

加速された暗黒物質の 特徴的なシグナルの検出と そこから見える物理

長尾 桂子 (岡山理科大学)

東野聡さん、中竜大さん、身内賢太郎さんとの以下の共同研究に基づいています

arXiv:2211.13399 “Directional direct detection of light dark matter up-scattered by cosmic-rays from direction of the Galactic center”

銀河系の中心には暗黒物質
がいっぱいあるっていうのでその証拠を見つけない。

~~加速された暗黒物質~~

~~特徴的なシグナルの検出と~~

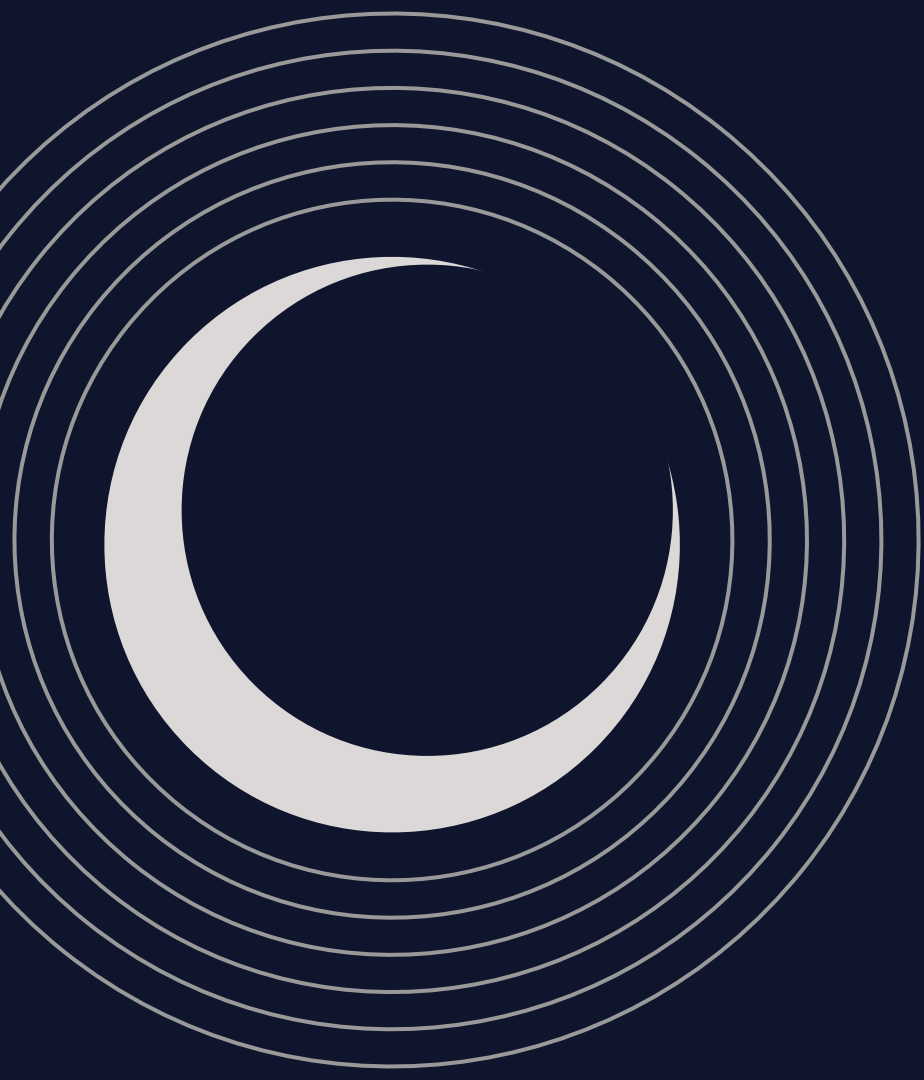
~~そこから見える~~

暗黒物質を見つけるための地下
実験でそれができるのでは？

長尾 桂子 (岡山理科大学)

東野聡さん、中竜大さん、身内賢太郎さんとの以下の共同研究に基づいています

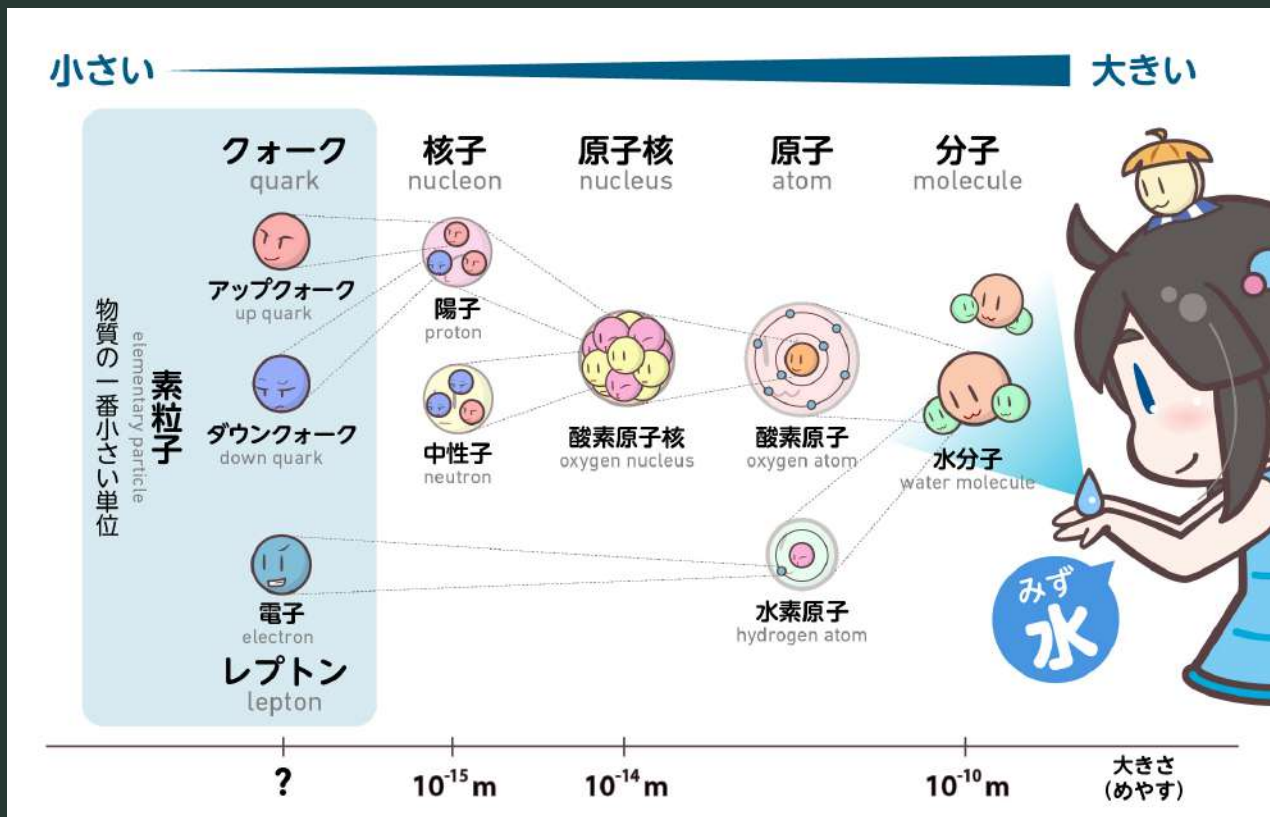
arXiv:2211.13399 "Directional direct detection of light dark matter up-scattered by cosmic-rays from direction of the Galactic center"



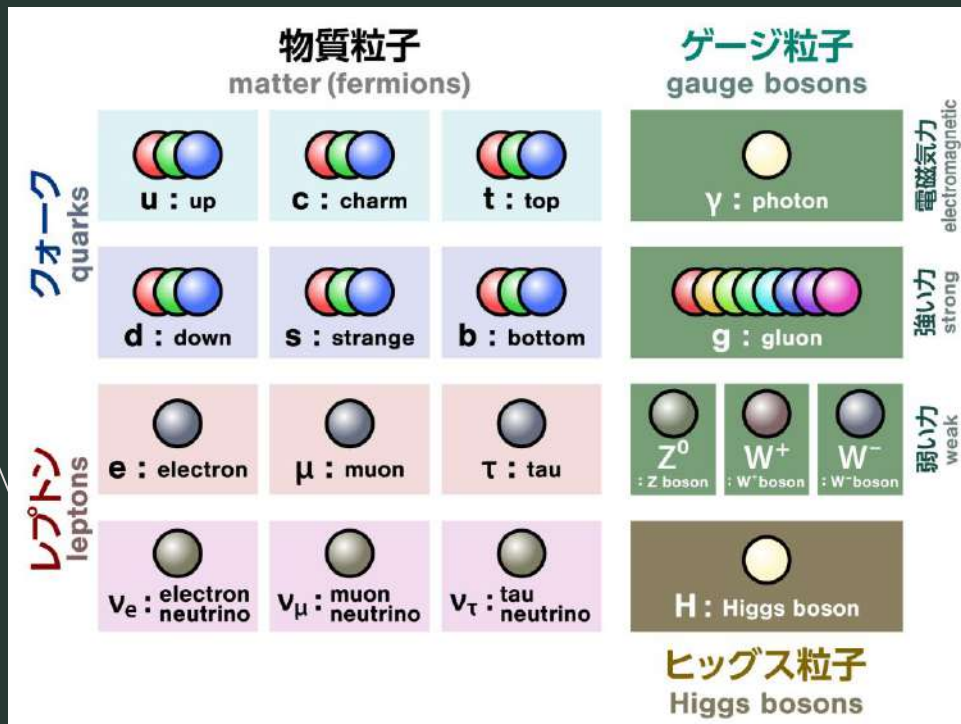
01

ダークマターって
どうして大事なの

すべての物質は素粒子に分解できる



標準模型は高い精度で実験と一致

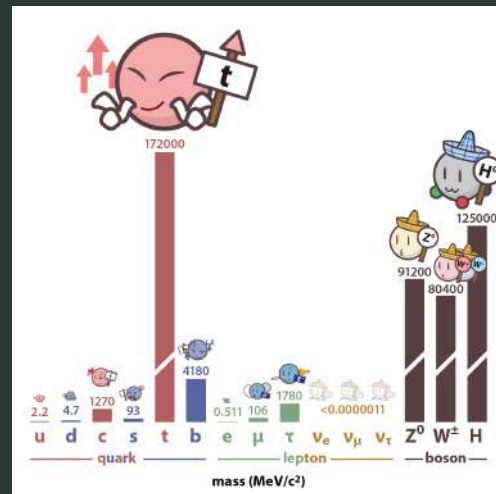


<https://higgstan.com/>

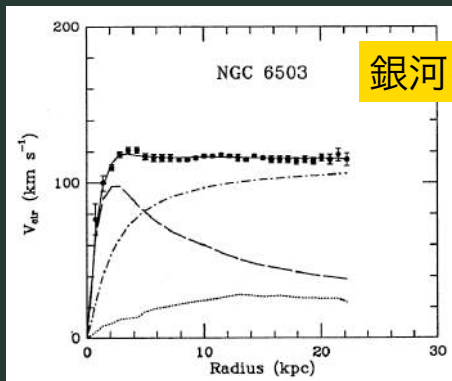
- これが究極の理論なのか？
- これで終わりではない、もっと良い理論があるはずと考えている人は多い

標準模型で説明できないこと

- ニュートリノの質量
 - 宇宙のダークマター
 - 宇宙のダークエネルギー
 - ミューオンの異常磁気能率
 - Wボソンの質量異常？
 - ...
- △ 粒子数-反粒子数の非対称性
 - △ 力の/物質の統一
 - △ 質量の階層性
 - △ 電荷の量子化
 - △ 強いCP問題
 - △ ...



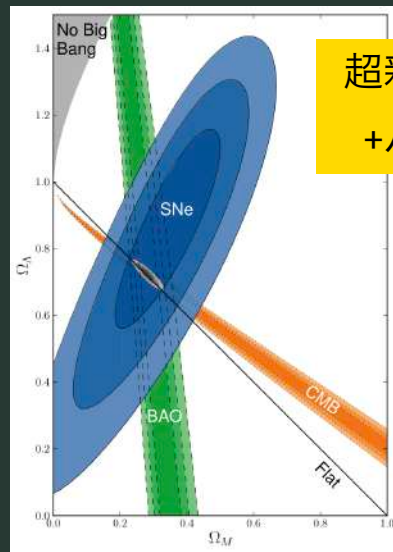
ダークマターは多くの観測から支持されている



Begeman, Broeils, Sanders (1991)

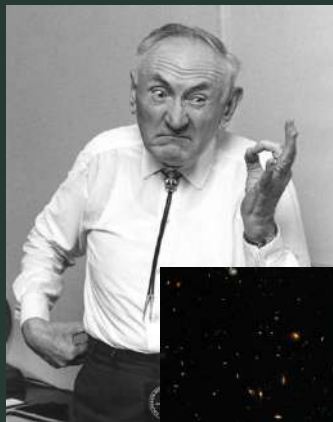


重力レンズ

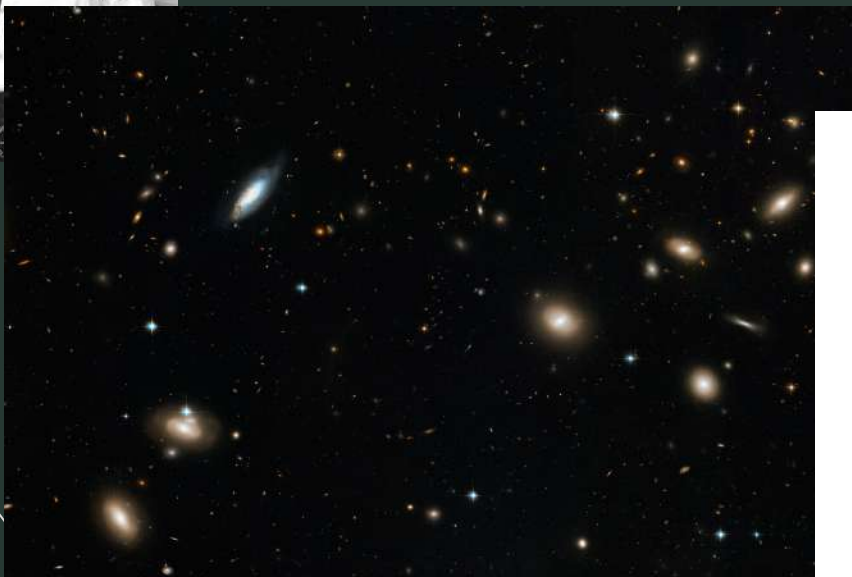


Supernovae Cosmology Project
Amanullah et al. ApJ (2010),
arXiv:1004.1711

ダークマターの発見のきっかけ



- ▶ 1933年 Fritz Zwickyがかみのけ座銀河団の速度分散から「見えない物質」の存在を発見
- ▶ “dark matter (暗い物質)” (=光らない天体?)



Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln

von F. Zwicky.

(16. II. 33.)

arXiv:1711.01693

Inhaltsangabe. Diese Arbeit gibt eine Darstellung der wesentlichsten Merkmale extragalaktischer Nebel, sowie der Methoden, welche zur Erforschung derselben gedient haben. Insbesondere wird die sog. Rotverschiebung extragalaktischer Nebel eingehend diskutiert. Verschiedene Theorien, welche zur Erklärung dieses wichtigen Phänomens aufgestellt worden sind, werden kurz besprochen. Schliesslich wird angedeutet, inwiefern die Rotverschiebung für das Studium der durchdringenden Strahlung von Wichtigkeit zu werden verspricht.

§ 1. Einleitung.

Es ist schon seit langer Zeit bekannt, dass es im Weltraum gewisse Objekte gibt, welche, wenn man mit kleinen Teleskopen

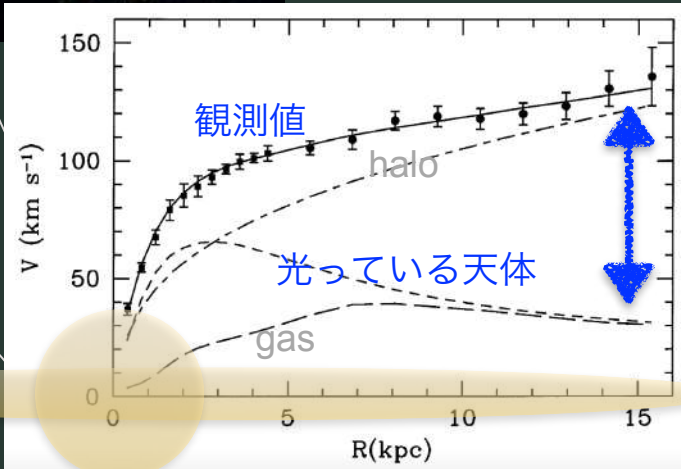
DMの証拠：渦巻き銀河の回転速度



Credit: NASA/JPL-Caltech
さんかく座銀河 (M33)

- ▶ 1970 Vera Rubinらがアンドロメダ銀河の周辺部の速度が想定より速いことを発見

パロマー天文台での女性の観測は認められていなかった



- ▶ 質量 m の天体の回転速度 v は、万有引力の法則と半径 r の円運動から

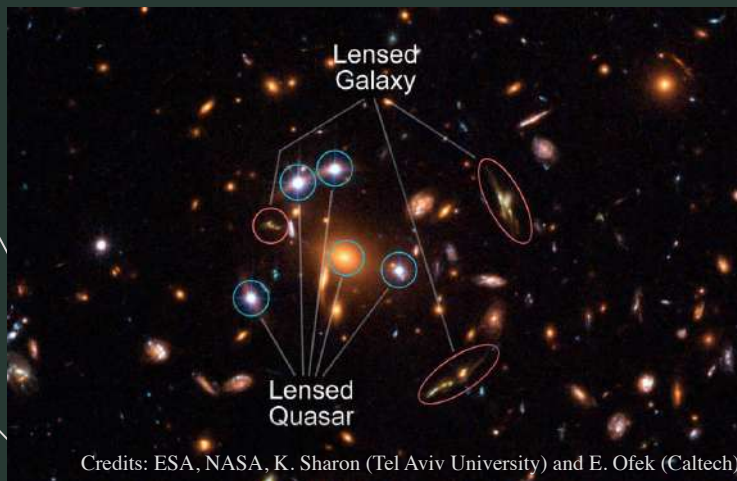
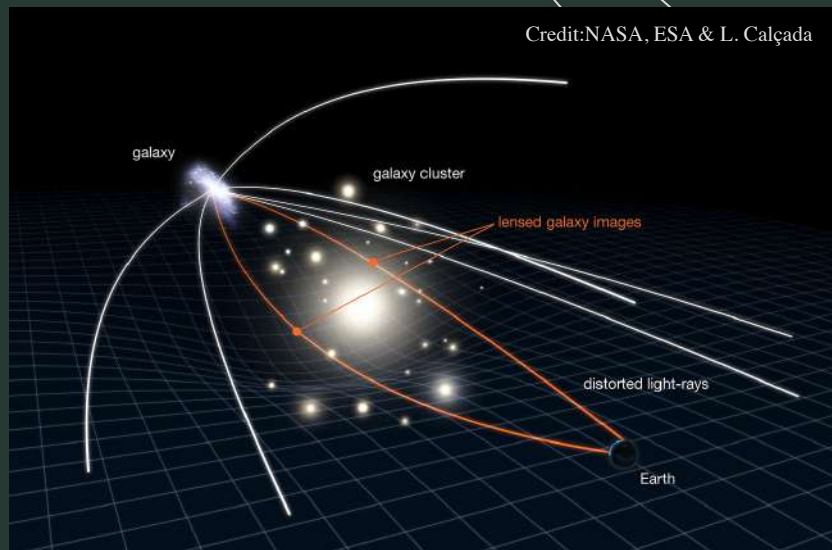
$$G \frac{mM(< r)}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \quad \rightarrow \quad v = \frac{\sqrt{GM}}{\sqrt{r}}$$

光る天体だけでは観測値を説明できない

DMの証拠：重力レンズ

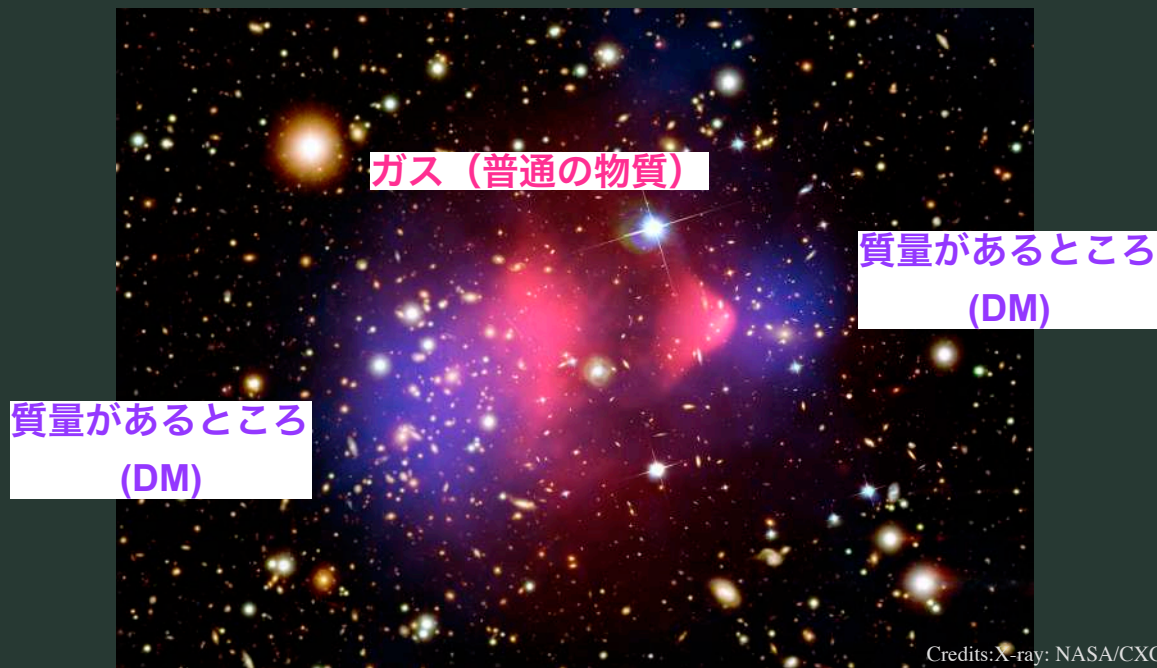
強い/弱い重力レンズ効果

観測したい光源から観測者までの経路に非常に重い天体（銀河団やDM）があると、光源の像が弓状に歪んだり複数に見える

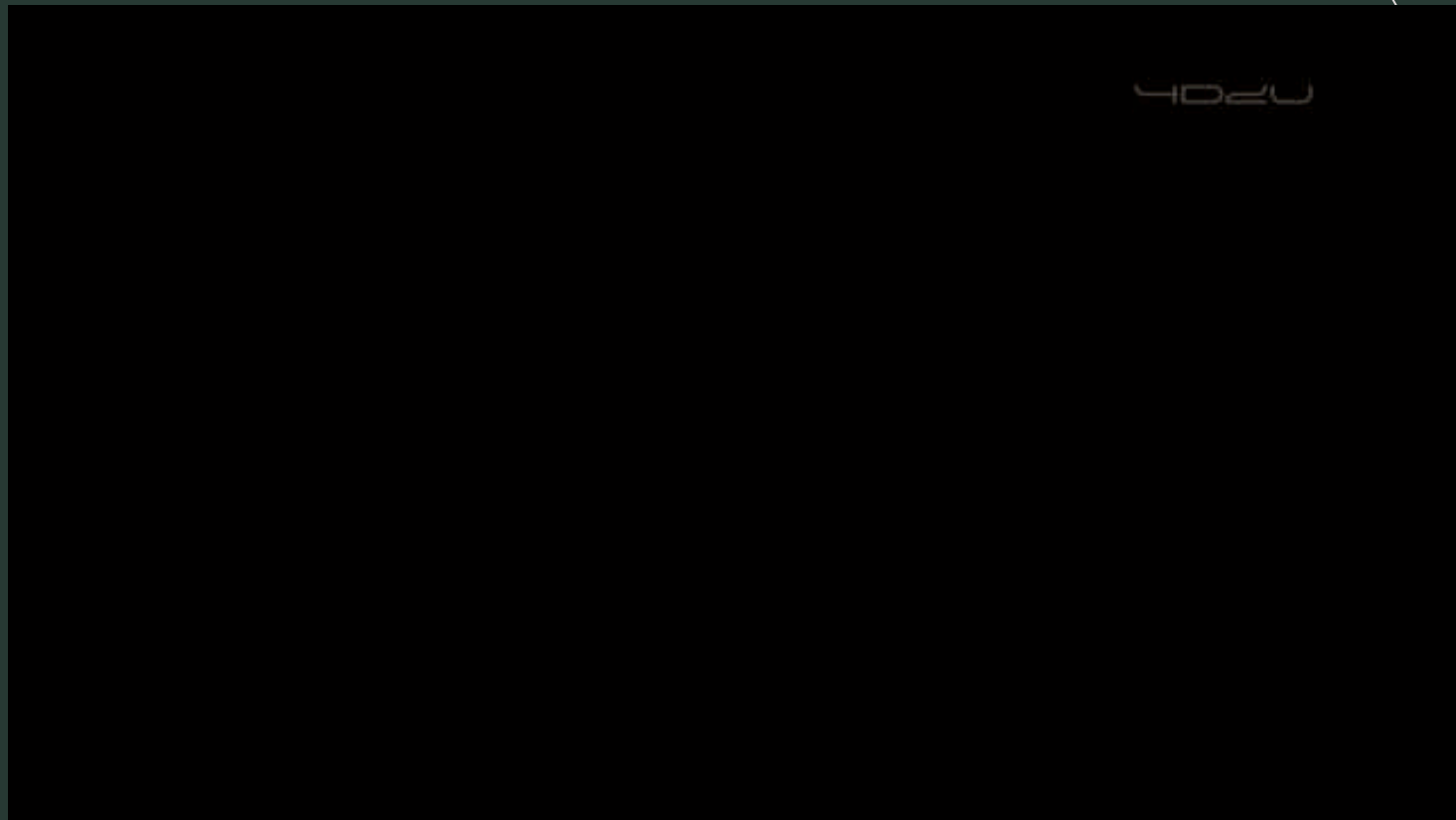


DMの証拠：弾丸銀河団内の銀河の衝突

- ▶ DMとバリオンを初めて分離. DMの存在を決定的にした
- ▶ 重力理論の修正よりDMが有力なのは



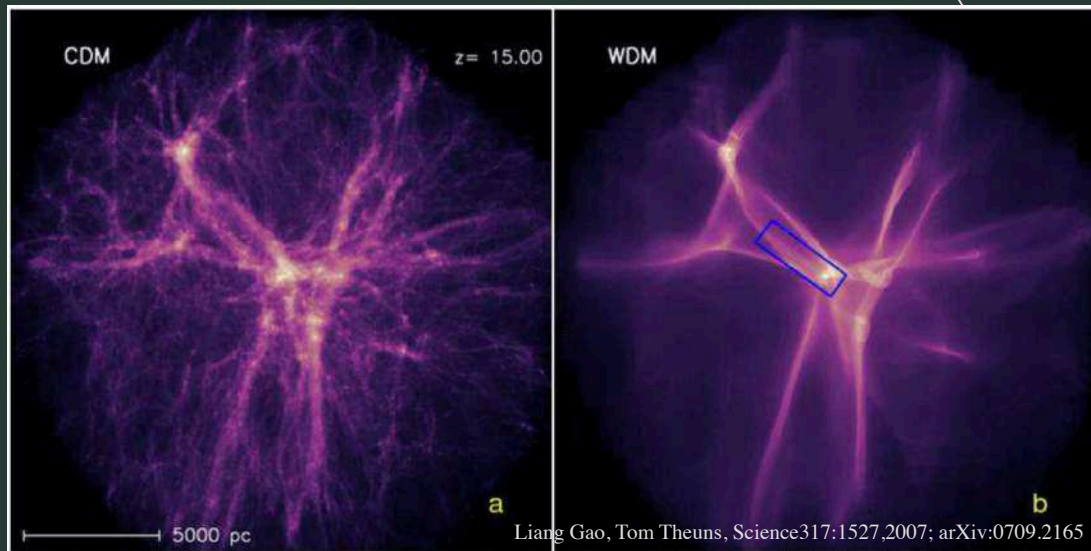
DMによって宇宙の構造形成が進んだ



構造形成からの示唆されるDMの性質

- DMを質量で分類

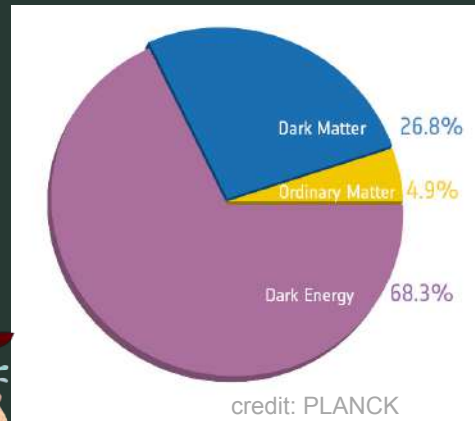
- ▶ 冷たいDM
(質量 \gg 運動エネルギー)
- ▶ 温かいDM
- ▶ 熱いDM
(質量 \ll 運動エネルギー)



- 構造形成のシミュレーションは冷たいDMを支持
 - ▶ DMが速すぎると構造をかき消してしまう

ダークマターってなに？ (特に素粒子論屋さんにとって)

- 標準模型に候補がない
 - 電氣的に中性 (電磁相互作用をしない)
 - 安定に存在 $\Omega_{DM} \sim 27\%$
 - 重い



候補

- ✓ 弱い (弱く) 相互作用をする重い粒子 (WIMPs)
- ✓ アクシオン, アクシオンの粒子, ... (WISPs)
- ✓ 強い相互作用をする重い粒子 (SIMP)
- ✓ 原始ブラックホール (PBHs) } (MACHOs)
- ✓ 暗い天体

	物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons		
クォーク quarks	U : up	C : charm	t : top	γ : photon		
	d : down	S : strange	b : bottom	g : gluon		
	e : electron	μ : muon	T : tau	Z^0 : Z boson	W^+ : W boson	W^- : W boson
レプトン leptons	ν_e : electron neutrino	ν_μ : muon neutrino	ν_τ : tau neutrino	H : Higgs boson		
				ヒッグス粒子 Higgs bosons		



各領域からのアプローチ

重力レンズ



銀河中心のダークマター？

対称性

相互作用

構造
構造



ダークセクター
スピン



密度分布

標準模型を超えた物理

ニュートリノ？ 質量
重い or 軽い



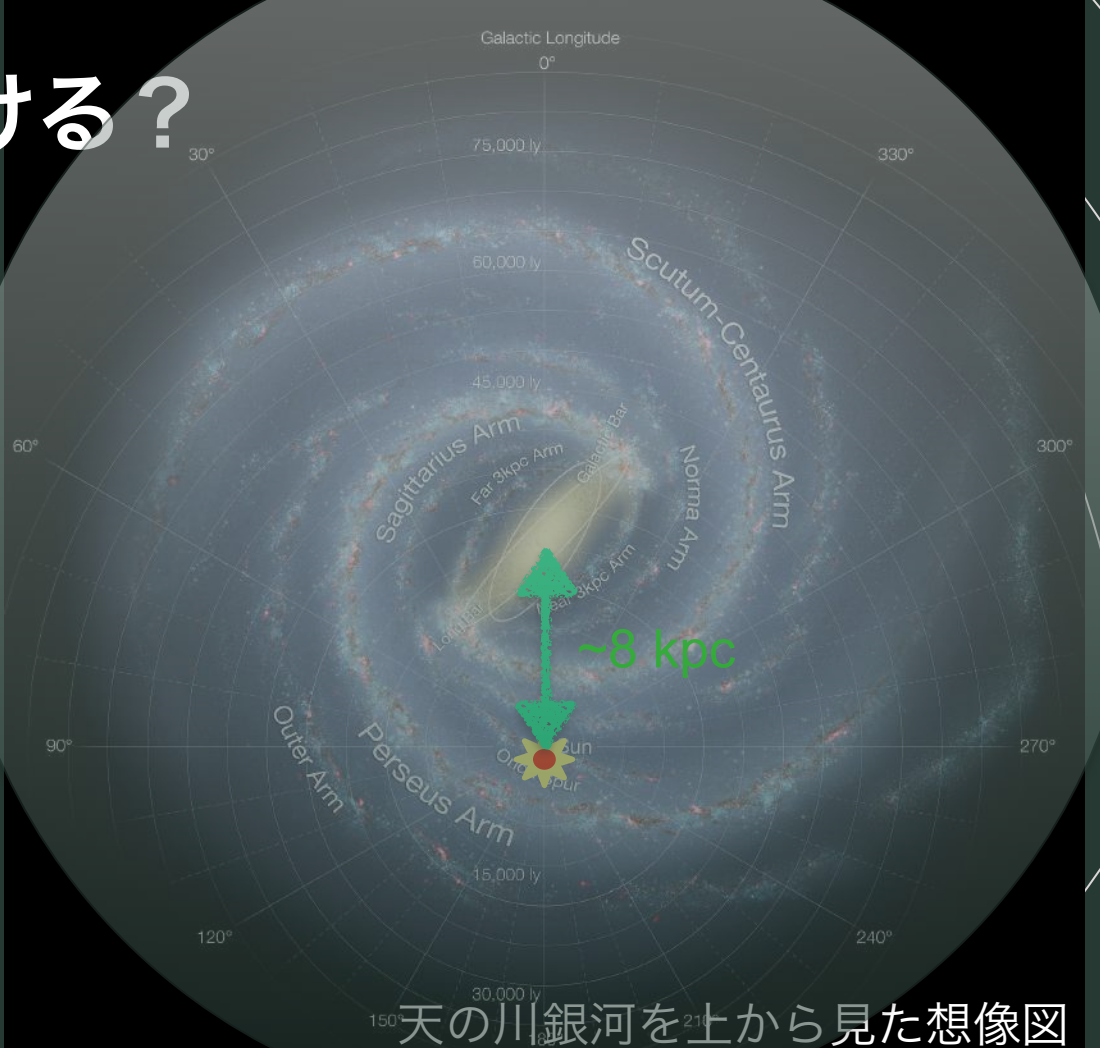
速度分布

DMの流れ



DMをどこで見つける？

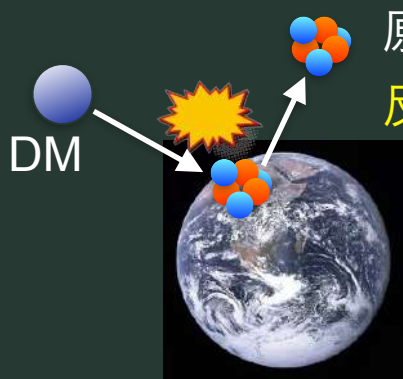
- 地球で
宇宙から地球に到来する
DMを検出（直接検出）
- 宇宙で
対消滅でできる γ 線・荷電
粒子を検出（間接探索）
- 実験室で
運動量が保存しないイベン
ト（加速器実験）



WIMPの直接検出実験

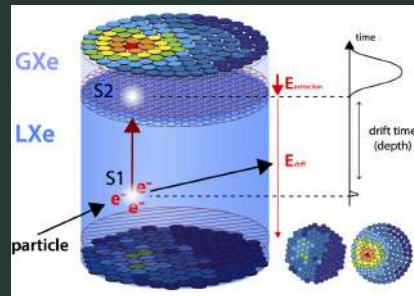
M. Goodman and E. Witten (1985)

- DMと原子核の散乱からDMを検出



原子核反跳

反跳エネルギー E_R (+時間)



credit: XENON collaboration

- 検出実験 \Leftrightarrow 素粒子論

$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{N_T \rho_0}{m_\chi} \int^{v_{\max}} d\vec{v} f(\vec{v}) |\vec{v}| \frac{d\sigma(\vec{v})}{dE_R}$$

R : 単位時間に期待される散乱イベント数

N_T : 実験で用意する標的の数

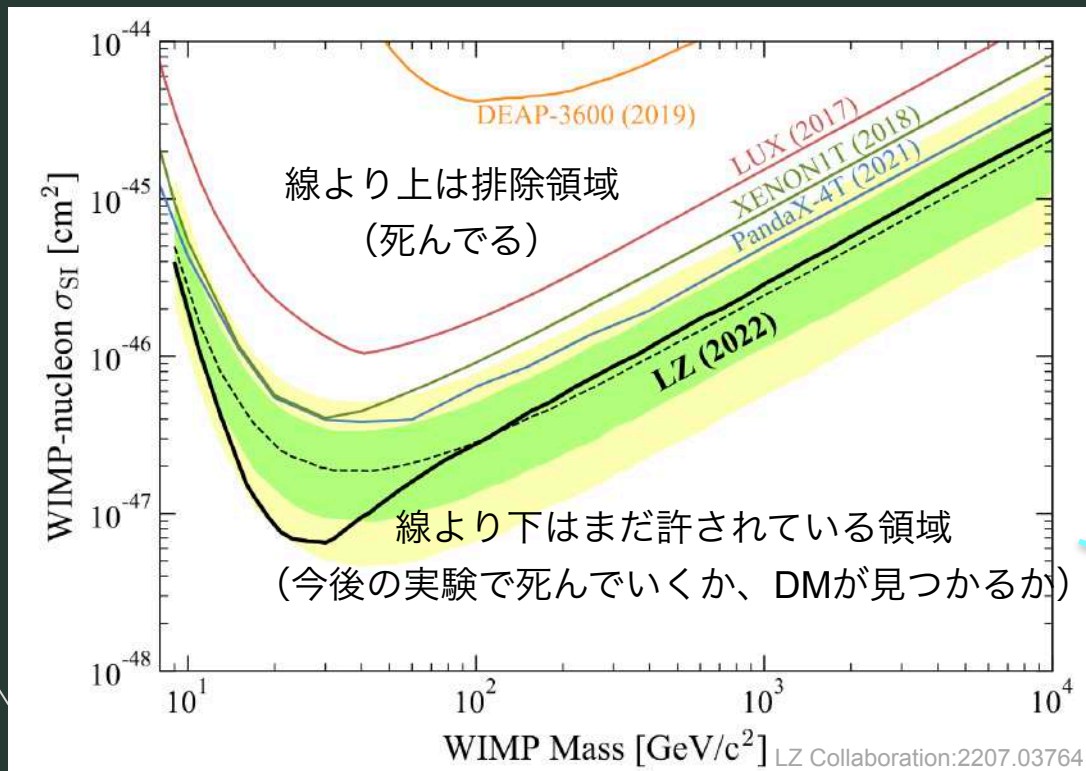
ρ_0 : 太陽系近傍のDMの質量密度

m_χ : DMの質量

$f(v)$: DMの速度分布

$\sigma(\vec{v})$: DMと原子核子の散乱断面積

直接検出実験の現状

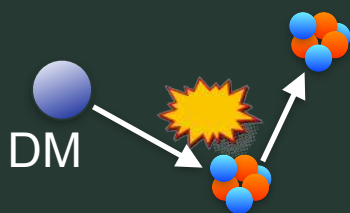


たくさんある線は、複数の実験がそれぞれつけている制限。一番下の線が最も強力。

下の方は、ニュートリノがノイズになってDMの検出は厳しい

方向の検出

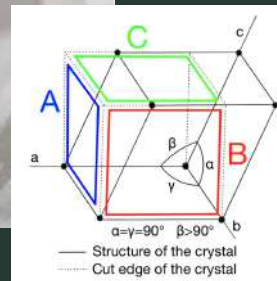
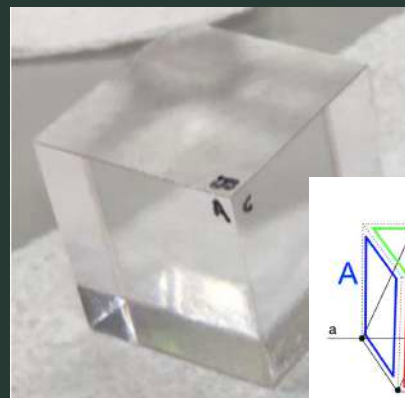
- 直接検出実験の進化型



原子核反跳
反跳エネルギー E_R
+ 方向 (+時間)

- 種類

- ガス検出器 *DRIFT, NEWAGE, DMTPC, MIMAC, ...*
- 固体検出器 (原子核乾板, 結晶, ...) *Emulsion, ZnWO₄ crystal, ...*
- イベント数の年変動・日変動などから方向の情報を使う



credit: Pedersen, Sekiya and Ichimura
1912.09683

for CR-DM
S-F Ge, J-L Liu, Q. Yuan, N. Zhou 2005.09480
Panda-X 2112.08957

方向情報を有用に使うには

- DMの到来方向

宇宙線に加速された軽いWIMPsの到来

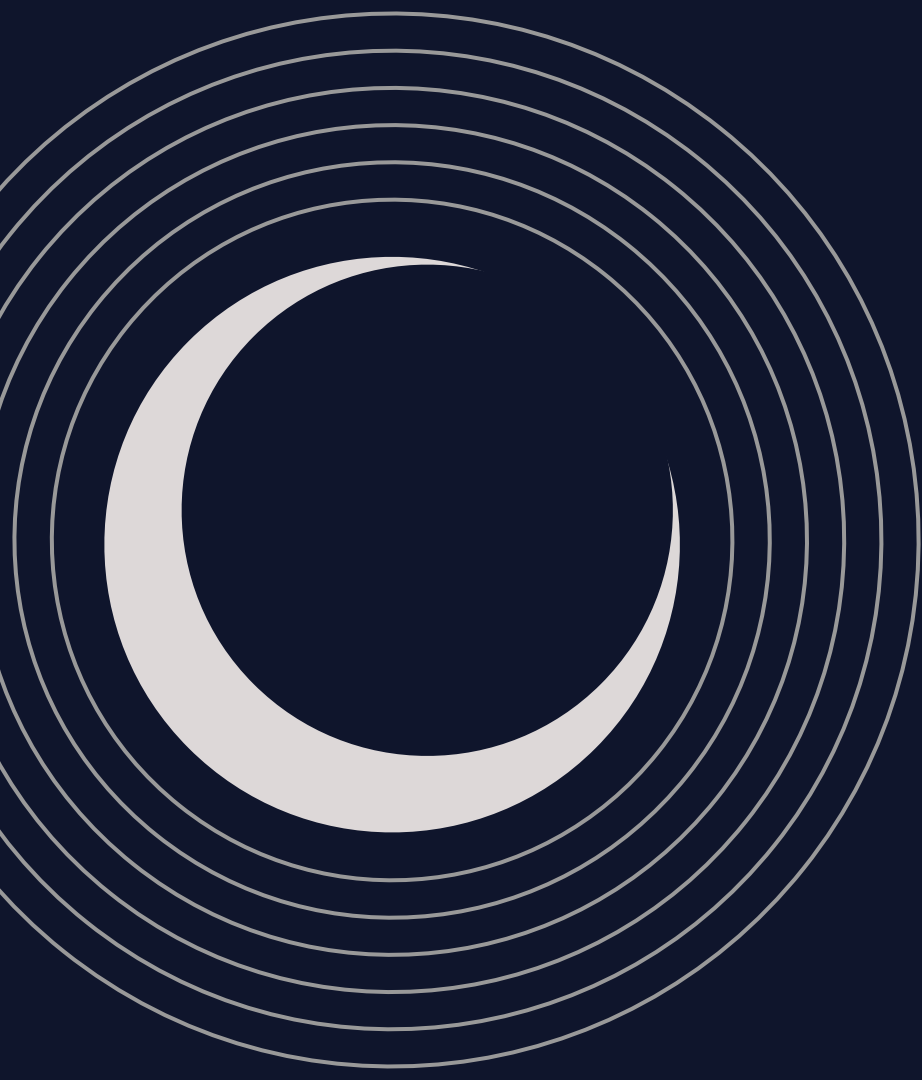
- 速度分布の非等方性

DMの速度分布は等方的ではないかも

- 他にもあるかも...? (議論しましょう)

目次

- 01 ダークマターってどうして大事ななの
- 02 方向がわかる直接検出実験
- 03 ‘加速されたDM’はどこから来る？
- 04 速度分布の非等方性 (時間があれば)
- 05 結論



02

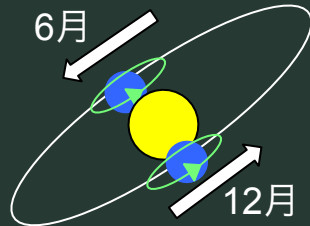
方向がわかる 直接検出実験

なぜ方向が大事？

- 強力な背景事象(ノイズ)除去
 - DMははくちょう座の方向から来る
- ↔ 背景事象 と方向で区別できる



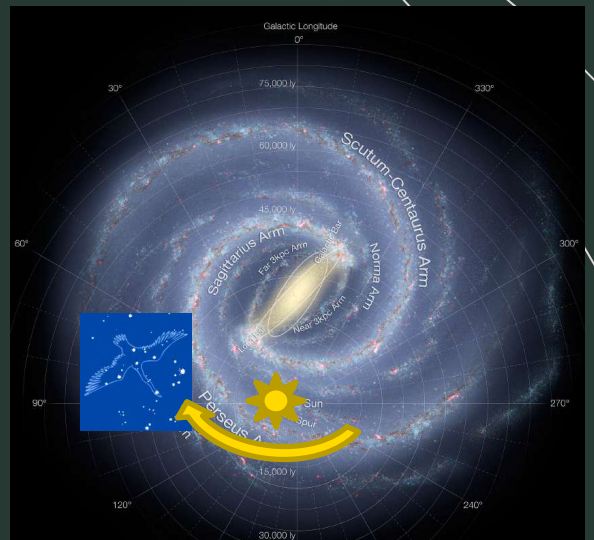
DMの風



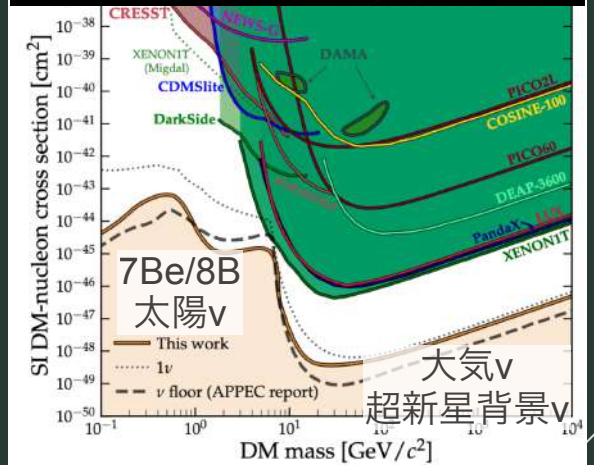
太陽系



- ニュートリノの床 (霧)



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



ガス検出器

- 方向

平均自由行程 $\sim \mu\text{m}$

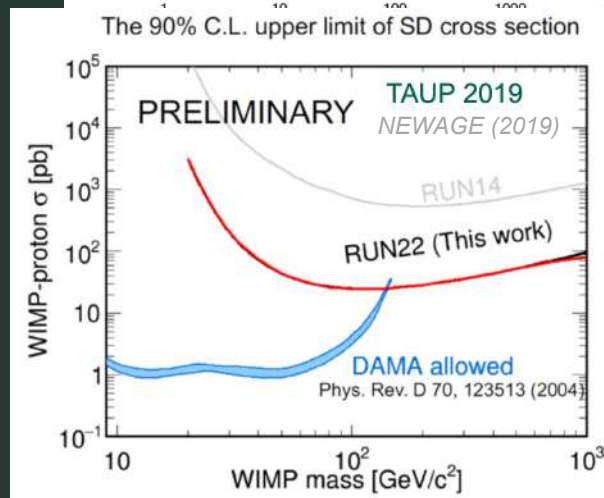
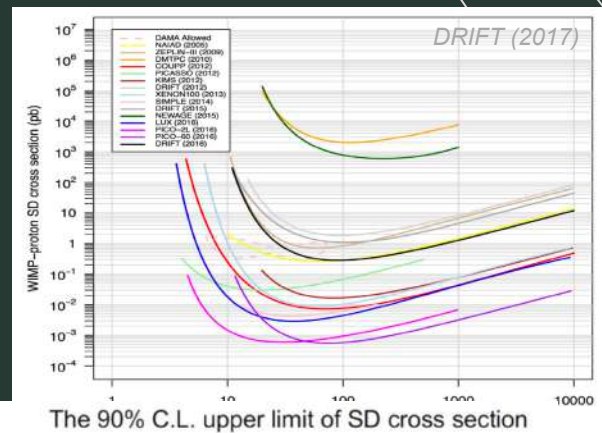
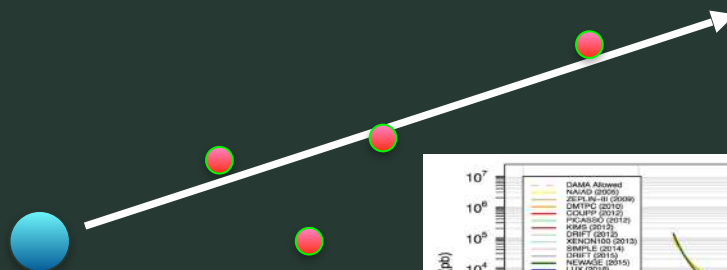
- 低圧ガス

$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{N_T \rho_0}{m_\chi} \int^{v_{\max}} d\vec{v} f(\vec{v}) |\vec{v}| \frac{d\sigma(\vec{v})}{dE_R}$$

イベント率を上げるために容量が必要

- 標的粒子

CF_4 , SF_6 , CS_2 , CHF_3



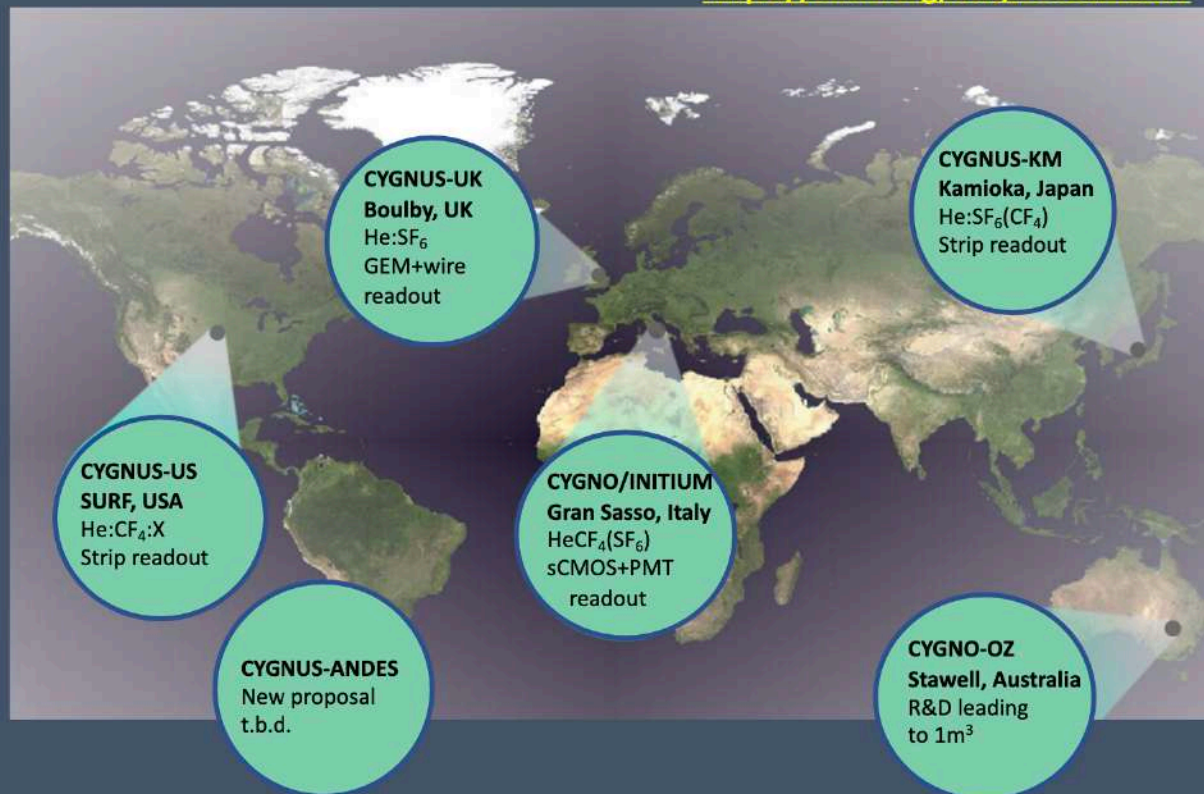
Long term CYGNUS Vision: Multi-site Galactic Recoil Observatory with directional sensitivity to WIMPs and neutrinos

<https://arxiv.org/abs/2008.12587>

Proto Collaboration formed:

- 55+ signed members from the US, UK, Japan, Italy, Spain, China
- Six US faculty members
- Close collaboration and regular meetings on detector R&D and physics studies

New collaborators welcome!



*Credit: Sven Vahsen's talk
in SNOWMASS 2022*

原子核乾板: NEWSdm

- 方向検出のために超微粒子の原子核乾板を開発
- 固体なので高密度

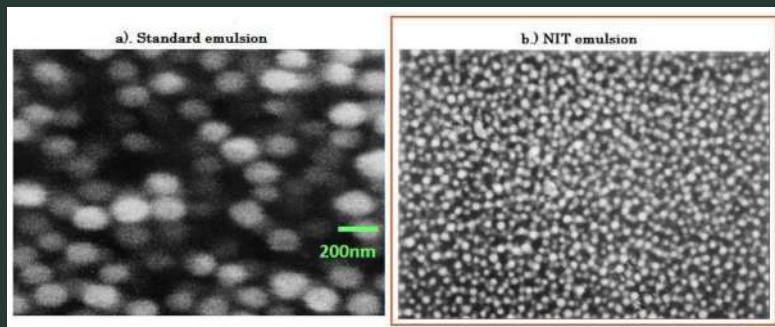
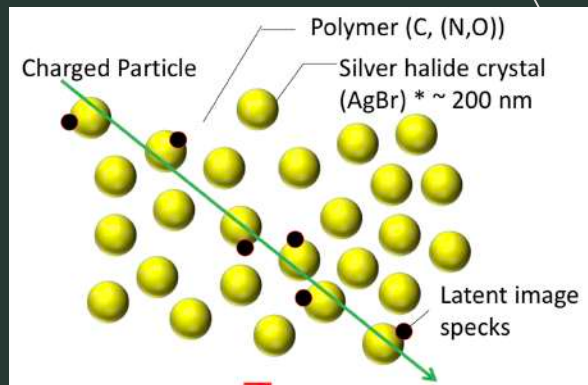
Slides by T. Naka

$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{N_T \rho_0}{m_\chi} \int^{v_{\max}} d\vec{v} f(\vec{v}) |\vec{v}| \frac{d\sigma(\vec{v})}{dE_R}$$

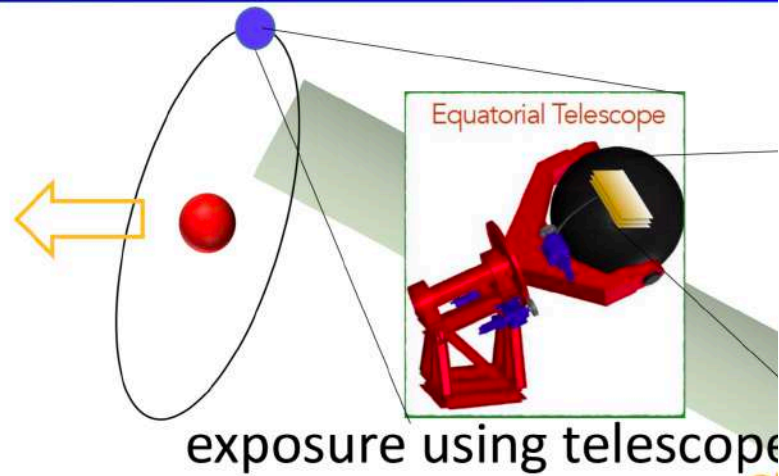
標的粒子の個数を増やすのが容易

- 時間分解能がない
- 標的

ρ , C, N, O, Ag, Br



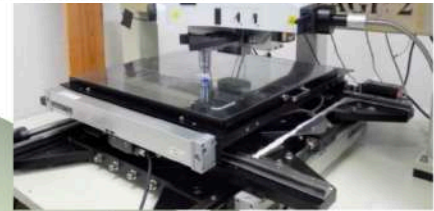
Concept of NEWSdm e



exposure using telescope

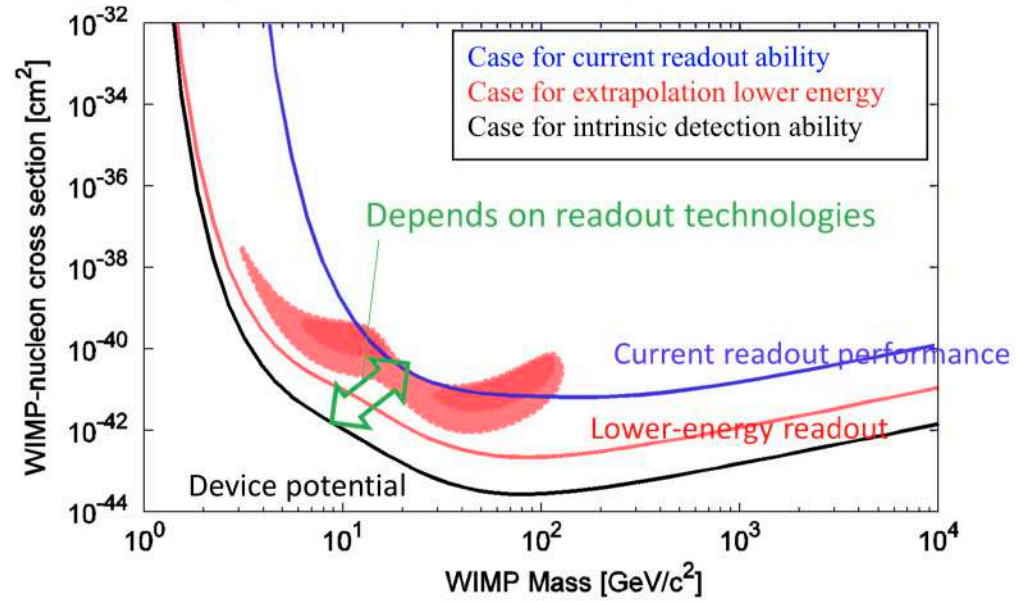
Underground laboratory

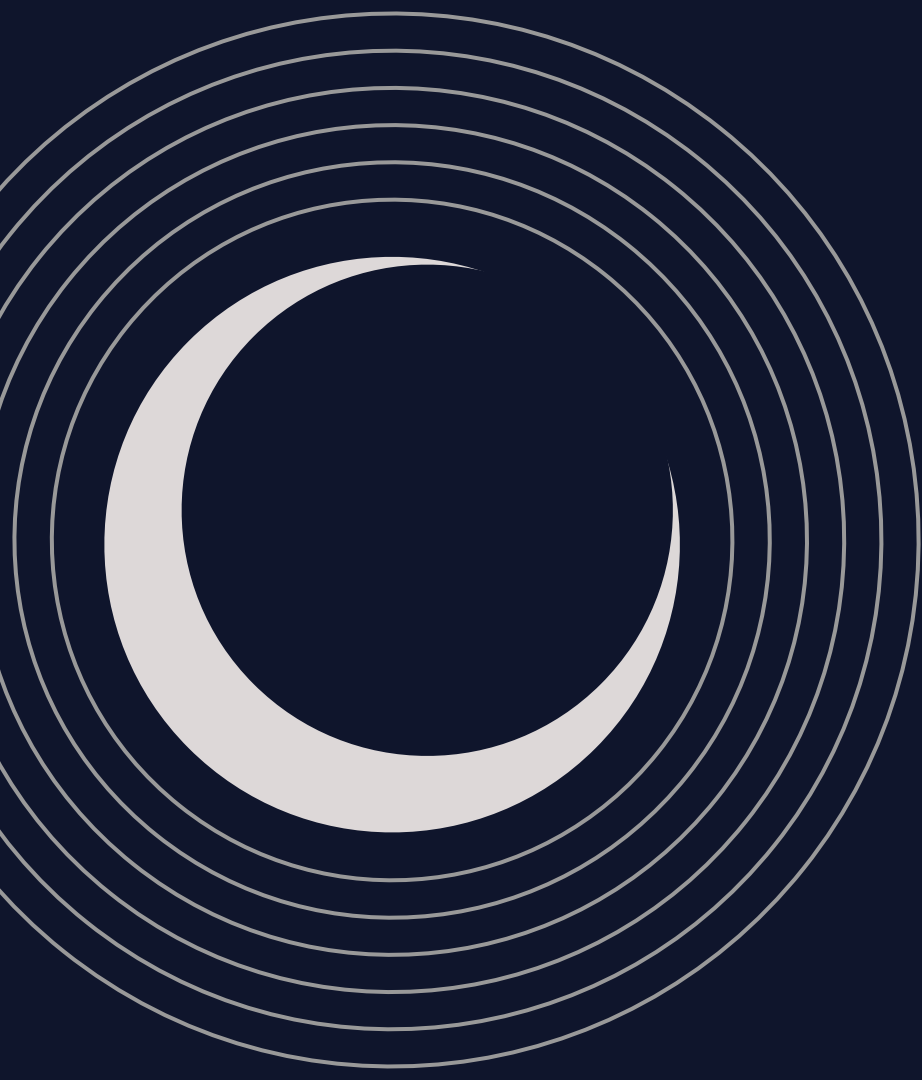
Chemical development
treatment



Readout + analysis
Using microscope techniques

10 kg-year simulated sensitivity [90 % C.L.] + zero BG





03

**‘加速されたDM’は
どこから来る？**

軽いDMは検出が難しい

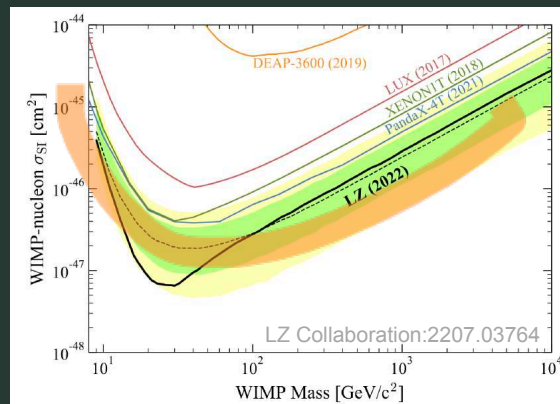
• 軽いDM

- $\langle v_{DM} \rangle \sim 230 \text{ km/s} \ll c$
- 運動エネルギー $\sim \frac{m_{DM} v_{DM}^2}{2}$
- 軽いDMが運動エネルギーが低く、検出器のエネルギーしきい値を超えられない。

→ DM-電子 相互作用 (R. Essi et al.

2101.08275), Migdal効果 (M. Ibe

1707.07258), 加速されたDM, ...



• 重いDM

$$\Omega_{DM} = \frac{m_{DM} n_{DM}}{\rho_c} = 0.27$$

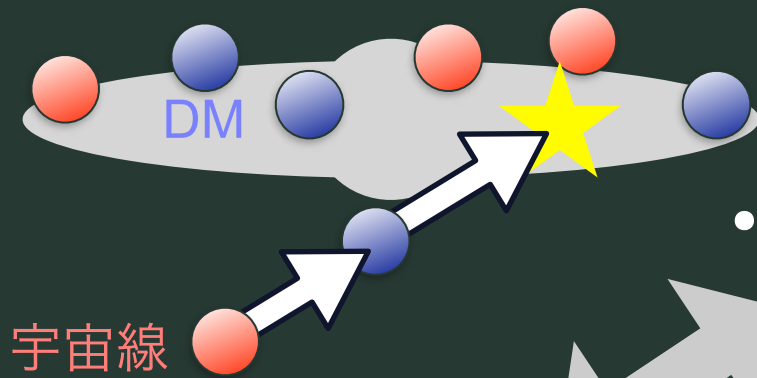
$$n_{DM} \propto 1/m_{DM}$$

DM粒子の数は少ない

→ 多くのイベントは期待できない

“加速されたDM”

W. Yin 1809.08610
Y.Ema, F.Sala, R.Sato 1811.00520
T.Bringmann and M.Pospelov 1810.10543
...



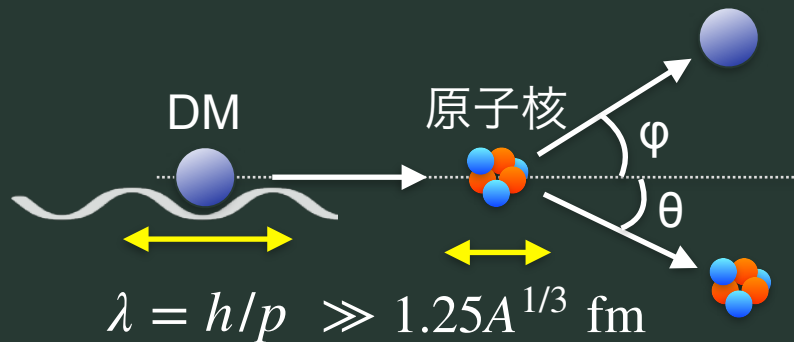
- 宇宙線で加速されたDM (CR-DM)

- ▶ $v_{DM} > v_{esc}$ でもOK!
- ▶ v_{DM} は散乱する宇宙線のエネルギーによる
- ▶ 検出器のエネルギーしきい値を超える高いエネルギーを得ることも可能

- 従来のWIMPs

- ▶ $v_{DM} \ll v_{esc}$
- ▶ $v_{DM} \sim 230 \text{ km/s}$; 遅い

従来のWIMPと原子核の散乱



$m_{DM} = 10 \text{ GeV}/c^2$ の場合

$$p = m_{DM}v_{DM} = 10\text{GeV}/c^2 \cdot 230\text{km/s} \simeq 8\text{MeV}/c$$

$$\lambda = \frac{hc}{pc} = \frac{197\text{MeV} \cdot \text{fm}}{8\text{MeV}} = 25 \text{ fm}$$

- 原子核の内部構造は見えない

- 古典力学の弾性散乱
エネルギー保存則

$$\frac{1}{2}m_{DM}v_{DM}^2 = \frac{1}{2}m_{DM}v_{DM}'^2 + \frac{1}{2}m_Nv_N'^2$$

運動量保存則

$$m_{DM}v_{DM} = m_{DM}v_{DM}' \cos \phi + m_Nv_N' \cos \theta$$

$$0 = m_{DM}v_{DM}' \sin \phi + m_Nv_N' \sin \theta$$

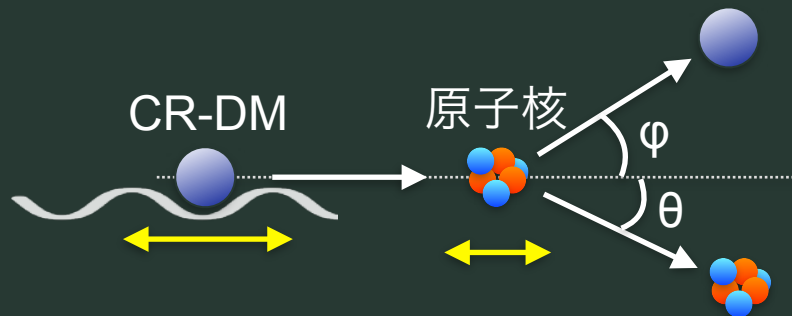
$$E_R = \frac{1}{2}m_{DM}v_{DM}'^2$$

$$= \frac{1}{2}m_{DM}v_{DM}^2 \times \frac{4m_{DM}m_N}{(m_{DM} + m_N)^2} \times \frac{1 + \cos \theta^*}{2}$$

θ^* : 質量中心系での散乱角



CR-DMと原子核の散乱



- DMの運動量が高い

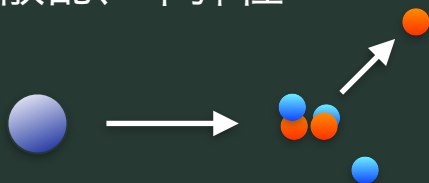
- ▶ CR-DMのde Broglie波長 < 原子核サイズ
- ▶ 原子核の内部構造が見える？
 - 非弾性散乱、深非弾性散乱、準弾性散乱...今回は考えない

- 弾性散乱の場合

WIMPの場合と同様に、**相対論的な**
エネルギー保存則・運動量保存則から

$$E_R = \frac{T_{DM}^2 + 2m_{DM}T_{DM}}{T_{DM} + (m_N + m_{DM})^2/(2m_N)} \times \frac{1 + \cos \theta^*}{2}$$

T_{DM} : 入射するDMの運動エネルギー

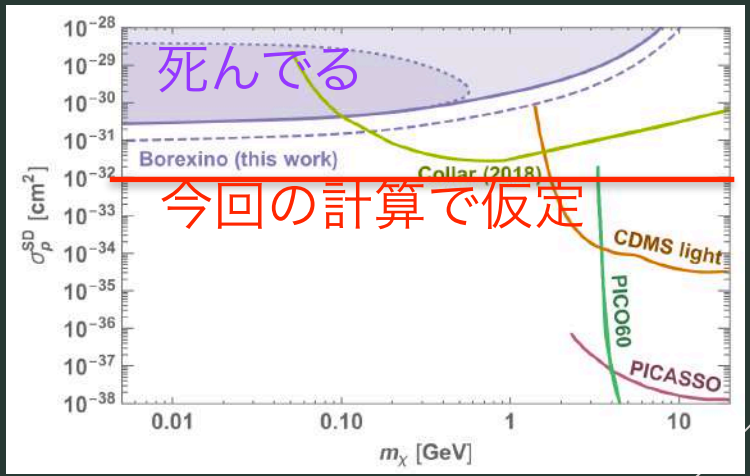
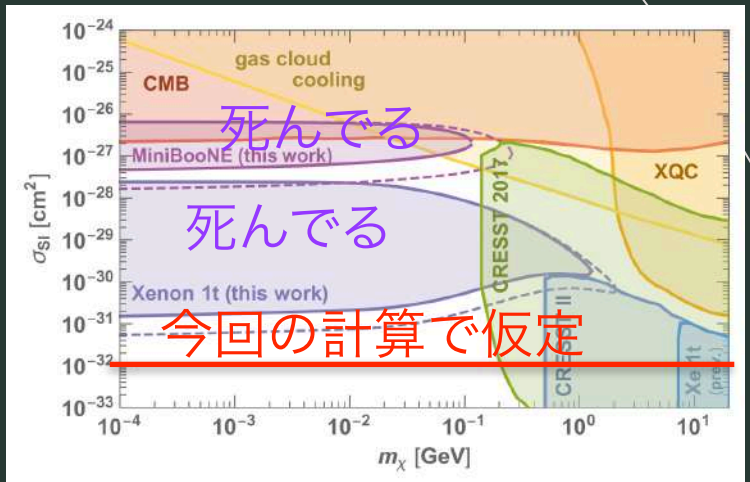
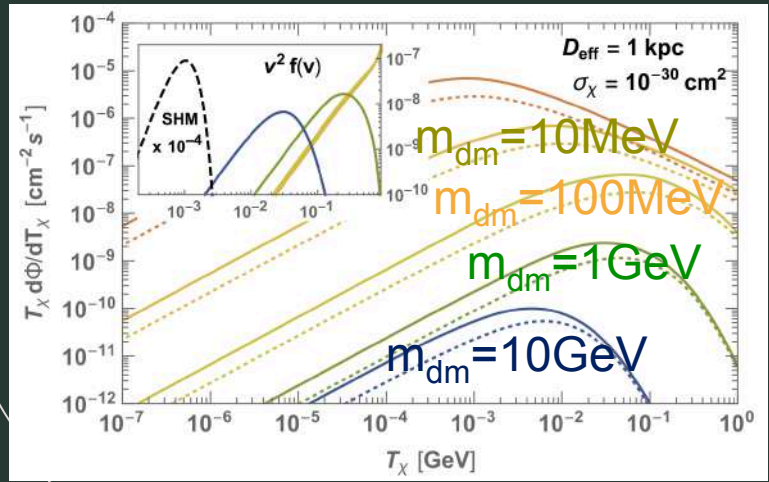


制限

CR-DM

フラックス

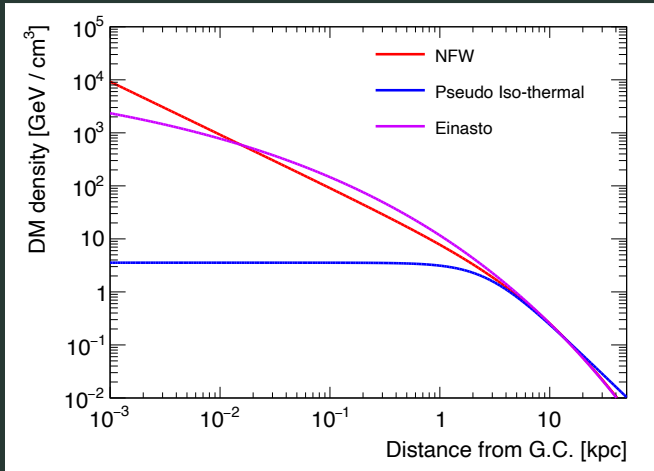
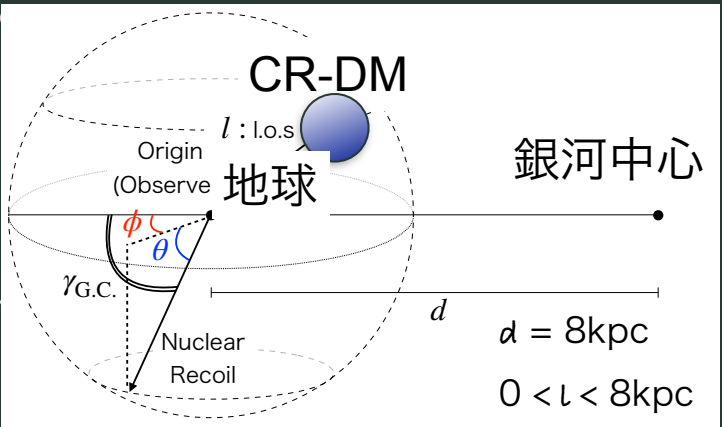
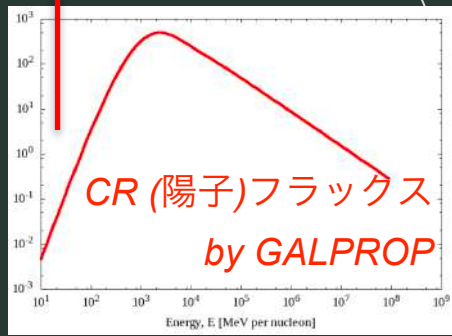
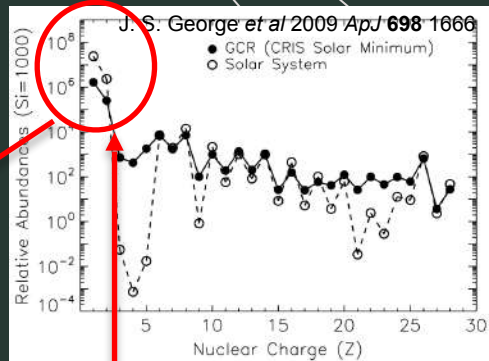
$$f(v) = \frac{m_\chi^2 \gamma^3}{\rho_\chi^{\text{local}}} \frac{d\Phi_\chi}{dT_\chi}$$



各方向へのCR-DMフラックス

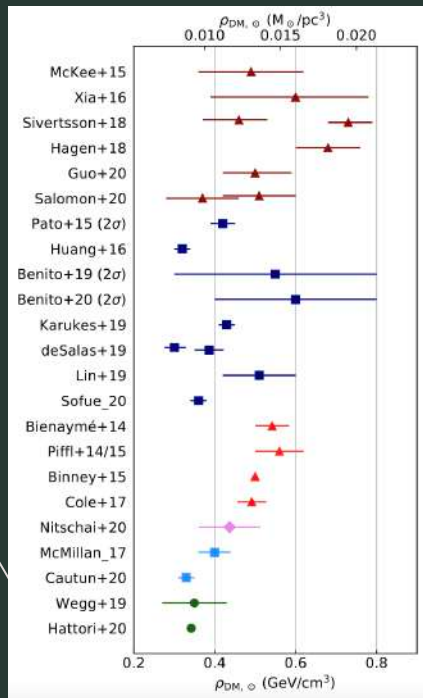
$$\frac{d\Phi_\chi}{dT_\chi d\theta d\phi} = \int l^2 dl \frac{1}{4\pi l^2} \sigma_{\chi p} \frac{\rho_\chi(r)}{m_\chi} \int_{T_i^{min}}^{\infty} dT_p \frac{d\Phi_p}{dT_p}$$

密度プロファイル



太陽系近傍のDM密度

- 太陽系近傍の質量密度
- 密度分布



Salas, a, Widmark (2020)
2012.11477

- Navarro–Frenk–White (NFW) プロファイル

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

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

- Einasto プロファイル

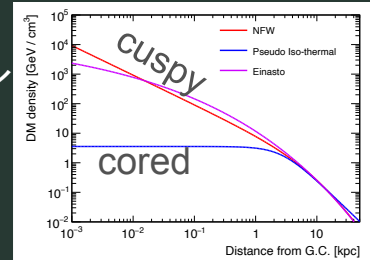
$$\rho_{Ein}(r) = \rho_0 \exp[2\alpha(1 - (r/r_0)^{1/\alpha})]$$

NFWより観測結果を良くフィットできる

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

- Pseudo-isothermal プロファイル

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



$$\rho_{\chi}(r \sim 8kpc) \approx 0.3-0.4 GeV/cm^3$$

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

上空からのCR-DMフラックス

NFW

Einasto

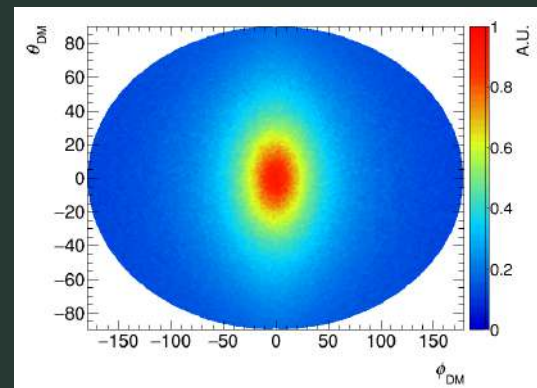
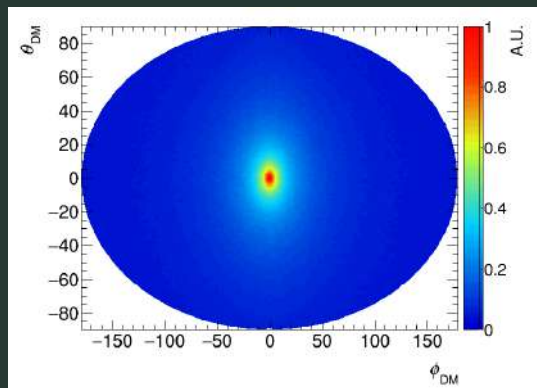
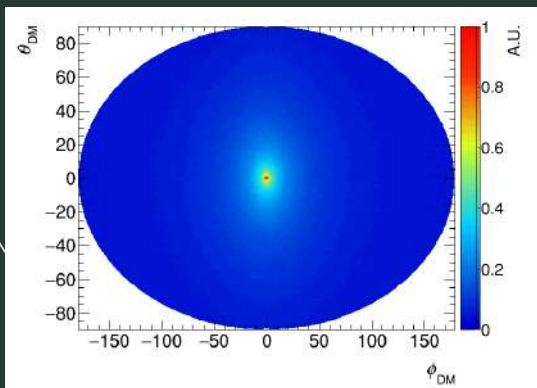
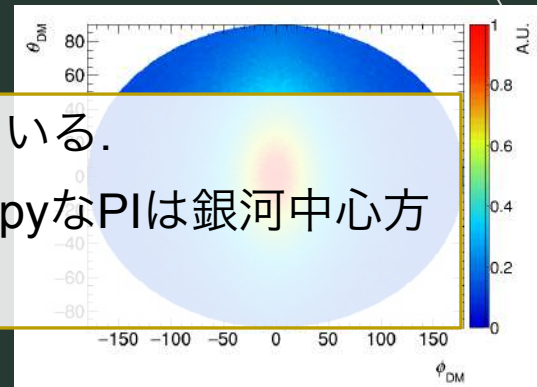
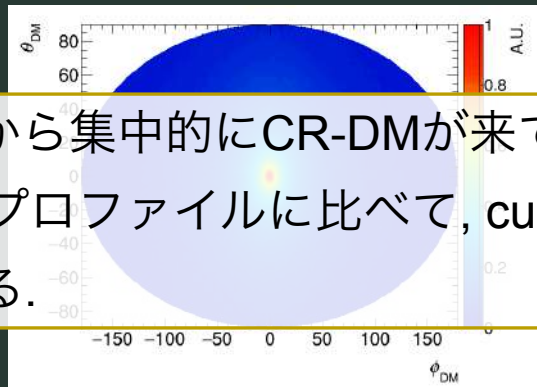
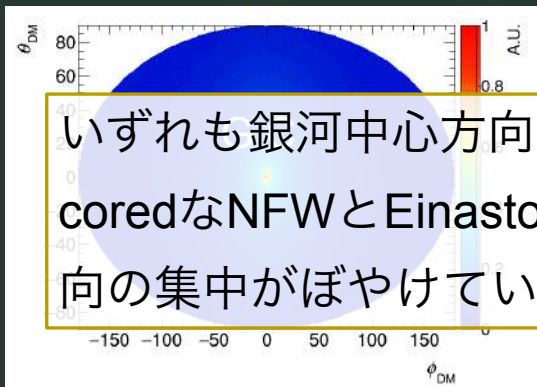
Pseudo-
isothermal

100MeV

1MeV

いずれも銀河中心方向から集中的にCR-DMが来ている。

coredなNFWとEinastoプロファイルに比べて, cuspyなPIは銀河中心方向の集中がぼやけている。



CR-DMの原子核反跳

target: F

NFW

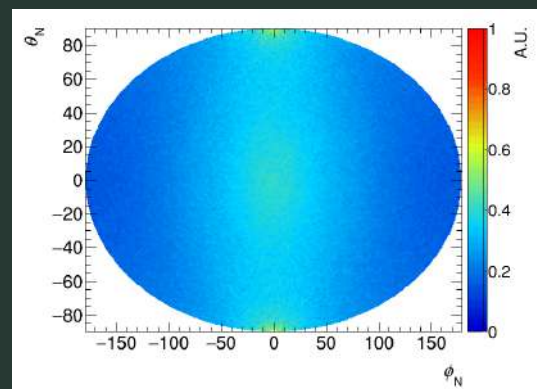
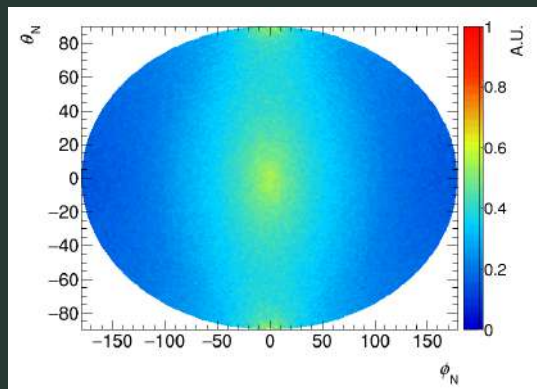
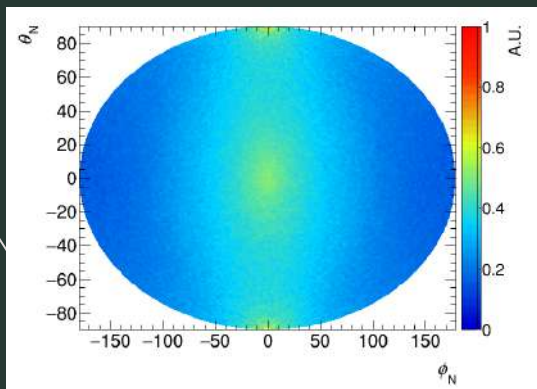
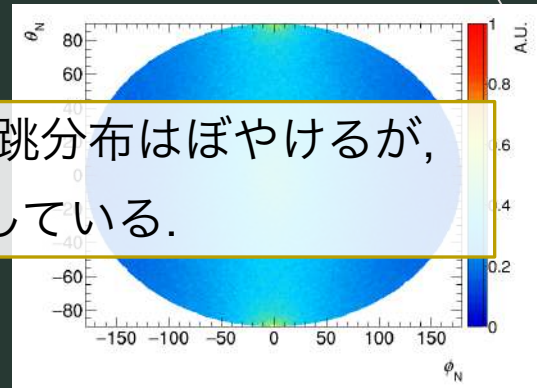
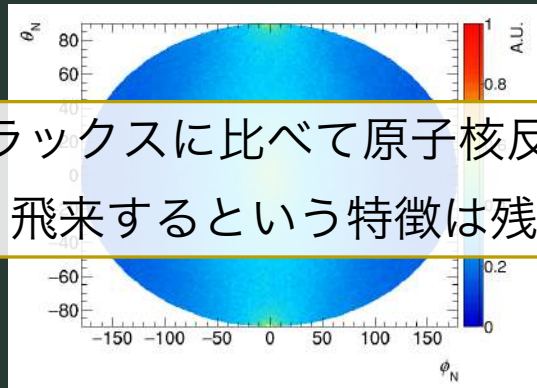
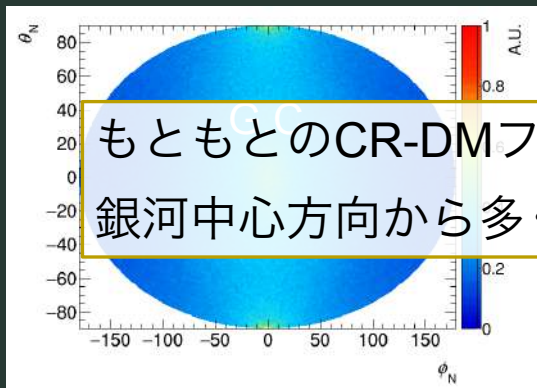
Einasto

Pseudo-
isothermal

100MeV

1MeV

もともとのCR-DMフラックスに比べて原子核反跳分布はぼやけるが、
銀河中心方向から多く飛来するという特徴は残している。



CR-DMの反跳エネルギー(p)

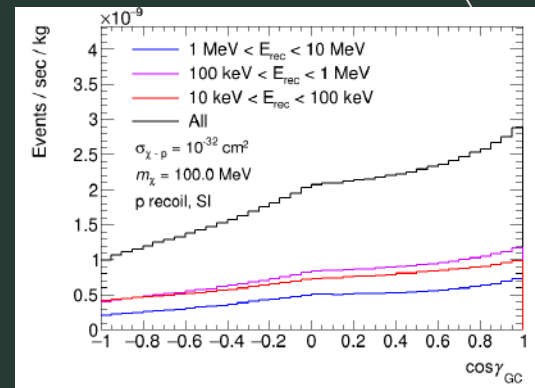
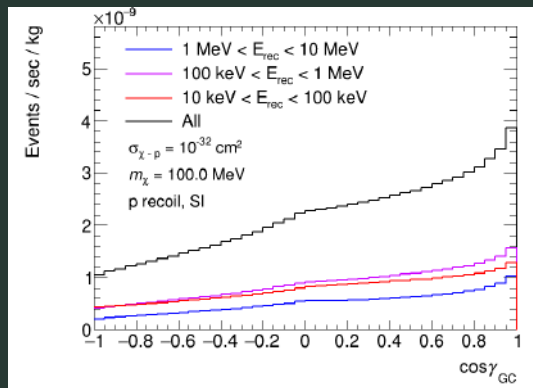
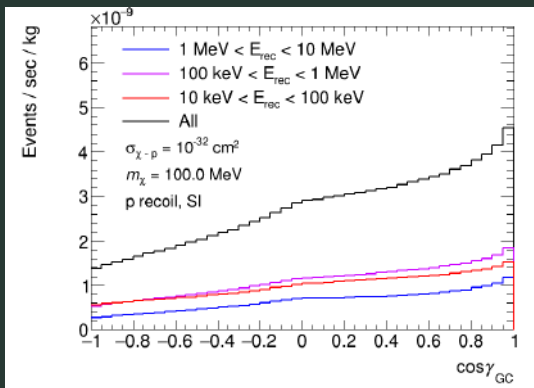
target: p

NFW

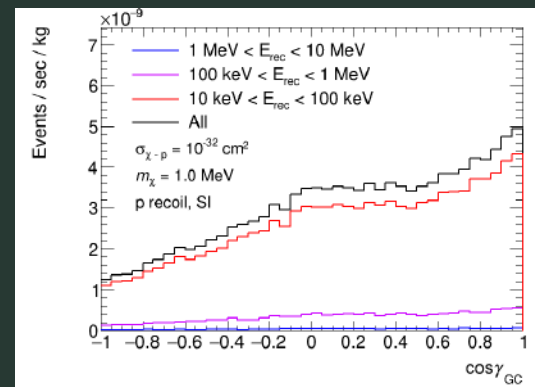
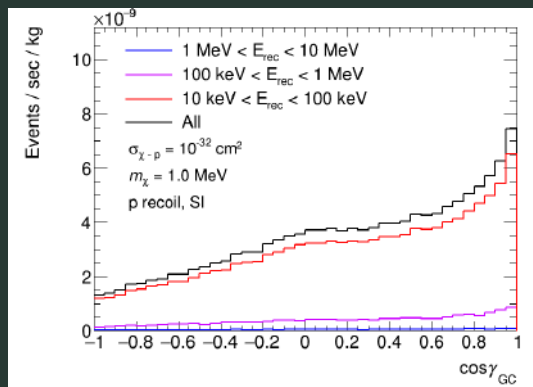
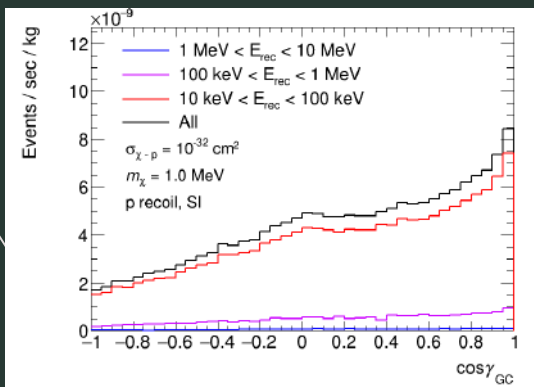
Einasto

Pseudo-
isothermal

100MeV



1MeV



CR-DMの反跳エネルギー(F)

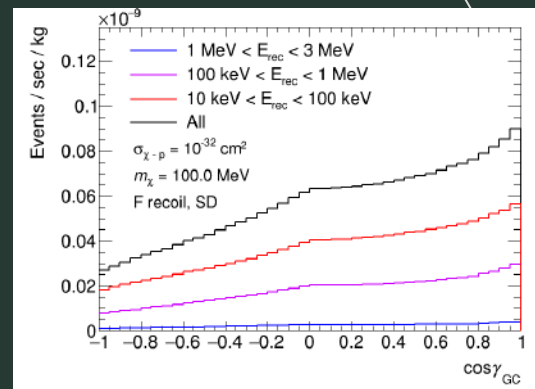
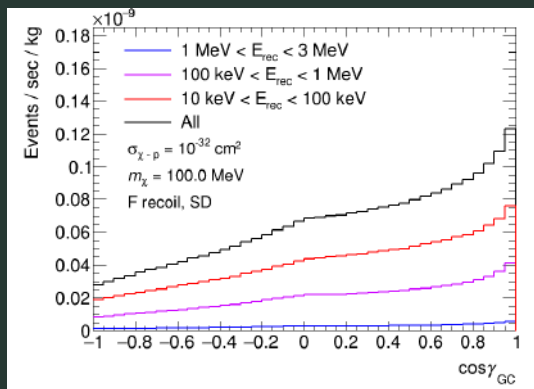
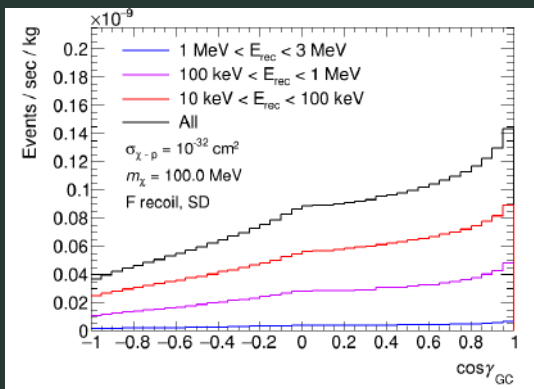
target: F

NFW

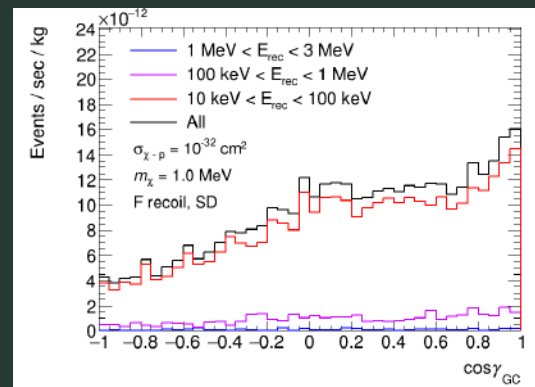
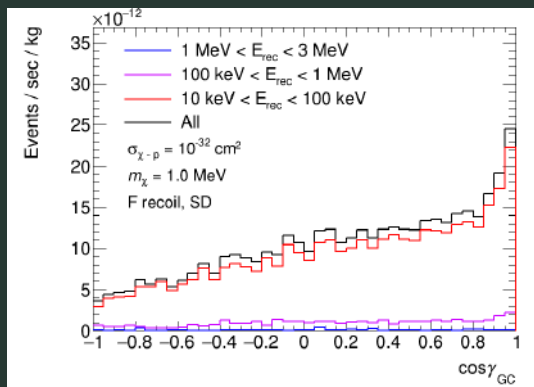
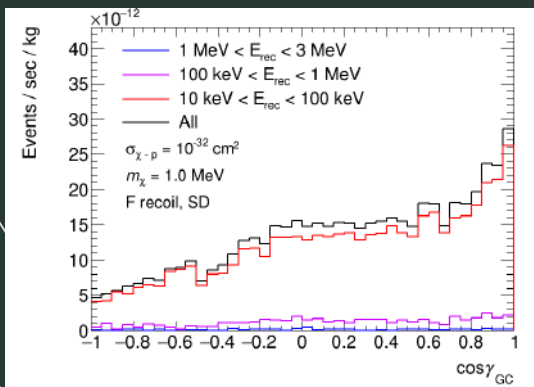
Einasto

Pseudo-
isothermal

100MeV



1MeV



CR-DMの反跳エネルギー(Ag)

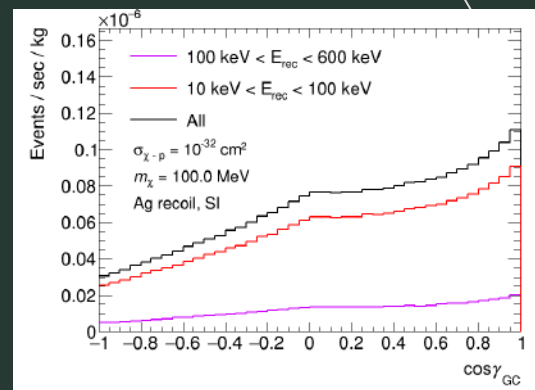
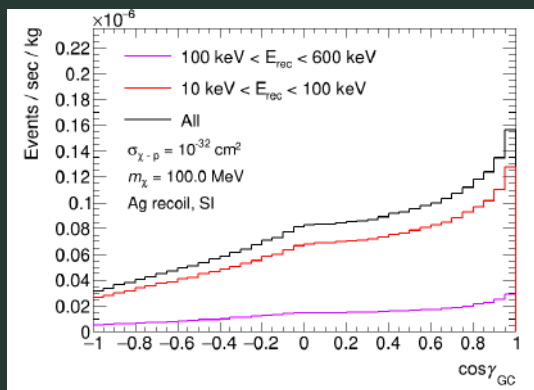
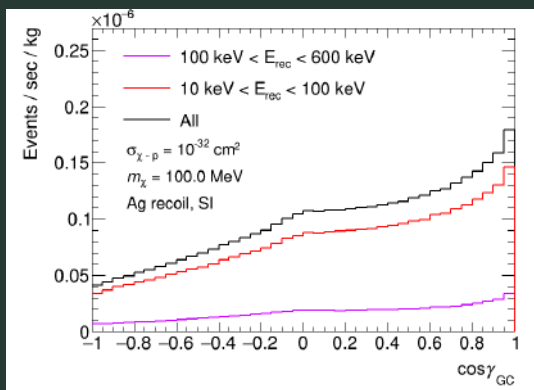
target: Ag

NFW

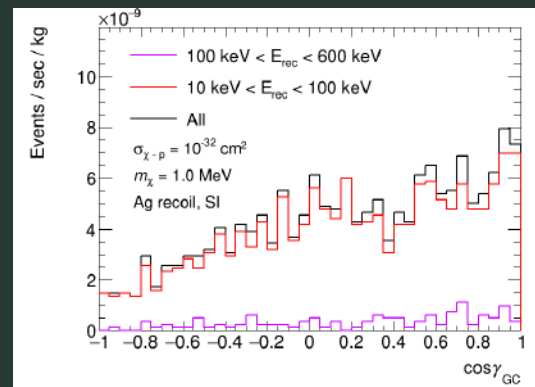
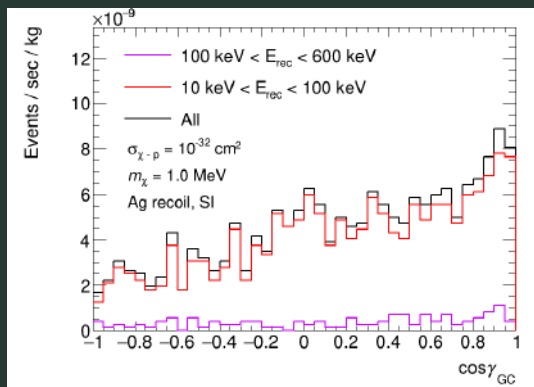
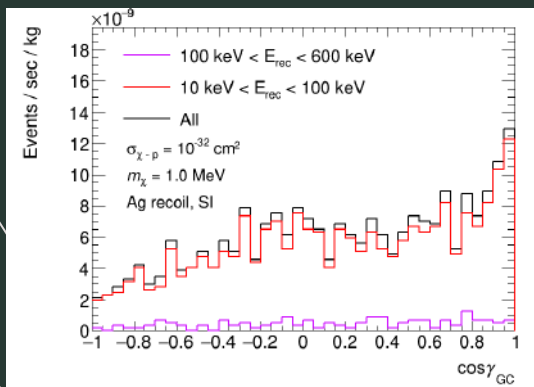
Einasto

Pseudo-
isothermal

100MeV



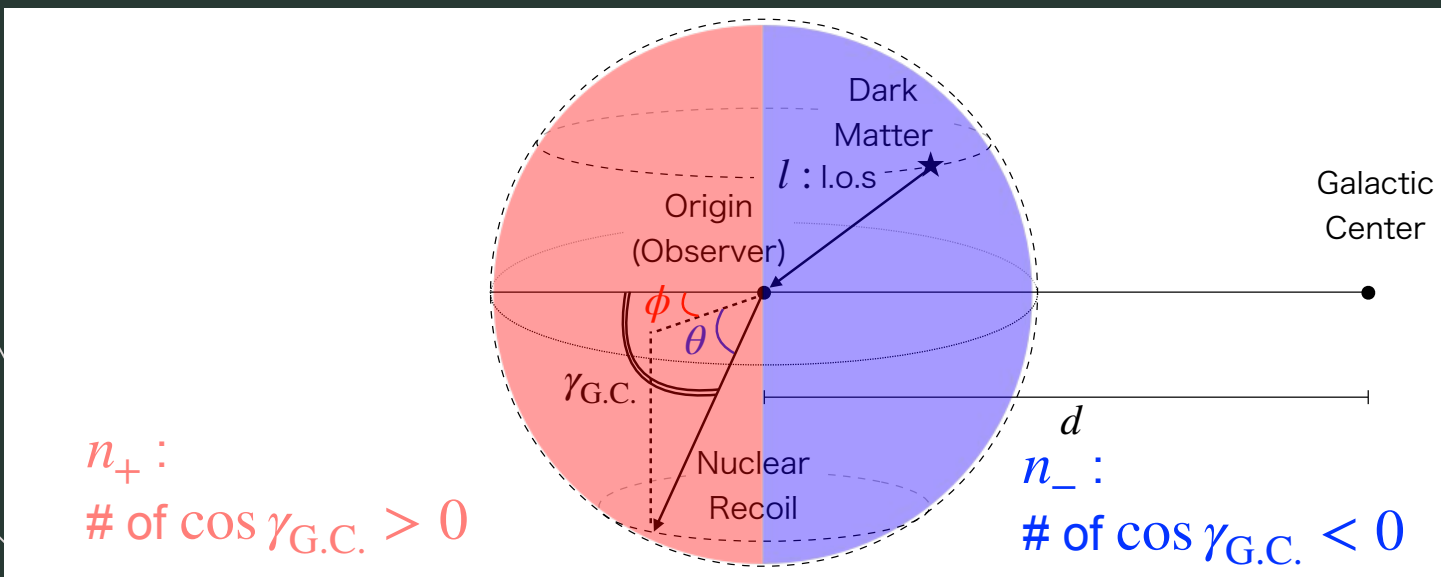
1MeV



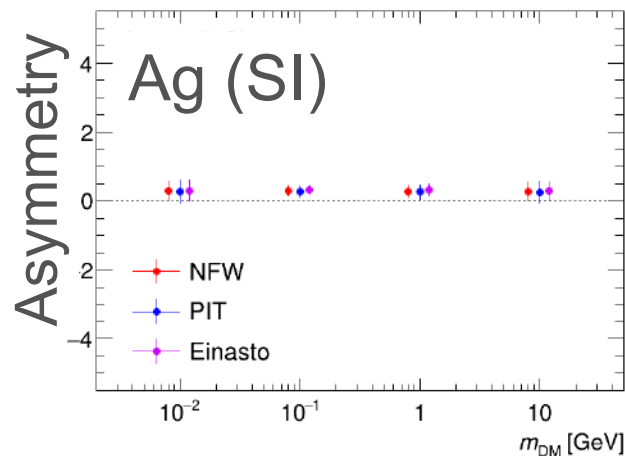
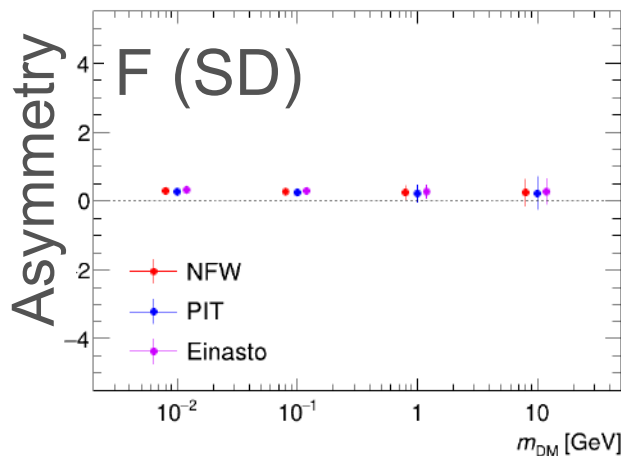
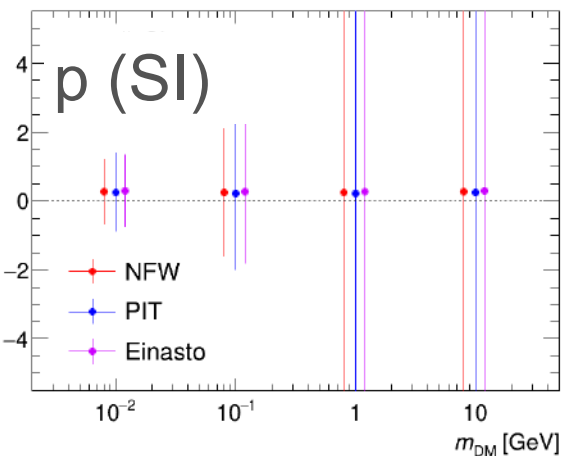
非対称性

- 他の方向に比べて銀河中心方向からのフラックスはどれだけ多いか？

$$\text{Asymmetry : } A = \frac{n_+ - n_-}{n_+ + n_-}$$



非対称性 A



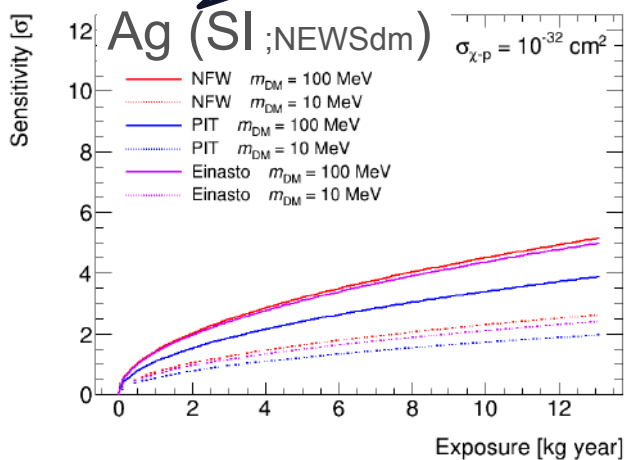
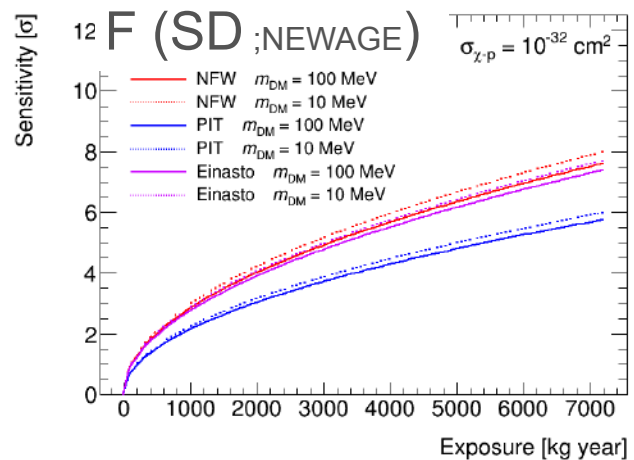
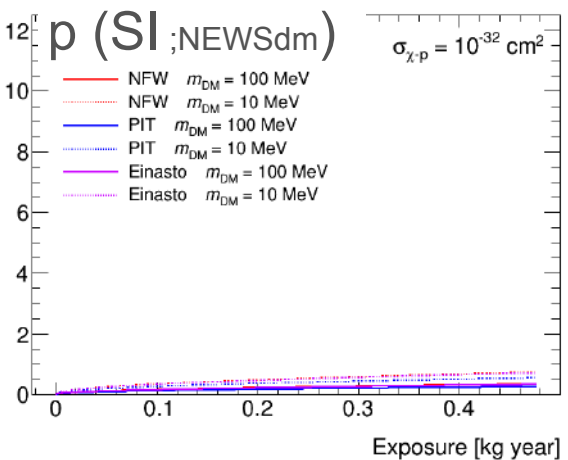
- p, Ag : 原子核乾板(NIT) 5.0 kg-yr
- F : SF_6 10k Torr $1m^3$, 6 yr
- $\sigma=10^{-32} cm^2$

□ 弾性散乱しない E_R を伴う検出イベントは省いて解析



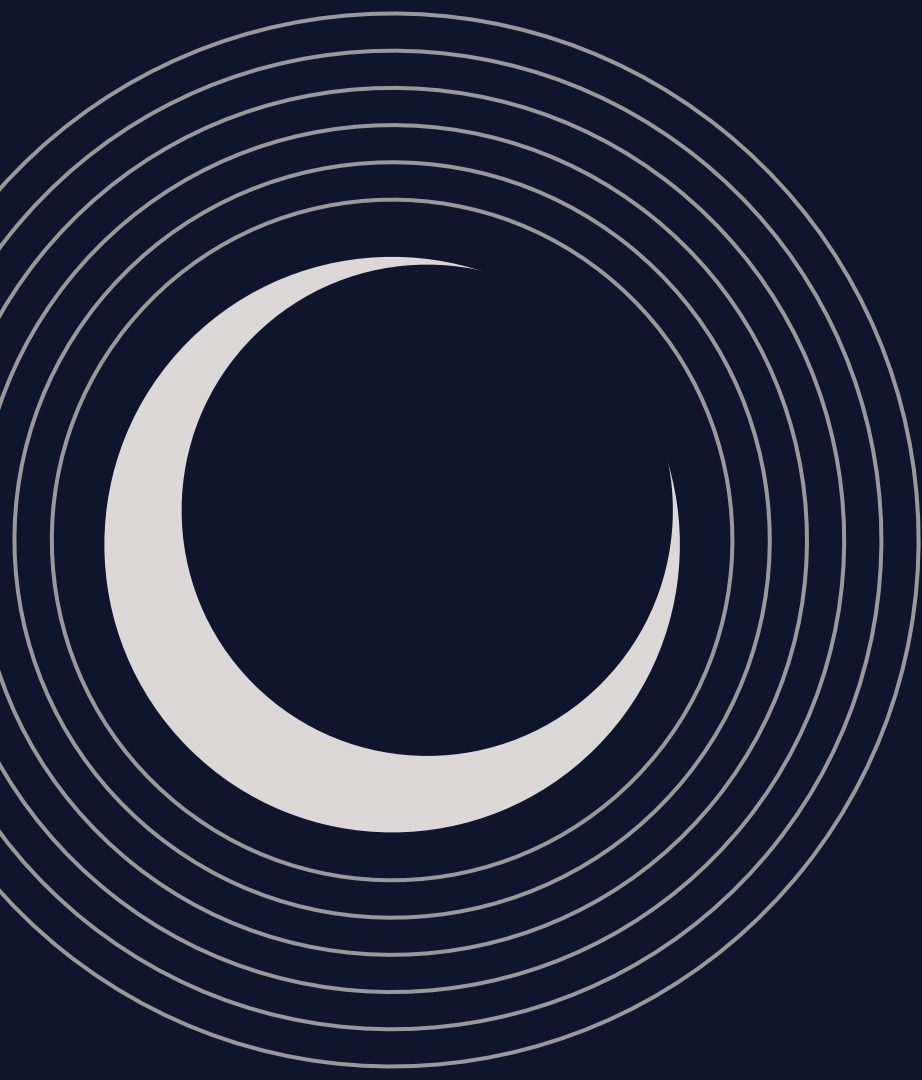
非対称性Aがどれだけ見える？

3 σ で「兆候」
5 σ で「発見」



- NEWSdmは将来的に0(1-10)kgへの拡張を想定→5 σ の感度を見込める.
- ガス検出器も Cygnus-1000(1000m³)の10倍のexposureを想定すれば ~>5 σ の感度を見込める.





04

速度分布の非等方性

arXiv:1707.05523 “Discrimination of anisotropy in dark matter velocity distribution with directional detectors”

速度分布

- Maxwell-Boltzmann 分布 (MB分布)

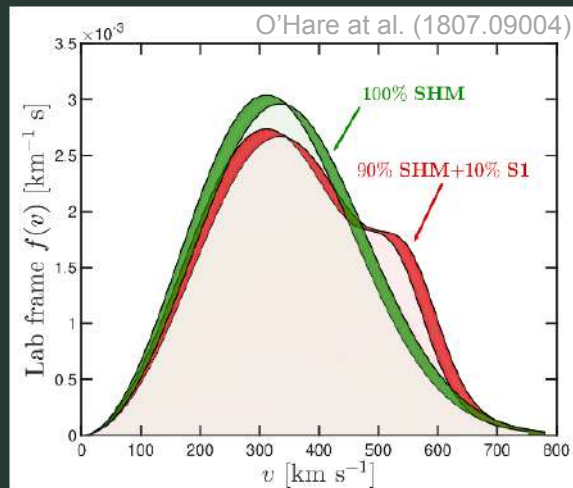
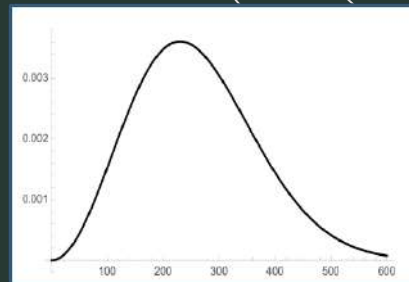
$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{N_T \rho_0}{m_\chi} \int^{v_{\max}} d\vec{v} f(\vec{v}) |\vec{v}| \frac{d\sigma(\vec{v})}{dE_R}$$

$$f(v) = \frac{1}{(\pi v_0^2)^{3/2}} e^{-(v+v_E)^2/v_0^2}$$

- $f(v)$ は非等方的かも

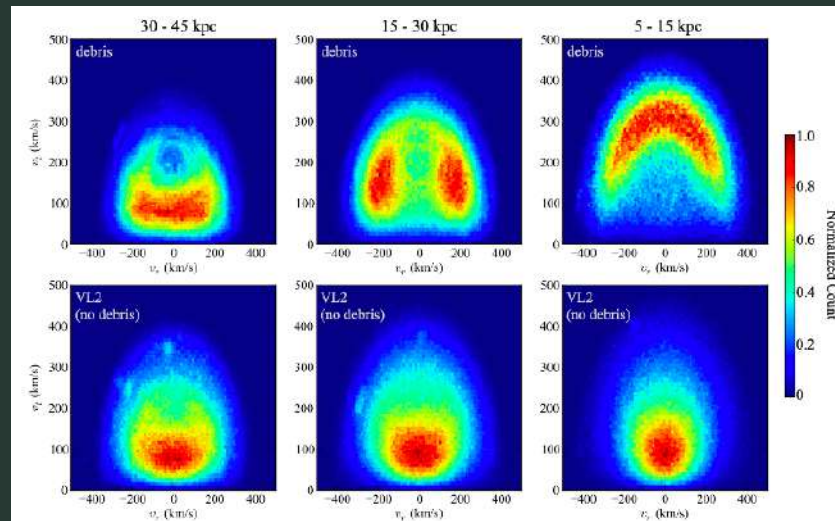
SDSS-Gaia データで得られたS1 ストリームは ~10% の非等方成分を含んでいる. 方向検出が有効そう.

DMの速度分布として、等方的なMB分布が一般的に使われる

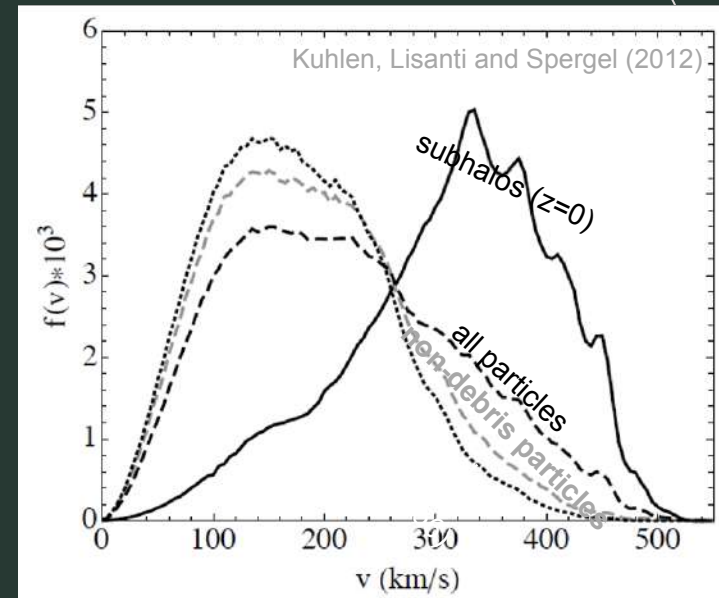


シミュレーションから示唆される塵の流れ

- 複数のN体シミュレーション → 銀河の中に‘塵の流れ’



Lisanti and Spergel (2011)



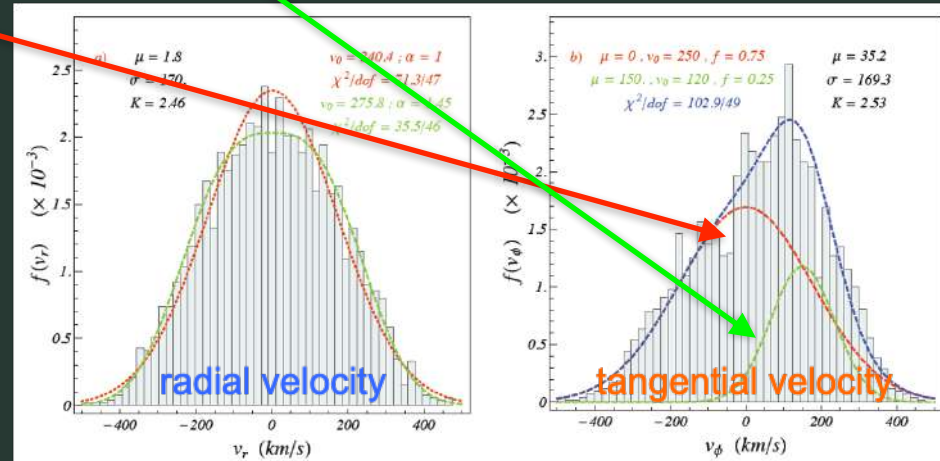
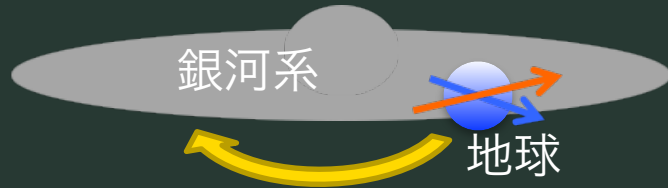
DM+バリオン+ガスのシミュレーション

- DMがバリオンの運動を追う
- 非等方成分

$$f(v_\phi) = \frac{1-r}{N(v_{0,\text{iso.}})} \exp[-v^2/v_{0,\text{iso.}}^2] + \frac{r}{N(v_{0,\text{ani.}})} \exp[-(v-\mu)^2/v_{0,\text{ani.}}^2]$$

非等方成分
25%

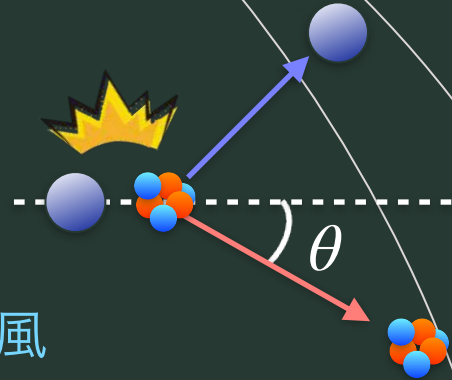
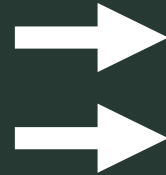
等方成分
75%



DM検出のシミュレーション

- モンテカルロ

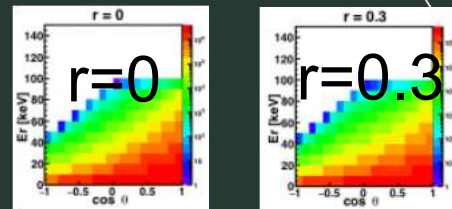
- シミュレーション



- E_R, θ のデータが得られる $f(v)$ を仮定したDMの風
 - 仮定: 完全弾性散乱, 背景事象なし, 完全な解像度
 - 標的: F (軽) / Ag (重)
- 2種類のデータを作る
 - テンプレート: 十分な統計量がある理想的なデータ
 - 擬実験データ: 統計量が少ないデータ

速度分布の非等方性を見るための方針

理想的“テンプレート”
大量のデータ数(#10⁸)

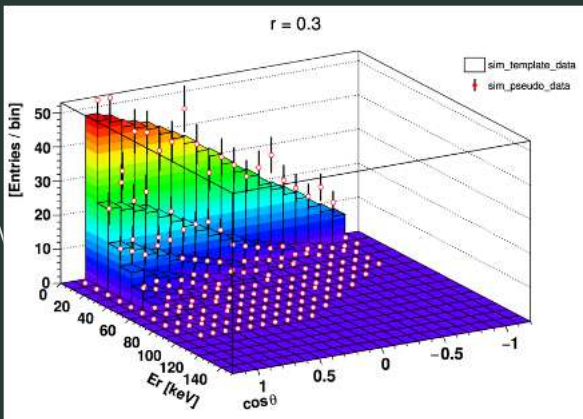


・ ライクリフッド

$$\mathcal{L} = \prod_{\text{bins}} P(r | \text{pseudo}, \text{template})$$

・ χ^2 テスト

$$\chi^2 = \sum_{\text{bins}} \frac{(\text{pseudo} - \text{template})^2}{\text{pseudo}}$$

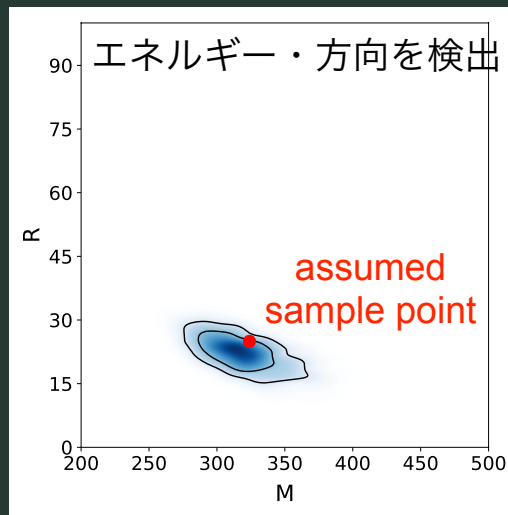
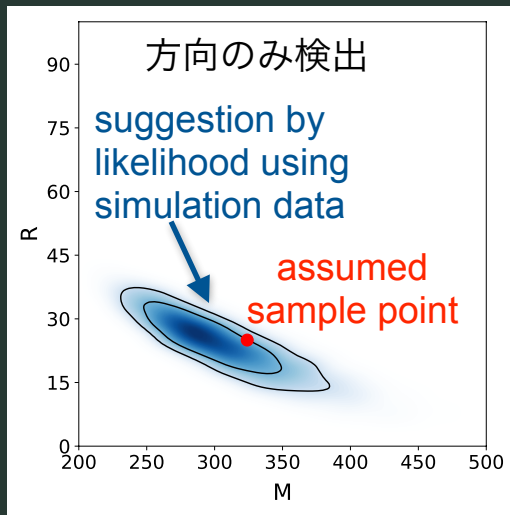
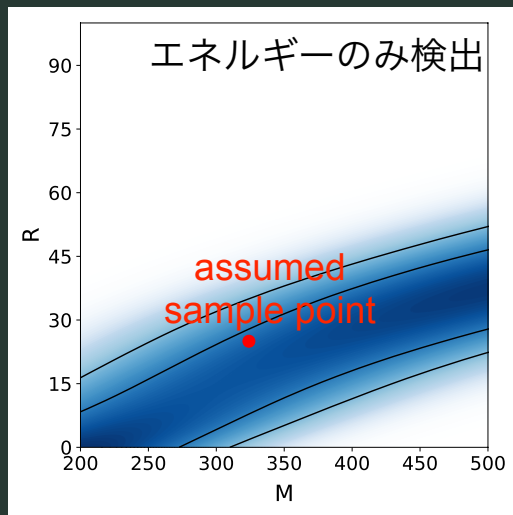


どのテンプレートが最も
擬実験データに似ている
か比較



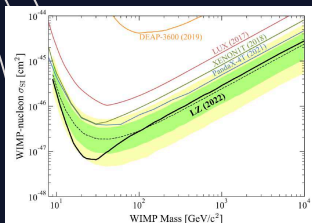
“擬実験”データ
データ数は少なめ (#10³-10⁴)

速度分布非等方性と質量がどれだけ見える？



方向情報を使うと、非等方性と質量をより効率よく見つけられそう

- $E_{thr}=50\text{keV}$
- target:Ag
- $M_{dm}=300\text{GeV}$
- #event: 10000
- ($\sigma_p=10^{-28}\text{cm}^2$, 1/kg/day)



おみやげメッセージ（４年生）



- DMは未発見の素粒子？その性質を調べる→新しい素粒子模型の発見！
- 検出実験が進んだ→DM候補は混沌...
- 宇宙線で加速された軽いDMは良い候補の1つ。方向の情報がわかるのも◎。

おみやげメッセージ（スタッフの方）



- 100-10MeVのCR-DMに対して，NEWAGE実験は構想中のアップグレード×10，NEWSdmは×1で $\sim 5\sigma$ くらい方向の非対称性が見えそう.
- 弾性散乱以外も考慮したい(future work).