A detailed 3D rendering of a satellite in low Earth orbit. The satellite has a central grey body with various instruments and sensors. Large blue solar panels are deployed in a diamond-like configuration around the main body. The Earth is visible in the background, showing clouds and landmasses from a high vantage point.

世界初の紫外線時間領域天文衛星 打ち上げへ

東工大・理 谷津 陽一

河合誠之（東工大・理）、S.R.Kulkarni (Caltech)、

富永望（甲南大・理）、田中雅臣（東北大・理）、

諸隈智貴（東大天文）、鈴木尚（IPMU）、

松永三郎（東工大・工）

Outline

1. 紫外線が必要な理由

2. Science Case

1. 重力崩壊型超新星

2. 重力波

3. ミッションデザイン

4. システムデザイン

5. 開発状況など

非「大艦巨砲主義」天文学

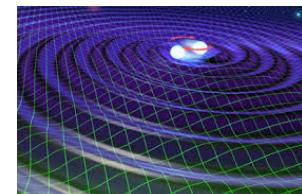
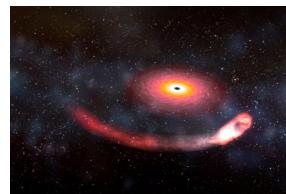
◆ 天文学の歴史は望遠鏡の大型化の歴史

- 16世紀 口径=4 cm
- 17世紀 口径=100 cm
- 20世紀 口径~1000 cm

より暗く（遠く）、細かく（空間分解）、精密に（波長分解）

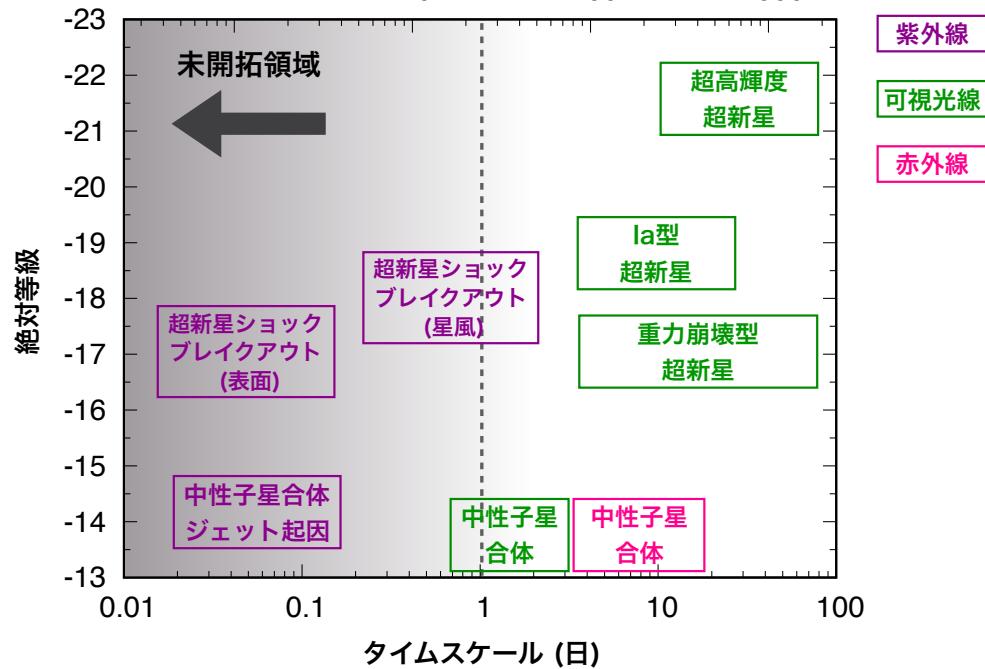
◆ 重力波研究では口径50cmの望遠鏡が大活躍

- 数秒～数時間で暗くなってしまう
- 高機動人工衛星、高速/常時通信、ロボット望遠鏡、スパコン
より速く・早くという科学的価値（小さくてもスピードで勝負）



138億年の宇宙進化を一瞬の爆発現象が引き起こしている

時間領域天文学

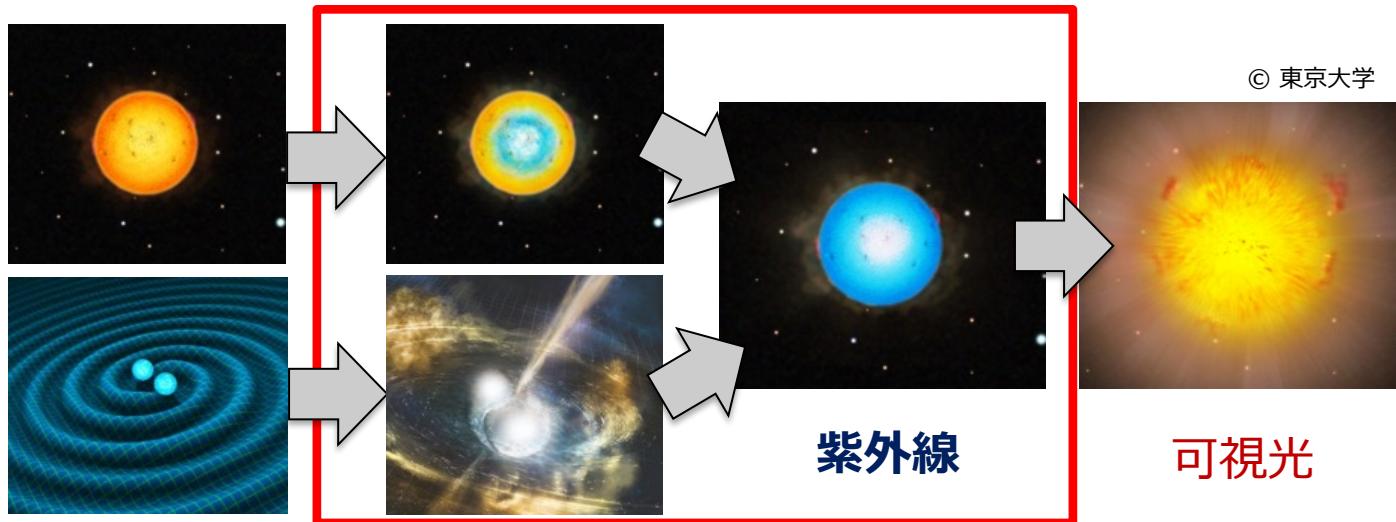


実は、爆発から1日以内の振る舞いはあまり良くわかっていない（GRB除く）
⇒ このフロンティアを一桁早い世界へと切り拓くことが我々の使命

どうして紫外線なのか？

爆発直後は高温 ⇒ 紫外線で明るい

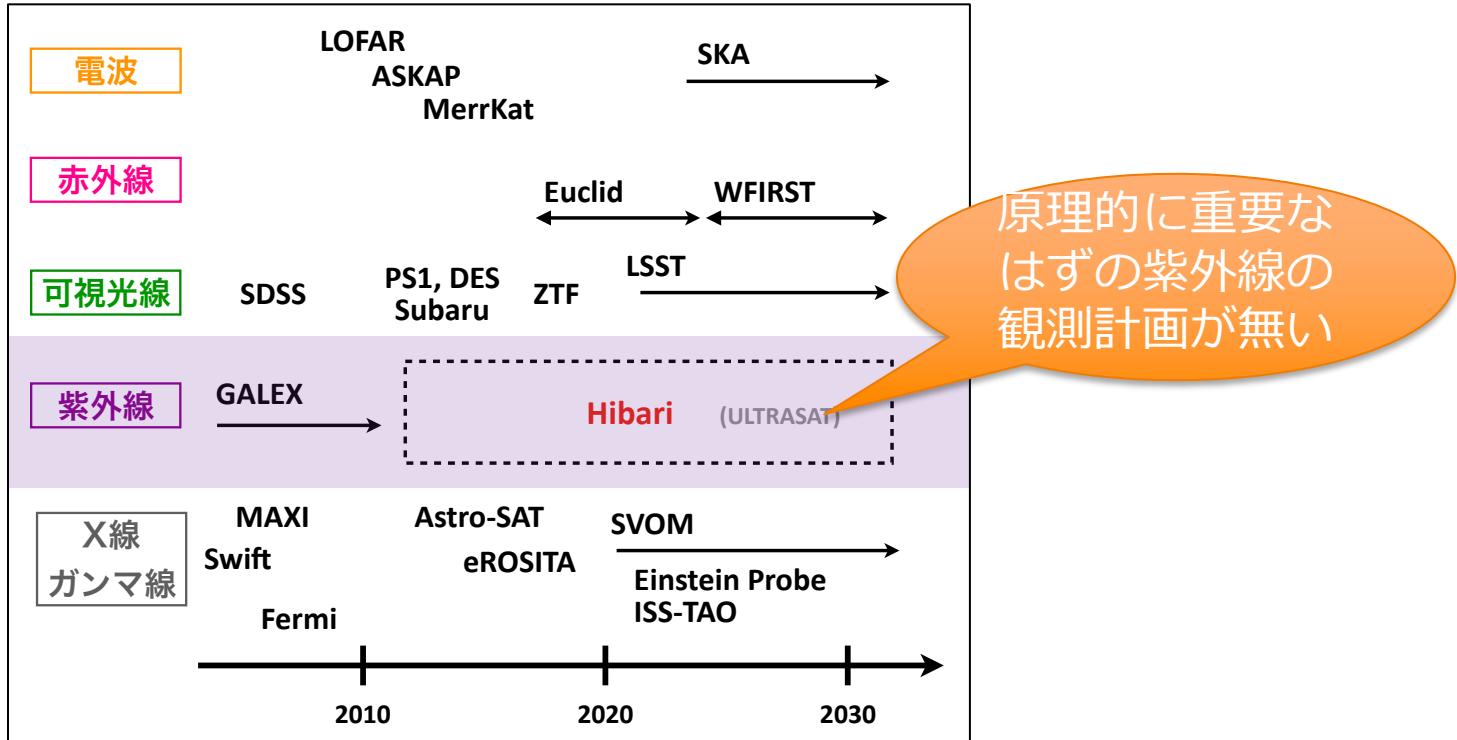
爆発天体の「最初の数時間」を見るならば紫外線が原理的に有利



超新星爆発 (10イベント/年) → 大質量星の最後の10年間

中性子星合体 (0.4-40イベント/年) → 相対論的ジェットの形成

時間領域天文のための広視野サーベイ計画



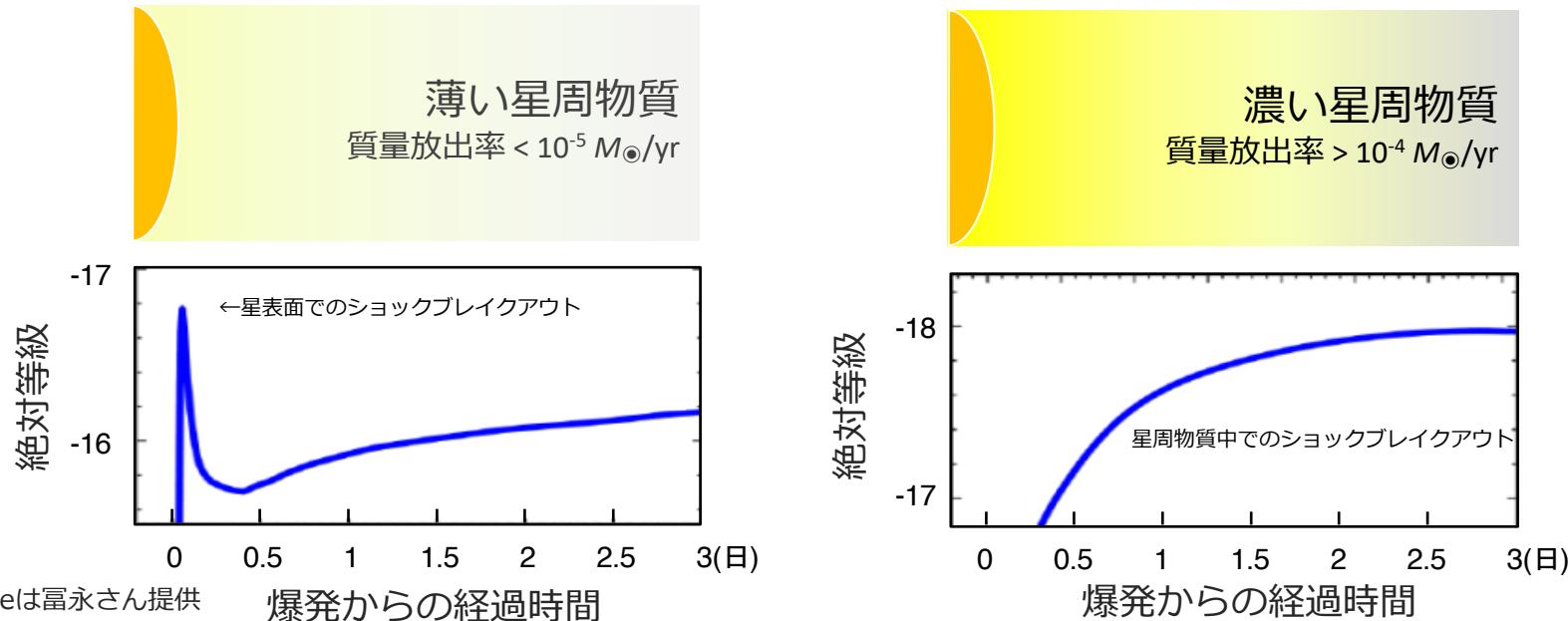
- ◆ 時間領域天文学の中でも要となる紫外線で新発見を狙う
- ◆ そのためには"超小型衛星"で**世界で最初**の観測が必要

あんな爆発・こんな爆発

目指すサイエンス

①大質量星の最期の10年間の解明

◆重力崩壊型超新星爆発の直前の質量放出の謎解き明かす

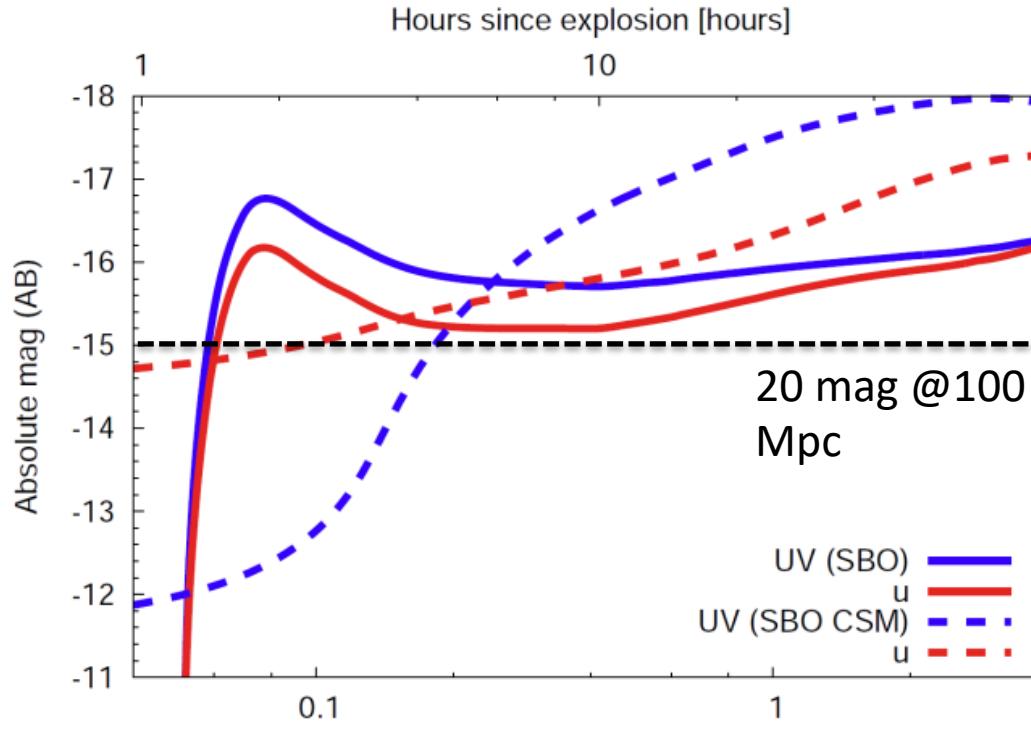


lightcurveは富永さん提供

爆発からの経過時間

爆発直後の超新星ショックブレイクアウトを検知し、極早期光度変動を調査
星周物質の放出履歴を3日間追いかけることで最期の10年の活動を明らかにする

地上観測との比較（超新星爆発）



本計画 UV: 視野100平方度

CFHT (地上4m) u-band: 視野1平方度

Days since explosion [days]

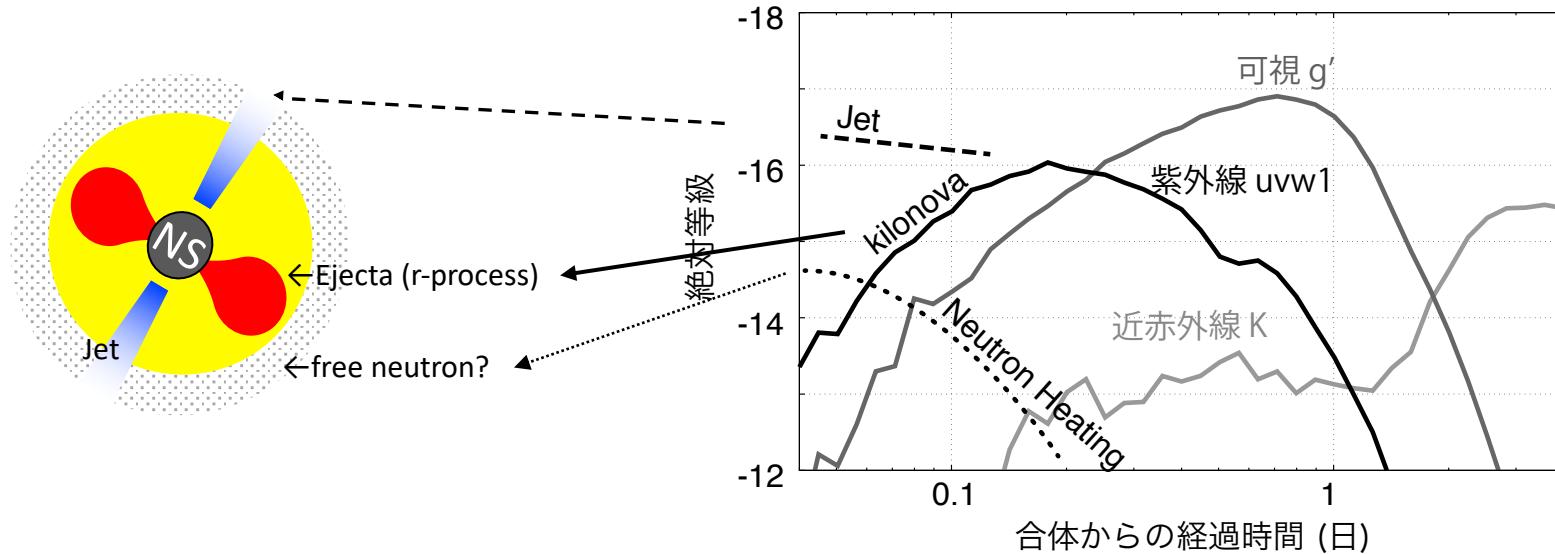
UVで明るい、地上観測との共同で温度が決まる

星周物質の分布が関連する現象

- ◆ ガンマ線バーストの残光
- ◆ 超新星残骸やパルサー星雲等の構造形成
- ◆ 宇宙線加速

②重力波とShortGRBのミッシングリンク解明

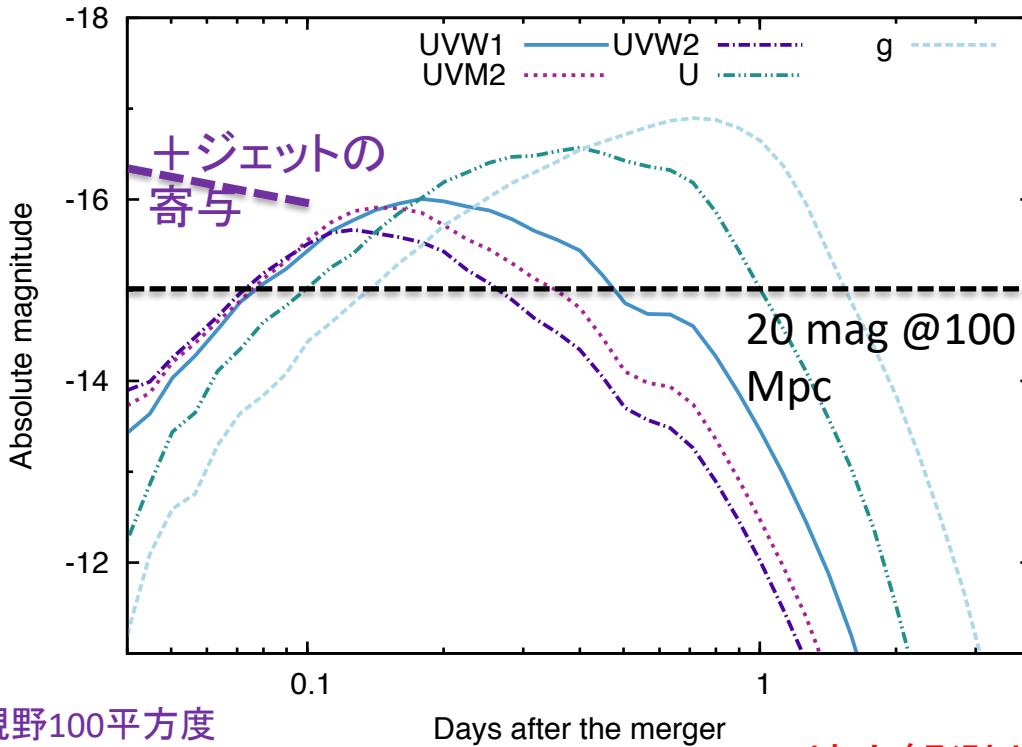
◆だれも見たことのない爆発からの10時間以内を見る



- r-プロセス元素合成の物理
- 放出物の速度分散・状態方程式への制限
- 相対論的ジェットの形成 ⇒ sGRBの正体解明へ

lightcurveはM田中さん提供

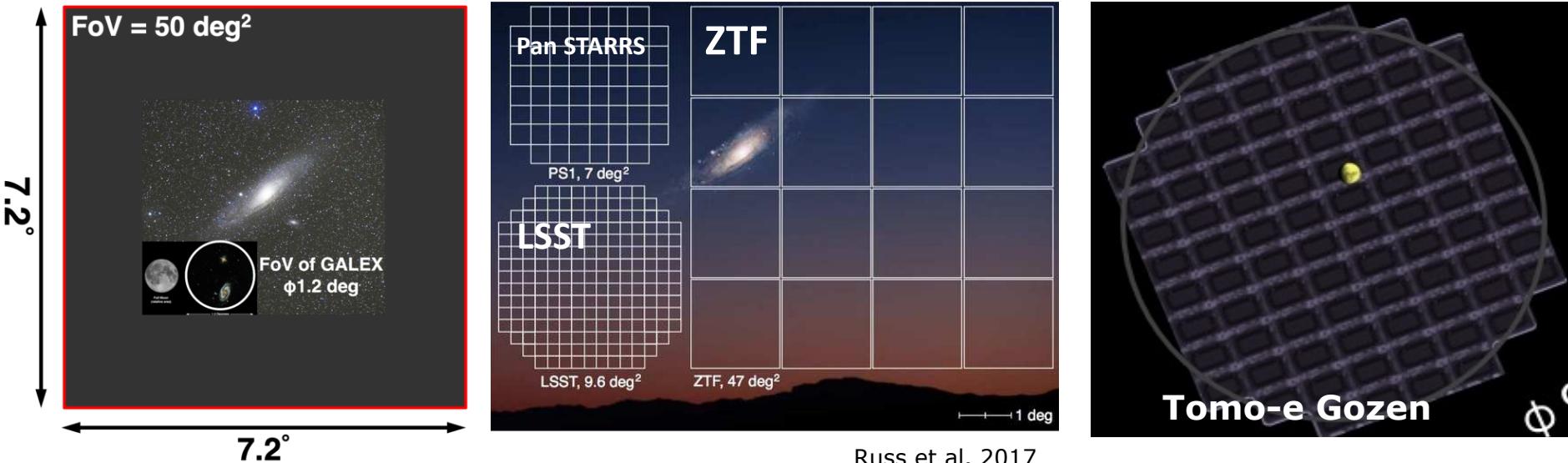
地上観測との比較（重力波天体）



地上観測より早く観測開始可能

視野サイズの比較

ZTF・Tomo-e Gozenの視野をフルカバー
⇒ 多波長同時観測が可能



ミッション要求

パラメータ	要求値	
観測波長域	紫外線 (< 300 nm)	超新星、重力波
視野	100平方度	重力波
サーベイ領域	400平方度	超新星
限界等級 (AB等級)	19等級 / orbit 20 等級 / 1時間	超新星 重力波
サーベイ観測頻度	1 時間	超新星
データリンク	観測から1時間以内	超新星、重力波

S.R. Kulkarni@Caltech からの要求 :

「“おもちゃ”にしたくなかったら画像を全部おろせ。」

(日本の超小型衛星界隈ではまだモールス使ってる人もいるんですが、、、)

ではどうやって実現するのか？？？

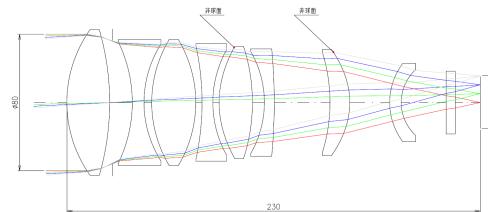
衛星システムの検討

観測装置の概念設計

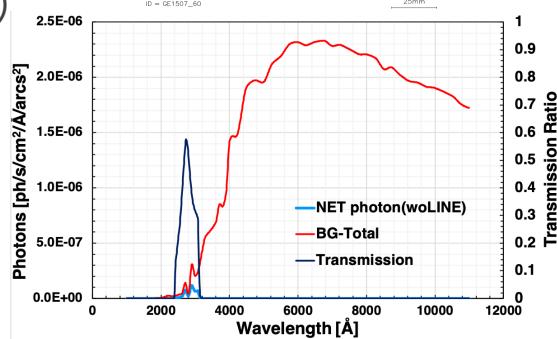
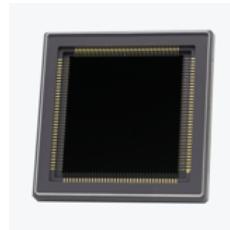
◆ 広視野紫外線望遠鏡システム

- 設計コンセプトは「**今ある技術で実現できる**」こと
- 光学系（ジェネシア）+ OptBlind UV フィルター（朝日分光）
 - 光学系の支持構造の環境試験は完了
 - フィルターは本年度試作

有感波長域250-300nm
300-1000nmで0.1%以下



- 紫外線センサ・読み出し系
 - **センサは市販品**（入念な環境試験済）
 - **エンジニアリングモデルが本日納品されます!!!**



- OBC・Storage・ソフトウェア
 - **JAXA革新1号でフライト実証済**

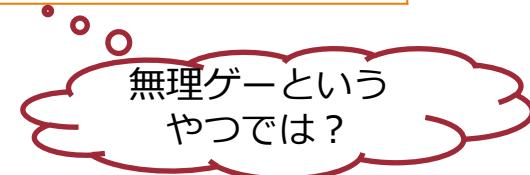


観測装置諸元

PARAMETERS	VALUES
口径	φ80 mm
焦点距離	180 mm (F 2.25)
波長帯域	250-300 nm @FWHM
可視光透過率	300~1000 nm全域で1000分の1以下
検出器	CMOS 2k×2k ($22 \times 22 \text{ mm}^2$)
ピクセルスケール	12.6 arcsec / pix
検出限界	20 MagAB (1800秒露光 @ 5σ)
センサ運用温度	-20 °C 以下
鏡筒温度制御	±1 °C 以内 (日陰600秒間中)
データレート	700 MByte / day
ミッションOBC	CPU 400MHz以上、RAM 512MB以上
ライト	座標計算、変動天体検知、全天体の簡易測光、
ソフトウェア	データ圧縮をフレーム当たり60秒以内完了
外形寸法	3U以内 (今は50kgバスとして4Uくらいを想定)
消費電力	10 W
質量	5 kg以下

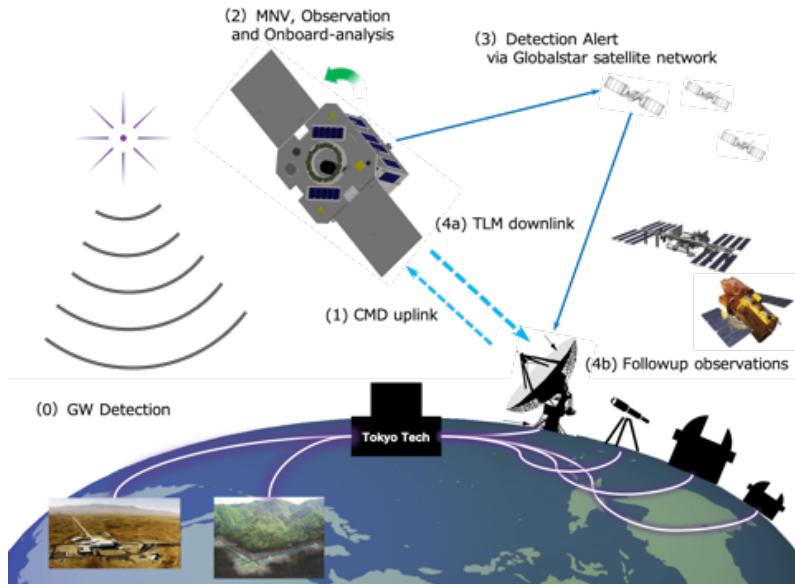
観測ミッションから衛星システムへの要求

PARAMETERS	VALUES
ペイロードサイズ	3U / 5kg
電力	ピーク電力10W
姿勢安定度	露光時間中10 arcsec @1sigma
温度環境	センサ部冷却：観測中 -20 °C以下 鏡筒温度安定度：600秒間中±1°C以内
画像データ転送量	1 GByte / day
ALERT遅延	up/downともに30分以内
観測時間	日陰中 (30min/orbit)
ミッション期間	2年以上
打ち上げ時期	同様の計画の中で世界で最初であること



衛星システムの検討

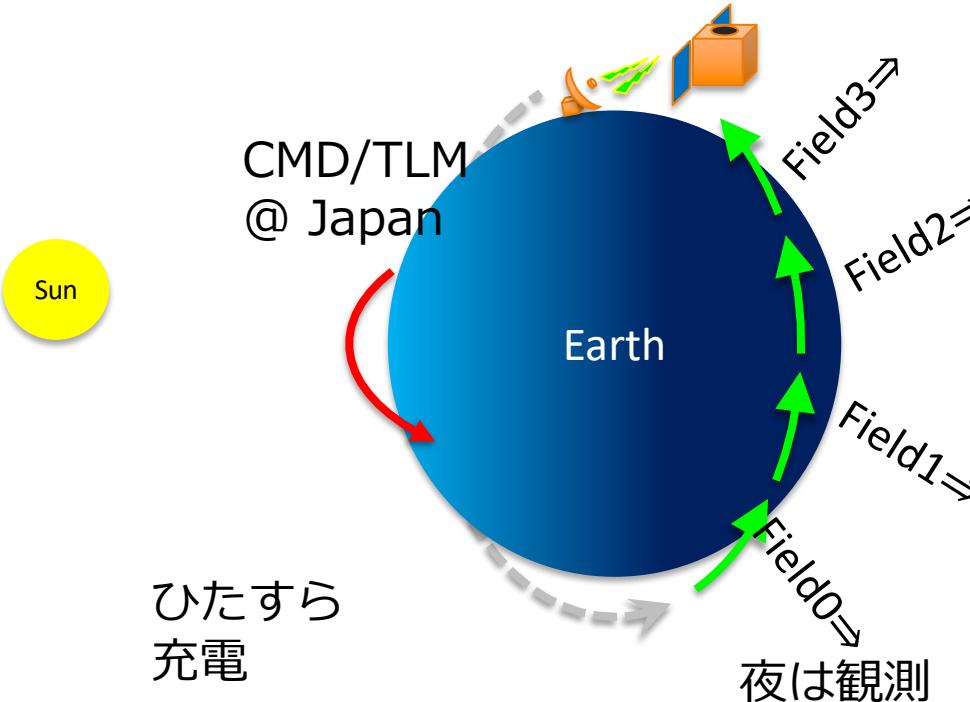
- ◆ 東工大ひばり（2021年打ち上げ）をベースとした50kg衛星バスと地上を繋いだ観測システム
 - ひばりから工学実験要素を省いた実用衛星（ミッション系以外はすべてリピート）
 - 電力・姿勢安定度・排熱・レイアウトいずれも6Uキューブより容易
 - 開発コスト・フライターチャンスは？？？



PARAMETERS	VALUES
衛星サイズ	50kg級バス（革新2号ひばりバス）
質量	~50kg
消費電力	メニナル22.2 W (Max 33.2 W)
電源	発電電力39W @ EOL 電池容量 85 Wh @ BOL
姿勢制御	制御方式：3軸姿勢制御 要求安定度：10秒角@1sigma(100 s) 角速度：1分以内に20度MNV完了
想定軌道	高度500km 太陽同期軌道（GALEXと同じ）
通信系	CMD/HK: S-band (Up 4kbps / Down 1Mbps) TLM: X-band (Down 10 Mbps) ALERT: Globalstar 700 Byte/connection
地上局	S-band: 東北大局・緊急時はKSATも使用 X-band: 東北大および海外局
データ処理系	データサーバ: 東大情報基盤センター データ解析: 3時間ごとに自動処理 速報配信: JGEM・OISTER（国内中小望遠鏡による観測チーム）およびGROWTH（Caltechを中心とした国際連携チーム）
ミッション期間	2年

観測シーケンス

ToO uplink



視野 : 50 deg^2

探査領域 : $50 \text{ deg}^2 \times 4$

到達感度 : 19.5 mag /orbit

20.5 mag /day

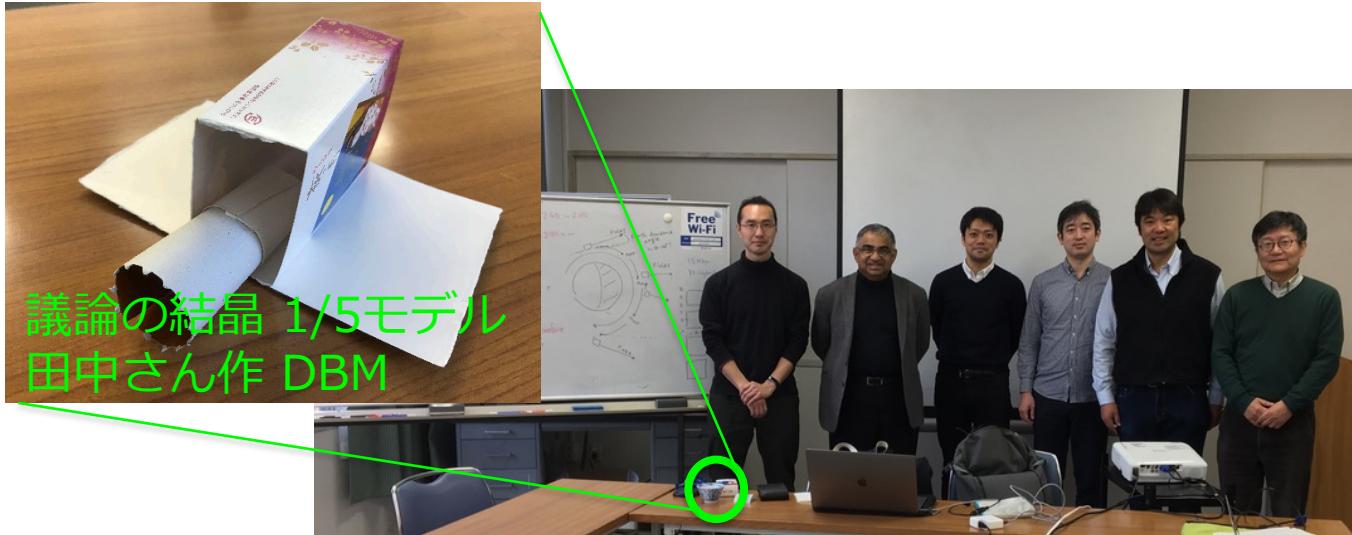
1視野集中なら $20\text{mag}/30\text{min}$

3週で次の視野へ移動

⇒ 年間 3400 deg^2 をサーベイ

- ◆ 年間20以上の重力崩壊SN
- ◆ 年間 0.4~16個のGW

紫外線衛星のミッション戦略検討会



期待される検出頻度

天体種	期待される検出頻度
重力崩壊型超新星爆発	
-星表面ショックブレイクアウト	1 個/yr (0.1日積分×200平方度 100 Mpc以内)
-星周物質ショックブレイクアウト	12 個/yr (1日積分×200平方度 200 Mpc以内)
重力波（中性子星連星合体）	
-GW170817を想定した場合	0.4-16 個/yr (理論モデルより1等級暗い場合)
-ジェットからの紫外線が無い場合	0.1-4 個/yr (理論モデルより2等級暗い場合)

- 近傍銀河である大マゼラン雲やM31を重点領域として集中的にサーベイ観測を行う。
- メインターゲット以外にも**Ia型超新星**、**新星**、**恒星フレア**、**潮汐破壊現象**等の検出が期待されており、ZTF, GROWTH, Tomo-e Gozenそして**OISTER**との連携観測を検討している。

実現へ向けて

- ◆ 2016: 紫外線望遠鏡を思いつく
衛星設計コンテストで設計大賞受賞
- ◆ 2017: NASAジェット推進研究所に売り込み
「俺の衛星用にセンサをタダでくれ」と言いに行く。
- ◆ 2018: 試験用カメラとOBCをJAXAの衛星に乗せてもらう
- ◆ 2019: ⇒打ち上げ成功！
JAXA/宇宙研に提案 ⇒ 不採択（宇宙研へクレーム）
MITに「受信アンテナ貸して」と言いに行く

ここで緊急事態発生!!!



紫外線サーベイをめぐる世界の情勢が激変

◆ Caltech/JPL イスラエル : ULTRASAT

- NASAの100億円規模プロジェクト提案するも予算獲れず
- **2019イスラエルが単独で同一コンセプトの衛星を国家プロジェクト化
2023 Q4打ち上げを私の目の前の発表@COSPAR2019 Telaviv**

◆ NASA/GSFC:GUCI

- 2014年頃に6Uキューブサットを提案するも予算獲れず
- **2020年3月 NASA70億円規模プロジェクトの予備調査費獲得**
- 12U キューブサット 2機による編隊飛行観測計画

◆ Caltech/JPL : 重力波探査紫外線衛星（名無し）

- NustarチームのFionaがPIとなって、紫外線観測衛星を提案
- **2020年のNASA100億円規模プロジェクトは予算獲れず**

◆ NASA/JPL: LUVOIR

- 1000億円規模の大型計画。上記衛星はそのための技術開発ステップでしかない。



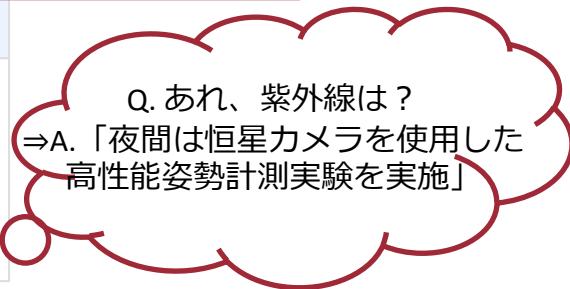
エルサレム観光中の図

もはや、待ったなし。二番煎じでは国家プロジェクトには絶対に勝てない。

ロケット・衛星開発費の調達

2020年 5月JAXA 革新的衛星技術実証3号機 ピギーバッグ打ち上げ枠獲得

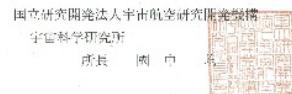
テーマ名称	/提案代表者	主な選定理由
超低コスト高精度姿勢制御 バスによるマルチスペクトル 海洋観測技術の実証	東京工業大学 谷津 陽一	高精度姿勢制御とマルチスペクトルカメラを組み合わせた地球・海洋観測技術の実証で、デタリ利用サービスを見越したシステム構築を行つており、上流から出口までの実証を行う意義は高い。新規ビジネスを見据えた提案で、今後の衛星関連産業の活性化が期待できる。



2020年5月 文科省 宇宙航空研究開発委託経費 不採択

2020年8月JAXA 小規模計画に採択

2019年度推進 0826003
2020年8月26日



2019年度小規模計画公募の評価結果について
(通知)

記
標記について、貴殿より「2019年度小規模計画」に応募のあった提案について、
宇宙科学研究所長の下に設置された評議会において慎重に評議した結果、下記のと
おり「採択」となりましたので、ここに通知いたします。

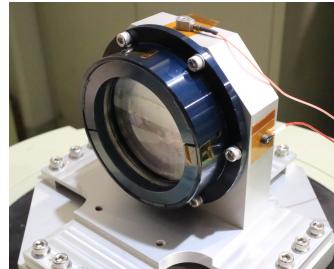
【提案計画名】紫外線時間領域天文学のための超広視野検査衛星

既にJAXAとはフライト・スケジュールの
調整で神経戦を展開中。

開発状況

◆ ミッション系

- 光学系・支持機構の環境試験
- フォーカス調整機構の開発

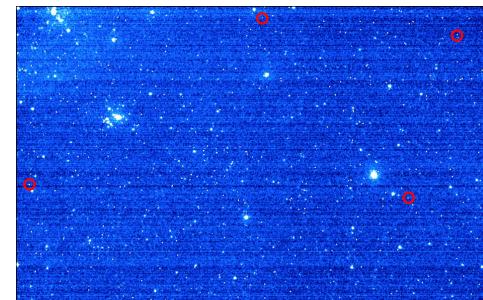


◆ バス系・OBC・Flight Software

- RAPIS-1/DLASで軌道上実証中
- 機上恒星識別・精密座標計算技術を獲得
- 民生CMOSの軌道上劣化計測中
- バス系EMはほぼ調達完了



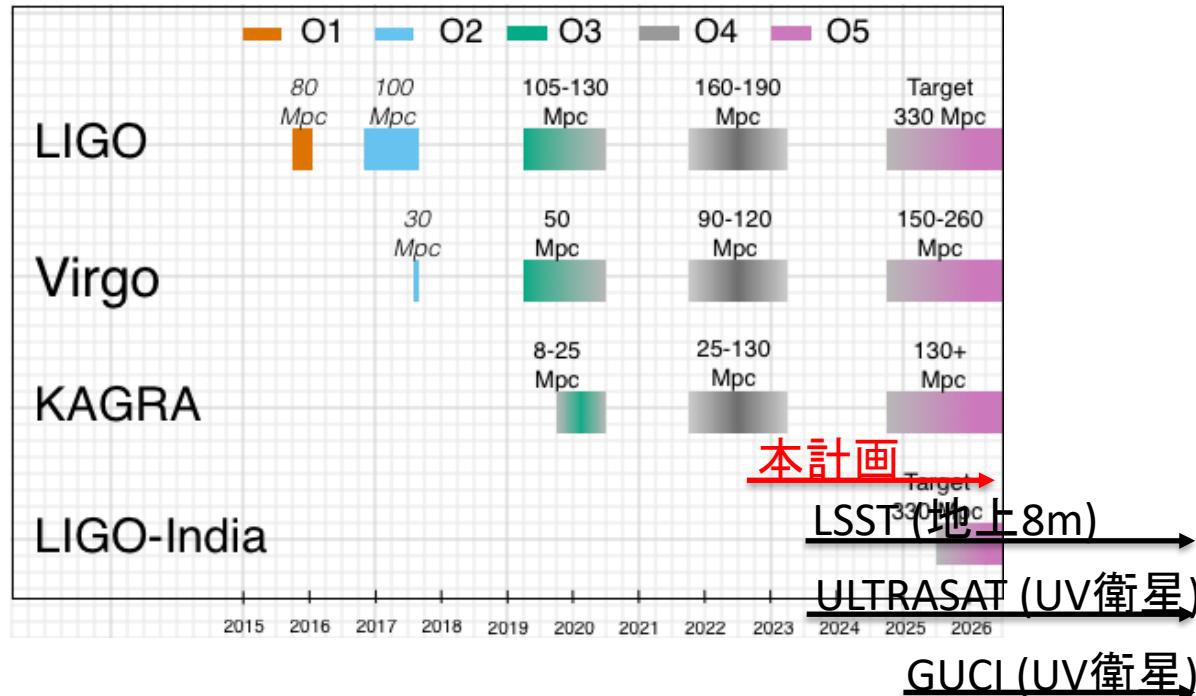
❖ 最新データによるセンサー劣化の確認



2019年3月12日 日陰 STT-X系側で撮影した画像
画像上を動作しない点源が3月7日の画像と比較して増加している

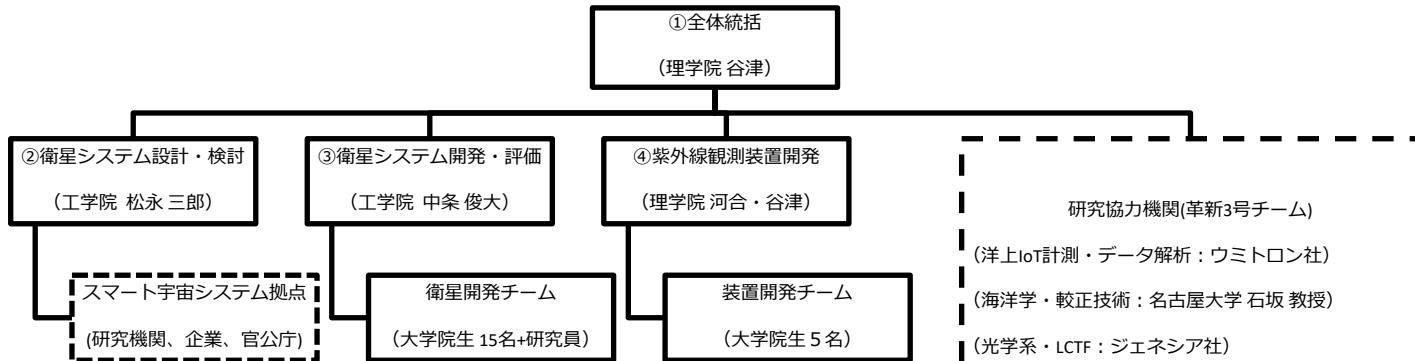
ここ数ヶ月は最近はビジネスチームと営業したり

重力波観測と他計画の予定



<https://www.ligo.org/scientists/GWEMalerts.php>

開発体制



◆ 紫外線観測

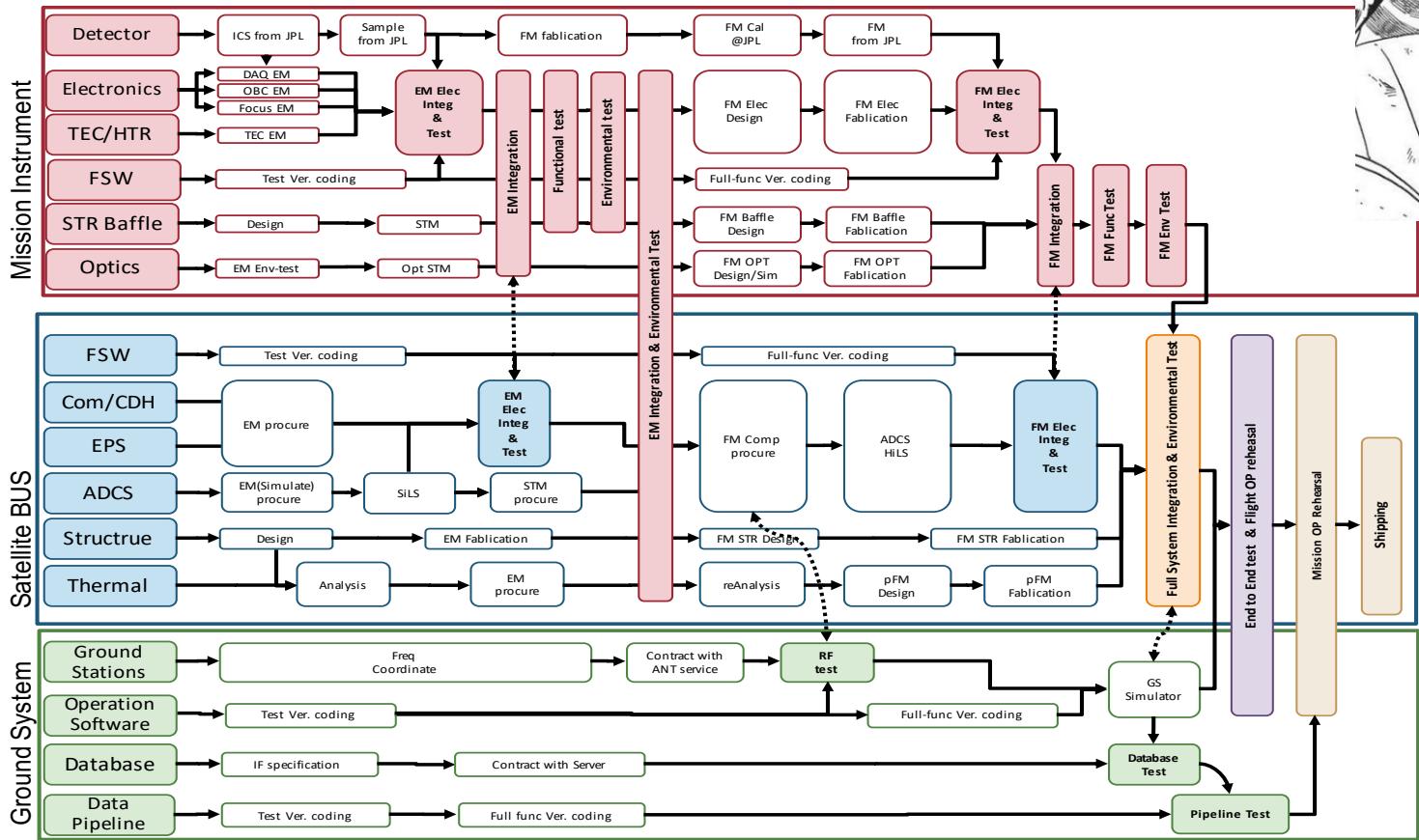
- 設計・開発：東工大（河合・谷津）
- 地上処理・理論：甲南大（富永）、東北大（田中）、東京大学（諸隈）、IPMU（鈴木）
- 設計・試験：ジェネシア（武山・江野口）

◆ 衛星バス

- 設計・開発：東工大（松永・中条）
- 地上局ネット：東北大（坂本）
- 姿勢・システム設計アドバイザ：iNET(堀内・小林・卯尾)
- 熱・構造アドバイザ：テクノソルバ（中村）・JAXA（岡本）

クリティカルパスの
サポート体制を確保

開発フロー



これかうのが
地獄だ…

開発スケジュール

革新2号/ひばり打ち上げ?

紫外線衛星打ち上げ?

FY		FY2020										FY2021										FY2022										
Month		10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
システムイベント		▲ミッション確定	△SDR	△PDR	▲CDR	▲電気噛み合わせ	▲コンボIF確定	▲コンボ引き渡し	▲フィットチェック	▲FM組立	▲E2E	△Shippin	△Launch	Phase-B/C	PM設計・部品手配	Phase-D	PM製造	PM単体試験	PM組立	PM SYS試験	Phase-E/F	初期	△PQR									
BUS		STR	▲仕様確定	△EM 電池手配	△FM Design	▲FM 完成	△FM STR手配	▲FM 完成	△FM 電池手配	▲FM 完成	△FM ADCS test	Debug	Debug																			
地上観測		SubSystem	▲仕様確定	▲IF確定	▲PM完成	▲PM完成	▲PM完成	▲PM完成	▲PM完成	▲PM完成	▲PM完成	▲PM完成	▲PM完成																			
紫外線観測		SubSystem	▲仕様確定	▲IF確定	▲実装	▲TLM試験	▲通信試験																									
Ground		GS	▲仕様確定	▲免許申請	▲仕様確定	▲通信試験	GS operation Test																									
Data Pipeline																																

- ◆ コンポーネントのフライテ品を2021年度内に完了
- ◆ 22以降ソフトウェア・地上処理系開発に専念



まとめ

- ◆ 広視野紫外線サーベイ衛星を開発中
- ◆ 2022年のフライトが確定。ロケットに置いていかれなければ世界初
- ◆ 期待される成果
 - 超新星爆発 (10イベント/年) → 大質量星の最後の10年間の解明
 - 中性子星合体 (0.4-40イベント/年) → 相対論的ジェットの形成・sGRBの正体解明
 - その他、近傍の爆発天体
- ◆ 超小型衛星ゆえ、この衛星単独ではサイエンスは完結しません。
OISTERの皆さんと連携してマルチメッセンジャー・時間領域を実現
- ◆ ToO・同時観測等も検討中
- ◆ 上記以外のサイエンスについても是非一緒に議論させてください!!