

2017年1月17日(火)

第31回 宇宙環境利用シンポジウム



# 惑星居住地選定のための 核ガンマ線イメージングによる 資源探査

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<sup>2</sup>

## 私の普段の生息地

天文学会

物理学会

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4名)

- 土井隆雄(宇宙飛行士)
- 中宮賢樹(軌道工学)
- 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!!

宇宙資源探査は、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

→ **惑星資源の探査**に使えないか？

# 岩石天体からの核ガンマ線

原子核固有のエネルギーのガンマ線



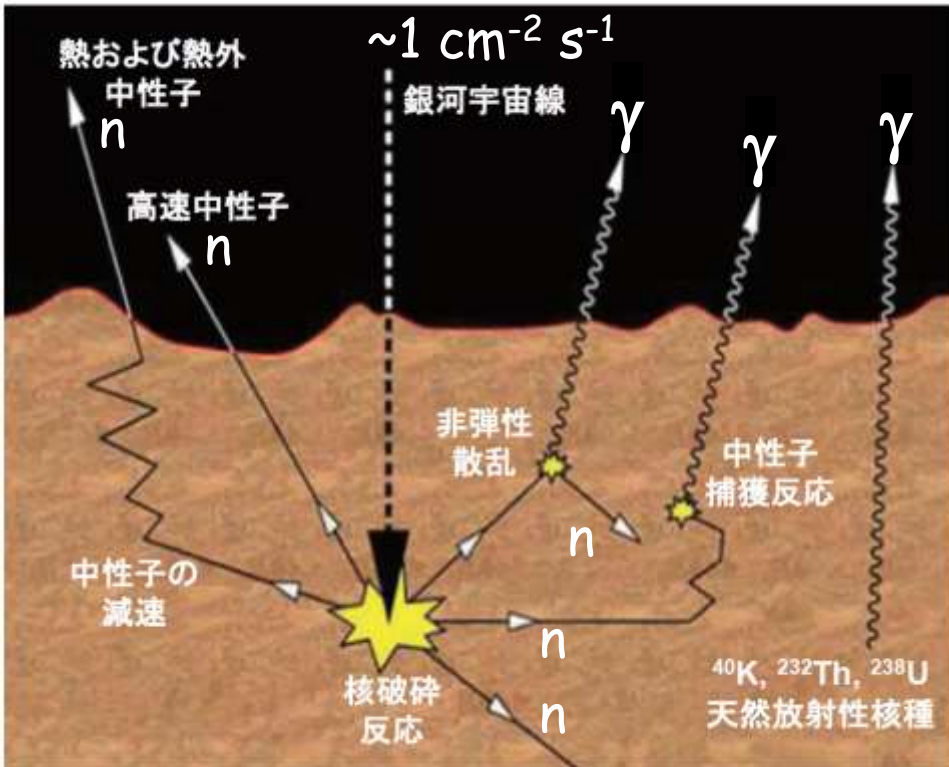
## 天体表層の元素組成分布

### 科学面

- 地殻形成の過程・環境
- 地殻形成後の熱的活動
- 天体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

- 惑星資源の探査・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

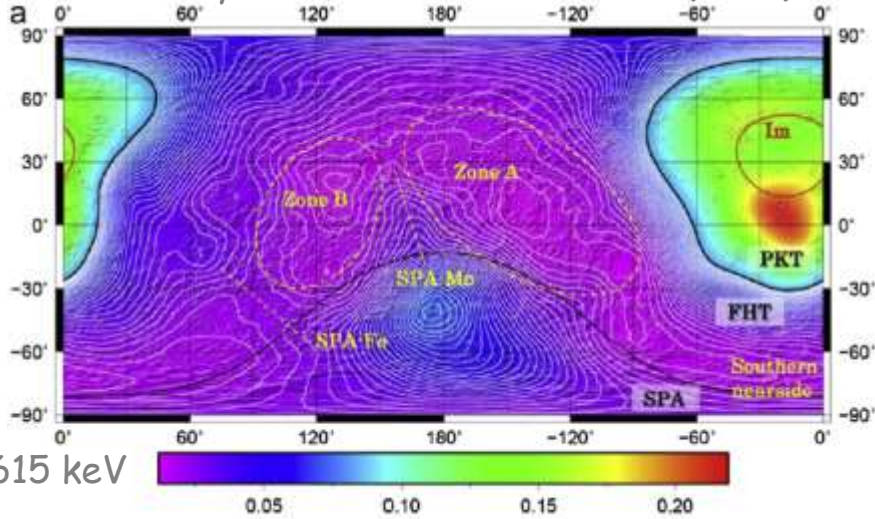
かぐや	X線	ガンマ線
測定対象	Mg, Al, Si, (Ca, Ti, Fe)	(H), O, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Fe, Th, U
空間分解能	~20 km @100 km	~130 km @100 km
探査深さ	< $10^{-4} \sim 10^{-2}$ g/cm <sup>2</sup> (数 μm)	< 4~40 g/cm <sup>2</sup> (数十 cm)
日陰(夜・極域)	探査×	探査○

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

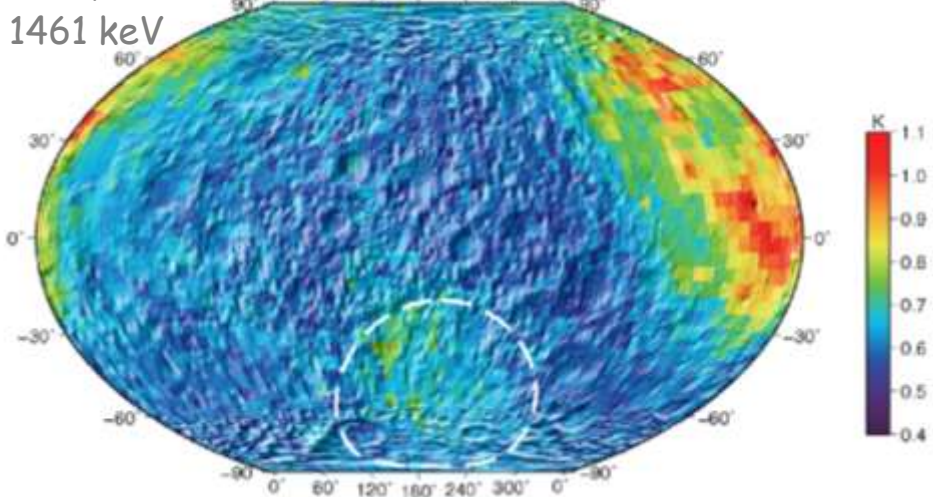


# かぐや搭載ガンマ線分光器K-GRSの 代表的成果：元素マップ

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

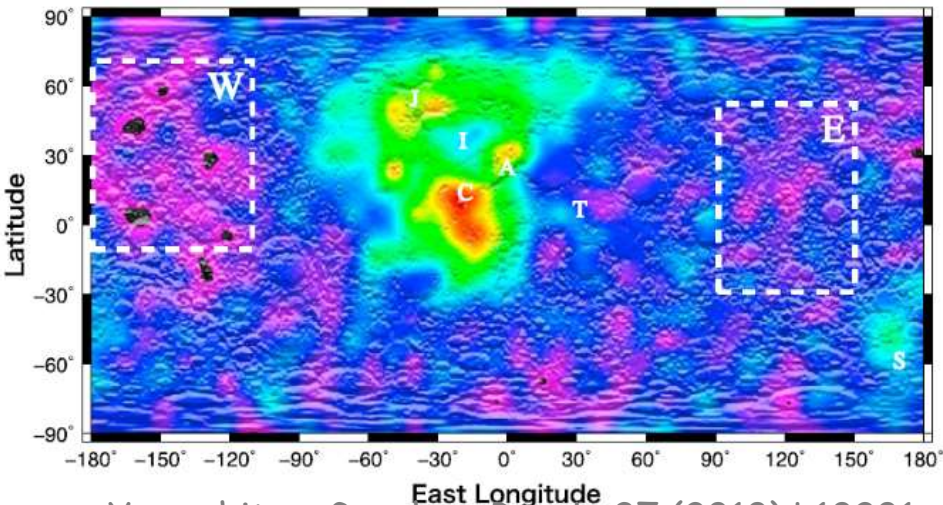


$^{40}\text{K}$  Kim+, *Adv. Space Res.* 50 (2012) 1629



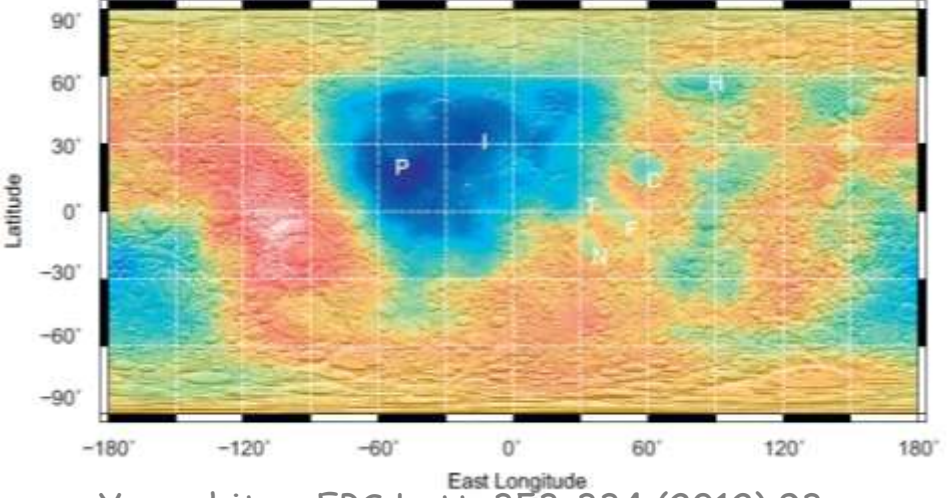
$^{238}\text{U}$  1764 keV

0.0 0.3 0.6 0.9 1.2 1.5 1.8 2.1 U ppm



$^{40}\text{Ca}$  (CaO) 3737 keV

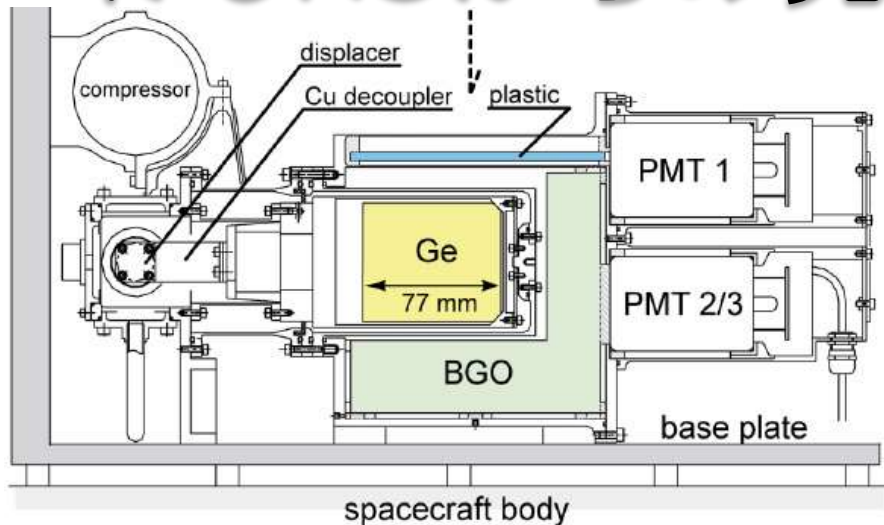
8 10 13 15 17 20 wt% (oxide)



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

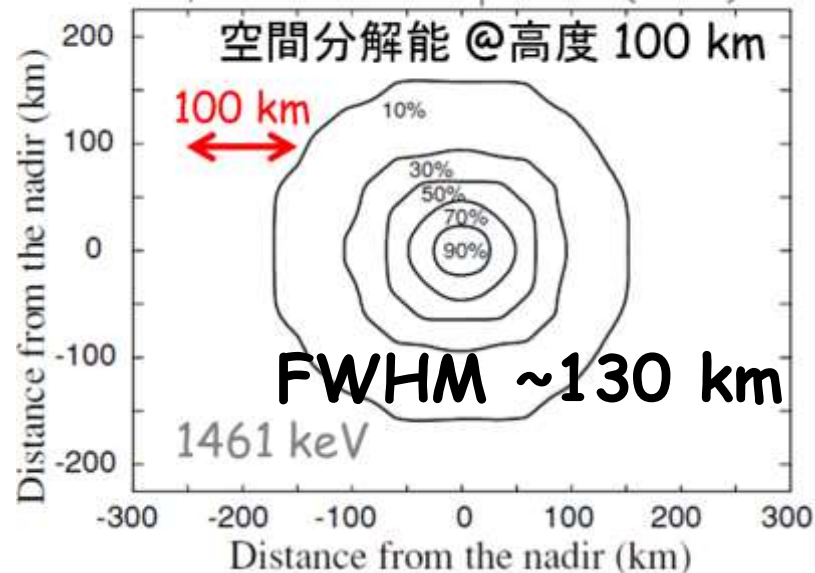


## K-GRS の長所

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

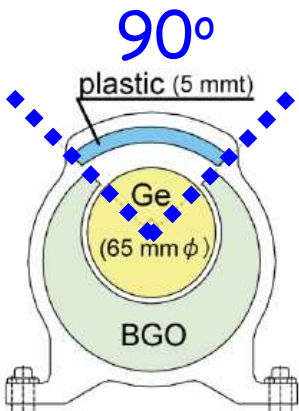
Hasebe+, Earth Planets Space 60 (2008) 60



## K-GRS の弱点

開口角  $90^\circ$  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

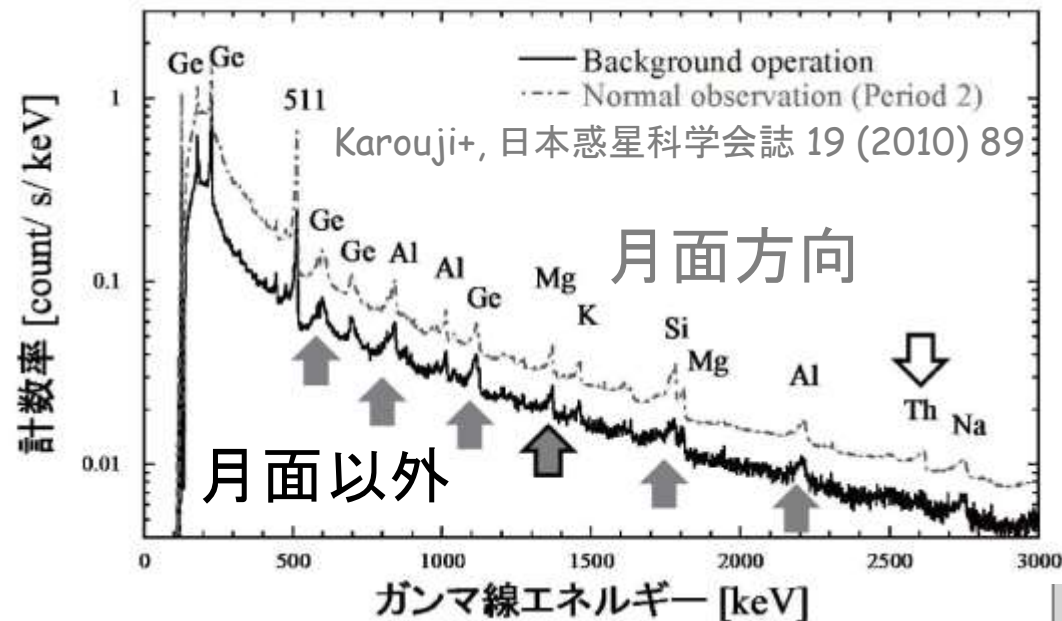
月面有人活動を考えるなら、  
数km分解能の資源マップが必須

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 <sup>6</sup>

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

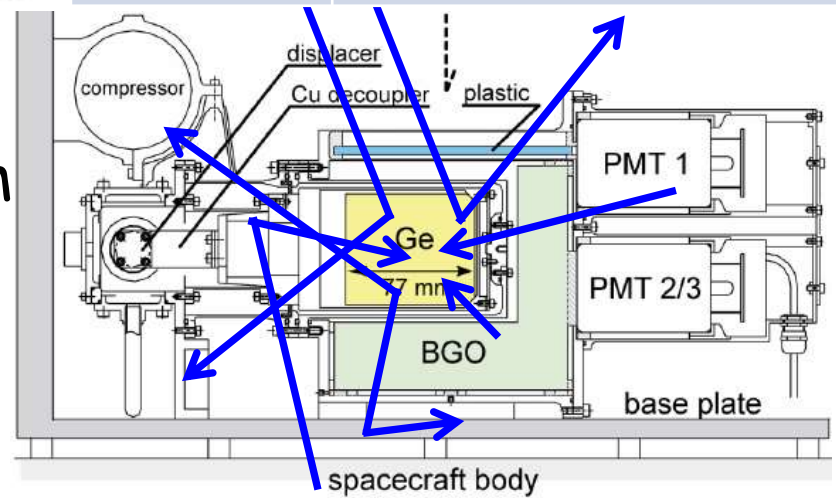
Ge	検出器
Al	衛星筐体や検出器
Mg	Alの核破砕
Si	Alの中性子捕獲
連続成分	様々な反応の和

## 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

7

## 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

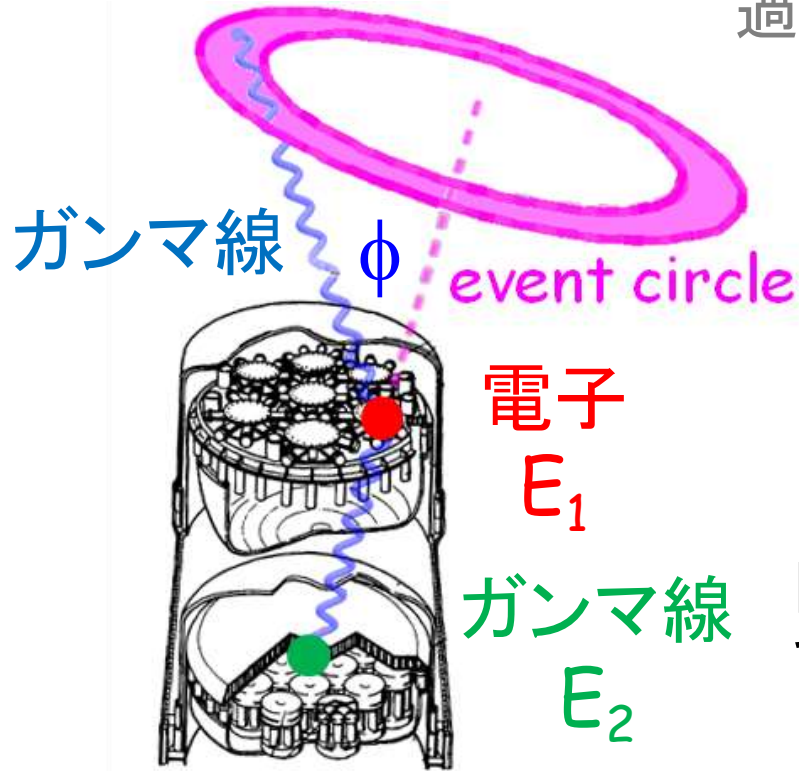
- 数kmの空間分解能 (@100 km)
- ~3桁の雑音除去能力
- 2 sr以上の超広視野
- 1~3%のエネルギー分解能
- K-GRSと同程度の有効面積

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<sup>8</sup>

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



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

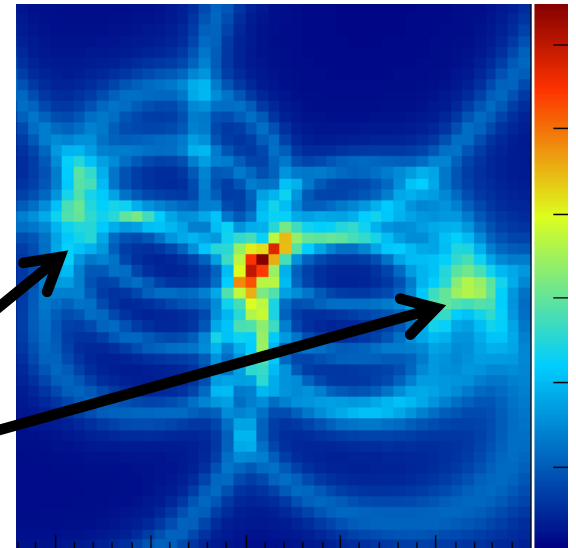
$E_1$  と  $E_2$  から散乱角  $\phi$  のみを測定

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
- $\phi$  の精度(event circleの幅)を向上

偽信号

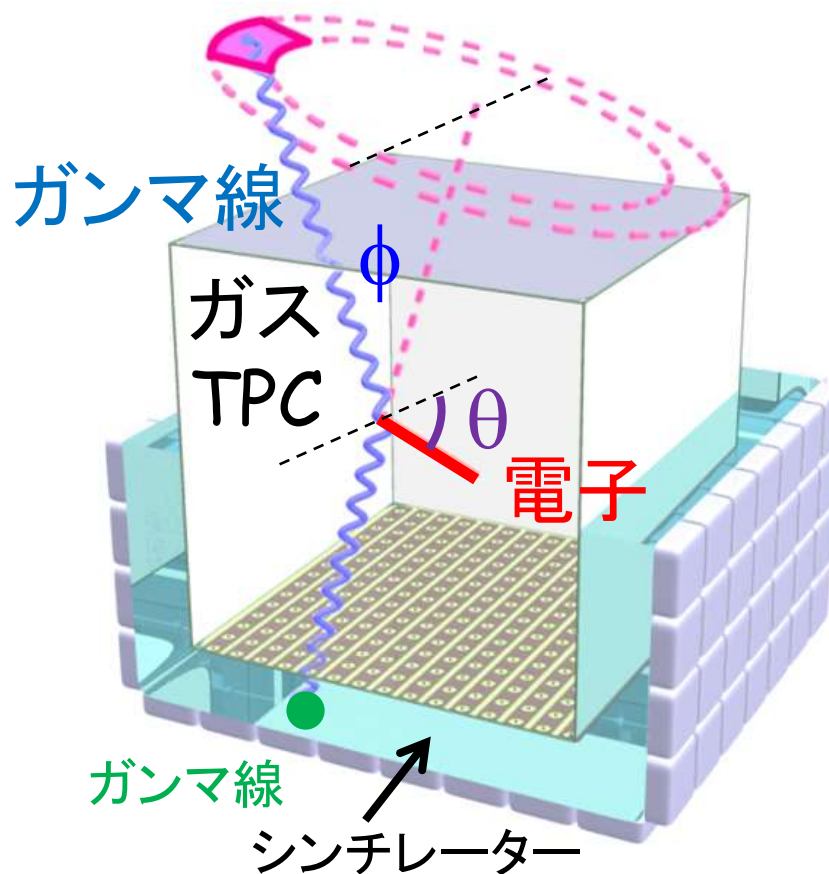


光子毎には 1個の角度情報: 擬似イメージング

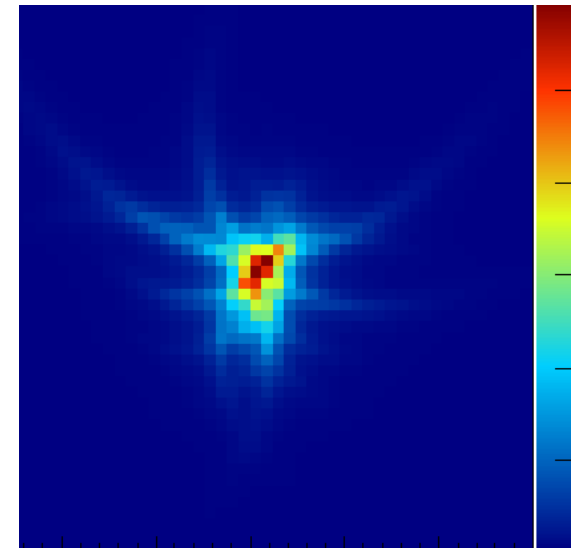
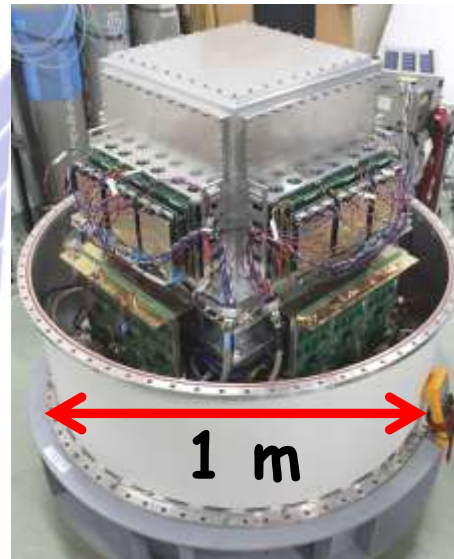


# 電子飛跡を測定するコンプトンカメラ<sup>9</sup> Electron-Tracking Compton Camera (ETCC)

逆転の発想：(一見)スカスカでも、しっかり**2角度**を測定



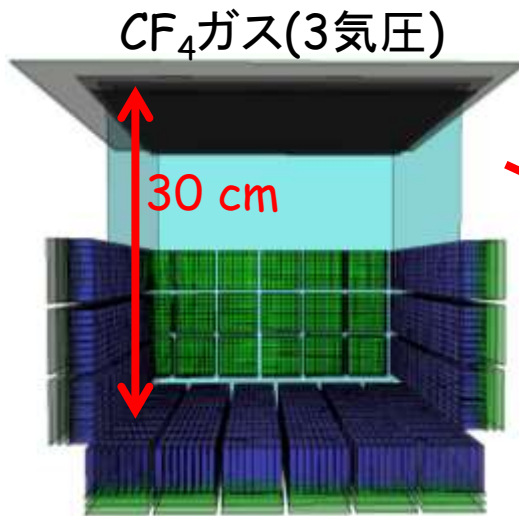
散乱体をガスにすることで、  
電子がある程度は走れる。  
→ 反跳方向を測定可能



光子毎には **2個**の角度情報：**真のイメージング**

# ETCCと大型Ge検出器の有効面積 10

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

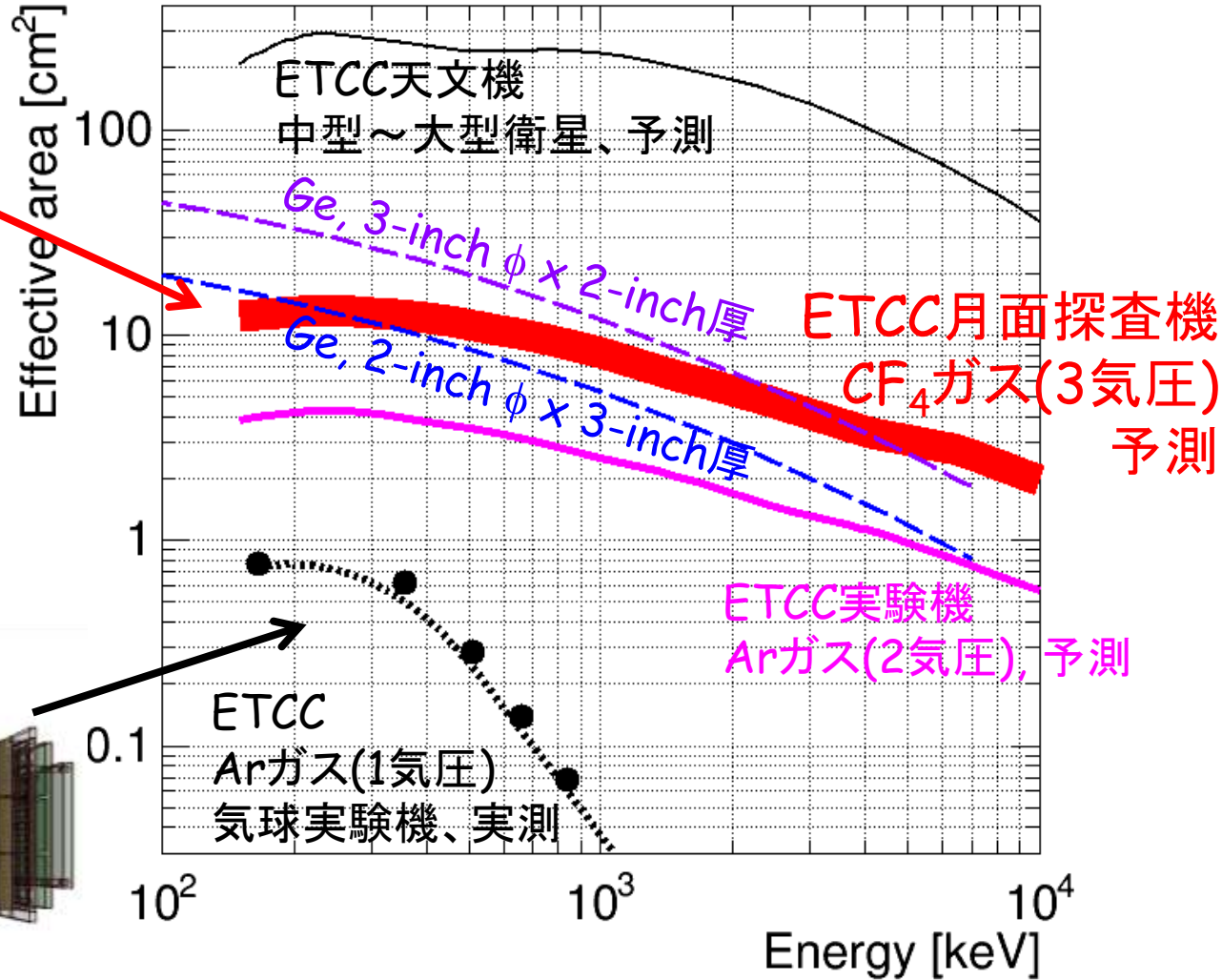


CF<sub>4</sub>ガス(3気圧)

30 cm

Arガス(1気圧)

30 cm



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とGe検出器の予想スペクトル <sup>11</sup>

※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

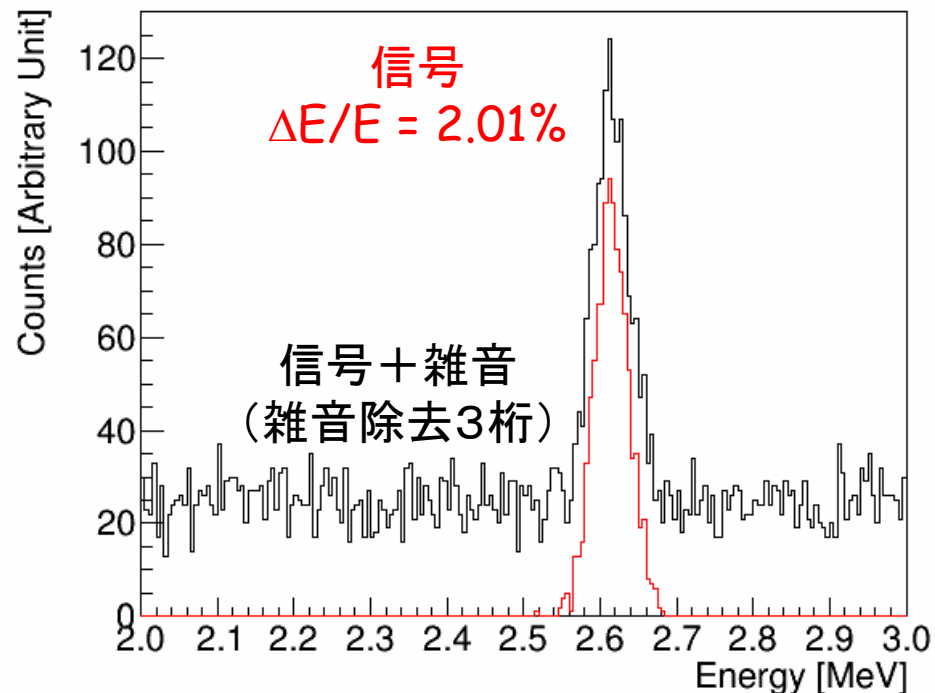
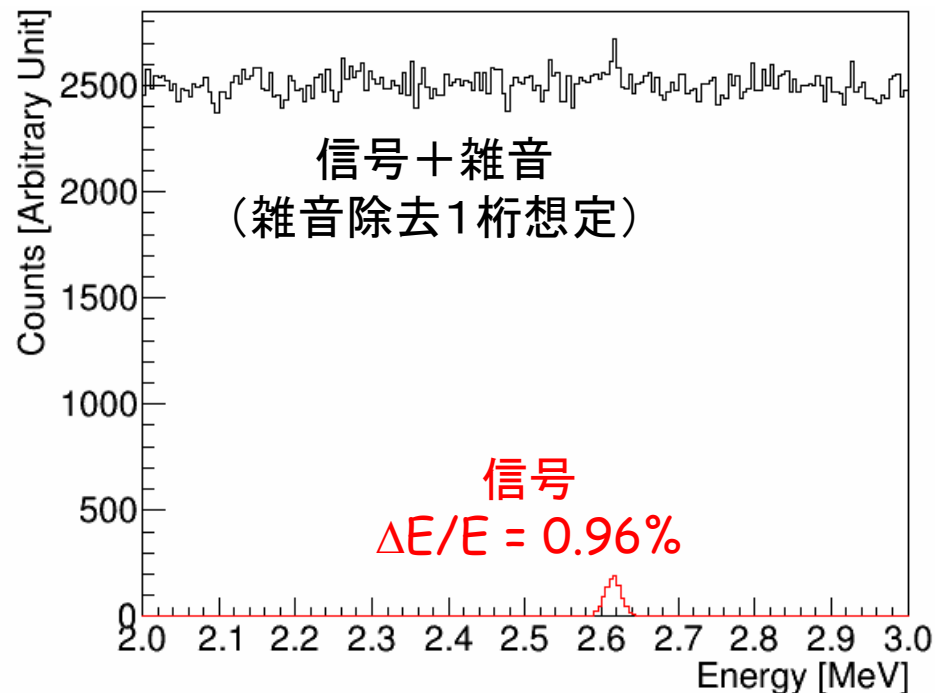
**ETCC**: エネルギー分解能**予測**値  
2.01% (@ 2.615 MeV, FWHM)

LaBr<sub>3</sub>シンチ: 4.0%@662 keV →  $\propto E^{-0.5}$  で推定

信号:雑音 = 1:500

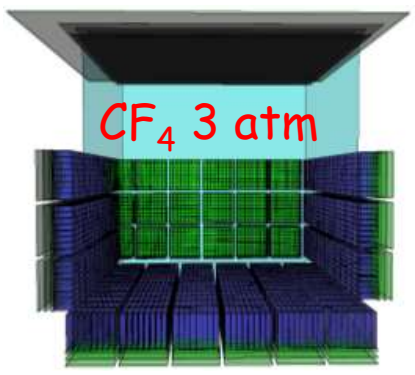
信号:雑音 = 1:5

雑音除去能力に2桁の差

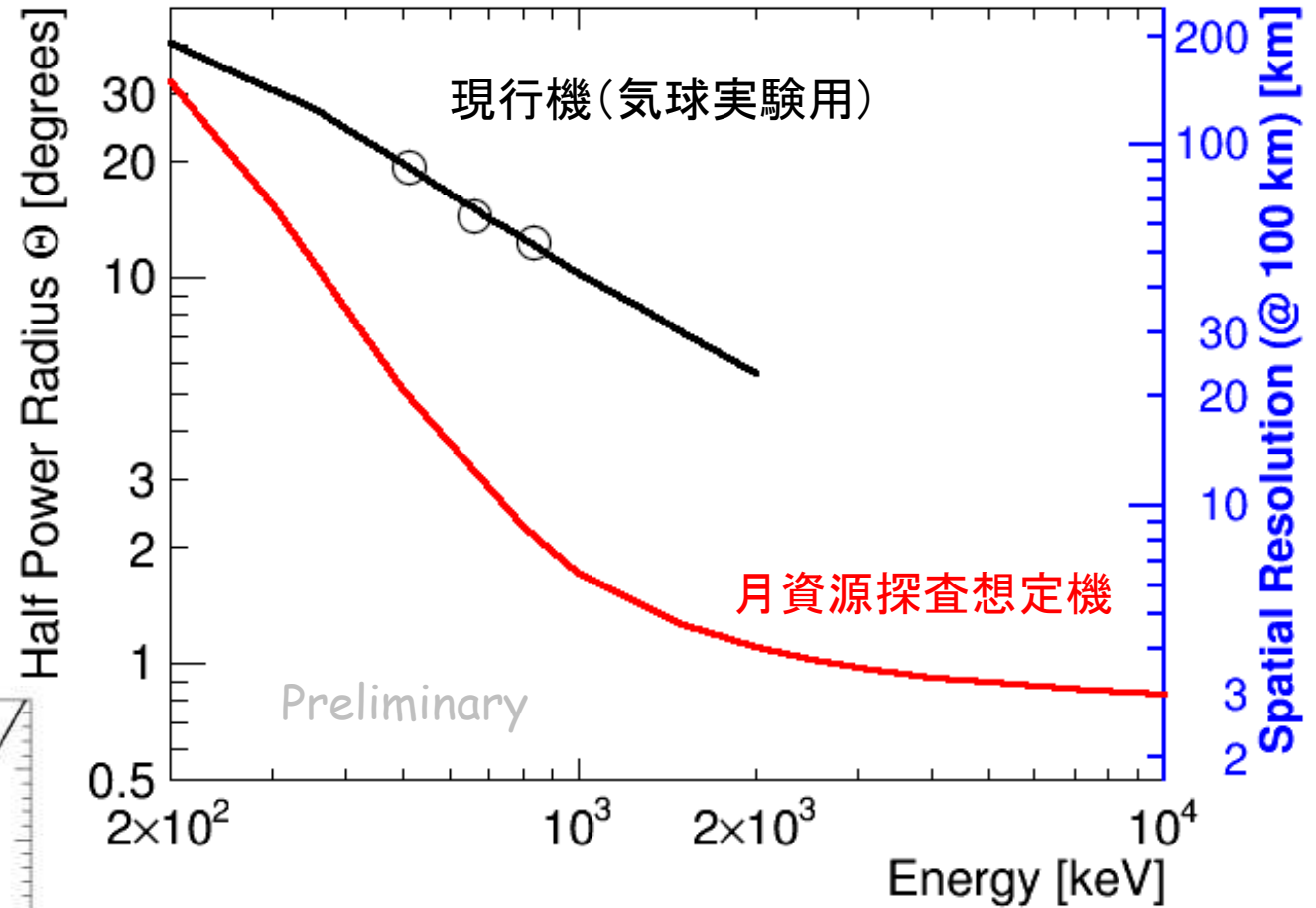
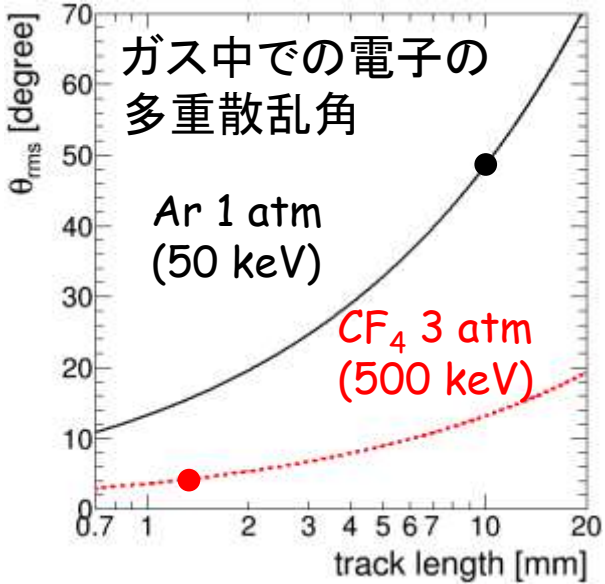


# ETCCの角度分解能

月資源探査想定機



現行機(気球実験用)



散乱ガンマ線測定レンジ拡張  
 反跳電子測定レンジ拡張  
 荷電粒子飛跡解析の改良

実証は必要だが、  
 現存技術で改良可

角度分解能: 立体角で~250倍精細



# SMILE計画: 開発・実験の進行状況<sup>13</sup>

Sub-MeV/MeV gamma-ray **I**maging **L**oaded on balloon **E**xperiment

(※ SMILESではありません)

SMILE-I 2006年秋 大気球実験@三陸

上空での雑音除去性能を確認

Takada+, ApJ, 733 (2011) 13

SMILE-II 2013年春 装置完成(基盤S)、未放球

有効面積100倍と読み出し回路サイズ1/5を達成

地上実証: 微弱線源撮像、福島環境ガンマ線定量評価

Tanimori+, ApJ, 810 (2015) 28

Tanimori+, Sci. Reports, in press

SMILE-II+ 2016年～ 装置改良開始(基盤A)

エネルギー帯域拡張(~数MeV)

撮像能力改善(数度@1 MeV)

SMILE-II+ 2018年春 大気球実験@オーストラリア

上空での天体撮像試験、銀河中心

**ISASより採択通知！(先週金曜日)**

SMILE-III 2018年秋～ 装置改良予定、長期気球実験を狙う

SMILE衛星(?) 20XX年 惑星資源探査

# 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

### ➤ 惑星居住地選定のために、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・惑星の資源探査に高い関心を持っています



# 宇宙ユニットシンポ@京大、2/11-12 <sup>15</sup>



**2.11 土 13:00-17:00**  
「宇宙研究の広場」ポスター展示発表  
会場◎京大百周年時計台記念館2階  
国際交流ホール(吉田キャンパス本部構内)

宇宙研究の広場とは…  
高校生、大学生、大学院生、教員、研究者、宇宙開発  
や産業に携わる人、そして市民のみならず、全ての来  
場者が交流する場です。様々な研究や取り組みをポス  
ター展示で紹介いたします。お気軽にご参加下さい。

主催◎京大 宇宙総合学研究ユニット  
京大 宇宙大学院 理学研究科附属天文台  
後援◎宇宙航空研究開発機構、京都府教育委員会、京都市教育委員会、和歌山大学国際観光学研究センター

**2.12 日 10:30-16:30**  
シンポジウム講演+パネルディスカッション  
会場◎京大百周年時計台記念館1階 時計台記念ホール

- 講演(映像中継あり)
- 近藤 圭介 京大 宇宙大学院 法学研究科 准教授 (法哲学)
  - 稲川 貴大 インターステラテクノロジズ株式会社 代表取締役 (宇宙飛行士)
  - 土井 隆雄 京大 宇宙総合学研究ユニット 特定教授 (宇宙工学)
  - 山敷 庸亮 京大 宇宙大学院 総合生化学 教授 (水資源工学)
  - 保尊 隆享 大阪市立大学 大学院 理学研究科 教授・所長 (生態学)
  - 湯本 貴和 京大 宇宙工学 准教授 (宇宙工学)
  - 稲谷 芳文 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 教授・副所長 (宇宙工学)

お問い合わせ  
uss@kwasan.kyoto-u.ac.jp



参加費無料  
託児室あり

お申し込みはWEBフォームにて  
<https://www.uss.kyoto-u.ac.jp/symposium10.html>

第10回 宇宙ユニットシンポジウム

## 宇宙にひるがる人類文明の未来 — 宇宙における持続可能な社会基盤の構築 —

# 2017

**関連イベント**  
**2.10 金 18:00-20:00**  
京都大学国際芸術フォーラム  
奇跡への挑戦—未来創成学と宇宙総合学からの展望  
会場◎京大百周年時計台記念館1階 時計台記念ホール  
1. 喜多郎さんによる映像ライブ演奏「古事記と宇宙」  
2. パネル討論：喜多郎、佐々木剛、柴田一成、村瀬雅俊(司会)  
主催◎京大 未来創成学国際研究ユニット  
共催◎宇宙総合学研究ユニット

月面で地図を見ているアポロ14号クルーのエドガー・ミッチェル(提供: NASA)



# 宇宙ユニットシンポ@京大、2/11-12<sup>16</sup>

**2.12** 日 10:30-16:30

シンポジウム講演+パネルディスカッション  
会場◎京都大学百周年時計台記念館1階 時計台記念ホール

講演 (映像中継あり)

- 近藤 圭介 京都大学大学院 法学研究科 准教授 (法哲学)
- 稲川 貴大 インターステラテクノロジズ株式会社 代表取締役
- 土井 隆雄 京都大学 宇宙総合学研究ユニット 特定教授 (宇宙飛行士)
- 山敷 庸亮 京都大学大学院 総合生存学館 教授 (水資源工学)
- 保尊 隆享 大阪市立大学大学院 理学研究科 教授 (宇宙生物学)
- 湯本 貴和 京都大学 霊長類研究所 教授・所長 (生態学)
- 稲谷 芳文 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 教授・副所長 (宇宙工学)

発  
の  
来  
ポ  
ス

委員会、和歌山大学国際観光学研究センター

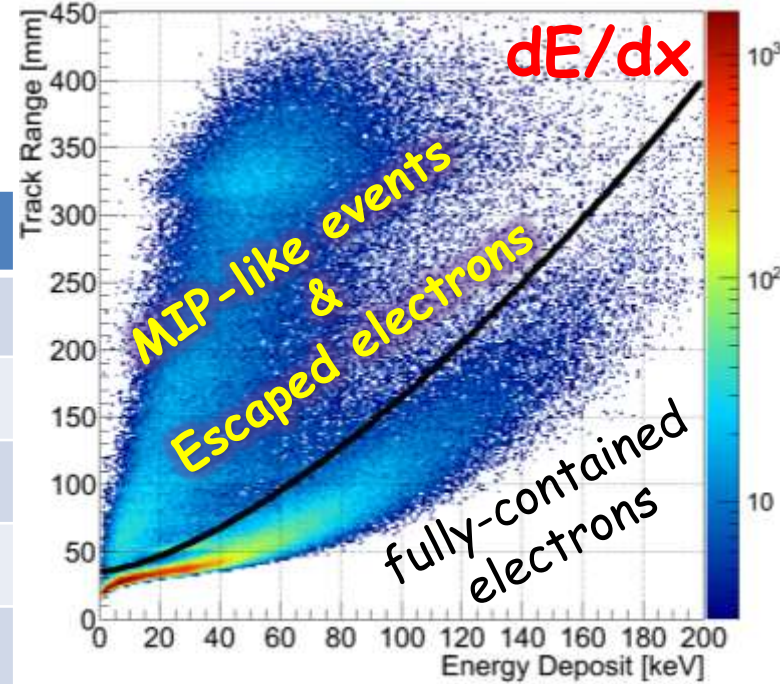
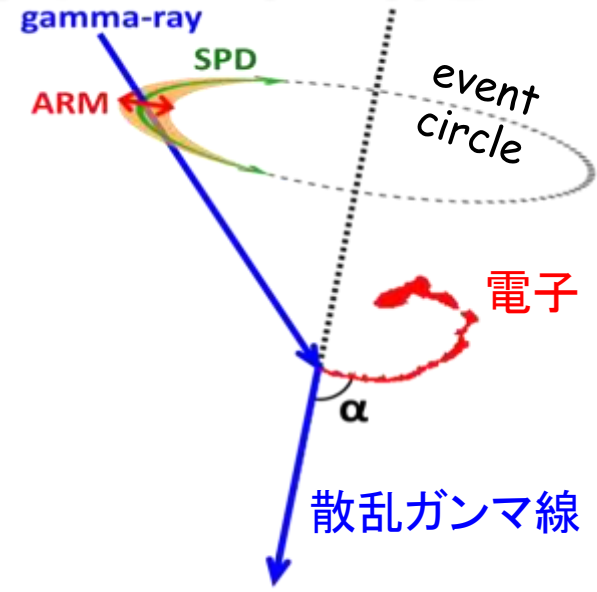




# ETCCがもたらす雑音除去性能

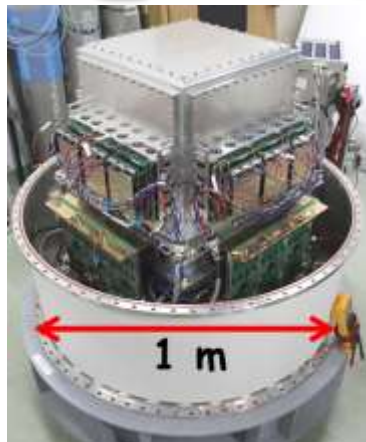
事象毎に3つの物理量を新たに得る

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

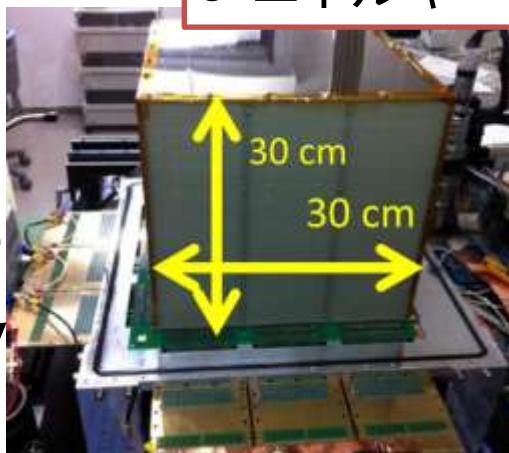
# ETCCの構成: ガスTPC + シンチ <sup>19</sup>



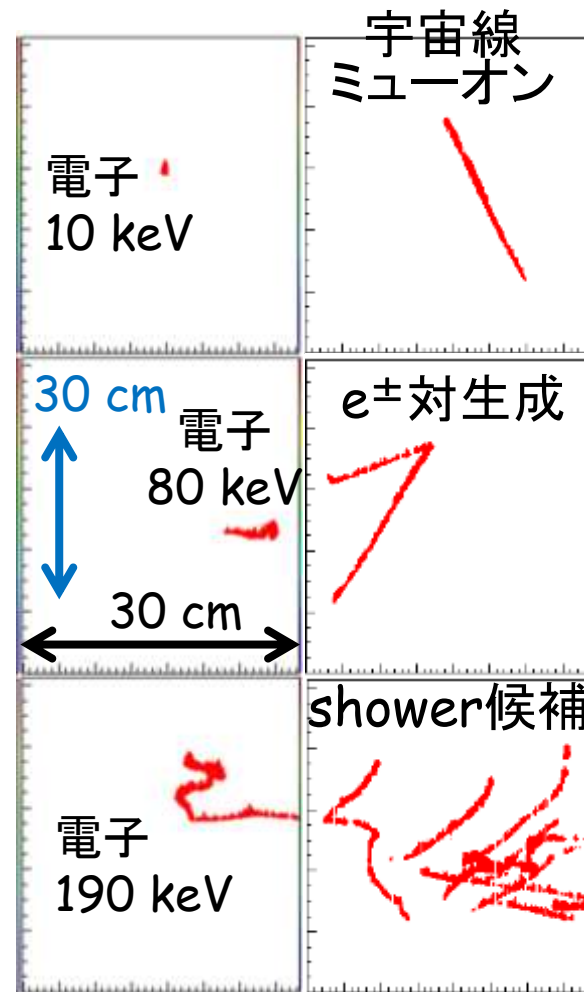
SMILE-II  
気球実験用の  
ETCC

**反跳電子**

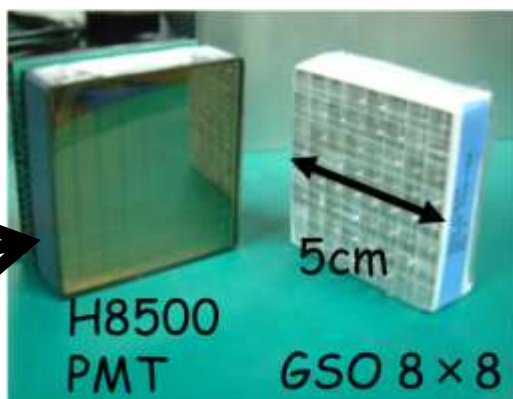
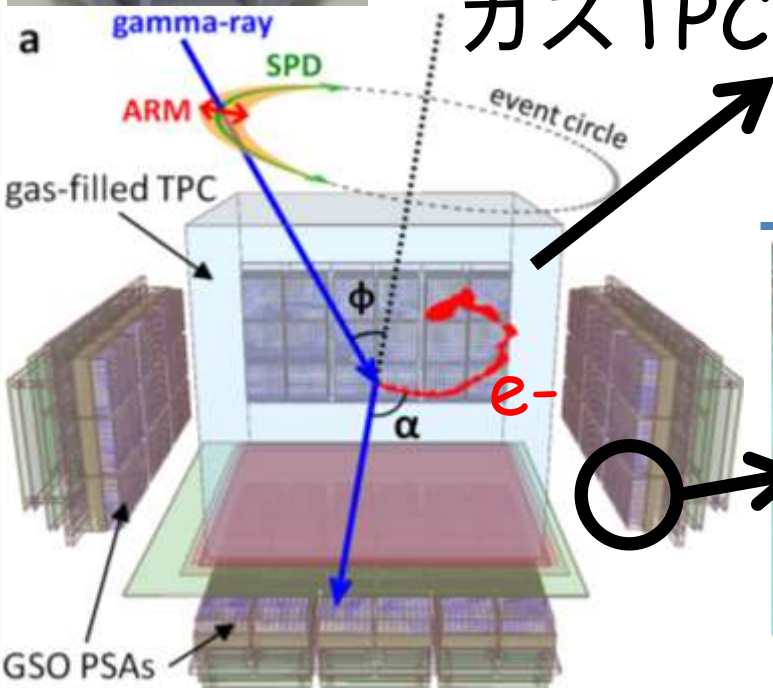
- 3次元飛跡
- エネルギー



## 粒子飛跡の実測例



## ガスTPC



**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