超小型衛星による重力波に同期したX線天体探査計画 Kanazawa-SAT^{3}~~3~~

澤野達哉

米徳大輔，三原建弘，吉田和輝，加川保昭，伊奈正雄，太田海一，
鈴木大智，宮尾耕河，渡辺彰汰，三原建弘，高尾祐介，池田博一，久徳浩太郎，
八木谷聡，笠原禎也，井町智彦，北昴之，河越幸平，瀬川浩史，中嶋拓也，源輝也

金沢大学，RIKEN，立教大学，ISAS/JAXA，KEK

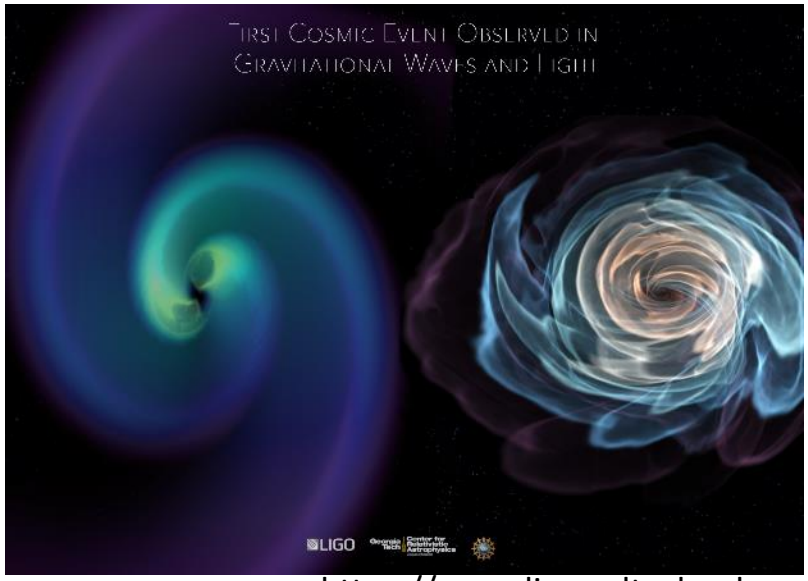
かなざわ･きゅうぶ･さっと

【Kanazawa-SAT^3】《固有名詞》
金沢大学が進めている
手作り大学衛星計画の名称。
しばしば「かなざわ･さっと」や
「かなざわ･さっと･の･さんじょう」と
読まれている。

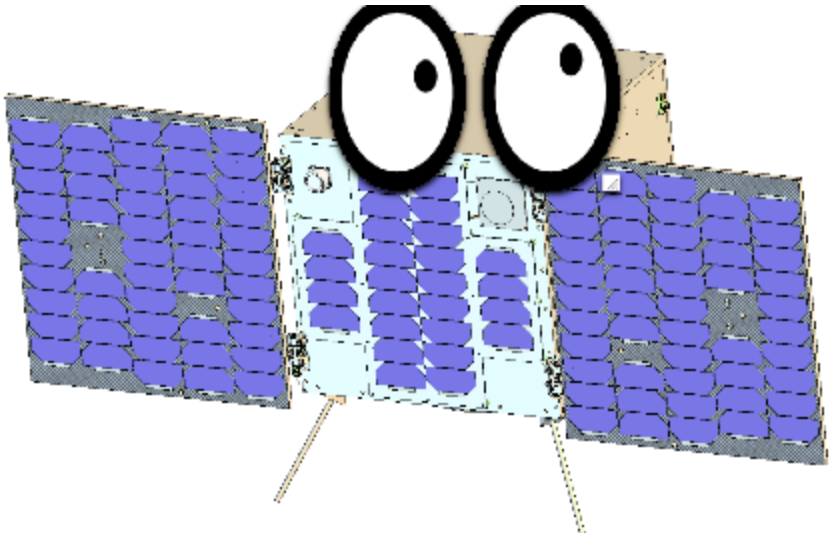
Kanazawa-SAT^{3}計画

2013年度~

- 目指すサイエンス
  - 連星中性子星合体衝突からの重力波源の電磁波対応天体同定の促進
  - 短時間ガンマ線バーストの放射メカニズムの解明
- 何をするか
  - 軟X線帯域で広視野で突発天体を監視する超小型衛星を作る
  - 発生時刻と発生方向を地上に準リアルタイム通報
  - 2018年度末打ち上げ1年以上の運用を目指す



https://www.ligo.caltech.edu

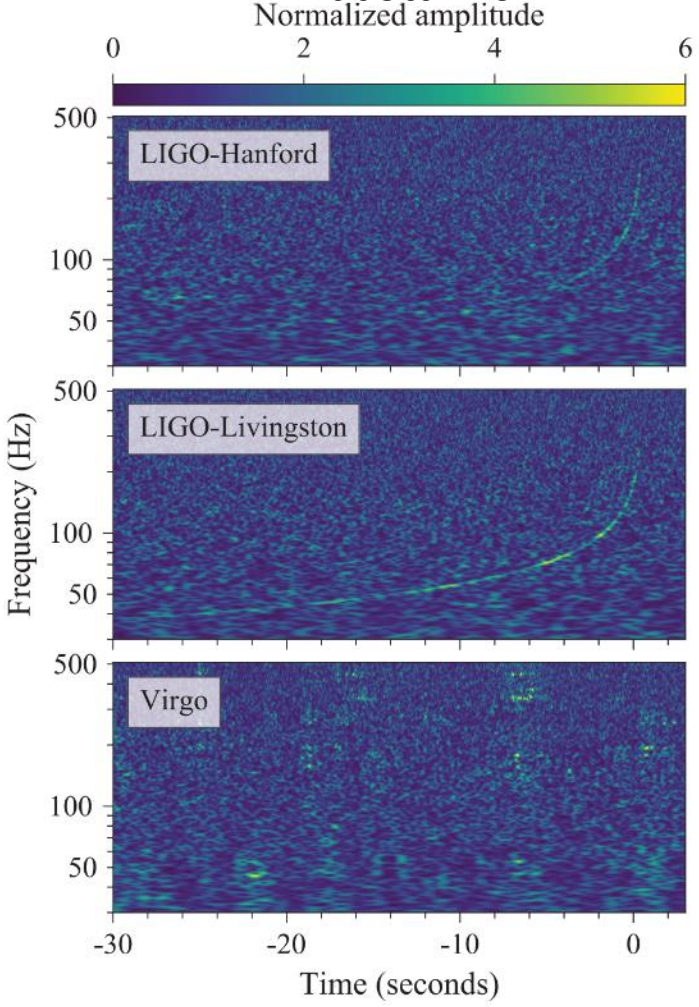


もくじ

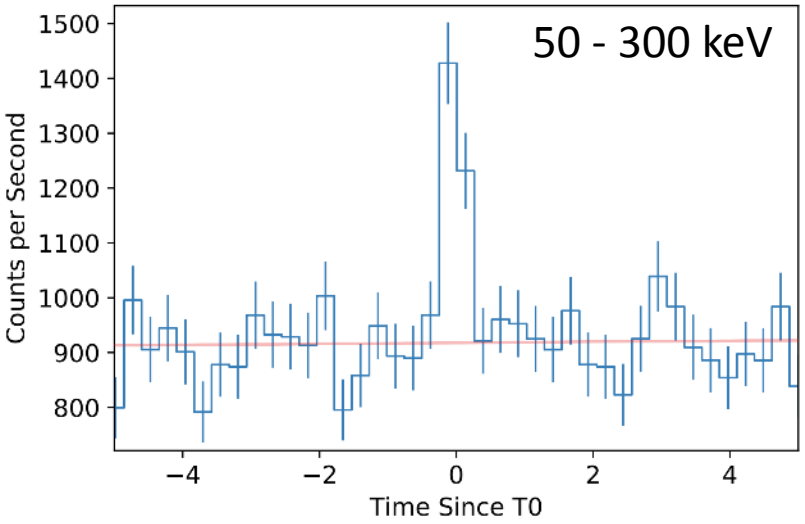
- GW 170817/GRB 170817A, GW astronomy era
- Short GRBs associated with Extended Emission
- Kanazawa-SAT^3
  - 衛星概要
  - X線撮像検出器の原理
  - 目標感度
  - 即報性
  - 衛星準備状況

GW 170817 / GRB 170817A

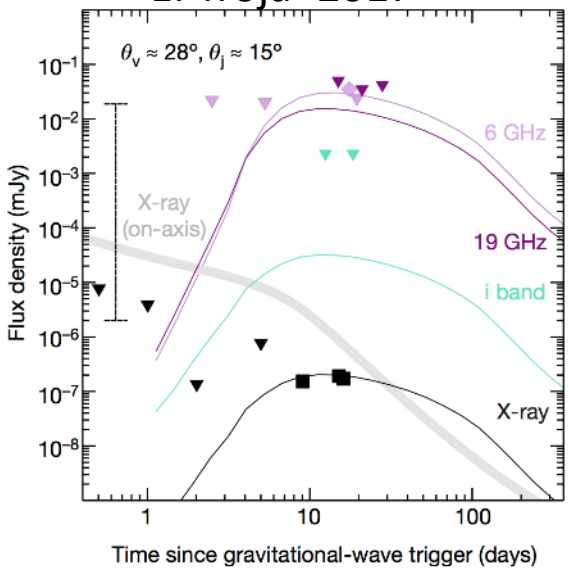
B.P. Abbott+ 2017

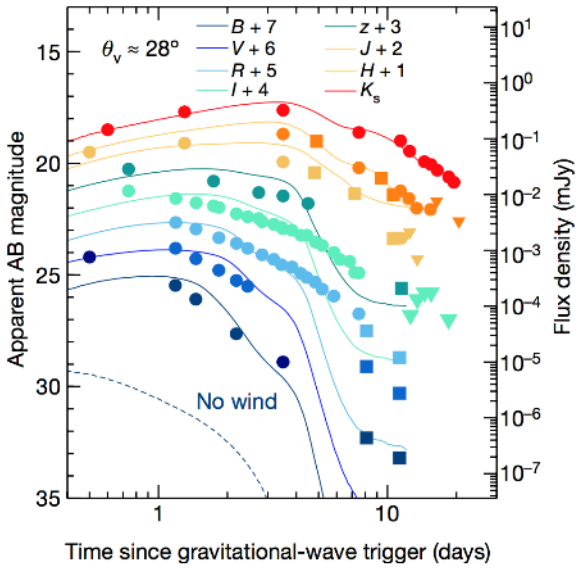


A. Goldstein+ 2017

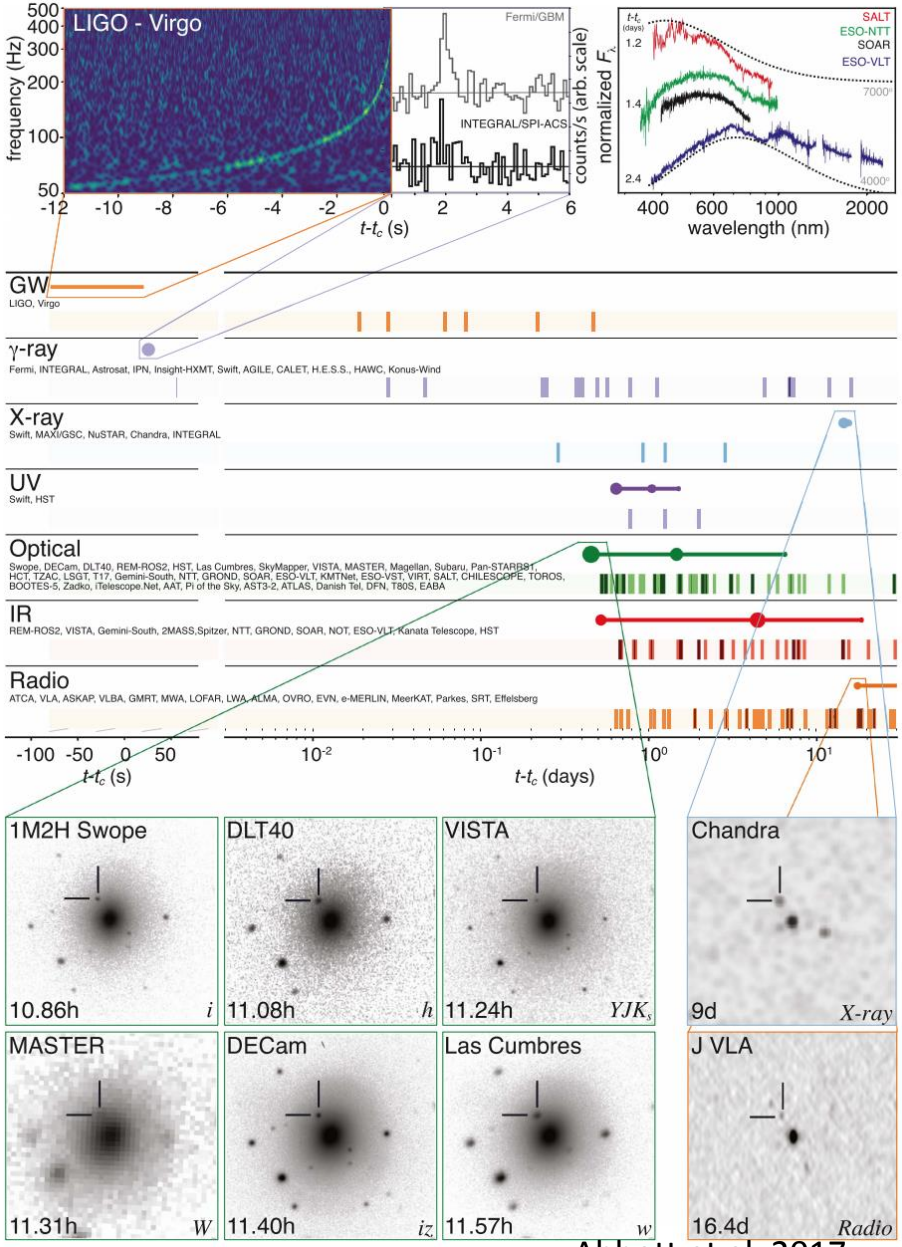


E. Troja+2017





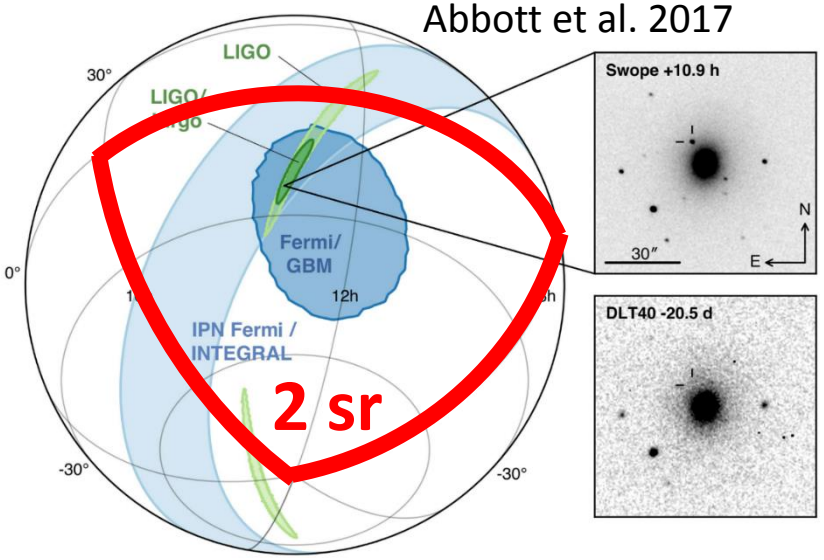
X線/ガンマ線帯域の意義



Abbott et al. 2017

短時間ガンマ線バーストの初期放射は
最も早い電磁波対応天体

Abbott et al. 2017



SGRBsの初期放射の観測は
残光観測とは異なるサイエンス

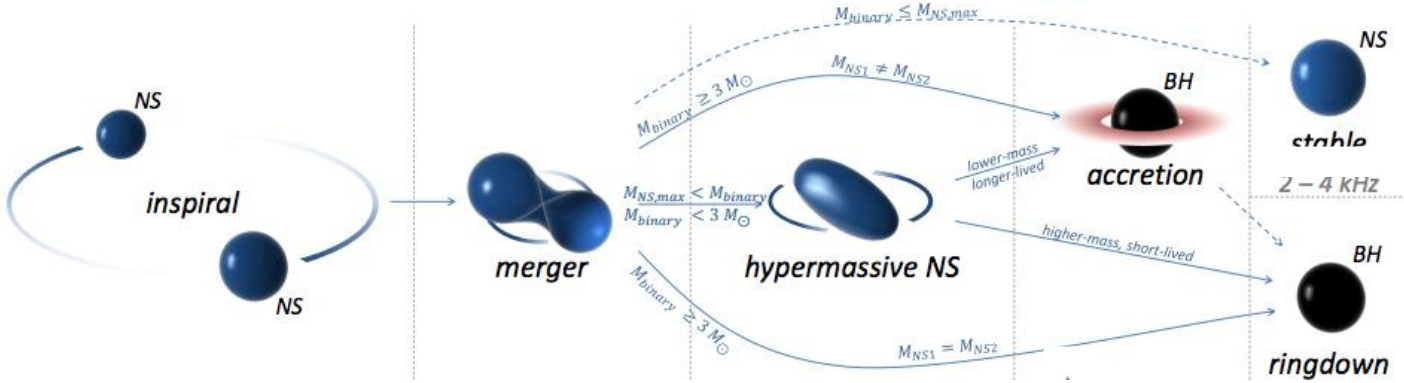
同時観測を狙うためには
LIGO-Virgo-KAGRAの方向決定 ~ 10 deg^{2}を
すっぽり覆う1 - 2 sr以上の視野で全天監視

重力波とGRB観測の時間差

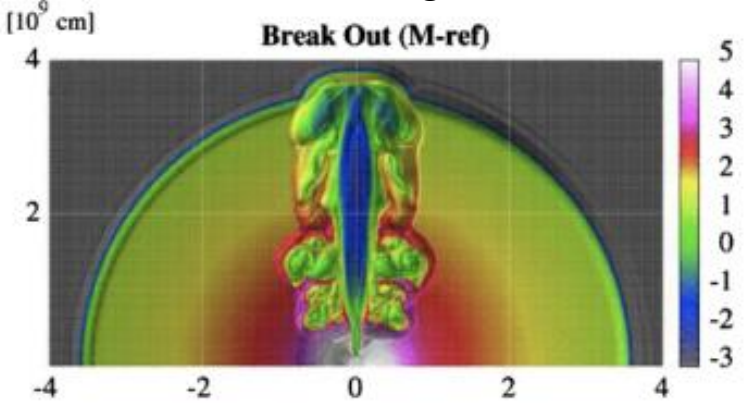
『合体』から1.7秒遅れてSGRBが観測された（B.P. Abbott+ 2017）
GRBの到達後れを作る3つの要素（Ioka & Nakamura 2017）

- 合体から相対論的ジェットが駆動されるまでの時間
- ジェットが星の外層を突き破る時間
- ジェットの速度とoff-axisからの幾何学的な効果

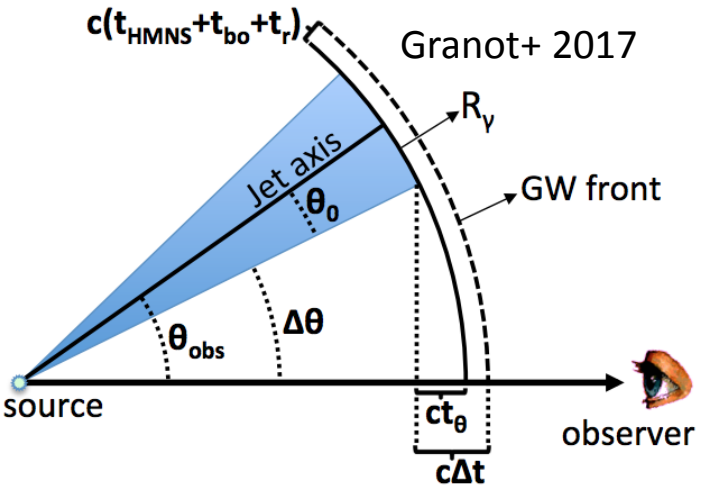
Bartos+ 2013



Nagakura+ 2014



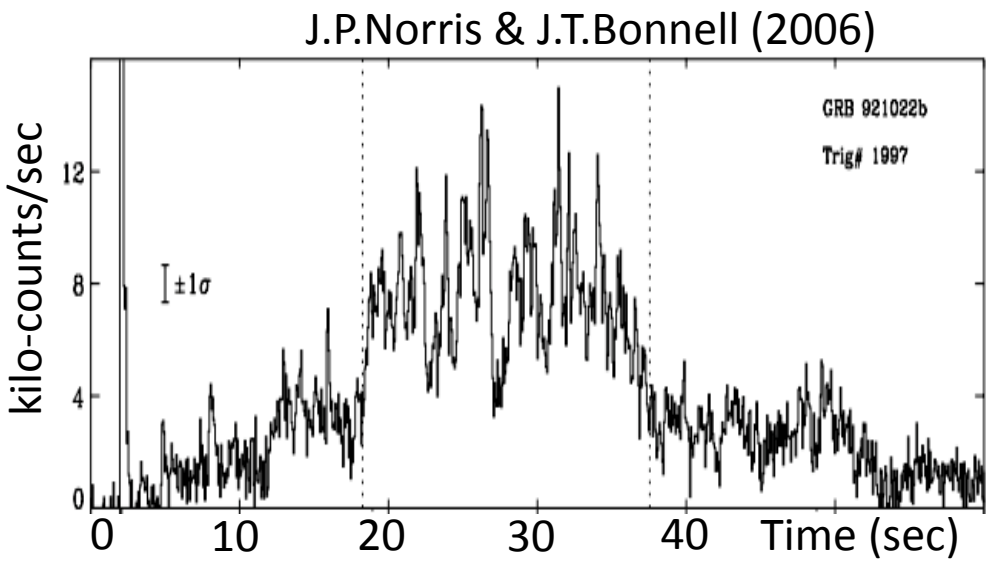
Granot+ 2017

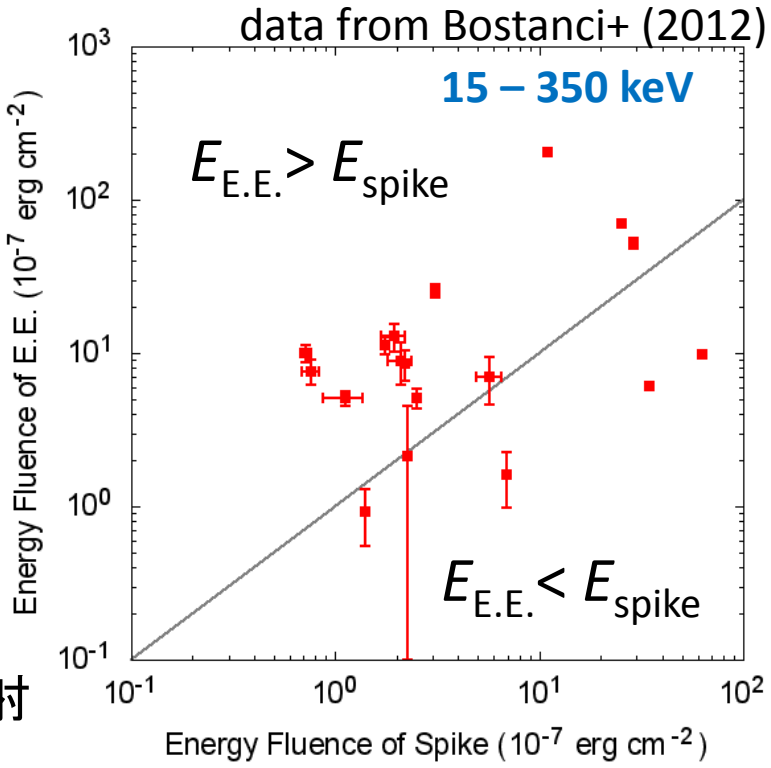


もくじ

- GW 170817/GRB 170817A, GW astronomy era
- Short GRBs associated with Extended Emission
- Kanazawa-SAT^3
  - 衛星概要
  - X線撮像検出器の原理
  - 目標感度
  - 即報性
  - 衛星準備状況

短時間ガンマ線バーストに付随する Extended Emission（軟X線超過成分）





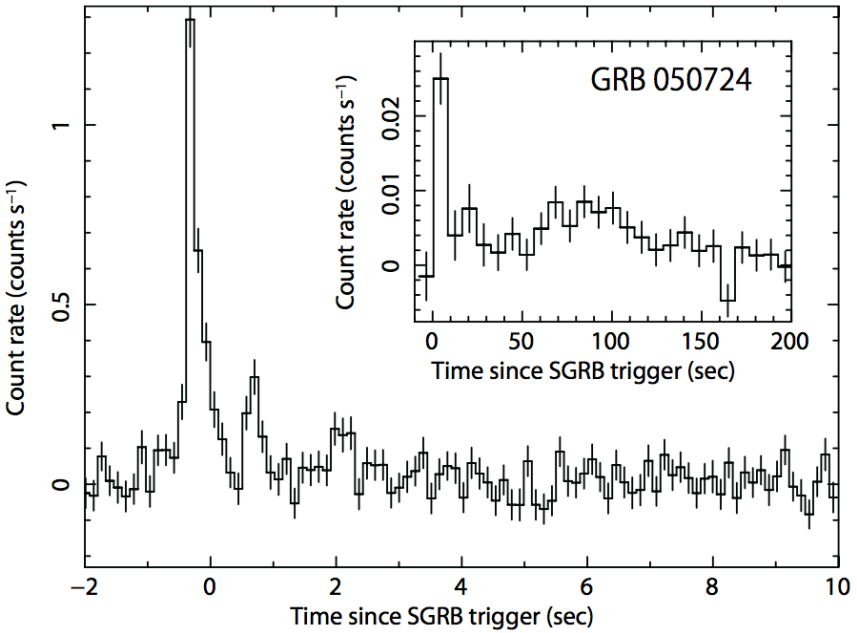
- 初期放射のあとに数10～100秒程度続く放射
- エネルギーフルエンスは初期放射と同程度
  初期放射より大きいものもある

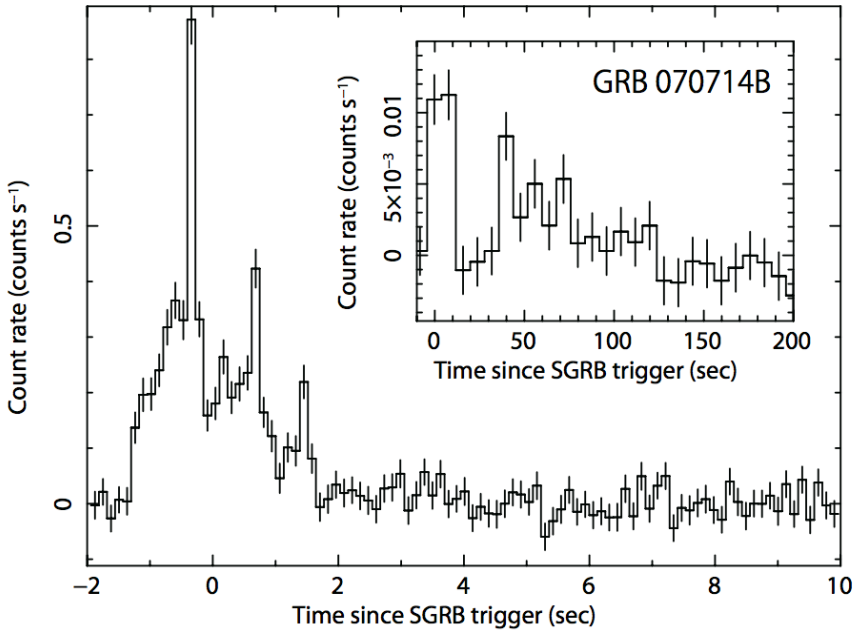
SwiftのBATとXRTで見たExtended Emission

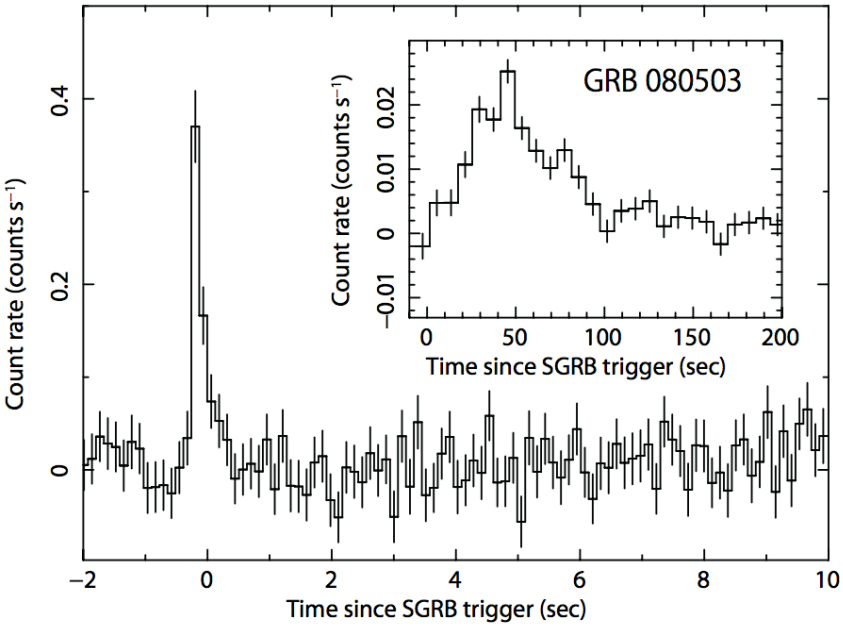
Kagawa, Yonetoku, TS et al. 2015

- 2014年末までのSwift/BATで明るいsGRBs
- XRTの残光観測があり
  $F \geq 10^{-11}$ erg cm^{-2}s^{-1} in 2 – 10 keV
- BATの15 – 25 keVの帯域で
  ライトカーブにExtended Emissionが見える

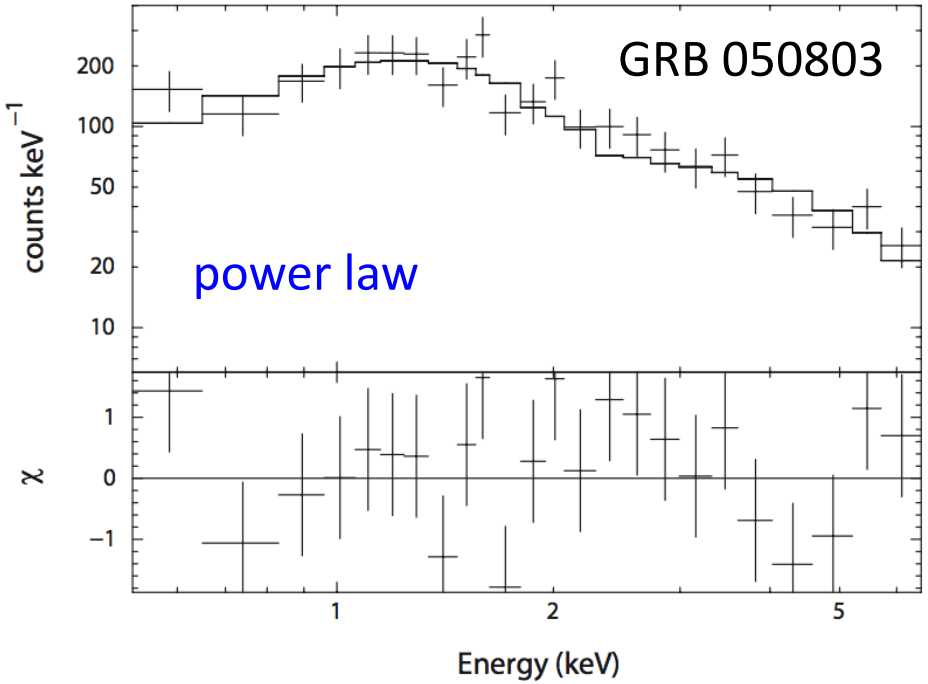
⇒ 3イベント
GRB 050724, GRB 070714B, GRB 080503

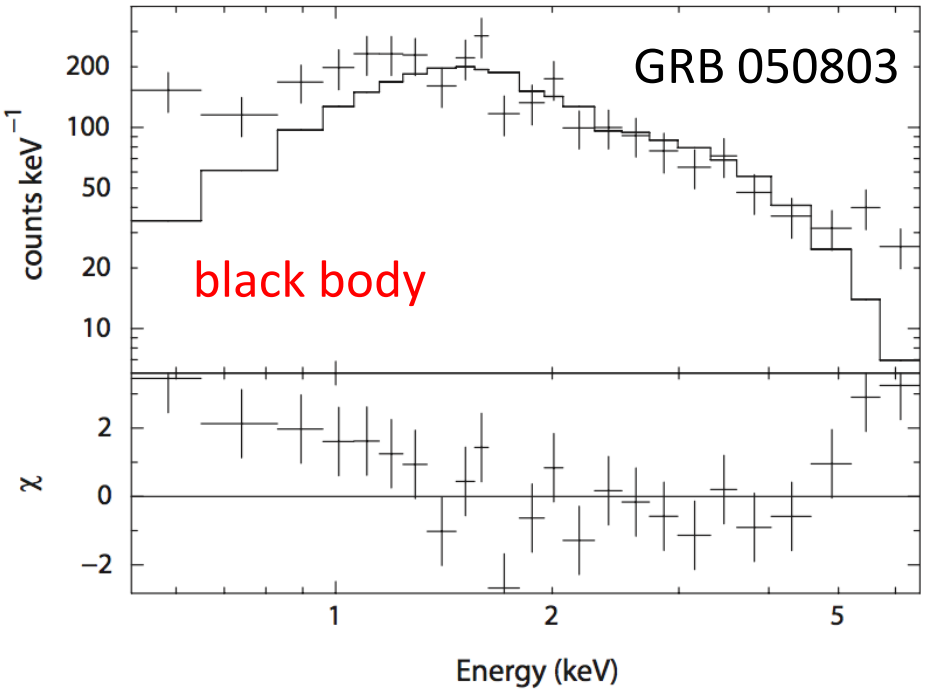


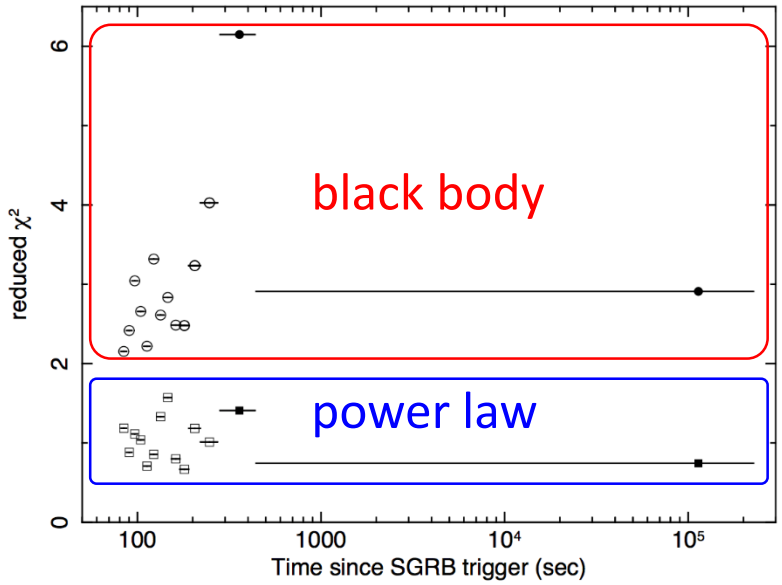




GRB 050803 Extended Emissionスペクトル

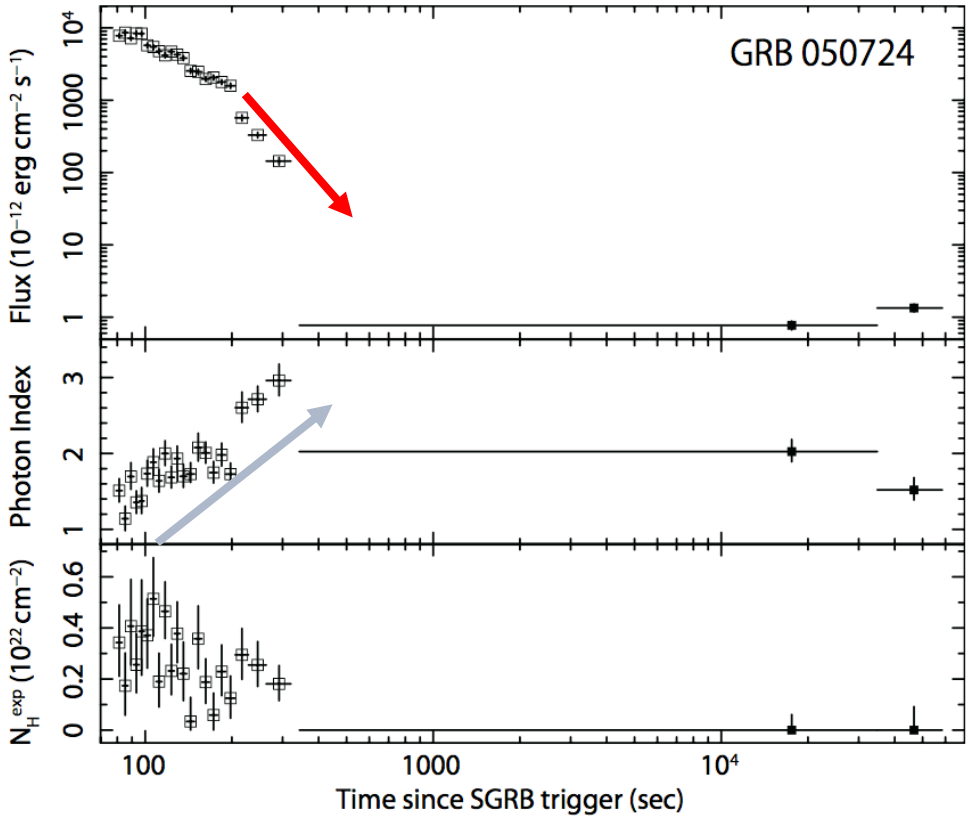


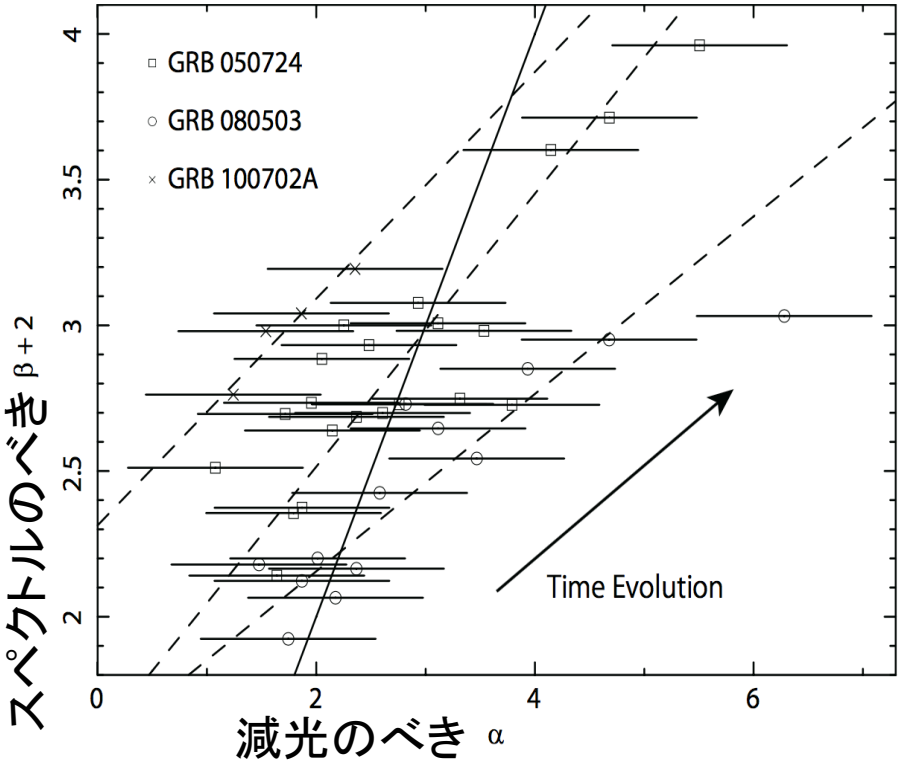




全時間領域にわたって
power lawがfavorされる

Extended Emissionの急激な減光





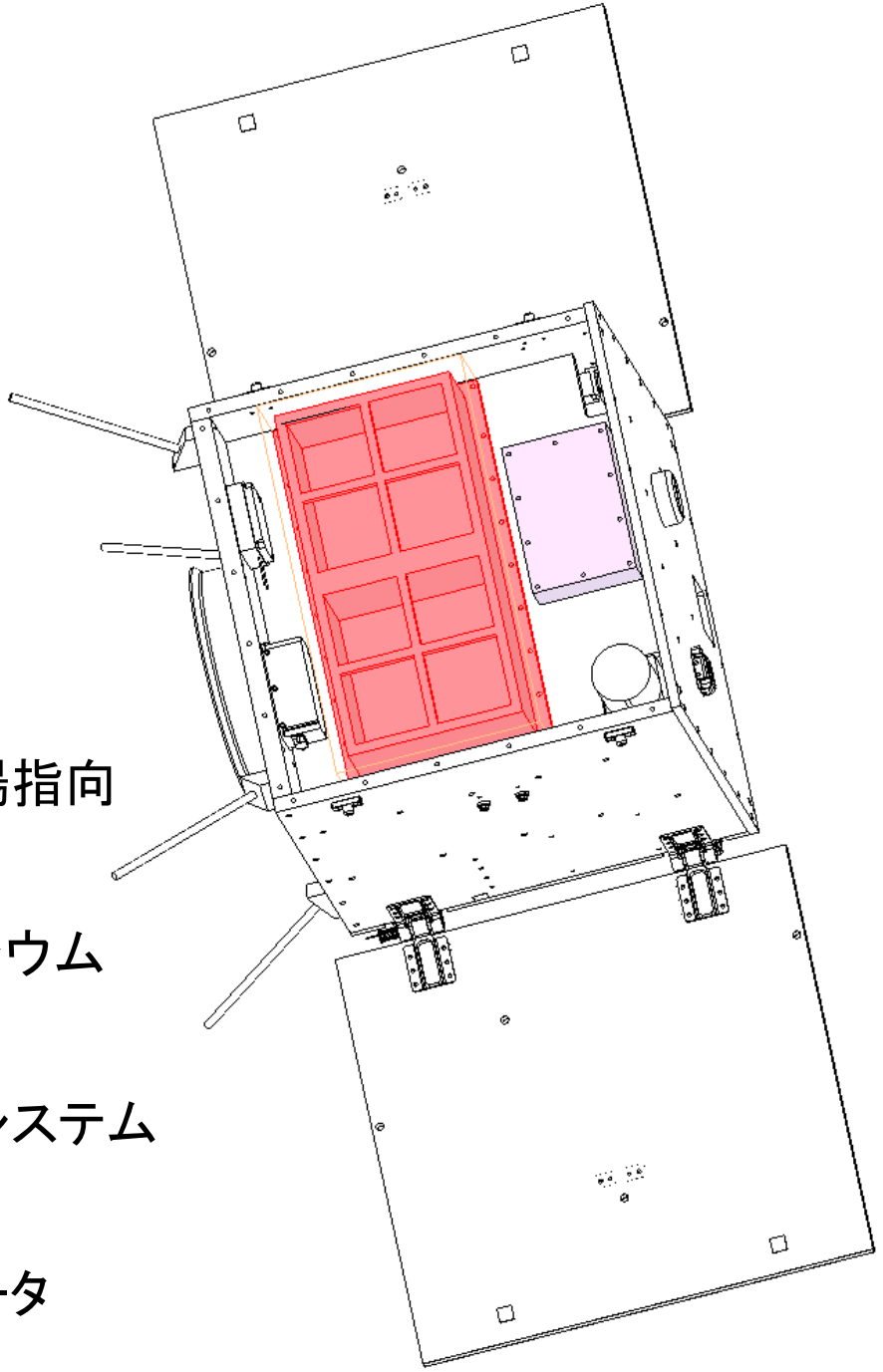
球対称なuniform jetからのhigh-latitude curvature emission
と異なるシナリオを示唆

もくじ

- GW 170817/GRB 170817A
- 短時間ガンマ線バーストのExtended Emission
- Kanazawa-SAT^3
  - 衛星概要
  - X線撮像検出器の原理
  - 目標感度
  - 即報性
  - 衛星準備状況

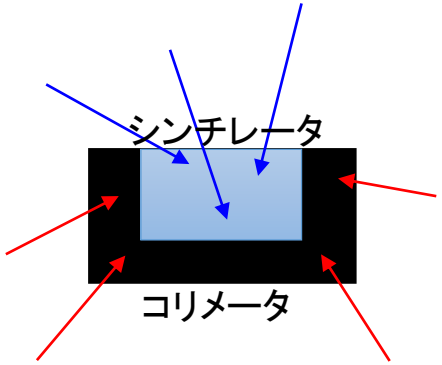
Kanazawa-SAT^{3}諸元

衛星サイズ	50 kg, 50 cm立方
打ち上げ目標	2018年度末 （H-IIA相乗りを想定）
ミッション期間	1年以上，目標3年
想定軌道	太陽同期準回帰軌道 高度600 – 700 km
姿勢制御	3軸制御による（反）太陽指向 天体追尾はしない
通信回線	Uバンド，Sバンド，イリジウム
観測装置	X線撮像検出器（T-LEX） 1次元コーデッドマスクシステム ガンマ線検出器 コリメータなしシンチレータ

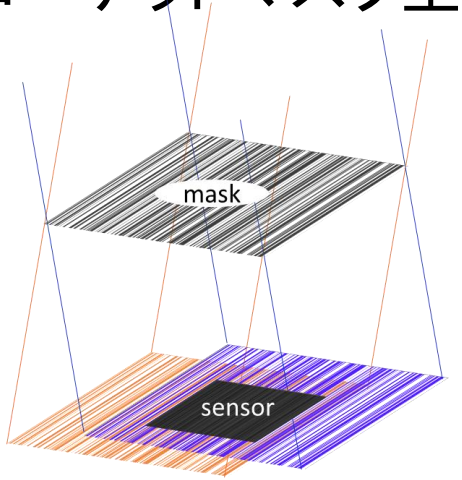


古典的な軟X線/硬X線の検出方法

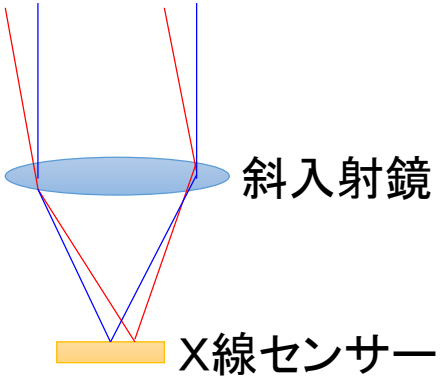
シンチレータ
(+コリメータ)型



コーデッドマスク型



望遠鏡型



視野　~ 2π sr

~ 1 sr

< 1 deg^2

測位　~ 10 deg

~ 1 - 10 arcmin

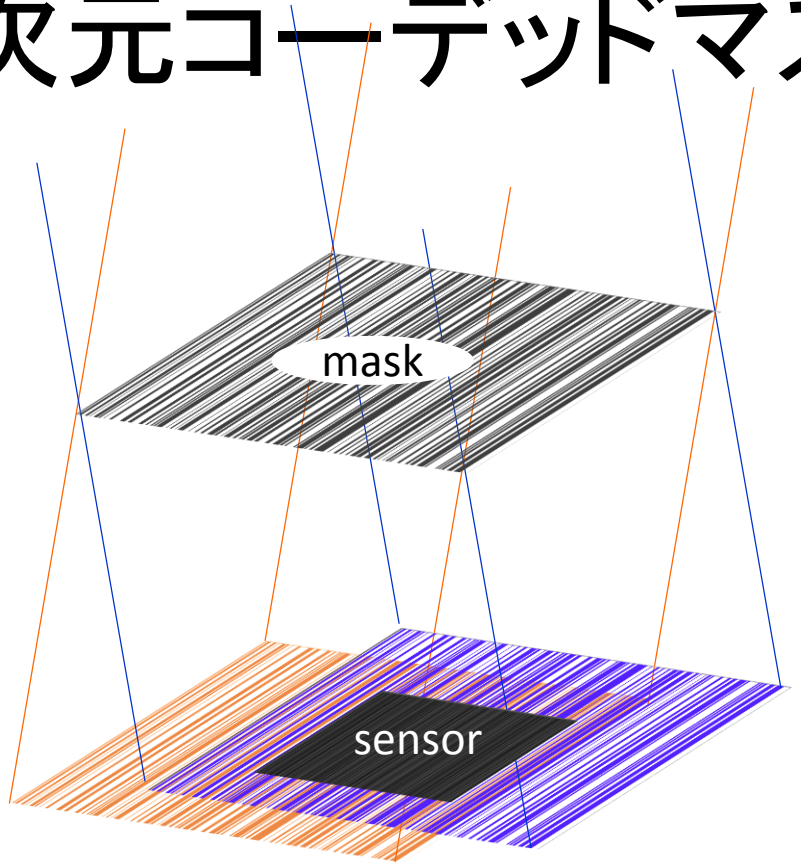
~ 1 - 10 arcsec

CGRO/BATSE
Fermi/GBM
CALET/GBM
など

HETE-2/WXM
Swift/BAT
など

Swift/XRT
など

1次元コーデッドマスクによる方向決定

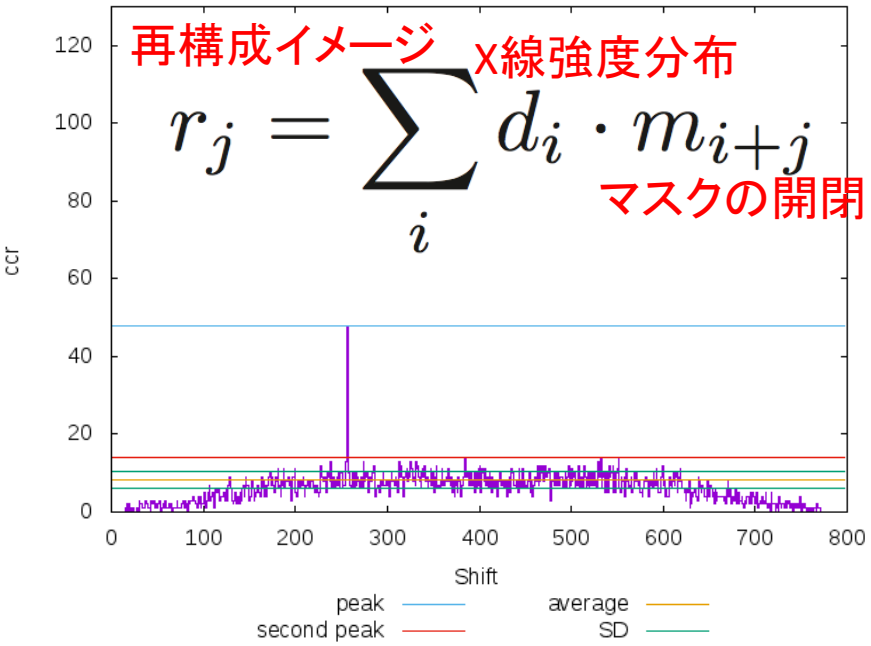


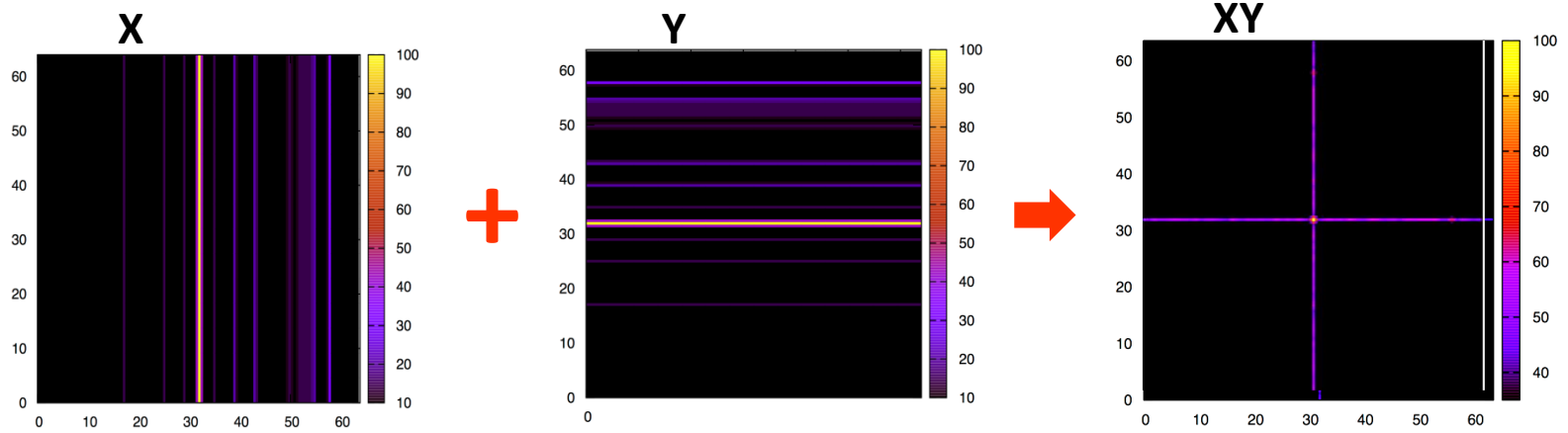
マスクの絵柄とX線の影絵をマッチングする
⇒ 相互相関をとる

再構成イメージ　X線強度分布

$$r_j = \sum_i d_i \cdot m_{i+j}$$

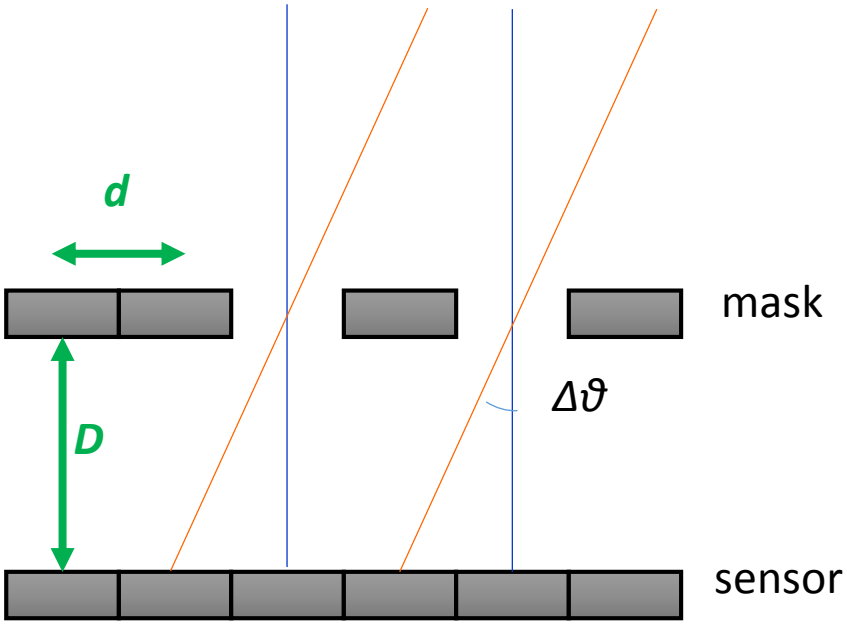
マスクの開閉





X線強度分布とマスクパターンの相互相関をとった再構成図

1次元コーデッドマスクの位置決定精度



射影されるX線の像が1ライン分ずれる角度

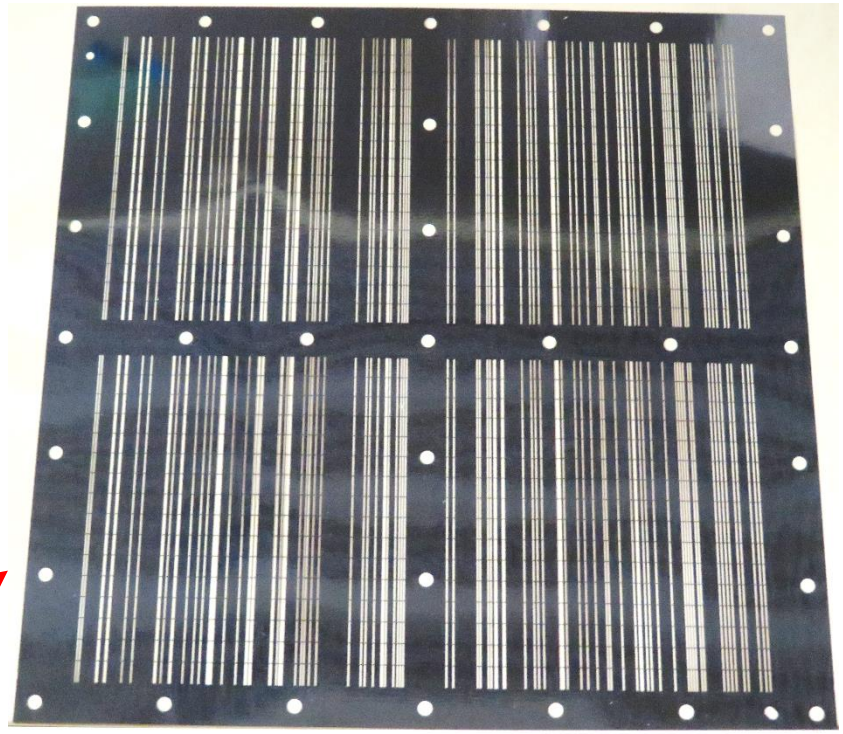
$\Delta\vartheta = \tan^{-1}(d/D) =$ 15 arcmin

for d = 0.3 mm, D = 70 mm

X線撮像検出器

Transient Localization Experiment(T-LEX)

諸元	
エネルギー帯域	2 - 20 keV
検出器面積	100 cm^2
マスク開口率	20%
有効面積	20 cm^2
視野	1 sr
位置決定精度	15 arcmin



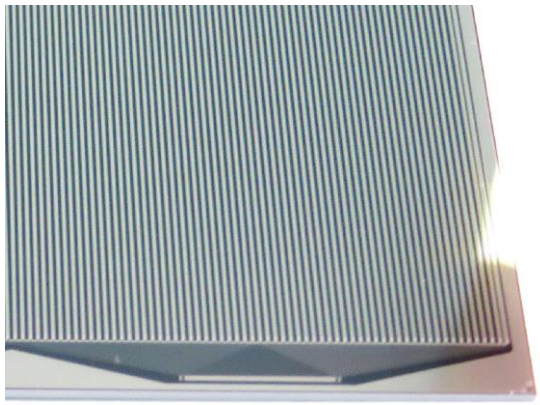
タングステン材1次元ランダムマスク

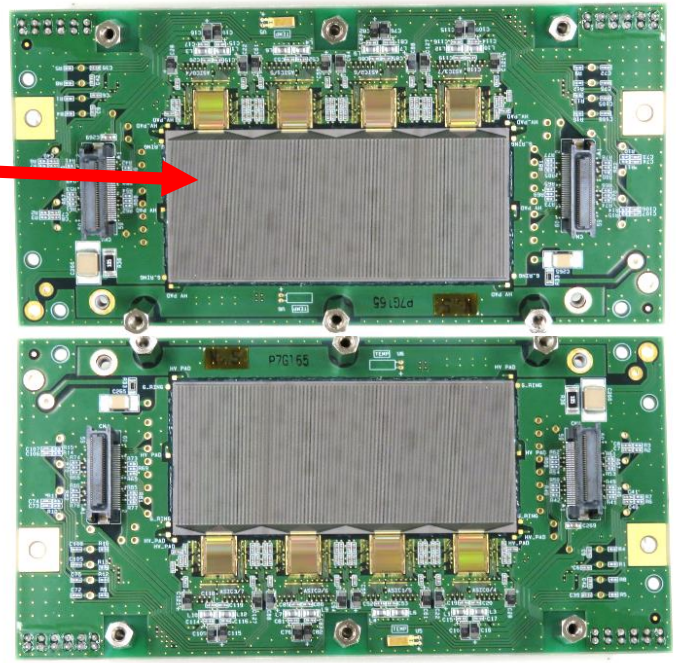
原子番号74

$$\sigma_{\mathrm{abs}} \propto Z^5$$

1次元シリコンストリップ検出器

ピッチ0.3 mm, 厚さ0.5 mm, 1枚当たり25 cm^2

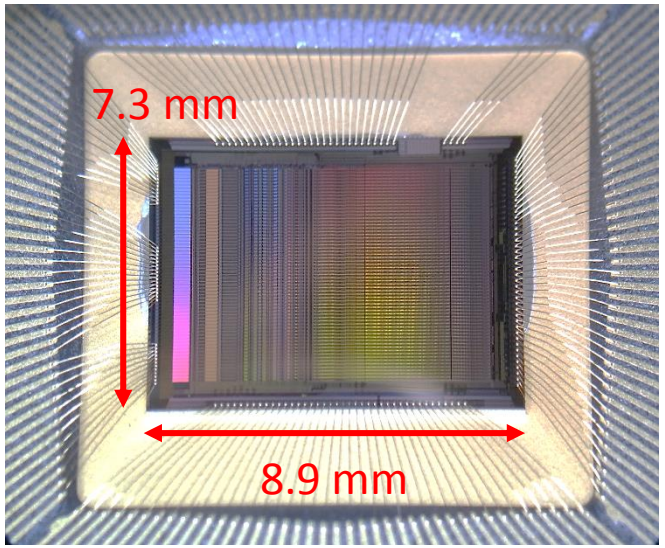


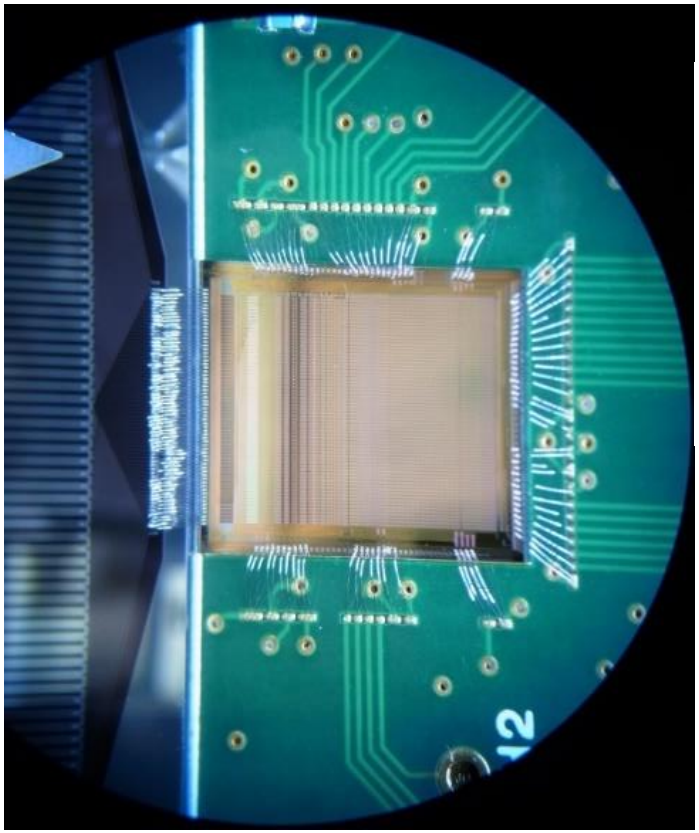


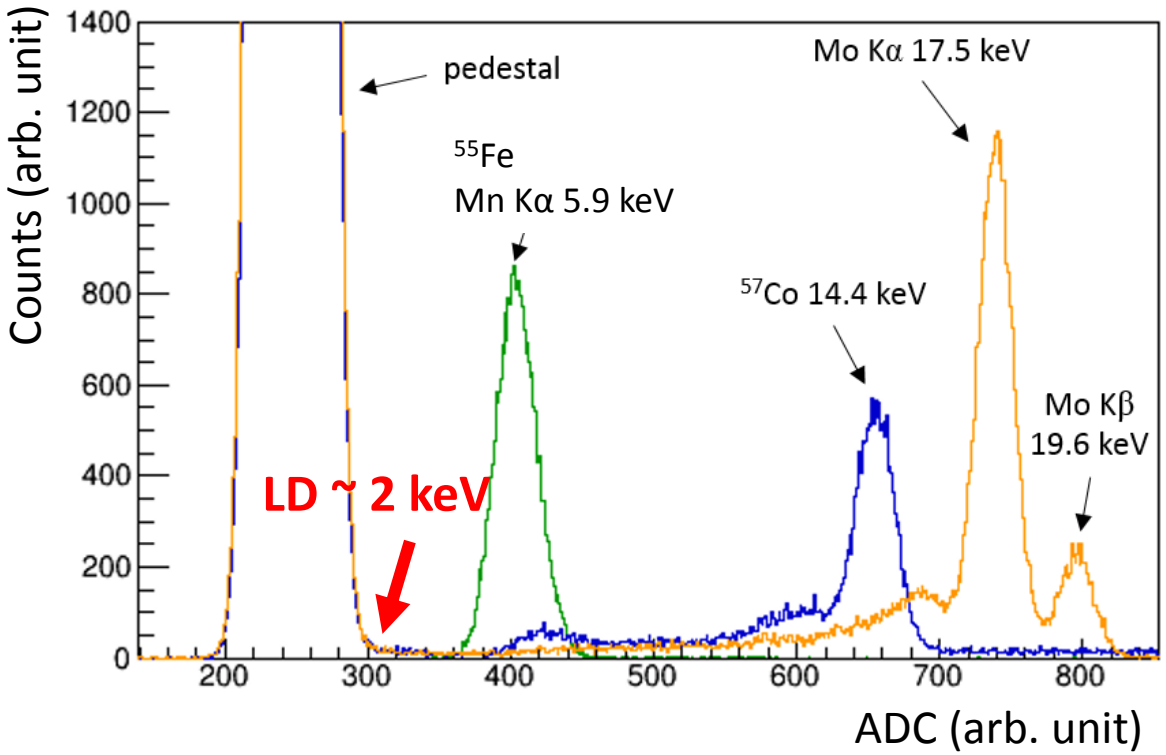
アナログ集積回路

T-LEXのシリコン検出器のチャンネル数合計1024
アナログ集積回路を開発

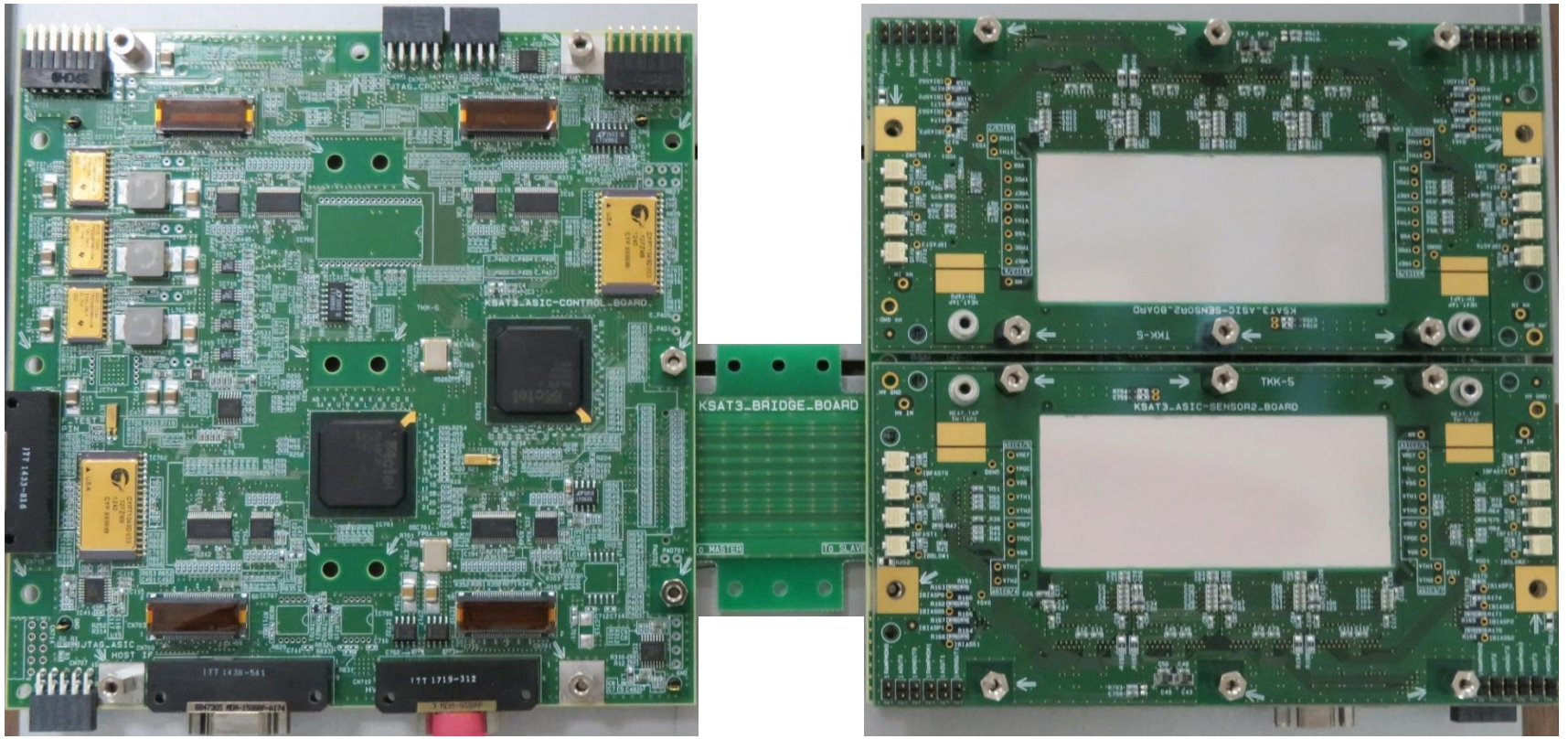
- 1チップあたり64系統アナログ入力
- 高利得アンプ ~ 750 mV/fC
- 10-bit ウィルキンソン型ADC
- 低消費電力 ~ 2 mW/ch





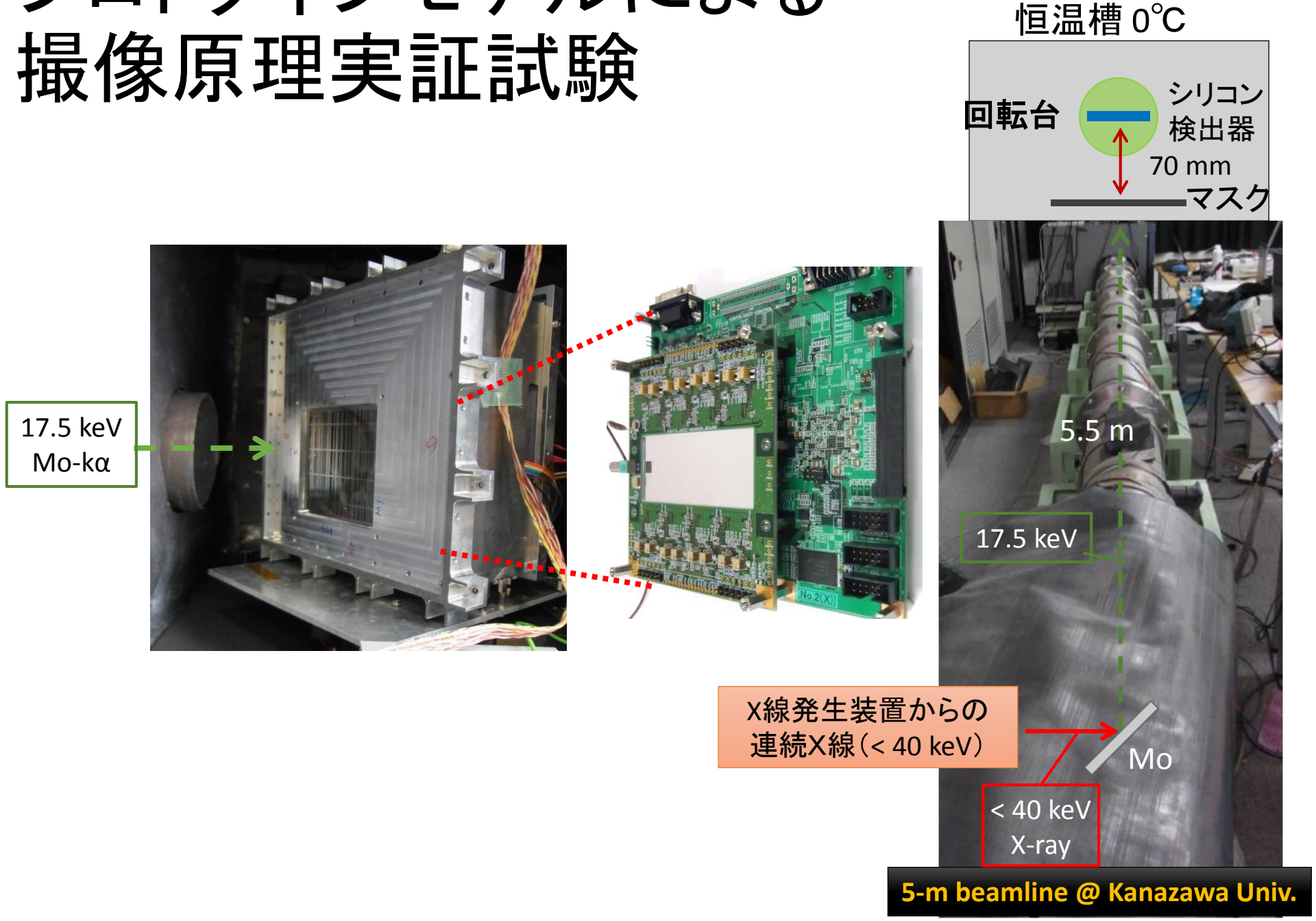


T-LEX プロトフライトモデル

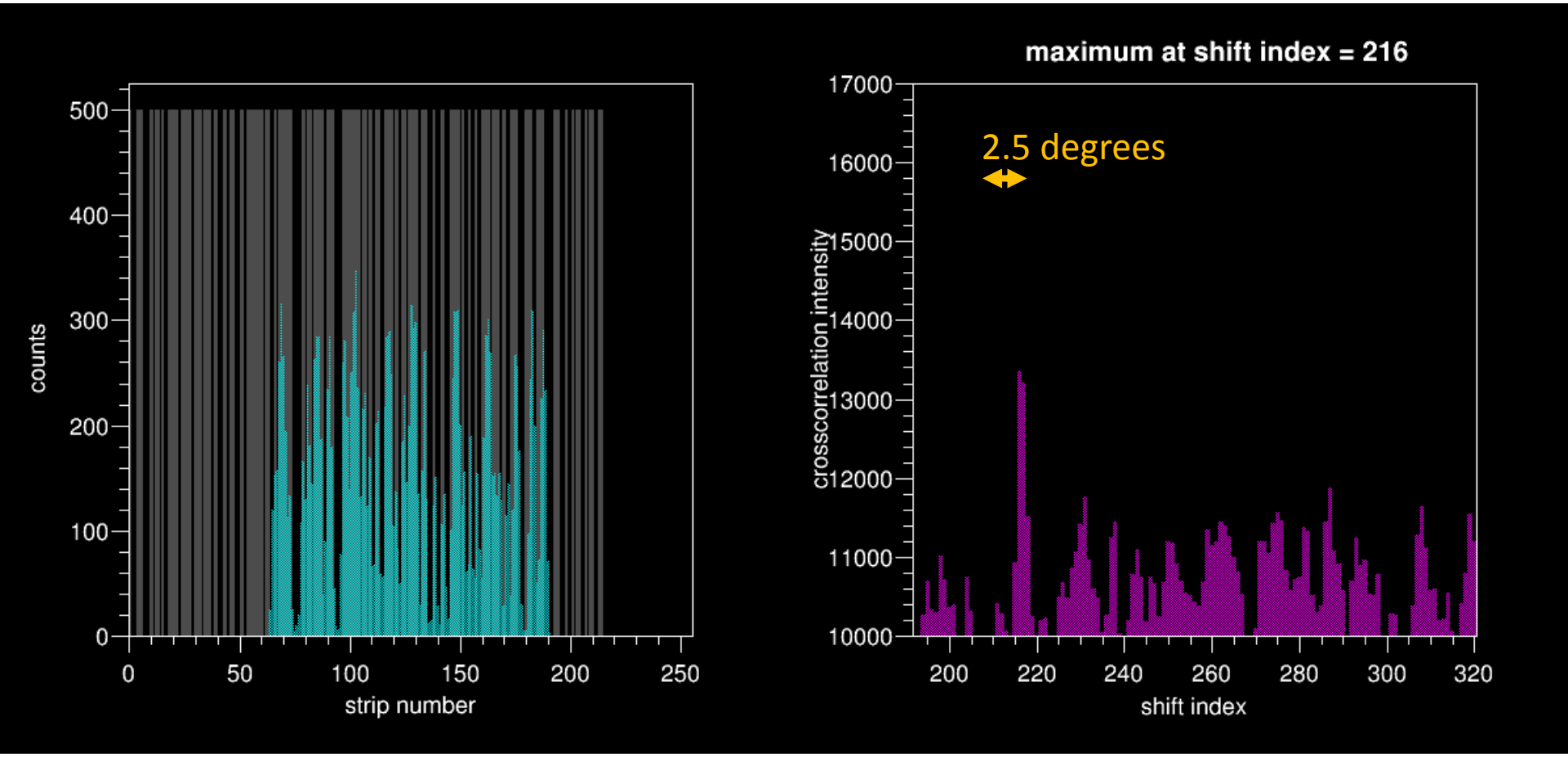


~ 40 cm

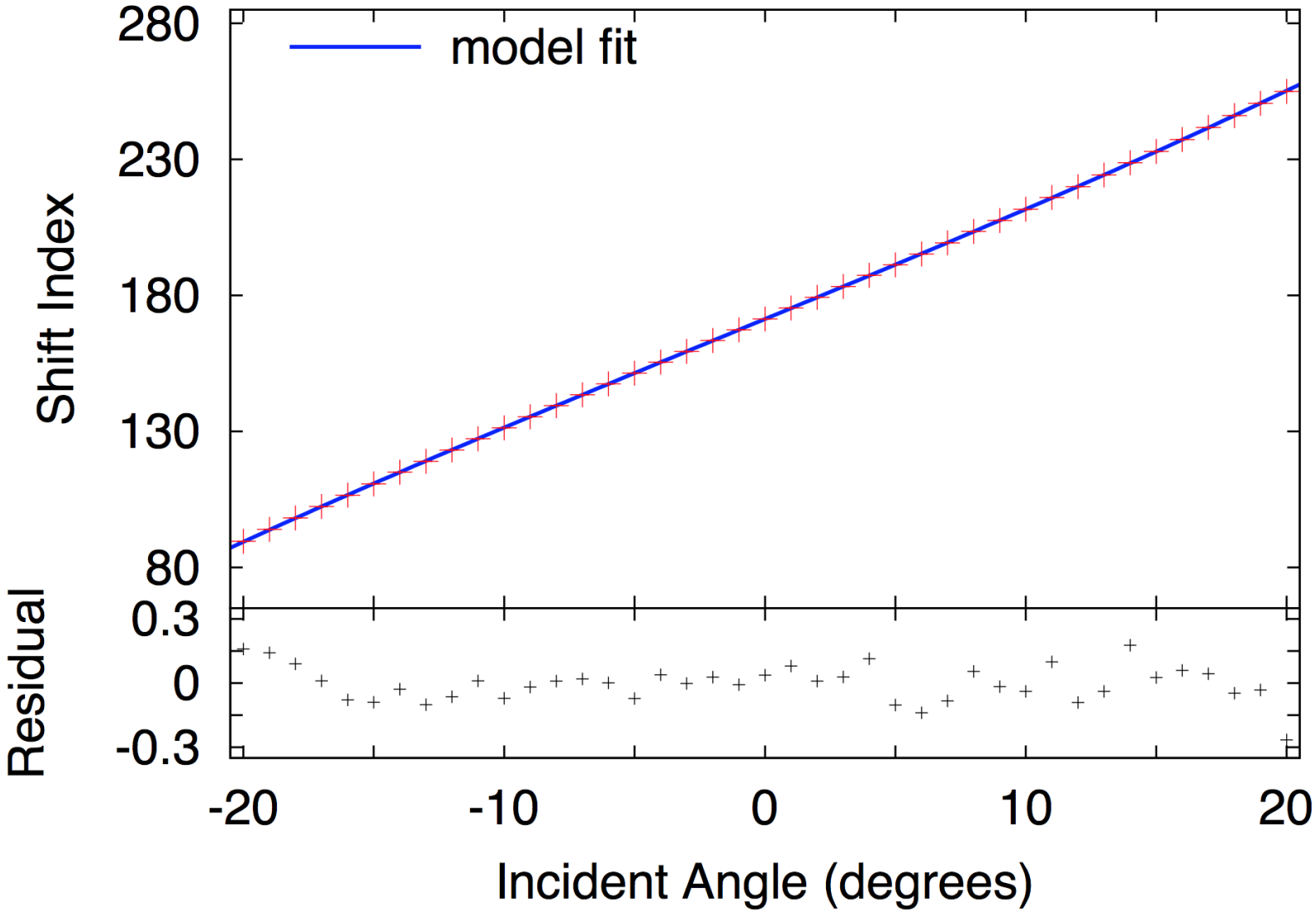
プロトタイプモデルによる撮像原理実証試験



プロトタイプモデルによる撮像原理実証試験



プロトタイプモデルによる撮像原理実証試験

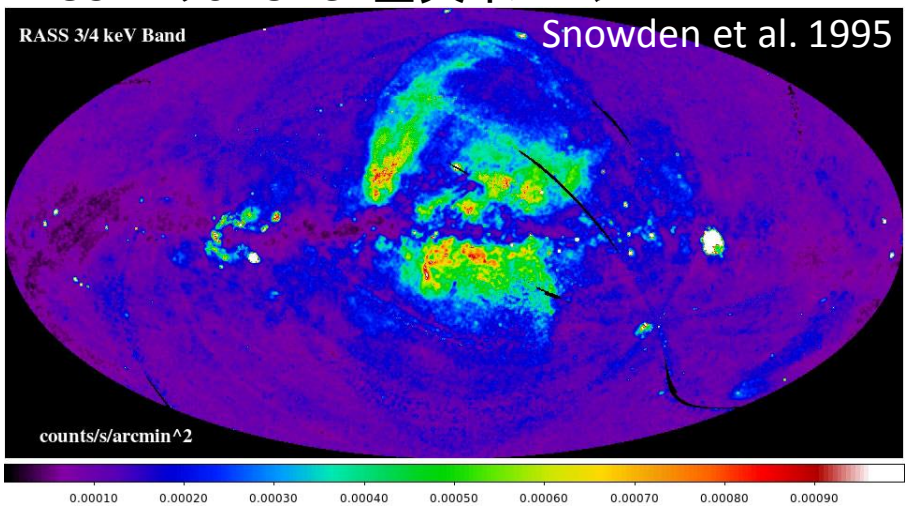


軟X線帯域での主なバックグラウンド事象

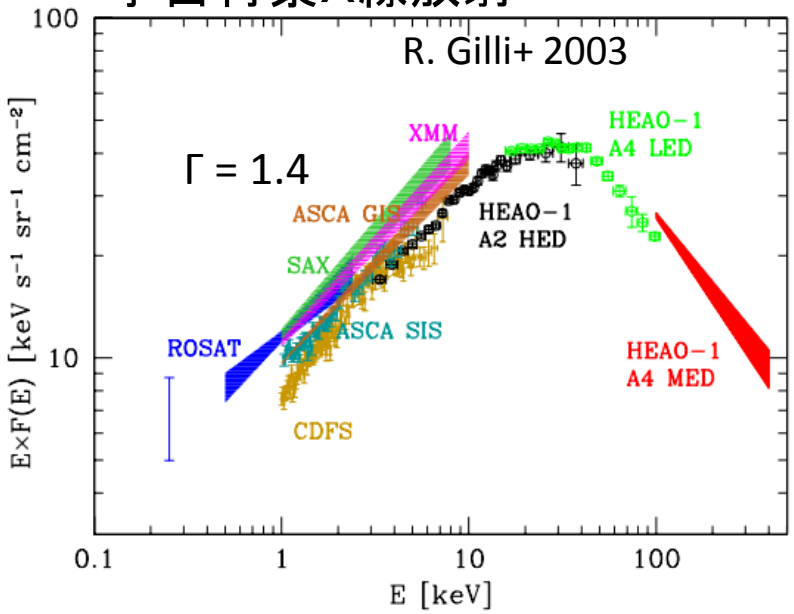
軟X線帯域の広視野検出器の場合

- 宇宙背景X線放射
  （活動銀河核からの放射の足し合わせ）
  Gruber+ 1992, Kushino+ 2002, Lumb+ 2002
- 銀河面のプラズマからの放射
  Kaneda+ 1997

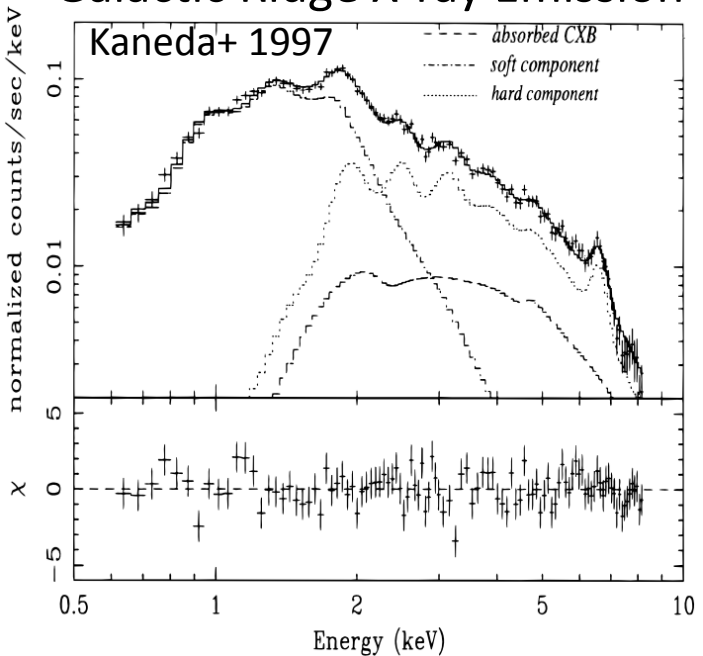
ROSATの0.75 keV全天イメージ



宇宙背景X線放射



Galactic Ridge X-ray Emission

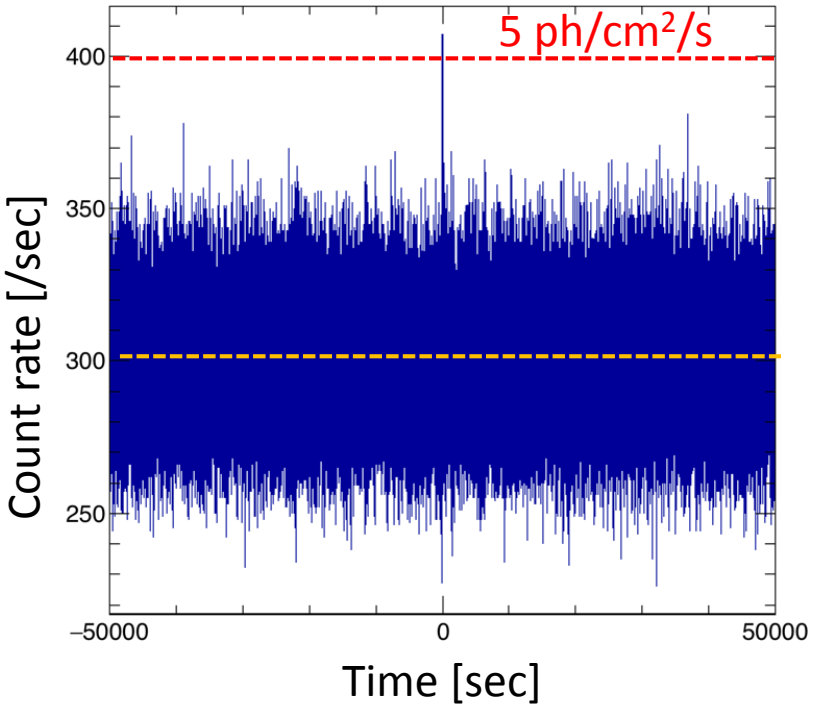


T-LEXの感度

T-LEXの帯域2 – 20 keVで宇宙背景X線放射の強度を計算すると
B = 10 ph/cm2/s/sr
コーデッドマスク(f=1)とシリコン検出器の幾何学配置から見積もった検出器のSΩは~ 130 cm^2 sr
⇒宇宙背景X線放射を見込む実効的な視野は1.3 sr

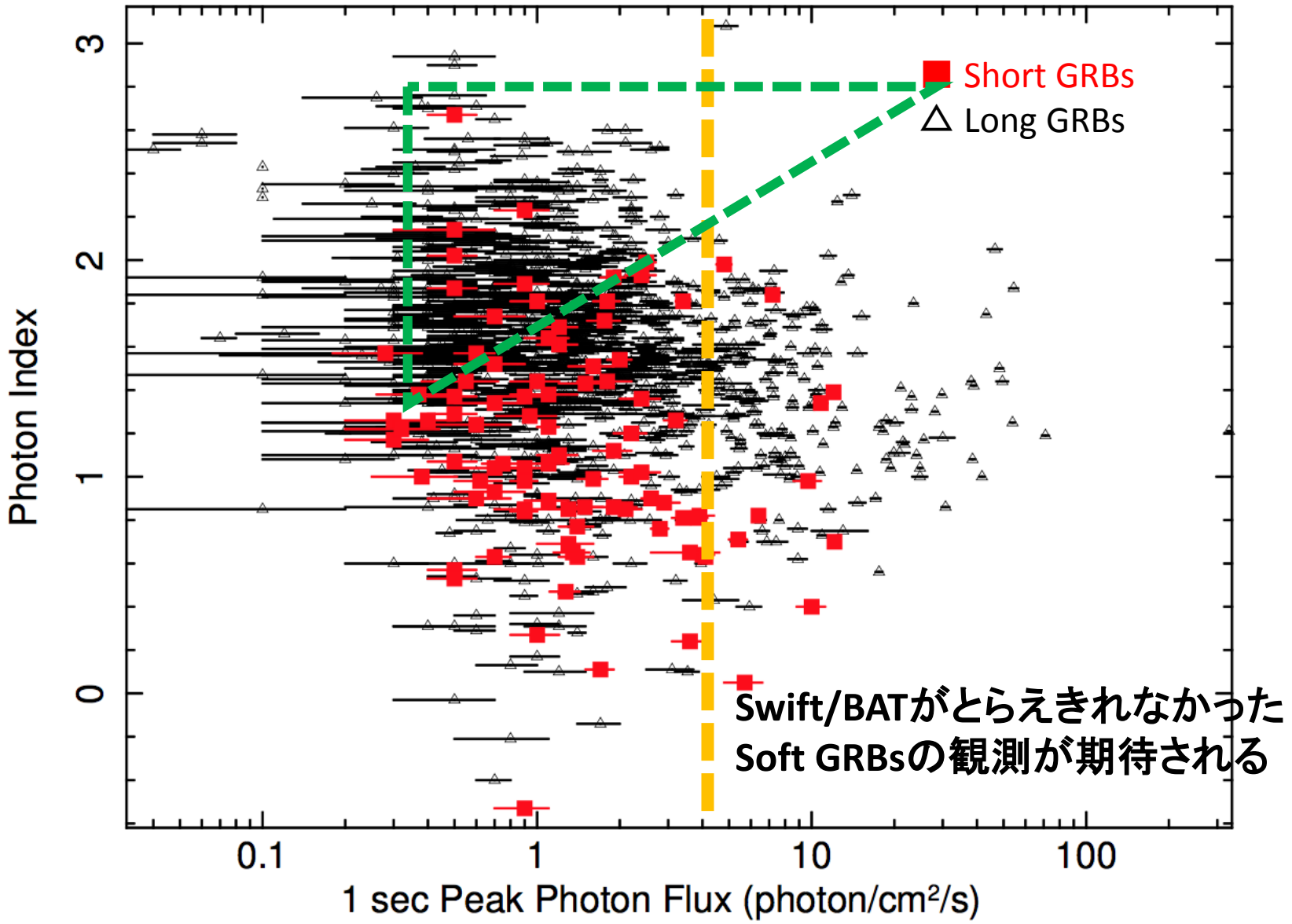
$B\Omega$ = 15 cnts/cm^2/s
A = 100 cm^2
f = 0.2
S = 5 ph/cm^2/s

1秒bin x 10^5秒のライトカーブMC



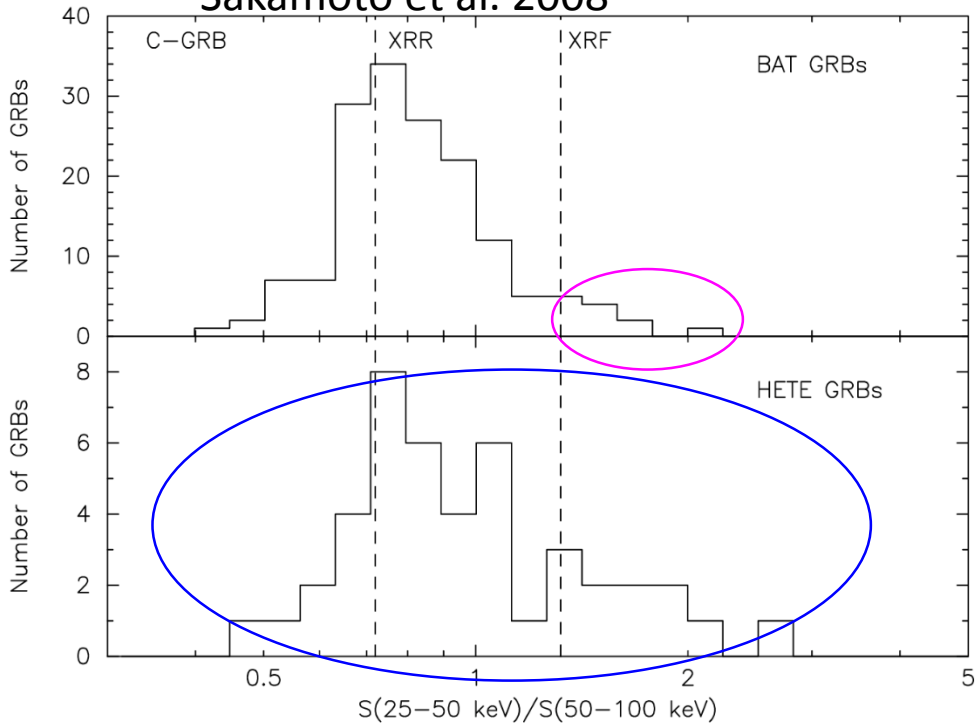
軟X線帯域で観測が期待されるSoft GRBs

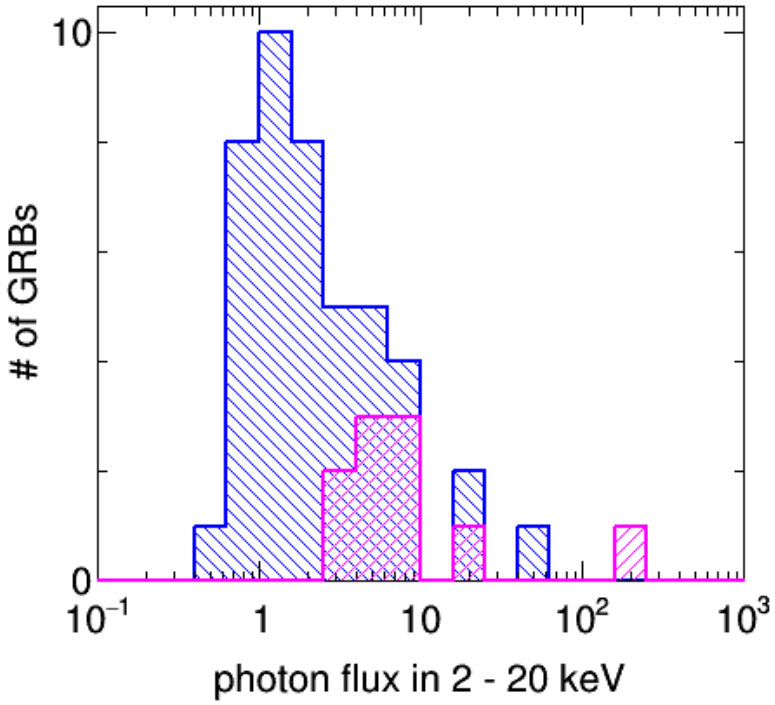
Swift/BAT 15 -150 keVでの観測 での観測



*HETE-2*が見たGRBや *Swift*/BATが見たX-Ray Flashの感度

Sakamoto et al. 2008



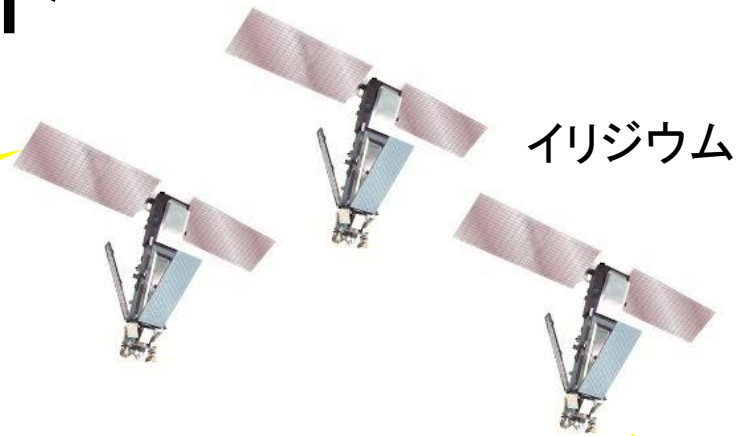


HETE-2の45イベントのうち5 ph/cm^2/s(2 – 20 keV)なもの 10 events
⇒ detection of 3 events/year
Swift/BATのXRF 10イベントのうち5 ph/cm^2/s(2 – 20 keV)なもの 6 events
⇒ detection of 3 events/year

イリジウム衛星通信による バーストアラート

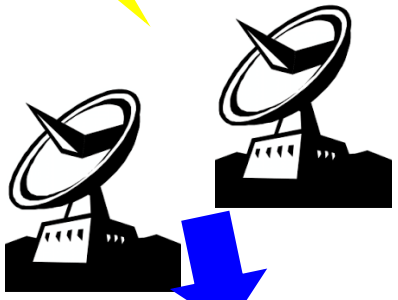
3 cm

「ショート・バースト・データ」
イリジウム衛星を経由して
メール（1通当たり340バイト）を
送受信できるデバイス



イリジウム衛星ネットワーク

イリジウム地球局

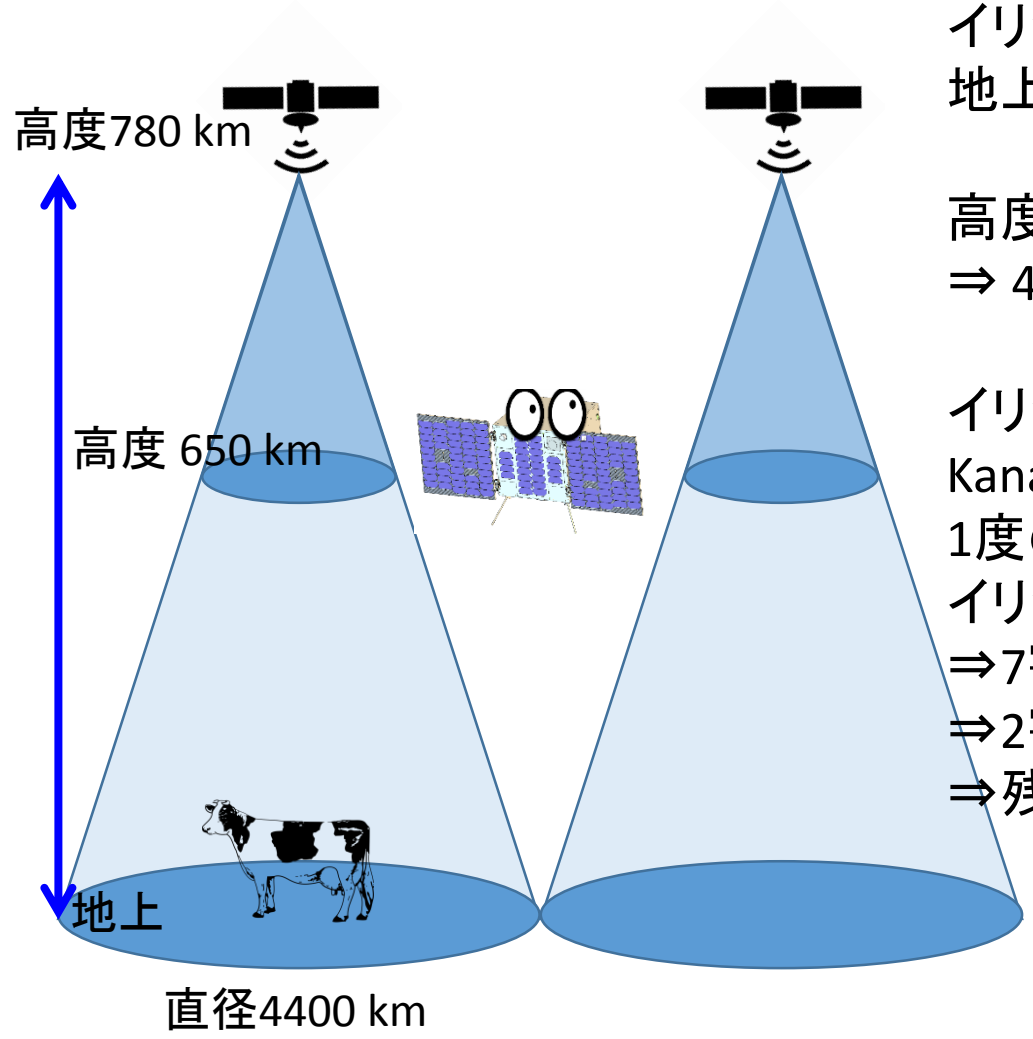


ショートバーストデータ
システムサーバー

インターネット

典型的に2時間以内に
GRBの発生方向と時刻を
地上通報する

軌道上での
イリジウム通信衛星アラートの即時性



イリジウム衛星 66台のネットワークで
地上を1台あたり直径4400 kmカバー

高度 650 kmにおけるカバー率 4%
⇒ 4%のイベントは2分以内に地上へ通報

イリジウム衛星は南極・北極の上空を通る
Kanazawa-SAT^{3}も極を通る
1度の極域通過で
イリジウム衛星と遭遇しない確率 26%
⇒7割のイベントは45分以内に地上に通報
⇒2割のイベントは90分以内に地上に通報
⇒残り5%くらいは90分以上かかる

速報以外に地上に下ろす観測データ（案）

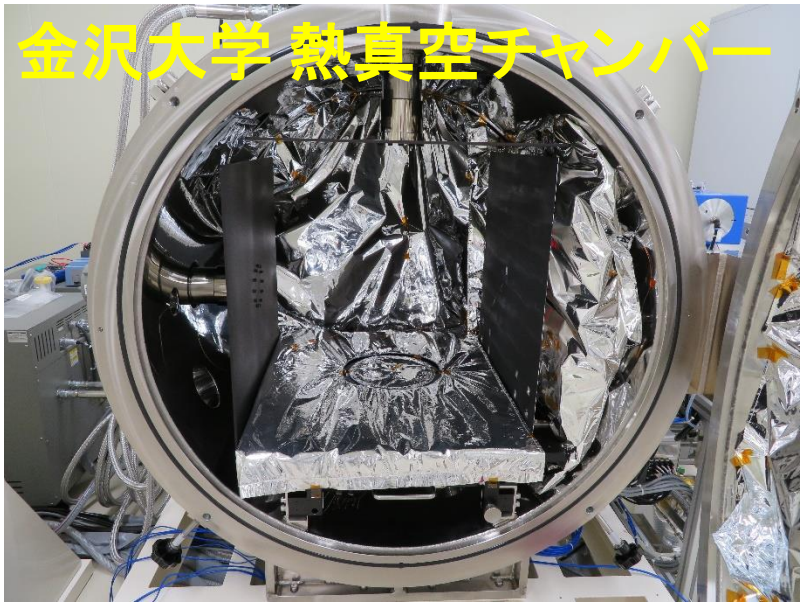
- 光子毎のイベントデータはデータ回線の制約で不可
- バーストを検知したとき
  - ライトカーブ（8 ms, 64 ms, 1 s）
    スペクトルデータ（時間分解能？　エネルギービン数？）
- 平常時
  - 0.1秒binnedライトカーブ
    エネルギー全バンド

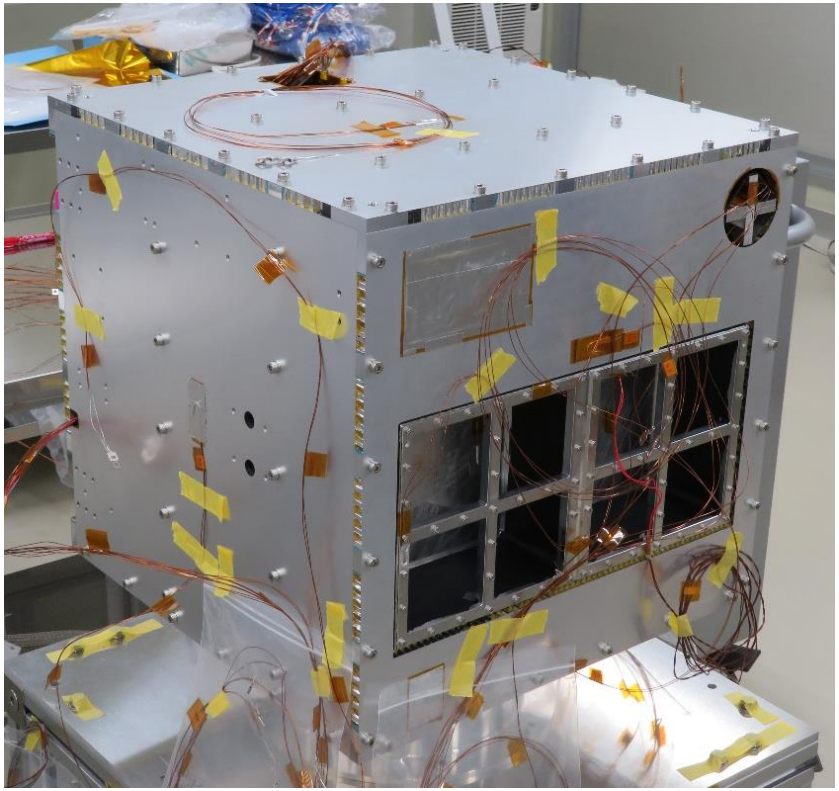
まだまだ検討不足です　要望やご意見などのインプット歓迎します

衛星の準備状況

衛星の機器の質量や発熱量を模擬した
熱構造モデルを製作

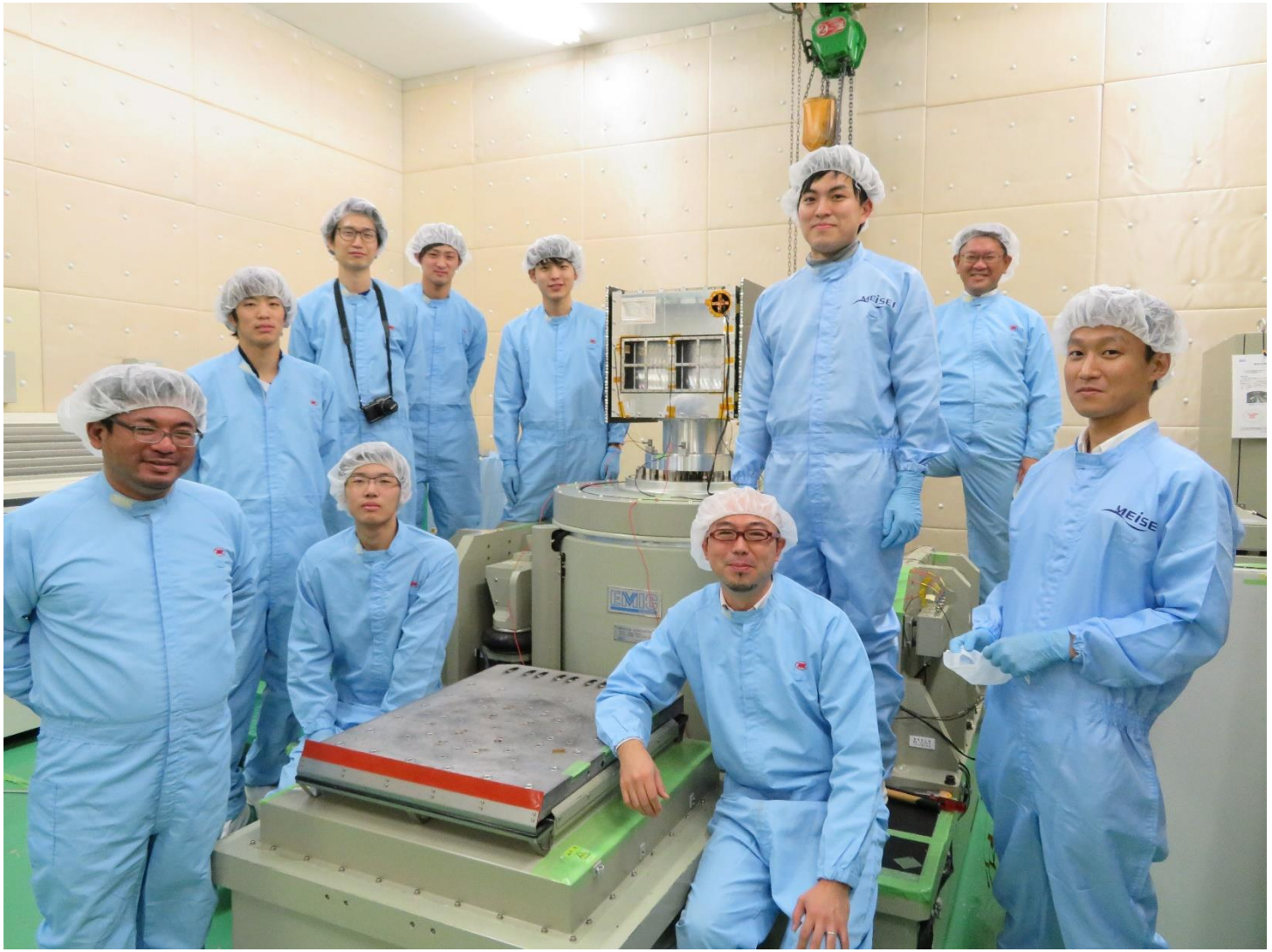
- 熱真空試験
  各機器の到達温度が適切な範囲か
- 振動試験
  ロケット打上げの振動に耐える構造か





機軸方向正弦波振動試験
（Qualification Test加振レベル）

まとめ

- 2018年度末打ち上げ1年以上の運用を目指した超小型衛星計画を進めている
- コーデッドマスクX線撮像検出器
  - 2 - 20 keV
  - 視野1 sr
  - 位置決定精度 15分角
  - 有効面積 20 cm^2
  - 5 ph/cm^2/s (2 – 20 keV)は見えそう
- 地上アラート
  - バースト発生から2時間以内に発生方向と発生時刻を地上に通報する
  - 4%のバーストは約2分で通報できる

ご清聴ありがとうございました