

小型重力波観測衛星 DECIGOパスファインダー (DPF)

安東正樹 (京都大学)
川村静児 (国立天文台)
佐藤修一 (法政大学)
瀬戸直樹 (京都大学)
森脇成典 (東京大学)
他, DPFワーキンググループ



論点

1. 科学的価値
2. 衛星バスへの要求と実現可能性
3. 衛星搭載に起因する固有の問題
4. 実施体制
5. コスト評価について

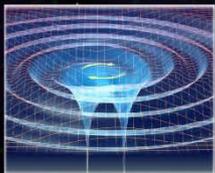
論点

- ⇒ **1. 科学的価値**
- 2. 衛星バスへの要求と実現可能性**
- 3. 衛星搭載に起因する固有の問題**
- 4. 実施体制**
- 5. コスト評価について**

DPFが目指す科学的成果

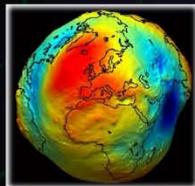
宇宙・地球の観測

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

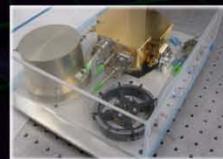
宇宙干渉計による精密計測

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

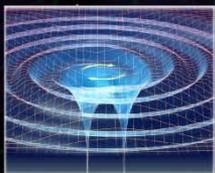
重力傾度による受動安定化と能動制御を併用した、ドラッグフリー制御の実現。



DPFが目指す科学的成果

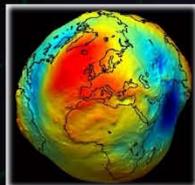
宇宙・地球の観測

重力波観測

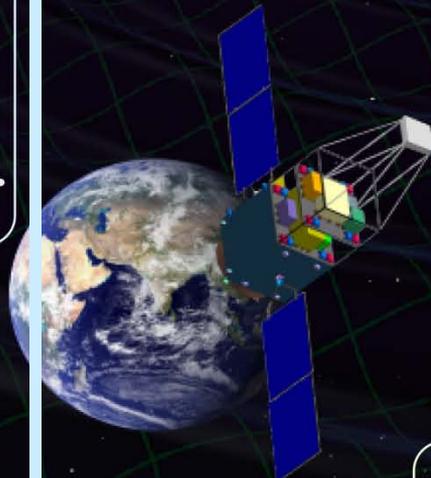


銀河中心付近の中間質量ブラックホールの合体や振動現象を観測。

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

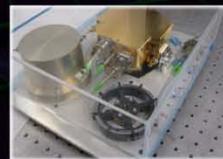
宇宙干渉計による精密計測

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

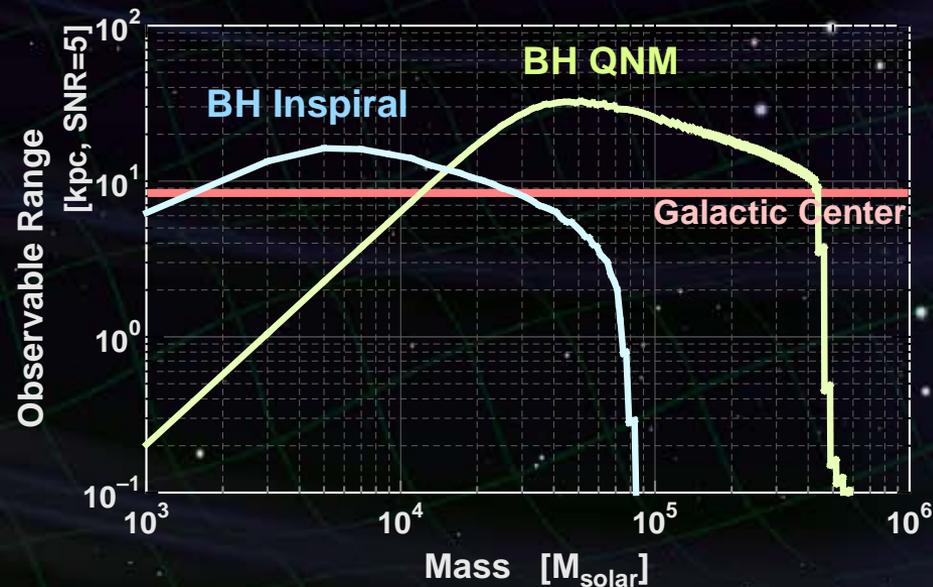
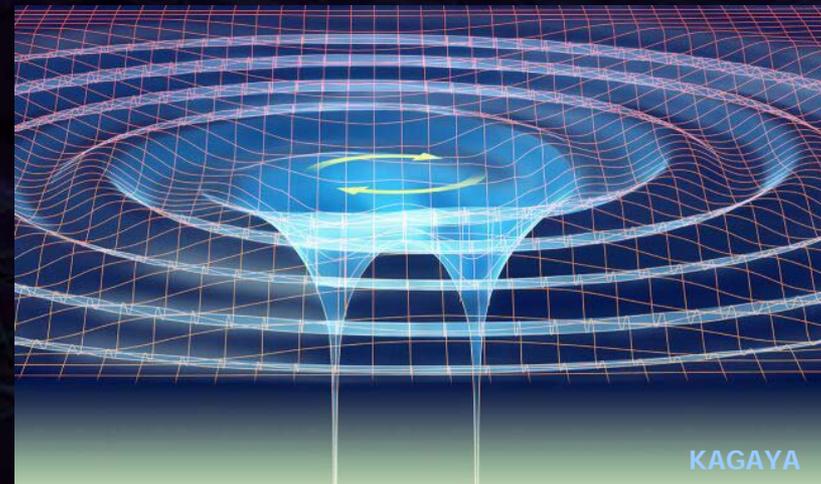
$h \sim 10^{-15}$, $f \sim 4$ Hz
Distance 10kpc, $m = 10^3 M_{\text{sun}}$
観測時間(~数千秒)

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



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)

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観測

Globalな重力ポテンシャルの決定

→ 密度分布のモニタ

時間変動のモニター

地球規模の水の監視技術
(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

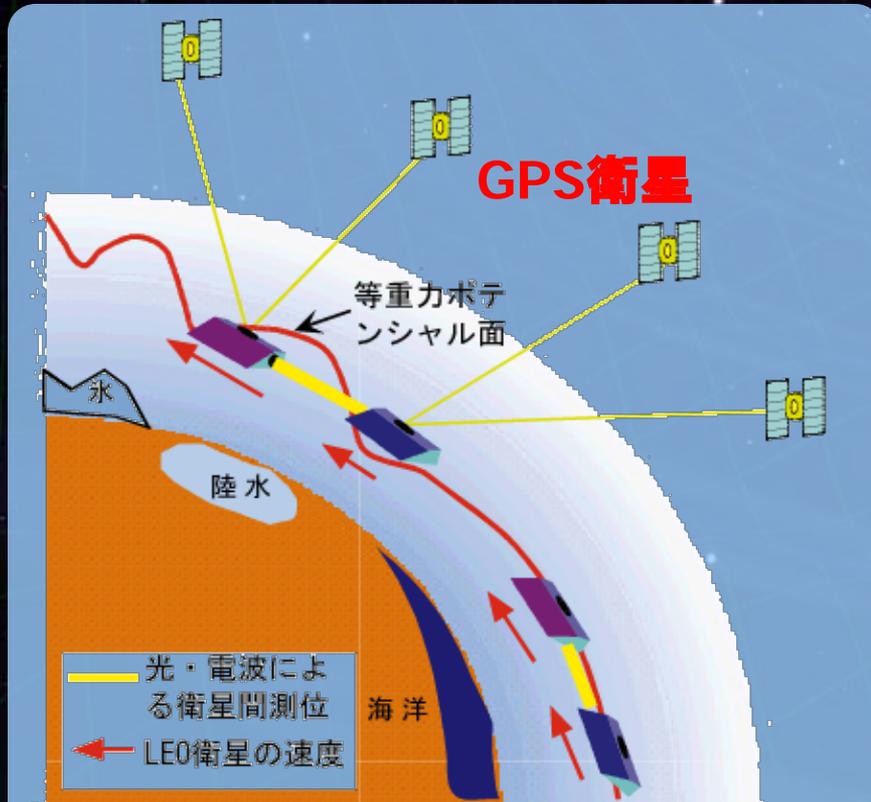
DPFの観測モード

・試験マス + GPS

→ 長波長ターゲット

・2つのマスの相対測定

→ 短波長ターゲット



東京大学地震研・新谷氏、
京都大学・福田氏の資料/情報提供

地球重力場観測の観測網

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

(2012-16年) の空白を埋める可能性

\rightarrow 独自の成果, 国際貢献

The Future of Satellite Gravimetry

Report from the

Workshop on The Future of Satellite Gravimetry

12-13 April 2007, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands

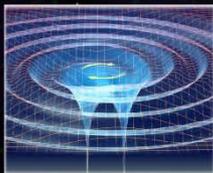
Radboud Koop and Reiner Rummel (Eds.)



DPFが目指す科学的成果

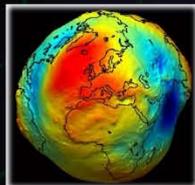
宇宙・地球の観測

重力波観測

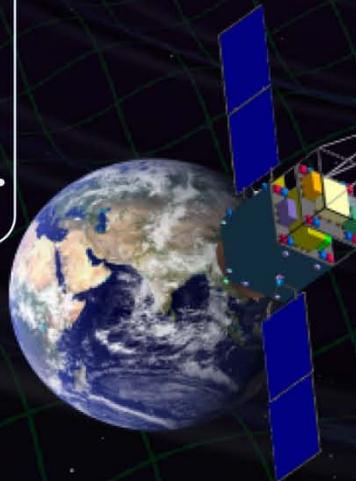


銀河中心付近の中間質量ブラックホールの合体や振動現象を観測。

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

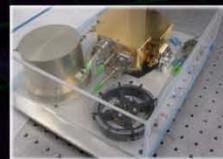
宇宙干渉計による精密計測

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)

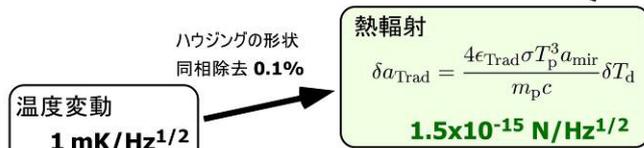
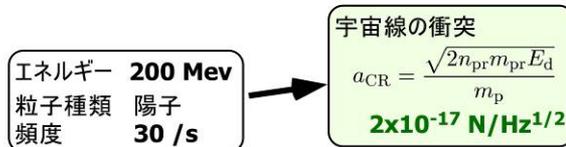
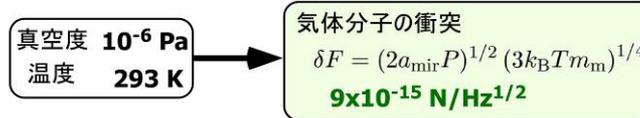
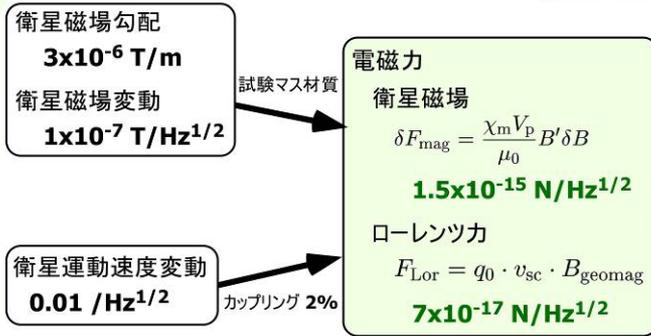
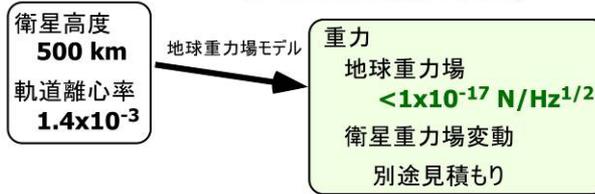
長時間安定な無重力環境
→宇宙環境利用の新しい可能性
基礎物理学実験, 材料工学
フォーメーションフライト
(TPF-C, LISA, GRACE follow-on)
小型低雑音スラスタ

論点

1. 科学的価値
- ➔ 2. 衛星バスへの要求と実現可能性
- ➔ 3. 衛星搭載に起因する固有の問題
4. 実施体制
5. コスト評価について

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

干渉計による計測雑音

鏡の熱雑音
$$\delta x_{\text{ther}} = \sqrt{\frac{8k_B T_m (1 - \sigma^2)}{2\pi^{3/2} Q E_0 w_0 f}}$$

 $2 \times 10^{-17} \text{ m/Hz}^{1/2}$

散射雑音
 $3 \times 10^{-18} \text{ m/Hz}^{1/2}$
周波数雑音
$$\delta x_{\text{freq}} = \frac{\delta \nu}{\nu} L$$

 $0.5 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$
基線長 30cm

DPF感度要求値

試験マス外力雑音
 $1 \times 10^{-14} \text{ N/Hz}^{1/2}$

試験マス変動
 $6 \times 10^{-16} \text{ m/Hz}^{1/2}$

カップリング係数
 $10^{-6} / \text{s}^2$
衛星重力場
極板表面磁場

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

制御ゲイン 40

衛星変動による外力

太陽輻射圧変動
 $5 \times 10^{-9} \text{ N/Hz}^{1/2}$
残留大気摩擦
$$D_{\text{atom}} = \frac{1}{2} \rho c_d A_{\text{sc}} v_{\text{sc}}^2$$

衛星スラスト雑音
 $1 \times 10^{-7} \text{ N/Hz}^{1/2}$

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)

パワースペクトル

時系列信号をフーリエ変換して規格化

$$\overline{x^2(t)} = \int_0^{\infty} \overline{G(f)} df$$

平均変動パワー
(RMS変動)²

(パワースペクトル)²

⇒ **パワースペクトル: 変動の平均パワーに対する
各周波数成分の寄与を表す**

(例) 衛星の機械的変動要求値

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

⇒ **変動の 1Hz (1秒周期)
成分のRMS変動 $1 \times 10^{-9} \text{ m}$**

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

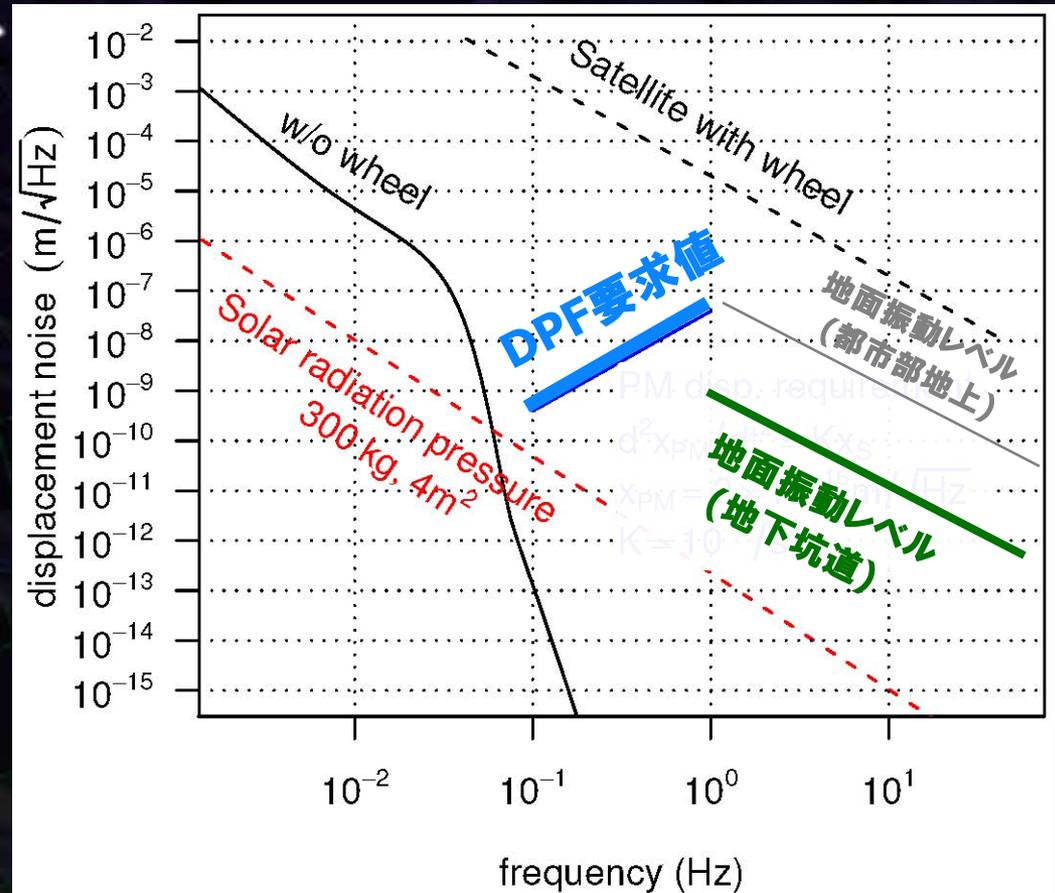
(静寂環境での
地面振動程度の安定度)

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



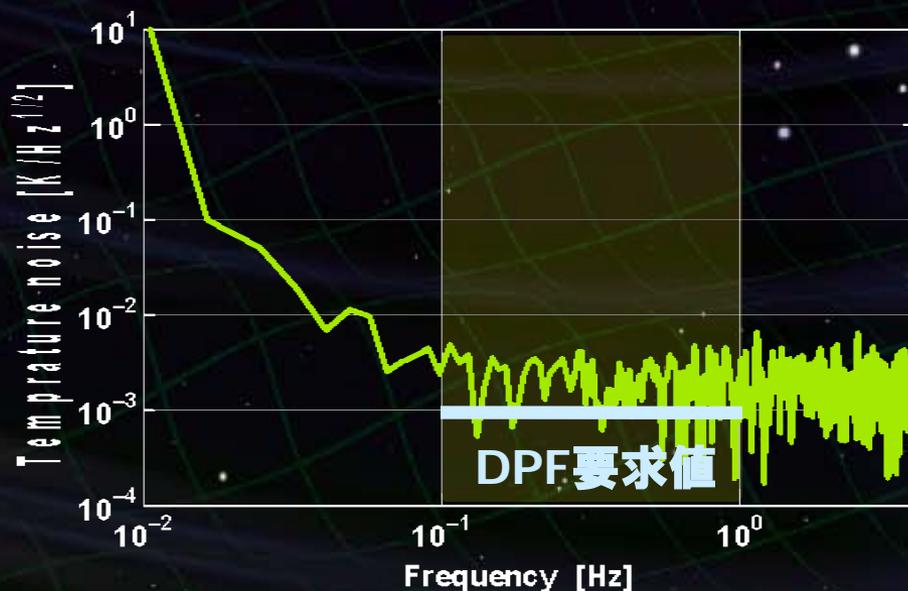
SDS-1

「いぶき」搭載カメラによる
衛星分離の様子
(2009年1月23日) ©JAXA

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)



衛星固有の問題と対策

DPFで特に注意すべき点

衛星打ち上げ時の振動や歪み

試験マスのロック, クランプ・リリース
レーザー光源, 干渉計のアラインメントのずれ

⇒ 十分に対応可能

地上試験の制約

試験マスの制御
無重力下でないと動作確認ができない部分

⇒ 落下塔・航空機による試験

他の可能性の検討

	中型衛星 (ASTRO-X)	小型科学衛星 (SPRINT-X)	技術実証衛星 (SDS-X)	相乗り衛星 (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

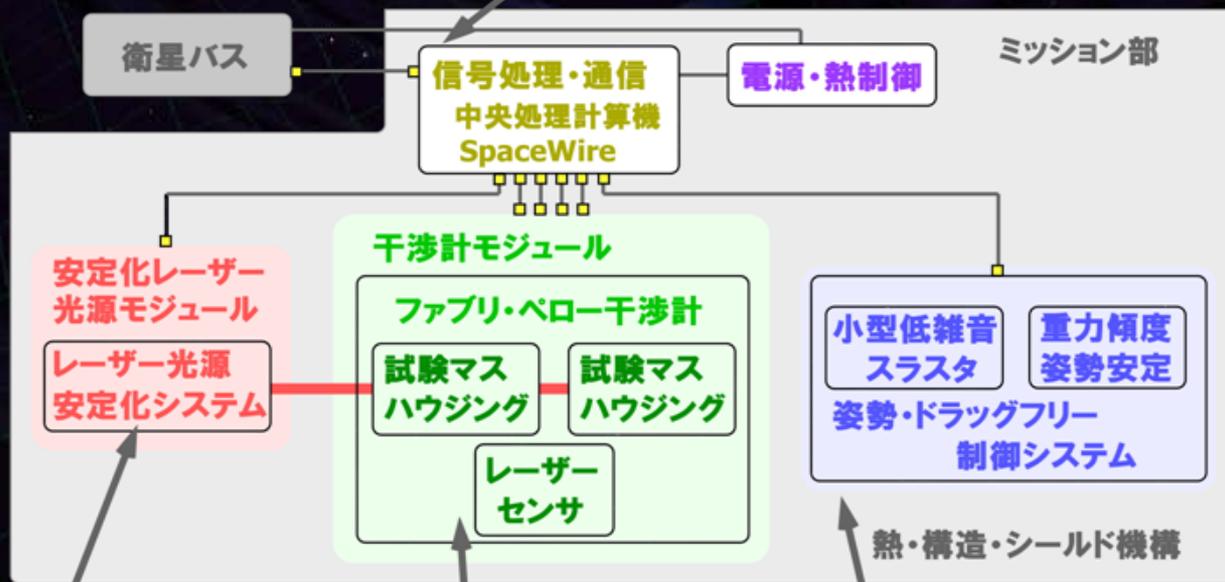
論点

1. 科学的価値
2. 衛星バスへの要求と実現可能性
3. 衛星搭載に起因する固有の問題
- 4. 実施体制
5. コスト評価について

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)



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

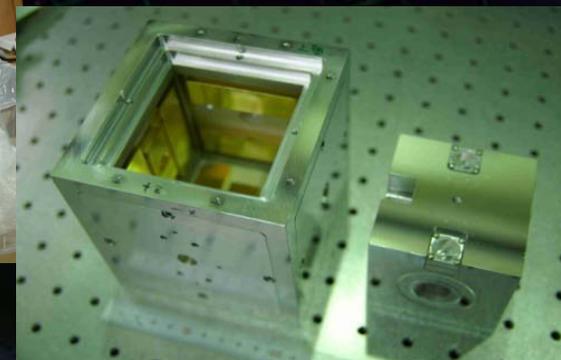
→ 基本性能の試験

地球重力場観測用センサの試作

⇒ 国立天文台 (NAOJ)
東京大学・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

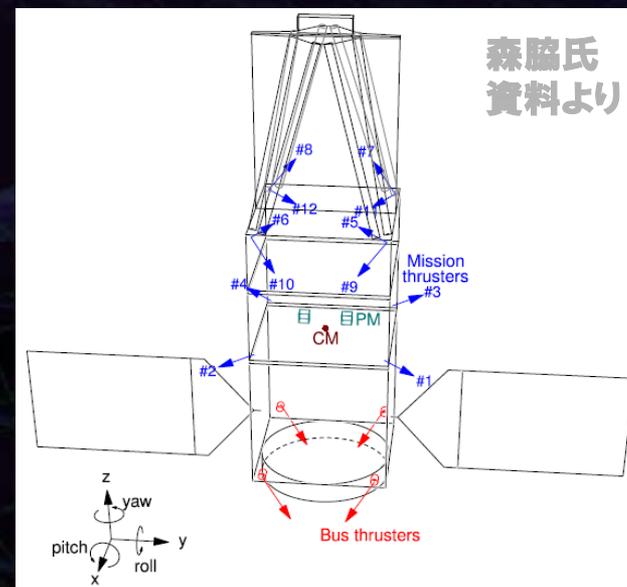
構成 (構造・制御則) の検討

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)

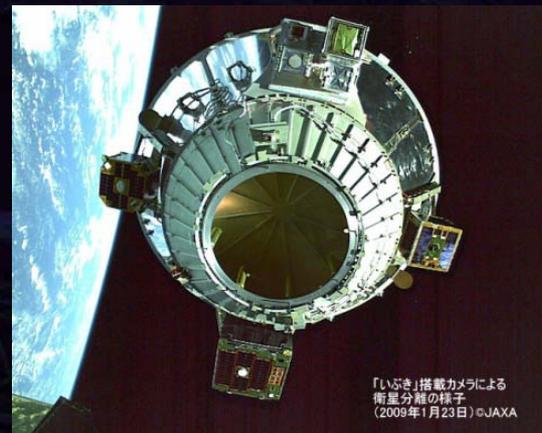


写真:
JAXA

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 μ v : 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



SWIM_{μν} 軌道上実証

SWIM

In-orbit operation

Test mass controlled

Error signal → zero

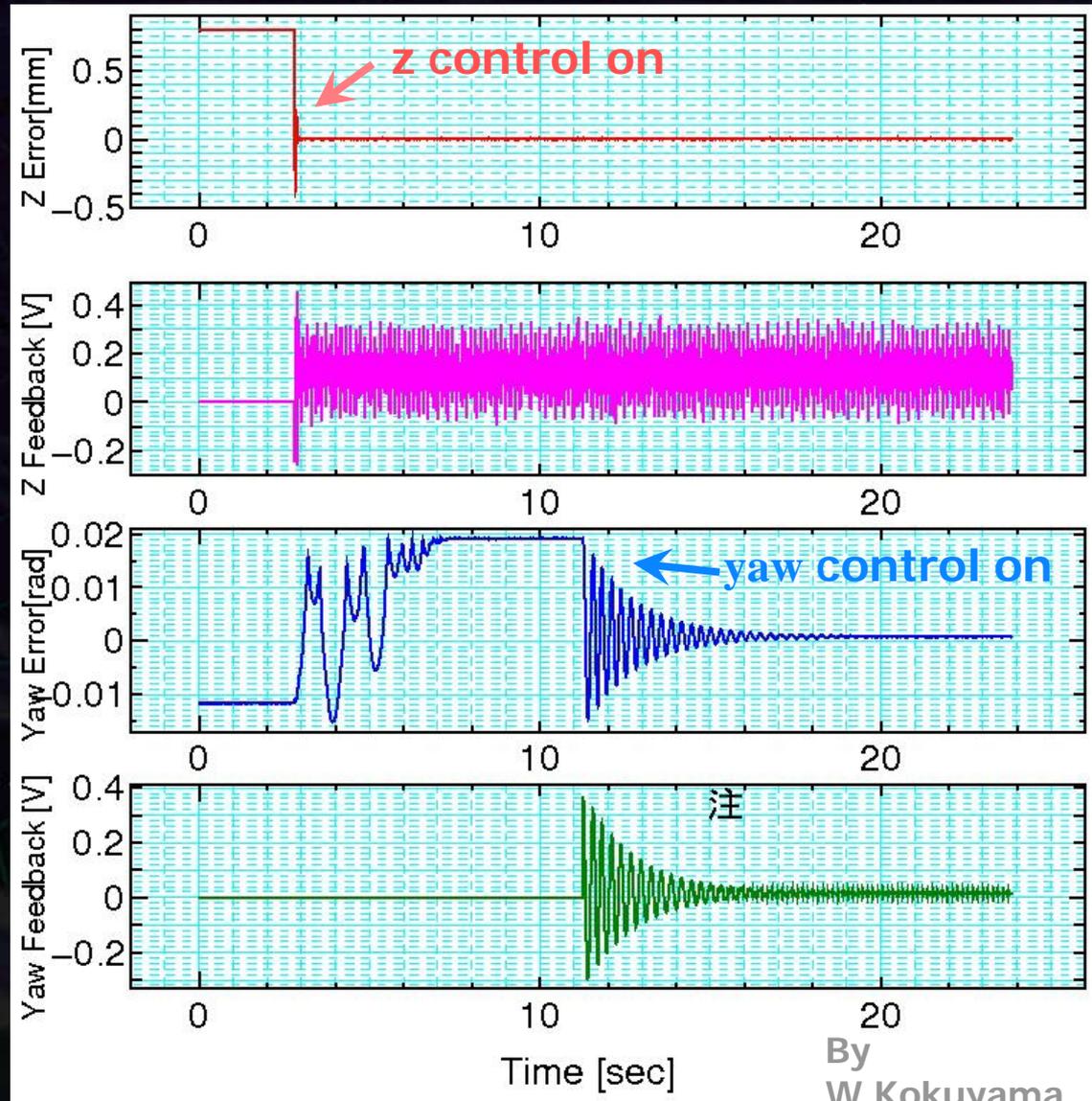
Damped oscillation
(in pitch DoF)

Free oscillation
in x and y DoF

Signal injection
→ OL trans. Fn.

Operation: May 12, 2009

Downlink: ~ a week



By
W.Kokuyama

他プロジェクトとの関係

地上重力波望遠鏡との関係

日本の重力波のグループ

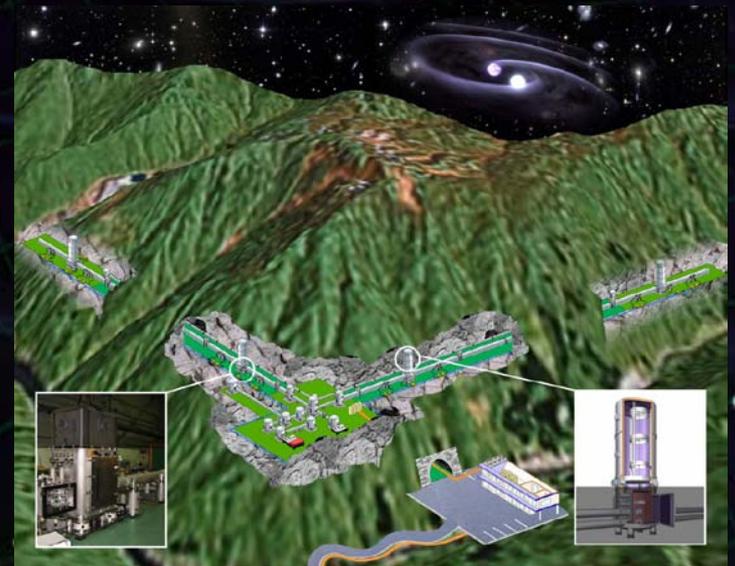
- LCGT : 最優先のプロジェクト
- DECIGO : その先の中心プロジェクト

重力波/宇宙というフロンティアへの意欲

- ⇒ DECIGO/DPFには、
LCGT以外からの研究者/学生
も多く参入

LCGT : 予算獲得のために準備中

計画最初の3年程度は、トンネル掘削や真空槽設置などの工事が主であり、現在と同程度のエフォート率を維持



体制の強化

- **LISAとの協力関係**

LISA/LPFの技術情報や経験, サポートレターの提供

LISA-DECIGO workshop (2008.11)

- **スタンフォード大グループとの協力**

Dan Debra: **ドラッグフリー衛星の創始者**, Gravity Probe Bの副PI

DPFの帯電制御,

DPFドラッグフリーへの協力

- **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-)

- **大学の工学系研究室との協力**

UNISEC (University Space Engineering Consortium) への呼びかけ

工学系研究者 → 衛星システム 搭載機器製作

論点

1. 科学的価値
2. 衛星バスへの要求と実現可能性
3. 衛星搭載に起因する固有の問題
4. 実施体制
- ⇒ 5. コスト評価について

DPFコスト検討

コスト: 上限値の制約

→ 信頼性確保とのトレードオフとして検討

構造系・電気系: メーカーの概算を参照

ミッション機器 (光学系)

民生部品 ↔ 宇宙仕様部品 の間
(リスク) (コスト)

信頼性確保の考え方

基幹部 (電源系, 信号処理系, 熱制御系)

バス部に準じた冗長性・信頼性の確保

ミッション機器

機能冗長構成

重要度に応じて民生部品の使用を検討

DPFミッション部 経費見積もり	数量	費用 [千円]		備考
		1台	小計	
ミッション部全体	1		計	(9.95 億円)
干渉計モジュール	1		140,000	
重力波観測用干渉計	1	50,000	50,000	
ハウジング	2	30,000	60,000	
レーザーセンサ	12	2,500	30,000	
主干渉計制御モジュール	IFO CTRL 1		15,000	
ハウジング制御モジュール	TM CTRL 1		15,000	
レーザーセンサ制御モジュール	LS CTRL 1		15,000	
安定化レーザー光源モジュール	1		135,000	
レーザー光源	1	70,000	70,000	
周波数安定化光学系	1	50,000	50,000	
安定化・通信回路	Laser CTRL 1	15,000	15,000	
ドラッグフリー	1		95,000	
スラストヘッド	16	5,000	80,000	
スラスト制御モジュール	Thrust CTRL 1	15,000	15,000	
信号処理モジュール	1		110,000	
中央処理計算機	SpC 1	20,000	20,000	
ユニバーサルSpWボード	USpWB 6	15,000	90,000	
電源・熱制御モジュール	PSU, Heater 1		20,000	
電源制御装置	1	10,000	10,000	
温度制御装置	1	10,000	10,000	
ミッション部構体	1		50,000	以上のミッション部本体割 5.95 億円
搭載機器試験経費	-		50,000	
総合試験経費	-		70,000	
射場作業・打ち上げ	-		80,000	
運用とデータ処理・解析	-		100,000	
マージン			100,000	マージン比率 0.10

提案書見積もり		民生部品で構成した場合			
合計		合計		比率	
干渉計モジュール	140,000		31,200	4.5	
重力波観測用干渉計	50,000		11,000	4.5	
ハウジング	60,000		13,100	4.6	
レーザーセンサ	30,000		7,100	4.2	
安定化レーザー光源	135,000		15,000	9.0	
レーザー光源	70,000		8,000	8,000	8.8
周波数安定化光学系	50,000			5,100	9.8
光源制御系	15,000			1,900	7.9
				2,000	
				300	
				1,500	
				1,300	
				800	
				1,100	

単位: 千円



最後に

(2009年5月29日, 小型科学衛星審査会, 宇宙科学研究本部)

DPFで期待できる成果

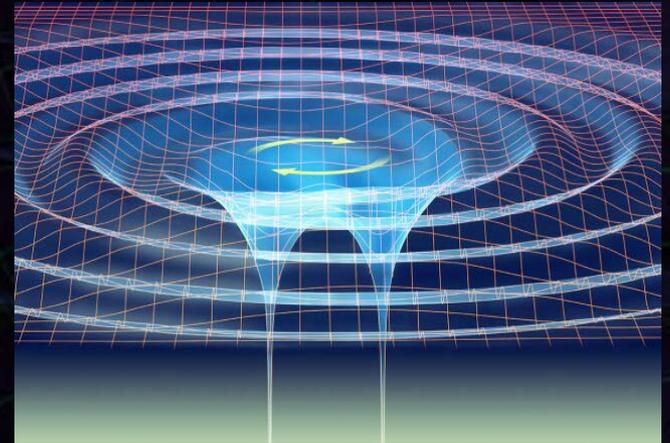
重力波：直接検出されたことがない



DPFでは、我々の銀河中心付近の
ブラックホールに関連する現象
を観測可能



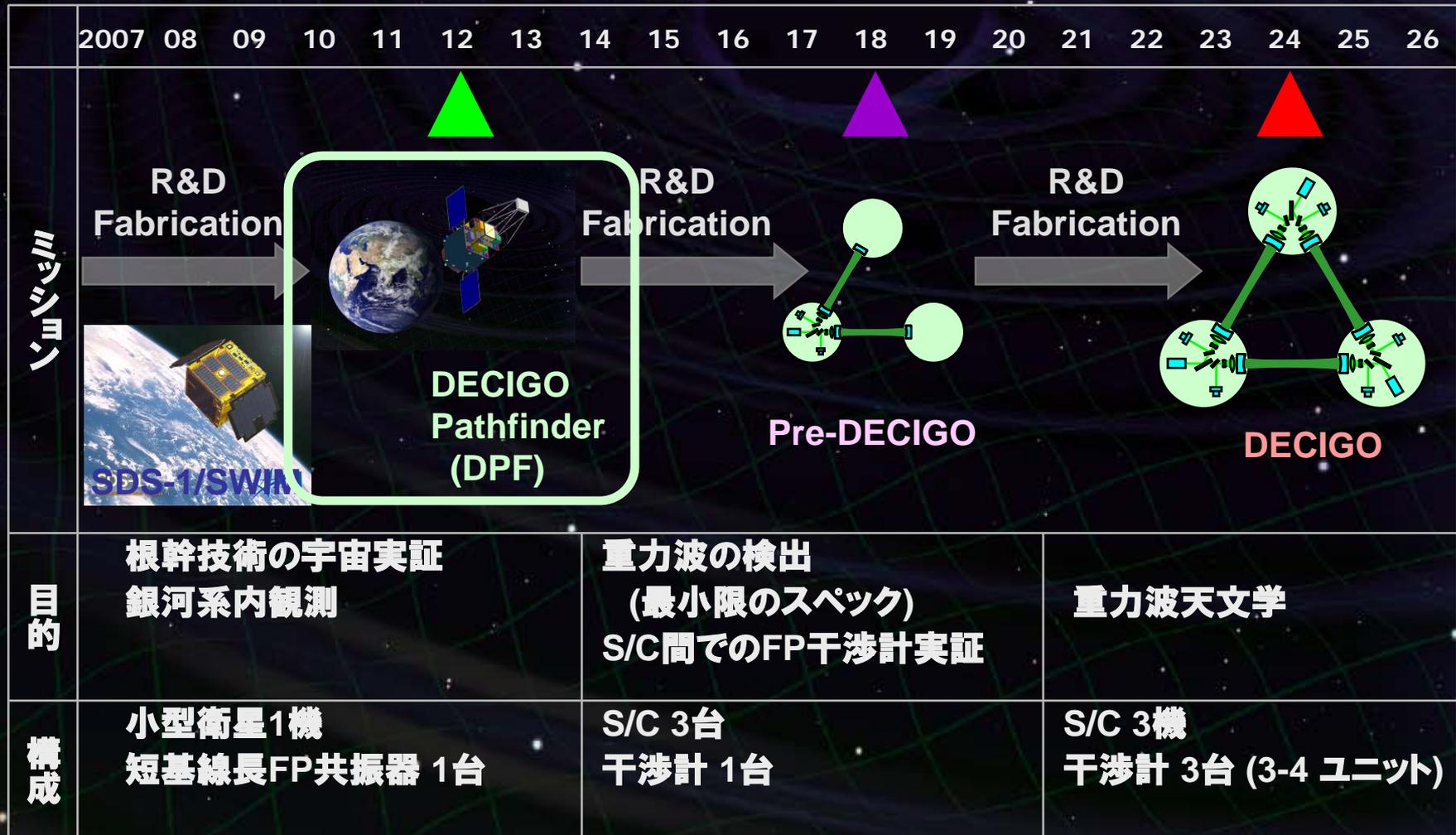
検出できれば、ノーベル賞は間違いない



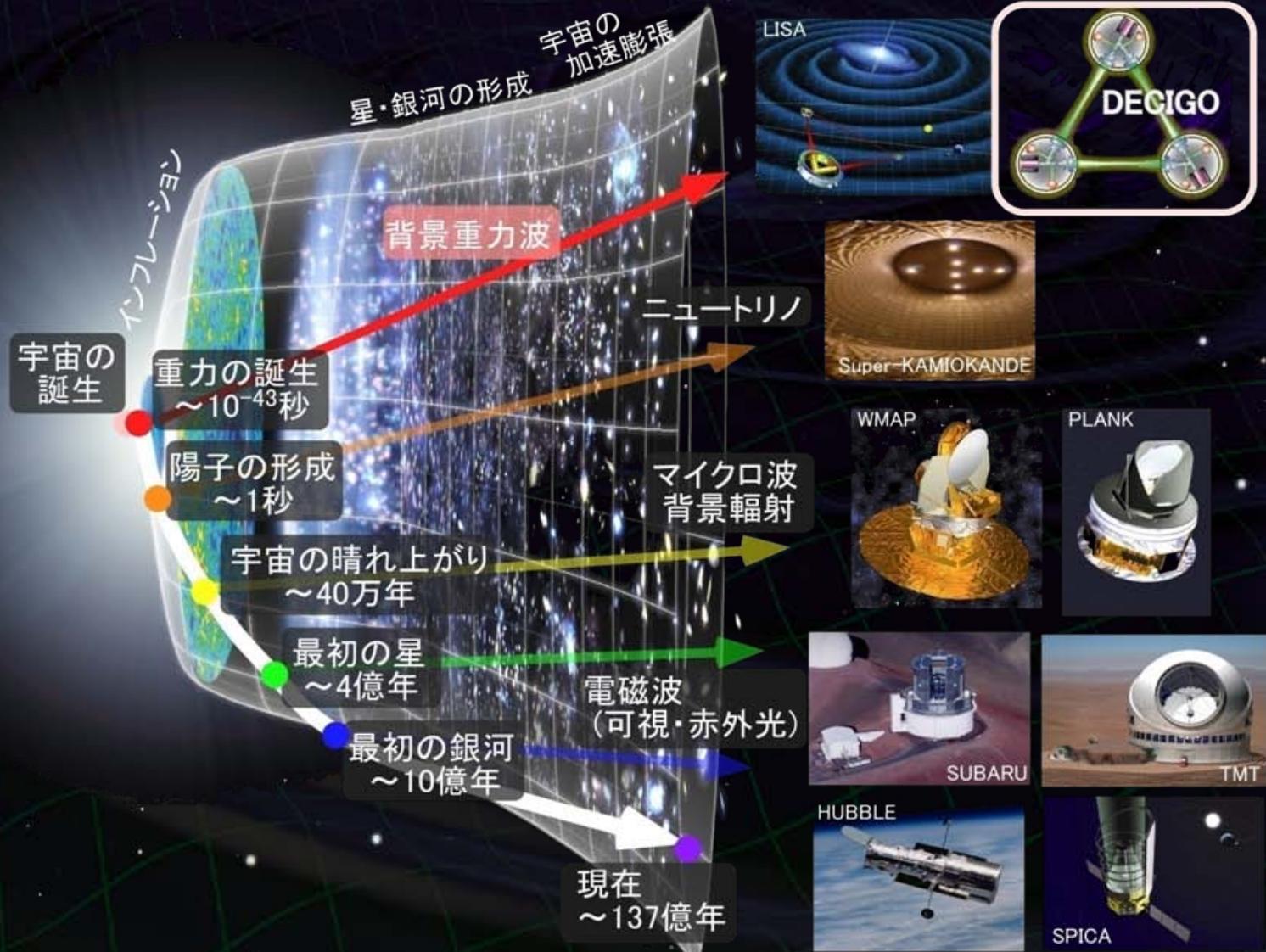
KAGAYA

DECIGOのロードマップ

Figure: S.Kawamura



初期宇宙の観測



DPFの意義

今回の内容 → 「DPF単体での科学的成果」が中心

しかし、DPFの意義は、単体だけの意義に限られない

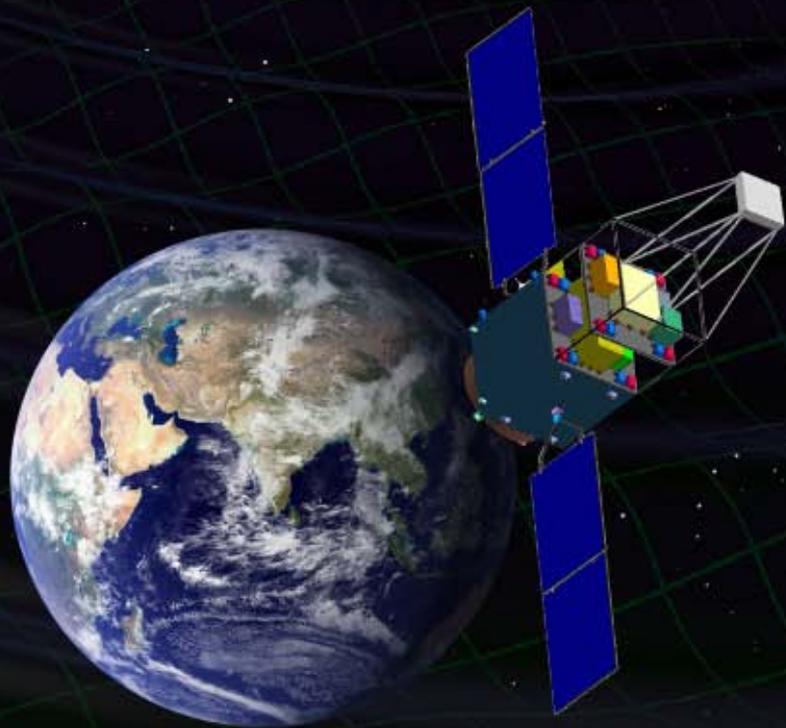
科学の目標 : 真理を知ること
我々の成り立ち, 宇宙の始まり

宇宙開発の目標 : 人類のフロンティア・夢
人類の可能性を広げる

→ DECIGO : **宇宙の始まりに最も肉薄する可能性を持つ**
DPFはその重要なステップ

→ DPFは、**宇宙環境利用の新しい可能性を切り拓く**

終



(2009年5月29日, 小型科学卫星審査会, 宇宙科学研究本部)

日本物理学会声明

宇宙基本法施行に関する声明

2008年12月8日

- 1 自由な発想に基づいた意思決定
- 2 情報公開と透明性の確保
- 3 長期的視野に立った運営
- 4 宇宙活動の先導役としての宇宙物理学の推進
- 5 学問の府としての推進体制の整備・強化

3 長期的視野に立った運営

ニュートンによる人工衛星の原理の発見から実際に人工衛星が打ち上げられるまで、実に250年以上を要したように、物理学の基礎研究が現実的な応用成果として結実するまでには長い年月が必要です。宇宙物理学においても、いたずらに短期的な研究成果を求めるのではなく、人材育成にも十分配慮した、研究者の立案に基づく長期計画の下で推進されることを要望します。

球状星団のブラックホール

中心付近の星の速度分布の観測

Core velocity dispersions for 25 Galactic and 10 old Magellanic globular clusters?

Pierre Dubath et al.,
Astron. Astrophys. 324, 505–522 (1997)

Table 6. Radial velocities and core velocity dispersions for all Galactic globular clusters in our sample.

Obs No. (1)	NGC No. (2)	V_r (km s ⁻¹) (3)	σ_{CCF} (km s ⁻¹) (4)	D (%) (5)	S/N (6)	ϵ (km s ⁻¹) (7)	σ_{ref} (km s ⁻¹) (8)	σ_{core}^{obs} (km s ⁻¹) (9)	stat err (km s ⁻¹) (10)	σ_p (core) (km s ⁻¹) (11)
1	104	-19.4±1.6	11.8±0.2	0.110	13.0	0.12	7.2±0.15	9.3 ^{+0.4} _{-0.4}	+4.8 _{-2.6}	10.0 ^{+4.8} _{-2.6}
2	"	-19.9±1.6	11.5±0.2	0.107	13.0	0.12	6.8±0.10	9.3 ^{+0.3} _{-0.3}	...	...
3	362	223.3±1.6	8.9±0.1	0.171	14.0	0.07	6.8±0.10	5.7 ^{+0.3} _{-0.3}	+3.0 _{-1.6}	6.2 ^{+3.0} _{-1.6}
4	1851	320.3±0.8	13.8±0.2	0.071	59.8	0.04	9.0±0.20	10.5 ^{+0.4} _{-0.5}	+2.5 _{-1.7}	11.3 ^{+2.5} _{-1.8}
5	1904	200.6±0.9	9.7±0.3	0.050	15.4	0.19	9.0±0.20	3.6 ^{+1.1} _{-1.0}	+1.9 _{-1.0}	3.9 ^{+2.2} _{-1.9}
6	5272	-146.3±1.6	8.1±0.3	0.112	5.0	0.30	6.8±0.10	4.4 ^{+0.7} _{-0.8}	+2.3 _{-1.2}	4.8 ^{+2.4} _{-1.4}
7	5286	57.2±1.7	10.8±0.7	0.050	5.0	0.67	7.2±0.15	8.0 ^{+1.0} _{-1.1}	+4.2 _{-2.2}	8.6 ^{+4.3} _{-2.5}
8	5694	-142.7±1.7	8.8±0.5	0.053	6.4	0.49	6.8±0.10	5.6 ^{+0.9} _{-1.0}	+1.3 _{-1.3}	6.1 ^{+1.3} _{-1.3}
9	5824	-26.0±1.6	12.6±0.3	0.037	16.0	0.28	6.8±0.10	10.6 ^{+0.4} _{-0.4}	+1.6 _{-1.6}	11.1 ^{+1.6} _{-1.6}
10	5904	54.7±1.6	9.1±0.3	0.084	6.0	0.33	6.8±0.10	6.0 ^{+0.6} _{-0.7}	+3.1 _{-1.7}	6.5 ^{+3.2} _{-1.8}
11	5946	129.1±1.9	8.1±1.1	0.101	1.5	1.10	7.2±0.15	3.7 ^{+2.2} _{-2.7}	+1.9 _{-1.0}	4.0 ^{+2.9} _{-2.9}
12	6093	7.8±1.7	15.0±0.5	0.037	10.0	0.45	6.8±0.10	13.4 ^{+0.6} _{-0.6}	+7.0 _{-3.8}	14.5 ^{+7.0} _{-3.8}
13	6256	-104.6±3.1	9.5±2.6	0.081	0.8	2.57	6.8±0.10	6.6 ^{+3.4} _{-6.0}	+3.4 _{-1.8}	...
14	6266	-71.8±1.6	16.0±0.3	0.067	10.0	0.25	7.2±0.15	14.3 ^{+0.4} _{-0.4}	+7.4 _{-4.0}	15.4 ^{+7.4} _{-4.0}
15	6284	27.5±1.7	9.3±0.4	0.134	3.0	0.42	6.8±0.10	6.3 ^{+0.7} _{-0.8}	+3.3 _{-1.8}	6.8 ^{+3.4} _{-2.0}
16	6293	-147.9±1.8	10.5±0.8	0.037	5.5	0.82	7.2±0.15	7.6 ^{+1.2} _{-1.4}	+4.0 _{-2.1}	8.2 ^{+4.2} _{-2.5}
17	6325	31.0±1.8	9.0±0.8	0.157	1.4	0.76	6.8±0.10	5.9 ^{+1.2} _{-1.4}	+3.1 _{-1.7}	6.4 ^{+3.3} _{-2.7}
18	6342	118.0±1.6	8.3±0.3	0.172	3.2	0.30	6.8±0.10	4.8 ^{+0.7} _{-0.7}	+2.5 _{-1.3}	5.2 ^{+2.6} _{-1.5}
19	6397	15.1±1.6	7.5±0.3	0.045	13.0	0.28	7.2±0.15	2.1 ^{+1.3} _{-1.1}	+1.1 _{-0.6}	...
20	"	15.0±1.6	7.4±0.4	0.050	10.0	0.33	7.2±0.15	1.7 ^{+1.5} _{-1.7}	...	...
21	6441	14.6±1.6	19.3±0.2	0.098	12.0	0.14	6.8±0.10	18.1 ^{+0.2} _{-0.2}	+9.4 _{-5.1}	19.5 ^{+9.4} _{-5.1}
22	6522	-10.3±1.6	9.6±0.3	0.133	4.3	0.29	6.8±0.10	6.8 ^{+0.5} _{-0.6}	+3.5 _{-1.9}	7.3 ^{+3.5} _{-2.5}
23	6558	-198.8±1.6	7.5±0.2	0.168	5.6	0.18	6.8±0.10	3.2 ^{+0.6} _{-0.8}	+1.7 _{-0.9}	3.5 ^{+1.8} _{-1.2}
24	6681	223.4±1.6	11.5±0.3	0.092	7.4	0.24	6.8±0.10	9.3 ^{+0.4} _{-0.4}	+4.8 _{-2.6}	10.0 ^{+4.8} _{-2.6}
25	6752	-32.0±1.6	8.5±0.2	0.082	21.0	0.10	7.2±0.15	4.5 ^{+0.5} _{-0.6}	+2.3 _{-1.3}	4.9 ^{+2.4} _{-1.4}
26	7078	-111.3±1.6	15.6±0.2	0.015	54.0	0.21	6.8±0.10	14.0 ^{+0.8} _{-0.3}	+5.0 _{-3.0}	15.1 ^{+5.0} _{-3.0}
27	7099	-180.7±1.8	8.2±0.8	0.022	11.0	0.83	6.8±0.10	4.6 ^{+1.5} _{-2.0}	+2.8 _{-1.5}	5.8 ^{+2.9} _{-1.7}
28	"	-181.1±1.8	8.6±0.9	0.020	11.0	0.91	6.8±0.10	5.3 ^{+1.5} _{-1.9}	...	...
29	"	-183.6±2.2	8.9±1.5	0.017	8.0	1.47	6.8±0.10	5.7 ^{+2.2} _{-2.2}	...	...
30	"	-185.1±1.7	8.9±0.5	0.031	14.4	0.45	6.8±0.10	5.7 ^{+0.8} _{-0.9}	...	...
31	"	-182.9±2.7	8.2±2.2	0.017	5.4	2.18	6.8±0.10	4.6 ^{+3.6} _{-3.6}	...	...



中心付近の星の速度分布 とBH質量の関係

GEMINI AND HUBBLE SPACE TELESCOPE
EVIDENCE FOR AN INTERMEDIATE-MASS
BLACK HOLE IN ω CENTAURI

Eva Noyola et al., ApJ 676 (2008) 1008Y1015

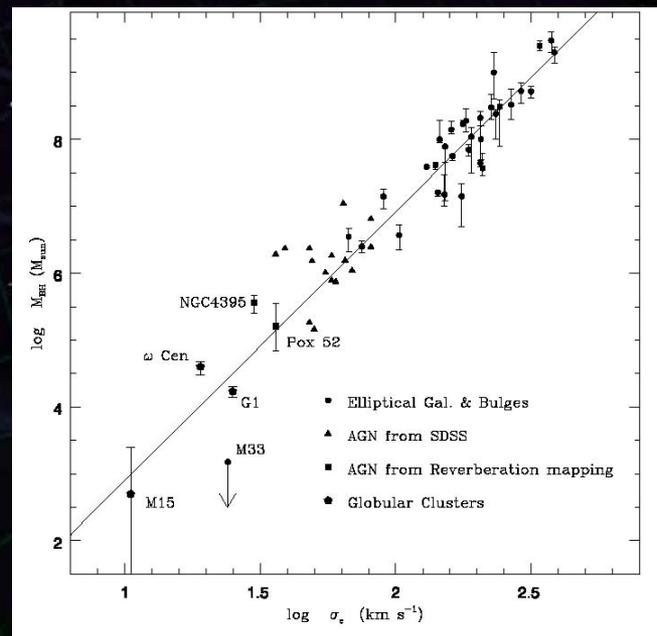


FIG. 9.— M_{BH} - σ_{vel} relation for elliptical galaxies and bulges. The solid line is the relation in Tremaine et al. (2002). ω Cen lies on the low-mass extrapolation and suggests a similarity between it and the galaxies. Different types of systems such as star clusters and low-luminosity AGNs appear to populate the low-mass end of the diagram.