

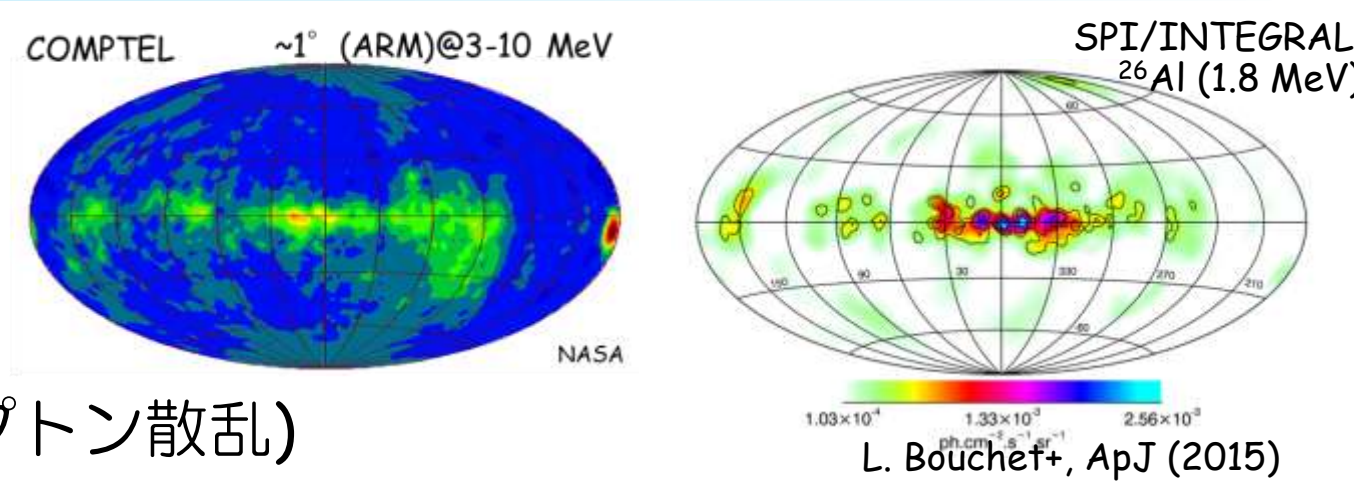


# 長時間気球を用いたMeVガンマ線天文学の開拓

高田淳史, 谷森達, 窪秀利, 水本哲矢, 水村好貴, J. D. Parker, 澤野達哉<sup>1</sup>, 中村輝石, 松岡佳大, 古村翔太郎, 岸本哲朗, 小田真, 竹村泰斗, 宮本奨平, 中増勇真, 吉川慶, 身内賢太郎<sup>2</sup>, 黒澤俊介<sup>3</sup>  
(京都大学, <sup>1</sup>金沢大学, <sup>2</sup>神戸大学, <sup>3</sup>東北大学)

## 1. MeVガンマ線天文学の現状

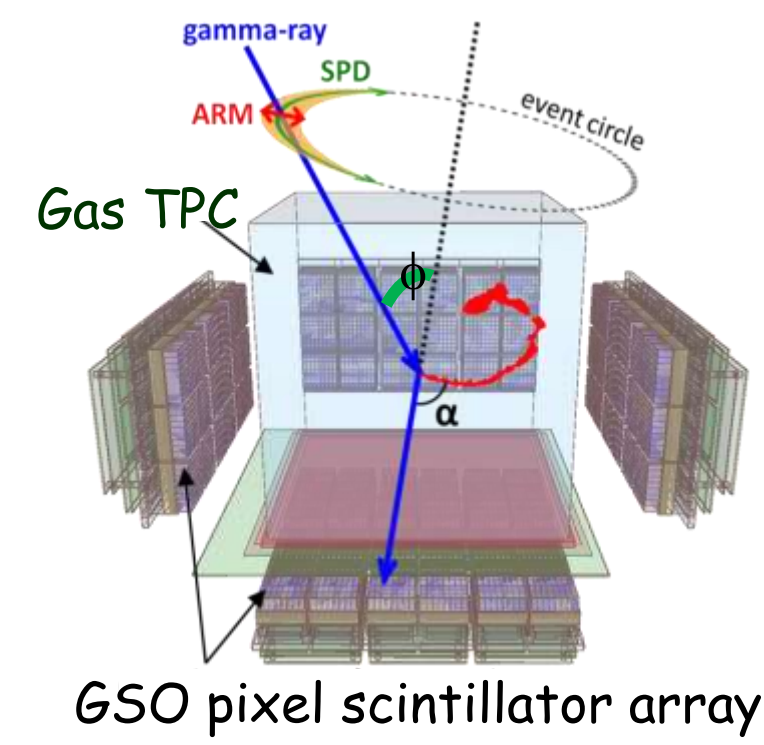
- 元素合成**
  - 超新星残骸：元素合成のプロセスの解明
  - 銀河面 (<sup>26</sup>Al, <sup>60</sup>Fe)：元素拡散のトレース
- 粒子加速**
  - 活動銀河核, ガンマ線バースト：放射機構の解明
  - 超新星残骸：宇宙線加速源の探査 ( $\pi^0$ -decay or 逆コンプトン散乱)
- 遠方宇宙**
  - 活動銀河核：銀河の進化への制限 (anisotropy)
  - ガンマ線バースト：宇宙初期の星生成



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

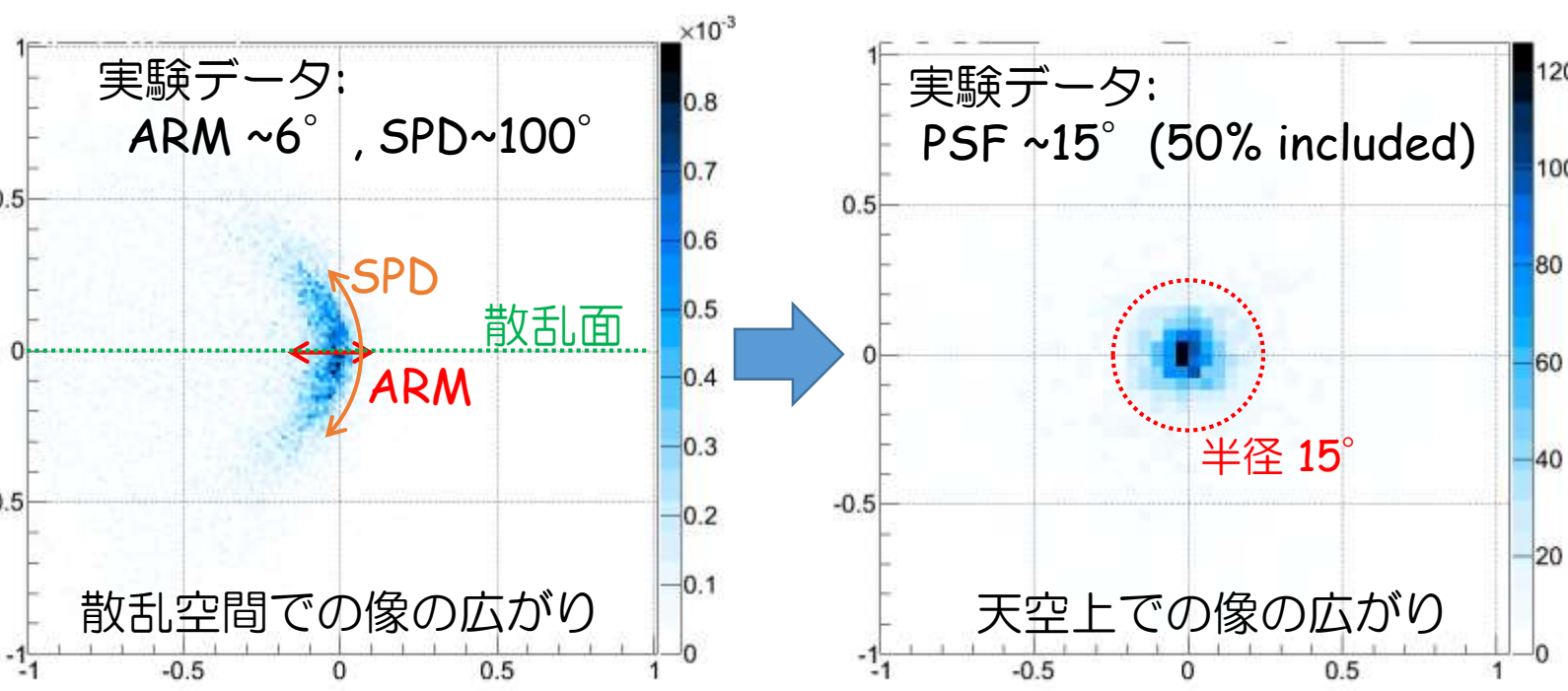
## 2. 1 mCrabの感度実現に向けて



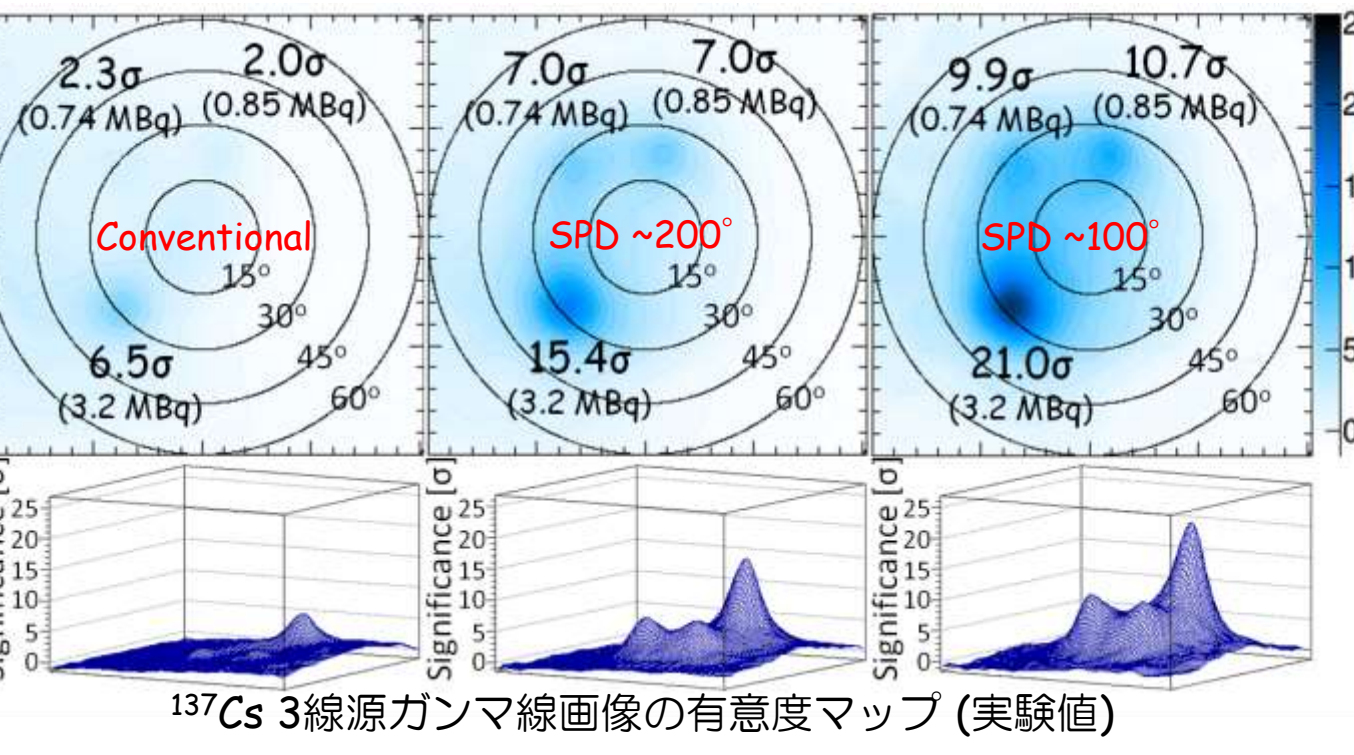
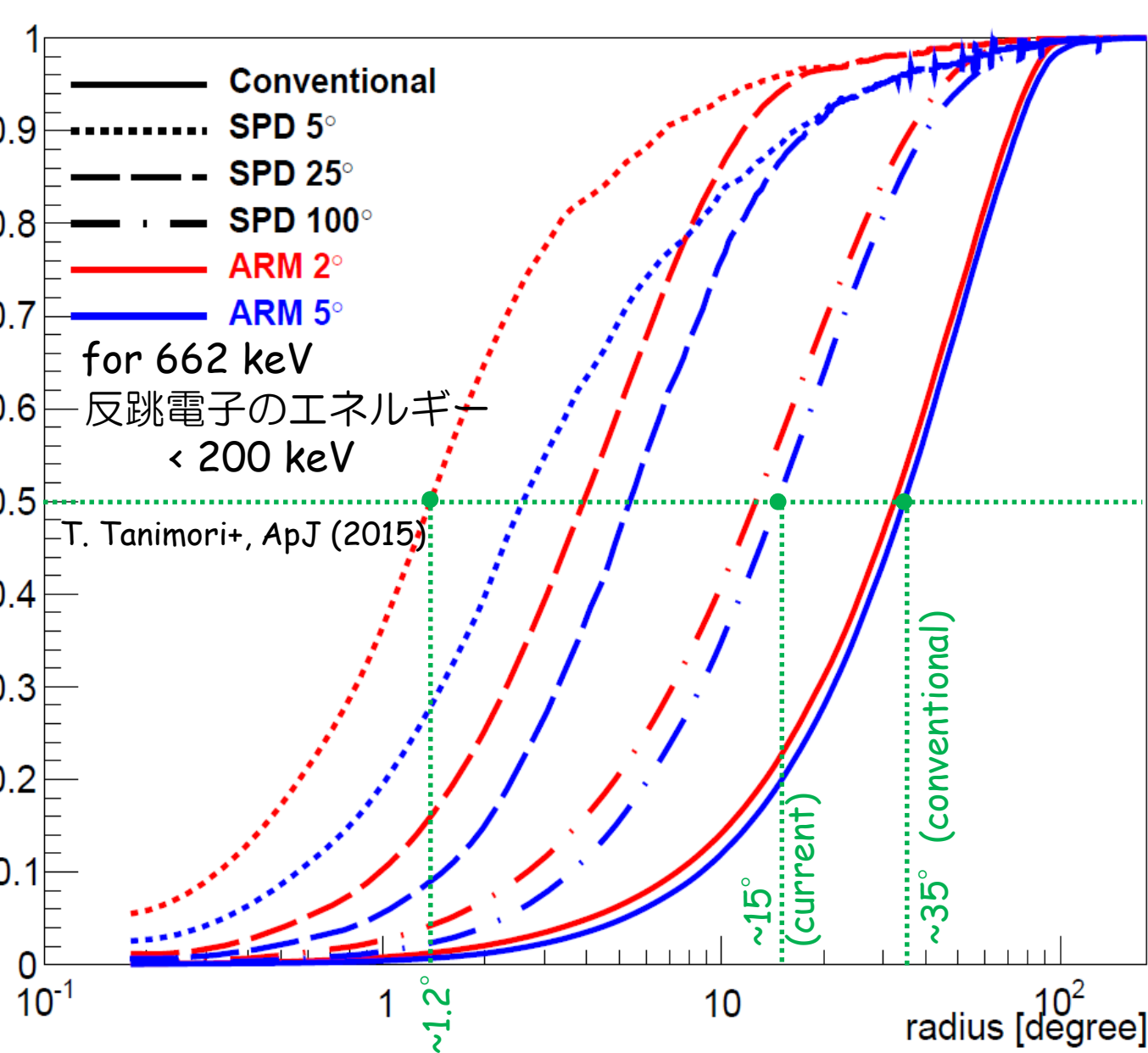
**電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC)**  
 コンプトン散乱を利用したガンマ線望遠鏡。反跳電子のエネルギーと方向を取得するガス飛跡検出器と、散乱ガンマ線のエネルギーと吸収点を取得する位置感度型シンチレーション検出器から構成される。COMPTELと異なり、反跳電子の方向を取得することにより、運動量の足し算という単純な方法で入射したガンマ線のエネルギーと方向を光子毎に測定できる。これにより、従来方法では不可能な鋭いPSFを実現できる。さらにガンマ線検出に使用しないパラメータにより、非常に強力な雑音除去を可能とする。

### ガンマ線像の天空上の角度広がり

通常天体望遠鏡の角度分解能は、像の天空上での広がり (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 (scattering plane deviation: SPD) により評価されてきたが、どちらもPSFではない。今回、ARM/SPDがPSFに対してどのように寄与するかを調査した。



左図は、画像処理を施さない場合、X軸で表される半径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だと、半径35°内に含まれる事象は50%と、PSFが非常に広く、ARMのみ改善したところでPSFに対しては大きな効果がないことが分かる。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、電子飛跡検出型コンプトン法では、画像処理を行わなくても鋭いPSFが実現でき、その広がりも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。SPDは電子の多重散乱によって制限されるため、ガス検出器で数mmの飛跡長(固体では数μmに相当)の間で方向決定できれば、SPDは10°以下に抑え込める。

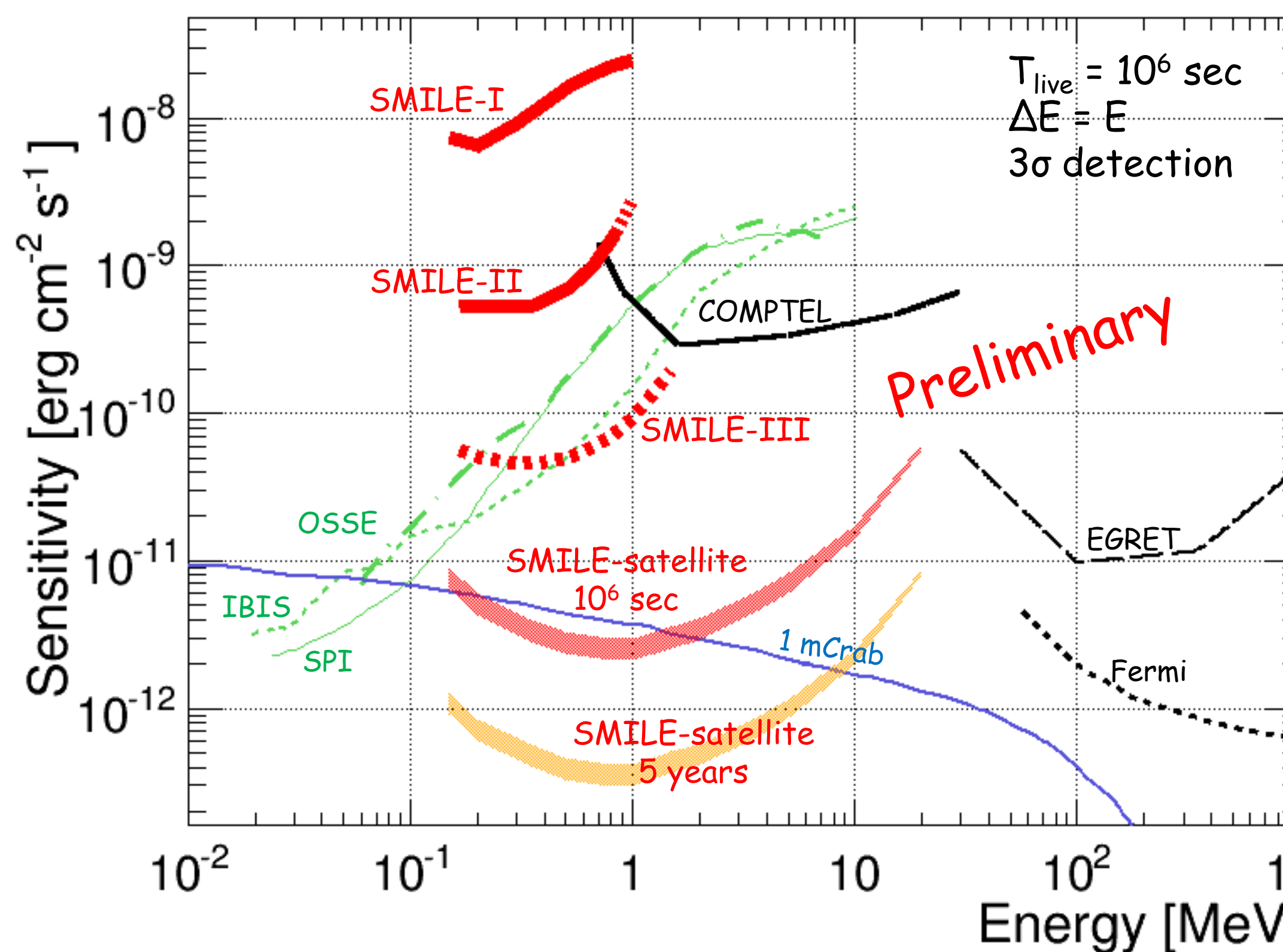


### 予想検出感度

**SMILE-II (現状のETCC)**  
 30 cm角 TPC (Ar 1 atm)  
 GSO (1放射長)  
 高度40km 3時間でかに星雲 or 銀河中心 (2017~)

**SMILE-III**  
 40 cm角 TPC (CF<sub>4</sub> 3 atm)  
 GSO (3放射長)  
 極周回気球でGRB偏光観測 <sup>26</sup>Alの銀河面分布 (2019~)

**SMILE-Satellite**  
 50 cm角 TPC (CF<sub>4</sub> 3 atm)  
 GAGG (10放射長) × 4台  
 1 mCrabの検出感度 (COMPTELの100倍)



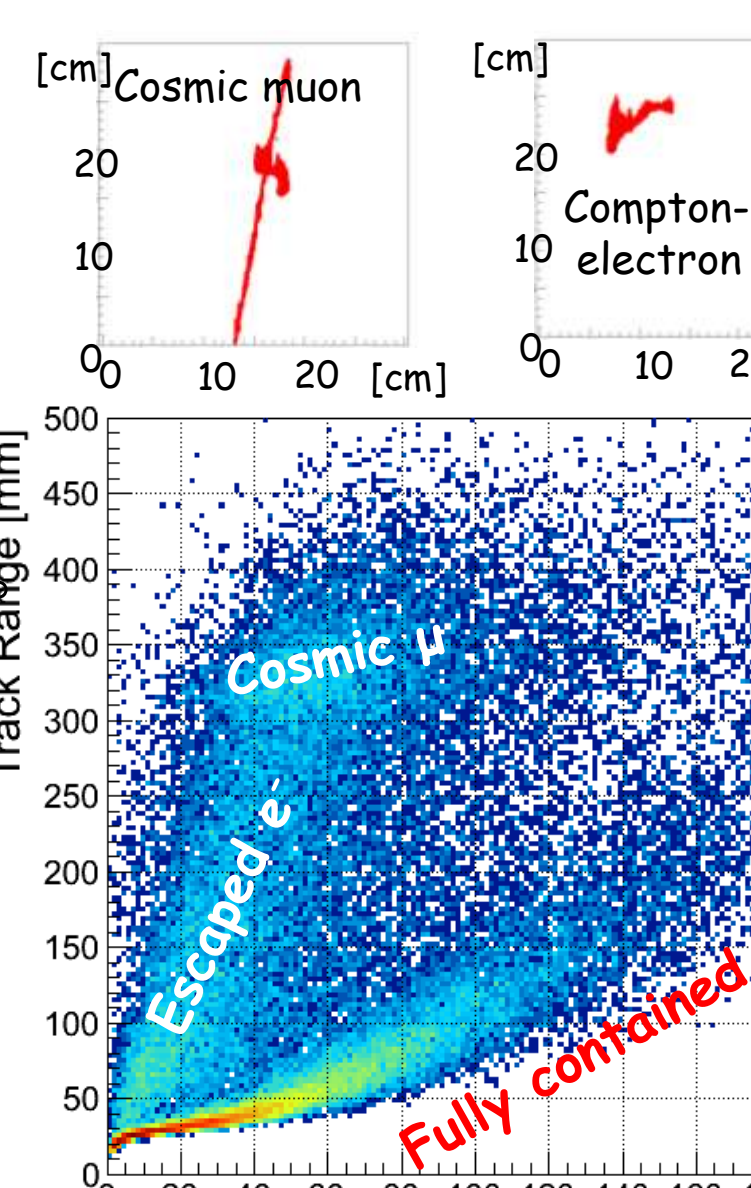
SMILE-II及びSMILE-IIIの雑音は、SMILE-I観測の雑音強度を基に計算した。また、SMILE-satelliteでは、0.1-5 MeVにかけて、SMMとCOMPTELで観測された系外拡散ガンマ線のフラックスを2倍して雑音とした。SPDは5-10°を実現できるとして、ガンマ線事象はARM程度の幅に50%が含まれるとした。衛星の観測時間は、運用時間の1/3としている。

### 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。

$$\cos \alpha_{geo} = \hat{g} \cdot \hat{e} \quad \cos \alpha_{kin} = \left(1 - \frac{m_e c^2}{E_e}\right) \sqrt{\frac{K_e}{K_e + 2m_e c^2}}$$

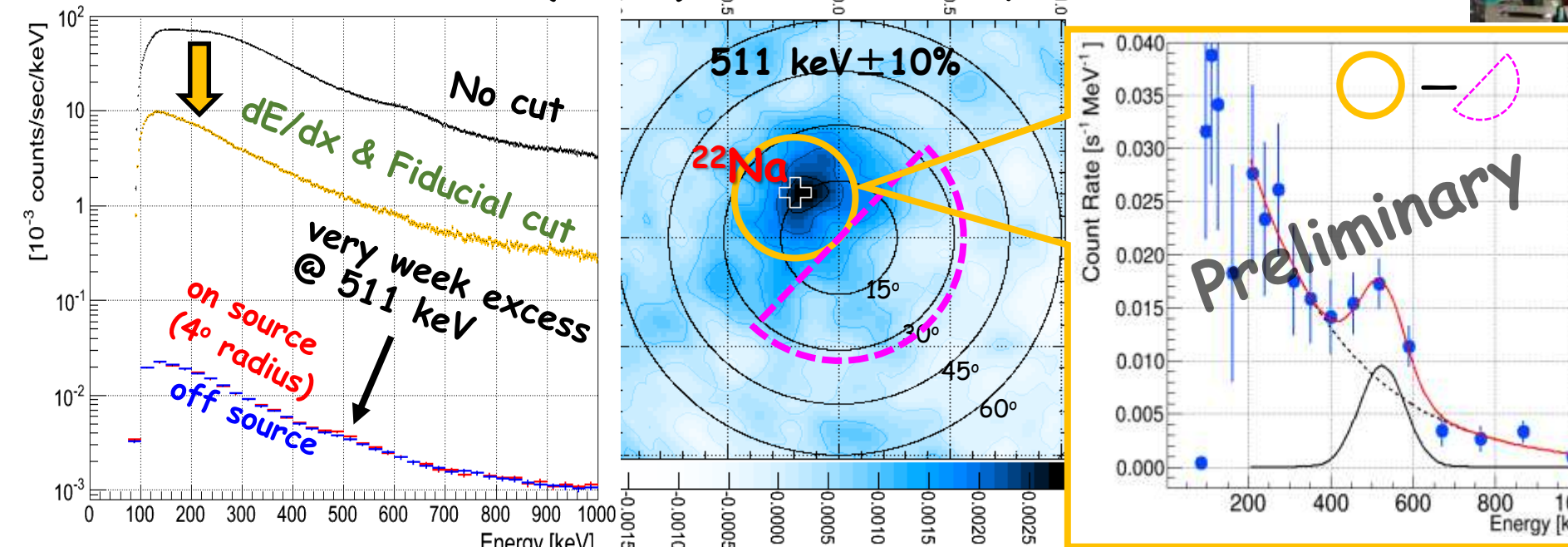
右式はコンプトン散乱であることが仮定されている。従って、上記2つの値が一致するものを選べば、コンプトン散乱事象のみを選び出すことができる。加えて、荷電粒子のエネルギー損失率のエネルギー依存性は、質量電荷比によって異なる。このため、エネルギー損失率を用いれば飛跡検出器中の粒子を識別することが出来る。右図は実際にガス飛跡検出器で得られた、飛跡長と損失エネルギー量の相関である。この図から飛跡検出器内でエネルギーを落とし切った電子・検出器外部へ飛び去った電子・宇宙線ミュー粒子がはっきりと区別できる。ガンマ線が起すコンプトン散乱では、電子が反跳されるのみであるため、中性子事象などは強力に排除可能である。



## 3. イメージングスペクトロスコピー

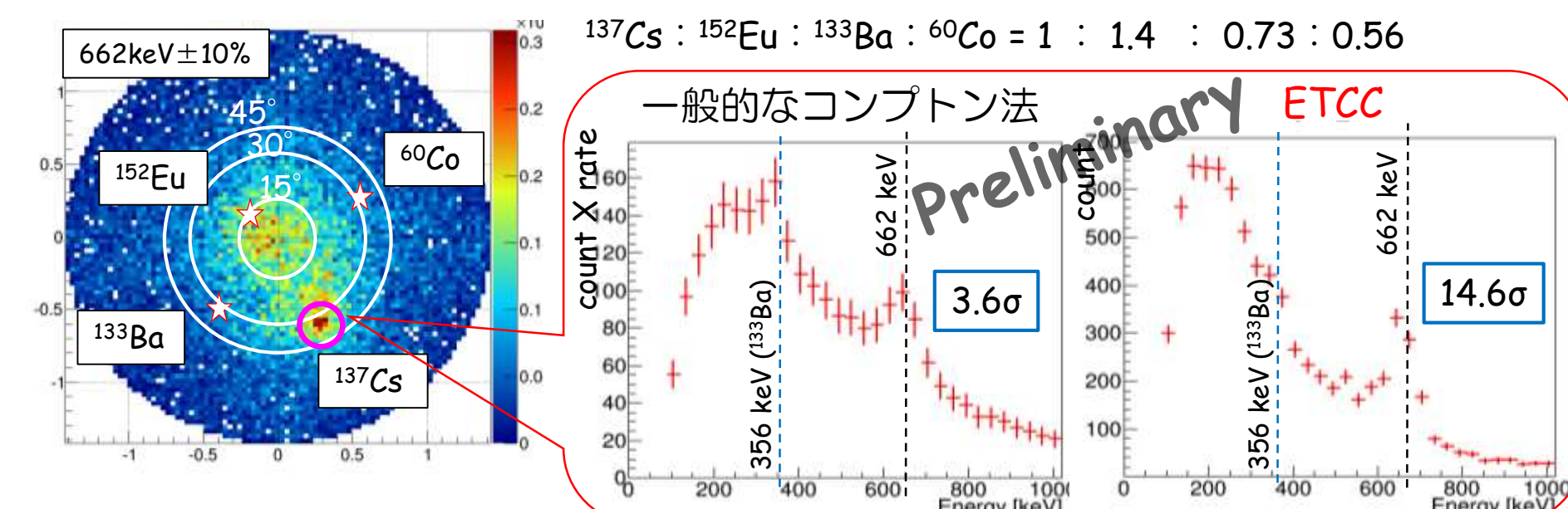
### 弱い放射線源のイメージング

- 27 kBq相当の<sup>22</sup>Na (511 keV)をETCCから5.5 m離して設置
- 線源由来の線量：~0.0003 μSv/h
- 空間線量 (京都)：0.05-0.1 μSv/h



空間線量の1/200-1/300の線源のイメージングに成功  
 イメージからON領域とOFF領域を設定することで線源由来のエネルギースペクトルの取得にも成功  
 イメージングにより非常に微弱なガンマ線源も観測可能

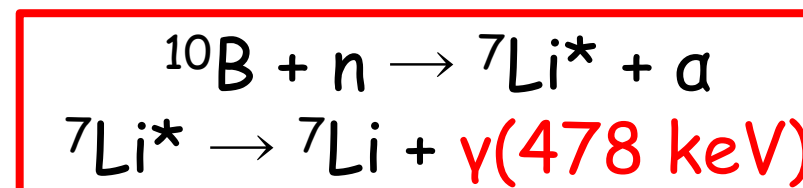
### 観測領域外からのもれこみの評価



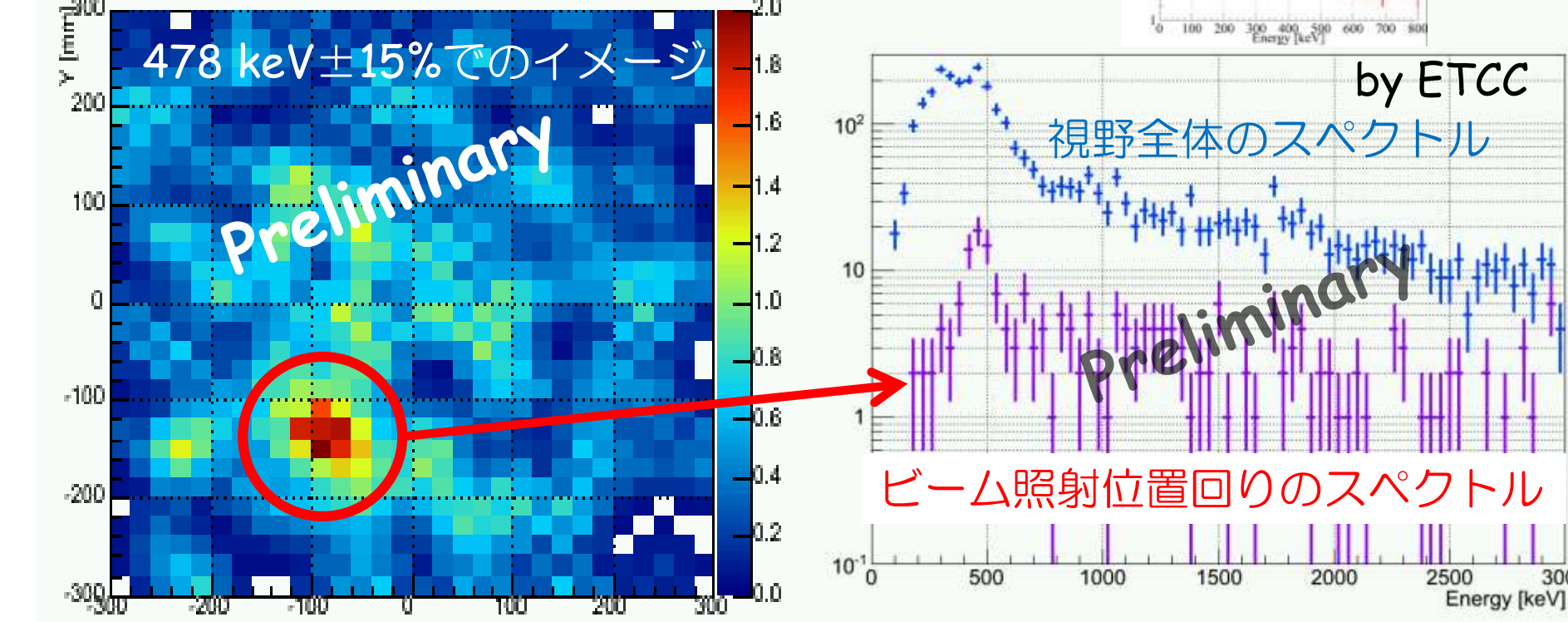
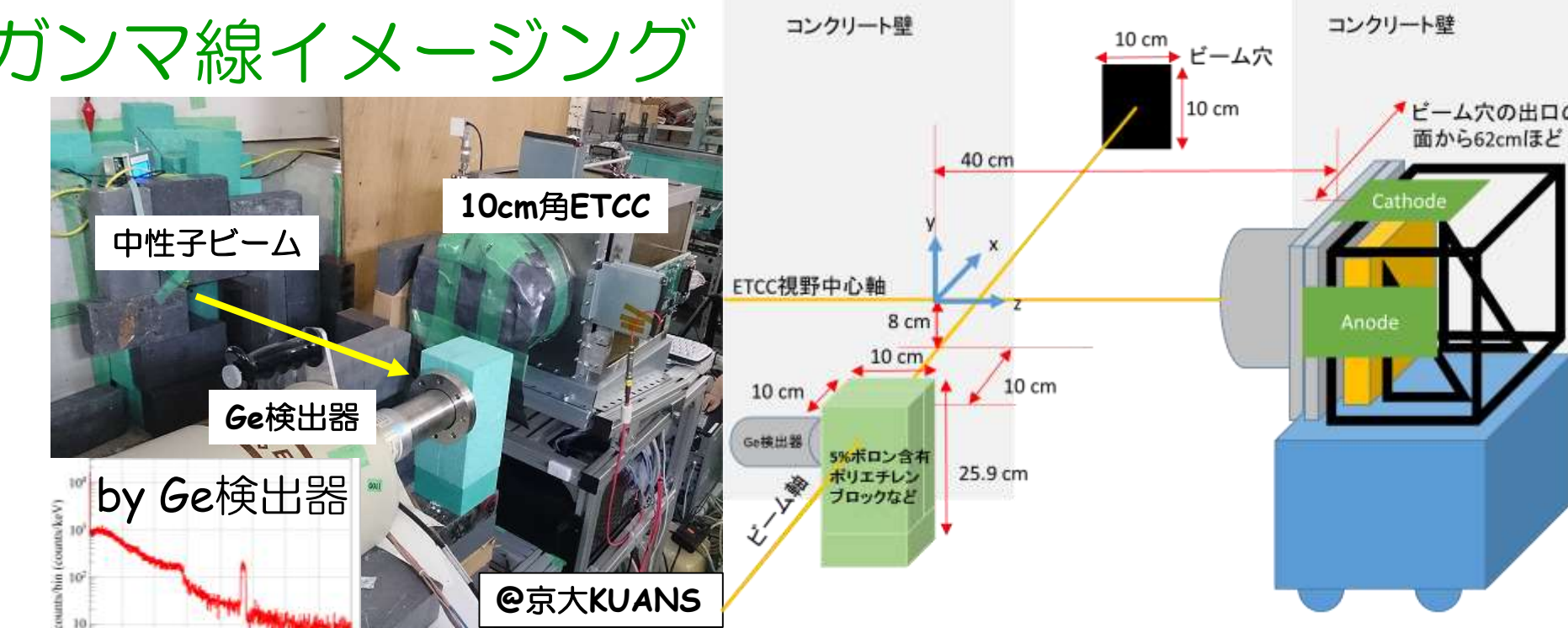
視野内に複数のガンマ線源を設置  
<sup>137</sup>Cs周りの直径5度のエネルギースペクトルを従来コンプトン法とETCC法と比較  
 ETCC法の鋭いPSFにより<sup>137</sup>Cs由来の662 keVの有意度は大きく改善  
 観測領域外にある<sup>133</sup>Baのピークや<sup>60</sup>Co/<sup>152</sup>Eu由来の高エネルギー成分を大きく削減

### ホウ素中性子捕獲反応の即発ガンマ線イメージング

中性子ビームをホウ素ターゲットに照射すると、中性子捕獲反応に伴う即発ガンマ線が生じる



これを利用し、ETCCによるイメージングスペクトロスコピーを試験



<sup>7</sup>Li由来のガンマ線の撮像に成功  
 Ge検出器に比べ5-8倍遠い位置からガンマ線を検出  
 イメージで切り出したスペクトルは雑音がないクリアなスペクトル  
 熱中性子浴の中でもガンマ線イメージングが可 (速中性子の中でも可、昨年報告済)

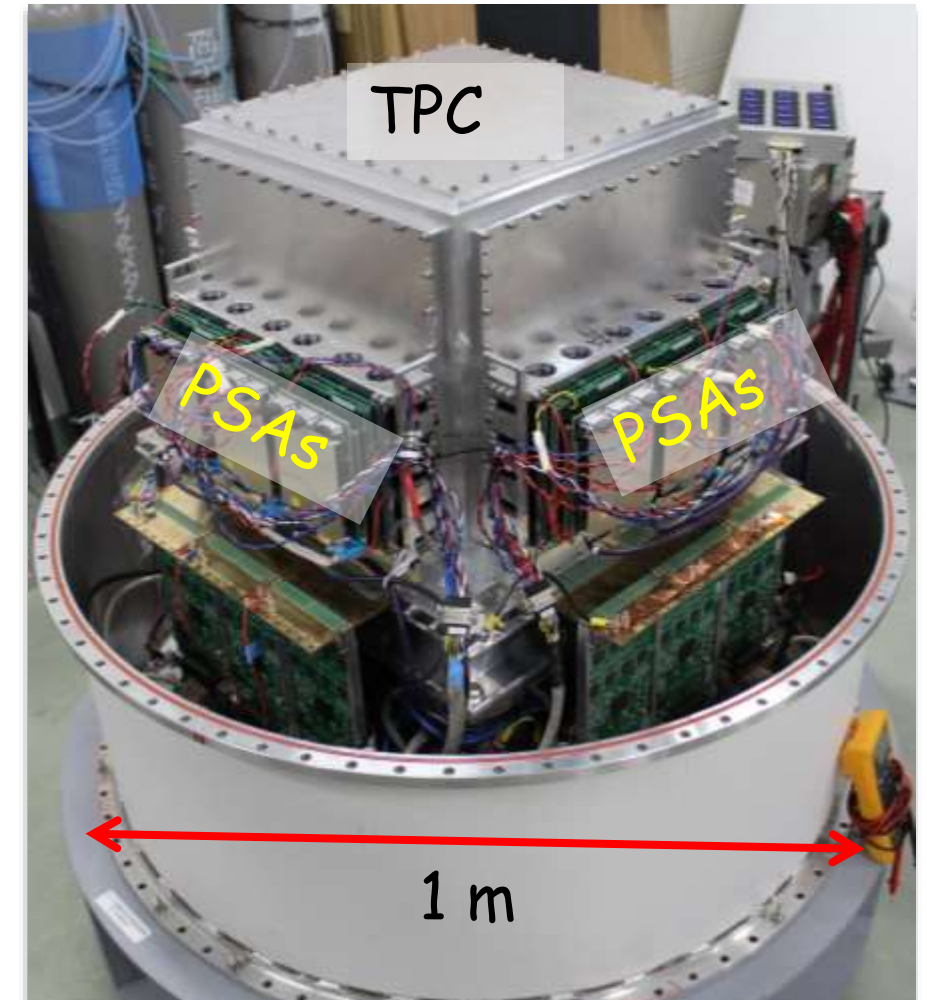
## 4. 現状のETCCの性能評価

### Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment II

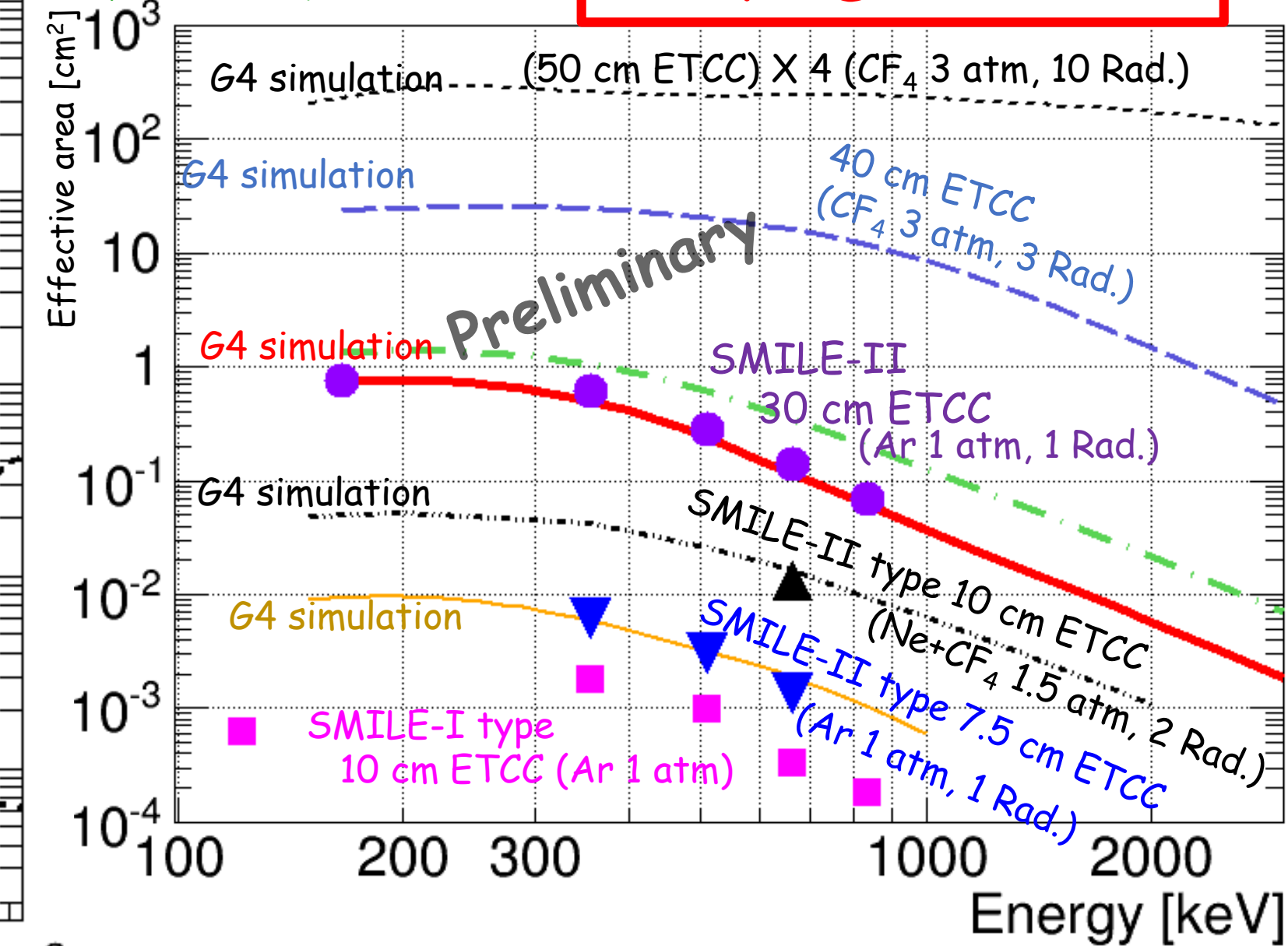
- 現在、検出器の性能評価中
- コマンド・テレメトリ及び低温への対策は準備中
- 上記2種の対策、フライトレディ

- SMILE-IIへの要求
  - 有効面積：> 0.5 cm<sup>2</sup> (< 300 keV)
  - 角度分解能：< 10° (662 keV)

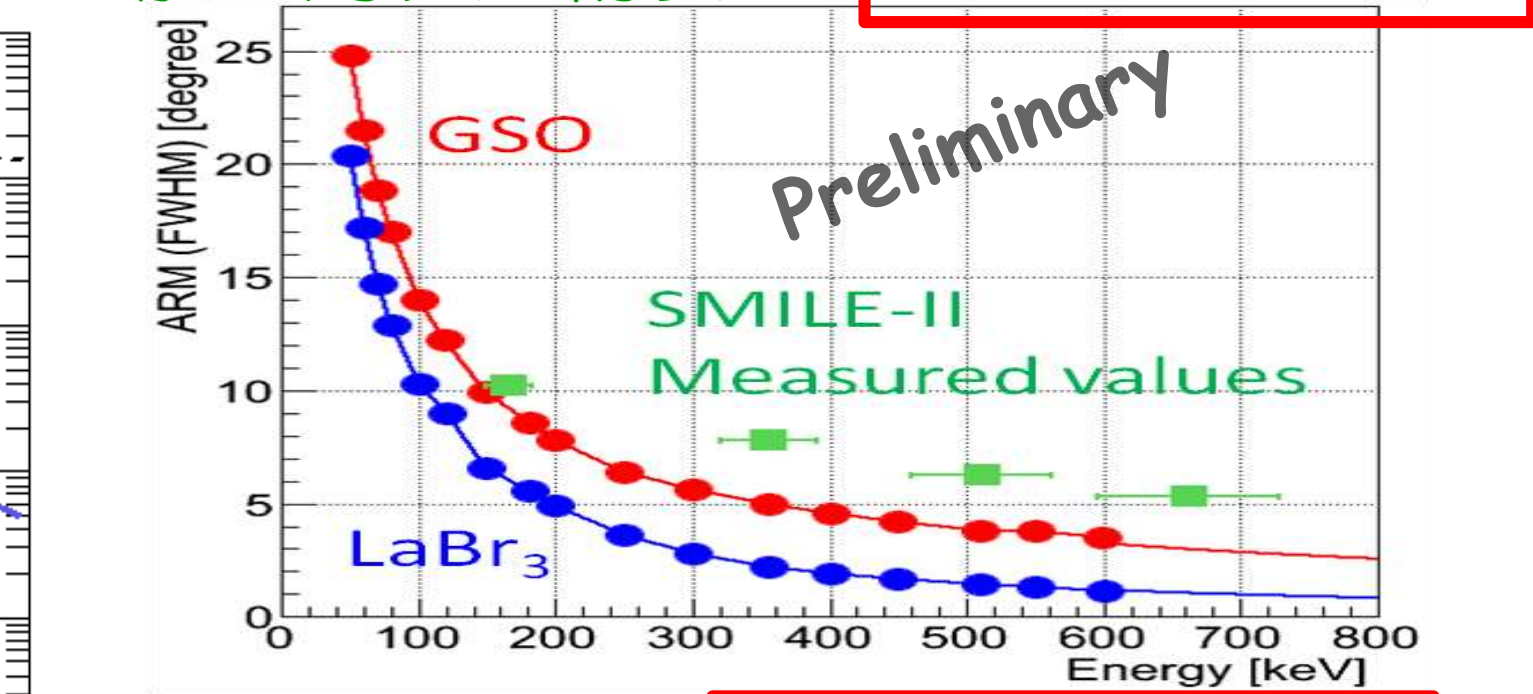
システム&HK	位置検出型シンチレーション検出器
システム重量 (容器込)	~250 kg
消費電力	~250 W
圧力容器	Al, φ1 m × 1.4 m
姿勢測定	GPSコンパス, 傾斜計, 磁場センサ
HKセンサ	圧力計, 温度計
飛跡検出器サイズ	30 × 30 × 30 cm <sup>3</sup>
ガス	Ar:iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> :CF <sub>4</sub> (95:2:3), 1 atm.
空間分解能	< 0.5 mm
エネルギー分解能 (FWHM)	20 % (@ 22 keV)
Scintillator	GSO:Ce (6.71 g/cm <sup>3</sup> )
Pixel size	6 × 6 × 13 mm <sup>3</sup>
# of pixels	6912
Dynamic range	80 keV-1.3 MeV
エネルギー分解能 (FWHM)	10 % (@ 662 keV)



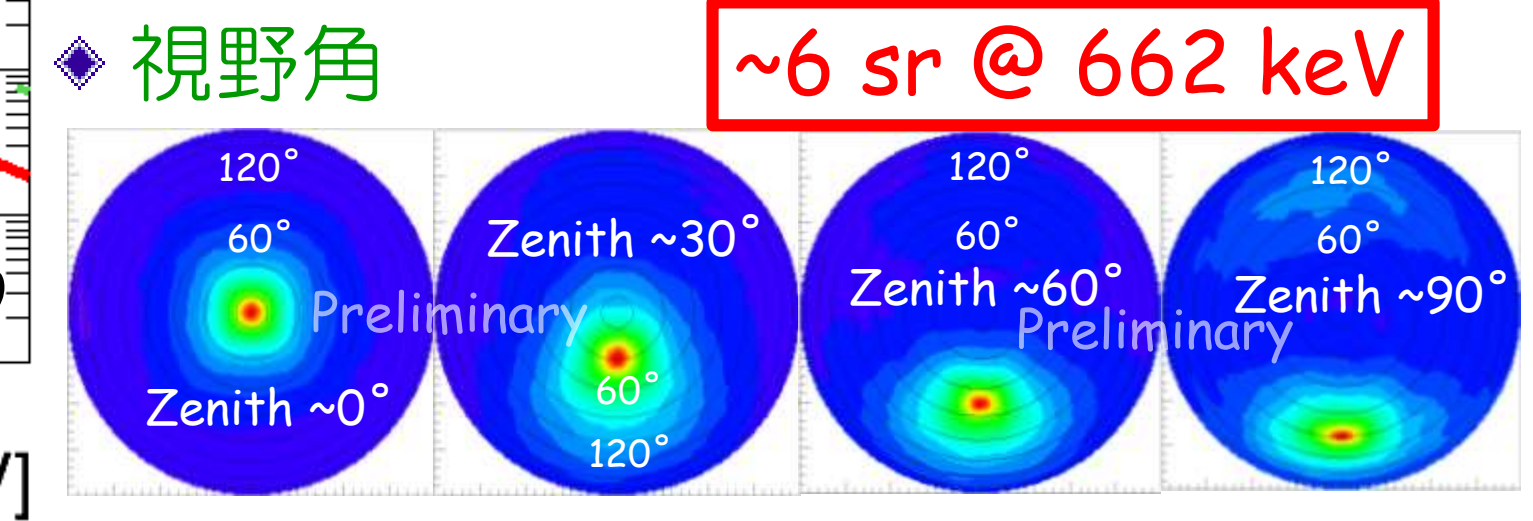
### 有効面積



### 散乱角決定精度



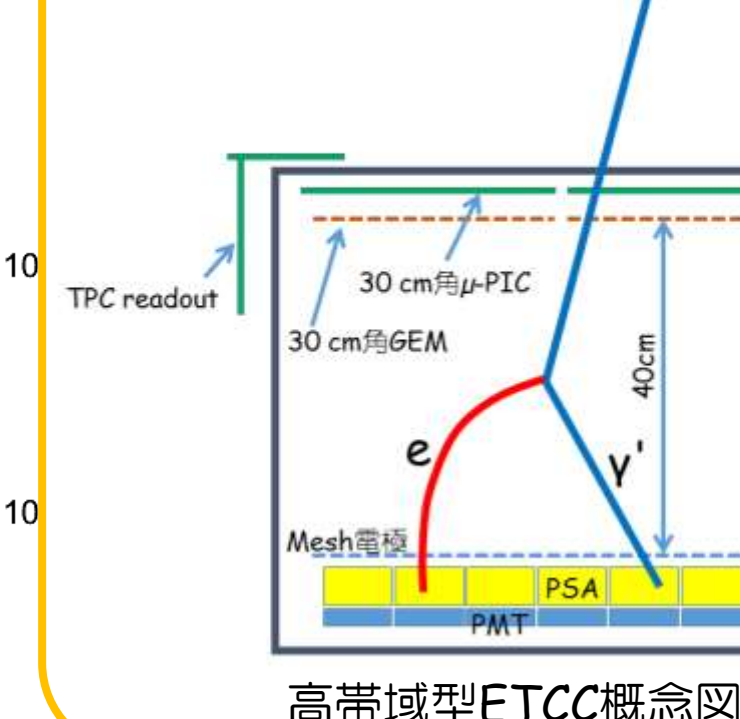
### 視野角



## 5. ETCCの性能向上へ

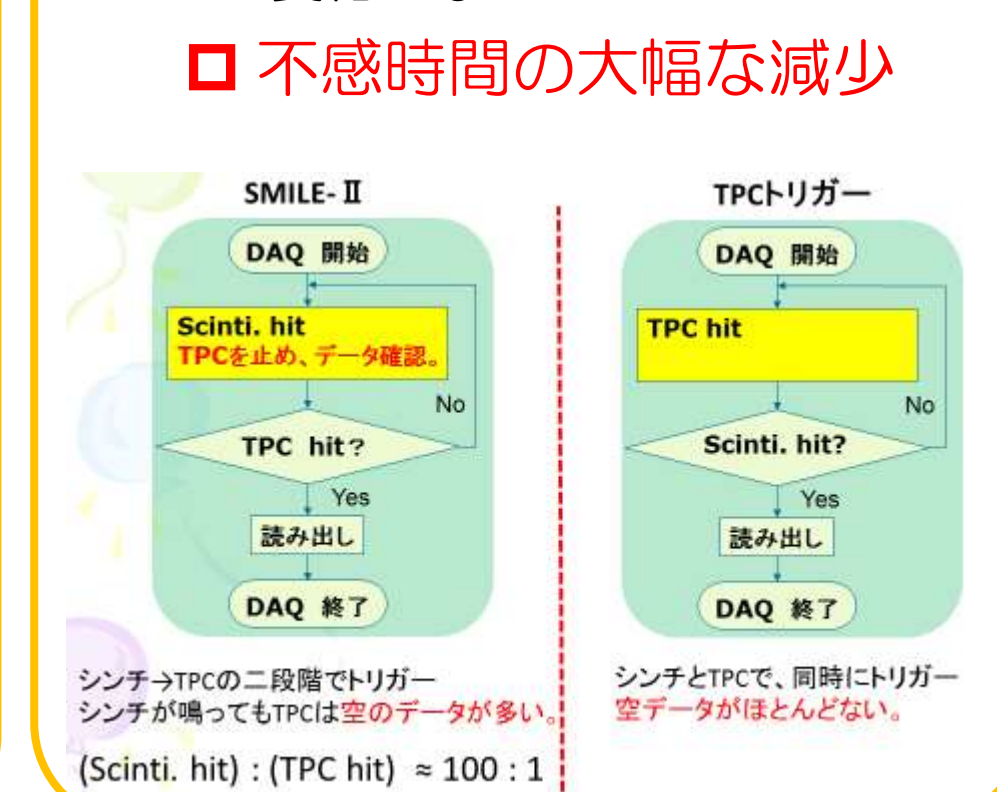
高エネルギー電子の取得  
 シンチレータをガス飛跡検出器内に配置  
 ⇒ SMILE-IIで取得可能な高エネルギー電子を取得

- 有効面積の拡大
- SPD向上によるPSFの改善



### DAQシステム改良

TPCのヒット情報をトリガー信号として使用  
 ⇒ シンチレータでトリガーするSMILE-IIに比べて2桁少ないトリガー率を実現し取得できるデータ数は変化しない



### シンチレーション検出器改良

- 2.5放射長GAGGシンチレータとMPPC光検出器による検出器開発  
 ⇒ SMILE-IIはGSO 1放射長をPMTで読み出しシステム消費電力の~1/4がPMTフリーダー電流
- シンチ厚み拡大による広帯域化
- エネルギー分解能向上
- 消費電力削減

