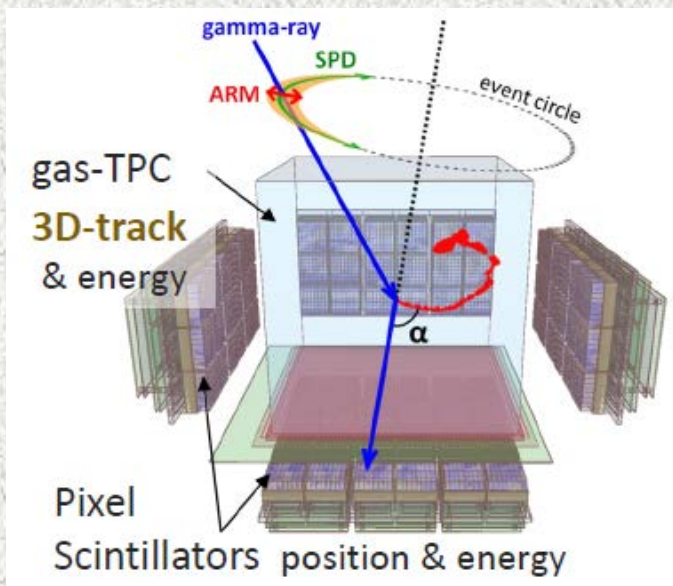
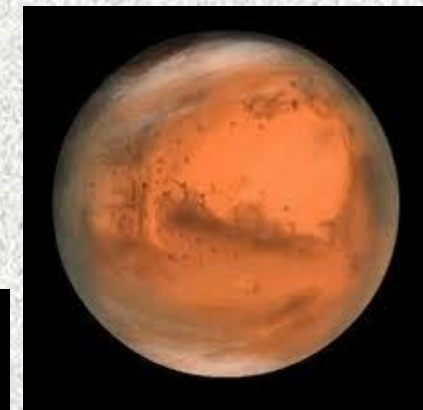


# 天文学以外のSpaceを利用したMeVガンマ線観測



岩石惑星  
Primordial BH  
太陽(ガンマ線、中性子)  
極域電子降下

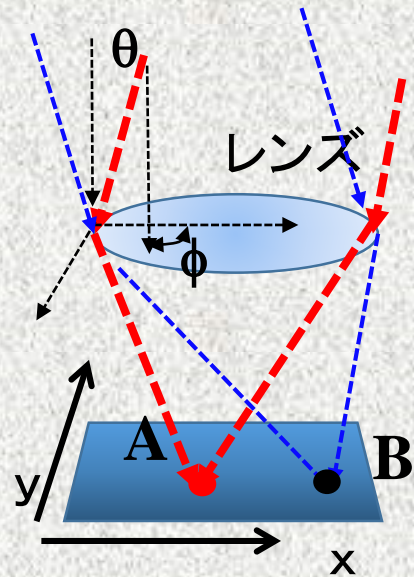


27/02/2017 MeVガンマ線天文学@ 京大

谷森 達, 高田淳史 他 宇宙線研究室MeVガンマ線グループ  
所属: 京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻  
京都大学宇宙総合学研究ユニット

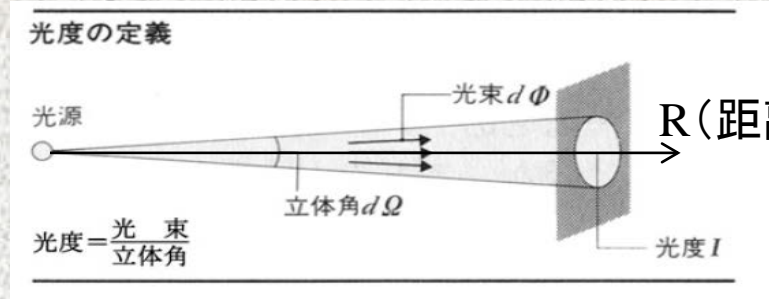
# 幾何光学によるイメージング分光

- 電波、可視光～X線など電磁波は屈折と反射が可能（レンズ、反射鏡）
- 幾何光学**：入射方向の2つの角度 $\theta$ 、 $\phi$ を2次元面の座標（ $x$ 、 $y$ ）への変換

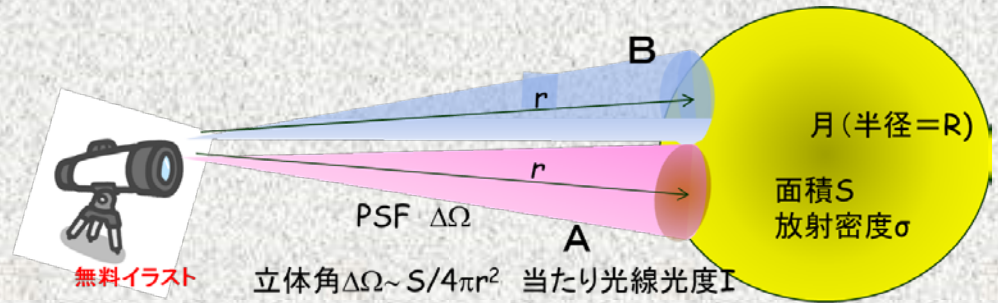


$$f(\theta, \phi) = x$$

$$g(\theta, \phi) = y$$



光度I は R によらず一定！ $d\Omega$ の光線数不変。



幾何光学では光を集光  
→光源 A, Bを弁別可(光度を定義可)

画像のボヤケ度合いを幾何光学に  
基づき定量評価することが重要！

Point Spread Function (PSF)

幾何光学、イメージング分光の基本  
PSFで情報(光線)の弁別を定量評価可。  
(AとBが混じらない。)

# 1 mCrabは実現可能

- 革新的なMeV  $\gamma$  天文学には **感度(significance)  $\sim 10^{-13}$  erg cm $^{-2}$  s $^{-1}$  /5年 $\rightarrow$  COMPTTELの**500倍****

$$\text{Significance} \propto \frac{EA \cdot S}{\sqrt{EA \cdot (S + BG \cdot \theta^2)}}$$

雑音が卓越

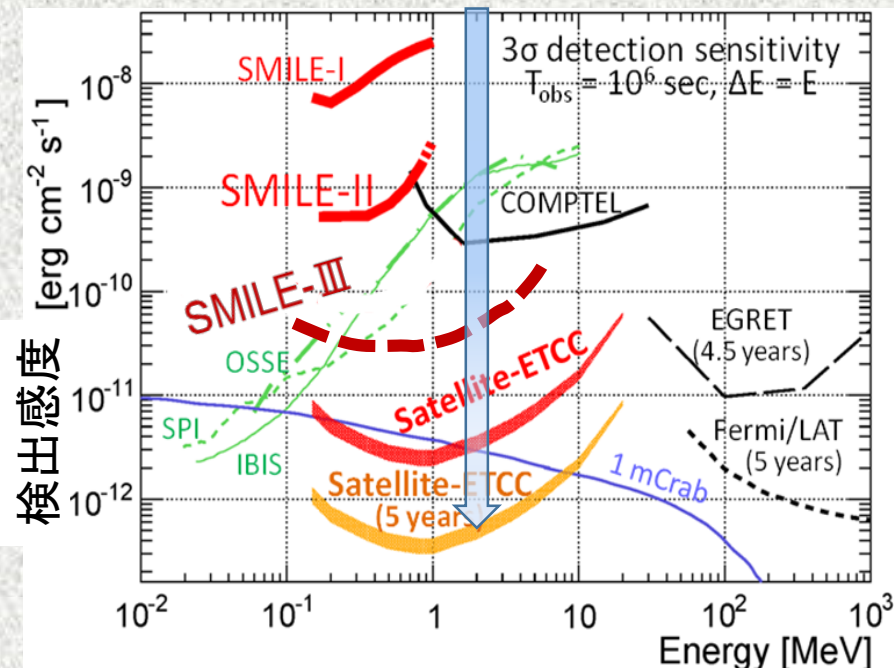
$$2. \text{Significance} \propto \frac{EA \cdot S}{\theta \sqrt{EA \cdot BG}}$$

- 有効面積 (EA)  $\sim$ 約200 cm $^2$  可能!
- 低雑音 (BG) 宇宙背景ガンマ線 (PSF, dE/dx, 運動学試験) 可能!
- PSF  $\theta = 1 \sim 2^\circ$  が不可欠、
- 2次元PSFにより初めてX線同様のイメージング分光が可能

S: シグナル量

$\theta$ : PSF

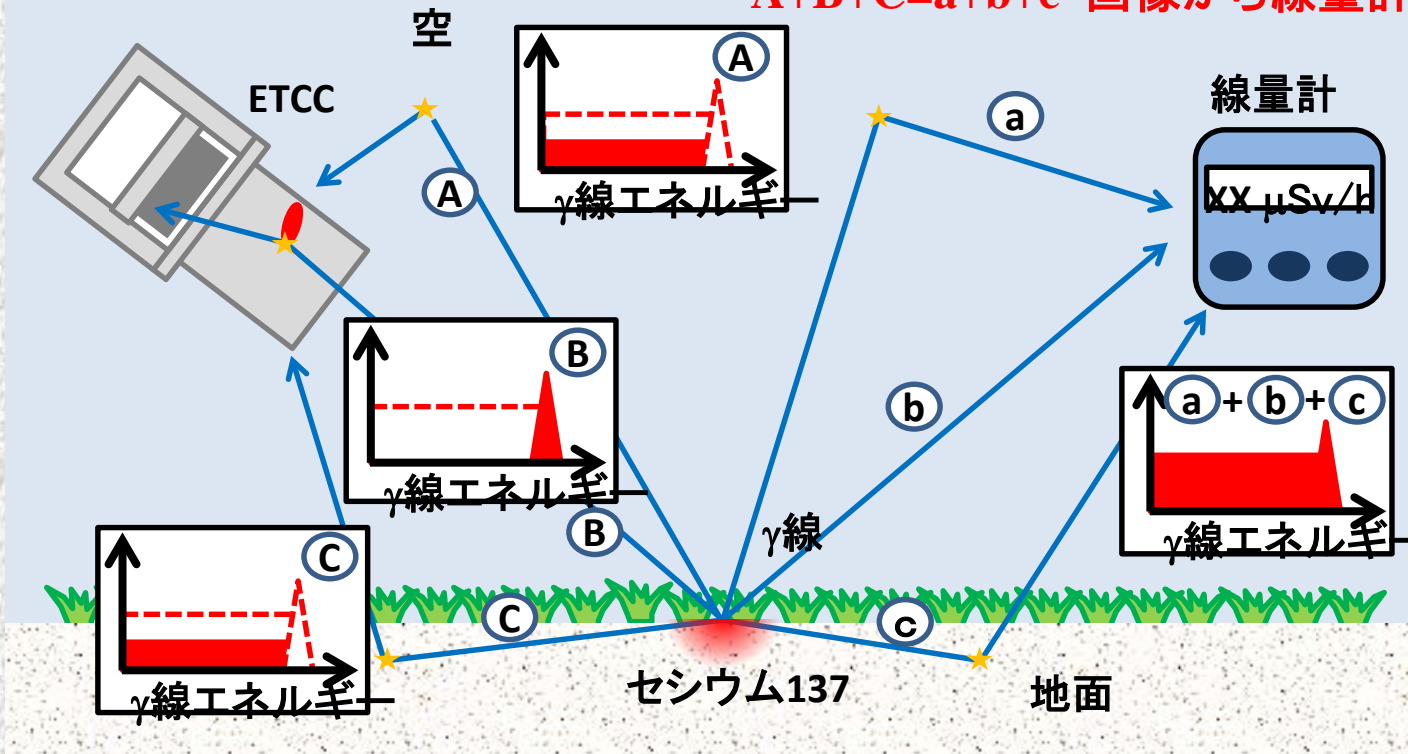
我々のETCC計画



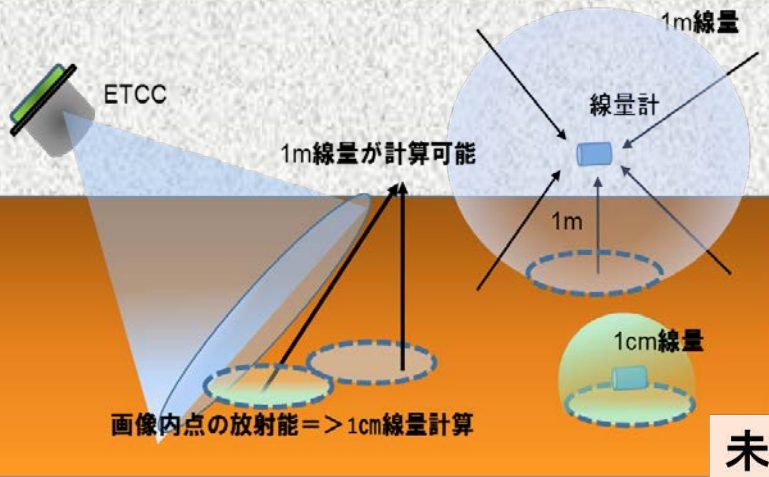
- "An Electron-Tracking Compton Telescope for a Survey of the Deep Universe by MeV gamma-rays" T.Tanimori et al. ApJ 810 (2015)
- "Establishment of Imaging Spectroscopy of Nuclear Gamma-Rays based on Geometrical Optics" T.Tanimori et al. Scientific Reports 7, 41511; doi: 10.1038/srep41511 (2017).
- "First On-Site True Gamma-Ray Imaging-Spectroscopy of Contamination near Fukushima Plant", D.Tomono et al. Scientific Reports 7, 41972; doi: 10.1038/srep41972 (2017).

# イメージング分光計測（カラー撮像）

$A+B+C=a+b+c$  画像から線量計算が可能！



# ETCC 福島調査 (未除染区域)

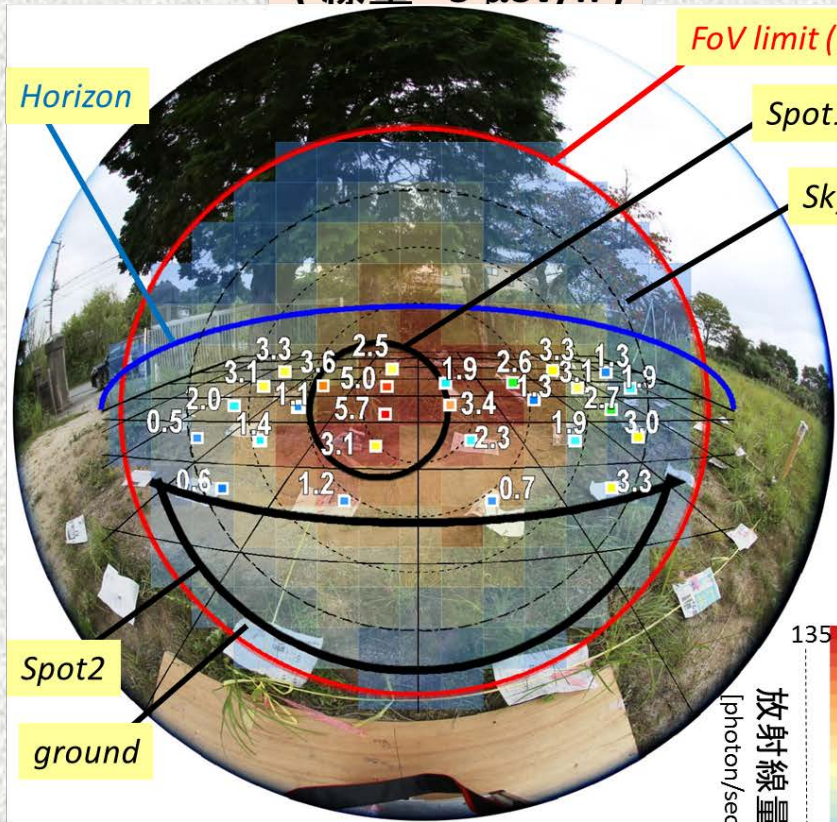


未除染区域  
(線量 ~ 5  $\mu\text{Sv/h}$ )

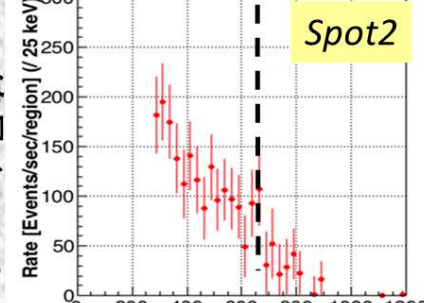
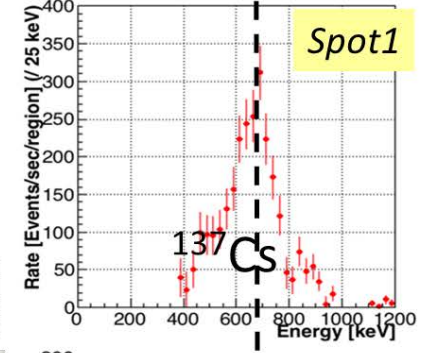
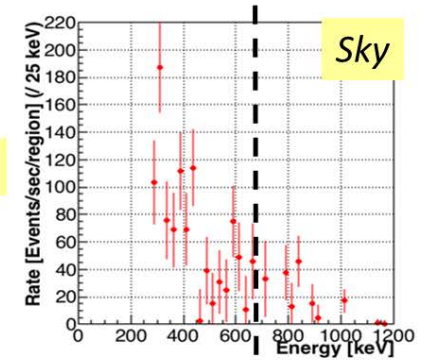
## 可搬型ETCC



検出面積 数 $\text{mm}^2$   
PSF  $\sim 15^\circ$



■ 5.7 : 1-cm dose measured with dosimeter



ETCC 1cm-線量 (  $\mu\text{Sv/h}$  )

放射線量  
[photon/sec/sr/cm<sup>2</sup>]

# 岩石天体からの核ガンマ線

# JAXA KAGUYA 衛星

原子核固有のエネルギーのガンマ線

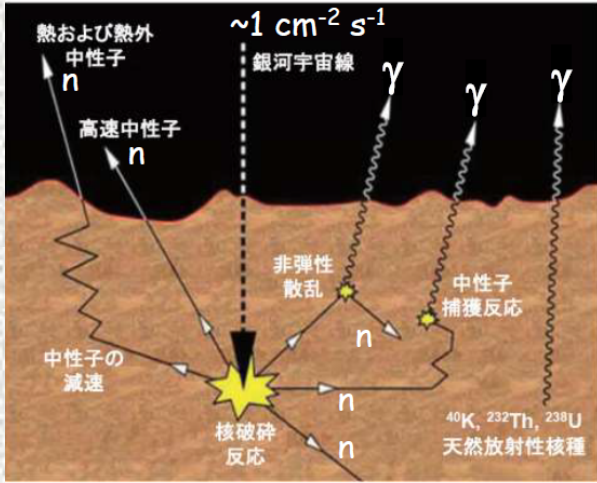
天体表層の元素組成分布

## 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

特集「かぐや」が見た新“月世界”

月探査衛星「かぐや」搭載ガンマ線分光計で探る月表層の元素分布

唐牛 譲<sup>1</sup>, 柴村 英道<sup>2</sup>, 小林 正規<sup>3</sup>, 奥平 修<sup>1</sup>, 山下 直之<sup>1</sup>, 小林 進悟<sup>1</sup>, 晴山 慎<sup>1</sup>, 長谷部 信行<sup>1</sup>

惑星は強いガンマ線源宇宙放射の10倍以上強いガンマ線放射。

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 <sup>-4</sup> ~10 <sup>-2</sup> 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○

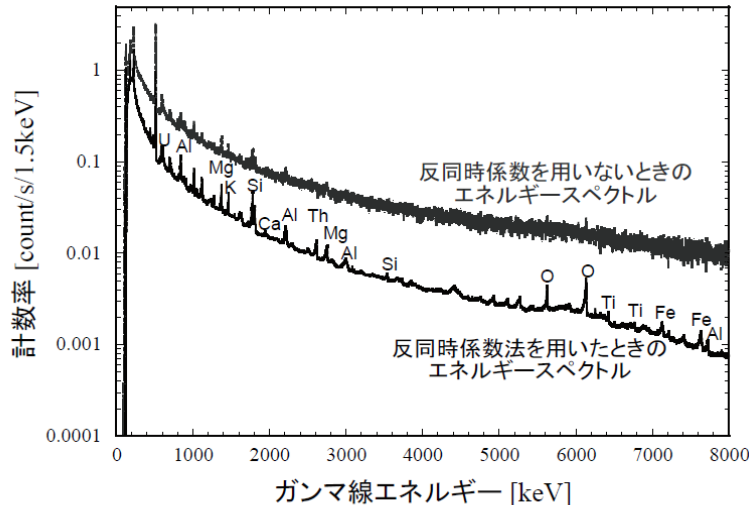
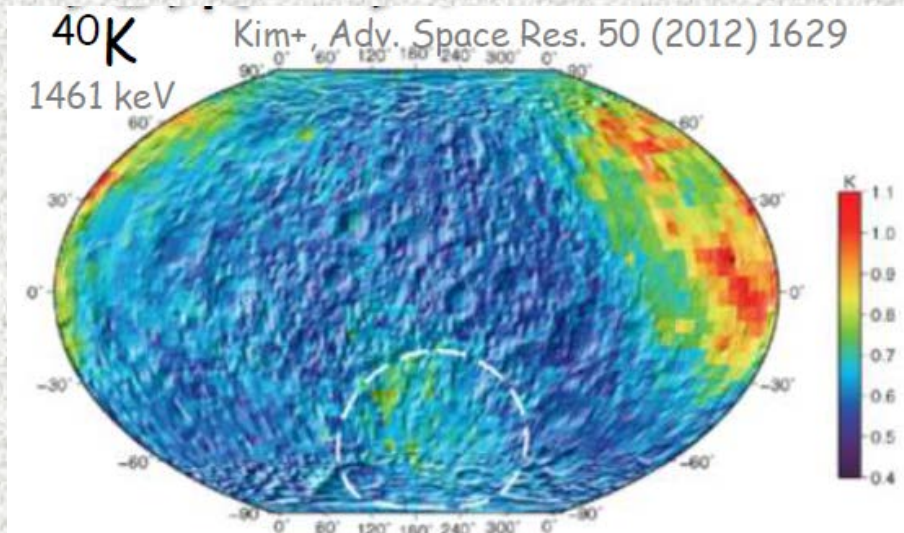
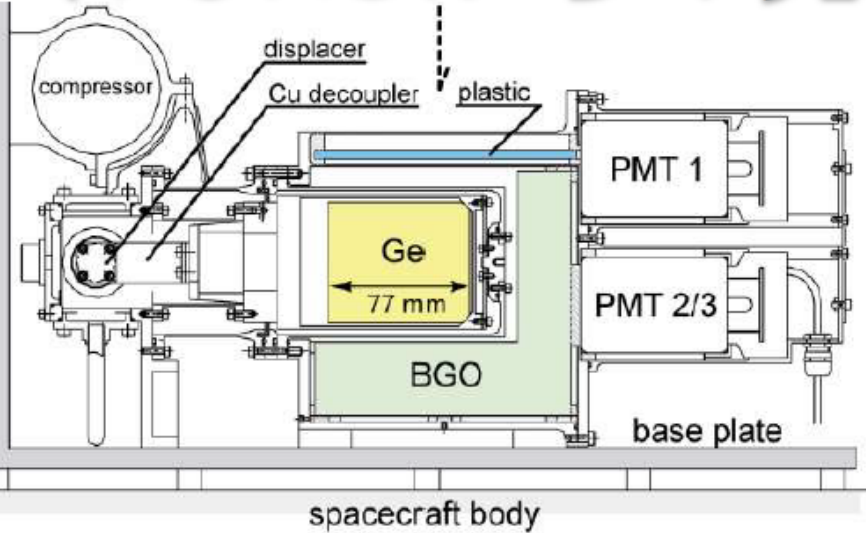


図3: 反同時計数法を行なったときと行っていないときのガンマ線エネルギースペ



# K-GRSからの発展1: 空間分解能

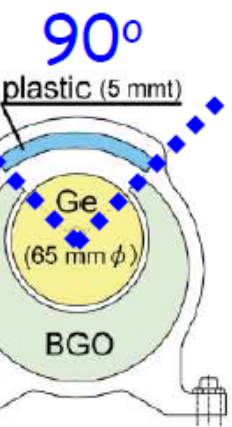
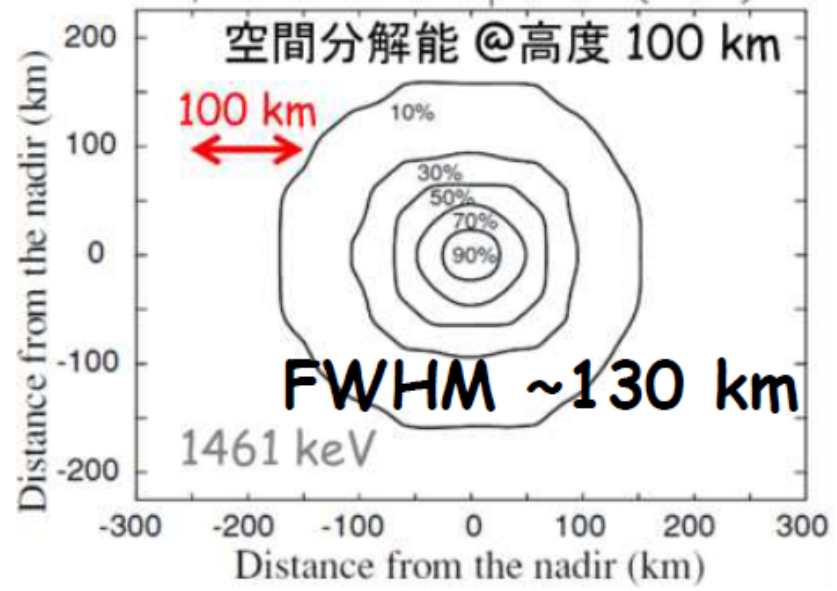


## K-GRS の長所

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° 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?

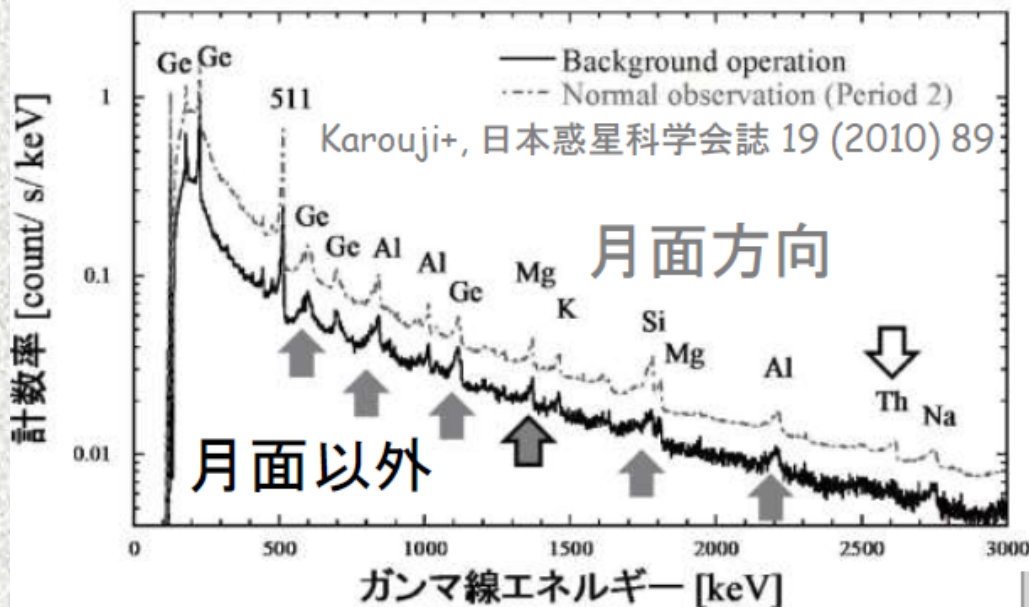
- 数km単位の全球マップ
- 元素分布の特異点探査
- クレーター内外の差異、など

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 6

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

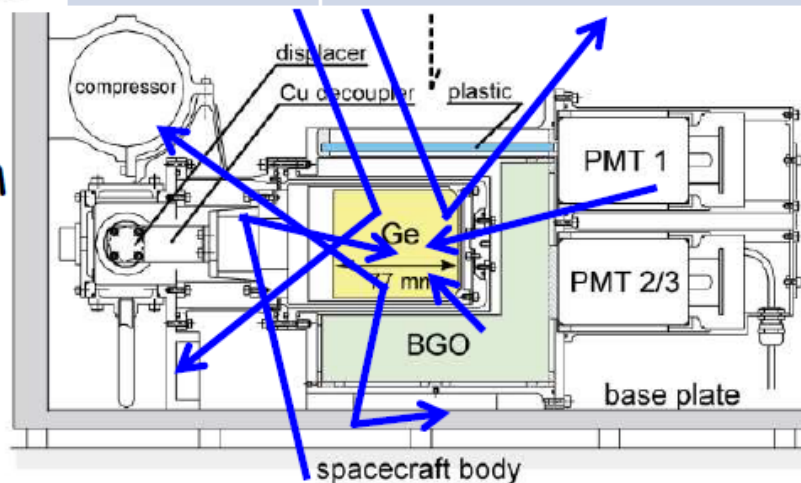
Ge	検出器
Al	衛星筐体や検出器
Mg	Alの核破砕
Si	Alの中性子捕獲
連続成分	様々な反応の和

## 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!!



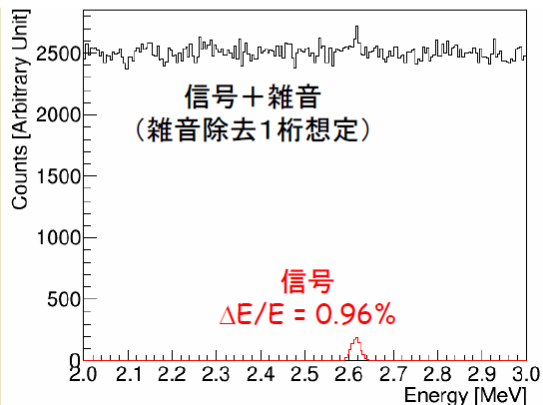
# 数MeVのガンマ線に対して

- 数kmの空間分解能 (@100 km)
- ~3桁の雑音除去能力 PSF 数度
- 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

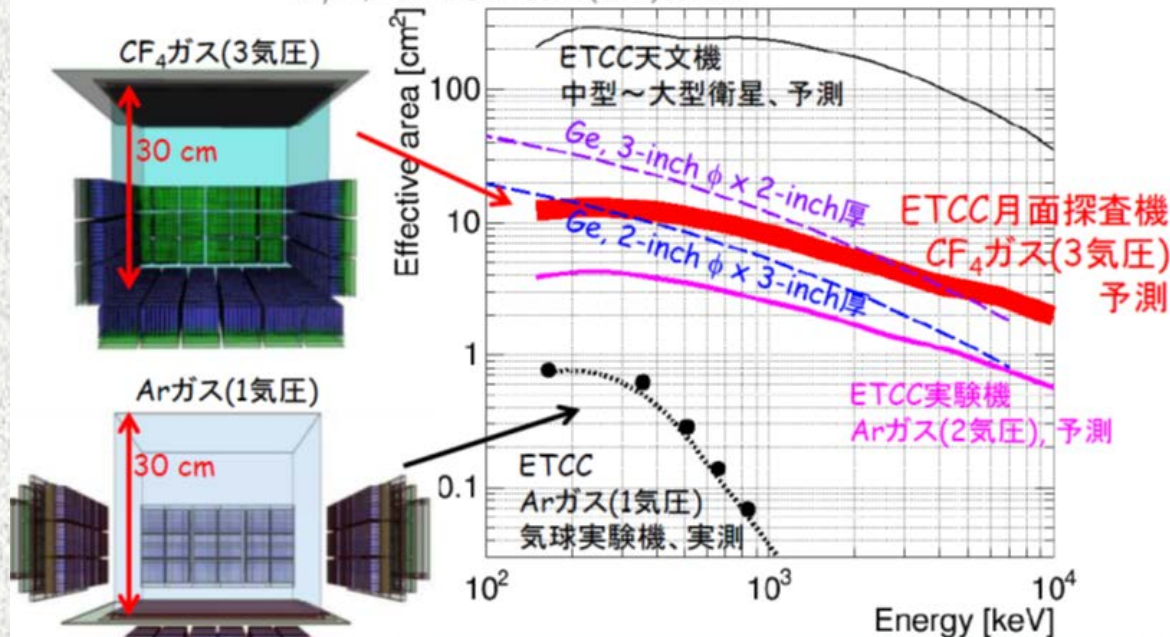
K-GRS: エネルギー分解能実測値  
0.96% (@ 2.615 MeV, FWHM)  
Kobayashi+, EPS Lett. 337-338 (2012) 10-16

信号:雑音 = 1:500

雑音除去能



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

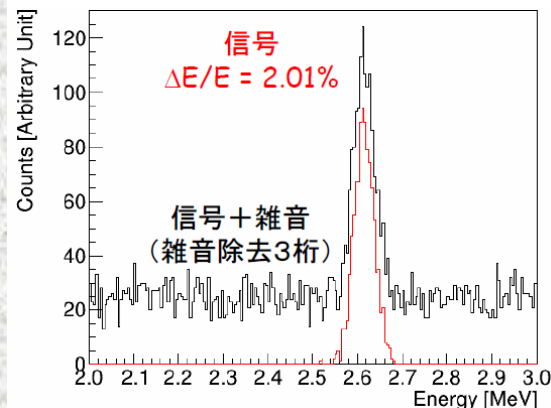


ETCCと大型Ge検出器の有効面積は、  
1 MeV 以上にて同等レベル

ETCC: 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 → ∝ E<sup>-0.5</sup> で推定

信号:雑音 = 1:5

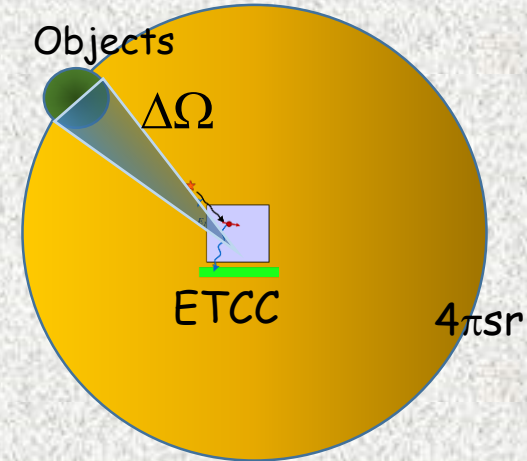
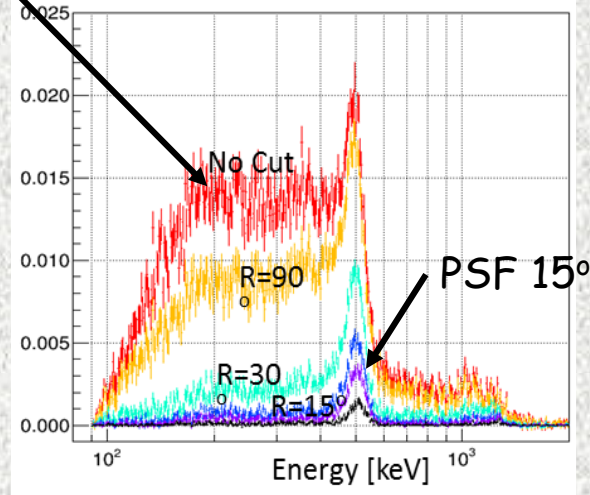
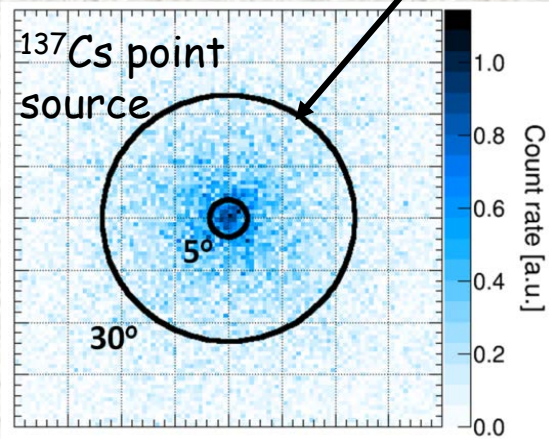
力に2桁の差



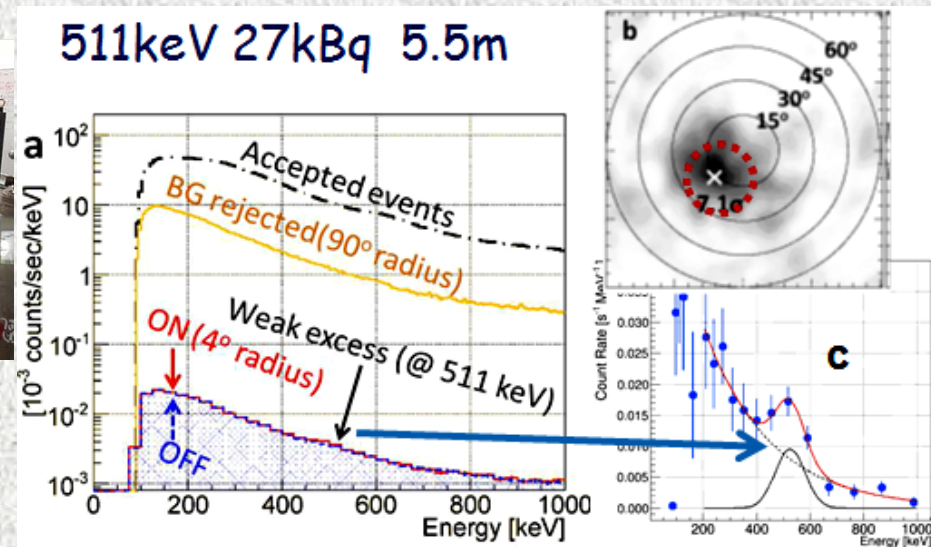
# Noise Reduction by Imaging Spec.

FoV 4 sr ( $\sim 60^\circ$  Radius) PSF  $5^\circ$  FoV 0.02sr **BG $\sim 1/150$**

Scattered gamma in Air



$^{22}\text{Na}$  (27 kBq, 511 keV) 5.5m  
 $8 \times 10^{-5} \mu\text{Sv/h}$   
(1/1000 of Environmental radiation)



# Primordial Black Holes in Solar System

$$\tau \sim \frac{M^3}{\hbar} \sim 10^{10} \text{ yr} \left( \frac{M}{10^{15} \text{ g}} \right)^3 \quad \frac{dE}{dt} \sim 10^{20} \text{ erg s}^{-1} \left( \frac{10^{15} \text{ g}}{M} \right)^2 \quad \hbar\omega \sim 100 \text{ MeV} \left( \frac{10^{15} \text{ g}}{M} \right)$$

Primordial B.H. still surviving  
would emit  $\sim 20 \text{ MeV}$  thermal  $M \sim 10^{15} \text{ g}$ ,  $\sim 10^{20} \text{ erg/s}$

Density  $\sim 10^4 \text{ pc}^{-3}$  (flat 分布で)

$10^4 \text{ pc}^{-3} \rightarrow \sim 10 \text{ BH}$  < Oort cloud ( $10^4 \text{ AU}$ )

Condensation Factor in Galactic halos  $\times \sim 10^6$

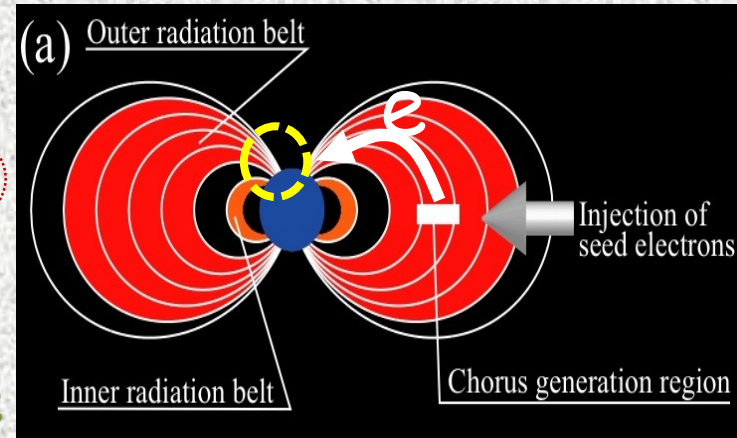
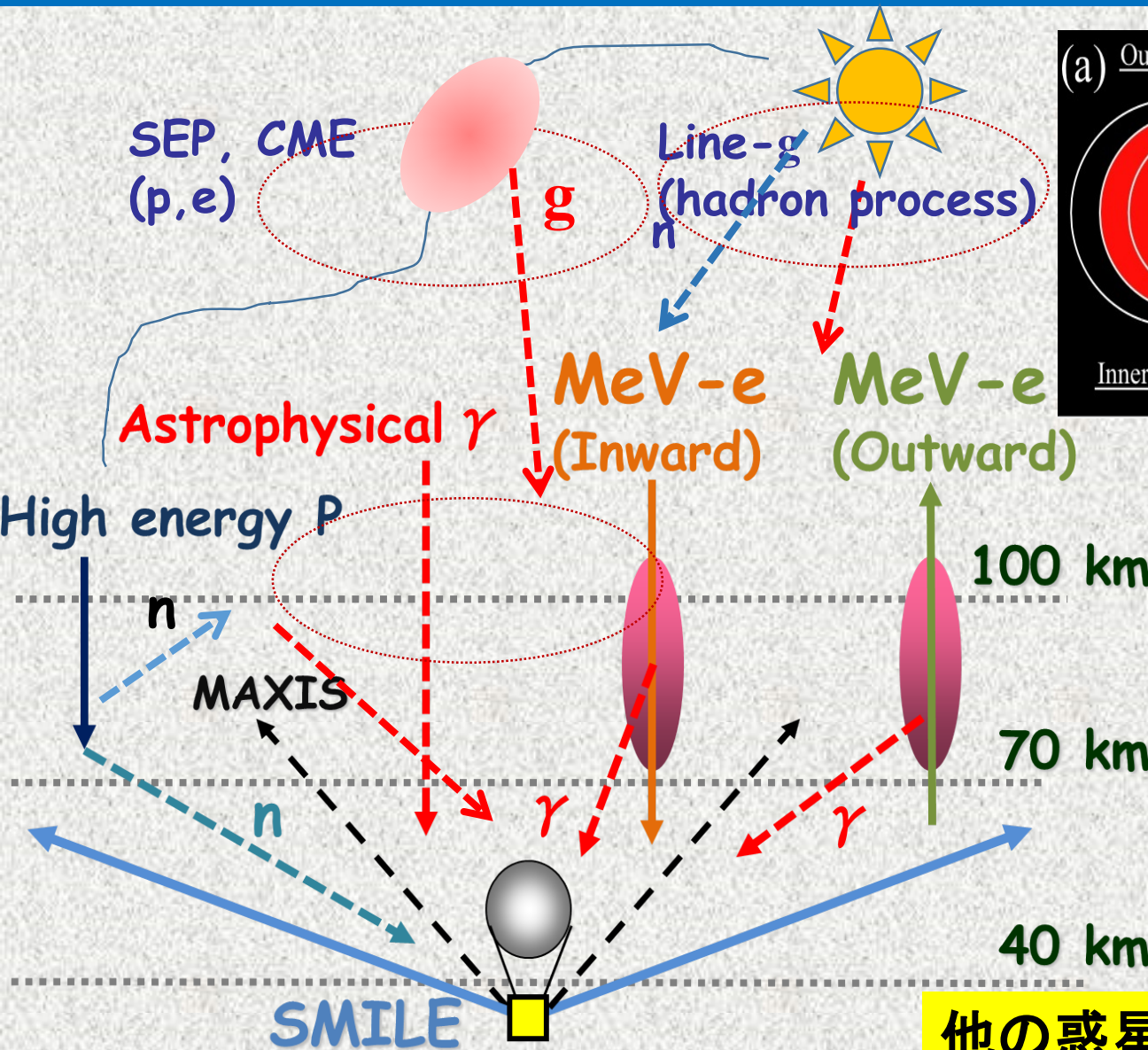
$\Rightarrow 100 \text{ AU}$  球に  $\sim 10 \text{ BHs}$

Satellite-ETCC  $\gamma$ 線 10個 ( $1 \text{ MeV}$ )  $\text{s}^{-1}$  @  $1 \text{ AU}$  for  $10^{20} \text{ erg/s}$

BHが  $10^6 \text{ s}$ の間同じ天球位置として、検出限界  $100 \gamma$  @  $10^6 \text{ s}$

この場合、 $300 \text{ AU}$ のBHまで観測可能 数10個のBHが見える。  
さらに太陽系の増幅効果、ディスク(黄道面)分布、太陽近傍集中  
1桁以上の増加、さらにコメット軌道(数日、明るい)、

# SMILE Observations for Solar and Terrestrial science (Relativistic Electron Precipitation : REP)



**SMILE**  
(広視野核ガンマ線カメラ)

太陽フレアから地球大気と  
SEPの相互作用まで系統的  
な太陽、地球圏のハドロン過  
程が観測される。!

他の惑星にもREPはある。  
惑星の雷現象も観測できる。

# Energy Deposition & Line gammas in Atmosphere

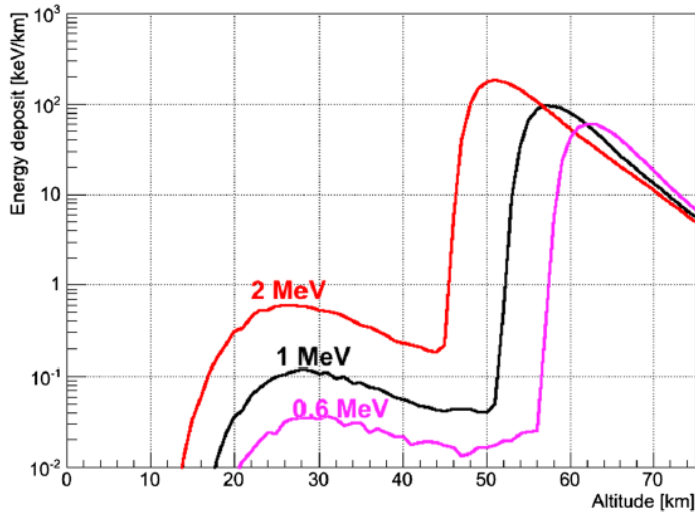


Figure 11. Energy deposition for 0.6, 1, and 2 MeV electrons entering the top of the atmosphere.

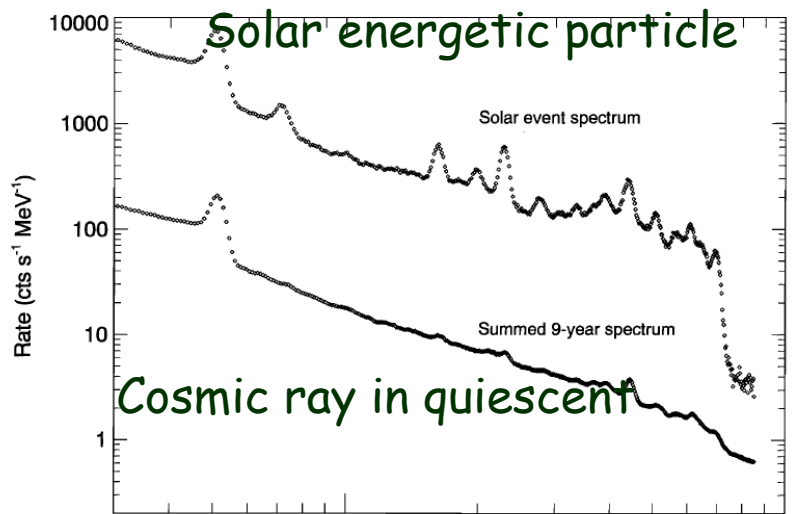
J. of Geo. Res. Sp. Phys. 2016  
Tsurutani, Tanimori Takada et al.

## Energy loss of REP

極域でのNO<sub>x</sub>の生成原因かも。  
オゾンホール発生原因

## SMM observation Atmospheric gammas in Solar events and Quiescent season

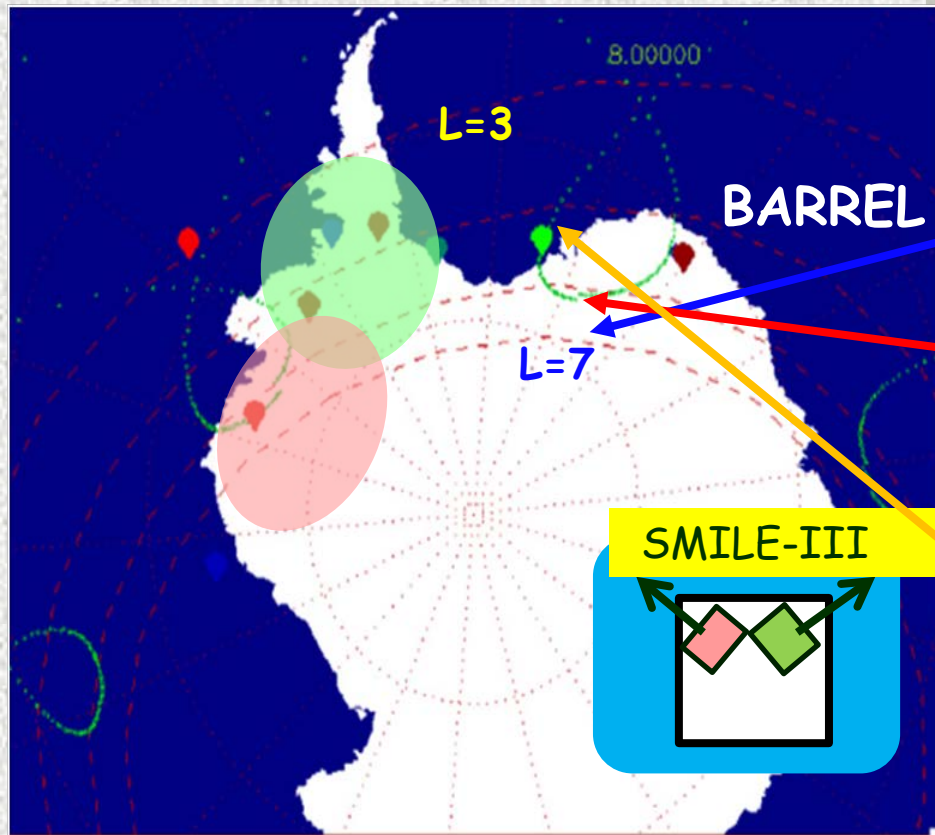
Gerald et al. J. of Geo. Res. (2001)



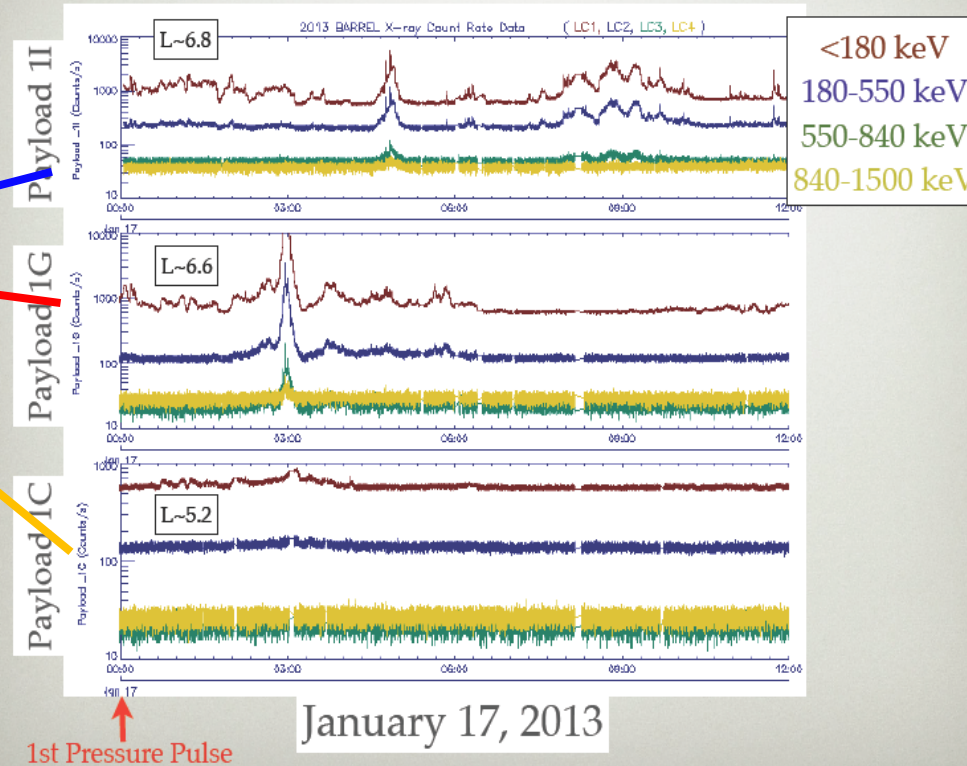
- Cosmic ray in quiescent
- Solar energetic particle (ion) in Solar events
- 最も強いMeVガンマ線源(普段は雑音)
- SEPのスペクトルが宇宙線と比べかなりソフト
- **imaging at the impact point of SPE on the Atmosphere**が指摘されている。!

Atmospheric gammas 1 Energy (MeV) 10

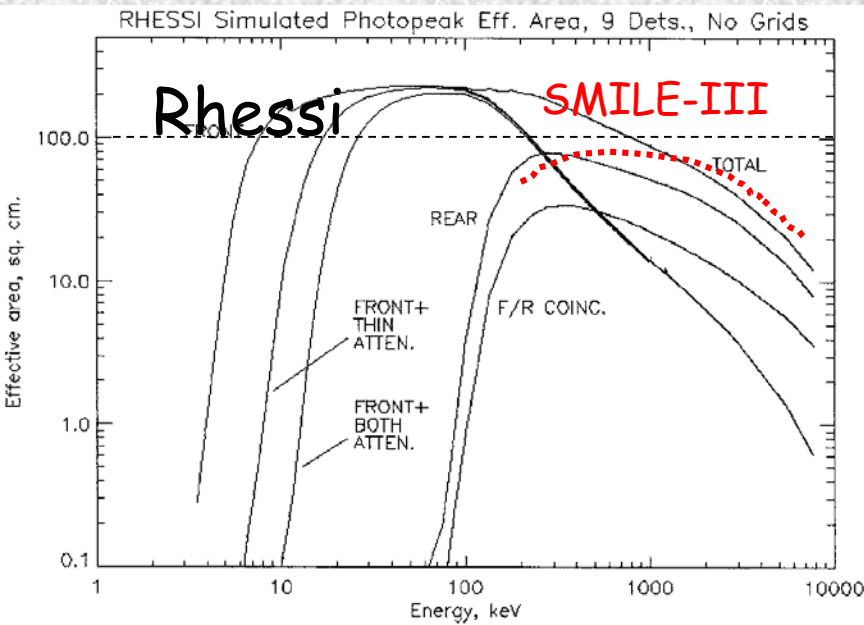
# Imaging Observation of REP in Antarctic



## BARREL OBSERVATIONS



# SMILE-II+以上 Solar Observation



Rhessi  $\sim 100\text{cm}^2 @ 100\text{keV Ge}$

But No shield + no real imaging

全方向から雑音、 $>1\text{kHz}$  ( $E_\gamma > 100\text{keV}$ )

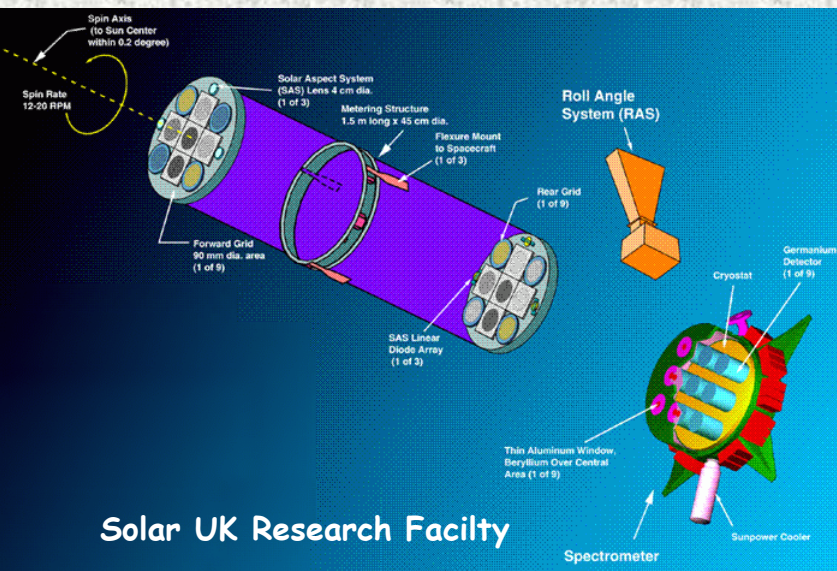
SMILE -III Imaging with  $5^\circ$ 直径

有効面積同程度、しかし立体角  $10^{-3}$

(有効面積: $80\text{cm}^2 \sim 1\text{Hz} > 100\text{keV}$   $5^\circ$  径)

観測時間同じで2桁、長時間観測

( $10^5$ 秒以上) で4桁弱いフレアを検出。



Line  $\gamma$ 線: REHSSI:Ge  $3\text{keV} @ 1\text{MeV}$

しかし $511\text{keV}$   $2.2\text{MeV}$  以外は $10\text{-}30\text{keV}$ の幅)

SMILE-II+以上 GAGG  $30\text{keV} @ 1\text{MeV}$

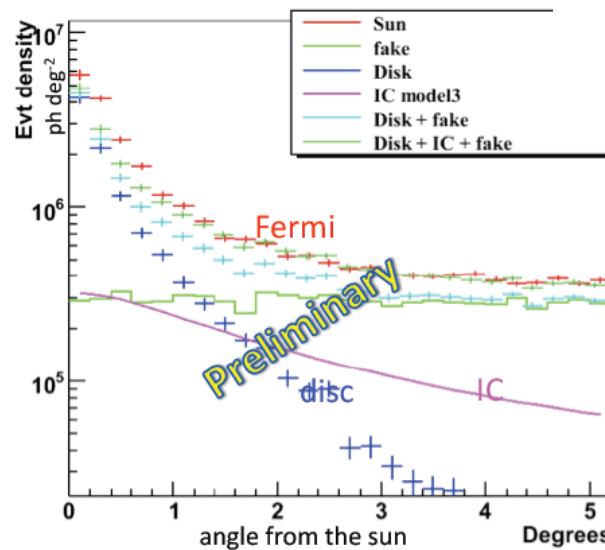
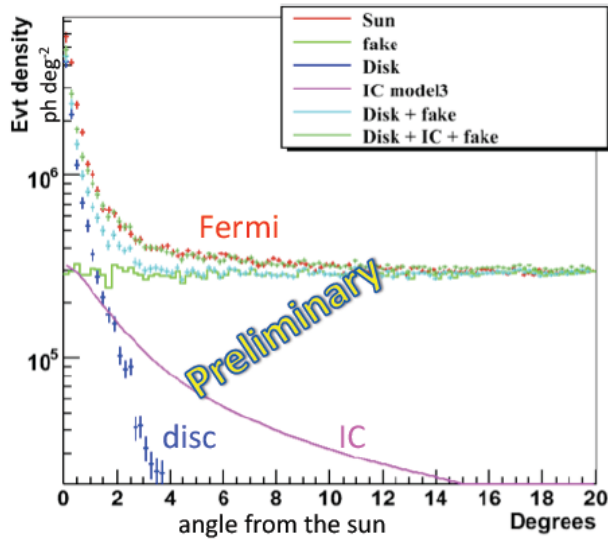
しかし雑音  $10^{-3}$

大半のLine  $\gamma$ 線2桁感度改善

# GeV emission from Quiet Sun (Fermi)

## Angular profiles with inverse Compton emission

> 100 MeV

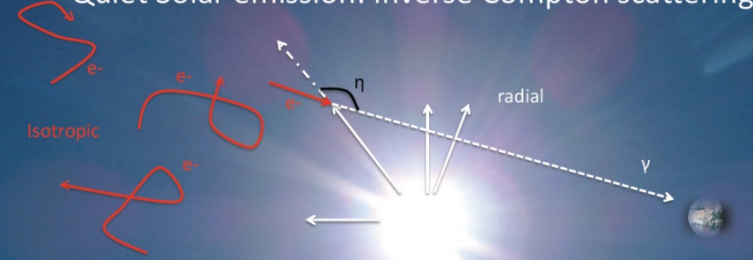


Good agreement with model of the angular profile of inverse Compton

**Elena Orlando**  
(MPE Garching)

MeVでも十分同様な  
Extended は見えるはず

Quiet Solar emission: Inverse Compton scattering



✓ Solar black-body distribution: photons with radial distribution

✓ Modulated CRE are isotropic



# Summary

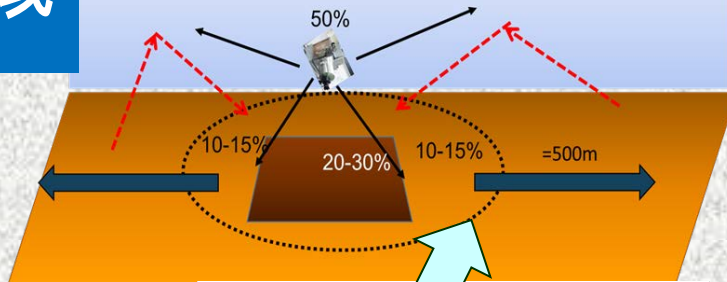
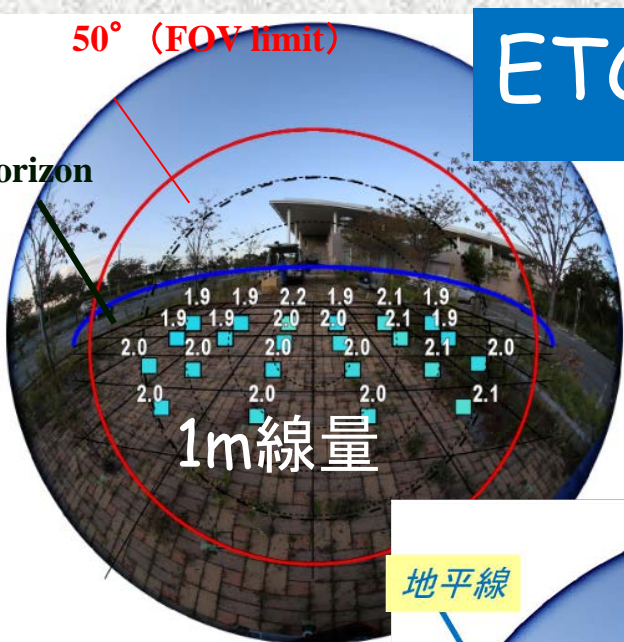
- 核ガンマ線でもX線、光学同様 **イメージング分光が実現**
- **1mCrab以下の感度達成技術、基本的に確立、**
- 今はUniverse 以外にSpace (地球、太陽系)も考えないと宇宙科学としての発展は容易でない。
- また核ガンマ線は惑星科学、太陽観測、地球観測などSpaceサイエンスに新しい展開を与えられ、充分興味を持てる。
- 京大では、宇宙総合学ユニットが基盤事業に発展、有人宇宙学を創設し、その一環として惑星探査が重要。

50° (FOV limit)

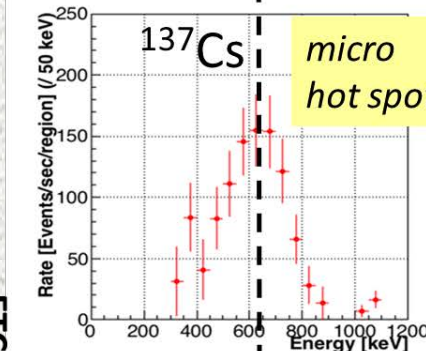
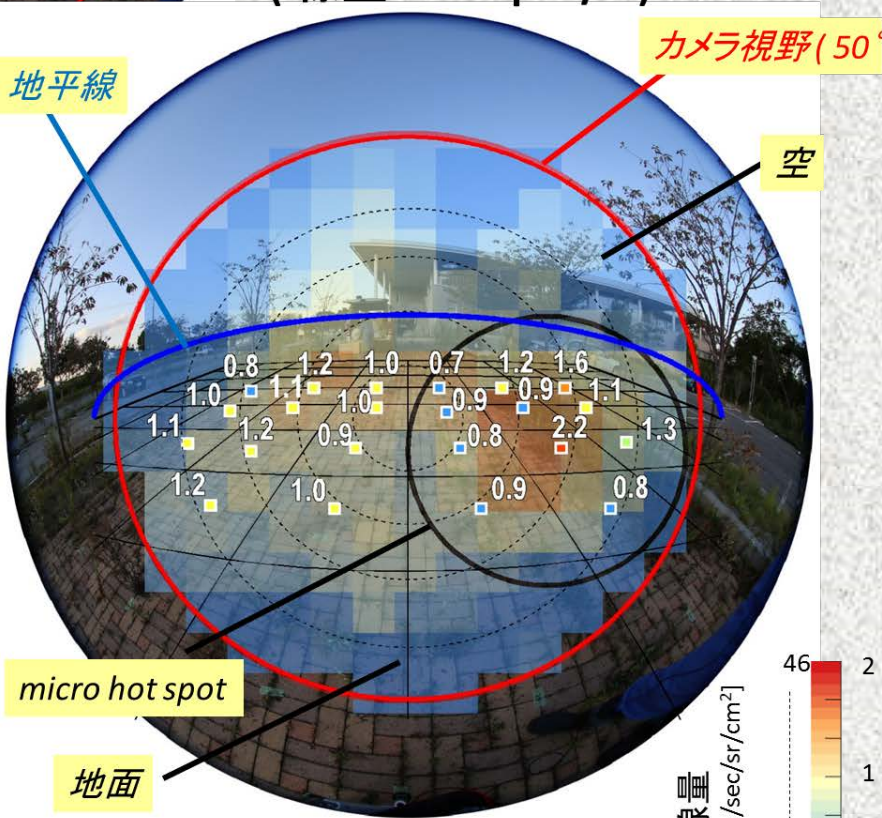
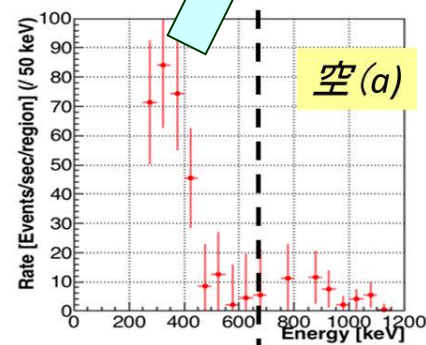
# ETCC (除染区域)

1m空間線量の内訳

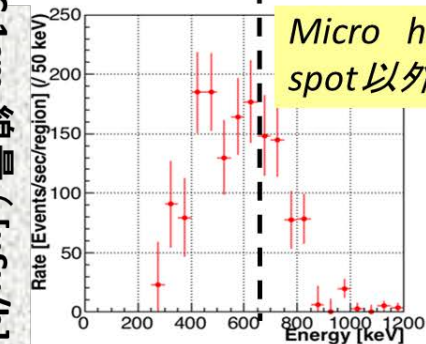
horizon



除染区域 (駐車場)  
(線量 0 ~ 2 μSv/h)



ETCC 1cm-線量 ( [μsv/h]



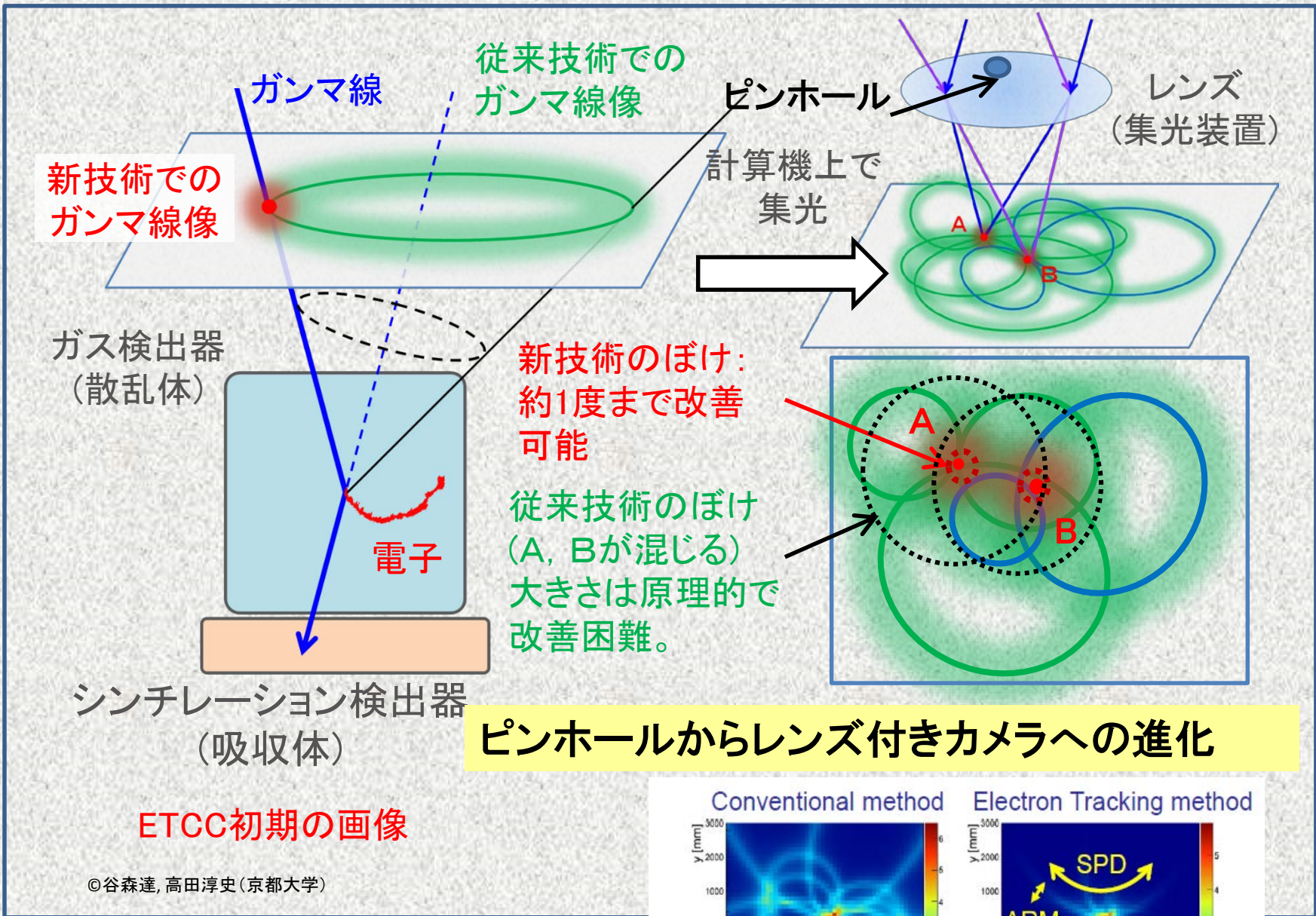
放射線量

[photon/sec/sr/cm<sup>2</sup>]



2.2 : 1-cm dose measured with dosimeter

Tomono et al., (2017),  
Scientific Reports



## ピンホールからレンズ付きカメラへの進化

