

---

# 小型衛星パスファインダーによる総合的試験

---

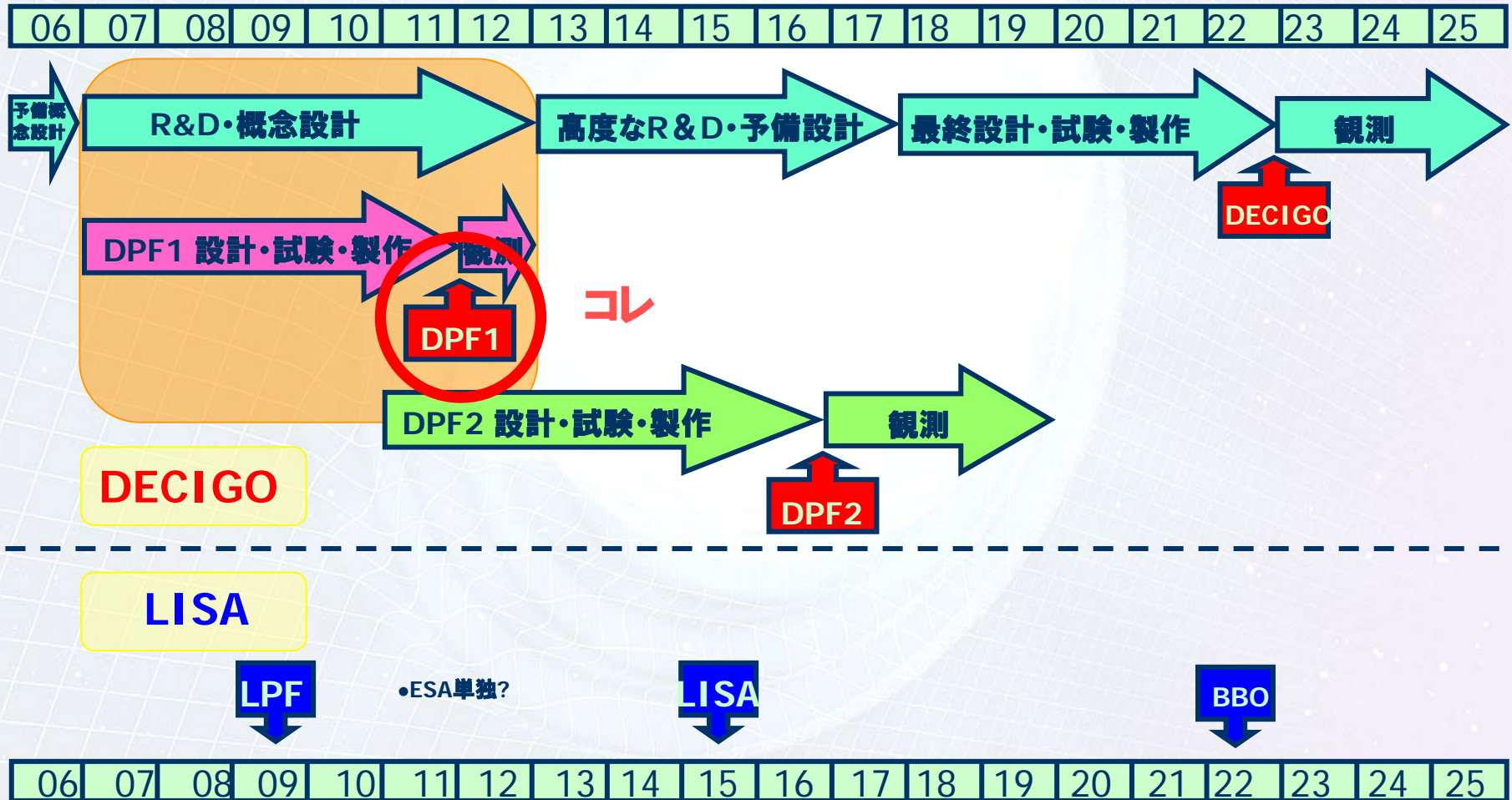
**安東 正樹**

**(東京大学 理学系研究科 物理学教室)**

**DECIGO-WG**

# DECIGO-PF1 (1)

## ● DECIGO-PF



# DECIGO-PF1 (2)

## ● DECIGO-PF1

DECIGO実現のためには、各要素技術の地上での入念な試験は不可欠  
その一方で、実際に**宇宙空間でなければ試験できない項目**もある

### 小型実験衛星 (DECIGO-PF1) で試験

衛星のサイズ：70cm立方, 100kg級, 1機

地球周回軌道 (ピギーバック打ち上げ)

開発期間： 6年



宇宙空間における基礎技術の**総合的な宇宙実証試験**  
宇宙空間の安定な環境・レーザー干渉計  
を利用した**重力波観測実験**

# DECIGO-PF1 (3)

## ● DECIGO-PF1の目標

### DECIGOのための**宇宙実証試験**

- (1) **衛星のドラッグフリー制御** の実証試験
- (2) **レーザー光源とその安定化システム** の宇宙実証試験
- (3) **レーザー干渉計(FP共振器)制御** の宇宙実証
- (4) **クランプ・リリース機構** の宇宙実証試験

### 科学的成果

- (5) **小型重力波検出器による低周波数の重力波の観測**



#### DECIGO-PF1

**衛星** : 70cm立方, 100kg級, 1機, 地球周回軌道

ドラッグ・フリーの組み込み

レーザー光源とその安定化システム

フリーマスで構成された基線長10cmのFP共振器

→ **実証試験と, 半年間の重力波観測**

地上での観測が困難な 0.1-10Hzの重力波を観測

実際に検出されない場合

→ これまでに無い周波数帯で, 上限値を与える

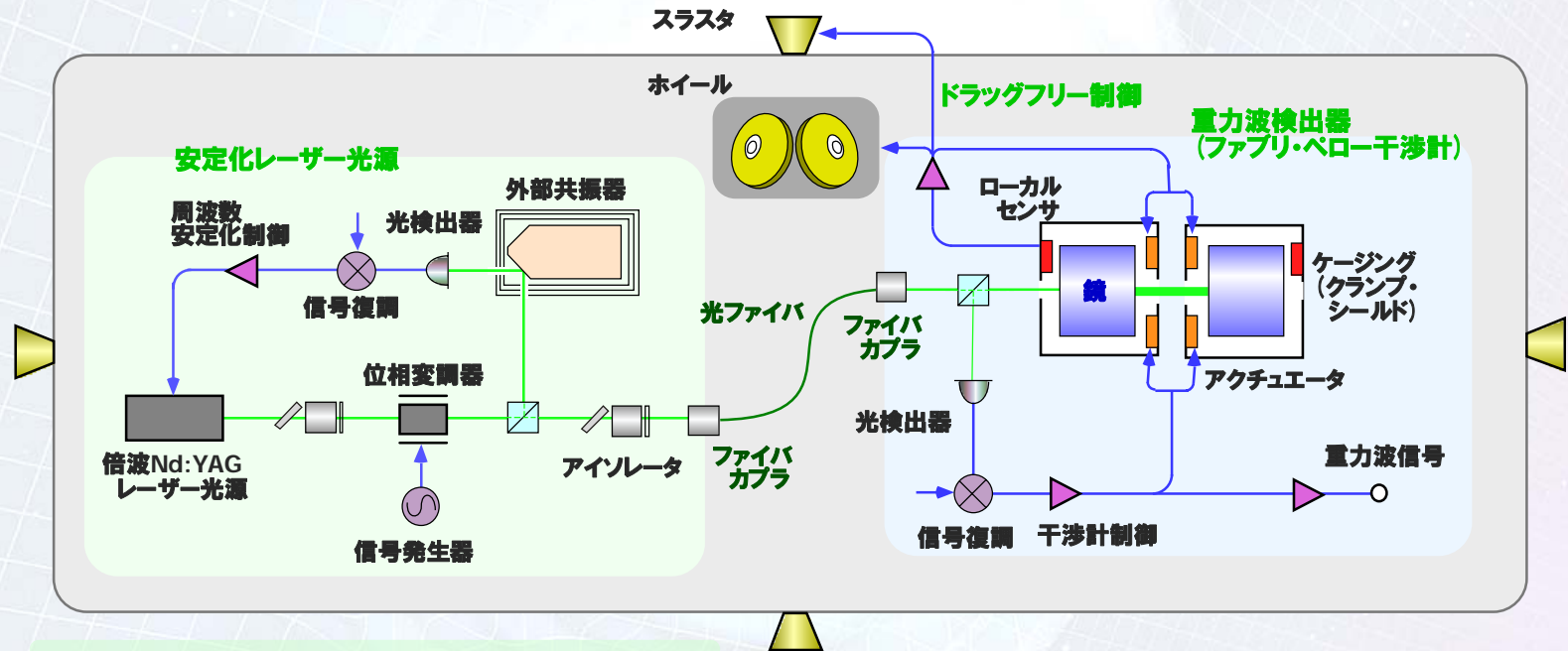
# DECIGO-PF1 (4)

## ● DPF1 概念設計

ミッション機器重量 : 20kg  
ミッション機器空間 : 400x400x400 mm

### ドラッグフリー

ローカルセンサで相対変動検出  
→ スラスト・ホイールにフィードバック



### レーザー光源

倍波Nd:YAGレーザー  
(NPRO + 高調波変換)  
出力 100mW  
外部共振器による周波数安定化

### ファブリー・ペロー共振器

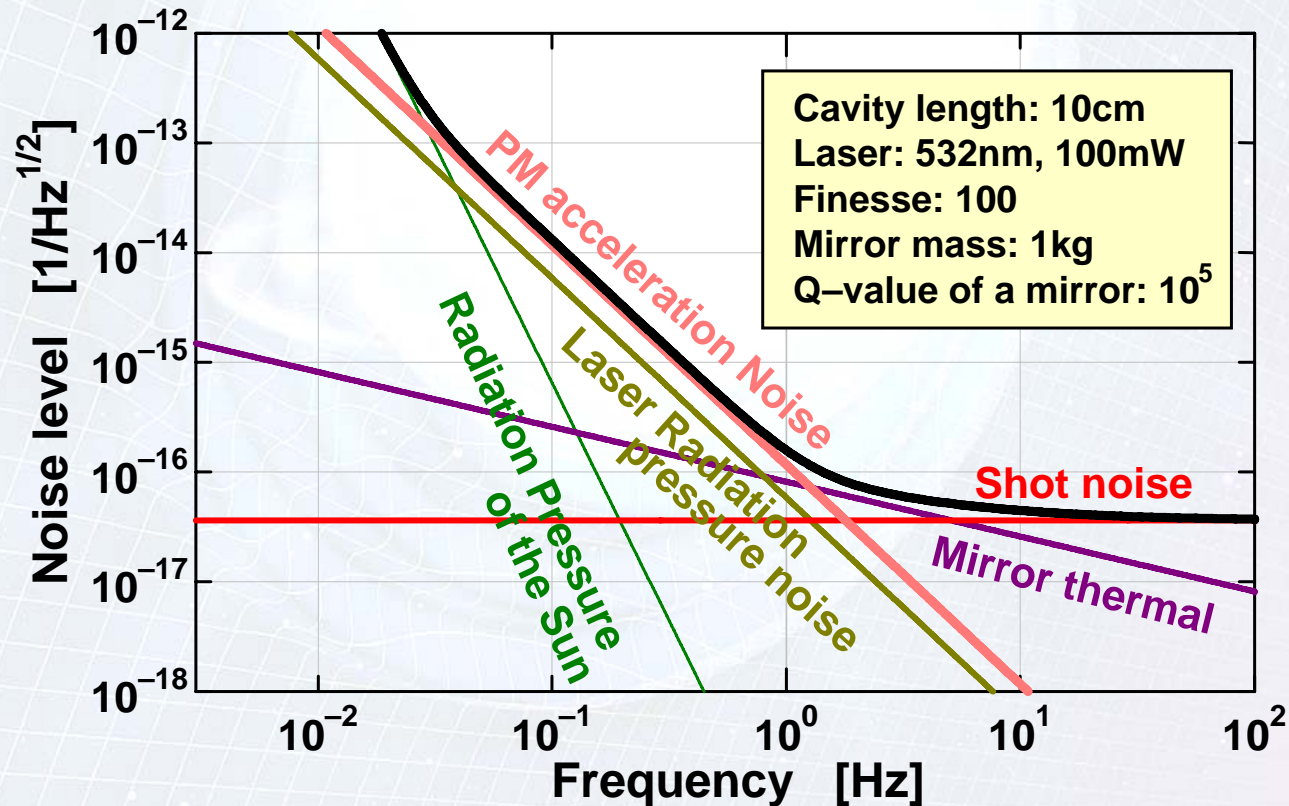
フィネス : 100  
基線長 : 10cm  
テストマス : 質量 1kg  
PDH法により信号取得・制御

# DECIGO-PF1 (5)

## ● 重力波に対する感度

光源 : 532nm, 100mW  
共振器長 : 10cm  
フィネス : 100, 鏡質量 : 1kg  
鏡Q値 :  $10^5$ , 基材: 銅合金  
温度 : 293K

衛星重量 : 100kg, 衛星実効面積 :  $1\text{m}^2$   
衛星高度: 750km  
スラスト雑音:  $0.1 \mu\text{N}/\text{Hz}^{1/2}$



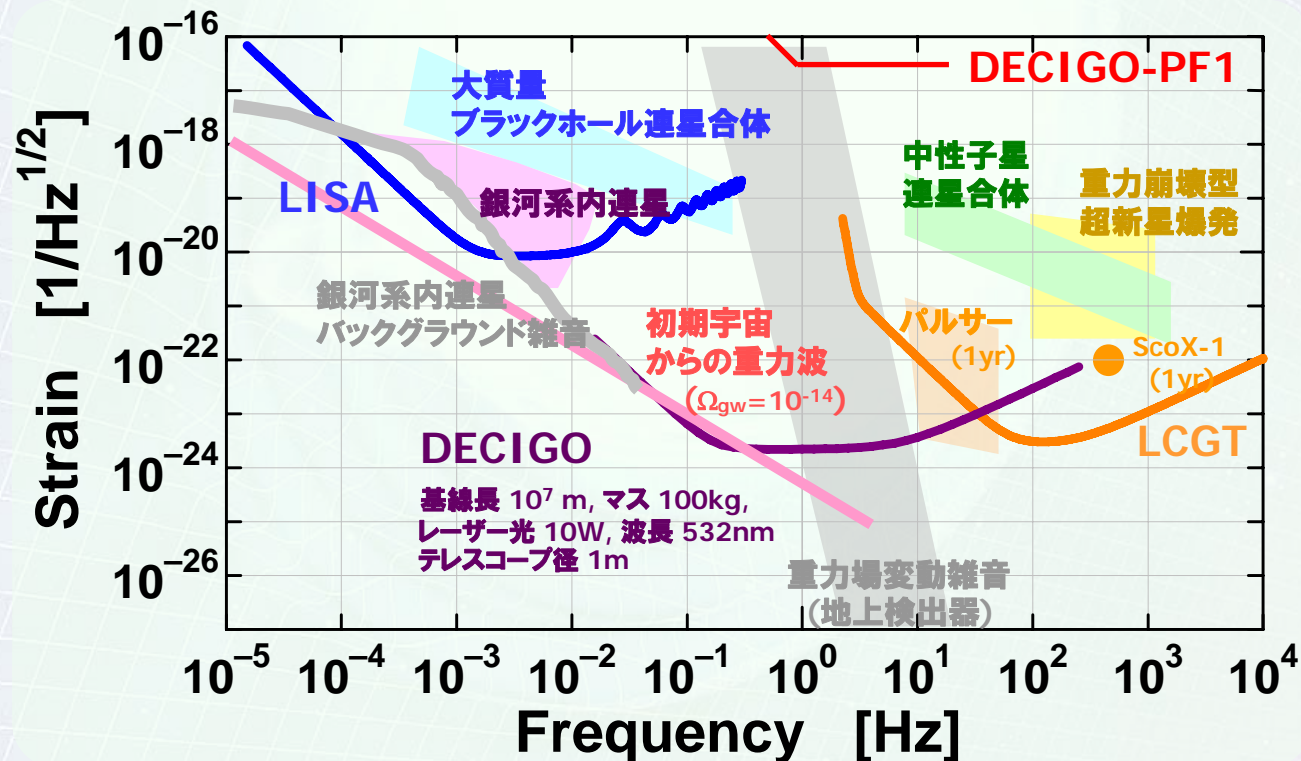
# DECIGO-PF1 (6)

## ●他の重力波検出器との比較

本格的な将来計画と比較すると見劣りするが、過去のものよりはやや良い

ドップラートラッキング  $h \sim 10^{-15}$  ( $10^{-4}$ - $10^{-2}$  Hz)

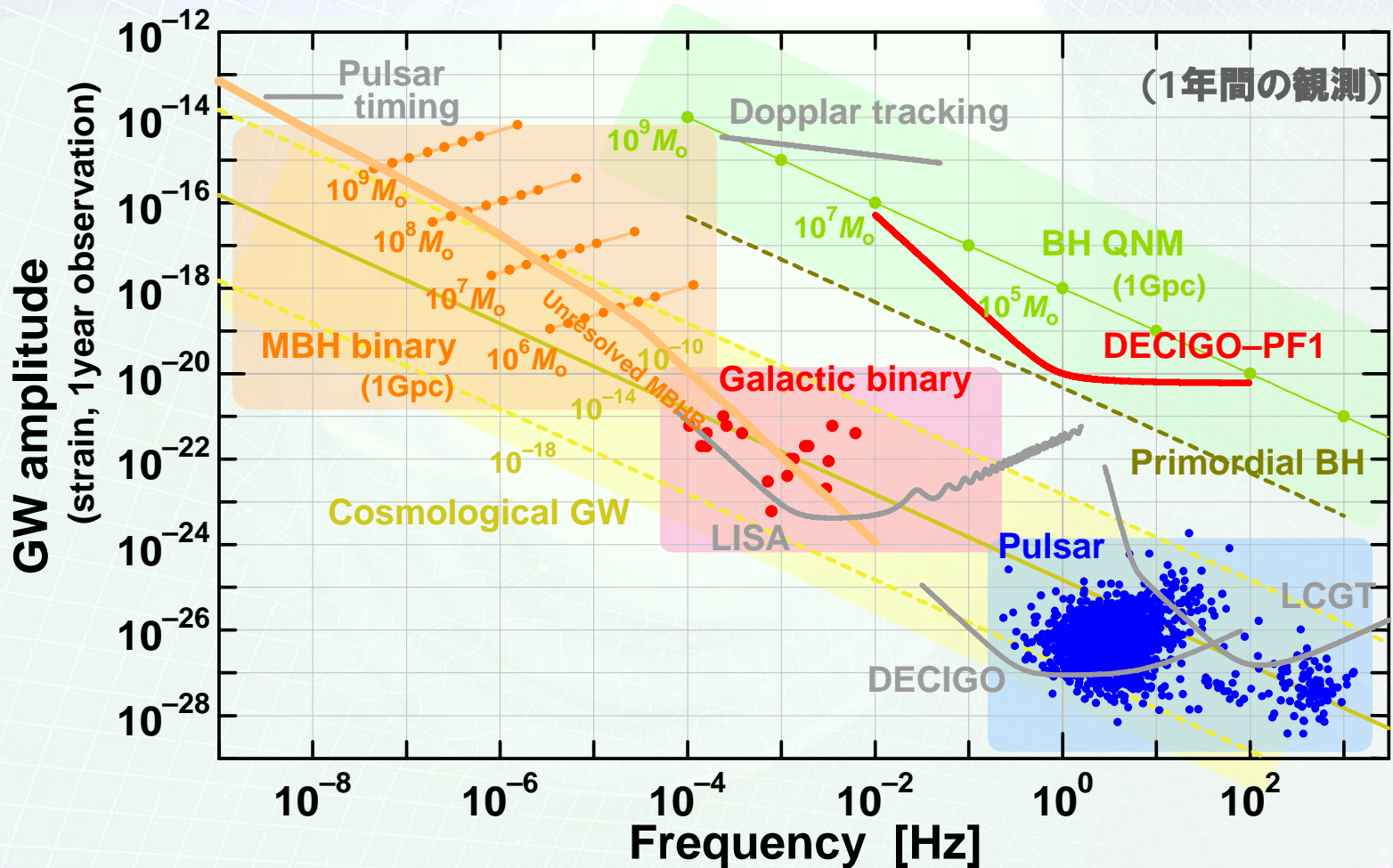
パルサータイミング  $h \sim 10^{-14}$  ( $10^{-8}$  Hz)



# DECIGO-PF1 (7)

## ● 重力波源

連続重力波, バックグラウンド重力波 (1年間の観測, 2台での観測を仮定)





# DECIGO-PF1 (8)

## ●バースト的重力波

### BH準固有振動からの重力波

(「重力波をとらえる」の見積り)

$$h \sim 10^{-15} \left( \frac{m}{10^8 M_{\odot}} \right) \left( \frac{1 \text{ Gpc}}{r} \right)$$

$$f \sim 10^{-3} \left( \frac{10^8 M_{\odot}}{m} \right) \text{ [Hz]}$$

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

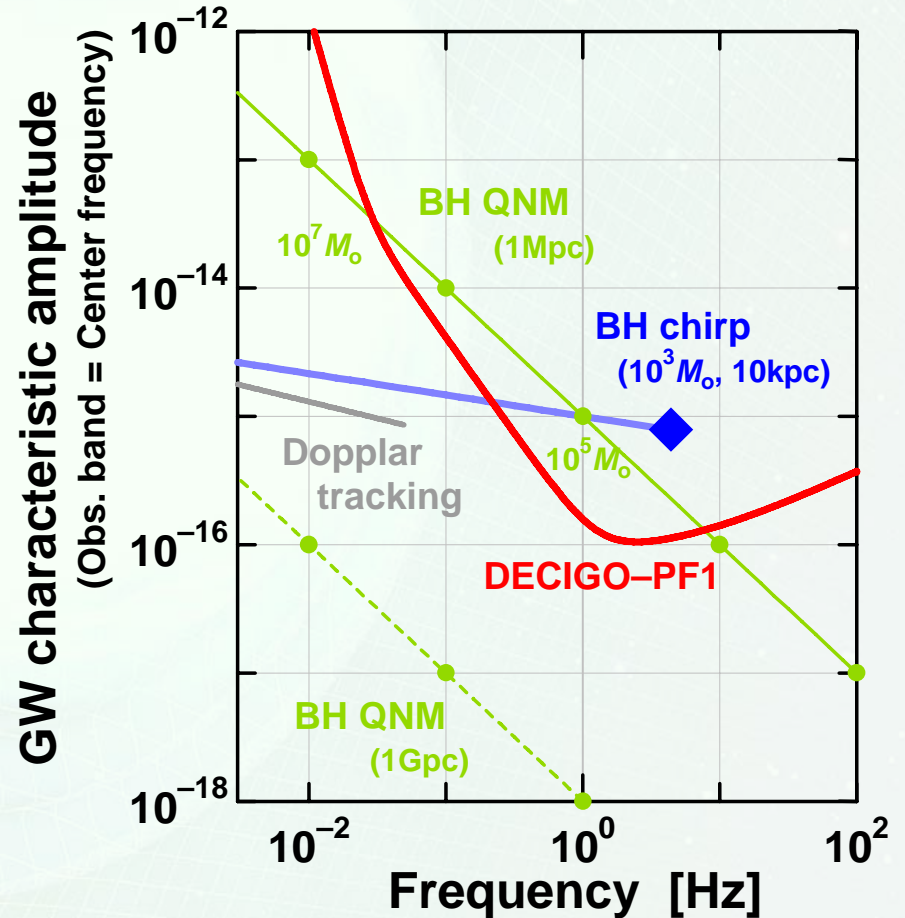
### 中間質量ブラックホール合体

(高橋龍一氏の見積り)

$$h \sim 10^{-15} \left( \frac{m_c}{10^3 M_{\odot}} \right)^{5/6} \left( \frac{1 \text{ Hz}}{f} \right)^{1/6} \left( \frac{10 \text{ kpc}}{r} \right)$$

$$f \sim 4 \left( \frac{10^3 M_{\odot}}{m_t} \right) \text{ [Hz]}$$

$h \sim 10^{-15}$ ,  $f \sim 4 \text{ Hz}$   
距離 10kpc,  $m = 10^3 M_{\text{sun}}$



# DECIGO-PF1 (9)

## ● 研究計画

### 1年目： 概念設計およびブレッドボードモデルの開発

ブレッドボードモデルを作製し、その動作を行なう。衛星本体とインターフェース部の基本設計を取りまとめ、それら結果を元に、DECIGOパスファインダーの基本設計を固める。

### 2年目： ブレッドボードモデルの性能評価とエンジニアリングモデルの設計

ブレッドボードモデルの性能の評価と感度の向上実験を行い、雑音に関して所定の要求値を満たすよう改良を行う (歪み感度で $10^{-16}/\text{Hz}^{1/2}$ )。また、それらを元にエンジニアリングモデルの設計に取り掛かる。

### 3年目： エンジニアリングモデルの製作

他の開発要素 (ドラッグフリー制御技術、Nd:YAGレーザー光源、外部共振器による周波数安定化) の開発成果の供与を受けて、重力波観測装置部のエンジニアリングモデルを製作し、各種試験を行う。それらの結果を踏まえて、実際に打ち上げる衛星全体の詳細設計を完成させる。

### 4年目： プリ・フライトモデルの開発

実際に打ち上げる仕様での試験機 (プリ・フライトモデル) の製作と試験を行う。

### 5年目： フライトモデルの製作と試験

フライトモデルの振動試験・宇宙環境試験を行なう。

### 6年目： 打ち上げと動作

打ち上げと軌道上の宇宙実証試験を行う。さらに、半年間の重力波観測を行なう。

# DECIGO-PF1 (10)

## ● 研究体制・開発コスト

### 研究体制 (暫定)

安東 正樹, 坪野 公夫, 石徹白 晃治, 高橋 走, 小野里 光司, 沼田 健司 (東京大学 理学系研究科), 川村 静児, 新井 宏二, 佐藤 修一, 森本 睦子, 苔山 圭以子, 高橋 龍一 (国立天文台 重力波プロジェクト推進室), 森脇 成典, 川浪 徹 (東京大学 新領域創成科学研究科), 武者 満, 植田 憲一 (電気通信大学), 神田 展行 (大阪市立大学), 瀬戸 直樹 (カリフォルニア大学), 佐藤 孝 (新潟大学), 麻生 洋一 (コロンビア大学), 船木 一幸 (宇宙航空研究開発機構), .....

**仕様書(提案書)を作成中**

**申請書に記載する研究体制に関しては、今後、調整**

### 開発コスト

**研究開発費** : 300百万円

**衛星本体製作費** : 300百万円 (ミッション 150, 衛星バス 150)

(光源や安定化システム、スラスタなどは、各計画研究より支給)

**合計** : 600百万円 (6億円)

(打ち上げ・運用費は含まれていない)

(注)

小型衛星本体製作費には予備機も含む  
研究開発費にはプロトタイプ機も含む  
人件費 延べ 10 (人x年) を含む  
掛け値は考慮していない

# まとめ

**小型衛星 (DECIGO-PF1) によって,**  
**宇宙空間における基礎技術の総合的な宇宙実証試験**  
ドラッグフリー技術, レーザー光源と安定化システム,  
干渉計を用いた計測システム, クランプシステム

**宇宙空間の安定な環境・レーザー干渉計**  
**を利用した重力波観測実験** を行なう

# DECIGO-PF1 (11)

## ● 開発コスト内訳

項目	細目	費用	小計	備考
衛星本体				予備部品も含む
		レーザー光源	15	
		干渉計用鏡	10	
		周波数安定化光学系	10	
		干渉計用ケーシング	25	
		その他光学系	20	熱シールド・温度安定化を含む
		干渉計制御回路	30	
		ドラッグフリー用センサ	10	
	コンピュータインターフェー	30		
	小計		150	
衛星バス系		電源ユニット	40	太陽電池パネルを含む
		衛星制御回路	20	
		衛星姿勢制御装置	30	スラスタを含む
		データ通信装置	30	地上でのデータ取得・解析装置を含む
		コンピュータユニット	30	
	小計		150	
開発費		プリ・フライトモデル	70	
		ブレッドボードモデル	70	
		試験費用	70	
		測定機器	40	
		人件費	50	
			300	
衛星開発費小計			600	

運用費		打ち上げ	300	衛星重量 100kg
		観測・通信施設	100	
			400	
合計			1000	

単位：百万円

# DECIGO-PF1 (12)

## ● 加速度雑音

(沼田氏の計算を参考)

### 磁気的な効果

衛星の持つ磁気-テストマス帯磁率:  $A_1$

惑星間磁気-テストマス帯磁率:  $A_2$

電荷の揺らぎによるローレンツ力揺らぎ:  $A_3$

惑星間磁気揺らぎによるローレンツ力揺らぎ:  $A_4$

### 衝突による効果

宇宙線の衝突による反跳:  $A_5$

残留ガスの衝突による反跳(熱雑音):  $A_6$

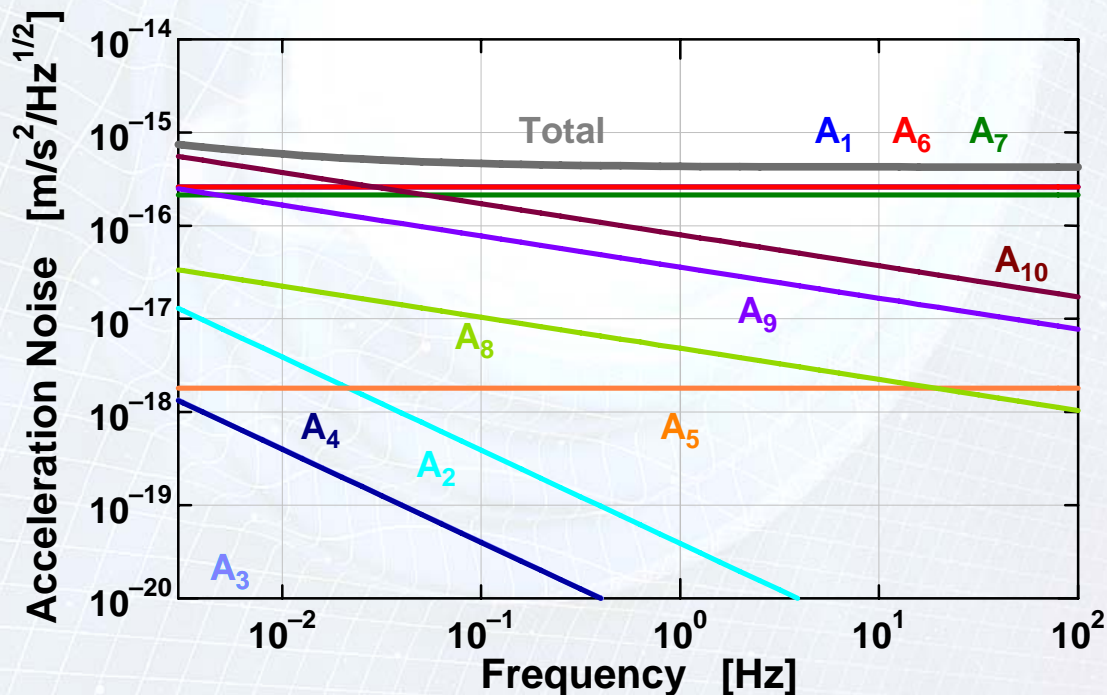
光子の衝突による反跳(光輻射圧雑音):  $A_7$ (古典的)

### 温度による効果

ハウジングの差動温度揺らぎ-残留ガス気圧変化:  $A_8$

ハウジングの温度揺らぎ-熱輻射圧変化:  $A_9$

衛星の熱変形-重力場変化:  $A_{10}$



# DECIGO-PF1 (13)

## ●平成19年度 特定領域研究

DECIGOのための基礎研究 + DECIGO Path Finder1 +PTA で申請する  
総額 20 億円

DPF1の開発

レーザー光源 + 安定化システムの開発

スラスタの開発

ドラッグフリー制御の研究

地上試験用シミュレーター

大口径ミラーの開発

DPF1 で 8億円 (本体 6億円 + 各要素の供給 2億円)

打ちは、JAXAで公募されているものに申請する

# DECIGO-PF1 (14)

## ●ドラッグフリー・スラストに対する要求 (DPF1)

### 仕様決定要素

衛星にかかるDC的な力(太陽輻射圧  $10 \mu\text{N}$ )の影響  
を十分に打ち消すことができるだけの最大推力  
ドラッグフリー制御の結果, 衛星にかかる外乱  
(太陽輻射圧雑音  $2.5 \times 10^{-9} \text{ N}/\sqrt{\text{Hz}}$ ) よりも  
衛星変動を安定化できるだけの, スラスト雑音レベル  
 $10 \text{ Hz}$ のドラッグフリー制御帯域が確保できるだけの応答特性  
半年間の運用ができるだけの寿命と総推力



### スラストに対する要求値

最大推力  $100 \mu\text{N}$  (安全係数10, 推力可変であること)  
推力雑音  $\delta F_{\text{thruster}} < 10^{-7} \text{ N}/\sqrt{\text{Hz}}$  (0.1 Hzでの値)  
応答速度  $10 \text{ Hz}$ 以上  
半年以上の運用寿命 (平均推力  $30 \mu\text{N}$ , 安全係数3)

### ドラッグフリー制御に対する要求

0.1 Hzでの制御ゲイン  $K > 40$   
制御帯域  $10 \text{ Hz}$  以上

### 衛星-試験質量間カップリングに対する要求

0.1 Hzでのカップリング係数  $K < 10^{-6}$  以下 (安全係数 8)

