

# Indirect detection of WIMP dark matter: Foreground effect on the $J$ -factor estimation of dSphs

**堀米俊一** (Kavli IPMU), 市川幸史 (NEC), 石垣美歩 (Kavli IPMU), 松本重貴 (Kavli IPMU), 伊部昌宏 (ICRR, Kavli IPMU), 菅井肇 (Kavli IPMU), 林航平 (ICRR)

# 目次

- Introduction: WIMPの間接検出
- J-factor推定の方法
- dSphのJ-factor推定の精密化
- 現状のJ-factor値のUpdate
- まとめ、展望

cf.

- K. Ichikawa et al., MNRAS 468, 2884 (2017), arXiv[1608.01749].
- K. Ichikawa et al., MNRAS 479, 64 (2018), arXiv[1706.05481].

# Introduction: WIMPの間接検出

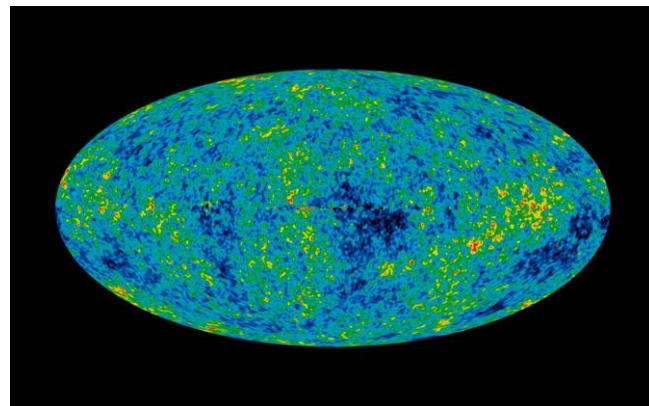
**Dark matter**の存在 …

————→ **WIMP (Weakly Interacting Massive Particle)**

freeze outにより残存DM量をうまく説明



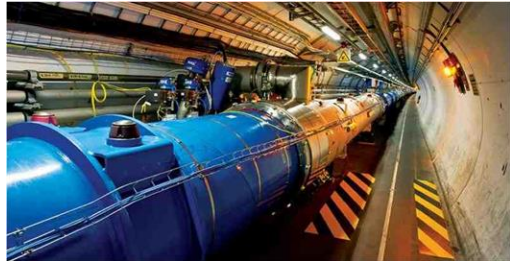
Rotation curve



Large Scale Structure

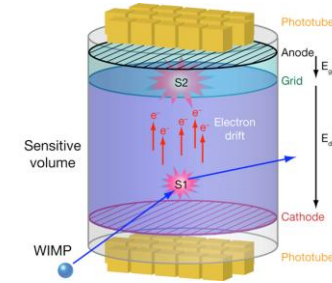
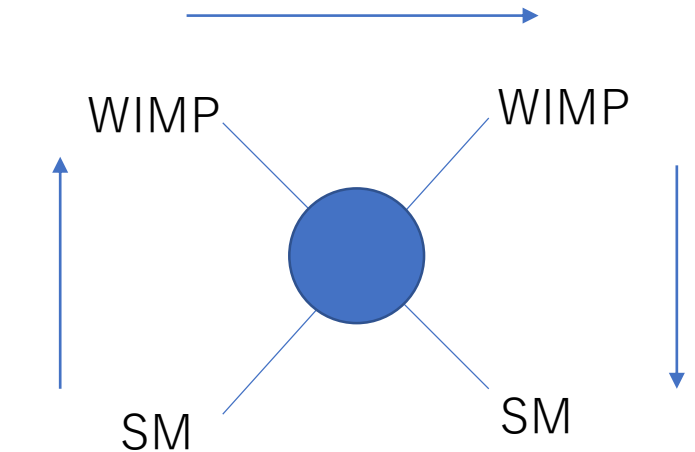
# Introduction: WIMPの間接検出

## WIMP検出の3つの方法



加速器  
(collider)

直接観測  
(direct detection)



間接観測  
(indirect detection)

…それぞれが相補的な役割を持っている

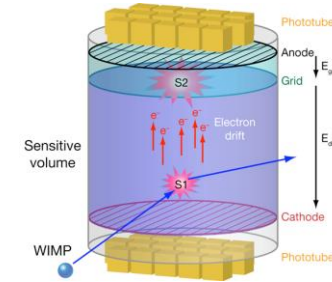
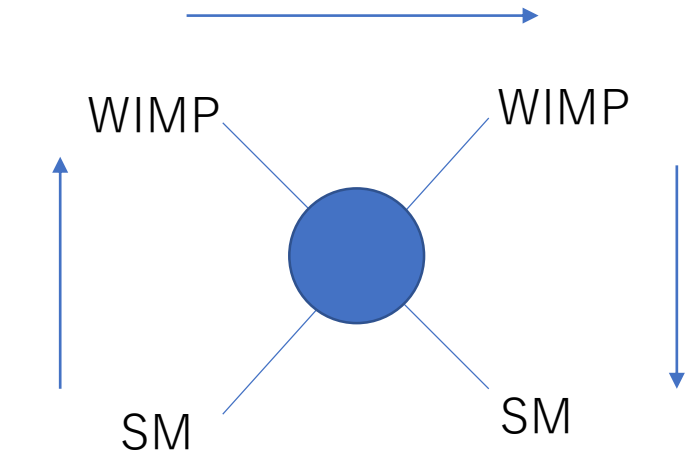
# Introduction: WIMPの間接検出

## WIMP検出の3つの方法



加速器  
(collider)

直接観測  
(direct detection)



間接観測  
(indirect detection)

…それぞれが相補的な役割を持っている

# Introduction: WIMPの間接検出

間接検出 (Indirect Detection)  $DM DM \rightarrow SM SM$  対消滅の観測

$SM = \gamma$  (photon)なら観測しやすい。

ガンマ線望遠鏡でTeVくらいまで見える。

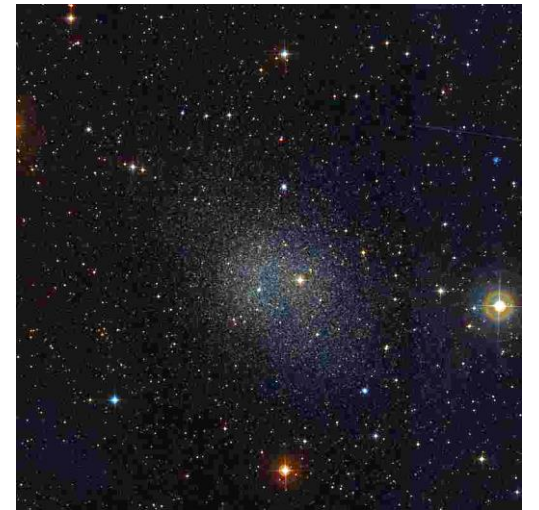
観測対象:

銀河中心 (GC)  $D \sim O(10)$  kpc,

銀河団中心 (CG)  $D \sim O(10)$  Mpc,

矮小楕円体銀河 (dSph)  $D \sim O(10)$  kpc

etc...



Fornax dSph

# Introduction: WIMPの間接検出

間接検出 (Indirect Detection)  $DM DM \rightarrow SM SM$  対消滅の観測

$SM = \gamma$  (photon)なら観測しやすい。

ガンマ線望遠鏡でTeVくらいまで見える。

観測対象:

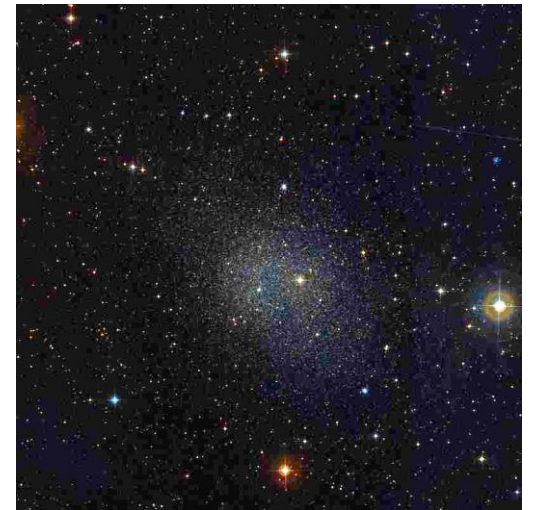
銀河中心 (GC)  $D \sim O(10)$  kpc,

銀河団中心 (CG)  $D \sim O(10)$  Mpc,

矮小楕円体銀河 (dSph)  $D \sim O(10)$  kpc

etc...

近い, 余計なガンマ線が少ない



Fornax dSph

# Introduction: WIMPの間接検出

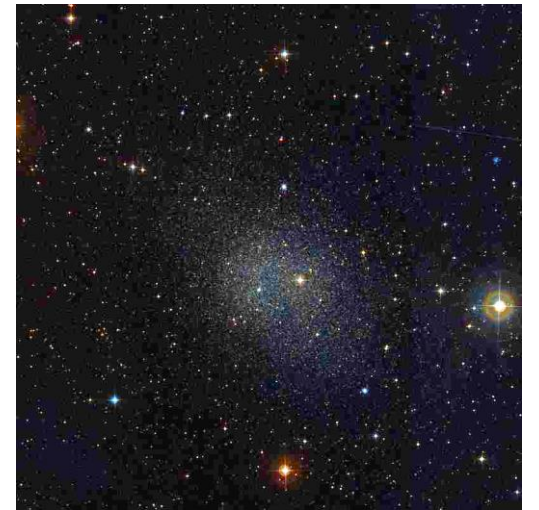
間接検出 (Indirect Detection)  $DM DM \rightarrow SM SM$

$SM = \gamma$  (photon)なら観測しやすい。

Gamma-ray flux:

$$\frac{d\Phi_\gamma}{dE_\gamma} = \left( \frac{C}{m_\chi^2} \sum_f \langle \sigma v \rangle_f \frac{dN^f}{dE_\gamma} \right) \times \underbrace{\left( \int \rho_{DM}^2 dV \right)}_{J\text{-factor}},$$

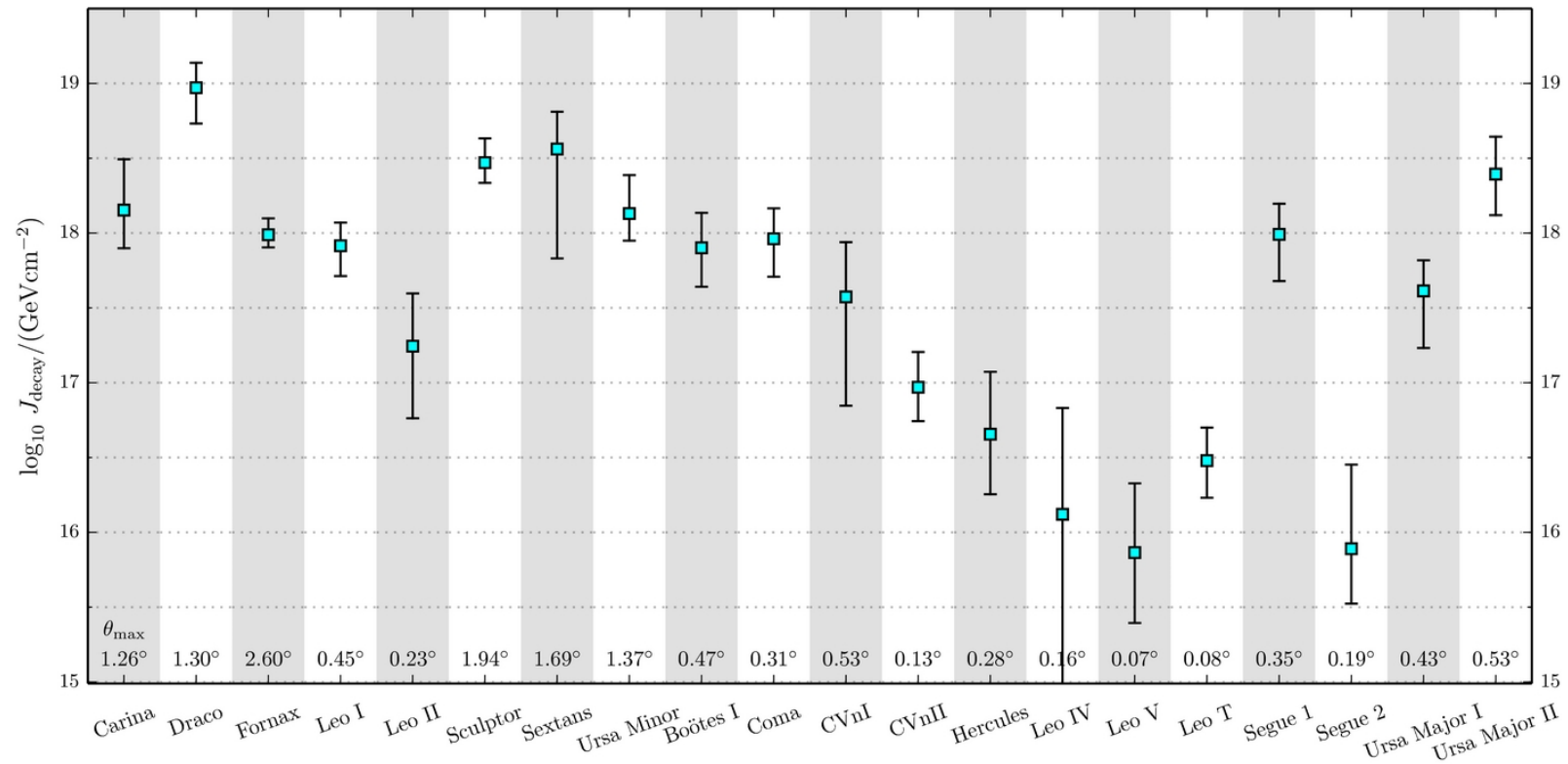
→  $J$ -factor ( $\sim$ dSph中のDM分布) の推定精度が flux、ないし検出の精度に直結する



Fornax dSph



# Introduction: WIMPの間接検出

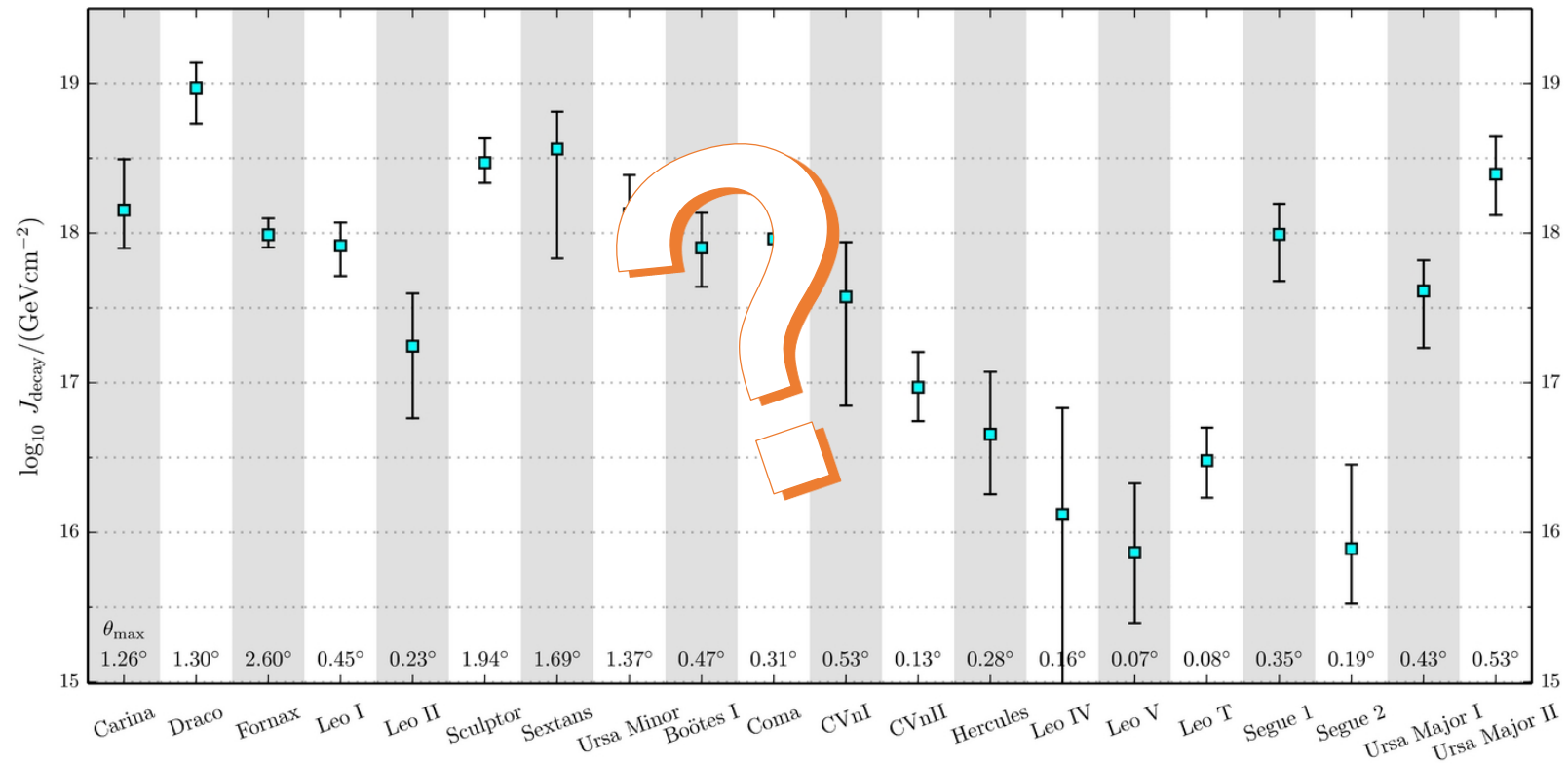


J-factorの値を求めてくれている人たちがいます  
ご丁寧にエラーバーまで  
しっかりついている…

これを元にDMを検証しよう…

[Geringer-Sameth et al. (2015)]

# Introduction: WIMPの間接検出



[Geringer-Sameth et al. (2015)]

J-factorの値を求めてくれている人たちがいます  
ご丁寧にエラーバーまで  
しっかりついている…

これを元にDMを検証しよう…

本当にこれを信じていいのでしょうか？

(J-factor推定時の  
Astrophysical な仮定が不適切な場合、  
誤って大きなJ-factor値が推定され、  
本来棄却できないパラメータ領域まで棄却されてしまう可能性がある！)

# J-factor推定の方法

星の運動  $\Leftrightarrow$  DM質量の作る重力ポテンシャル (dSph はDM dominant)

Jeans equation (仮定: spherical)

$$\frac{1}{\nu_*(r)} \frac{\partial(\nu_* \sigma_r^2(r))}{\partial r} + \frac{2\beta(r)\sigma_r^2(r)}{r} = -\frac{d\Phi}{dr}$$

$\nu_*(r)$  : (星の3D密度分布)

$\sigma_r(r)$  : (星の動径方向速度分散)

$\beta(r)$  : (速度分散非等方性)

$\Phi(r)$  : (重力ポテンシャル)

# J-factor推定の方法

星の運動  $\Leftrightarrow$  DM質量の作る重力ポテンシャル (dSph はDM dominant)

実際に観測できるのは、

photometry  $\cdots R$  : (位置)  $\rightarrow \Sigma_*(R)$  : (2D密度分布)

spectroscopy  $\cdots v_{los}$  : (視線方向速度)  $\rightarrow \sigma_{los}(R)$  : (視線方向速度分布)

$$\sigma_{l.o.s.}^2(R) = \frac{2}{\Sigma_*(R)} \int_R^\infty \frac{dr}{\sqrt{1 - R^2/r^2}} \left( 1 - \beta_* \frac{R^2}{r^2} \right) \nu_*(r) \sigma_r^2(r)$$

観測に合うような $\Phi(r)$ を探す。

# J-factor推定の方法

星の運動  $\Leftrightarrow$  DM質量の作る重力ポテンシャル (dSph はDM dominant)

実際に観測できるのは、

photometry  $\cdots R$  : (位置)  $\rightarrow \Sigma_*(R)$  : (2D密度分布)

spectroscopy  $\cdots v_{los}$  : (視線方向速度)  $\rightarrow \sigma_{los}(R)$  : (視線方向速度分布)

$$\sigma_{l.o.s.}^2(R) = \frac{2}{\Sigma_*(R)} \int_R^\infty \frac{dr}{\sqrt{1 - R^2/r^2}} \left( 1 - \beta_* \frac{R^2}{r^2} \right) \nu_*(r) \sigma_r^2(r)$$

観測に合うような $\Phi(r)$ を探す。

**本当にこれでいいか？**

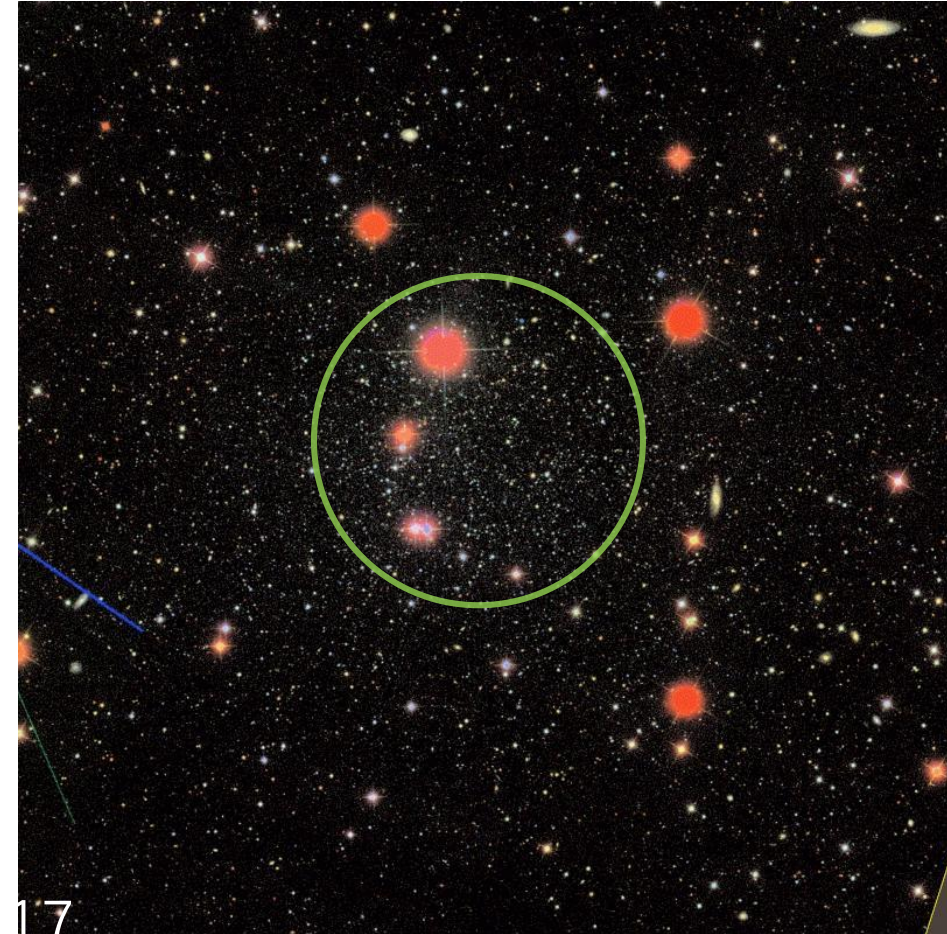
# dSphのJ-factor推定の精密化

星の運動  $\Leftrightarrow$  DM質量の作る重力ポテンシャル  
Jeans equation (仮定: spherical)

$$\frac{1}{\nu_*(r)} \frac{\partial(\nu_* \sigma_r^2(r))}{\partial r} + \frac{2\beta(r)\sigma_r^2(r)}{r} = -\frac{d\Phi}{dr}$$

## 考えられる系統誤差要因:

- Constant anisotropy ( $\beta(r) = \text{const.}$ )
- 球対称近似 ( $\leftarrow$  dwarf *spheroidal* galaxy)
- パラメータに貸すPrior (事前分布)
- 前景星(Foreground stars)



17

# dSphのJ-factor推定の精密化

星の運動  $\Leftrightarrow$  DM質量の作る重力ポテンシャル

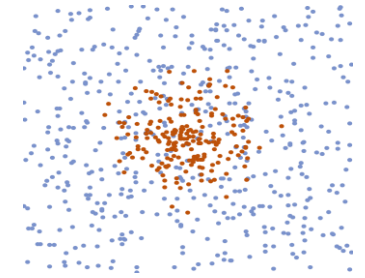
Jeans equation (仮定: spherical)

$$\frac{1}{\nu_*(r)} \frac{\partial(\nu_* \sigma_r^2(r))}{\partial r} + \frac{2\beta(r)\sigma_r^2(r)}{r} = -\frac{d\Phi}{dr}$$

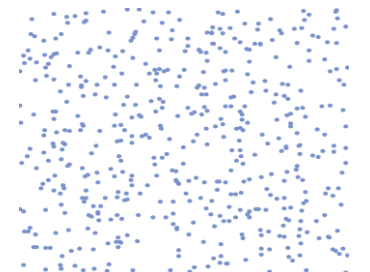
## 考えられる系統誤差要因:

- Constant anisotropy ( $\beta(r) = \text{const.}$ )
- 球対称近似 ( $\leftarrow$  dwarf *spheroidal* galaxy)
- パラメータに貸すPrior (事前分布)
- 前景星(Foreground stars)  $\leftarrow$ 今回はこれに注目する

Observed image  
(dSph + Foreground)



dSph



Foreground

# dSphのJ-factor推定の精密化

Foregroundを取り除く方法

1. EMアルゴリズム [Walker et al. (2009)]

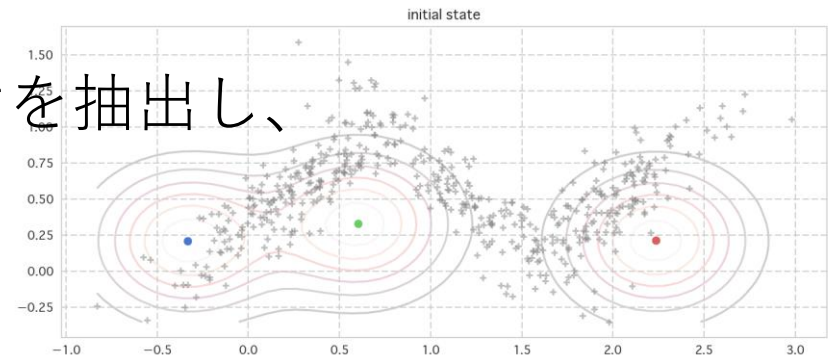
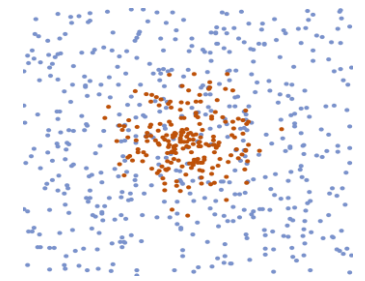
「観測された一つ一つの星は潜在的に

“dSph” OR “foreground” のどちらかである」。

Foregroundのモデルに基づき、dSphの星である確率  
(membership probability) を各星ごとに計算する。

→ 「95%以上の確率でdSphの星」だけを抽出し、  
 $\Phi(r)$ を推定→  $J$ -factorを計算

Observed image  
(dSph + Foreground)





# dSphのJ-factor推定の精密化

Foregroundを取り除く方法

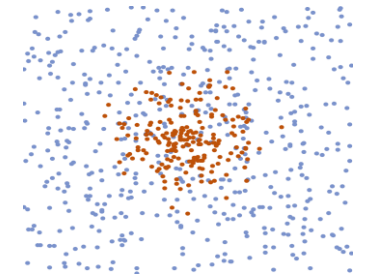
## 2. [Ichikawa et al. 2017]

“control region”でforegroundの星分布を予め推定、  
それを元に“signal region” (dSph+FG) の  
データからdSph+FGのモデルに基づき  
 $\Phi(r)$ を推定→J-factorを計算

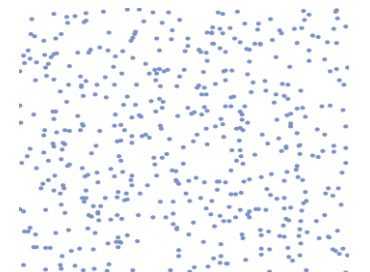
dSph: Plummer model + gen. NFW  
(Anisotropy: const.)

FG: Uniform \* Gaussian

Observed image  
(dSph + Foreground)



dSph



Foreground

# dSphのJ-factor推定の精密化

Foregroundを取り除く方法

## 2. [Ichikawa et al. 2017]

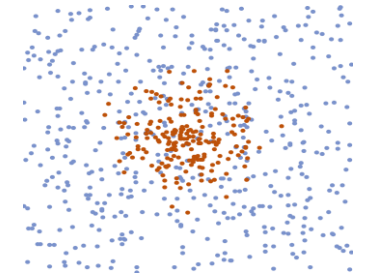
“control region”でforegroundの星分布を予め推定、  
それを元に“signal region” (dSph+FG) の  
データからdSph+FGのモデルに基づき  
 $\Phi(r)$ を推定→J-factorを計算

$$\mathcal{L}_{\text{KI17}} = \prod_i [s f_{\text{Mem}}(v_i, R_i) + (1 - s) f_{\text{FG}}(v_i, R_i)]$$

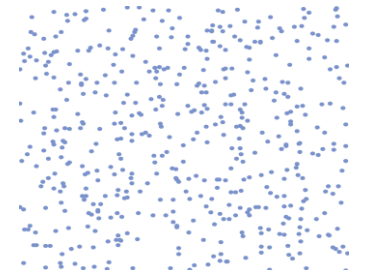
$$f_{\text{Mem}}(v, R) = \mathcal{N}_{\text{Mem}} 2\pi R \Sigma_*(R) \mathcal{G}[v; \bar{v}_{\text{Mem}}, \sigma_{\text{los}}(R)]$$

$$f_{\text{FG}}(v, R) = \prod_{i \in \{\text{thic}, \text{thin}, \text{halo}\}} \mathcal{N}_{\text{FG}} 2\pi R \mathcal{G}[v; \bar{v}_{\text{FG},i}, \sigma_{\text{FG},i}] \Phi(r)$$

Observed image  
(dSph + Foreground)



dSph

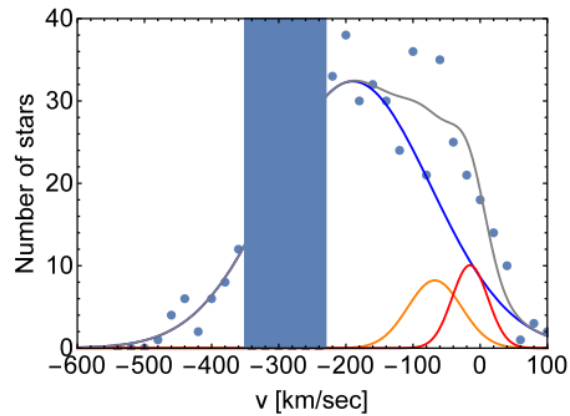


Foreground

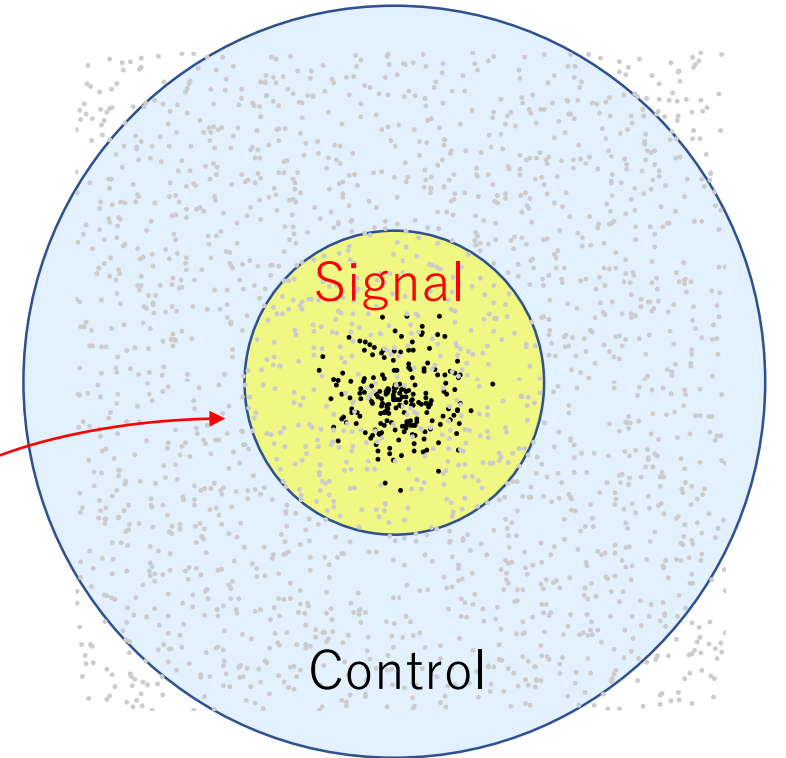
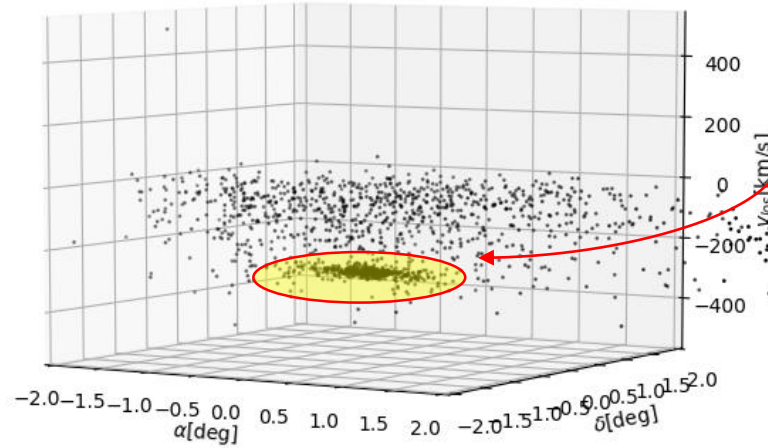
# dSphのJ-factor推定の精密化

Signal, Control region:  
速度空間や座標空間上でFGしかいないところを  
Control Regionにとる

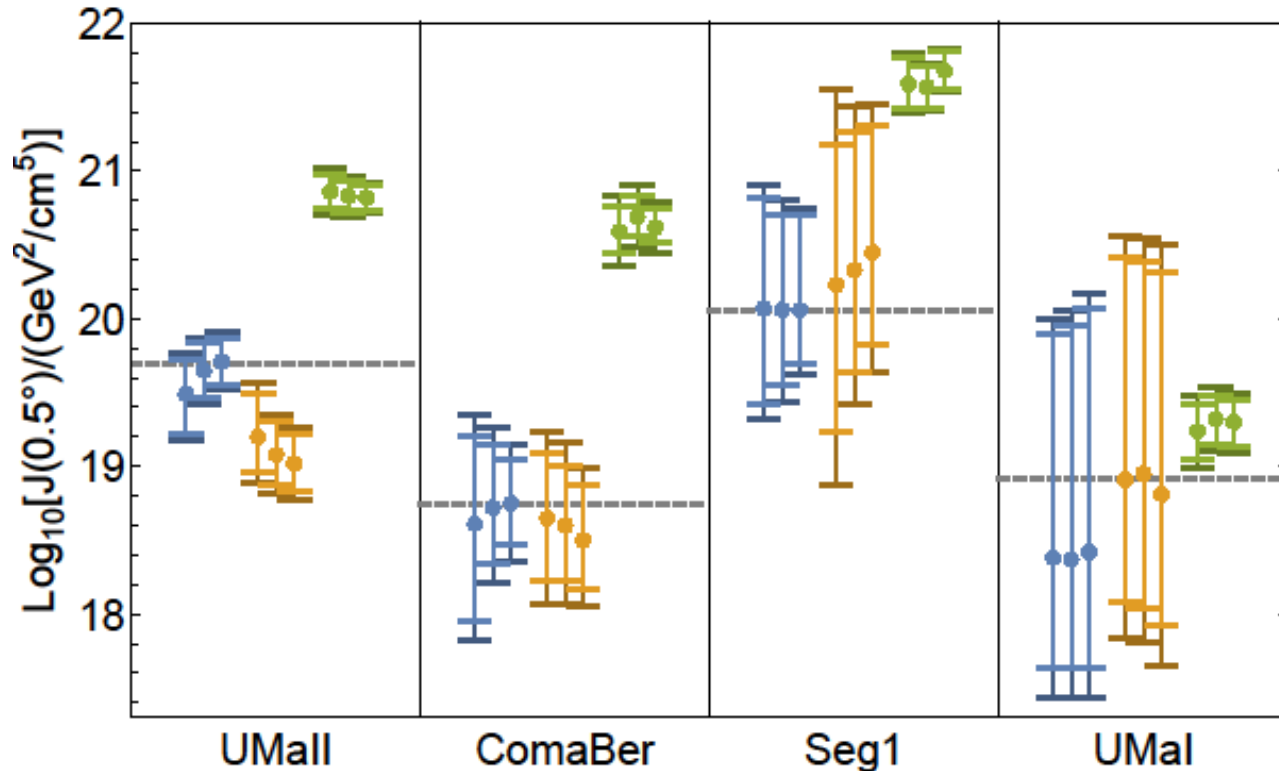
例：



Magellan observation of Draco dSph:  
(Duplicate observation averaged, w/ quality criteria w/o naive cut)  
dra\_sspp2.asc



# dSphのJ-factor推定の精密化



[K. Ichikawa et al., (2017), arXiv:1706.05481].

**手法の検証**：PFSでの測定を想定

$i_{\text{max}} = 21, 21.5, 22$

作られたMock sampleに対して真値を正しく推定できるか？

青：今回の方法 (KI17)

橙：EMアルゴリズム

緑：Contaminated (観測された星をすべてdSphの星と思う)

点線：真値 (Mock生成時パラメータ)

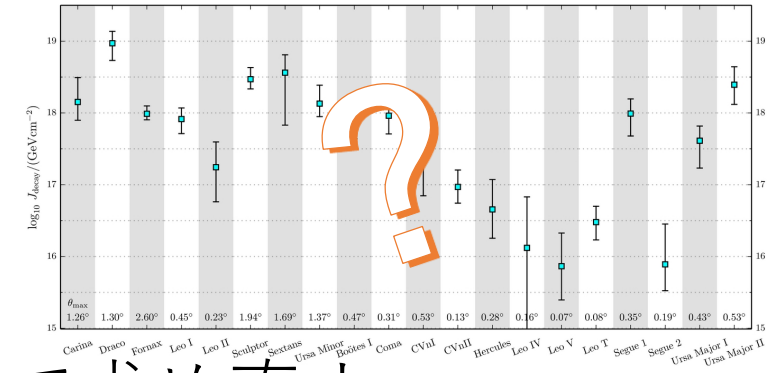
Contami.はFGの影響をもろに受けるが、KI17, EMは誤差が抑えられている

**更に、**

特定のdSph (例：UMaII) に対してはEMの結果は有意に真値から外れうるが、KI17はそれを回避できる

# 現状のJ-factor値のUpdate (in progress)

- 現在すでに見つかっているdSphたち (Draco, Sculptor, etc) のJ-factorは適切か？ (解析のされ方がまちまち)



→Foreground contaminationを考慮した上で求め直す。

良いsensitivityを与えてくれるdSphを知りたい

- 十分なデータが無いdSphに対してはSampling Biasがかかる

→Sampling Biasの影響を受けづらいパラメータ推定法

conditional likelihood:

$$\mathcal{L}(v, R|\theta) \rightarrow \mathcal{L}(v|R, \theta) = \mathcal{L}(v, R|\theta) / \mathcal{L}(R|\theta)$$

## まとめ、展望

- 有力なDM候補WIMPに対し、  
間接検出では TeV くらいの領域まで感度がある
- 特にdSphは有望なターゲットだが、DM分布(J-factor)決定の際には  
前景星が大きな誤差要因になる
- dSph周囲の星も同時に観測することで前景星の影響を取り除き、  
J-factor推定の精度をより高めることができる  
→DM間接検出法の信頼度がより確かなものになる！
- 他の誤差要因 (cf. axisymmetric profile, constant anisotropy)

# Mock generator

Mock sample: Jeans inversion

特定の対称性を満たしているとき、3D密度分布がわかれば  
相空間上分布関数(distribution function)を求められる

$$f(x_i, v_i) \rightleftharpoons v(r)$$

求めた分布関数を元に、それに従うdSph mockを生成

# Photometry

## SDSS (Sloan Digital Sky Survey)

” The Sloan Digital Sky Survey has created the most detailed three-dimensional maps of the Universe ever made, with deep multi-color images of one third of the sky, and spectra for more than three million astronomical objects. Learn and explore all phases and surveys —past, present, and future—of the SDSS.”

(<https://www.sdss.org/>)



# Spectroscopy

[MMT/Hectochelle](#) for Draco [Walker et al. (2015)]

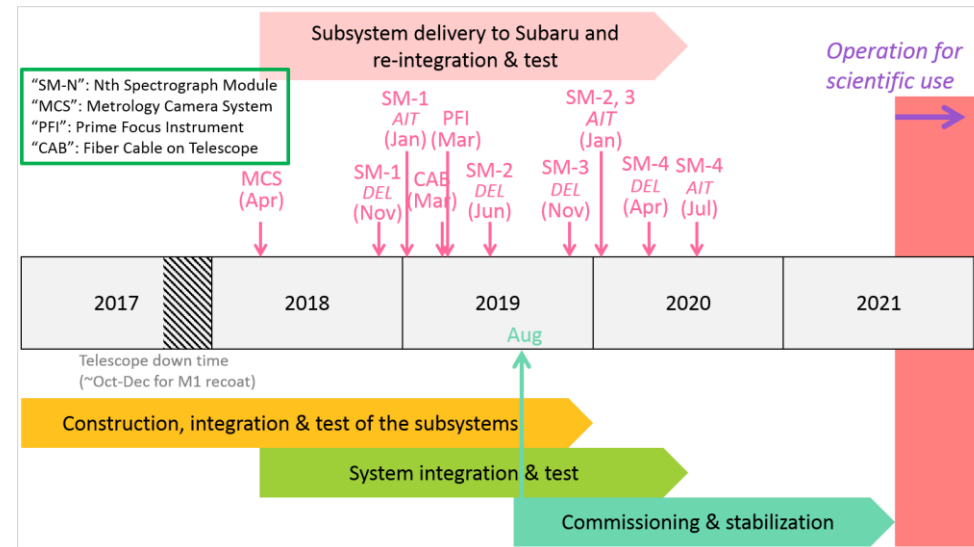
6.5 m, Mt Hopkins, Arizona

[Magellan/MMFS](#) for Carina, Fornax, Sculptor, Sextans [Walker et al, (2009)]

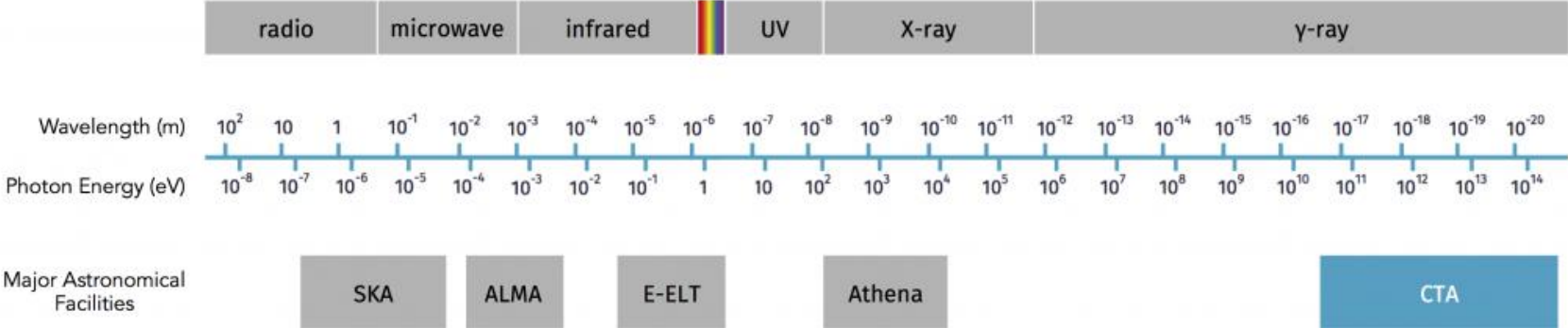
6.5 m, Las Campanas Observatory, Chile

[PFS](#)

8.2 m, マウナケア山頂



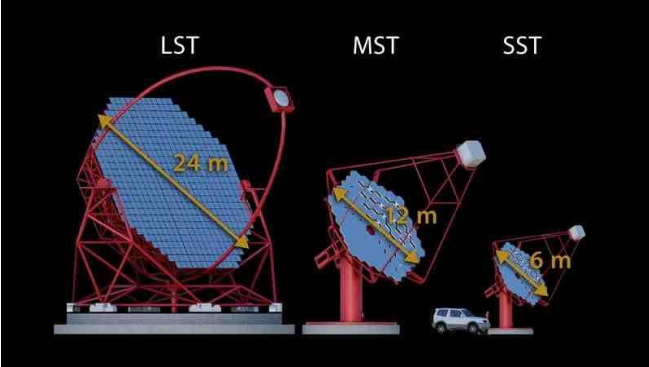
# Cherenkov Telescope Array (CTA)



<https://www.cta-observatory.org/science/cta-performance/>

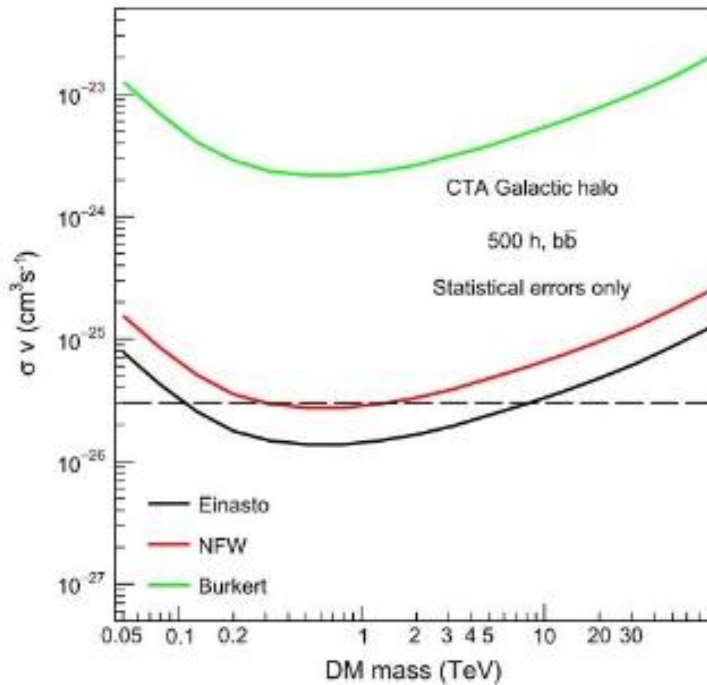


<https://www.cta-observatory.org/project/technology/lst/>



<http://www.innovations-report.com/html/reports/physics-astronomy/gamma-ray-astronomy-site-negotiations-for-cherenkov-telescope-array-started.html>

# Core Cusp Problem



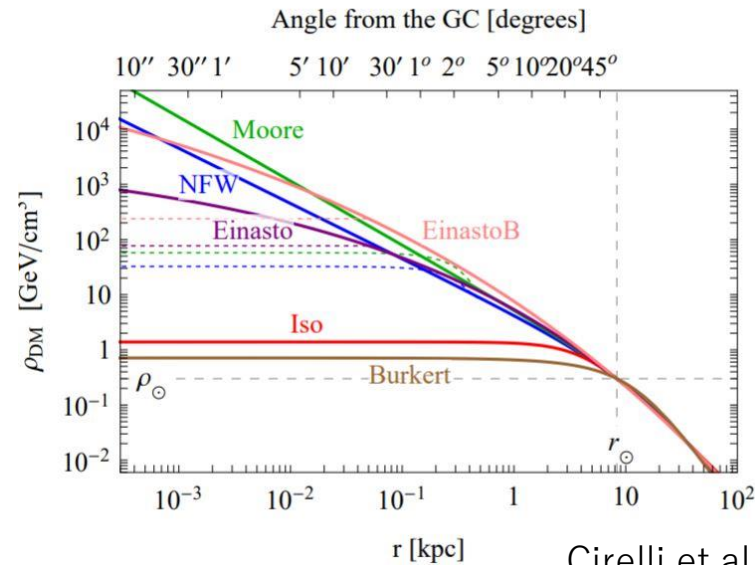
[The CTA Consortium (2017)]

中心部でのDM densityのふるまい：

$$\rho_{DM}(r) \sim r^{-\gamma}$$

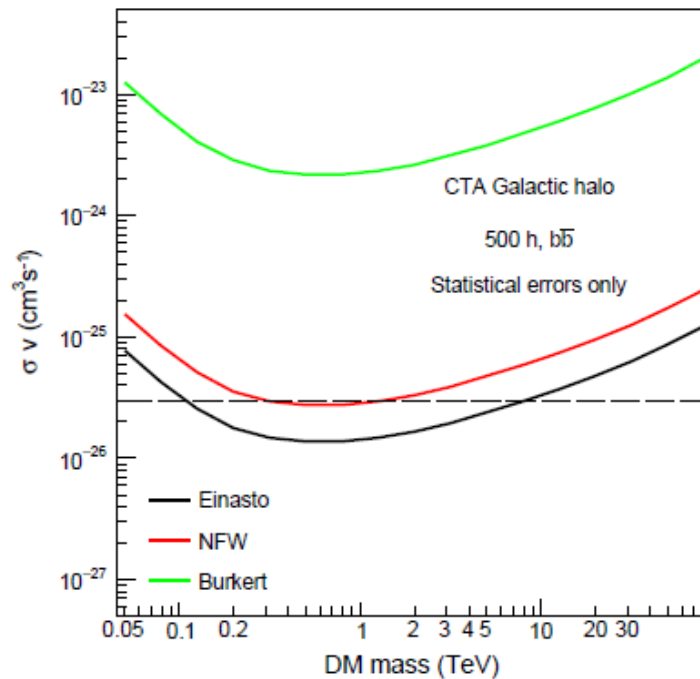
$\gamma = 0$  (core) なのか  $\gamma > 0$  (cusp) なのか？

銀河中心の観測ではこの差が結構効いてくる



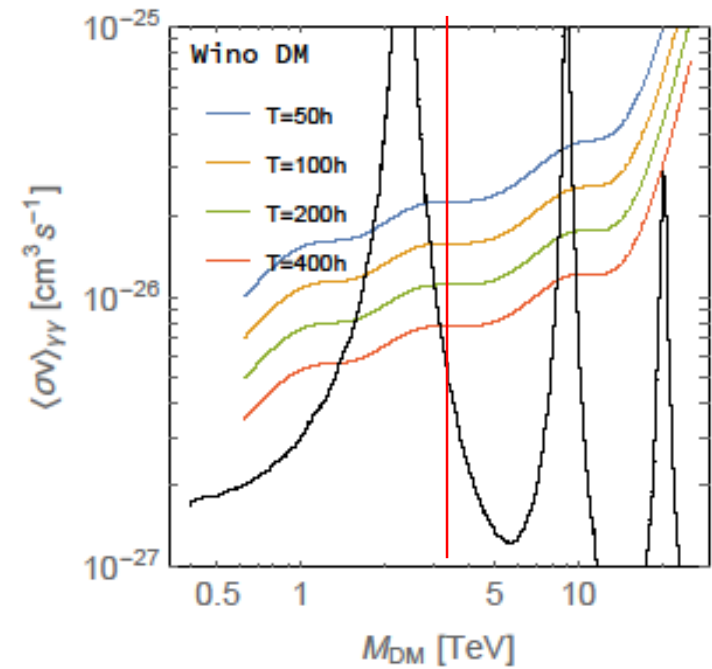
Cirelli et al. (2011)

# Sensitivity (example)



<- cored

<- cusp



$\log_{10} J = 18.83$ , Draco dSph

[The CTA Consortium (2017)]