



SMILE16：次期気球実験へ向けた 電子飛跡検出型コンプトンカメラ 開発の現状報告

中村祥吾^A

谷森達^A 窪秀利^{A, B} Parker Joseph^A 水本哲矢^A 水村好貴^A 友野大^A
岩城智^A 澤野達哉^A 中村輝石^A 松岡佳大^A 古村翔太郎^A 小田真^A
園田真也^C 身内賢太郎^D 高田淳史^E 岸本祐二^F 株木重人^G
黒澤俊介^H 田中真伸^{B, I} 池野正弘^{B, I} 内田智久^{B, I}

京大理^A Open-It^B 京大工^C 神戸大理^D 京大生存圏研^E
KEK放射線科学センター^F 東海大医^G 東北大金属研^H KEK素核研^I

物理学会 第69回秋季大会 高知大学朝倉キャンパス 2013年9月22日

MeV γ 線天文学の課題

- 観測技術の課題

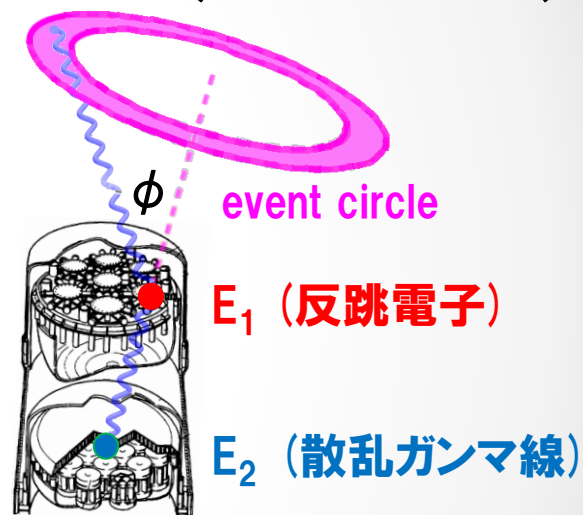
- イメージング

反跳電子と散乱ガンマ線のエネルギー、
散乱点、散乱ガンマ線の吸収点
⇒ガンマ線の到来方向が**円環**

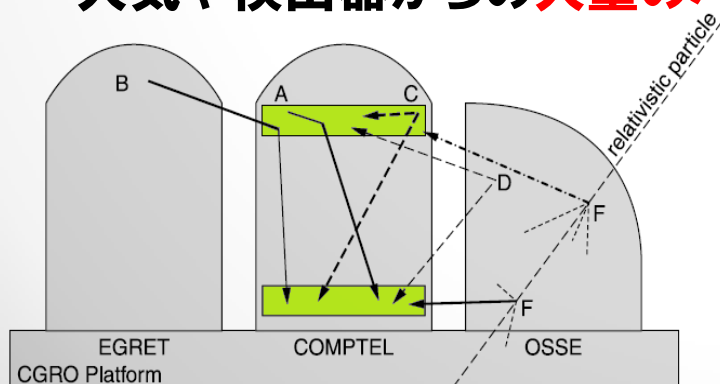
- バックグラウンド

大気や検出器からの**大量のバックグラウンド**

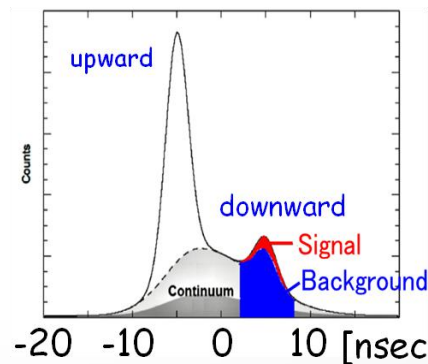
COMPTEL (1991~2000)



V. Schönfelder+ (ApJS, 1993)



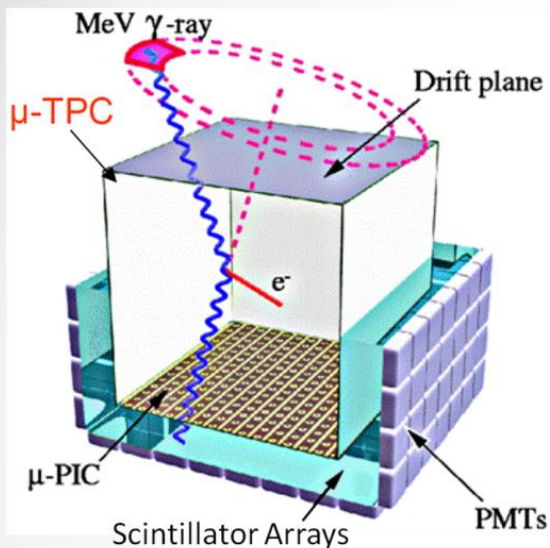
R. van Dijk (Ph.D thesis, 1996)



G. Weidenspointner+ (A&A, 2001)

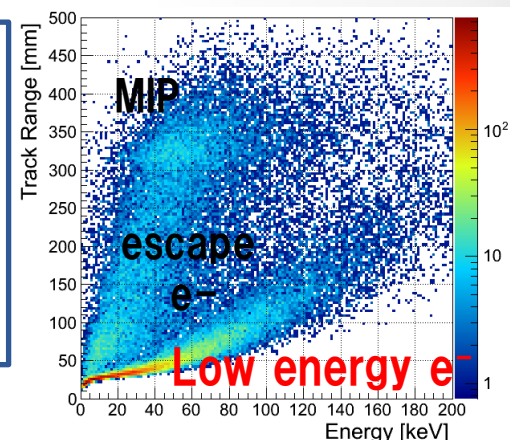
電子飛跡検出型コンプトンカメラ

Electron Tracking Compton Camera

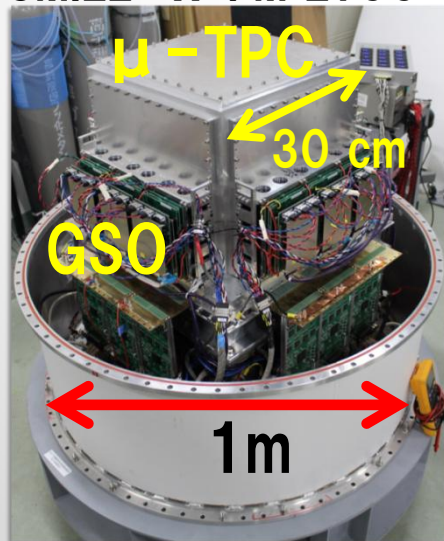


- μ -TPC ... Ar:iso-C₄H₁₀:CF₄ (95:2:3)、1気圧
⇒ 反跳電子の三次元飛跡 + エネルギー
- シンチレーションカメラ ... GSO:Ce 6 mm×6 mm ピクセル
⇒ 散乱 γ 線の吸収点 + エネルギー

- ガンマ線毎に到来方向を扇形に限定
- 電子のdE/dx分布を用いたバックグラウンド除去
- 広い視野(～3 str)

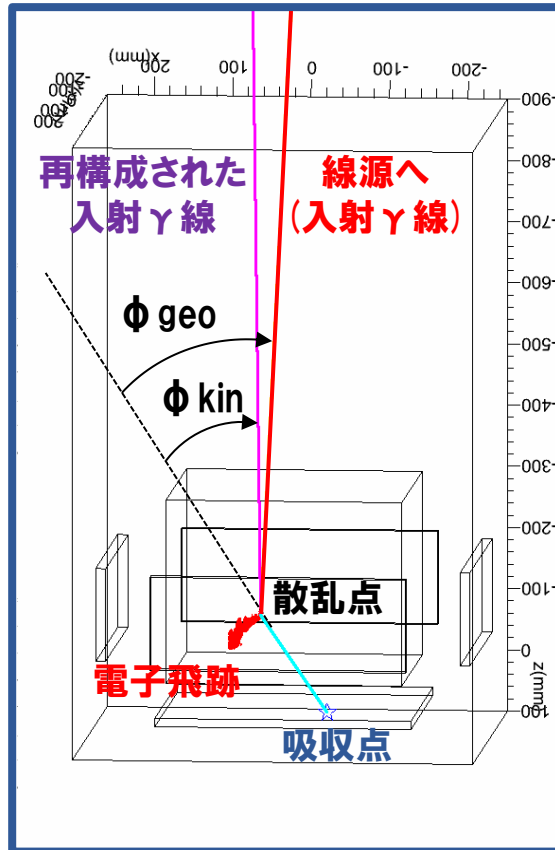
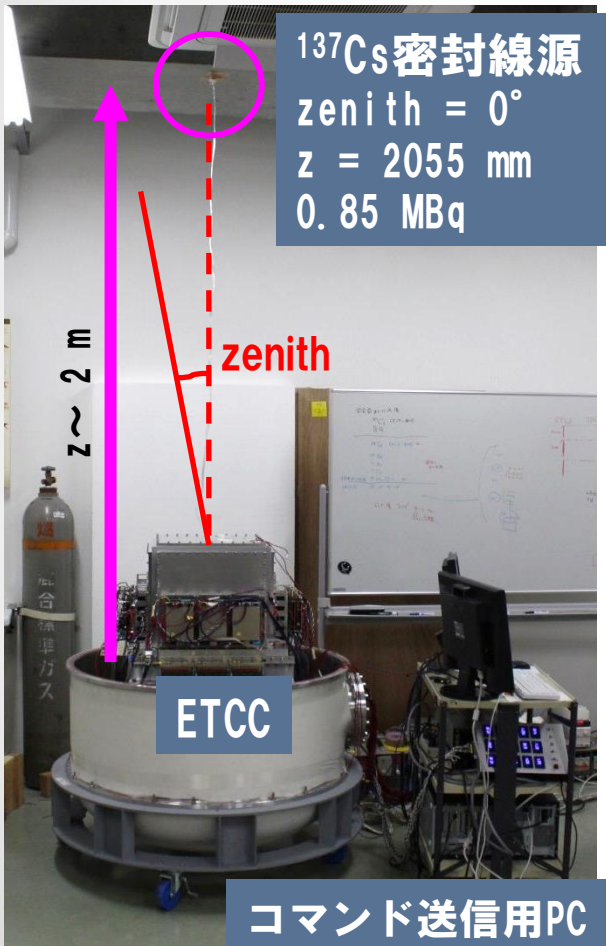


SMILE-II FM ETCC

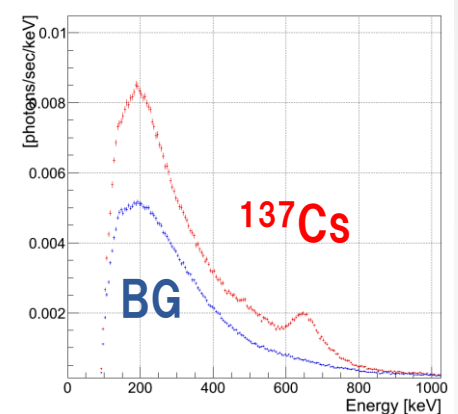


- SMILE-II
 - (30cm)³ ETCC
 - Crabの観測、5 hで5 σ を目指す
 - 要求される有効面積: 1 cm² @ 300 keV
ARM: 10 deg. @ 662 keV
 - 2014年 アメリカで放球申請中
 - 高度35～40 km 1日程度

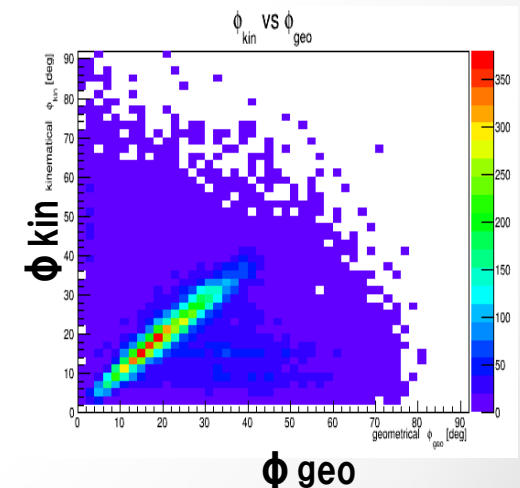
ガンマ線の再構成



1イベント毎に
入射 γ 線を再構成可能



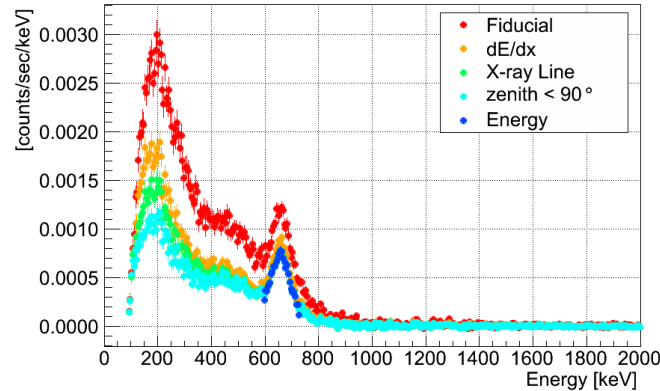
再構成したエネルギースペクトル



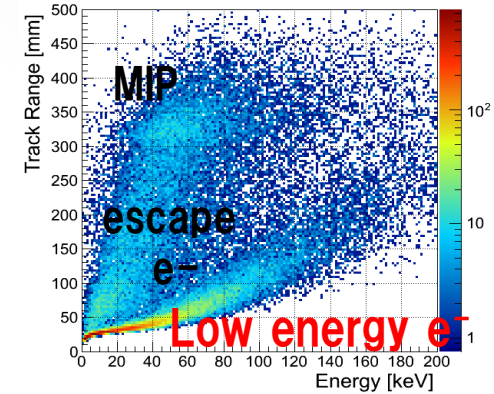
散乱点、吸収点、エネルギーが正しくとれて
いれば実際の線源位置(ϕ_{geo})と再構成から
得られる位置(ϕ_{kin})との相関が見える

ガンマ線の再構成

- ^{137}Cs
 - 0.85 MBq
 - zenith = 15 deg.
 - z = 2055 mm

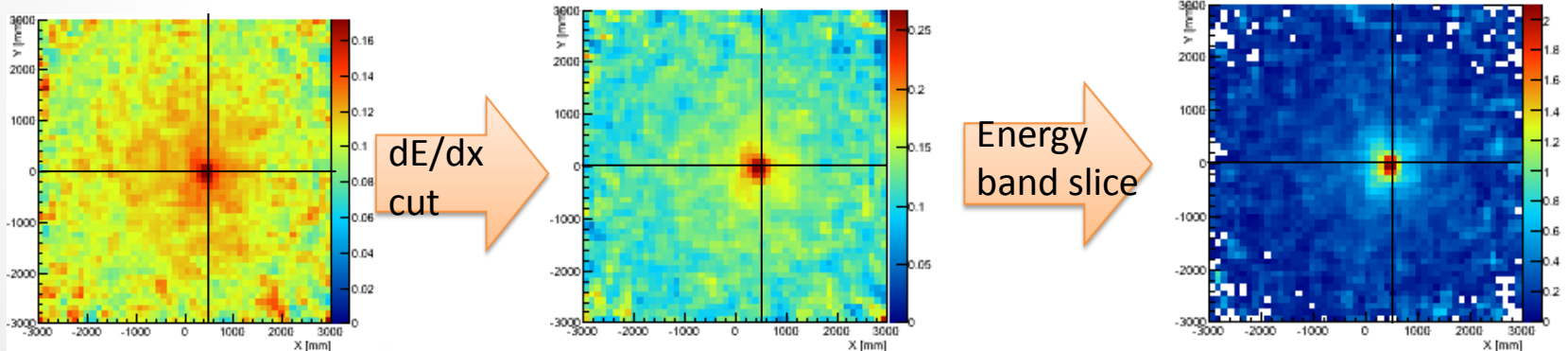


エネルギースペクトル (BG引き後)



dE / dx 分布

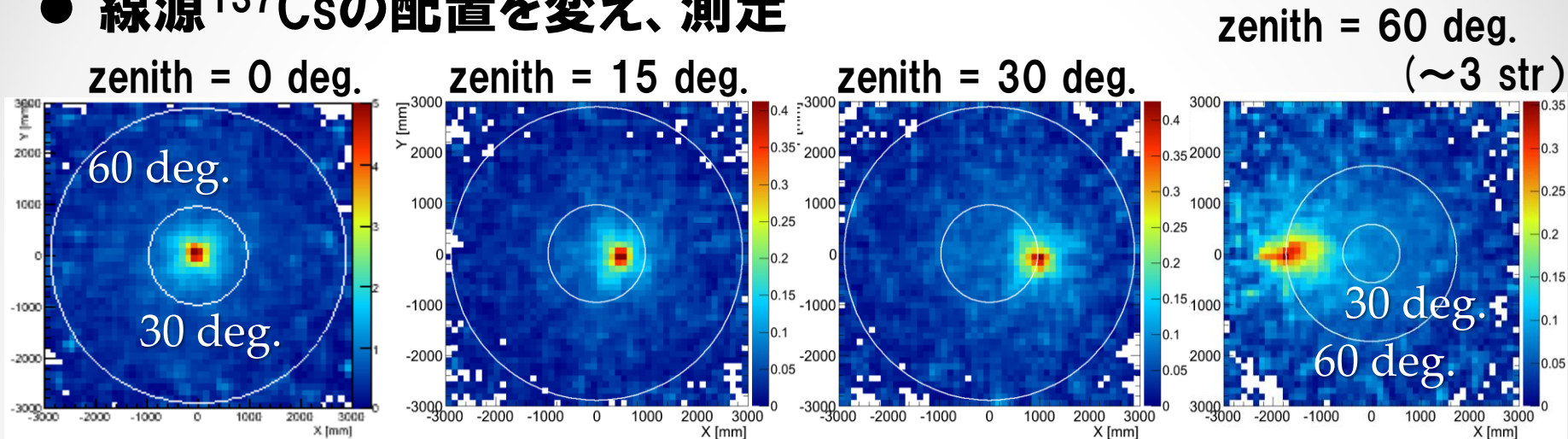
- 到来ガンマ線の再構成イメージ (BG引き後、2直線の交点が線源の位置)



- 簡単なcut条件でより鮮明なイメージングが可能
- dE/dx分布よりBG除去
- 連続成分に対してもBG除去

再構成イメージの視野変化

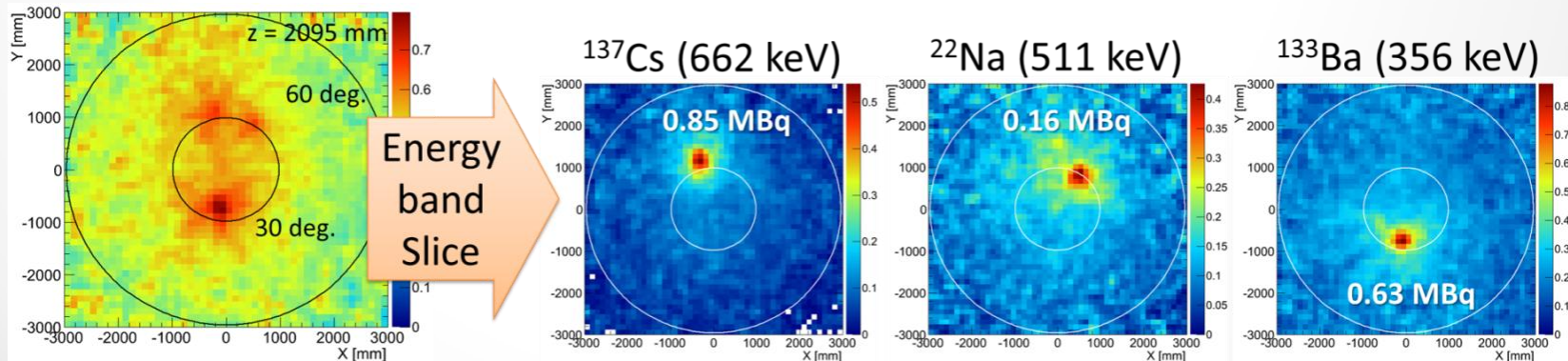
- 線源 ^{137}Cs の配置を変え、測定



zenith = 60 deg.
(~3 str)

到来ガンマ線のzenith方向の変化を確認

- ^{137}Cs (0.85 MBq), ^{22}Na (0.16 MBq), ^{133}Ba (0.63 MBq)

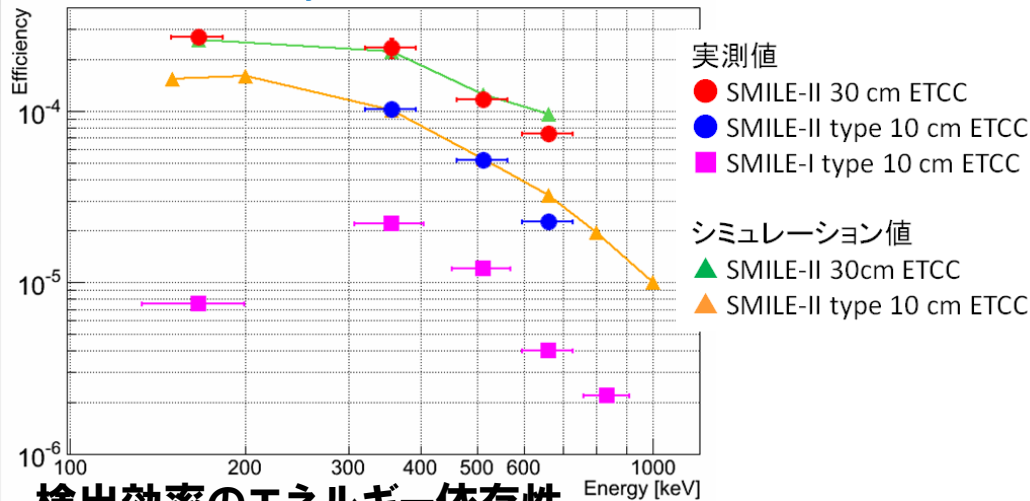


dE/dxカット後のイメージ
この段階でも線源の位置が区別できる

複数の線源イメージの識別に成功

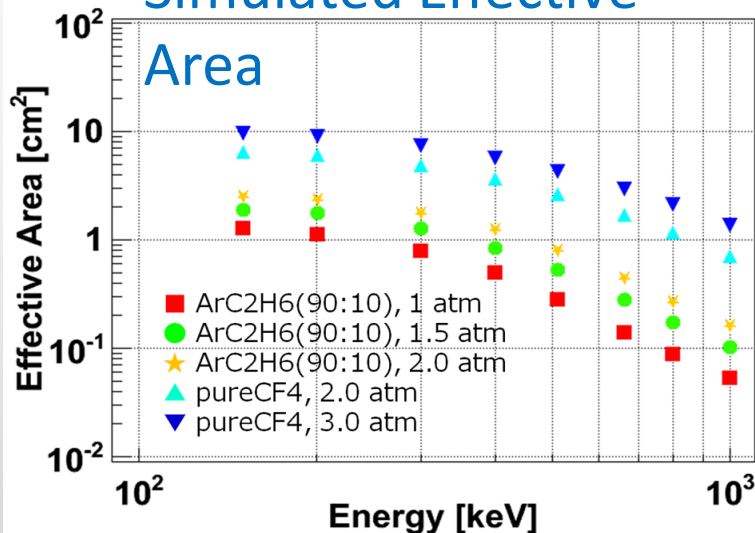
検出効率

Efficiency



検出効率のエネルギー依存性
(GSOシンチレータアレイは底面のみで計算)

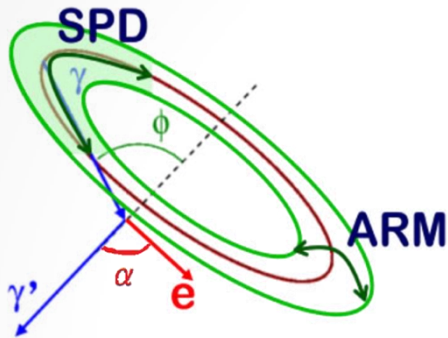
Simulated Effective



- SMILE-I からSMILE-IIで
検出効率向上
- 側面シンチレータアレイを組み込み、
有効面積 **1cm²**を目指す
- 物理シミュレーションと測定の検出
効率がよく一致、Compton eventを
100%検出
⇒シミュレーションにより検出器の
性能の正確な予想が可能に

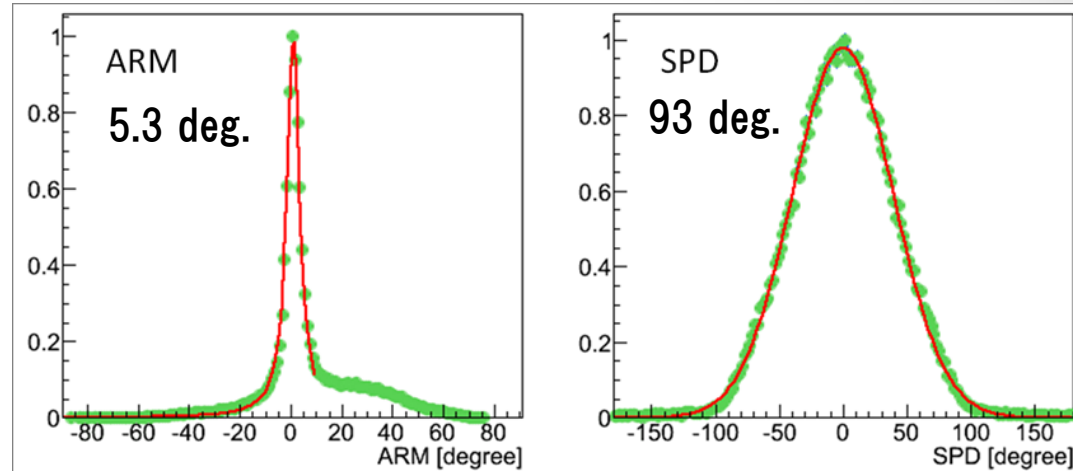
- 今後に向けて
シミュレーションで最適な
ガスの種類、ガス圧を算出
⇒CF₄、3気圧で有効面積 **10cm²**

角度分解能

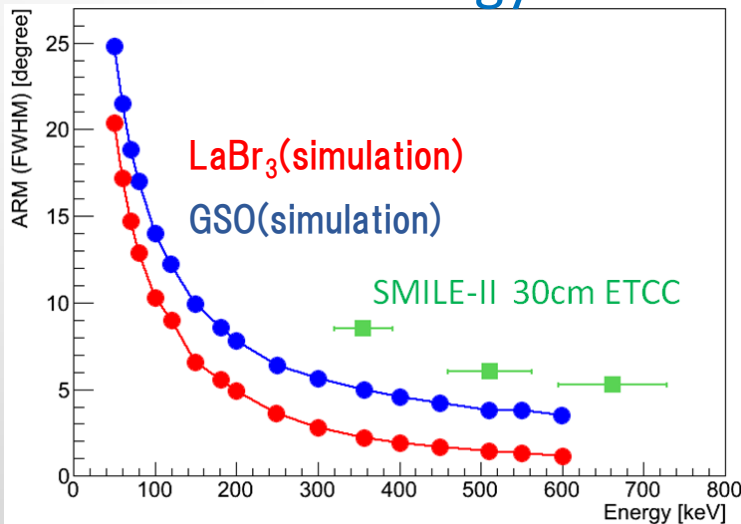


- ARM … 散乱角の決定精度
- SPD … 散乱平面の決定精度

角度分解能(FWHM) @662 keV

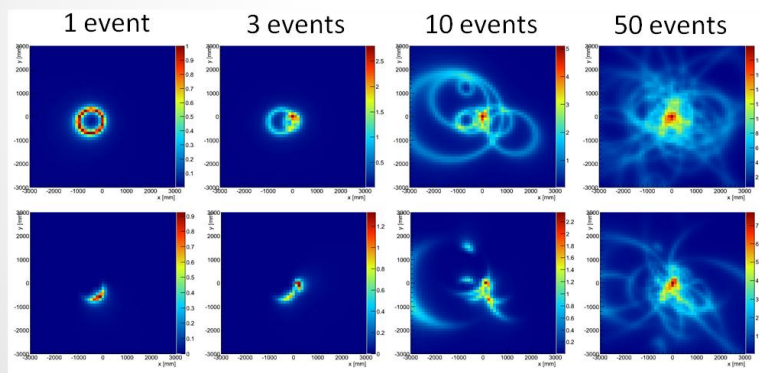
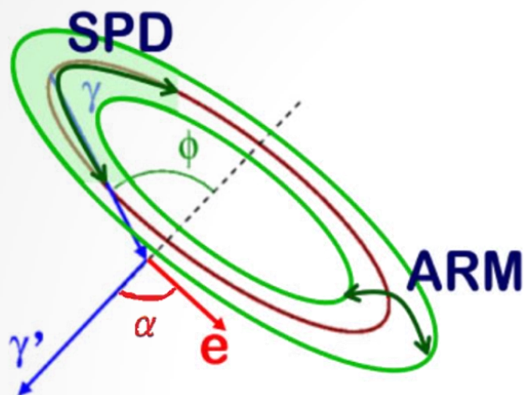


ARM vs. Energy



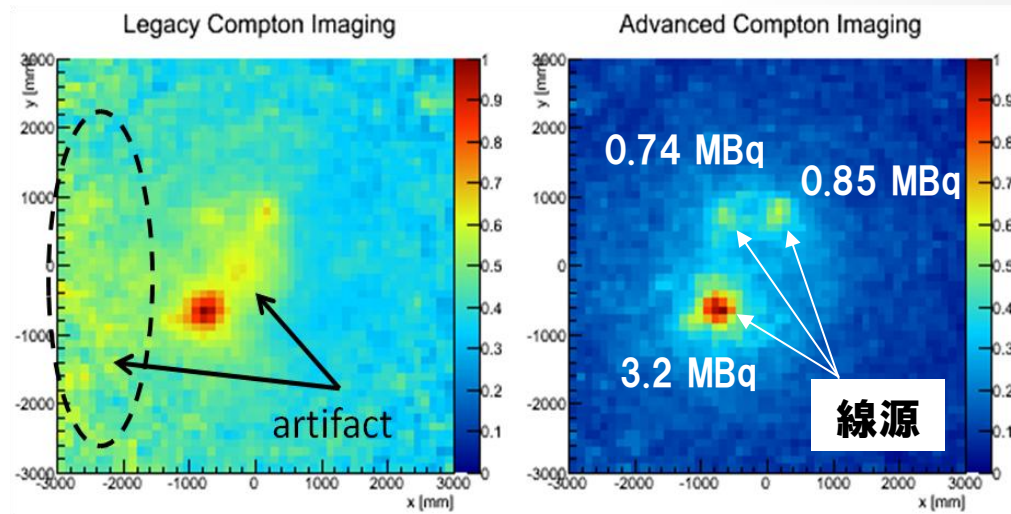
- ARMは当初目標(10 deg.)の倍良い値
測定器の原理限界に近い値
- SPD=93 deg. は他の検出器と比べ、
非常に良い値

SPDの有効性



上段：円環を重ね合わせた場合
(Legacy Compton)
下段：円弧を重ね合わせた場合
SPD=200 deg.
(Advanced Compton)

$^{137}\text{Cs} \times 3$ (3.2 MBq, 0.85 MBq, 0.74 MBq)

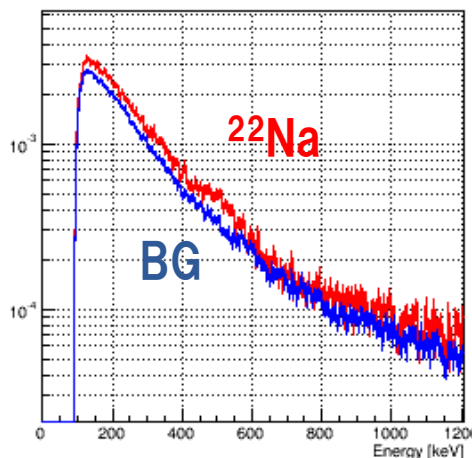


SPDを考慮することで
円環の場合より約4倍高いコントラストのイメージ
(この図ではSPD=200 deg.)

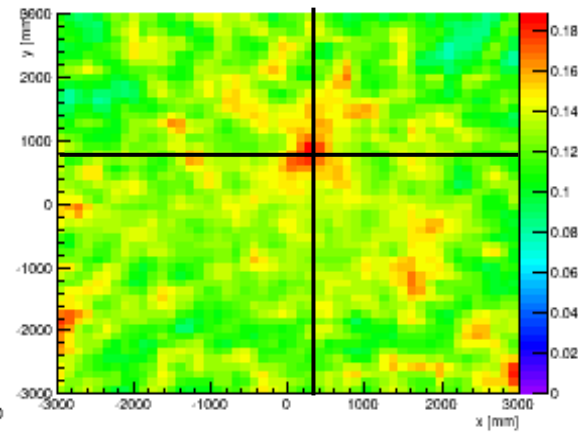
弱線源のイメージング

● 線源: ^{22}Na

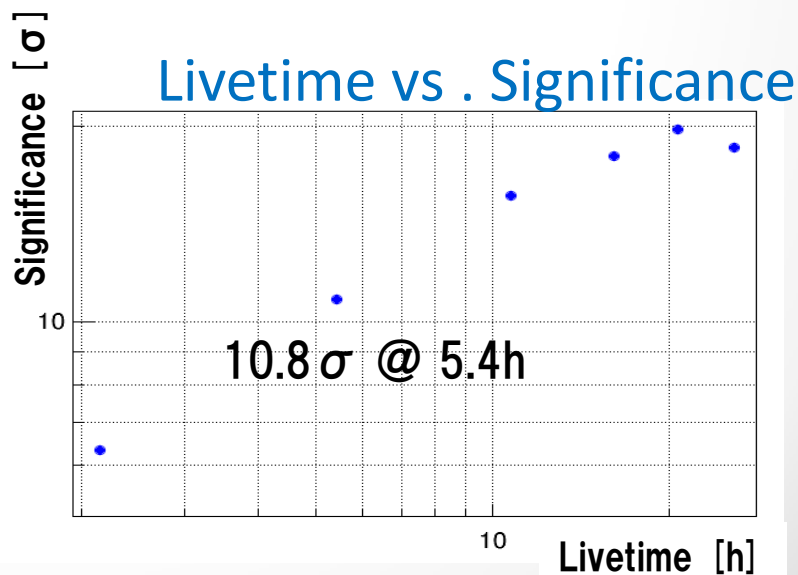
- zenith = 26 deg.
- z = 2095 [mm]
- 2mmの鉛で線源を覆う
 - 覆う前: 44 kBq
 - 覆った後: **31 kBq相当**
- 511 keV \pm 10% での event 数 = 26 h で 1.2×10^3 events (0.013 Hz)
- dE/dx カット後の BG γ = 0.69 Hz
 \Rightarrow **S/N = 0.019**
予想される Crab の数倍



dE/dx cut後のスペクトル
(livetimeで規格化)



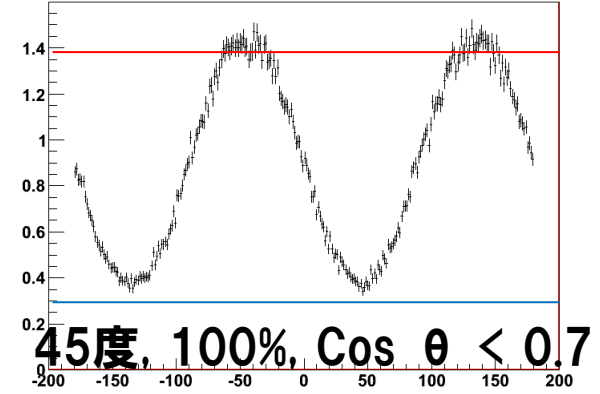
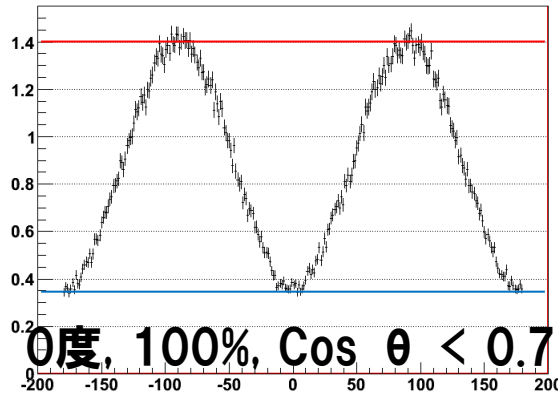
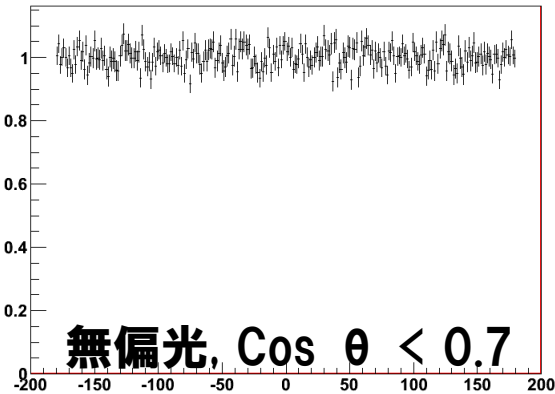
511 keV \pm 10% での
Advanced Compton image



偏光観測の可能性

- シミュレーション条件

- Gas: CF_4 40% + Ar 54% + C_2H_6 6%, 1 atm
- initial energyを200keV単色に固定
- 天頂方向から平行光

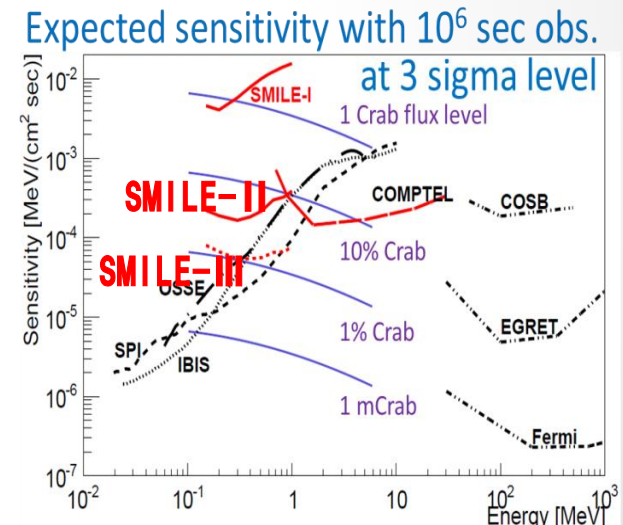


	Event数	Max	Min	M
無偏光	5.33e5			
0度, 100%	4.69e5	1.4	0.35	0.60
45度, 100%	4.83e5	1.45	0.35	0.61

モジュレーションファクター
 $M = (\text{Max} - \text{Min}) / (\text{Max} + \text{Min})$

まとめ

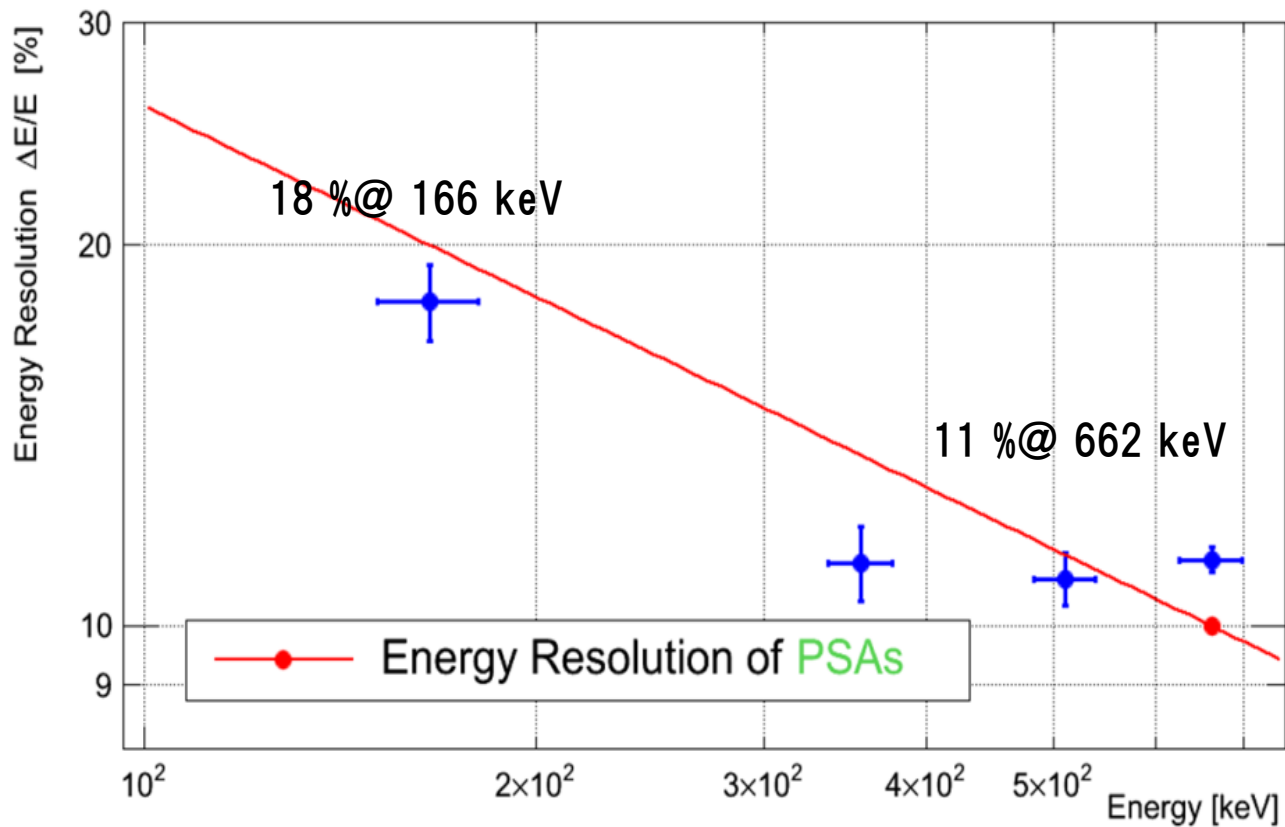
- 気球実験SMILE-IIのFM ETCCを構築、性能試験を実施中
予定している有効面積 1cm^2 達成の可能性大
- 複数線源、広い視野でのイメージの取得に成功
- 角度分解能: ARM = 5.3 deg.
SPD = 93deg. @662 keV
- 検出効率はシミュレーションと一致
- dE/dx 分布による低雑音化
- SPDによる高コントラスト(~ 4 倍)
- 偏光観測が期待できる
- 今後のSMILE計画
 - SMILE-IIに向け、高BG環境試験、熱真空環境試験



おわり

エネルギー分解能

Energy resolution (FWHM) vs. Energy



Simulation条件

- 30cm角TPCとGSO-PSA 108個
- Gas: CF_4 40% + Ar 54% + C_2H_6 6%, 1 atm
- Geant4.9.0.p01
- G4LowEnergyPolarizedCompton modified by T. Mizuno

- initial energyを200keV単色に固定
- 天頂方向から平行光
 - ⇒ 散乱方向ベクトルのxy平面の角度だけみればよい

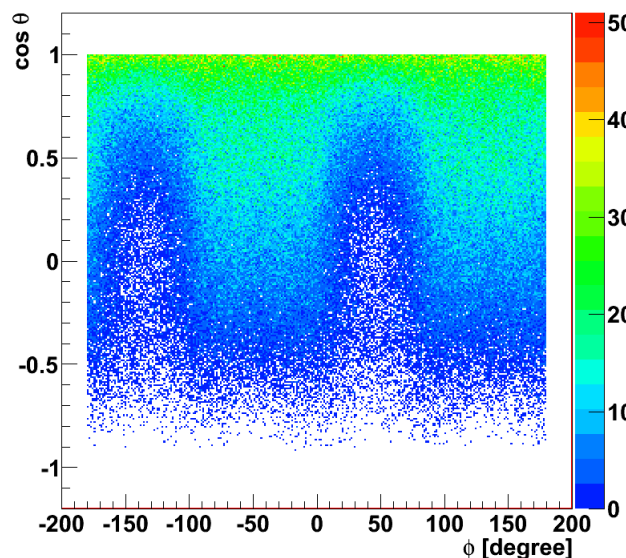
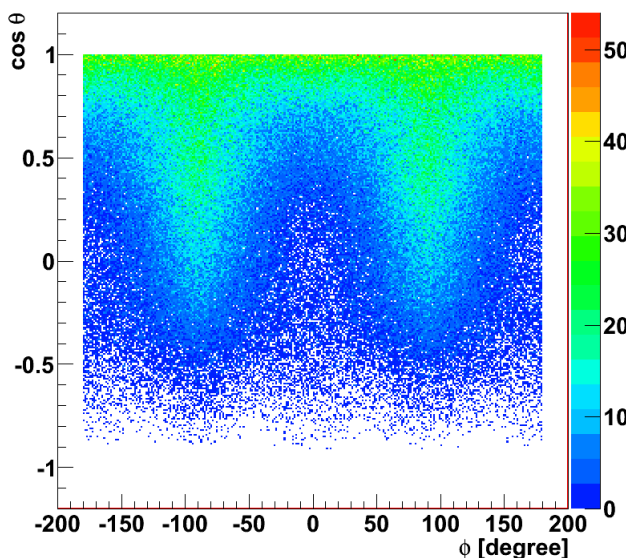
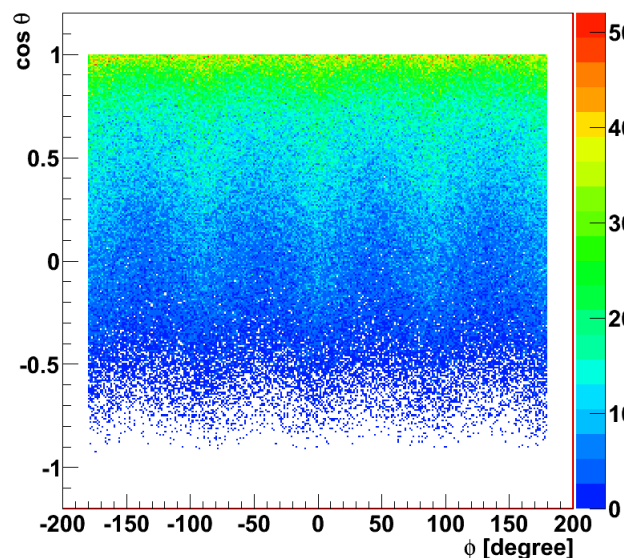
- 散乱点分解能・エネルギー分解能等はとりあえず忘れる
- BGのことも忘れる
- シンチレータのピクセル分解能のみ考慮

散乱方向ベクトル分布

Scattered Direction

Scattered Direction

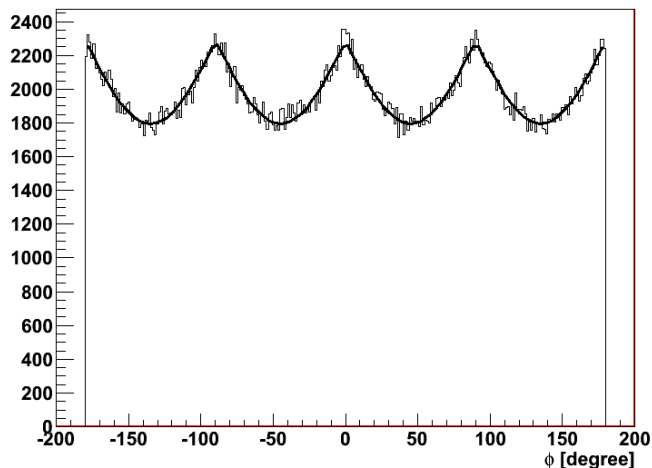
Scattered Direction



無偏光

0度, 100%

45度, 100%



responseを無偏光のデータで仮定

$$y = -489 \left| \sin\left(\frac{\pi}{90}x - 0.00357\right) \right| + 2290$$