

広視野・近紫外線探査衛星 ひばり計画

谷津 陽一 (東工大・理)

小澤俊貴、針田聖平、吉井健敏、河合誠之 (東工大・理)

富永望 (甲南大)、田中雅臣 (NAOJ)、諸隈智貴 (東京大学)

S. R. Kulkarni (カリフォルニア工科大)、坂本貴紀 (青学大)

N. Vasquez (エクアドル工大)、俵京佑、松永三郎 (東工大・工)

他 ひばりチーム

研究背景

◆ X線天文学の現状

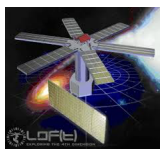
- 大型化・精密化 ⇒ 狭視野・小回りが効かない
- 宇宙へ行くのがそもそも辛い（打ち上げ・姿勢・熱・電力・通信）

◆ 我々の挑戦

- 超小型衛星による観測アイデアの早期実現
- 安価・短期開発・フライト機会多数

◆ X線でのタイムドメイン天文学

- X線光学系 ⇒ 広視野化困難
- コリメータ ⇒ 広視野化すると感度・位置決定精度低下
- 競合は2tクラス



LOFT



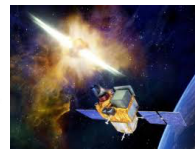
eROSITA



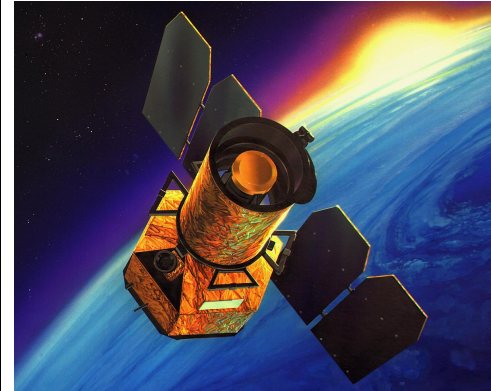
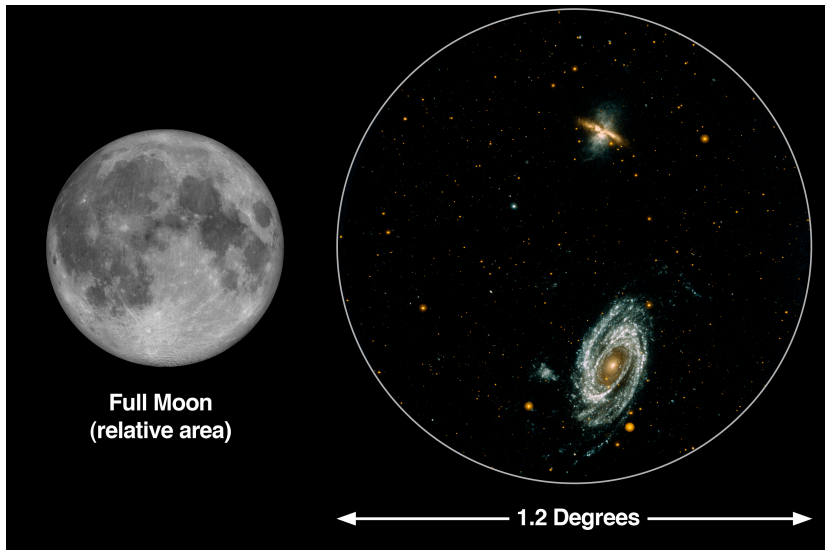
HXMT



Einstein Probe



SVOM



浅く広い近紫外線サーベイ

1視野10平方度以上

22 Mag(AB)@NUV

ケイデンス 100 平方度/hour

どうして紫外線

◆ 我々にできること

- 3~4年で衛星を打ち上げること
- 大きさは50x50x50cm³ 以下
- 装置は10kg, 10W, 100MB/day

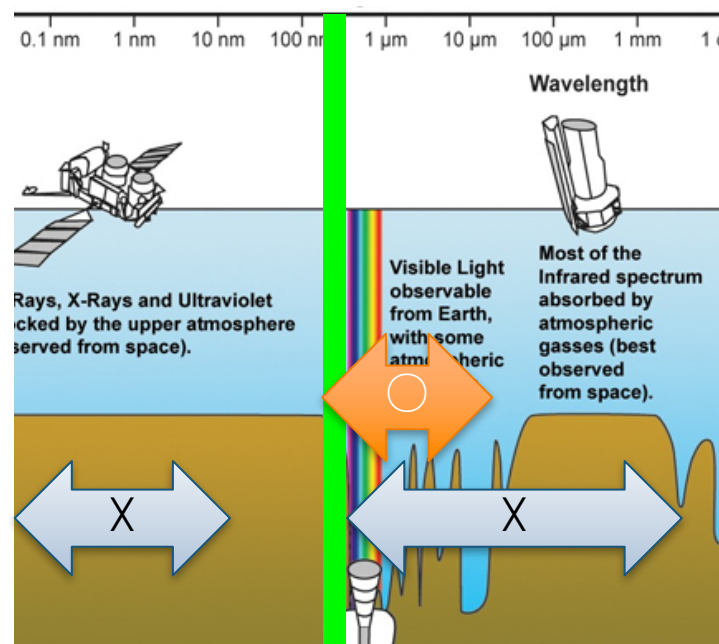
小さくても広視野・高感度 ⇒ 光学系
短期開発 ⇒ ガラスレンズを使える帯域

◆ 波長帯

- 地上から見えてはダメ
- 大型衛星がいるところもダメ
- 既存技術でないと3年で作れない

近紫外線 (200~300 nm)

- 地上から見えず、広視野サーベイ無し、CCD・レンズ使用可
- 5年以内に実現できれば小規模でも世界初のデータを取れる



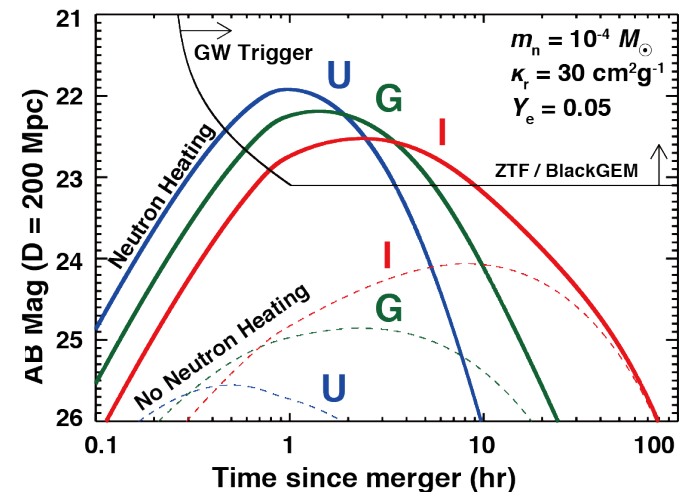
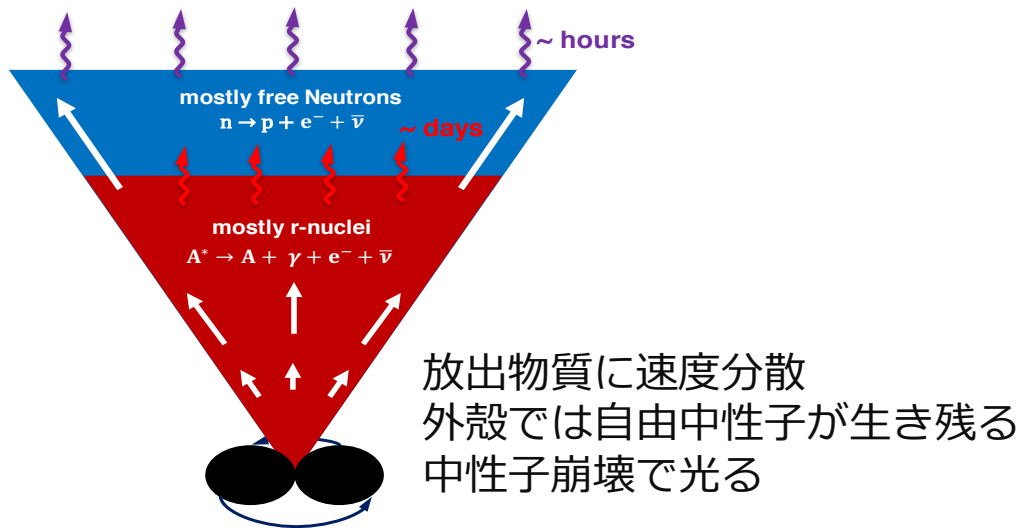
ターゲット（１）重力波対応天体

◆ NS-NS merger

- r-プロセス元素生成
- kilonova (macronova)

◆ 紫外が出るというモデルもある

- free neutron beta-decay (Metzger et al. 2015)



外殻が光るため早く明るくなる $\Rightarrow$ 斥候衛星に最適？

紫外線の情報は中性子星のEOS、元素合成の過程に制限を与える

Summary: UV emission from NS mergers

by M. Tanaka

	Timescale	Wavelengths	AB Mag @ 100 Mpc	AB Mag @ 200 Mpc	Note
Early thermal	~ 15 min	UV	~26	~27.5	Too rapid cooling
Early non-thermal	~ 1 sec	UV	~>24 @ 1hr	~>25.5 @ 1hr	Depends on ambient density
Radioactivity (main ejecta)	~10 days	Opt-NIR	~21	~22.5	Not UV
Radioactivity (free neutron)	~ 1 hr	UV	~20.5	~22	*Uncertain* assuming $M \sim 10^{-4} M_{\text{sun}}$

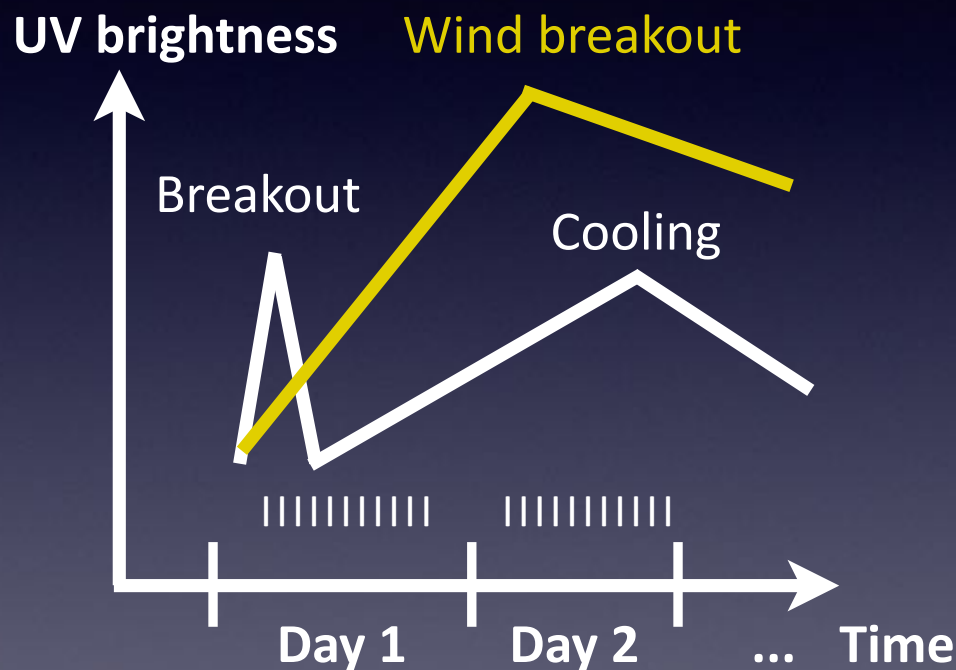
Survey with Hibari: 22.5 mag -100 deg² in 1 hr

Survey with Hibari

22.5 mag - 100 deg² every 1 hr

=> ~ 100 supernova detections / year

by M. Tanaka



Uniqueness

- UV wavelength
- Continuous coverage

More interesting with

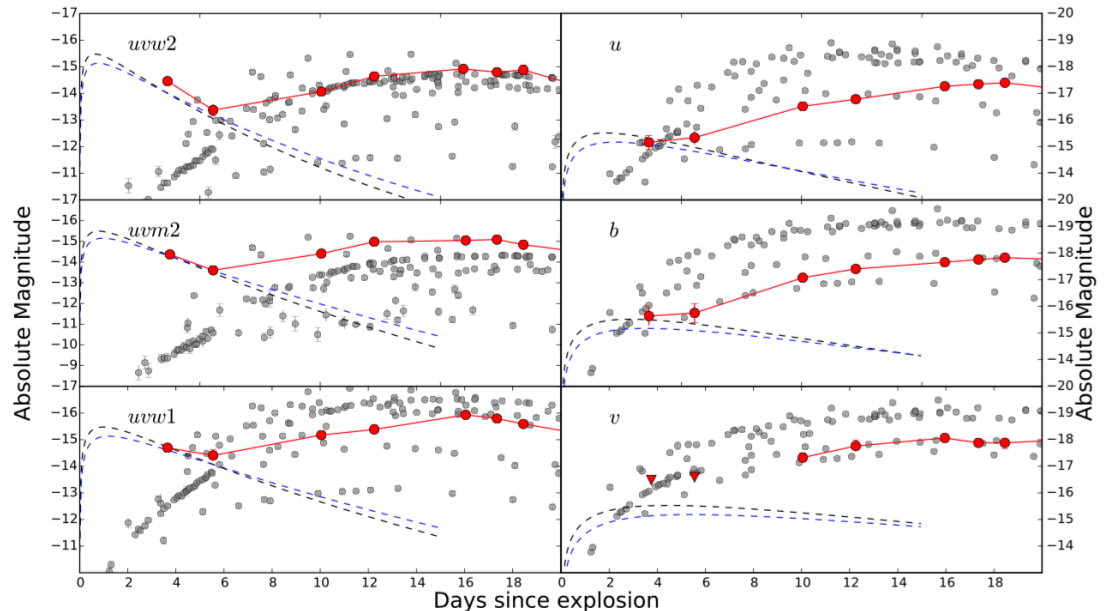
- coordinated (optical) surveys from the ground
- Rapid spectroscopy

=> Unique probe of the last stage of stellar evolution

そのほか

◆ Type-Iaからの紫外線パルス

- 伴星と放出物との相互作用による放射？



Yi Cao et al. 2015

◆ そのほか

- 潮汐破壊現象
- ニュートリノ放射源
- Active Galactic Nuclei, etc.
- 大気からの放射 (BG評価 ⇒ 後続ミッションへの知見)

どの現象を観測するにしても紫外線に加えて、多波長での追観測が重要

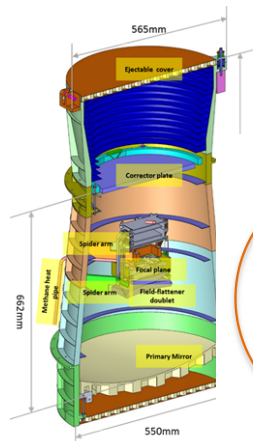
紫外線帯の競合相手

from Wikipedia

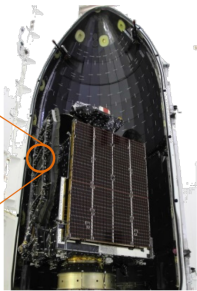
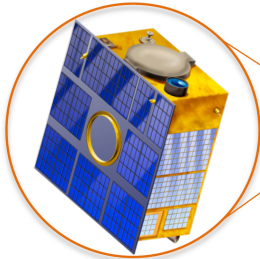
- ◆ 望遠鏡はあるが広視野探査は少ない
- ◆ 最近のプロジェクト

- GALEX ($\Phi 1.2^\circ$)
- UVOT/Swift ($17' \times 17'$)
- ASTROSAT ($28'$)
- **ULTRASAT (210 deg^2 21.5mag 900s)**

これまでのミッションは
狭視野

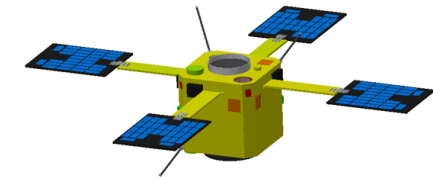


Caltech/JPL/Israel



UV-CCD

Demo in Space



Tokyo Tech small satellite team

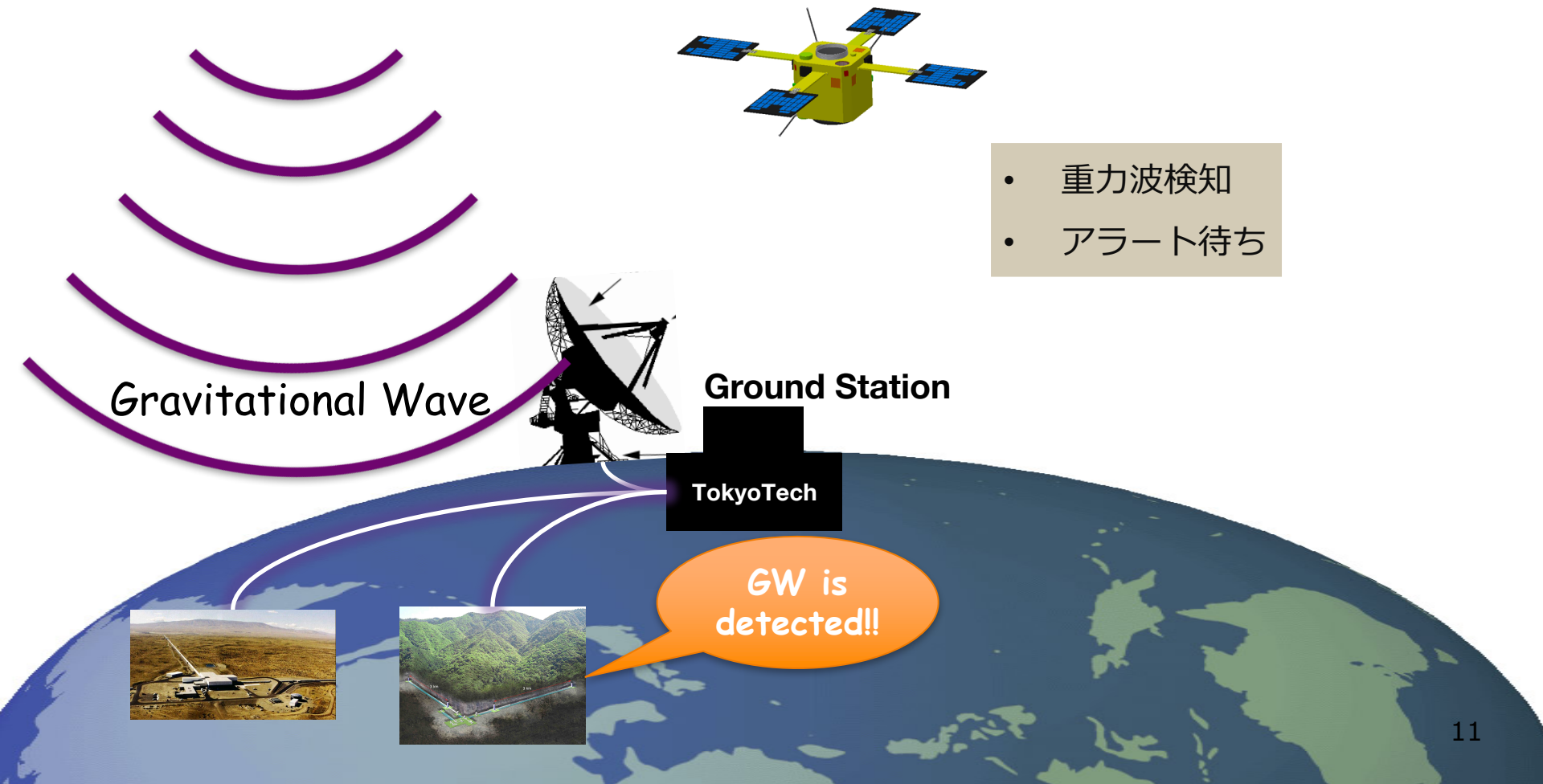
Ultraviolet space telescopes [edit]

- [Far Ultraviolet Camera/Spectrograph on Apollo 16](#) (April 1972)
- [ESRO - TD-1A](#) (135-286 nm; 1972-74)
- [Orbiting Astronomical Observatory](#) (#2:1968-73. #3:1972-81)
- [Orion 1 and Orion 2 Space Observatories](#) (#1:1971; 200-380 nm spectra; #2:1971-74)
- [Astronomical Netherlands Satellite](#) (150-330 nm, 1974-76)
- [ESA - International Ultraviolet Explorer](#) (115-320 nm spectra, 1978-96)
- [Astron-1](#) (1983-89; 150-350 nm)
- [Glazart 1 & 2 on Mir](#) (in [Kvant-1](#), 1987-2001)
- [EUVE](#) (7-76 nm, 1992-2001)
- [FUSE](#) (90.5-119.5 nm, 1999-2007)
- [ESA - Extreme ultraviolet Imaging Telescope](#) (on [SOHO](#) imaging sun at 17.1, 30.1, 44.7, 86.4 nm)
- [GALEX](#) (135-280 nm, 2003-2013)
- [ESA - Hubble Space Telescope](#) (Hubble [STIS](#) 1997-115-1030 nm) (Hubble [VIS](#) 1997-115-1030 nm)
- [Swift Gamma-Ray Burst Mission](#) (170-650 nm spectra, 2004--)
- [Hopkins Ultraviolet Telescope](#) (flew in 1990 and 1995)
- [ROSAT XUV](#)^[2] (17-210eV) (30-6 nm, 1990-1999)
- [Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer](#), 1999-2007
- [Galaxy Evolution Explorer](#), 2003-2012
- [Public Telescope \(PST\)](#)^{[3][4][5]} (100-180 nm, Launch planned 2019)
- [Astrosat](#) (130-530 nm, launched in September 2015)

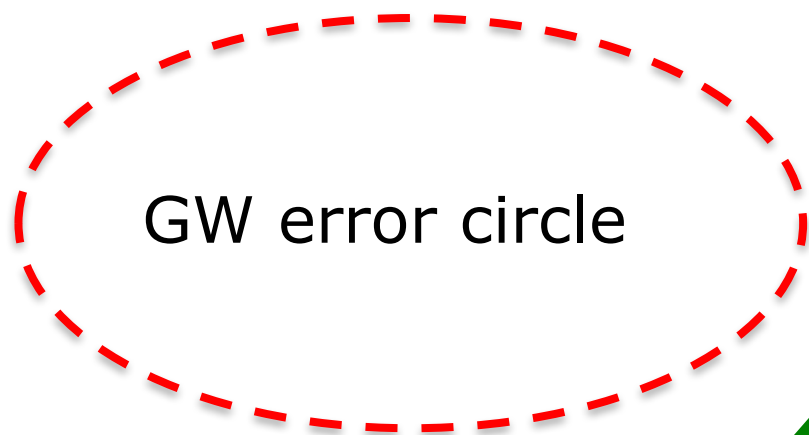
重力波(一番要求がきつい)に対応できそうなのはULTRASATのみ

- ULTRASATチームではセンサの実証機会を欲していた
- 我々はバスは設計できるが、センサを探していた

Mission Sequence: Arrival of Gravitational Wave

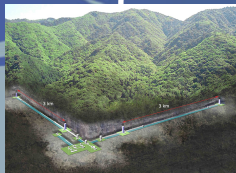
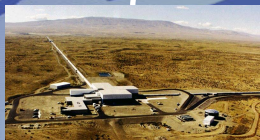
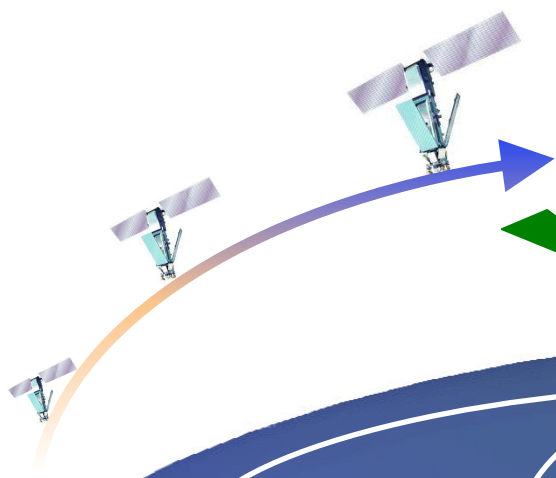


Command uplink for follow-up Obs

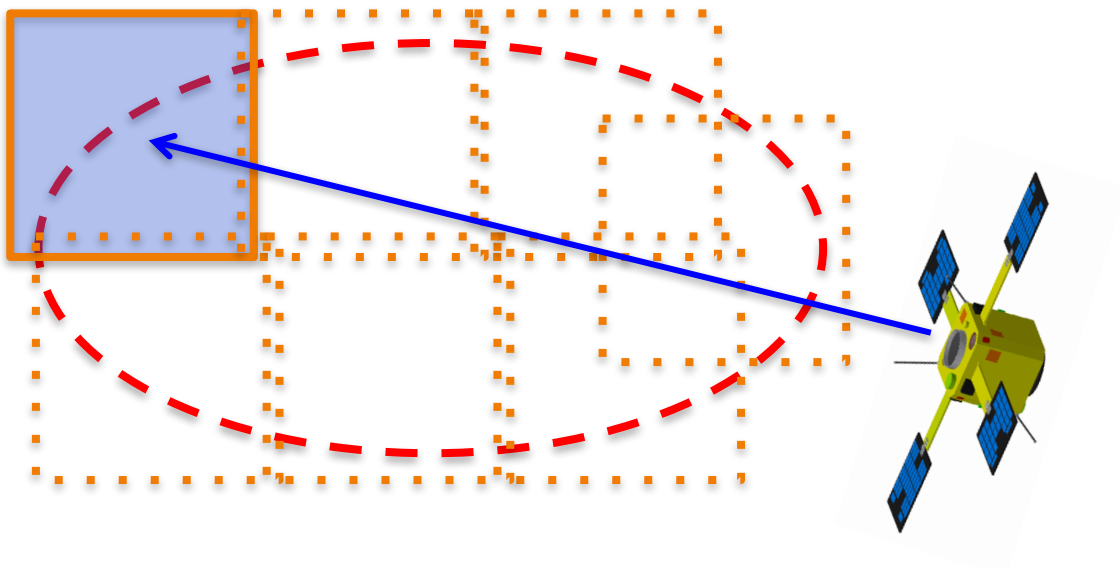


GW error circle

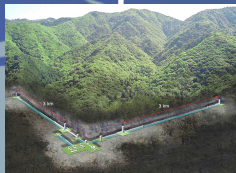
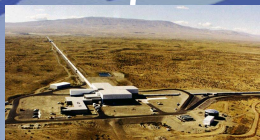
- 観測コマンド送信
- 条件：できるだけ早く
- 常時接続が要求される



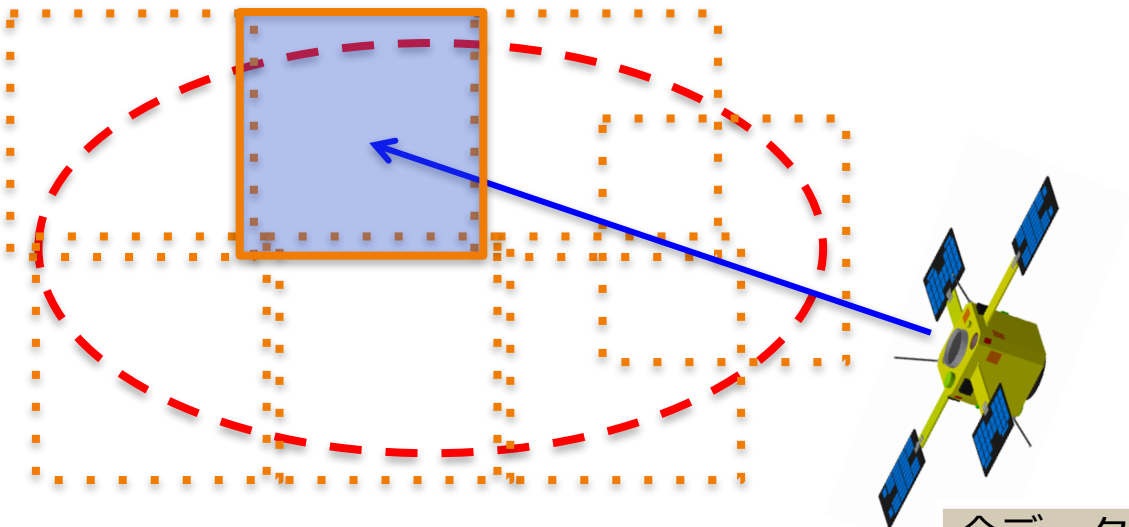
Tiling observation #1



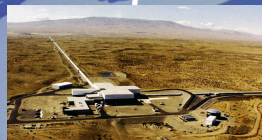
コマンド受信後、即回頭して観測開始
即時観測開始・タイリング観測には高速姿勢制御が必要



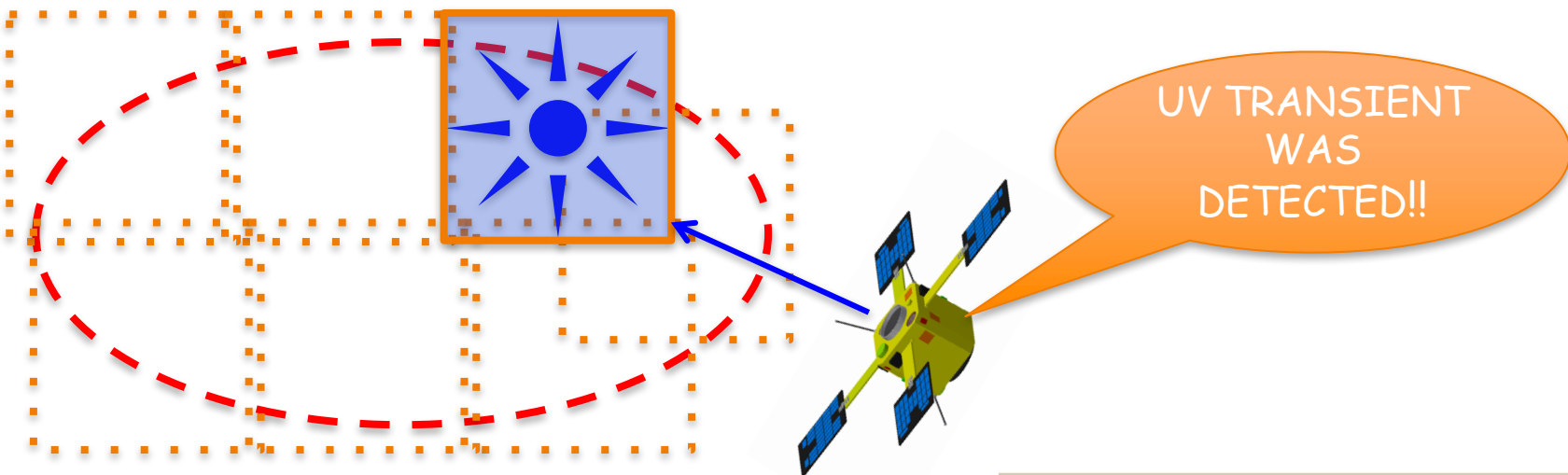
Tiling observation #2



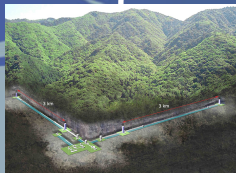
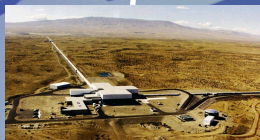
全データの即時転送は不可能
⇒ 機上での自動解析が必要
(リダクション・変動天体検知)



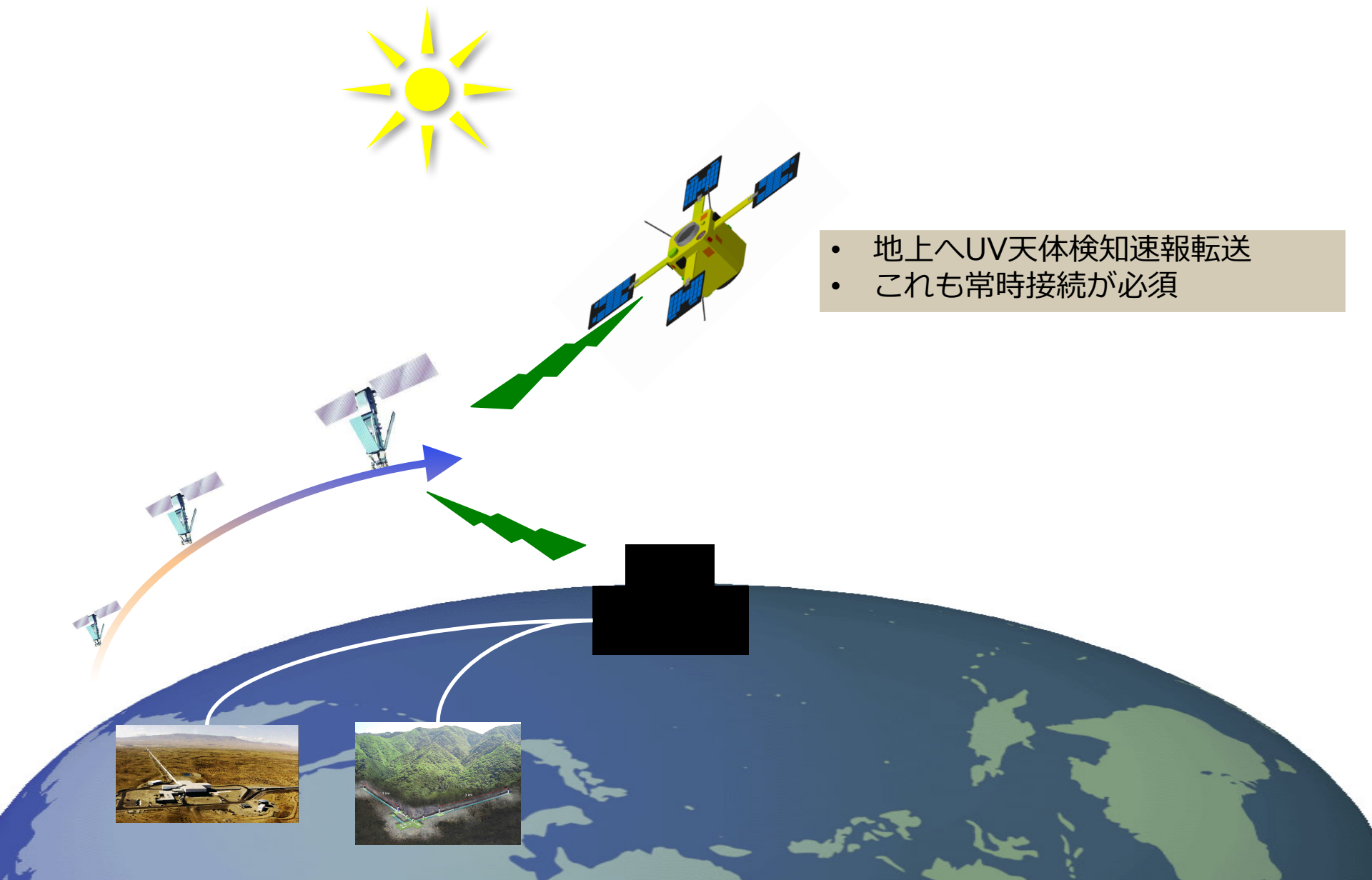
Tiling observation #3



情報抽出：
時刻・明るさ・位置等



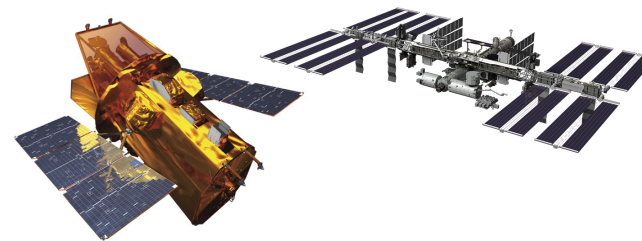
Alert to the Ground station



Multi-messenger astronomy

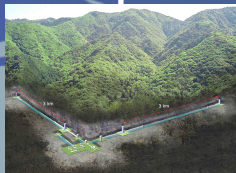
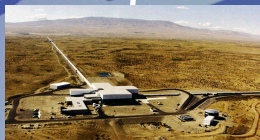
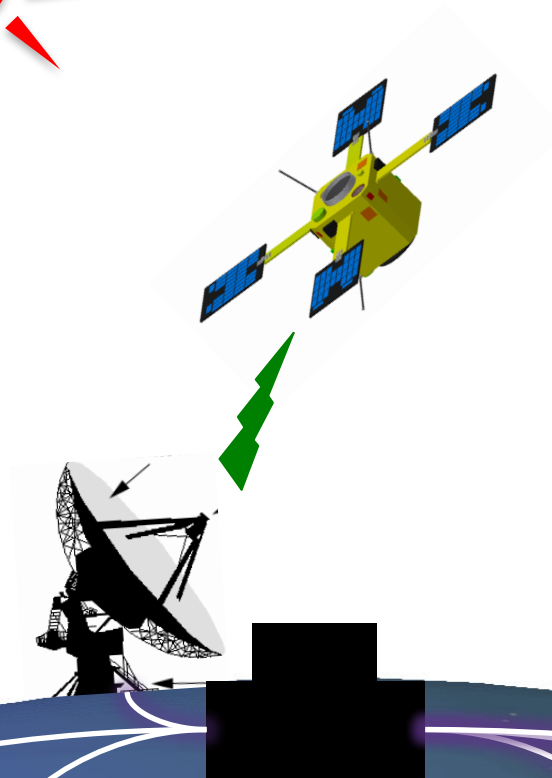


Satellites for X, γ , UV



地上望遠鏡

-GROWTH
-JGEM



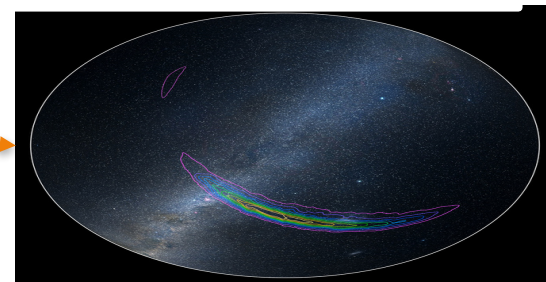
ミッション要求

一番条件の厳しい重力波天体の検出を目標とする：

> 1 NS-NS merger/yr (仮定10 NS merger yr⁻¹)

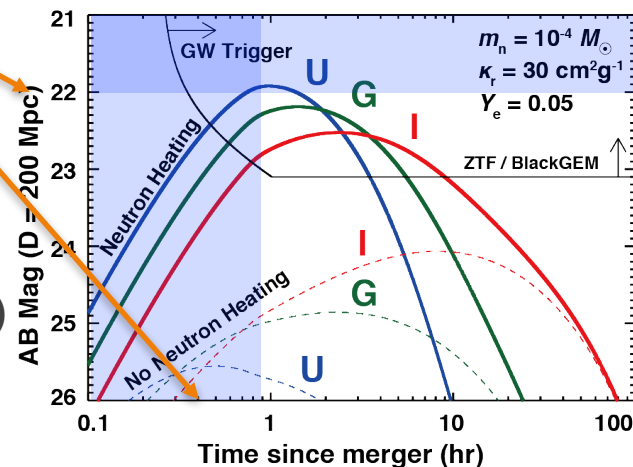
◆ ターゲットの特性 in NUV (中性子加熱あり):

- Error-circle: > 100 deg²
- Rise time: < 1 hr
- Flux: > 22 mag
- Position Accuracy: < 10"



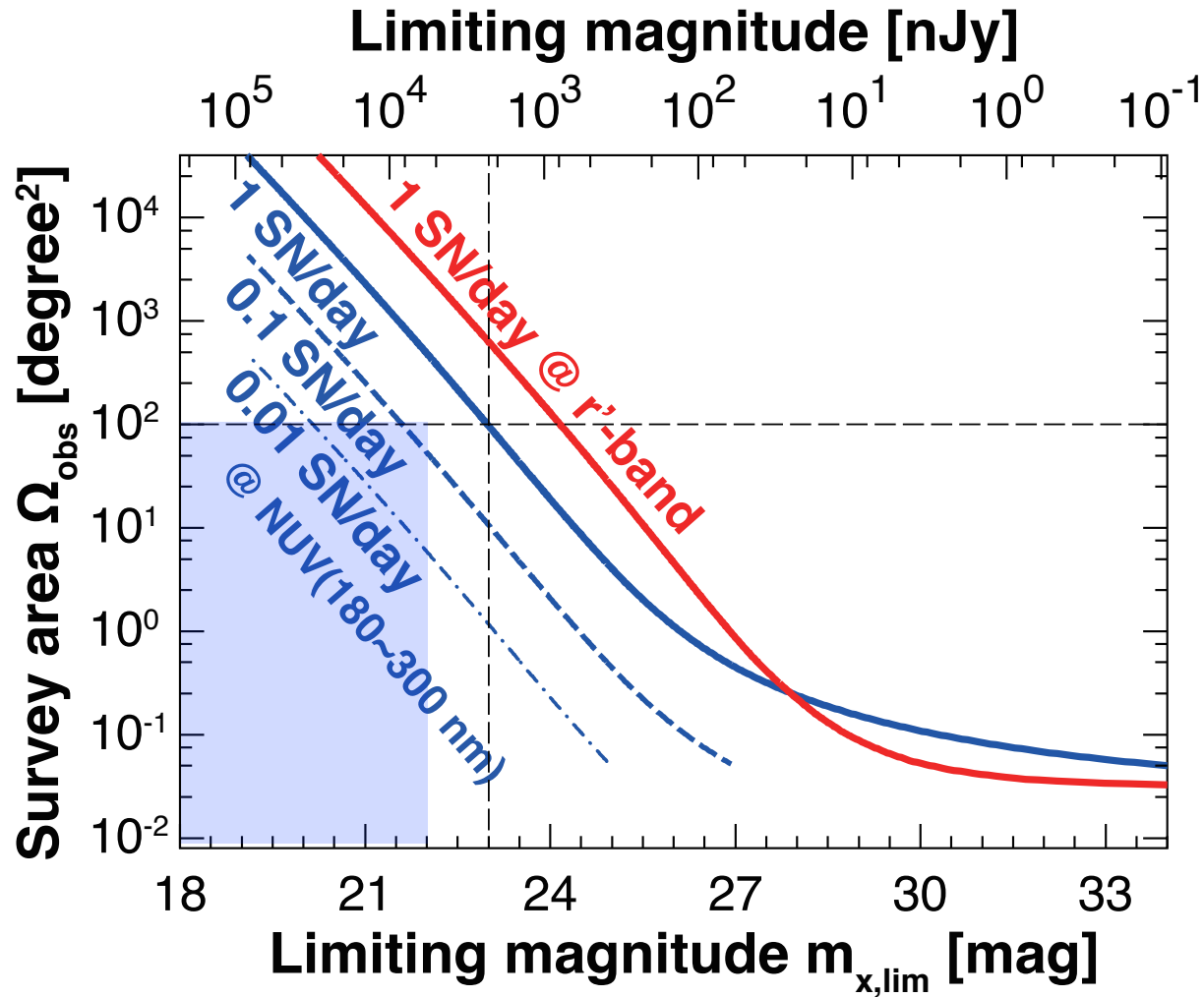
◆ ミッション要求:

- 検出限界: > 22mag
- ケイデンス: > 2 cycle/hr
- 露光時間: < 0.5 hr / (100deg²/FoV)
- 観測継続時間: > 1 hour (電池のみで駆動)
- 速報の遅延許容: < 30 min



- 広視野で22 magを検知できる光学系を搭載する
- 姿勢安定度は~10"
- タイリング観測のため姿勢変更は速いほうが良い
- 低速でもよいから常時通信できること

Shock Breakoutを探すと...



Based on Tominaga et al. 2011

重力崩壊型超新星が毎月3個以上？

センサ選定

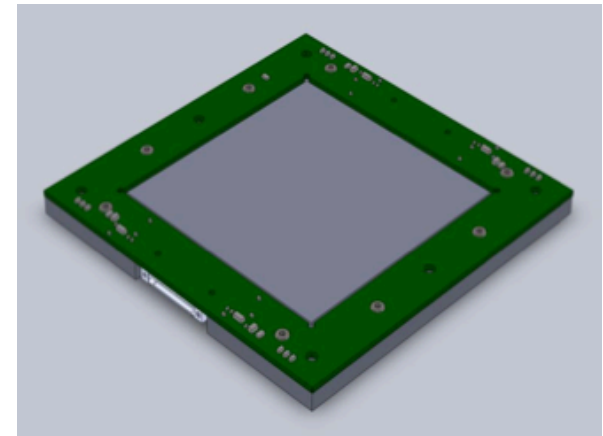
◆ ミッション要求から...

- 裏面照射 CCD or CMOS
- 広視野のためラージフォーマット
- Q.E. > 60-80% @NUV

Detector	Size	QE@UV	Rad-hard	Support
Canon CMOS	○	×	△	△
SONY CMOS	○	×	×	×
CCD by Hamamatsu	△	○	△	○
E2V CCD	○	○	?	?
Caltech CCD	○	○	○	○

◆ 筆頭候補: Caltech CCD

- 画素数: **2k x 2k pixels**
- サイズ: **31mm x 31mm**
- Q.E. : **60~80@NUV(BI)**
- 暗電流: **3 e⁻/pix/hour@-110°C**
- 読み出し雑音: **2 e⁻ (RMS)**



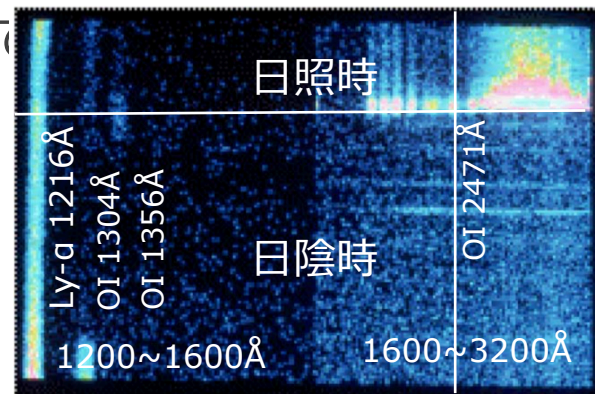
ULTRASAT のプロトタイプスペアを提供してもらえる
(性能は十分)

検出限界の見積もり

◆ UVOT/Swift (Φ300mm) の情報を基準として

◆ ひばりの場合...

- 口径: 200mm (バスからの制限)
 - 透過率: 70% (Requirement)
 - Q.E.: 80% (Caltech's UV-CCD)
 - 雑音:
 - 読み出し雑音(RMS): **15.5 e- (5s x 60 frames)**
 - 暗電流@-30°C: **790 e-/pixel/300s**
 - 大気光 (airglow ← GALEXの情報から...):
 - Airglow(衛星の地方時依存性): **~78.6** [ph/s/cm²/str/Å] (-6<L.T<+6h)
 - Airglow(太陽角依存性): **~675** [ph/s/cm²/str/Å] (120<S.A.180)
 - 黄道光: **~800** [ph/s/cm²/str/Å] (黄道以外)
- => **97 e-/pix/300s(日陰) / ~ 1000 e-/pix/300s (日照)**



200-300 nm, 300s露光で

⇒ **22.5 mag (日陰時)**

⇒ **< 21.6 mag (日照時)** (ただし、理想的な長波長カットを仮定)

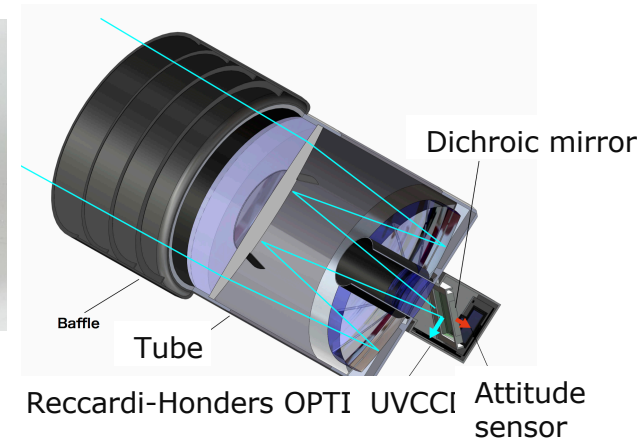
光学系の設計（妄想）

◆ ミッション要求とバスの制約から：

- 主鏡口径： $< \Phi 200 \text{ mm} \Rightarrow 22$ 等を検出するための露光時間 300 s 以上
- 視野： $> 17 \text{ deg}^2 \leq 100 \text{ deg}^2 \div (30\text{min}/300\text{s})$
- 焦点距離： $< 430 \text{ mm}$ (CCDサイズと視野から)
- PSF： $15\mu\text{m}$ ($\sim 2 \text{ pixel}$ $\Leftarrow$ 宇宙線と区別するため)

◆ ベースとなるデザインの選定：

- 最重要課題：全長が短いこと (40cm)
- $\Rightarrow$ **Riccardi-Honders**光学系
- D200mm (F3.0) / 80万円



◆ 改修案

- 硝材変更 BK7 $\Rightarrow$ 紫外線グレード熔融石英
- 短焦点化 600mm (10平方度) $\Rightarrow 430 \text{ mm}$ (20平方度・ちょっと厳しそう)

鏡筒：熔融石英を用いて透過率70%@200~300nmは行ける見通し

衛星側の熱・機械環境を要求されている状態（ロケット決まってないけど）

フィルター：ダイクロイックミラーの設計を開始（今日見積もりが来る予定）

データ量

◆ Alert(uplink) / Detection Notice(downlink)

- Time : 24 bit
- Coordinate: 12 bit x 2 (x 5 points)
- Magnitude: 8 bit

Total: ~146 bit (~18 Byte)



イリジウム衛星回線等の利用（これもチャレンジングである）

◆ 画像データ

- Rawデータ: 2064×2046 pixel × 16bit = 8 MB/frame + Header
- 重ね合わせ: 10 sec × 6 frame (& Cosmic-ray subtraction)
- 画像の切り出し
 - 天体数: 5~10 (候補天体 + 参照星)
 - 切り出しサイズ: 50x50 pixel (5 kByte/sub-region)
 - ヘッダー: ~1 kB (座標+ 時刻 + 温度,...)

データレート ~ 50 kByte /min

可観測時間を1日あたり10時間として
テレメトリの容量は **~30 Mbyte/day** (Sバンドで回収可能)

変動天体検知（搭載用ソフトウェア）

◆ 検討中

- 技術的に難しいことは認識している
- ミッション成立性に関わることも認識している

◆ 課題

- 手法（画像差っ引き・カタログ化などなど）
- 分類も要る（全データは落とせないなのでゴミか宝かの区別必須）
- CPU・メモリが足りない？（足りたとして排熱しきれるか？）
- 校正にどれくらいかかる？（校正中完了まで衛星が生き残れるか）

システム要求まとめ

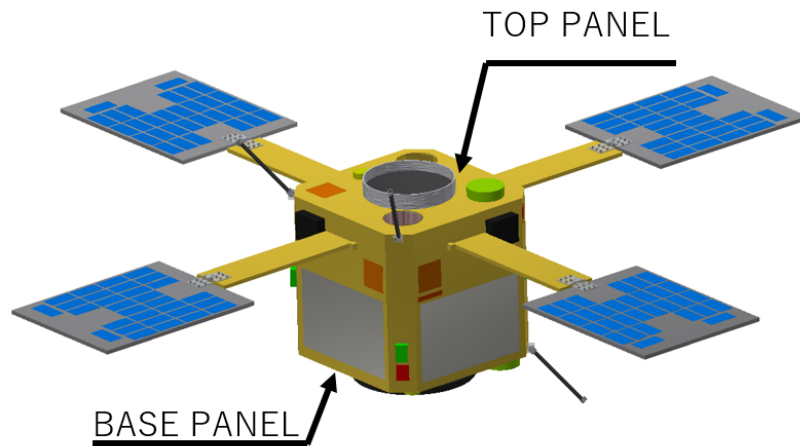
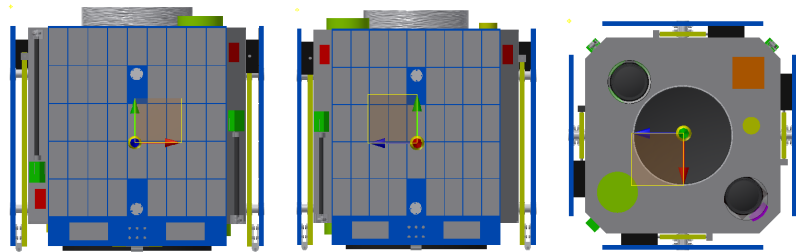
Mission Life	> 3 yr ($\propto$ 1/MNV Coverage, $\sim$ 3yr for 1 str)
Orbit	Twilight orbit (Sun synchronous is also acceptable) Altitude $\sim$ 500 km
Thermal Structure	Φ 200 UV telescope & Detector Temp < -30°C
Electric Power System	enables 1 hour observation without Sun light
Attitude Control & Determination	Pointing accuracy : 30 arcmin Attitude determination accuracy : 10 arcsec Attitude stability : 15 arcsec/10 sec Accuracy of Time: 10 ms
Communication & Data Handling	Data Rate: 30MB/day (Limited by S-band transmitter) Real-time line: $\sim$ 18 byte/access, delay time < 30min

Success Criteria

	Engineering	Science
minimum success	Deployment and checkout of the Variable Structure Attitude Control Technics (VSAC)	- Demonstration of UV-CCD in orbit - Demonstration of onboard data analysis (Electronics/Software)
Full success	Confirmation of Attitude control utilizing VSAC	The world first WF-NUV survey - GW/neutrino follow-up observation (flux upper limit in NUV band)
Extra success	High-speed Attitude control with VSAC	Detect UV transients with 10" position accuracy and send alerts to the ground.
Challenging mission	UV observation utilizing VSAC	

熱構造設計

口径Φ200mm・長さ400mmの観測装置を何とか押し込めることに成功

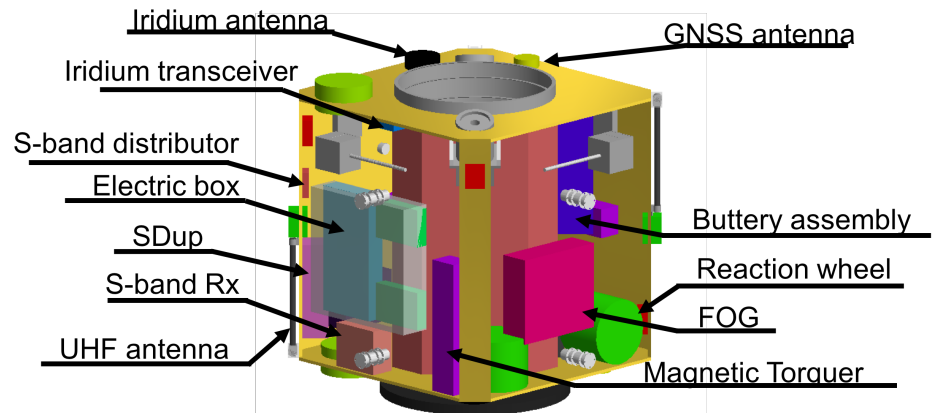
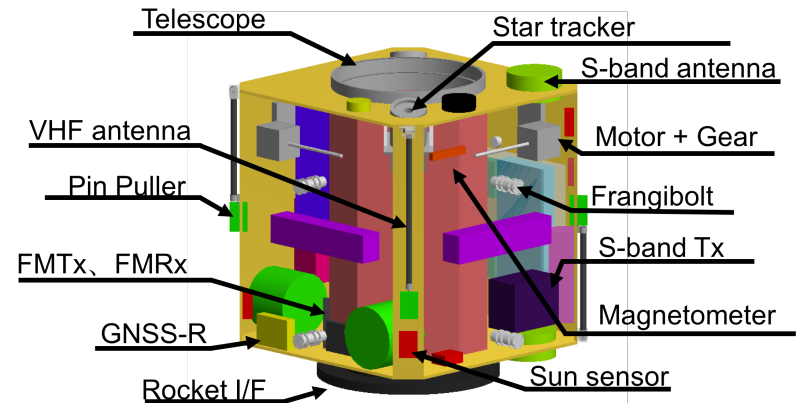


重量: 44.1 kg

寸法: 500x500x500

H-IIA piggy backで打ち上げ可能

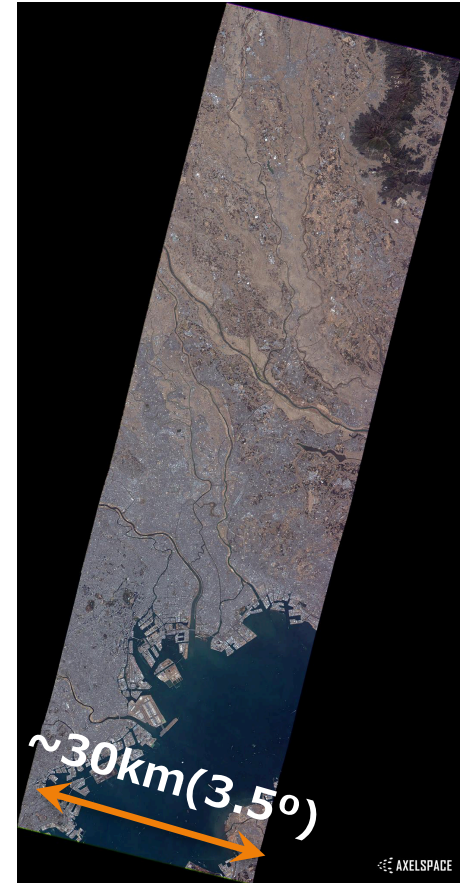
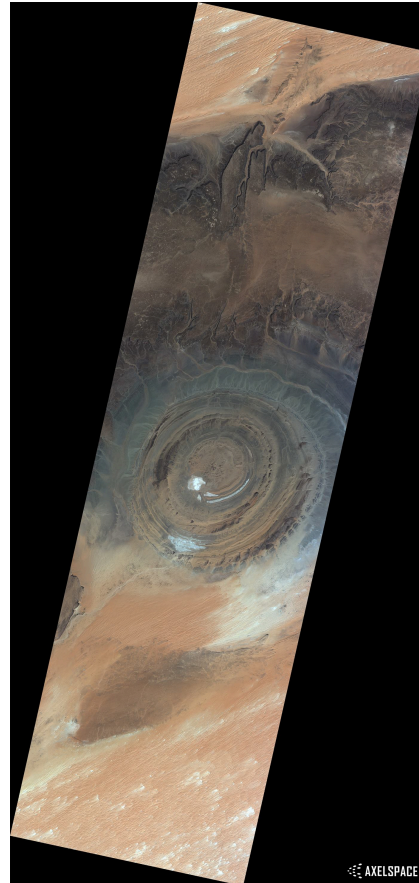
(H-IIAが一番条件きついで、他のロケットにはだいたい乗れる)



最近の超小型衛星の実力

◆ AXELSPACE ほどよし1号機の実績

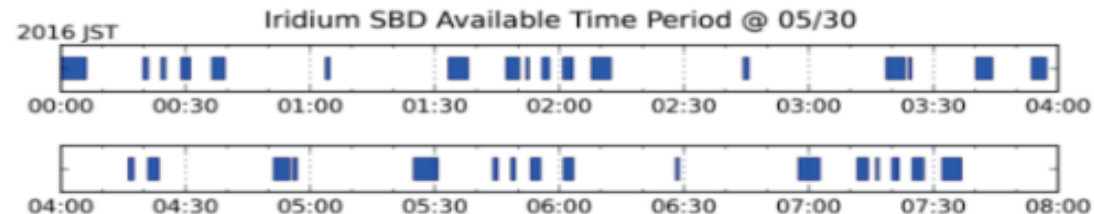
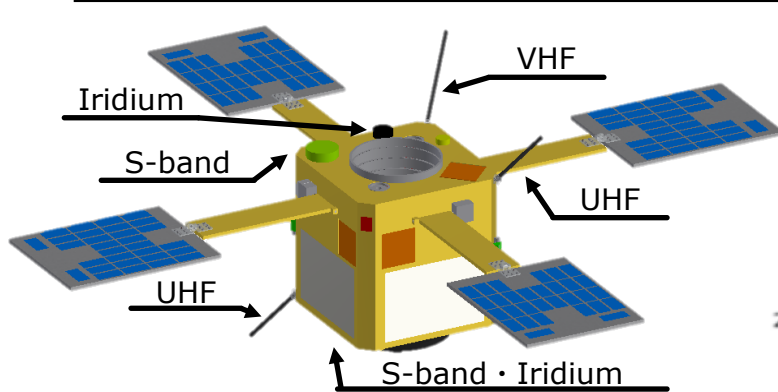
- システム全体として安定度は10秒角



恒星姿勢センサが星のトラックをミスらなければ10秒角達成は可能

通信回線設計

Freq	Dir	Modulation	Speed	Data	Station
144 MHz	Up	AFSK	1200 bps	CMD	Tokyo Tech
430 MHz	Down	AFSK/Morse	1200/1 bps	HK	Tokyo Tech
2 GHz	Up	PSK/PM	1200 bps	CMD sub	JAXA/ISAS
2.2 GHz	Down	BPSK	100 kbps	Mission TLM	JAXA/ISAS
1.6 GHz	Up	IrisiumSBD	270B/pkt	Alert/CMD	via Internet
1.6 GHz	Down	IrisiumSBD	340B/pkt	Alert/HK	via Internet



イリジウムはこれから検証実験を行う予定
S帯ライセンス所有・BPF/復調器は宇宙研局に設置済

Nagata et al. 2015

開発計画

◆ Schedule

Year	2016			2017										2018										2019										2020																																																										
Month	~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	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3																																									
System Evt	△MDR			△SRR										△SDR										△Elec Integ										△FitCheck										△PDR										△EM Integ										△CDR																												
	Pre Phase A			Phase A										Phase B										Phase C										Phase D																																																										
	Consept Dsgn			Consept Dsgn2										System Dsgn										BBM devlp/test										Preliminary Design										EM manuf										EM evaluation										Critical Design										FM manuf										FM test								
Dtector	Mission Dsgn	Consept Dsgn										CCD evaluation										Devlp CCD drv/DAQ										EM Dsgn										EM manf										Integ Test of mission comp										Backup(pFM) Calibration Software Development																														
Optics		△Ordering CCD										△Ordering Electronics										△Order FM-CCD										△Manuf																																																												
Therm/Mech		Opt Dsgn1										Opt test1										env test										Opt Dsgn1										Test2																																																		
		△Order										△Order Sample										△Order										△Order																																																												
		Therm/Mech Dsgn																				EM-Thrm/Mech Dsgn										EM Manuf										△EM order										△Integration										△EM checkout																														
												△order										△integ test										△mech test																																																												

Year	2004~			2009										2010										2011										2012										2013																																																											
Month				9	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	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8																																																				
TSUBAME				△Got Fund										△PDR										△LaunchDate1										△LaunchDate2																																																																					
	Pre Phase A			Phase A										Phase B										Phase C										Phase D																																																																					
	Consept Dsgn			Sys Dsgn										Preliminary Dsgn										EM manf										EM test										Critical Dsgn										M manf										FM Test										▼Error in EPS										▼EPS Noise										▼Error in RF									
				BBM										BBM										Preliminary Design										EM test										FM Manuf										Software Development & Debug																																																	
																								△EM thermVac										△EM Elec Integ										△FM Integ1										△FM Th-Vac Test										△FM Integ2																																							
Mission	Electronics	BBM										WBM BBM										Criteical Design										pFM manuf/tests										FM manuf										Software Development																																																			
	Thrm/Mech											EM Structure										EM Str test										FM dsgn										FM test																																																													
				△BBM Beam Test																				▼HV discharge										▼PMT brok										△BeamTest										△V-test Pass										△final Integ										△FM BeamTest																													

◆ Cost of Development

ADCS	C&DH	Comm	EPS	Structure	Science	環境試験	合計
6000万円	300万円	1300万円	1600万円	2100万円	3000万円	600万円	1.5億円

打ち上げ ~ 2021? (H-IIA, epsilon, Indian or Russian Rockets)
開発費用 ~ マージン込みで約2億

まとめ

- ◆ 紫外線天体探査用超小型衛星を提案・概念設計を実施
- ◆ ターゲットは
 - 重力波対応天体（NS-NS Mergerからの放射）
 - SN Shock breakouts, Ia-SNe, 潮汐破壊, AGNe etc
- ◆ サイエンスのサクセスクライテリア
 - 年間1回以上のNS-NS merger即時観測
 - 年間数十個の shock breakouts検出
- ◆ 現状
 - 概念設計（第一次）⇒ コンテスト優勝
 - 打ち上げ予定2021~2022
 - 基本コンポーネントの開発に着手
 - 宇宙研のワーキンググループ立ち上げ準備中

