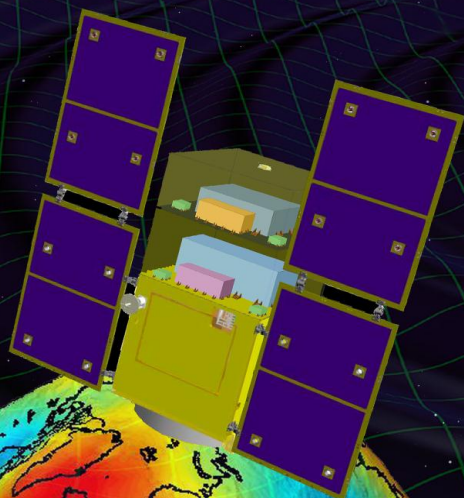


# スペース重力波アンテナDECIGO計画 (36)

## 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, 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,  
井岡邦仁, 池上健, 石川毅彦, 石崎秀晴, 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, 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, 黒柳幸子, 小泉宏之, 洪鋒雷, 郡和範, 穀山涉, 苔山圭以子, 古在由秀, 小鳶康史,  
固武慶, 小林史歩, 権藤里奈, 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, 正田亜八香, 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, 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, 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, 疋田涉, 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, 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, 横山順一, 吉田至順, 吉野泰造, 柳哲文, 若林野花,  
柴田和憲, 牛場崇文

(2012年1月時点)

- **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)**

# 目次

DECIGOの概要

DPFの概要と現状

まとめ

## DECIGO (DECI-hertz interferometer Gravitational wave Observatory)

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

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

## KAGRA (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

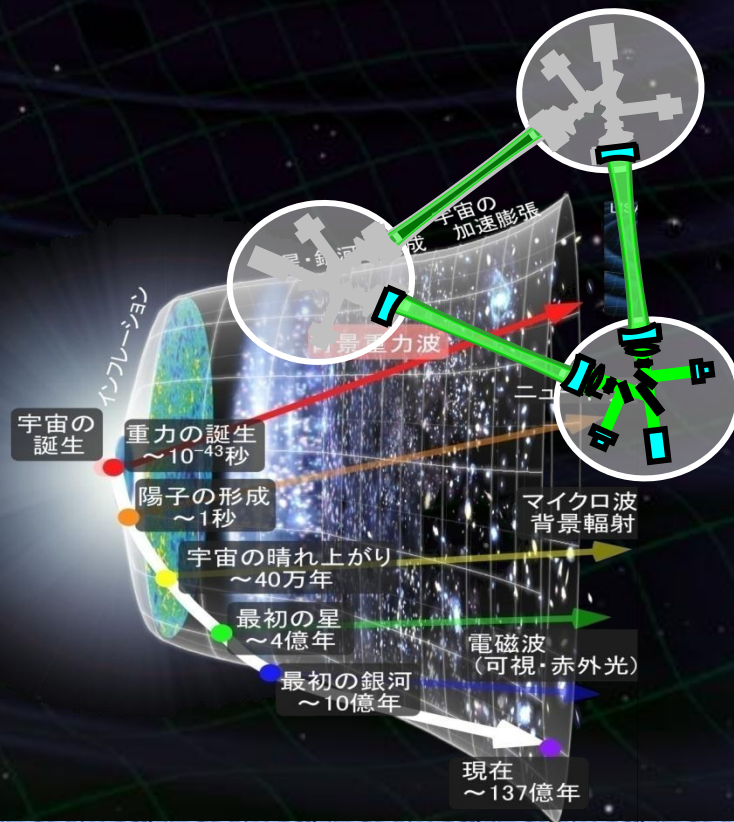


## DECIGO (~2027)

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

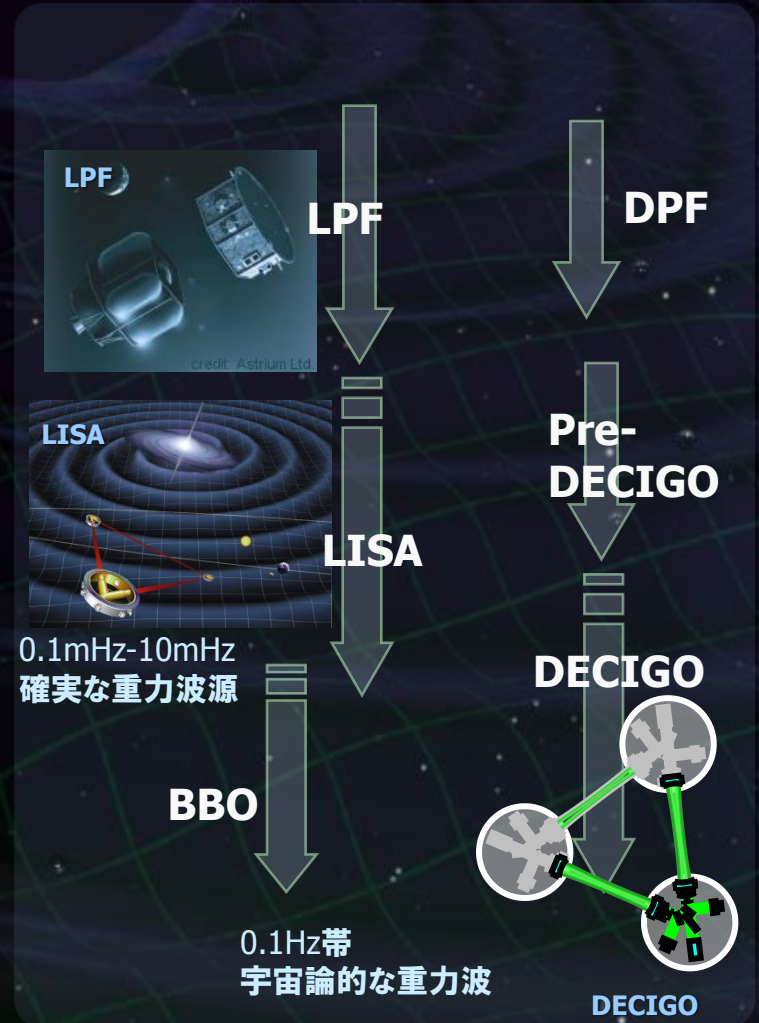
## 地上望遠鏡

より遠くを観測 (10Hz-1kHz)



## 宇宙望遠鏡

低周波数帯の観測

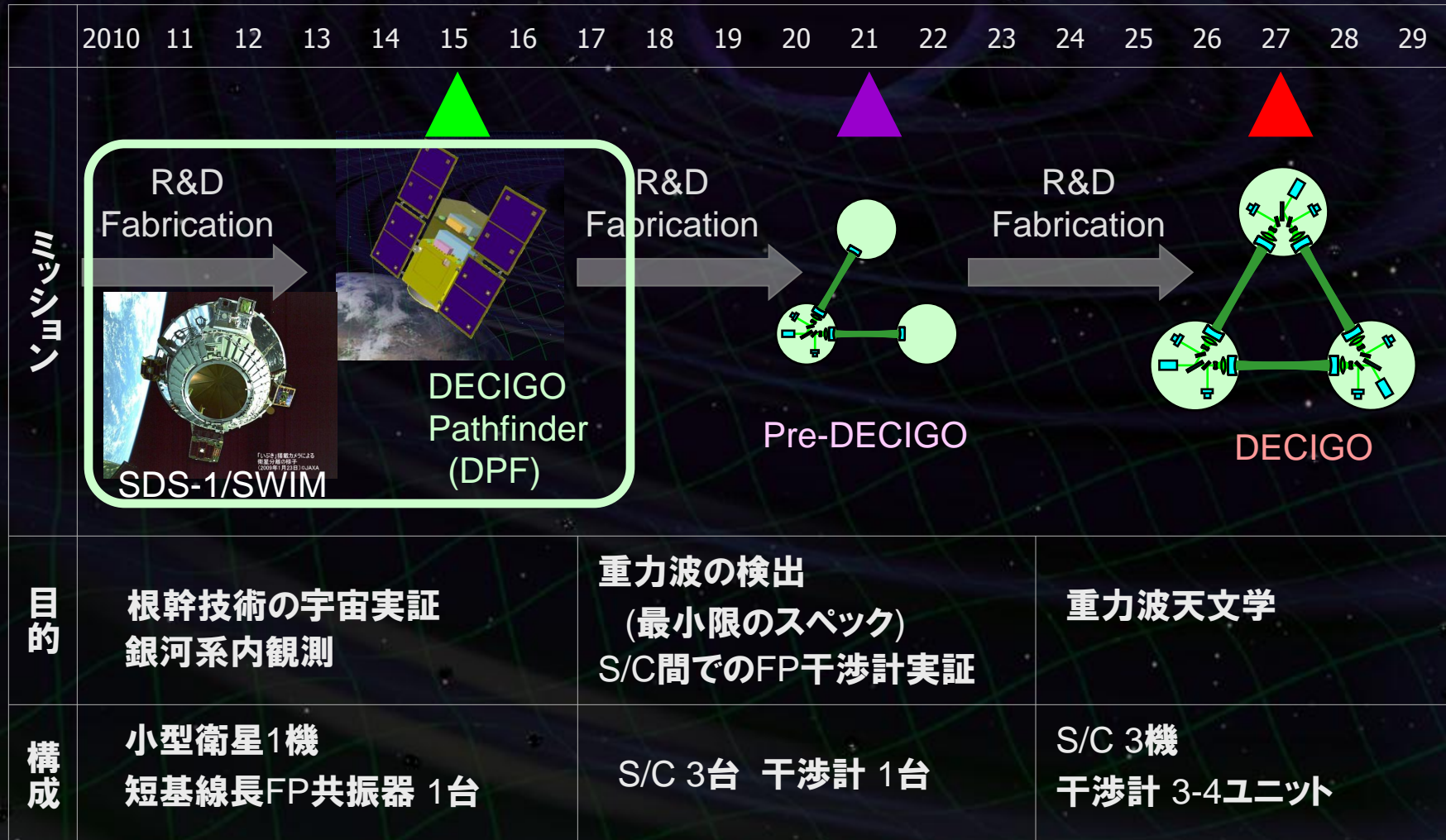




# DECIGOのロードマップ



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

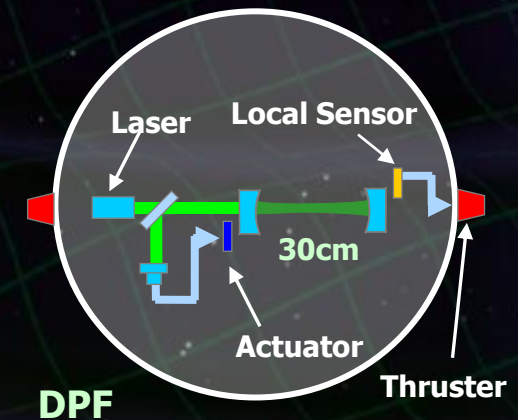
地球周回軌道 (高度 500km)



## 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



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

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

$10^{-15}$  N/Hz<sup>1/2</sup>  
の外力雑音

$10^{-17}$  N/Hz<sup>1/2</sup>  
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

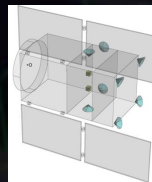


$0.5$  Hz/Hz<sup>1/2</sup>  
の周波数安定度

$0.5$  Hz/Hz<sup>1/2</sup>  
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

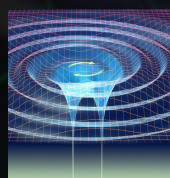


衛星変動安定度  
 $10^{-9}$  m/Hz<sup>1/2</sup>

スラスト雑音  
 $10^{-7}$  N/Hz<sup>1/2</sup>

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

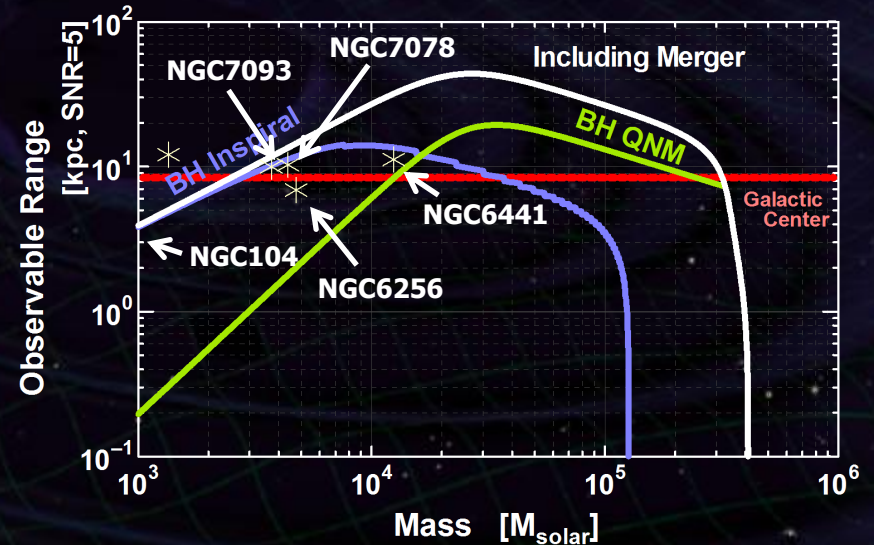


0.1 Hz帯の連続  
観測とデータ解析

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

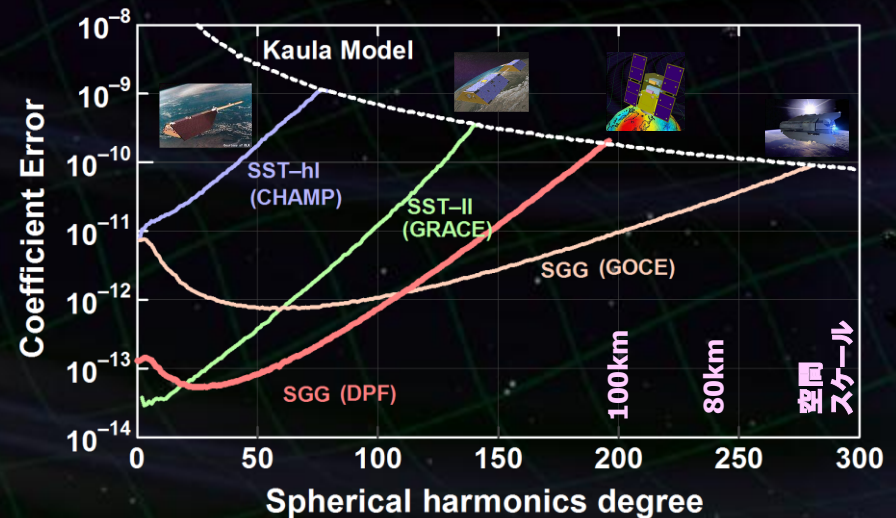
重力波により宇宙を見る  
 銀河系内のBH連星合体  
 → 巨大BH形成への知見.

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

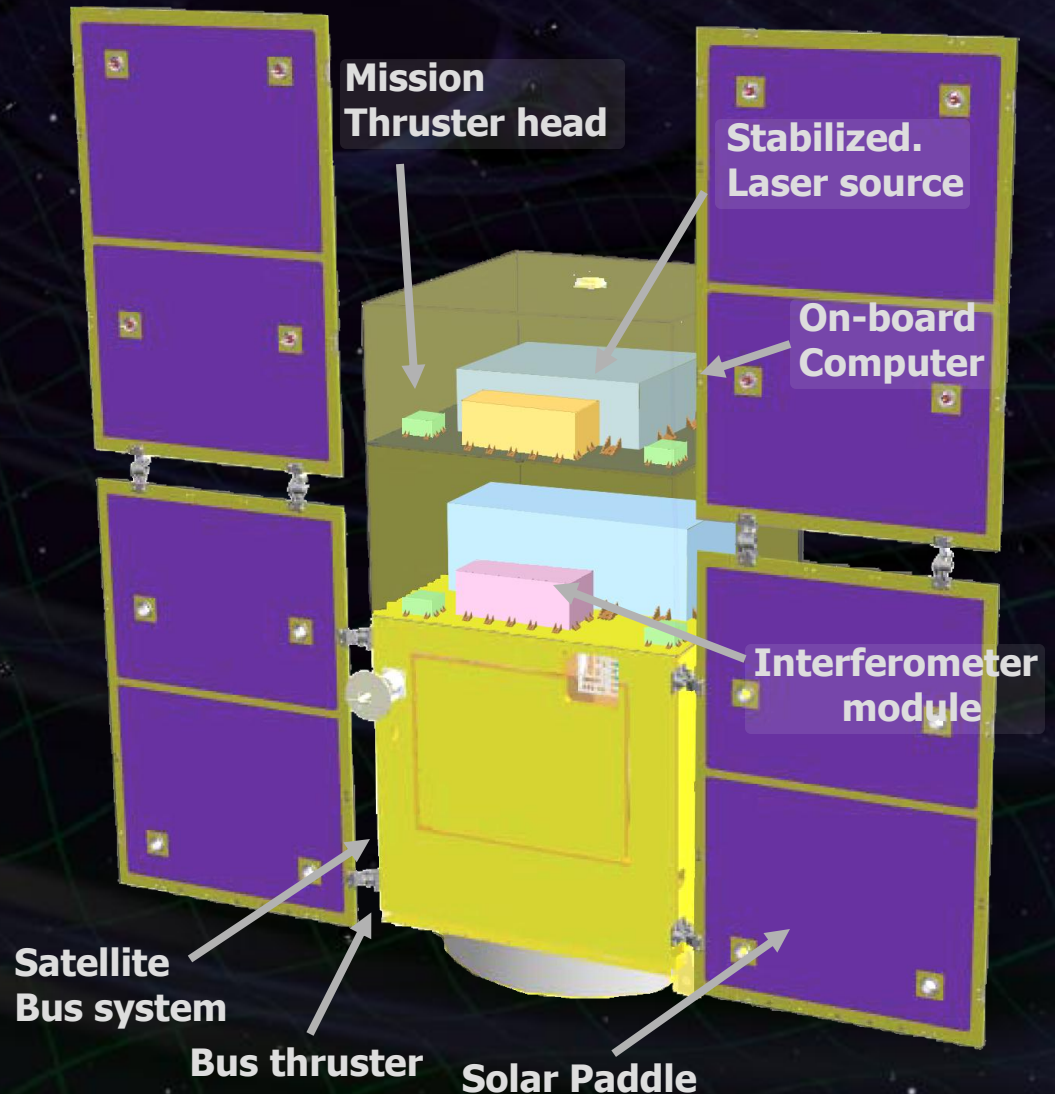
Size : 950mm cube  
Weight : 150kg  
Power : 130W  
Data Rate: 800kbps  
Mission thruster x12

Power Supply  
SpW Comm.

## Satellite Bus

(‘Standard bus’ system)

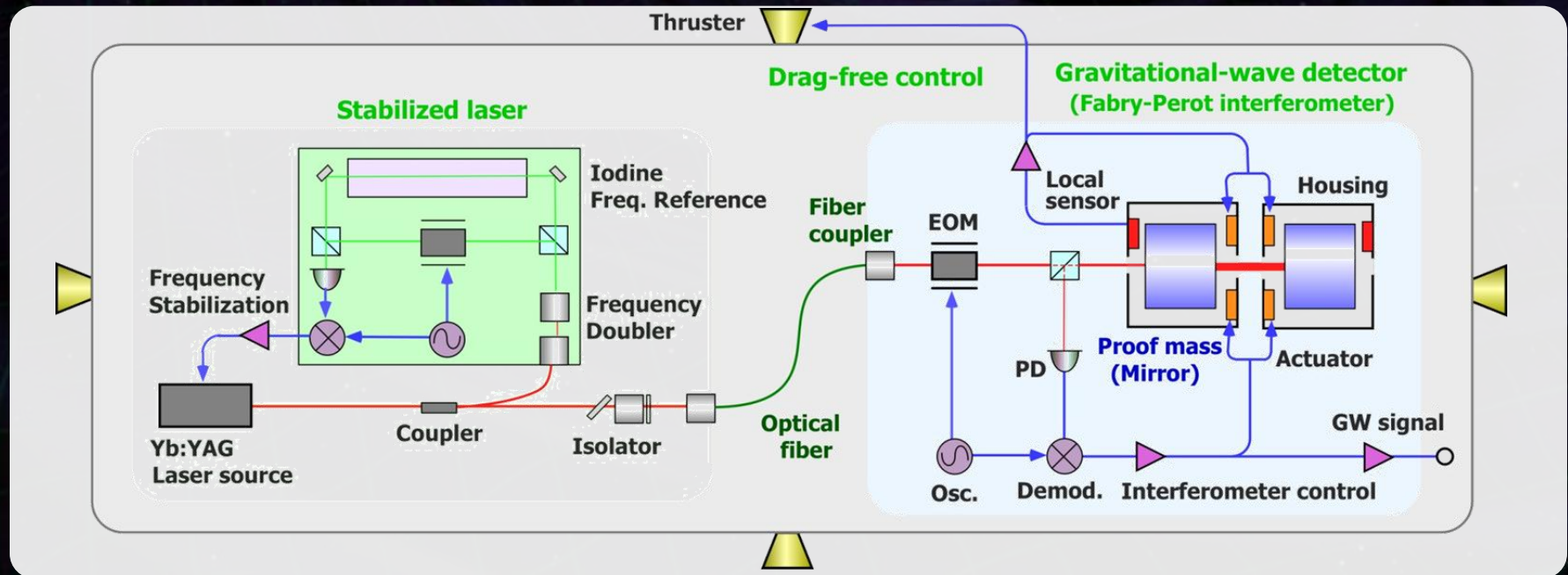
Size :  
950x950x1100mm  
Weight : 200kg  
SAP : 960W  
Battery: 50AH  
Downlink : 2Mbps  
DR: 1GByte  
3N Thrusters x 4



# 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

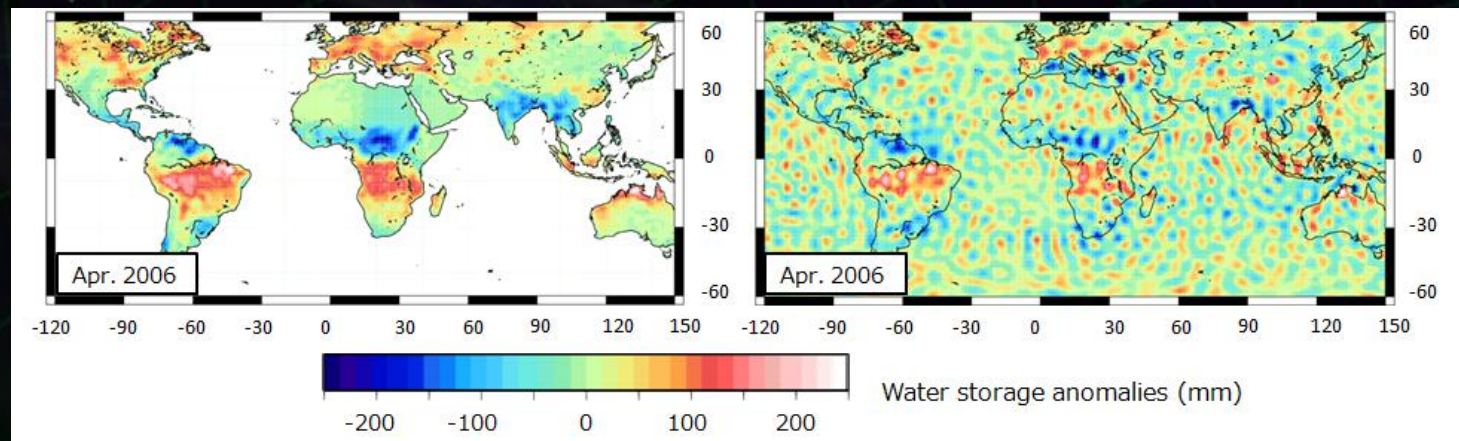
# 地球重力場の観測

- 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.

- 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

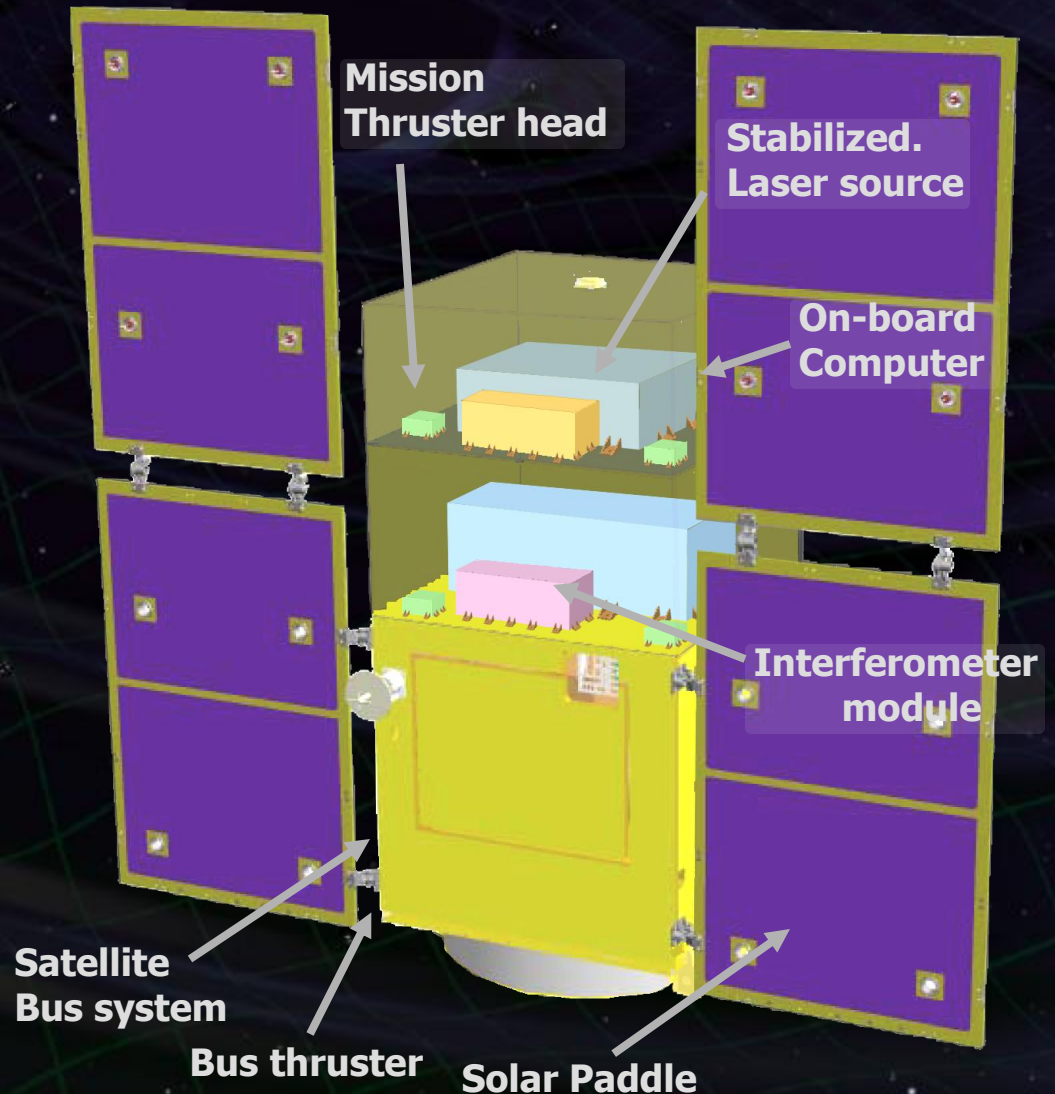
Size : 950mm cube  
Weight : 150kg  
Power : 130W  
Data Rate: 800kbps  
Mission thruster x12

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

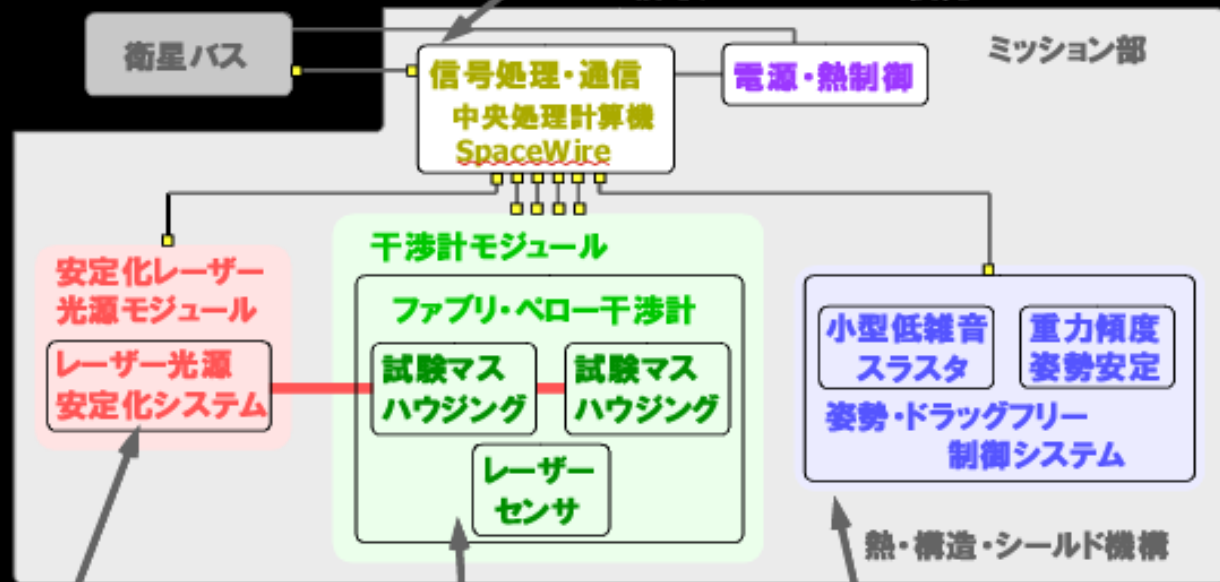




# 推進体制

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

阿久津 (国立天文台),  
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  
101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), 阿久津,  
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

# 干渉計モジュール

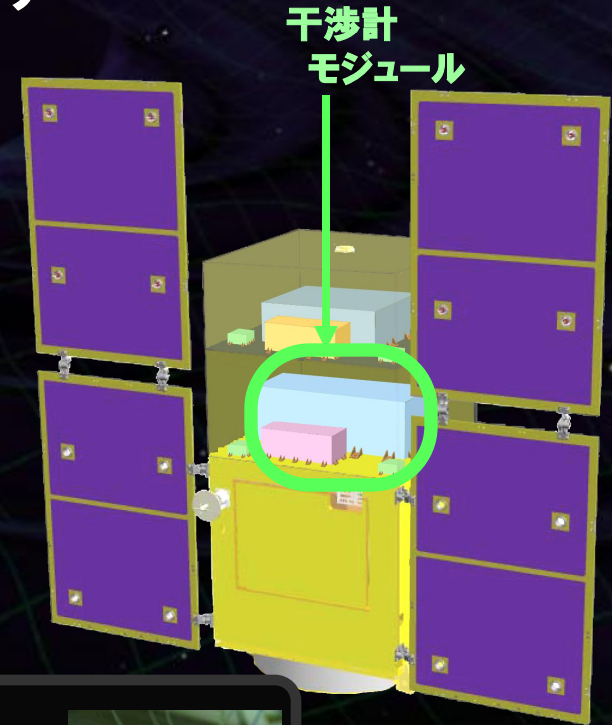
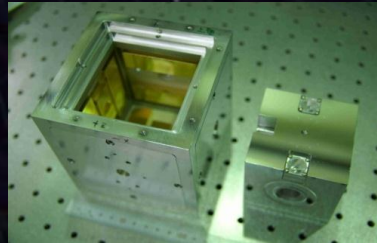
レーザー干渉計：試験マス + 干渉計 + センサ

## 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
- $\mu$ -Grav. Exp.

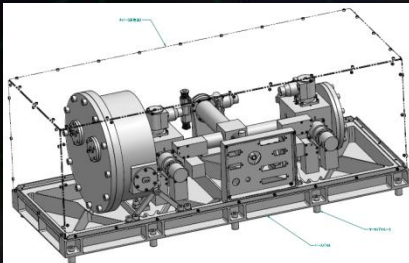
法政大, 国立天文台,  
お茶大, スタンフォード大



## 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.



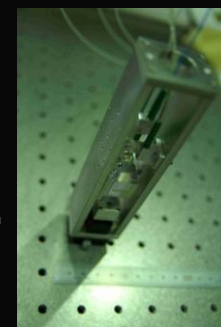
国立天文台, 東大

## レーザーセンサ

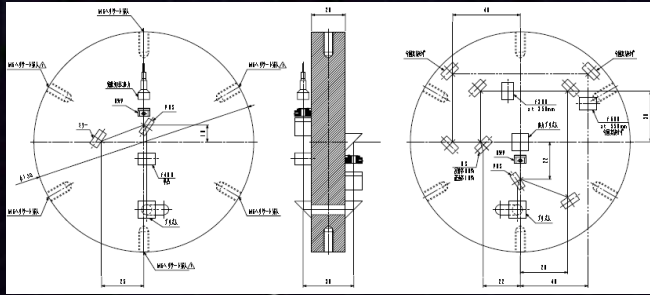
→ 加速度計センサ

- BBM test
- Sensitivity meas.

東大地震研, 東大理



### 入射光学系設計

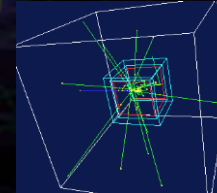


### 落下実験用 予備試験セットアップ

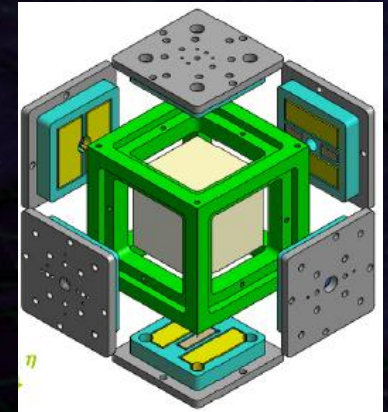


### 試験マス 材質試験品

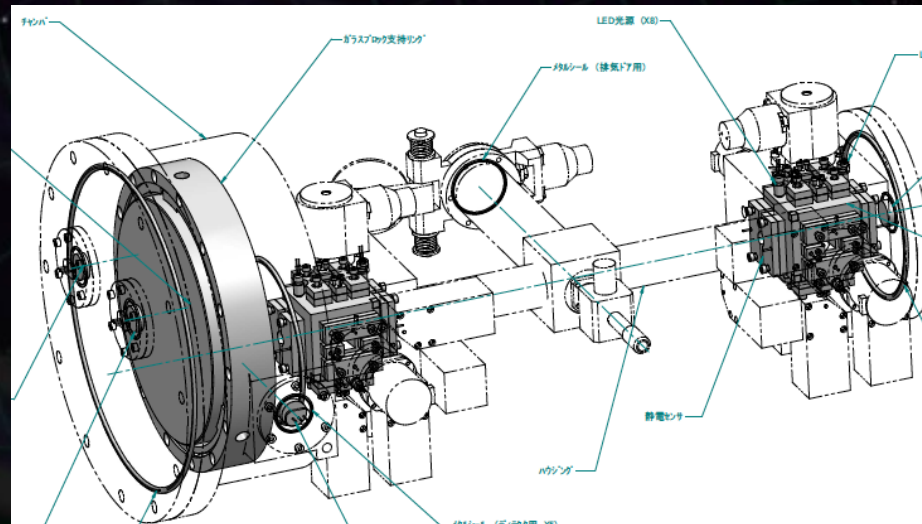
### 宇宙線の 影響評価



### 試験マスモジュール設計

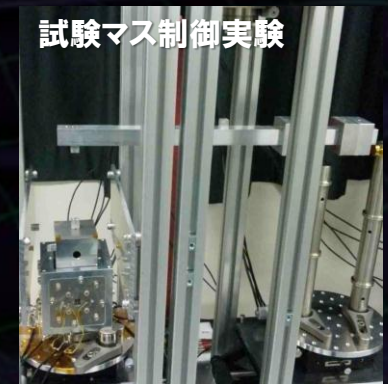


### 制御ボード試作品

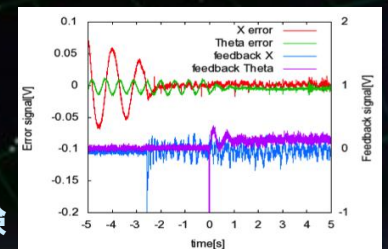


### 干渉計モジュール設計

### 試験マス制御実験



### 干渉計モジュール制御実験



### 2自由度制御実験

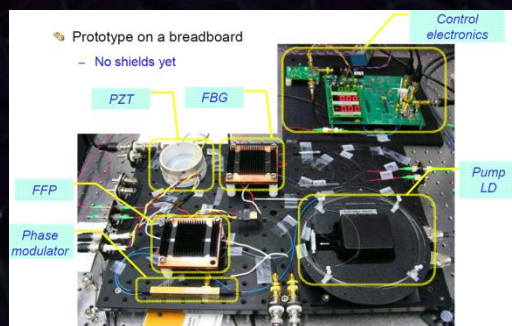
# 安定化レーザー光源

安定化レーザー光源：光源 + 安定化システム

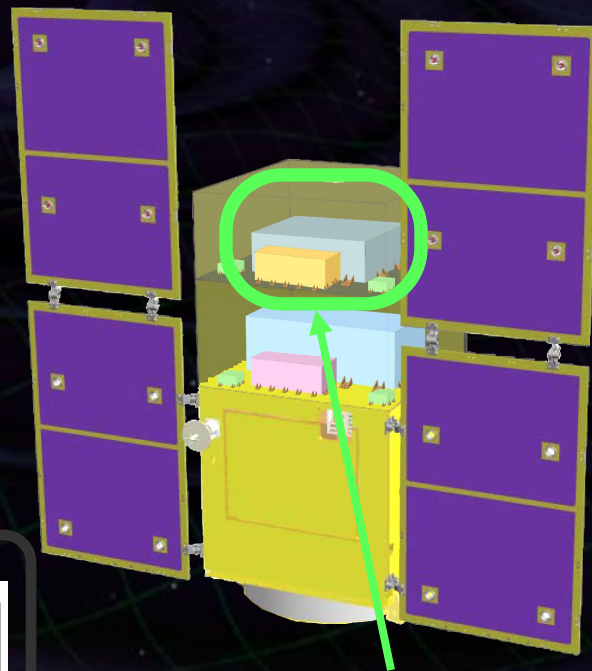
Yb:YAG (NPRO or Fiber laser) 光源

→ 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

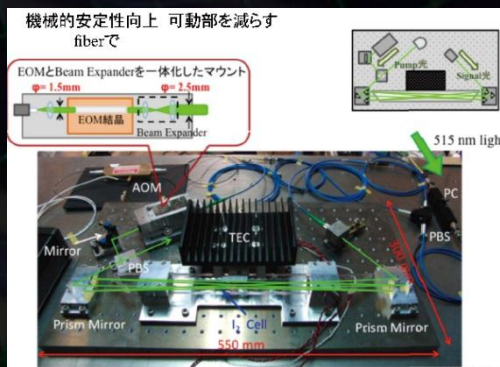
→ 周波数基準

擾乱耐性

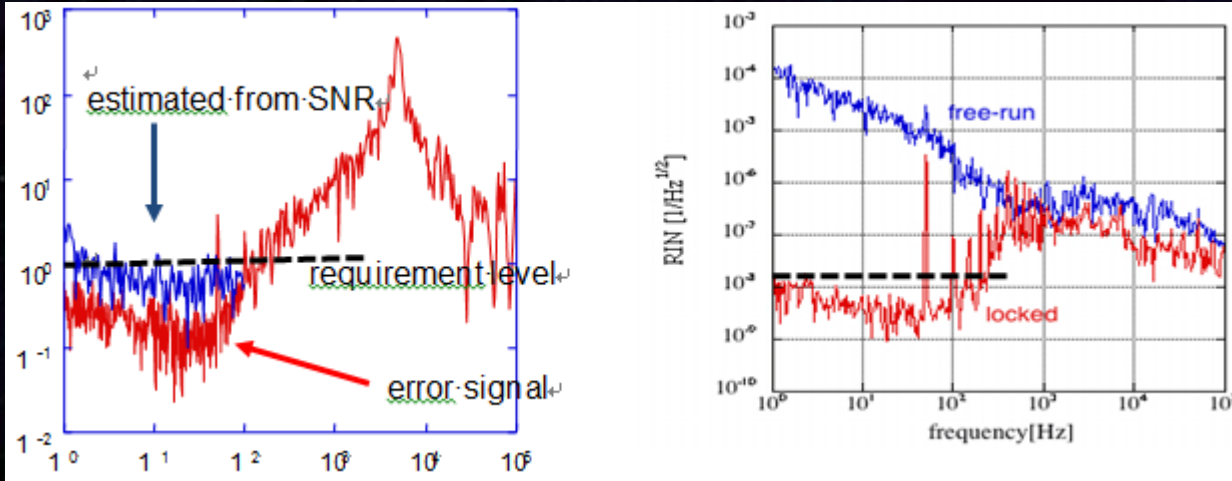
•BBM development

•Stability meas.

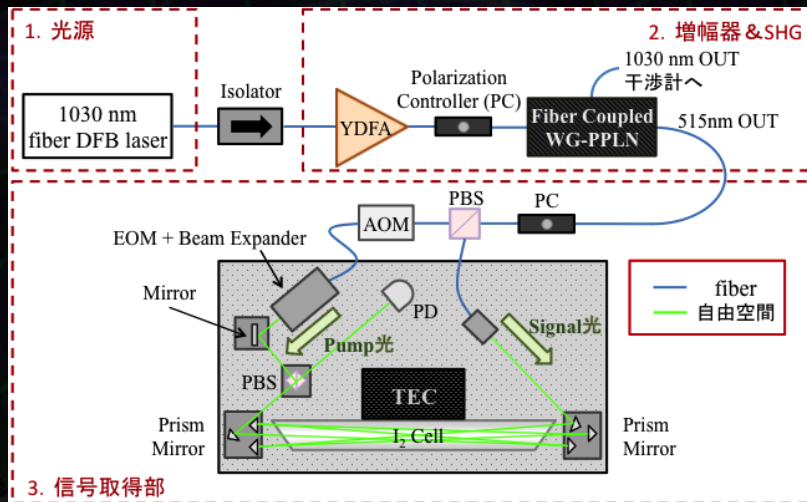
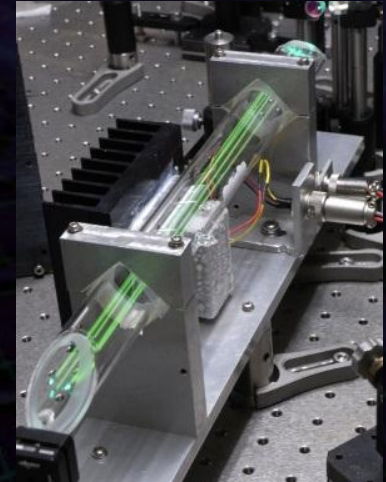
電通大, NICT



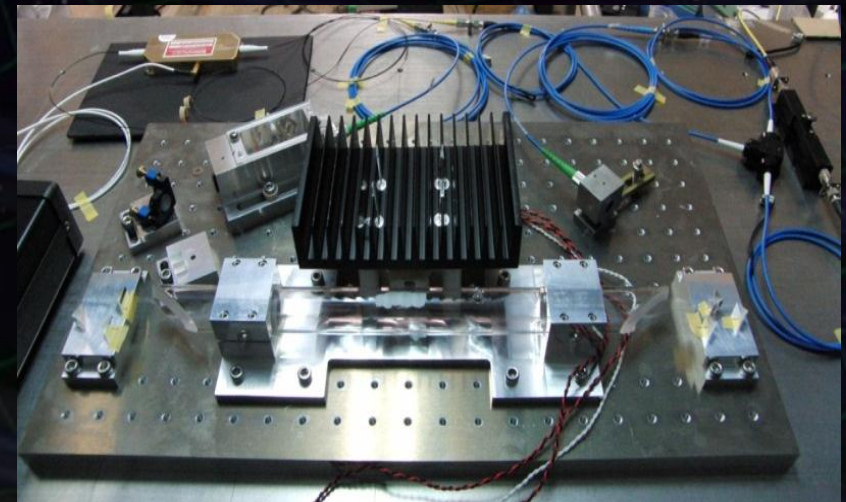
## 周波数・強度安定化実験結果



## ヨウ素セル



周波数安定化モジュール構成

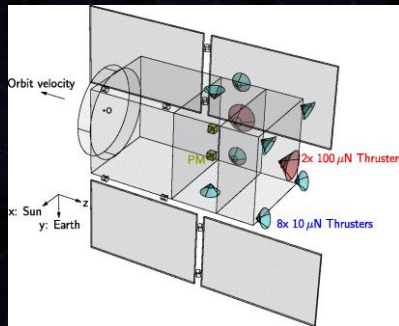


ファイバーベースのヨウ素 周波数安定化モジュール

# 姿勢・ドラッグフリー制御

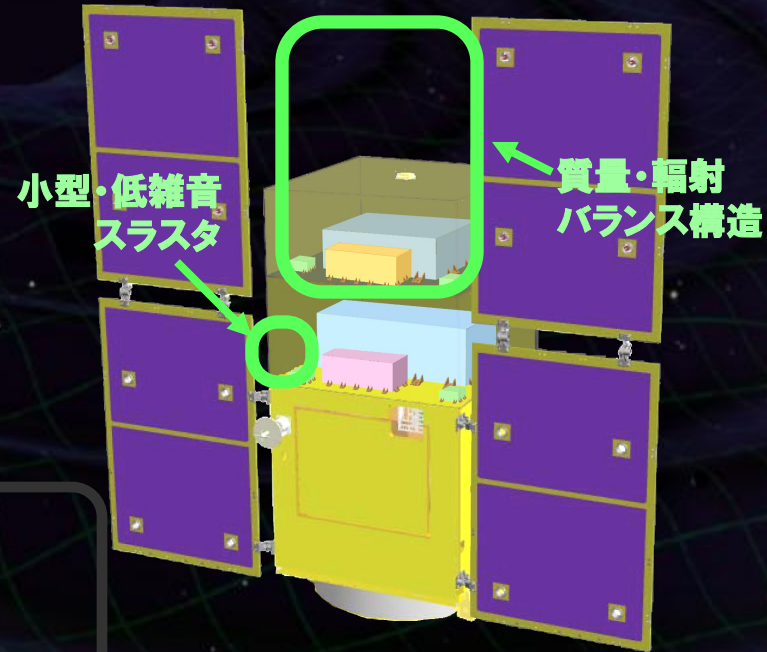
## 姿勢・ドラッグフリー制御：衛星構造検討，制御則，ミッションスラスタ

### 衛星構成，熱・構造検討



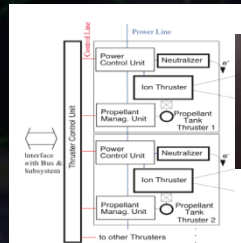
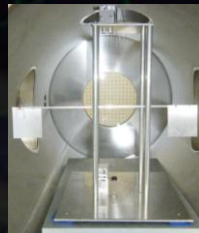
- Passive attitude stability
- Drag-free control

東大, JAXA



### 小型低雑音スラスタ

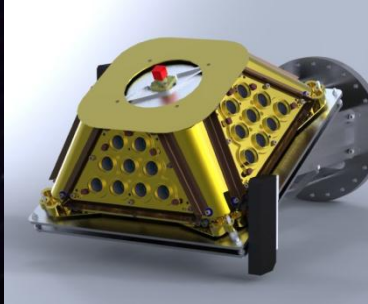
→ Actuators for satellite control



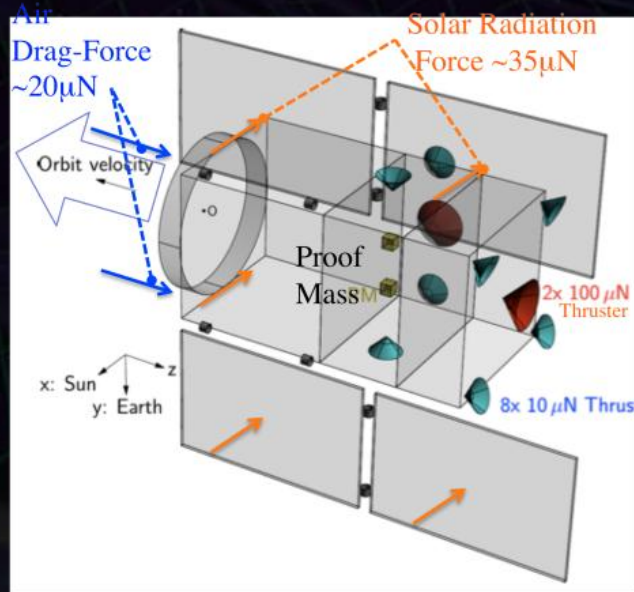
•BBM and system design

JAXA, 東海大, 防衛大

## LPF用100 $\mu$ Nスラスタモジュール

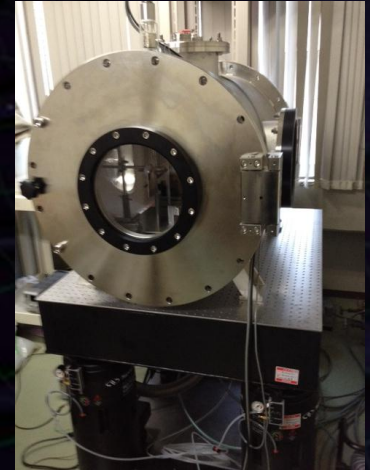


## 10 $\mu$ N FEEDスラスタ



## ドラッグフリー・構造設計

## スラスタ雑音評価用セットアップ



## SLIT FEED 試作品



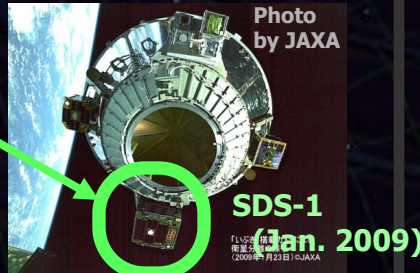
# 信号処理・制御システム

## 信号処理・制御システム : SpWベースの信号処理システム

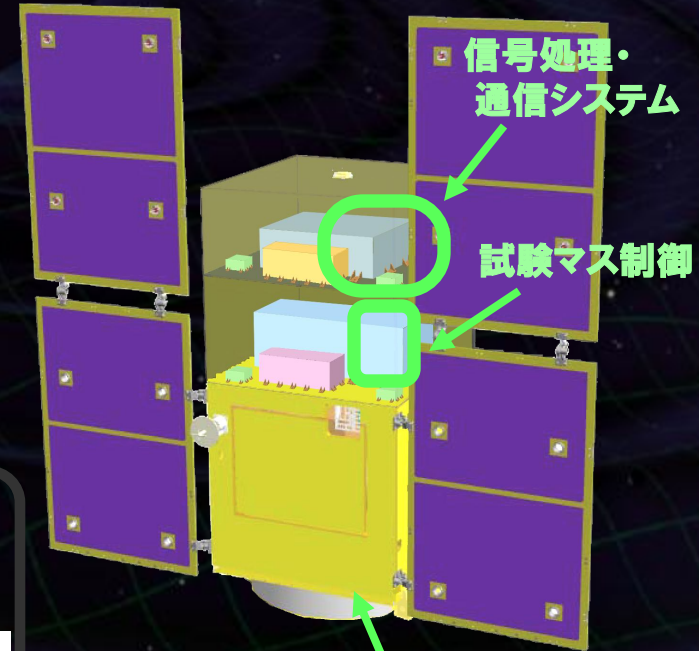
SpC2 + SpW信号処理システム  
 → SDS-1/SWIMによる宇宙実証



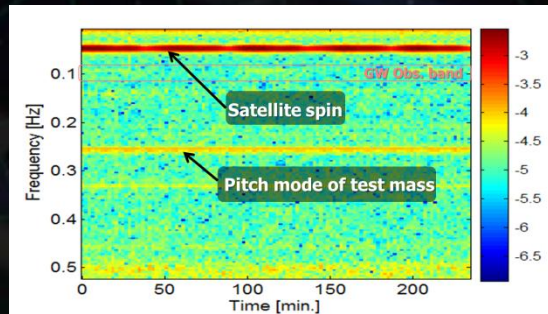
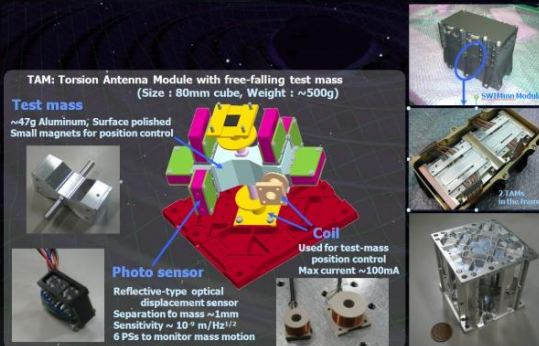
Space demonstration  
 by SDS-1/SWIM



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



## 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

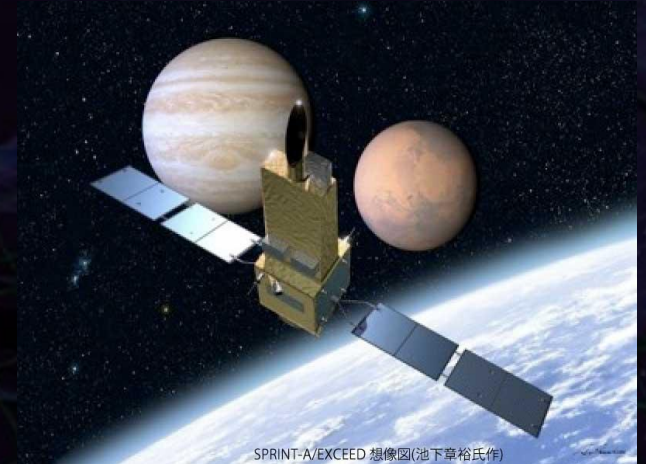
2号機 SPRINT-B/ERG (~2014/15年)

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

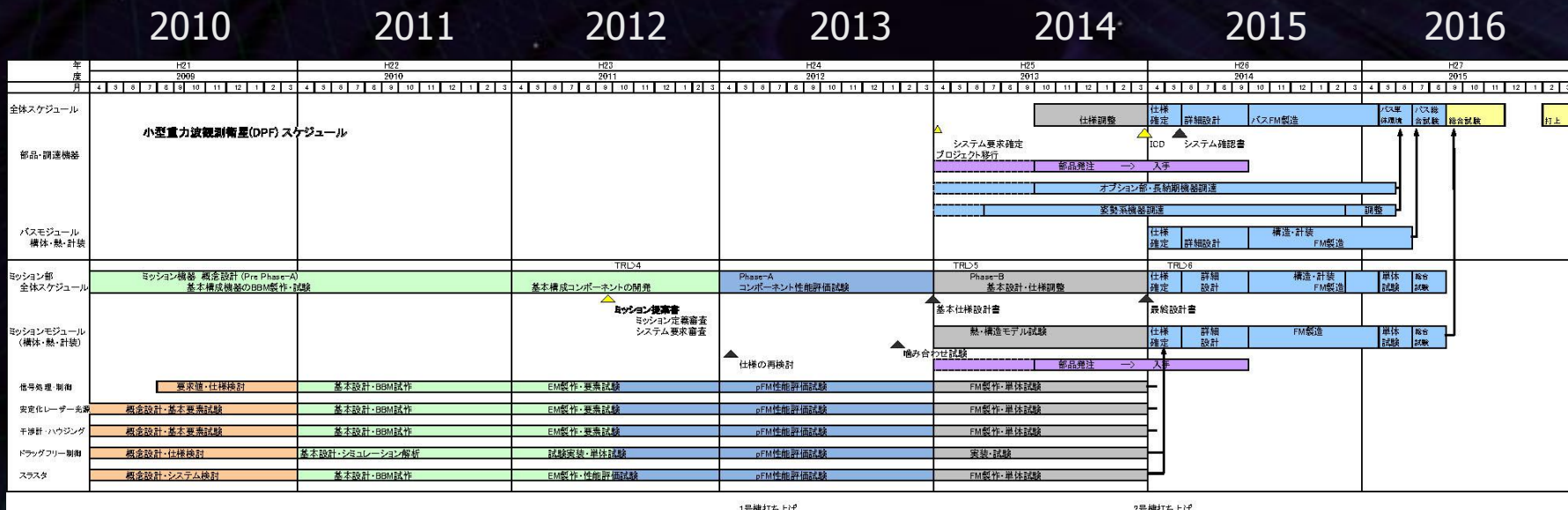


小型科学衛星1号機 SPRINT-A/EXCEED



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

# 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

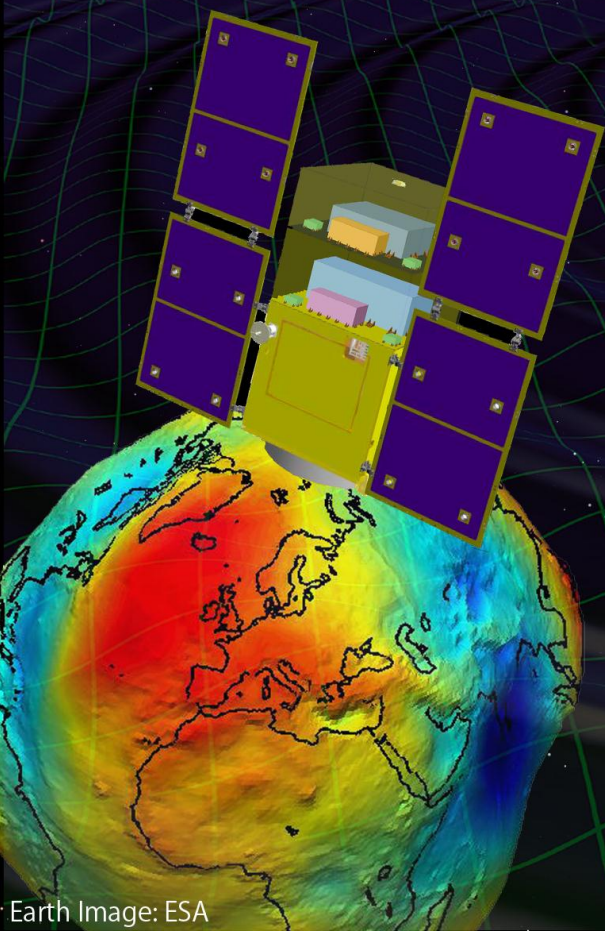
⇒ 将来必ず実現されるはず。

## 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