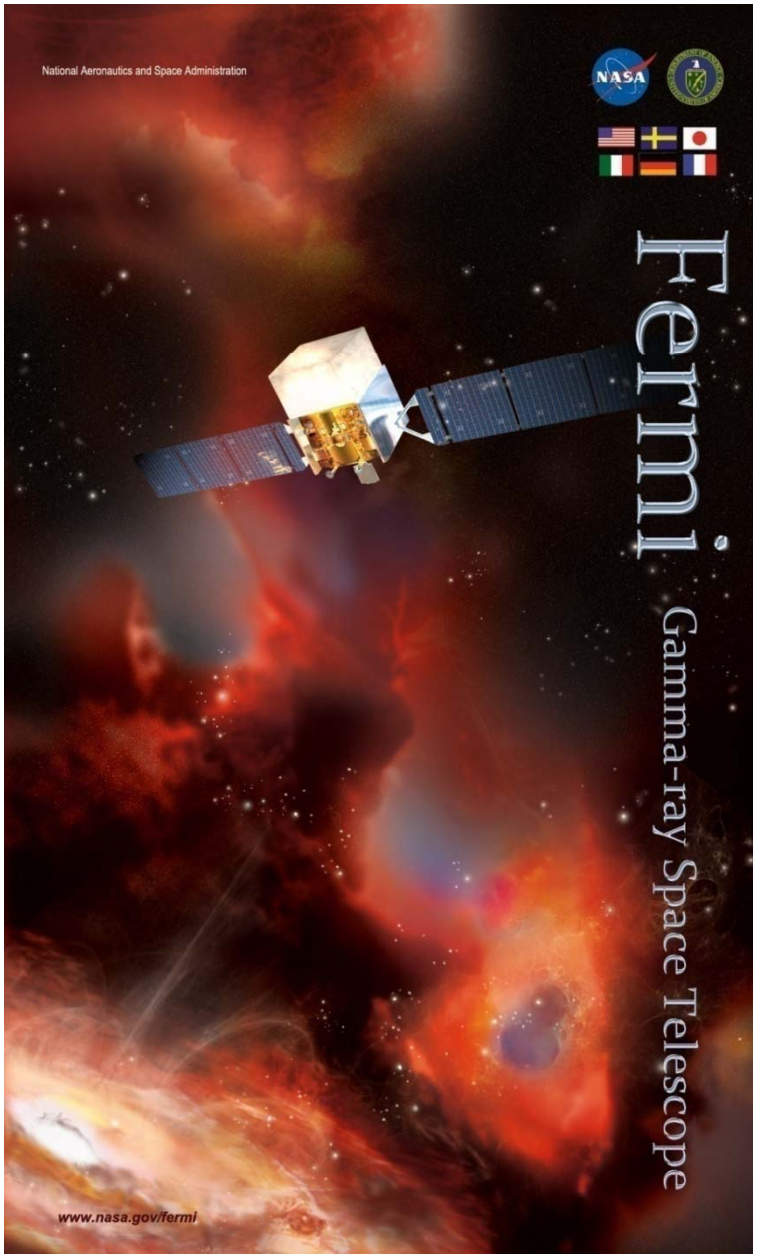
ガンマ線による銀河団の観測の現状と今後

深沢泰司（広島大学）



研究会「銀河団の物理」
@東京理科大学 2013/12/28

GeV/TeVガンマ線による銀河団の観測

GeVガンマ線　全天サーベイ観測（多数サンプル）

CGRO/EGRET(1991-1999)　　Reimer+03, ApJ 588, 155

Fermi(2008--)　EGRETの10倍以上良い感度、現在も観測中

TeVガンマ線　ポインティング観測（少数サンプル）
主に以下の観測装置で進行中、
検出器のアップグレードも進む

MAGIC	Perseus	Zandanel+13, 1308.0492
HESS	A496/A85	Aharonian+09, A&A 495, 27
Veritas	Coma	Arien+12, ApJ 757, 123

Outline

1.フェルミ衛星による銀河団宇宙線量の観測

2.暗黒物質について

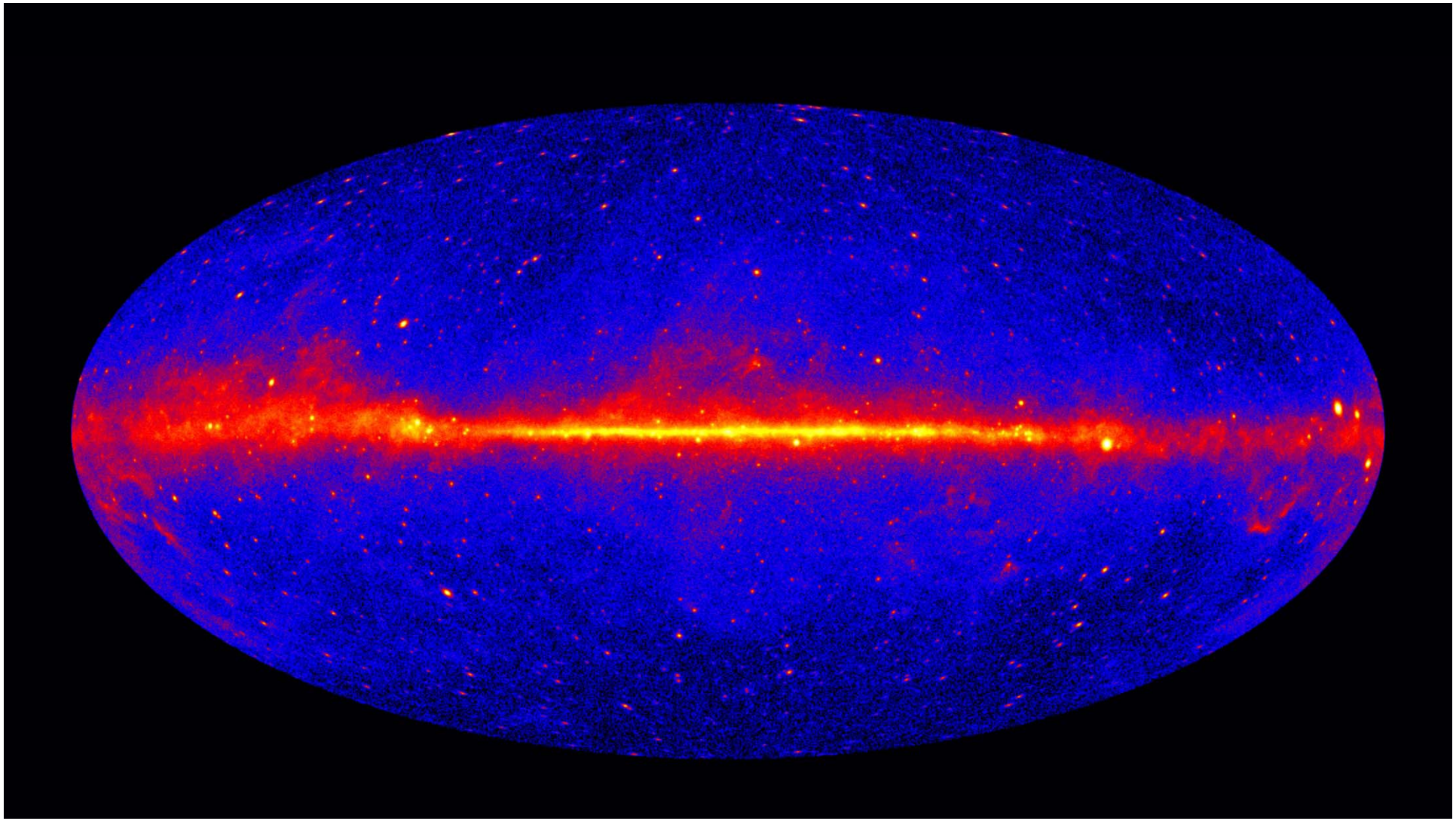
3.フェルミ衛星による暗黒物質信号の探査

4.他の暗黒物質信号探査の観測

5.今後のガンマ線観測

1.フェルミ衛星による銀河団宇宙線量の観測

5 year map　>1GeV Front+Bak



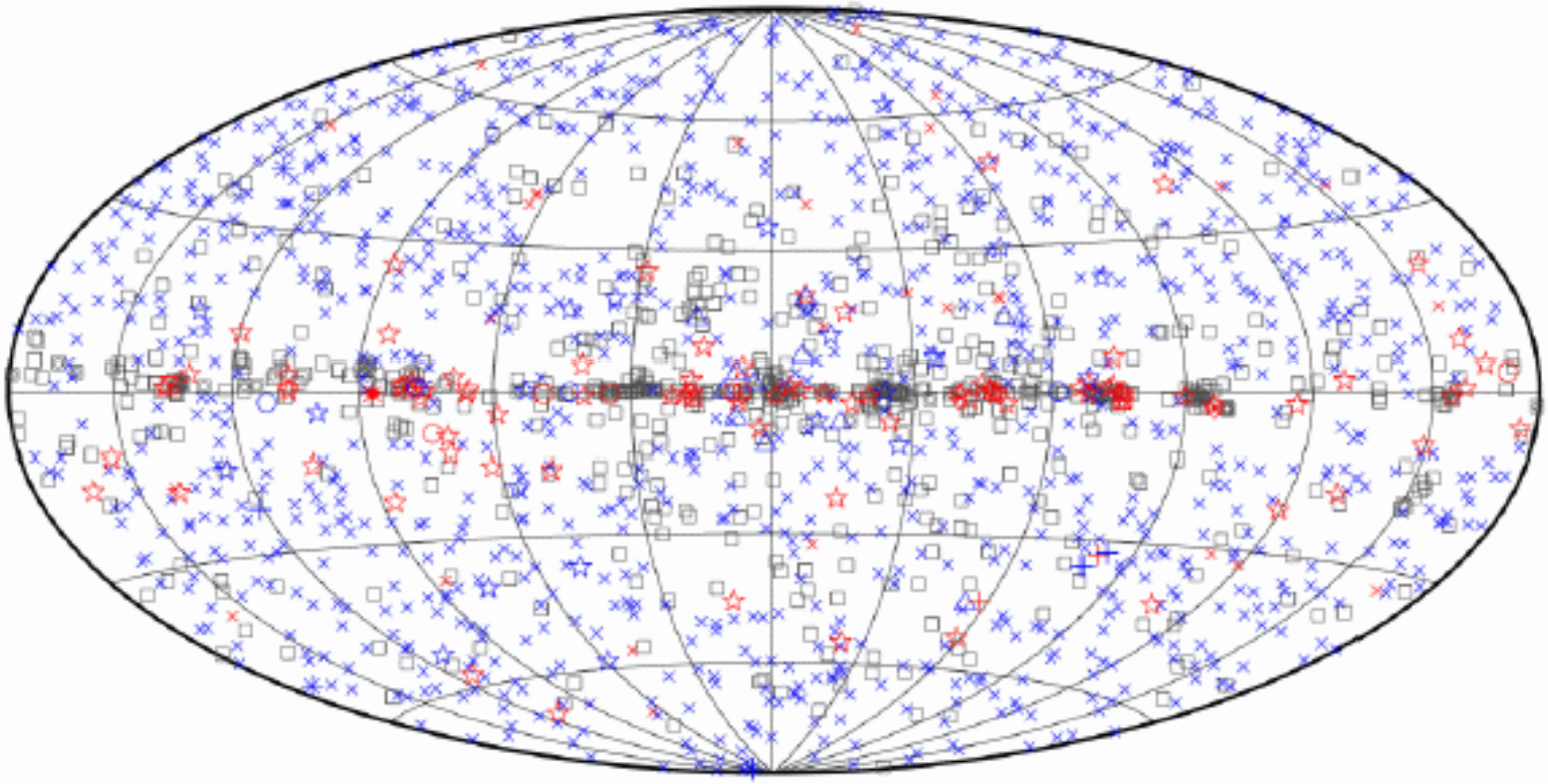
フェルミ2年カタログ

2FGL Associations

Nolan et al. 2012, ApJS 199, 31

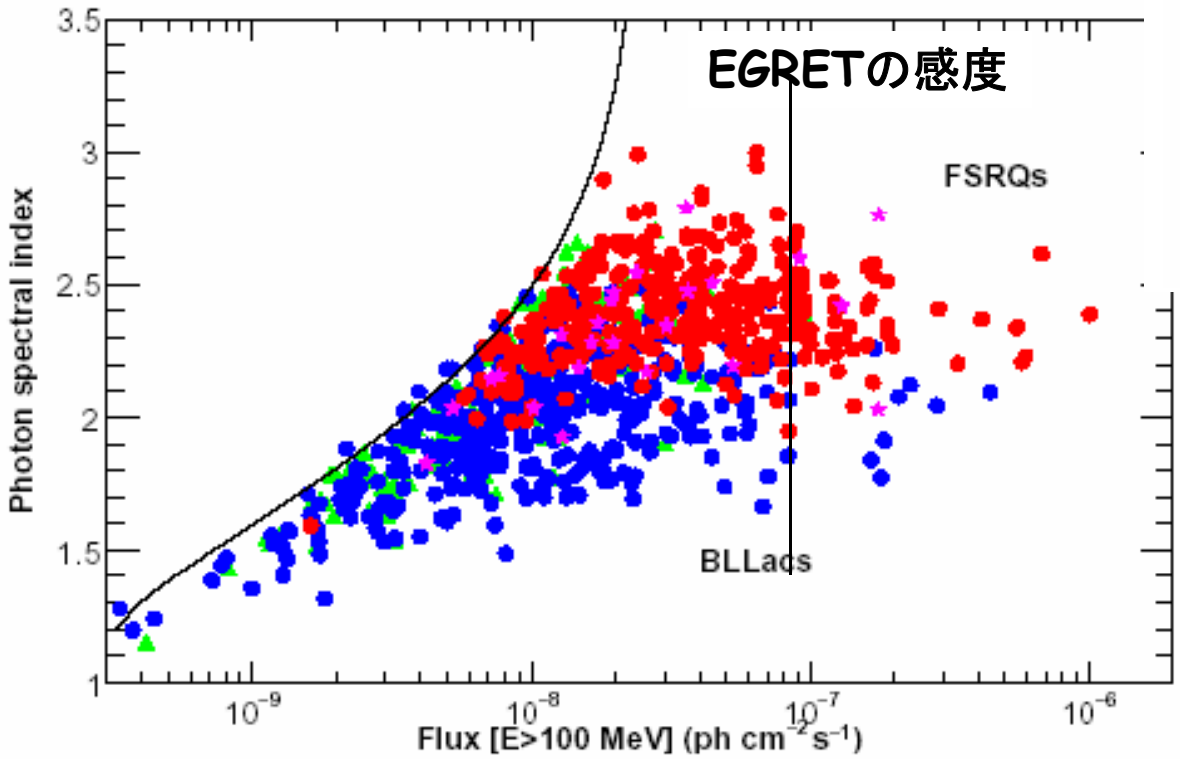
Red symbols: Identified sources

Blue symbols: Associated sources



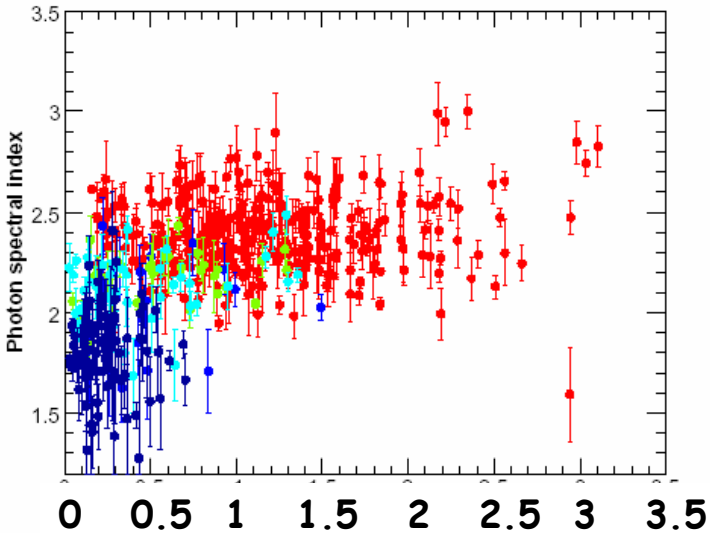
□ No association	⊠ Possible association with SNR or PWN	
× AGN	☆ Pulsar	△ Globular cluster
✳ Starburst Gal	◈ PWN	⊠ HMB
+ Galaxy	○ SNR	✷ Nova

2年AGNカタログ（2LAC）



光子Flux（明るさ）

Redshift分布



Ackermann et al. 2011, ApJ 743, 171

GeV/TeVガンマ線での銀河団宇宙線量の観測意義

宇宙線陽子からの信号を捉えられる

$$p + p \rightarrow \pi_0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

宇宙線陽子と銀河団ガスの相互作用
地球に降り注ぐ宇宙線のほとんどは陽子

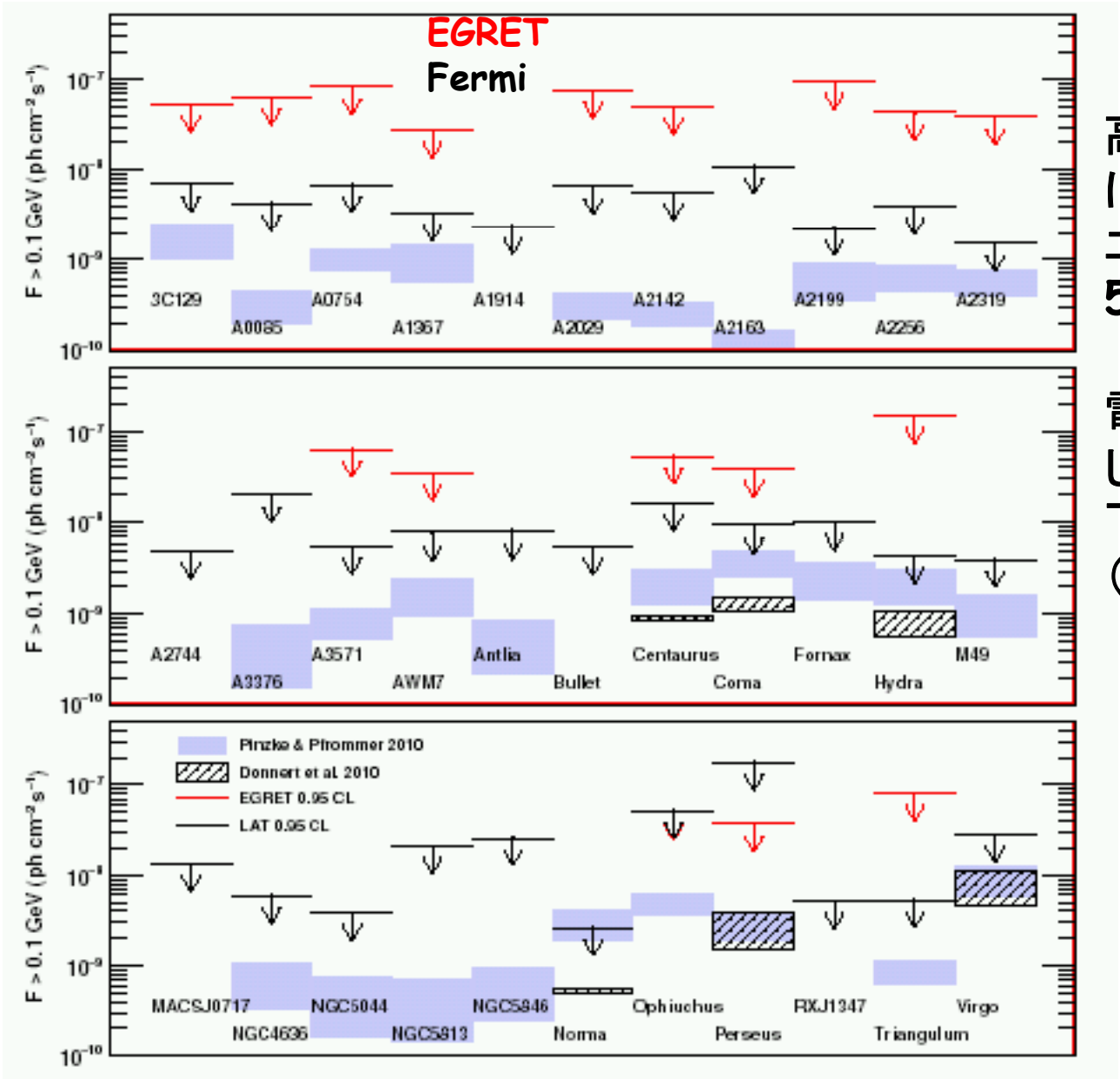
これとともに、

陽子が上以外の反応で生成する2次粒子からの放射
電子による逆コンプトン散乱

GeVの場合は、硬X線ほど空間分解できない

硬X線： 宇宙線電子によるCMBの逆コンプトン散乱
電波： 宇宙線電子によるシンクロトロン

フェルミ1年間での観測（上限値のみ）　Ackermann+10, ApJL 717, L71



高温ガスの熱エネルギーに対する宇宙線（陽子）のエネルギーの上限値は、5%以下。

電波シンクロトロンと比較した場合、銀河団磁場の下限値は、0.15uG。（reasonable）

フェルミ4年間での観測

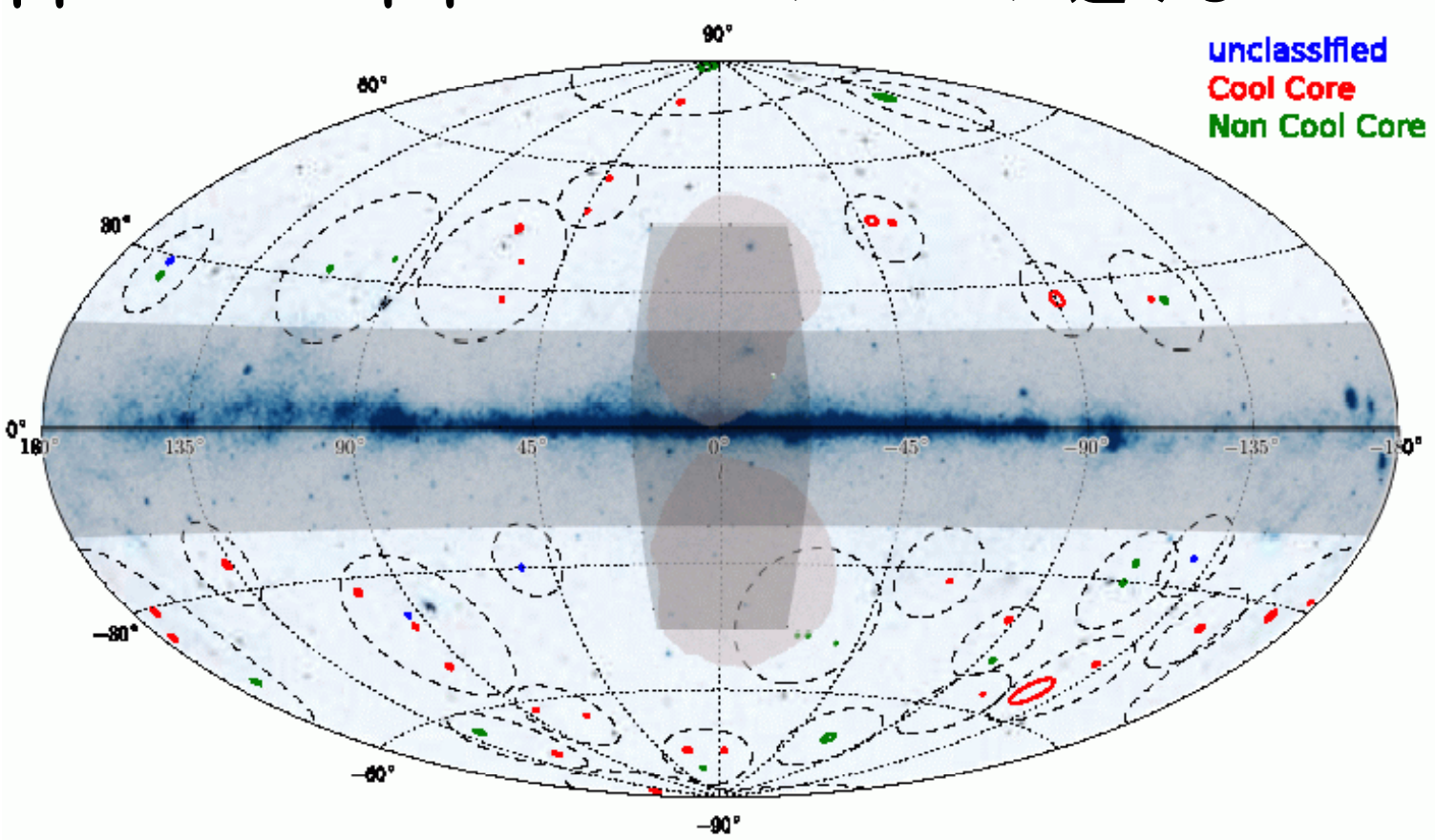
Ackermann+13, 1308.5654

サンプル銀河団（50個）

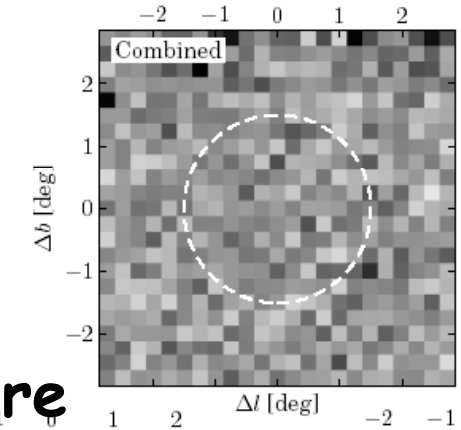
From 106 nearby X-ray brightest (Reprich+02,Chen+07)

|b|<20d　銀河面避ける

|l|<20d and |b|<50d　フェルミバブル避ける



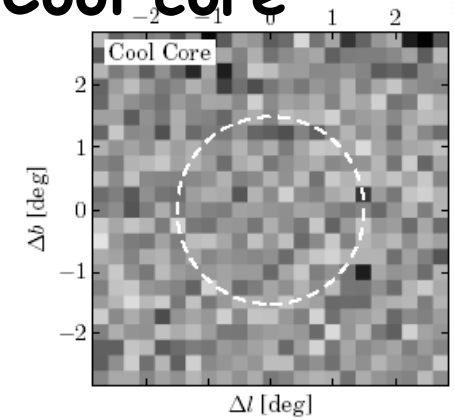
Stacking analysis



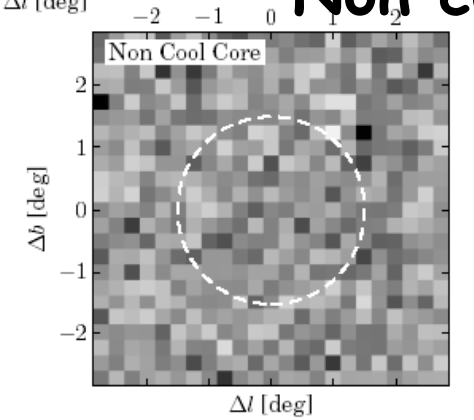
全銀河団

有意な信号なし

Cool core



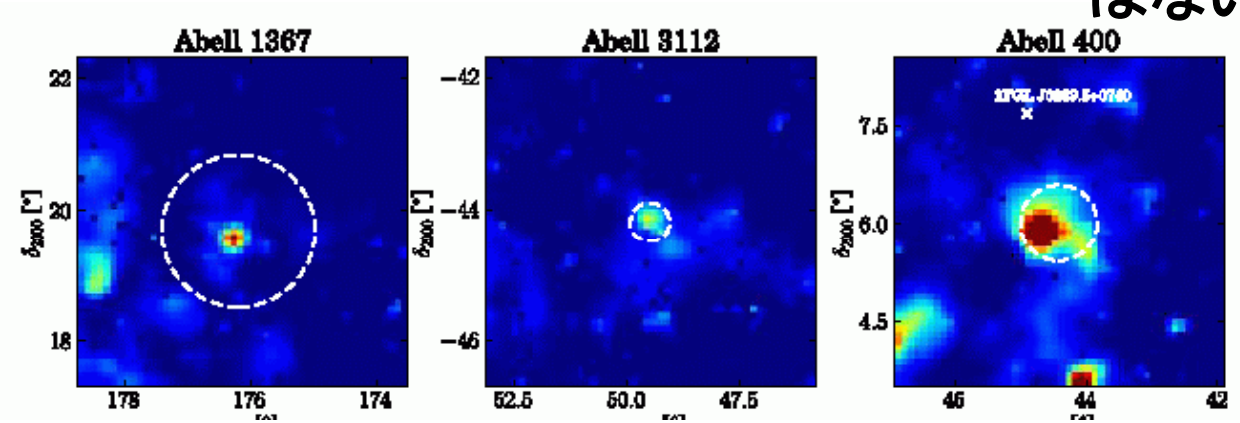
Non cool core



(中心entropy<30keVcm2)

特に宇宙線が大量にいると思われる銀河団ではない

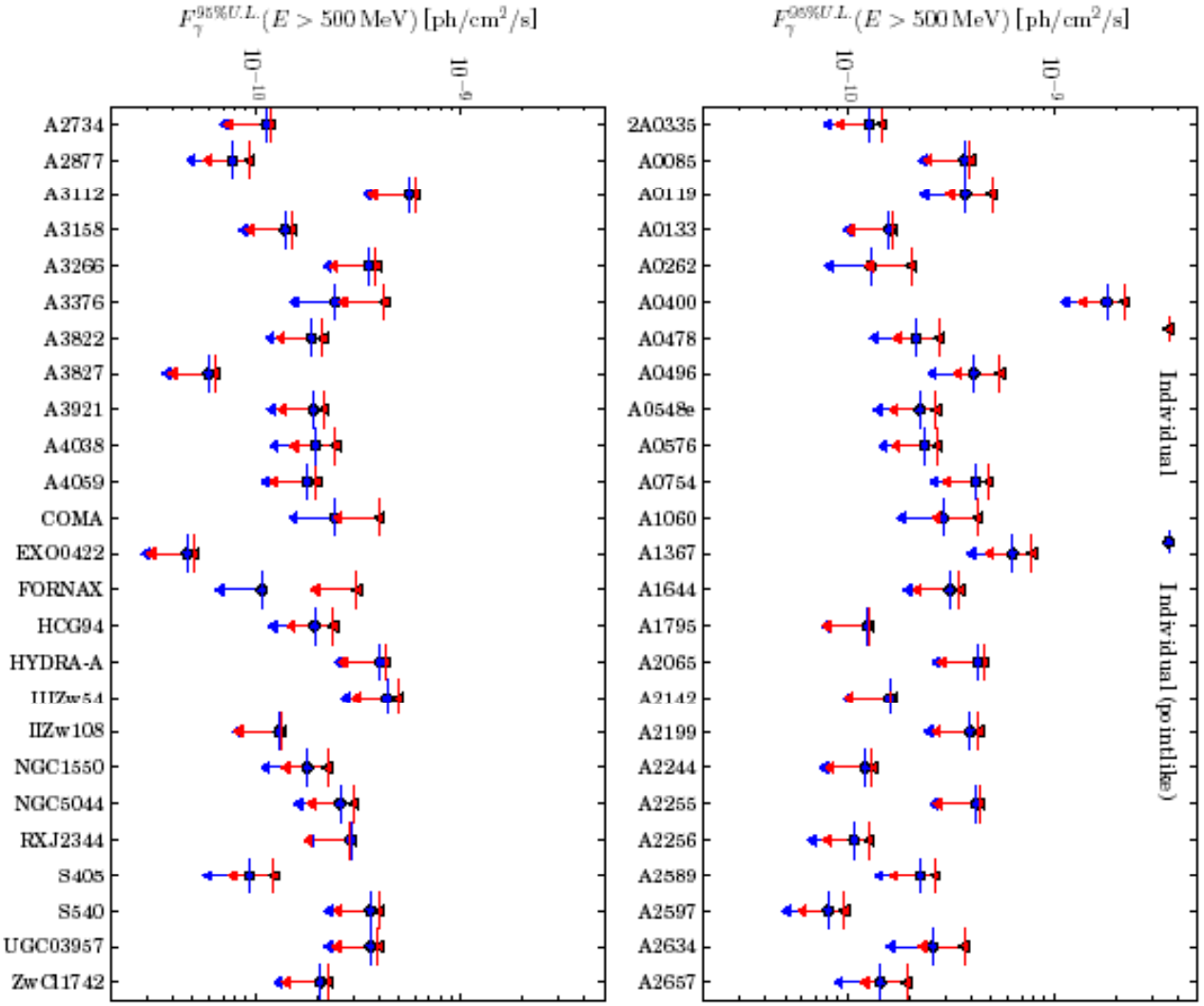
3つの銀河団付近で信号あり



AGNだろう

各銀河団のガンマ線上限値

宇宙線加速伝搬計算で定式化された宇宙線分布を用いると（Pinzke+10）、
陽子のnonthermalエネルギーは、ガスの熱エネルギーの1.4%以下



2. 暗黒物質について

よく議論されるダークマター粒子の候補

- ➢ Super Symmetry (SUSY) particle(s)　超対称性理論で予想　TeV
- ➢ Gravitino (mod SUSY)　グラヴィティーノ（超対称性を修正）　keV
- ✓ Kaluza-Klein particles　カルーザ・クライン理論　TeV
- ✓ Axion　アクシオン　μeV
- ✓ Sterile Neutrino　重い未発見種のニュートリノ　keV

LHCで、SUSYが発見されず、ヒグス粒子の質量が低いことが判った、いま

あらゆる可能性を再検討し直す時期
複数のダークマターが併存している可能性も十分ある

From 釜江講演資料@京都産業大学 2013/12/16

ニュートラリーノ

SUSY，WIMPsの1つ

数10GeV以上の質量

地上直接検出
宇宙線陽電子によってもサーチ

宇宙初期で熱的に生成

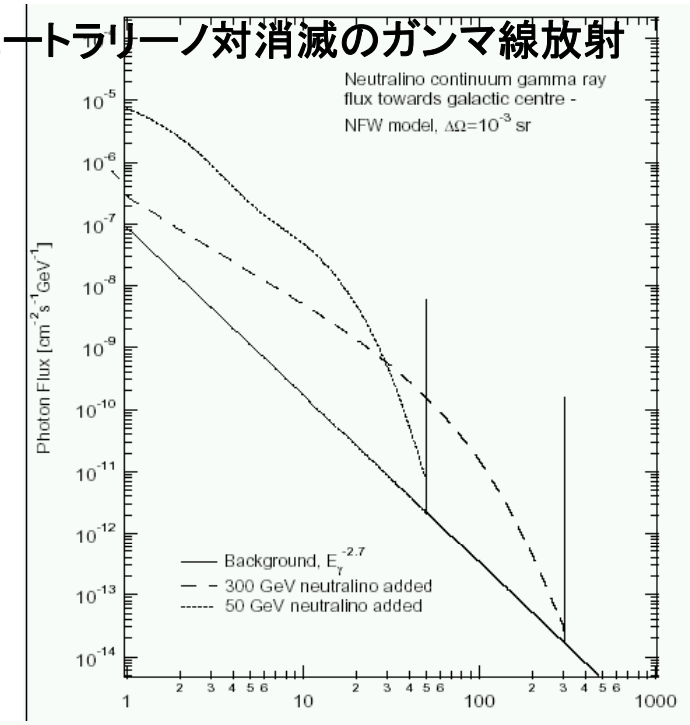
decouple後、対消滅で減少

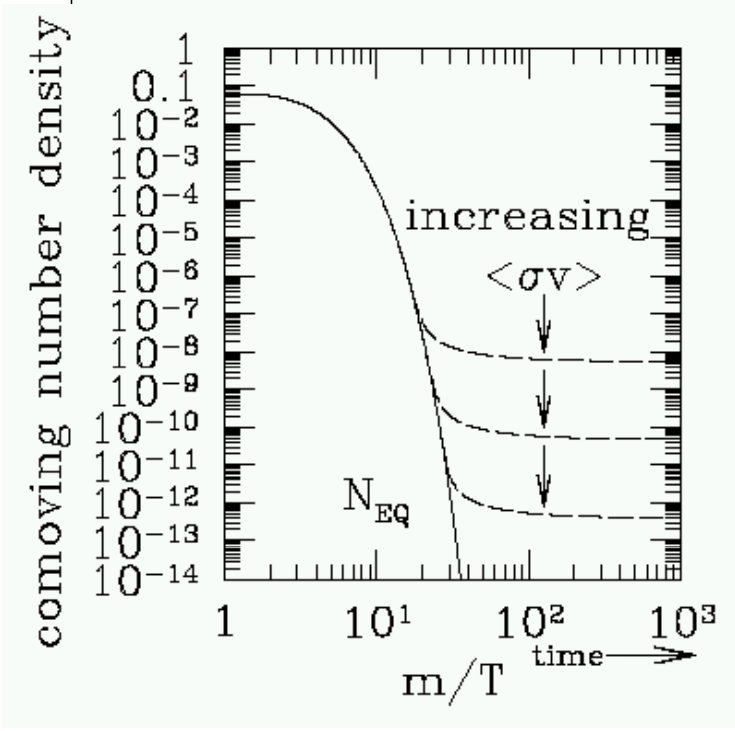
$$X + X \rightarrow \gamma + \gamma$$

現在のダークマターの量を再現する
反応率

$$\Omega_{DM} h^2 \approx \frac{3\times10^{-27} cm^3 / s}{\langle \sigma v \rangle}$$

ニュートラリーノ対消滅のガンマ線放射



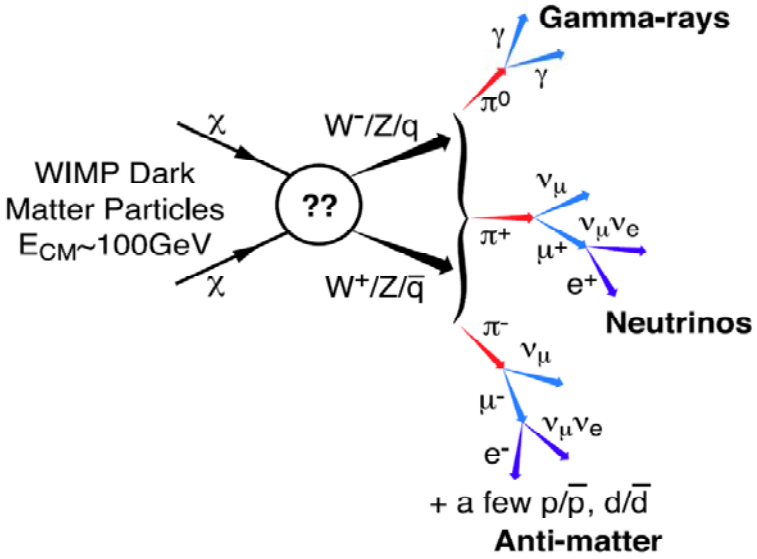


Photons from WIMP Annihilation

$$\frac{d\Phi_\gamma}{dE_\gamma}\left(E_\gamma,\phi,\theta\right)=\frac{1}{4\pi}\frac{\left\langle\sigma_{ann}v\right\rangle}{2m_\chi^2}\sum_f\frac{dN_\gamma^f}{dE_\gamma}B_f \times\int_{\Delta\Omega(\phi,\theta)}d\Omega'\int_{los}\rho^2\left(\vec{r}\left(l,\theta',\phi'\right)\right)dl$$

出てくるガンマ線のスペクトル形

ダークマターの密度分布



ラインガンマ線が出る場合と、
連続ガンマ線が出る場合がある

3. フェルミ衛星によるダークマターからのガンマ線探査

Ackermann+12, ApJ, 747, 121

★ダークマターsatetllite

どのガンマ線天体か区別しにくい

★銀河中心

明るいが、天体や宇宙線からのガンマ線混入が大きいので、難しい

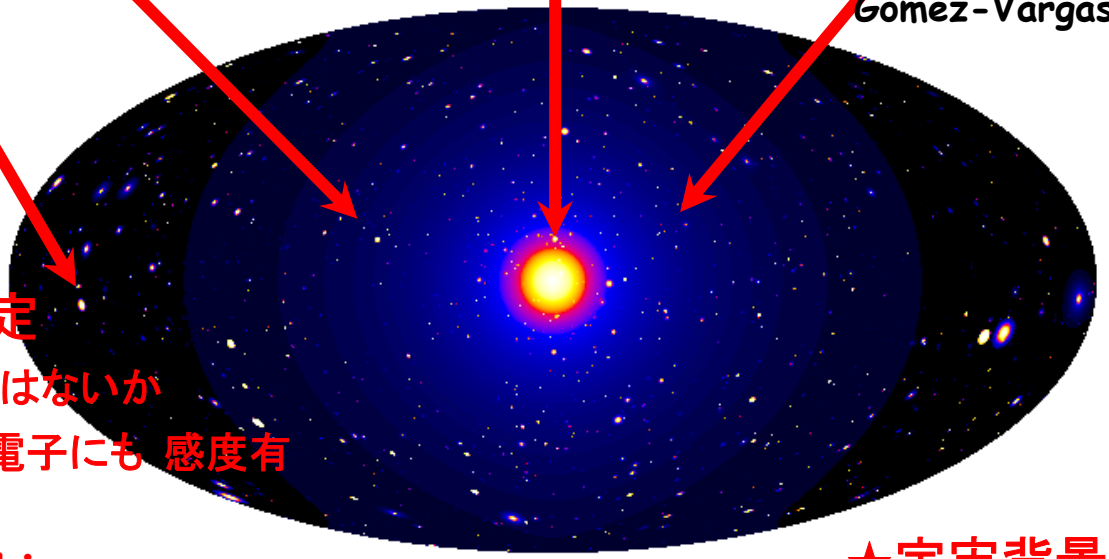
★Milky Way Halo

銀河面放射や背景放射との区別が難しい

Gomez-Vargas+13, JCAP, 10, 29

★矮小銀河

調べやすい



★宇宙線測定

スペクトルや比率に異常はないが

フェルミ衛星は、電子陽電子にも 感度有

★Spectral Lines

天体からの寄与を考えなくても良い。

Abdo+10, PRL 104, 091302

★宇宙背景放射

天体からの放射との区別が必要

Ackermann+12, PR D 86, 022002

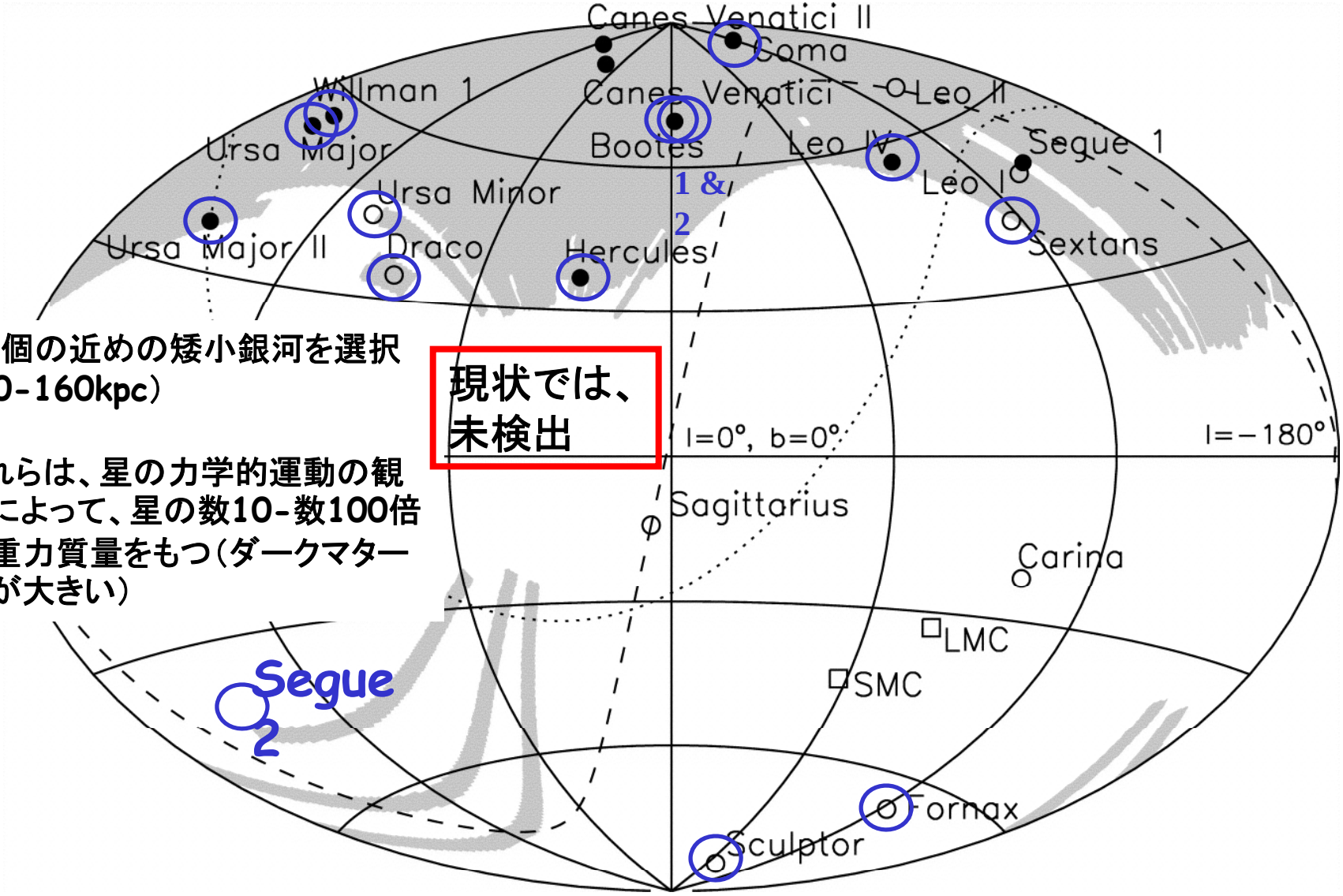
Cuoco+11, MNRAS, 414, 2040

Abdo+10, JCAP 04, 014

★銀河団

加速粒子からの放射との区別が必要

最初の1年間での銀河系周辺の矮小銀河からのガンマ線探査



14個の近めの矮小銀河を選択（30-160kpc）

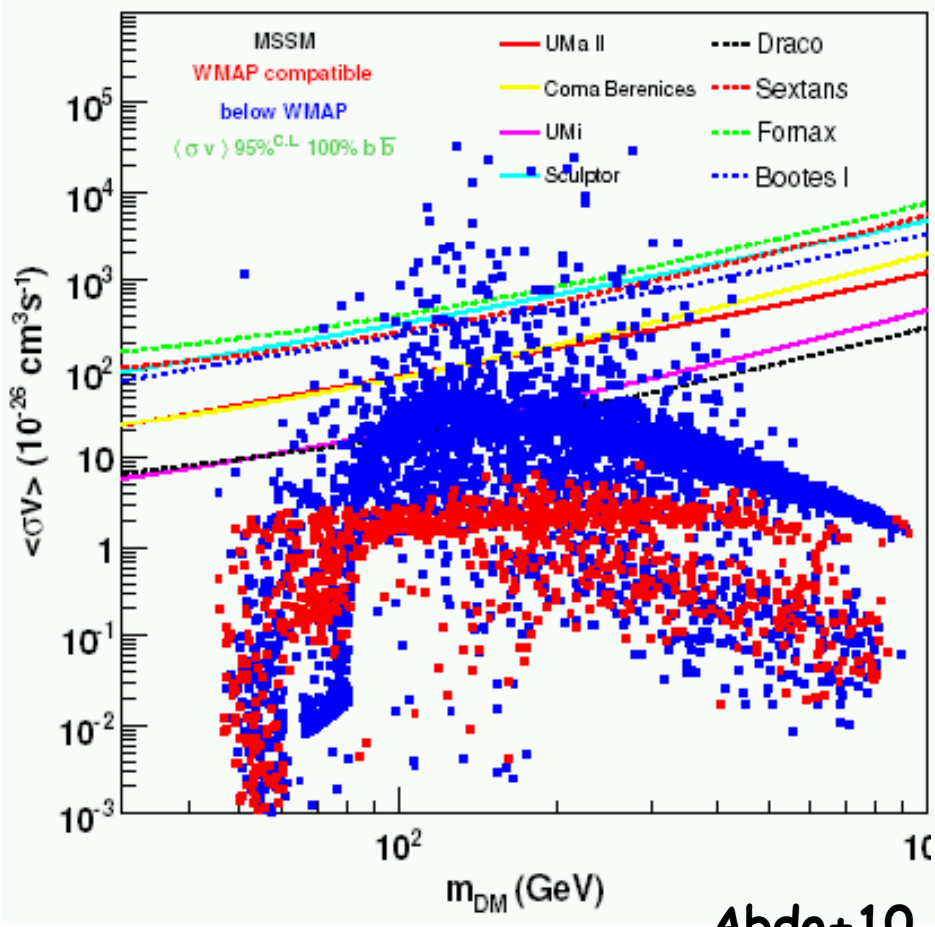
これらは、星の力学的運動の観測によって、星の数10-数100倍の重力質量をもつ（ダークマター率が大きい）

現状では、未検出

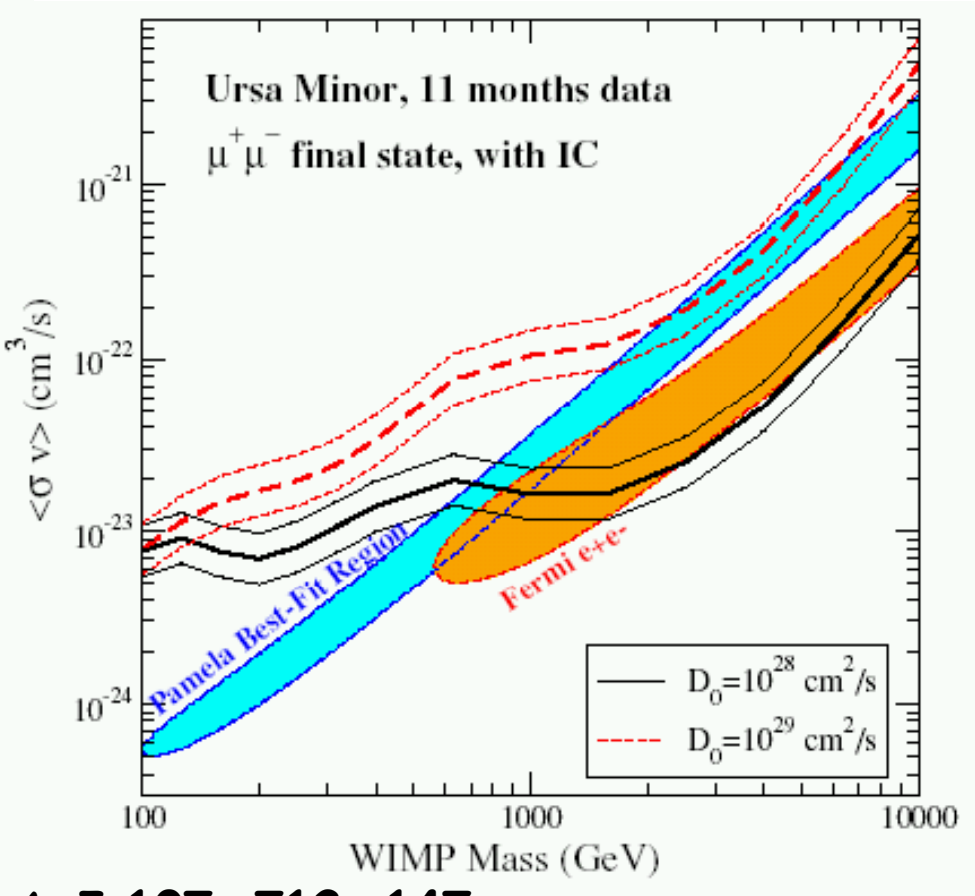
Belokurov, V., et al. 2007, ApJ, 654, 897

フェルミによる矮小銀河からのガンマ線の上限値（連続ガンマ線）から得られるDMの断面積の上限値の例

MSSMモデルの場合（100% $\bar{b}b$）
各銀河ごとの上限値（95%信頼度）
赤：WMAPによるthermal relic DM量を用いて各種DMモデルから得られる値(青は、nonthermalもある場合)

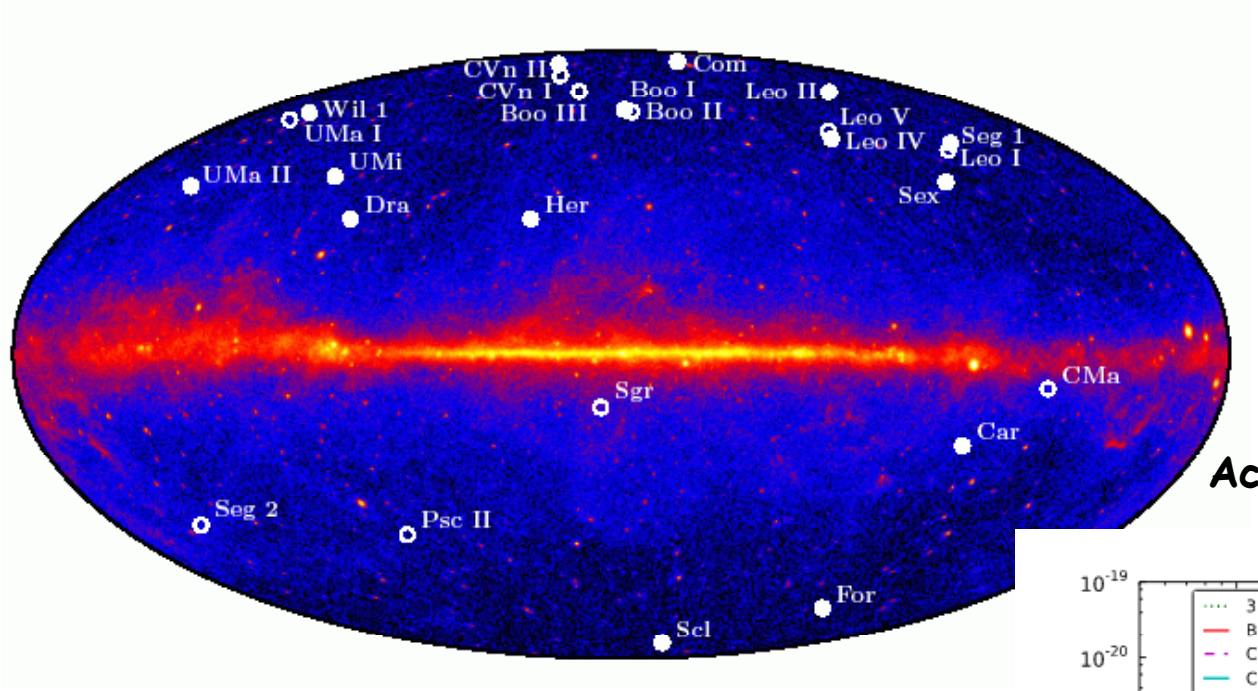


Final Stateがミューオンの場合
宇宙線電子陽電子による制限と比較
最も近傍のUrsa Minor銀河による制限

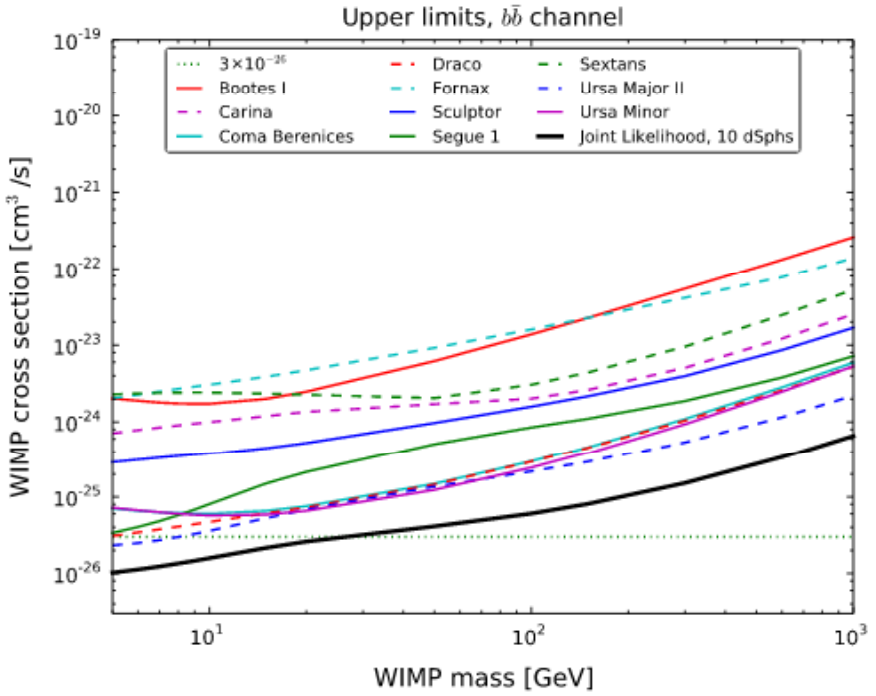


Abdo+10, ApJ 107, 712, 147

2年データ、25個の矮小銀河を用いた制限



Ackermann+11, PRL 107, 241302



他の制限例

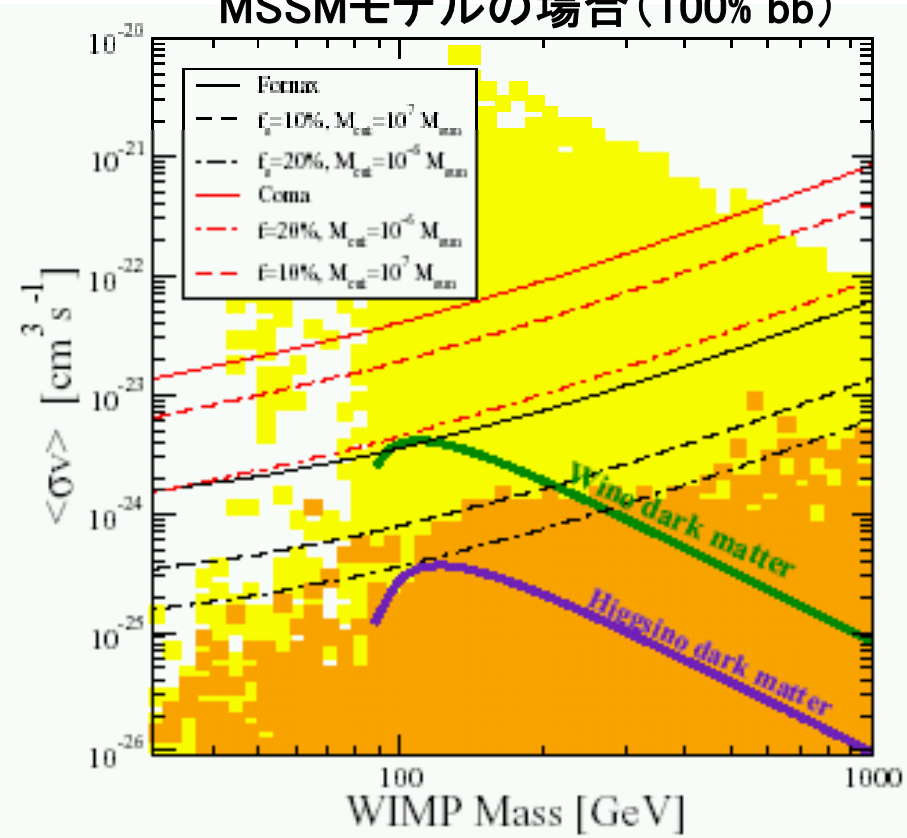
Ackermann+13, 1310.0828 (PRL) Stacking

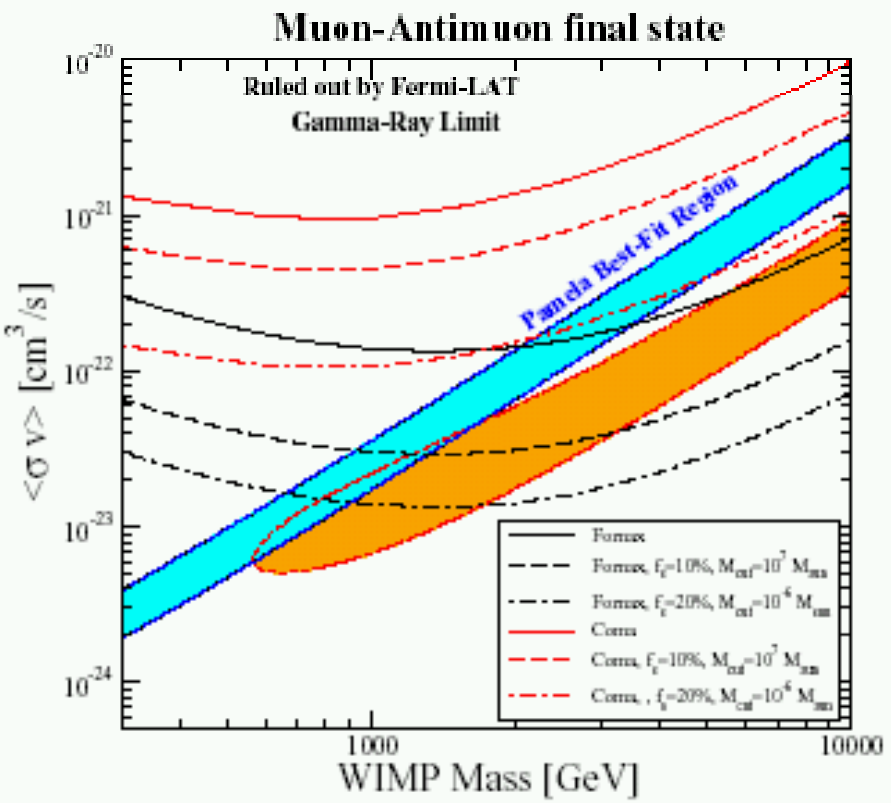
銀河団からのガンマ線上限値によるDMの制限

Final Stateミューオンの場合に、DMサブハローの寄与も考えた場合に、
矮小銀河より強い制限（ただし、DM密度分布の仮定の不定性大）

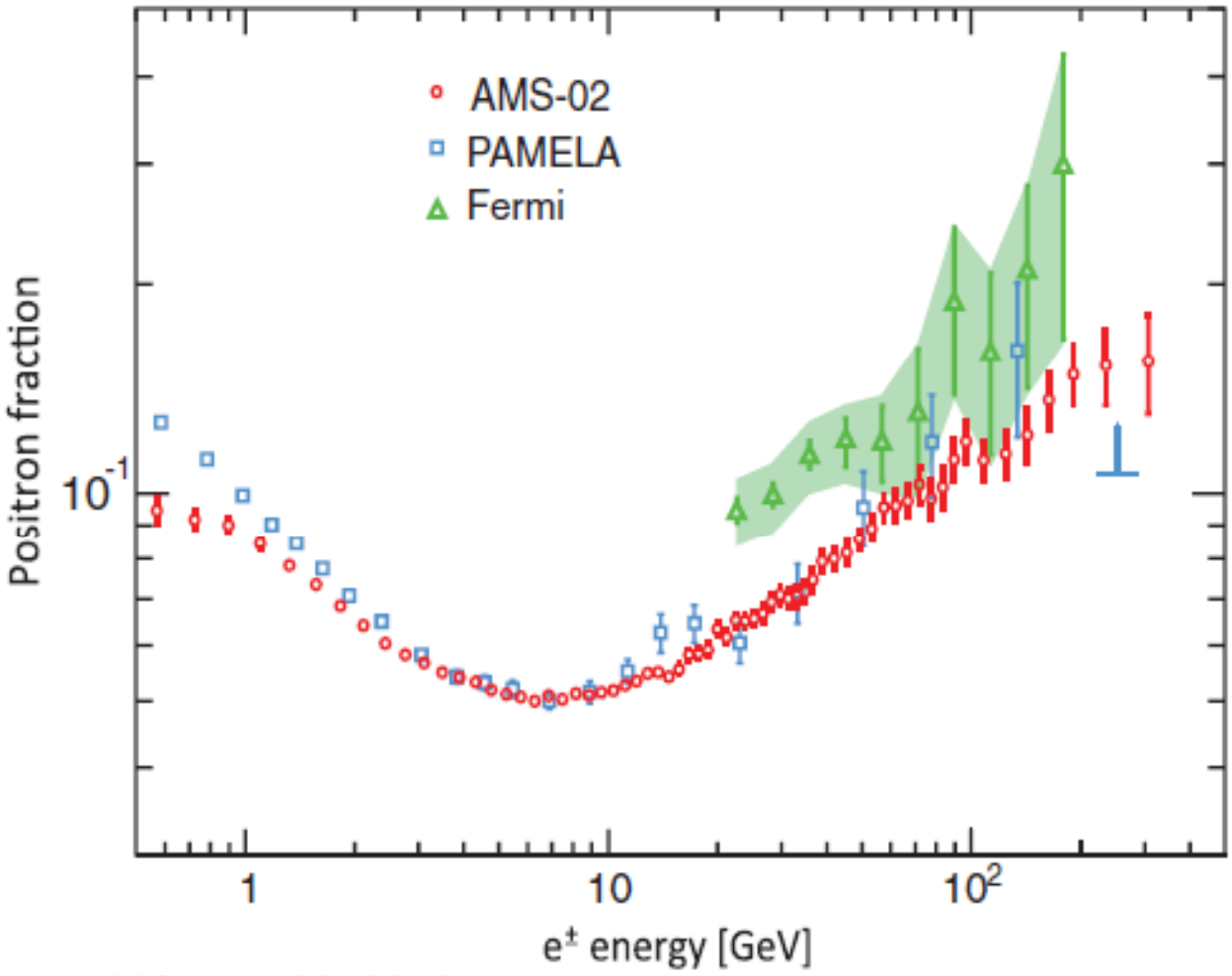
Ackermann+10, JCAP, 05, 025

MSSMモデルの場合（100% bb）





$e^+/(e^- + e^+)$ 比測定：
AMS, PAMELA, Fermi



PRL **110,** 141102 (2013)

AMS-2 results

- Extends to ~300GeV
- Highest precision
- Agree with PAMELA

- 300GeVまで拡張
- 高精度
- PAMELAと合っている

ダークマター説

Ishiwata+ ,Ibe+

パルサー説

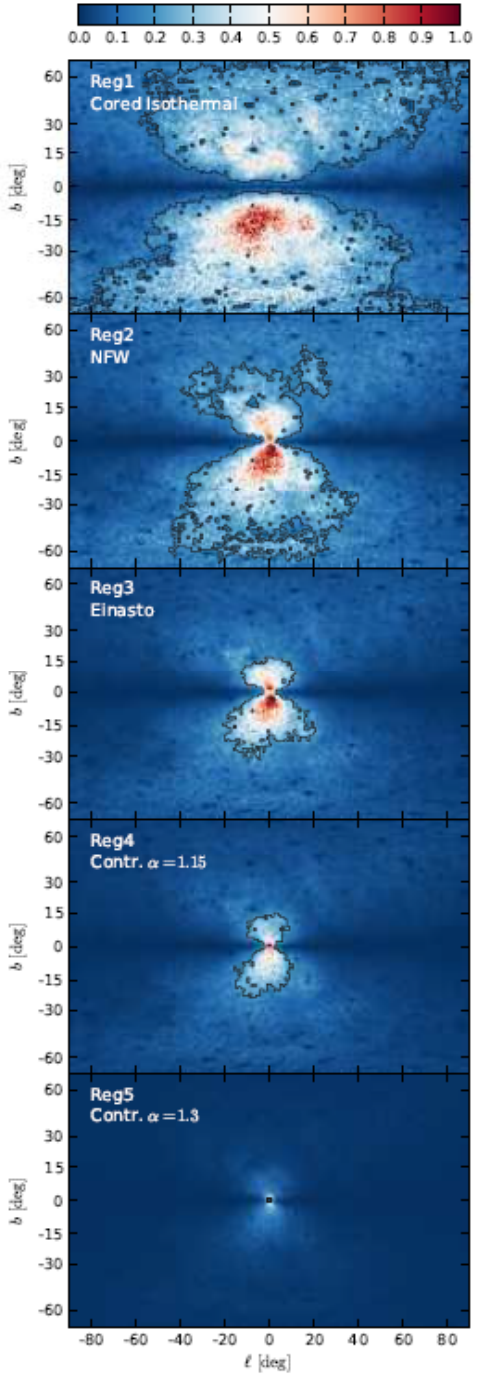
Lee+12, Cholis+13

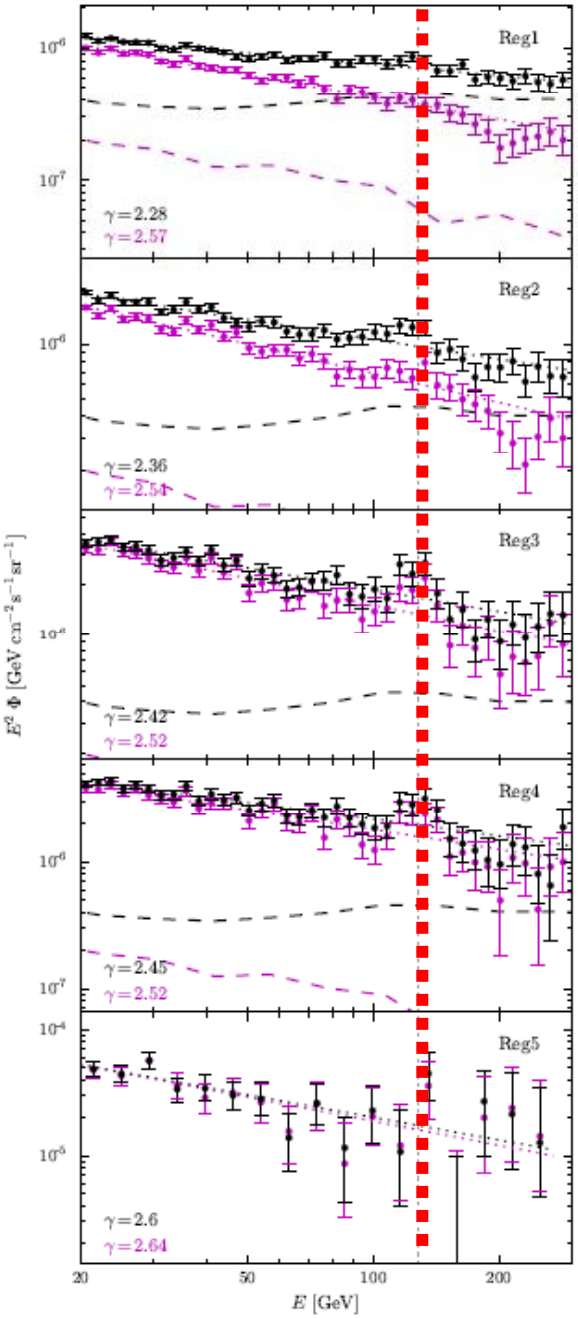
銀河中心の探査

130GeVガンマ線　？

C. Weniger 2012

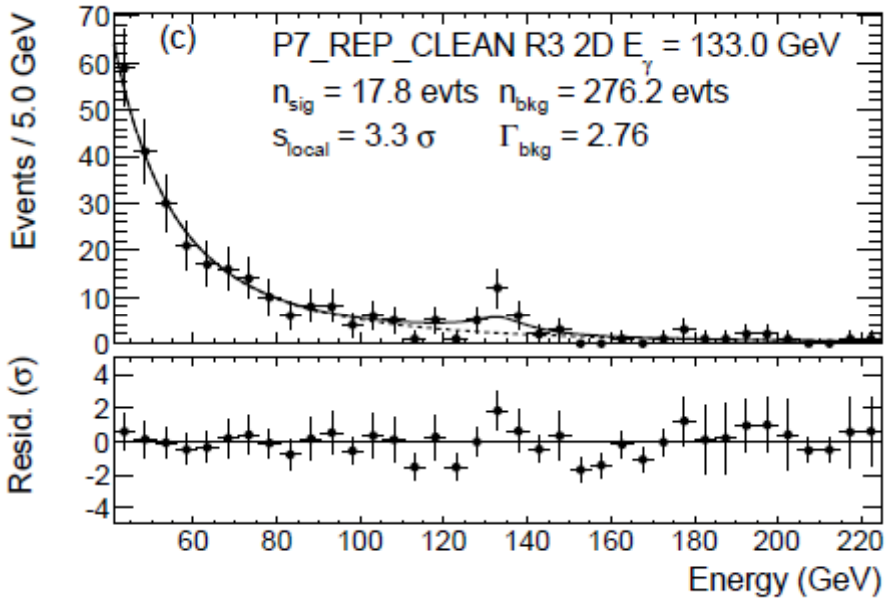
A line feature
found
near the GC





C. Weniger, JCAP 1208 (2012) 007

Fermi teamによる解析結果



エネルギー分解能などを考慮して解析すると、130GeVに対して有意度は、3.3σとなる

ガンマ線エネルギーが130GeV以外であった可能性も含めて解析し直すと 有意度は1.6σになる

We did not find any globally significant lines in our *a priori* search regions and present 95% confidence limits for WIMP annihilation cross sections and decay lifetimes. Our most significant fit occurred at 133 GeV in our smallest search region and had a local significance of 3.3σ, which translates to a global significance of 1.6σ. We discuss potential systematic effects in this search and why the

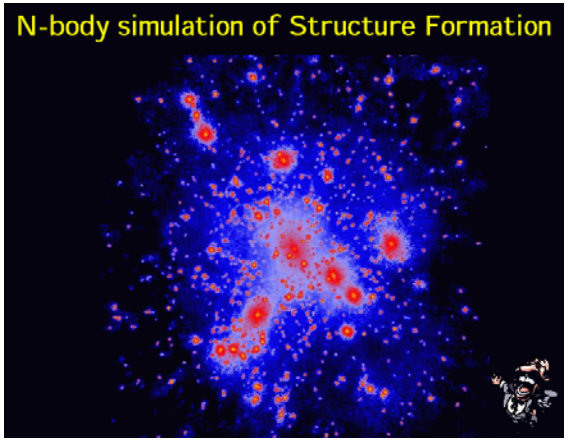
Ackermann+13, Pys.Rev.D 88, 082002

4. 他の暗黒物質からの信号の探査

Sterile neutrino ？　温かいDM(keV)？

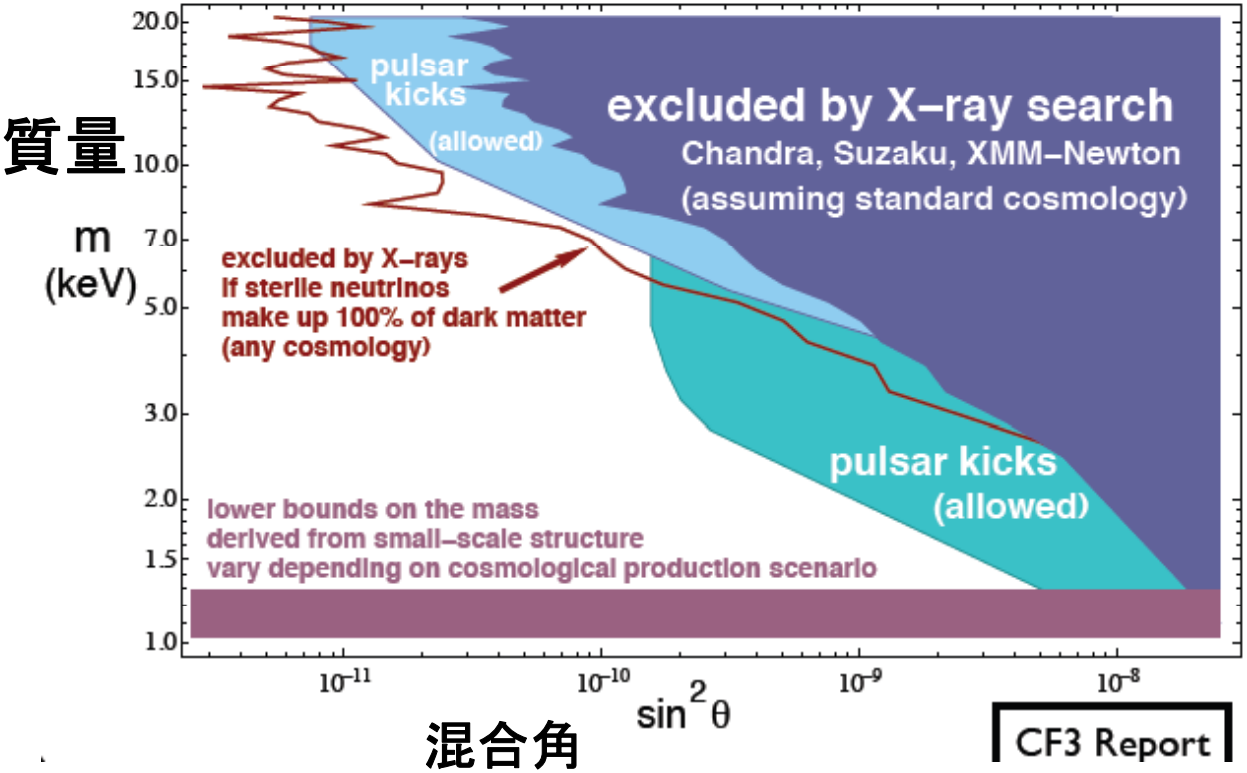
パートナーとなる電荷を持ったレプトンが無い、マヨラナ型のニュートリノ
ニュートリノ振動と関係、重力しか感じない、標準モデルに便宜的に導入

- 中性子星誕生時にキックを与える？
- Chandraの線スペクトルの発見？
- ニュートリノ振動実験などから制限
- Planck の観測から制限



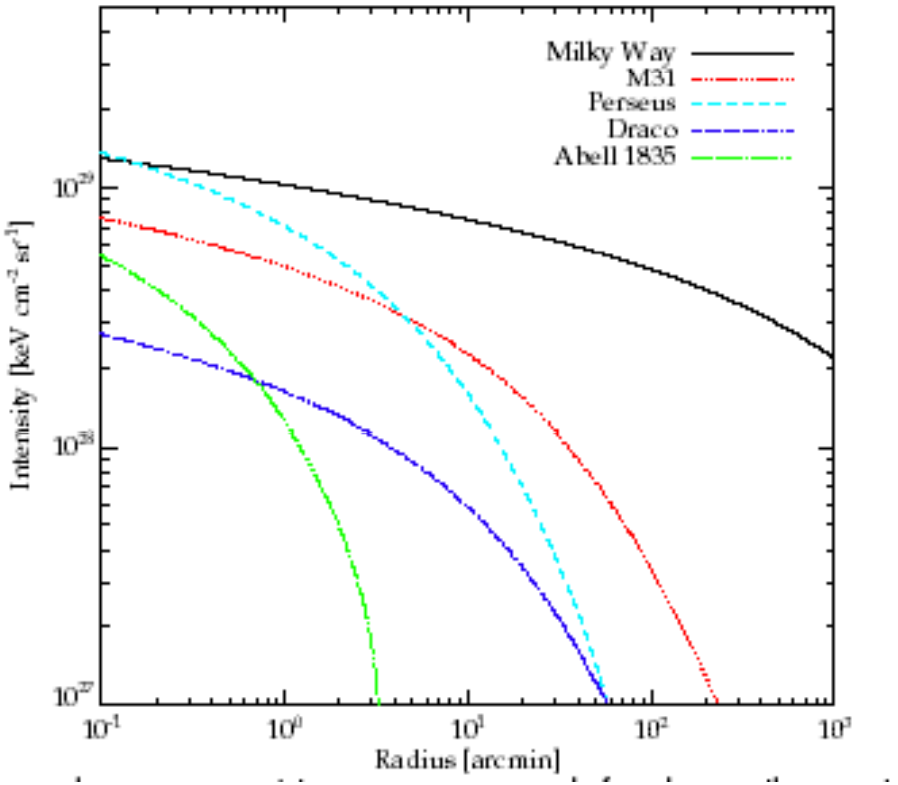
銀河周辺の矮小銀河
がCDMの予想より少ない

Boyarsky+13, 1306.4945

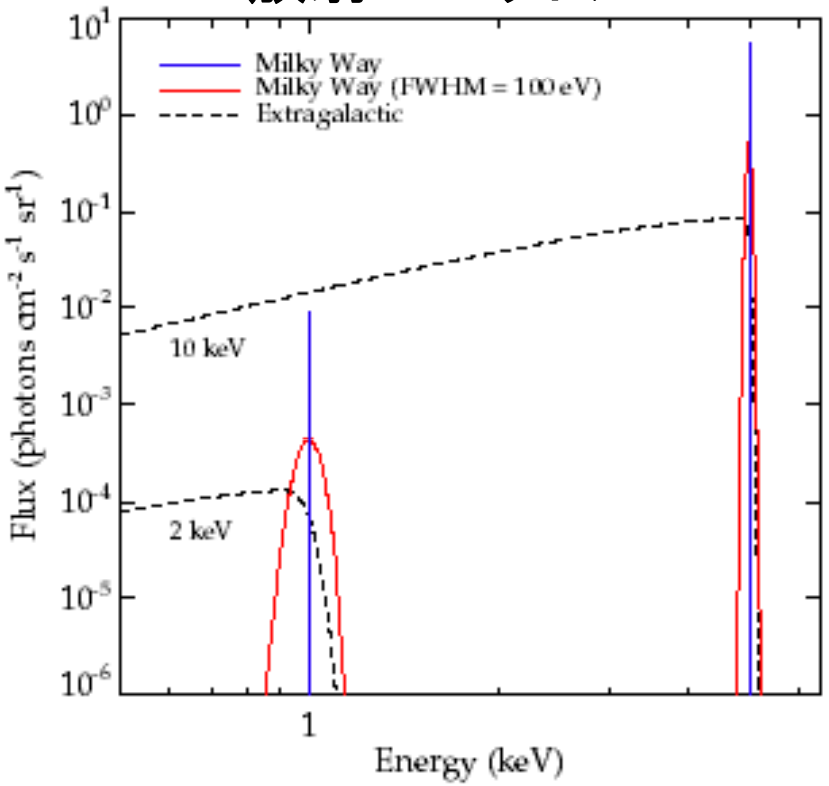


ASTRO-H SXSの高分解能によって、より強く制限できるだろう

放射の半径分布



放射スペクトル



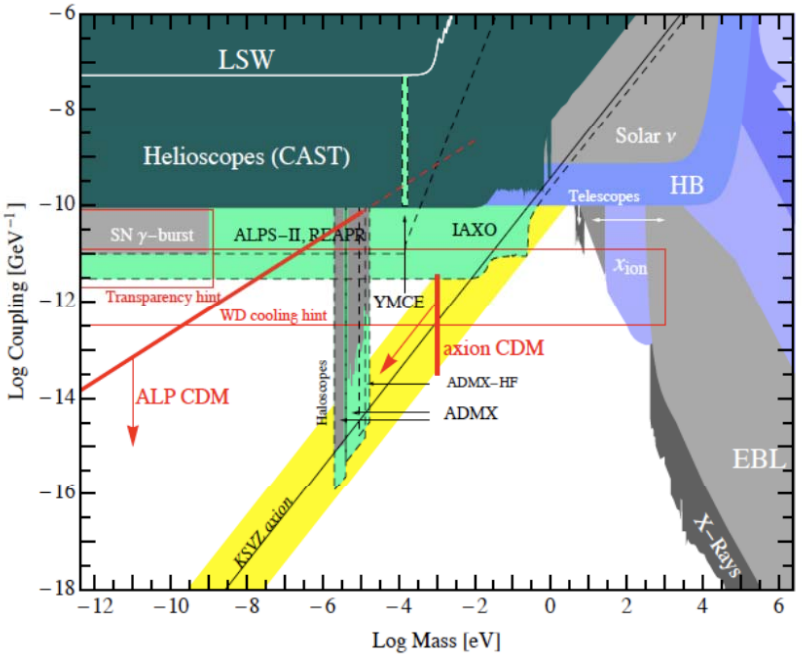
ASTRO-H team,
following Abazajian+01, ApJ 562, 593

Axion

CP非保存に関係する粒子
もともとのPQ-axionは否定されたが、その派生であるaxion-like particle (ALP)が現在では主流
光子や巨視的な磁場と結合する

X線ガンマ線による制限

TeV-blazar 吸収 Meyer+13, 1310.2058 など
X線銀河団 中の点源のスペクトル変形
Meyer+12, 1211.6408, Wouters+13, ApJ 772, 44など
銀河団軟X線超過 Angus+13. 1312.3947など



Graham & Rajendran 2013

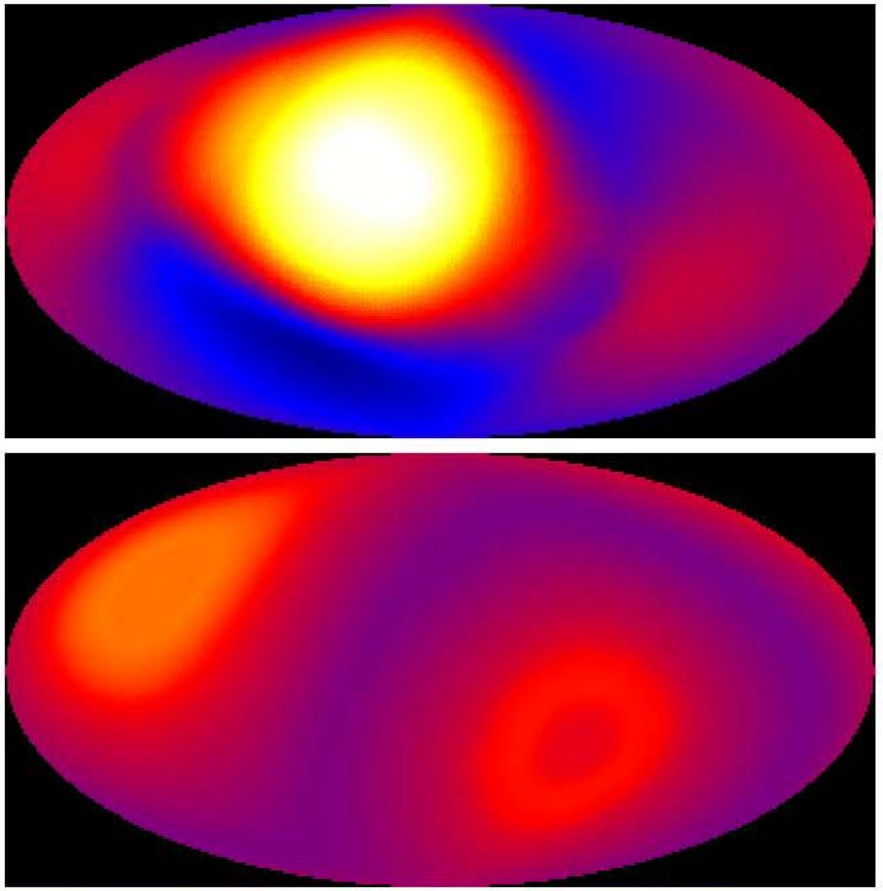
5. 今後のガンマ線観測

フェルミ衛星

全天サーベイ方法の変更

2014年の1年間だけ試しに行う
（2014年12月5日よりスタート）

銀河中心に重きを置いた
サーベイ
（ダークマターライン探査、パルサー探査の効率が向上）



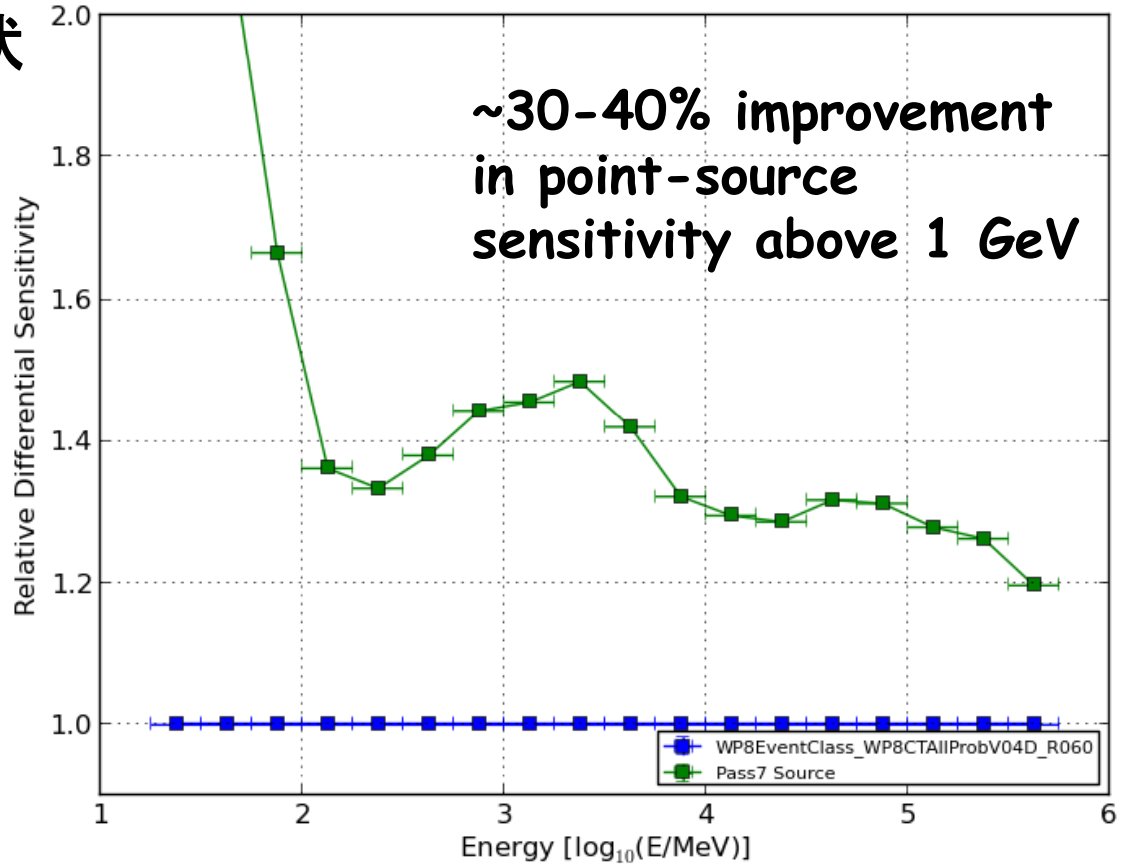
現状の
全天サーベイ

フェルミ衛星

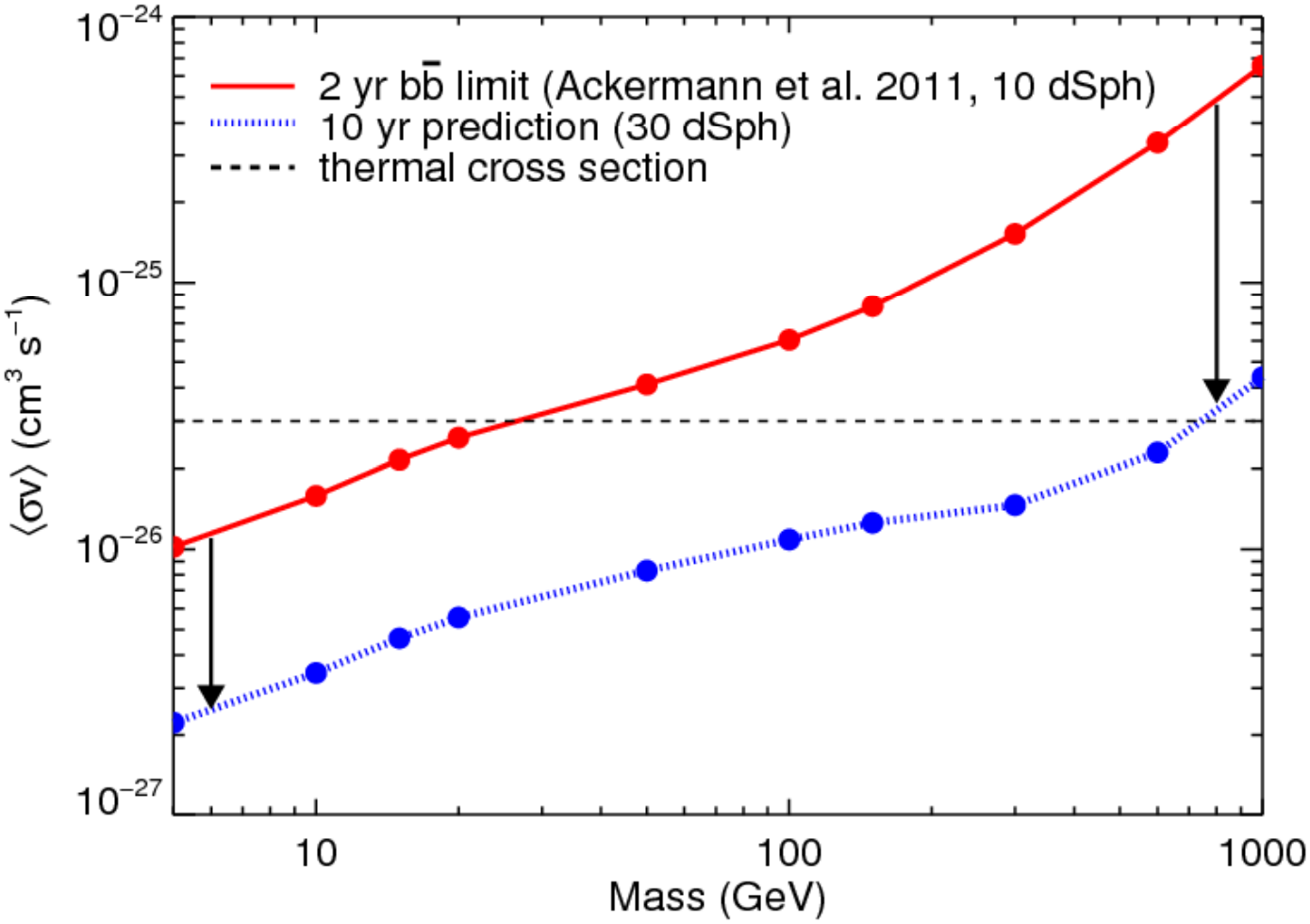
イベント再構成の改良によるSensitivity
の向上：2014年以降　データ解析可能に

今後

現状

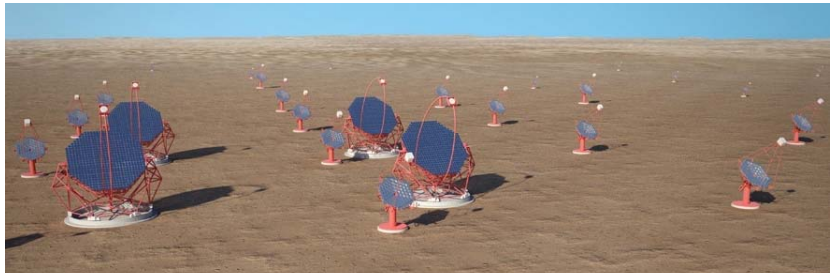


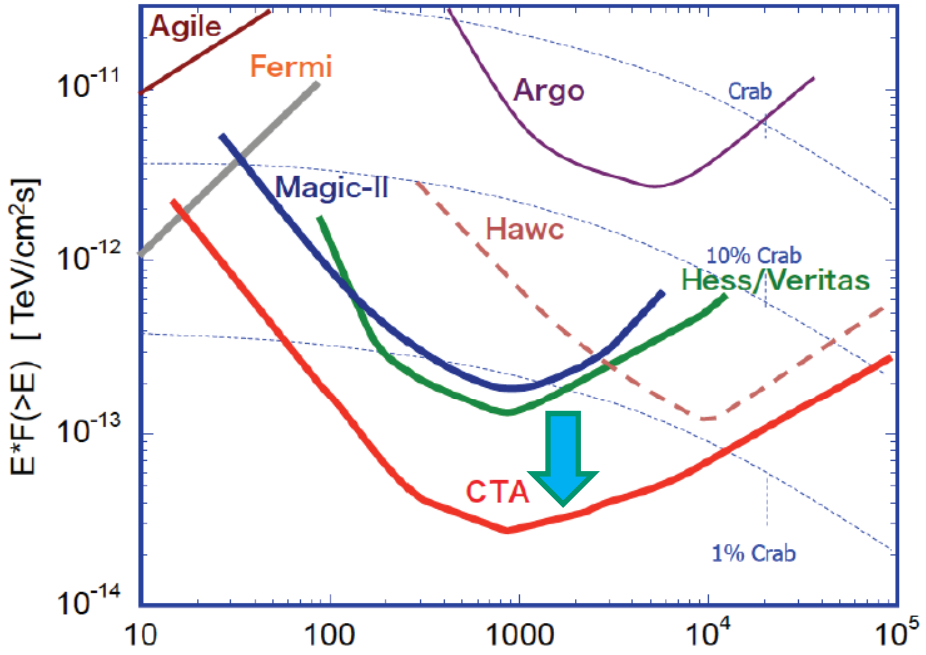
フェルミ衛星によるダークマターからのガンマ線探査の今後の制限



大気チェレンコフ望遠鏡による超高エネルギーγ線観測

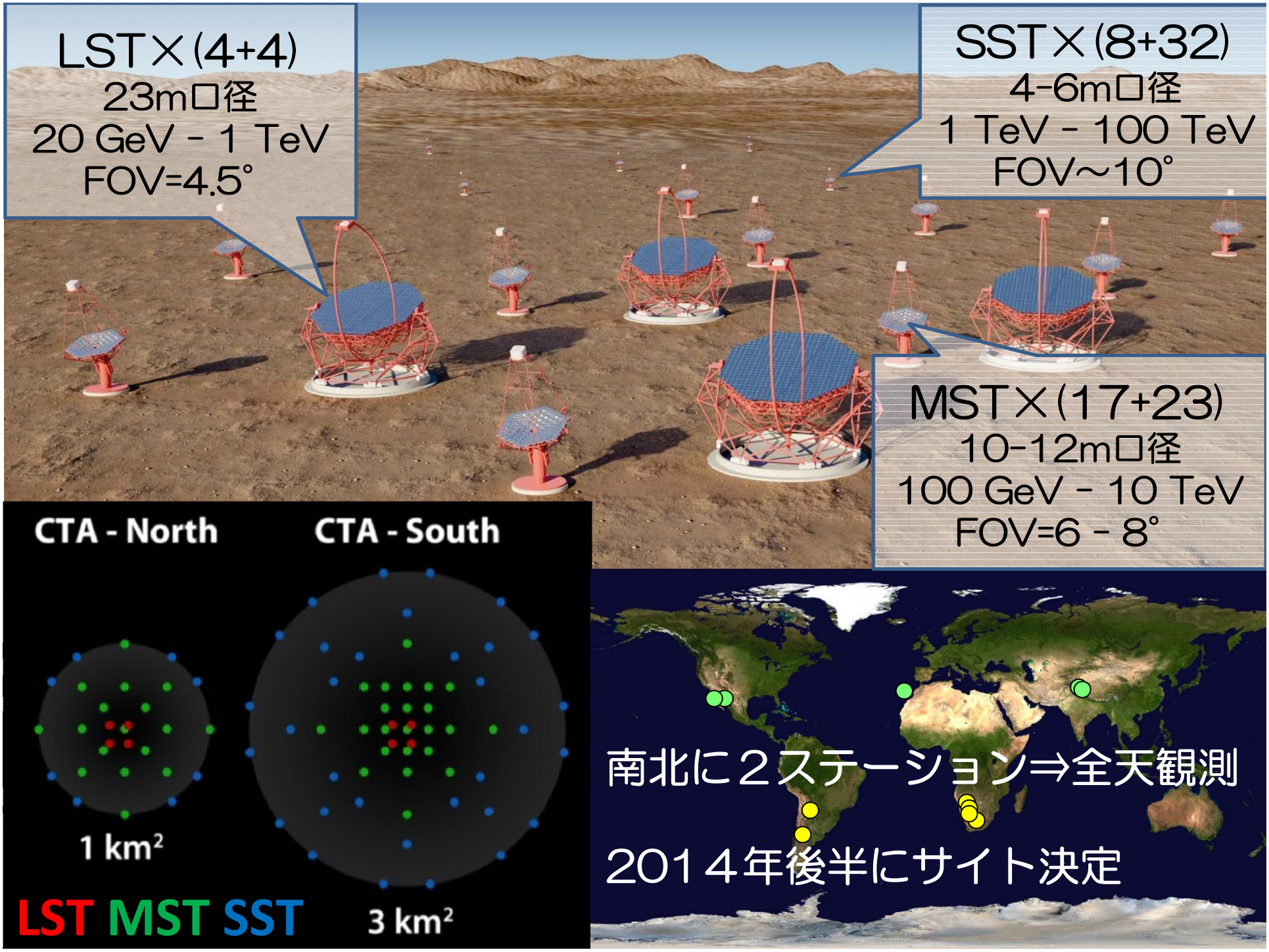
Cherenkov Telescope Array (CTA)計画



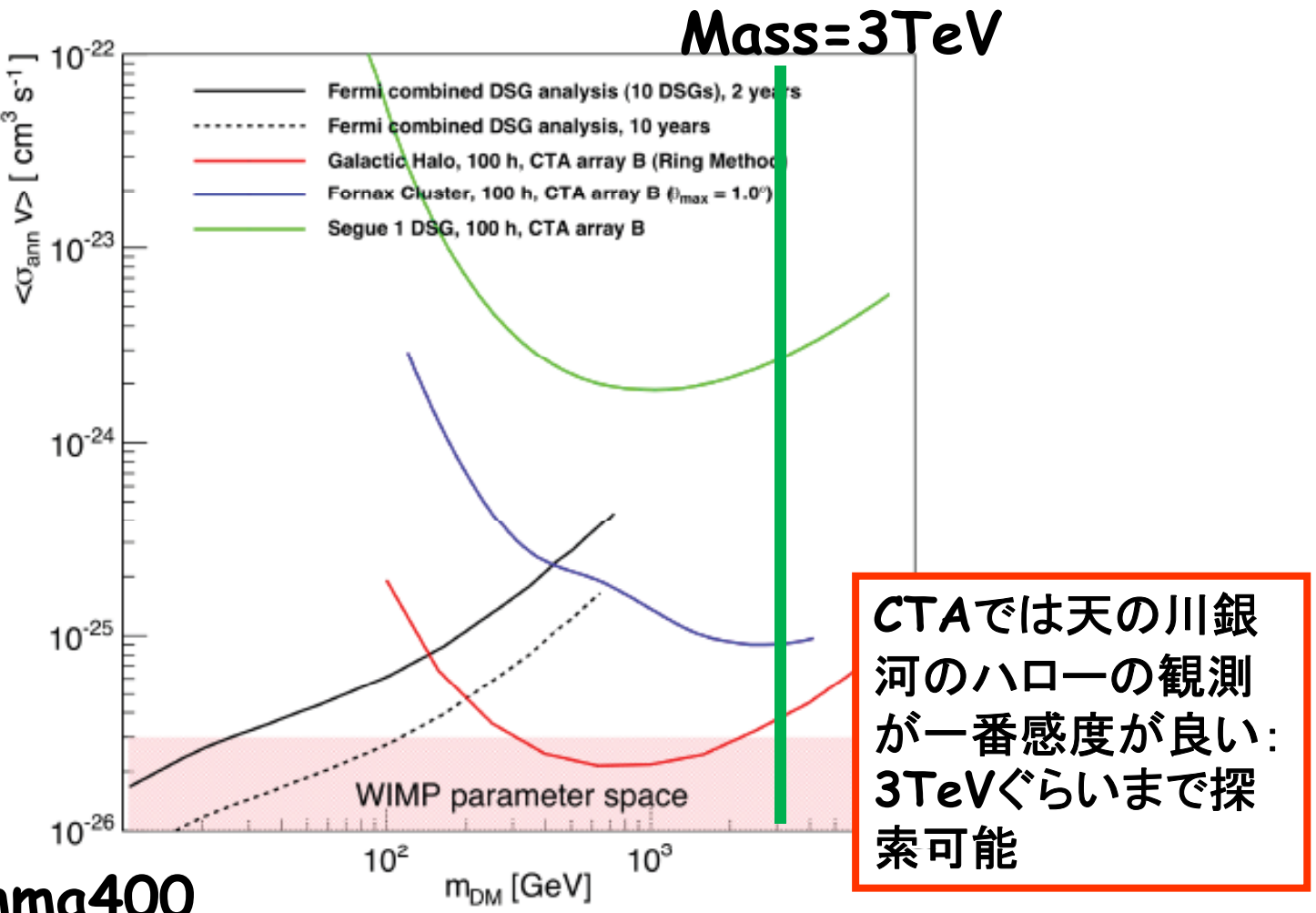


- ◆一桁高い感度
- ◆広帯域化(20GeV-100TeV以上)
- ◆角度分解能3倍(2分@1TeV)

>1000個のソース検出期待


LST×(4+4)
23m口径
20 GeV – 1 TeV
FOV=4.5°
SST×(8+32)
4-6m口径
1 TeV – 100 TeV
FOV～10°
MST×(17+23)
10-12m口径
100 GeV – 10 TeV
FOV=6 – 8°
CTA - North
CTA - South
1 km²
3 km²
LST MST SST
南北に２ステーション⇒全天観測
２０１４年後半にサイト決定

フェルミ衛星の10年間 + CTA：矮小銀河の観測



CTAでは天の川銀河のハローの観測が一番感度が良い：3TeVぐらいまで探索可能

CTA collaboration, Astropart.Phys. 43 (2013) 189-214, arXiv:1208.5356

2020? Gamma400

MeV?