



SMILE project

高田 淳史 (京大理)

経歴

- ▶ 1998-2002 京都大 理学部
- ▶ 2002-2008 京都大 大学院 理学研究科
物理学・宇宙物理学専攻 宇宙線研究室
電子飛跡検出型コンプトンカメラの開発
気球を用いた実証実験 (SMILE-I)
- ▶ 2008-2010 JAXA/ISAS 大気球実験室 (プロジェクト研究員)
新気球通信システムの開発
大気球実験運用
- ▶ 2010-2013 京都大 生存圏研究所
宇宙圏航行システム工学 (特定研究員)
地球観測用超小型衛星用データハンドリングユニットの開発
SMILE-IIの開発
- ▶ 2013- 京都大 大学院理学研究科 (助教)
SMILE-II/SMILE-2+の開発

MeVガンマ線天文学

◆ 元素合成

SNR : 放射性同位体

銀河面 : ^{26}Al ・電子陽電子対消滅線

◆ 粒子加速

ジェット (AGN) :

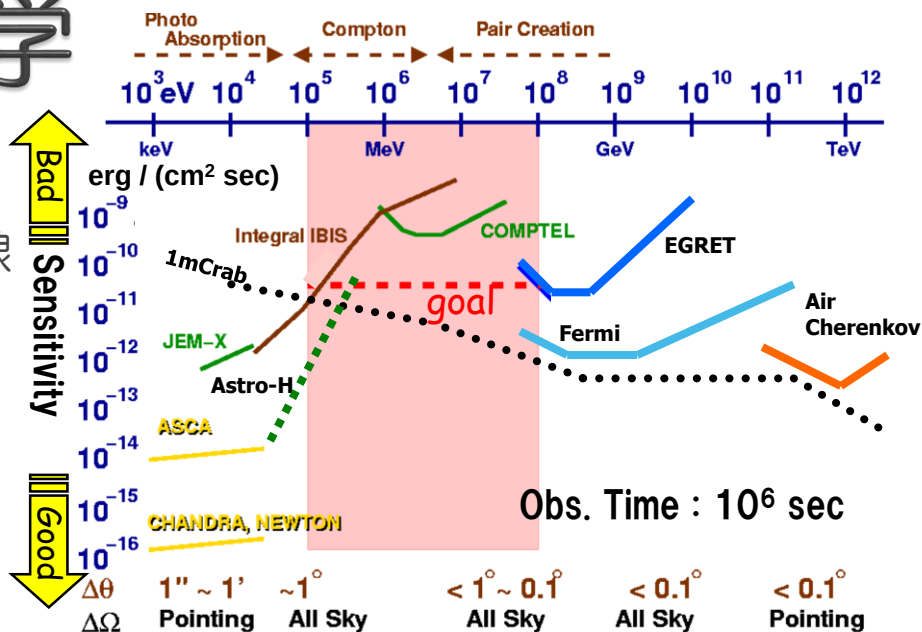
シンクロトロン + 逆コンプトン

◆ 強い重力場

Black hole : 降着円盤, π^0

◆ Etc.

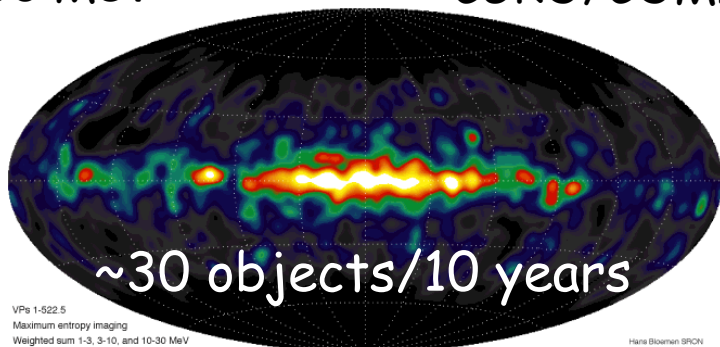
ガンマ線パルサー, 太陽フレア



MeV sky map

1-30 MeV

CGRO/COMPTEL

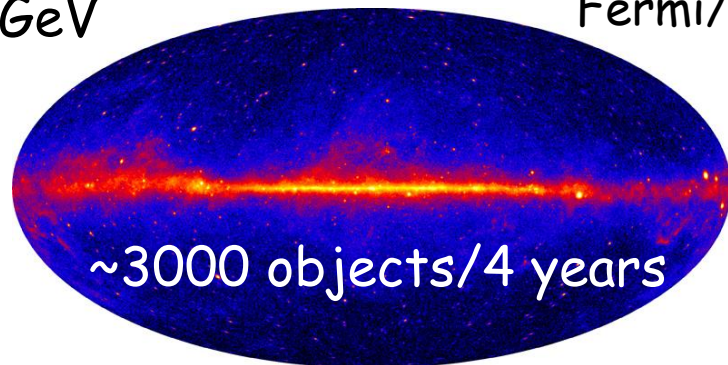


V. Schönfelder+ (A&AS, 2000)

GeV sky map

> 1 GeV

Fermi/LAT



F. Acero+ (ApJS, 2015)

次世代MeVガンマ線望遠鏡への要請

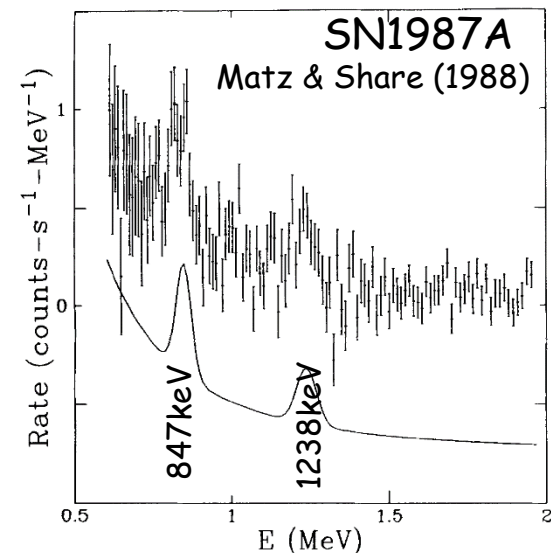
- 数百keV ~ 100 MeVの広帯域
- 全天探査の為に広い視野
- 高S/Nの鮮明な画像

核ガンマ線

放射性同位体からのガンマ線

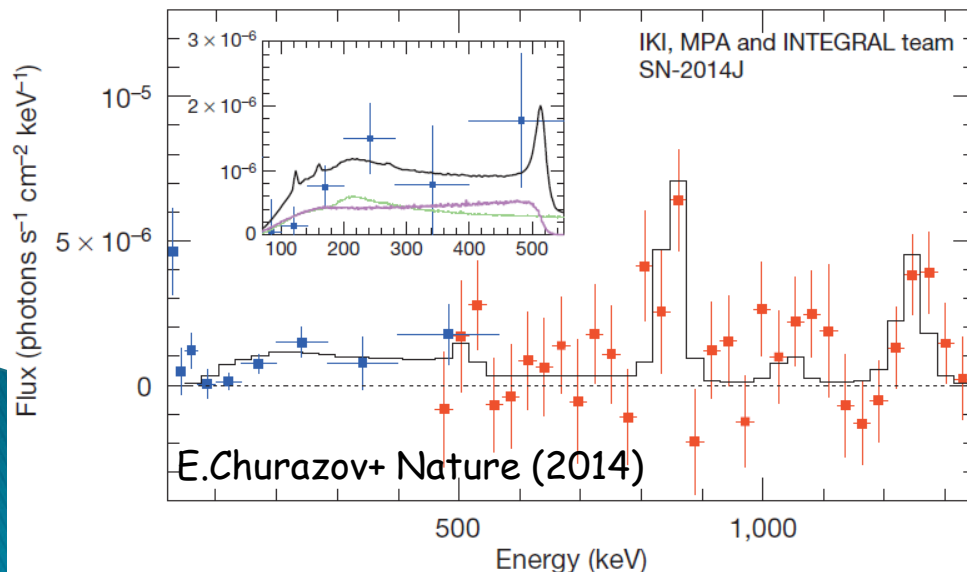
⇒ 元素合成の現場・元素の拡散を直に見る

	Energy [keV]	Decay
^{56}Ni	158,270,480,759,812	6.10d
^{56}Co	847,1238,2598	77.2d
^{57}Co	122,136	271.7d
^{44}Ti	1157	63year
^{26}Al	1809	7.4×10^5 year

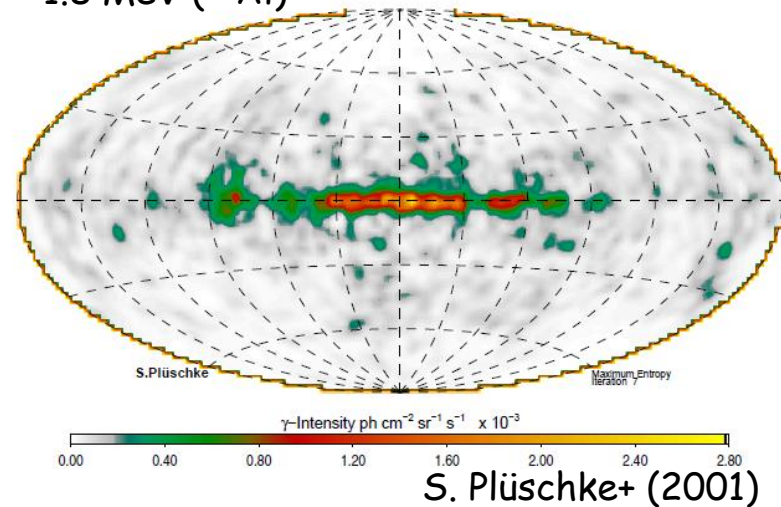


Broad band SN2014J spectrum and the model (day 75)

Fluxes of 847 and 1238 keV lines + continuum below 511 keV

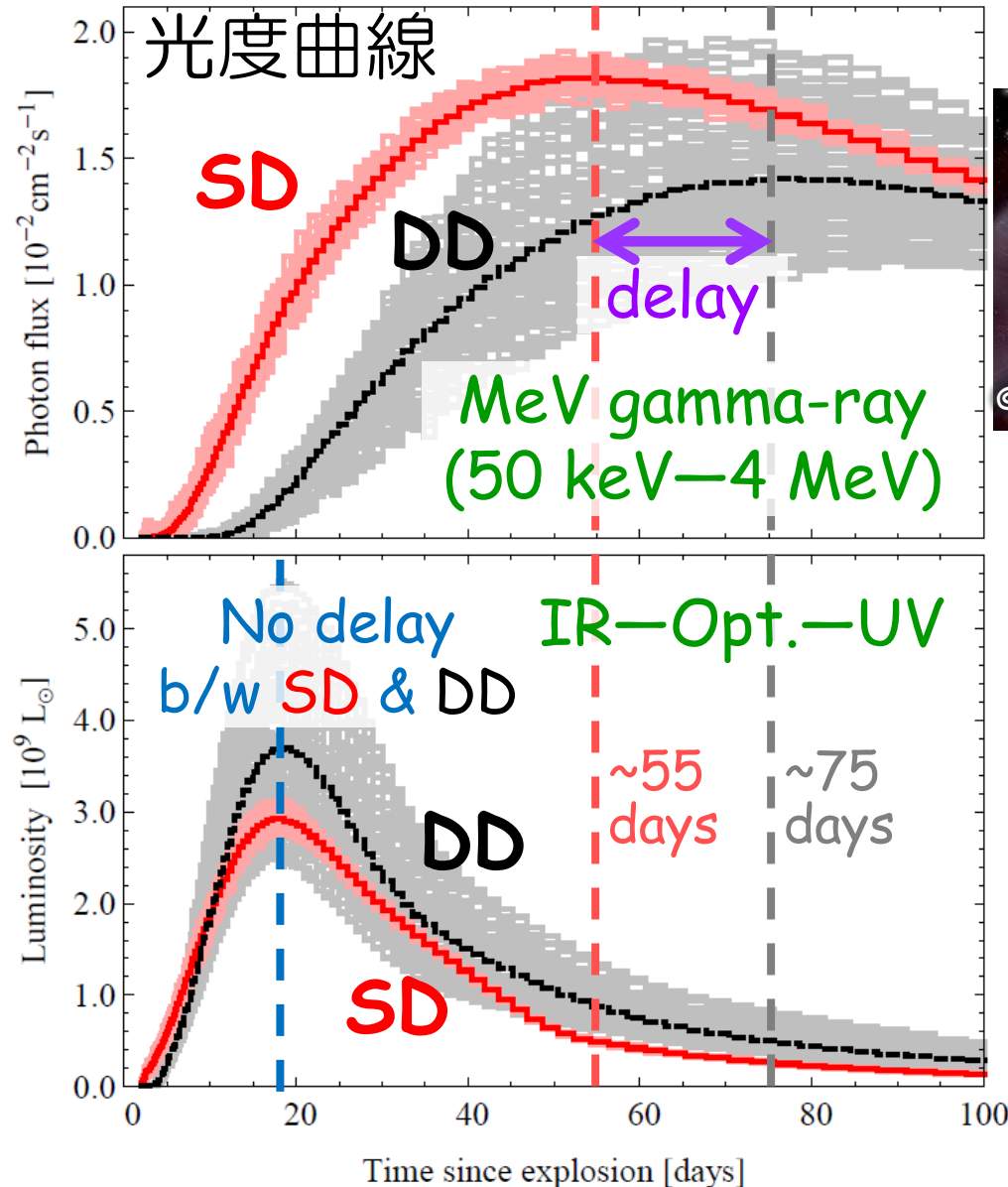


1.8 MeV (^{26}Al)

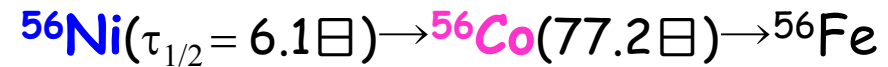


Ia型超新星の爆発過程診断方法

A. Summa, ..., K. Maeda, et al., A&A 554, A67 (2013)



伴星からの質量降着 白色矮星同士の合



**MeVガンマ線観測は
Ia型超新星爆発の
重大なヒントをもたらす**

観測機器に要求される項目

- 良い点源角度分解能 (PSF)
- 効率的な雑音事象の抑制
- 広い視野 (FoV)

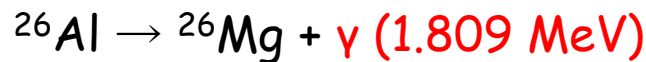
銀河面拡散核ガンマ線観測の現状

◆ ^{26}Al (1.809 MeV)

- AGB星
- Wolf-Rayet星
- 重力崩壊型超新星爆発
- 新星のアウトフロー

等で生成

N. Prantzos & R. Diehl, Physics Reports (1996)



半減期 7×10^5 年

HEAO-Cで発見後, SMMでも確認

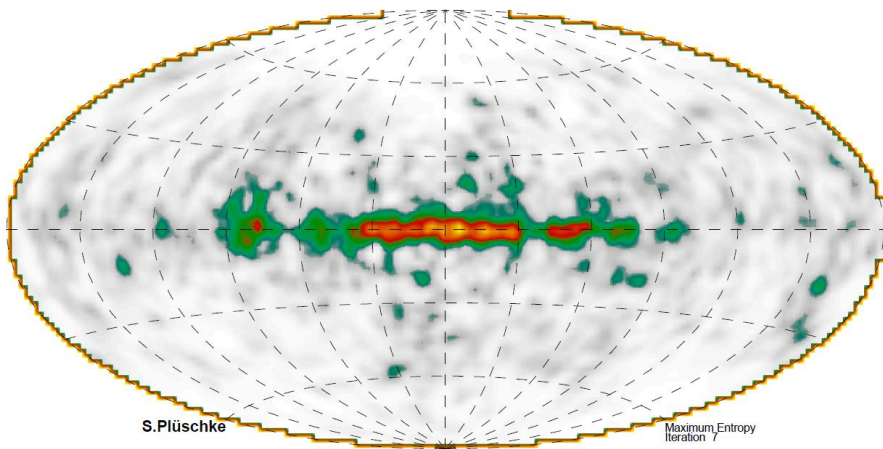
W. A. Mahoney+, ApJ (1982),

G. H. Share+, ApJ (1985)

COMPTEL

S. Plüschke+, ESASP (2001)

J. Knödseder+, A&A (1999)

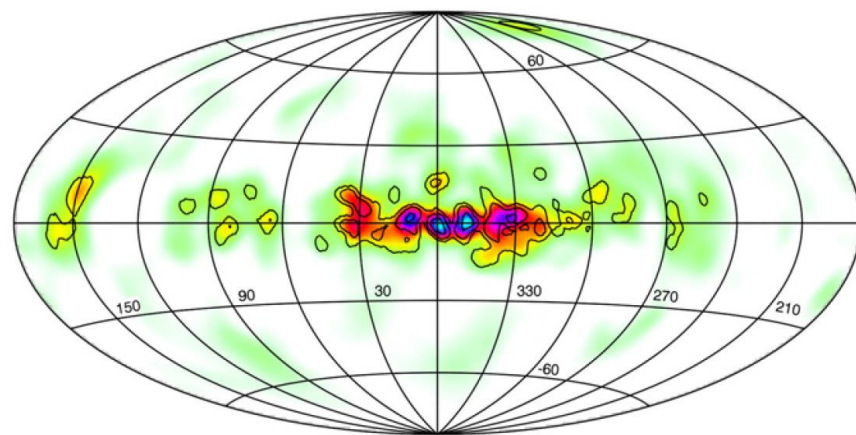


γ -Intensity $\text{ph cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1} \times 10^{-3}$

- 銀河面に広く分布
- X線やNIRとは良い一致は見られない
- マイクロ波やFIR (DIRBE $240 \mu\text{m}$)とは粗い一致が見られる

SPI/INTEGRAL

L. Bouchet+, ApJ (2015)

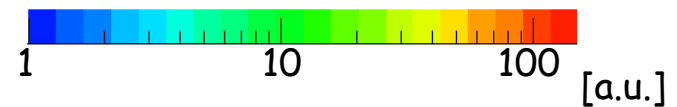
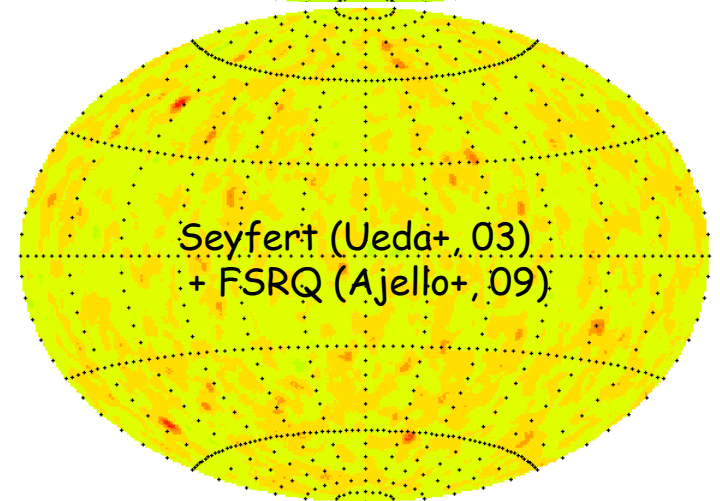
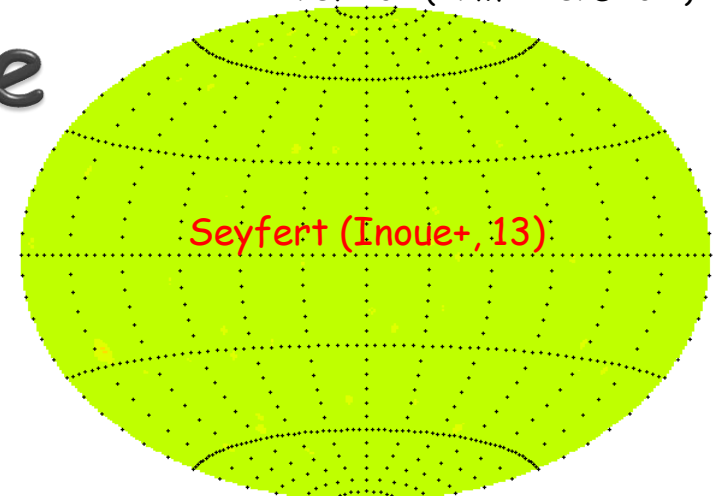
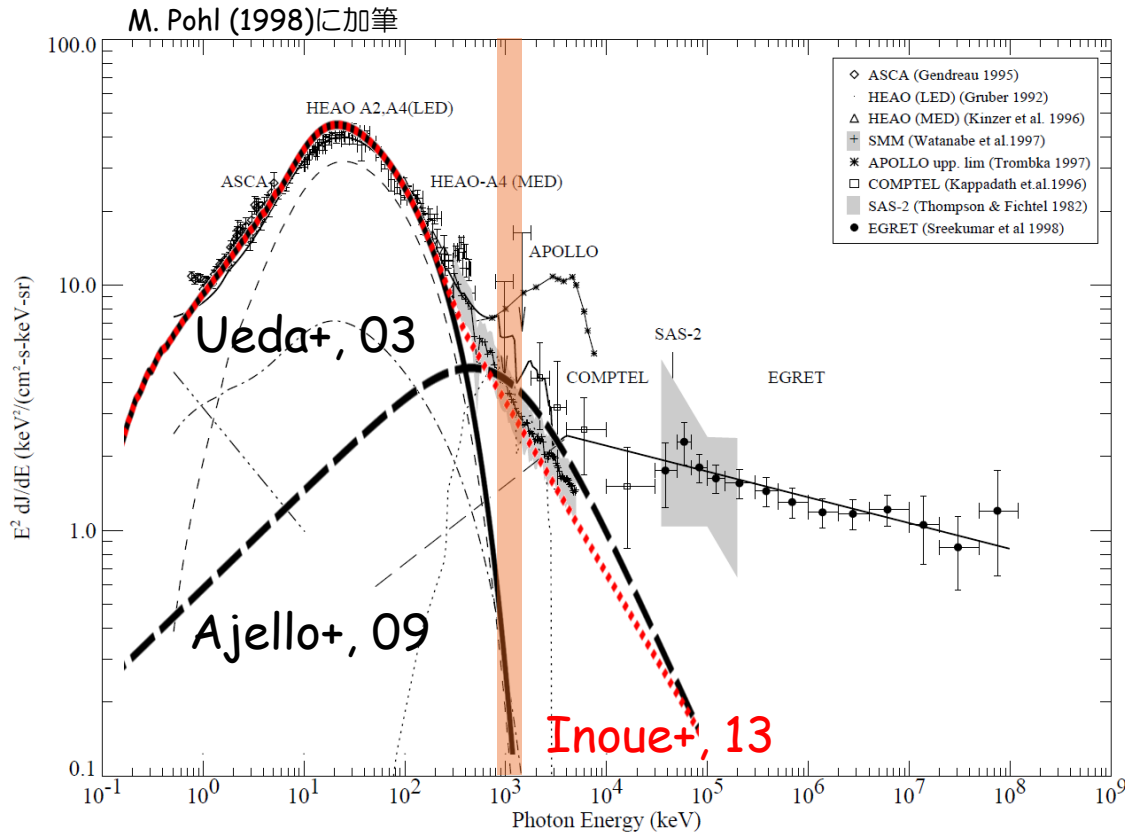


$\text{ph.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{sr}^{-1}$

- マイクロ波やFIRとは粗い一致
- 他にもMIRとも矛盾しない

Extragalactic diffuse

0.8~1.2 MeV
PSF ~3° (ARM 2° SPD 10°)



背景放射の詳細なスペクトル + 非一様性

⇒ MeV領域の背景放射の起源を特定可能
5° 以下のPSFがあれば非一様性が見える

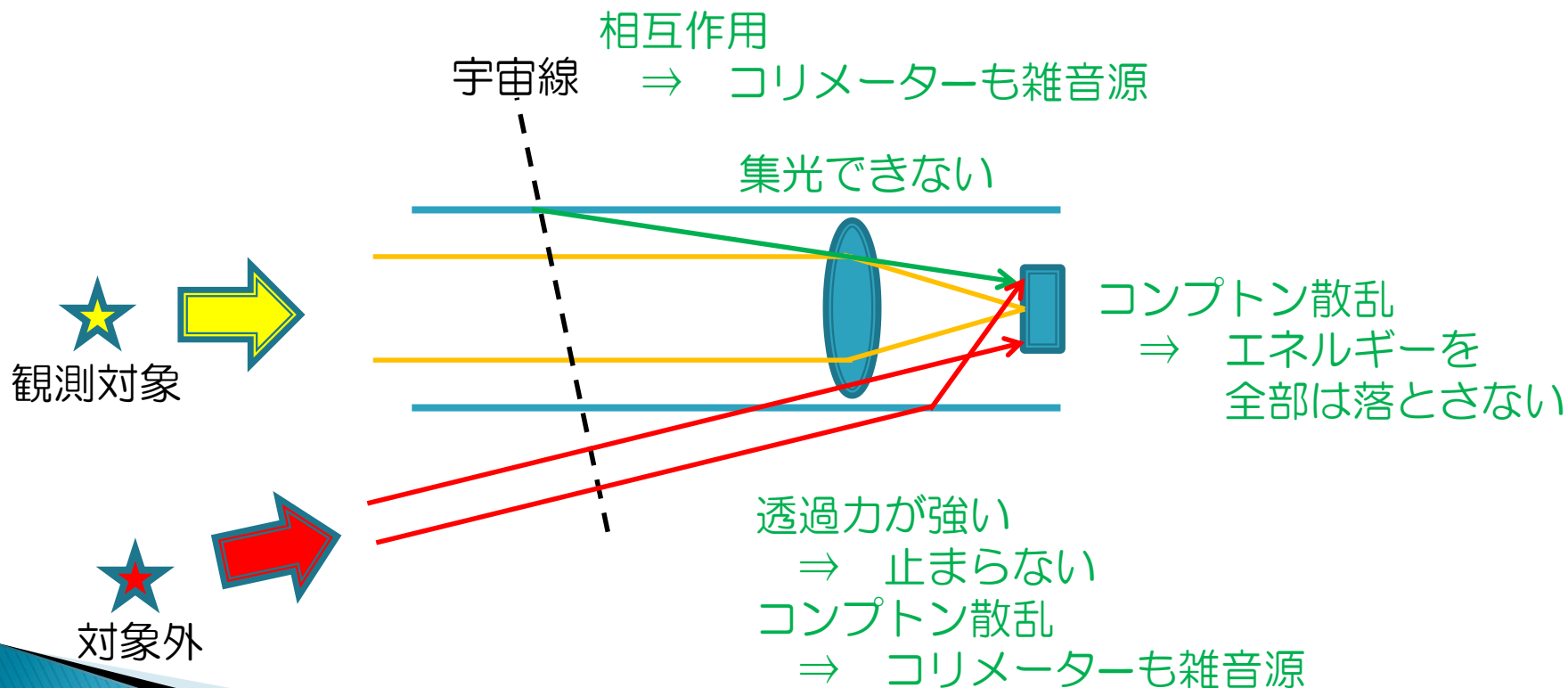
ガンマ線を見る

放射性同位体・原子核の脱励起・粒子の崩壊
対消滅・制動放射・シンクロトロン放射
逆コンプトン散乱 ...etc



観測対象の
スペクトルだけが見たい

軟ガンマ線にあったイメージング方法が必要



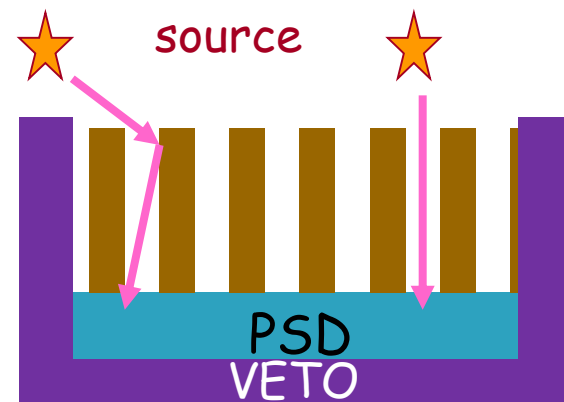
軟ガンマ線イメージング方法

➤ コリメータ + 位置検出器

⇒ OSSE (CGRO)

入射方向を制限し、その方向のみ測定

→ 高エネルギーでは困難



➤ 符号化マスクを用いたイメージング

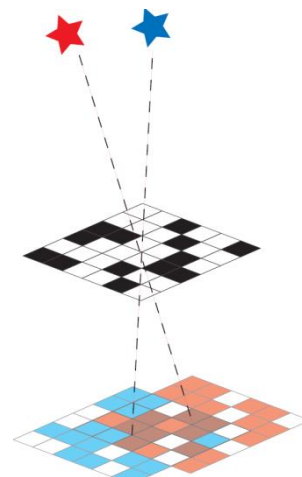
⇒ BAT (Swift), SPI (INTEGRAL)

方向に対応する影絵を作り

積分画像から方向毎の強弱を推定

→ 高エネルギーでは困難

マスクを通らないガンマ線は雑音に



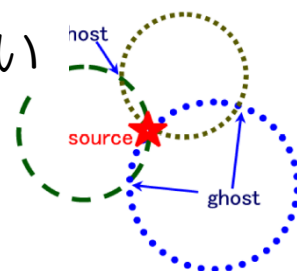
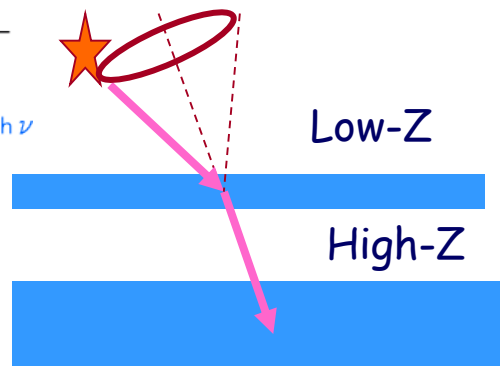
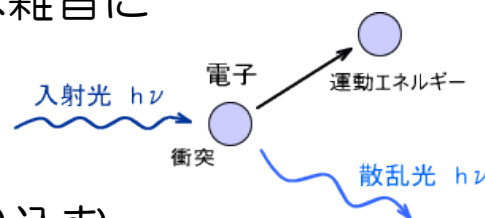
➤ コンプトン法

⇒ COMPTEL (CGRO)

散乱現象を利用して到来方向を絞り込む

→ 高エネルギーでも使用可

情報不足の為、事象毎には決まらない



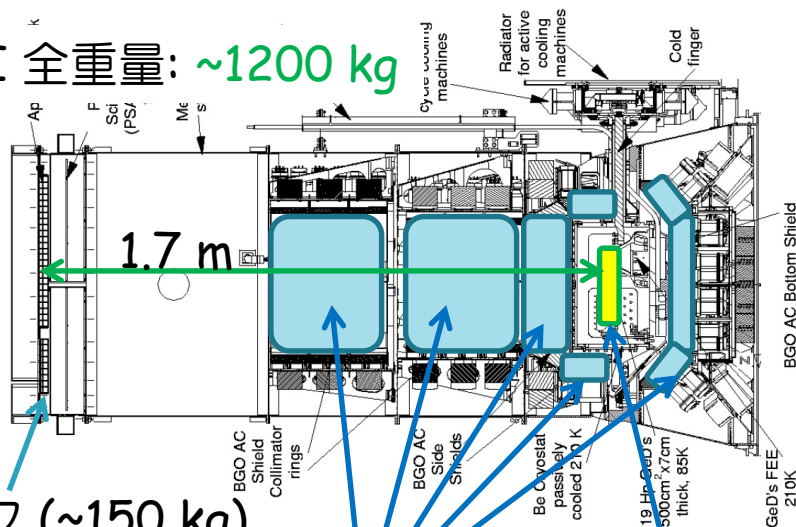
Single Compton

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

符号化マスク法の現状

SPI (INTEGRAL) G. Vedrenne+, A&A (2003)

SPI 全重量: ~1200 kg



マスク (~150 kg)
タングステン 3cm厚

Anti用BGO (~500 kg)

Ge (~20 kg)

- 検出器質量 ≪ VETO質量
- 検出スペクトルは**ほぼinstrumental BG**
- 多量のNoiseを含む統計数から方向導出

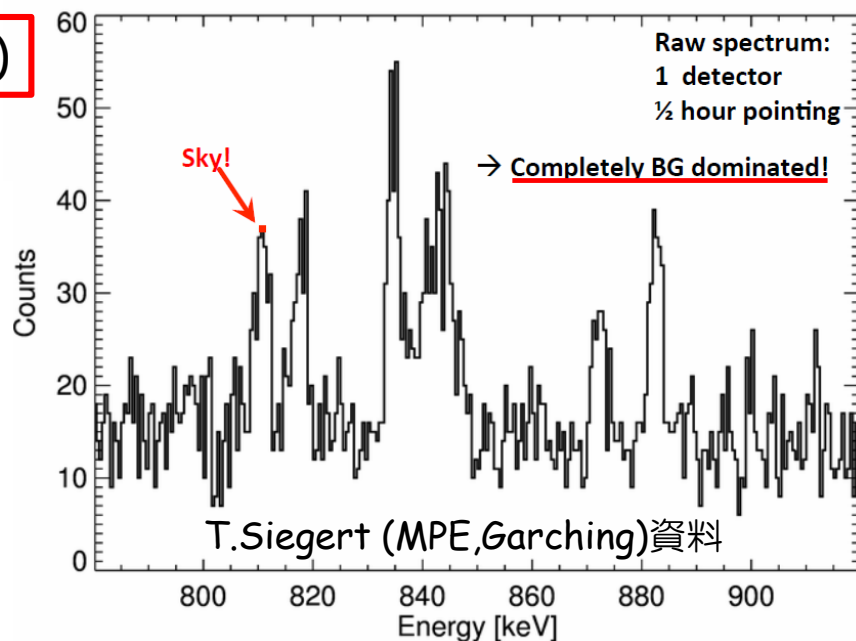
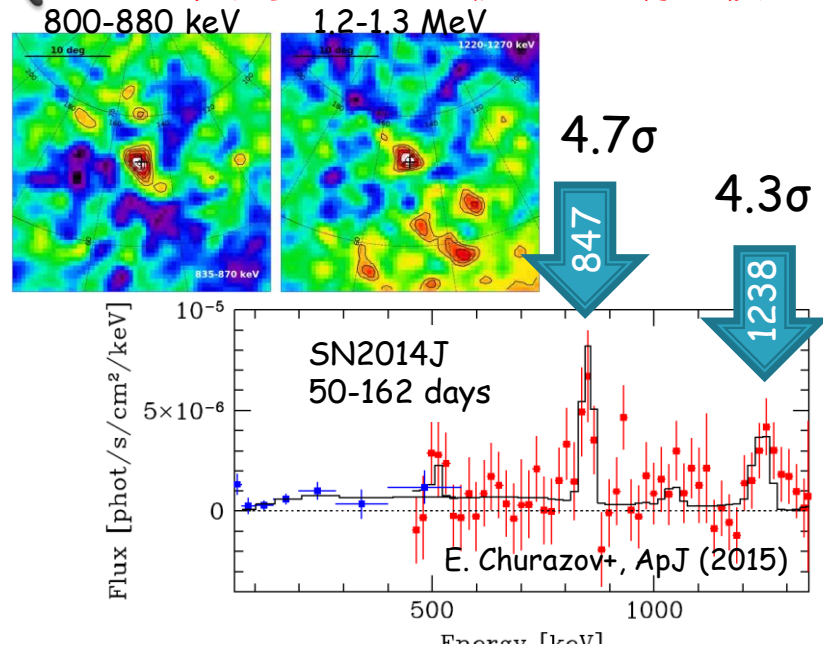
$$\text{Detect} = \text{Response} \times S + B$$

⇒ **S**に対して大きな不定性

- >600 keVでは4天体のみの検出

L. Bouchet+, ApJ (2008)

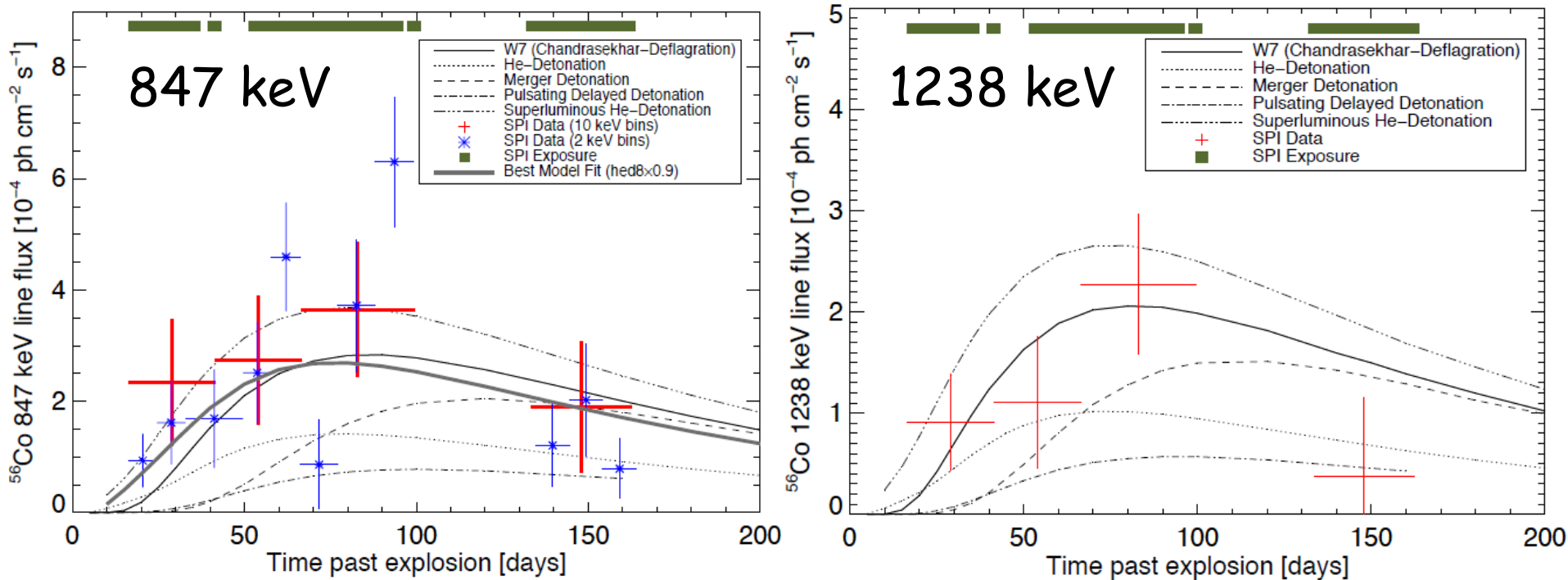
40年ぶりの非常に明るいIa型SNで
30年ぶりの⁵⁶Coの核ガンマ線の検出



INTEGRAL's lightcurves of SN2014J

Time profiles of two bright ^{56}Co lines (847 & 1238 keV) are successfully obtained.

These are consistent with both of SD & DD scenarios

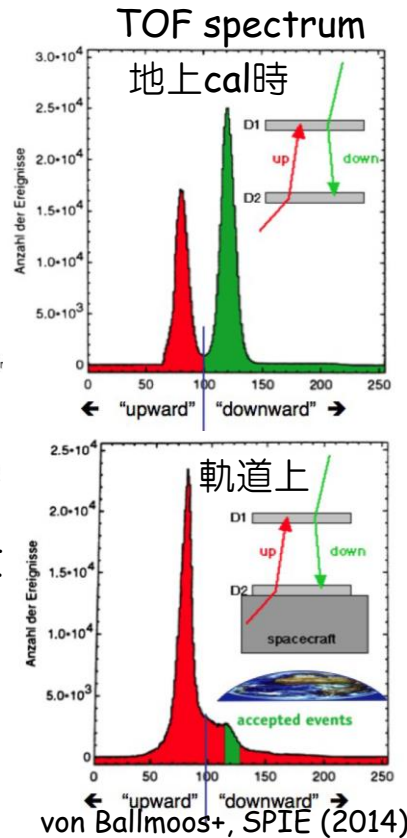
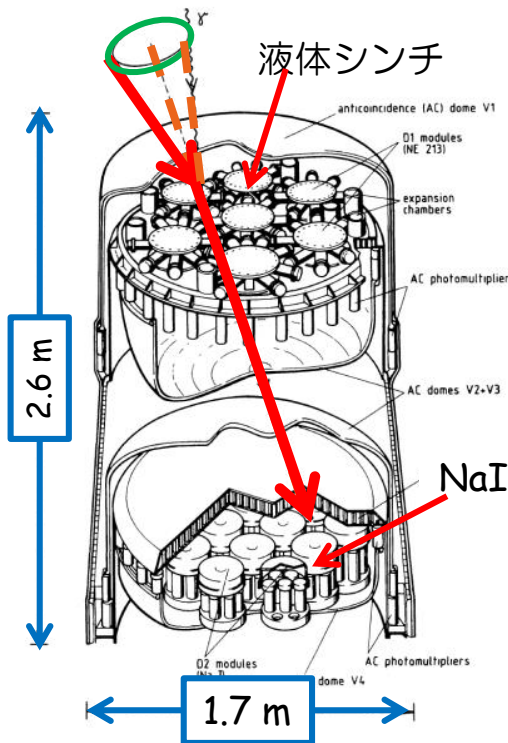


R. Diehl+, 2015, A&A, 574, A72

Even for the closest SN Ia (~ 3.5 Mpc) in the last 40 years, current large satellite suffers huge background.

コンプトンイメージング法の現状

COMPTEL (CGRO)



COMPTEL 有効面積: 13~20 cm²

BGの除去努力をするも

予想より~3倍悪い感度に留まる

- 前後の検出器間のTOF
 ↳ 下方からの事象の除去
- 散乱角の制限
 ↳ 中性子事象の除去
- 液体シンチのPSD
 ↳ 中性子事象の除去
- Anti用プラシン
 ↳ 荷電粒子事象の除去

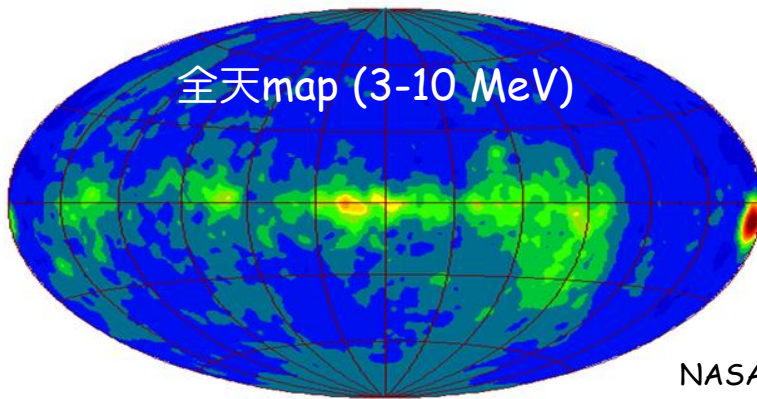
V. Schönfelder, ApJSS (1993)

COMPTELからの7つの提言

V. Schönfelder, New Astron. Rev. (2004)

1. 角度分解能の向上
2. 雑音除去能力が必要
3. 反跳電子の方向を取得
4. 周辺物質の削減
5. 大気ガンマ線を視野外に
6. 低雑音の軌道の選択
7. 散乱体と吸収体の同時

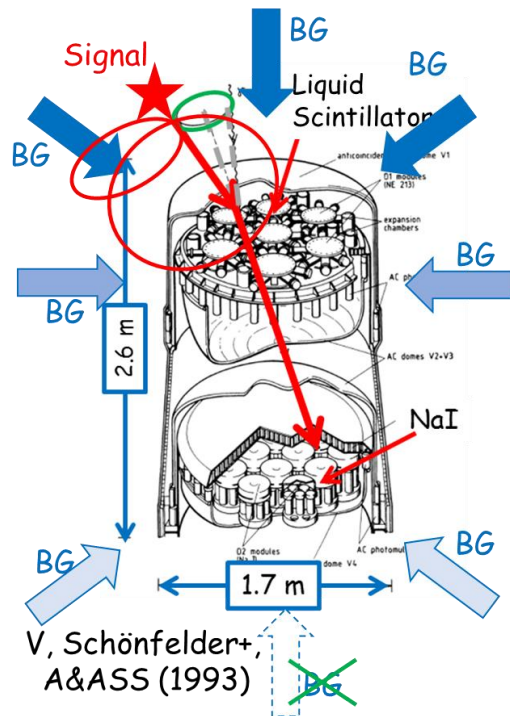
⇒ 『観測領域のノイズを下げる』が重要



NASA

MeVガンマ線観測の現状打開へ

COMPTEL

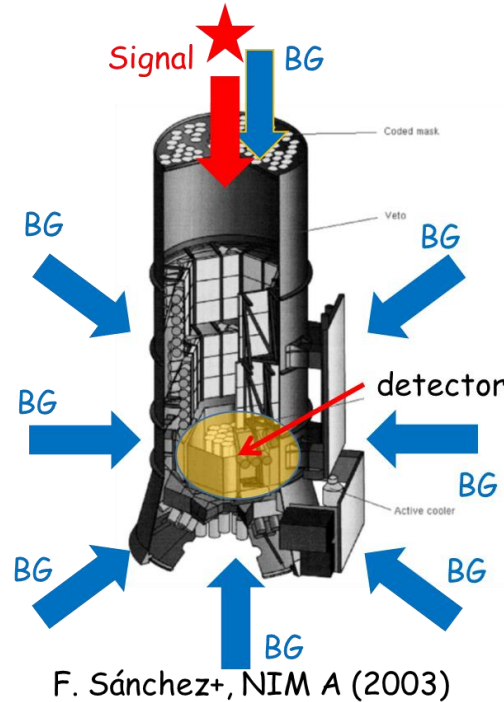


PSF ~ 平均的な散乱角

3 σ の有意度で検出できる最小flux

$$\text{検出感度} = 3 \times \sqrt{\frac{f_B \Delta\Omega \Delta E}{A T}}$$

SPI/INTEGRAL



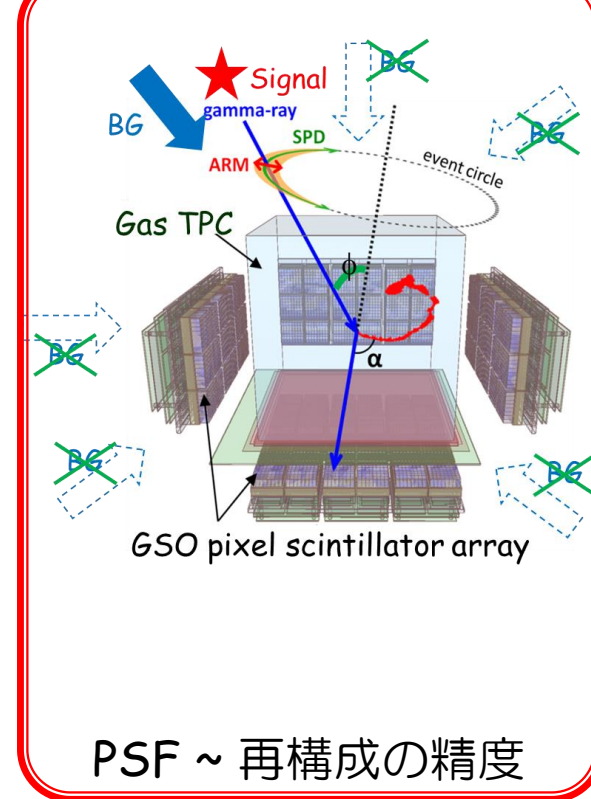
BGを含む統計量で方向検出

f_B : 雑音量 A : 有効面積 $\Delta\Omega$: PSF

シミュレーション・計算で算出可能

PSFの広がり小さければ、視線方向のBGが主

SMILE ETCC



PSF ~ 再構成の精度

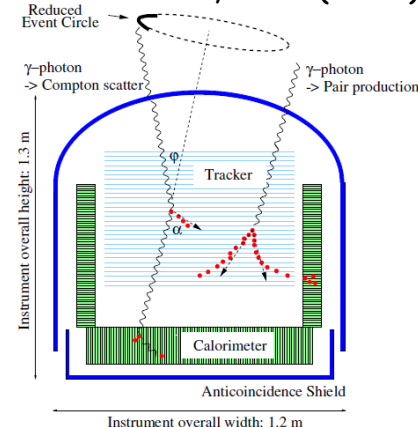
電子飛跡検出型コンプトンイメージング

従来型のコンプトンイメージング

⇒ 反跳方向の情報が取れていない

取得できればevent毎に到来方向を決定可能

MEGA G. Kanbach+, SPIE (2003)



1990半ば~
2000頃~
2003

MEGA開発開始
谷森研ETCC開発開始
MEGA prototype完成
谷森研ETCC first image

2006

SMILE-I 気球実験

MEGA開発Stop

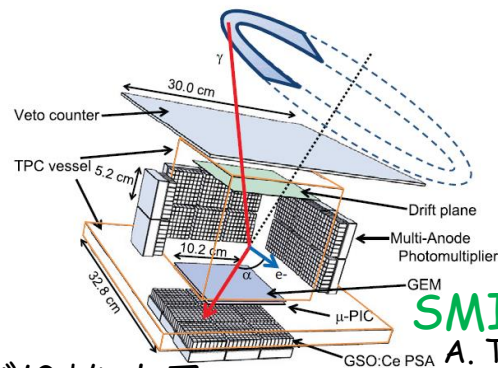
2010頃

じわっとETCC開発が広がり始める

MeVガンマ線の観測要求が増加

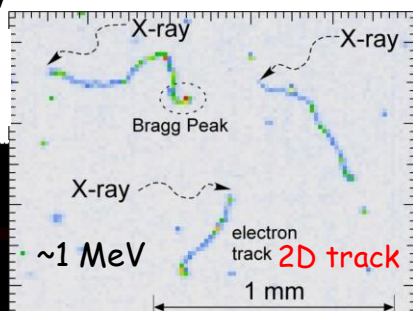
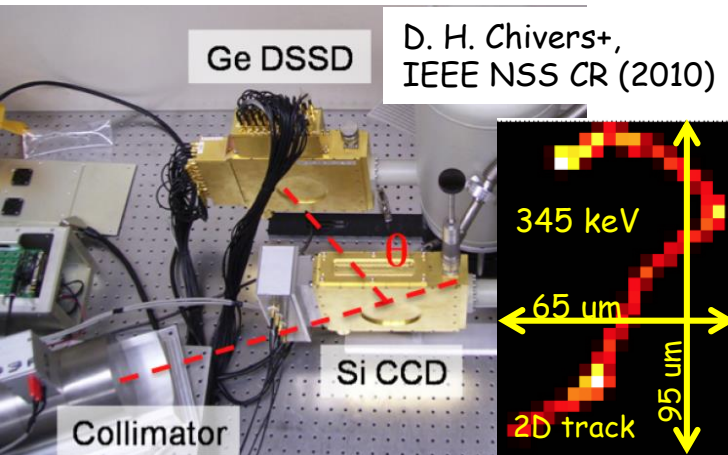
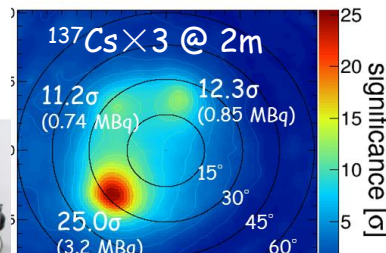
2013

SMILE-II system完成

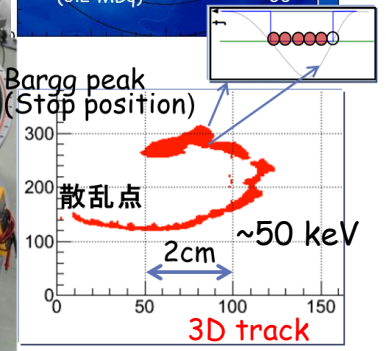
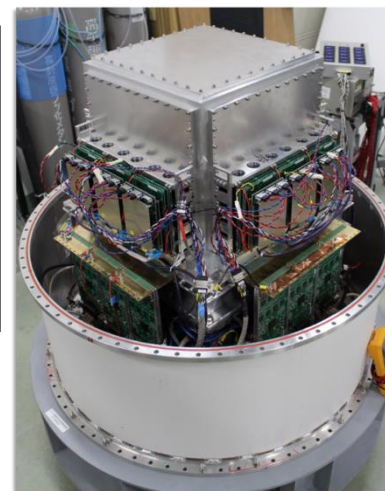


SMILE-I
A. Takada+, ApJ (2011)

SMILE-II
T. Tanimori+, ApJ (2015)



SOIピクセル検出器による
電子飛跡
武田彩希,
private communication (2015)

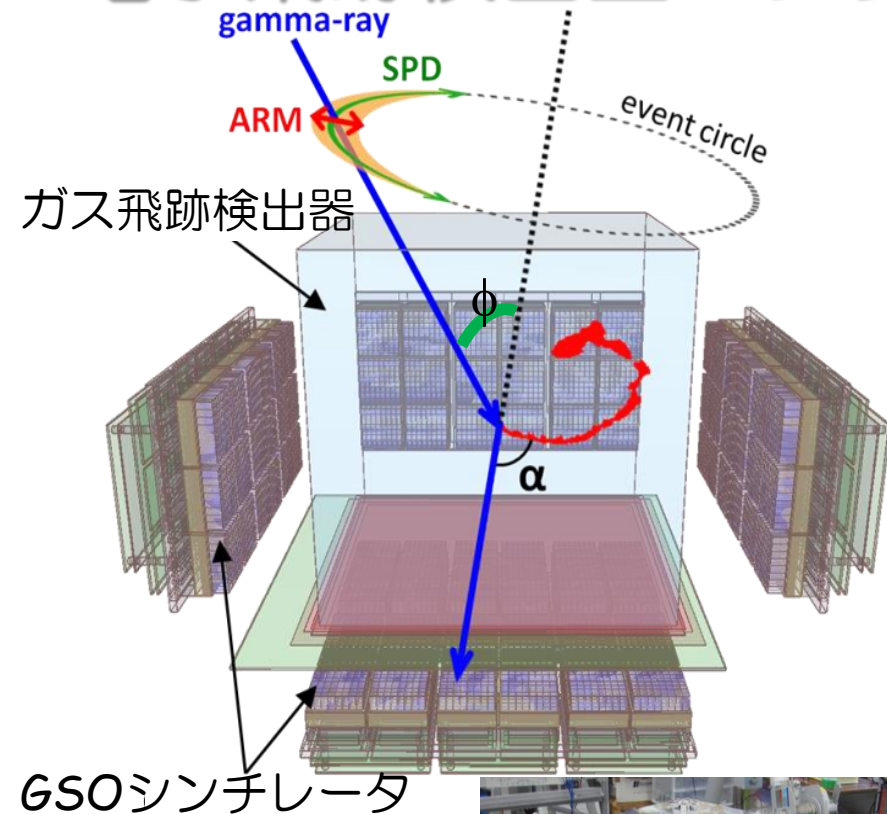


「ガス」？「半導体」？

	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

「ガスだから有効面積が小さい」は間違い！！

電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (ETCC)



➤ ガス飛跡検出器

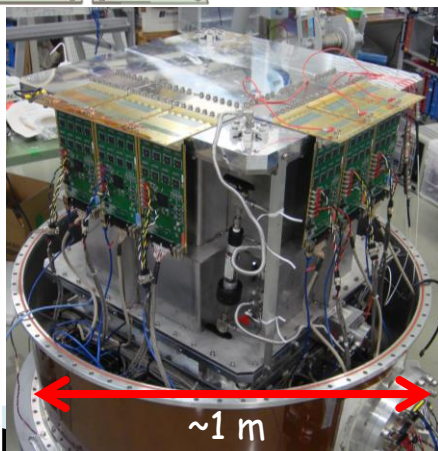
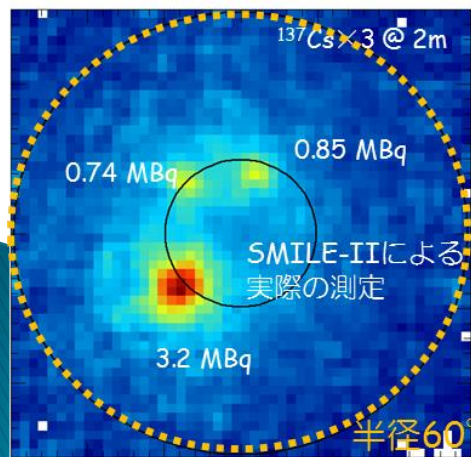
コンプトン反跳電子の
飛跡とエネルギー

➤ ピクセルシンチレータアレイ

コンプトン散乱ガンマ線の
吸収点とエネルギー



検出事象ごとに
コンプトン散乱を完全に再現



SMILE-2+ ETCC

- 到来方向とエネルギーを一意に特定
- 大きな視野 (~ 3 sr)
- 電子飛跡による鋭いPSF
⇒ 範囲外の雑音をイメージングで除去
- α 角によるコンプトン散乱運動学テストと
 dE/dx による粒子識別による雑音除去能力
⇒ 重いVETO検出器が不要

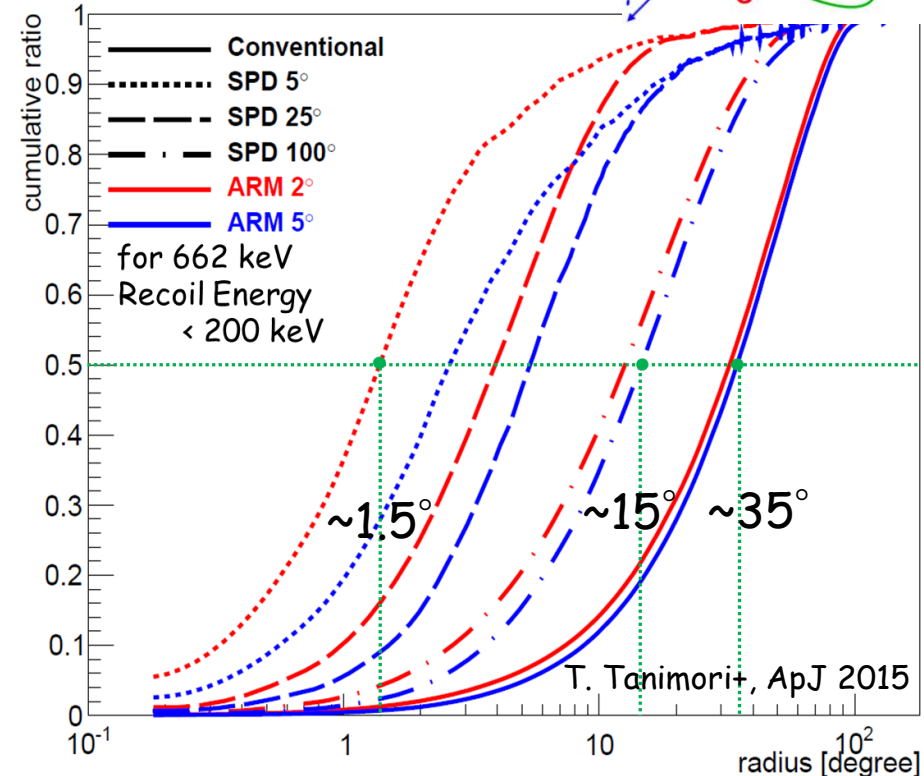
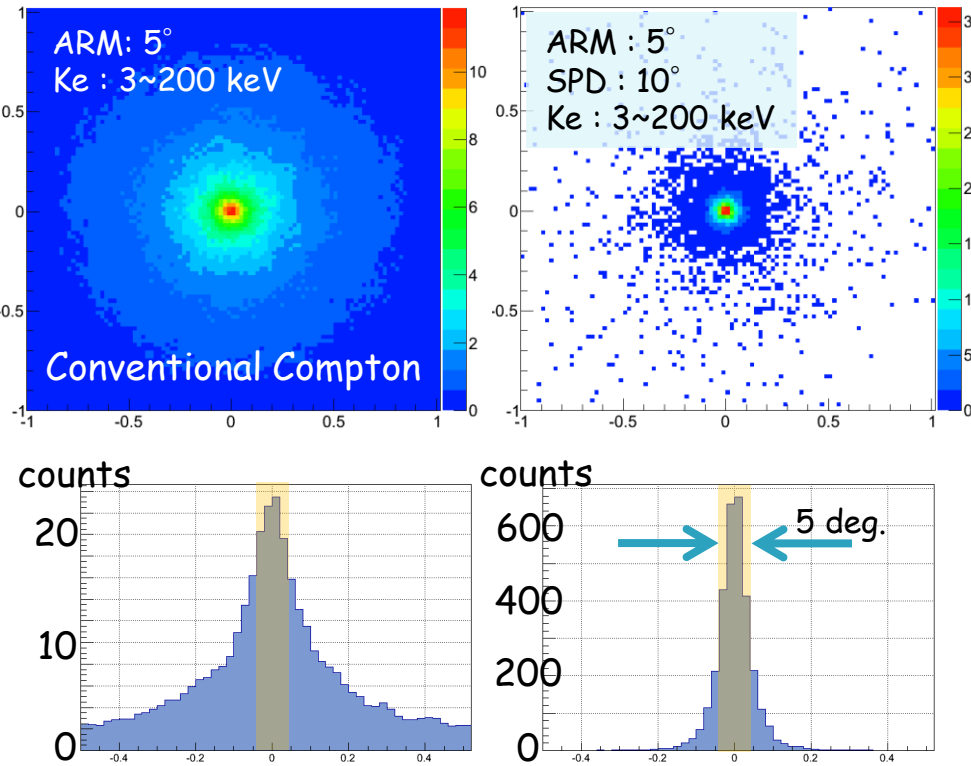
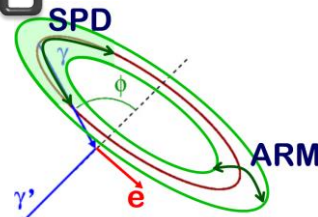
コンプトン望遠鏡の角度分解能

Angular Resolution Measure : コンプトン散乱角の決定精度

Scatter Plane Deviation :

散乱方向を軸とする散乱平面の決定精度

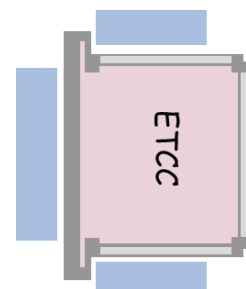
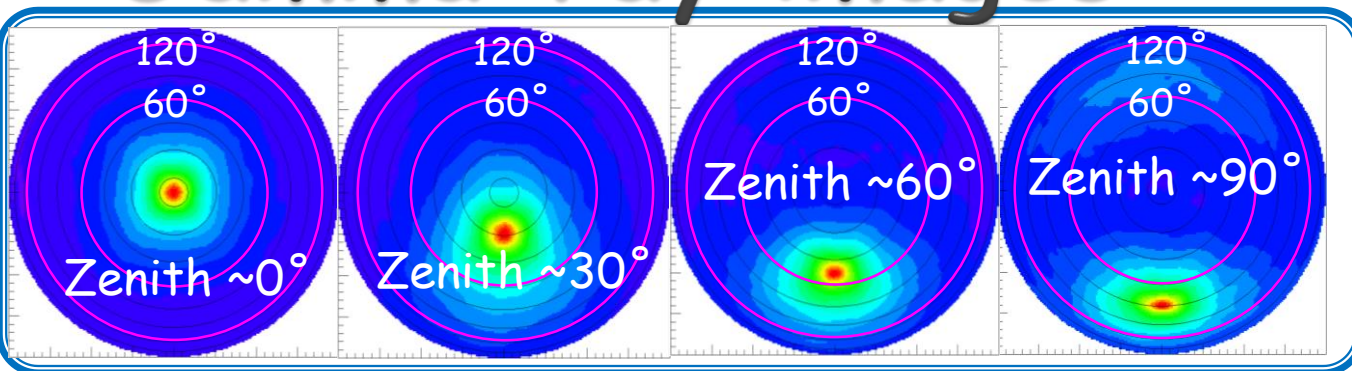
$$\cos \phi = 1 - \frac{m_e c^2 K_e}{E_\gamma (E_\gamma + K_e)}$$



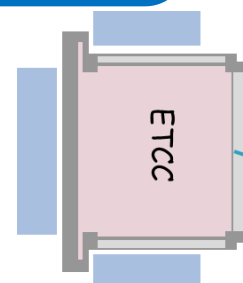
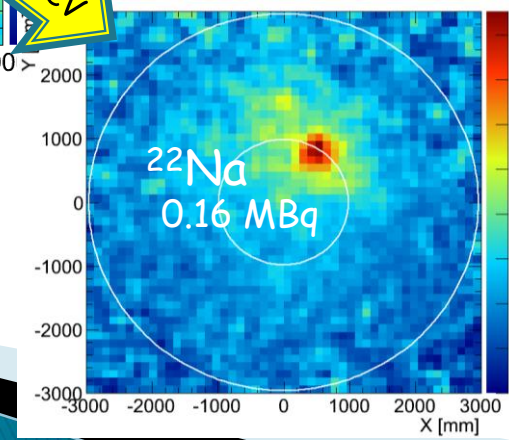
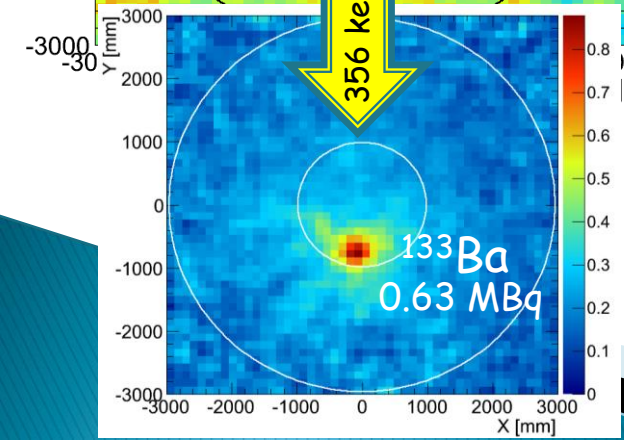
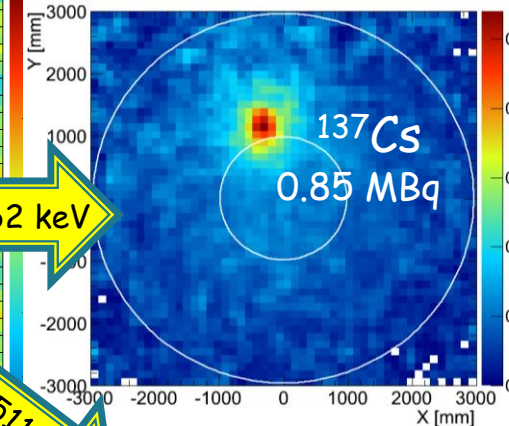
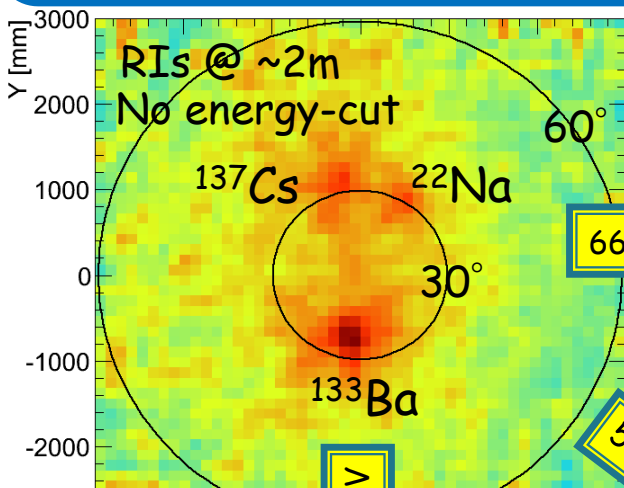
- 散乱角の精度が同じでも反跳方向の精度の違いによってPSFに大きな差
- 反跳方向の精度が悪い $\Rightarrow$ 測定領域に周囲からの大量のもれこみ
- 高角度分解能 $\Rightarrow$ **ARM $\approx$ SPD**が必須
- 反跳方向の精度 $\Leftarrow$ 多重散乱でlimit $\Leftarrow$ 方向決定距離/放射長を小さく
 10^{-5} 放射長 = **Ar: $\sim 1\text{mm}$, Si: $\sim 1\mu\text{m}$**

電子の反跳方向を精度良くとらえるにはTPC with MPGDが有利

Gamma-ray images



~3 hours
No source

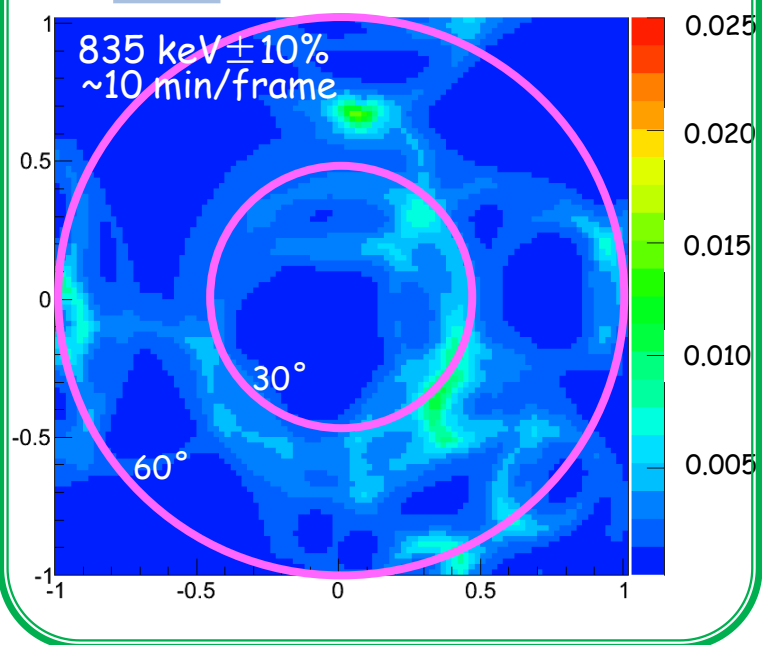


~20 min

+0.01 $\mu\text{Sv/h}$

~3 m

^{54}Mn (835 keV, 1 MBq)



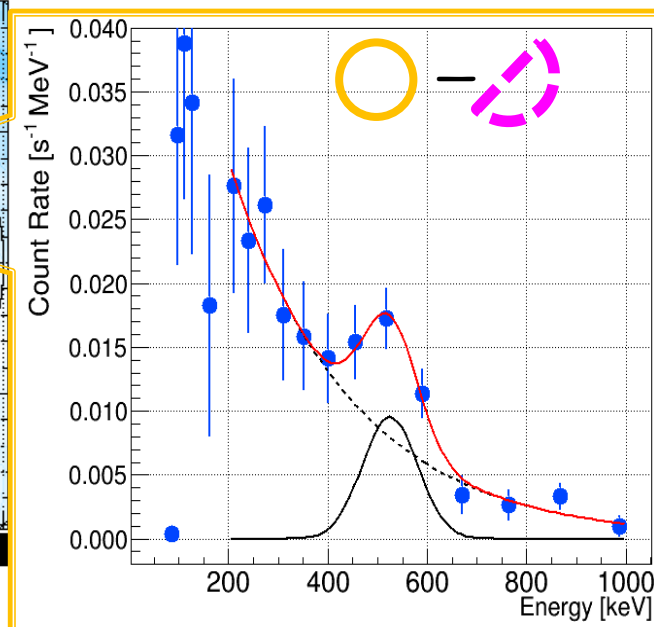
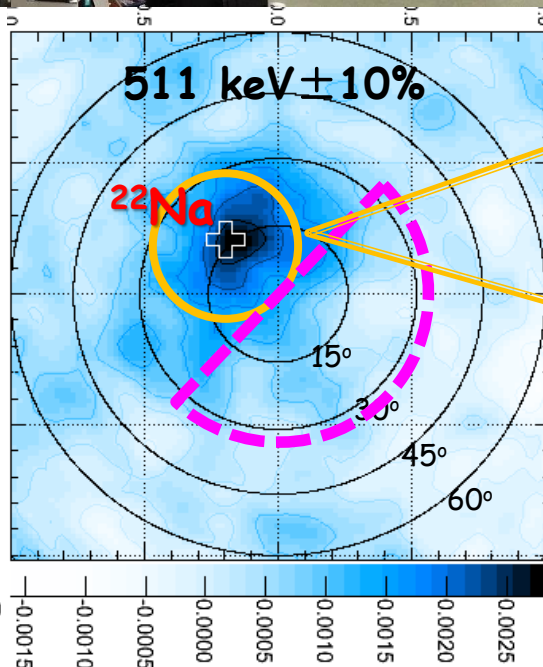
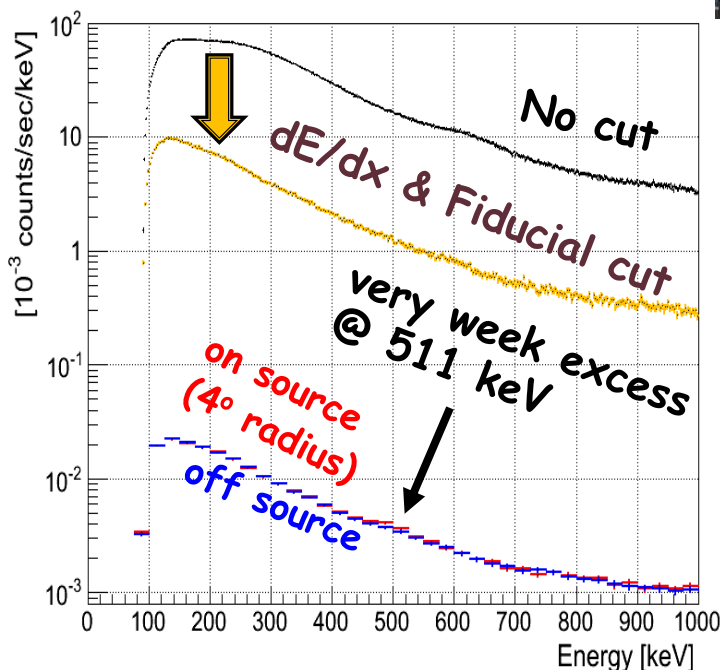
Imaging spectroscopy

T. Tanimori+, ApJ 2015

鉛2mmで遮蔽した ^{22}Na
(27 kBq 相当)

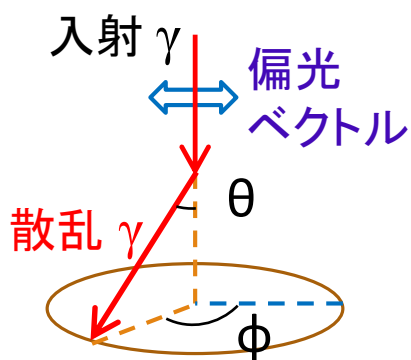
SMILE-II
ETCC
(横倒し状態)

線源分の線量: $\sim 0.0003 \text{ uSv/h}$
空間線量: $0.05\text{--}0.1 \text{ uSv/h}$
 $\Rightarrow 1/200\text{--}300$ の線源

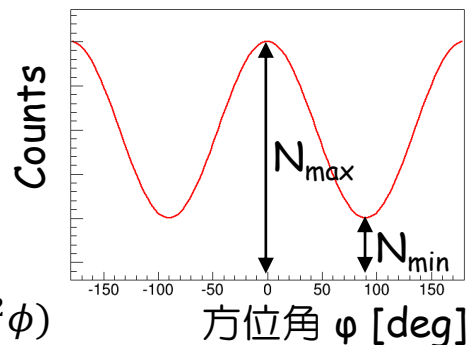


イメージングにより非常に微弱なガンマ線源も観測可能

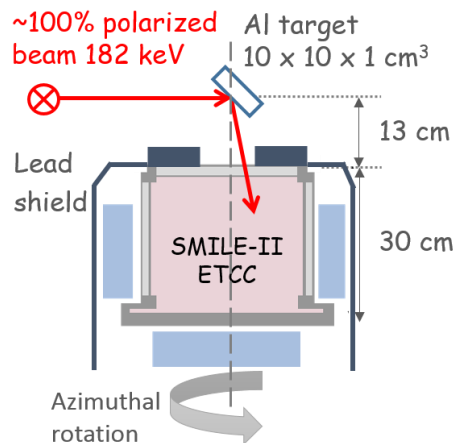
ETCCの偏光検出能力



散乱方向分布の異方性
(Modulation Curve)



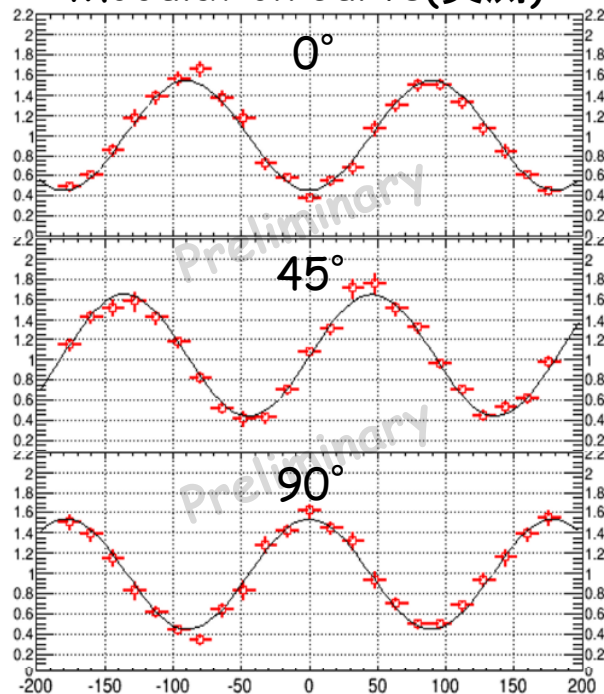
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \left(\frac{E_0}{E} + \frac{E}{E_0} - 2\sin^2\theta \cos^2\phi \right)$$



SPring-8 BL08W

最大入射角	±21°
エネルギー	123–148 keV (134 keV at 90°)
偏光度	~ 96 %
SN比	1 : 1 (trigger rate)

Modulation Curve(実測)



◆ Modulation Factor

$$M = \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{max} + N_{min}}$$

◆ Minimum Detectable Polarization

$$MDP = \frac{429}{ASM} \sqrt{\frac{AS + B}{T}}$$

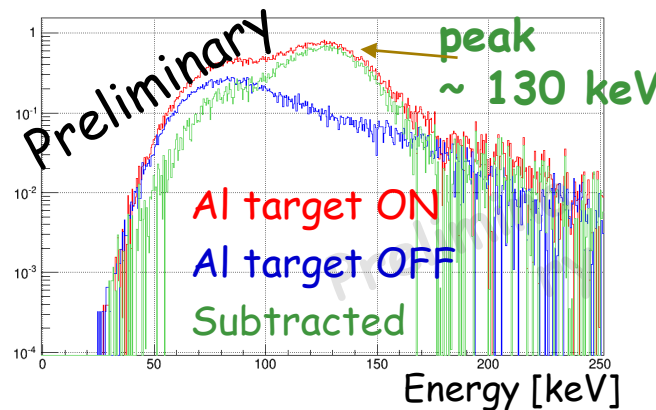
雑音除去重要

A 有効面積 [cm²]

S 信号レート [cm⁻² sec⁻¹]

T 観測時間 [sec]

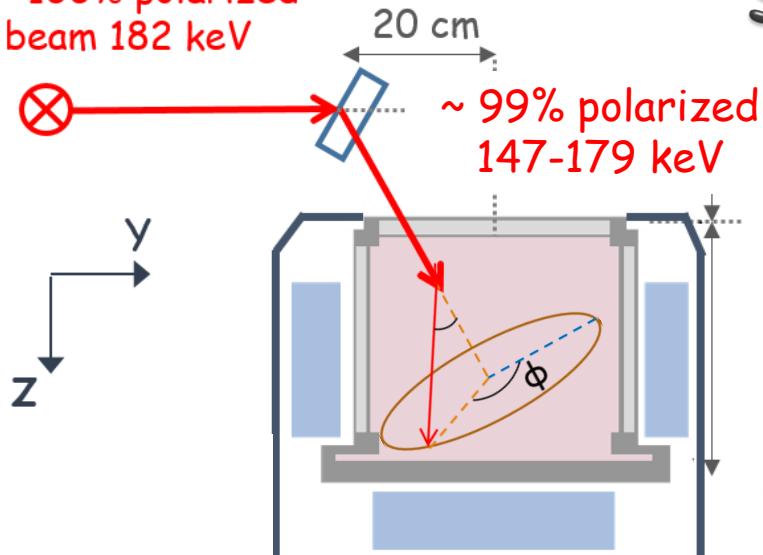
B 雑音レート [sec⁻¹]



設定 角度 [deg.]	Modulation Factor	測定 角度 [deg.]
0	0.57	0.3±1.3
22.5	0.59	-22±1.0
45	0.60	-44±0.7
90	0.57	-90±1.1
180	0.60	-2.3±1.1

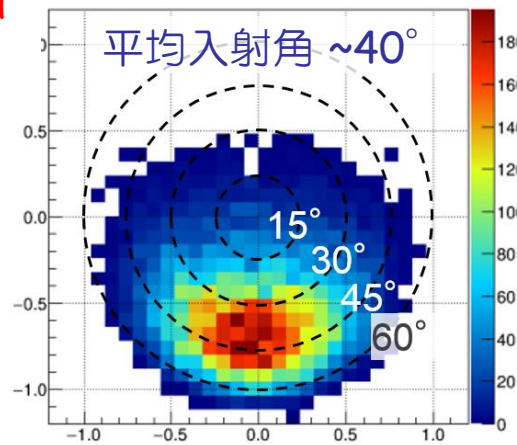
Imaging analysis of off-axis

~100% polarized
beam 182 keV

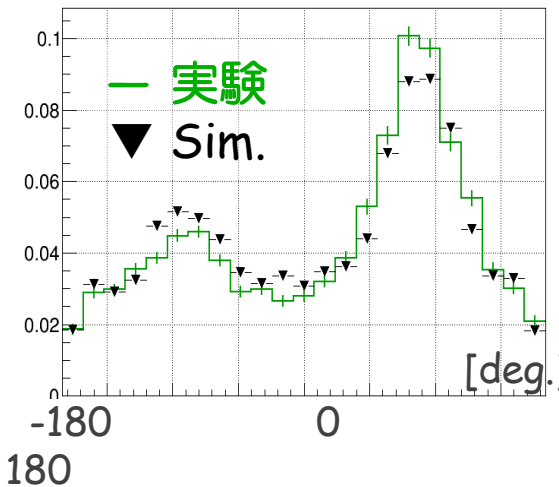


source

X線到来方向イメージ



Modulation curve



◆ Imagingによる到来方向決定

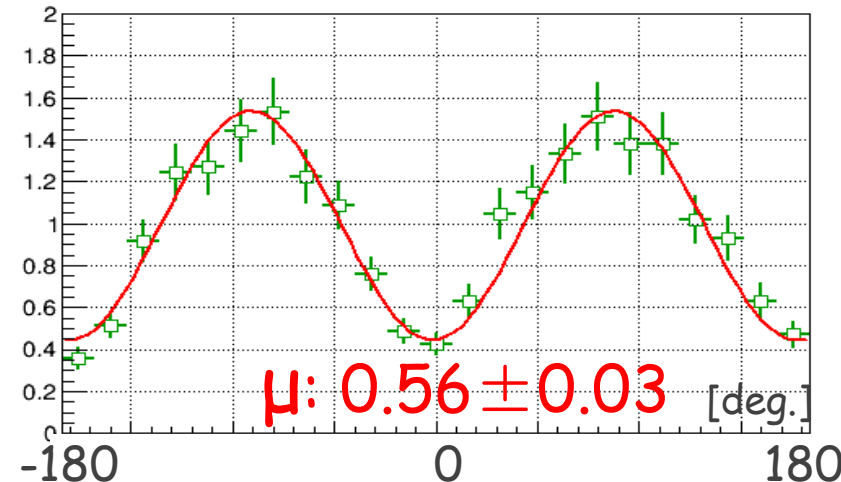
- 斜め入射効果の補正
- 他の衛星の情報が必要

ガンマ線広視野

撮像偏光測定の実証

世界初!

Corrected Modulation Curve



SMILE

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

SMILE-I @ 三陸 (Sep. 1st 2006)

➤ 宇宙拡散・大気ガンマ線の観測 (0.1 ~ 1MeV)

➤ dE/dX によるバックグラウンド除去の成功 A. Takada+. ApJ, 2011

SMILE-2: 地上試験のみ

T. Tanimori+. ApJ, 2015

SMILE-2+ 1-day flight @ Alice Springs (Apr. 7th 2018)

➤ MeVガンマ線天文学におけるイメージングの確立

➤ 明るい天体(かに星雲と銀河中心)のイメージング

Requirement

Effective area

a few cm^2

(detect 5σ)

PSF (50% included)

radius

$\sim 10 \text{ deg}$ @ 662 keV

NOW!!

SMILE-3

➤ 長時間気球を用いた科学観測

➤ COMPTELの感度を上回る望遠鏡で数回放球

人工衛星による全天観測

$\sim$ sub-mCrab sensitivity

1st balloon experiment (SMILE-I)

Sub-MeV gamma-ray imaging Loaded-on-balloon Experiment

Launched on Sep. 1, 2006 @ Sanriku (ISAS/JAXA)

- Test flight using (10 cm)³ ETCC
- Measure diffuse cosmic and atmospheric gamma ray
0.1 - 1 MeV, @ 35 km, 3 hours

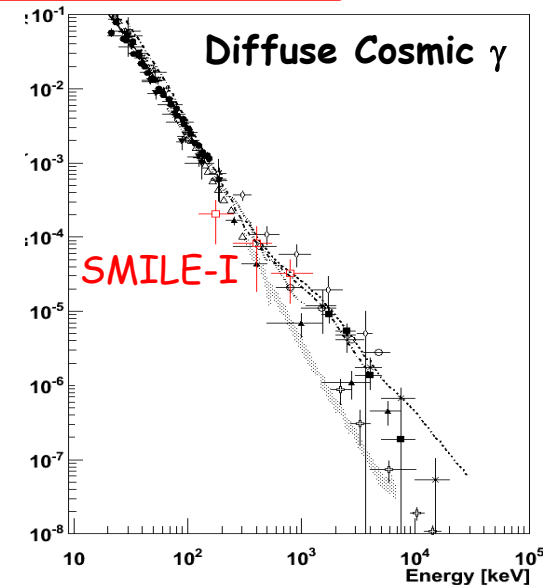
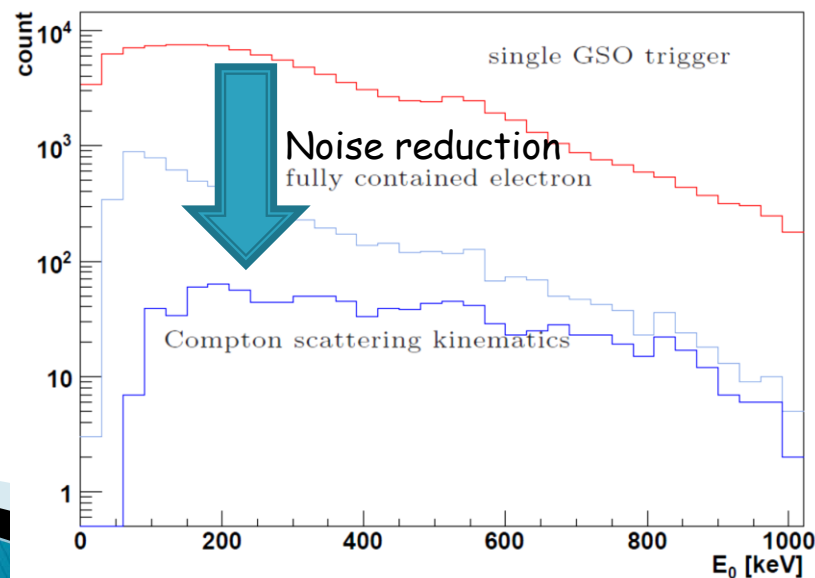
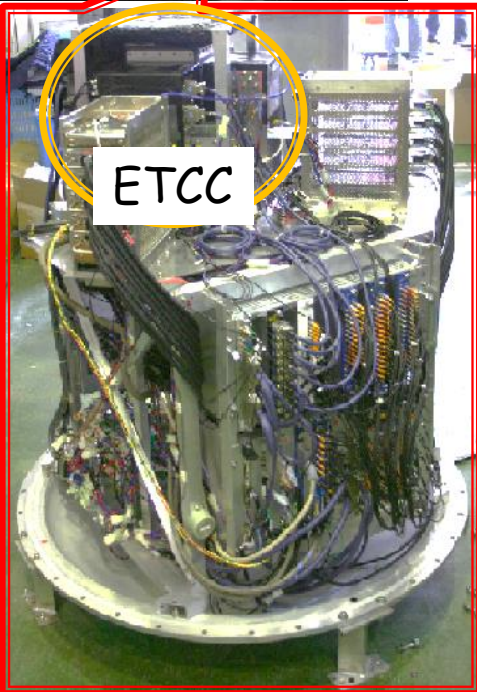


Measured : 420 events

Simulation : ~400 events (cosmic + atmospheric)

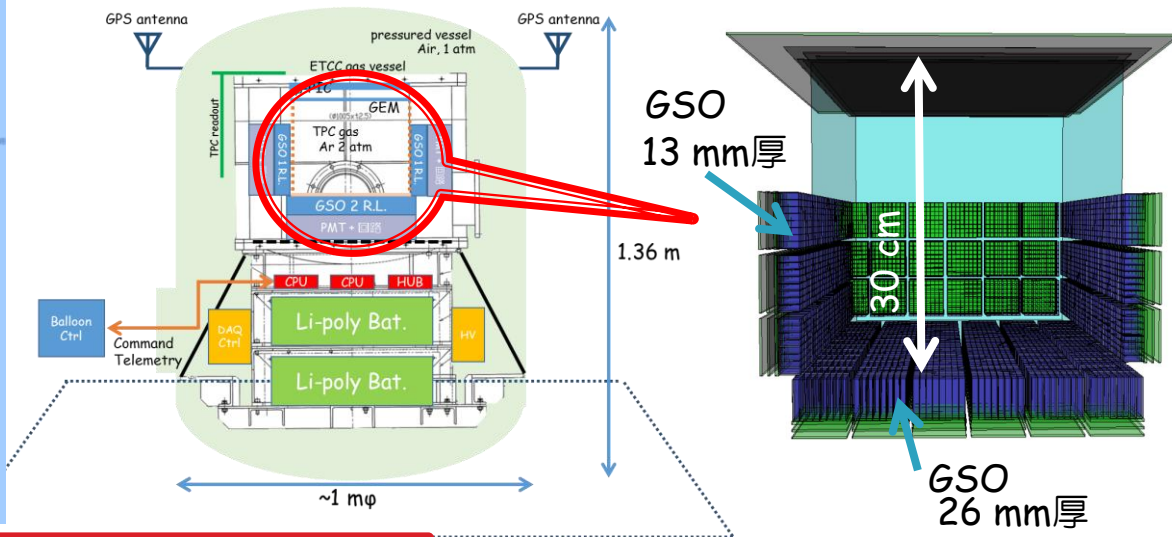
Non-gamma events : < 2%

Compton kinematic test and Particle identify
provided low-background observation.



天文観測気球実験 SMILE-2+

Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-Balloon Experiment 2+



2018年春の豪州気球実験に採択！！

最低成功基準：

大気ガンマ線を観測→残留大気圧特性+東西効果を検出
⇒ 雑音除去能力・有効面積の検証

高度成功基準：

$e^\pm$ 対消滅線(銀河中心領域)及びCrab(かに星雲)を観測
⇒ 有効面積 (3 cm^2)・PSF (10°)で
かに星雲 5.1σ ・銀河中心領域 5.5σ

大気ガンマ線の撮像分光→大気成分の分析手法を検証

最高度成功基準：

MeVガンマ線背景放射のスペクトルを得る

オーストラリア
アリススプリングから
ロングリーチへ
約1日のフライト
予定高度38.5km

2018年4月の放球予定

SMILE-IIからSMILE-II+へ

➤ 広帯域化・PSFの向上

GSO 13 mm ⇒ 500 keVで40%は素通り
光電吸収は~25%
Ar 1気圧, 30 cm角 ⇒ 測定できる反跳電子は
せいぜい150 keV以下
~50 keVの電子が受ける
多重散乱は~100度

◆ GSOの厚みを増大

⇒ 散乱ガンマ線の検出確率大

◆ ガス容器内にGSOを設置

⇒ >150 keVの電子も測定
多重散乱は~20度

➤ 有効面積の拡大

GSOシンチの位置 ⇒ 飛跡検出器を覆えていない

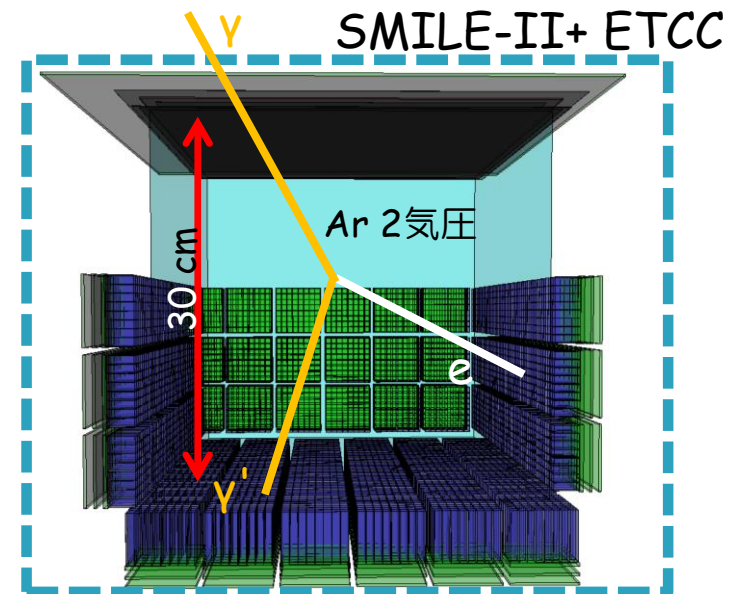
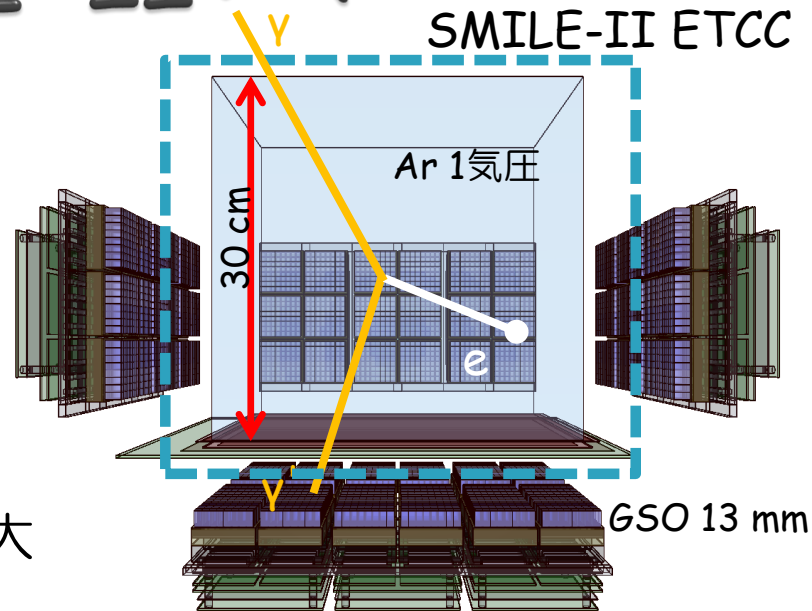
◆ ガス容器内にGSOを設置

⇒ シンチ間の隙間が激減

➤ 安定性・不感時間

◆ ガス純化の純化システム

◆ Ethernetによる高速DAQ



SMILE-2+の歩み



(2017/1/17 JAXA) SMILE-2+実験 2018年度豪州気球に採択

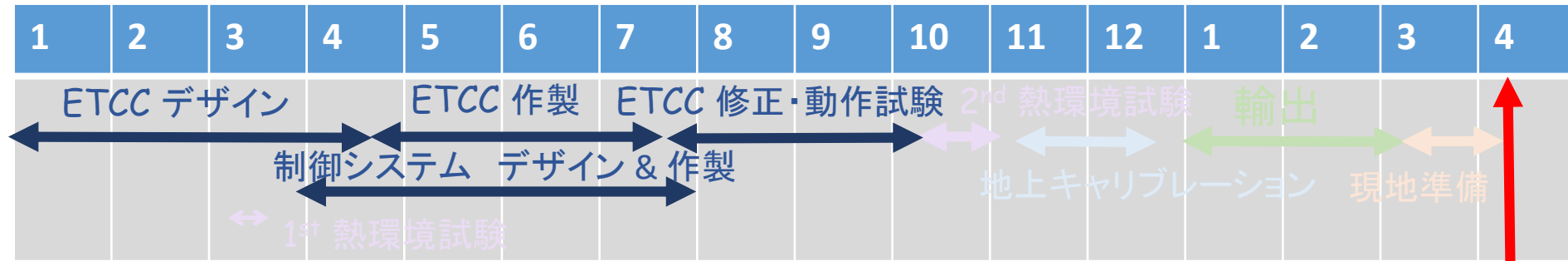


ちょうどSMILE-2+への過渡期にて採択されたため

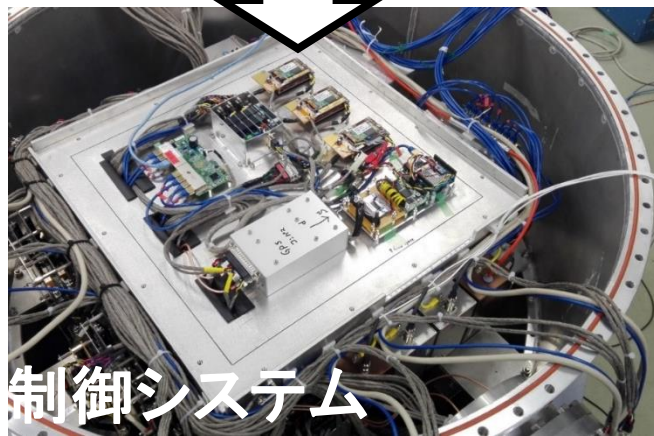
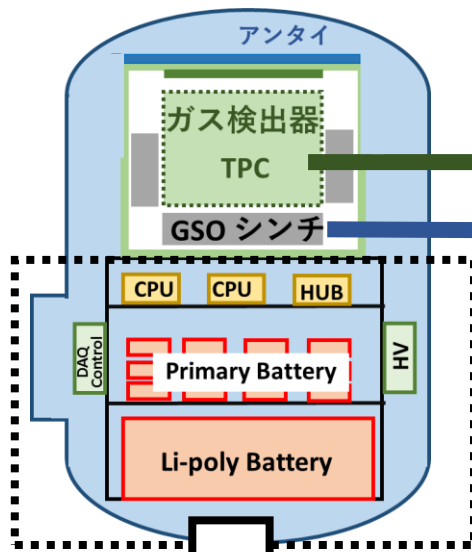
2017年1月時SMILE-2+システムはまったく存在しない状況

約1年間でほぼゼロからSMILE-2+システムを完成が必須

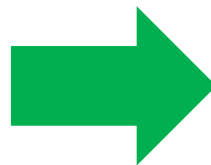
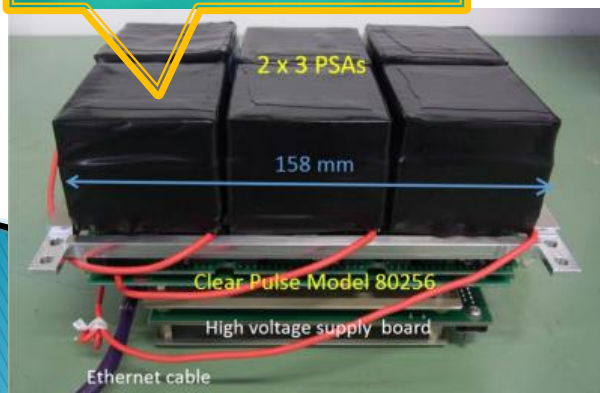
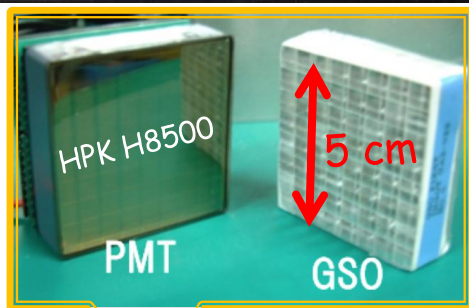
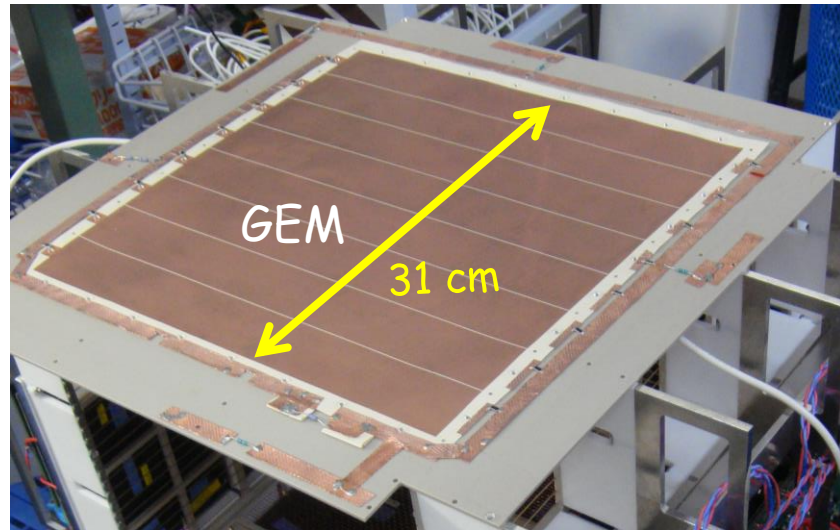
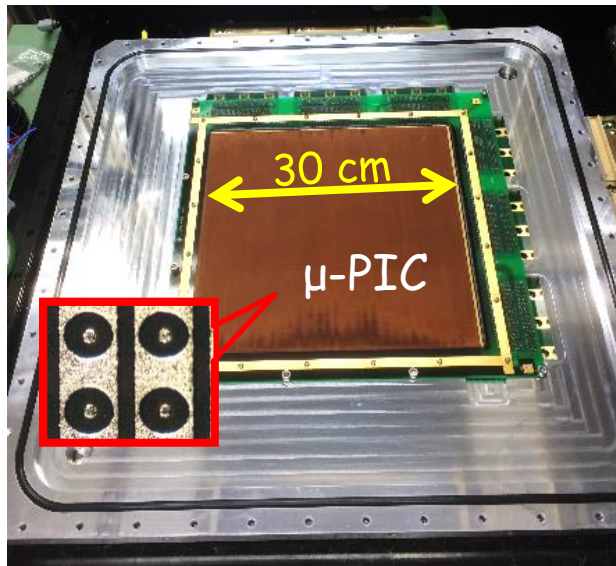
ETCC組み立て



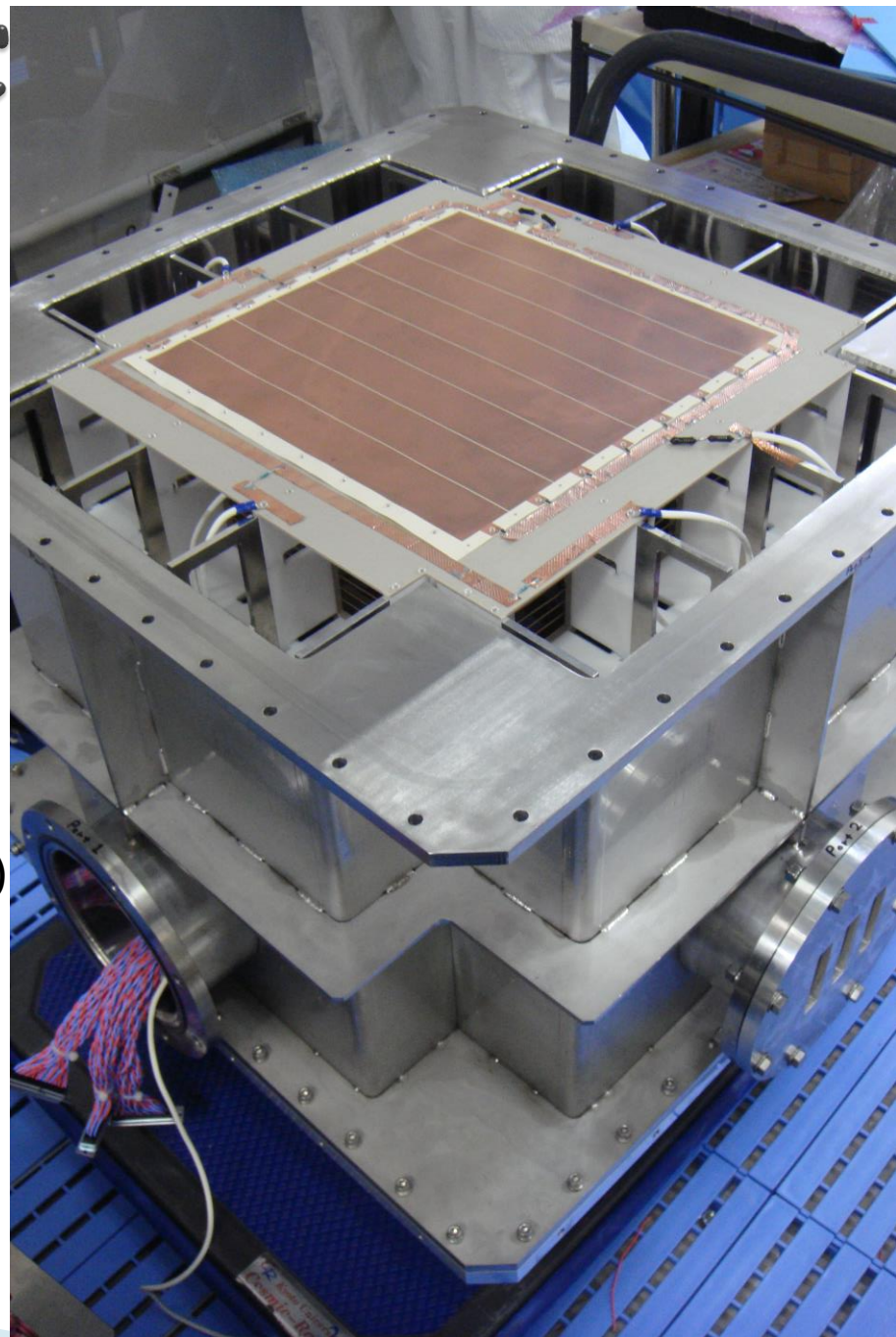
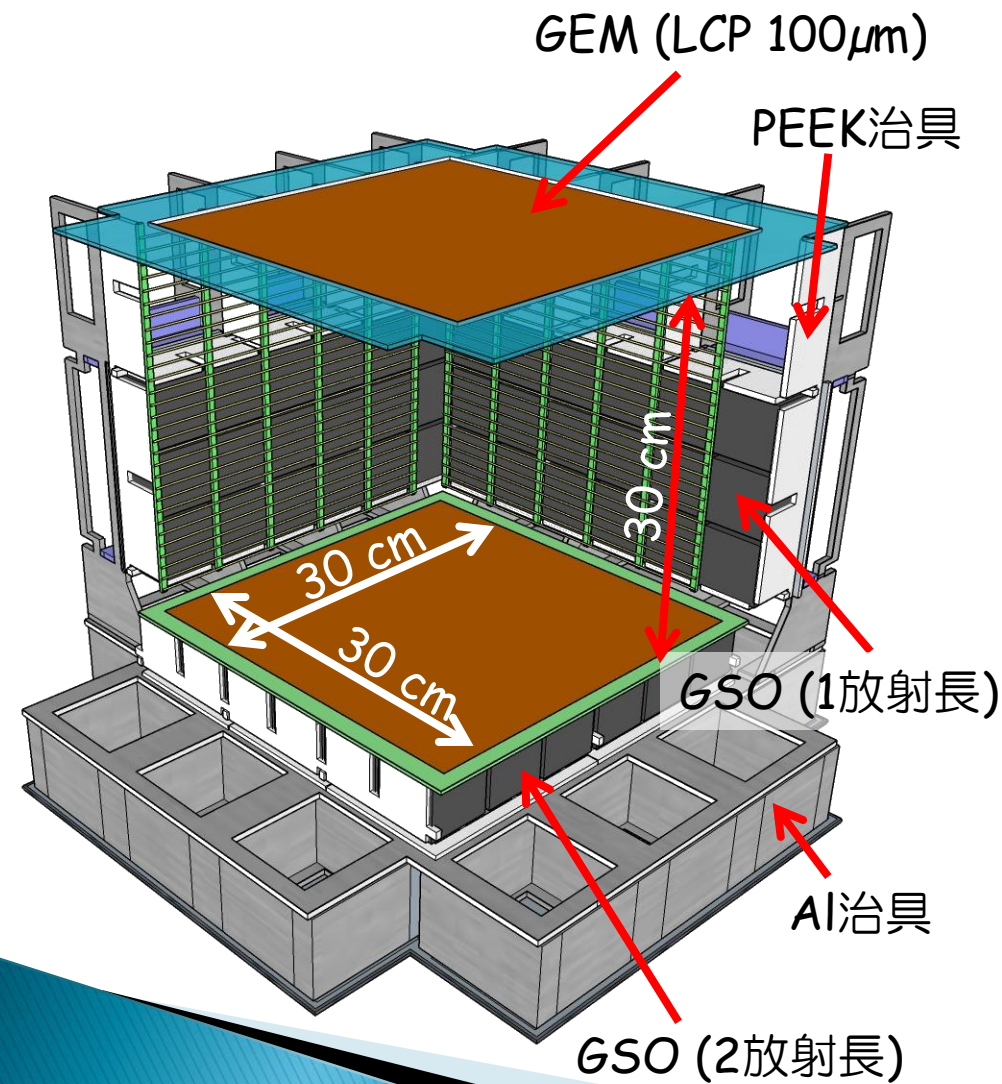
SMILE-2+気球打ち上げ@4/7



SMILE-2+ ETCC

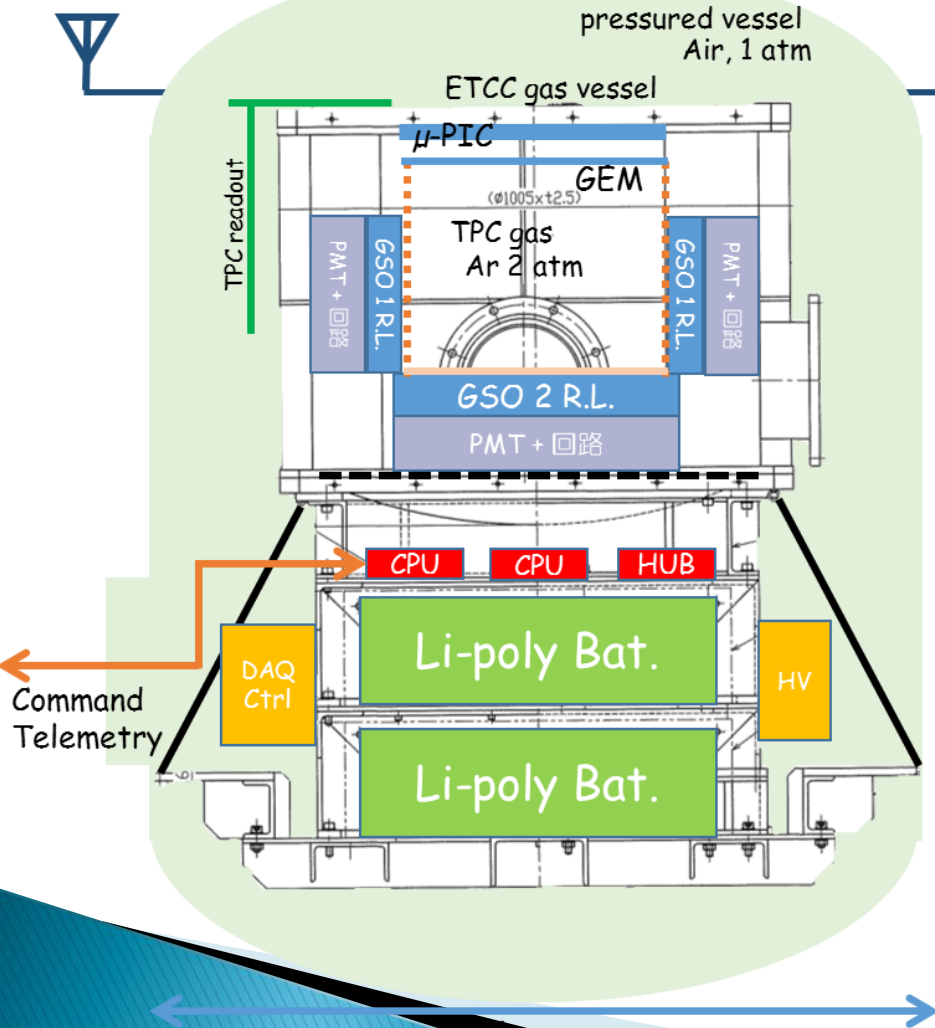


SMILE-2+ ETCC

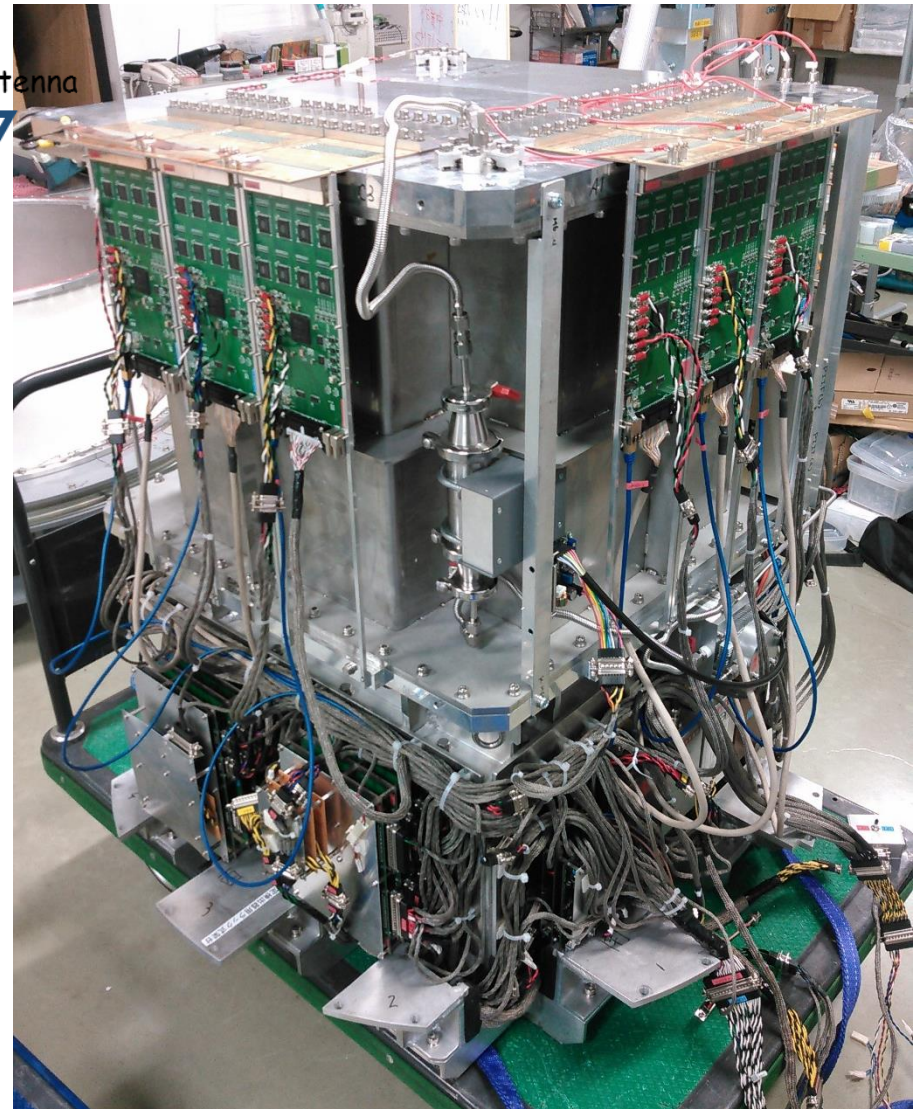


SMILE-2+ ETCC

GPS antenna



GPS antenna



ガス純化システム

これまで

- μ -PIC・GEM・ドリフトケージのみ
- ガス入れ後、~10日でガス交換

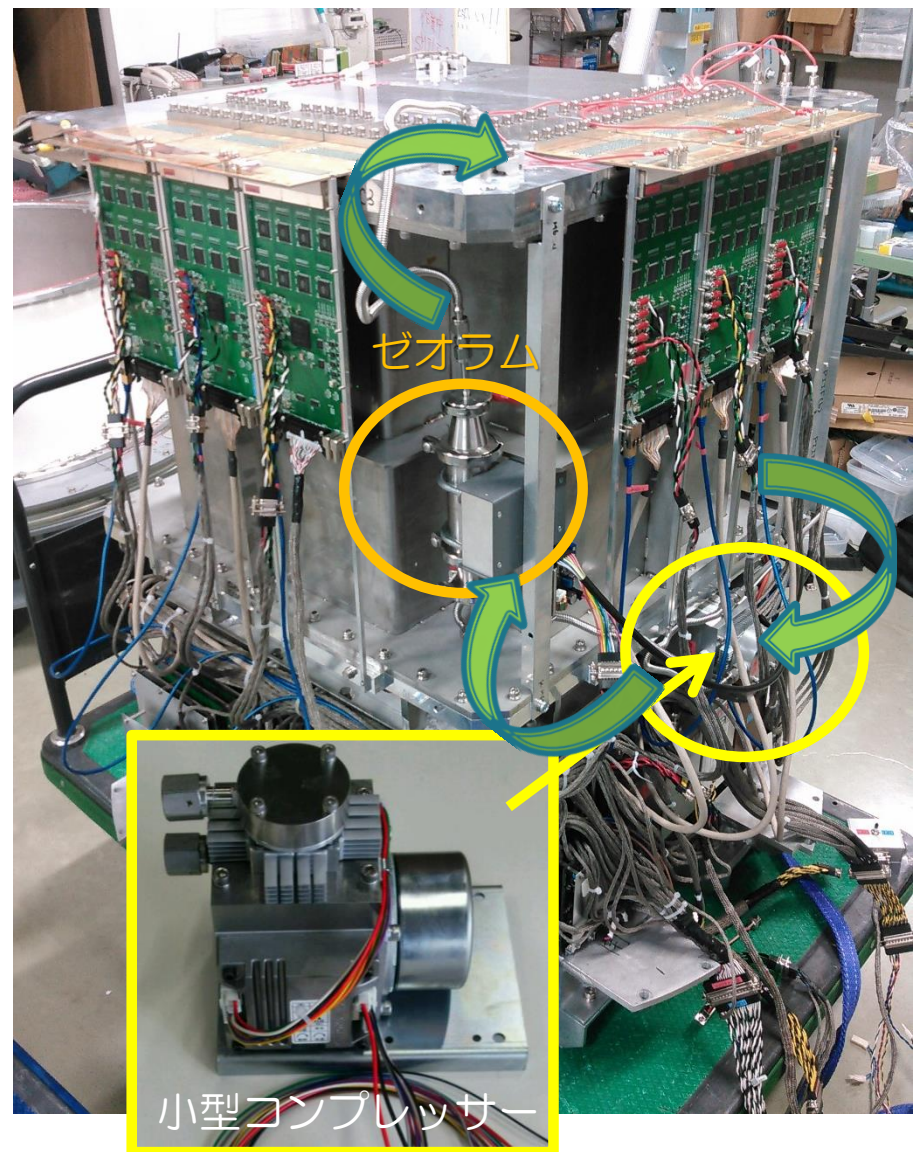
SMILE-2+ ETCC

- 容器内にPMTやGSOなど**大量の物質**
- 気象条件待ちで
最大1ヵ月ガス交換できない可能性

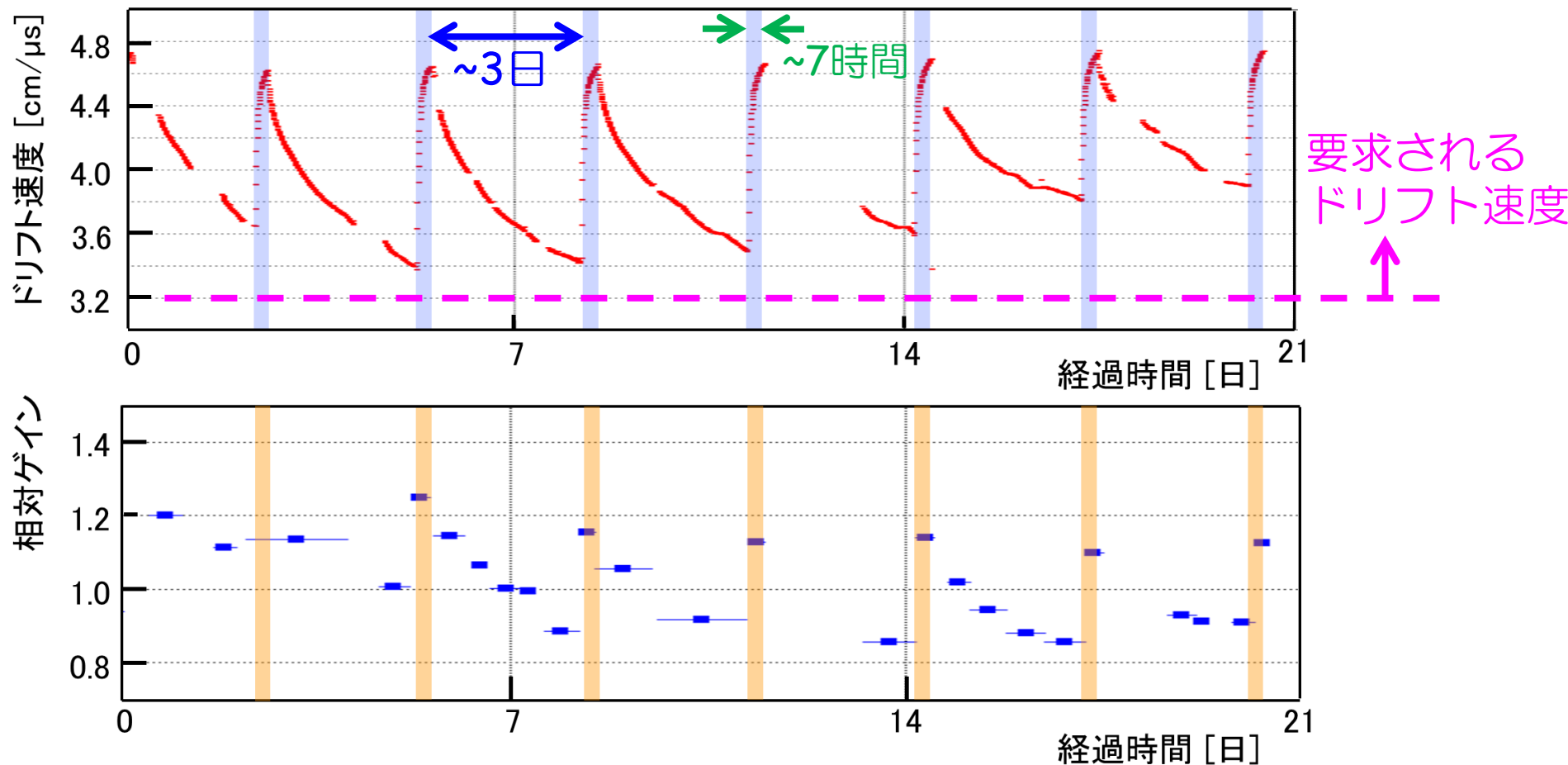
ガスが劣化して
TPCとして機能しないのでは？



ガス純化システムを搭載して
ちよくちよくきれいにしましょう！



純化システム試験 with SMILE-2+ TPC



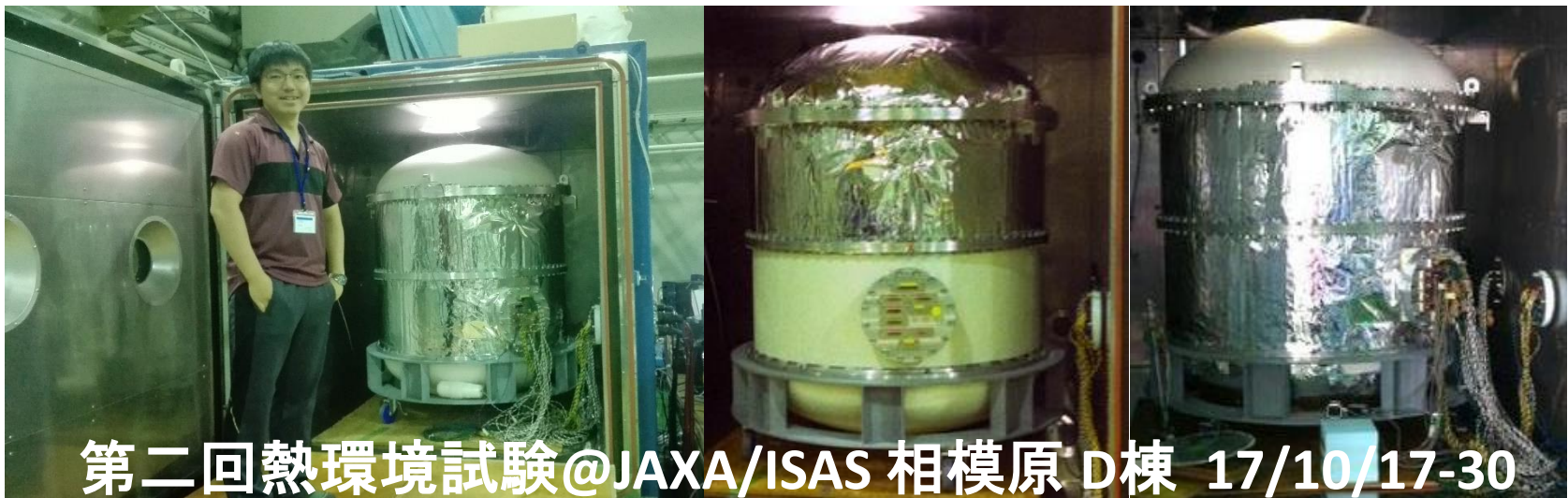
ドリフト速度・相対ゲイン値: ガス状態によって変化
3日ほどで劣化⇔7時間の浄化を繰り返す

性能劣化の回復を実証 ⇒ ガス交換無しに運用が可能に

熱環境試験



SMILE-2+気球打ち上げ@4/7



✓一回目:模擬熱源を使用して断熱材候補を選別

✓二回目:断熱材MLIの巻き方を決定

詳細は次の小野坂講演にて 15aS36-11

使用するバッテリーと与圧容器内部の温度

使用するバッテリー

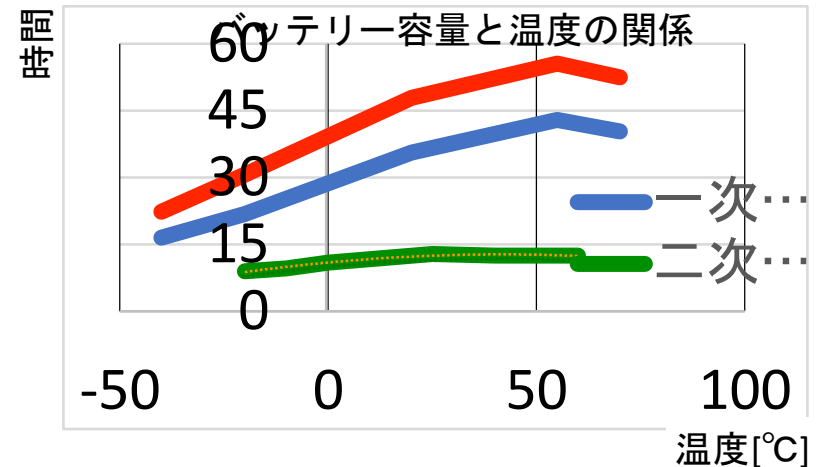
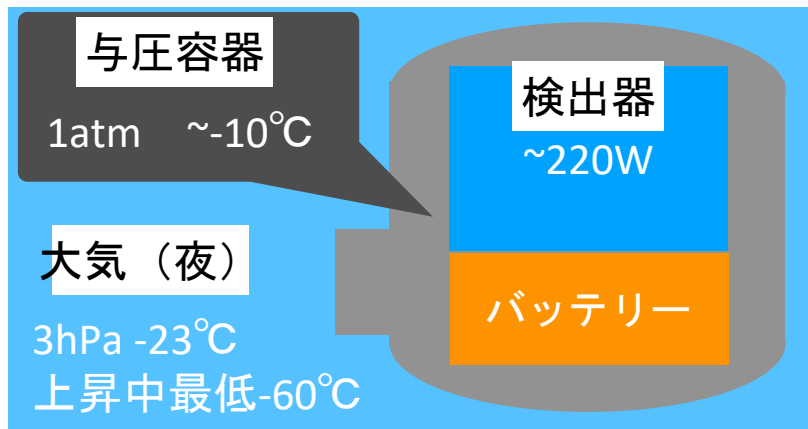


1次電池 Saft社 LSH 20
3.6 V 13.0 Ah (単体)
7直列 x 30並列で使用
25.2V 390Ah (実装)



2次電池 Kokam社 SLPB
7直列で使用
DC25.9 V 100 Ah

室温ならば~58時間稼働可能だが...



- ・ 気球高度で与圧容器内~-10°Cに→要求稼働時間を確保できない。~0°C付近にすればよい
- ・ 過去の熱環境試験でCPU停止(2013年3月 澤野講演)→CPU変更。動作テストが必要
- ・ ヒーター搭載は電源が余分に必要になるため不可→軽いものを巻いて断熱

断熱材の種類,巻き方の検討・気球高度環境下で検出器の動作テスト : 熱環境試験の目的

熱収支計算と断熱材

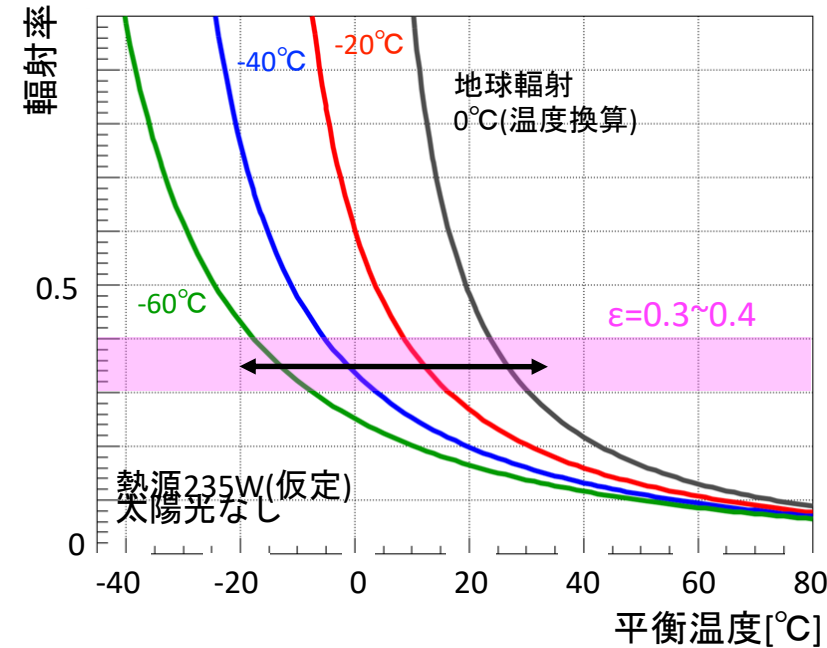
熱収支計算

$$235W + \epsilon\sigma T_a^4 S + \alpha L S_{irr} + \alpha I S_{irr} = \epsilon\alpha T^4 S$$

発熱量(仮定) 地球輻射 太陽光吸収 アルベド 系放射熱

ϵ : 輻射率 α : 吸収率 S : 表面積 L : 太陽強度
 I : アルベド強度 T_a : 地球輻射(温度換算)
 T : 平衡温度 σ : ステファン・ボルツマン定数

- ・ 夜は太陽光吸収・アルベドの項を無視
- ・ 地球輻射117~316W/m²(温度換算 -60~0°C)
 に対して平衡温度(夜間) -20°C~30°Cに
 →輻射率 $\epsilon \sim 0.3-0.4$ にすればよい



断熱材について

MLI (Multi Layer Insulation)

- ・ アルミ蒸着ポリイミドフィルムなどを多層に重ねたもの
- ・ 本来は衛星用。3hPa環境下での断熱効果は保証されていない

Kapton 100μm

- ・ 超耐熱、耐寒ポリイミドフィルム
- ・ 太陽光をよく吸収するので検出器が高温になり過ぎてしまう可能性あり

	(IR)	α (Optical)	特徴
MLI	0.032(※1)	0.115	放熱しにくく、太陽光吸収が小さい
Kapton 100um	0.755(※1)	0.544	放熱しやすく、太陽光吸収が大きい
アルミ白色塗装	0.83(※2)	~0.2	放熱しやすく、太陽光吸収が小さい

※1: JAXA 岡崎氏による実測 ※2: 大西昇 2000年12月 宇宙科学研究所報告第113号

熱環境試験1（熱源：模擬熱源） @ISAS 2017/3/6-9

下の5通りについて平衡温度調査



① Kapton全体＋
MLI全体



② Kapton全体＋
MLI胴部



③ Kapton全体＋
ポリエチレン胴部



④ Kapton全体

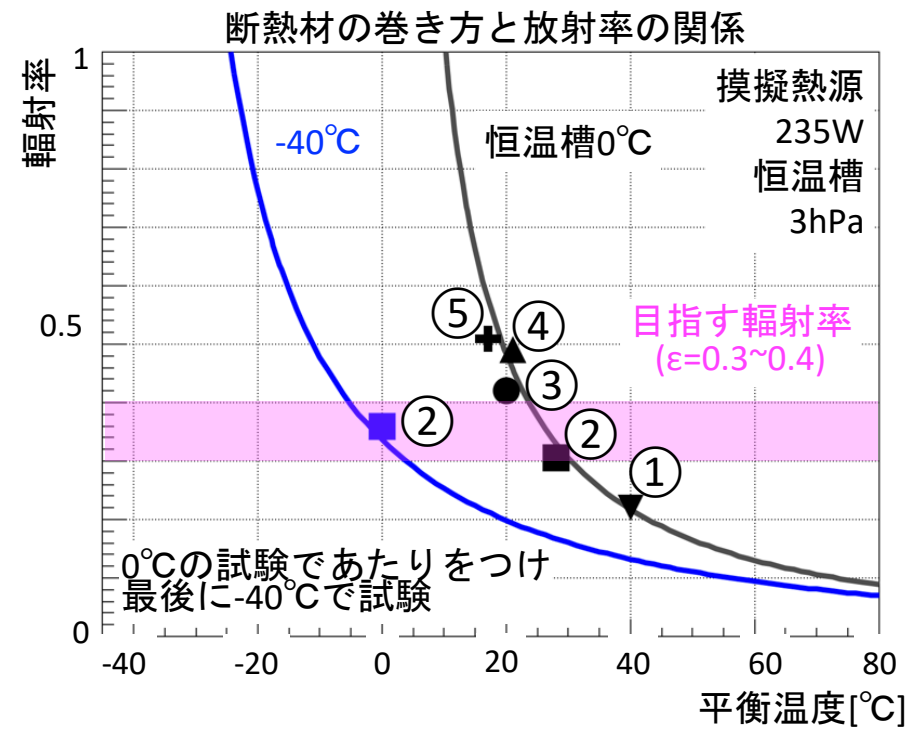


⑤ Kapton下部

結果

- ・ Kaptonは特に効果がない(④,⑤より)
- ・ 与圧容器の面積～52%をMLIで覆うと放射率 $\epsilon \sim 0.35$ (②より)
- ・ 3hPa環境下でのMLIの断熱効果を確認

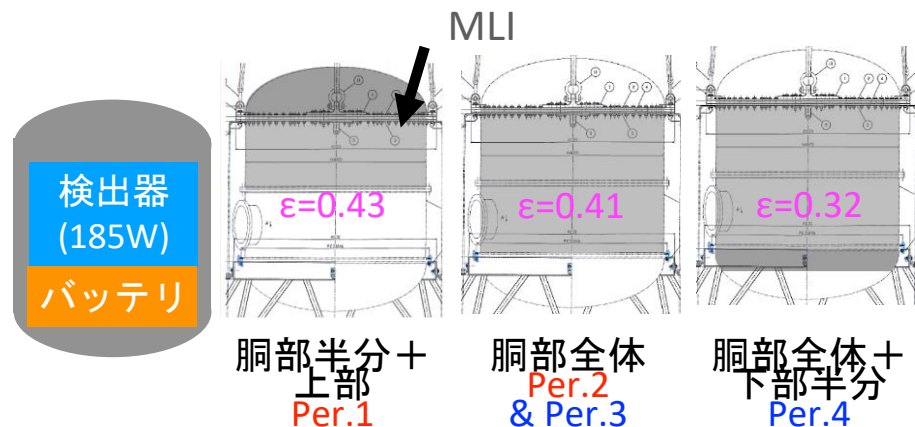
次は検出器を与圧容器内に入れて試験



熱環境試験2（熱源：検出器）@ISAS 2017/10/17-30

MLI巻き方検討・検出器動作テスト

- ・ファン非搭載なので内部熱循環は対流のみ
→断熱材の巻き方が重要
- ・バッテリーがある圧容器下部の温度に注意
- ・試験時の電源は外部から供給



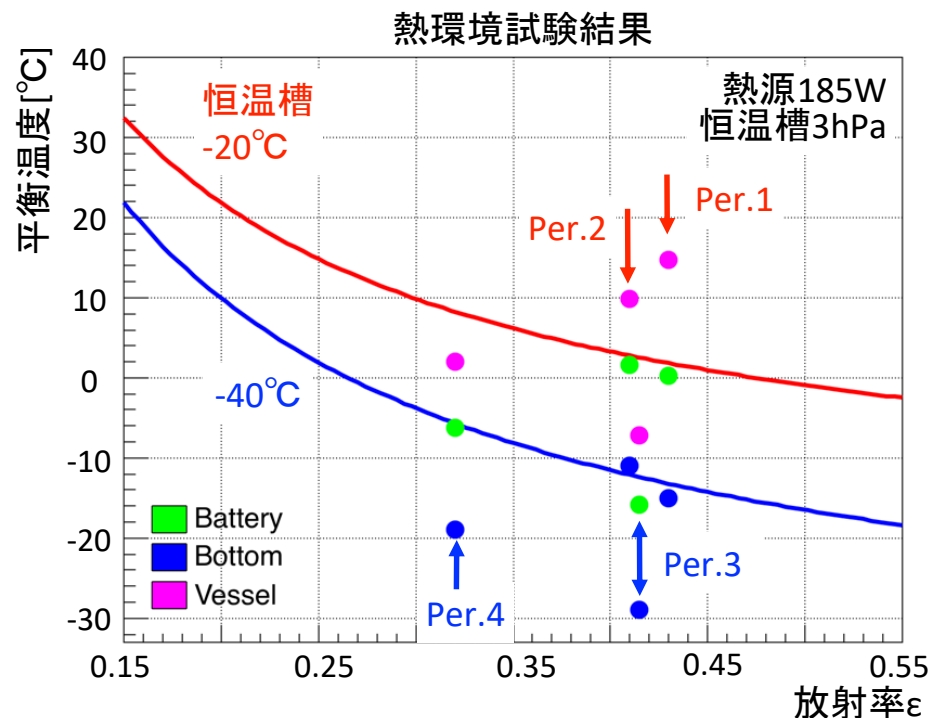
結果

- ・気球高度環境下で30時間以上正常稼働
- ・圧容器内下部が特に冷える
→下部が冷え難いPer4の巻き方に決定

検出器(フライトモデル)の消費電力は
熱環境試験時の185Wから19%程度増



Per4の巻き方でフライト時に圧容器下部は
~0°Cになる計算

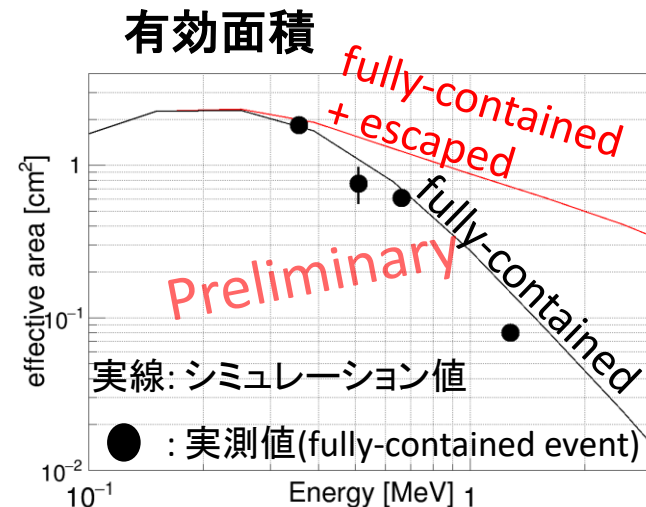
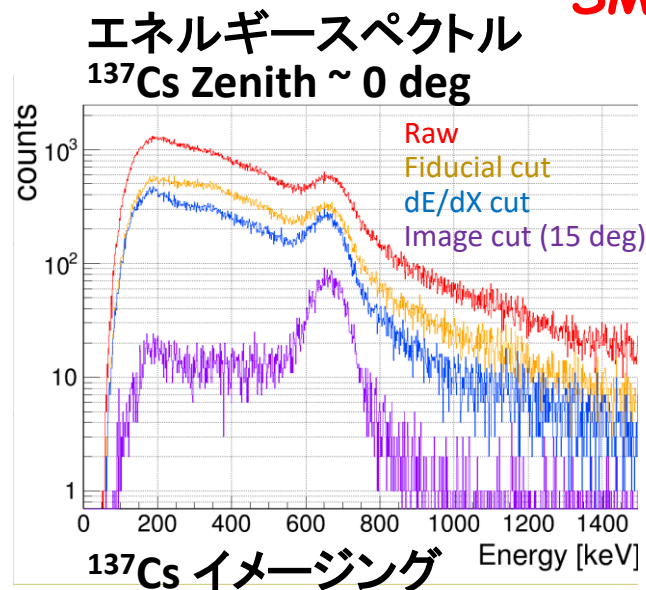
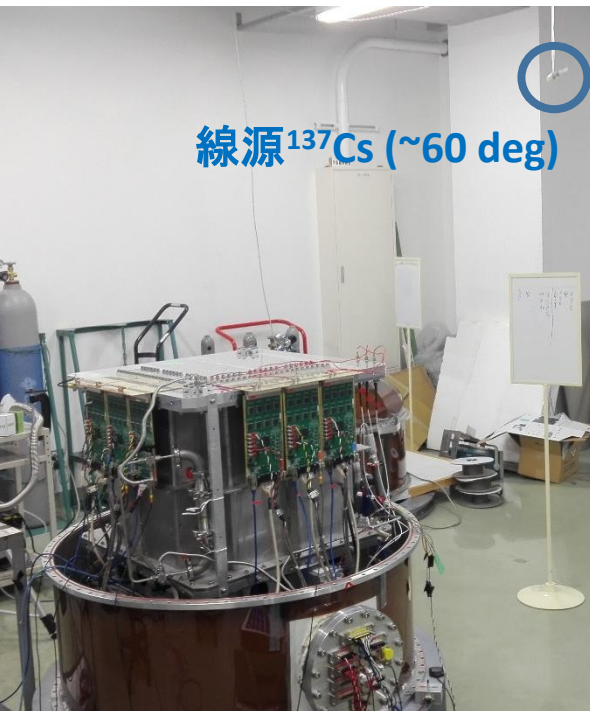


地上キャリブレーション

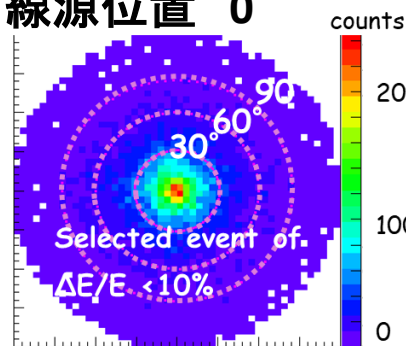


SMILE-2+気球打ち上げ@4/7

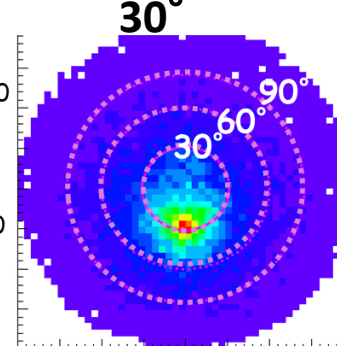
地上キャリブレーション写真



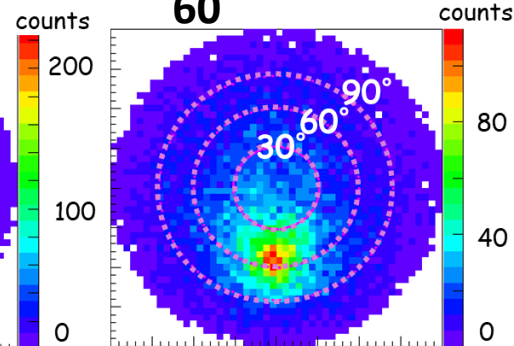
線源位置 0°



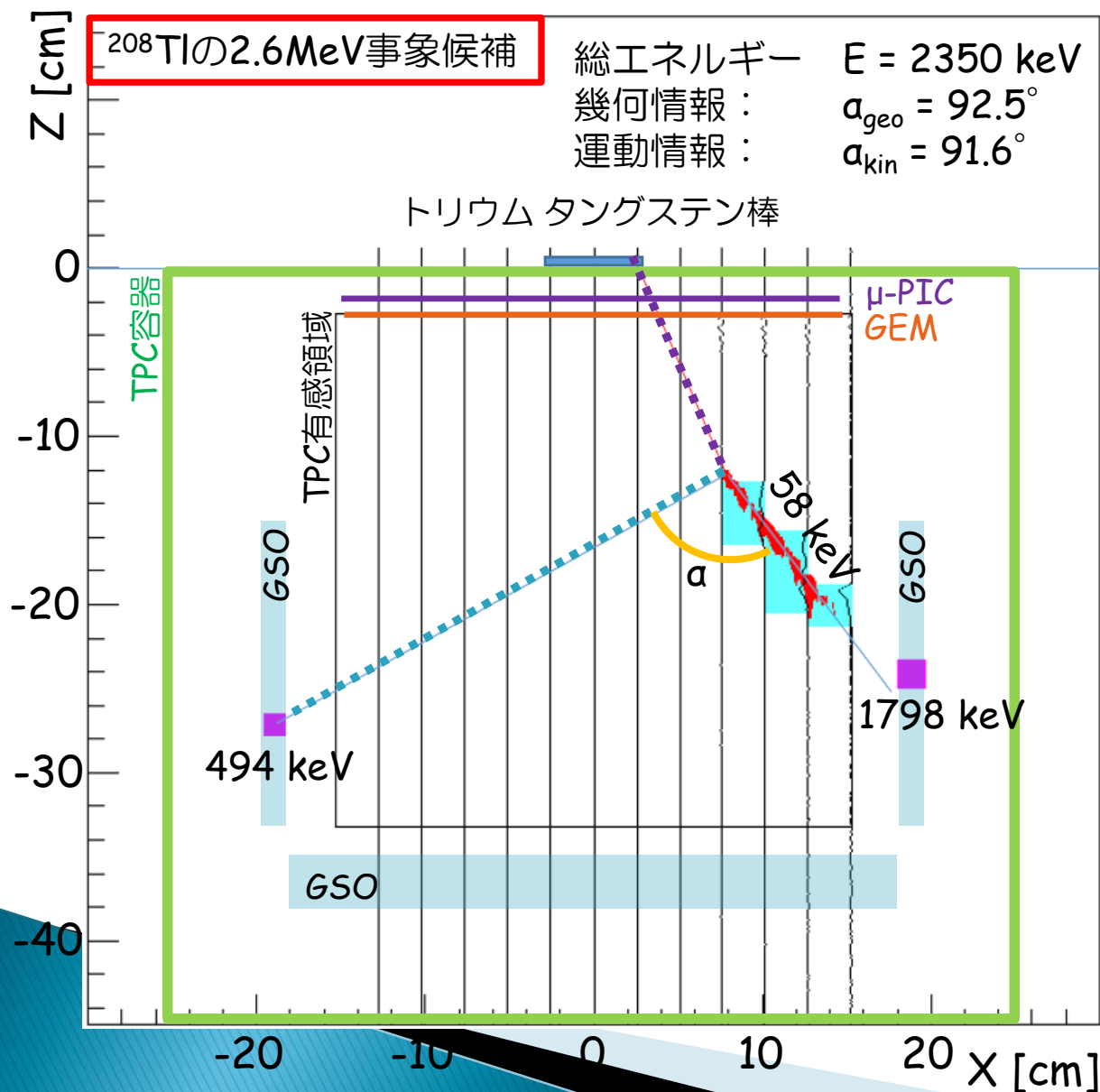
30°



60°



高エネルギー電子事象候補



30 cm角のTPC

- 150 keV以上の電子は止め切れない
- $>1 \text{ MeV}$ のガンマ線の検出を制限



SMILE-2+ ETCC

- GSOシンチレータをTPC容器内部に設置
- TPCからはみ出す電子もシンチレータで測定

高エネルギー電子
事象候補の取得に成功

将来計画に向けた
大きな一歩！

輸出



SMILE-2+気球打ち上げ@4/7



荒野

空港



現地準備



現地準備進行

- 3/5: SMILE-2+グループ現地入り
- 3/6-8: 制御システム&ETCC動作確認
- 3/7: ガス入れ
- 3/8: ガス入れ替え(ガス純度を高めるため)
- 3/9-16: ETCCキャリブレーション
- 3/13: JAXA HKとかみ合わせ
- 3/16: 屋外試験
- 3/17: ガス純化システム作動
- 3/18-19: 与圧容器密封試験
- 3/23: 感度試験 + 最終かみ合わせ
- 3/27: ガス純化システム作動
- 3/28: リハーサル
- 4/2: ガス純化システム作動
- 4/4: Flight Readiness Review

SMILE-2+気球打ち上げ@4/7



組立て作業

SMILE-2+ Flight Model



屋外試験

GPS試験 & GAキヤル

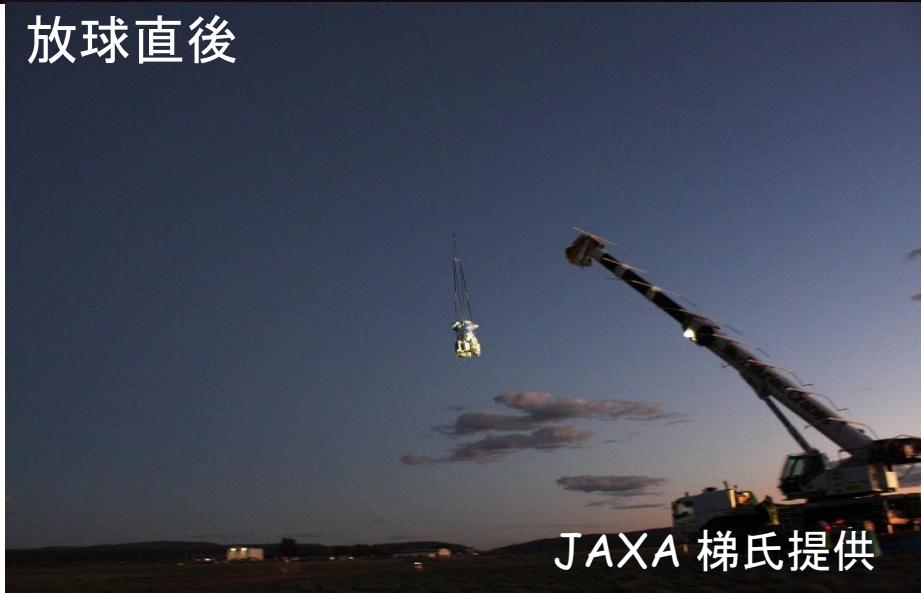


放球

2017/4/7 早朝



放球直後



JAXA 梯氏提供

放球直後



高度~40 km

150 m

ゴンドラ

JAXA 梯氏提供

フライト運用

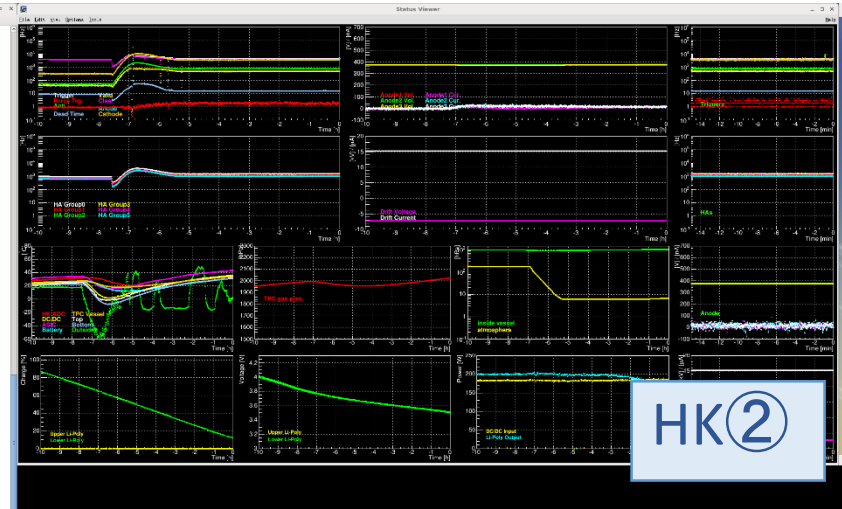
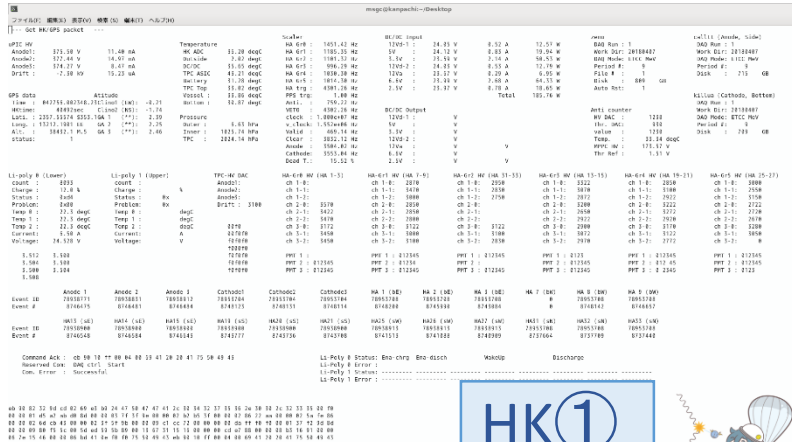
Bi-phase 8 kbps HKデータを1 Hzで受信

□ HK(温度・圧力など)

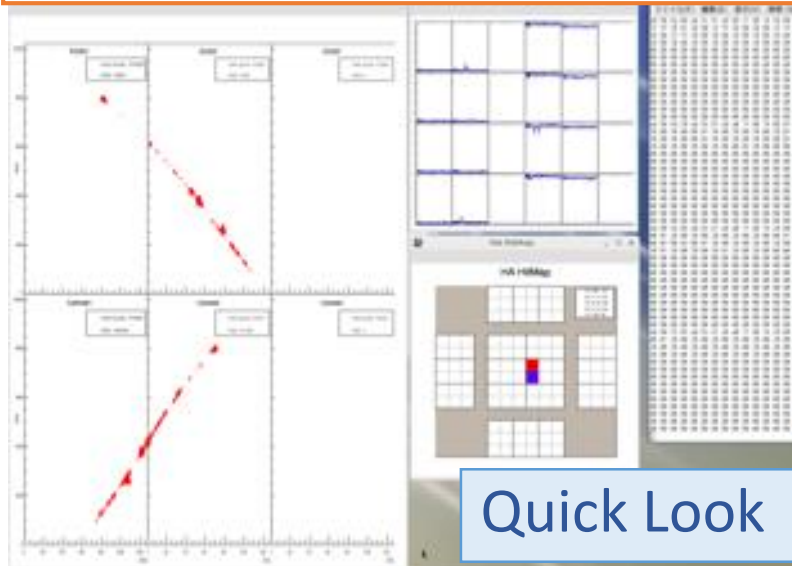
136 byte

□ Scaler(各種カウンタ)

144 byte



QPSK 800 kbps 一部イベントデータ



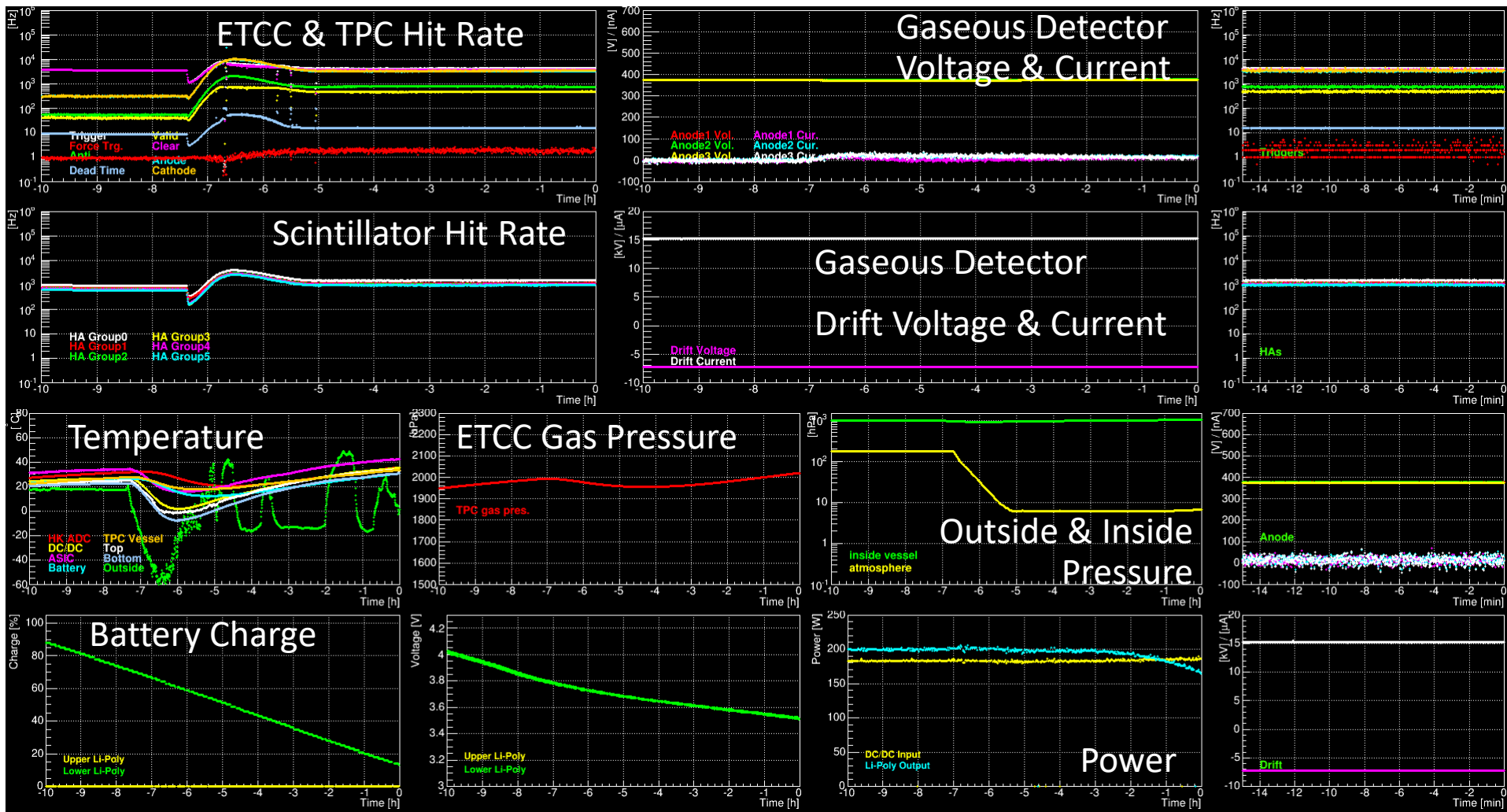
コマンド

HK①

HK②



フライト運用



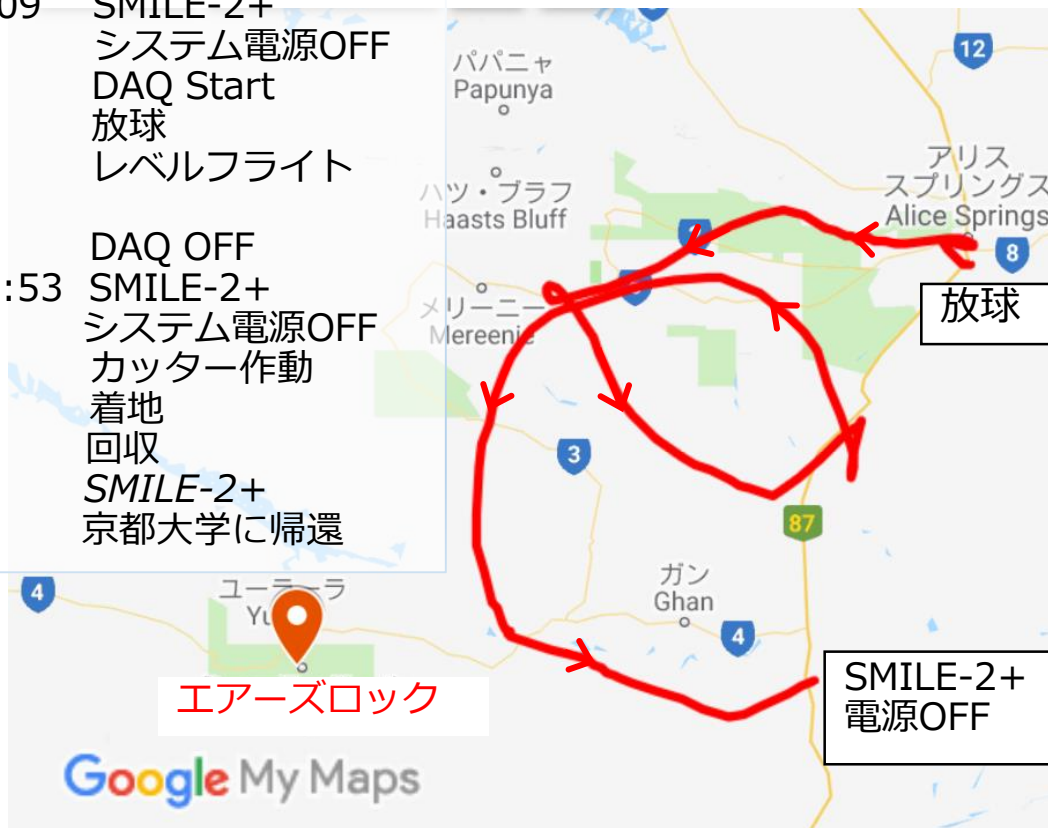
フライト & 回収

April 7 (local time)

2:47-3:09 SMILE-2+
システム電源OFF
3:09 DAQ Start
6:24 放球
8:44 レベルフライト

April 8

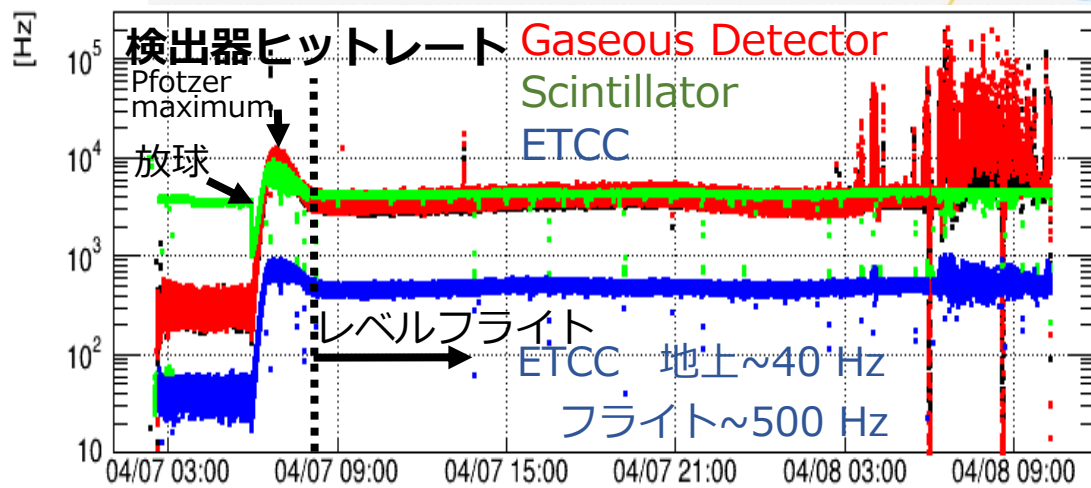
10:45 DAQ OFF
10:45-10:53 SMILE-2+
システム電源OFF
11:07 カッター作動
11:40 着地
April 9 回収
July 19 SMILE-2+
京都大学に帰還



回収



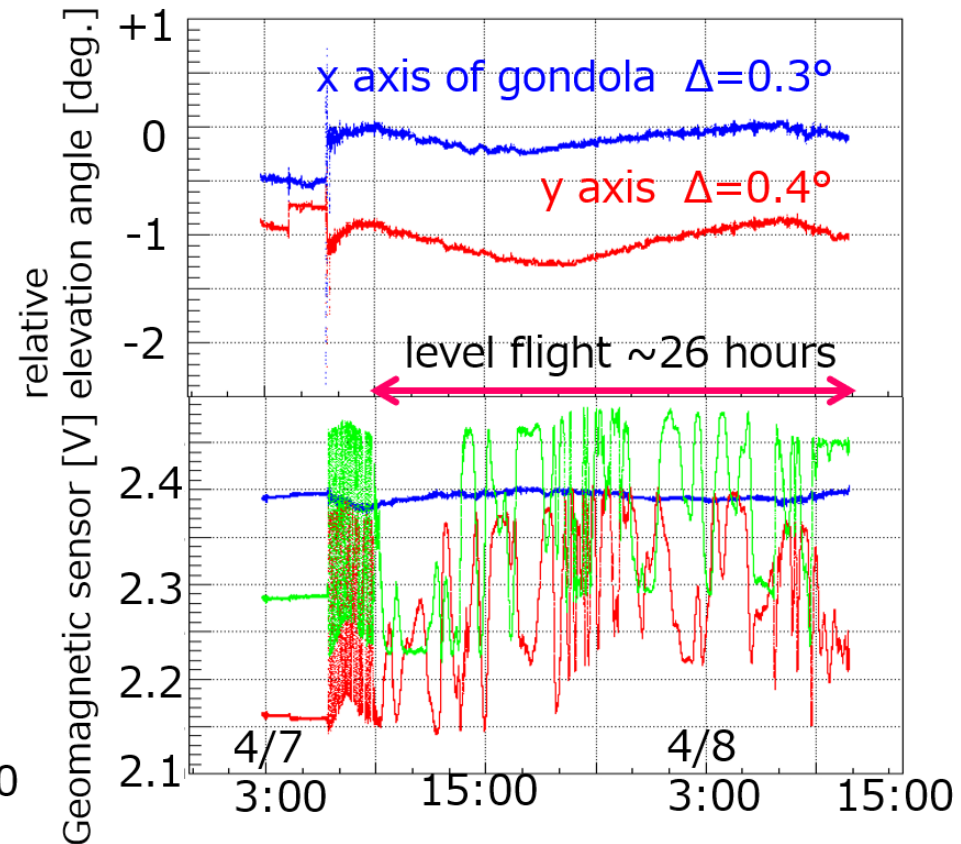
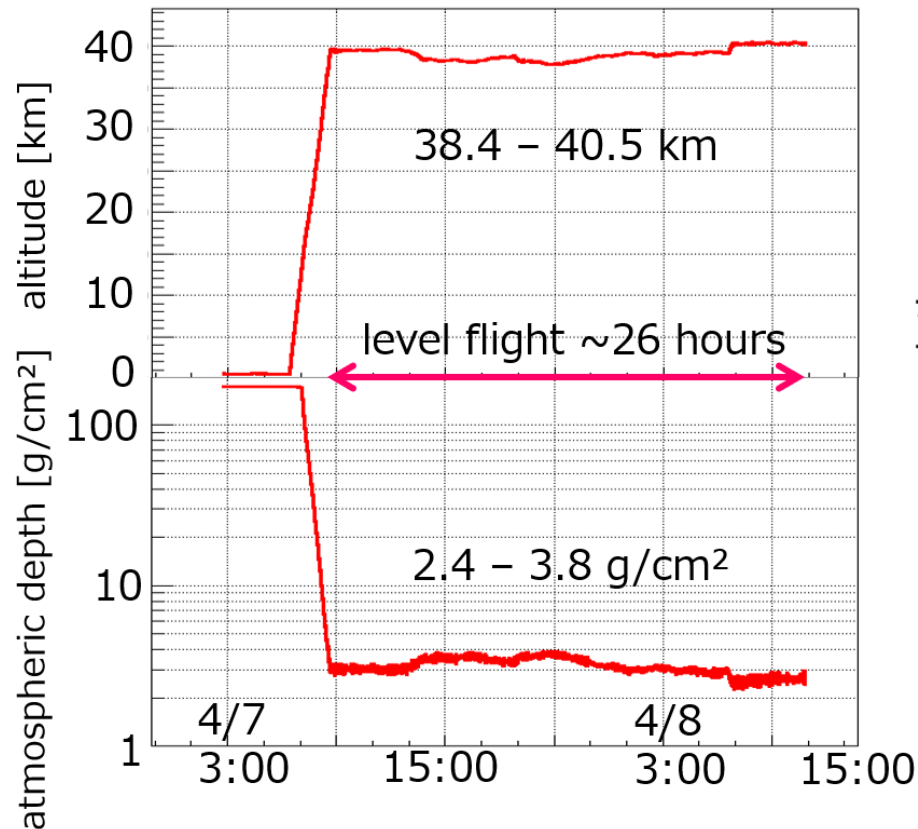
日本に帰還



ハウスキーピングデータ

搭載したセンサ類：

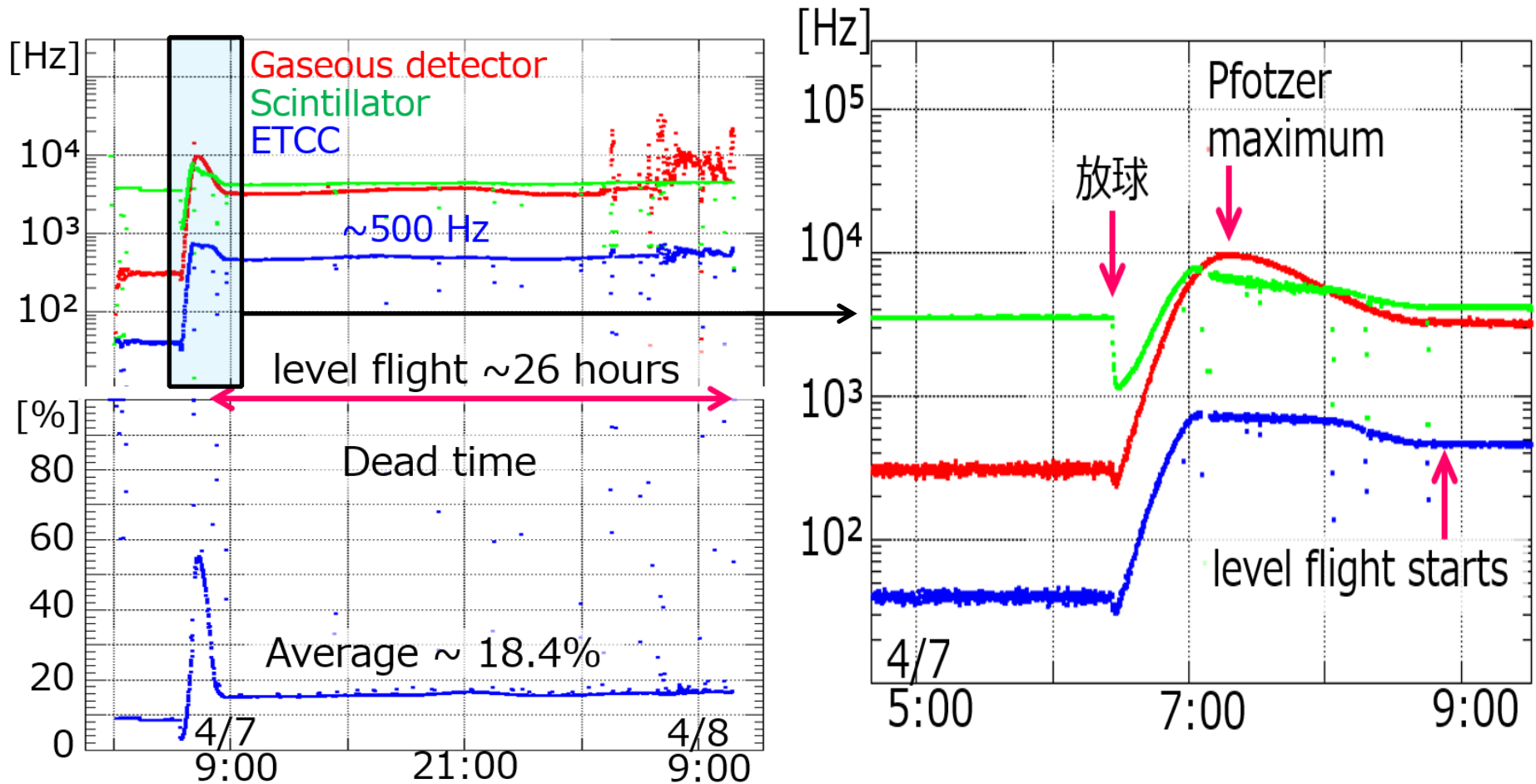
GPS、外気圧計、容器内気圧計、ガス検出器圧力計、傾斜計、磁場センサ、温度計



- 装置の監視・運用に成功。
- 残留大気量は予定通り要求を満たした。

検出レートの時間変化

ETCC 検出=ガス飛跡検出器とシンチレーション検出器の同時検出
実験前のETCC予測検出レート = 500 Hz



気球実験中、検出器は計画通りの検出レートで、安定に動作した。

荷電粒子の飛跡

検出器
上面

30 cm

検出器
底面

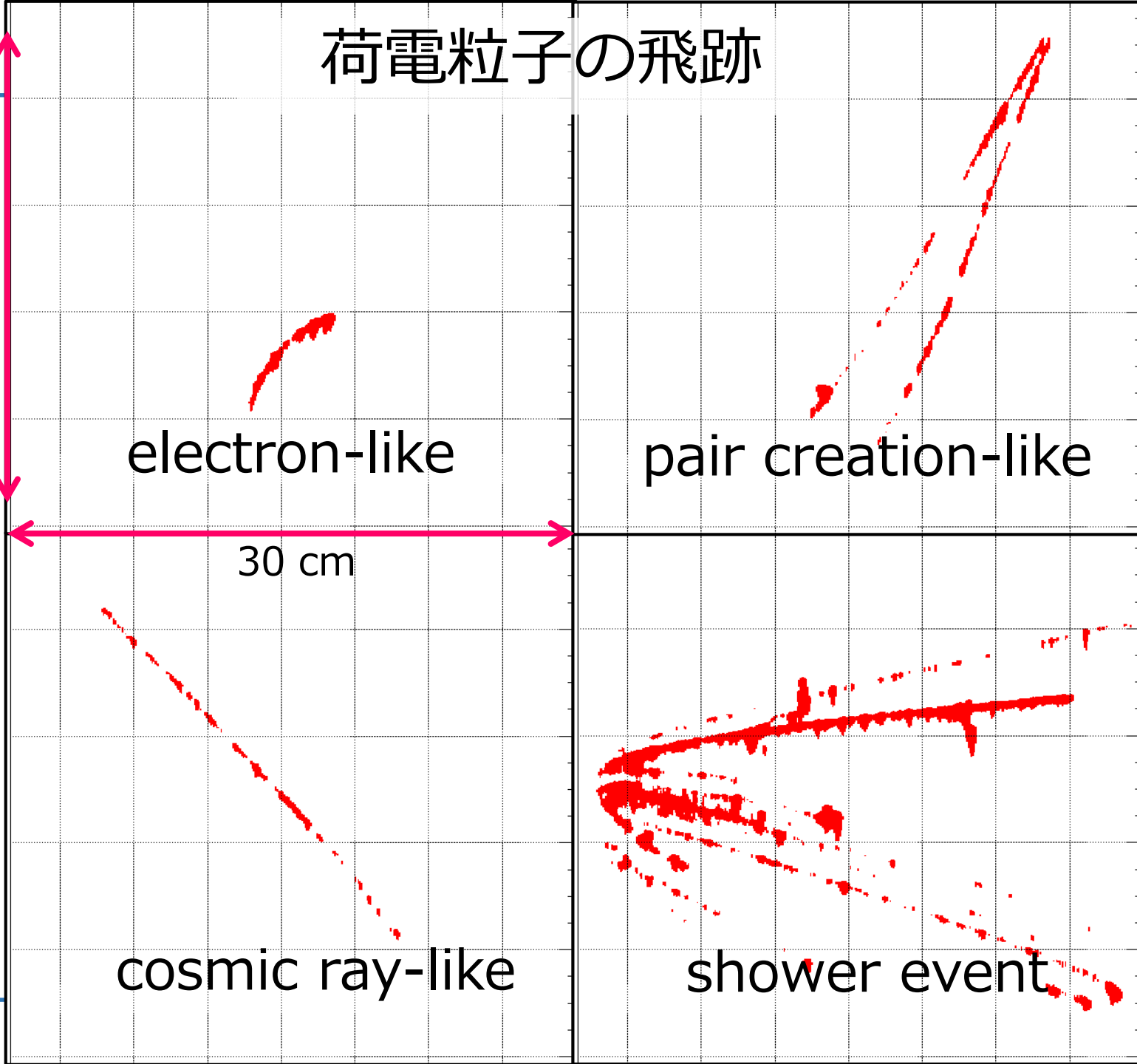
electron-like

pair creation-like

30 cm

cosmic ray-like

shower event



ETCCデータの解析方法

割合(カットなし) 3

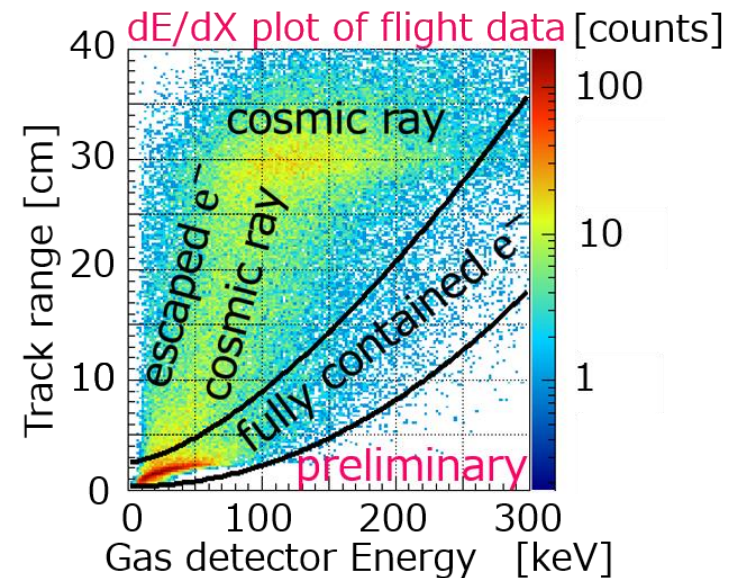
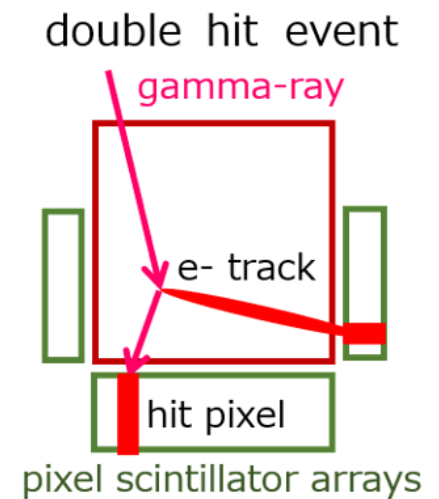
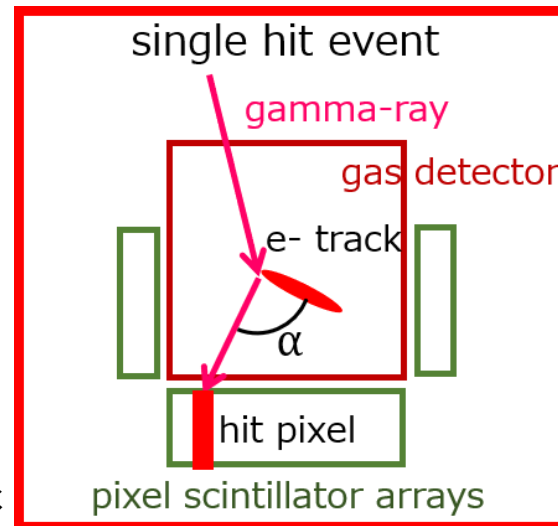
: 2

検出できるガンマ線事象は2通り
今回は single hit event のみ

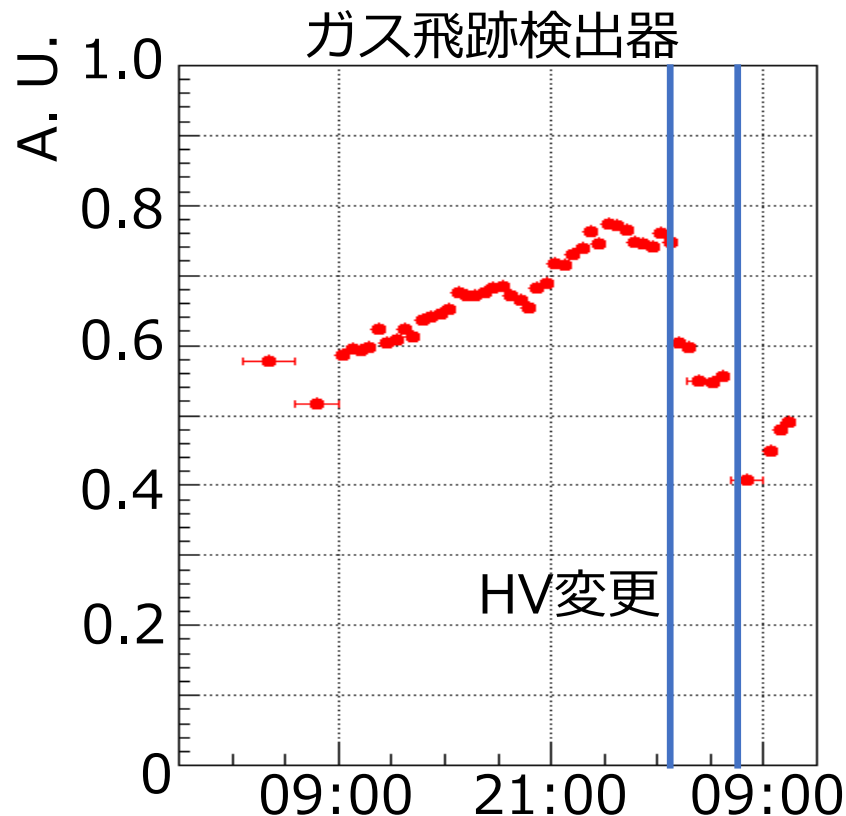
事象の選別条件

1. single scintillator hitの事象
2. 有効体積内に散乱点がある事象
3. fully contained e⁻ の 事象
4. α 角によるCompton散乱事象の選択

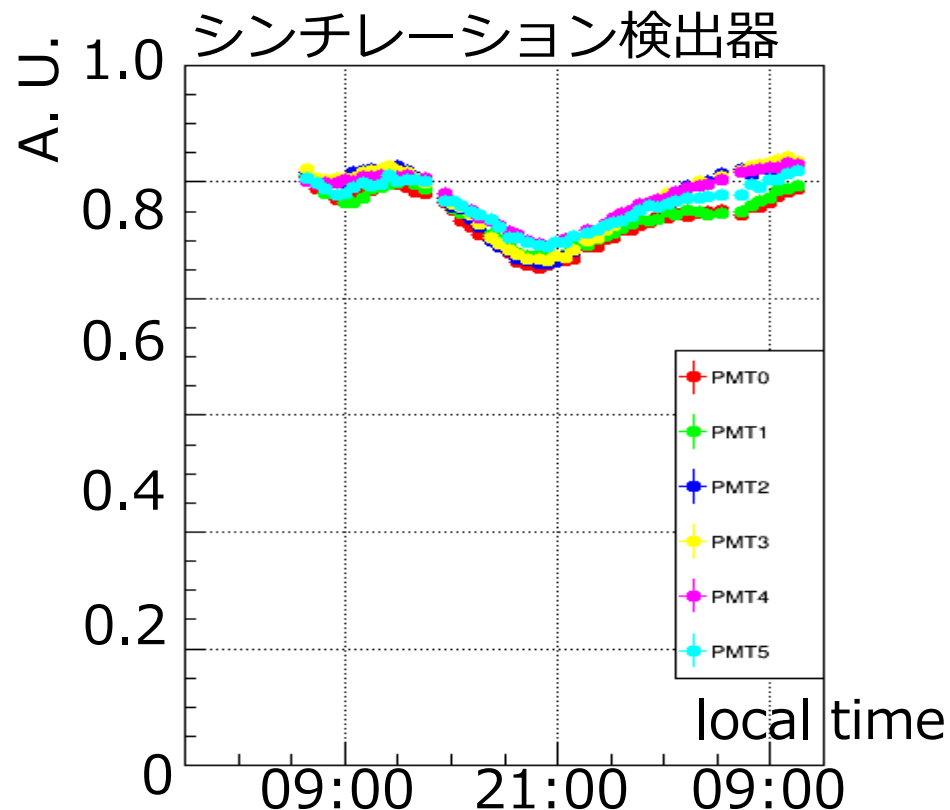
- シンプルなセレクションのみ
- ガンマ線vetoが必要ない



検出器の利得変化



宇宙線候補事象の
エネルギー損失率から補正



偶然同時事象を用いて
電子・陽電子消滅線で補正

時間による利得変化を補正でき

た。

level flight 時の解析

level flight

4/7 8:45 - 4/8 4:05

livetime 5.8×10^4 sec

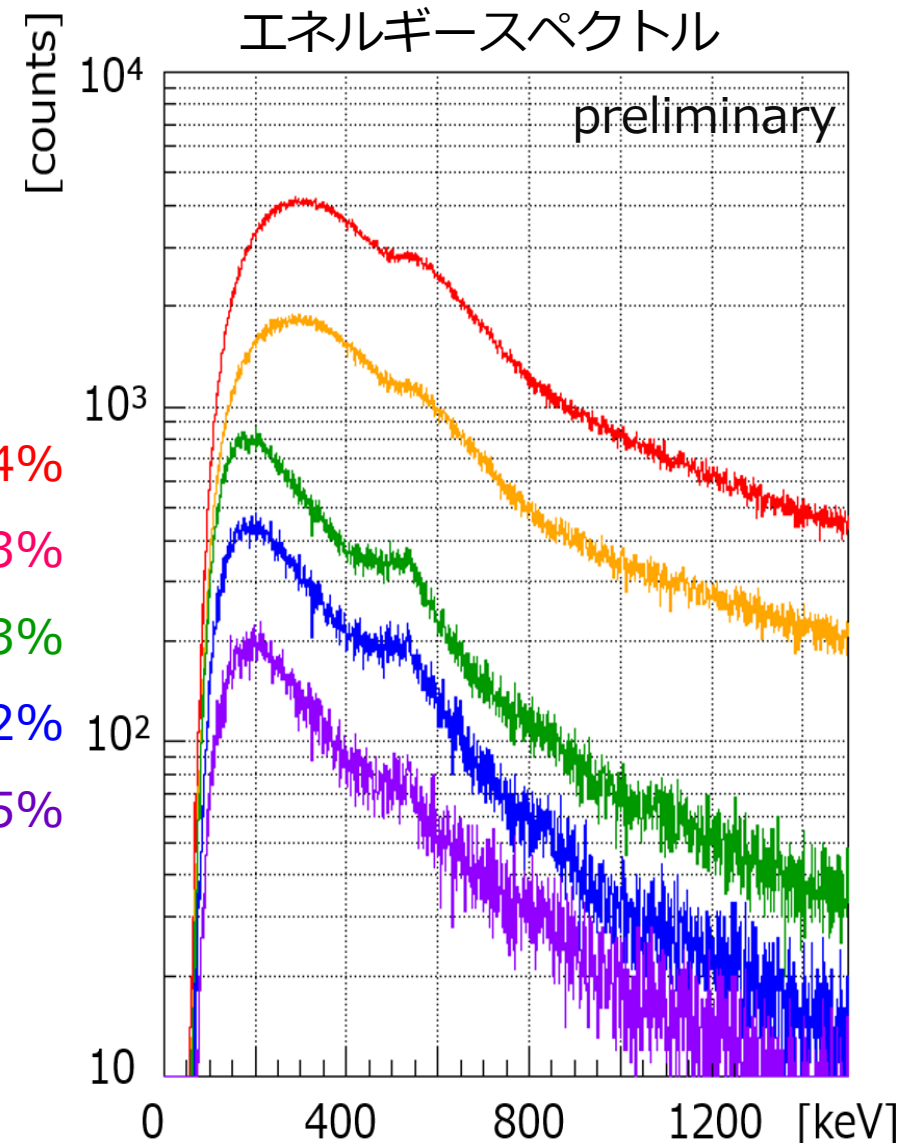
Raw 1.7×10^7 events

- | | |
|--------------------------------|-------|
| 1. single scintillator hitの事象 | 22.4% |
| 2. 有効体積内に散乱点がある事象 | 10.3% |
| 3. fully contained e- の 事象 | 2.3% |
| 4. α 角によるCompton散乱事象の選択 | 1.2% |
| 5. zenith angle $0 - 60^\circ$ | 0.5% |

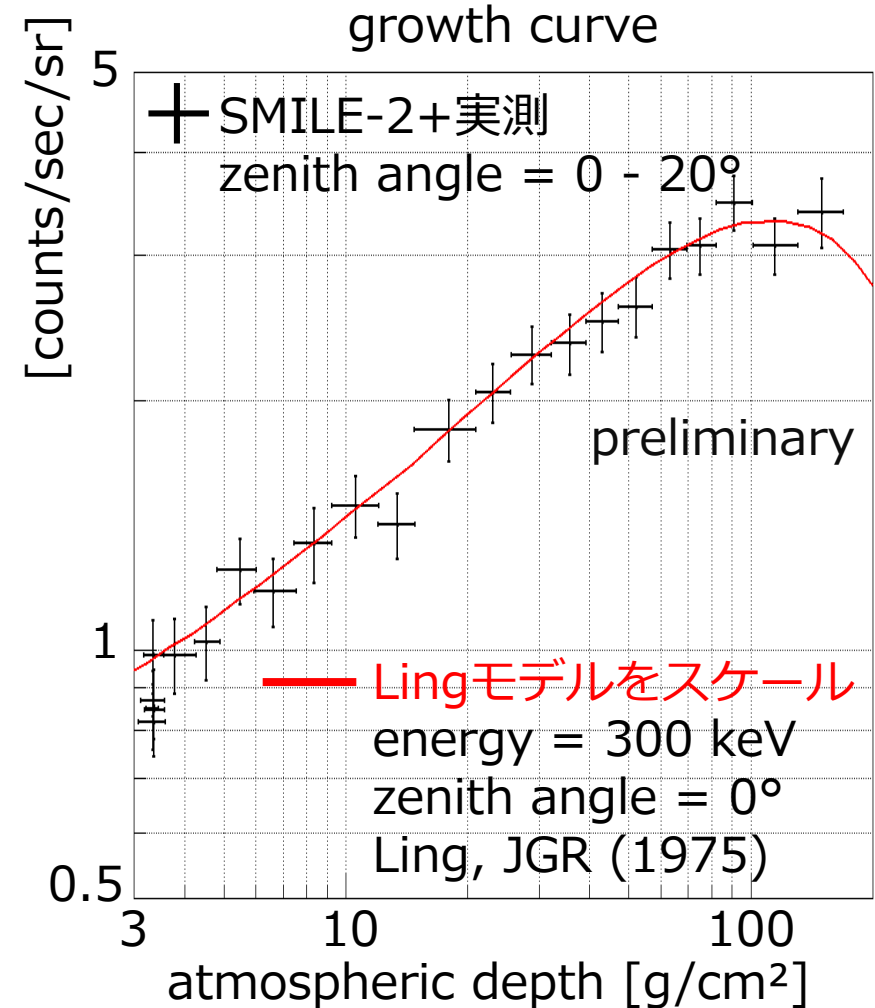
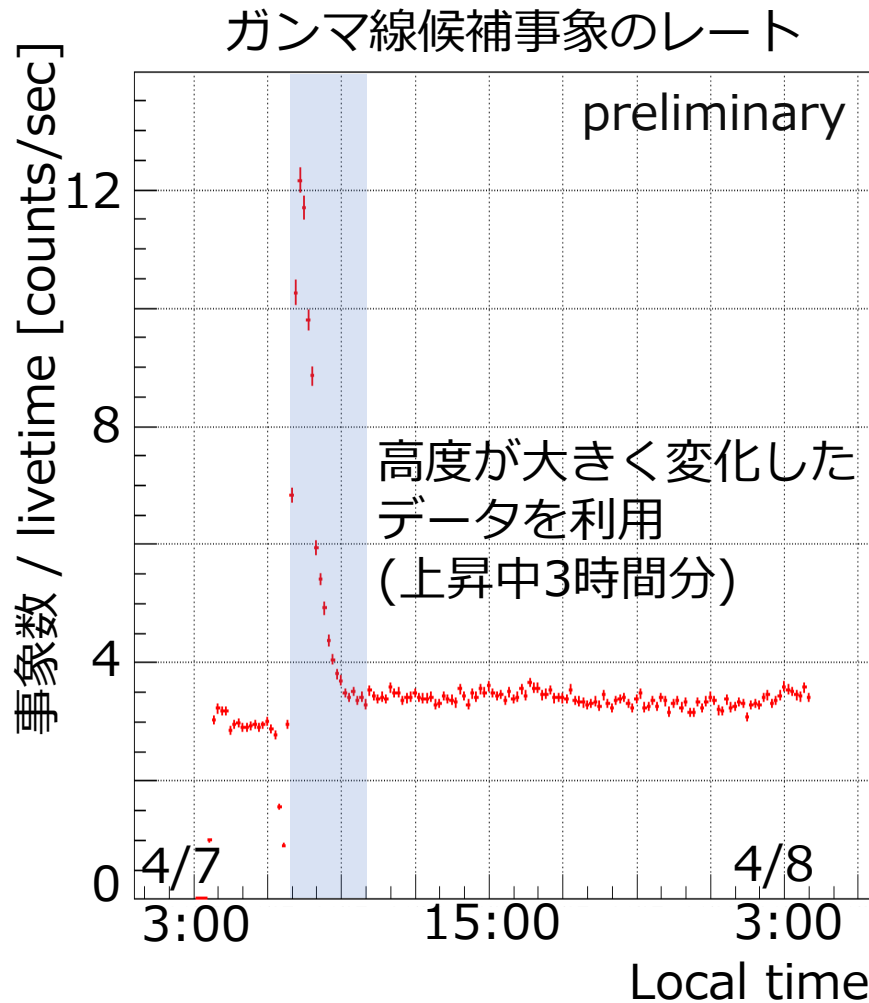
2桁のノイズ除去ができた。

第1回気球実験 SMILE-Iとコンシステント

Takada et al., ApJ (2011)



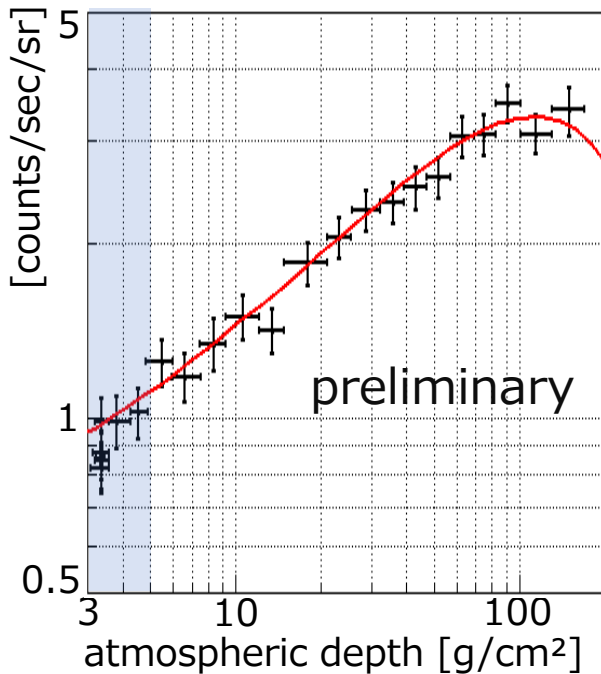
ガンマ線強度の残留大気圧依存性



検出レートの高度依存性はモデルと無矛盾

ガンマ線強度の残留大気圧依存性

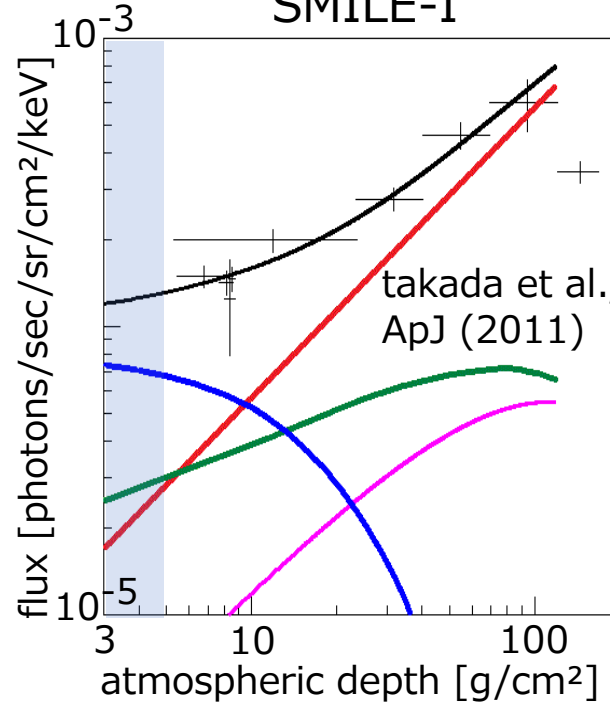
SMILE-2+



SMILE-Iとの比較

- 有効面積 100倍
- 事象数 500倍 (水平飛翔)
- 低大気圧 ~ 3 g/cm²

SMILE-I



Total

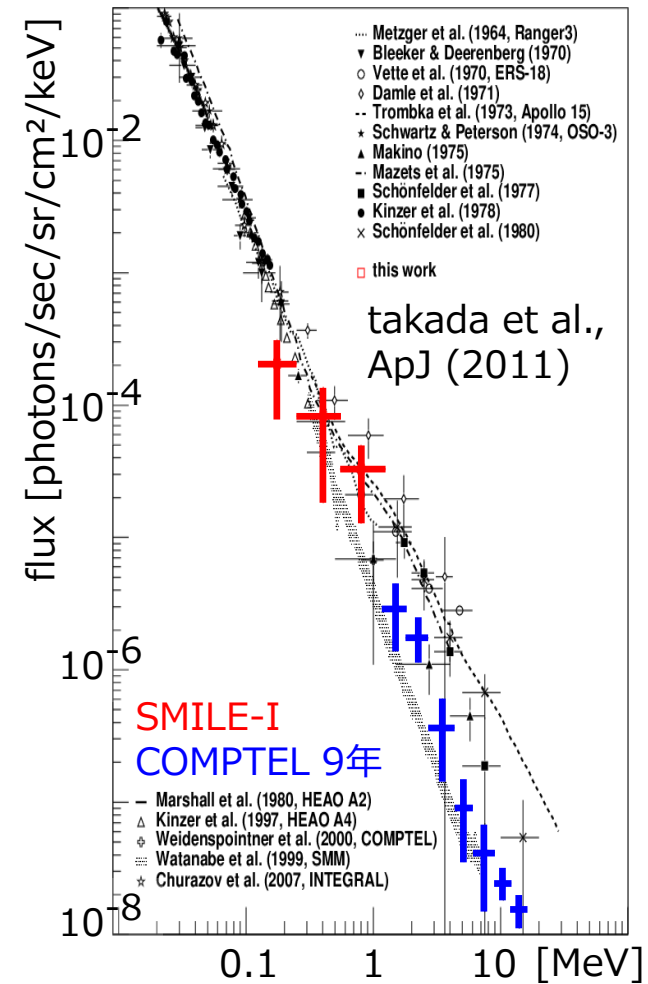
Cosmic

Atmospheric

e⁺ e⁻ annihilation

Background

宇宙拡散ガンマ線フラックス



今後の解析で、宇宙拡散ガンマ線を精度よく決める。

SMILE

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

SMILE-I @ 三陸 (Sep. 1st 2006)

➤宇宙拡散・大気ガンマ線の観測 (0.1 ~ 1MeV)

➤**dE/dXによるバックグラウンド除去の成功** A. Takada+. ApJ, 2011

SMILE-2: 地上試験のみ

T. Tanimori+. ApJ, 2015

SMILE-2+ 1-day flight @ Alice Springs (Apr. 7th 2018)

➤MeVガンマ線天文学におけるイメージングの確立

➤明るい天体(かに星雲と銀河中心)のイメージング

Requirement

Effective area

a few cm²

(detect 5 σ)

PSF (50% included)

radius

~ 10 deg @ 662 keV

NOW!!

SMILE-3

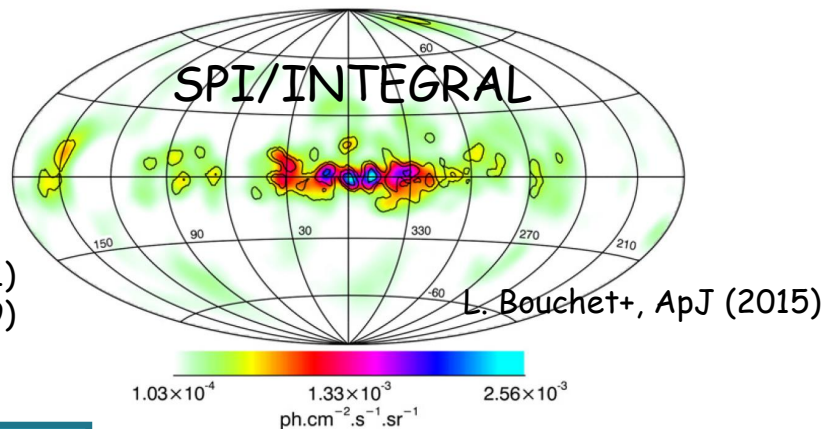
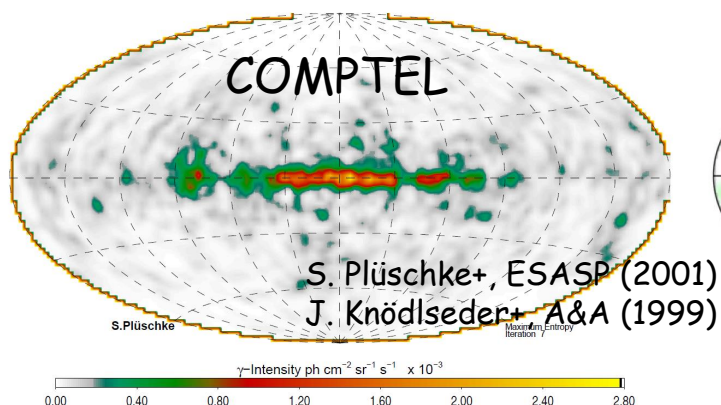
➤長時間気球を用いた科学観測

➤COMPTELの感度を上回る望遠鏡で数回放球

人工衛星による全天観測

~ sub-mCrab sensitivity

1 mCrabの検出感度で見える宇宙 (^{26}Al)

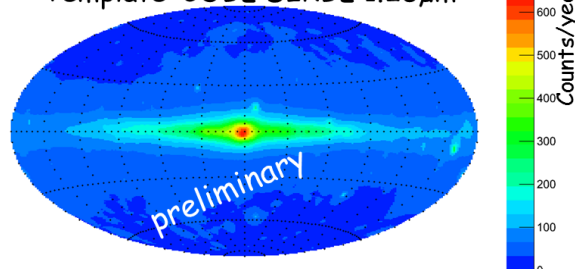


銀河中心に集中している場合

ある程度の広がりを持っている場合

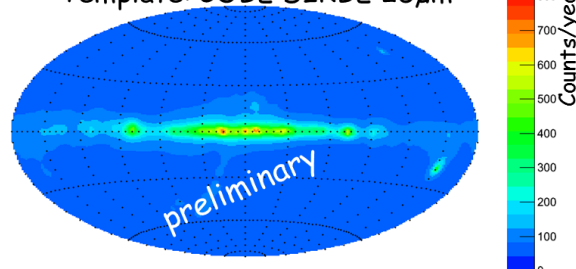
Star tracer (K and M giants)

Template: COBE DIRBE $1.25\mu\text{m}$



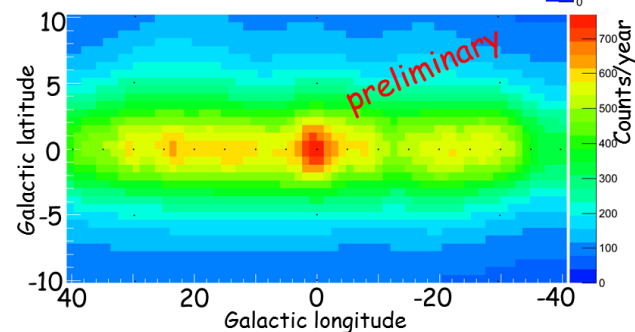
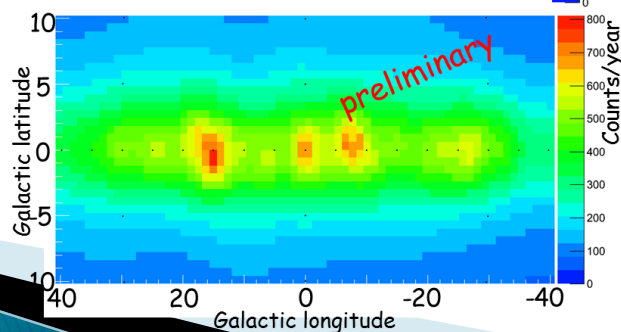
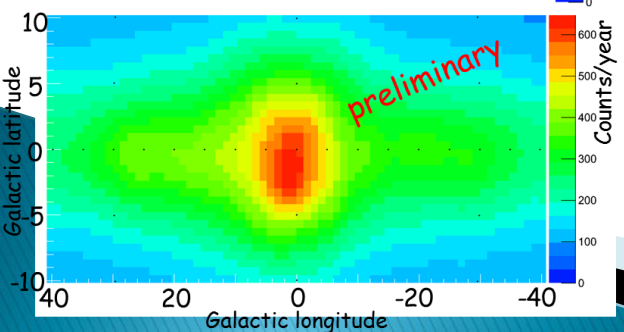
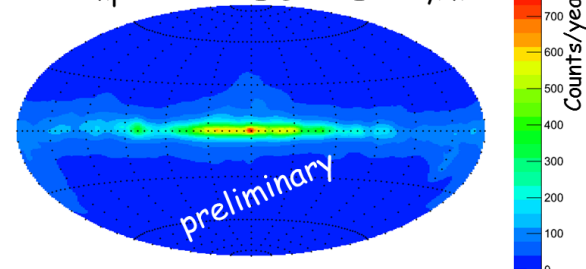
Dust ($T \sim 120\text{K}$)/AGB star tracer

Template: COBE DIRBE $25\mu\text{m}$



Dust ($T \sim 12\text{K}$) tracer

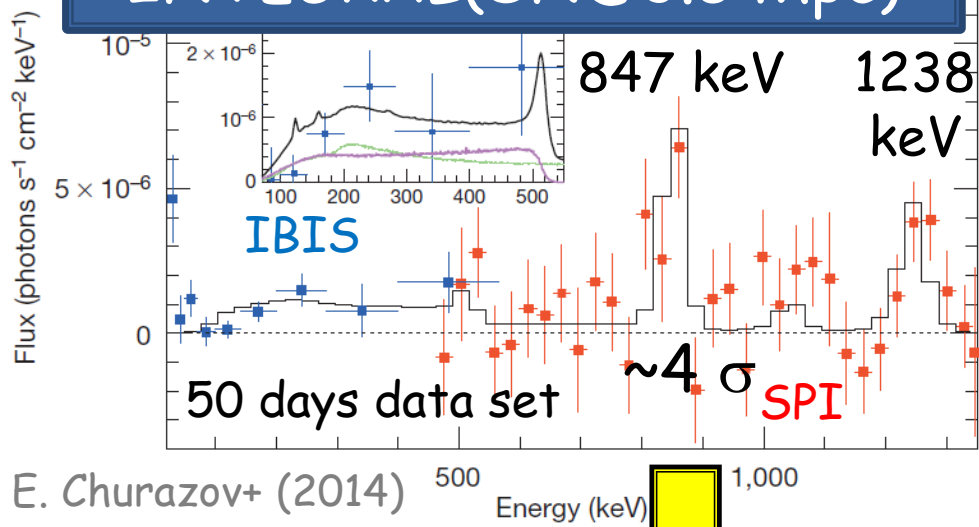
Template: COBE DIRBE $240\mu\text{m}$



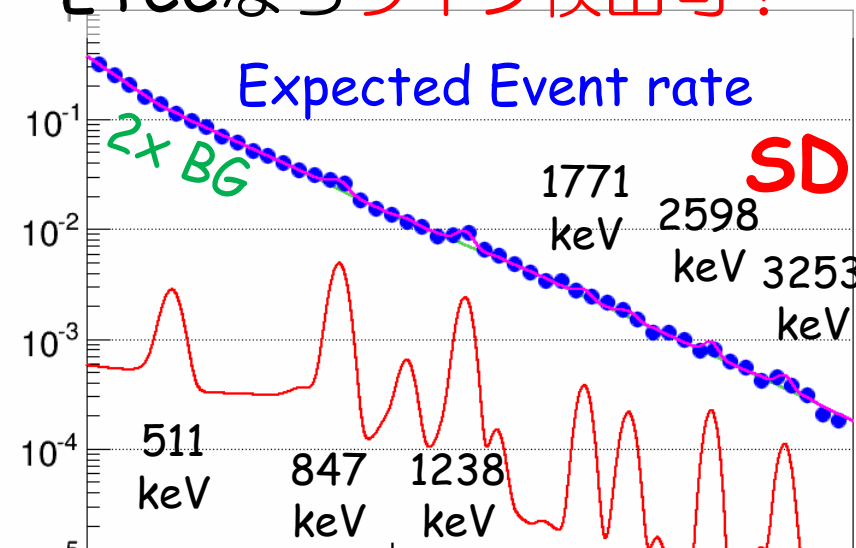
イメージング核分光の世界が変わる！！

INTEGRAL(SN@3.5 Mpc)

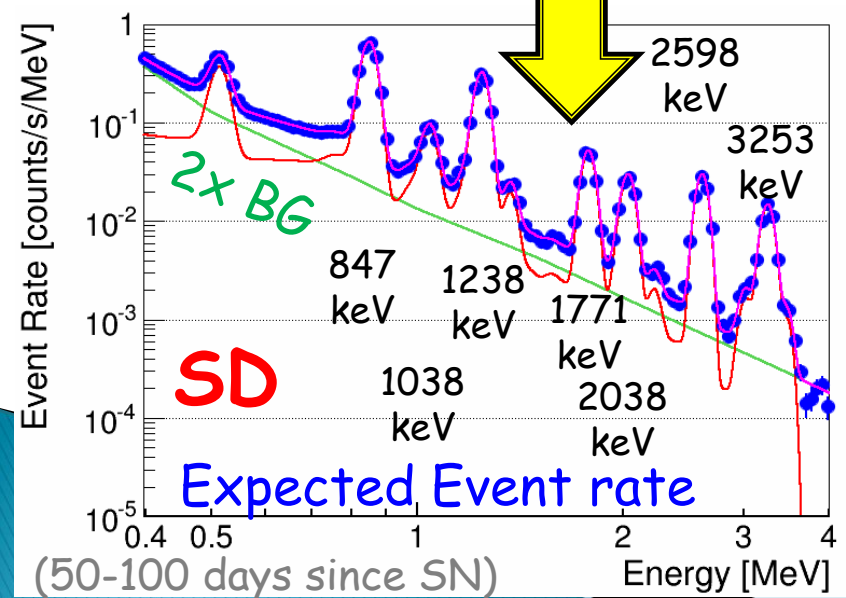
40 Mpc (~ 5.4 SNe/yr) でさえ
ETCCならライン検出可！



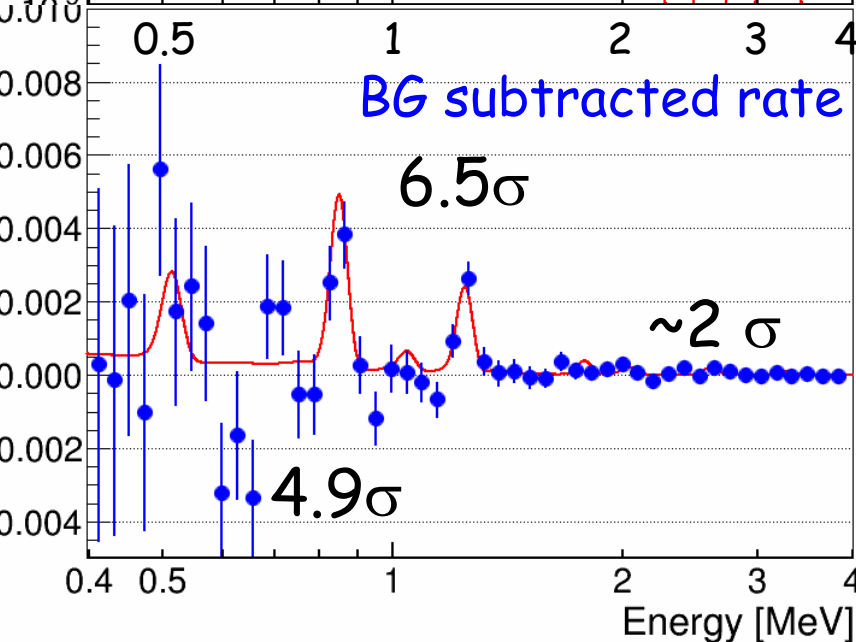
Event Rate [counts/s/MeV]



ETCC衛星(SN@3.5 Mpc)

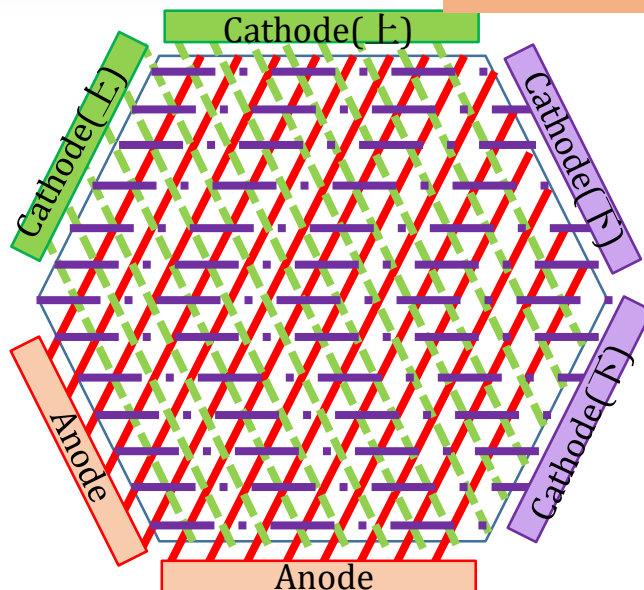
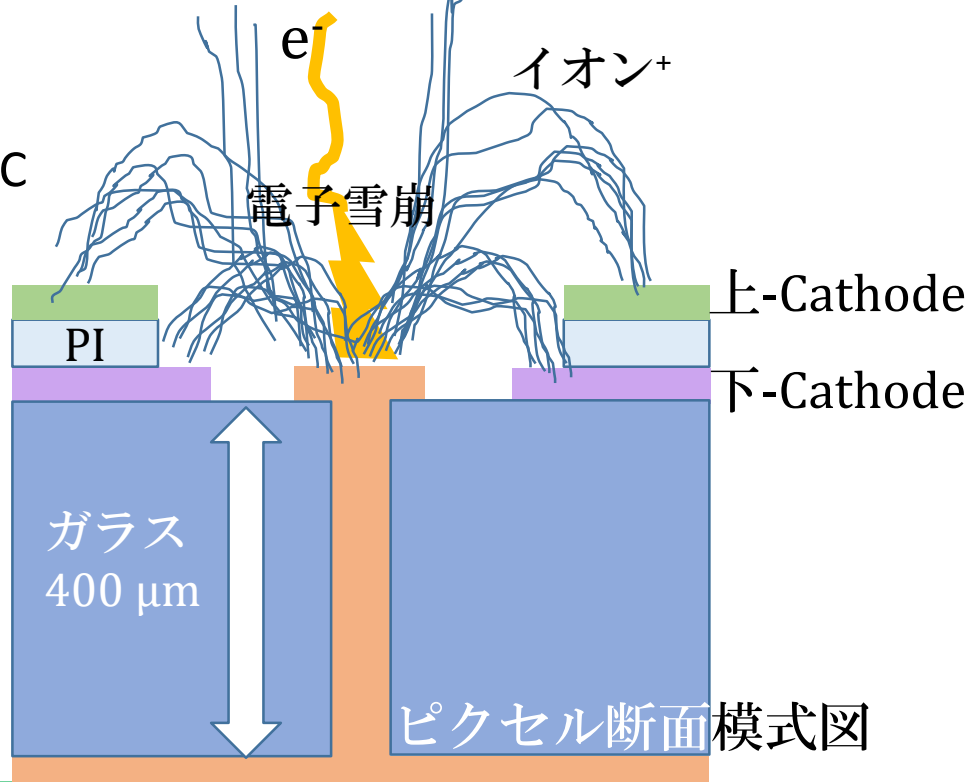
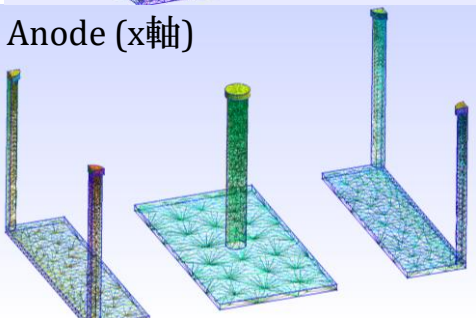
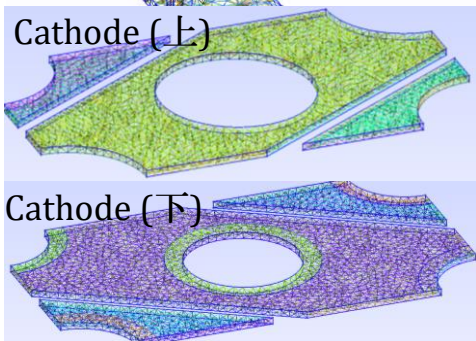
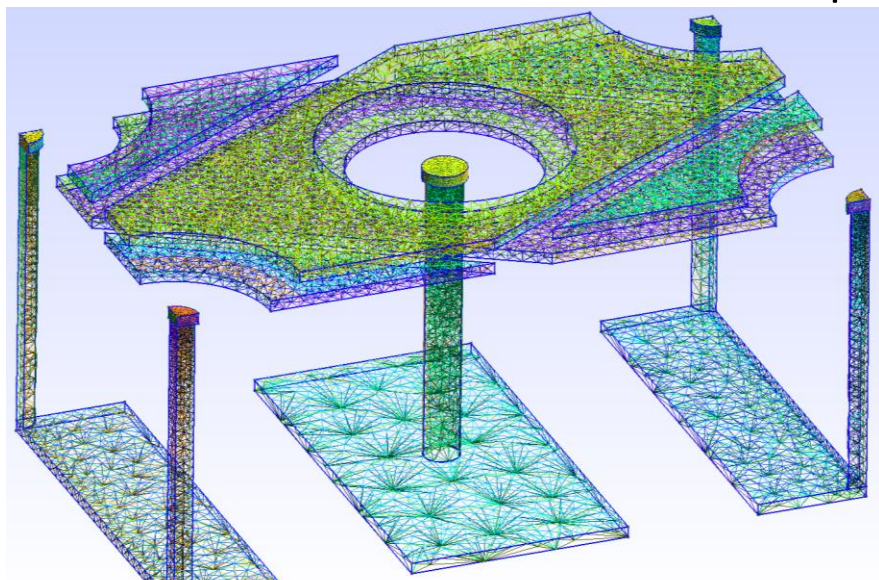


Event Rate [counts/s/MeV]



新3軸μ-PIC

Cathodeを分割・立体交差した3軸μ-PIC

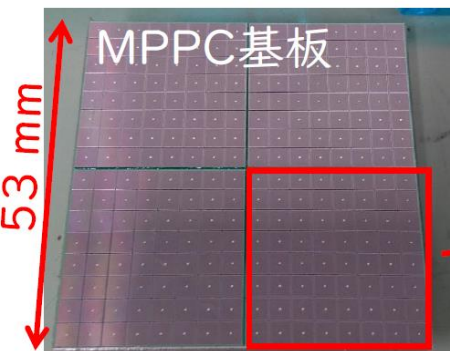


読み出しストリップの概観

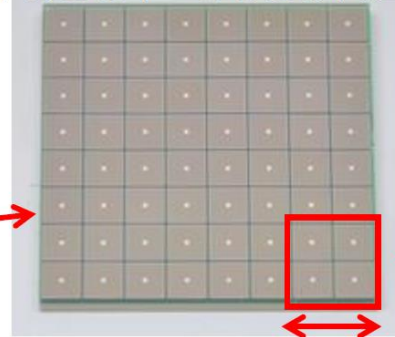
- 各ストリップのなす角120度
- ピクセル配列は最密充填六角形μ-PIC

- ✓ 電子雪崩は起こるのか?
- ✓ 狙い通りカソード信号は分割されるのか?

MPPC, AMP, ADC基板



SI3361-3050NE-08



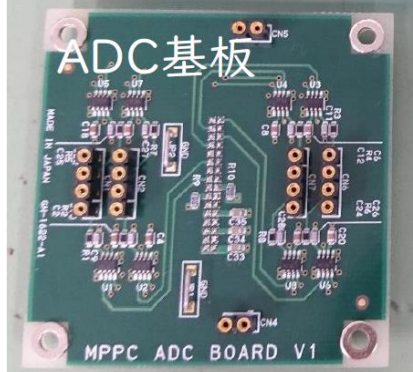
6 mm

(GSO 픽셀サイズと同等)

3584 cells/ch

4ch直列接続 → 1 pixel (6 mm角)

合計64pixelを抵抗分割し
4端読み出し



電荷積分

時定数 $\sim 6 \mu\text{s}$

波形整形

差動増幅

High Gain

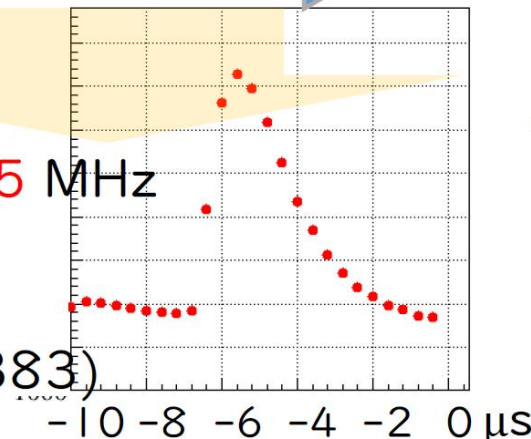
Low Gain

$\times 3.5$

ダイナミックレンジの拡大

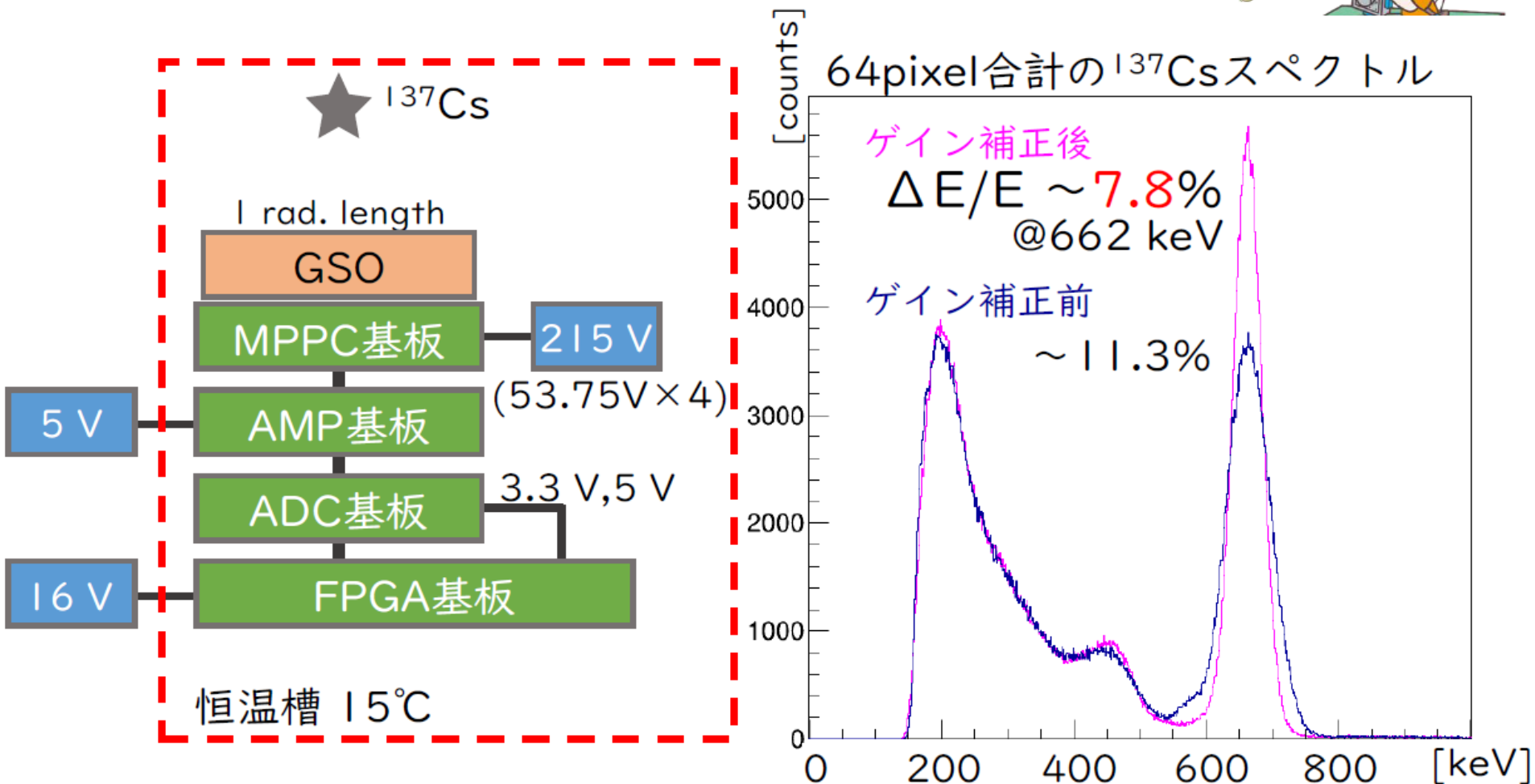
Sampling ADC

- ・ sampling rate : 2.5 MHz
- ・ 逐次比較型ADC
- ・ 入力 0-4096 mV
- 出力 14bit (0-16383)



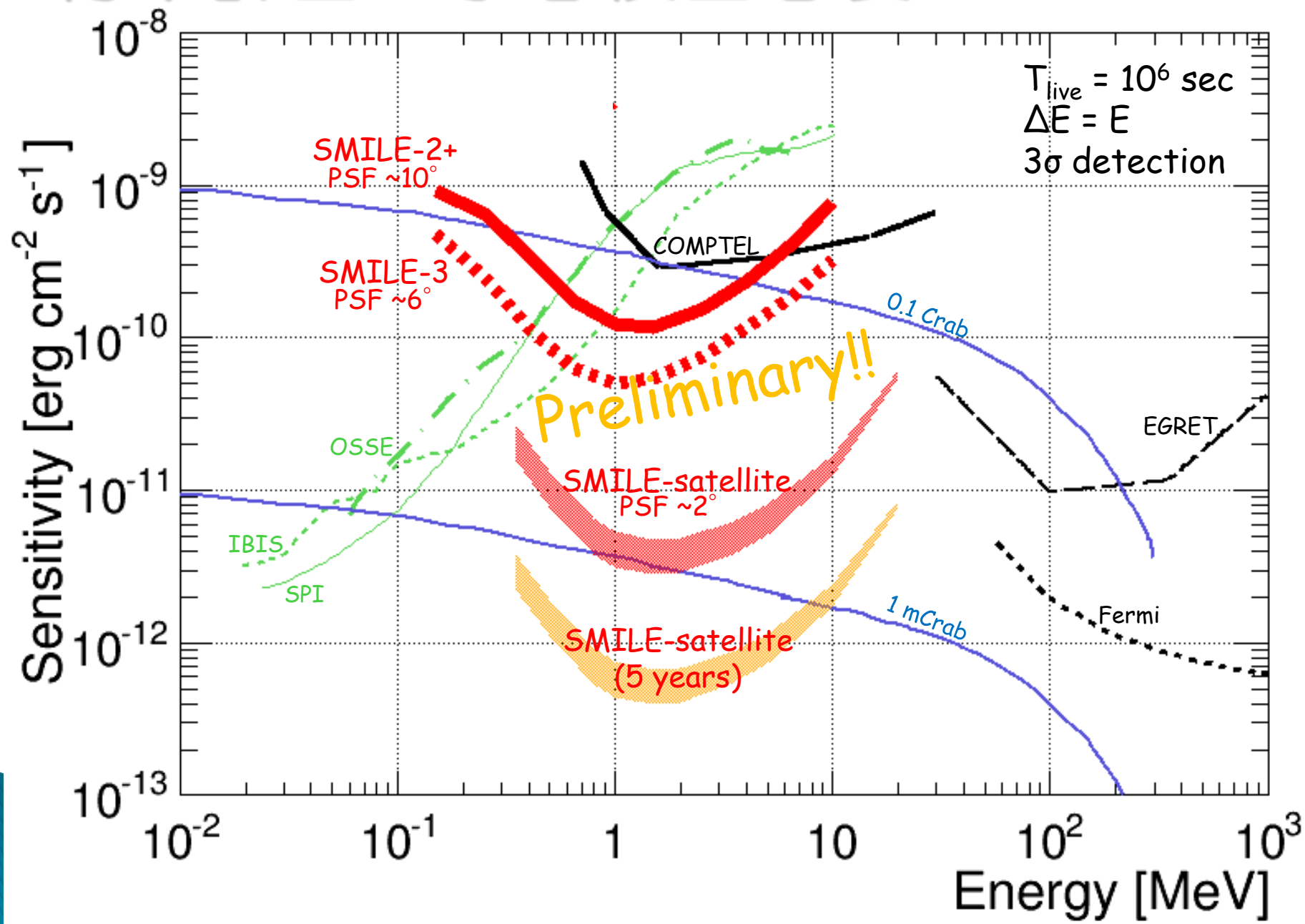
低消費電力
LTC2313-14
(2.5 MHz)
25 mW $\times 8$

エネルギー分解能



MPPCピクセル間ゲイン補正をすることで
エネルギー分解能 **7.8%** @662 keV

将来計画の予想検出感度





<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp>