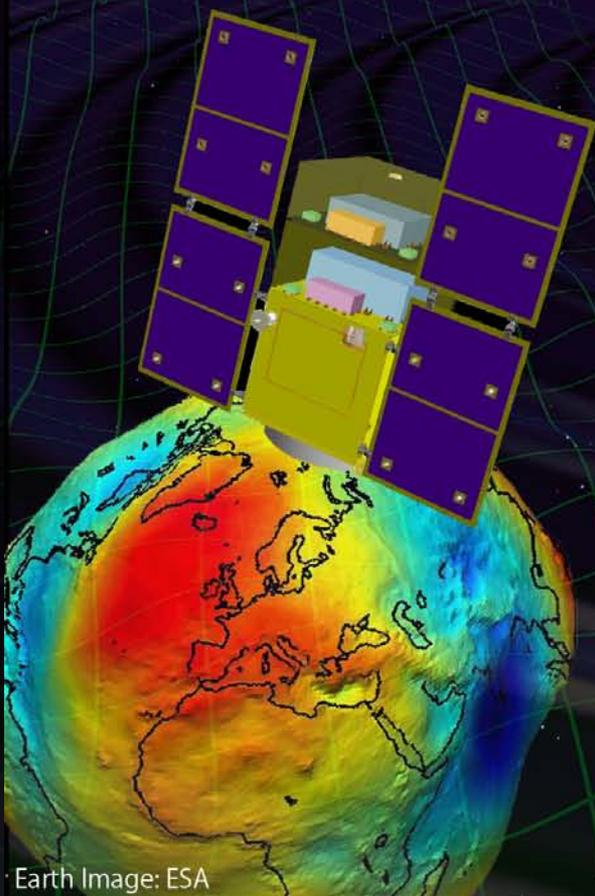


DECIGOパスファインダー



Earth Image: ESA

安東 正樹 (京都大学 理学研究科)

他, DPFワーキンググループ

DECIGOワークショップ (2010年6月14日, 東京大学, 東京)

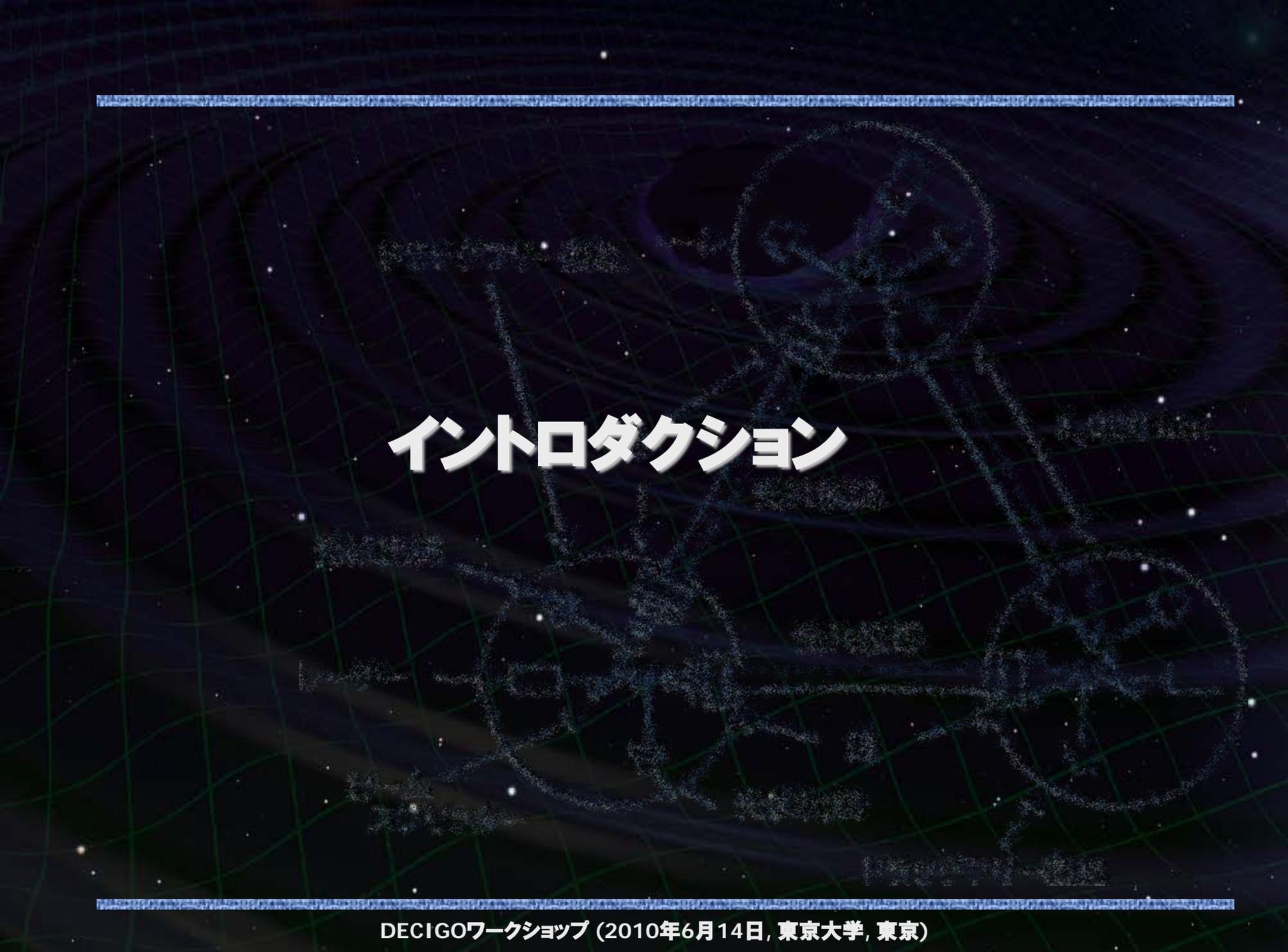
目次

イントロダクション

DPFの科学的意義

衛星概要と開発状況

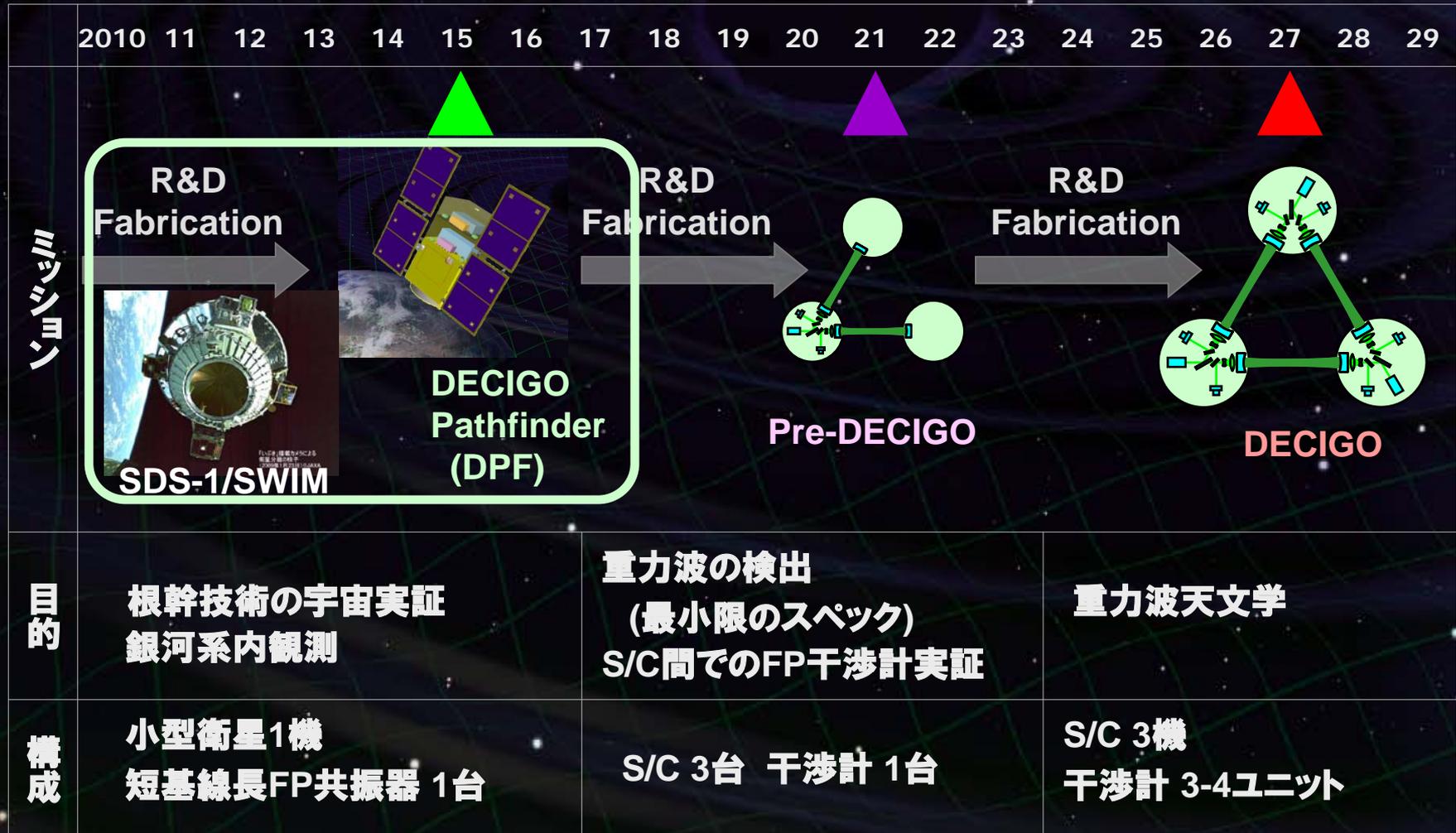
まとめ



イントロダクション

DECIGOのロードマップ

Figure: S.Kawamura



DECIGOパスファインダー (DPF)

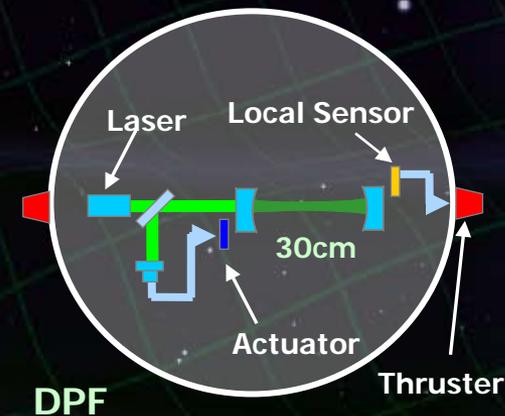
DECIGOのための最初の前哨衛星

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



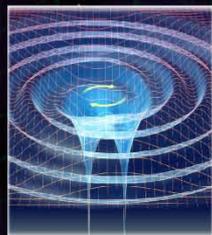
DPFの科学的意義

DECIGOワークショップ (2010年6月14日, 東京大学, 東京)

DPFの目指す科学的成果

宇宙・地球の観測

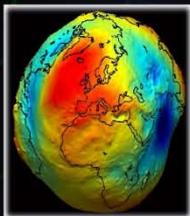
重力波観測



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。

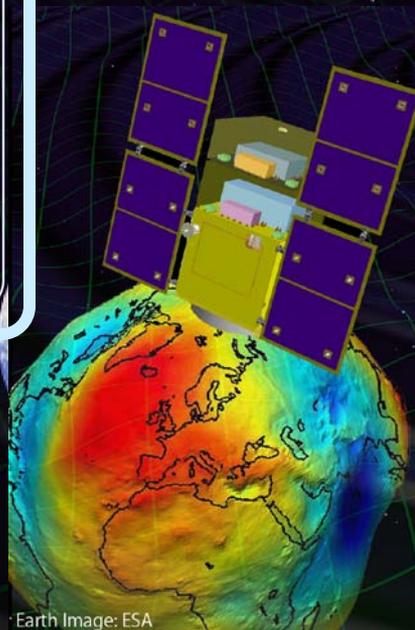
➡ 銀河形成への知見

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。

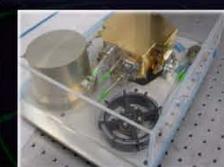
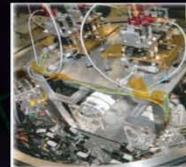
➡ 地球環境モニタ



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の観測対象

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)

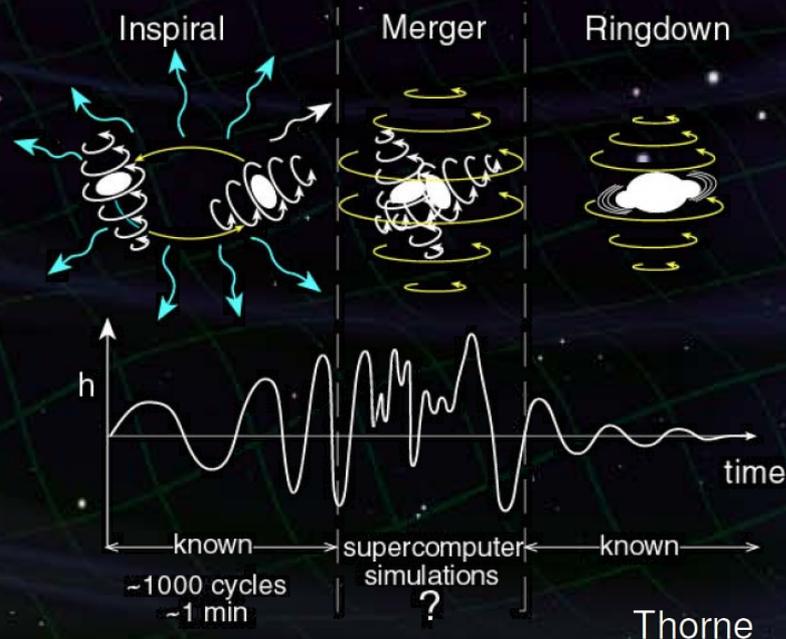
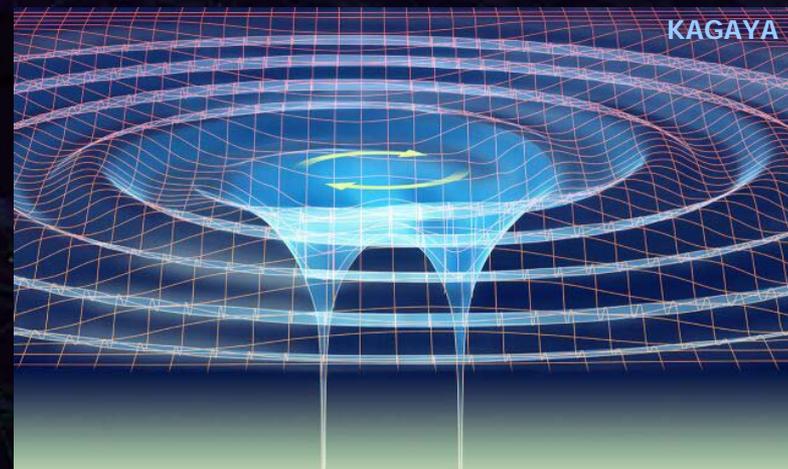
中間質量ブラックホール
(質量 $10^3 - 4 \times 10^5 M_{\text{sun}}$) が対象

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

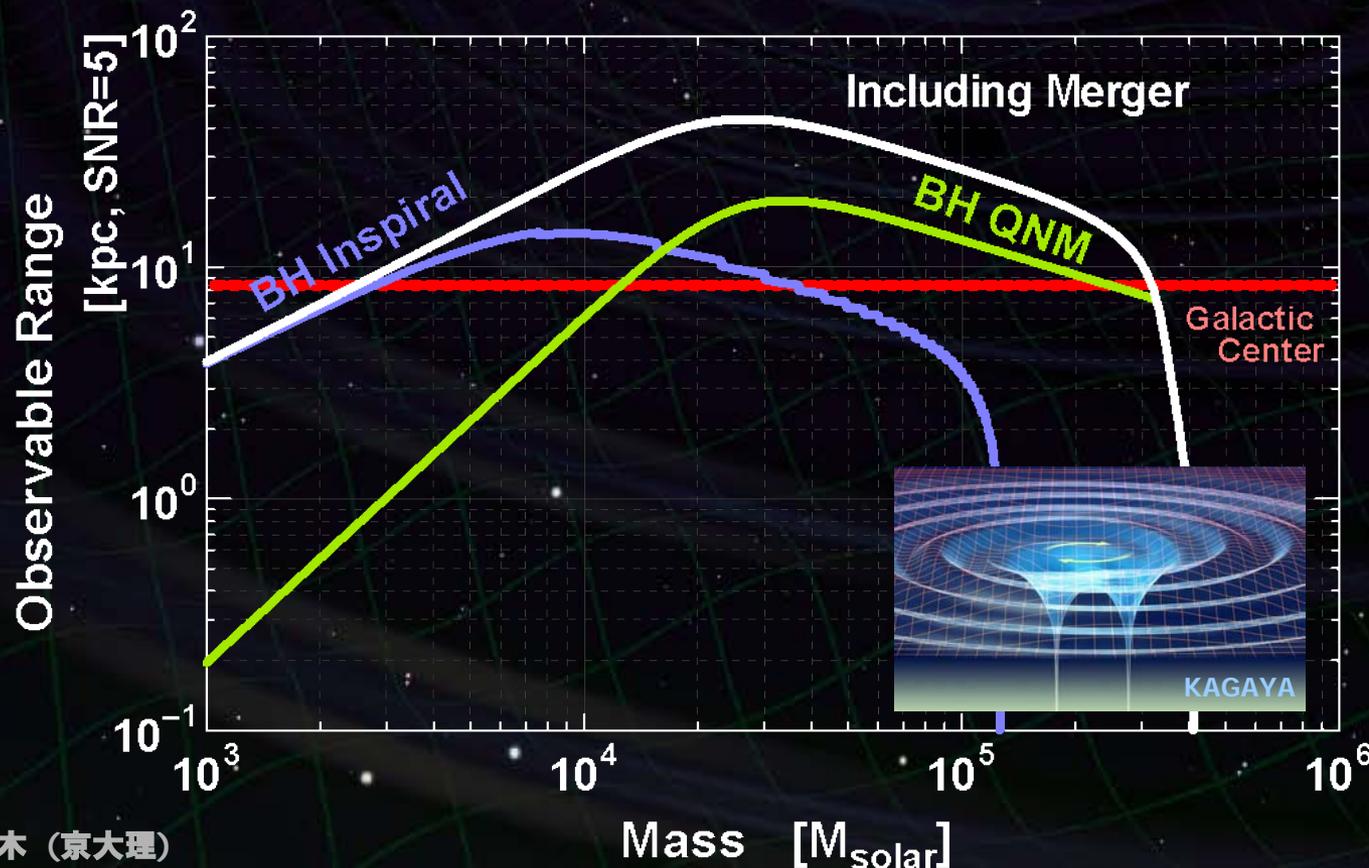


DPFの観測距離

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)

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

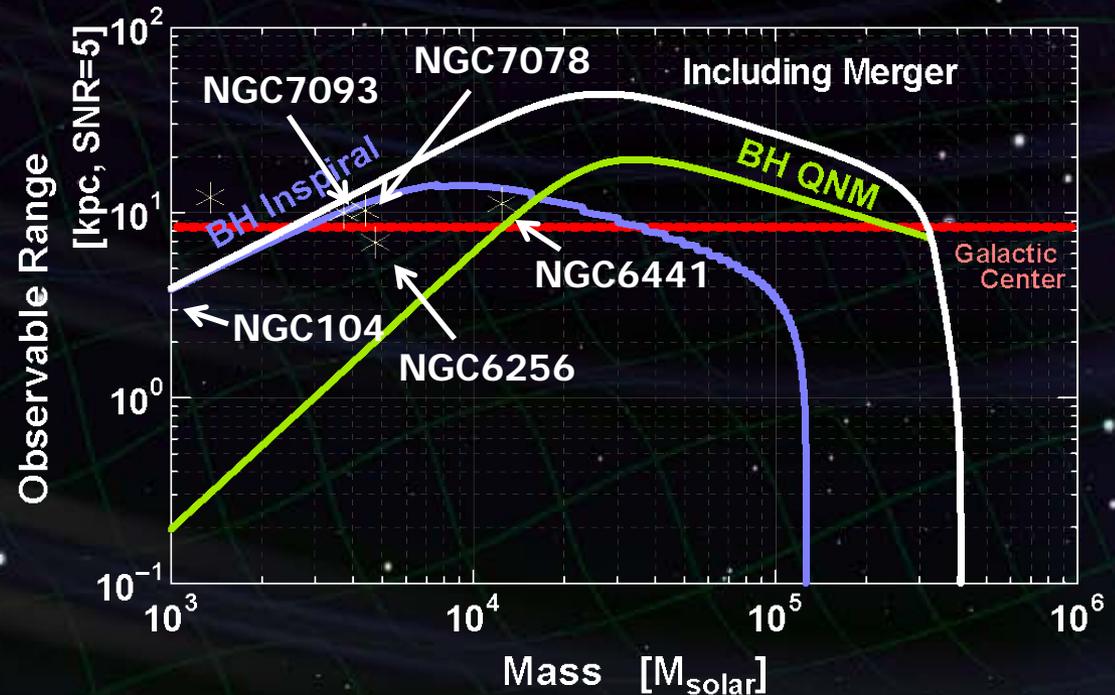
Globular clusters known
to have black holes

Credit: NASA, STScI

M15

Our Sun

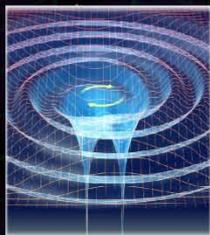
Milky Way Galaxy
(artist's concept)



DPFの目指す科学的成果

宇宙・地球の観測

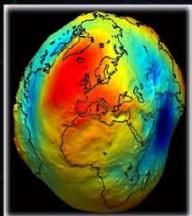
重力波観測



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。

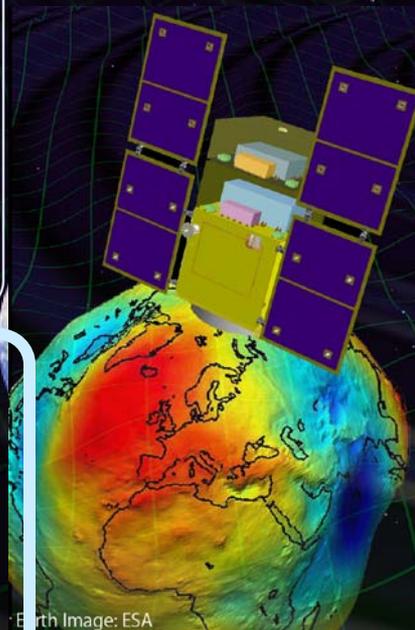
➡ 銀河形成への知見

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。

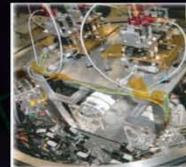
➡ 地球環境モニタ



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

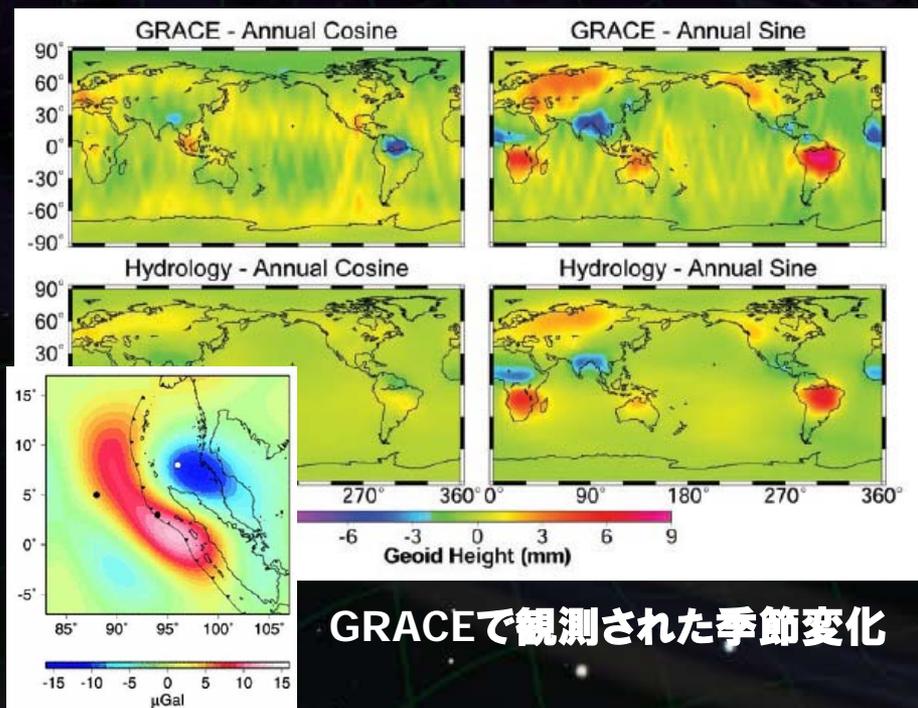


➡ 宇宙環境利用の新しい可能性

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



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
(海洋・陸水・氷床等)
地震・火山噴火にともなう

地殻変動の検知・予測

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)

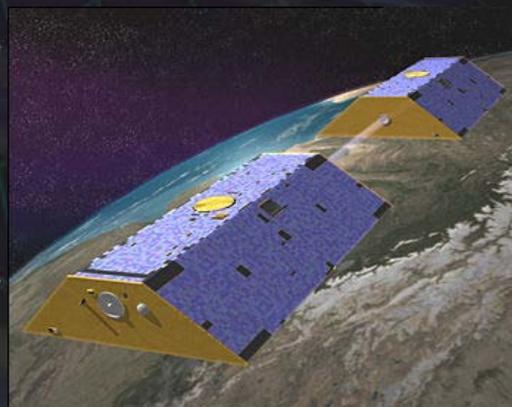
- GPSなどの測位システムで衛星軌道を連続測定
- 搭載加速度計データを用いて擾乱振動を差し引く



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振動を差し引く



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-)

地球重力ポテンシャルを 球面調和関数展開で表現

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

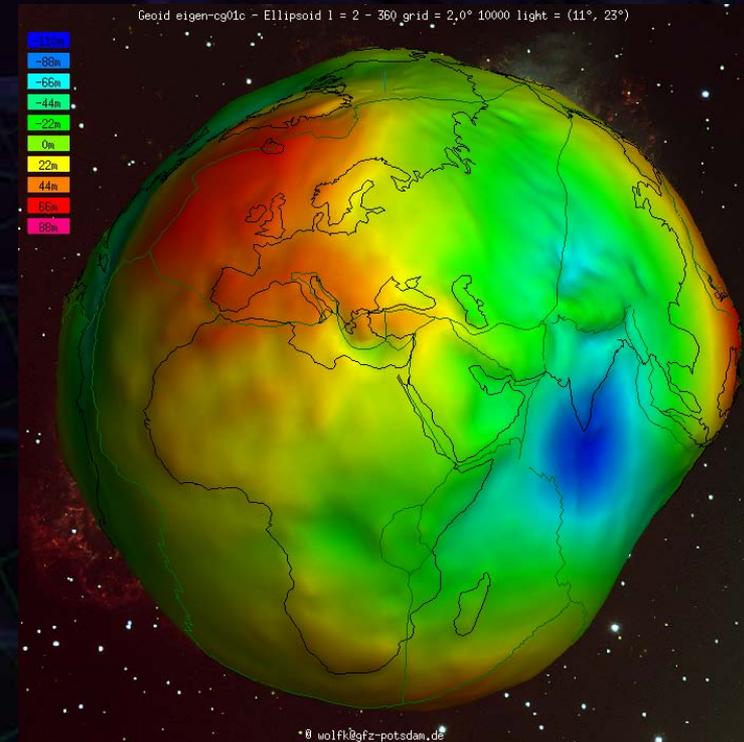
G, M, R : 重力定数, 地球質量, 地球半径

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

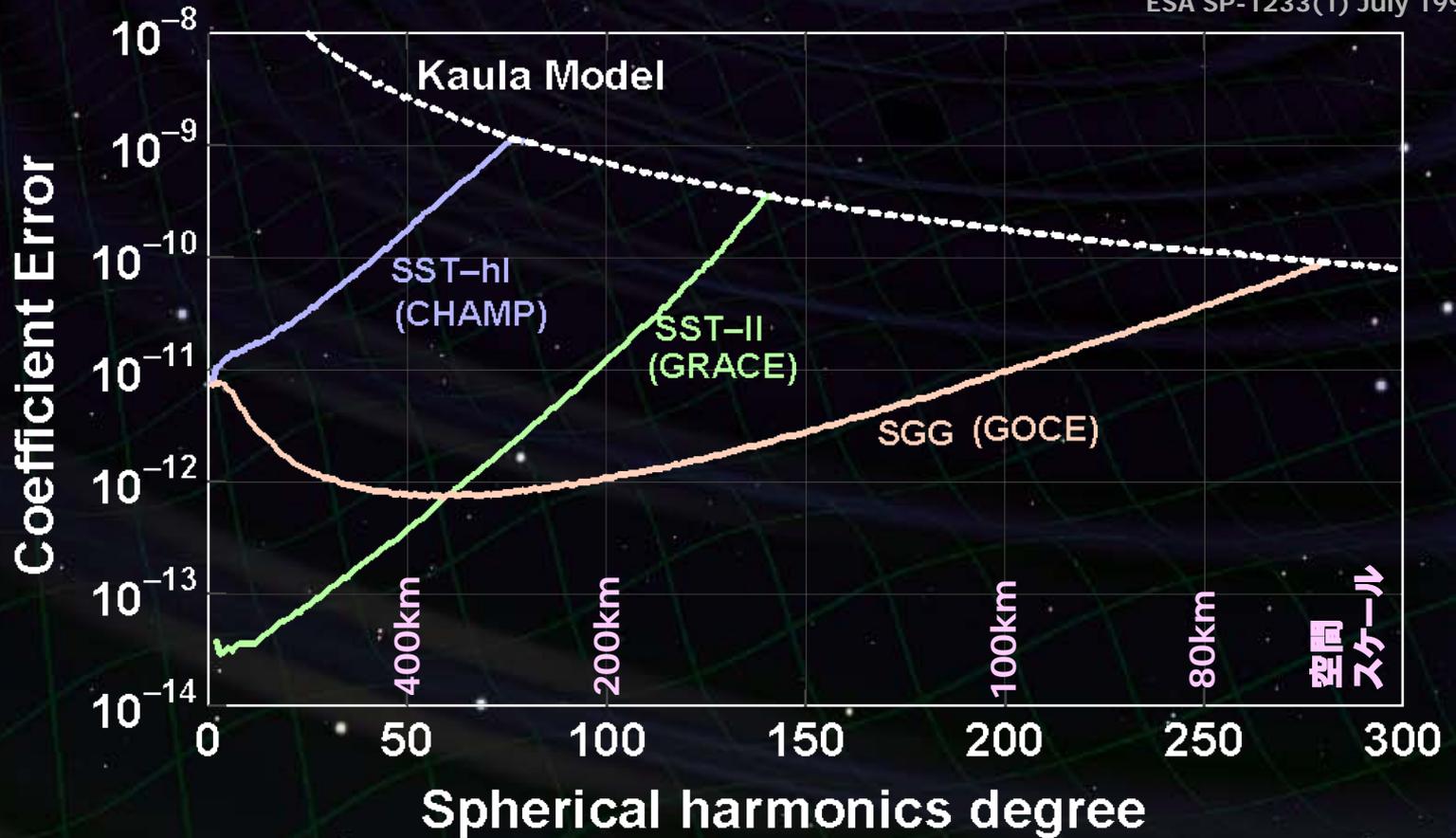


International Centre for Global
Earth Models (ICGEM)
[http://icgem.gfz-
potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html](http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html)

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.



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

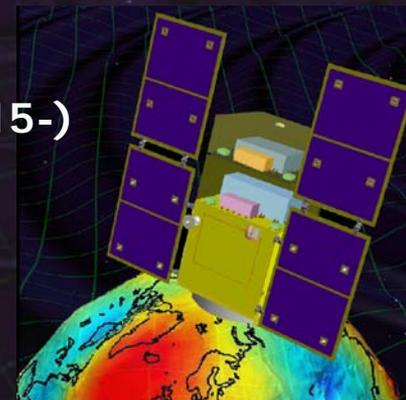
感度 $5 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$

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 $9 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$

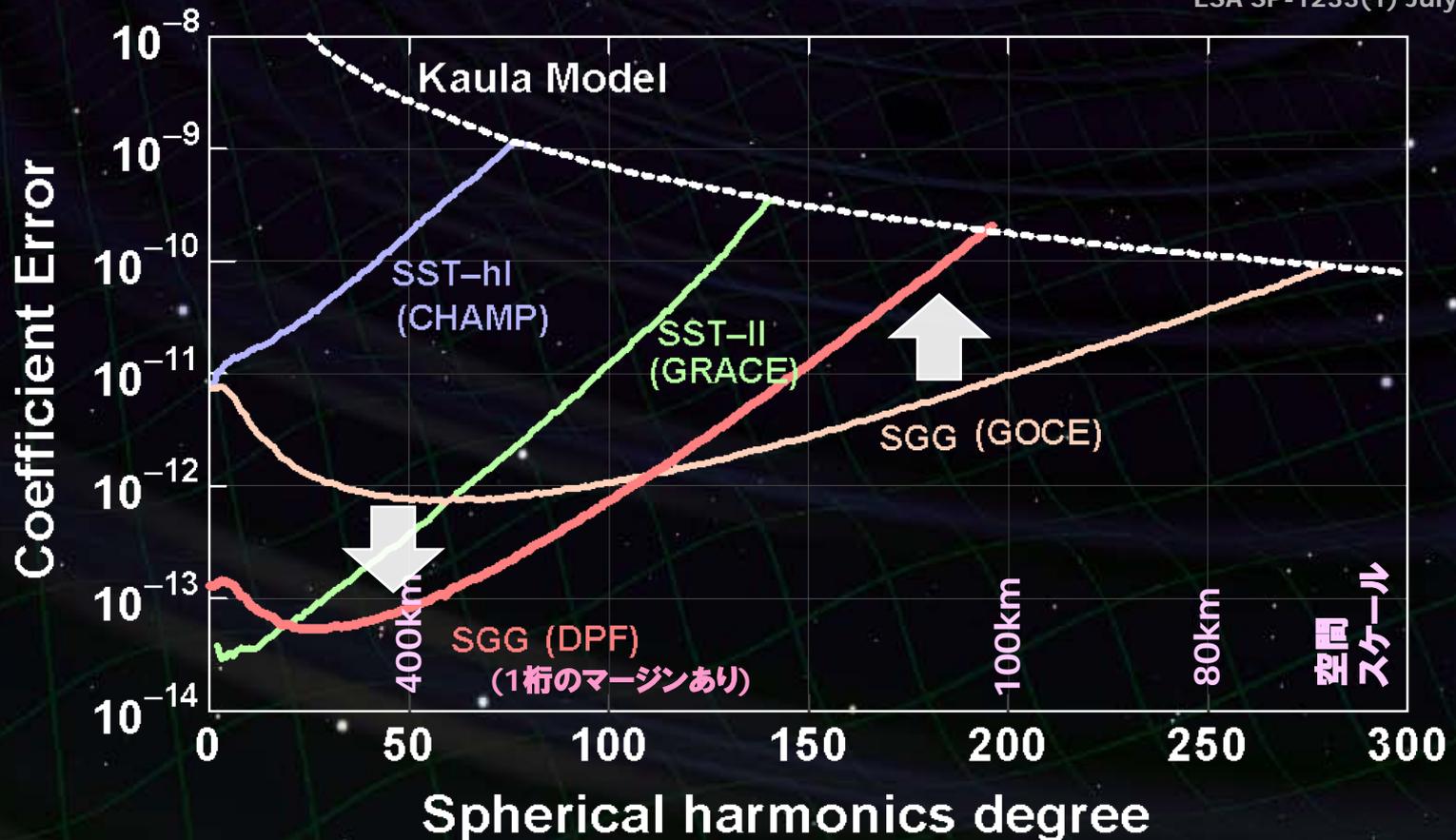
基線長 0.3m

重量 350 kg

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)

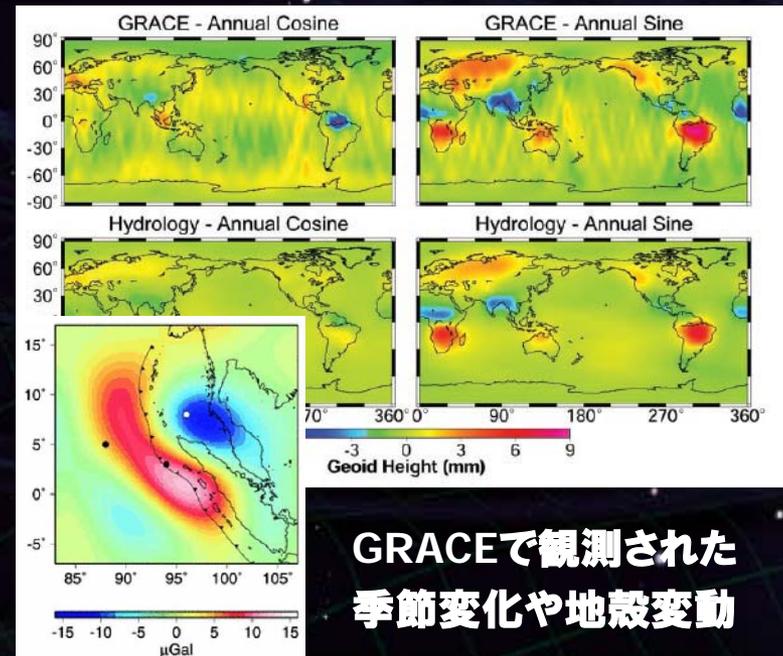
⇒ 2012年頃には運用寿命を迎える見込み

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

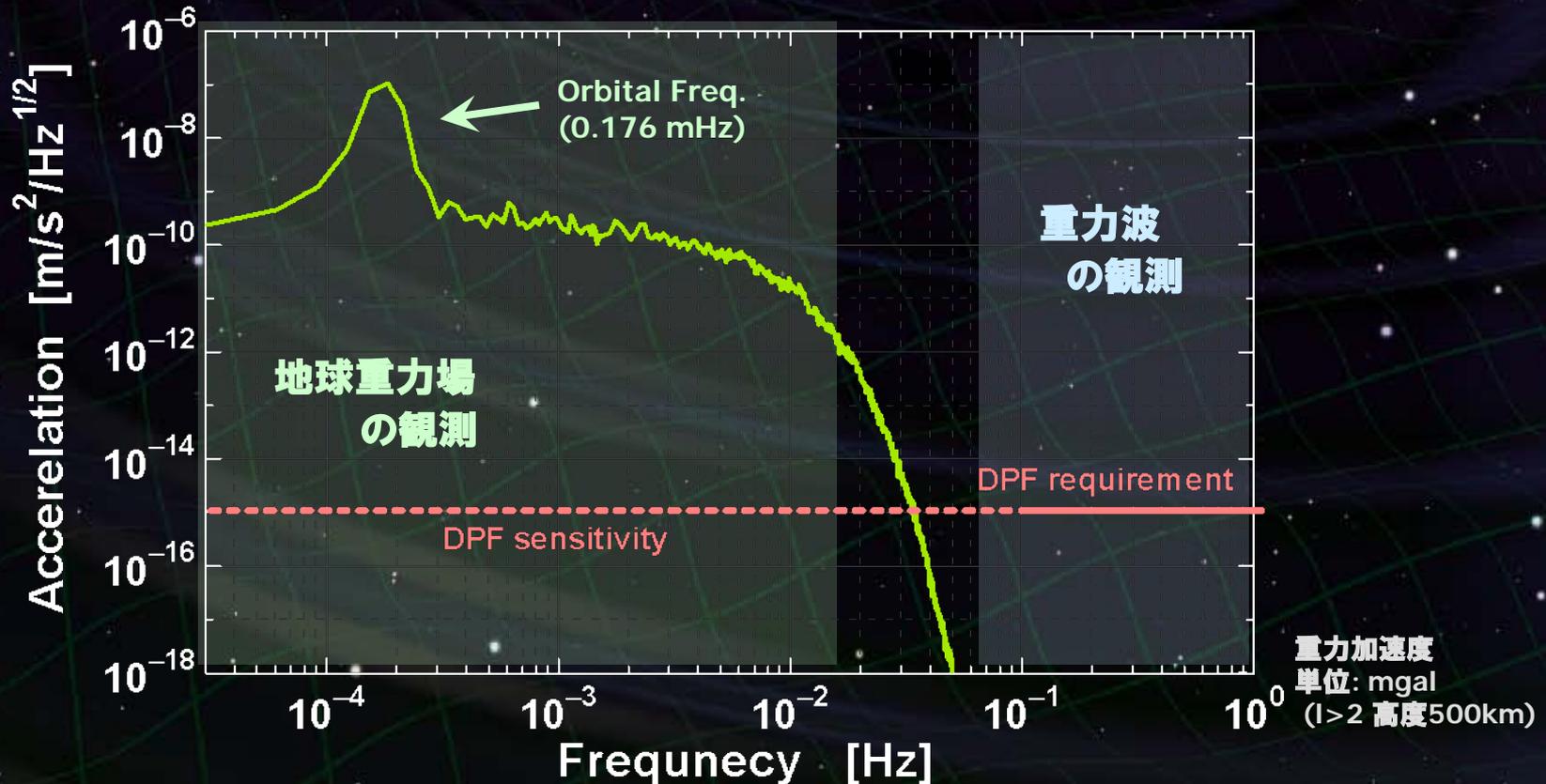
地球重力場・重力波の観測

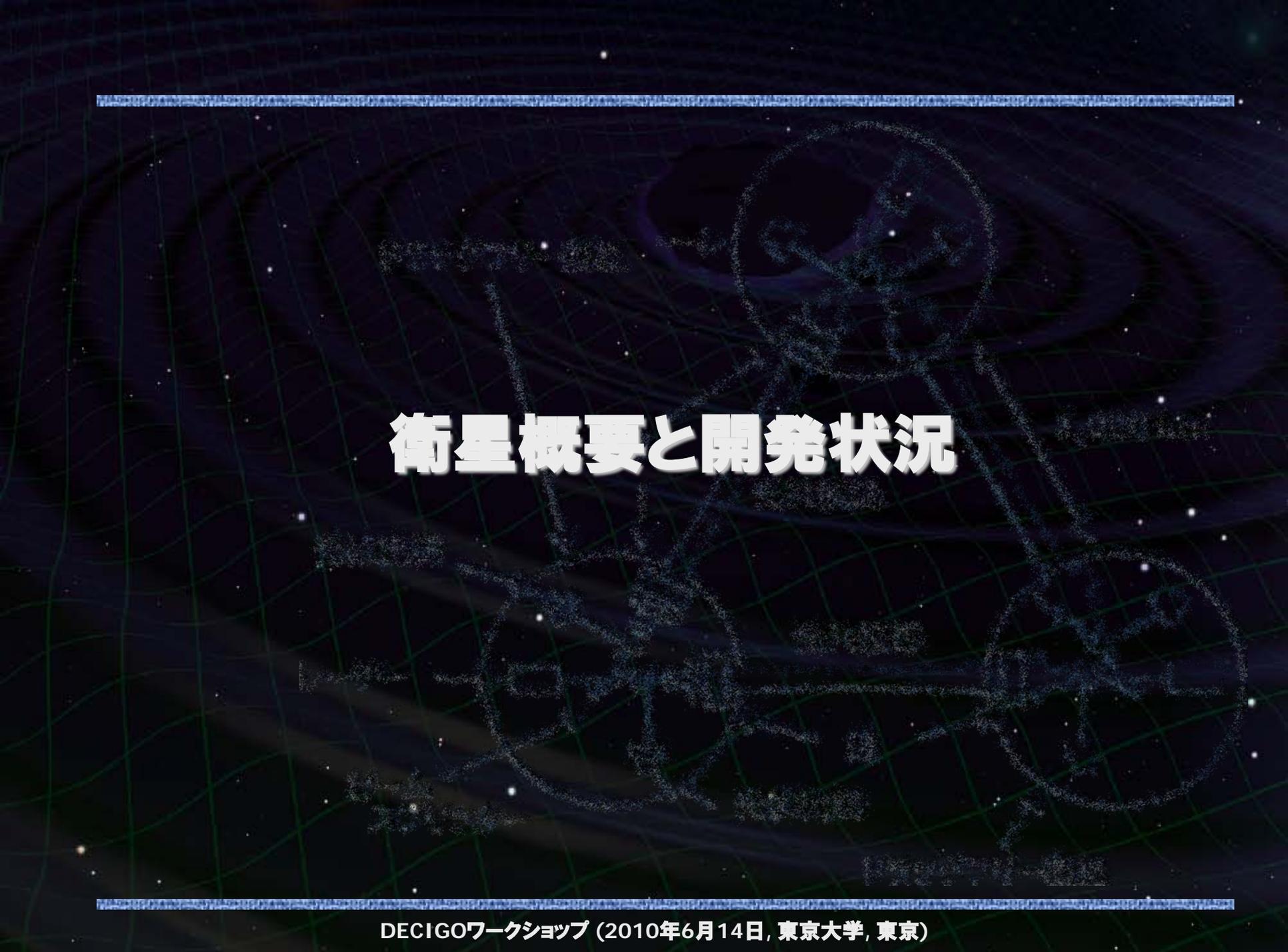
地球重力場の計算

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





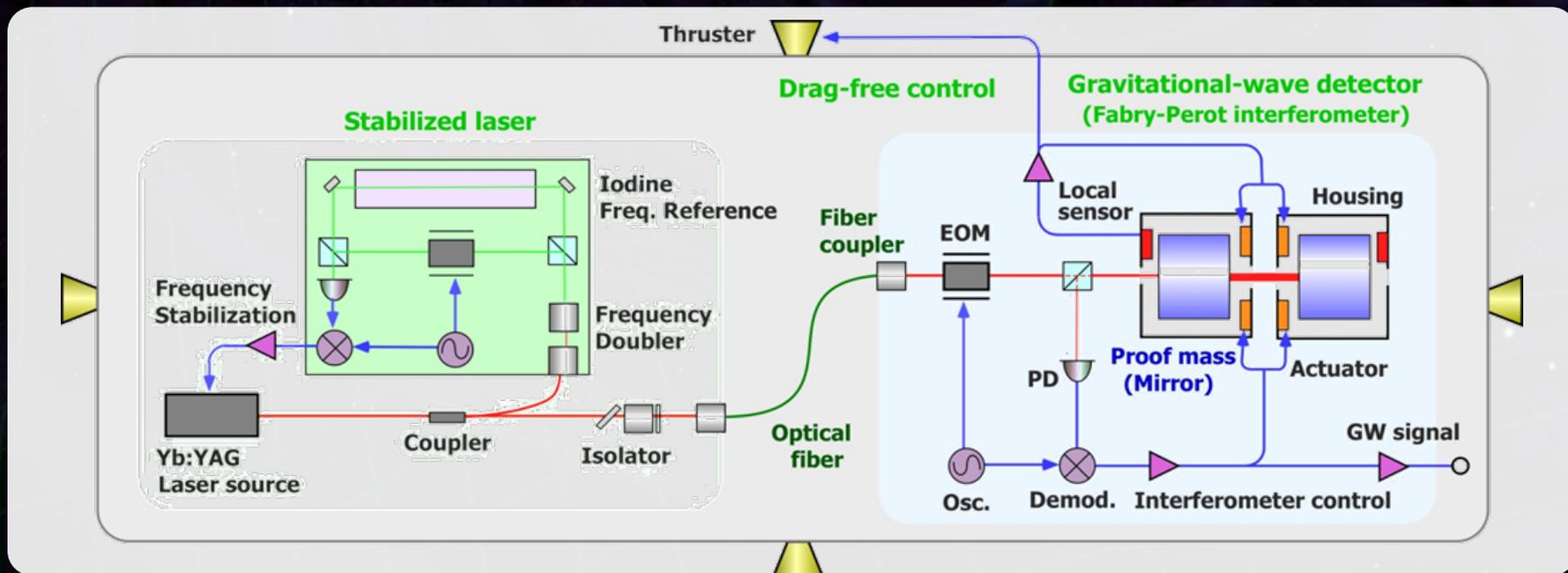
衛星概要と開発状況

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

DPFシステム概要

DPF Payload

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

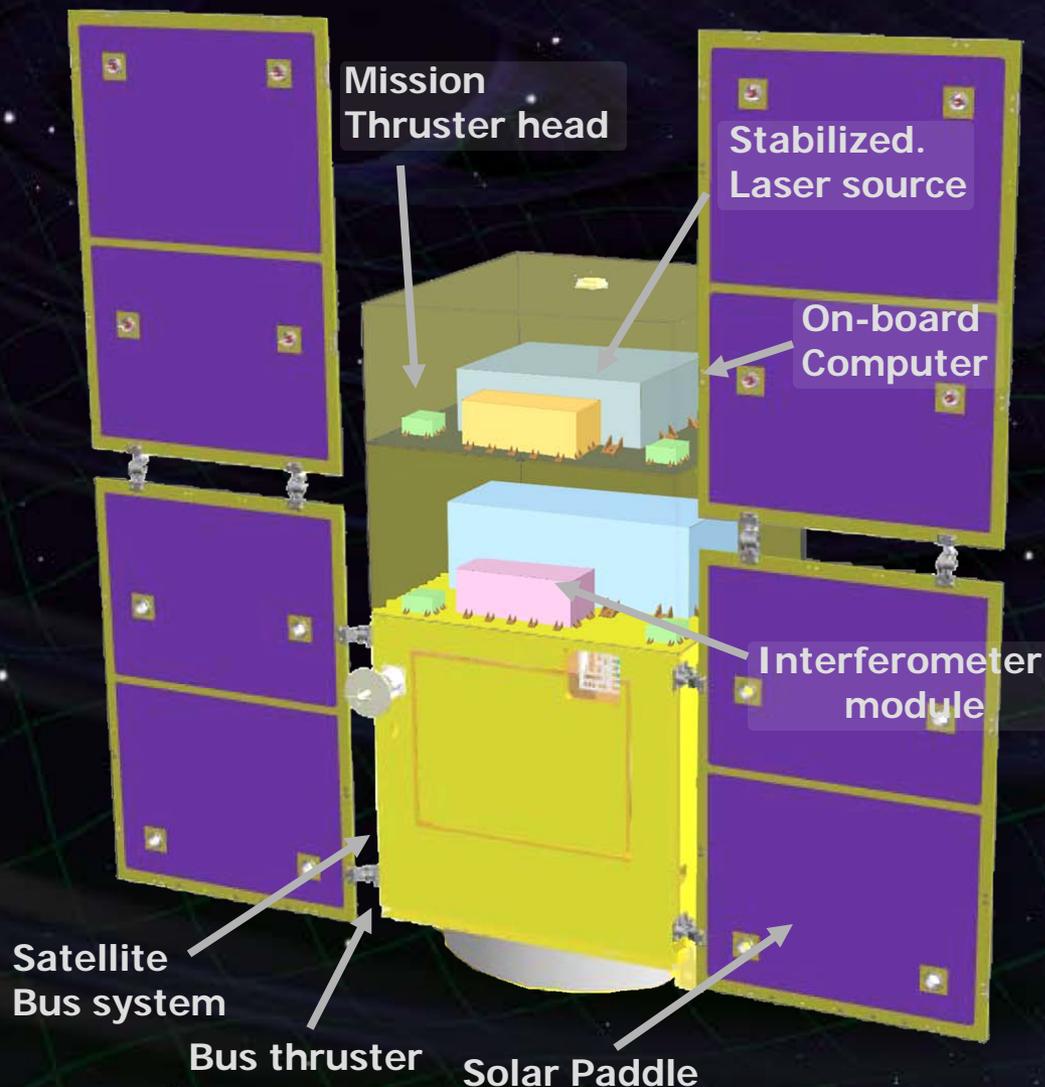
Power Supply
SpW Comm.



Satellite Bus

('Standard bus' system)

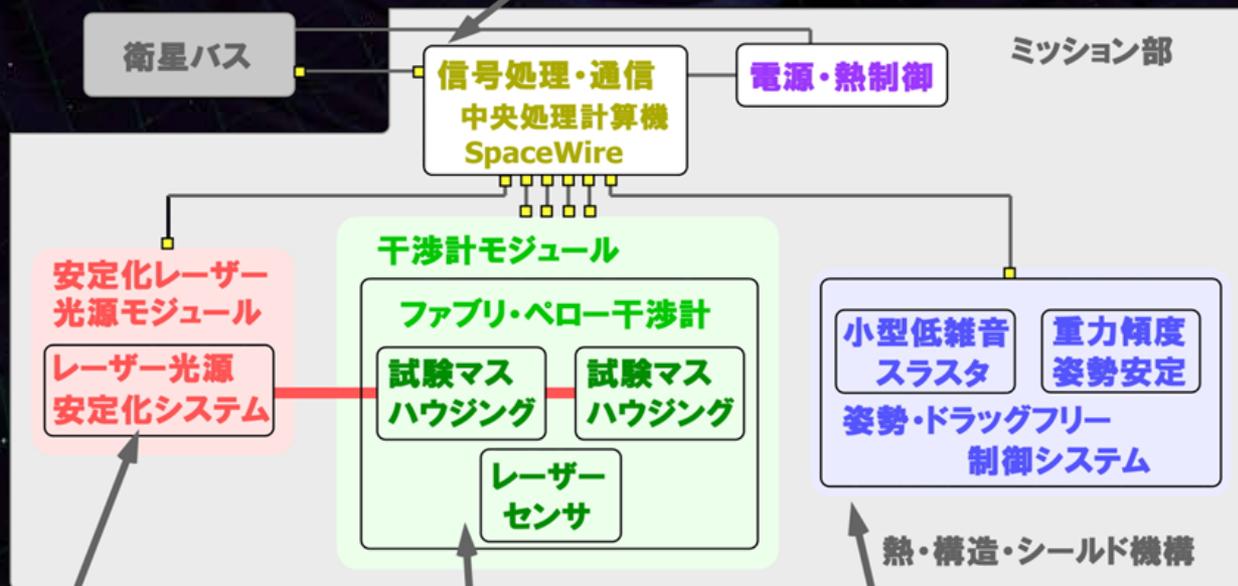
Size :
950x950x1100mm
Weight : 200kg
SAP : 960W
Battery: 50AH
Downlink : 2Mbps
DR: 1GByte
3N Thrusters x 4



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

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
 137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

干渉計モジュール

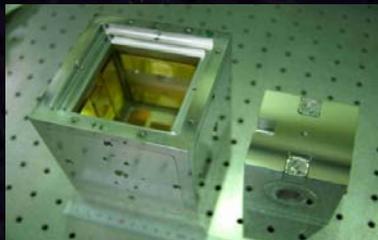
レーザー干渉計：試験マス + 干渉計 + センサ

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
- 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



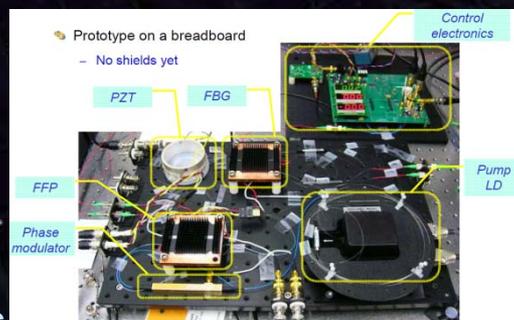
安定化レーザー光源

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.

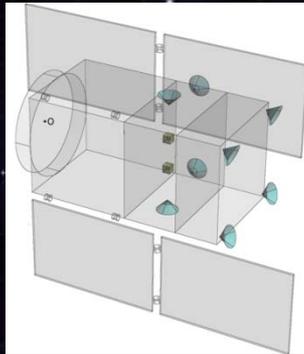
電通大, NICT



安定化
レーザー光源

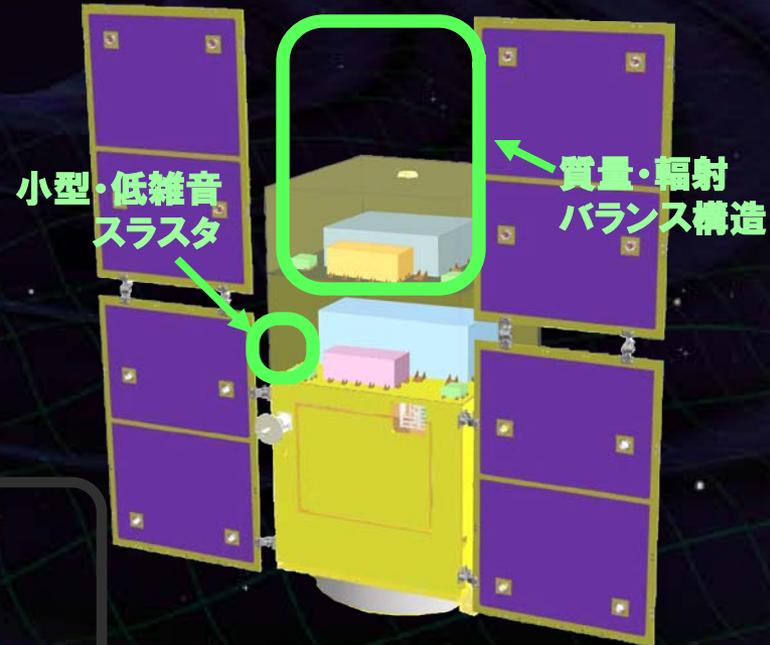
姿勢・ドラッグフリー制御：衛星構造検討，制御則，ミッションスラスタ

衛星構成，熱・構造検討



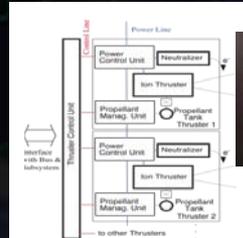
- Passive attitude stability
- Drag-free control

東大, JAXA



Low-noise Thruster

→ Actuators for satellite control

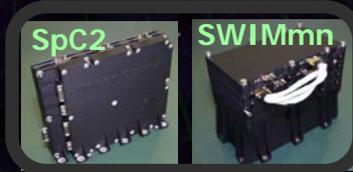


- BBM and system design

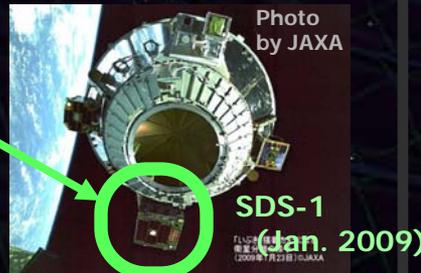
JAXA, 東海大, 防衛大

信号処理・制御システム : SpWベースの信号処理システム

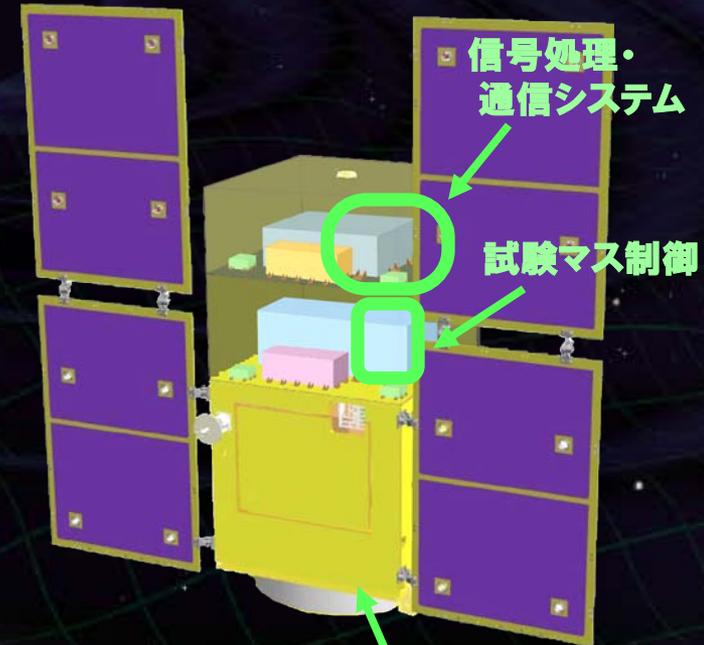
SpC2 + SpW信号処理システム
→ SDS-1/SWIMによる宇宙実証



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 ~10mA

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

Graphs showing feedback signals over time (0 to 20 seconds):
- z Error [mm]
- z Feedback [V]
- Yaw Error [deg]
- Yaw Feedback [V]

JAXA, 東大, 京大

小型科学衛星シリーズ

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 (~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

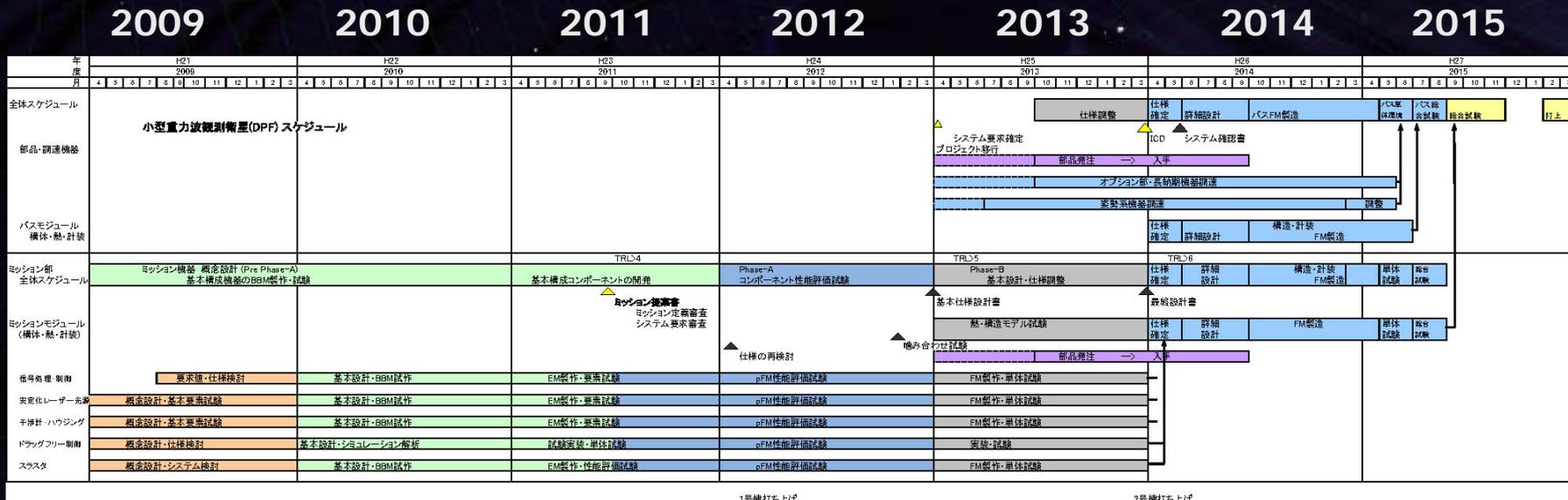


小型科学衛星1号機 SPRINT-A/EXCEED



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

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

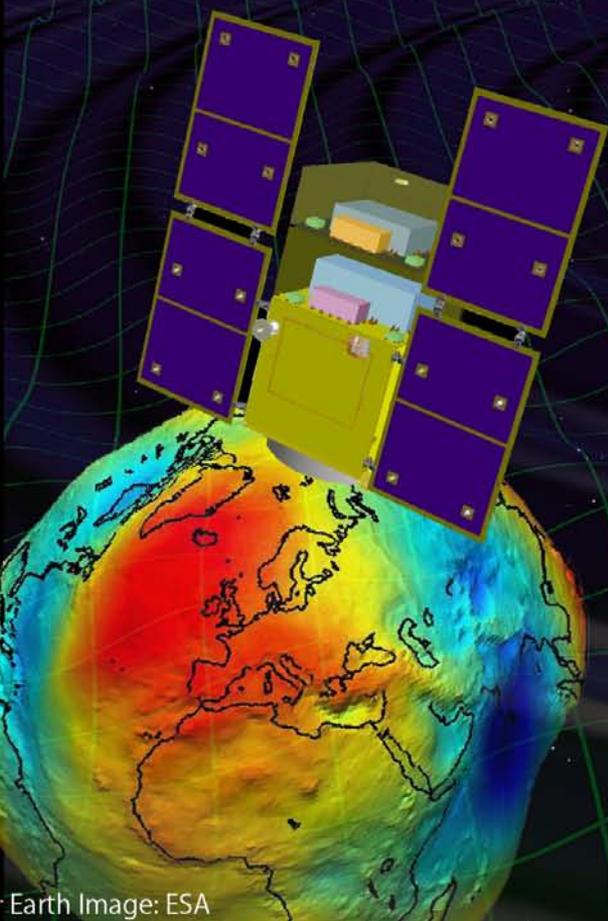
先端科学技術の確立

→ 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

Earth Image: ESA



Earth Image: ESA

終わり