

SMILE-3

Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiments

高田 淳史 (京大理)

MeVガンマ線天文学

◆ 元素合成

SNR : 放射性同位体

銀河面 : ^{26}Al ・電子陽電子対消滅線

◆ 粒子加速

ジェット (AGN) :

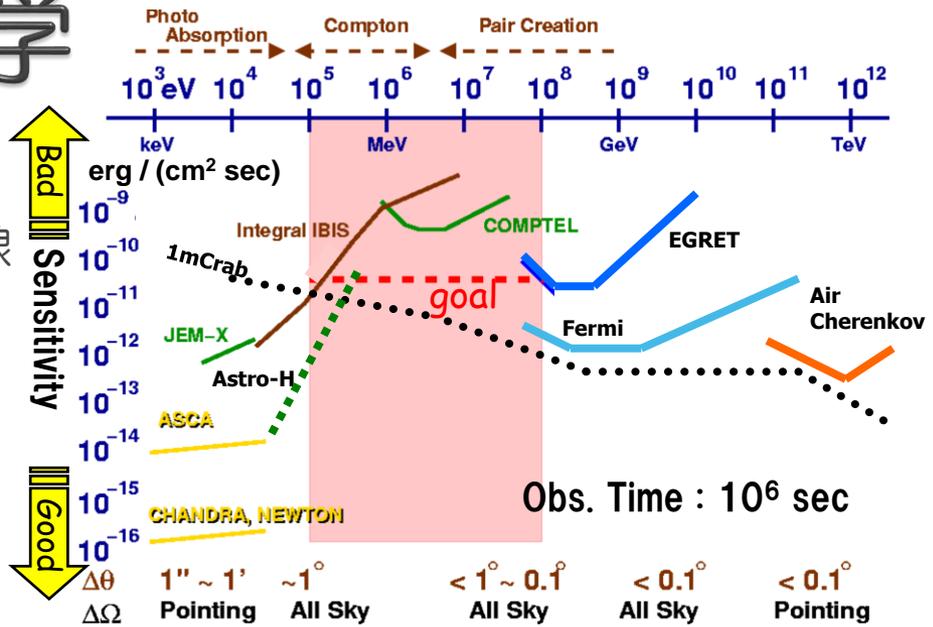
シンクロトロン + 逆コンプトン

◆ 強い重力場

Black hole : 降着円盤, π^0

◆ Etc.

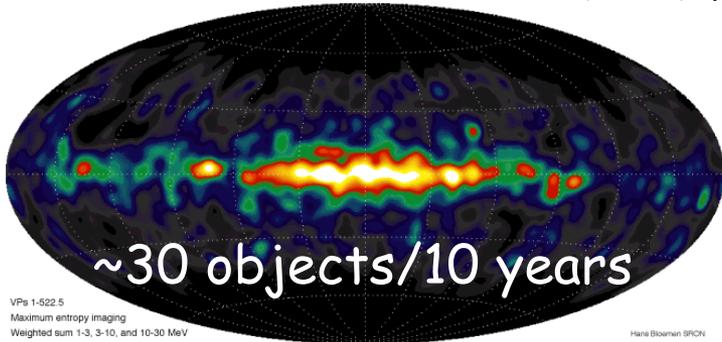
ガンマ線パルサー, 太陽フレア



MeV sky map

1-30 MeV

CGRO/COMPTEL



VPs 1-522.5
Maximum entropy imaging
Weighted sum 1-3, 3-10, and 10-30 MeV

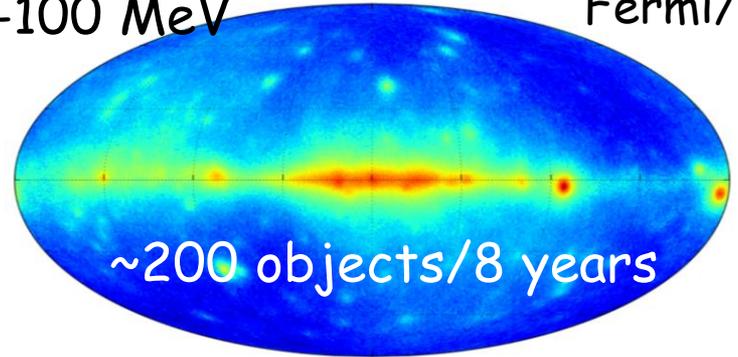
Hans Bloeman SRON

V. Schönfelder+ (A&AS, 2000)

Sub-GeV sky map

30-100 MeV

Fermi/LAT

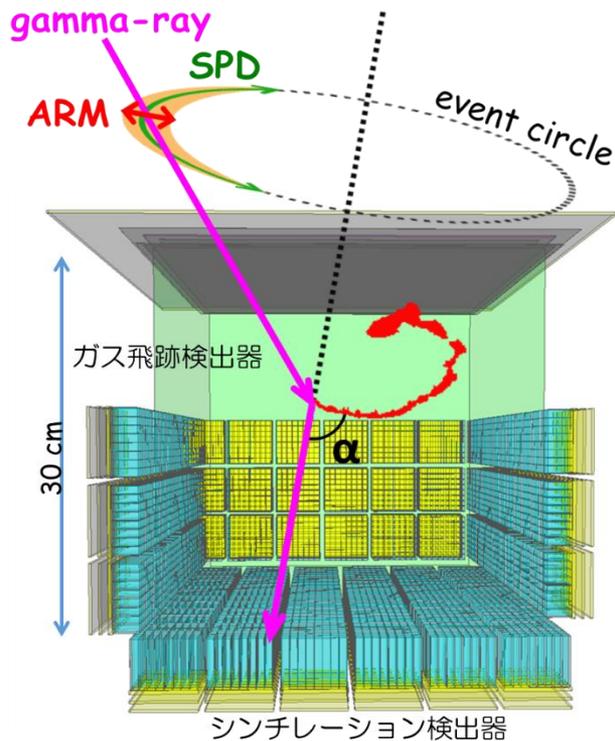


G. Principe+ (A&A, 2018)

次世代MeVガンマ線望遠鏡への要請

- 数百keV ~ 100 MeVの広帯域
- 全天探査の為に広い視野
- 高S/Nの鮮明な画像

電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (ETCC)

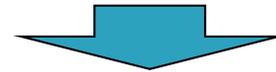


➤ ガス飛跡検出器

コンプトン反跳電子の
飛跡とエネルギー

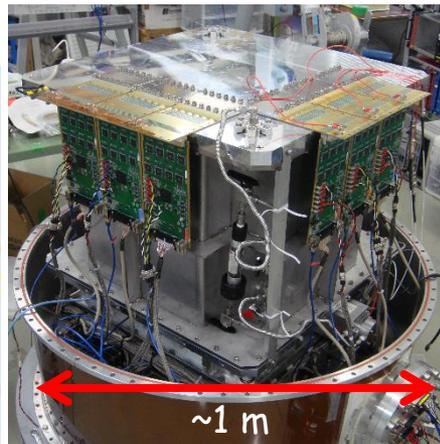
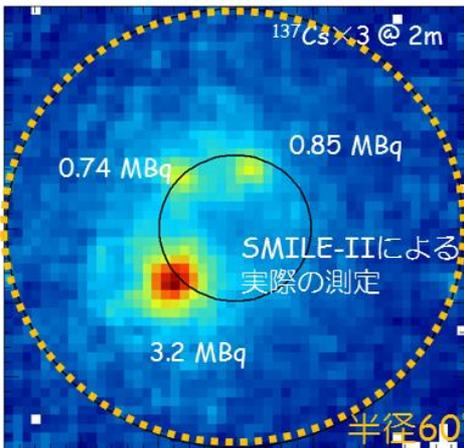
➤ ピクセルシンチレータアレイ

コンプトン散乱ガンマ線の
吸収点とエネルギー



検出事象ごとに
コンプトン散乱を完全に再現

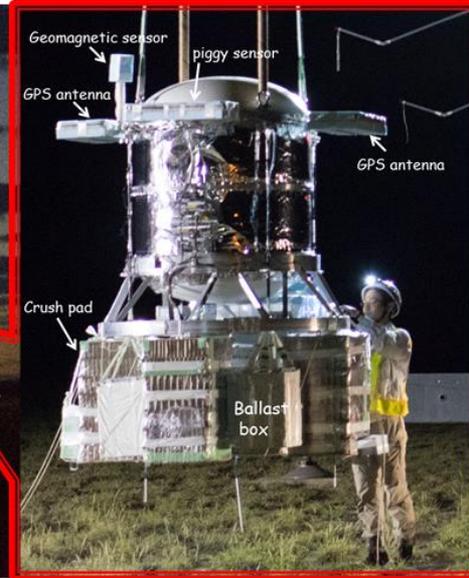
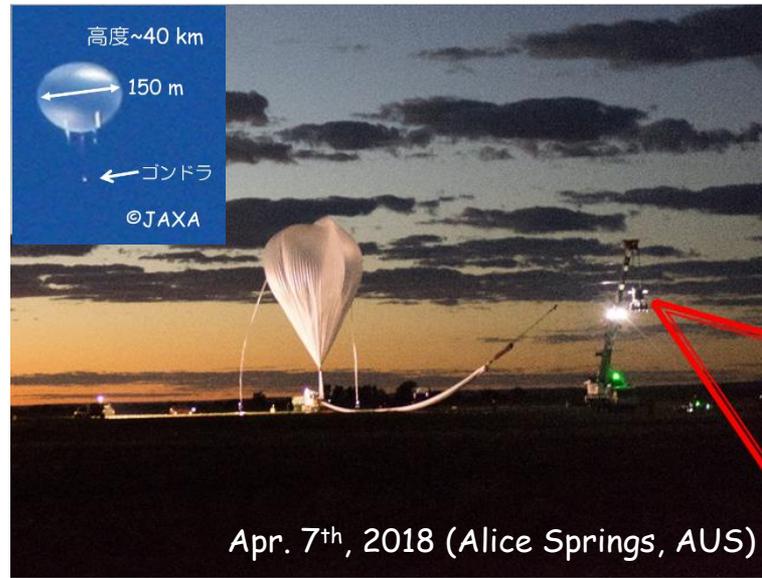
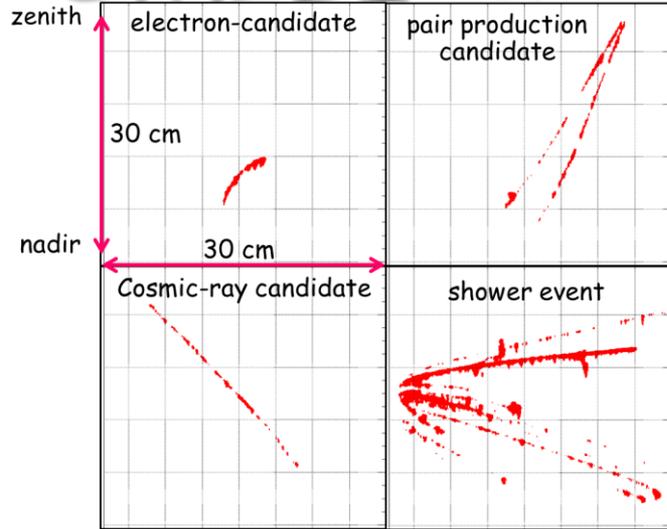
GSOシンチレータ



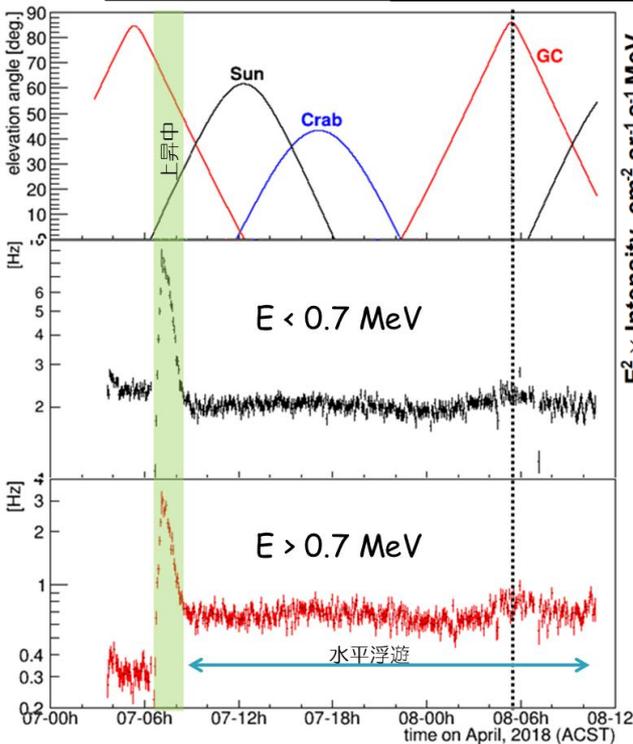
SMILE-2+ ETCC

- ▶ 到来方向とエネルギーを一意に特定
- ▶ 大きな視野 (~3 sr)
- ▶ 電子飛跡による鋭いPSF
 - ⇒ 範囲外の雑音をイメージングで除去
- ▶ α 角によるコンプトン散乱運動学テストと dE/dx による粒子識別による雑音除去能力
 - ⇒ 重いVETO検出器が不要

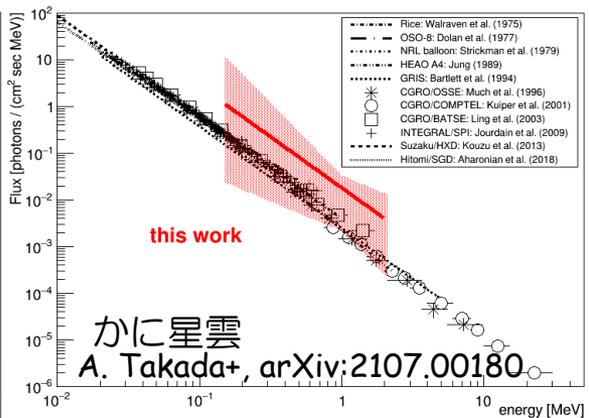
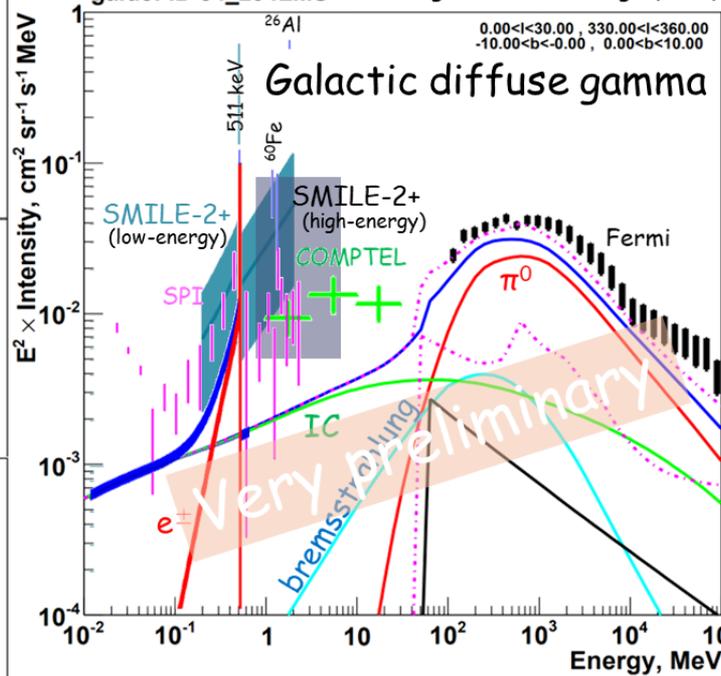
SMILE-2+



Apr. 7th, 2018 (Alice Springs, AUS)



galdef ID 54_z04LMS Adding to A. W. Strong+ (2011)



かに星雲
A. Takada+, arXiv:2107.00180

観測データから
銀河中心領域・かに星雲
を検出
他観測と無矛盾な結果

Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiments

✓ SMILE-I (2006年, 三陸, 4h)

- 宇宙拡散/大気ガンマ線の観測
- dE/dxを用いたBG除去

有効面積 1 mm²
Xe + Ar 1 atm

A. Takada+, ApJ (2011)

✓ SMILE-2+ (2018年, Alice Springs, 26h)

- 銀河中心領域 (~10 σ), かに星雲 (~4 σ)を検出
- 単純なON-OFF法でスペクトル取得

有効面積 1 cm²
Ar 2 atm

T. Tanimori+, J. Phys CS (2020)
A. Takada+, arXiv:2107.00180



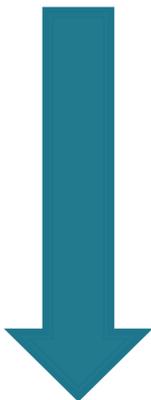
Now

➤ SMILE-3

有効面積 5~10 cm²
CF₄-base 3 atm

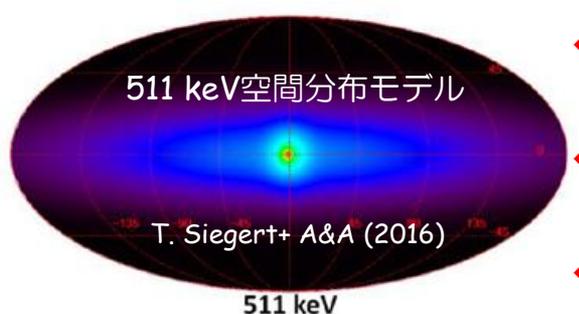
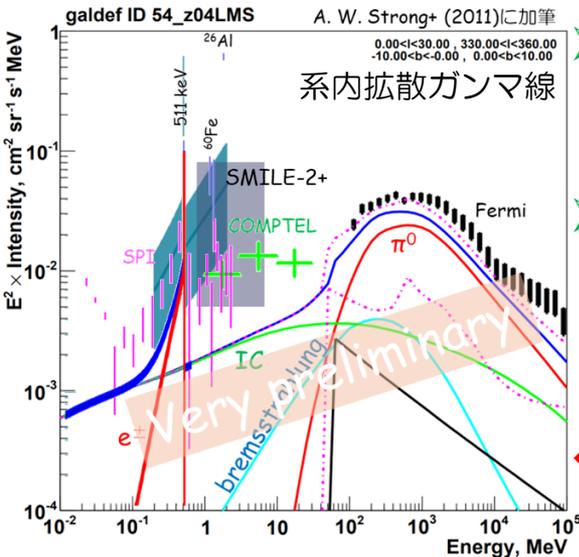
- 長時間気球を用いた科学観測
 - 銀河中心領域 ⇒ e[±]対消滅線・系内拡散ガンマ線
 - 銀河面 ⇒ ²⁶Al・⁶⁰Fe
 - 高銀緯領域 ⇒ 系外拡散ガンマ線・GRB
 - かに星雲・Cyg X-1・CenA・新天体探査
- 数年に1度程度の頻度で複数回の気球観測
 - SPB/flight ~5.16 M USD
 - (100%日本の研究で、且つ回収できたとして)

南半球：
SPB @ 中緯度
ZPB @ 南極 (NASA)
ZPB @ 中緯度 (JAXA)
北半球：
ZPB @ 中緯度 (NASA)
ZPB @ 高緯度 (SSC, NASA)



➤ SMILE衛星

銀河系内拡散ガンマ線とその起源



MeV帯域での連続成分

- ICで期待されるよりも強い
- MeVに特徴的な放射の存在

電子陽電子対消滅線

- 陽電子の起源は不明
- 空間分布モデルは他波長と異なる



暗黒物質

軽いWIMPの対消滅・崩壊
 ⇒ 電子・陽電子・ガンマ線

原始ブラックホール

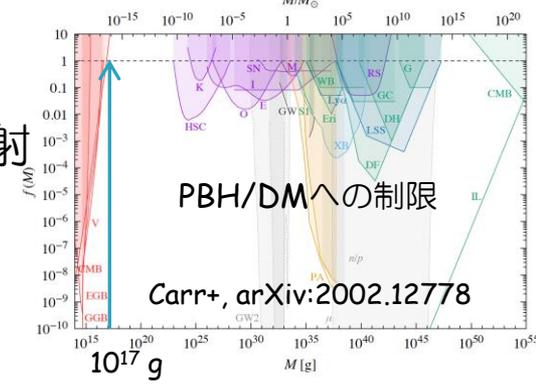
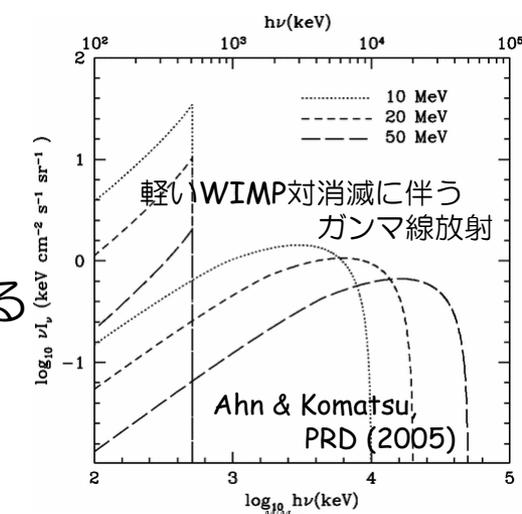
~10¹⁷g ⇒ ~MeVでHawking放射

天体の集合

MeV放射を持つ天体種族は不明

宇宙線と星間物質との相互作用

計算ではICよりも暗いはず



MeVガンマ線の空間分布は？

- DMの対消滅
- PBH, DMの崩壊
- 天体, CR-ISM

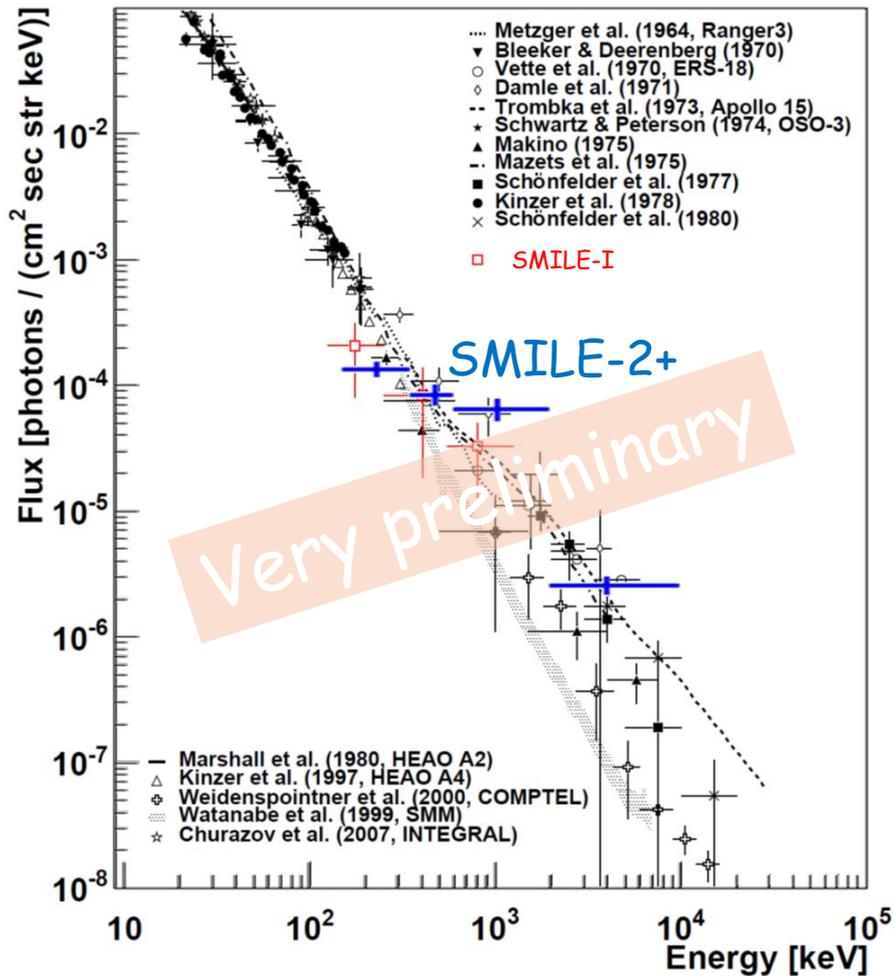
- ∝ 密度の二乗
- ∝ 密度
- 銀河面に集中

他の銀河でも
同様なはず

系外拡散ガンマ線の起源は？

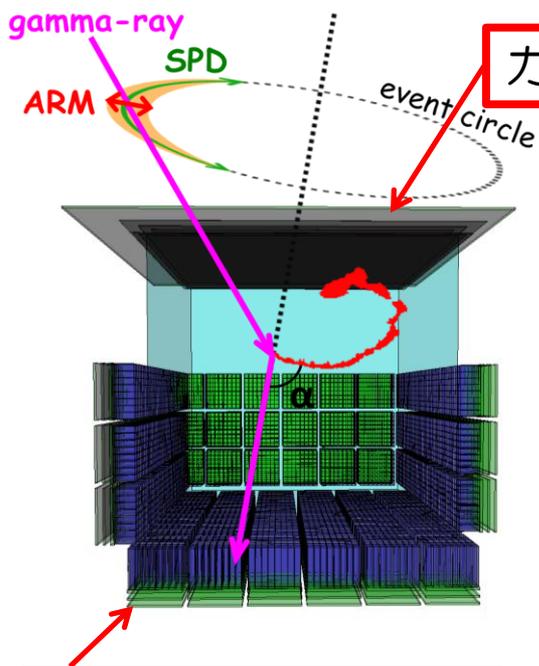
- AGN (Seyfert or FSRQ)
- 遠方のIa型SNe
- DM, PBH (近傍, 重い銀河)

系外拡散ガンマ線



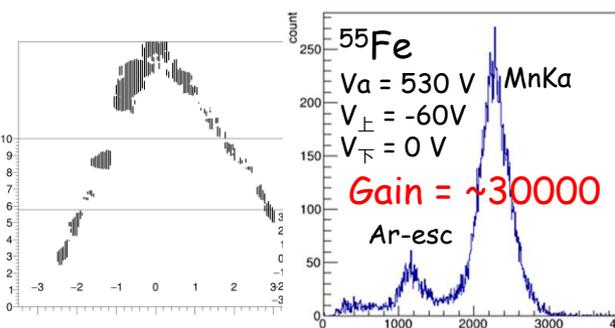
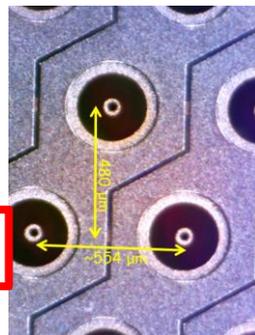
- MeVガンマ線領域でも
全天に広がる背景放射が存在
- 遠方銀河からの放射の重ね合わせ
⇒ **どんな銀河の何の放射かは不明**
 - 活動銀河核
 - Seyfert銀河 Inoue+ (2013)
 - Flat Spectrum Radio Quasars Ajello+ (2009)
 - 遠方銀河中のIa型超新星爆発
 - 暗黒物質
- 観測されたガンマ線強度は
大きな不定性が存在
⇒ 詳細なスペクトルが必要
- ~1カ月の長期気球で観測すれば
特別明るいものが
点源として検出される可能性あり
⇒ 同定できれば系外拡散ガンマ線の
起源に対する示唆が得られる

SMILE-3 ETCC



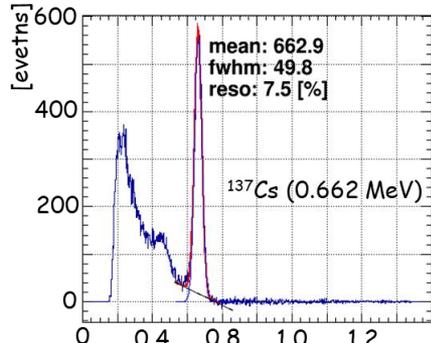
ガス飛跡検出器の改良

- 3軸読み出し μ -PIC
6 cm ϕ 試作品 \Rightarrow 単体でgain 30,000を達成 (必要gain ~ 20,000)
複雑な飛跡も3次元再構成可
 \Rightarrow 大型化に向け貼り合わせを検討中
- CF₄-base 3気圧
試験用の耐圧容器で試験中 \Rightarrow 電圧/ガス混合比などのパラメータを調査中
- ガス容器の再設計
容器の二重構造をやめ検出器を曝露



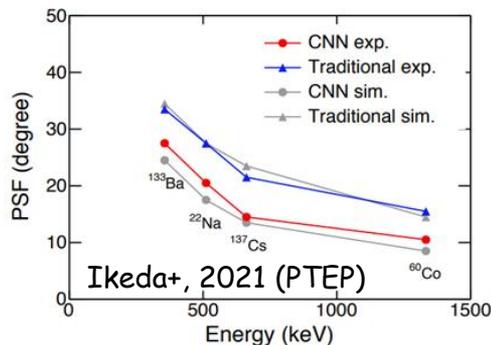
シンチレータの改良

- SiPMによる光読み出し
 \Rightarrow エネルギー分解能向上

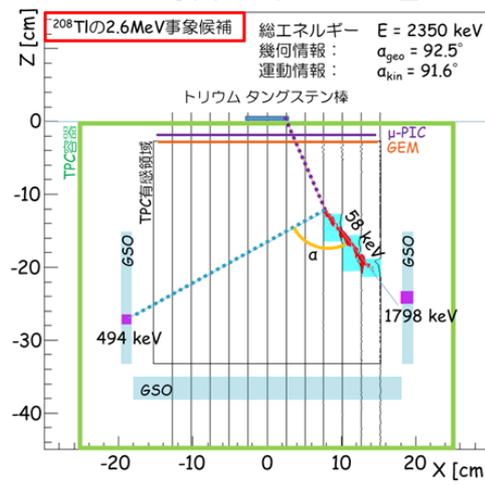


解析方法のupdate

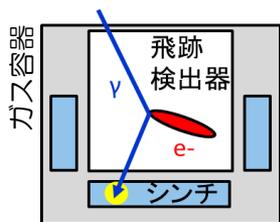
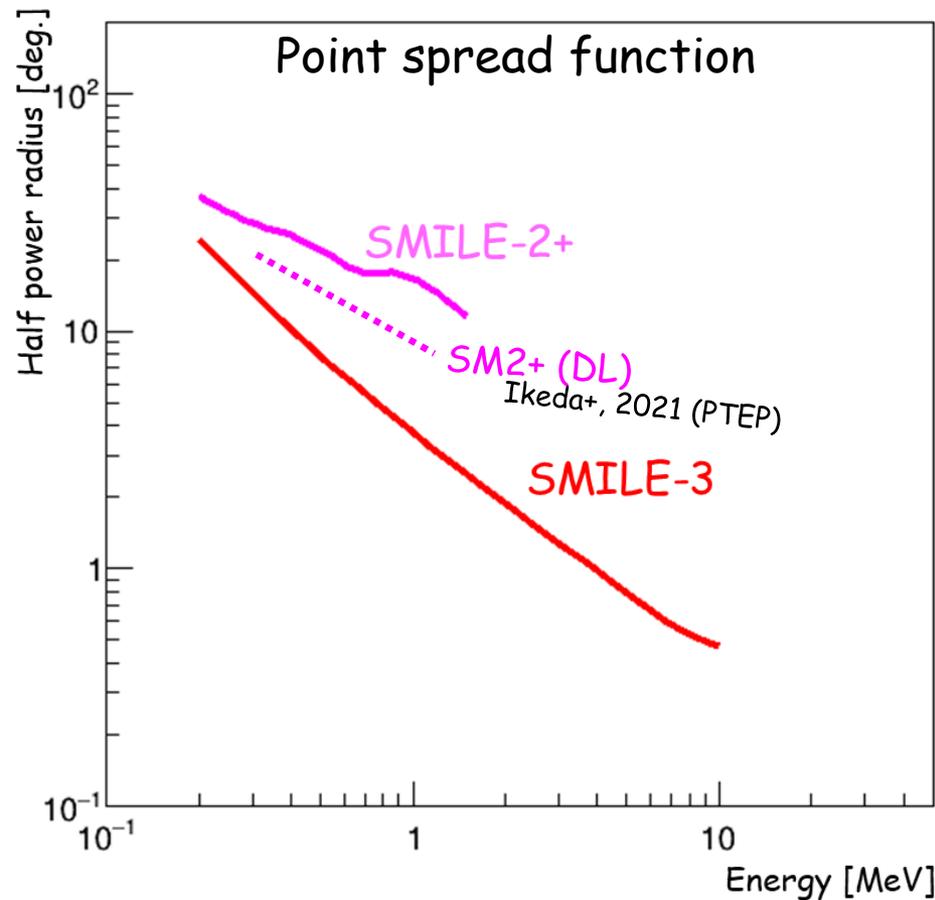
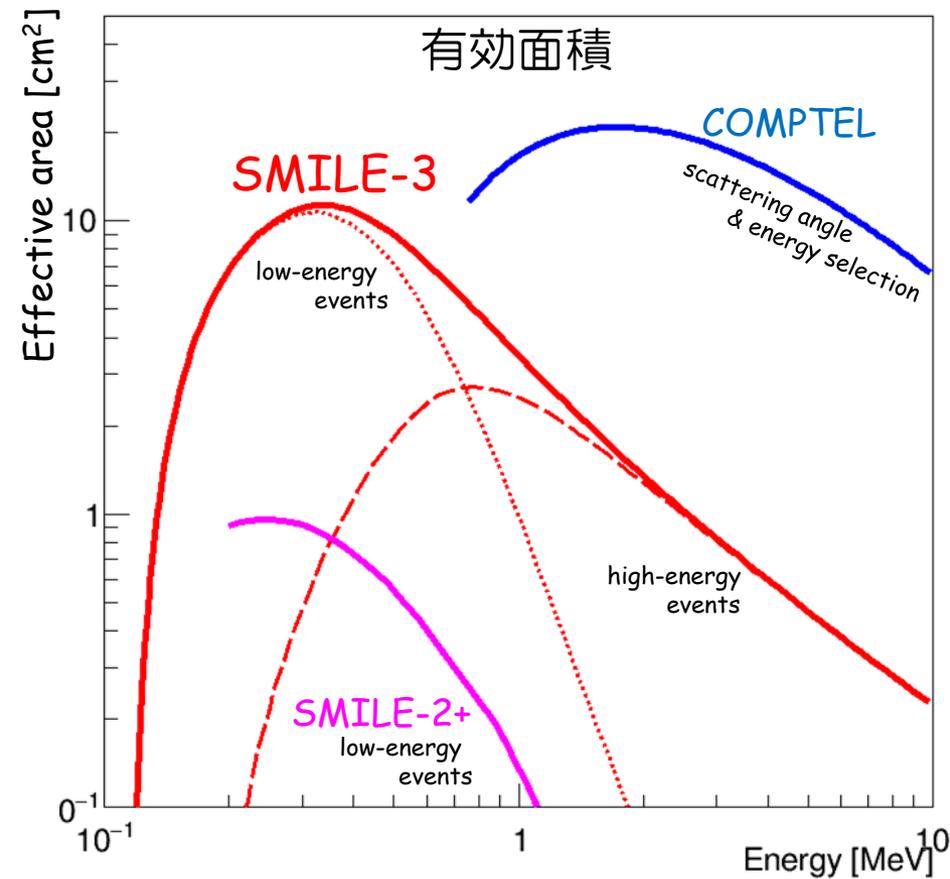
- 機械学習を用いた飛跡解析



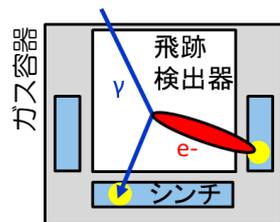
- 高energy事象の解析方法の確立



期待される有効面積と空間分解能



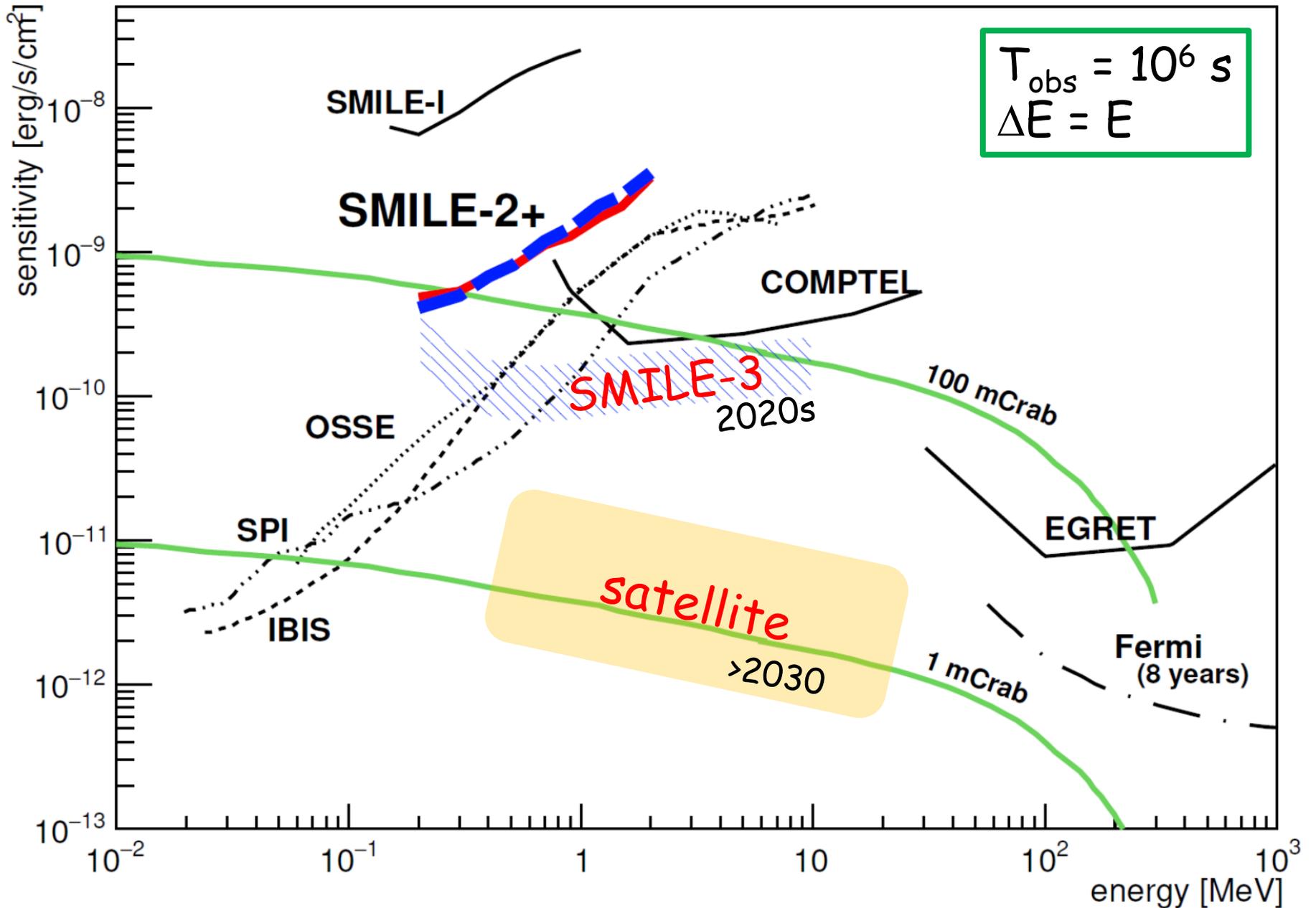
Low-energy event



High-energy event

Energy [MeV]	有効面積 [cm ²]	PSF [deg.]
0.3	10	13
0.5	9	8
2.0	1.3	2

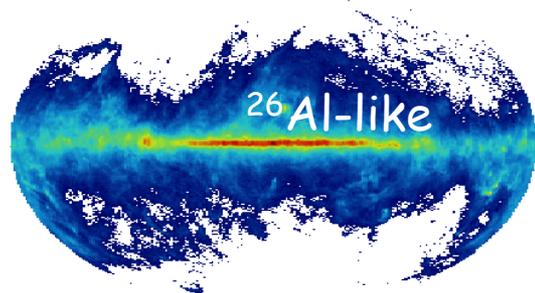
将来計画の予想検出感度



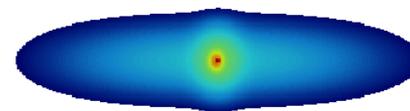
SMILE-3で期待される観測例

電子陽電子対消滅線

銀河面に広く分布？

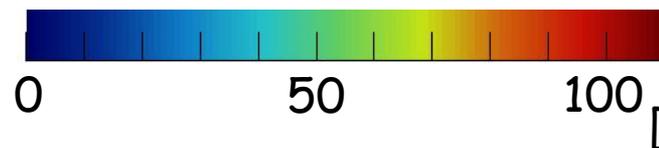
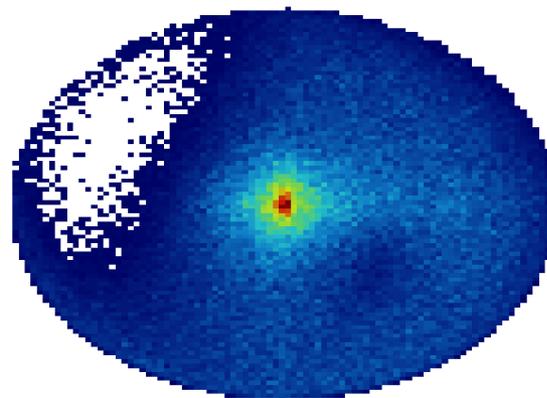
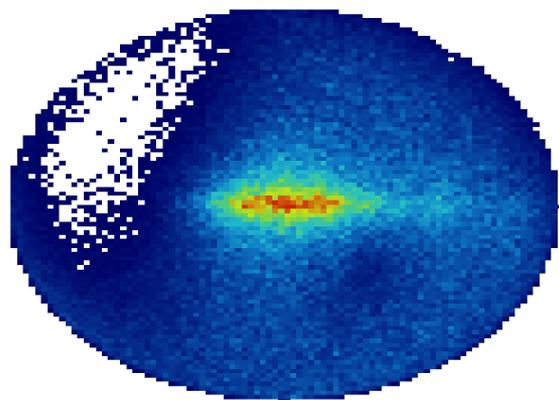


銀河中心領域十ハ口一的？



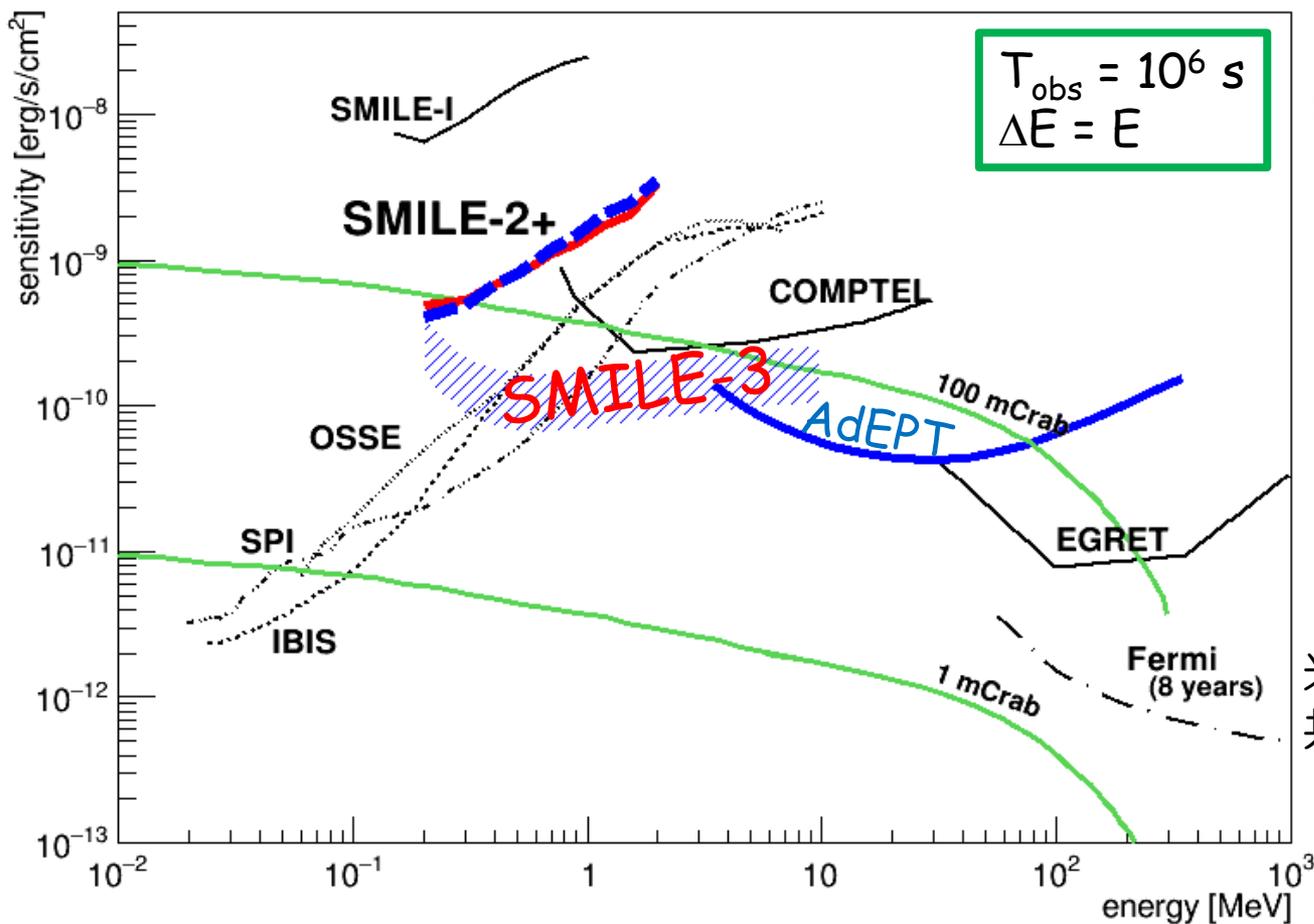
SPI/INTEGRAL
T. Siegert+, 2016

有効面積 $\sim 5 \text{ cm}^2 @ 0.5 \text{ MeV}$
空間分解能 $\sim 10 \text{ 度} @ 0.5 \text{ MeV}$
南半球の高度40 kmで30日間観測

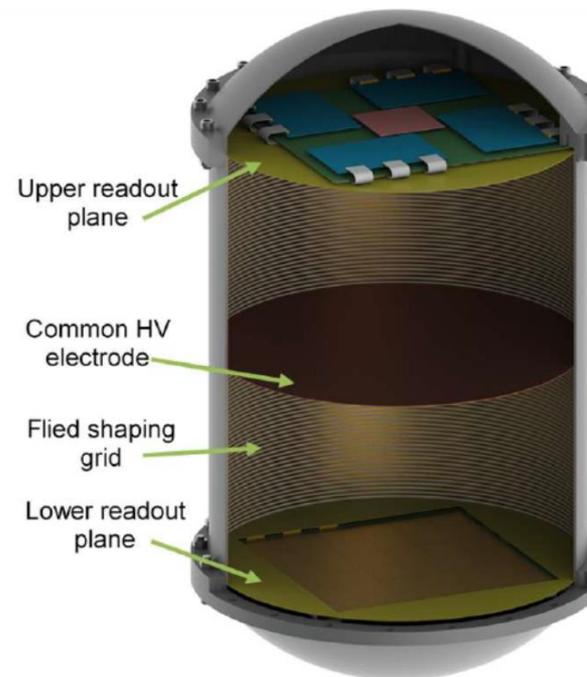


$3.6^\circ \times 1.8^\circ$ /pixel

With AdEPT

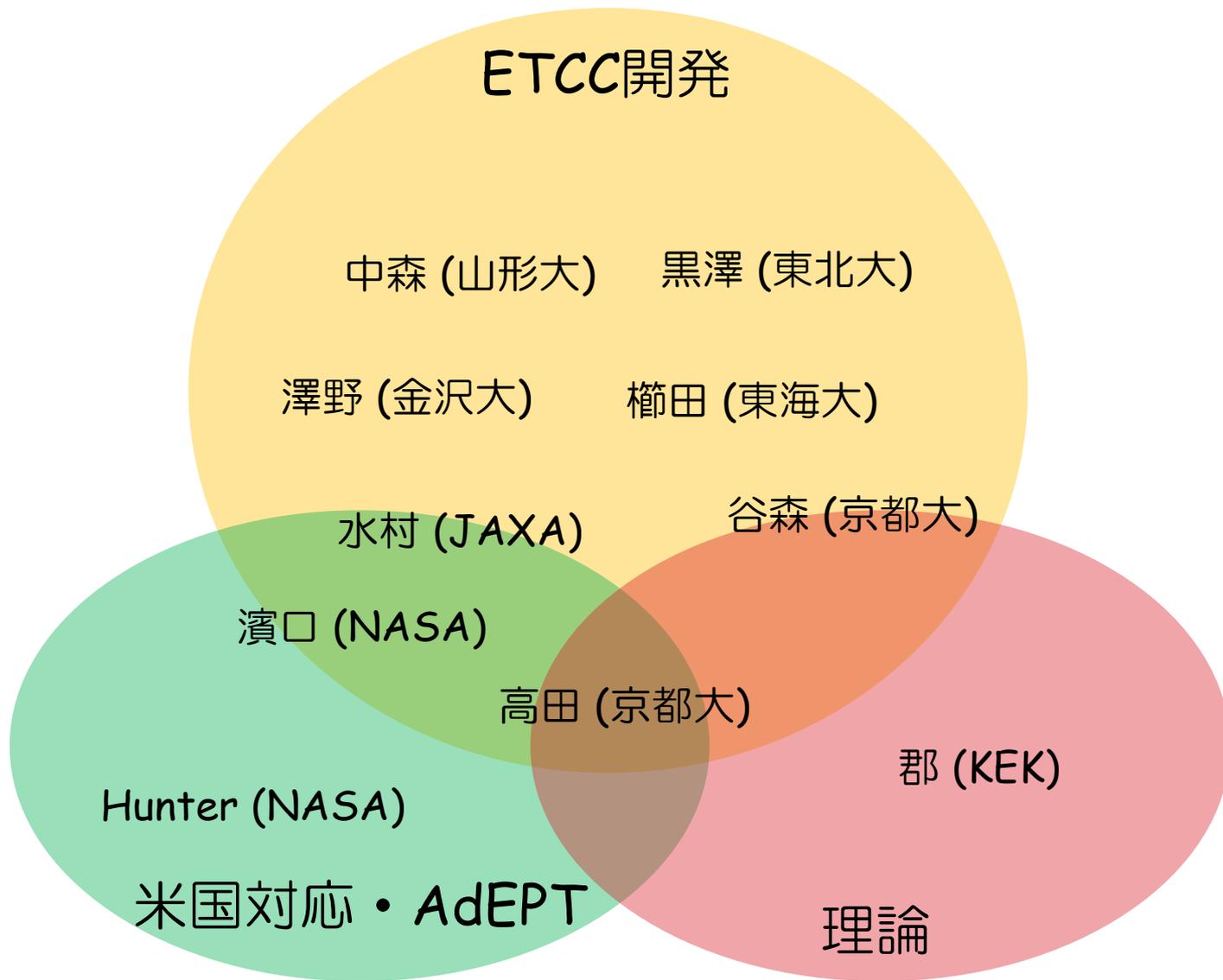


AdEPT TPC



米国のAdEPTグループとの
 共同気球実験を計画中

- Ft. Sumnerのtest flight
- 南半球中緯度SPB
or 極周回気球



Thank you for your attention!
<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp>

