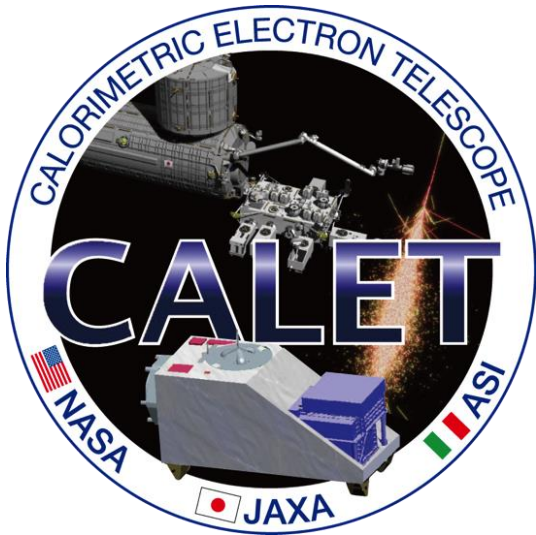


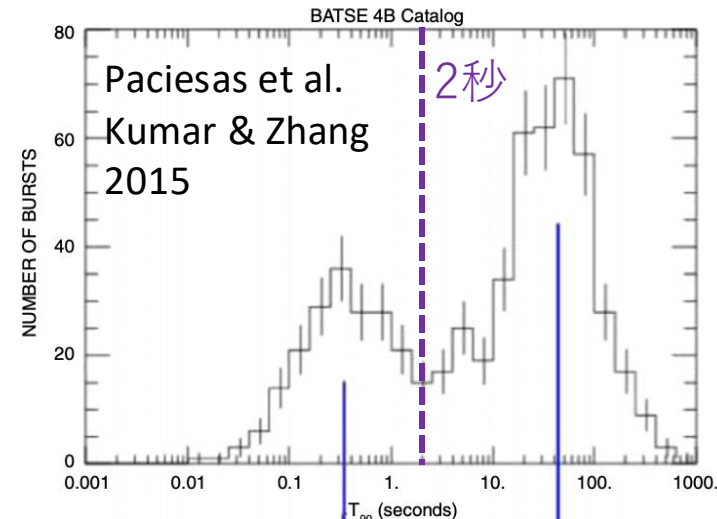
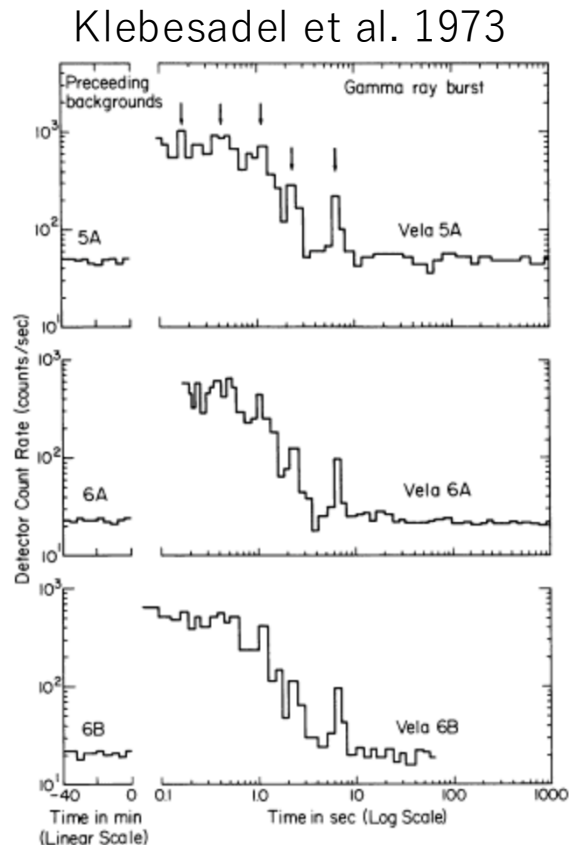
10年間のGRB観測成果と 重力波対応天体探索

川久保雄太 (青山学院大学)



ガンマ線バースト (GRB)

大量のX線・ガンマ線が短時間に飛来する突発天体现象
1960年代後半に核実験監視衛星Velaによって発見

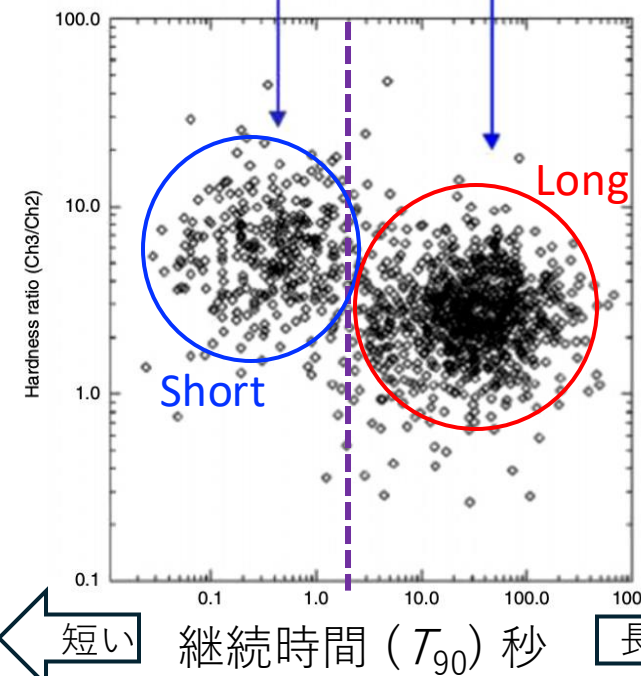


GRBの継続時間 T_{90} の分布は約2秒を境に二つのピークが見える。

Short GRB
 $T_{90} < 2$ 秒

Long GRB
 $T_{90} \geq 2$ 秒

連星中性子星合体
中性子星-ブラックホール合体
大質量星の重力崩壊

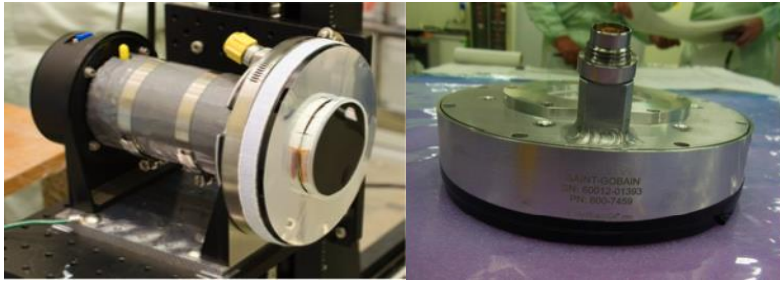


特にshort GRBは連星中性子星合体, ブラックホール-中性子星合体の電磁波対応天体としても注目されている。
(例: GW170817/GRB 170817A)

T_{90} は観測された全光子数の最初と最後の5%を除いた90%の光子を含む時間

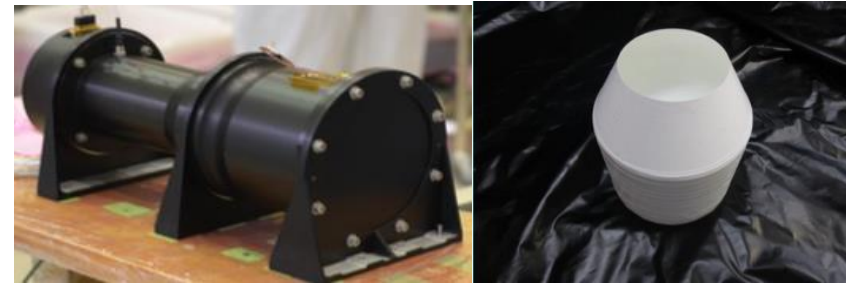
CALET Gamma-ray Burst Monitor (CGBM)

Hard X-ray Monitor (HXM)



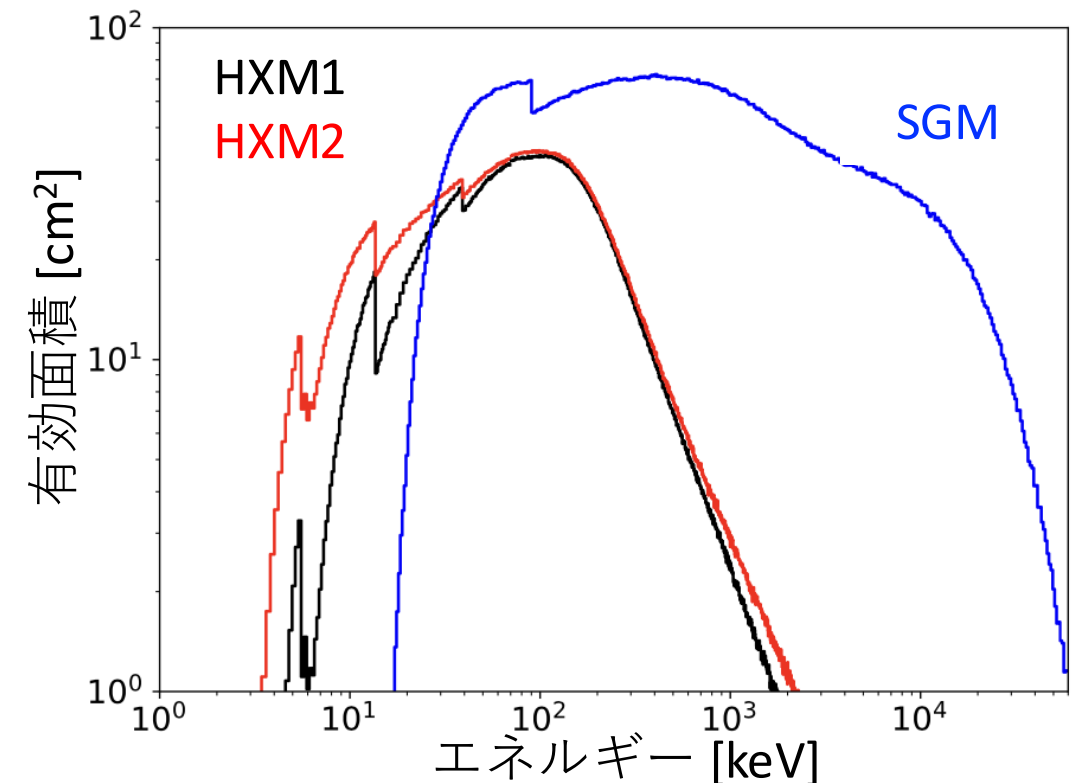
7 – 1000 keV

Soft Gamma-ray Monitor (SGM)



40 keV – 20 MeV

	HXM	SGM
検出器	LaBr ₃ (Ce) + PMT	BGO + PMT
台数	2	1
直径 [mm]	61	102
厚み [mm]	12.7	76
エネルギー分解能	8 % @ 511 keV	11 % @ 511 keV
視野	~3 sr	~8 sr



2種類の検出器を搭載することによりGRBの典型的なエネルギー範囲を網羅

CGBMの軌道上運用と速報体制

2025年11月現在も
CGBMは正常に観測
を続けている。

モニターデータ

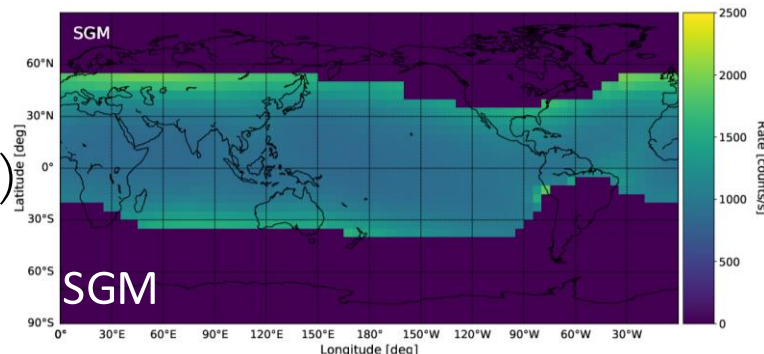
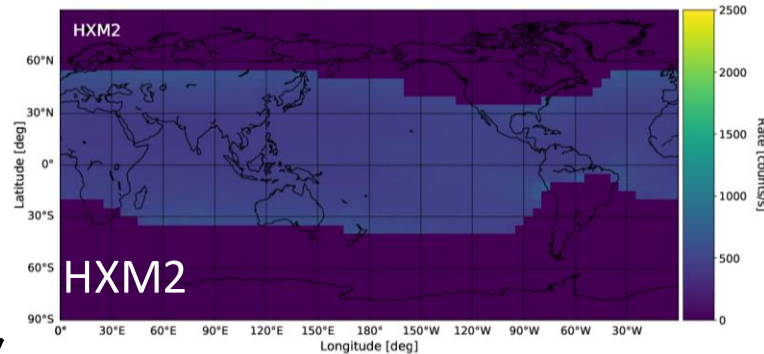
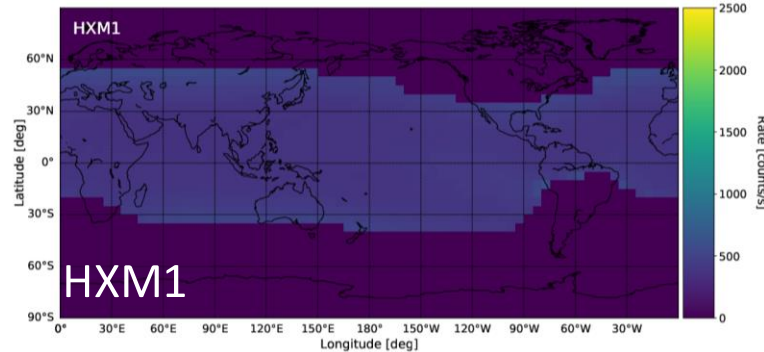
Time History (TH) data
1/8 秒毎, 4+4 ch

Pulse Height (PH) data
4 秒毎, 102 + 410 ch

高緯度では高圧電源オフ
観測効率: ~ 60 %

カウントレート (低緯度)
HXM: ~500 counts/s
SGM: ~1000 counts/s

平均カウントレート (2020/09)



機上トリガー

0.25秒毎にシグナルノイズ比を計算・判定
現在のトリガー設定

閾値: 8.5 σ / 7 σ

エネルギー帯域: 25-100 keV / 50 - 300 keV

判定時間: 1/4 s, 1/2 s, 1 s, 4 s

イベントデータの取得

62.5 us, 4096 ch x 2 (High, Low)

General Coordinates Network (GCN)への速報

GCN Notice (~ 1分)

TH 光度曲線 (~ 15分)

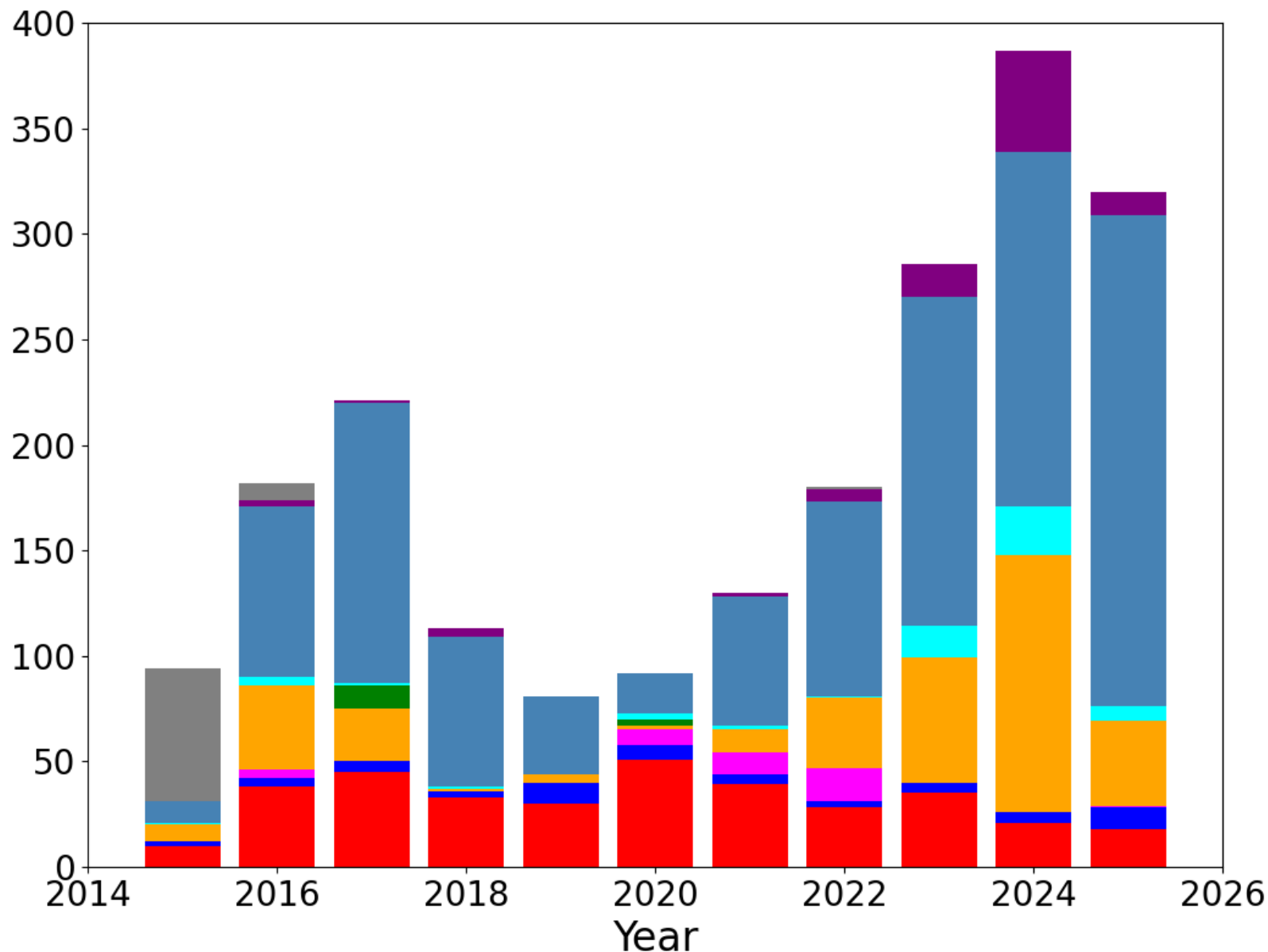
https://cgbm.calet.jp/cgbm_trigger/flight/

GCN Circulars (数日)

GRBリストの更新 & 光度曲線 (数日)

https://cgbm.calet.jp/cgbm_trigger/ground/

機上トリガーされたイベント



2015年10月5日
～ 2025年10月31日
合計: 2086 トリガー

Long GRB: 348 (16.7 %)

Short GRB: 59 (2.8 %)

possible GRB: 58 (2.8 %)

SGR: 38 (1.8 %)

太陽フレア: 345 (16.5 %)

既知X線天体: 14 (0.7 %)

荷電粒子BG: 1061 (50.9 %)

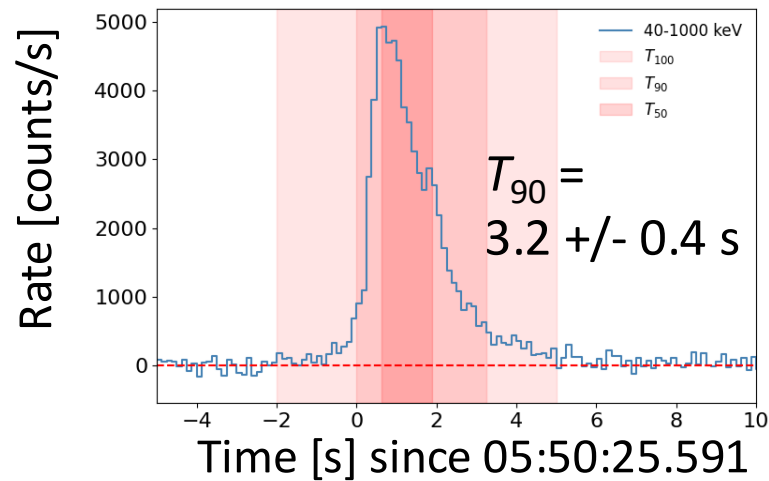
BGのゆらぎ: 72 (3.5 %)

未同定: 91 (4.4 %)

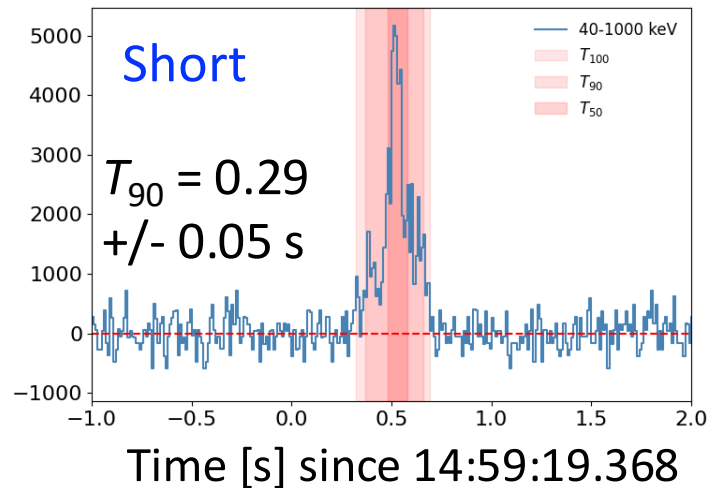
機上トリガーの19.5 %
がGRBによるトリガー

CGBMによるGRB観測例

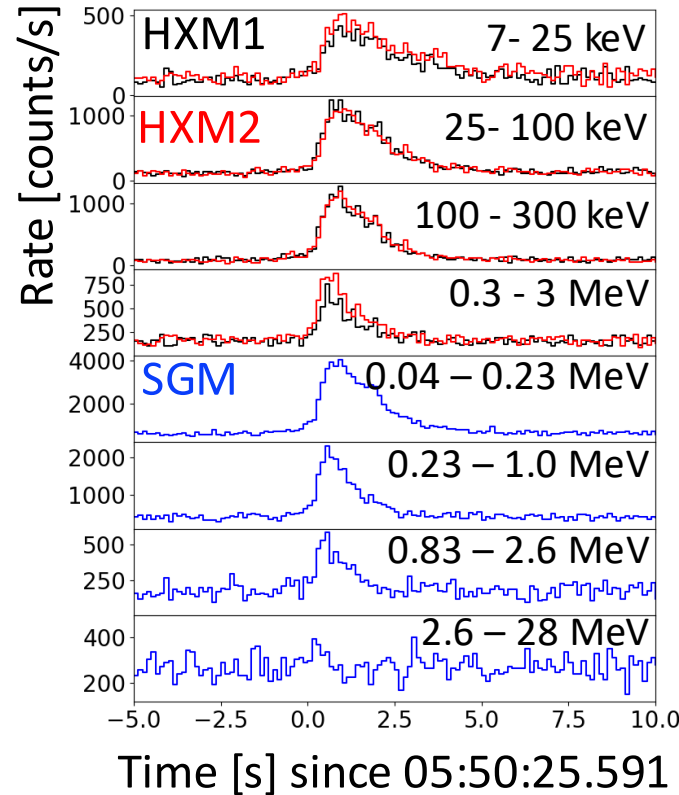
GRB 221209A SGM 光度曲線 (TH)



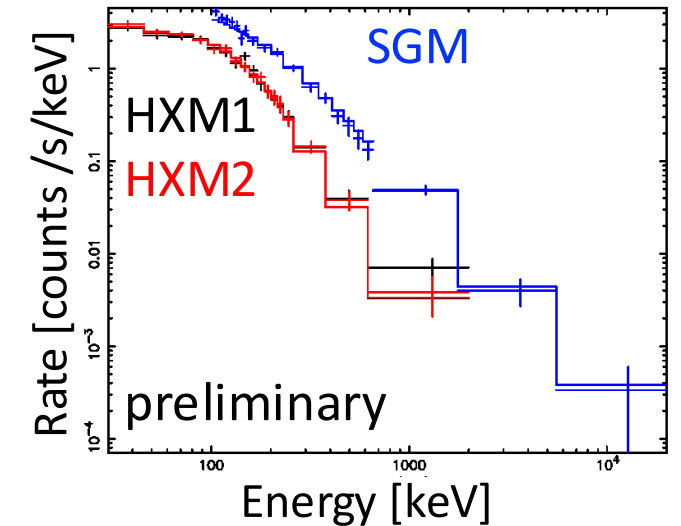
GRB 251016A SGM 光度曲線 (Event)



GRB 221209A
光度曲線 (TH)



GRB 221209A
時間平均スペクトル (PH)



Band関数

$$\alpha = -0.5 \pm 0.2, \beta = -2.1 \pm 0.1$$

$$E_{\text{peak}} = 280 \pm 50 \text{ keV}$$

$$\text{Fluence (30 - 1000 keV)} \\ = (2.9 \pm 0.1) \times 10^{-5} \text{ erg/cm}^2$$

- 広いエネルギー範囲でライトカーブ、スペクトルを観測可能
- 十分な時間分解能で継続時間を計測可能

CGBMで観測されたGRBの継続時間分布

2015/10/05 ~ 2025/10/31

406 GRBs

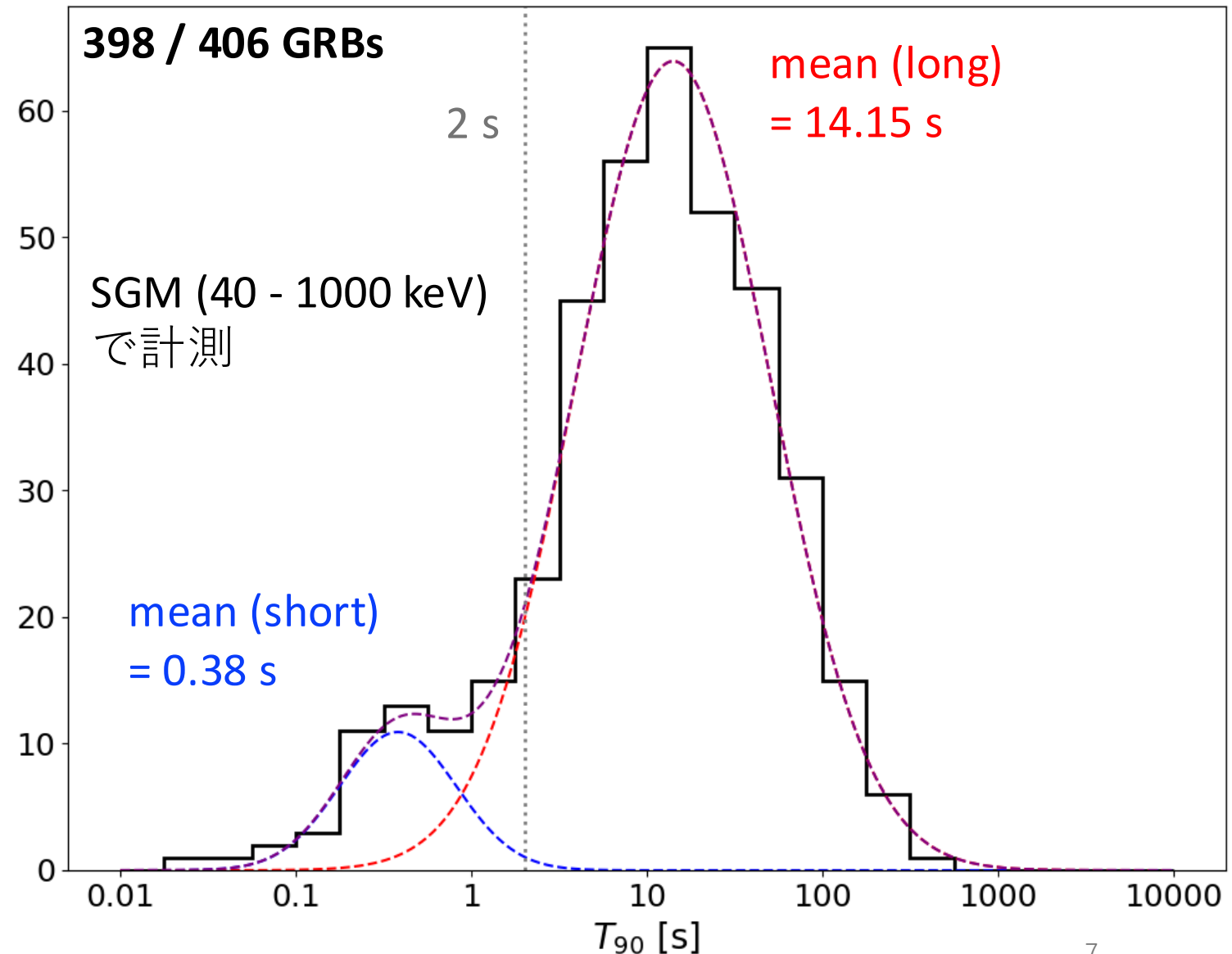
Long ($T_{90} \geq 2$ s): 338 (+ 9)

Short ($T_{90} < 2$ s): 59

+9のGRBはSGMの40 – 1000 keV
で計測できなかったもの

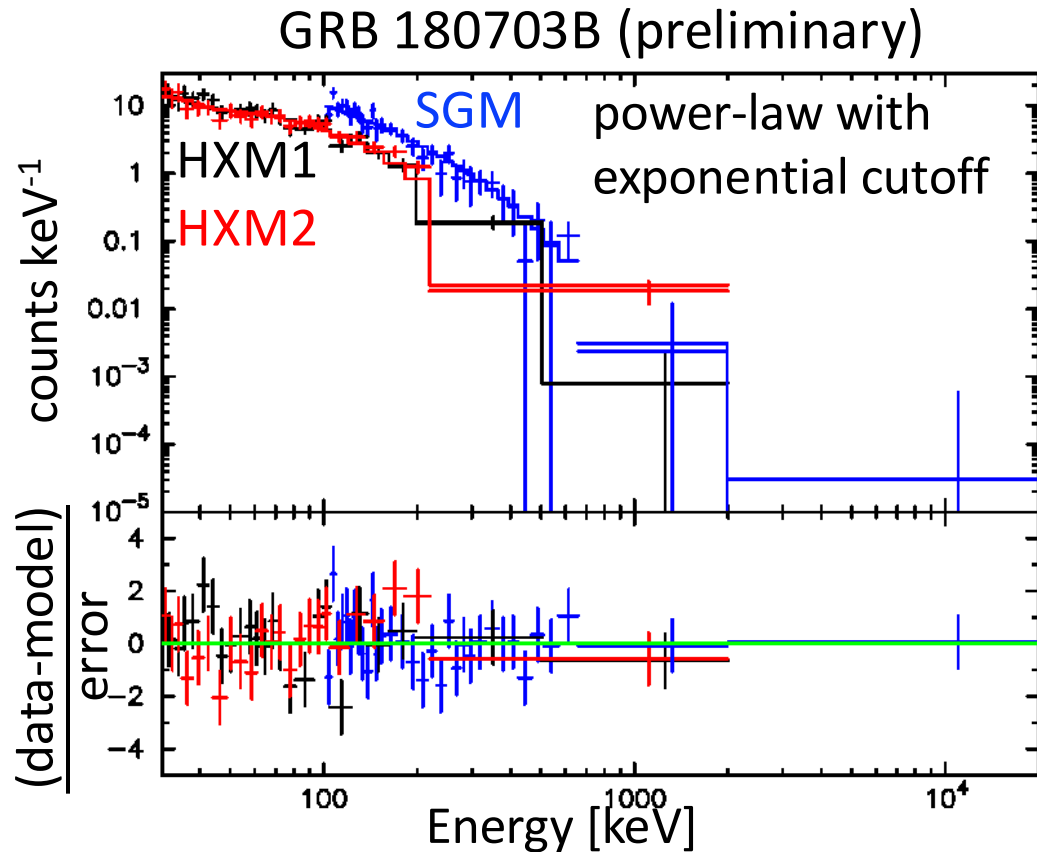
CGBMはLong と Shortの両方の
GRBを検出している。

連星中性子星合体の電磁波対
応天体であるshort GRBの観測
が期待できる

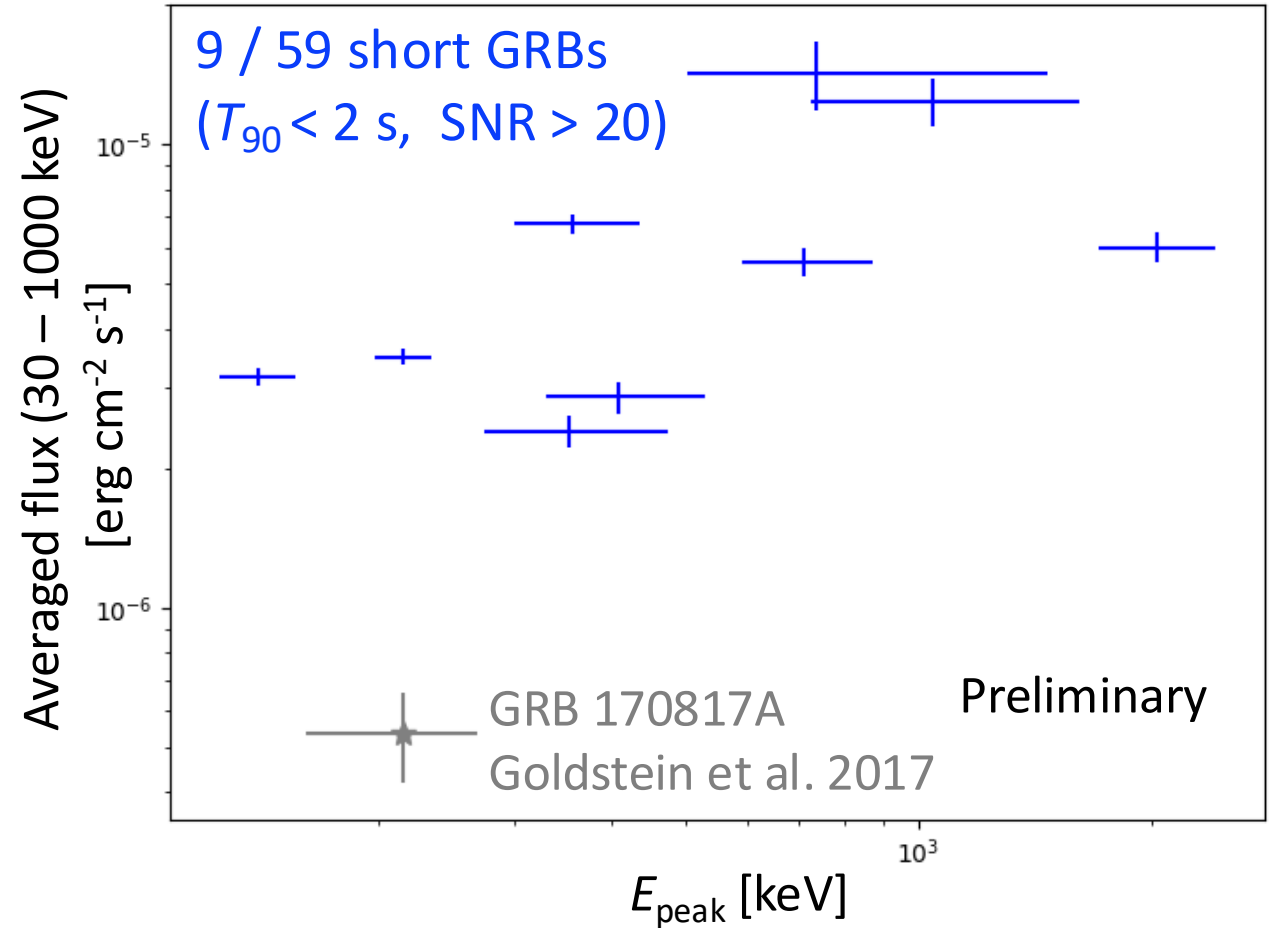


Short GRBのスペクトル解析

観測条件の良い 9 のshort GRBについて
スペクトル解析を行った。

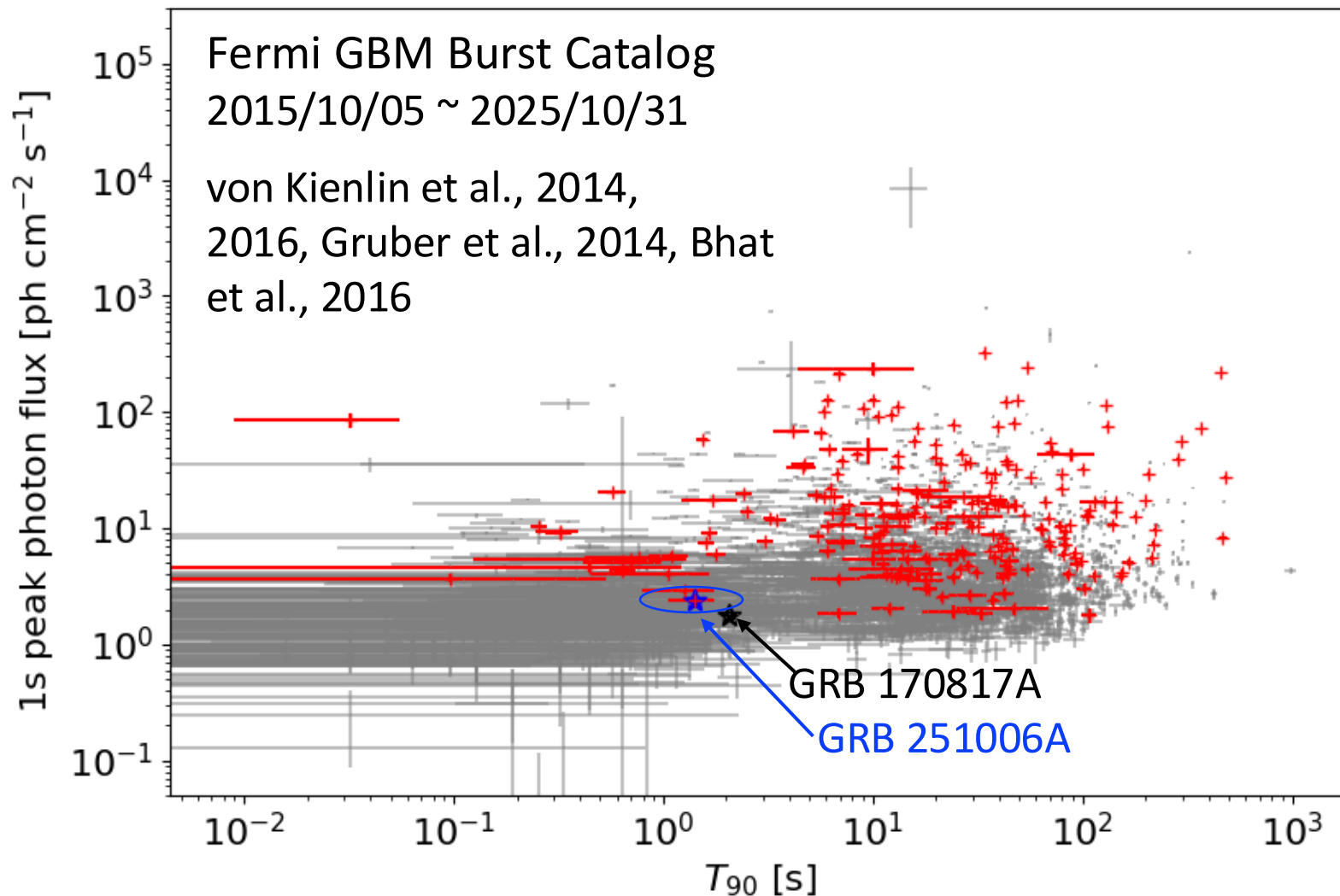


$\alpha = -1.1 \pm 0.3$, $E_{\text{peak}} = 140 \pm 17$ [keV]
 $\text{flux} = (3.16 \pm 0.13) \times 10^{-6}$ [$\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$]
 $\chi^2 / \text{d.o.f} = 99.47 / 102$



- **CGBMはGRB 170817Aと同程度の E_{peak} を持つ short GRBを観測している。**
- **スペクトルパラメータを決定するには GRB 170817Aの数倍程度のfluxが必要**

Fermi-GBMが観測したGRBの中でのCGBM GRB



2015/10/05 ~ 2025/10/31

Fermi-GBM GRBs (2401 GRBs)

Fermi-GBM & CGBM GRBs

238 / 2401 (Fermi-GBM GRBの10 %)

238 / 406 (CGBM GRBの59%)

Fermi-GBMが観測したGRBの
中で高fluxのGRBのみを検出

GRB 251006Aのfluxでさえも
GRB 170817Aの2倍程度

CALETによる重力波電磁波対応天体探索

CGBMが観測を開始したのはLIGO/VirgoのO1が始まって約1ヶ月後
O1からO4まで積極的に電磁波対応天体の探索を行ってきた。

O1 & O2

対応天体候補なし

- GW150914: CALET観測開始前
- **GW151226: 対応天体なし**
- GW170817A & GRB 170817A: 視野外
- Adriani et al. 2016, Yamaoka et al. 2017, Abbott et al. 2017, Adriani et al. 2018

O3

対応天体候補なし

- 特筆すべきイベントなし。
- Adriani et al. 2022

O4

対応天体候補なし (2025年10月末時点)

- 高いイベントレートに対応するため自動解析パイプラインを開発
- 特筆すべきイベントなし。
- 2025/11/18に終了予定

次期観測期間 (<https://observing.docs.ligo.org/plan/>)
2026年夏, 秋頃から半年間の予定

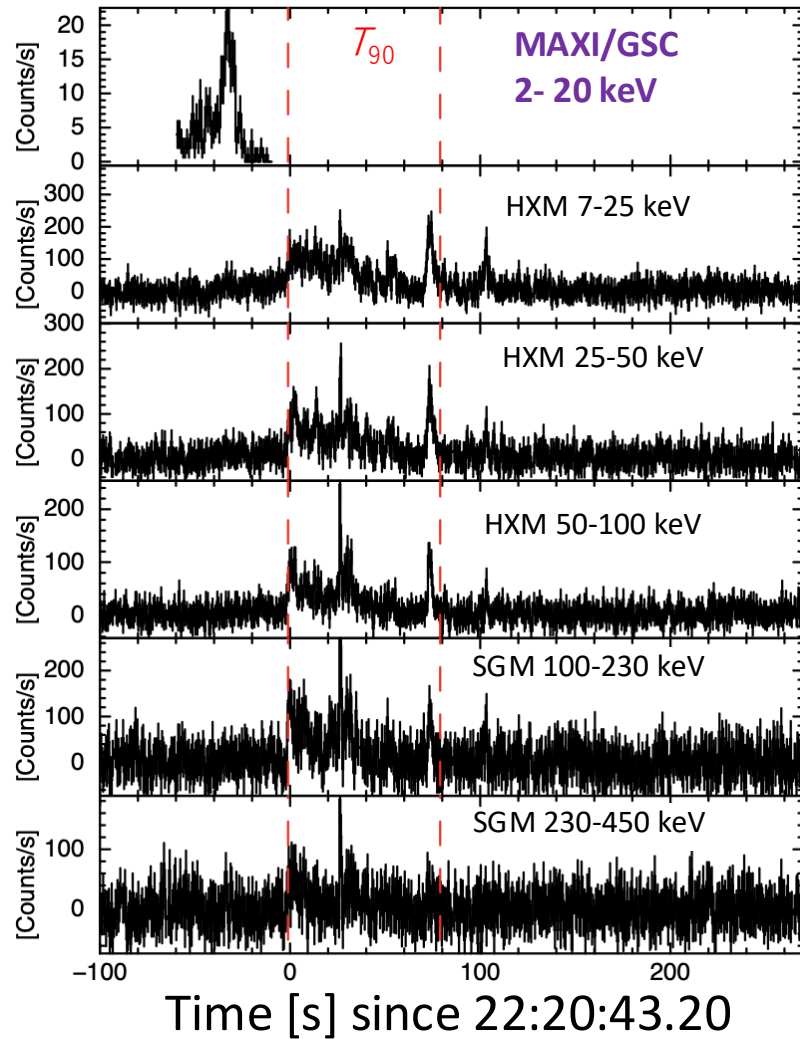
CALETは2030年の運用延長が承認されており
次期観測期間においても対応天体探索が期待できる。

2025年10月末時点でCALETのデータに対応天体候補なし
2026-2027年実施予定の次期観測期間でも対応天体探索を実施予定

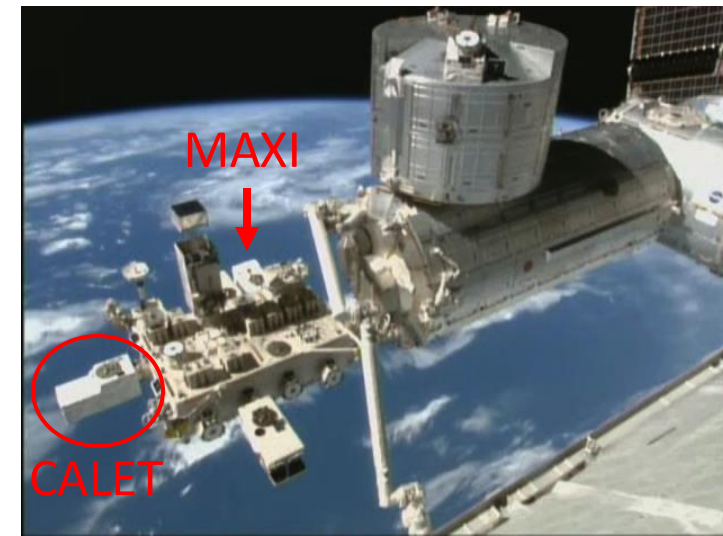
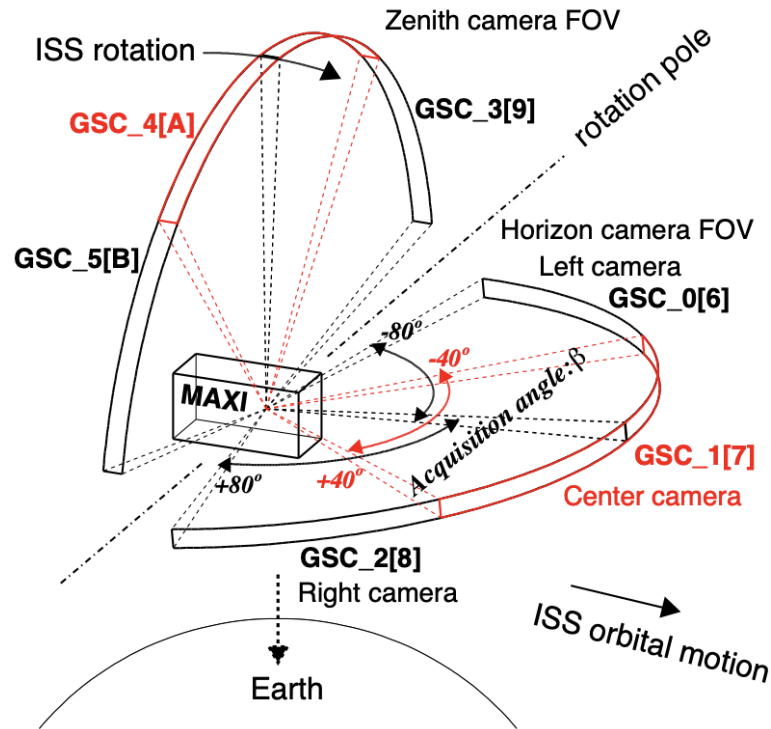
MAXIとの連携観測

MAXIの検出時刻はCGBMの47秒前
ソフトなスペクトルを持つ放射を検出
(Kawakubo et al. 2018)

GRB 160107Aの光度曲線



Sugizaki et al. 2011



MAXIとCGBMのデータは相補的

- CGBM: 7 keV – 20 MeV
- MAXI: 2 – 20 keV
- 視野に重なり (4, 5番)
- 2030年まで運用予定

34例のGRBをCGBMとMAXI/GSCの両方で検出
(機上トリガーで21例, 地上解析で14例を検出)

同時 (時間差30秒未満) : 19
MAXIの検出が30秒以上先: 1
MAXIの検出が30秒以上後: 14

まとめ

- **CGBMは観測開始から10年経過した2025年11月現在も正常に観測を続けている。**
 - 広いエネルギー範囲でGRBの光度曲線、スペクトルを観測している。
 - GCN Noticeへの機上トリガーの自動速報
 - https://cgbm.calet.jp/cgbm_trigger/flight/
 - GCN Circularへの観測結果の速報 (検出情報、光度曲線、継続時間)
 - https://cgbm.calet.jp/cgbm_trigger/ground/
- **2025年10月までの10年間の観測で406のGRBを機上検出している。**
 - **Long GRB: 338 (+9)**
 - **Short GRB: 59**
 - 機上検出にはGRB 170817Aの2倍程度のfluxが必要
 - スペクトルパラメータの決定にはGRB 170817Aの5倍程度のfluxが必要
- **Short GRBを検出可能な観測装置として、重力波電磁波対応天体の探索を継続**
 - **2025年11月現在までに対応天体の候補は見つかっていない。**
 - **2030年までの運用継続が承認され、次期観測期間 (2026-2027)での観測に期待している。**
- **CGBMとMAXIの両方で34例のGRBを検出**