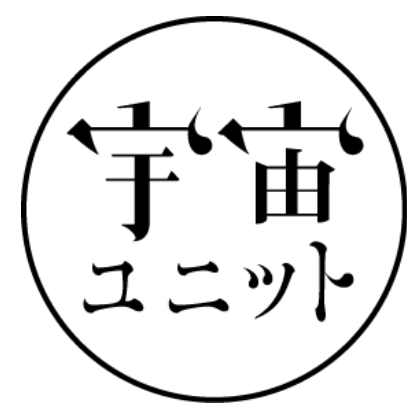


2016年10月11日(火)

第16回CPS月惑星探査研究会

太陽系探査を目指した、観測装置に関するワークショップ



核ガンマ線イメージングで探る 月・惑星の資源量マップ

水村 好貴

(京都大学 宇宙総合学研究ユニット)

谷森 達, 高田 淳史

(京都大学大学院 理学研究科)

参加動機と京大(宇宙ユニット)の状況²

私の普段の生息地

物理学会

天文学会

宇宙線研究者会議

高エネルギー宇宙物理連絡会

などなど

京都大学 宇宙総合学研究所

宇宙をテーマに京大の研究者をゆるく、
まとめた組織(併任教員 70名以上！)

専任教員・研究員(計3名)

- 土井隆雄(宇宙飛行士)
- 呉羽 真(哲学・倫理学)
- 水村好貴(ガンマ線天文)



土井隆雄 特定教授が、強かに「**有人宇宙学**」の体系化を牽引中!!

月資源探査は、将来の有人宇宙活動の発展にとって、
必要不可欠との位置付け

開発中の天文用ガンマ線カメラ→月資源の探査に使えないか？

月からの核ガンマ線

原子核固有のエネルギーのガンマ線



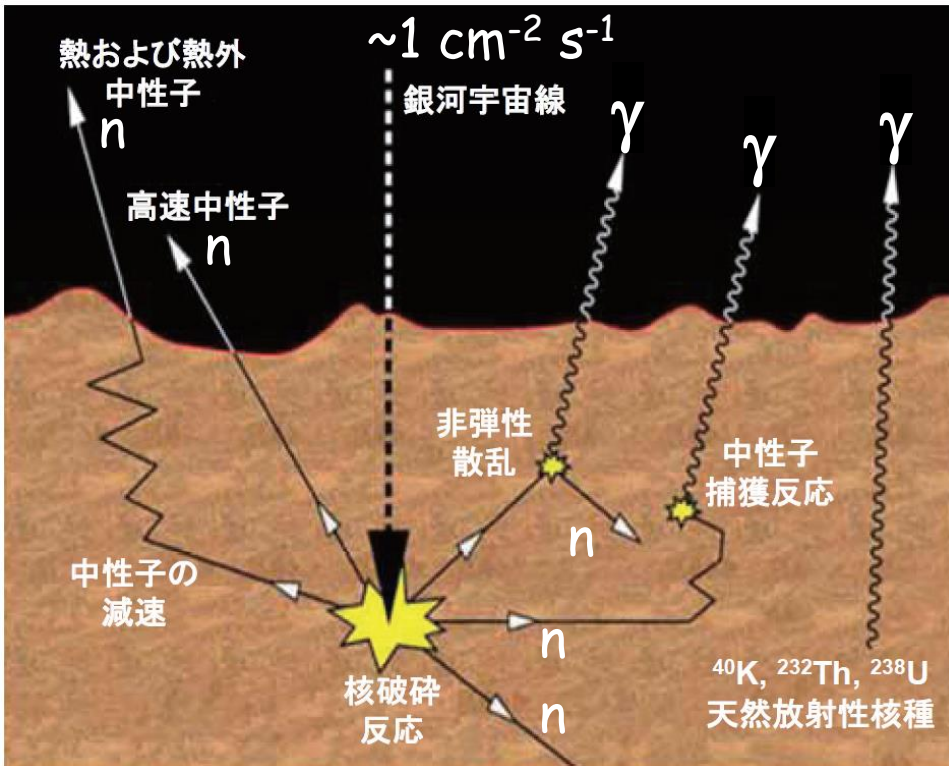
天体表層の元素組成分布

科学面

- 地殻形成の過程・環境
- 地殻形成後の熱的活動
- 月全体の化学組成への制約
- 宇宙線曝露の巨大サンプル

宇宙戦略面

- 月資源の探査・利用
- 将来の有人宇宙活動拠点

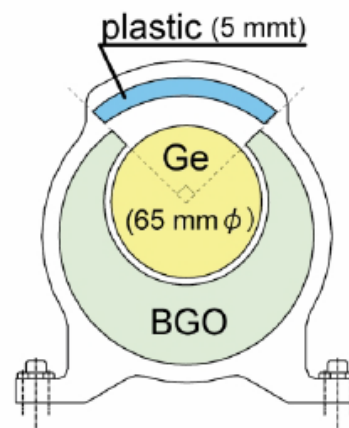
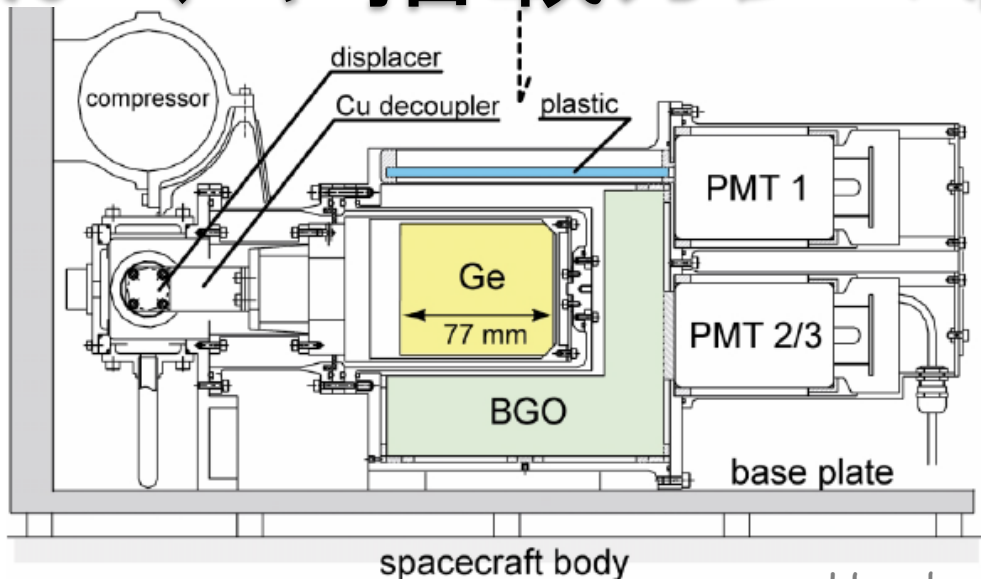


Karouji+, 日本惑星科学会誌 17 (2008) 161-166

| かぐや | X線 | ガンマ線 |
|----------|---|--|
| 測定対象 | Mg, Al, Si, (Ca, Ti, Fe) | (H), O, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Fe, Th, U |
| 空間分解能 | ~20 km @100 km | ~130 km @100 km |
| 探査深さ | < $10^{-4} \sim 10^{-2}$ g/cm ² (数 μm) | < 4~40 g/cm ² (数十 cm) |
| 日陰(夜・極域) | 探査× | 探査○ |

Hasebe+, J. Phys. Soc. Jpn. 78 (2009) 18

かぐや搭載ガンマ線分光器K-GRS⁴



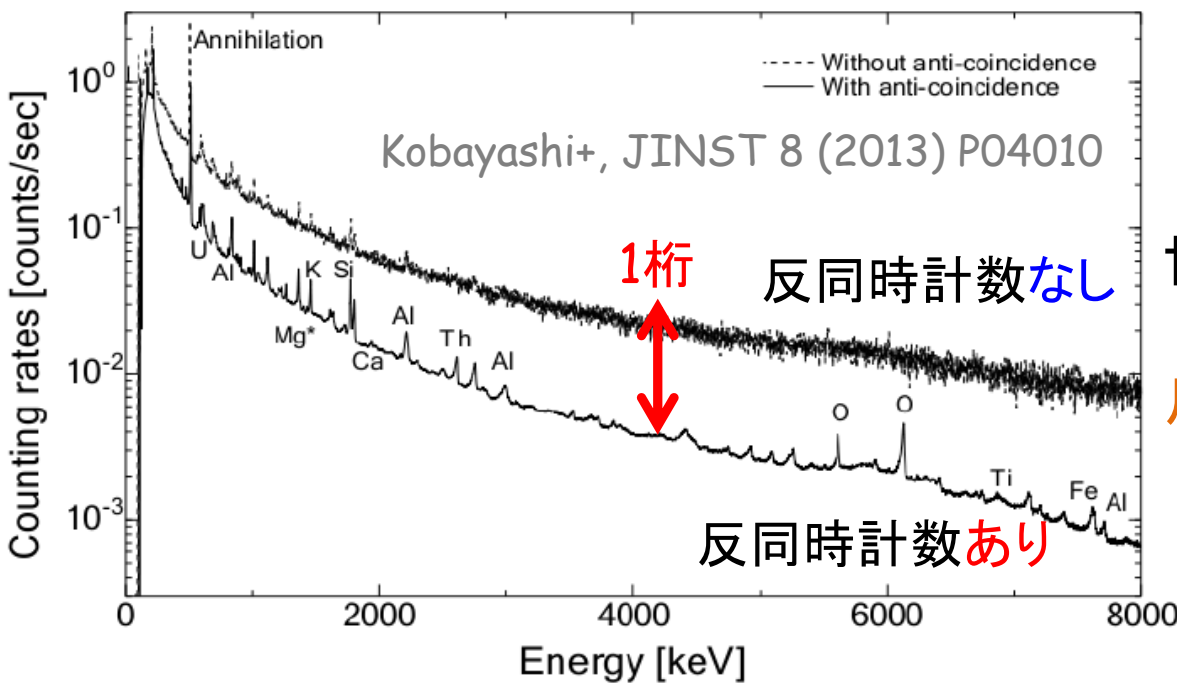
Ge半導体検出器

77 mm x 65 mm ϕ
(252 cm³)

+

反同時計数用の
BGOシンチおよび
プラスチックシンチ

Hasebe+, Earth Planets Space 60 (2008) 60



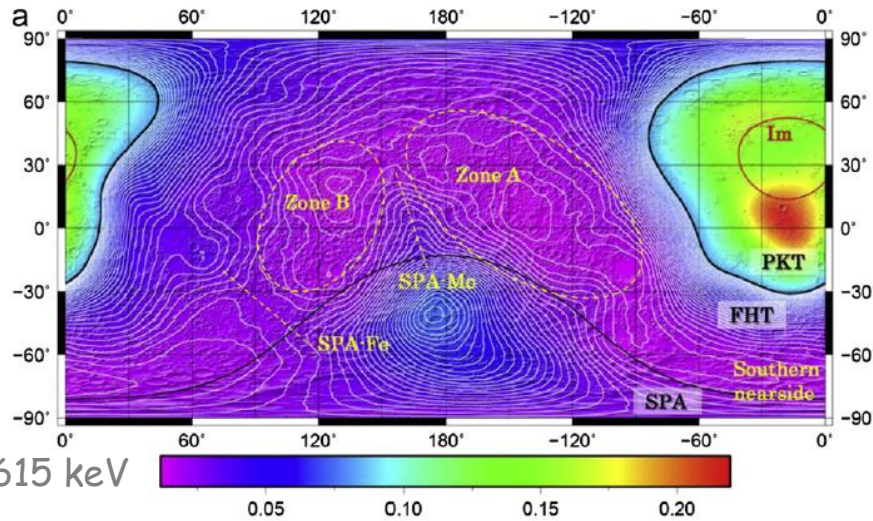
K-GRS の長所

世界最高のエネルギー分解能
0.4% @ 662 keV

反同時計数を用いた雑音除去
1桁弱の雑音抑制

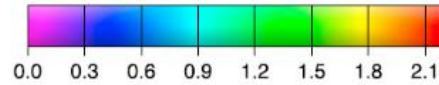
K-GRSの代表的成果: 元素マップ

^{232}Th Kobayashi+, *EPS Lett.* 337-338 (2012) 10

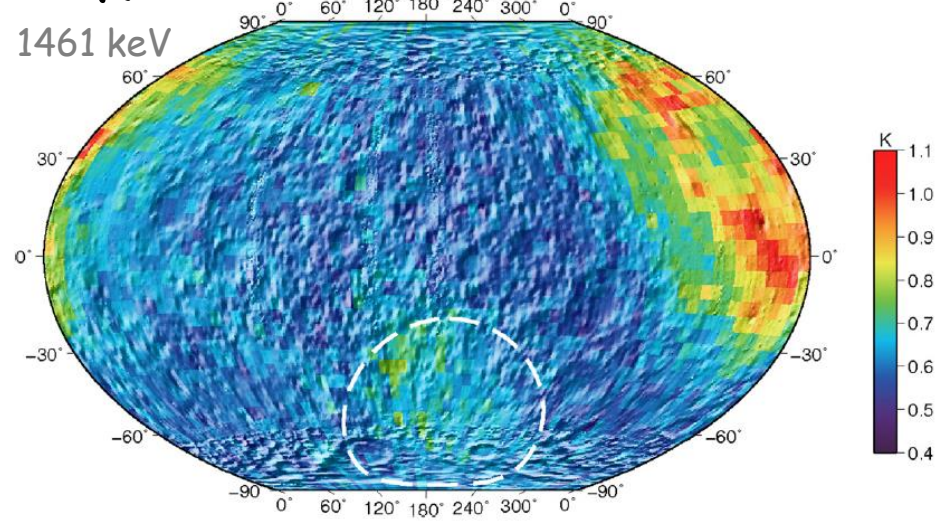


Thorium abundance (count rate of 2615 keV, cps)

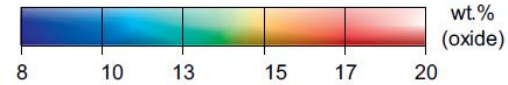
^{238}U 1764 keV U ppm



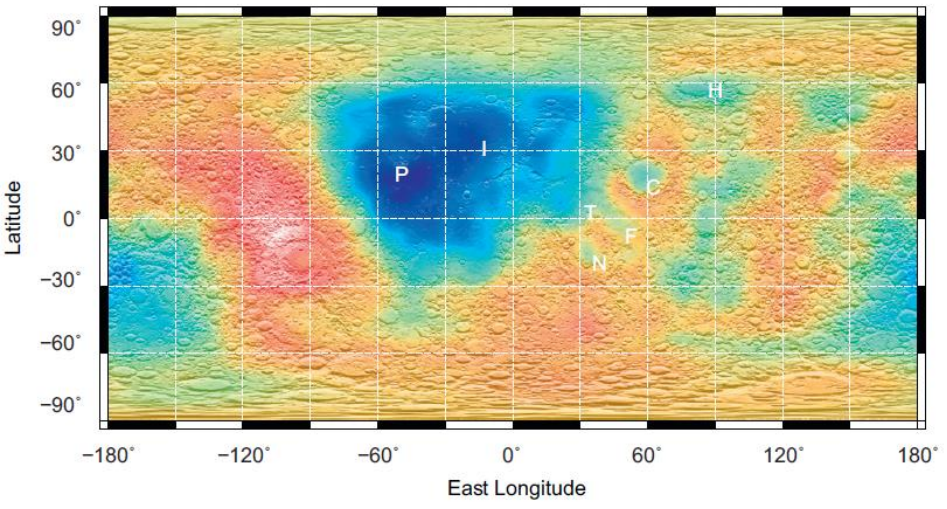
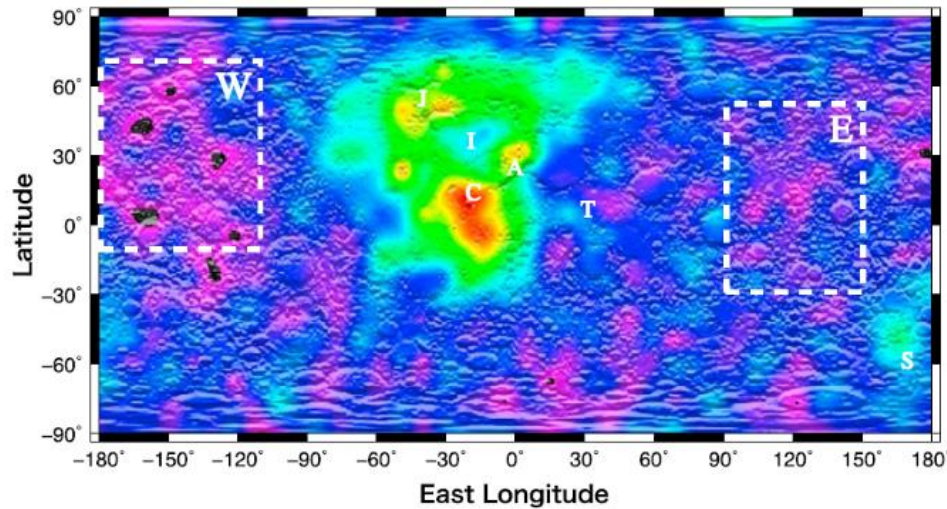
^{40}K Kim+, *Adv. Space Res.* 50 (2012) 1629



^{40}Ca (CaO)



3737 keV

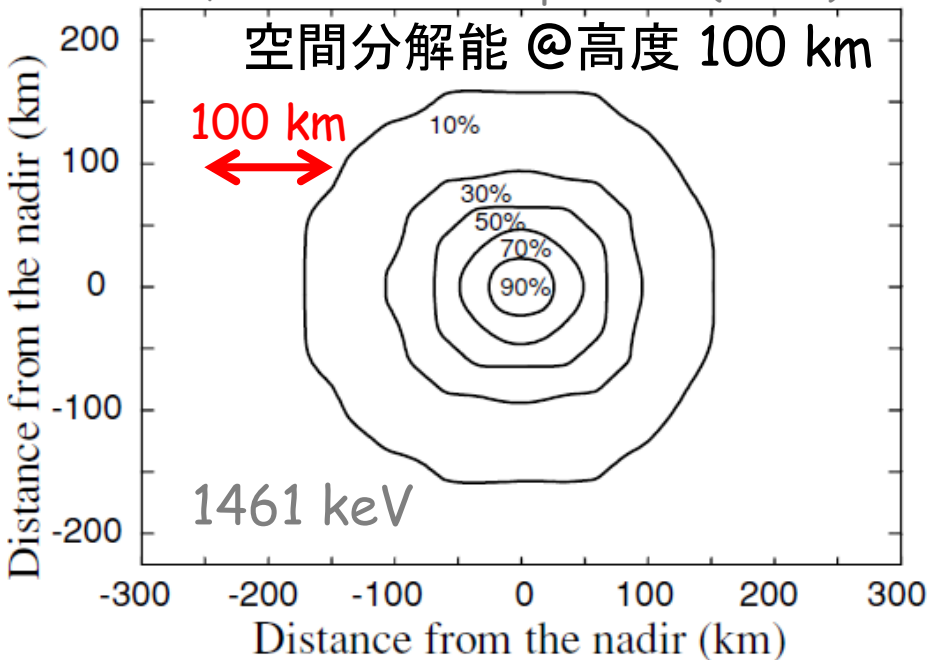


Yamashita+, *Geophys. Res. L.* 37 (2010) L10201

Yamashita+, *EPS Lett.* 353-334 (2012) 93

K-GRSからの発展1: 空間分解能

Hasebe+, Earth Planets Space 60 (2008) 60

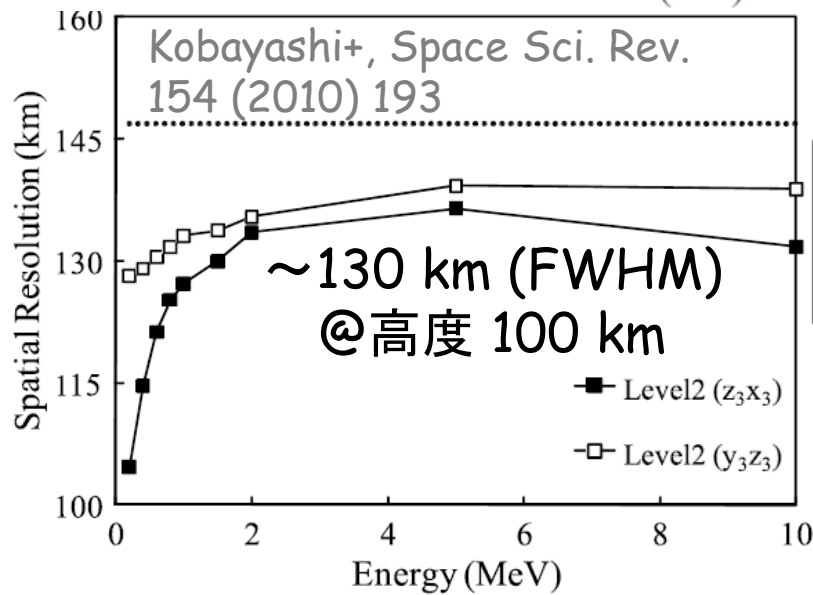


K-GRS:

開口角 90° の
非撮像ガンマ線検出器

もし、数度の分解能の
ガンマ線撮像装置なら?

- 数km単位の全球マップ
- 元素分布の特異点探査
- クレーター内外の差異
などの議論に発展

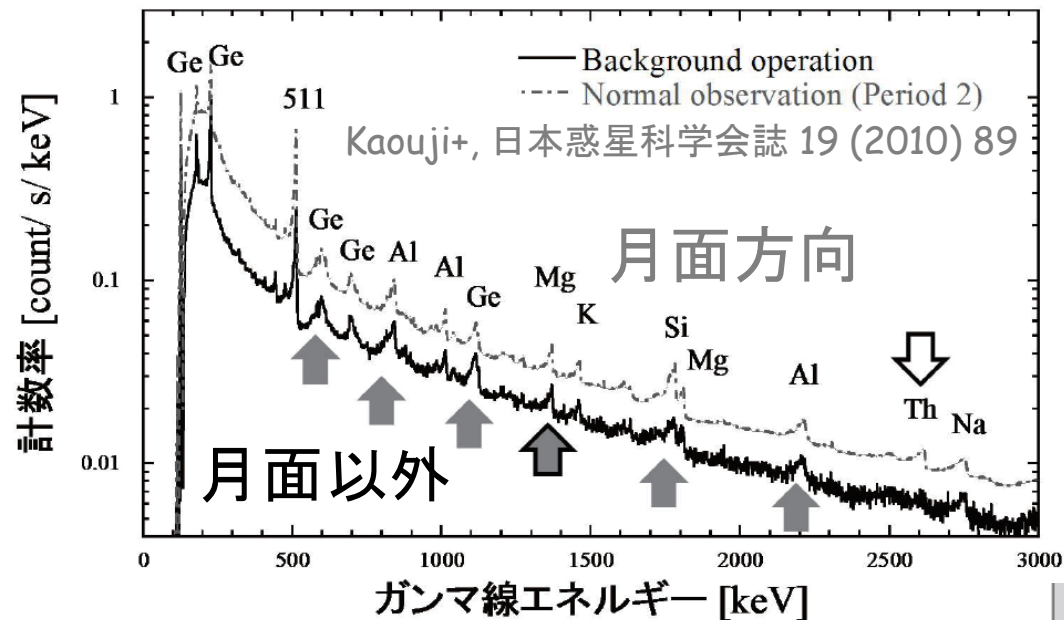


月面有人活動を考えるなら、
数km分解能の資源マップが必須

月着陸後に、100 km単位の移動は非効率

K-GRSからの発展2: 雑音除去能力 ⁷

反同時計数で**1桁**の雑音を除去したが、まだ不十分



月面以外に検出器を向けても、多数のガンマ線雑音が混入

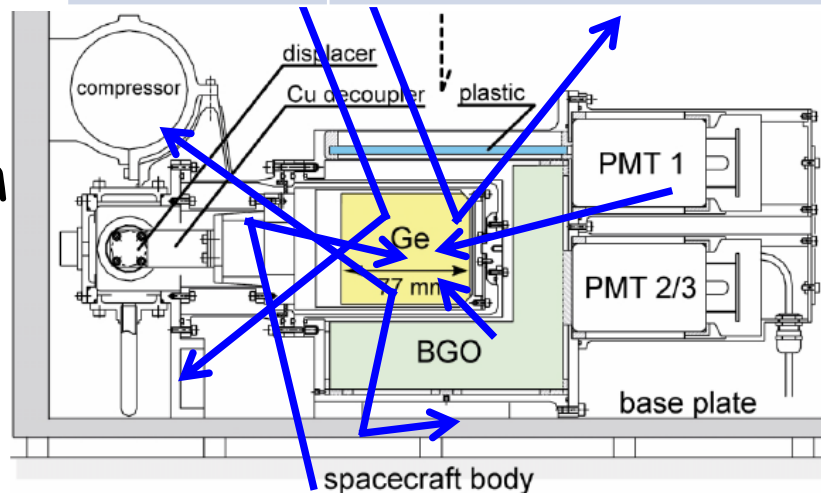
| | |
|------|----------|
| Ge | 検出器 |
| Al | 衛星筐体や検出器 |
| Mg | Alの核破砕 |
| Si | Alの中性子捕獲 |
| 連続成分 | 様々な反応の和 |

Mg (1368 keV) の場合

- 月面方向 8.4 cpm } 正味 3.3 cpm
- 月面以外 5.1 cpm } 雑音 > 正味!!

雑音の大部分は装置由来

雑音を**~3桁**、異なる原理で抑制できる観測装置なら?



シールドや反同時計数装置、衛星本体でさえも雑音源!!

本日、ご紹介する観測装置

Electron-Tracking Compton Camera (電子飛跡検出型コンプトンカメラ)

数MeVのガンマ線に対して

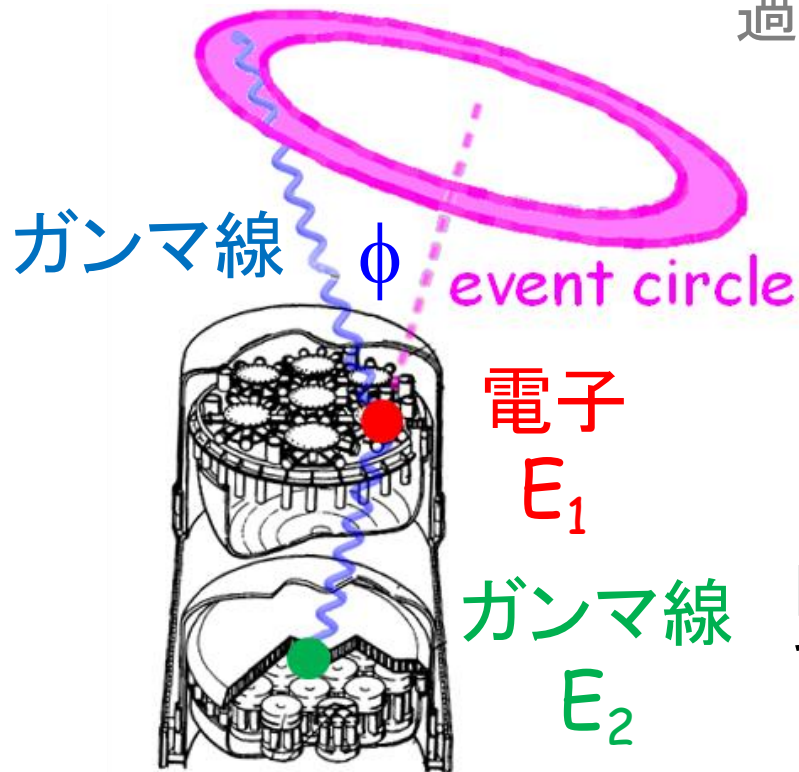
- 数kmの空間分解能 (@100 km)
- ~3桁の雑音除去能力
- 2 sr以上の超広視野
- 1~3%のエネルギー分解能
- K-GRSと同程度の有効面積

広視野低雑音MeVガンマ線撮像分光装置

電子飛跡を測定しないコンプトンカメラ⁹

COMPTEL 検出器

MeVガンマ線帯で、
過去最高感度の全天宇宙観測を実施



$$\cos \phi = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right)$$

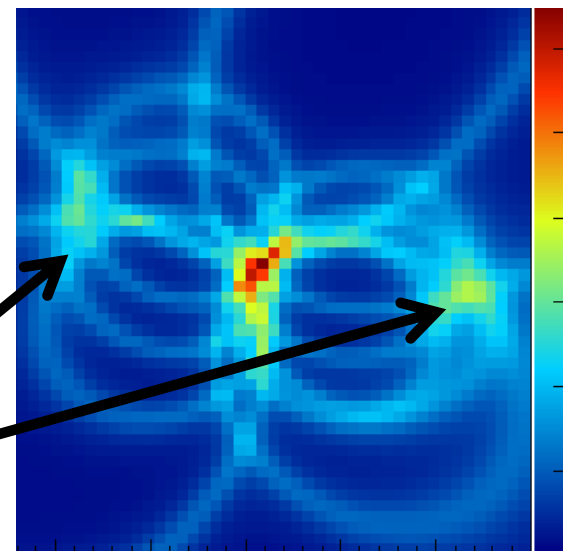
E₁ と E₂ から散乱角 φ のみを測定

円環の重ね合わせ
でのイメージング

世界の方向性

- 多層・高密度化で検出効率向上
- φの精度(event circleの幅)を向上

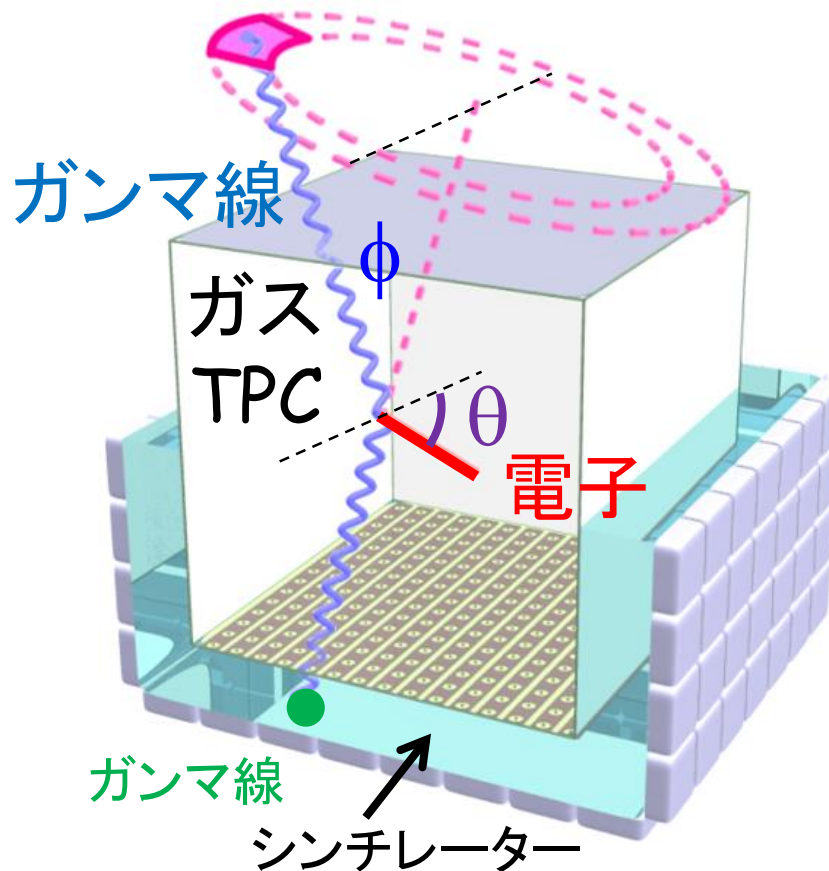
偽信号



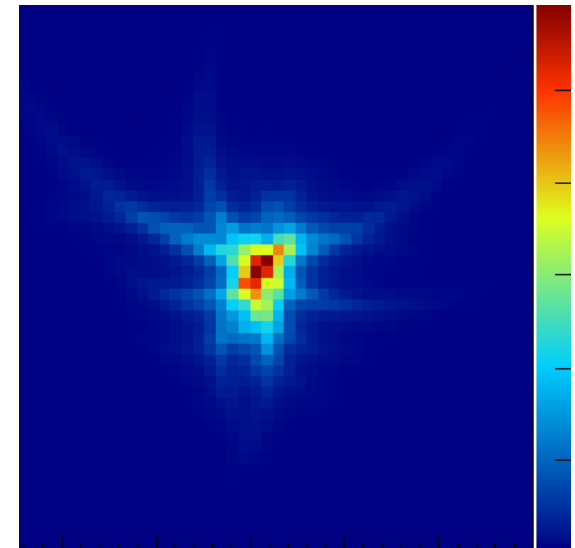
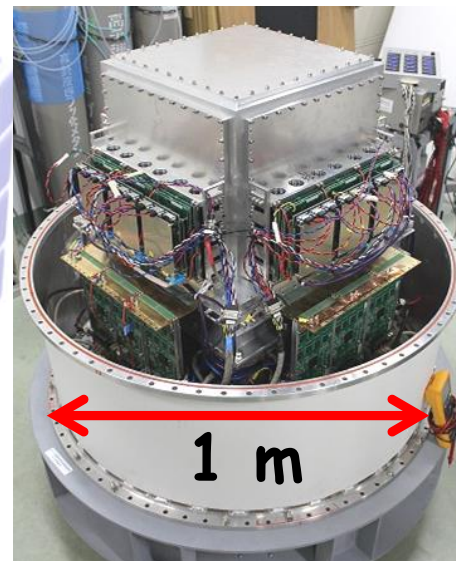
光子毎には 1個の角度情報: 擬似イメージング

電子飛跡を測定するコンプトンカメラ¹⁰ Electron-Tracking Compton Camera (ETCC)

逆転の発想：(一見)スカスカでも、しっかり**2角度**を測定

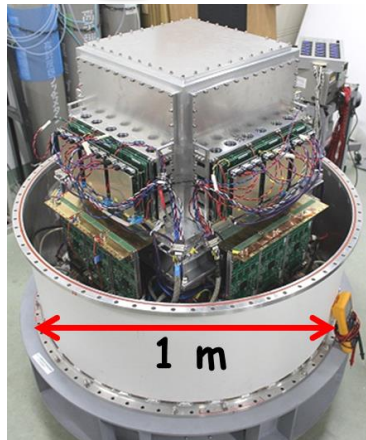


散乱体をガスにすることで、
電子がある程度は走れる。
→ 反跳方向を測定可能



光子毎には **2個**の角度情報：**真のイメージング**

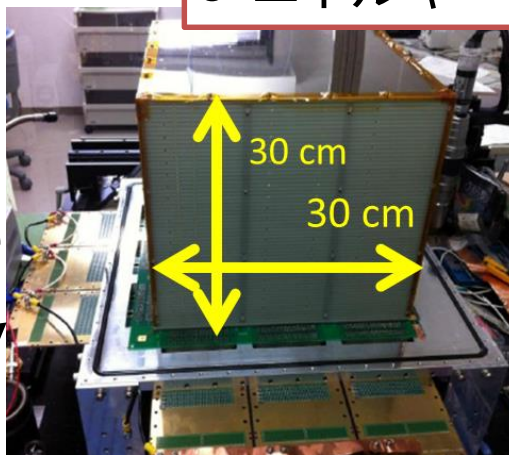
ETCCの構成: ガスTPC + シンチ ¹¹



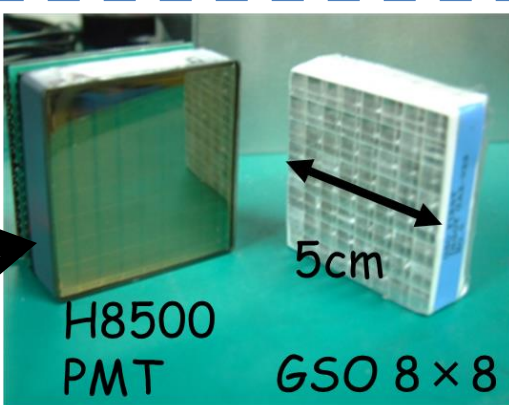
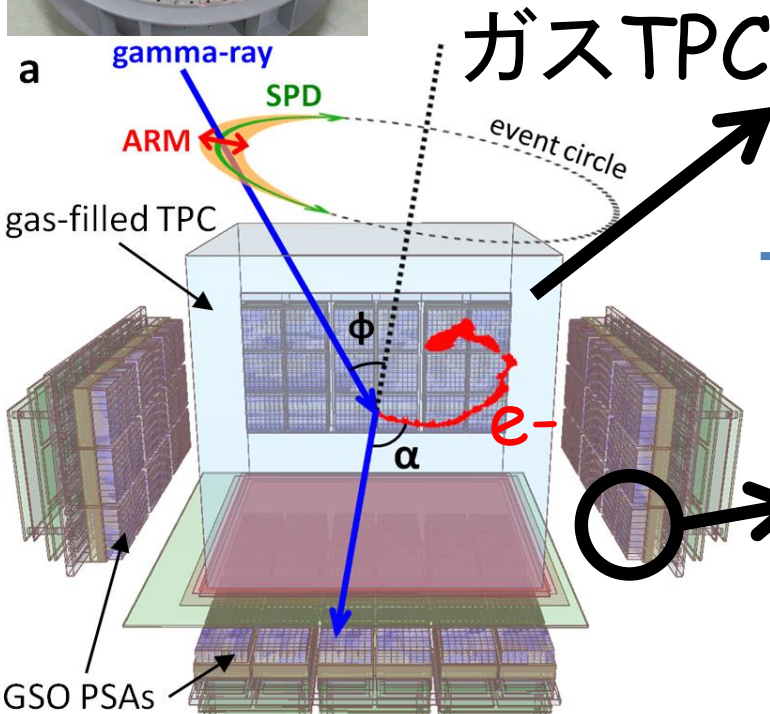
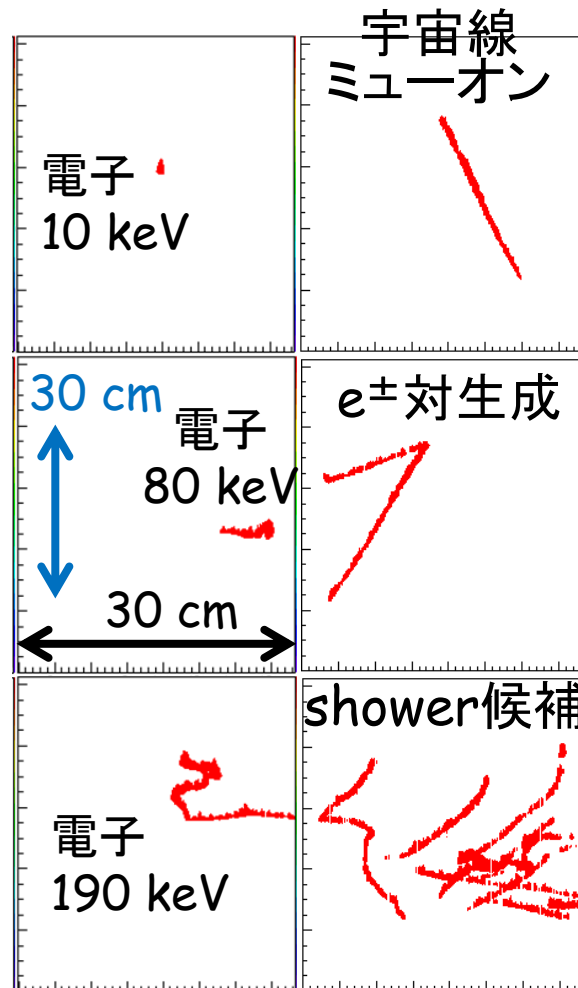
SMILE-II
気球実験用の
ETCC

反跳電子

- 3次元飛跡
- エネルギー



粒子飛跡の実測例



散乱ガンマ線

- 吸収位置
- エネルギー

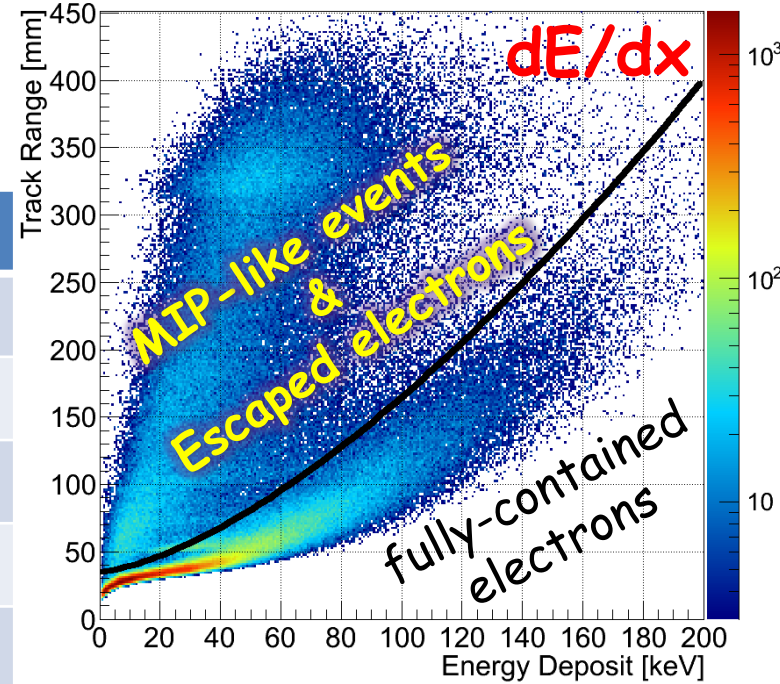
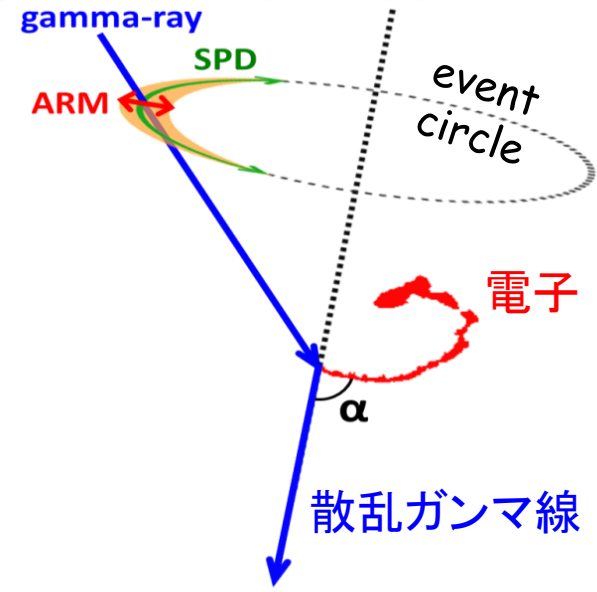
Pixel Scintillator Arrays (PSAs)
計6912 pixels (64 x 108 PMTs)

中性子 recoil 陽子から
中性子フラックスも観測可

ETCCがもたらす雑音除去性能

事象毎に3つの物理量を新たに得る

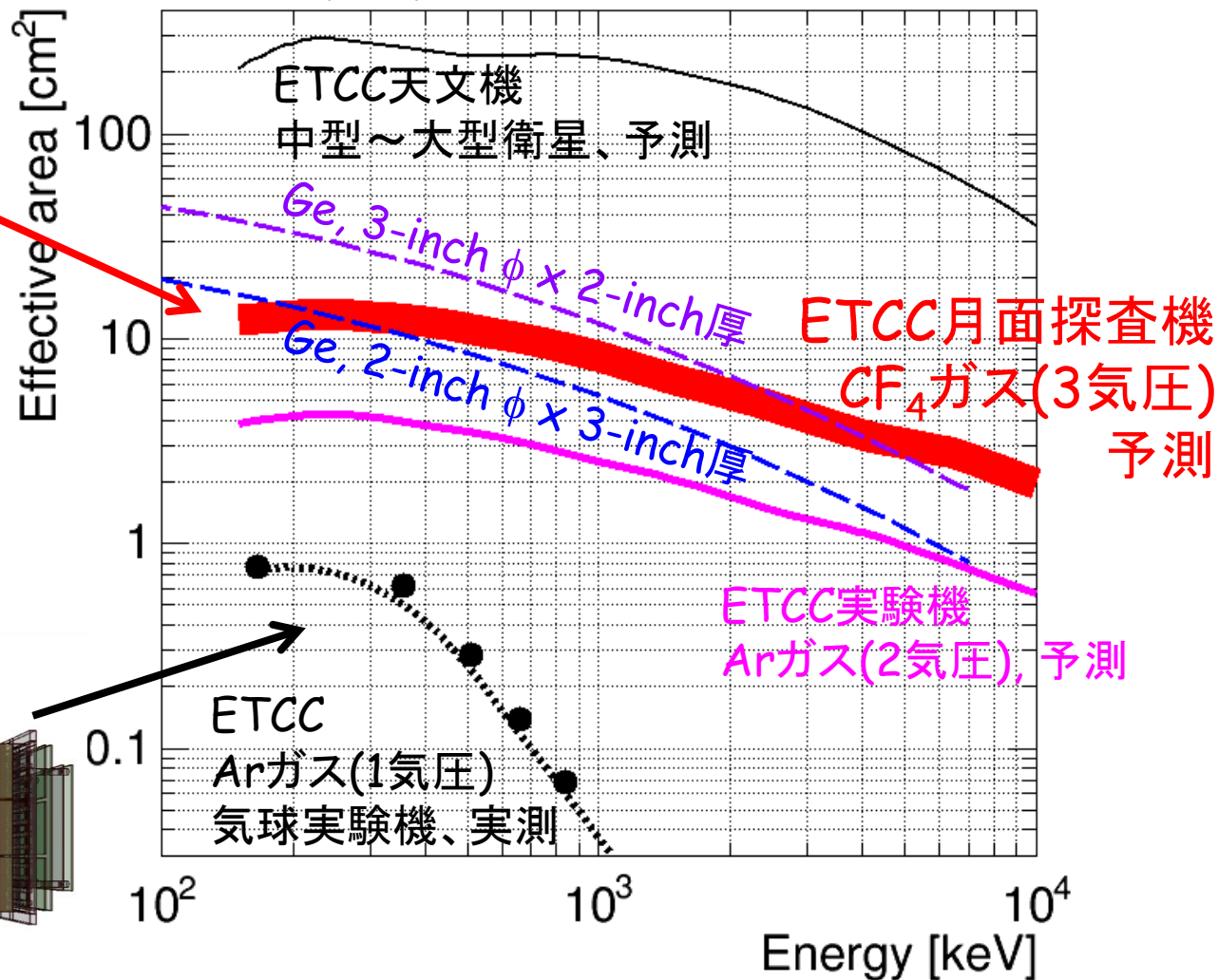
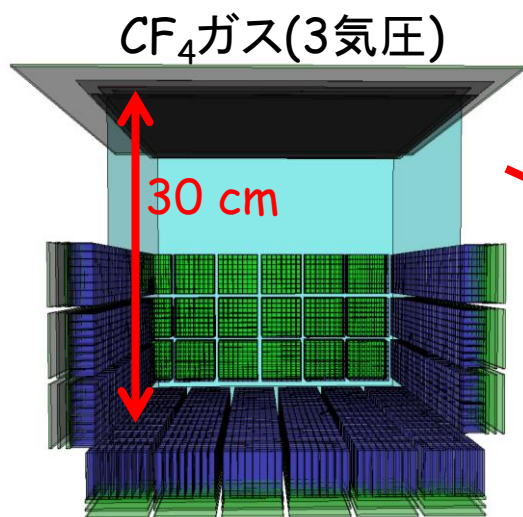
1. **SPD**, コンプトン散乱平面の向き
→ 1光子毎の到来方向完全決定
2. **dE/dx**, 荷電粒子のエネルギー損失率
→ 粒子識別による雑音除去
(ガス中で電子が止まる事を保証)
3. **alpha**, 反跳電子と散乱ガンマ線の成す角
→ コンプトン運動学による雑音除去
(コンプトン散乱でない事象を排除)



| 雑音の種類 | 除去手法 |
|---------------|--------------|
| ガンマ線(装置由来) | SPD (方向決定) |
| ガンマ線(視野外から入射) | SPD (方向決定) |
| ガンマ線(コンプトン脱出) | alpha |
| ガンマ線(電子の脱出) | dE/dx, alpha |
| 非ガンマ線, 偶然同時計数 | dE/dx, alpha |

ETCCと大型Ge検出器の有効面積

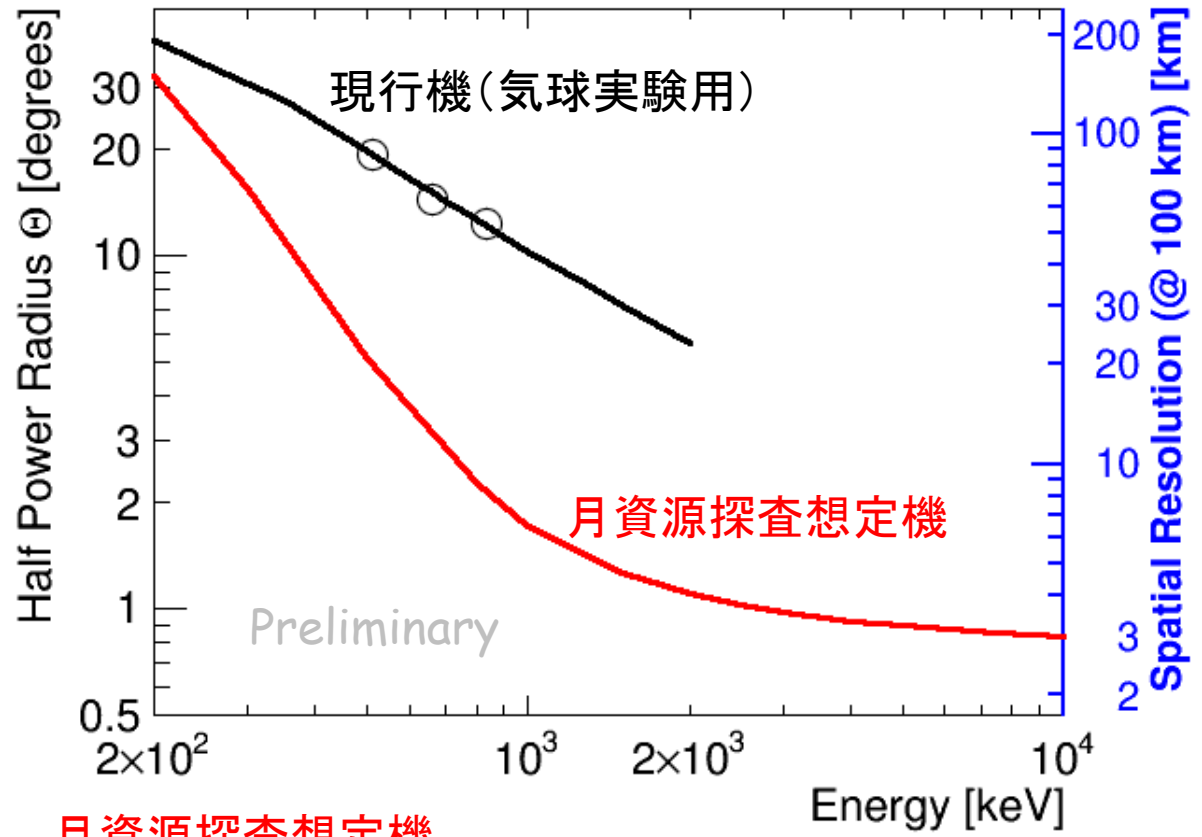
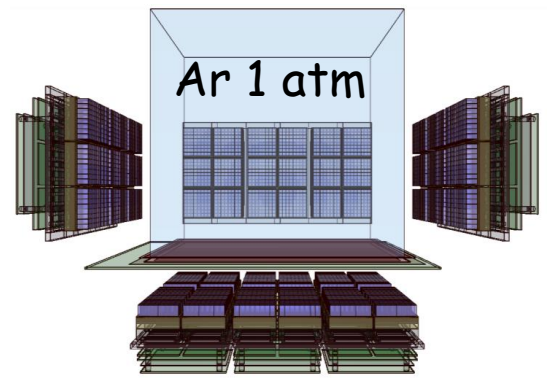
Goyal+, Proc. of SPIE 9905 (2016) 99056G



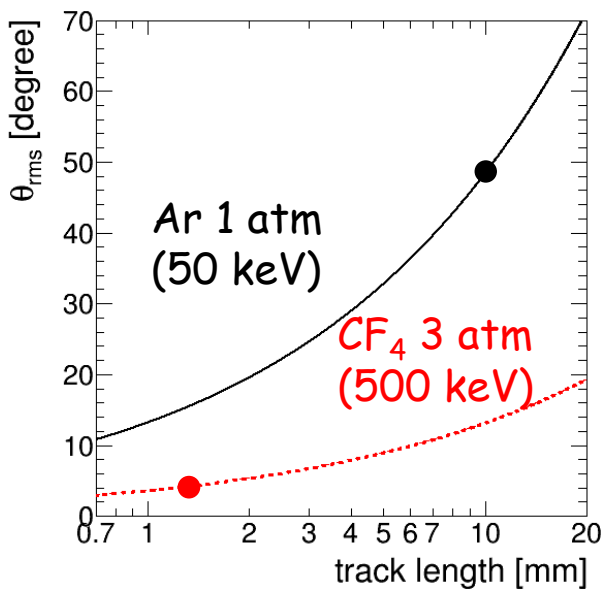
ETCCと大型Ge検出器の有効面積は、
1 MeV 以上にて同等レベル

ETCCの角度分解能

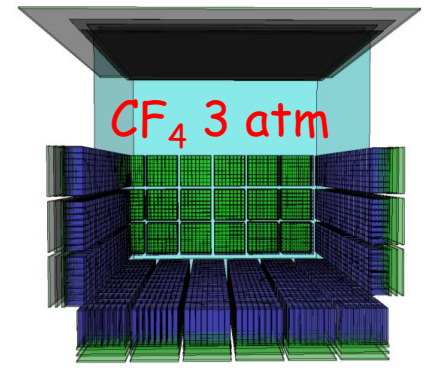
現行機(気球実験用)



ガス中での電子の多重散乱角



月資源探査想定機



- 現行機 → 月資源探査想定機
- 電子の測定エネルギー範囲
 - 飛跡解析の精度向上

実証は必要だが、
現存技術で対応可

エネルギー分解能

K-GRS: 実測値

0.96% (@ 2.615 MeV, FWHM)

Kobayashi+, EPS Lett. 337-338 (2012) 10-16

気球実験機: 実測からの外挿値

5.38% (@ 2.615 MeV, FWHM)

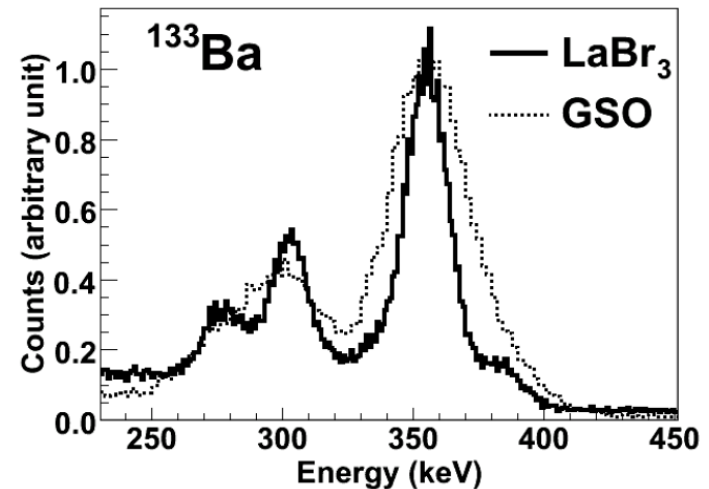
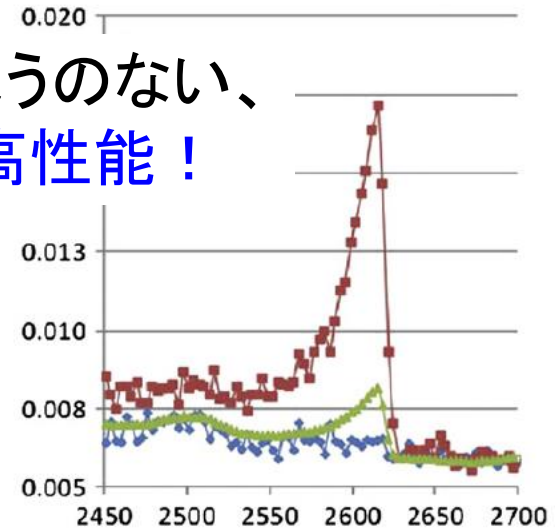
GSOシンチ: 10.7% @ 662 keV $\rightarrow \propto E^{-0.5}$ で推定

月面探査機: 文献からの外挿値

2.01% (@ 2.615 MeV, FWHM)

LaBr₃シンチ: 4.0% @ 662 keV $\rightarrow \propto E^{-0.5}$ で推定

揺るぎようのない、
過去最高性能！



Kurosawa+, IEEE TNS 56 (2009) 3779

エネルギー分解能は、
正直 Ge検出器に及ばない

だが、撮像能力、雑音除去能力が
もたらす**メリットは絶大！**

ETCCとGe検出器の予想スペクトル ¹⁶

※注意、超単純な計算しか入れていません

K-GRS: エネルギー分解能**実測**値
0.96% (@ 2.615 MeV, FWHM)

Kobayashi+, EPS Lett. 337-338 (2012) 10-16

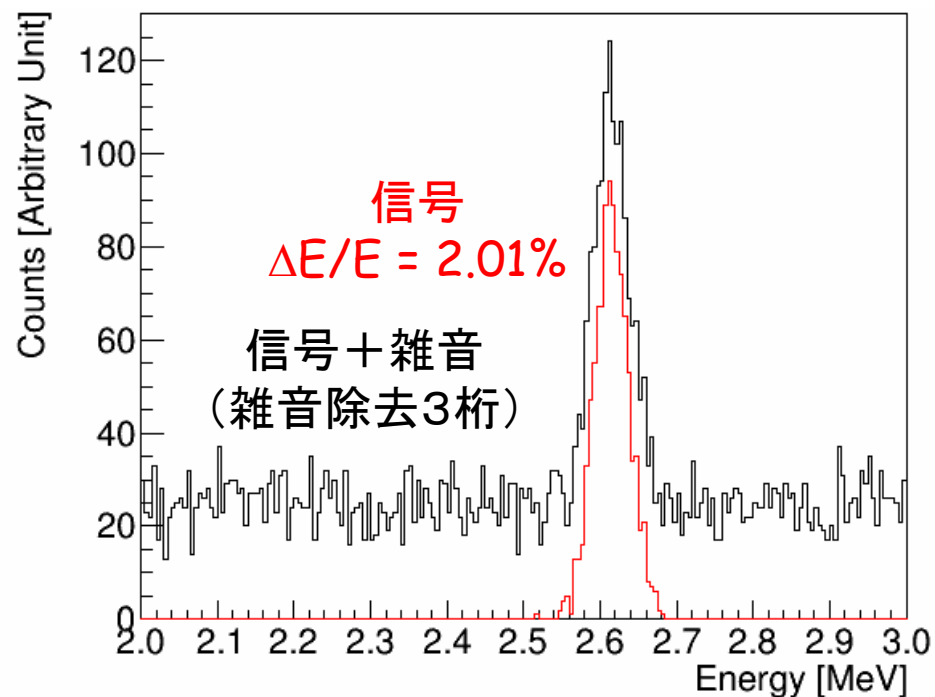
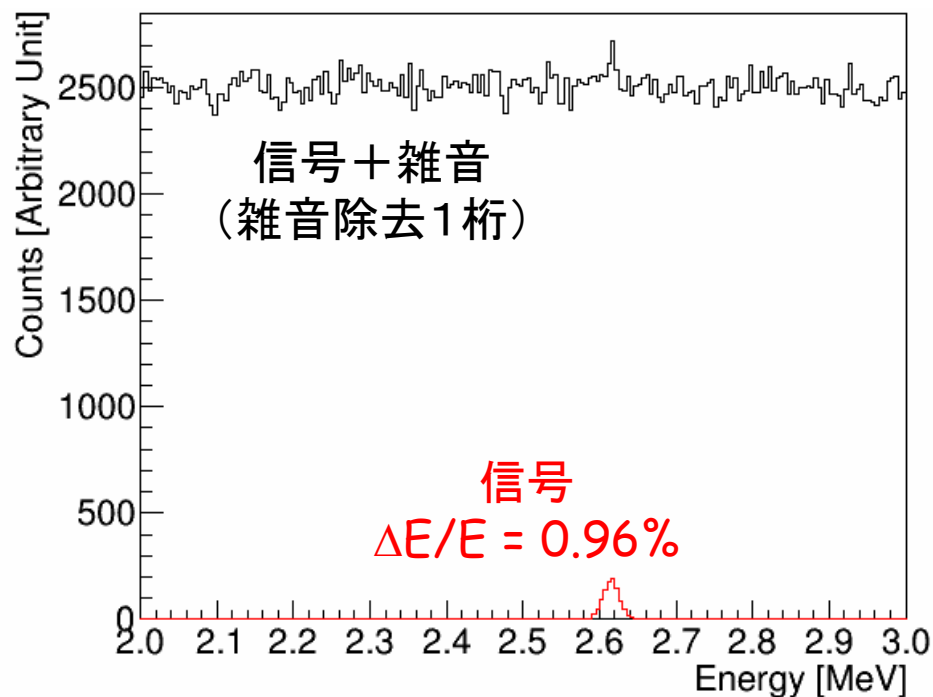
ETCC: エネルギー分解能**予測**値
2.01% (@ 2.615 MeV, FWHM)

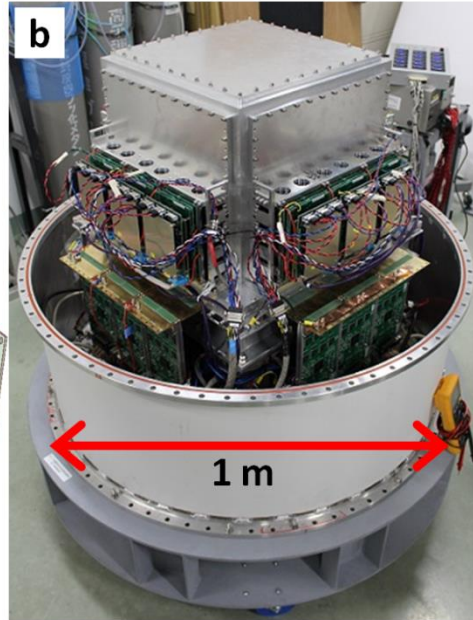
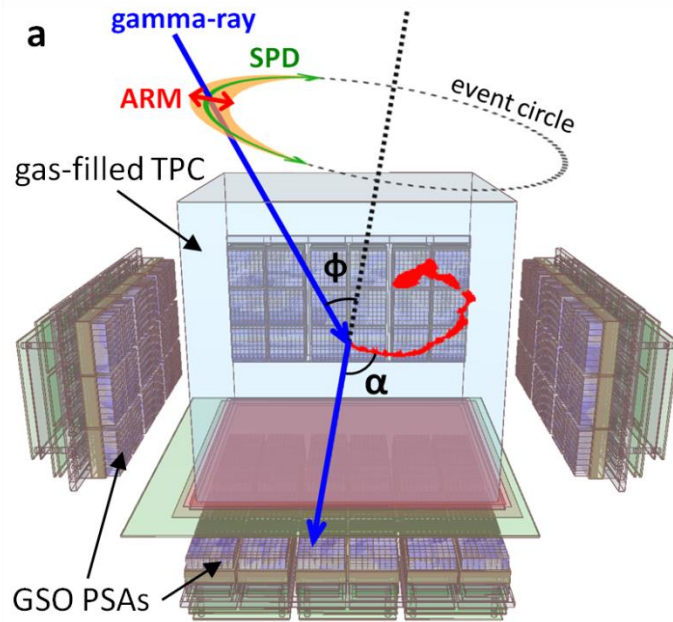
LaBr₃シンチ: 4.0%@662 keV → $\propto E^{-0.5}$ で推定

信号 : 雑音 = 1 : 500

信号 : 雑音 = 1 : 5

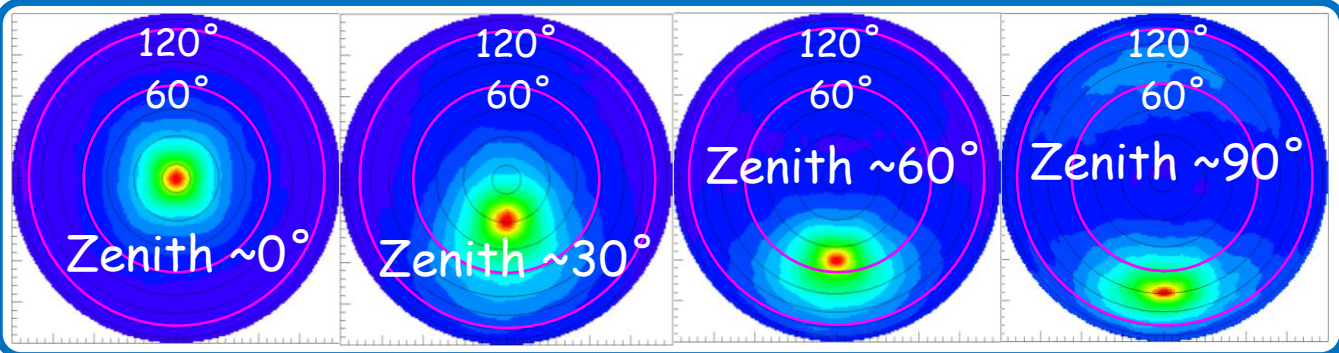
雑音除去能力に2桁の差



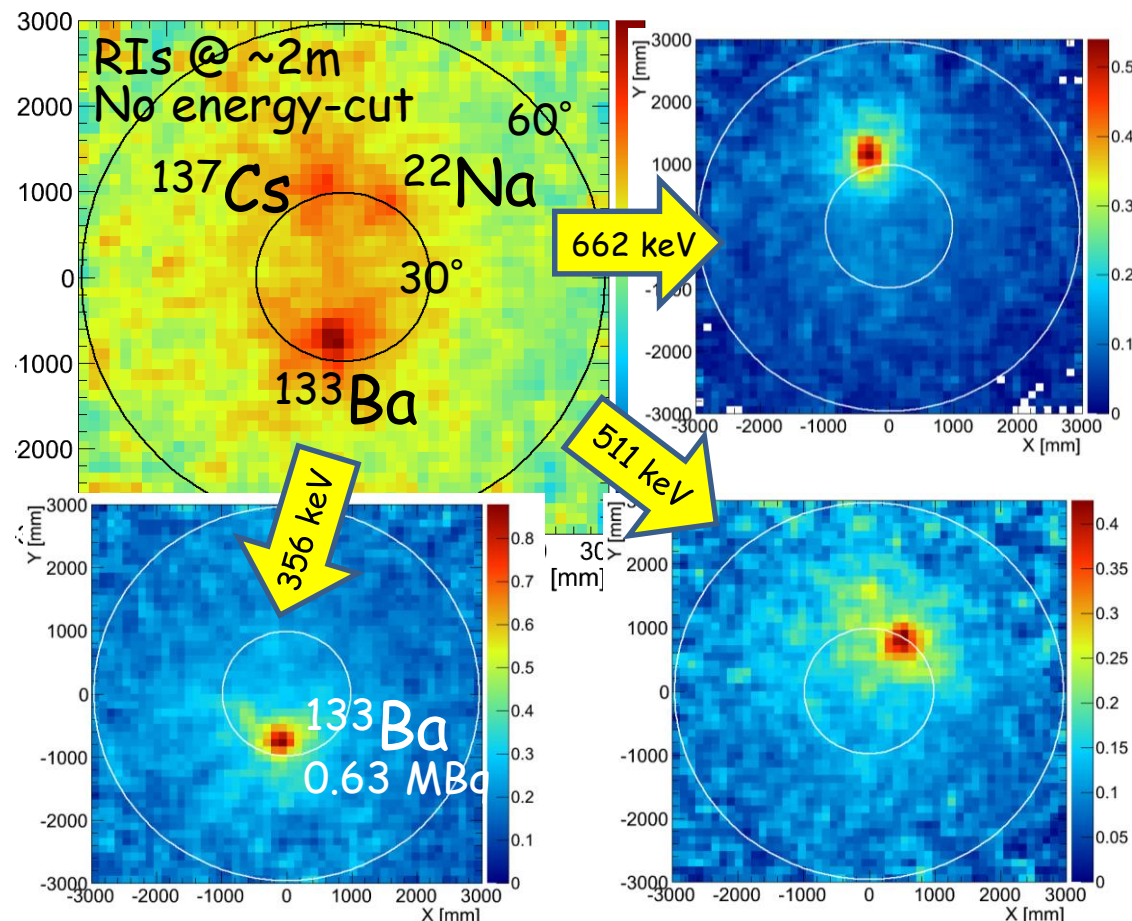
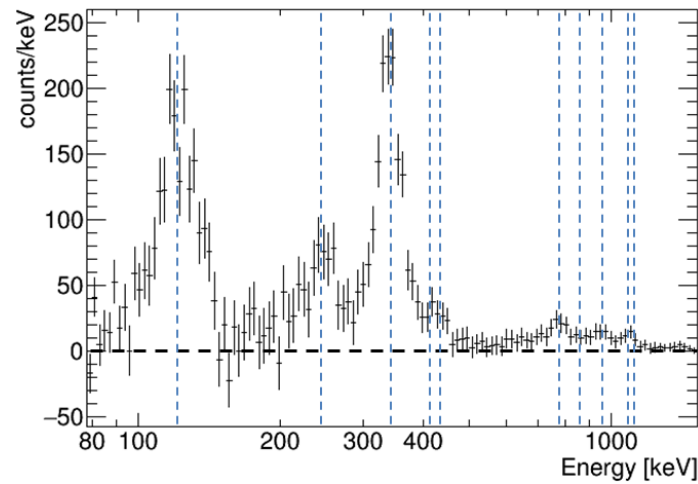
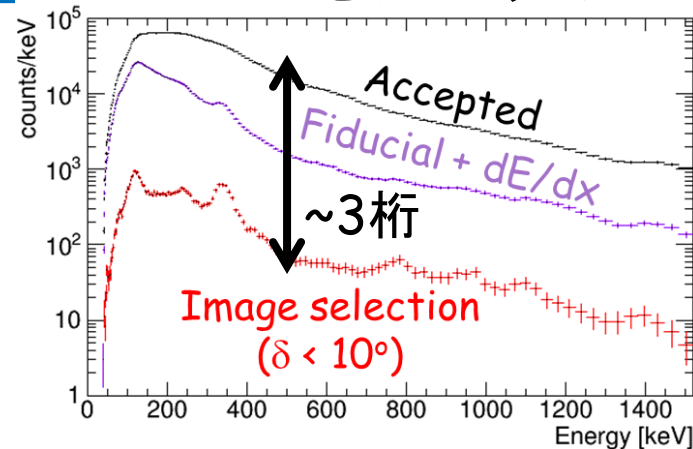


開発済みのETCC実験機による 性能実証例

気球実験機でのガンマ線撮像分光¹⁸

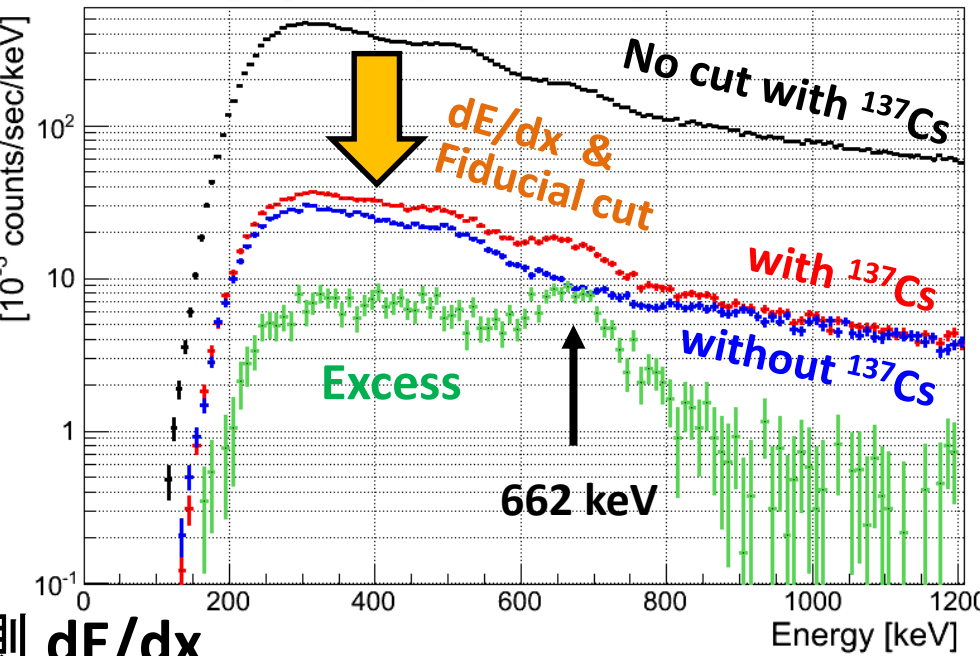
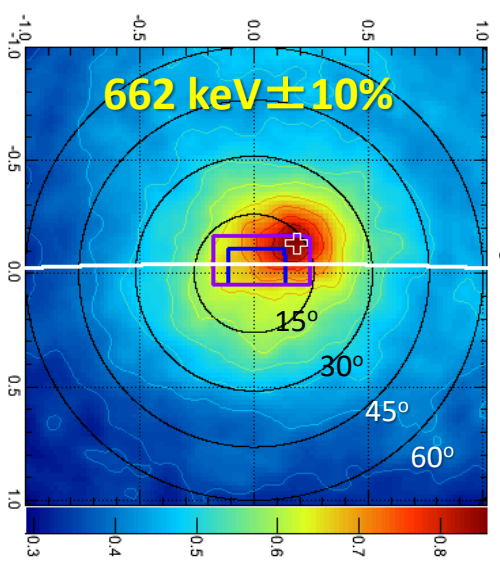
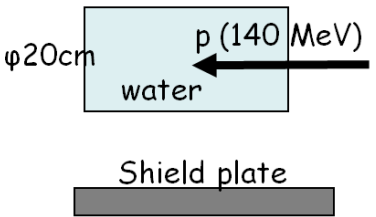


^{152}Eu スペクトル

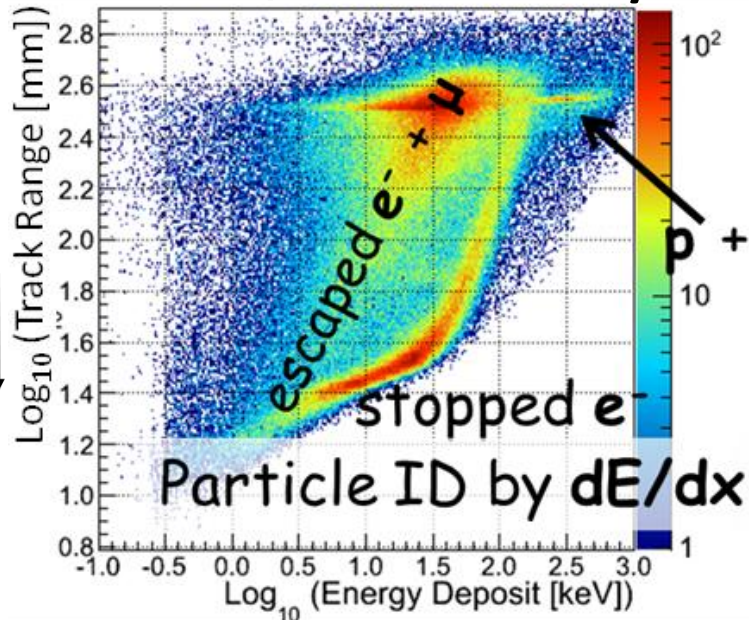
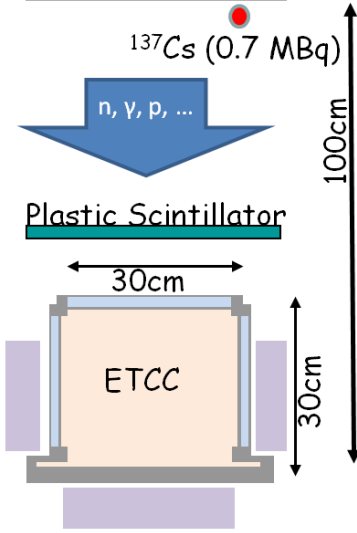


高雑音環境での撮像試験

チェック用線源
(¹³⁷Cs, 662 keV)を
正しい位置で検出



高雑音環境の実測 dE/dx

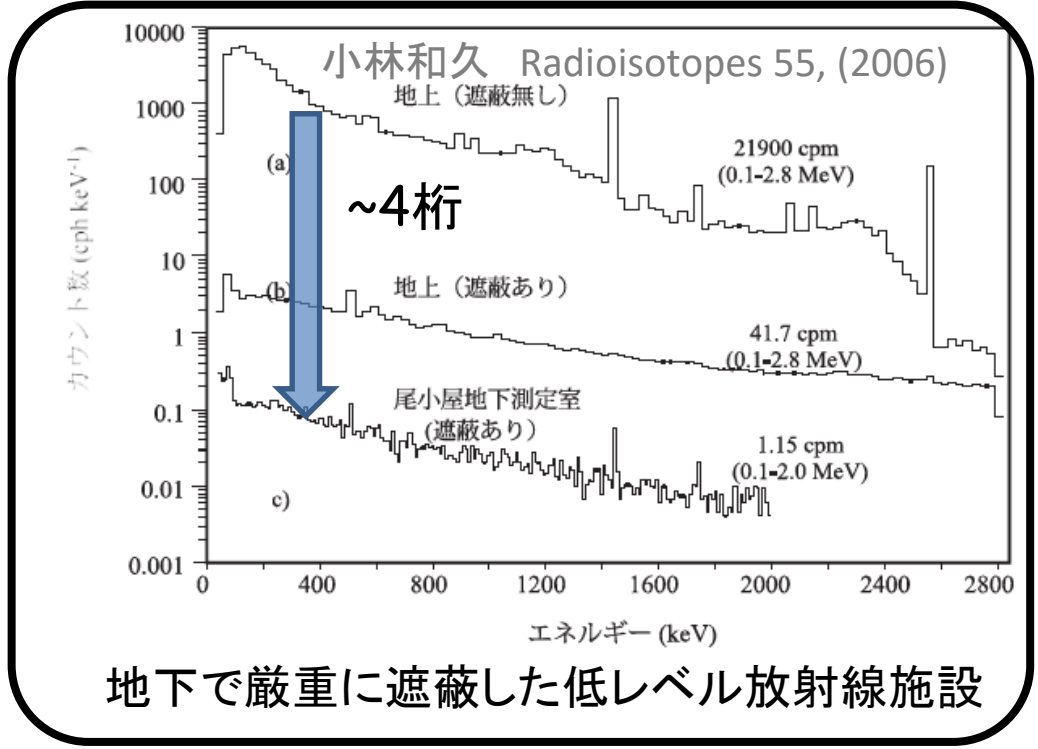
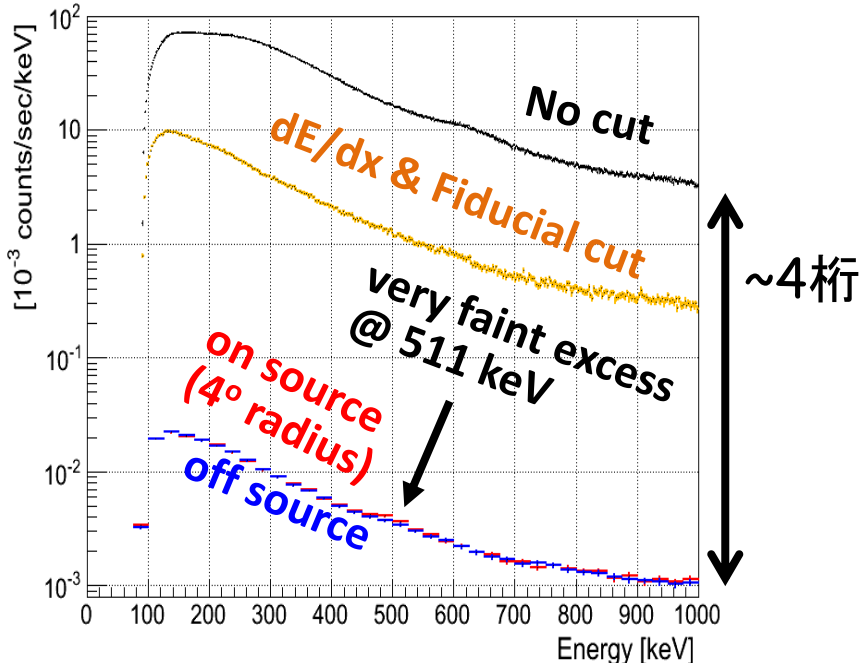
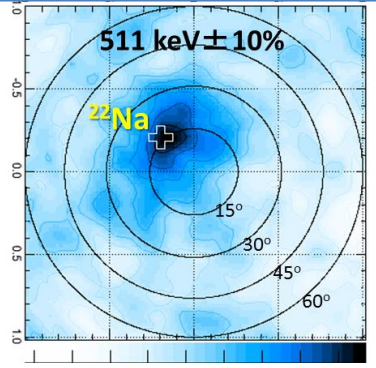


荷電粒子、中性子、
ガンマ線が飛び交う
環境で、撮像に成功！

超微弱線源の撮像試験

鉛2mmで遮蔽した²²Na
(27 kBq 相当)

実験setup: SN = 0.005 ~ 0.01



地下で嚴重に遮蔽した低レベル放射線施設

小型装置での、福島環境測定



論文受理まで
公開お待ち下さい

hot spotの
発見だけでなく、
除染後の環境を
定量的撮像できたのは、
我々のグループのみ

論文準備中

まとめ

■ 月・惑星の資源をガンマ線でリモート探査

➤ Kaguya-GRS:

- ◆ 非撮像のため、130 km分解能の資源マップ
- ◆ 1桁の雑音除去をしたが、装置由来雑音に苦しむ

➤ 有人活動のために、数km単位のマップが必要

■ ETCC: 広視野低雑音MeVガンマ線撮像分光器

➤ 数kmの空間分解能 (@100 km)

➤ ~3桁の雑音除去能力

➤ 2 sr以上の超広視野

➤ 1~3%のエネルギー分解能

➤ K-GRSと同程度の有効面積

● 数km単位の全球マップ

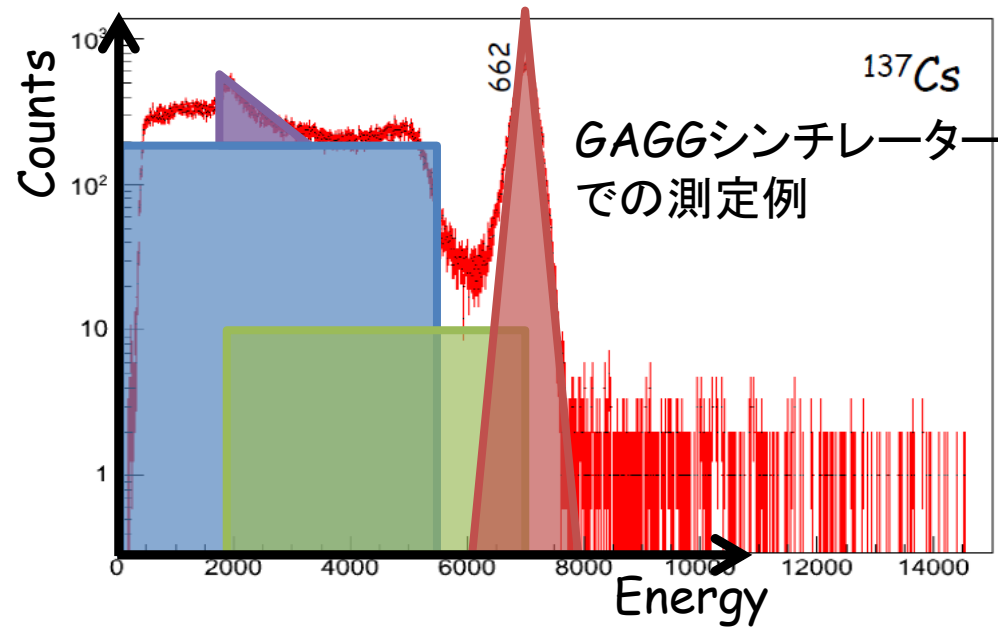
● クレーター内外の差異

● 月面基地候補地の選定

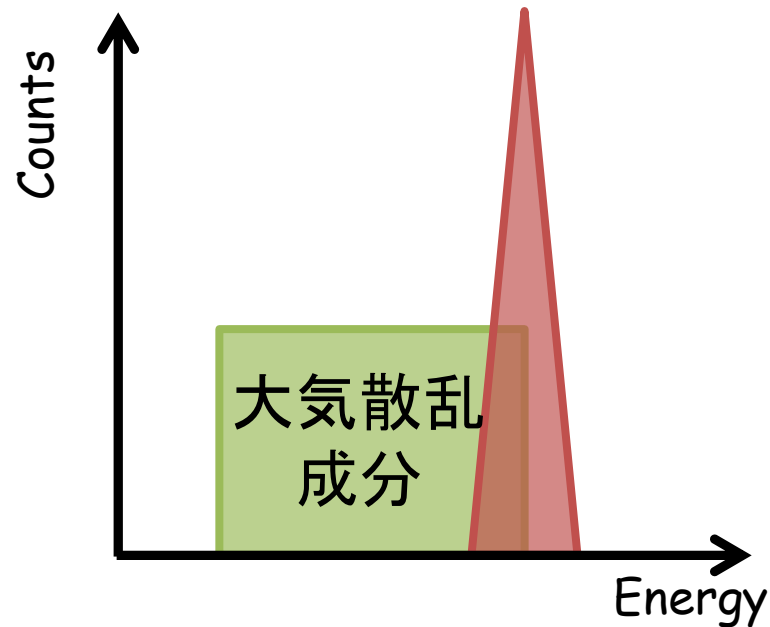
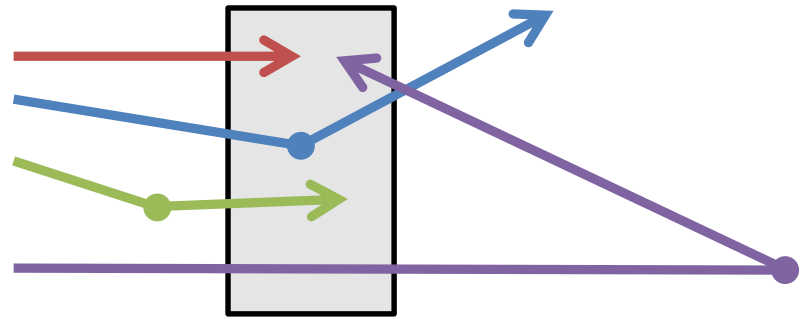
などの議論に発展

■ 京大宇宙ユニットは、月惑星探査に高い関心を持ち始めています

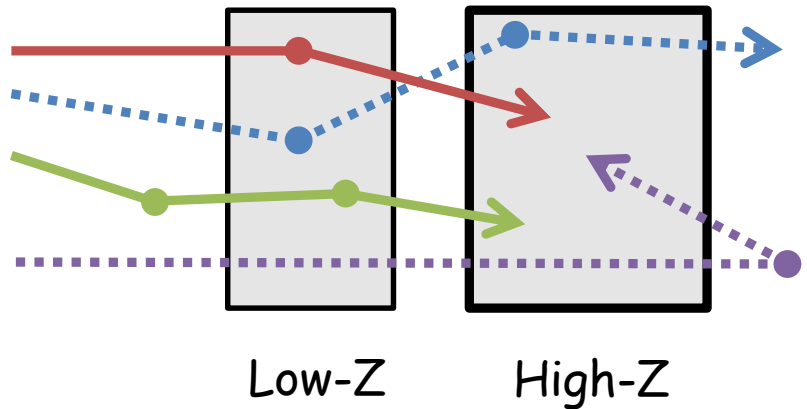
本来あるべき、ガンマ線スペクトル²⁴



一般的なガンマ線検出器



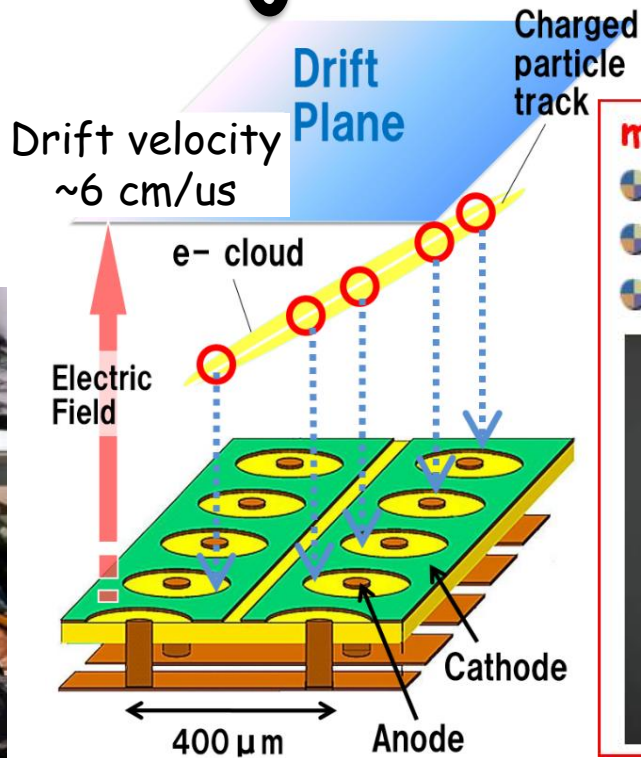
ETCC



もし大気が無い天体なら、
ライン成分のみに！

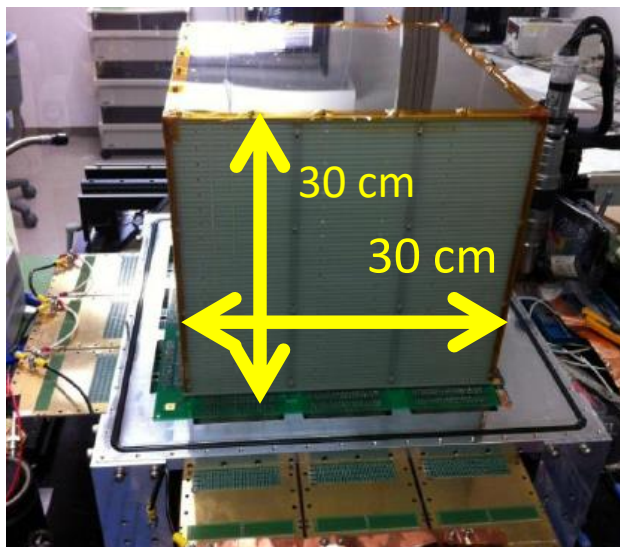
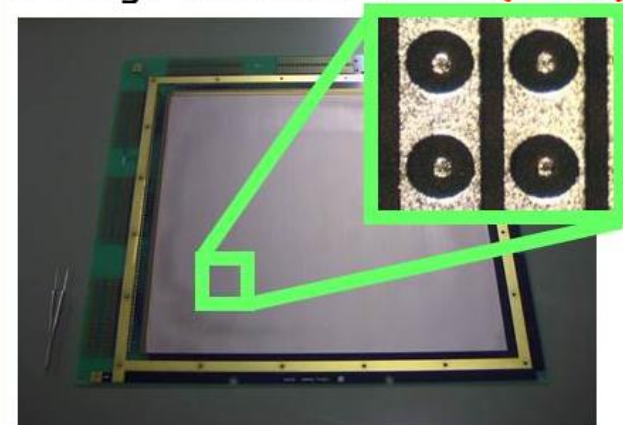
ガス Time Projection Chamber²⁵

二次元位置検出器
+ 時間 (Z軸)
→ 三次元飛跡



micro Pixel Chamber (μ -PIC)

- sliced proportional chambers
- 2D readout ($400 \mu\text{m}$ pitch)
- Large detection area : $(30\text{cm})^2$

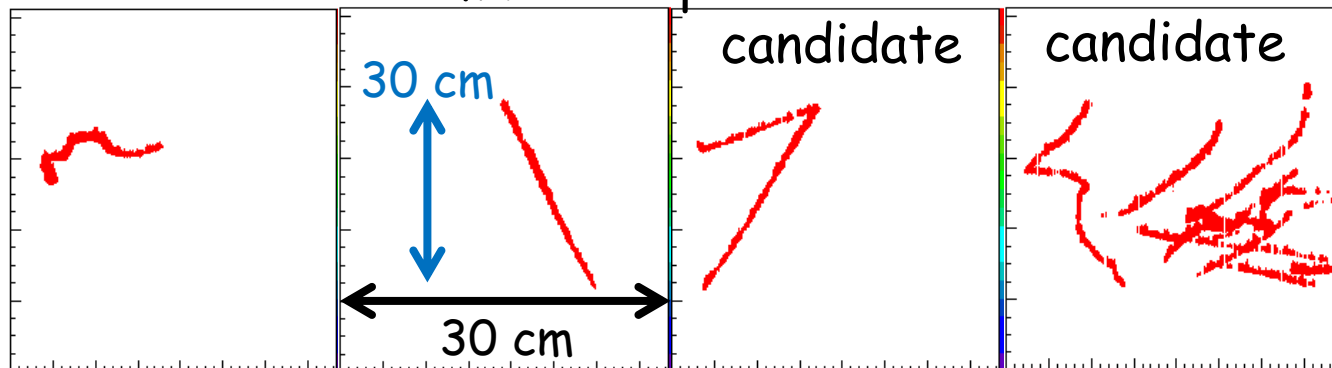


electron

muon

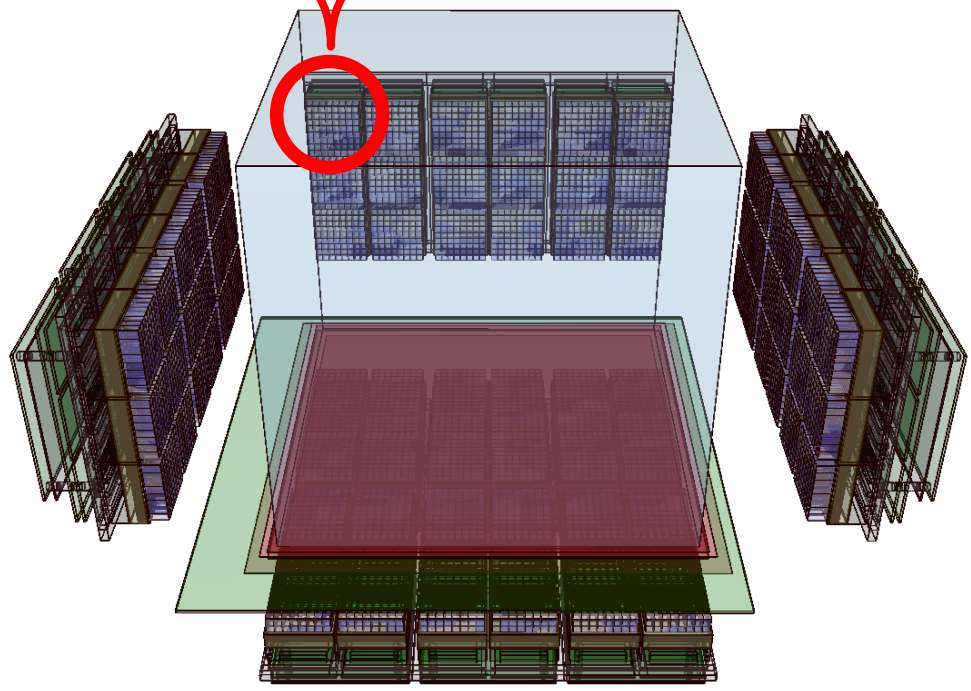
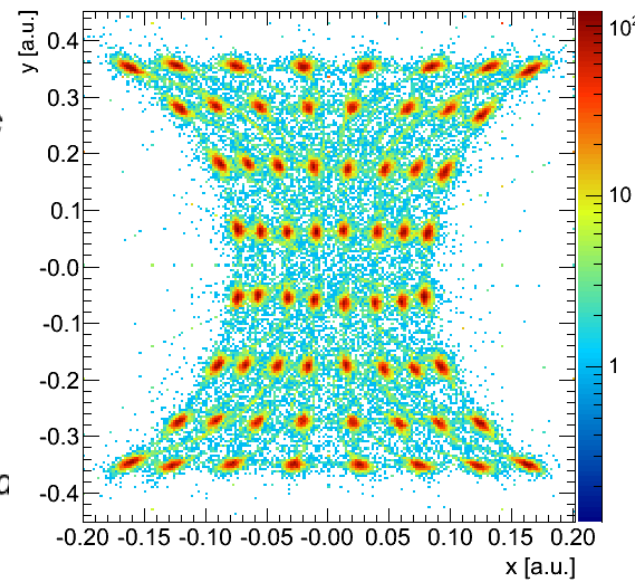
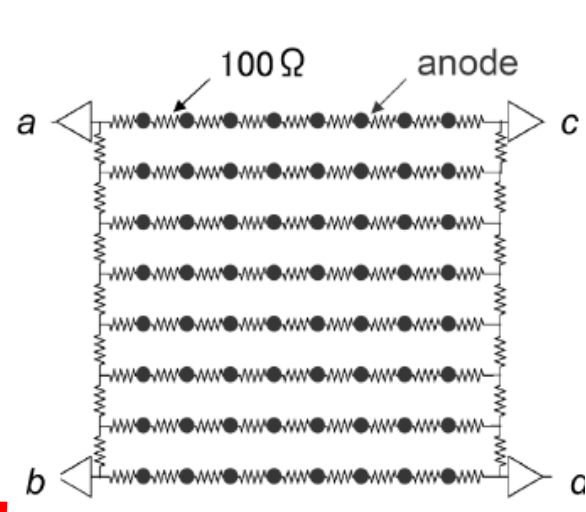
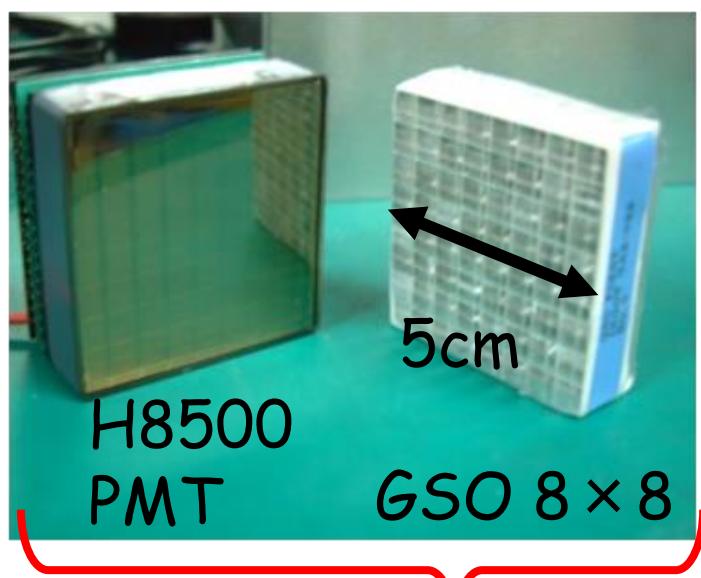
pair-creation candidate

shower candidate



得られる
典型的な事象例

シンチレーションカメラ



システム全体で
GSO結晶を6912個使用

ガスと半導体、有効面積は？

表 E1 : ガス TPC と半導体散乱ターゲットの比較

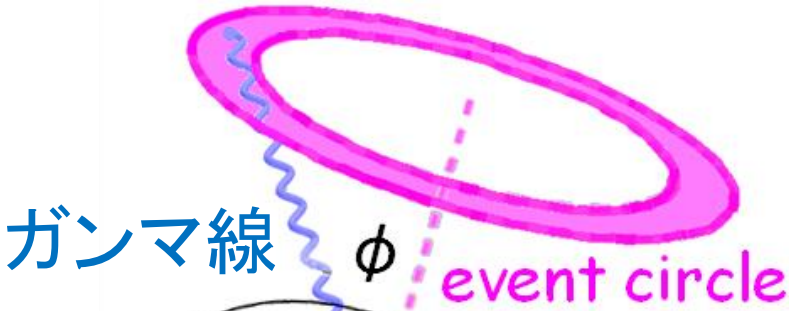
| | ガス TPC | | 半導体 |
|---------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| | Ar 1 atm | CF ₄ 3 atm | Si |
| 電子の数 | 18 | 42 | 14 |
| 密度 | 1.78 mg/cm ³ | 10.9 mg/cm ³ | 2.33 g/cm ³ |
| 厚み | 300 mm | | 0.5 mm × 32 層 |
| 散乱確率 (300 keV) | 0.507 % | 3.26 % | 32.5% (1 層 : 1.22 %) |
| 散乱確率 (600 keV) | 0.386 % | 2.48 % | 25.8 % (1 層 : 0.930 %) |
| 幾何面積 | 30 × 30 cm ² | | 5 × 5 cm ² |
| 散乱有効面積 (300 keV) | 4.56 cm ² | 29.3 cm ² | 8.13 cm ² |
| 散乱有効面積 (600 keV) | 3.47 cm ² | 22.3 cm ² | 6.46 cm ² |

これまでのMeVガンマ線望遠鏡

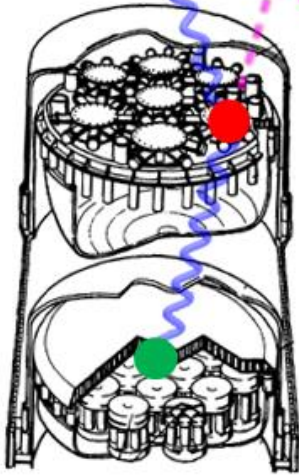
Compton Camera手法: 1角度の測定でなんとか

COMPTEL検出器

CGRO衛星



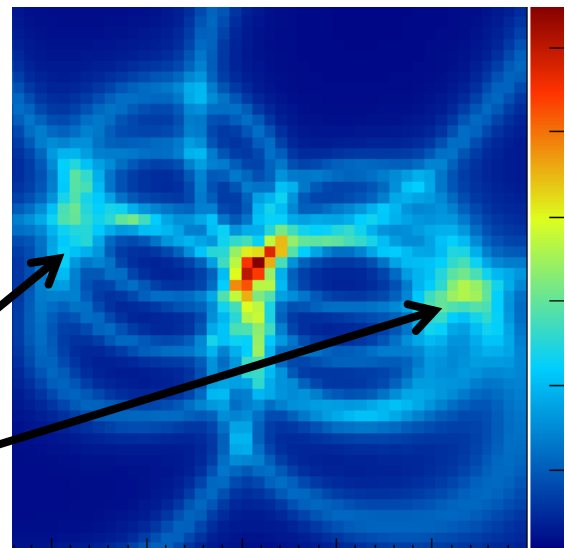
$$\cos \phi = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right)$$



電子
 E_1

ガンマ線
 E_2

円環の重ね合わせでのイメージング



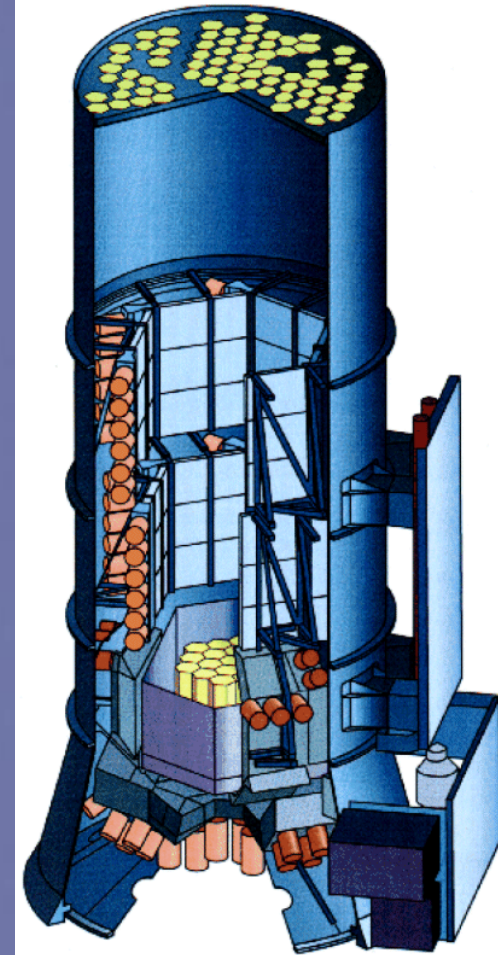
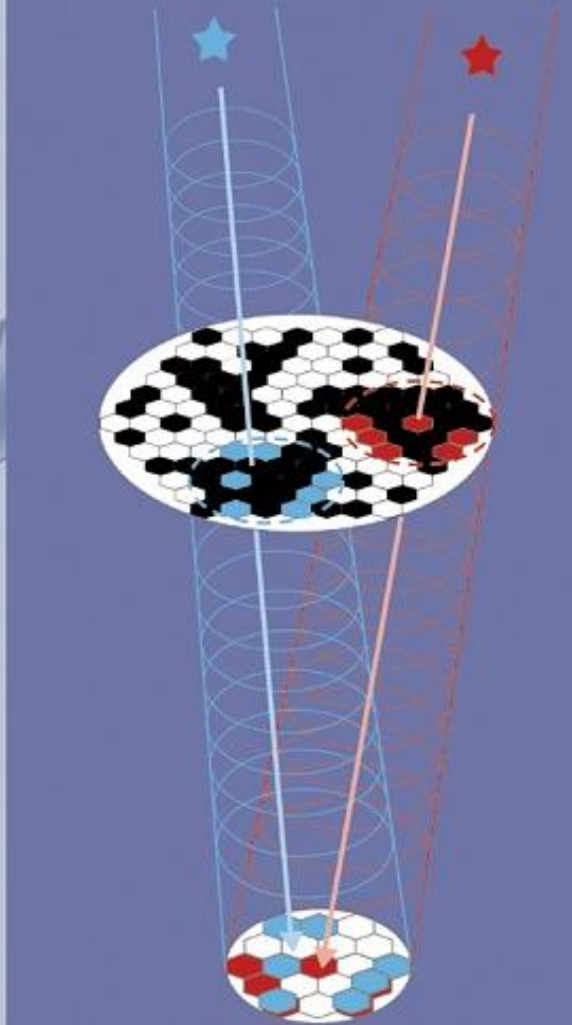
偽信号

光子毎には 1個の角度情報: 擬似イメージング

これまでのMeVガンマ線望遠鏡 29

Coded Mask手法: 影のパターンから方向推測

INTEGRAL衛星

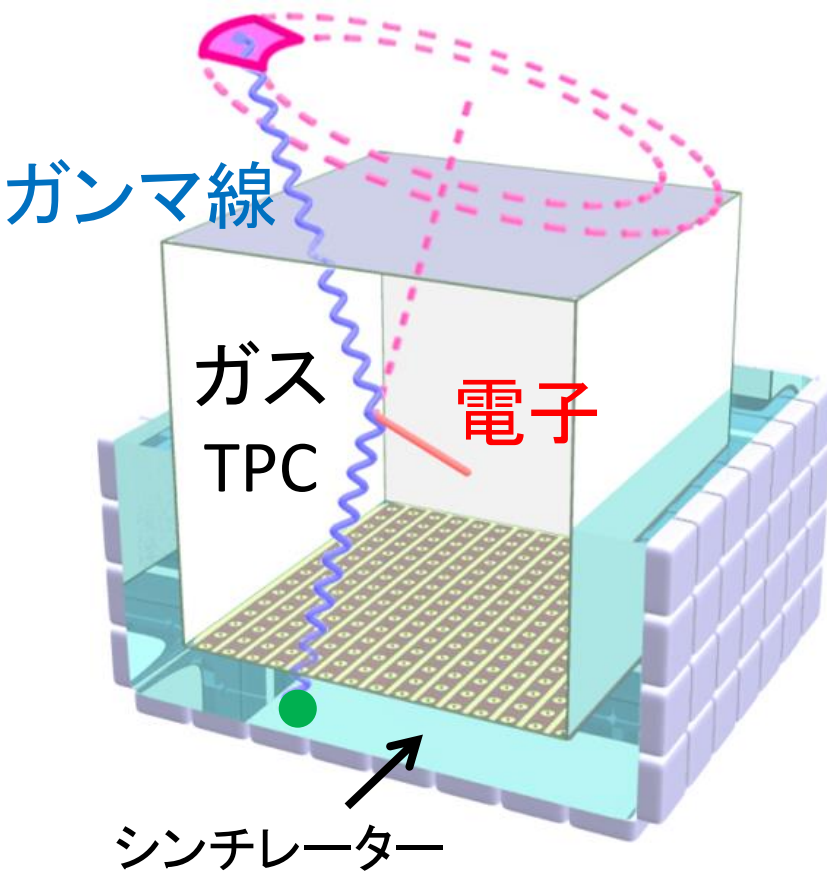


光子毎には 0個の角度情報: 擬似イメージング

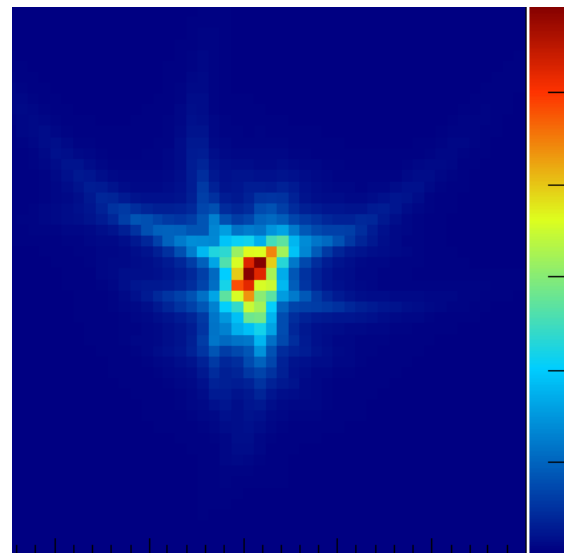
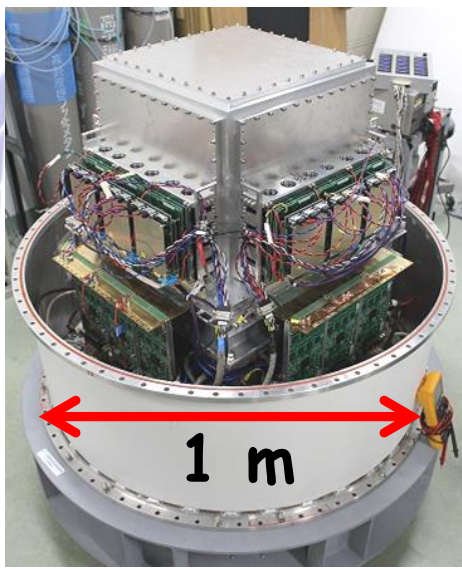
次世代のMeVガンマ線望遠鏡

Electron-Tracking Compton Camera (ETCC)

逆転の発想：(一見)スカスカでも、しっかり**2角度**を測定



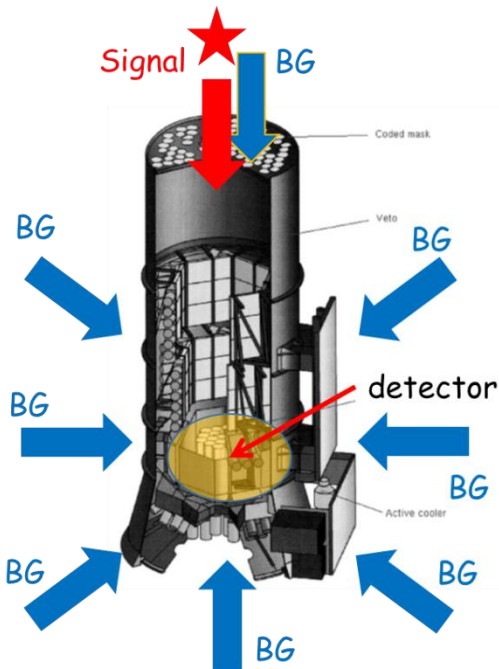
ガスを散乱体とすることで、
 電子がある程度は走れる。
 → 反跳方向を測定可能



光子毎には **2個**の角度情報：**真のイメージング**

真のイメージングと雑音除去

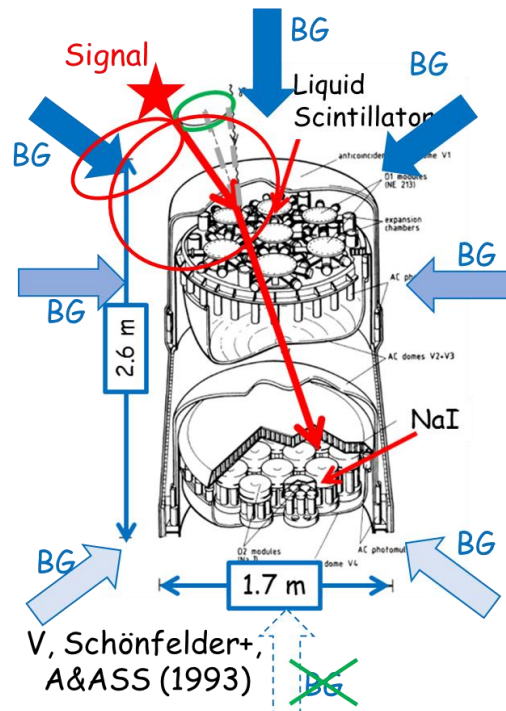
INTEGRAL (Coded Mask)



F. Sánchez+, NIM A (2003)

光子毎には
0方向角情報

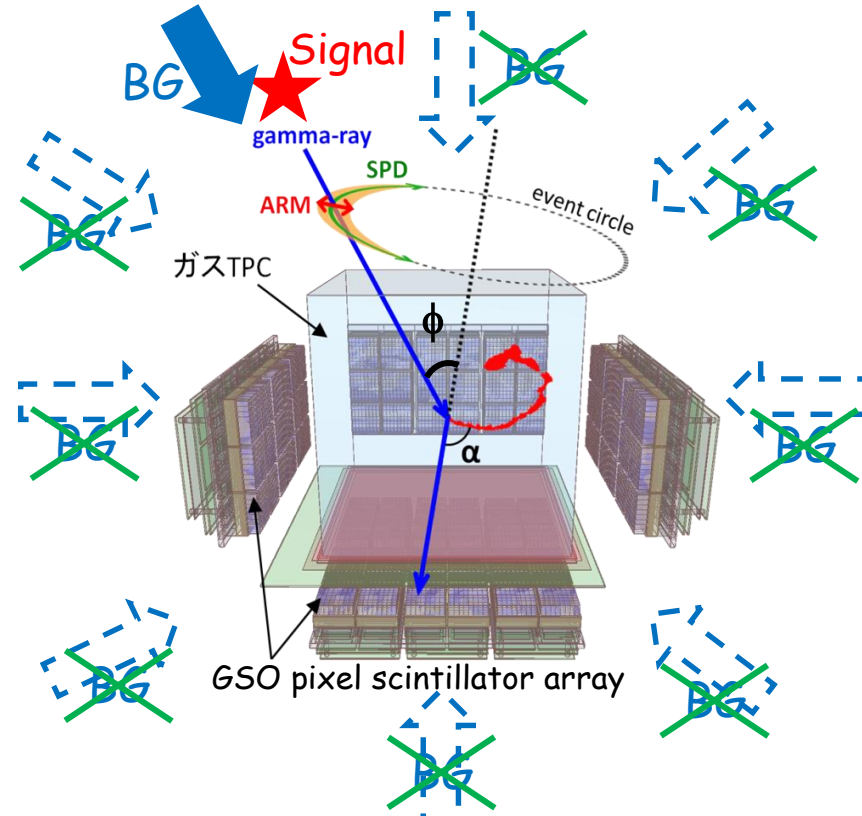
COMPTEL (Compton Camera)



V, Schönfelder+,
A&ASS (1993)

光子毎に
1方向角情報

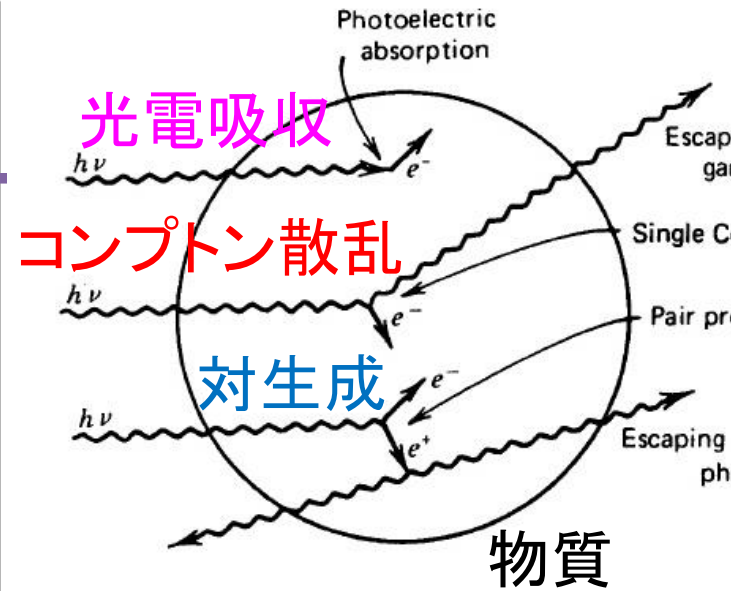
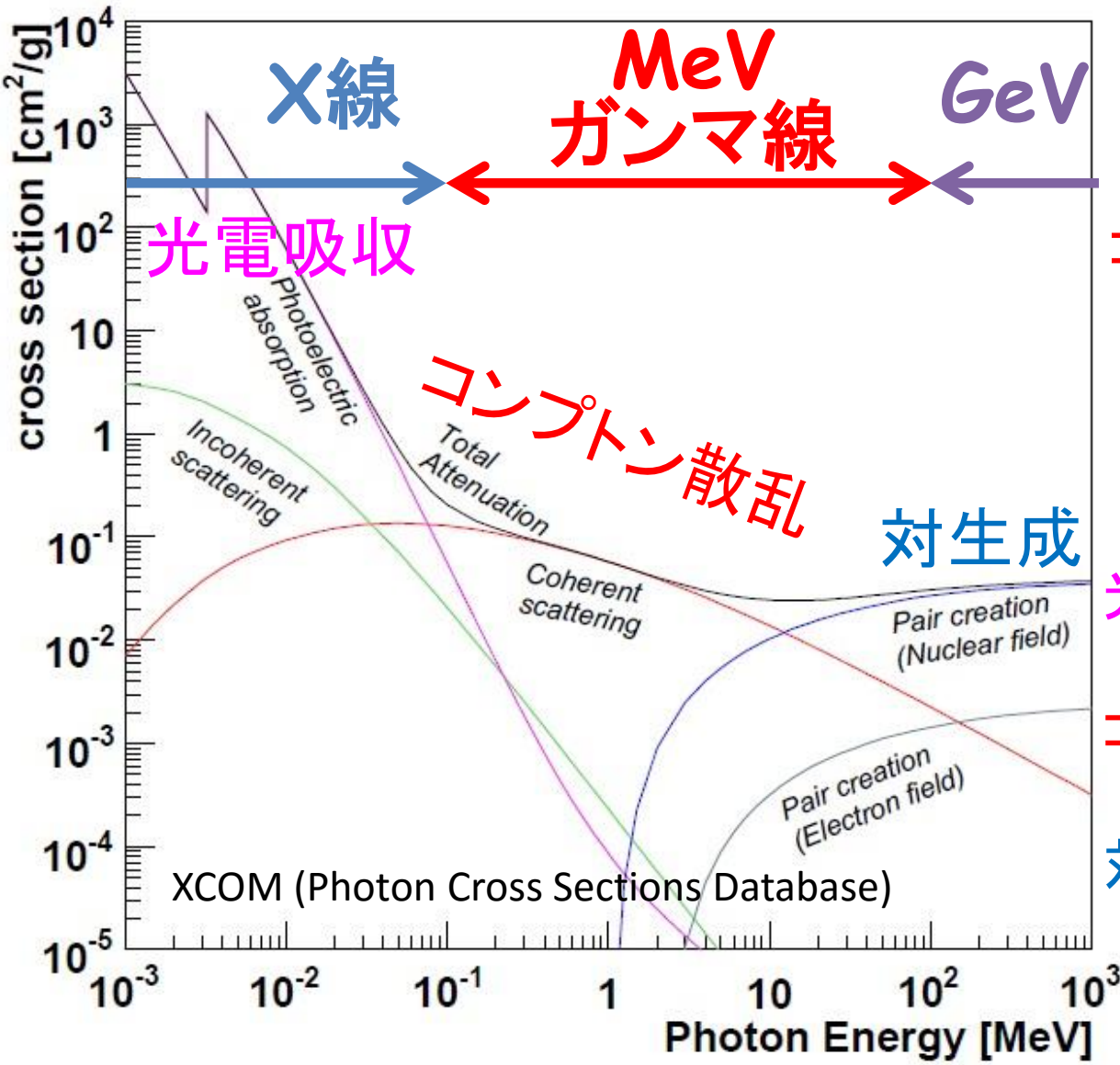
ETCC Electron-Tracking Compton Camera



光子毎に2方向角情報
真のイメージング

擬似イメージング

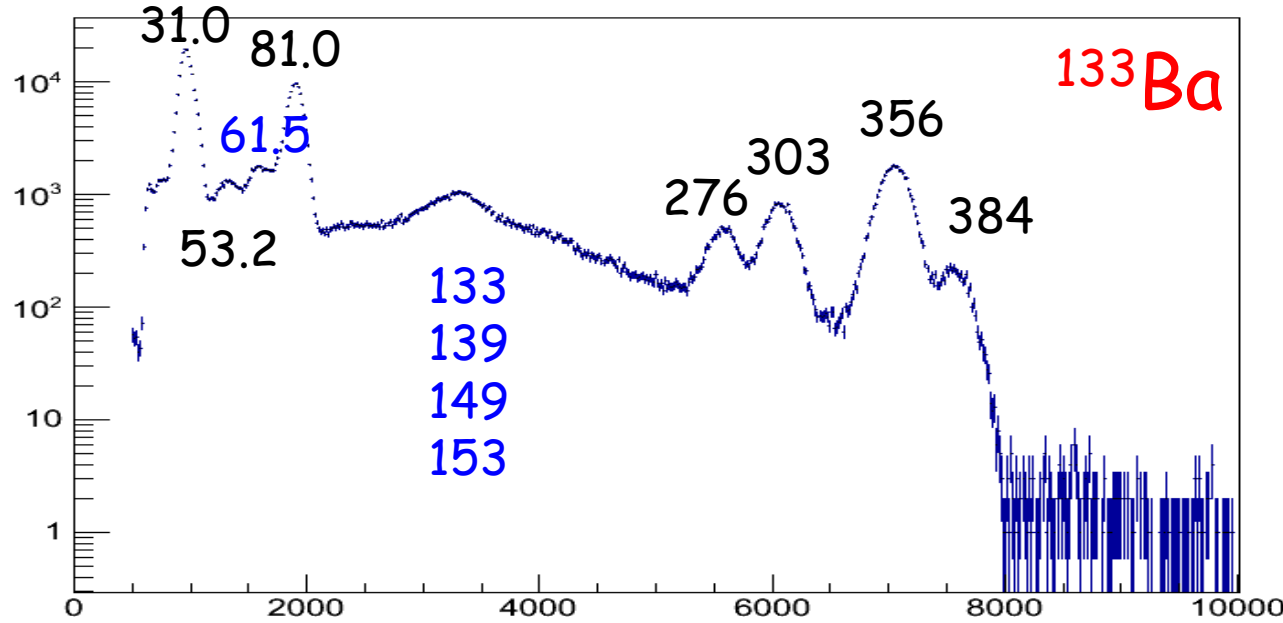
ガンマ線と物質の相互作用



- 光電吸収
ガンマ線 → 電子
- コンプトン散乱
ガンマ線 → 電子 + ガンマ線
- 対生成
ガンマ線 → 電子 + 陽電子

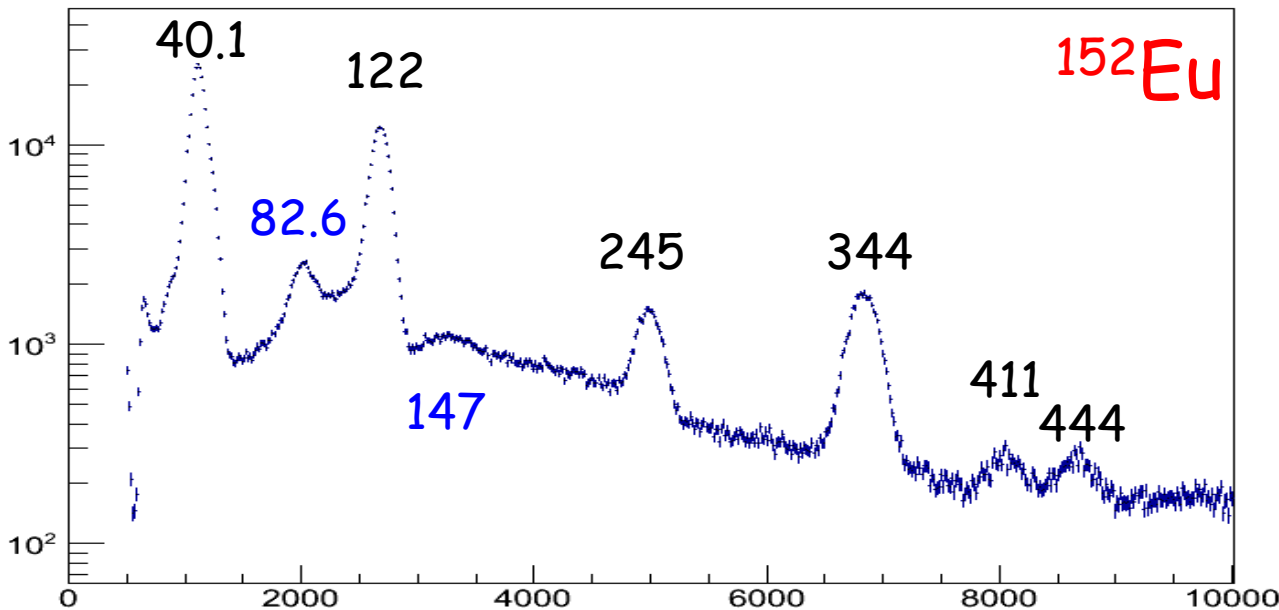
0.1 ~ 10 MeV は **コンプトン散乱** が支配的、難しい！

参考スペクトル: LaBr_3 シンチ



黒: ラインガンマ線
青: 後方散乱ピーク

メモ
4.0% @662 keVなら、



2.7% @1461 keV (K-40)
2.5% @1764 keV (U-238)
2.0% @2615 keV (Th-232)
1.7% @3737 keV (Ca-40)
1.5% @4439 keV (C-12)
1.3% @6.130 keV (O-16)

3.3% @1.0 MeV
2.3% @2.0 MeV

参考資料

資料4

国際宇宙探査における 月・惑星探査の動向について

平成26年5月9日(金)

(独)宇宙航空研究開発機構

参考資料

1. 国際宇宙探査ロードマップにおける位置づけ(2/2)

- 国際宇宙探査ロードマップにおける一連の月・小惑星・火星の無人探査ミッションは、将来の有人探査の準備として、有人探査を安全で効果的に行うための技術的・科学的知見を獲得し、後に続く有人探査の投資に対する最大限の成果を確保するために不可欠なものとして位置づけられている。
- 有人探査に先行する無人探査ミッションにより、科学の進展に加えて以下が可能となる。
 - 有人探査に必要な技術の実証：軌道間推進、エネルギー、有人支援ロボティクス、その場資源利用技術(ISRU: In-Situ Resource Utilization)、その他の重要システムの技術実証
 - 有人探査のための情報収集：将来の着陸地点の選定や有人探査に伴うリスクの把握・低減のために必要な環境データ(資源分布、放射線、ダスト、大気成分等)の取得
- 有人探査に貢献する最近の主な成果
 - ① ルナ・リコネサンス・オービタ(LRO)/米国、かぐや/日本
リモートセンシングデータにより、月面の詳細な地形データや利用可能な資源分布など、有人探査に向けた月環境データを取得。
 - ② はやぶさ/日本
小惑星イトカワの特性を解明すると共に、小惑星サンプルを用いた網羅的な小惑星の分析を可能にし、有人探査での環境条件の設定に寄与した。
 - ③ キュリオシティ(MSL)/米国
火星有人探査で必要な突入・降下計画立案に向けた火星の大気特性データ、および有人滞在に向けた火星の表面の宇宙放射線の最初の測定データを獲得。

各国が無人探査ミッションで解決を目指す課題

- 将来の有人探査の準備として、将来の着陸地点の選定や、新システムの設計、有人探査に伴うリスクの低減等に用いる知見・技術の獲得の為に、各目的地毎に無人探査を計画している。

| | 主な関心 | 目的 | 課題 | 対応するミッション | 日本の優位性 |
|-------------|-----------------|---|---|--|--------|
| 月 (極域) | その場資源利用 (ISRU*) | <ul style="list-style-type: none"> • 現地の資源を有人ミッションのためにその場で利用 | <ul style="list-style-type: none"> • 水、氷の確認と存在量 • 月の砂(レゴリス)からのに含まれる酸素等の抽出 • 氷の存在が予測される極域の永久影クレータの傍でかつ日照条件の良い地点へのピンポイント着陸 | A-4.RPM(米) A-3.Luna-27(露・欧) <u>A-5.月着陸ミッション(日)</u> <u>(検討中)</u> | ○ |
| 月 (中低緯度) | 環境調査技術実証 | <ul style="list-style-type: none"> • 有人活動のための月表面の環境調査 • 着陸技術の実証 | <ul style="list-style-type: none"> • 月地表面の物理特性、放射線、ダスト環境等の調査 • 着陸技術の実証(極域と比較して容易) | A-1.LADEE(米) A-2.嫦娥3号(中) A-3.Luna-25(露・欧) A-3.Luna-26(露・欧) | △ |
| 小惑星 | 有人探査目標の特定 | <ul style="list-style-type: none"> • 有人探査の対象となる小惑星の特定 | <ul style="list-style-type: none"> • 小惑星の物理特性、組成等の調査(サンプルリターンによる) | <u>B-1.はやぶさ2(日)</u> B-2.OSIRIS-REx(米) B-3.ARM(米) | ○ |
| 火星 | 大気モデル | <ul style="list-style-type: none"> • 火星着陸のための大気モデル構築 | <ul style="list-style-type: none"> • 火星大気密度、圧力、温度、風向等の調査 | C-1.MSL(米) C-2.マンガルヤーン(印) C-3.ExoMars(欧・露) | △ |

ISRU: In-Situ Resource Utilization