

小型重力波観測衛星 DECIGOパスファインダー



Original
Picture : Sora

安東 正樹 (国立天文台)

DECIGO/DPF collaboration

Earth Image: ESA

DECIGOパスファインダー (DPF)

将来の宇宙重力波望遠鏡のための前哨衛星

小型衛星 1 機 (重量 450kg)

地球周回軌道 (高度 500km)

非接触保持された試験マスの変動を
レーザー干渉計を用いて精密計測



宇宙・地球の観測

→ 銀河の成り立ち, 地球環境モニタ

先端科学技術の確立

→ 宇宙・無重力環境利用の新しい可能性

小型科学衛星3号機 としての実現を目指す

Earth Image: ESA

初期宇宙の観測



Background:
original figure by
NASA/WMAP Science Team

DECIGOのロードマップ

Figure: S.Kawamura



DECIGOパスファインダー (DPF)

DECIGOのための最初の前哨衛星

DECIGO : 基線長 1000kmの編隊飛行

→ DPF 1機の衛星 (基線長30cm干渉計)

400kg級 小型衛星

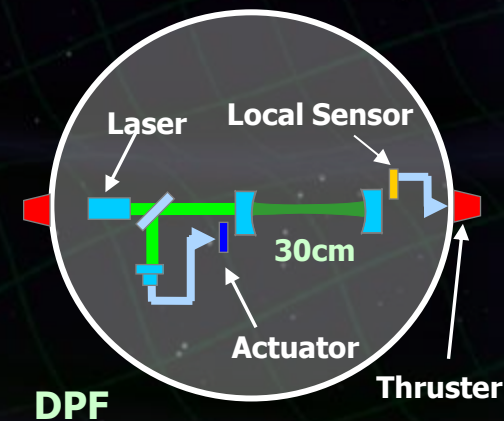
地球周回軌道 (高度 500km)



DECIGOの主要技術の宇宙実証

レーザー干渉計, 安定化レーザー光源,

ドラッグフリーシステム、データ取得と解析



重力波により宇宙を見る

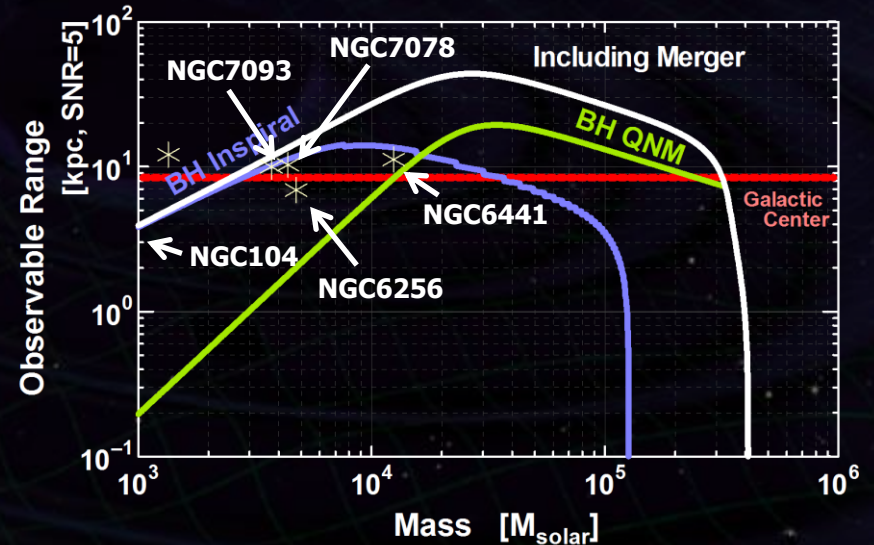
銀河系内のBH連星合体

→ 巨大BH形成への知見.

DPFの感度では

~30個の球状星団を観測可能

独自・野心的なサイエンス



重力で地球を見る

地球重力場の観測

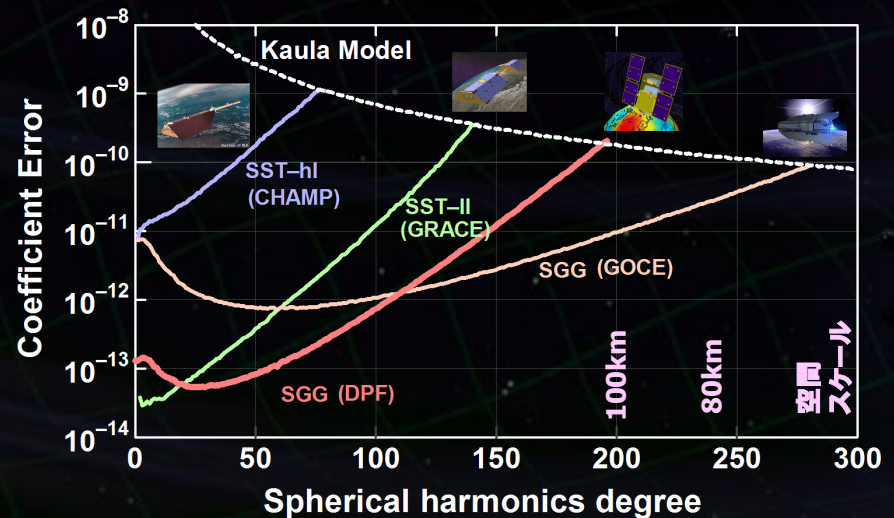
→ 地球形状・地球環境モニタ

他の海外ミッションに匹敵する感度

国際観測網への貢献, 独自の観測

(2012-2016に国際観測網にギャップ)

確実なサイエンス・国際貢献



DPF成功基準



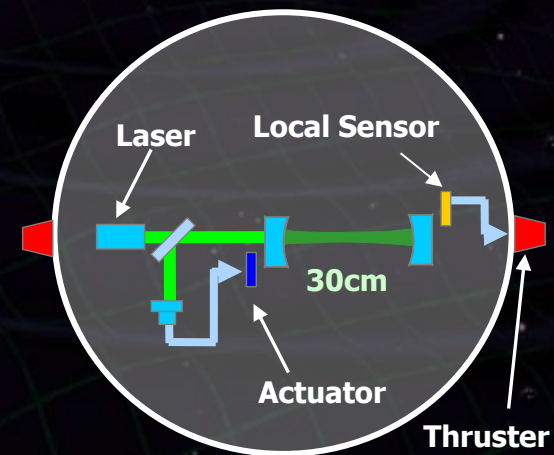
		最低限の成功基準	所期の成功基準	所期の成果を超える成功基準
	DPF全体	各サブシステムの基本動作を確認する。	各サブシステムの期待性能での動作と、重力波・地球重力場観測。	性能の最適化と長期安定観測。
観測による成果	重力波観測	重力波観測データの取得。	地球周回時間(100分程度)を超える期間、所期の感度(歪み感度 2×10^{-15})での重力波観測データの取得。重力波振幅の上限値と雑音源の評価。	6ヶ月以上に渡る観測と重力波信号の探査。背景重力波の上限値と空間分布を求める。
	地球重力場観測	衛星変動の長周期成分から地球重力場を観測する。	試験マス-衛星変動信号と軌道情報から1mm程度のジオイド高分解能で地球重力場を観測し、観測精度を評価する。	全球に相当する重力場を重複観測し、データの再現性や重力場の時間変動を評価。
科学技術の確立	安定化レーザー光源	レーザー光源と安定化システムの動作と安定度を評価する。	レーザー光源を目標レベル ($0.5 \text{ Hz} / \text{ Hz}^{1/2}$)まで安定化する。	地上で達成されていないレベルの安定度を達成する。
	宇宙干渉計	ファブリ・ペロー干渉計を安定に制御し、基線長変動を測定する。ローンチ・ロック機構を動作させ、試験マスを衛星内に非接触保持する。	地球周回時間(100分程度)を超える間の干渉計の連続安定動作を実現。データを重力波振幅に換算するための校正測定。レーザーセンサを動作させ、 10^{-11} m/s^2 の高感度で試験マス-衛星間の加速度変動測定を行う。	雑音源の評価と制御系の最適化を行い、原理的に可能なレベルまで干渉計雑音を低減する。
	ドラッグフリー	低雑音スラスタの動作確認と雑音レベル評価。	試験マスと衛星の相対変動信号をミッションスラスタにフィードバックし、ドラッグフリー制御を実現。	ドラッグフリー制御によって、衛星変動を太陽輻射圧雑音レベルより小さいレベル($10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$)にまで抑圧する。

・重力波・地球重力場の観測

→ 歪み感度要求値 $2 \times 10^{-15} \text{ Hz}^{-1/2}$ (0.1 Hz)

搭載ミッション機器

- 2つの試験マスからなる,
基線長30cmレーザー干渉計.
- 安定化レーザー光源.
- ドラッグフリー制御.



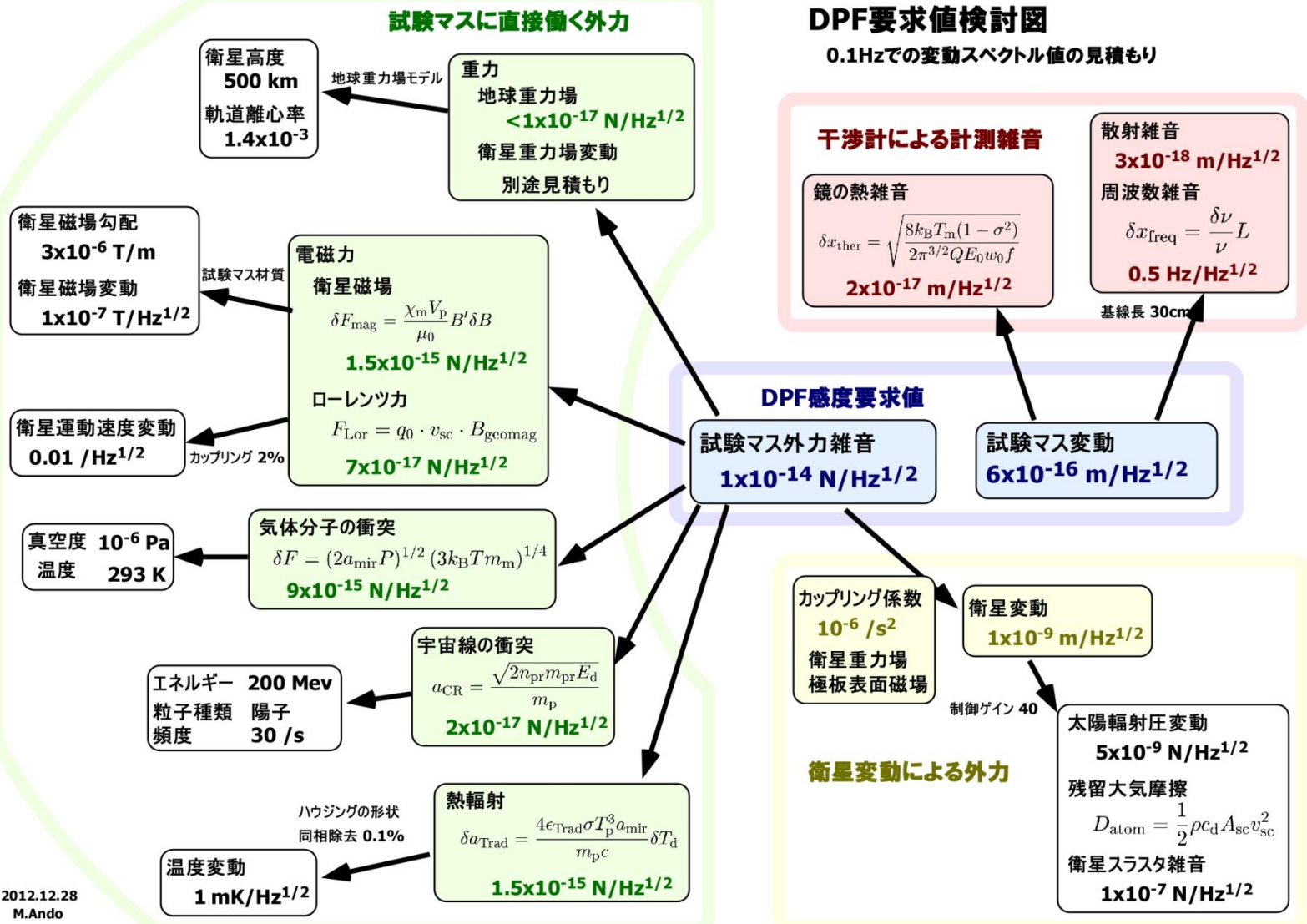
重力勾配計：試験マス間の距離変動を精密計測

- 干渉計による測距感度 $6 \times 10^{-16} \text{ m/Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)
- 試験マスに働く外力雑音 $1 \times 10^{-14} \text{ N/Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)

DPFシステム要求値

DPF要求値検討図

0.1Hzでの変動スペクトル値の見積もり

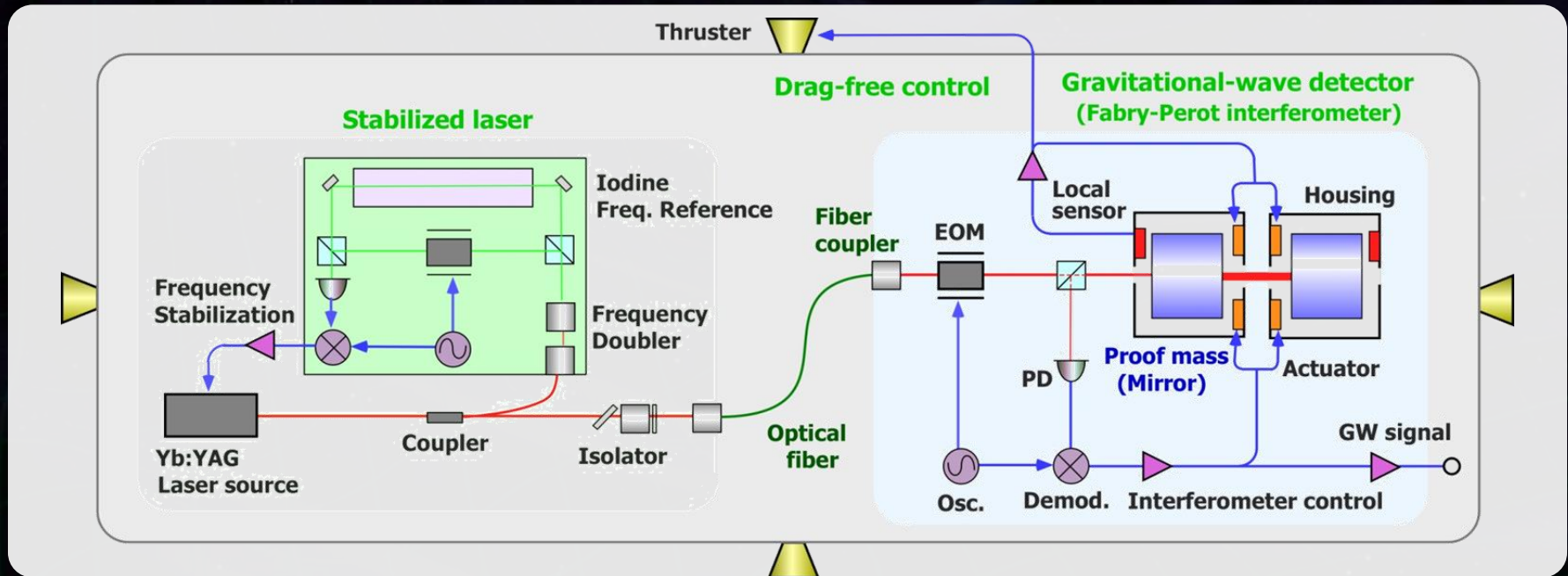


2012.12.28
M.Ando

DPFミッション機器構成

ミッション機器重量 : ~200kg
ミッション機器空間 : 95 cm立方

ドラッグフリー
ローカルセンサで相対変動検出
→ スラスタにフィードバック



安定化レーザー光源
Yb:YAGレーザー
出力 25mW
ヨウ素飽和吸収による
周波数安定化

ファブリー・ペロー共振器
フィネス : 100
基線長 : 30cm
試験マス : 質量 数kg
PDH法により信号取得・制御

DPFシステム概要

DPF Payload

Size : 950mm cube
Weight : 220kg
Power : 150W
Data Rate: 800kbps
Mission thruster x10

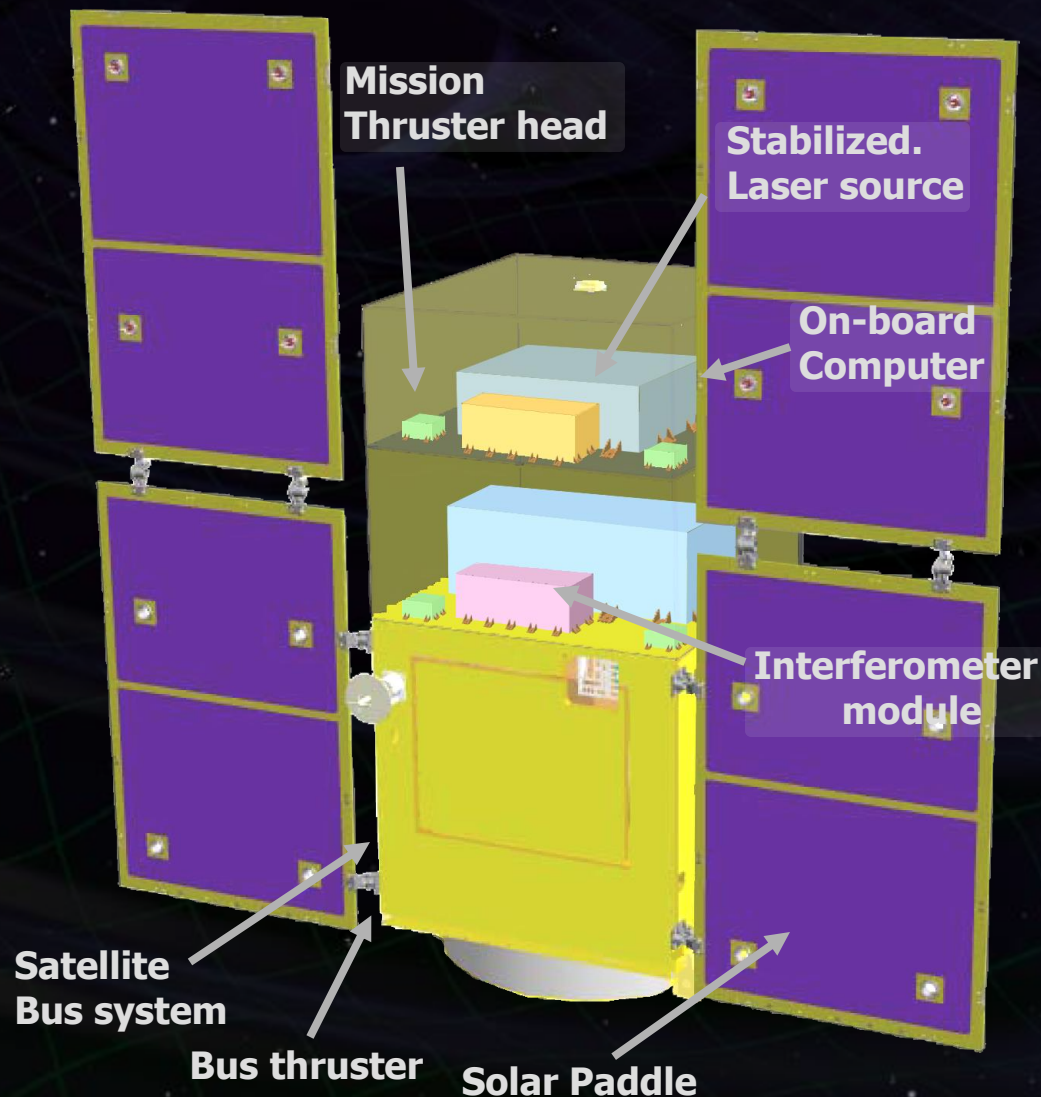
Power Supply
SpW Comm.



Satellite Bus

(‘Standard bus’ system)

Size :
950x950x1100mm
Weight : 230kg
SAP : 960W
Battery: 50AH
Downlink : 2Mbps
DR: 1GByte
1N Thrusters x 4



DPF主要緒元 (1/2)

全体構成

質量・寸法	450kg, 950 x 950 x 2000 mm
軌道	高度500 km 太陽同期極軌道 (全日照軌道)
姿勢	太陽同期, 地球指向姿勢

ミッション部

質量・寸法	220kg, 950 x 950 x 900 mm (フィン構造除く)
消費電力	150 W
レーザー干渉計	基線長30cm, 2-3kg試験マス x2, 変位感度 6×10^{-16} m/Hz ^{1/2}
レーザー光源	干渉計入力 25 mW, 波長 1060 nm ヨウ素飽和吸収線による安定化 周波数安定度 0.5 Hz/Hz ^{1/2}
スラスタ	100 μ N x 2台, 10 μ N x 8台 推力雑音 0.1 μ N/Hz ^{1/2}
ドラッグフリー	全自由度の制御, 変動安定度 10^{-9} m/Hz ^{1/2}
データレート	800 kbps, 観測データ量 圧縮後 600 MByte/day

バス部

質量・寸法	230kg, 950 x 950 x 1100 mm
データ処理・通信	SpW準拠信号処理システム 記録容量 2 GByte, ダウンリンクレート 2 Mbps
電源	SAP 片翼 2枚, 発生電力 820W (22度傾斜) バッテリー 50Ah, ミッション供給 150W
姿勢	3軸制御 (初期軌道捕捉, ファイルセーフ時) スラスタ 4本搭載

※ 標準バス構成からの差分・要検討事項

- 低擾乱化 (RW非搭載, ジャイロはFOGに変更)
- SAP取り付けの変更 (受動姿勢安定のため)
- GPS受信機搭載 (地球重力場観測のため)
- 主放熱面の変更 (+Y面)
- 重量バランス, SAP等の共振振動 (ドラッグフリー制御系設計)
- 姿勢情報等の伝達 (ドラッグフリー制御の実装)

DPF質量検討



衛星質量 450kg (WET) (ミッション部バランスウエイト 46kgを含む)

DPF 機器構成	略号	台数	単体質量 (約値) [kg]	合計質量 (約値) [kg]
ミッション部				
ミッション系 (1階層)				
46.00				
干渉計モジュール		1	30.00	30.00
干渉計制御モジュール		1	5.00	5.00
ハウジング制御モジュール		1	5.00	5.00
レーザーセンサー制御モジュール		1	5.00	5.00
ミッション系 (2階層)				
70.00				
安定化レーザー光源モジュール		1	15.00	15.00
電源・制御モジュール		1	5.00	5.00
信号処理モジュール		1	5.00	5.00
ドッキングフリー・スラスター制御モジュール		1	5.00	5.00
スラスターヘッド・制御モジュール (大2, 小8)		1式	40.00	40.00
ミッション機体系				
106.20				
ミッション機体	M-STR	1式	36.57	36.57
ミッション部設計架	M-TINT	1式	5.00	5.00
ミッション部電気計装	M-EINT	1式	5.00	5.00
ミッション部機械計装	M-MINT	1式	0.60	0.60
ミッション部フィン	M-FIN±X	2	3.27	6.54
ミッション部フィン	M-FIN±Y	2	4.43	8.87
バランスウエイト		1式	4.622	4.622
バスシステム				
衛星マネジメント系				
9.63				
システムマネジメントユニット	SMU	1	2.00	2.00
テレメトリコマンドインタフェースモジュール	TCIM	1	2.14	2.14
スペースワイヤルータ	SWR1, SWR2	2	1.72	3.44
データレコーダ	DR	1	2.05	2.05
温度系				
6.18				
Sバンドアンテナ(±X方向)	S-ANT1, S-ANT2	2	0.18	0.36
Sバンドアンテナ(±Y方向)	S-ANT3	1	0.18	0.18
Sバンドダイブレッサ	S-DIP1, S-DIP2	2	0.41	0.82
Sバンドスイッチ	S-SW	1	0.10	0.10
Sバンドハイブリッド	S-HYB	1	0.05	0.05
Sバンドトランスポンダ	S-TRP-A, S-TRP-B	2	3.35	6.70

電圧系	EPS			46.60
太陽電池パドル	SAP1, SAP2 (各1組)	1式	31.10	31.10
	(セリノ部)		↑	—
	(TDM)		↑	—
パドル駆動モータ	SADM1, SADM2	0	0.00	0.00
電力制御	POU	1	5.00	5.00
アレイパワーレギュレータ	APR	1	4.00	4.00
SAPブロッキングダイオード	SBD1, SBD2	2	0.40	0.80
バッテリ(50Ah)	BAT (BAT_L)	1	25.70	25.70
	(BAT_U)	1	↑	—
姿勢制御系				
ACOP				
姿勢制御用計算機	ACOP-A, ACOP-B	2	2.00	4.00
リアクションホイールアセンブリ	RWA1, RW42, RWA3, RWA4	0	0.00	0.00
磁気トルカ	MTQ-X, MTQ-Y, MTQ-Z	0	0.00	0.00
恒星センサ	STT	1	3.28	3.28
慣性基準装置				
FOB (FB)				
粗大角センサ	CSAS1, CSAS2	2	0.04	0.08
サブピケルセンサ	SPSH1, SPSH2	0	—	—
地磁気センサ	QAS	0	0.00	0.00
ACOSインタフェースモジュールANT QZAFM	ACNDZ	0	0.00	0.00
ACOSインタフェースモジュールRNAH Honeywell	ACRWH	0	0.00	0.00
ACOSインタフェースモジュールST TSSODERN	ACSTS	1	1.48	1.48
ACOSインタフェースモジュールSADMNTS	ACSDN	0	0.00	0.00
ACOSインタフェースモジュールAnalogMNTS	ACANA	1	2.13	2.13
ACOSインタフェースモジュールIRUMFPC	ACIRJ	1	2.80	2.80
ACOSインタフェースモジュールVDRB/1A	ACVBD1	1	2.50	2.50
推進系				
RCS				
14.20				
推進系	RCS	1式	14.2	14.20
注排弁モジュール	PFV, QFD		↑	↑
バルブモジュール	LVV, FLT, PRE		↑	↑
推進タンク	TKK		↑	↑
配管	PIPE		↑	↑
配管ブラケット	—		↑	↑
インタフェースコネクタブラケット	—		↑	↑
4Nスラスターモジュール	4N TRN	4	↑	↑
推進				
16.00				
推進		1	15.00	15.00
電気計装				
E-INT				
26.00				
ハーネスおよび中継コネクタブラケット	WHN	1式	26.00	26.00
制御系				
TCG				
14.50				
ヒータ制御装置	HCE	1	4.50	4.50
熱計装	T-INT	1式	10.00	10.00
機体系				
STR				
60.69				
機体	STR	1式	50.11	50.11
機体計装(バランスウエイト含まず)	M-INT	1式	1.58	1.58
機体計装(バランスウエイト)		1式	0.00	0.00
ミッション部合計				
223.20				
バス部合計 (DRY)				
215.31				
機体系				
15.00				
バス部合計 (WET)				
230.31				
合計 (DRY)				
438.51				
合計 (WET)				
453.51				

DPF電力検討



観測+地上伝送時 415W (ミッション部予備・ヒータ電力 50W)

DPF衛星 (2012.03.23)	略号	台数	消費電力[W]	モード別消費電力[W]				備考
				観測		観測+伝送(地上)		
				定常	日照	日陰	日照		日陰
ミッション								
ミッション機室								
190.0								
干渉計モジュール		1	3.0	3.0		3.0	2012/01/20付け 防塵室モジュール積置	
干渉計制御モジュール		1	4.0	4.0		4.0	2012/01/20付け 防塵室モジュール積置	
パワージング制御モジュール		1	10.0	10.0		10.0	2012/01/20付け 防塵室モジュール積置	
レーザセンサ制御モジュール		1	3.0	3.0		3.0	2012/01/20付け 防塵室モジュール積置	
安定化レーザ光源モジュール		1	23.0	23.0		23.0	2012/01/20付け 防塵室モジュール積置	
電扇・防制機モジュール		1	10.0	10.0		10.0	2012/01/20付け 防塵室モジュール積置	
慣性処理モジュール		1	12.0	12.0		12.0	2012/01/20付け 防塵室モジュール積置	
ドラッグフリースタスタ制御モジュール		1	3.0	3.0		3.0	2012/01/20付け 防塵室モジュール積置	
スタスタ電力		1	20.0	20.0		20.0	2012/01/20付け 防塵室モジュール積置	
(予備)		1	33.0	33.0		33.0	ミッション合計が150Wとなるように調整	
システム								
衛星マネージメント系								
SMS								
システムマネジメントユニット	SMU	1	12.8	12.8		12.8	SPPRENT-Aベース	
データレコーダ	DR	1	13.9	13.9		13.9	SPPRENT-Aベース	
テレメトリ・コマンド・インタフェースモジュール	TCIM	1	14.0	14.0		14.0	SPPRENT-Aベース	
スペースワイヤルータ	SMR	1	3.1	3.1		3.1	SPPRENT-Aベース	
電源系								
EP								
3φトランスオング	3-TRP	1	13.0(消費)×30.4	13.0		30.4	SPPRENT-Aベース	
電源系								
EPS								
電力制御器	PCU	1	10.0	10.0		10.0	SPPRENT-Aベース	
アレイパワーレギュレータ	APS	1	1.6(日陰時のみ)	1.6	0.0	1.6	0.0	SPPRENT-Aベース
姿勢制御系								
AOCS								
姿勢制御計算機	AOCP	1	12.8	12.8		12.8	SPPRENT-Aベース	
リチウムイオン電池セル制御回路	SMC	0					積置ノイズは4台で30W(一定回転時)	
慣性センサ	IFS	0					積置ノイズは3台で30W	
慣性基準装置	IBU	3	2.2	8.8		8.8	*DCARS搭載機(JME機) ・積置ノイズは20W程度(MPC製TDG)	
AOCSインテグレーションモジュールANAL	AGRMH	0					積置ノイズは14W	
AOCSインテグレーションモジュールDIG	AGMDE	0					積置ノイズは15W程度	
AOCSインテグレーションモジュールRCS	ACVDI	1	11.0	11.0		11.0	4SHARSベース(8BYモード)	
AOCSインテグレーションモジュールSTT	ACSIS	1	7.0	7.0		7.0	SPPRENT-Aベース	
AOCSインテグレーションモジュールAnalog	ACANR	1	10.0	10.0		10.0	SPPRENT-Aベース	
AOCSインテグレーションモジュールRU	ACIRU	1	20.0	20.0		20.0	SPPRENT-Aベースで9.5W(6FPOGへの二次電源供給 積置追加で計20Wと設定)	
熱制御系								
TCS								
ヒータ制御装置	HCE	1	10.5	10.5		10.5	SPPRENT-Aベース	
ヒータ		1区	50.0	50.0		50.0	システム 動作所求実施のための計算値は不明、 未設計では衛星負荷電力の増加変化要因としての パラメータ扱いとした。	
衛星負荷電力合計(ノミナル)				355.4 W	353.9 W	372.9 W	371.3 W	
衛星負荷電力合計				355.4 W	353.9 W	372.9 W	371.3 W	
衛星への電力伝送ロス				10.2 W	2.2 W	10.9 W	3.2 W	
APF変換ロス(日陰負荷分)				30.9 W	0.0 W	32.4 W	0.0 W	
日照/日陰負荷				396.3 W	356.2 W	415.1 W	374.5 W	

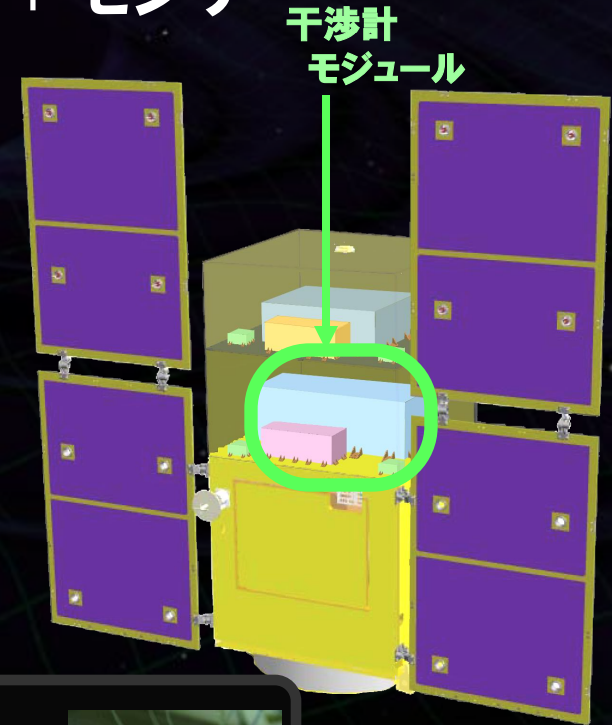
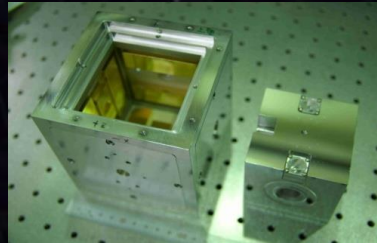
レーザー干渉計：試験マス + 干渉計 + センサ

試験マスモジュール

重力・重力波を観測するための基準

- BBM of Module, Sensor, Actuator, Clump/Release
- μ -Grav. Exp.

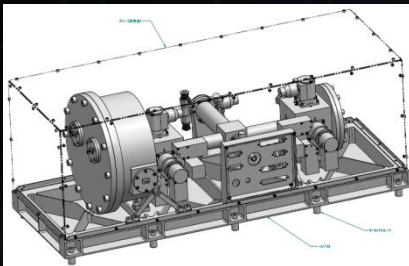
法政大, 国立天文台,
お茶大, スタンフォード大



干渉計モジュール

→ 重力波観測, 重力勾配計

- 30cm IFO BBM
- Packaging
- Digital control
- Monolithic Opt.



国立天文台, 東大

レーザーセンサ

→ 加速度計センサ

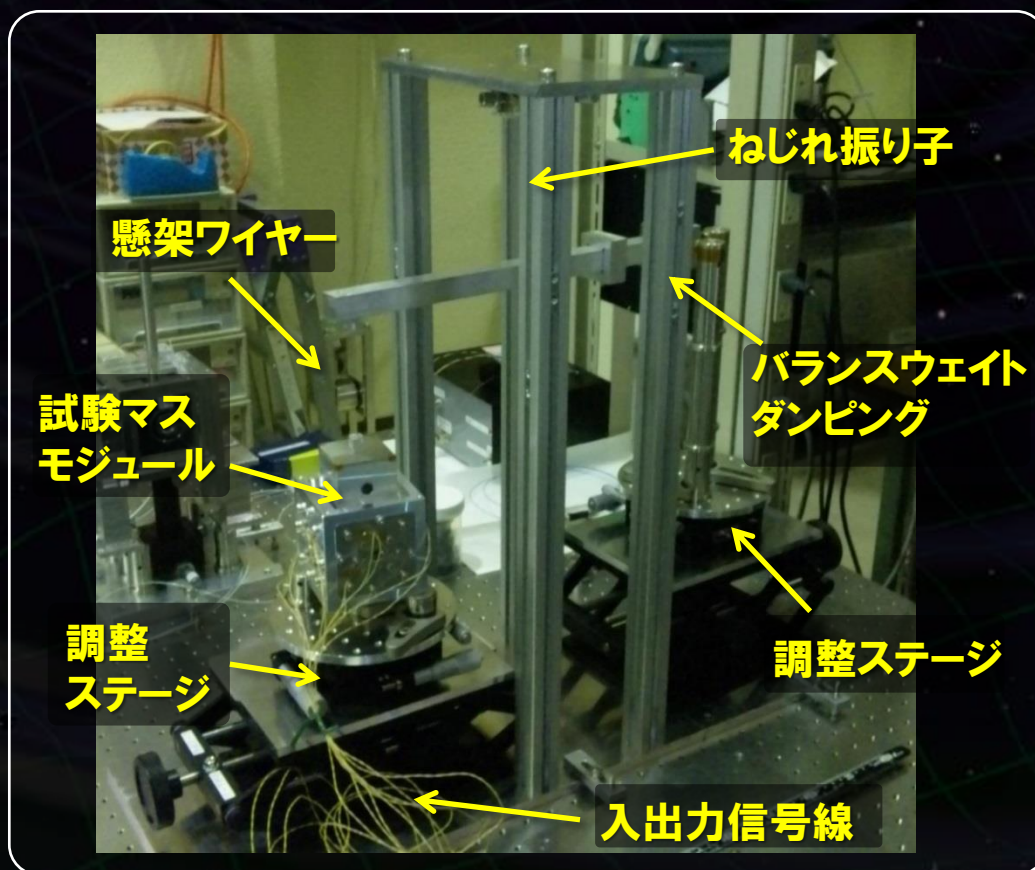
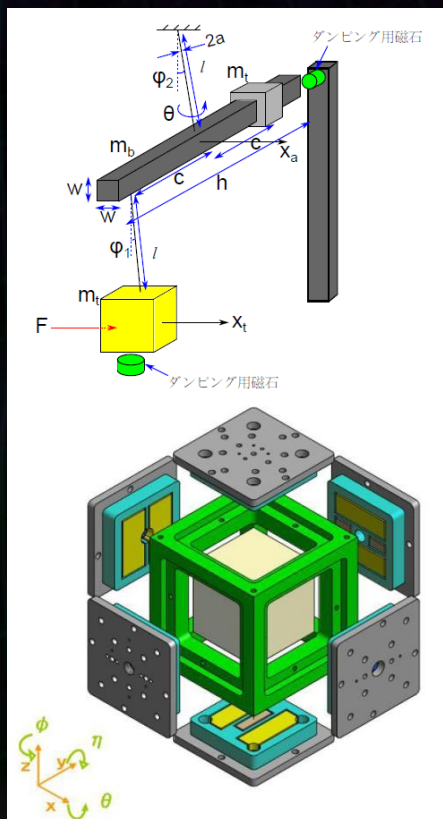
- BBM test
- Sensitivity meas.

東大地震研, 東大理



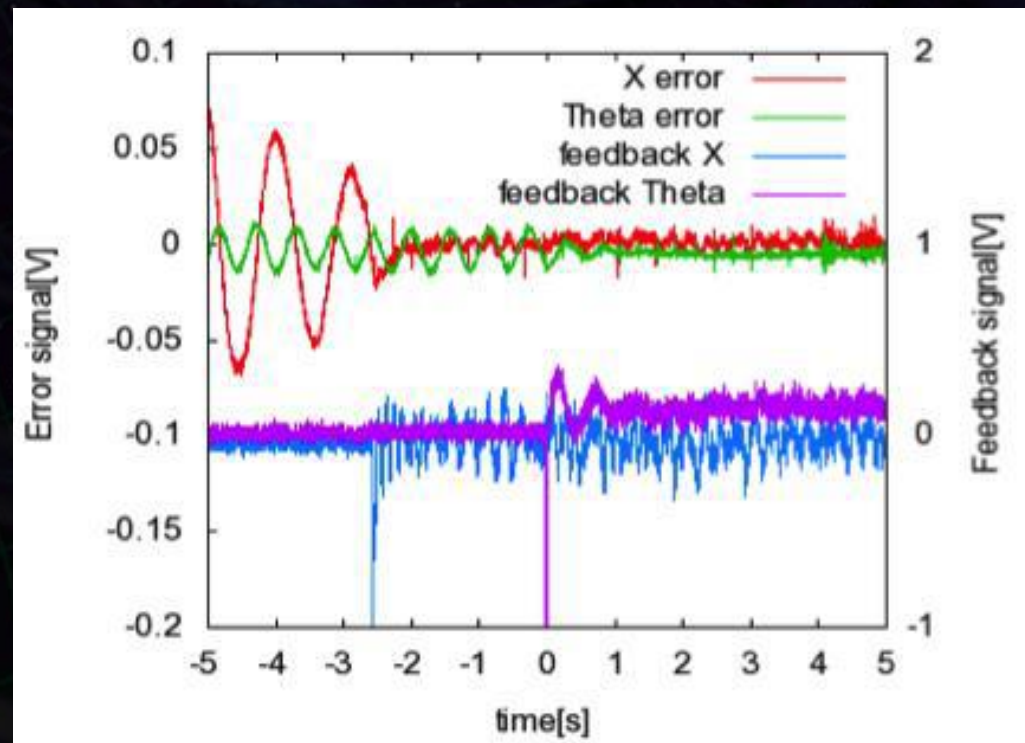
ポスター参照
P13 阿久津

- 試験マスモジュール2自由度制御実験 (~2012, 国立天文台)
 - 試験マスをねじれ振り子で懸架
 - 静電センサ・アクチュエータを用い, 回転・位置を制御



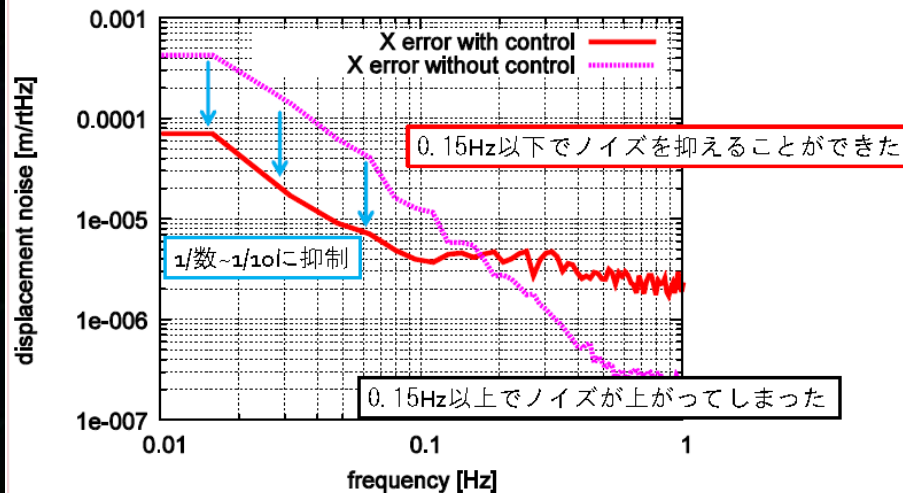
・試験マスモジュール2自由度制御実験

- 試験マスの並進・回転の2自由度制御を実現.
- 0.1Hzでの残留変動
並進 $3 \times 10^{-5} \text{ m/Hz}^{1/2}$,
回転 $10^{-4} \text{ rad/Hz}^{1/2}$.

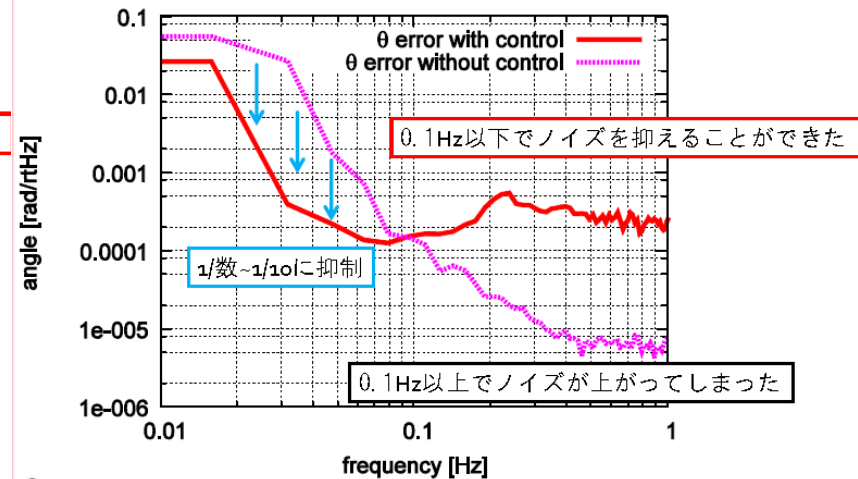


・試験マスモジュール2自由度制御実験 (~2012, NAOJ)

制御結果(並進)

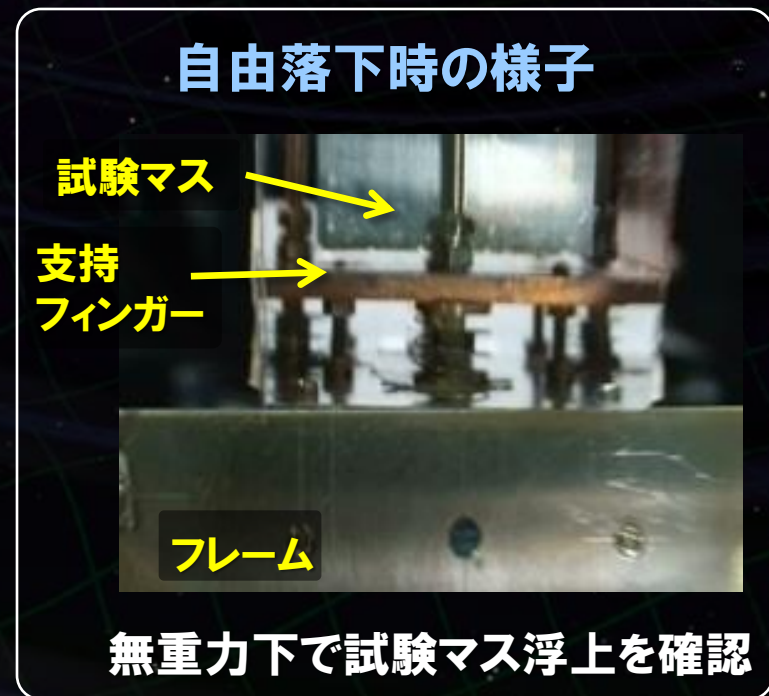
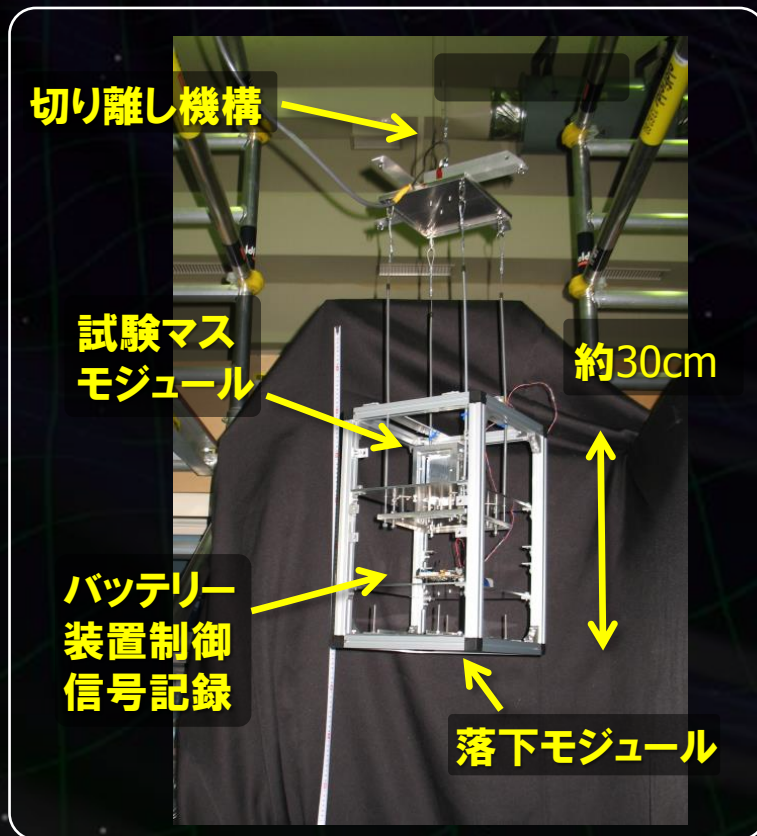


制御結果(回転)



・無重力下での試験マス制御デモンストレーション (NAOJ)

- 落下モジュール (構造, 電源, センサ, ロガーなど)
- ~3m落下設備 (足場, 切り離し機構, クッションなど)

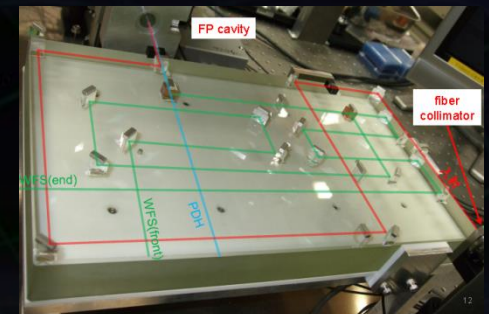
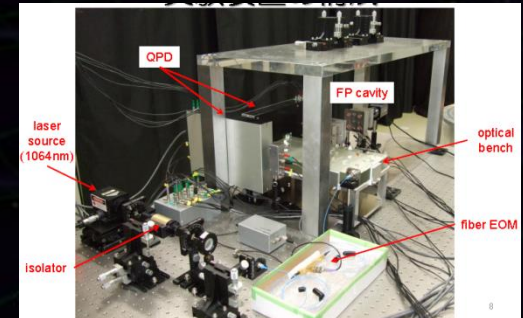
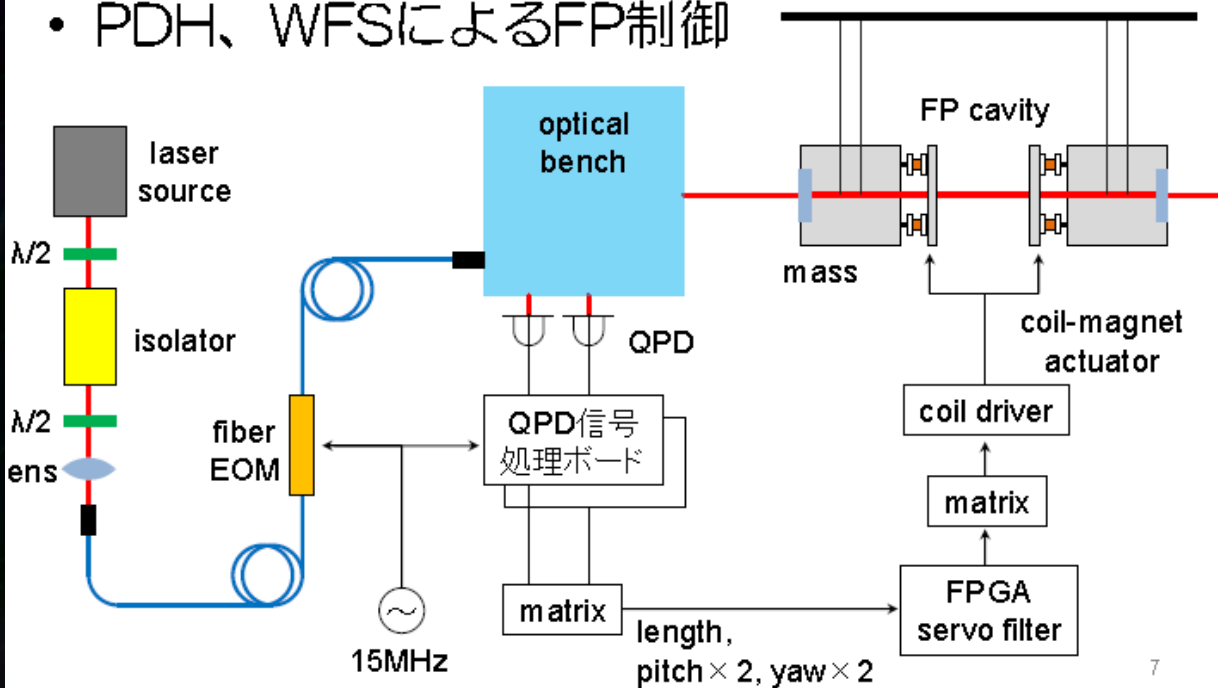


今後, 静電S/Aによる制御をめざす.

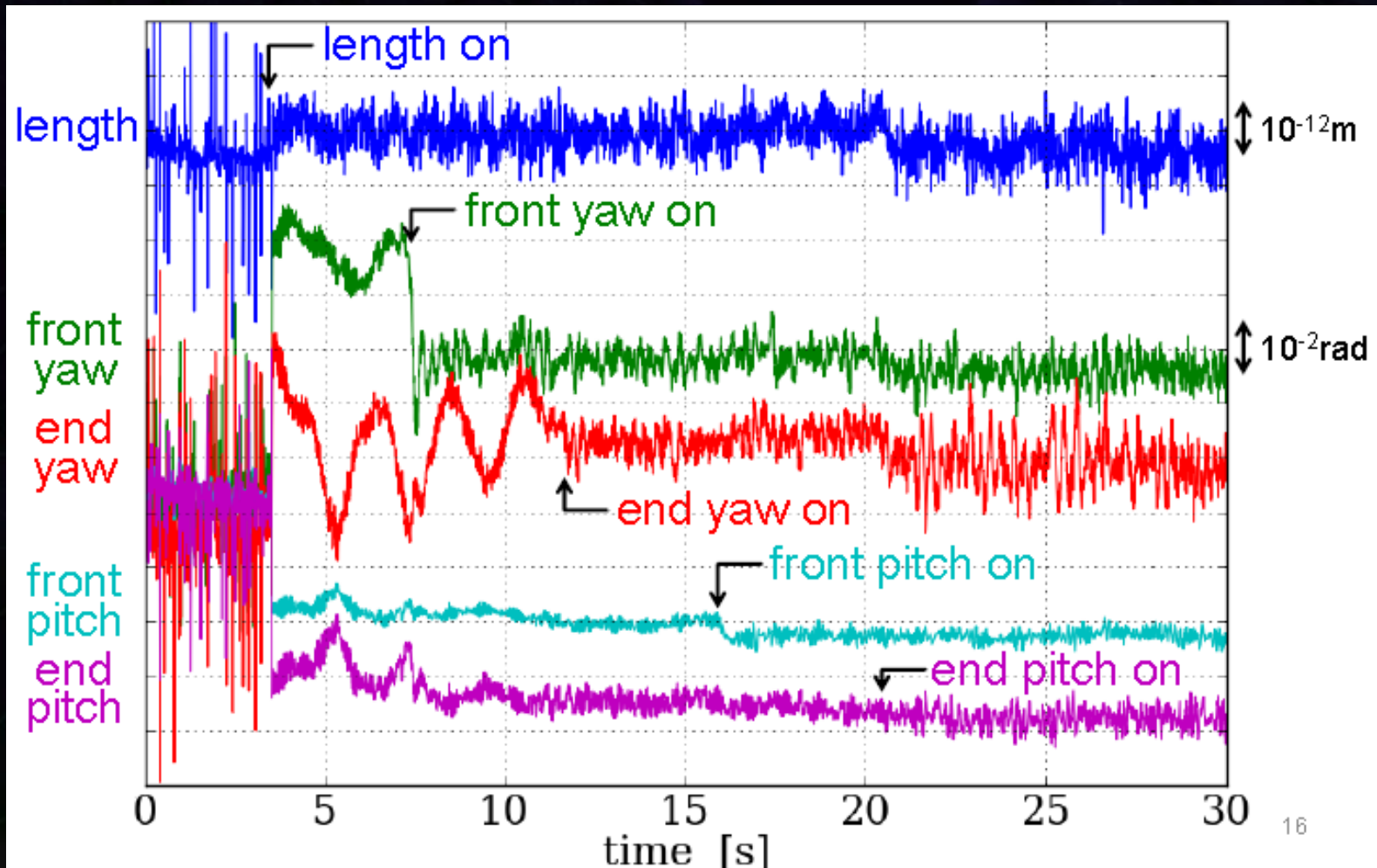
干渉計BBM 制御実験 (～2011, 東京大学)

- 試験マスをワイヤーで懸架, アクチュエータは簡略化.
- 入出射用のモノリシック光学系BBM.
- QPD BBM + デジタルボードBBM による制御.

• PDH、WFSによるFP制御



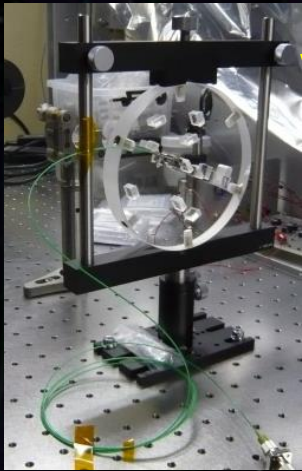
干渉計基線長, 角度変動の安定制御を実証



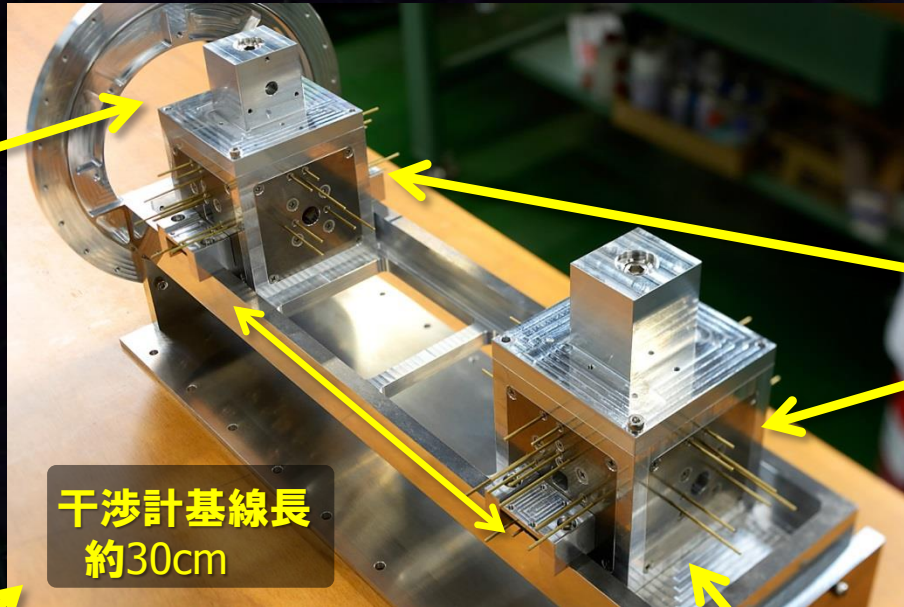
干渉計モジュールEM

入出射光学系

シリケートボンディングにより一体化



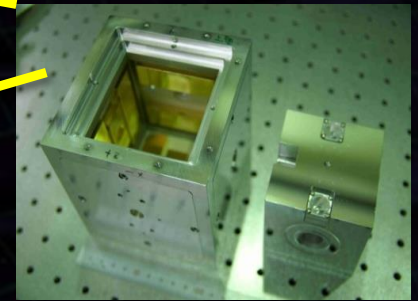
干渉計モジュール



干渉計基線長
約30cm

試験マスモジュール

試験マス、静電センサ・アクチュエータ、ローンチロック



4分割RF フォトディテクタ

4分割PD + 復調回路
干渉計基線長・角度の
変動を取得



SpW信号処理・ 制御ボード

SpW FPGA +
16bit AD/DA
干渉計の制御

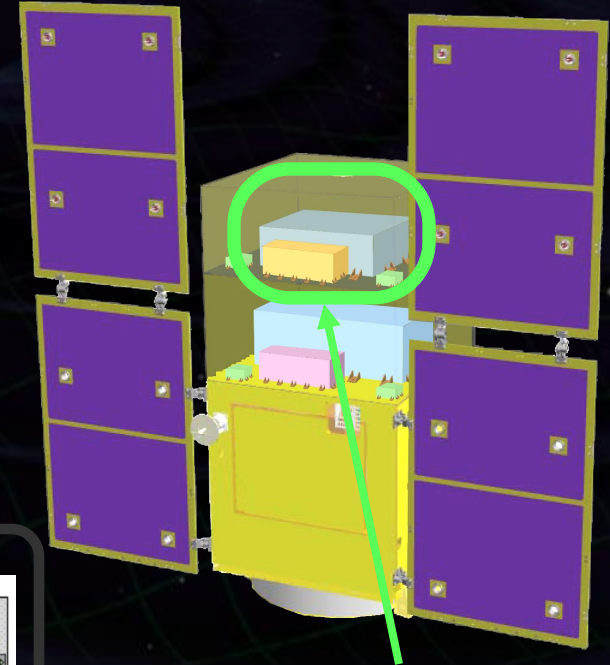
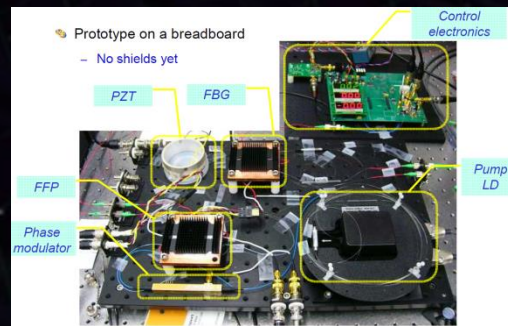


安定化レーザー光源：光源 + 安定化システム

Yb:YAG (NPRO or Fiber laser) 光源
→ 小型・軽量化, 耐振動性

•BBM development

電通大, NASA/GSFC

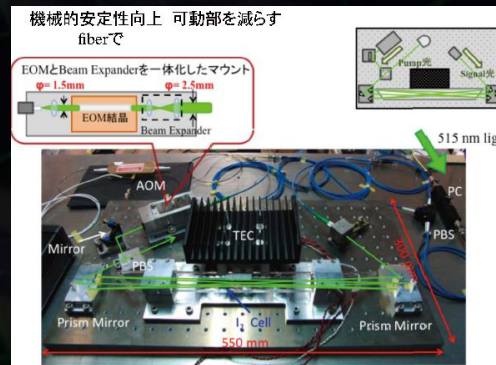


安定化
レーザー光源

ヨウ素飽和吸収
による安定化制御
→ 周波数基準
擾乱耐性

•BBM development
•Stability meas.

電通大, NICT



ポスター参照
P14 他

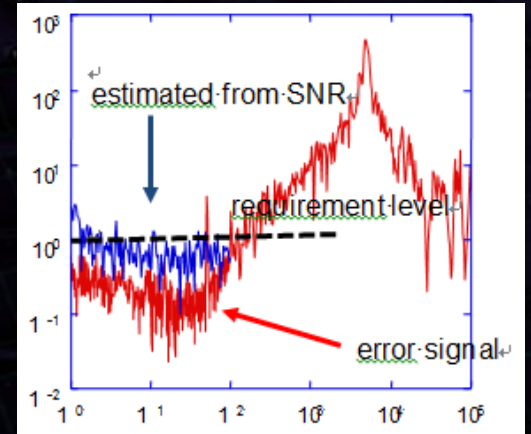
周波数安定化モジュール

・周波数安定化モジュールBBM1 (~2011, 電通大)

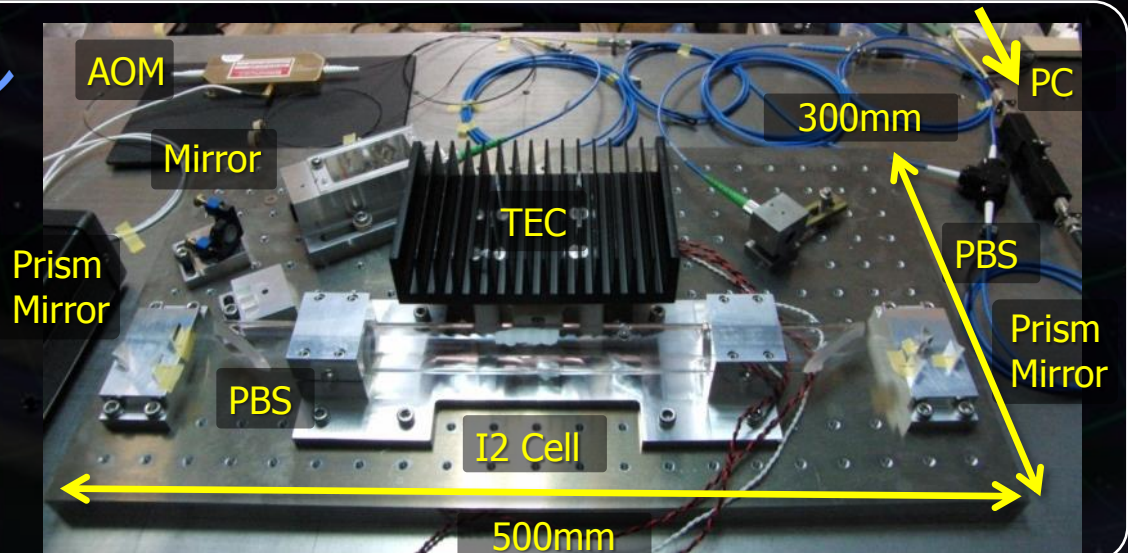
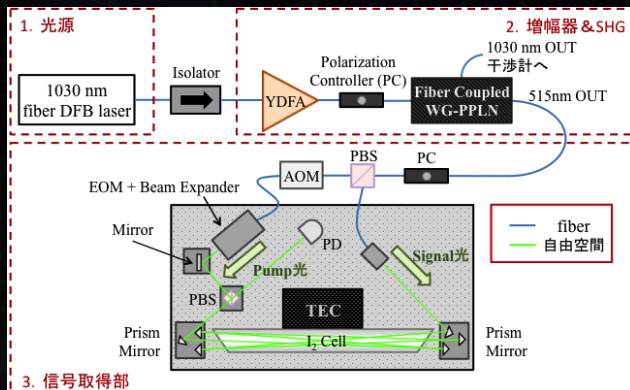
- ヨウ素セルを用いた周波数安定化.
- 安定度要求 ($0.5 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$)を満たす.

・周波数安定化モジュールBBM2 (電通大)

- ファイバ素子を用い, 小型・軽量・堅牢化.
- SpWデジタル制御ボードによる動作.



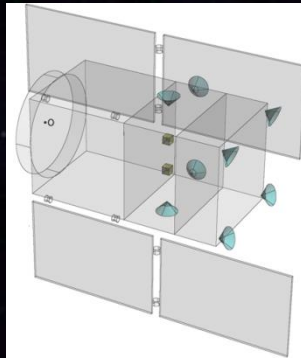
レーザー周波数安定化モジュール



姿勢・ドラッグフリー制御 :

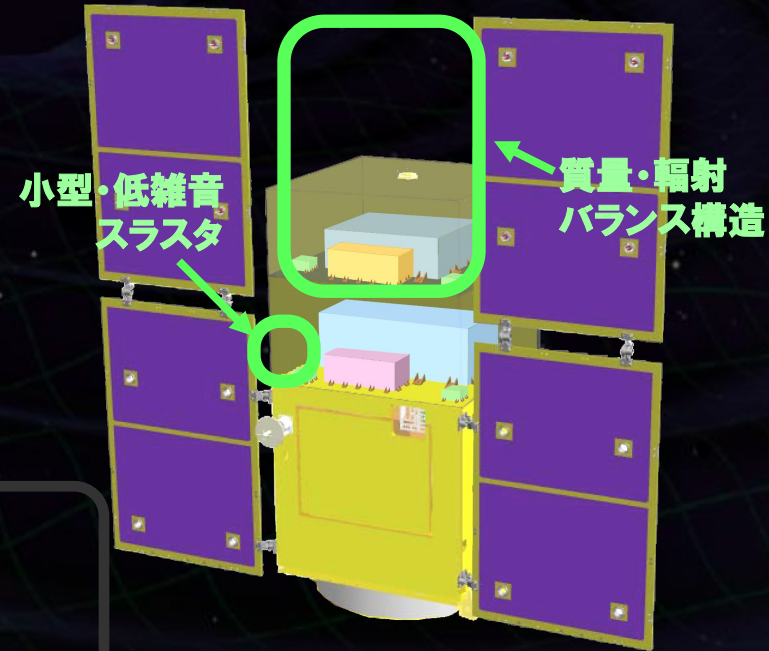
衛星構造検討, 制御則, ミッションスラスタ

衛星構成, 熱・構造検討



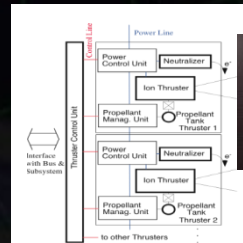
- Passive attitude stability
- Drag-free control

東大, JAXA



小型低雑音スラスタ

→ Actuators for satellite control



• **BBM and system design**

JAXA, 東海大, 防衛大

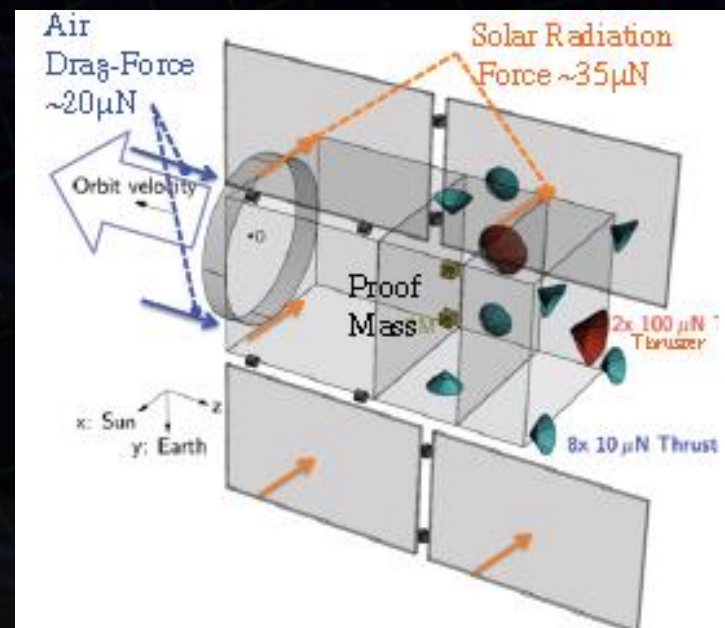
ポスター参照
P15 佐藤 他

・ミッションスラスタ構成

- 準定常成分 **100 μN スラスタ 2台**
大気ドラッグ, 太陽輻射圧
- 変動成分 **10 μN スラスタ 8台**
大気圧変動, 太陽輻射変動

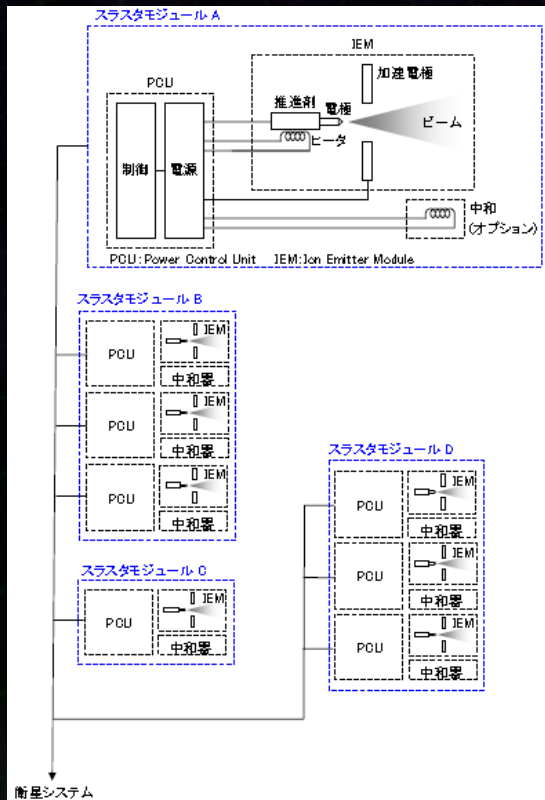
ミッションスラスタ仕様

推力	0.5-100 μN x2 (可変)
	0.5-10 μN x 8 (可変)
分解能	0.1 μN
推力雑音	0.1 $\mu\text{N}/\text{Hz}^{1/2}$
制御応答	>10Hz
Isp	TBD
電力・質量	<40W, <40kg
運用寿命	4,300 時間



・ミッションスラスタ検討・開発 (ISAS/JAXA) 既存技術を利用 → FEEDスラスタ

スラスタシステム構成

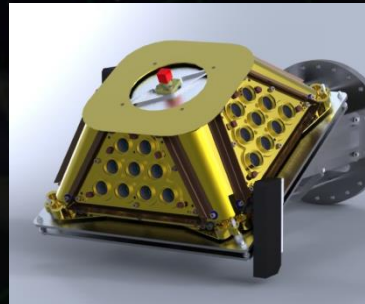


AIT FEED (10 μ N)



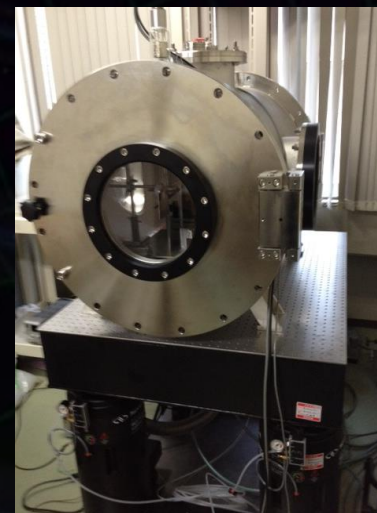
※ Flight Proven

Cluster Type FEED (100 μ N)



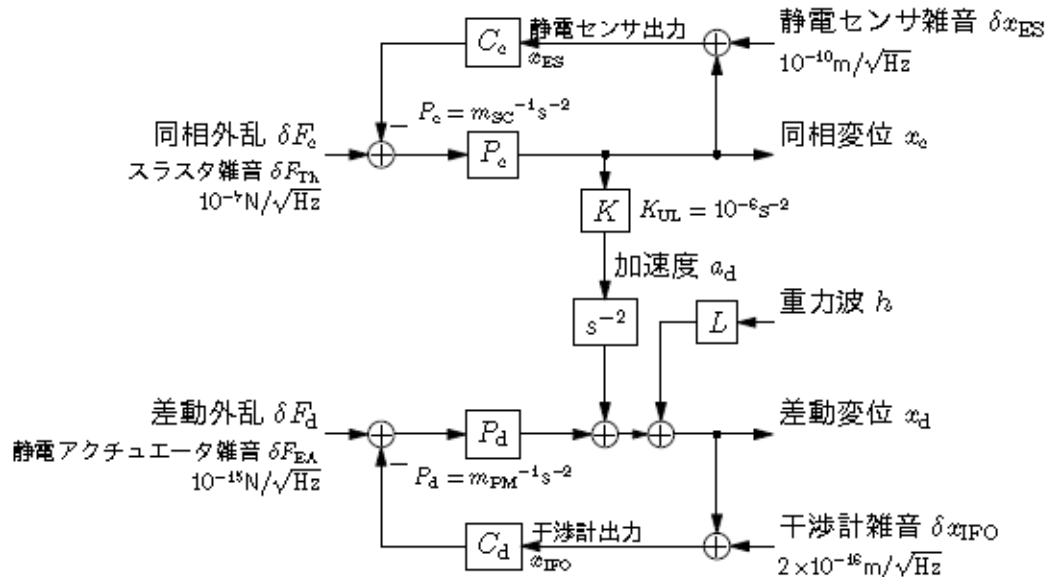
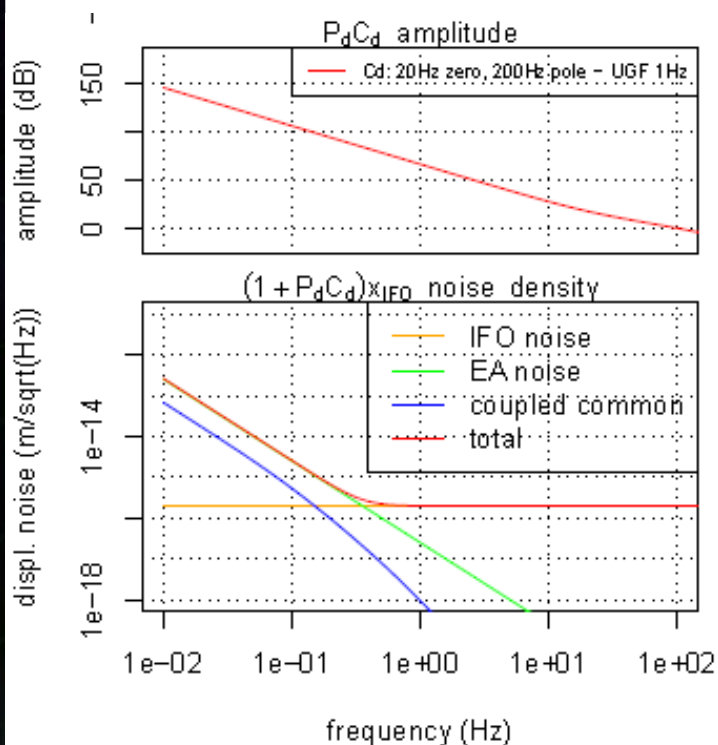
スラスタスタンド

微小推力雑音の測定装置。
0.1 μ Nの測定分解能を実現。



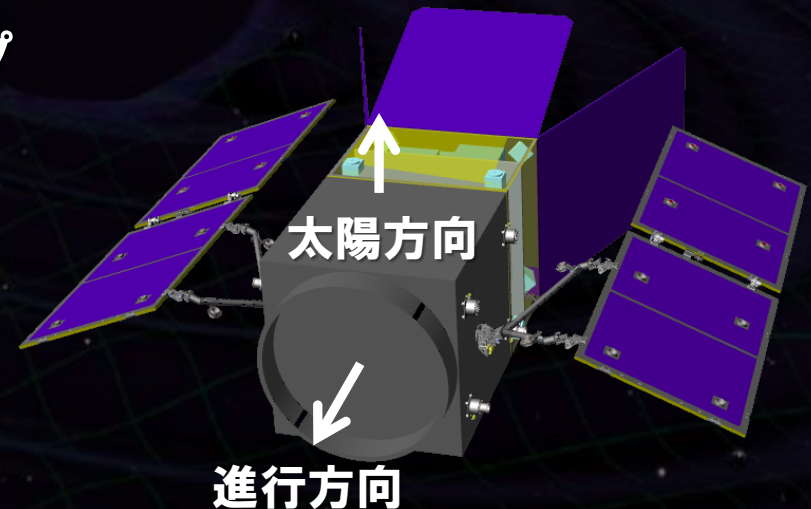
・干渉計制御 + ドラッグフリー制御系の雑音評価

- 制御帯域 10Hz → 静電S/A雑音, スラスト雑音が、干渉計感度に影響を与えない構成.



・衛星構造・姿勢検討

- ドラッグフリー制御のバックアップ
 - ミッションスラスタの運用寿命
- ⇒ 受動安定となる衛星構造.
SAP傾斜, フィン構造.



・初期姿勢捕捉・セーフホールド

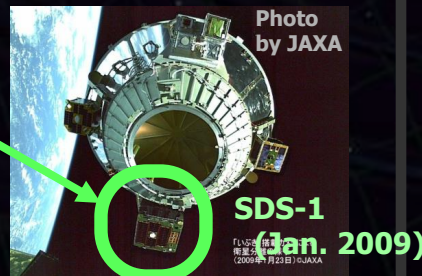
- バス部に RCS 搭載
コールドガスジェットスラスタ (窒素, 1N)
- 計10回の姿勢捕捉, 日陰時姿勢保持 → 推薬量 3.3 kg
- 残留レート < 0.01 deg/s

信号処理・制御システム : SpWベースの信号処理システム

SpC2 + SpW信号処理システム
→ SDS-1/SWIMによる宇宙実証

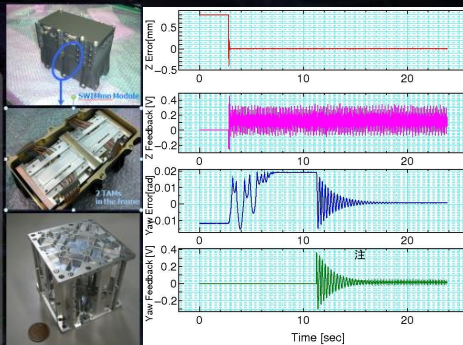
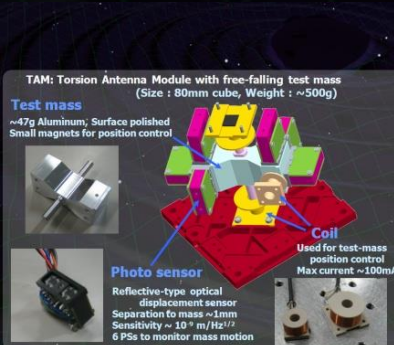


Space demonstration
by SDS-1/SWIM

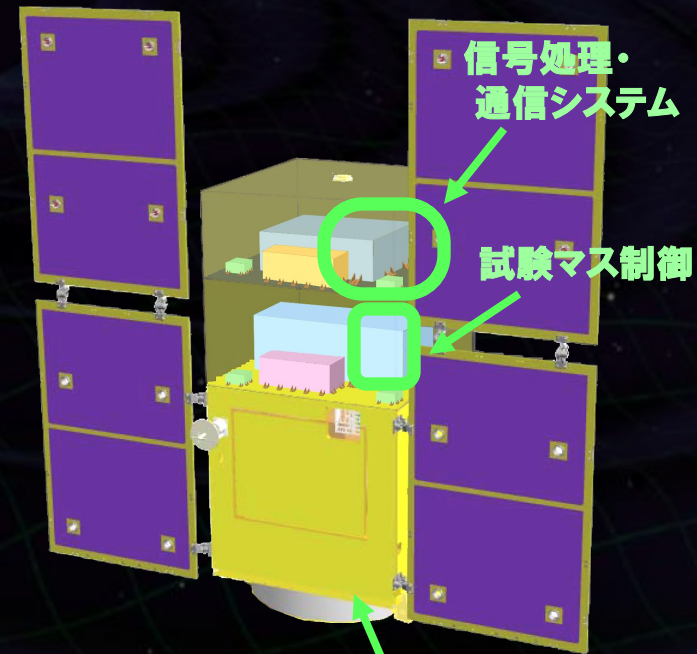


JAXA, 東大, 京大

試験マスの非接触制御と精密計測
→ SWIMによる宇宙実証



JAXA, 東大, 京大



ポスター参照
P13 阿久津 他

SWIMによる宇宙実証

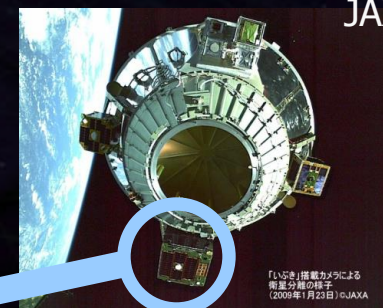
DECTGO

Photo:
JAXA

SDS-1搭載のSWIM (Space wire demonstration module)

2009年1月打ち上げ, 2010年9月運用停止

⇒ 世界で最初の 宇宙重力波検出器



SpaceCube2: Space-qualified Computer

CPU: HR5000
(64bit, 33MHz)

System Memory:
2MB Flash Memory
4MB Burst SRAM
4MB Asynch. SRAM
Data Recorder:
1GB SDRAM
1GB Flash Memory
SpW: 3ch

Size: 71 x 221 x 171
Weight: 1.9 kg
Power: 7W

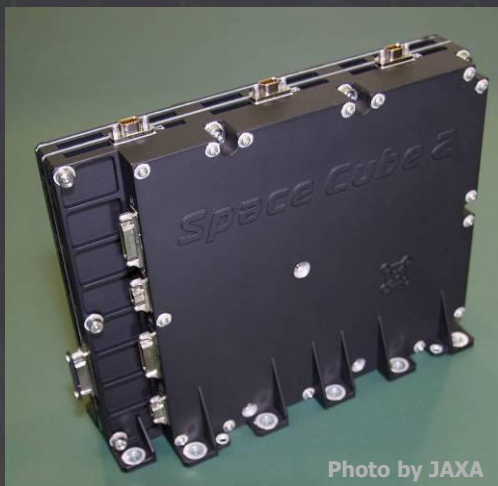


Photo by JAXA

SWIM_{μv} : User Module

Processor test board
GW+Acc. sensor
FPGA board
DAC 16bit x 8 ch
ADC 16bit x 4 ch
→ 32 ch by MPX
Torsion Antenna x2
~47g test mass

Data Rate : 380kbps
Size: 124 x 224 x 174
Weight: 3.5 kg
Power: ~7W

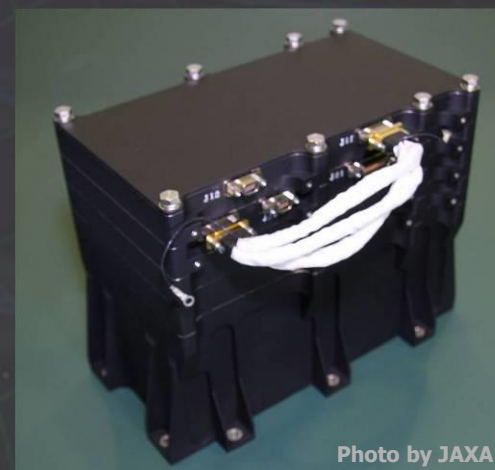


Photo by JAXA

SDS-1
Bus System

Power +28V
RS422 for CMD/TLM
GPS signal

Power ±15V, +5V
SpW x2 for CMD/TLM

超小型宇宙重力波検出器

⇒ 世界で最初の 宇宙重力波検出器

Photo:
JAXA

TAM: Torsion Antenna Module with free-falling test mass
(Size : 80mm cube, Weight : ~500g)

Test mass

~47g Aluminum, Surface polished
Small magnets for position control

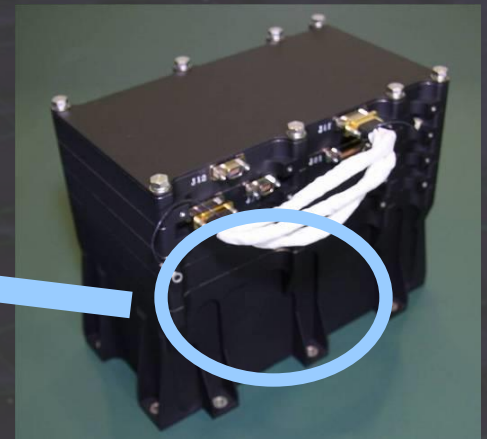
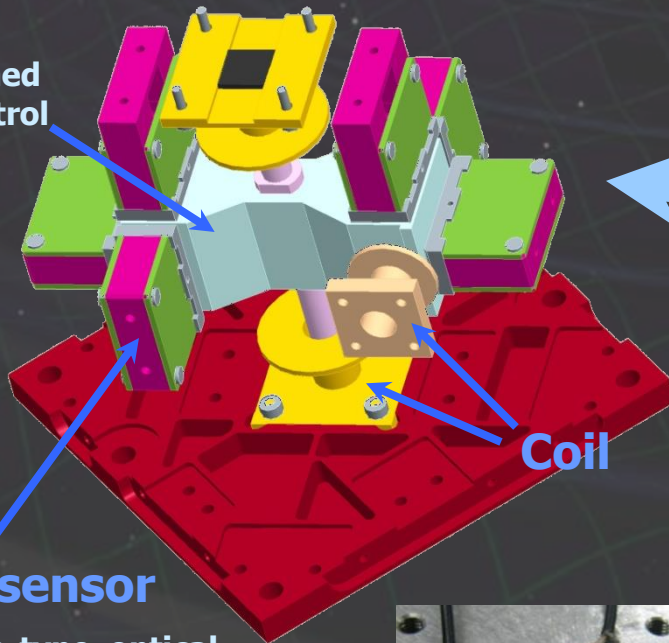
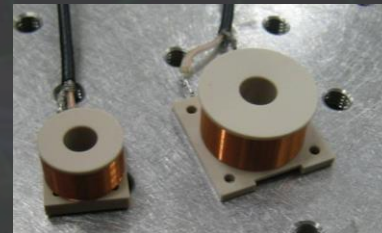


Photo sensor

Reflective-type optical
displacement sensor
Separation to mass ~1mm
Sensitivity ~ 10^{-9} m/Hz^{1/2}
6 PSs to monitor mass motion

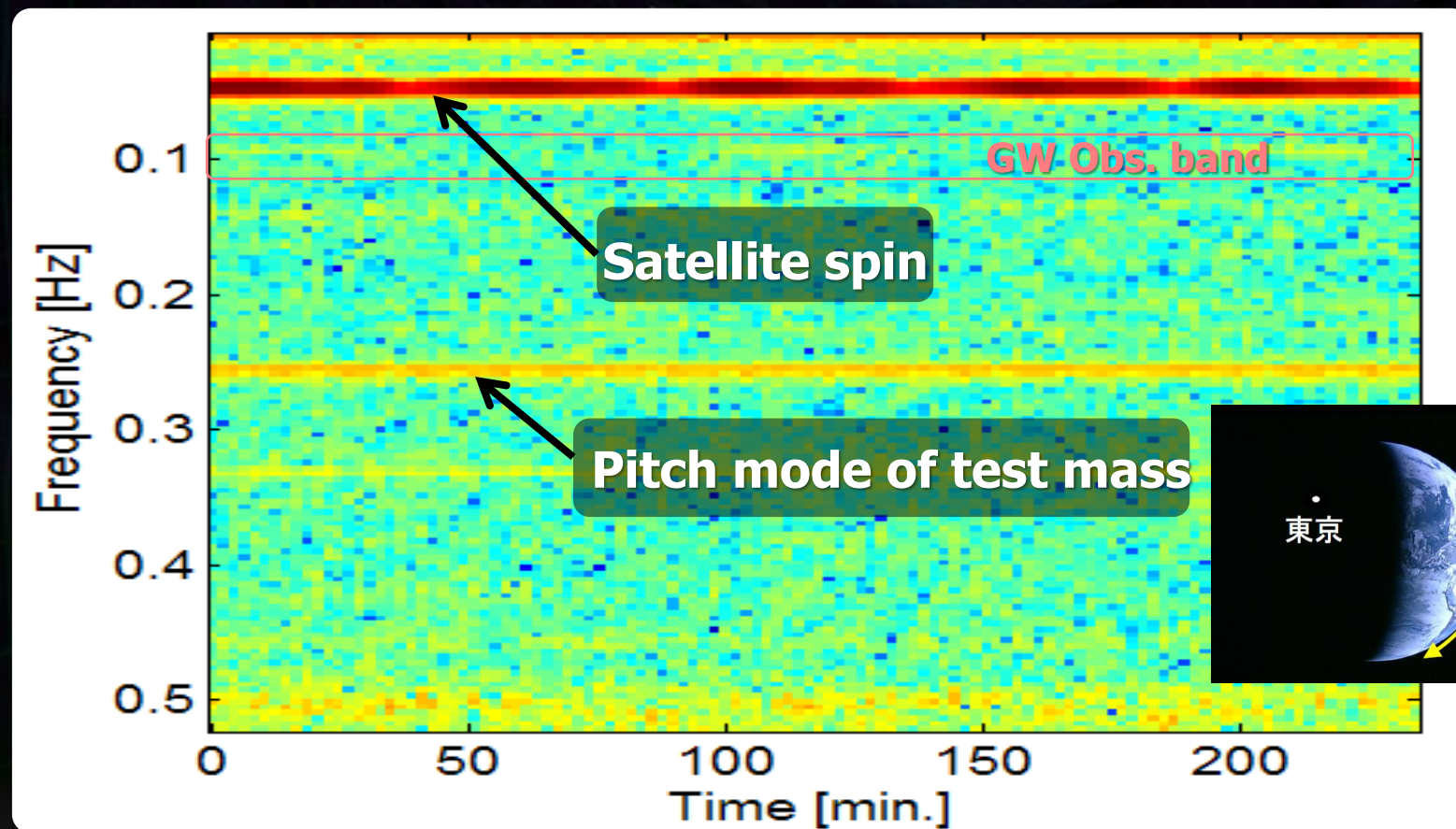


長時間データ取得

Jun 17, 2010 ~120 min.

July 15, 2010 ~240 min.

⇒ 宇宙背景重力波に対する上限値



•SWIMで実証された回路構成を基に設計・製作

- FPGA, ADC, DAC, バッファアンプを一体化.
- チャンネル数を 16ch に増加.

⇒ 搭載機器開発BBM/EMに組み込む.

干渉計EM, 試験マスモジュールBBM, 安定化レーザー

デジタル制御ボード

FPGA x2

(SpW FPGA, User FPGA)

SDRAM 32MByte

SpW Port x2, RS232C

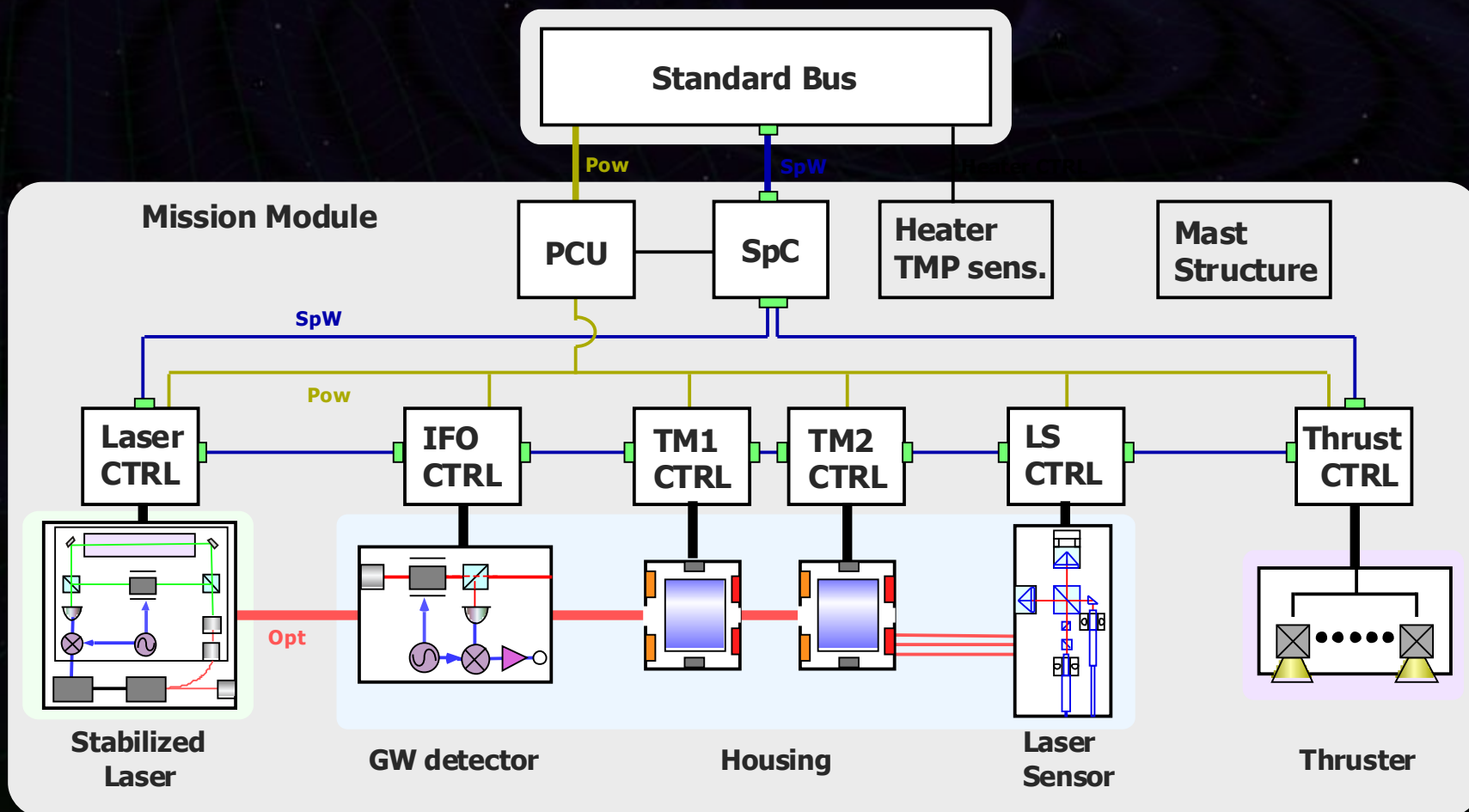
16ch 16bit ADC/DAC

Digital I/O 各10ch

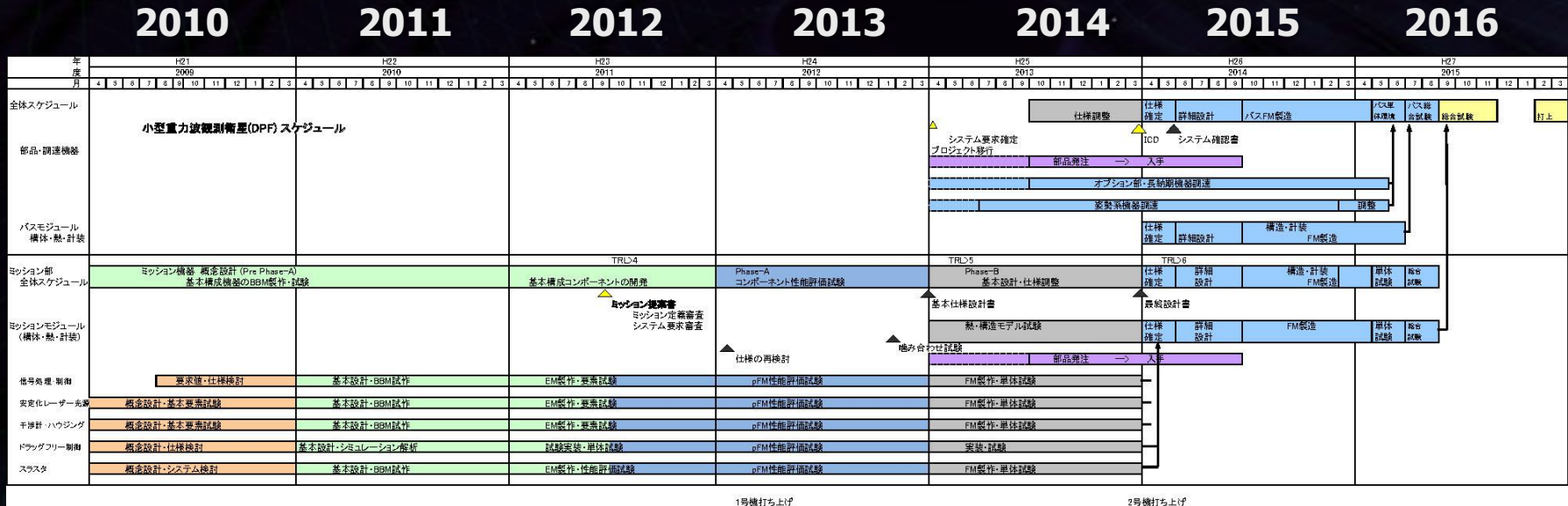
バッファアンプ搭載.



DPFミッション部ブロック図



DPFスケジュール



概念設計

BBM

EM / pFM

FM

衛星FM

総合試験

↑
ミッション提案

TRL 4以上が必要

基本技術要素が同時に動作し、
実証モデルとして性能を発揮し
ていること'

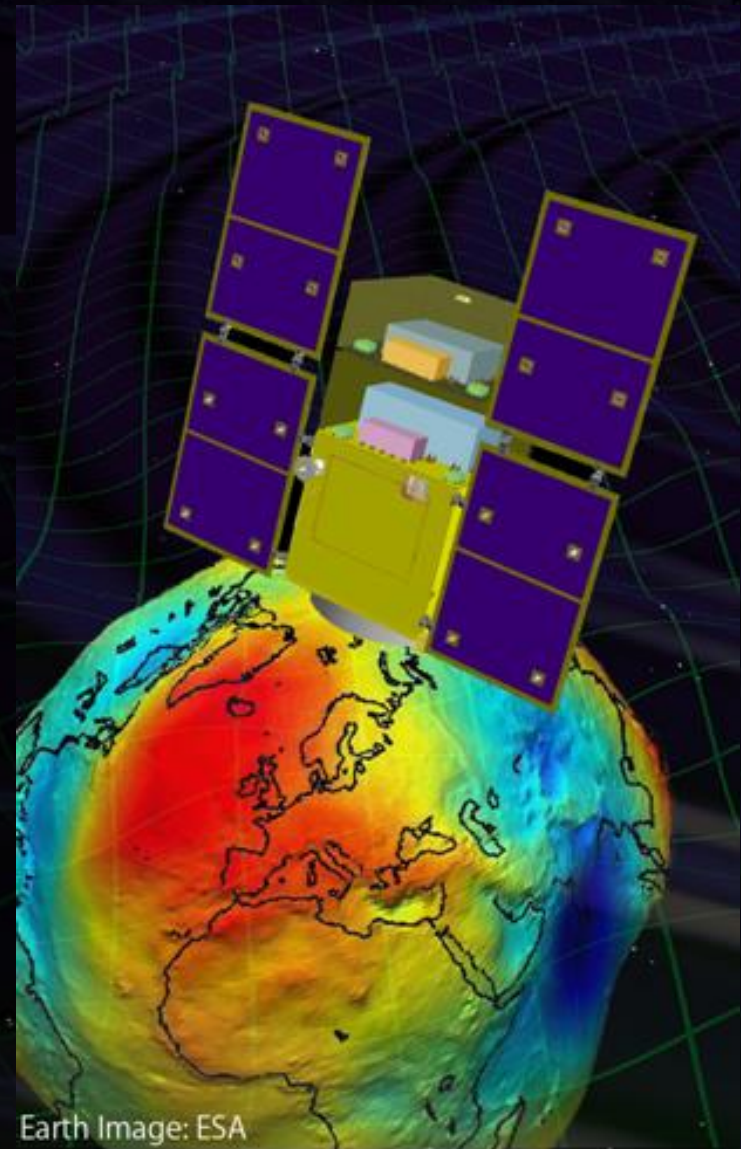
↑
コンポーネントFM完成

仕様を満たす
各種環境試験に合格

DPF WG members



青柳巧介, 我妻一博, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二, 新谷昌人, 安東正樹, 井岡邦仁, 池上健, 石川毅彦, 石崎秀晴, 石徹白晃治, 石原秀樹, 和泉究, 市來淨與, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 上田暁俊, 植田憲一, 歌島昌由, 江尻悠美子, 榎基宏, 戎崎俊一, 江里口良治, 大石奈緒子, 大河正志, 大橋正健, 大原謙一, 大淵喜之, 岡田健志, 岡田則夫, 河島信樹, 川添史子, 河野功, 川村静児, 神田展行, 木内建太, 岸本直子, 國中均, 國森裕生, 黒田和明, 小泉宏之, 洪鋒雷, 郡和範, 穀山涉, 苔山圭以子, 古在由秀, 小薫康史, 固武慶, 小林史歩, 西條統之, 齊藤遼, 坂井真一郎, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀親, 佐々木節, 佐藤修一, 佐藤孝, 柴田大, 真貝寿明, 杉山直, 鈴木理恵子, 諏訪雄大, 瀬戸直樹, 宗宮健太郎, 祖谷元, 高島健, 高野忠, 高橋走, 高橋慶太郎, 高橋忠幸, 高橋弘毅, 高橋史宜, 高橋龍一, 高橋竜太郎, 高森昭光, 田越秀行, 田代寛之, 田中貴浩, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 辻川信二, 常定芳基, 坪野公夫, 豊嶋守生, 鳥居泰男, 中尾憲一, 中澤知洋, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中村卓史, 中山宜典, 西澤篤志, 西田恵里奈, 西山和孝, 丹羽佳人, 沼田健司, 能見大河, 橋本樹明, 端山和大, 原田知広, 正田涉, 姫本宣朗, 平林久, 平松尚志, 福嶋美津広, 藤田龍一, 藤本真克, 二間瀬敏史, 船木一幸, 細川瑞彦, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英雄, 宮川治, 宮本雲平, 三代木伸二, 向山信治, 武者満, 森澤理之, 森本睦子, 森脇成典, 八木絢外, 山川宏, 山崎利孝, 山元一広, 柳哲文, 横山順一, 吉田至順, 吉野泰造, 若林野花, 阿久津智忠, 松本伸之, 正田亜八香, 道村唯太, 田中伸幸, 黒柳幸子, 陳たん, 江口智士, 権藤里奈



Earth Image: ESA

まとめ

DECIGOパスファインダー (DPF)

DECIGOのための最初の前哨衛星

小型衛星 1 機 (95cm立方x2, 450kg)
地球周回軌道 (高度 500km, 太陽同期軌道)



宇宙・地球の観測

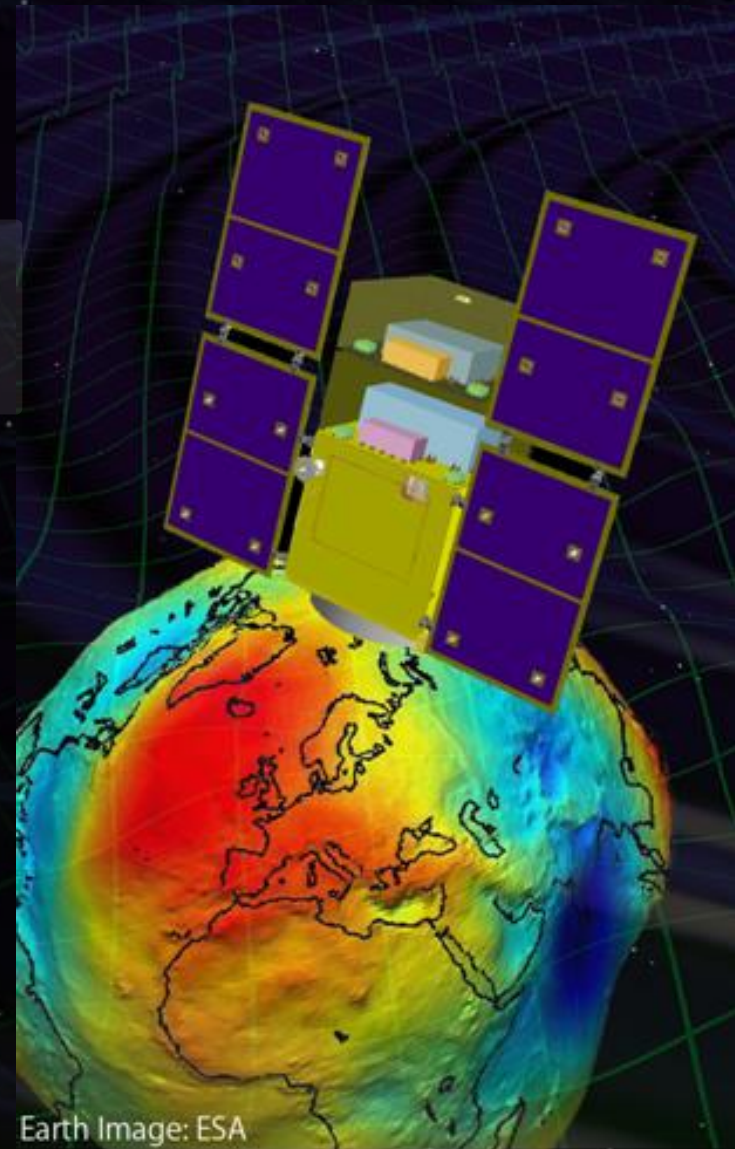
→ 銀河の成り立ち, 地球環境モニタ

先端科学技術の確立

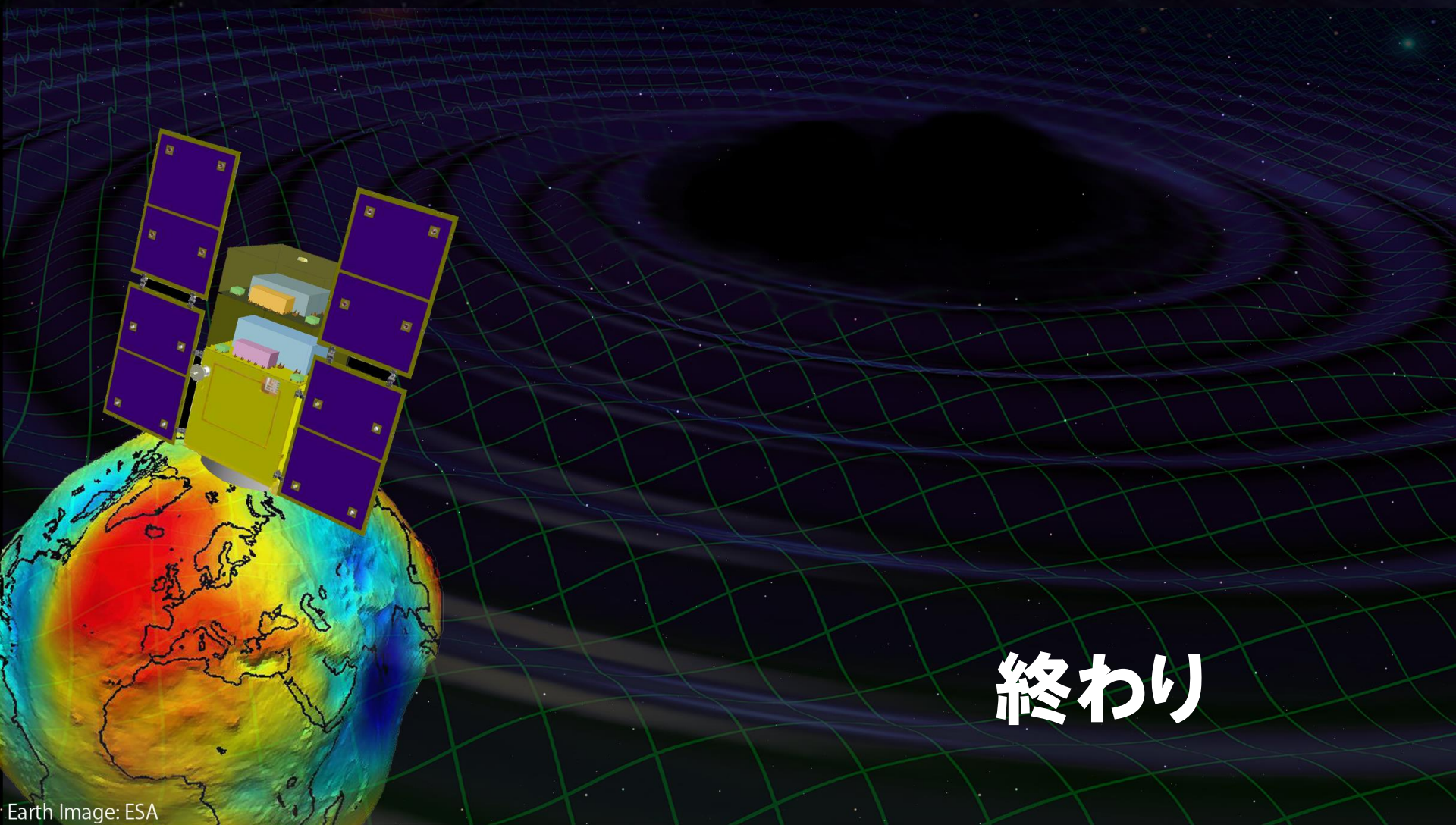
→ 無重力環境利用の新しい可能性

BBM試作・試験が進行中

SDS-1/SWIMによる宇宙実証



Earth Image: ESA



終わり

Earth Image: ESA

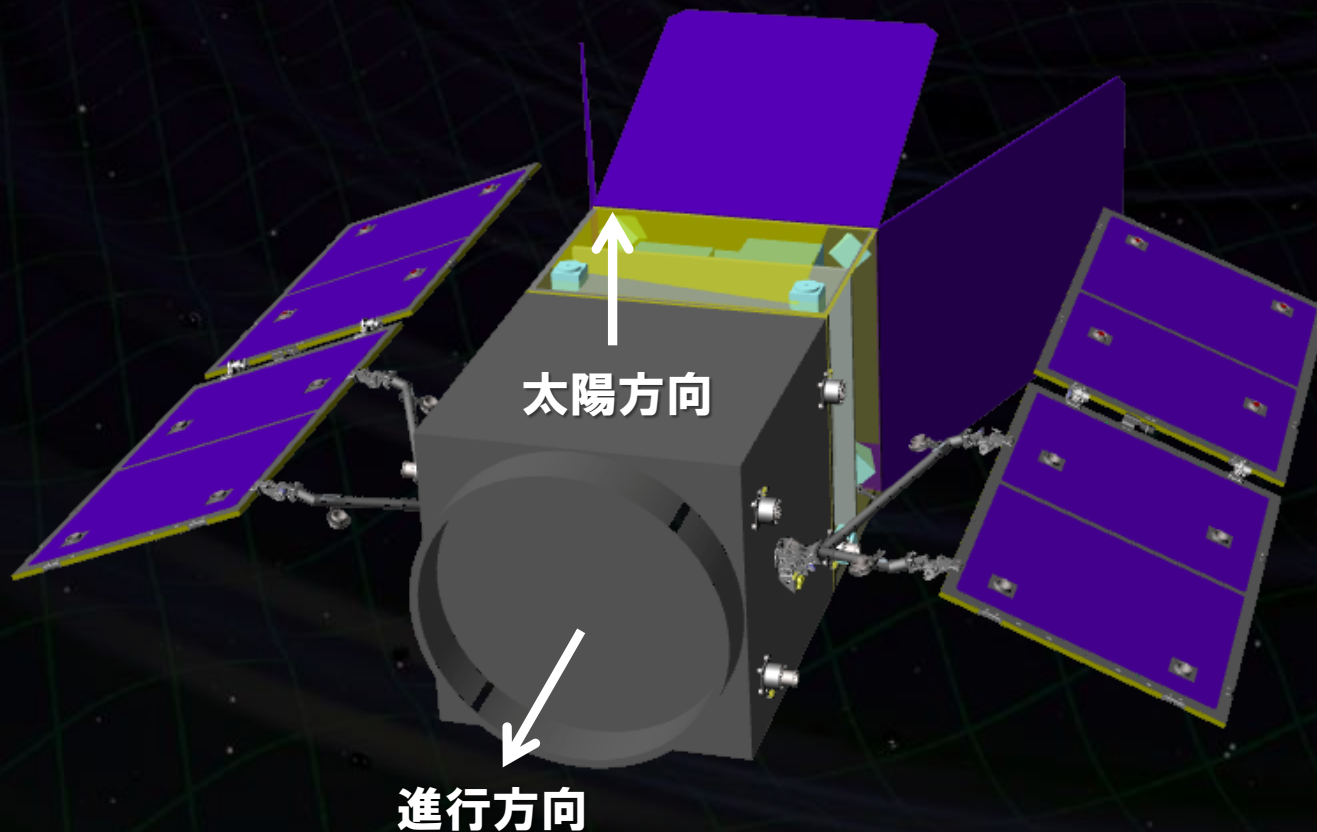
DECIGO-WG **メンバー** 145名

理論	57名
実験	80名
シニア	8名

実験 80名の内訳

KAGRAでも主要タスクを担うメンバー	17名 (21%)
KAGRAでも一部のタスクを持つメンバー	3名 (3%)
DECIGO/DPFのみに参加	57名 (71%)
国外	4名 (5%)

- DPF衛星のミッション検討 (法政大, 安東, 阿久津)
 - 構造, ドラッグフリー, ミッションシーケンス, 受動姿勢安定など



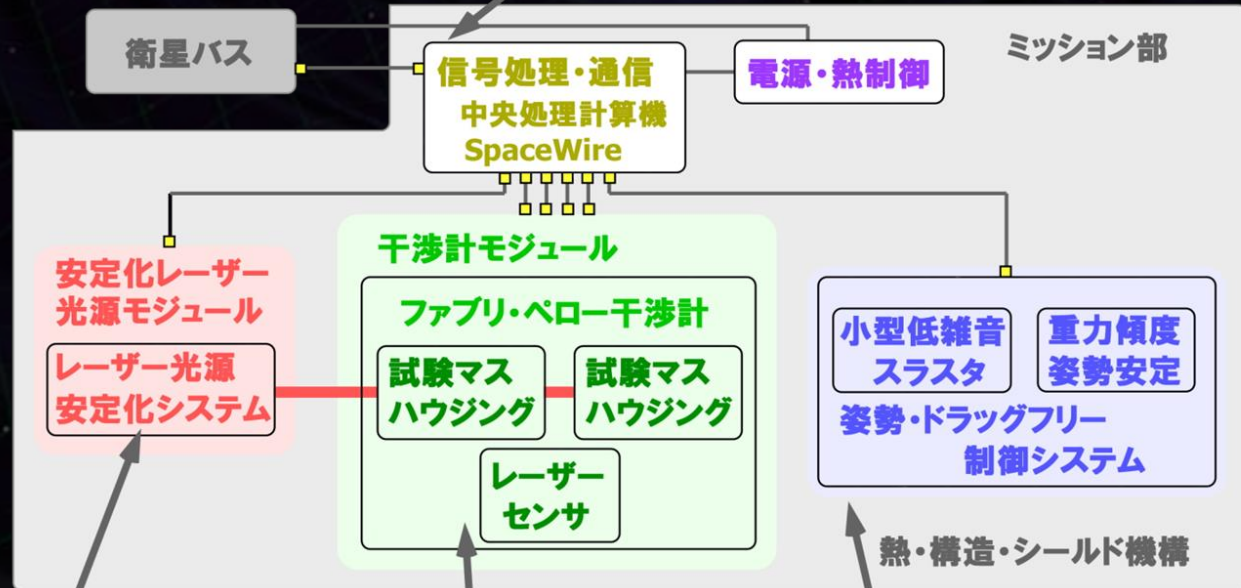
バックアップ

推進体制



神田 (大阪市大)
中村, 田中, 瀬戸 (京都大学)
井岡 (KEK), 横山 (東京大学)
データ解析、理論研究

高島, 坂井 (宇宙科学研究本部)
安東 (京都大学), 中澤 (東京大学)
ミッション検討
バスとのインターフェース
信号処理システムの開発



DPF-WG
84名
DECIGO
145名

沼田 (NASA/GSFC)
レーザー光源の開発
武者 (電気通信大学)
安定化レーザーの開発
長野 (情報通信研究機構)
光源安定度の評価

佐藤 (法政大学)
上田, 川村, ATC (国立天文台)
干渉計・ハウジングの開発
麻生 (東京大学)
干渉計の開発
新谷 (東大地震研究所)
地球重力場観測部の開発

船木, 小泉 (宇宙科学研究本部)
堀澤 (東海大学), 中山 (防衛大)
スラスタの開発
森脇 (東京大学)
坂井, 河野 (JAXA)
姿勢制御・ドラッグフリー
システムの開発

- **LISAとの協力関係**

 - LISA/LPFの技術情報や経験の提供, LISA-DECIGO workshop (2008.11)

- **スタンフォード大グループとの協力**

 - DPFの帯電制御, DPFドラッグフリーへの協力

- **NASA/GSFCとの協力**

 - 光源の開発

 - GRACEとの共同観測検討

- **JAXA研究開発本部・軌道・航法グループとの協力**

 - DECIGOのフォーメーションフライト, DPFのドラッグフリー制御への協力

- **東京大学ビッグバンセンター (RESCEU)**

 - DECIGOを主要プロジェクトとしてサポート (2009.4-)

- **地球重力場観測グループ (京大理, 東大地震研, 地球研, NAOJ)**

 - DPFでの観測, データ解析, 得られる科学的成果の検討

- **国立天文台 先端技術センター (ATC)**

 - DECIGO/DPF 実験装置製作などのサポート

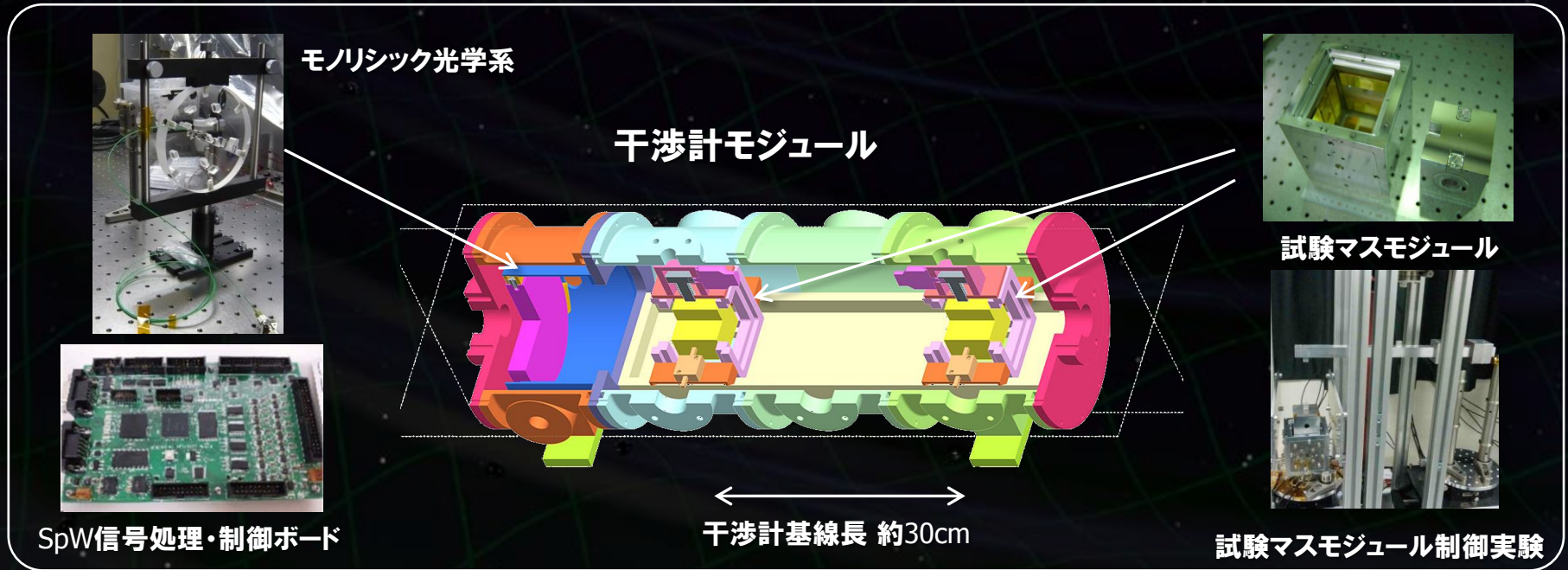
• DPF搭載の干渉計

- 各コンポーネントのBBM試験進行中

(試験マスモジュール, モノリシック光学系, 信号処理).

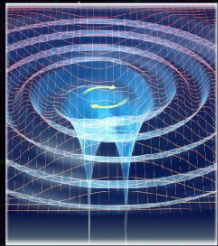
→ 干渉計モジュールとしてパッケージ化.

構造設計と製作進行中.



宇宙・地球の観測

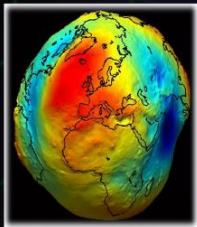
重力波観測



銀河中心付近の中間質量ブラックホールの合体現象を観測。

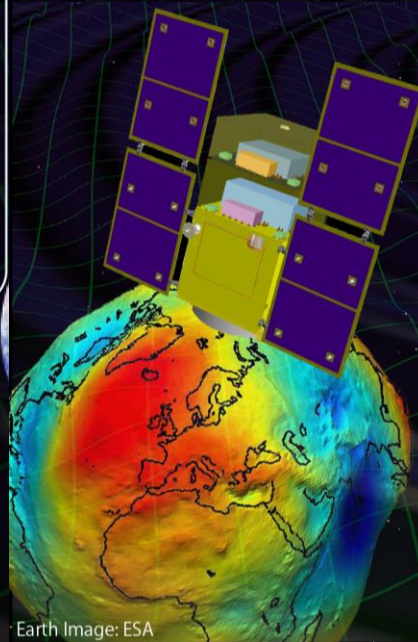
⇒ 銀河形成への知見

地球重力場観測



1mm程度のジオイド高分解能での地球重力場観測。

⇒ 地球環境モニタ

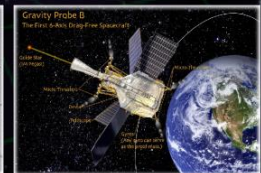
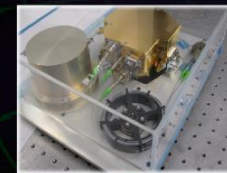
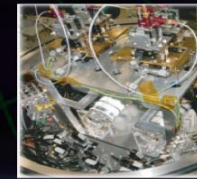


Earth Image: ESA

先端科学技術の確立

無重力精密実験プラットフォーム

- ・干渉計による精密変動計測
- ・安定化レーザー光源の実現
- ・ドラッグフリーによる低振動環境

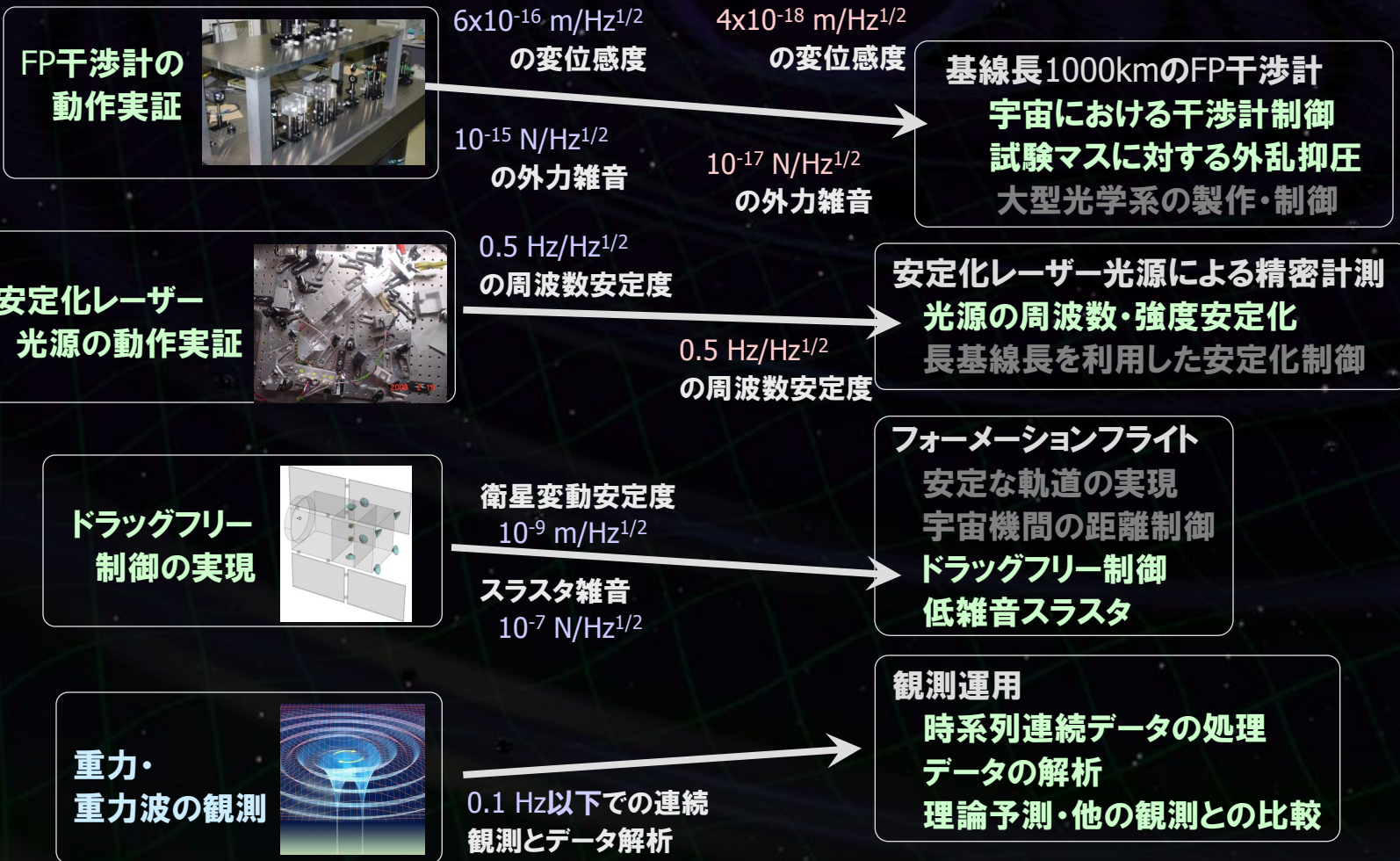


⇒ 宇宙環境利用の新しい可能性

DECIGOのための根幹技術実証

DPFで実証される技術

DECIGOで必要とされる主要技術



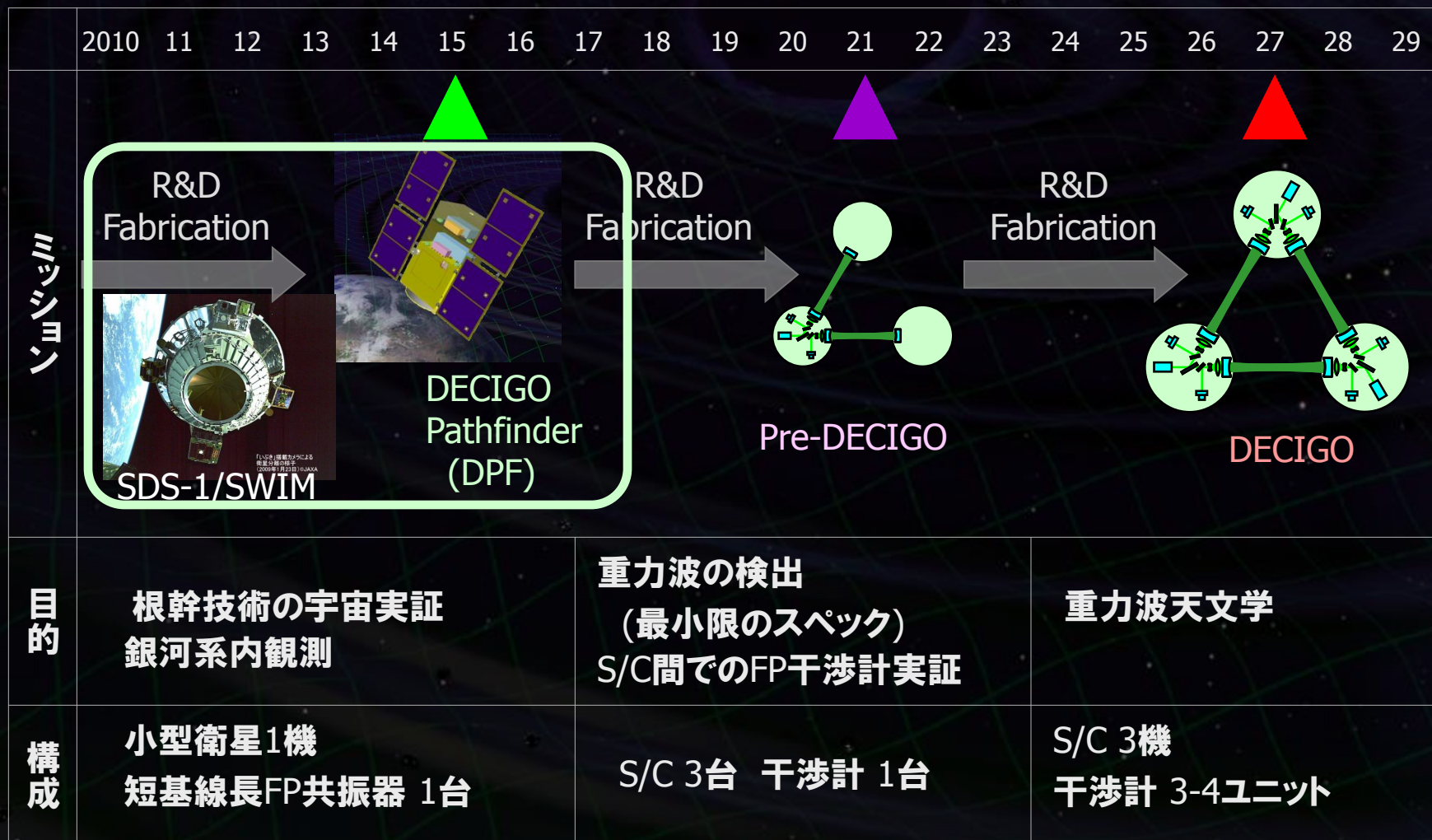
重力波で宇宙を探る



背景画: NASA/WMAP Science Team

DECIGOのロードマップ

Figure: S.Kawamura



光共振型マイケルソン干渉計
アーム長: 1000 km
レーザーパワー: 10 W
レーザー波長: 532 nm
ミラー直径: 1 m

DECIGO

(DECI-hertz interferometer
Gravitational wave Observatory)

宇宙重力波望遠鏡 (~2027)

→ 他では得られない豊富なサイエンス

宇宙の成り立ちに関する知見

インフレーションの直接観測

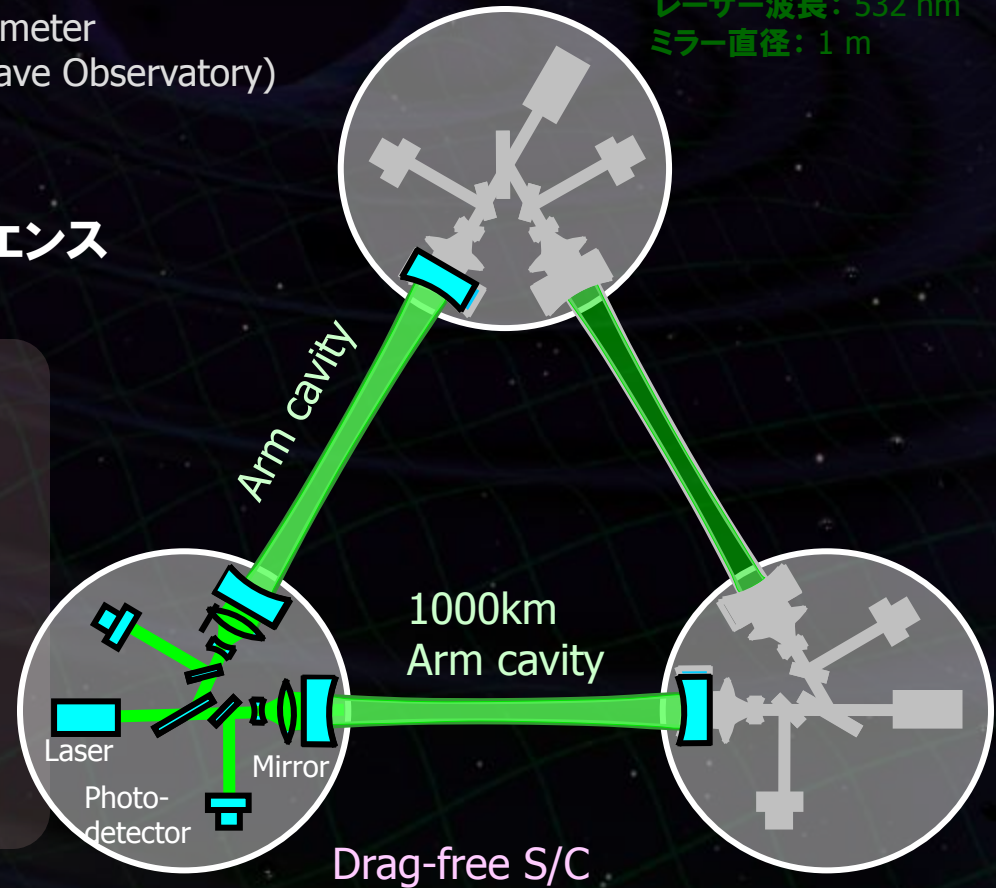
ダークエネルギーの性質

ダークマターの探査

銀河形成に関する知見

ブラックホール連星の観測

宇宙の基本法則に関する知見



互いに1000km離れた3機のS/C
非接触保持された鏡間距離を
レーザー干渉計によって精密測距

太陽公転軌道
最大4ユニットで相関をとる

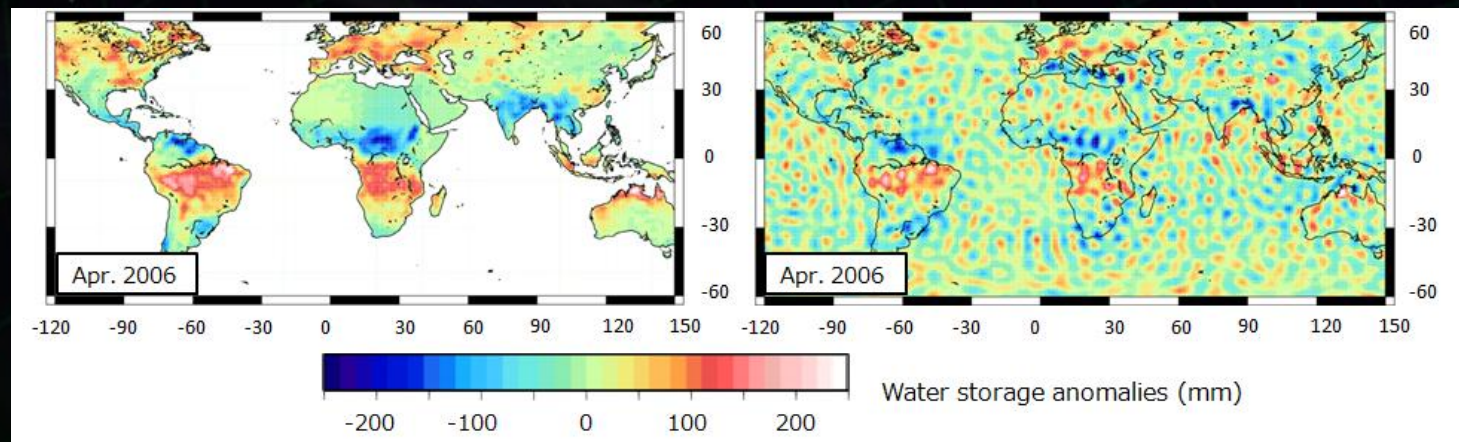
• NASA/GSFC GRACEチームとの共同研究

- GRACE用に開発されたシミュレーションツールを改良
→ DPFの構成で時系列シミュレーション.
- DPFの感度(+安全係数)で陸水変動の情報が得られることを確認.

⇒ ポスター参照 P17 長谷川 他

• 今後

- パラメータサーベイと要求値の確定.
- GRACEとの同時観測によるエリアシング除去の研究.



DPFシステム概要

DPF Payload

Size : 950mm cube
Weight : 150kg
Power : 130W
Data Rate: 800kbps
Mission thruster x12

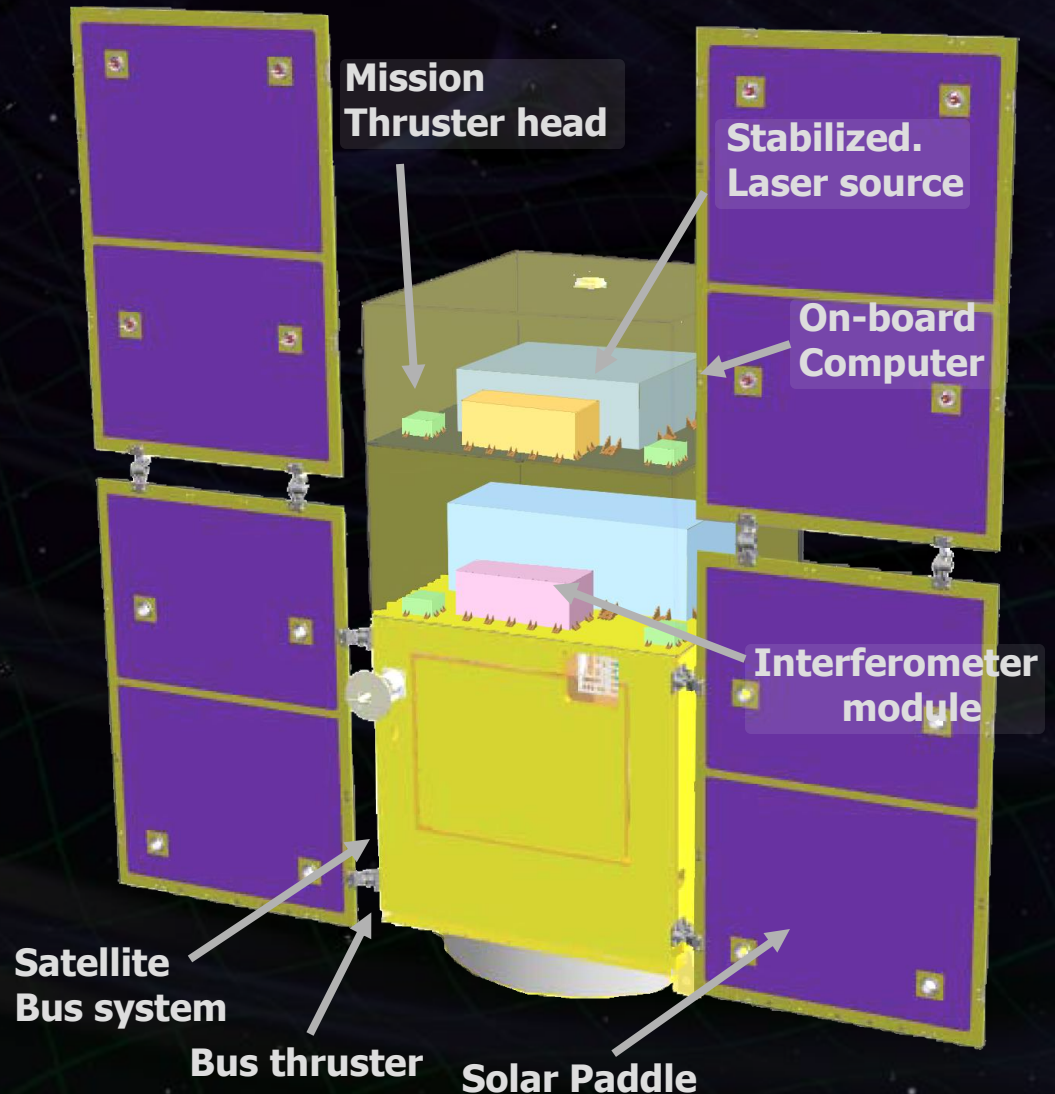
Power Supply
SpW Comm.



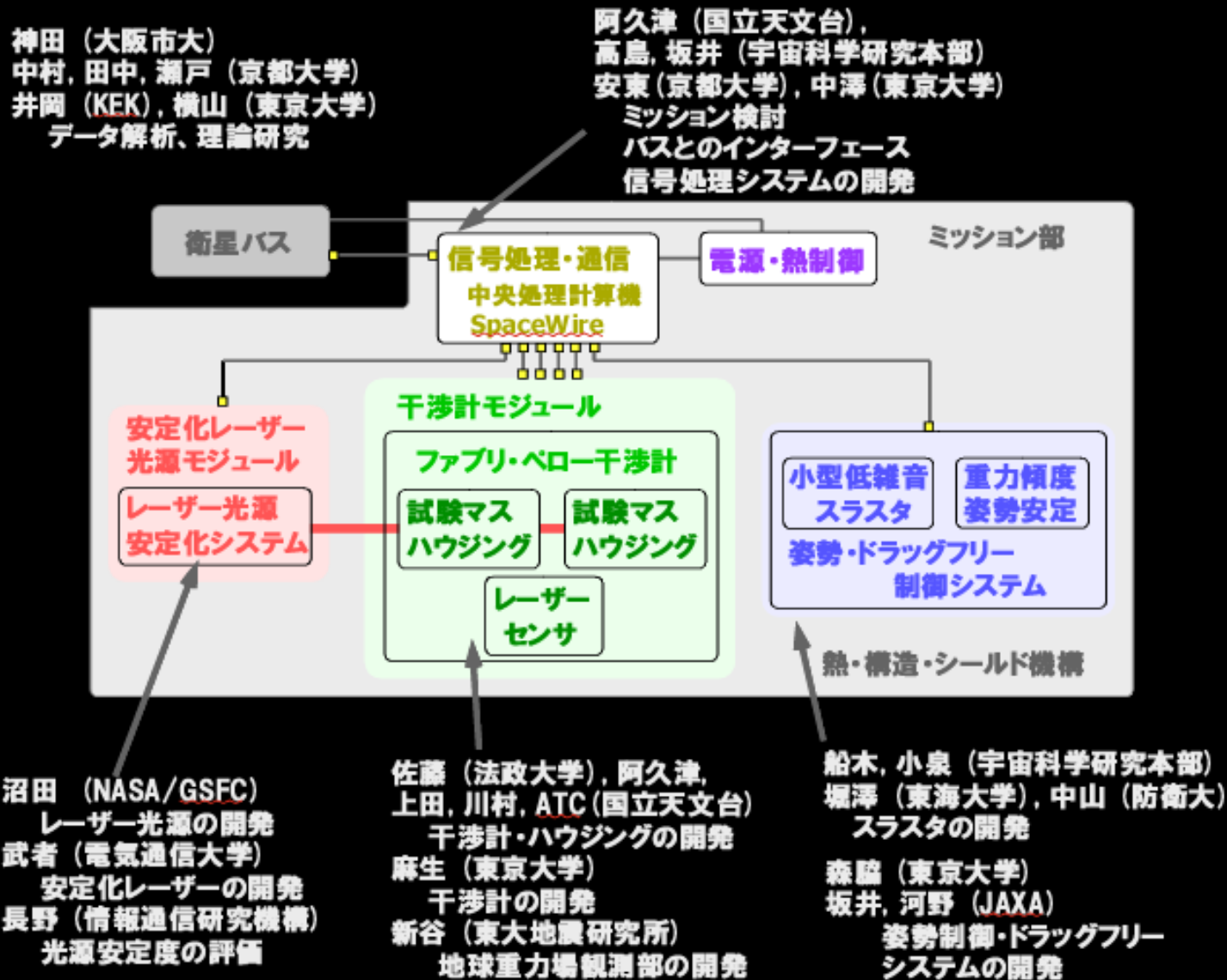
Satellite Bus

(‘Standard bus’ system)

Size :
950x950x1100mm
Weight : 200kg
SAP : 960W
Battery: 50AH
Downlink : 2Mbps
DR: 1GByte
3N Thrusters x 4



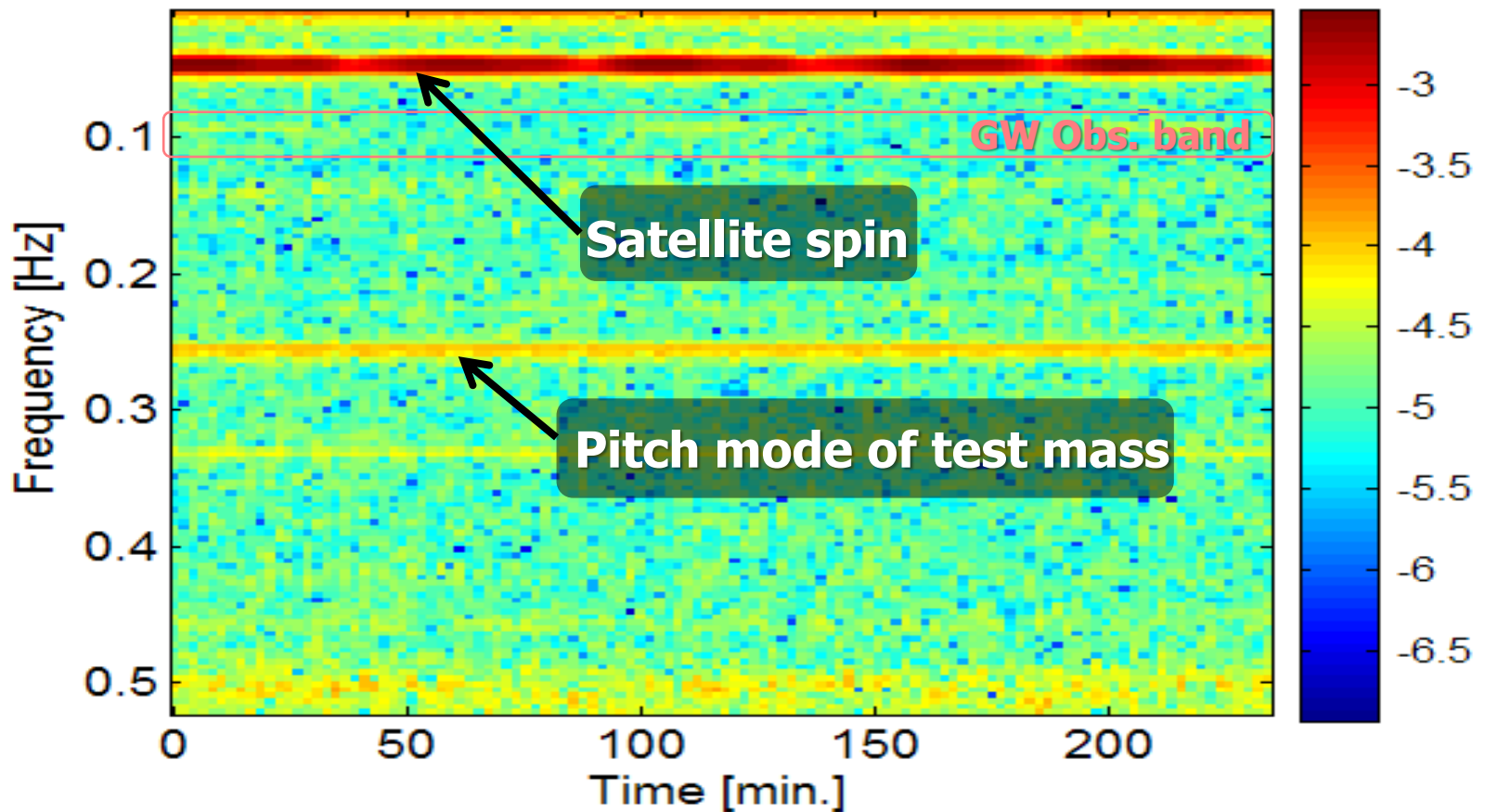
推進体制

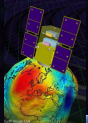


DPF-WG
 101名
 DECIGO
 145名

SWIM observation (2nd run on July 15, 2010 ~240 min.)

⇒ 背景重力波に対する上限値 (P15 穀山 他)





•DPFのサイエンス 重力波観測・地球重力場観測

P15 SDS-1/SWIMによる重力波観測とDPF要素技術の宇宙実証 穀山渉 (東大理)

P16 DECIGO pathfinderにおける重力場測定の感度評価 正田亜八香 (東大理)

P17 DECIGO Pathfinderによる地球重力場観測のシミュレーション 長谷川崇 (京大理)

•DPFのミッション検討と根幹技術開発

P18 DPF衛星の干渉計部および信号取得系の開発 阿久津智忠 (国立天文台)

P19 DECIGO Pathfinder向けプロトタイプ干渉計実験 道村唯太 (東大理)

P22 DECIGO pathfinderの試験マス制御系の開発(2) 陳たん (東大天文)

P20 DPFのための衛星搭載用高安定化光源の開発 武者 満 (電気通信大学)

P21 DPFのドラッグフリー制御系の開発 佐藤修一 (法政大理工)

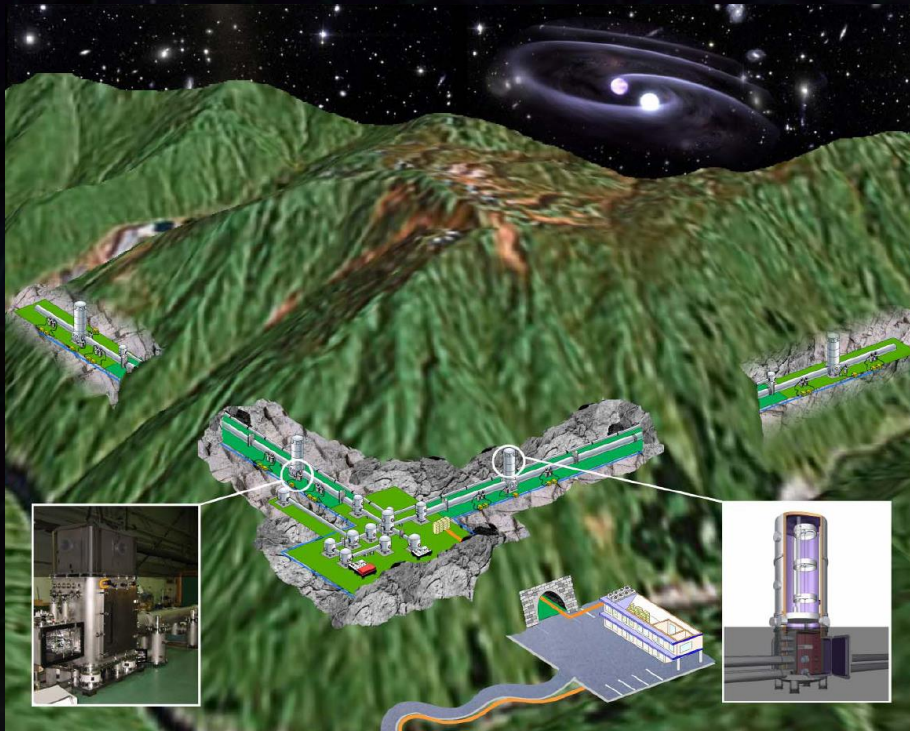
LCGT and DECIGO

LCGT (~2016)

Terrestrial Detector

→ High frequency events

Target: GW detection

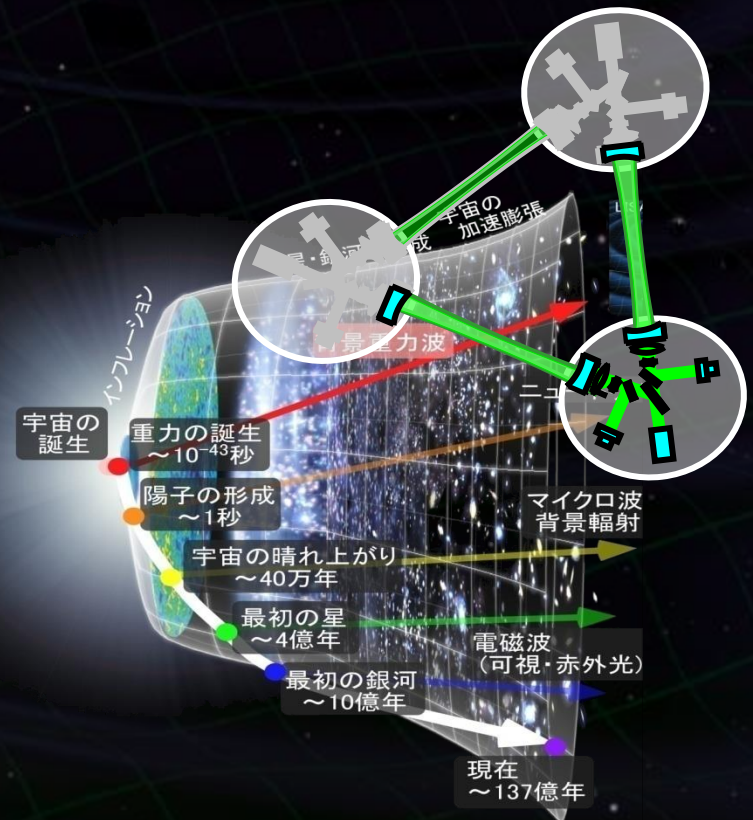


DECIGO (~2027)

Space observatory

→ Low frequency sources

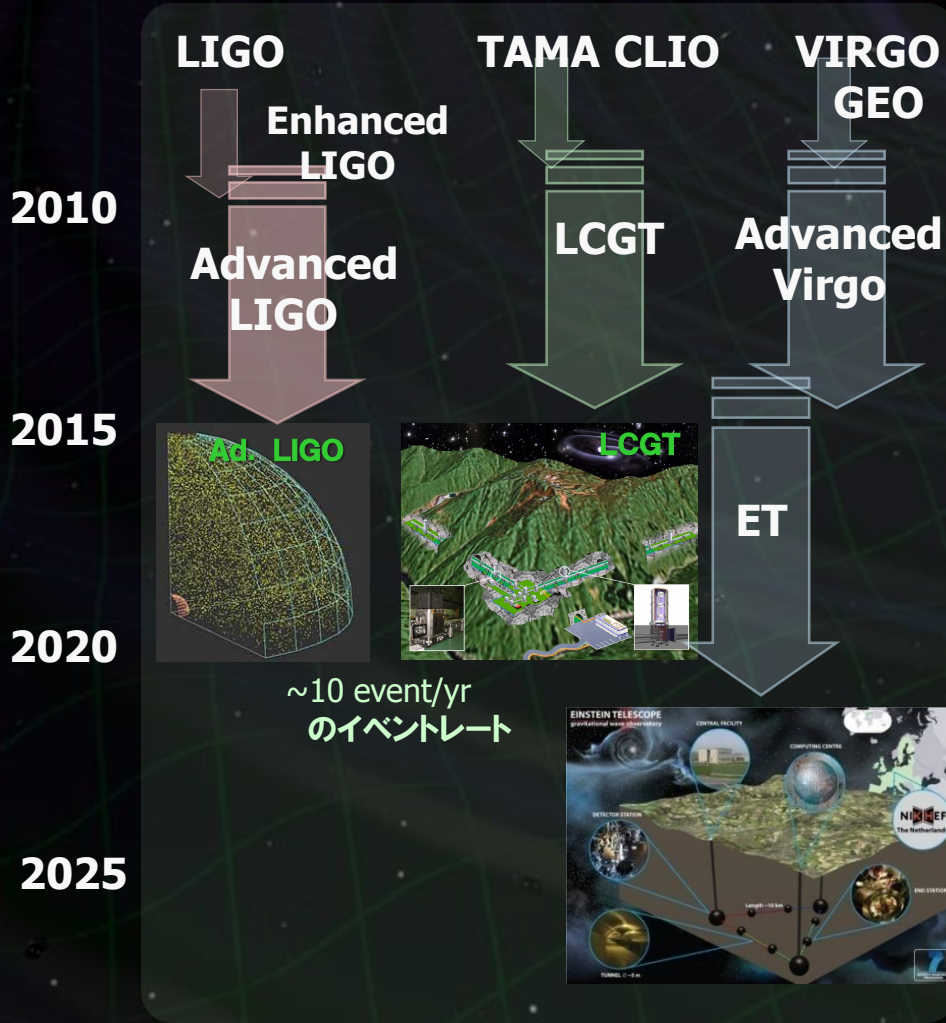
Target: GW astronomy



重力波天文学のロードマップ

地上望遠鏡

より遠くを観測 (10Hz-1kHz)



宇宙望遠鏡

低周波数帯の観測



3種類の観測手法, 衛星ミッション

高軌道-低軌道衛星追跡 (SST High-Low)

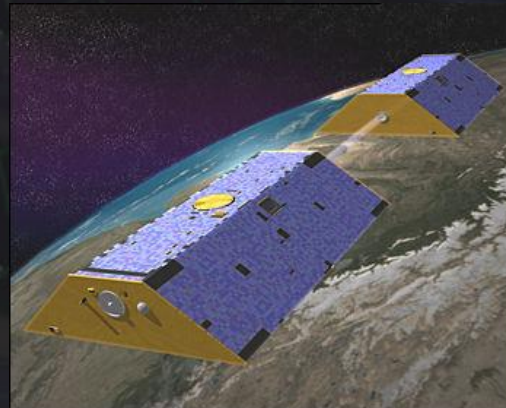
- GPSなどの測位システムで衛星軌道を連続測定
- 搭載加速度計データを用いて擾乱摂動を差し引く



CHAMP (GFZ, 2000-)

低軌道-低軌道衛星追跡 (SST Low-Low)

- 2機の衛星間の距離変動から、重力場を観測
- 搭載加速度計データを用いて擾乱摂動を差し引く



GRACE (NASA, 2002-)

衛星による重力勾配観測 (Satellite GG)

- 衛星搭載の**重力勾配計**により、重力場を観測
- 衛星擾乱を抑えるため、ドラッグフリー制御を行う

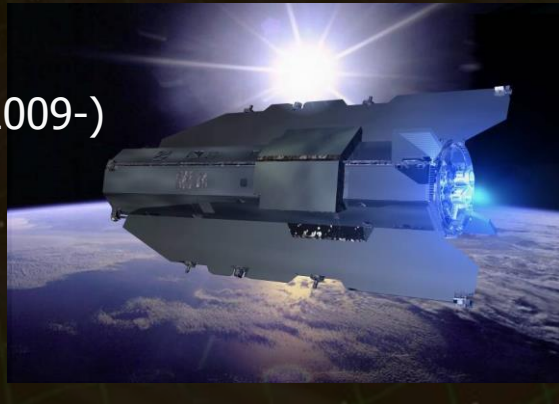


GOCE (ESA, 2009-)

同じ観測方式：衛星による重力勾配観測 (Satellite GG)

GOCE

(ESA, 2009-)



衛星搭載の重力勾配計により、重力場を観測
衛星擾乱を抑えるため、ドラッグフリー制御を行う

高度 295km, 3軸の重力勾配計

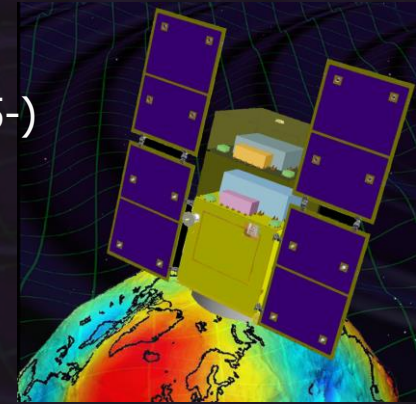
感度 5×10^{-12} m/s²/Hz^{1/2}

基線長 0.5m

重量 1,200 kg

DPF

(JAXA, 2015-)



高度 500km, 1軸の重力勾配計

感度 9×10^{-15} m/s²/Hz^{1/2}

基線長 0.3m

重量 350 kg

地球重力ポテンシャルを 球面調和関数展開で表現

$$U(r, \lambda, \phi) = \frac{GM}{r} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^l P_{lm}(\sin \phi) \times [C_{lm} \cos(m\lambda) + S_{lm} \sin(m\lambda)]$$

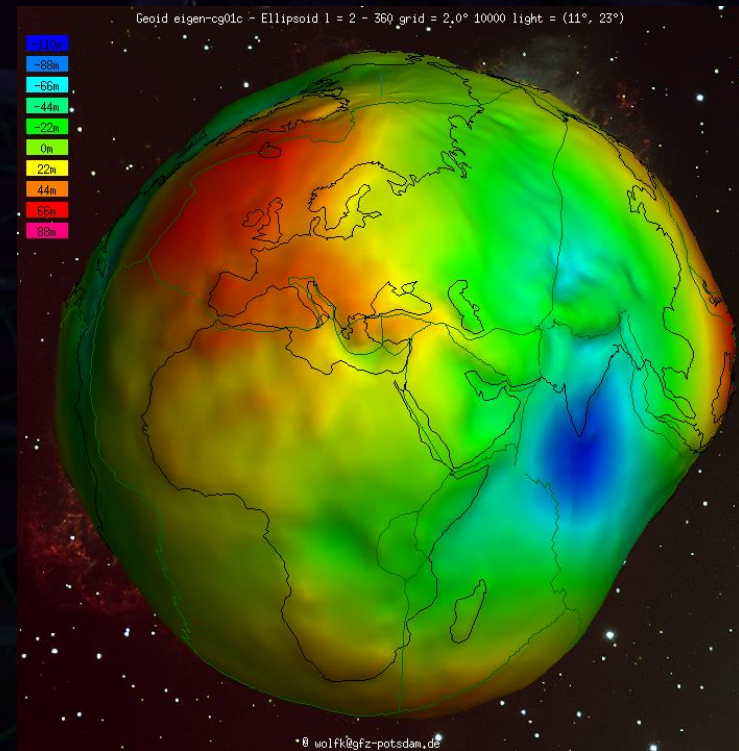
G, M, R : 重力定数, 地球質量, 地球半径

r, λ, ϕ : 軌道半径, 経度, 緯度

P_{lm} : Legendre 陪関数

係数 C_{lm}, S_{lm} :

地球内部の質量分布に依存する
衛星による測定などの観測から求める

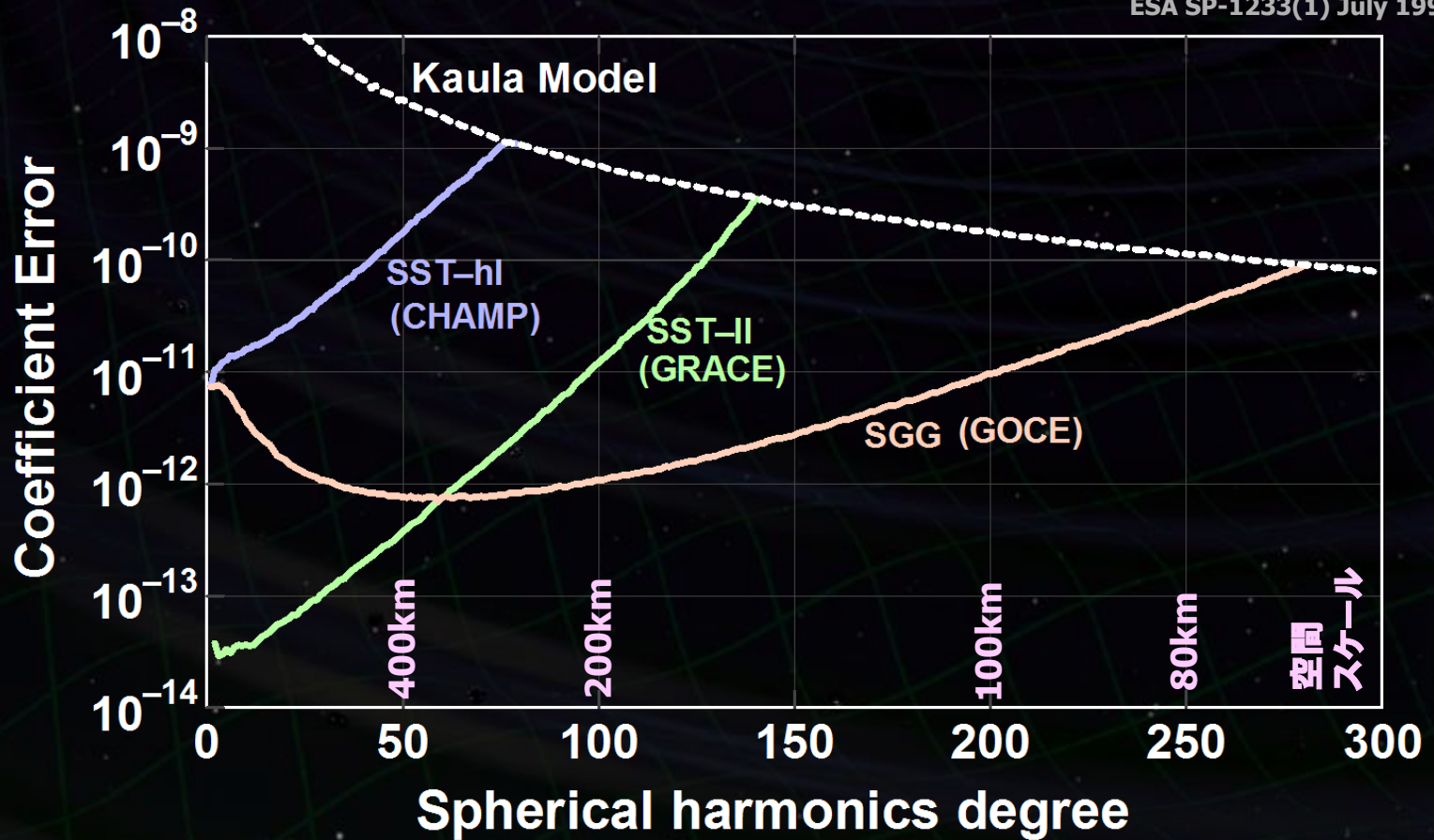


International Centre for Global
Earth Models (ICGEM)
[http://icgem.gfz-
potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html](http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html)

衛星重力ミッションによる観測性能の比較

(球面調和関数展開係数の観測精度)

Report for Mission Selection
Gravity Field and Steady-State
Ocean Circulation Mission
ESA SP-1233(1) July 1999.



我々の銀河系内の ブラックホール 合体現象からの重力波

DPFの観測周波数 (0.1-1Hz)

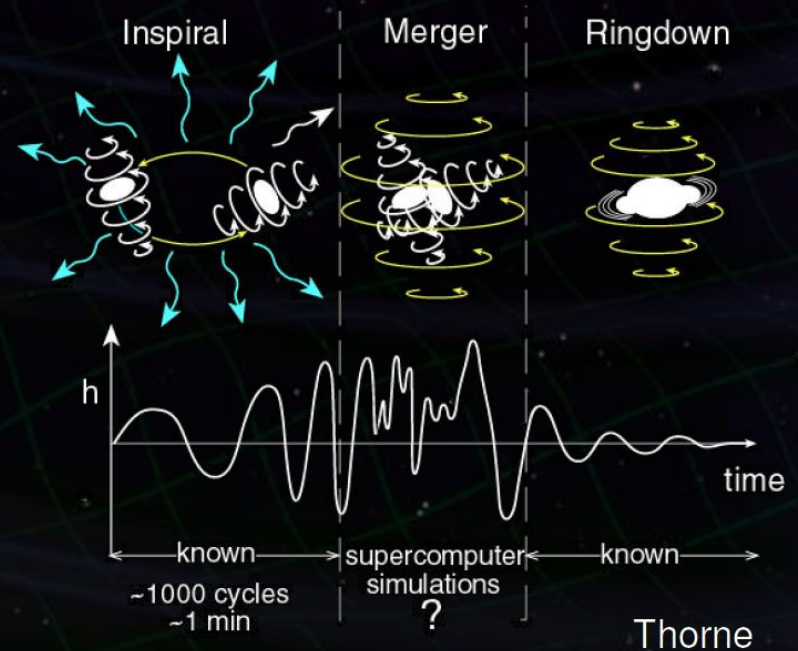
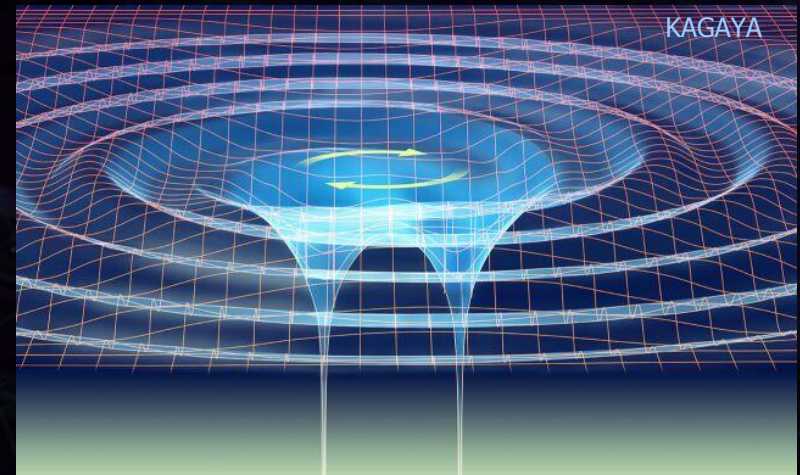
中間質量ブラックホール
(質量 $10^3 - 4 \times 10^5 M_{\text{sun}}$) が対象

最大100kpcの距離まで観測可能

⇒ 銀河中心BH, 球状星団中のBH
の形成メカニズムに対する知見

他の手段では観測が困難

→ これまでにない観測結果となる



DPFによる重力波の観測

球状星団中のBH (我々の銀河内に約150の球状星団)

中心付近の星の運動
から BH質量を推定 (23個)

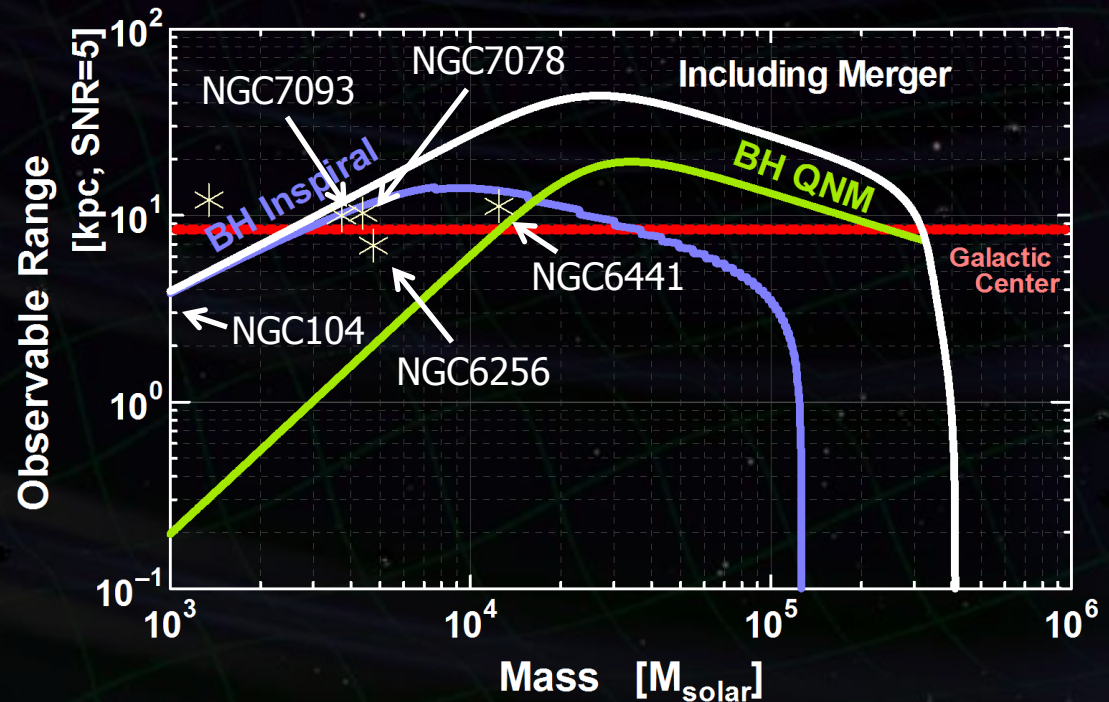


BH同士の合体からの
重力波を検出可能 (5個)



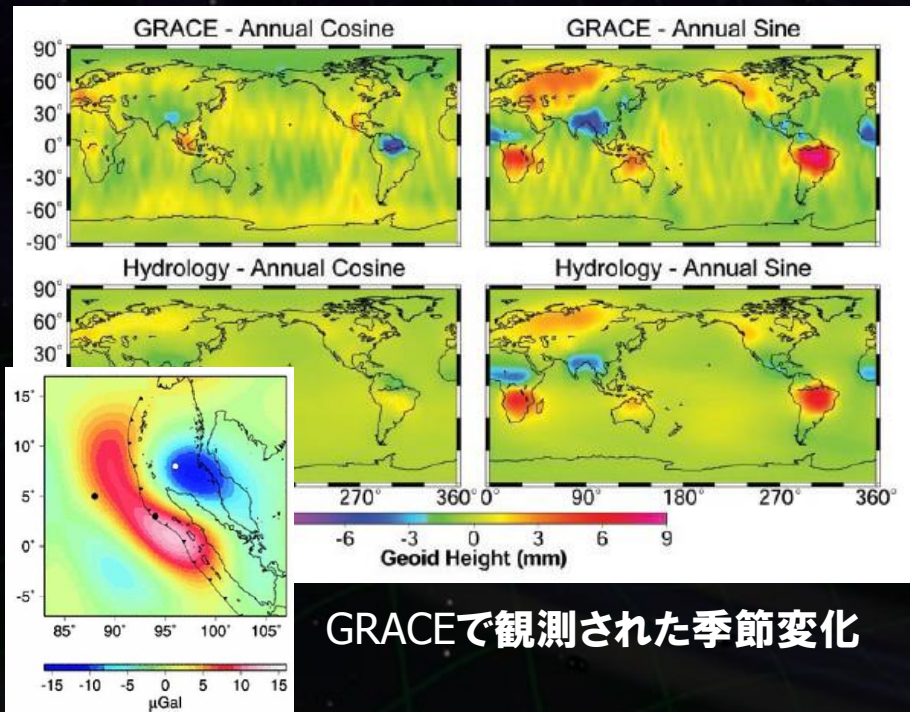
~30個の球状星団が観測範囲内

Globular clusters known
to have black holes



人工衛星から地球重力ポテンシャルを観測

⇒ 全地球に対して、網羅的・均質な観測データ



グローバルな重力ポテンシャルの決定

→ 地球形状の基準 (ジオイド)

時間変動のモニター

→ 地球ダイナミクスの総体

地球規模の水の監視

地震・火山噴火にともなう

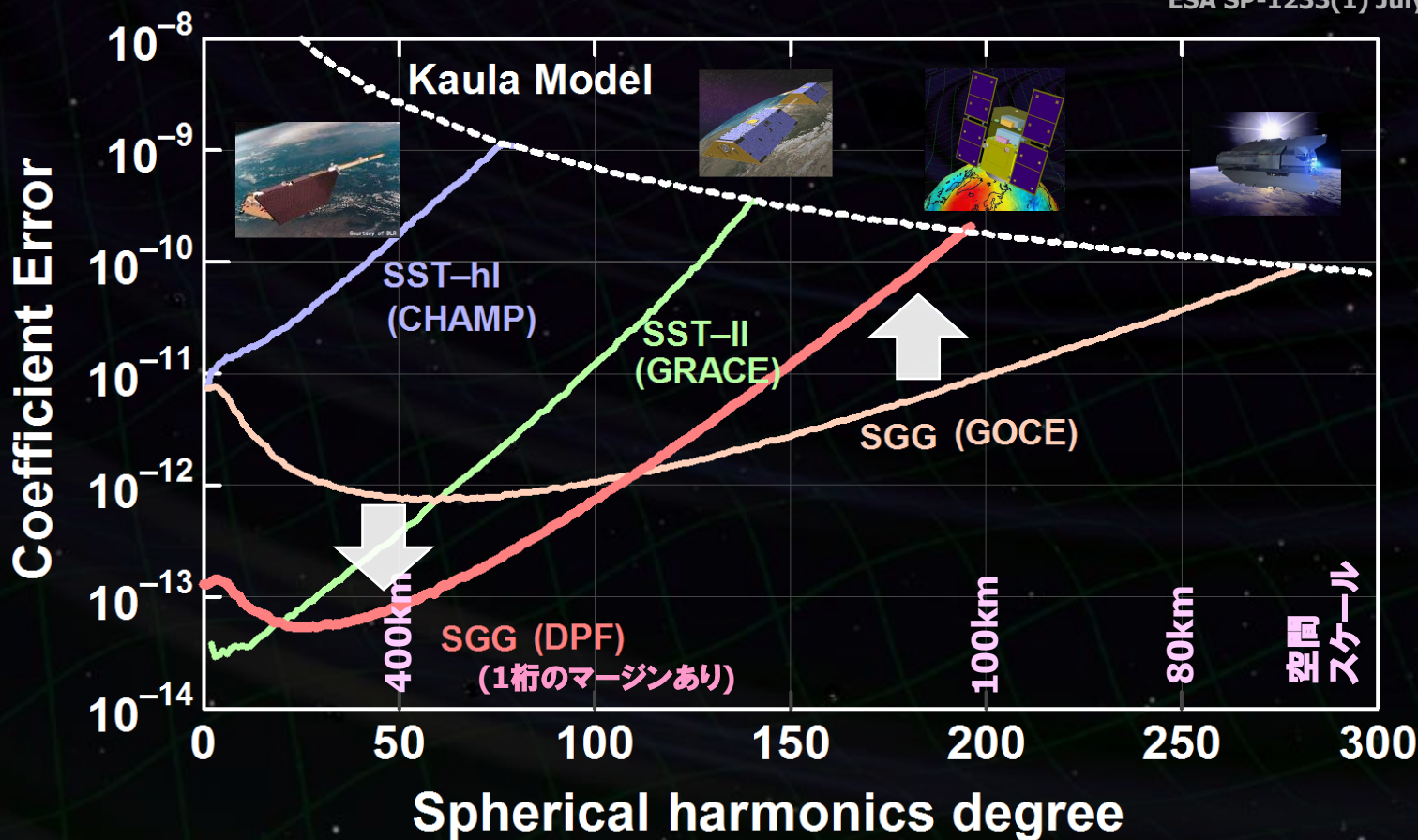
地殻変動の検知・予測

DPFの観測精度

低次係数 (大スケール) で良い感度 ← 高いセンサ感度

高次係数 (小スケール) で悪化 ← 高い軌道高度

Report for Mission Selection
Gravity Field and Steady-State
Ocean Circulation Mission
ESA SP-1233(1) July 1999.



地球重力場観測の現状

CHAMP, GRACE, GOCEが稼働中

•地球形状

2190次までの係数データ
(GRACEなど, 2008)

⇒ 高精度・高分解能な地球形状基準

•時間変動

アマゾン流域, ヒマラヤなどの
陸水季節変動の観測データ
地震による地殻変形の観測
(スマトラ沖地震 2004年)

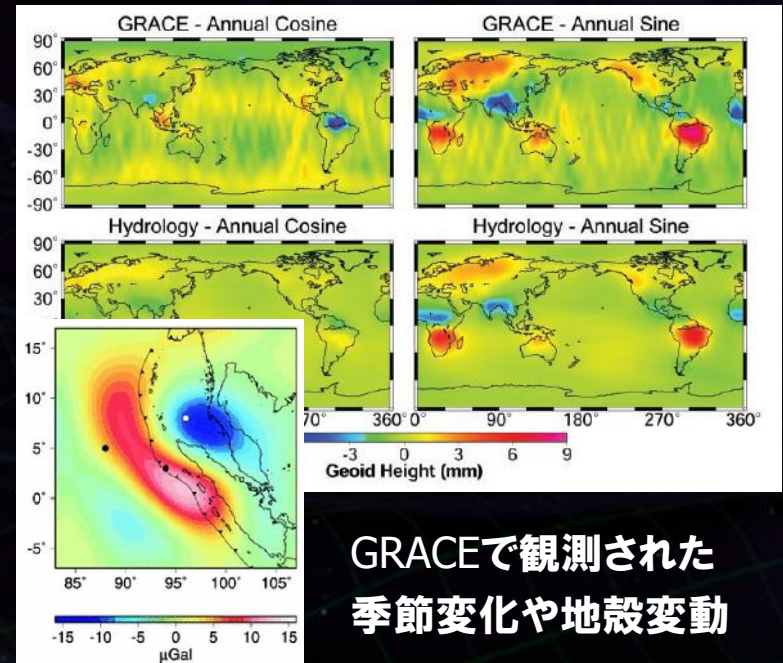
⇒ 2012年頃には運用寿命を迎える見込み

GRACE-FOが採択 (NASA)

GRACEをベース, レーザー測距を追加
2016年打ち上げ見込み



DPFによる国際観測網の補完
国際共同観測



GRACEで観測された
季節変化や地殻変動

SWIM による観測運転

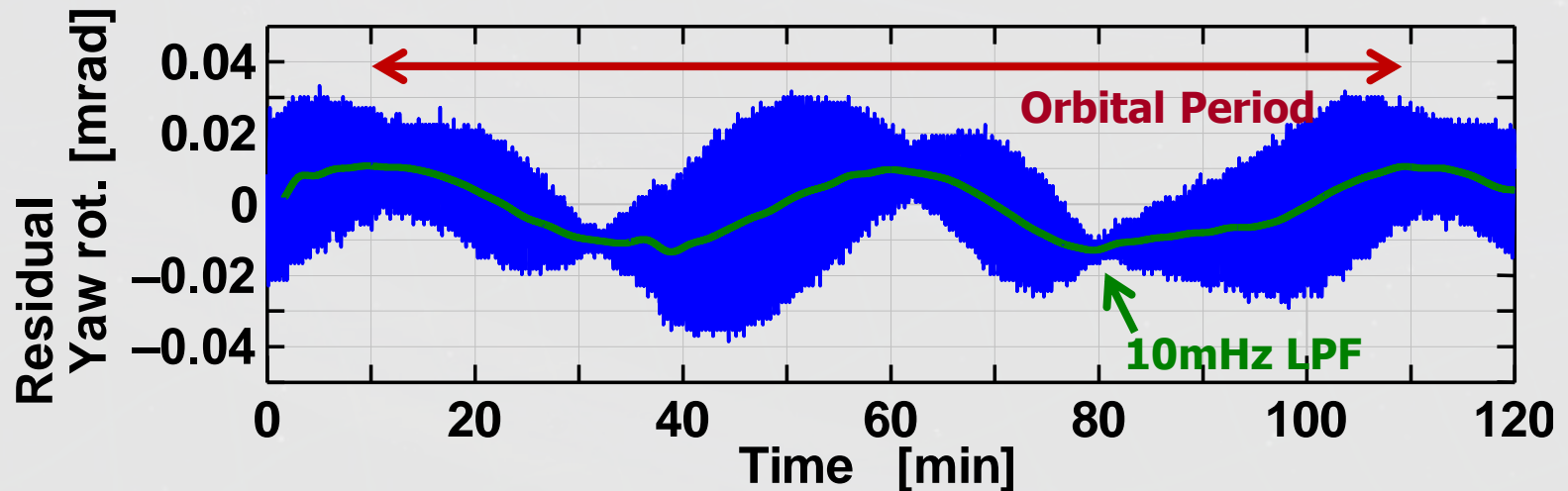
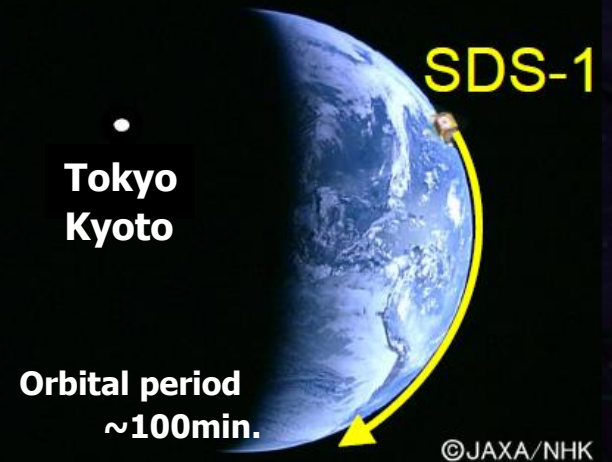
長時間データ取得

Jun 17, 2010 ~120 min.

July 15, 2010 ~240 min.

地上重力波検出器との同時観測運転

⇒ データ解析進行中



観測運用は「平成22年度 飛翔体による宇宙科学観測支援経費」の支援を受けて実施されました。

重力波をもちいて、宇宙の成り立ちと進化を解き明かす。

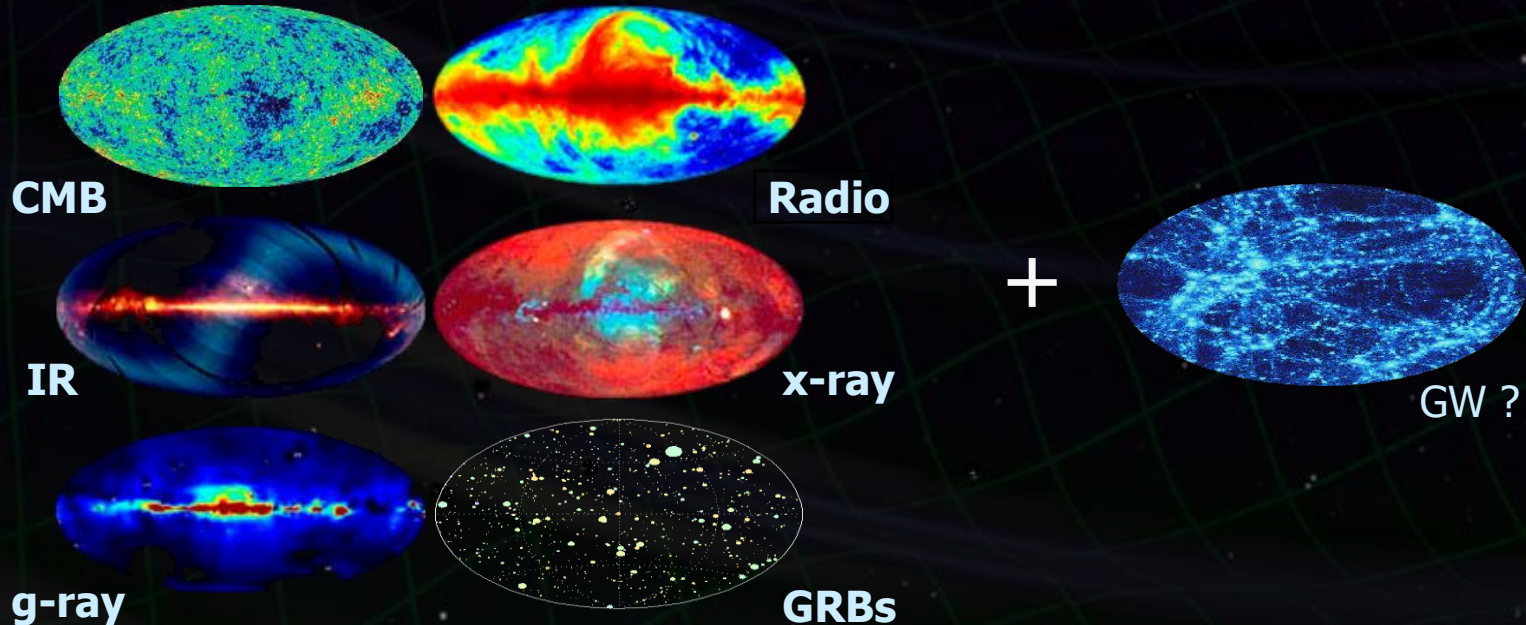
重力波の特徴

質量の加速度運動により生成
物質に対して強い透過力



宇宙を観測する新しい手段

電磁波と相補的・独立な観測
他では見ることの出来ない現象
‘晴れ上がり’前の初期宇宙
激しい天体現象の内部



重力波で宇宙を探る



背景画: NASA/WMAP Science Team

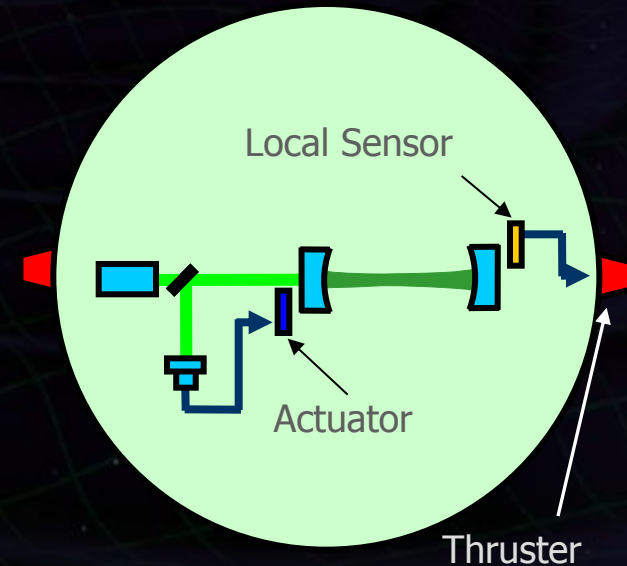
DECIGOパスファインダー (DPF) DECIGOのための最初の前哨衛星

小型衛星 1機 (95cm立方x2, 350kg)
地球周回軌道 (高度 500km, 太陽同期軌道)
試験マス x2 → 基線長30cmのFP共振器
安定化レーザー光源, ドラッグ・フリー制御



宇宙・地球の観測
→ 銀河の成り立ち, 地球環境モニタ
先端科学技術の確立
→ 無重力環境利用の新しい可能性

BBM試作・試験
SDS-1/SWIMによる宇宙実証 が進行中



地上重力波望遠鏡との関係

日本の重力波のグループ

- LCGT : 最優先のプロジェクト
- DECIGO : その先の中心プロジェクト

LCGT : 予算獲得のために準備中

計画最初の3年程度は、トンネル掘削や真空槽設置などの工事が主であり、現在と同程度のエフォート率を維持

重力波/宇宙というフロンティアへの意欲

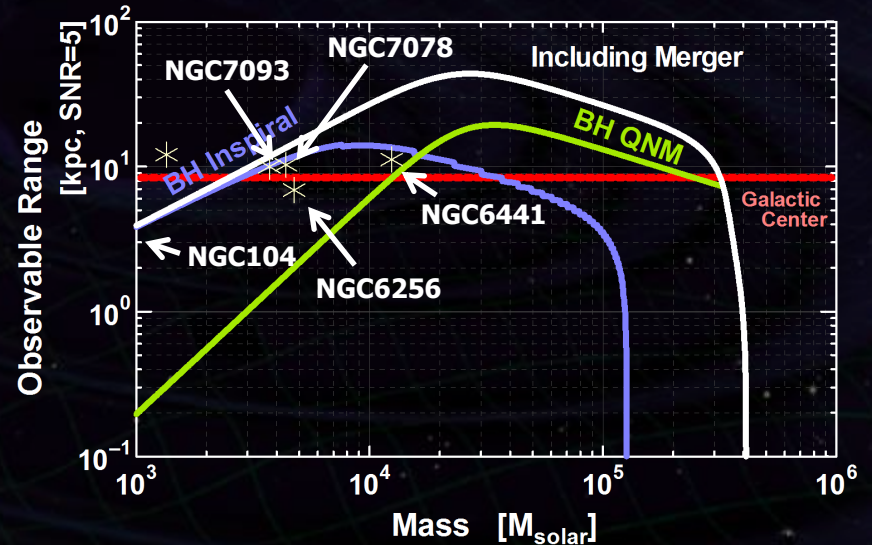
- ⇒ DECIGO/DPFには、
LCGT以外からの研究者/学生
も多く参入



DPFの概要と意義

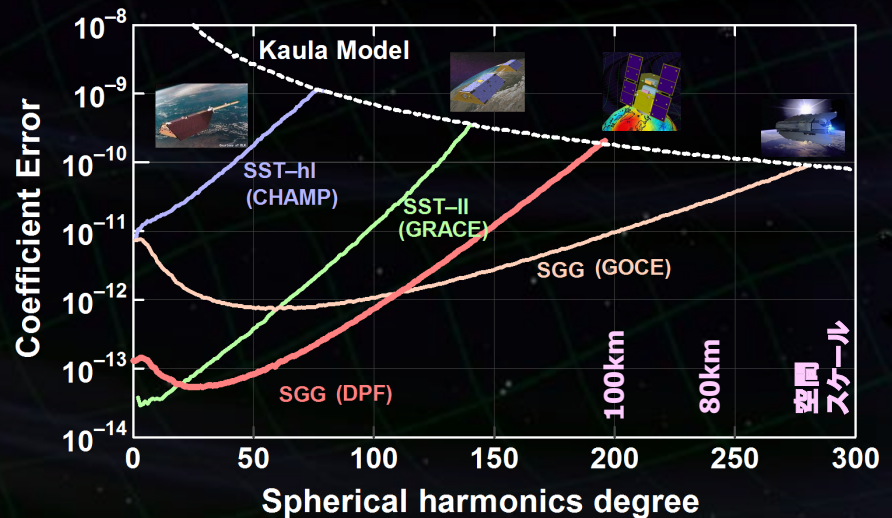
重力波により宇宙を見る
 銀河系内のBH連星合体
 → 巨大BH形成への知見.

DPFの感度では
 ~30個の球状星団を観測可能



重力で地球を見る
 地球重力場の観測
 地球形状の計測
 地球環境モニタ

他の海外ミッションに匹敵する感度
 国際観測網への貢献, 独自の観測
 (2012-2016に国際観測網にギャップ)

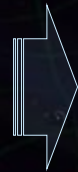


時系列信号をフーリエ変換して規格化

$$\overline{x^2(t)} = \int_0^{\infty} G(f) df$$

平均変動パワー
(RMS変動)²

(パワースペクトル)²



**パワースペクトル: 変動の平均パワーに対する
各周波数成分の寄与を表す**

(例) 衛星の機械的変動要求値

$$1 \times 10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$$



**1Hz (1秒周期) の
変動成分のRMS変動 $1 \times 10^{-9} \text{ m}$**

観測帯域 (0.1-1 Hz) での 変動成分 (スペクトル) が重要

機械的振動

衛星変動 $1 \times 10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$

重力などによる
試験マス変動へのカップリング

磁場

磁場変動 $1 \times 10^{-7} \text{ T/Hz}^{1/2}$

磁場勾配 $3 \times 10^{-6} \text{ T/m}$

磁場勾配途地場変動による
試験マス変動

温度

温度変動 $1 \times 10^{-3} \text{ K/Hz}^{1/2}$

熱輻射揺らぎによる試験マス変動
(ハウジング内面での要求値)

衛星の機械的変動要求値

$$1 \times 10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$$

⇒ 機械変動を排除した
衛星で実現可能

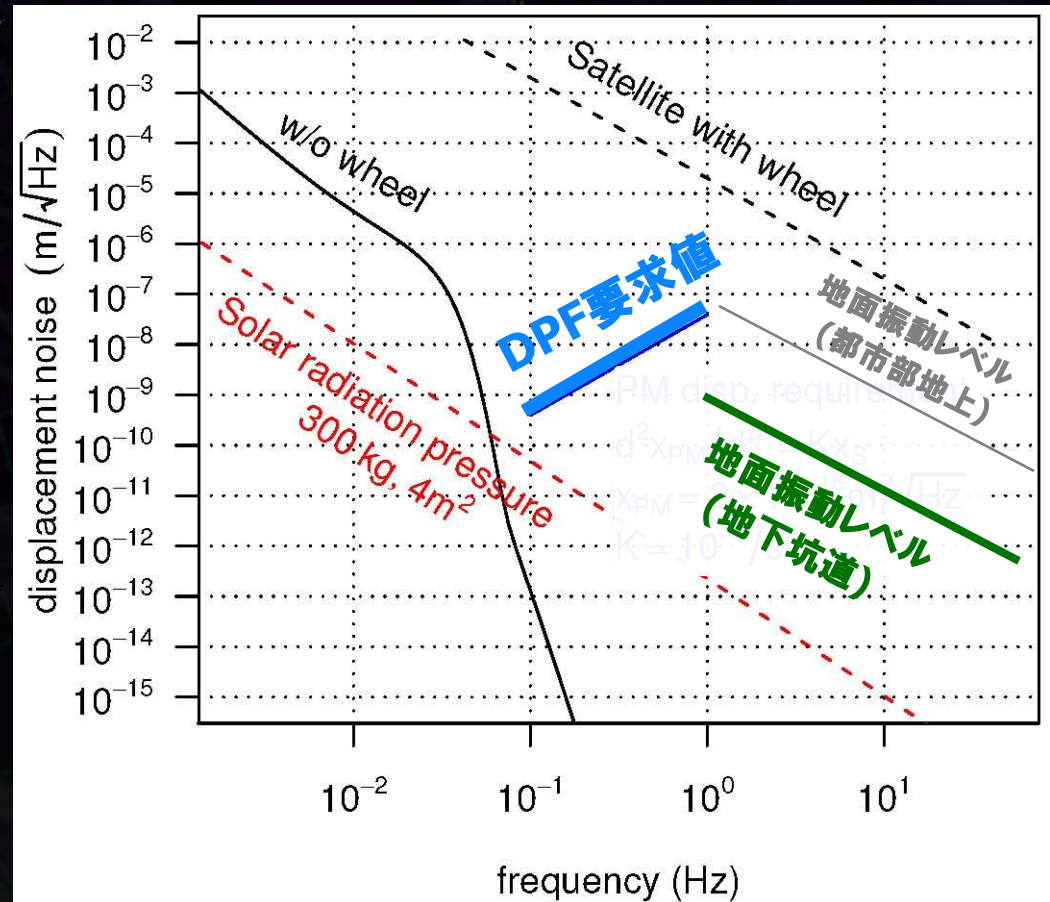
(静寂環境での
地面振動程度の安定度)

DPF構成：機械変動部は無い

モメンタムホイールは非搭載

リングレーザージャイロ

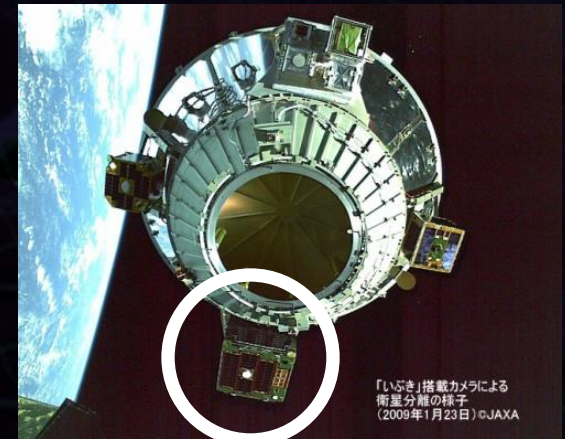
→ FOG に変更



試験マス周囲の温度変動要求値

$$1 \times 10^{-3} \text{ K/Hz}^{1/2}$$

- ⇒ 多重の輻射シールド
大きな熱浴, 熱伝導の良い材質



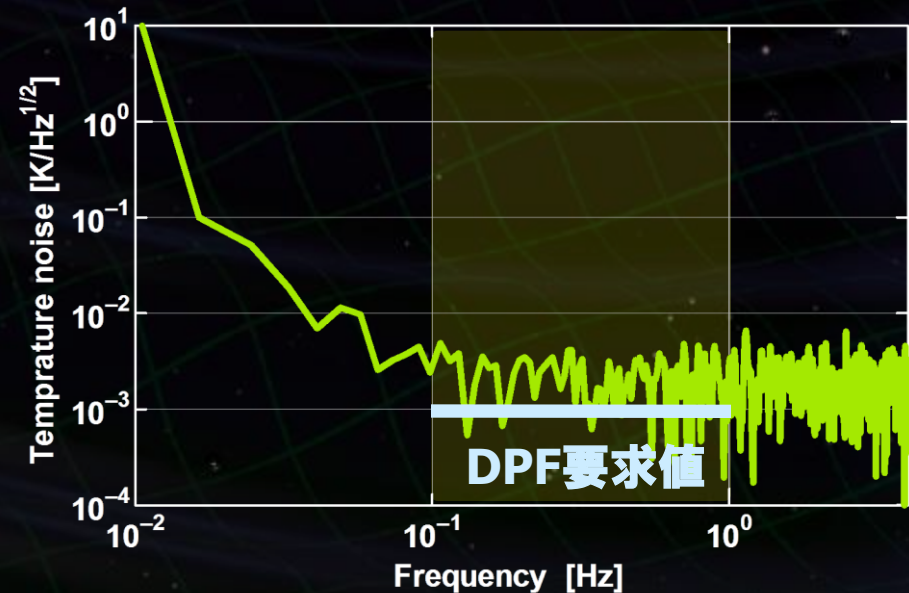
SDS-1

「いぶき」搭載カメラによる
衛星分離の様子
(2009年1月23日) ©JAXA

SWIMモジュール (SDS-1搭載)
での温度変動実測結果

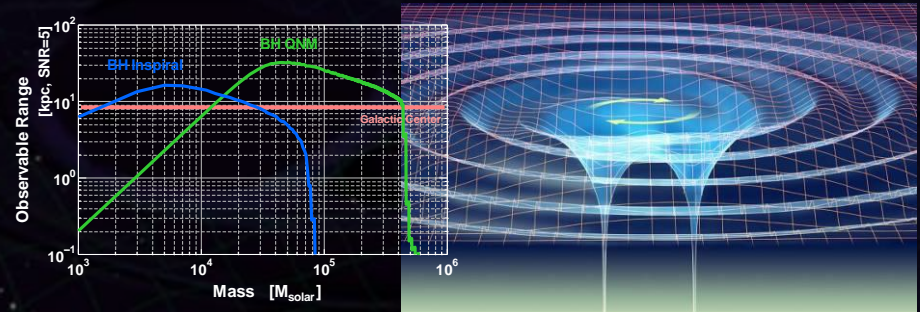
サバイバルヒータでのON/OFF制御
SWIMでは温度制御はしていない

- ⇒ DPFの要求値を
ほぼ満たす結果
(ADC雑音による測定限界)



DPFによる重力波の観測

我々の銀河中心内の
中間質量ブラックホール連星合体
ブラックホール準固有振動
からの重力波が観測対象



観測の意義

他の手段では観測が困難な周波数 (0.1Hz)での観測

→ これまでにない観測結果となる

運用中に、我々の銀河で、電磁波による別の観測から導かれた仮説を否定できる可能性。

(例)

M15等の幾つかの球状星団に
3000Msun程度のブラックホールがある、という説

→ その存在は確定していない。

これらのブラックホールが連星であったり、
1-10Msun程度のコンパクト天体が公転していれば、
DPFで観測できる可能性がある。

Globular clusters known to have black holes



Andromeda Galaxy
(2.2 million light-years from Milky Way)

M15

G1

Our Sun

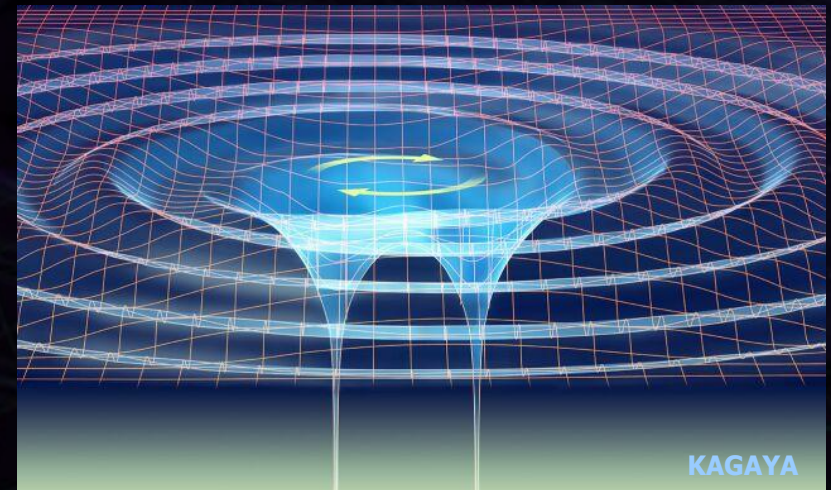
Milky Way Galaxy
(artist's concept)

Credit: NASA, STScI

我々の銀河中心付近の ブラックホールに関連する現象

中間質量ブラックホール合体

$h \sim 10^{-15}$, $f \sim 4$ Hz
Distance 10kpc, $m = 10^3 M_{\text{sun}}$
観測時間(～数千秒)

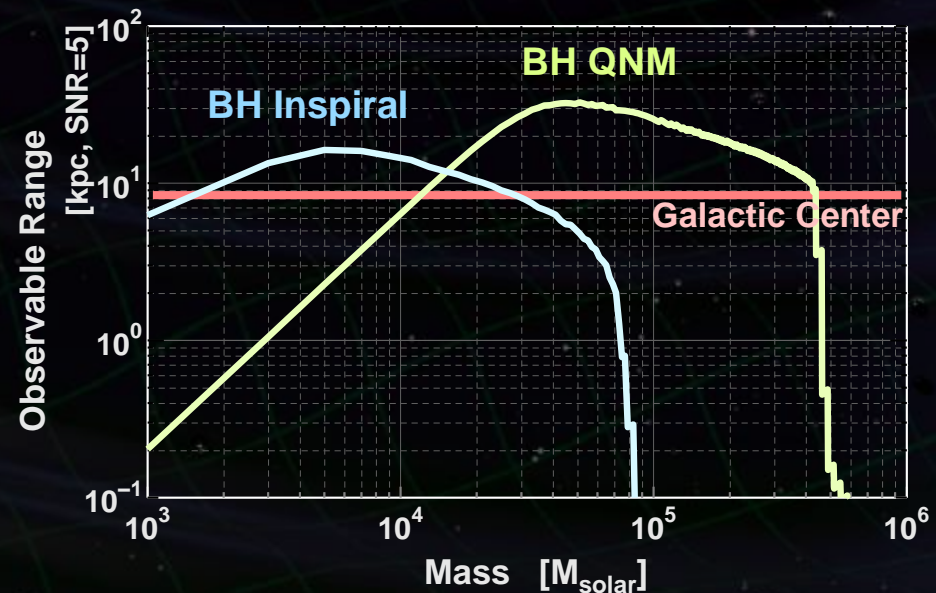


BH準固有振動からの重力波

$h \sim 10^{-15}$, $f \sim 0.3$ Hz
Distance 1Mpc, $m = 10^5 M_{\text{sun}}$

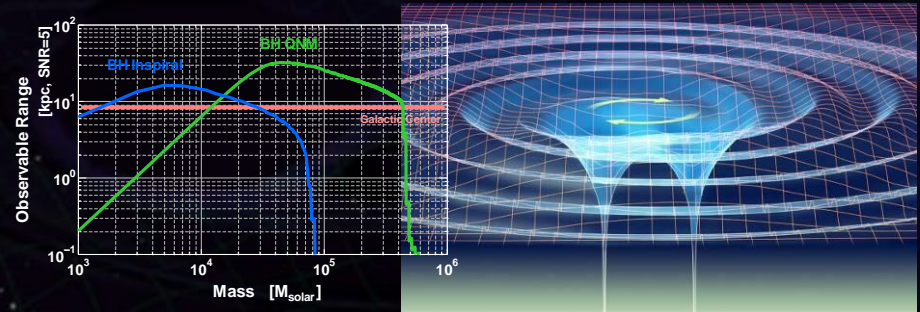
DPFの観測可能距離
～ 銀河中心をカバー (SNR>5)

他の手段では観測が困難
→ これまでにない観測結果となる



DPFによる重力波の観測

我々の銀河中心内の
中間質量ブラックホール連星合体
ブラックホール準固有振動
からの重力波が観測対象



観測の意義

他の手段では観測が困難な周波数 (0.1Hz)での観測

→ これまでにない観測結果となる

運用中に、我々の銀河で、電磁波による別の観測から導かれた仮説を否定できる可能性。

(例)

M15等の幾つかの球状星団に
3000Msun程度のブラックホールがある、という説

→ その存在は確定していない。

これらのブラックホールが連星であったり、
1-10Msun程度のコンパクト天体が公転していれば、
DPFで観測できる可能性がある。

Globular clusters known to have black holes

Andromeda Galaxy
(2.2 million light-years from Milky Way)



Credit: NASA, STScI

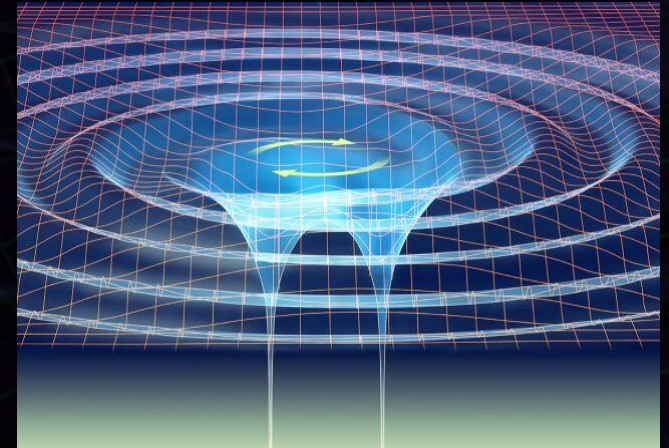
重力波：直接検出されたことがない



**DPFでは、我々の銀河中心付近の
ブラックホールに関連する現象
を観測可能**



検出できれば、ノーベル賞は間違いない



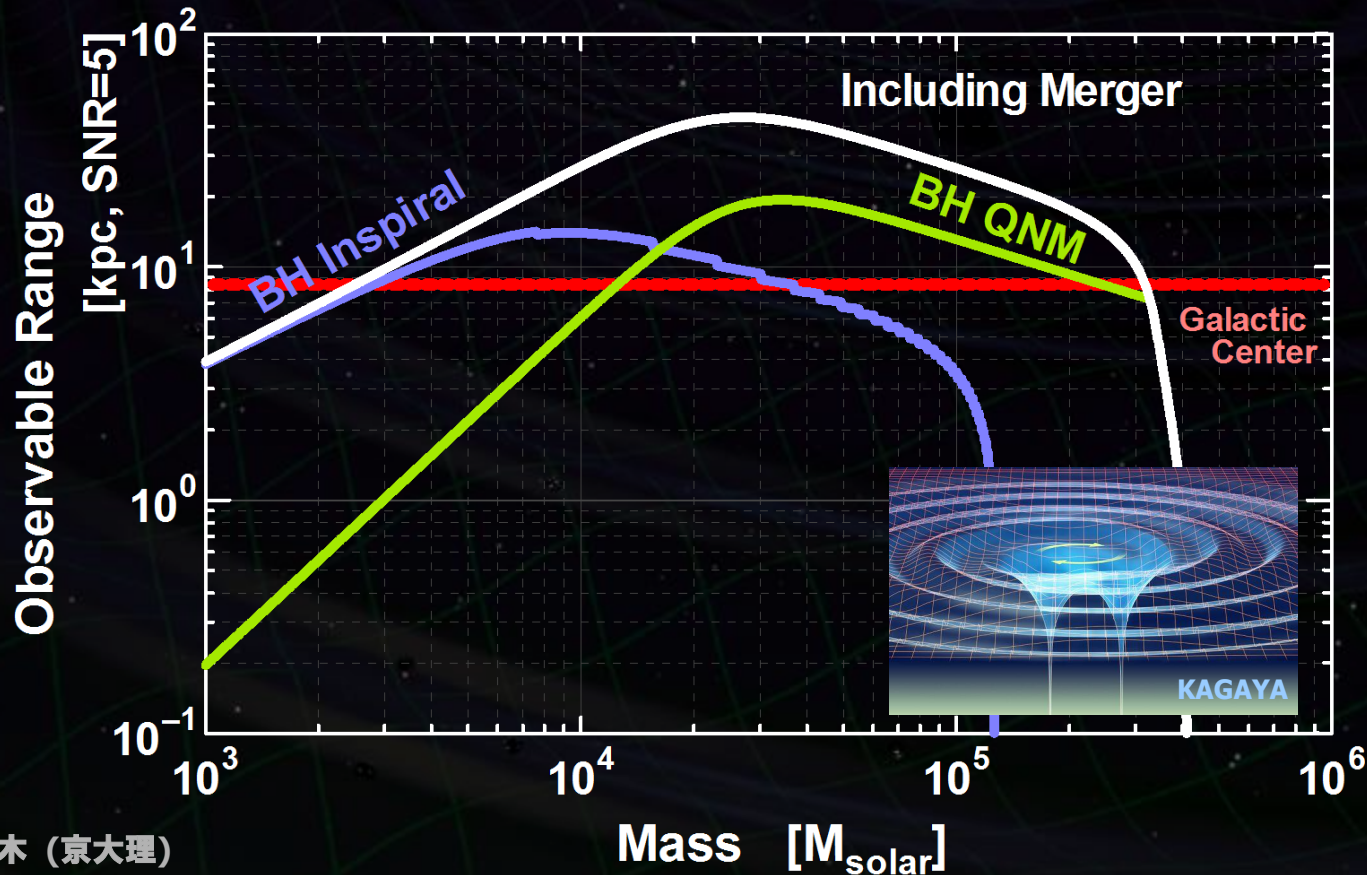
KAGAYA

DPFの観測距離

DPFのブラックホール
合体現象 への観測可能距離



DPFの観測可能距離
~ 銀河中心をカバー
(100kpc, SNR>5)



八木 (京大理)

中心付近の星の速度分布の観測

Core velocity dispersions for 25 Galactic and 10 old Magellanic globular clusters?

Pierre Dubath et al.,
Astron. Astrophys. 324, 505–522 (1997)

Table 6. Radial velocities and core velocity dispersions for all Galactic globular clusters in our sample.

Obs No. (1)	NGC No. (2)	V_r (km s ⁻¹) (3)	σ_{CCF} (km s ⁻¹) (4)	D (%) (5)	S/N (6)	ϵ (km s ⁻¹) (7)	σ_{ret} (km s ⁻¹) (8)	σ_{core}^{obs} (km s ⁻¹) (9)	stat err (km s ⁻¹) (10)	σ_p (core) (km s ⁻¹) (11)
1	104	-19.4±1.6	11.8±0.2	0.110	13.0	0.12	7.2±0.15	9.3 ^{+0.4} _{-0.4}	+4.8 _{-2.6}	10.0 ^{+4.8} _{-2.6}
2	"	-19.9±1.6	11.5±0.2	0.107	13.0	0.12	6.8±0.10	9.3 ^{+0.3} _{-0.3}	...	...
3	362	223.3±1.6	8.9±0.1	0.171	14.0	0.07	6.8±0.10	5.7 ^{+0.3} _{-0.3}	+3.0 _{-1.6}	6.2 ^{+3.0} _{-1.6}
4	1851	320.3±0.8	13.8±0.2	0.071	59.8	0.04	9.0±0.20	10.5 ^{+0.4} _{-0.5}	+2.5 _{-1.7}	11.3 ^{+2.5} _{-1.8}
5	1904	200.6±0.9	9.7±0.3	0.050	15.4	0.19	9.0±0.20	3.6 ^{+1.1} _{-1.0}	+1.9 _{-1.9}	3.9 ^{+2.2} _{-1.9}
6	5272	-146.3±1.6	8.1±0.3	0.112	5.0	0.30	6.8±0.10	4.4 ^{+0.7} _{-0.8}	+2.3 _{-1.2}	4.8 ^{+2.4} _{-1.4}
7	5286	57.2±1.7	10.8±0.7	0.050	5.0	0.67	7.2±0.15	8.0 ^{+1.0} _{-1.1}	+4.2 _{-2.2}	8.6 ^{+3.3} _{-2.2}
8	5694	-142.7±1.7	8.8±0.5	0.053	6.4	0.49	6.8±0.10	5.6 ^{+0.9} _{-1.0}	+1.3 _{-1.3}	6.1 ^{+1.3} _{-1.3}
9	5824	-26.0±1.6	12.6±0.3	0.037	16.0	0.28	6.8±0.10	10.6 ^{+0.4} _{-0.4}	+1.6 _{-1.6}	11.1 ^{+1.6} _{-1.6}
10	5904	54.7±1.6	9.1±0.3	0.084	6.0	0.33	6.8±0.10	6.0 ^{+0.6} _{-0.7}	+3.1 _{-1.7}	6.5 ^{+3.2} _{-1.8}
11	5946	129.1±1.9	8.1±1.1	0.101	1.5	1.10	7.2±0.15	3.7 ^{+2.2} _{-2.7}	+1.9 _{-1.0}	4.0 ^{+2.9} _{-2.9}
12	6093	7.8±1.7	15.0±0.5	0.037	10.0	0.45	6.8±0.10	13.4 ^{+0.6} _{-0.6}	+7.0 _{-3.8}	14.5 ^{+7.0} _{-3.8}
13	6256	-104.6±3.1	9.5±2.6	0.081	0.8	2.57	6.8±0.10	6.6 ^{+3.4} _{-6.0}	+3.4 _{-1.8}	...
14	6266	-71.8±1.6	16.0±0.3	0.067	10.0	0.25	7.2±0.15	14.3 ^{+0.4} _{-0.4}	+7.4 _{-4.0}	15.4 ^{+7.4} _{-4.0}
15	6284	27.5±1.7	9.3±0.4	0.134	3.0	0.42	6.8±0.10	6.3 ^{+0.7} _{-0.8}	+3.3 _{-2.1}	6.8 ^{+3.4} _{-2.5}
16	6293	-147.9±1.8	10.5±0.8	0.037	5.5	0.82	7.2±0.15	7.6 ^{+1.2} _{-1.4}	+4.0 _{-2.1}	8.2 ^{+4.2} _{-2.5}
17	6325	31.0±1.8	9.0±0.8	0.157	1.4	0.76	6.8±0.10	5.9 ^{+1.2} _{-1.4}	+3.1 _{-1.7}	6.4 ^{+3.3} _{-2.2}
18	6342	118.0±1.6	8.3±0.3	0.172	3.2	0.30	6.8±0.10	4.8 ^{+0.7} _{-0.7}	+2.5 _{-1.3}	5.2 ^{+2.6} _{-1.5}
19	6397	15.1±1.6	7.5±0.3	0.045	13.0	0.28	7.2±0.15	2.1 ^{+1.3} _{-1.1}	+1.1 _{-0.6}	...
20	"	15.0±1.6	7.4±0.4	0.050	10.0	0.33	7.2±0.15	1.7 ^{+1.5} _{-1.7}	...	...
21	6441	14.6±1.6	19.3±0.2	0.098	12.0	0.14	6.8±0.10	18.1 ^{+0.2} _{-0.2}	+9.4 _{-5.1}	19.5 ^{+9.4} _{-5.1}
22	6522	-10.3±1.6	9.6±0.3	0.133	4.3	0.29	6.8±0.10	6.8 ^{+0.5} _{-0.6}	+3.5 _{-1.9}	7.3 ^{+3.5} _{-2.5}
23	6558	-198.8±1.6	7.5±0.2	0.168	5.6	0.18	6.8±0.10	3.2 ^{+0.6} _{-0.8}	+1.7 _{-0.9}	3.5 ^{+1.8} _{-1.2}
24	6681	223.4±1.6	11.5±0.3	0.092	7.4	0.24	6.8±0.10	9.3 ^{+0.4} _{-0.4}	+4.8 _{-2.6}	10.0 ^{+4.8} _{-2.6}
25	6752	-32.0±1.6	8.5±0.2	0.082	21.0	0.10	7.2±0.15	4.5 ^{+0.5} _{-0.6}	+2.3 _{-1.3}	4.9 ^{+2.4} _{-1.4}
26	7078	-111.3±1.6	15.6±0.2	0.015	54.0	0.21	6.8±0.10	14.0 ^{+0.3} _{-0.3}	+5.0 _{-3.0}	15.1 ^{+5.0} _{-3.0}
27	7099	-180.7±1.8	8.2±0.8	0.022	11.0	0.83	6.8±0.10	4.6 ^{+1.5} _{-1.0}	+2.8 _{-1.5}	5.8 ^{+2.9} _{-1.7}
28	"	-181.1±1.8	8.6±0.9	0.020	11.0	0.91	6.8±0.10	5.3 ^{+1.5} _{-1.9}	...	...
29	"	-183.6±2.2	8.9±1.5	0.017	8.0	1.47	6.8±0.10	5.7 ^{+2.2} _{-3.0}	...	...
30	"	-185.1±1.7	8.9±0.5	0.031	14.4	0.45	6.8±0.10	5.7 ^{+0.8} _{-0.9}	...	...
31	"	-182.9±2.7	8.2±2.2	0.017	5.4	2.18	6.8±0.10	4.6 ^{+3.3} _{-3.6}	...	...

中心付近の星の速度分布 とBH質量の関係

GEMINI AND HUBBLE SPACE TELESCOPE
EVIDENCE FOR AN INTERMEDIATE-MASS
BLACK HOLE IN ω CENTAURI

Eva Noyola et al., ApJ 676 (2008) 1008Y1015

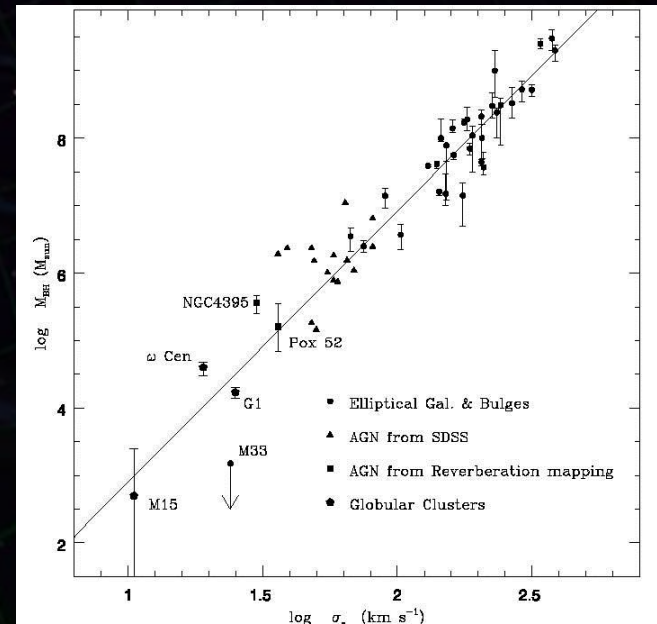


FIG. 9.— M_{BH} - σ_{vel} relation for elliptical galaxies and bulges. The solid line is the relation in Tremaine et al. (2002). ω Cen lies on the low-mass extrapolation and suggests a similarity between it and the galaxies. Different types of systems such as star clusters and low-luminosity AGNs appear to populate the low-mass end of the diagram.

球状星団中のBH

中心付近の星の運動から BH質量を推定

⇒ BH同士の合体からの重力波で期待できるSNR
 等質量, 質量比1:1/3, 100Msun BHが落下の場合

Globular clusters known to have black holes



Credit: NASA, STScI

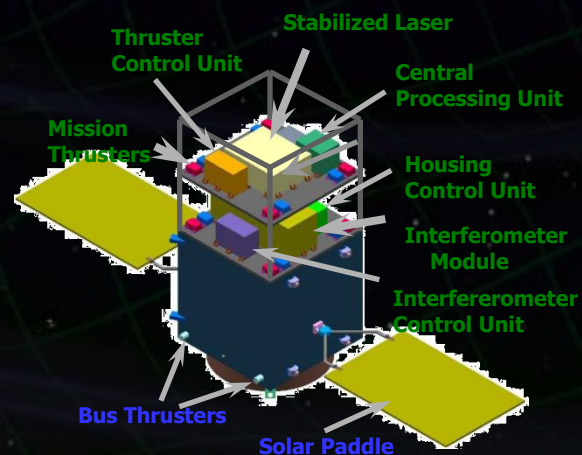
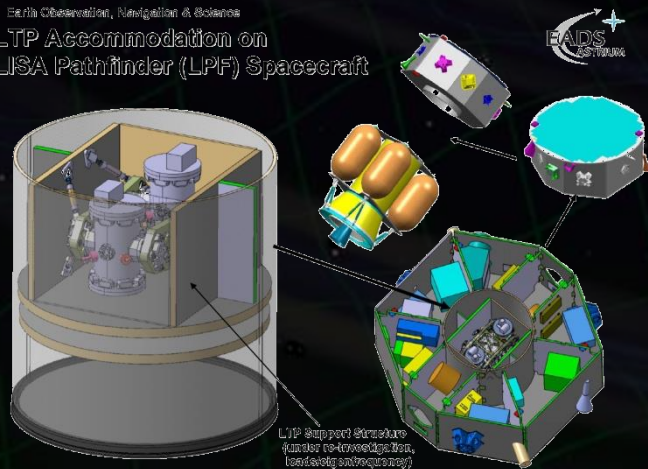
NGC#	BH質量 [Msun]	距離 [kpc]	SNR (同質量)	SNR (1:1/3)	SNR +100Msun	速度分散 [km/sec]
6441	12,424	11.2	36.4	22.2	3.7	19.5
6256	4,754	6.9	26.6	16.2	4.3	15.4
7078	4,388	10.3	16.6	10.2	2.8	15.1
6093	3,720	10.0	14.9	9.1	2.7	14.5
104	820	4.5	9.4	5.7	3.6	10
1851	1,348	12.1	5.3	3.2	1.6	11.3
6681	820	9.0	4.7	2.9	1.8	10
6293	366	8.8	2.5	1.5	1.4	8.2
5286	444	11.0	2.3	1.4	1.2	8.6
6522	228	7.8	1.9	1.1	1.3	7.3
5904	142	7.5	1.3	0.8	1.1	6.5
6325	133	8.0	1.2	0.7	1.0	6.4
6752	45	4.0	0.9	0.6	1.3	4.9
7099	89	8.0	0.8	0.5	0.9	5.8
6284	171	15.3	0.7	0.5	0.6	6.8
5272	41	10.4	0.3	0.2	0.5	4.8

(我々の銀河内に約150の球状星団)

Comparison with LPF

	LPF (LISA Pathfinder)	DPF (DECIGO Pathfinder)
Purpose	Demonstration for LISA	Demonstration for DECIGO GW observation
Launch	2010	~2013
Weight	1,900 kg	350 kg
Orbit	Halo orbit around L1 Drag-free attitude control	SSO altitude 500km Drag-free attitude control
Test Mass	Au-Pt alloy x2	TBD x2
Laser source	Nd:YAG (1064nm)	Yb:YAG (1030nm)
Interferometer	Mach-Zehnder	Fabry-Perot
Sensitivity	$3 \times 10^{-14} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ (1mHz)	$1 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ (0.1Hz)

Earth Observation, Navigation & Science
LTP Accommodation on
LISA Pathfinder (LPF) Spacecraft



干渉計感度

変位雑音 $6 \times 10^{-16} \text{ m/Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)

↳ x 200 of DECIGO in disp. noise

他の雑音

レーザー光源周波数雑音: $0.5 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$ (1Hz)

加速度雑音

力の雑音 $1 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)

↳ x 250 of DECIGO

衛星変動

変位雑音 $1 \times 10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)

外力雑音:

残留気体変動, 磁場勾配-変動, 熱輻射,
温度変動, 電場変動, 重力場変動, など.

衛星スケールの検討

	中型衛星 (ASTRO-X)	小型科学衛星 (SPRINT-X)	技術実証衛星 (SDS-X)	大学衛星 (Cube sat.)
衛星 サイズ [m]	1 - 10	1 - 3	0.5 - 1	0.1-0.5
衛星重量 [kg]	~ 2000	~ 400	~ 100	~ 10
開発期間 [年]	~ 10	~ 6	~ 4	~ 3
コスト [億円]	~ 200	~ 70	~ 5	~ 0.1
期待できる 成果	(Pre-DECIGO) 重力波の検出 フォーメーション フライト	(DPF) 観測データ取得 根幹技術の 総合試験	(SWIM) 根幹技術の 個別試験 (× Drag-free)	動作試験 原理実証

DECIGOのための根幹技術実証

DPFで実証される技術

宇宙干渉計
による
精密計測



$6 \times 10^{-16} \text{ m/Hz}^{1/2}$
の変位感度

$10^{-14} \text{ N/Hz}^{1/2}$
の外力雑音

$4 \times 10^{-18} \text{ m/Hz}^{1/2}$
の変位感度

$10^{-17} \text{ N/Hz}^{1/2}$
の外力雑音

DECIGOで必要 とされる主要技術

基線長1000kmのFP干渉計
宇宙における干渉計制御
試験マスに対する外乱抑圧
大型光学系の製作・制御

安定化レーザー
の宇宙実証



$0.5 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$
の周波数安定度

安定化レーザー光源による精密計測
光源の周波数・強度安定化
長基線長を利用した安定化制御

ドラッグフリー
制御の実現

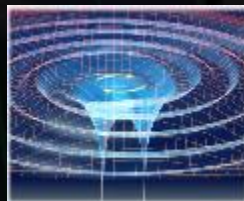


衛星変動安定度
 $10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$

スラスト雑音
 $10^{-7} \text{ N/Hz}^{1/2}$

フォーメーションフライト
安定な軌道の実現
宇宙機間の距離制御
ドラッグフリー制御
低雑音スラスト

重力波観測



0.1 Hz帯の連続
観測とデータ解析

観測運用
時系列連続データの処理
データの解析
理論予測・他の観測との比較

DPFで実証される技術

宇宙干渉計
による
精密計測



$6 \times 10^{-16} \text{ m/Hz}^{1/2}$
の変位感度

$10^{-14} \text{ N/Hz}^{1/2}$
の外力雑音

意義・波及効果

基礎物理学実験
無重力環境下での精密計測
宇宙・衛星内環境の理解

安定化レーザー
の宇宙実証

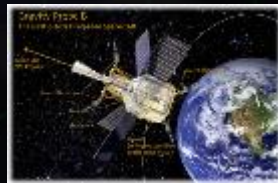


$0.5 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$
の周波数安定度

宇宙空間で、高い安定度の実現
さまざまな応用

地球環境観測 (ADM-Aeolus, GIFTS),
基礎物理学実験, マイクロ波標準, 通信
(ACES), 惑星探査 (TPF-C), X線観測
(MAXIM), フォーメーションフライト (LISA,
GRACE-follow-on)

ドラッグフリー
制御の実現



衛星変動安定度
 $10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$

スラスタ雑音
 $10^{-7} \text{ N/Hz}^{1/2}$

長時間安定な無重力環境

→宇宙環境利用の新しい可能性

基礎物理学実験, 材料工学

フォーメーションフライト

(TPF-C, LISA, GRACE follow-on)

小型低雑音スラスタ

宇宙干渉計による精密計測

背景

地上干渉計では豊富な実績

(10^{-19} m/Hz^{1/2}の変動測定)

宇宙では、FP干渉計は実現されていない

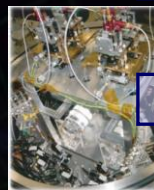
(LPFでは MZ干渉計を使用

10^{-12} m/Hz^{1/2} 程度の変位感度)

DPFで
目指す成果

宇宙干渉計による精密計測

宇宙空間におけるファブリ・ペロー干渉計の動作と精密計測の実証。衛星内に試験マスを非接触で低雑音保持する技術の実証。



FP干渉計による

6×10^{-16} m/Hz^{1/2} の変位感度

試験マスへの外乱除去技術の確立

意義・波及効果

宇宙空間での精密計測技術

→ 基礎物理学実験

無重力環境下での精密計測

宇宙・衛星内環境のより深い理解

DECIGOの根幹技術

FP干渉計による

4×10^{-18} m/Hz^{1/2}

の変位感度

安定化レーザー光源の実現

背景

広い応用範囲

→ 多くの地上研究 (数 Hz/Hz^{1/2}の安定度)

光周波数標準, 原子・分子の精密分光,
光通信, 量子情報・コンピュータ
重力波検出器での実績

(10⁻⁶ Hz/Hz^{1/2}の相対安定度)

宇宙では, 高安定レーザーの実績

→ 外部基準による高安定化はない

意義・波及効果

宇宙空間での

これまでに無い安定度の実現

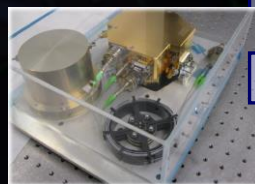
さまざまな応用

地球環境観測 (ADM-Aeolus, GIFTS),
基礎物理実験, マイクロ波標準, 通信
(ACES), 惑星探査 (TPF-C), X線観測
(MAXIM), フォーメーションフライト (LISA,
GRACE-follow-on)

DPFで
目指す成果

安定化レーザー光源の実現

宇宙において高い周波数安定度
を持つレーザー光源の実現。ヨウ
素吸収線を用い、既存ミッション
を超える安定度の実現を目指す。



0.5 Hz/Hz^{1/2}の周波数安定度
飽和吸収分光による安定化の宇宙実証

DECIGOの根幹技術
要求値を満たす安定度

ドラッグフリー制御の実現

背景

ナビゲーションシステムの開発

→ 1972年 TRAJID-1 で初実証

精密基礎物理実験

→ 2004年 Gravity Probe-B

LPF (2010/11) L1点で実証

国内: 高高度気球からの

自由落下 (BOV) で実証

意義・波及効果

長時間安定な無重力環境

→ 宇宙環境利用の新しい可能性

基礎物理学実験, 材料工学

フォーメーションフライト

のための基礎技術

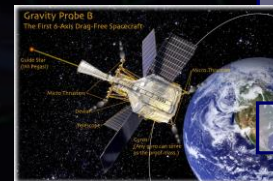
(TPF-C, LISA, GRACE follow-on)

小型低雑音スラスターの宇宙実証

DPFで
目指す成果

ドラッグフリー制御の実現

重力傾度による受動安定化と能動制御を併用した、全自由度ドラッグフリー制御の実現。制御則と低雑音スラスターの宇宙実証を目指す。



重力傾度安定との併用による低雑音制御

太陽輻射圧雑音以下への

衛星変動安定化 $10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$

DECIGOの根幹技術

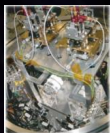
要求値と同程度の安定度

DECIGOのための根幹技術実証

DPFで実証される技術

宇宙干渉計による精密計測

宇宙空間におけるファブリ・ペロー干渉計の動作と精密計測の実証。衛星内に試験マスを非接触で低雑音保持する技術の実証。



$6 \times 10^{-16} \text{ m/Hz}^{1/2}$
の変位感度

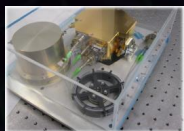
$10^{-14} \text{ N/Hz}^{1/2}$
の外力雑音

$4 \times 10^{-18} \text{ m/Hz}^{1/2}$
の変位感度

$10^{-17} \text{ N/Hz}^{1/2}$
の外力雑音

安定化レーザー光源の実現

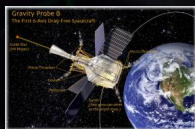
宇宙において高い周波数安定度を持つレーザー光源の実現。ヨウ素吸収線を用い、既存ミッションを超える安定度の実現を目指す。



$0.5 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$
の周波数安定度

ドラッグフリー制御の実現

重力傾度による受動安定化と能動制御を併用した、全自由度ドラッグフリー制御の実現。制御則と低雑音スラスタの宇宙実証を目指す。

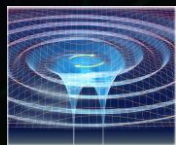


衛星変動安定度
 $10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$

スラスタ雑音
 $10^{-7} \text{ N/Hz}^{1/2}$

重力波観測

地上での観測が困難な周波数帯 (0.1Hz) での重力波の観測。銀河中心の中間質量ブラックホールの合体や振動現象を観測対象とする。



0.1 Hz帯の連続観測とデータ解析

DECIGOで必要とされる主要技術

基線長1000kmのFP干渉計
宇宙における干渉計制御
試験マスに対する外乱抑圧
大型光学系の製作・制御

安定化レーザー光源による精密計測
光源の周波数・強度安定化
長基線長を利用した安定化制御

フォーメーションフライト
安定な軌道の実現
宇宙機間の距離制御
ドラッグフリー制御
低雑音スラスタ

観測運用
時系列連続データの処理
データの解析
理論予測・他の観測との比較

DPFコスト検討

コスト: 上限値の制約

→ 信頼性確保とのトレードオフとして検討

構造系・電気系：メーカーの概算を参照
ミッション機器（光学系）

民生部品 ↔ 宇宙仕様部品 の間
(リスク) (コスト)

信頼性確保の考え方

基幹部（電源系, 信号処理系, 熱制御系）

バス部に準じた冗長性・信頼性の確保

ミッション機器

機能冗長構成

重要度に応じて民生部品の使用を検討

DPFミッション部 経費見積もり	数量	費用 [千円]		備考
		1台	小計	
ミッション部全体	1		995,000	(9.95 億円)
干渉計モジュール	1		140,000	
重力波観測用干渉計	1	50,000	50,000	
ハウジング	2	30,000	60,000	
レーザーセンサ	12	2,500	30,000	
主干渉計制御モジュール	1		15,000	
ハウジング制御モジュール	1		15,000	
レーザーセンサ制御モジュール	1		15,000	
安定化レーザー光源モジュール	1		135,000	
レーザー光源	1	70,000	70,000	
周波数安定化光学系	1	50,000	50,000	
安定化・通信回路	1	15,000	15,000	
ドラッグフリー	1		95,000	
スラストヘッド	16	5,000	80,000	
スラスト制御モジュール	1	15,000	15,000	
信号処理モジュール	1		110,000	
中央処理計算機	1	20,000	20,000	
ユニバーサルSpWボード	6	15,000	90,000	
電源・熱制御モジュール	1		20,000	
電源制御装置	1	10,000	10,000	
温度制御装置	1	10,000	10,000	
ミッション部構体	1		50,000	以上のミッション部本体割 5.95 億円
搭載機器試験経費	-		50,000	
総合試験経費	-		70,000	
射場作業・打ち上げ	-		80,000	
運用とデータ処理・解析	-		100,000	
マージン			100,000	マージン比率 0.10

提案書見積もり		民生部品で構成した場合			
合計		合計		比率	
干渉計モジュール	140,000		31,200	4.5	
重力波観測用干渉計	50,000		11,000	4.5	
ハウジング	60,000		13,100	4.6	
レーザーセンサ	30,000		7,100	4.2	
安定化レーザー光源	135,000		15,000	9.0	
レーザー光源	70,000		8,000	8,000	8.8
周波数安定化光学系	50,000		5,100	5,100	9.8
光源制御系	15,000		1,900	7.9	
		周波数変換光学系	2,000		
		沃素セル	300		
		変調器類	1,500		
		光学部品	1,300		
		ドライバ回路	800		
		制御回路	1,100		

単位: 千円

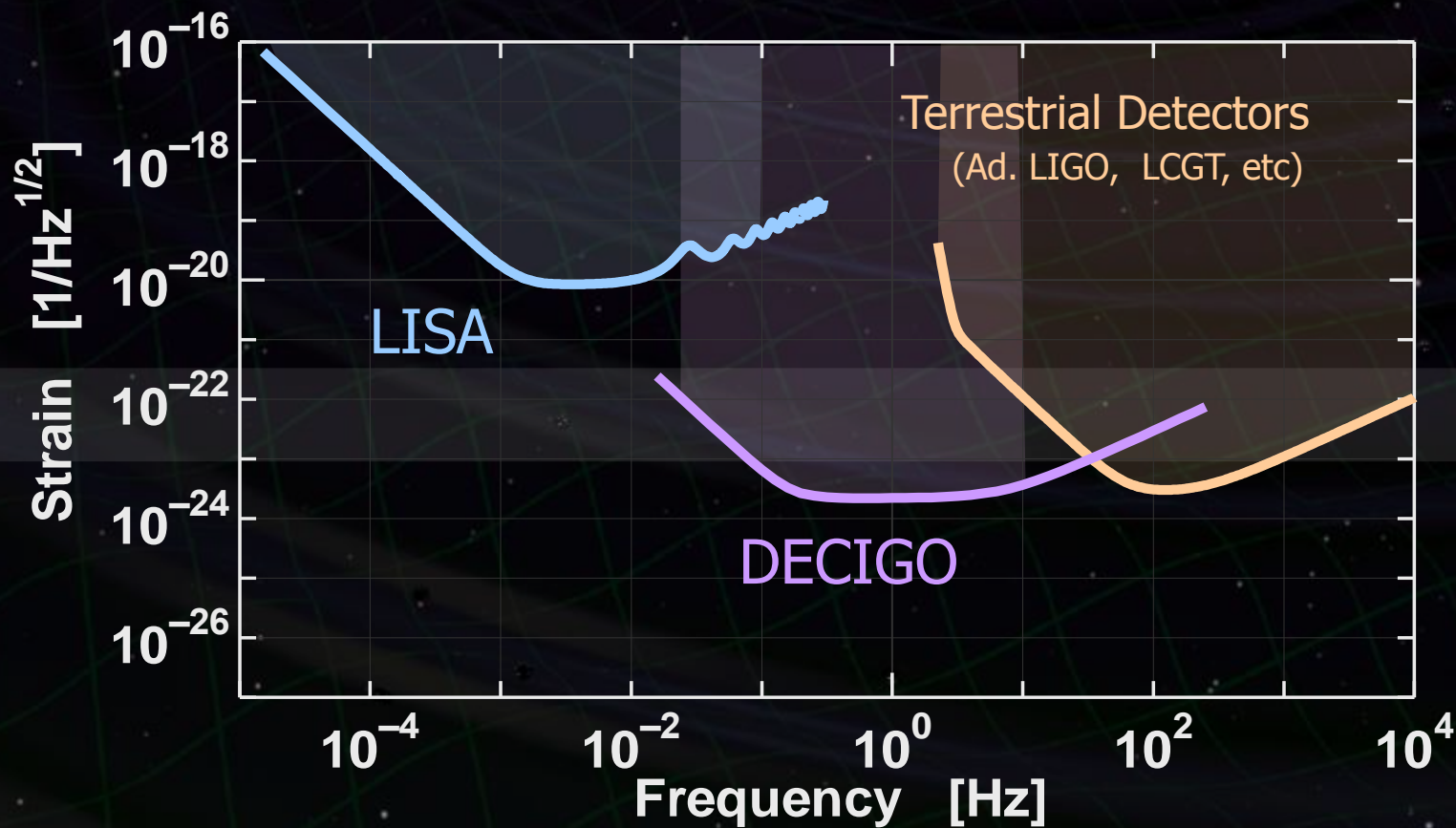
DECIGO

(Deci-hertz interferometer Gravitational wave Observatory)

宇宙重力波望遠鏡 (~2027)
観測周波数帯 ~0.1 Hz

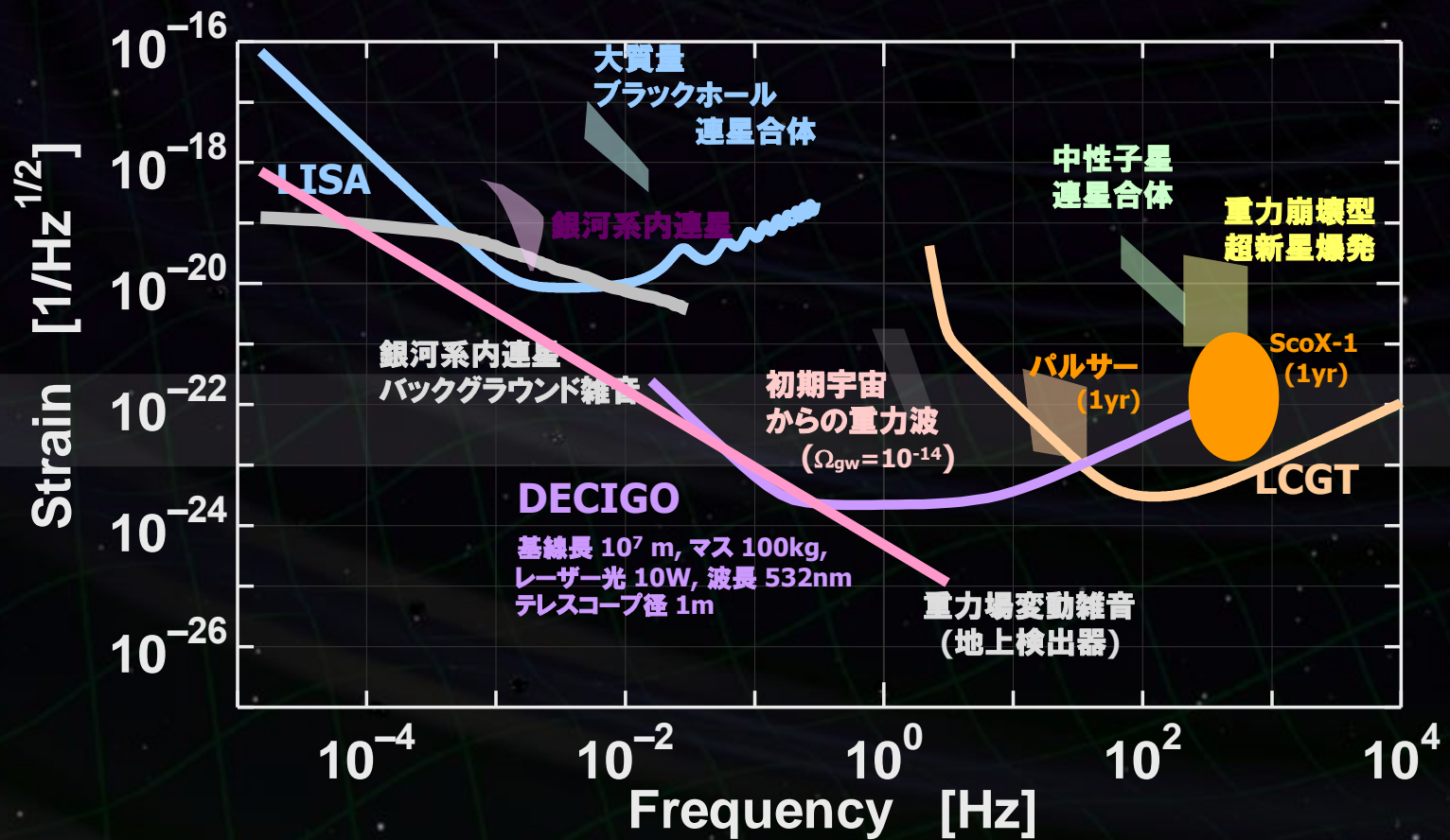


LISA と 地上重力波望遠鏡
の間の周波数を狙う



観測周波数帯と観測対象

- 地上干渉計 : 10Hz - 1kHz → 中性子星など
- DECIGO : 0.1 - 1Hz → 中間質量BHなど, 初期宇宙からの重力波
- LISA : 1mHz - 10mHz → 大質量BHなど

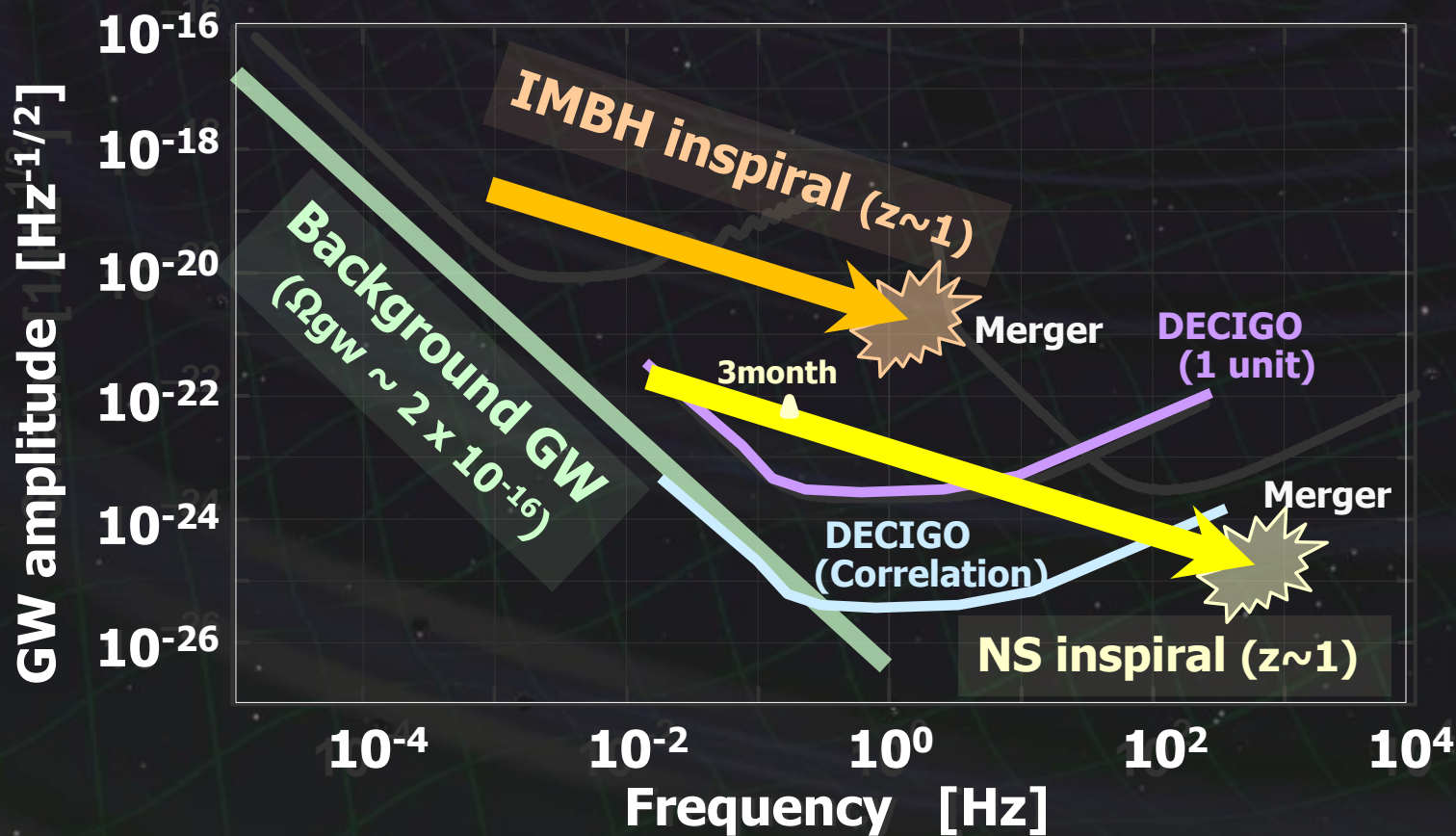


DECIGOの観測対象

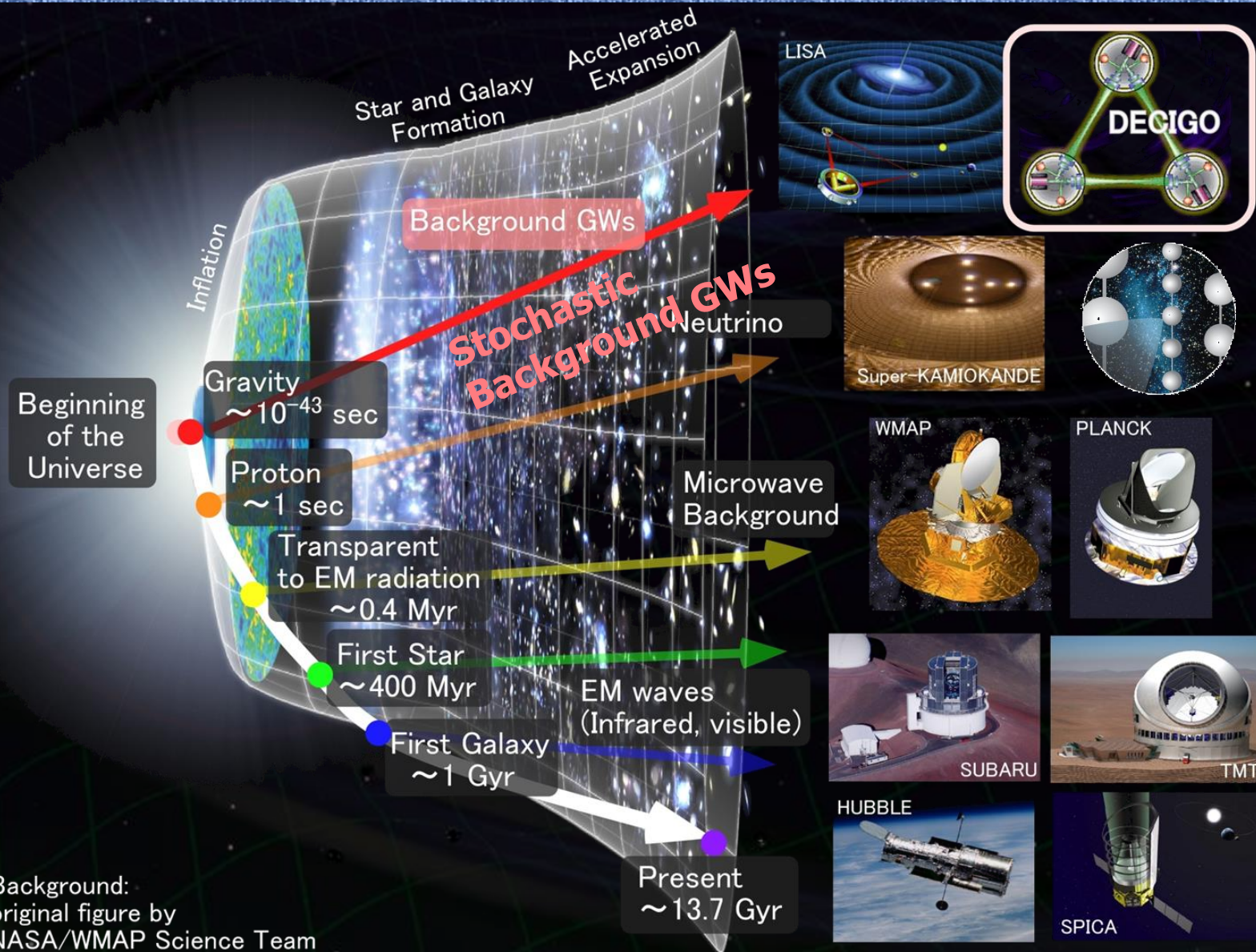
中間質量BH 連星の合体
中性子星 連星の合体
宇宙背景重力波



宇宙の成り立ちと進化
銀河・超巨大BHの形成



Stochastic Background GWs



Background:
original figure by
NASA/WMAP Science Team

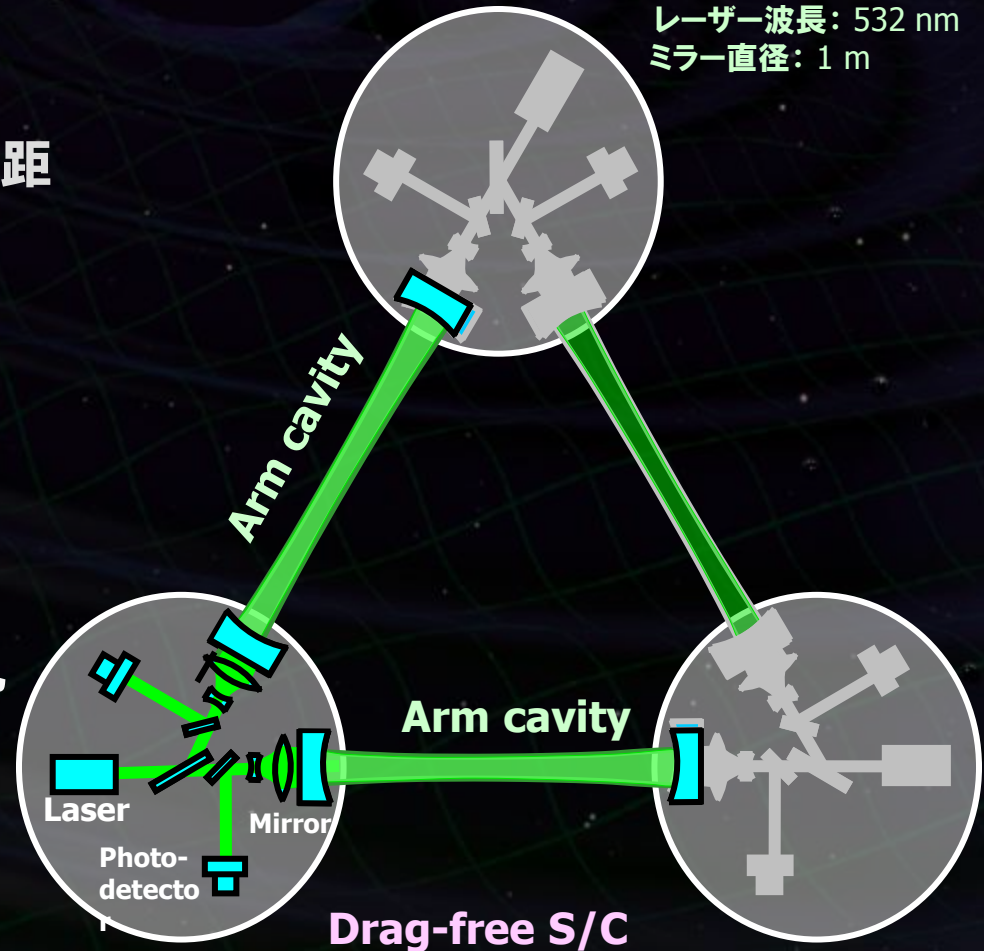
DECIGOの概要

互いに1000km離れた3機のS/C
非接触保持された鏡間距離を
レーザー干渉計によって精密測距
太陽公転軌道
最大4ユニットで相関をとる



初期宇宙からの重力波,
連星からの重力波 の観測
→宇宙の成り立ちに関する知見

光共振型マイケルソン干渉計
アーム長: 1000 km
レーザーパワー: 10 W,
レーザー波長: 532 nm
ミラー直径: 1 m



光共振型マイケルソン干渉計
アーム長: 1000 km
レーザーパワー: 10 W
レーザー波長: 532 nm
ミラー直径: 1 m

DECIGO

(DECI-hertz interferometer
Gravitational wave Observatory)

宇宙重力波望遠鏡 (~2027)

→ 他では得られない豊富なサイエンス

宇宙の成り立ちに関する知見

インフレーションの直接観測

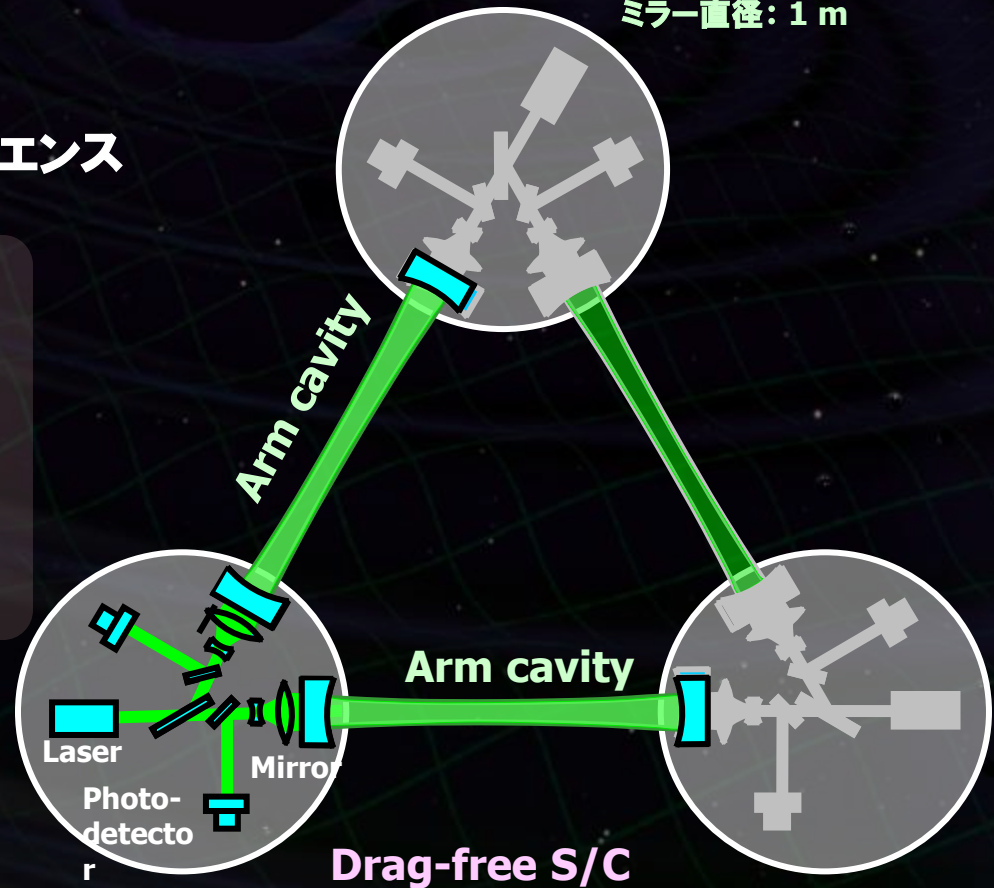
ダークエネルギーの性質

ダークマターの探査

銀河形成に関する知見

ブラックホール連星の観測

互いに1000km離れた3機のS/C
非接触保持された鏡間距離を
レーザー干渉計によって精密測距
太陽公転軌道
最大4ユニットで相関をとる



干渉計と宇宙機の制御

干渉計(FP共振器)の基線長制御

干渉計信号 → 鏡の位置(と光源周波数)制御

宇宙機と鏡の相対位置

ローカルセンサー信号 → スラスタ (ドラッグフリー制御)

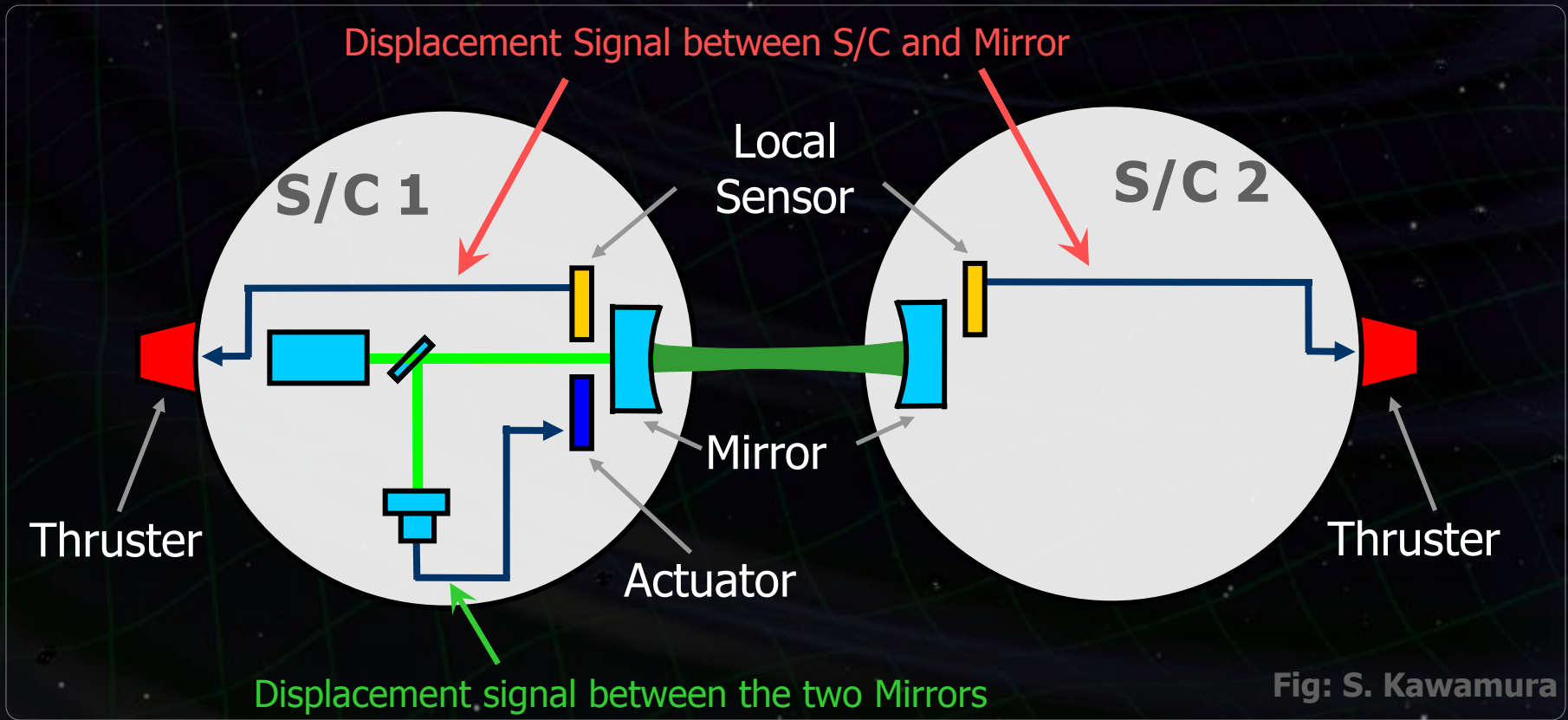


Fig: S. Kawamura

干渉計による測距

変位雑音 $3 \times 10^{-18} \text{ m/Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)

⇒ LCGT より10倍緩やか.

他の雑音は散射雑音以下であることが要求される

レーザー光源周波数雑音: $1 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$ (1Hz)

安定化ゲイン 10^5 , CMRR 10^5

加速度雑音

力の雑音 $4 \times 10^{-17} \text{ N/Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)

⇒ LISAより50倍厳しい.

多くの外乱雑音源

磁場変動, 電場変動, 宇宙機重力場変動,
温度, 残留気体, など.

候補軌道:

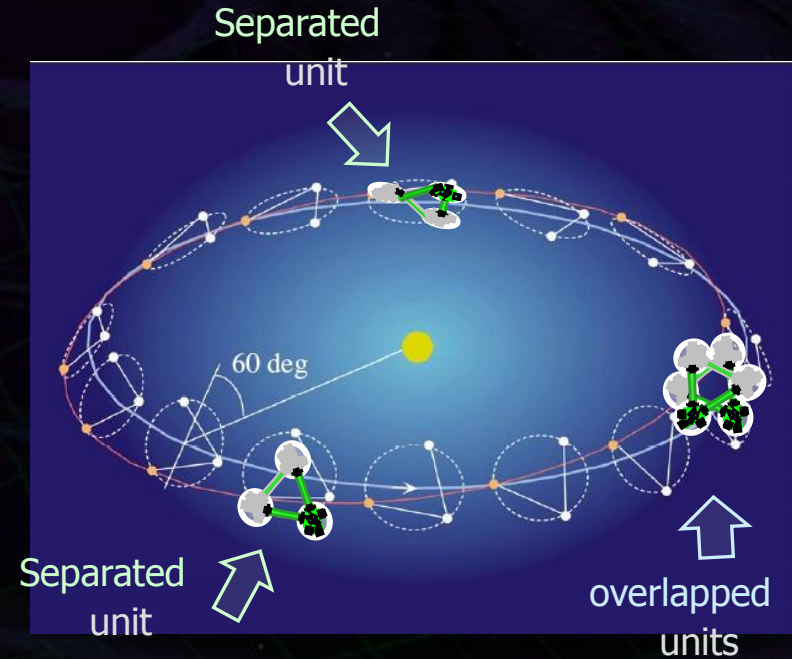
太陽周回のレコード盤軌道

相対加速度 $4 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2$
(鏡への制御力 $\sim 10^{-9} \text{ N}$)

干渉計配置

4つの干渉計ユニット

- 2 overlapped units → 相関解析
- 2 separated units → 重力波源の同定



インフレーションからの重力波をより確実に受けたい

→ 感度を数倍上げる必要がある？

- パラメターの最適化が必要

- 感度の向上と技術的難しさの評価が必要

基線長: 歪み感度向上 と 光損失増加の兼ね合い

鏡のサイズ: 光の損失低減

鏡の質量: 輻射圧雑音・力の雑音低減



阿久津氏のもと検討開始

DECIGO暫定組織

代表: 川村 (国立天文台)
副代表: 安東 (京大理)

運営委員会

川村 (国立天文台), 安東 (京大理), 瀬戸 (京大理), 中村 (京大理),
坪野 (東大理), 佐藤 (法政大工), 田中 (京大基研), 船木 (JAXA),
沼田 (Maryland), 神田 (阪市大理), 井岡 (KEK), 高島 (JAXA),
横山 (東大理)

Pre-DECIGO

佐藤 (法政大工)

検出器

阿久津
(国立天文台)
沼田 (Maryland)

サイエンス・データ

田中 (京大基研)
瀬戸 (京大理)
神田 (阪市大理)

衛星

船木 (JAXA)

Design phase

DECIGO パスファインダー
リーダー: 安東 (京大理)

Mission phase

干渉計

佐藤 (法政大工)
上田 (国立天文台)
麻生 (東大理)

レーザー

武者 (電通大)
植田 (電通大)

ドラッグフリー

森脇
(東大新領域)
坂井 (JAXA)

スラスタ

船木 (JAXA)

信号処理

阿久津
(国立天文台)

バス

高島
(JAXA)

データ解析

神田
(阪市大理)

干渉計感度

変位雑音 $6 \times 10^{-16} \text{ m/Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)

↳ x 200 of DECIGO in disp. noise

他の雑音

レーザー光源周波数雑音: $0.5 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$ (1Hz)

加速度雑音

力の雑音 $1 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)

↳ x 250 of DECIGO

衛星変動

変位雑音 $1 \times 10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)

外力雑音:

残留気体変動, 磁場勾配-変動, 熱輻射,
温度変動, 電場変動, 重力場変動, など.

JAXAの小型科学衛星シリーズの候補

標準衛星バス + 次期固体ロケットを利用して
最低 3機の小型科学衛星 を打ち上げる計画

1号機 SPRINT-A/EXCEED (~2012年)

UV望遠鏡による惑星観測

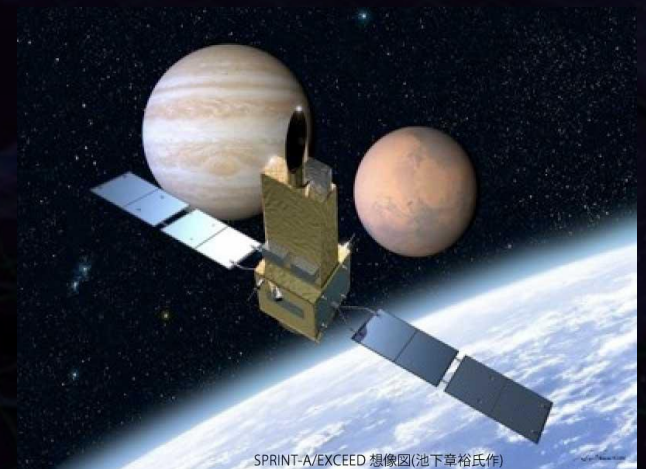
2号機 ERG (~2013年)

地球周辺の磁気圏観測



DPF: 小型科学衛星3号機 を目指す
宇宙分野における新しいサイエンスの
可能性として評価を受けている

打ち上げ目標： 2015年度



小型科学衛星1号機 SPRINT-A/EXCEED



Next-generation
Solid rocket booster (M-V FO)
Fig. by JAXA

DECIGO

豊富な科学的知見が期待できる

→ 宇宙の成り立ちと進化, 銀河形成, 基礎物理.

DECIGOパスファインダー

DECIGOのための最初の前哨衛星

重力波・地球重力場の観測

JAXAの小型衛星シリーズとしての実現を目指す.

研究開発が進行中

DECIGOの仕様検討

DPF搭載機器のBBM製作・試験

SWIM – 1年9カ月の宇宙実証運用が成功のもと終了.

- Verification of the alternative theories of gravity
Test Brans-Dicke theory by NS/BH binary evolution
→ Stronger constraint by 10^4 times

K. Yagi and T. Tanaka, Prog. Theor. Phys. 123, 1069 (2010)

- Black hole dark matter
Gravitational collapse of the primordial density fluctuations
→ Primordial black holes (PBHs)
as a candidate of dark matter

R. Saito and J. Yokoyama, Phys. Rev. Lett. 102 161101 (2009)

- Neutron-star physics
Determine mass of 10^5 NSs per year
→ Constrain the EOS of NS
Formation process of NS from the spectrum

DECIGO will observe

10^{4-5} NS binaries at $z \sim 1$

↳ Precise 'clock' at cosmological distance

'Standard Siren'

Relationship between
distance and redshift

Distance: chirp waveform

Redshift: host galaxy

→ Information on acceleration
of expansion of the universe



Seto, Kawamura, Nakamura,
PRL 87, 221103 (2001)

Determine cosmological parameters

Absolute and independent measurement

Angular resolution

~10arcmin (1 detector)

~10arcsec (3 detectors)

at $z=1$

衛星スケールの検討

	中型衛星 (ASTRO-X)	小型科学衛星 (SPRINT-X)	技術実証衛星 (SDS-X)	大学衛星 (Cube sat.)
衛星 サイズ [m]	1 - 10	1 - 3	0.5 - 1	0.1-0.5
衛星重量 [kg]	~ 2000	~ 400	~ 100	~ 10
開発期間 [年]	~ 10	~ 6	~ 4	~ 3
コスト [億円]	~ 200	~ 70	~ 5	~ 0.1
期待できる 成果	(Pre-DECIGO) 重力波の検出 フォーメーション フライト	(DPF) 観測データ取得 根幹技術の 総合試験	(SWIM) 根幹技術の 個別試験 (× Drag-free)	動作試験 原理実証

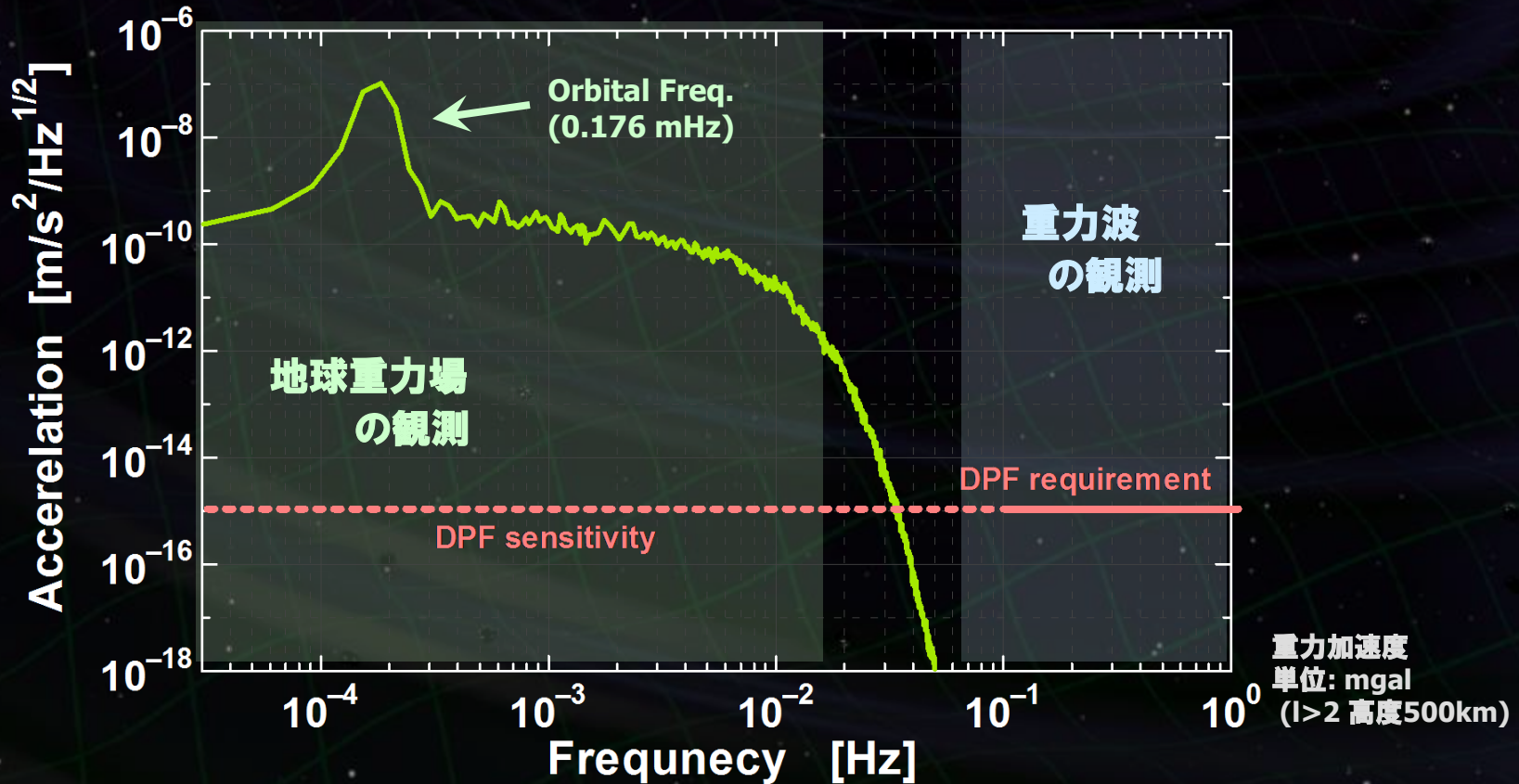
地球重力場・重力波の観測

地球重力場の計算

EGM2008 (2190次)の係数データ
DPF軌道高度 500km, 極軌道



地球重力場観測と 重力波観測の両立



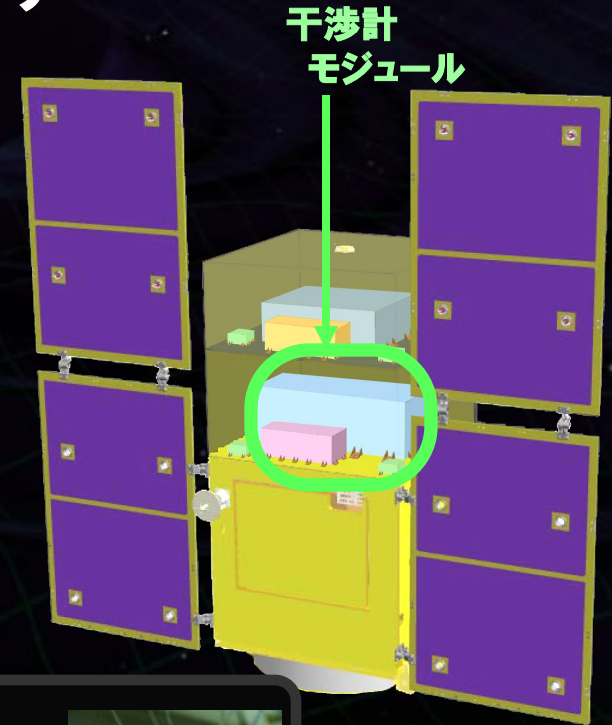
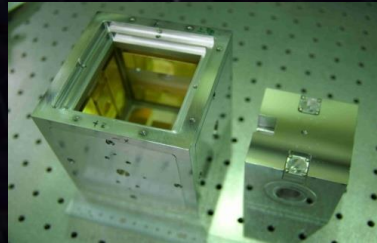
レーザー干渉計：試験マス + 干渉計 + センサ

試験マスモジュール

重力・重力波を観測するための基準

- BBM of Module, Sensor, Actuator, Clump/Release
- μ -Grav. Exp.

法政大, 国立天文台,
お茶大, スタンフォード大



干渉計モジュール

→ 重力波観測, 重力勾配計

- 30cm IFO BBM
- Packaging
- Digital control
- Monolithic Opt.

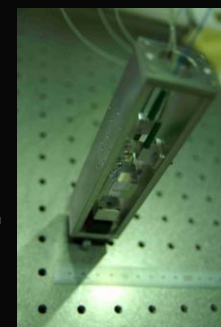


国立天文台, 東大

レーザーセンサ

→ 加速度計センサ

- BBM test
- Sensitivity meas.



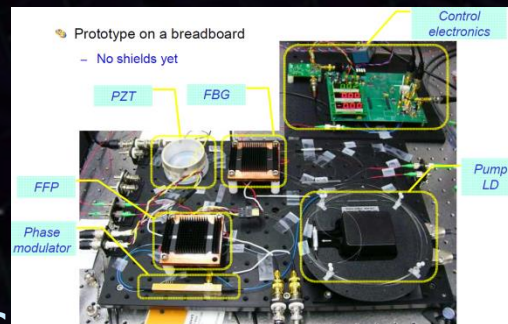
東大地震研, 東大理

安定化レーザー光源：光源 + 安定化システム

Yb:YAG (NPRO or Fiber laser) 光源
→ 小型・軽量化, 耐振動性

•BBM
development

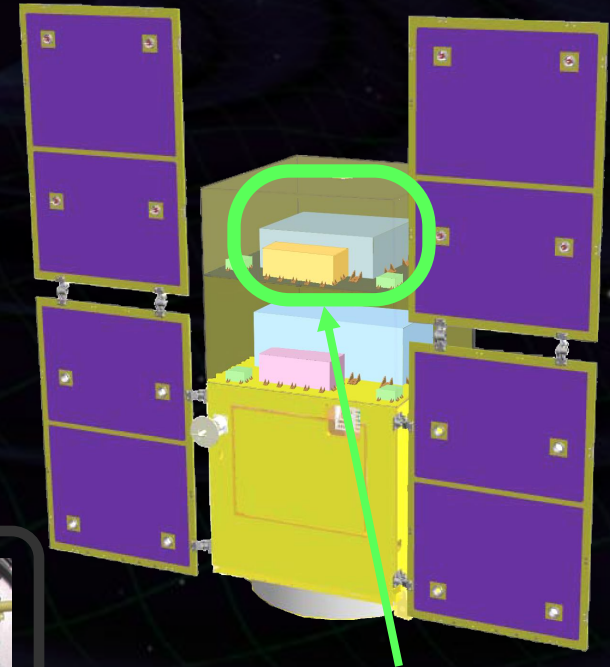
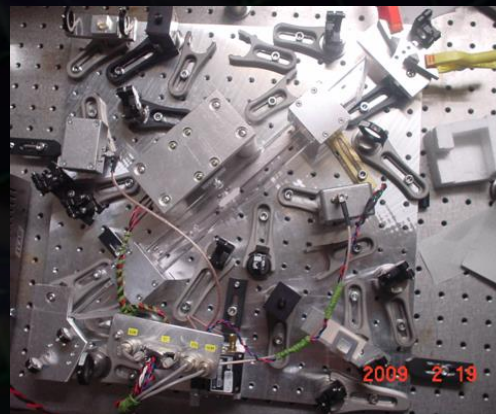
電通大, NASA/GSFC



ヨウ素飽和吸収
による安定化制御
→ 周波数基準
擾乱耐性

•BBM development
•Stability meas.

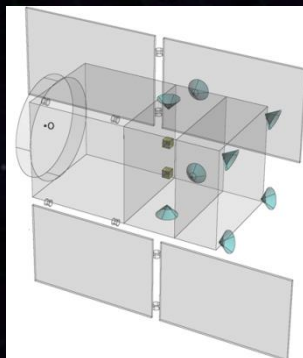
電通大, NICT



安定化
レーザー光源

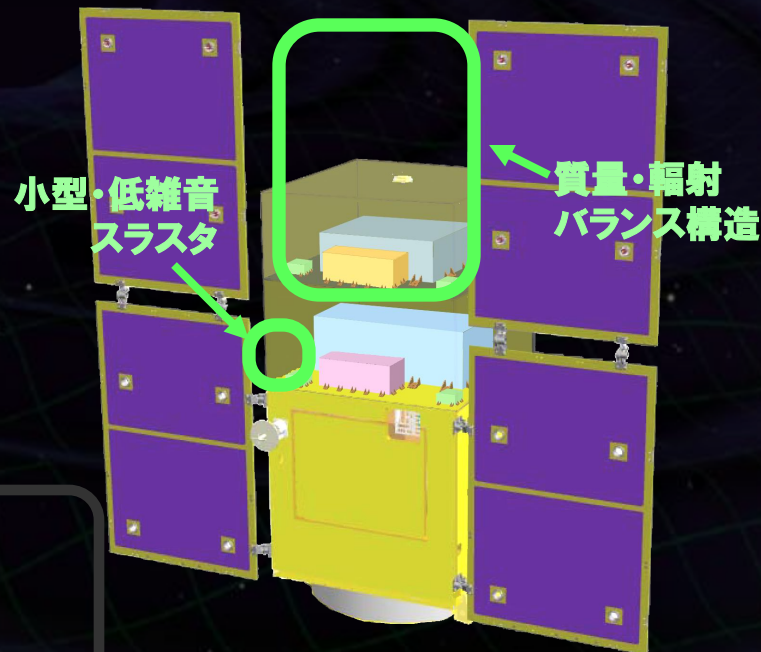
姿勢・ドラッグフリー制御：衛星構造検討, 制御則, ミッションスラスタ

衛星構成, 熱・構造検討



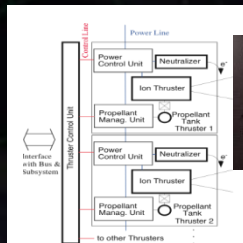
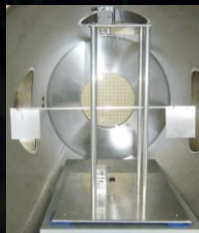
- Passive attitude stability
- Drag-free control

東大, JAXA



Low-noise Thruster

→ Actuators for satellite control



- BBM and system design

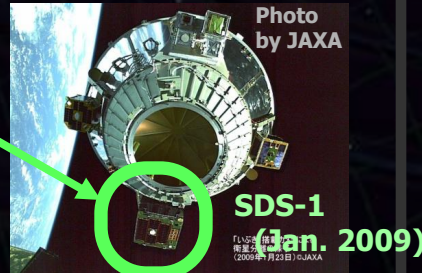
JAXA, 東海大, 防衛大

信号処理・制御システム : SpWベースの信号処理システム

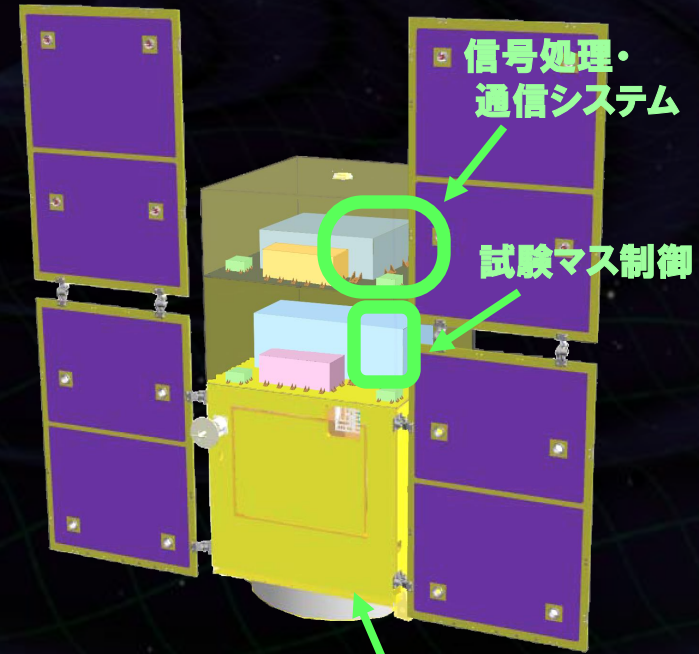
SpC2 + SpW信号処理システム
→ SDS-1/SWIMによる宇宙実証



Space demonstration
by SDS-1/SWIM



JAXA, 東大, 京大



試験マスの非接触制御と精密計測
→ SWIMによる宇宙実証

TAM: Torsion Antenna Module with free-falling test mass
(Size : 80mm cube, Weight : ~500g)

Test mass
~47g Aluminum, Surface polished
Small magnets for position control

Coil
Used for test-mass position control
Max current ~100mA

Photo sensor
Reflective-type optical displacement sensor
Separation to mass ~1mm
Sensitivity ~ 10^{-4} m/Hz^{1/2}
6 PSs to monitor mass motion

JAXA, 東大, 京大

安定化レーザー光源

Yb:YAG (NPRO) 光源

ヨウ素飽和吸収による安定化制御

→ 安定度向上, パッケージ化

⇒ 電気通信大学
情報通信研究機構 (NICT)



武者氏
資料より

干渉計・ハウジング

プロトタイプ的设计・製作

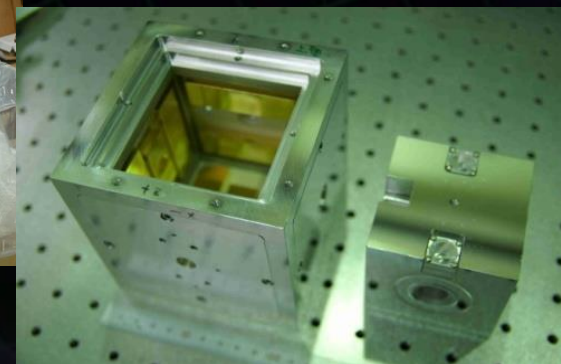
→ 基本性能の試験

地球重力場観測用センサの試作

⇒ 国立天文台 (NAOJ)
東京大学・地震研究所
スタンフォード大



新谷氏
資料より



佐藤氏
資料より

姿勢制御・ドラッグフリー

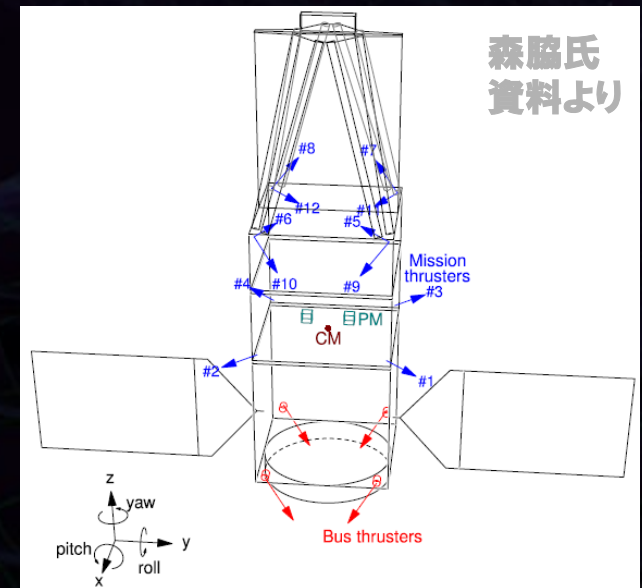
構成 (構造・制御則) の検討

重力傾度安定による受動安定化

衛星にマスト構造を取り付ける

ミッション部スラスタによるドラッグフリー制御

⇒ 東京大学・新領域創成科学研究科
宇宙航空研究開発機構 (JAXA)



スラスタ

既存技術のシステム化検討

推力雑音評価装置

(スラスタスタンド) 製作

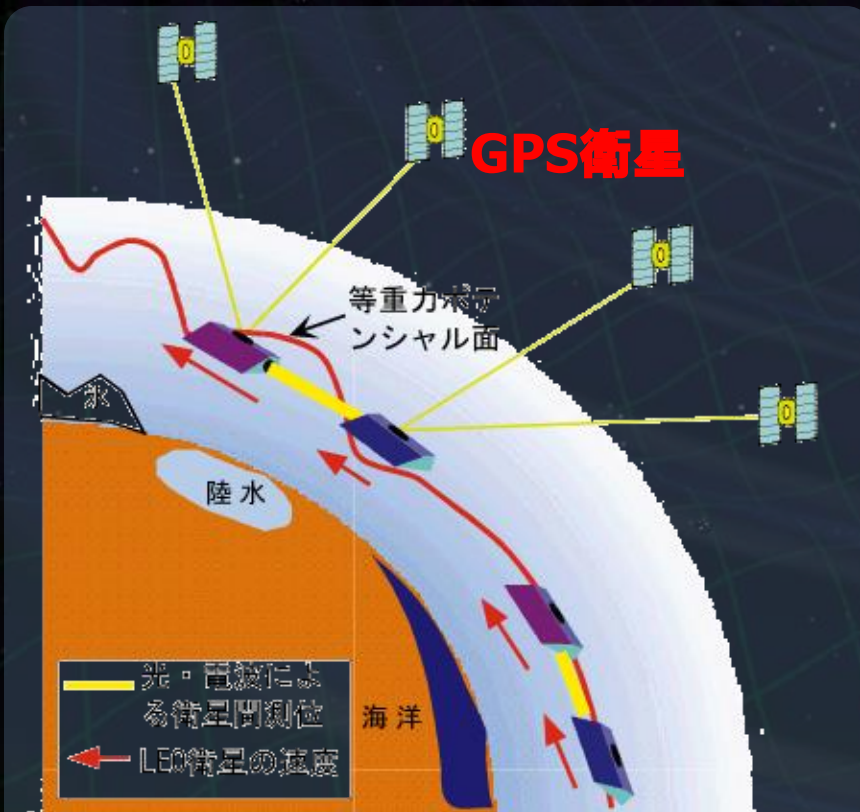
スリット型FEEPの試作

⇒ 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
東海大学, 防衛大学



人工衛星の軌道から地球重力ポテンシャルを検知

2つの観測モード: GPS受信機 + 加速度計, 重力勾配計



東京大学地震研・新谷氏、
京都大学・福田氏の資料/情報提供

GRACE, GOCEが稼働中

次世代計画 GRACE-FO

GRACEと同等 (マイクロ波測距)

GRACE

$L \sim 220\text{km}, \Delta L \sim 5\mu\text{m}$

$\rightarrow \Delta L/L \sim 2 \times 10^{-11}$

DPF

$L \sim 0.3\text{m}, \Delta L \sim 10^{-11}\text{m}$

$\rightarrow \Delta L/L \sim 3 \times 10^{-11}$

GRACEとGRACE-FOの間の期間

2012-16年を埋める可能性

\rightarrow 独自の成果, 国際貢献

DPF --- GRACEと同等の感度を持つ
高感度干渉計
衛星のドラッグフリー精密制御

GRACE

$L \sim 220\text{km}, \Delta L \sim 5\mu\text{m}$

$\rightarrow \Delta L/L \sim 2 \times 10^{-11}$

DPF

$L \sim 0.3\text{m}, \Delta L \sim 10^{-11}\text{ m}$

$\rightarrow \Delta L/L \sim 3 \times 10^{-11}$

GRACEとGRACE2の間

(2012-16年)の空白を埋める可能性

\rightarrow 独自の成果, 国際貢献

The Future of Satellite Gravimetry

Report from the

Workshop on The Future of Satellite Gravimetry

12-13 April 2007, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands

Radboud Koop and Reiner Rummel (Eds.)



DPFで実証される技術

宇宙干渉計
による
精密計測



$6 \times 10^{-16} \text{ m/Hz}^{1/2}$
の変位感度

$10^{-14} \text{ N/Hz}^{1/2}$
の外力雑音

意義・波及効果

基礎物理学実験
無重力環境下での精密計測
宇宙・衛星内環境の理解

安定化レーザー
の宇宙実証



$0.5 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$
の周波数安定度

宇宙空間で、高い安定度の実現
さまざまな応用

地球環境観測 (ADM-Aeolus, GIFTS),
基礎物理学実験, マイクロ波標準, 通信
(ACES), 惑星探査 (TPF-C), X線観測
(MAXIM), フォーメーションフライト (LISA,
GRACE-follow-on)

ドラッグフリー
制御の実現



衛星変動安定度
 $10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$

スラスタ雑音
 $10^{-7} \text{ N/Hz}^{1/2}$

長時間安定な無重力環境
→宇宙環境利用の新しい可能性
基礎物理学実験, 材料工学
フォーメーションフライト
(TPF-C, LISA, GRACE follow-on)
小型低雑音スラスタ

DPF: 宇宙分野における

新しいサイエンスの可能性として評価を受けている

JAXA小型科学衛星 戦略的開発経費

→ 加速ミッションとして採択

次ミッションの有力候補の1つになっている



小型科学衛星3号機 を目指して再スタート

課題 実現性を高める

工学面を含めた体制の強化

より具体的な衛星構成検討

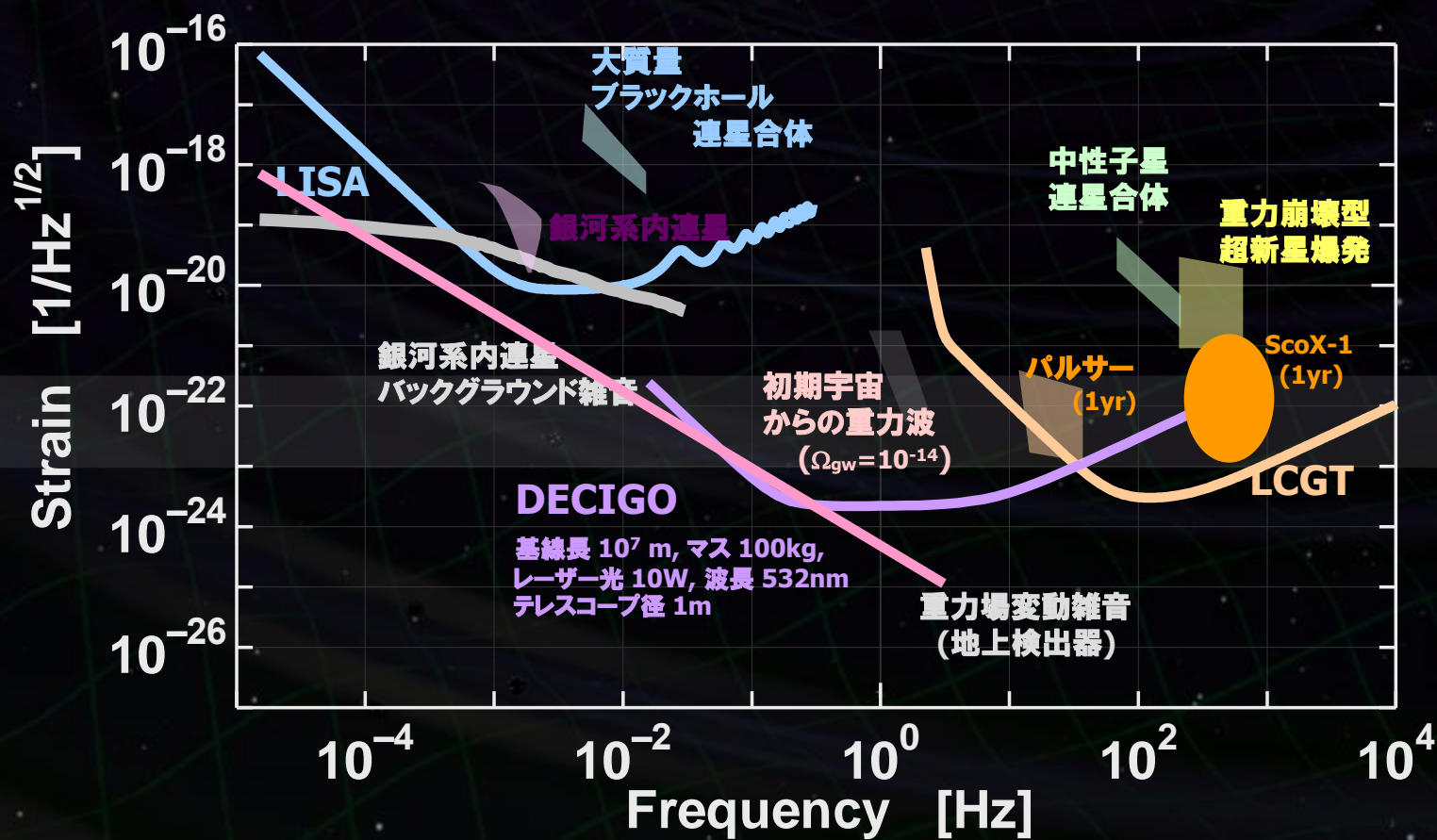
技術性成熟度の更なる向上・分かり易い実績

説得力のある科学的成果の検討

打ち上げ目標： 2015年

観測周波数帯と観測対象

- 地上干渉計 : 10Hz - 1kHz → 中性子星など
- DECIGO : 0.1 - 1Hz → 中間質量BHなど, 初期宇宙からの重力波
- LISA : 1mHz - 10mHz → 大質量BHなど

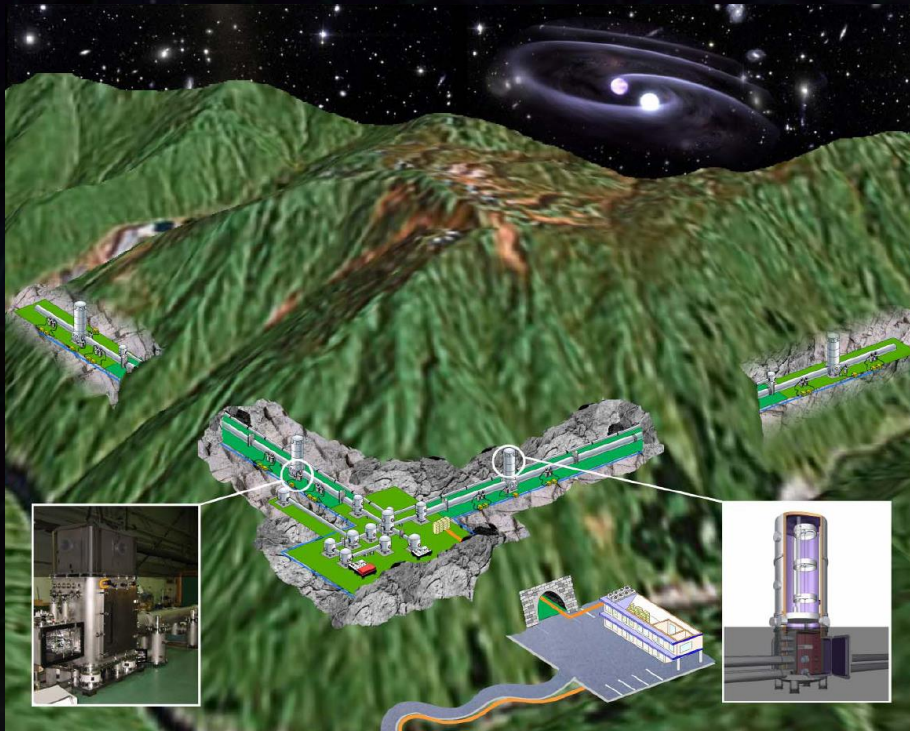


LCGT (~2016)

Terrestrial Detector

→ High frequency events

Target: GW detection

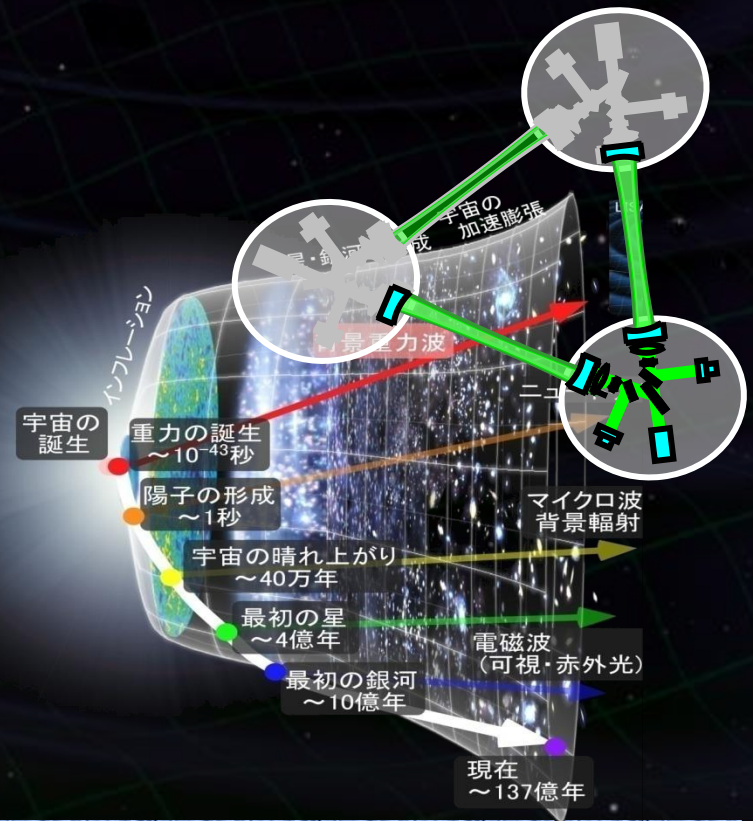


DECIGO (~2027)

Space observatory

→ Low frequency sources

Target: GW astronomy



地上重力波望遠鏡との関係

日本の重力波のグループ

- LCGT : 最優先のプロジェクト
- DECIGO : その先の中心プロジェクト

LCGT : 予算獲得のために準備中
計画最初の3年程度は、トンネル掘削や真空槽設置などの工事が主であり、現在と同程度のエフォート率を維持

重力波/宇宙というフロンティアへの意欲

- ⇒ DECIGO/DPFには、
LCGT以外からの研究者/学生
も多く参入



SWIMによる実証とDPF

SDS-1搭載のSWIM (Space wire demonstration module)

DPF衛星のプロトタイプとしての役割

SpC2 小型衛星標準バス (通信・信号処理, 電源制御)

Snm DPFミッション部 (デジタル制御ボード, AD/DAコンバータ, センサモジュール)

SpaceCube2: Space-qualified Computer

CPU: HR5000

(64bit, 33MHz)

System Memory:

2MB Flash Memory

4MB Burst SRAM

4MB Asynch. SRAM

Data Recorder:

1GB SDRAM

1GB Flash Memory

SpW: 3ch

Size: 71 x 221 x 171

Weight: 1.9 kg

Power: 7W



Photo by JAXA

SWIM_{μv} : User Module

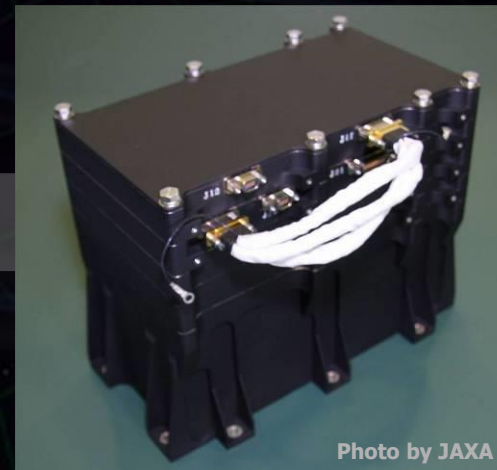


Photo by JAXA

Processor test board

GW+Acc. sensor

FPGA board

DAC 16bit x 8 ch

ADC 16bit x 4 ch

→ 32 ch by MPX

Torsion Antenna x2

~47g test mass

Data Rate : 380kbps

Size: 124 x 224 x 174

Weight: 3.5 kg

Power: ~7W

**SDS-1
Bus System**

Power +28V
RS422 for CMD/TLM
GPS signal

Power ±15V, +5V
SpW x2 for CMD/TLM

SWIMによる実証とDPF

SDS-1搭載のSWIM (Space wire demonstration module)

DPF衛星のプロトタイプとしての役割

SpC2 小型衛星標準バス (通信・信号処理, 電源制御)

Snm DPFミッション部 (デジタル制御ボード, AD/DAコンバータ, センサモジュール)

SpaceCube2: Space-qualified Computer

CPU: HR5000

(64bit, 33MHz)

System Memory:

2MB Flash Memory

4MB Burst SRAM

4MB Asynch. SRAM

Data Recorder:

1GB SDRAM

1GB Flash Memory

SpW: 3ch

Size: 71 x 221 x 171

Weight: 1.9 kg

Power: 7W



Photo by JAXA

SWIM_{μv} : User Module

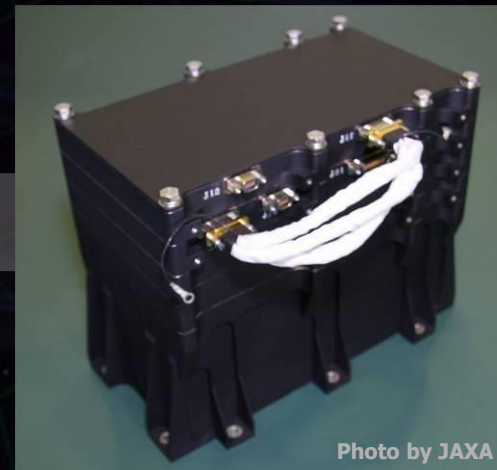


Photo by JAXA

Processor test board

GW+Acc. sensor

FPGA board

DAC 16bit x 8 ch

ADC 16bit x 4 ch

→ 32 ch by MPX

Torsion Antenna x2

~47g test mass

Data Rate : 380kbps

Size: 124 x 224 x 174

Weight: 3.5 kg

Power: ~7W

**SDS-1
Bus System**

Power +28V
RS422 for CMD/TLM
GPS signal

Power ±15V, +5V
SpW x2 for CMD/TLM

信号処理・制御

SpaceWire/SpaceCube

SDS-1/SWIM

1/23打上げ → 宇宙実証試験

⇒ 東京大学, 京都大学
宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

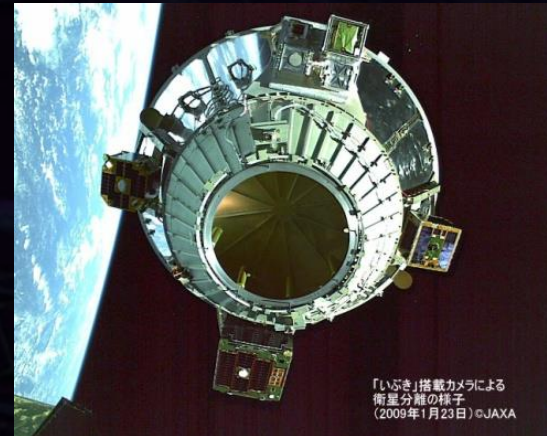


写真:
JAXA

SpaceCube2: Space-qualified Computer

CPU: HR5000
(64bit, 33MHz)

System Memory:
2MB Flash Memory
4MB Burst SRAM
4MB Asynch. SRAM

Data Recorder:
1GB SDRAM
1GB Flash Memory
SpW: 3ch

Size: 71 x 221 x 171
Weight: 1.9 kg
Power: 7W



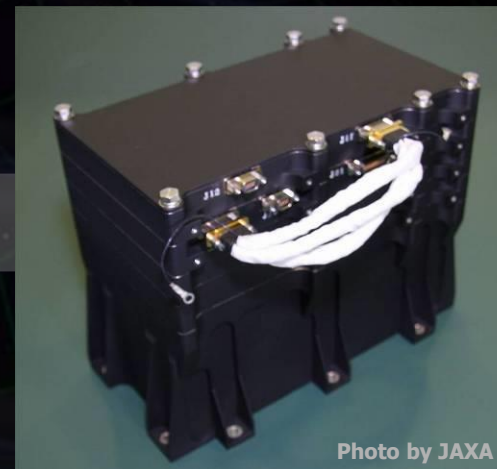
SWIM_μV : User Module

Processor test board
GW+Acc. sensor

FPGA board
DAC 16bit x 8 ch
ADC 16bit x 4 ch

→ 32 ch by MPX
Torsion Antenna x2
~47g test mass

Data Rate : 380kbps
Size: 124 x 224 x 174
Weight: 3.5 kg
Power: ~7W



SWIM μ v センサーモジュール

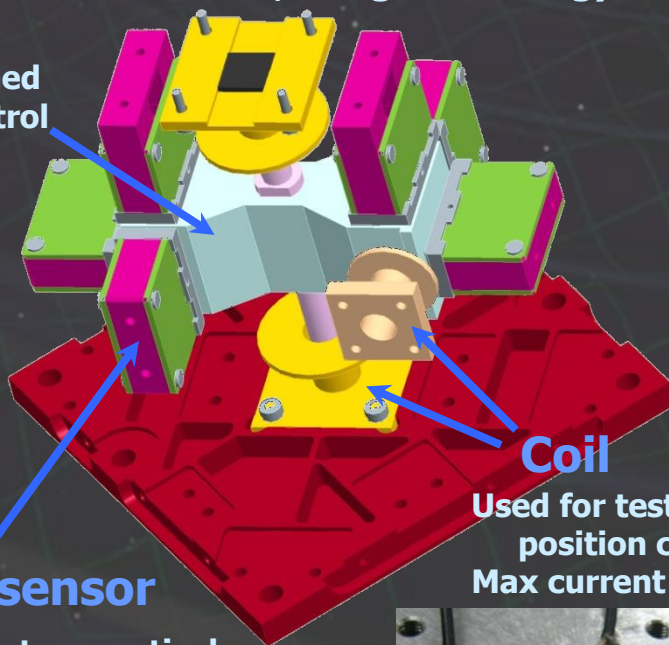
超小型重力波検出器

SpW 通信の宇宙実証のためのセンサーモジュール
将来の宇宙重力波望遠鏡のための最初のステップ

TAM: Torsion Antenna Module with free-falling test mass
(Size : 80mm cube, Weight : ~500g)

Test mass

~47g Aluminum, Surface polished
Small magnets for position control

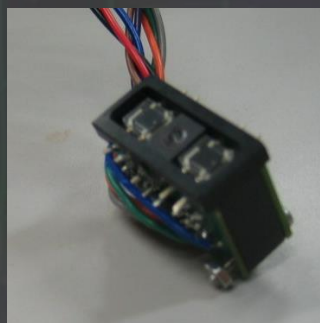
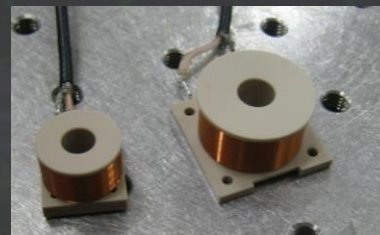


Coil

Used for test-mass position control
Max current ~100mA

Photo sensor

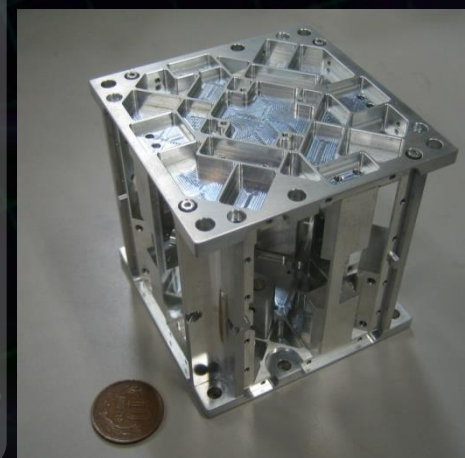
Reflective-type optical displacement sensor
Separation to mass ~1mm
Sensitivity ~ 10^{-9} m/Hz^{1/2}
6 PSs to monitor mass motion



SWIMmn Module



2 TAMs in the frame



超小型宇宙重力波検出器

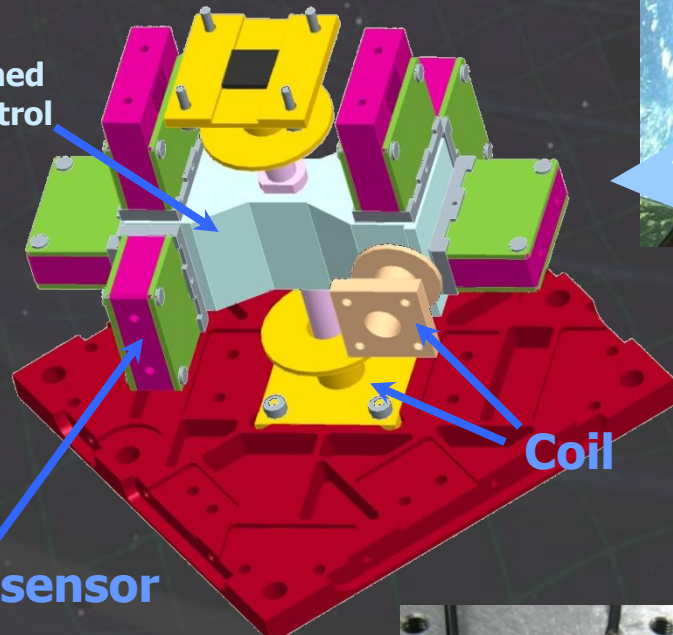
2009年1月打ち上げ, 2010年9月運用停止

⇒ 世界で最初の 宇宙重力波検出器

TAM: Torsion Antenna Module with free-falling test mass
(Size : 80mm cube, Weight : ~500g)

Test mass

~47g Aluminum, Surface polished
Small magnets for position control



Coil

Photo sensor

Reflective-type optical displacement sensor
Separation to mass ~1mm
Sensitivity ~ 10^{-9} m/Hz^{1/2}
6 PSs to monitor mass motion

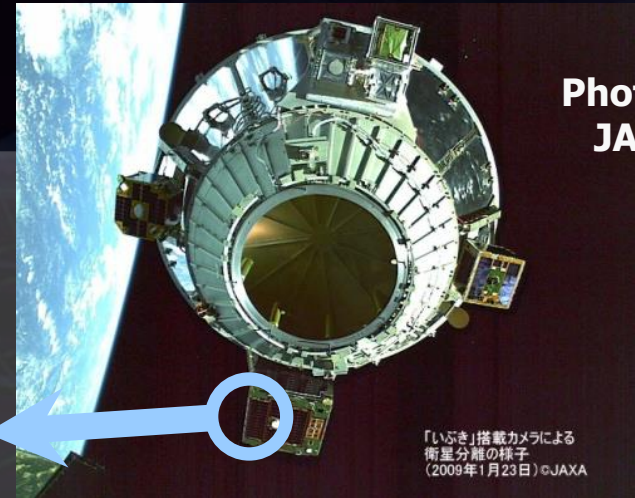
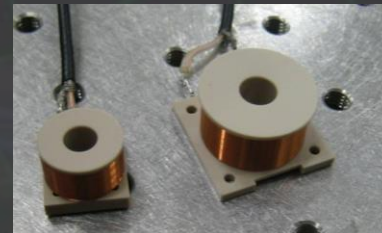
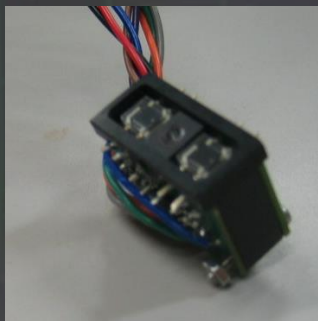
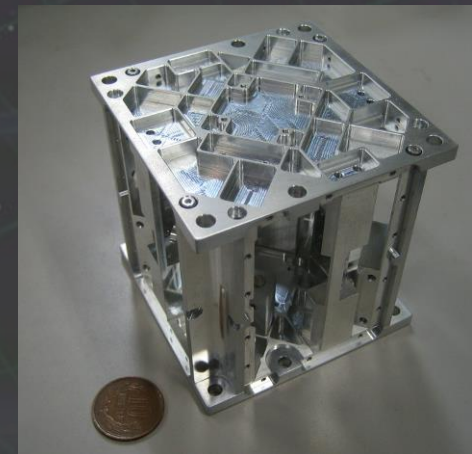


Photo: JAXA

「いぶき」搭載カメラによる衛星分離の様子 (2009年1月23日) ©JAXA



SWIM_{μν} 軌道上実証

SWIM

In-orbit operation

Test mass controlled

Error signal → zero

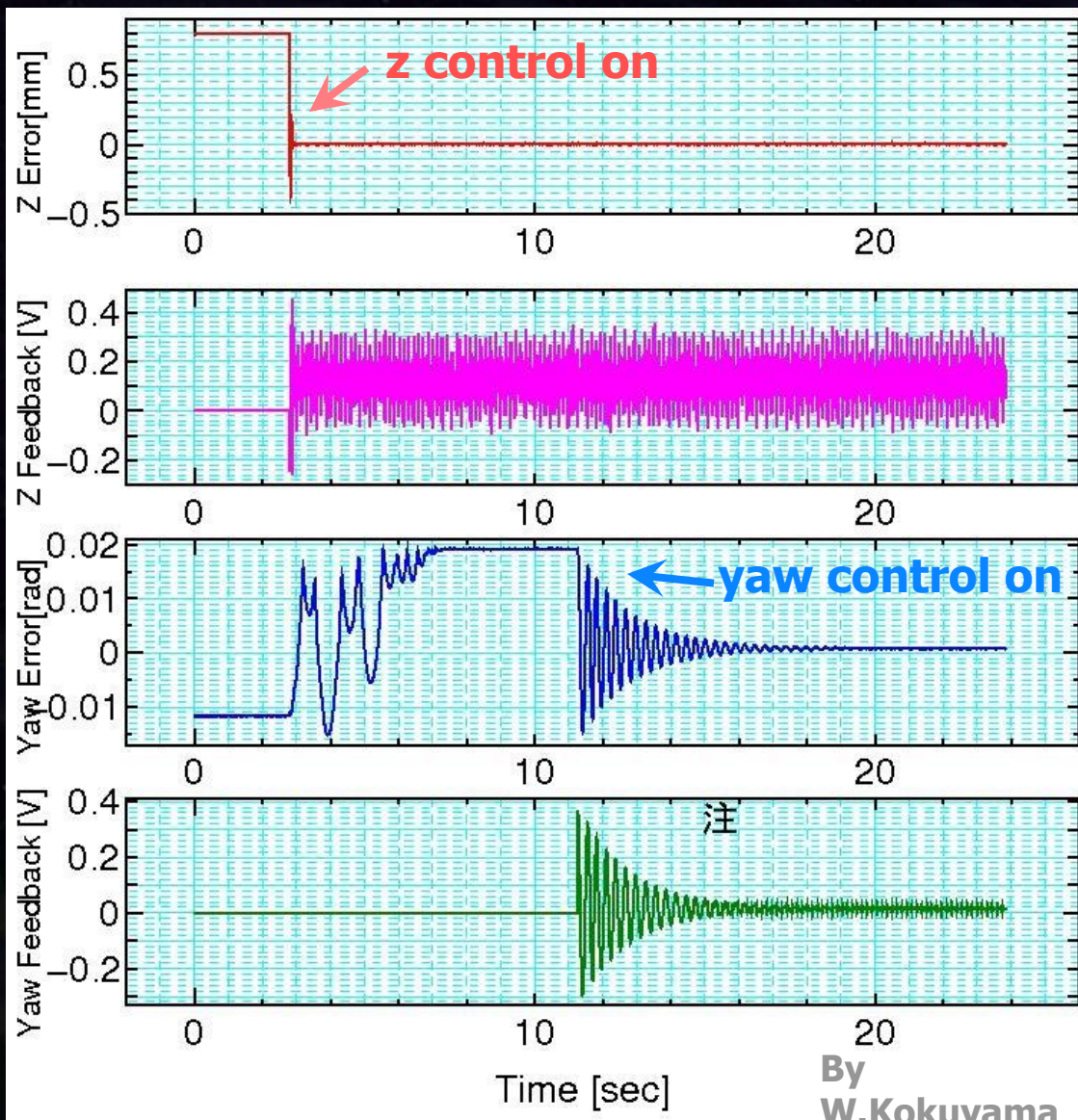
Damped oscillation
(in pitch DoF)

Free oscillation
in x and y DoF

Signal injection
→ OL trans. Fn.

Operation: May 12, 2009

Downlink: ~ a week



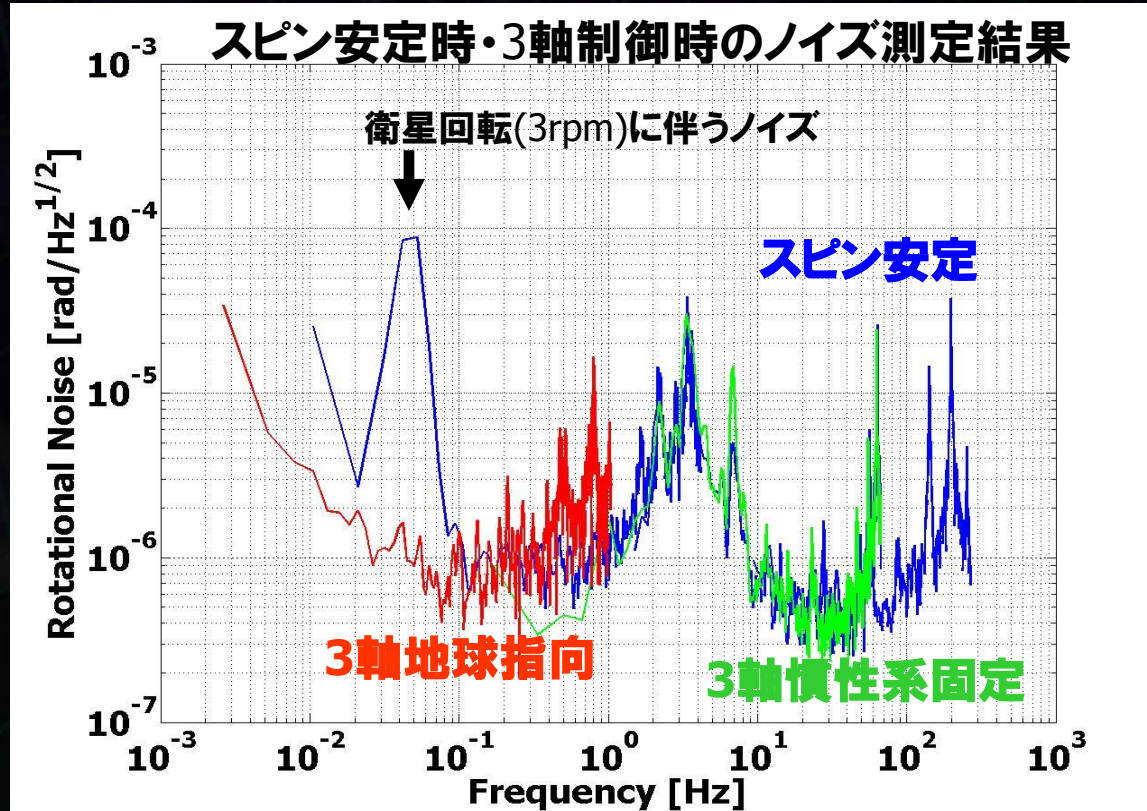
By
W.Kokuyama

月1回のペースで順調に運用中

伝達関数測定, DC gain測定
衛星3軸制御時のスペクトル測定



6月より観測を計画中



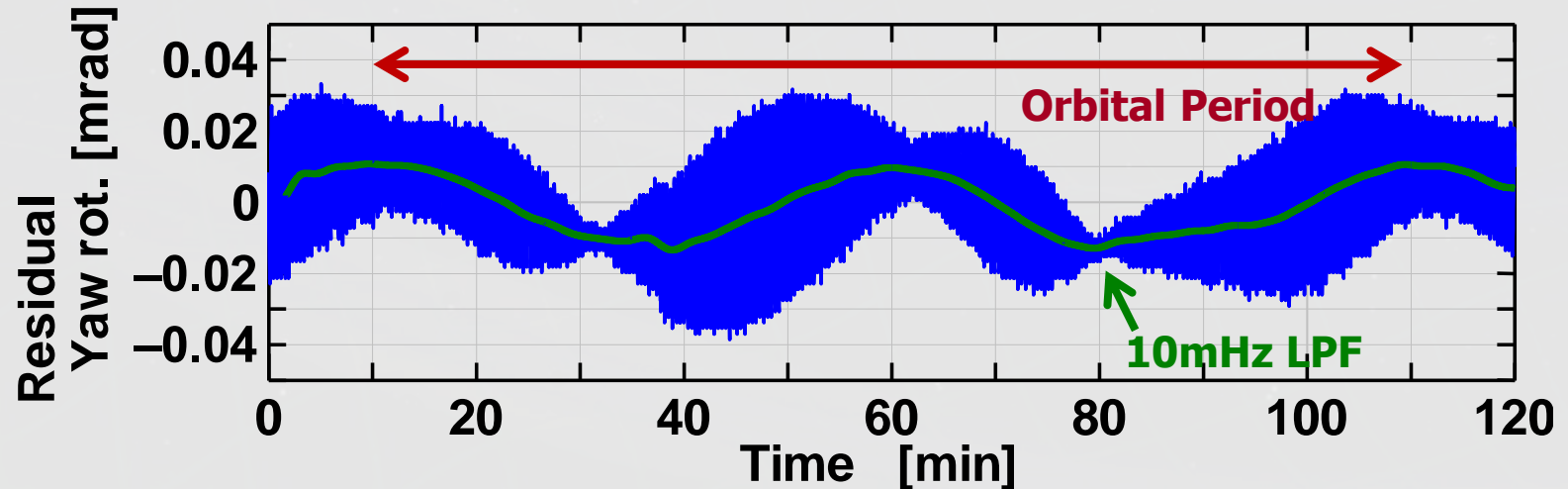
長時間データ取得

Jun 17, 2010 ~120 min.

July 15, 2010 ~240 min.

地上重力波検出器との同時観測運転

⇒ データ解析進行中



安定化レーザー光源

Yb:YAG (NPRO) 光源

ヨウ素飽和吸収による安定化制御

→ 安定度向上, パッケージ化

⇒ 電気通信大学
情報通信研究機構 (NICT)



武者氏
資料より

干渉計・ハウジング

プロトタイプ的设计・製作

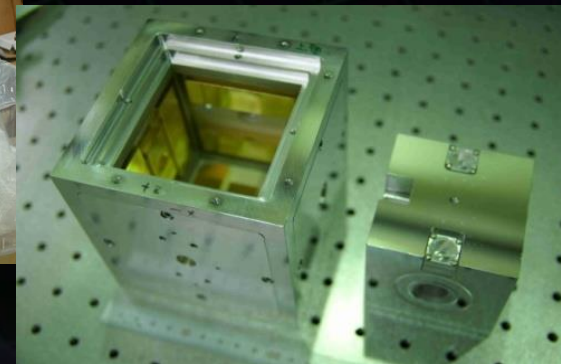
→ 基本性能の試験

地球重力場観測用センサの試作

⇒ 国立天文台 (NAOJ)
東京大学・地震研究所
スタンフォード大



新谷氏
資料より



佐藤氏
資料より