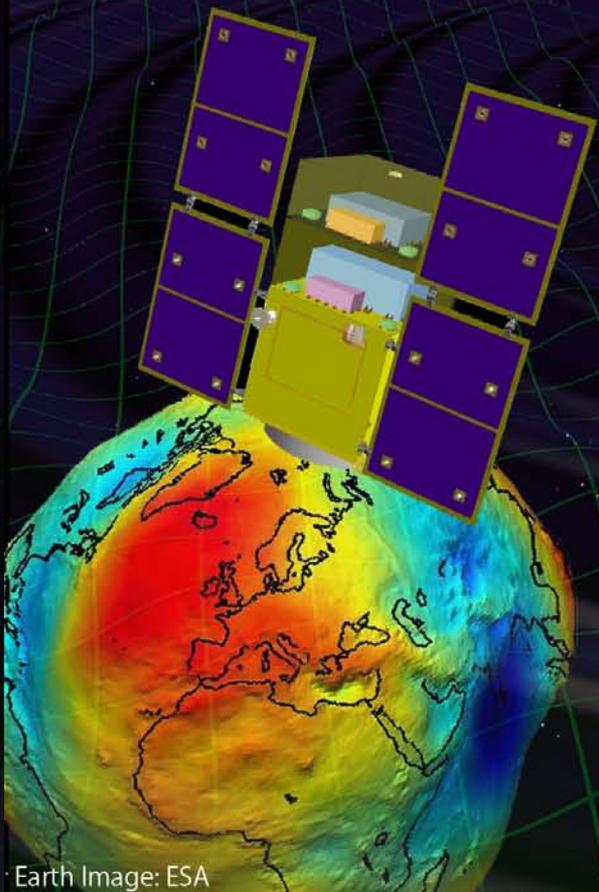


小型重力波観測衛星DPF (DECIGOパスファインダー)



Original
Picture : Sora



Earth Image: ESA

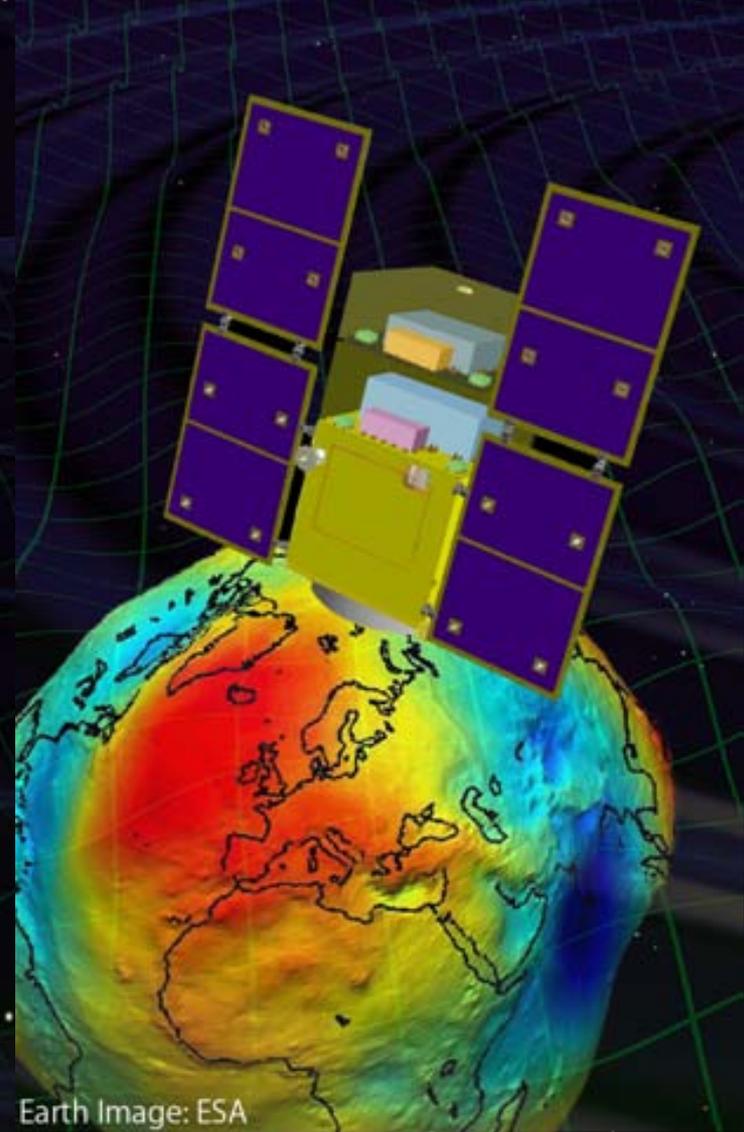
安東 正樹 (京都大学 理学研究科)

DECIGO/DPF collaboration

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



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。

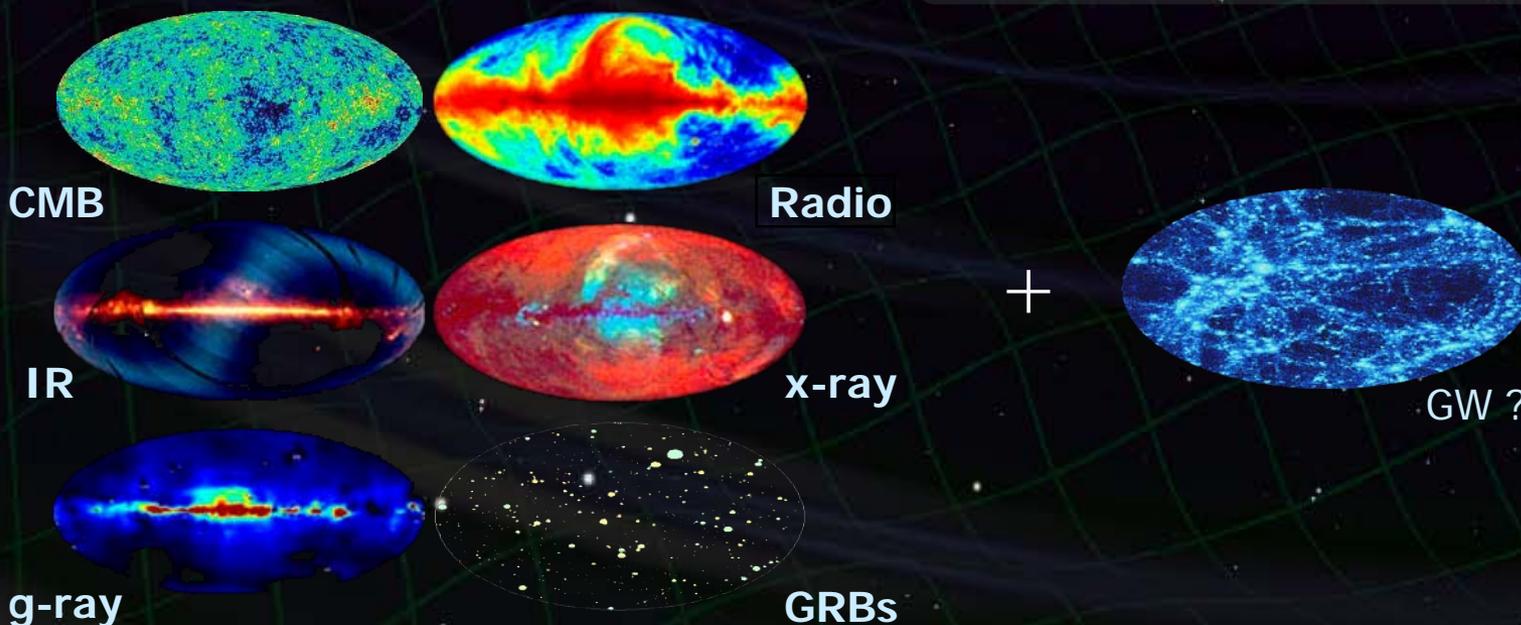
重力波の特徴

質量の加速度運動により生成
物質に対して強い透過力

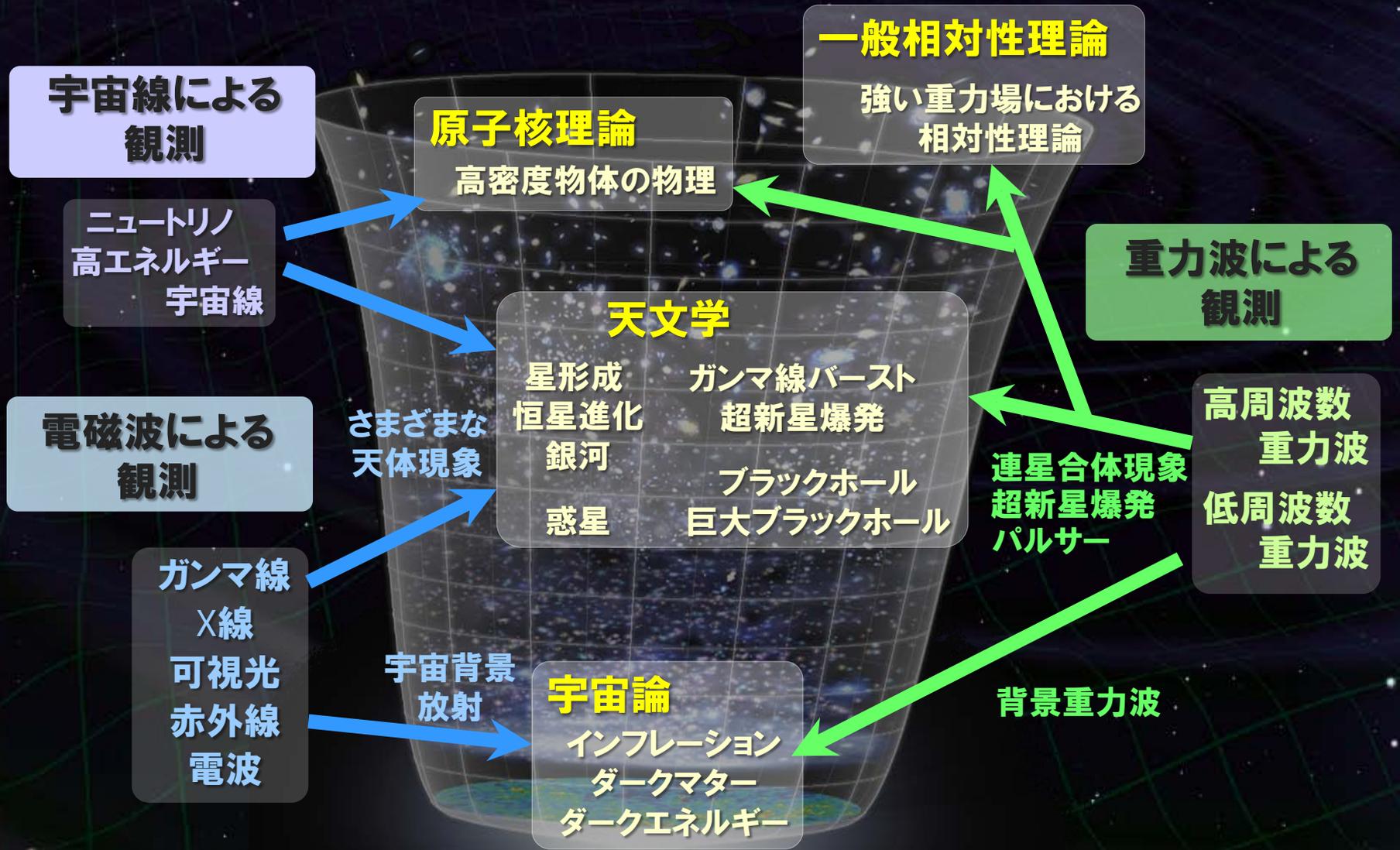


宇宙を観測する新しい手段

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

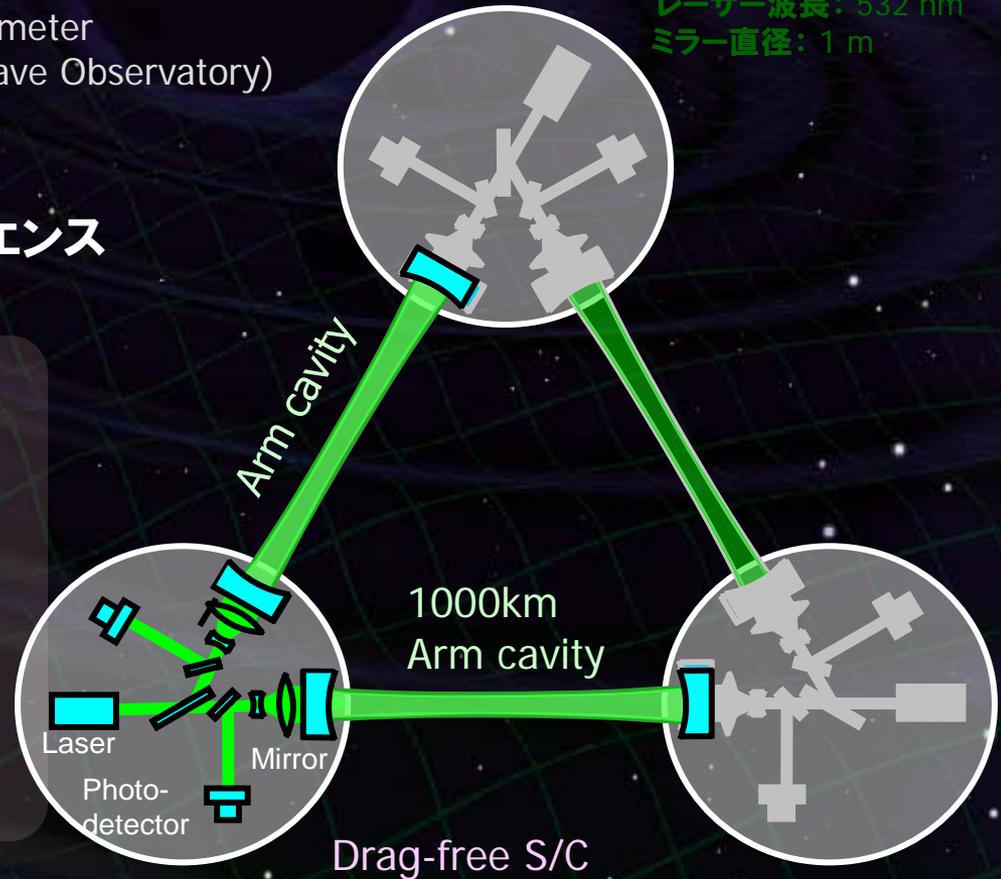
ダークエネルギーの性質

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

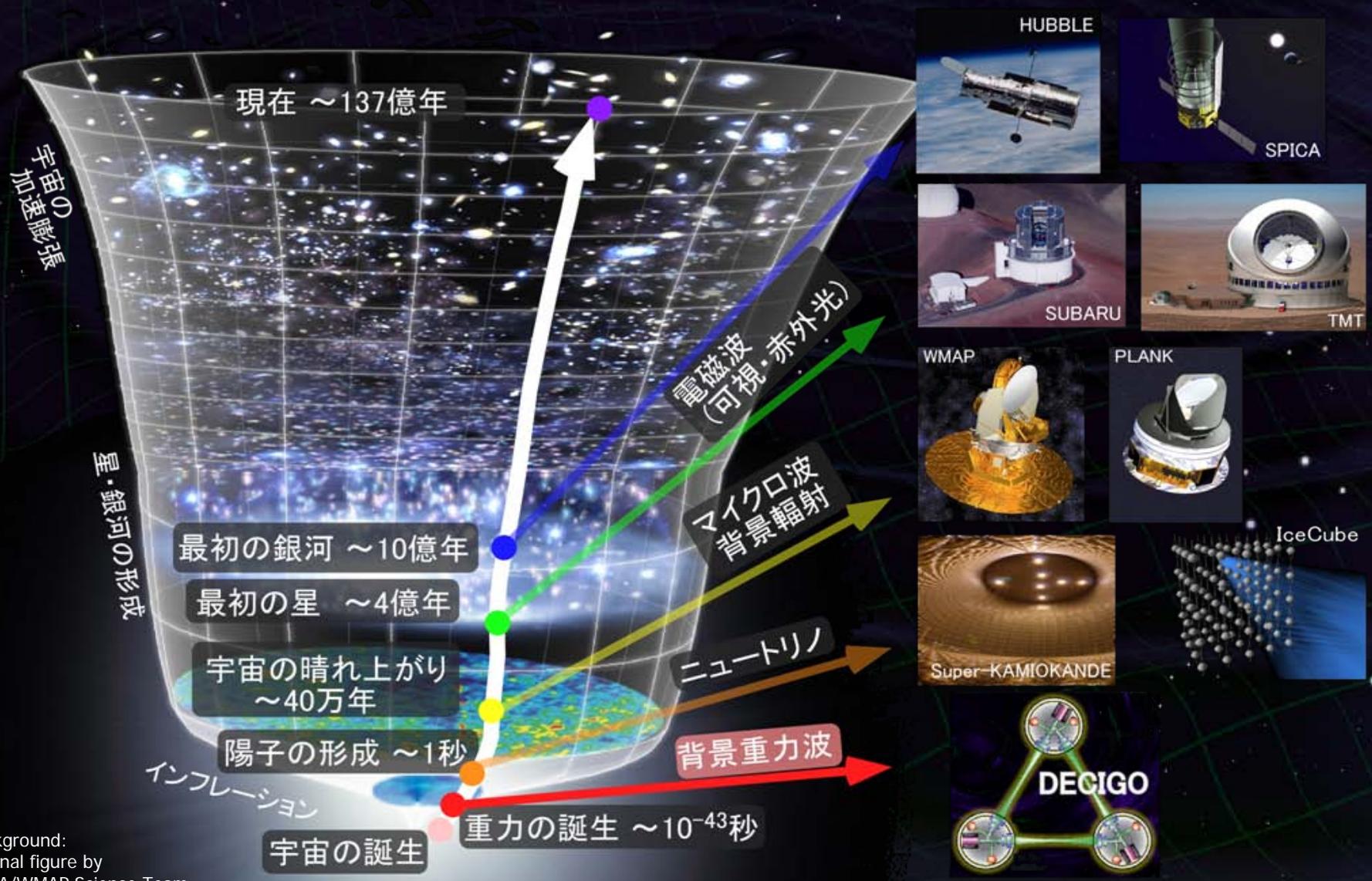
非接触保持された鏡間距離を

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

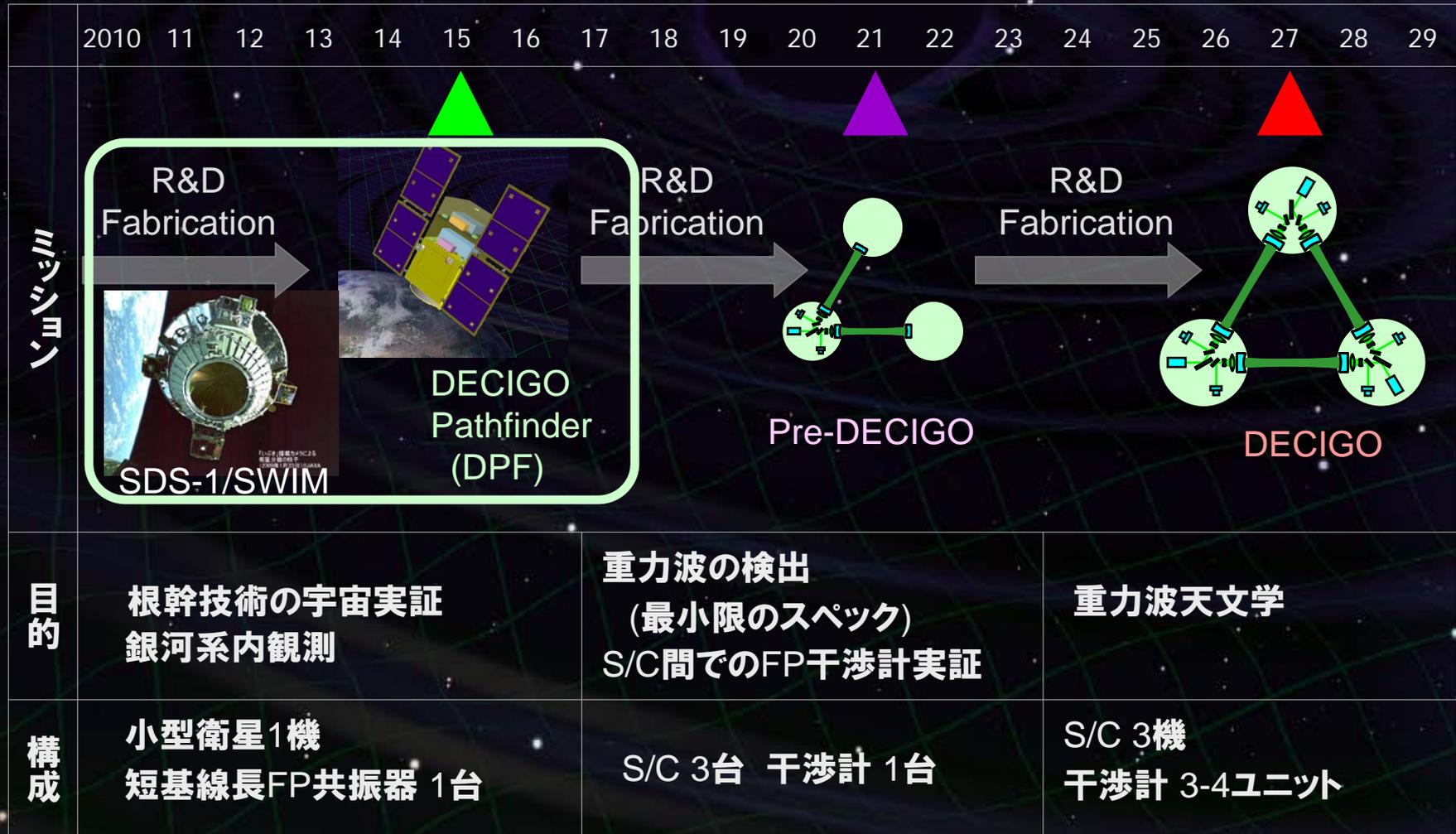


Background:
original figure by
NASA/WMAP Science Team

DECIGOのロードマップ



Figure: S.Kawamura





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)

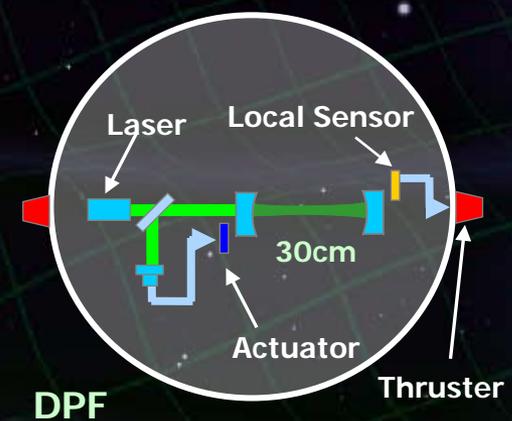
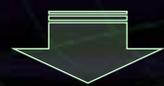
DECIGOのための最初の前哨衛星

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

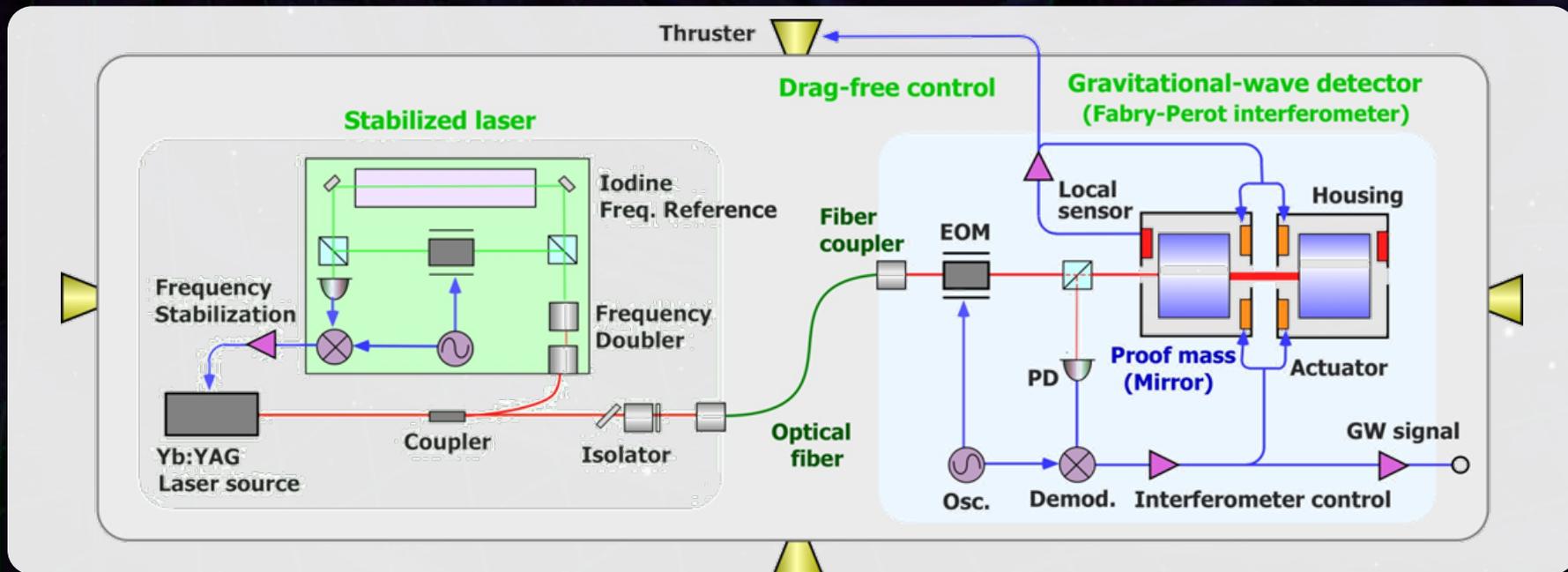
レーザー干渉計, 安定化レーザー光源,
ドラッグフリーシステム、データ取得と解析

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



6×10^{-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

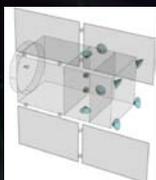


0.5 Hz/Hz^{1/2}
の周波数安定度

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

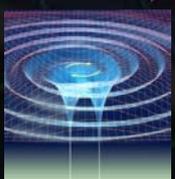


衛星変動安定度
 10^{-9} m/Hz^{1/2}

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

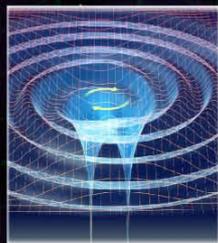


DPFの科学的意義

DPFの目指す科学的成果

宇宙・地球の観測

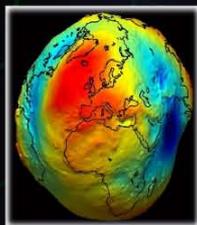
重力波観測



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。

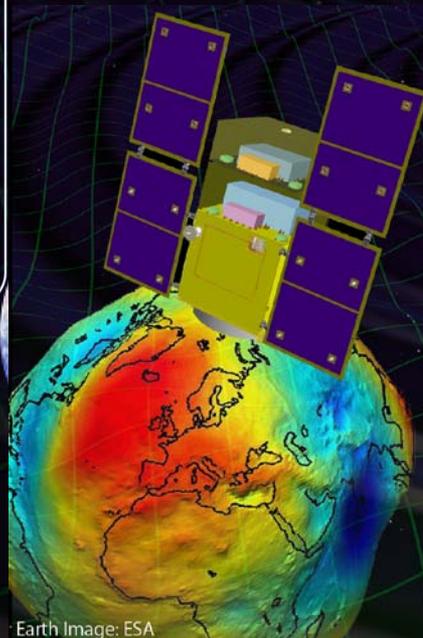
⇒ 銀河形成への知見

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。

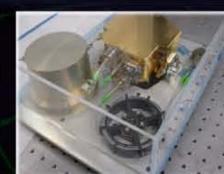
⇒ 地球環境モニタ



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)

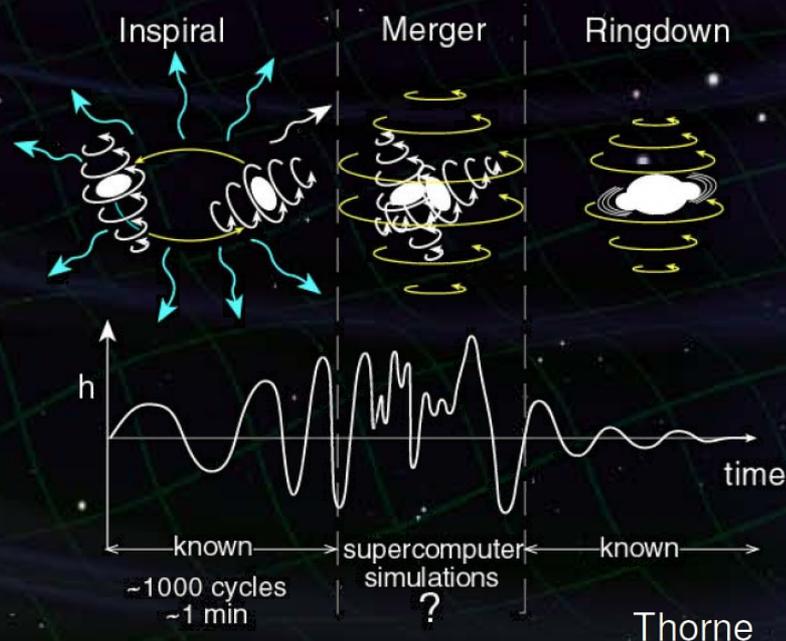
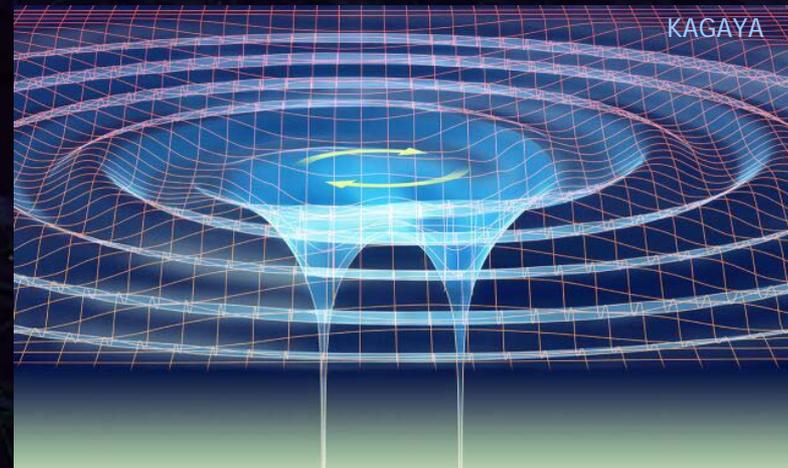
中間質量ブラックホール
(質量 $10^3 - 4 \times 10^5 M_{\text{sun}}$) が対象

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

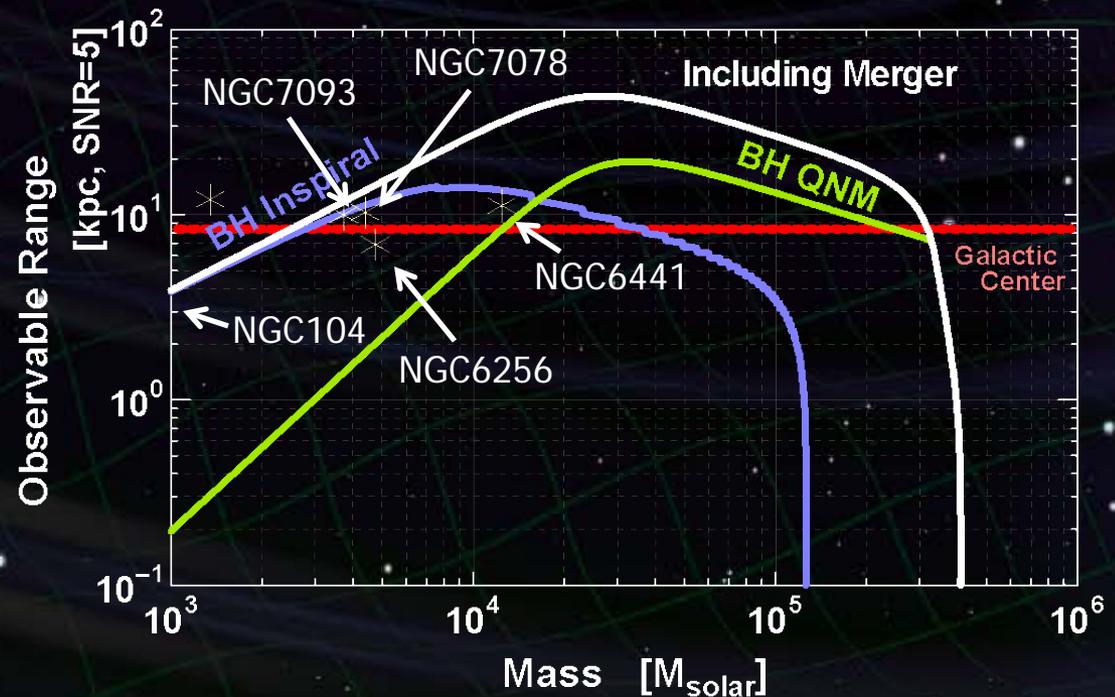
Globular clusters known
to have black holes

Credit: NASA, STScI

M15

Our Sun

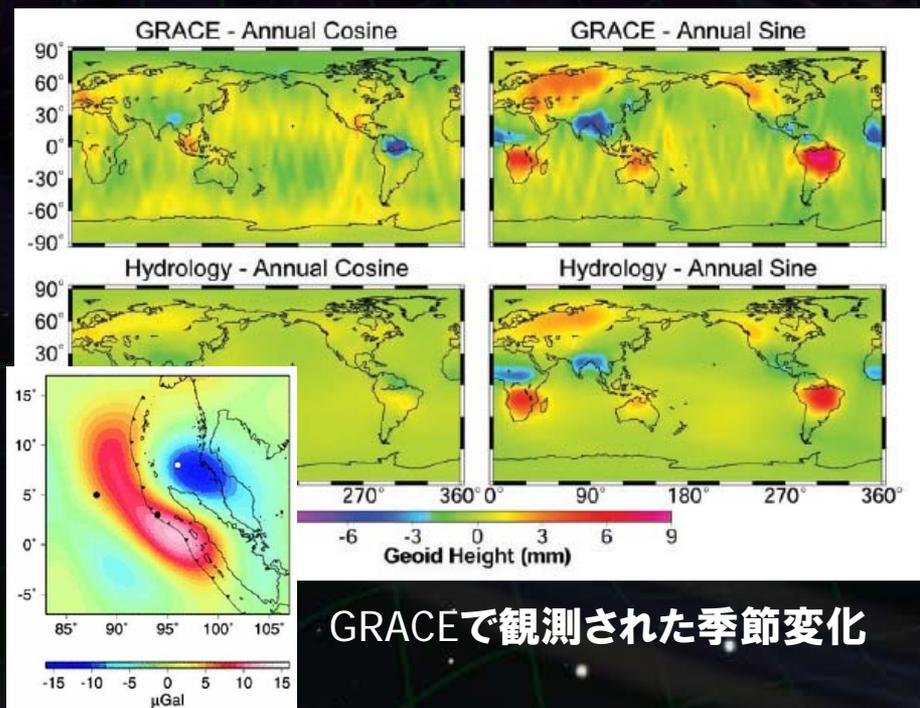
Milky Way Galaxy
(artist's concept)



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

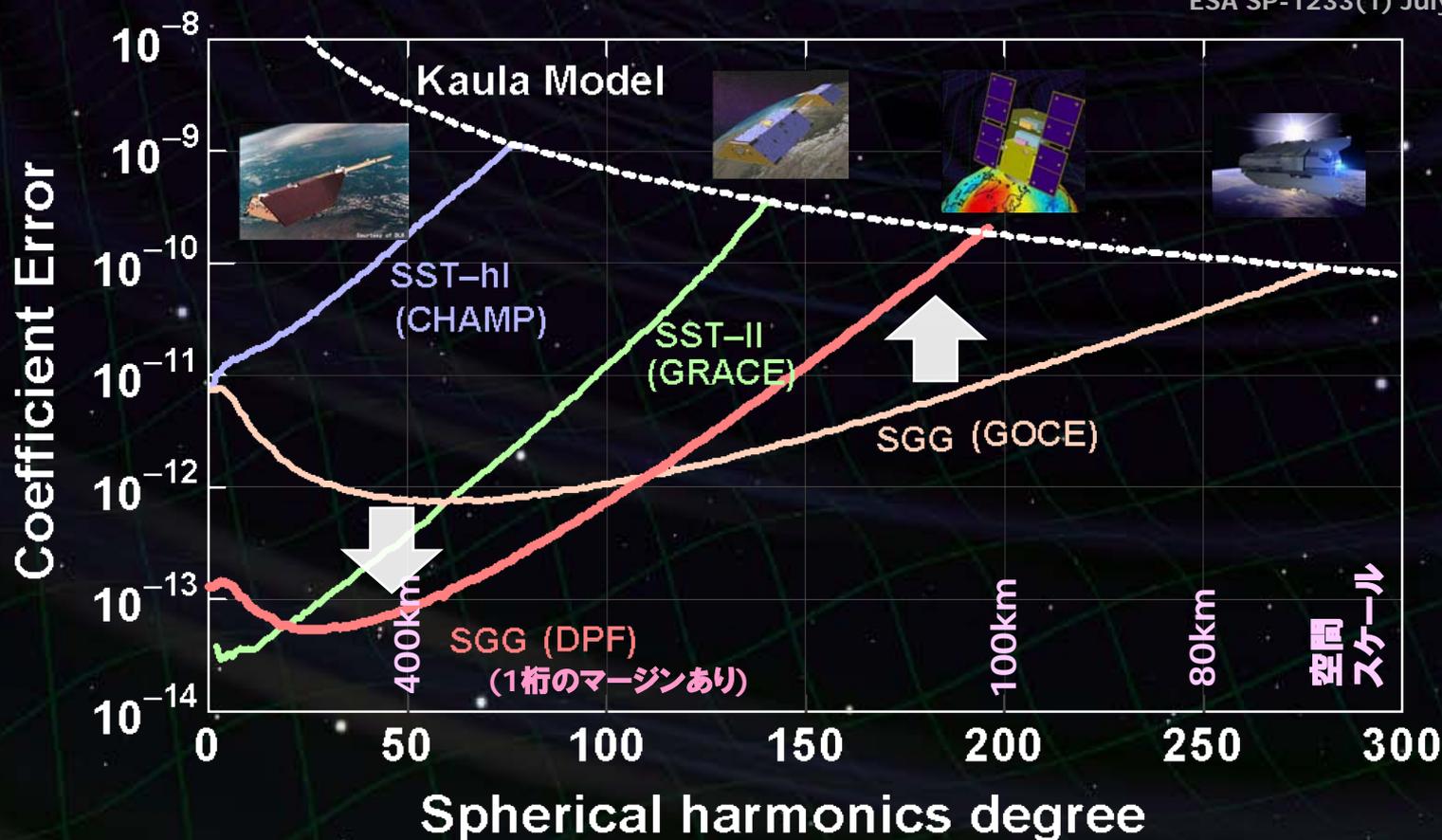
地殻変動の検知・予測

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)

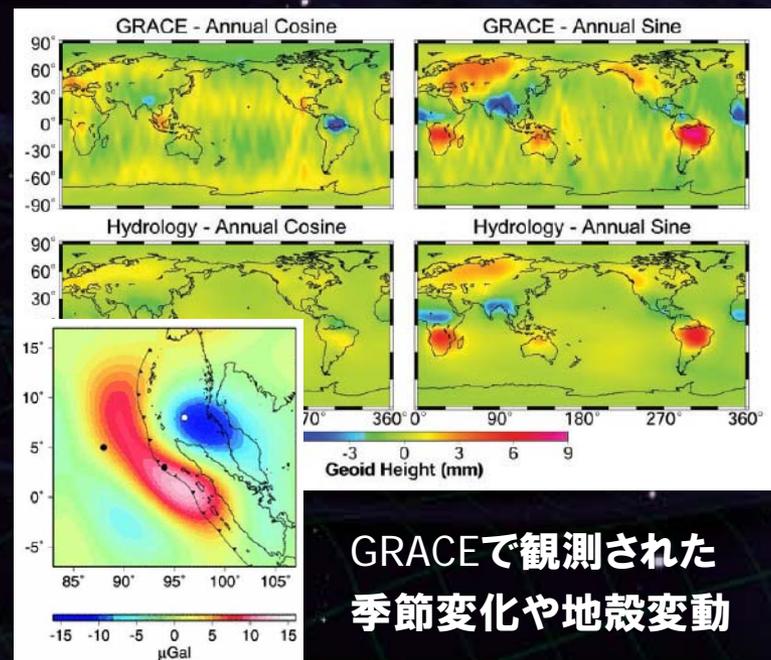
⇒ 2012年頃には運用寿命を迎える見込み

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

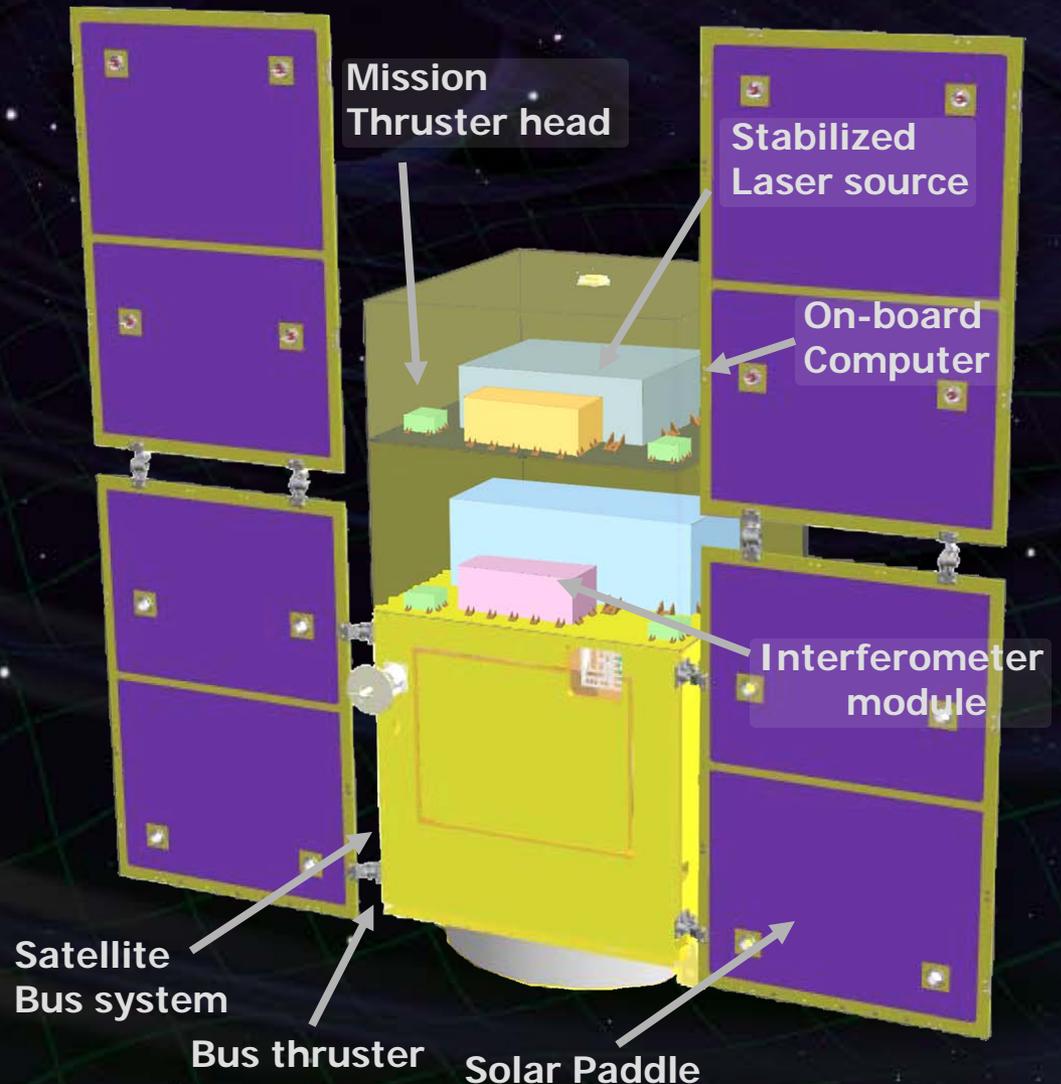
Power Supply
SpW Comm.



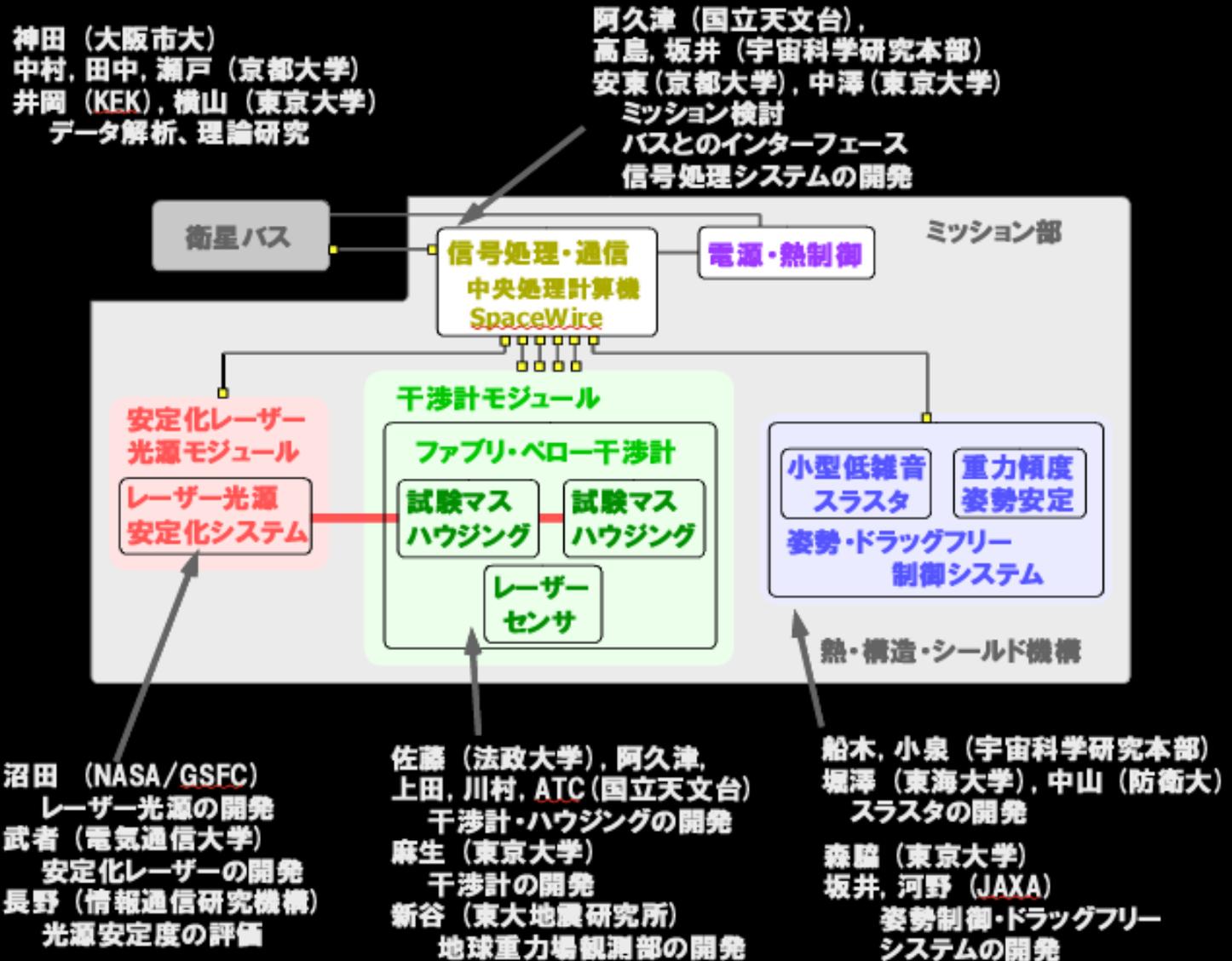
Satellite Bus

('Standard bus' system)

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



推進体制



DPF-WG
 84名
 DECIGO
 137名

干渉計モジュール

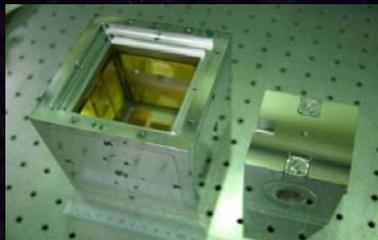
レーザー干渉計：試験マス + 干渉計 + センサ

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
- 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



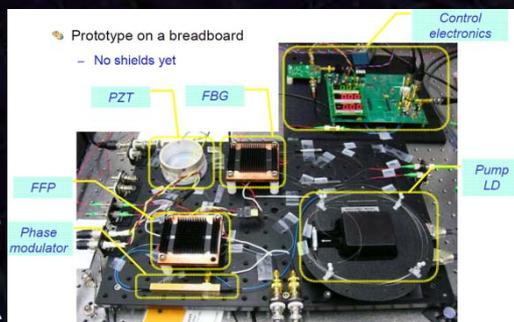
安定化レーザー光源

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

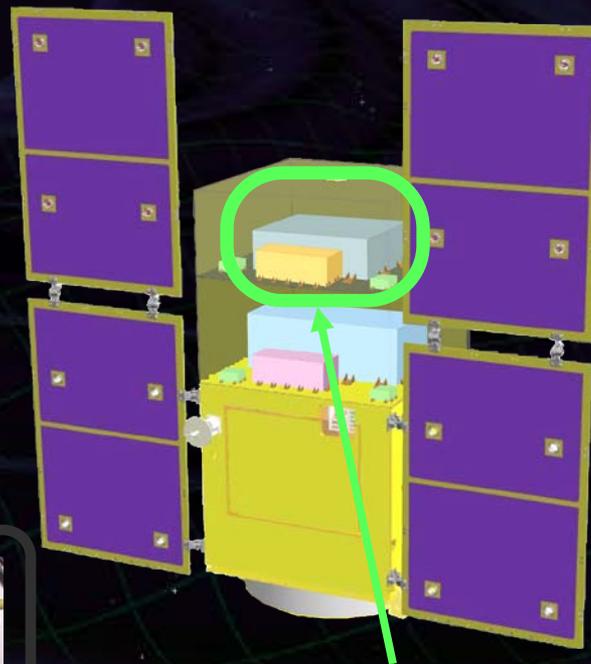
電通大, NASA/GSFC



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.

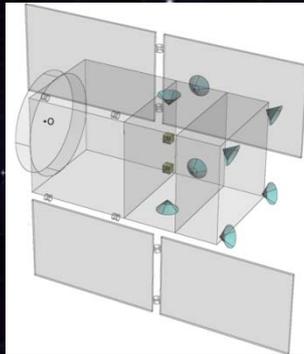
電通大, NICT



姿勢・ドラッグフリー制御

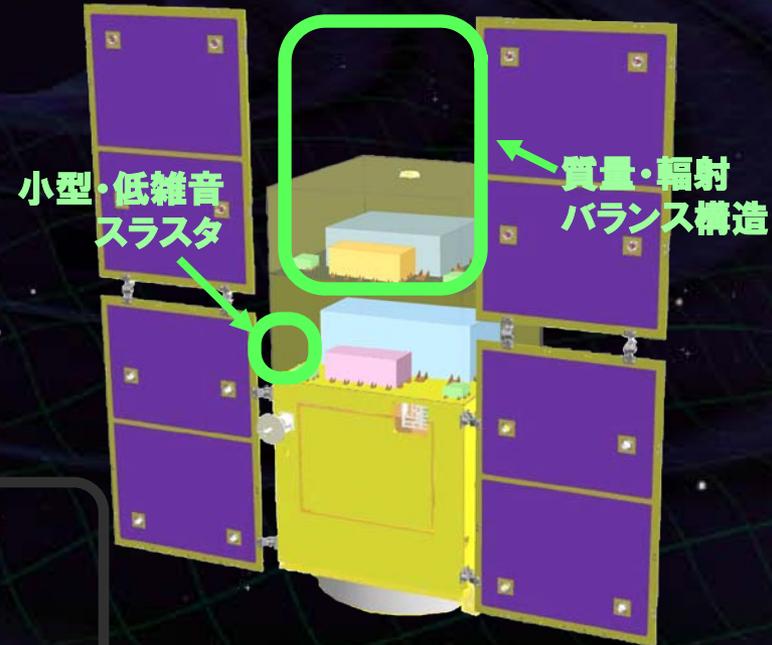
姿勢・ドラッグフリー制御：衛星構造検討，制御則，ミッションスラスタ

衛星構成，熱・構造検討



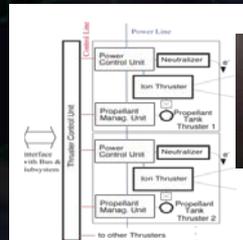
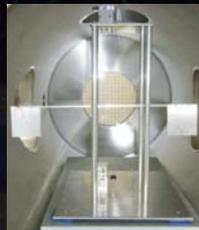
- Passive attitude stability
- Drag-free control

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

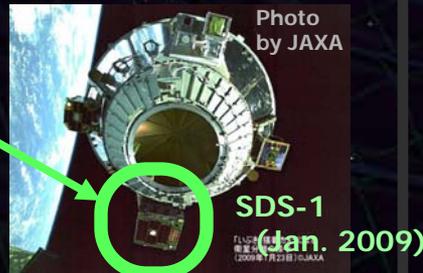
信号処理・制御システム

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



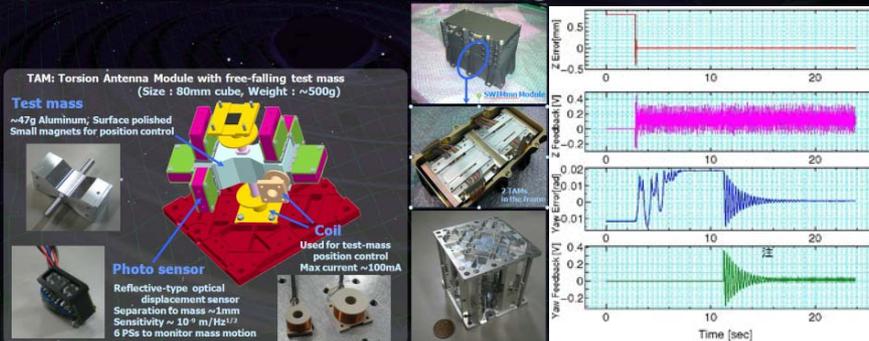
Space demonstration
by SDS-1/SWIM



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

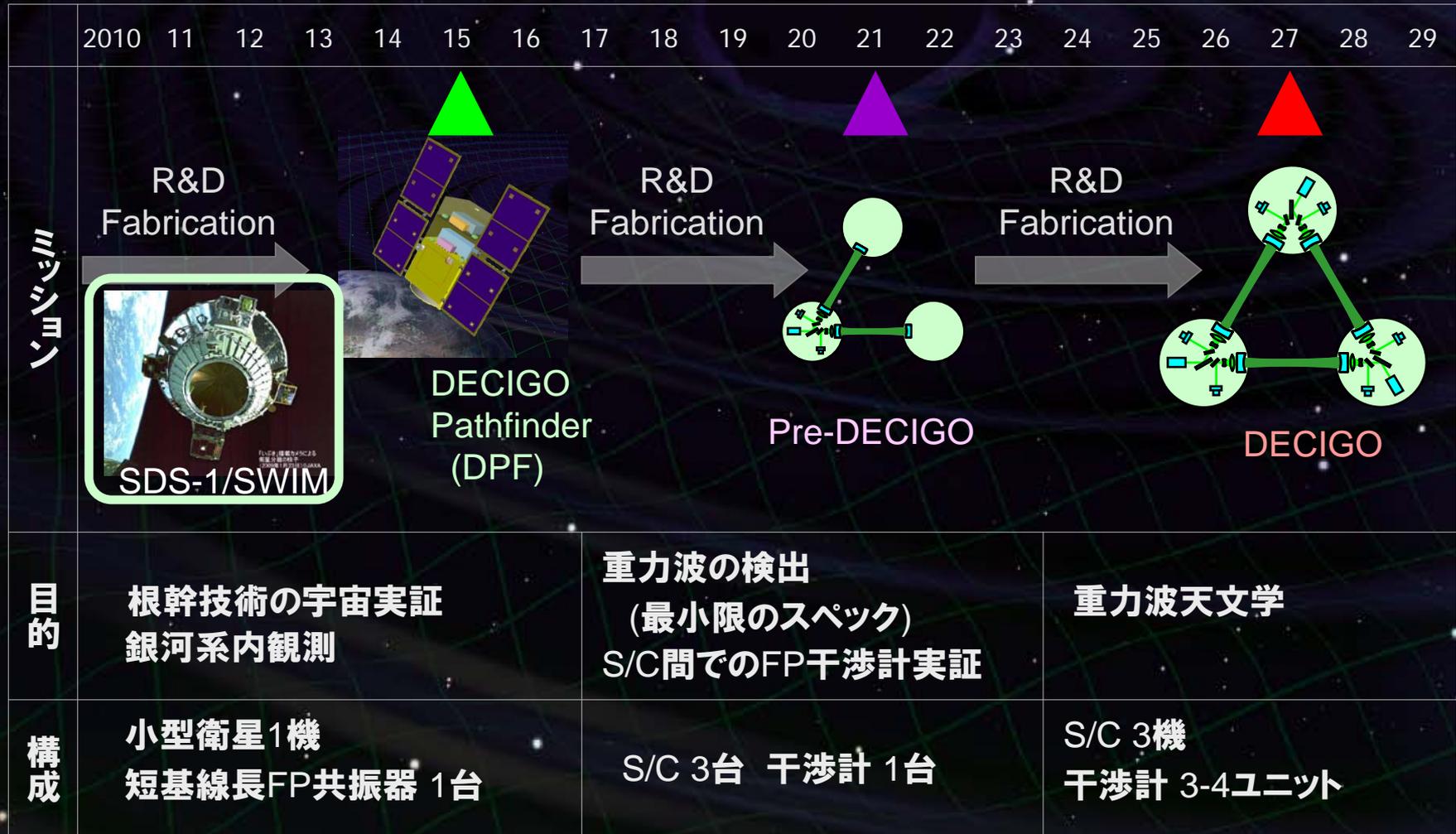


SWIMによる宇宙実証

DECIGOのロードマップ



Figure: S.Kawamura



SWIMによる宇宙実証



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

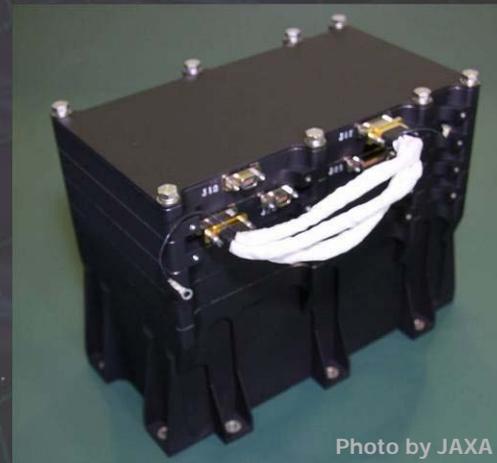


Photo by JAXA

SDS-1 Bus System

Power +28V
RS422 for CMD/TLM
GPS signal

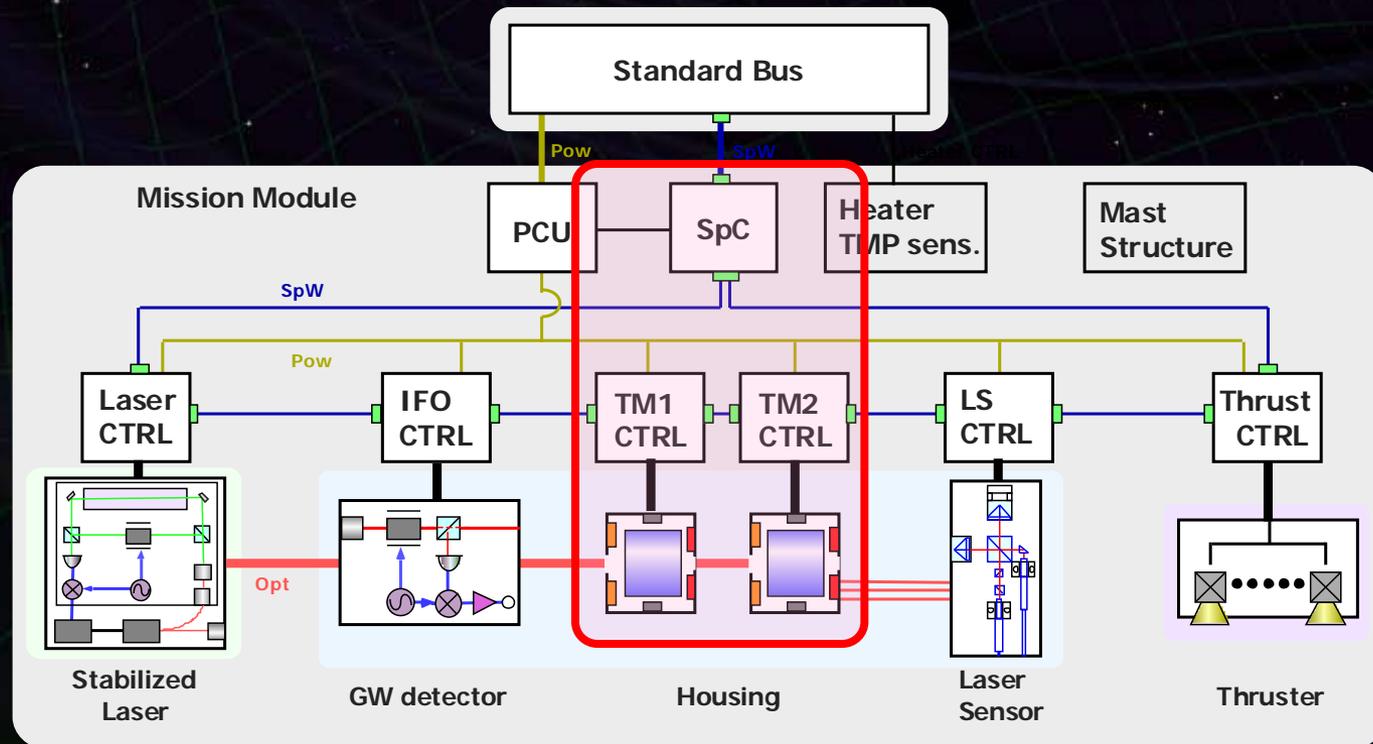
Power ±15V, +5V
SpW x2 for CMD/TLM

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)



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

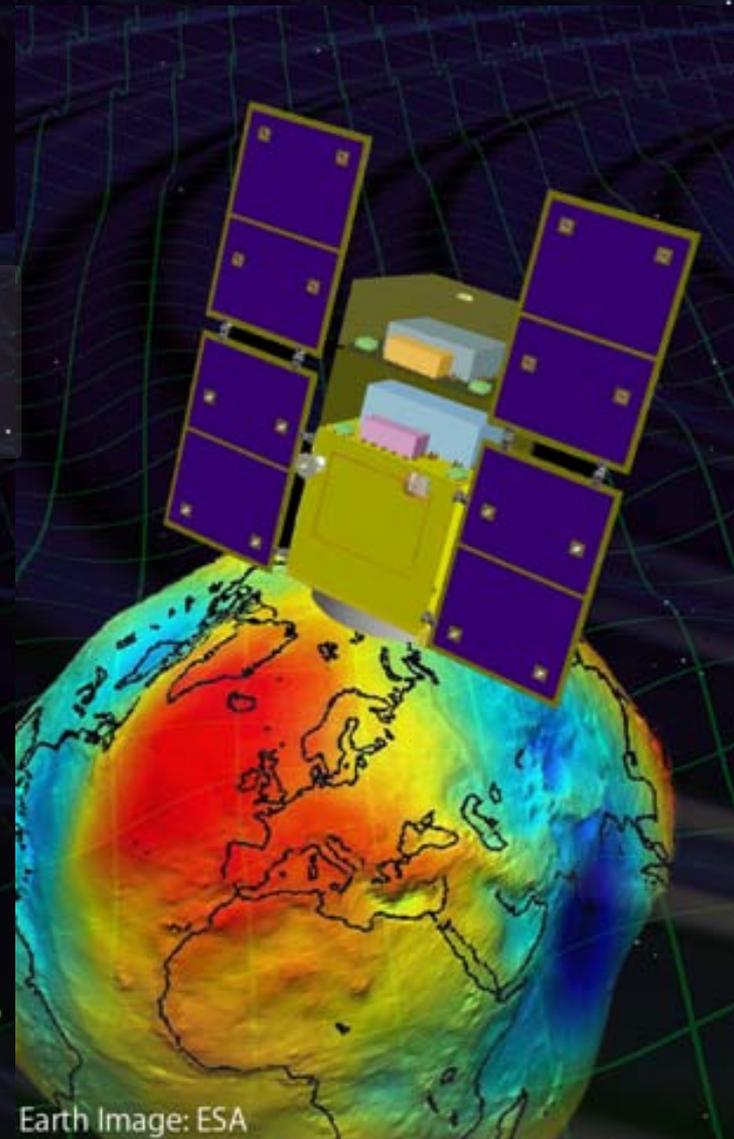
→ 銀河の成り立ち, 地球環境モニタ

先端科学技術の確立

→ 無重力環境利用の新しい可能性

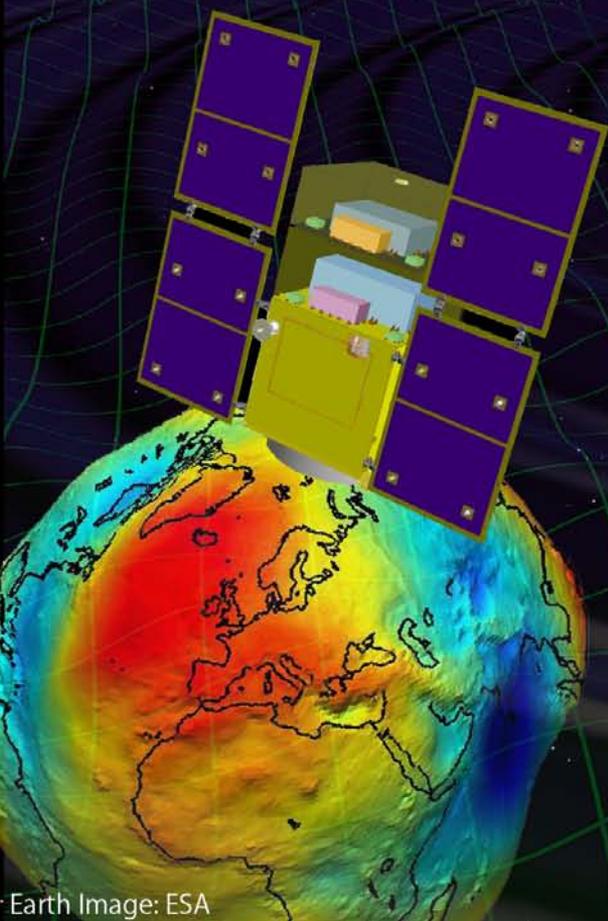
BBM試作・試験が進行中

SDS-1/SWIMによる宇宙実証



関連ポスター講演

- P2 SDS-1/SWIM搭載超小型重力波検出器の運用とデータ解析 穀山 渉
- P3 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 渉
- P4 DECIGO Pathfinderの信号取得系の開発 阿久津 智忠
- P5 DECIGO Pathfinderの試験マス制御系の開発 陳 たん
- P6 DECIGO Pathfinder向けプロトタイプ干渉計実験 道村 唯太
- P7 DECIGO Pathfinder (DPF)のための干渉計モジュールの開発 佐藤 修一
- P8 DECIGO Pathfinderにおける地球重力場観測の感度評価 正田 亜矢香



Earth Image: ESA

終わり