



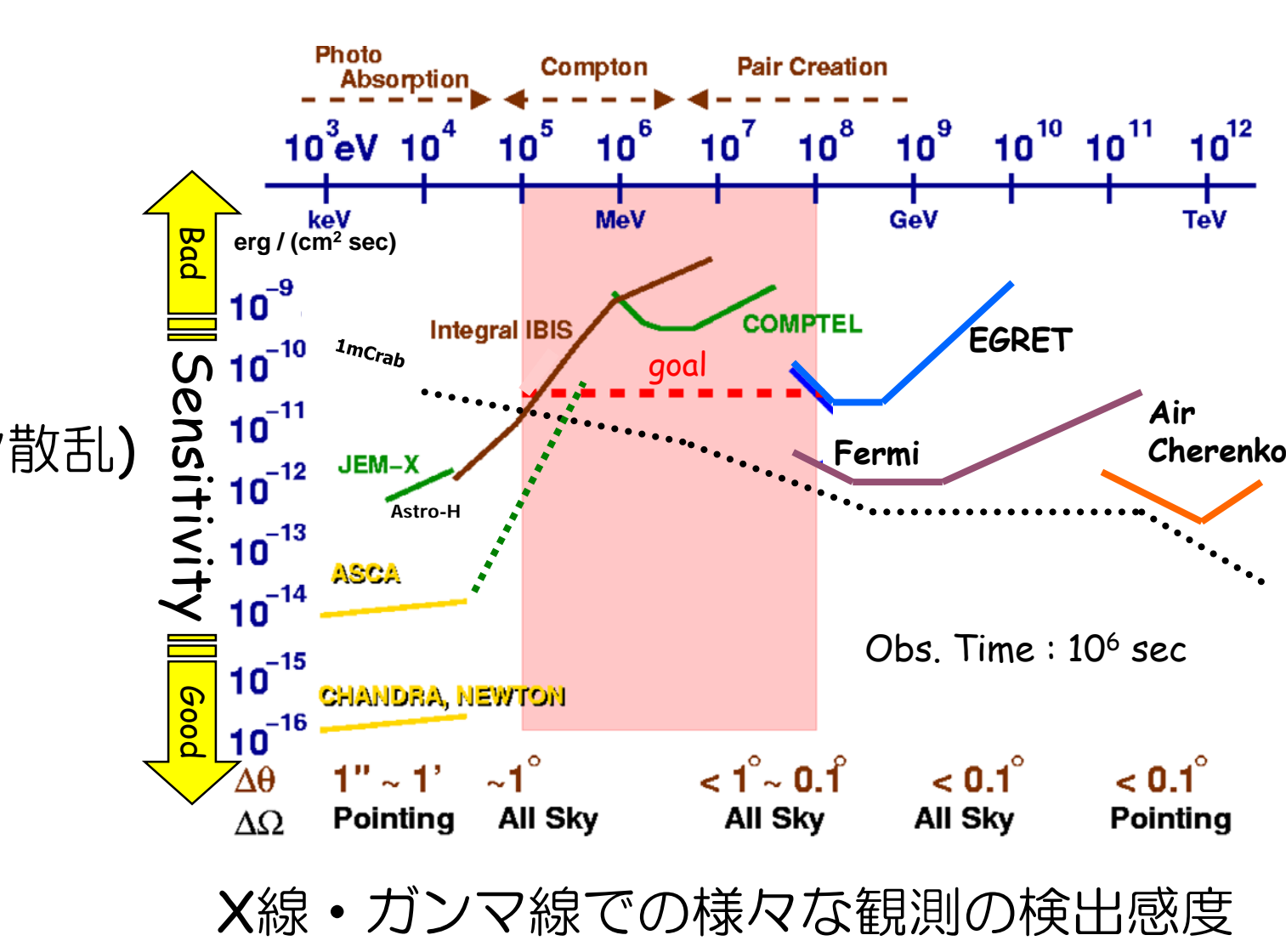
ガス飛跡検出器を用いたコンプトンカメラによる MeVガンマ線天体探査気球実験

高田淳史, 谷森達, 窪秀利, J. D. Parker, 水本哲矢, 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, 岸本祐二¹, 身内賢太郎², 黒澤俊介³
京都大学, ¹高エネルギー加速器研究機構, ²神戸大学, ³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

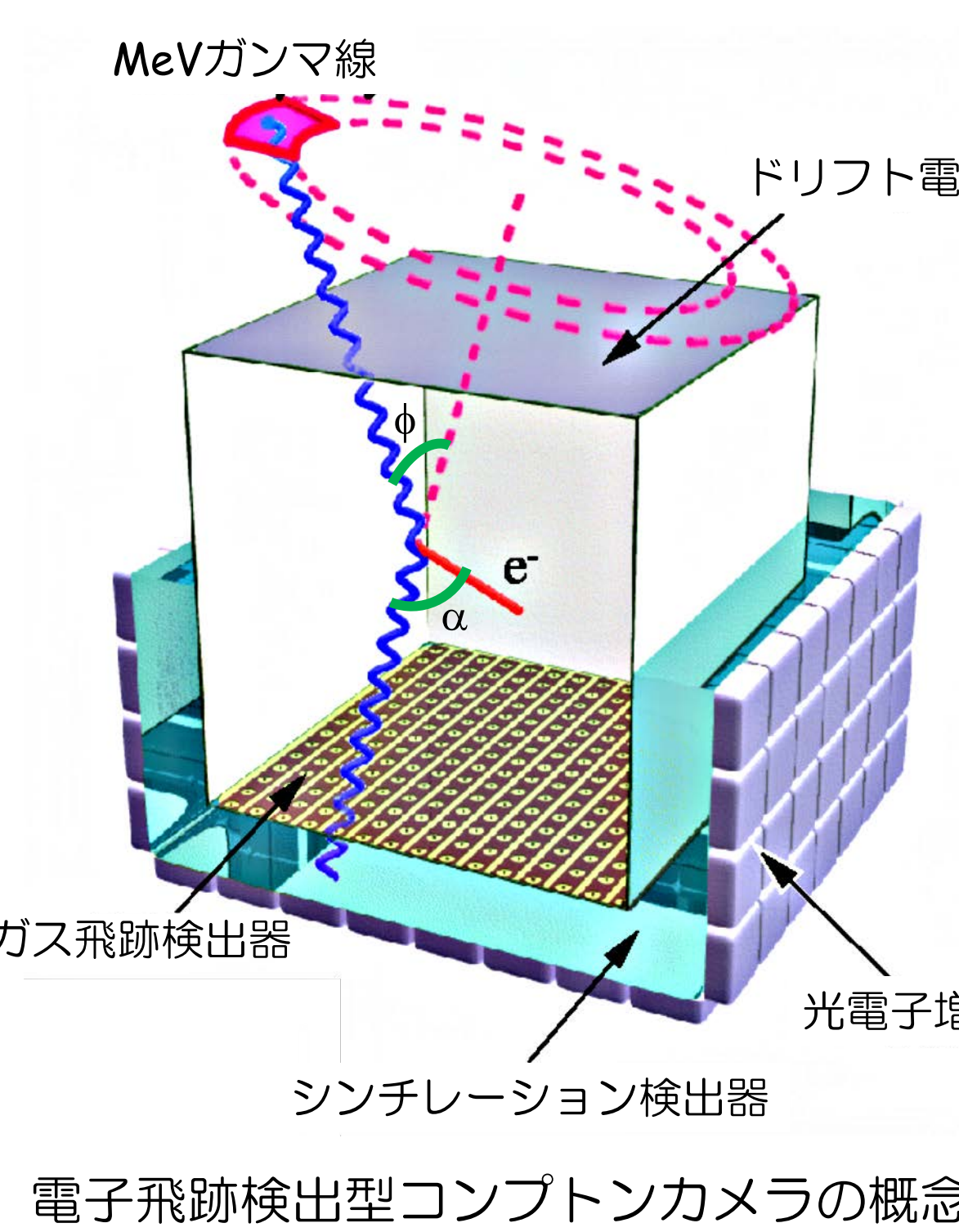


◆ 過去・現在のMeVガンマ線望遠鏡

- ▶ COMPTEL (CGRO): コンプトンイメージング
 - 全天で約30個の定常天体を発見 [1]
 - 軌道上での雑音ため、設計通りの感度は達成できず
- ▶ IBIS, SPI (INTEGRAL): 符号化マスク法
 - COMPTELの検出感度を更新できていない [2, 3]

- COMPTELから次世代望遠鏡への7つの提言 [4]
- 角度分解能の向上
 - 雑音除去能力が必要
 - 1光子で方向特定
 - 周辺物質の削減
 - 大気ガンマ線を視野外に
 - 低雑音の軌道の選択
 - 散乱体と吸収体の同時

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[5]。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。

$$E_0 = E_\gamma + K_e$$

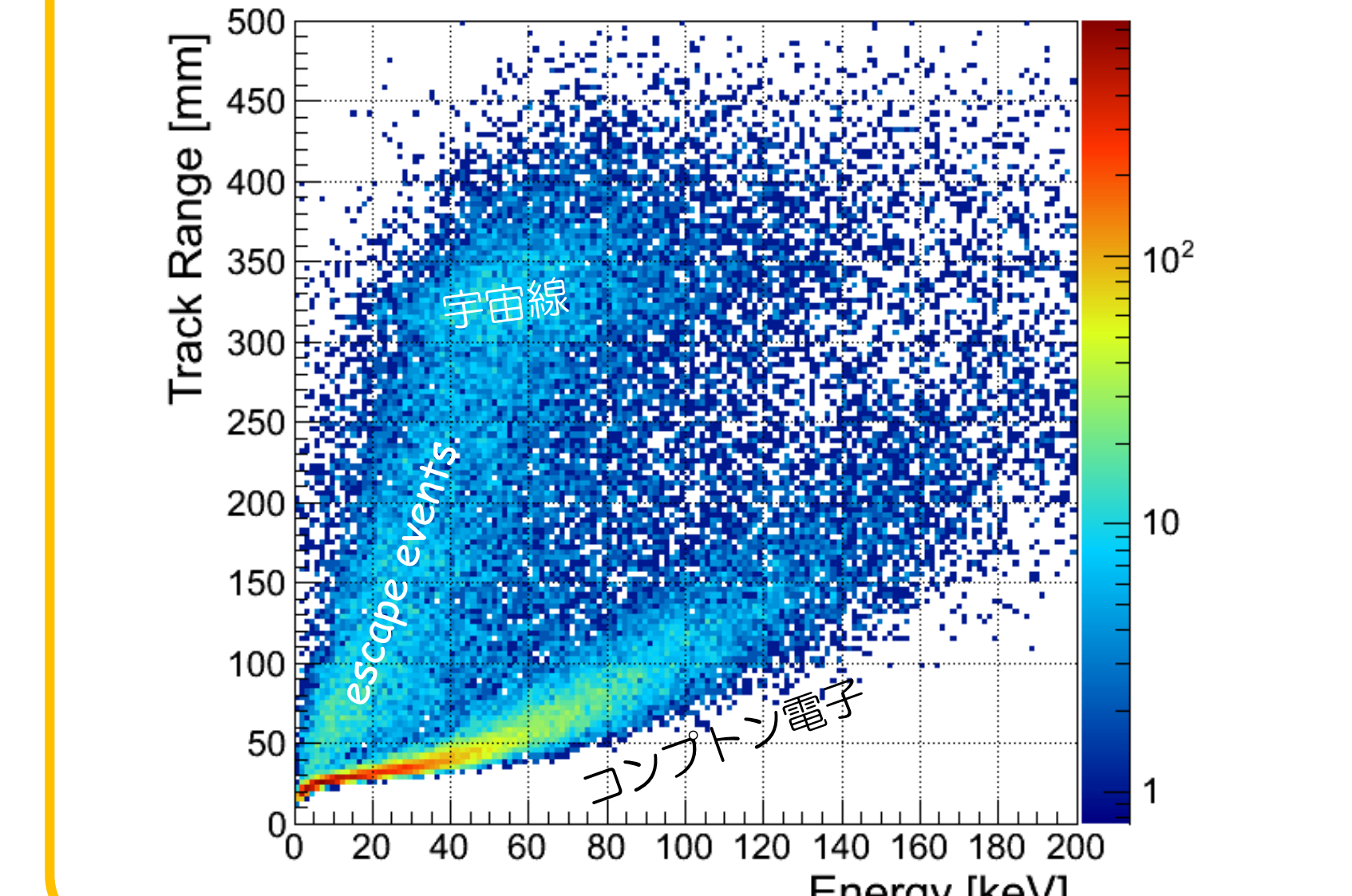
$$\cos \phi = 1 - \frac{m_e c^2 K_e}{E_\gamma (E_\gamma + K_e)}$$

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

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

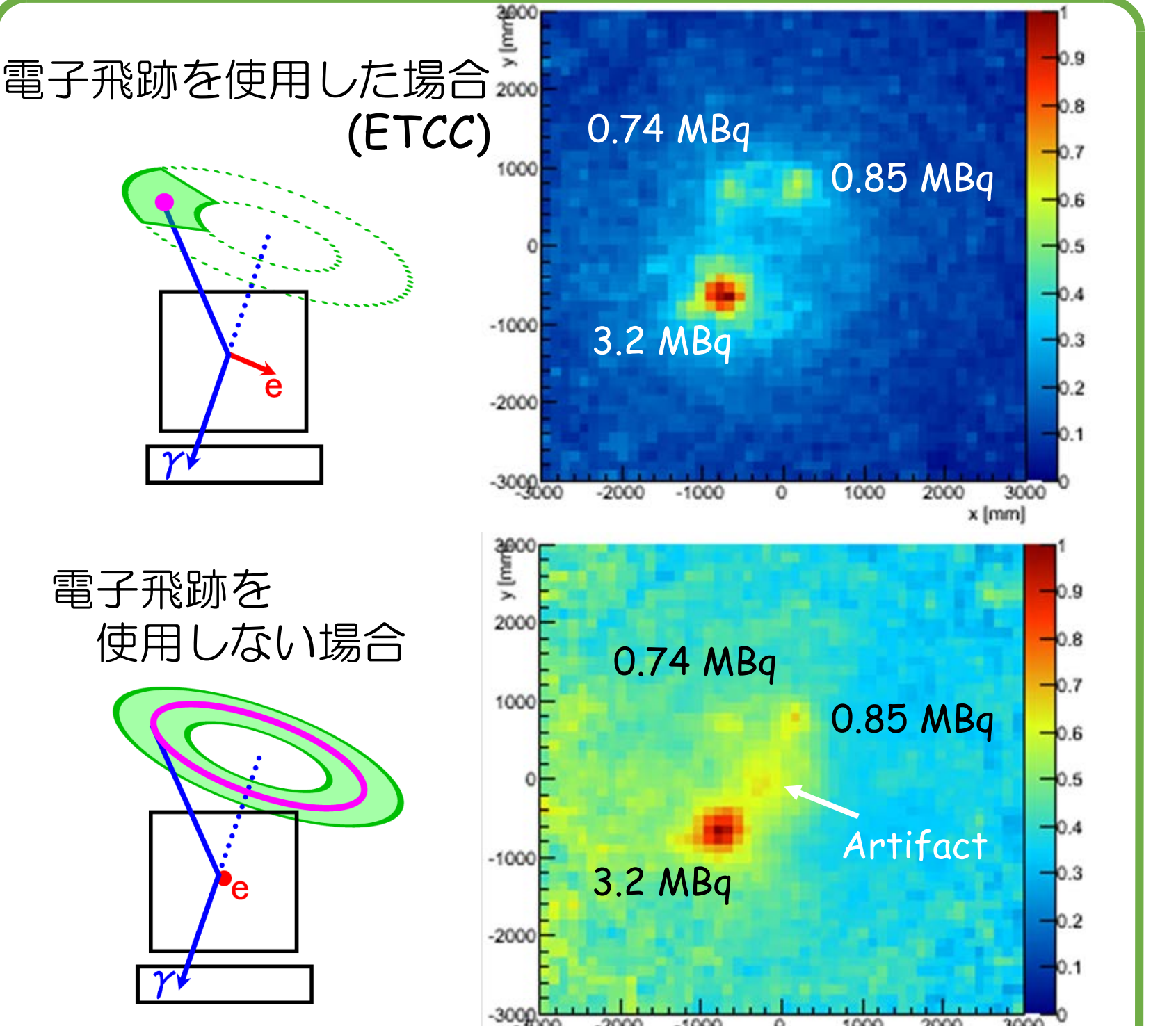
- ▶ エネルギー損失率による粒子識別
 - 荷電粒子のエネルギー損失率は質量・エネルギーによって変化するため、これを用いて粒子識別が可能となる。コンプトン散乱では電子しか発生しない為、宇宙線と筐体の相互作用から生じる中性子を始めとする種々の雑音粒子を強力に除去することができる。



▶ 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。

▶ 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。



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

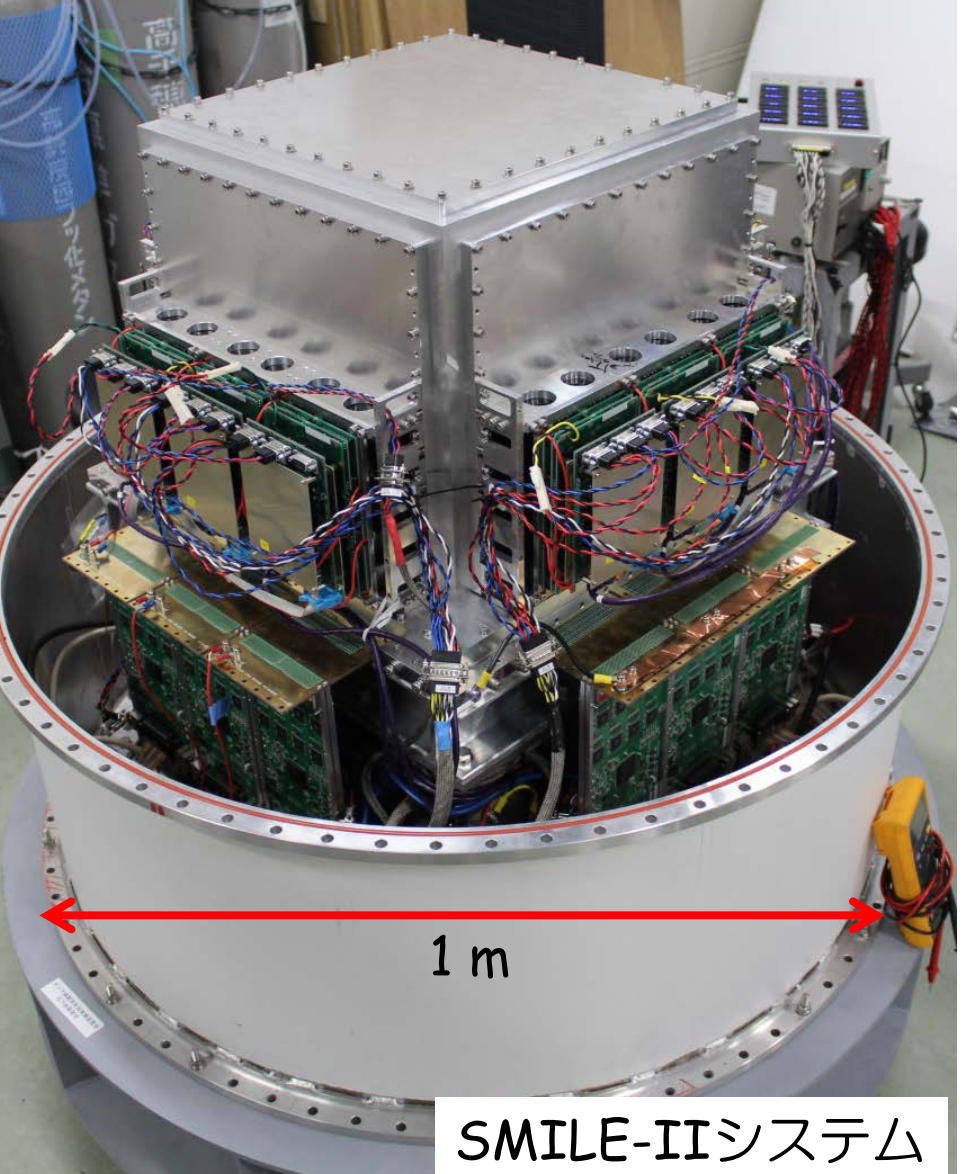
- ▶ SMILE-I (2006/9/1)
 - 衛星搭載での全天探査を目指した、段階的な気球実験シリーズ
 - SMILE-I (2006): ISAS/JAXA三陸大気球観測所からの放球
 - 気球高度でのガンマ線検出実証実験 ⇒ 宇宙環境下でも雑音除去能力が実証された
 - 次期気球実験 SMILE-II: 明るい天体であるかに星雲の観測で望遠鏡としての実証実験
 - ⇒ 要求値: >0.5 cm²の有効面積と <10°の角度分解能
 - Goddardとの共同実験でFt. Sumnerからの放球を予定
 - 極周回気球実験 SMILE-III: 銀河面の天体探査, 系外拡散ガンマ線のanisotropy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

◆ 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

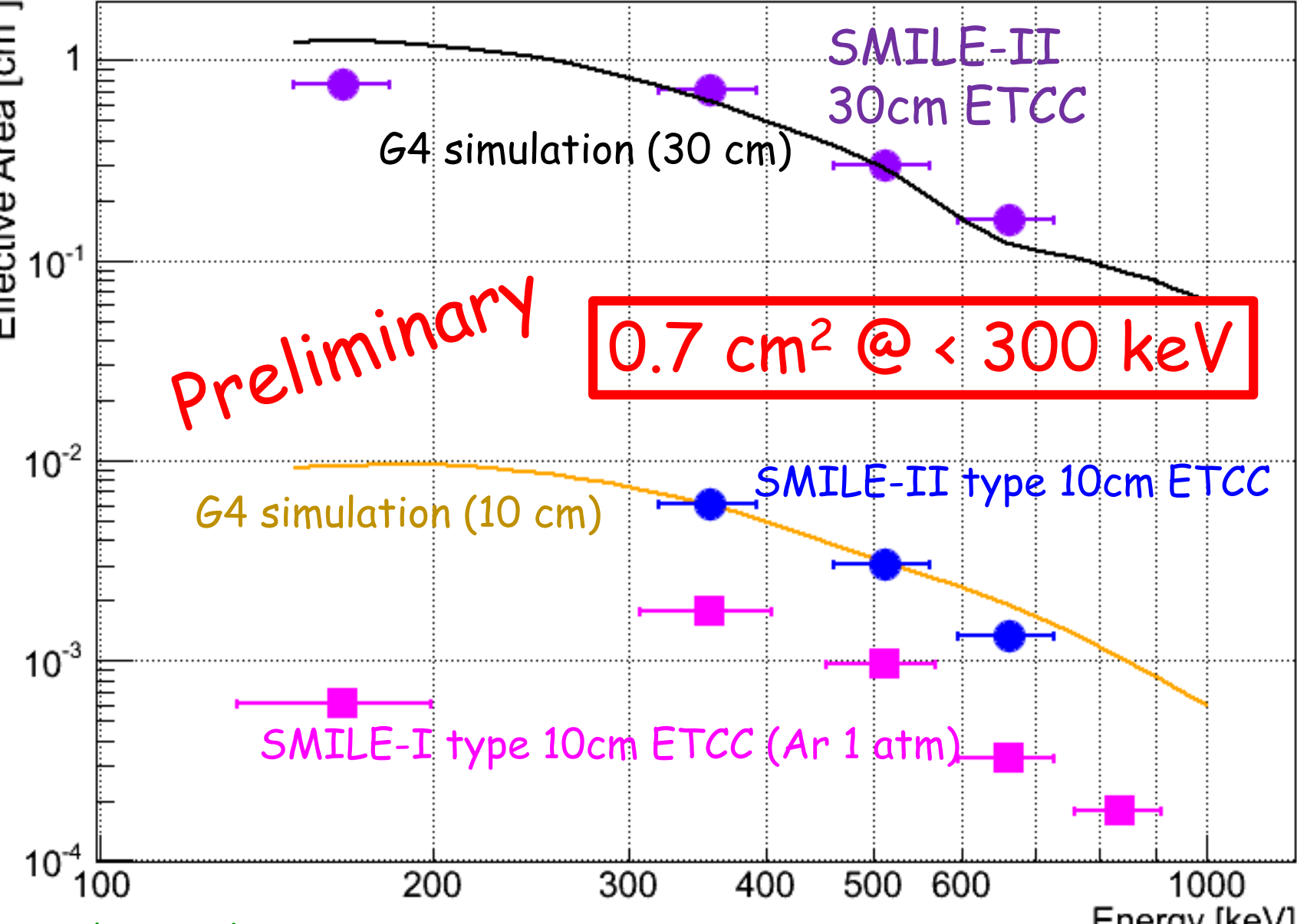
システム重量 (容器込)	~250 kg
消費電力	~250 W
圧力容器	Al, φ1 m×1.2 m
姿勢測定	GPSコンパス, 傾斜計, 磁場センサ
HKセンサ	圧力計, 温度計

ガス飛跡検出器	飛跡検出器サイズ	30 × 30 × 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
	Energy resolution (FWHM)	22 % (@ 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 × 6 × 13 mm ³
	# of pixels	6912
	Dynamic range	80 keV~1.3 MeV
	Energy resolution (FWHM)	10 % (@ 662 keV)

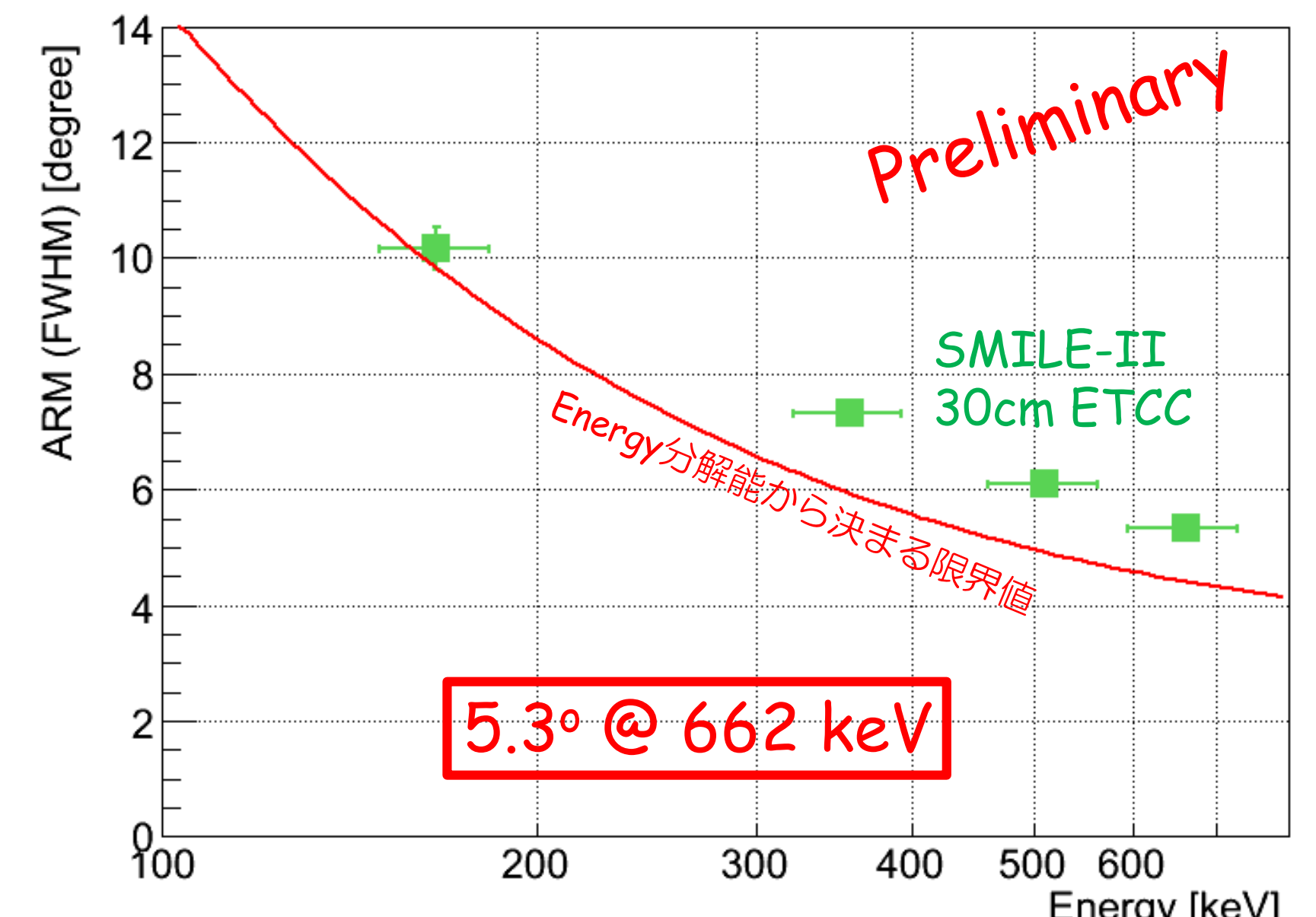


3. SMILE-II検出器の性能評価

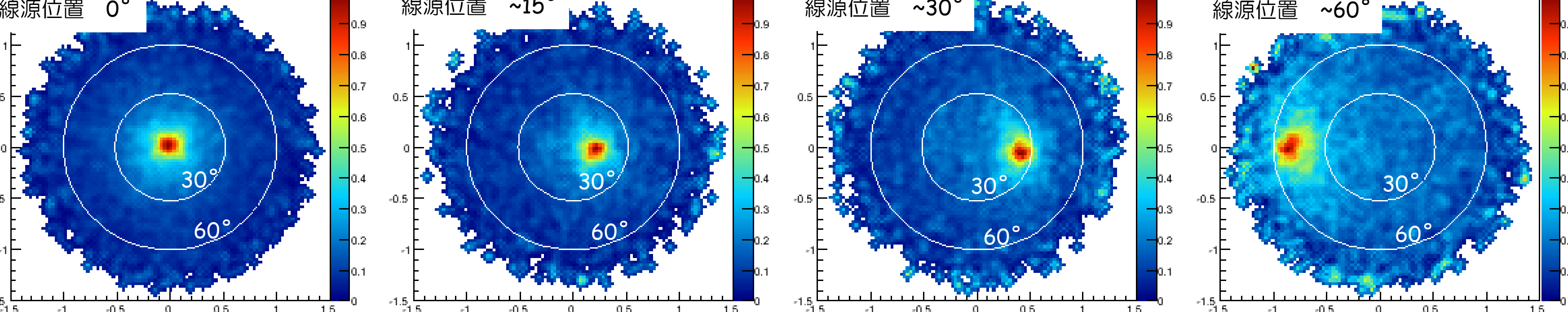
◆ 有効面積



◆ 角度分解能

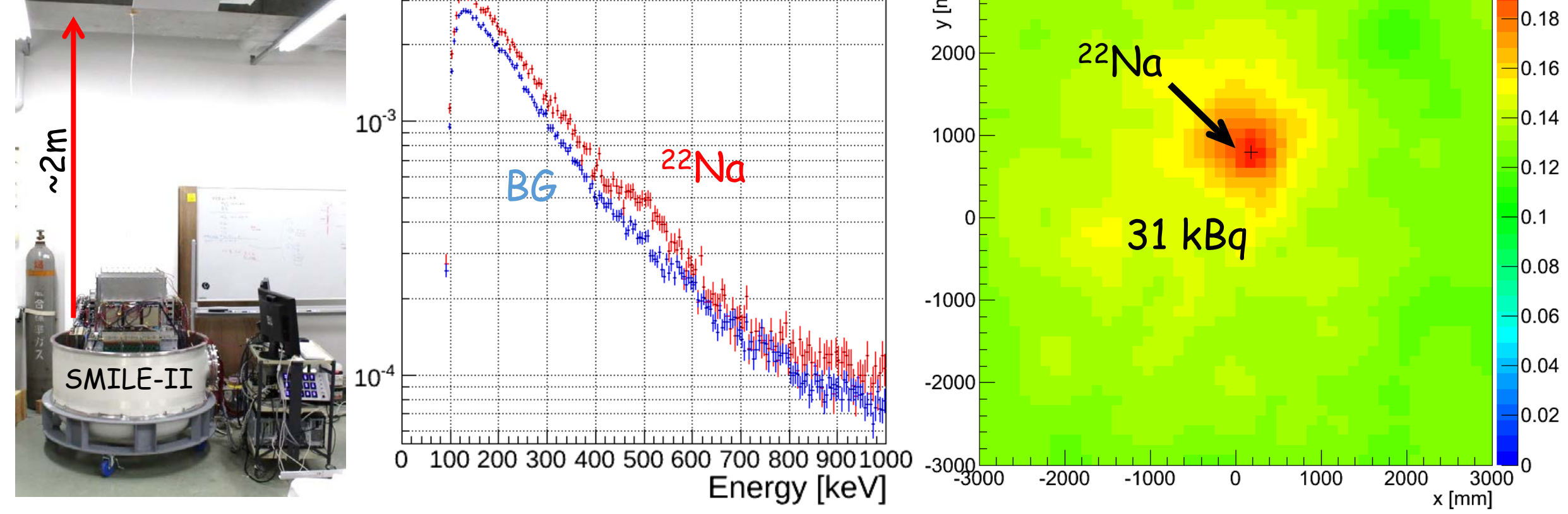


◆ 視野角 ~3 sr



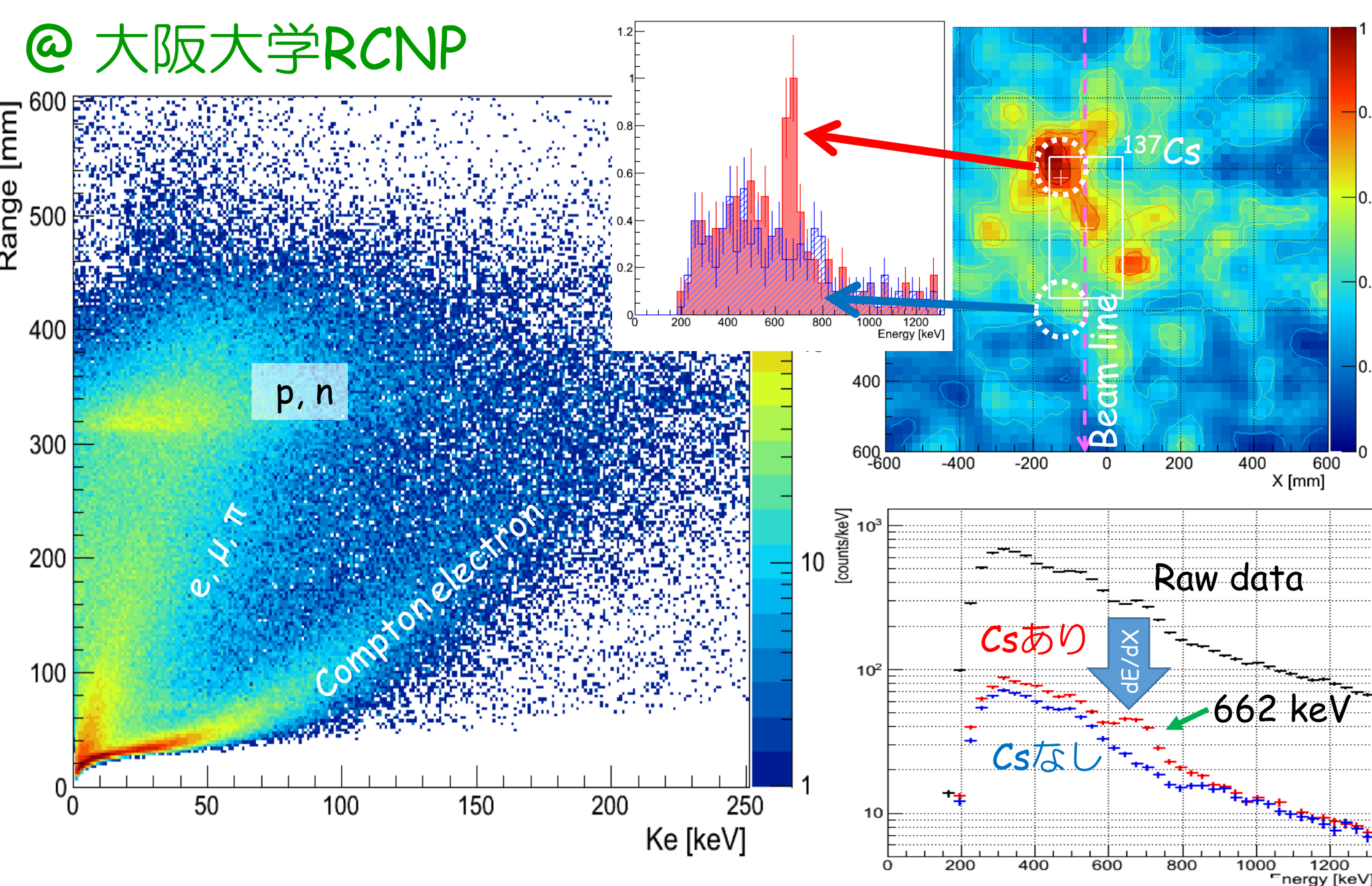
◆ 暗いガンマ線源の検出

- 検出器から約2 m離れた位置に 31 kBqの²²Naを設置
- バックグラウンド優位
- S/N = 0.019 (かに星雲観測時の数倍良い)

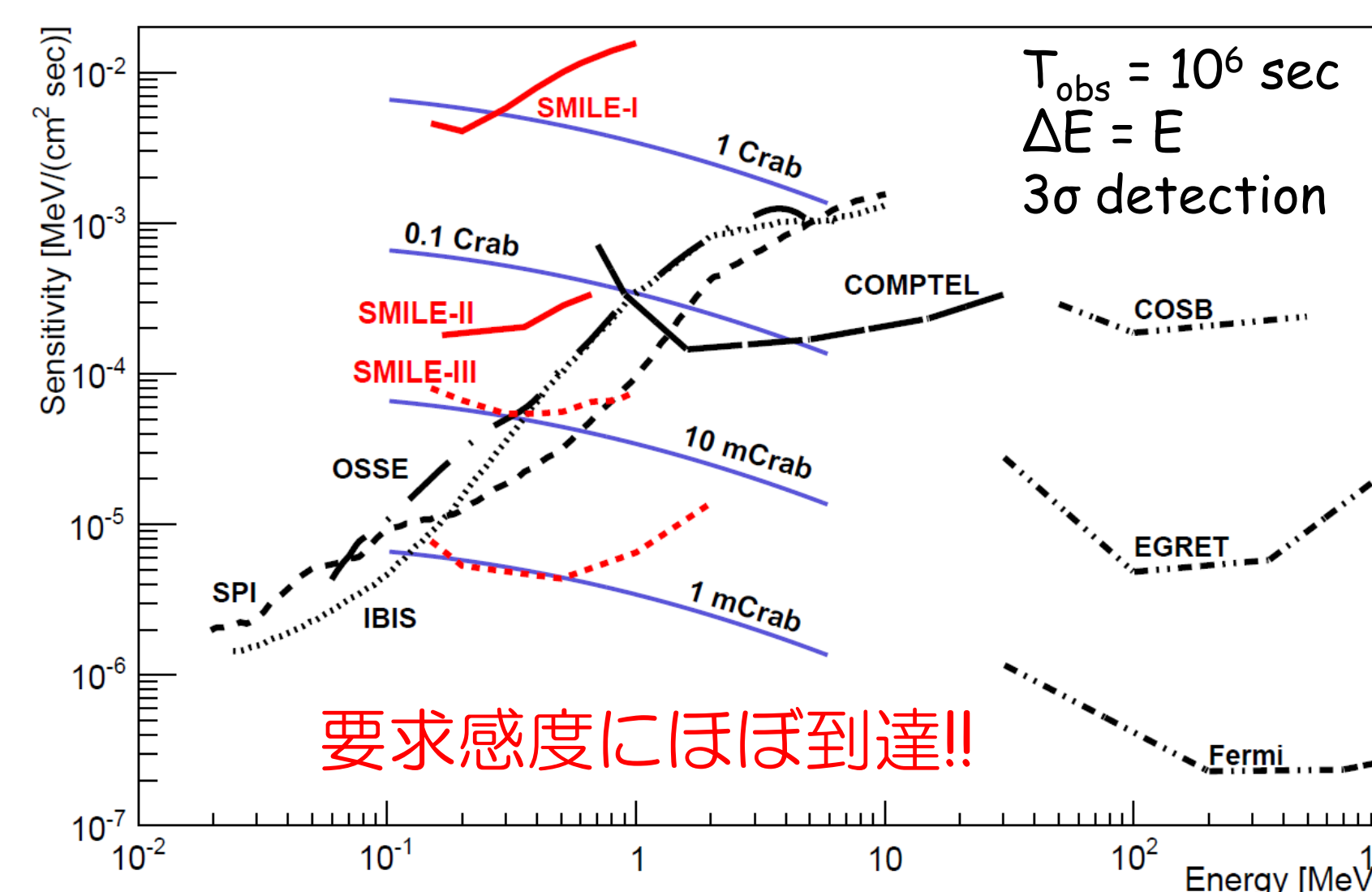


◆ 強い雑音環境下でのガンマ線検出 @ 大阪大学RCNP

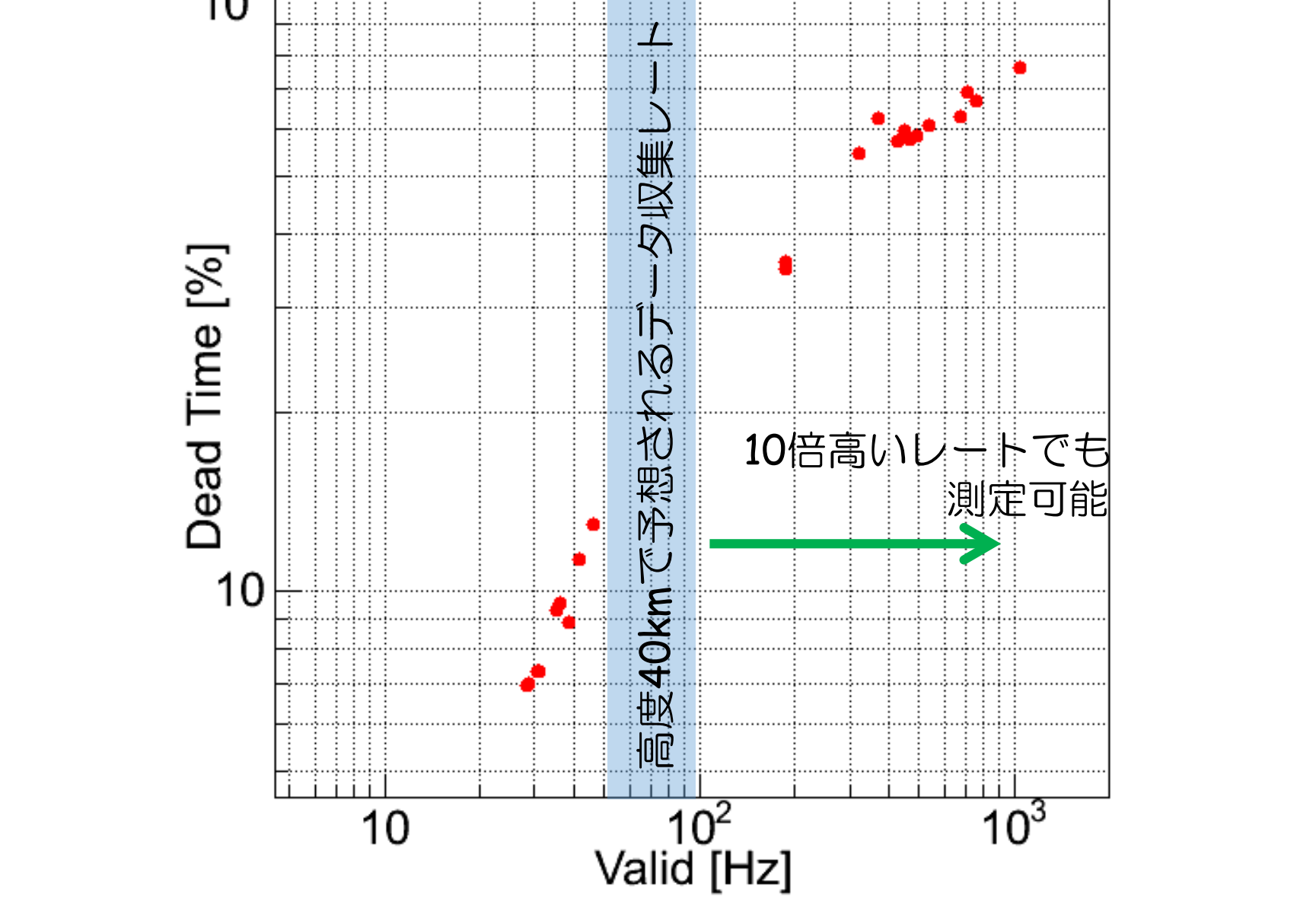
- 陽子ビームをウォーターゲットに照射
 - 生成された多量のガンマ線や中性子中に検出器を設置
 - 多量の雑音中からもガンマ線が検出可能か
- 中緯度での気球実験で予想される雑音の~5倍の雑音中
 粒子識別によって多量の雑音を除去できている
 密封線源由来のガンマ線を雑音の中から取り出せている



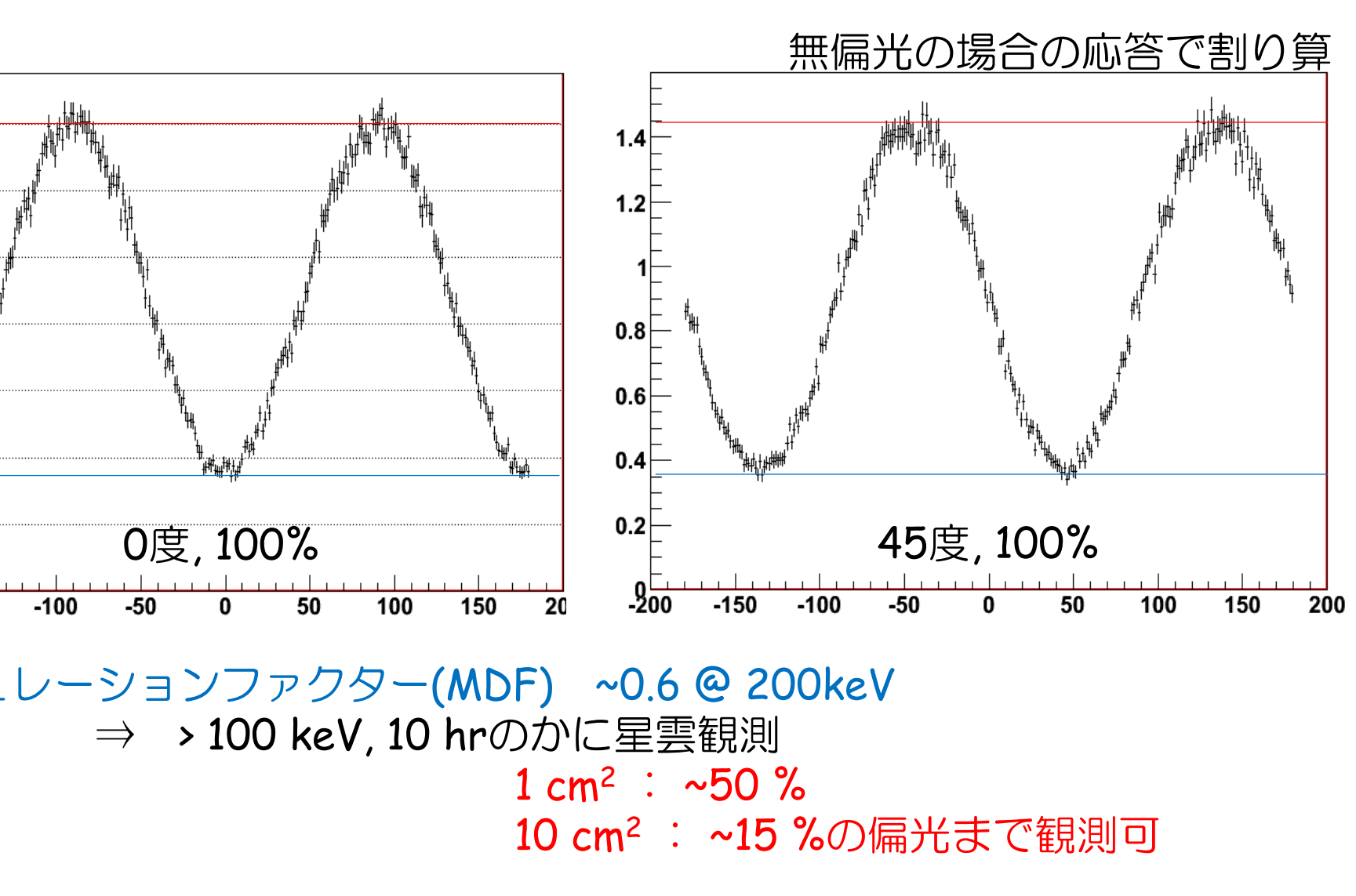
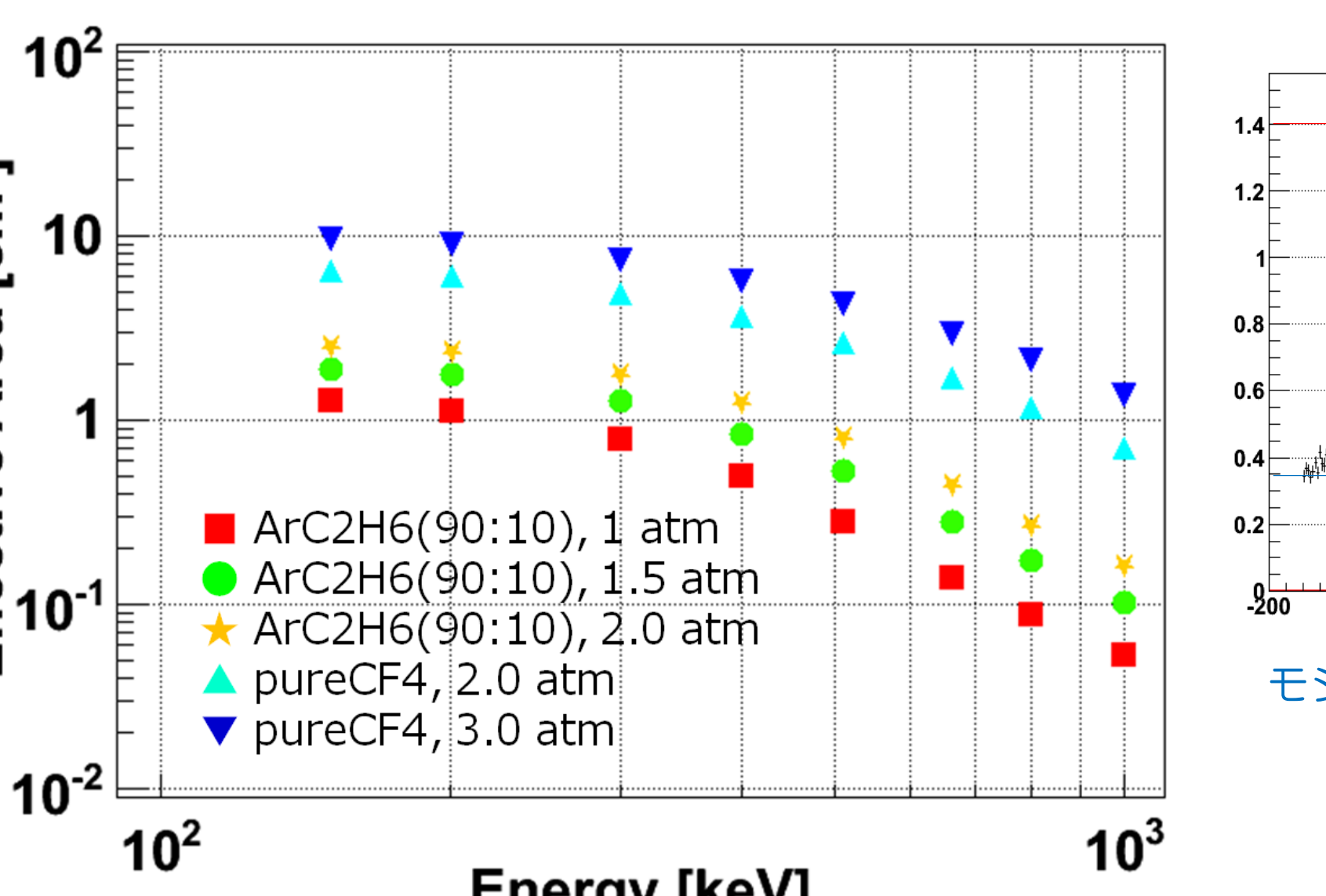
◆ 予想される到達検出感度



◆ データ収集レートと不感時間



4. SMILE-III



- ▶ SMILE-II検出器: 有効面積 0.7 cm² (<300 keV) 角度分解能 5.3° (@662 keV)
 - ⇒ ガス種・圧力を変更することで有効面積を10倍に増やすことが可能!
 - ⇒ シンチレータの厚みを2倍に増やすことで300 keV以上の有効面積をさらに改善可能
 - ⇒ 極周回気球で可能な2週間(~10°秒)の観測で複数の天体観測が期待される
- ▶ コンプトン散乱は直線偏光に対して大きな感度を持つ
 - ⇒ SMILE-IIの配置であれば200keVでモジュレーションファクターは~0.6というシミュレーション結果
 - ⇒ 到来方向・エネルギー・偏光の3つの情報を同時に観測
- ▶ Goddardとの共同ミッション
 - ⇒ LOIを取り交わし済、具体的な内容は現在検討中

SMILE-III 有効面積~10 cm²のETCCで極周回気球気球実験で新しいサイエンスに挑戦

References

[1] V. Schönfelder+, A&ASS, 143 (2000), 145.
 [2] J. Roques+, A&A, 411 (2003), L91.
 [3] D. J. Thompson+, ApJSS, 86 (2004), 629.
 [4] V. Schönfelder+, A&ASS, 143 (2000), 145.
 [5] T. Tanimori+, New Astron. Rev., 48 (2004), 263.
 [6] A. Takada+, ApJ, 733 (2011), 13.