

# 暗黒物質の検出に向けて

中山和則 (東北大 & QUP/KEK)

2023/5/17 @ 大阪公立大セミナー

# 目標

専門外の人、これから学ぶ人に、最近の  
暗黒物質の研究について**雰囲気**を伝える



# 目次

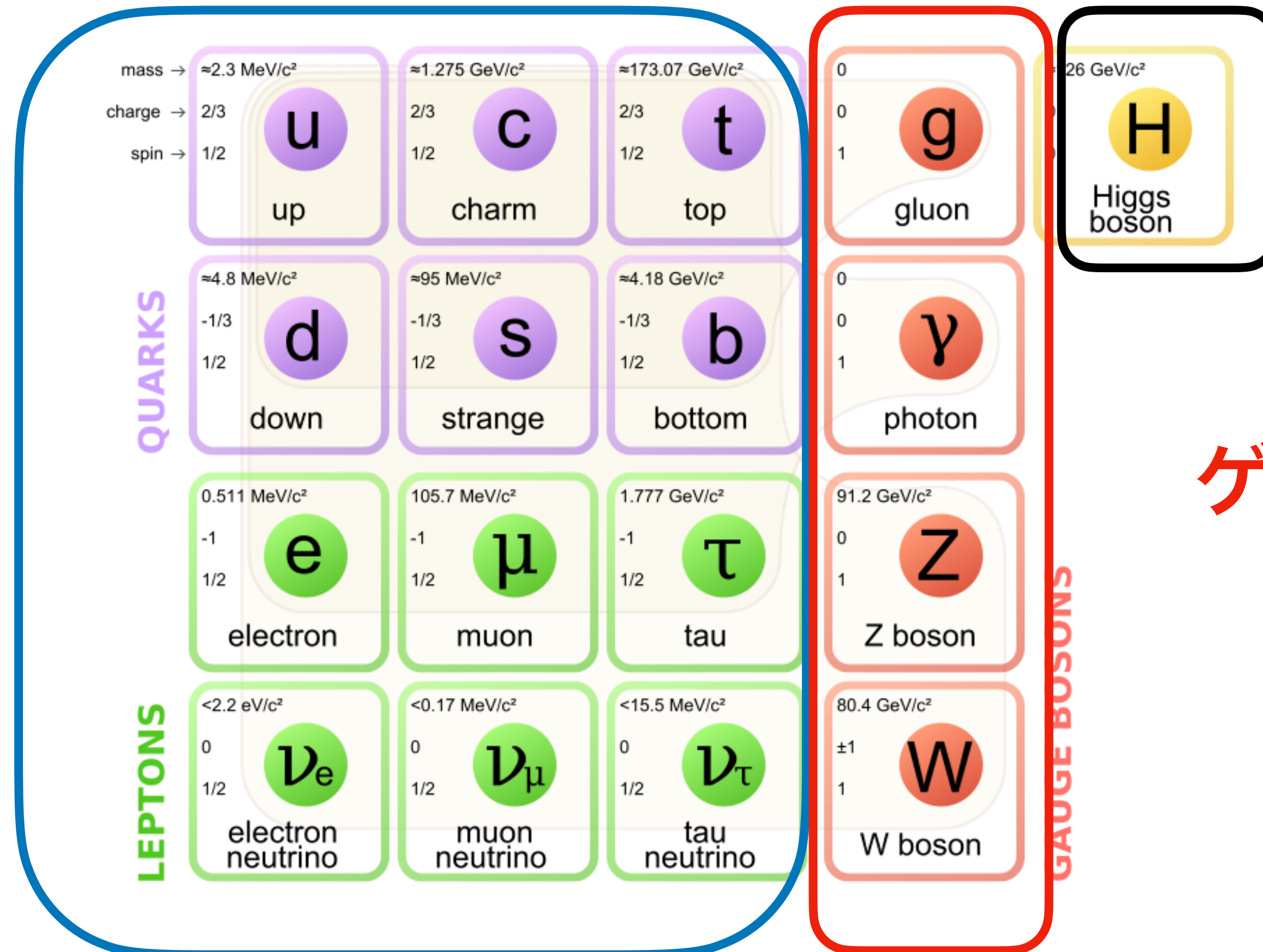
1. 素粒子標準模型と暗黒物質
2. 暗黒物質の様々な検証方法
3. 暗黒物質検出と物性物理

# 1. 素粒子標準模型と暗黒物質

# 素粒子標準模型

## 物質場

クォーク・レプトンx3世代



## ヒッグス場

ゲージ場・物質場に質量を与える

## ゲージ場

強い相互作用  
弱い相互作用  
電磁相互作用

を媒介

[Figure from Wikipedia]

# 素粒子標準模型

- 標準模型：以下のラグランジアンを持つ場の量子論

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & - \sum \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{\mu\nu a} && \text{----- ゲージ場} \\ & + \sum i\bar{\psi}\gamma^\mu D_\mu\psi && \text{----- 物質場+ゲージ相互作用} \\ & + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi) && \text{----- ヒッグス場} \quad \longrightarrow \text{ゲージ場の質量} \\ & + \sum y\phi\psi\psi + \text{h.c.} && \text{----- 湯川相互作用} \quad \longrightarrow \text{物質場の質量}\end{aligned}$$

この世界のほとんど全てを正しく記述する “神の数式”

# 標準模型の問題点

宇宙論的問題

暗黒物質

物質反物質非対称性

インフレーション

理論的問題

階層性問題

強いCP問題

世代構造    ゲージ構造

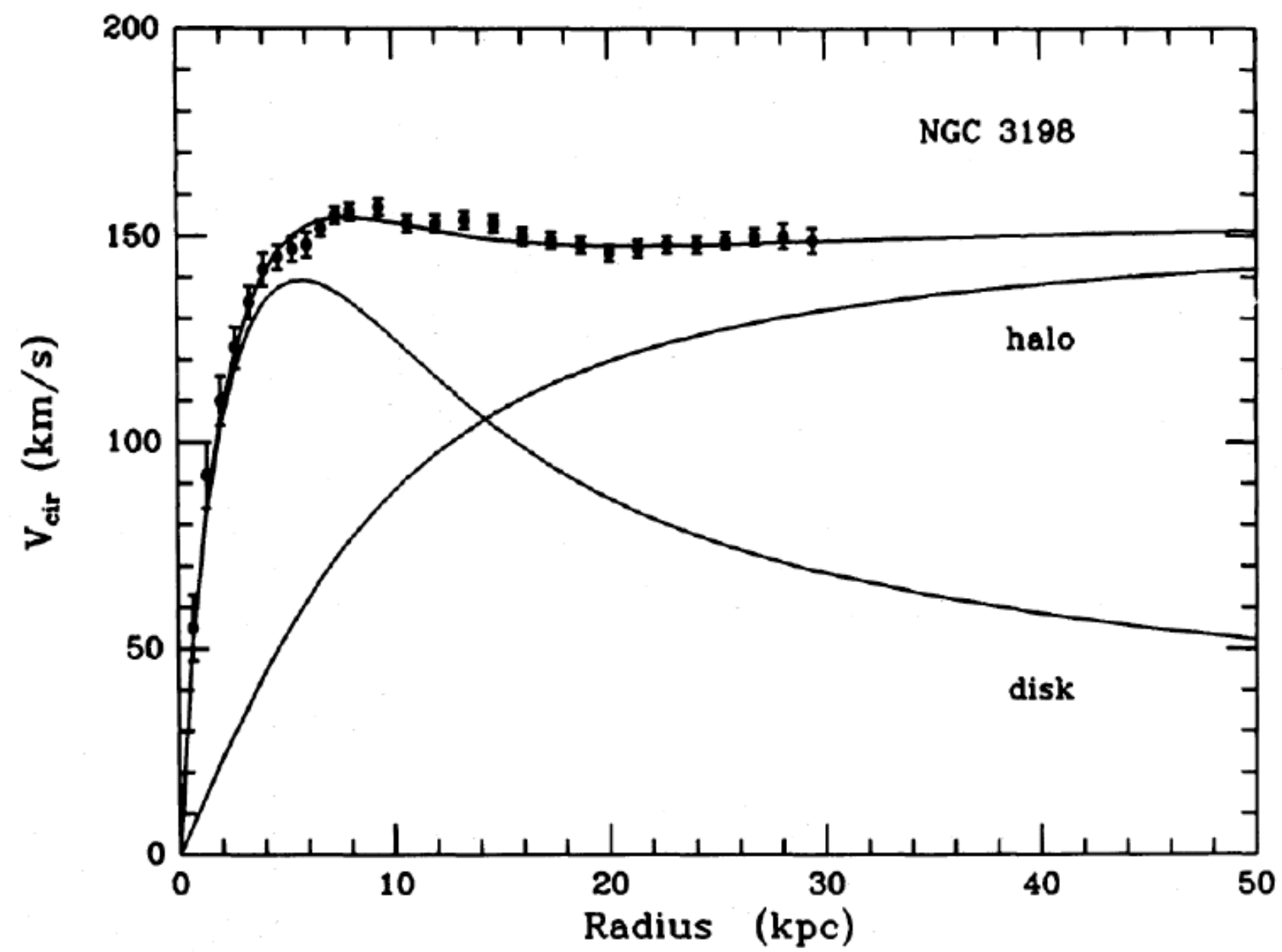
量子重力

標準模型は究極理論ではない！



# 暗黒物質の観測的証拠

## 銀河の回転曲線



## 重力レンズ



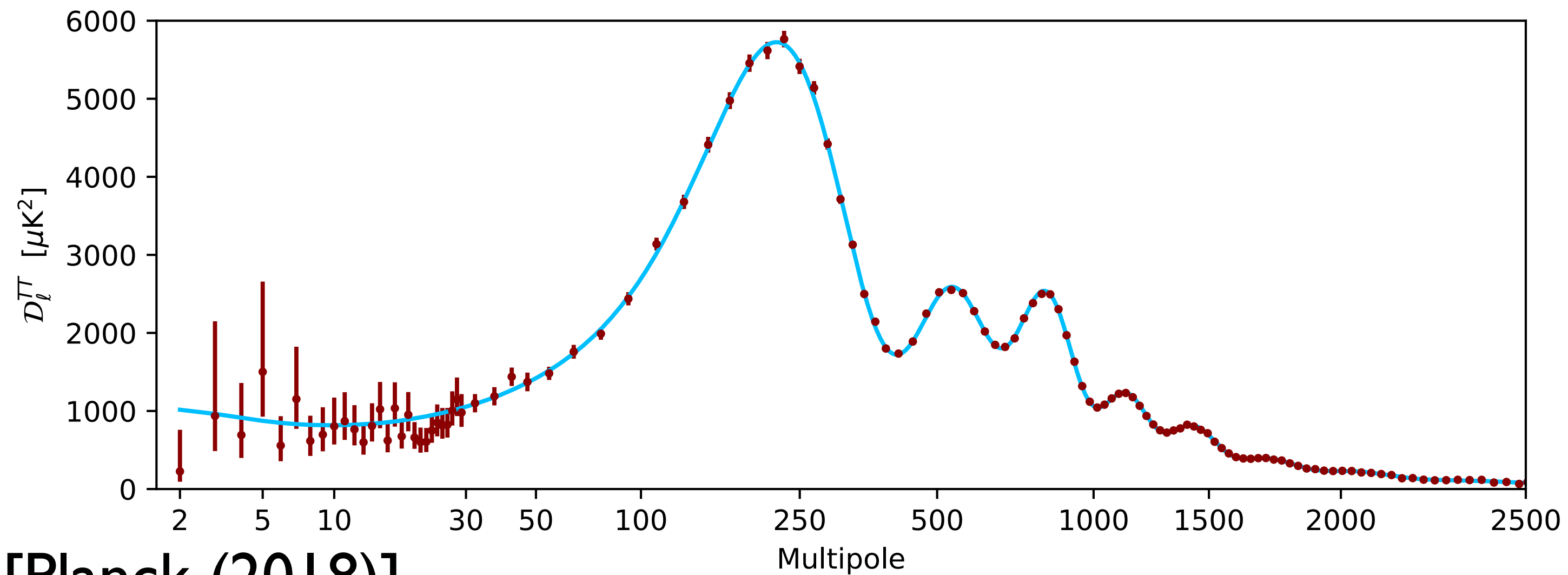
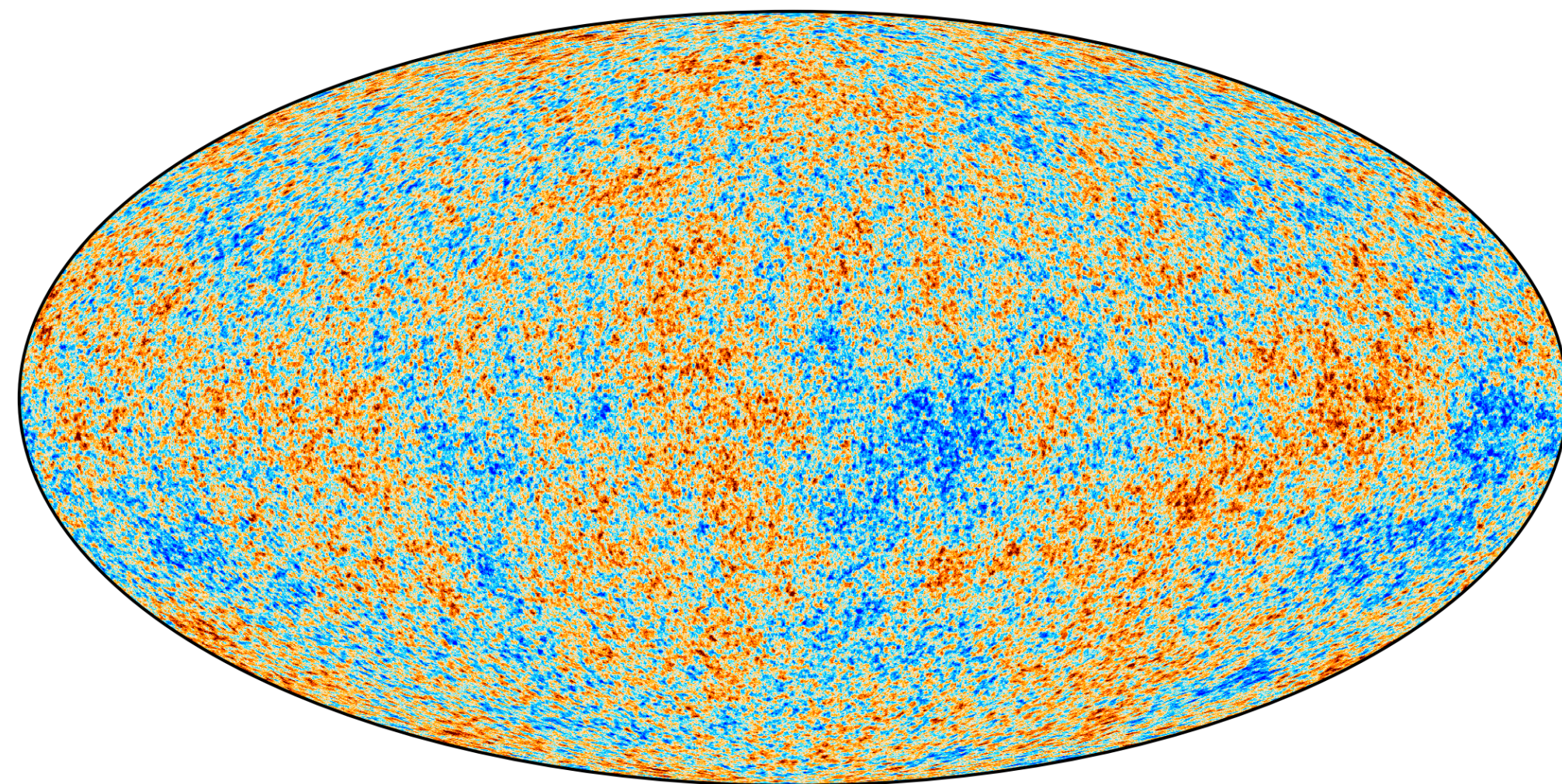
## 銀河団の衝突





# 暗黒物質の観測的証拠

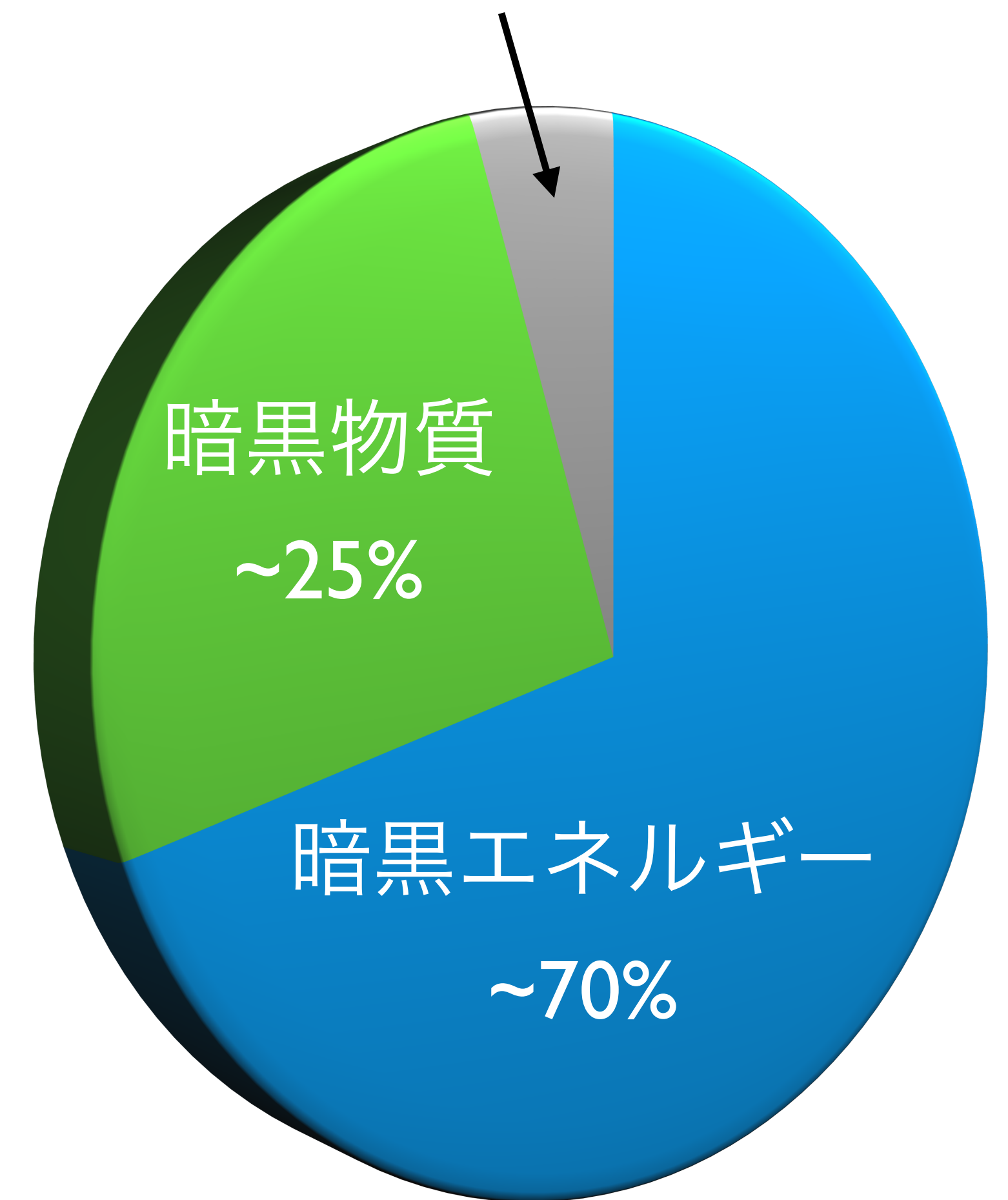
## 宇宙背景放射



[Planck (2018)]

## 宇宙のエネルギーの割合

通常物質 ~5%





# 暗黒物質について分かっていること

- 宇宙の全エネルギーの約20%
- 地球近傍では質量密度  $\rho \simeq 0.4 \text{ GeV}/\text{cm}^3$
- 重力を及ぼす
- “冷たい” (速度が小さい)
- 質量  $10^{-22} \text{ eV} - 10^{52} \text{ eV}$  (ほぼ全く決まってない!)

## 単位

1 GeV

~陽子1個の質量

meV =  $10^{-3} \text{ eV}$

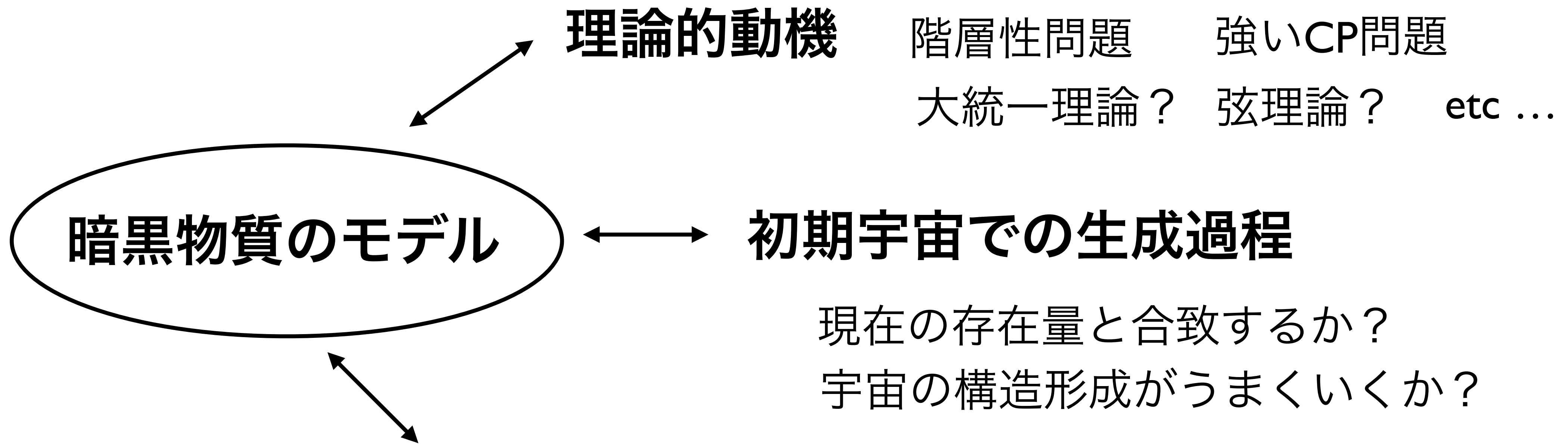
GeV =  $10^9 \text{ eV}$

TeV =  $10^{12} \text{ eV}$  など

雲を掴むような話



# 暗黒物質の研究



今日の  
主題

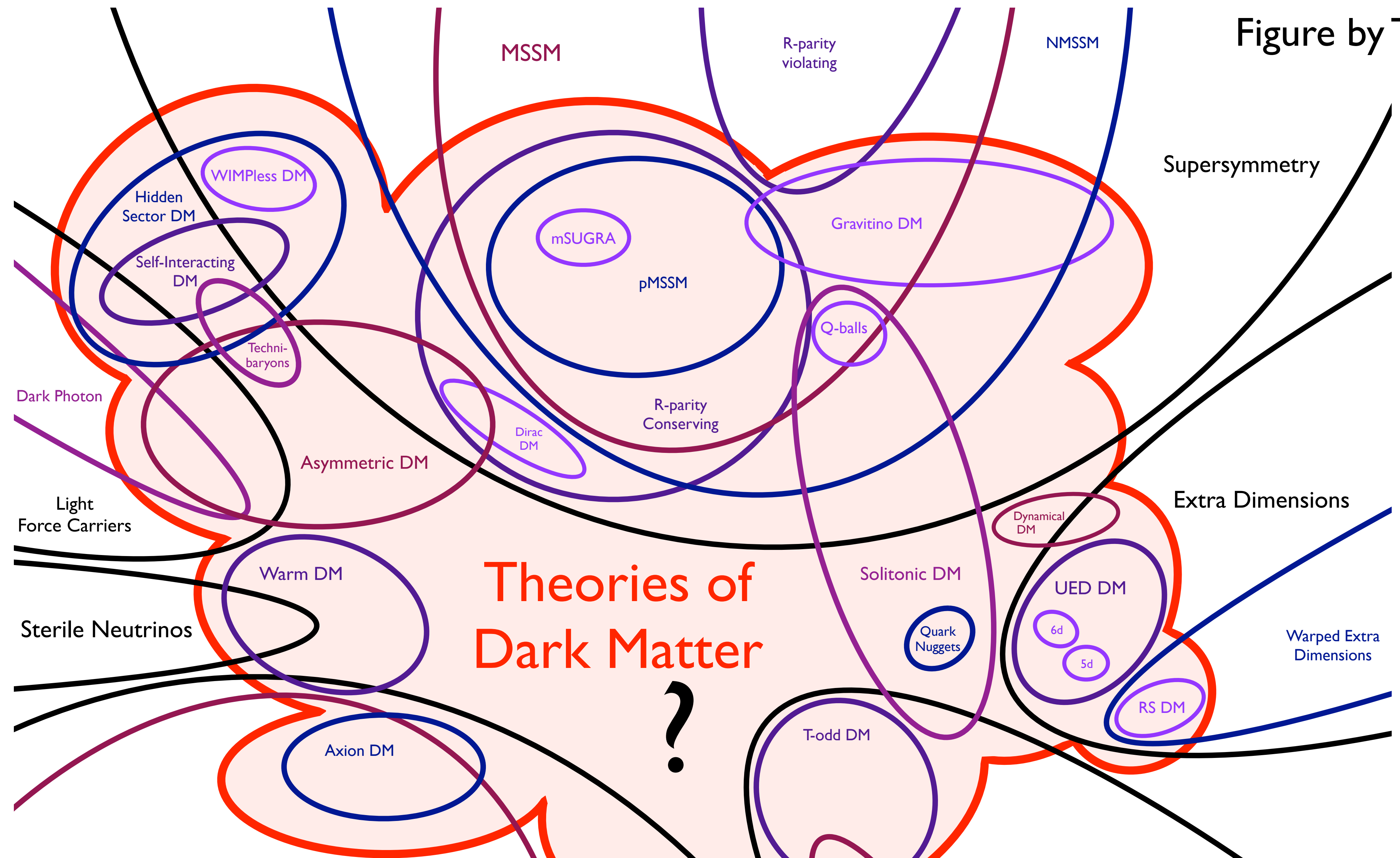
## 実験・観測との関係

地上実験 (加速器実験、直接検出実験 ...)

宇宙観測 (宇宙線、宇宙背景放射、重力波、星の進化 ...)

新たな実験手法の提案

Figure by T.Tait



暗黒物質のモデルは  $O(100)$  (1000以上?) あると思われる

# 暗黒物質の代表的な模型

## ● **WIMP** (Weakly-Interacting Massive Particle)

典型的には質量  $1\text{TeV}$  程度で、弱い相互作用程度の相互作用の大きさを持つ

超対称性理論のニュートラリーノなどが代表例  $\longrightarrow$  標準模型の階層性問題を解決

## ● アクシオン

典型的には質量  $1\mu\text{eV} - 1\text{meV}$  程度で、相互作用はすごく弱い

標準模型の強いCP問題を解決

[Peccei, Quinn (1977)]

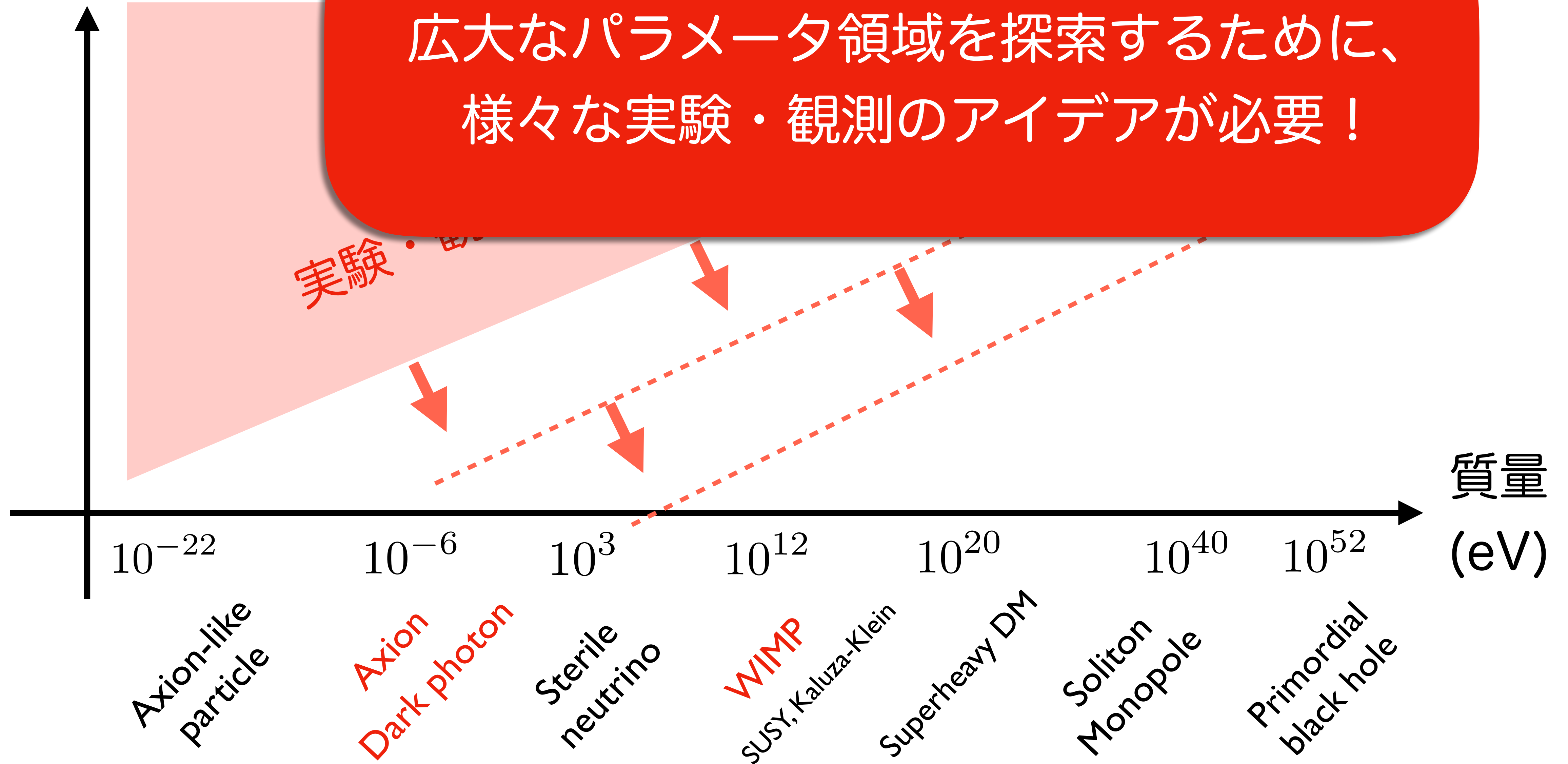
## ● **ALP** (Axion-Like Particle), ダークフォトン

典型的には質量  $\ll 1\text{eV}$  で、相互作用はすごく弱い

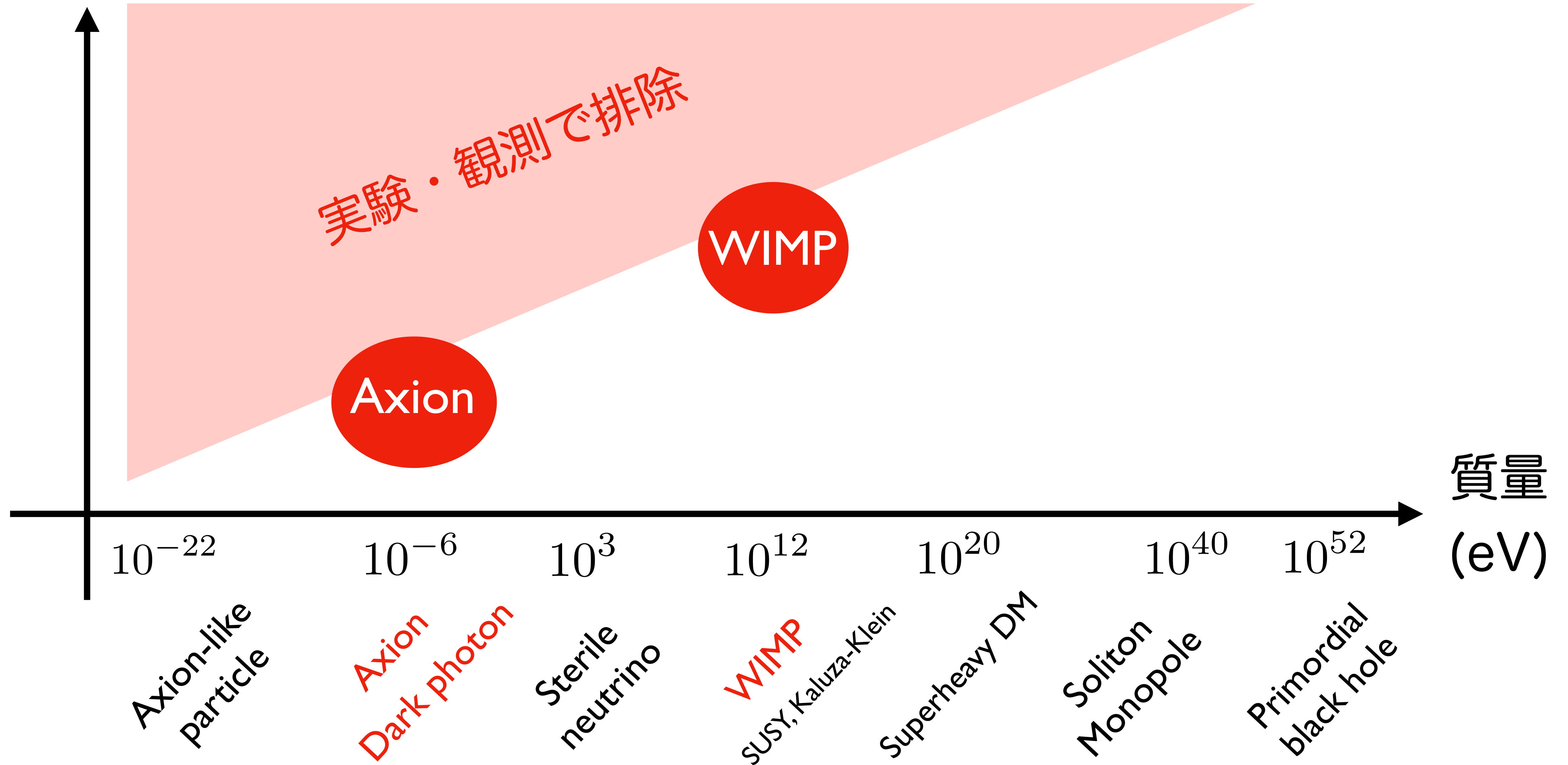
弦理論から多数のALP, ダークフォトンが予言される? [Arvanitaki et al. (2009)]

(重力以外の)  
相互作用の強さ

広大なパラメータ領域を探索するために、  
様々な実験・観測のアイデアが必要！



(重力以外の)  
相互作用の強さ



## 2. 暗黒物質の様々な検証方法

### 2-1. WIMP暗黒物質

### 2-2. アクシオン暗黒物質



# WIMP暗黒物質の直接・間接検出

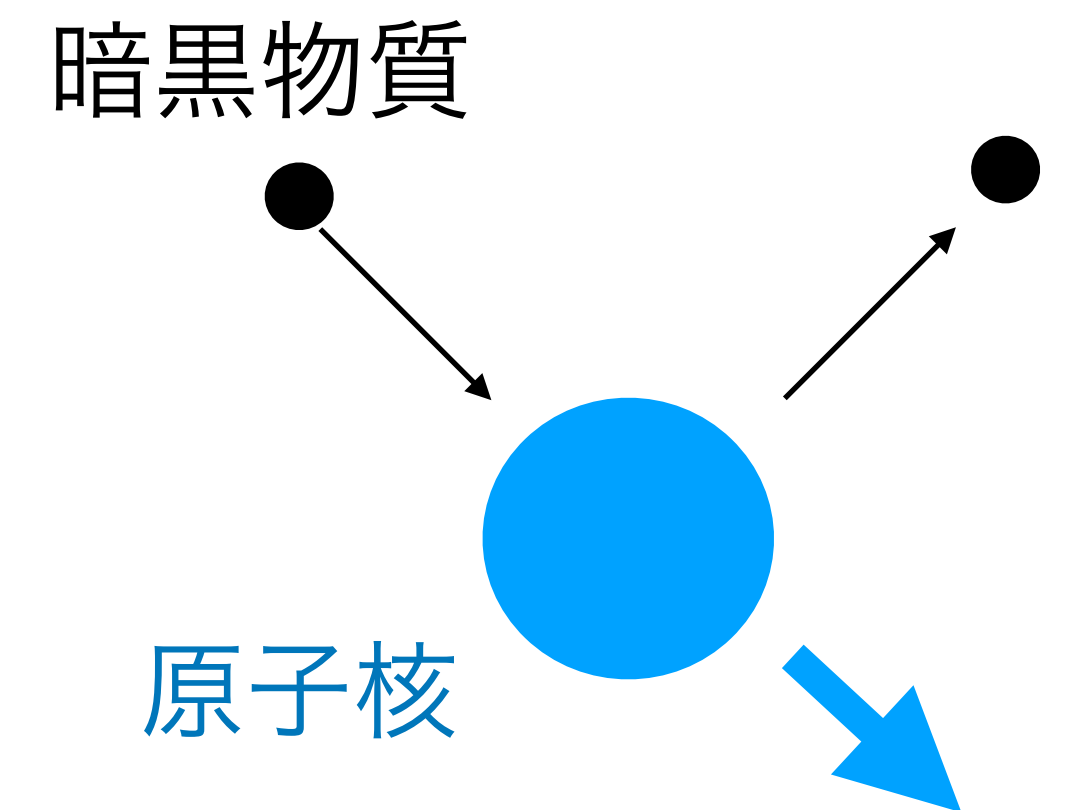
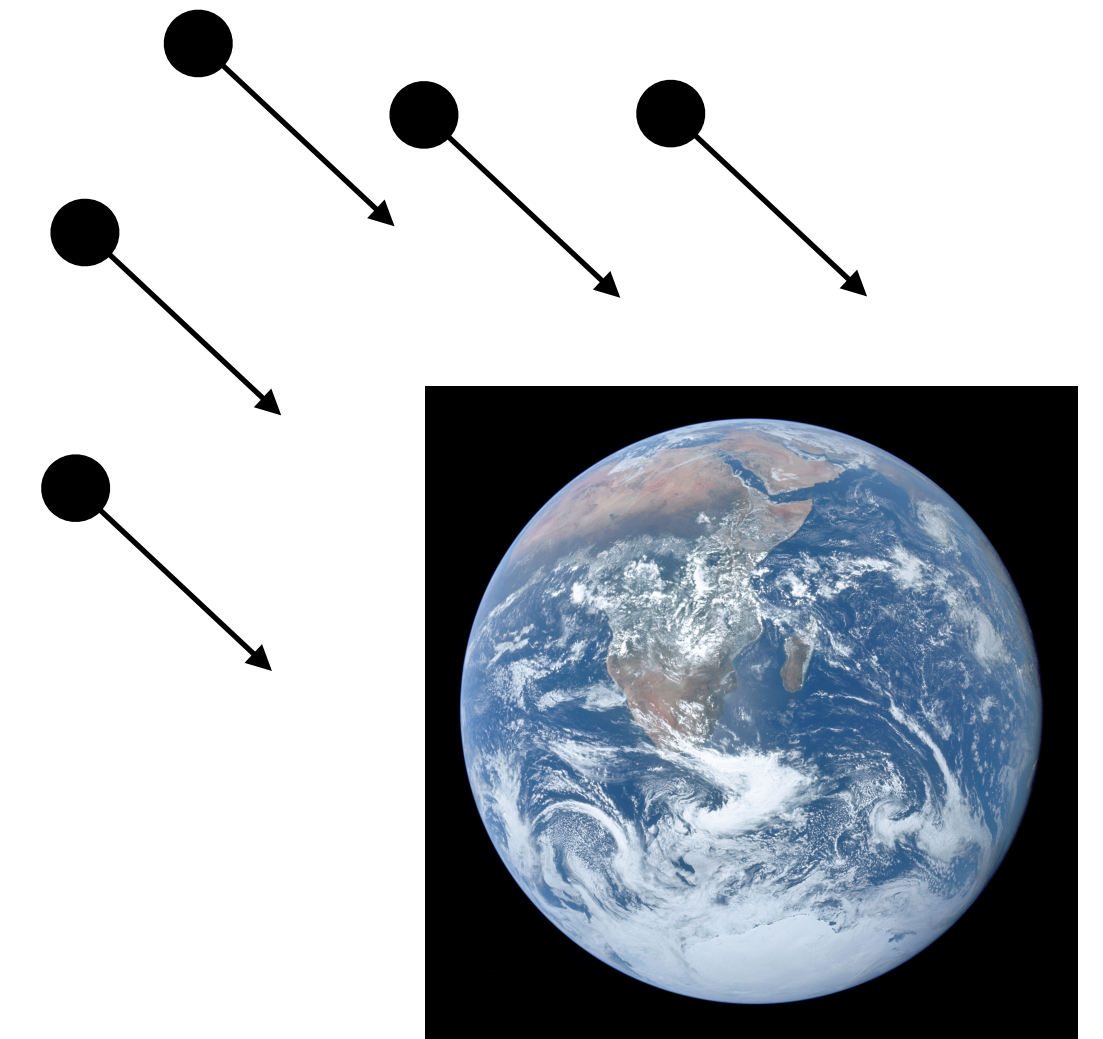
## ● 直接検出

- 暗黒物質のフラックス  $\sim 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \left( \frac{10^3 \text{ GeV}}{m} \right)$
- 暗黒物質が検出器中の原子にたまにぶつかる
- 典型的な反跳エネルギー

$$E \sim \frac{m^2 m_N}{(m + m_N)^2} v^2 \sim 100 \text{ keV} \left( \frac{m_N}{100 \text{ GeV}} \right)$$

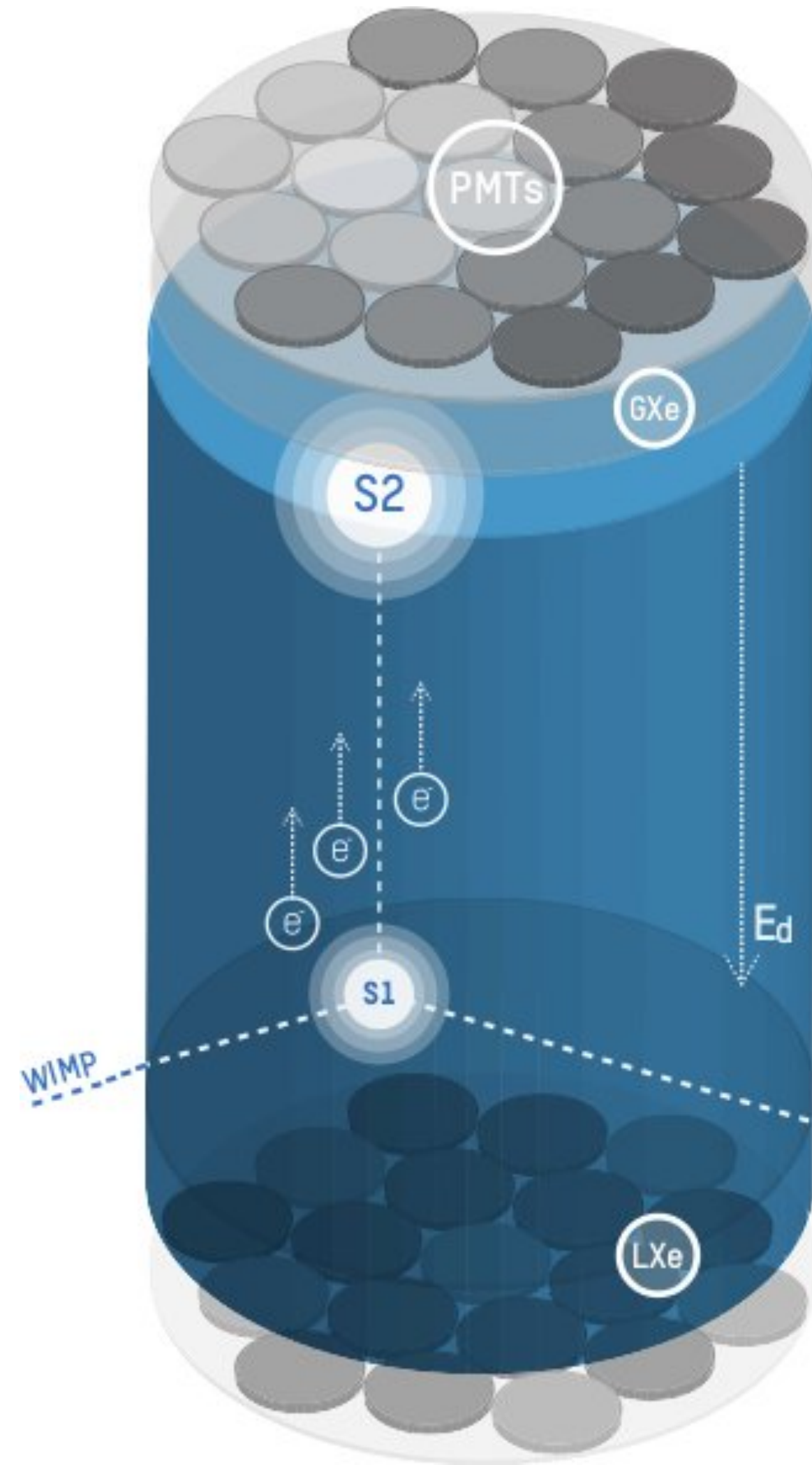
→ 電離、シンチレーション、温度上昇など

- 相互作用の大きさ（**散乱断面積**）の情報が得られる





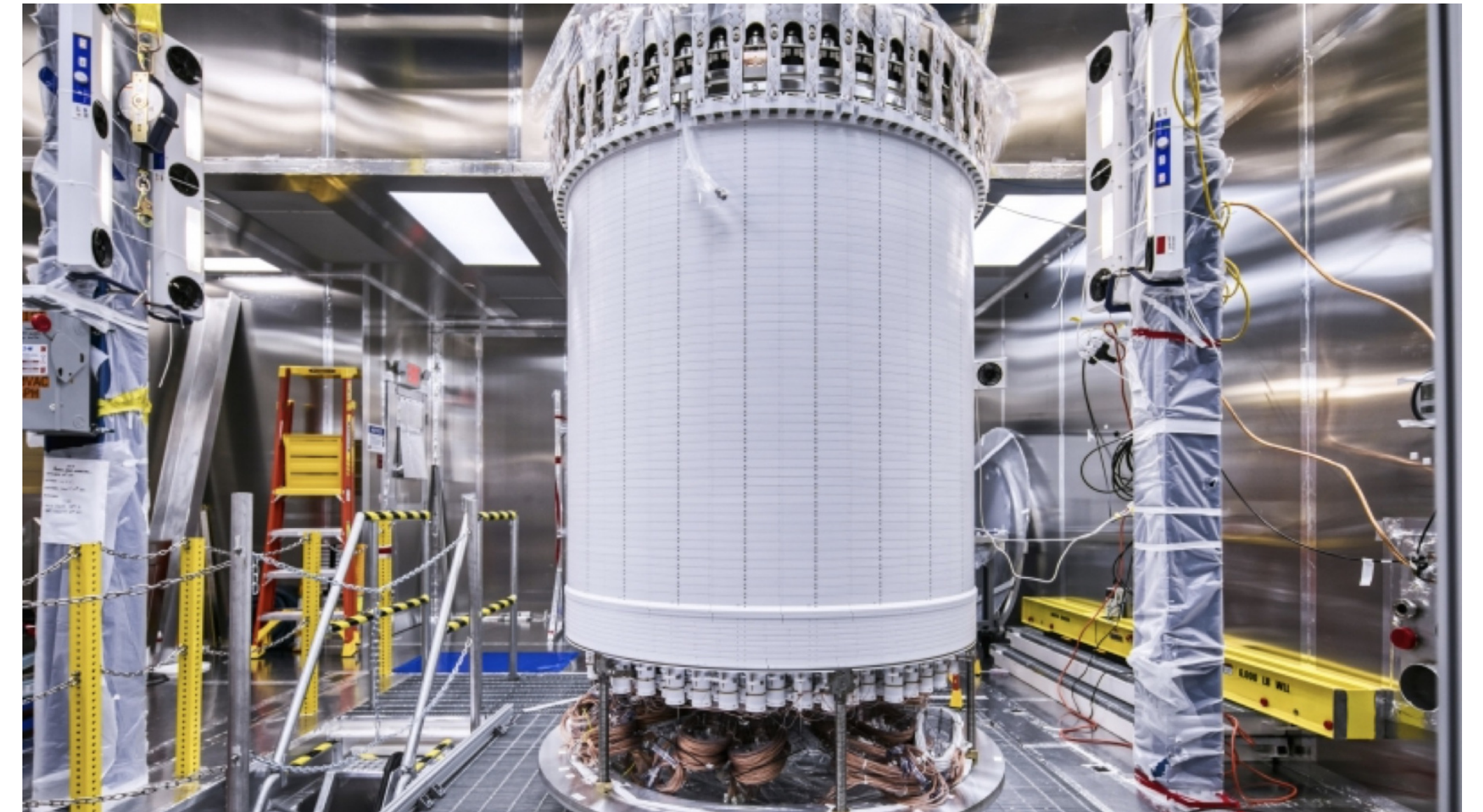
# 液体キセノンの場合



# XENON実験

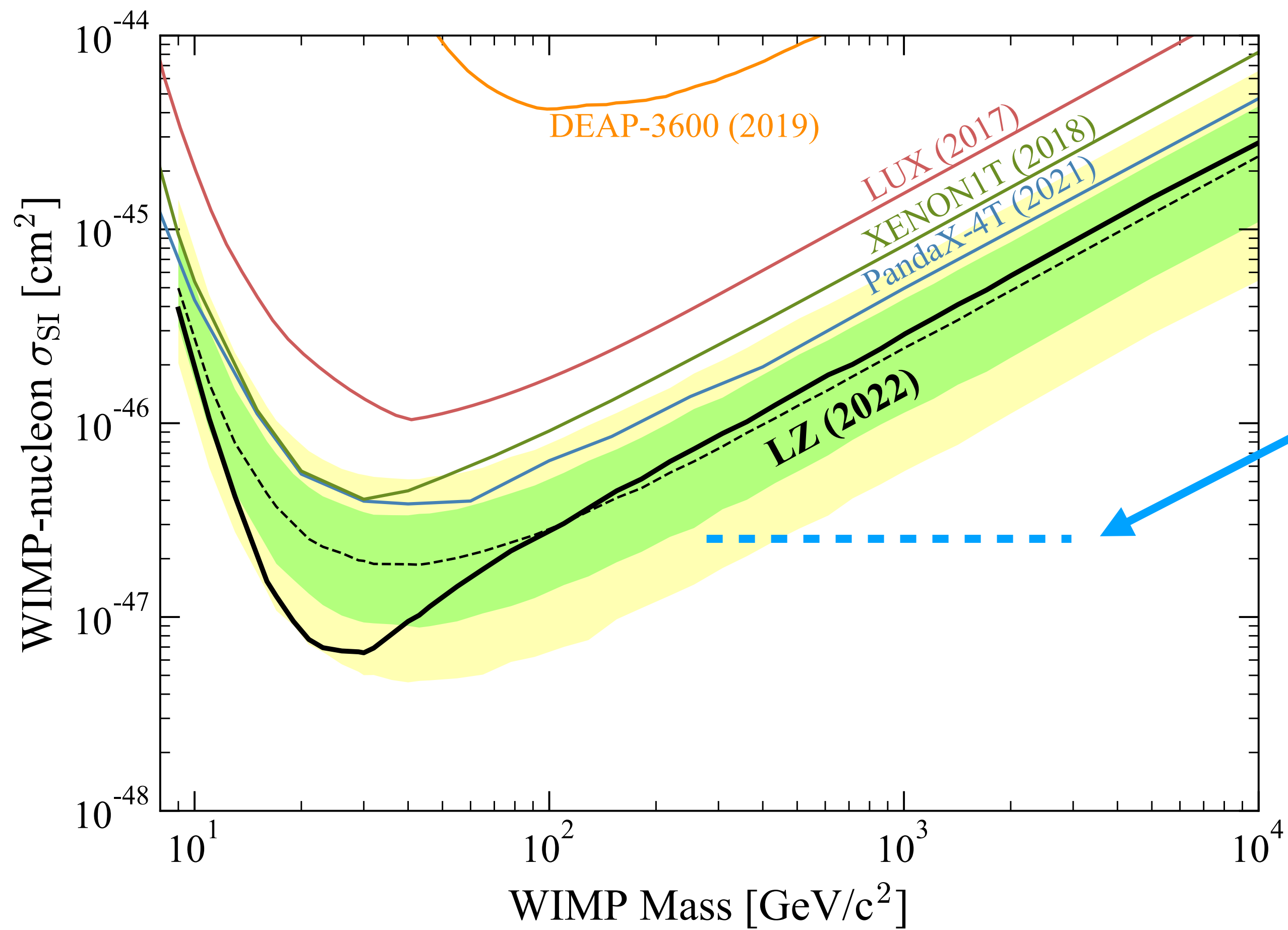


# LZ実験



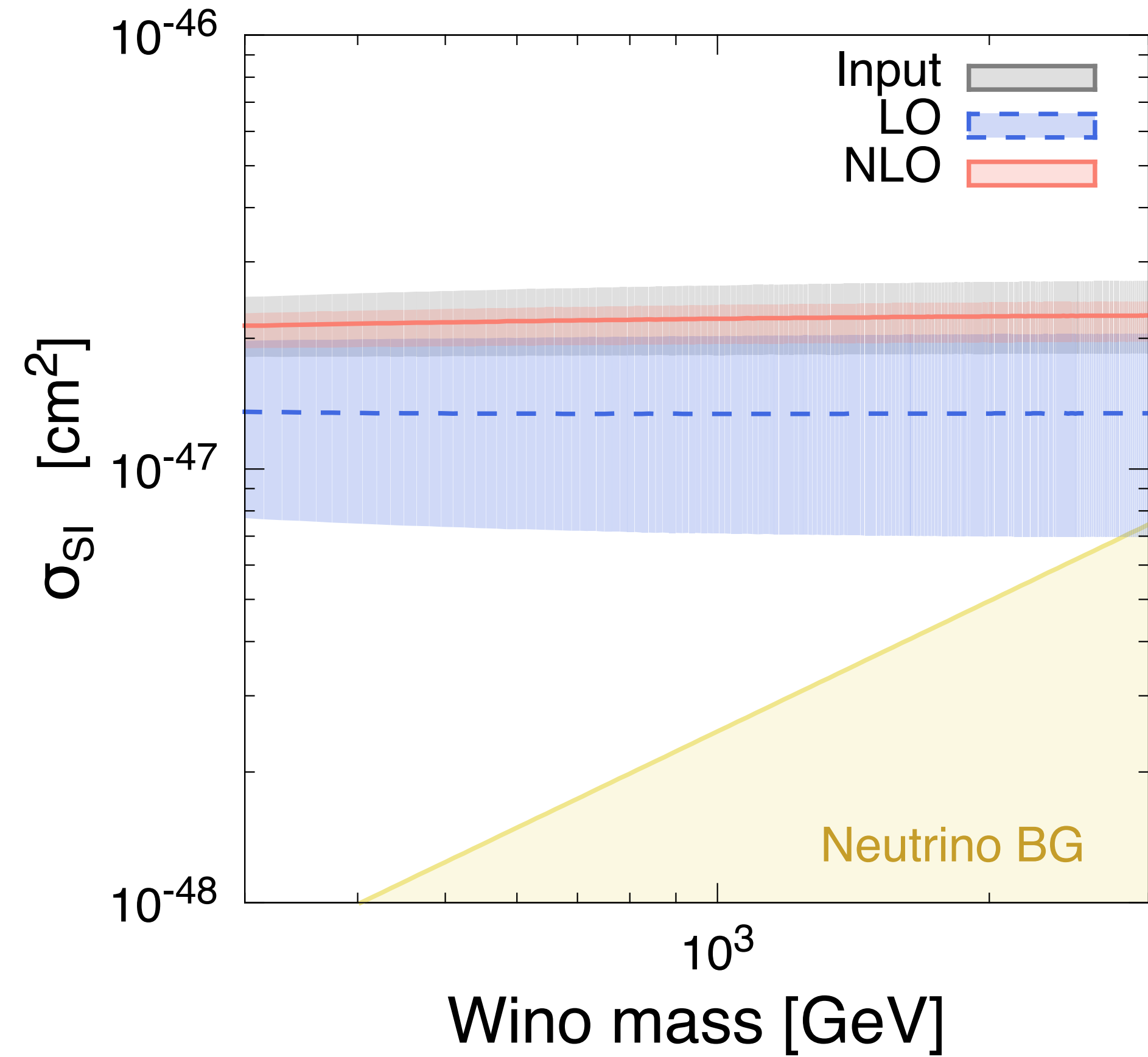


# 暗黒物質-核子 散乱断面積への上限



[LZ collaboration (2022)]

# Wino暗黒物質の予言



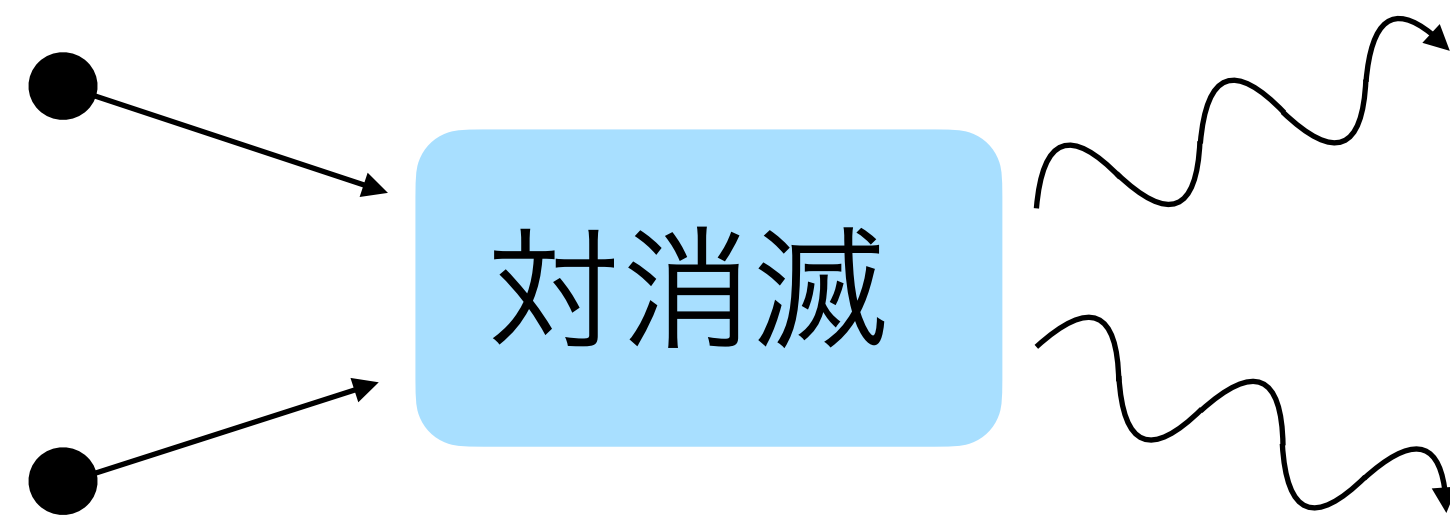
[Hisano, Ishiwata, Nagata (2015)]



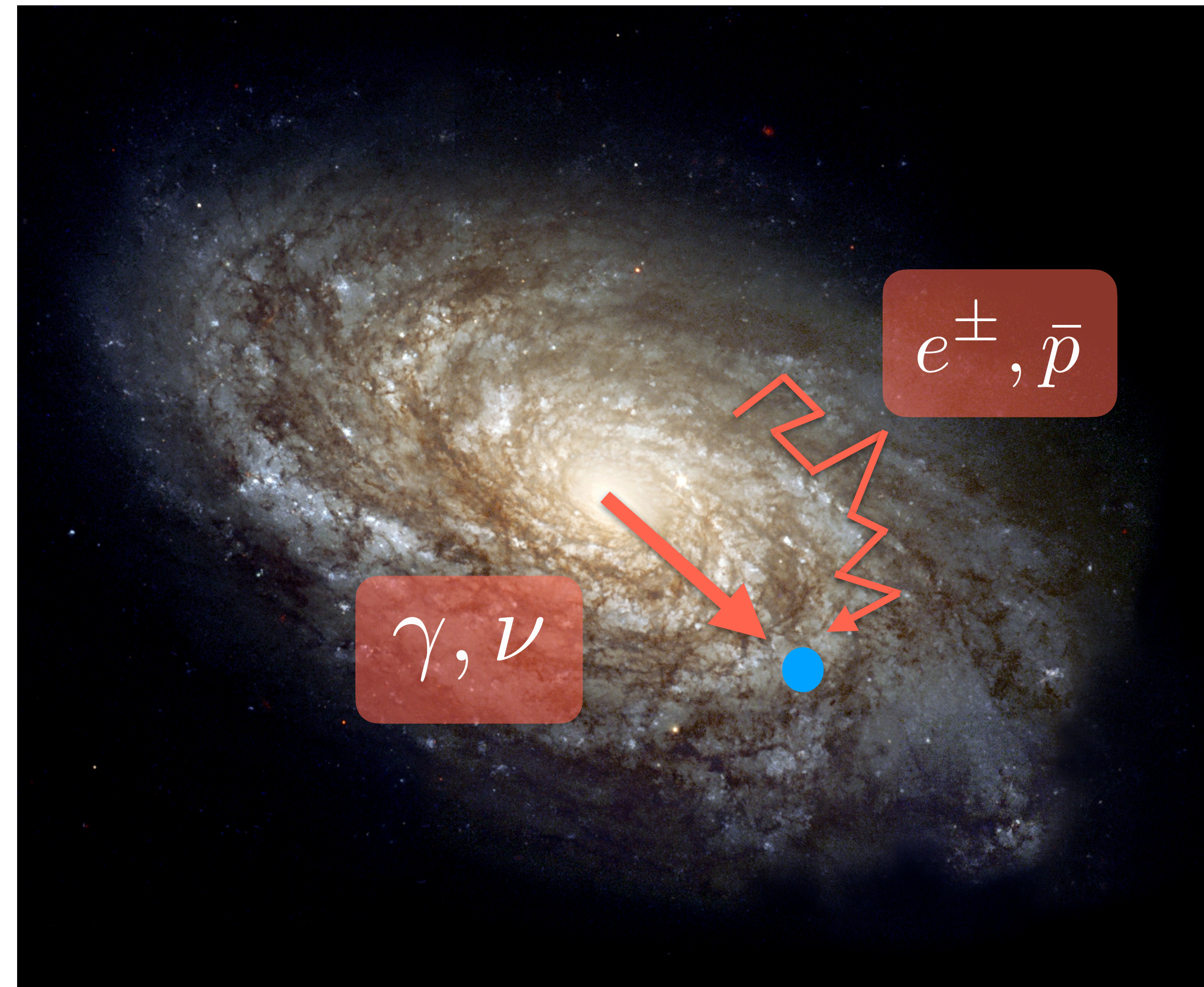
# WIMP暗黒物質の直接・間接検出

## ● 間接検出

- 暗黒物質はたまに対消滅する

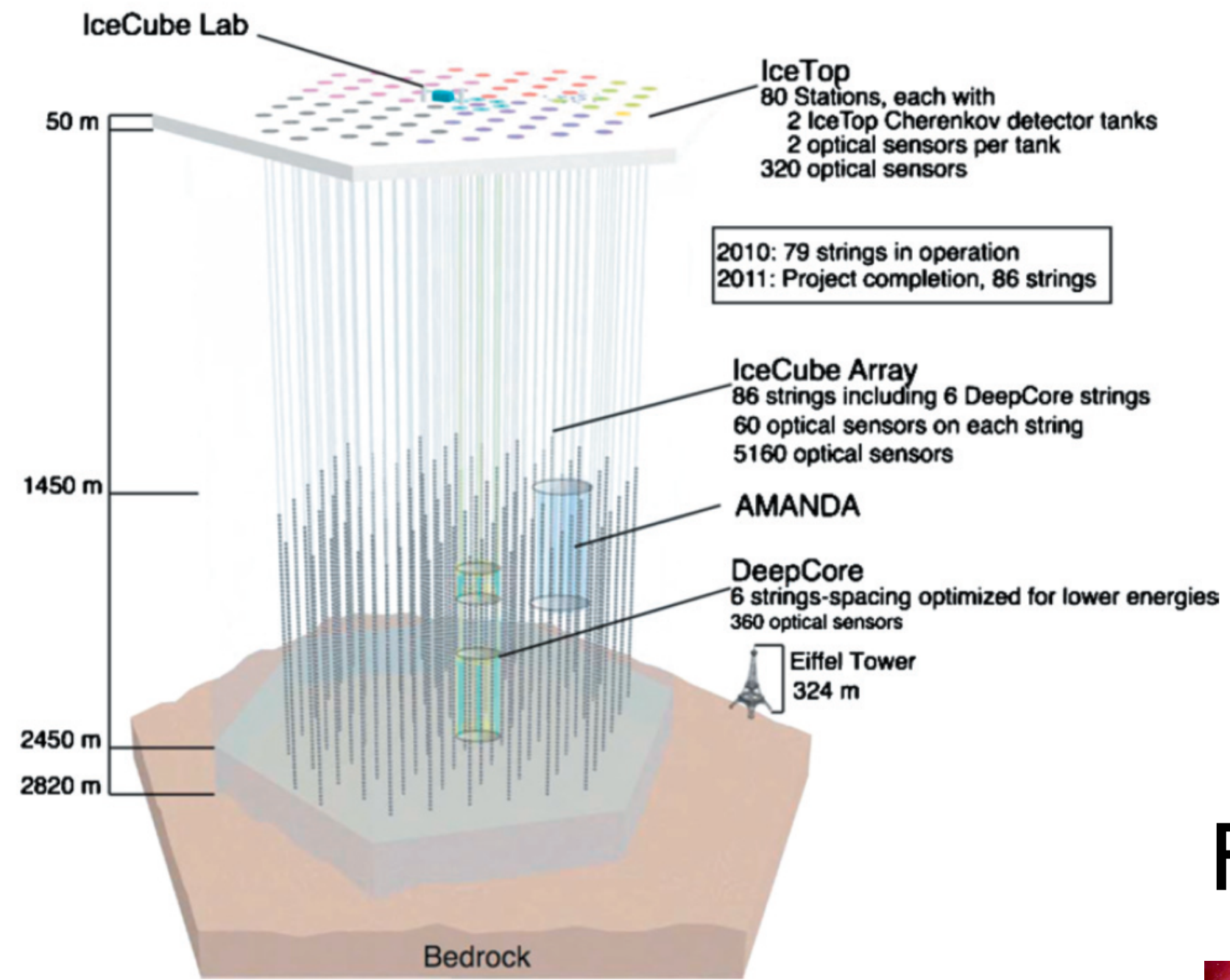


- ガンマ線、ニュートリノ、陽電子などが宇宙線として地球に届く
- 銀河系内成分 + 銀河外成分
- 質量・対消滅断面積に制限





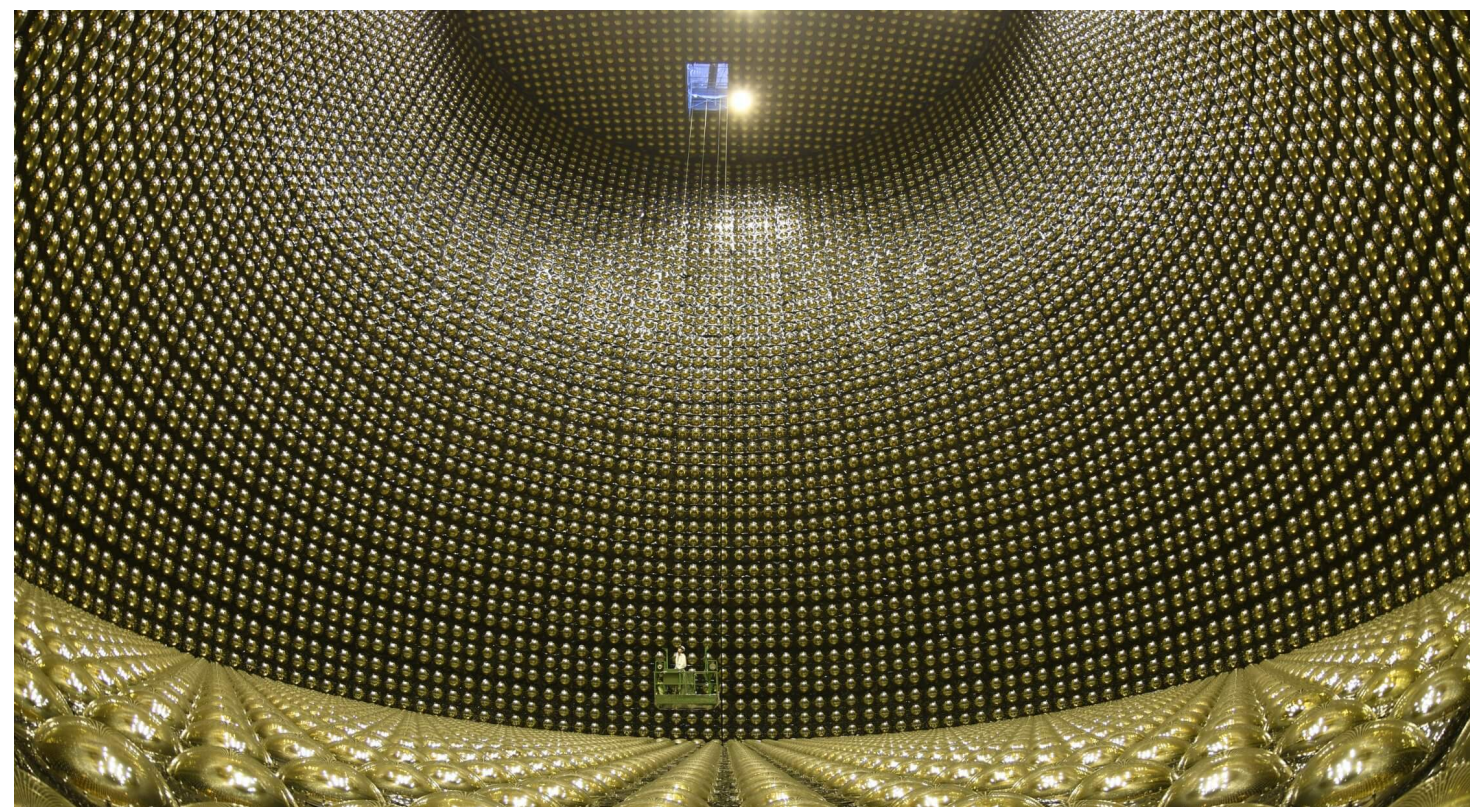
# IceCube



# AMS-02



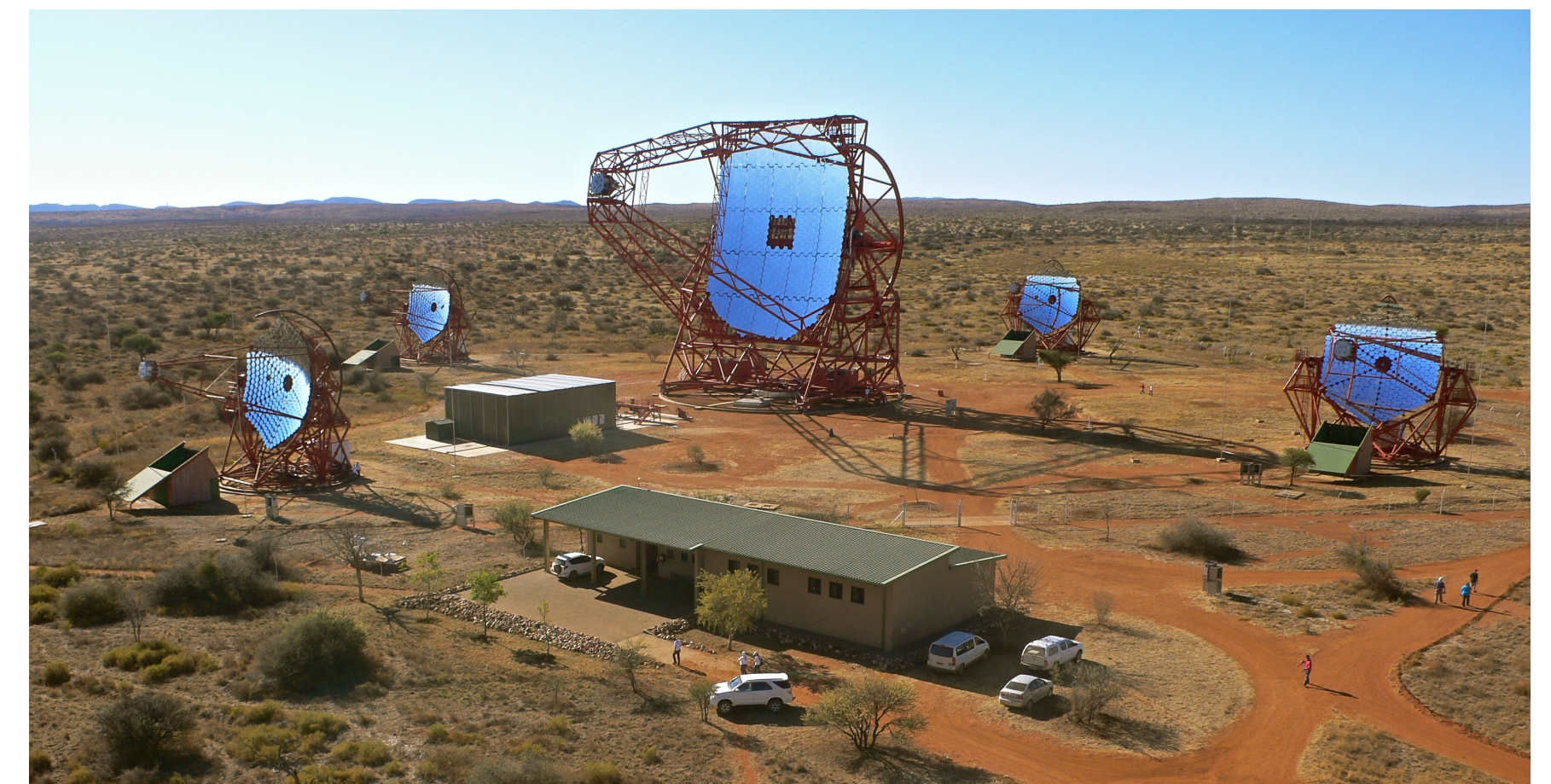
# Super-Kamiokande



# Fermi



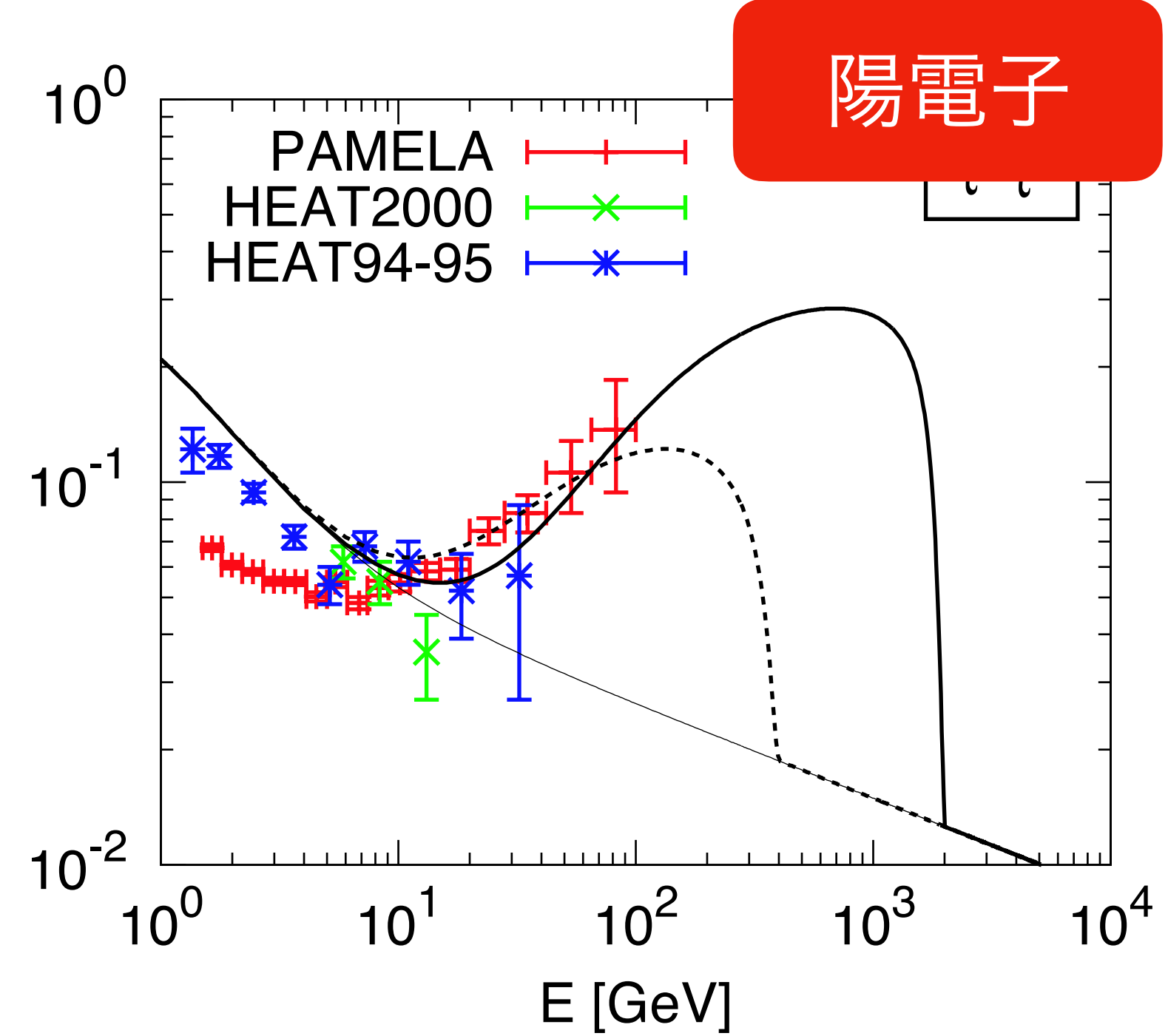
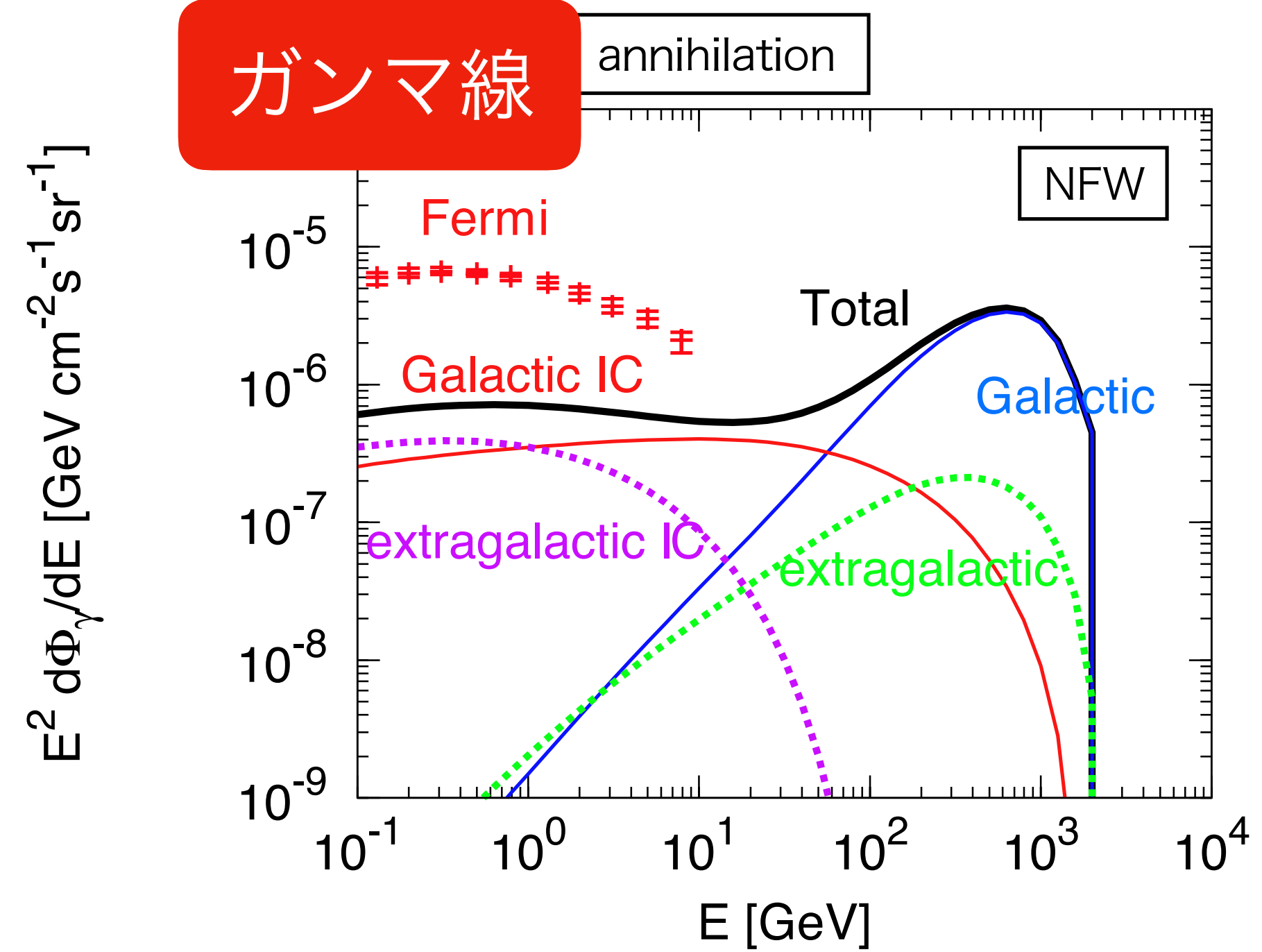
# HESS



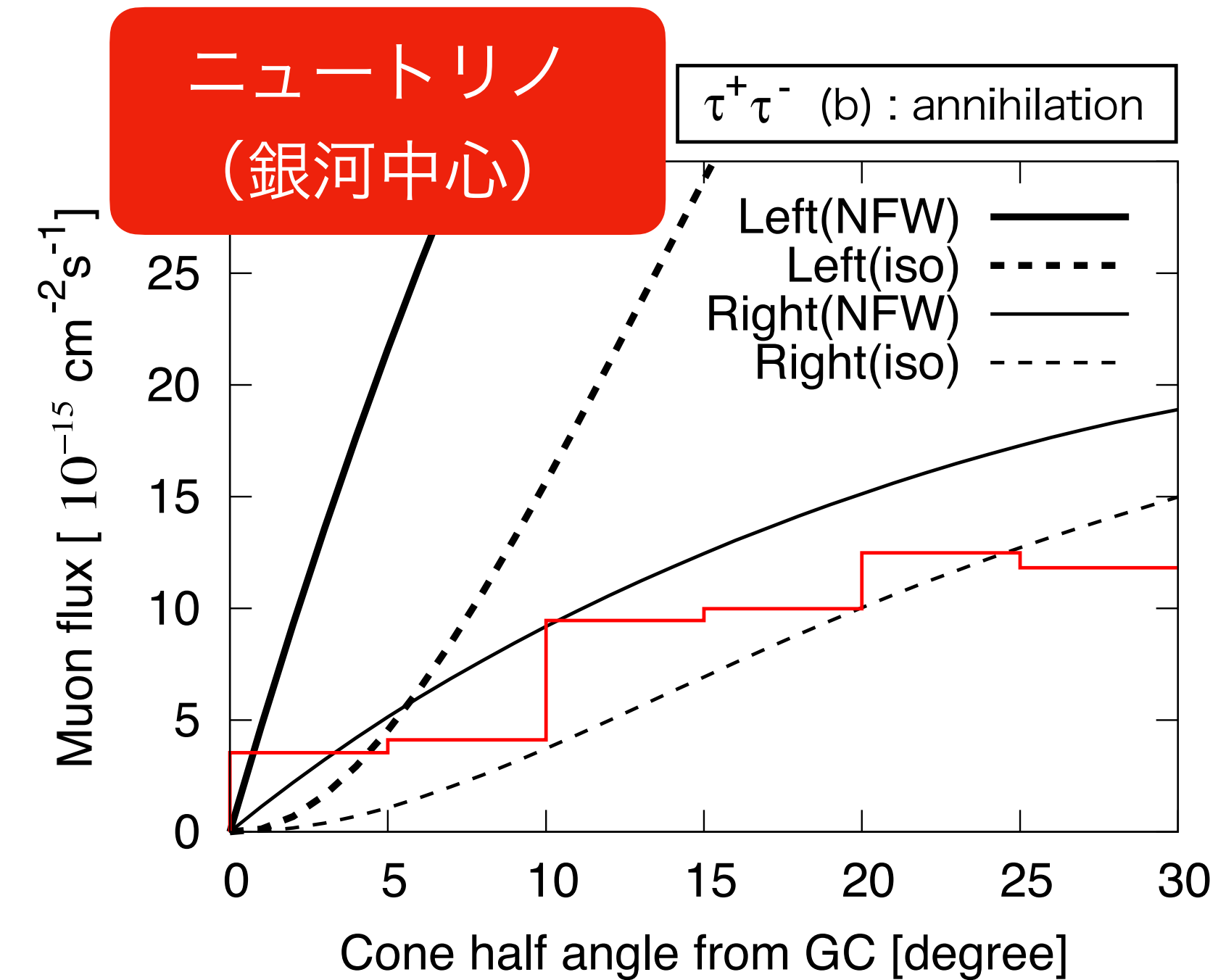
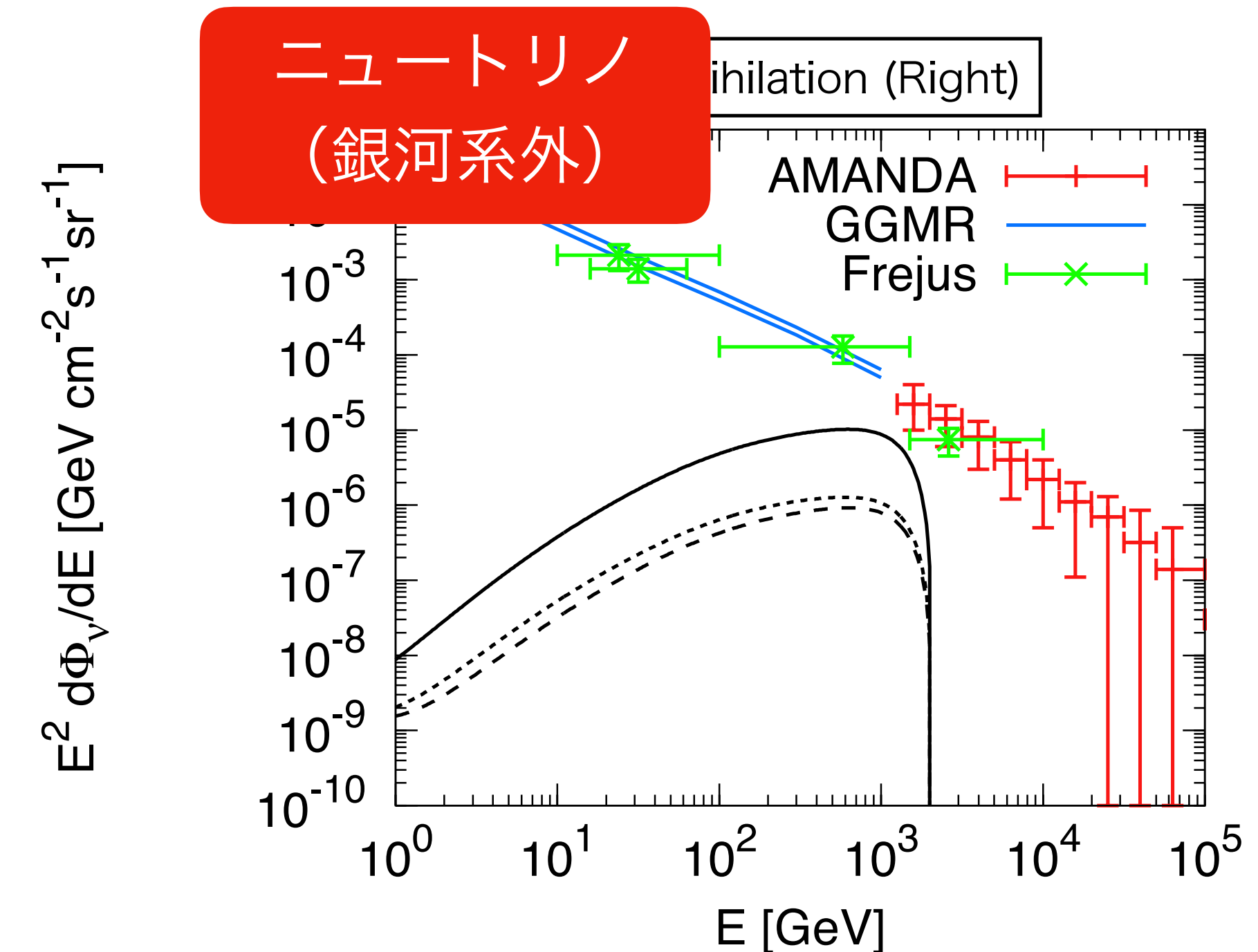


適当な質量・断面積を  
仮定した場合の予言

[K.Nakayama, PhD thesis]



様々な宇宙線  
観測データから  
暗黒物質模型に  
対して制限が付く

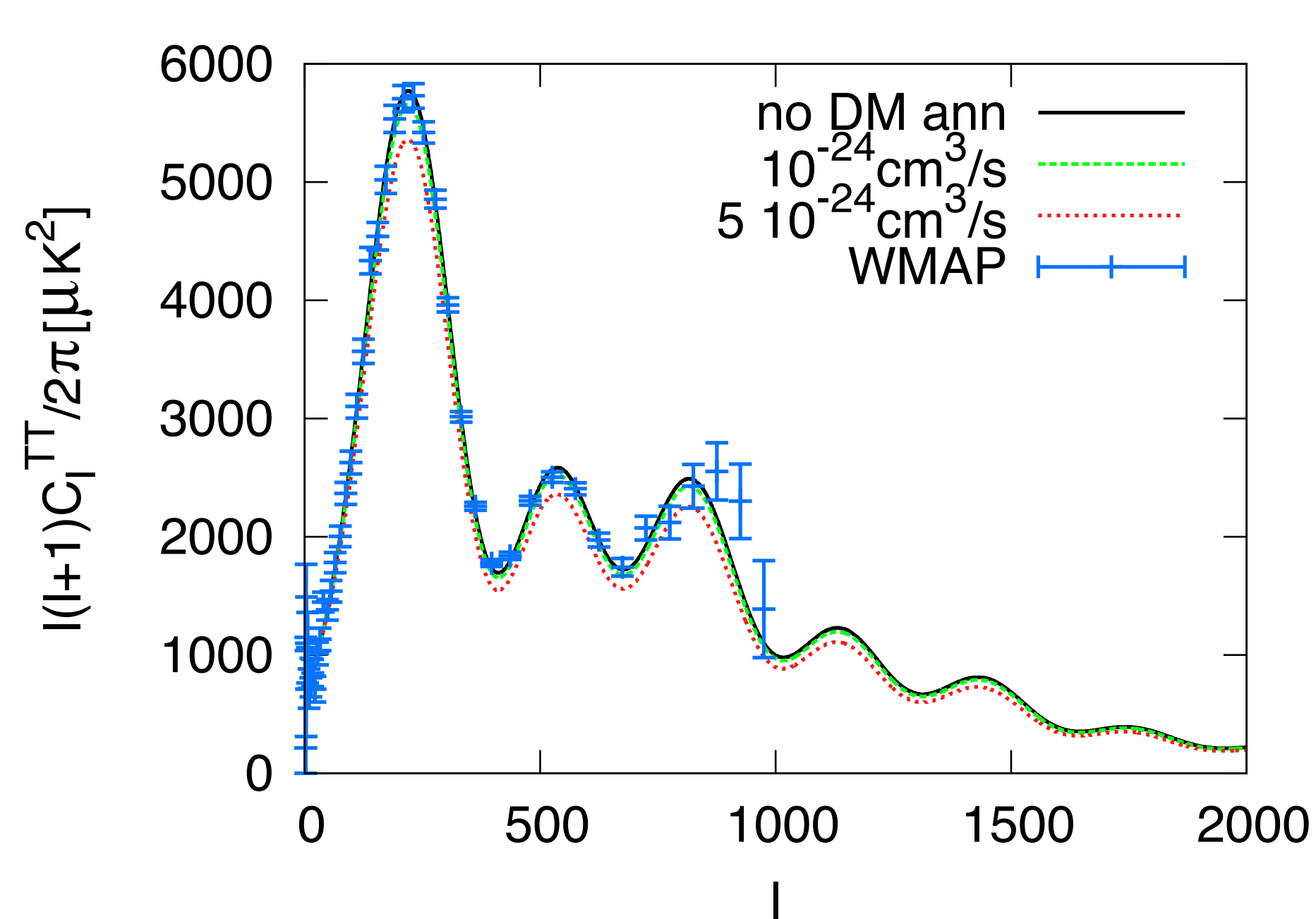


# 宇宙論・天体物理からの制限

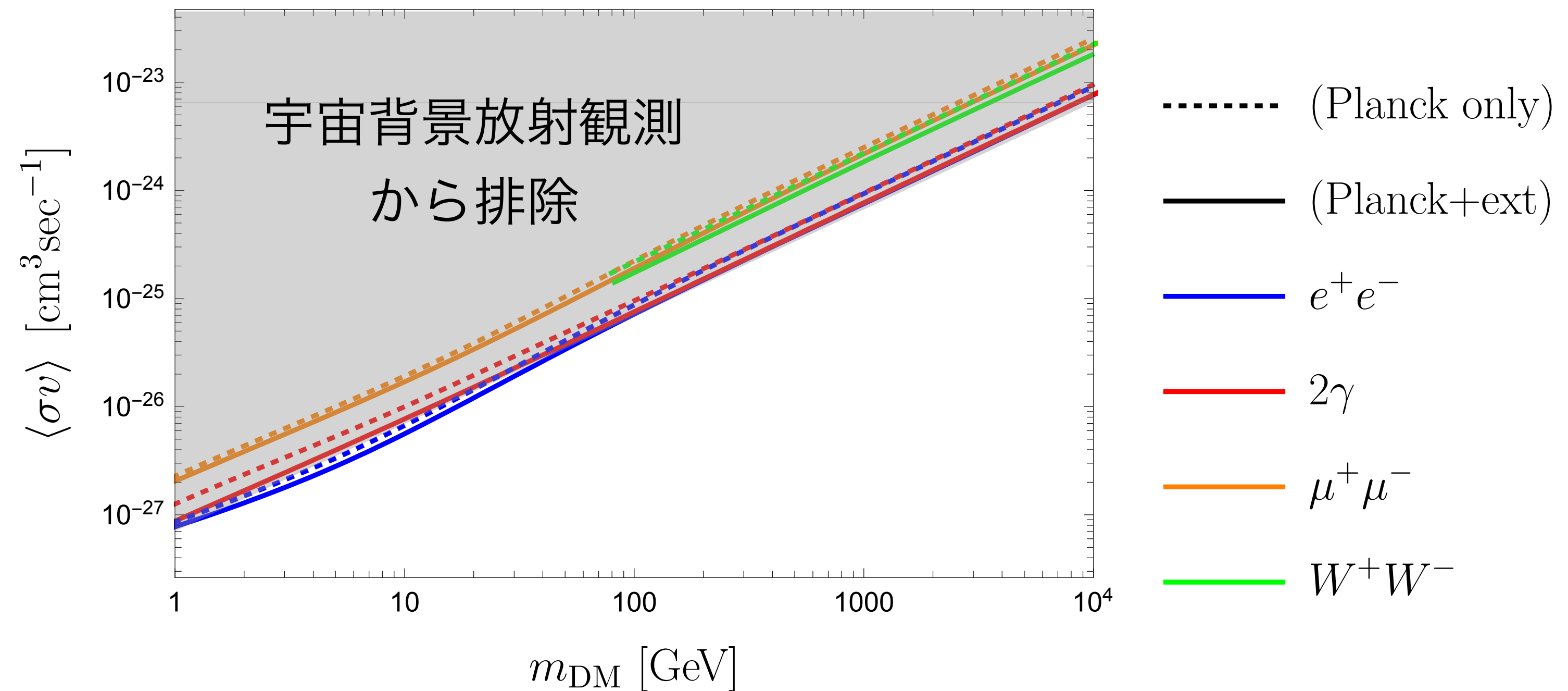
## ● 宇宙背景放射

[Padmanabhan, Finkbeiner (2005)]

- 初期宇宙での暗黒物質の対消滅  $\longrightarrow$  高エネルギー光子・電子  
 $\longrightarrow$  水素, ヘリウムの再結合を阻害  $\longrightarrow$  宇宙背景放射に影響



[Kanzaki, Kawasaki, Nakayama (2009)]

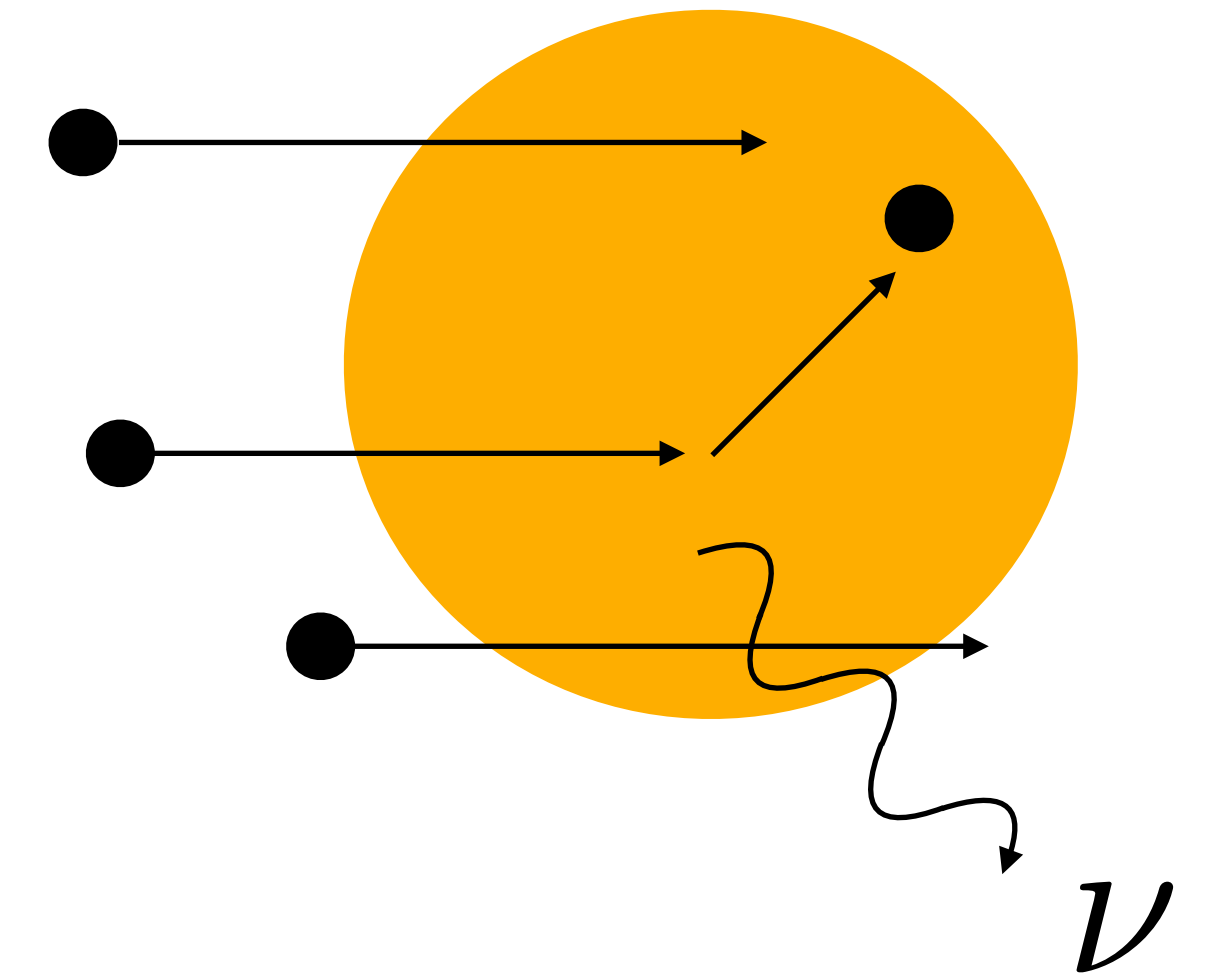


[Kawasaki, Nakatsuka, Nakayama, Sekiguchi (2021)]

# 宇宙論・天体物理からの制限

## ● 太陽からのニュートリノ

- 暗黒物質はたまに太陽の中の水素と散乱してエネルギーを失い太陽内部に溜まっていく
- 溜まった暗黒物質は対消滅してニュートリノを出す
  - Super-Kamiokande, IceCubeなどから強い制限



## ● 中性子星のheating

- 暗黒物質の対消滅が中性子星を温める
  - 中性子星の温度に下限が与えられる
  - 低い温度の中性子星が見つければ、断面積に上限が与えられる

[Kouvaris (2008), Baryakhtar et al. (2017),  
Fujiwara, Hamaguchi, Nagata, Zheng (2022)]

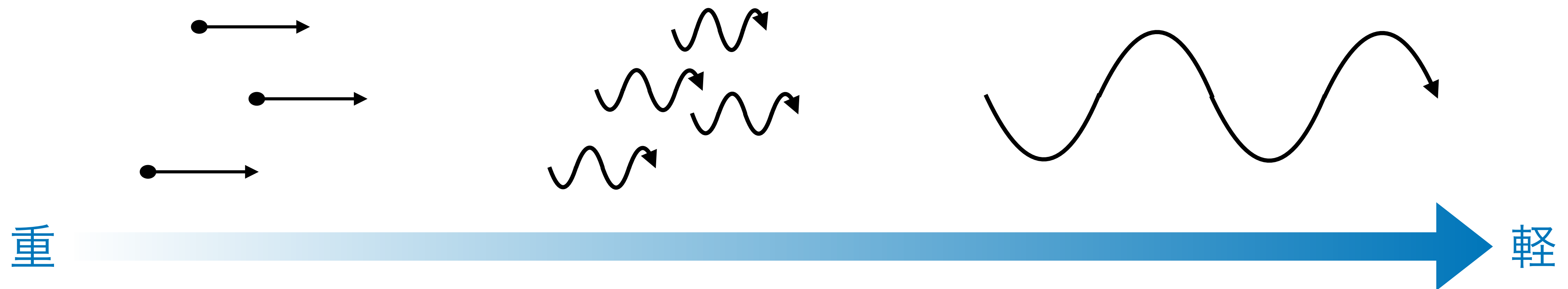
## 2. 暗黒物質の様々な検証方法

### 2-1. WIMP暗黒物質

### 2-2. アクシオン暗黒物質

# アクシオン/ダークフォトン暗黒物質

- 典型的なアクシオン/ダークフォトン暗黒物質：  $m \ll 1 \text{ eV}$
- 質量が軽い  $\longrightarrow$  数密度が大きい  $\longrightarrow$  「波」のように振る舞う



- アクシオン暗黒物質：  $a(\vec{x}, t) = a_0 \cos(m(t - \vec{v} \cdot \vec{x}))$   
ダークフォトン暗黒物質：  $\vec{H}(\vec{x}, t) = \vec{H}_0 \cos(m(t - \vec{v} \cdot \vec{x}))$   
このような振動場の下での特徴的な反応を探す



# アクシオン暗黒物質 直接探索

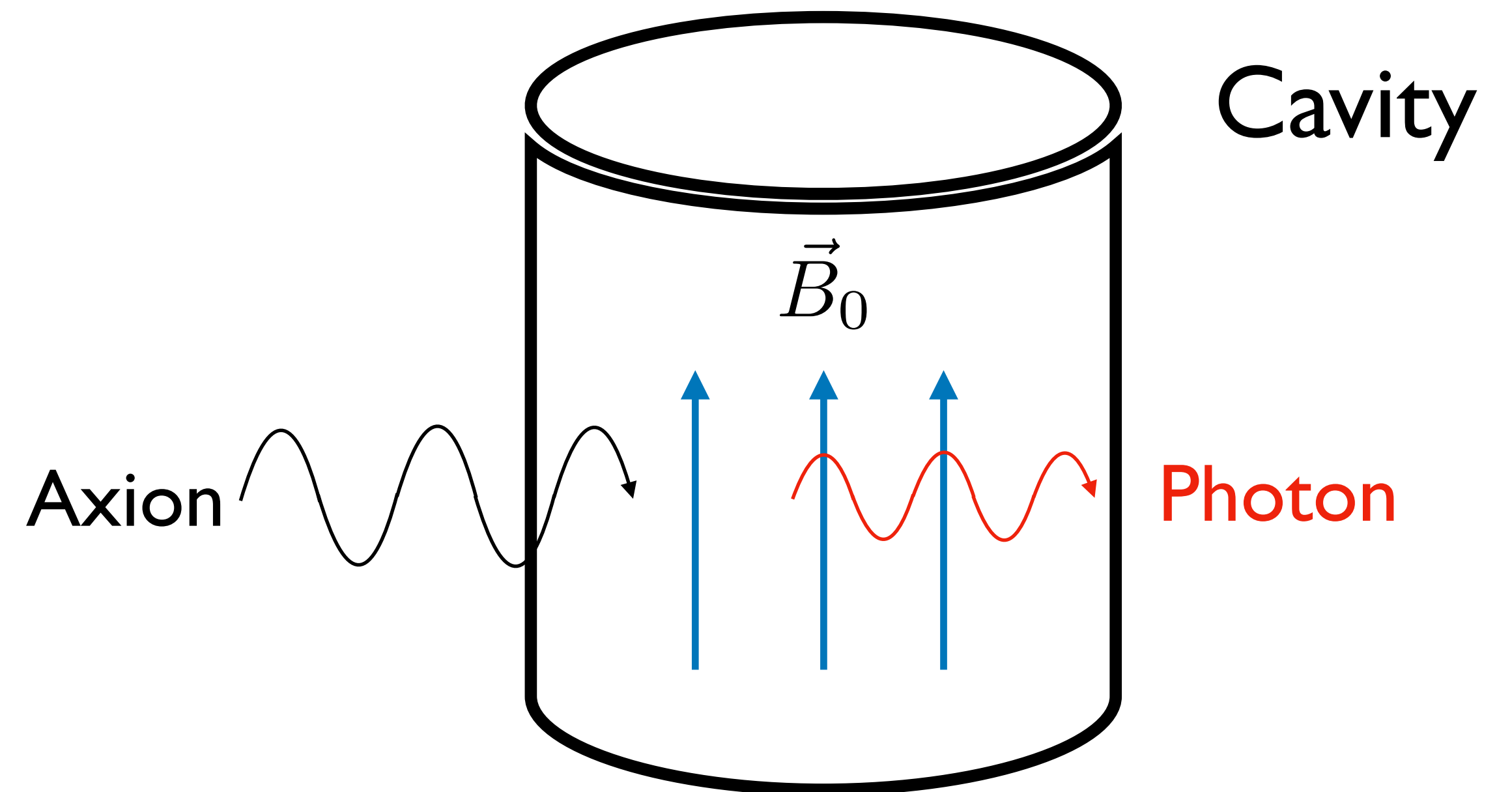
- Axion haloscope [Sikivie (1983)]

- 磁場の下でアクシオンは光子に変換する

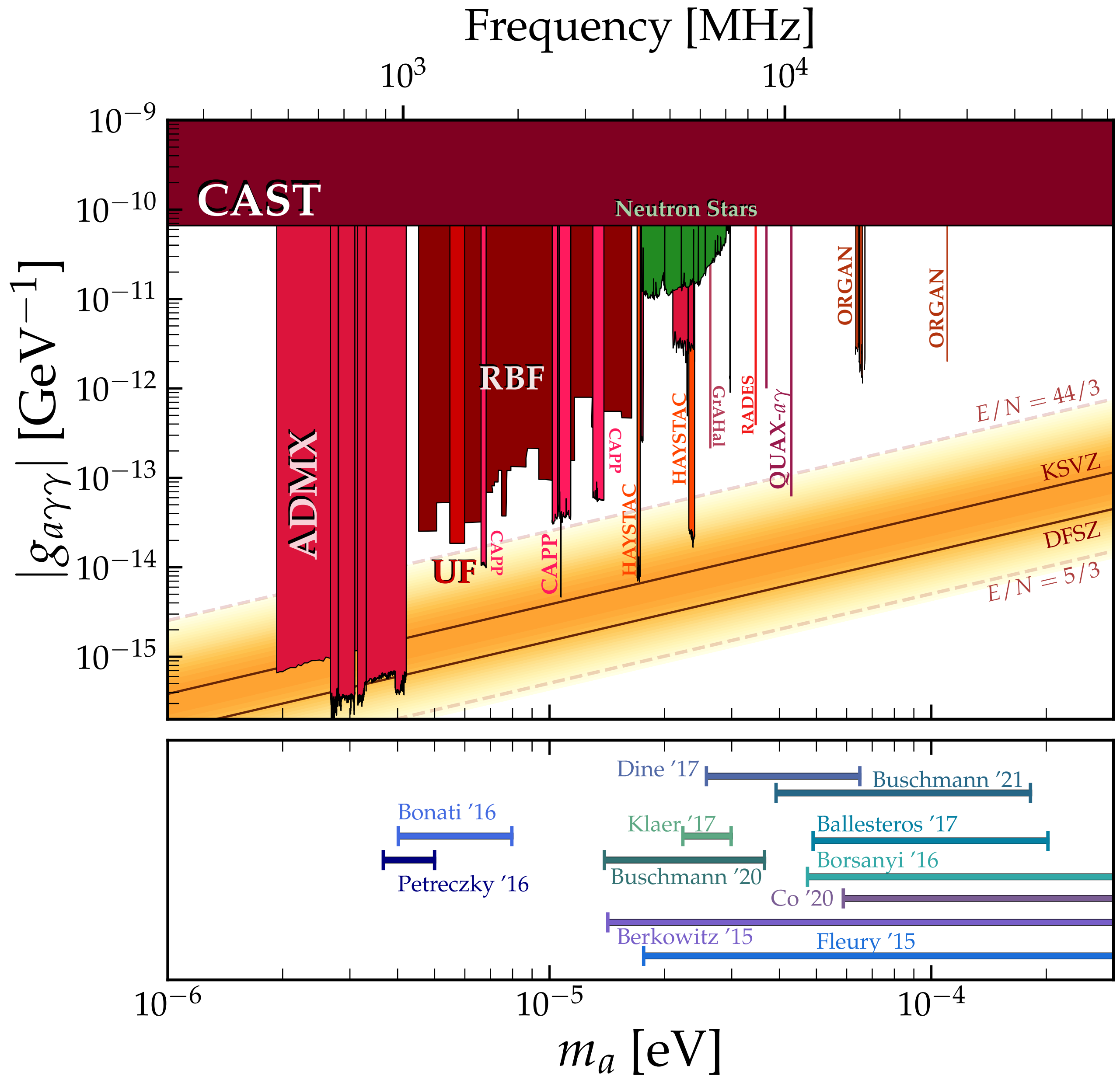
$$\mathcal{L} = -\frac{g_{a\gamma}}{4} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} \simeq -g_{a\gamma} a \vec{E} \cdot \vec{B} \longrightarrow \square \vec{E} = g_{a\gamma} \ddot{a} \vec{B}_0 \quad a \simeq a_0 \cos(mt)$$

- Cavity 周波数とアクシオン質量が等しいとき、共鳴が起こる

- 周波数をスキャンすることで、広いアクシオン質量領域を探索



# ADMX experiment

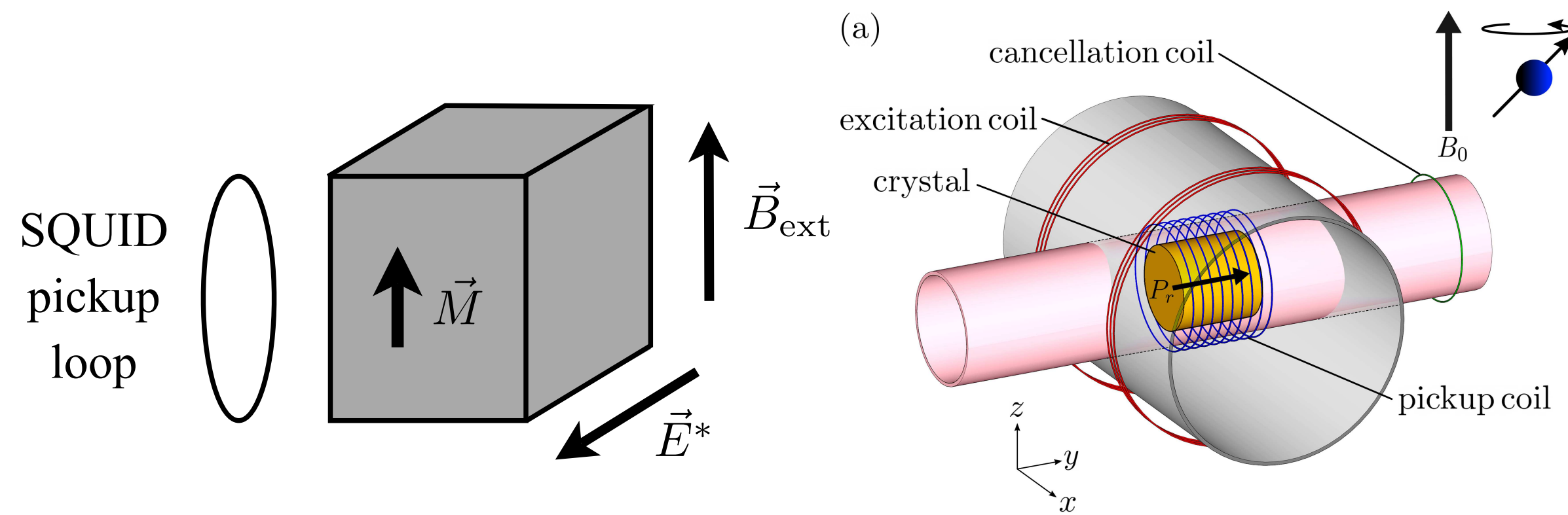




# アクシオン暗黒物質 直接探索

- CASPEr [Budker et al. (2013)]

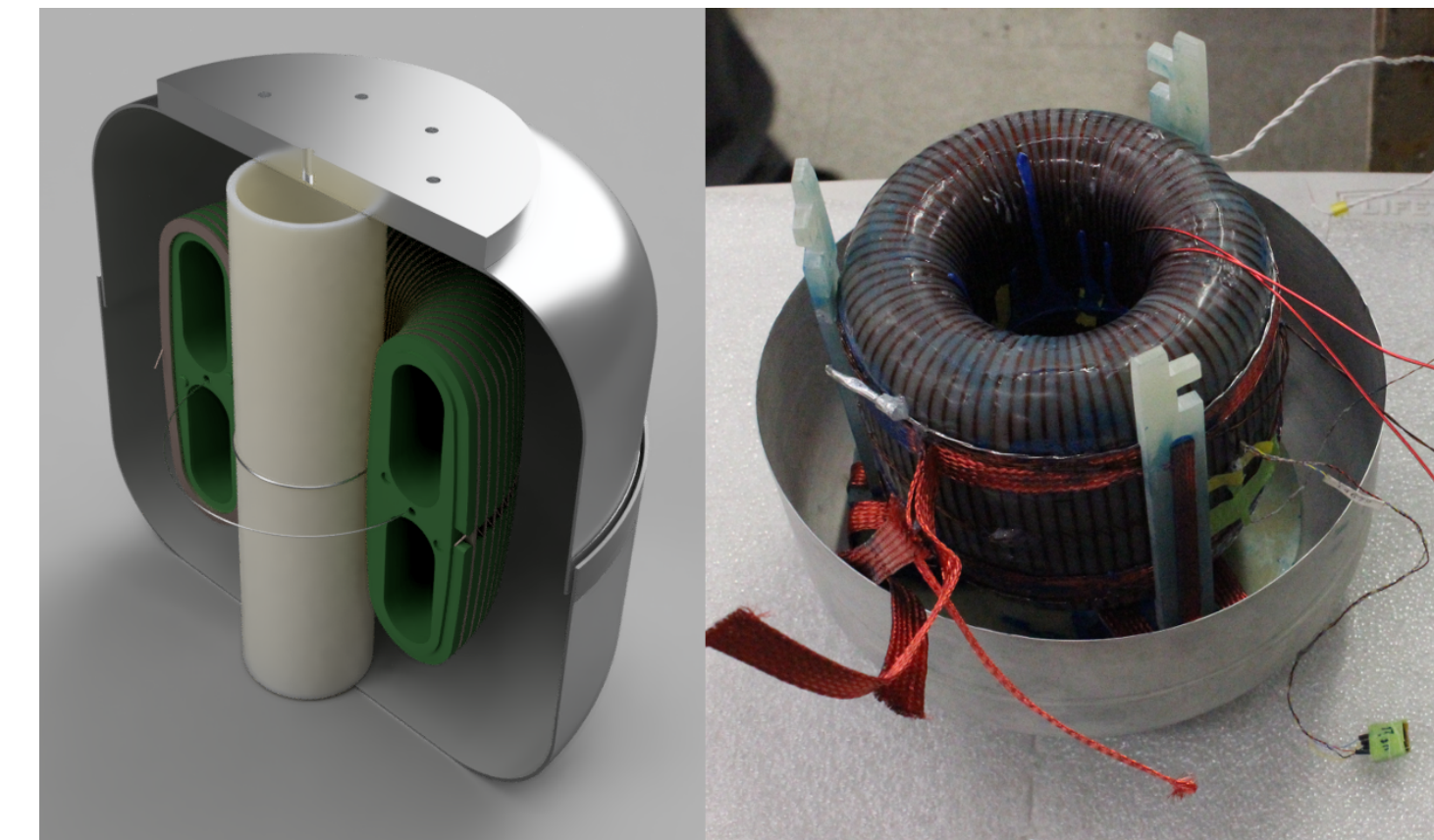
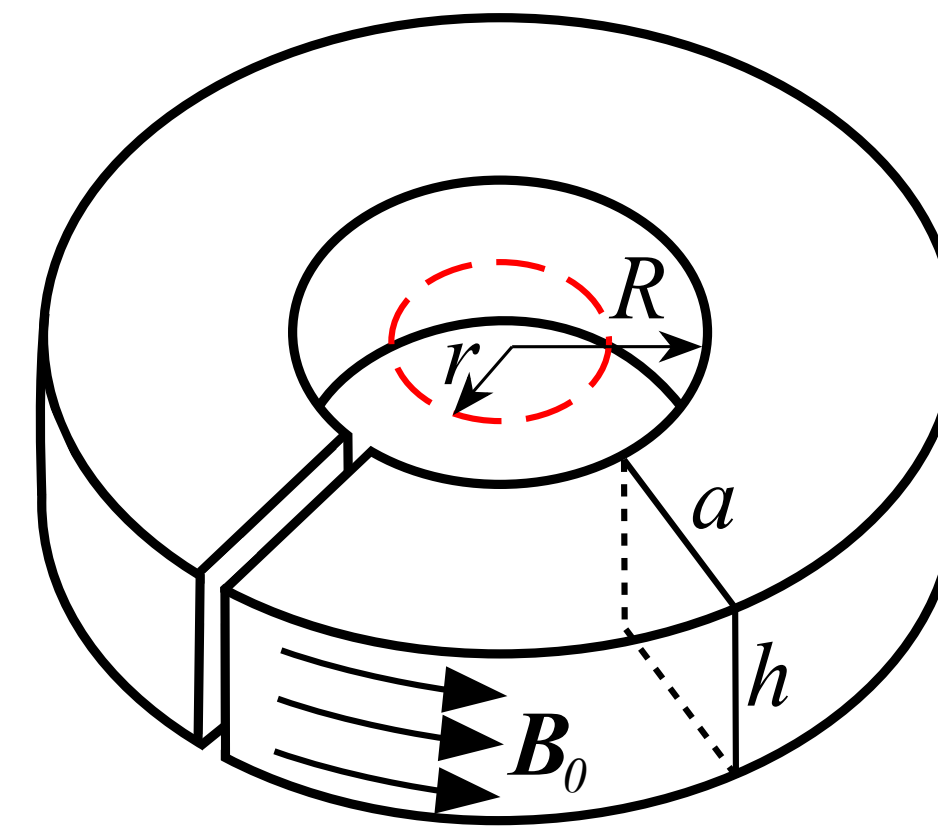
- アクシオン暗黒物質が核スピンの歳差運動を励起 (~核磁気共鳴)



[Aybas et al. (2021)]

- ABRACADABRA [Kahn, Safdi, Thaler (2016)]

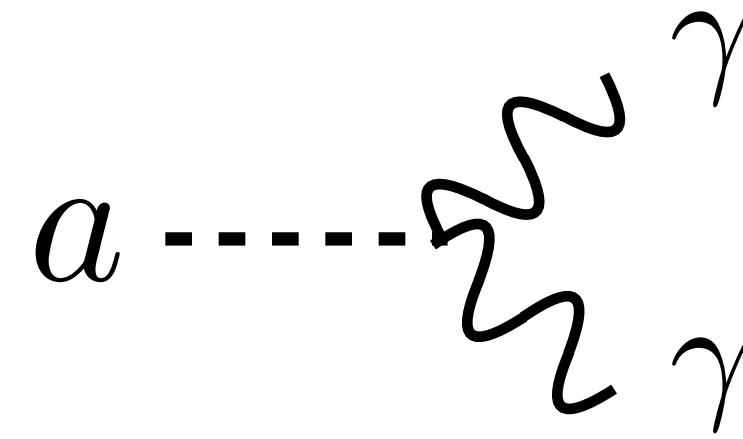
- $\mathbf{J}_{\text{eff}} = g_{a\gamma\gamma} \sqrt{2\rho_{\text{DM}}} \cos(m_a t) \mathbf{B}_0.$   
 → アクシオンが振動磁場を励起



[Ouellet et al. (2018)]

# アクシオン暗黒物質 間接探索

- アクシオンは2光子へ崩壊



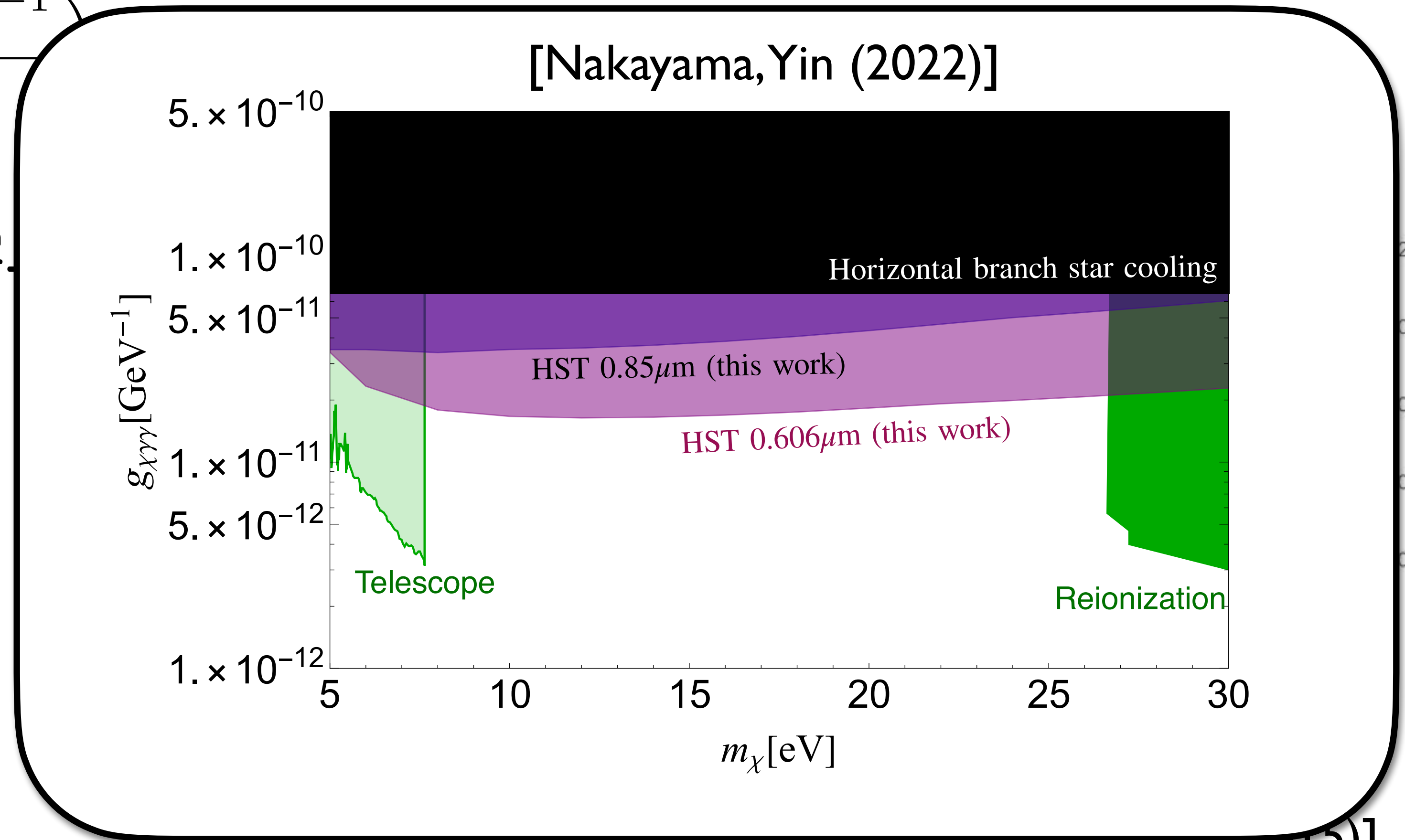
$$\tau \sim 10^{22} \text{ sec} \left( \frac{1 \text{ eV}}{m} \right)^3 \left( \frac{10^{-9} \text{ GeV}^{-1}}{g_{a\gamma}} \right)^2$$

- 可視・赤外背景放射に寄

望遠鏡による天文観測が  
暗黒物質探索に使える！

- 背景光の非等方性の  
観測から特に強い制限

[Nakayama, Yin (2022)]

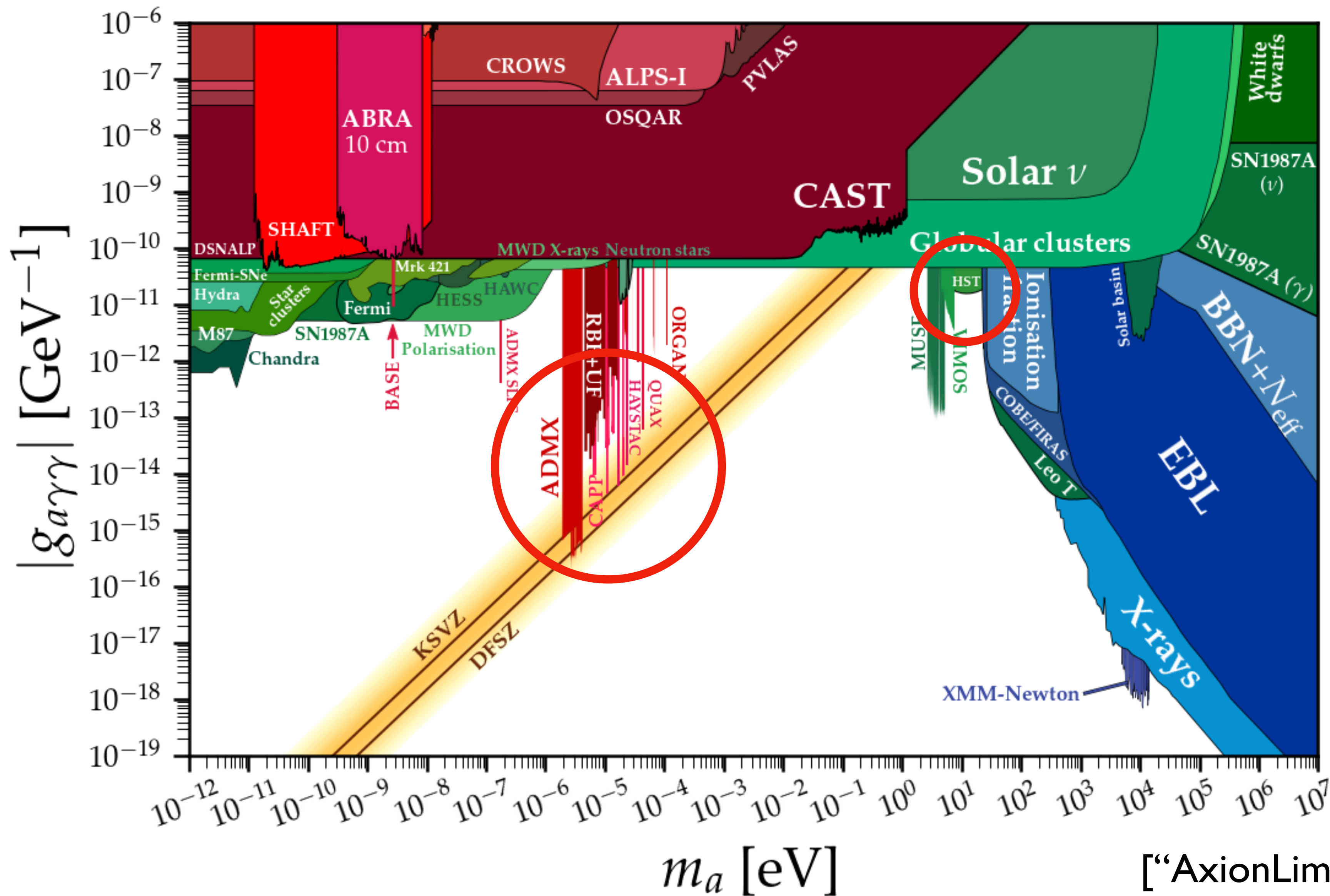


[Fletcher-Vaynshtein et al., (2015)]



# アクシオン-光子結合に対する制限

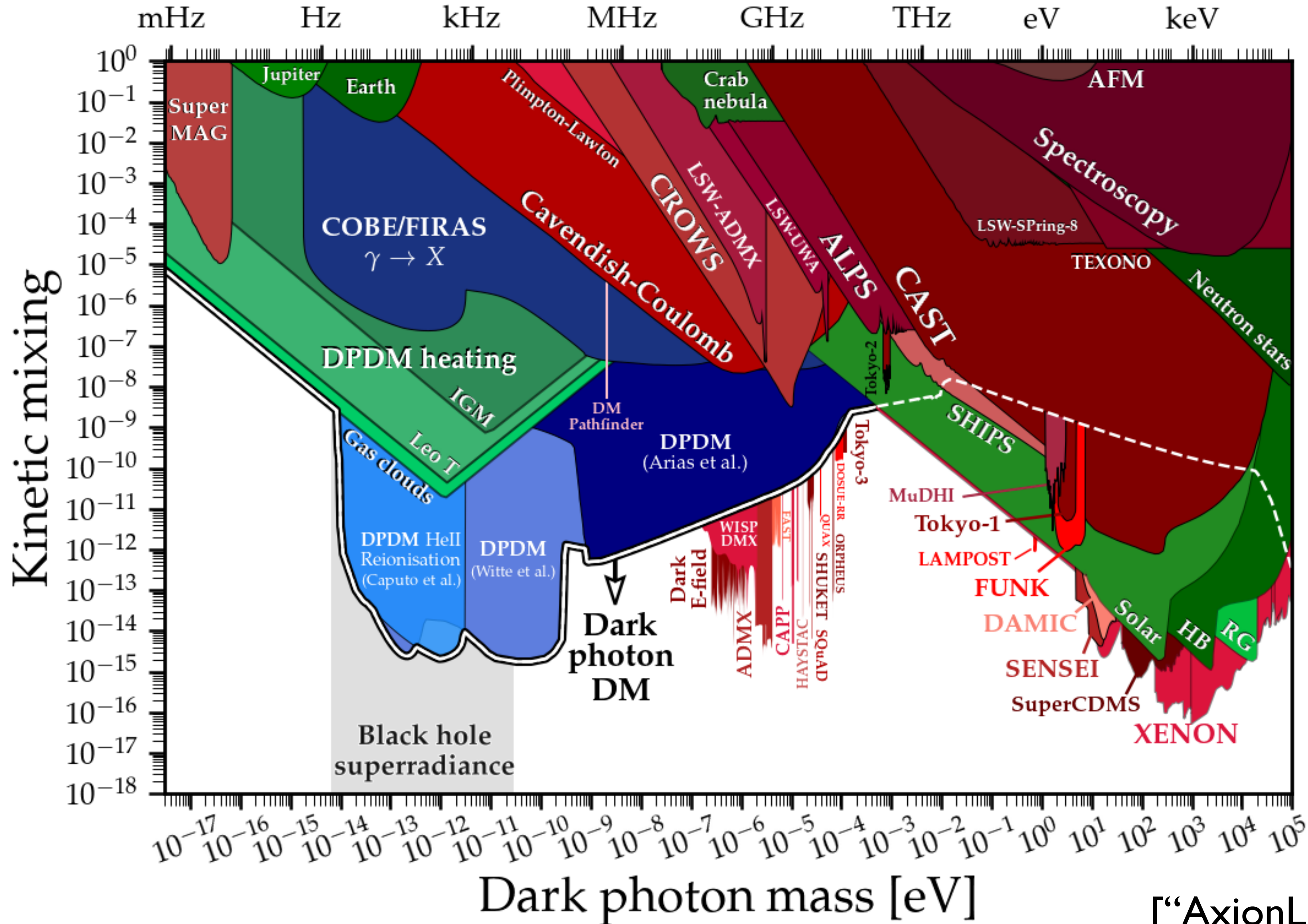
$$\mathcal{L} = -\frac{g_{a\gamma}}{4} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$



["AxionLimits", C.O'Hare,  
<https://cajohare.github.io/AxionLimits/>]

# ダークフォトン結合定数に対する制限

$$\mathcal{L} = \frac{\epsilon}{2} F_{\mu\nu} H^{\mu\nu}$$



["AxionLimits", C.O'Hare,  
<https://cajohare.github.io/AxionLimits/>]



# 重力波とダークフォトン暗黒物質

- ダークヒッグス場により  
ダークフォトンが質量を持つ

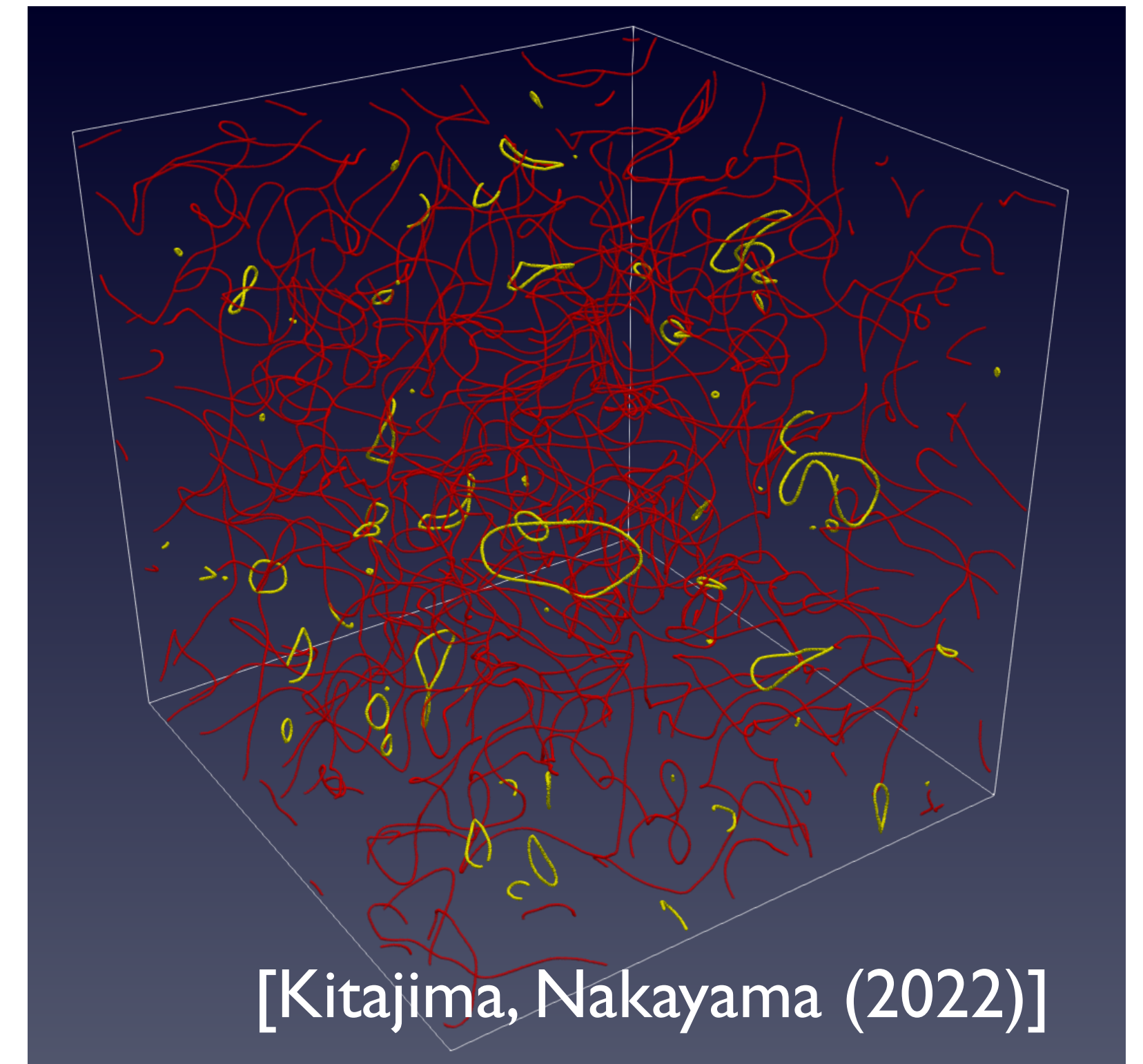
$$\mathcal{L} = (D_\mu \Phi)^* D^\mu \Phi - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - \frac{\lambda}{4} (|\Phi|^2 - v^2)^2$$

- 初期宇宙で自発的対称性の破れ

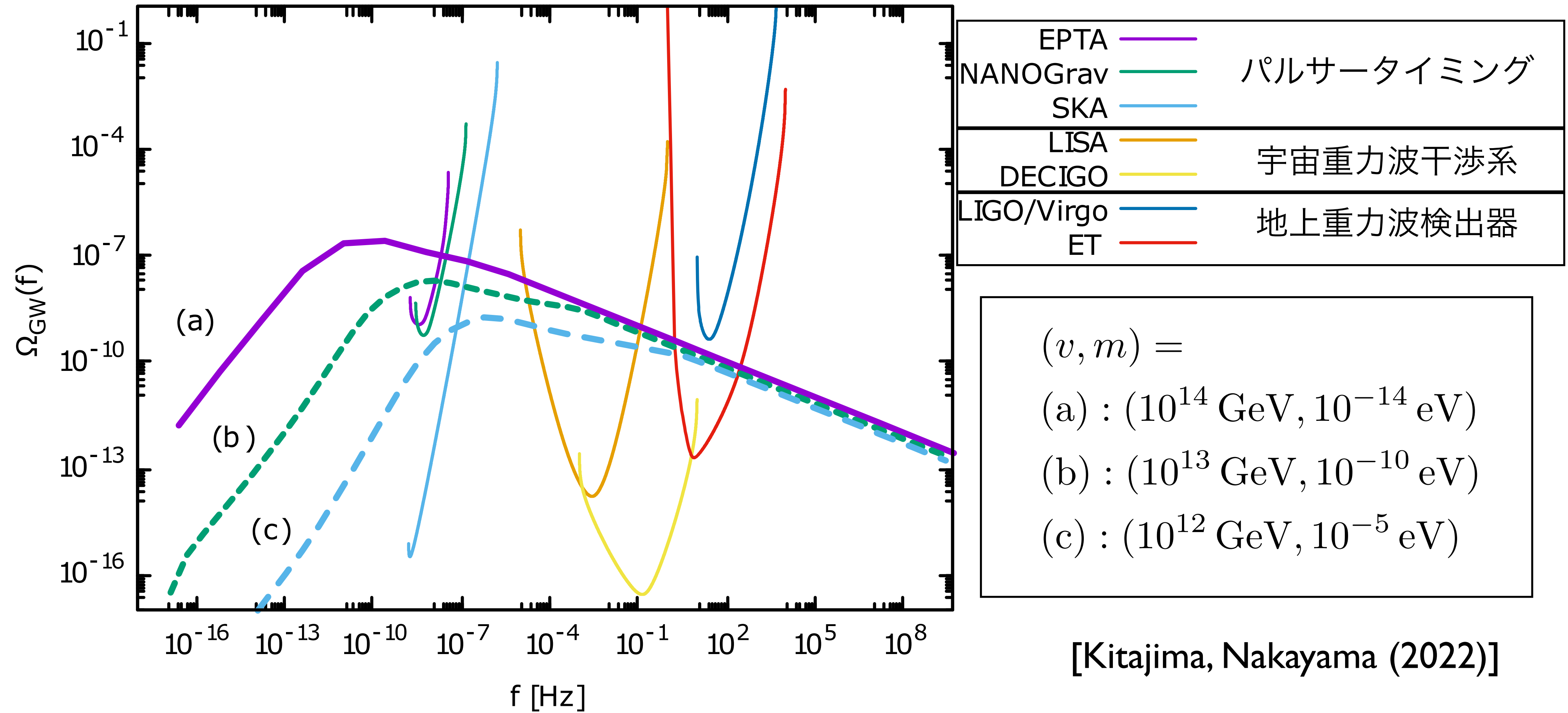
→ 位相欠陥 (cosmic string) の生成

→ Cosmic string がダークフォトンを生成 [Long, Wang (2019)]

→ Cosmic string は同時に重力波も生成



# 背景重力波スペクトル



重力波でダークフォトン暗黒物質シナリオの一つを検証可能

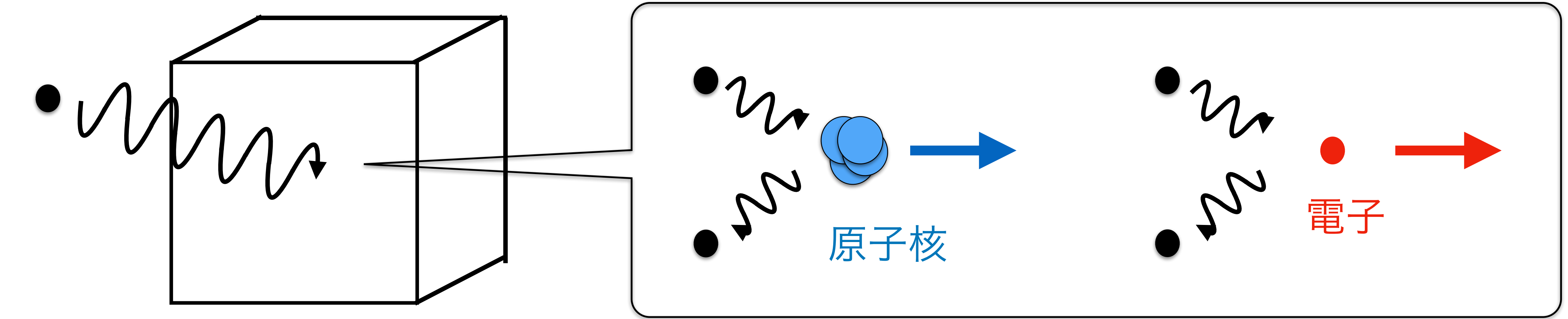


- いろいろな種類の暗黒物質に対して、いろいろな観測方法が考案されている
- 先に進むには
  - これまでの手法をさらに突き詰める
  - 新しいアイデアを考える
- この後は、最近のアイデア（のごく一部）を紹介します

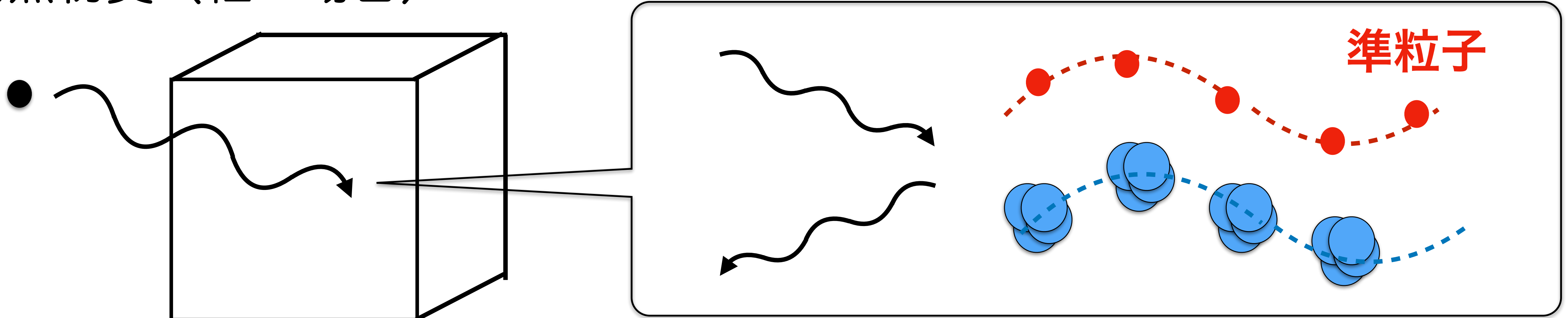
# 3. 暗黒物質検出と物性物理

# 暗黒物質と物質との反応

暗黒物質 (重い場合)

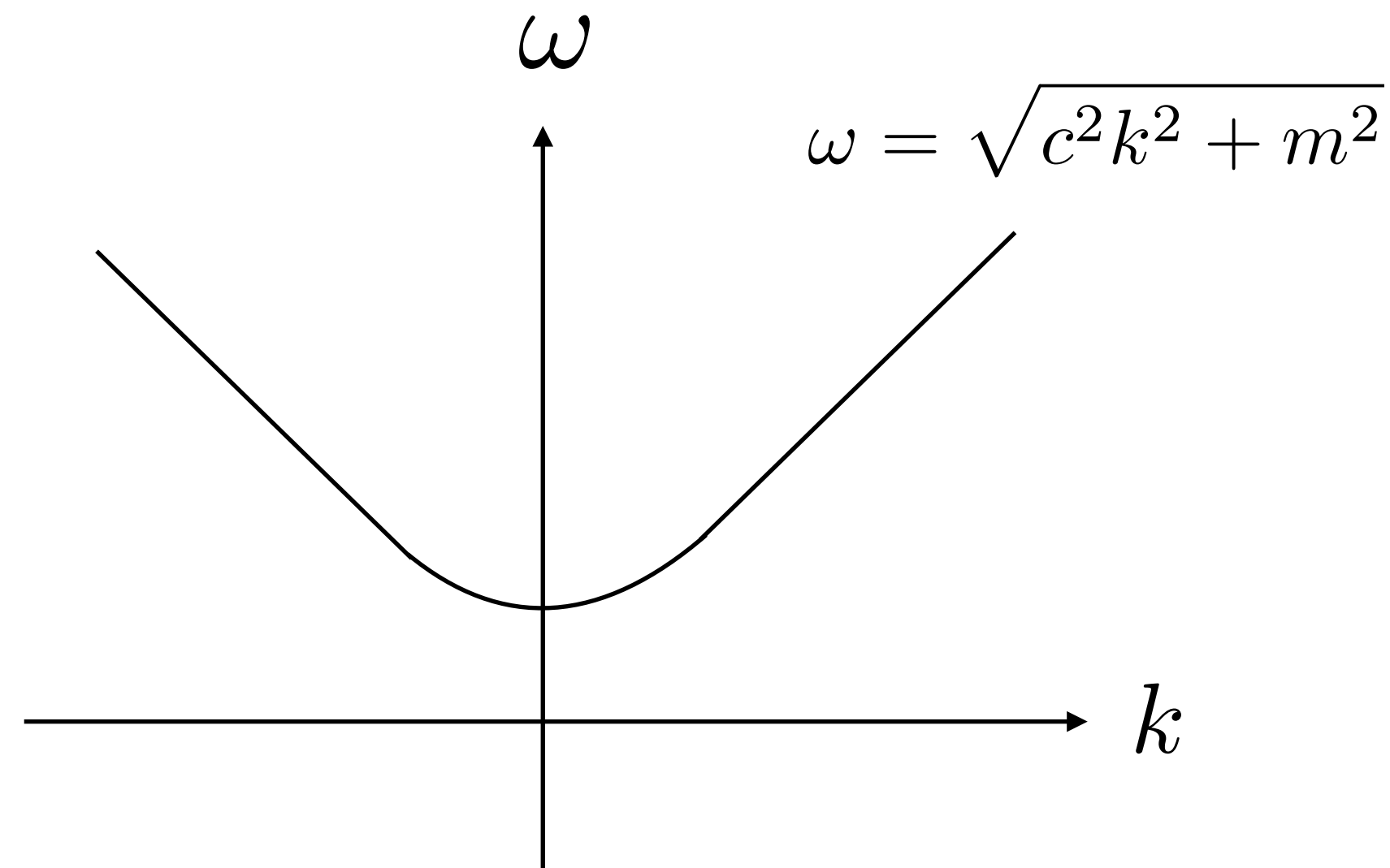


暗黒物質 (軽い場合)



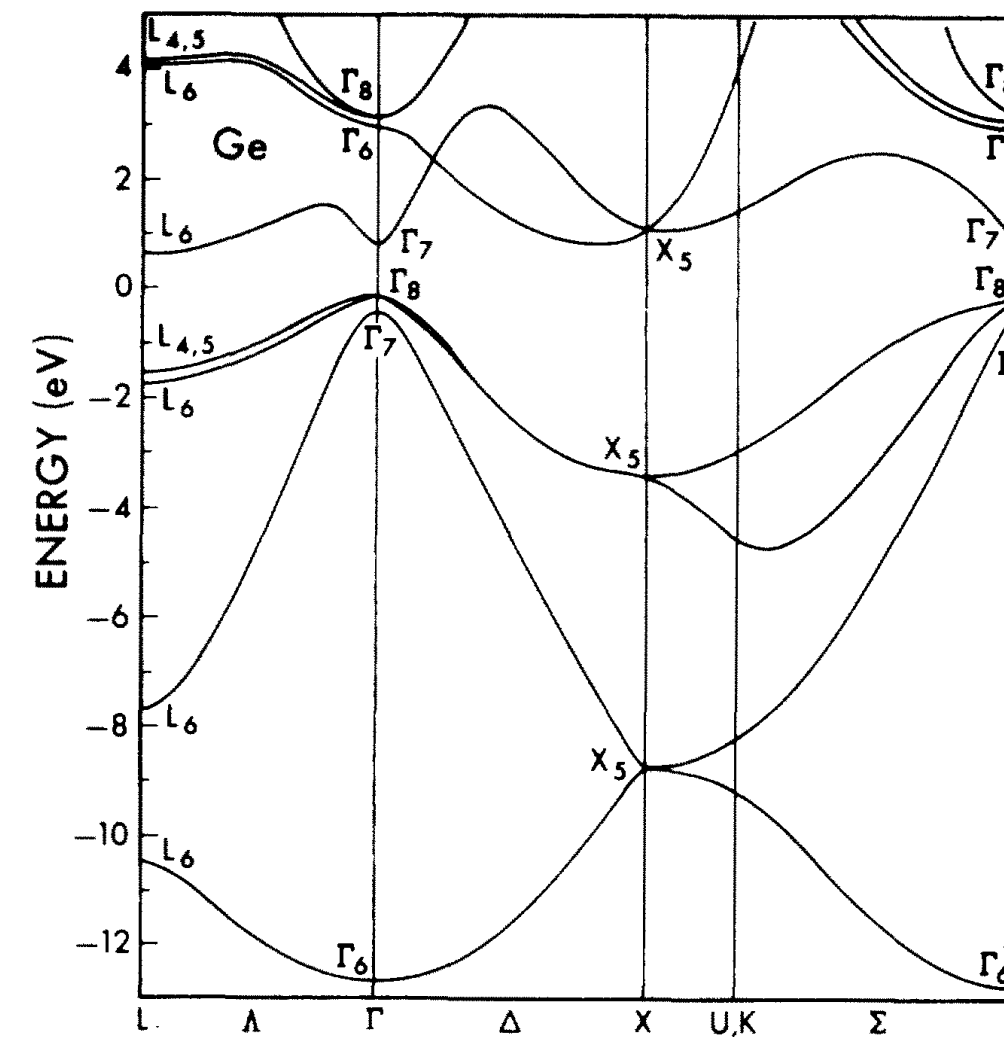


# 真空中の粒子の分散関係

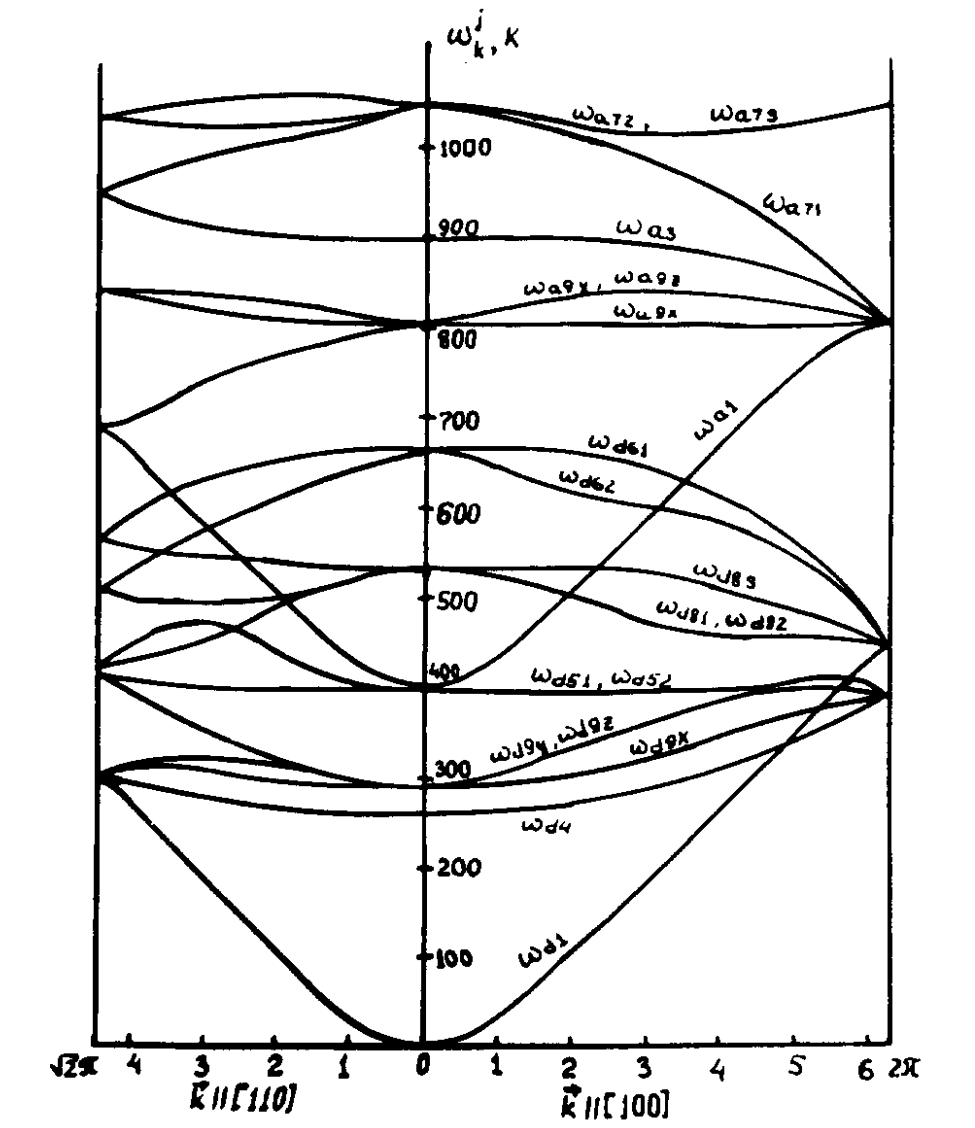


# 固体中の準粒子の分散関係

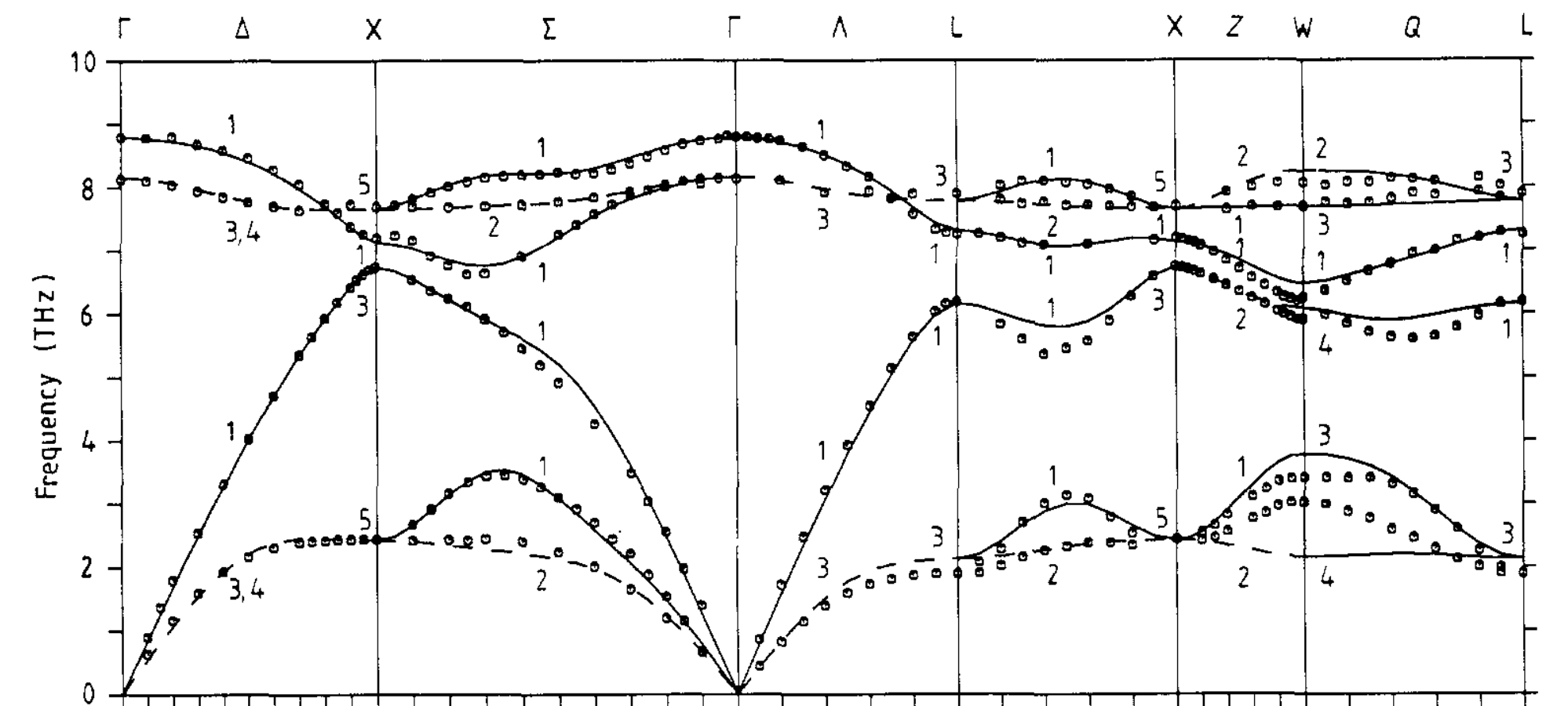
## 電子 (Ge)



## マグノン (YIG)



## フォノン (GaAs)



固体中には様々な準粒子が存在  
暗黒物質との反応に利用可能

# 固体電子による暗黒物質の吸収

- 暗黒物質が電子を励起状態に  
(光による励起と同じような原理)

[Hochberg, Lin, Zurek (2016)]

- 典型的な半導体のギャップ  
エネルギー  $\sim 1\text{eV}$

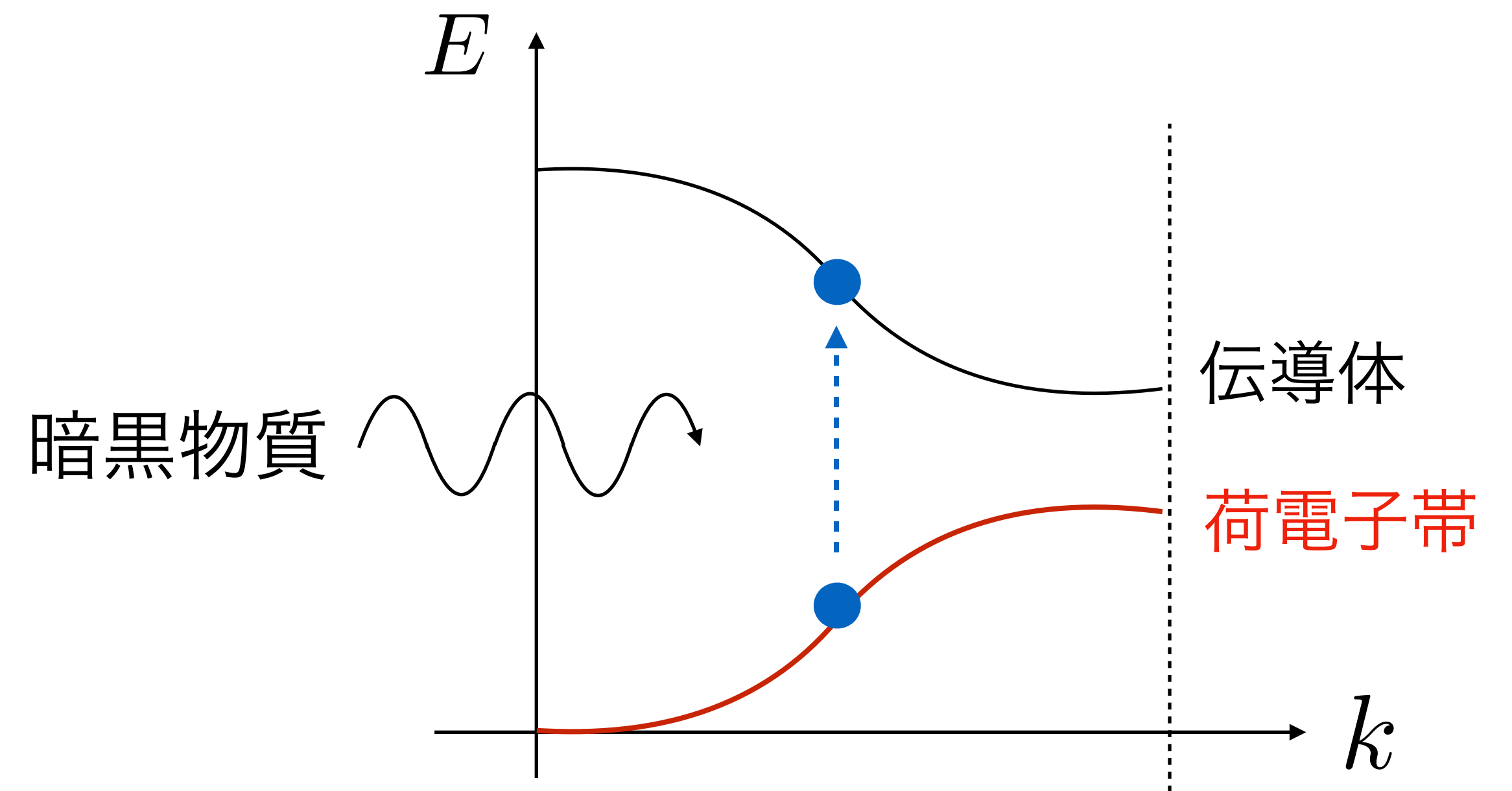
1eVより重い暗黒物質であれば可能

- 超伝導体のギャップ  $\sim 1\text{meV}$

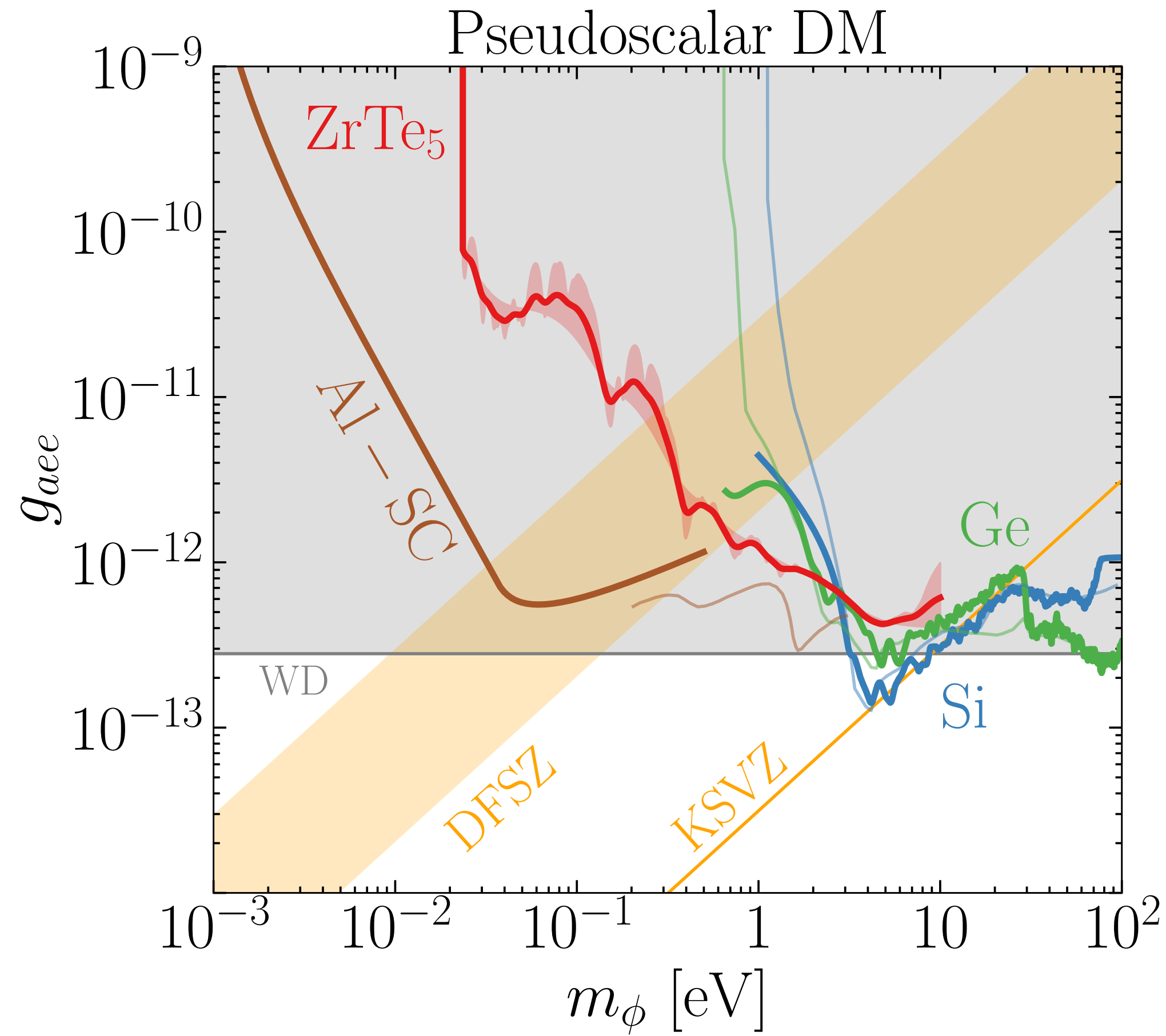
[Hochberg et al (2015), Hochberg, Lin, Zurek (2016)]

- Dirac 物質のギャップ  $\sim 10\text{meV}$

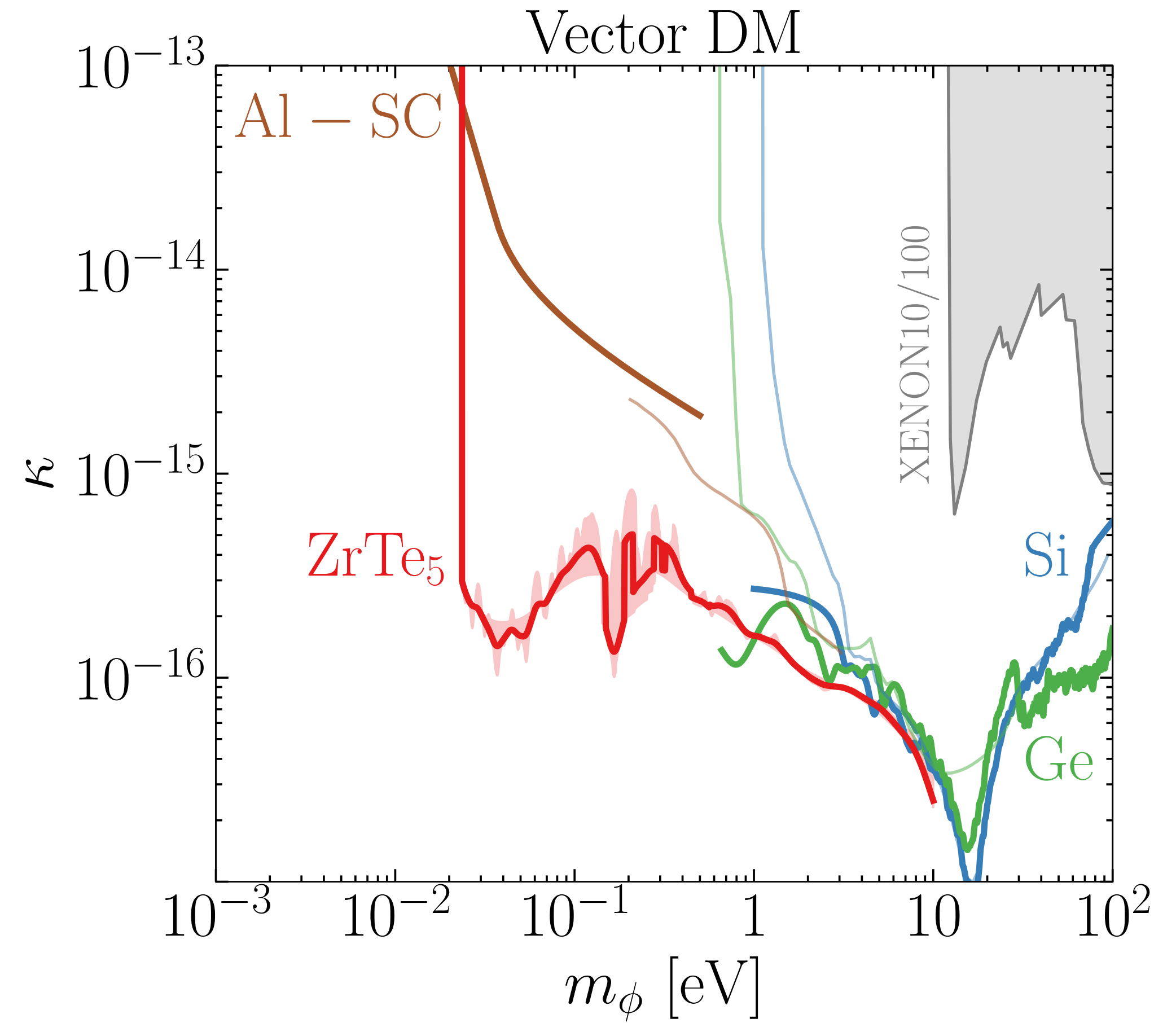
[Hochberg et al (2017), Geilhufe, Kahlhoefer, Winkler (2019)]



# アクシオン暗黒物質の場合



# ダークフォトン暗黒物質の場合

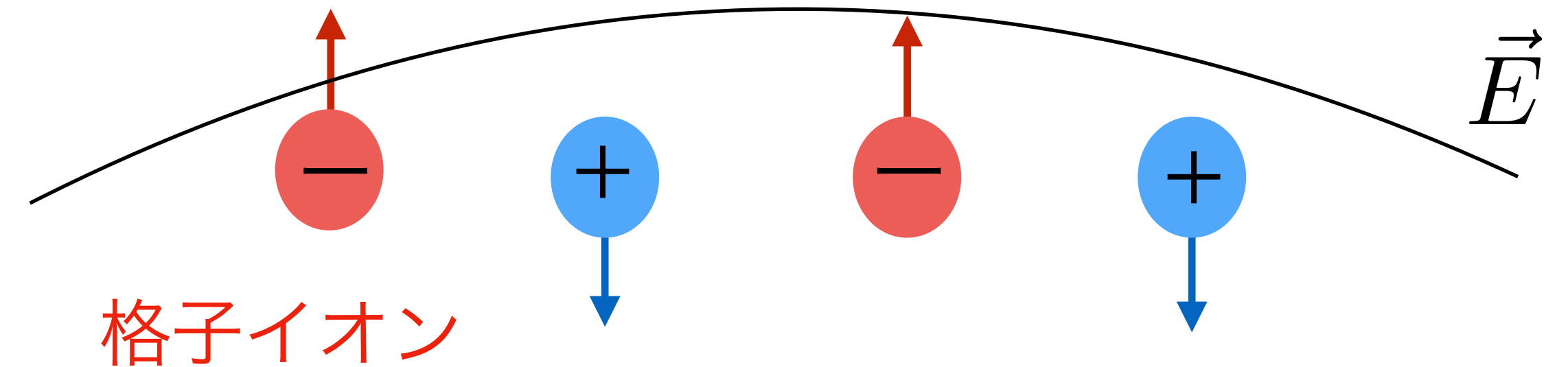
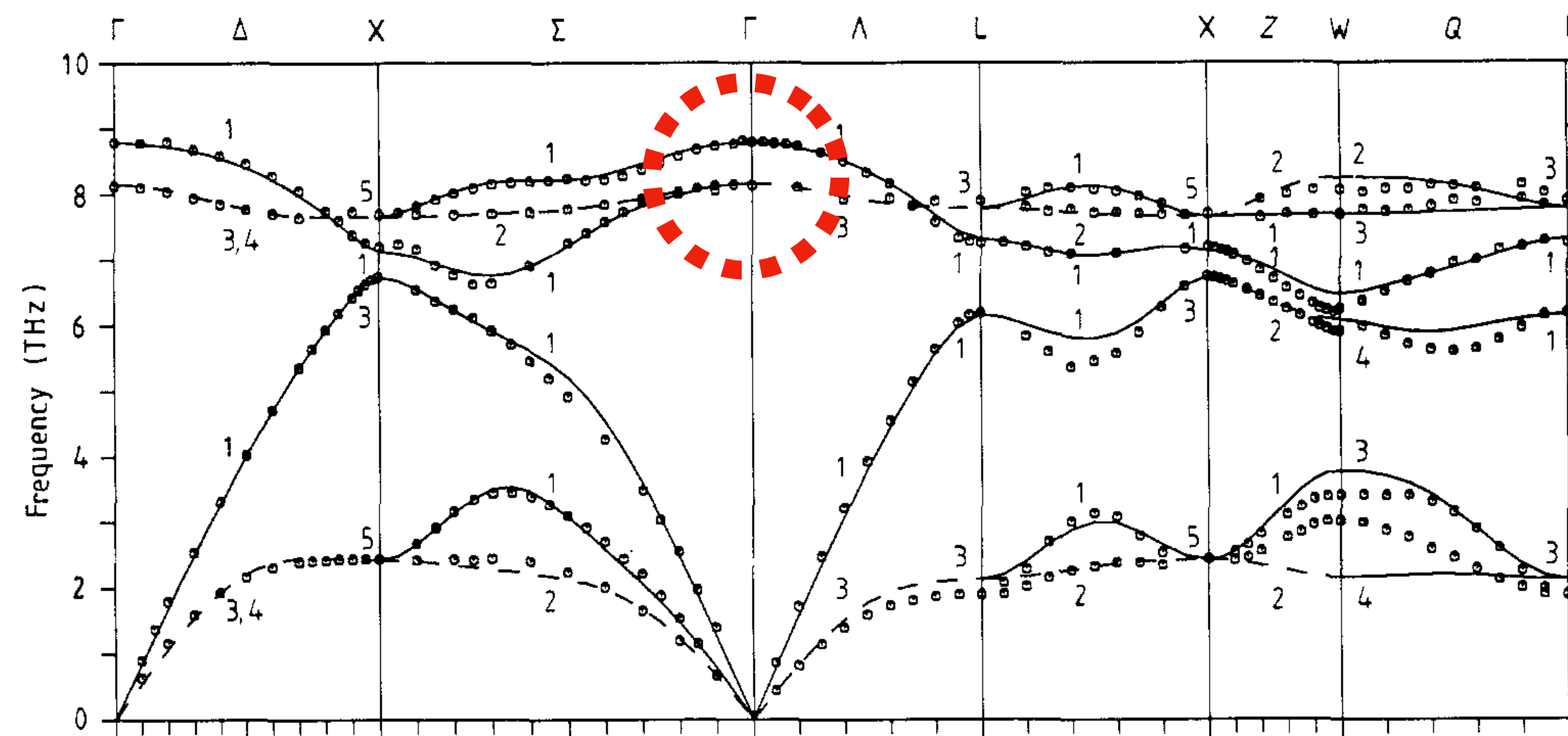


[Mitridate et al. (2021)]

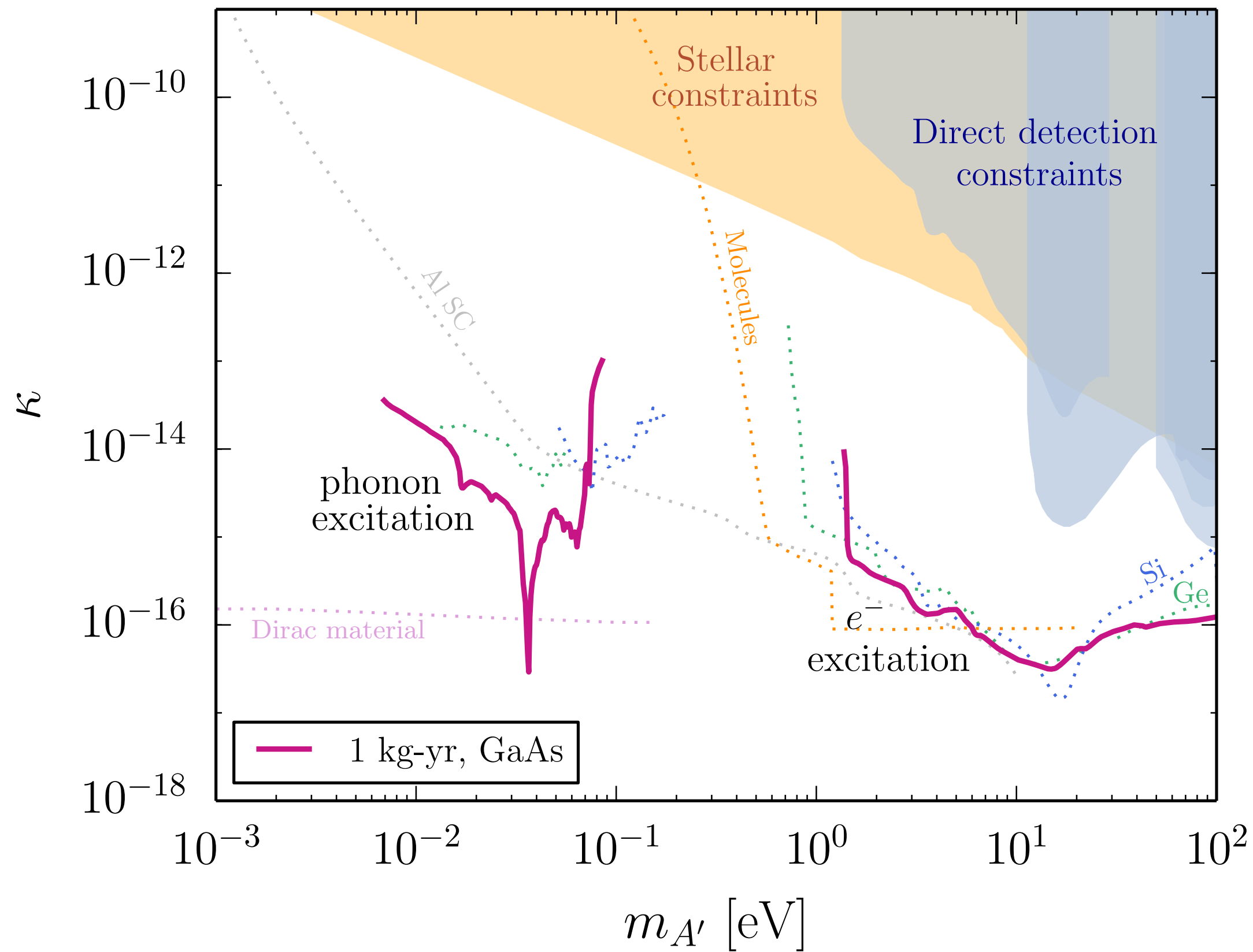


# フォノンによる暗黒物質の吸収

- ギャップエネルギー以下でも光が吸収されることがある  
→ (光学) フォノンを励起
- 典型的なフォノンエネルギー  $\sim 0.1\text{eV}$   
0.1eV 程度のダークフォトン暗黒物質検出などに有効

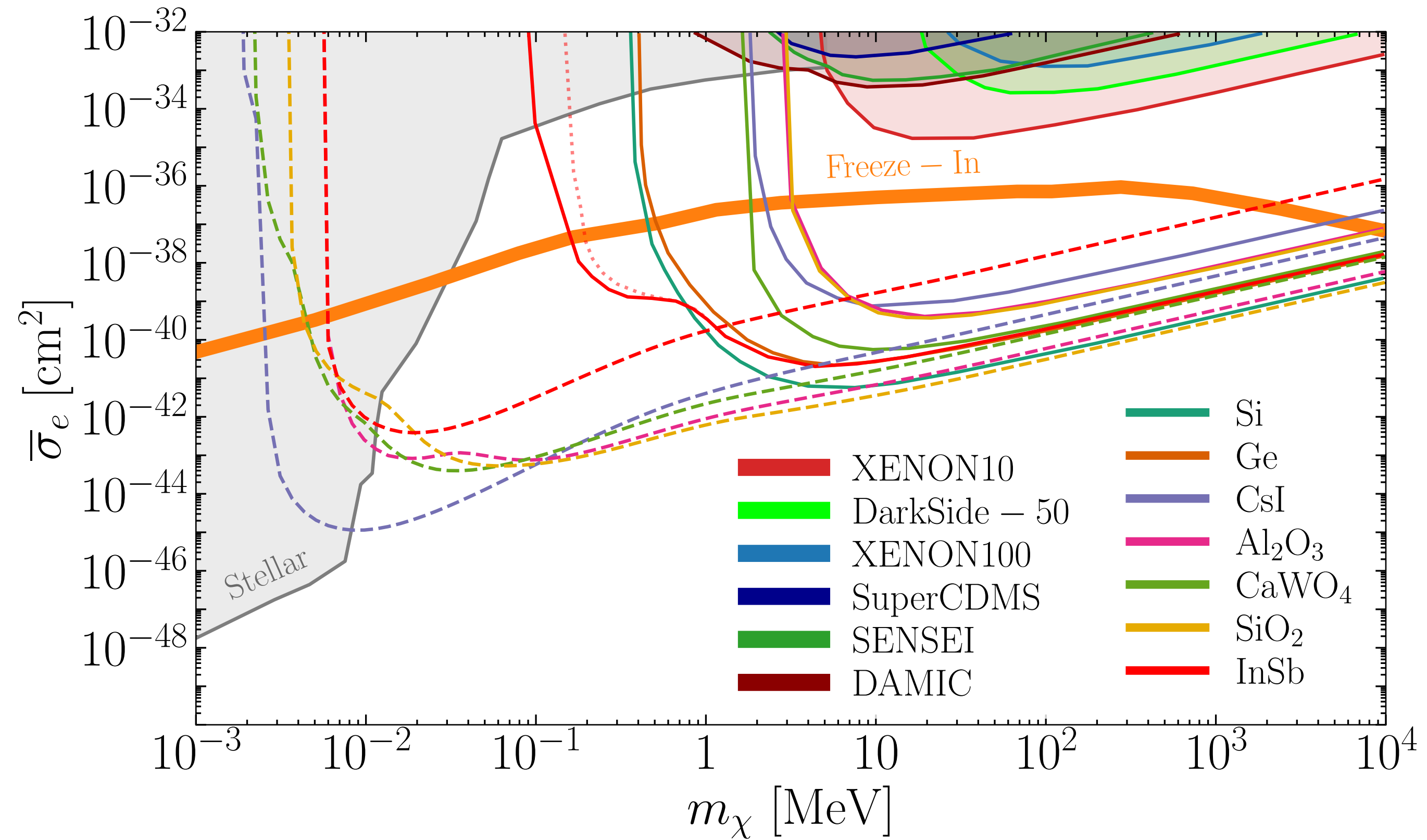


# ダークフォトン暗黒物質の場合



[Knapen, Lin, Pyle, Zurek (2017)]

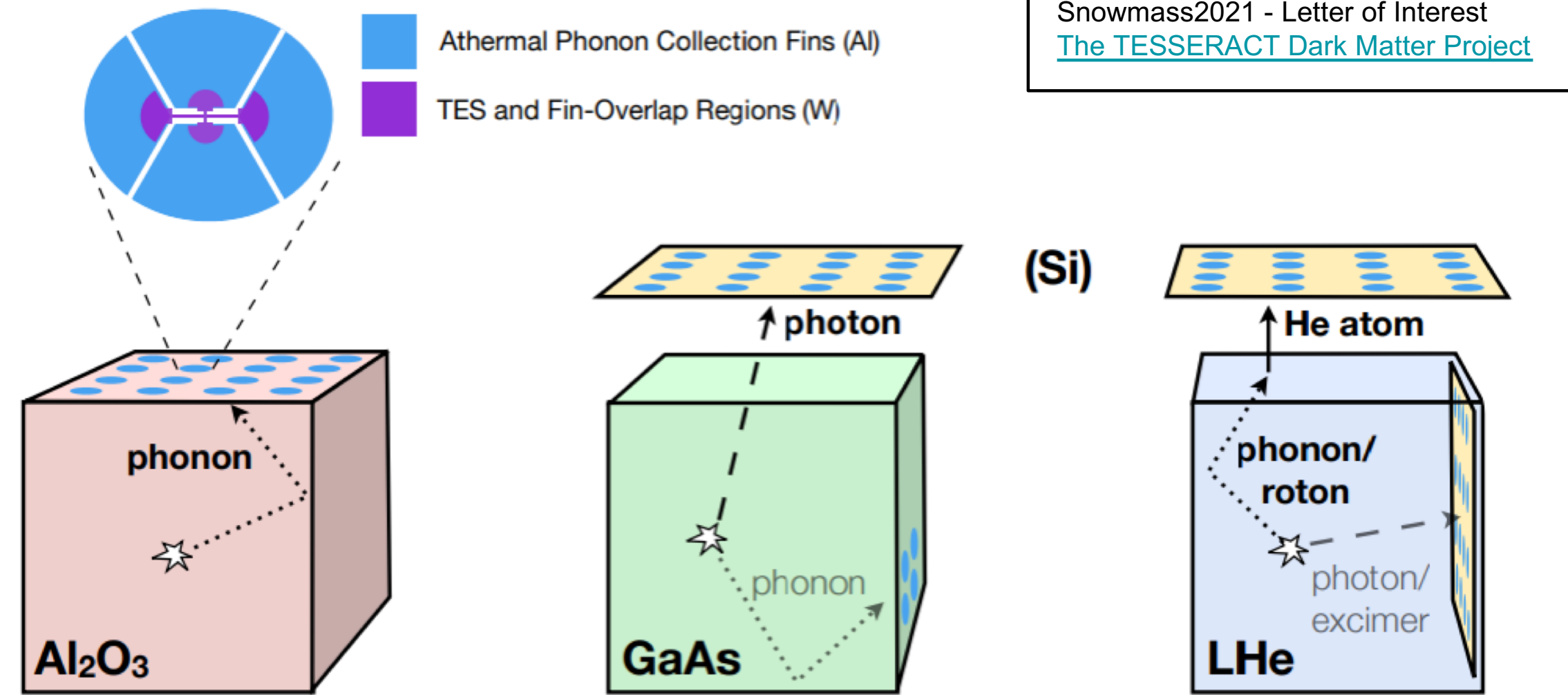
# 軽い散乱型の暗黒物質の場合



[Griffin et al., (2019)]



# SPICE-HeRALD project



# Kamioka Cryolab project



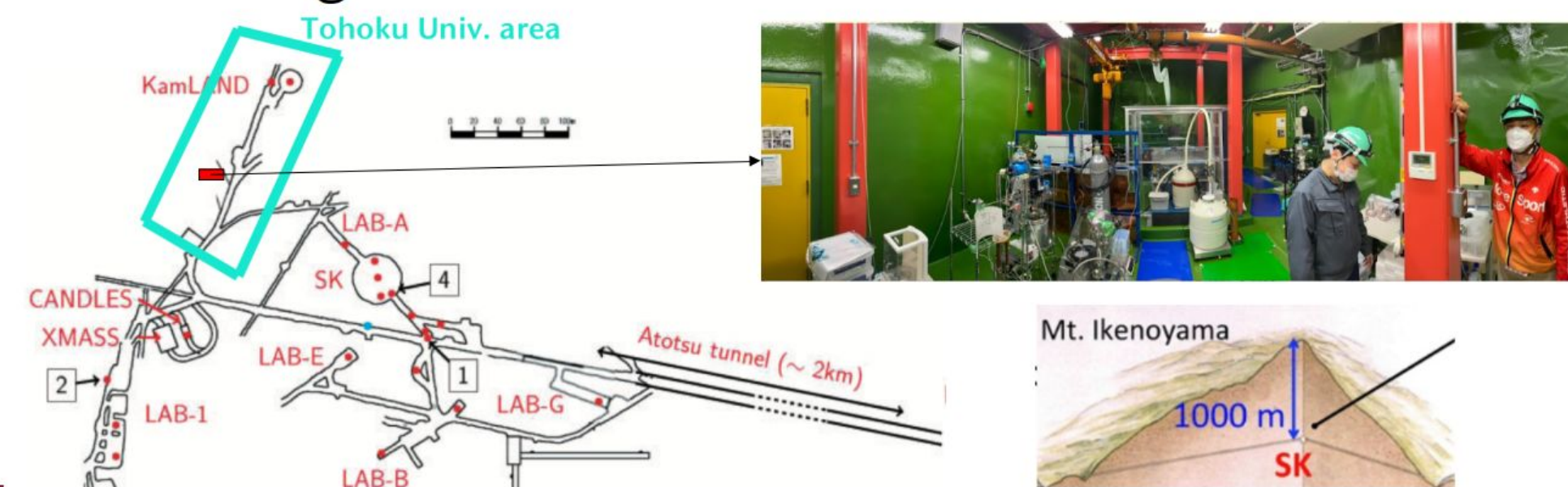
## Kamioka Cryolab development



Awarded US-Japan Proposal

Collaborators: [Koji Ishidoshiro](#) (Tohoku, JP PI), [Masaya Hasegawa](#) (KEK, QUP Co-Pi), [Aritoki Suzuki](#) (LBNL & QUP), [O. Tajima](#) (Kyoto), [K. Kiuchi](#) (U-Tokyo), [A. Kusaka](#) (LBNL & Tokyo), [J. Suzuki](#) (Kyoto), [K. Ichimura](#) (Tohoku), [S. Yoshida](#) (Osaka)

- Title: “New Kamioka underground facility for quantum sensing and low mass dark matter searches”



[Talk by M. Garcia-Sciverse]

# マグノンによる暗黒物質の吸収

[Barbieri et al (1989), Chigusa, Moroi, Nakayama (2020)]

- アクシオン-電子相互作用

$$\mathcal{L} = \frac{\partial_\mu a}{2f} \bar{\psi} \gamma^\mu \gamma_5 \psi \quad \longrightarrow \quad H_{\text{int}} = \frac{1}{f} \sum_{\ell} \vec{\nabla} a(\vec{x}_\ell) \cdot \vec{S}_\ell$$

- アクシオンの勾配は振動磁場のように振る舞う

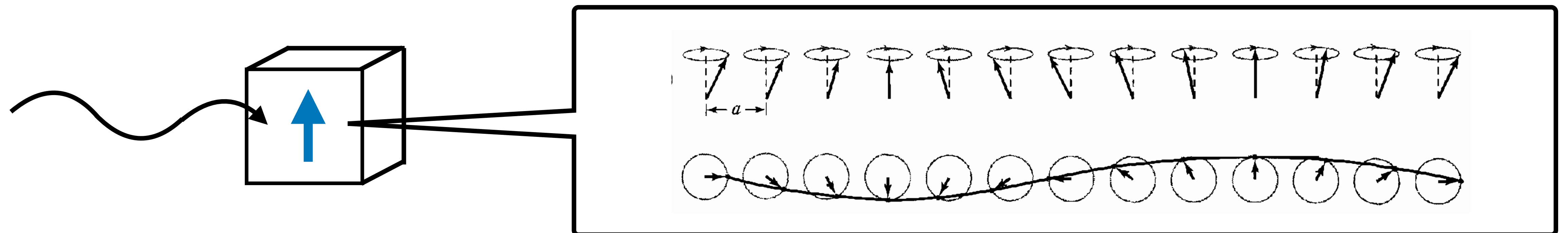
→ 電子スピンの歳差運動を引き起こす

→ 磁性体のスピン波 (マグノン) を励起

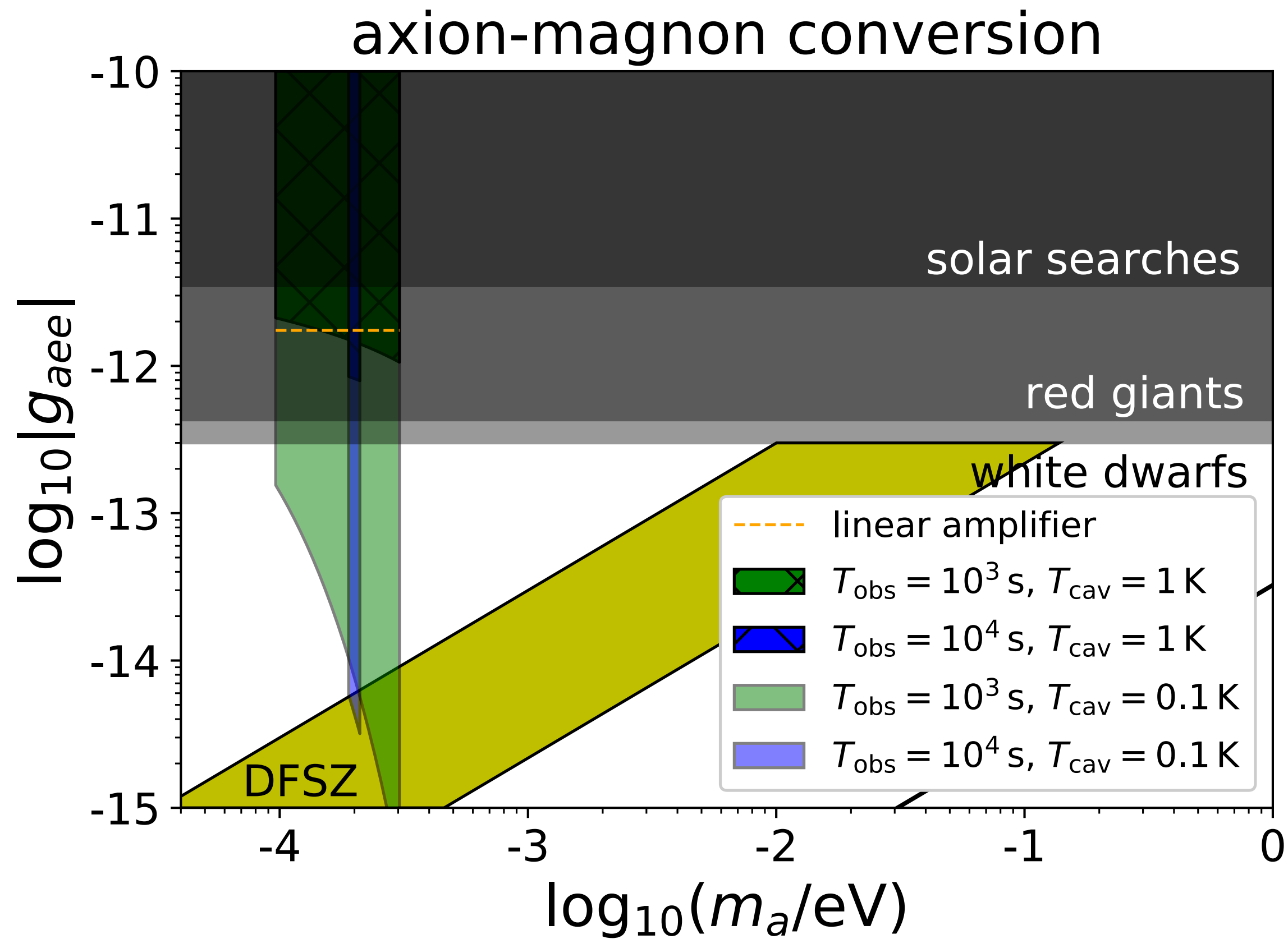
YIG



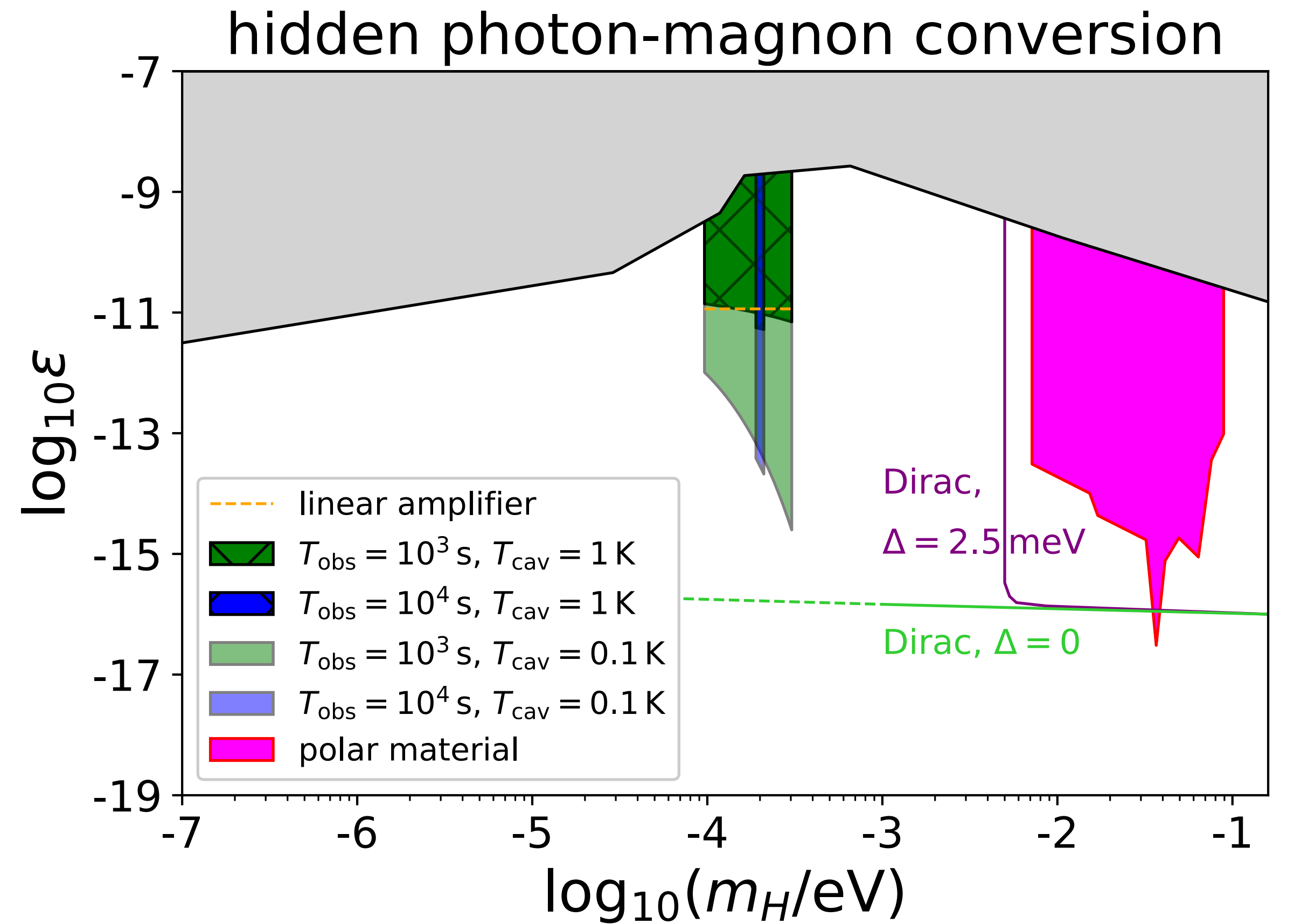
wikipedia



# アクシオン暗黒物質の場合



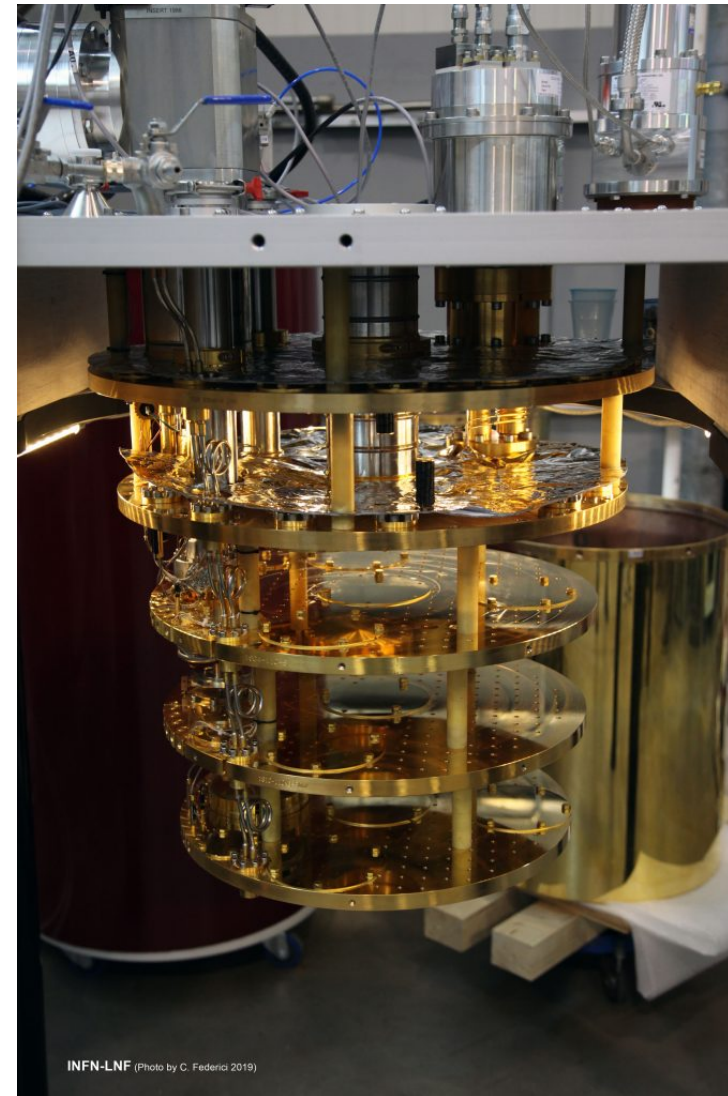
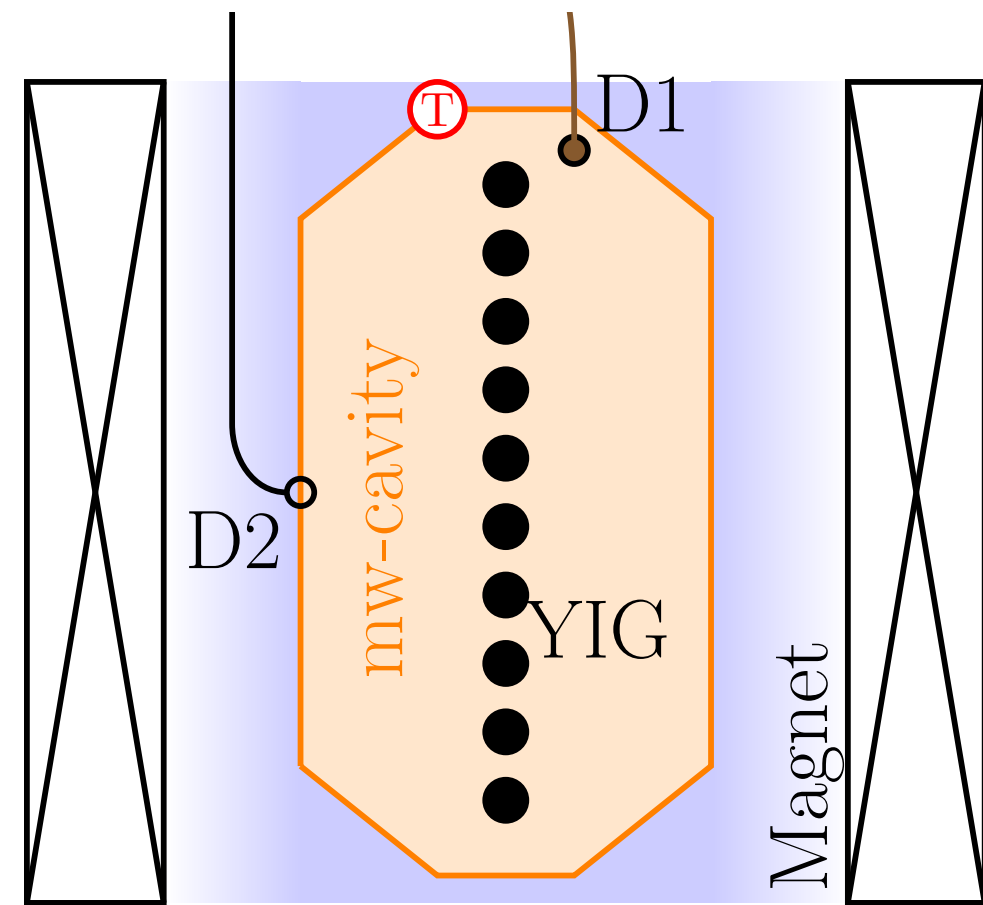
# ダークフォトン暗黒物質の場合



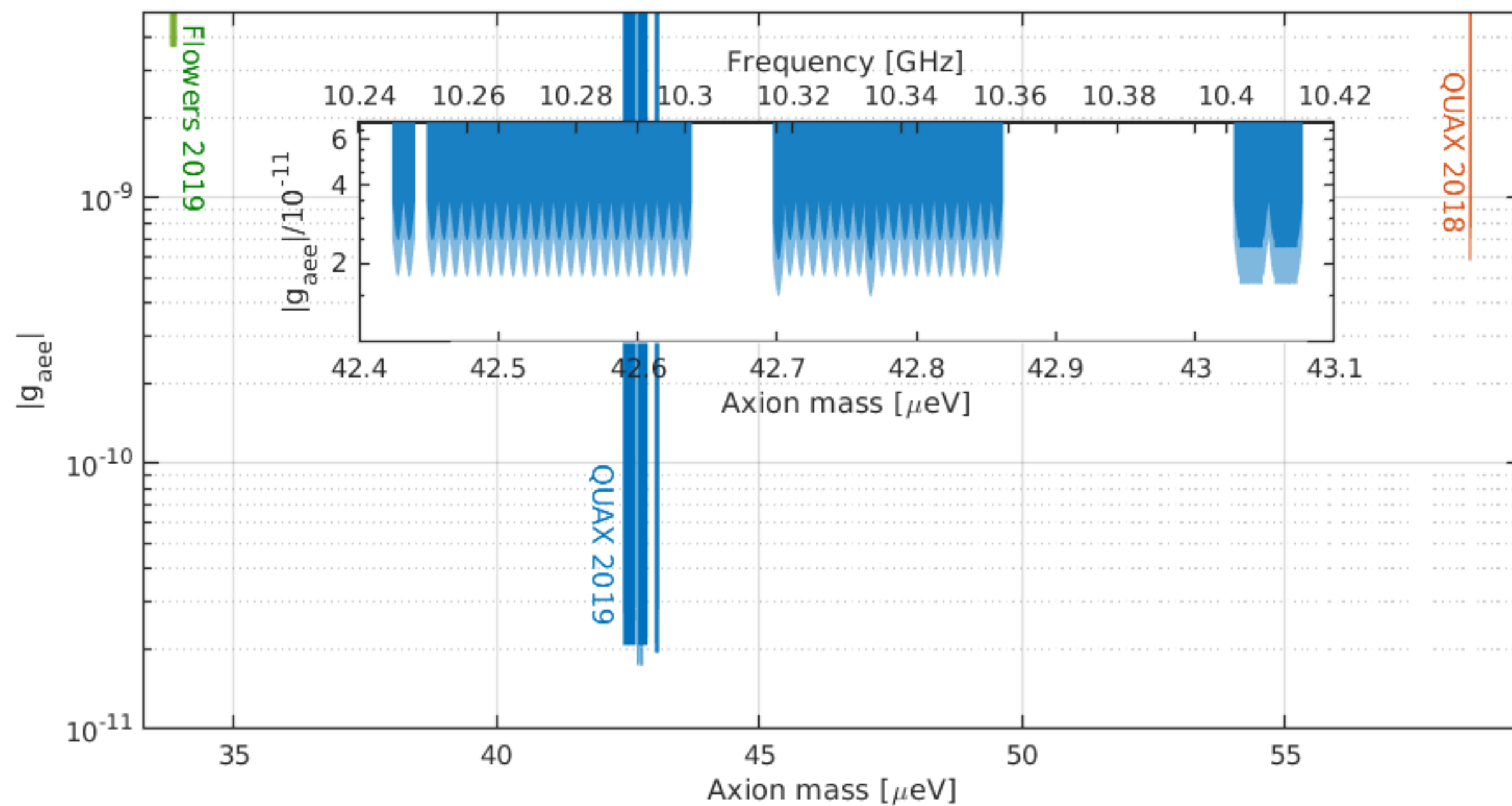
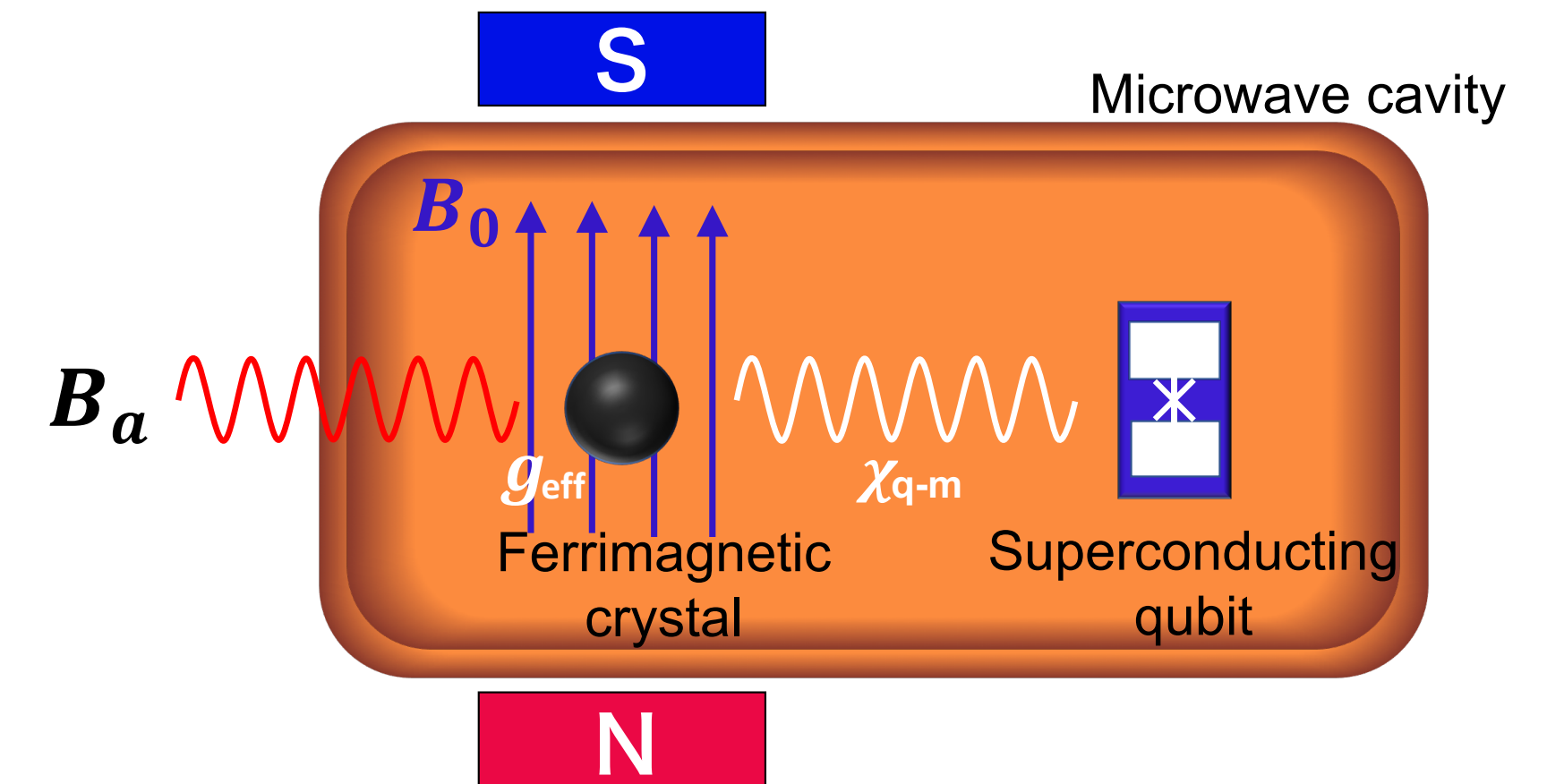
[Chigusa, Moroi, Nakayama (2020)]



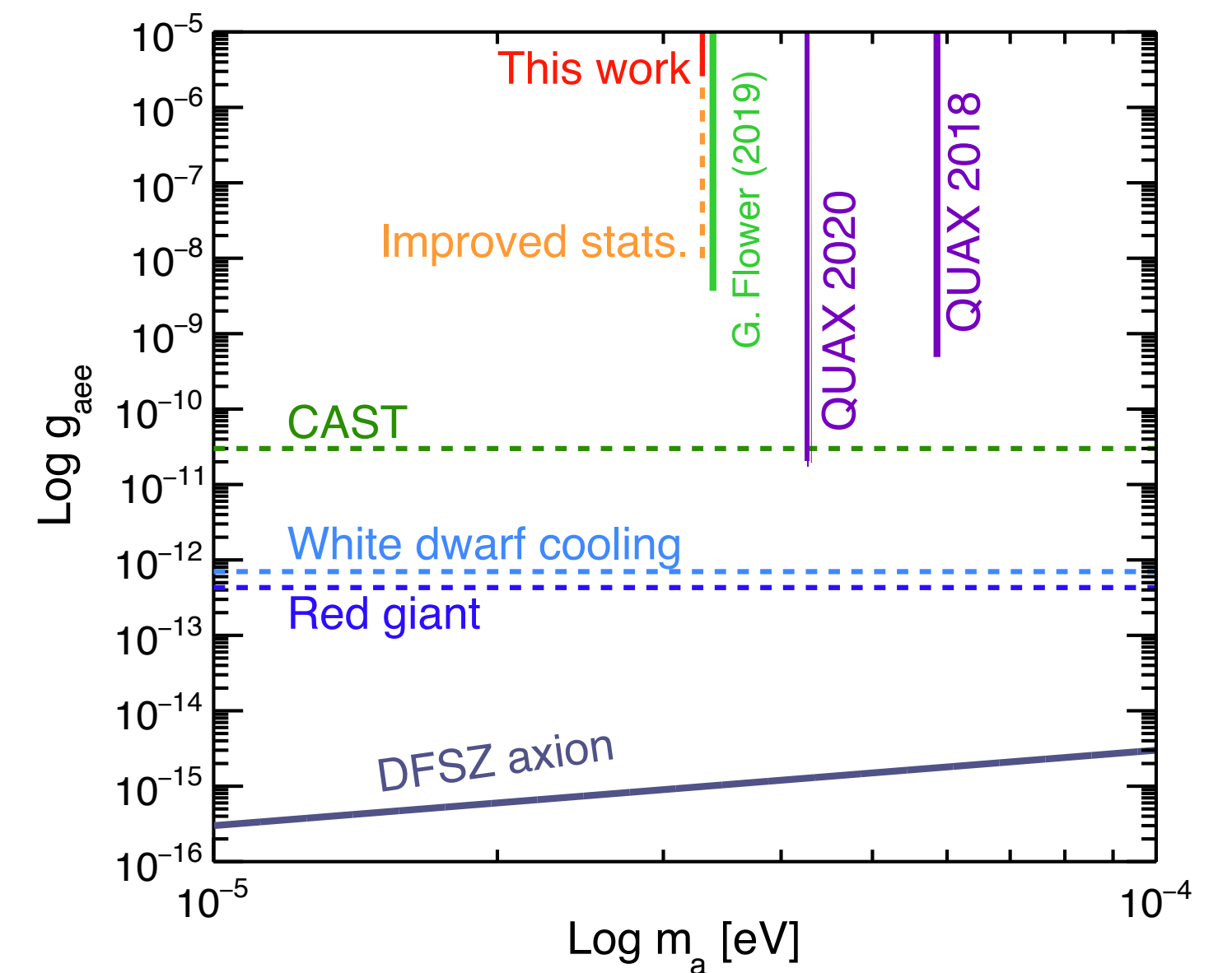
# QUAX experiment



# Use of Qubit



[QUAX collaboration (2020)]



[Ikeda, Ito, Miuchi, Soda, Kurashige, Shikano (2020)]

# 固体中のアクシオン準粒子

- トポロジカル絶縁体 [Kane, Mele (2005), Fu, Kane, Mele (2007)]

$$\mathcal{L} = \theta \frac{\alpha_e}{4\pi} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$

$\theta = 0$  : normal insulator  
 $\theta = \pi$  : topological insulator

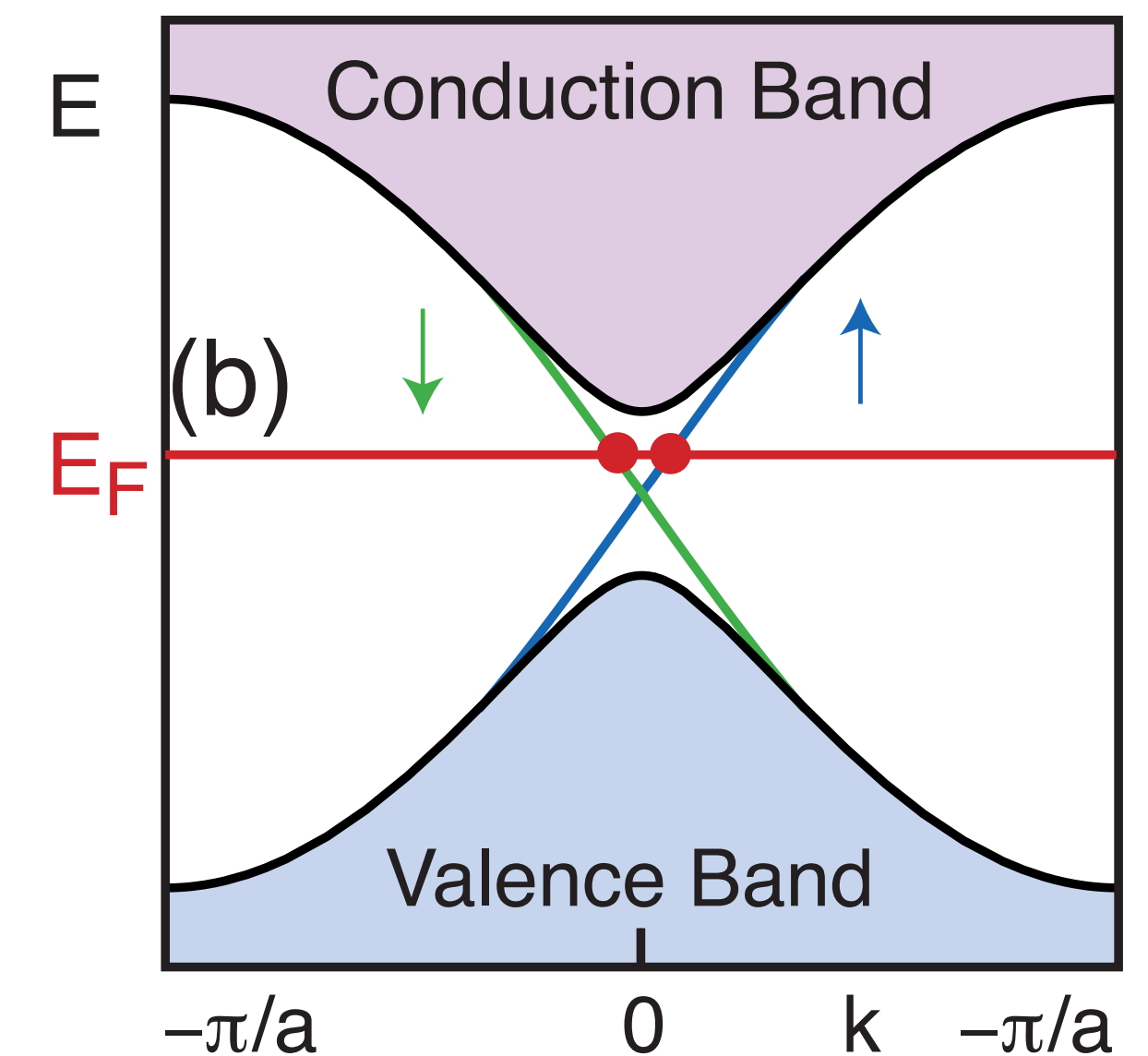
- 磁性体における“アクシオン”の存在可能性

[Wilczek (1987)]

$$\theta \rightarrow \theta(t, \vec{x})$$

- トポロジカル磁性体における“アクシオン”

Fe-doped Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> [Li, Wang, Qi, Zhang (2009)]



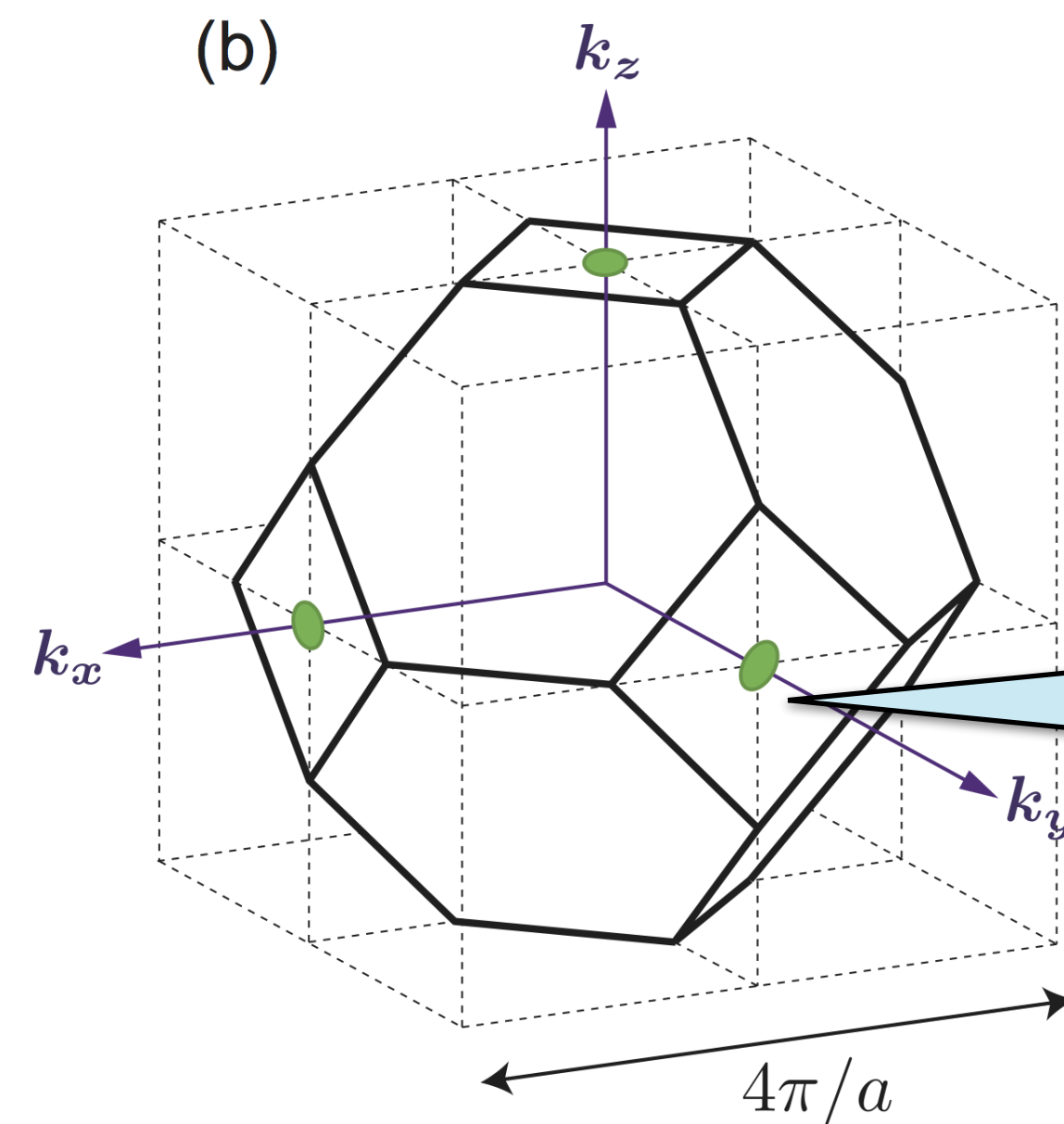
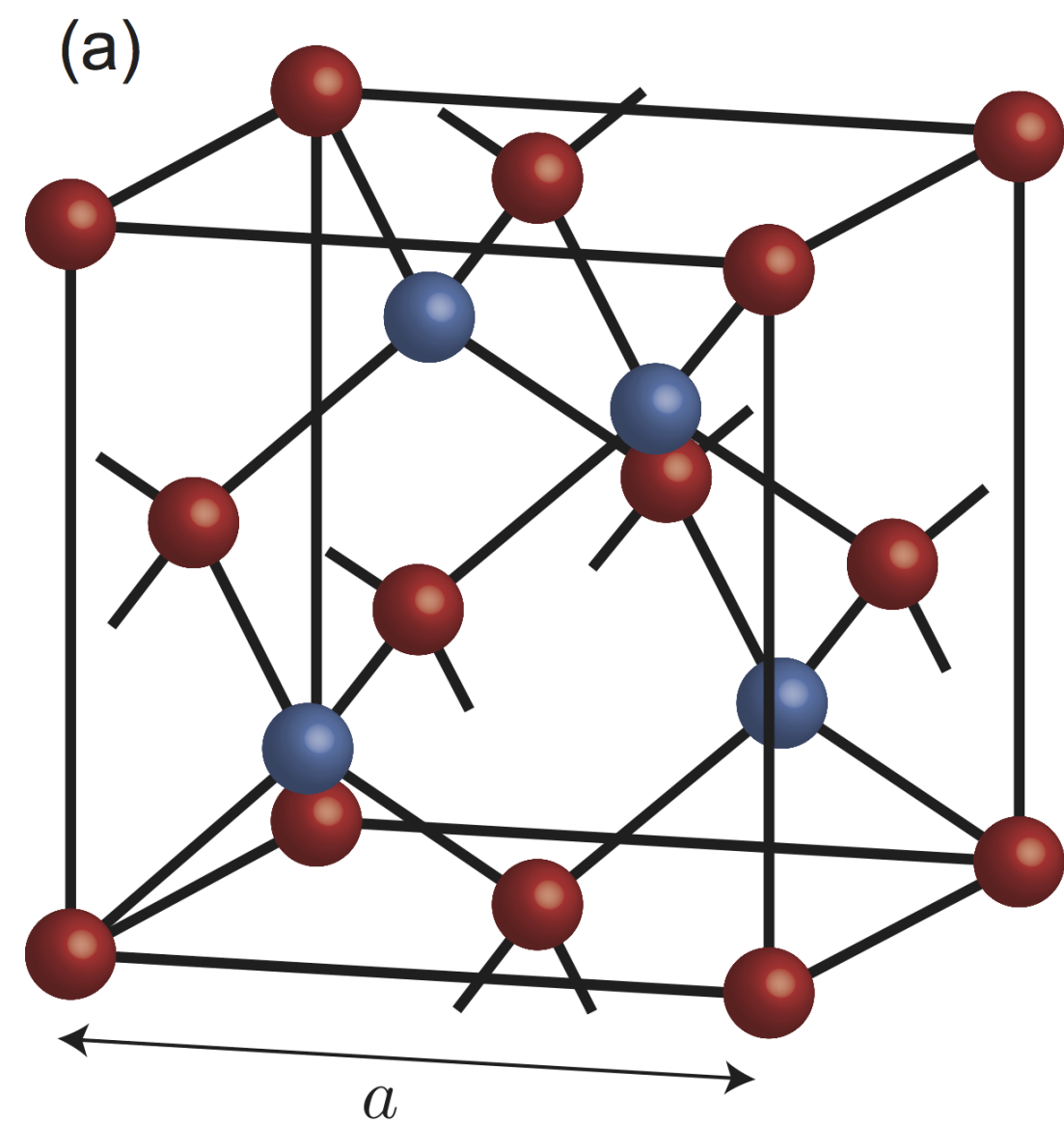
[Hasan, Mele (2010)]



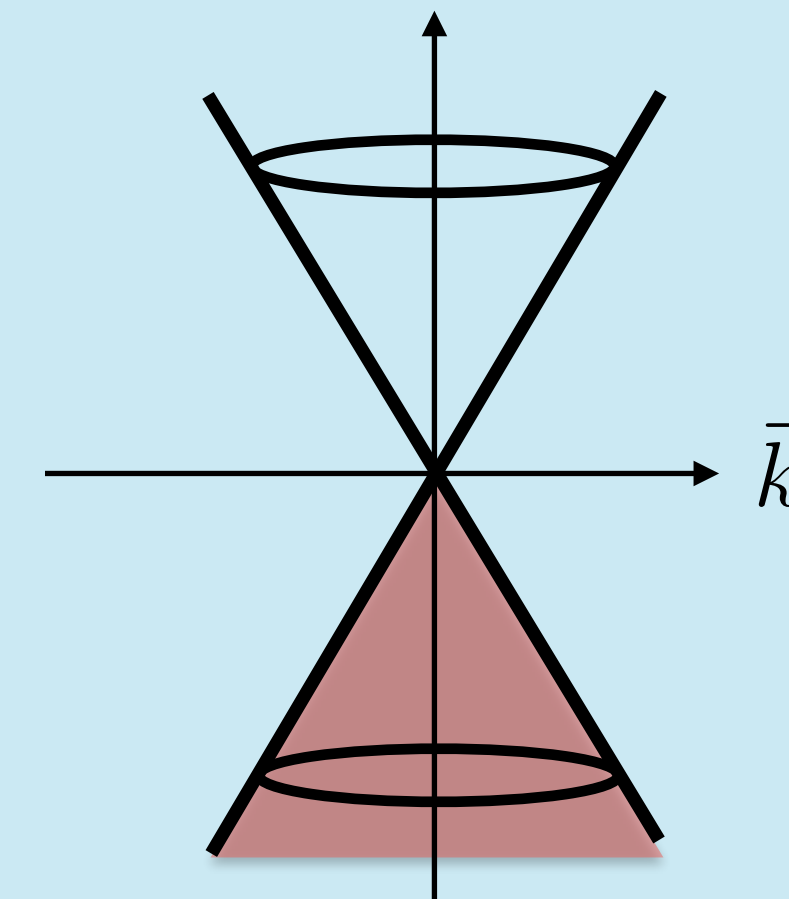
# 例：Fu-Kane-Mele-Hubbard 模型

[Sekine, Nomura (2014)]

$$H_0 = \sum_{\langle i,j \rangle \sigma} t_{ij} c_{i\sigma}^\dagger c_{j\sigma} + i \frac{4\lambda}{a^2} \sum_{\langle\langle i,j \rangle\rangle} c_i^\dagger \vec{\sigma} \cdot (\vec{d}_{ij}^1 \times \vec{d}_{ij}^2) c_j \quad H_U = U \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}$$



3 Dirac points in Brillouin zone



この模型では反強磁性マグノン～“アクシオン”

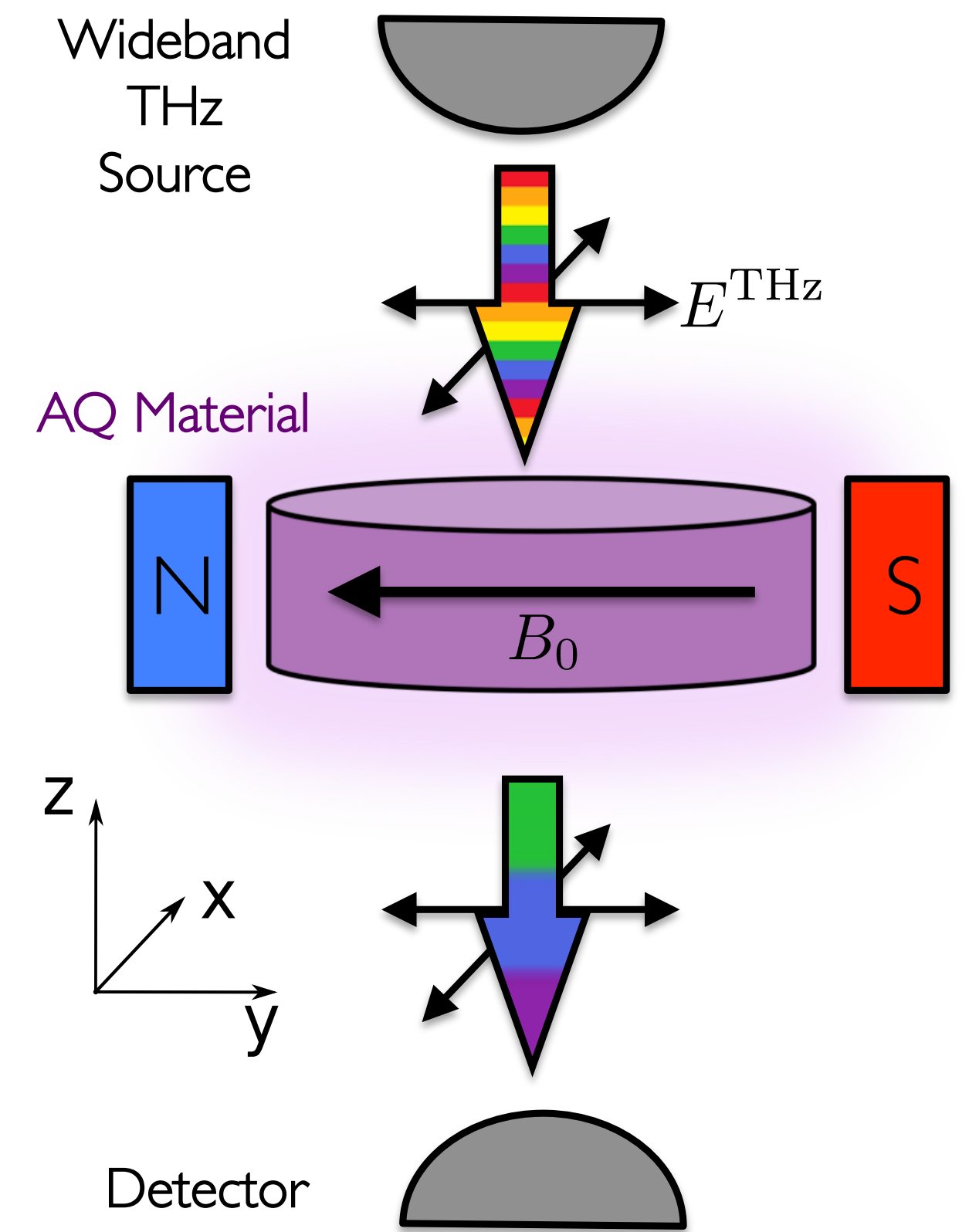
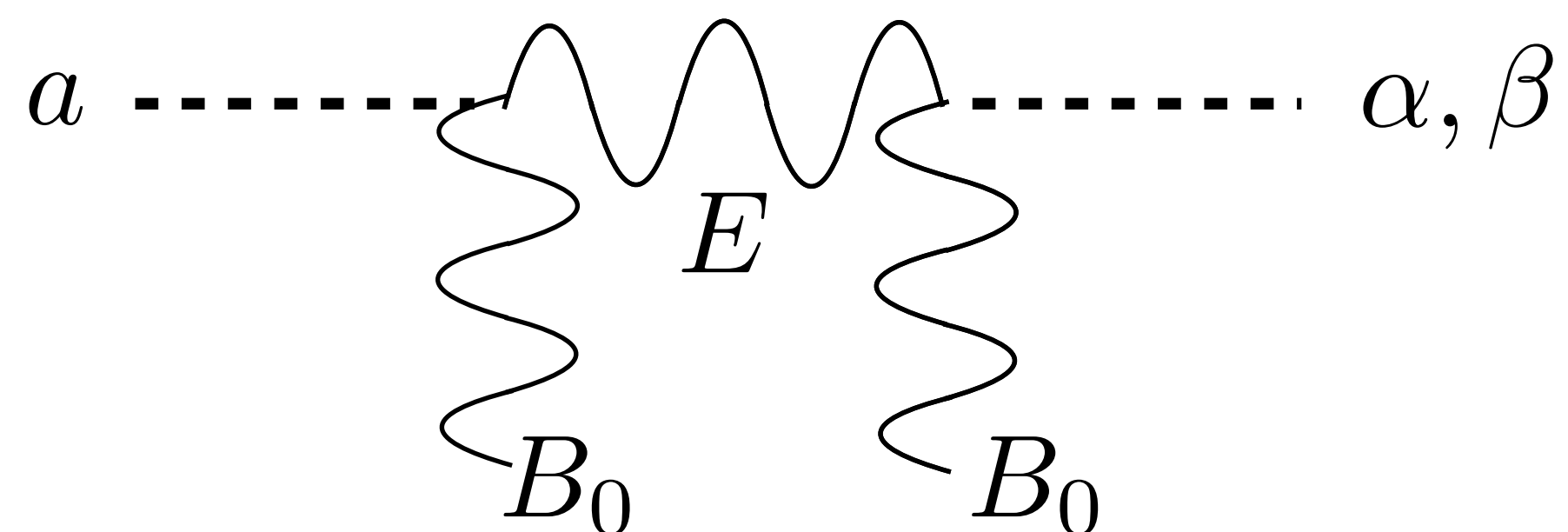
# 固体アクシオンを利用した暗黒物質検出

[Marsh et al (2018), Chigusa, Moroi, Nakayama (2021)]

- 固体アクシオンは暗黒物質アクシオンと同じ形の電磁相互作用を持つ

$$\mathcal{L} \sim \frac{1}{4} (g_{a\gamma} a + C_{a\gamma} \alpha) F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$

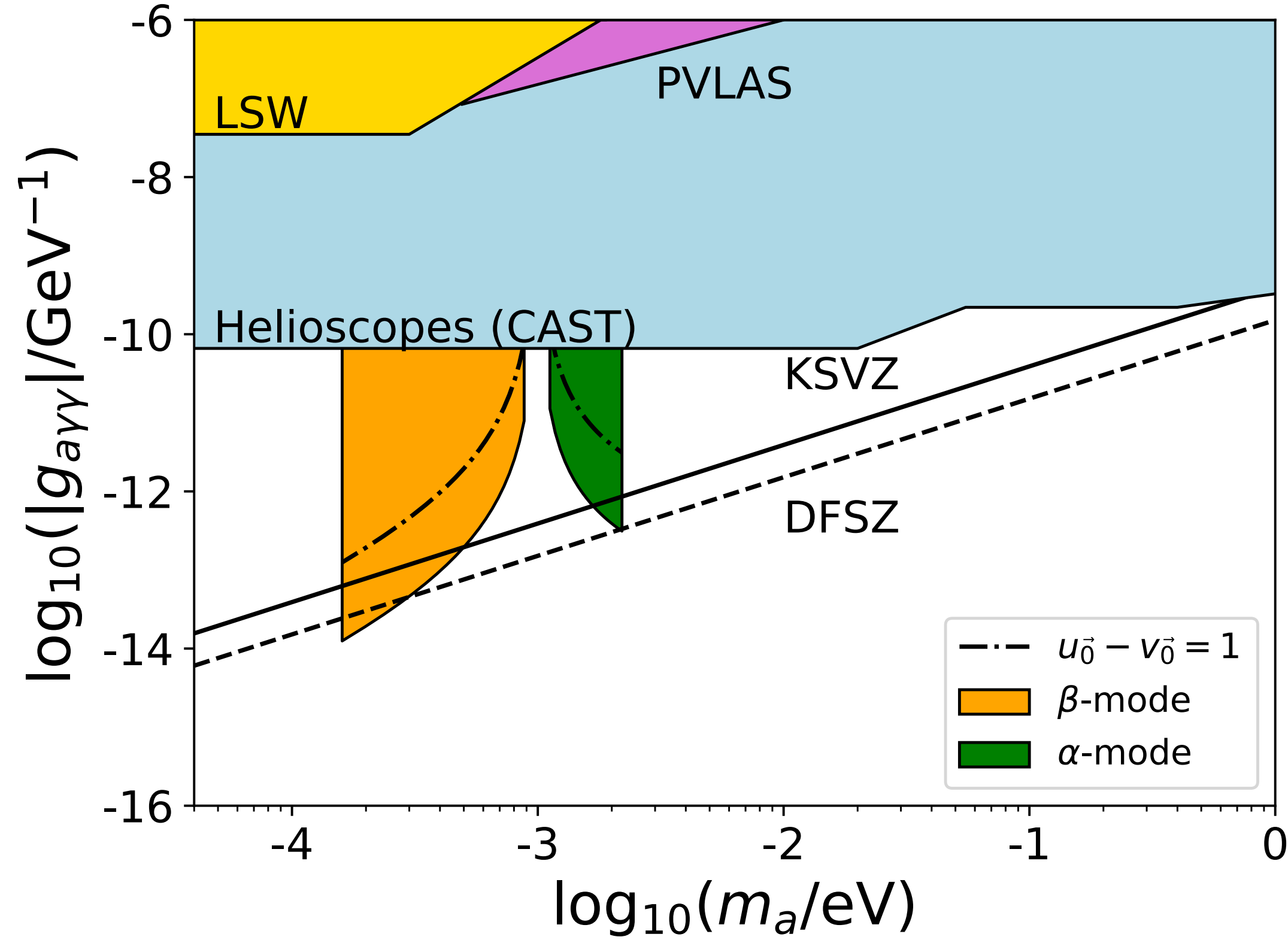
- 暗黒物質から固体アクシオンへの変換



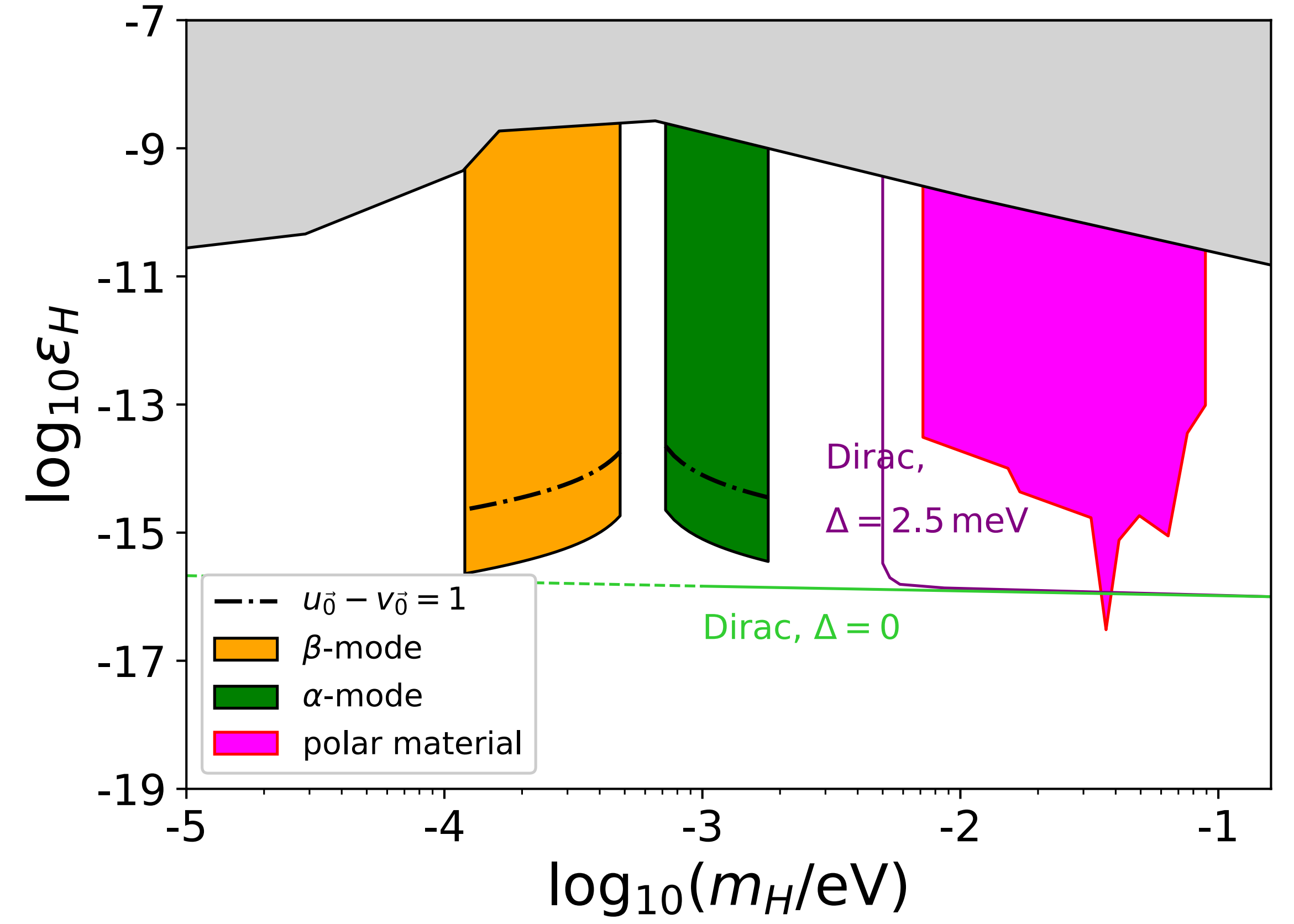
[Schutte-Engel et al. (2021)]



# アクシオン暗黒物質の場合



# ダークフォトン暗黒物質の場合



# 暗黒物質検出と物性物理

- 物質の種類によって色々な準粒子が存在する
- 比較的軽い暗黒物質の検出に向いている

吸収型の暗黒物質：1 meV ~ 1 keV ぐらい

散乱型の暗黒物質：1 keV ~ 1 GeV ぐらい

- 暗黒物質の種類によって、反応のし易さが違う

アクシオン … 電子/核子スピンと結合 → マグノン

ダークフォトン … 電子/核子電荷と結合 → フォノン

- こうしたアイデアに基づいた実験計画も進行中



# 量子センサーと暗黒物質検出

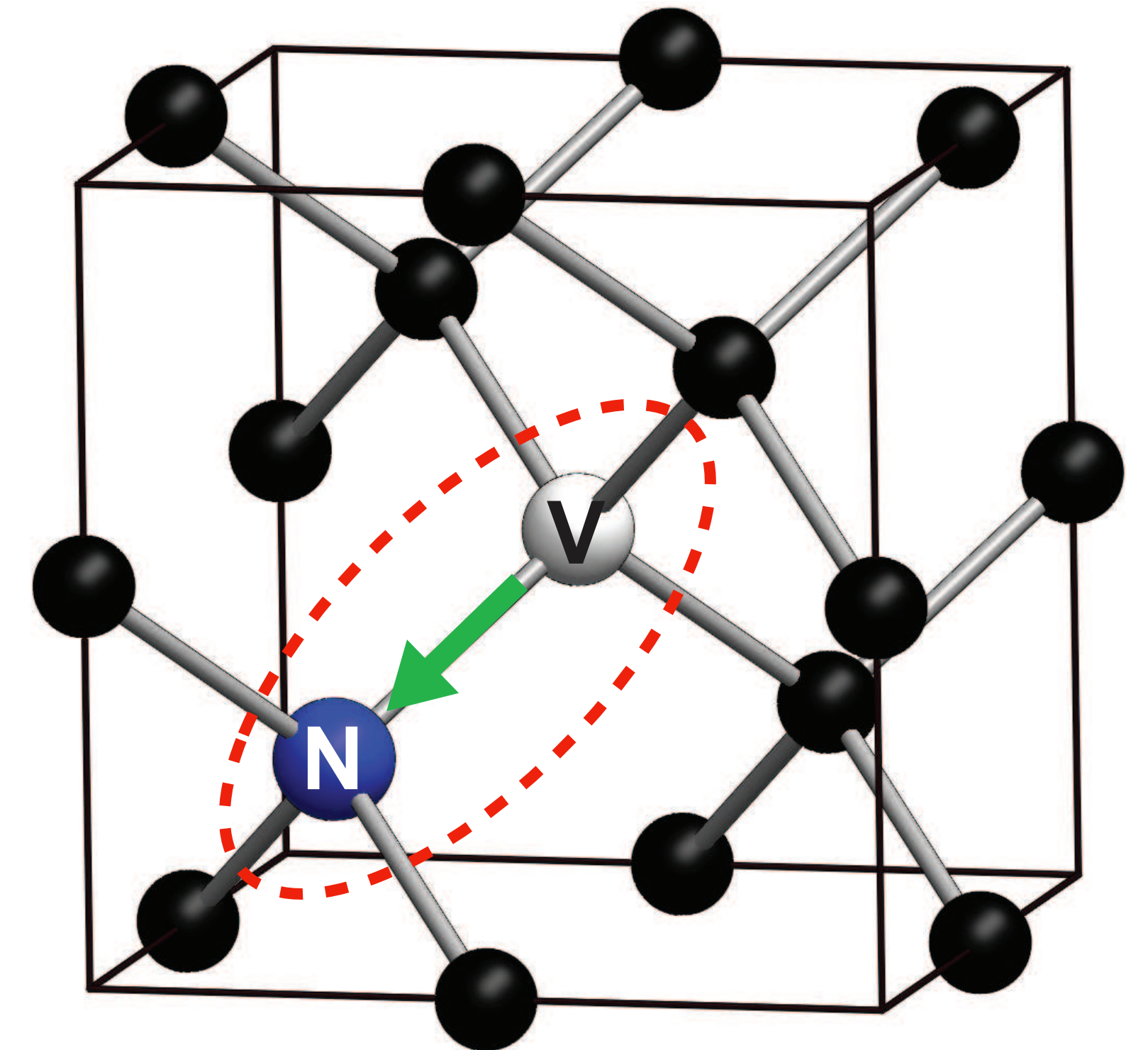
- ダイヤモンドセンサー

Nitrogen-Vacancy (NV) 中心の  
電子の量子状態を制御

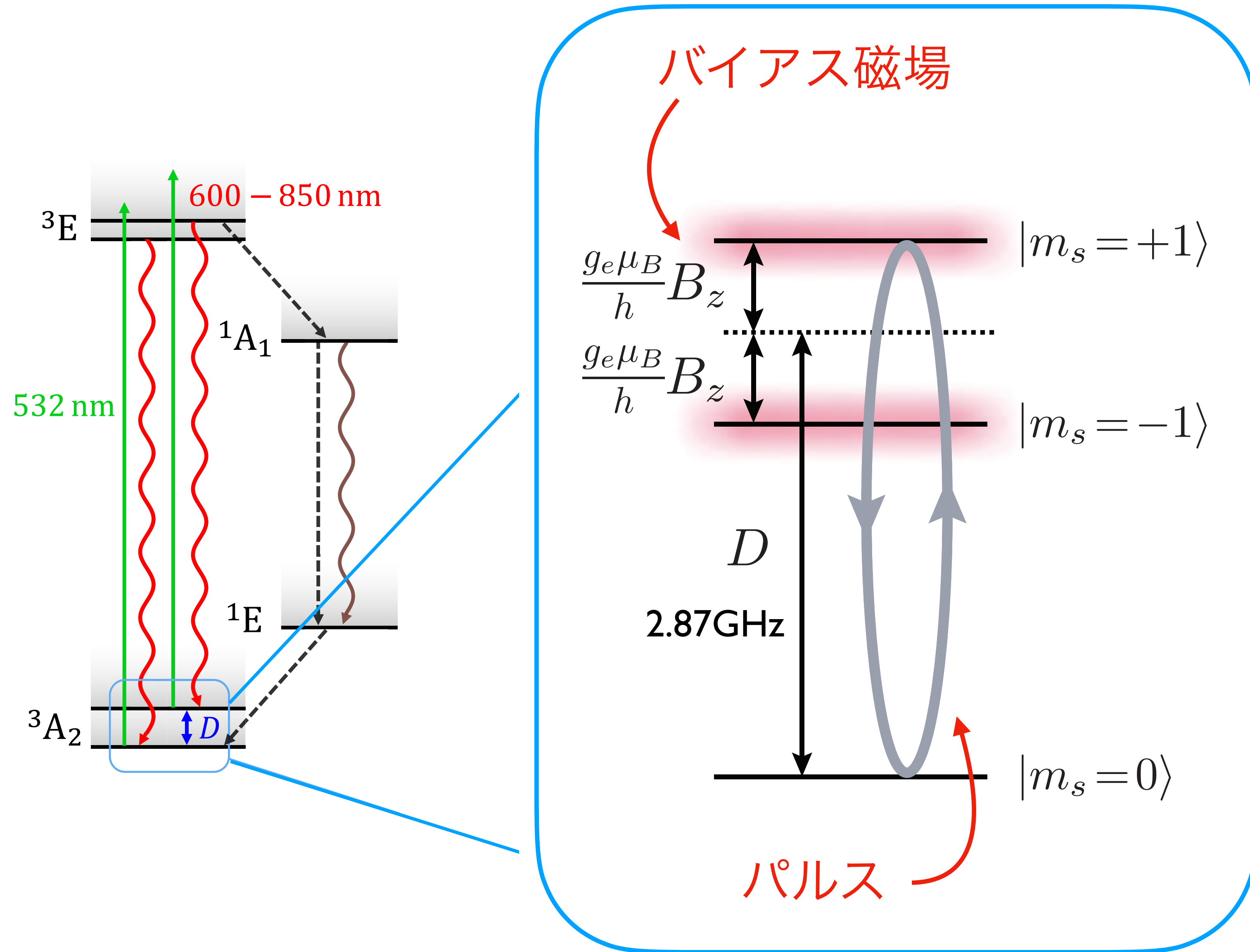
(2電子のspin triplet state)

磁場、温度、圧力などの  
高感度センサーとして利用

- アクシオン暗黒物質検出へ応用



# NV中心による磁場検出



## Ramsey sequence:

- 初期状態：  $|0\rangle$
- $\pi/2$ -パルス:  

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |+1\rangle)$$
- Free precession  
 磁場があると状態の  
 時間発展に影響
- $\pi/2$ -パルス
- 終状態を読み出す (蛍光)



# 暗黒物質のNV中心への影響

- アクシオン

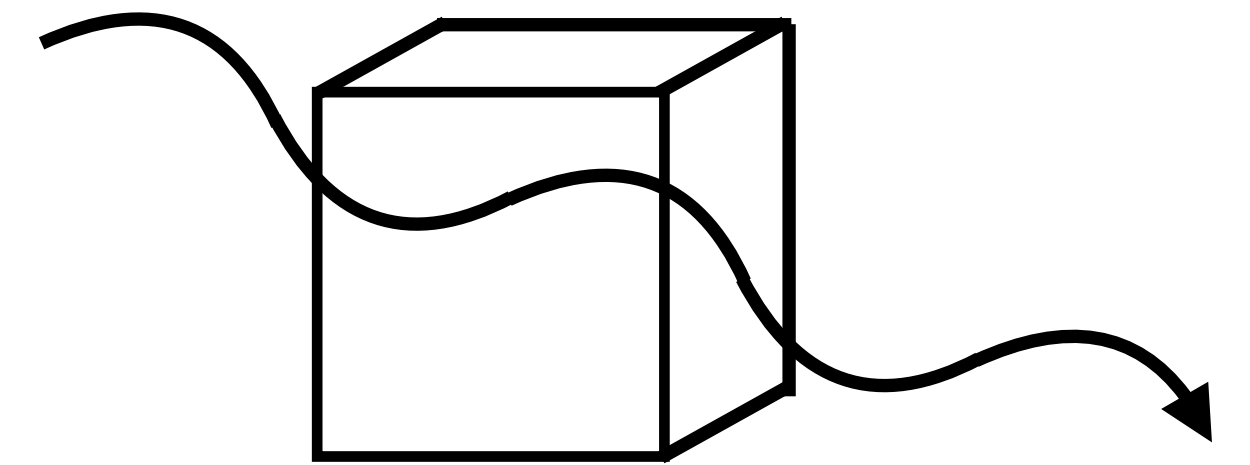
$$\mathcal{L} = g_{aee} \frac{\partial_\mu a}{2m_e} \bar{\psi} \gamma^\mu \gamma_5 \psi \quad \rightarrow \quad H_{\text{eff}} = \frac{g_{aee}}{m_e} \vec{\nabla} a \cdot \vec{S}_e,$$

- ダークフォトン

$$\mathcal{L} = -\frac{\epsilon}{2} F_{\mu\nu} H^{\mu\nu} \quad \rightarrow \quad H_{\text{eff}} = \frac{\epsilon e}{m_e} (\vec{\nabla} \times \vec{H}) \cdot \vec{S}_e$$

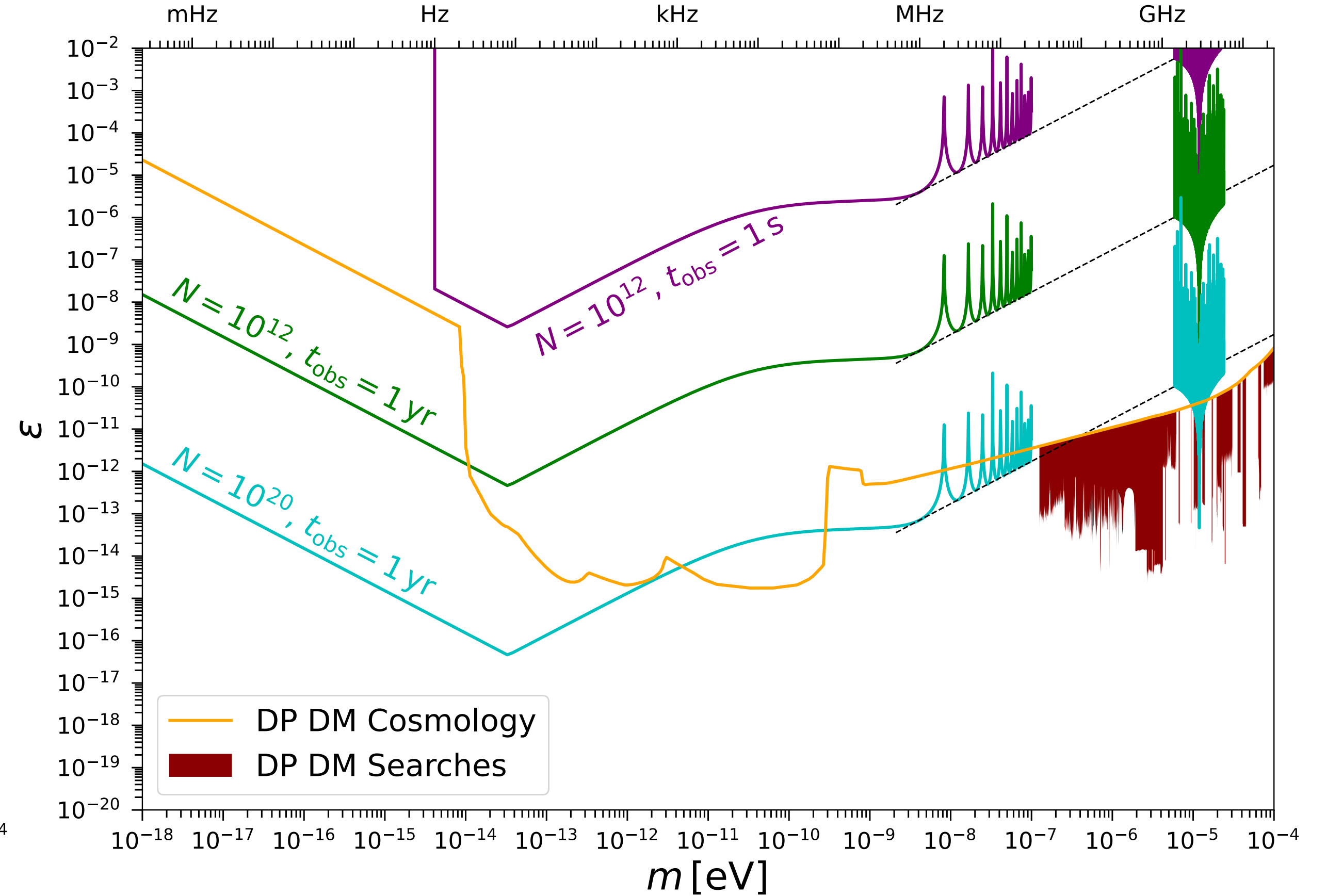
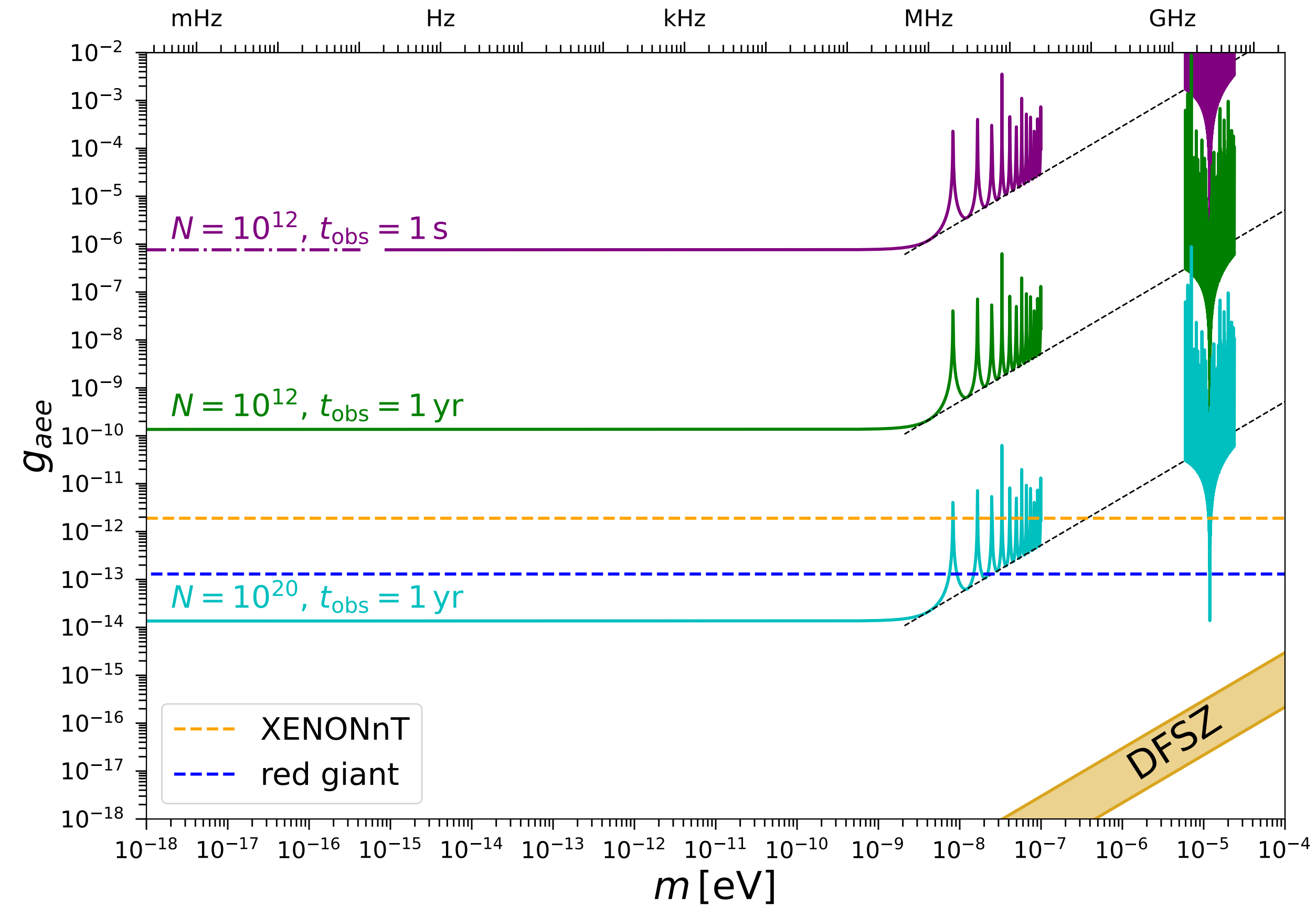
- 暗黒物質が電子に及ぼす “**磁場**”

$$\vec{B}_{\text{eff}} = \sqrt{2\rho_{\text{DM}}} \times \begin{cases} \frac{g_{aee}}{e} \vec{v}_{\text{DM}} & \text{for axion,} \\ \epsilon (\vec{v}_{\text{DM}} \times \hat{H}) & \text{for dark photon,} \end{cases} \quad \sqrt{2\rho_{\text{DM}}} v_{\text{DM}} \simeq 1.3 \times 10^{-8} \text{ T}$$



# アクシオン

# ダークフォトン



[Chigusa, Hazumi, Herbschleb, Mizuochi, Nakayama, (2023)]



# まとめ

- 暗黒物質の研究は多岐に渡る

今日紹介したものはほんの一部！

- 検出のための色々なアイデアが求められている

宇宙物理・物性物理の応用や、検出器のテクノロジーの進展など  
たぶんまだ誰も思い付いていないアイデアがたくさんある