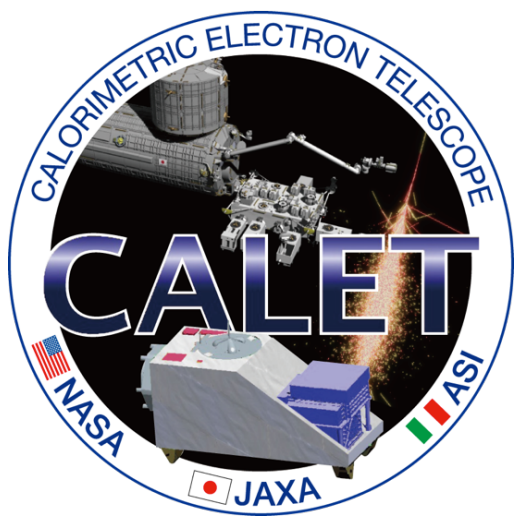




国際宇宙ステーション搭載CALETによるガンマ線バースト観測

川久保雄太, Michael Cherry (LSU), 吉田篤正, 坂本貴紀 (青学大), 赤池陽水, 小林兼好,
鳥居祥二 (早大), 森正樹 (立命館大), Cannady Nicholas (NASA/GSFC), 他CALETチーム

Summary: 国際宇宙ステーションに搭載されているCALETには主検出器のカロリメータ (CAL)とガンマ線バースト (GRB)の観測を主目的としたCALETガンマ線バーストモニター (CGBM)が搭載されている。CALETは観測から6年以上経過した現在も正常に観測を継続しており、CGBMは2021年11月末までに33 のshort GRBを含む271のGRBを機上検出している。CALによるGRBからの高エネルギーガンマ線の探査も継続しており、今までに2例の候補を発見している。CALETはGRBを観測する能力を有しており、重力波電磁波対応天体の探査を積極的に実施してきた。LIGO/Virgo の3回目の観測期間に報告された57のイベントに対して、重力波電磁波対応天体の探査を行った結果、CALETのデータには有意な信号は発見出来なかったが、ガンマ線フラックスの上限値を見積もった。

CALorimetric Electron Telescope (CALET) (P-117, Asaoka et al. 2018)

- 国際宇宙ステーション(ISS)搭載の高エネルギー電子、ガンマ線観測装置
- 2015年10月から現在まで正常に観測を継続中
- 科学観測装置としてカロリメータとガンマ線バーストモニターを搭載
- 2024年末までの延長運用が承認されている

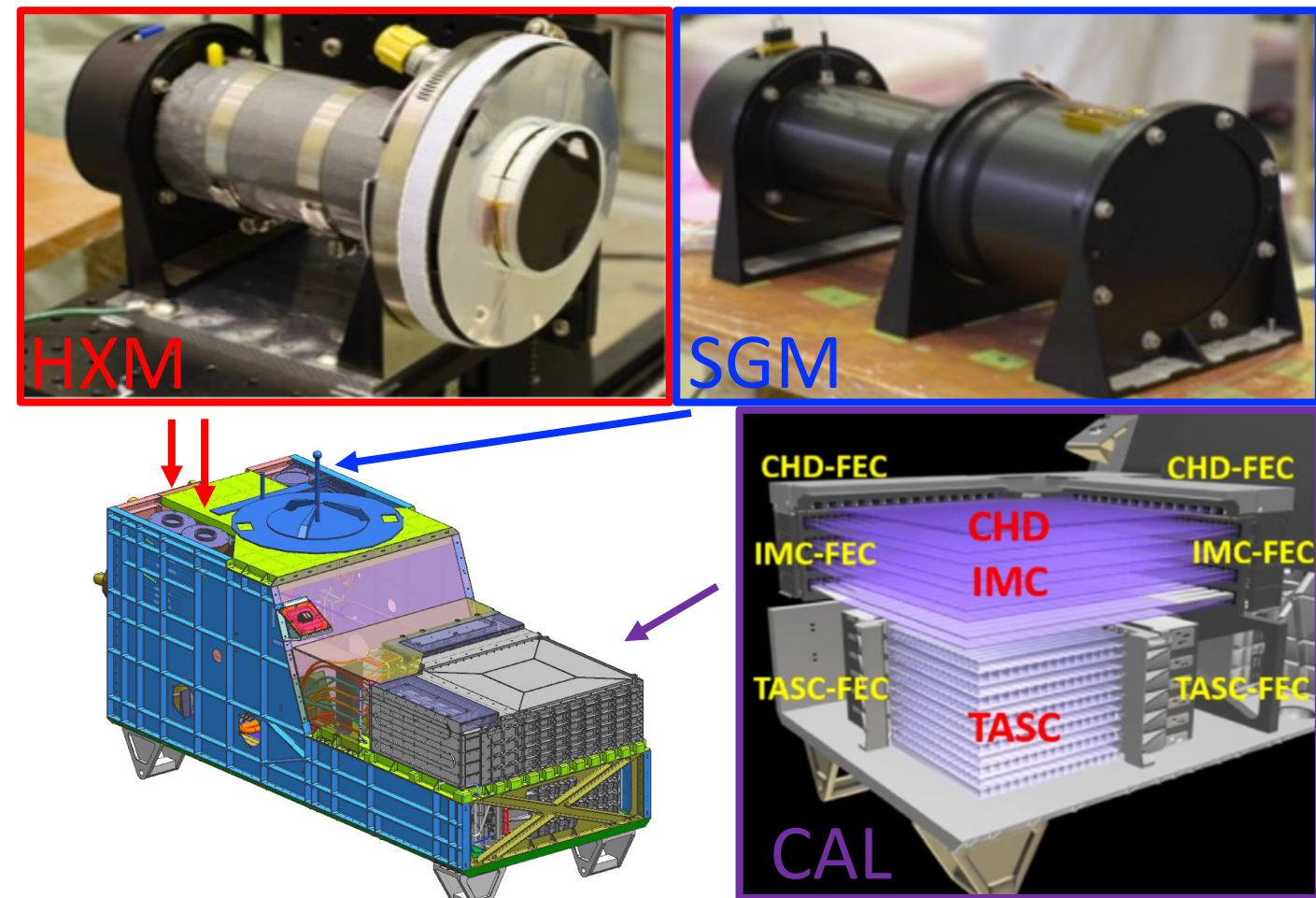


図1. CALETとCALの概念図とCGBMのフライト検出器の写真

	CAL
エネルギー分解能	~3 % @ 10 GeV
エネルギー範囲	1 GeV - 10 TeV
視野	~2 sr
角度分解能	~0.5° @ 10 GeV

Cannady et al. 2018

ガンマ線バーストモニター (CGBM)
Hard X-ray Monitor (HXM)
7 keV – 1 MeV
Soft Gamma-ray Monitor (SGM)
40 keV - 20 MeV

カロリメータ (CAL)
電子: 1 GeV – 20 TeV
ガンマ線: 1 GeV – 10 TeV
陽子・原子核: 100 GeV - 1 PeV

	HXM	SGM
シンチレータ	LaBr ₃ (Ce)	BGO
搭載数	2	1
エネルギー分解能	8 % @ 511 keV	11 % @ 511 keV
エネルギー範囲 [keV]	7 keV -1 MeV	40 keV – 20 MeV
視野	~3 sr	~8 sr

Yamaoka et al. 2013, Kawakubo et al. 2021

CALETによるガンマ線バースト(GRB)観測体制

- CGBMによるモニターデータの常時取得
 - Time History data (TH, 1/8 s, 8 channels)
 - Pulse Height data (PH, 1/8 s, 512 channels)
 - 高緯度帯とSAA付近では高圧電源をoff。観測効率 約 60 % (図2)。
 - 観測開始から6年経過した現在も検出器は正常に動作 (図3)

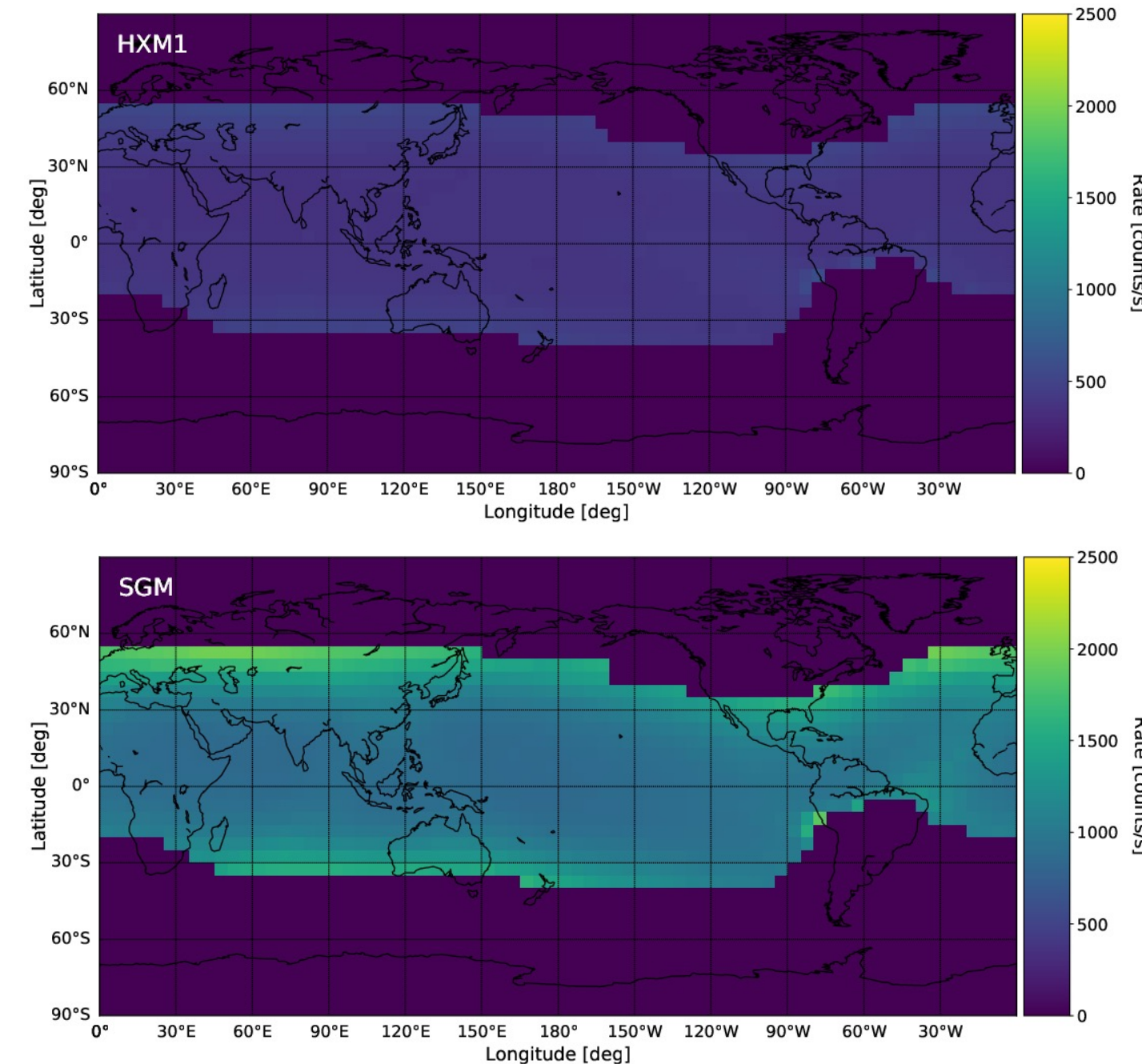


図2. 平均バックグラウンドカウントレート (2020/09) 上: HXM1 下: SGM

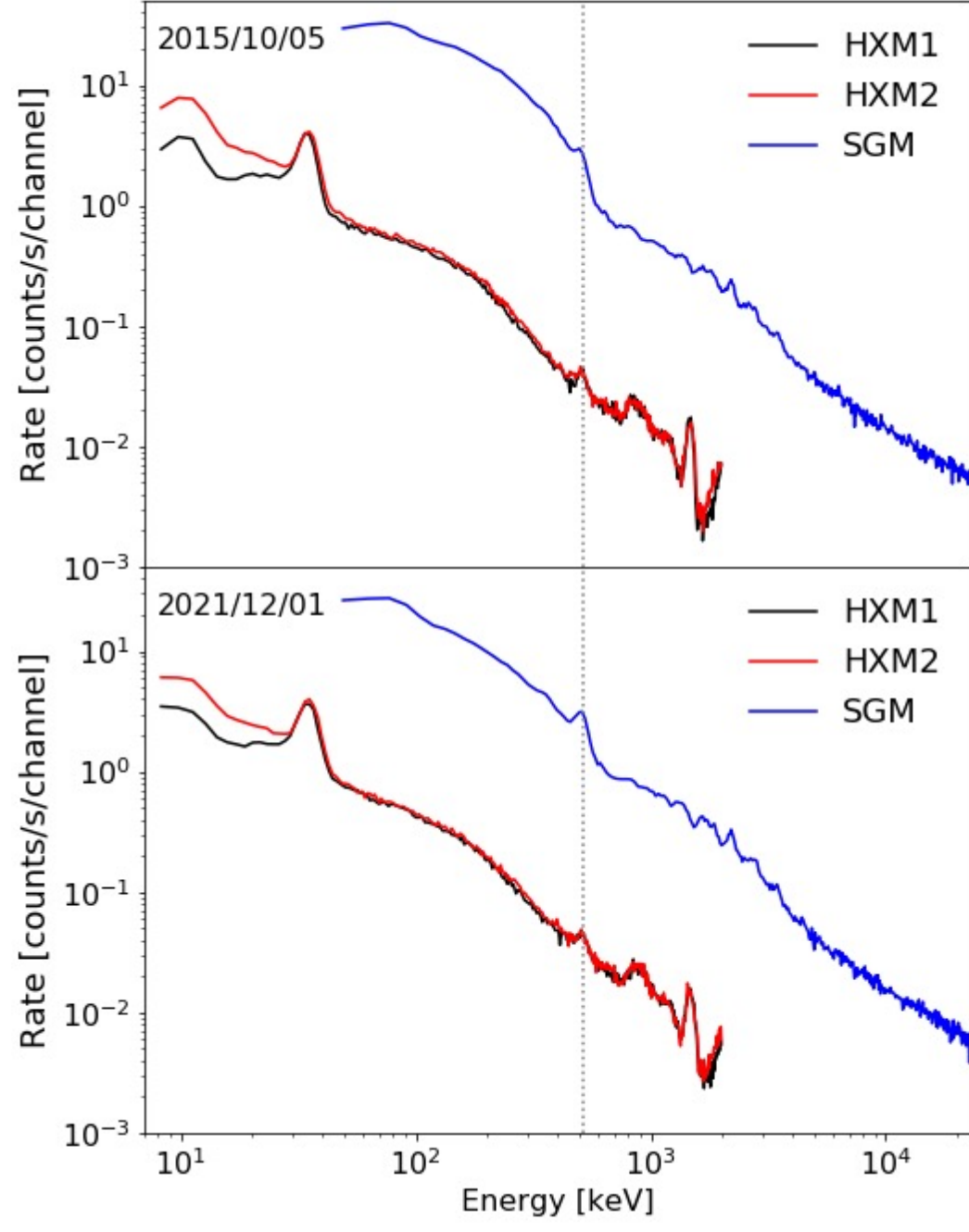


図3. 運用開始直後(2015/10/05)と現在(2021/12/01)のバックグラウンドスペクトル。破線は511 keV。

- 1/4 s 毎に機上トリガー判定とGRB観測モード
 - トリガー閾値 (HXM:8.5 σ SGM: 7.0 σ)
 - Event data 取得
 - 62.5 μ s, 4096 channels x 2
 - 機上に4つまで蓄積可能 (週3回のダウンリンク)
 - CALのトリガー閾値変更 10 GeV -> 1 GeV
 - トリガー時に即時地上解析を行い The Gamma-ray Coordinate Network (GCN) noticeへ1分程度で速報
- CALによる高エネルギーガンマ線観測 (P-116, Cannady et al. 2018, Asaoka et al. 2018)
 - High energy trigger (HE) 10 GeV 以上 (常時)
 - Low energy gamma-ray (LEG) 1 GeV 以上 (低緯度とCGBMトリガー時)
- CALガンマ線データの地上即時解析
 - 1時間毎に配信されるデータを即時解析しガンマ線選別(数時間以内)
 - 同方向からきたガンマ線ペアの探査
 - 詳細解析用の高レベルデータの生成

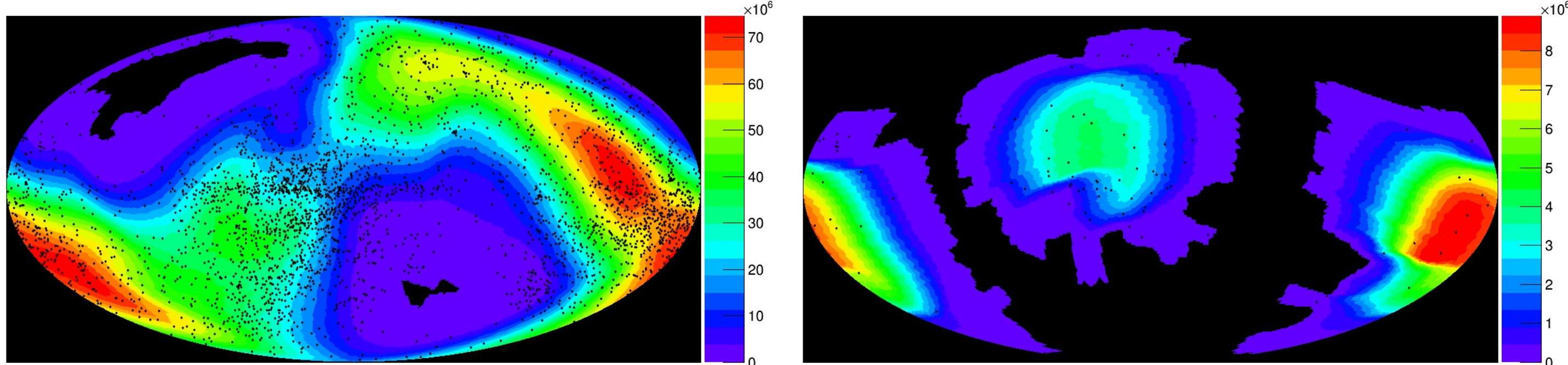


図4. 即時解析で生成された低エネルギーガンマ線データのExposure map とガンマ線イベントの到来方向。カラーマップがExposure、黒い点がガンマ線イベント。左図が30日間((2021/10/29 ~ 11/26))、右図が1日間(2021/11/26)。一日毎に同様の図を自動生成している。

CGBM によるプロンプト放射の検出と観測 CALによる高エネルギーガンマ線放射の観測

6年間のGRB観測成果

- CGBMは2021年11月末までの約6年間に271のGRBを機上検出 (図5)
- CGBMが観測したGRBのうち 33 (12 %) のGRBが short GRB (図6)

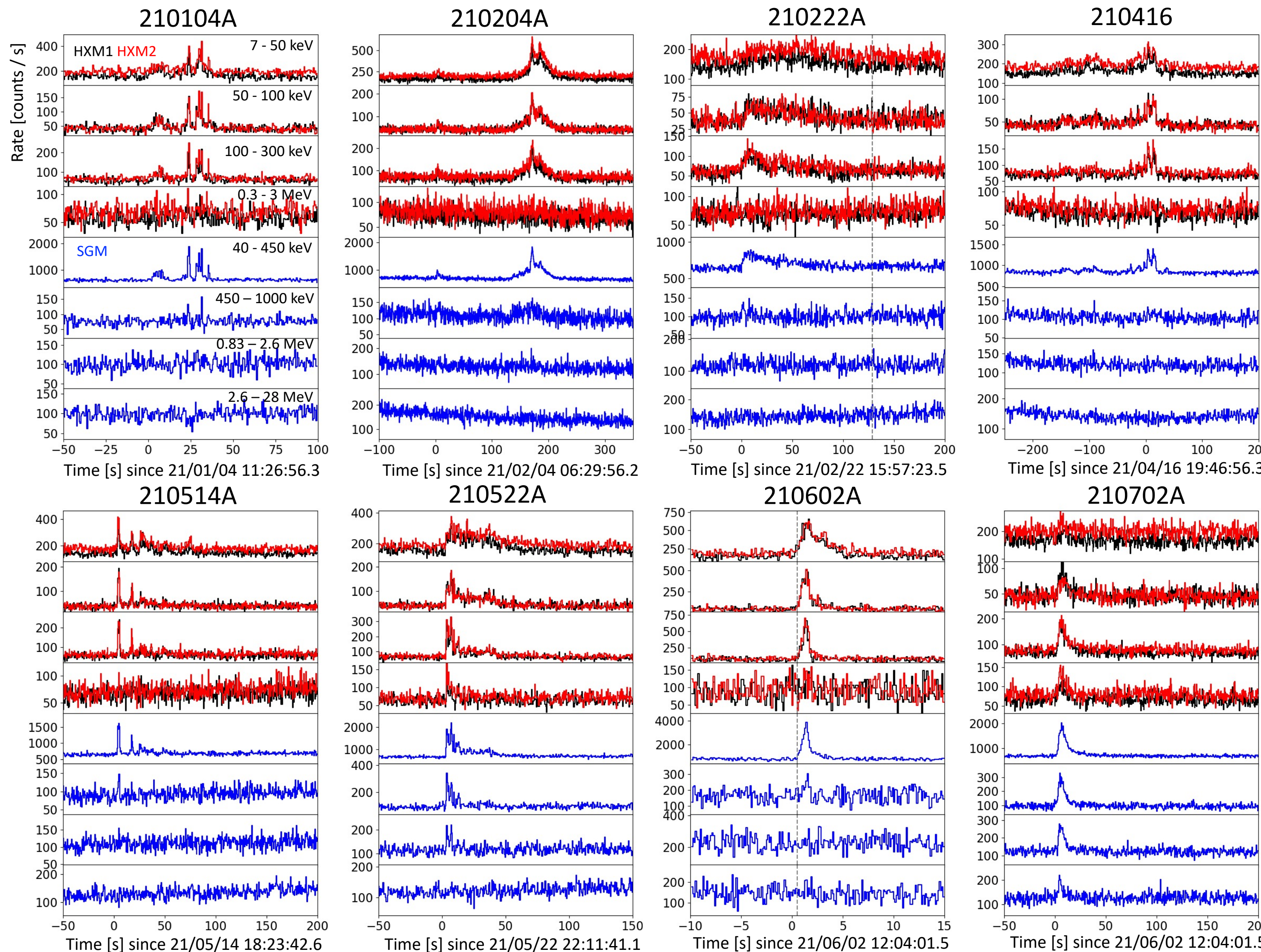


図5. CGBM が2021年中に観測したGRBの光度曲線。GRB 21022AとGRB 210602Aに示した破線はCALETと同じくISSに搭載されているMAXIのGRB検出時刻。

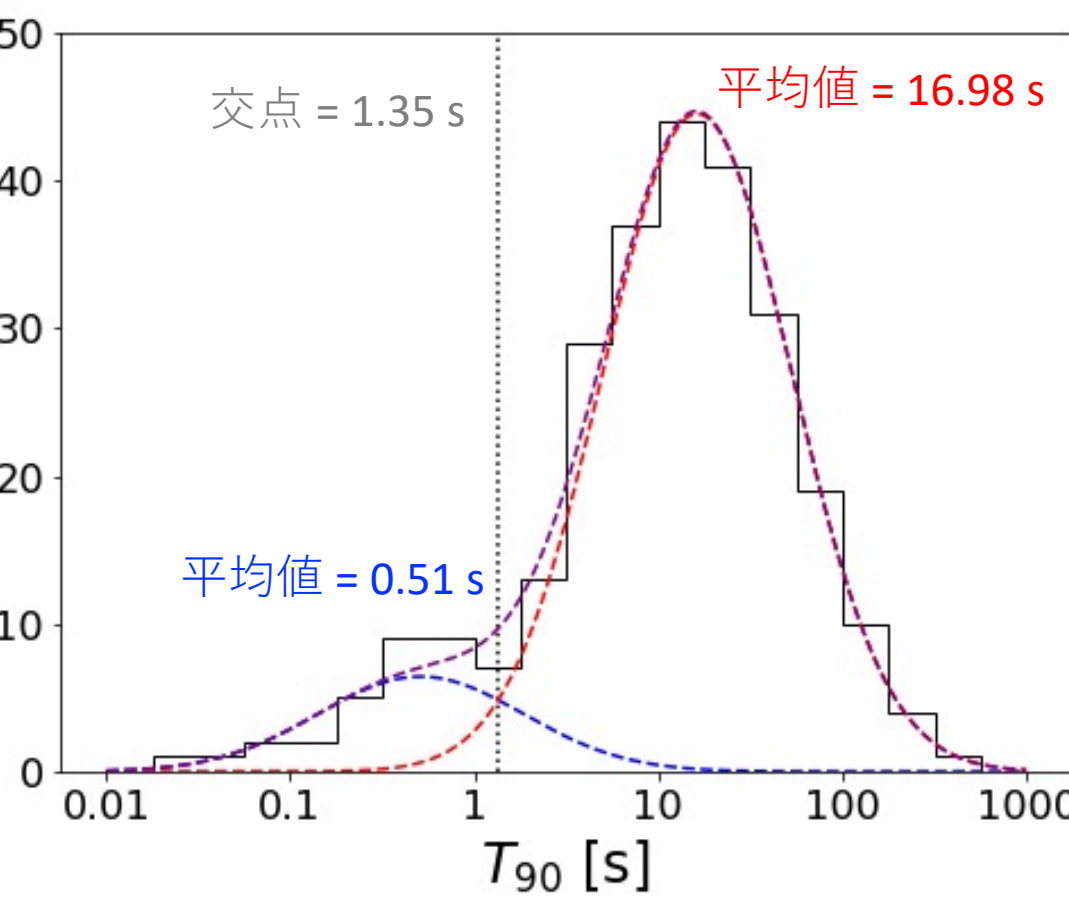


図6. CGBMが観測したGRBの継続時間分布(対数). 破線で示したのはフィッティングされた対数正規分布関数。点線は二つの対数正規分布関数の交点を示している。

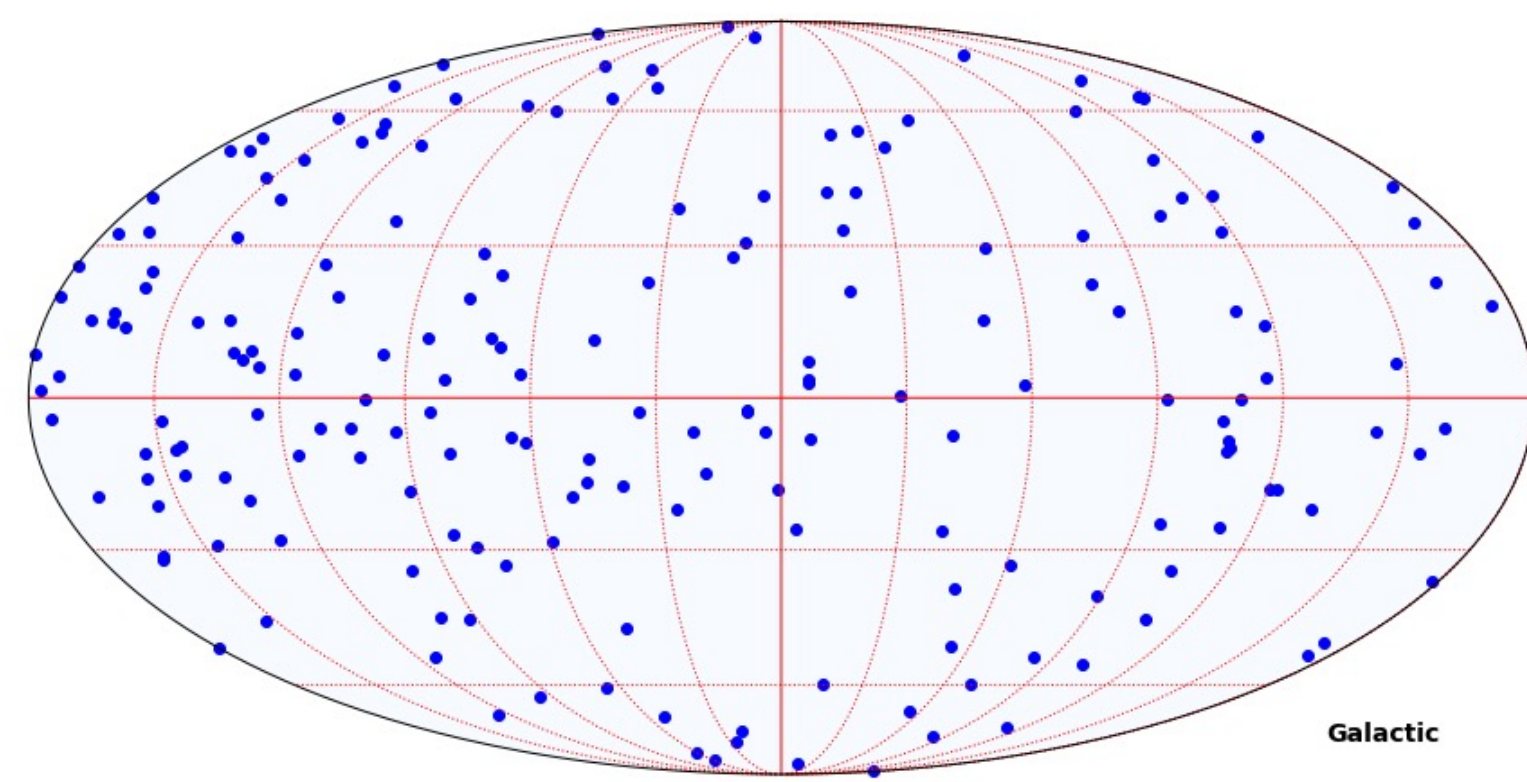


図7. CGBMが観測したGRBの到来方向。CGBMは位置決定能力を持たないため他の観測装置によってGCNに報告された位置を使用した。CGBMが観測したGRBが銀河面に集中していないことがわかる。

- CGBMが検出したGRBからの高エネルギーガンマ線の探査 (Kawakubo et al. 2021)
 - 109 / 271 GRBs (他の観測装置により精度よく位置が決まっているもの)
 - CGBMの検出時刻 $T_0 - 60 \text{ s} \sim T_0 + 7200 \text{ s}$ の低エネルギーガンマ線データ
 - 昨年報告した2例 (GRB 180526A, GRB 200101A)以来、新たな候補なし

重力波電磁波対応天体の探査

- 観測開始時から重力波電磁波対応天体の探査を積極的に実施
- LIGO/Virgoの3回目の観測期間(03) (Mori et al. 2019, Kawakubo et al. 2020, 2021, in prep.)
 - 57 イベント(Fermi-GBMによって報告された準検出イベントも含む)
 - 重力波の検出時刻 $T_0 \pm 60 \text{ s}$ のデータを使用
 - CGBM: 各検出器のTH データ
 - CAL: LEGデータ(1 GeV ~ 10 GeV) or HE データ (10 GeV ~ 100 GeV)
 - GraceDBにて公開されている重力波の誤差領域マップを使用し、ISSの構造物を考慮して視野と誤差領域マップの重なりを計算
 - CGBM: いずれかの検出器の視野内の積算確率が1 % 以上
 - CAL:視野内の積算確率が5% 以上
- 有意な信号の探査
 - CGBM: いずれかの検出器で7 σ を超える信号 (1つのチャンネルのみで見えている信号は除く)
 - CAL: 誤差領域マップの99%信頼区間内のガンマ線イベント

CGBMの観測結果

観測中かつ非検出: 34
観測不可: 23

CALの観測結果

HEモードで観測中かつ非検出: 13
LEGモードで観測中かつ非検出: 7
観測不可: 37

- ガンマ線フラックスの上限値の計算
 - CGBM: 典型的なshort GRBのスペクトルを仮定して7 σ 上限値を計算
 - CAL: 光子定数-2の冪関数を仮定し90%上限値を計算

S190408anに対するCGBMのガンマ線フラックス上限値

	7 σ 上限値 (10 - 1000 keV)
HXM1 (45度入射)	$9.7 \times 10^{-7} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
HXM2 (45度入射)	$1.2 \times 10^{-6} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
SGM (45度入射)	$8.4 \times 10^{-7} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

- Band 関数, $\alpha = -0.46$, $\beta = -2.98$, $E_{\text{peak}} = 413 \text{ keV}$ (Poolakkil+ 2021) を仮定
- 継続時間を1sと仮定し $T_0 \sim T_0 + 1 \text{ s}$ の実際のTHデータのカウン数をバックグラウンドカウントとして使用

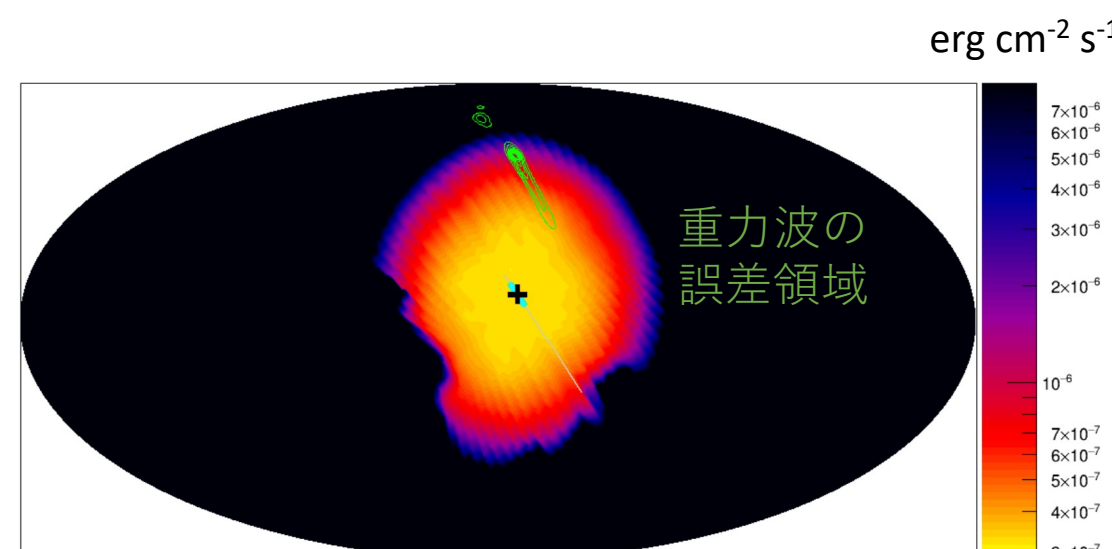


図8. S190408anに対するCALのガンマ線フラックスの90%上限値マップ (1 ~ 10 GeV). カラーマップがCALの90%上限値。