

Uncertainty of Dark Matter Energy Density in Direct Detection

長尾桂子（岡山理科大）

(進行中) 長尾桂子, 中林拓帆, 正木彰伍

arXiv:2211.13399 長尾桂子, 東野聡, 中竜大, 身内賢太郎

arXiv:1707.05523 長尾桂子, 池田智法, 矢ヶ部遼太, 中竜大, 身内賢太郎

の共同研究に基づく

先にまとめ

- 太陽系近傍のダークマターのエネルギー密度が直接検出の制限に影響
- substructureが効くかも
- 高分解能・大体積の宇宙論的シミュレーションIllustris TNGのデータから、太陽系近傍の暗黒物質のエネルギー密度 ρ_{DM} を評価した。

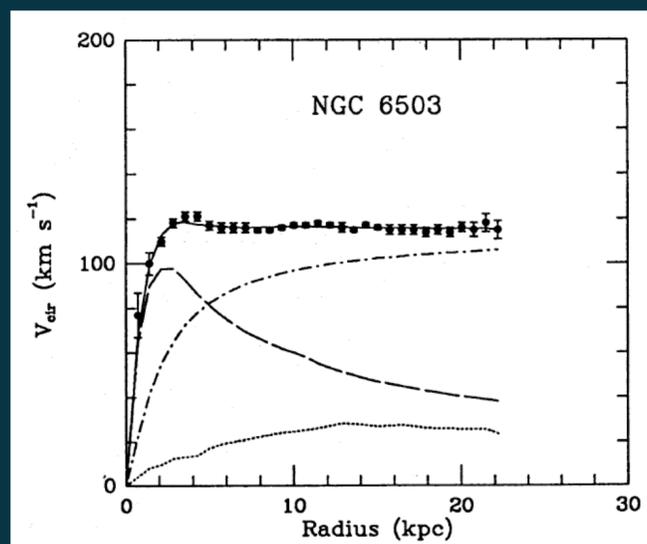
PRELIMINARY	$\rho_{\text{DM}}^{\text{Max}}$	5.90 GeV/cm ³
	$\rho_{\text{DM}}^{\text{min}}$	0.01 GeV/cm ³
	$\langle \rho_{\text{DM}} \rangle$	0.37±0.58 GeV/cm ³ (観測から0.2-0.6くらい)

目次

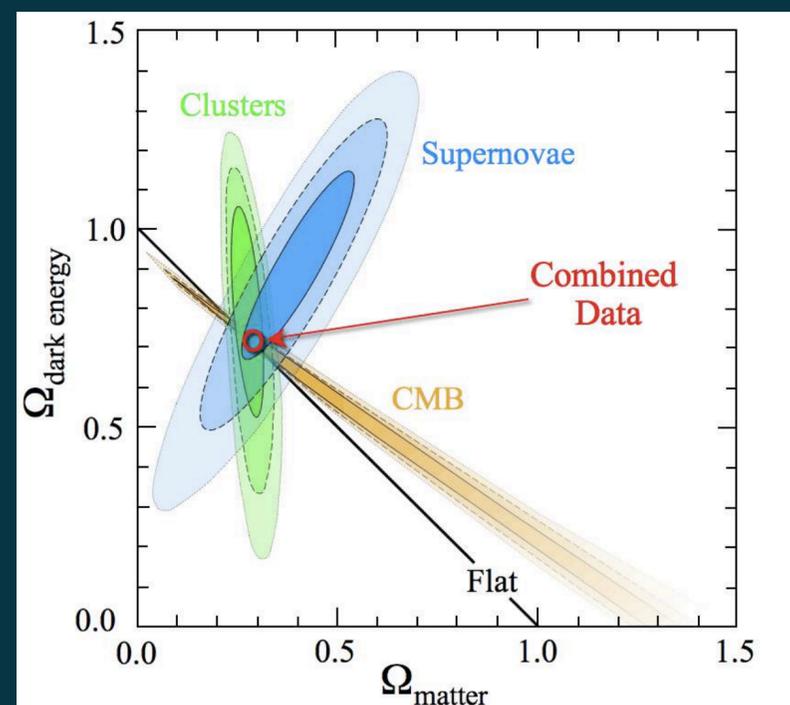
1. **DM直接検出実験からの制限**
2. DMのSubstructure
3. シミュレーションデータから評価した太陽系近傍のDM密度
4. まとめ

ダークマター(DM)

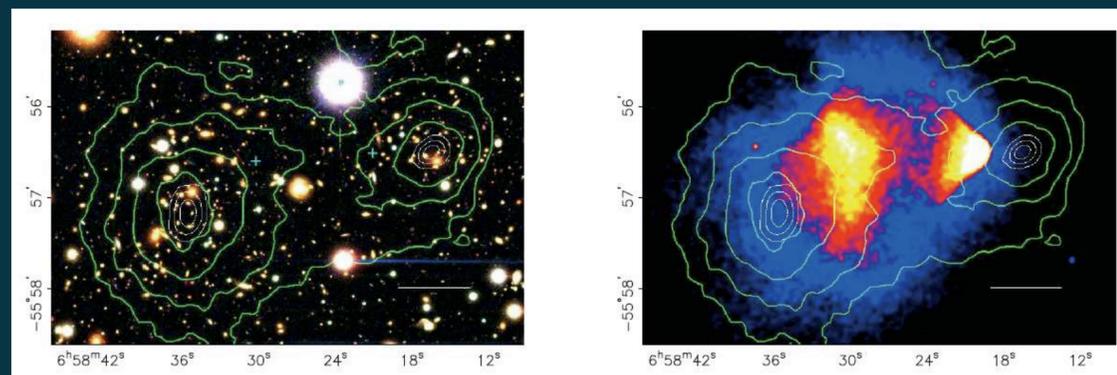
- Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs)
- Axions, Axion Like Particles (ALPs)
- Primordial black holes
- Modified Gravity
-



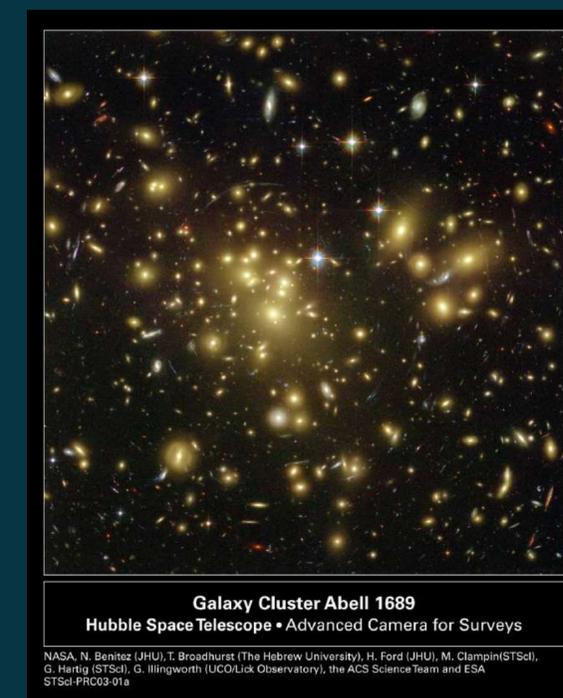
Galactic
Rotation Curve



CMB



Bullet cluster



Weak Lensing

直接検出実験 (詳しくは身内さんのトークで)

- イベント率

$$\frac{dR}{dE_R} = N_T \frac{\rho_{DM}}{m_{DM}} \int dv f(v) v \frac{d\sigma(v)}{dE_R}$$

N_T : 標的原子核数

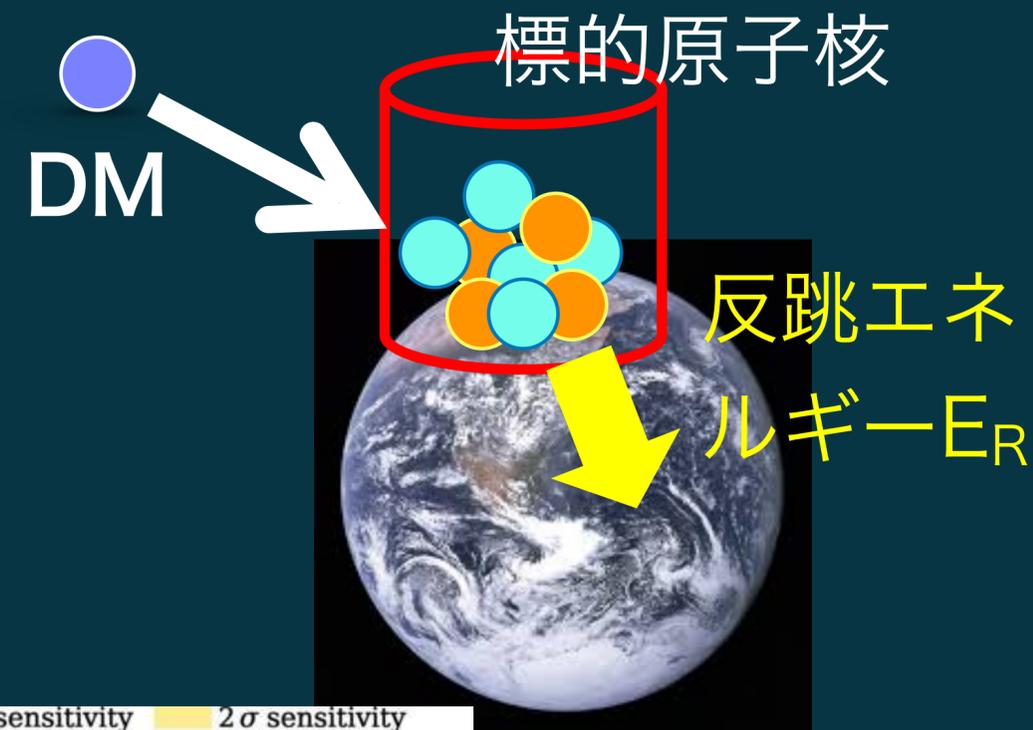
ρ_{DM} : 太陽系近傍のDM密度

m_{DM} : DM質量

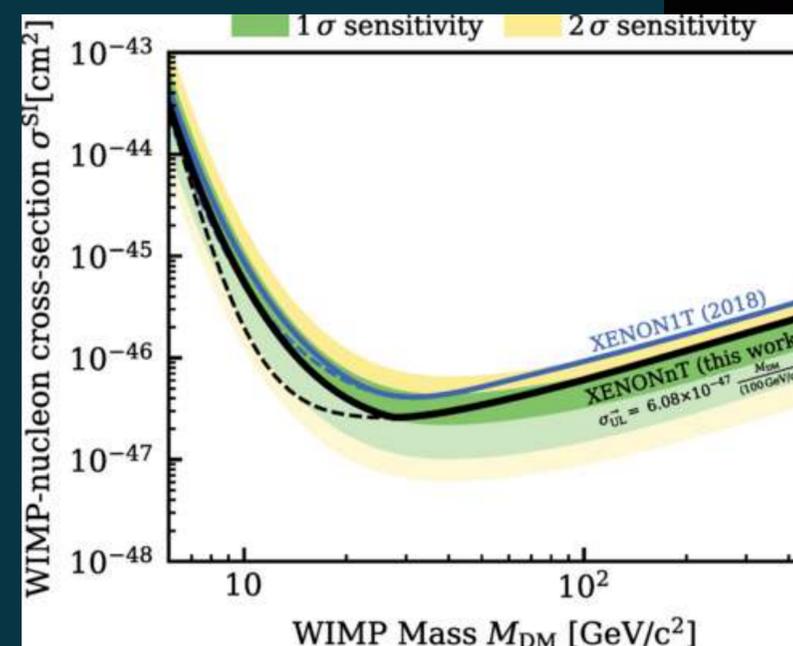
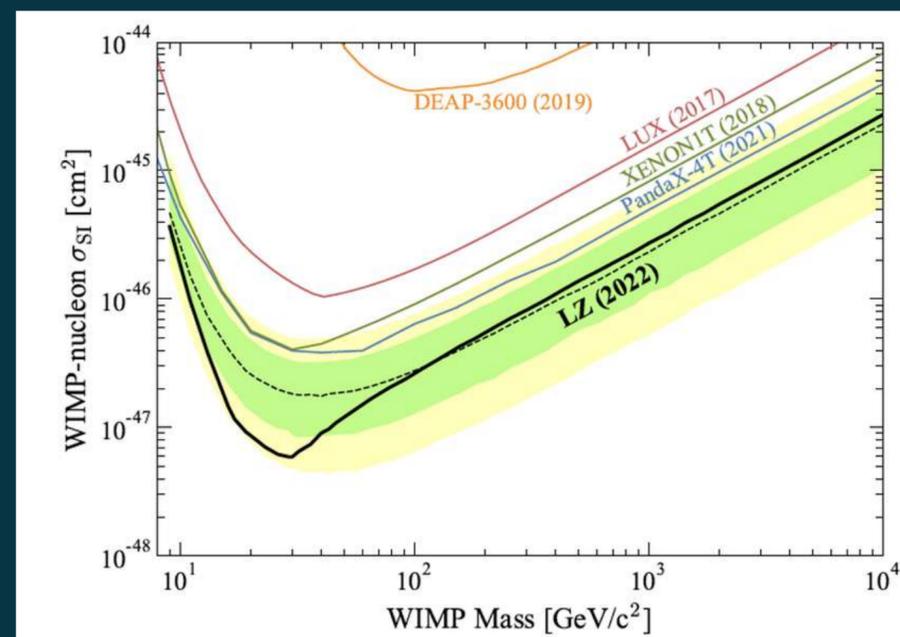
$f(v)$: DMの速度分布

$\sigma(v)$: DMと原子核の散乱断面積

E_R : 反跳エネルギー



- WIMPsへの制限



それって信用できるの？

$$\frac{dR}{dE_R} = N_T \frac{\rho_{\text{DM}}}{m_{\text{DM}}} \int dv f(\mathbf{v}) v \frac{d\sigma(\mathbf{v})}{dE_R}$$

- 太陽系近傍 (< 数100 pc)での暗黒物質のエネルギー密度

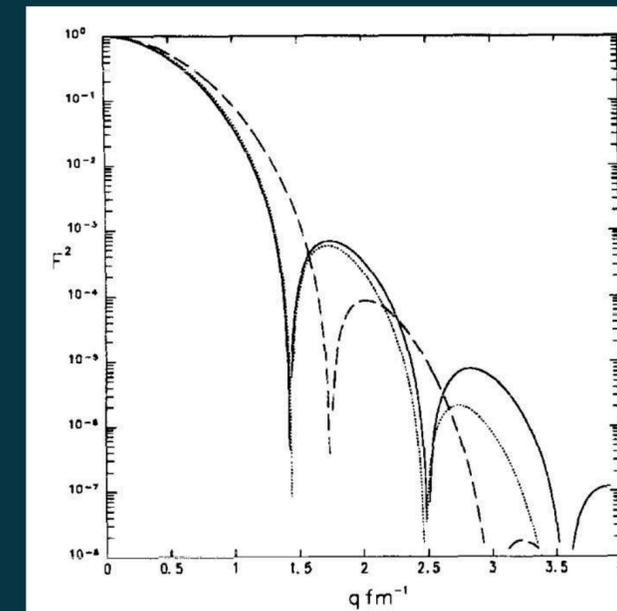
- (0.2 – 0.6) GeV/cm³
- 最近は0.4 GeV/cm³が多い M Pato et al, arXiv:1504.06324

- 暗黒物質の速度分布

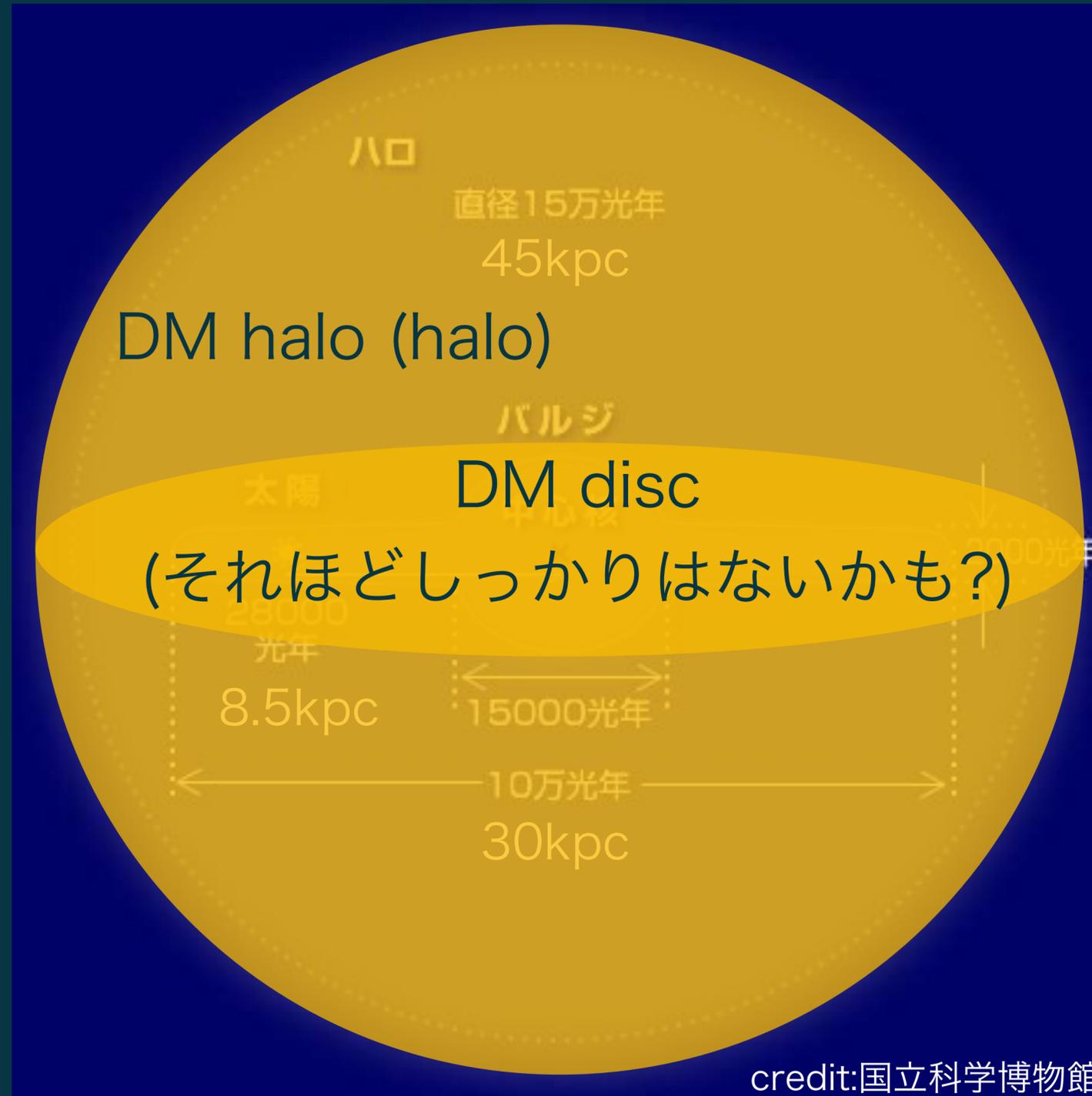
- 銀河系で等方的なMaxwell分布 $f(\mathbf{v}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \text{Exp} \left[-\frac{v^2}{2\sigma_v^2} \right]$

- 原子核の形状因子

- $\frac{d\sigma(\mathbf{v})}{dE_R} = \frac{m_N}{2m_R^2 v^2} (\sigma_{SI} F_{SI}^2(E_R) + \sigma_{SD} F_{SD}^2(E_R))$
- thin shell近似/solid sphere近似



太陽系近傍のDM



観測から ρ_{DM} を決める

- Local measurement

- 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

- Global measurement

- 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が求められる→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



Local measurements

- 太陽近傍のトレーサー星の鉛直方向の運動

理想銀河(←?)の垂直Jeans方程式

$$\frac{\partial(\nu\bar{v}_z)}{\partial t} + \frac{1}{R} \frac{\partial(R\nu\bar{v}_z\bar{v}_R)}{\partial R} + \frac{\partial(\nu\bar{v}_z^2)}{\partial z} + \frac{1}{R} \frac{\partial(\nu\bar{v}_z\bar{v}_\phi)}{\partial \phi} + \nu \frac{\partial\Phi}{\partial z} = 0$$

$$\underbrace{\frac{1}{R} \frac{\partial(R\nu\sigma_{Rz})}{\partial R}}_{\text{tilt term } \mathcal{T}} + \frac{\partial}{\partial z} (\nu\sigma_z^2) + \nu \frac{\partial\Phi}{\partial z} = 0$$

半径方向-鉛直方向

Poisson方程式

$$\begin{aligned} 4\pi G\rho &= \frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial\Phi}{\partial R} \right) \\ &= \frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2} + \underbrace{\frac{1}{R} \frac{\partial v_c^2(R, z)}{\partial R}}_{\text{rotation curve term } \mathcal{R}} \end{aligned}$$

Local vertical kinematics analyses			
Label	z range	Tracer description	$\rho_{DM, \odot}$
McKee+15	—	comprehensive list of star and gas observations	0.49 ± 0.13
Xia+16	$0.2 < z < 1.5$	1427 G & K stars (LAMOST DR2)	$0.60^{+0.18}_{-0.21}$
Sivertsson+18 ^a	$ z \sim 0.5-1.2$ (y) $ z \sim 0.6-2.3$ (o)	G dwarfs from [60] (SDSS/SEGUE)	$0.46^{+0.07}_{-0.09}$ (y - tilt) $0.48^{+0.05}_{-0.06}$ (y - no tilt) $0.73^{+0.06}_{-0.05}$ (o - tilt) $0.46^{+0.02}_{-0.02}$ (o - no tilt) $0.40^{+0.03}_{-0.03}$ (y+o - tilt)
Hagen+18	$ z \sim 0.6-1.5$	red clump stars (TGAS × RAVE DR5)	0.68 ± 0.08
Guo+20 ^b	$0 < z < 1.3$	~ 90 000 G & K stars (LAMOST DR5 × Gaia DR2)	$0.50^{+0.09}_{-0.08}$ (N+S, $P(\Sigma_*)$) $0.27^{+0.22}_{-0.16}$ (N+S, $P(\rho_{*,0})$) $0.65^{+0.08}_{-0.08}$ (N, $P(\Sigma_*)$) $0.19^{+0.15}_{-0.12}$ (S, $P(\Sigma_*)$)
Salomon+20 ^c	$0.6 < z < 3.5$	43 589 red clump stars (Gaia DR2)	0.51 ± 0.09 (N) 0.37 ± 0.09 (S)
Very local analyses			
Label	Spatial cuts	Tracer description	$\rho_{DM, \odot}$
Schutz+18	$ z < 0.2$ $\Delta R' < 0.15$	1599 A stars 16 302 F stars 14 252 G stars (Gaia DR1 [TGAS])	$1.43^{+0.45}_{-0.56}$ (A stars) $0.71^{+0.45}_{-0.41}$ (F stars) $0.15^{+0.38}_{-0.15}$ (G stars)
Buch+19	$ z < 0.2$ $\Delta R' < 0.15$	4445 A stars 37 707 F stars 43 332 G stars (Gaia DR2)	$0.61^{+0.38}_{-0.38}$ (A stars) $1.48^{+0.30}_{-0.30}$ (F stars) $0.42^{+0.38}_{-0.34}$ (G stars)

最近のlocal analysisの結果 (2012.11477)

Kapteyn, J. C. 1922, ApJ, 55, 302, Jeans, Oort
Jeans J. H., 1922, MNRAS, 82, 122
J. I. Read, arXiv:1404.1938

Global measurements

- 天の川銀河の大域的質量モデルのフィッティング
- e.g. 回転曲線から外挿
重力ポテンシャルから

$$v_c^2(R) = R \left. \frac{\partial \Phi}{\partial R} \right|_{z=0}$$

定常状態、軸対称を仮定した理想銀河 (←?) の
r方向のJeans方程式から

$$v_{c,obs}^2 = \overline{v_\phi^2} - \overline{v_R^2} \left(1 + \frac{\partial \ln \nu}{\partial \ln R} + \frac{\partial \ln \overline{v_R^2}}{\partial \ln R} \right)$$

Distribution function fitting analyses of disc stars				
Label	Main cuts	Observational inputs	$\rho_{DM,\odot}$	R_\odot
Bienaymé+14	$\Delta R' < 0.5$ $0.2 < -z < 2$	4600 red clump stars (RAVE × 2MASS × UCAC)	0.542 ± 0.042	8.5
Piffl+14/15 ^{ac}	$ R - R_\odot < 1$ $ z < 1.5$	• Giant star kinematics (RAVE) ($ R - R_\odot < 1$ & $ z < 1.5$)	0.50–0.62	8.3
Binney+15 ^{bc}		• Vertical dens. distr. (SDSS) • Gas terminal velocities	0.50	8.3
Cole+17 ^c		• Maser kinematics • Proper motion of SgrA*	0.456–0.527	8.3
Jeans anisotropic modelling of disc stars				
Label	Main cuts	Tracer description	$\rho_{DM,\odot}$	R_\odot
Nitschai+20	$3.6 < R < 12$ $ z < 2.5$	~ 2 million giant stars (Gaia DR2)	0.437 ± 0.076	8.2
Galactic mass models driven by circular velocity data				
Label	Main cuts	Observational inputs	$\rho_{DM,\odot}$	R_\odot
McMillan_17	$4 \lesssim R \lesssim 20$	• Maser kinematics • Gas terminal velocities • Proper motion of SgrA* • Vertical force at 1.1 kpc • Total mass at 50 kpc	0.40 ± 0.04	8.20 ± 0.09
Cautun+20	$5 < R < 25$	• $v_c(R)$ curve from [47] (Gaia DR2 × APOGEE × WISE × 2MASS) • Total Galactic mass • Vertical force at 1.1 kpc	0.33 ± 0.02	8.12 ± 0.03
Galactic mass models from halo stars				
Label	Main cuts	Observational inputs	$\rho_{DM,\odot}$	R_\odot
Wegg+19 ^d	$1.5 < r < 20$	15 651 RR Lyrae halo stars (PanSTARRS1 × Gaia DR2)	0.35 ± 0.08	8.2
Hattori+20	$r' < 20$	• 16 197 RR Lyrae halo stars (Gaia DR2) • $v_c(R)$ curve from [47] • Vertical force at 1.1 kpc	0.342 ± 0.007	8.178

最近のglobal analysisの結果 (2012.11477)

観測から求めた ρ_{DM}

- local measurements

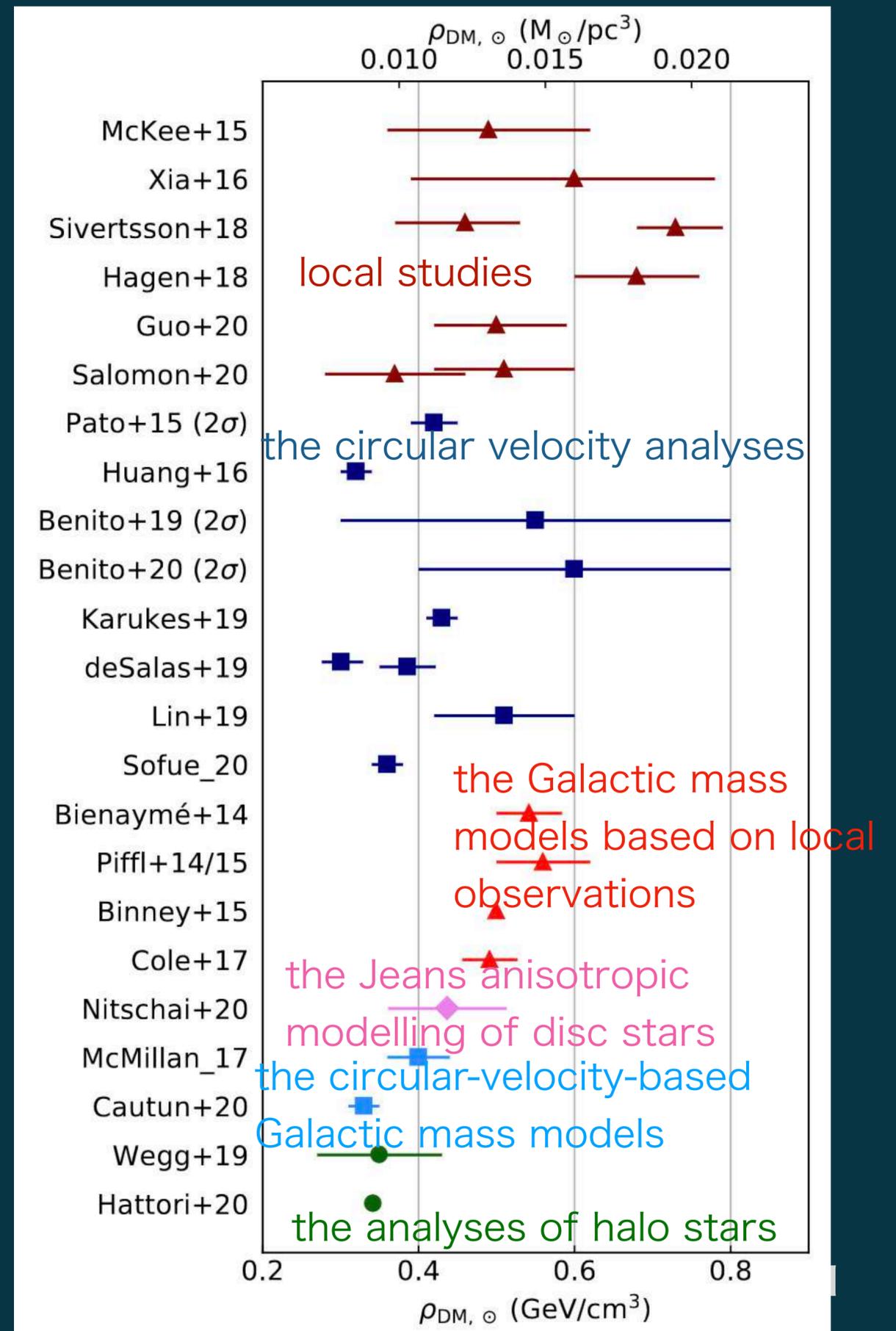
- Discの有無によらず、確実に太陽系近傍の密度を測れる
- $\rho_{\text{DM},\odot}=0.4-0.6 \text{ GeV/cm}^3$

- global measurements

- $\rho_{\text{DM}}=0.3-0.5 \text{ GeV/cm}^3$

- 不定性

- ファクターが変わるくらい



宇宙論的シミュレーションで ρ_{DM} を調べる

- 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、直接 ρ_{DM} を測定できない
 - 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

$$\frac{dR}{dE_R} = N_T \frac{\rho_{\text{DM}}}{m_{\text{DM}}} \int dv f(\mathbf{v}) v \frac{d\sigma(\mathbf{v})}{dE_R}$$

宇宙の構造形成シミュレーション

- 「CDMの衝突合体が銀河団や銀河の構造を形成」

S. D. M. White, M. J. Rees, 1978, MNRAS, 183, 341

- 観測されている大規模構造をよく再現している

Davis et al. 1985

- 重力が働く多体系 (N体) のシミュレーション

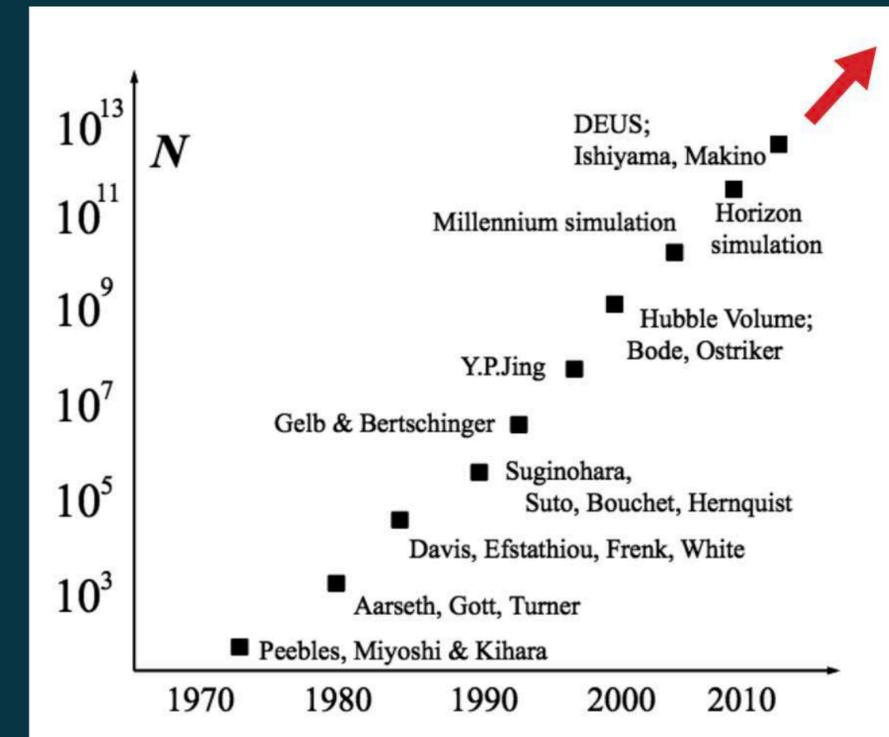
$$\frac{d^2 \mathbf{x}_i}{dt^2} = - \sum_{j \neq i} G m_j \frac{\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i}{|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|^3}$$

- 宇宙初期のある時期の物質分布をN個の質量”粒子”に置き換える

- 計算量 $\propto N^3$

- ツリー法、P3M法 (Particle-Particle/Particle Mesh)、ツリーPM法

- CMBを初期条件とする



credit: Naoki Yoshida

宇宙の構造形成シミュレーション

- Small scale problems…小スケールではシミュレーションが観測と合わない

- ▶ ミッシングサテライト問題(Moore et al. 1999)
- ▶ コア・カusp問題(Moore, B., 1994, Nature, 370, 629)
- ▶ Too Big To Fail 問題(Boylan-Kolchin et al. 2011, 2012)

- 信用できるシミュレーションとは？

- 粒子数・質量分解能・空間分解能
 - ▶ 分解能以下の物理は議論できない
- バリオンとの相互作用
 - ▶ DMだけではdiscや天体ができない→バリオンがやっぱり必要
 - ▶ 恒星・ガスによるエネルギー損失（輻射輸送方程式）→観測を再現できるモデル

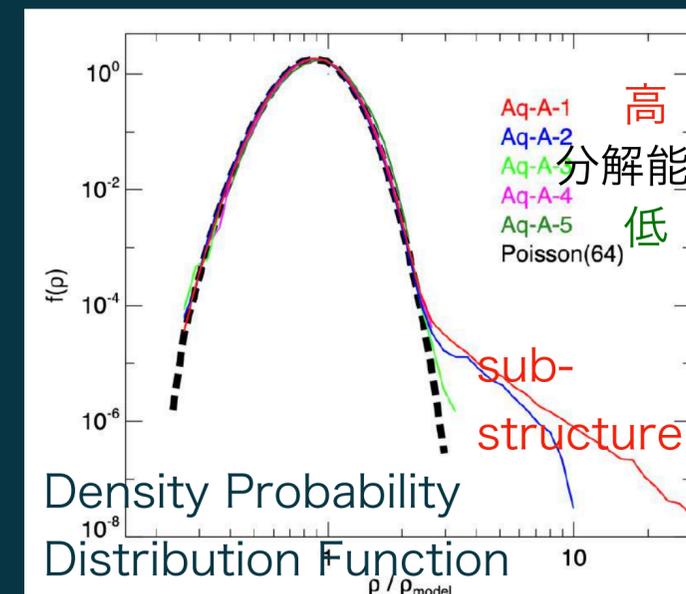
シミュレーションから示唆されるDM密度

- 3つの銀河(DMハロー)

	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.

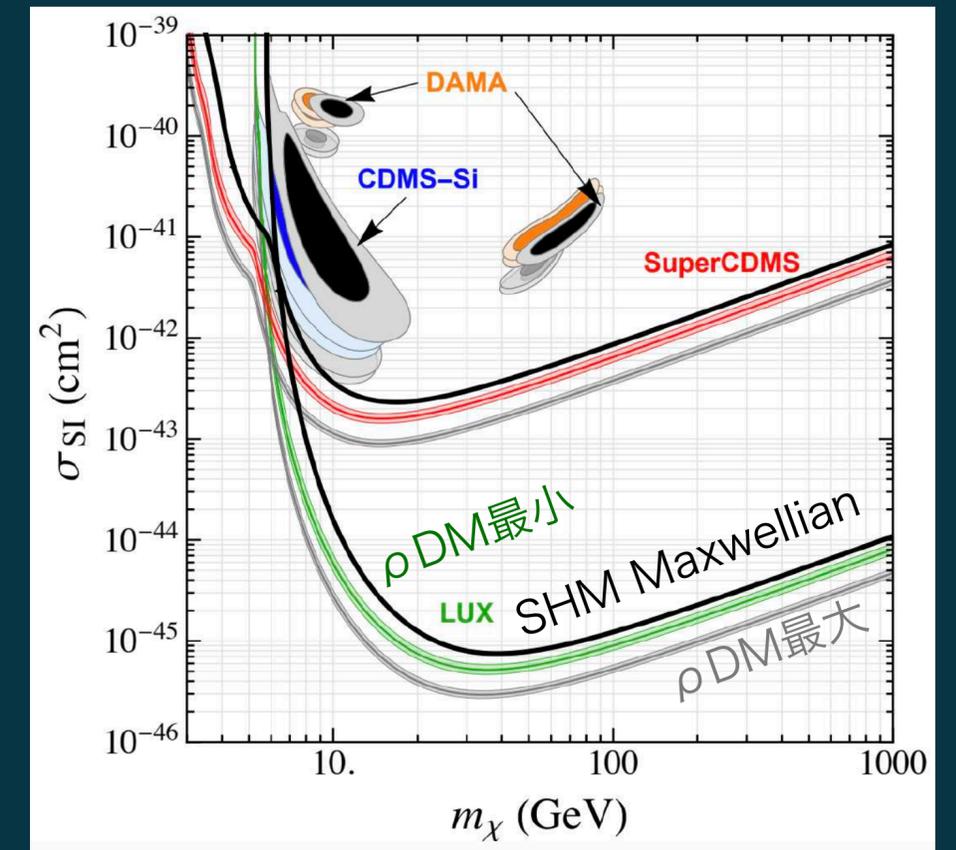
MaGICC cosmological simulation
Chris Kelso et al., arXiv:1601.04725

- $\rho_{\text{DM}}=0.396 \text{ GeV}/\text{cm}^3$, M. Zemp et al., arXiv:0812.2033; Via Lactea II DMO simulation, 球殻平均
- 高分解能だと ρ_{DM} のsubstructureが見える M. Vogelsberger et al., arXiv:0812.0362; Aquarius DMO simulations, 球殻平均



直接検出への影響

- $\rho_{DM}=0.42 - 0.73 \text{ GeV/cm}^3$ (the 12 haloes in the eagle HR simulation)
- $\rho_{DM}=0.41 - 0.54 \text{ GeV/cm}^3$ (the two haloes in the apostle IR simulation)



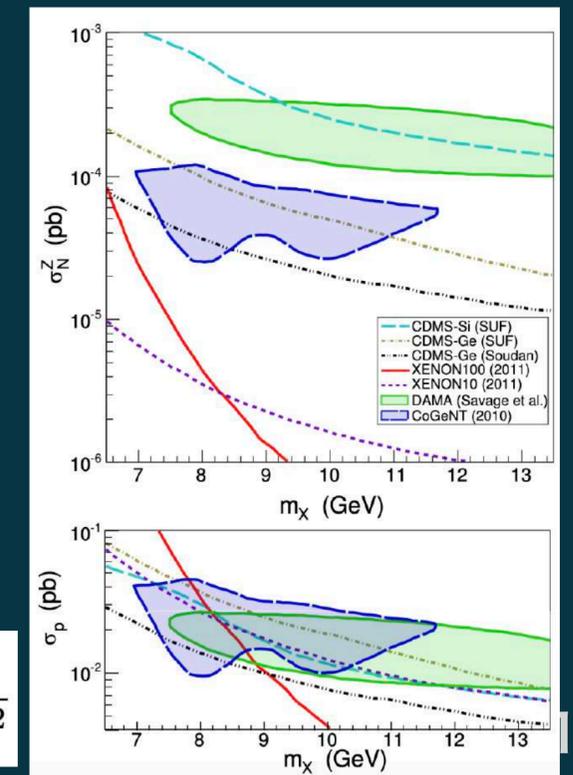
N. Bozorgnia et al., arXiv:1601.04707

c.f.

素粒子論系の不定性 (Isospin-violatingとか)

1102.4331

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_N^Z} = \frac{\sum_i \eta_i \mu_{A_i}^2 A_i^2}{\sum_i \eta_i \mu_{A_i}^2 [Z + (A_i - Z) f_n / f_p]^2}$$



目次

1. DM直接検出実験からの制限
2. DMのSubstructure
3. シミュレーションデータから評価した太陽系近傍のDM密度
4. まとめ

Substructureがあると？

- DMのsubstructure

- DM clumps/Subhalos

銀河に付随するDM haloより小さく、銀河に重力的に束縛されている

arXiv:1405.2204

→ 太陽系近傍の密度

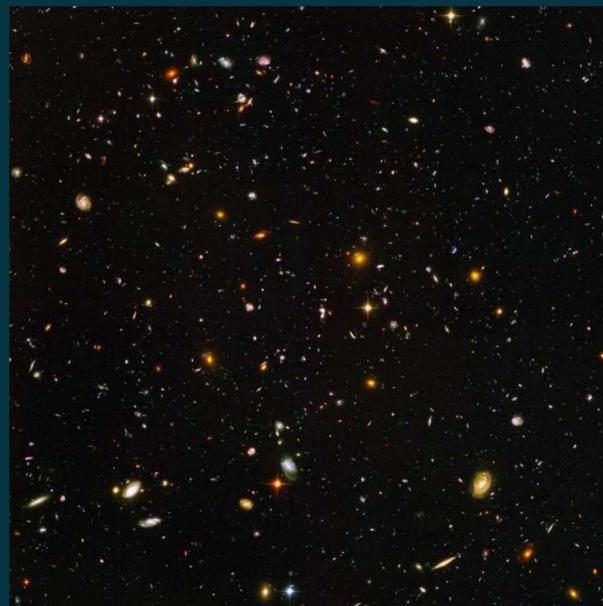
- tidal stream, debris flow → 速度分布 $f(v)$

$$\frac{dR}{dE_R} = N_T \frac{\rho_{DM}}{m_{DM}} \int dv f(v) v \frac{d\sigma(v)}{dE_R}$$

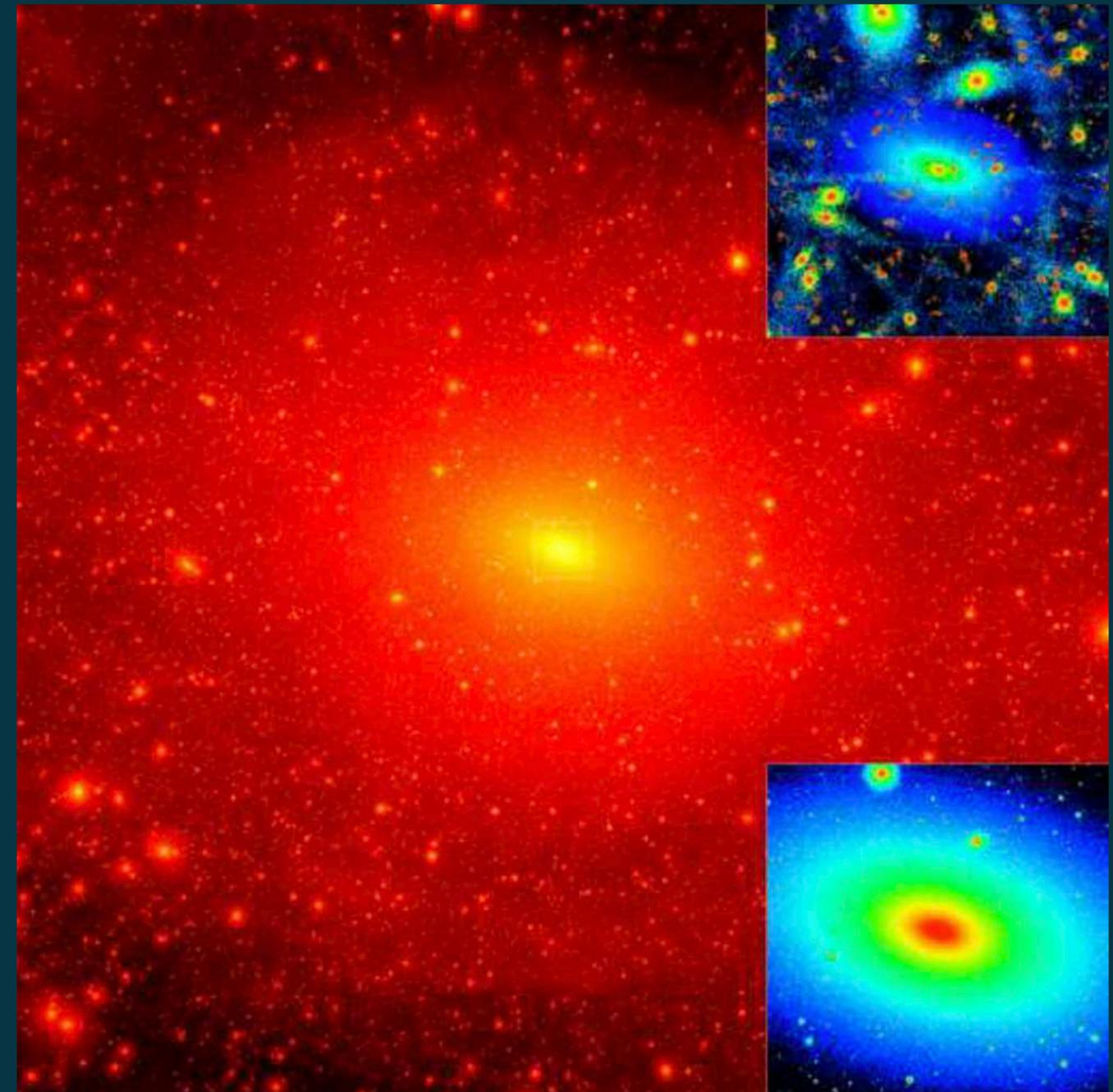


DM Clumps

- シミュレーションから示唆されているDM haloに内包されるDMの小さいかたまり
- 銀河団-銀河 \leftrightarrow DM halo-Clumps



Hubble Ultra Deep Field
Credit: NASA

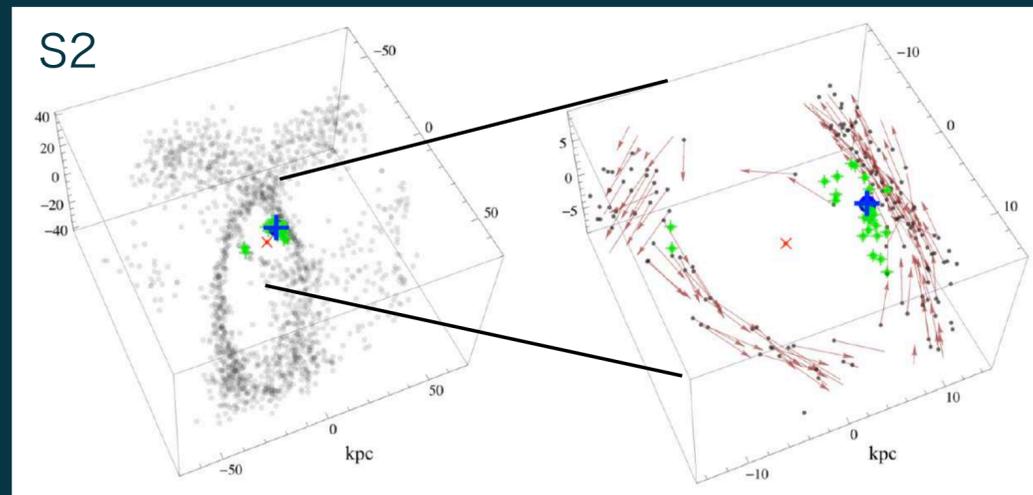
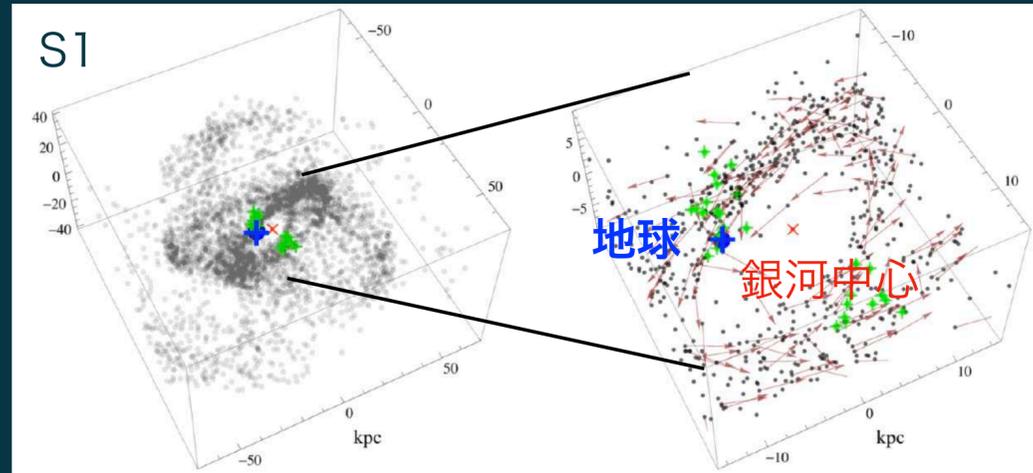


- 直接観測できるのは重力レンズ
 - ただし、 $M_{\text{subhalo}} > 10^8 - 5 \times 10^9 M_{\odot}$

K. T. Inoue, M. Chiba, astro-ph/0503212
A. D. Rivero, C. Dvorkin, arXiv:1910.00015

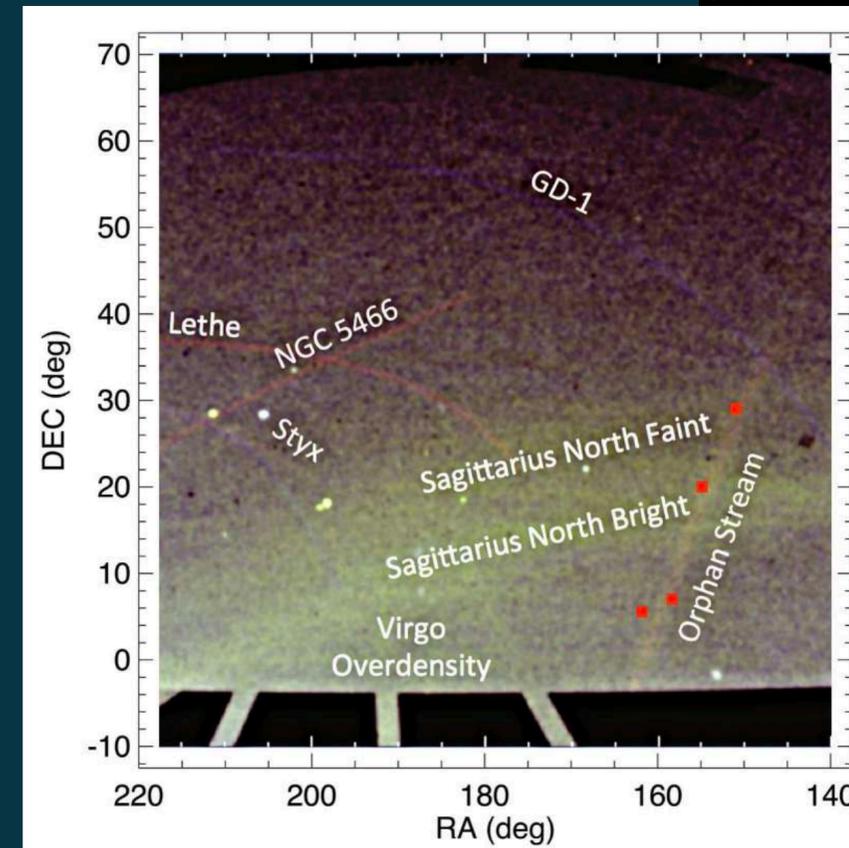
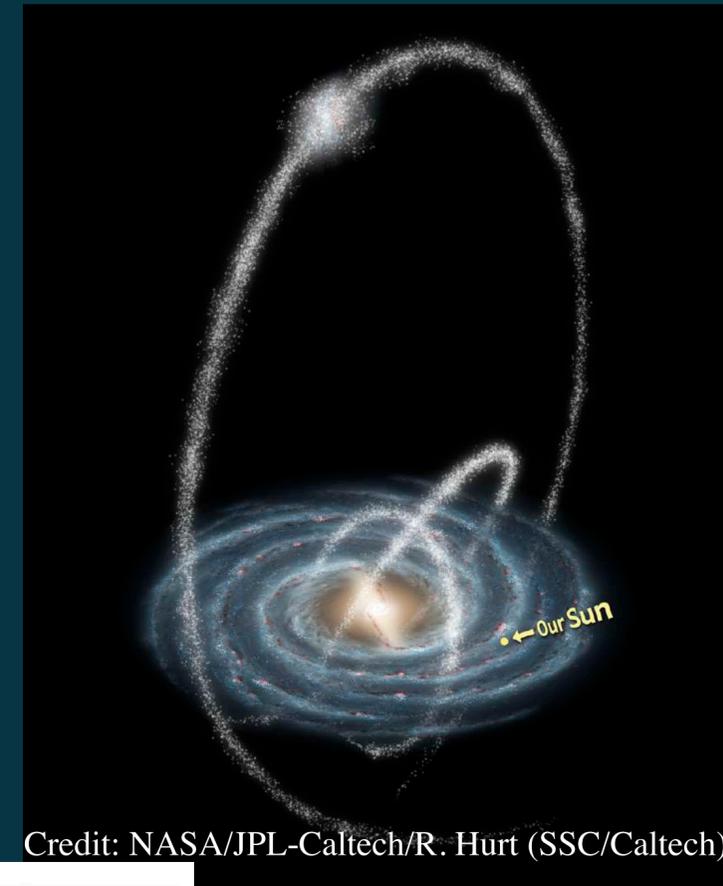
Stellar Stream

- Streams by SDSS-Gaia



G.C. Myeong et al.,
arXiv:1712.04071
SDSS-Gaia

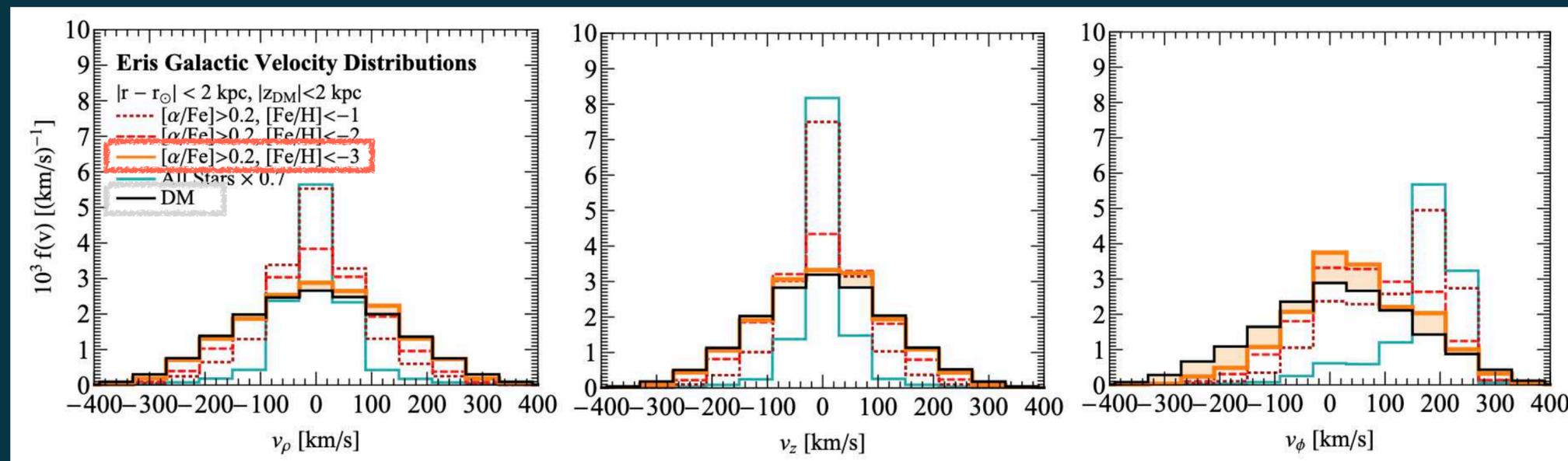
- Sagittarius Streams



S. T. Sohn et al.,
arXiv:1611.02282
Hubble Space Telescope

ダークマターと恒星は連動

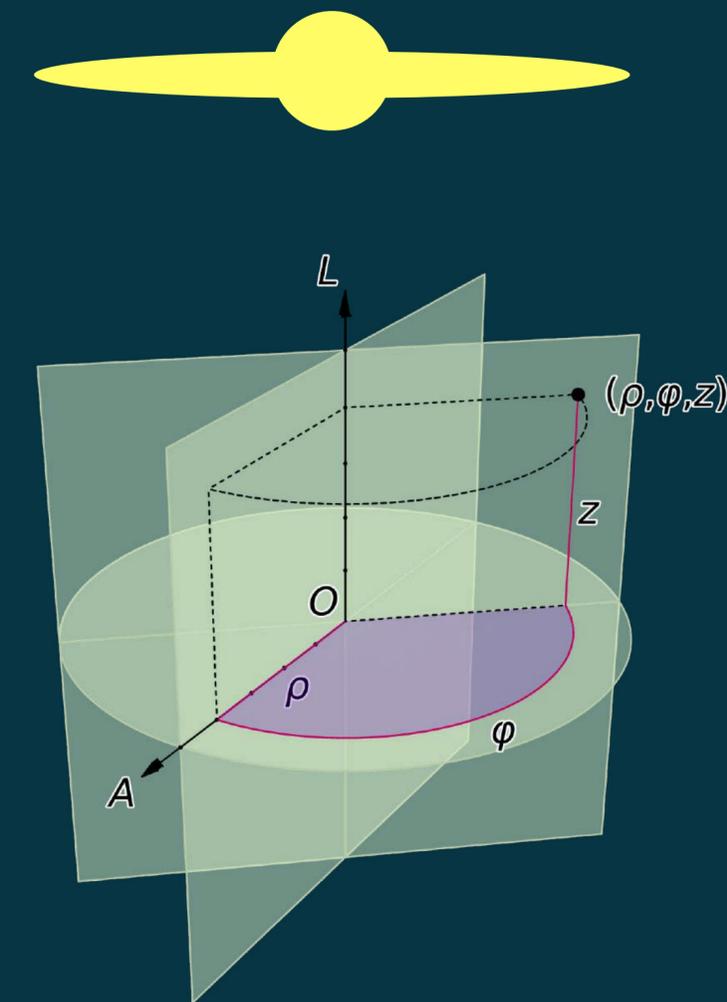
- シミュレーションでは、DMとmetal-poorな恒星の運動は酷似



Eris simulation

J. Herzog-Arbeitman et al., arXiv:1704.04499

- Stellar StreamがあるならDM Streamもあるはず

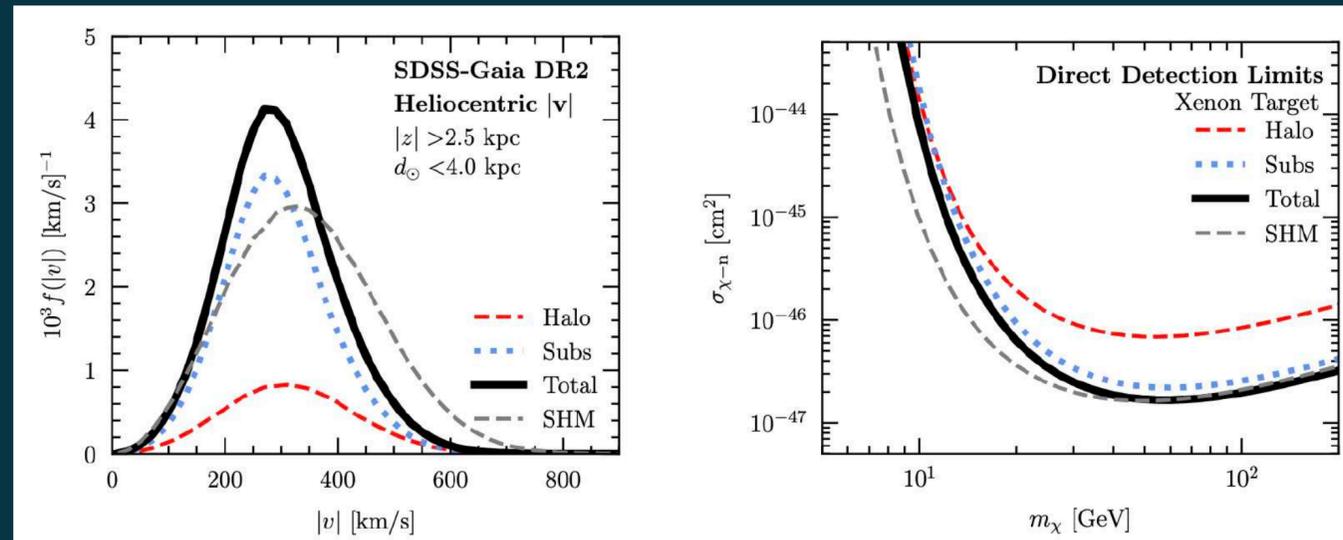


DM Stream

T, Fukushige, J. Makino, astro-ph/0008104

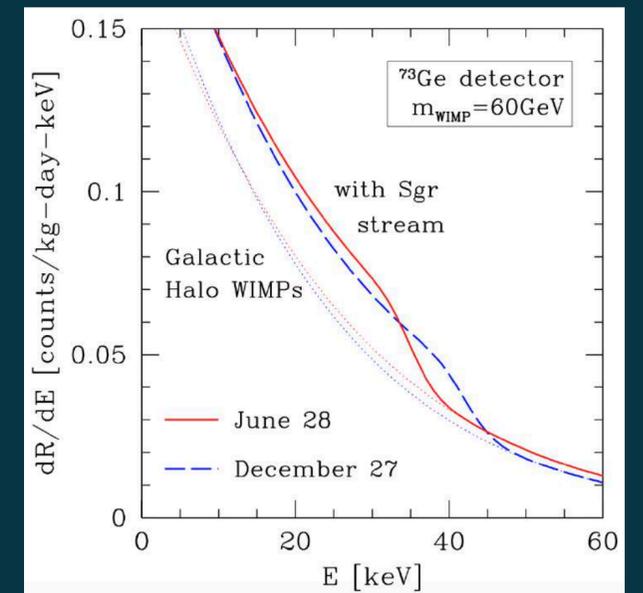
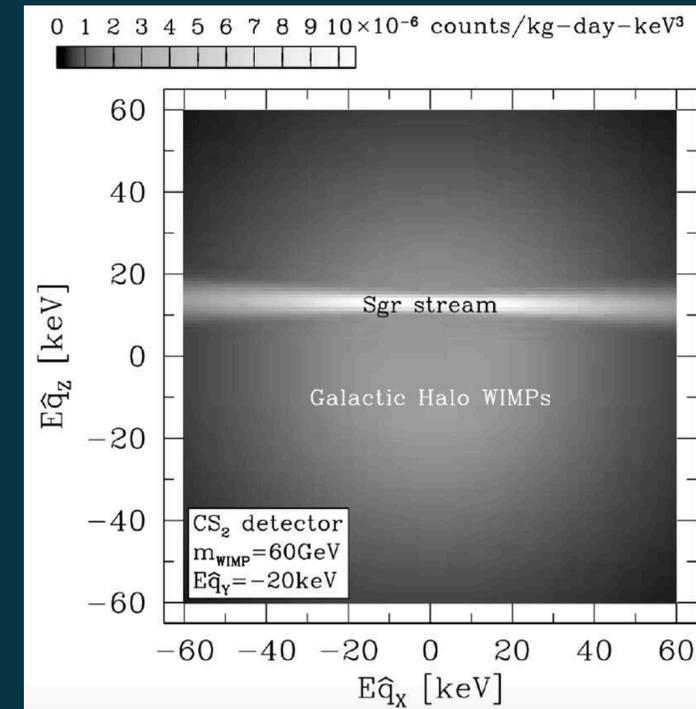
R. A. Ibata, G. F. Lewis, M. J. Irwin, astro-ph/0110690

- 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
- いて座ストリームに伴うDM Stream
 - 方向感度がある検出器で見える可能性



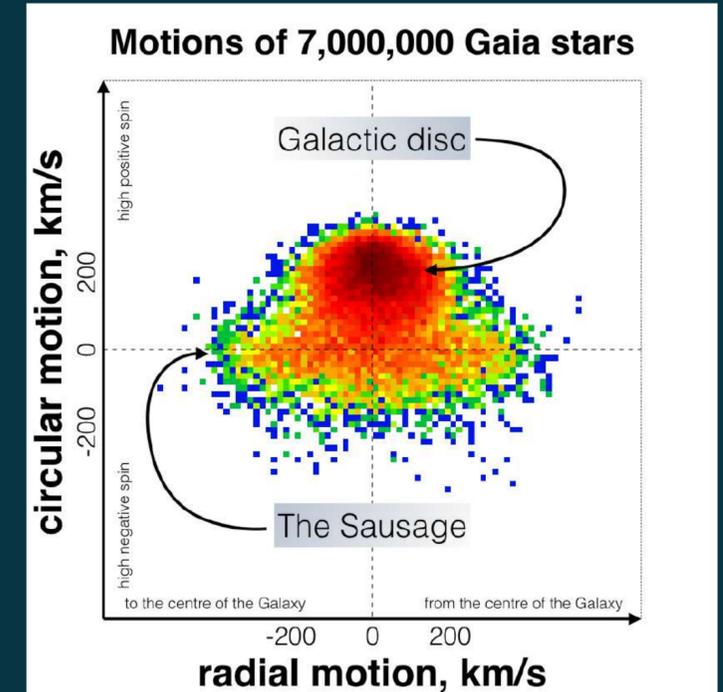
SDSS-Gaia DR2

L. Necib et al., arXiv:1807.02519



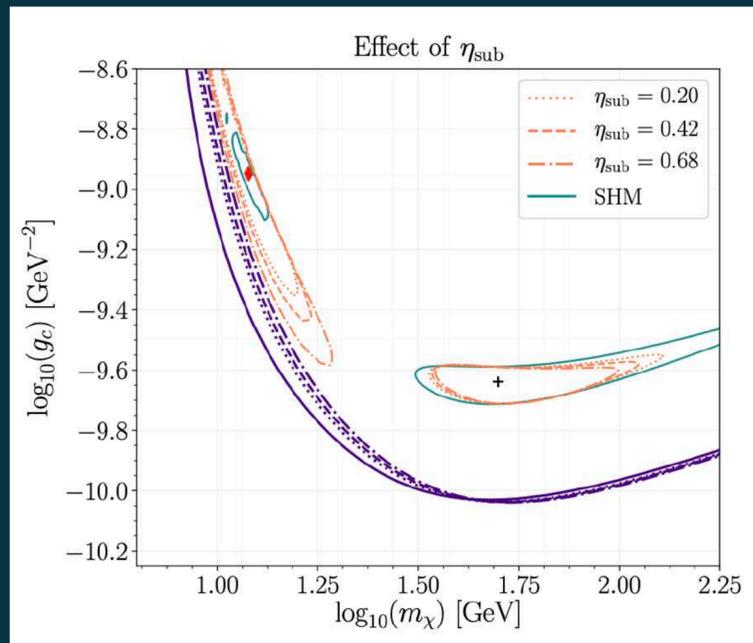
K. Freese, P. Gondolo, H. J. Newberg, astro-ph/0309279

ガイア・ソーセージ



- 80-110億年前に銀河系に合流した矮小銀河の残骸

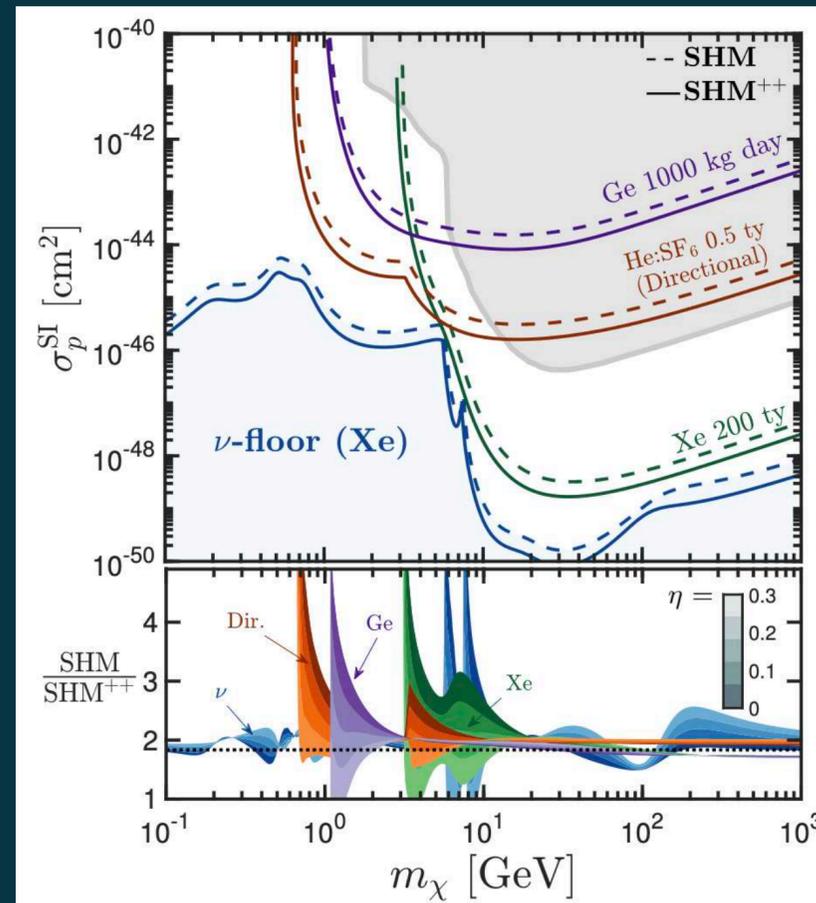
- 銀河円盤と異なる成分・運動
- 恒星+ガス+DM



$$f(v) = (1 - \eta_{\text{sub}})f_{\text{halo}}(v) + \eta_{\text{sub}}f_{\text{sub}}(v)$$

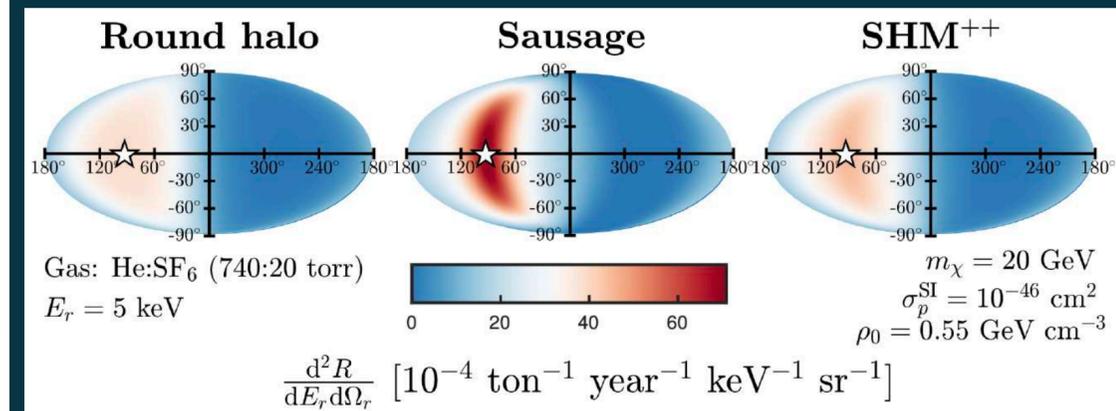
Direct Detection

J. Buch et al., arXiv:1910.06356



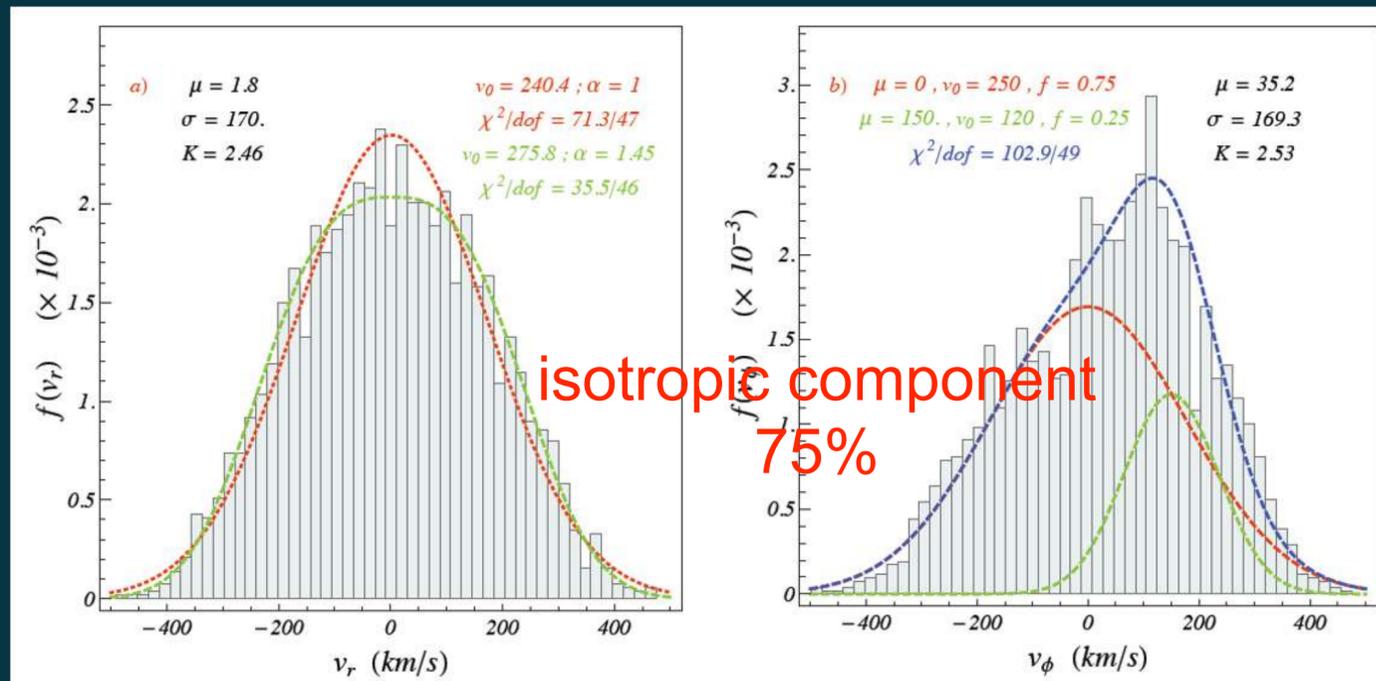
V. Belokurov et al., arXiv:1802.03414
credit: V. Belokurov (Cambridge, UK and CCA, New York, US) and Gaia/ESA

Directional Detection: N. W. Evans et al., arXiv:1810.11468



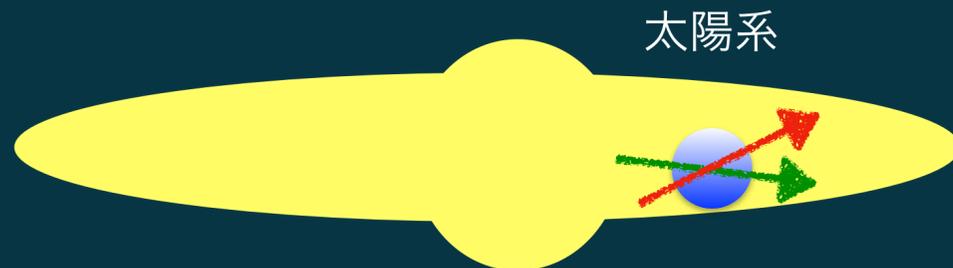
DM streamを直接検出で見られるか？

- 速度分布の非等方性

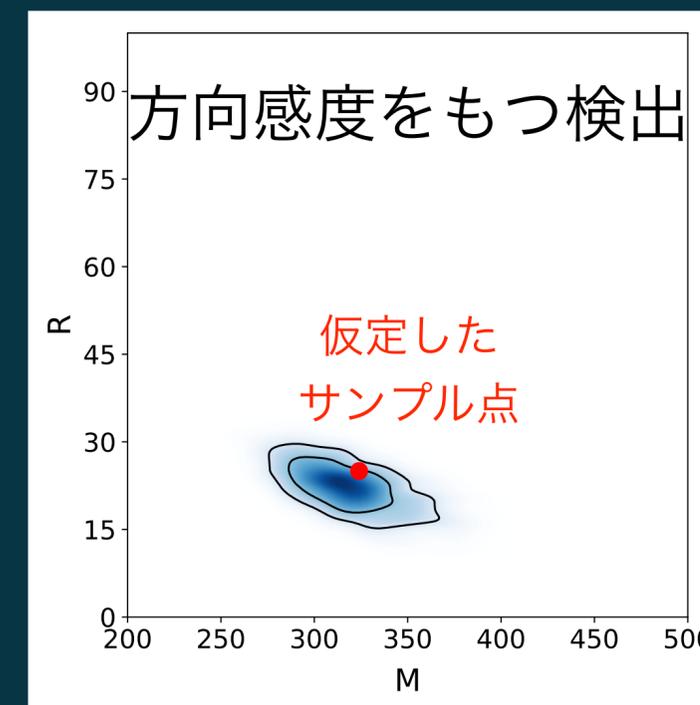
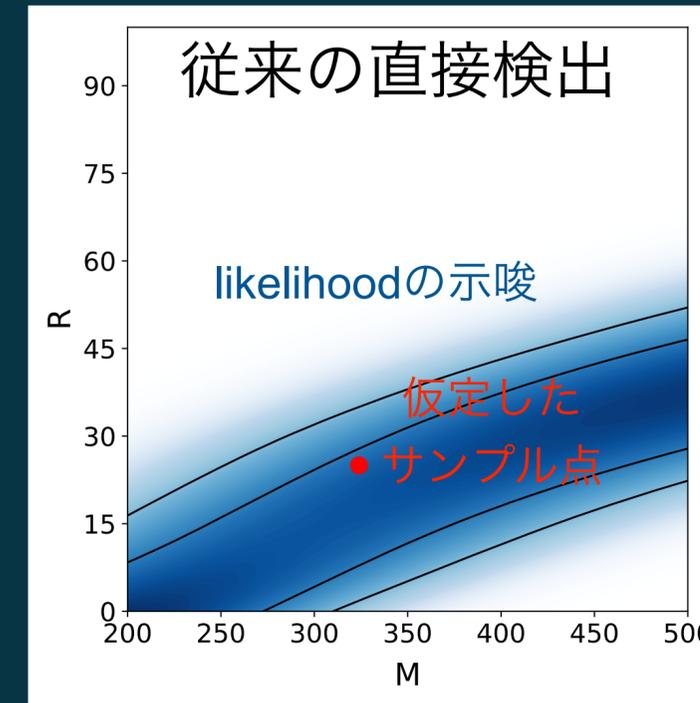


isotropic component
75%

anisotropic component
25%

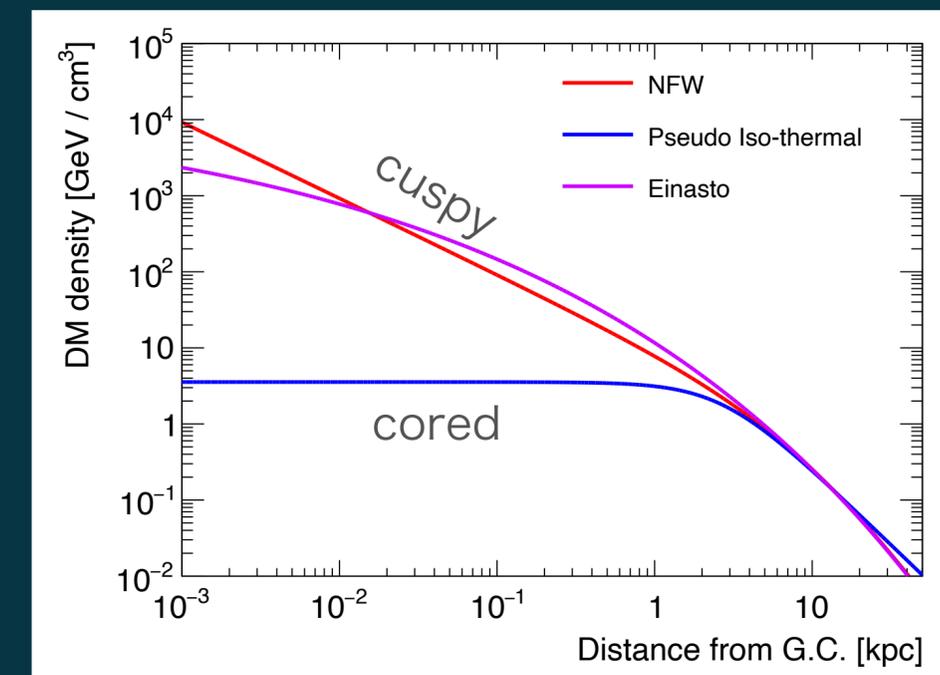
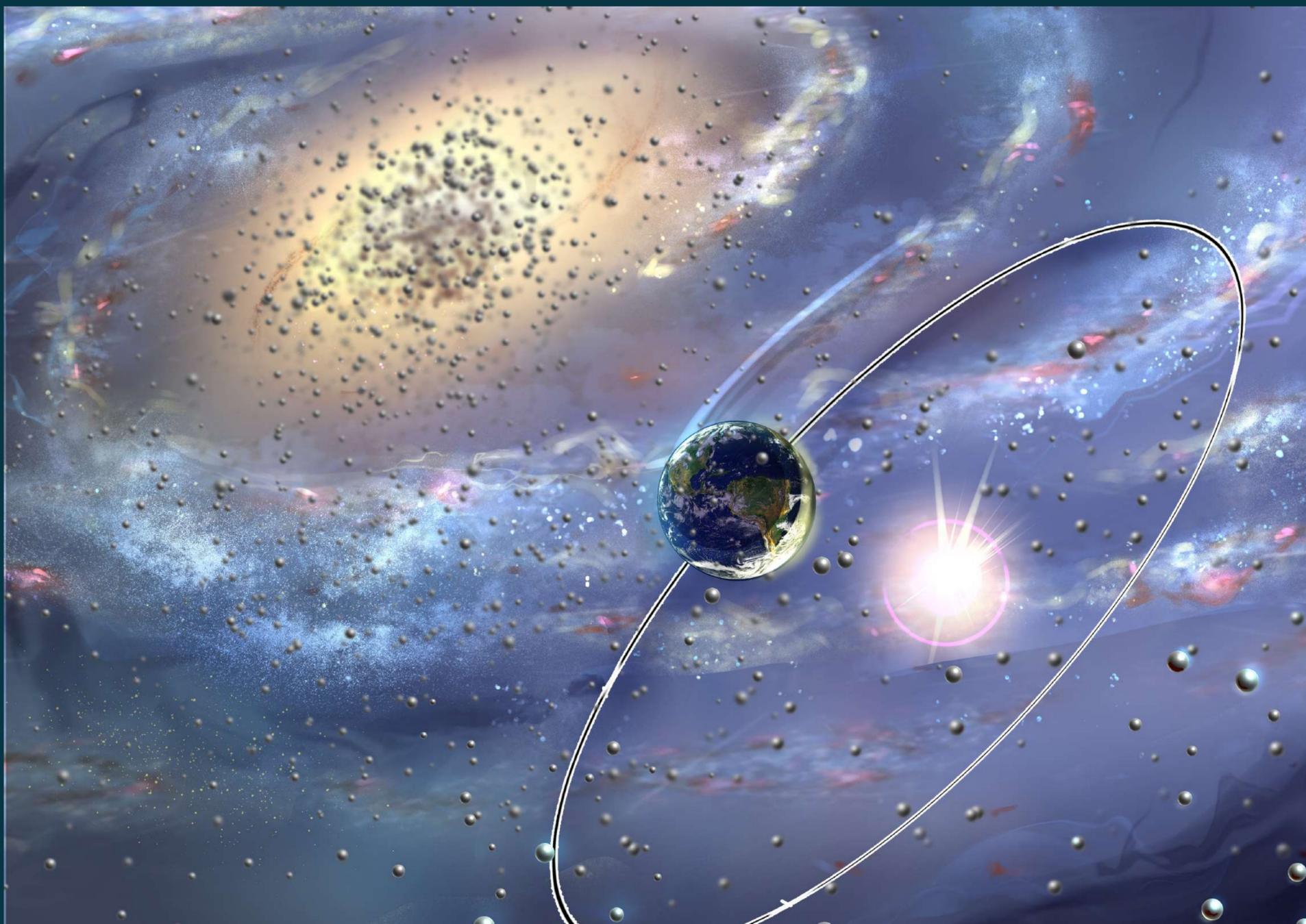


Ling, Nezri, Athanassoula, Teyssier (2009)



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

DM信号の特徴的な方向を調べる

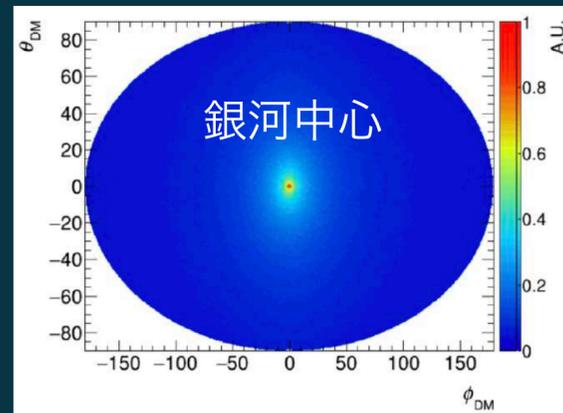


- 銀河系の中心方向にはDMがたくさん存在しているはず
- 太陽系の進行方向・銀河系の中心方向からDMが到来？

宇宙線と散乱して加速されるDM

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

- 銀河系の中心方向から到来する方向的特徴を将来的に検証可能な場合も

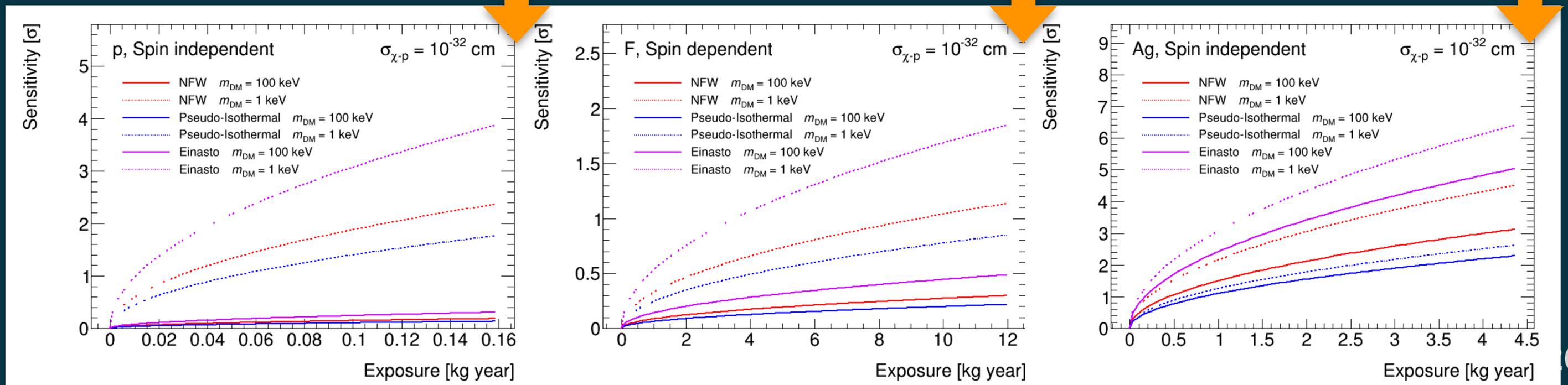


到来するDMの方向分布
m_{DM}=0.01 GeV
NFW profile

原子核乾板 5 kg-yr

SF₆, Cygnus-1000×10

原子核乾板 5 kg-yr

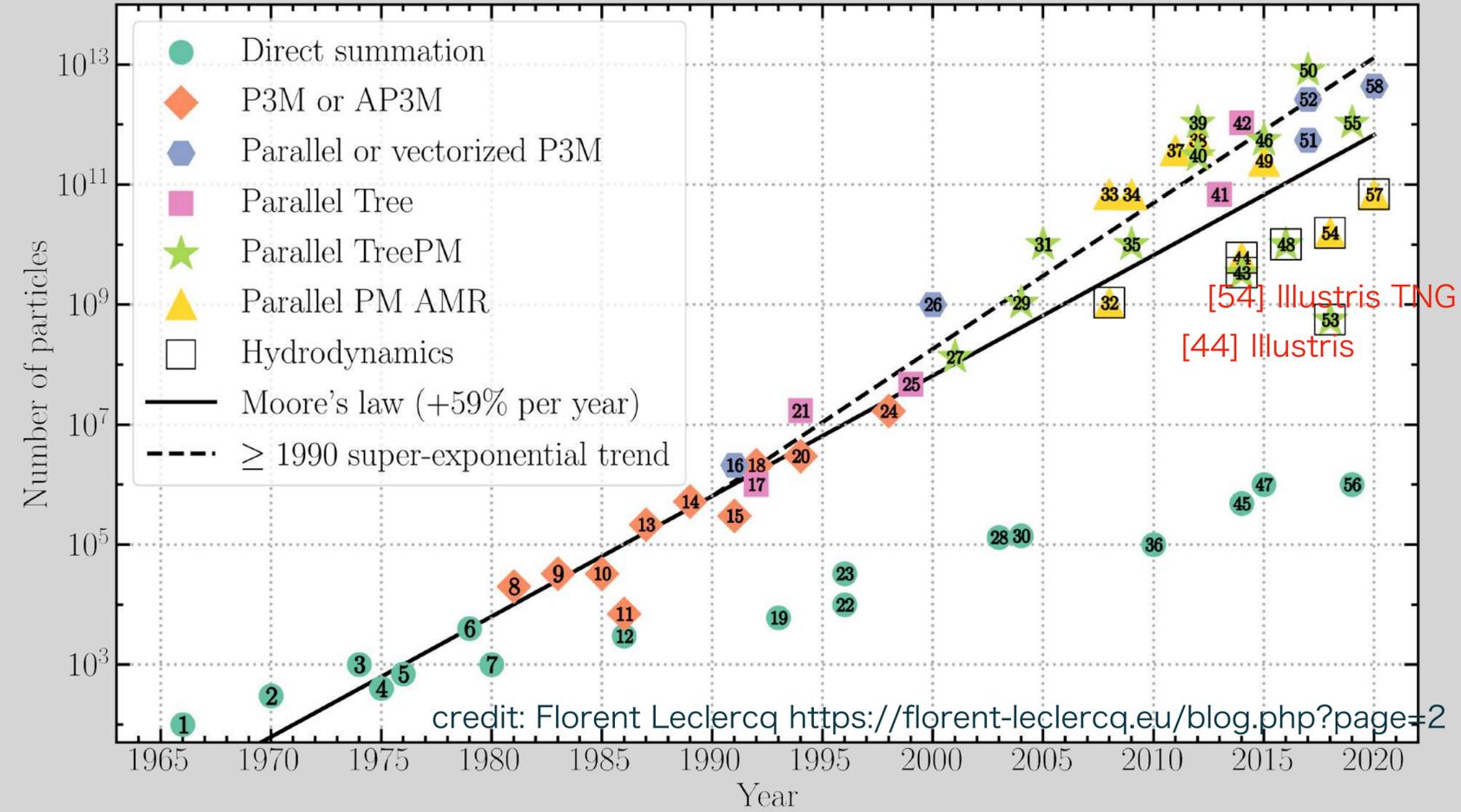


目次

1. DM直接検出実験からの制限
2. DMのSubstructure
3. シミュレーションデータから評価した太陽系近傍のDM密度
KN, 中林拓帆（岡山理科大）, 正木彰伍（鈴鹿高専）
4. まとめ

IllustrisTNG

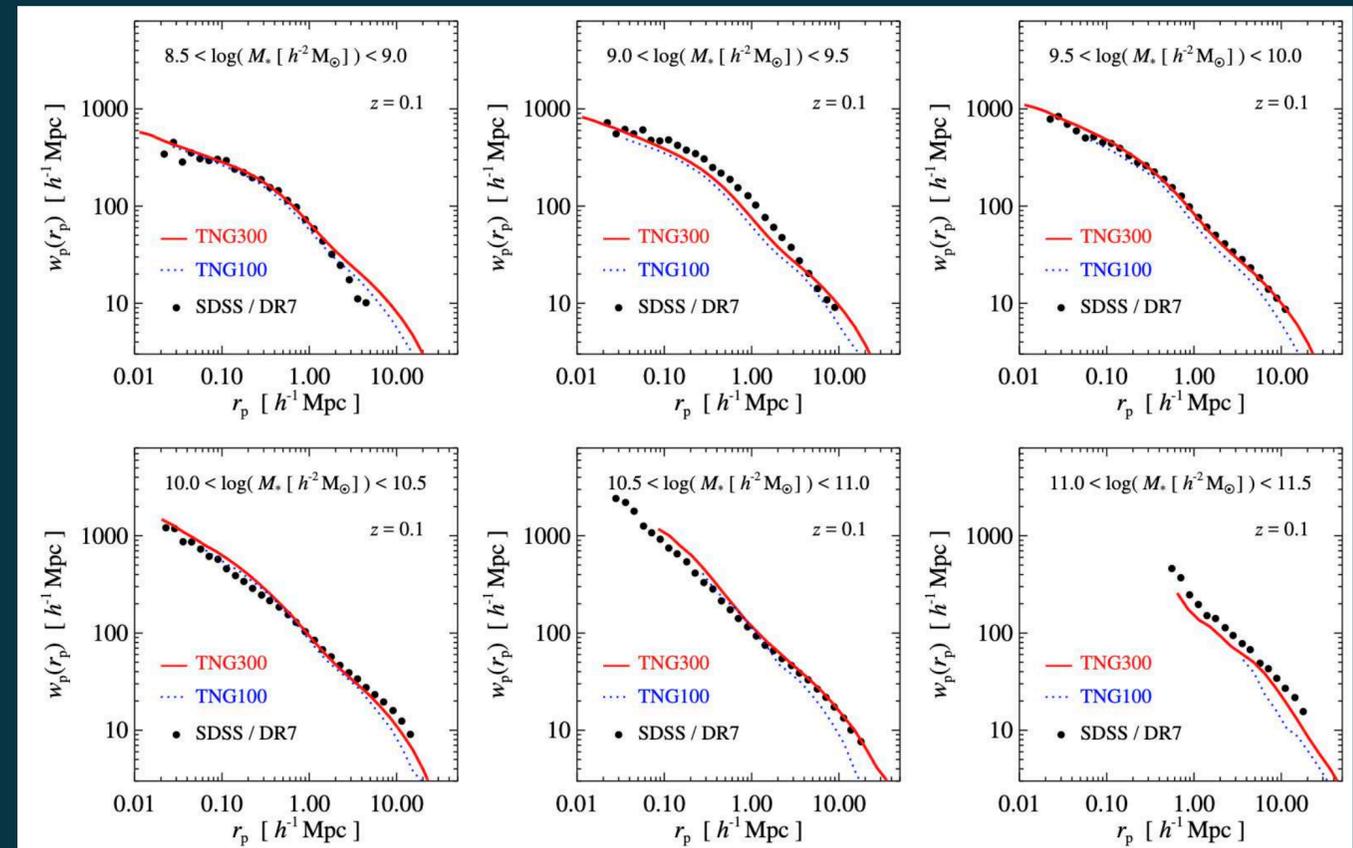
- 大規模な宇宙電磁流体力学シミュレーション
 - DM+バリオン
 - 観測とよく合っている=バリオンの物理のモデルが良い
 - TNG50, 100, 300の3つのボリューム



credit: Florent Leclercq <https://florent-leclercq.eu/blog.php?page=2>

the projected correlation function

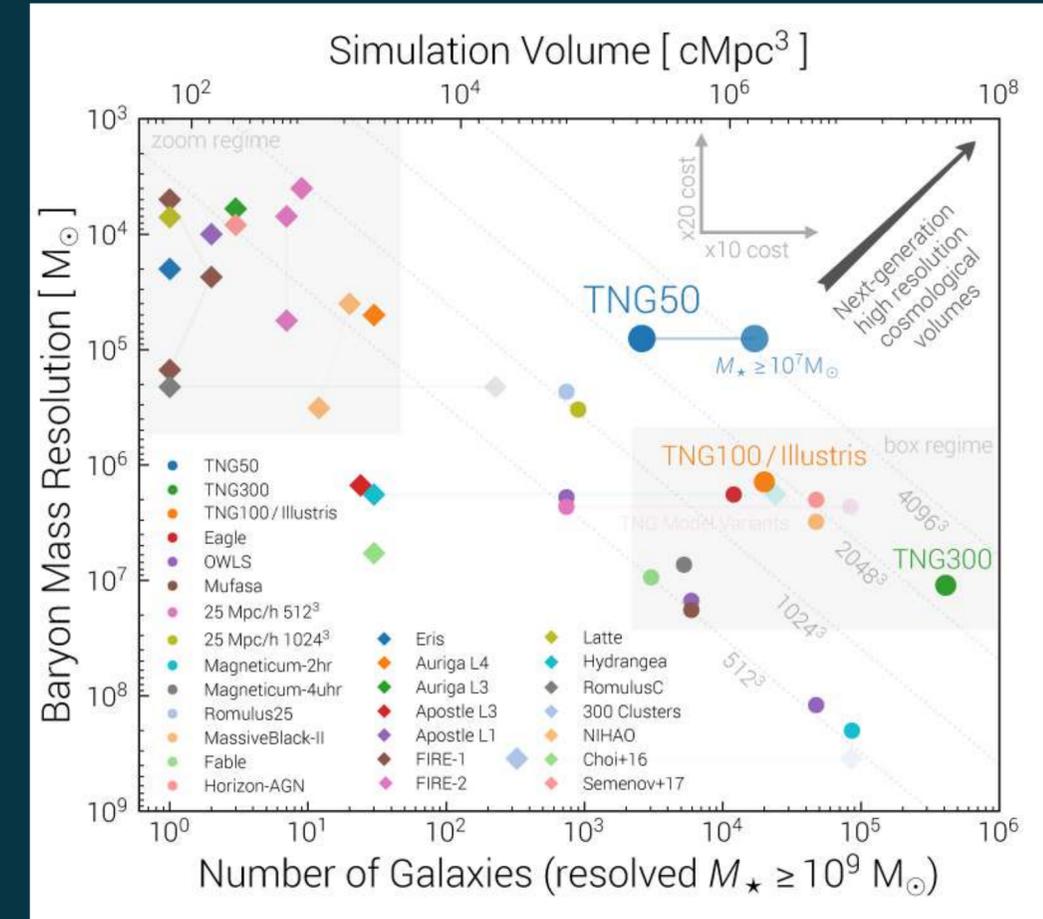
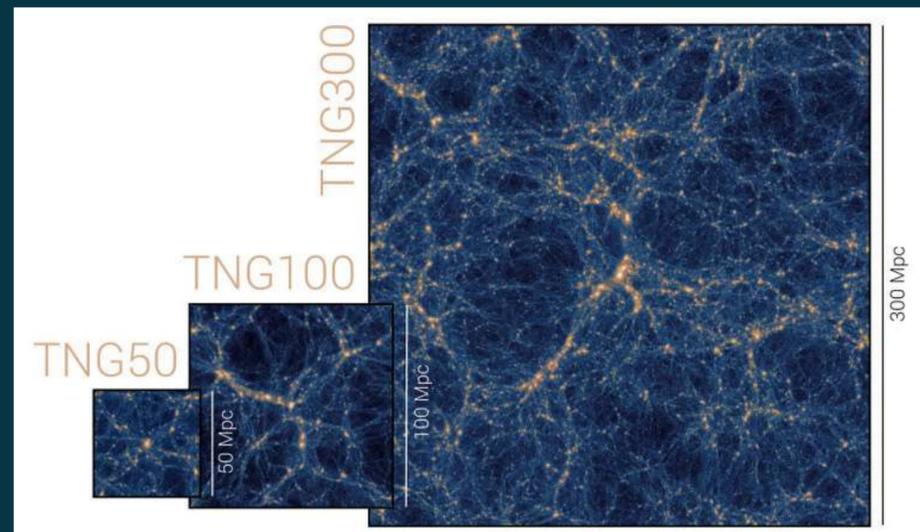
$$w_p(r_p) = 2 \int_0^\infty \xi(\sqrt{r_p^2 + \pi^2}) d\pi$$



IllustrisTNG -TNG50

- TNG50

- 1辺が50Mpcと他の2つより小さめ
- 質量分解能が高い
- 銀河の構造的性質、銀河周辺のガスの詳細な構造を見るのに適している
- 銀河系っぽい銀河(MW-like Galaxies)が質量基準で100個くらい



credit:TNG simulation

	TNG50
Volume	[Mpc ³] 51.7 ³
L_{box}	[Mpc/h] 35
N_{GAS}	- 2160 ³
N_{DM}	- 2160 ³
N_{TR}	- 2160 ³
m_{baryon}	[M _⊙] 8.5×10^4
m_{DM}	[M _⊙] 4.5×10^5
$\epsilon_{\text{gas,min}}$	[pc] 74
$\epsilon_{\text{DM,*}}$	[pc] 288

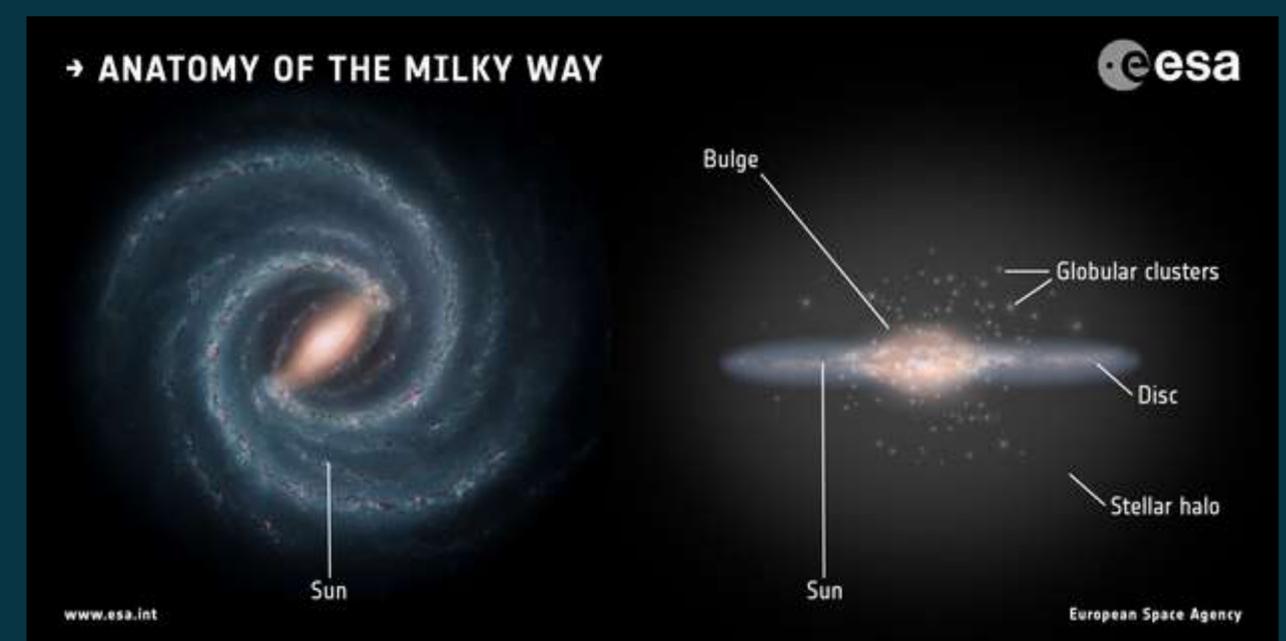
銀河系っぽい銀河を抜き出す

- 銀河の質量

- $(2.5+0.5-1.0) \times 10^{12} M_{\odot}$ T. Sakamoto et al., astro-ph/0210508
- $(1.28+0.97-0.48) \times 10^{12} M_{\odot}$ (Gaia DR2) L. L. Watkins et al., arXiv:1804.11348
- $(0.9+0.4-0.3) \times 10^{12} M_{\odot}$ (Blue horizontal branch stars; SDSS/SEGUE) P. R. Kafle et al., arXiv:1210.7527
- $(2.06+0.24-0.13) \times 10^{11} M_{\odot}$ (Gaia DR3) Y. Jiao et al., arXiv:2309.00048
- 今回は $(0.6-2) \times 10^{12} M_{\odot}$ とした (もっと軽くてもいいのかもしれない)

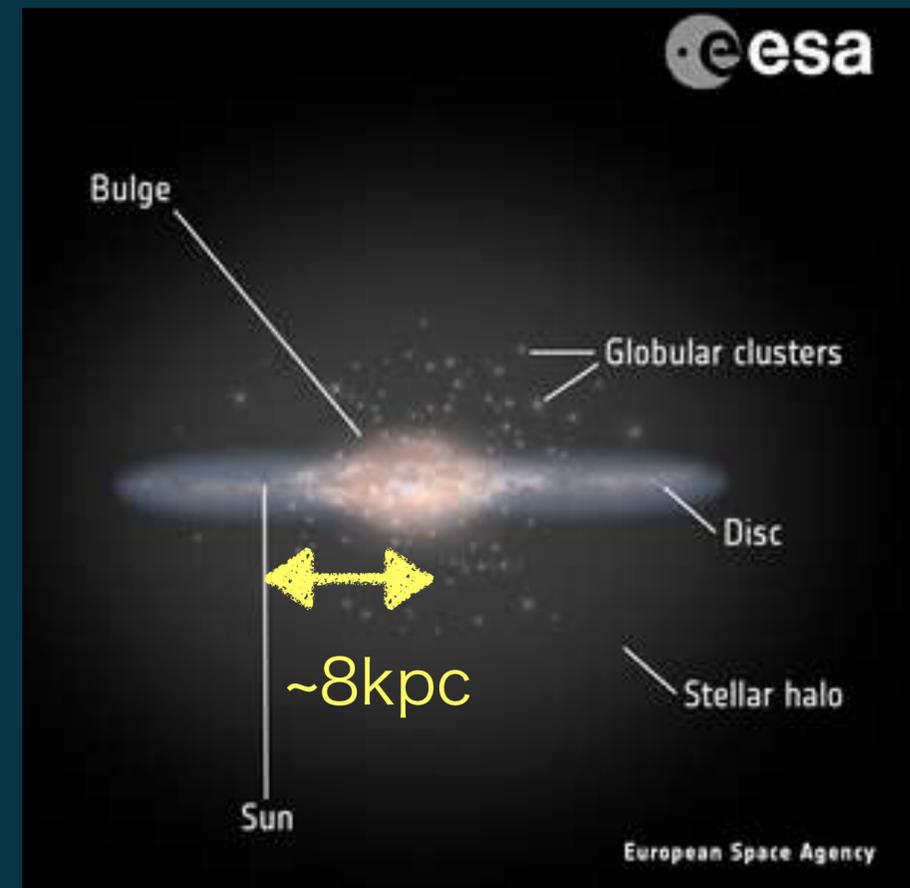
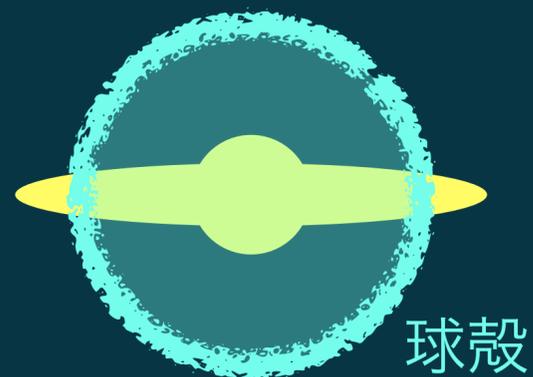
- Morphology (形態学)

- **Bulge-to-total mass ratio $B/T = 0.150+0.028-0.019$** , T. C. Licquia, J. A. Newman, arXiv:1407.1078 今回
はこれを使った



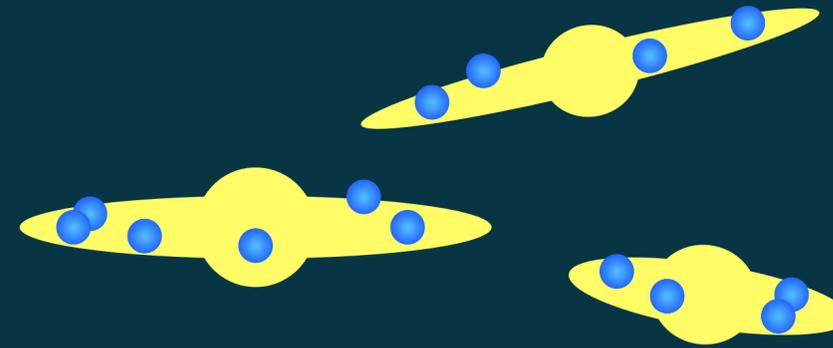
太陽系っぽいところのDMを抜き出す

- 銀河中心から太陽系の距離 $\sim 8\text{kpc}$
 - $7\text{kpc} < r < 9\text{kpc}$ のDM particleを抽出
- Dark Halo or Dark Disc?



- disc付近のDM Particleのみ抽出する方が、太陽系近傍のDM密度を求めるには良いかもしれない

結果



- 条件を満たす銀河の ρ_{DM} を解析

DM粒子の評価

#DM particles	481,589
$\rho_{\text{DM}}^{\text{Max}}$	5.90 GeV/cm ³
$\rho_{\text{DM}}^{\text{min}}$	0.01 GeV/cm ³
$\langle \rho_{\text{DM}} \rangle$	0.74±0.34 GeV/cm ³

銀河ごとの評価

#Galaxies	18
$\rho_{\text{DM}}^{\text{Max}}$	1.32 GeV/cm ³
$\rho_{\text{DM}}^{\text{min}}$	0.10 GeV/cm ³
$\langle \rho_{\text{DM}} \rangle$	0.37±0.13 GeV/cm ³

PRELIMINARY

- 観測から得られる 0.2-0.6 GeV/cm³ とだいたい同じくらい
- やや上振れする場合もあるかも
- 銀河や太陽系近傍の抽出条件は再考の余地がありそう

まとめ

- DMの直接検出実験の制限に対する不定性のうち、速度分布とエネルギー密度 ρ DMは天文学的な不定性。特にclumpやstreamなどのsubstructureがあれば単純化された値からずれることがある。
- IllustrisTNGシミュレーションで太陽系近傍の ρ DMとその不定性を見積もった。