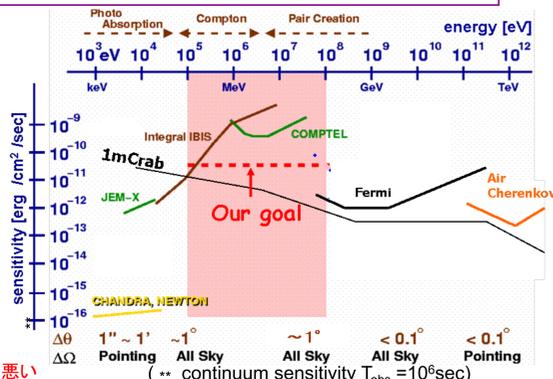




1. MeV ガンマ線天文学

過去の観測

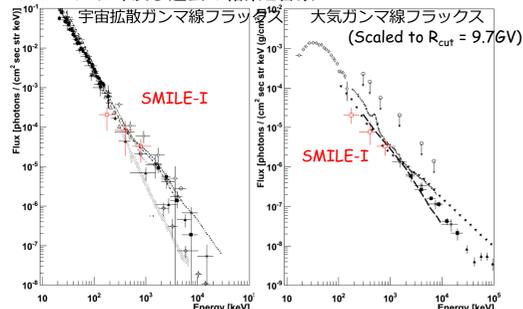
- COMPTEL (CGRO) [1]
Compton Imagingを用いた検出器
約30個の定常放射天体を検出
- IBIS, SPI (INTEGRAL) [2]
Coded Aperture Imagingを使用
MeV付近での感度は
COMPTELと同程度
- MeV領域は宇宙線と検出器との
相互作用などによって生じる
大きなバックグラウンドあり[3]
上記検出器はガンマ線イベント毎に
到来方向を決定できず
バックグラウンドに弱い
⇒他の領域に比べ感度が一桁以上悪い



3. SMILE (Sub-MeV γ-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment)

SMILE-I [8]

- 宇宙拡散および大気ガンマ線の測定が目的(2006年、三陸から放球、高度約35 km)
- power: ~250 W (system)
- balloon: 100,000 m³
- TPC: 10 x 10 x 15 cm³ (gas: Xe+Ar+C₂H₆ 1 atm)
- scintillator (GSO): 3 x 3 PMTs@bottom 4 x (3 x 2) PMTs@side
- ~400の下向きガンマ線イベントを検出、シミュレーション、及び過去の結果と合致



SMILE-II ではCrabやCyg-X1といったガンマ線で明るい天体がターゲット ⇒ 検出効率の改善が必要

4. SMILE-II の開発状況1 ~Gas Study~

TPCのガスの最適化

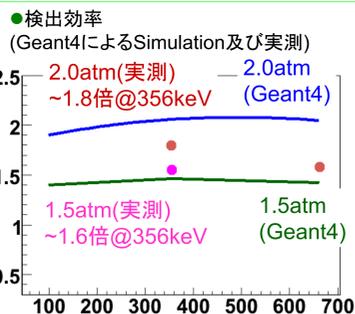
ETCC全体の検出効率改善、及び拡散を現象させるためにTPCのガスの種類と圧力を検討

高圧化

- TPCのガスの圧力を上げることにより
- ◎検出効率改善
- × Gas Gain低下

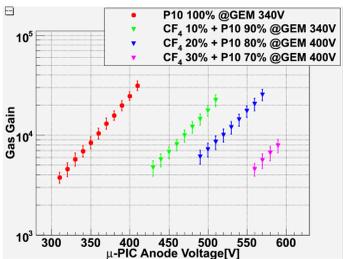
- TPCの基本性能(2atm時)
- gas: Ar90% + C₂H₆ 10% (2atm)
- drift velocity: 4.2 cm/μsec
- gain: ~20000
- energy resolution: ~50% (@32 keV, FWHM)
- position resolution: 388 μm

ガス圧2.0atmでイメージング成功、検出効率1.8倍

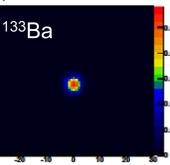


CF₄ Gas

- TPCのガスにCF₄を用いることで
- ◎拡散が小さい→位置分解能改善
- ◎検出効率大
- × Gas Gain小(下図)



- TPCの基本性能
- gas: CF₄ 20% + Ar 72% + C₂H₆ 8% (1atm)
- drift velocity: 6.5 cm/μsec
- gain: ~25000
- energy resolution: 28.8%(@32 keV, FWHM)
- position resolution: 614 μm

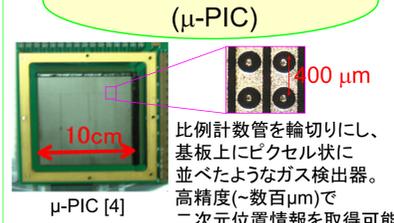


CF₄カメラ SPD: 99.4 deg. ARM: 9.1 deg. (FWHM) 検出率はAr90% + C₂H₆ 10% の1.1倍@356keVに

現在CF₄メインのガス、1~2atmで試験中。検出効率従来の2~3倍を目指す

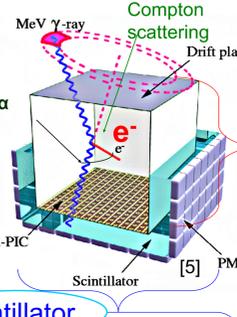
2. われわれの電子飛跡測定型ガスコンプトンカメラの概要

Micro Pixel Chamber (μ-PIC)

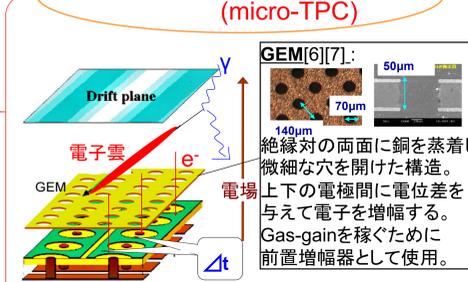


比比例計数管を輪切りにし、基板上にピクセル状に並べたようなガス検出器。高精度(~数百μm)で二次元位置情報を取得可能

Gd₂SiO₅:Ce (GSO) ピクセルシンチレータ (6 x 6 x 13 mm³) マルチアノード光電子増倍管(MAPMT)と接合(アノードピッチはピクセルと同じ)



Micro Time Projection Chamber (micro-TPC)



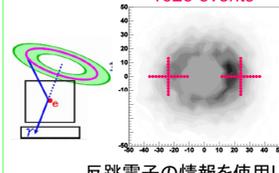
μ-PIC面への到達時間差Δt 水平二次元およびエネルギー情報 垂直方向の位置情報

散乱ガンマ線の吸収位置およびエネルギーの測定 イベントごとにコンプトン散乱を再構成、コリメーターを用いていないので広視野(~3str.)を実現

Classical vs. Advanced Compton imaging

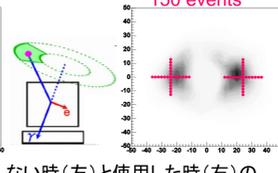
Classical:

- 反跳電子の情報は破棄
- 到来方向は円形に限定
- 誤差は円形 (COMPTEL) 1625 events



Advanced:

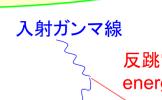
- 反跳電子の情報を使用
- 到来方向を一意に決定
- 誤差は扇形 (われわれの検出器) 150 events



反跳電子の情報を使用しない時(左)と使用した時(右)のイメージング(点線十字は線源位置)

バックグラウンド除去: α-cut

- コンプトン散乱のα角(右図)を下記の2通りの方法で独立に求め、角度が一致しないイベントをバックグラウンドとして除去(α-cut)
- 幾何学的方法
散乱ガンマ線の吸収位置と反跳電子の飛跡から幾何学的に求める
- 運動学的方法
反跳電子と散乱ガンマ線各々のエネルギーからコンプトン散乱の式(以下)を用いて計算



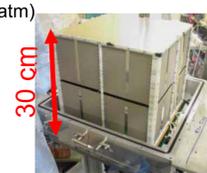
$$\cos \alpha = \left(1 - \frac{m_e c^2}{E_g}\right) \sqrt{\frac{K_e}{K_e + 2m_e c^2}}$$

m_e : 電子質量
 c : 光速

5. SMILE-II の開発状況2 ~検出器の大型化~

(30cm)³ micro-TPC

- gas: Ar 90% + C₂H₆ 10% (1atm)
- drift velocity: 4 cm/μsec
- gain: ~30000
- energy resolution: 46% (@32 keV, FWHM)
- position resolution: 400 μm

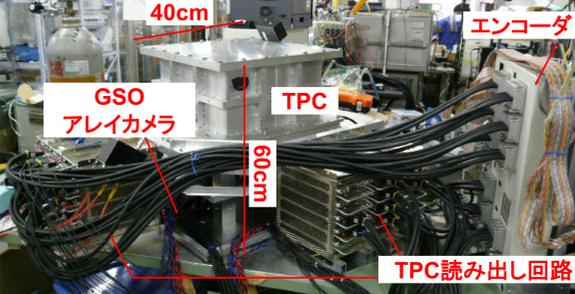


Scintillator: 6 x 6 PMTs GSOアレイカメラ

- number of pixels: 2304
- pixel size: 6 x 6 x 13 mm³
- energy resolution: 10.9% (@662 keV, FWHM)
- position resolution: 6 mm

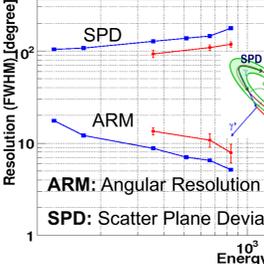


(30cm)³ サイズ コンプトンカメラ



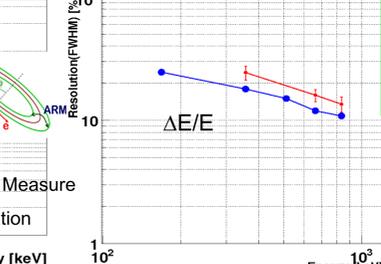
角度分解能

- 赤線: (30cm)³カメラ
- 青線: (10cm)³カメラ

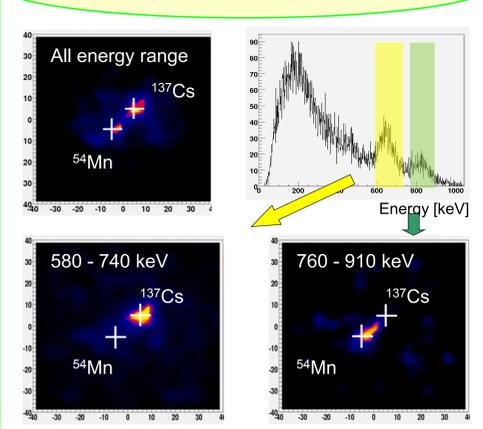


エネルギー分解能

- 赤線: (30cm)³カメラ
- 青線: (10cm)³カメラ



2線源(137Cs, 54Mn)同時測定



図中の白十字が線源の位置 エネルギースペクトル(右上図)の各ピークで区切ると線源別にイメージが分離できる

(30cm)³カメラ SPD: 109 deg. ARM: 10.8 deg. ΔE/E: 16.0% (FWHM) @662keV

(10cm)³カメラ SPD: 130 deg. ARM: 6.6 deg. ΔE/E: 12.0% (FWHM) @662keV

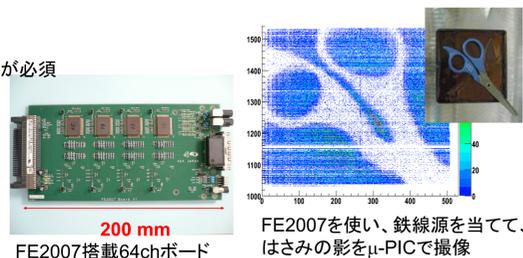
6. SMILE-II の開発状況3 ~省電力化~

ガスTPC読み出し回路の省電力化

- 検出器の大型化にともないガスTPCの読み出し回路の省電力化及び高集積化が必須
- 目標消費電力: 20mW/ch以下

- SMILE-I
- ATLAS TGC ASD (Bipolarプロセス) : 59mW/ch, 4ch/chip

- FE2007(0.5 μm CMOS ASIC, KEK測定器開発室と共同で開発) : 30mW/ch, 8ch/chip



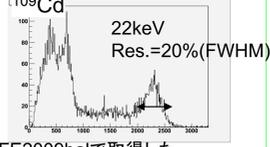
FE2007搭載64chボード

FE2007を使い、鉄線源を当てて、はさみの影をμ-PICで撮像

- FE2009ba(0.5 μm CMOS ASIC) : 18mW/ch (目標値を達成)、16ch/chip
- テスト基板を用いて μ-PICからの信号を確認



FE2009baテストボード



FE2009baで取得した μ-PICからの信号のスペクトル

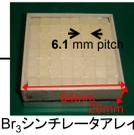
7. 今後の課題

SMILE-II に向けて

- Double GEMの導入
CF₄などのガスゲインが低いガスの対策として GEMを2層にしてGainをかさせ、MeVカメラとしての性能評価
- 30cmTPCに2atm CF₄ mixガスの導入
- 電子トラッキングロジックの改良
コンプトン点の位置精度向上⇒角度分解能の向上
- SMILE-II の実行
2011年の放球を目指す

SMILE-II 以降のために

- 40cmμ-PICの開発
検出効率を上げるために更に大型のmicro-TPCの開発
- よりエネルギー分解能のよいシンチレータの導入
シンチレータのエネルギー分解能があがるとコンプトンカメラの角度分解能がよくなる。(既に10cm角の検出器ではGSOの約半分のエネルギー分解能をもつLaBr₃シンチレータアレイ[9]で実証済み。これにより角度分解能(ARM)が約半分に。(6.4deg.→4.2deg.)



References

[1] V. Schönfelder et al., A&AS 143, 45, (2000).
[2] C. Winkler et al. A & A 411, 1-6, (2003).
[3] G. Weidenspointner et al., A&A 368, 347, (2001).
[4] A. Ochi et al., NIM A 471, 264, (2001).
[5] T. Tanimori et al., New Astro. Rev. 48, 263, (2004).
[6] F. Sauli, NIM A 386, 531, (1997).
[7] T. Tamagawa et al., NIM A 560, 418, (2006).
[8] A. Takada et al., JPSJ 78, 161, (2006).
[9] S. Kurosawa et al., IEEE TNS 56, 3779, (2009)