# 素粒子稀崩壊実験の視点による宇宙MeVガンマ線撮像法の系統的な研究

Tanimori et al. ApJ(2015)

Tanimori et al. Sci. Rep. (2017)

Tomono et al Sci. Rep. (2017)

Mizumura et al (2018) arXiv:1805.07939

ガンマ線可視化、イメージング分光法の確立に関する 論文を基に

> MeVガンマ線研究会 京都大学大学院理学研究科 谷森 達

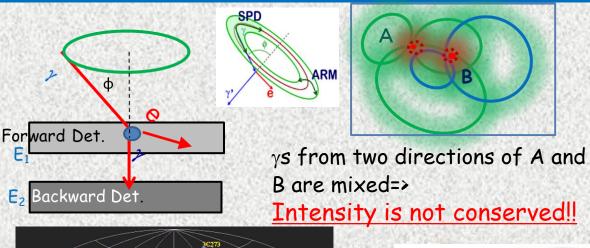
## 宇宙MeV γ観測を天文学として遂行する基本条件

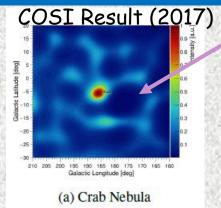
- ▶天文学の最低条件、定量的イメージングの実現 = > Intensity, (Brightness)の保存の保証(Radi. Process) => 2次元PSFを担保、 光学、X線 GeV等望遠鏡の基本イメージング分光の確立 => コンプトン散乱過程の完全再構成が不可欠!
- ▶ 高雑音化での微弱信号検出
  反跳電子数KeV~MeV Dark Matter直接探査と同じ
  - 一方、雑音MEV 数10μSv/h ~10^-6μSv/h 6桁以上!

共に反跳電子エネルギー微弱性により非常に困難! 高雑音化での微弱粒子反応の検出

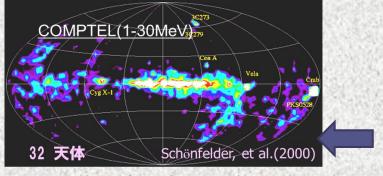
- =>素粒子稀崩壊実験
  - この観点から実験遂行に必要な概念を整理。

## Basic study of imaging in MeV gamma

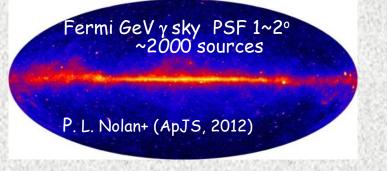


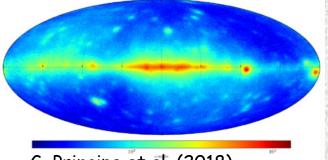


0.5Crab? ?



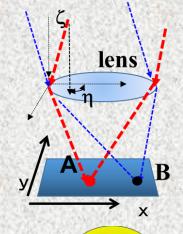
COMPTEL 1d-auglar resolution(RMS) ~1.5° 32sources (9yrs)





G. Principe et al. (2018)

Fermi low energy Map (30-100MeV) 198sources 2D-PSF (3°-12°) 9yrs.



planet (radius, R)

Area S in PSF Emissivity σ

 $\Delta\Omega \sim 5/4\pi r^2$  I=  $\sigma \Delta\Omega$ 

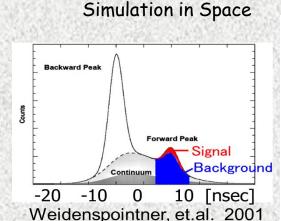
Fine Tracking is inevitable

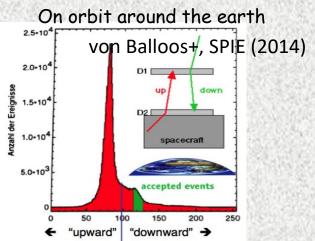
我々はSM2でARM7度を用いた設計を行ったが、その後 PSF~15度を基に装置を修正、SM2+に。

=>SM2+では全ターゲット予想値に近いガンマ線検出確認!

#### Recent Wide FoV Conventional Compton Camera

COMPTEL TOF spectrum





NCT + VETO (8時間観測) Crab,3800 γ予測 =>実験 667 γ (MLEM法シグナル検出)

COSI + VETO 2016気球観測(地球周回, 時間~46 days, 高度~34 km)

GC 511keV  $5 \sim 9 \sigma$  S/N 1/40~80 (Ge  $\Delta$ E/E<1%) Crab 950 $\gamma$  (93Ksec)

有効面積 <0.5cm^2? (10cm^2以上の装置) 2017,2018年の発表より

**LXeGRIT** 気球実験実施(飛翔時間~27 hour, 高度~40 km)液体XeTPC

Crab 13σ予想=> 実験 1σ以下

**TIGRE** 2 度以上気球実験実施(Ft. Sumner, 2007, 観測時間~ 18 ksec,高度~40 km) 多層SSD + CsI(Ti) 一度も結果が出ていない。

COMPTEL以後の従来型CC、天体の定量的観測はCOSIのライン511keV以外無い。

=>VETOを搭載してもCOMPTELを超えるものは出ていない?

# 稀崩壊実験の鉄則

- A 目的の粒子反応と他チャンネルの厳密な識別(反応の運動学的再構成)
- B 雑音の低減

をともに向上することが必要だがAが特に重要!

具体的には以下の

- 1. 粒子反応の完全把握、
  - =>完全再構成に必要な物理量の計測、
- 2. 1と独立な雑音除去手段の確保
- =>雑音分離には"再構成のための物理量"とは異なる"独立な物理量 (Redundancy)"の充実(複数)
- 3. 装置内雑音発生源の最小化
- =>検出器の反応領域、崩壊領域には必要なターゲット物質以外の物質の排除

従来、核ガンマ線撮像ではAの観点の認識が低い、Aはガンマ線の完全可視化(イメージング分光)にも不可欠!

# How to reach sub-m Crab (Motivation)

Final Goal; significance ~10-13 erg cm-2 s-1

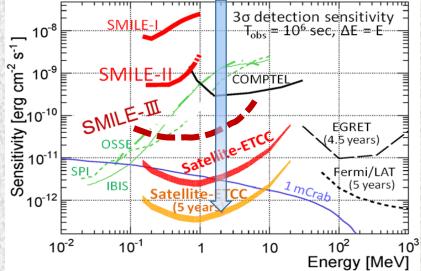
SNe  $\gamma$  Spectroscopy up to 60Mpc!

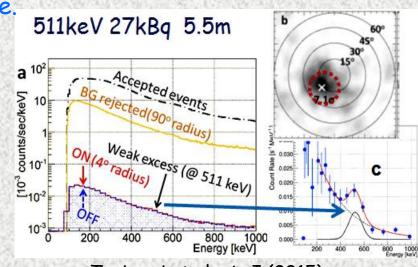
S: signal EA: Effective Area  $\theta$ :; Half Power Radius (HPR) as PSF

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

BG dominated

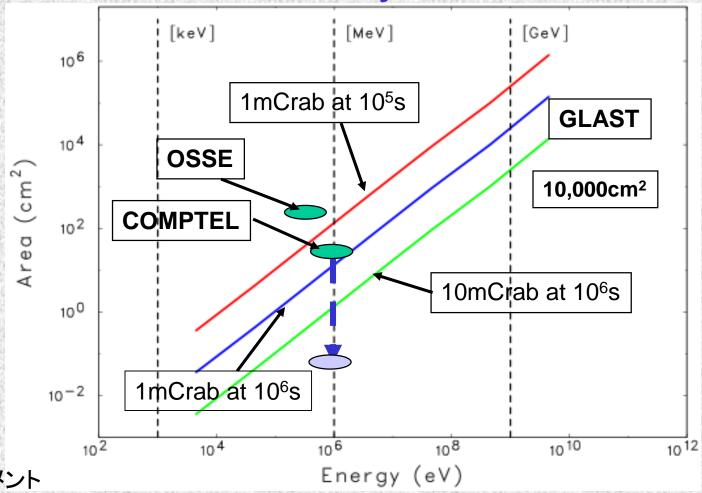
- 2. Significance  $\propto \frac{EA \cdot S}{\theta \sqrt{(EA \cdot BG)}}$
- Effective Area ~200 cm<sup>2</sup> @1MeV:
   gas (3atm CF<sub>4</sub>) and Si in <1m<sup>3</sup> cube is possible.
- Minimum Back Ground =>
   Same as Cosmic MeV background
   good PSF, dE/dx cut, kinematical fit cut in ETCC
- PSF  $\theta(HPR) = 1 \sim 2^{\circ}$  is needed!!
- => Fine electron tracking (mm sampling in gas
- =  $sub-\mu m$  sampling in Si ) Key technology





Tanimori et al., ApJ (2015)

# Sensitivities by Photon fluxes



谷森コメント

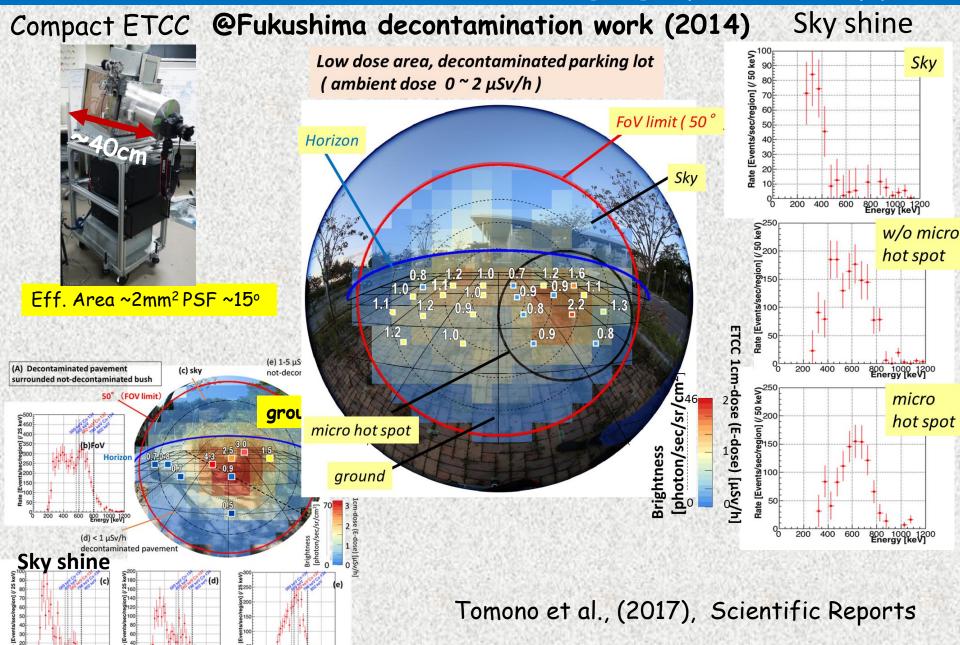
この計算には多分宇宙背景MEVが含まれず、 考慮すると1桁近く時間が長くなる。

- GeV region; Photon Limit
- Sub MeV & MeV region; B.G. Limit

Modified from Prof.T.Takahashi

Large Detection Area (GLAST)
Good B. G. Rejection !!!

## First realization of Nuclear $\gamma$ imaging spectroscopy



## 項目1.(基本項目)

- コンプトン散乱過程; 散乱過程の再構成=>反跳電子、散乱ガンマ線のエネルギー、運動量ベクトル測定が必要。
- 1. 全物理量の測定且つ誤差が同等程度、(特にARMとSPD)
- 2. 確実な再構成=>多重コンプトン、マルチコンプトンを
- 極力削減 (コンプトン散乱 + 偶発光電効果と区別困難)
- 散乱体 コンプトン1回散乱のみ発生(電子が多く原子番号が小さい物質 炭素分子)

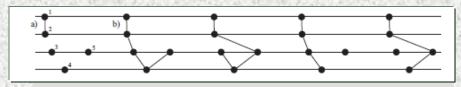
吸収体 光電吸収のみ(Zが出来る限り大きい物質、)

=>1,2が不完全な場合、画像の不鮮明、定量性欠如以外に

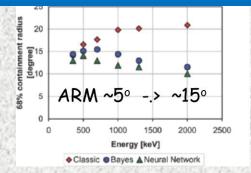
強雑音下では大量の雑音増加、混入を起こす!

### 事象トポロジー(事象の明確な識別)

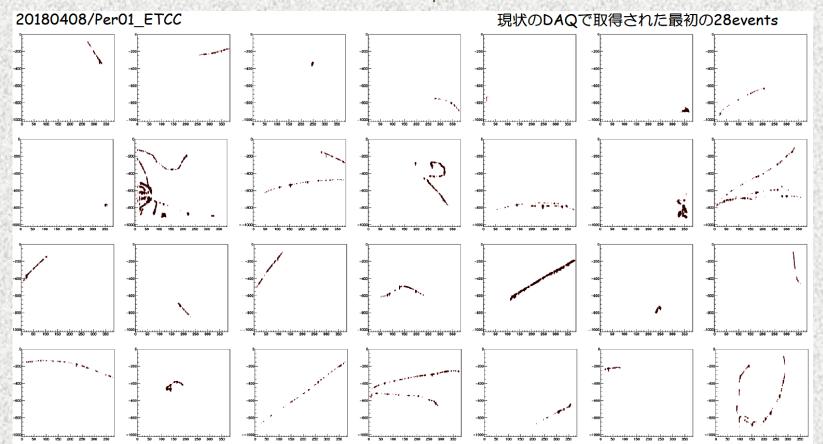
#### 1. Multi hit problem in Advanced CC



From G.Weidenspointner, G.Kanbach , A.Zoglauer JRA7: Background modelling

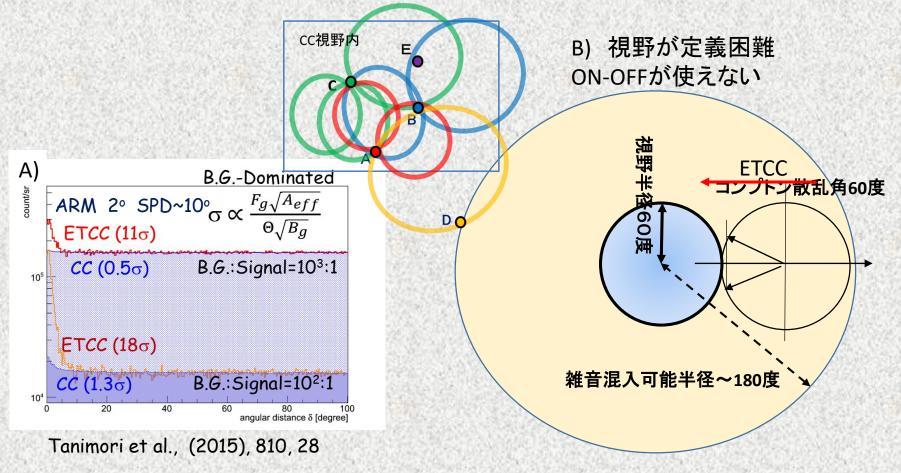


Observed Tracks in space 2atm Ar 30cm ~ 200µm thick SSD x2~3



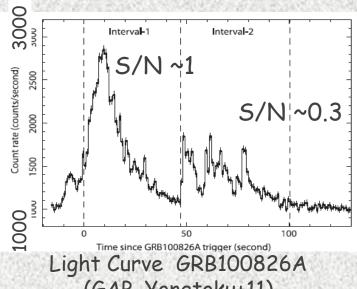
# 項目1 1D-Angluar res.による雑音増加

- A) ETCC:一般の望遠鏡同様2次元PSFが定義できる。ARMのみと比べ、SPD=30度の場合、単純に強雑音下で視野内雑音ガンマ線が30/360~1/12に低減
- B) 従来型CCのコンプトン環は視野外全域に広がり、視野制限による雑音低減は低い。 下はコンプトン散乱角θ=60度の場合、視野外の全領域から雑音混入が可能に なる。 ETCCはSPDが数10.度でも視野外からの雑音ガンマ線をほぼ除去、



## GRB detection in Compton Camera

Non-imaging detector Gap (70-300keV)



(GAP, Yonetoku+11)

 $(3.0 \pm 0.3) \times 10^{-4} \,\mathrm{erg} \,\mathrm{cm}^{-2}$ 

~1GRB/year

Compton Camera; due to incomplete focusing,

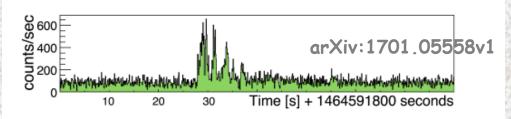
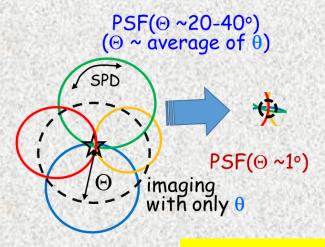


Figure 10: Image and lightcurve GRB 160530A detected with COSI.

 $1.3 \times 10^{-4} \text{ erg/cm}^2$  ~1GRBs/year

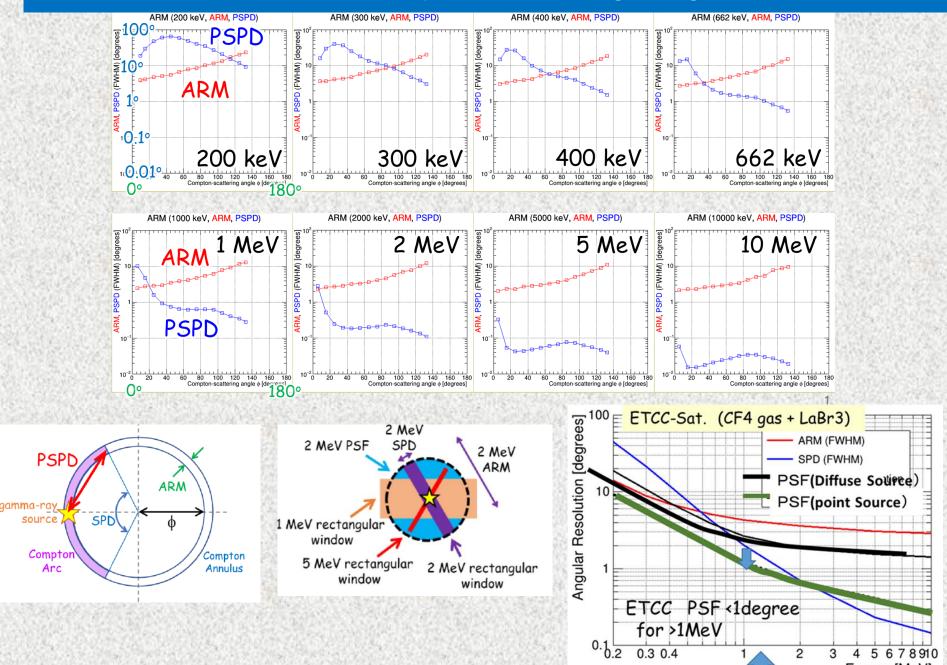
COSI: Fffective area ~10cm<sup>2</sup>

COMPTEL ~15-30cm<sup>2</sup> >1MeV  $3GRBs/(1sr \cdot year) > 0.4 \times 10^{-5} cm^{-2}$ Rate of COSI consistent to COMPTEL



⊕ is a Half Power Radius (HPR)

#### ARM & SPD variation by Scattering-angle $\phi$



## 項目2 (高雑音ほど重要)

- ・コンプトンの場合、 運動方程式に必要な物理量以外の独立な測定量
- 1. 反跳電子と散乱ガンマ線の間の角度
- ; 測定値と予想値から運動方程式の独立的な確認
- 2. 粒子識別 =>dE/dx とEの相関、パルス立ち上がり
- 3. 飛跡のトポロジー
- 4. 飛跡のTOF
- 5. Time window 10μ秒以内に

# 3 低雑音化への重要項目

検出器内の不感部分での反応は除去不能、不感部分が無い状況が理想

- コンプトンの場合
- 1. 散乱体での光電吸収を抑え(偶発事象源)、コンプトン散乱を最大化。
  - =>低原子番号物質の分子が理想的、

例えば CF4ガス、 液体シンチ(COMPTEL)、プラスチックシンチ。

2. 散乱体;一様構造(飛跡トポロジーの高精度化)、内部に他物質を入れない。

# COMPTELの再評価

#### 項目1 に対する工夫

視野制限 コンプトン散乱角(θ)30度以内、 雑音混入領域、現在の多くの提案は散乱 角90度以上。 さらに、ARM 散乱角に逆比例で悪化。

Figure of Merit 有効面積θ^2, ARM ∞θ, 雑音混入 θ^2

FoM  $\propto \theta^2/V(\theta^{2+1+2})^{-0.5}$  悪くなる傾向にある。

#### 項目2.3に対する工夫

• 多数の雑音低減法 TOF, パルス立ち上がり、低分子散乱体の採用、散乱体内に異物質無, =>採用しない場合より2桁以上低雑音を実現していると考えられる。

#### 証拠

COMPTEL: Likelihoodのみで天体検出、定量的フラックス算出が20天体以上で実現。

COSI: 高ΔE/Eを利用し511KEVを検出(MLEM不使用)、但し装置等からの511keV は銀河より約40倍高い。 連続ガンマ線天体はすべてMELM適用画像のみでフラックスは出ていない。

多数の従来型CCの将来計画 =>COMPTELの多くの工夫を排除し有効面積と視野の増大、高ΔE/Eを指向、雑音低減の工夫の記述は少ない。

## 最近の装置提案での私的検証

GRIPS arXiv:1105.1265v1, Honest な提案書 AL-26のみだが感度の根拠が出ている。

Table 4 Break-down of GRIPS improvement relative to COMPTEL at 1.8 MeV

Parameter	COMPTEL	GRIPS	Improve- ment	Sensitivity improvement
Effective area (similar selection)	$16 \text{ cm}^2$	$195 \text{ cm}^2$	12.2	3.49
Observing time (pointing vs. scanning)	0.35	1	2.9	1.69
Energy resolution	59  keV	17  keV	3.5	1.87
Angular resolution	3.9	1.5	2.6	1.61
Field-of-View (HWHM)	30°	$45^{\circ}$	2.2	1.48
Background (orbit, passive material,			3.0	1.73
tracker shielding)				
Total				45.2

#### マイナス要因が述べられていない。

- 1. TOF, パルス立ち上がりがない、 雑音 20~40倍 増加。
- 2. 散乱角θの制限が無い COMPTEL 30度 =>90度場合 雑音染込領域~10倍 ARM 2倍以上悪化 ARM1.5度はθ前方でも困難。
- 3 散乱体のZの増加と内部の余分な物質増加による雑音増加=偶発事象増加、2~3 (偶発係数は10倍以上増加するが、偶発事象の割合が不明なので2倍程度とした)

#### 雑音は全体で数100倍の増加。

- 3. 連続スペクトルにエネルギー分解能は感度に無関係 この場合、改善ファクタ 45ではなく。 45/1.87~25
- さらにARM 1.5度は困難 AMEGO の3.5度ぐらいが妥当、 改善total ~10になる。 マイナス要因が 20~30 COMPTELより悪い可能性がかなりある。

# まとめ

天文学や物理実験の次世代計画は世代毎に着実 に進展。

- =>MeVガンマ線天文学にはそれな見られない。
- 1. 前の実験(COMPTEL、INTEGRAL)の正確な評価が出来ていない。
- 2. その評価に基づき科学的基本に立ち返り根本問題の解決を踏まえた上での次世代計画が基本
- 3. MeVの場合、他波長同様なイメージング分光能力を実現することが天文学観測として樹立するための最低条件。(TeV も90-90年代、このような議論があったが当然イメージングになった)