



# 突発天体位置決定に向けた 超小型衛星 CAMELOT の開発現状

眞武寛人, 深沢泰司, 水野恒史, 高橋弘充, 内田悠介, 内田和海, 今澤遼, 廣瀬憲吾 (広島大学), 中澤知洋 (名古屋大学), 一戸悠人 (立教大学), 小高裕和 (東京大学), 榎戸輝揚 (理研), 大野雅功, Norbert Werner, Gábor Galgóczi (MTA-Eötvös University), András Pál, László Mészáros (Konkoly Observatory), Jakub Řípa (Masaryk University), CAMELOT team

---

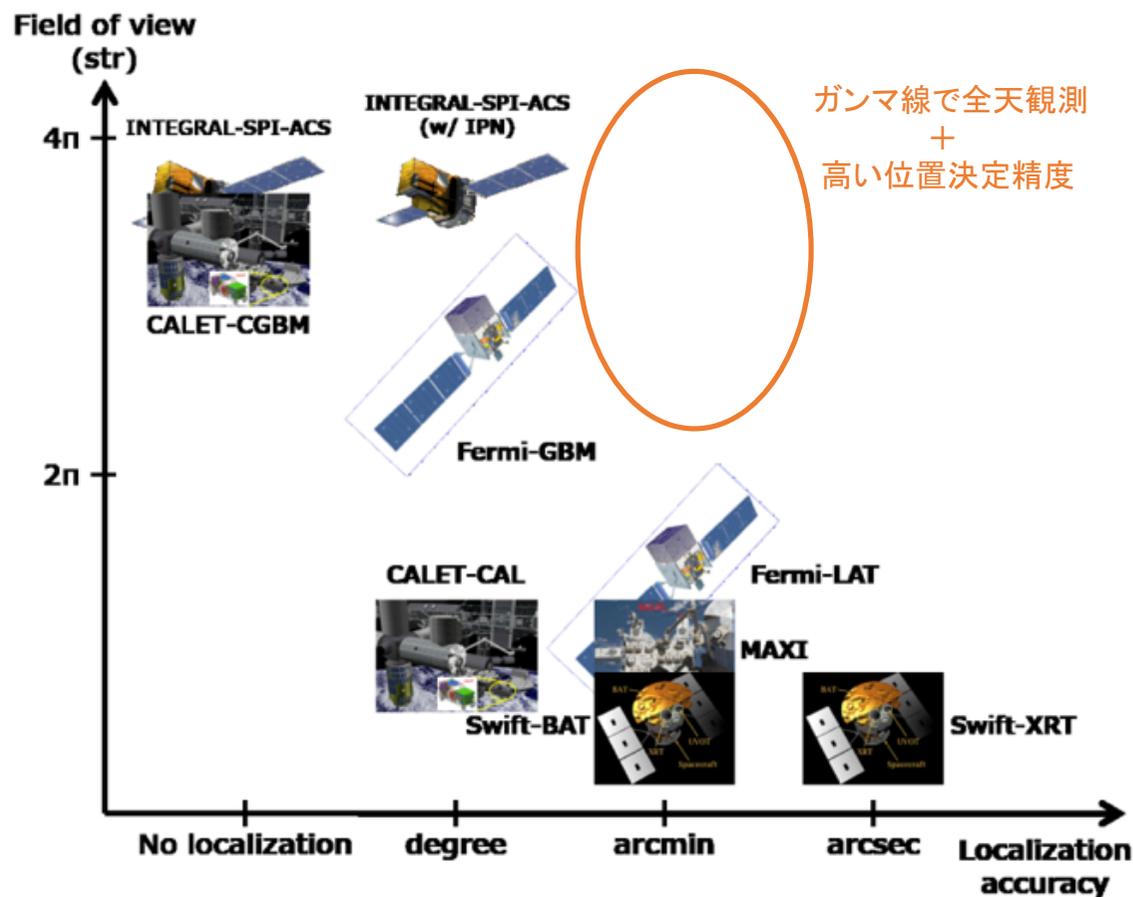
1. CAMELOTについて p3,4
2. 開発現状 p5
3. ハンガリーでの開発現状: EM/FMの製作、環境試験 p6
4. 日本での開発状況: MPPCの放射線耐性検証 p7, 8
5. まとめと今後 p9

# 1. CAMELOTについて

3/9

## CAMELOT : Cubesat Applied for MEasuring and LOcating Transients

日本とハンガリーの共同研究。重力波対応天体の同定を見据えて、ガンマ線バースト(GRB)検出を目的とした衛星。複数の超小型衛星を用いることで常に全天監視を行い、数度から数十分角の位置決定精度を持つことが求められる。



これまでのGRBを観測  
→ ガンマ線で全天観測  
→ X線残光を観測で高い精度の位置決定

従来の検出器が持ち合わせていなかった

- ・常に全天を観測(>2 $\pi$  str)
- ・数度から数十分角のスケールでの高い位置決定精度の両方をもち合わせた衛星が求められる

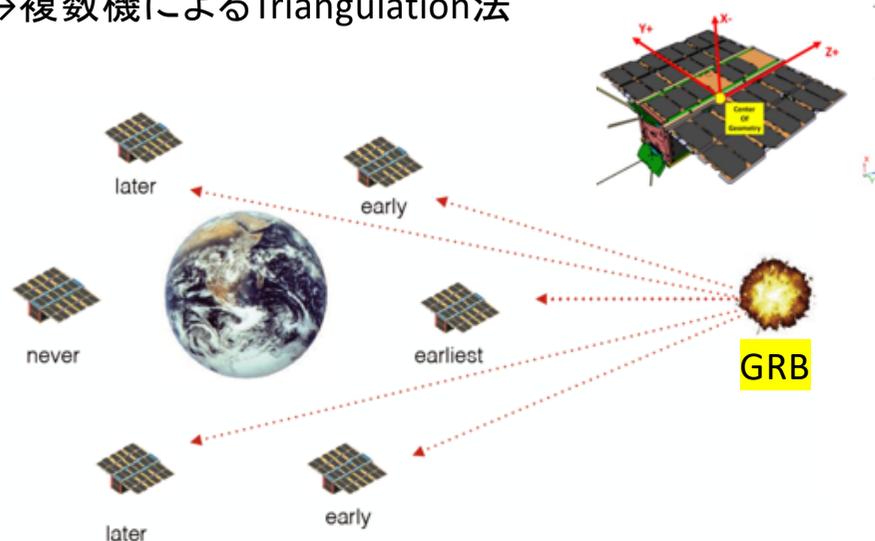
重力波観測とGRB観測を結びつける  
→ 重力波源の特定ができる  
→ Sort GRBがNS連星やBH連星からの放射だと断定できる

# 1. CAMELOTについて

4/9

- ・常に全天を観測
- ・数十分角から度のスケールでの高い位置決定

→複数機によるTriangulation法



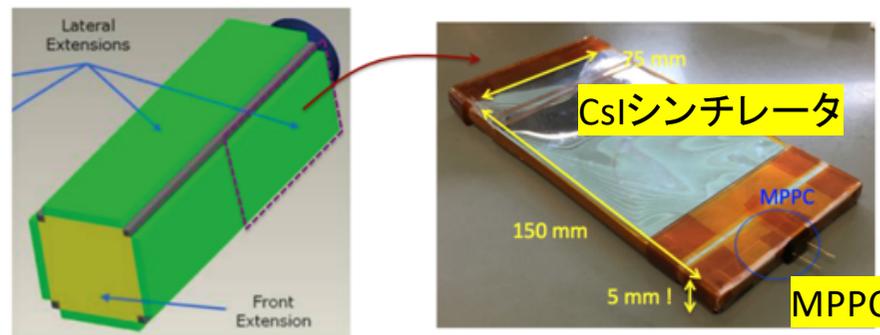
最低でも9機と複数の超小型衛星を使用

→常に全天監視が可能

衛星間で検出されたイベントの検出時間差をGPSで精密に測定(Triangulation法)

→高い位置決定精度を達成

3U衛星: 10x10x30cm<sup>3</sup>, 4 kg



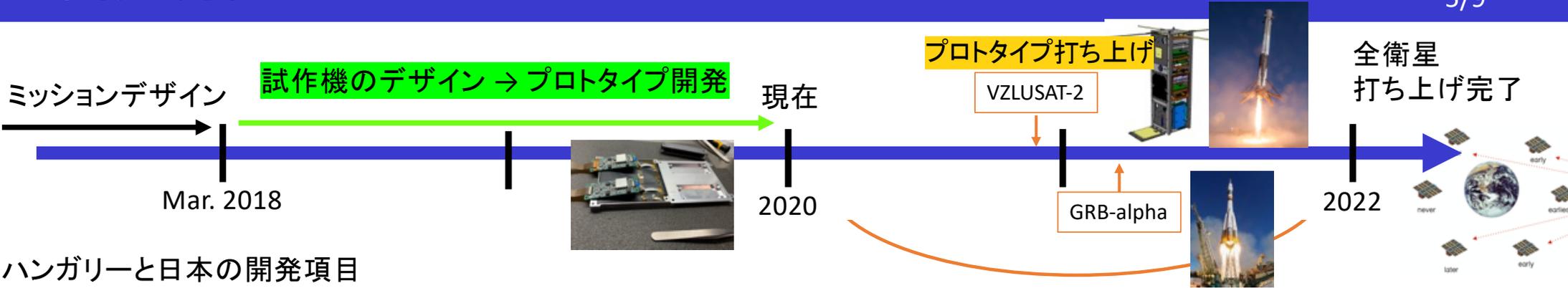
高光子統計(低エネルギースレッショルド)を超小型衛星で実現する必要がある

→

CsIシンチレータ (高シンチレーション光量、ハンドリング容易)  
+ MPPC (低電圧(低消費電力)、コンパクト、高ゲイン)  
の検出器の組み合わせを採用

## 2. 開発現状

5/9



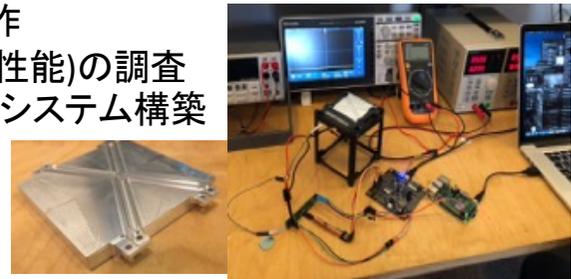
ハンガリーと日本の開発項目

### プロトタイプ開発

プロトタイプ機では75 × 75 × 5 mm<sup>3</sup>のシンチを採用  
(CAMELOTでは1機につき150 × 75 × 5 mm<sup>3</sup>のシンチを4枚使用)

(日本)  
MPPCの衛星軌道上で受ける放射線による性能劣化の評価  
→ 陽子線を照射しスレッシュホールドへの影響調査

(ハンガリー)  
Flight Model(FM)の設計・製作  
→ AIケースの光漏れ(遮光性能)の調査  
→ スペクトルの取得までのシステム構築



### プロトタイプ打ち上げ

(日本)  
シンチレータとMPPCの性能調査

(ハンガリー)  
プロトタイプ機を打ち上げ予定  
→ VZLUSAT-2 チェコの3U衛星  
12月 2検出器 打ち上げ予定(アメリカ, Falcon9)  
→ GRB-alpha 1U衛星  
1検出器 打ち上げ予定(ロシア, ソユーズ)

2022年以降に全機打ち上げができるように調整

# 3. ハンガリーでの開発現状: EM/FMの製作、環境試験

## Engineering modelの作成

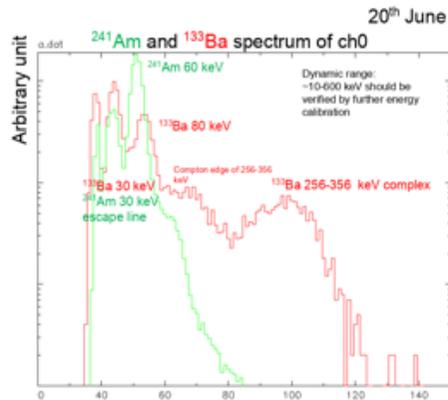
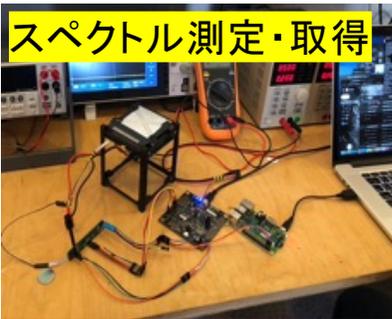
Al caseの光漏れの調査



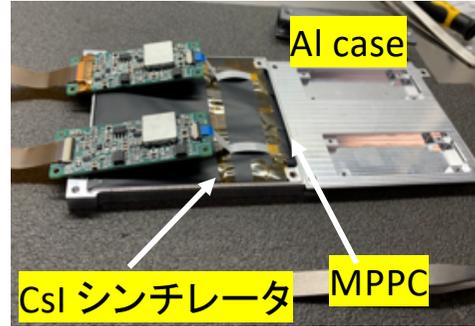
基盤の作成



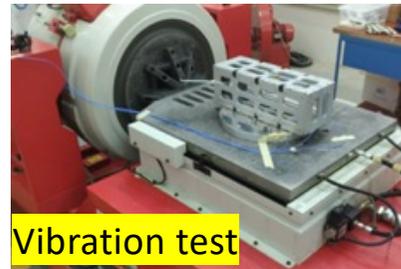
スペクトル測定・取得



## 完成したEM



## Environment test vibration test, shock test



## VZLUSAT-2

- ・FM品製作完了
- ・環境試験(9月頭)
- ・アメリカへ搬送(9月中旬)
- ・10月組み立て、12月打ち上げ予定

## GRB-alpha

- ・FM品製作完了
- ・2021年初頭に打ち上げ予定(時期は未定)
- ・8月末にFM組み上げ
- ・スロバキアで衛星とのかみ合わせ

シンチ、MPPC  
大きな問題なし

# 4. 日本での開発状況: MPPCの放射線耐性検証

これまでの検出器についての調査

- ・シンチレータのサイズ
- ・MPPCの読み出し数による光量の違い
- ・衛星軌道上でのMPPCの放射線耐性

1年で数100 rad(シールドあり)  
1000 rad(シールドなし)を想定



若狭湾エネルギー  
研究センター

新しいMPPC(S14)の放射線耐性について試験を行った

200MeVの陽子線を300 rad, 1000 rad, 5000 rad照射  
エネルギースレッシュホールドの劣化、7ヶ月後のアニーリングを調査

Model	S13360-6050CS	S14160-6050HS
Type	lead	surface mount
Gain ( $10^6$ )	1.7	<u>2.5</u>
Operation $V_{op}$ (V)	54.4	41.0
PDE (%)	49	50
Dark current ( $\mu A$ )	<u>0.4</u>	1.6

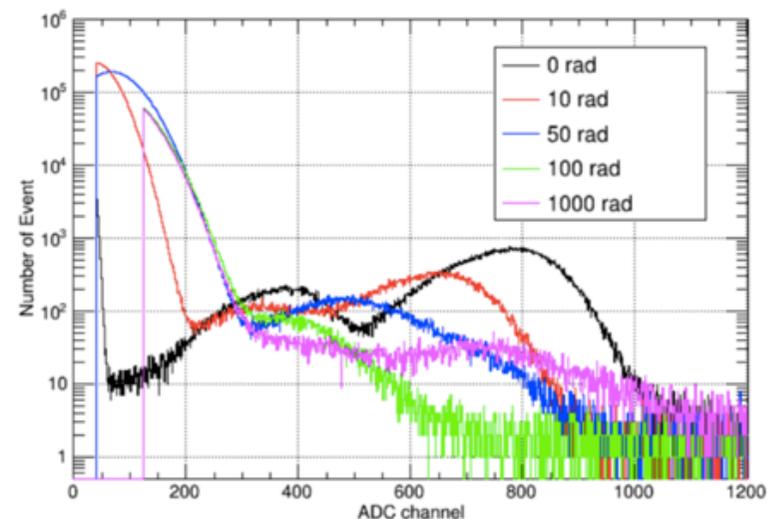
Hirade et al. 2020



S13 暗電流小

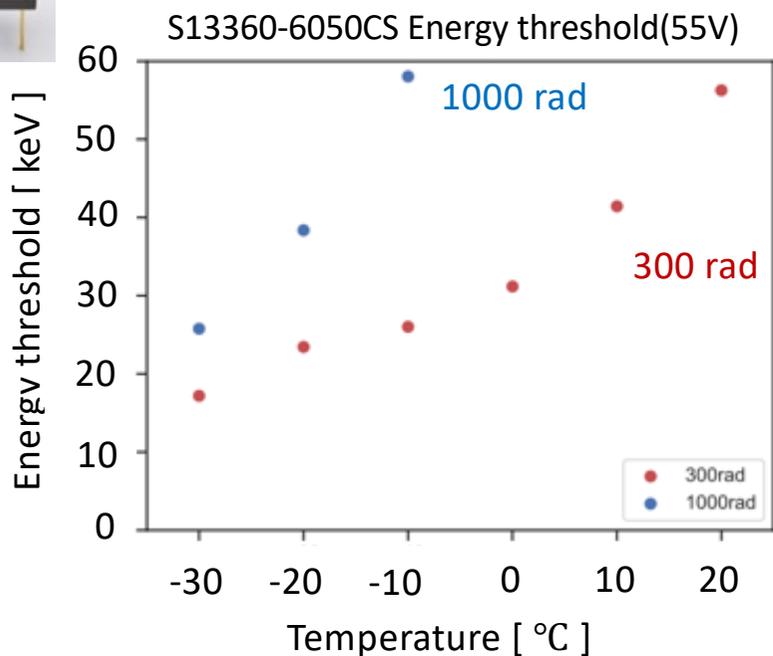
S14 ゲインが高い

スレッシュホールドの決定

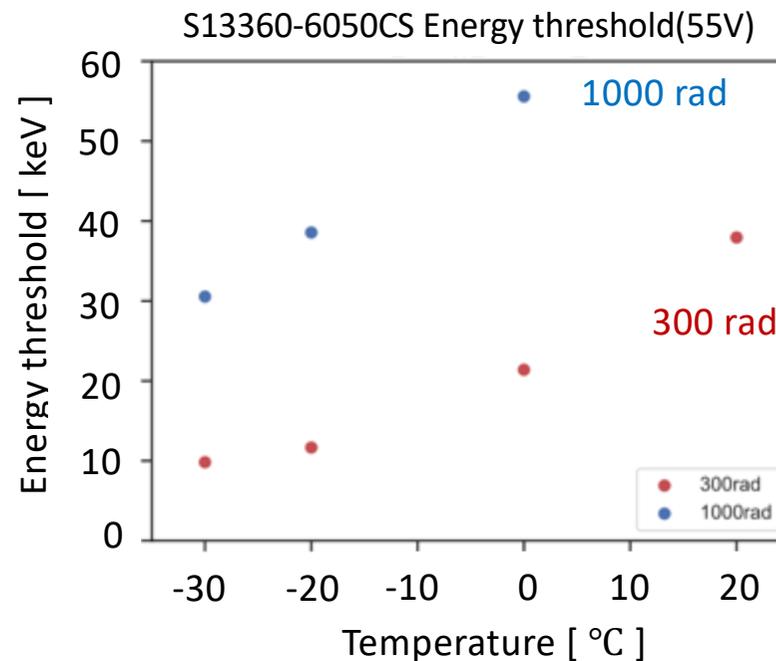


ノイズをGauss fitし4 $\sigma$ の位置をスレッシュホールドとする

# 4. 日本での開発状況: MPPCの放射線耐性検証



7 month after...



300 rad: 数10%改善  
1k rad: ~10%改善



- ・現状としてはS13を使う予定
- ・cubesatでは低温での使用が難しい
- ・放射線ダメージによりS13,S14はスレッシュホールドが300 radで1.5-3倍、1k radで>5倍となる  
→ 放射線を遮蔽するものが必要である

### まとめ

#### ハンガリー

FM製作完了、プロトタイプ機の打ち上げに向けての準備

- ・3UのVZLUSAT-2に2検出器相乗りして2020年12月打ち上げ予定
- ・1UのGRB-alphaを2021年初頭に打ち上げ予定

#### 日本

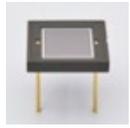
最終的な衛星に搭乗させるMPPCを決めるため放射線ダメージについて調査

- ・放射線ダメージのアニーリングも確認できた。
- ・より低いthresholdを達成するには、現状のMPPCでは放射線を遮蔽する必要がある。

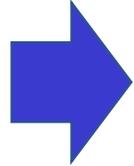
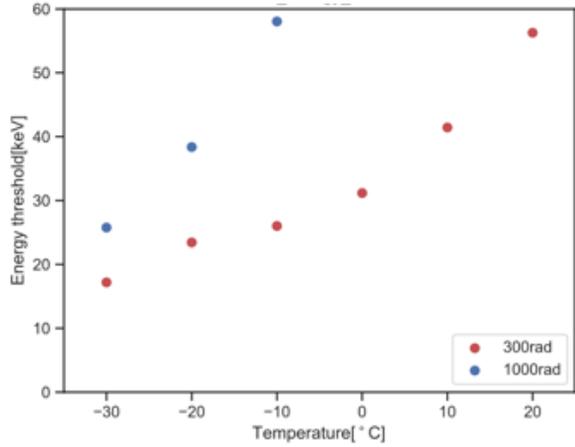
### 今後

- ・プロトタイプ機打ち上げ後のデータ解析
- ・最新のMPPCを用いた放射線ダメージの性能評価

予備スライド

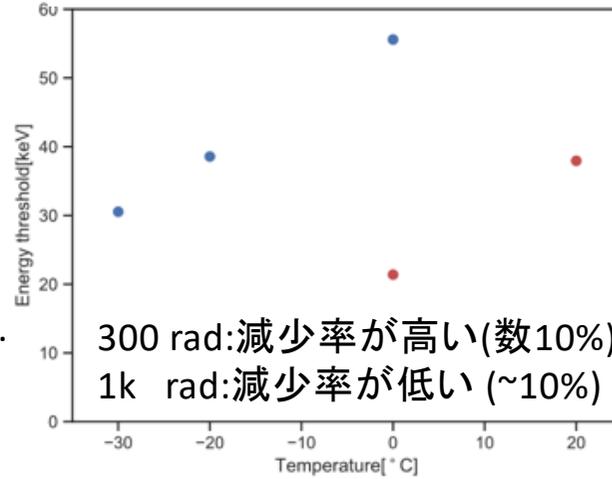


S13360-6050CS Energy threshold(55V)



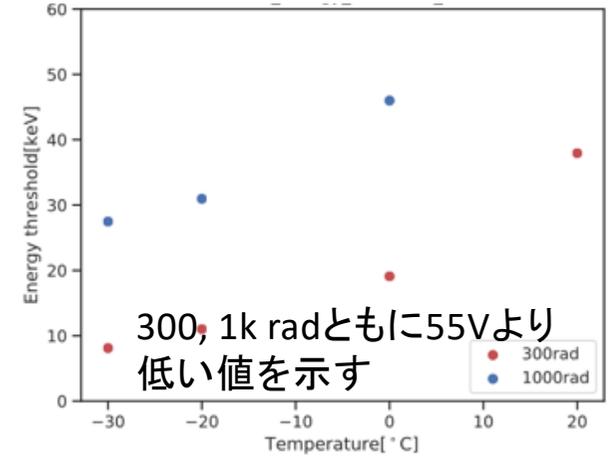
7 month after...

S13360-6050CS Energy threshold(55V)



300 rad:減少率が高い(数10%)  
1k rad:減少率が低い(~10%)

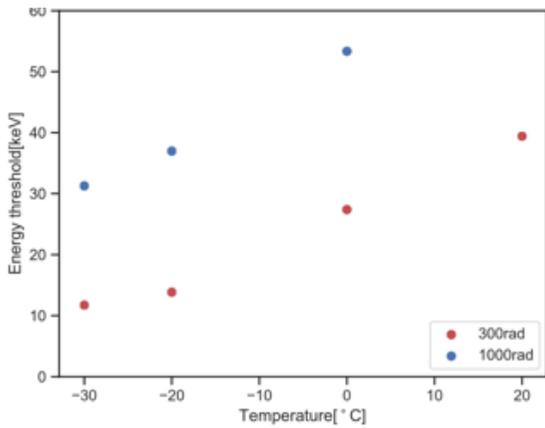
S13360-6050CS Energy threshold(best HV)



300, 1k radともに55Vより  
低い値を示す

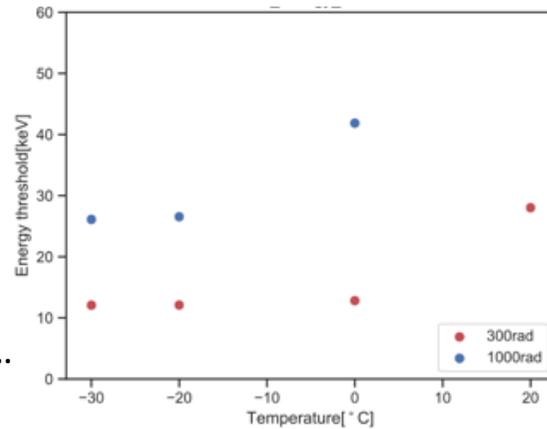


S14160-6050HS Energy threshold(41V)



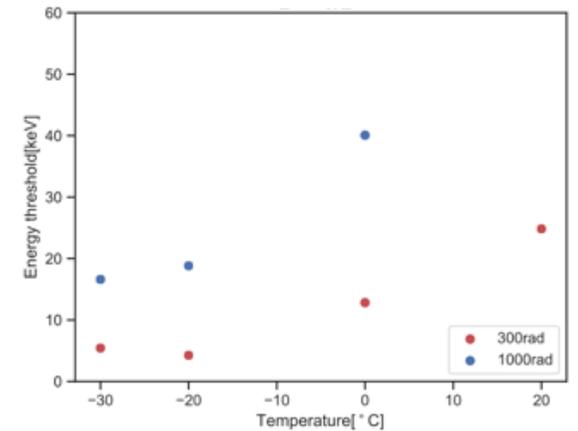
7 month after...

S14160-6050HS Energy threshold(41V)



0°Cより低温では減少率が低い  
0°C以上では数10%の減少率

S14160-6050HS Energy threshold (best HV)



41Vに比べて低い値を示す

# MPPCの性能

## 照射前のS13とS14の性能比較

Model	S13360-6050CS	S14160-6050HS
Type	lead	surface mount
Gain ( $10^6$ )	1.7	2.5
Operation $V_{op}$ (V)	54.4	41.0
PDE (%)	49	50
Dark current ( $\mu A$ )	0.4	1.6

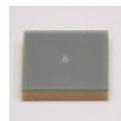
- ・S13はS14に対して暗電流が低い設定になっている
- ・S14はゲインが高くより光子検出効率が高い

Table 1: Properties of S13360-6050CS and S14160-6050HS

Hirade et al. 2019

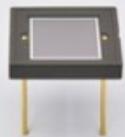


S13360-6050CS  
リード  
(窓枠:セラミック)



S14160-6050HS  
表面実装

# MPPCの性能



MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)

S13360シリーズ

## セレクションガイド

型名	ピクセルピッチ (μm)	有効受光面サイズ (mm)	ピクセル数	パッケージ	開口率 (%)	
S13360-1325CS	25	1.3 × 1.3	2668	セラミック	47	
S13360-1325PE				表面実装型		
S13360-3025CS	25	3.0 × 3.0	14400	セラミック		
S13360-3025PE				表面実装型		
S13360-6025CS	25	6.0 × 6.0	57600	セラミック		
S13360-6025PE				表面実装型		
S13360-1350CS	50	1.3 × 1.3	667	セラミック		74
S13360-1350PE				表面実装型		
S13360-3050CS	50	3.0 × 3.0	3600	セラミック		
S13360-3050PE				表面実装型		
S13360-6050CS	50	6.0 × 6.0	14400	セラミック		
S13360-6050PE				表面実装型		
S13360-1375CS	75	1.3 × 1.3	285	セラミック	82	
S13360-1375PE				表面実装型		
S13360-3075CS	75	3.0 × 3.0	1600	セラミック		
S13360-3075PE				表面実装型		
S13360-6075CS	75	6.0 × 6.0	6400	セラミック		
S13360-6075PE				表面実装型		

## 構成/絶対最大定格

型名 (パッケージ)	窓材	窓材屈折率	絶対最大定格			
			動作温度*1 Topr (°C)	保存温度*1 Tstg (°C)	はんだ付け条件	リフローはんだ付け条件*2 Tsol
S13360-****CS (セラミック)	シリコーン樹脂	1.41	-20 ~ +60	-20 ~ +80	350 °C以下, 1回, 3秒以内*3	-
S13360-****PE (表面実装型)	エポキシ樹脂	1.55			-	ピーク温度: 240 °C, 2回 (P.11参照)

\*1: 結露なきこと

\*2: JEDEC level 5a

\*3: リード根元より1 mm以上離す

注) 絶対最大定格を一瞬でも超えると、製品の品質を損なう恐れがあります。必ず絶対最大定格の範囲内で使用してください。

[https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360\\_series\\_kapd1052j.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360_series_kapd1052j.pdf)



## Structure

Typ. no.	Number of channels (ch)	Effective photosensitive area/channel (mm <sup>2</sup> )	Pixel pitch (μm)	Number of pixels/channel	Package	Window	Window refractive index	Geometrical fill factor (%)
S14160-3050HS	1	3.0 × 3.0	50	3531	Surface mount type	Silicone	1.57	74
S14160-4050HS		4.0 × 4.0		6331				
S14160-6050HS		6.0 × 6.0		14331				
S14161-3050HS-04	16 (4 × 4)	3.0 × 3.0		3531				
S14161-3050HS-08	64 (8 × 8)	3.0 × 3.0		3531				
S14161-4050HS-06	36 (6 × 6)	4.0 × 4.0		6331				
S14161-6050HS-04	16 (4 × 4)	6.0 × 6.0	14331					

## Absolute maximum ratings

Parameter	Symbol	Specification	Unit
Operating temperature*1	Topr	-40 to +85	°C
Storage temperature*1	Tstg	-40 to +85	°C
Soldering temperature*2	Tsol	240 (3 times)	°C

\*1: No dew condensation

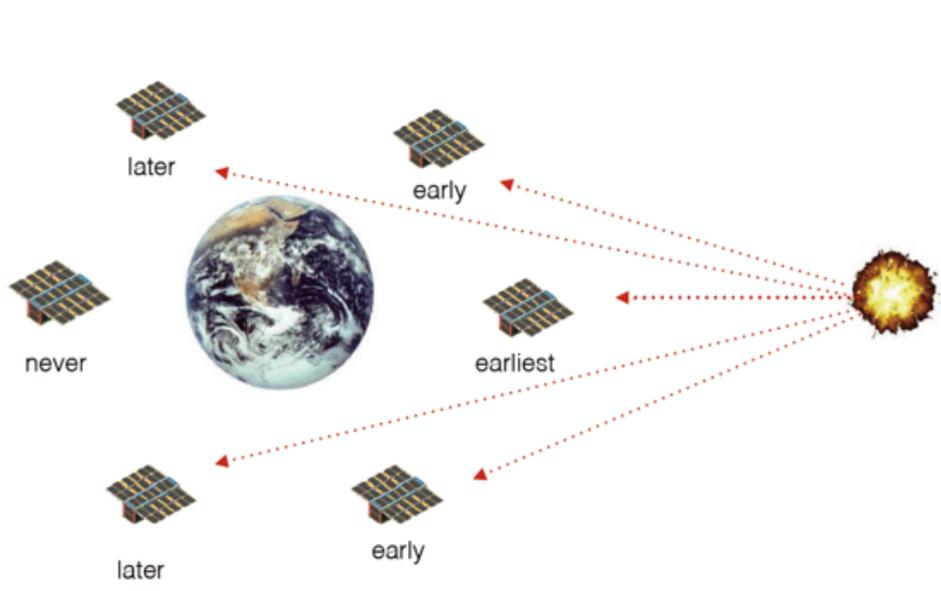
When there is a temperature difference between a product and the surrounding area in high humidity environment, dew condensation may occur on the product surface. Dew condensation may cause deterioration in characteristics and reliability.

\*2: Reflow soldering, JEDEC J-STD-020 MSL 5a, see P.10

Note: Exceeding the absolute maximum ratings even momentarily may cause a drop in product quality. Always be sure to use the product within the absolute maximum ratings.

[https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s14160\\_s14161\\_series\\_kapd1064e.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s14160_s14161_series_kapd1064e.pdf)

# Triangulation法



衛星間のイベント検出時間差 $\Delta t$   
 衛星間の距離 $d$   
 衛星を結ぶ直線となす角 $\theta$

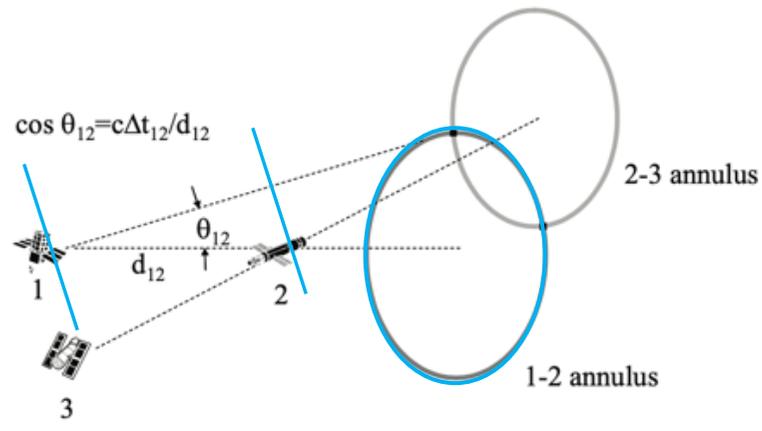
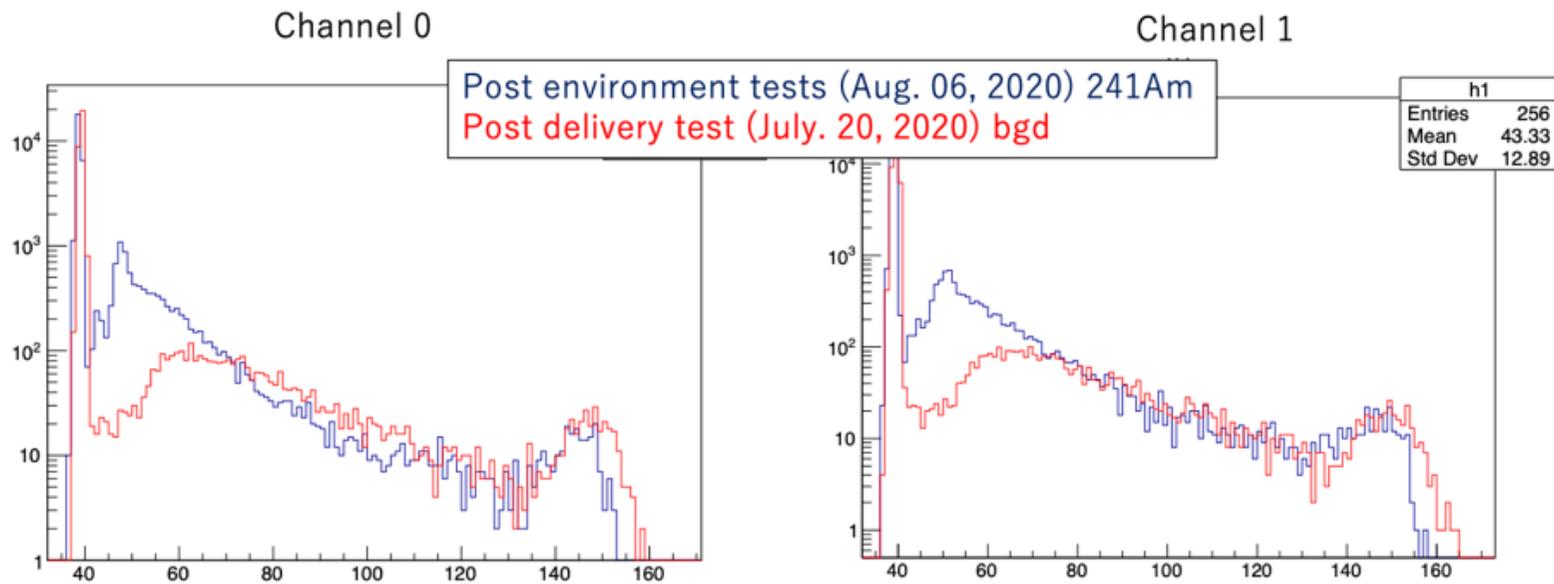


図 2.15: triangulation 法を用いた GRB 位置決定の概念図 [19]

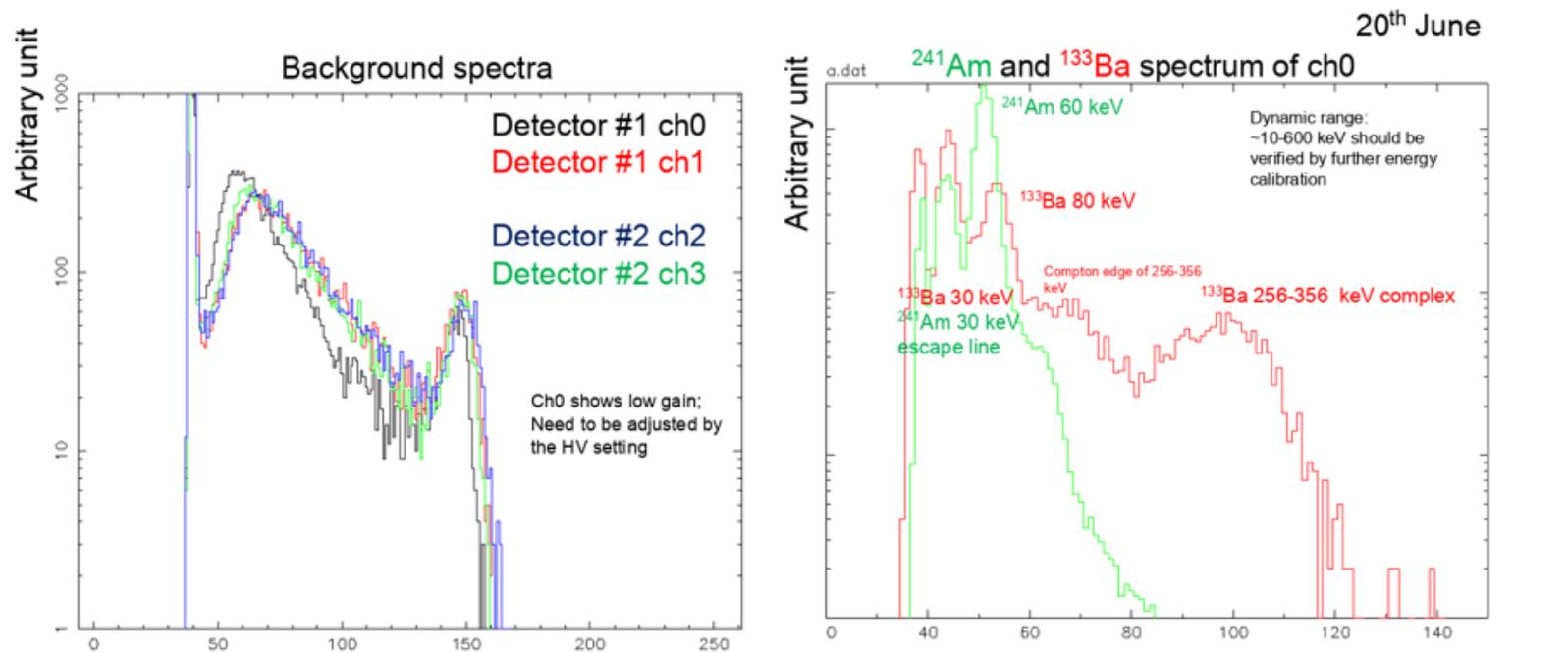
$$\cos \theta_{12} = c\Delta t_{12}/d_{12}$$

# Environment test後のスペクトル



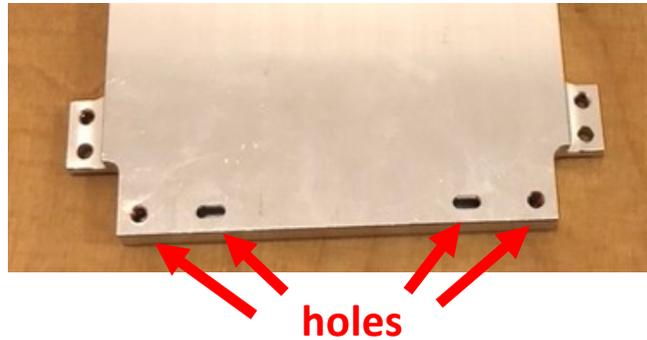
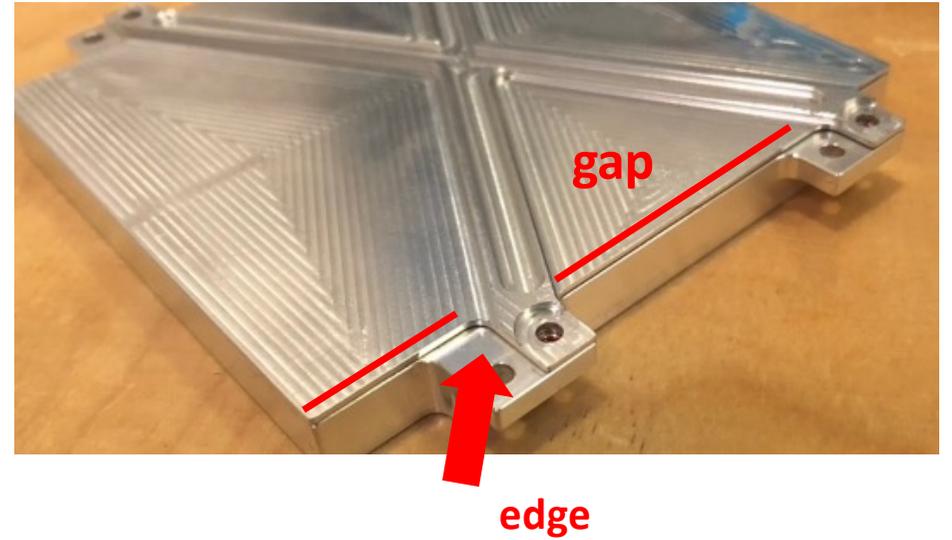
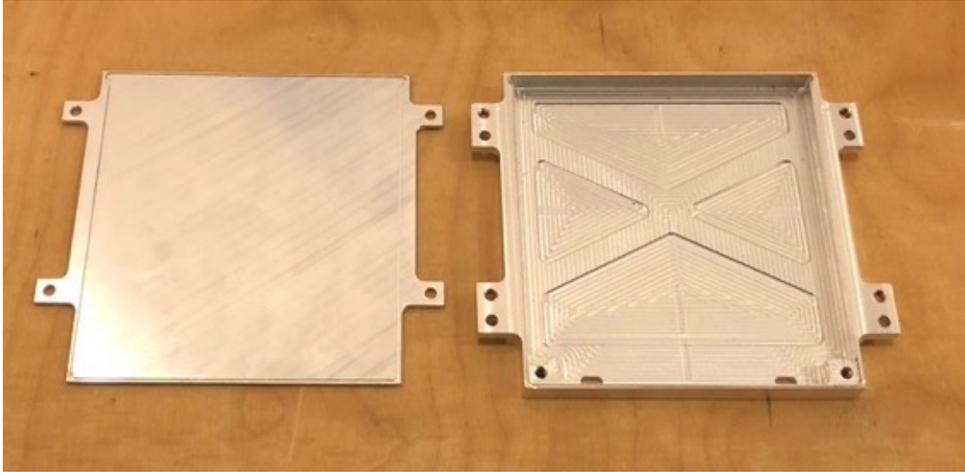
Gain is not exactly same probably due to the temperature, but the noise level is almost same  
And both 60 keV and 30 keV line is seen after the environment tests !

## Post-delivery signal validation



No serious problem is found in the background spectra after the delivery.  $^{241}\text{Am}$  and  $^{133}\text{Ba}$  spectra are also observed from one of the detector channel

## The Al casing



- The Al casing is consisted of 2 parts.
- We think the **gap**, **edges** and **the holes** leak the light, so I tested this using the black tape to prevent the leaking of the light.

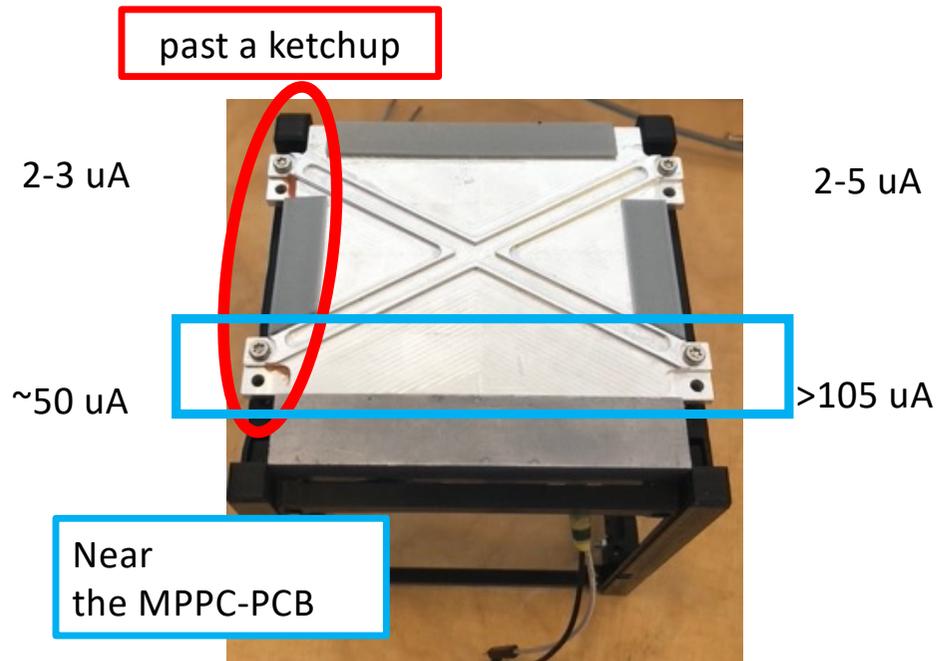
- We can probably prevent the leaking of the light when this lead-antimony part is put at the side of the Al casing.

## When we use a past or some black liquid



For the first-time test, we use a “ketchup” to test the effect of some liquid.

- The Al casing is covered by the antimony part and the cover parts.
- One side past a ketchup and the other side do not past the ketchup, and such dark current was observed at such 4 edges directing flush light of the smart phone.



The dark current is large value when the edge do not use a ketchup.

- The dark current is saturated ( $>105 \mu\text{A}$ ) when flush light is directed to the edge of near the MPPC-PCB.

The edges using a ketchup is to be low value compared with the other edges.

- The dark current of the edge of the back side of this picture almost never change the value.
- The dark current of the near the MPPC-PCB down to value  $\sim 50 \mu\text{A}$ .

# VZLUSAT-2 EM full detector assembling work

11<sup>th</sup> June 2020 Masanori Ohno, Laszlo Meszaros, Andras Pal, Jakub Ripa and Norbert Werner

Al casing for VZLUSAT-2

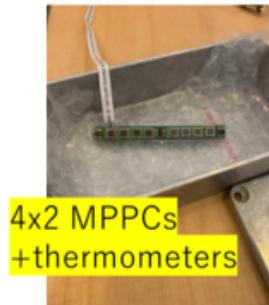
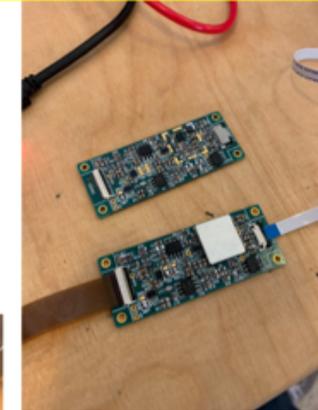


75x75x5mm<sup>3</sup> CsI(Tl)  
Scintillator (ESR wrapped)



Lead shield

Two analog daughterboards



4x2 MPPCs  
+thermometers



Tedlar wrapping

Now we have all components of the VZLUSAT-2 GRB detector.  
Let's assemble them !!