



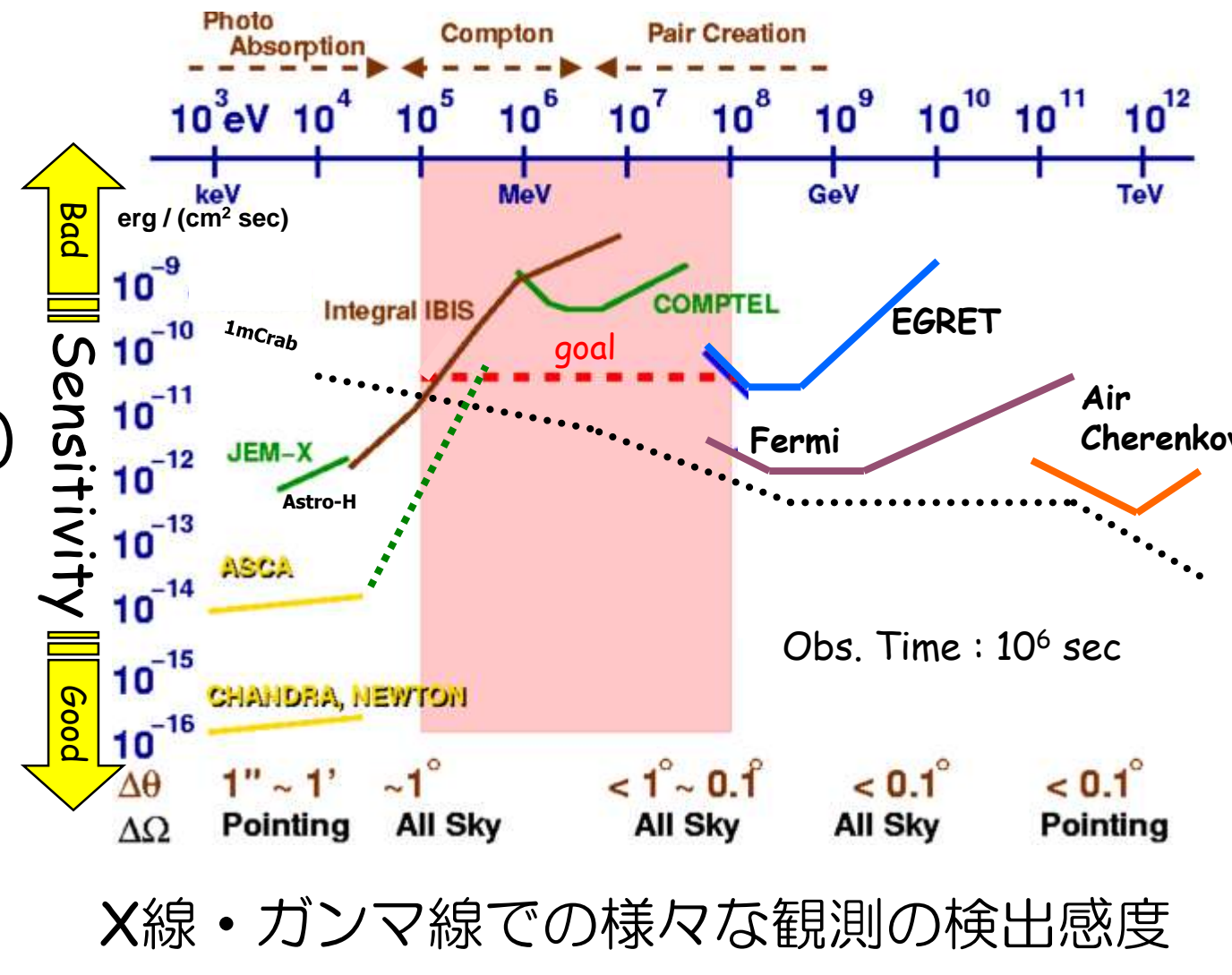
電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡による 高感度MeVガンマ線天体探査気球実験

高田淳史, 谷森達, 窪秀利, 水本哲矢, J. D. Parker, 水村好貴, 澤野達哉, 中村輝石,
松岡佳大, 古村翔太郎, 中村祥吾, 小田真, 岸本哲朗, 竹村泰斗, 宮本奨平, 身内賢太郎¹, 黒澤俊介²
京都大学, ¹神戸大学, ²東北大学

1. MeVガンマ線天文学の現状

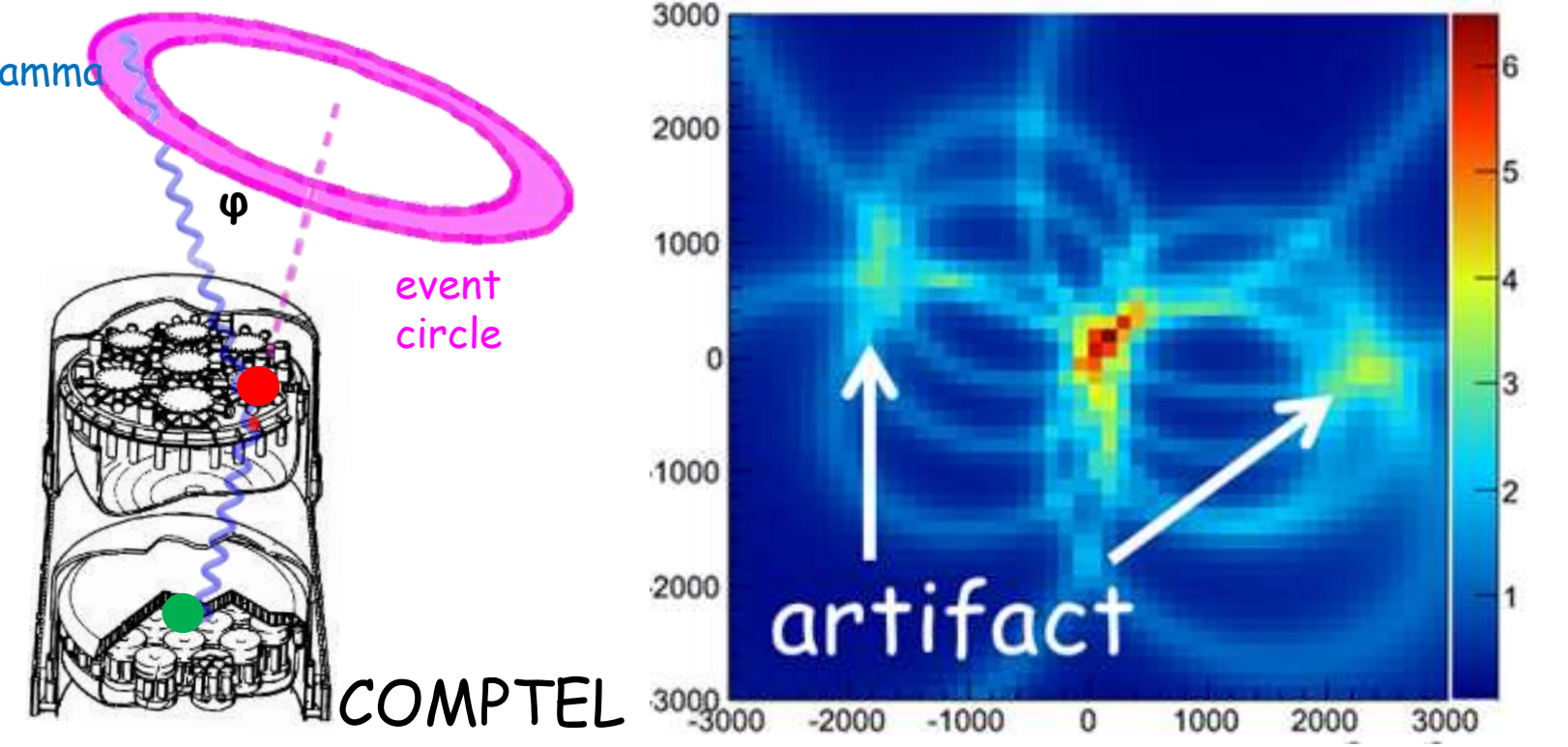
◆ MeVガンマ線でみる宇宙

- ▶ 元素合成
 - 超新星残骸: 元素合成のプロセスの解明
 - 銀河面 (²⁶Al, ⁶⁰Fe): 元素拡散のトレース
- ▶ 粒子加速
 - 活動銀河核, ガンマ線バースト: 放射機構の解明
 - 超新星残骸: 宇宙線加速源の探査 (π^0 -decay or 逆コンプトン散乱)
- ▶ 強い重力場
 - ブラックホール: 強い重力場の存在証明 (π^0 -decay)
- ▶ 遠方宇宙
 - 活動銀河核: 銀河の進化への制限 (anisotropy)
 - ガンマ線バースト: 宇宙初期の星生成
- ▶ その他
 - ガンマ線パルサー, 太陽フレア



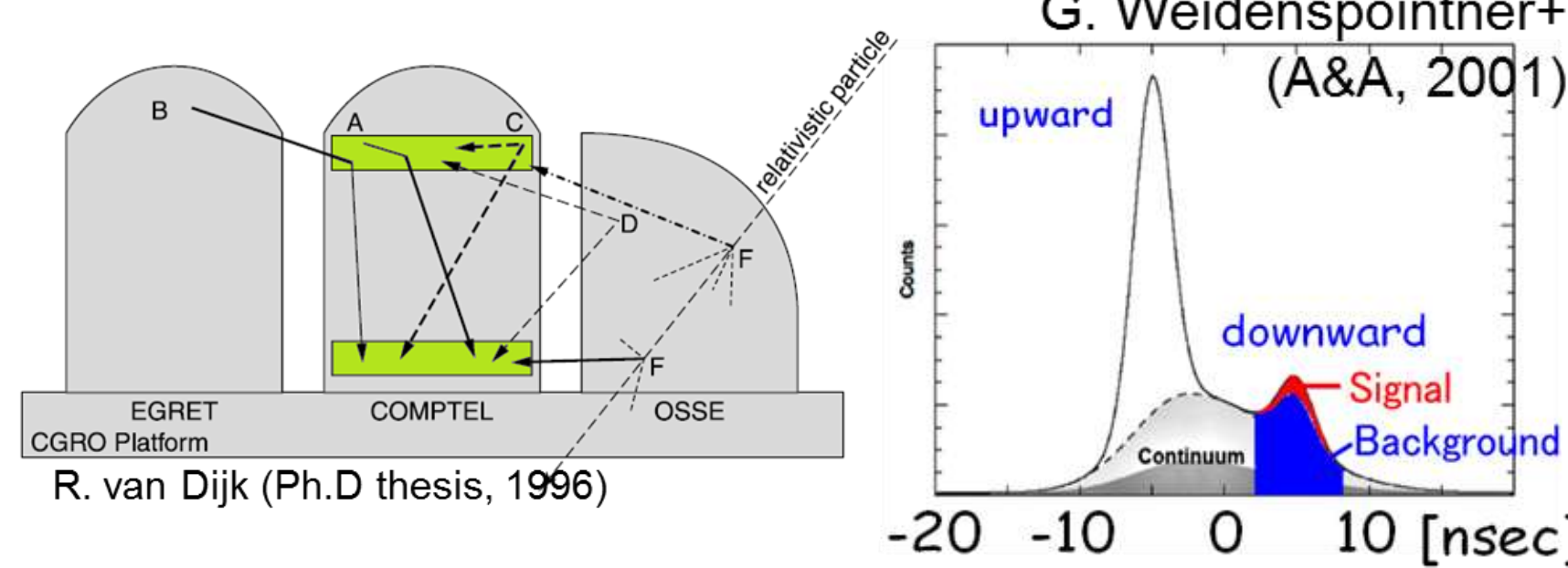
◆ MeVガンマ線画像取得の難しさ

この領域で最も結果を出しているCOMPTELは、コンプトン散乱を利用した検出器であるが、散乱で生じた反跳電子の方向を取得できなかったため、個々のガンマ線の到来方向を円形に制限することしかできなかった。この為、多くの偽信号を生み、SN比の悪い観測となった。



◆ Huge Background

宇宙から到来する宇宙線は、衛星本体と相互作用し、ガンマ線や中性子・荷電粒子を生じる。中でも励起された原子核からの核ガンマ線はMeV領域に存在し、観測を阻害する。COMPTELはこれらの排除の為、散乱から吸収までの時間(time of flight: TOF)を測定することで到来方向に制限をかけたが、雑音除去には十分ではなく期待した感度には届かなかった。



- COMPTELから次世代望遠鏡への提言
- ▶ 角度分解能の向上 = エネルギー分解能の向上
 - ▶ 冗長な雑音除去方法 (TOF, コンプトン運動学, 粒子識別, ...)
 - ▶ 電子の反跳方向の取得
- V. Schönfelder (New Astron. Rev., 2004)

2. SMILE実験

◆ 電子飛跡検出型コンプトンカメラ

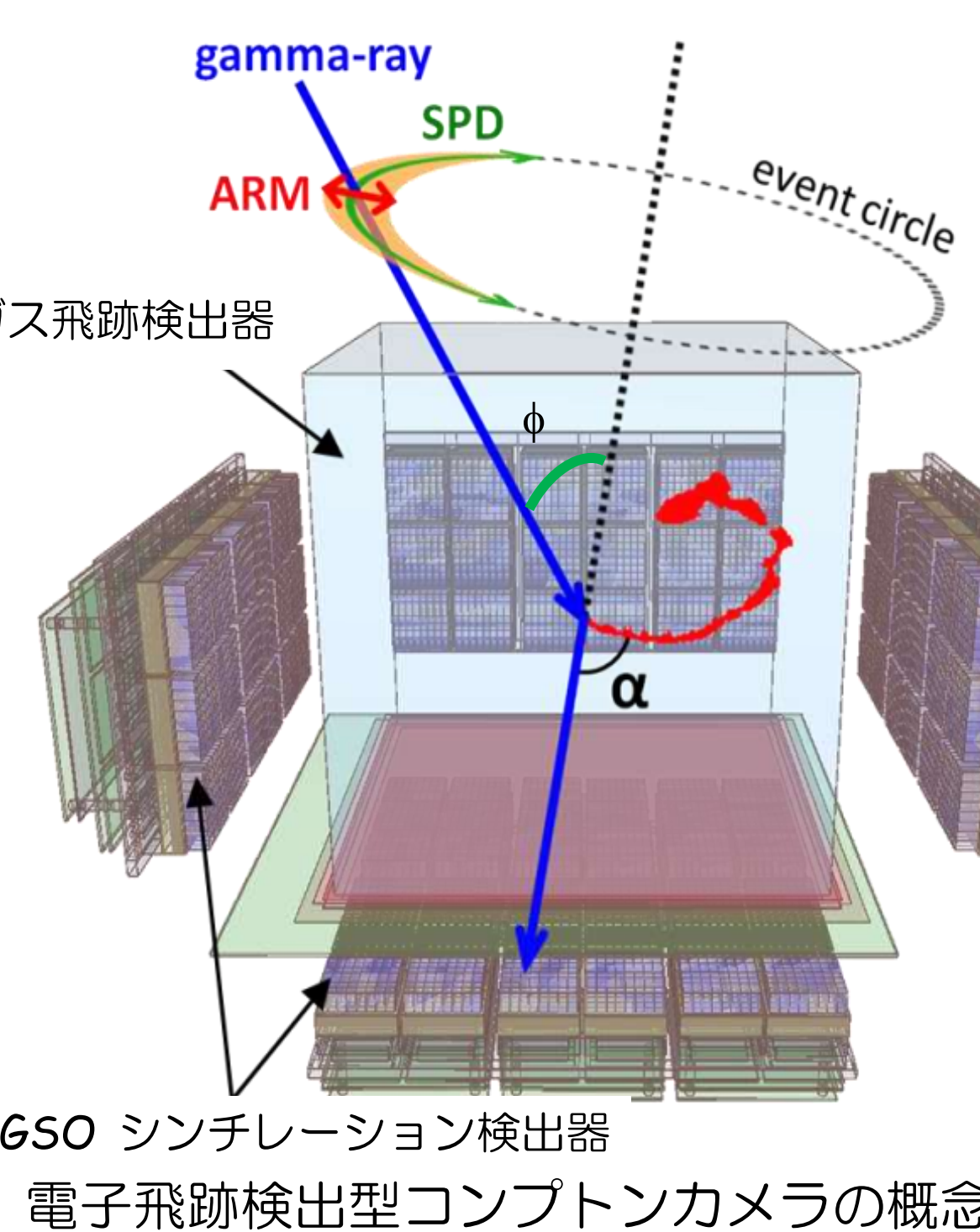
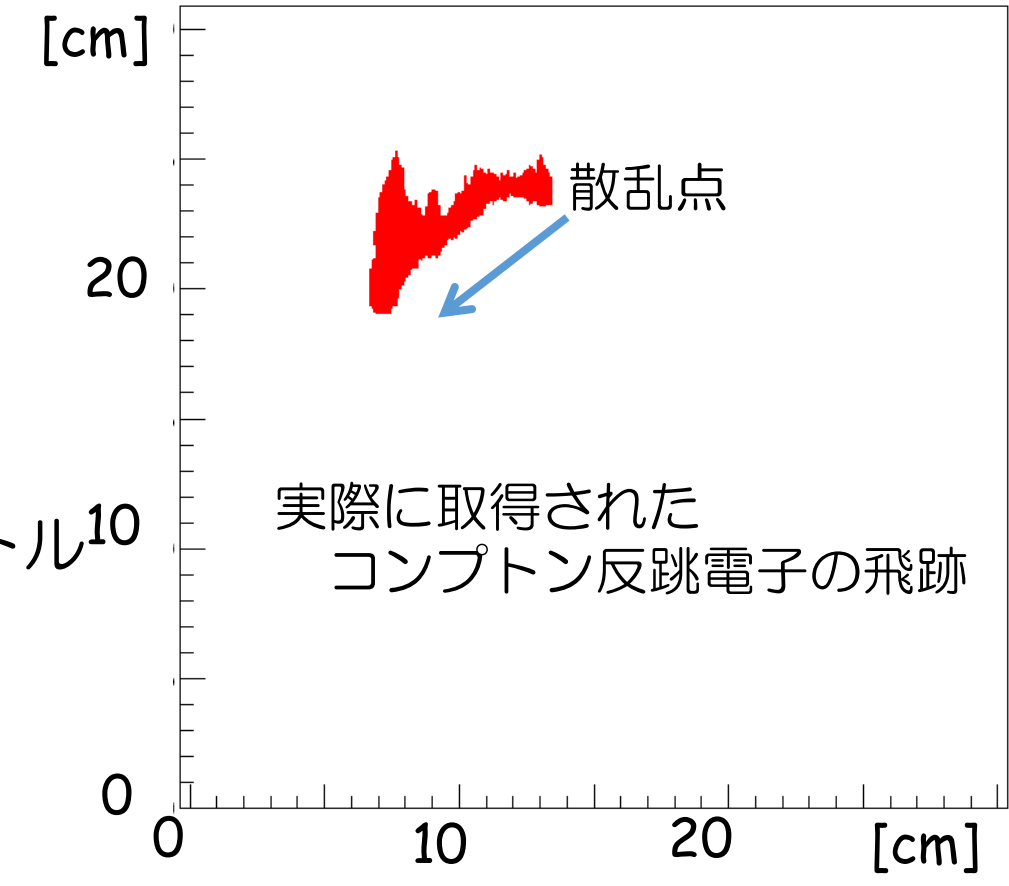
コンプトン散乱を利用したガンマ線望遠鏡。反跳電子のエネルギーと方向を取得するガス飛跡検出器と、散乱ガンマ線のエネルギーと吸収点を取得する位置感度型シンチレーション検出器から構成される。COMPTELと異なり、反跳電子の方向を取得することにより、運動量の足し算という単純な方法で入射したガンマ線のエネルギーと方向を光子毎に測定できる。

$$E_0 = E_\gamma + K_e$$

$$\cos \phi = 1 - \frac{m_e c^2 K_e}{E_\gamma (E_\gamma + K_e)}$$

$$\vec{s} = (\cos \phi - \frac{\sin \phi}{\tan \alpha}) \vec{g} + \frac{\sin \phi}{\sin \alpha} \vec{e}$$

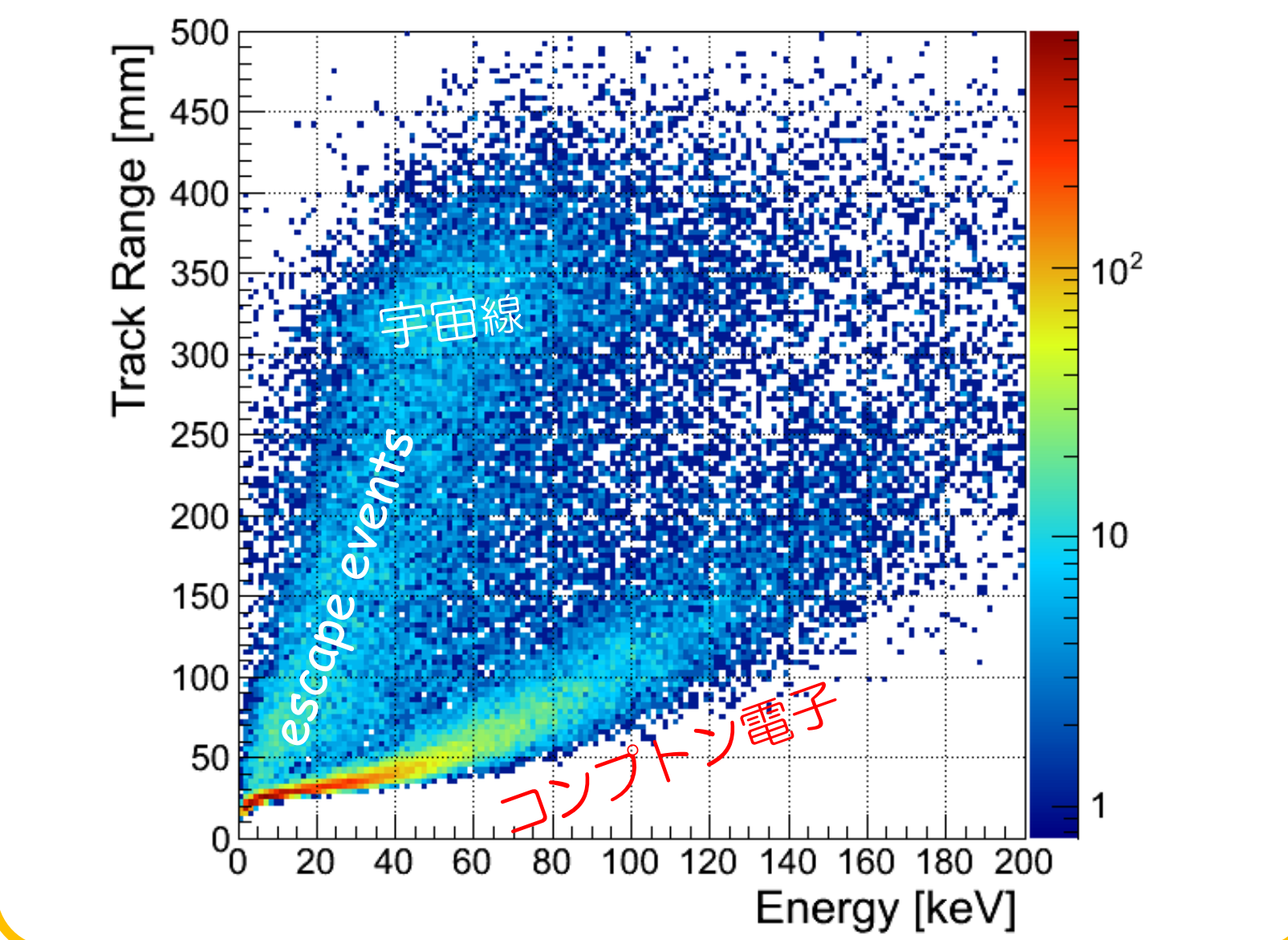
- E_0 : 入射ガンマ線のエネルギー
- E_γ : 散乱ガンマ線のエネルギー
- K_e : 反跳電子の運動エネルギー
- \vec{s} : 入射ガンマ線の到来方向ベクトル
- \vec{g} : 散乱方向の単位ベクトル
- \vec{e} : 反跳方向の単位ベクトル
- ϕ : 散乱角
- α : \vec{g} と \vec{e} のなす角



◆ 電子飛跡検出型コンプトンカメラの雑音除去能力

▶ エネルギー損失率による粒子識別

荷電粒子のエネルギー損失率は質量・エネルギーによって変化するため、これを用いて粒子識別が可能となる。コンプトン散乱では電子しか発生しない為、宇宙線と筐体の相互作用から生じる中性子を始めとする種々の雑音粒子を強力に除去することができる。



▶ コンプトン運動学テスト

散乱方向と反跳方向の間のなす角 α は、幾何的情報のみを用いて、

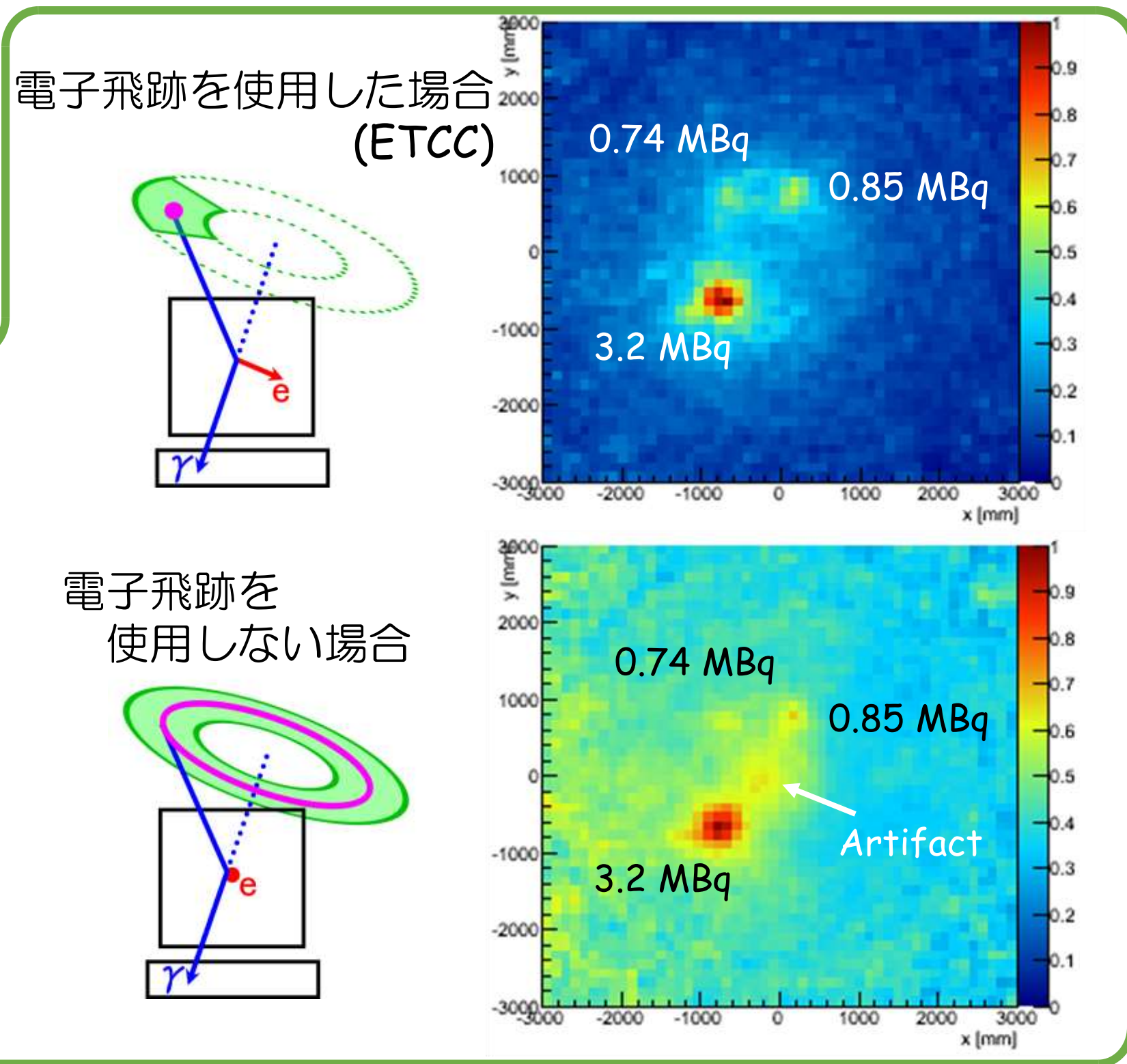
$$\cos \alpha_{geo} = \vec{g} \cdot \vec{e}$$

と表せる。

一方で、コンプトン散乱を仮定すると、散乱ガンマ線のエネルギーと反跳電子のエネルギーから角度 α は

$$\cos \alpha_{kin} = \left(1 - \frac{m_e c^2}{E_\gamma}\right) \sqrt{\frac{K_e}{K_e + 2m_e c^2}}$$

となる。この2つは完全に独立な測定から得られるため、分解能の範囲で一致するものを選び出すことで、運動学的にコンプトン散乱を満たす事象のみを選択することができる。



▶ 反跳方向を取得することによる高コントラストな画像

COMPTELのような一般的なコンプトン法を用いると、電子の反跳方向を取得しない為、ガンマ線到来方向はリング状にしか求まらず、光子毎に特定することはできない。従ってリングを重ね書きして画像を得ることになるが、疑似ピークを作ってしまう上、本来の到来方向以外への漏れ込みも多い。一方、電子飛跡検出型コンプトンカメラは、散乱の全ての物理量を測定するため、光子毎の到来方向の決定が可能で、漏れ込みも最小限に抑えられる。このため、右に示されるように同じ検出器を用いても、4倍近く高いコントラストの画像が得られ、より暗い天体まで観測が可能となる。

◆ Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment

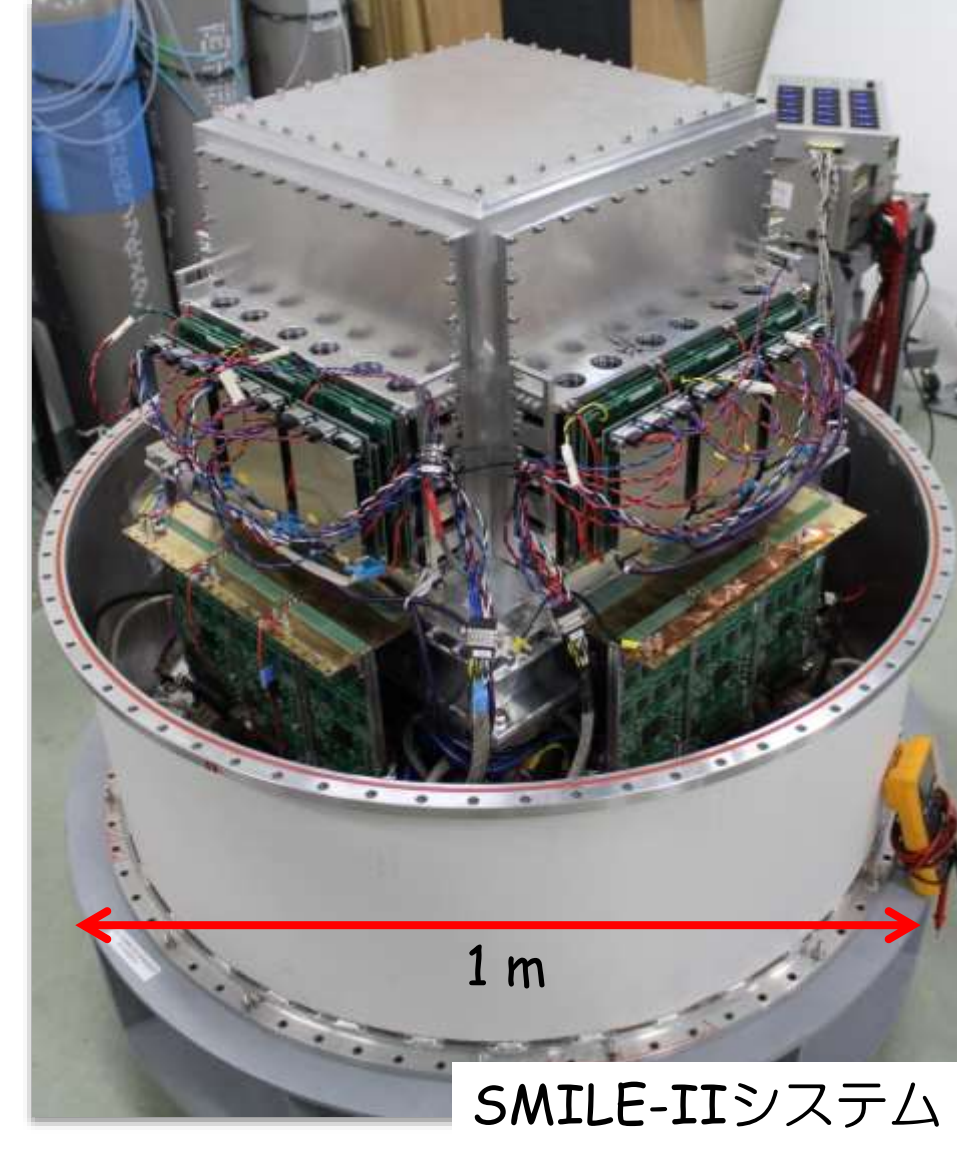
- ▶ SMILE-I (2006/9/1)
 - ▶ 衛星搭載での全天探査を目指した、段階的な気球実験シリーズ
 - ▶ SMILE-I (2006):
 - ISAS/JAXA三陸大気球観測所からの放球
 - 気球高度でのガンマ線検出実証実験 ⇒ 宇宙環境下でも雑音除去能力が実証された
 - ▶ 次期気球実験 SMILE-II:
 - 明るい天体であるかに星雲の観測で望遠鏡としての実証実験 ⇒ 要求値: >0.5 cm²の有効面積と <10°の角度分解能
 - ▶ Goddardとの共同実験でFt. Sumnerからの放球を予定
- ▶ 極周回気球実験 SMILE-III:
 - 銀河面の天体探査, 系外拡散ガンマ線のanisotropy測定, かに星雲偏光観測, 放射線帯からの相対論的電子降り込みに伴うバースト的ガンマ線放射の観測

3. SMILE-II検出器の性能評価

◆ SMILE-IIシステム緒言

- ▶ SMILE-IIのハードは、ほぼ完成
- ▶ 現在、検出器の性能評価中
- ▶ コマンド・テレメトリ及び低温への対策は準備中
- ▶ 上記終了次第、フライトレディ

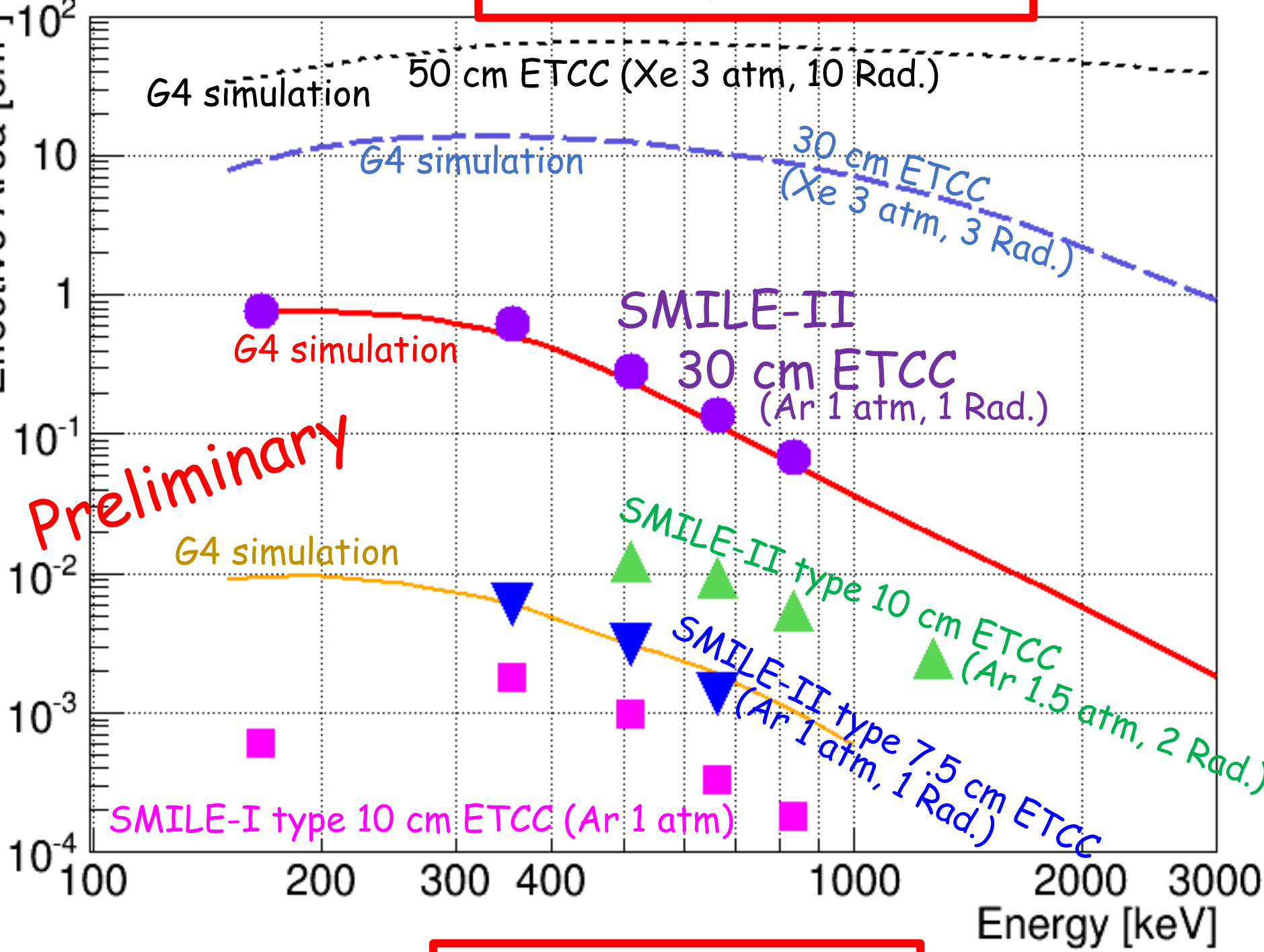
ガス飛跡検出器	飛跡検出器サイズ	30 x 30 x 30 cm ³
	ガス	Ar:iso-C ₄ H ₁₀ :CF ₄ (95:2:3), 1 atm.
	空間分解能	<0.5 mm
	エネルギー分解能 (FWHM)	20% (@ 22 keV)
位置検出型シンチレーション検出器	Scintillator	GSO:Ce (6.71 g/cm ³)
	Pixel size	6 x 6 x 13 mm ³
	# of pixels	6912
	Dynamic range	80 keV-1.3 MeV
	エネルギー分解能 (FWHM)	10% (@ 662 keV)



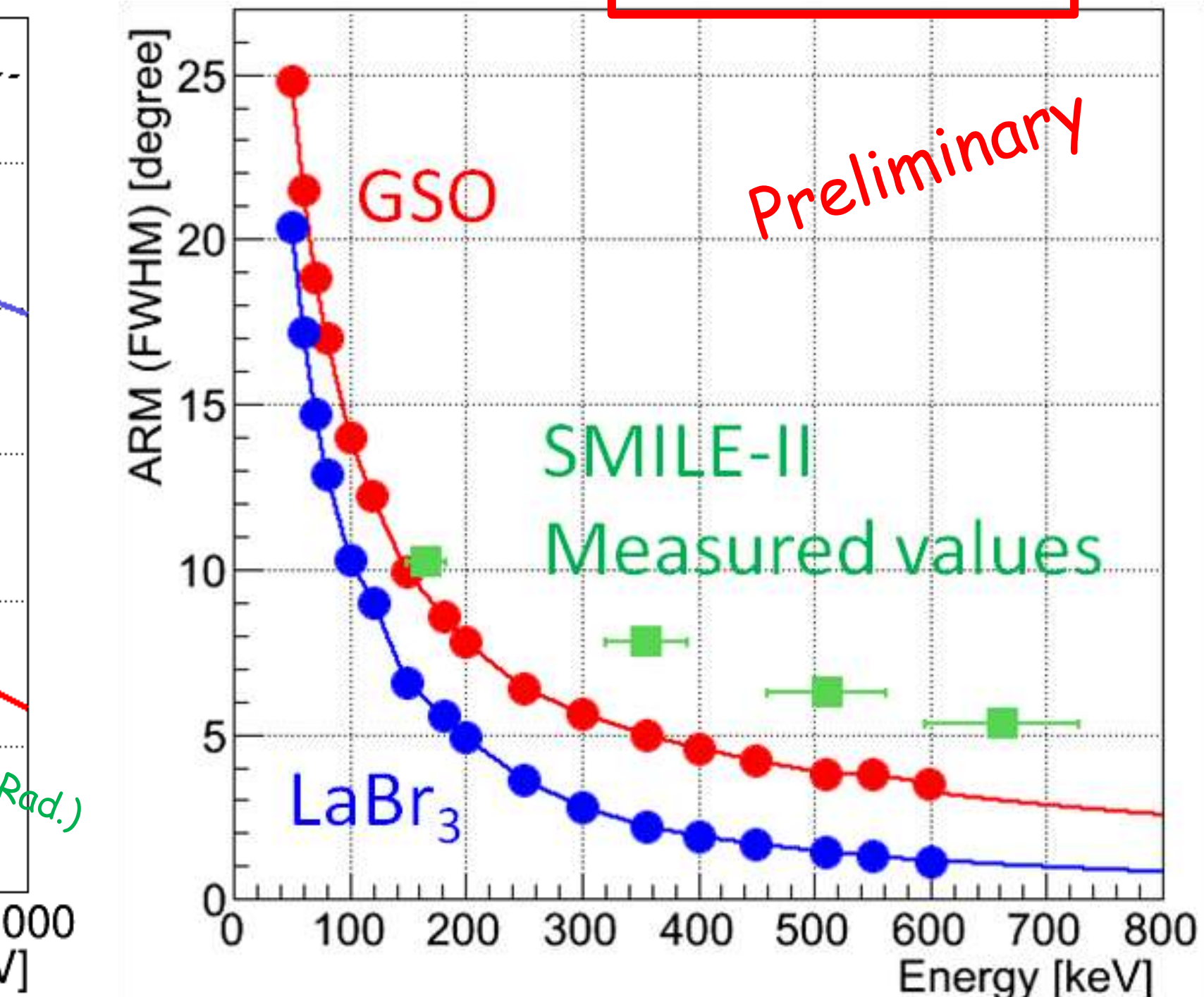
◆ システム&HK

システム重量 (容器込)	~250 kg
消費電力	~250 W
圧力容器	Al, ϕ 1 m x 1.4 m
姿勢測定	GPSコンパス, 傾斜計, 磁場センサ
HKセンサ	圧力計, 温度計

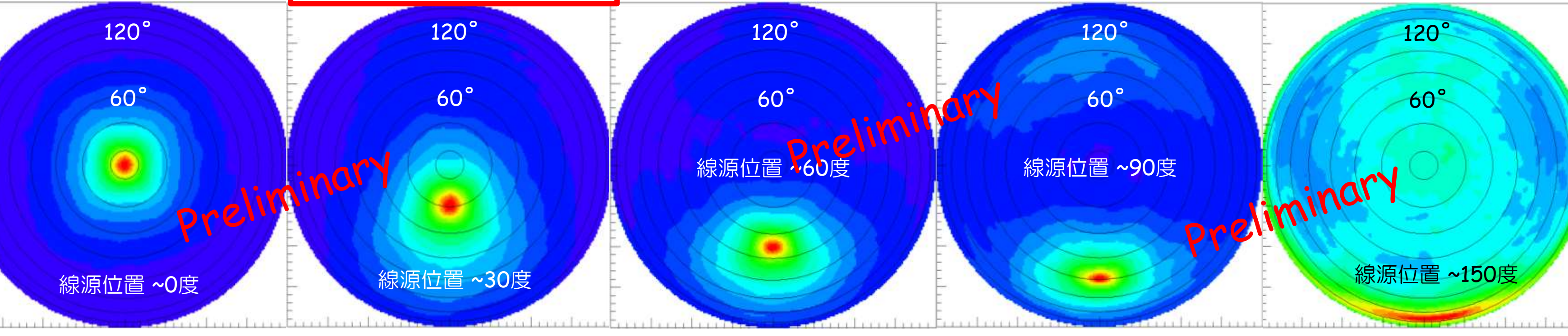
◆ 有効面積



◆ 角度分解能

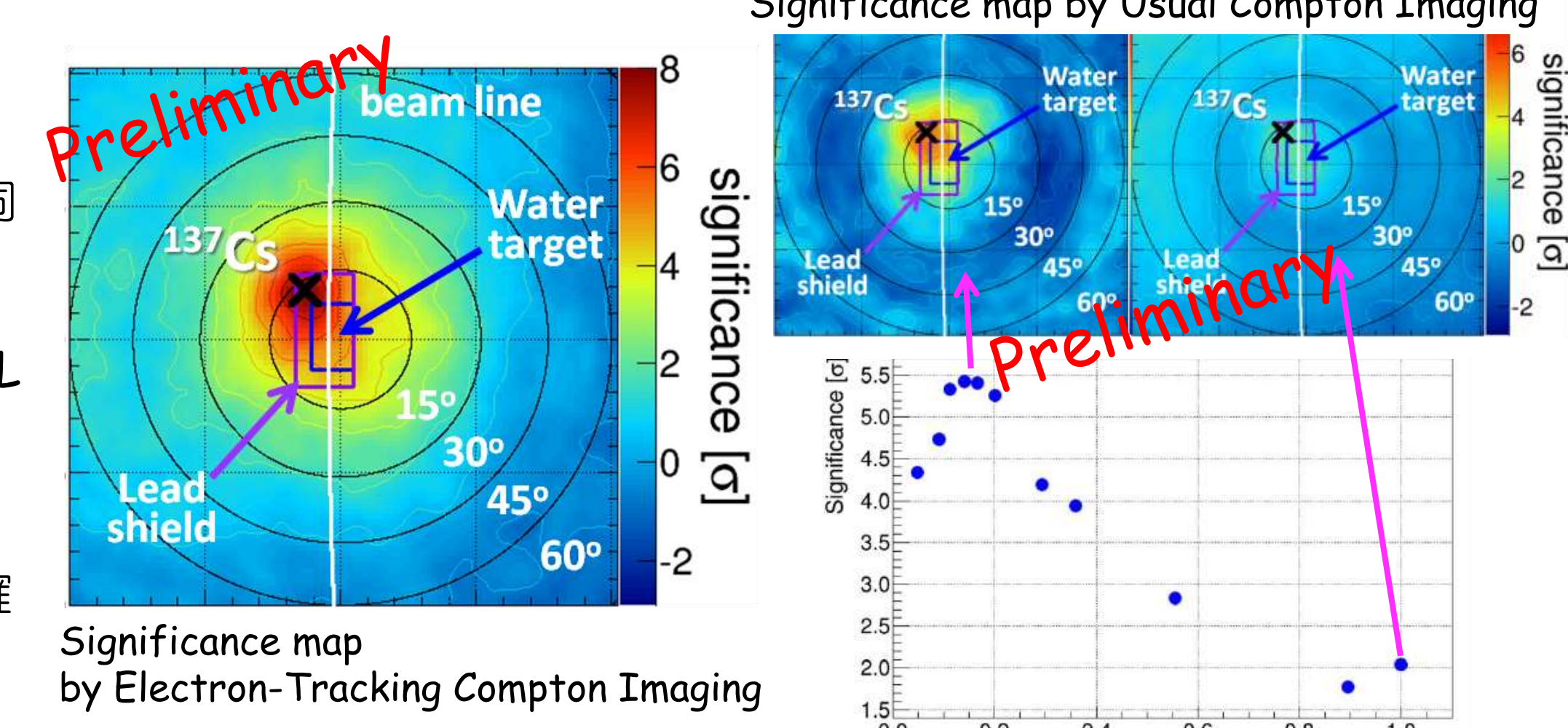


◆ 視野角



◆ COMPTELの手法との比較

陽子ビームを水ターゲットに照射し、主にガンマ線と中性子からなる高放射線環境下で行った¹³⁷Cs線源の観測について、電子の反跳方向を用いた場合と、用いないCOMPTELと同様の方法を用いた場合と、それぞれのガンマ線検出優位度マップを右に示す。反跳方向を用いると検出優位度は7.9 σ であるが、COMPTEL方式で解析した場合、¹³⁷Csの検出優位度は2.0 σ に過ぎない。検出効率を犠牲にして信号判定の条件を厳しくすると5.4 σ まで改善できるが、有効面積は1/6にまで減少することが確認できた。電子反跳方向の情報で検出感度は少なくとも4倍改善できていることがわかる。



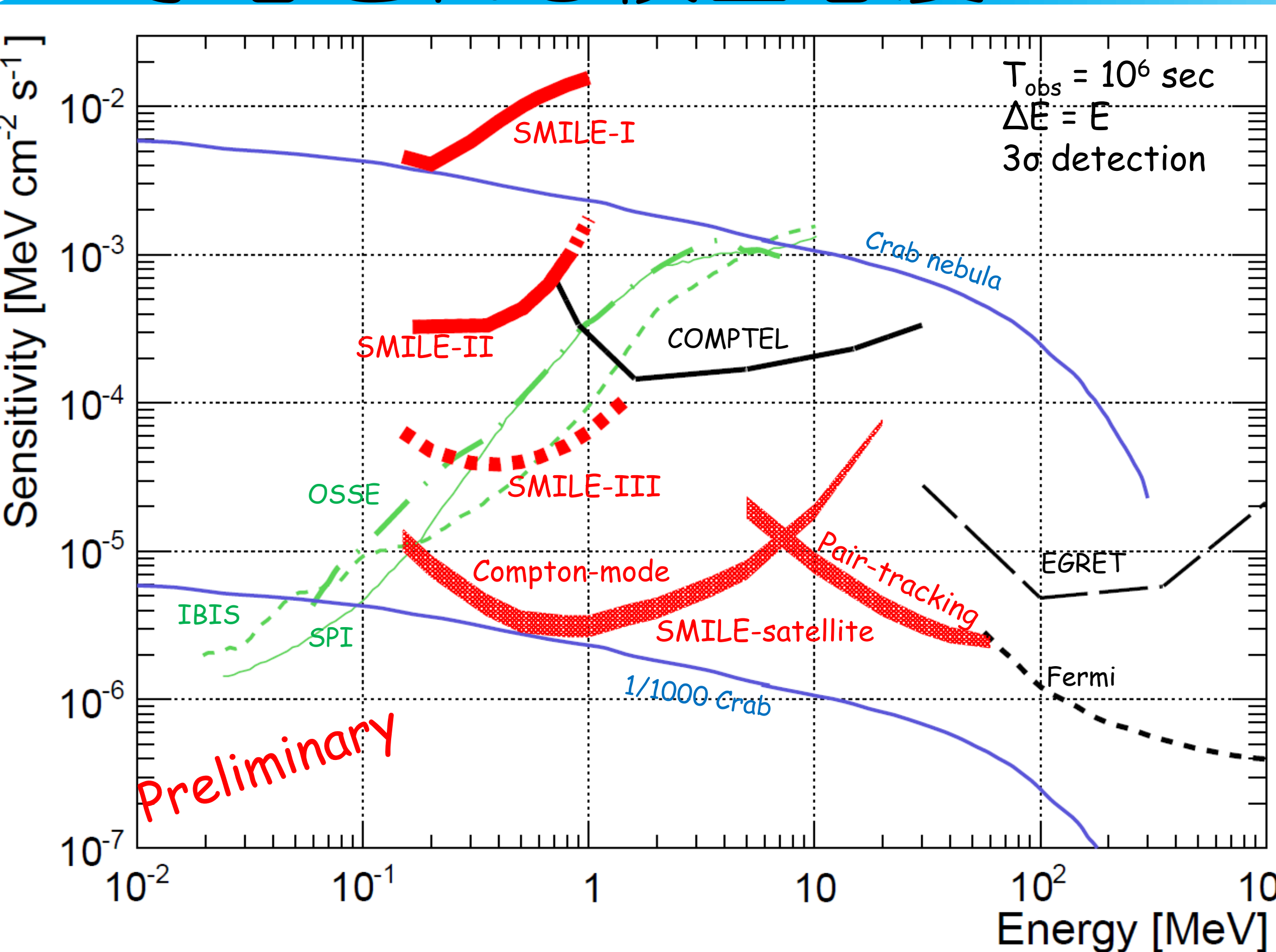
◆ 核ガンマ線観測への可能性

Ia型の超新星爆発では太陽質量の0.6倍もの⁵⁶Niが生成されるとされているが、実際に⁵⁶Niからの核ガンマ線が観測されたのはわずか2例のみ (SN1987A, SN2014J)である。鉄ターゲットに陽子を照射する実験から、励起されたFeからのガンマ線がいくつか観測されている兆候が得られており、今後の検出器改良によって、より有意な検出が可能になり、核ガンマ線によるサイエンスの開拓が期待できる。

◆ 暗いガンマ線源の観測

ガンマ線は完全なシールドが難しいため、実際の天体観測においては背景のガンマ線の方が数多く入射する。そのような環境を作って観測したところ、7.1 σ の有意度で画像取得に成功した。再構成されたスペクトルでも511 keVにわずかな超過がみられる。

4. 予想される検出感度



- ▶ SMILE-II (current ETCC):
 - 30 cm-cubic TPC (Ar 1 atm)
 - GSO (1放射帳)
 - かに星雲を高度40km・数時間で検出可能
- ▶ SMILE-III:
 - 30 cm-cubic TPC (Xe 3 atm)
 - GSO (3放射帳)
 - 気球高度で10時間の観測からかに星雲の偏光観測が可能
- ▶ SMILE-Satellite:
 - 50 cm-cubic TPC (Xe 3 atm)] x 4
 - LaBr₃ (10放射帳)
 - COMPTELの100倍の検出感度
 - 対生成も捉えることでFermi衛星と接続

SMILE-II及びSMILE-IIIの予想感度の計算で使用した背景雑音量は、SMILE-I観測結果 (宇宙拡散・大気ガンマ線及び宇宙線由来の雑音で説明可)を外挿した。SMILE-Satelliteについては、SMMとCOMPTELによる0.1-5 MeVの背景ガンマ線フラックスを用いている。また、ETCCのpoint spread functionが2次元のローレンツ分布と仮定し、検出されたうちの1/4の事象が入る半値全幅内を信号領域としている。

電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡でMeVガンマ線天文学を開拓!!