



長時間気球による MeVガンマ線天文学の開拓

京大理 高田淳史

谷森達, 窪秀利, J. D. Parker, 水本哲矢, 水村好貴,
古村翔太郎, 岸本哲朗, 竹村泰斗, 宮本奨平,
中増勇真, 吉川慶, 黒澤俊介 (東北大), 澤野達哉 (金沢大)

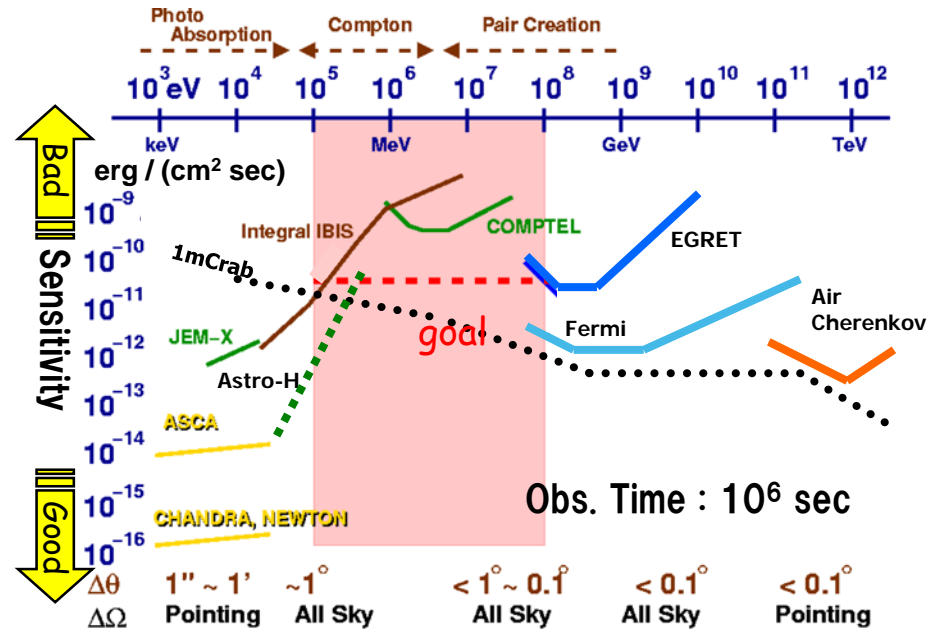
MeV天文学

ラインガンマ線

◆元素合成 超新星残骸, 銀河面

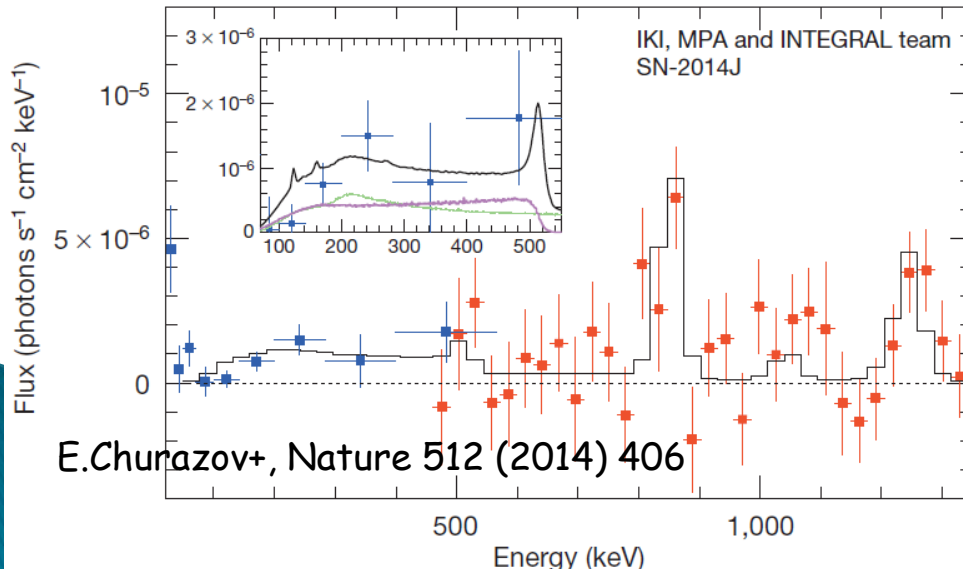
連続スペクトル

- ◆粒子加速 活動銀河核のジェット
- ◆強い重力場 ブラックホール
- ◆遠方宇宙 活動銀河核の分類, ガンマ線バースト
- ◆その他 ガンマ線パルサー, 太陽フレア

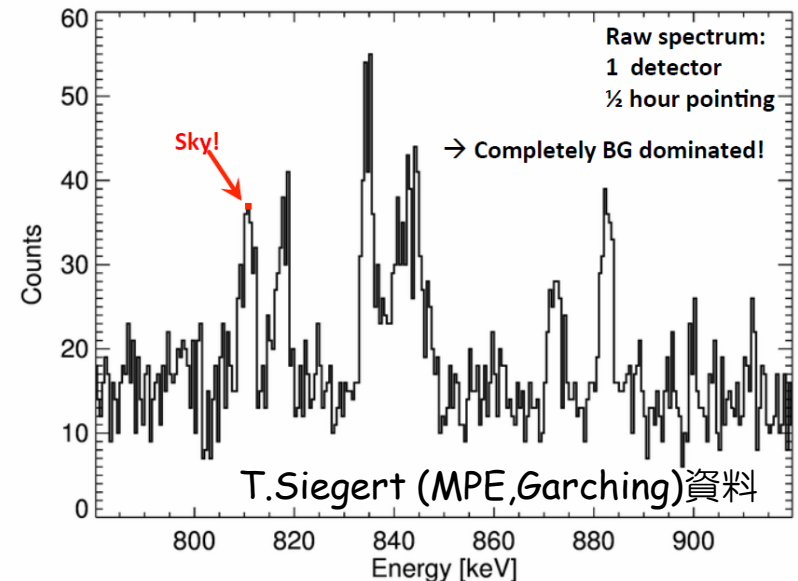


Broad band SN2014J spectrum and the model (day 75)

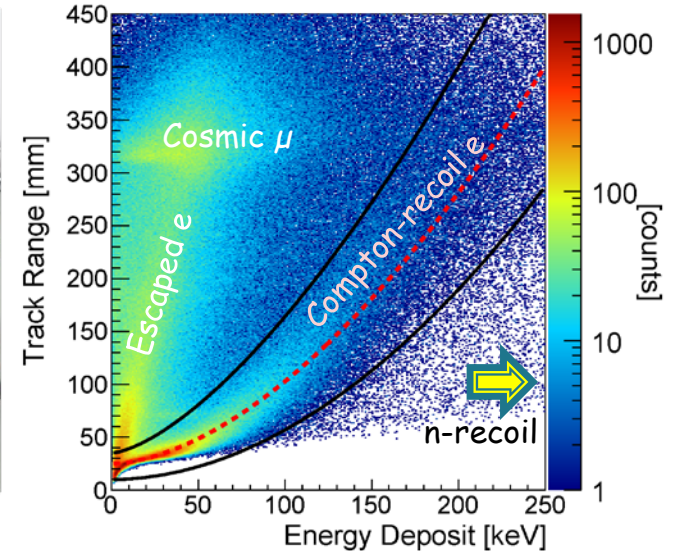
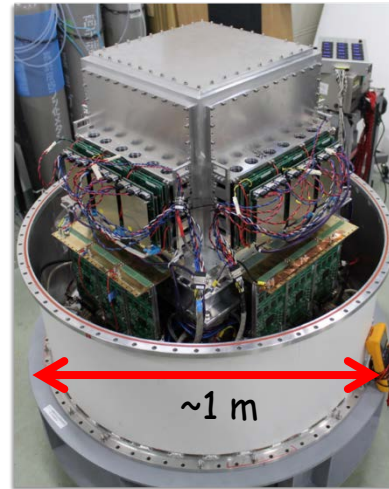
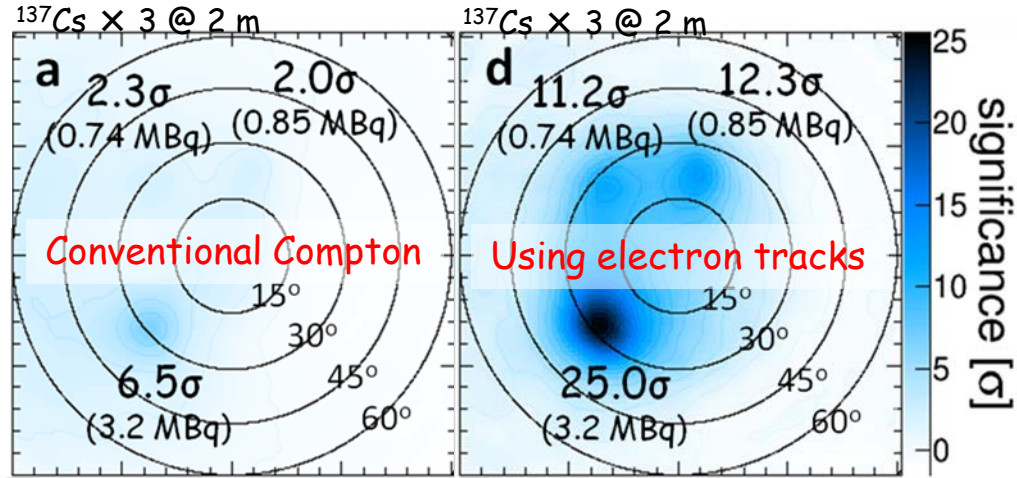
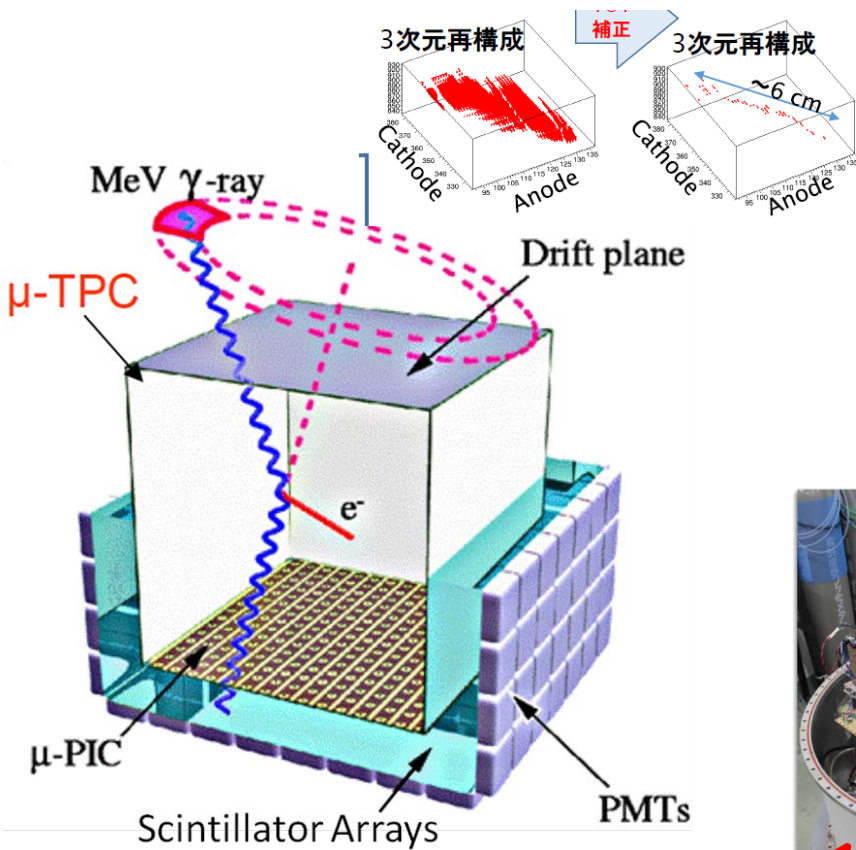
Fluxes of 847 and 1238 keV lines + continuum below 511 keV



How to discriminate between sky and BG?



電子飛跡検出型コンプトンカメラ



ガス飛跡検出器

反跳電子のエネルギーと3次元飛跡

シンチレーションカメラ

散乱ガンマ線のエネルギーと吸収点

- 反跳方向取得による高品質イメージ
- エネルギー損失率による粒子識別
- α 角によるコンプトン運動学テスト
 ⇒ 強力な雑音除去能力

1st balloon experiment (SMILE-I)

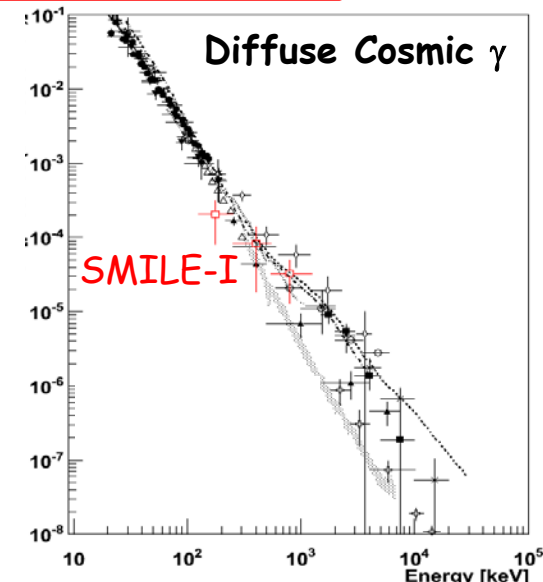
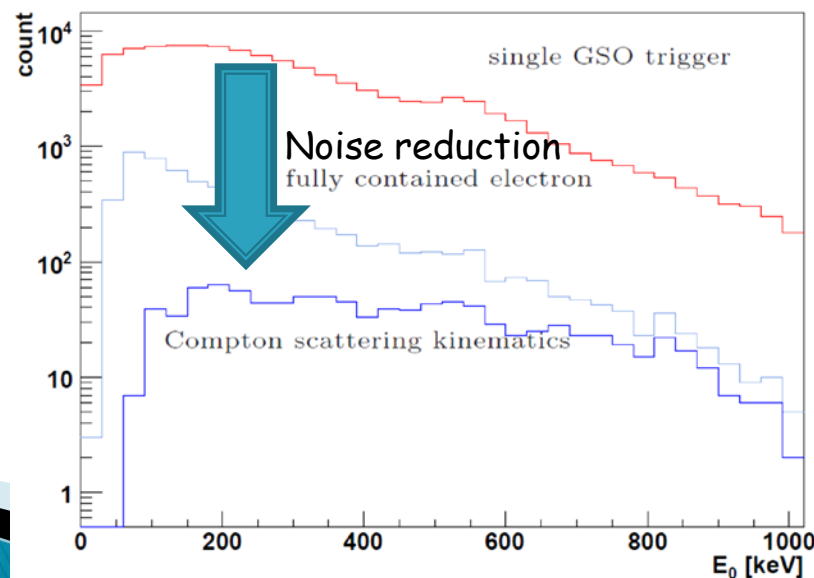
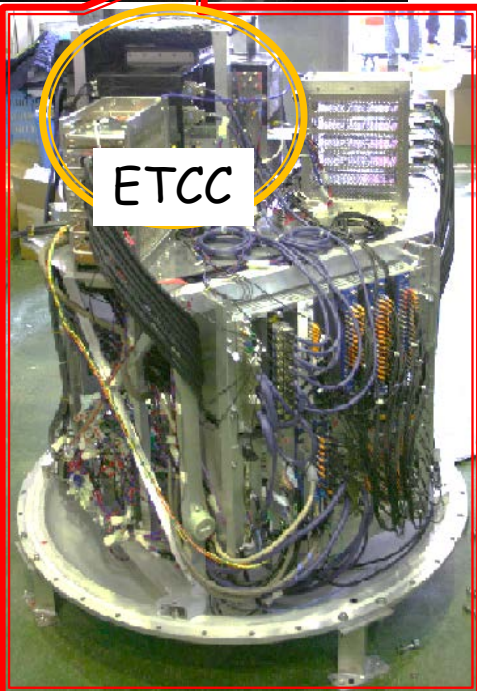
Sub-MeV gamma-ray imaging Loaded-on-balloon Experiment

Launched on Sep. 1, 2006 @ Sanriku (ISAS/JAXA)

- Test flight using (10 cm)³ ETCC
- Measure diffuse cosmic and atmospheric gamma ray
0.1 - 1 MeV, @ 35 km, 3 hours

➔ Measured : 420 events
Simulation : ~400 events (cosmic + atmospheric)
Non-gamma events : < 2%

Compton kinematic test and Particle identify
provided low-background observation.



検出感度の見積り

$$\text{検出感度} : 3 \times \sqrt{\frac{f_B \Delta\Omega \Delta E}{A T}}$$

3 σ の有意度で検出できる最小flux

宇宙ではnoise優位
⇒ 感度 $\propto S/\sqrt{N}$
観測領域($\Delta\Omega$)内への
雑音量が支配

f_B : 雑音量
 A : 有効面積
 $\Delta\Omega$: PSF

これらを見積れば
検出感度が予想できる

最終目標 : 1 mCrab

⇒ ~1度の角度分解能

実際のコンプトン望遠鏡では...

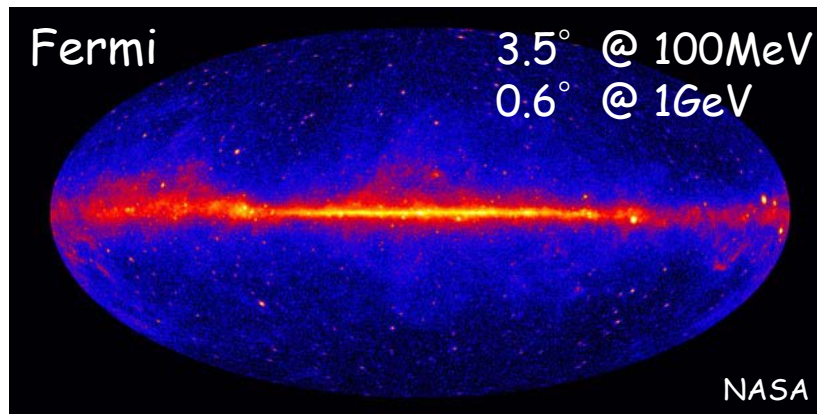
COMPTEL	予想の1/3の検出感度
LXeGRIT	Crabの検出できず
NCT (Crab)	予想の1/6の検出事象数

何かの見積もりを根本的に誤っている？

PSF ~ ARMは本当か？

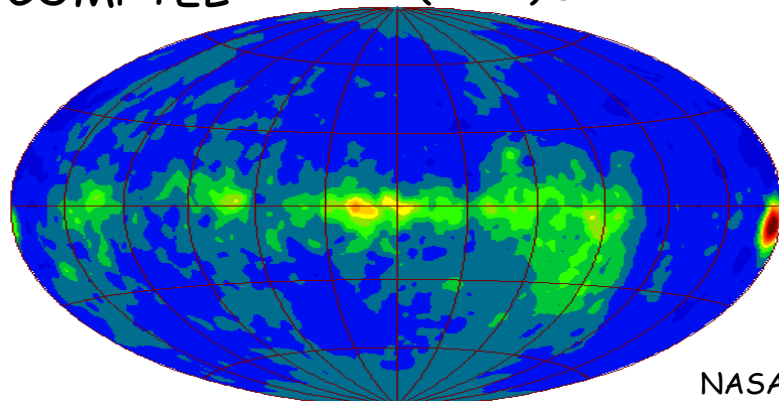


コンプトン望遠鏡の
PSF($\Delta\Omega$)を再検討



同程度の角度分解能？

COMPTEL ~1° (ARM)@3-10 MeV



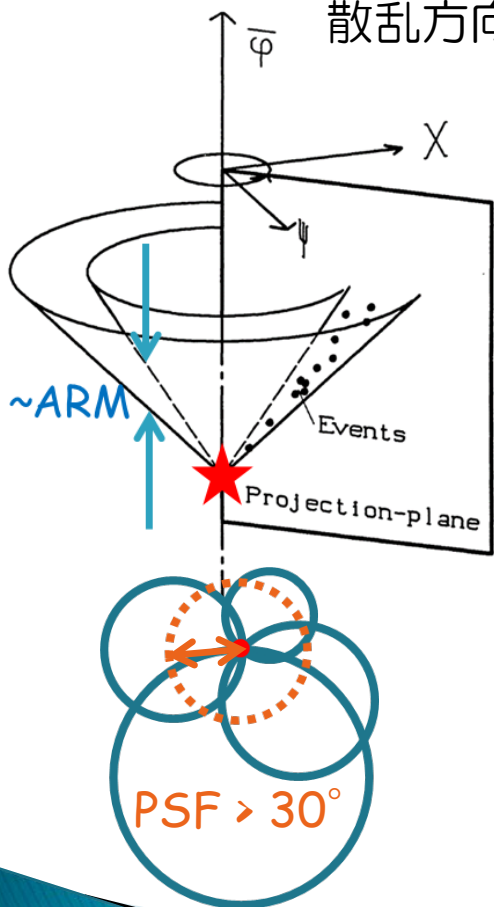
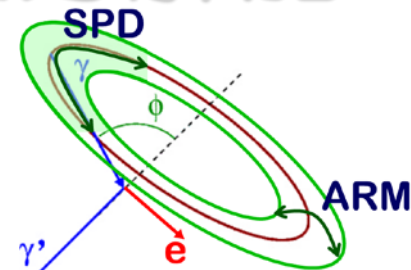
コンプトン望遠鏡の角度分解能

Angular Resolution Measure :

コンプトン散乱角の決定精度

Scatter Plane Deviation :

散乱方向を軸とする散乱平面の決定精度



COMPTELのデータ空間 : V. Schönfelder et al., ApJSS, 1993, 86, 657

散乱方向(χ, ψ)と散乱角(ϕ)の3次元空間

コンプトン事象は 45° の円錐状に分布

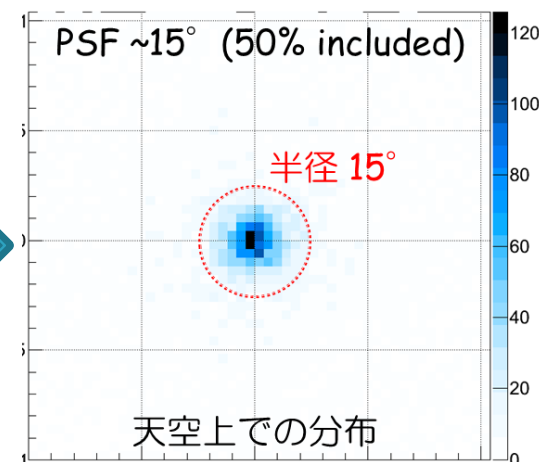
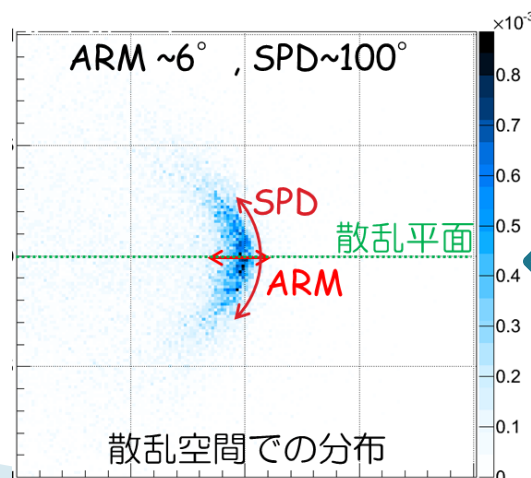
円錐の頂点 = 線源の位置

ϕ 軸方向の平均的な揺らぎがARM



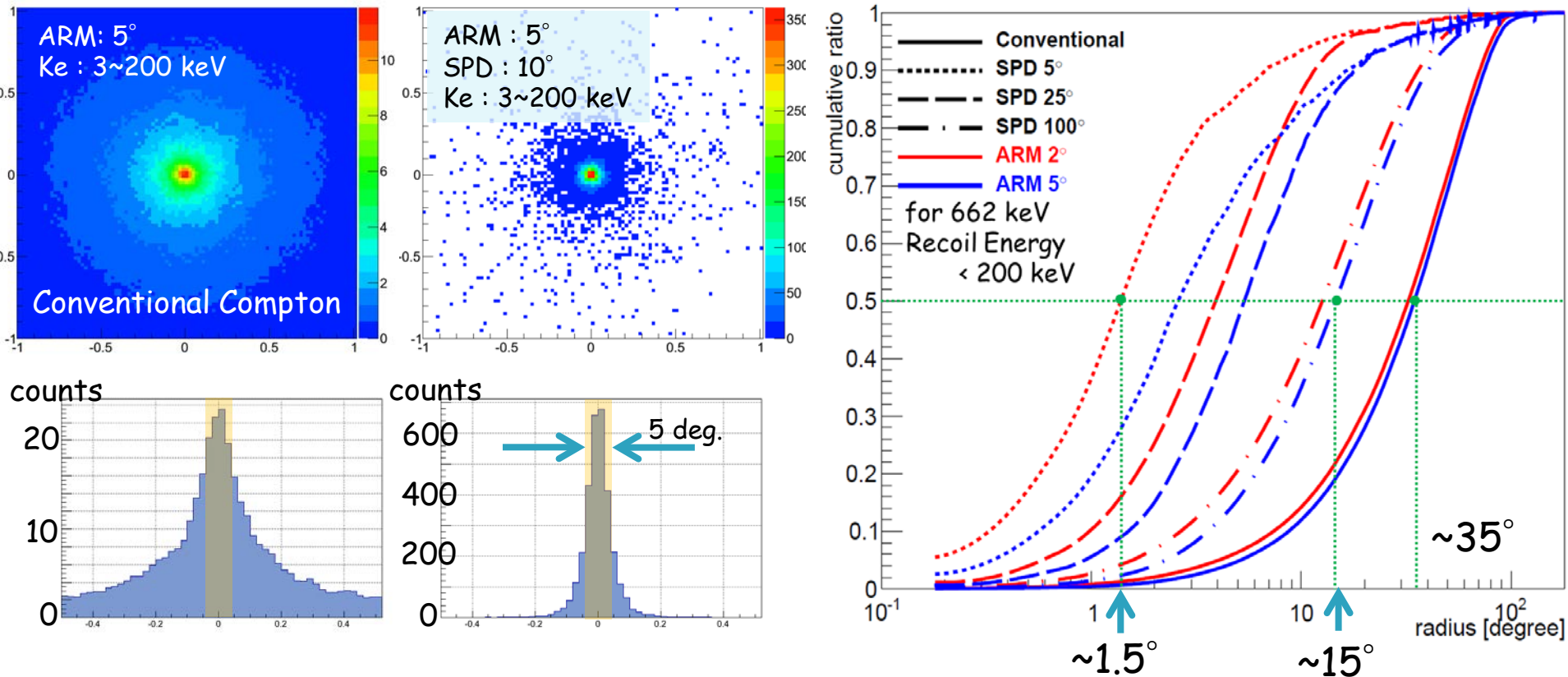
頂点の(χ, ψ)平面上の揺らぎはARM程度?

天空上のevent circleの広がり \approx 平均的な散乱角



ETCCで実際に取得したデータ \Rightarrow PSFはARMともSPDとも一致しない

Point spread function



- 同じARMでもSPDの違いによってPSFに大きな差がある
- ARM ≠ PSF
- SPDが悪い ⇒ 測定領域に周囲からの大量のもれこみ
中心のevent数も激減

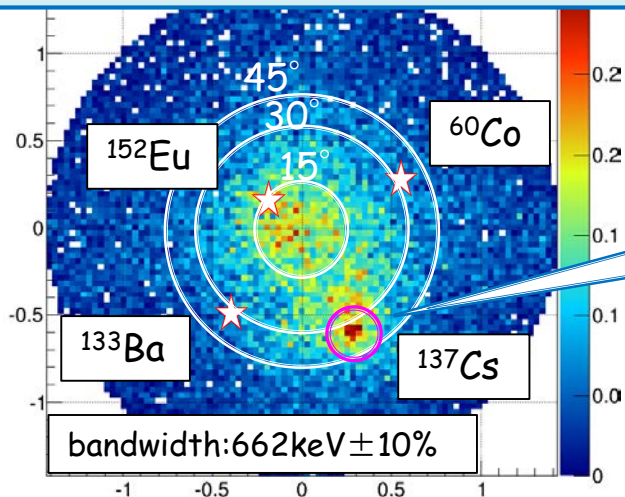
imaging spectroscopy(漏れ込みの効果)

4線源を配置し測定したデータ

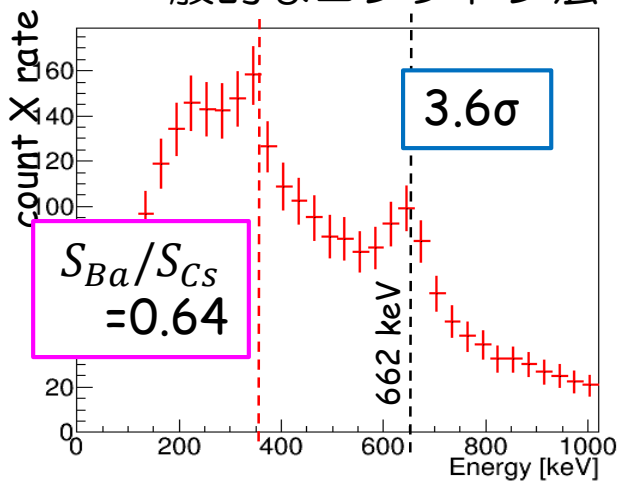
flux ratio \rightarrow $^{137}\text{Cs} : ^{152}\text{Eu} : ^{133}\text{Ba} : ^{60}\text{Co}$
 $= 1 : 1.4 : 0.73 : 0.56$

^{137}Cs の位置から直径 10° をイメージングカット
 (漏れ込みの効果を見るための敢えて狭いカット)

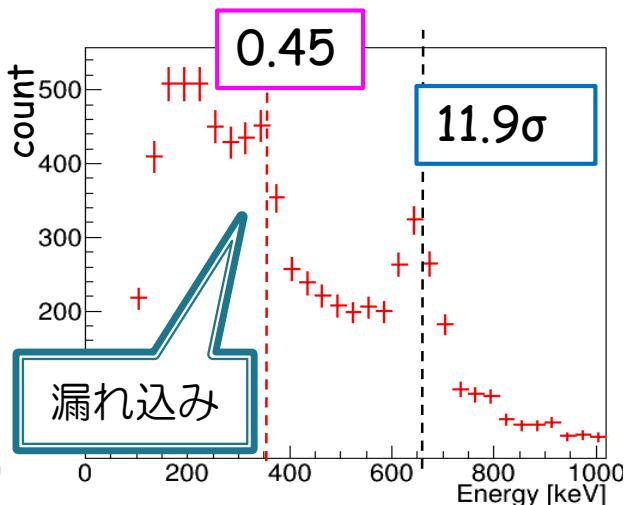
SPDが小さくなることで
 周囲からの線源やBGの漏れ込みを抑えられる



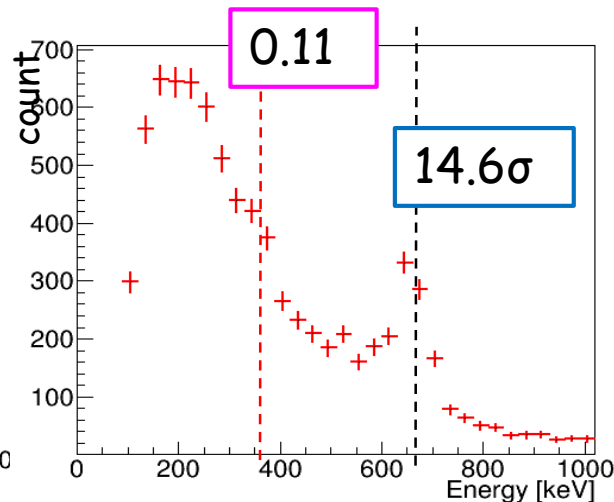
一般的なコンプトン法



ETCC(従来解析)



ETCC(TOT補正)

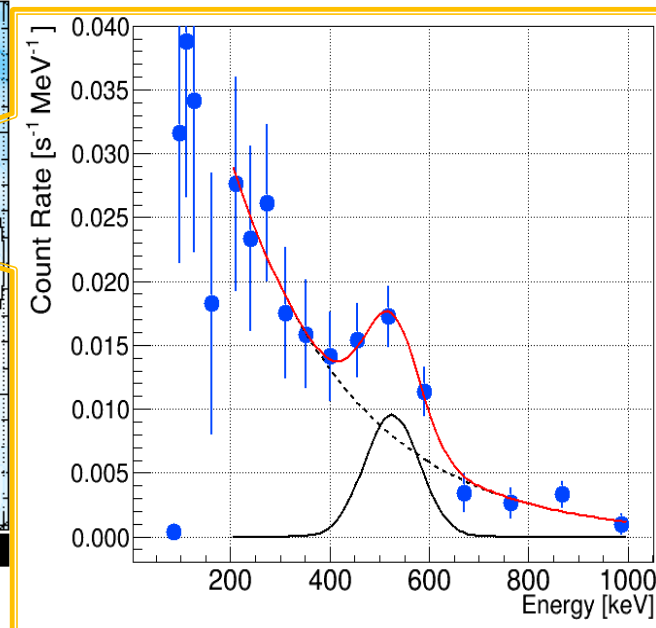
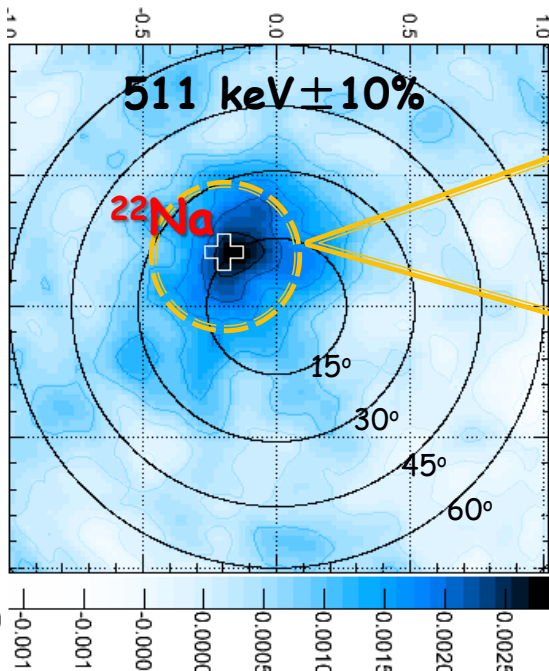
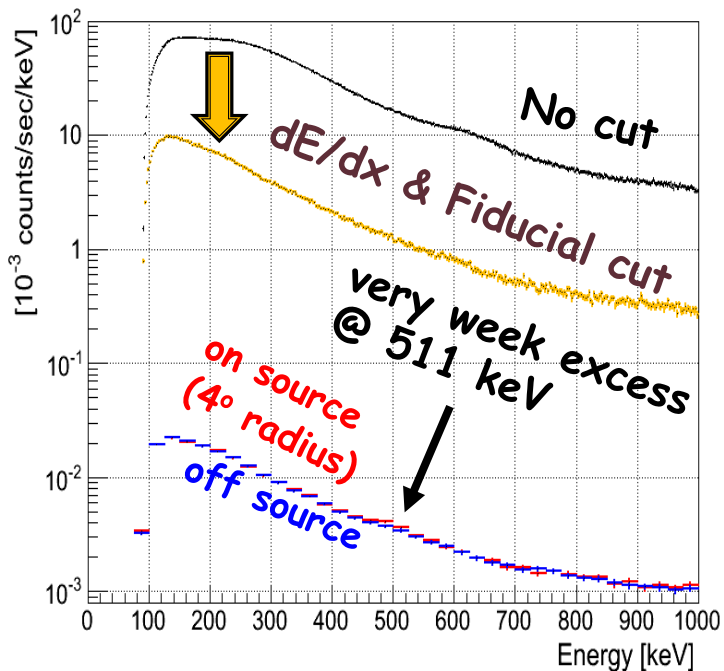


Imagingによる分光

低S/Nの観測対象を、SMILE-II ETCCは撮像できるか？

鉛2mmで遮蔽した ^{22}Na
(27 kBq 相当)

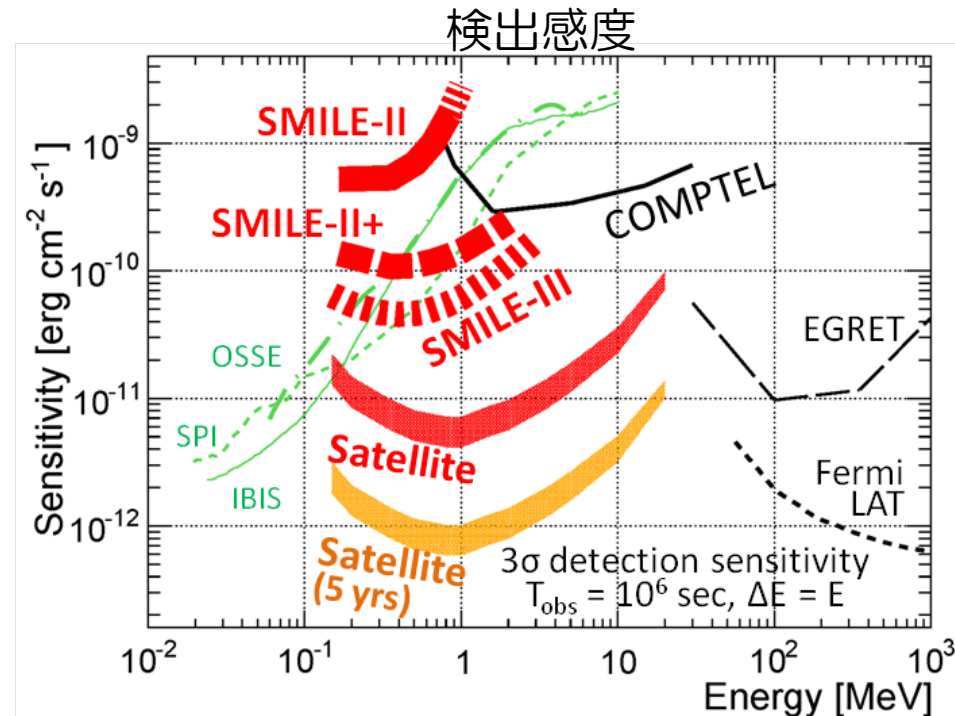
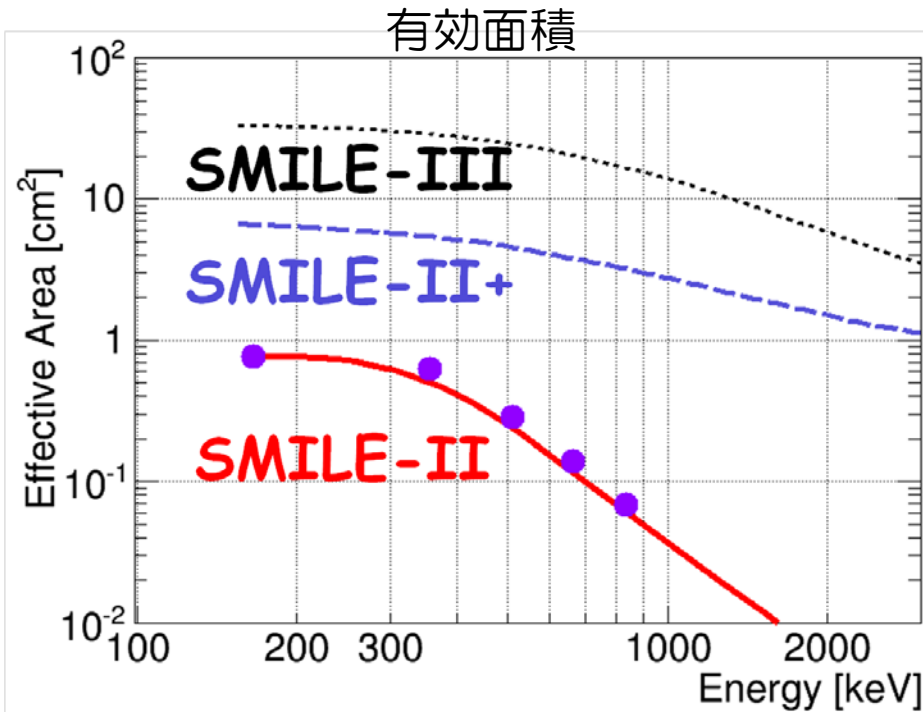
Crab 観測予想: $S/N \sim 0.02$
実験: $S/N = 0.005 \sim 0.01$



到達予想検出感度

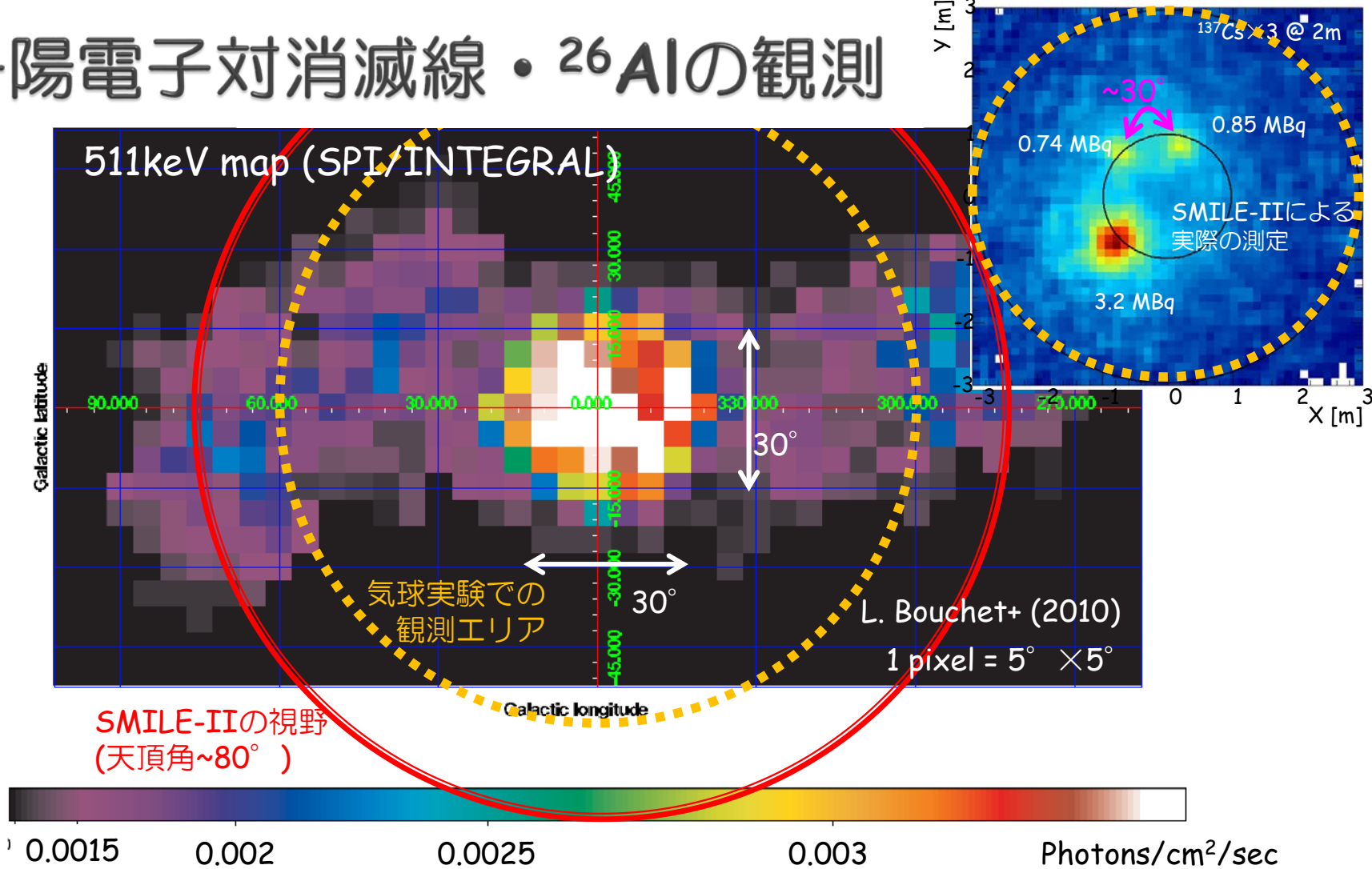
PSFの明確な定義

⇒ 予想検出感度の不定性が排除



	Gas	TPC size	Scintillator	PSF (662 keV)
SMILE-II	Ar 1 atm	30 cm-cube	GSO 1 R.L.	~12°
SMILE-II+	Ar+CF ₄ 1.5 atm	30 cm-cube	GSO 2.5 R.L.	~5°
SMILE-III	CF ₄ 3 atm	60x60x30 cm ³	GSO 2.5 R.L. (bottom only)	~5°
satellite	CF ₄ 3 atm	(50 cm-cube)x4	GAGG 10 R.L.	~2.5°

電子陽電子対消滅線・ ^{26}Al の観測



豪州気球 (SMILE-II, 10^4 sec) \Rightarrow 銀河面全体で ~ 300 events
 (SMILE-II+, 10^4 sec) \Rightarrow ~ 2000 events

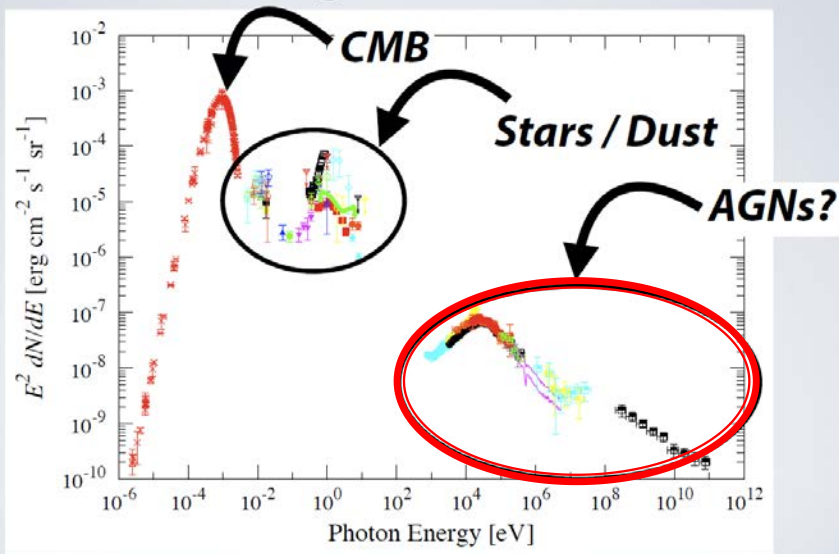
極周回気球 (SMILE-III, 10^6 sec) \Rightarrow $> 10^4$ event/pixel

宇宙線由来の励起ガンマ線は完全に視野外

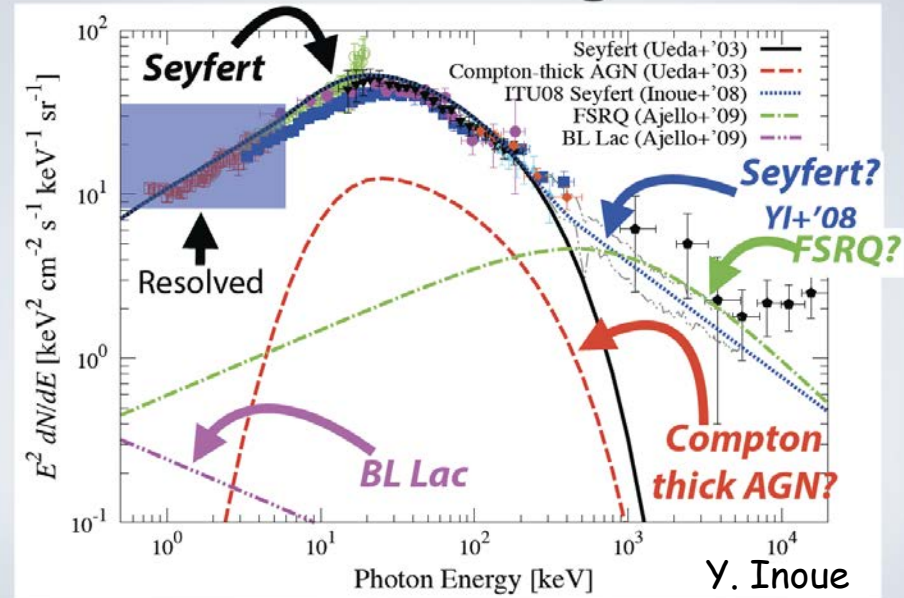
同時に銀河面探査 \Rightarrow 新しいMeVガンマ線天体の探索

銀河系外拡散ガンマ線の起源特定

Cosmic Background Radiation



CXB & MeV Background



MeV領域系外diffuse起源

- Ia型超新星?
- 少量の明るいFSRQ?
- 暗いSeyfertがたくさん?



個々に分離できなくても
Anisotropyから議論可
銀河の進化に対して新しい知見

豪州気球 (SMILE-II, 10⁴ sec)

⇒ > 5000 events

詳細なスペクトルが取得可能

Exploring GRB astronomy by Balloon-SMILE

1. SMILE-II one-day flight(s) for Crab and Cyg X-1 (Anytime, OK)
2. Next plan, SMILE-III Long-duration flight with larger ETCCs

Polar region 14-50 days ($T_{\text{obs}} > 10^6$ sec)

40 cm-cubic ETCC x2 modules (Eff. Area ~ 80 cm²)

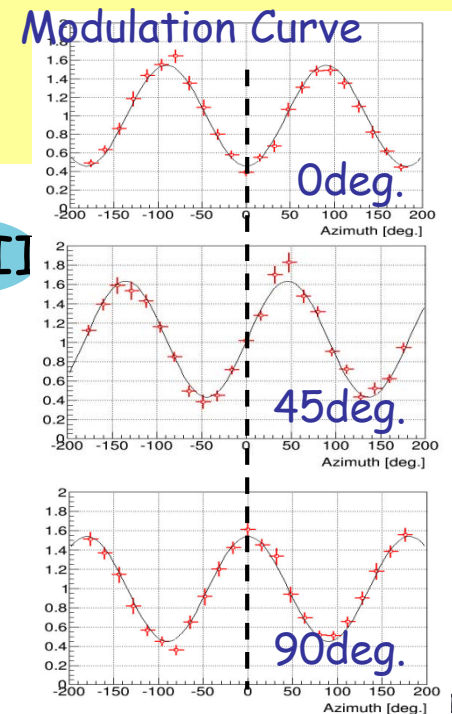
GRB Search in Long duration flight

10^6 s $\rightarrow \sim 3 \times 10^{-11}$ erg cm⁻² s⁻¹ (+ FoV of 4 str) $\rightarrow \sim 1$ GRBs/day

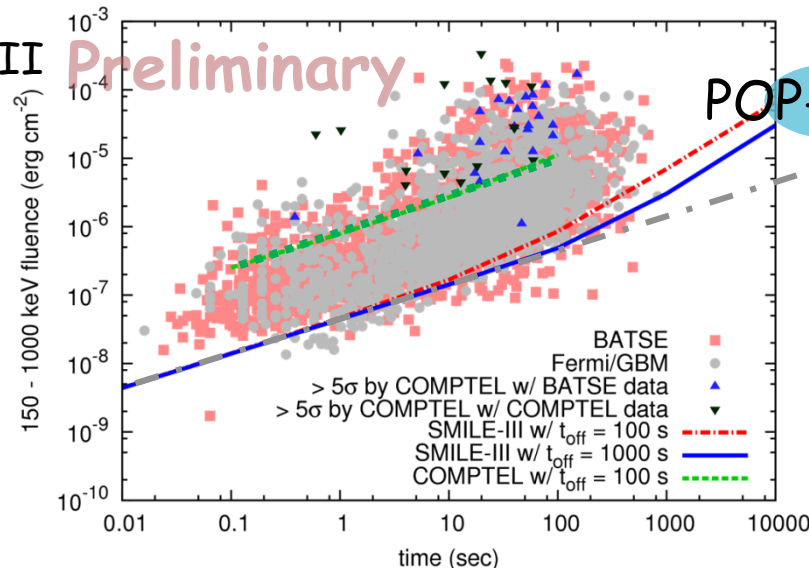
In addition, Polarization Modulation factor 0.6 at 130 keV in SPring-8

MDP $\sim 6\%$ for 10^{-6} erg cm⁻² s⁻¹ (2-3 GRBs/month)

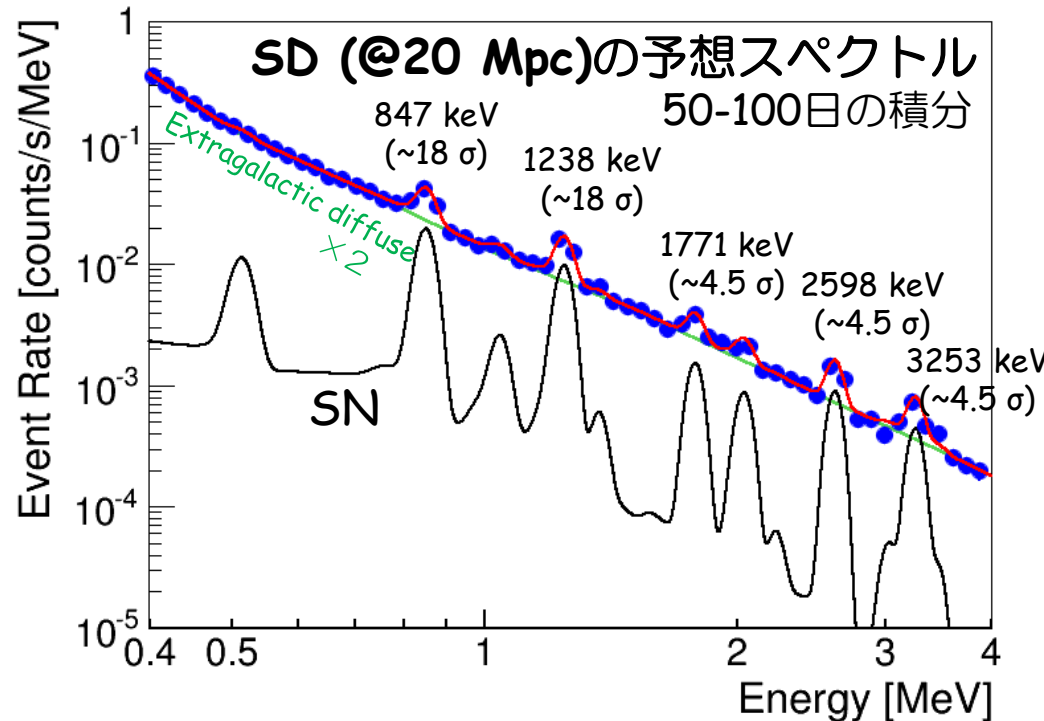
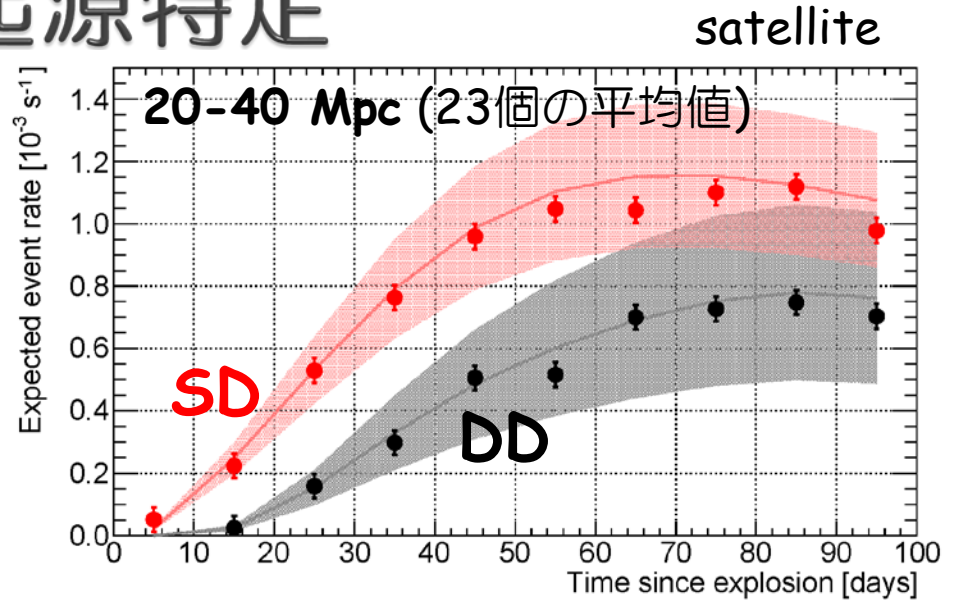
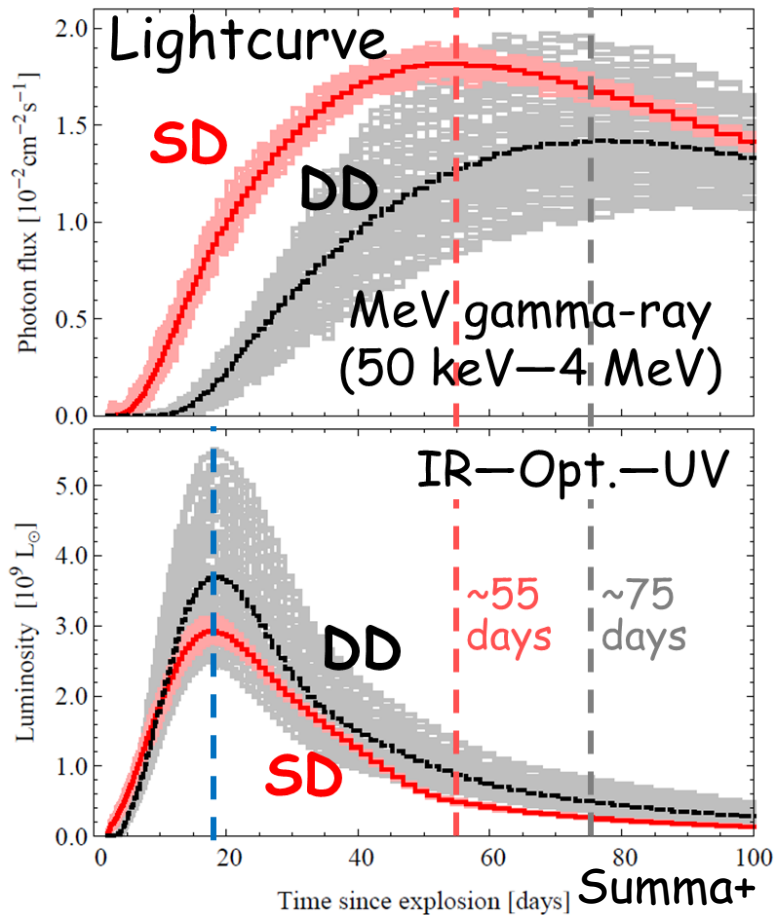
$\sim 20\%$ for 10^{-7} erg cm⁻² s⁻¹ (~ 10 GRBs/month)



GRB detection in SMILE-III
Simulated by T. Sawano



Ia型超新星爆発の起源特定



高エネルギー降りこみ現象

SMILE-III

E. Turunen et al. / Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 71 (2009) 1176–1189

SMILE-III
MIRROR POINT
Small pitch angle
=> Low mirror point

$$B_m = B_{eq} / \sin^2 \alpha_{eq}$$

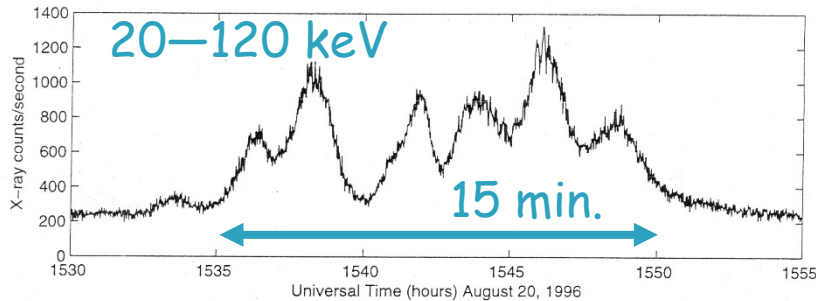
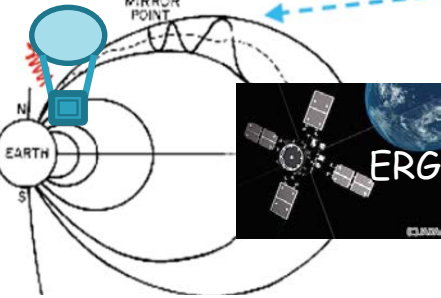
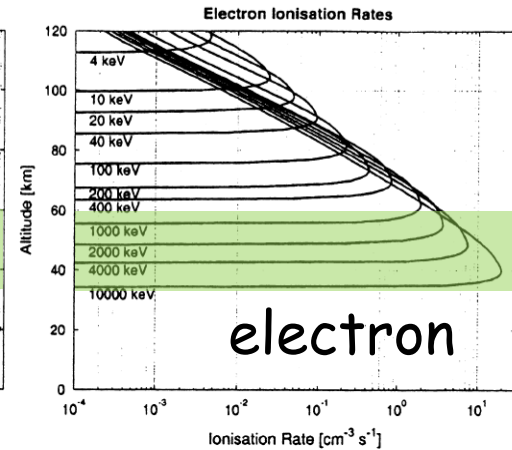
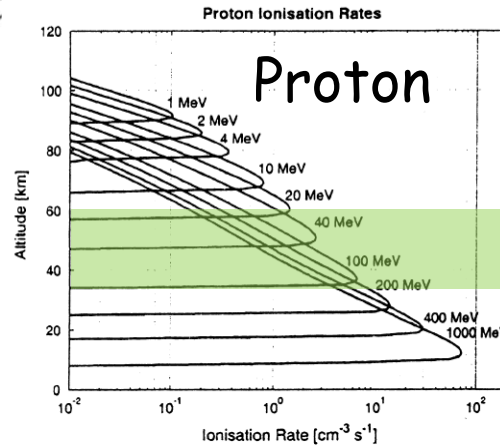
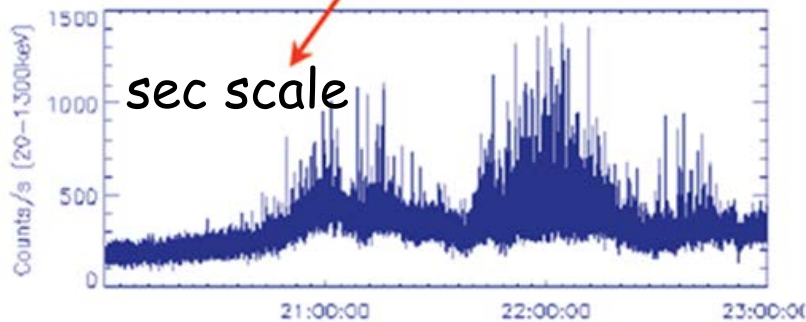


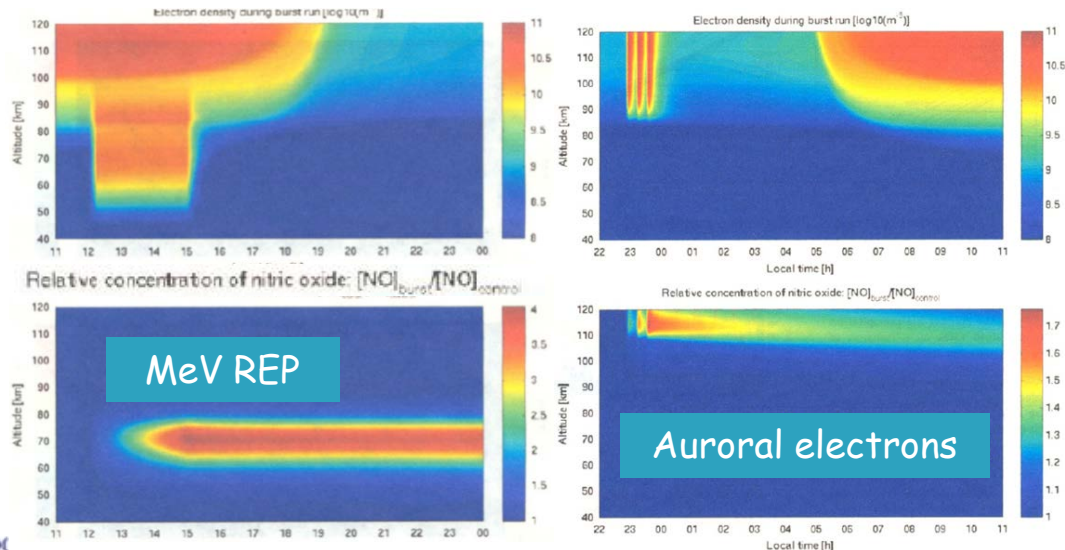
Figure 1. X-ray imager data taken during the relativistic electron precipitation event of August 20, 1996. The X-ray count rate between 20 and 120 keV is averaged over 1 s. The 10–20 s modulation is most clearly visible superposed on the peak starting near 1545 UT.

K. R. Lorentzen et al., (2000)

MAXIS Observations of ~100 keV microburst precipitation



Simulation by E. Turunen et al (2009)



まとめ

- ▶ MeVガンマ線天文学の開拓には**Imaging Spectroscopy**が必須
 - ⇒ 明確に定義された細い**Point Spread Function**が必要
- ▶ 従来**コンプトン法**では観測領域外から大量にもれこむ
 - ⇒ 観測領域外のガンマ線源が完璧に理解できないと観測領域のガンマ線源を理解できない
 - ⇒ 雑音優位な天体観測では高感度にはならない
- ▶ **ETCC**は通常の望遠鏡と同様に**PSF**が定義可能
 - ⇒ **MeVガンマ線天文学の開拓の唯一解**
- ▶ **SMILE-II/II+** :
 - 豪州気球実験 電子陽電子対消滅線・ ^{26}Al の銀河面分布観測
銀河系外拡散ガンマ線の起源特定
 - 米国気球実験 かに星雲・Cyg X-1偏光観測
- ▶ **SMILE-III** :
 - 極周回気球 ガンマ線バースト偏光観測
高エネルギー電子降りこみ現象の観測
新**MeV**ガンマ線天体の探索