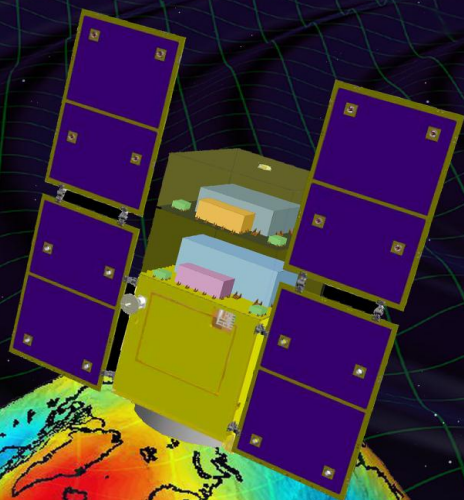


スペース重力波アンテナDECIGO計画 (33)

DECIGO/DPF



Earth Image: ESA

安東 正樹 (京都大学 理学研究科)

他, DECIGO/DPFワーキンググループ

安東正樹, 川村静児, 瀬戸直樹, 中村卓史, 坪野公夫, 佐藤修一, 田中貴浩, 船木一幸, 沼田健司, 神田展行, 井岡邦仁, 高島健, 横山順一, 青柳巧介, 我妻一博, 阿久津智忠, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二, 新谷昌人, 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, 江口智士, 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, 木内建太, 岸本直子, 國中均, 國森裕生, 黒田和明, 黒柳幸子, 小泉宏之, 洪鋒雷, 郡和範, 穀山渉, 苔山圭以子, 古在由秀, 小寫康史, 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, 佐藤孝, 柴田大, 正田亜八香, 真貝寿明, 杉山直, 鈴木理恵子, 諏訪雄大, 宗宮健太郎, 祖谷元, 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, 田中伸幸, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 陳たん, 辻川信二, 常定芳基, 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, 中山宜典, 西澤篤志, 西田恵里奈, 西山和孝, 丹羽佳人, 能見大河, 橋本樹明, 端山和大, 原田知広, 疋田渉, 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, 細川瑞彦, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英雄, 松本伸之, 道村唯太, 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, 吉田至順, 吉野泰造, 柳哲文, 若林野花

目次

DECIGO/DPFの概要と現状
小型宇宙モジュール SWIM μ v
まとめ



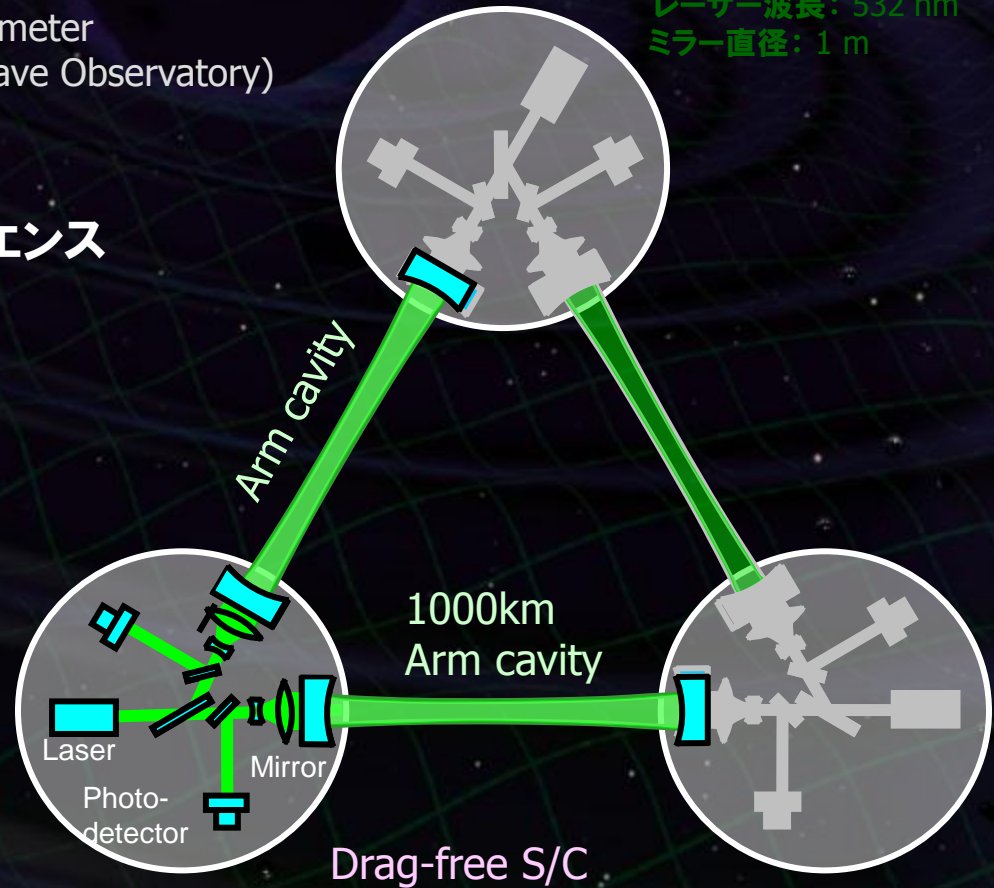
DECIGO/DPFの概要

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

初期宇宙の観測



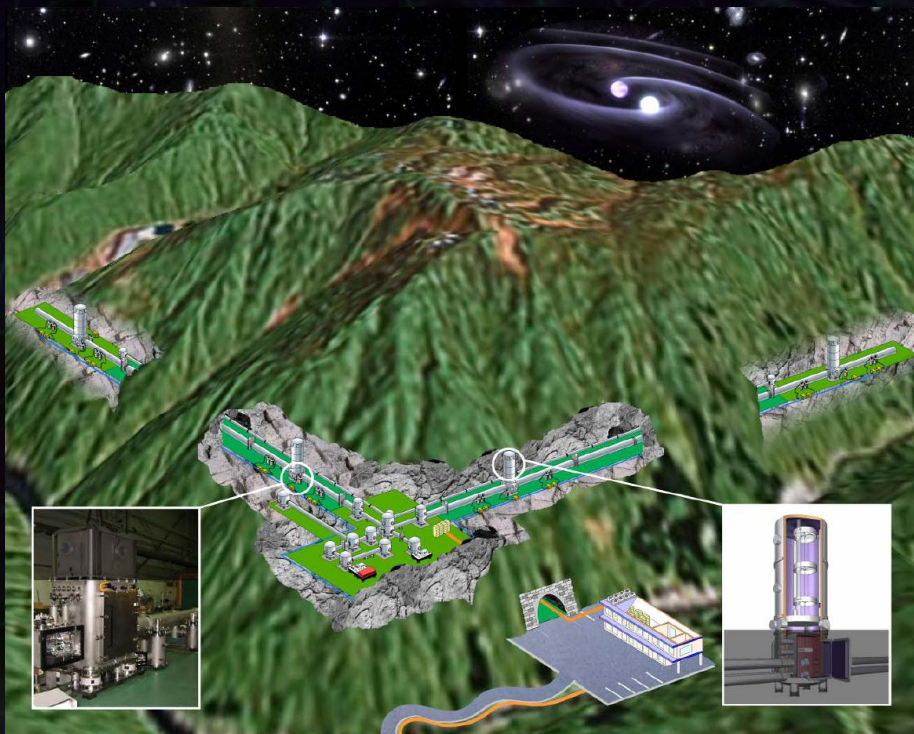
Background:
original figure by
NASA/WMAP Science Team

LCGT (~2017)

Ground-based Detector

→ 高周波数の重力波イベント

目標: 重力波の検出, 天文学

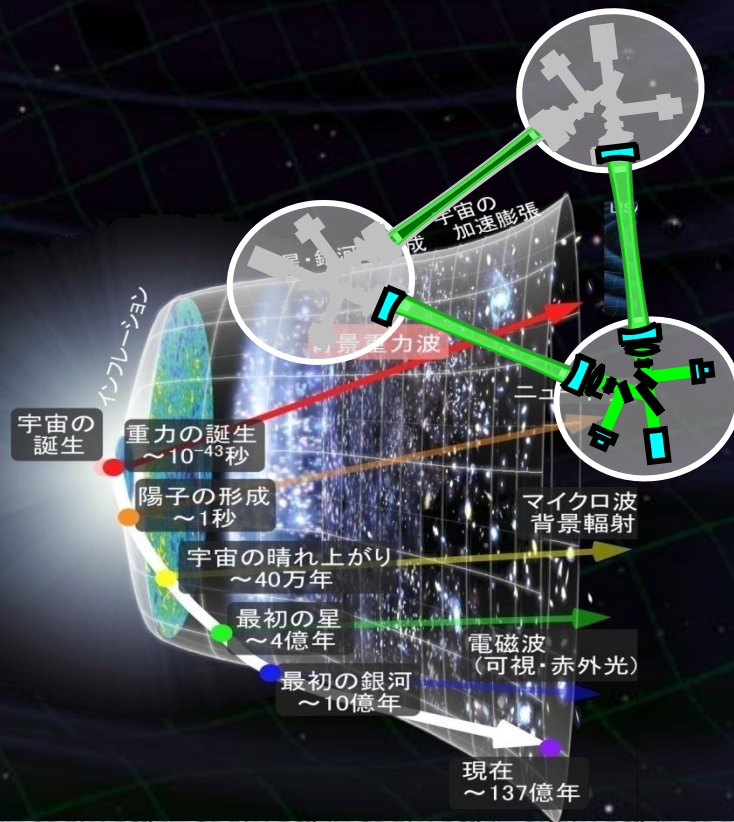


DECIGO (~2027)

Space observatory

→ 低周波数の重力波

目標: 重力波天文学の展開



重力波天文学のロードマップ

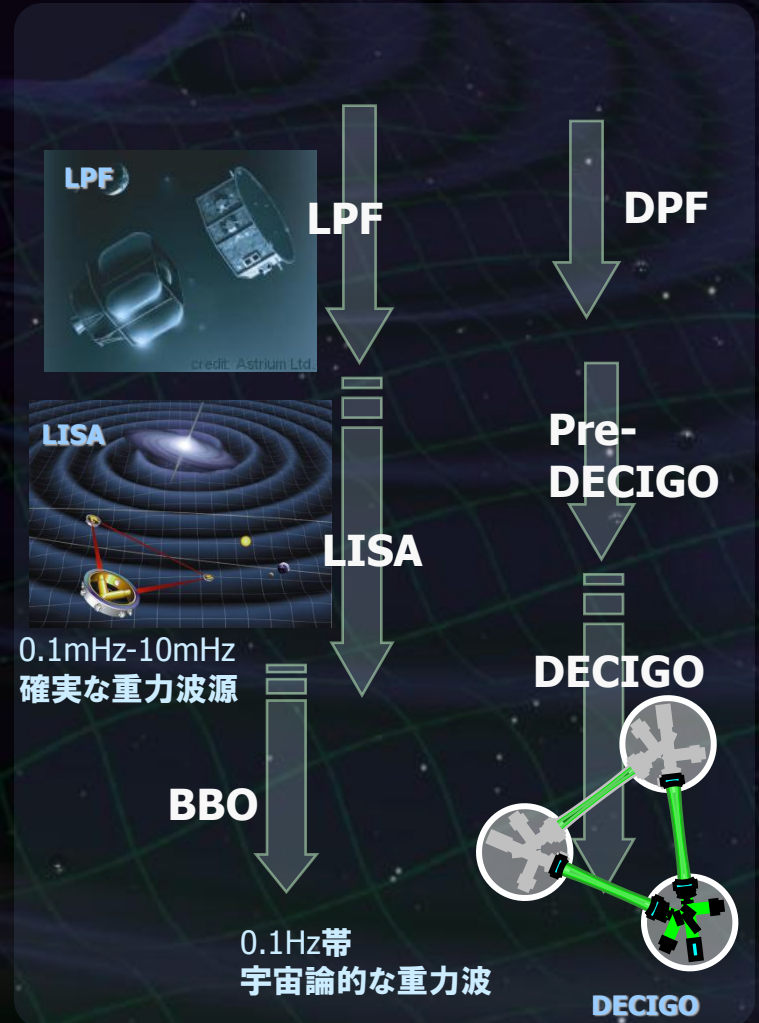
地上望遠鏡

より遠くを観測 (10Hz-1kHz)



宇宙望遠鏡

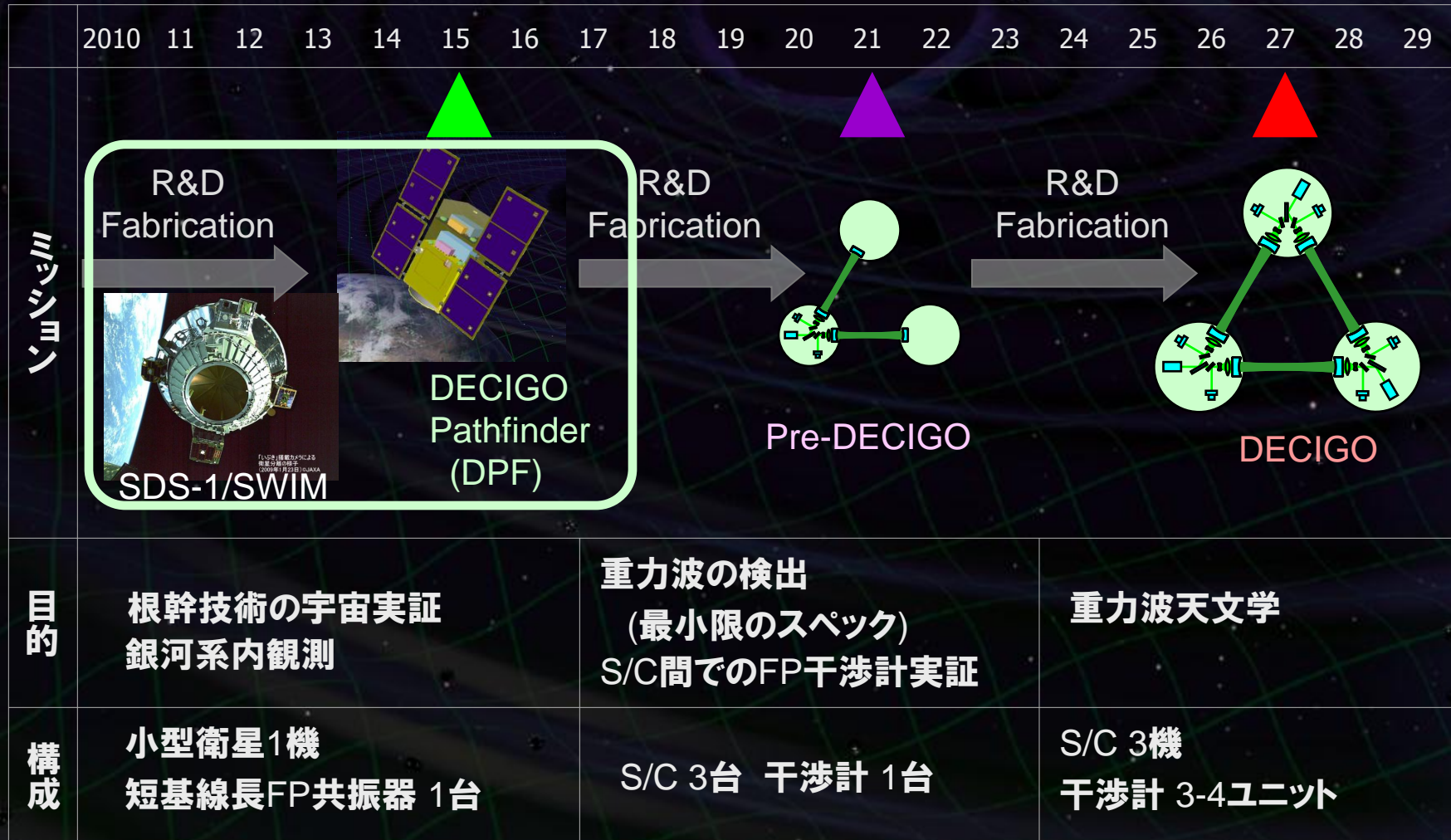
低周波数帯の観測



DECIGOのロードマップ



Figure: S.Kawamura



DECIGOパスファインダー (DPF)

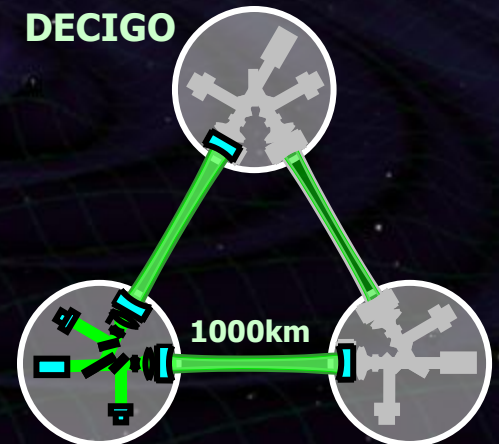
DECIGOのための最初の前哨衛星

DECIGO : 基線長 1000kmの編隊飛行

→ DPF 1機の衛星 (基線長30cm干渉計)

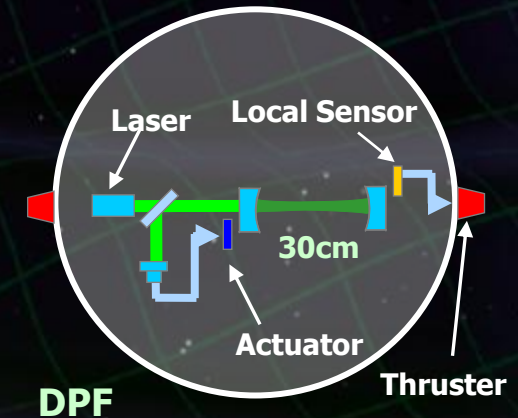
350kg級 小型衛星

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



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

FP干渉計の
動作実証



6×10^{-16} m/Hz^{1/2}
の変位感度

4×10^{-18} m/Hz^{1/2}
の変位感度

10^{-15} N/Hz^{1/2}
の外力雑音

10^{-17} N/Hz^{1/2}
の外力雑音

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
光源の動作実証

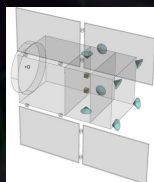


0.5 Hz/Hz^{1/2}
の周波数安定度

0.5 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

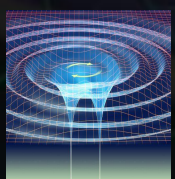


衛星変動安定度
 10^{-9} m/Hz^{1/2}

スラスト雑音
 10^{-7} 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

重力波の観測

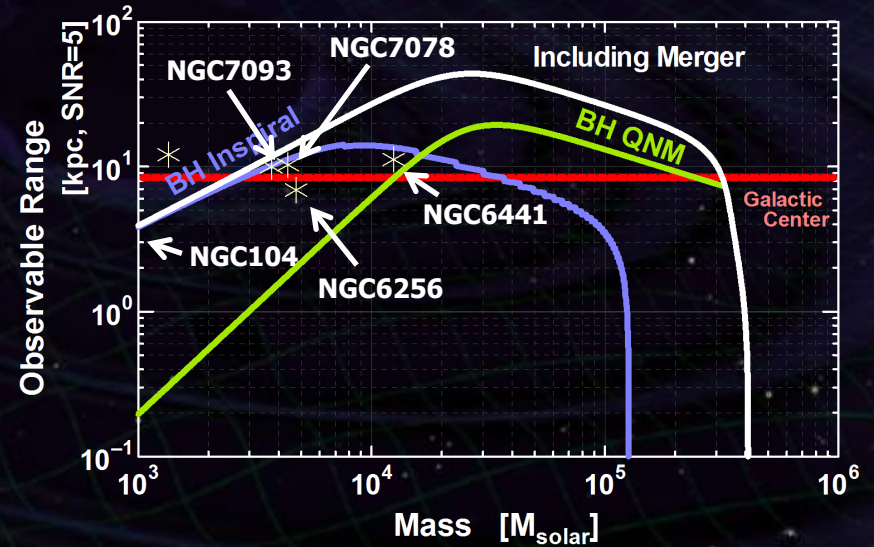


0.1 Hz帯の連続
観測とデータ解析

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

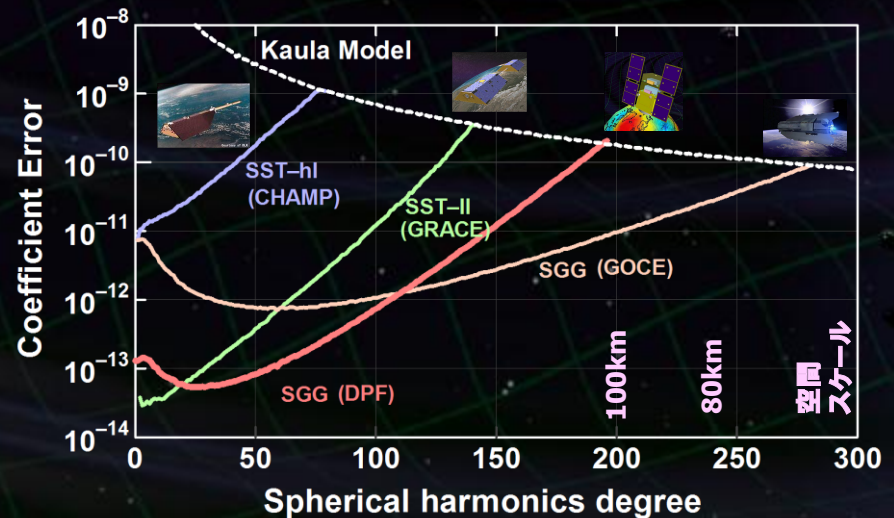
重力波により宇宙を見る
 銀河系内のBH連星合体
 → 巨大BH形成への知見.

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)



DPFシステム概要

DPF Payload

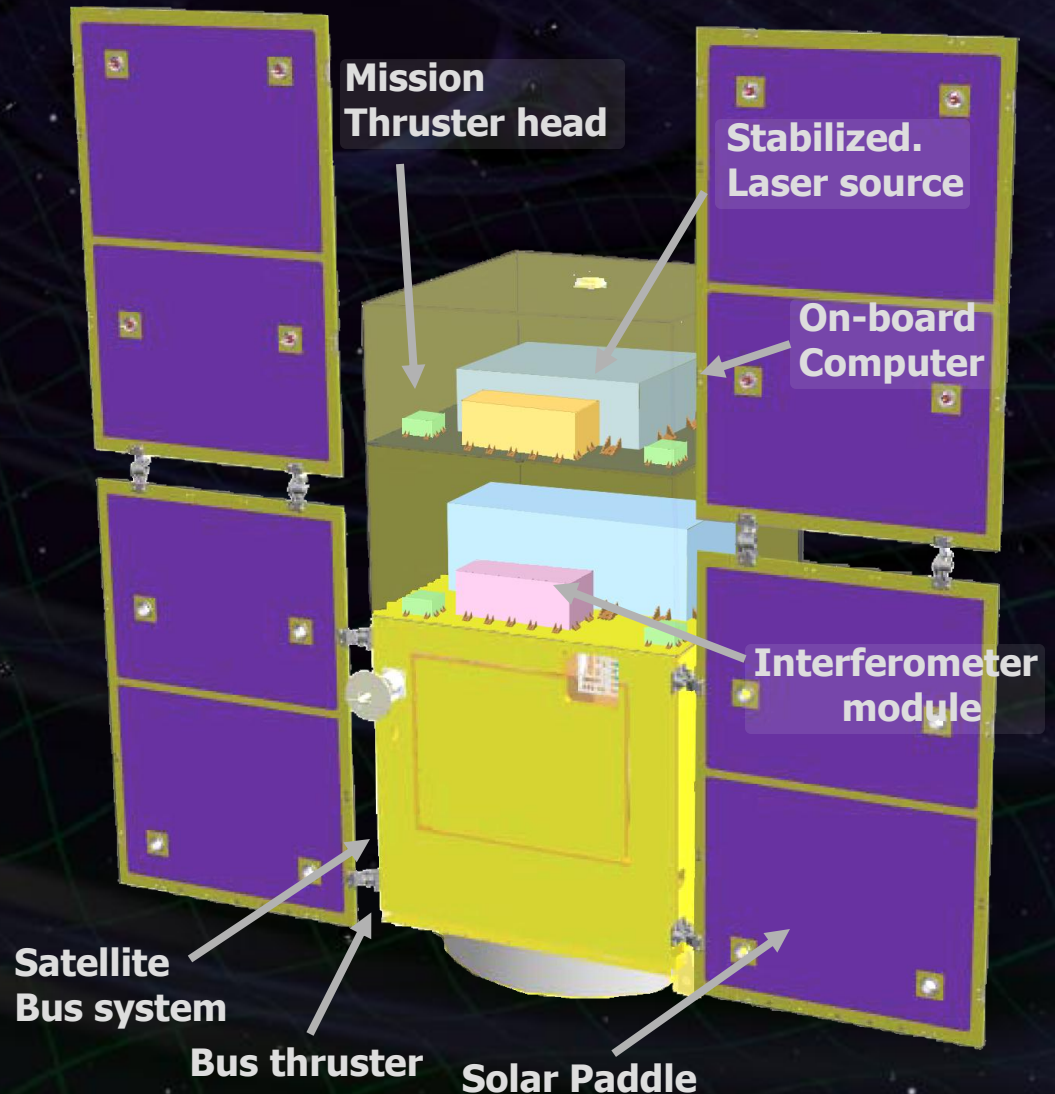
Size : 950mm cube
Weight : 150kg
Power : 130W
Data Rate: 800kbps
Mission thruster x12

Power Supply
SpW Comm.

Satellite Bus

(‘Standard bus’ system)

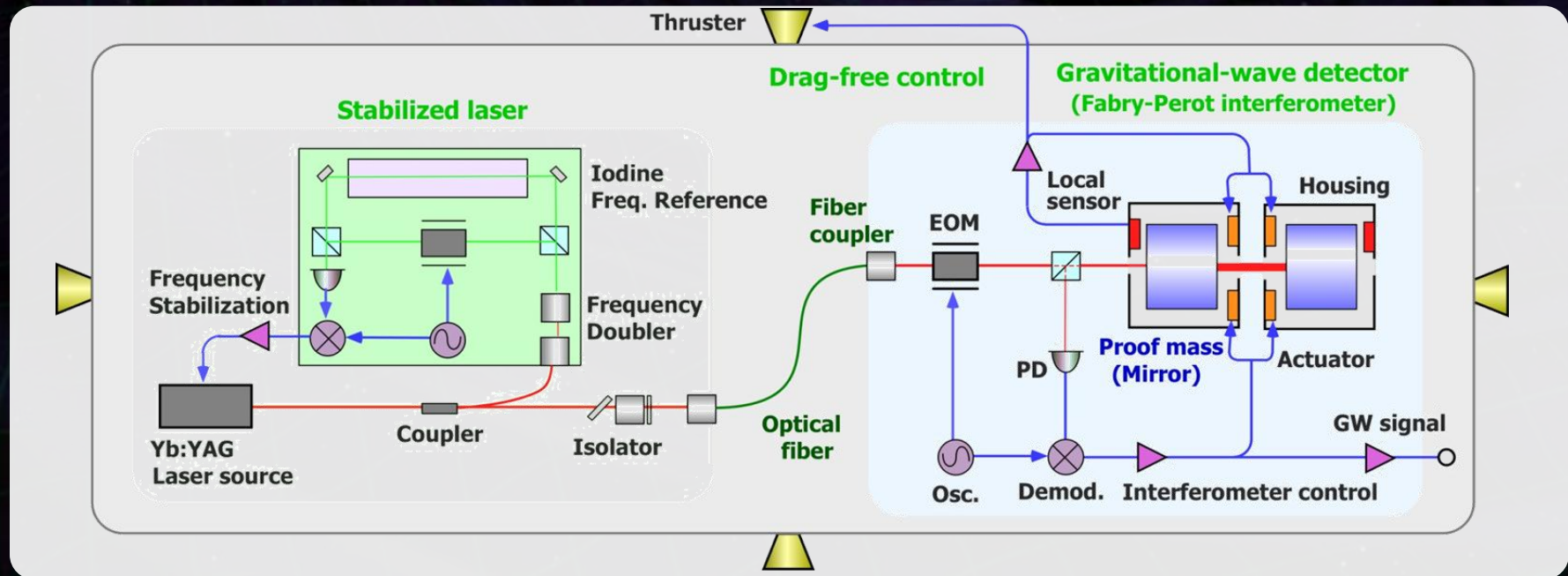
Size :
950x950x1100mm
Weight : 200kg
SAP : 960W
Battery: 50AH
Downlink : 2Mbps
DR: 1GByte
3N Thrusters x 4



DPFミッション機器構成

ミッション機器重量 : 150kg
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

JAXAの小型科学衛星シリーズの候補

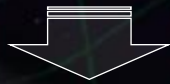
標準衛星バス + 次期固体ロケットを利用して
最低 3機の小型科学衛星 を打ち上げる計画

1号機 SPRINT-A/EXCEED (~2012年)

UV望遠鏡による惑星観測

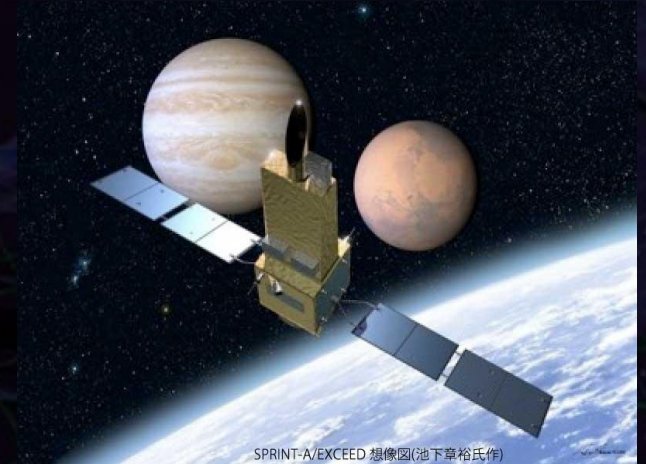
2号機 SPRINT-B/ERG (~2014/15年)

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: 2016/17年度

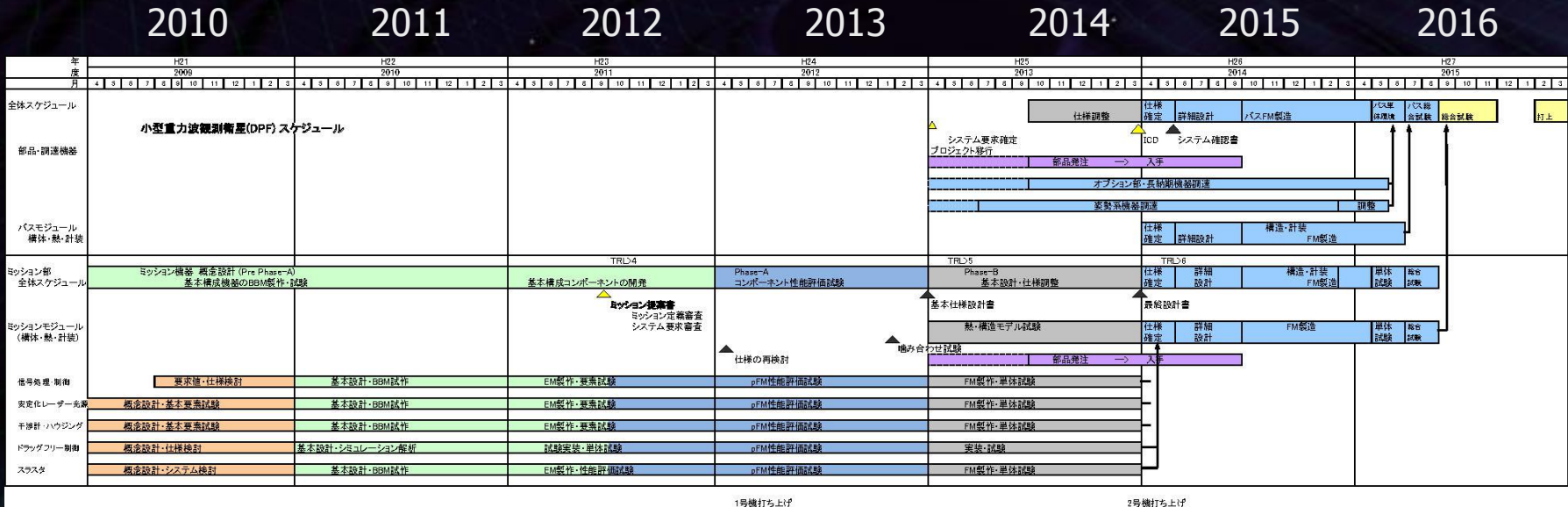


小型科学衛星1号機 SPRINT-A/EXCEED



Next-generation Solid rocket booster
(M-V Follow-on, Fig. by JAXA)

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

- **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・誘導制御グループとの協力**

→ 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)**

中核機関としての DECIGO/DPFサポート 議論開始

•LISAの状況変化

- 欧米の宇宙重力波望遠鏡 LISA (Laser Interferometer Space Antenna)が、ESA/NASA共同プロジェクトから ESA主導プロジェクトに変更。
→ NGO (New Gravitational-wave Observatory) として計画見直し作業中。
基線長 1/5 (100万km), 主宇宙機 1機 – 副宇宙機 2機 構成に変更など。

•DECIGOグループの体制

- 川村さんが代表を退く。 → 安東が代表代理となっています。
- DPFの体制などは, 大きな変更はなし。

•DPFのミッション検討・開発進行中 (JAXA, RESCUEなどのサポート)

- JAXA小型科学衛星 3号機のミッション募集は 2012年度にある見込み。
- サブシステムBBMの開発, 衛星ミッション検討
干渉計・信号処理系の開発・検討 (佐藤氏, 阿久津氏, 陳たん氏, 岡田氏講演)
安定化レーザー光源の開発・検討 (武者氏講演)
ドラッグフリーシステム検討, スラスタ開発 (JAXA・船木氏中心に)
地球重力場観測の検討 (京大・長谷川氏, 福田氏 を中心に)

•SWIMデータの解析進行中 (東大・穀山氏中心に)

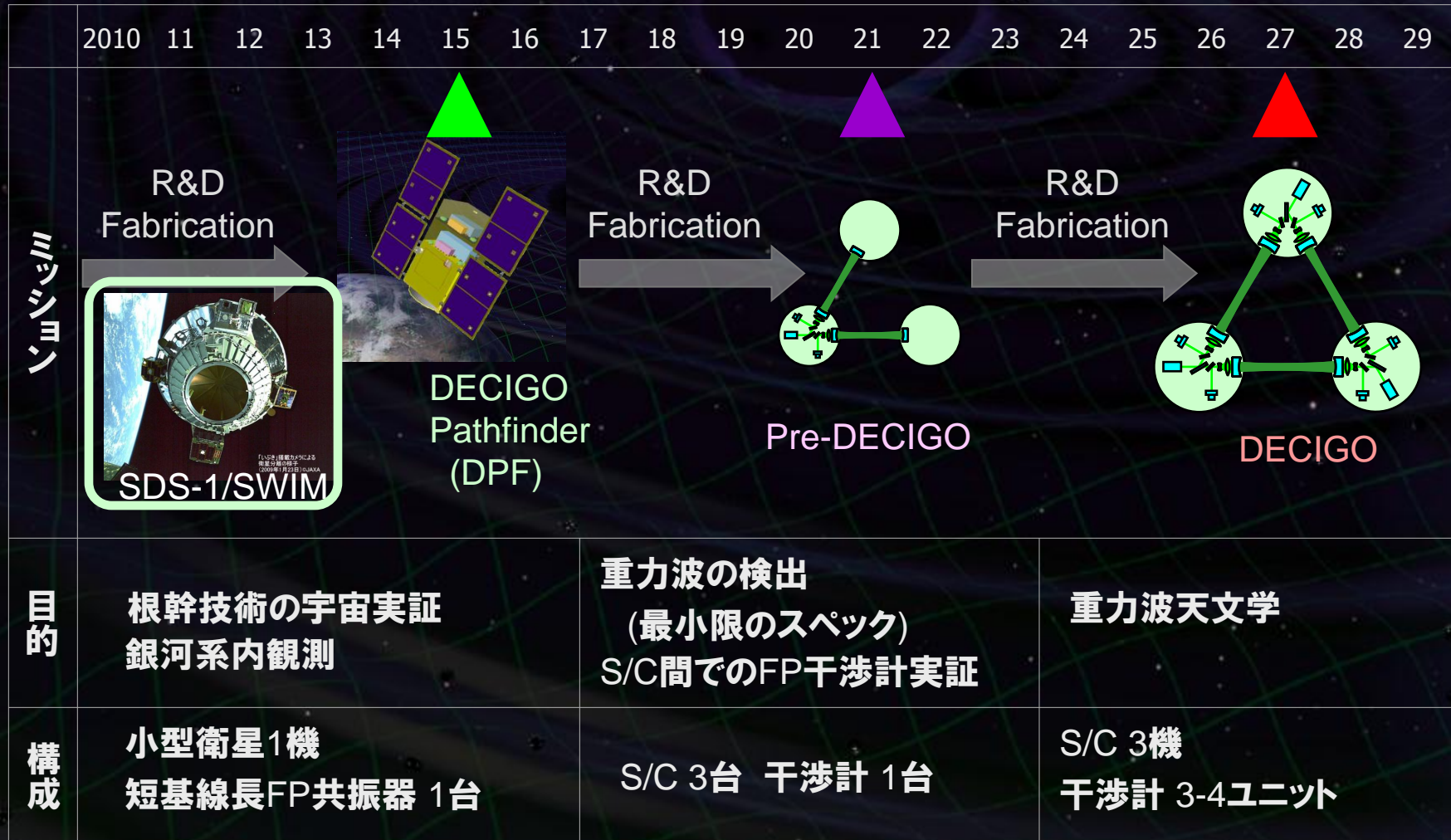
小型宇宙モジュール SWIM μ v

~ 図などの多くは穀山 (東大理) の提供 ~

DECIGOのロードマップ



Figure: S.Kawamura



超小型宇宙重力波検出器

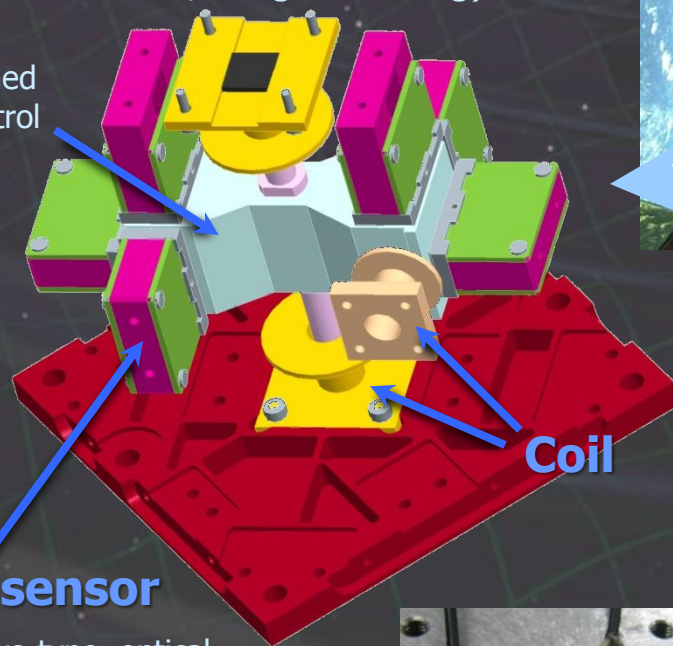
2009年1月打ち上げ, 2010年9月運用停止

⇒ 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

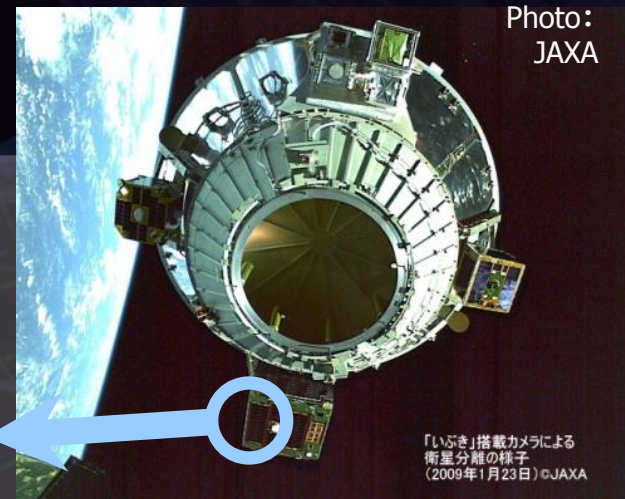
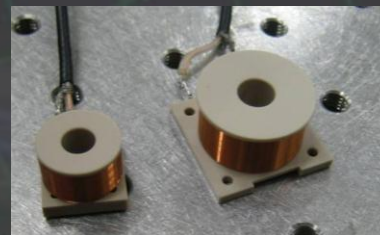
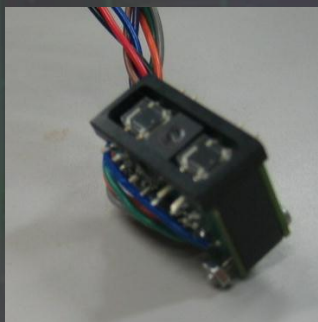
~47g Aluminum, Surface polished
Small magnets for position control



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

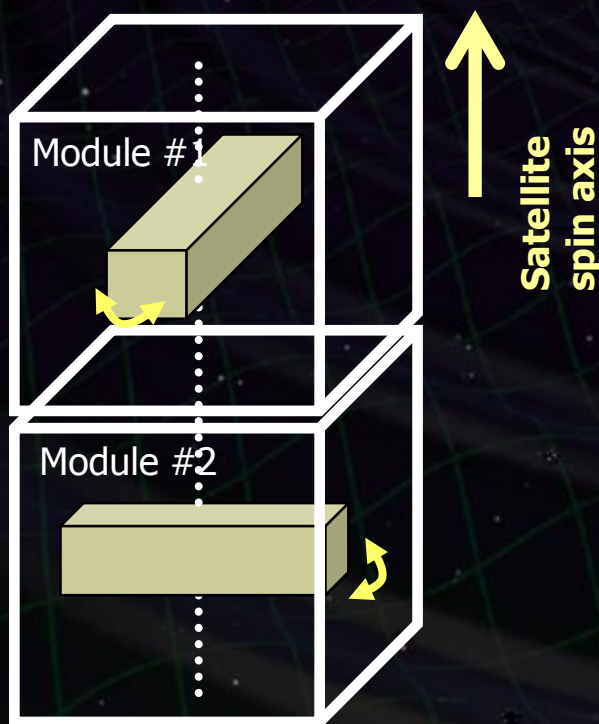


「いぶき」搭載カメラによる
衛星分離の様子
(2009年1月23日) ©JAXA

振じれ型重力波望遠鏡

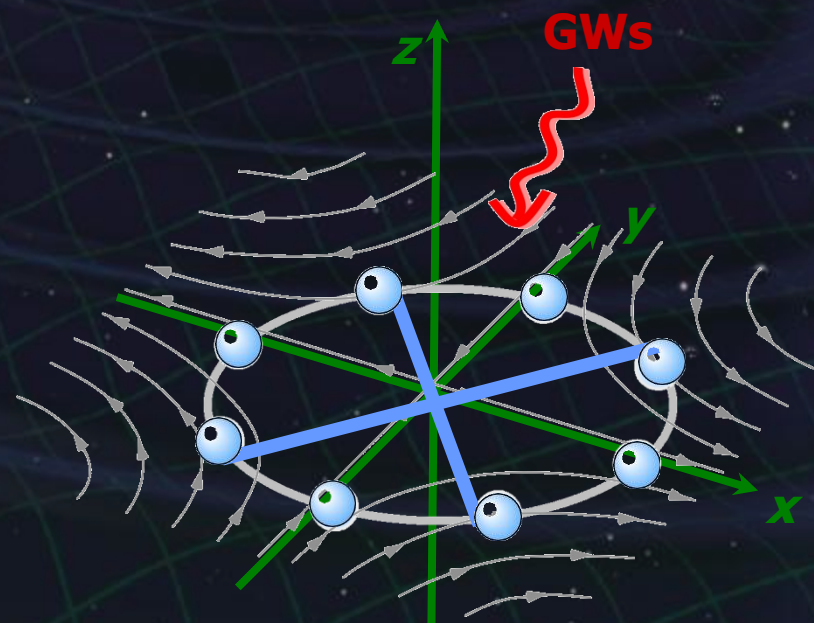
SWIM – 回転TOBA方式での観測

低周波数重力波を
(衛星スピン周波数 x2) にアップコンバート



SWIMmn : Two floating test masses placed orthogonal to each other

Torsion Detector
Detect differential rotation



差動振じれ変動 $h \sim \delta\theta \sim \frac{\delta L}{L}$

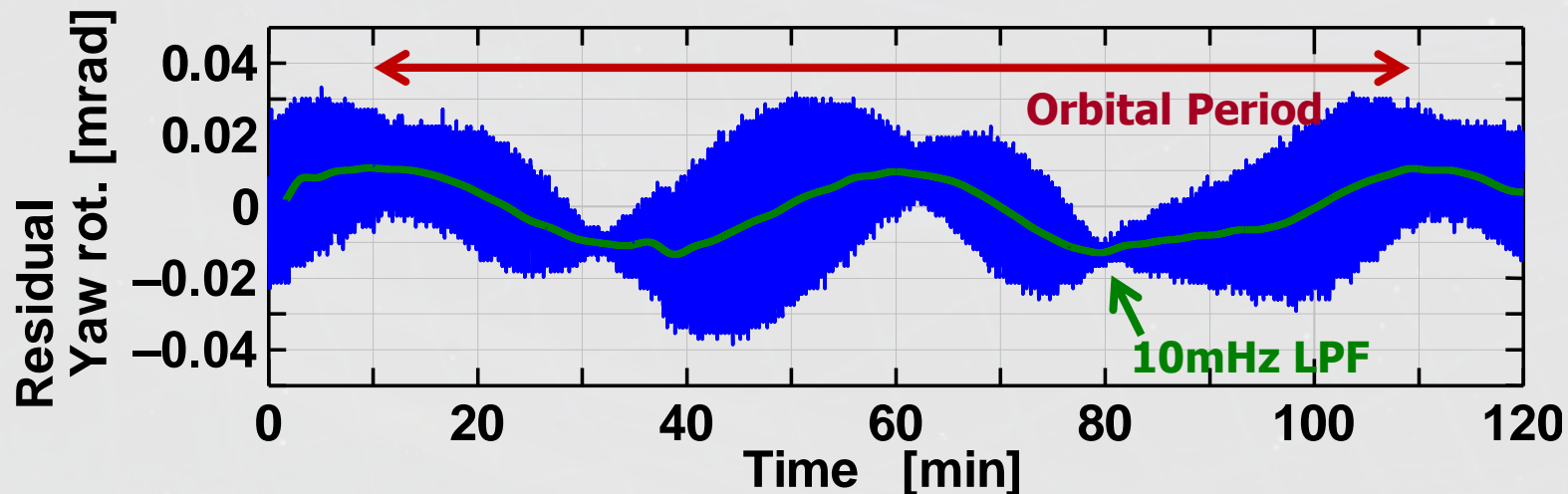
SWIM による観測運転

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
銀河中心方向に感度を持つよう姿勢決定



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。

観測データの異常

観測データを地上へ回収したとき、本来センサ出力にはない異常信号が混入。
→ 重力波観測にとって致命的な、データの汚れが発生。

・原因

(1) オンボードソフトウェアのバグ

データレート低減のための平均化処理部において
数値のフォーマットを間違えた計算をしていた。

(2) 衛星通信における転送エラー

衛星-地上局間の通信時のビットエラー
観測データパケットには誤り訂正等の対策をしていなかった。

データ異常のクリーニング

・対処

(1) オンボードソフトウェアのバグ

データの異常状態が地上で推定できる

→ 地上での解析により、真のデータを復元処理.

(2) 衛星通信における転送エラー

同じデータを2回衛星から転送.

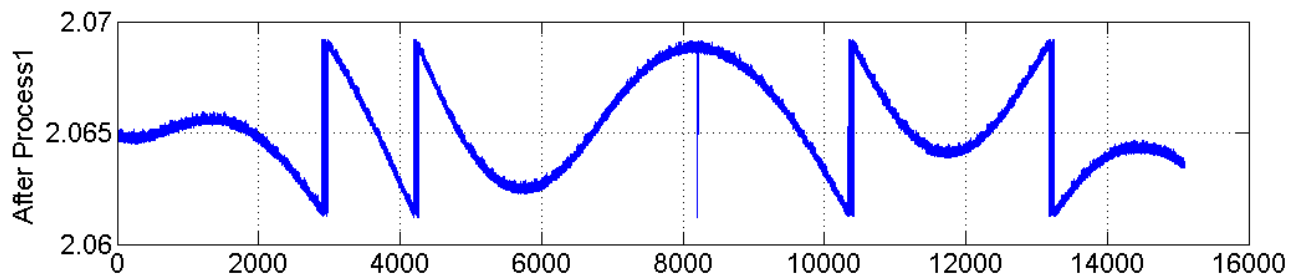
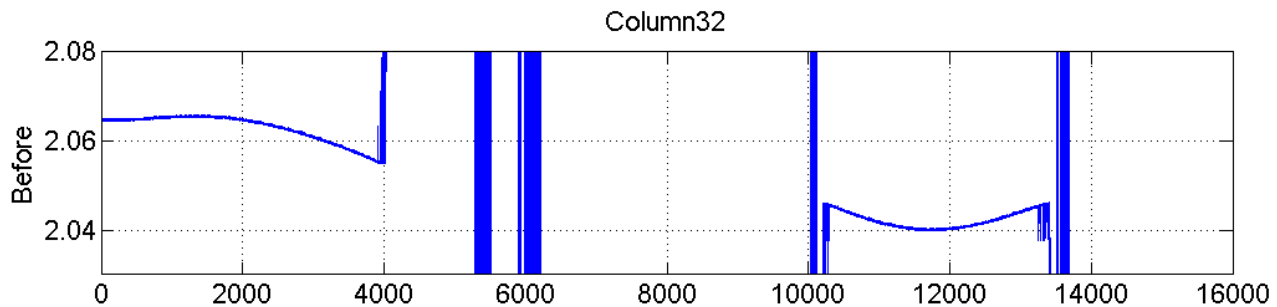
→ 互いに比較し、エラー部を復元.

(3回転送して多数決、のほうが簡単だが、転送の回数を減らして観測データ量をなるべく多くすることを狙った)

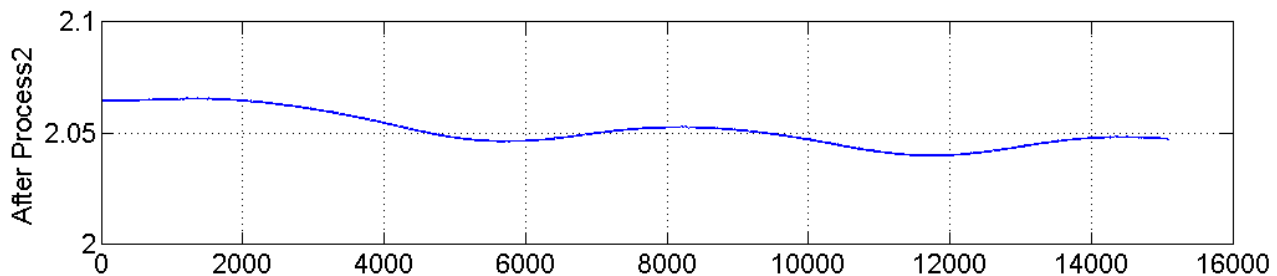
(1) オンボードソフトウェアのバグ

約2時間分の時系列データ

生データ



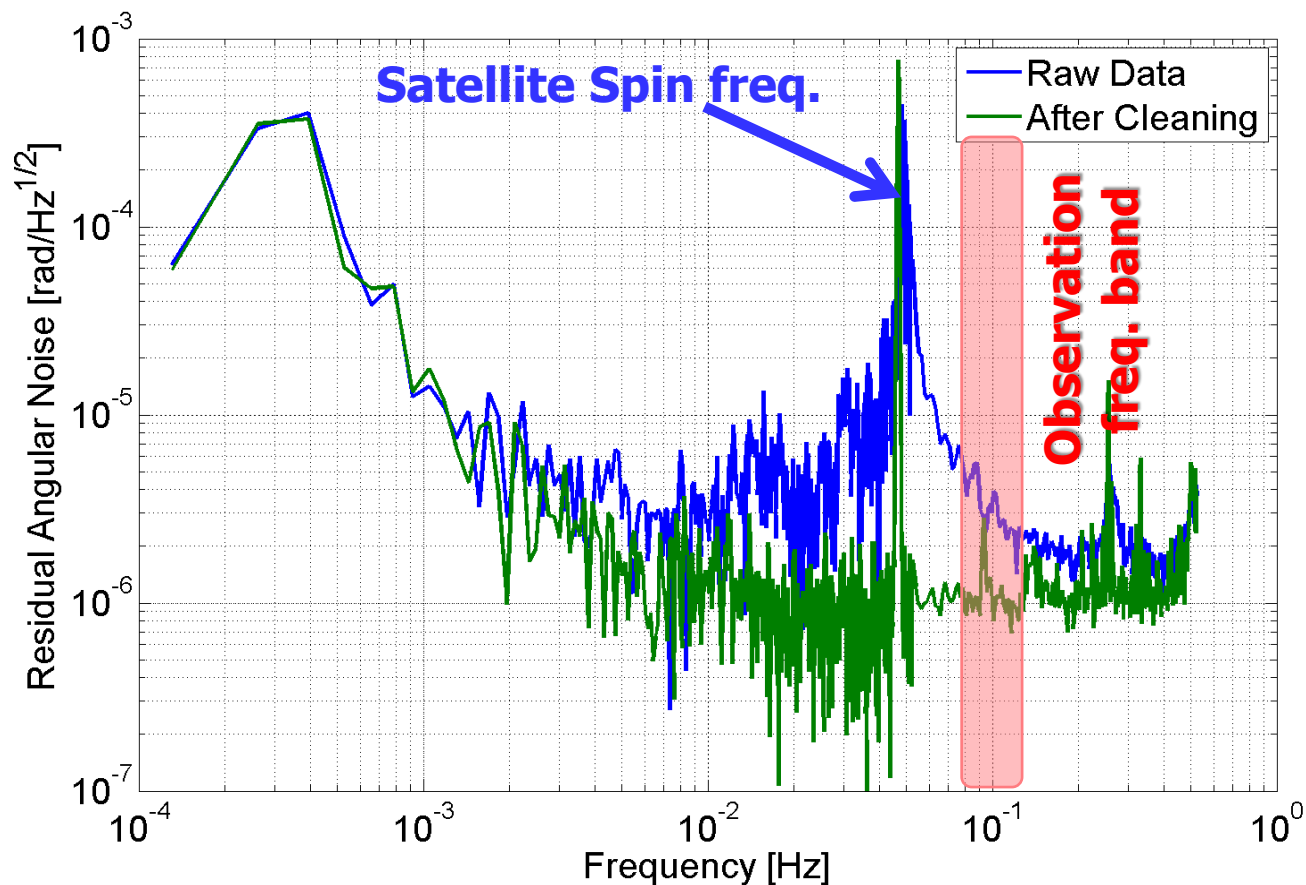
修復後



時間 [arb. unit]

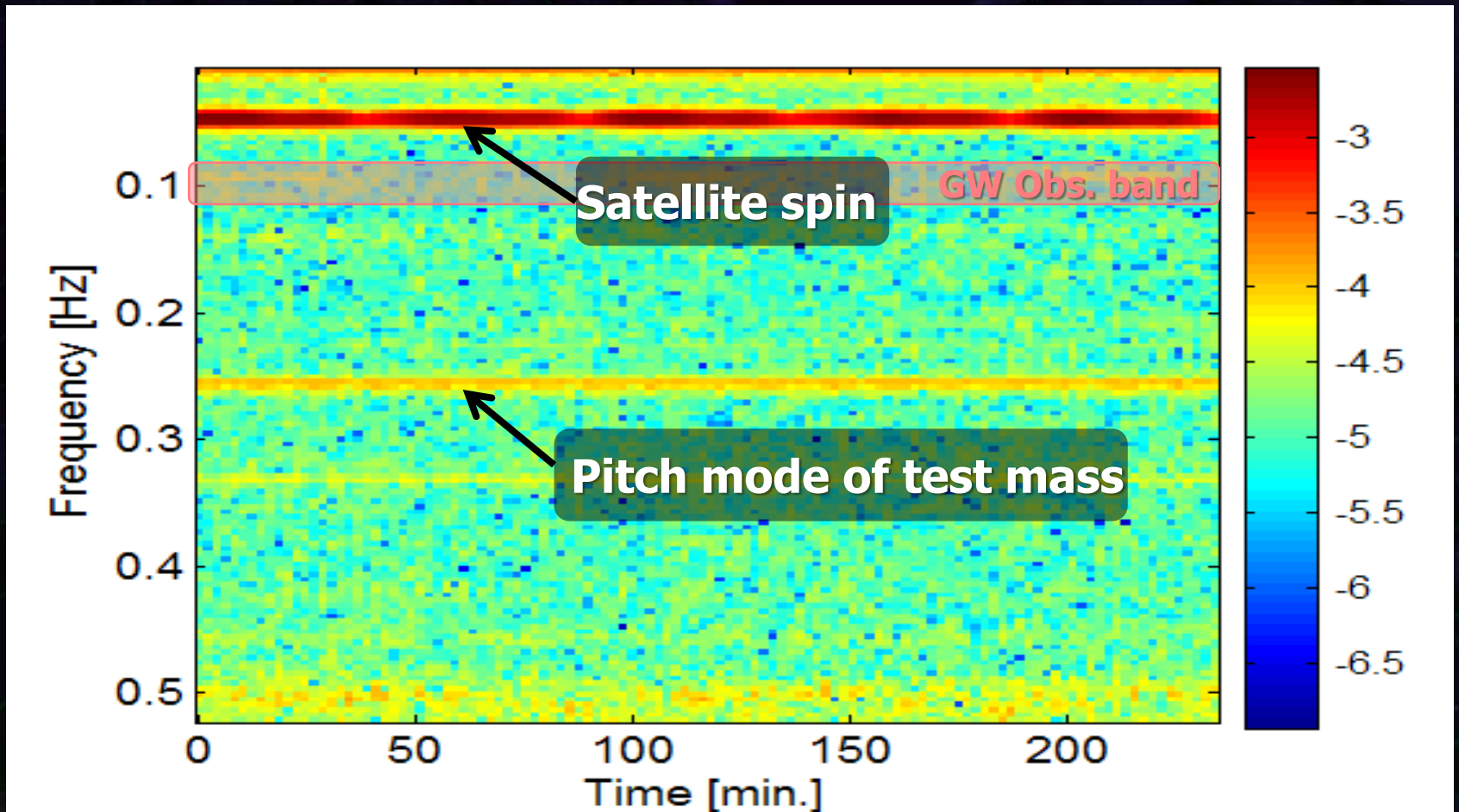
(2) 衛星通信における転送エラー

データ修復により、観測周波数帯での感度が向上.



SWIM観測運用

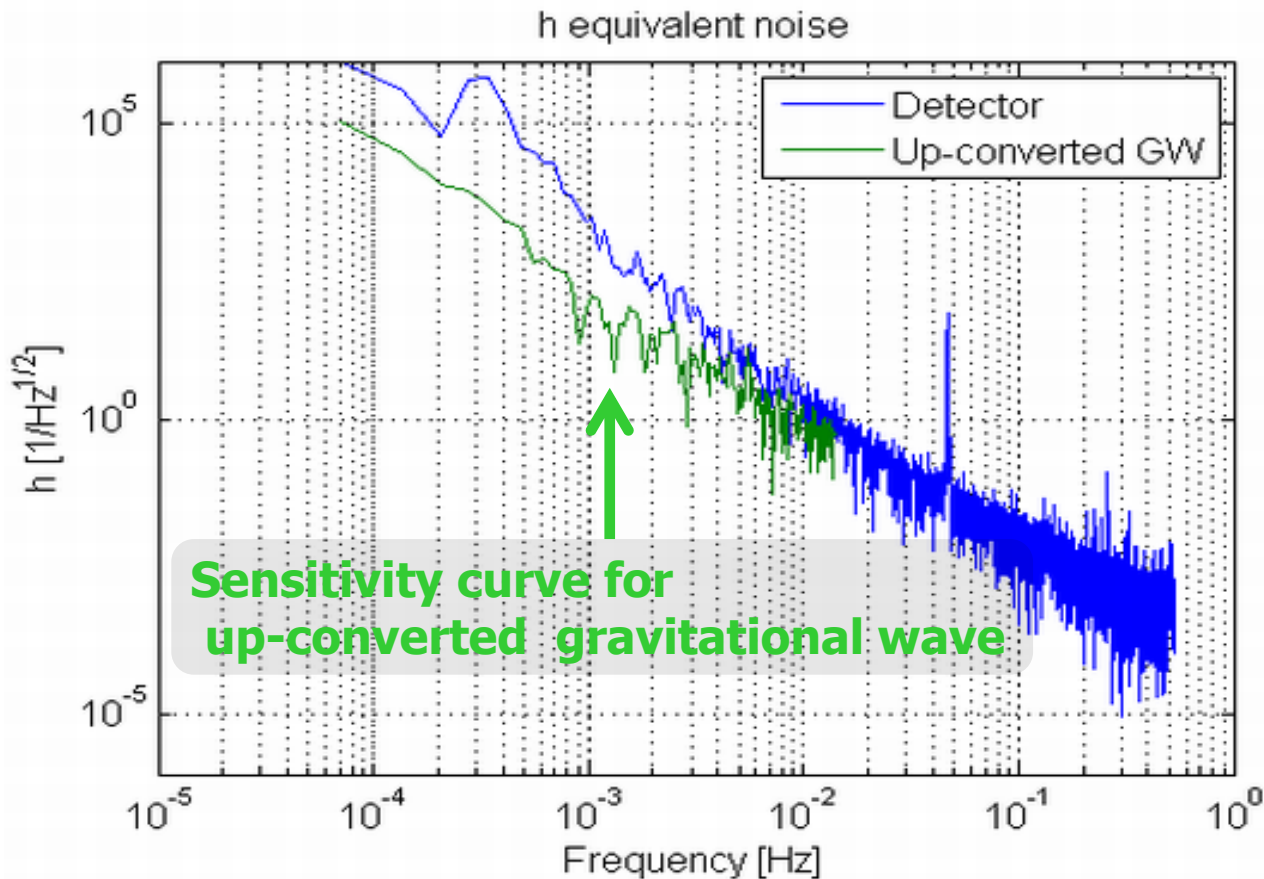
SWIM observation (2nd run on July 15, 2010 ~240 min.)



低周波重力波に対する感度

衛星スピンを利用した低周波観測

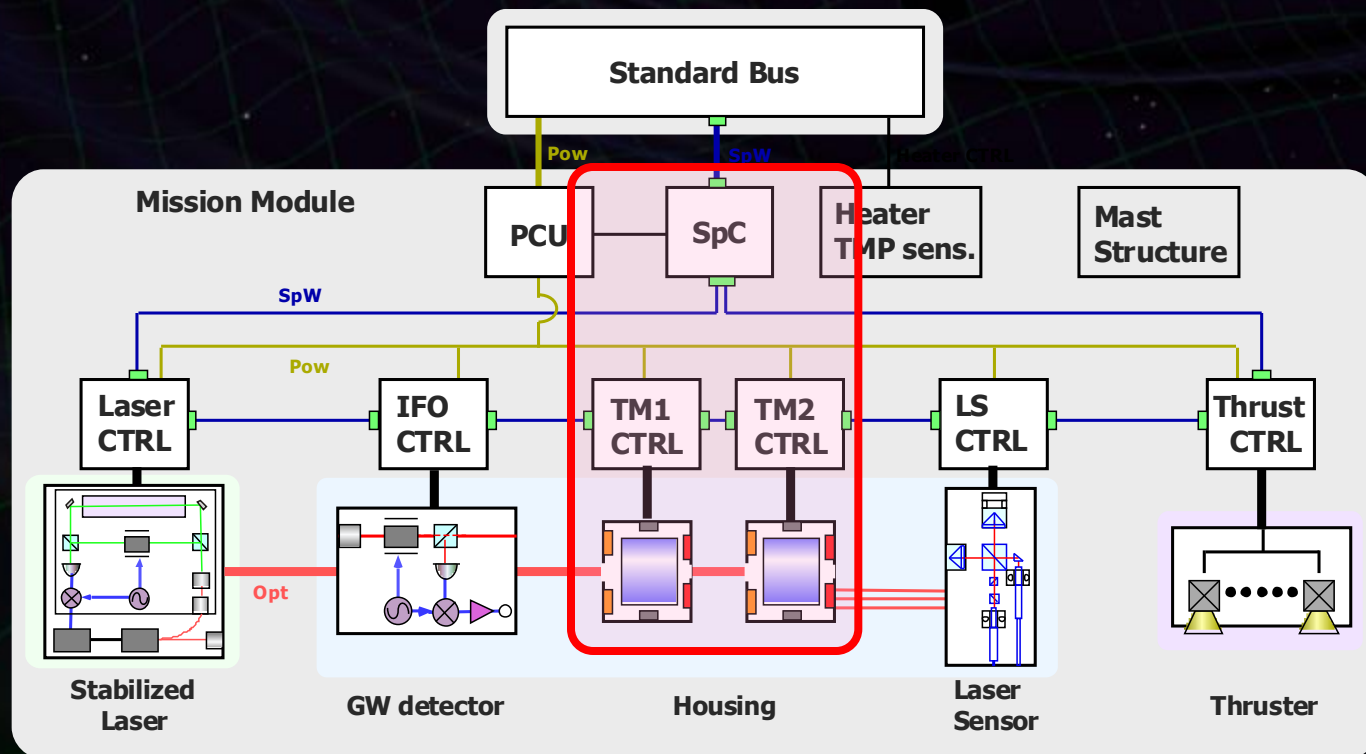
→ 独自の新しい観測手法(回転TOBA)の実証.



DPF衛星のプロトタイプとしての役割

SpC2 制御・信号処理 (通信・信号処理, 電源制御)

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



まとめ

DECIGO : 独自の豊富な科学的成果

- 宇宙の始まりの直接観測
- ダークエネルギー
- 銀河形成

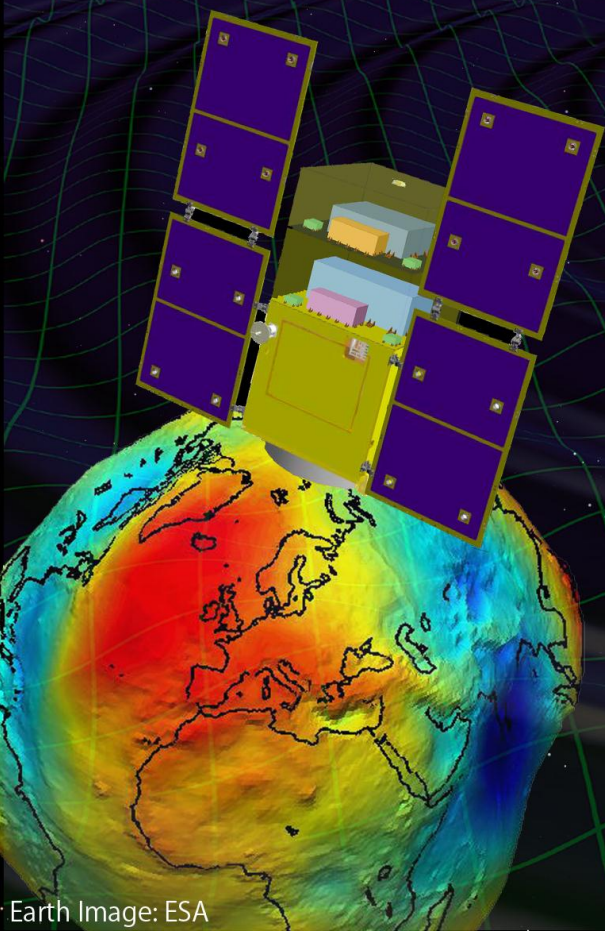
⇒ 将来必ず実現されるはず。

DECIGO Pathfinder

- DECIGOのための最初の前哨衛星。
- 重力波による銀河系内の観測と、地球重力場観測。
- 搭載機器開発・衛星システム検討進行中。
- JAXA・小型科学衛星シリーズの候補。

SWIM

- 重力波モジュールの宇宙実証
→ 最初の「宇宙重力波検出器」



Earth Image: ESA

終わり