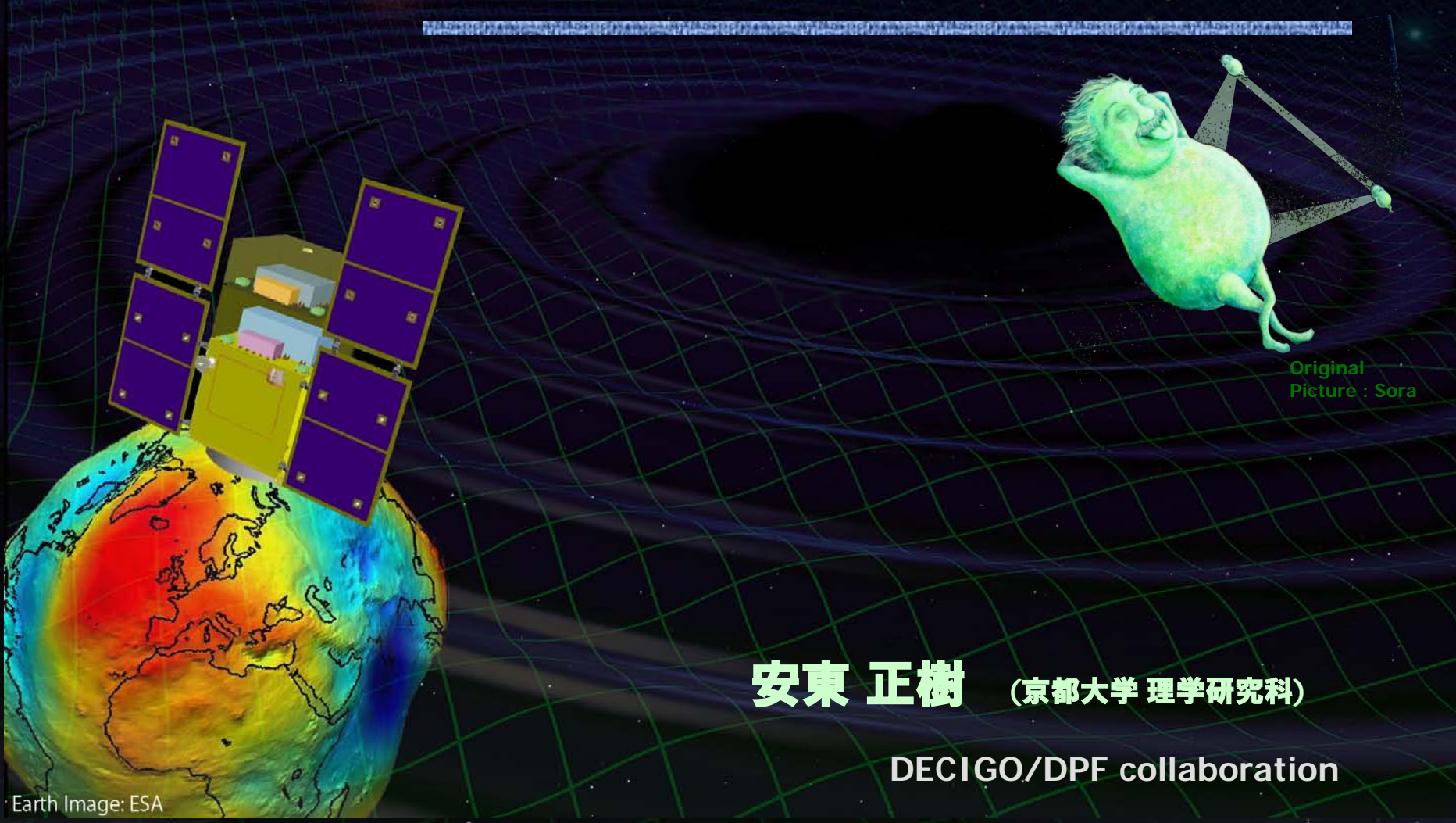


# 小型重力波観測衛星 DECIGOパスファインダー



Original  
Picture : Sora

**安東 正樹** (京都大学 理学研究科)

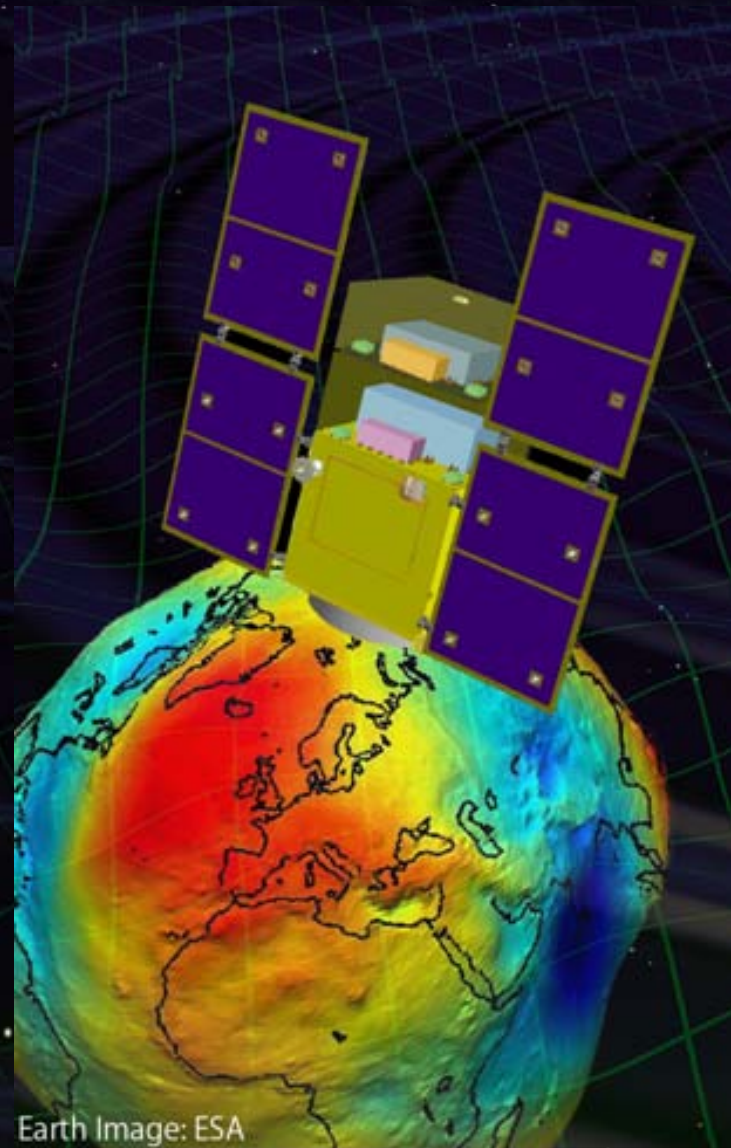
DECIGO/DPF collaboration

Earth Image: ESA

# DPF collaboration



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, 上田暁俊, 植田憲一, 江尻悠美子,  
大河正志, 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, 國森裕生, 黒田和明, 洪鋒雷, 郡和範,  
穀山涉, 苔山圭以子, 古在由秀, 小林史歩, 西條統之,  
齊藤遼, 坂井真一郎, 阪田紫帆里, 佐合紀親, 佐々木節,  
佐藤修一, 佐藤孝, 柴田大, 杉山直, 鈴木理恵子,  
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, 高橋史宣,  
高橋竜太郎, 田越秀行, 田中貴浩, 樽家篤史, 千葉剛,  
辻川信二, 坪野公夫, 鳥居泰男, 内藤勲夫, 中尾憲一,  
中澤知洋, 長野重夫, 中村卓史, 西澤篤志, 西田恵里奈,  
丹羽佳人, 沼田健司, 能見大河, 端山和大, 平林久,  
平松尚志, 福嶋美津広, 船木一幸, 細川瑞彦, 前田恵一,  
松原英雄, 宮川治, 三代木伸二, 武者満, 森脇成典,  
八木絢外, 山川宏, 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



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 350kg)

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

## 目次

背景 – 重力波観測とDECIGO計画 –

DPFの科学的意義

衛星概要と開発状況

まとめ



**背景**  
**- 重力波観測とDECIGO計画 -**

# 重力波による天文学

重力波をもちいて、宇宙の成り立ちと進化を解き明かす。

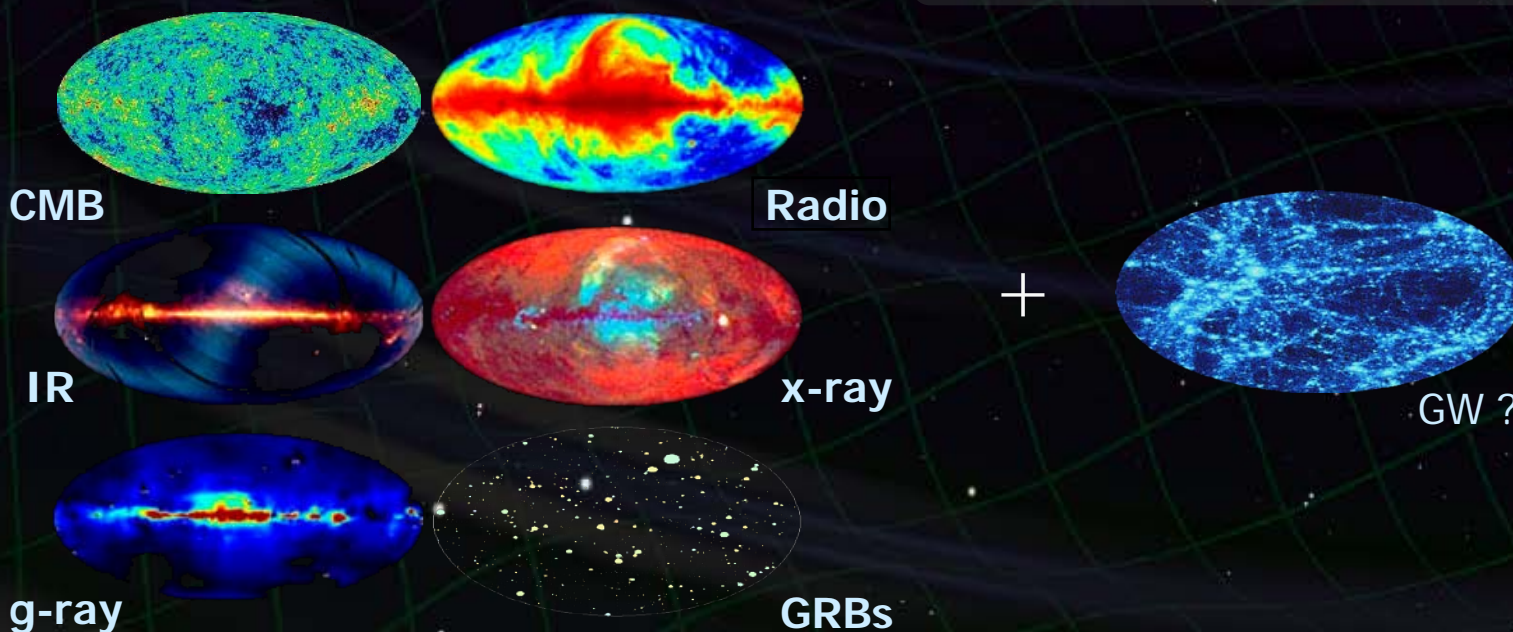
## 重力波の特徴

質量の加速度運動により生成  
物質に対して強い透過力

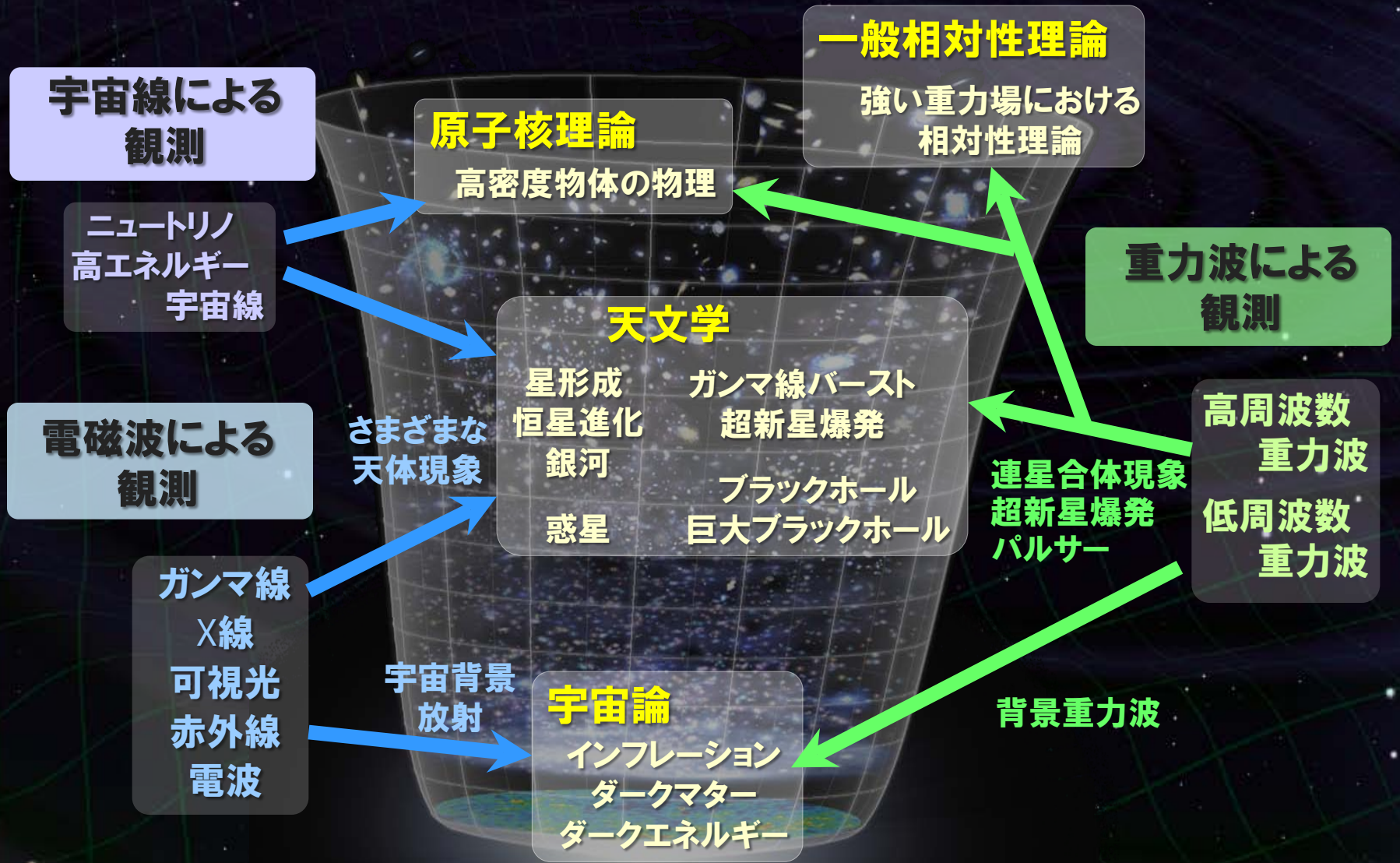


## 宇宙を観測する新しい手段

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



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

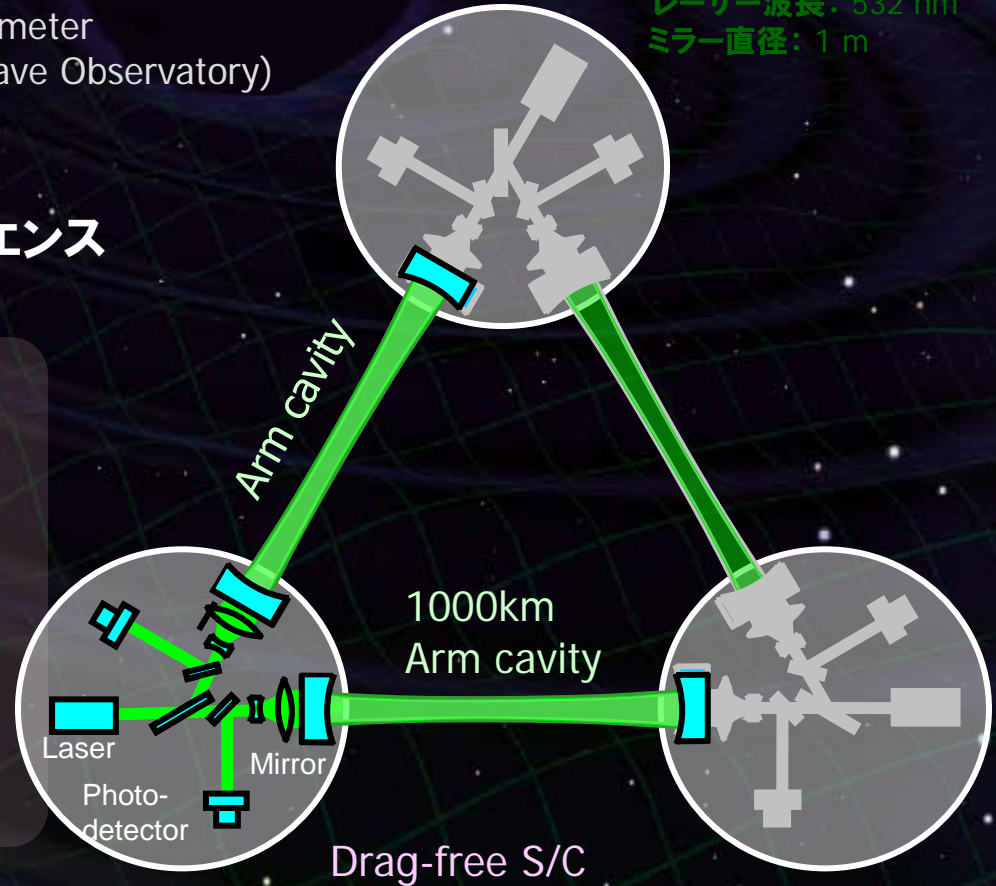
ダークエネルギーの性質

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

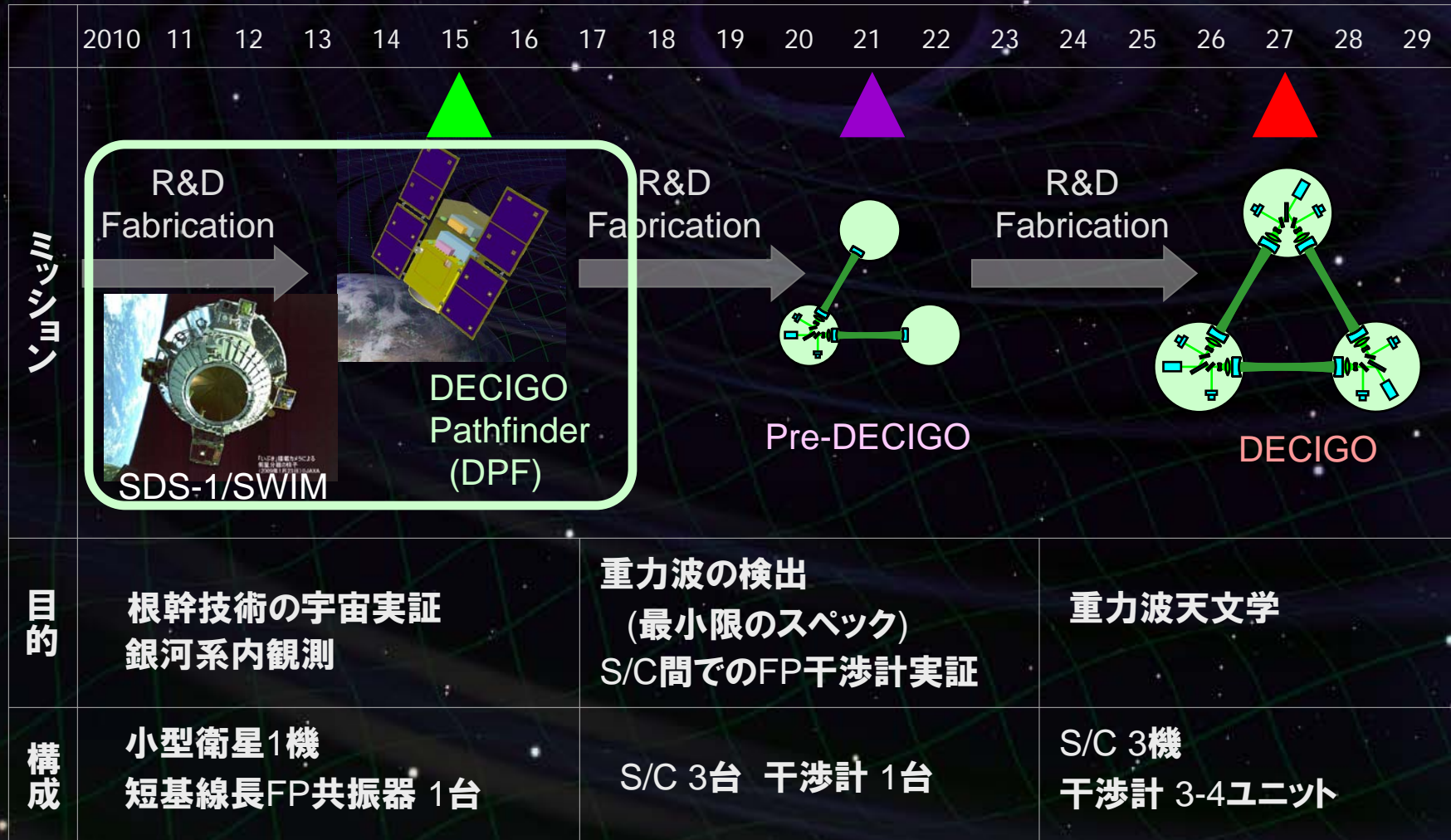


Background:  
original figure by  
NASA/WMAP Science Team

# DECIGOのロードマップ



Figure: S.Kawamura



- 2010年6月 地上の大型低温重力波望遠鏡(LCGT)計画が、「最先端研究基盤事業」に採択され、建設が始まった。
- まずLCGTを実現し、その後にDECIGOを目指す、という当初の方針に変更は無い。

# LCGT and DECIGO



LCGT (~2016)

Terrestrial Detector

→ High frequency events

Target: GW detection

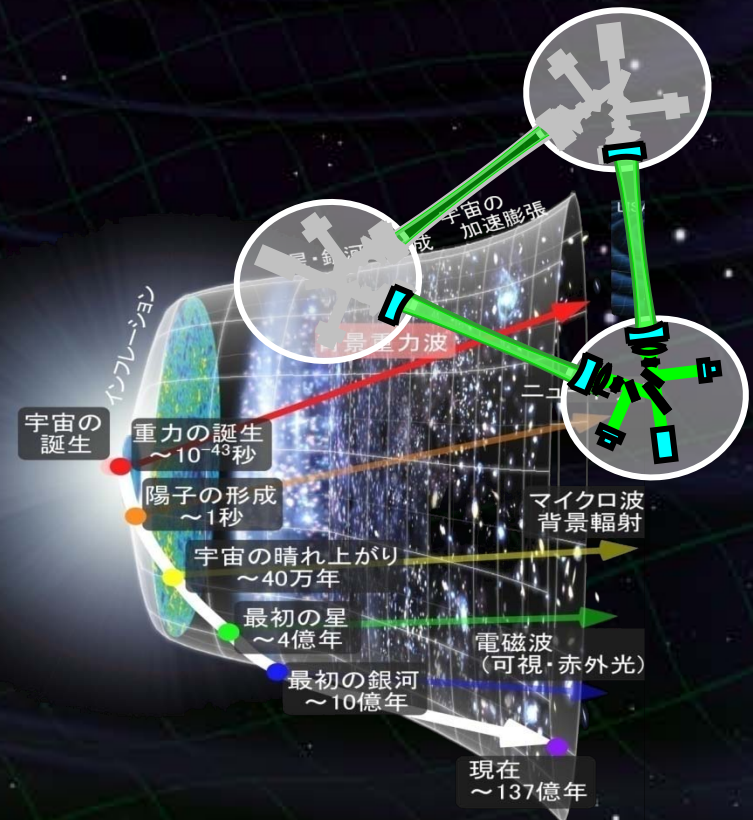


DECIGO (~2027)

Space observatory

→ Low frequency sources

Target: GW astronomy





# DPFの概要と意義

# DECIGOパスファインダー



## 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)

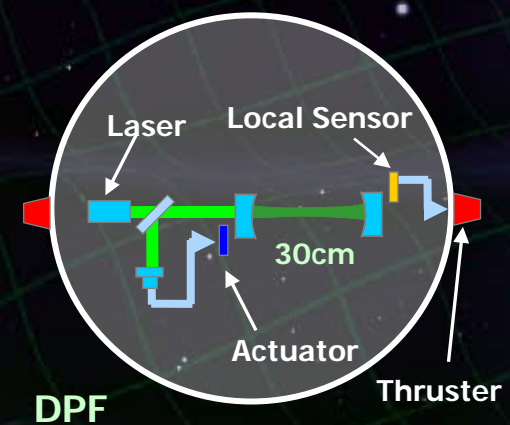
350kg級 小型衛星

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

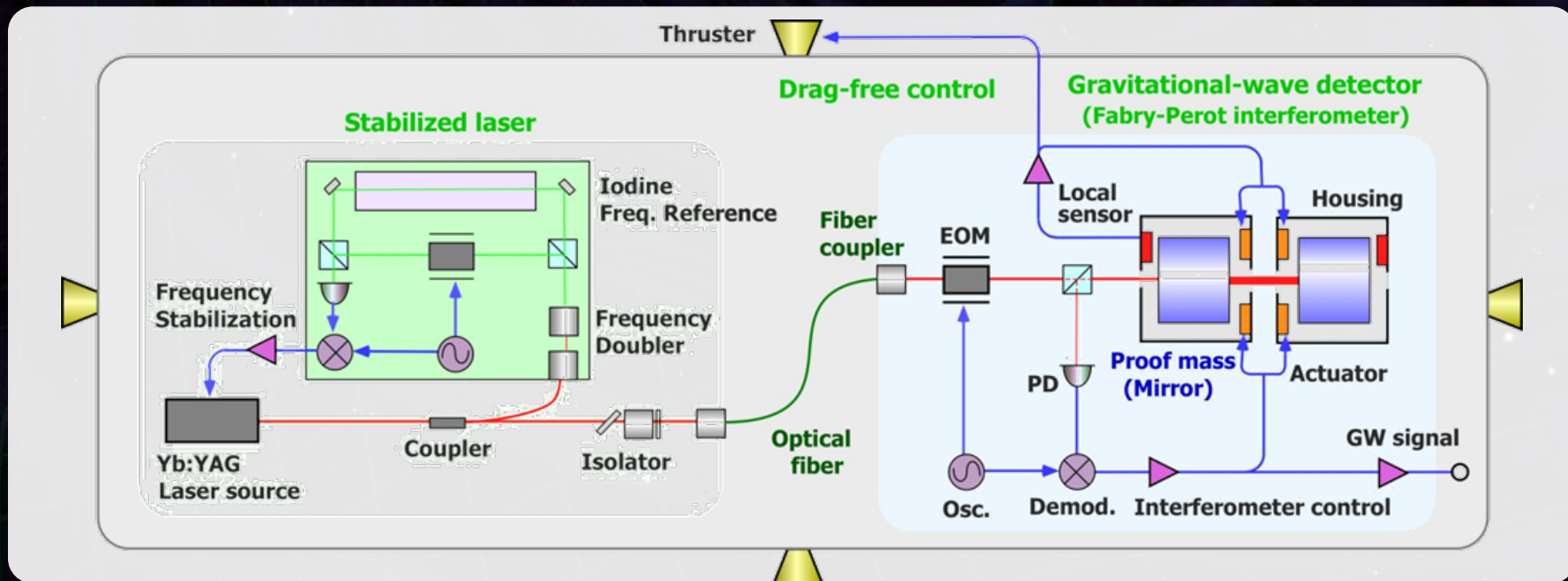


# DPFミッション機器構成

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

# 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

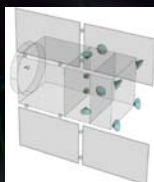


$0.5$  Hz/Hz<sup>1/2</sup>  
の周波数安定度

$0.5$  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

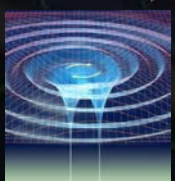


衛星変動安定度  
 $10^{-9}$  m/Hz<sup>1/2</sup>

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



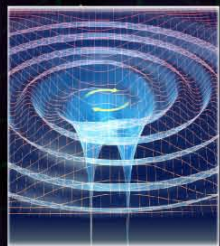


# DPFの科学的意義

# DPFの目指す科学的成果

## 宇宙・地球の観測

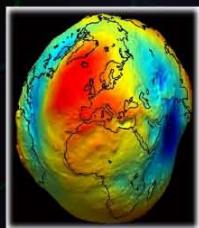
### 重力波観測



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。

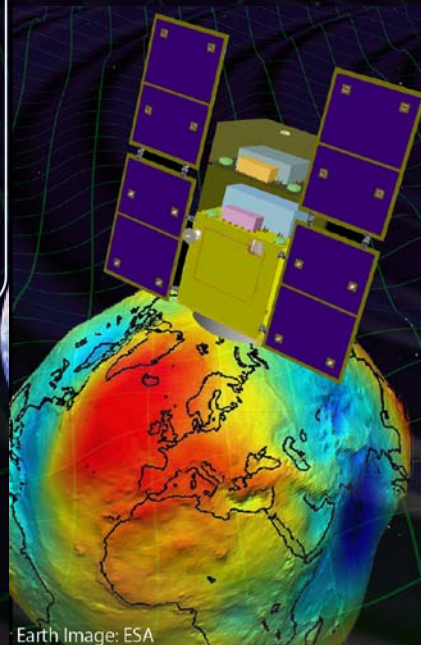
⇒ 銀河形成への知見

### 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

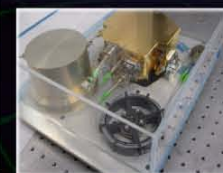
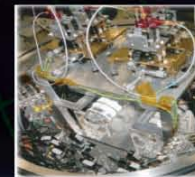


Earth Image: ESA

## 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

# DPFによる重力波観測

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)

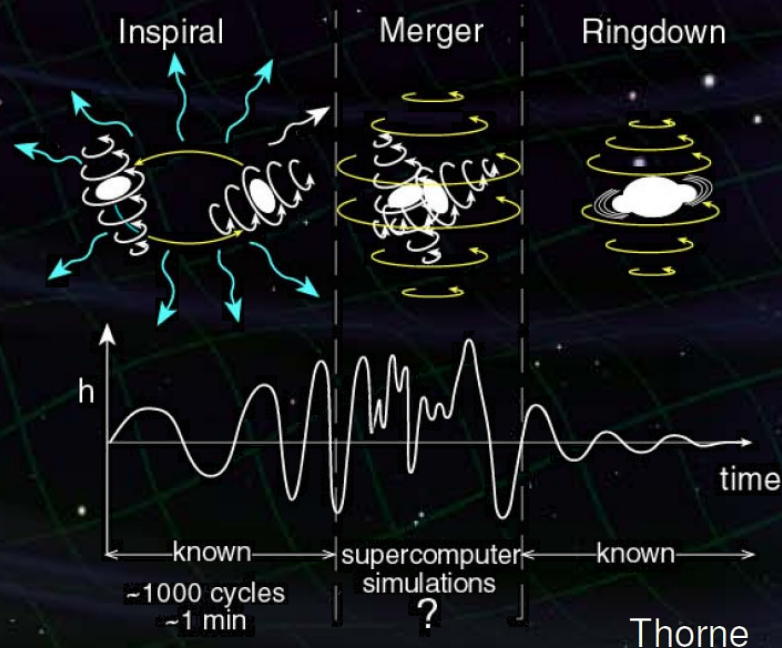
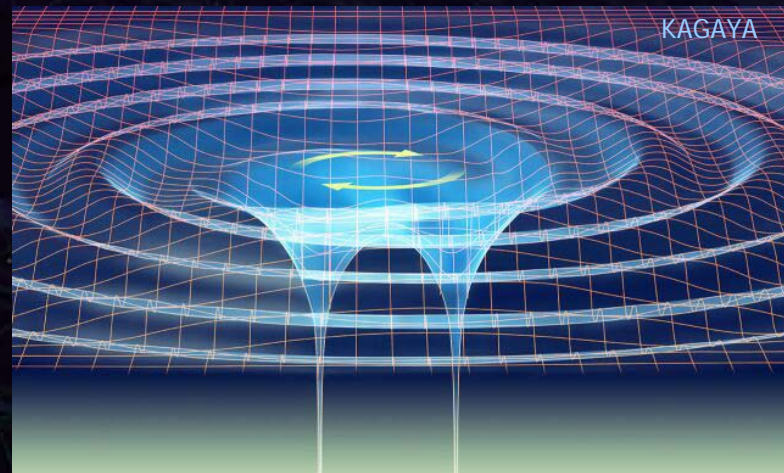
中間質量ブラックホール  
(質量  $10^3 - 4 \times 10^5 M_{\text{sun}}$ ) が対象

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

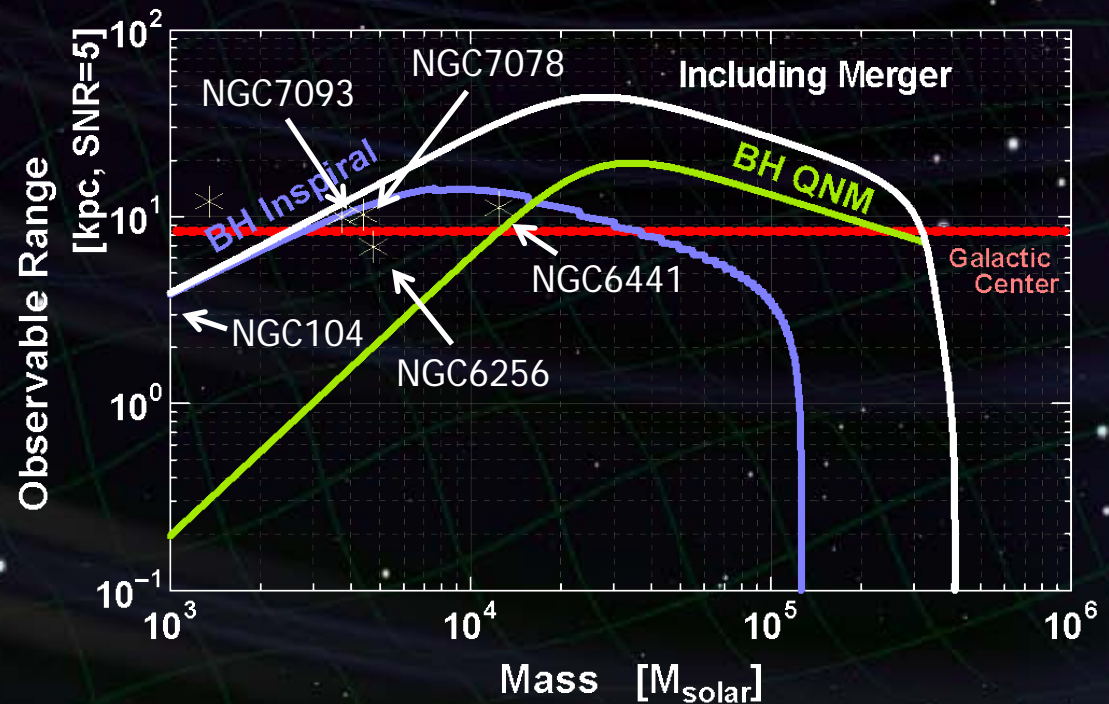
Globular clusters known  
to have black holes

Credit: NASA, STScI

M15

Our Sun

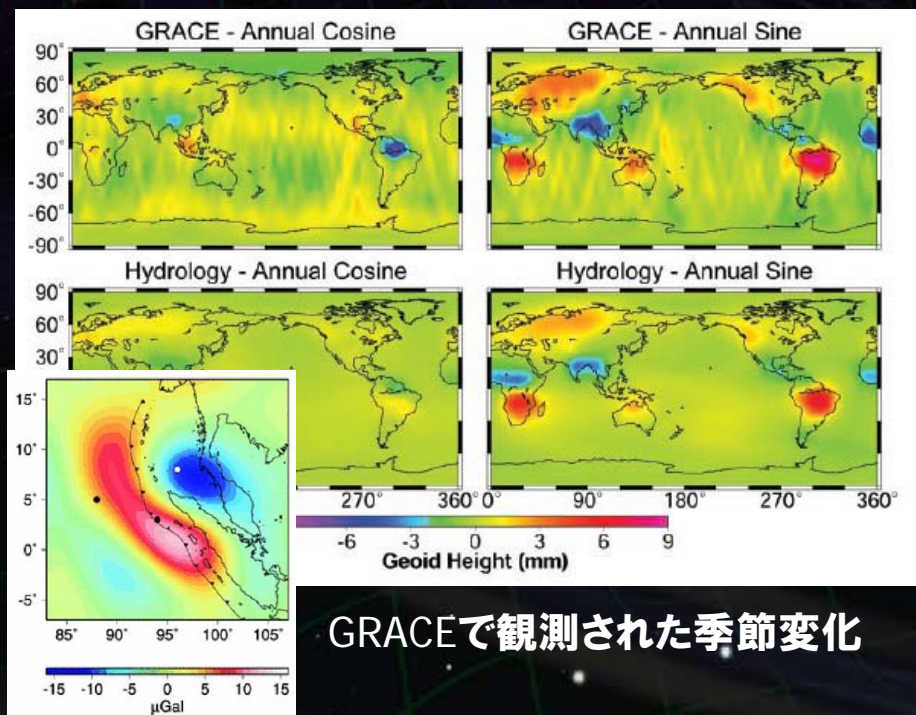
Milky Way Galaxy  
(artist's concept)



# 衛星による地球重力場観測

## 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



GRACEで観測された季節変化

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

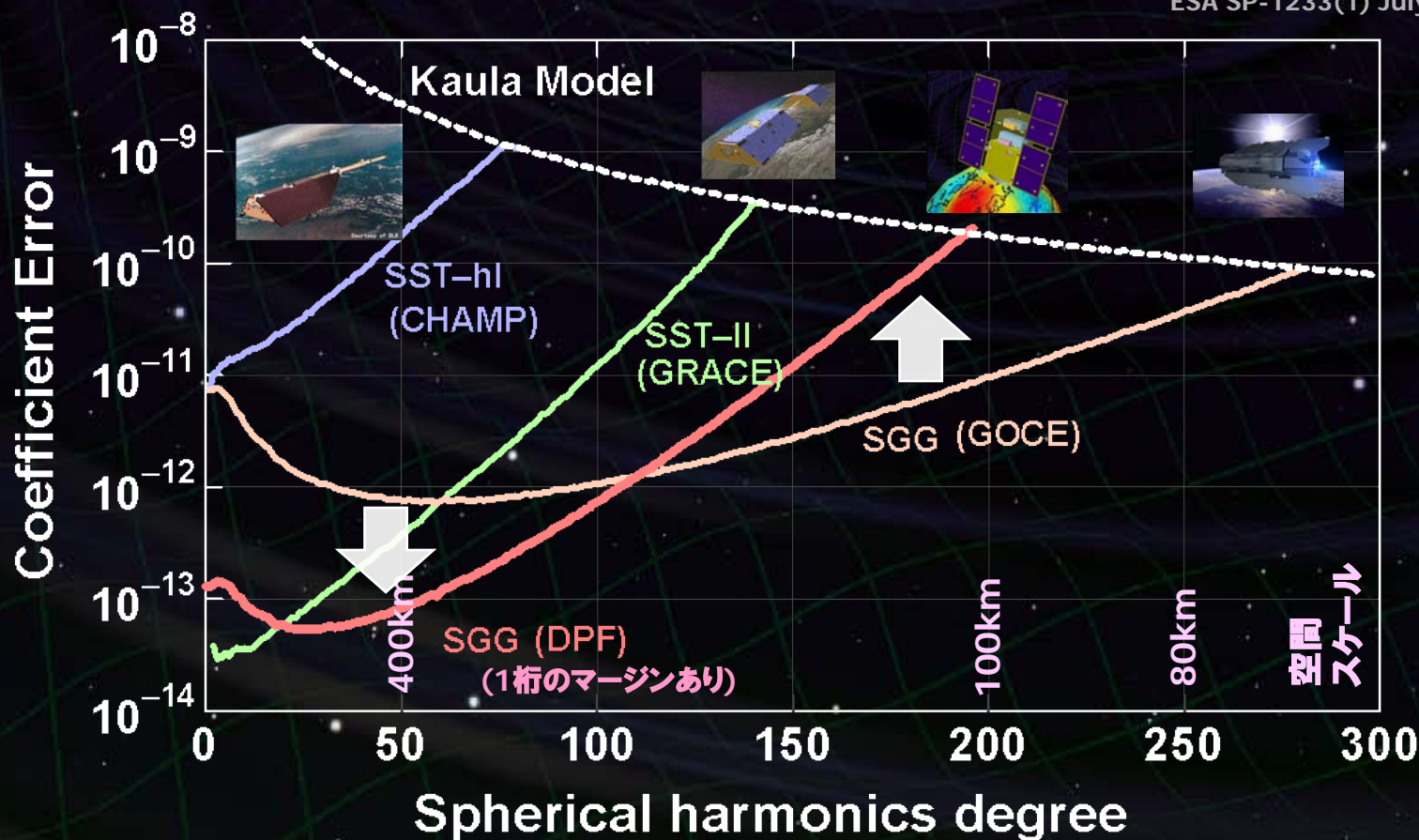
地殻変動の検知・予測

# 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)

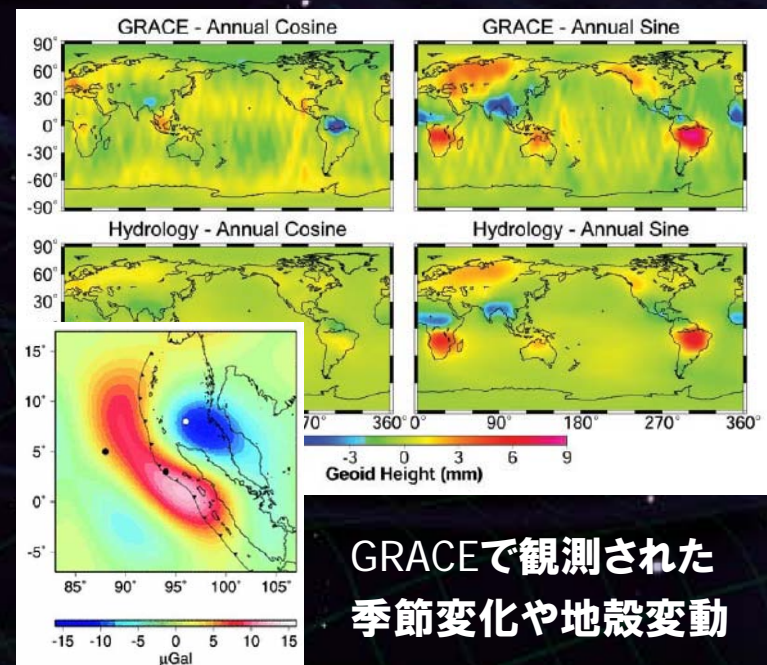
⇒ 2012年頃には運用寿命を迎える見込み

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

# 衛星概要と開発状況



# DPFシステム概要

## DPF Payload

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

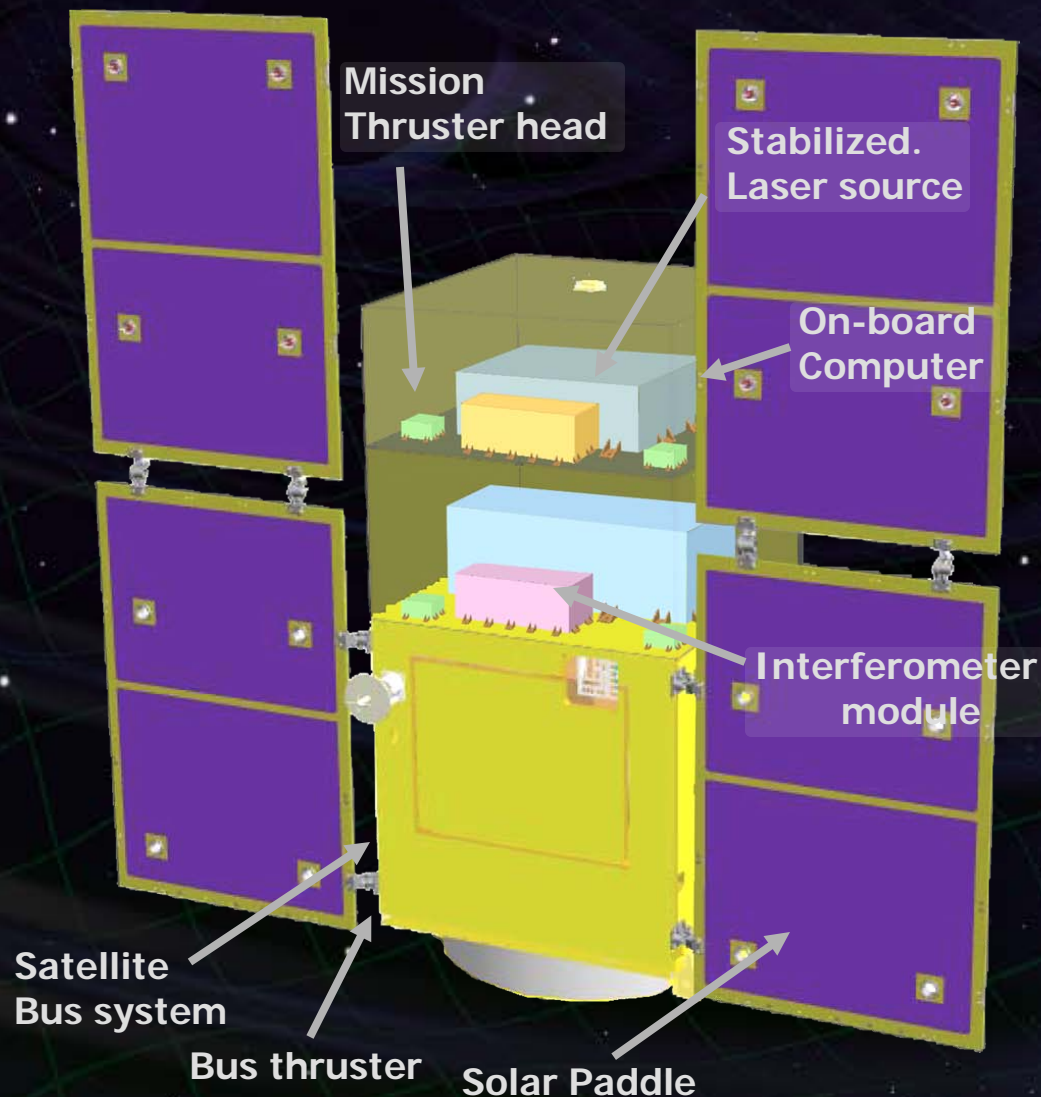
Power Supply  
SpW Comm.



## Satellite Bus

(‘Standard bus’ system)

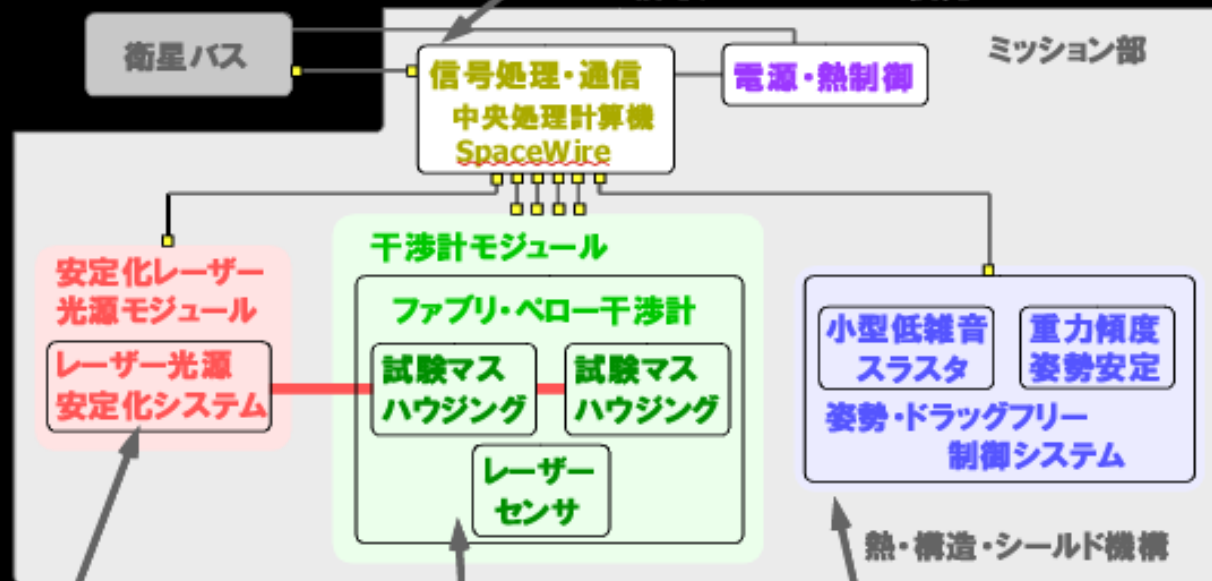
Size :  
950x950x1100mm  
Weight : 200kg  
SAP : 960W  
Battery: 50AH  
Downlink : 2Mbps  
DR: 1GByte  
3N Thrusters x 4



# 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



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

DPF-WG  
84名  
DECIGO  
137名

# 干渉計モジュール

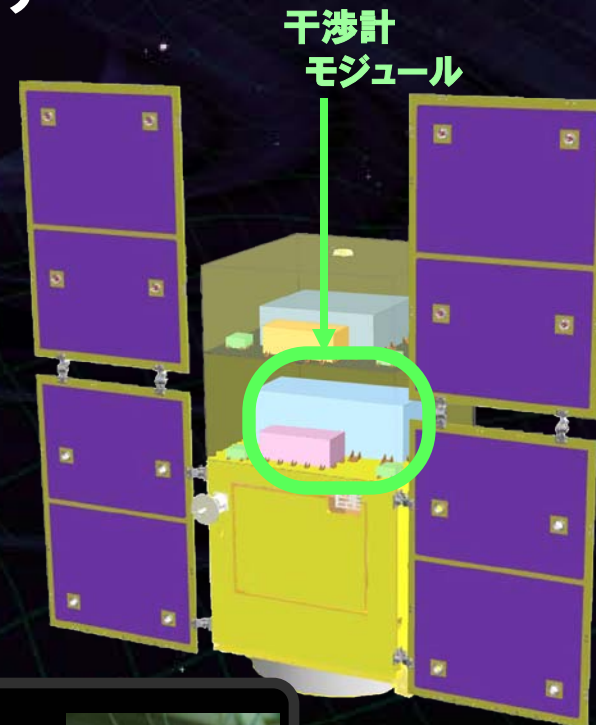
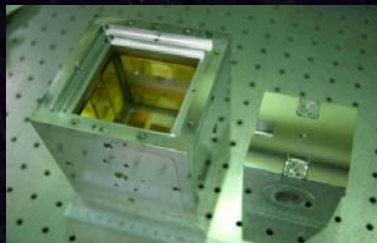
レーザー干渉計：試験マス + 干渉計 + センサ

## 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.



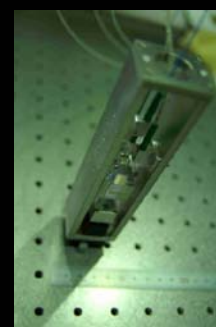
国立天文台, 東大

## 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



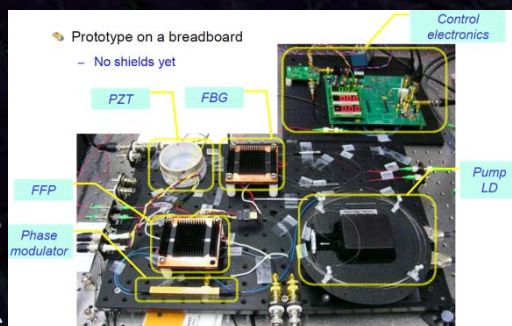
# 安定化レーザー光源

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.

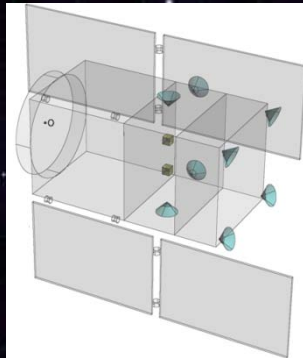
電通大, NICT



# 姿勢・ドラッグフリー制御

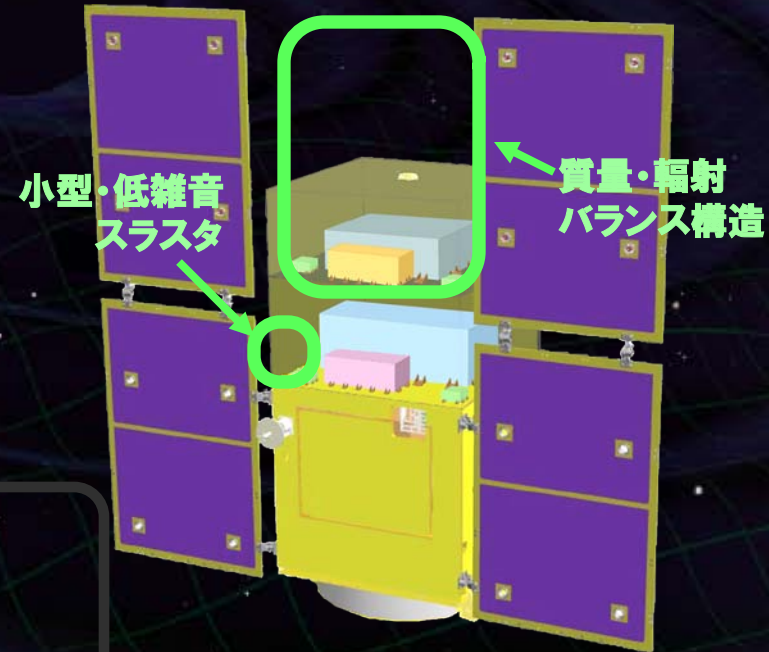
## 姿勢・ドラッグフリー制御：衛星構造検討，制御則，ミッションスラスタ

### 衛星構成，熱・構造検討



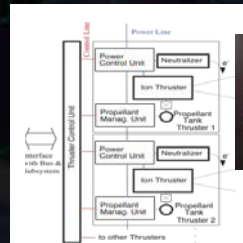
- Passive attitude stability
- Drag-free control

東大, JAXA



### 小型低雑音スラスタ

→ Actuators for satellite control



•BBM and system design

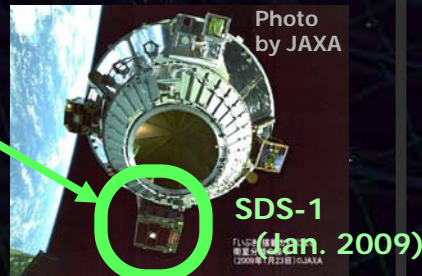
JAXA, 東海大, 防衛大

## 信号処理・制御システム : SpWベースの信号処理システム

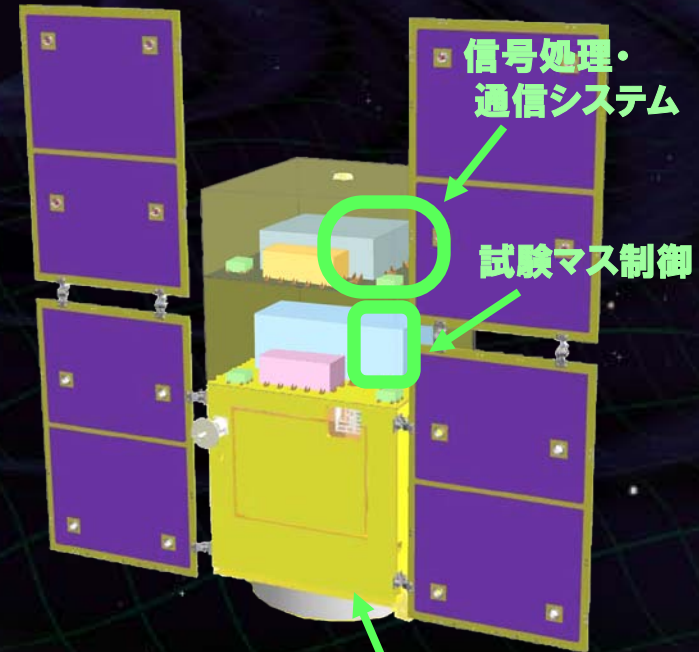
SpC2 + SpW信号処理システム  
→ SDS-1/SWIMによる宇宙実証



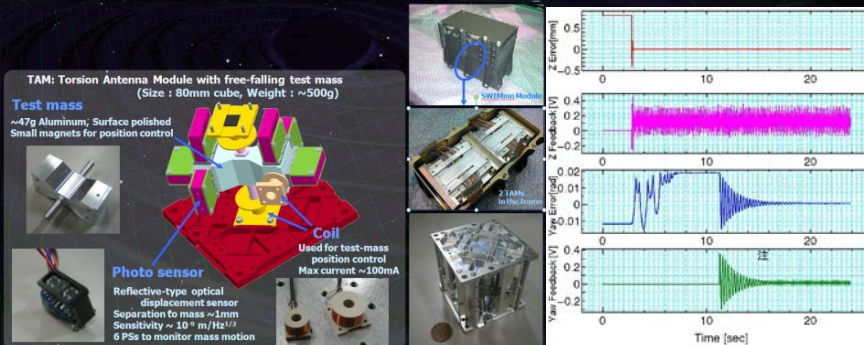
Space demonstration  
by SDS-1/SWIM



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

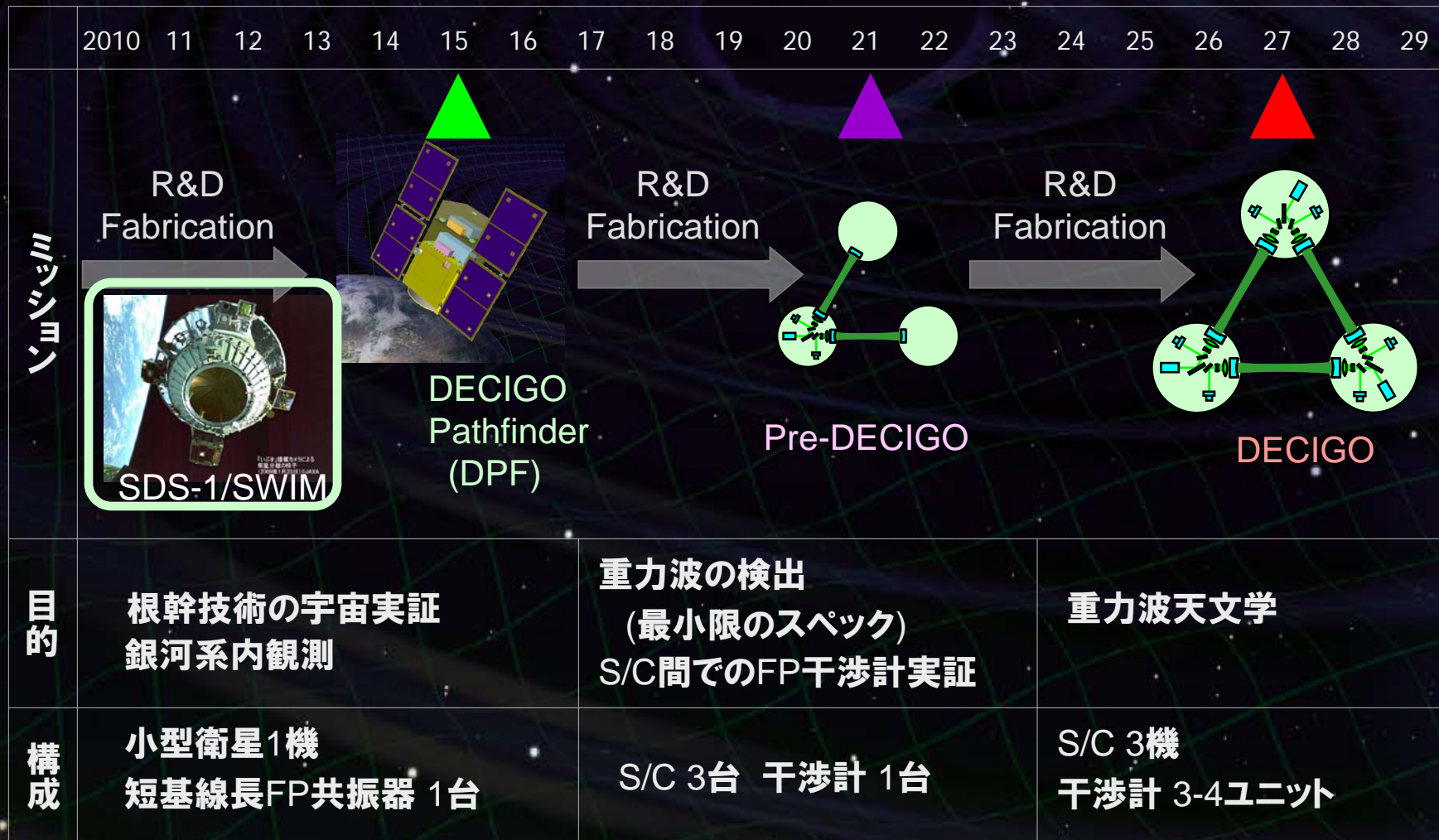


# SWIMによる宇宙実証

# DECIGOのロードマップ



Figure: S.Kawamura





# SWIMによる宇宙実証

DECIGO

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<sub>μv</sub> : 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

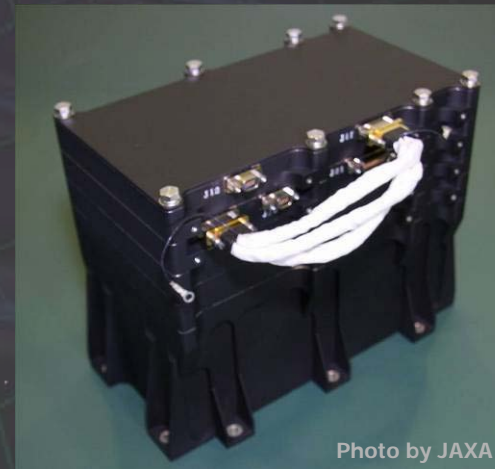


Photo by JAXA

SDS-1  
Bus System

Power +28V  
RS422 for CMD/TLM  
GPS signal

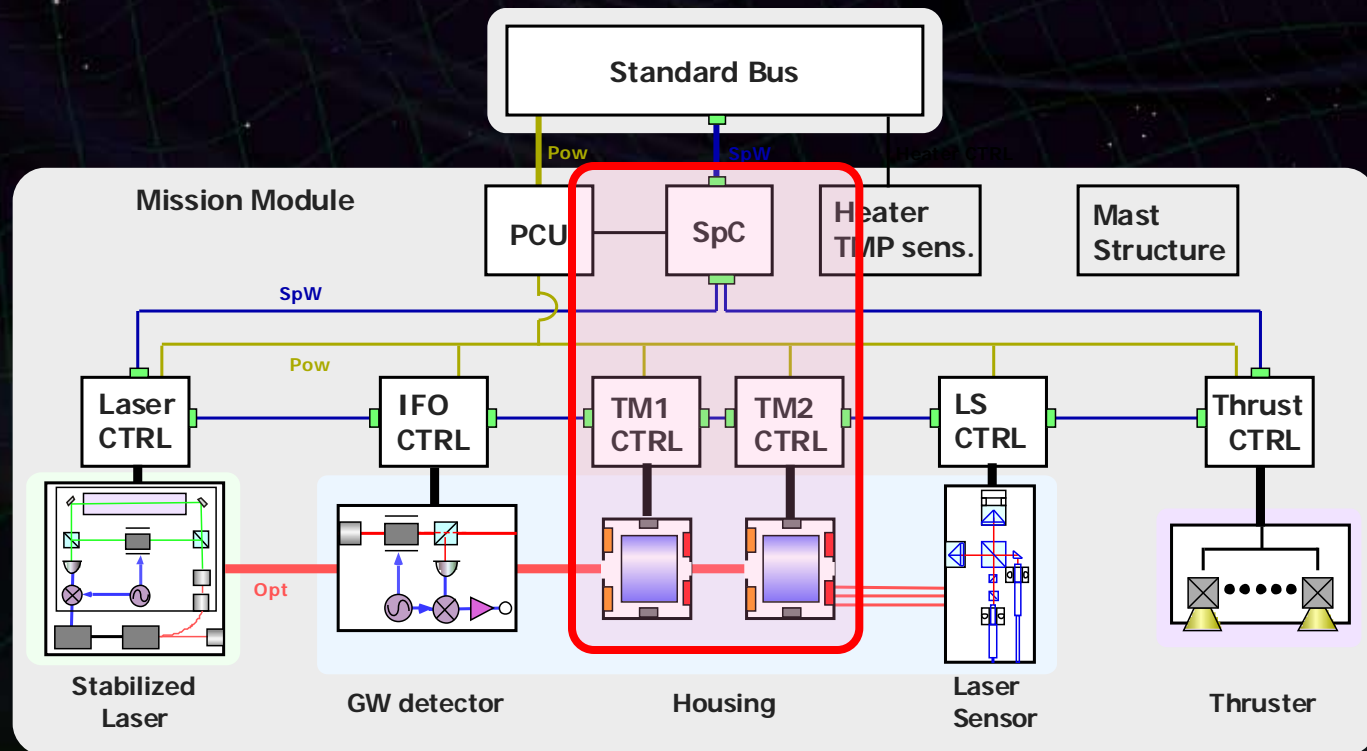
Power ±15V, +5V  
SpW x2 for CMD/TLM

# SWIMによる実証とDPF

## 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)



## 超小型宇宙重力波検出器

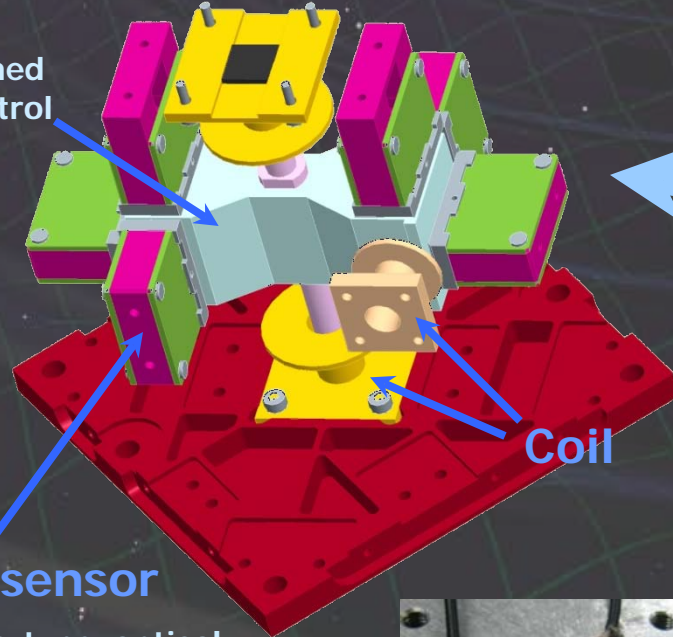
⇒ 世界で最初の 宇宙重力波検出器

Photo:  
JAXA

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

### Test mass

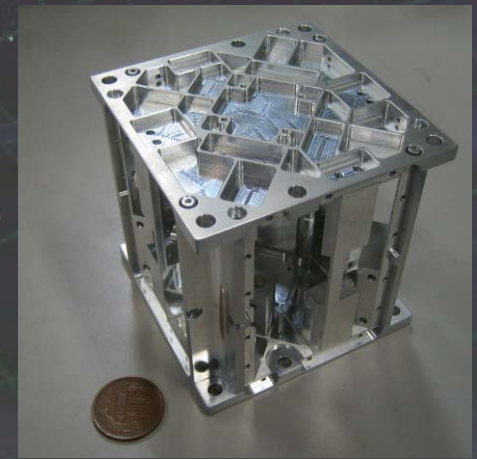
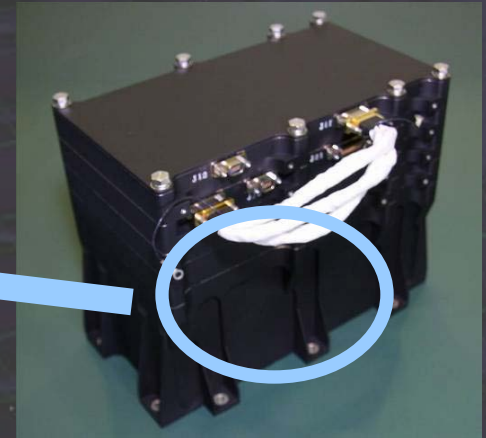
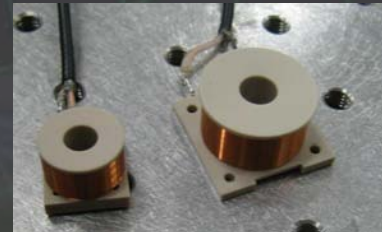
~47g Aluminum, Surface polished  
Small magnets for position control



Coil

### Photo sensor

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



# SWIM による観測運転

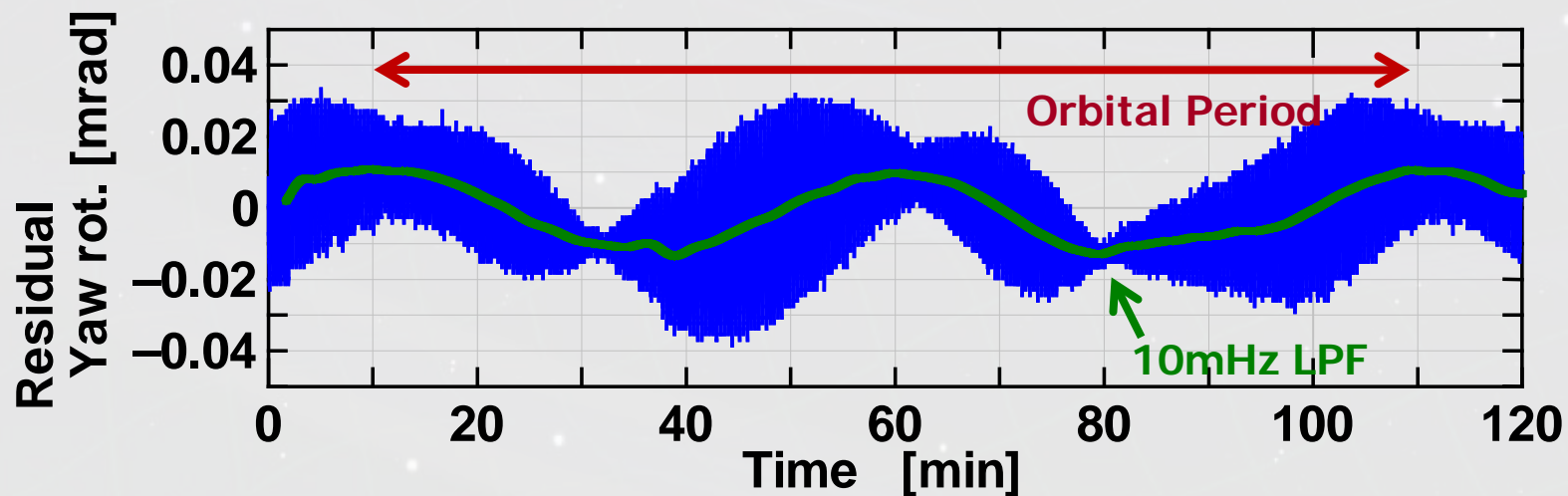
## 長時間データ取得

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。

# サポート・協力体制



- **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



# まとめ

# DECIGO Pathfinder



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)



宇宙・地球の観測

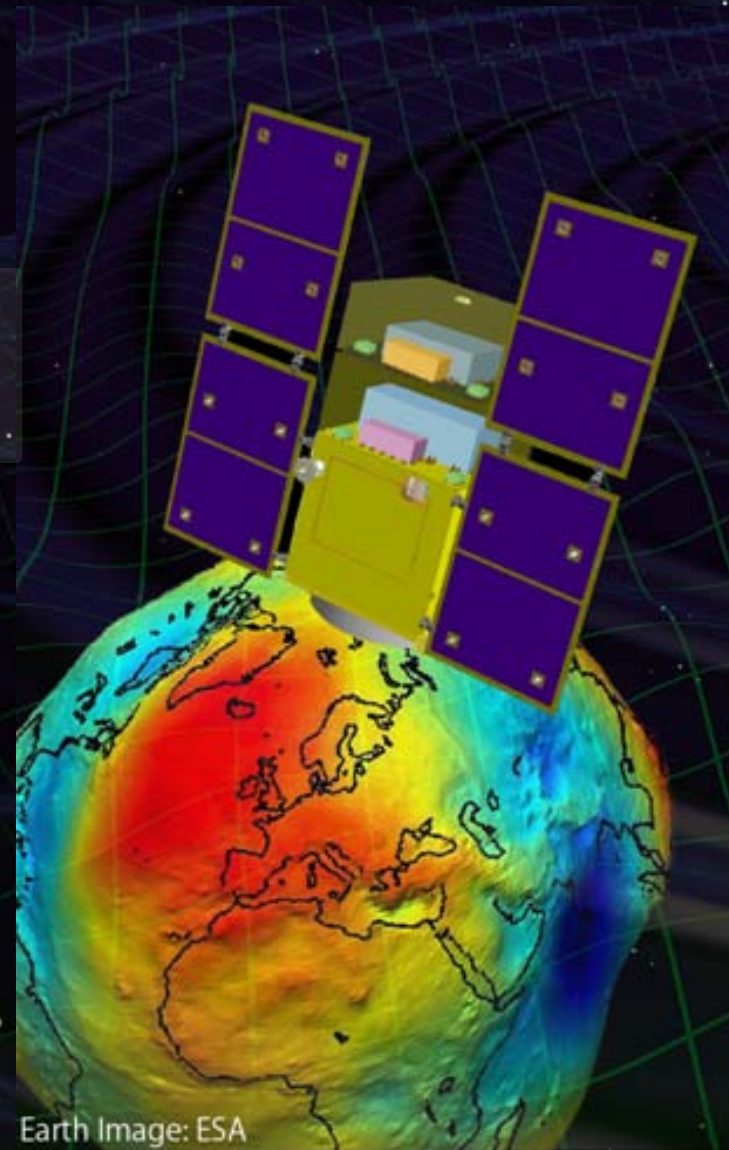
→ 銀河の成り立ち, 地球環境モニタ

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

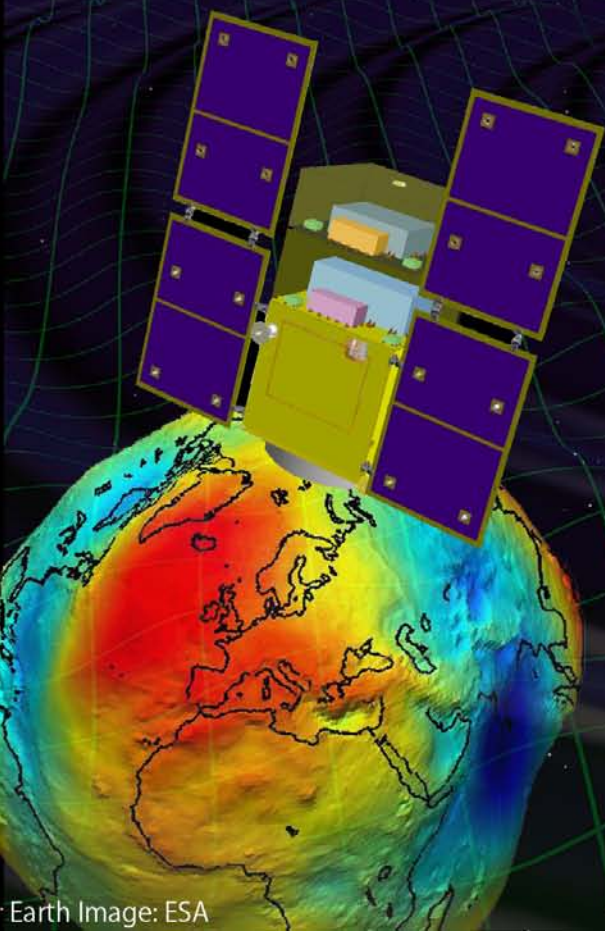
SDS-1/SWIMによる宇宙実証



## 関連ポスター講演

- P3-150 DECIGO Pathfinderにおける地球重力場観測の感度評価 (正田, 他)
- P3-151 DECIGO/DPFのための光源開発 (武者, 他)
- P3-152 DECIGO Pathfinder向けプロトタイプ干渉計実験
- P3-153 SWIM搭載超小型重力波検出器の運用とデータ解析 (穀山, 他)
- P3-154 DECIGO Pathfinderで実現実証される技術の応用
  - 惑星重力場観測衛星 - (穀山, 他)
- P3-155 DECIGO Pathfinderの信号取得系の開発 (阿久津, 他)
- P3-156 DPFドラッグフリー制御システムの開発 (森脇, 他)
- P3-157 DECIGO Pathfinderのための干渉計モジュールの開発 (佐藤, 他)





Earth Image: ESA

終わり