



電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡と SMILE計画

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) :

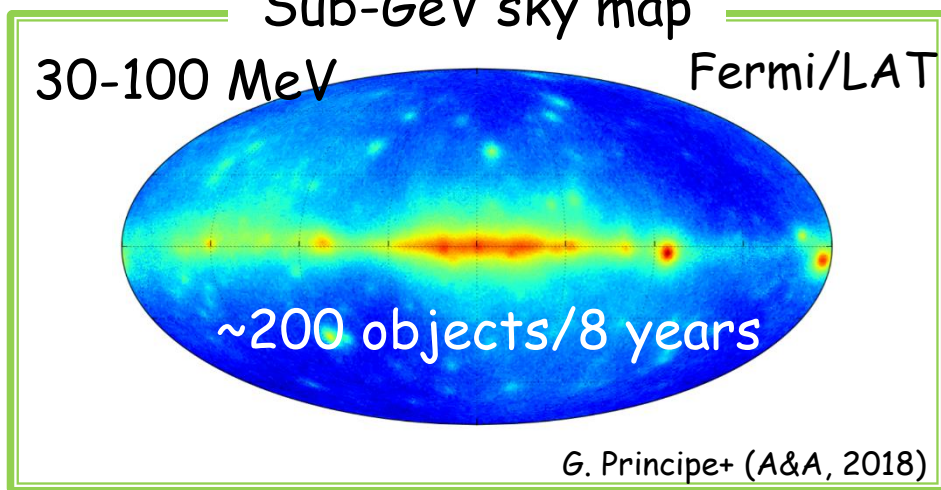
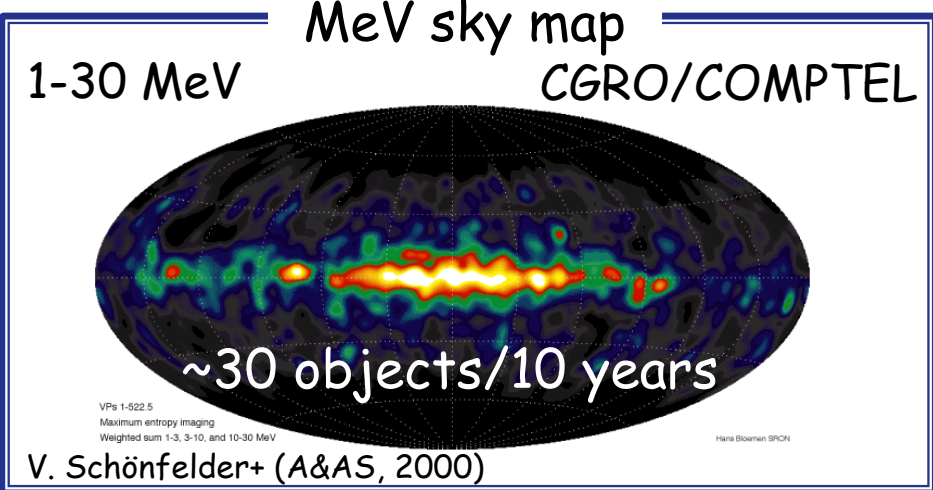
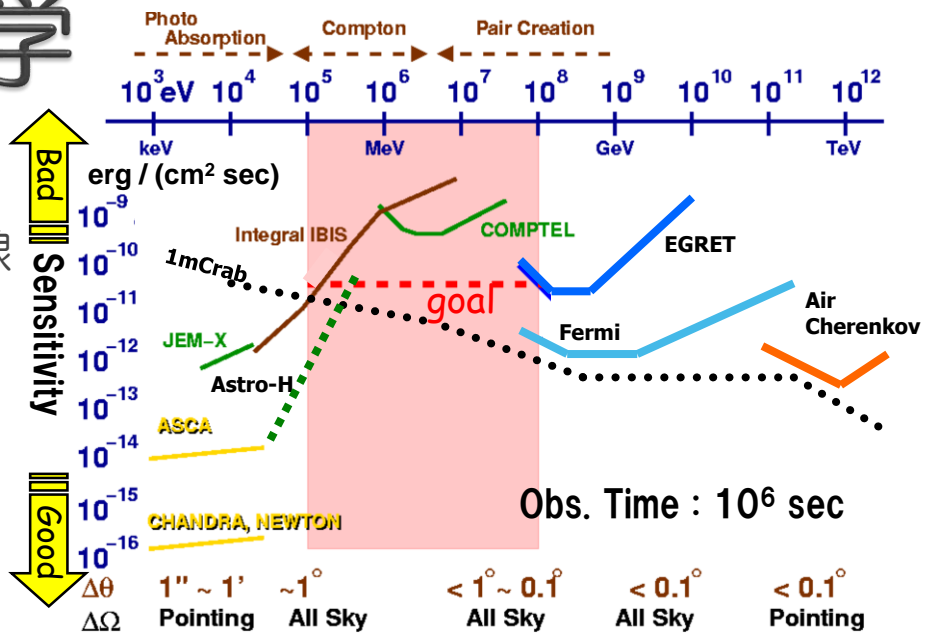
シンクロトロン + 逆コンプトン

◆ 強い重力場

Black hole : 降着円盤, π^0

◆ Etc.

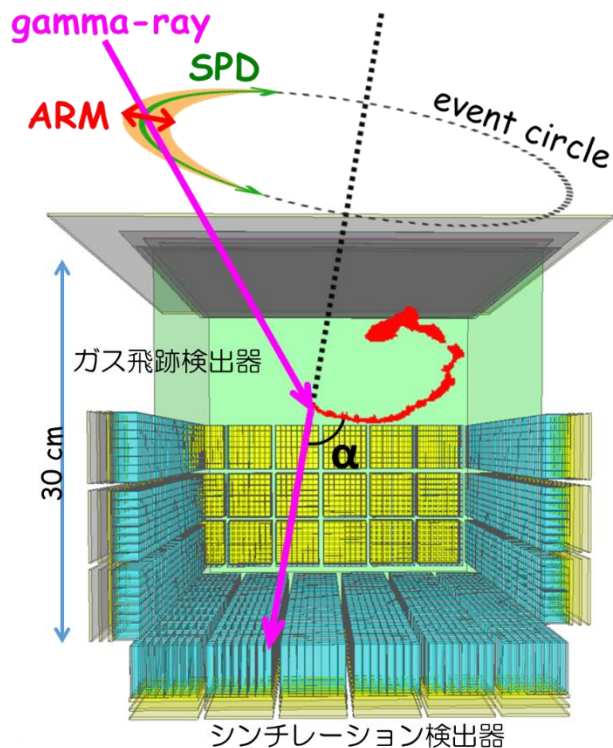
ガンマ線パルサー, 太陽フレア



次世代MeVガンマ線望遠鏡への要請

- 数百keV ~ 100 MeVの広帯域
- 全天探査の為の広い視野
- 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

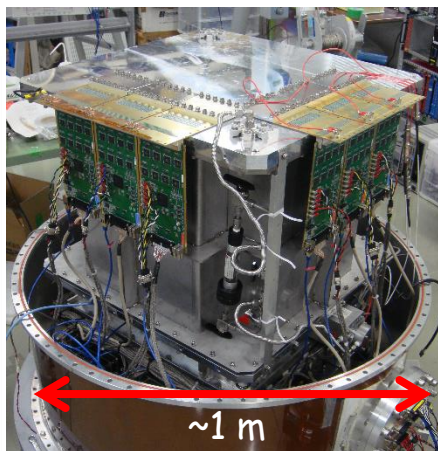
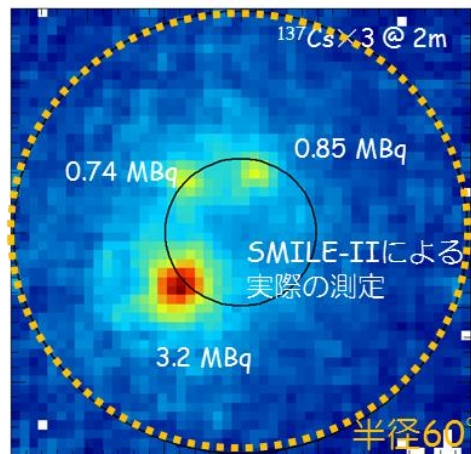
➤ ピクセルシンチレータアレイ

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

荷電粒子の飛跡

検出器
上面

30 cm

検出器
底面

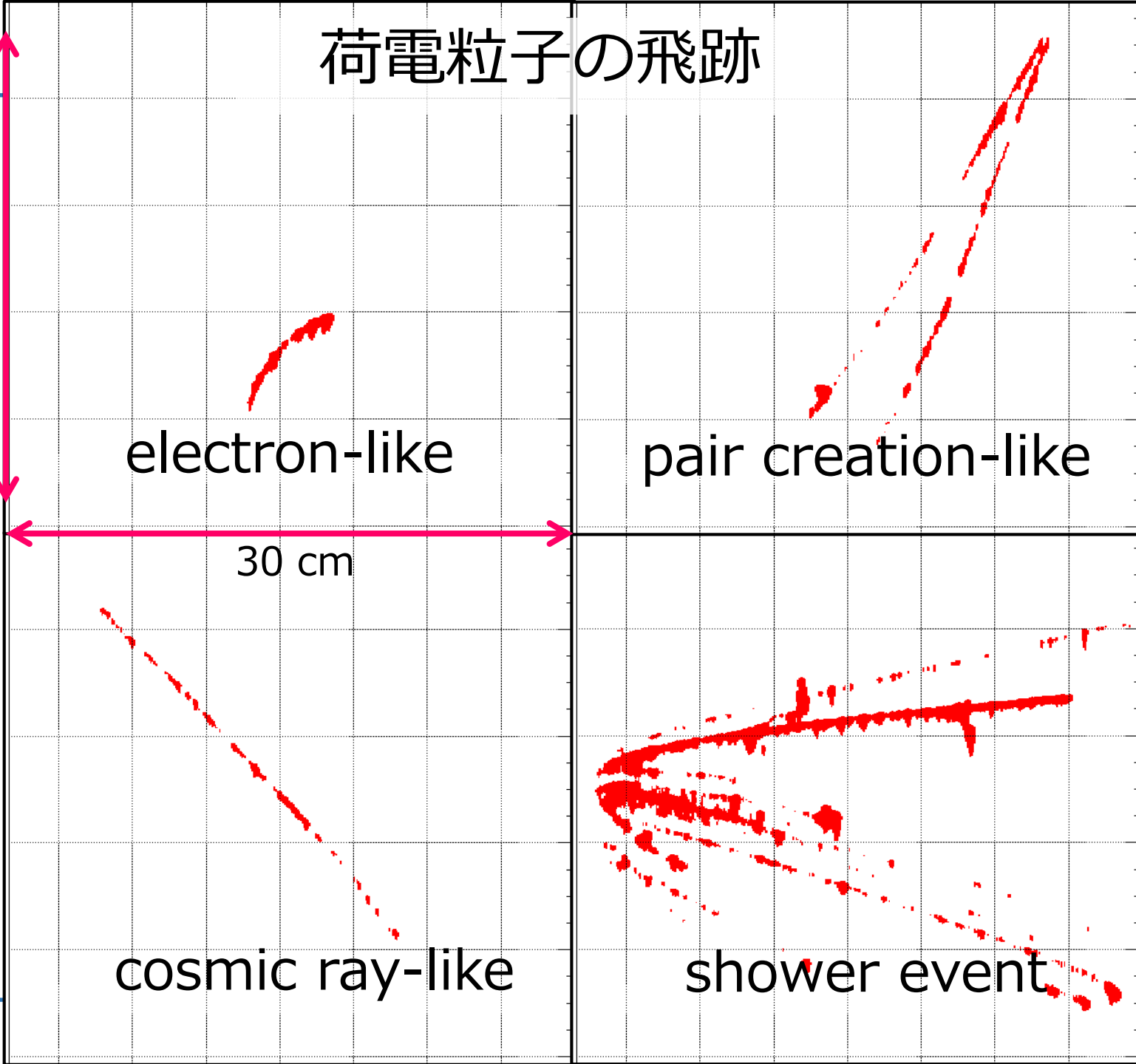
electron-like

pair creation-like

30 cm

cosmic ray-like

shower event



SMILE

Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment

SMILE-I @ 三陸 (Sep. 1st 2006)

- 宇宙拡散・大気ガンマ線の観測 (0.1 ~ 1MeV)
- dE/dXによるバックグラウンド除去の成功

A. Takada+. ApJ,2011

SMILE-II: 地上試験のみ T. Tanimori+. ApJ,2015

SMILE-2+ 1-day flight @ Alice Springs (Apr. 7th 2018)

- MeVガンマ線天文学におけるイメージングの確立
- 明るい天体(かに星雲と銀河中心)のイメージング

Requirement

Effective area

~1 cm²

(detect 5σ) PSF (50% included) ^{radius} ~ 25 deg @ 662 keV

Now!!

SMILE-3

- 長時間気球を用いた科学観測
- COMPTELの感度を上回る望遠鏡で数回放球

人工衛星による全天観測 ~ sub-mCrab sensitivity

SMILE-2+

➤ 検出器

帯域 : 0.2~5 MeV

有効面積 : $\sim 1 \text{ cm}^2$ (0.3 MeV)

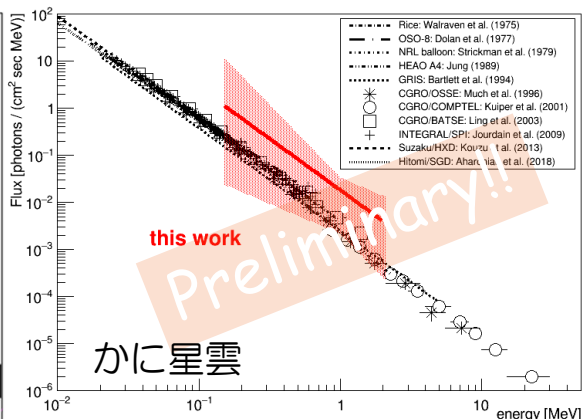
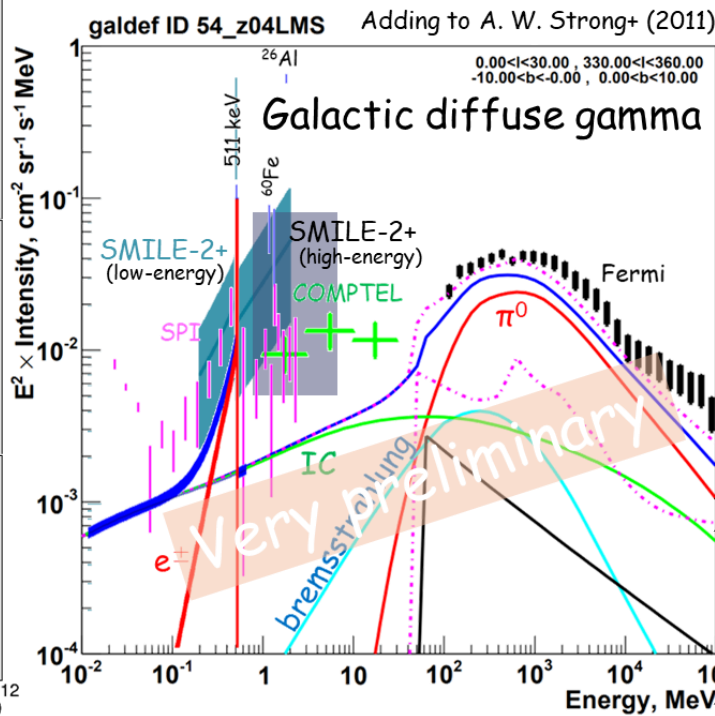
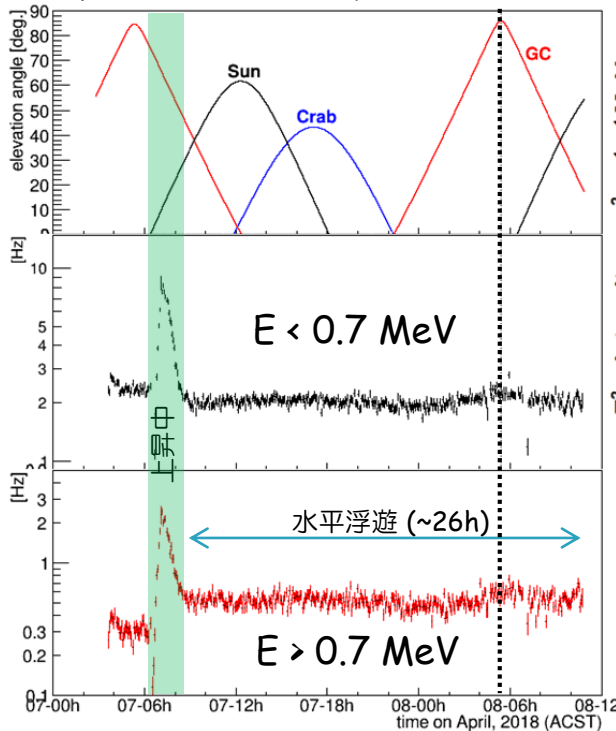
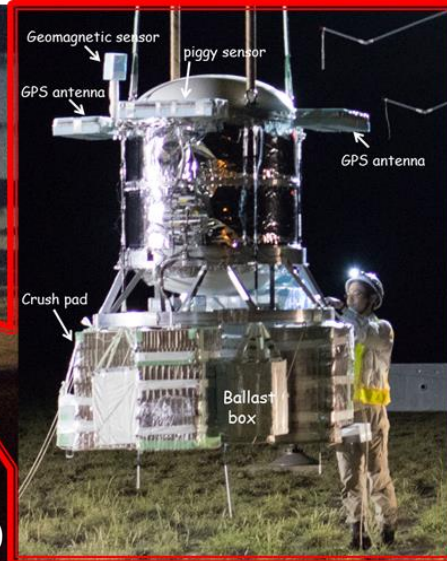
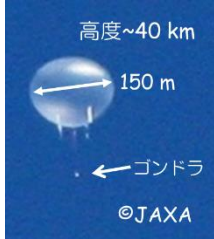
PSF : $\sim 25^\circ$ (0.6 MeV)

➤ 高度 >38 km で

~ 26 時間の水平浮遊

➤ ETCCは飛翔中、安定に動作

➤ 機器は2018年4月9日に無事回収 \Rightarrow 現在も京大で動作中



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

➤ 現在、論文準備中

Growth curve

- 視野内に明るい天体が無い
時間帯のガンマ線観測

⇒ 背景放射

大気ガンマ線

装置由来の雑音ガンマ線

の足し合わせ

- 大気ガンマ線

2次電子宇宙線の制動放射

⇒ \propto 残留大気圧

- 背景放射

大気で散乱と吸収を受ける

⇒ $\propto \exp(-\tau z)/(1-A)$

A : 散乱効果の補正項

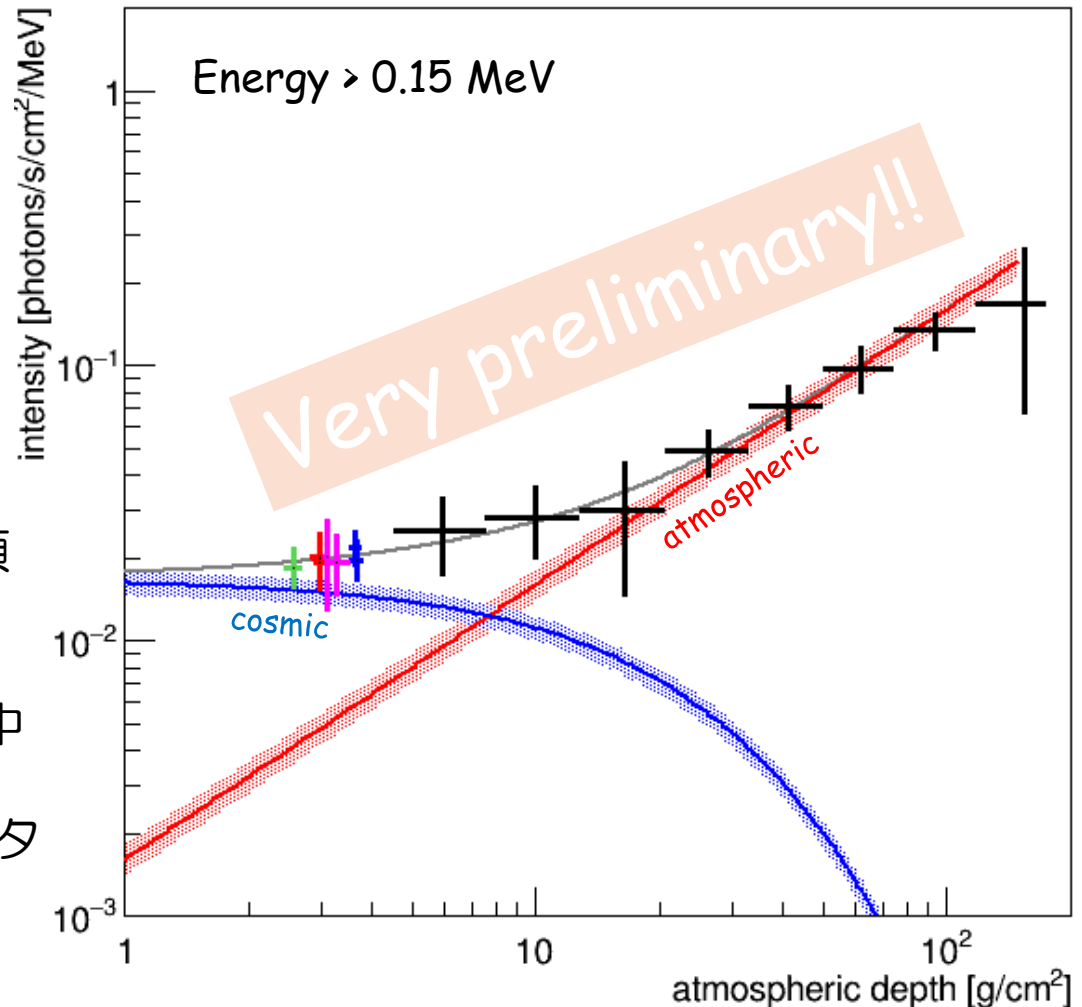
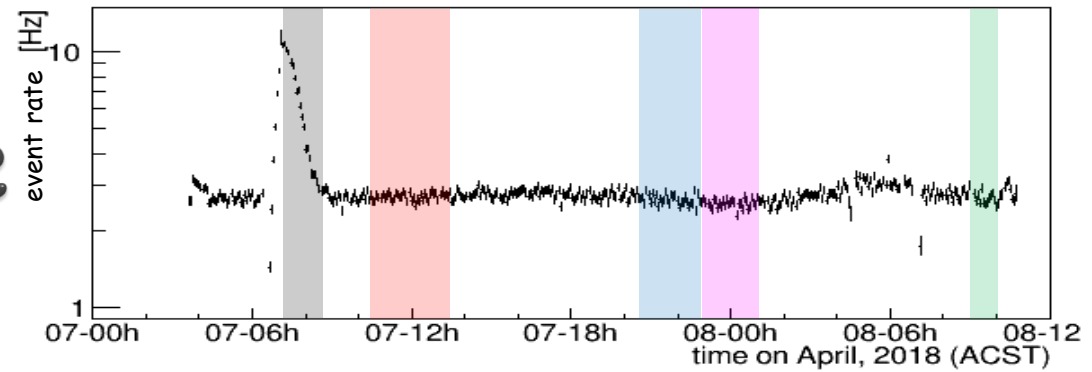
- 装置由来の雑音ガンマ線

宇宙線スペクトルに依存

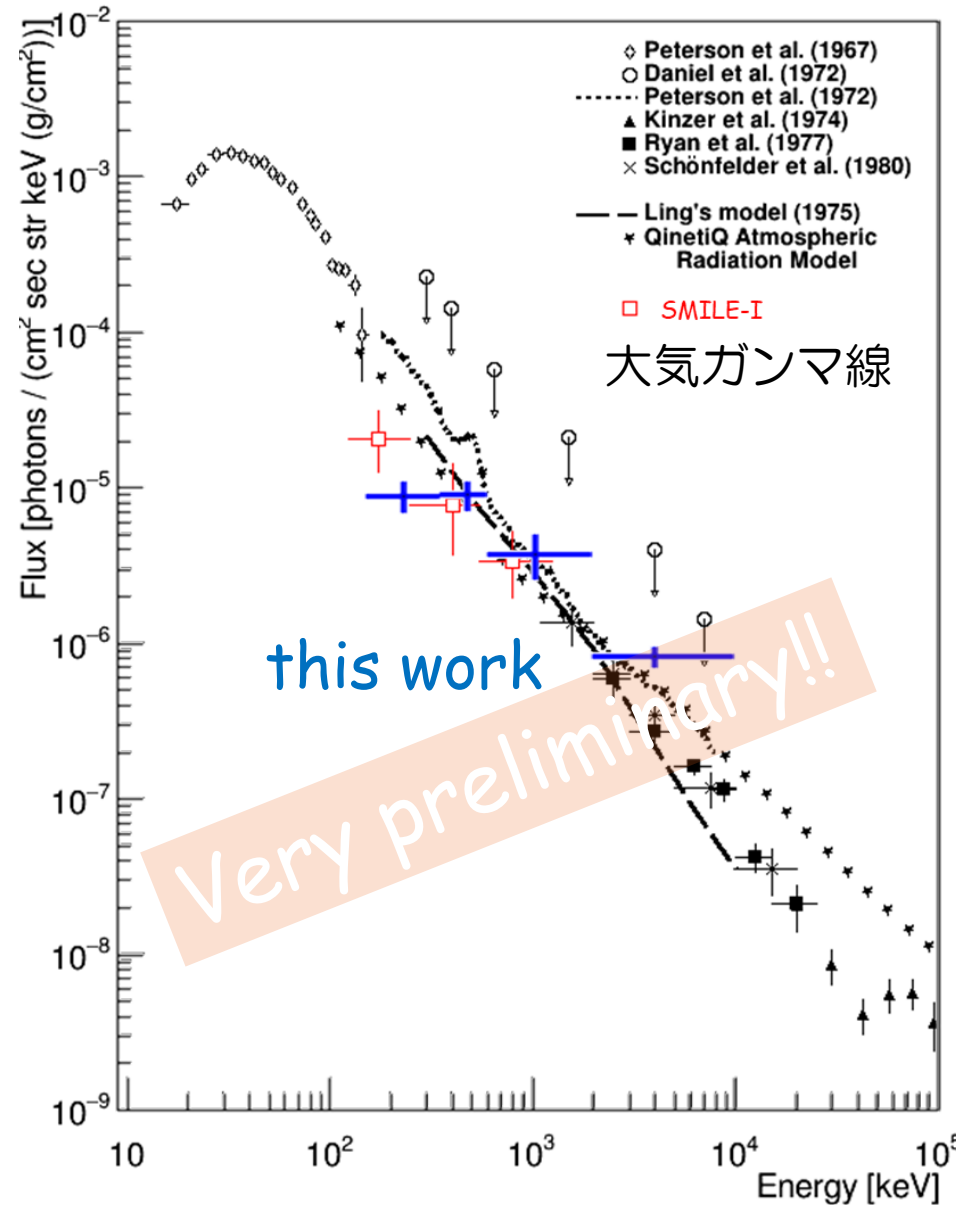
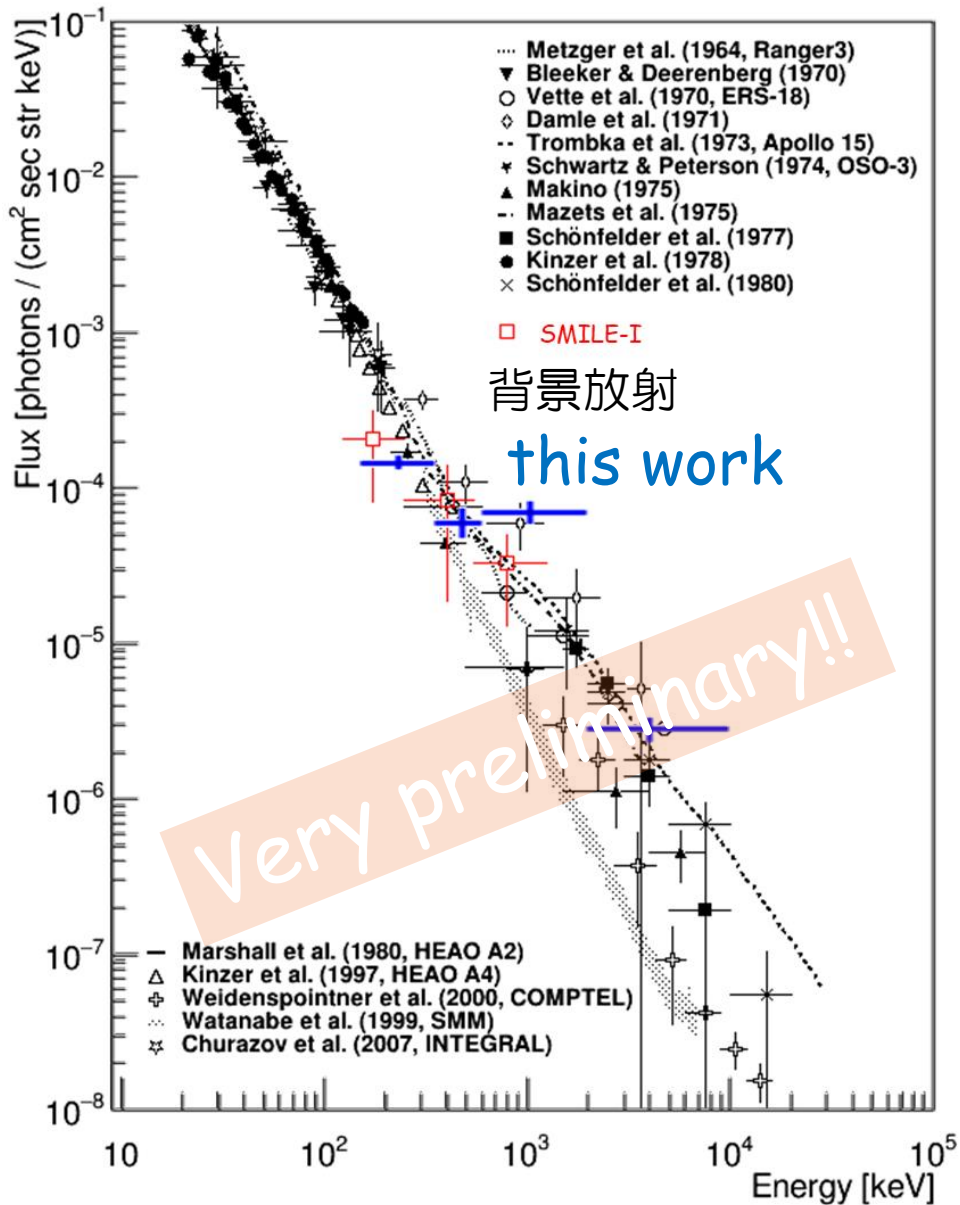
⇒ simulationによる見積中

- 観測データを背景放射と

大気ガンマ線の強度をパラメータ
としてfitting

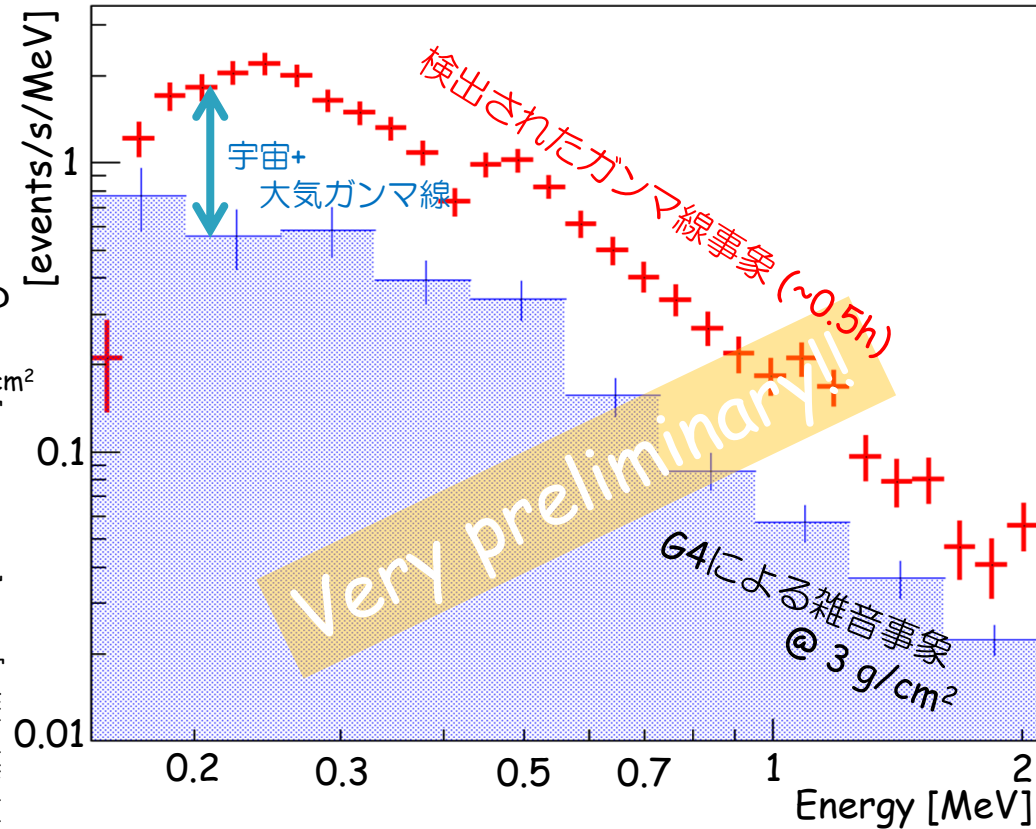
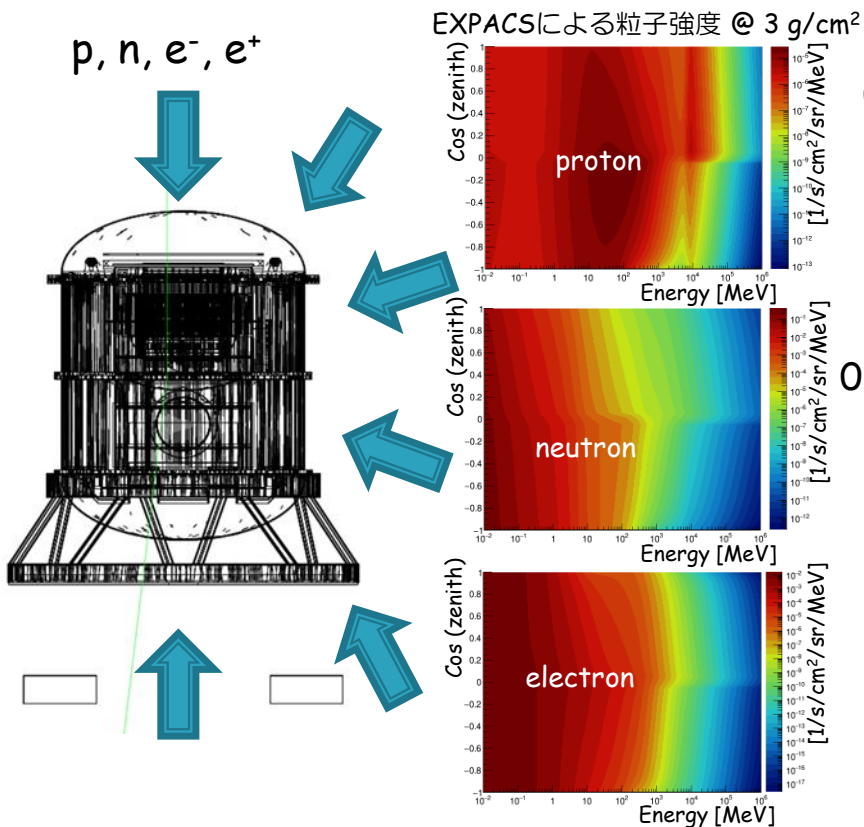


背景放射と大気ガンマ線スペクトル



機器由来の雑音ガンマ線見積もり

- EXPACSにより環境放射線を計算
- 陽子・中性子・電子・陽電子
 - ⇒ 天頂角依存性も考慮
- Geant4で雑音環境をsimulation
 - ⇒ 検出器で検出される事象は？



背景ガンマ線 > 雑音量

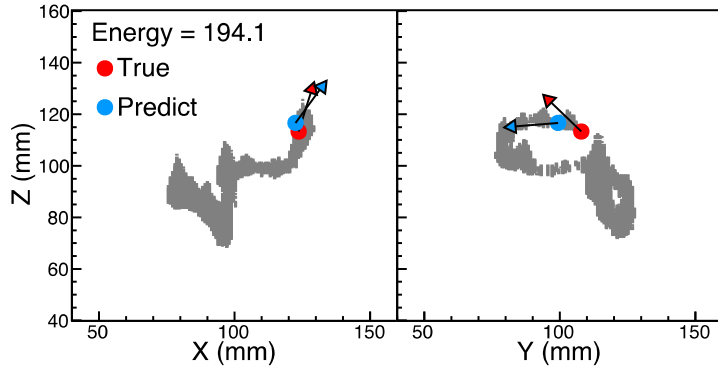
宇宙線が生成する雑音ガンマ線
ガンマ線以外を誤って検出

➡ 各高度・時間で見積もり中
雑音量を除いて再解析予定

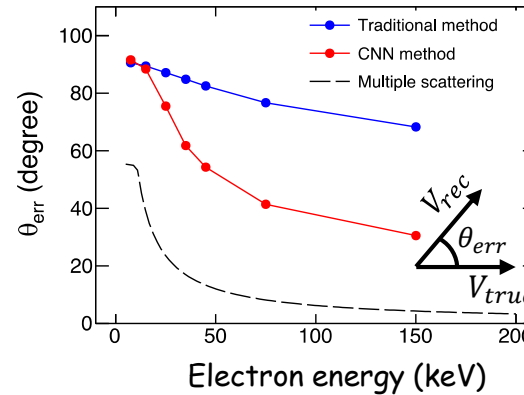
機械学習による点源分解能の改善

- ✓ 反跳電子飛跡の機械学習(Convolutional Neural Network)による解析
 - ガス飛跡検出器のイメージデータから、散乱点と電子反跳方向の決定

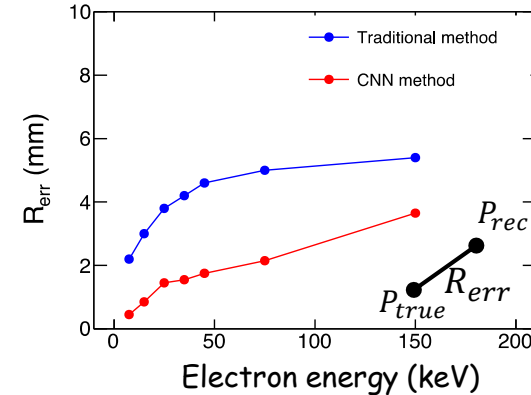
イベント例



電子飛跡方向決定精度



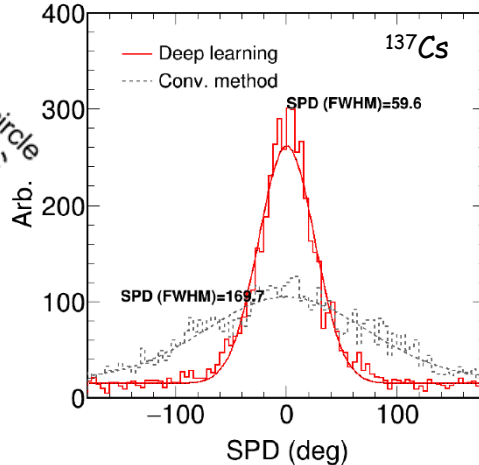
散乱点決定精度



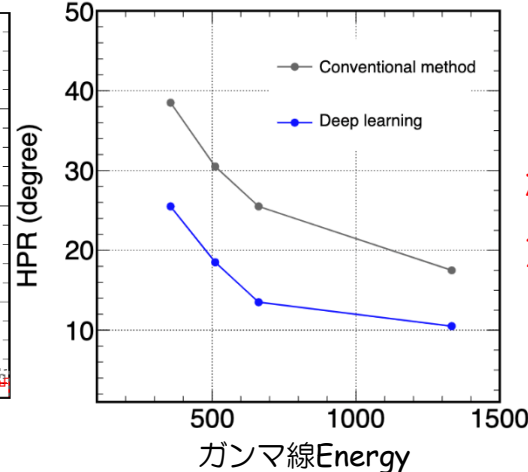
- ✓ 散乱点と電子反跳方向の決定精度向上により
2次元角度分解能(Point Spread Function: PSF, Half power radius角度で評価)の改善へ

ガンマ線イメージング例

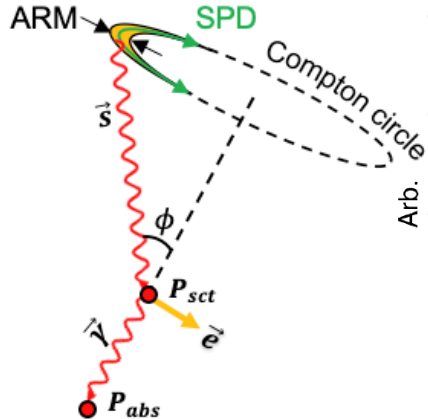
SPDの分布



PSFのエネルギー依存



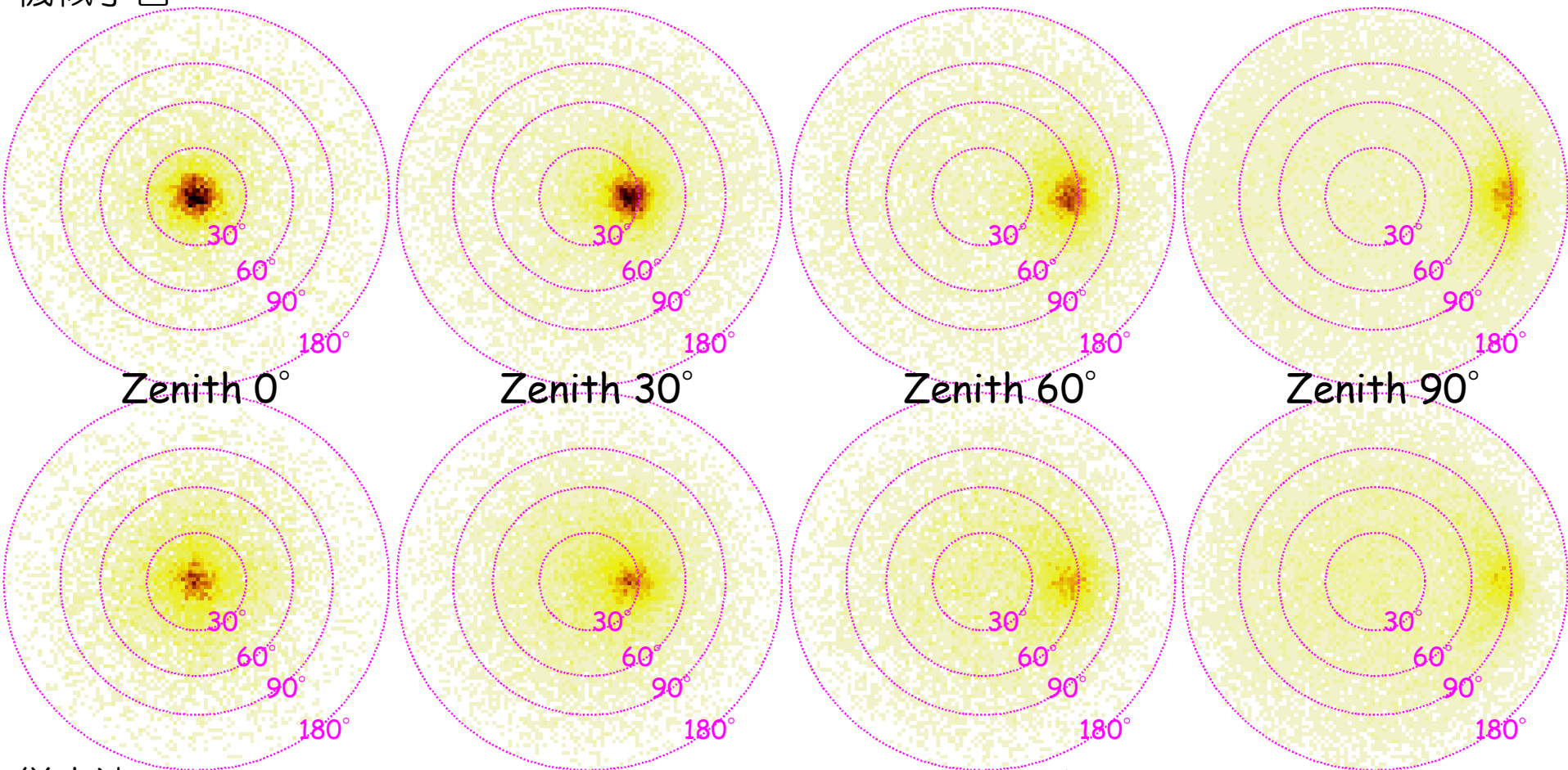
検出器はそのままで
角度分解能を~2倍改善



機械学習による点源分解能の改善

SMILE-2+ ETCCの地上実験(^{137}Cs)のデータに適用、同じデータを2通りで比較

機械学習



全事象数を1にscaleしたimage



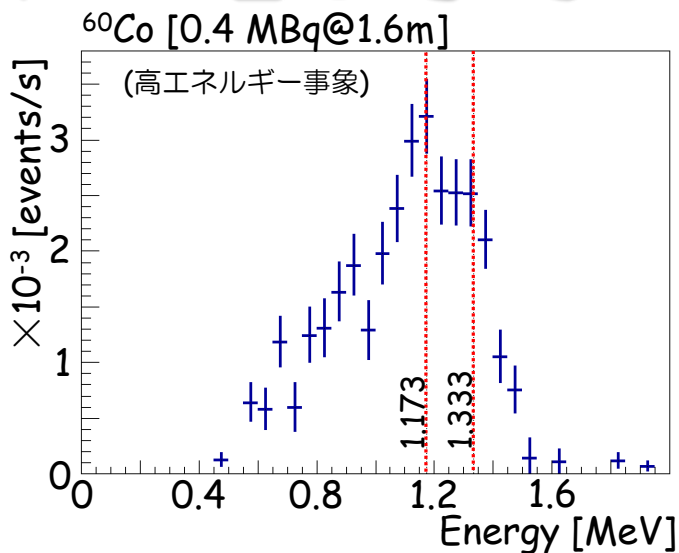
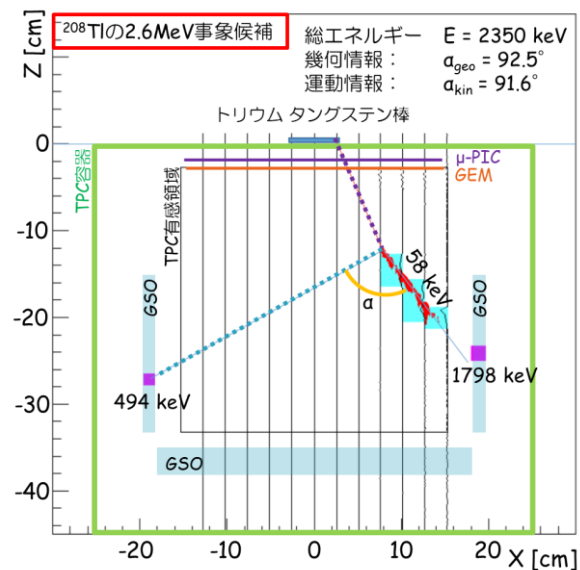
従来法

機械学習を用いた解析

⇒ 集中度が顕著に上昇

⇒ フライトデータへの適用を試み中

高エネルギー電子事象の解析



30 cm角のTPC

- 150 keV以上の電子は止め切れない
- >1 MeVのガンマ線の検出を制限



SMILE-2+ ETCC

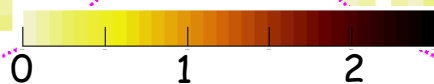
- GSOシンチレータをTPC容器内部に設置
- TPCからはみ出す電子もシンチレータで測定

^{60}Co Zenith $\sim 0^\circ$
1.05~1.48 MeV

^{60}Co Zenith $\sim 90^\circ$
1.05~1.48 MeV

地上実験データでは再構成できている事を確認

- Geant4との比較
 - フライトデータの解析
 - 雑音事象の見積もり
- が進行中



SMILE-3へ

検出感度を向上させて科学観測へ

- ⇒ @ Alice Springs : e^\pm の銀河面分布・Cen A・NGC4945他
- @ Fort Sumner : Cyg X-1 / Crabの偏光観測

有効面積を >5倍、角度分解能2~3倍改善していく為に...

シンチレータの改良

光読み出しをMPPCへ

⇒ エネルギー分解能向上

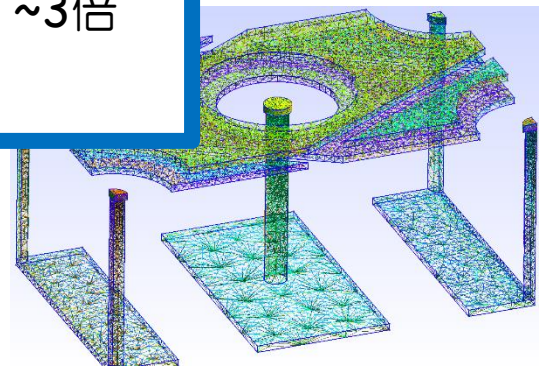
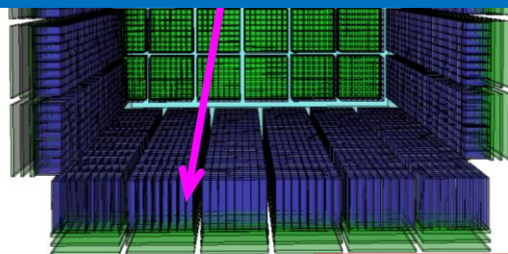
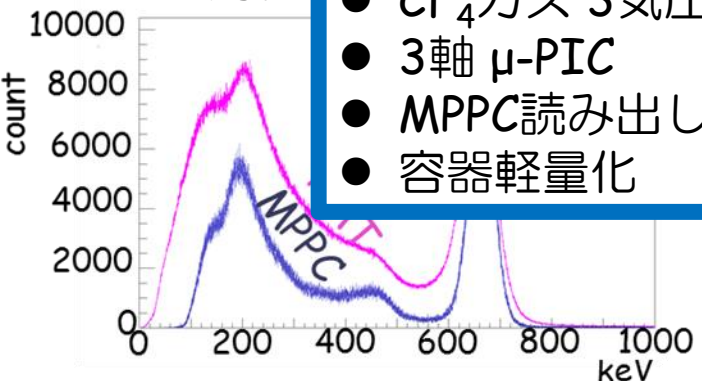
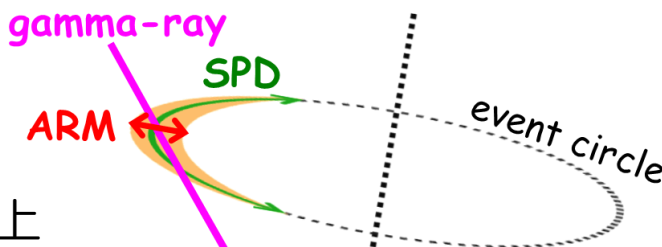
角度分解能向上

- CF_4 ガス 3気圧 ⇒ 有効面積 3.5倍
 - 3軸 μ -PIC ⇒ SPD 3~4倍
 - MPPC読み出し ⇒ ARM 1.2倍
 - 容器軽量化 ⇒ 減衰量 ~20%低下
- ⇒ PSF ~3倍

ガス飛跡検出器の改良

CF_4 baseのガスで3気圧
ガス容積を $(50\text{ cm})^3$ へ

力容器の軽量化
読み出し μ -PIC



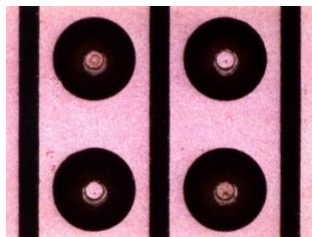
全体システムの改良

ガス圧力容器を露出
構造体の見直し (軽量化)

今回からの修正点

姿勢センサの見直し

直交型strip電極の問題点と3軸化



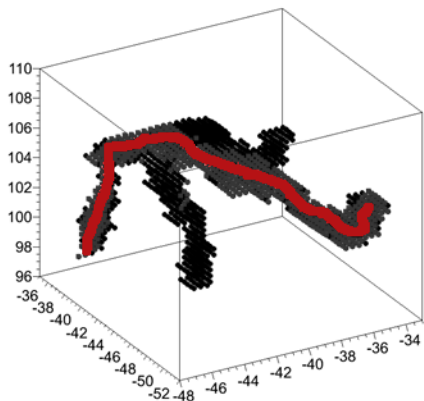
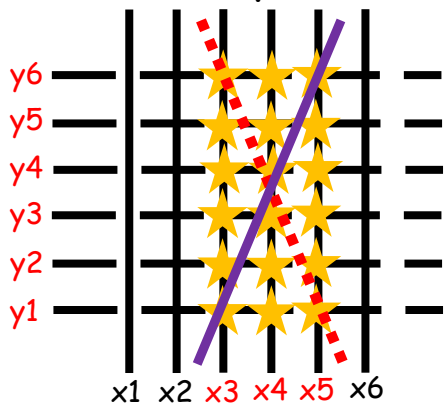
400 μm pitch, 30 cm角 = 589,824個の比例計数管

⇒ 回路数の削減 (=電力の削減) の為

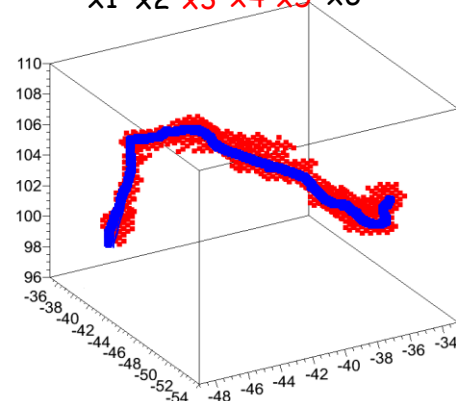
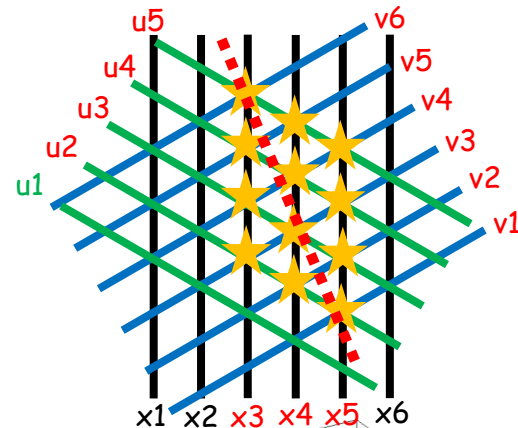
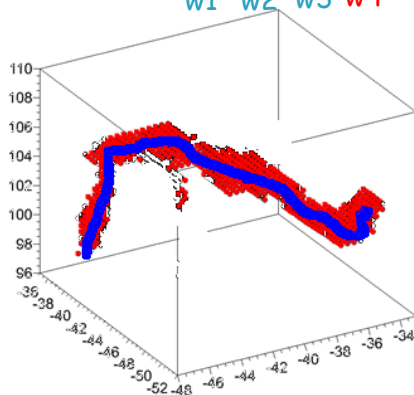
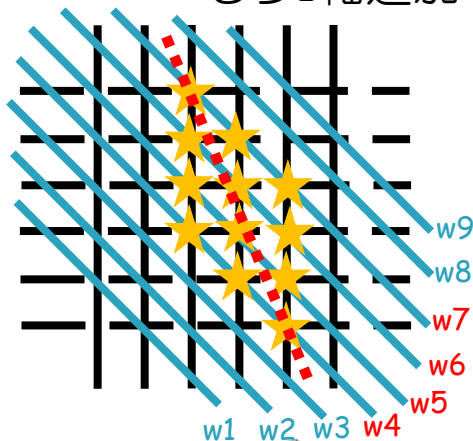
直交strip型電極で読み出し 1,536 ch

⇒ 但し3次元飛跡に大きな不定性を残す

現行の μ -PIC

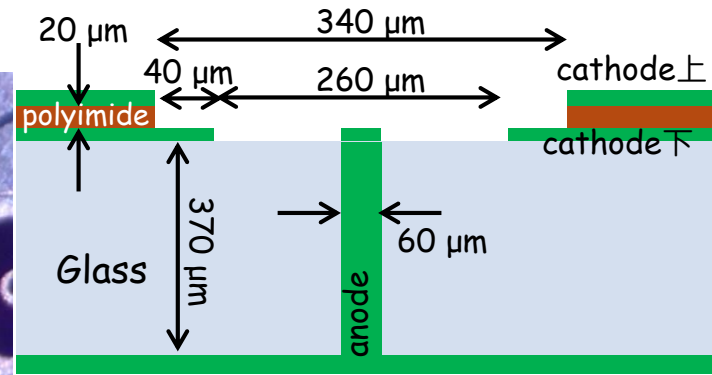
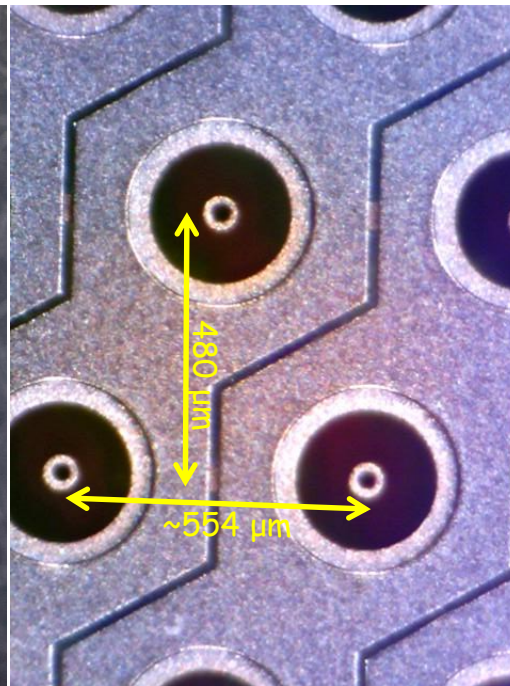
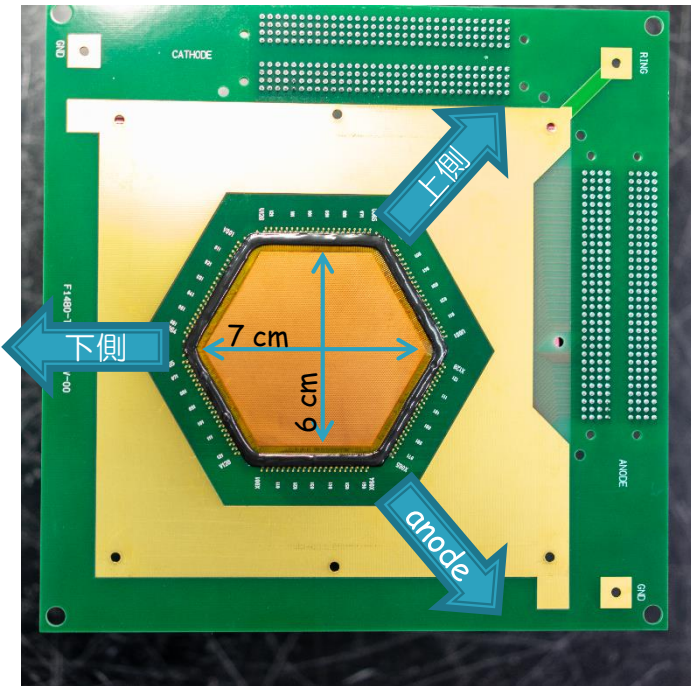


もう1軸追加できれば・・・

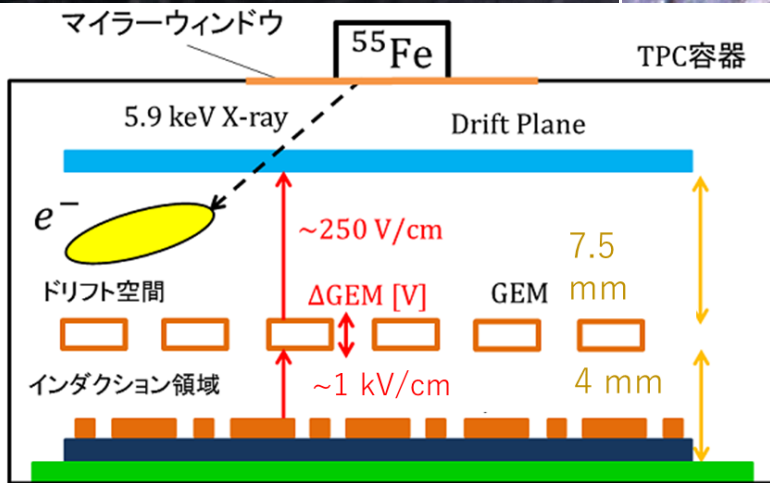


飛跡の不定性をある程度解く事が可能に！

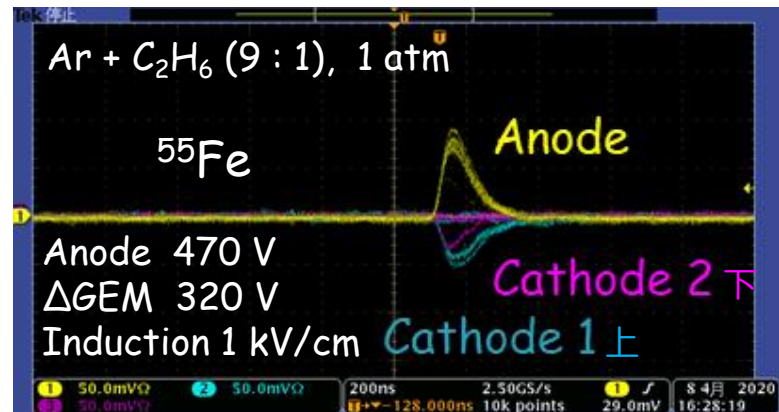
製作した3軸 μ -PIC



- TGV μ -PIC
- 最密充填なpixel配置
- 各軸のなす角は 120°
- 各軸に128 strip
- Strip電極のpitch : 480 μ m
- Pixel間距離 : ~554 μ m



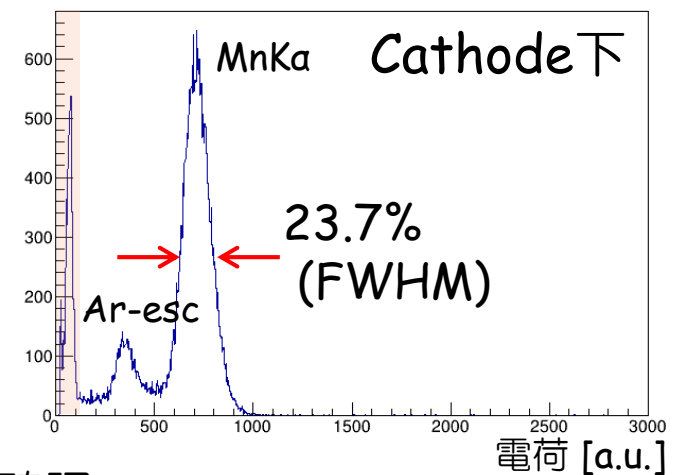
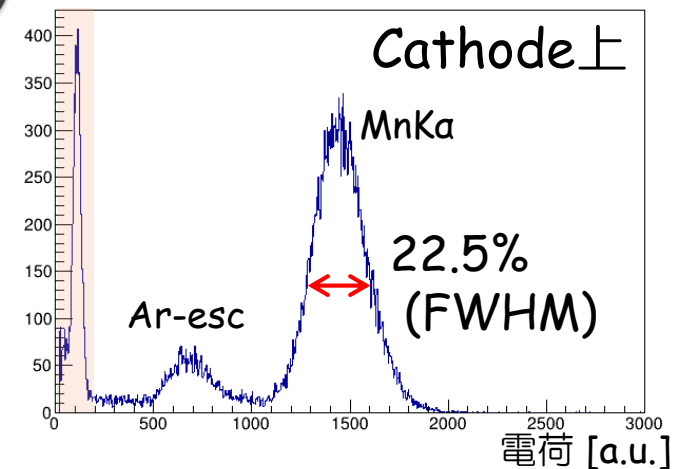
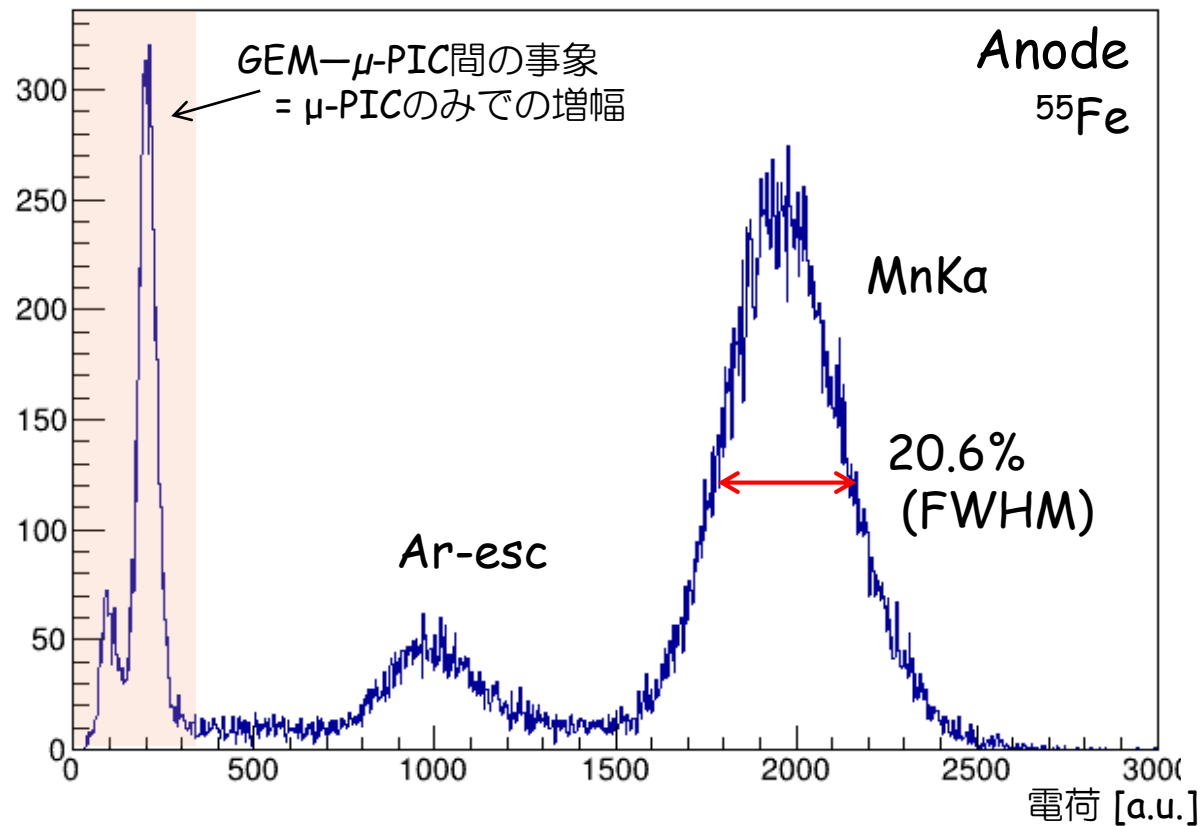
電圧供給基板



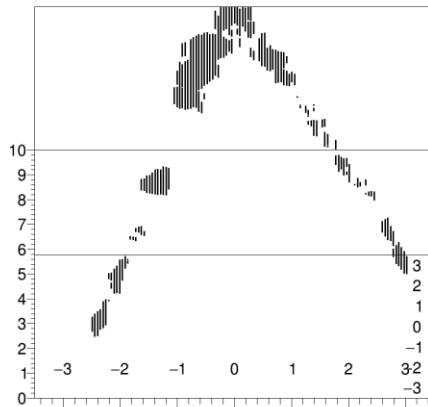
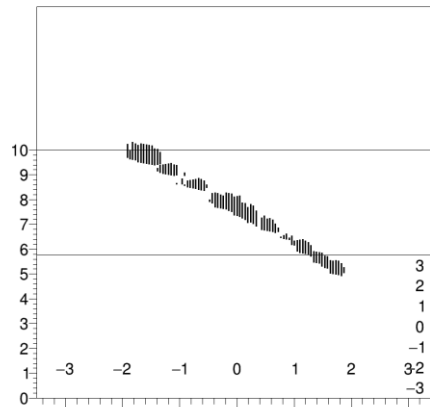
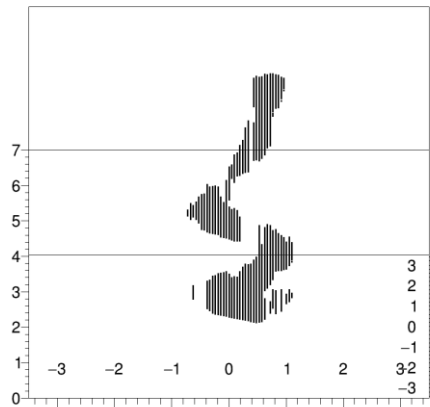
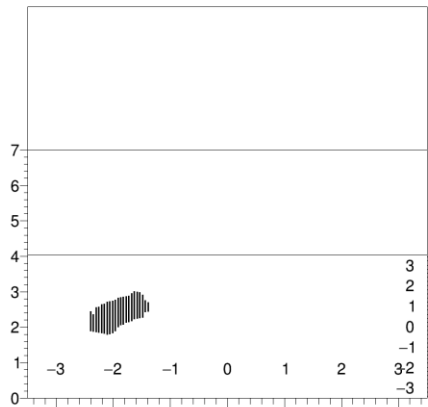
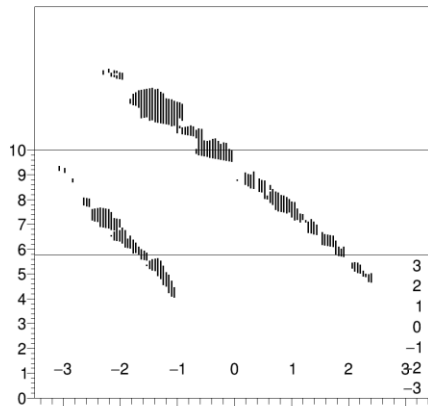
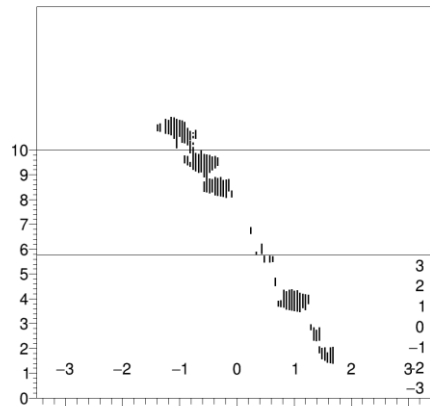
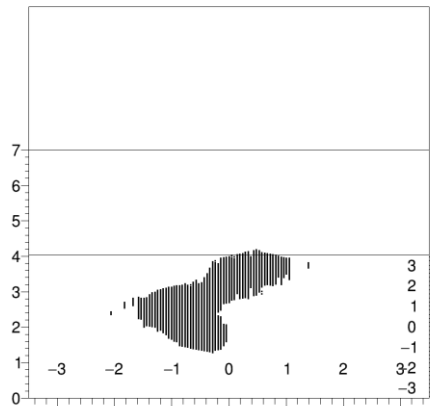
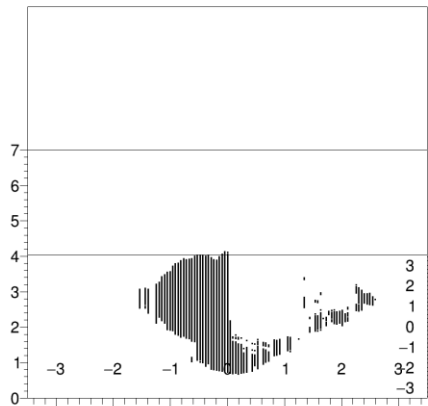
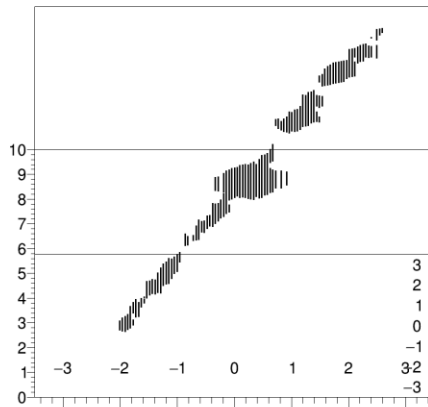
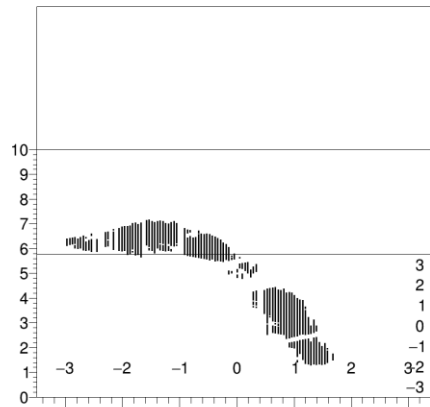
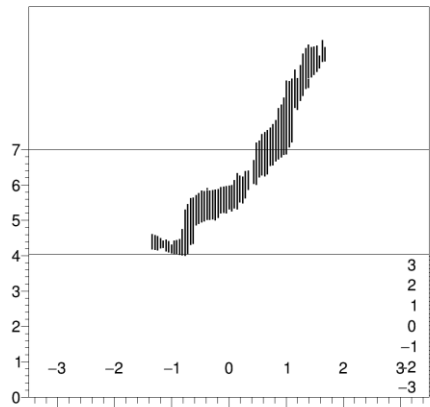
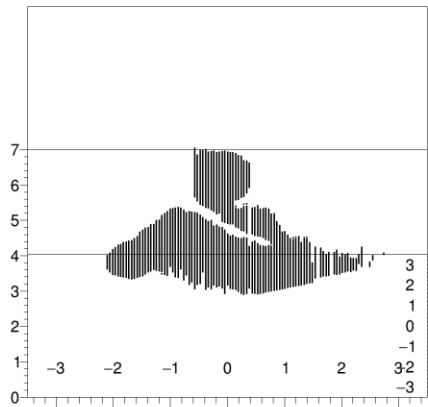
55Feの信号を各軸で確認!

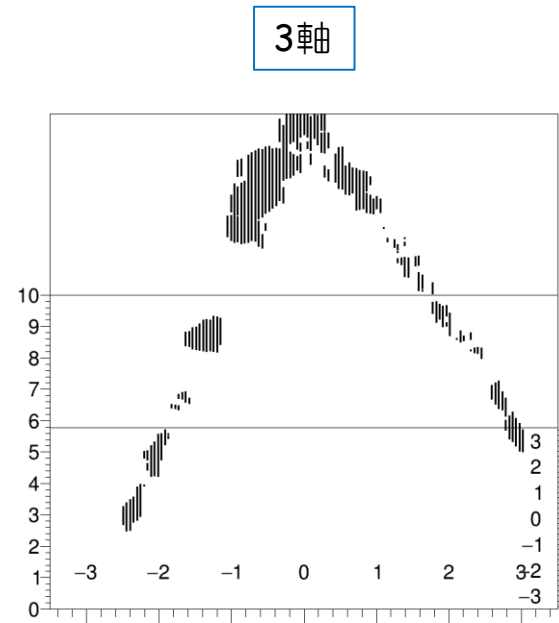
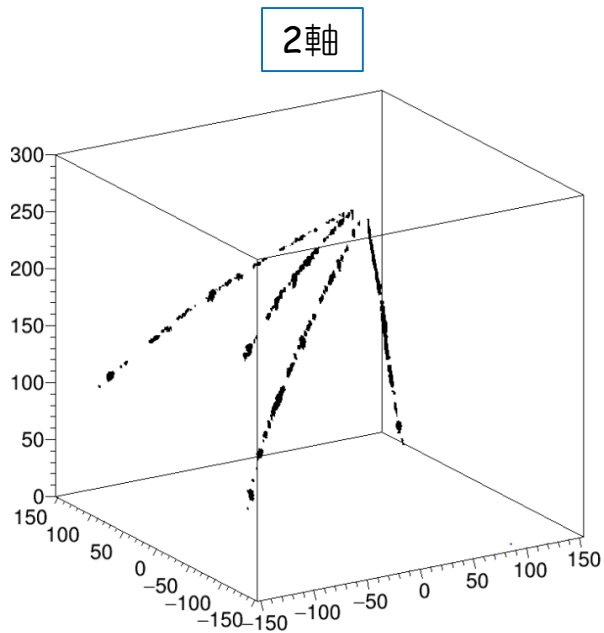
エネルギースペクトル

Anode 510 V
 Δ GEM 320 V
Induction 1 kV/cm



- 電荷積分により3軸全てで ^{55}Fe のスペクトルを確認
- 電荷比は anode : cathode上 : cathode下 \approx 3 : 2 : 1
⇔ 電圧比では anode : cathode上 : cathode下 \approx 2 : 1.5 : 1
- エネルギー分解能は全面で20.6% (FWHM)を達成
- ガス利得は従来 μ -PICの約2倍





飛跡の不定性削減に成功！

飛跡決定精度の定量的な評価は今後予定

MPPCによるシンチレータの読み出し

現在：GSO + PMT (浜松H8500)

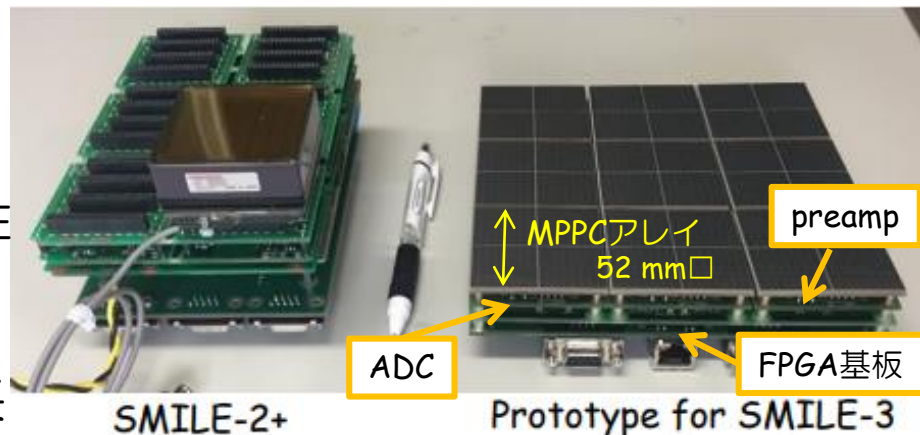
- エネルギー分解能 11~13% @ 662 keV
- ~1 kV, ~150 μ A = ~0.15W
- HV ONから数時間はgainに大きな不定性
- Peak-hold方式



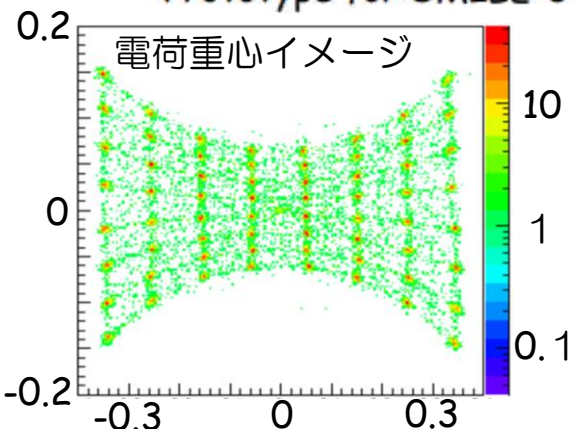
➤ GSOの発光波長 \approx MPPCの最大感度波長
 430 nm 450 nm

⇒ 7.5% @ 662 keVのエネルギー分解能

- 低倍率・高倍率の2つのアンプで広帯域化
- Sampling方式



SMILE-2+ Prototype for SMILE-3



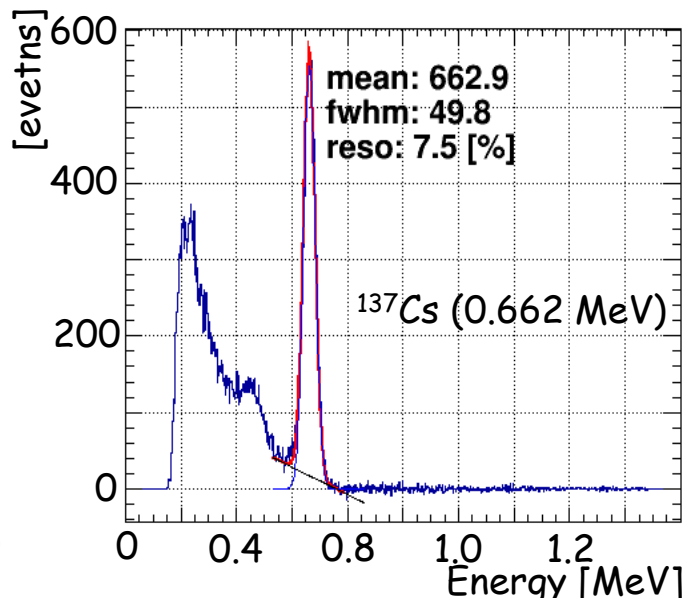
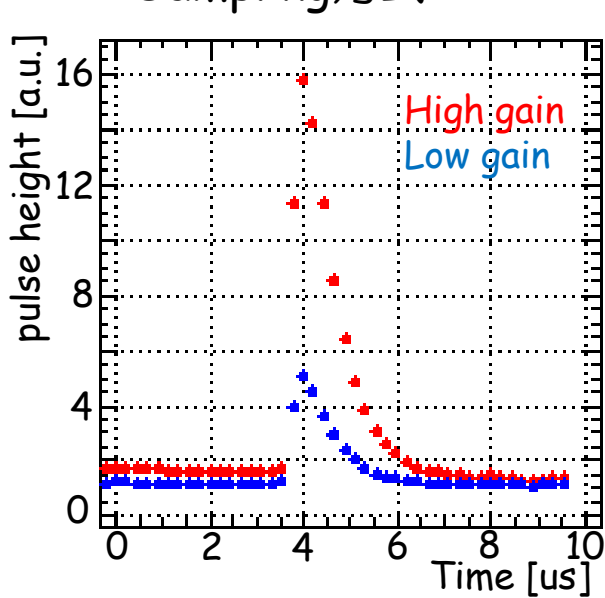
エネルギー分解能によるARM

~7度 by PMT

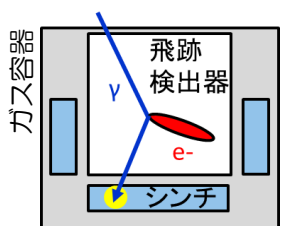
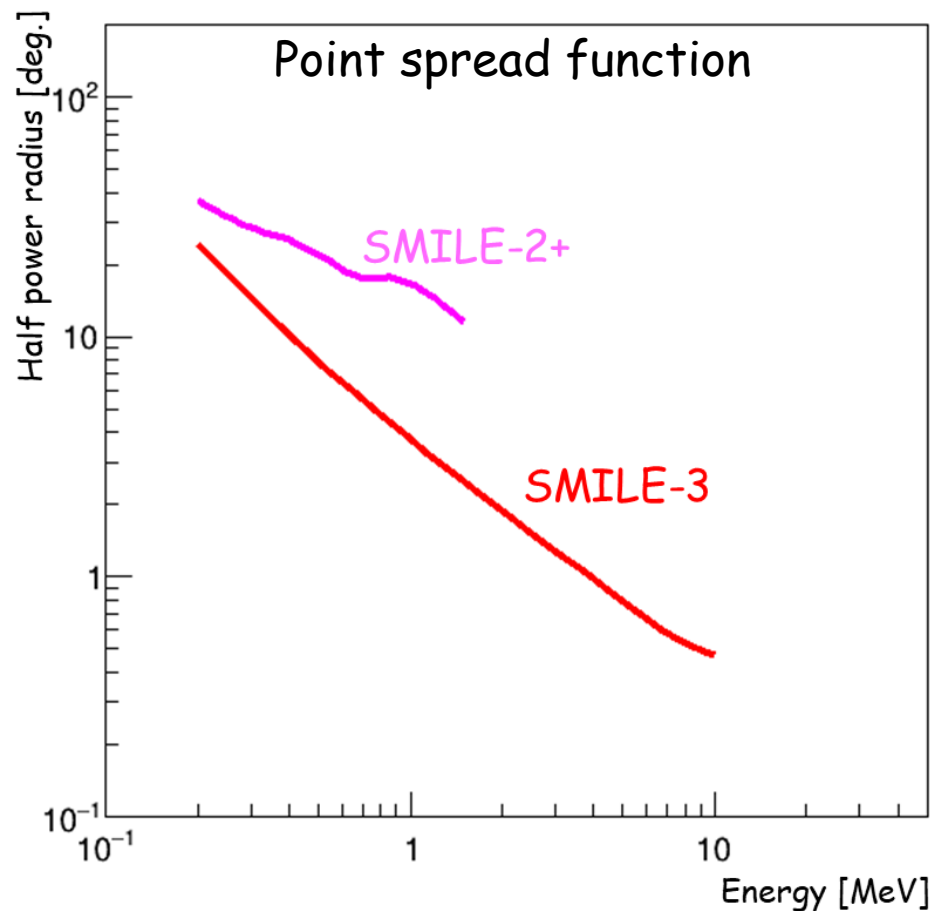
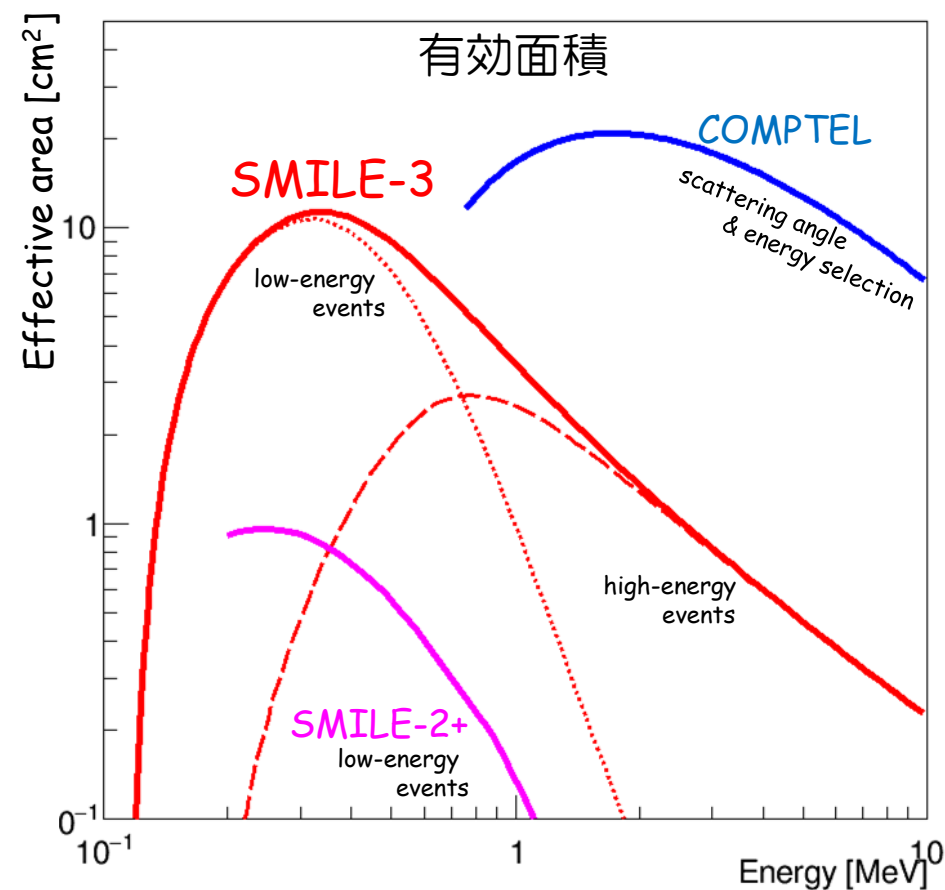
⇒ ~5度 by MPPC

@ 662 keeV

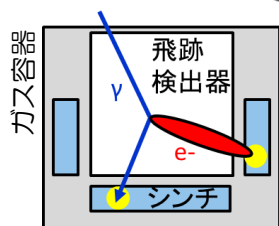
TPCのエネルギー分解能：
30% @ 30 keVと仮定



期待される有効面積と空間分解能



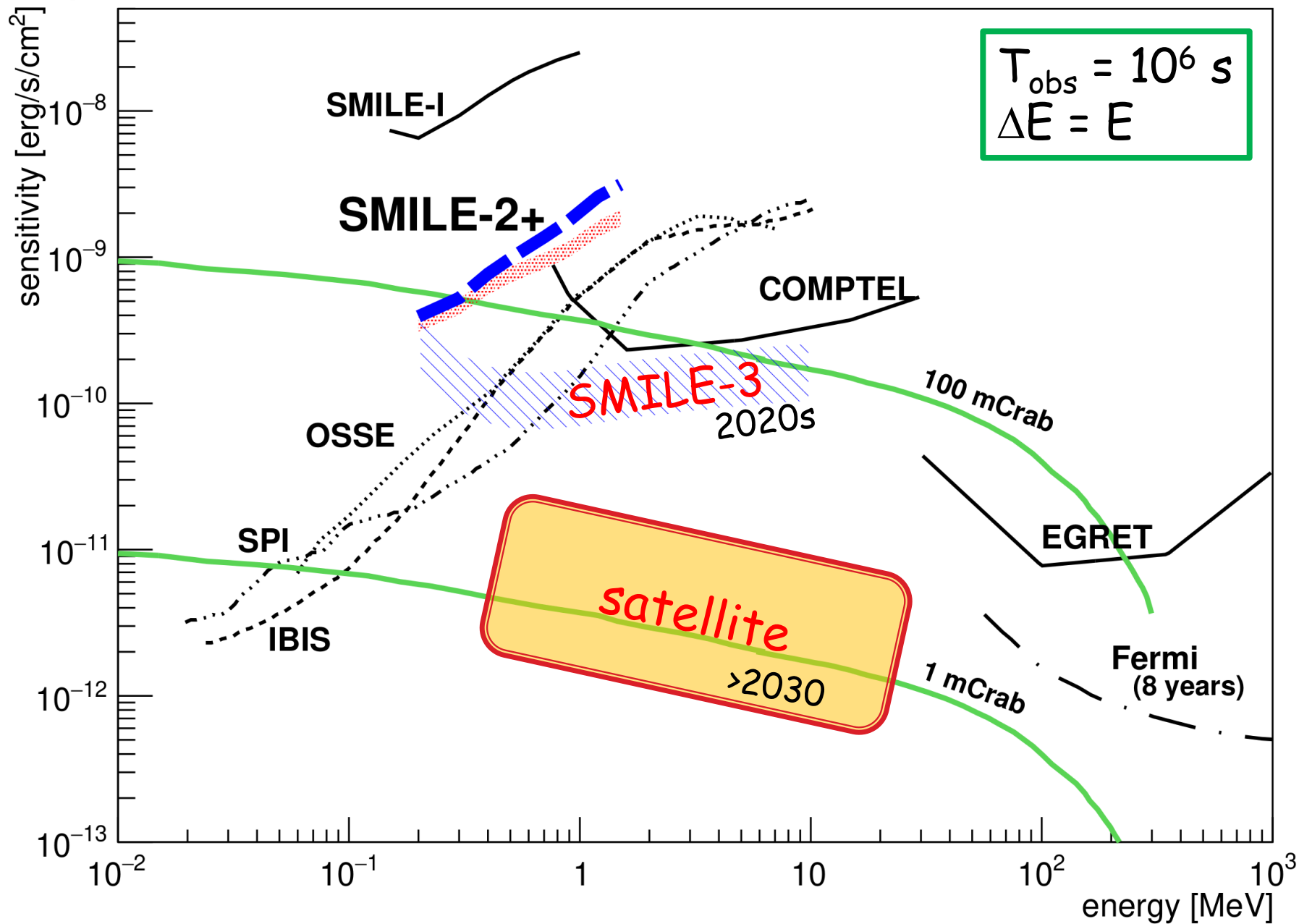
Low-energy event



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



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

