

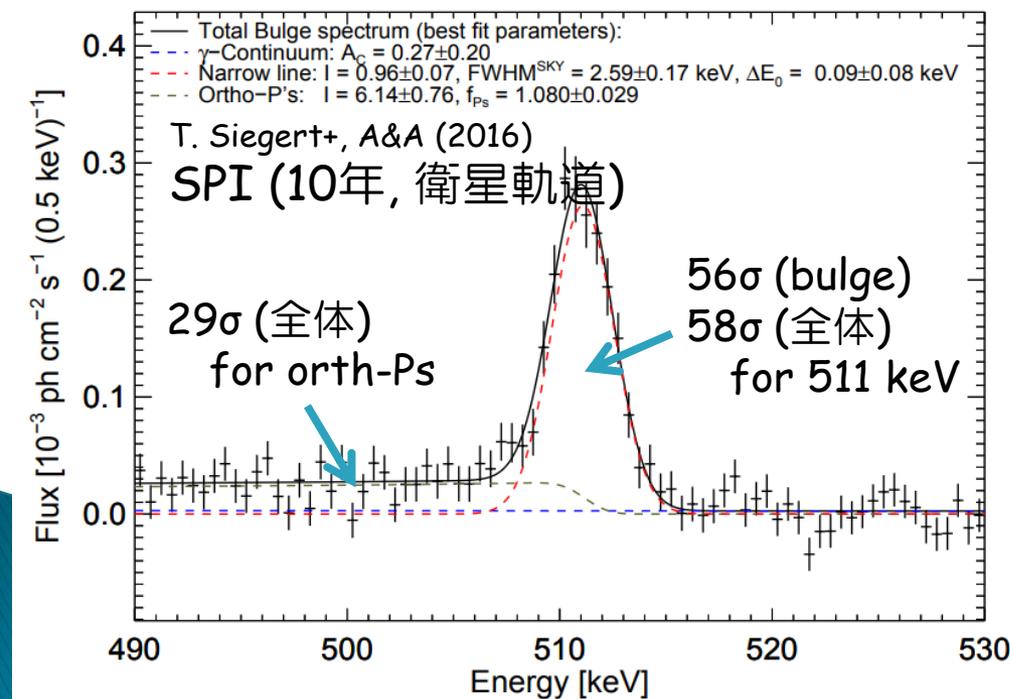
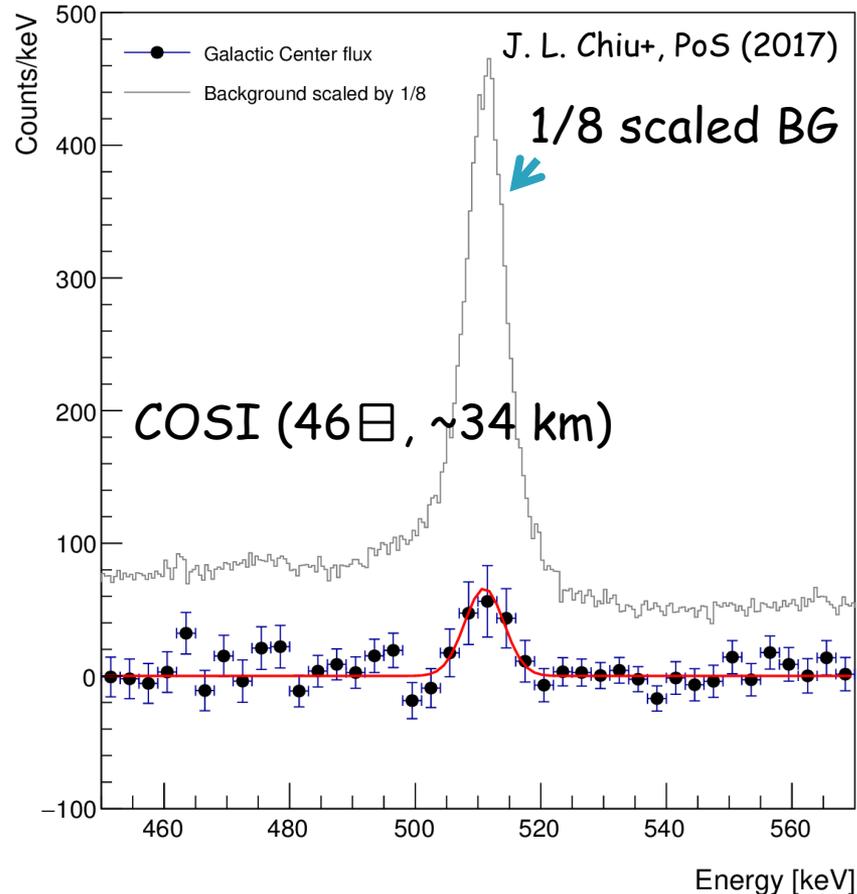
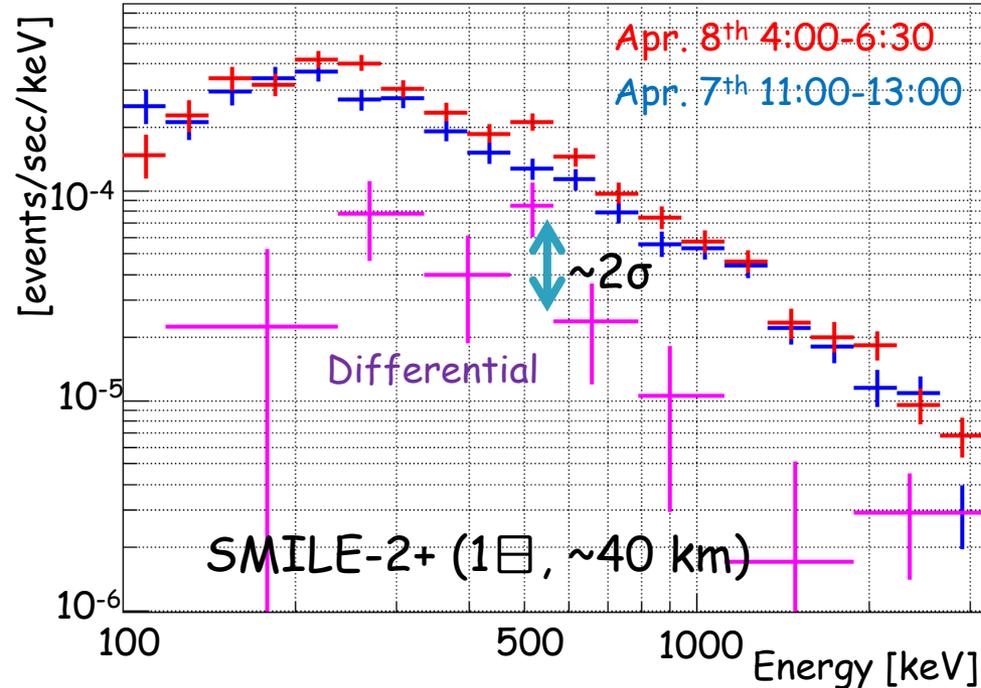
SMILE 48 :

長時間気球を用いた

MeVガンマ線天体探査計画 SMILE-3



高田淳史, 谷森達, 水村好貴, 竹村泰斗, 吉川慶, 中村優太, 小野坂健,  
齋藤要, 阿部光, 古村翔太郎, 岸本哲朗,  
中増勇真, 谷口幹幸, 水本哲矢, 園田真也, 窪秀利,  
黒澤俊介 (東北大), 身内賢太郎 (神戸大), 澤野達哉 (金沢大)



1日  $\rightarrow$  46日  
 $\sim 5\sigma \times \sqrt{6.1e5/6.4e3} \approx 48\sigma$   
 1日  $\rightarrow$  10年  
 $1.6e9 (\text{cm}^2 \text{s}) / 75 \text{cm}^2$   
 $\sim 2\sigma \times \sqrt{2.1e7/6.4e3} \approx 118\sigma$

従来観測を凌駕するSN比を  
 実現したことは間違いない

# SMILE

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

### SMILE-I @ 三陸 (Sep. 1<sup>st</sup> 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

30 cm角prototype地上試験 T. Tanimori+. ApJ,2015

### SMILE-2+ 1-day flight @ Alice Springs (Apr. 7<sup>th</sup> 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

a few cm<sup>2</sup>

(detect 5 $\sigma$ ) PSF (50% included) <sup>radius</sup> ~ 10 deg @ 662 keV



### SMILE-3



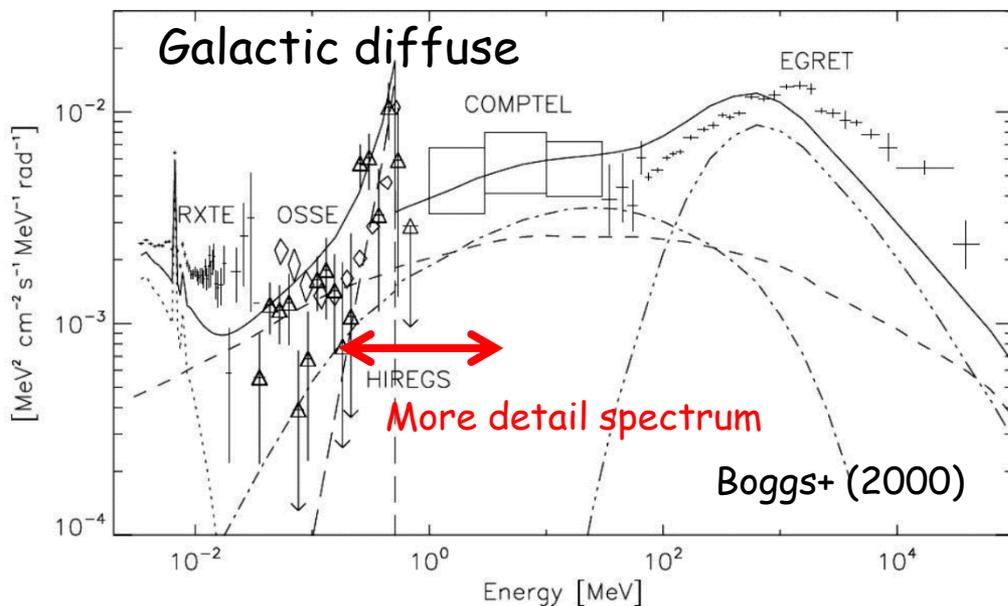
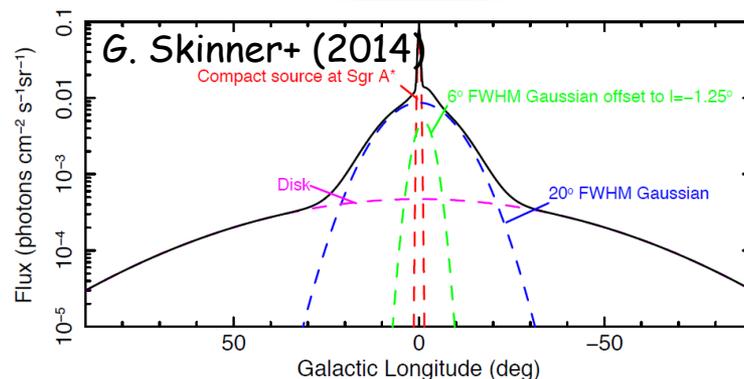
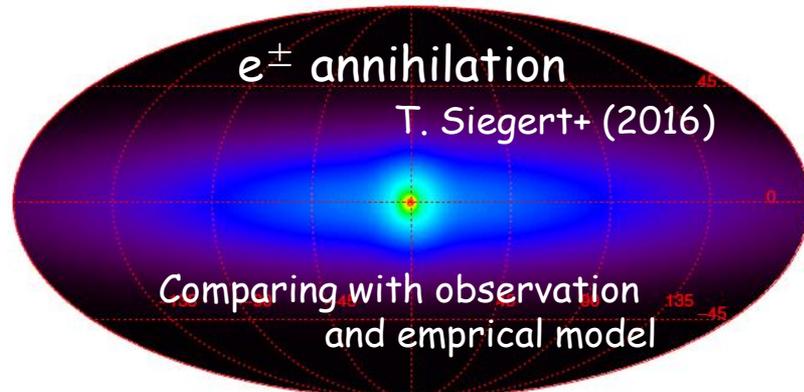
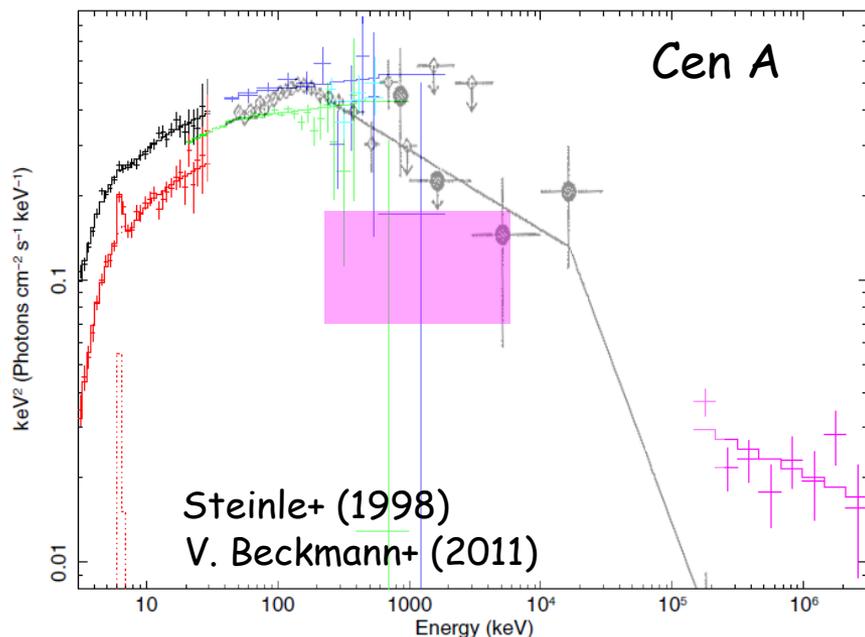
- ▶ 長時間気球を用いた科学観測
- ▶ COMPTELの感度を上回る望遠鏡で数回放球

**NOW!!**

人工衛星による全天観測

~ sub-mCrab sensitivity

# SMILE-3での観測候補



有効面積 ~10 cm<sup>2</sup>  
PSF ~5 deg. のETCC



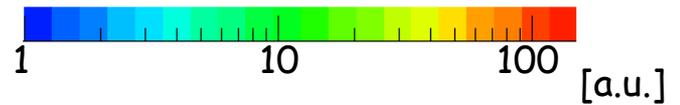
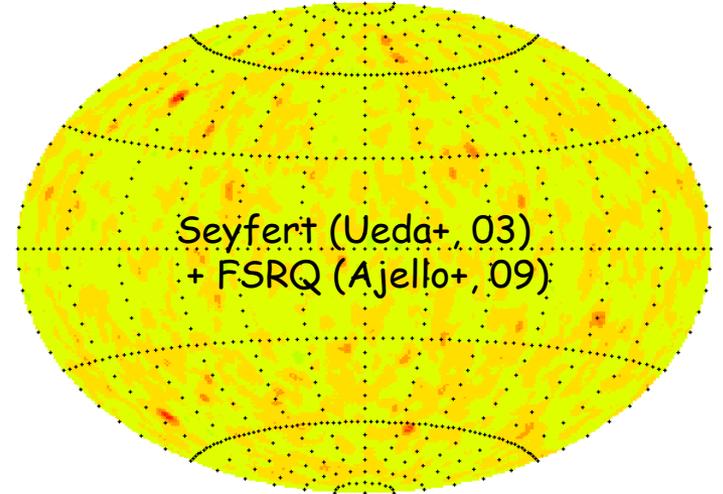
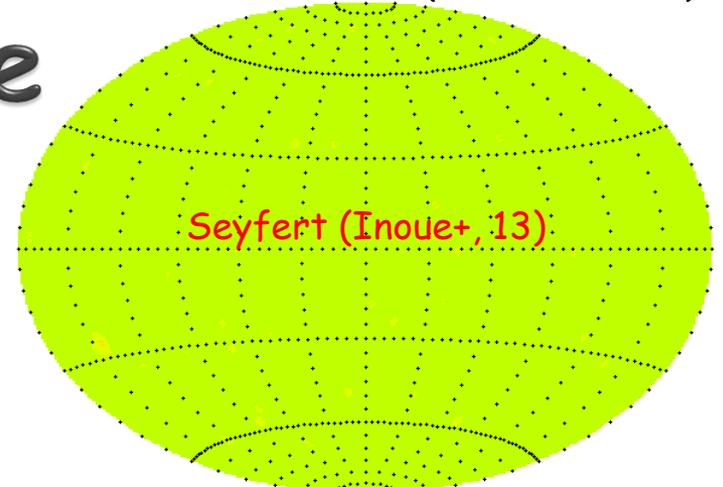
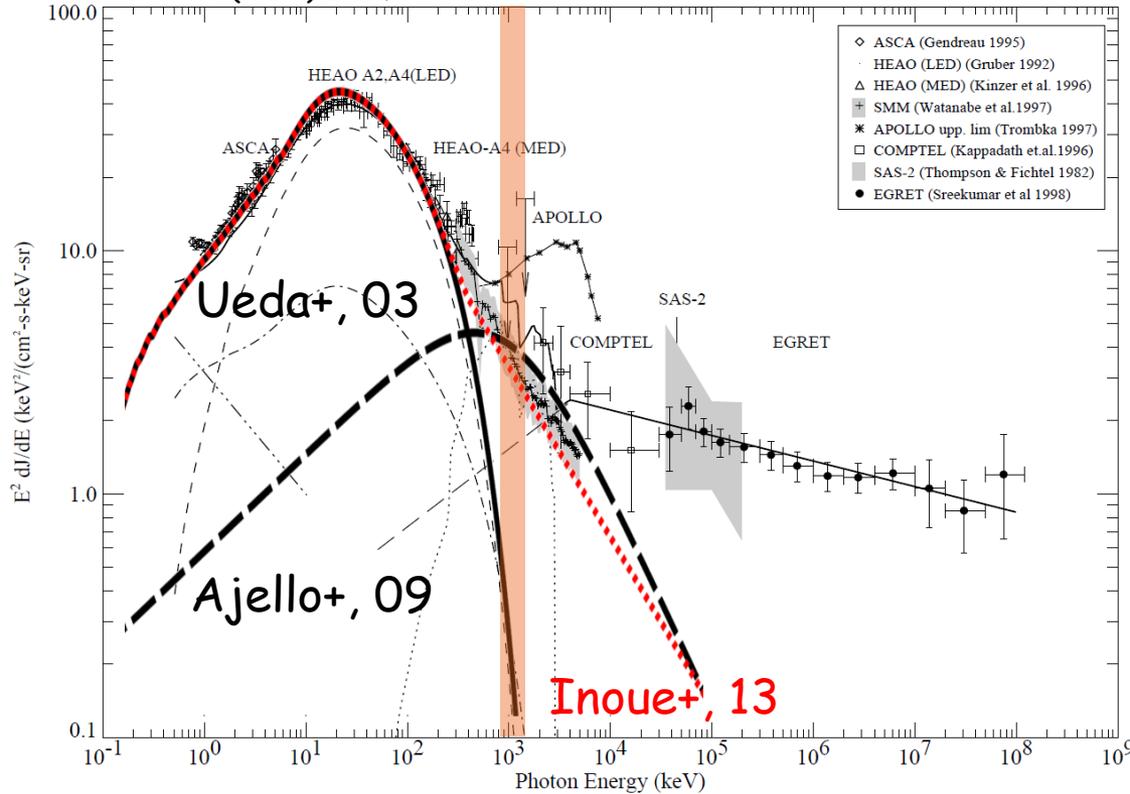
SMILE-2+の  
~5倍の検出感度

Galactic diffuse gamma-ray,  
Cen A, 511 keVの分布, <sup>26</sup>Al  
Crab/Cyg X-1の偏光, ...

# Extragalactic diffuse

0.8~1.2 MeV  
PSF ~3° (ARM 2° SPD 10°)

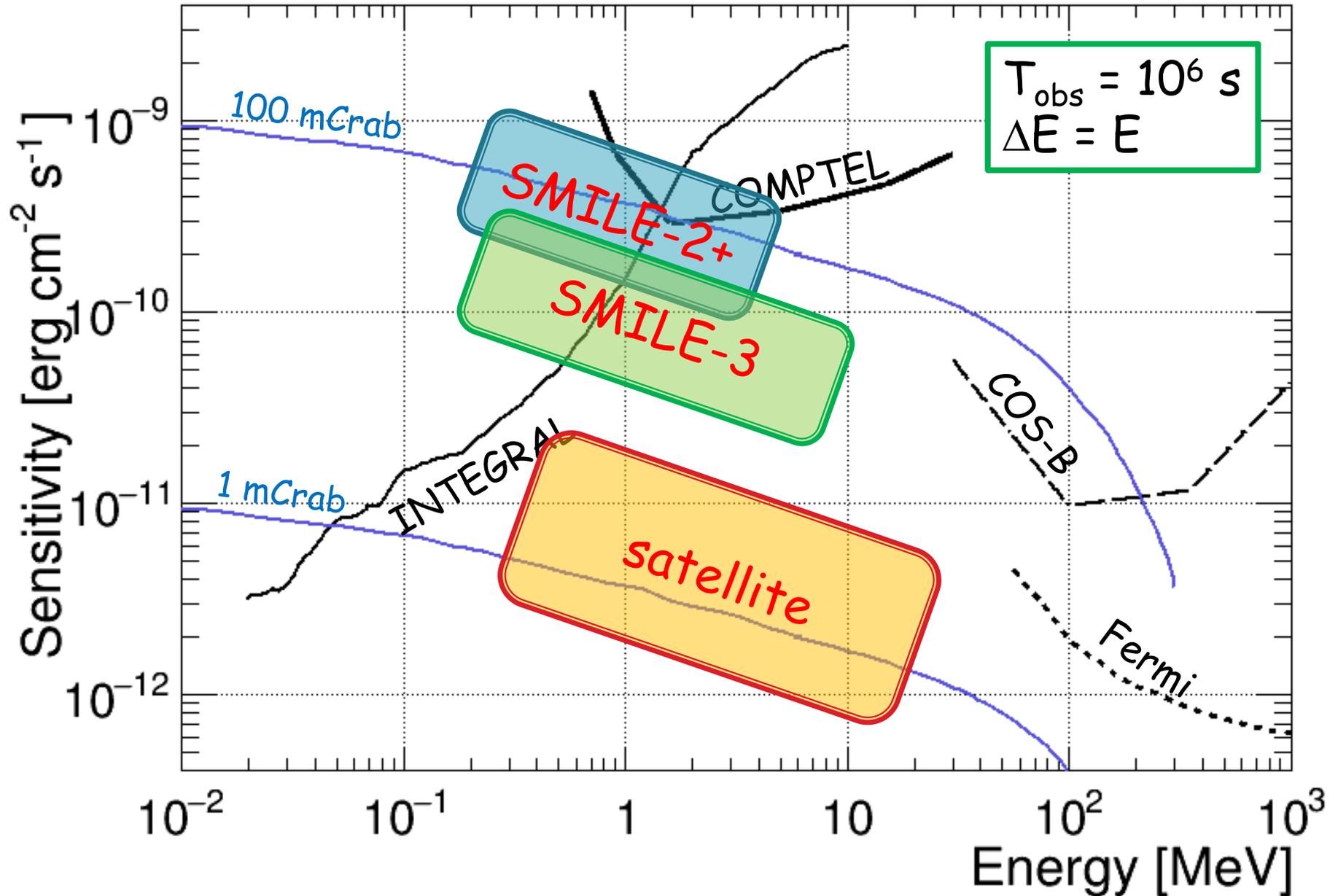
M. Pohl (1998)に加筆



背景放射の詳細なスペクトル + 非一様性

⇒ MeV領域の背景放射の起源を特定可能  
5°以下のPSFがあれば非一様性が見える

# 将来計画の予想検出感度

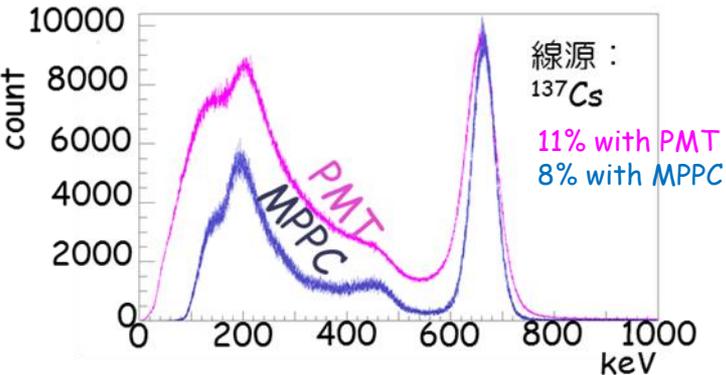


# 次期計画へ向けた検出器の改良

有効面積を ~5倍、角度分解能2~3倍改善していく為に...

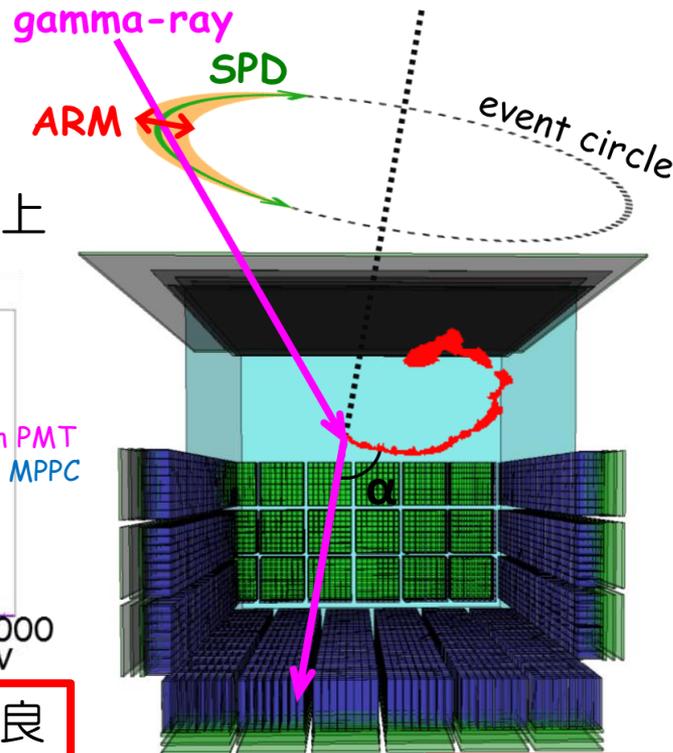
## シンチレータの改良

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



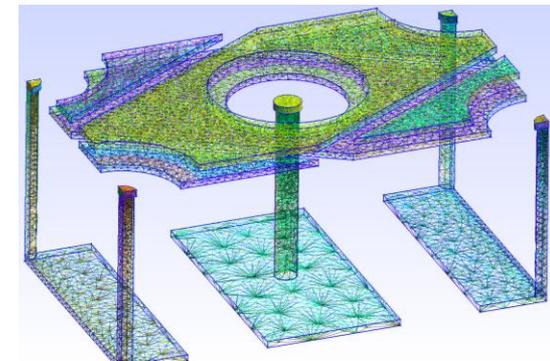
## 全体システムの改良

ガス圧力容器を暴露  
構造体の見直し (軽量化)



## ガス飛跡検出器の改良

$\text{CF}_4$  baseのガスで3気圧  
ガス容積を $(50\text{ cm})^3$ へ  
ガス圧力容器の軽量化  
3軸読み出し $\mu$ -PIC



## 今回からの修正点

姿勢センサの見直し

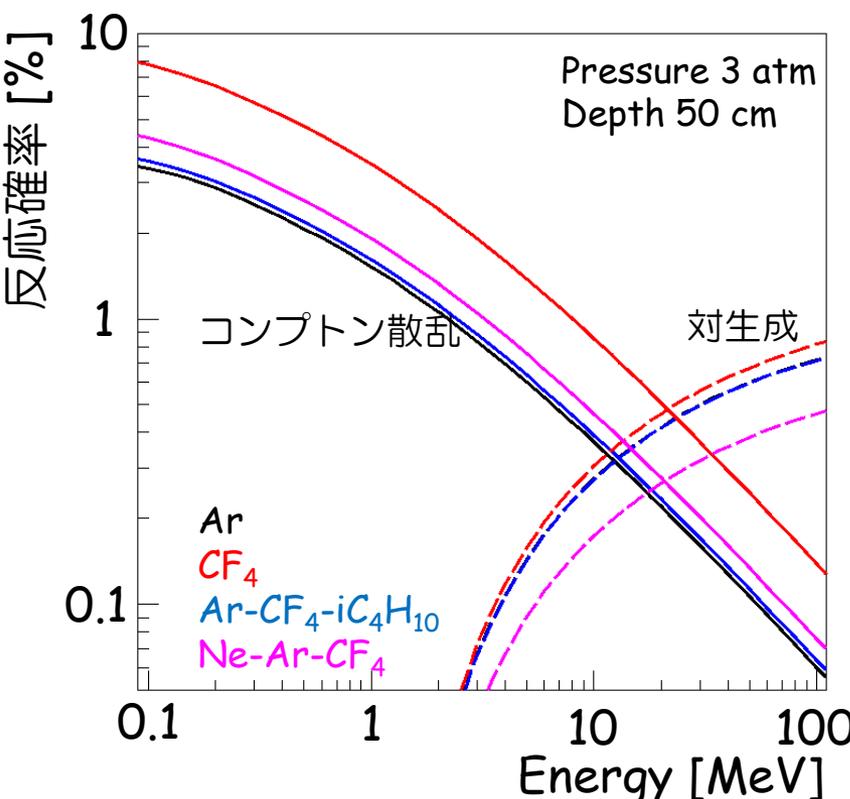
# TPCのガス選択

Ar-CF<sub>4</sub>-iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>  
Ne-Ar-CF<sub>4</sub>

95 : 3 : 2  
59.7 : 0.3 : 40

| gas   | Ne<br>[個/分子] | $\rho$<br>[mg/cm <sup>3</sup> /atm] | $X_0$<br>[m atm] | w<br>[eV] | dE/dx<br>[keV/cm/atm] |
|---|--------------|-------------------------------------|------------------|-----------|-----------------------|
| Ar  | 18           | 1.784                               | 109.6            | 26        | 2.44                  |
| CF <sub>4</sub>                                     | 42           | 3.884                               | 87.52            | 54        | 7                     |
| Ar-CF <sub>4</sub> -iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 19.04        | 1.865                               | 109.5            | 26.34     | 2.65                  |
| Ne-Ar-CF <sub>4</sub>                               | 22.824       | 2.096                               | 154.9            | 41.72     | 3.74                  |

動作実績有



- コンプトン散乱確率  $\propto$  1分子あたりの電子数  
⇒ **CF<sub>4</sub>が最も大きい**
- 対生成確率  $\propto Z^2$   
⇒ **ArとCF<sub>4</sub>はほぼ同じ確率**
- 多重散乱  $\propto$  (放射長  $X_0$ )<sup>-0.5</sup>  
⇒ **Ne-Ar-CF<sub>4</sub>が最も多重散乱しない**
- 最小電離粒子の検出確率  $\propto$  (dE/dx)/w  
⇒ **CF<sub>4</sub>が最も大きい**  
μ-PIC + GEMでの必要最低利得  
(CF<sub>4</sub>, 3 atm) = ~5000

|                                   |   |      |      |
|-----------------------------------|---|------|------|
| CF <sub>4</sub> 100% 3 atm        | ➡ | 有効面積 | 3.3倍 |
| or<br>Ne-Ar-CF <sub>4</sub> 3 atm |   |      | 1.8倍 |

# 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 11~12% @ 662 keV
- ~1 kV, ~150  $\mu$ A = ~0.15W
- HV ONから数時間はgainに大きな不定性



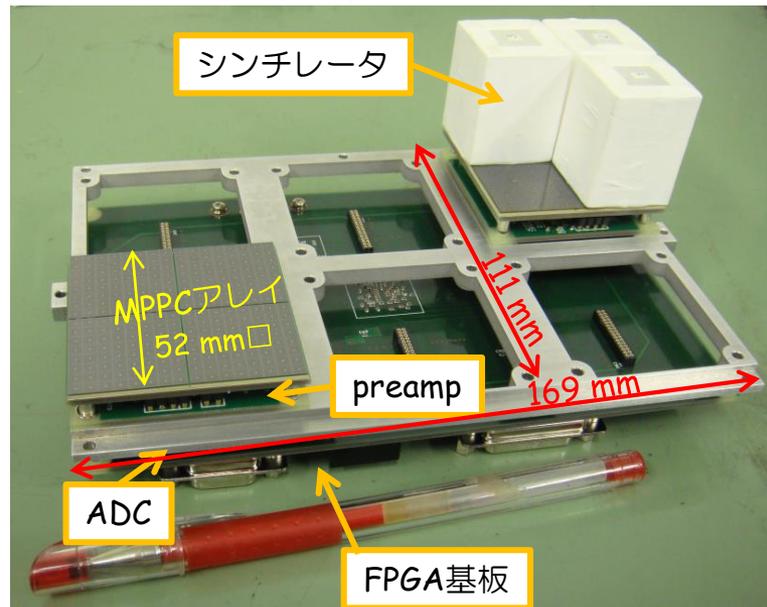
- GSOの発光波長  $\approx$  MPPCの最大感度波長  
 430 nm                      450 nm  
 $\Rightarrow$  ~8% @ 662 keVのエネルギー分解能
- MPPCの温度依存性は補正可能
- 軽量・省スペース・省電力
- 低倍率・高倍率の2つの  
 アンプで広帯域化

エネルギー分解能によるARM

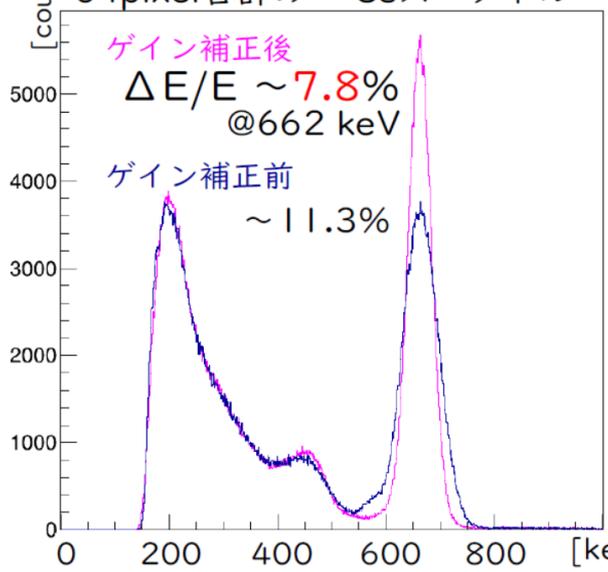
~7度 by PMT

$\Rightarrow$  ~5度 by MPPC  
 @ 662 keeV

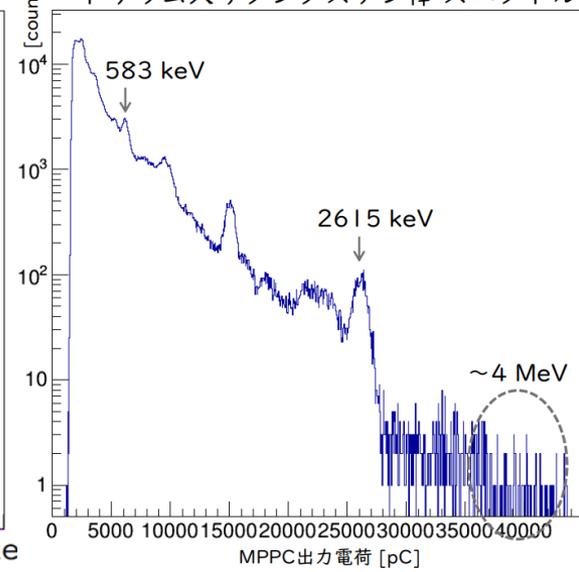
TPCのエネルギー分解能：30% @ 30 keVと仮定



2018年9月 物理学会(斎藤)  
 64pixel合計の<sup>137</sup>Csスペクトル



トリウム入りタングステン棒 スペクトル



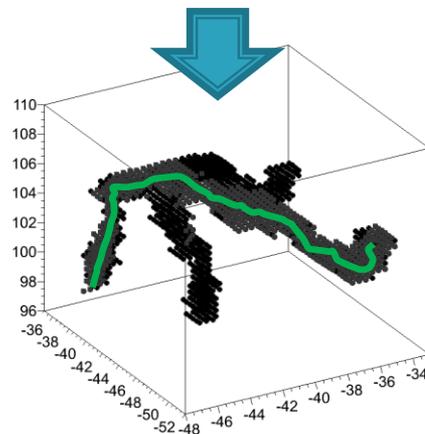
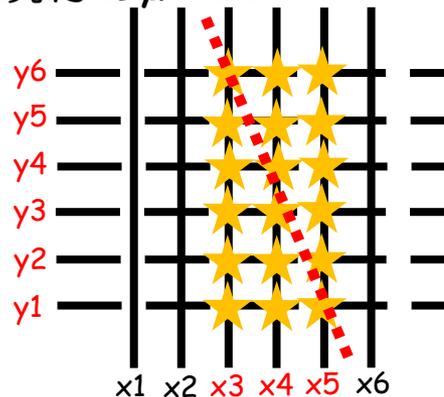
# 3軸 $\mu$ -PIC

現在：直交する2方向にstrip読み出し  
 ⇒ 同時を取得すると長方形にfakeな飛跡も生じる  
 ⇒ 不定性が生じて反跳方向の精度の悪化に

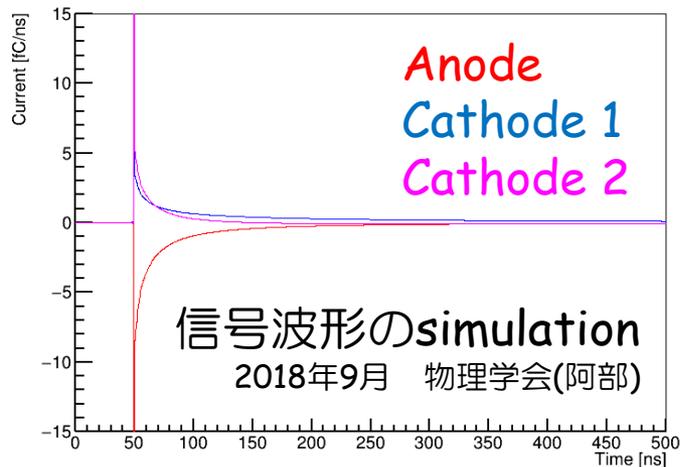
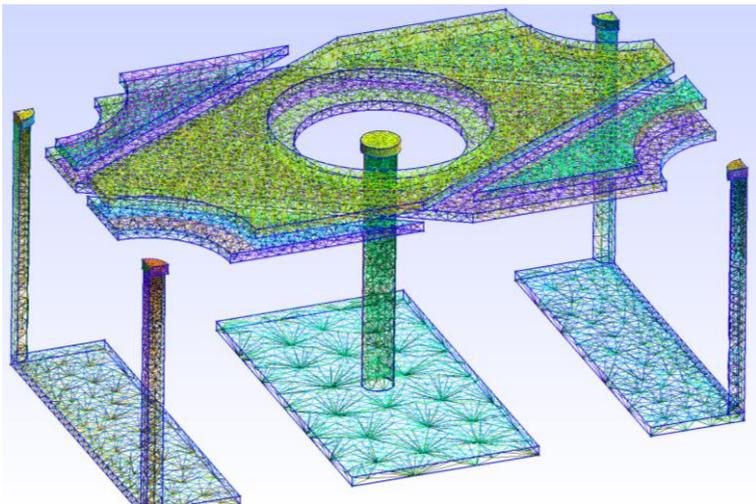
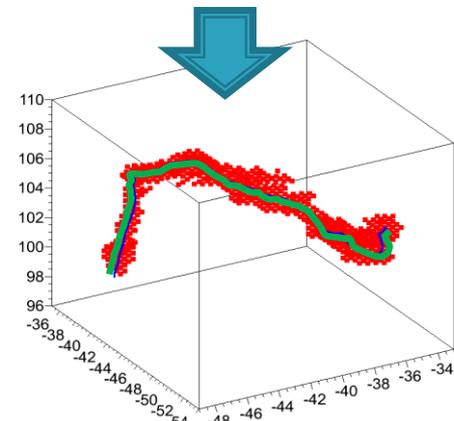
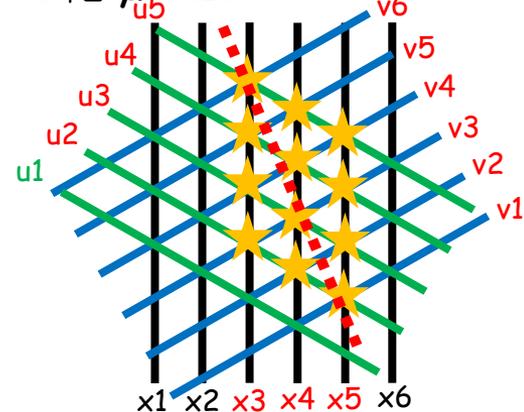


3軸 $\mu$ -PIC：120度毎のstrip読み出し  
 ⇒ 大部分の飛跡で不定性を減少  
 反跳方向の精度を多重散乱の限界まで向上へ

## 現行の $\mu$ -PIC



## 3軸 $\mu$ -PIC

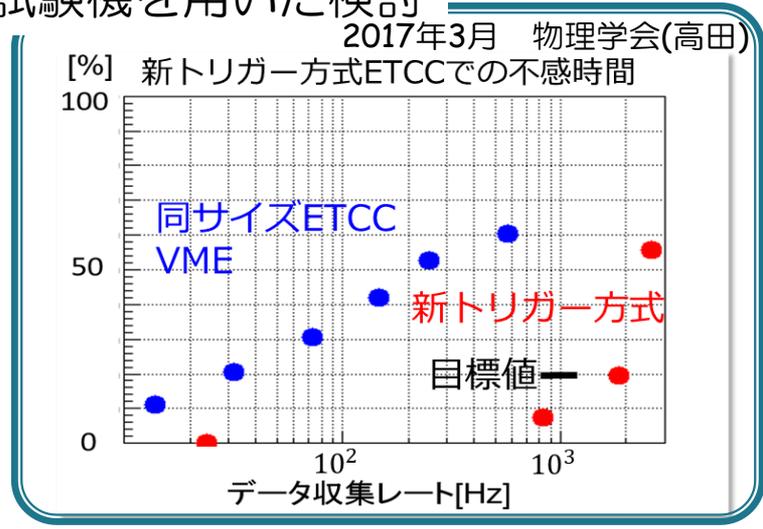
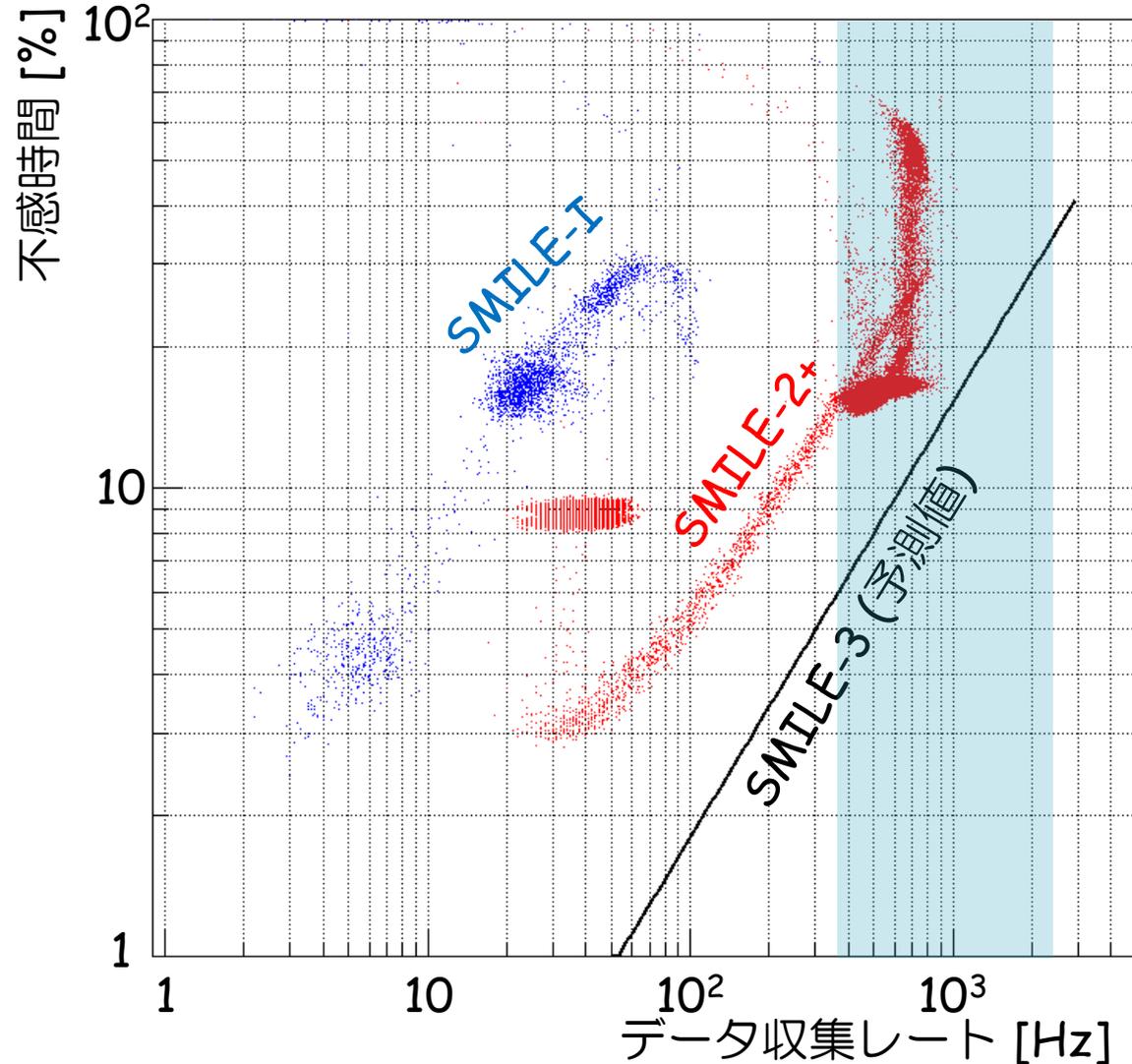


Simulationによる  
電極構造の設計終了



実機作成・試験へ

# 不感時間の削減



- SMILE-I
  - ↓ VME CPUへinterruptをかけたbus経由でデータを収集
- SMILE-2+
  - ↓ Ethernet経由での定常的なデータ転送
- SMILE-3
  - Common stop mode
  - シンチレータとTPCとの同時が取れた場合のみ不感時間が発生

# まとめ

## ▶ SMILE-I, SMILE-2+の結果

⇒ ガス飛跡検出器によるETCCが唯一解

⇒ 科学観測 SMILE-3へ

## ▶ SMILE-3でねらう天体候補

@ Alice Springs : Cen A, 511 keVの空間分布  
(ISASA/JAXA) galactic diffuse gamma-ray

SPB (NASA) : 背景ガンマ非一様性,  $^{26}\text{Al}$

## ▶ SMILE-3 ETCCの初期設計

ガス種変更 + 3気圧へ

シンチレータの配置最適化

MPPCによるシンチレータ読み出し ARM ~5 deg.

3軸 $\mu$ -PICを用いた飛跡検出器

Common stop mode DAQ

1.8~3.3倍

最大2倍

SPD ~30 deg.

有効面積

3.5~6.5倍

5~10 cm<sup>2</sup>

@ 300 keV

PSF

~5 deg.