

検出実験による 暗黒物質の検証

長尾桂子（岡山理科大学）

概要

1. WIMP直接検出の現状
2. 現状を受けて今後の展望
3. 制限に伴う不定性
4. 方向がわかる直接検出とDMの性質
5. まとめ

暗黒物質(DM)

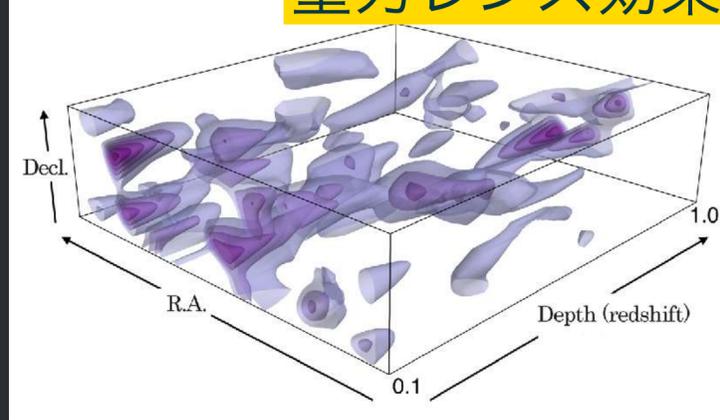
広いスケールで証拠
確からしい

重力レンズ効果



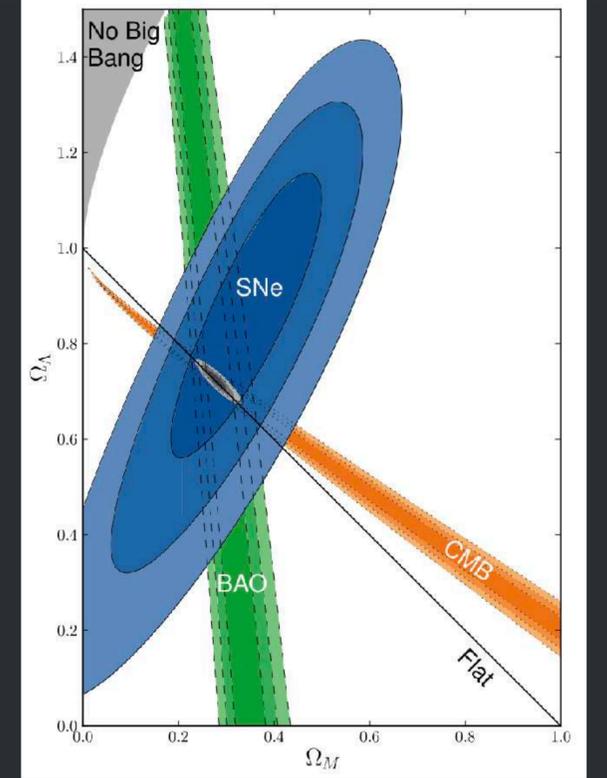
galaxy cluster ZwCl0024+1652
NASA, ESA, M.J. Jee and H. Ford

重力レンズ効果



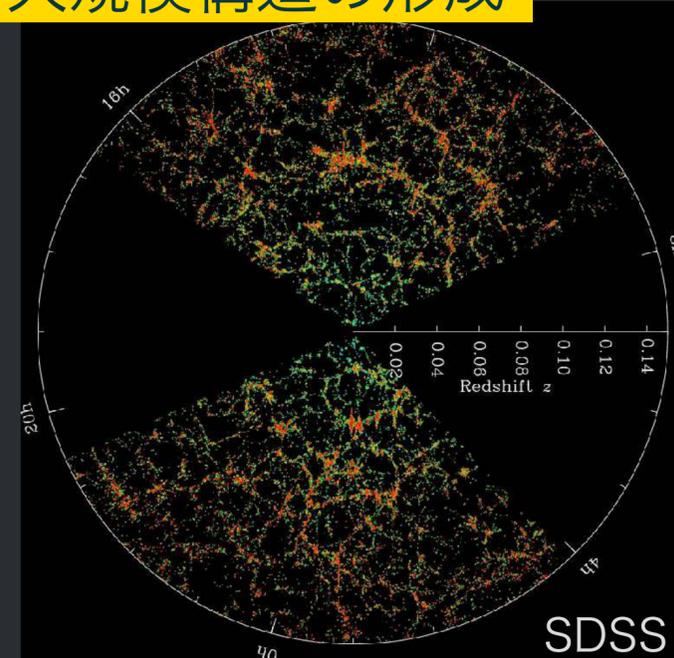
Univ. of Tokyo/NAOJ

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



>0(10)Mpc

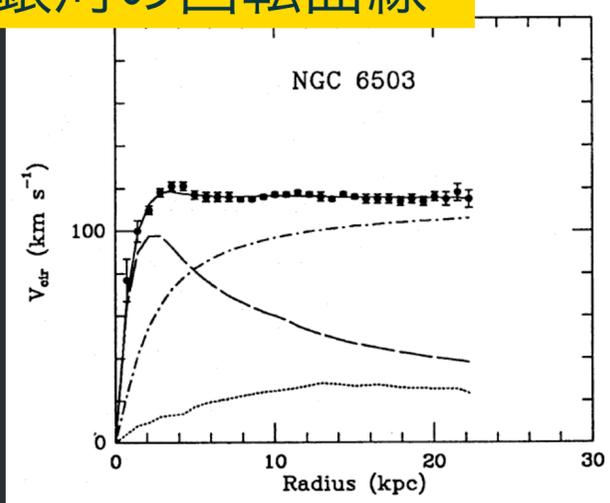
弾丸銀河団の銀河団の衝突



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.

1 Mpc

銀河の回転曲線

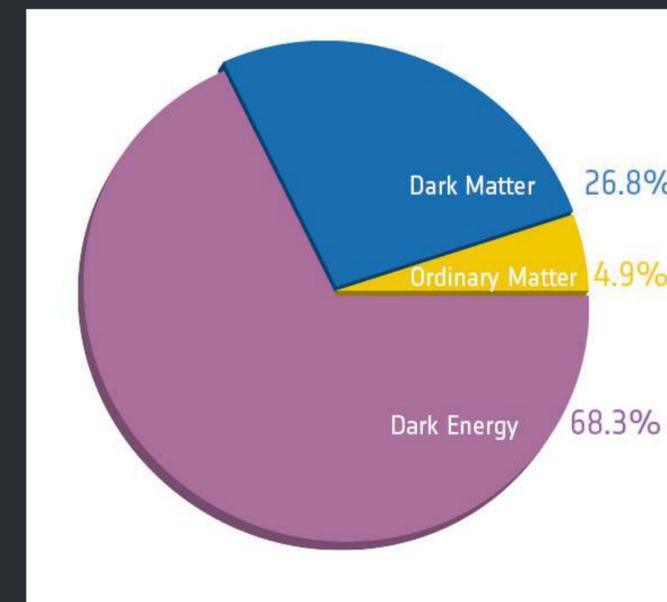


Begeman, Broeils, Sanders (1991)

1 kpc

暗黒物質 (DM) の性質

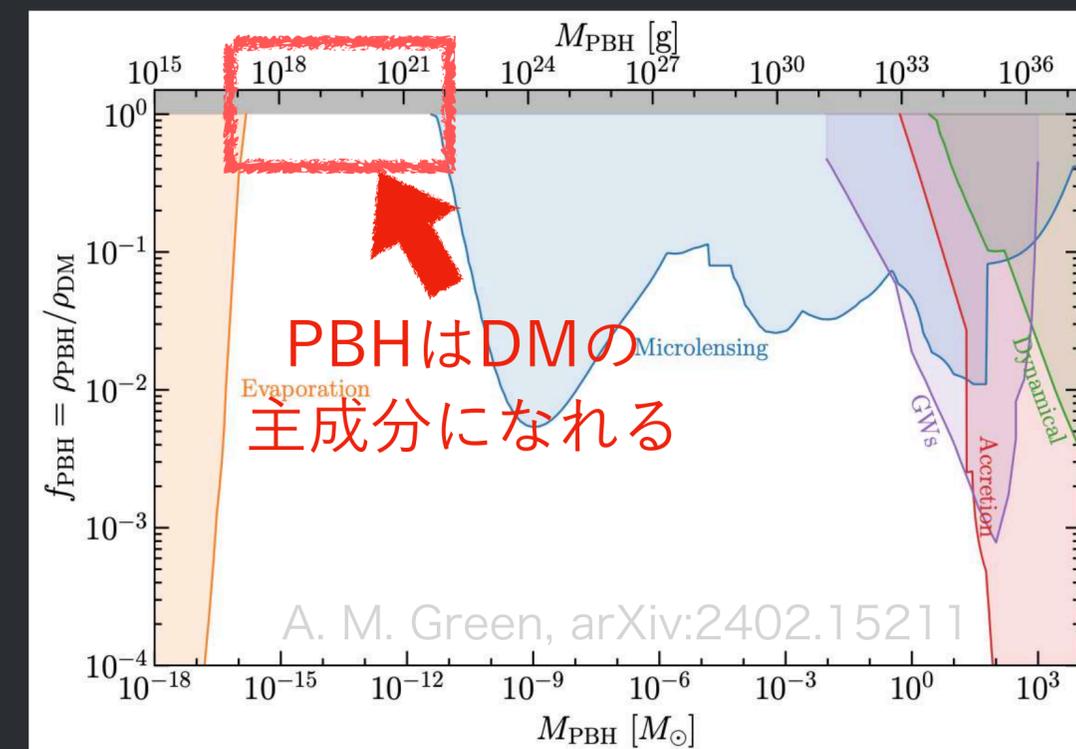
- 重力相互作用
- 光らない=電気的中性 (millicharged?)
- 長寿命で安定
- 宇宙のエネルギー密度の27%; $\Omega_\chi h^2 = 0.12$
- 構造形成時にCold (非相対論的)



credit: PLANCK

代表的な候補

- WIMPs
- アクシオン, アクシオンの粒子 (ALP)
 - ⇒ 8/21 横倉さん、村井さん、J.Leeさん、青木(隆)さん
- 原始ブラックホール (PBH)
- ...



WIMP

- Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs)

- 熱的生成シナリオでは、残存量が観測と一致して嬉しい

観測

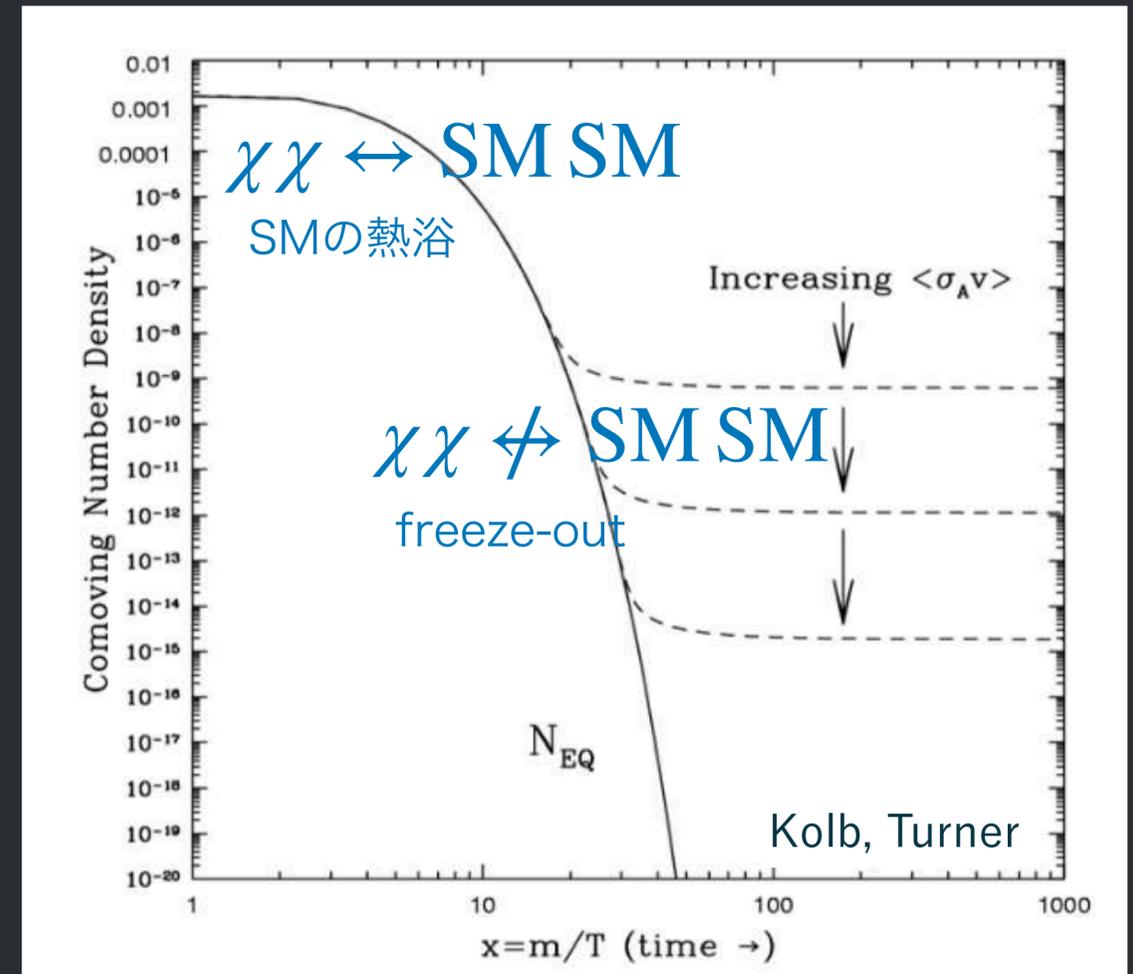
$$\Omega_\chi h^2 \simeq 0.1$$

理論

$$\Omega_\chi h^2 \simeq 0.1 \left(\frac{10^{-36} \text{cm}^2}{\langle \sigma_{\text{ann.}} v \rangle} \right)$$

weak scaleの相互作用と質量を仮定

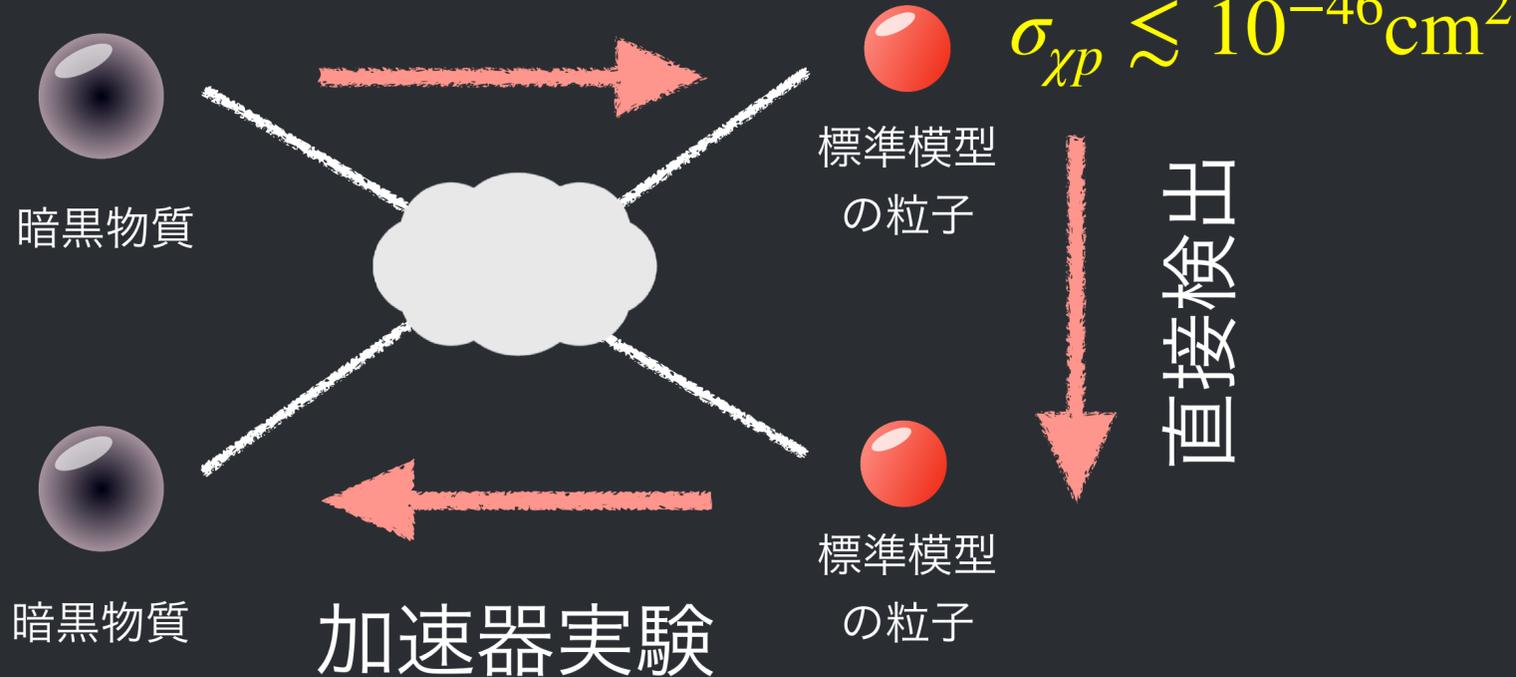
$$\sigma_{\text{ann.}} v \simeq \frac{g_{\text{weak}}^4}{16\pi^2 m_\chi^2} \simeq 10^{-36} \left(\frac{100 \text{GeV} - 1 \text{TeV}}{m_\chi} \right)^2 \text{cm}^2$$



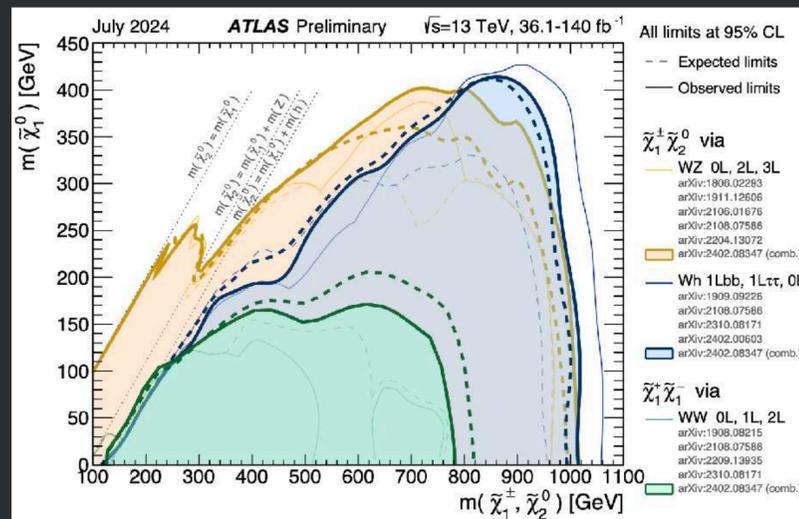
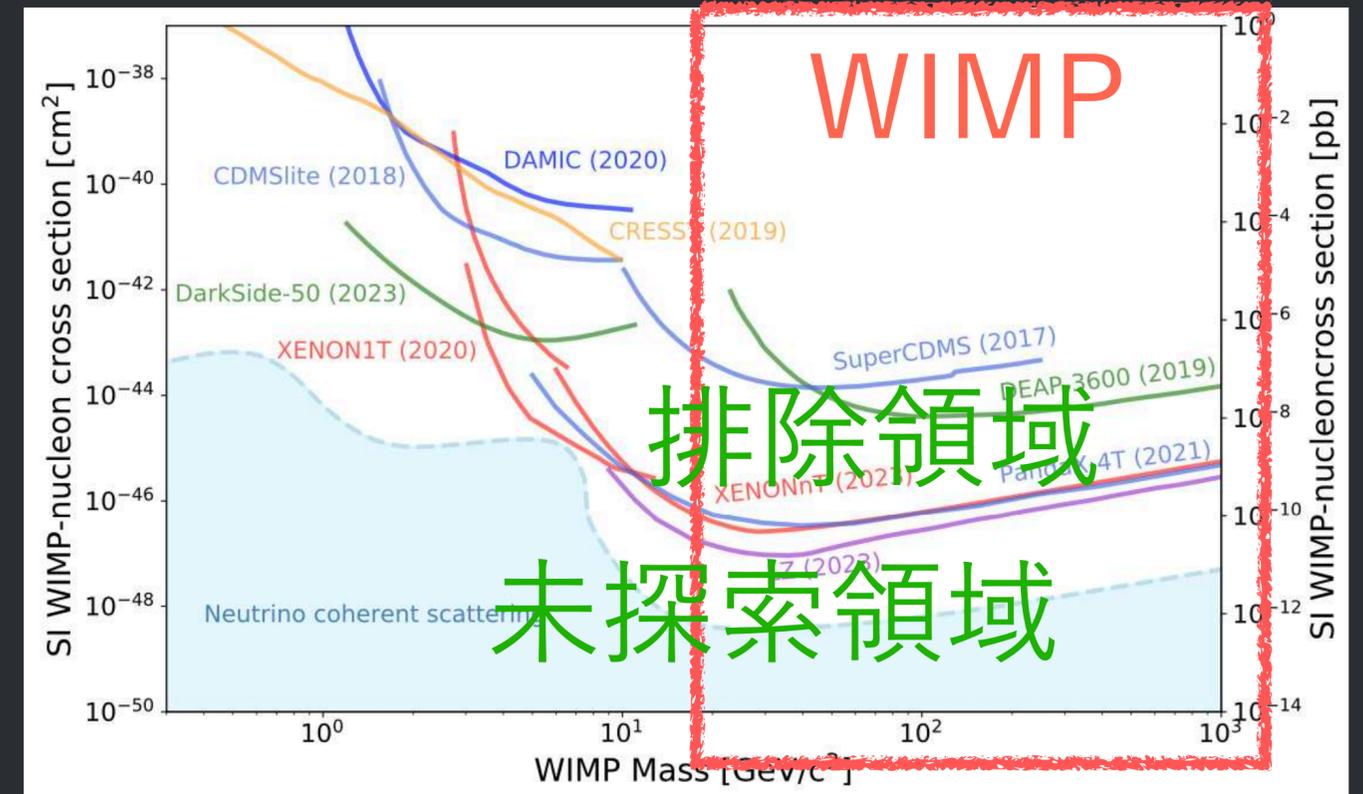
WIMP領域への制限

$\langle \sigma_{\text{ann.}\nu} \rangle \sim 10^{-36} \text{cm}^2$

残存量
間接検出



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



ATLAS; ATL-PHYS-PUB-2024-014

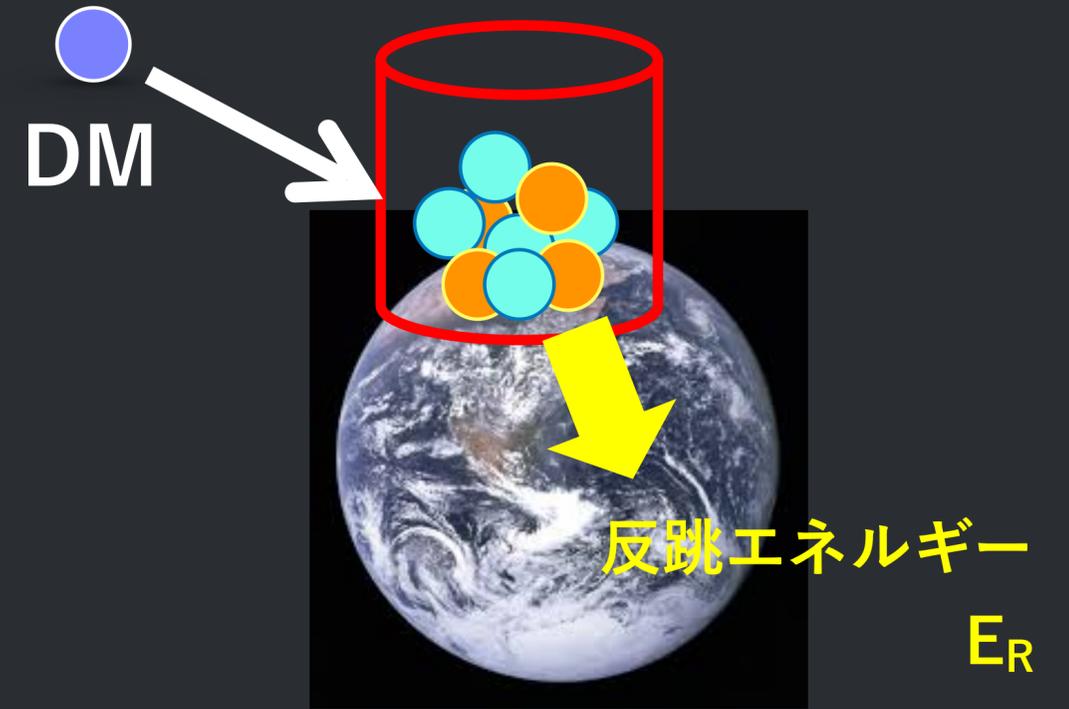
検出実験による暗黒物質の検証

DMはWIMPではない？

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



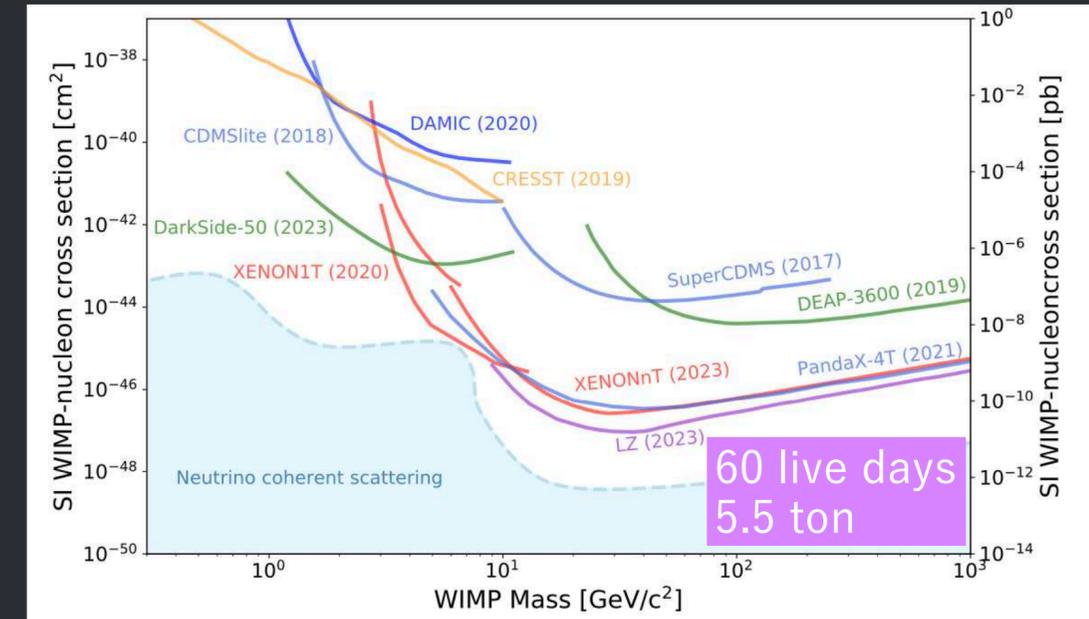
$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{\rho_{DM}}{m_N m_{DM}} \int_{v_{min}} dv f(v) v \frac{d\sigma_{\chi N}(v)}{dE_R}$$

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)
- $d\sigma_{\chi N}(v)$: DMと原子核の散乱断面積 (Scattering cross-section)
- dE_R : 反跳エネルギー (Recoil energy)

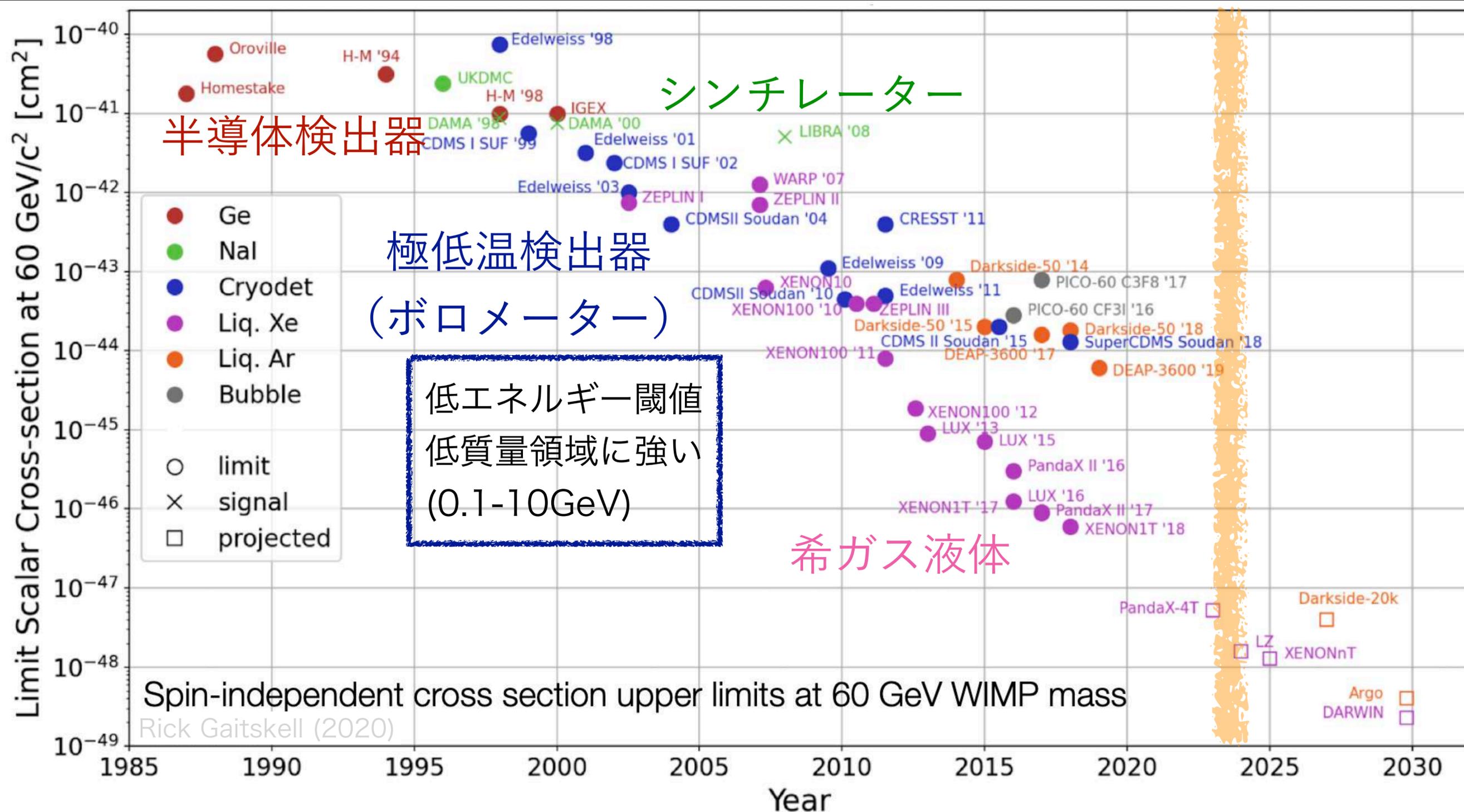
$$R \sim \frac{361}{m_N m_{DM}} \left(\frac{\rho_{DM}}{0.3 \text{ GeV/cm}^3} \right) \left(\frac{\sigma_{\chi N}}{10^{-36} \text{ cm}^2} \right) \left(\frac{v}{230 \text{ km/s}} \right) [\text{events/kg/day}]$$

- 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)

WIMP直接検出実験の今後



最前線

XENONnT, LZ
PandaX-4T

↓

DARWIN
PandaX-30T

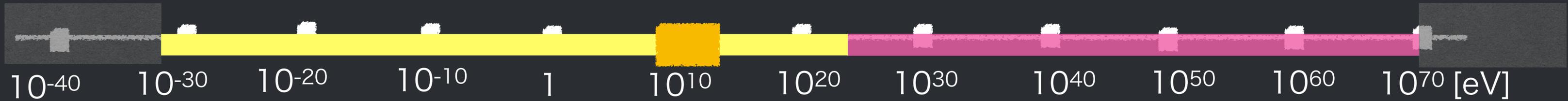
広い質量領域を考えよう ...という風潮

素粒子的なDM候補

天体的なDM候補

DM質量

wave-like ←→ particle-like



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

WIMP

1 GeV

Lee-Weinberg bound (弱い相互作用)

100 eV

Tremaine-Gunn bound (fermion)

1 eV

Lyman- α forest data (Thermal warm DM)

原始ブラックホール
の周りのガス降着が
CMBに影響

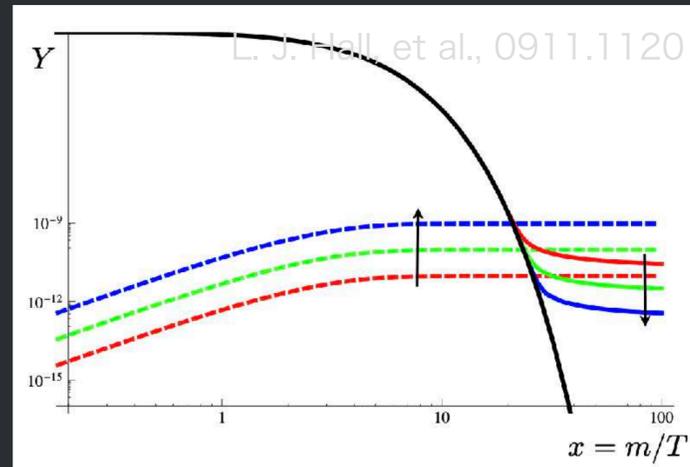
概要

1. WIMP直接検出の現状
2. 現状を受けて今後の展望
3. 制限に伴う不定性
4. 方向がわかる直接検出とDMの性質
5. まとめ

「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

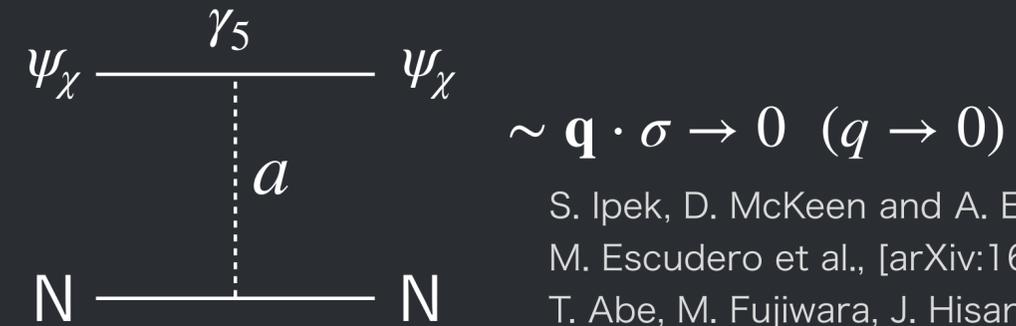
- e.g. Secluded DM

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



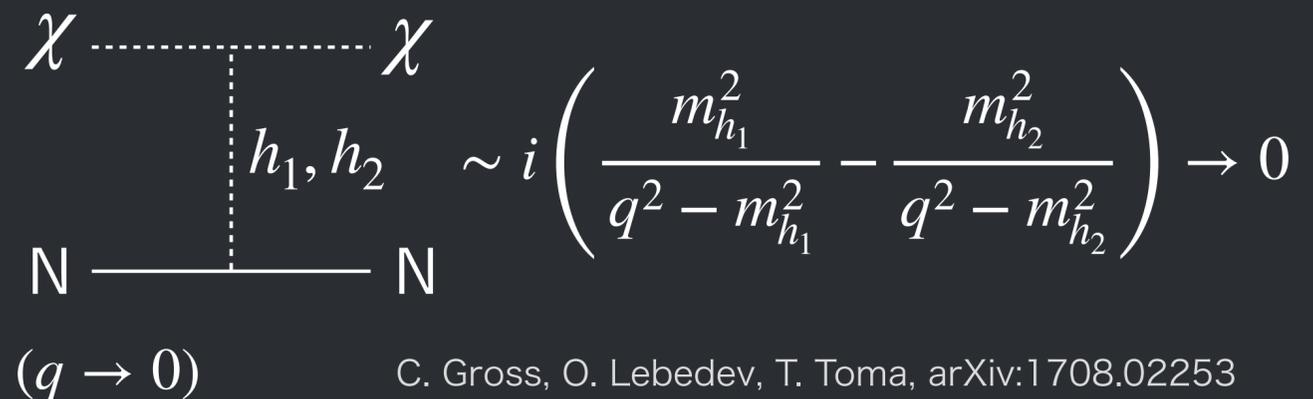
- 直接検出の散乱抑制ギミック

- fermion DM + pseudo scalar portal



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



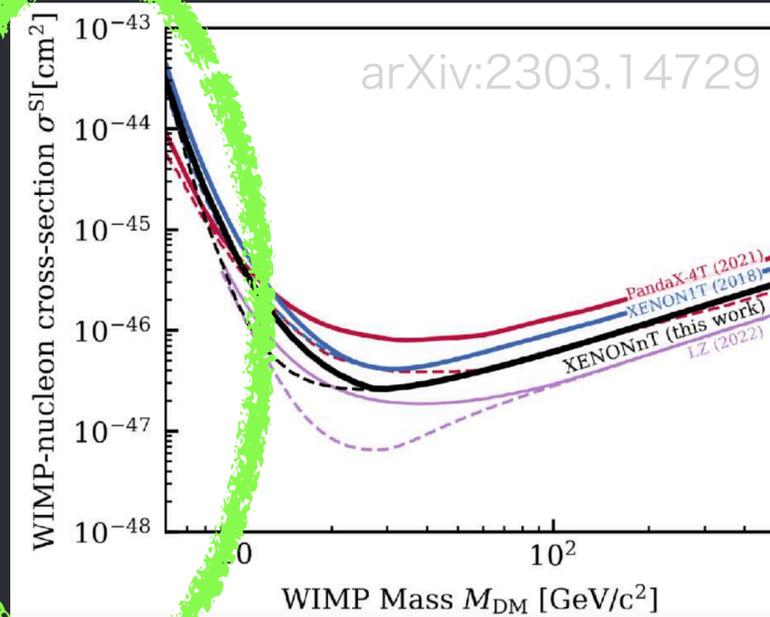
C. Gross, O. Lebedev, T. Toma, arXiv:1708.02253
Y. Abe, T. Toma, K. Tsumura, arXiv:2001.03954
D. Azevedo et al., arXiv:1810.06105, K. Ishiwata, T. Toma,
arXiv:1810.08139, S. Glaus et al., arXiv:2008.12985
Y. Abe, T. Toma, arXiv:2108.10647, ...

$(m_{h_1}^2 - m_{h_2}^2 \rightarrow 0)$ 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

軽いWIMP

- $m_{\text{DM}} < 0(1)\text{GeV}$ 領域の直接検出

標準的なWIMP
 ⇒ 運動エネルギー
 $\frac{1}{2}m_{\text{DM}}v_{\text{DM}}^2$ が小さすぎると検出できない

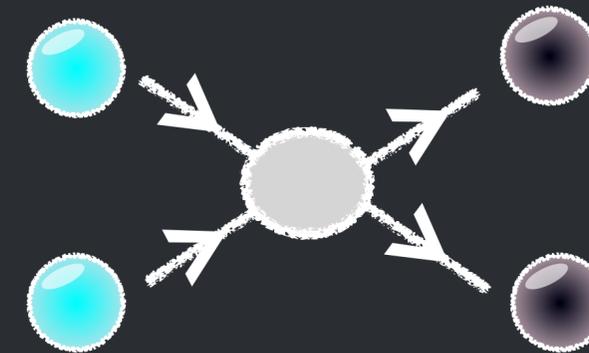


- 加速の機構



- 加速されたDM

- 運動エネルギーが大きければ軽いDMも検証可能
- 相互作用の制限が弱い
 e.g. $\sigma_{\chi p} < 10^{-32}\text{cm}^2$ (宇宙線による散乱)



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

パレオ検出器

D.P. Snowden-Ifft et al., Phys.Rev.Lett. 74 (1995)
S. Baum et al., arXiv:1806.05991

- 鉱物を利用して検出
- 重いDMの検出

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 \propto n_{\text{DM}} m_{\text{DM}} \Rightarrow n_{\text{DM}} \propto \frac{1}{m_{\text{DM}}}$$

重いDMはイベント数を稼げない

総イベント数

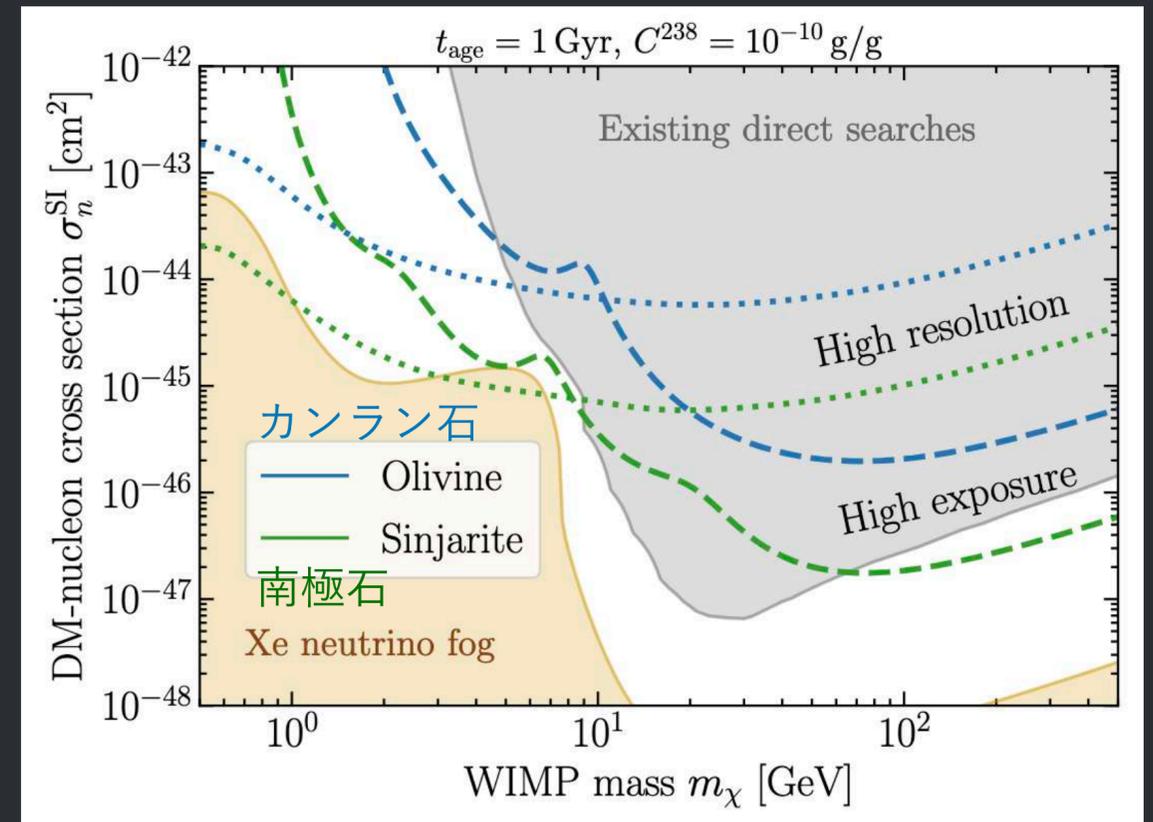
時間

$$N = M \cdot T \cdot R$$

標的質量

イベント率

- 直接検出実験
 $M \cdot T \sim 10 \text{ ton} \cdot 1 \text{ yr} \sim 10^4 \text{ kg yr}$
- 鉱物
 $M \cdot T \sim 1 \text{ g} \cdot 1 \text{ Gyr} \sim 10^6 \text{ kg yr}$



S. Baum et al., arXiv: 2301.07118

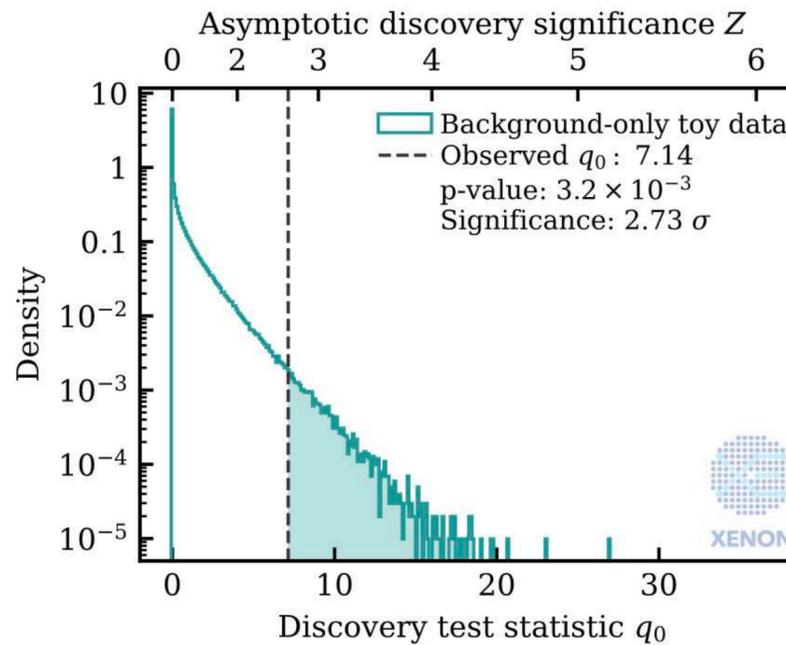
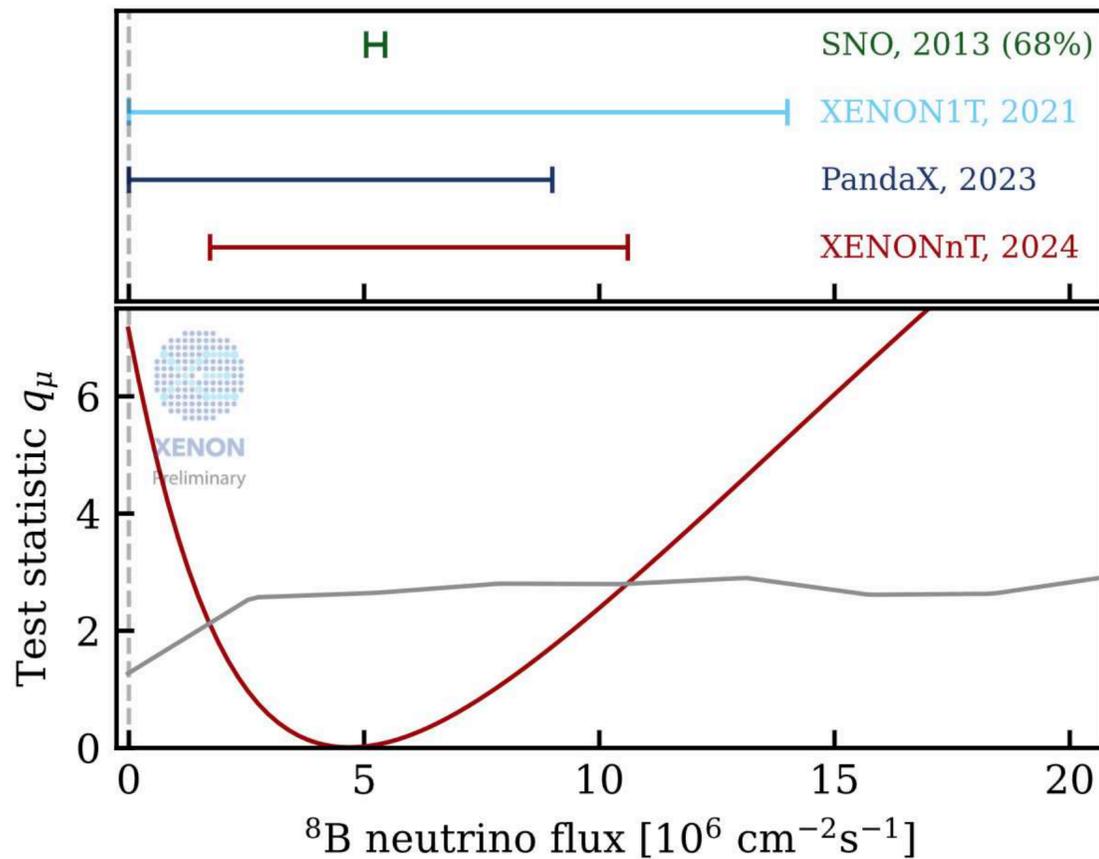


- 重いWIMP
- Q-ball
- モノポール
- ...

最近のニュース：ニュートリノフォグに到達

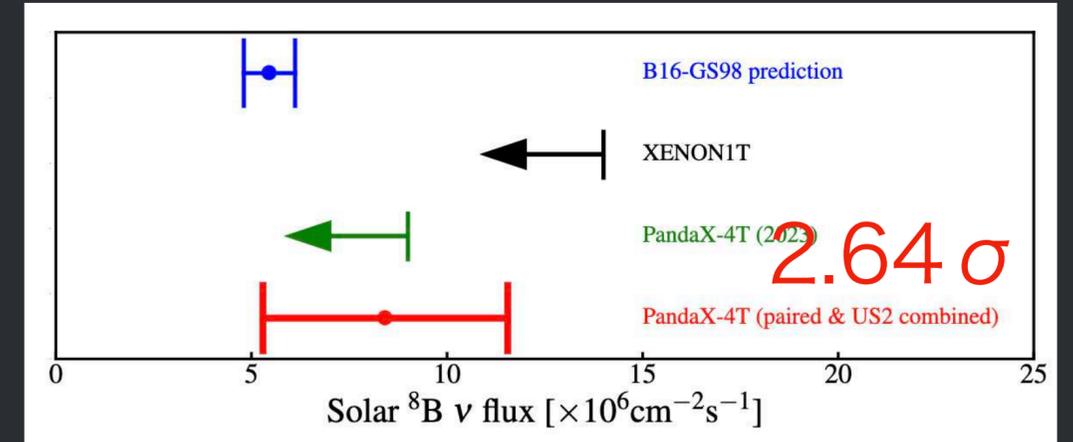
- XENONnT 2.73σ
- PandaX-4T 2.64σ

XENONnT Solar ^8B CEvNS Search Results

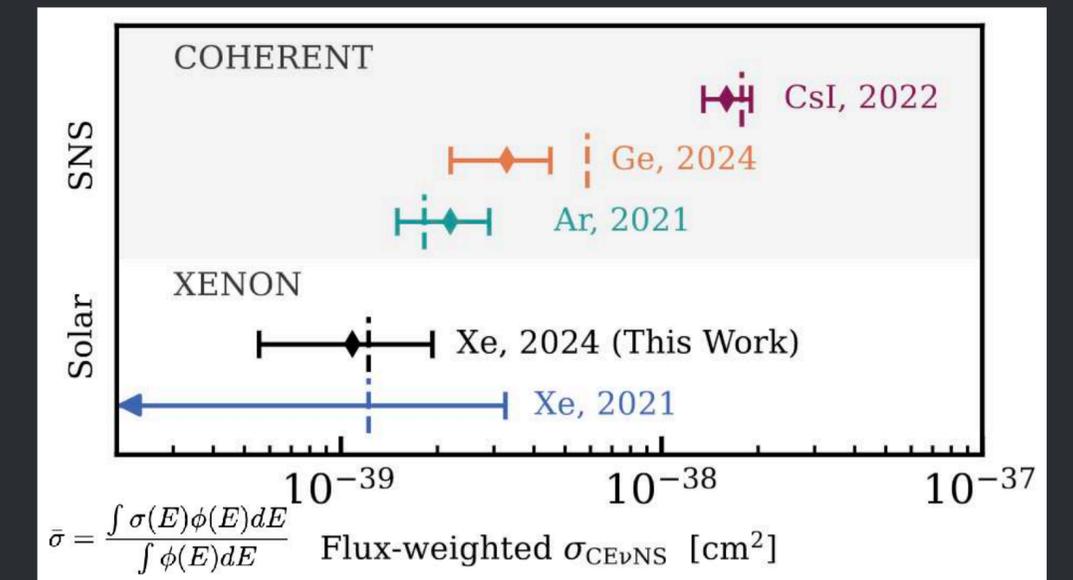


- We have measured the solar ^8B neutrinos via CEvNS in XENONnT at 2.73σ
- The first CEvNS measurement with Xe!
- The first astrophysical neutrino measurement via CEvNS

XENONnT presentation at the IDM 2024 conference



PandaX-4T arXiv:2407.10892



XENONnT arXiv:2408.02877

ニュートリノフォグ

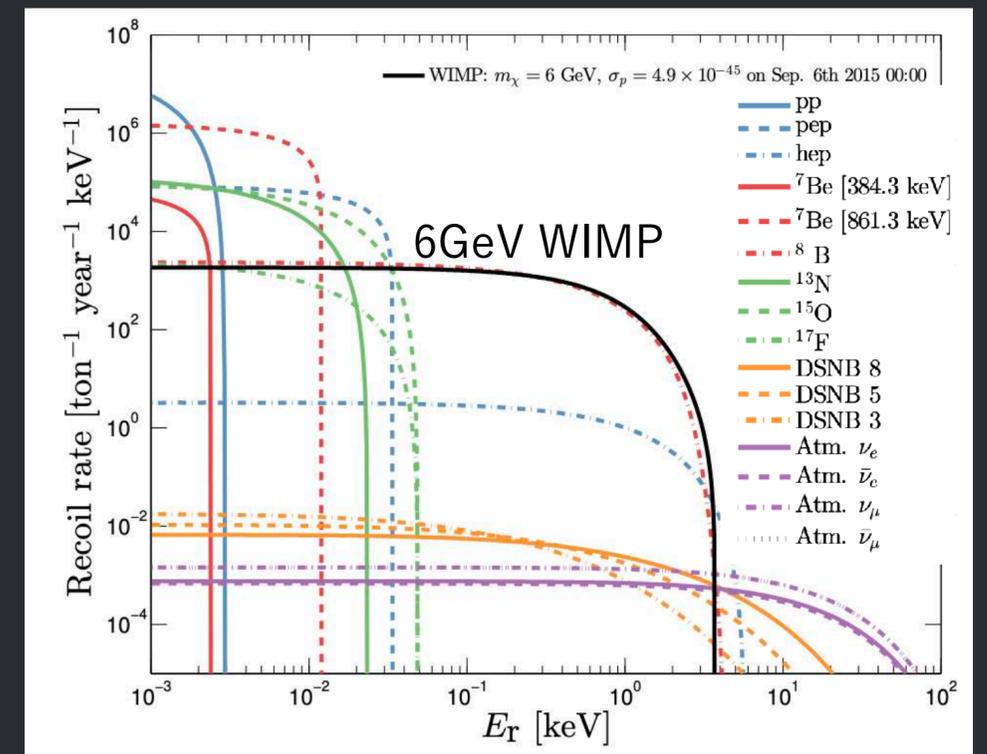
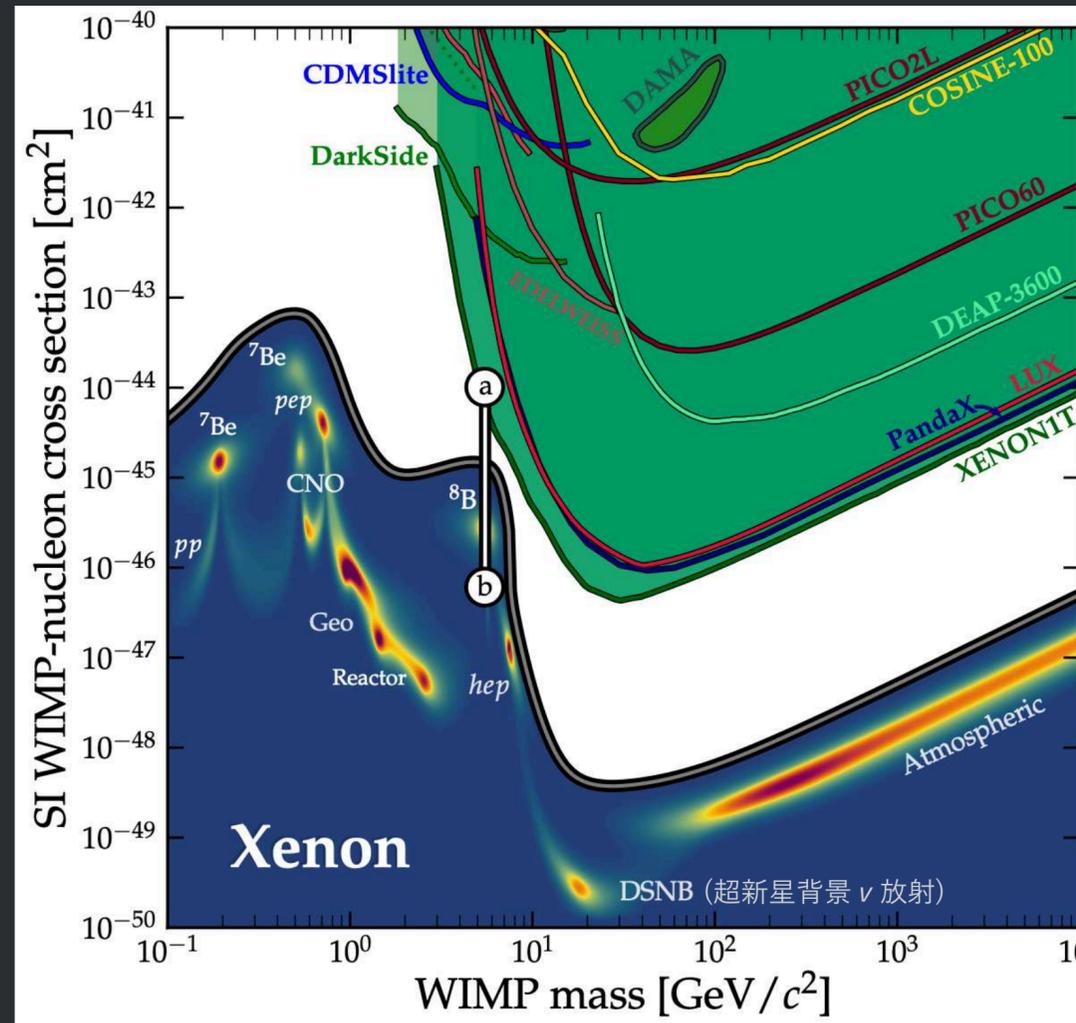
D. Z. Freedman, Phys. Rev. D 9, 1389 (1974)

- 前はニュートリノフロアと呼ばれていた
- 直接検出実験が最高感度を更新し続ける

→ Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering (CEvNS)が背景事象に



主要な太陽ν

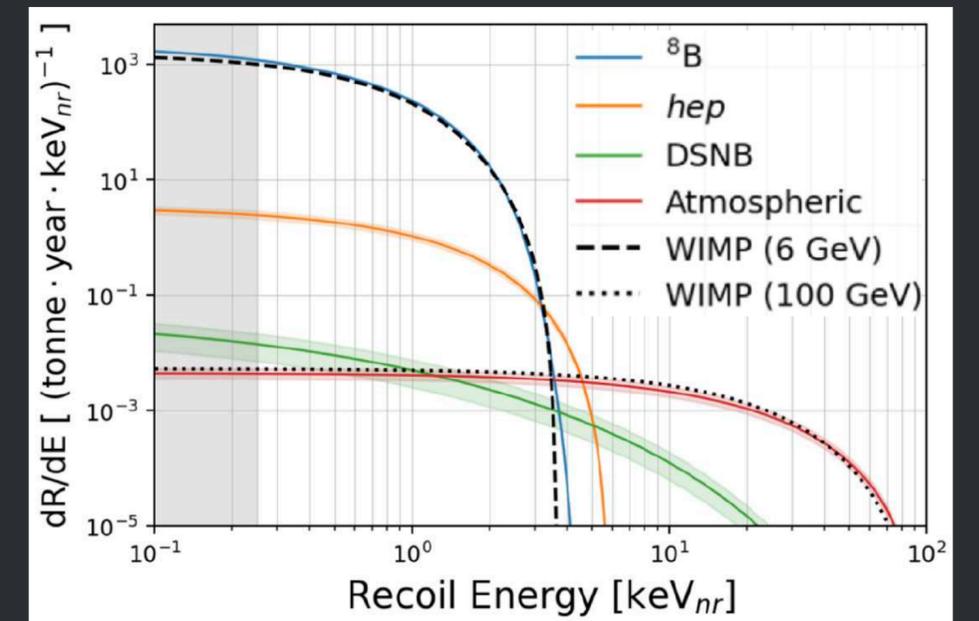


C. A. J. O'Hare et al., arXiv:1505.08061

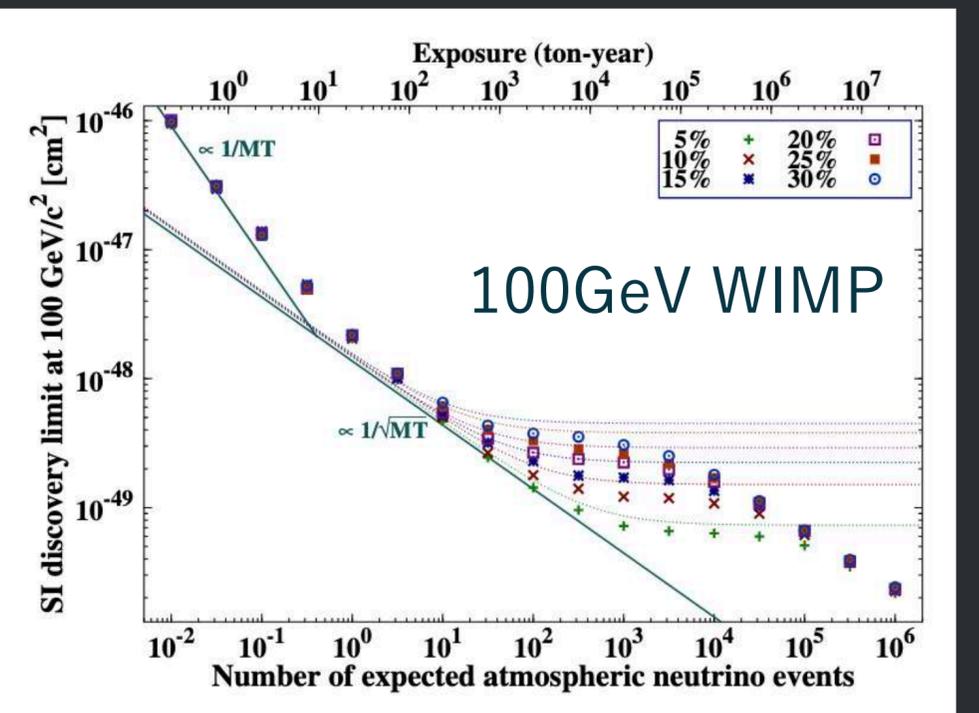
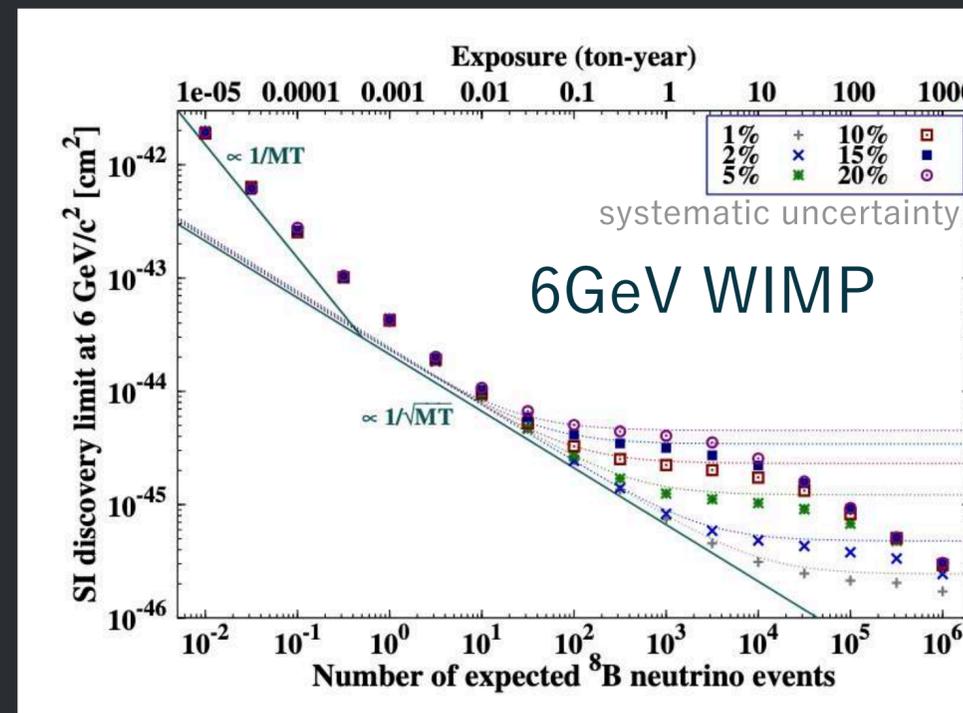
ニュートリノフォグに到達した後は？

- “DMらしさ”で識別する

- エネルギースペクトル
 $> 1-10^4$ tonのexposureが必要



X. Xiang et al., arXiv:2304.06142

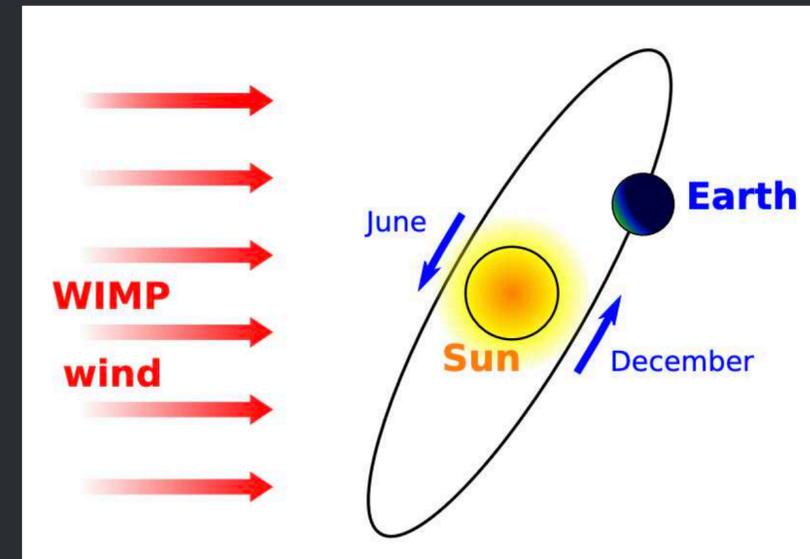


ニュートリノフォグに到達した後は？

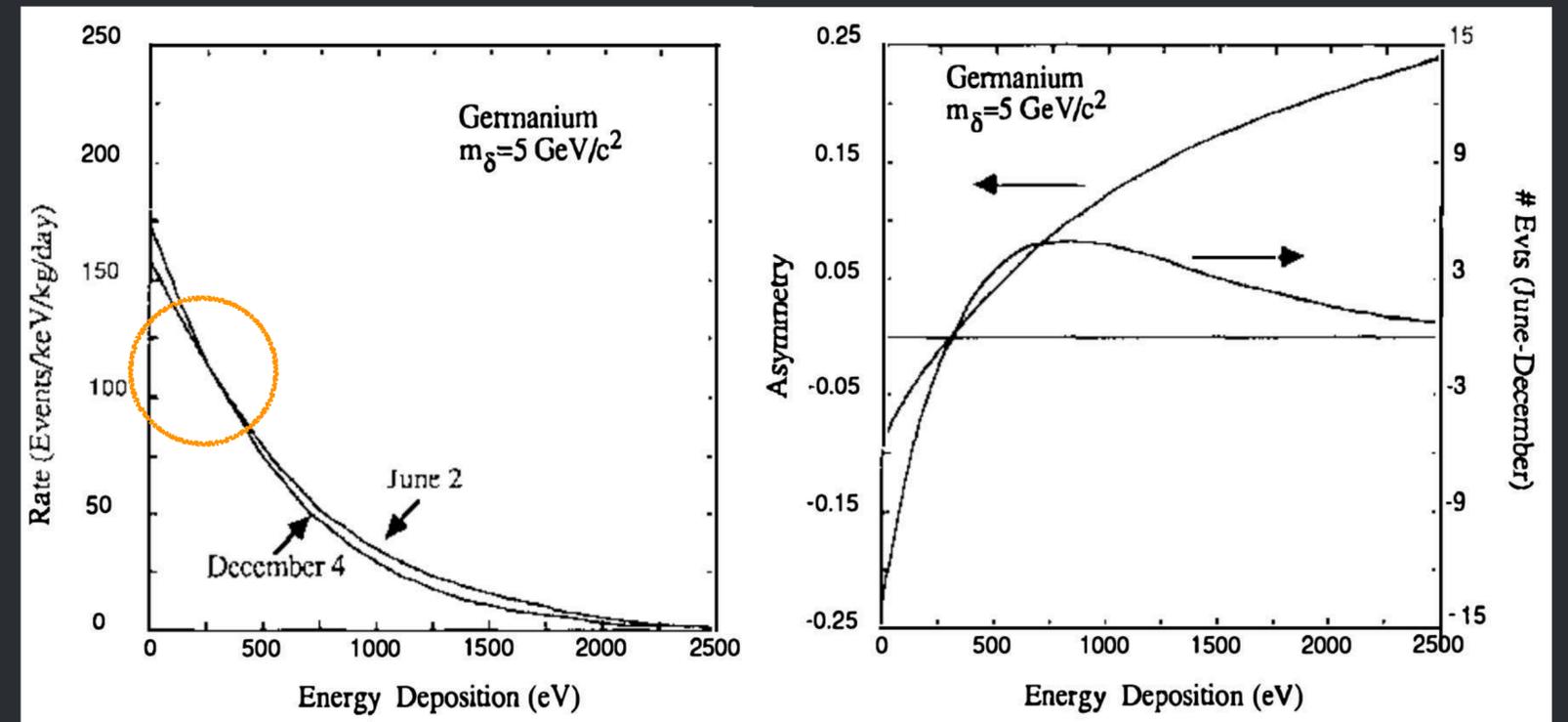
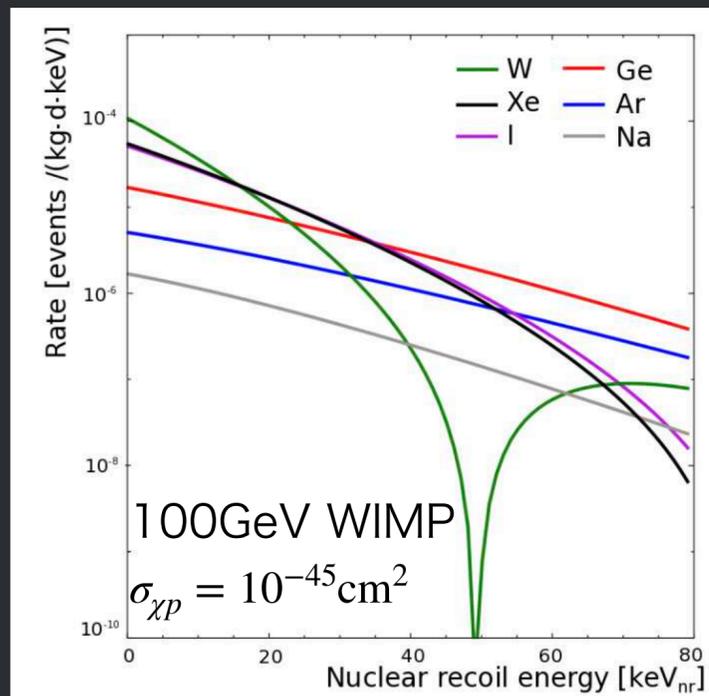
- “DMらしさ”で識別する

- エネルギースペクトル
 - > 1-10⁴ tonのexposureが必要

- 季節変動（日周変動）
 - ~ 10%程度の差しか出ない
- 標的核子依存性



K. Freese et al., arXiv:1209.3339



J. Primack et al., Ann.Rev.Nucl.Part.Sci. 38 (1988)

ニュートリノフォグに到達した後は？

- “DMらしさ”で識別する

- エネルギースペクトル
 > 1-10⁴ tonのexposureが必要

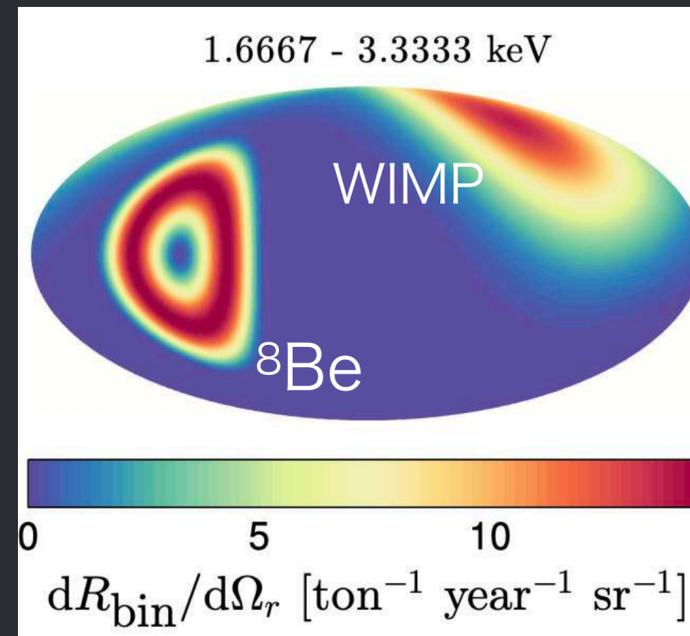
- 季節変動（日周変動）
 ~ 10%程度の差しか出ない

- 標的核子依存性

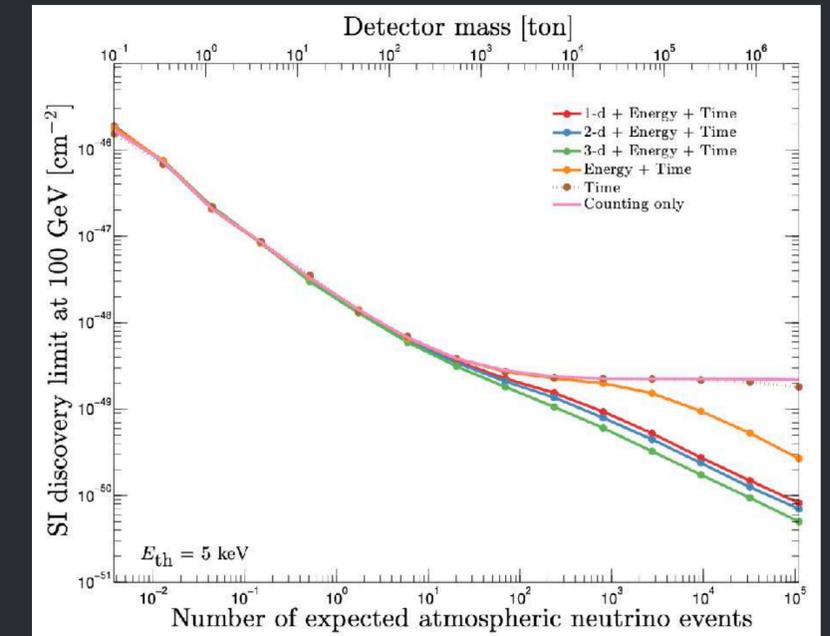
- 方向情報

> 10² tonのexposureが必要
 感度向上（背景事象除去・大容量）

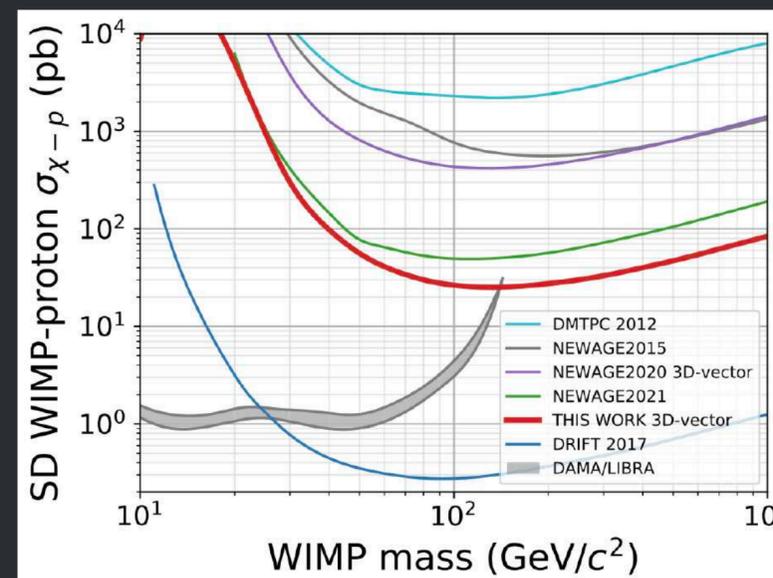
いずれにしても簡単ではない
 新しいアイデア・技術・予算…



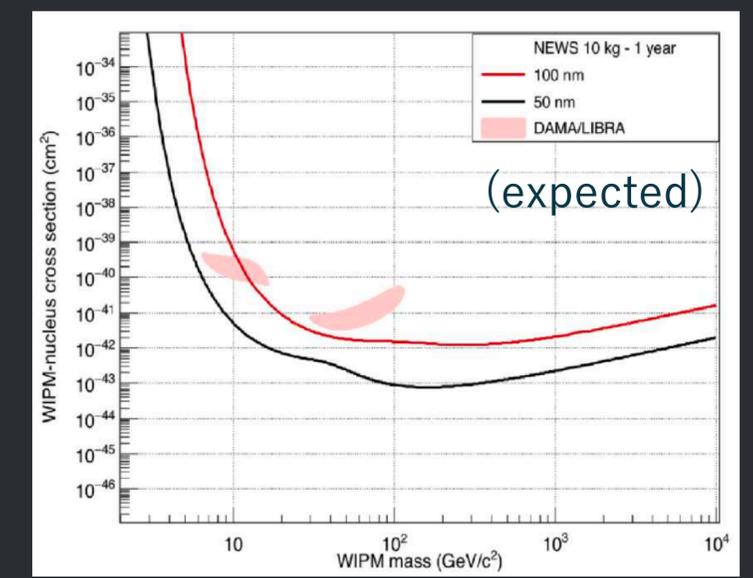
September, Xe target
 $m_\chi = 6\text{ GeV}$, $\sigma_{\chi p} = 4.9 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$



C. A. J. O'Hare et al., arXiv:1505.08061



NEWAGE collaboration (Prog. Theor. Exp. Phys. 2023 103F01)



NEWSdm collaboration

概要

1. WIMP直接検出の現状
2. 現状を受けて今後の展望
3. 制限に伴う不定性
4. 方向がわかる直接検出とDMの性質
5. まとめ

素粒子論パラメータへの読み替えに伴う不定性

直接検出のイベント率 $\frac{dR}{dE_R} = \frac{\rho_{DM}}{m_N m_{DM}} \int_{v_{min}} dv f(\mathbf{v}) v \frac{d\sigma_{\chi N}(\mathbf{v})}{dE_R}$

- 太陽系近傍 (< 数100 pc)での暗黒物質のエネルギー密度

- 直接検出実験では0.3 GeV/cm³ を使う協定 \longleftrightarrow 最近は0.4 GeV/cm³ が多い
M Pato et al, arXiv:1504.06324

- 暗黒物質の速度分布 $f(\mathbf{v})$ (後でやる)

- 銀河系で等方的なMaxwell分布

$$f(\mathbf{v}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \text{Exp} \left[-\frac{v^2}{2\sigma_v^2} \right]$$

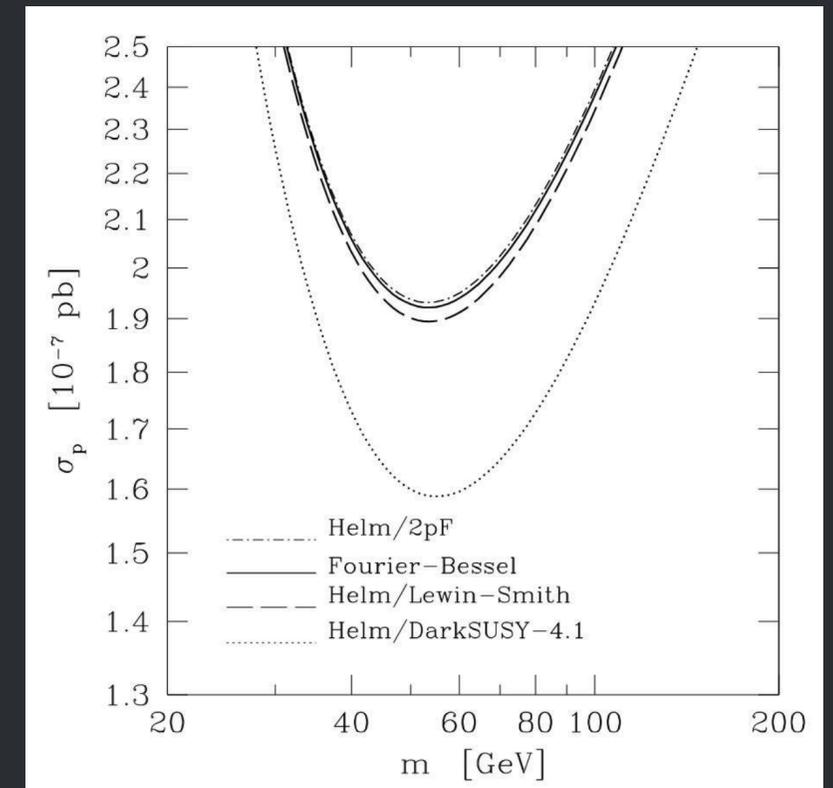
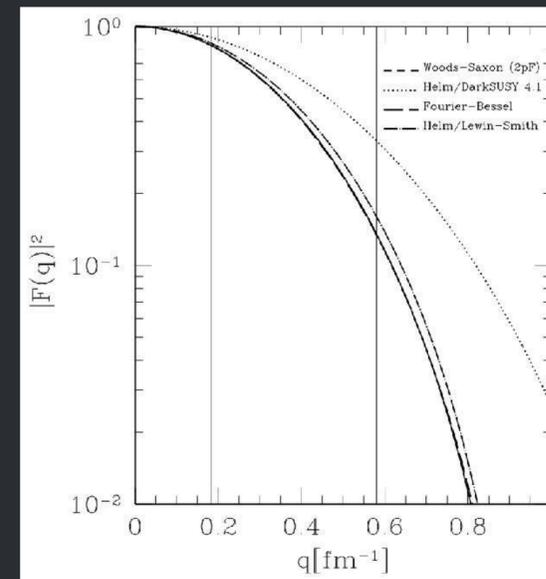
- 原子核の形状因子

DM-原子核 $\frac{d\sigma_{\chi N}}{dE_R} = \frac{m_N}{2m_R^2 v^2} (\sigma_{SI} F_{SI}^2(E_R) + \sigma_{SD} F_{SD}^2(E_R))$ DM-核子の散乱断面積

- Helmの形状因子

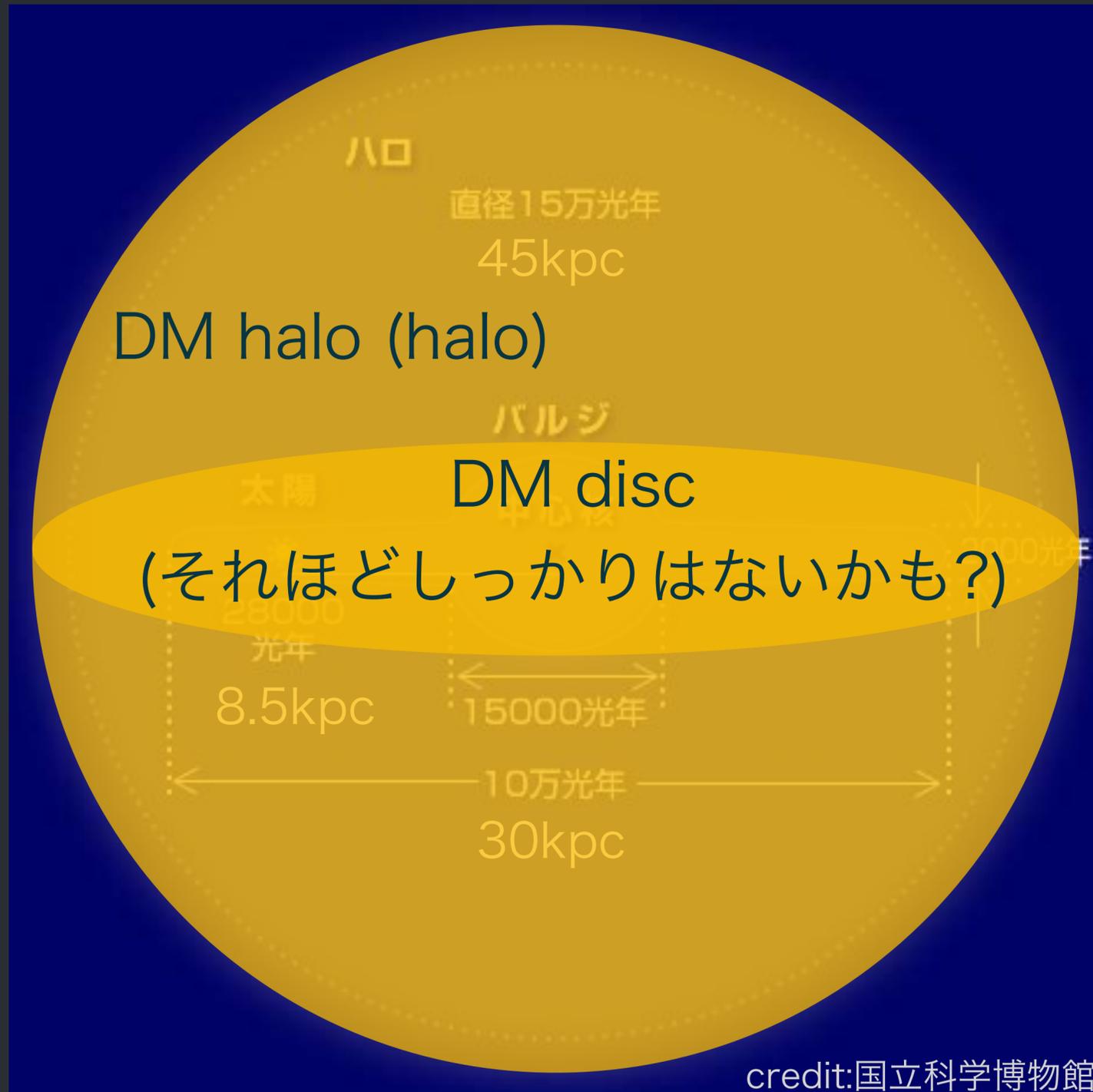
$$F(qr_n) = 3 \frac{\sin(qr_n) - (qr_n)\cos(qr_n)}{qr_n} e^{-(qs)^2/2}$$

Lewin and Smith, Astropart.Phys. 6 (1996) 87



G. Duda et al., JCAP 0704:012,2007

太陽系近傍のDM



観測から ρ_{DM} を決める

- Local measurements

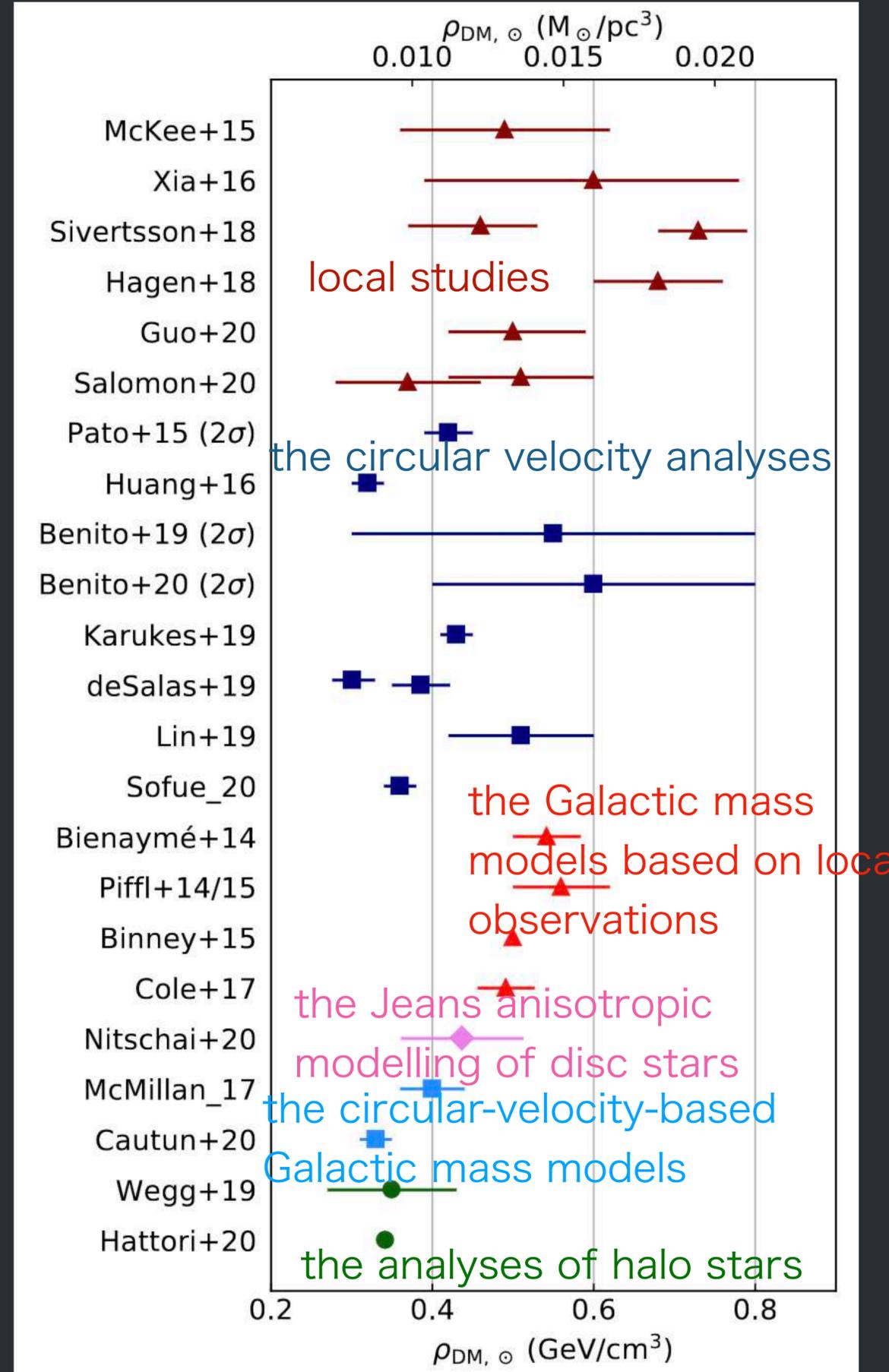
- 200-300pc以内の天体を使う
- 確実に太陽系近傍の密度を求められる→直接検出
- 統計量は少ない
 - Discの有無によらず、確実に太陽系近傍の密度を測れる
 - $\rho_{\text{DM},\odot}=0.4-0.6 \text{ GeV/cm}^3$

- Global measurements

- さらに外側の天体も使う
- 太陽系近傍だけでなく広い範囲での平均密度→間接検出
- 統計量が多い
 - 観測方法によって不定性も異なる
 - $\rho_{\text{DM},\odot}=0.3-0.5 \text{ GeV/cm}^3$

P. F. de Salas, A. Widmark, arXiv:2012.11477

検出実験による暗黒物質の検証



宇宙論的シミュレーション

- なぜ観測ではなくシミュレーション？
 - 観測はバリオンしか見られないので、DMを直接測定できない
 - DM速度も直接検出の結果に影響するが、観測から直接測れない
 - 観測では光源が少ないDMハローは見逃される
 - 観測に伴う不定性
- シミュレーションから示唆されるDM密度

	g1536DM (DM-only)	g1536 (DM+baryons)	g15784 (DM+baryons)
Simulation			
Virial Mass [M_{\odot}]	7.48×10^{11}	5.84×10^{11}	1.50×10^{12}
Virial Radius [kpc]	260	143	328
DM particle mass [M_{\odot}]	1.33×10^6	1.11×10^6	1.11×10^6
Circular velocity (at $R = 8$ kpc) [km/s]	108	187	273
Torus ($r_1 = 8$ kpc, $r_2 = 2$ kpc)			
Number of DM particles	3085	4849	6541
Average DM density [GeV/cm^3]	0.270	0.346	0.493
Average velocity (U, V, W) [km/s]	(0.0, 5.3, -0.5)	(2.7, 21.6, 2.3)	(0.9, 18.5, 3.4)
Velocity s.d. ($\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W$) [km/s]	(109, 95, 90)	(144, 128, 121)	(205, 166, 177)
RMS speed [km/s]	$98\sqrt{3}$	$133\sqrt{3}$	$184\sqrt{3}$
Maximum speed [km/s]	359	454	600.

MaGICC cosmological simulation
Chris Kelso et al., arXiv:1601.04725

c.f. $\rho_{\text{DM}} = 0.396 \text{ GeV}/\text{cm}^3$

(Lactea II DMO simulation, 球殻平均)

M. Zemp et al., arXiv:0812.2033

ρ_{DM} の不定性と素粒子論的パラメータへの示唆

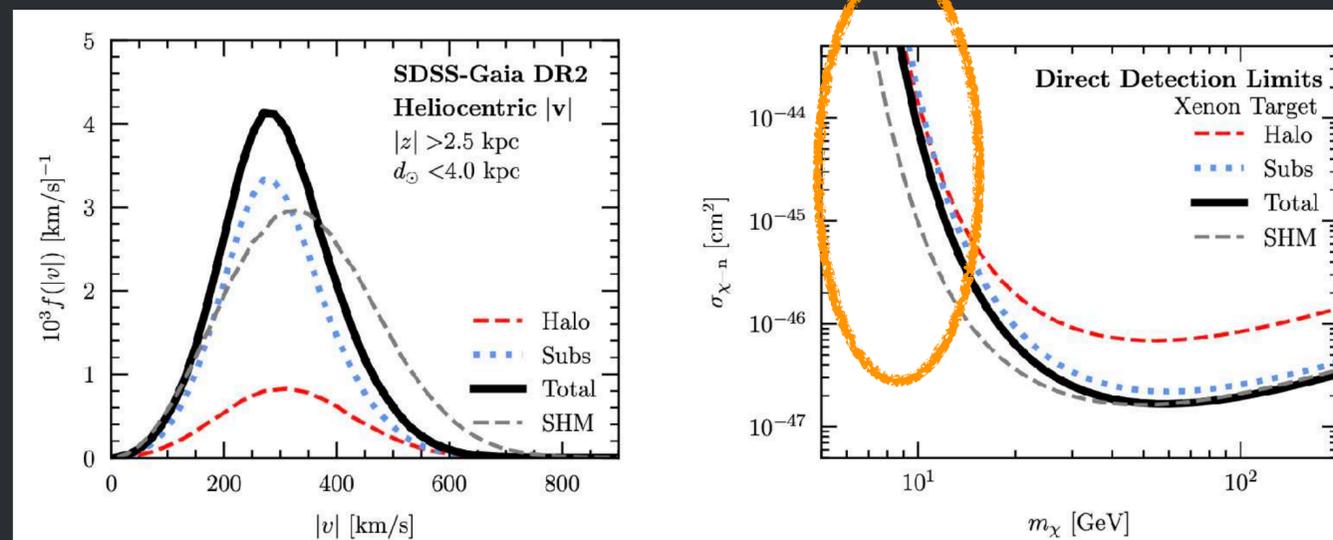
- 観測・シミュレーションから示唆される範囲内では σ への制限は桁では変わらない

- サブ構造もあるかも

- サブハロー

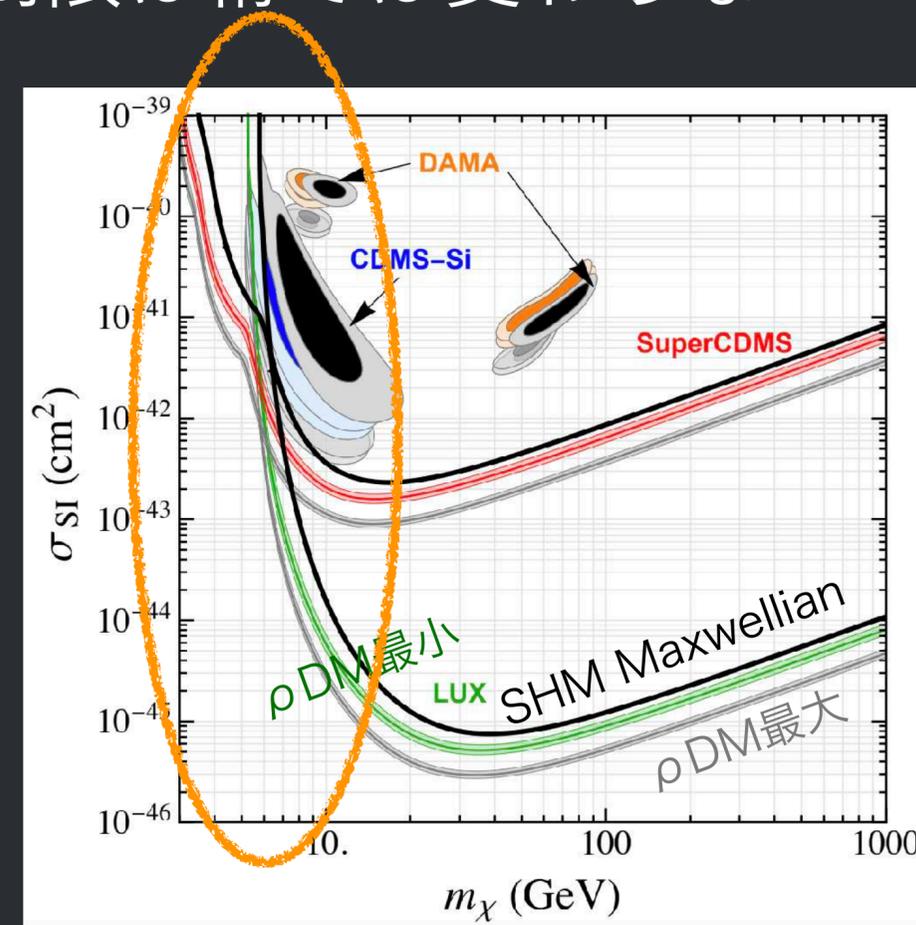
- tidal stream, debris flow

e.g. 主要成分(古い等方的な恒星ハロー)と潮汐debris(若い異方的な集団)が存在



SDSS-Gaia DR2

L. Necib et al., arXiv:1807.02519



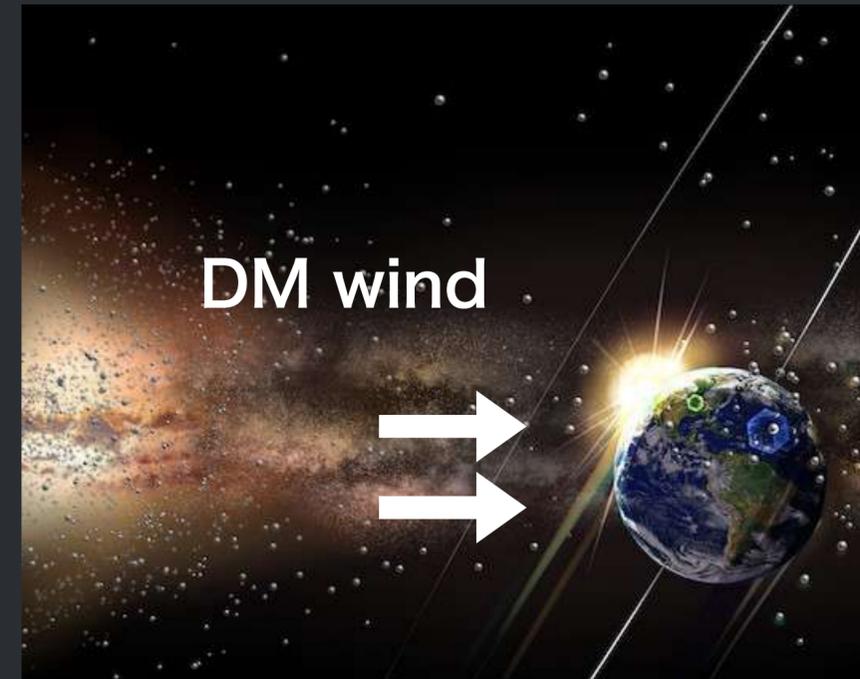
N. Bozorgnia et al., arXiv:1601.04707

概要

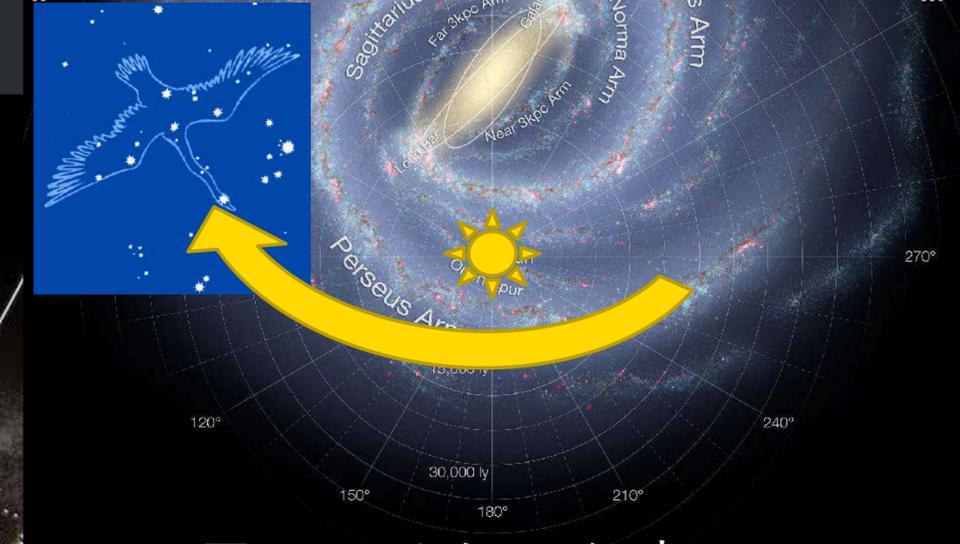
1. WIMP直接検出の現状
2. 現状を受けて今後の展望
3. 制限に伴う不定性
4. 方向がわかる直接検出とDMの性質
5. まとめ

方向感度をもつ直接検出実験

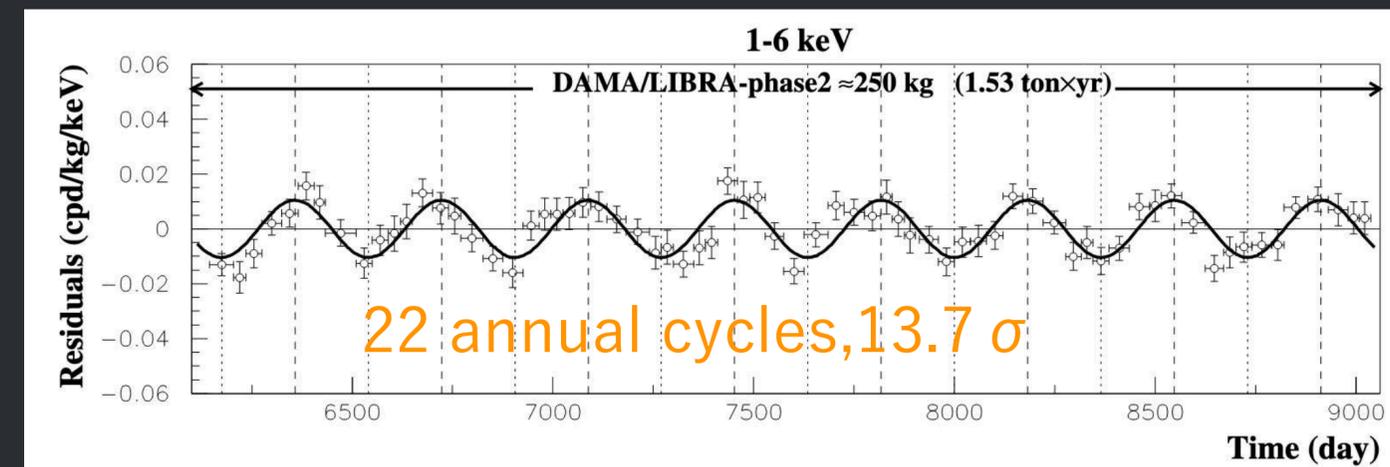
Credit: NASA/JPL-Caltech/ESO/R. Hurt



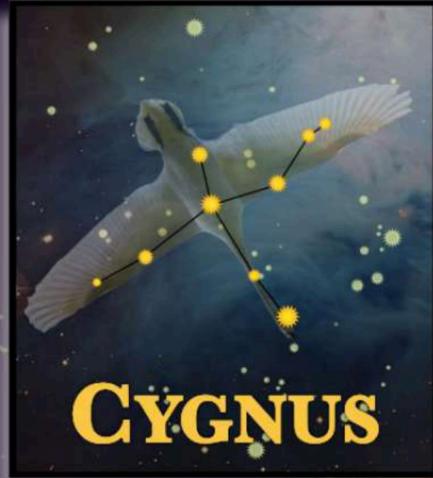
DMの風ははくちょう座の方向から来る



- 方向がわかるとなになが嬉しい？
 - 効率的に背景事象除去ができる
 - DAMA/LIBRAのチェックができる
 - ニュートリノフォグの開拓



方向感度をもつ直接検出実験



CYGNUS-UK
Boulby, UK

NEWSdm

CYGNUS-KM
Kamioka, Japan

CYGNUS-US
Lead, South Dakota

CYGNO
Gran Sasso, Italy

CYGNUS-Andes
Chile/Argentina

CYGNUS-OZ
Stawell, Aus.

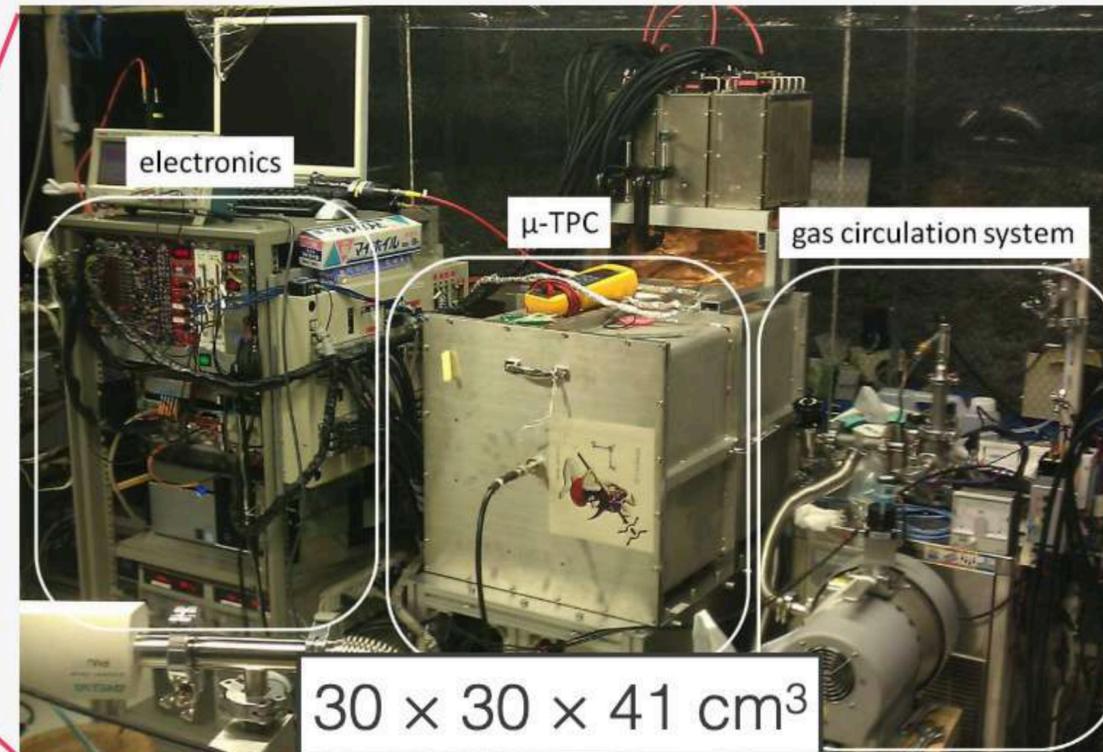
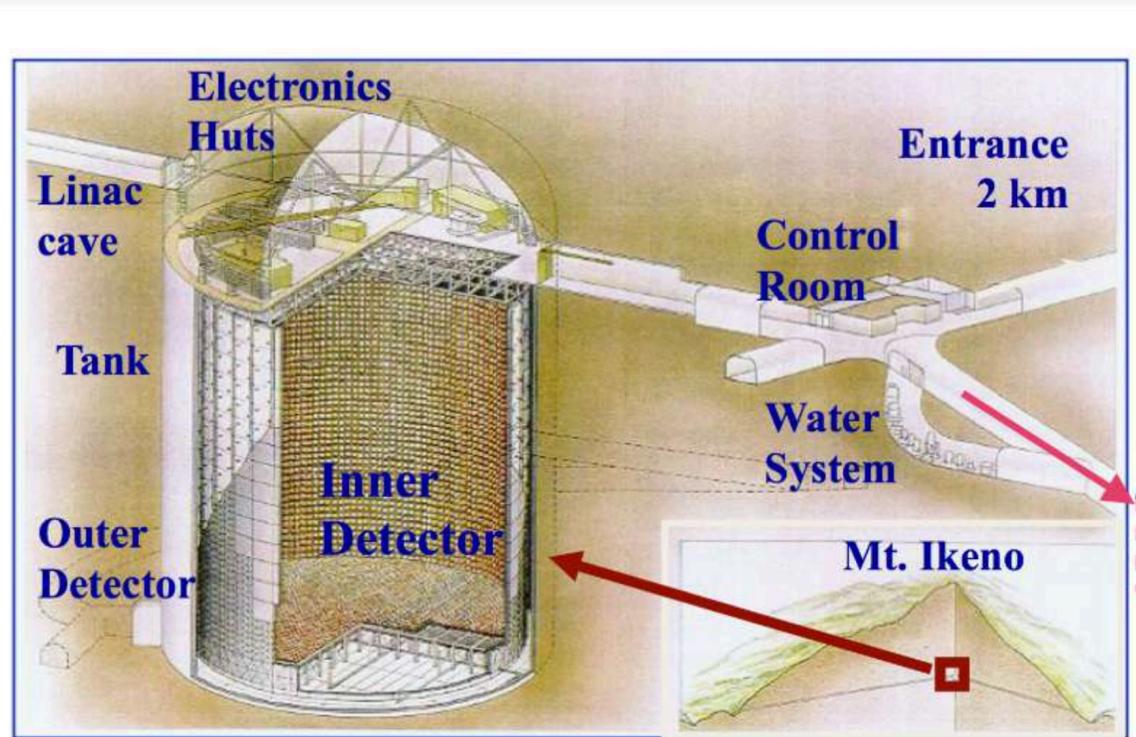
Gas
TPC

Nuclear
Emulsion

NEWAGE

S. Higashino's slide
at IDM2024

- 1,000 m underground experiment in the Kamioka mine
- Low pressure gaseous TPC
 - $30 \times 30 \times 41 \text{ cm}^3$ fiducial volume
 - filled with CF_4 gas (0.1 atm): spin-dependent search



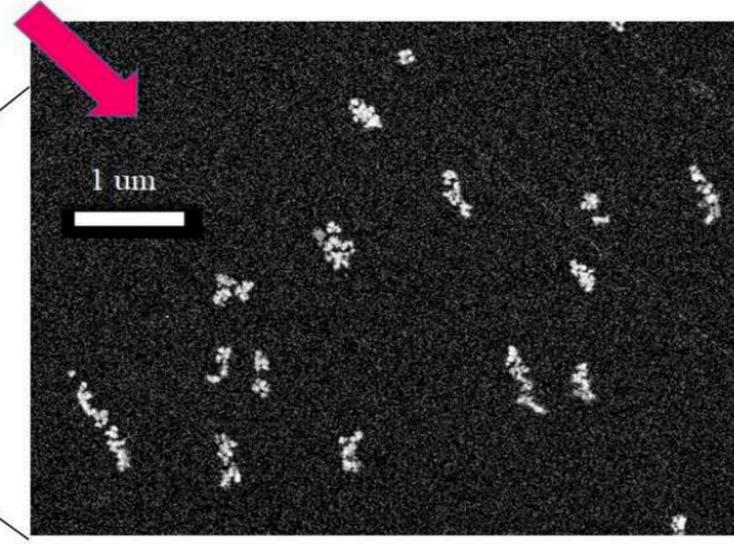
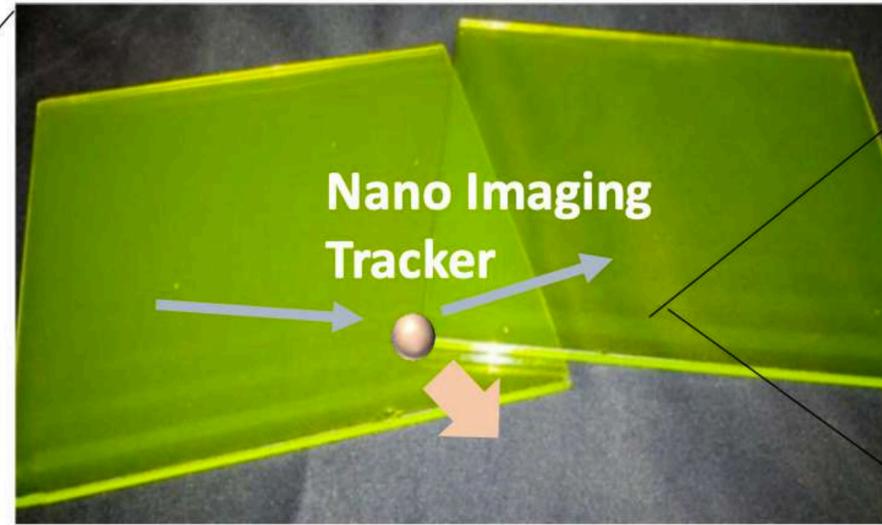
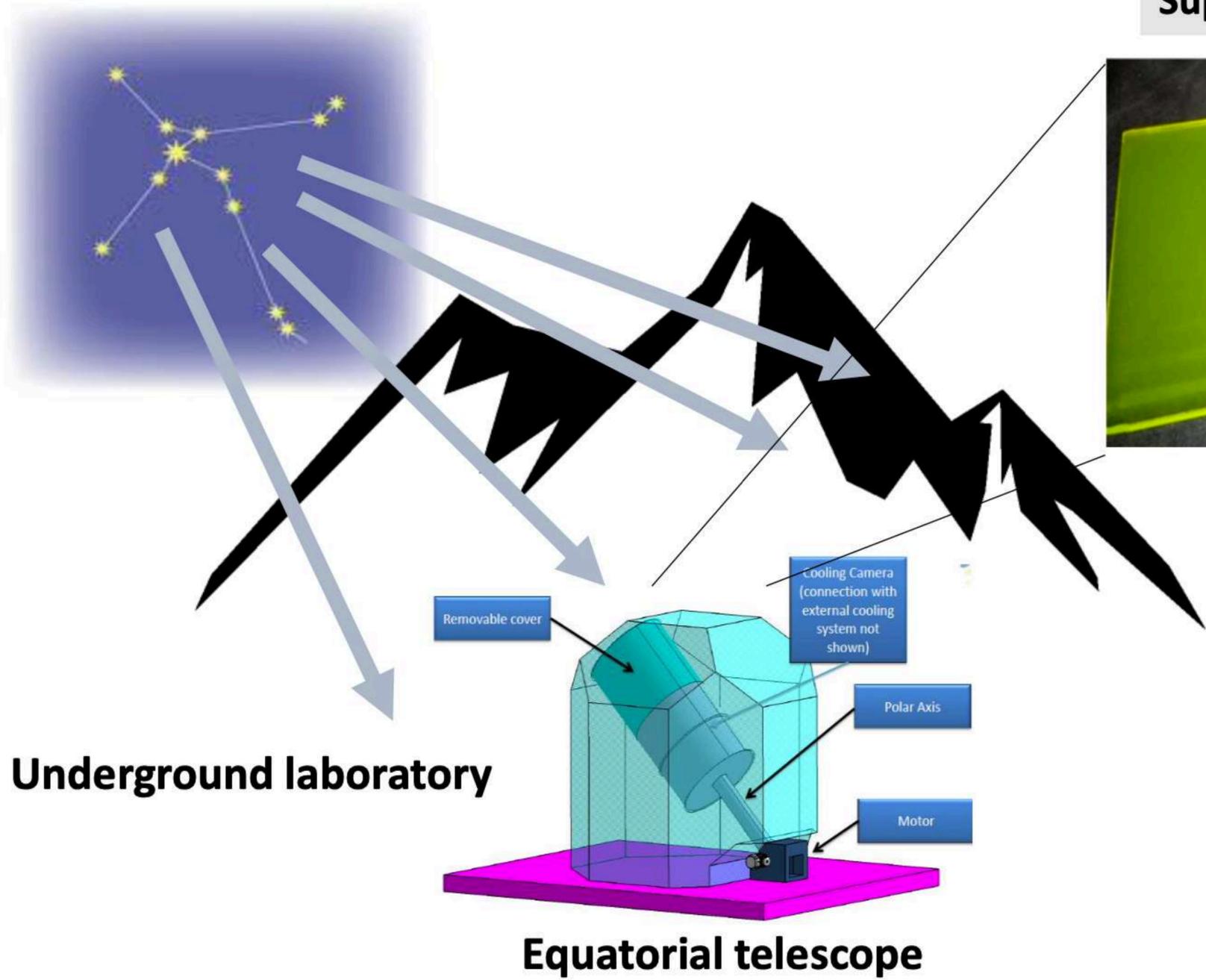


NEWSdm experiment

Collaborated by 5 counties, 14 institutes

Direction Sensitive Dark Matter Search with Super-high resolution nuclear emulsion

Super-resolution nuclear emulsion and sub-micron tracking



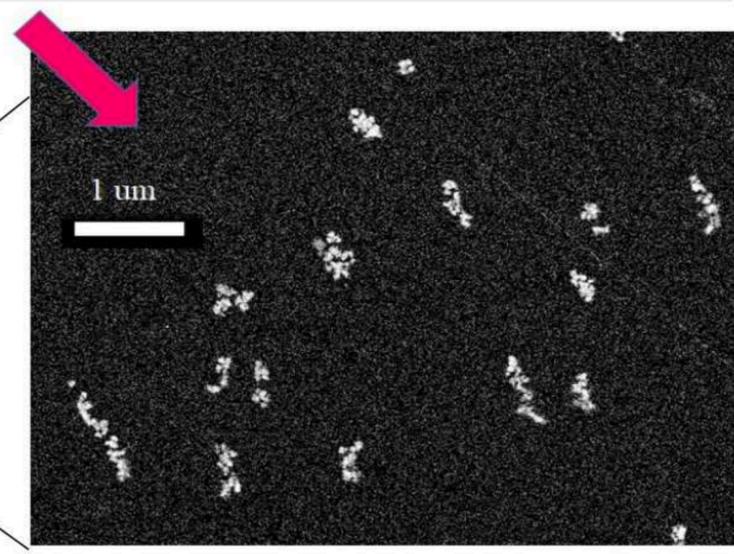
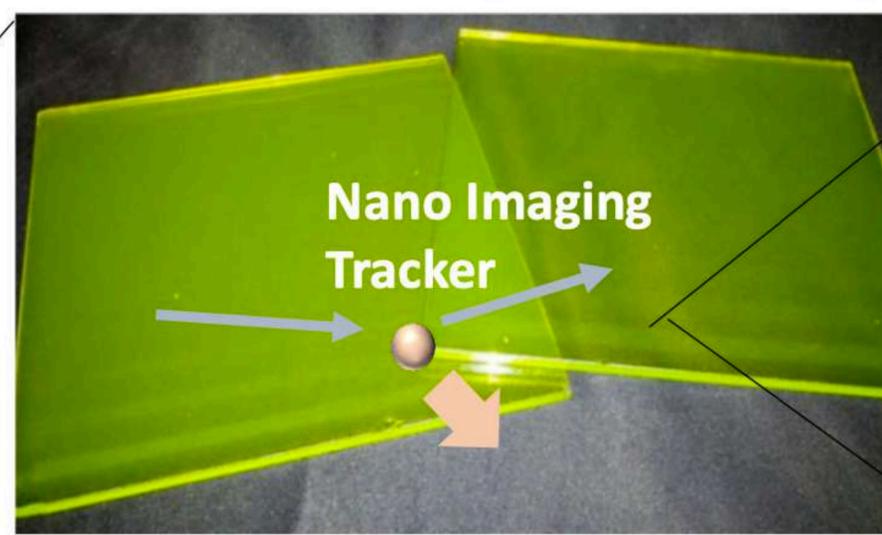


NEWSdm experiment

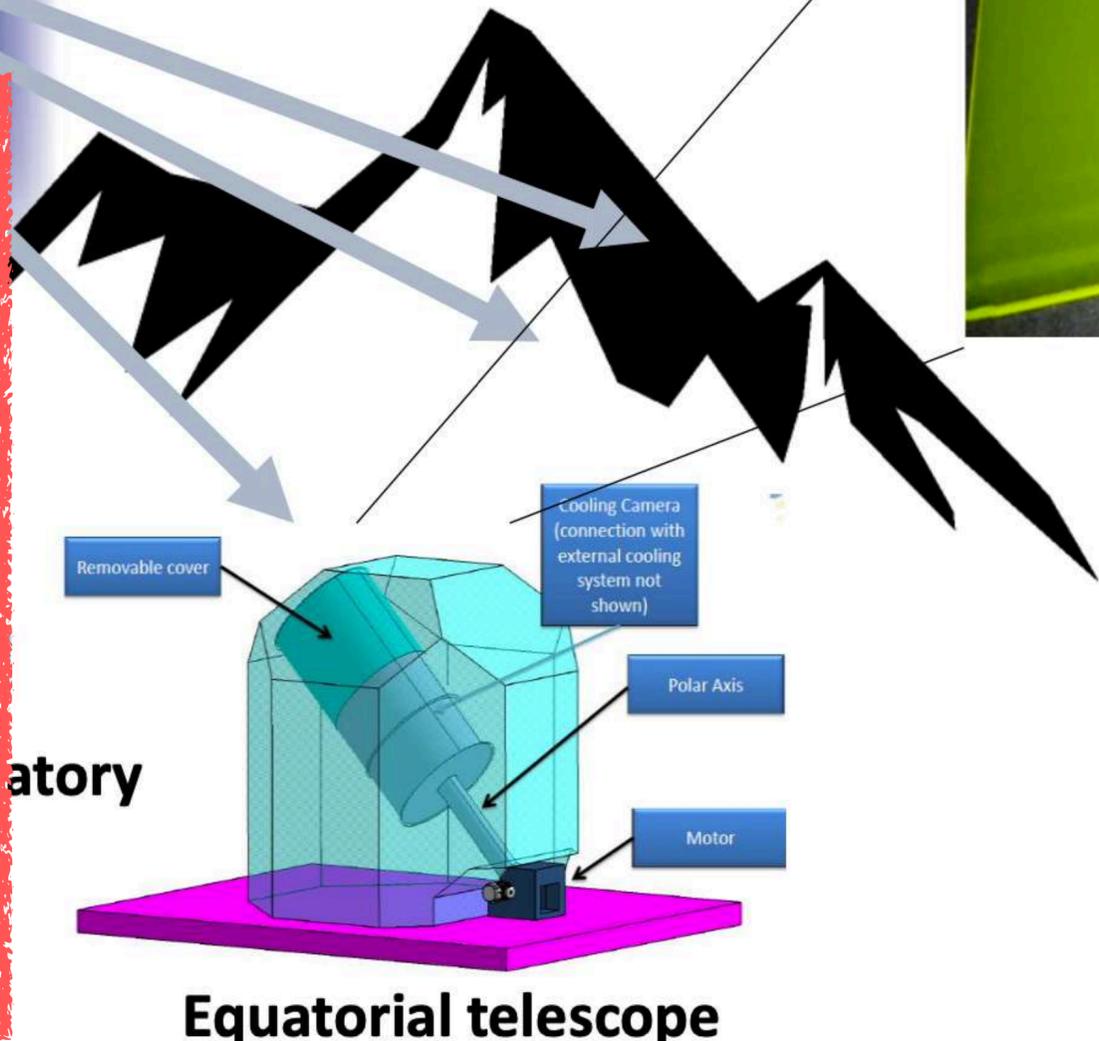
Collaborated by 5 counties, 14 institutes

Direction Sensitive Dark Matter Search with Super-high resolution nuclear emulsion

Super-resolution nuclear emulsion and sub-micron tracking



Element	Mass%	Atom%
Ag	44.5	10.5
Br	31.8	10.1
I	1.9	0.4
C	10.1	21.4
N	2.7	4.9
O	7.4	11.7
p	1.6	41.1



DMの速度分布

- 等方的Maxwell分布

$$f(v) = \frac{1}{(\pi v_0^2)^{3/2}} \exp \left[- (v + v_E)^2 / v_0^2 \right]$$

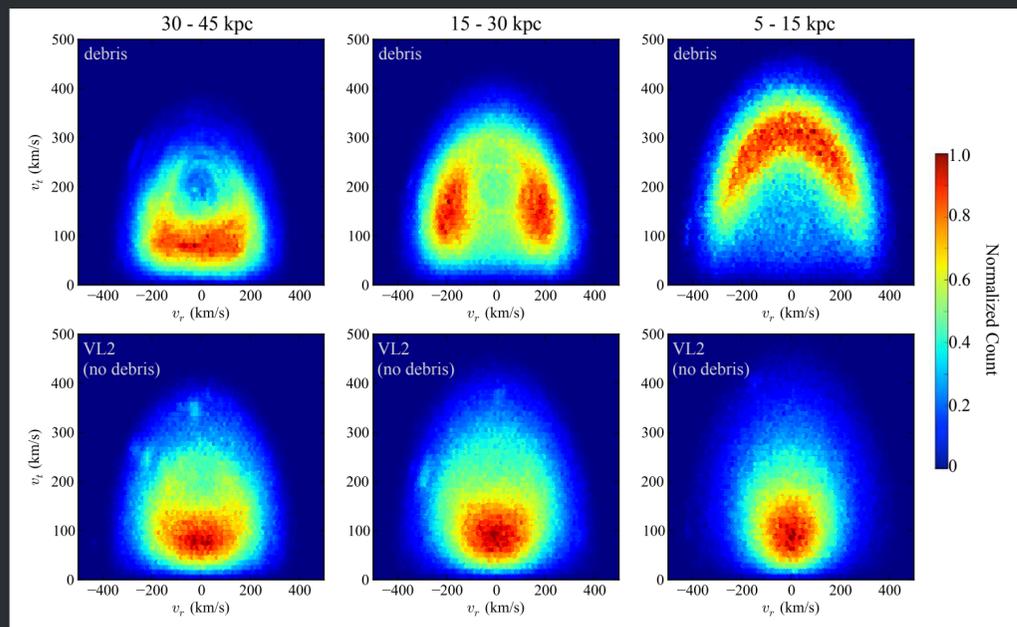
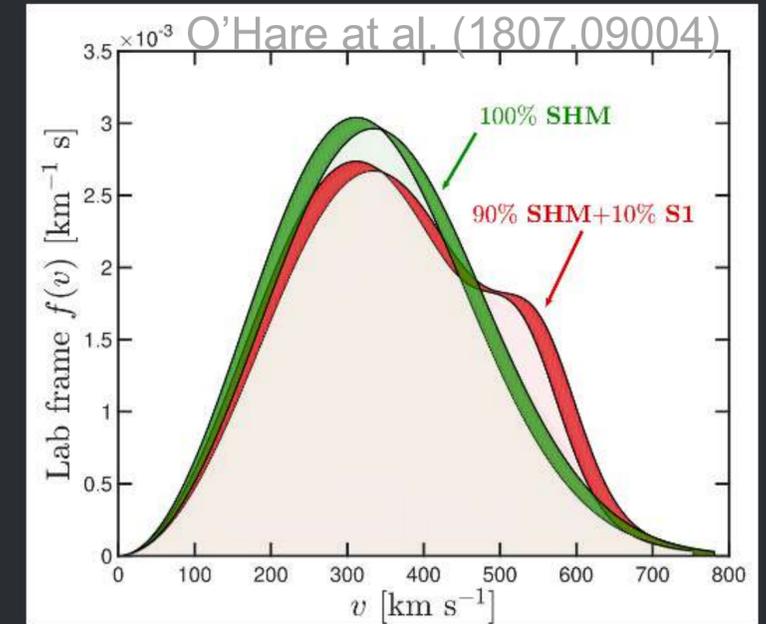
- よい近似なのか？

O'Hare et al. (1807.09004)

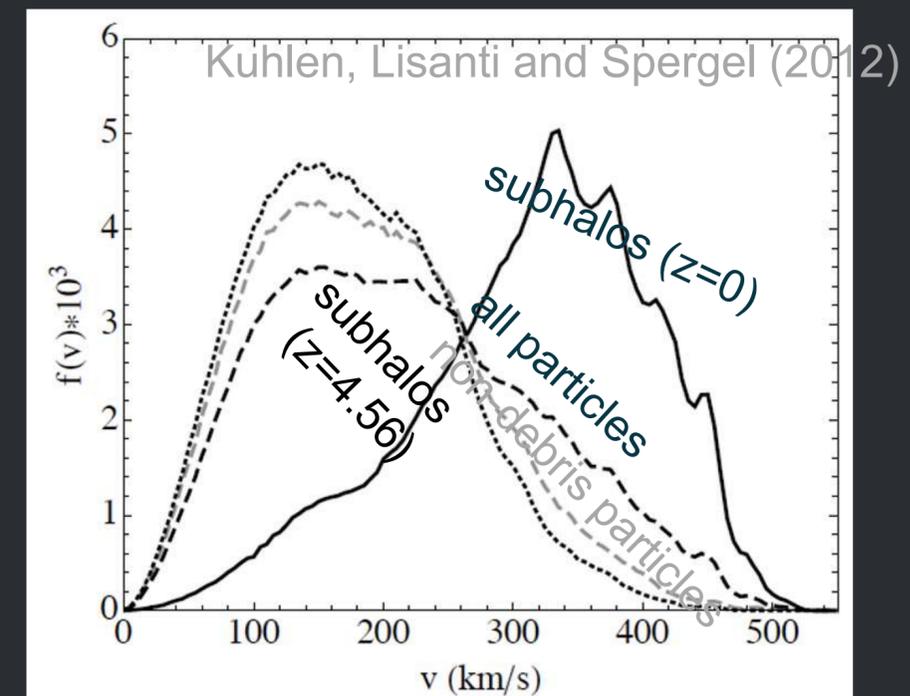
ストリームによる~10% 非等方成分

N体シミュレーションでのデブリフローの影響

S1 stream derived by SDSS-Gaia data has ~10% anisotropic component. Directional detection is suitable.

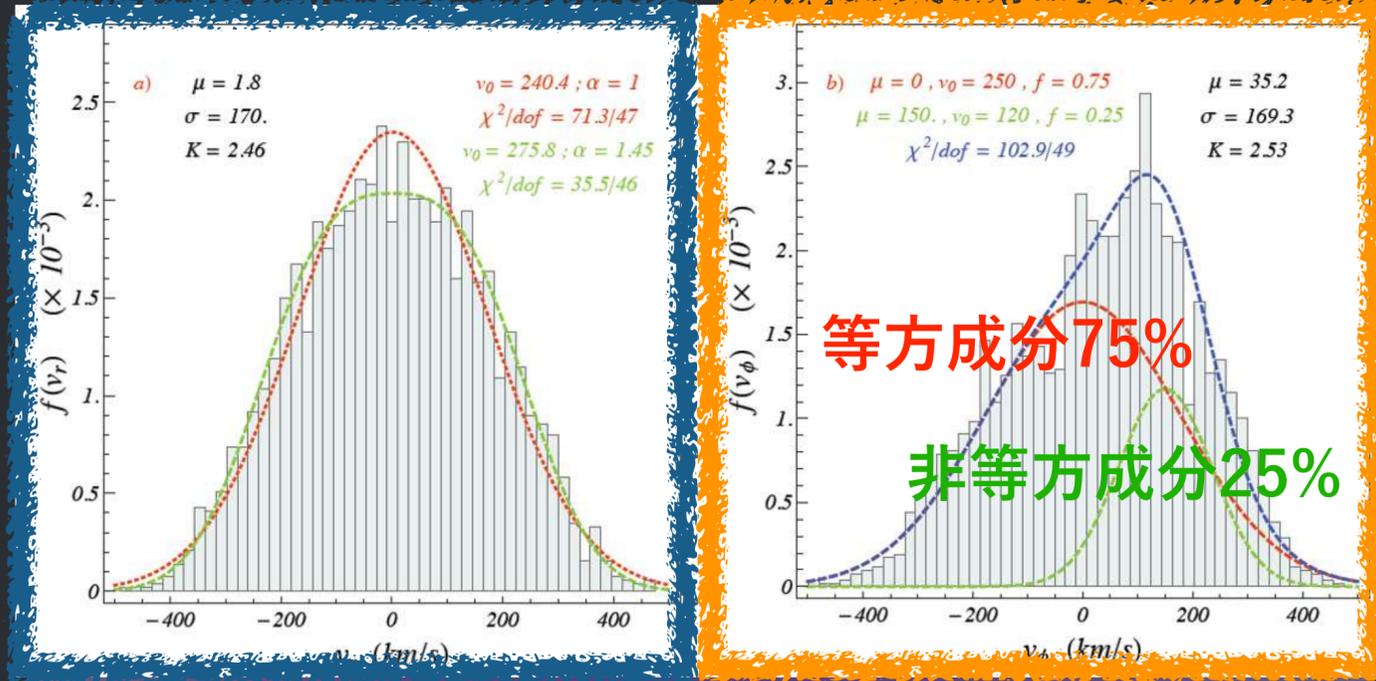


Lisanti and Spergel, arXiv:1105.4166

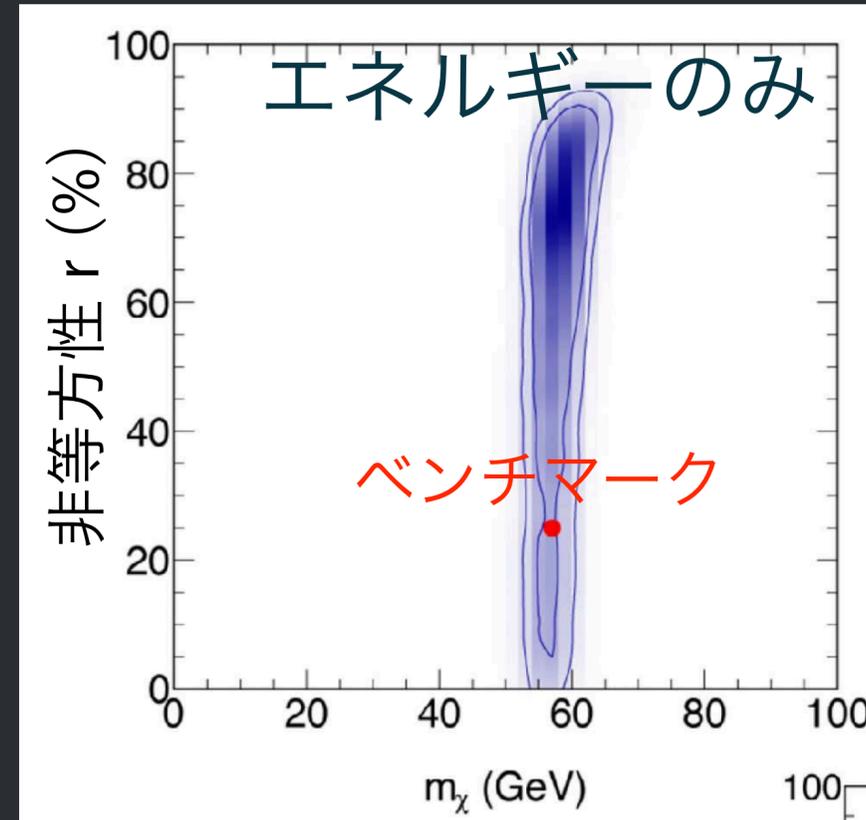


DMの速度分布の非等方性

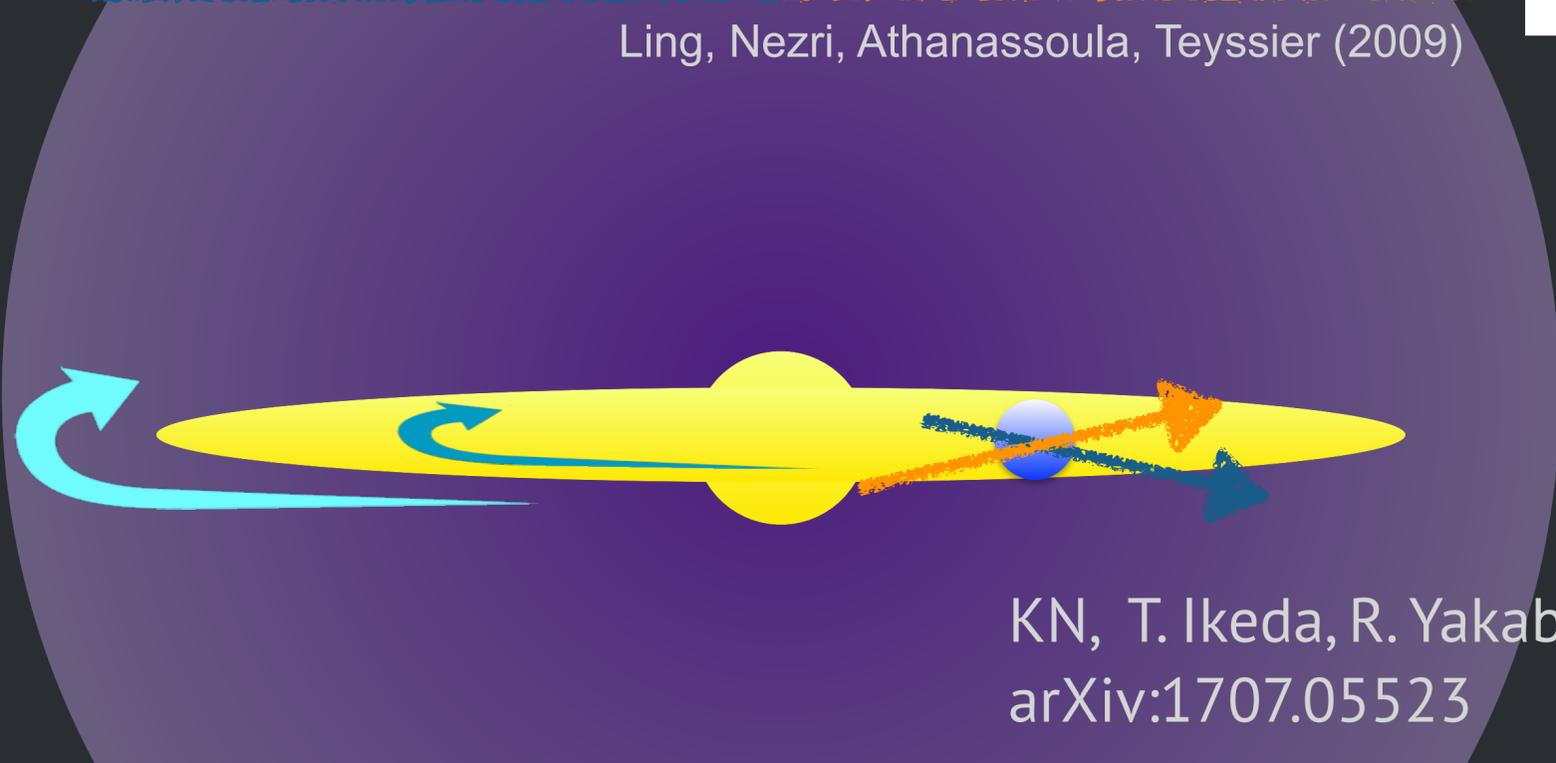
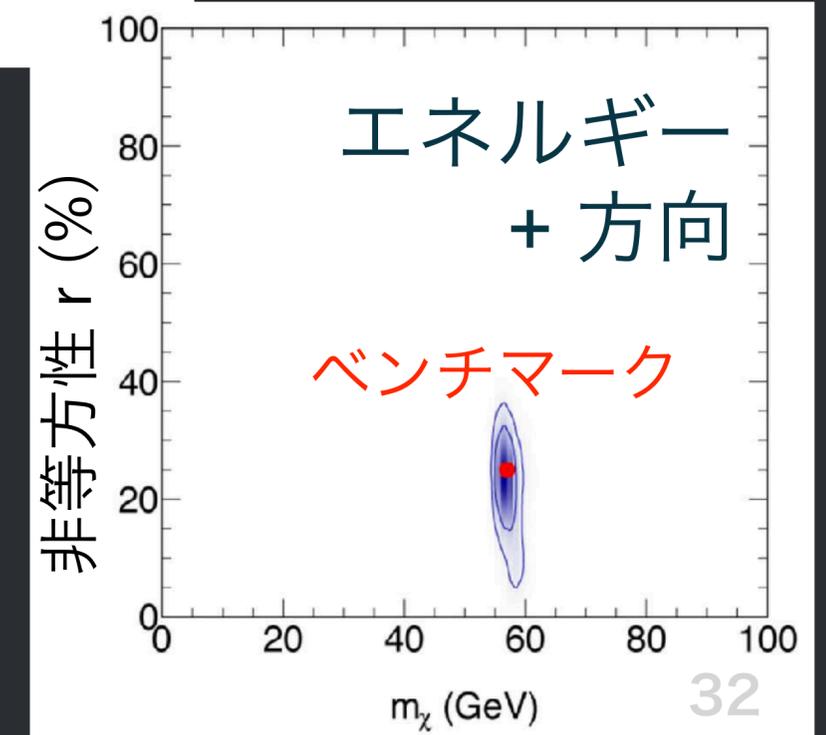
- DM+バリオンのN体シミュレーション



Ling, Nezri, Athanassoula, Teyssier (2009)



標的: F
 イベント数: 6×10^3
 $\sigma = 10^{-30} \text{cm}^2$



KN, T. Ikeda, R. Yakabe, T. Naka, K. Miuchi
 arXiv:1707.05523

Cosmic Ray Boosted DM (CR-DM)

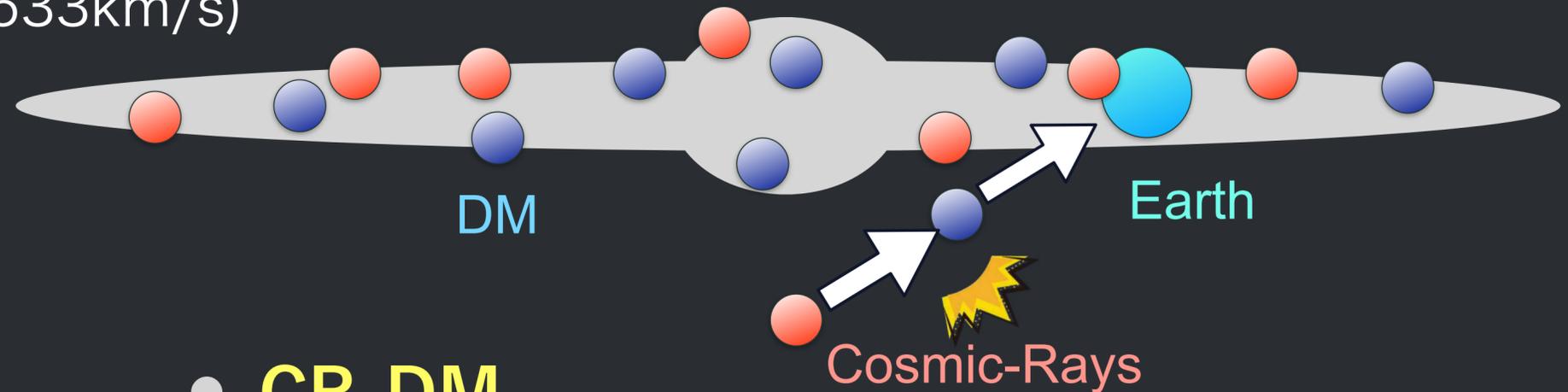
- 普通のWIMP

- $\langle v_{DM} \rangle \sim 230 \text{ km/s}$
- $v_{DM} < v_{esc}$ (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

- v_{esc} より速くてもよい
- 質量が $O(10-1) \text{ GeV}$ 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もつことができる

- CR-DM flux

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

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

DMの密度プロファイル

密度プロファイル

- Navarro–Frenk–White (NFW) profile

$$\rho_{NFW}(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_0)(1+r/r_0)^2}$$

J. Navarro, C. Frenk, S. White Astrophys. J. 490(1997)

- Einasto profile

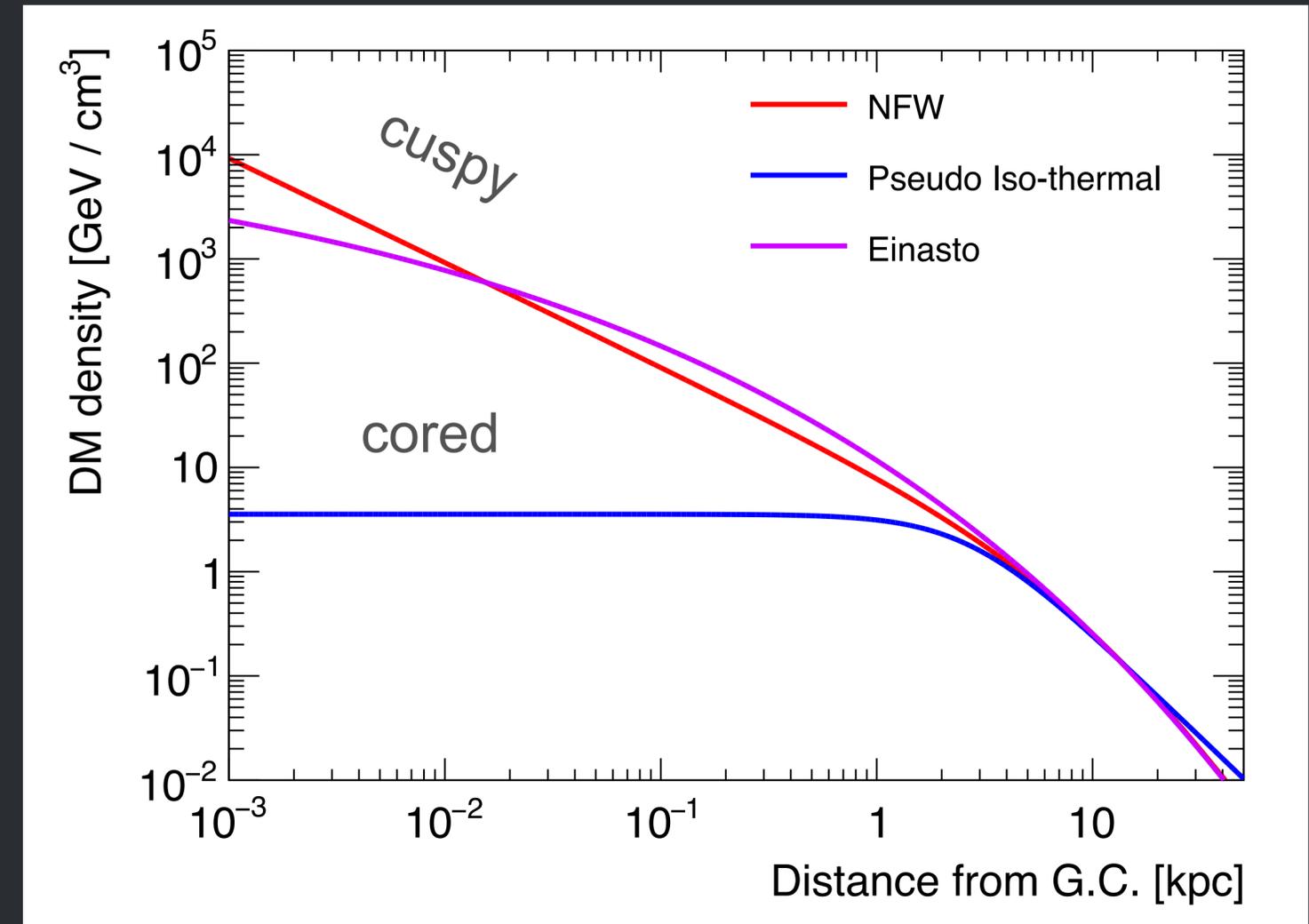
$$\rho_{Ein}(r) = \rho_0 \exp[2\alpha(1 - (r/r_0)^{1/\alpha})]$$

J. Navarro et al. curves. Mon. Not. Roy. Astron. So 349 (2004)

- Pseudo-isothermal profile

$$\rho_{Iso}(r) = \frac{\rho_0}{1 + (r/r_0)^2}$$

R. Jimenez, L. Verde, S. Pen, Mon. Not. Roy. Astron. So 339 (2003)



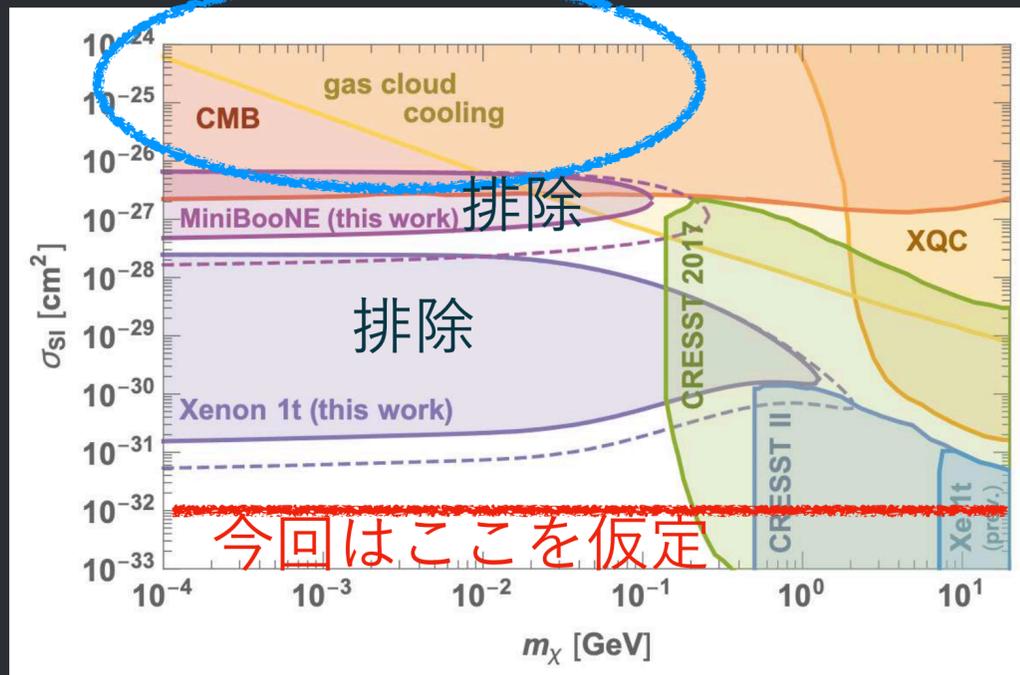
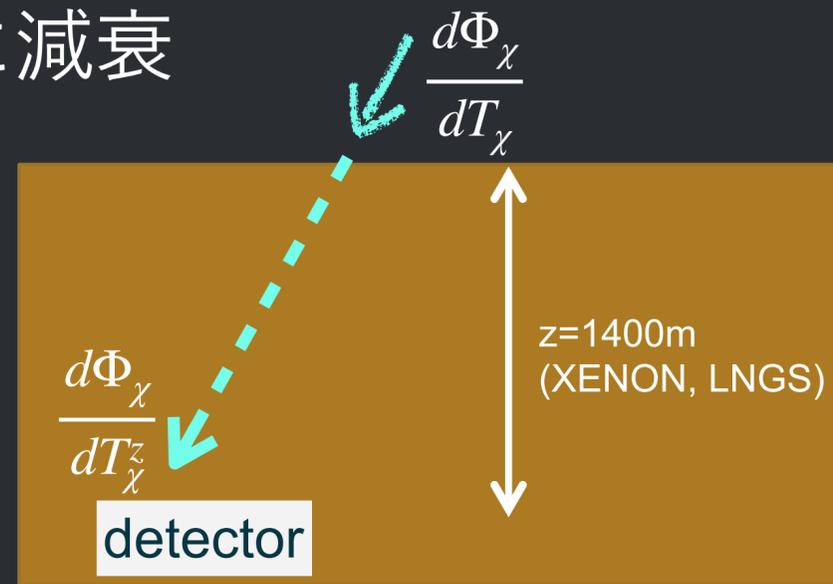
CR-DMの減衰

- sub GeV質量のboosted DMは相互作用が大きくてもよい

→地中を通過するときに減衰

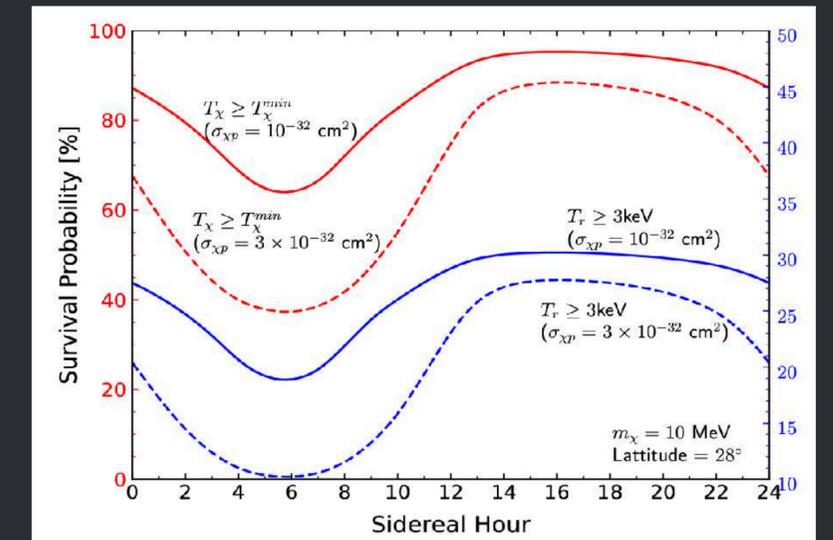
深さzでの減衰

$$\frac{d\Phi_\chi}{dT_\chi^z} = \frac{4m_\chi^2 e^{z/l}}{(2m_\chi + T_\chi^z - T_\chi^z e^{z/l})^2} \frac{d\Phi_\chi}{dT_\chi}$$



相互作用が大きいとCD-DMが検出器に届かない

c.f. 減衰によるイベント数の日変動



Jinpingでの日変動

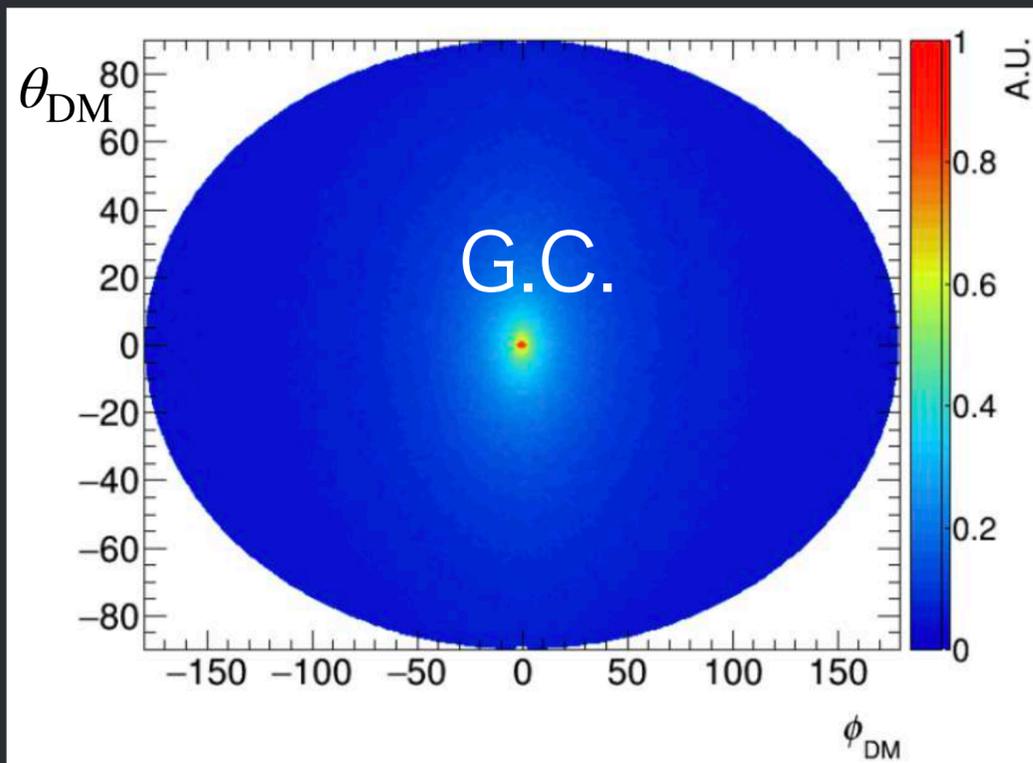
Shao-Feng Ge et al., arXiv:2005.09480

T. Bringmann and M. Pospelov 1810.10543

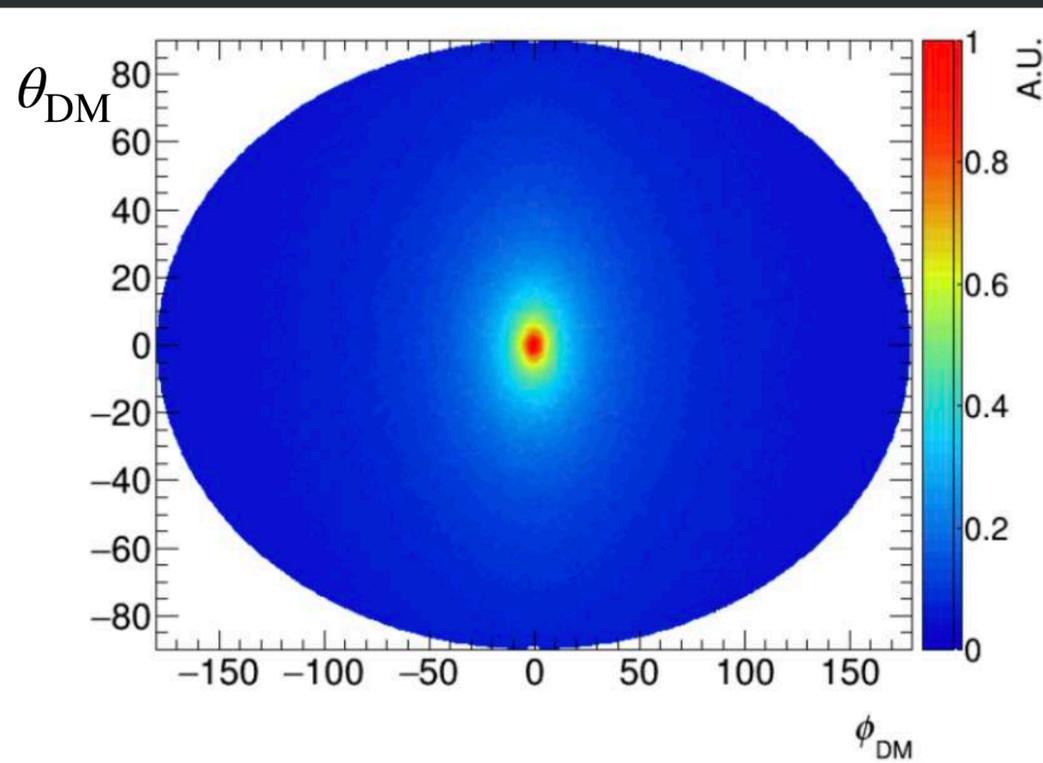
実験による暗黒物質の検証

CD-DMの角度分布

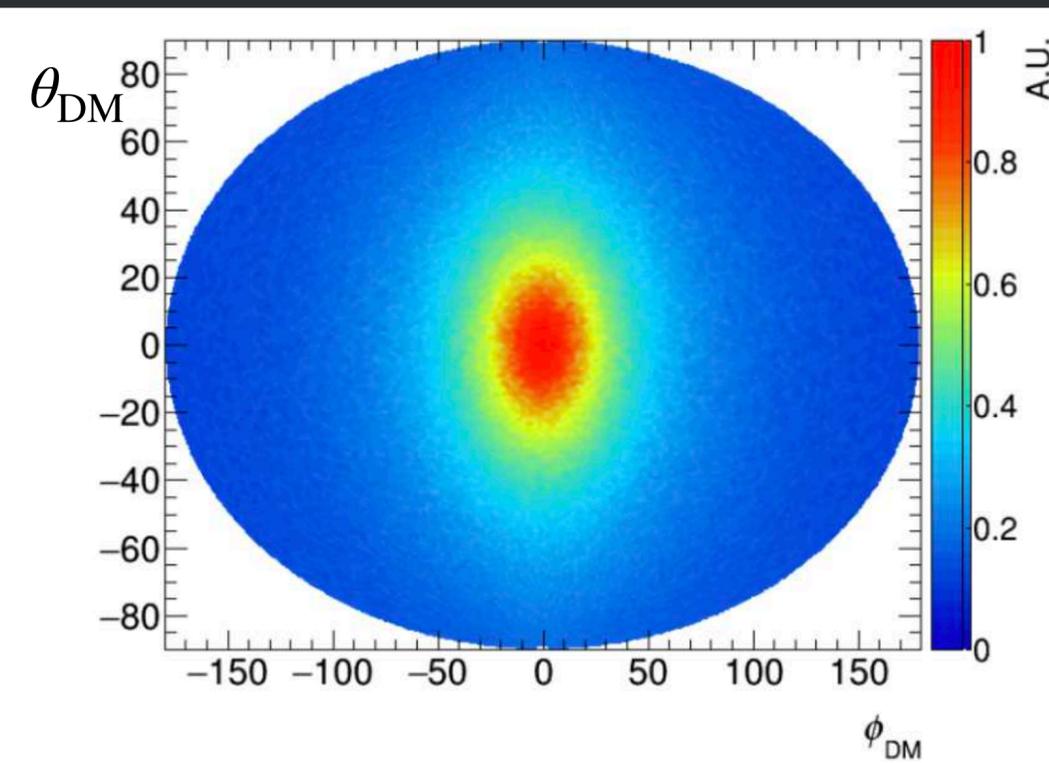
NFW
cuspy



Einasto
cuspy



Pseudo-
isothermal
cored



- コアなプロファイルの場合は銀河中心からのイベントの集中が弱い
- 反跳原子核がこの角度分布の傾向をどれくらい引き継ぐか？

イベント数の非対称性

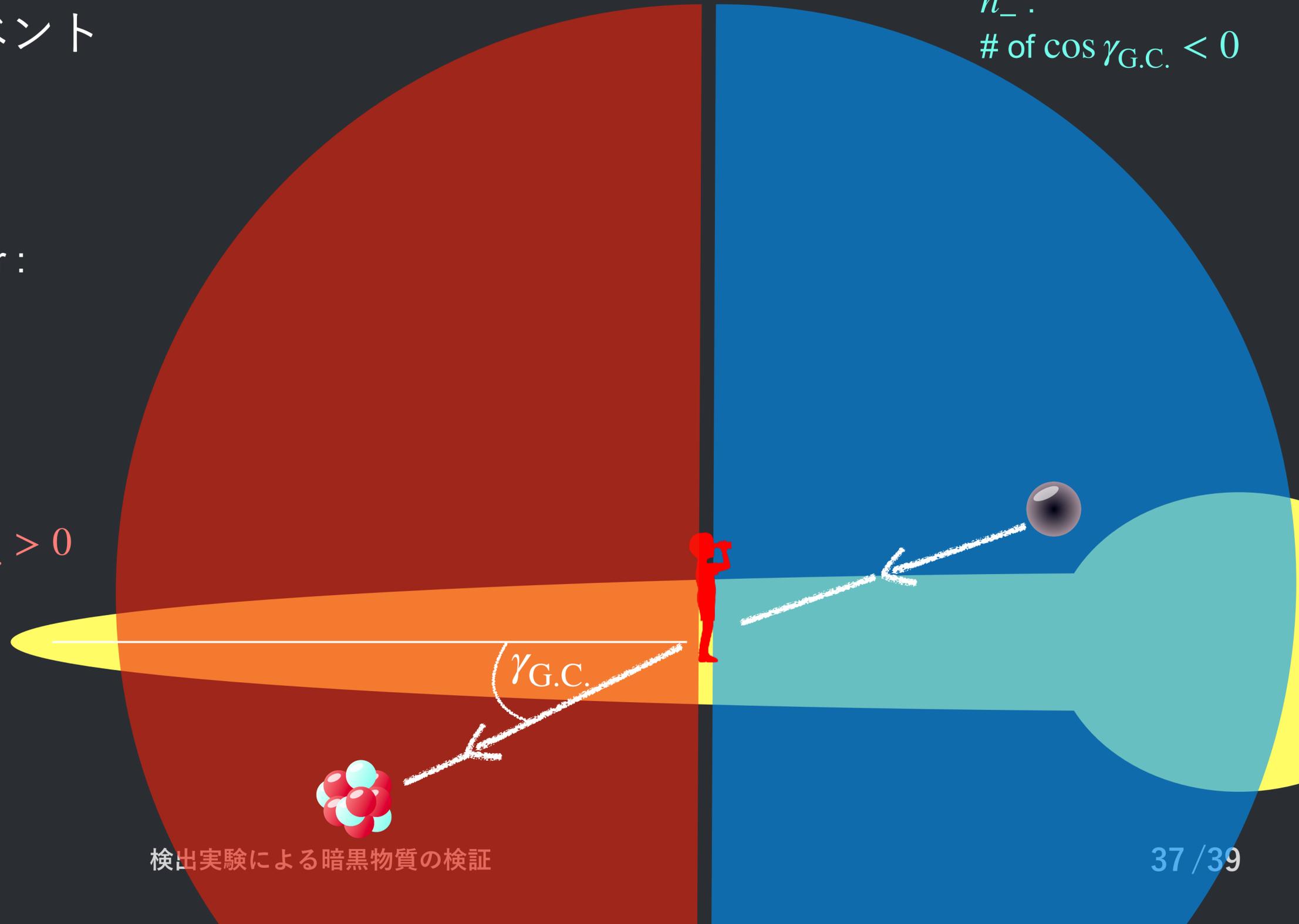
- 銀河中心方向からのイベント

Asymmetry parameter :

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

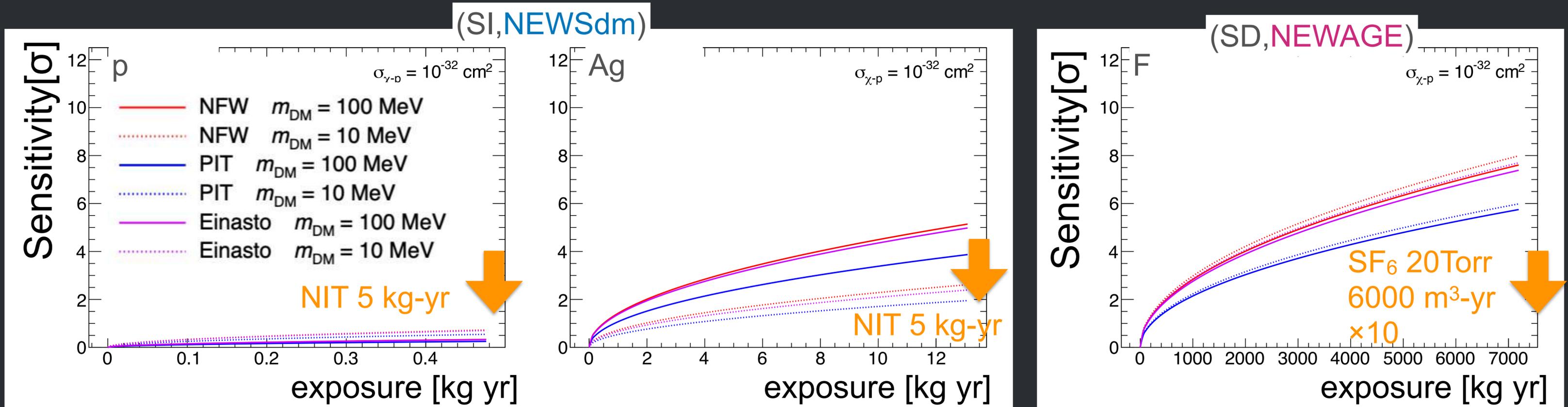
n_+ :
of $\cos \gamma_{G.C.} > 0$

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



CR-DM検出の角度分布

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



- ▶ 将来的なアップグレードまで考慮した大きいexposureを仮定すれば、方向の非対称性を検証できる
- ▶ 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した

まとめ

- WIMP直接検出実験でニュートリノフォグに到達。ここから先へは大きな転換が必要。方向情報が重要になるかも。
- 統計量があれば、方向を使って速度分布や密度プロファイルなどのDMの性質も議論できる。