



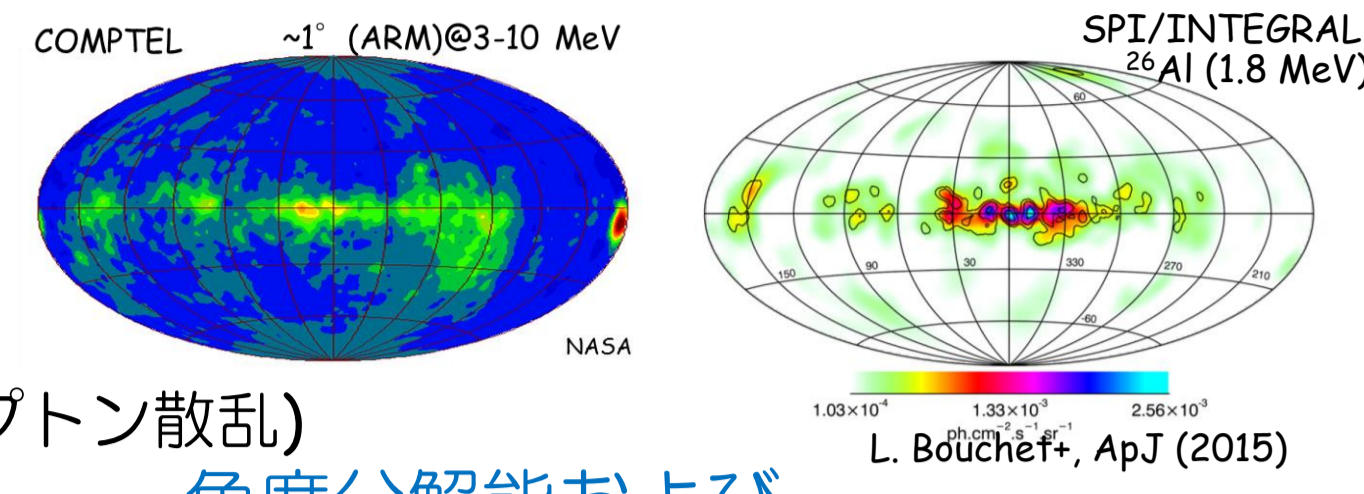
電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡による MeVガンマ線観測気球実験



高田淳史, 谷森達, 水本哲矢, 水村好貴, 古村翔太郎, 岸本哲朗, 竹村泰斗, 吉川慶, 中増勇真, 中村優太, 谷口幹幸, 黒澤俊介¹, 澤野達哉² (京都大学, ¹東北大学, ²金沢大学)

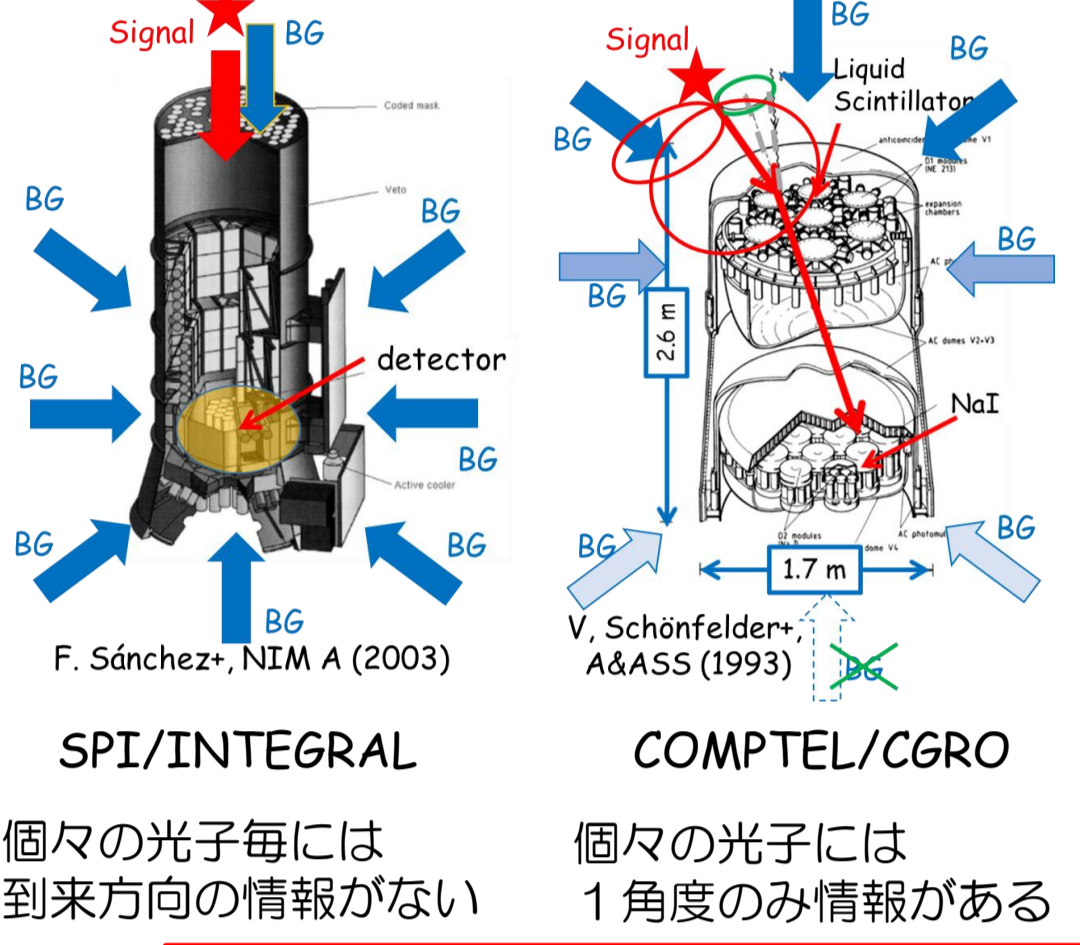
1. MeVガンマ線天文学の現状

- 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)
- 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 ...など



角度分解能および雑音除去に苦勞し感度は悪いまま進展がない

MeVガンマ線天文学の開拓には将来的に1 mCrabの感度が必要

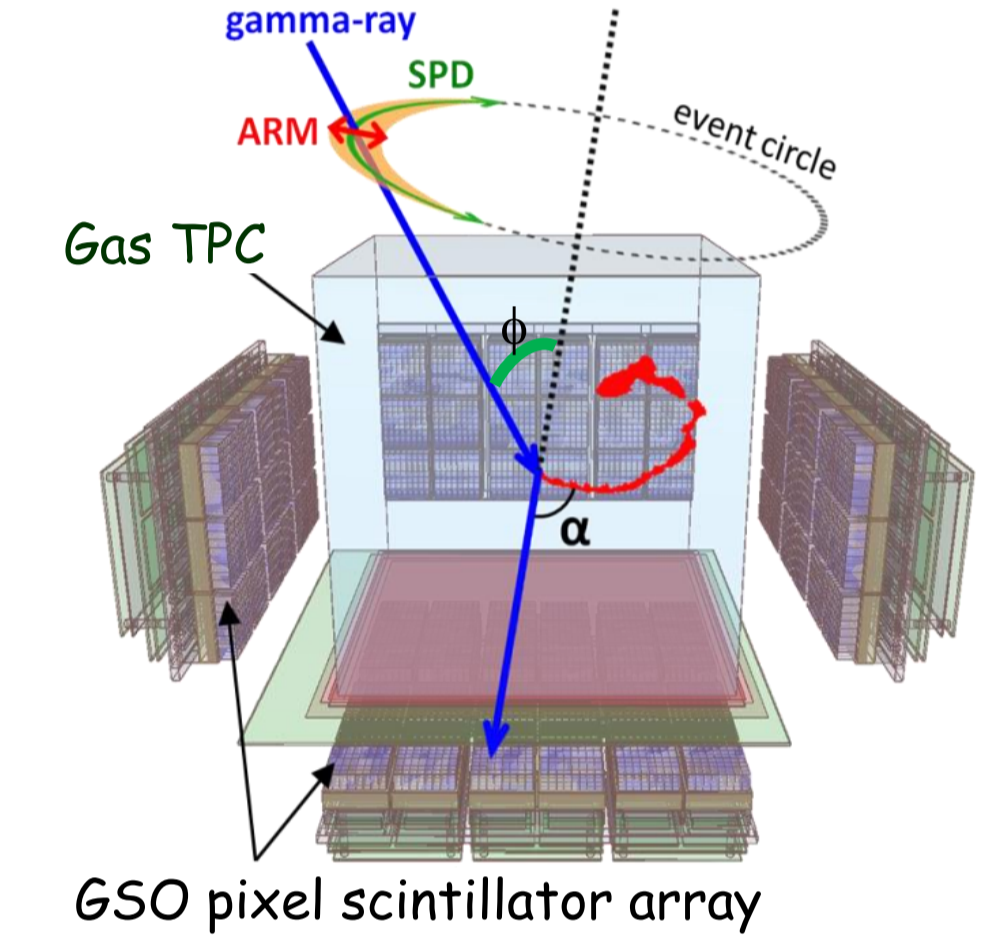


ガンマ線の到来方向: 2つの角度情報で表現
符号化マスク法: 光子毎には方向情報がない
従来コンプトン法: 光子毎には角度情報は1つのみ

MeVガンマ線は、透過力が高く、相互作用は散乱が優位である。このため、情報が不足する従来の観測方法では、観測領域への多量に生成される雑音の漏れこみを防げない。従って、MeVガンマ線天文学を切り拓くには、光子毎に到来方向を測定できる、新しい手法が必須である。

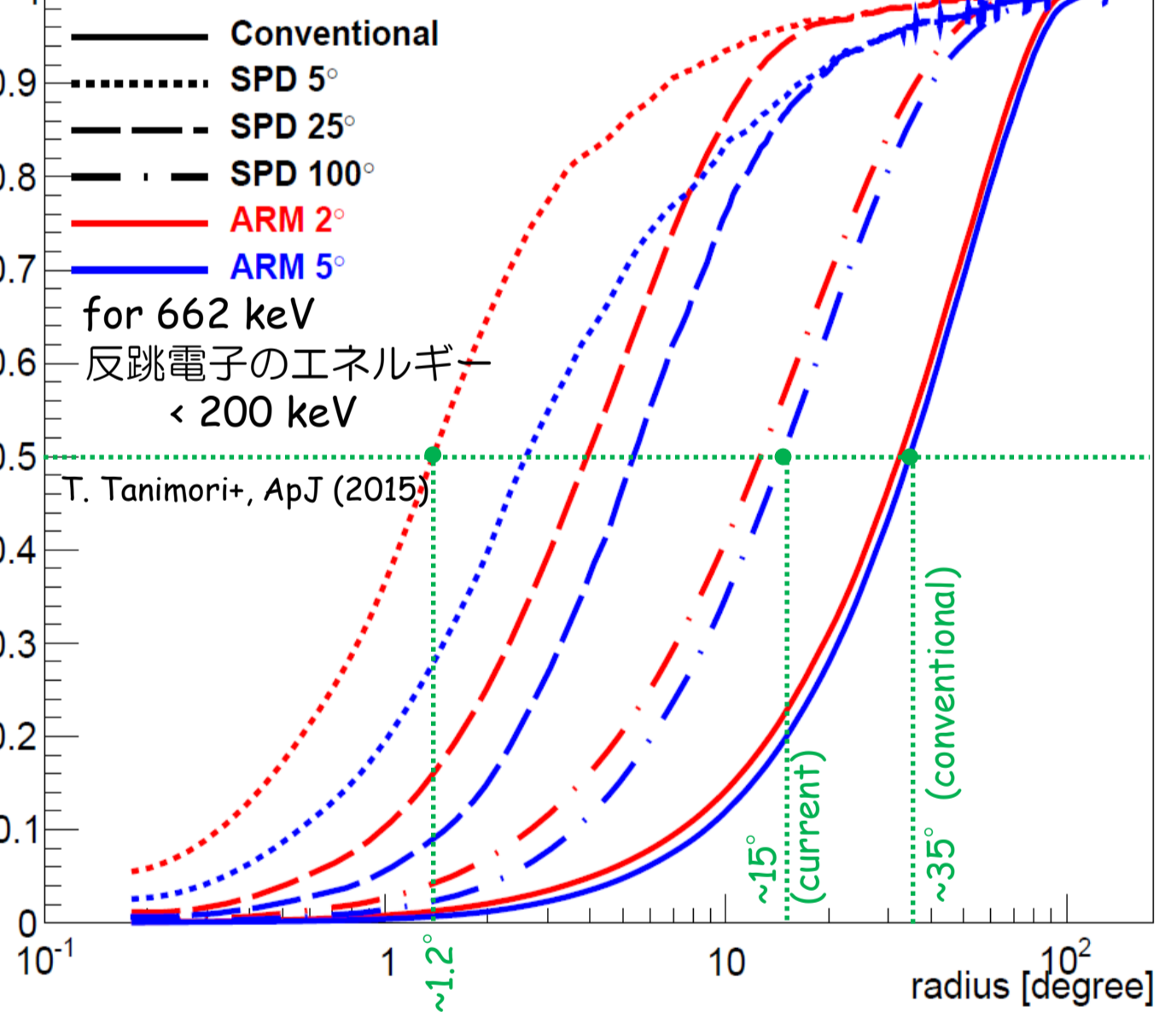
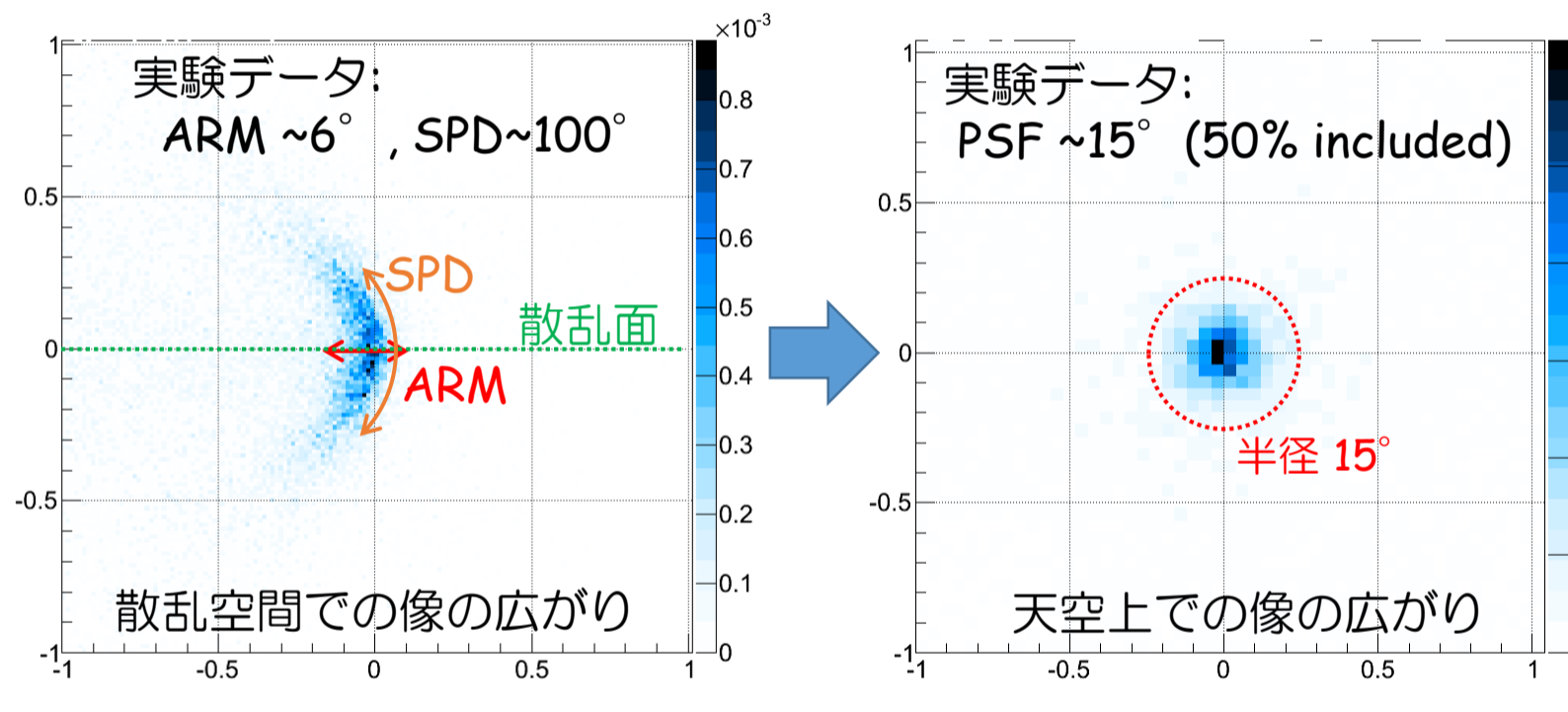
到来方向の2角度を光子毎に測定する新しい観測手法が必須

2. Photon Counting Imaging



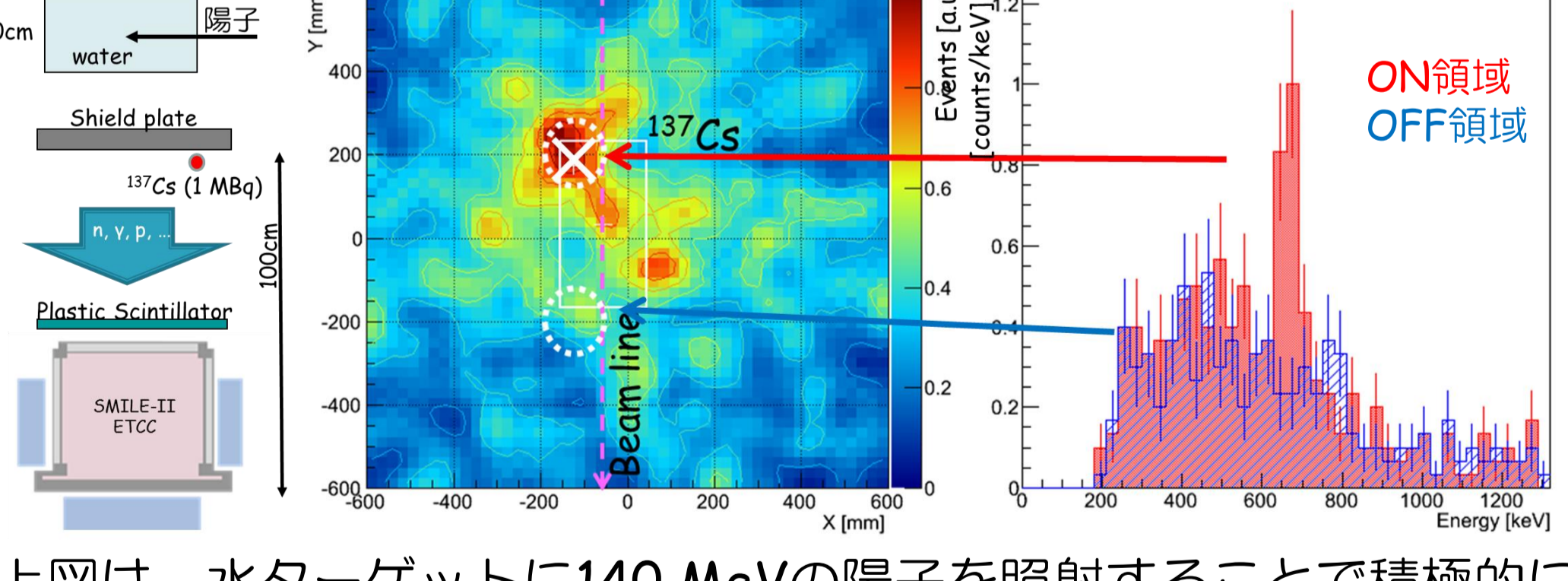
電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC)
コンプトン散乱を利用したガンマ線望遠鏡。反跳電子のエネルギーと方向を取得するガス飛跡検出器と、散乱ガンマ線のエネルギーと吸収点を取得する位置感度型シンチレーション検出器から構成される。COMPTELでは取得できなかった反跳電子の方向を取得することにより、運動量の足し算という単純な方法で、入射したガンマ線のエネルギーと方向を光子毎に測定できる。これにより、従来方法では不可能な鋭いPoint Spread Function (PSF)を実現できる。さらにガンマ線検出に使用しないパラメータにより、非常に強力な雑音除去を可能とする。

ガンマ線像の天空上の角度広がり
通常の天体望遠鏡の角度分解能は、像の天空上の広がり (point spread function: PSF) で定義される。しかしこれまでコンプトンカメラの角度分解能は散乱角決定精度 (angular resolution measure: ARM) と散乱平面決定精度 (scatter plane deviation: SPD) により評価されてきたが、どちらもPSFではない。



左図は、画像処理を施さない場合、ガンマ線源を中心とする円内に何割の事象が含まれるかを、様々なARM/SPDに対して示したものである。従来コンプトン法の円環を重ねる方式では、コンプトン散乱角の平均値で決定される為、ARMを改善したところでPSFに対しては大きな効果がないことが分かる。COMPTELは、前方散乱が卓越する高エネルギーに特化し、さらに散乱角に制限を与えることで影響を抑えている。従ってML-EM法などの画像処理が必須となり、天体解析を困難にする。一方、ETCCでは、画像処理を行わなくても鋭いPSFが実現でき、その広がりにはSPDに大きく依存している。即ち、SPDの改善によるPSFの向上で、観測領域外からのもれ込みが減るため、雑音量が低減し高感度の観測が可能となる。このことから、電子の反跳方向の効果は非常に大きい。

ガンマ線イメージングスペクトロスコピー



個別の天体からのスペクトルを得る為に、天体観測にはイメージングが欠かせない。特に、散乱優位コリメータが有効でなく、宇宙線によって雑音ガンマ線が多量に生成されるMeVガンマ線領域では、視野外の事象をイメージングで排除できるかが非常に重要となる。

上図は、水ターゲットに140 MeVの陽子を照射することで積極的に雑音を発生させた中で、既知のガンマ線源をETCCで観測して得られた、再構成ガンマ線画像とON領域とOFF領域のエネルギースペクトルである。この図からON領域とOFF領域の単純な差し引きから、ガンマ線源自体のスペクトルが得られることがわかる。これにより、ETCCによる天体観測では適切なOFF領域を設定し、BGとして差し引いて個別の天体のスペクトルを得る、一般的な方法の解析が可能と示される。

ガンマ線事象以外の雑音除去

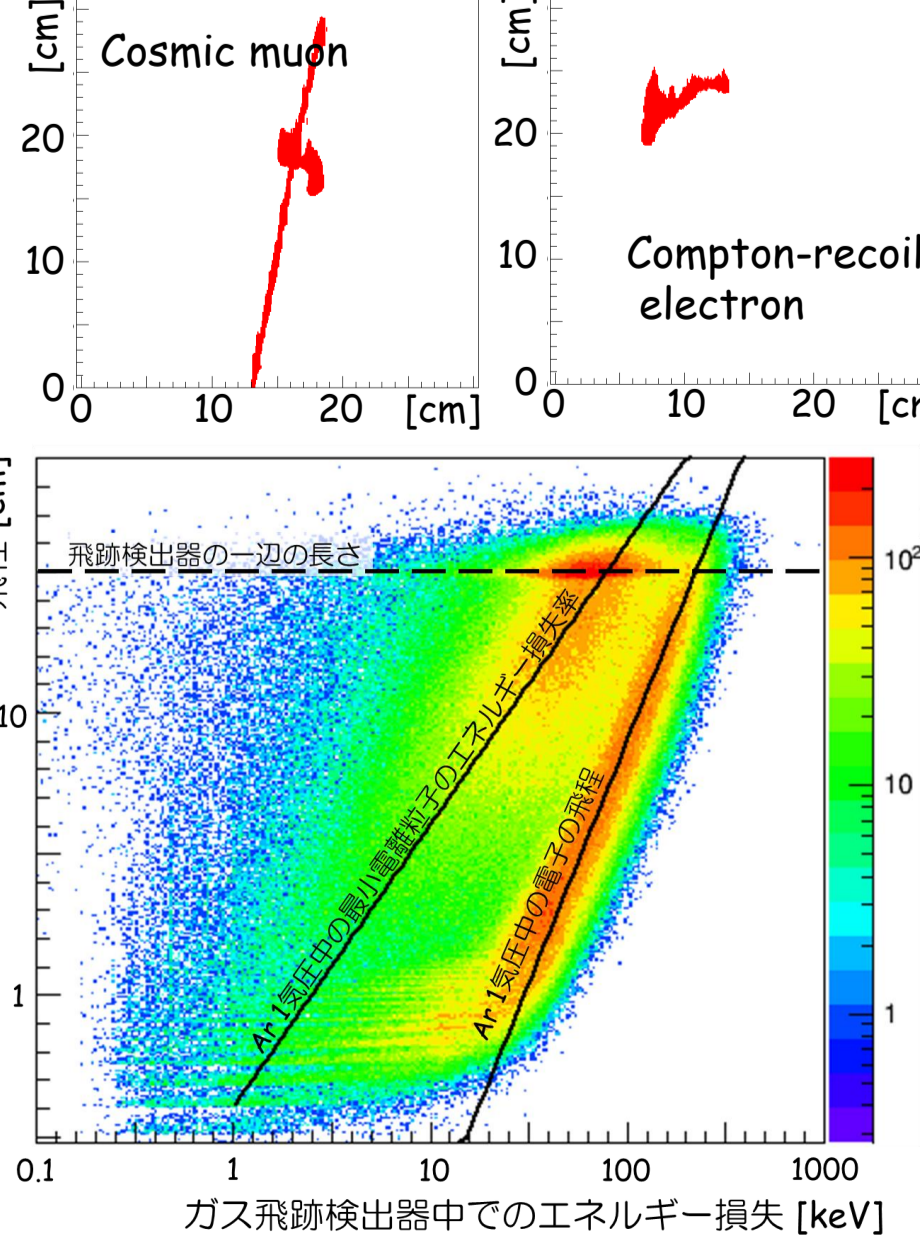
ガンマ線散乱方向と電子反跳方向の間の角 α は、以下に示す独立した2つの方法から得られる。

$$\cos \alpha_{\text{geo}} = \hat{g} \cdot \hat{e}$$

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

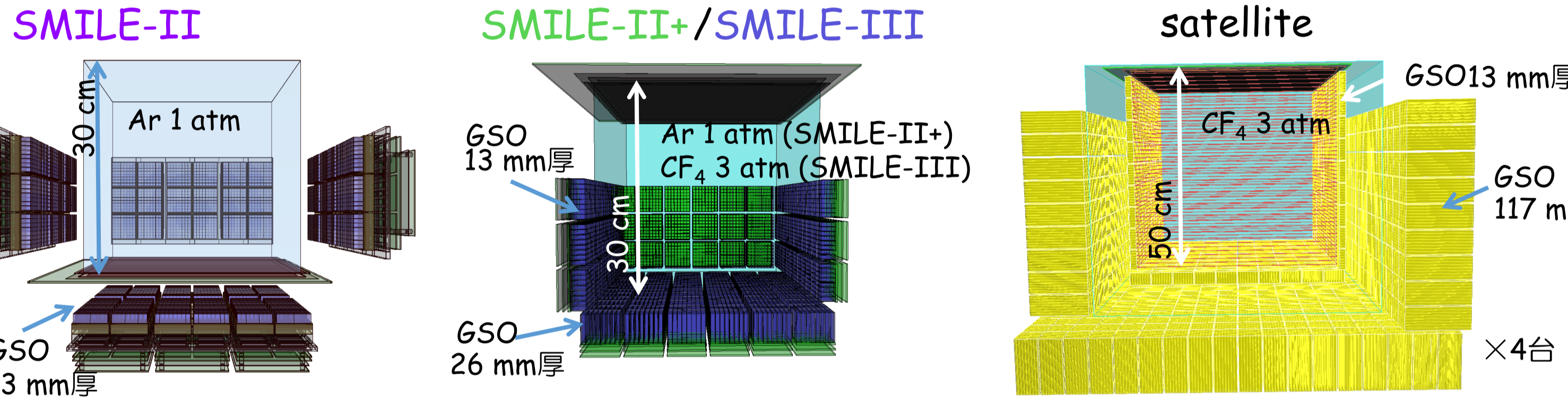
右式はコンプトン散乱であることが仮定されている。従って、上記2つの値が一致するものを選べば、コンプトン散乱事象のみを選び出すことができる。

加えて、荷電粒子のエネルギー損失率のエネルギー依存性は、質量電荷比によって異なる。このため、エネルギー損失率を用いれば飛跡検出器中の粒子を識別することが出来る。右図は実際にガス飛跡検出器で得られた、飛跡長と損失エネルギー量の相関である。この図から飛跡検出器内でエネルギーを落とし切った電子・検出器外部へ飛び去った電子・宇宙線ミュー粒子がはっきりと区別できる。ガンマ線が起こすコンプトン散乱では、反跳粒子は電子のみであるため、中性子事象などは強力に排除可能である。

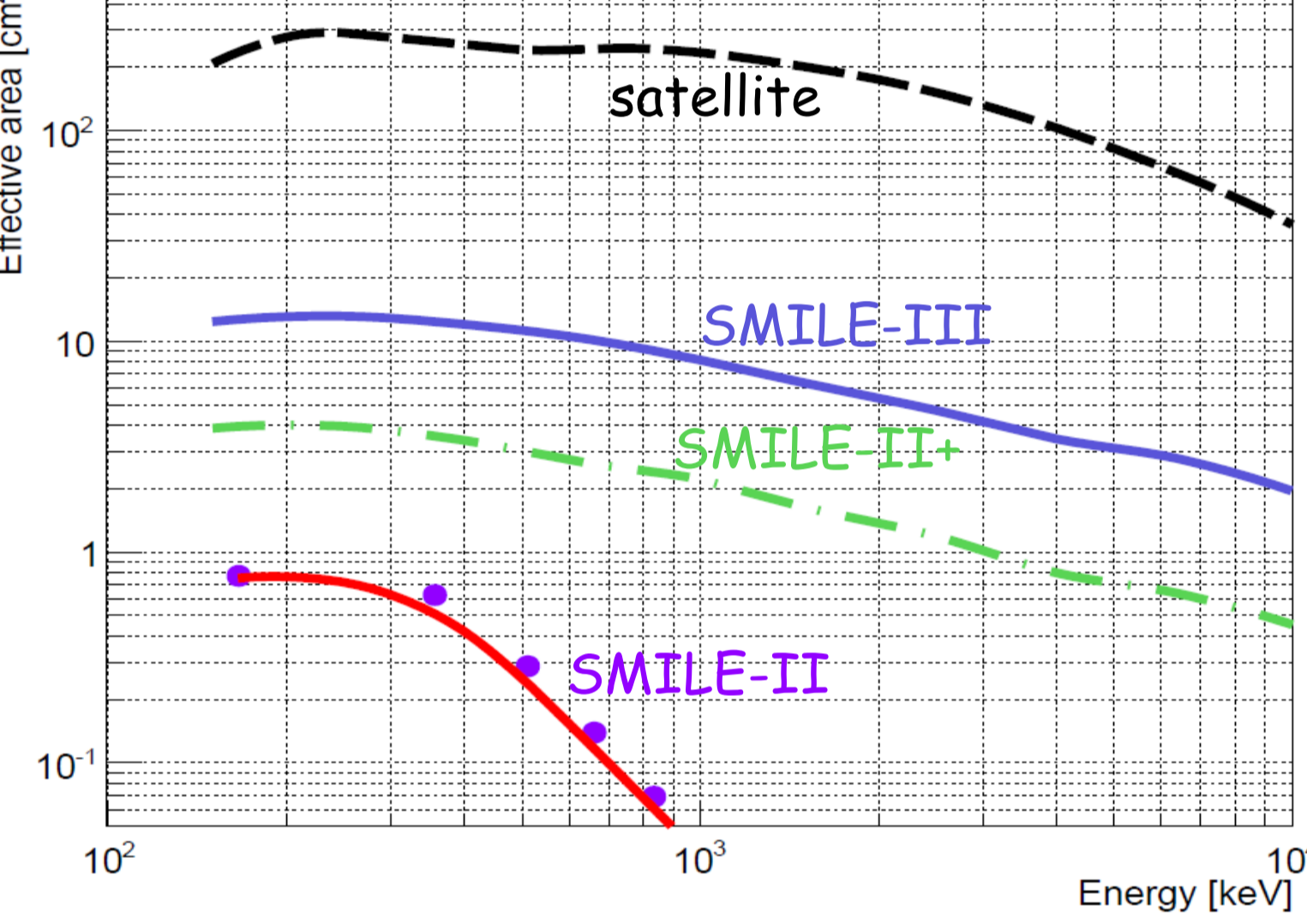


3. ガンマ線観測気球実験計画

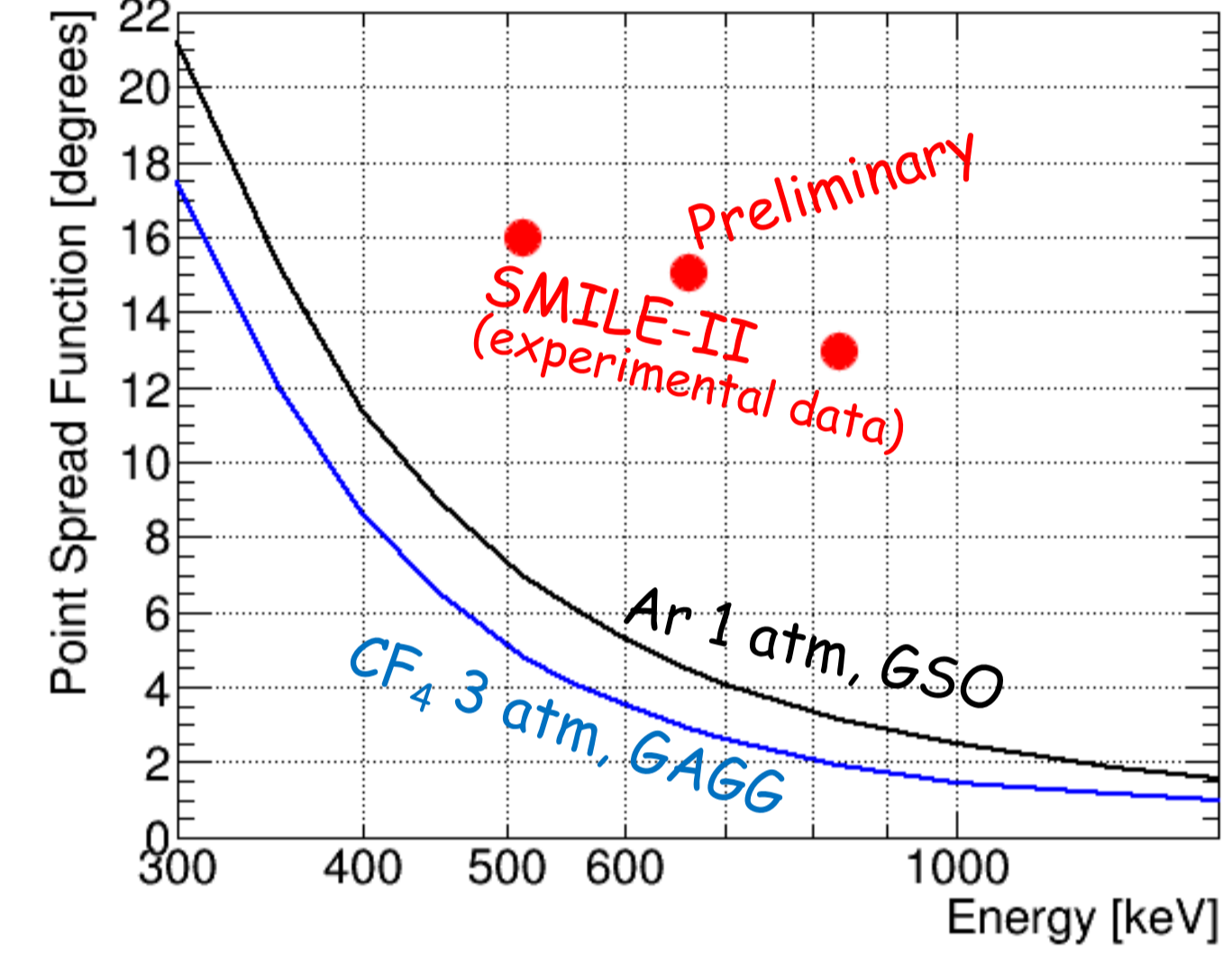
- Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiments
 - SMILE-I @ 三陸 (Sep. 1st 2006) 10 cm角, Xe+Ar 1気圧 \Rightarrow 気球高度において安定に動作
 - 気球高度におけるETCCの動作試験
 - 宇宙拡散・大気ガンマ線の観測 (100 keV ~ 1 MeV)
 - SMILE-II 未放球 30 cm角, Ar 1気圧
 - 地上試験 \Rightarrow 有効面積: $\sim 1 \text{ cm}^2$ @ <300 keV ARM: 5.3度 SPD: $\sim 100^\circ$ @ 662 keV \Rightarrow PSF: $\sim 15^\circ$ @ 662 keV
 - SMILE-II+ 30 cm角, Ar >1気圧
 - 明るい天体の観測によるイメージングの実証
 - 目標 有効面積: $\sim \text{数cm}^2$ @ <300 keV PSF: $\sim 5^\circ$ @ 662 keV
 - SMILE-III 30 cm角, CF₄ 3気圧
 - 長時間気球を用いた科学観測
 - 目標 有効面積: $\sim 10 \text{ cm}^2$ @ <300 keV PSF: $\sim 5^\circ$ @ 662 keV
 - 衛星による全天観測 50 cm角, CF₄ 3気圧
 - 目標 有効面積: $\sim \text{数百cm}^2$ @ <300 keV PSF: <2度 @ 662 keV



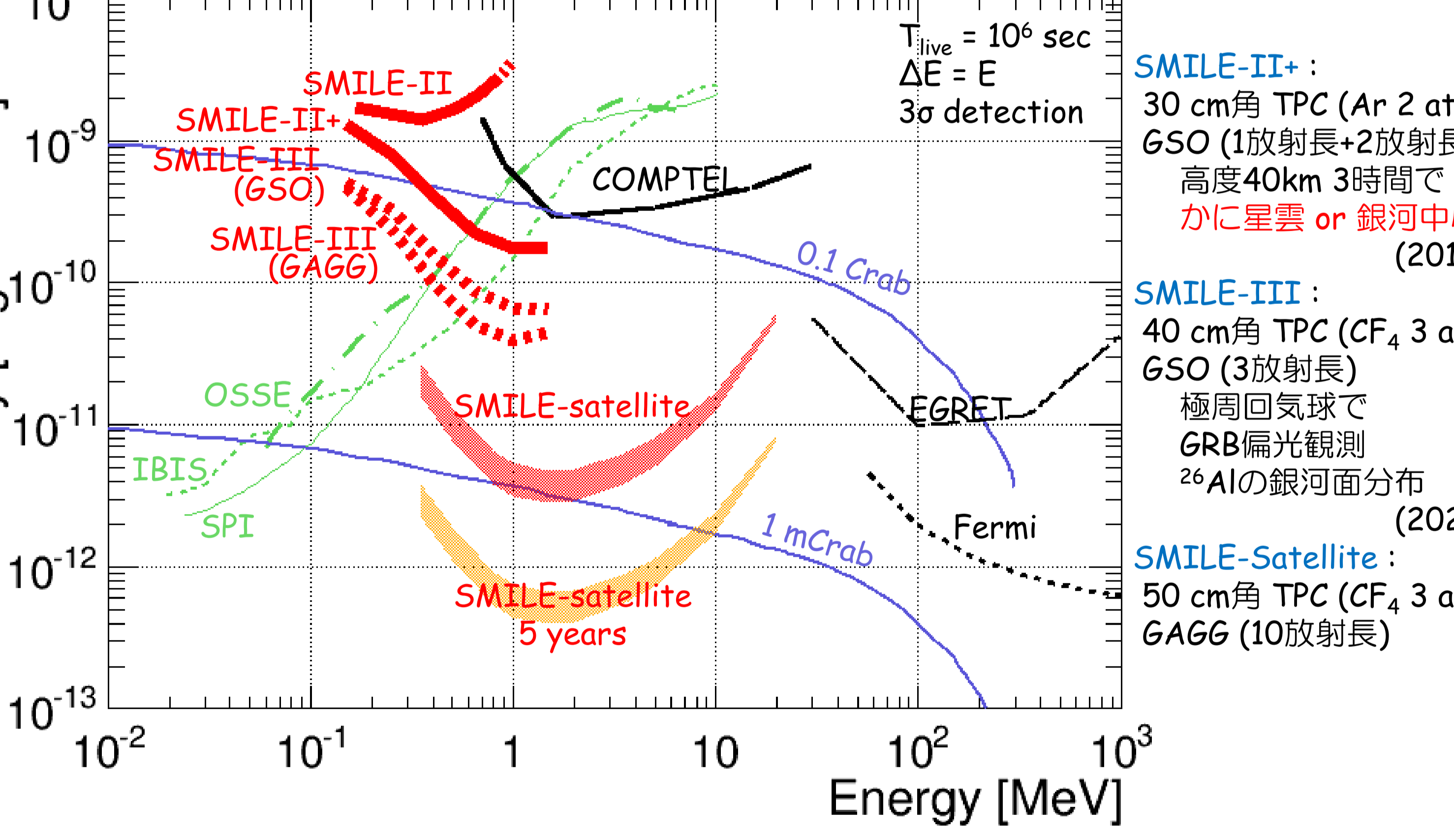
有効面積



角度分解能 (PSF)

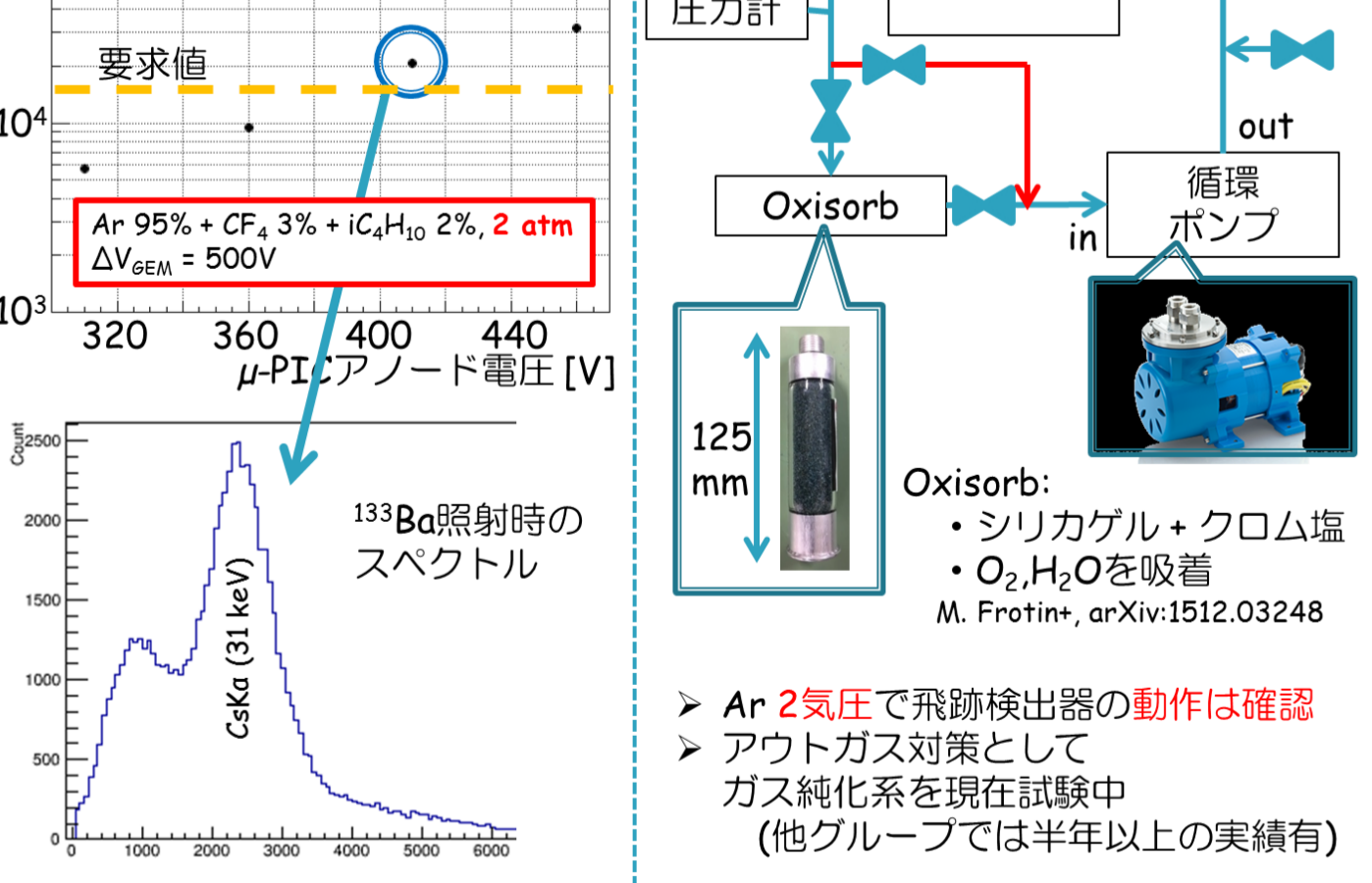


PSFに基づいた予想検出感度

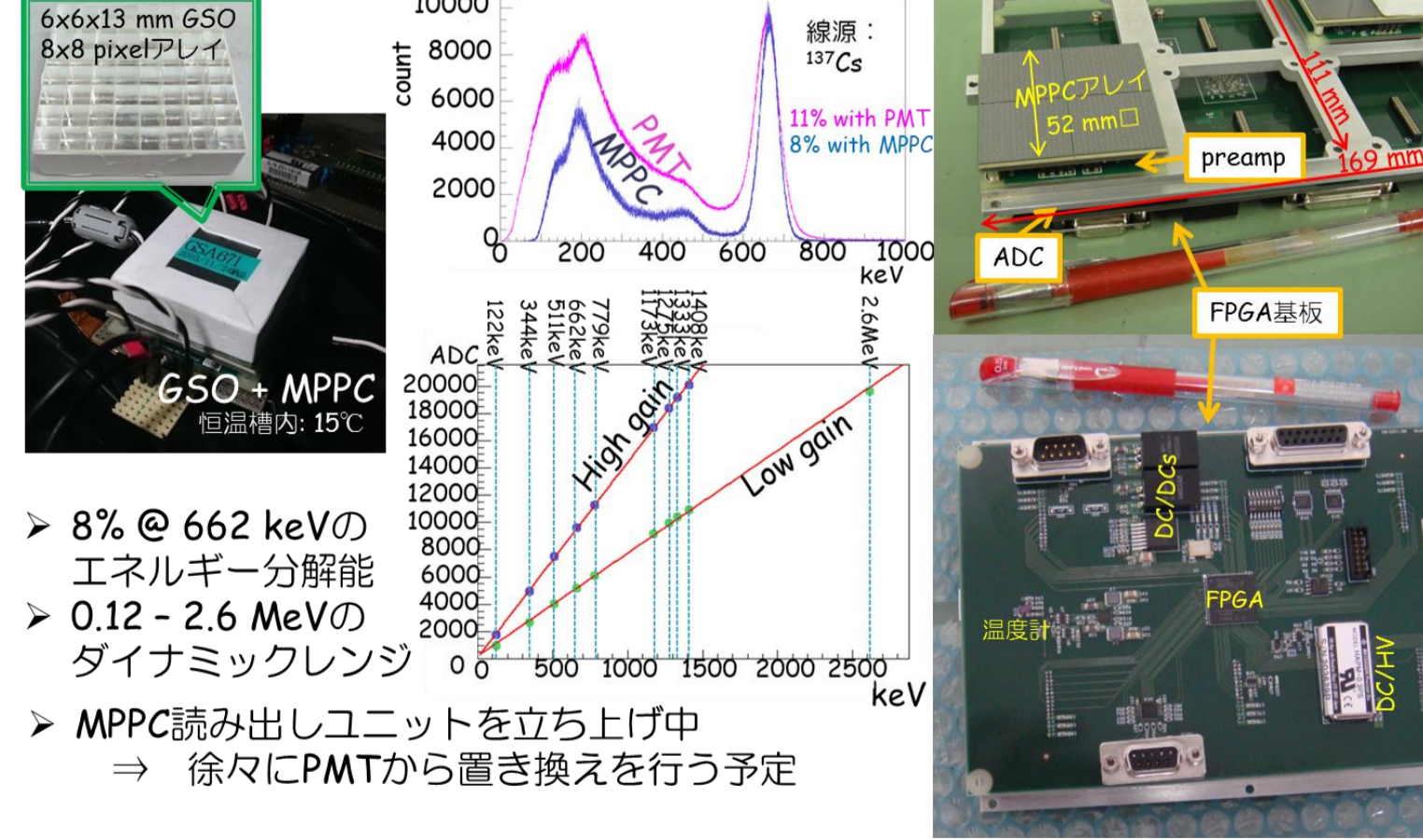


4. 将来計画へ向けた要素開発

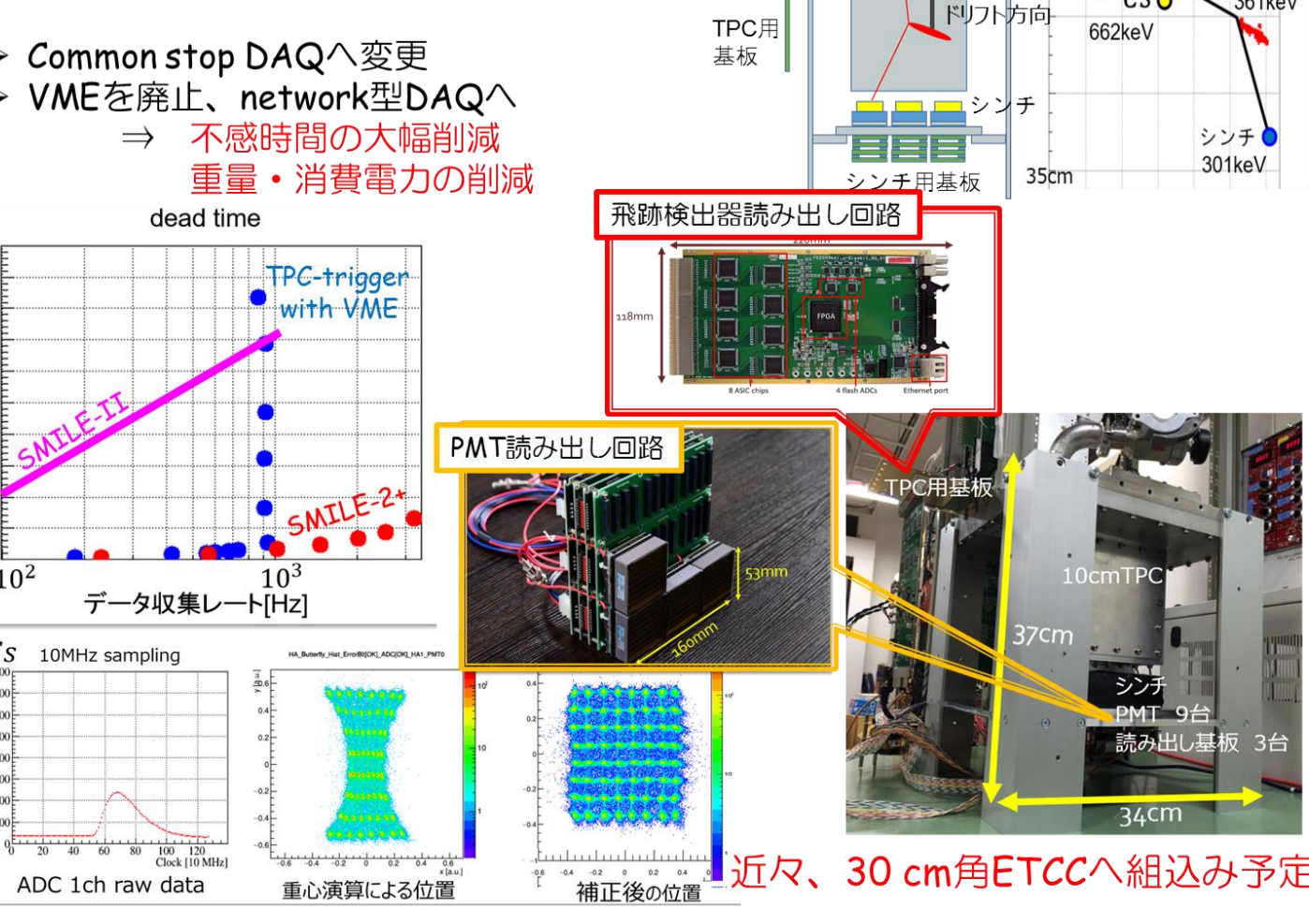
ガスタディ



MPPCを用いたシンチカメラ



高速DAQシステム



電子飛跡解析手法改良

