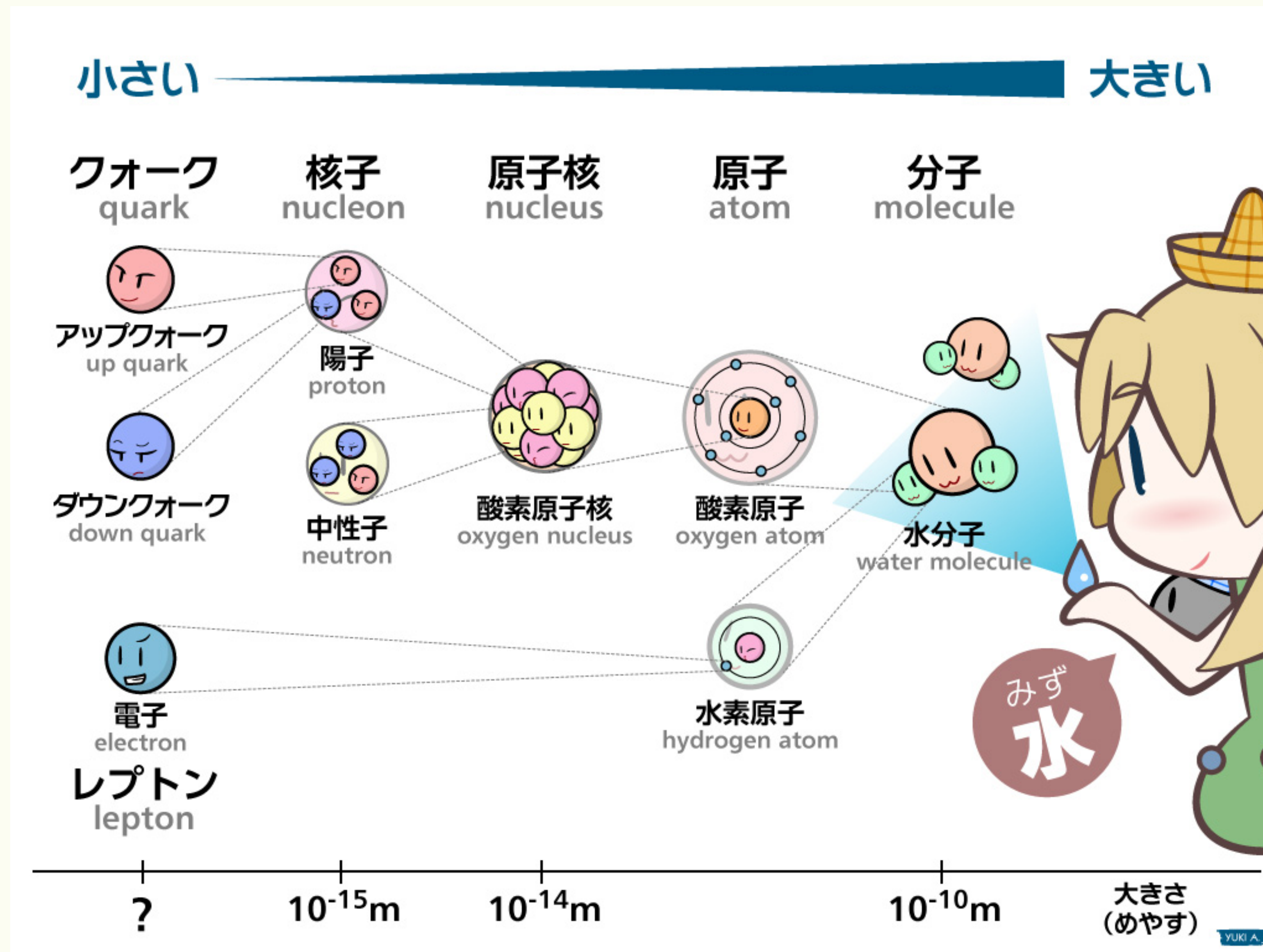
そもそも暗黒物質って？

# 「物質」。。。我々がよく知っている物質は？

Periodic Table

H 1																	He 2	
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10	
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18	
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36	
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54	
Cs 55	Ba 56	La 57	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86	
Fr 87	Ra 88	Ac 89	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118	
		La系	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71		
		Ac系	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103		

# 「物質」。。。我々がよく知っている物質は？



[Credit higgstan.com]

# 素粒子標準模型

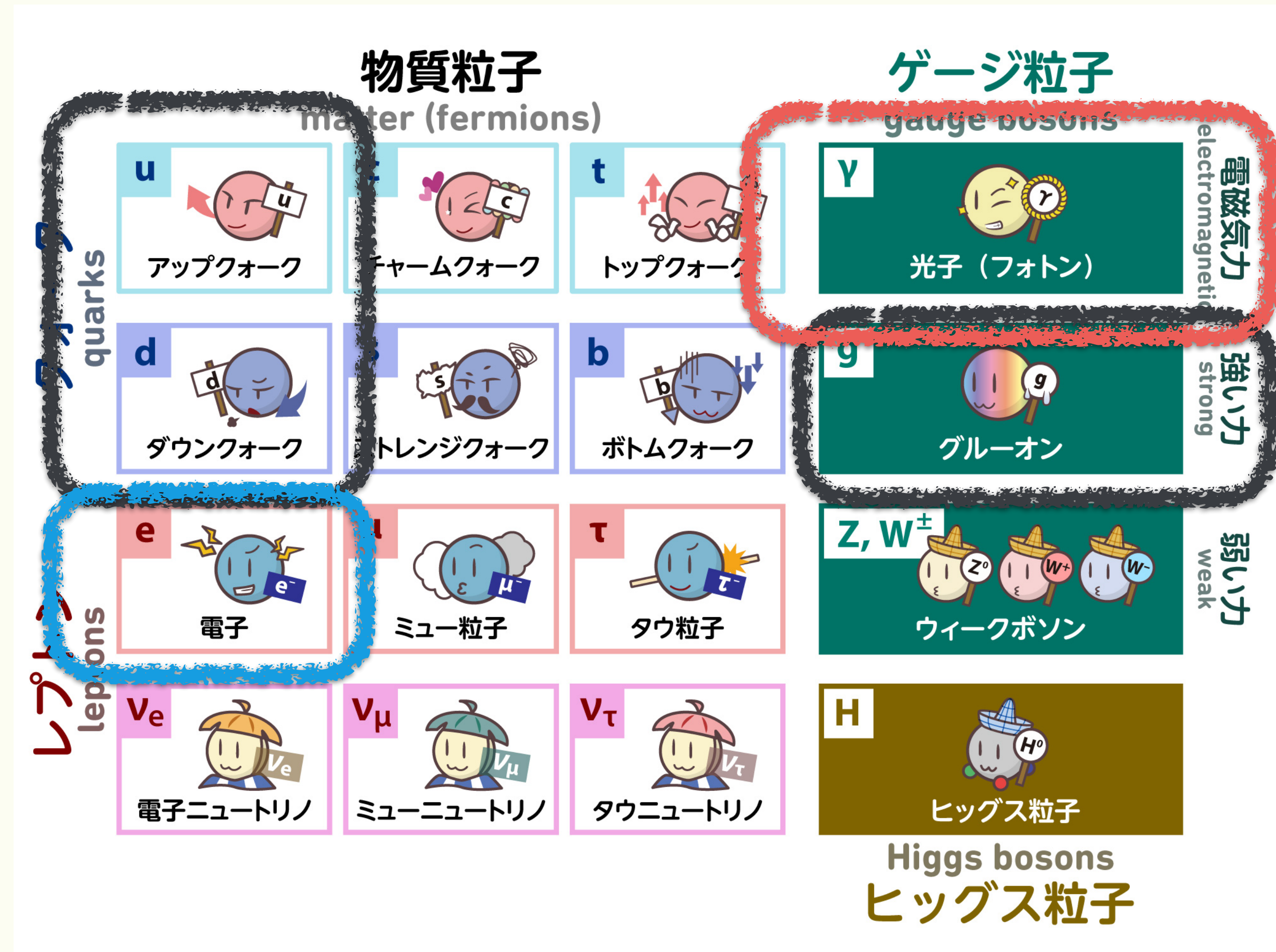
Periodic Table

[画像もと : <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000002.000039786.html>]

電荷を持つ粒子

(原子核、電子)

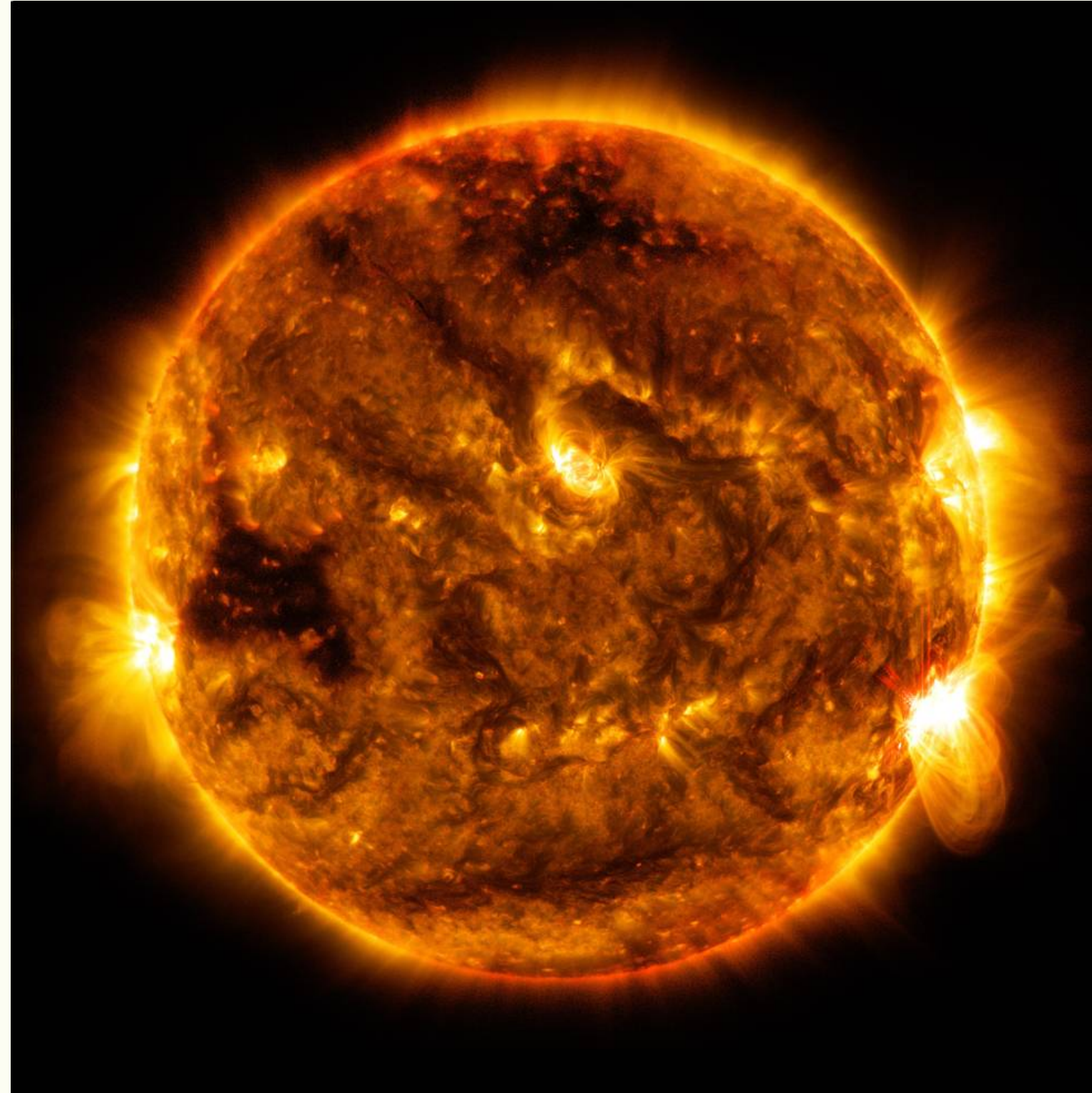
光を出しやすい→目に見える



[Credit higgstan.com]

# 星々も。。。

[Credit NASA]



水素がヘリウムになる反応で  
燃え続けている

物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons	
クォーク quarks	<b>u</b> アップクォーク	<b>c</b> チャームクォーク	<b>t</b> トップクォーク	<b><math>\gamma</math></b> 光子 (フォトン) 電磁気力 electromagnetic
	<b>d</b> ダウンクォーク	<b>s</b> ストレンジクォーク	<b>b</b> ボトムクォーク	
	<b>e</b> 電子	<b><math>\mu</math></b> ミュー粒子	<b><math>\tau</math></b> タウ粒子	<b>Z, W<sup>±</sup></b> ウィークボソン 弱い力 weak
	<b><math>\nu_e</math></b> 電子ニュートリノ	<b><math>\nu_\mu</math></b> ミューニュートリノ	<b><math>\nu_\tau</math></b> タウニュートリノ	

[Credit higgstan.com]

# 銀河は？

[Credit NASA]



星がぐるぐる回転して集まっている。。。だけ？

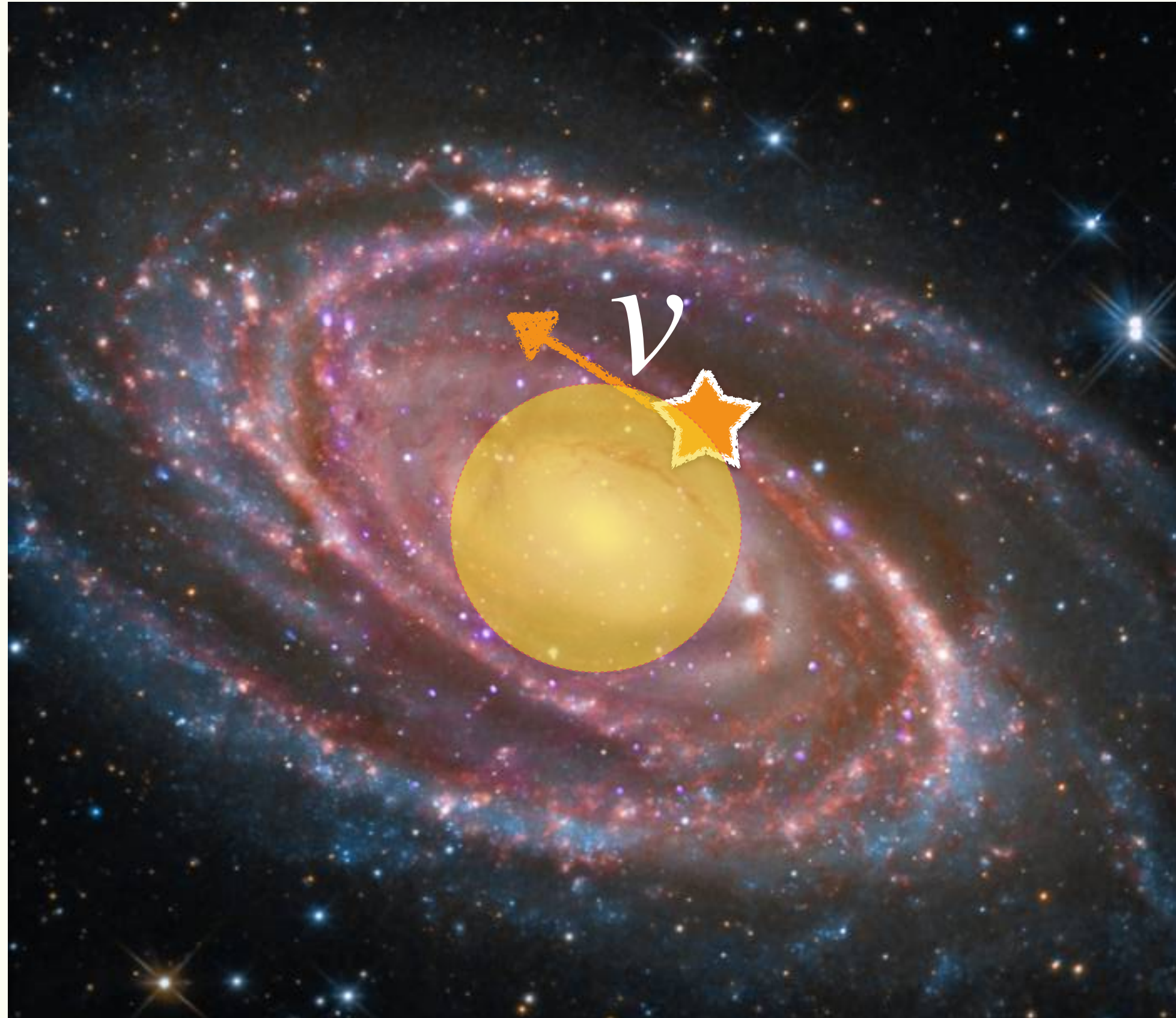
物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons	
クォーク quarks	<b>u</b> アップクォーク	<b>c</b> チャームクォーク	<b>t</b> トップクォーク	<b><math>\gamma</math></b> 光子 (フォトン) 電磁気力 electromagnetic
	<b>d</b> ダウンクォーク	<b>s</b> ストレンジクォーク	<b>b</b> ボトムクォーク	
	<b>e</b> 電子	<b><math>\mu</math></b> ミュー粒子	<b><math>\tau</math></b> タウ粒子	<b>Z, W<sup>±</sup></b> ウィークボソン 弱い力 weak
	<b><math>\nu_e</math></b> 電子ニュートリノ	<b><math>\nu_\mu</math></b> ミューニュートリノ	<b><math>\nu_\tau</math></b> タウニュートリノ	

[Credit higgstan.com]

# 銀河中の星の運動

# 銀河＝星の回転運動？

- 回転する運動：「中心に引っ張る力」が鍵



$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GM(r)m}{r^2}$$

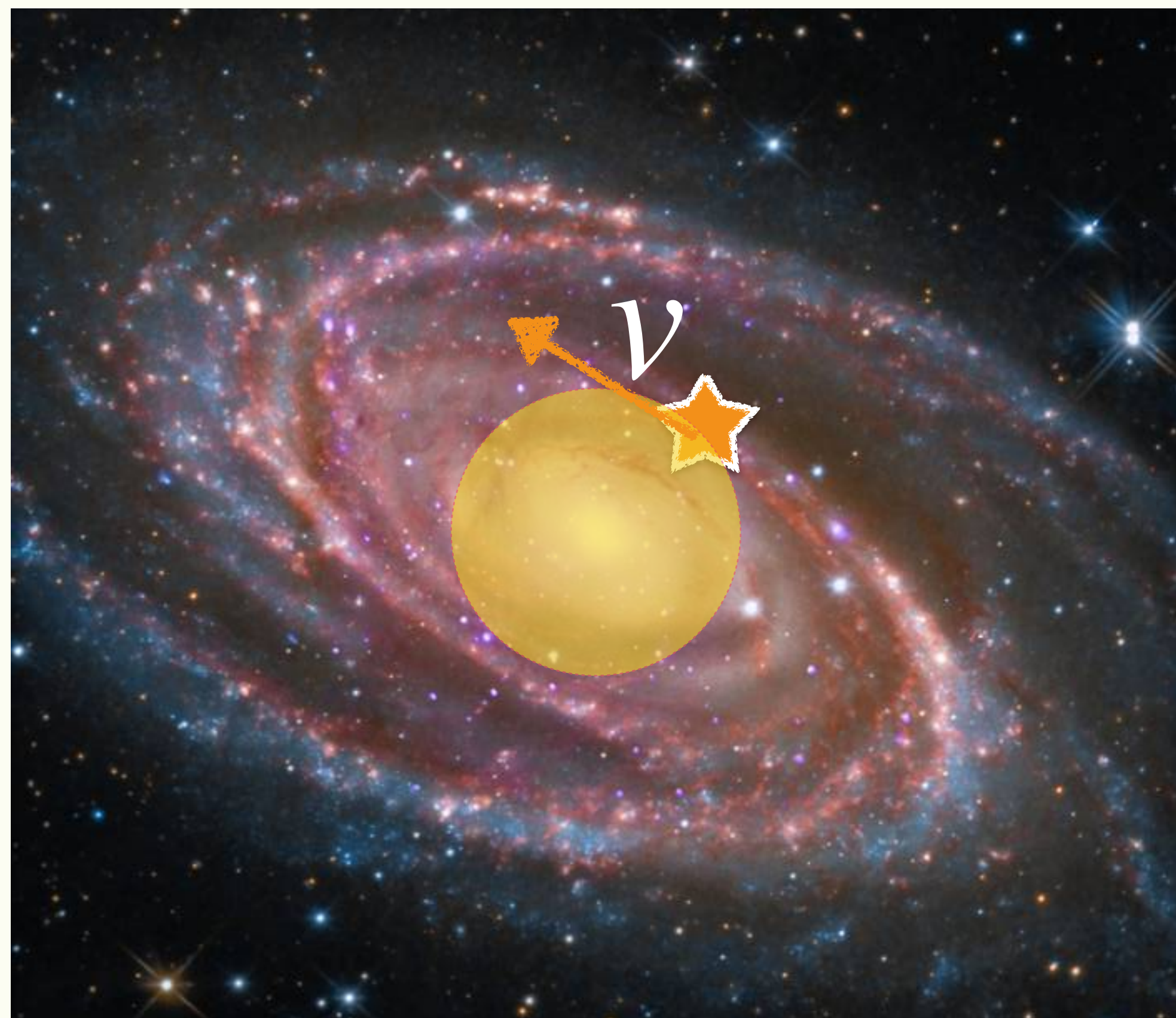
回転速度  $v$

中心に引っ張る力：  
重力（質量  $M(r)$ ）

[Credit NASA]

# 銀河＝星の回転運動？


- 回転する運動：「中心に引っ張る力」が鍵



[Credit NASA]

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GM(r)m}{r^2}$$

回転速度  $v$       中心に引っ張る重力（質）



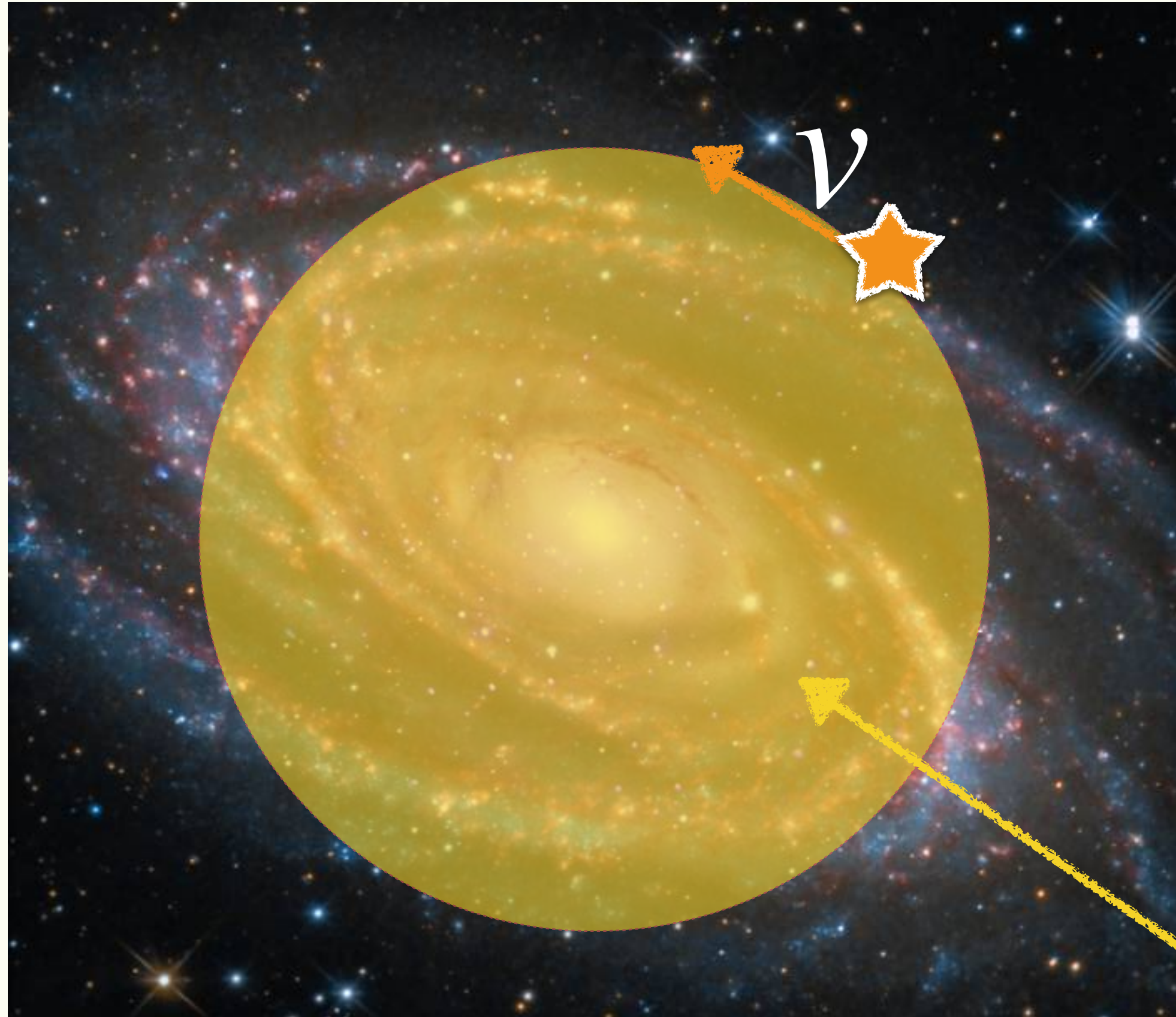
$$\rightarrow v \propto \sqrt{\frac{M(r)}{r}}$$

[Credit いらすとや]

中心に引っ張る力が強いほど  
半径が短いほど、回転速度は上がる

# 銀河＝星の回転運動？

- 回転する運動：「中心に引っ張る力」が鍵



$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GM(r)m}{r^2}$$

回転速度  $v$

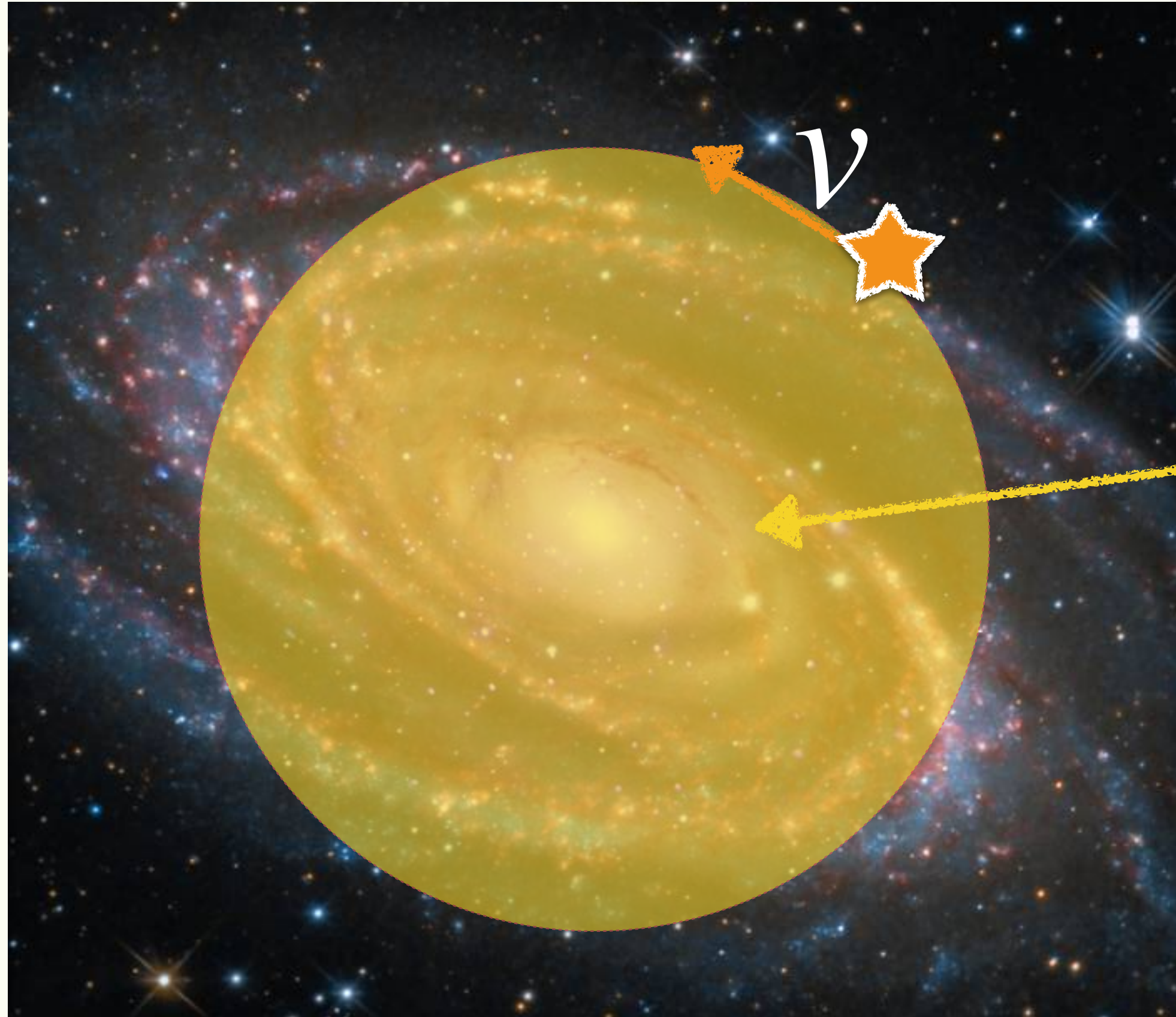
中心に引っ張る力：  
重力（質量  $M(r)$ ）

- 引っ張る力 → 観測（光）で見積もる  
内側の星の質量を全部足せばいい

$$M(r) = \int_0^r 4\pi dr' r'^2 \rho(r')$$

[Credit NASA]

# 銀河＝星の回転運動？



[Credit NASA]

$$M(r) = \int_0^r 4\pi dr' r'^2 \rho(r') \rightarrow \text{定数} (r \rightarrow \text{大})$$

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GM(r)m}{r^2}$$

$$\therefore v \propto \sqrt{\frac{M(r)}{r}} \propto \frac{1}{\sqrt{r}} (r \rightarrow \text{大})$$

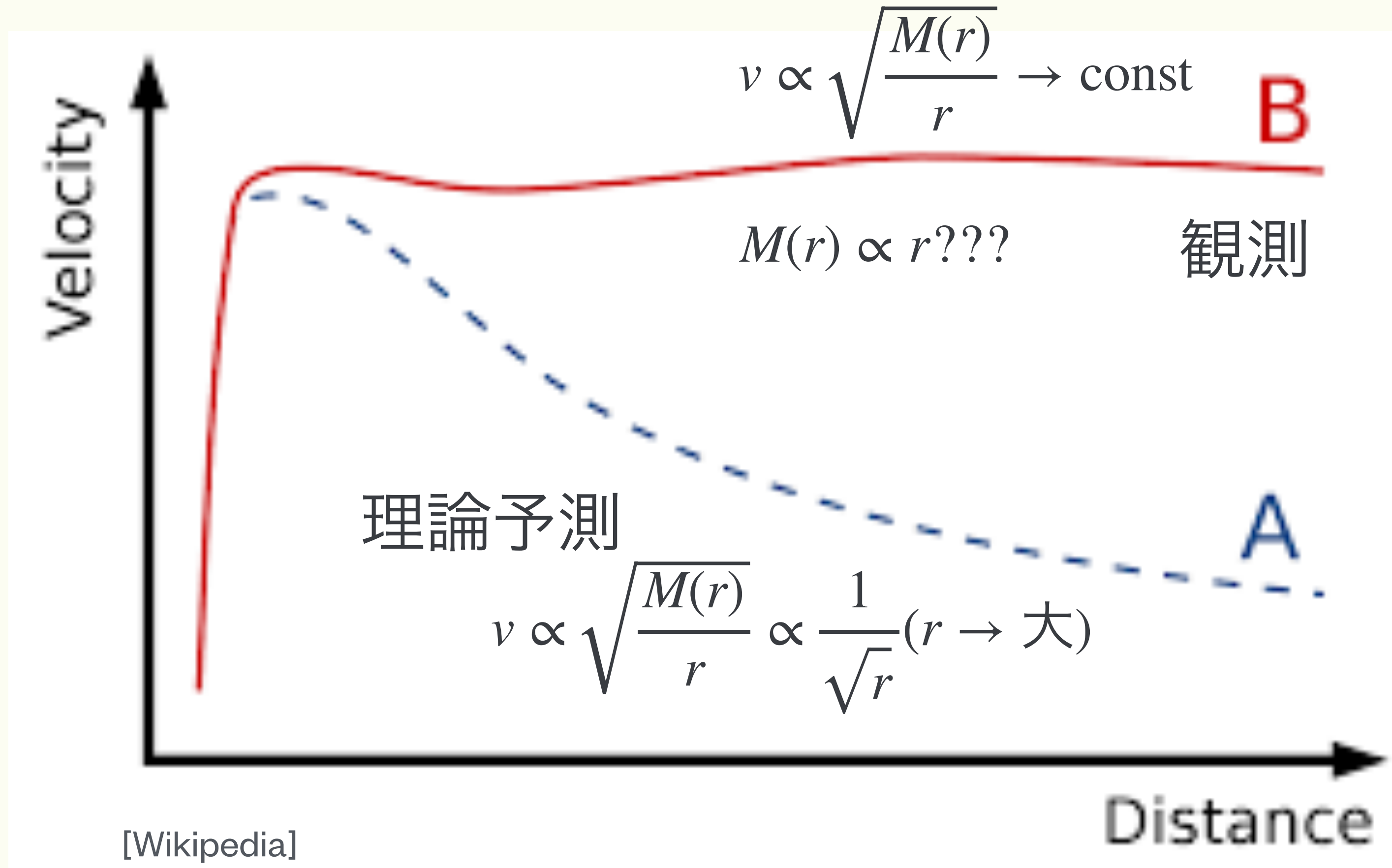
銀河の端っこの方では、

星を引っ張る力（銀河中心方向への重力）が増えないので、回転速度が小さくなるはず

**銀河中の星の運動**

**観測すると？**

# 銀河の回転曲線 [Rubin et al. (1970)]



銀河中心から離れても  
回転速度が減らない?!

||

光っていない  
(見えない) 物質が  
銀河中に存在する???

暗黒物質(DM)

# 暗黒物質の分布概要

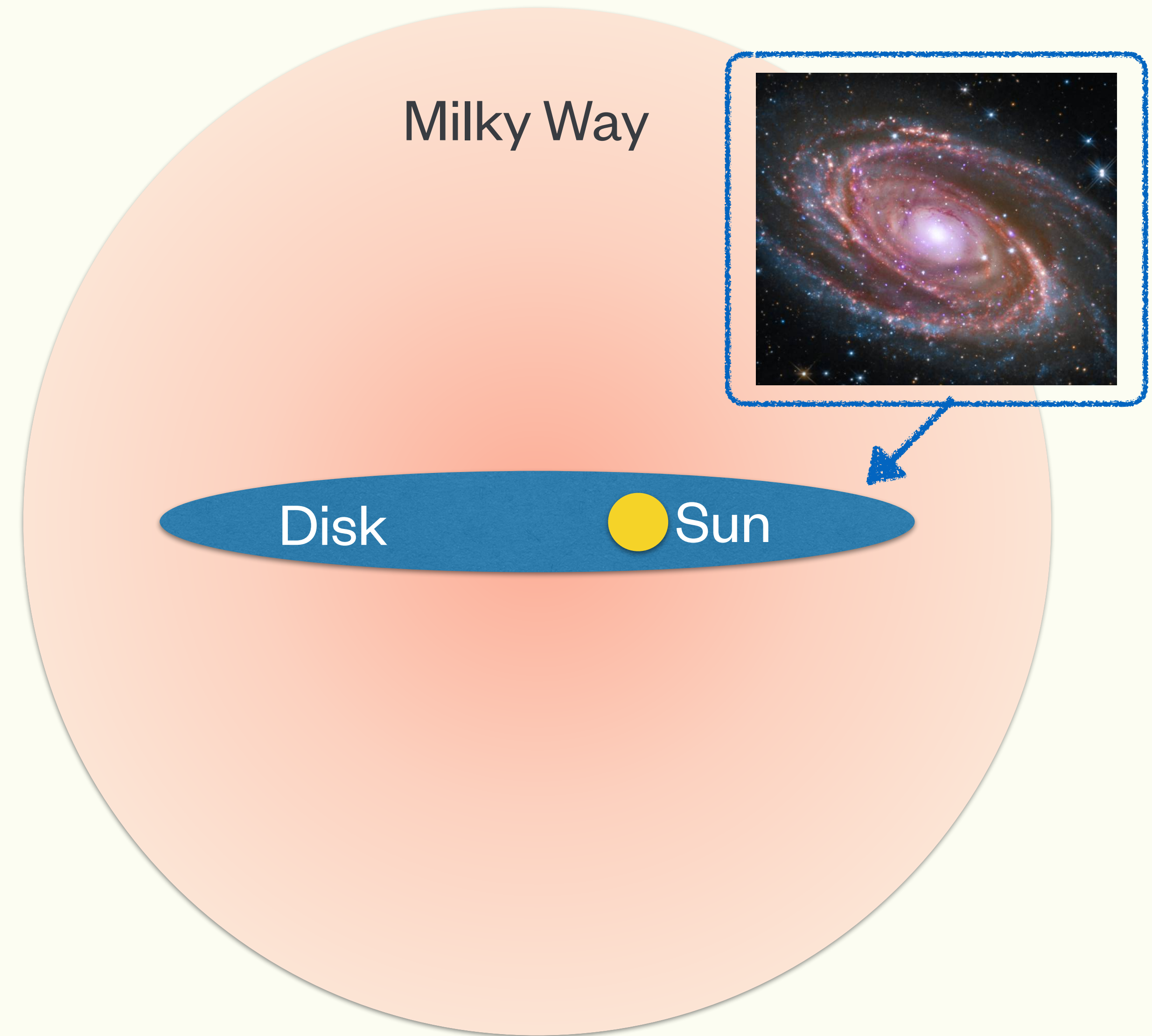
銀河中の星の質量だけでは、  
特に外側の星の回転速度を説明できない  
重力が足りない

Milky Way



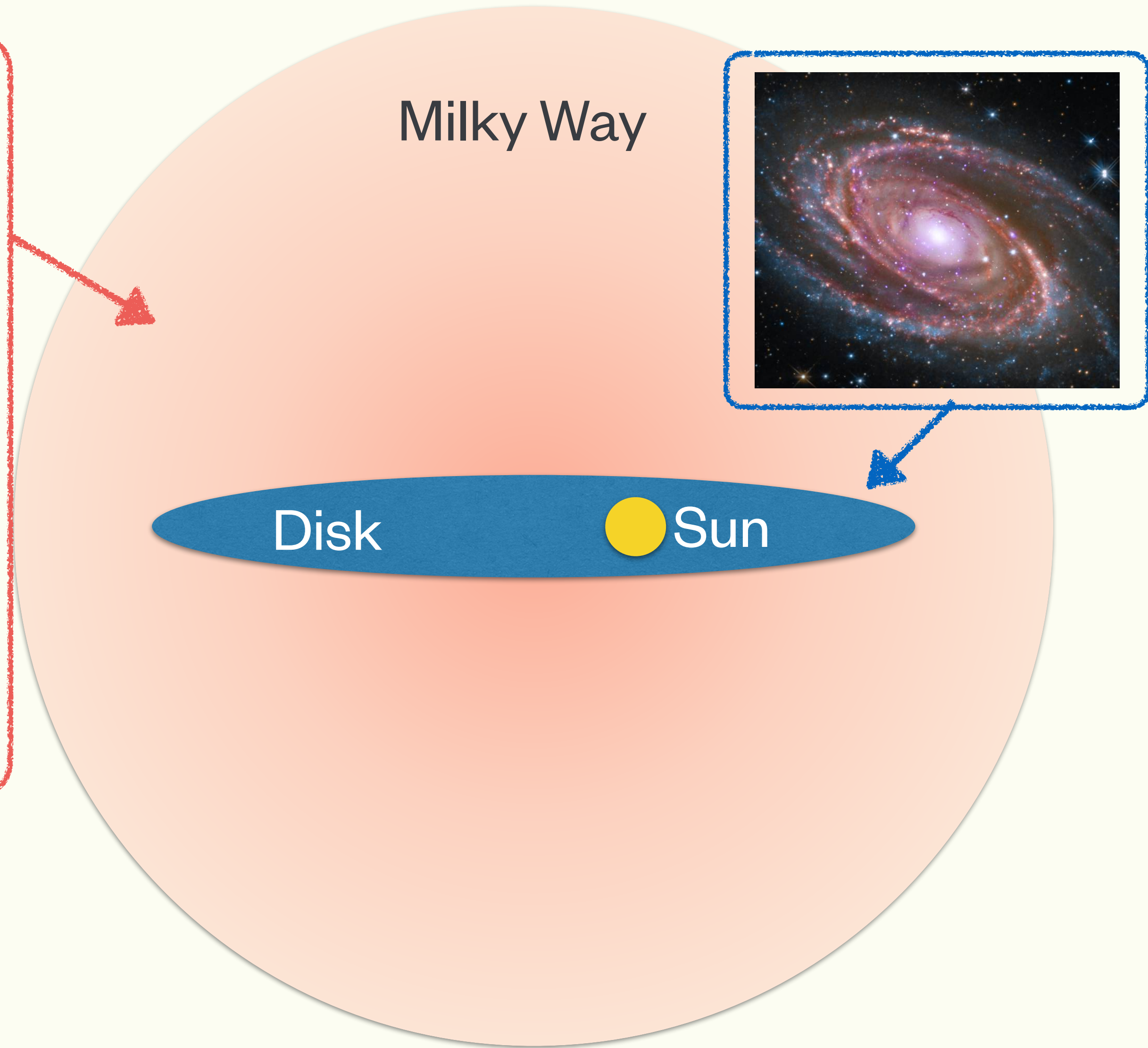
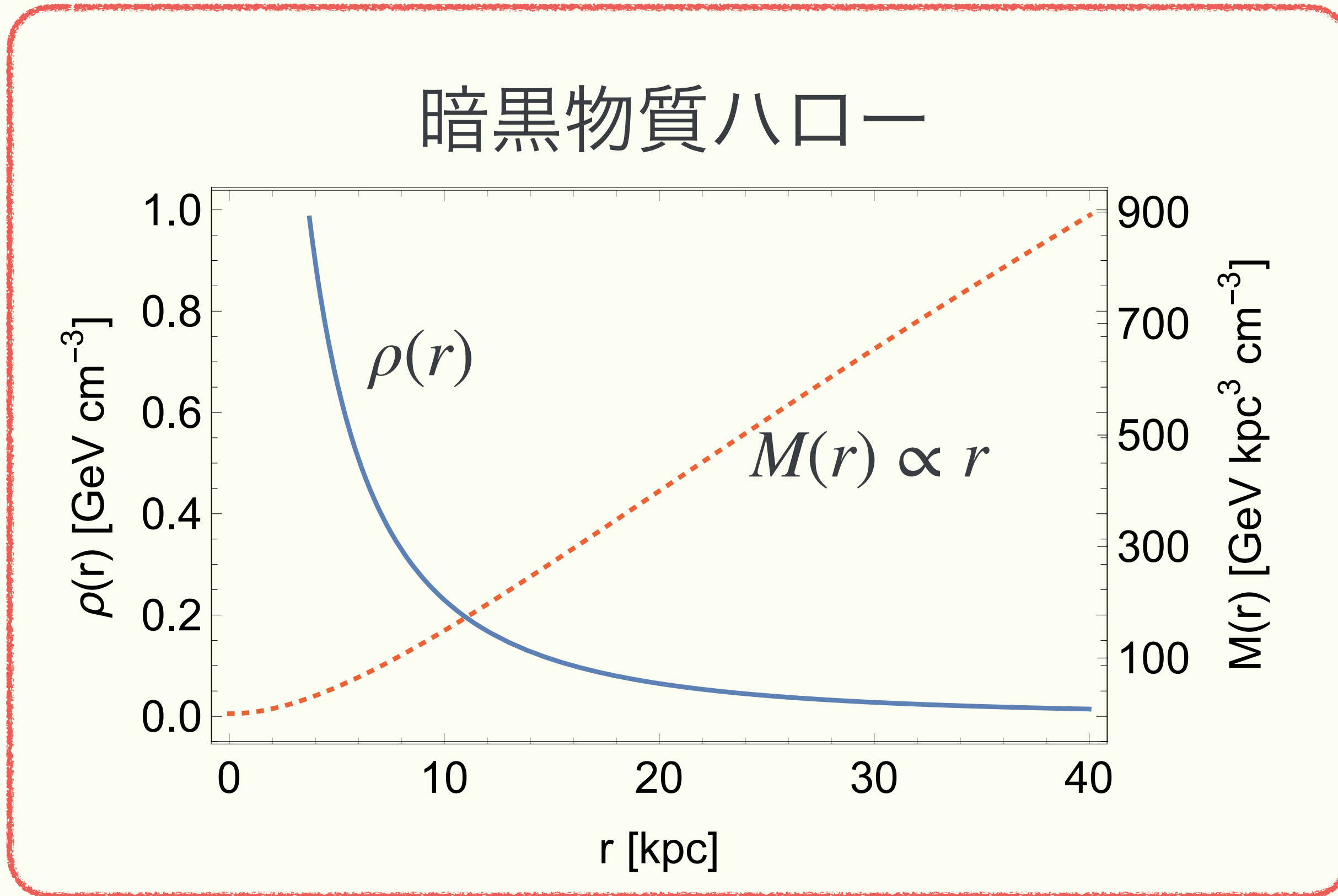
# 暗黒物質の分布概要

見えない物質（暗黒物質:DM）が  
外側まで多量に広がっていればいい！！



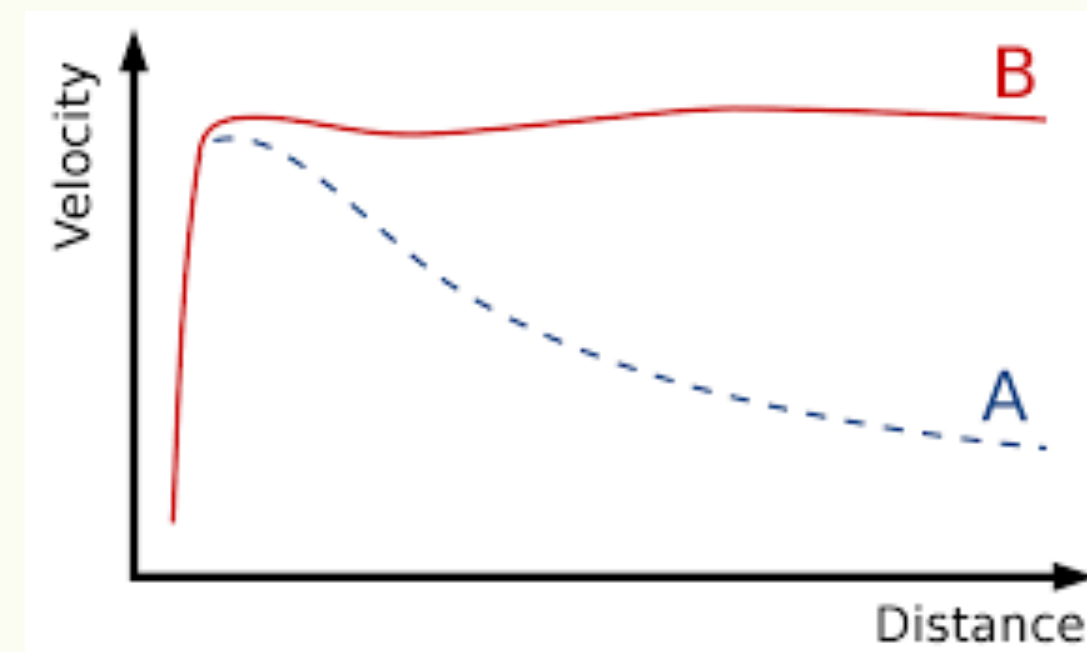
# 暗黒物質の分布概要

\*Schematic picture



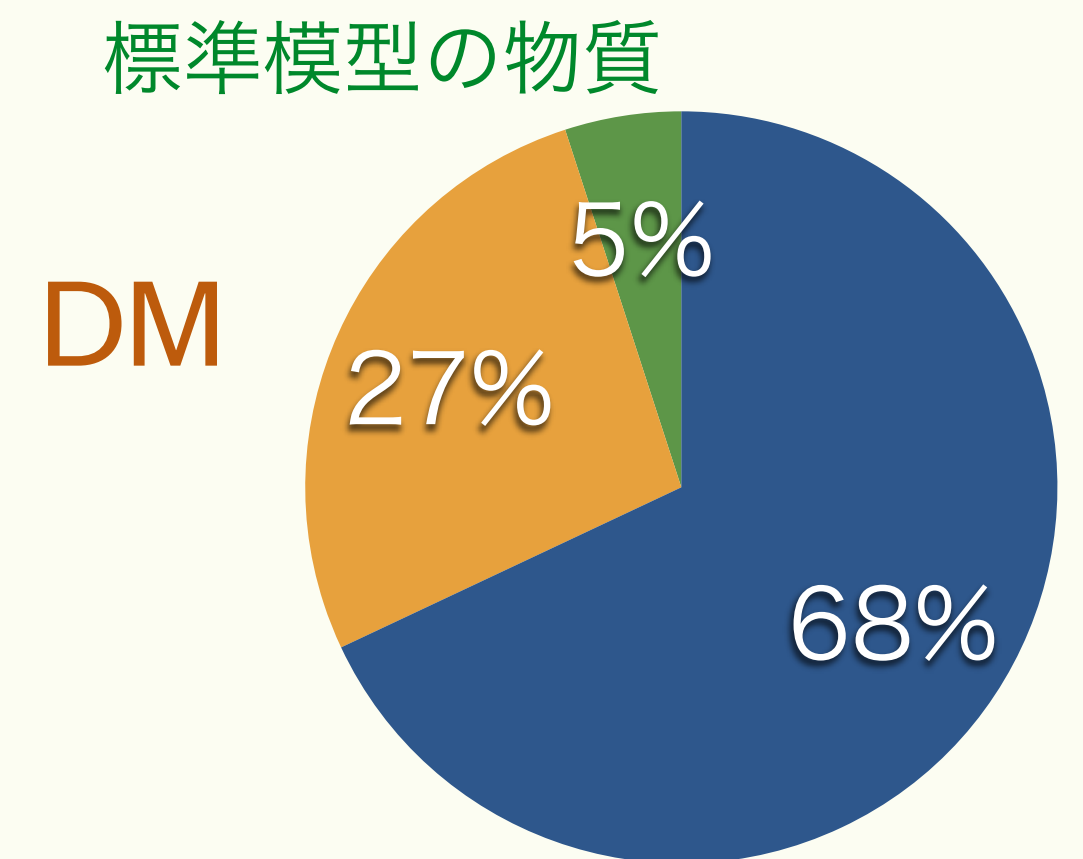
$$v \propto \sqrt{\frac{M(r)}{r}} : \text{const}$$

$$\therefore M(r) \propto r$$



# 暗黒物質(DM)についてわかっていることは？

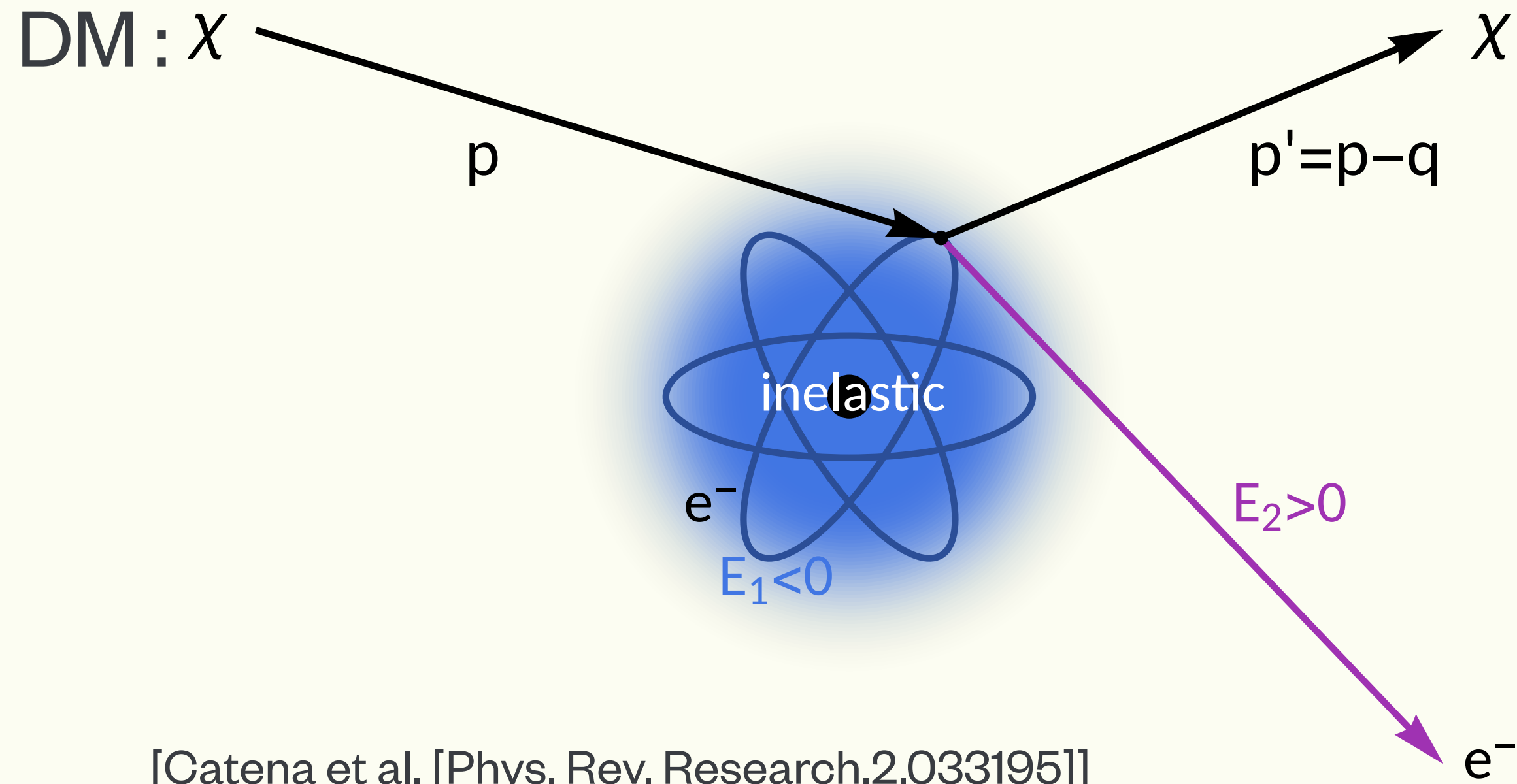
- 天文学的な観測により、**存在そのものは確実視**
  - CMBの観測：全エネルギーの1/4ほどがDM ( $\Omega_{CDM} \simeq 0.258$ )
- 電荷なし (光で見えない)
- 質量あり (重要な重力源、でもどのくらいの質量かはわからない)
- (とても)安定でほとんど崩壊しない：
  - 寿命 > 宇宙年齢  $\tau > t_0 \sim 137$  億年  $\sim 4 \times 10^{17}$  sec



このような性質を持つ物質は、  
標準模型 (=我々がよく知っている物質全体) には存在しない！  
質量も、どんな反応をするのかも、全くの未解明！

暗黒物質を  
検出するには？

# 検出方法(1) 直接検出



[Catena et al. [Phys. Rev. Research.2.033195]]

巨大なタンクに原子(Xeなど)を用意して、  
DMと原子の散乱が起きるのを待つ



# 検出方法(1) 直接検出

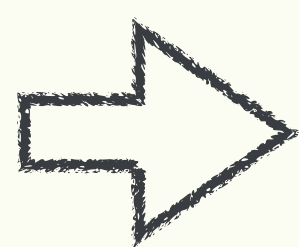
[LUX-ZEPLIN (LZ) (2022.7.9)]

今のところは残念ながら  
暗黒物質由来と断定できる信号の検出なし

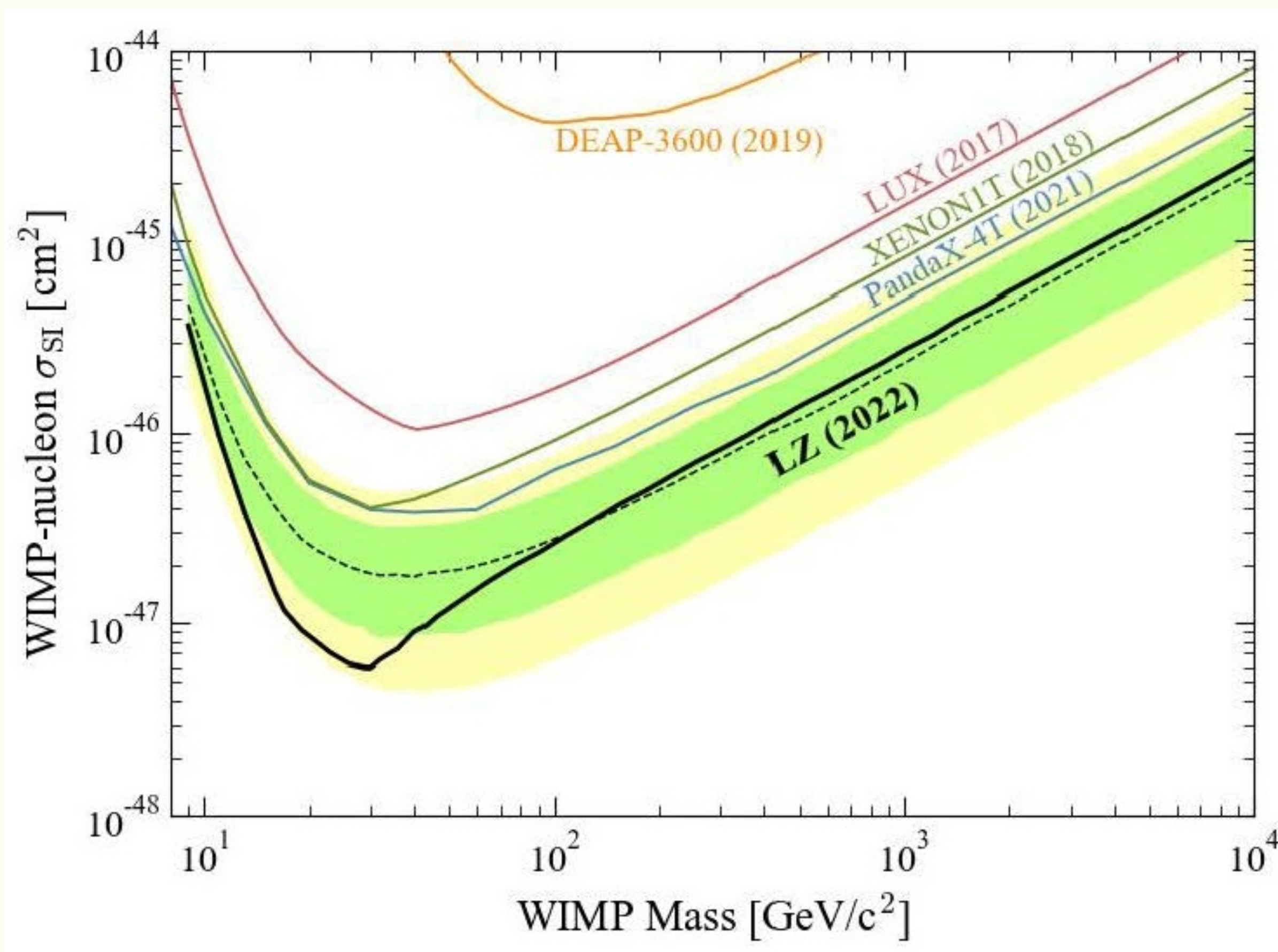
例えば  $m_{\text{DM}} \sim 10 \text{ GeV}$  に対して,

$$\sigma_{\text{DM-nucleon}} \sim 10^{-47} \text{ cm}^2$$

$$\ll \sigma_{\text{weak}} \simeq G_{\text{F}}^2 E^2 \sim 10^{-36} \text{ cm}^2 \left( \frac{E}{10 \text{ GeV}} \right)^2$$



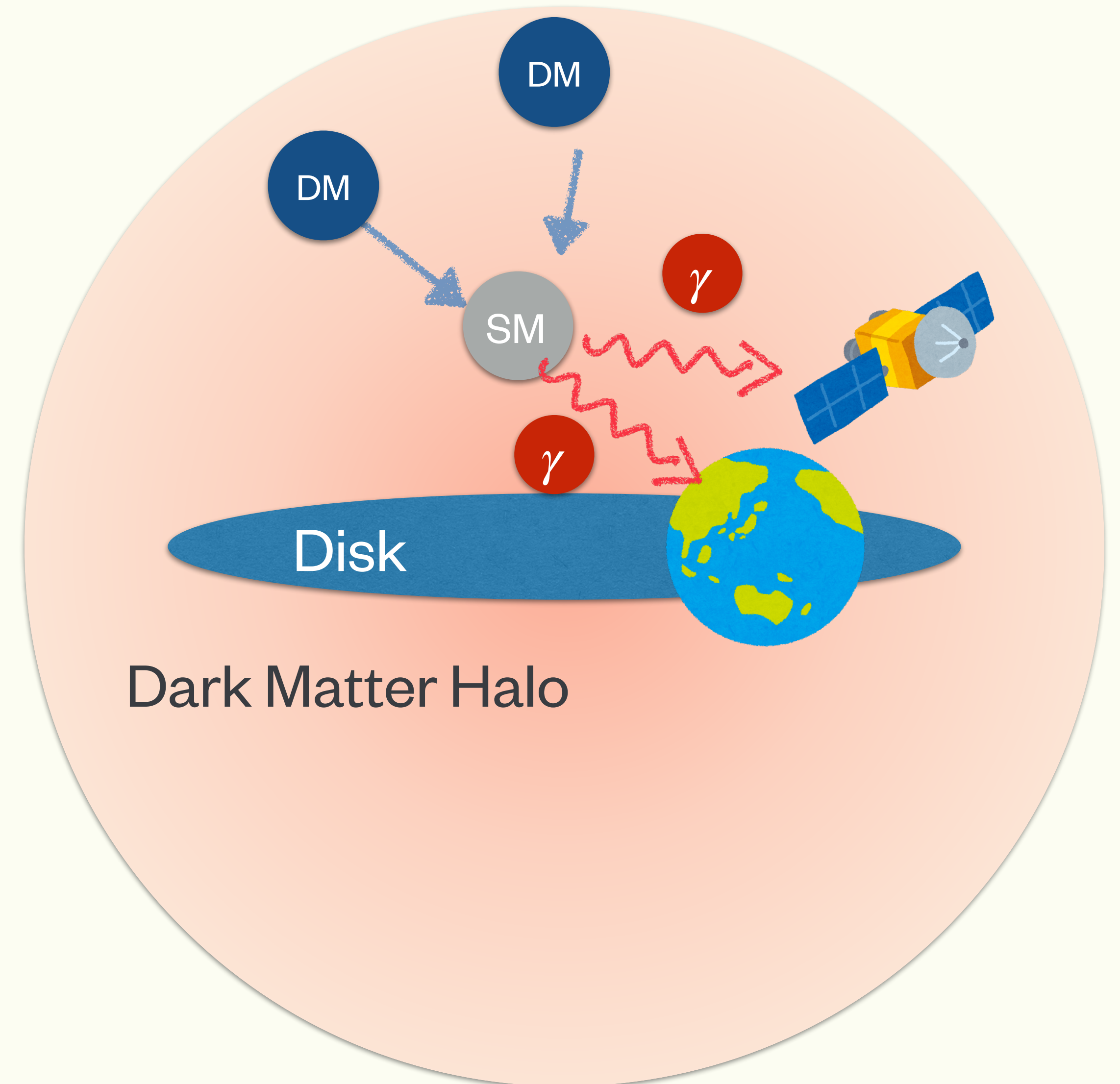
原子核との相互作用について  
強い制限が明らかになった



# 検出方法(2) 光学的検出

今のところは残念ながら  
暗黒物質由来と断定できる信号の検出なし

1. 銀河中に光を出すもの・現象が多い
  - ・ 星
  - ・ 星間物質
  - ・ 宇宙線、などなど
2. 信号が散乱・減衰しやすい
  - ・ 星間物質などと相互作用して、  
真っ直ぐに観測器へ届かない



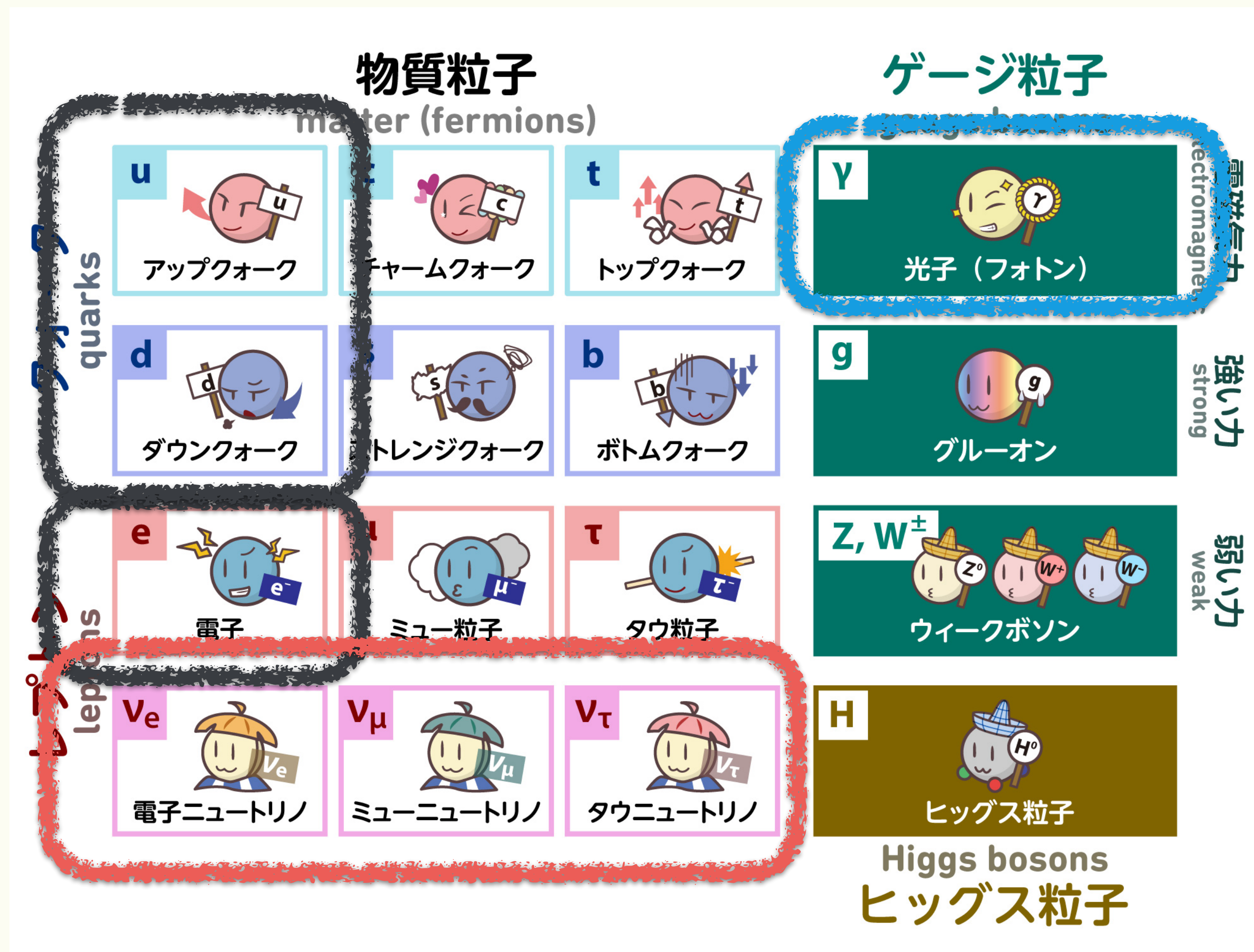
ニュートリノを使った

暗黒物質検出

# 検出方法(3) ニュートリノを使った検出

ニュートリノとは？

- 素粒子の一つ
- 電荷を持たない
- 地上での検出は (大変だけれど) 可能

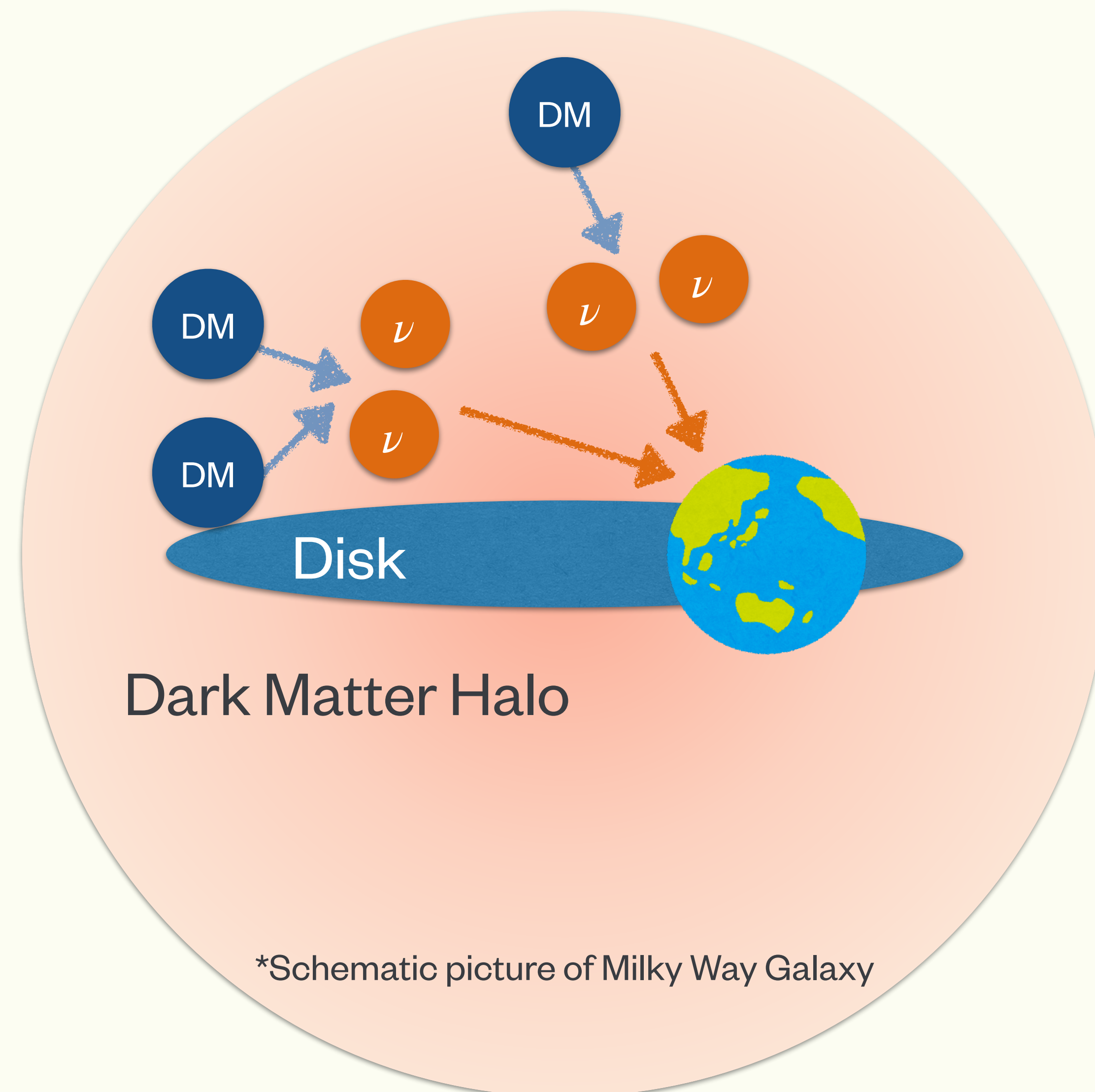


# 検出方法(3) ニュートリノを使った検出

直接検出や光学的検出実験に対して、

相補的な強みを持つ

- すでに観測器が存在する
- 光と比べると、信号を発する構造・現象は少ない
- 星間物質などに散乱されにくい

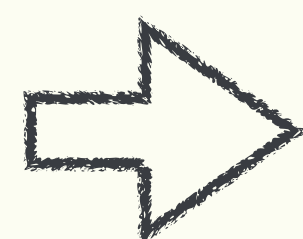


\*Schematic picture of Milky Way Galaxy

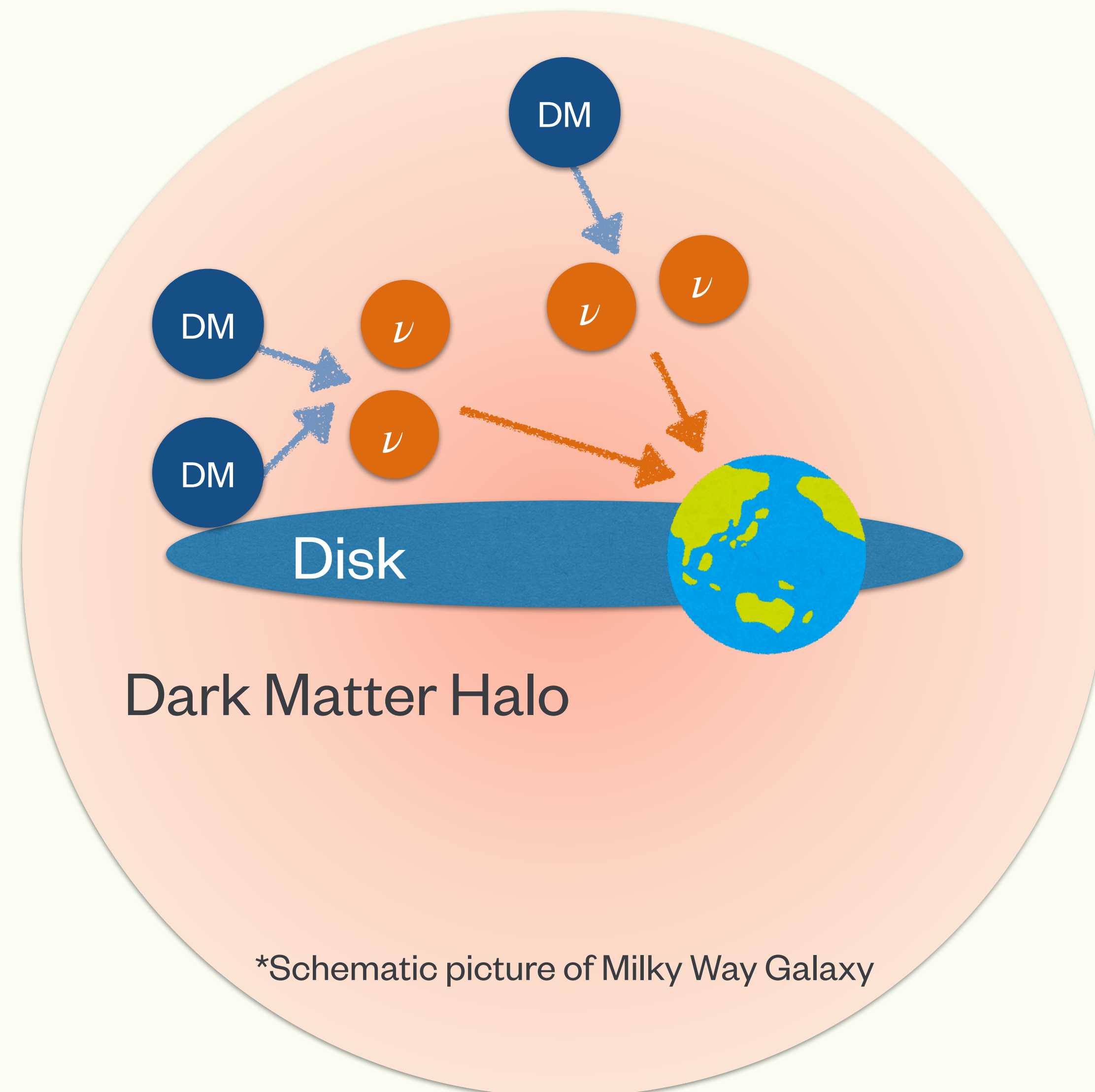
# 検出方法(3) ニュートリノを使った検出

次世代型ニュートリノ観測器が  
世界中で次々に設計・建設中！

- JUNO (2023 ? -)
- DUNE
- Super - Kamiokande (+ Gd )(2020 -)
- Hyper - Kamiokande (2027 -)....



未検出のDM信号も  
ニュートリノ観測実験でついに  
見つかるかも！



# ここまでのまとめ

- **暗黒物質 (DM)** : 天文学的な観測により、存在そのものは確実視
  - 質量あり、電荷なし、安定
  - 宇宙に多量に存在  しかし素粒子標準模型では説明できない
  - **検出して性質を調べたい！！**
- 検出するには？
  - 直接探索
  - 光学的探索
  - **ニュートリノ探索**

**DM検出感度の目安？**

**熱残存DMについて**

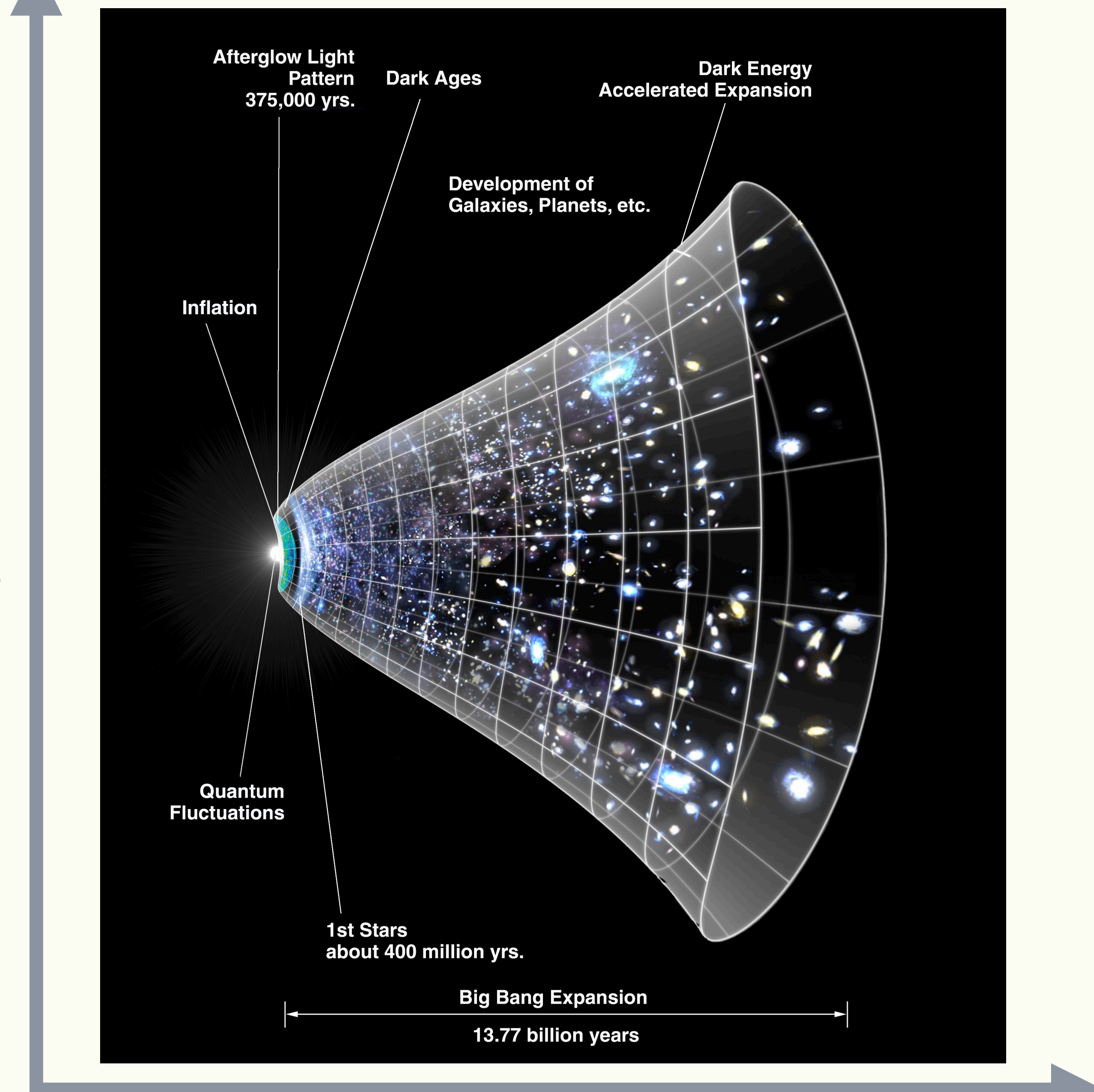
# DM生成シナリオの典型例：熱残存DM

FLRW 計量：  $ds^2 = - dt^2 + a(t)^2(dr^2 + r^2 d\Omega^2)$ ,

光子温度：  $T \propto a^{-1}$

- 初期宇宙→高温・高密度
- 標準模型の物質は全て熱平衡にあった
- 宇宙膨張により温度が下がり、物質は熱平衡から脱離していく ( $\Gamma \sim H \equiv \dot{a}/a$ ).
- 例) 宇宙マイクロ波背景放射(CMB)
- DMも高温・高密度宇宙では熱平衡に達していた?

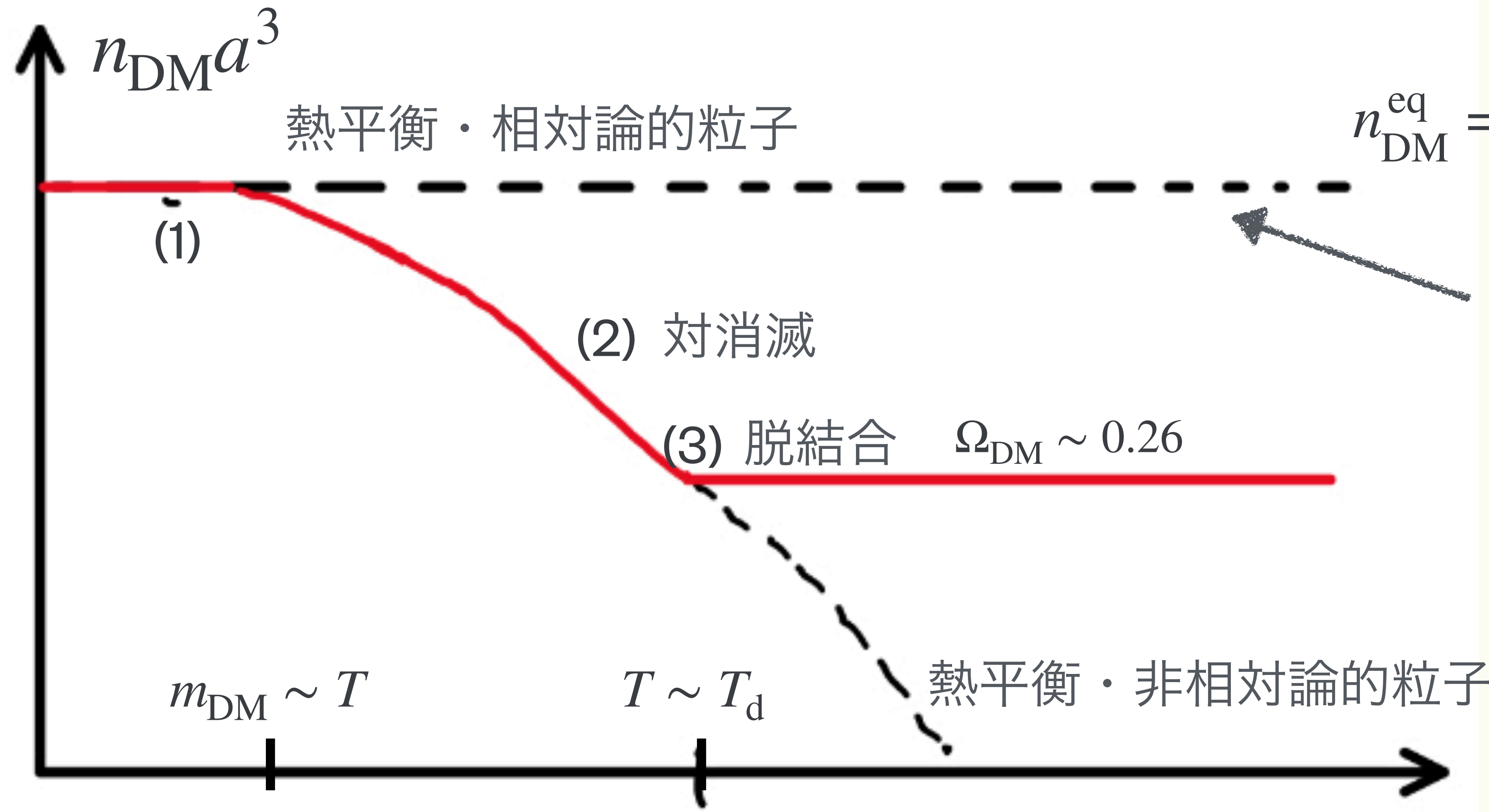
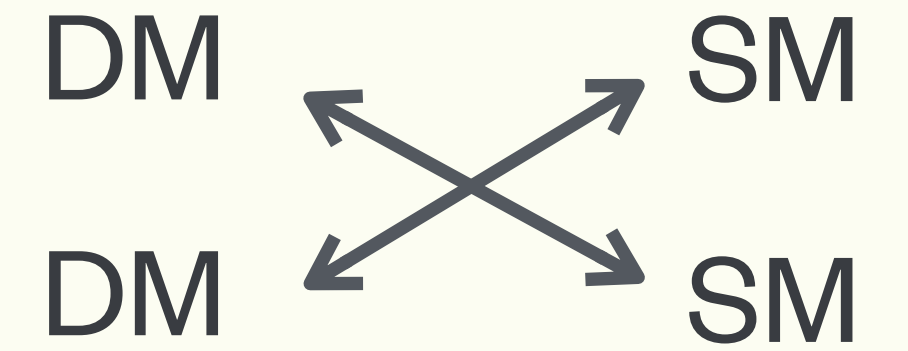
$a(t)$ : スケール因子



\* Schematic picture [Credit NASA]

# 熱残存DM

(1)  $T \gg m_{\text{DM}}$  : 熱平衡・相對論的に振る舞う

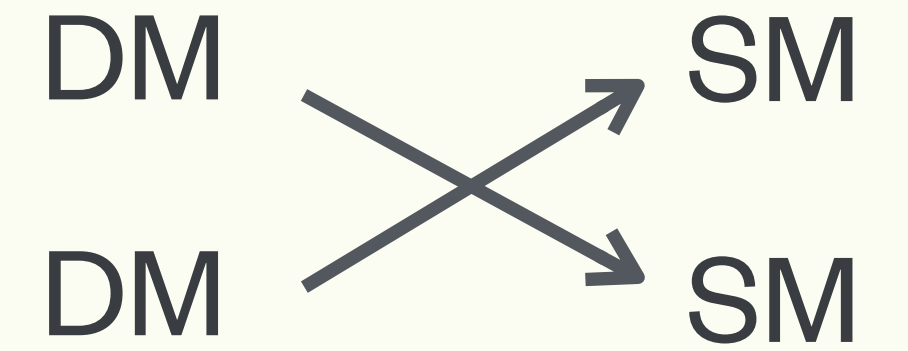


$$n_{\text{DM}}^{\text{eq}} = g_{\text{DM}} \left( \frac{\zeta(3)}{\pi^2} \right) T^3 \propto a^{-3}$$

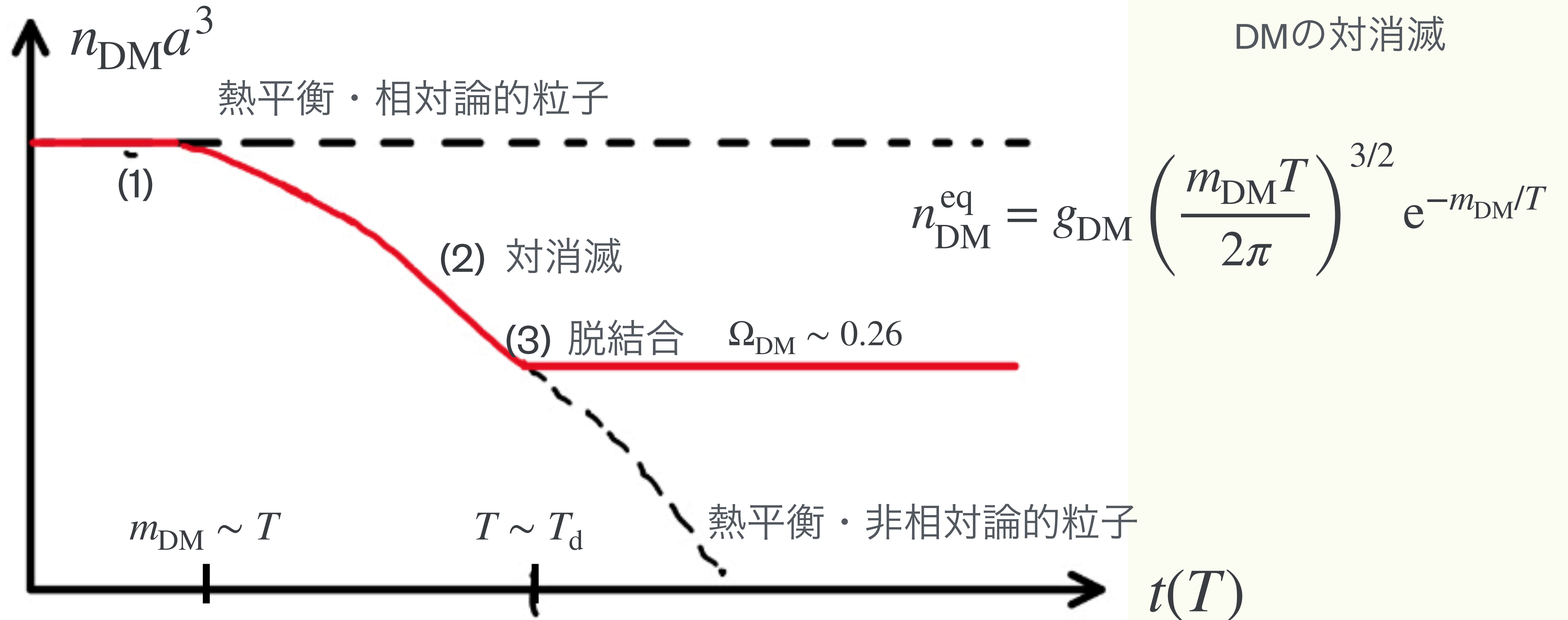
$$\therefore n_{\text{DM}} a^3 = \text{const}$$

# 熱残存DM

(2)  $T < m_{\text{DM}}$  : 熱平衡・非相対論的に振る舞う → 対消滅が盛んに



DMの対消滅

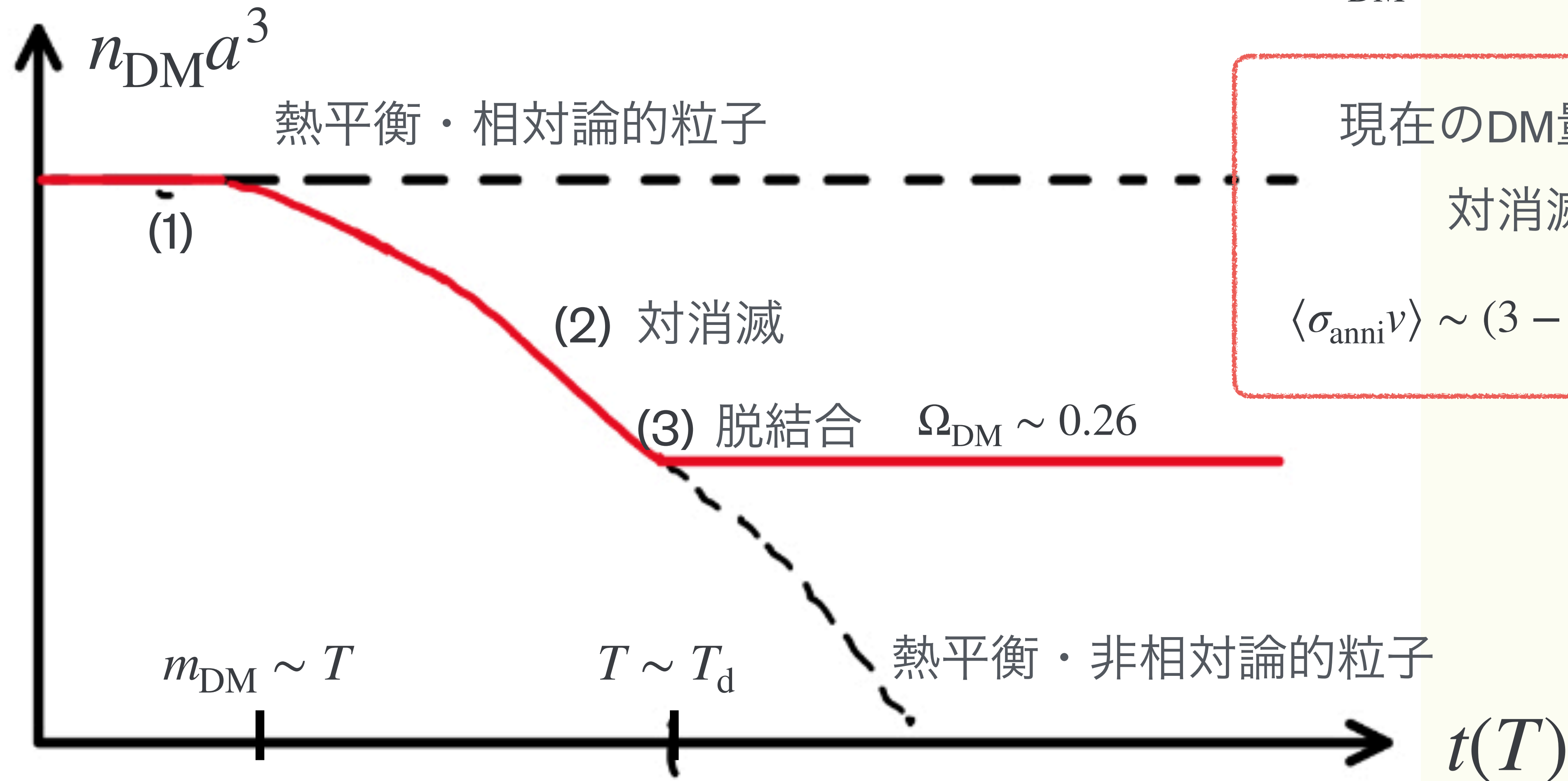


# 熱残存DM

## (3) 熱平衡からの離脱 (脱結合)

$$\Gamma_{\text{対消滅}} \sim H = \frac{\dot{a}}{a}$$

$$\Omega_{\text{DM}} \simeq \frac{m_{\text{DM}} n_{\text{DM}}(t_0)}{\rho_c} \simeq 0.26,$$



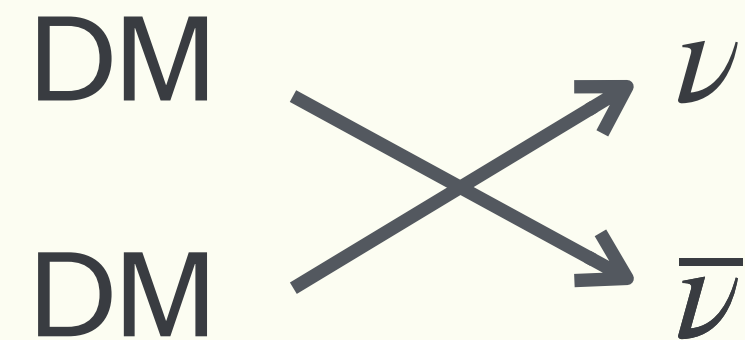
現在のDM量を説明できる  
対消滅断面積は

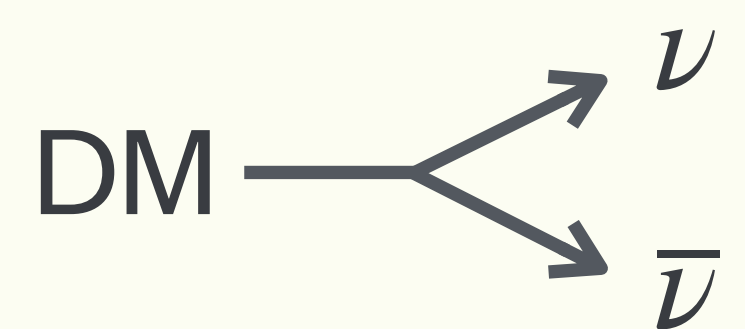
$$\langle \sigma_{\text{anni}} v \rangle \sim (3 - 4) \times 10^{-26} \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$$

# DMからの ニュートリノ信号

# DMからのニュートリノ信号

## DMからのニュートリノ生成


$$\frac{d\Phi_{\text{anni}}}{dE_\nu} = \Phi_{\text{anni}} \delta(E_\nu - m_{\text{DM}})$$


$$\frac{d\Phi_{\text{dec}}}{dE_\nu} = \Phi_{\text{dec}} \delta\left(E_\nu - \frac{m_{\text{DM}}}{2}\right)$$

$E_\nu$  と  $m_{\text{DM}}$  は一対一対応

## 天の川銀河全体からのニュートリノ

$$\Phi_{\text{anni}} = \frac{1}{6} \int \frac{ds d\Omega}{4\pi} \langle \sigma_{\text{anni}} v \rangle n_{\text{DM}}^2 \propto m_{\text{DM}}^{-2}$$

$$\Phi_{\text{dec}} = \frac{1}{6} \int \frac{ds d\Omega}{4\pi} 2\tau^{-1} n_{\text{DM}} \propto m_{\text{DM}}^{-1}$$

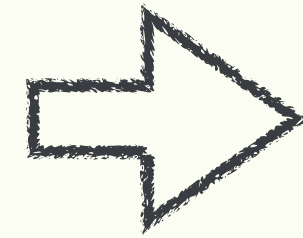
$$n_{\text{DM}} = \frac{\rho_{\text{DM}}}{m_{\text{DM}}} \quad : \text{DM 数密度} \quad \rho_{\text{DM}} : \text{DM profile}$$

$m_{\text{DM}}$  が大きくなるほど  $\Phi$  は減る

# DM profile $\rho = \rho(r)$ の不定性

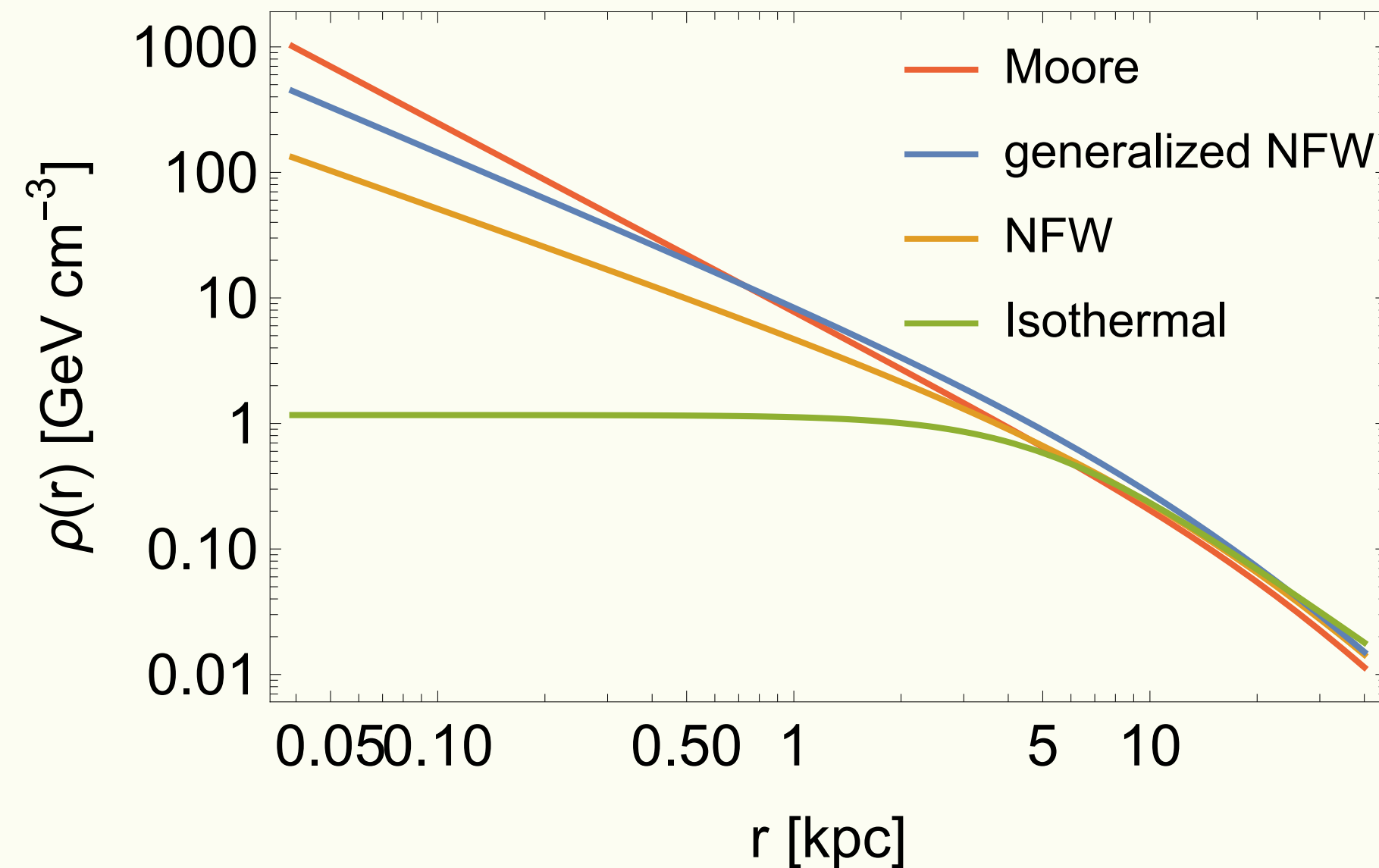
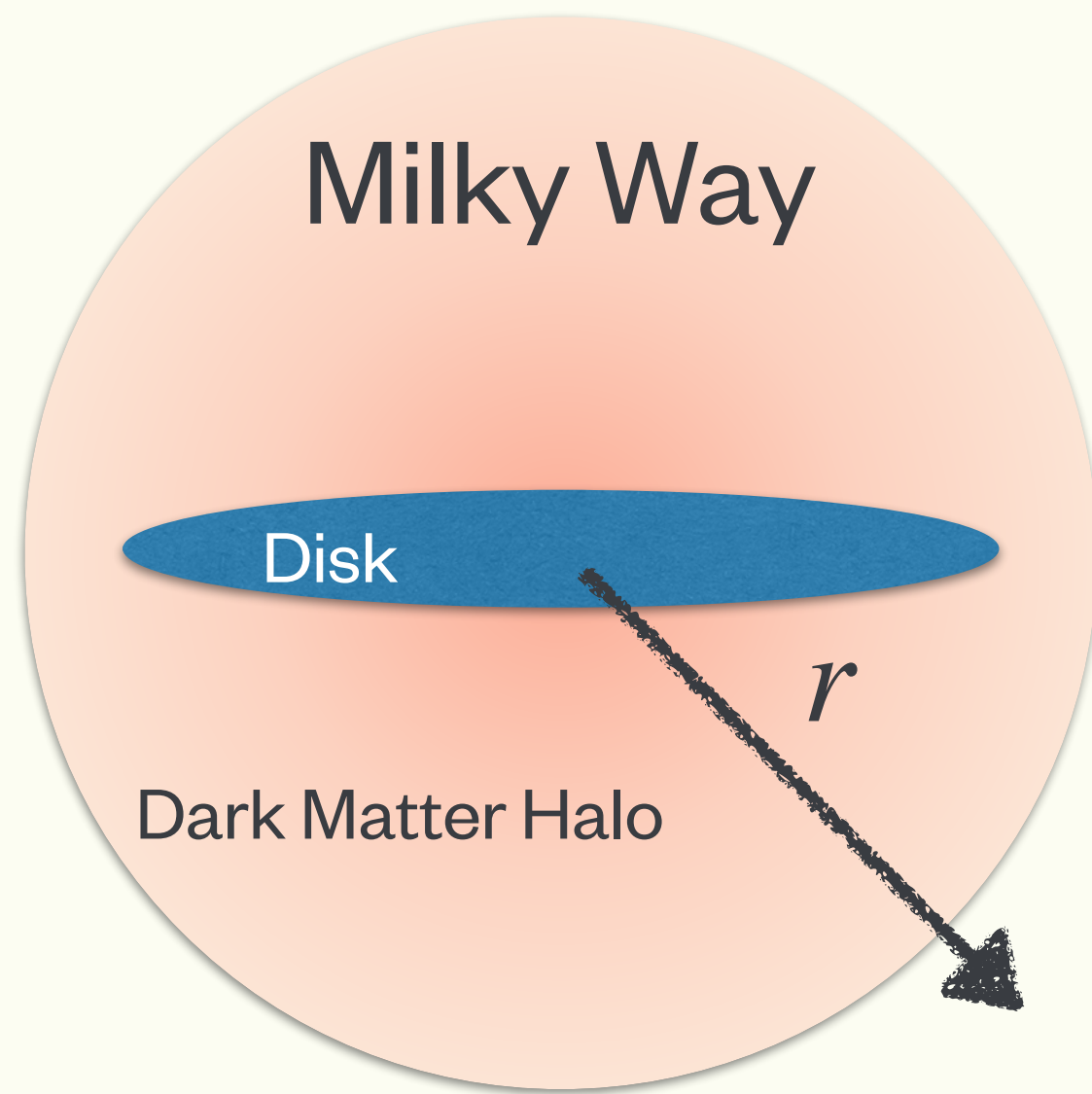
$$\Phi_{\text{anni}} = \frac{1}{6} \int \frac{ds d\Omega}{4\pi} \langle \sigma_{\text{anni}} v \rangle n_{\text{DM}}^2,$$

$$\Phi_{\text{dec}} = \frac{1}{6} \int \frac{ds d\Omega}{4\pi} 2\tau^{-1} n_{\text{DM}}^1,$$



$$\mathcal{J} = \int ds d\Omega \rho_{\text{DM}}^2, \quad (\text{対消滅})$$

$$\mathcal{D} = \int ds d\Omega \rho_{\text{DM}}. \quad (\text{崩壊})$$

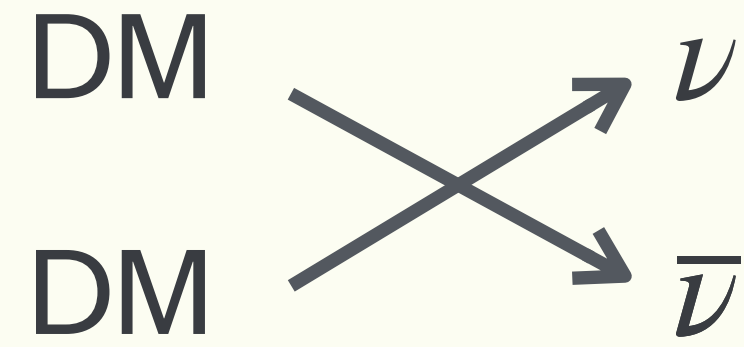


$\mathcal{J} [10^{23} \text{ GeV}^2 \text{ cm}^{-5}], \mathcal{D} [10^{23} \text{ GeV cm}^{-2}]$

	$\mathcal{J}$	$\mathcal{D}$
Generalized NFW	2.3	2.5
NFW	0.88	1.9
Moore	2.7	2.5
Isothermal	0.53	1.9

対消滅の場合、最大で5倍の不定性

# 現在の制限 (対消滅)



影付き

現在の観測からの制限

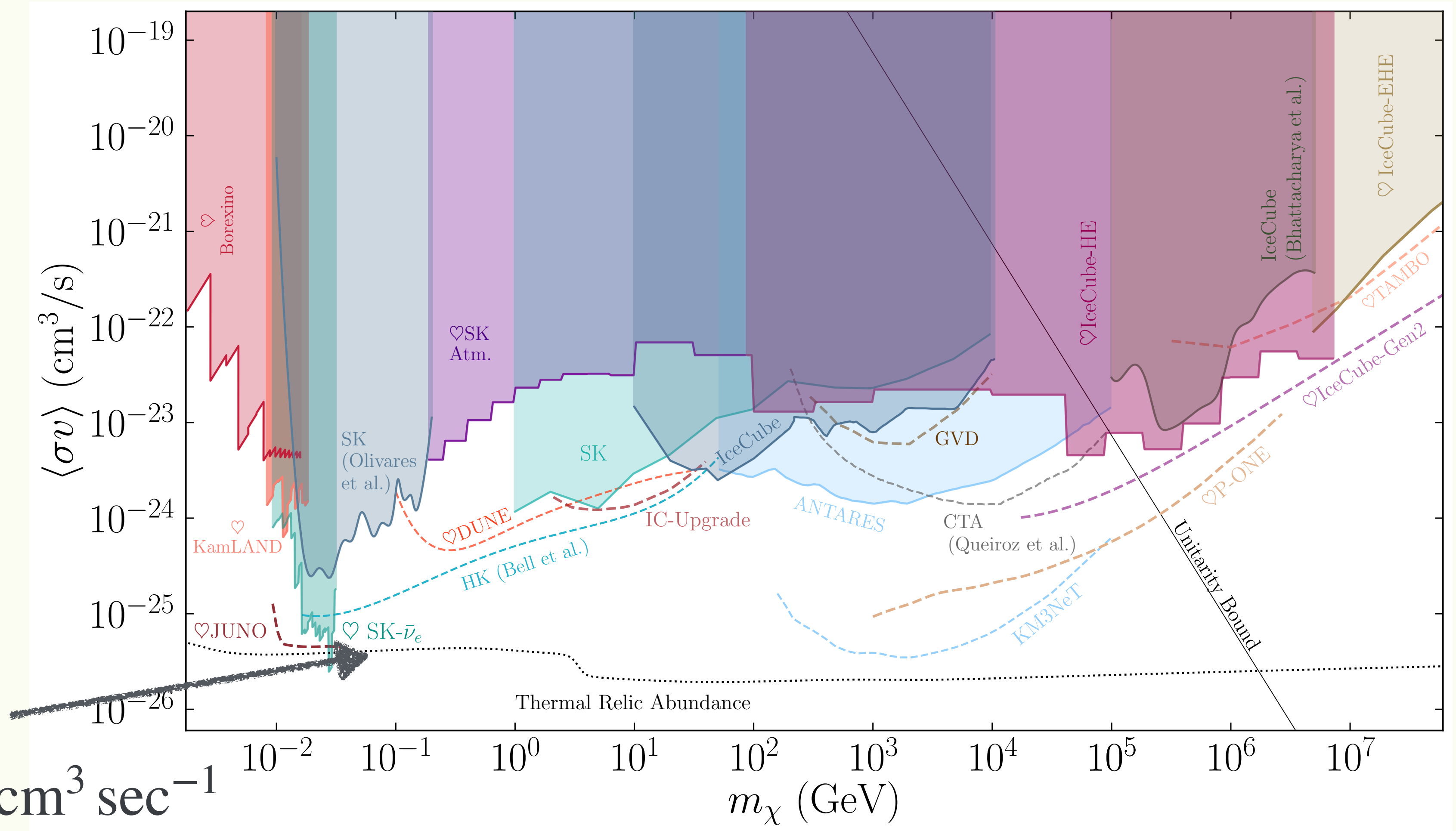
破線

将来的観測(5年間)の感度

黒点線：熱残存DM

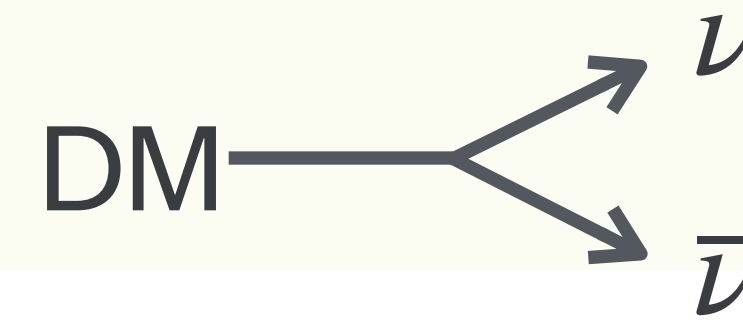
今のところ、ほぼ未検証！

$$\langle \sigma_{\text{anni}} \nu \rangle \sim (3 - 4) \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$$



[Arguelles et al. [1912.09486]]

# 現在の制限 (崩壊)



[Palomares-Ruiz [0712.1937]]

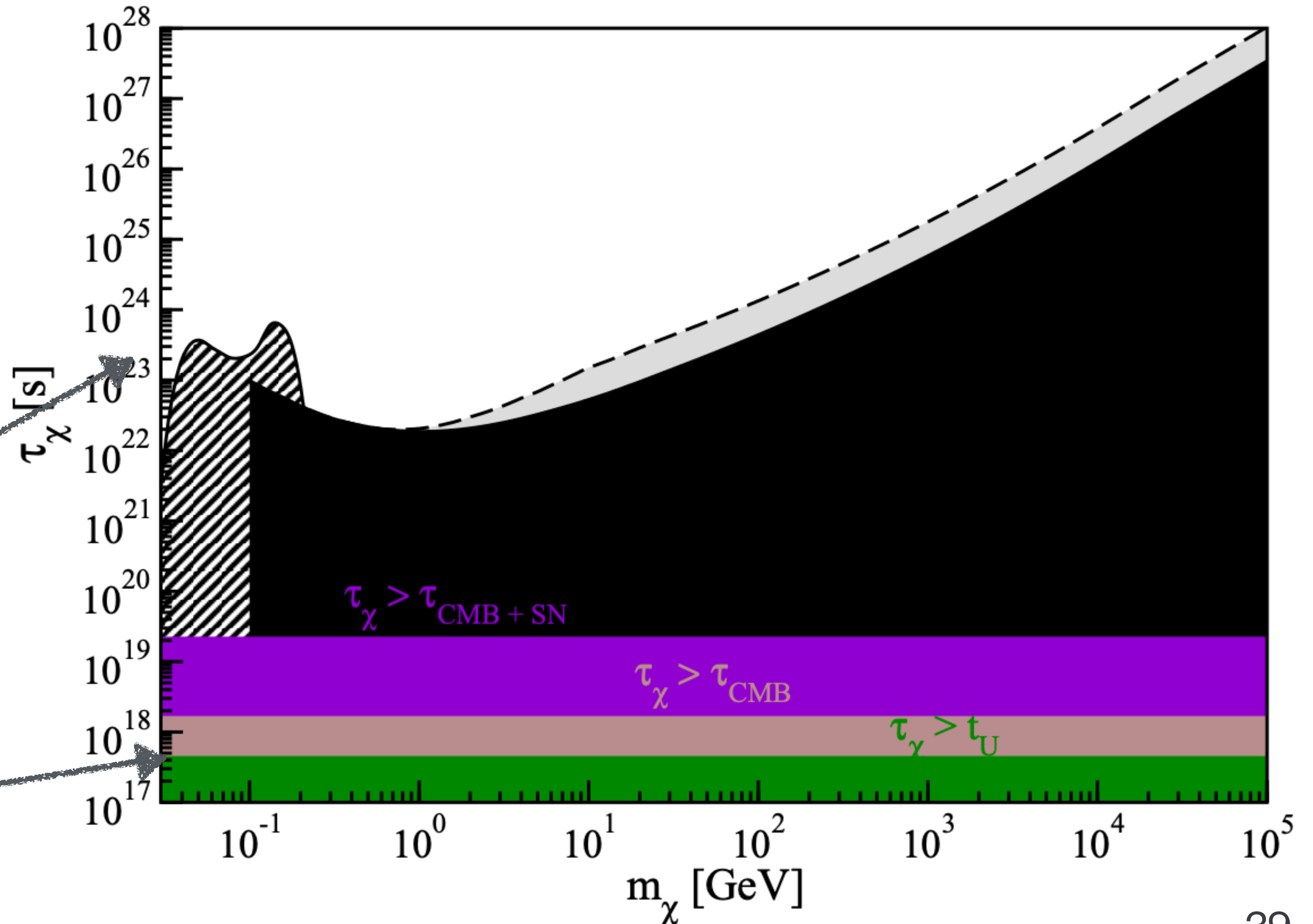
スーパーカミオカンデ

影付き:[0209028]

塗りつぶし:[0501064]

$\tau \geq 10^{23}$  sec  
MeV-DMに対する制限

$\tau > t_U \simeq 4 \times 10^{17}$  sec  
寿命 > 宇宙年齢



# 次世代型ニュートリノ検出器

## JUNO

# Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO)

- 中国で建設中（数年内に稼働？）
- **大きな体積とエネルギー解像度の高さ**がウリ

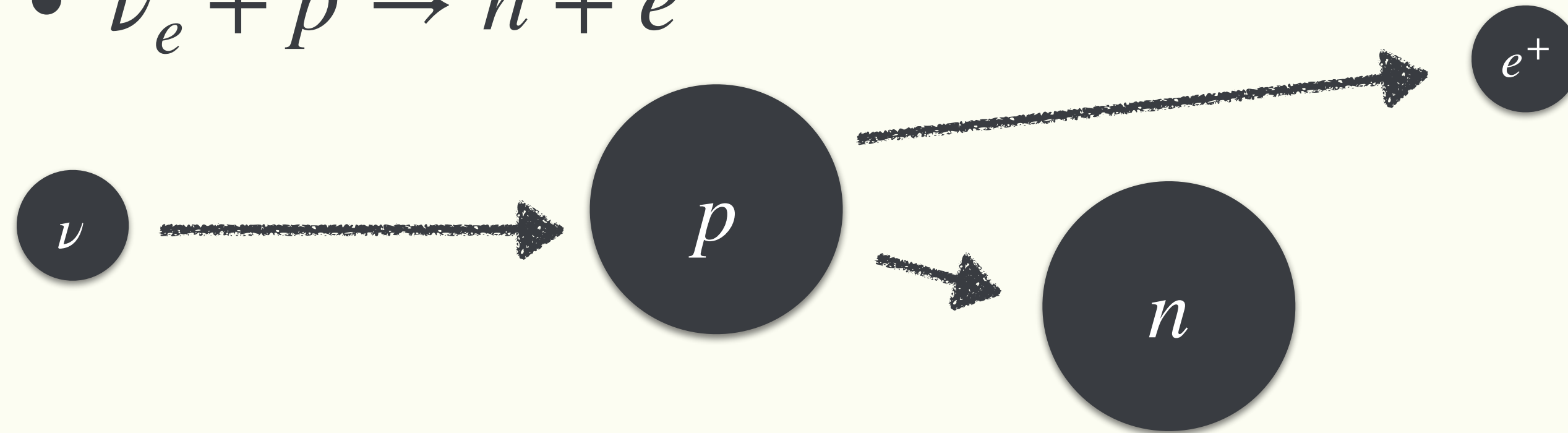


	KamLAND	Super Kamiokande	JUNO
<b>Detection</b>	liquid scintillator	Water	liquid scintillator
<b>Volume</b>	$\simeq 1$ kton	$\simeq 22.5$ kton	<b>17 kton</b>
<b>Resolution</b>	6 % at 1 MeV	$\simeq 14$ % at 10 MeV	<b>3 % at 1 MeV</b>

[<https://doi.org/10.2183/pjab.96.017>]

# 検出原理：逆ベータ崩壊(IBD)

- $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$

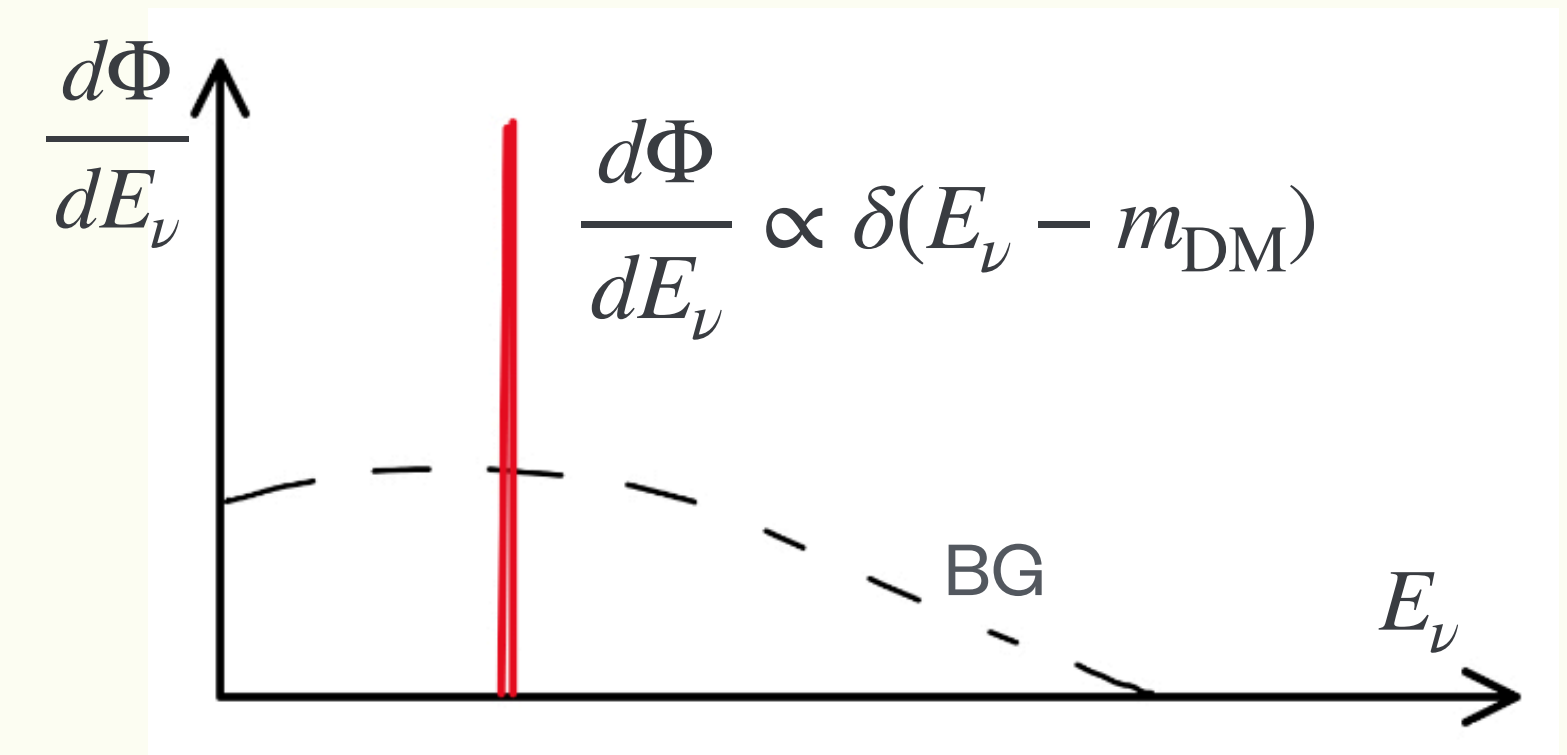


- $10 \text{ MeV} < E_\nu < 100 \text{ MeV}$  で主要な検出原理

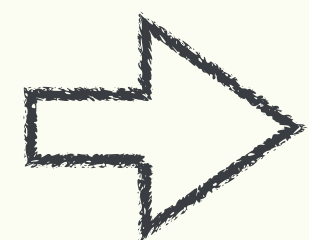
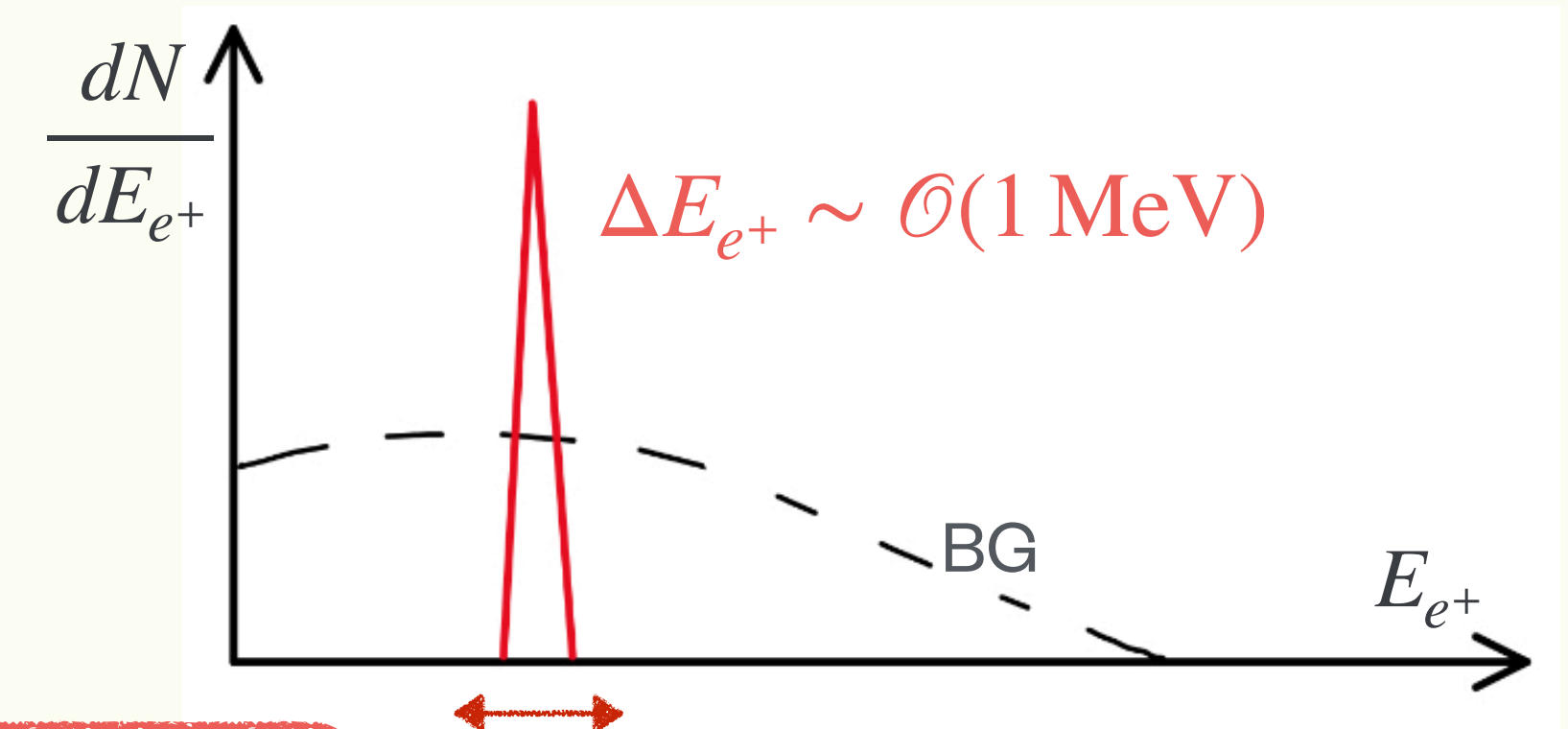
- 信号をほとんどなめさずに観測可能

$$E_{\min} < E_{e^+} < E_{\max},$$

$$\Delta E_{e^+} \equiv E_{\max} - E_{\min} \sim \frac{2}{m_p} E_\nu^2 \sim 5 \text{ MeV} \left( \frac{E_\nu}{50 \text{ MeV}} \right)^2$$



IBD ↓

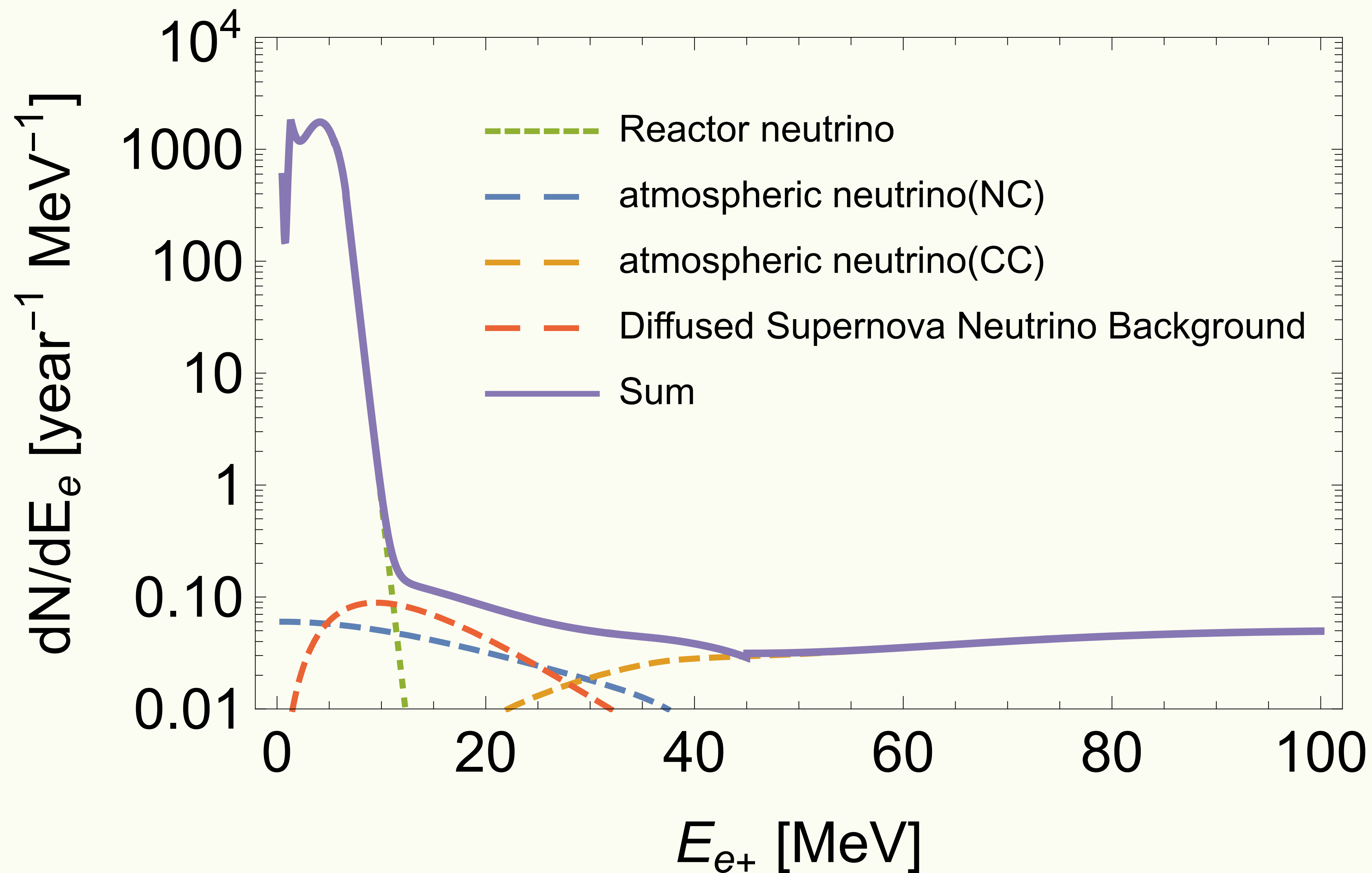


DM由来のピークを背景事象から簡単に識別可能！

# Background

$$\frac{dN}{dE_{e^+}} = \epsilon N_t T \int \frac{d\sigma}{dE}(E_{e^+}, E_\nu) \frac{d\Phi}{dE_\nu} dE_\nu$$

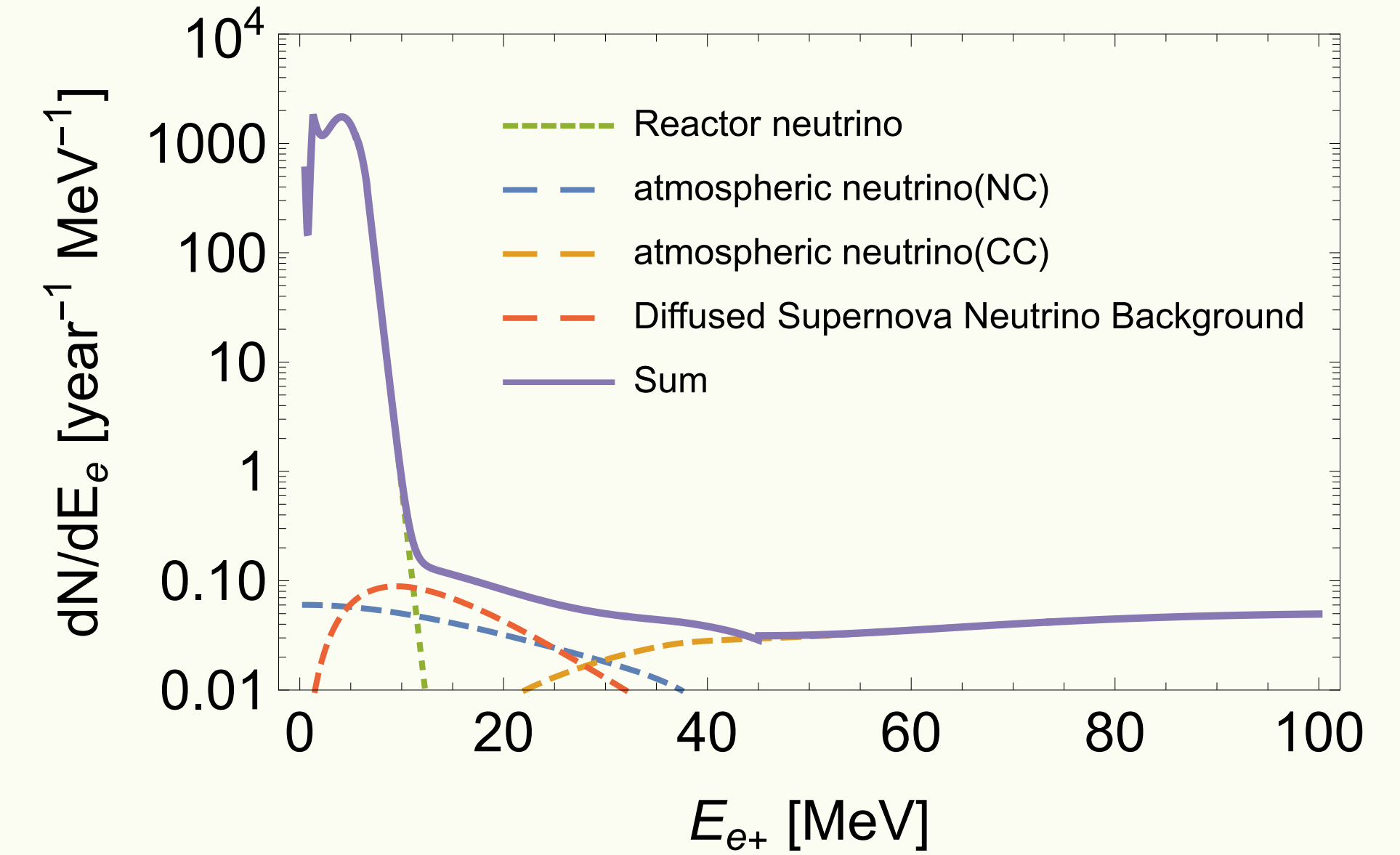
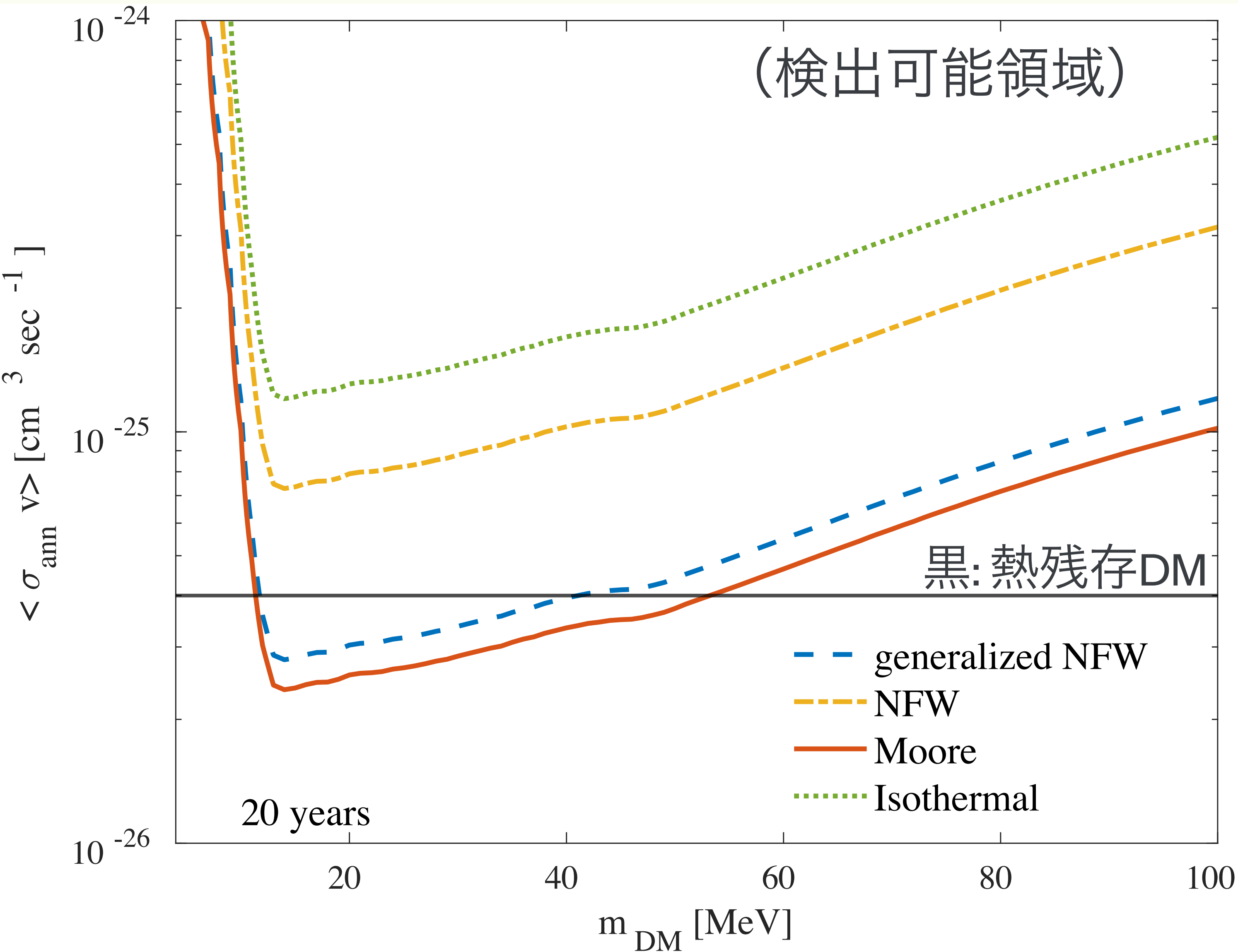
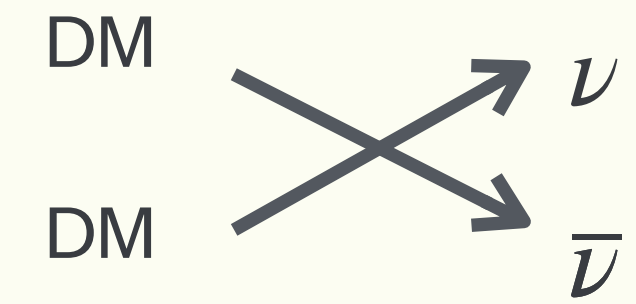
- $\epsilon = 0.6$  : detector efficiency
- $N_t = 1.21 \times 10^{33}$  : number of targets (free protons)
- $T = 20$  years : data-taking



背景事象はほぼ平坦

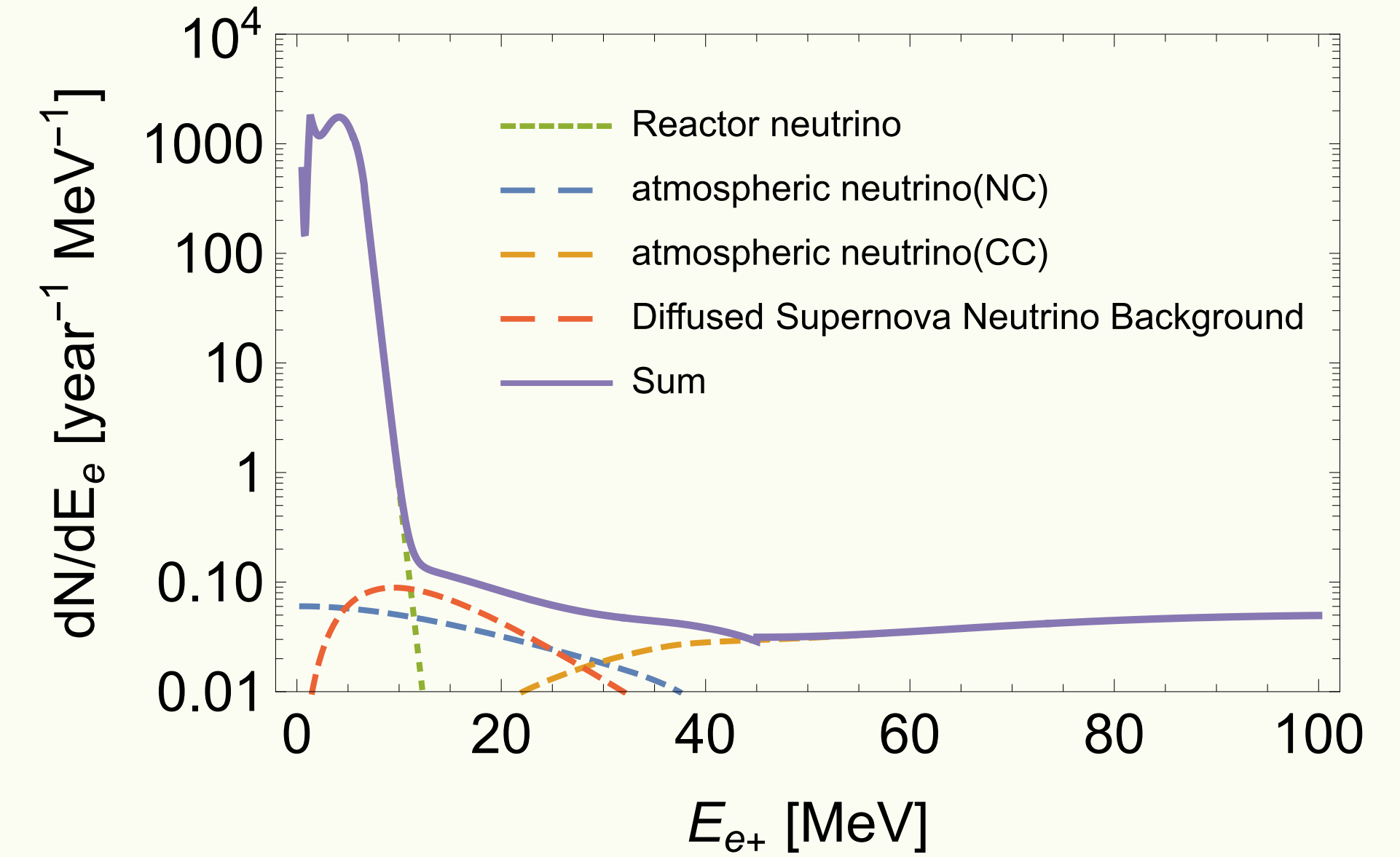
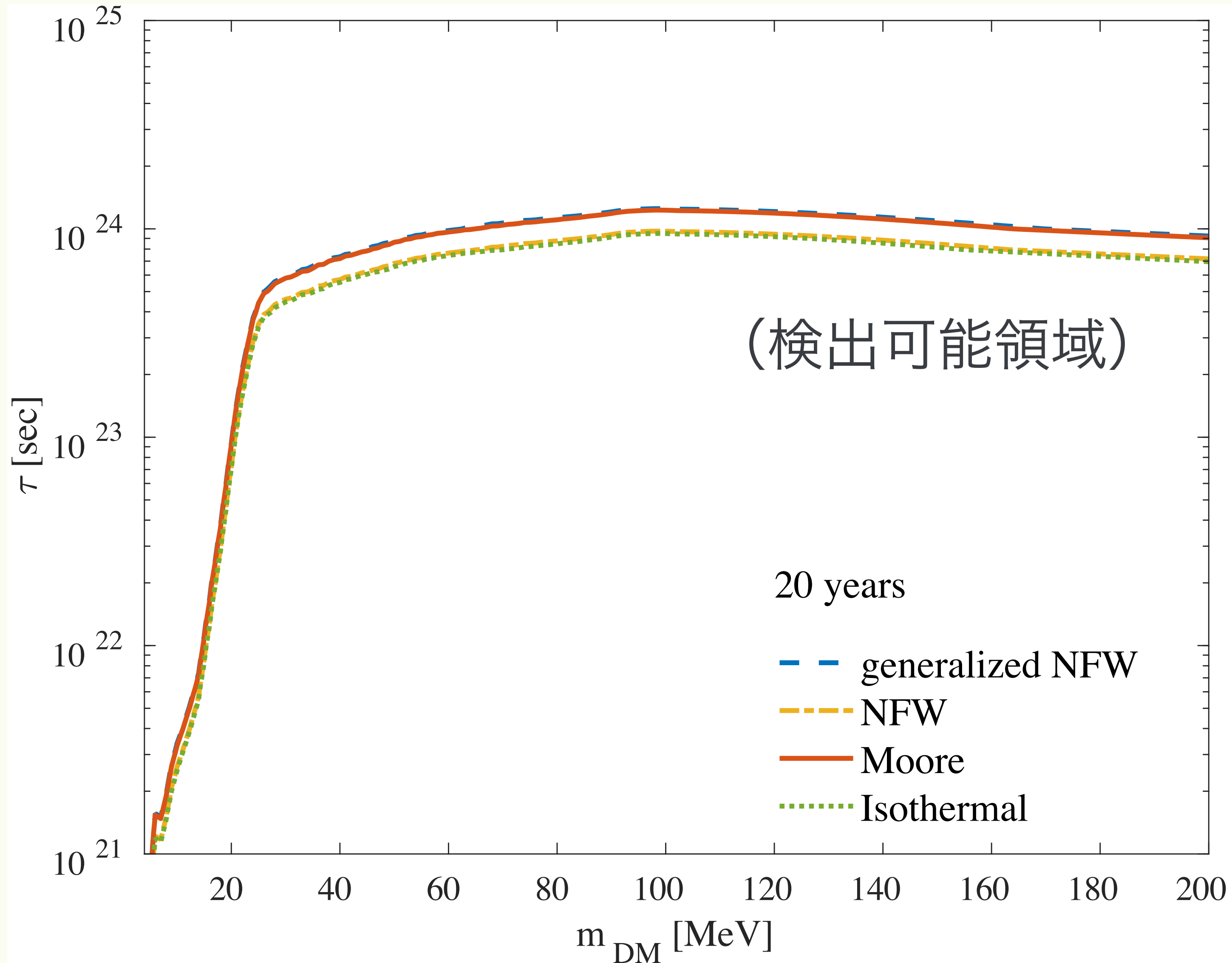
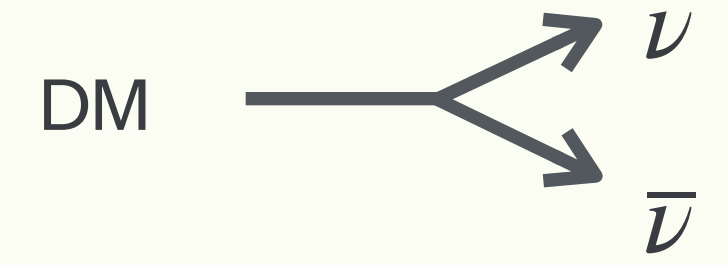
# 解析結果

# DM対消滅への制限 (20years, 90% C.L.)



- $10 \text{ MeV} \leq m_{\text{DM}} \leq 60 \text{ MeV}$  で熱残存DMの検証が可能
- DM profileの不定性が大きい (factor 5)
- $\Phi_{\text{anni}} \propto m_{\text{DM}}^{-2}$  のため、高いエネルギーで制限が弱くなる

# DM寿命への制限 (20years, 90% C.L.)



- $30 \text{ MeV} \leq m_{\text{DM}} \leq 200 \text{ MeV}$  で
- $\tau \simeq 1 \times 10^{24} \text{ sec}$
- DM profileの不定性が大きい (factor 2)
- $\Phi_{\text{dec}} \propto m_{\text{DM}}^{-1}$  のため、高いエネルギーで制限が弱くなる

# まとめ

- **暗黒物質 (DM)**

- 宇宙に多量に存在する未知の物質
- 熱残存DM:

$$\langle \sigma_{\text{anni}} \nu \rangle \sim (3 - 4) \times 10^{-26} \text{cm}^2 \text{sec}^{-1}$$

- **JUNO 実験 (建設中@中国) :**

	Super Kamiokande	JUNO
Detection	Water	liquid scintillator
Volume	$\simeq 22.5$ kton	17 kton
Resolution	$\simeq 14$ % at 10 MeV	3 % at 1 MeV

[<https://doi.org/10.2183/pjab.96.017>]

- **検出原理: 逆ベータ崩壊**

- MeV 領域の主要なチャンネル
- $\nu$  ピークをほぼなめさない

- **解析内容と結果**

- 天の川銀河のDMからの  $\nu$  線について
  1. DM信号への感度の大幅向上
  2. 熱残存DMの検証可能性
  3. DM profile による不定性 : factor 2-5
  4. 高エネルギーで制限が弱まる