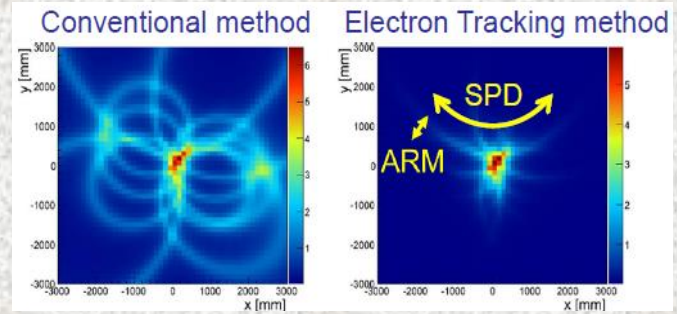
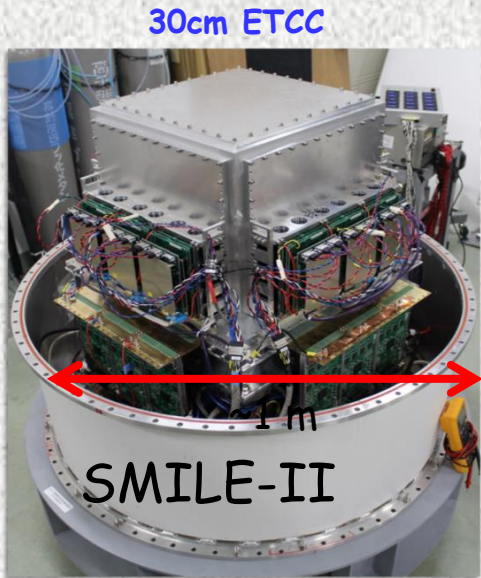
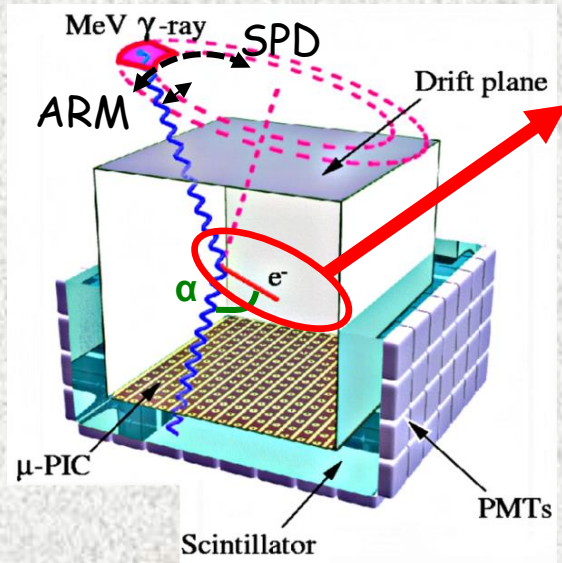


電子飛跡検出型コンプトンカメラ(ETCC)による イメージング核分光法の確立



21/Feb/2016 宇宙核物理研究会NAOJ

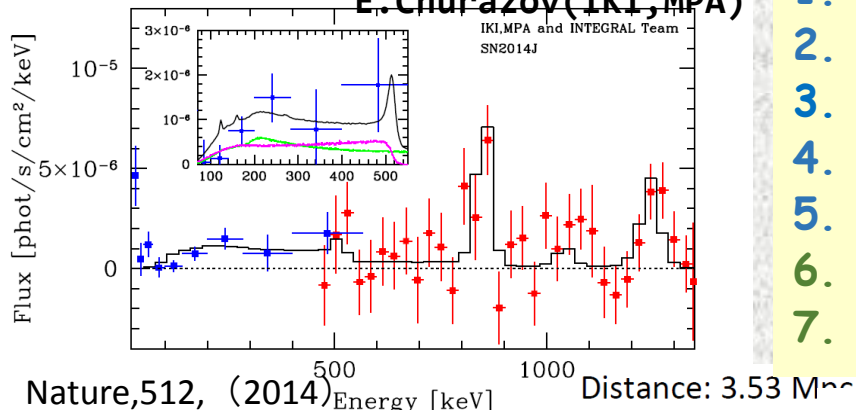
谷森達,

高田淳史,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,窪秀利,水本哲矢,園田真也,友野大,Parker Joseph,中村輝石,松岡佳大,小田真(京大理学研究科)、身内賢太郎(神大理)、澤野達哉(金大理)、黒澤俊介(東北

21世紀の科学をリード出来るMeVガンマ線天文学

Broad band SN2014J spectrum and the model (day 75)

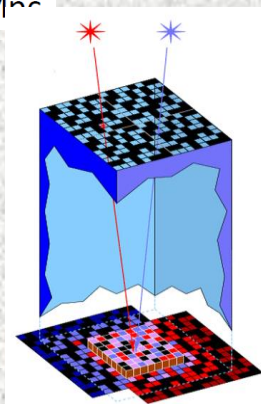
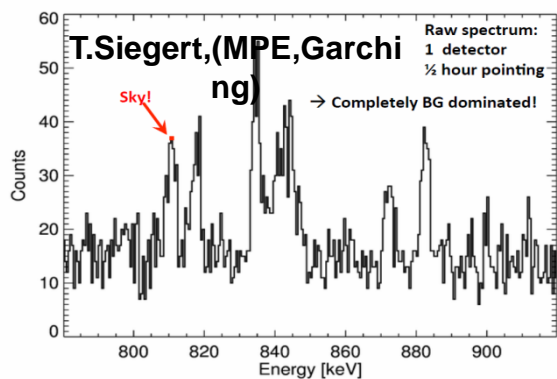
Fluxes of 847 and 1238 keV lines + continuum below 511 keV
E. Churazov (IKI, MPA)



もし1mCrab感度全天観測が出来たら！核ガンマ中心に

1. 宇宙論、最遠方GRB (PoP-III ($z \sim 20$)):
2. 元素合成、SNeの精密核分光 ~ 60 Mpc
3. 銀河進化 千個のSNeの系統的研究 (100 Mpc)
4. 銀河宇宙線加速: C、Oの励起 γ 線観測、 π^0 を同定。
5. 重力波、強重力場、Short-GRB, BH, Magnetar、
6. 太陽、地球磁気圏と気候変動
7. 個体惑星の物質分布

How to discriminate between sky and BG?



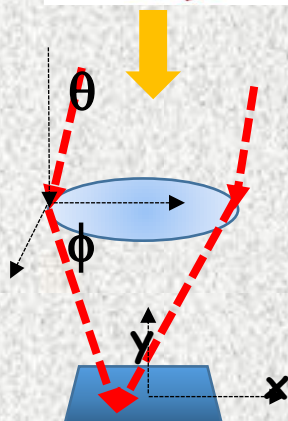
未開拓領域！

MeVガンマ線領域での大問題

集光型イメージング困難

大量の放射雑音

不完全イメージングしか無い
マスク法、コンプトン法



SPI Effective Area $65 \text{ cm}^2 @ 1 \text{ MeV}$

#of Photons: $\sim 4 \times 10^4 \gamma$ ($\sim 4\sigma$)

BG Estimation $\rightarrow \sim 10^8 \gamma$ at 60 keV

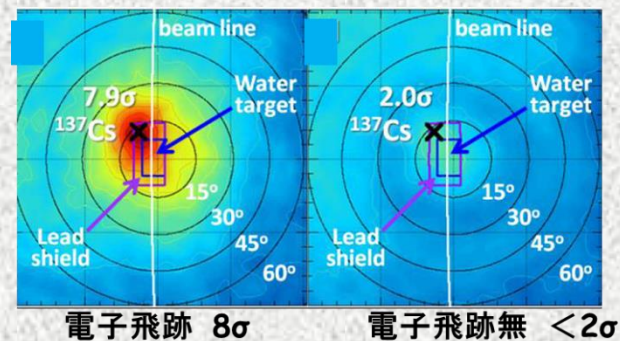
If BG were reduced by 3 orders

BG $\sim 10^5 \Rightarrow 4 \times 10^4 / \sqrt{(10^5)} >$

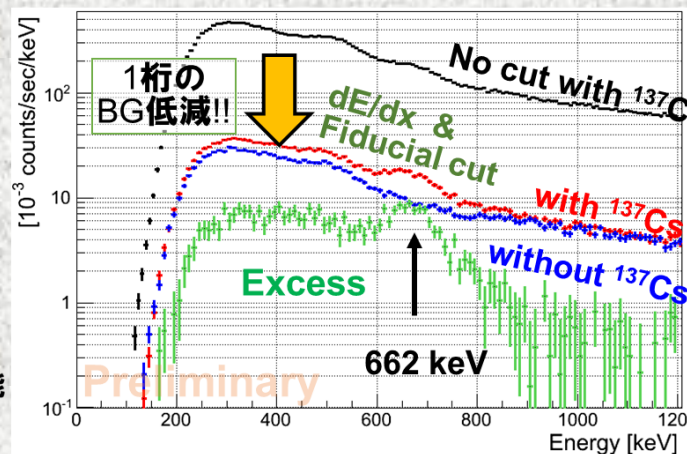
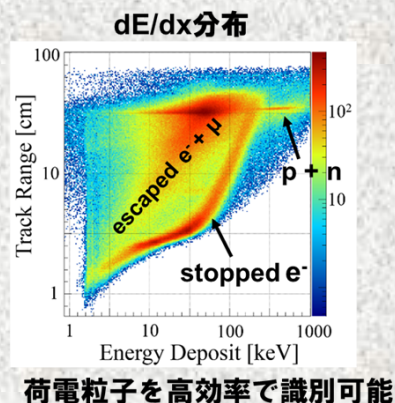
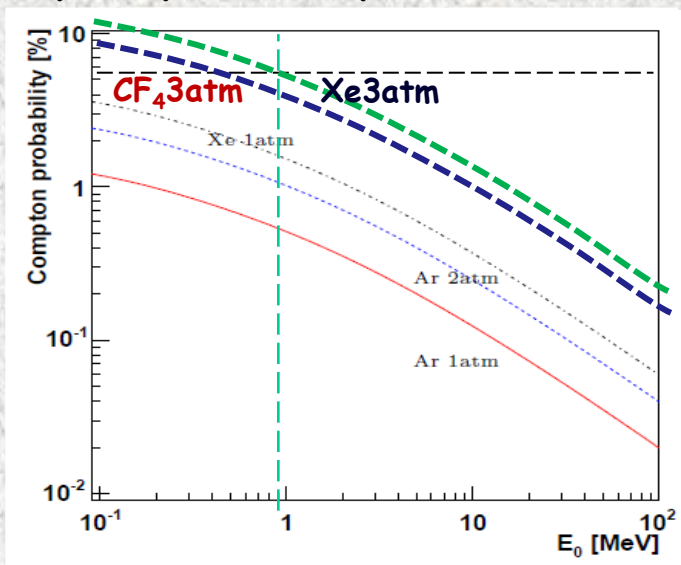
100 σ

昨年までのSMILE

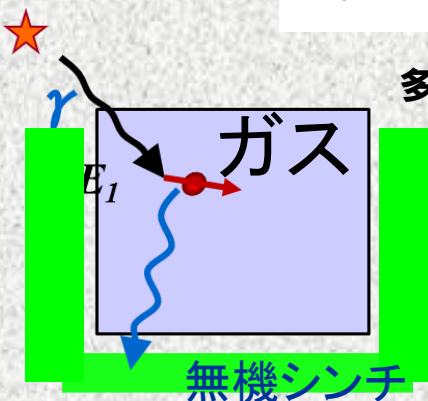
- 高雑音除去率 : 電子飛跡 dE/dx 雑音を1/10
- 2006年 気球実験 2桁の宇宙雑音除去に成功
- 有効面積; 1cm²以上は実現、10倍の改善可能
- 角度分解能 ARM 5度(半値)@662keV、SPDは200度
- 不明確なPSF ためスペクトロスコピー能力が判断できず.



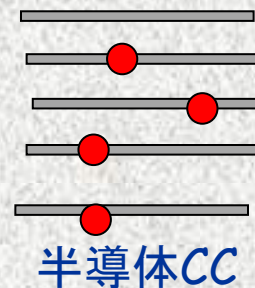
Compton probability (50cm thick)



50cm角立方 CF₄ 3atm 110cm² @1MeV
 COMPTON 約φ2x2m 有効面積 20cm²



多層半導体は再構成が困難!



Electron-Tracking Compton Camera (ETCC) in SMILE-II

ARM (Angular Resolution Measure)
SPD (Scatter Plane Deviation)

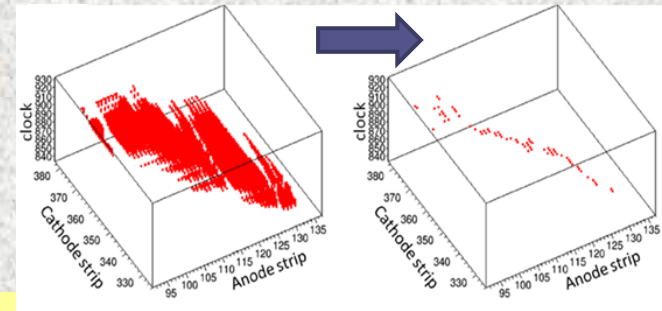
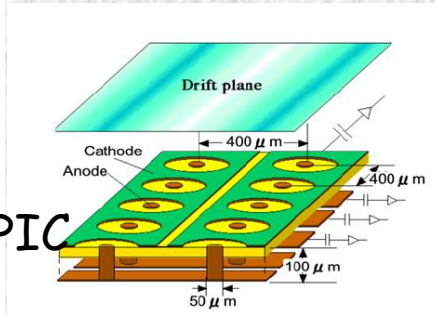
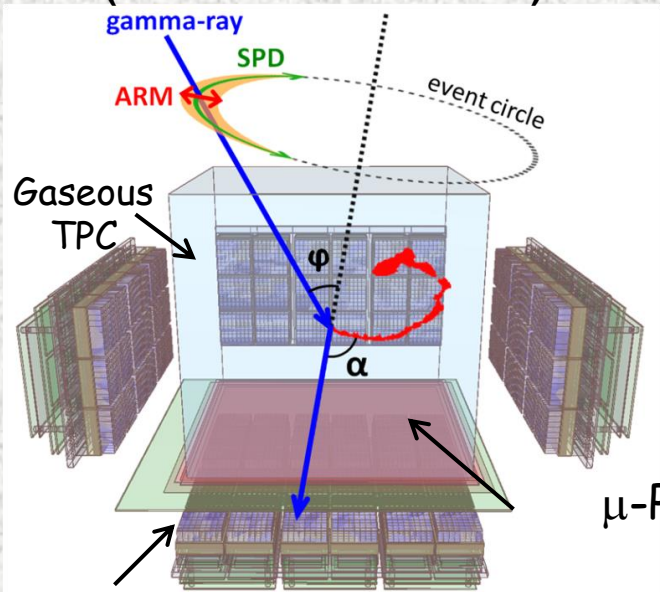
30cm-cubic Gaseous Time Projection Chamber

--- tracking of recoil electron ---

SPD (Scatter Plane Deviation) + dE/dx + α

Scintillator Array for scattered γ

FoV ~ 6 str



Scintillator Array

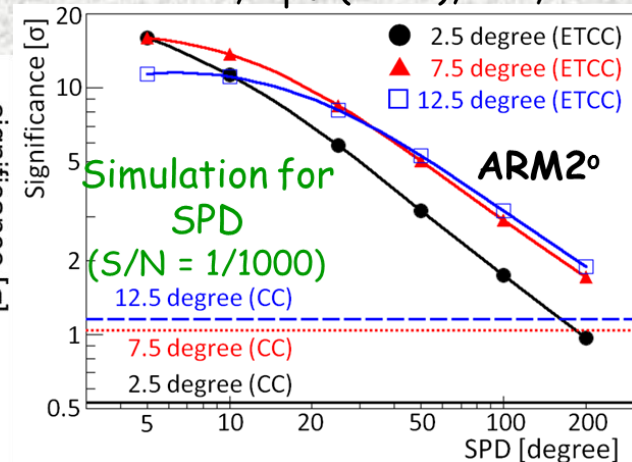
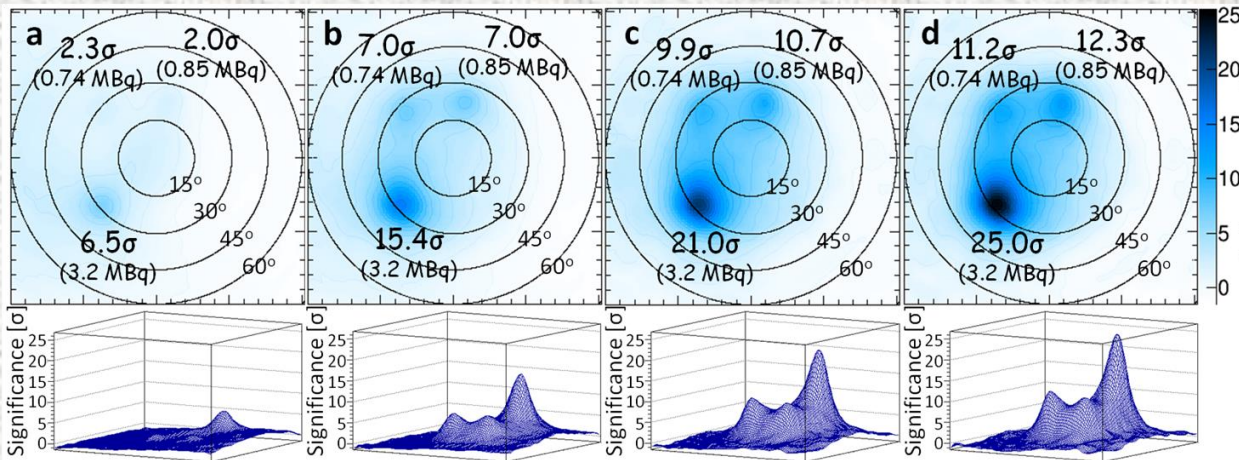
no use of SPD

SPD $\sim 200^\circ$

SPD 90° (< 80 keV)

SPD $\sim 100^\circ$ SPD 45° (> 80 keV)

Tanimori et al., ApJ (2015), 810, 28



1 mCrabを確実に達成するには！

- 革新的なMeV γ 天文学には **感度(significance) $\sim 10^{-13}$ erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$ /5年 \rightarrow COMPTTELの**500倍****

$$\text{Significance} \propto \frac{EA \cdot S}{\sqrt{EA \cdot (S + BG \cdot \theta^2)}}$$

S: シグナル量
 θ : PSF

1. Significance $\sim \sqrt{EA \cdot S}$ シグナルが卓越

2. Significance $\propto \frac{EA \cdot S}{\theta \sqrt{EA \cdot BG}}$ 雑音が卓越



宇宙観測

1. **有効面積 (EA) $> 2 \times 100$ cm 2 可能!**
2. **低雑音 (BG) \rightarrow 宇宙背景ガンマ線 可能!**
但し、強強力な雑音除去法必要 dE/dxなど ETCCのみ
3. **焦点型PSF $\theta \sim 1^\circ$ が不可欠 \Rightarrow 電子飛跡検出**

1. 各種コンプトンカメラで可能

2,3 高精度電子飛跡検出が鍵となる! (認識されていない)

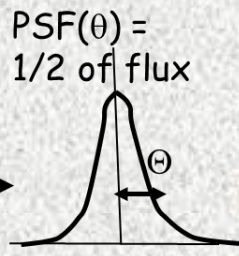
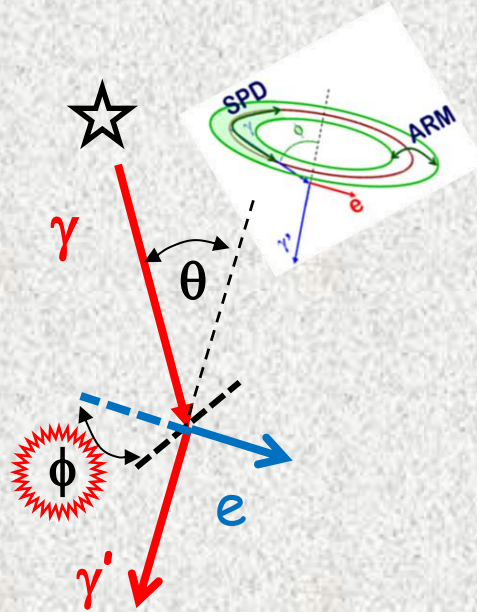
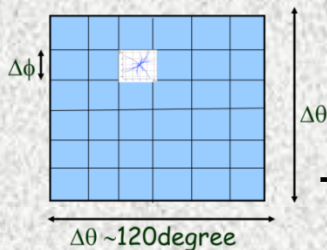
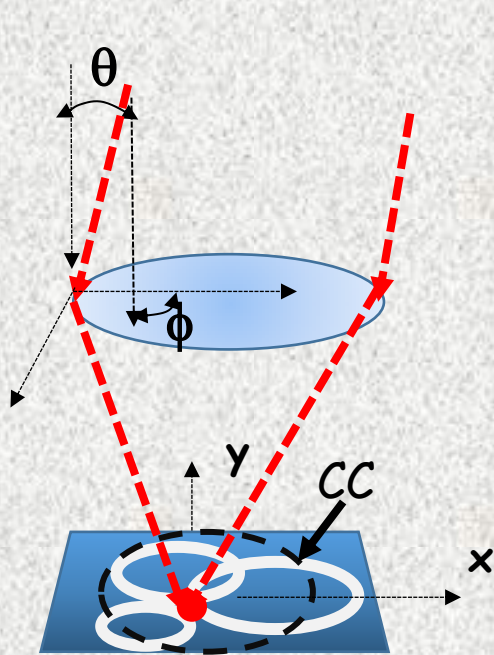
Imaging and Point Spread Function (PSF)

◆ 光学イメージング

◆ (θ, ϕ 2角の測定)

$$f(\theta, \phi) = x$$

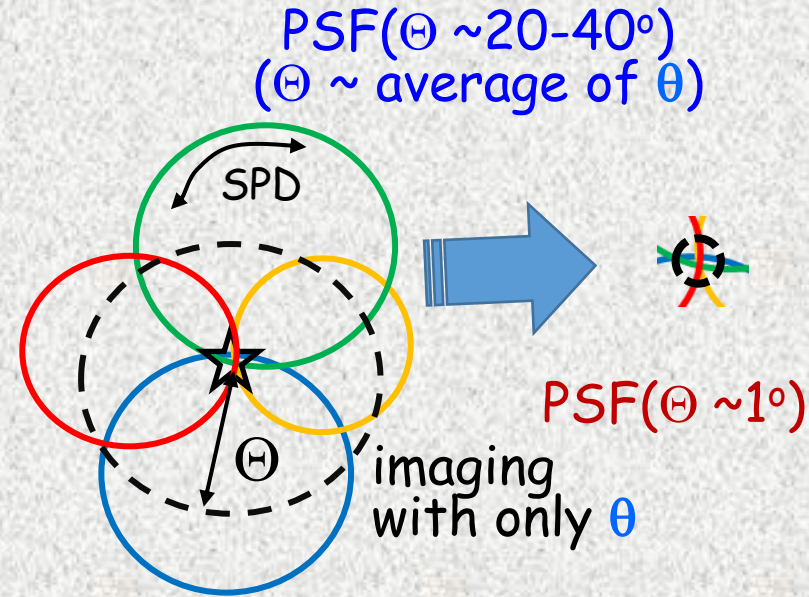
$$g(\theta, \phi) = y$$



◆ コンプトンカメラ (θ 1角のみ)

◆ Electron Tracking Imaging

θ, ϕ 2角の測定



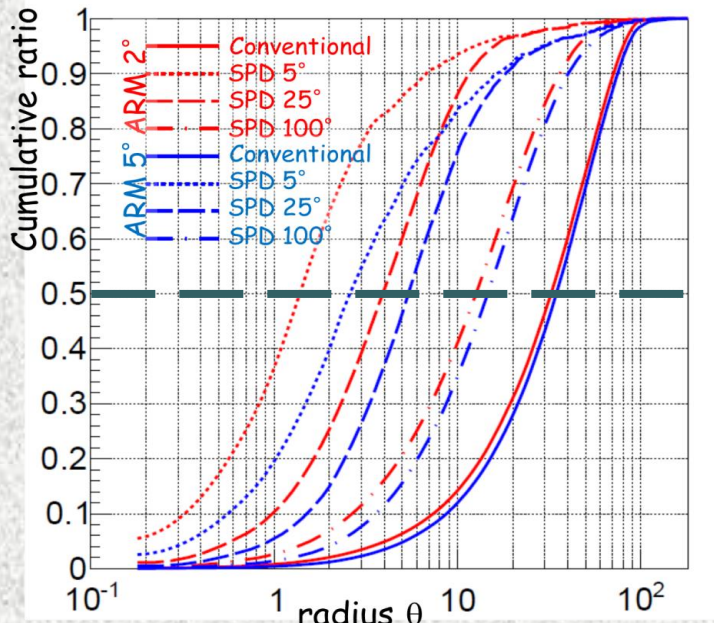
C.C. -> Electrically collimated



ETCC -> Electrically Focused

Point Spread Function in Compton Camera

Tanimori et al., ApJ (2015), 810, 28



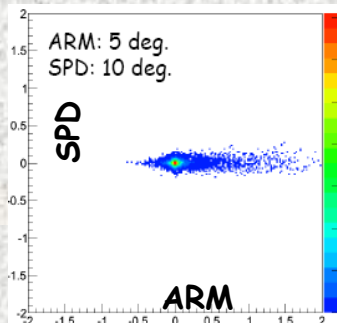
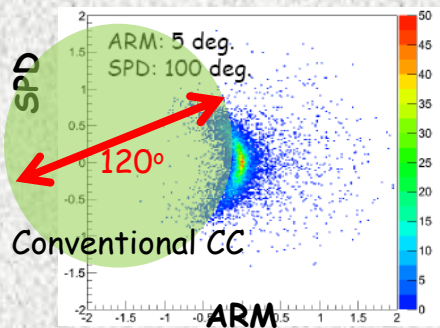
PSF(θ) = $\frac{1}{2}$ gammas in radius of θ

Conventional CC PSF(30-50°)

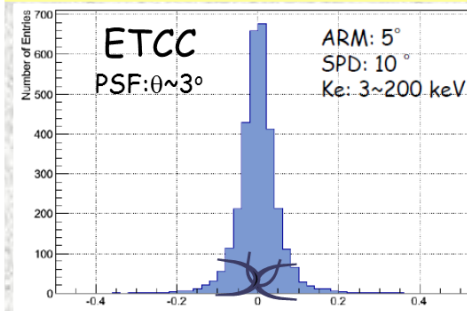
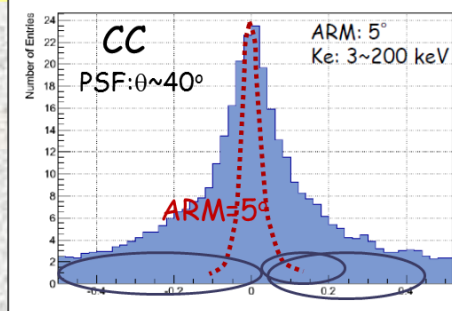
SPD 50° ARM 5° PSF(7°)

SPD 25° ARM 5° PSF(5°)

SPD 5° ARM 2° PSF(1.2°) ガスなら達成可能!

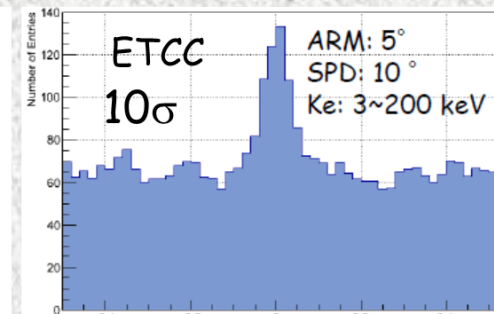
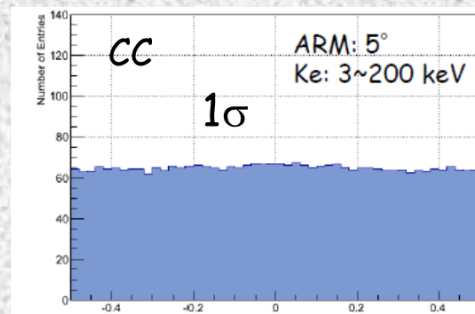


Significance $\sim \sqrt{EA \cdot S}$ シグナルが卓越 ときのPSF



2. Significance $\propto \frac{EA \cdot S}{\theta \sqrt{EA \cdot BG}}$

雑音が卓越の時 $\frac{S}{N} = \frac{1}{1000}$



CC法、大有効面積、高いエネルギー分解能でも
実際の実験で感度が出なかった理由。

雑音過多の状況 \rightarrow PSFで感度が決まる
(有効面積、ARMが良くてもPSFが良くないと
感度は出ない)

3D電子飛跡 @ 1mm in gas \Rightarrow $< 1\mu\text{m}$ in 個体
当面はガスでのみ実現可能

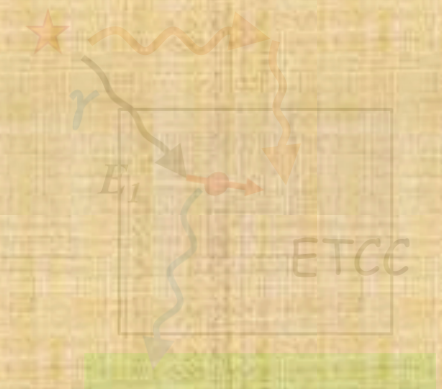
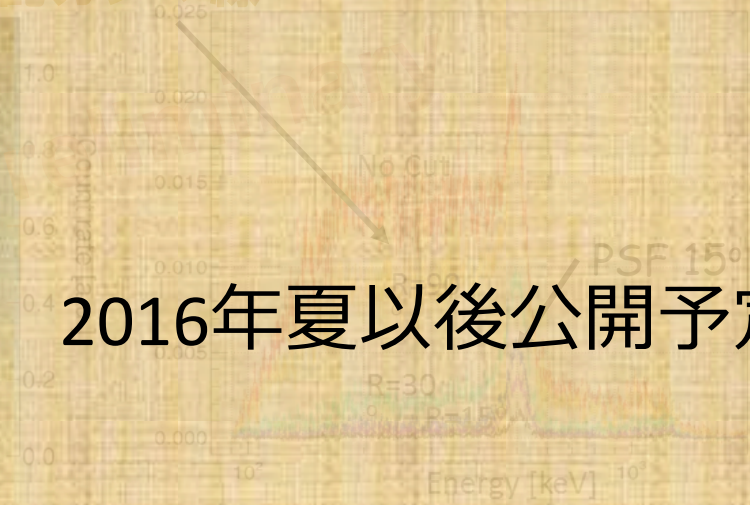
イメージング核スペクトロスコピー in ETCC

カメラの視野 3sr (60度径)

PSF 5° $\Delta\Omega = 2\pi(1-\cos 5^\circ) = 0.02\text{sr}$ 雑音が $\sim 1/150$ に低減

PSF 2° 0.004sr 雑音 $1/500$

空気散乱ガンマ線

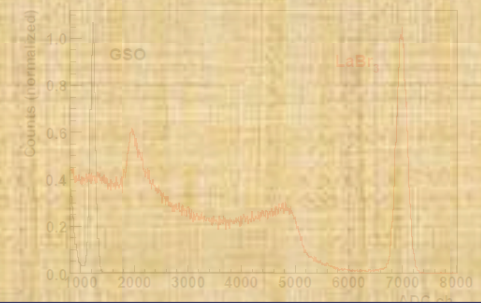


2016年夏以後公開予定

CC法でコンプトンエッジを作る
事象 (方向が間違う事象)



スペクトルにコンプトンエッジが現れない!
遮蔽からのラインガンマ線もない!

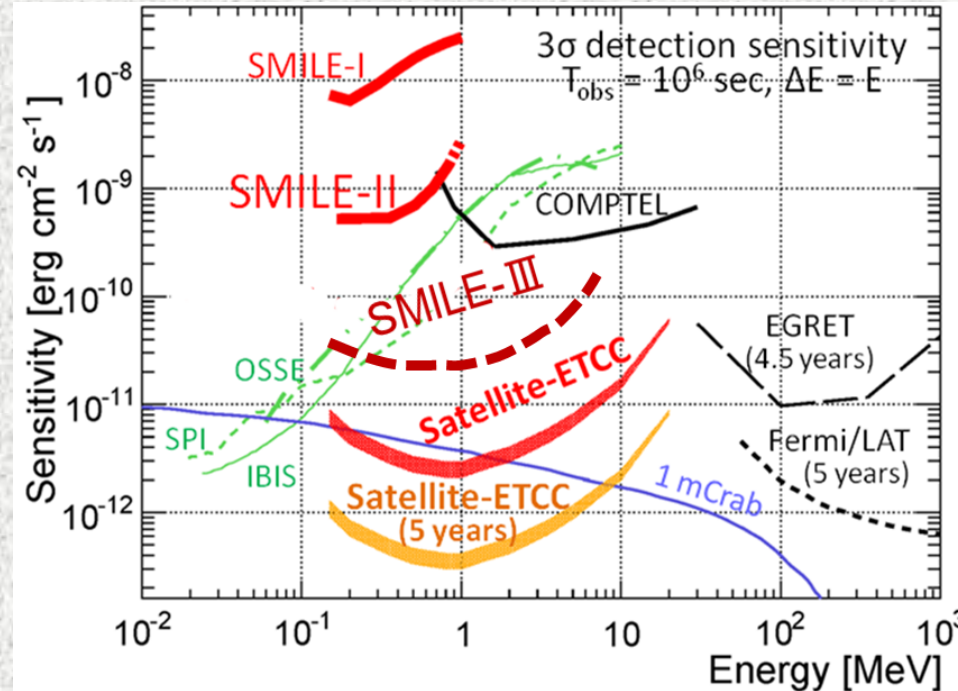
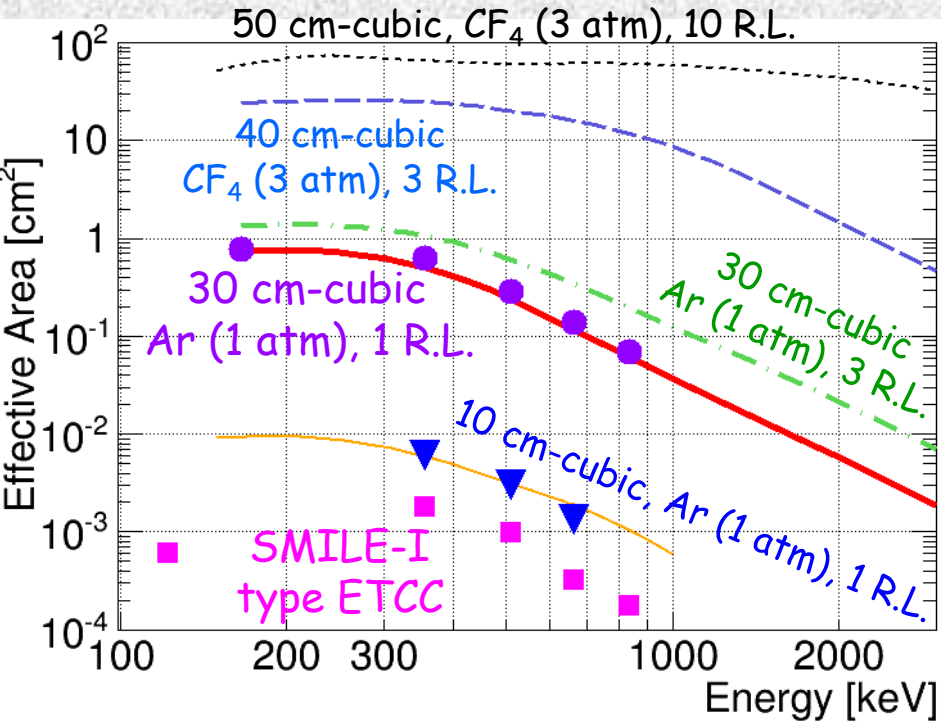


他の線源からターゲットへの染みこみ効果

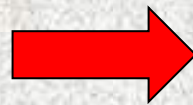


今後の計画 気球から宇宙へ

感度、有効面積とPSFで完全に決定出来た!



- SMILE-II (one-day Balloon)
(30 cm)³ ETCC = 1~4cm²
Crab or 511keV at $\gg 5\sigma$
- SMILE-III (Balloon, in polars)
(60x60x30cm) ETCC ~40cm²
- SMILE-Satellite:
(50 cm)³ ETCC x 4 = 250cm²



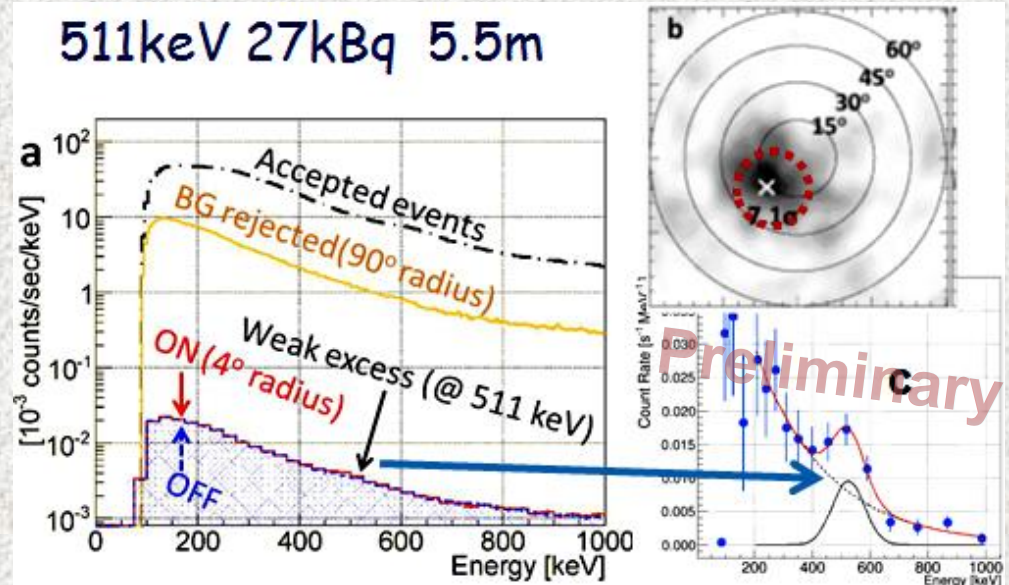
SMILE-II, III PSF(3-10 $^\circ$)
SMILE-Satellite PSF(1.2 $^\circ$)

PSF($\theta < 2^\circ$) @ 1mm 3D tracking in Gas
=> $< 1\mu\text{m}$ in Solid state

Imaging Spectroscopy の威力

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

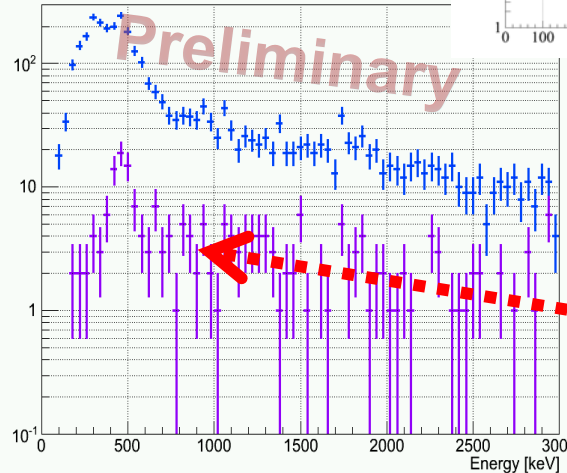
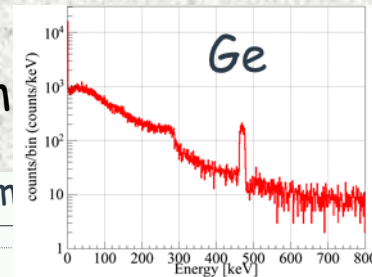
⇒ 30cm 距離 50Bq 測定可能



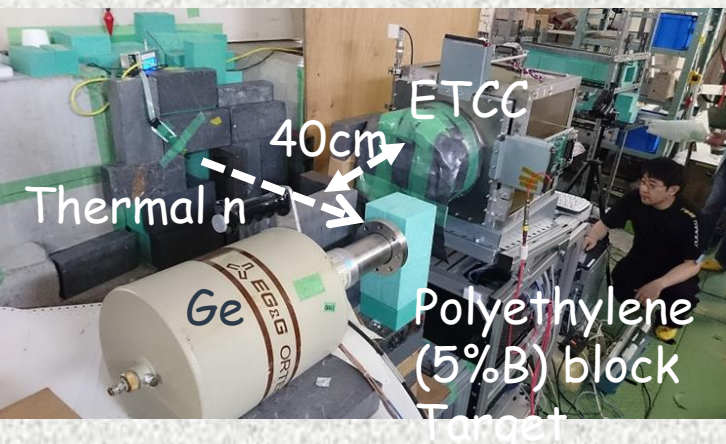
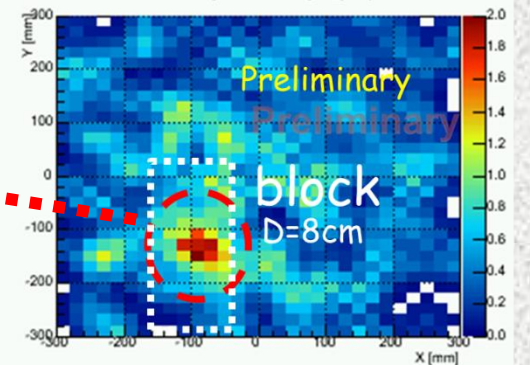
BNCT 中性子がん治療イメージング
 Ge より圧倒的高感度



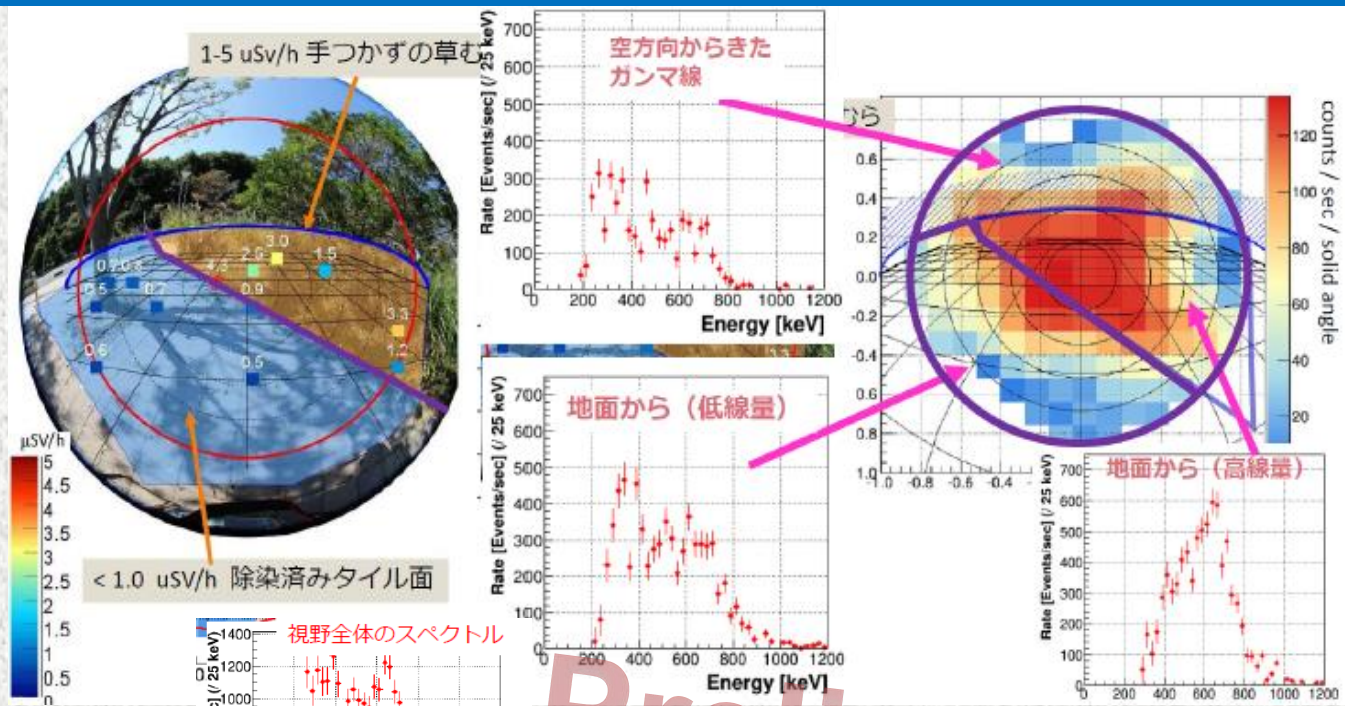
小型ETCC 距離50cm
 1/100のガンマ線
 ETCC Energy Spectrum



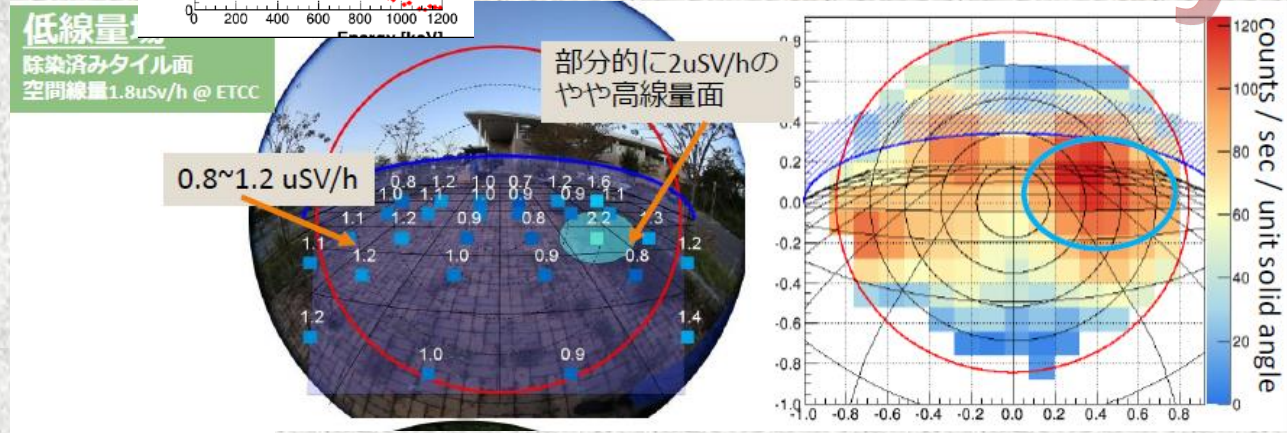
Back Projection of $478 \pm 47\text{keV}$
 Back Projection Image (geo)



Imaging Spectroscopy の例 (環境調査)



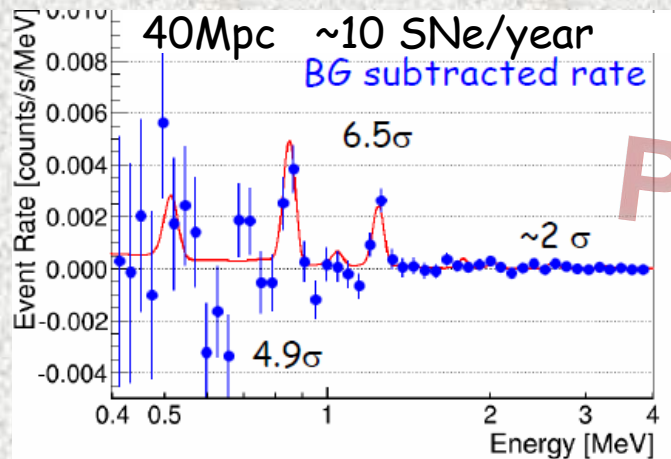
Preliminary



ETCC Imaging Spectroscopyで可能になる観測例

SNからの核分光

SMILE-Satellite 50days

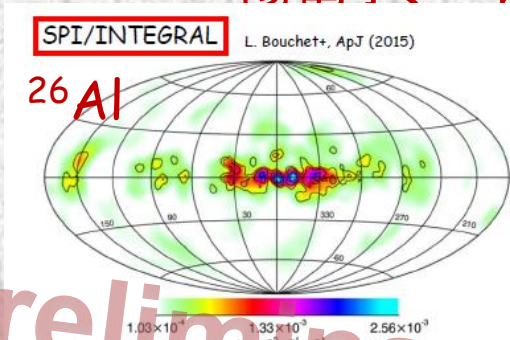


Detection up to 80-100Mpc
 検出可能なSNは100個/以上
 光学観測からの類推、見えないSNがあるので倍以上
銀河種類とSN発生率の無バイアスな相関測定が実現

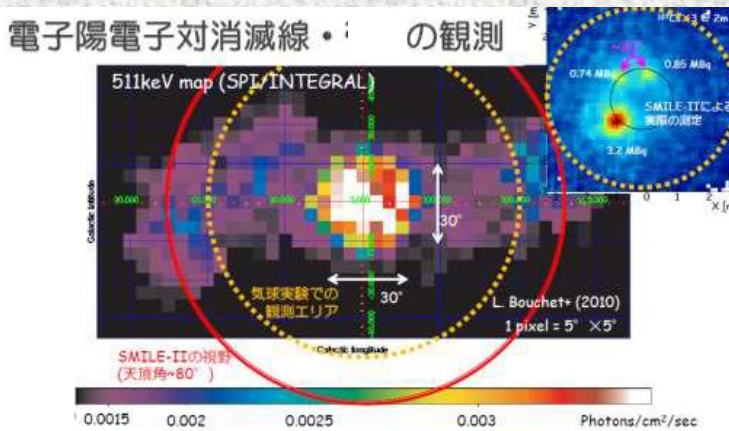
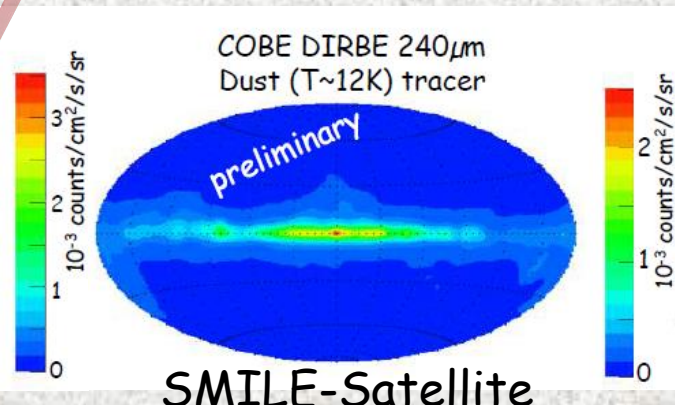
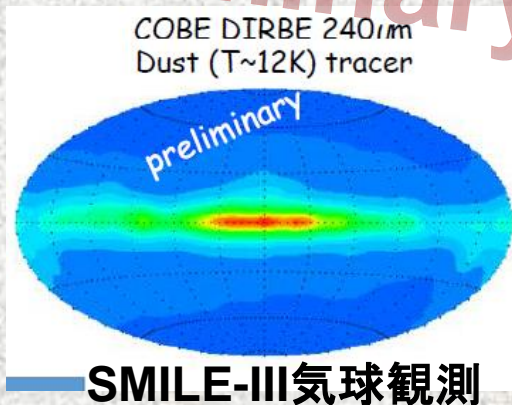
SMILE-III気球観測 (30-50日)
20Mpcまでの核分光は可能

織細は水村(ポスター)

陽電子、 ^{26}Al 銀河面精密分布



SMILE-III長期気球で飛躍的に改善、511keVはSMILE-II、JAXA豪州気球(2日)でも充分観測可能。



織細は高田
 (ポスター)

Summary

- ◆ 核ガンマ線の真の画像化を放射線発見依頼初めて実現、観測を阻む問題を解決 (Tanimori et al., ApJ (2015), 810, 28)
- ◆ 核ガンマ線イメージング分光を初めて実現、ガンマ線利用に大きな進歩 (論文準備中)
- ◆ 広視野、PSF1度以下、分光、偏光を一つの測定で実現、21世紀の天文学の牽引役になれる(最遠方、最大爆発、元素合成、、)
- ◆ これを実現するためJAXA豪州気球で銀河観測と極域観測でCOMPTELの5分の1以下の半球探査の早急な実現！
- ◆ JAXAのワーキンググループ申請(小型プロジェクトB申請のため)に協力を、関心ある方々のSMILEへの参加を切望