

暗黒物質は なぜ検出できないのか？ 一方向情報で探る加速暗黒物質モデル

長尾桂子（岡山理科大学）

JCAP07(2023)061 KN+東野聡(神戸大), 中竜大(東邦大), 身内賢太郎(神戸大)

JCAP04(2025)030 KN+中竜大, 野村 敬明(四川大)

(ongoing) KN+東野聡, 中竜大, 身内賢太郎+下村崇(宮崎大), 上坂優一(獨協医科大)

目次

1. DMがなぜ重要なのか？

2. DMはなぜ検出できないのか？

3. 加速されたDM

i. 対消滅によって加速されたDM

ii. 宇宙線によって加速されたDM

4. まとめ

素粒子の標準模型

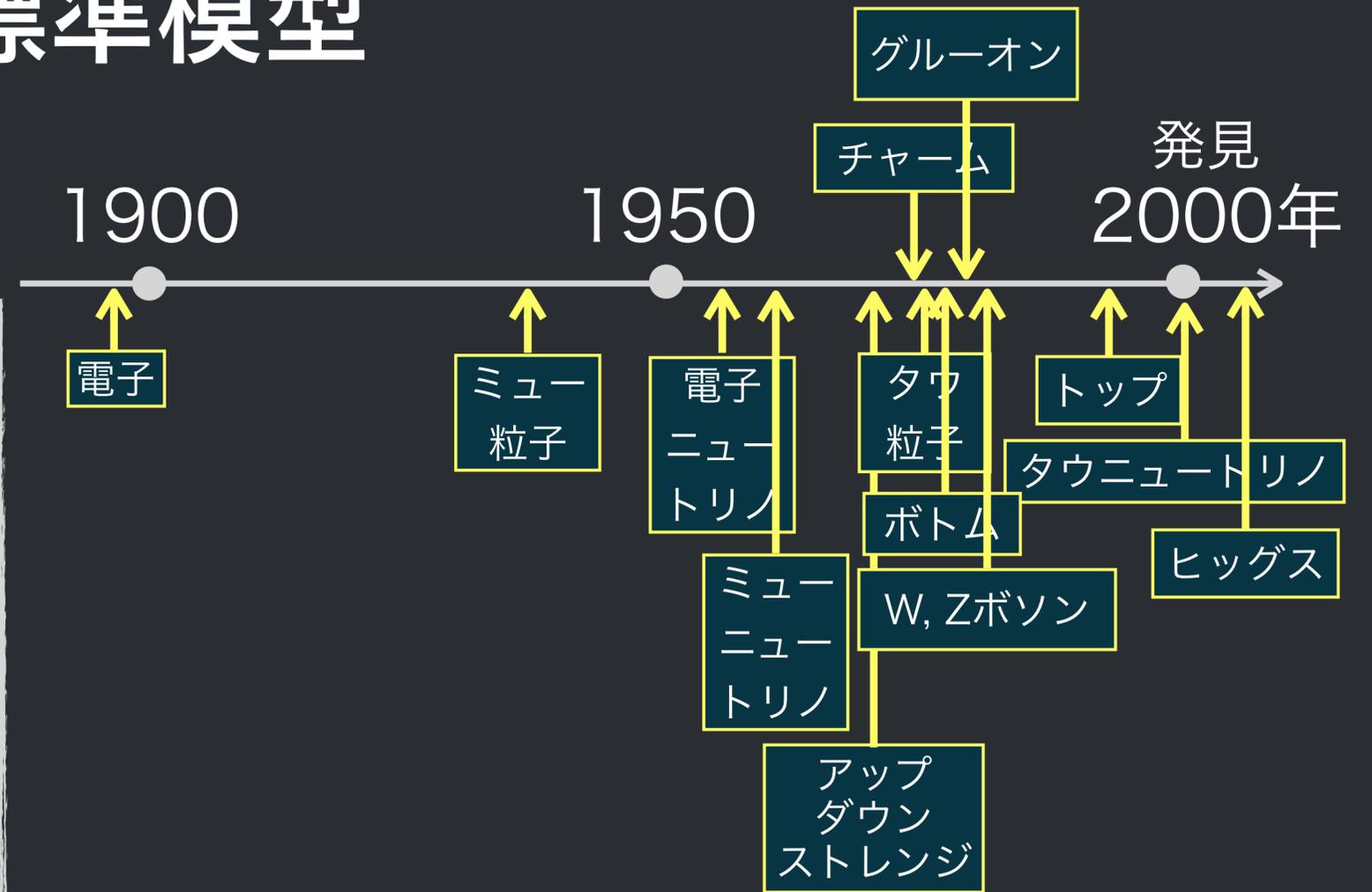


質量だけ違うコピー

力を伝える
粒子



ヒッグス粒子

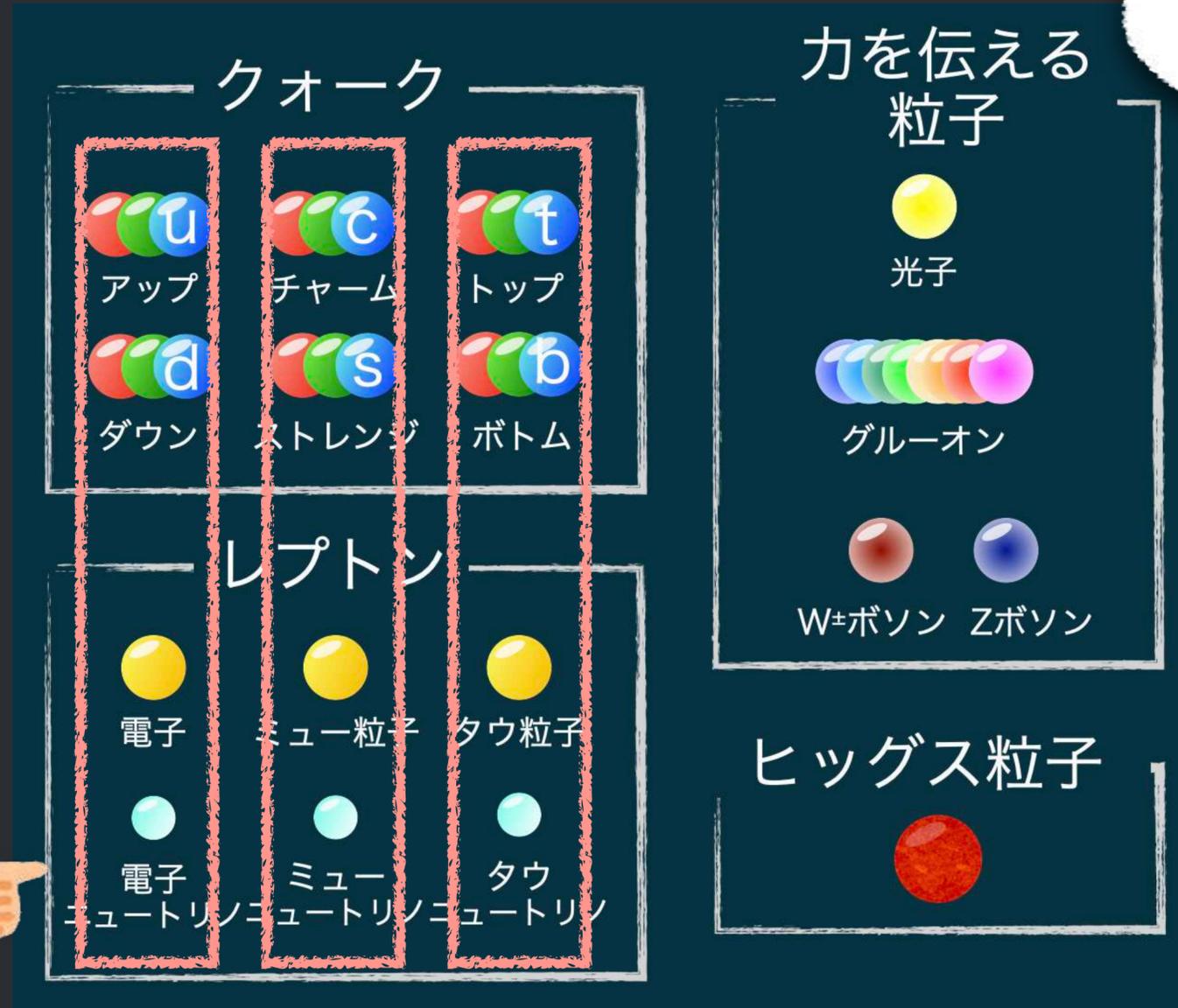


素粒子の標準模型

発見されている素粒子と実験結果を
矛盾なく説明できる理論

標準模型を眺めて浮かぶ疑問

同じコピーが3つあるのはなんで？
2つとか4つじゃだめなの？



基本の粒子がこんなにたくさんあるの？
これ以外にはないの？

電荷が分数の粒子
ありますか？

クォークは $\frac{2}{3}$, $-\frac{1}{3}$

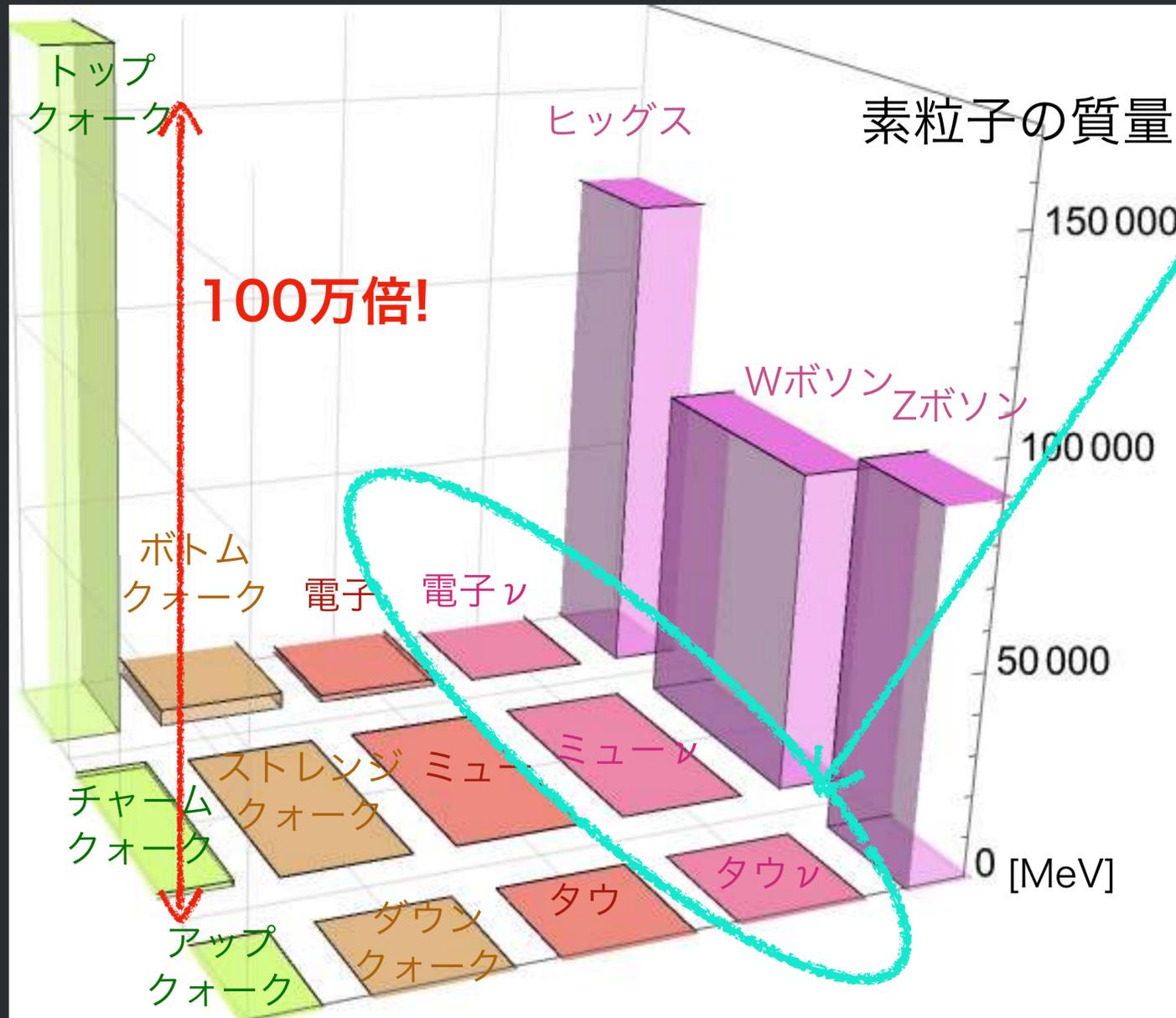
じゃあ電荷が1/700とか無限小数の粒子もある？

素朴な疑問に意外と答えられない

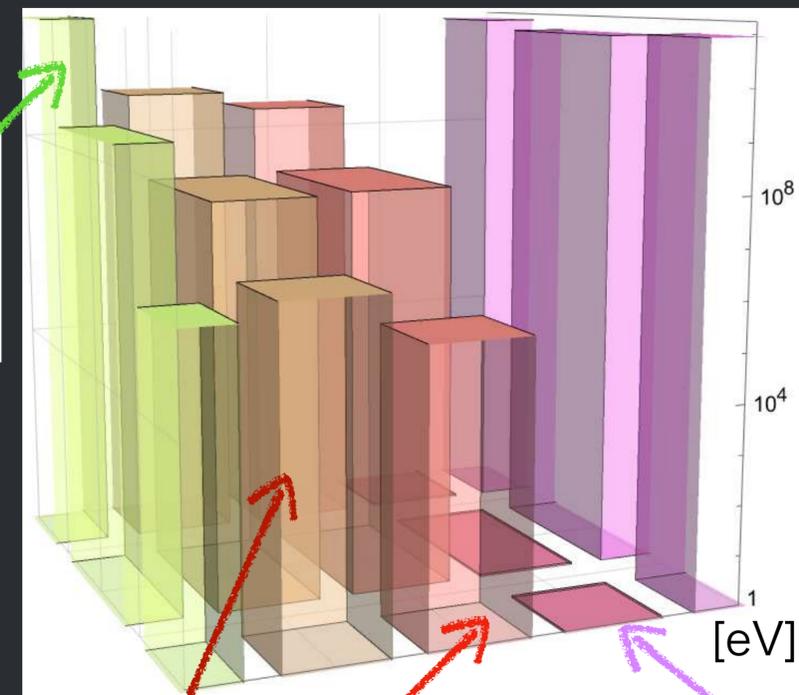
質量の謎

- 素粒子の質量に劇的な差がある

特にニュートリノ



トップクォーク
172 GeV
(=10¹¹eV)



桁違いに軽い!
標準模型では質量ゼロ

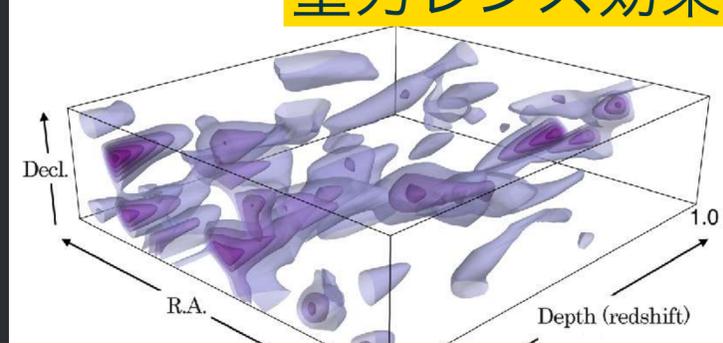
宇宙の暗黒物質(DM)

広いスケールで証拠
確からしい

重力レンズ効果



重力レンズ効果

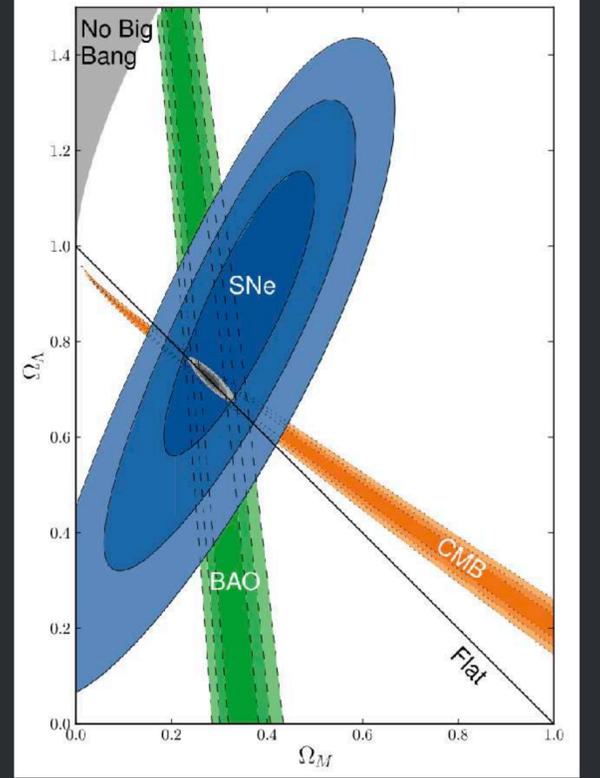


標準モデルでは正体が説明できない

Univ. of Tokyo/NAOJ

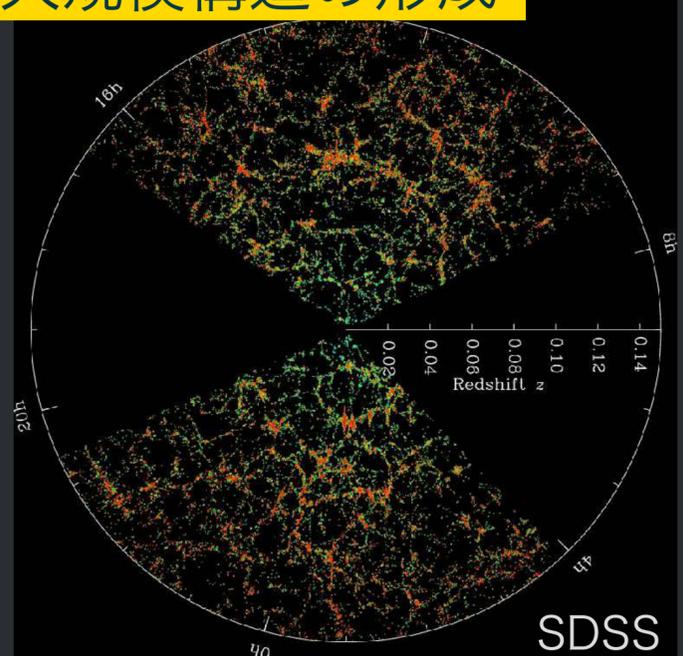
galaxy cluster ZwCl0024+1652
NASA, ESA, M.J. Jee and H. Ford

超新星+宇宙背景放射
+バリオン音響振動



Supernovae Cosmology Project
Amanullah et al., 1004.1711

大規模構造の形成

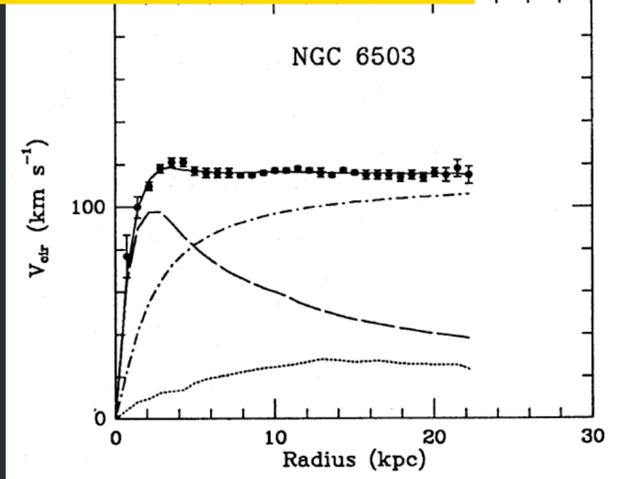


弾丸銀河団の銀河団の衝突



X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al.; Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.; Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.

銀河の回転曲線

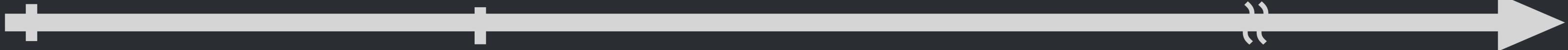


Begeman, Broeils, Sanders (1991)

1 kpc

1 Mpc

>0(10)Mpc



標準模型で説明しきれないこと

- ニュートリノの質量
- 宇宙の暗黒物質
- 宇宙のダークエネルギー
- ミュー粒子の異常磁気能率
- ...

ぜったい説明が
必要

- ▶ 素粒子の質量差
- ▶ 特定の電荷の粒子
- ▶ 物質生成の謎
- ▶ 力の/物質の統一
- ▶ ...

そういうものなのかもね
深く考えるのはやめよう
(実際はそういうことが本質)



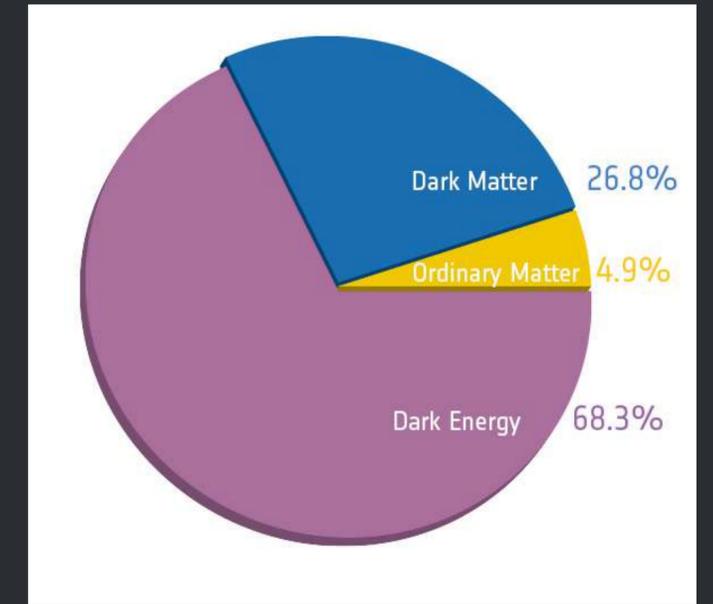
標準模型は実験とよく合う良い理論だけど、
ニュートリノや暗黒物質を説明できる
改良版の素粒子理論があるはず。

目次

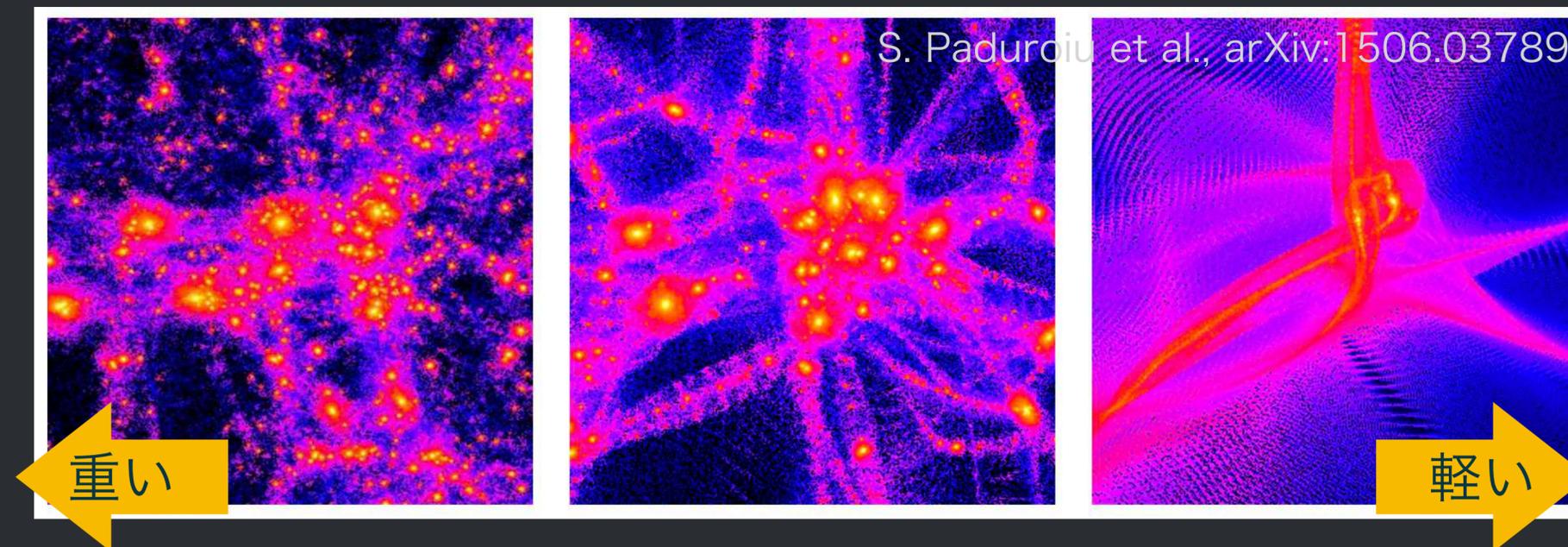
1. DMがなぜ重要なのか？
2. DMはなぜ検出できないのか？
3. 加速されたDM
 - i. 対消滅によって加速されたDM
 - ii. 宇宙線によって加速されたDM
4. まとめ

DMの性質

- 重力相互作用
- 光らない=電気的中性
- 宇宙のエネルギー密度の27%; $\Omega_{\chi}h^2 = 0.12 \rightarrow$ 安定
- 構造形成時に”冷たい” (非相対論的)



credit: PLANCK



4D2U

いろいろなDMの候補

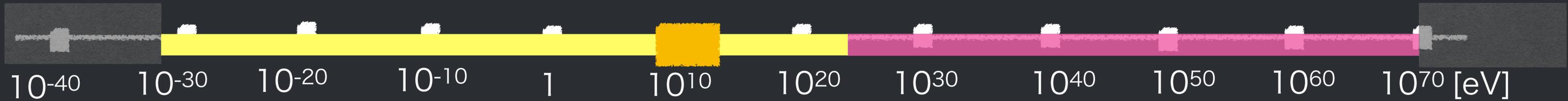
素粒子的なDM候補

天体的なDM候補

DM質量

wave-like ←→ particle-like

原始ブラックホール, 褐色矮星, 白色矮星, ...



波長が長すぎて
大規模構造を再
現できない

アクシオン(的粒子)

ダークフォトン

1 GeV →

Lee-Weinberg 限界 (弱い相互作用)

100 eV →

Tremaine-Gunn 限界 (フェルミオン)

1 eV →

Lyman- α forest データ (熱的な温かいDM)

原始ブラックホール
の周りのガス降着が
CMBに影響

原始ブラックホール(PBH)

- 宇宙初期にできた可能性があるブラックホール

$$M_{PBH} \sim M_H \sim 10^{15} \text{ g} \left(\frac{t}{10^{-23} \text{ s}} \right)$$

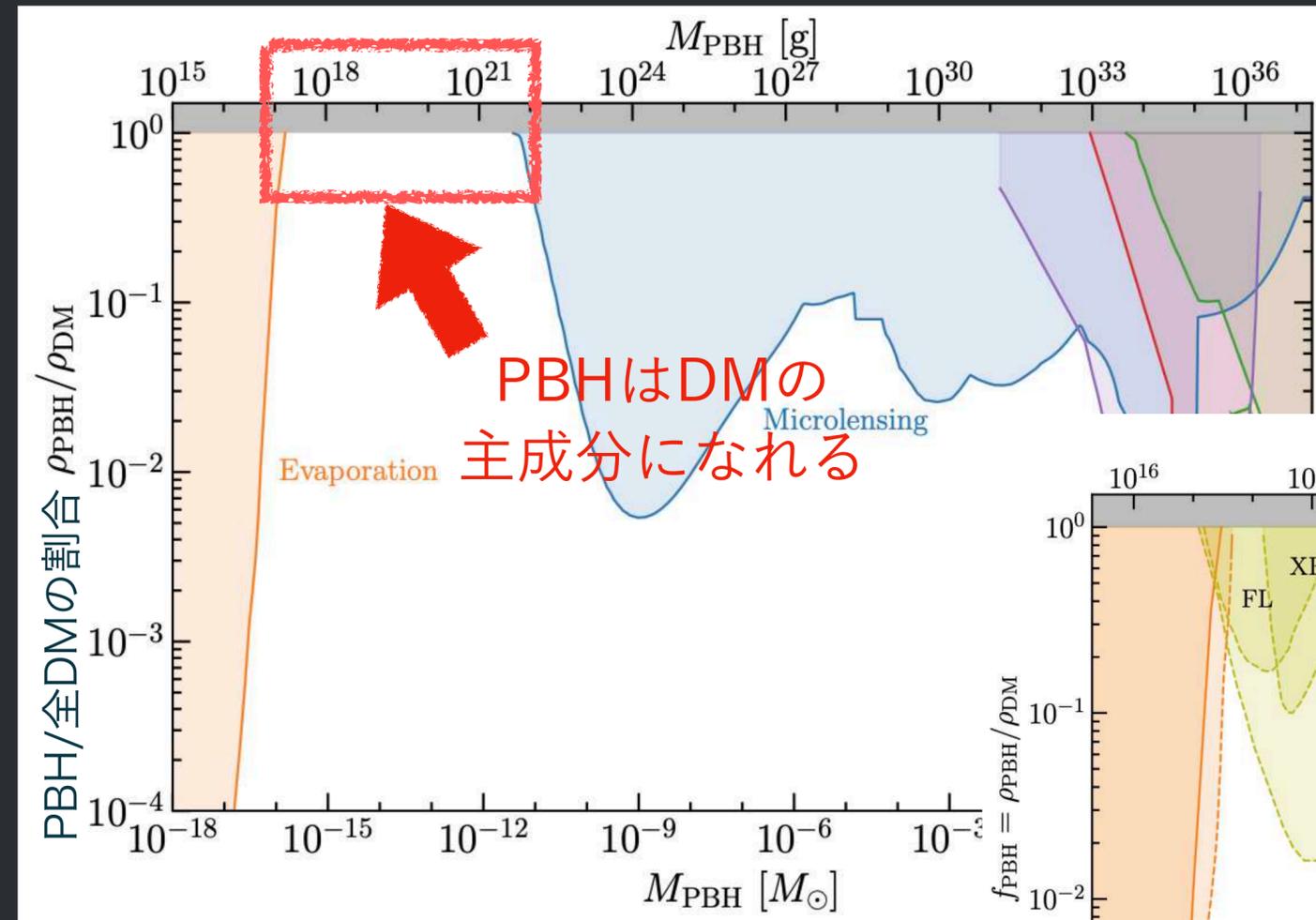
- DMの条件を満たす

- 光らない

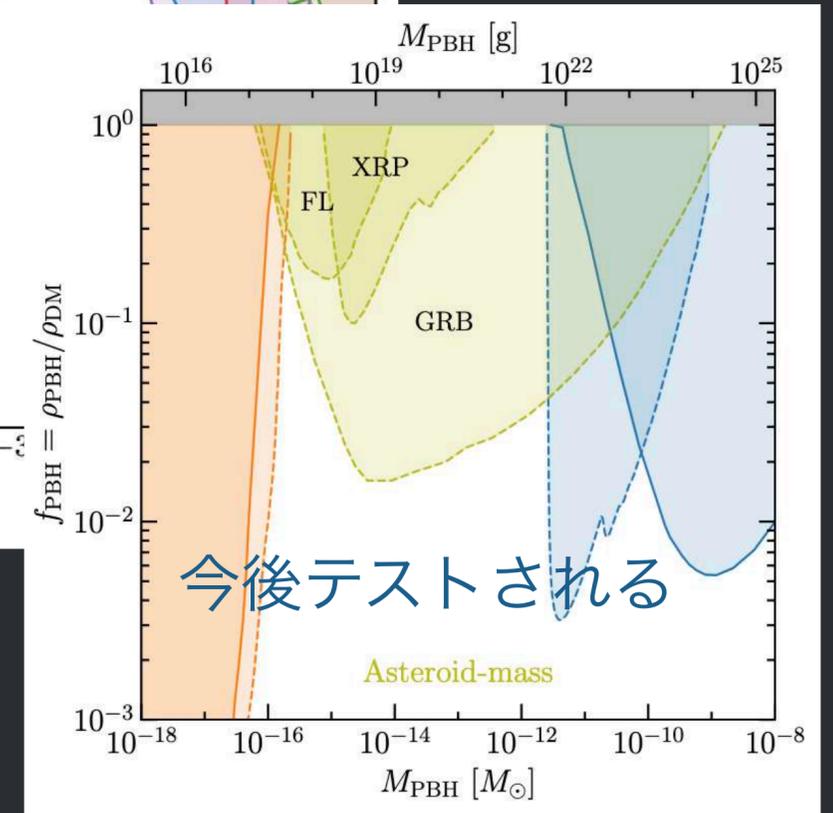
- 質量 $> 10^{15} \text{ g}$ で安定

- 冷たい

S.W. Hawking,
Commun.Math.Phys. 43 (1975)



A. M. Green, arXiv:2402.15211



アクシオン・アクシオンの粒子

- 強いCP問題

- 量子色力学 (QCD) で、必然性がないのにCP対称性があるようにみえる。自然さの問題。

中性子の電気双極子モーメント : $d_n \approx 2.4 \times 10^{-15} \bar{\theta} e [\text{cm}] < 3.0 \times 10^{-26} e [\text{cm}]$

$\rightarrow \bar{\theta} < 10^{-10}$ なぜこんなに小さい?

M. Pospelov, A. Ritz, Nucl.Phys. B573 (2000)

- 解決策の一例 \Rightarrow Peccei-Quinn 機構

R. Peccei, H. Quinn, Phys. Rev. Lett. **38**, 1440 (1977)

- Peccei-Quinn 機構

- グローバル対称性 $U(1)_{PQ}$ が自発的に破れ、擬南部 - ゴールドストーン粒子 a が導入される

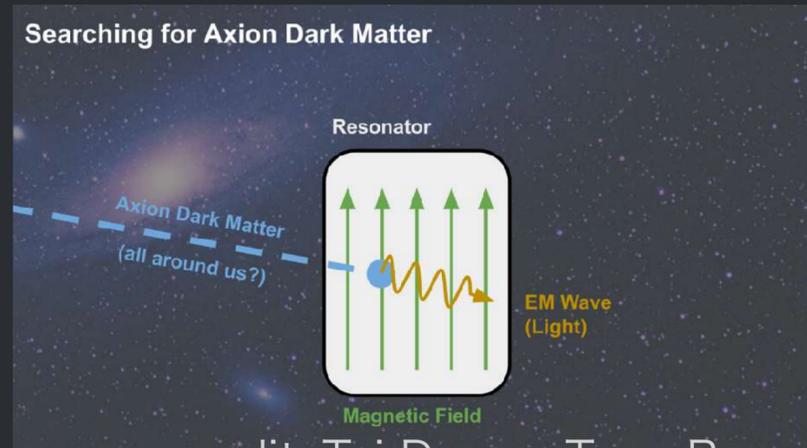
$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \partial_\mu a \partial^\mu a + \frac{a}{f_a} \frac{g_S^2}{32\pi^2} G_{\mu\nu} \tilde{G}^{\mu\nu} + \frac{g_{a\gamma\gamma}}{4} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} + \dots$$

光と弱く相互作用する

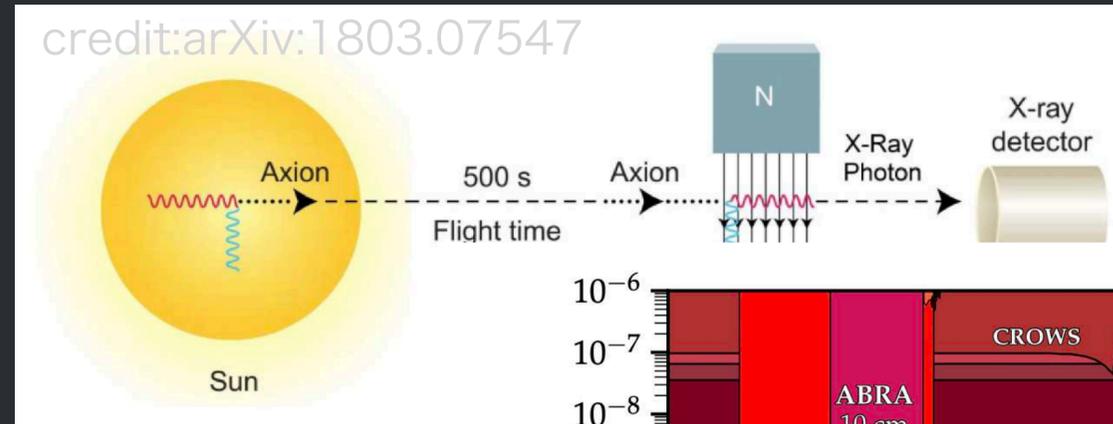
擬スカラー粒子

アクシオン・アクシオンの粒の探索

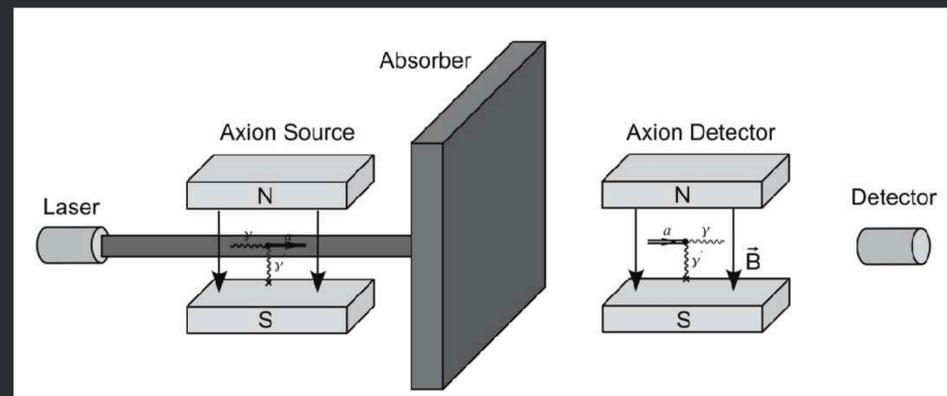
- 宇宙や太陽から来るアクシオンを磁場をかけて検出



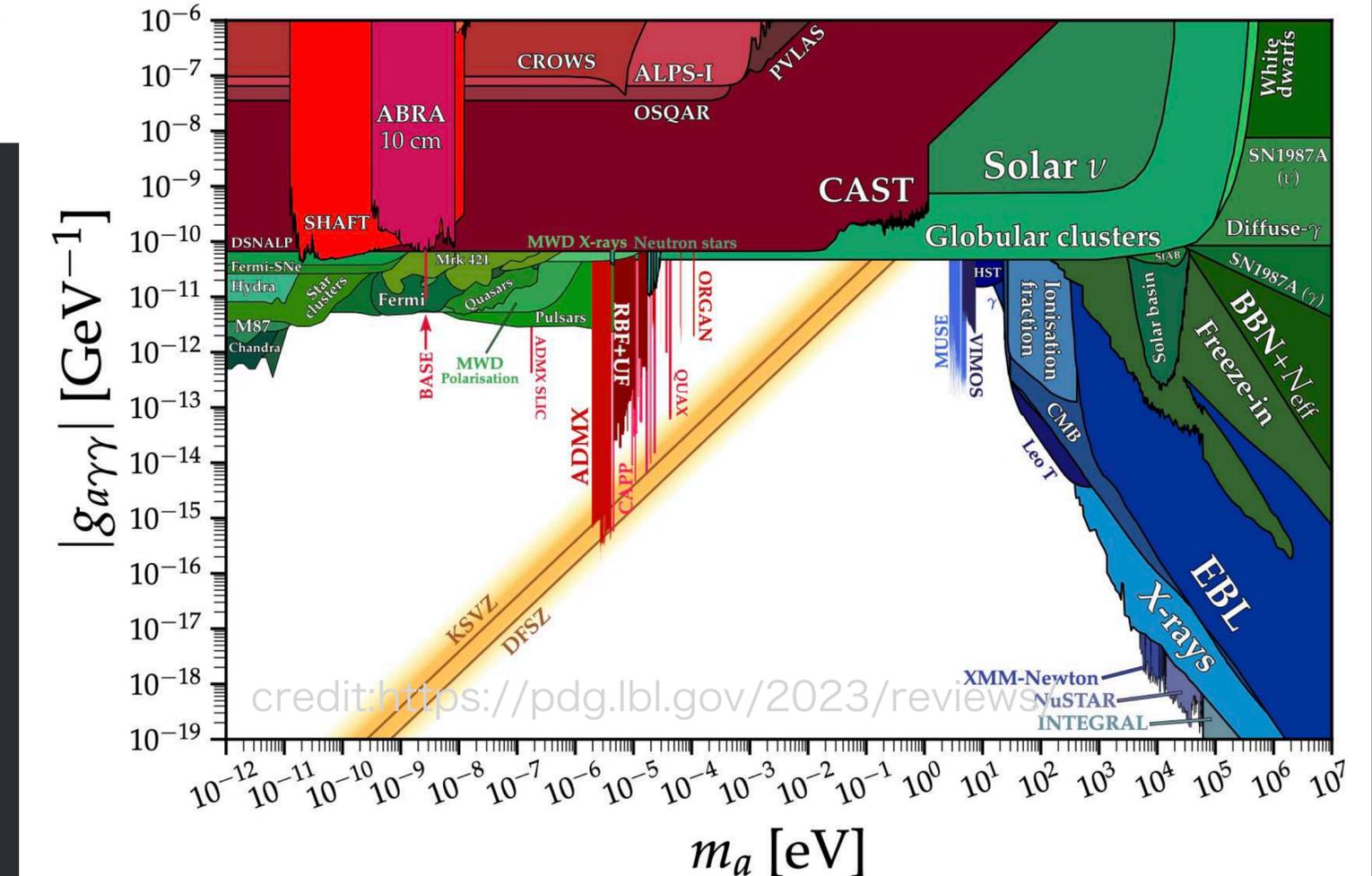
credit: Taj Dyson, Tony Rowell



- 人工的にアクシオンを生成



R. Battesti et al., Lecture Notes in Physics



WIMP

- Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs)

- 弱い相互作用
 - 重い: $m_{\text{DM}} = O(1) - O(10^3) \text{ GeV}$
 - 残存量が観測と自然に一致して嬉しい
- } いわゆる”電弱スケール”

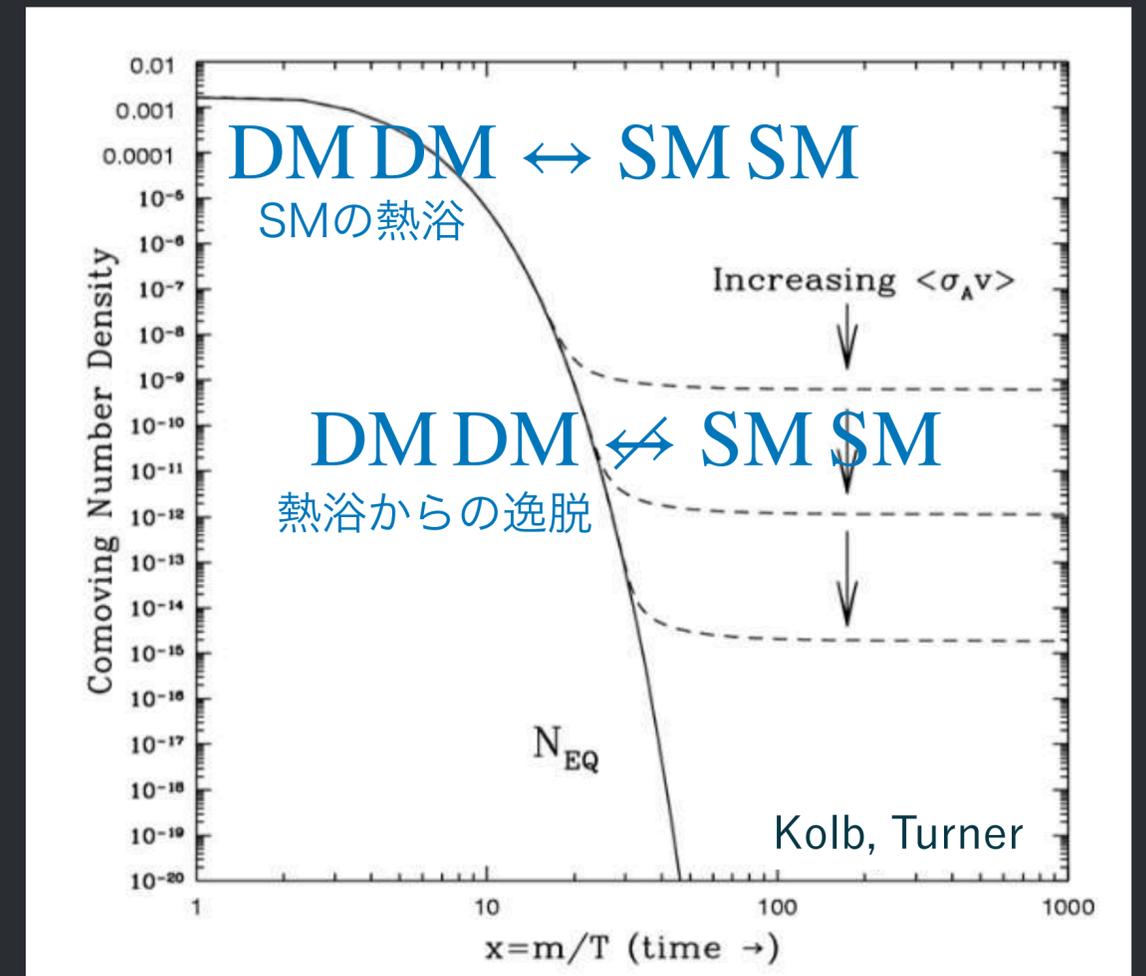
観測

$$\Omega_\chi h^2 = \frac{\rho_{\text{DM}}}{\rho_{\text{cr}}} h^2 \simeq 0.1$$

理論(熱的生成)

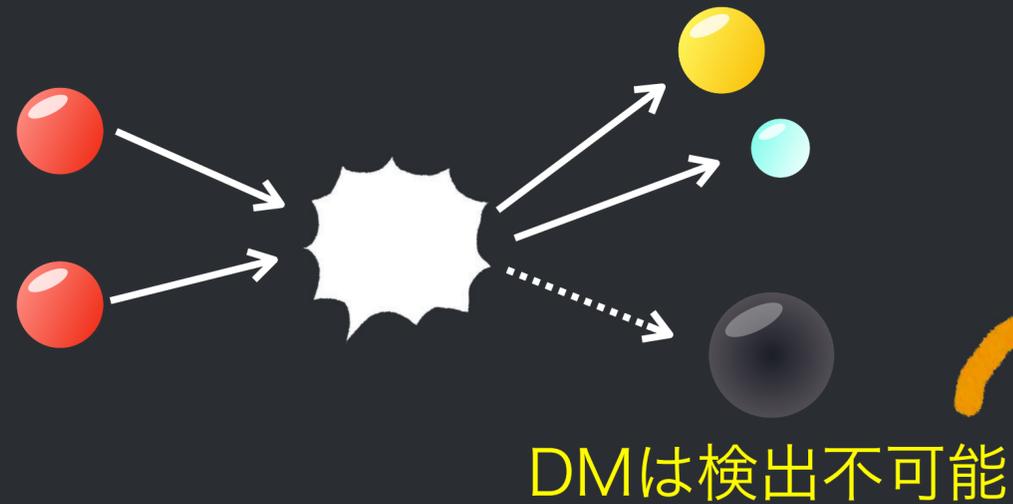
$$\Omega_\chi h^2 \simeq 0.1 \left(\frac{10^{-36} \text{ cm}^2}{\langle \sigma_{\text{ann.}} v \rangle} \right) \text{電弱スケールの相互作用と質量から自然に出る}$$

$$\sigma_{\text{ann.}} v \simeq \frac{g_{\text{weak}}^4}{16\pi^2 m_\chi^2} \simeq 10^{-36} \left(\frac{100 \text{ GeV} - 1 \text{ TeV}}{m_\chi} \right)^2 \text{ cm}^2$$



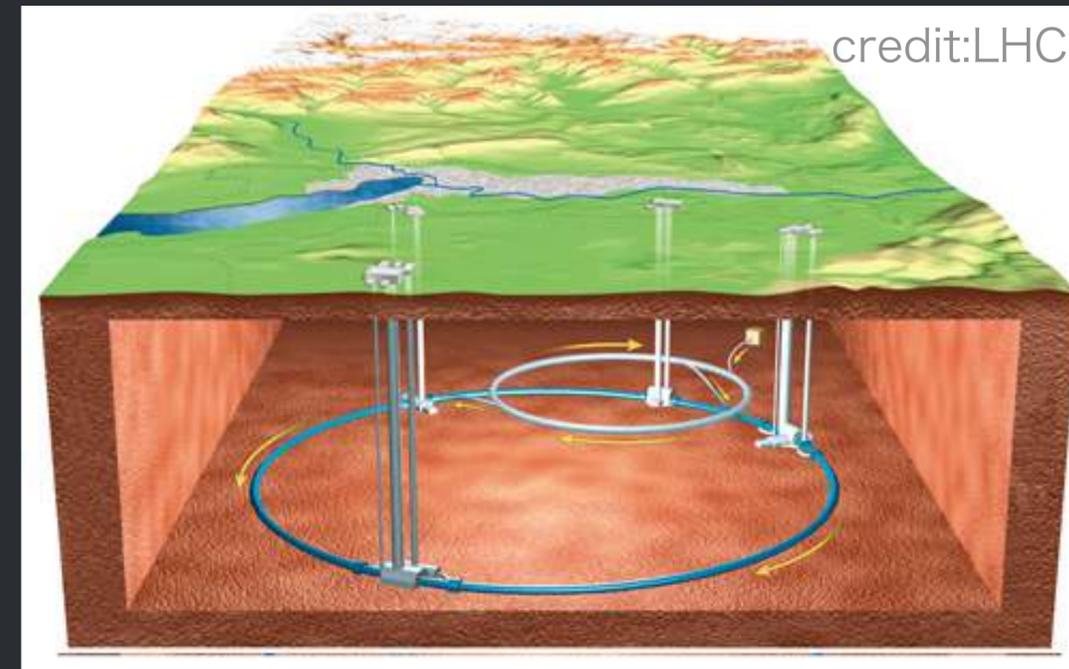
探す①：粒子加速器実験

- 粒子同士の衝突で新粒子が生まれることがある
 - DMが終状態に含まれると



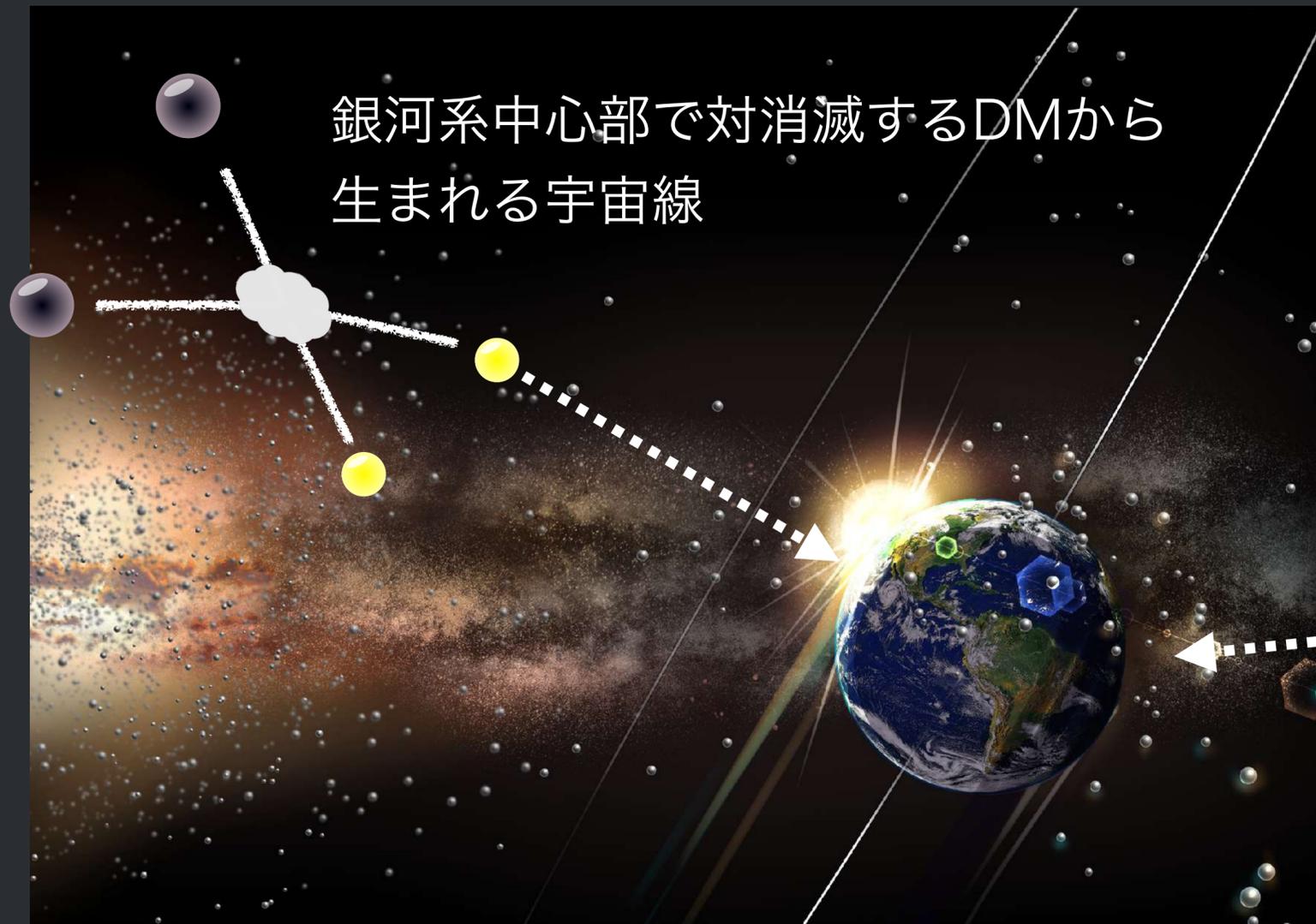
DMがあると
エネルギーや運動量が保存しない

- LHC(大型ハドロン衝突型加速器)
 - 13.6TeVのエネルギーで陽子同士が衝突

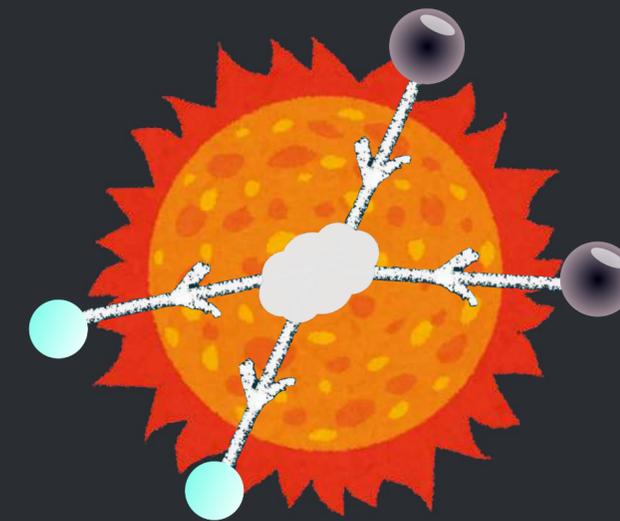


探す②：DMから生じる宇宙線を調べる

- DMの間接検出実験

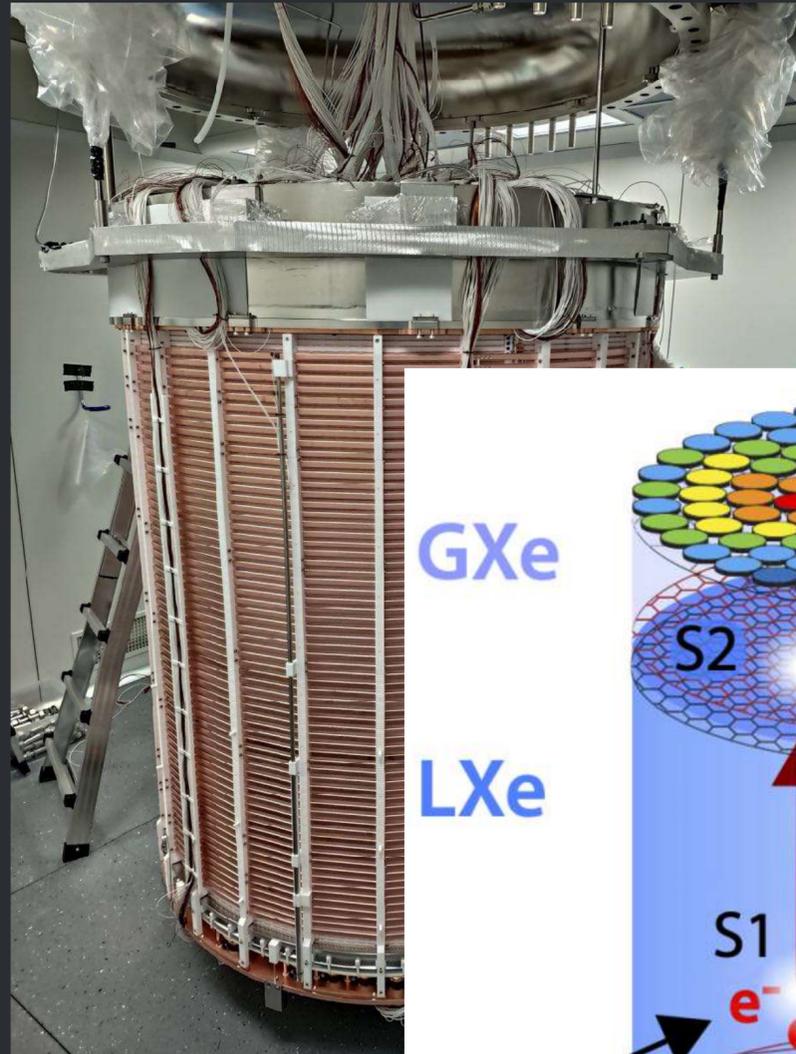


- 太陽中心で対消滅するDMから生まれる宇宙線

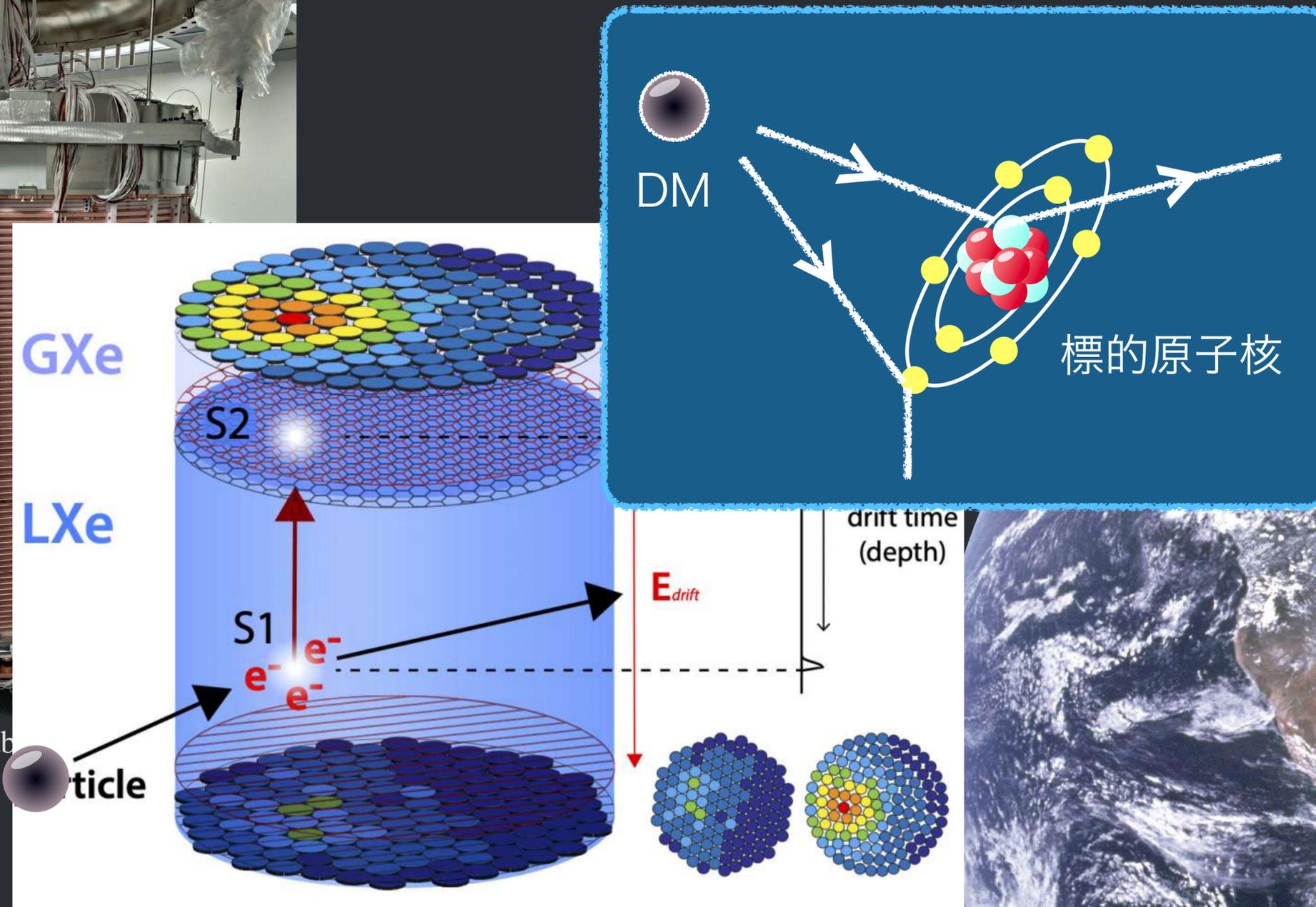


探す③：宇宙からやってくるWIMPを捕まえる

- DMの直接検出実験

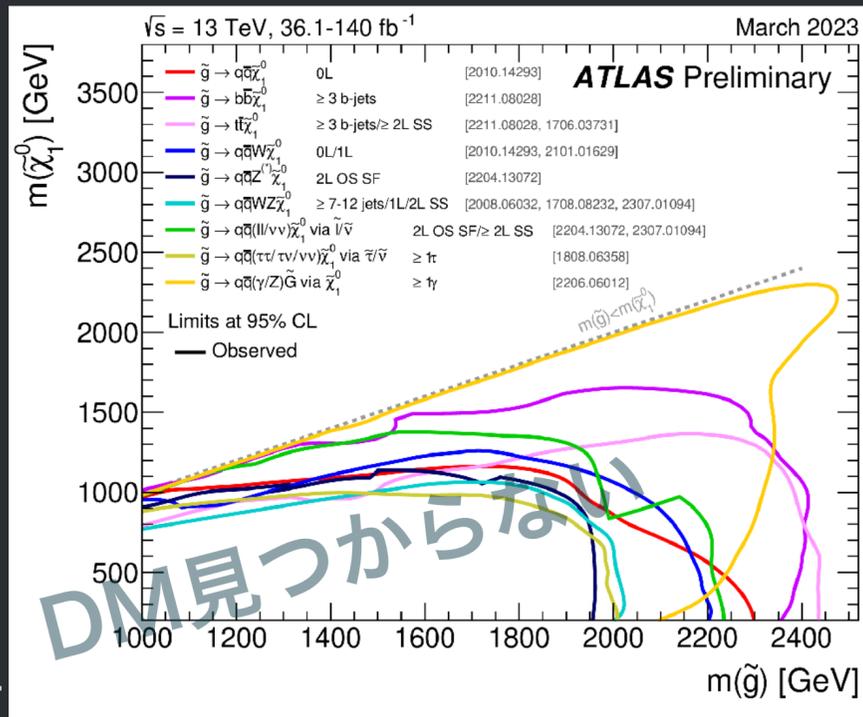
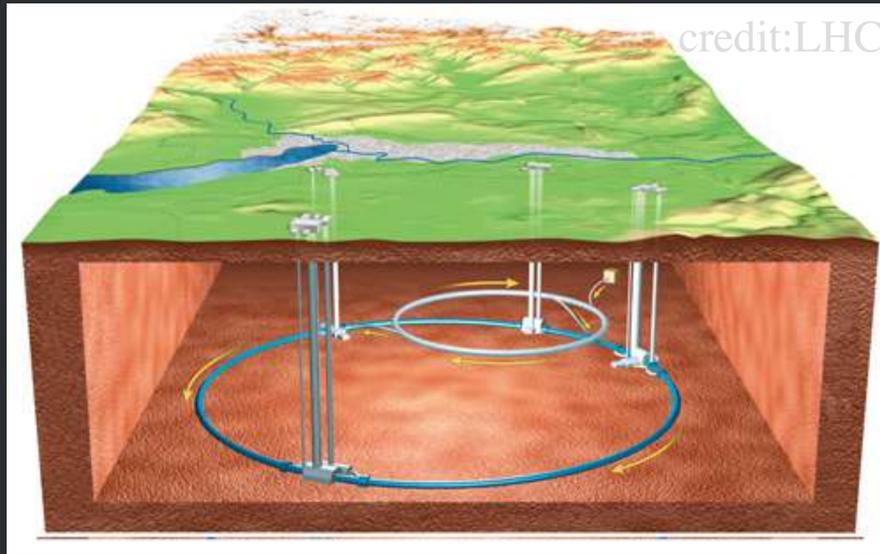


credit: XENON collab



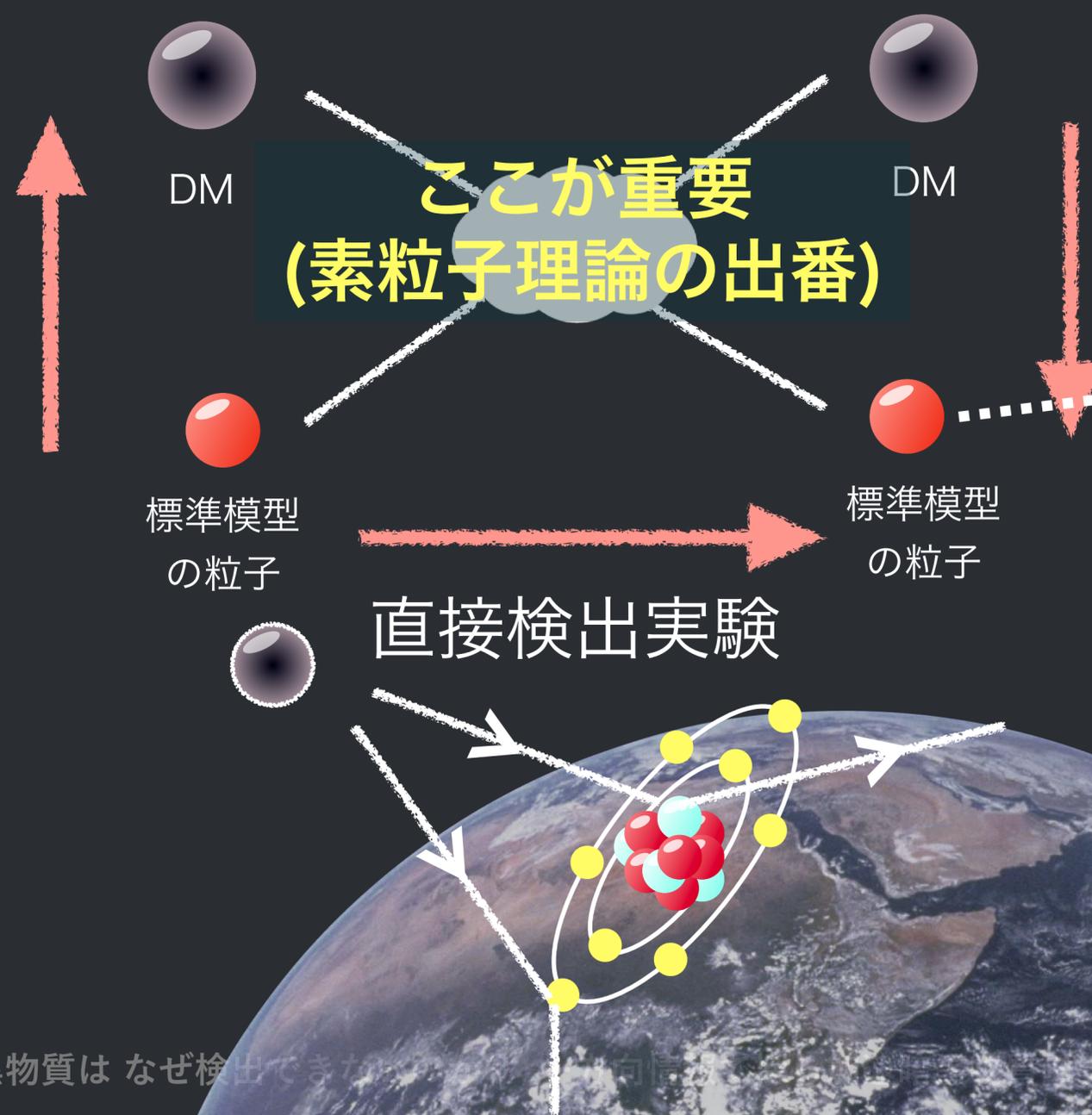
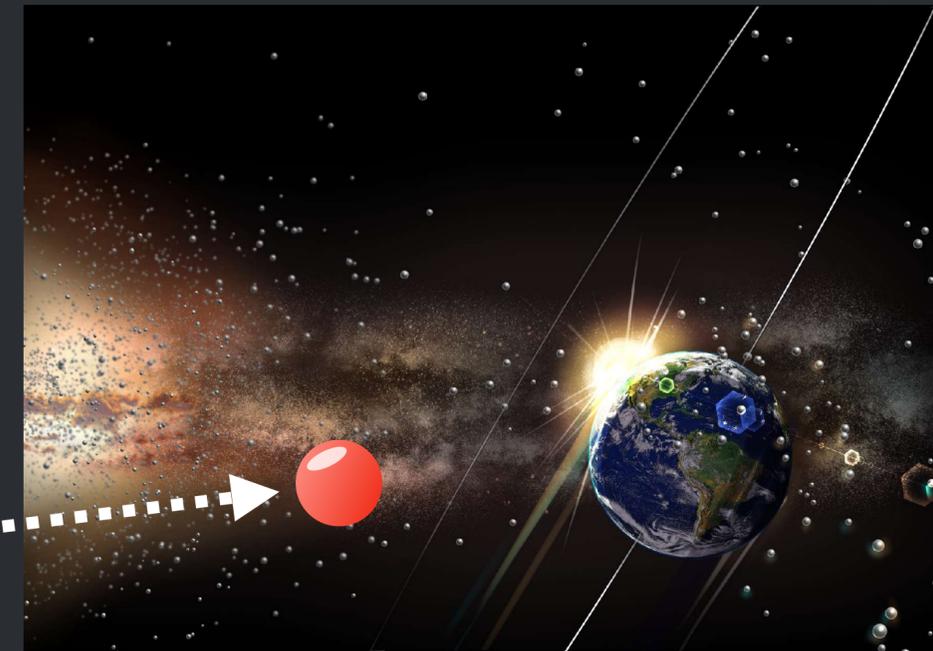
WIMPを捉えたい

加速器実験

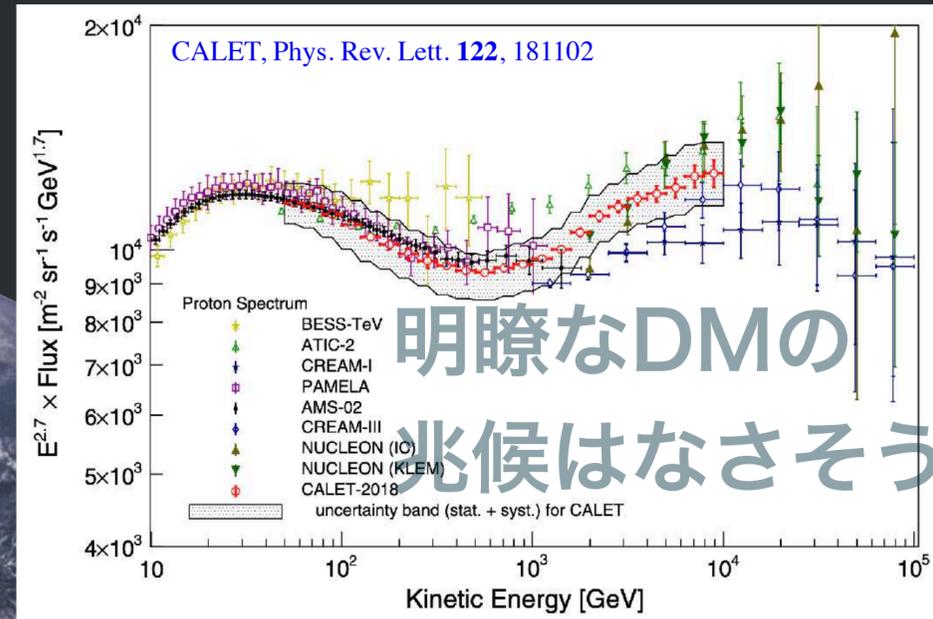


- ▶ DMと標準模型の粒子にどんな力が働く？
- ▶ 標準模型のどの粒子と相互作用する？

間接検出実験

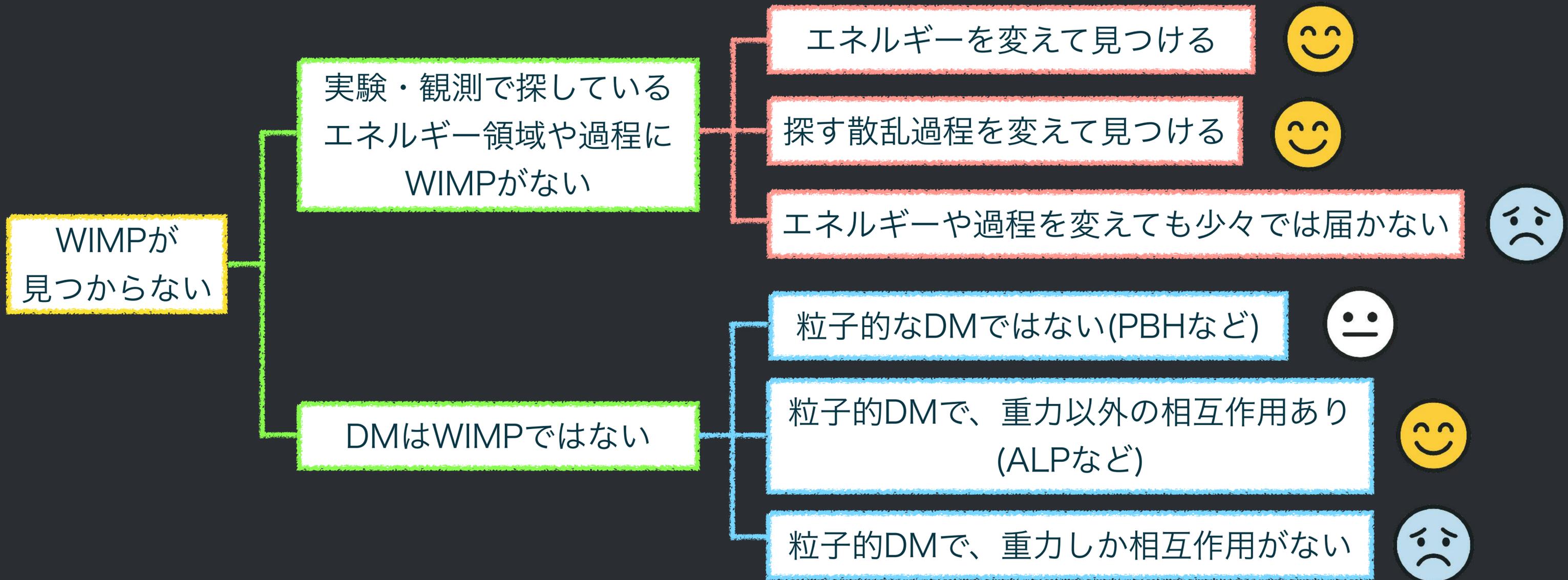


直接検出実験



明瞭なDMの兆候はなさそう

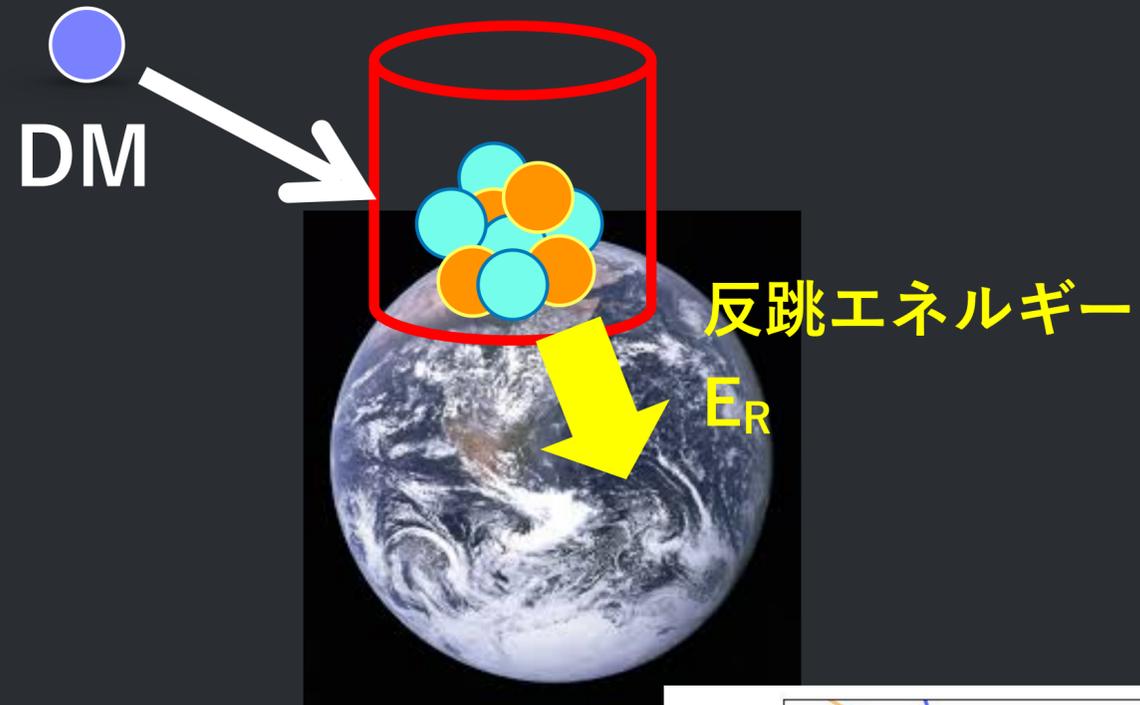
WIMPはなぜ見つからないのか？



WIMPの直接検出

M. W. Goodman, E. Witten, Phys.Rev.D 31 (1985) 3059

- DM-標的原子核(電子)反跳で検出
- イベント率 R [events/kg/day]

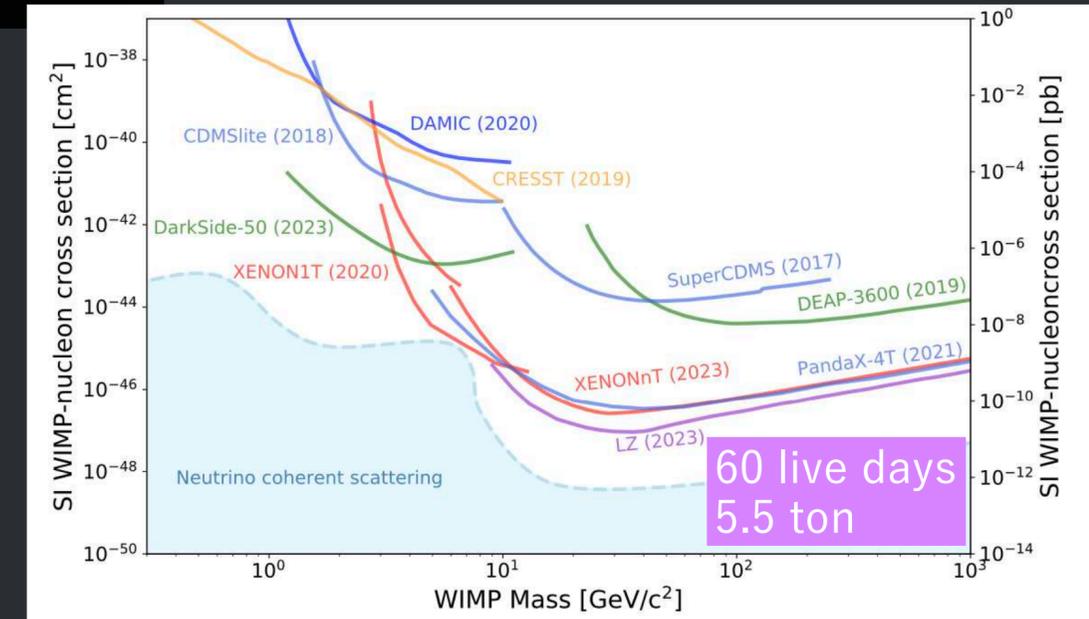


$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{\rho_{DM}}{m_N m_{DM}} \int_{v_{min}} dv f(v) v \frac{d\sigma_{\chi N}(v)}{dE_R}$$

Labels for the equation components:

- ρ_{DM} : 太陽系近傍のDM密度 (Local DM density)
- m_N : 原子核質量 (Nucleon mass)
- m_{DM} : DM質量 (DM mass)
- $f(v)$: DMの速度分布 (DM velocity distribution)
- v : DMの速度 (DM velocity)
- $d\sigma_{\chi N}(v)/dE_R$: DMと原子核の散乱断面積 (DM-nucleon scattering cross-section)
- E_R : 反跳エネルギー (Recoil energy)

- 検出器のエネルギーしきい値 E_R^{thr} を下げる
- 標的原子核数を増やす
- 時間をかける

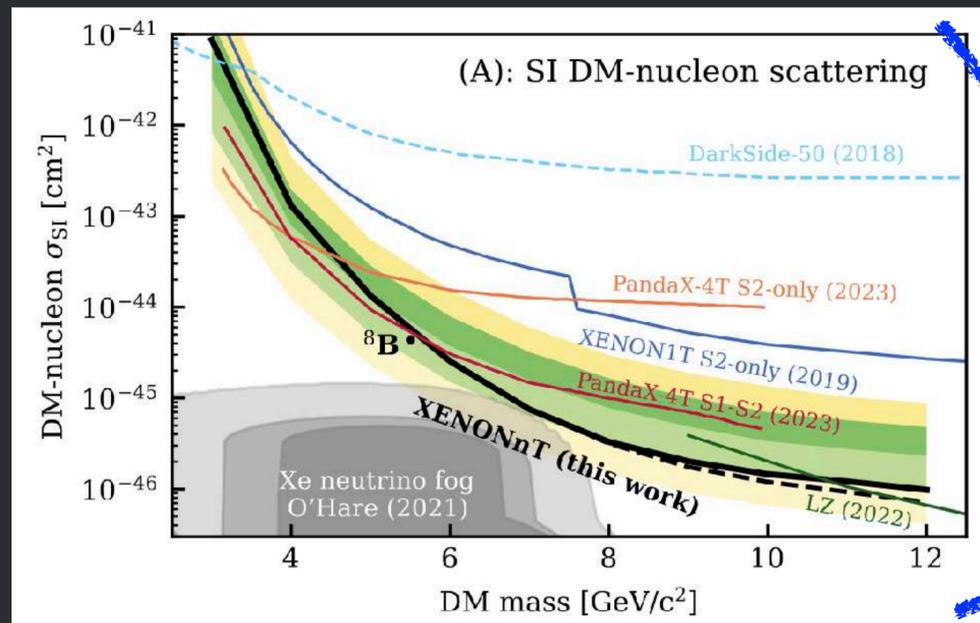


L. Baudis, S. Profumo (2024 PDG review)

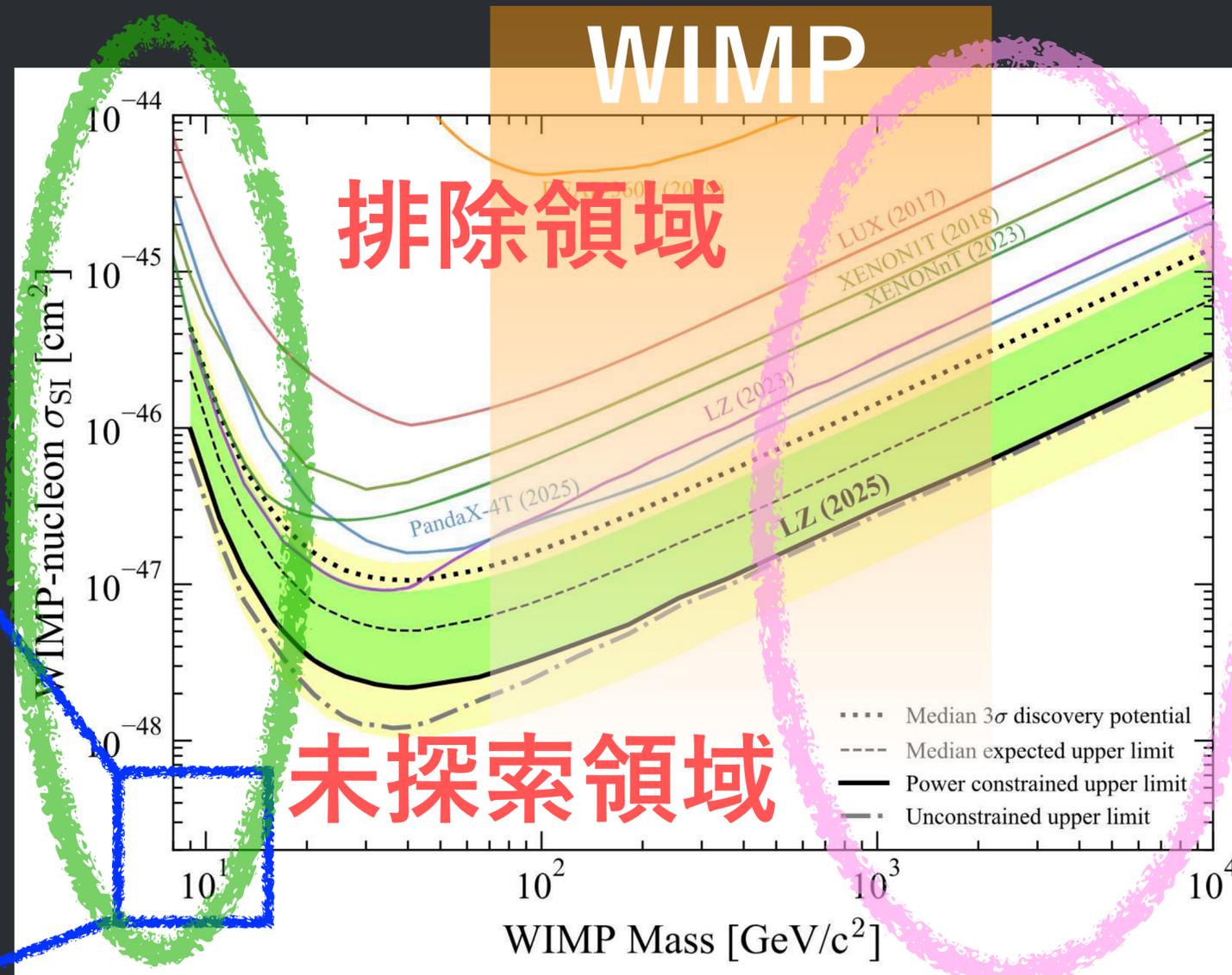
直接検出実験の近況

- $m_{\text{DM}} < O(1)\text{GeV}$

運動エネルギー $\frac{1}{2}m_{\text{DM}}v_{\text{DM}}^2 \ll$
 検出のエネルギーしきい値 E^{thr}



XENONnT, arXiv:2409.17868



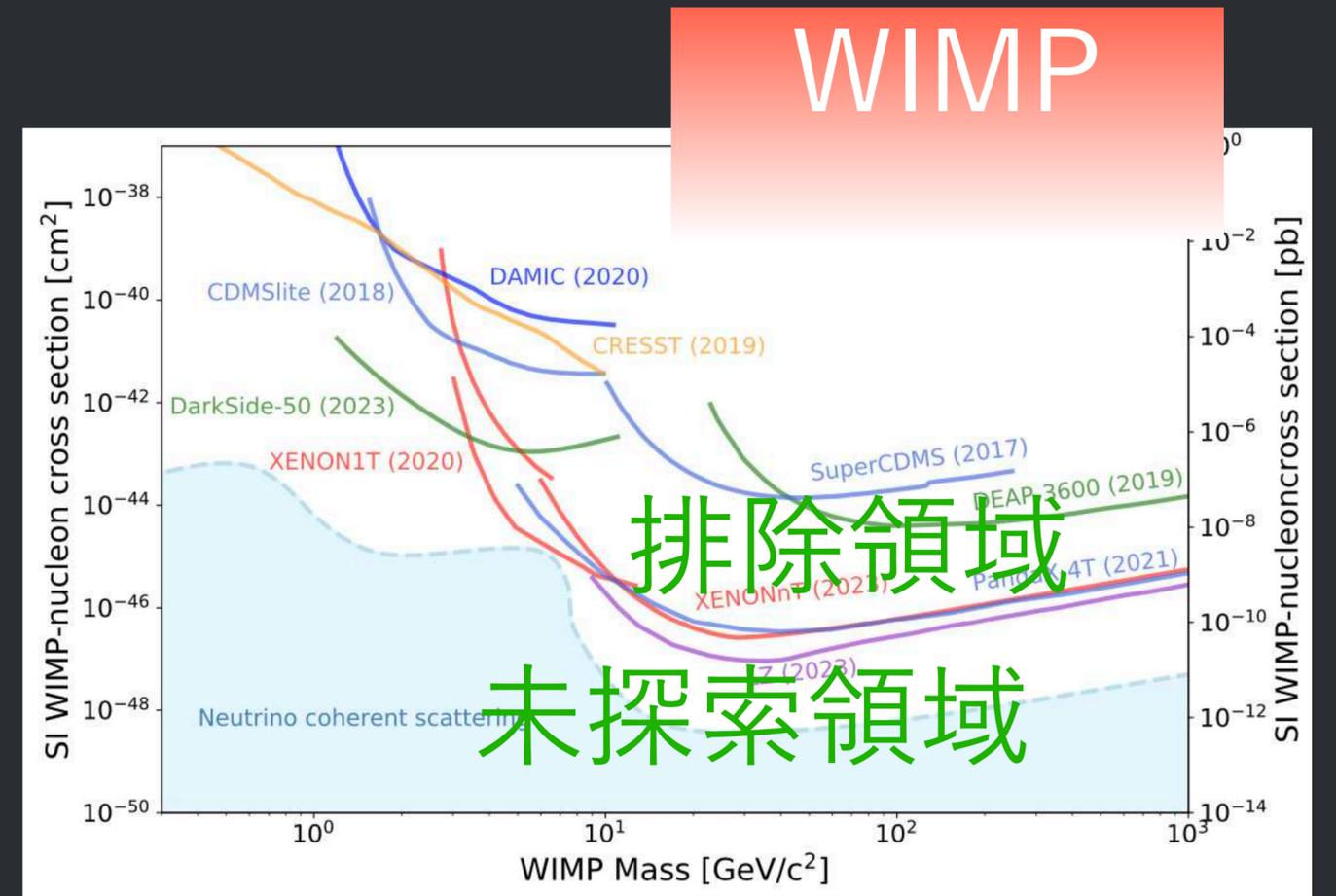
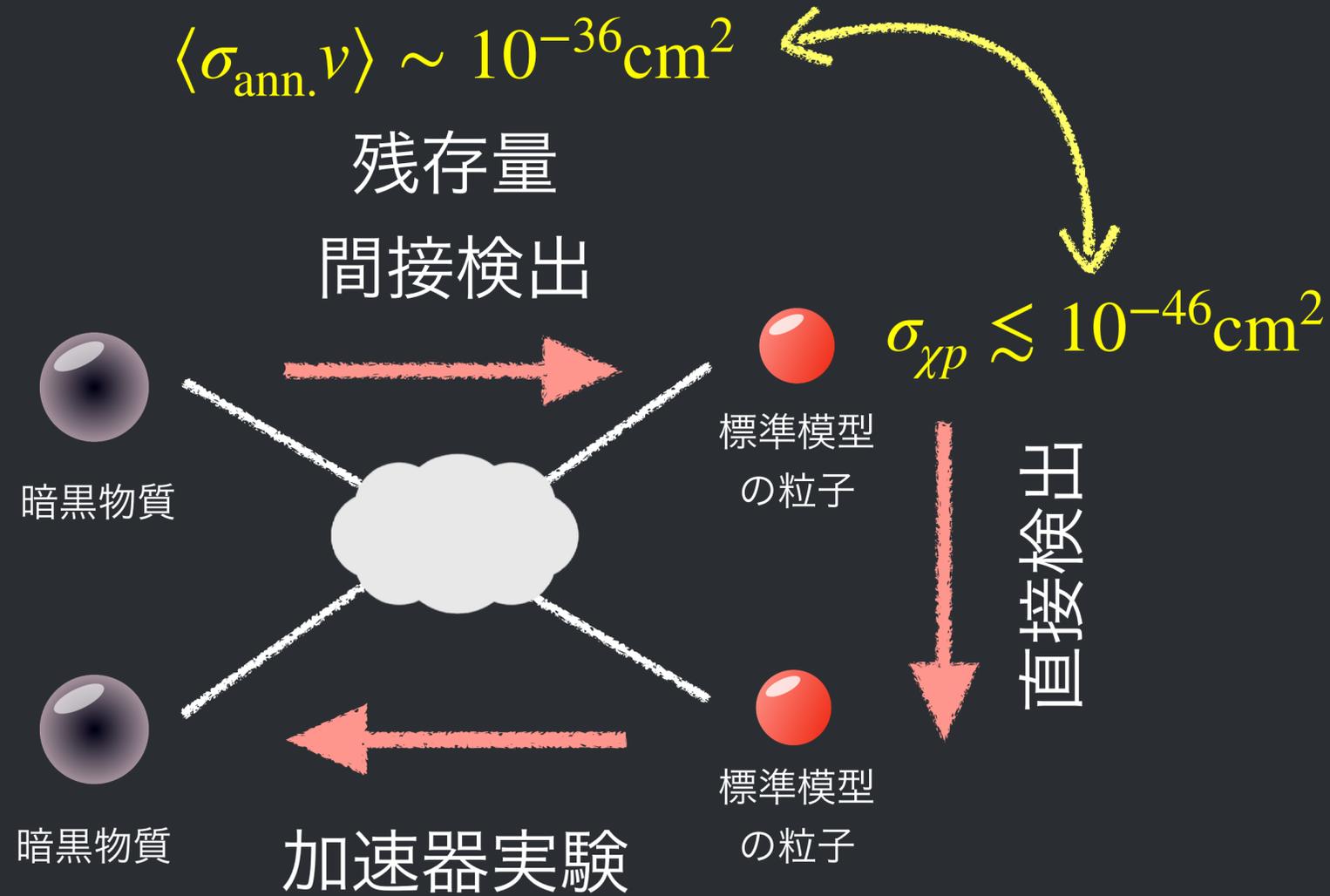
LZ, Phys. Rev. Lett. 135, 011802

- $0(1)\text{TeV} < m_{\text{DM}}$

$m_{\text{DM}}n_{\text{DM}} = \text{定数}$
 $\Rightarrow n_{\text{DM}} \propto 1/m_{\text{DM}}$

重いDM \Rightarrow 低数密度
 たくさんのイベント数は期待できない。

WIMP領域への制限

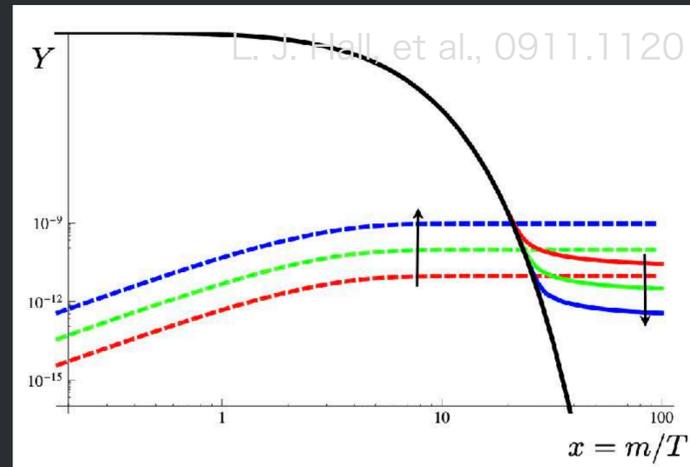


L. Baudis, S. Profumo (2024 PDG review)

「WIMP+熱的生成」からのバリエーションの一例

- 非熱的生成

- e.g. freeze-in mechanism



J McDonald,
hep-ph/0106249
L. J. Hall, et al.,
arXiv:0911.1120

- DM-SMの直接の相互作用を切る

- e.g. Secluded DM

M. Pospelov, A. Ritz, M. B. Voloshin, arXiv:0711.4866



- 直接検出の散乱抑制ギミック

- fermion DM + pseudo scalar portal

$$\begin{array}{ccc}
 \psi_\chi & \xrightarrow{\gamma_5} & \psi_\chi \\
 & \vdots & \\
 & a & \\
 & \vdots & \\
 N & \xrightarrow{\quad} & N
 \end{array}
 \sim \mathbf{q} \cdot \boldsymbol{\sigma} \rightarrow 0 \quad (q \rightarrow 0)$$

S. Ipek, D. McKeen and A. E. Nelson, arXiv:1404.3716
M. Escudero et al., [arXiv:1609.09079
T. Abe, M. Fujiwara, J. Hisano, arXiv:1810.01039

- pseudo Nambu-Goldstone DM

$$\begin{array}{ccc}
 \chi & \xrightarrow{\quad} & \chi \\
 & \vdots & \\
 & h_1, h_2 & \\
 & \vdots & \\
 N & \xrightarrow{\quad} & N
 \end{array}
 \sim i \left(\frac{m_{h_1}^2}{q^2 - m_{h_1}^2} - \frac{m_{h_2}^2}{q^2 - m_{h_2}^2} \right) \rightarrow 0$$

$(q \rightarrow 0)$

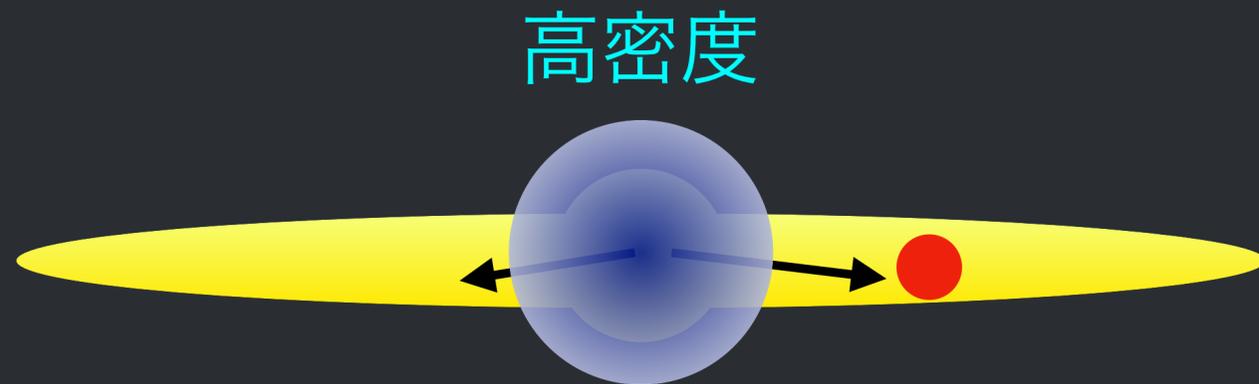
C. Gross, O. Lebedev, T. Toma, arXiv:1708.02253
Y. Abe, T. Toma, K. Tsumura, arXiv:2001.03954
D. Azevedo et al., arXiv:1810.06105, K. Ishiwata, T. Toma, arXiv:1810.08139,
..., T. Abe, Y. Hamada, K. Tsumura, arXiv:2401.02397, ...

$(m_{h_1}^2 - m_{h_2}^2 \rightarrow 0)$ S. Abe, G.-C. Cho, K. Mawatari, arXiv:2101.04887
G.-C. Cho, C. Idegawa, E. Senaha, arXiv:2105.11830, arXiv:2205.12046
G.-C. Cho, C. Idegawa, R. Sugihara, arXiv:2212.13029

GeV質量より軽いのでは？

- 加速されたDM

運動エネルギー $\frac{1}{2}m_{\text{DM}}v^2$ が大きければ
軽いDMも検出可能



加速されたDMは、銀河系の中心から来る。方向がわかっている。

- 加速機構

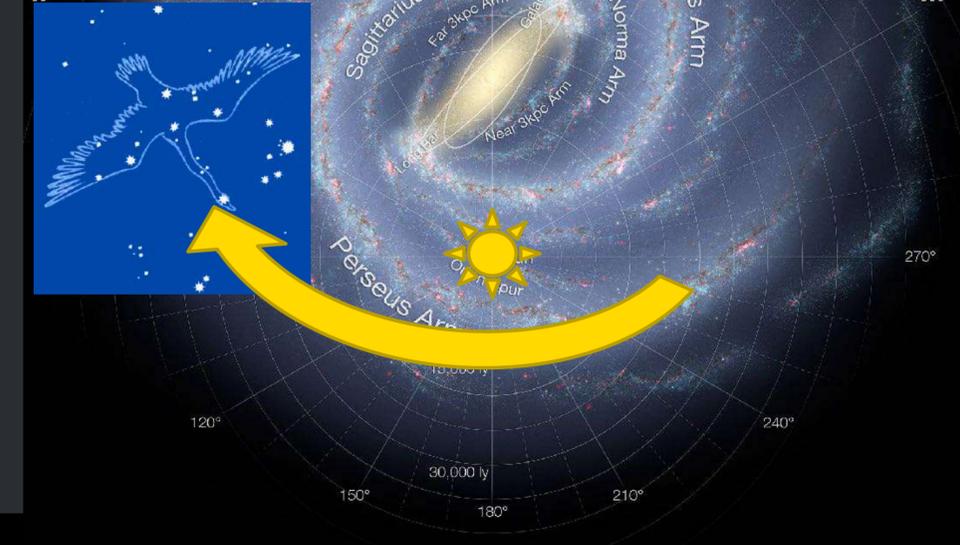
宇宙線による散乱
Y. Ema, F. Sala, R. Sato 1811.00520
T. Bringmann et al. 1810.10543

対消滅
K. Agashe et al. 1405.7370
J. Berger et al. 1410.2246

崩壊
Bhattacharya et al. 1407.3280
J. Kopp et al. 1503.02669

方向感度をもつ直接検出実験

Credit: NASA/JPL-Caltech/ESO/R. Hurt



- 方向がわかるとなにか嬉しい？
 - 効率的にノイズ除去ができる



DMの風ははくちょう座の方向から来る

方向感度をもつ直接検出

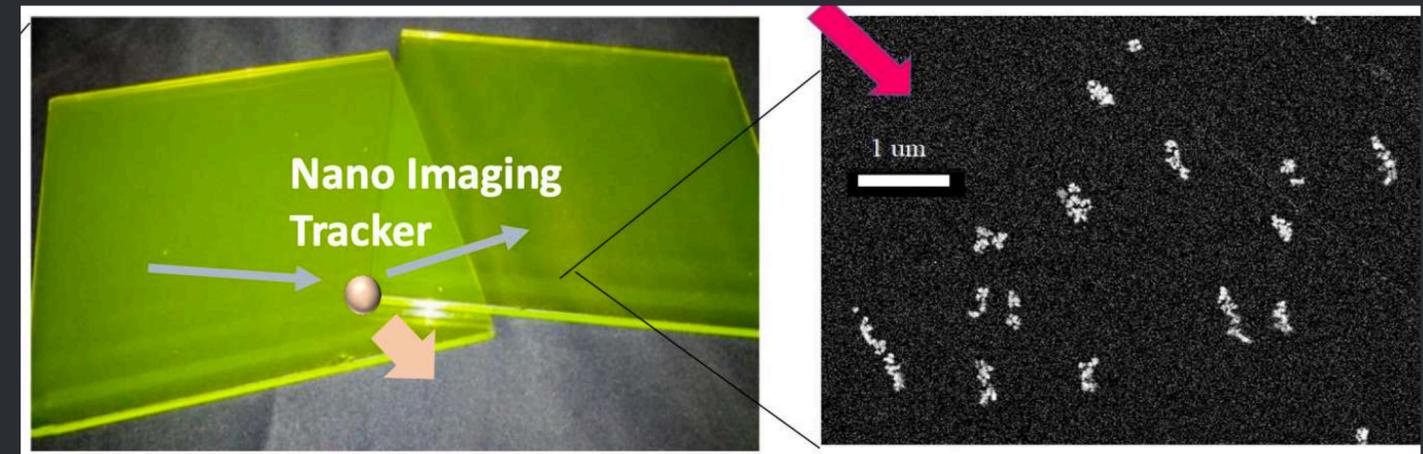
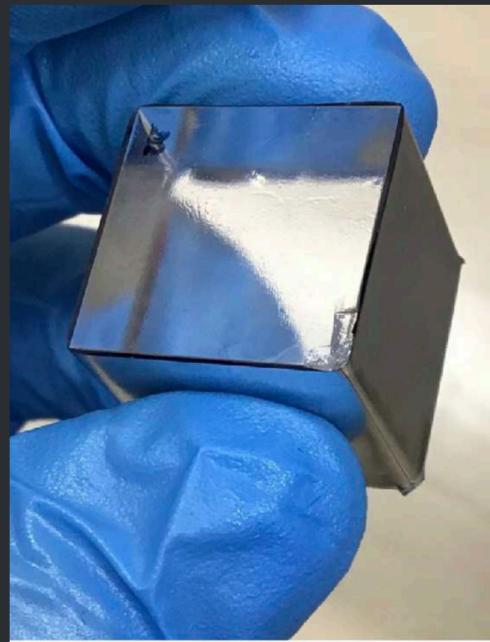
✓ ガスTPC (Time Projection Chamber)

- DRIFT / CYGNUS-UK
- NEWAGE / CYGNUS-KM
- CYGNUS-Oz
- CYGNO-LIME, CYGNO-04
- CYGNUS Hawaii
- MIMAC

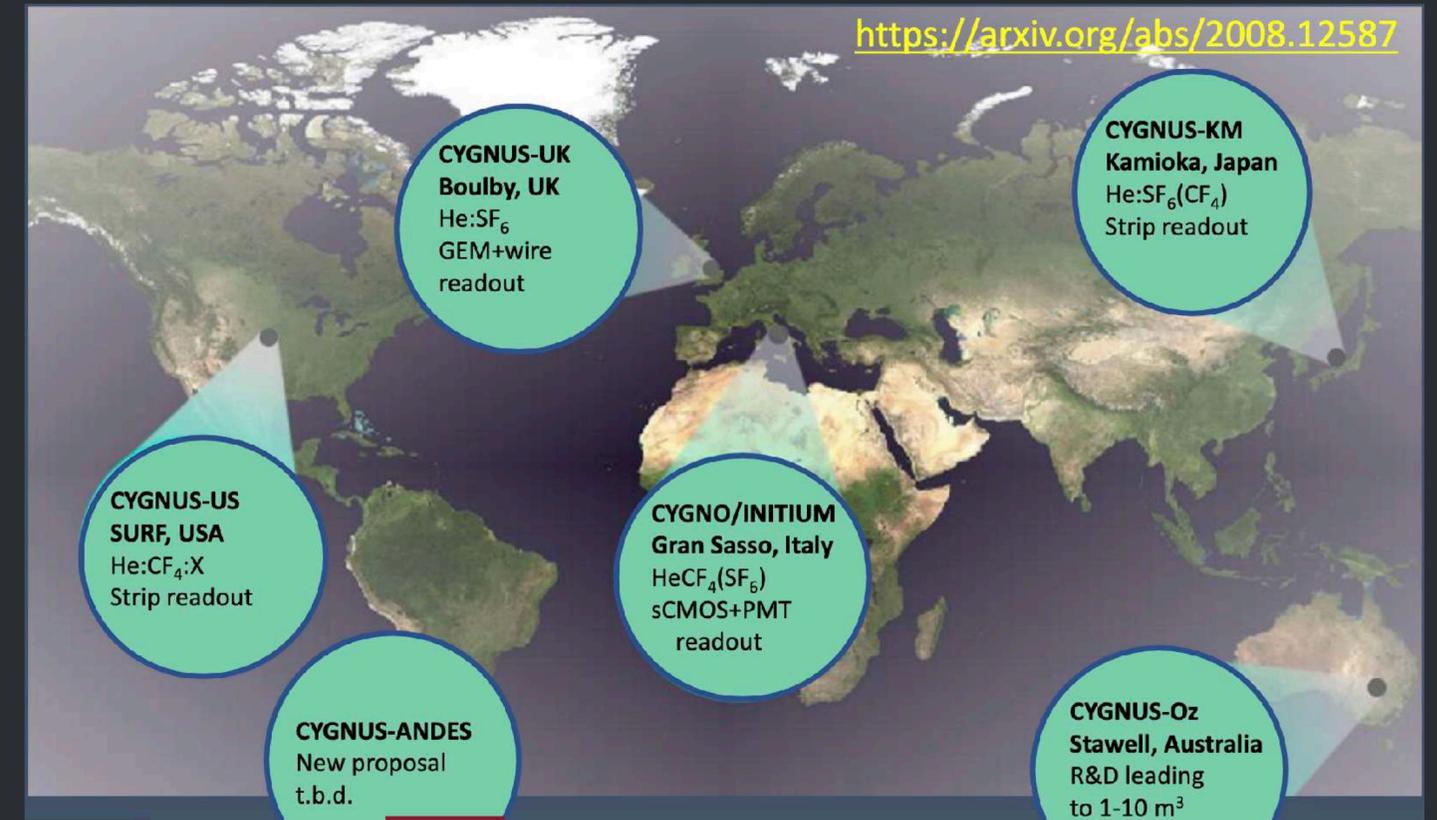
✓ 原子核乾板

- 結晶欠陥
- 量子欠陥
- DNA
- ...

M. Shibata et.al,
PTEP 2022 013C01



Taken from T. Naka's slides



Sven Vahsen's presentation, CYGNUS 2023

目次

1. DMがなぜ重要なのか？

2. DMはなぜ検出できないのか？

3. 加速されたDM

i. 対消滅によって加速されたDM

KN, T. Naka, T. Nomura, JCAP04(2025)030

ii. 宇宙線によって加速されたDM

4. まとめ

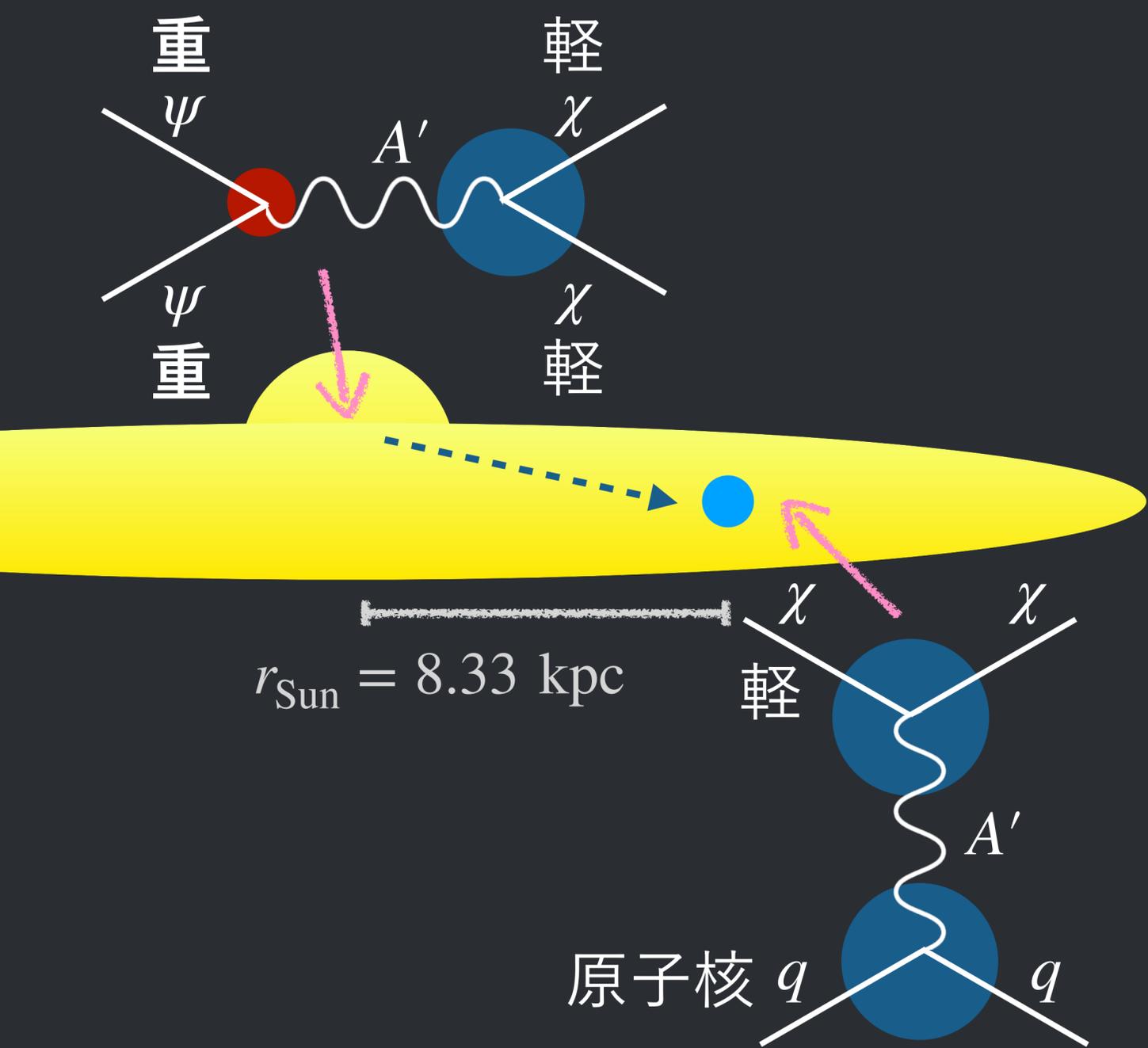
2成分DMモデルの加速DM

モノクロマティックなエネルギー

$$2\delta(E_\chi - m_\psi)$$

- 微分フラックス Φ_{GC}

$$\frac{d\Phi_{GC}}{d\Omega dE_\psi} = \frac{1}{4} \frac{r_{Sun}}{4\pi} \left(\frac{\rho_{local}}{m_\psi} \right)^2 J \langle \sigma_{\psi\bar{\psi} \rightarrow \chi\bar{\chi}} v \rangle_{v \rightarrow 0} \frac{dN_\chi}{dE_\chi}$$



- 実験での検出イベント数

$$N = \Delta T N_{target} \Phi_{GC}^{10^\circ} \int dE_R \frac{d\sigma_{\chi N \rightarrow \chi N}}{dE_R}$$

- ΔT : エクスポージャー時間
- N_{target} : 検出器中の標的数

2成分DMモデル

- 標準模型 + U(1)_D ゲージ対称性のある暗黒セクター

| | ディラックフェルミオン | | スカラー |
|----------------------|-------------|----------|---|
| 場 | ψ | χ | ϕ |
| U(1) _D 電荷 | Q_ψ | Q_χ | 1 |
| | 重いDM | 軽いDM | $\langle\phi\rangle$ がU(1) _D を破る |

DM主要成分 加速DM

$|Q_\chi| \neq |Q_\psi|, |2Q_\chi| \neq 2, |2Q_\psi| \neq 2$
 $|Q_\chi \pm Q_\psi| \neq 1$
 (余計なフェルミオン混合を禁止)

- U(1)_D対称性に伴うゲージボソン：**ダークフォトン A'**

$$\langle\phi\rangle = v_\phi \Rightarrow m_{A'} = g_D v_\phi$$

tiny kinetic mixing

$$\mathcal{L}_{U(1)} = -\frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}X_{\mu\nu}X^{\mu\nu} - \boxed{\frac{\epsilon}{2}X_{\mu\nu}B^{\mu\nu}} \quad \epsilon \ll 1$$

$$B_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu \text{ for } U(1)_Y$$

$$X_{\mu\nu} = \partial_\mu A'_\nu - \partial_\nu A'_\mu \text{ for } U(1)_D$$

$$\mathcal{L}_{A'-SM} = e\epsilon \cos\theta_W J_{EM}^\mu A'_\mu$$

DMの相互作用

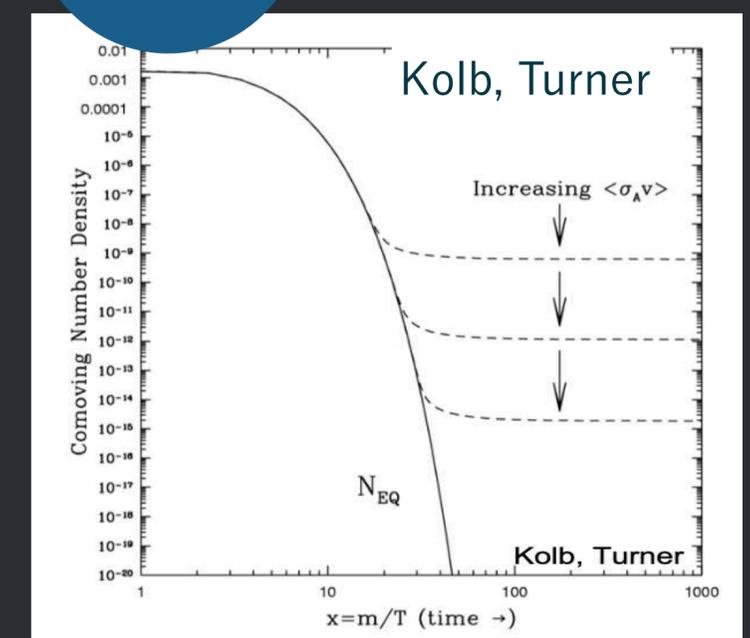
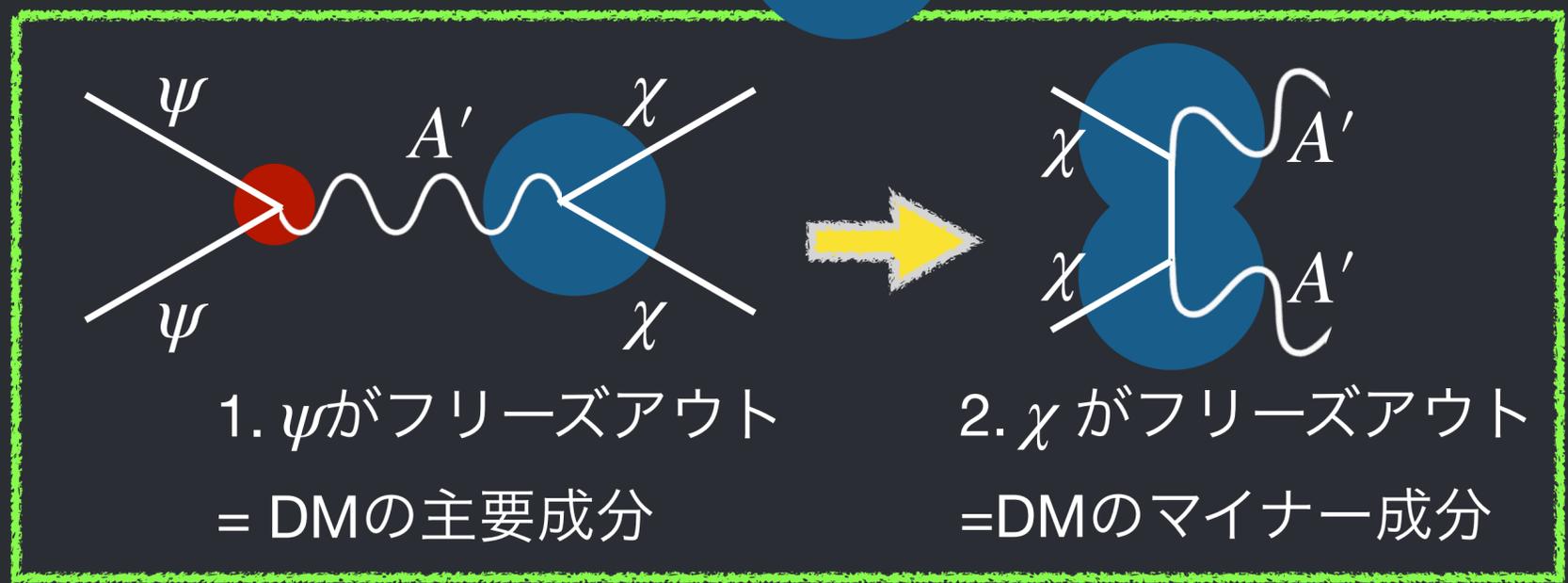
- 新しいフェルミオン ψ, χ とダークフォトン A'

$$\mathcal{L}_{\text{DM}} = \bar{\chi}(iD_\mu\gamma^\mu - m_\chi)\chi + \bar{\psi}(iD_\mu\gamma^\mu - m_\chi)\psi$$

$$= \bar{\chi} \left[i(\partial_\mu + iQ_\chi g_D A'_\mu)\gamma^\mu - m_\chi \right] \chi + \bar{\psi} \left[i(\partial_\mu + iQ_\psi g_D A'_\mu)\gamma^\mu - m_\chi \right] \psi \supset -A'_\mu \left(g_\chi \bar{\chi}\gamma^\mu\chi + g_\psi \bar{\psi}\gamma^\mu\psi \right)$$

- DM生成の歴史

$$m_\psi > m_\chi \simeq m_{A'} \quad g_\psi \ll g_\chi$$



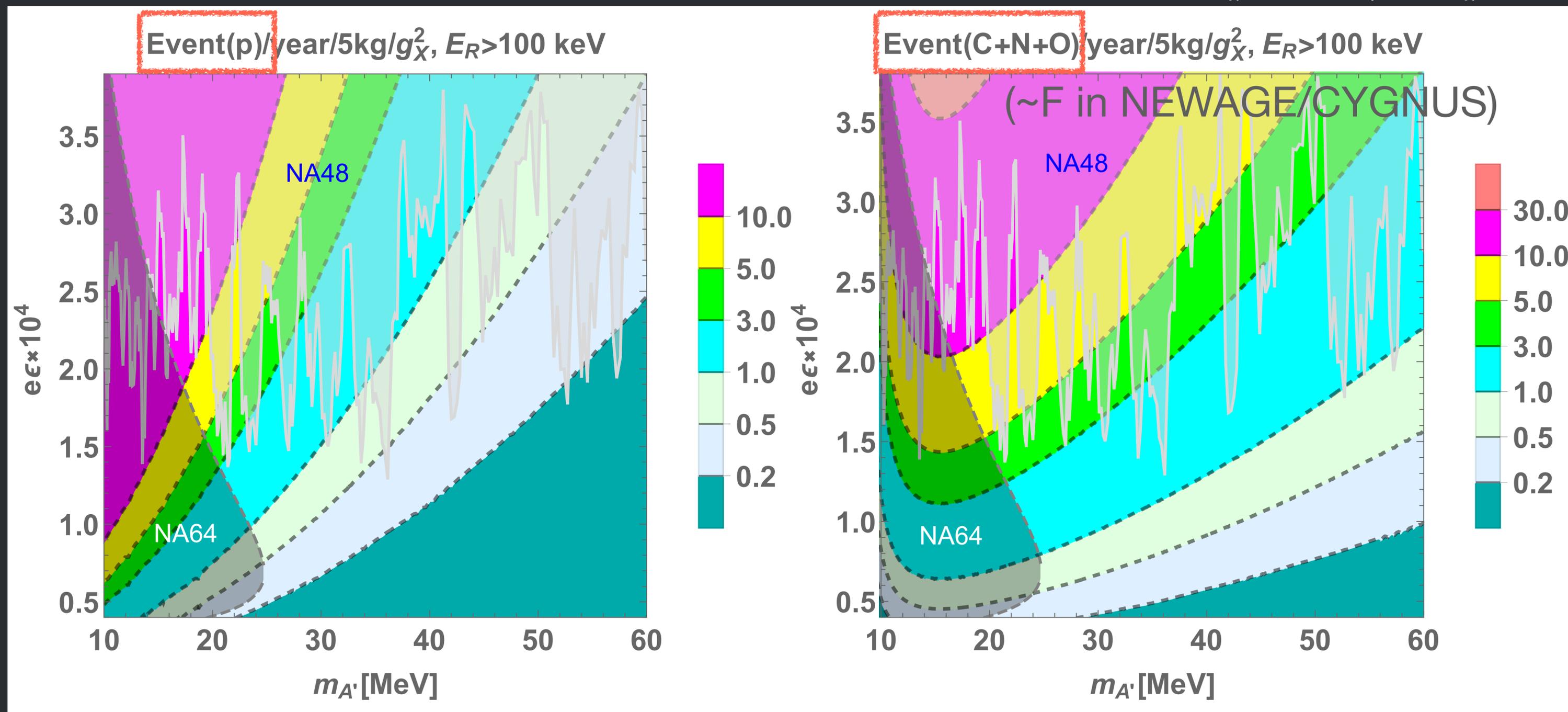
残存量が観測と一致するように g_ψ を調整

$$\langle\sigma_{\psi\bar{\psi}\rightarrow\chi\bar{\chi}}v\rangle \simeq 5 \times 10^{-26} \text{ cm}^2/\text{s}$$

期待されるイベント数

Einasto profile

$$m_\chi = m_{A'}, m_\psi = 3m_\chi$$



標的原子核ごとの比較

- 軽めの標的 p, C, N, O
 - 方向情報を取りながら、イベント率が高い反跳エネルギー領域を調べられる
 - 特に p は有利

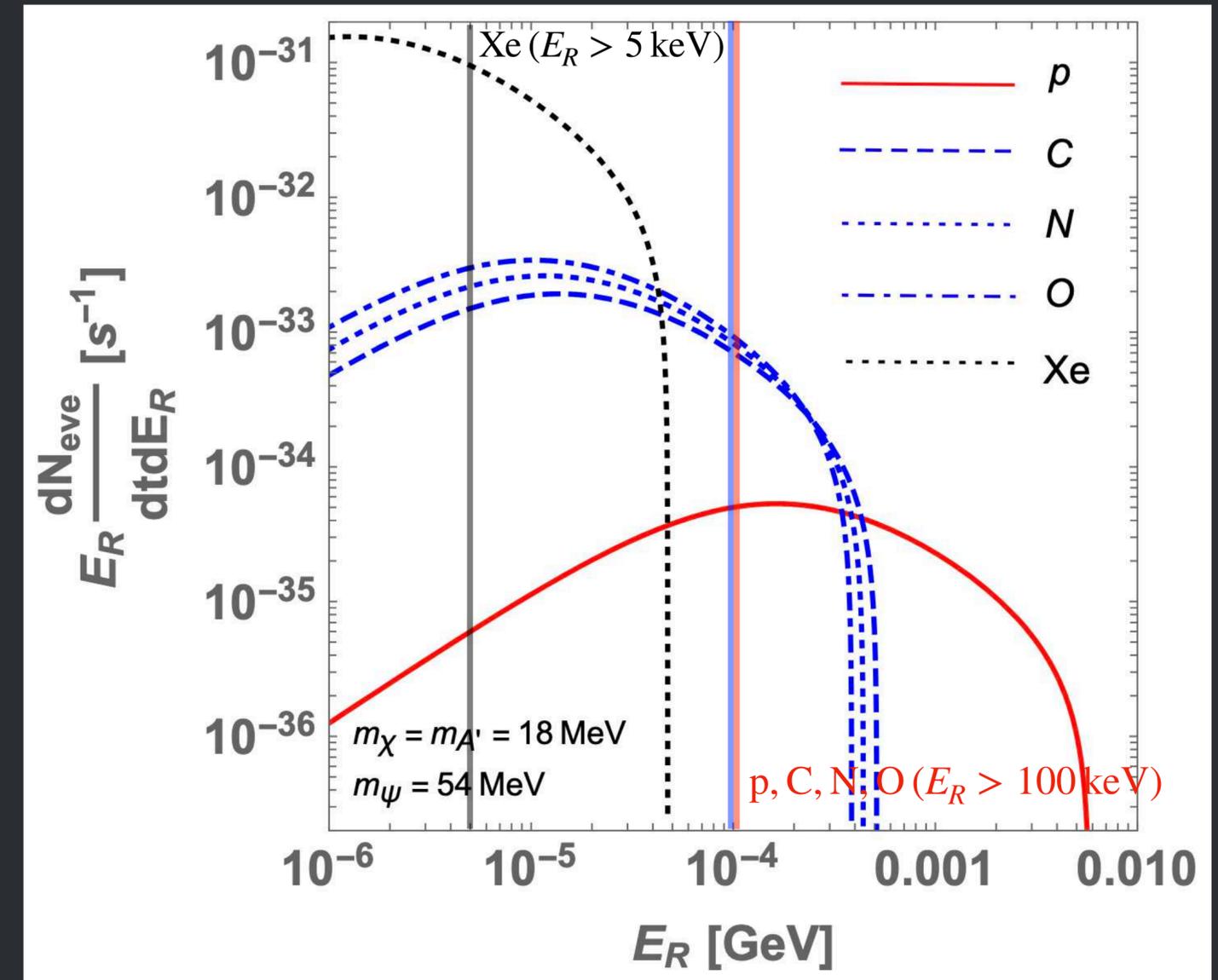
$\chi(\mathbf{p})N(\mathbf{0}) \rightarrow \chi(\mathbf{p}')N(\mathbf{q})$ のとき

$$N_{\text{eve}} = \Delta T N_{\text{target}} \Phi_{\text{GC}}^{10^\circ} \int_{E_R^{\text{min}}}^{E_R^{\text{max}}} dE_R \left| \frac{d\Omega}{dE_R} \right| \frac{d\sigma_{\chi N \rightarrow \chi N}}{d\Omega}$$

$$\frac{d\sigma_{\chi N \rightarrow \chi N}}{d\Omega} = \frac{1}{(4\pi)^2} \frac{(\epsilon e)^2 g^2}{(q^2 - m_{A'}^2)^2} \frac{p'}{p} \downarrow \text{(large } q)$$

非相対論的な場合 $E_{R,\text{peak}} \sim \frac{m_{A'}^2}{2m_N}$

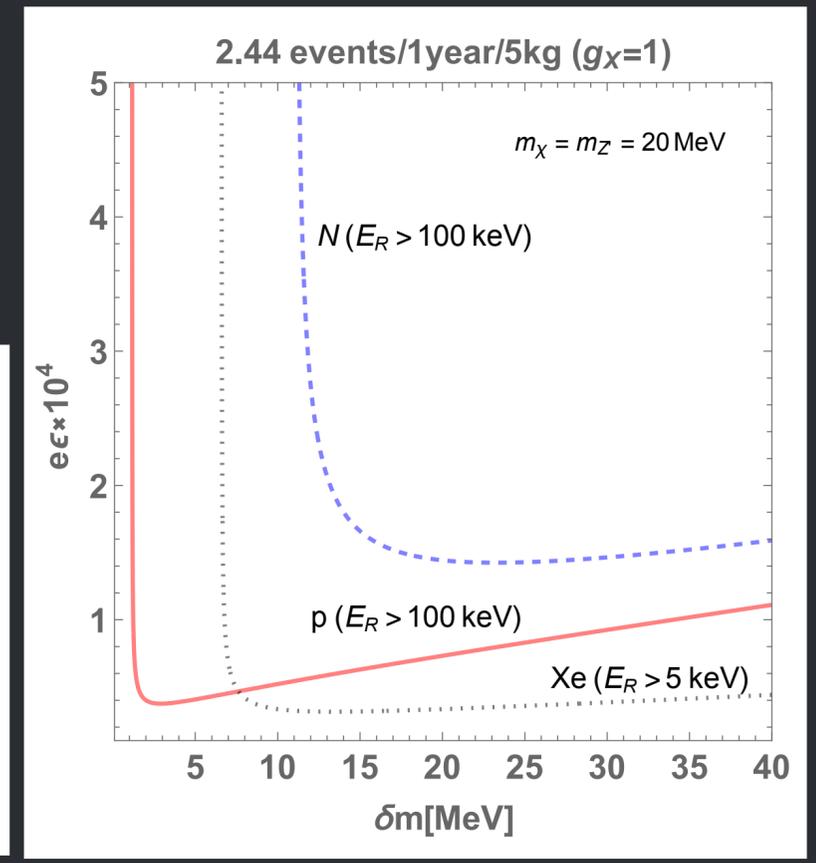
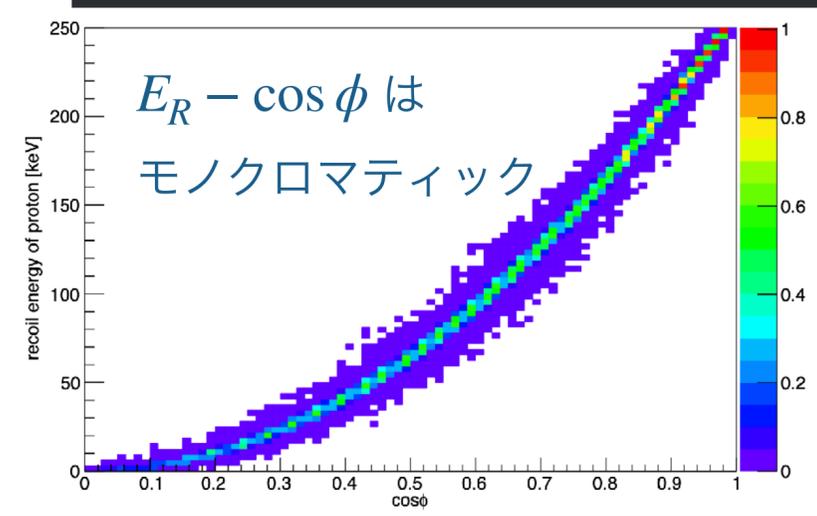
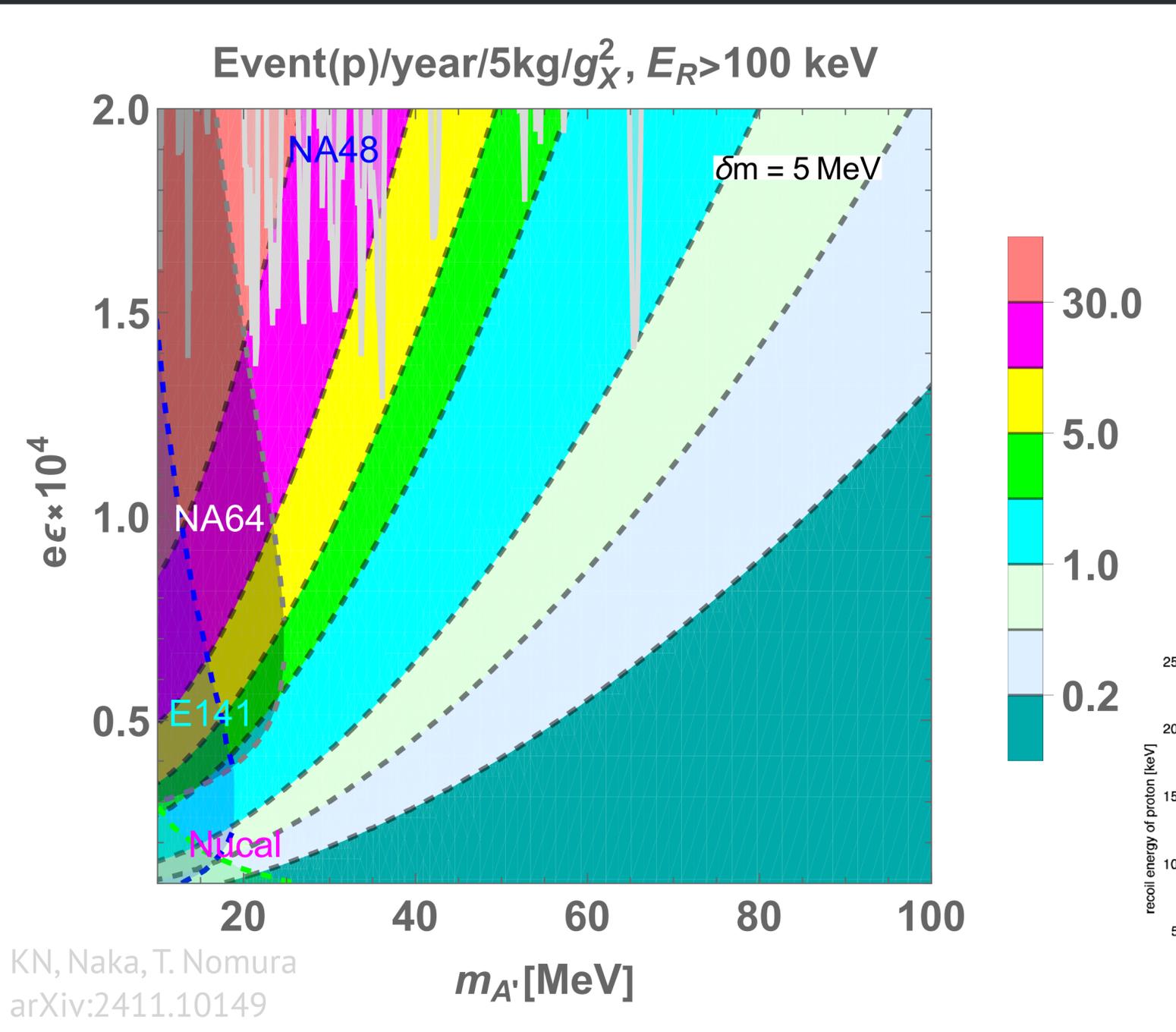
$$\times \left[\underbrace{G_E^2}_{\downarrow} \frac{4E_\chi E'_\chi + q^2}{1 - q^2/(4m_N^2)} + \underbrace{G_M^2}_{\downarrow} \left((4E_\chi E'_\chi + q^2) \left(1 - \frac{1}{1 - q^2/(4m_N^2)} \right) + \frac{q^4}{2m_N^2} + \frac{q^2 m_\chi^2}{m_N^2} \right) \right]$$



縮退した2成分DM

Einasto profile
 $m_\chi = m_{A'}, m_\psi - m_\chi = 5 \text{ MeV}$

- $m_\psi \simeq m_\chi \Rightarrow$ 軽いDM χ はほぼ加速されない
シグナルが弱く検出できない
- 最も軽い標的 p だけが ~30個程度のイベントを検出可能



目次

1. DMがなぜ重要なのか？

2. DMはなぜ検出できないのか？

3. 加速されたDM

i. 対消滅によって加速されたDM

ii. 宇宙線によって加速されたDM

4. まとめ

KN, S. Higashino, T. Naka, K. Miuchi, JCAP07(2023)061

KN, S. Higashino, T. Naka, K. Miuchi + T. Shimomura, Y. Uesaka (ongoing)

宇宙線に加速されたDM (CR-DM)

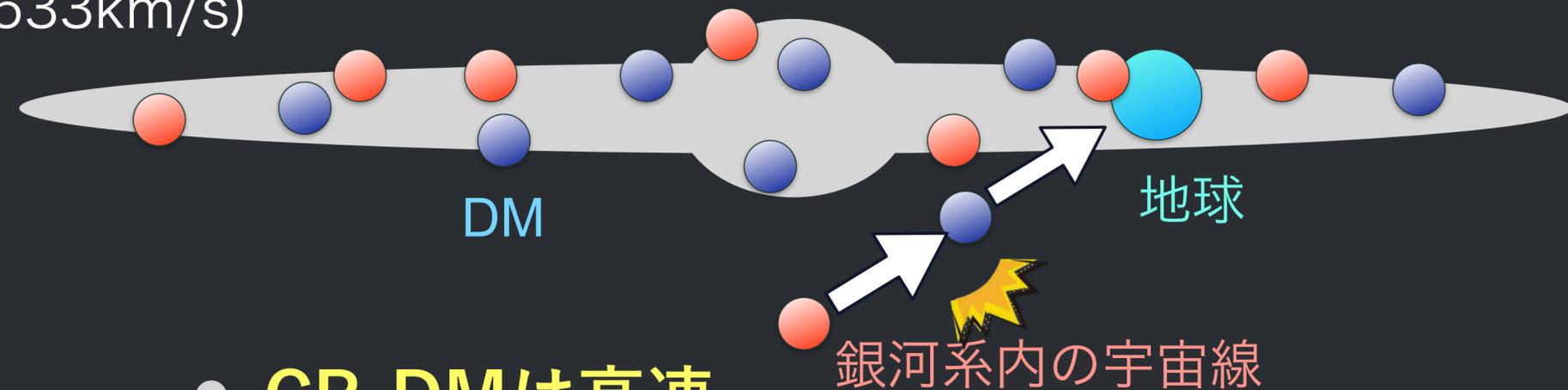
- 普通のWIMPは低速

- $\langle v_{DM} \rangle \sim 230 \text{ km/s}$
- $v_{DM} < v_{esc}$ (銀河系の脱出速度 $\sim 533 \text{ km/s}$)

W. Yin 1809.08610

Y. Ema, F. Sala, R. Sato 1811.00520

T. Bringmann and M. Pospelov 1810.10543



- **CR-DMは高速**

- $v_{DM} > \langle v_{DM} \rangle$
- sub-GeV質量のCR-DMは宇宙線に散乱され、検出器のエネルギーしきい値より高い運動エネルギーを持てる

- CR-DMのフラックス

$$\frac{d\Phi_\chi}{dT_\chi d\theta d\phi} = \int_{T_\chi^{\min}}^{\infty} \frac{dT_p}{T_\chi^{\max}} \int dV \frac{\rho_\chi}{m_\chi} \frac{d\Phi_p}{dT_p}$$

$$= \int dl d\theta d\phi \cos\theta G_p^2(2m_\chi T_\chi) \frac{\sigma_{p\chi}}{4\pi m_\chi T_\chi^{\max}} \left[\frac{\rho_s}{\left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2} \frac{r}{r_s} \right] \frac{d\Phi_p}{dT_p}$$

DMの密度プロファイル依存

イベント数の非対称性

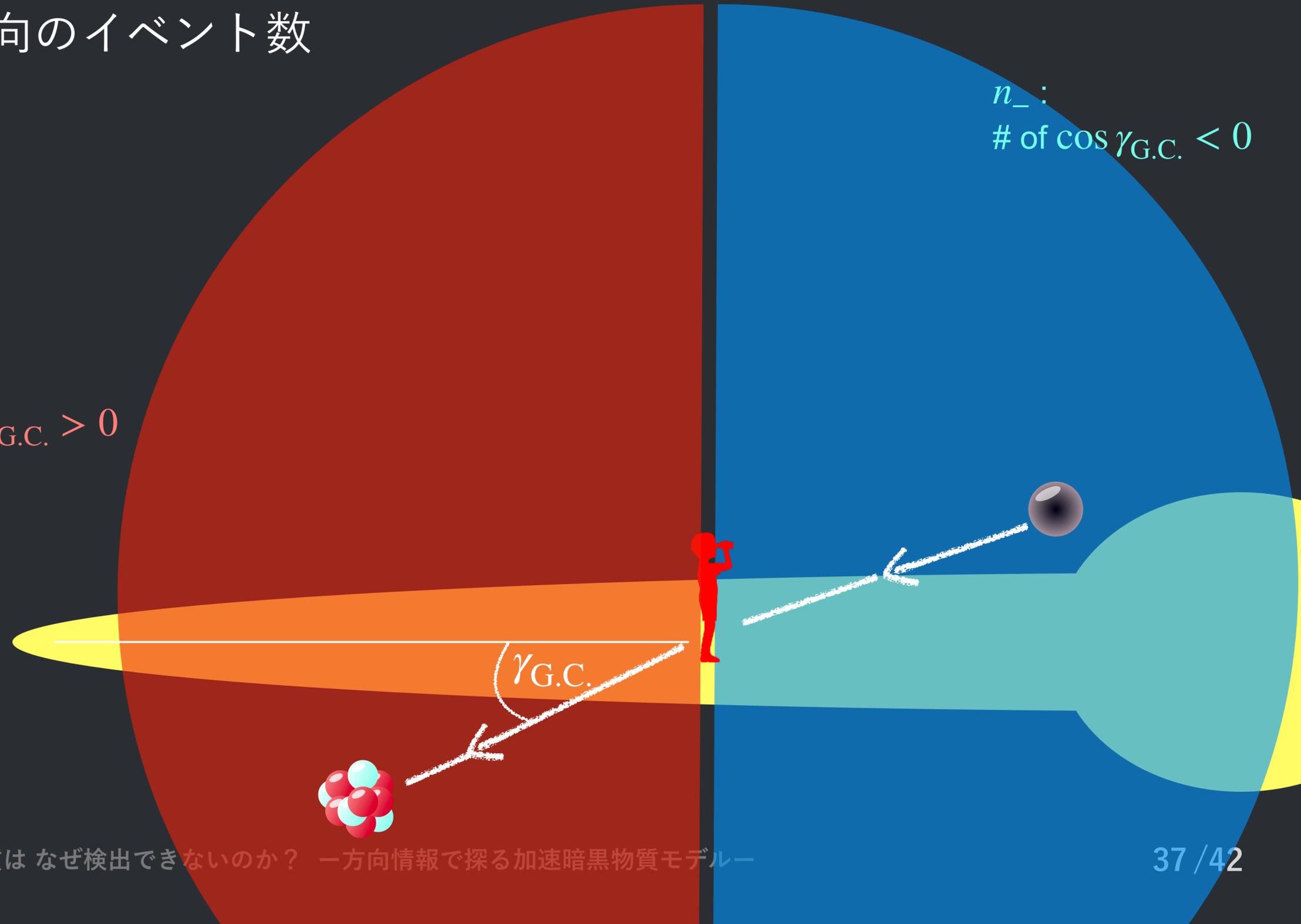
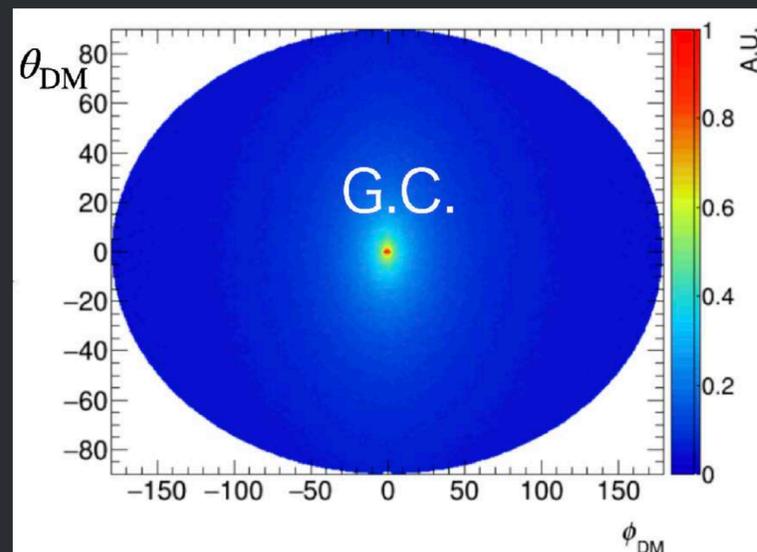
- 銀河中心方向-その逆方向のイベント数の違いを見たい

非対称性パラメーター:

$$A = \frac{n_+ - n_-}{n_+ + n_-}$$

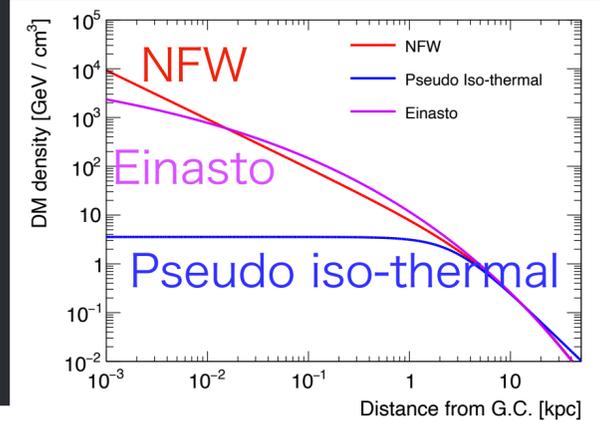
n_+ :
of $\cos \gamma_{G.C.} > 0$

n_- :
of $\cos \gamma_{G.C.} < 0$

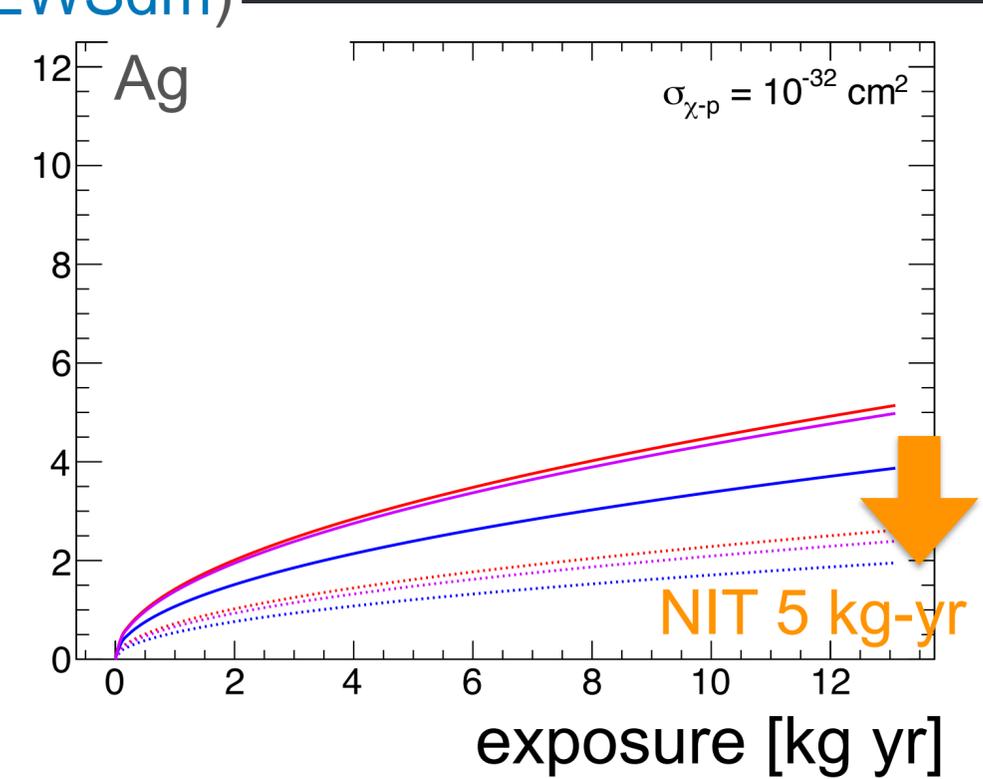
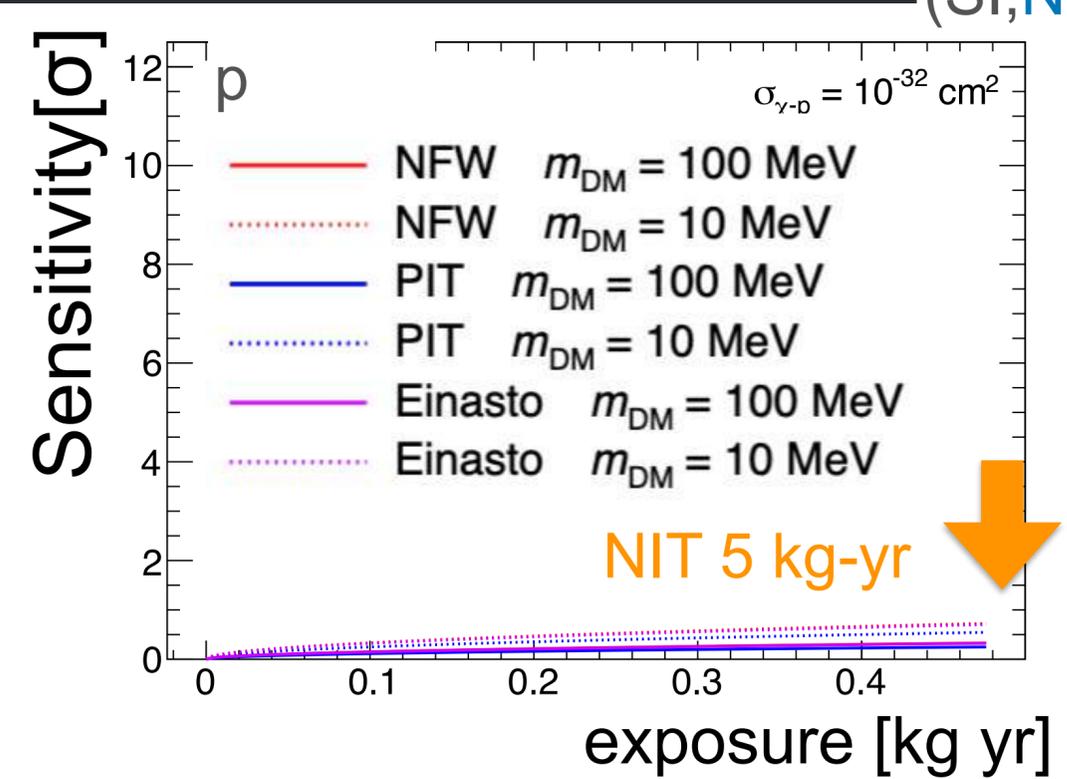


非対称性パラメータの検出感度

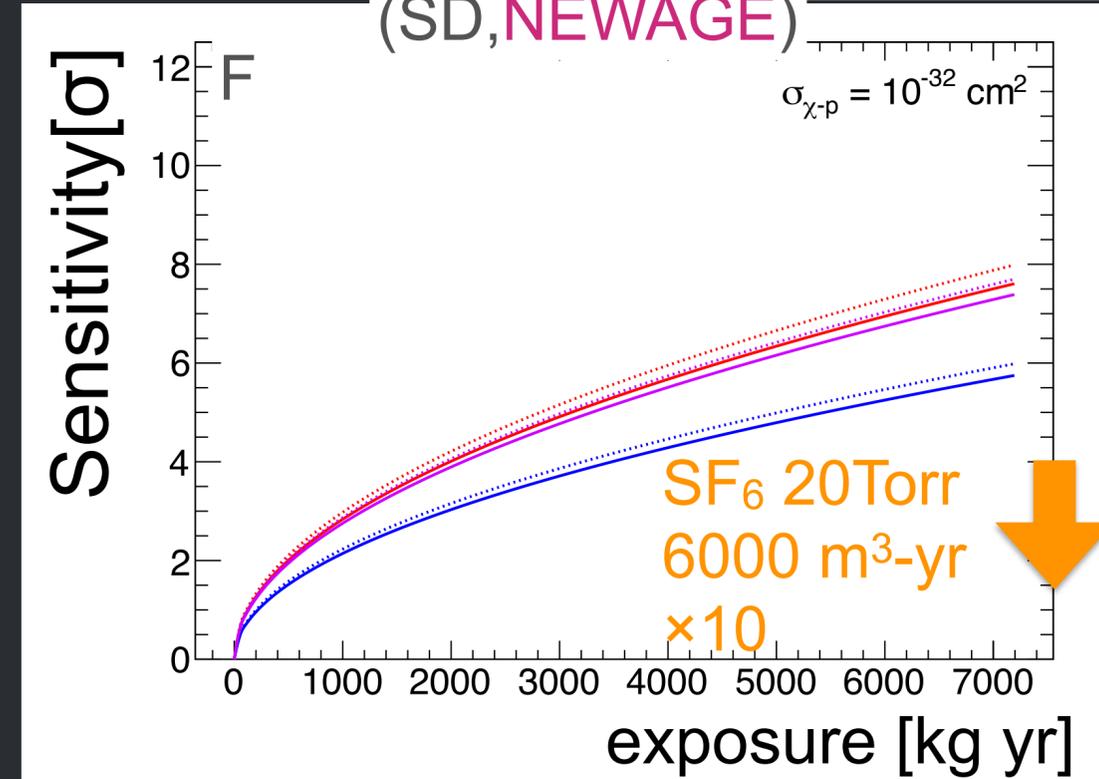
KN, S. Higashino, T. Naka, K. Miuchi
arXiv:2211.13399



(SI, NEWSdm)



(SD, NEWAGE)

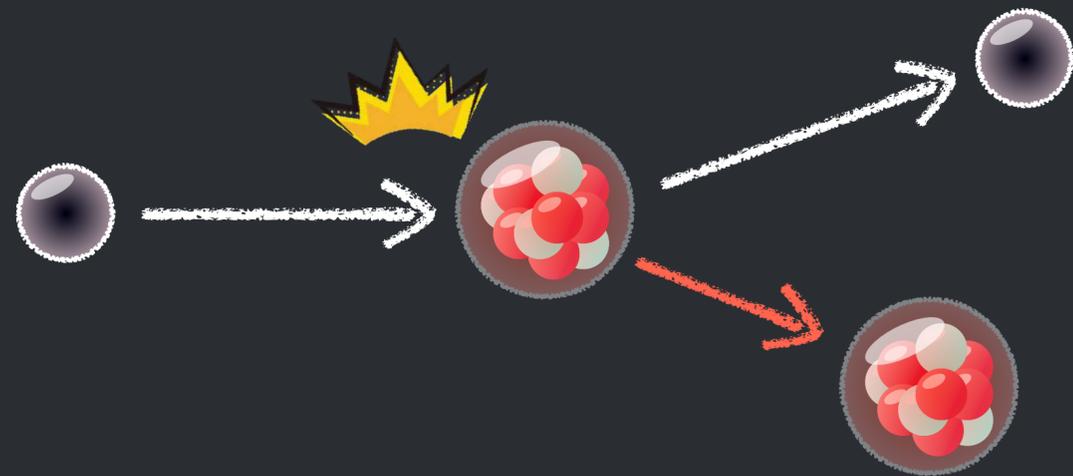


- ▶ 将来的なアップグレードまで考慮した高いexposureで、方向の非対称性を $\sim 3 - 5\sigma$ で検証できる
- ▶ NFW/Einastoプロファイルの場合は、Pseudo-Isothermalに比べて検証能力が高い
- ▶ E_R が高すぎるイベントは非弾性散乱になる可能性があるため切り捨てて解析

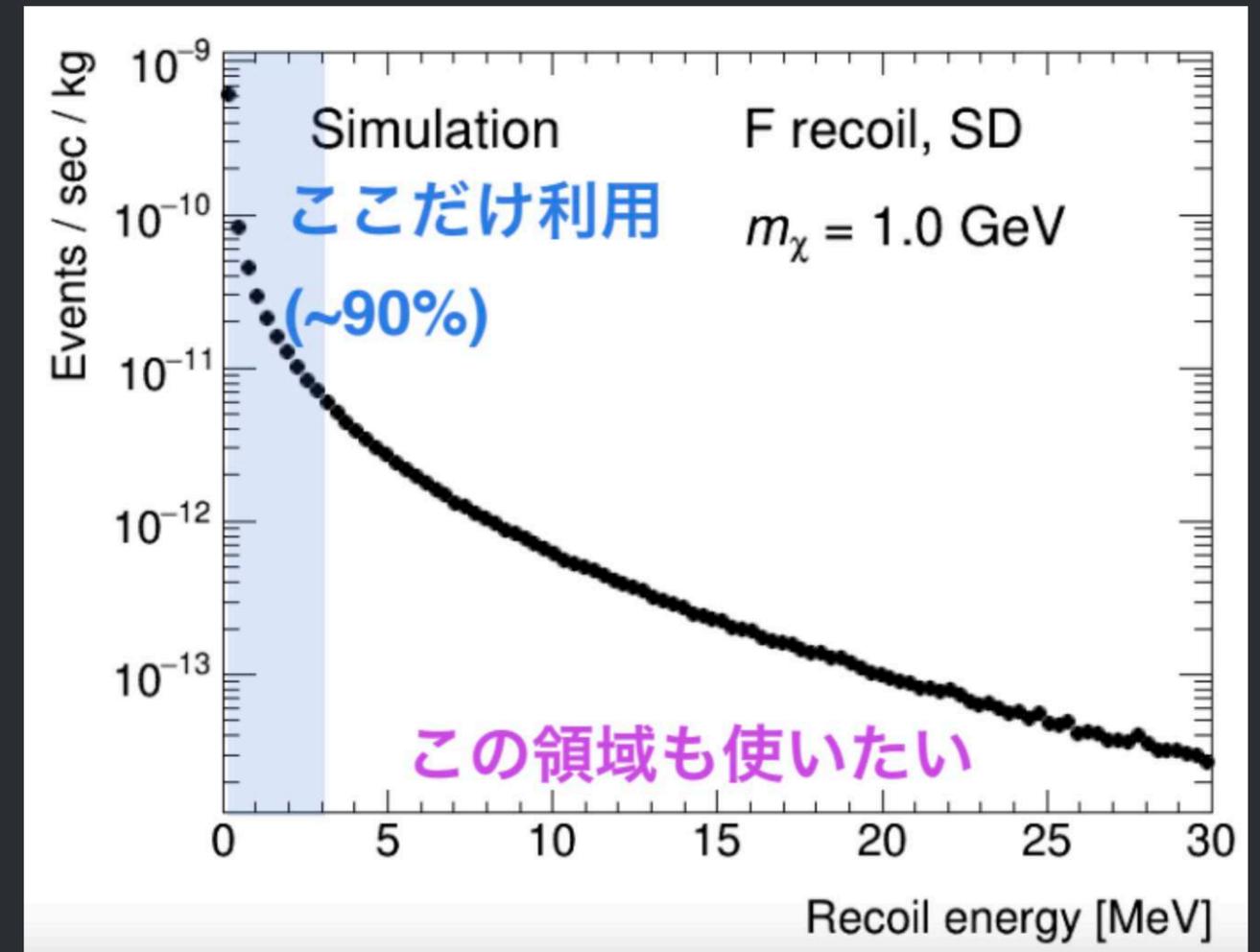
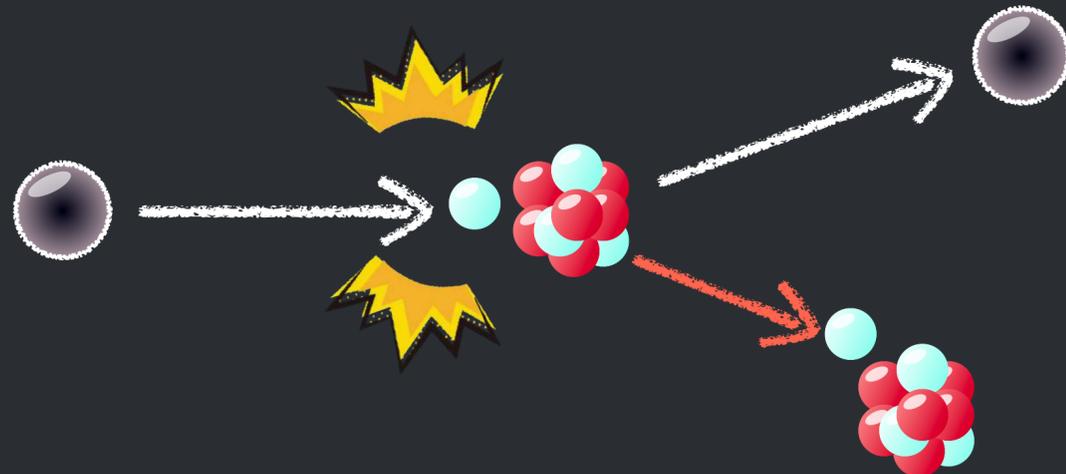
高エネルギーCR-DMの検出

- 加速されたCR-DMの検出過程は、弾性散乱でない可能性

- ド・ブロイ波長 \gg 原子核サイズ \rightarrow 弾性散乱

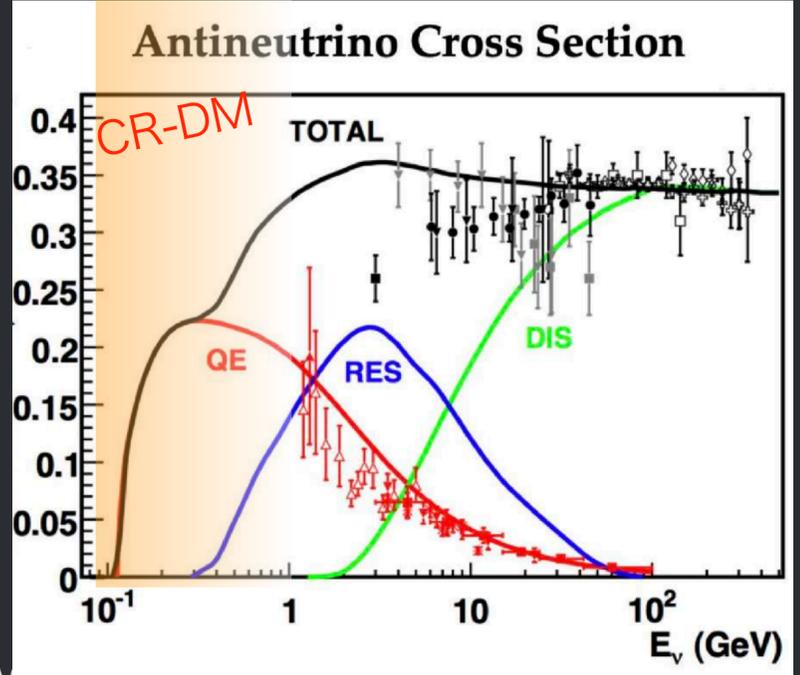
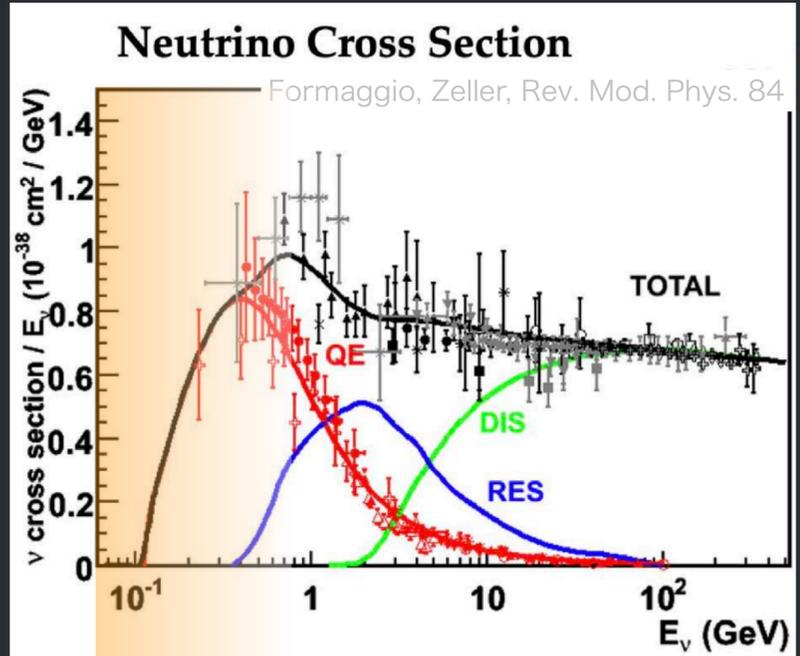


- ド・ブロイ波長 \ll 原子核サイズ \rightarrow 内部構造が見える

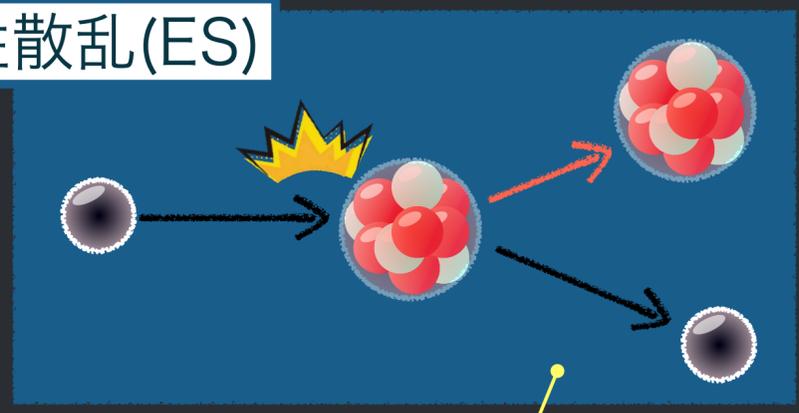


CR-DMの非弾性散乱

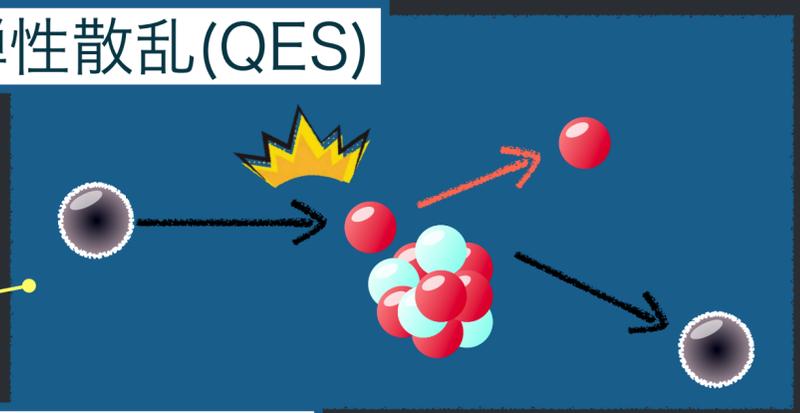
- ニュートリノ-原子核散乱



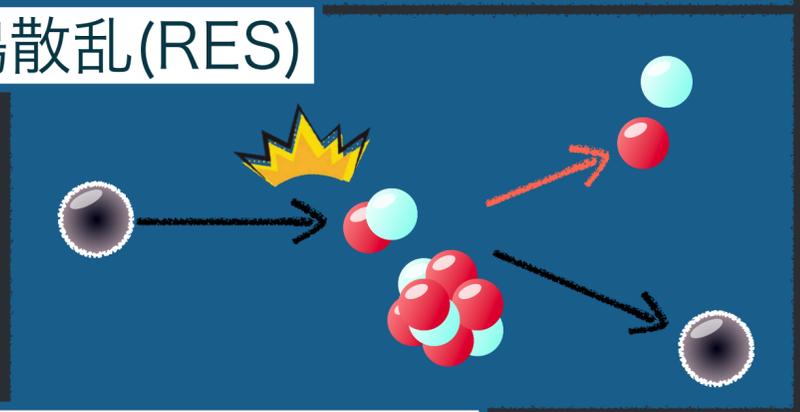
弾性散乱(ES)



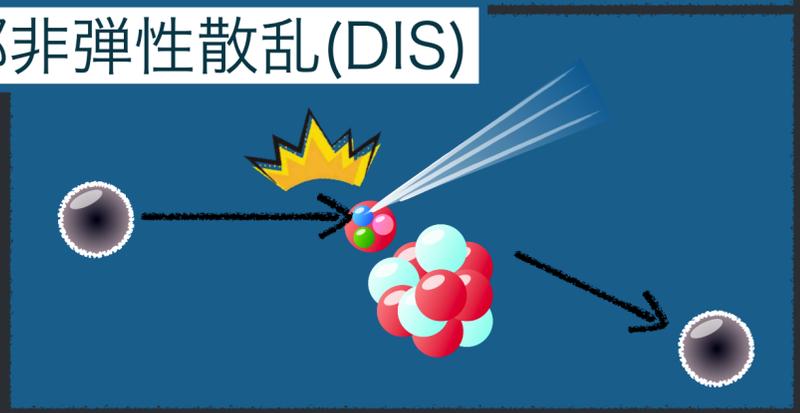
準弾性散乱(QES)



共鳴散乱(RES)



深部非弾性散乱(DIS)



CR-DMの場合、
ESとQESを考えれば
よさそう

低エネルギー



まとめ

- DMの候補であるWIMPを探したい。これまで予想されていたより少し軽くても、加速機構があれば直接検出実験で検証できるかも。
- 加速されたDMは銀河系の中心から到来する。統計量があれば、方向を使って密度プロファイルや（宇宙線・2成分DMモデルの）加速されたDMを検証できる。

おみやげメッセージ

長年の探索にもかかわらず、DMは未検出。新しい候補や検出方法を考えるのもやりがいがある。