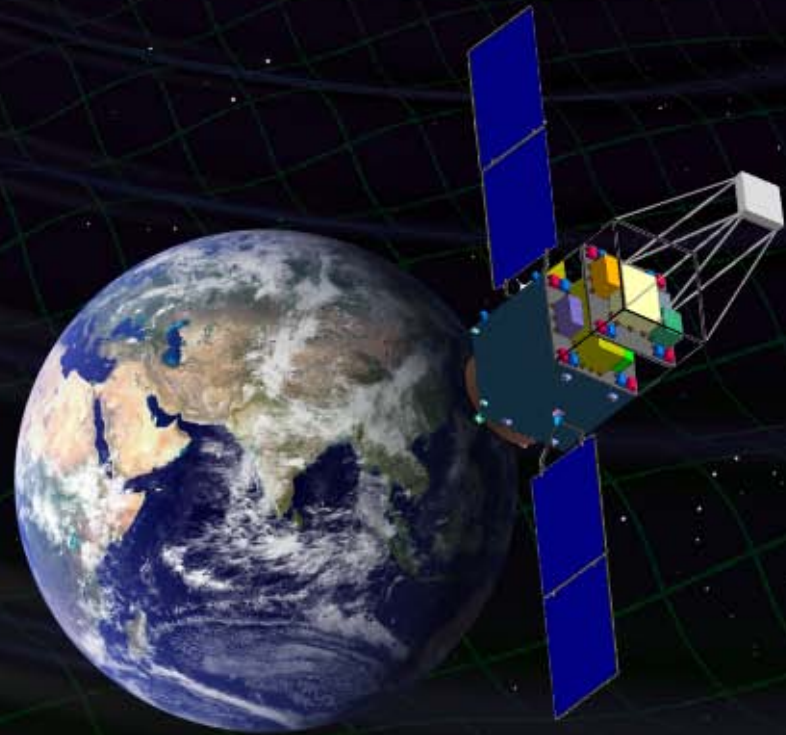


DECIGOパスファインダー (DPF)

安東正樹
京都大学
大学院理学研究科



講演内容

1. DPF概要
2. 科学的成果
3. プロジェクトの現状
4. この検討会の目的
5. まとめ

- 
- **1. DPF概要**
- 2. 科学的成果**
- 3. プロジェクトの現状**
- 4. この検討会の目的**
- 5. まとめ**

DECIGO-PF

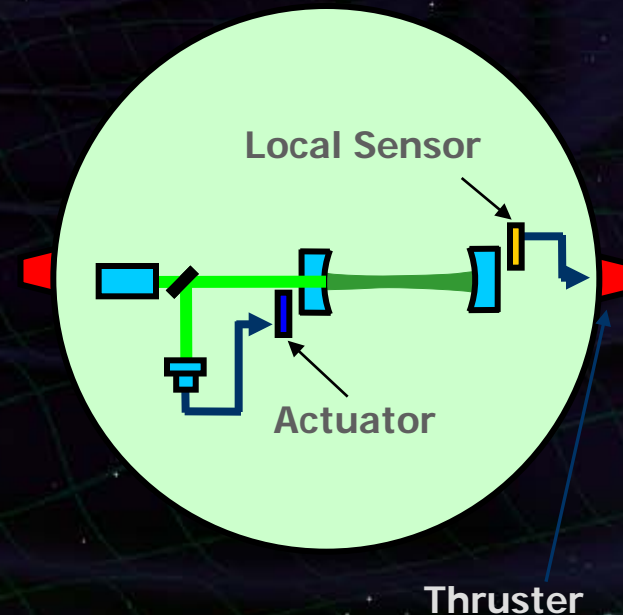
DECIGOパスファインダー (DPF)

宇宙重力波望遠鏡DECIGOのための最初の前哨衛星

DECIGOなどのための**科学技術の確立**

宇宙・地球の観測

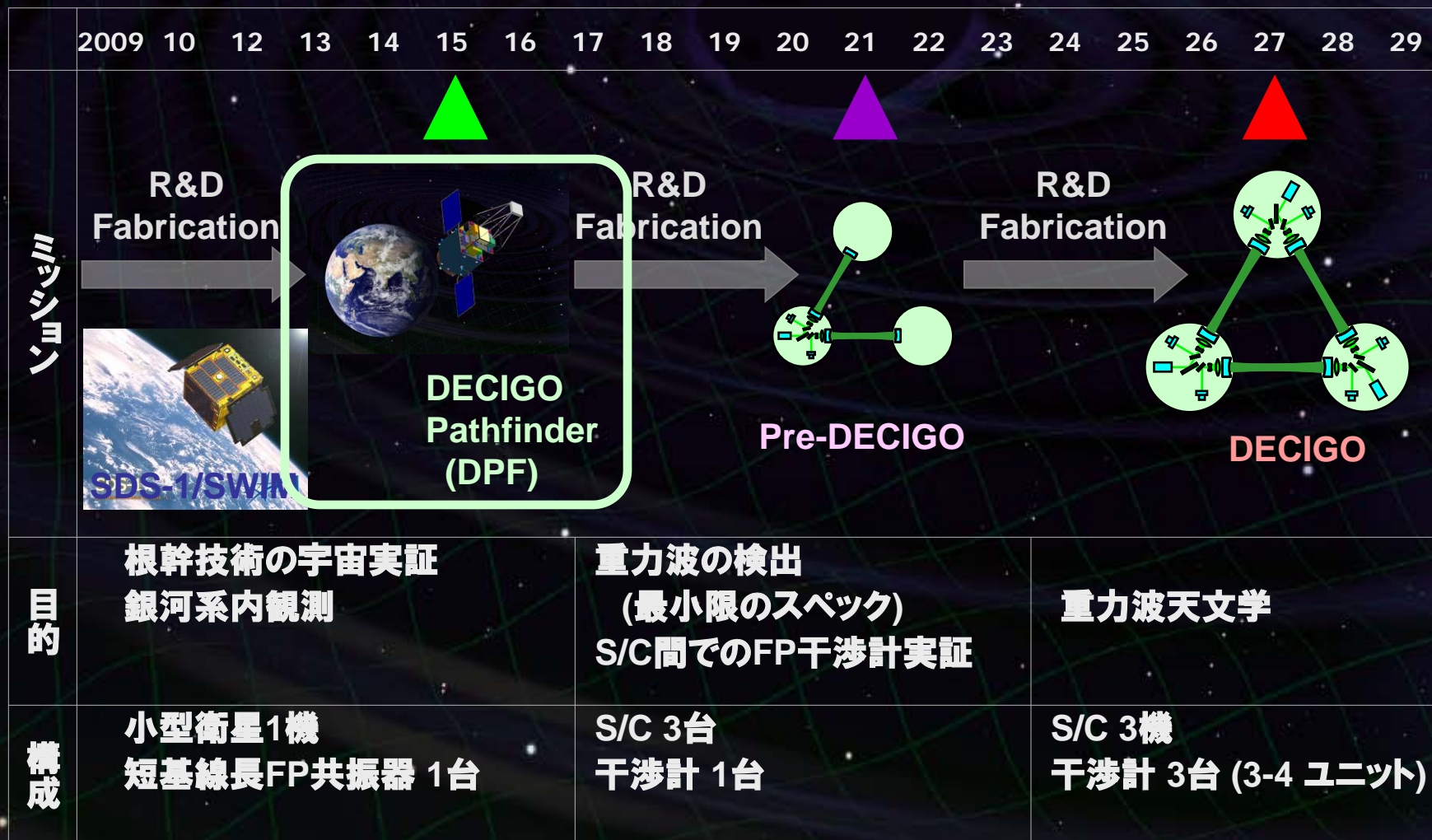
小型衛星 1 機 (95cm立方x2, 350kg)
地球周回軌道 (高度 500km, 太陽同期軌道)
フリーマス x2 → 基線長30cmのFP共振器
レーザー光源とその安定化システム
ドラッグ・フリーの組み込み



小型科学衛星3号機 (~2015年)を目指す

DECIGOのロードマップ

Figure: S.Kawamura



DPF衛星概要

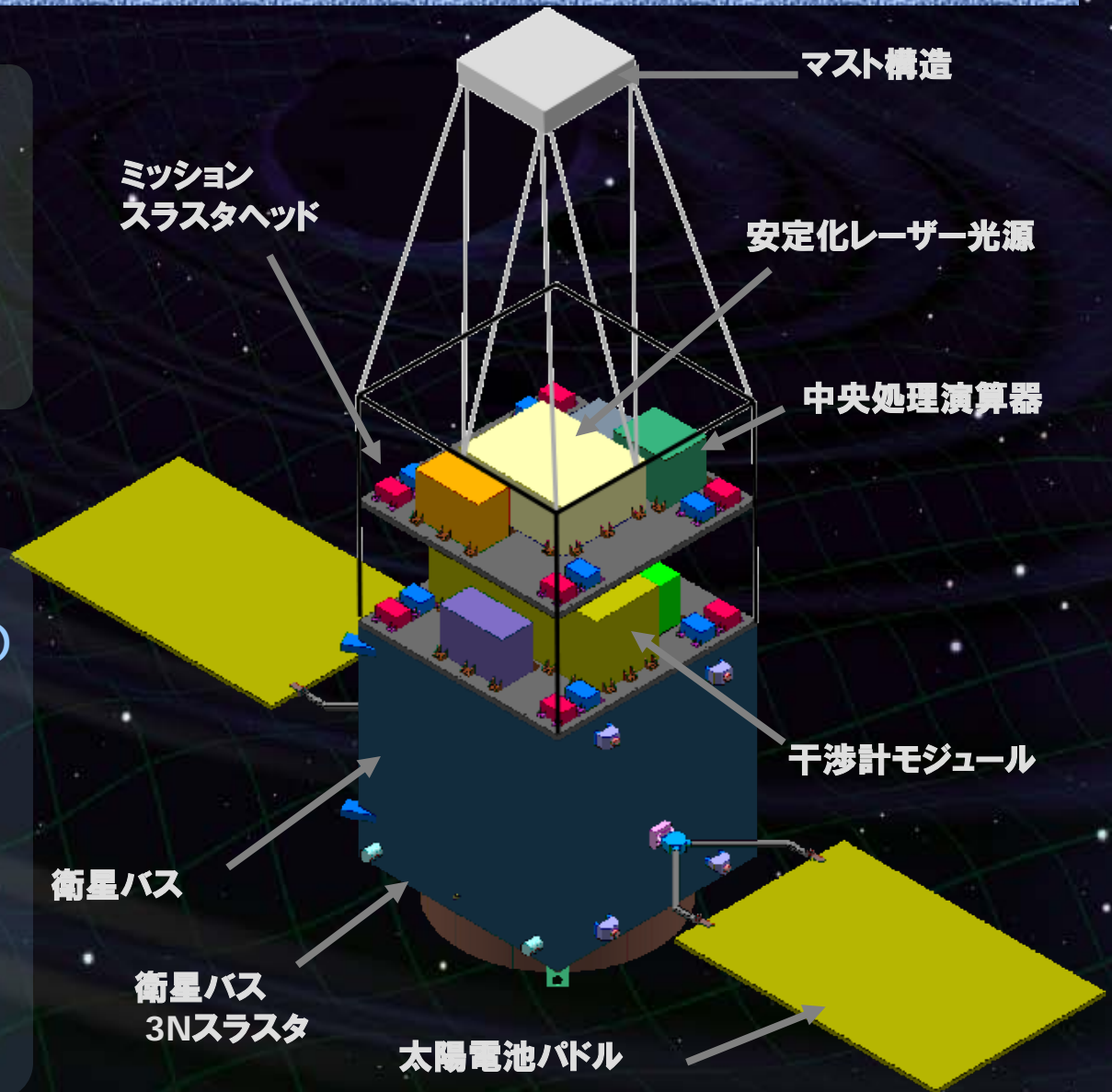
DPF Payload

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

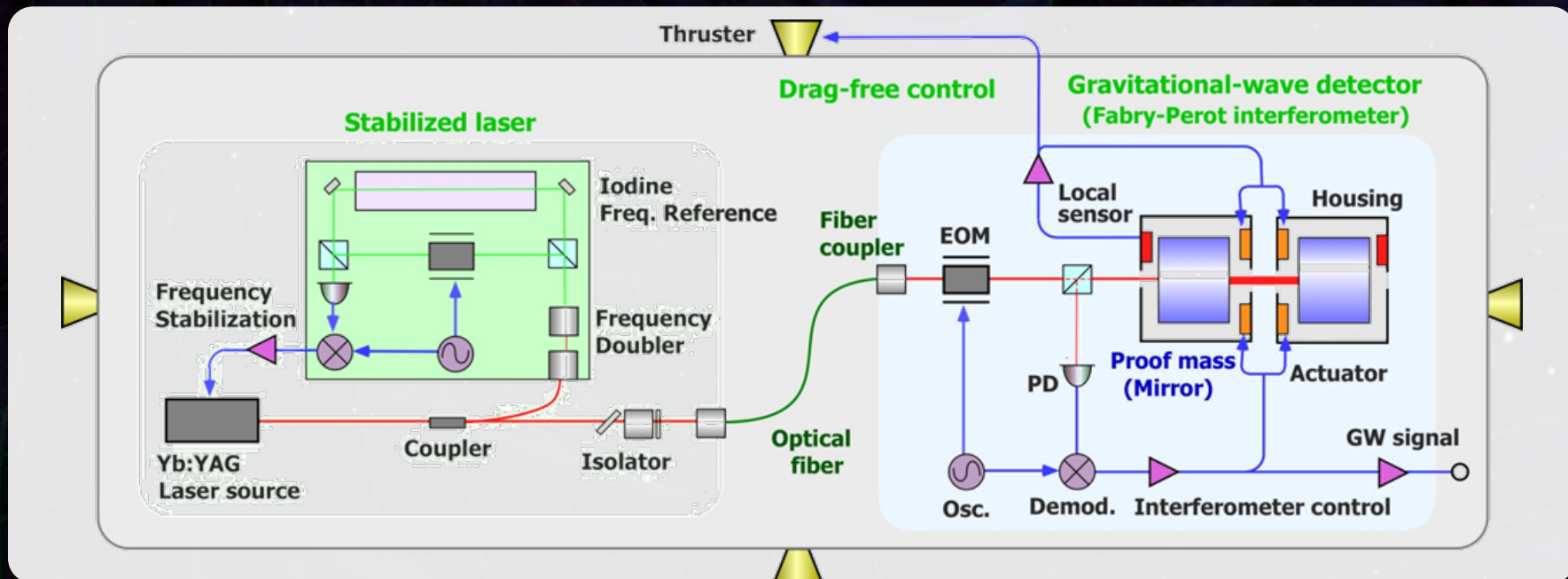


DPFミッション機器構成

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



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

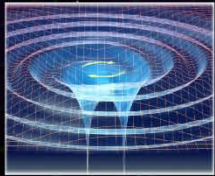
フィネス : 100
基線長 : 30cm
テストマス : 質量 数kg
PDH法により信号取得・制御

1. DPF概要
- 2. 科学的成果
3. プロジェクトの現状
4. この検討会の目的
5. まとめ

DPFが目指す科学的成果

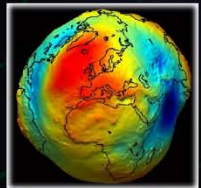
宇宙・地球の観測

重力波観測

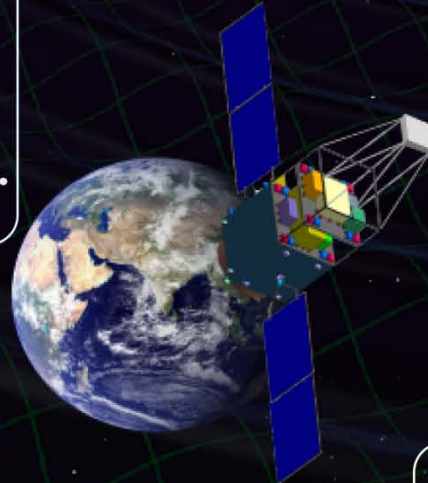


銀河中心付近の中間質量ブラックホールの合体や振動現象を観測。

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。



科学技術の確立

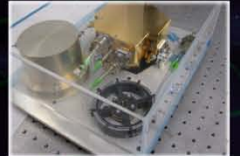
宇宙干渉計による精密計測

宇宙空間におけるファブリ・ペロー干渉計の動作と精密計測の実証。



安定化レーザー光源の実現

宇宙において高い周波数安定度を持つレーザー光源の実現。



ドラッグフリー制御の実現

重力傾度による受動安定化と能動制御を併用した、ドラッグフリー制御の実現。

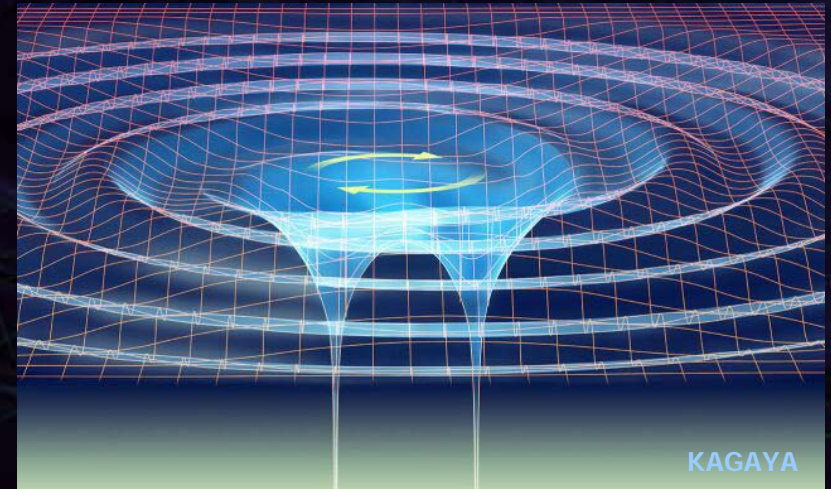


DPFの観測対象

我々の銀河中心付近の
ブラックホールに関連する現象

中間質量ブラックホール合体

$h \sim 10^{-15}$, $f \sim 4$ Hz
Distance 10kpc, $m = 10^3 M_{\text{sun}}$
観測時間(~数千秒)

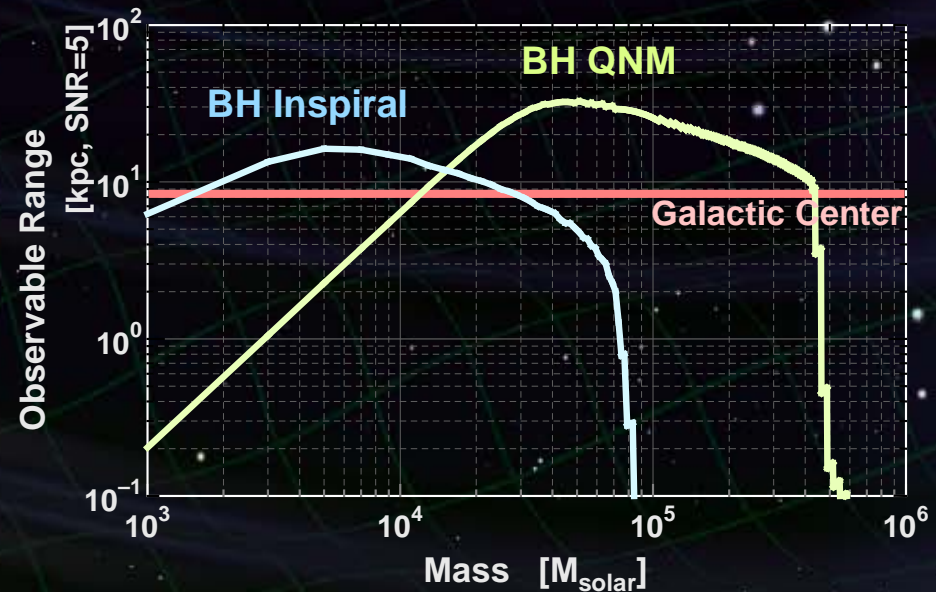


BH準固有振動からの重力波

$h \sim 10^{-15}$, $f \sim 0.3$ Hz
Distance 1Mpc, $m = 10^5 M_{\text{sun}}$

DPFの観測可能距離
~ 銀河中心をカバー (SNR>5)

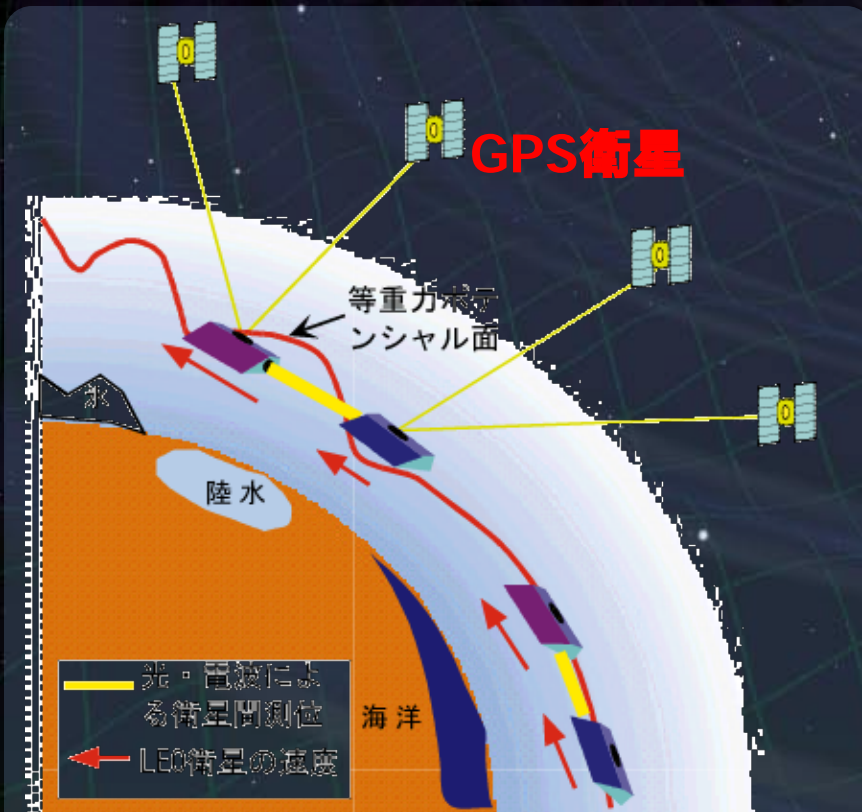
他の手段では観測が困難
→ これまでにない観測結果となる



地球重力場観測

人工衛星の軌道から地球重力ポテンシャルを検知

2つの観測モード: GPS受信機 + 加速度計, 重力勾配計



東京大学地震研・新谷氏、
京都大学・福田氏の資料/情報提供

GRACE, GOCEが稼働中

次世代計画 GRACE-FO

GRACEと同等 (マイクロ波測距)

GRACE

$L \sim 220\text{km}, \Delta L \sim 5\mu\text{m}$

$\rightarrow \Delta L/L \sim 2 \times 10^{-11}$

DPF

$L \sim 0.3\text{m}, \Delta L \sim 10^{-11}\text{m}$

$\rightarrow \Delta L/L \sim 3 \times 10^{-11}$

GRACEとGRACE-FOの間の期間

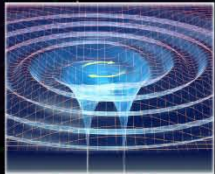
2012-16年を埋める可能性

\rightarrow 独自の成果, 国際貢献

DPFが目指す科学的成果

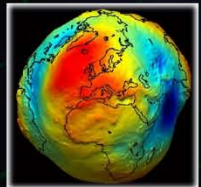
宇宙・地球の観測

重力波観測

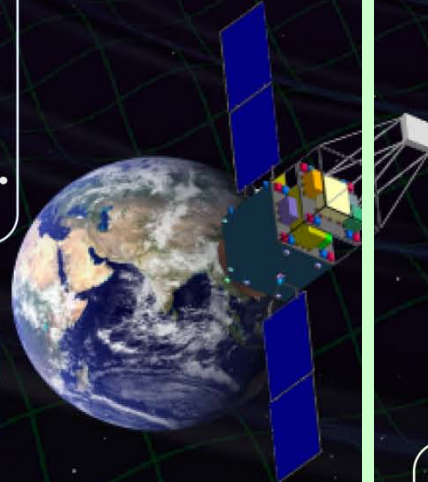


銀河中心付近の中間質量ブラックホールの合体や振動現象を観測。

地球重力場観測



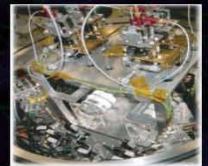
1mm程度のジオイド高分解能での地球重力場観測。



科学技術の確立

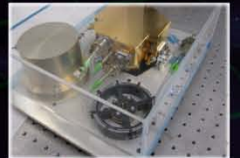
宇宙干渉計による精密計測

宇宙空間におけるファブリ・ペロー干渉計の動作と精密計測の実証。



安定化レーザー光源の実現

宇宙において高い周波数安定度を持つレーザー光源の実現。



ドラッグフリー制御の実現

重力傾度による受動安定化と能動制御を併用した、ドラッグフリー制御の実現。



宇宙干渉計による精密計測

背景

地上干渉計では豊富な実績
(10^{-19} m/Hz^{1/2}の変動測定)

宇宙では、FP干渉計は実現されていない
(LPFでは MZ干渉計を使用
 10^{-12} m/Hz^{1/2} 程度の変位感度)

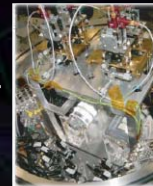
意義・波及効果

宇宙空間での精密計測技術
→ 基礎物理学実験
無重力環境下での精密計測
宇宙・衛星内環境のより深い理解

DPFで
目指す成果

宇宙干渉計による精密計測

宇宙空間におけるファブリ・ペロー
干渉計の動作と精密計測の実証。
衛星内に試験マスを非接触で低
雑音保持する技術の実証。



FP干渉計による
 6×10^{-16} m/Hz^{1/2} の変位感度
試験マスへの外乱除去技術の確立

DECIGOの根幹技術

FP干渉計による
 4×10^{-18} m/Hz^{1/2}
の変位感度

安定化レーザー光源の実現

背景

広い応用範囲

→ 多くの地上研究 (数 $\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ の安定度)

光周波数標準, 原子・分子の精密分光,
光通信, 量子情報・コンピュータ
重力波検出器での実績

($10^{-6} \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ の相対安定度)

宇宙では, 高安定レーザーの実績

→ 外部基準による高安定化はない

意義・波及効果

宇宙空間での

これまでに無い安定度の実現

さまざまな応用

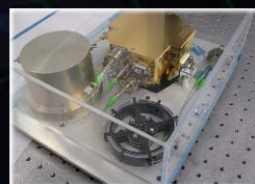
地球環境観測 (ADM-Aeolus, GIFTS),
基礎物理実験, マイクロ波標準, 通信
(ACES), 惑星探査 (TPF-C), X線観測
(MAXIM), フォーメーションフライト (LISA,
GRACE-follow-on)



DPFで
目指す成果

安定化レーザー光源の実現

宇宙において高い周波数安定度
を持つレーザー光源の実現。ヨウ
素吸収線を用い、既存ミッション
を超える安定度の実現を目指す。



0.5 $\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ の周波数安定度
飽和吸収分光による安定化の宇宙実証



DECIGOの根幹技術
要求値を満たす安定度

ドラッグフリー制御の実現

背景

ナビゲーションシステムの開発

→ 1972年 TRAID-1 で初実証

精密基礎物理実験

→ 2004年 Gravity Probe-B

LPF (2012) L1点で実証

国内: 高高度気球からの

自由落下 (BOV) で実証

意義・波及効果

長時間安定な無重力環境

→ 宇宙環境利用の新しい可能性

基礎物理学実験, 材料工学

フォーメーションフライト

のための基礎技術

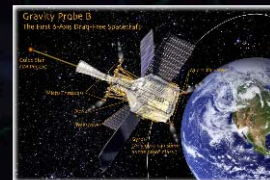
(TPF-C, LISA, GRACE follow-on)

小型低雑音スラスターの宇宙実証

DPFで
目指す成果

ドラッグフリー制御の実現

重力傾度による受動安定化と能動制御を併用した、全自由度ドラッグフリー制御の実現。制御則と低雑音スラスターの宇宙実証を目指す。



重力傾度安定との併用による低雑音制御

太陽輻射圧雑音以下への

衛星変動安定化 $10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$

DECIGOの根幹技術

要求値と同程度の安定度

1. DPF概要
2. 科学的成果
- ➔ 3. プロジェクトの現状
4. この検討会の目的
5. まとめ

衛星スケールの検討

	中型衛星 (ASTRO-X)	小型科学衛星 (SPRINT-X)	技術実証衛星 (SDS-X)	大学衛星 (Cube sat.)
衛星 サイズ [m]	1 - 10	1 - 3	0.5 - 1	0.1-0.5
衛星重量 [kg]	~ 2000	~ 400	~ 100	~ 10
開発期間 [年]	~ 10	~ 6	~ 4	~ 3
コスト [億円]	~ 200	~ 70	~ 5	~ 0.1
期待できる 成果	(Pre-DECIGO) 重力波の検出 フォーメーション フライト	(DPF) 重力波の観測 根幹技術の 総合試験	(SWIM) 根幹技術の 個別試験 (×Drag-free)	動作試験 原理実証

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

2008年9月 ミッション提案書募集 → 決定せず

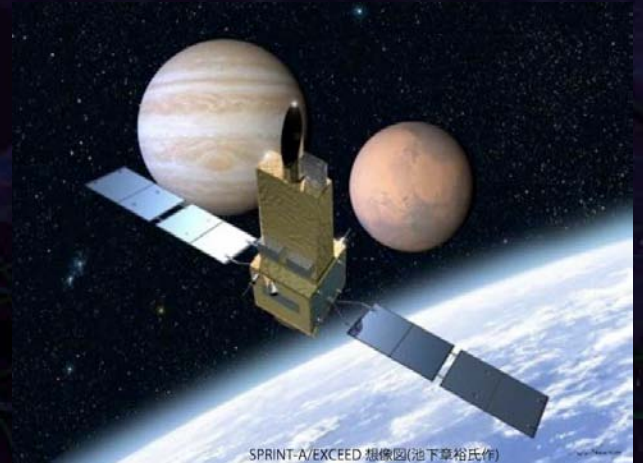
2009年3月 2号機ミッション再募集

候補: ERG, **DPF**, FFAST など 5ミッション

2009年5月 ヒアリング審査 (ERG, **DPF**)

2009年8月 2号機ミッション ERGに決定

2010年 3号機ミッション選定(予定)



小型科学衛星1号機 SPRINT-A/EXCEED



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

2号機ミッション選定の結果

DPFに対する 小型科学衛星専門委員会 のコメント

高い評価

- 重力波検出という極めて重要な 課題への明確な位置付け
- LISA計画とは異なる 独自性(ファブリ・ペロー干渉計)
- 宇宙実験としては新しいグループだが、
地上実験では十分な実績をもち、
SDS衛星など宇宙への参入に積極的にとりこんでいる点

問題点

- DPFの意義・目標について、 小型科学衛星単独として不十分
- 実現可能性について、その実現性が判断できるレベル
まで検討が進んでいない
- 提案されたコストの見積もりの精度が高くない

今後の方針

DPF: 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

JAXA小型科学衛星 戦略的開発経費

→ 加速ミッションとして採択

次ミッションの有力候補の1つになっている



小型科学衛星3号機 を目指して再スタート

課題 実現性を高める

工学面を含めた体制の強化

より具体的な衛星構成検討

技術性成熟度の更なる向上・分かり易い実績

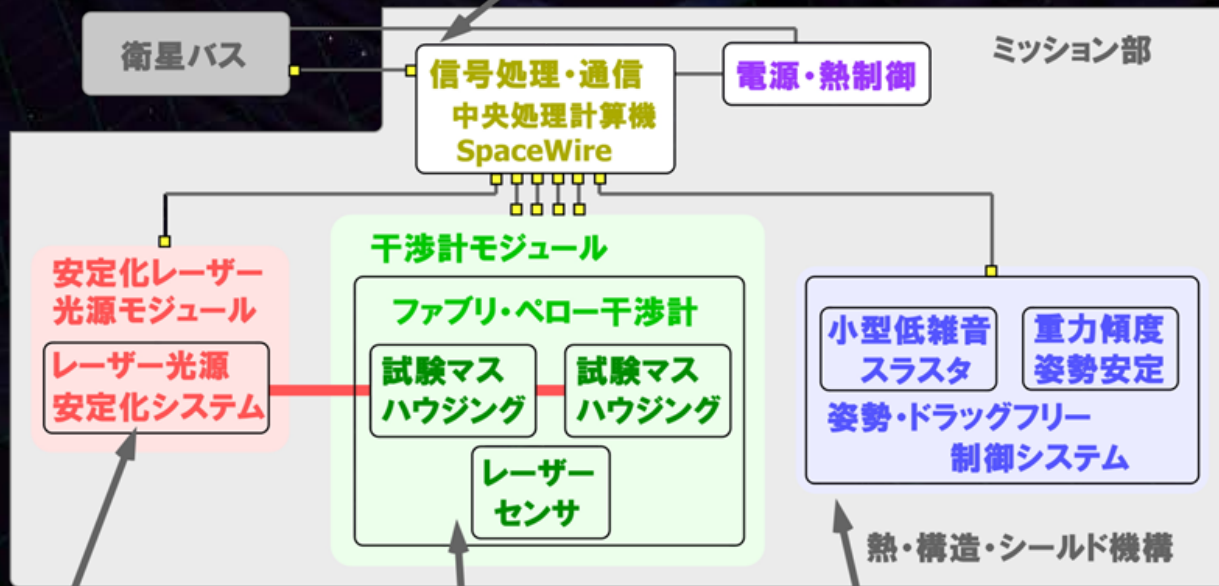
説得力のある科学的成果の検討

打ち上げ目標：2015年

推進体制

神田 (大阪市大)
 中村, 田中, 瀬戸 (京都大学)
 井岡 (KEK)
 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

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)
 川村, ATC (国立天文台)
 干渉計・ハウジングの開発
 新谷 (東大地震研究所)
 地球重力場観測用
 レーザーセンサの開発

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

坂井 (宇宙科学研究本部)
 森脇 (東京大学)
 姿勢制御・ドラッグフリー
 システムの開発

DPF技術開発

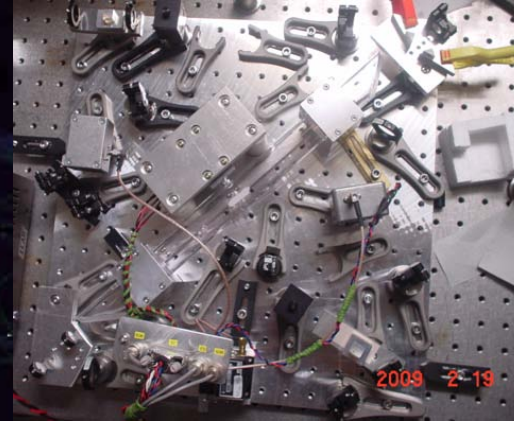
安定化レーザー光源

Yb:YAG (NPRO) 光源

ヨウ素飽和吸収による安定化制御

→ 安定度向上, パッケージ化

⇒ 電気通信大学
情報通信研究機構 (NICT)
NASAゴダード



武者氏
資料より

干渉計・ハウジング

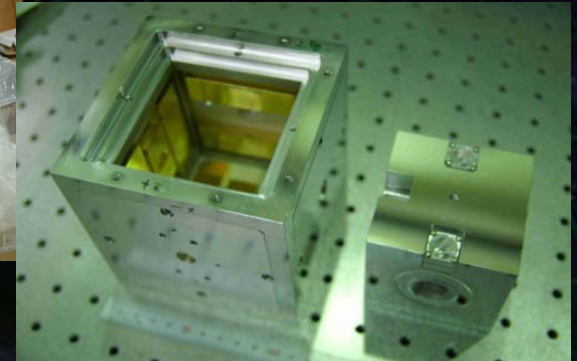
プロトタイプ的设计・製作

地球重力場観測用センサの試作

⇒ 国立天文台 (NAOJ)
東京大学・東大地震研究所
スタンフォード大



新谷氏
資料より



佐藤氏
資料より

DPF技術開発

姿勢制御・ドラッグフリー

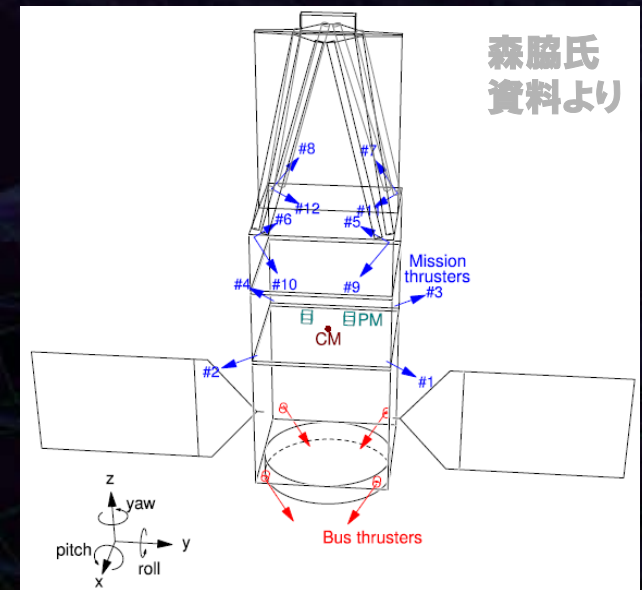
構成 (構造・制御則) の検討

重力傾度安定による受動安定化

衛星にマスト構造を取り付ける

ミッション部スラスタによるドラッグフリー制御

⇒ 東京大学・新領域創成科学研究科
宇宙航空研究開発機構 (JAXA)



スラスタ

既存技術のシステム化検討

推力雑音評価装置

(スラスタスタンド) 製作

スリット型FEFPの試作

⇒ 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
東海大学, 防衛大学



DPF技術開発

信号処理・制御

SpaceWire/SpaceCube

SDS-1/SWIM

1/23打上げ → 宇宙実証試験

⇒ 東京大学, 京都大学
宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

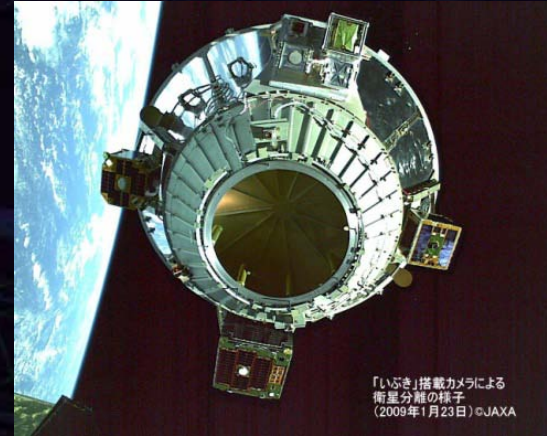


写真:
JAXA

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



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

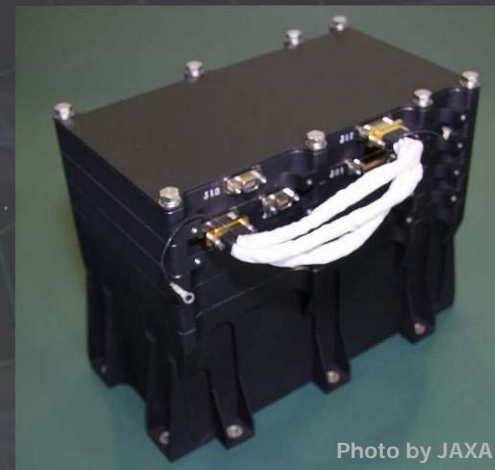
~47g test mass

Data Rate : 380kbps

Size: 124 x 224 x 174

Weight: 3.5 kg

Power: ~7W



1. DPF概要
2. 科学的成果
3. プロジェクトの現状
- ➔ 4. この検討会の目的
5. まとめ

この会議の目的

DPFで期待できる科学的成果を再検討する
新しいサイエンス・付加価値の可能性を探る

科学的成果

高感度な観測・計測
新しいアイデア



実現可能性

技術成熟度・実績
リソースの制約

設計はトレードオフを考慮して決まる

→ **明確な目標設定**を持っていることが必要

今回は...

DPFで得られる科学的成果の価値・位置付けは？

工夫によって新しい成果が期待できないか？

などを制約にはあまり捉われず、アイデア・材料を集める

プログラム構成

DPFサイエンス検討会

2009.11.24 東京大学 理学部4号館 1320号室

時間	講演時間 分	質疑 分	講演者 (敬称略)	備考
はじめに				
10:10	5		横山 順一	東大ビッグバンセンター
10:15	15		安東 正樹	京大理
1. 重力波の観測 (瀬戸・横山)				
10:30	15	5	八木 純外	京大理
10:50	15	5	斉藤 達	東大ビッグバンセンター
2. 宇宙での干渉計・安定化レーザー (佐藤・長野・武村)				
11:10	20	5	沼田 健司	NASA
11:35	20	5	長野 重夫	NICT
昼休み (12:00-13:00)				
3. 地球重力場の観測 (新谷・坪野)				
13:00	35	5	吉在 由秀	ぐんま天文台 (紹介: 坪野)
13:40	25	5	福田 洋一	京大理
14:10	20	5	山本 圭香	地球研
14:35	20	5	菅野 貴之	東大・地震研
15:00	15	5	松本 晃治	国立天文台
15:20	25	5	坪野 公夫	東大理
15:50	10	20	新谷 昌人	東大・地震研
16:20	20		休憩 (16:20 - 16:40)	
4. ドラッグフリー観測 (森脇)				
16:40	20	5	森脇 成典	東大・新領域
17:05	20	5	坂井 真一郎	JAXA
17:30	20	5	河野 功	JAXA
おわりに				
17:55	5		川村 静児	
18:00			検討会終了	
18:00			懇親会 (於 松本楼)	

1. DPF概要
2. 科学的成果
3. プロジェクトの現状
4. この検討会の目的
- ➔ 5. まとめ

DECIGO-PF

DECIGOパズファインダー (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)
フリーマス x2 → 基線長30cmのFP共振器
レーザー光源とその安定化システム
ドラッグ・フリーの組み込み

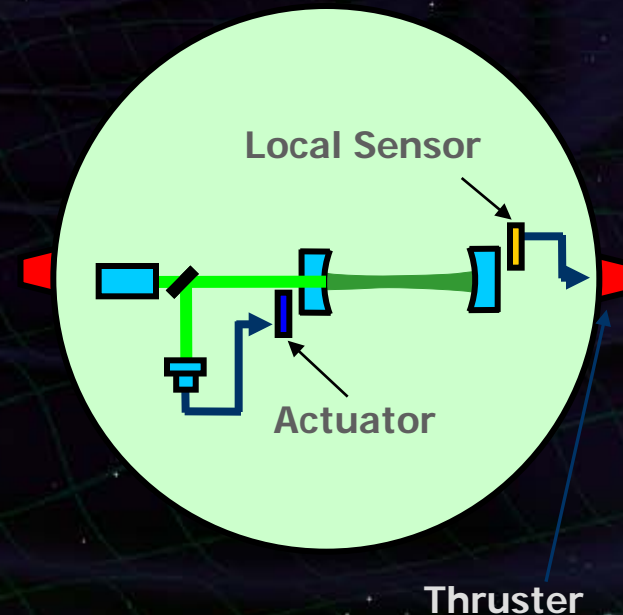


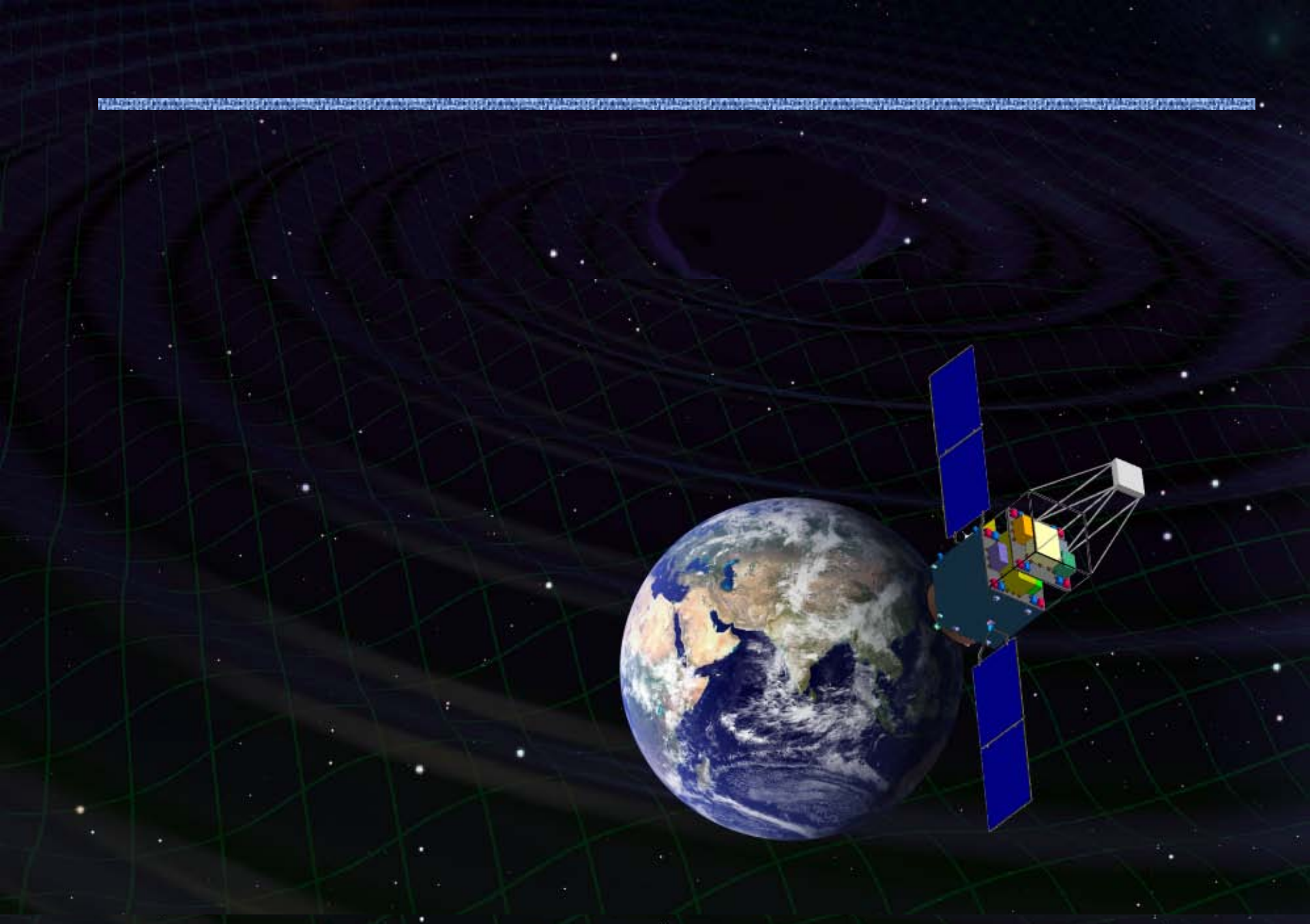
DECIGOなどのための**科学技術の確立**

宇宙・地球の観測

小型科学衛星3号機 (~2015年)を目指して再スタート

科学的成果を再検討しましょう





SWIM_μv センサーモジュール

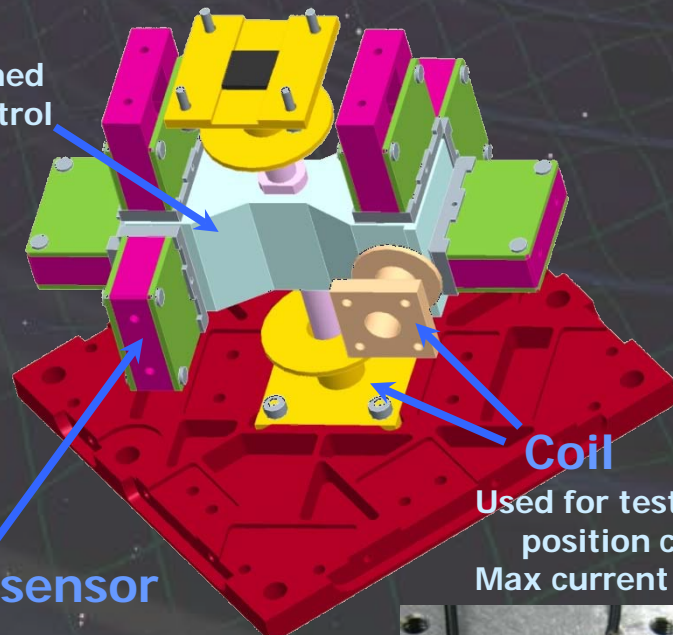
超小型重力波検出器

SpW 通信の宇宙実証のためのセンサーモジュール
将来の宇宙重力波望遠鏡のための最初のステップ

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

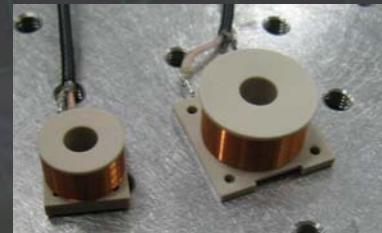


Coil

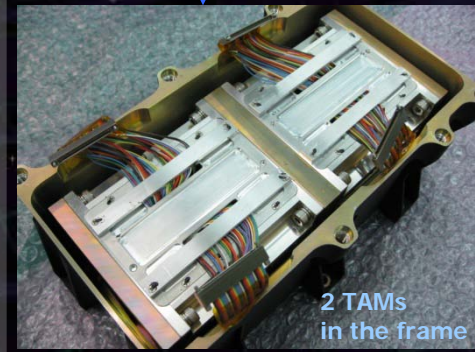
Used for test-mass
position control
Max current ~100mA

Photo sensor

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



SWIMmn Module



2 TAMs
in the frame



SWIM_{μv} 軌道上実証

SWIM

In-orbit operation

Test mass controlled

Error signal → zero

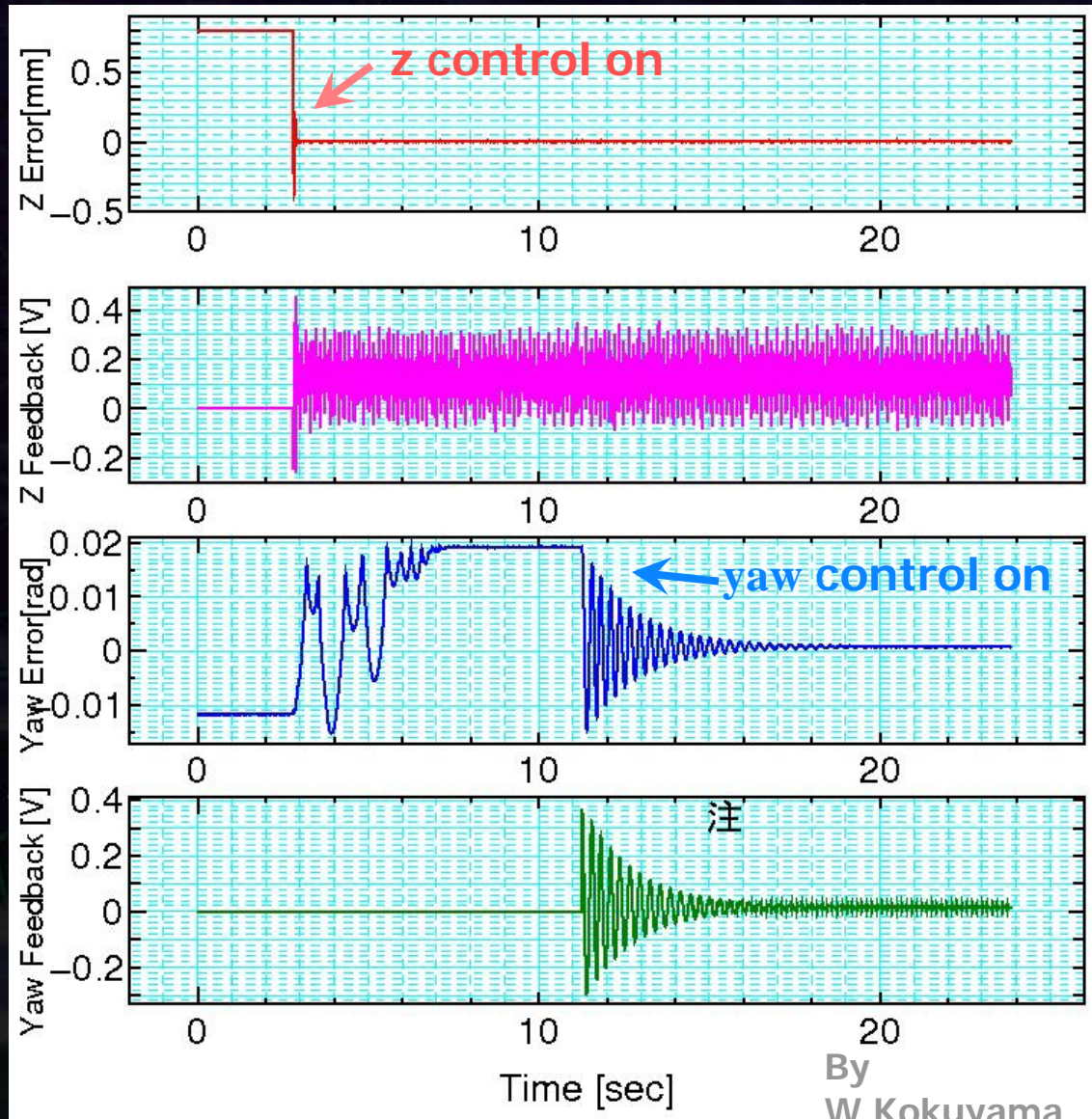
Damped oscillation
(in pitch DoF)

Free oscillation
in x and y DoF

Signal injection
→ OL trans. Fn.

Operation: May 12, 2009

Downlink: ~ a week



By
W.Kokuyama

DPFで実証される科学技術

DPFで実証される技術

宇宙干渉計
による
精密計測



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

$10^{-14} \text{ N/Hz}^{1/2}$
の外力雑音

安定化レーザー
の宇宙実証



$0.5 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$
の周波数安定度

ドラッグフリー
制御の実現



衛星変動安定度
 $10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$

スラスタ雑音
 $10^{-7} \text{ N/Hz}^{1/2}$

意義・波及効果

基礎物理学実験
無重力環境下での精密計測
宇宙・衛星内環境の理解

宇宙空間で、高い安定度の実現
さまざまな応用

地球環境観測 (ADM-Aeolus, GIFTS),
基礎物理学実験, マイクロ波標準, 通信
(ACES), 惑星探査 (TPF-C), X線観測
(MAXIM), フォーメーションフライト (LISA,
GRACE-follow-on)

長時間安定な無重力環境
→宇宙環境利用の新しい可能性
基礎物理学実験, 材料工学
フォーメーションフライト
(TPF-C, LISA, GRACE follow-on)
小型低雑音スラスタ

DECIGOのための根幹技術実証

DPFで実証される技術

宇宙干渉計による精密計測

宇宙空間におけるファブリ・ペロー干渉計の動作と精密計測の実証。衛星内に試験マスを非接触で低雑音保持する技術の実証。



$6 \times 10^{-16} \text{ m/Hz}^{1/2}$

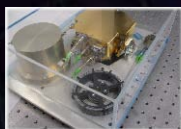
の変位感度

$10^{-14} \text{ N/Hz}^{1/2}$

の外力雑音

安定化レーザー光源の実現

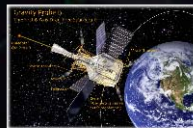
宇宙において高い周波数安定度を持つレーザー光源の実現。ヨウ素吸収線を用い、既存ミッションを超える安定度の実現を目指す。



$0.5 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$
の周波数安定度

ドラッグフリー制御の実現

重力傾度による受動安定化と能動制御を併用した、全自由度ドラッグフリー制御の実現。制御則と低雑音スラスタの宇宙実証を目指す。



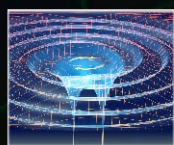
衛星変動安定度

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

スラスタ雑音

$10^{-7} \text{ N/Hz}^{1/2}$

重力波観測



地上での観測が困難な周波数帯 (0.1Hz) での重力波の観測。銀河中心の中間質量ブラックホールの合体や振動現象を観測対象とする。

0.1 Hz帯の連続観測とデータ解析

DECIGOで必要とされる主要技術

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

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
低雑音スラスタ

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概要

DECIGOのための前哨衛星

小型衛星 1 機
(95cm立方x2, 350kg)
地球周回軌道 高度 500km



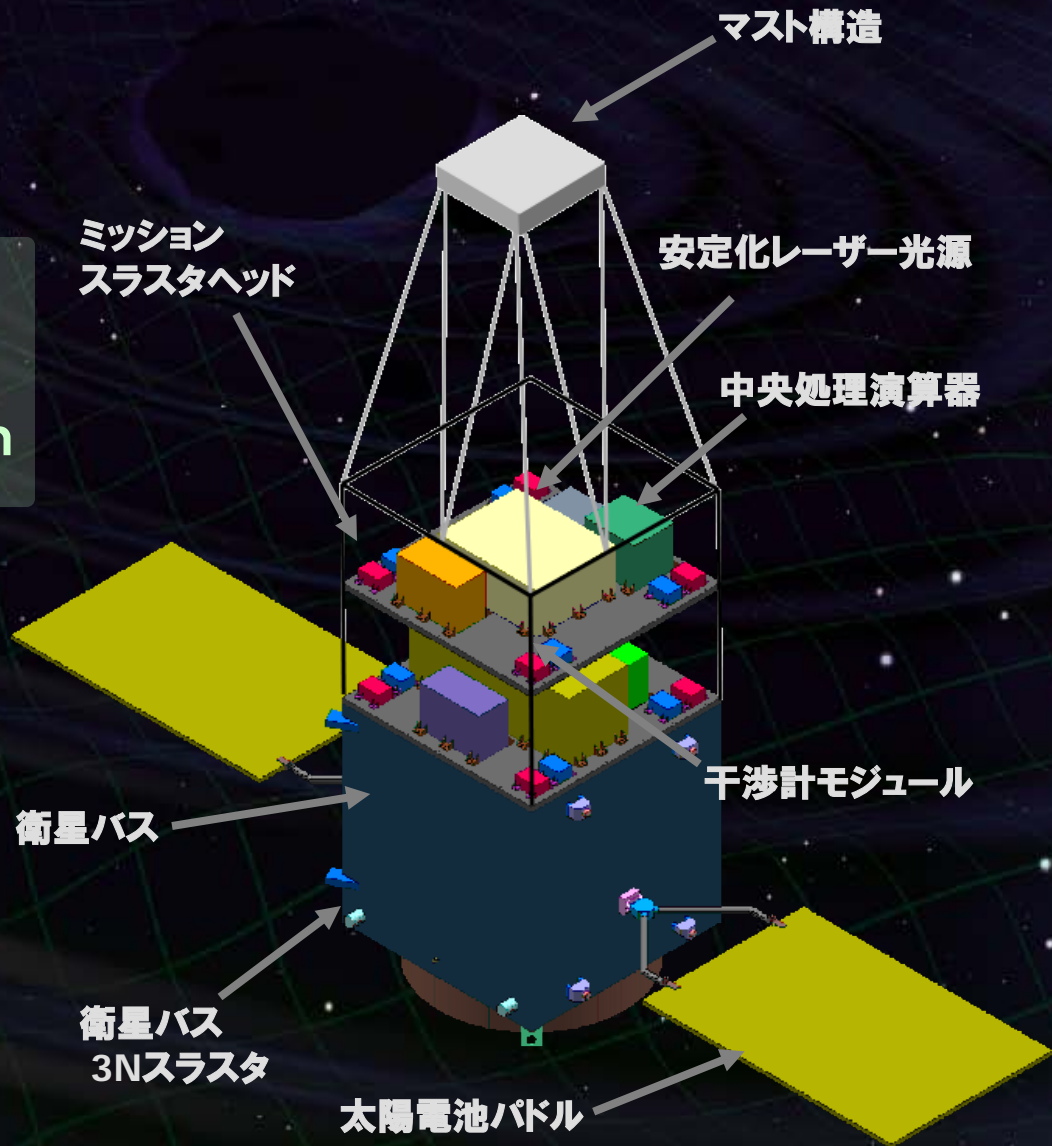
DECIGOのための宇宙実証

科学技術の確立

宇宙・地球の観測

重力波の観測

地球重力場の観測



DPFによる重力波の観測

球状星団中のBH

中心付近の星の運動から BH質量を推定

⇒ BH同士の合体からの重力波で期待できるSNR
等質量, 質量比1:1/3, 100Msun BHが落下の場合

Globular clusters known to have black holes



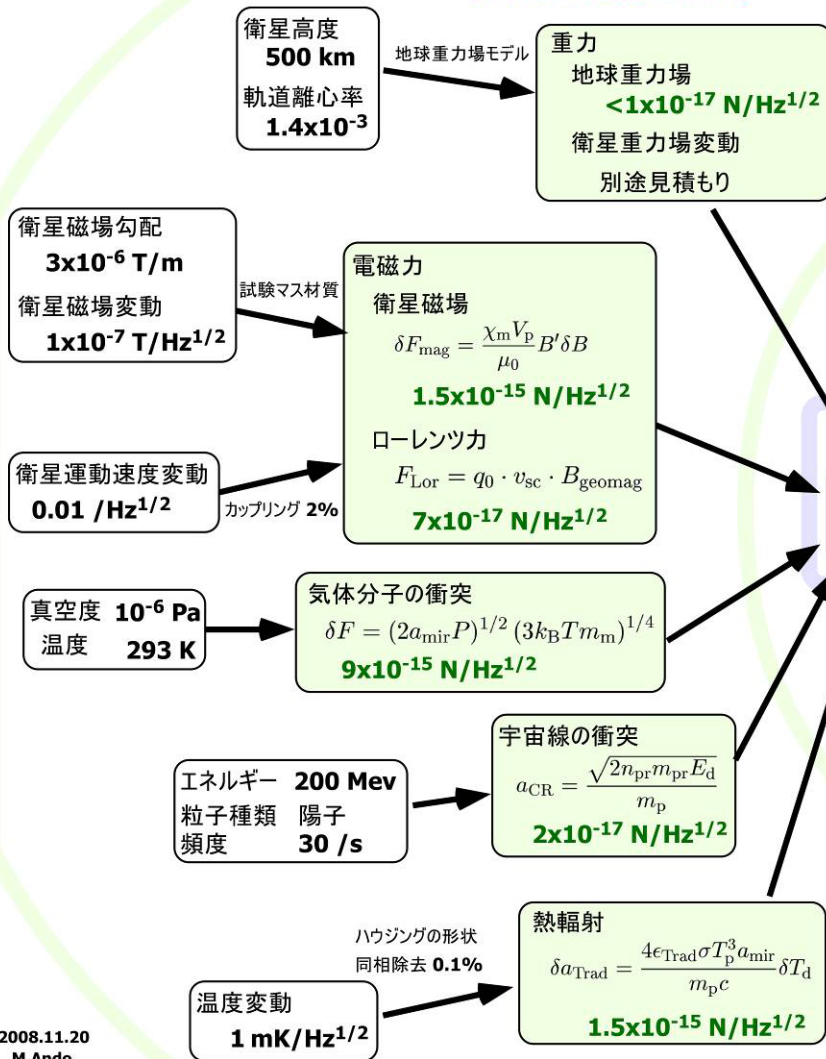
Credit: NASA, STScI

NGC#	BH質量 [Msun]	距離 [kpc]	SNR (同質量)	SNR (1:1/3)	SNR +100Msun	速度分散 [km/sec]
6441	12,424	11.2	36.4	22.2	3.7	19.5
6256	4,754	6.9	26.6	16.2	4.3	15.4
7078	4,388	10.3	16.6	10.2	2.8	15.1
6093	3,720	10.0	14.9	9.1	2.7	14.5
104	820	4.5	9.4	5.7	3.6	10
1851	1,348	12.1	5.3	3.2	1.6	11.3
6681	820	9.0	4.7	2.9	1.8	10
6293	366	8.8	2.5	1.5	1.4	8.2
5286	444	11.0	2.3	1.4	1.2	8.6
6522	228	7.8	1.9	1.1	1.3	7.3
5904	142	7.5	1.3	0.8	1.1	6.5
6325	133	8.0	1.2	0.7	1.0	6.4
6752	45	4.0	0.9	0.6	1.3	4.9
7099	89	8.0	0.8	0.5	0.9	5.8
6284	171	15.3	0.7	0.5	0.6	6.8
5272	41	10.4	0.3	0.2	0.5	4.8

(我々の銀河内に約150の球状星団)

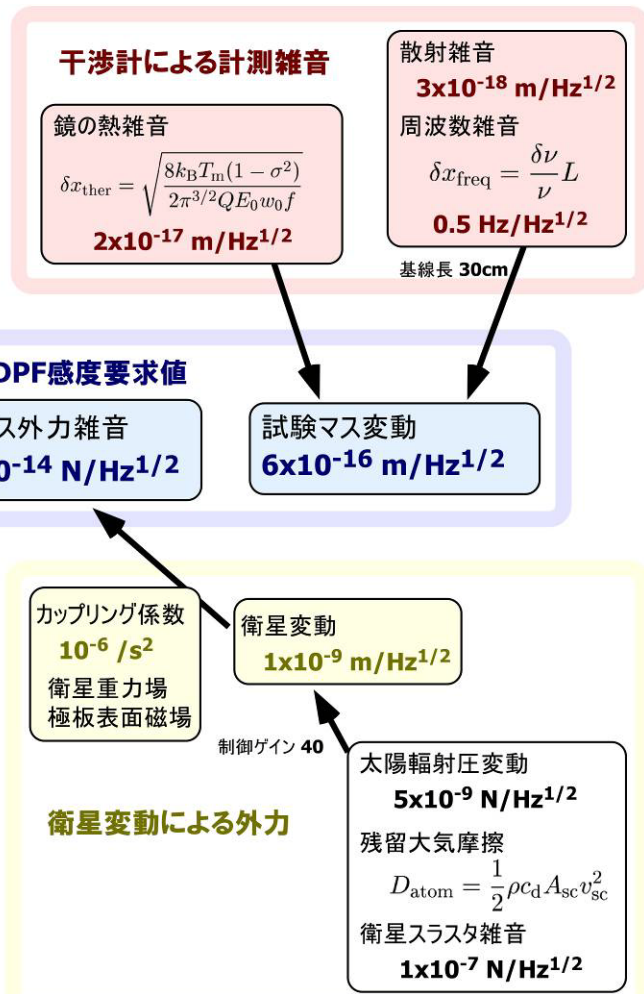
DPFシステム要求値

試験マスに直接働く外力



DPF要求値検討図

0.1Hzでの変動スペクトル値の見積もり



2008.11.20
M.Ando

衛星への要求

観測帯域 (0.1-1 Hz) での
変動成分 (スペクトル) が重要

機械的振動

衛星変動 $1 \times 10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$

重力などによる
試験マス変動へのカップリング

磁場

磁場変動 $1 \times 10^{-7} \text{ T/Hz}^{1/2}$

磁場勾配 $3 \times 10^{-6} \text{ T/m}$

磁場勾配途地場変動による
試験マス変動

温度

温度変動 $1 \times 10^{-3} \text{ K/Hz}^{1/2}$

熱輻射揺らぎによる試験マス変動
(ハウジング内面での要求値)

衛星変動

衛星の機械的変動要求値

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

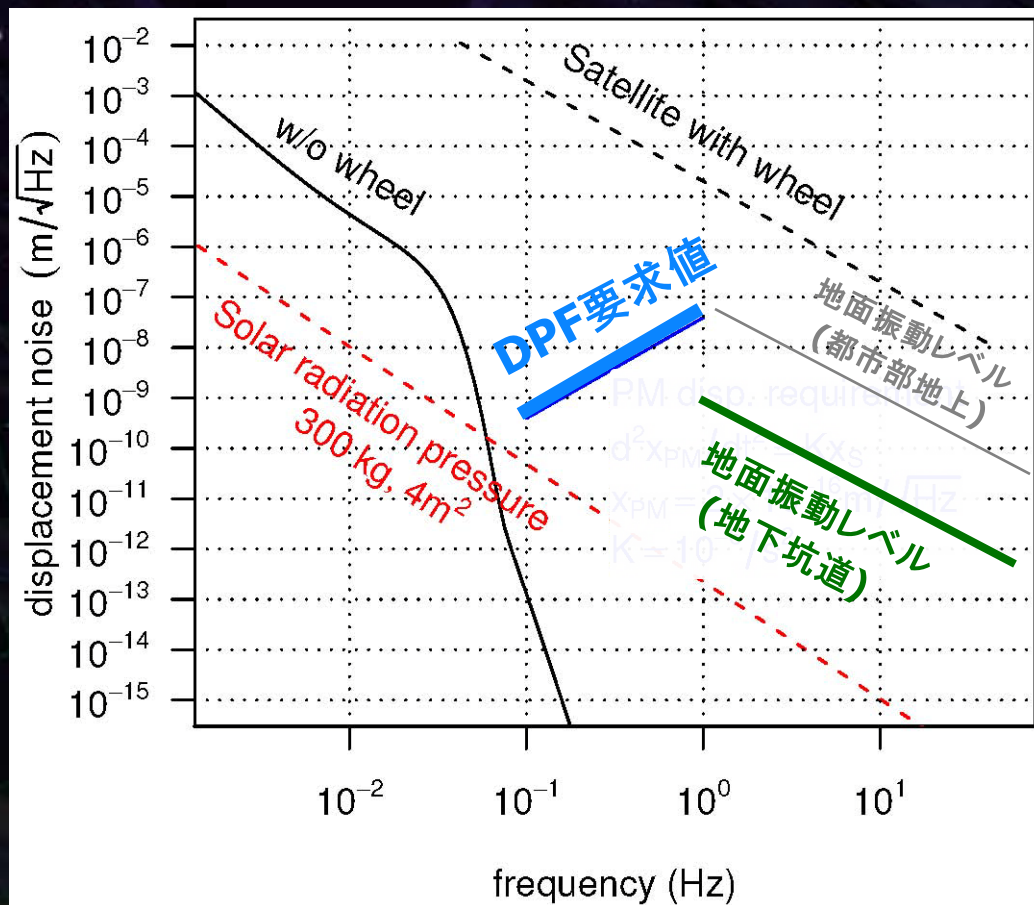
⇒ 機械変動を排除した
衛星で実現可能

(静寂環境での
地面振動程度の安定度)

DPF構成：機械変動部は無い

モメンタムホイールは非搭載
リングレーザージャイロ

→ FOG に変更

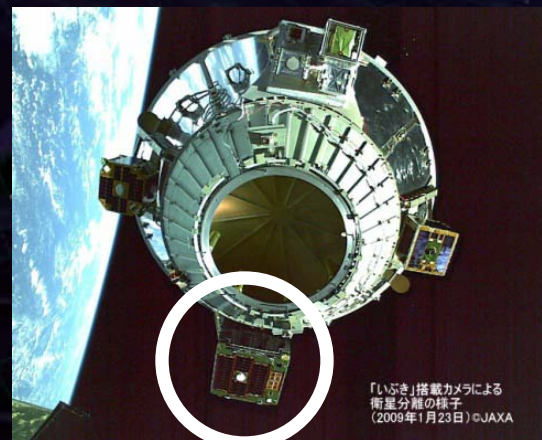


温度変動

試験マス周囲の温度変動要求値

$$1 \times 10^{-3} \text{ K/Hz}^{1/2}$$

- ⇒ 多重の輻射シールド
大きな熱浴, 熱伝導の良い材質



SDS-1

SWIMモジュール (SDS-1搭載) での温度変動実測結果

サバイバルヒータでのON/OFF制御
SWIMでは温度制御はしていない

- ⇒ DPFの要求値を
ほぼ満たす結果
(ADC雑音による測定限界)

