

小型重力波観測衛星 DECIGOパスファインダー



Original
Picture : Sora

安東 正樹 (東京大学)

DECIGO/DPF collaboration

Earth Image: ESA

DECIGOパスファインダー (DPF)

将来の宇宙重力波望遠鏡DECIGOのための前哨衛星

1機の衛星で可能な宇宙実証をおこなう

→ DECIGOのみならず、宇宙・無重力環境
利用のための先端宇宙技術の確立。



イプシロン搭載小型ミッション としての実現を目指す。

小型衛星 1 機 (重量 400kg)

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

DPFを、DECIGOのための技術実証衛星として提案する。
そのために、3つの論点について説明する。

- (1) **背景の説明**：宇宙重力波望遠鏡DECIGOでは、他では得られない本質的な科学的成果が期待できること。
- (2) **DPFの目的**： DPFはDECIGOへ技術的につなげる重要な役割を持っていること。
- (3) **DPFの概念設計**： DPFの実現が十分に可能であること。

(1) 背景

宇宙重力波望遠鏡 DECIGO



DECIGO (DECI-hertz interferometer
Gravitational wave Observatory)

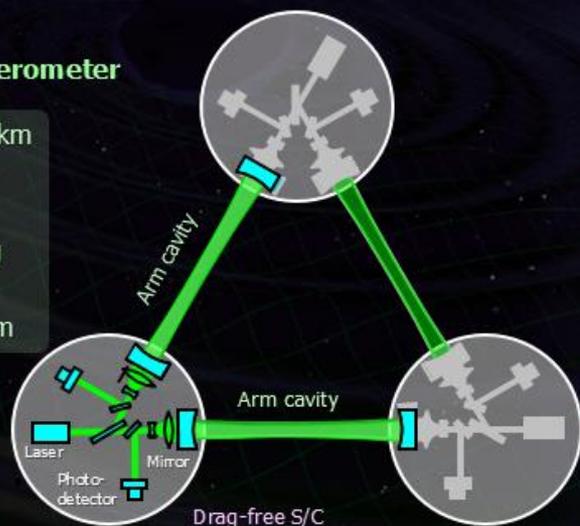
宇宙のはじまりを直接観測する。

ビッグバン宇宙論において、空間・物質の種が、
いかに形成されたかを観測によって解き明かす。

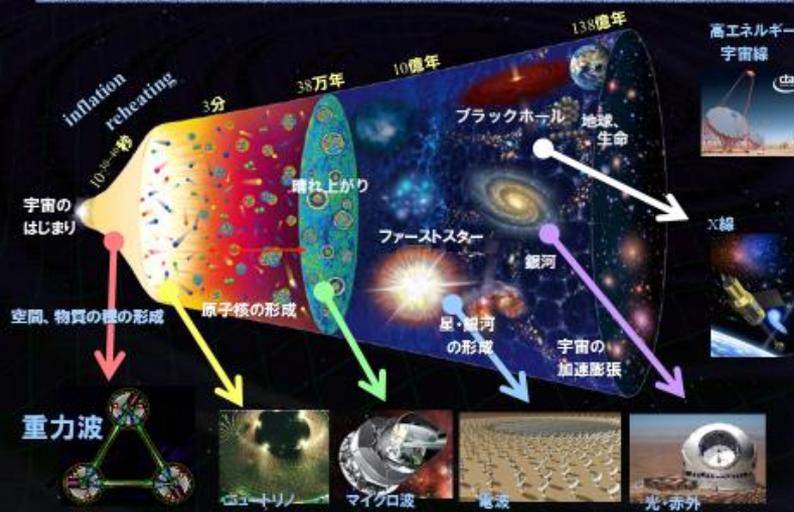
Interferometer Unit:
Differential FP interferometer

Arm length: 1000 km
Finesse: 10
Mirror diameter: 1 m
Mirror mass: 100 kg
Laser power: 10 W
Laser wavelength: 532 nm

S/C: drag free
3 interferometers



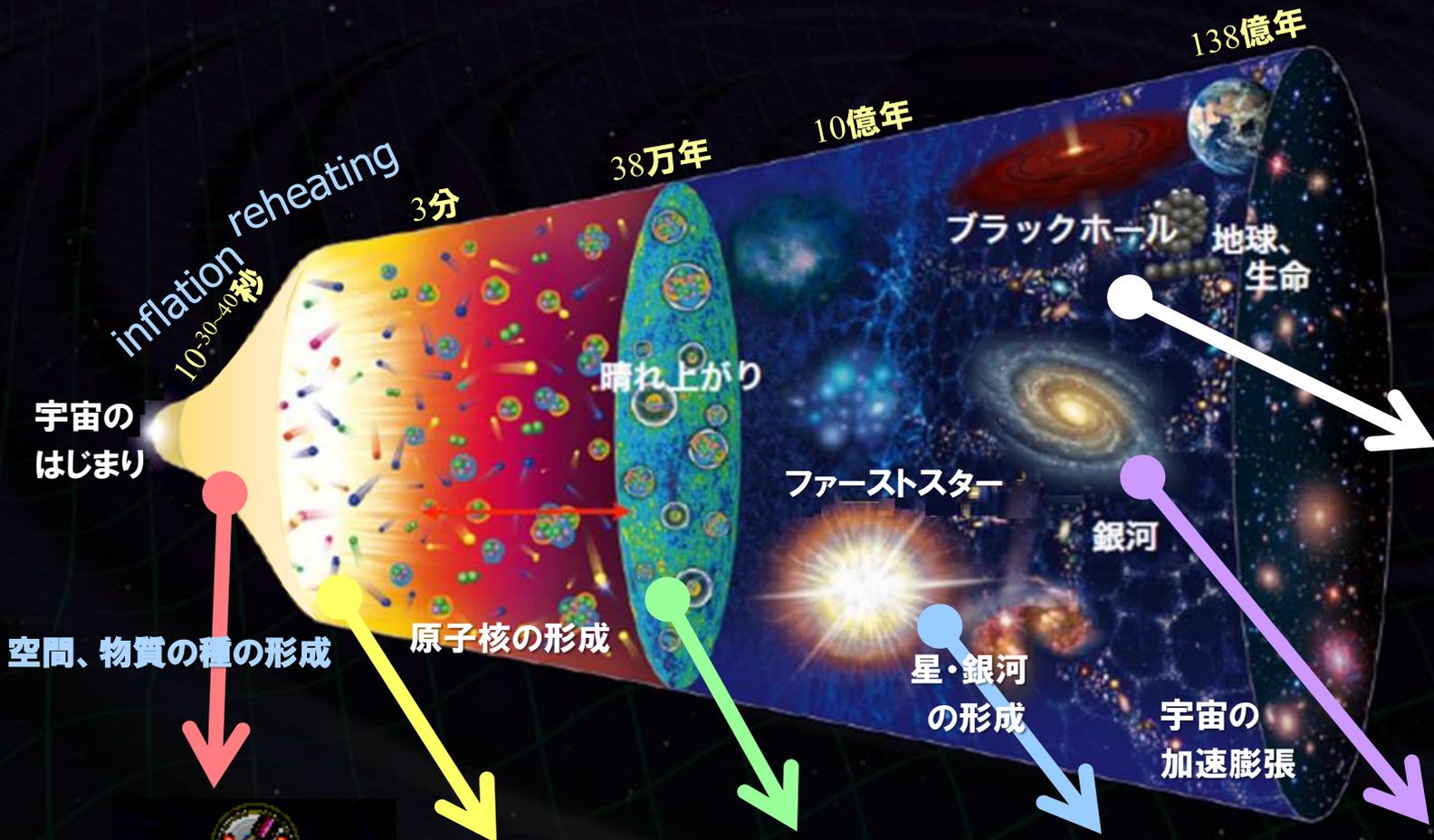
宇宙の誕生と進化



宇宙科学シンポジウム (2014年1月8日, 宇宙科学研究所, 相模原)

宇宙の誕生と進化

DECTGO



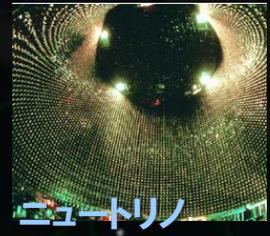
高エネルギー
宇宙線



X線



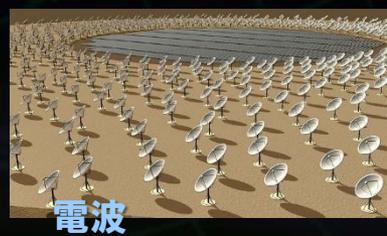
重力波



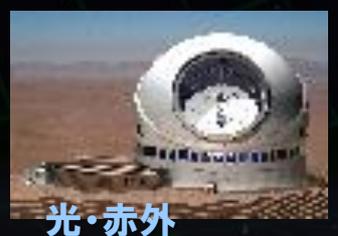
ニュートリノ



マイクロ波



電波



光・赤外

- 重力波の周波数 \sim (光の速度)/(波源の空間スケール)
 - 初期宇宙からの背景重力波の周波数は、それが放射された際の**宇宙のスケール(+赤方偏移補正)**に対応。



高い周波数ほど、より初期の宇宙を見ることになる。

- インフレーション起源の重力波: ほぼエネルギー一定スペクトル。
重力波振幅 h では、 $-3/2$ 乗のスペクトル依存性。
 - **高周波数帯では振幅が小さくなる。**
- 地上での観測 ($\sim 100\text{Hz}$): 振幅が小さい。地面振動の影響。
- eLISA ($\sim 1\text{mHz}$) : 白色矮星連星によるフォアグラウンド。
- **DECIGO ($\sim 0.1\text{Hz}$) : 背景重力波に対して開けた周波数帯。**

初期宇宙からの重力波

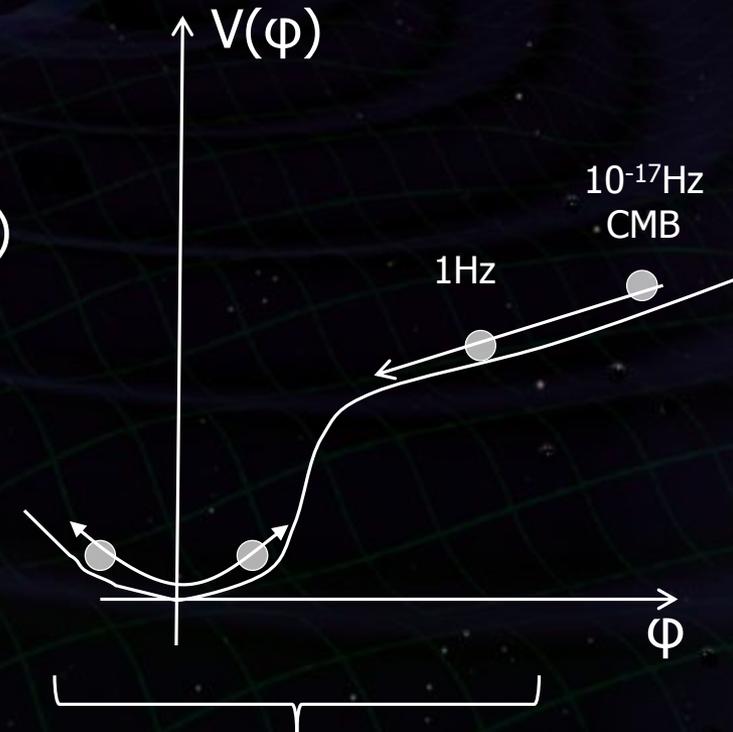
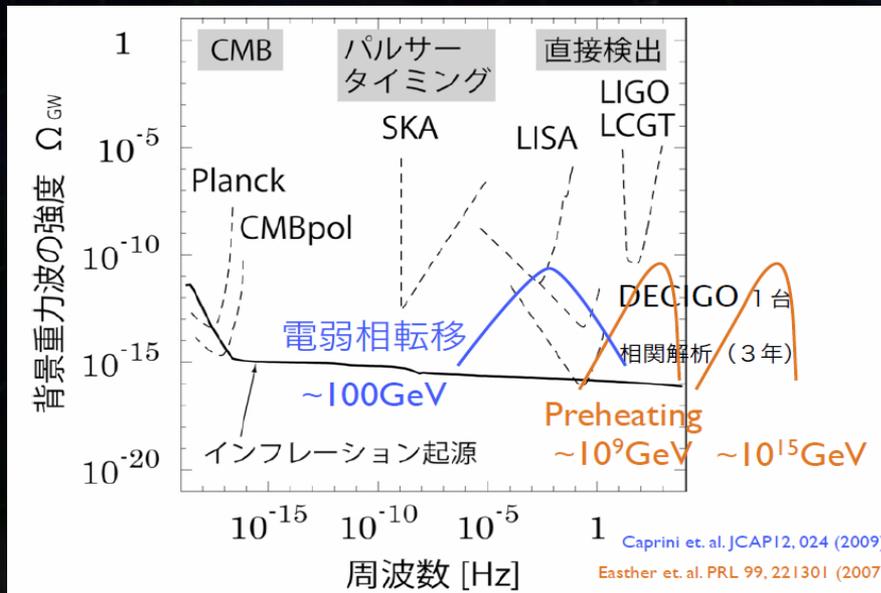
初期宇宙におけるスカラー場のダイナミクス

- インフレーション期

- * スカラー場がゆっくりと転がる
- * DECIGOとCMB: 異なった時期をみる

- リヒーティング期

- * ポテンシャルの底でのエネルギー変換(熱化)
- * 終了後にビッグバン宇宙が続く

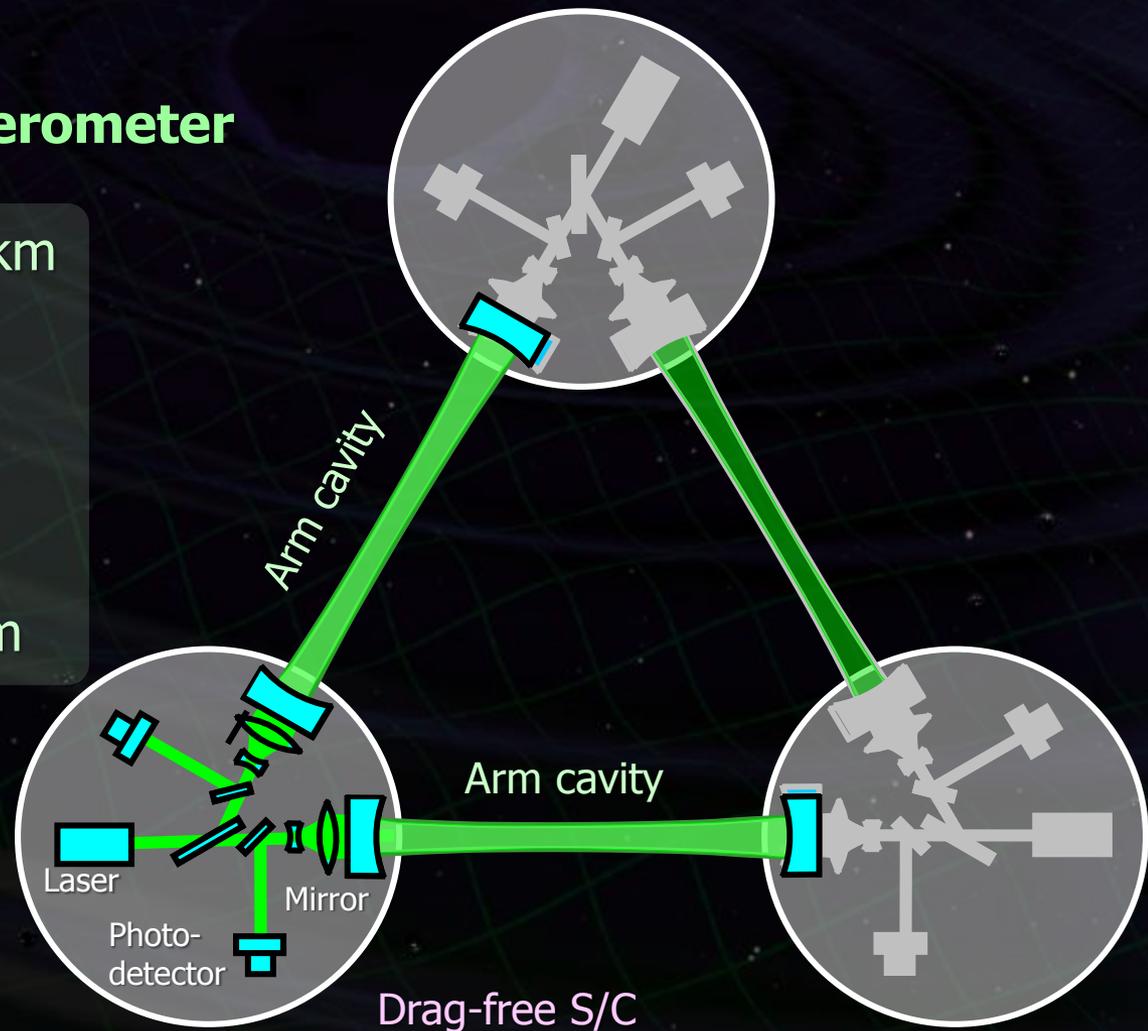


Interferometer Unit:

Differential FP interferometer

Arm length:	1000 km
Finesse:	10
Mirror diameter:	1 m
Mirror mass:	100 kg
Laser power:	10 W
Laser wavelength:	532 nm

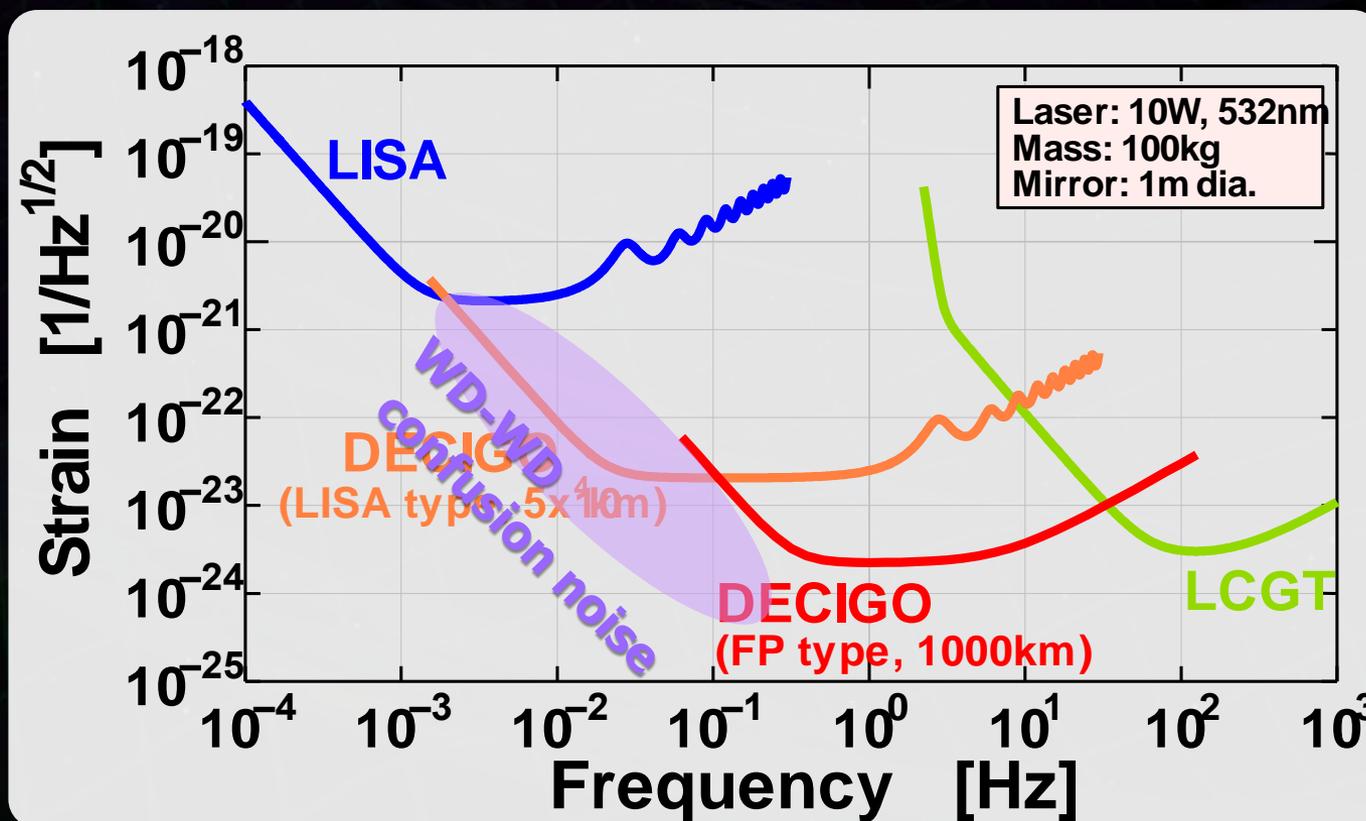
S/C: drag free
3 interferometers



Transponder type vs Direct-reflection type

Compare : Sensitivity curves and Expected Sciences

⇒ Decisive factor: Binary confusion noise



干渉計による測距

変位雑音 $3 \times 10^{-18} \text{ m/Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)

⇒ KAGRA より10倍緩やか.

他の雑音は散射雑音以下であることが要求される

レーザー光源周波数雑音: $1 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$ (1Hz)

安定化ゲイン 10^5 , CMRR 10^5

加速度雑音

力の雑音 $4 \times 10^{-17} \text{ N/Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)

⇒ LISAより50倍厳しい.

多くの外乱雑音源

磁場変動, 電場変動, 宇宙機重力場変動,
温度, 残留気体, など.

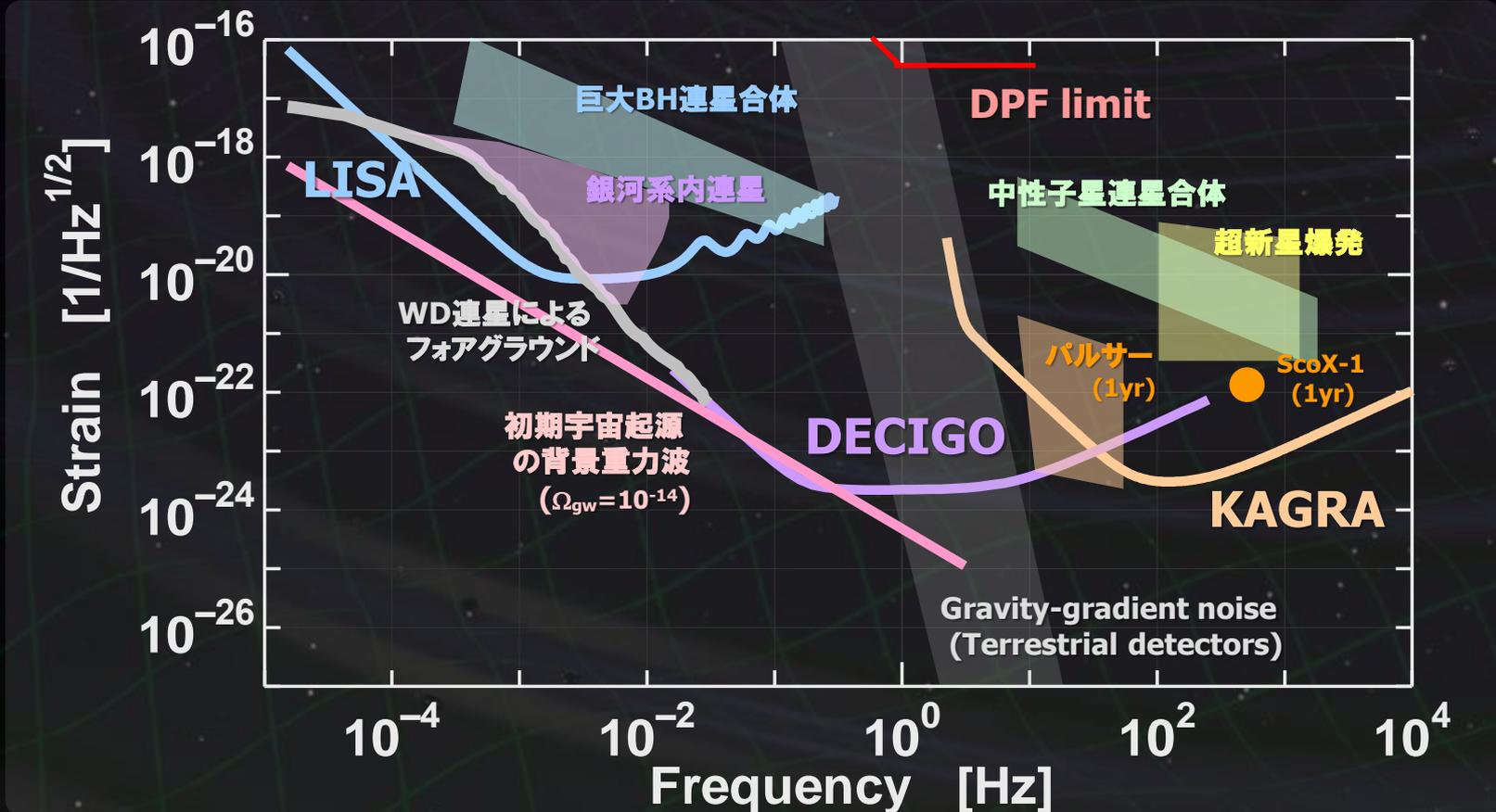
補足: 重力波望遠鏡の感度とターゲット

補足

地上干渉計 : 10Hz - 1kHz → 中性子星など

DECIGO : 0.1 - 1Hz → 初期宇宙からの重力波、中間質量BH

LISA : 1mHz - 10mHz → 大質量BHなど



補足: DECIGOで期待できる成果

補足

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

宇宙のはじまりに関する知見

空間の形成(インフレーション)

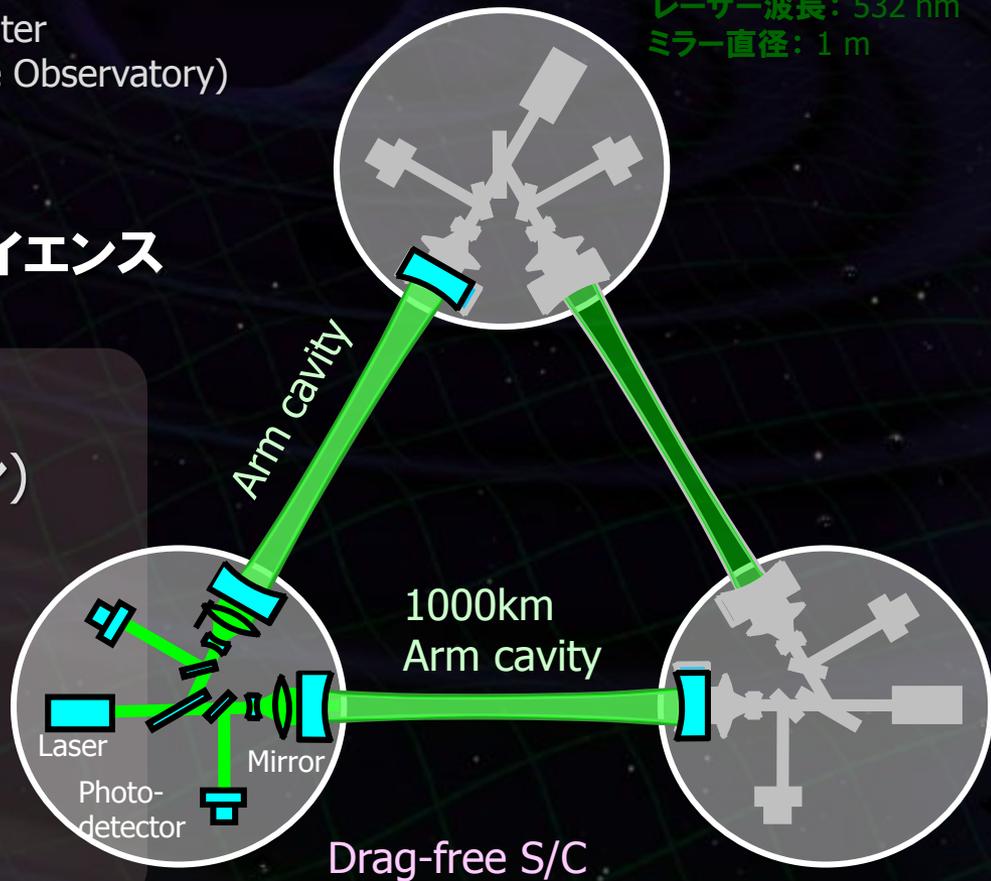
物質の起源(リヒーティング)

構造形成に関する知見

ブラックホール連星の観測

ダークマターの探査

宇宙の基本法則の探究



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

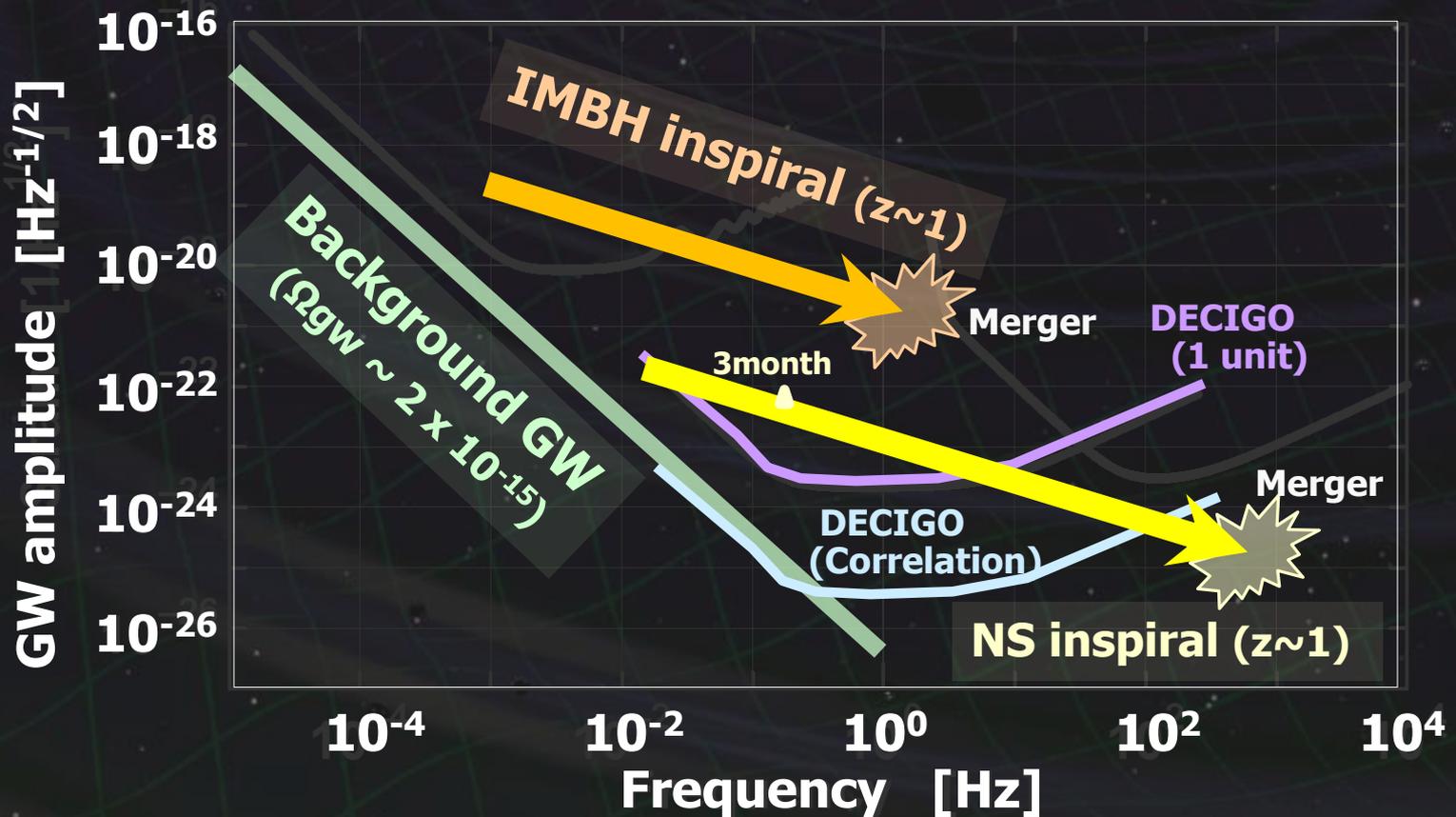
補足: DECIGOの観測対象

補足

中間質量BH 連星の合体
中性子星 連星の合体
宇宙背景重力波



宇宙の成り立ちと進化
銀河・超巨大BHの形成



補足: Arm length

補足

Cavity arm length : Limited by diffraction loss

Effective reflectivity ($TEM_{00} \rightarrow TEM_{00}$)

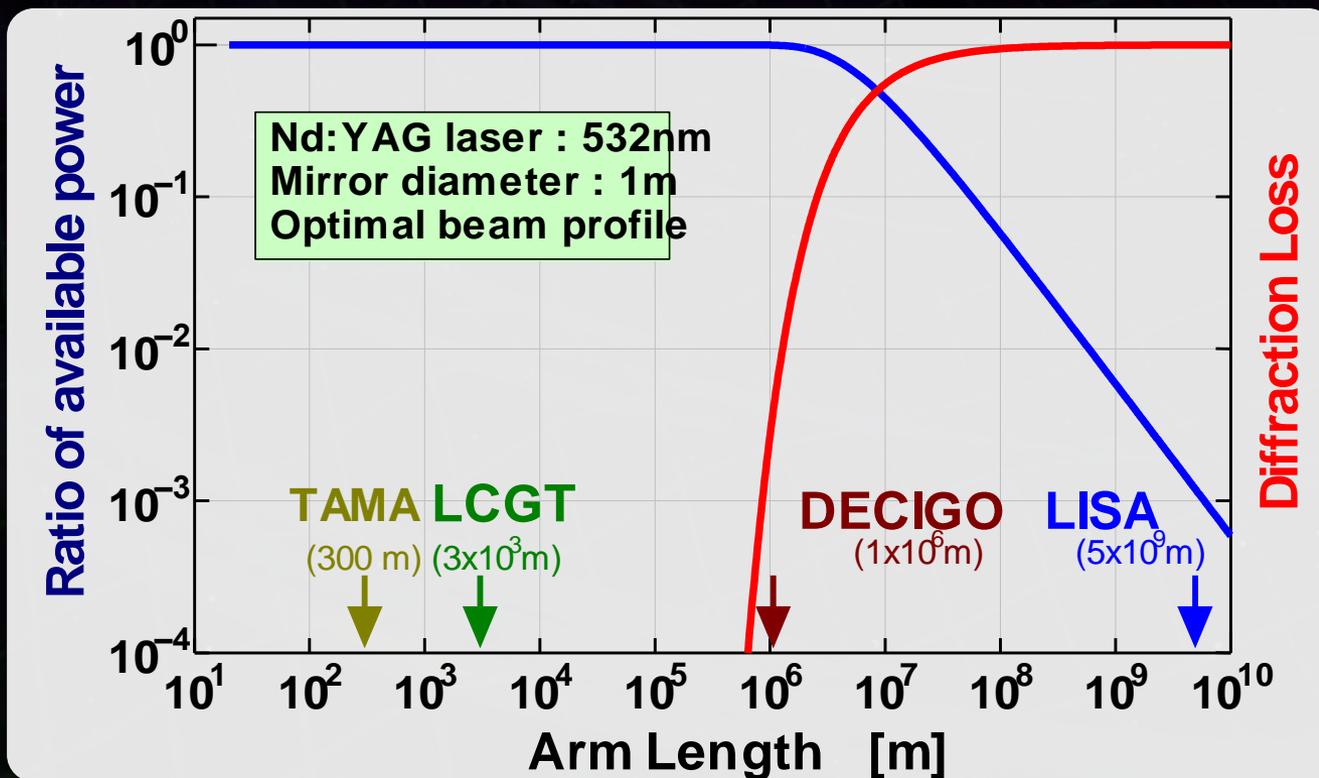
Laser wavelength : 532nm

Mirror diameter: 1m

Optimal beam size



1000 km
is almost max.



補足: 干渉計と宇宙機の制御

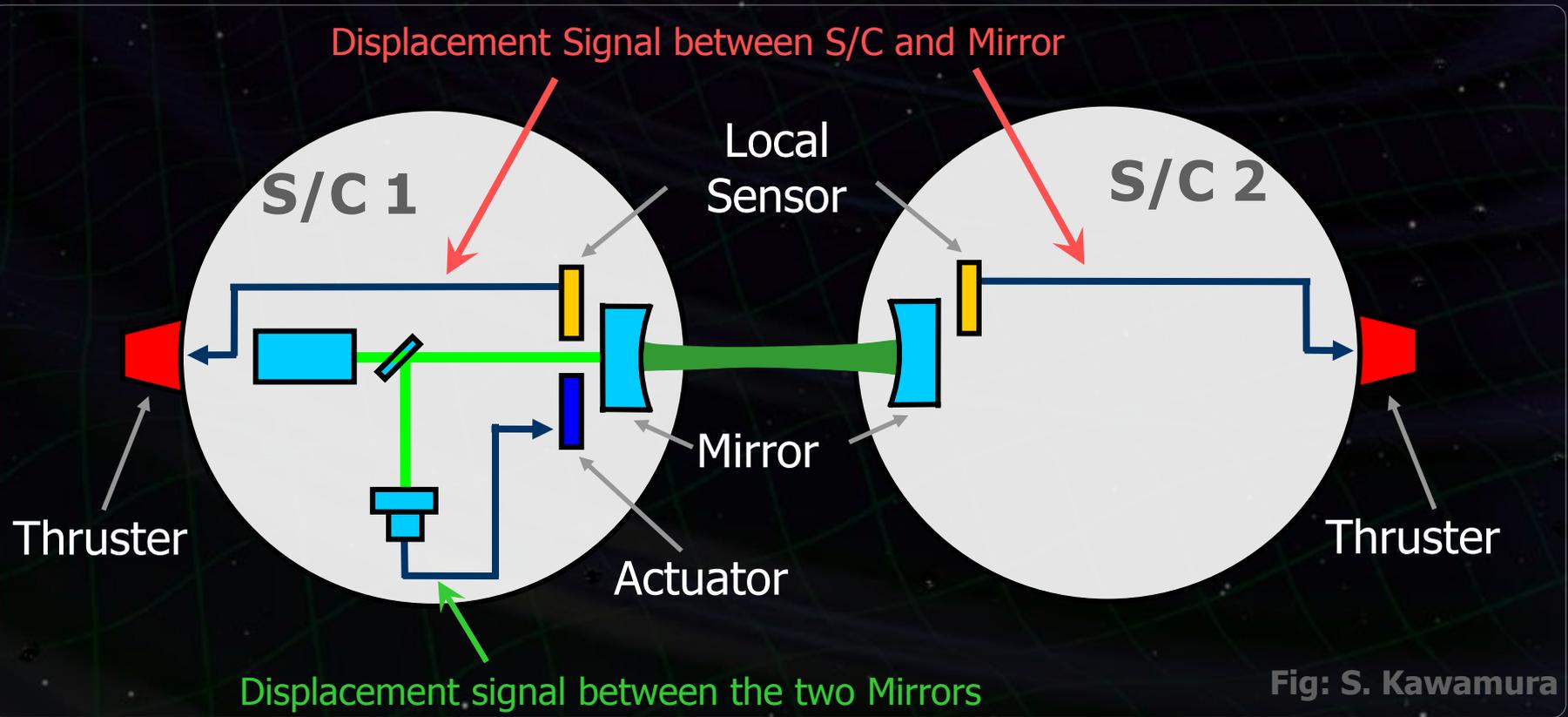
補足

干渉計(FP共振器)の基線長制御

干渉計信号 → 鏡の位置(と光源周波数)制御

宇宙機と鏡の相対位置

ローカルセンサー信号 → スラスタ (ドラッグフリー制御)



(2) DPFの目的

• DECIGOで必要とされる先端技術

(1) レーザー干渉計による精密計測技術.

宇宙空間において、レーザー干渉計を用いた精密変動計測・外乱除去が行われた例はない。

(2) 長基線長の精密フォーメーションフライト技術.

基線長1000km規模でのフォーメーションフライトが行われた例はない。



DPFでは、項目(1)の宇宙実証を目標とする。

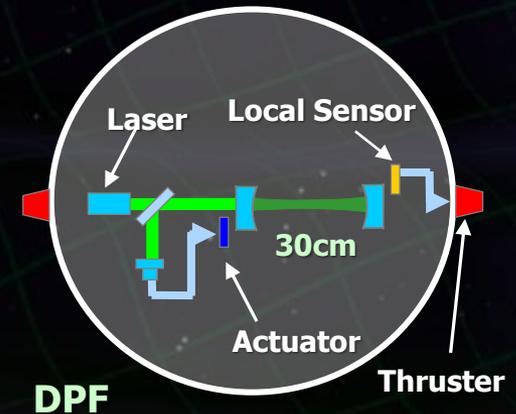
DECIGOパズファインダー (DPF)

- DECIGOの最初の前哨衛星
- DECIGOで必要とされる主要技術のうち、1機の衛星で可能な要素の宇宙実証。



400kg級 衛星一機 500km 地球周回軌道

- 基線長30cm干渉計による干渉計技術実証.
- 安定化レーザー光源の動作.
- ドラッグフリーの実現.
- 連続的な観測運用.



DECIGOのための技術実証

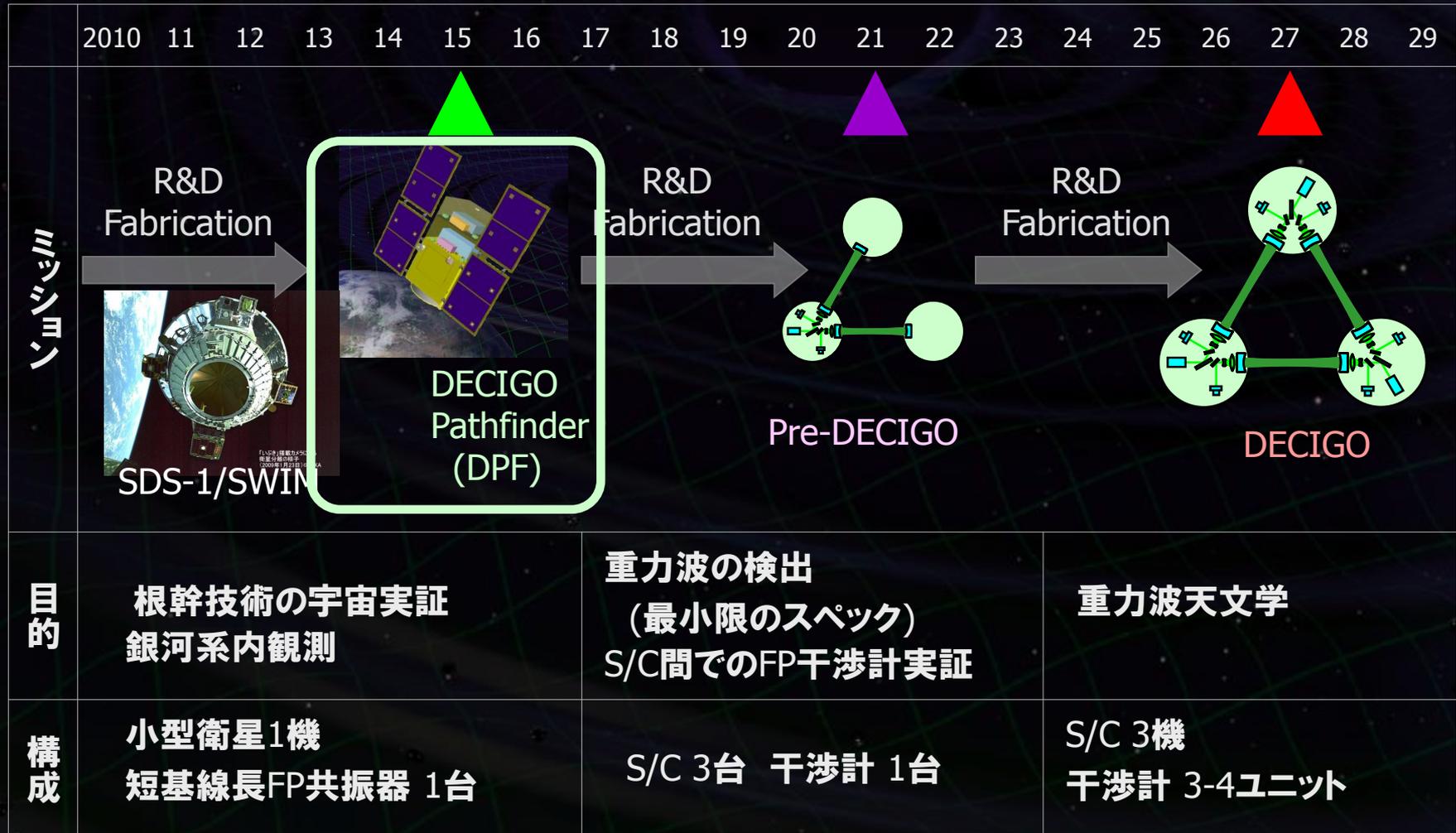


	既存技術, 背景	DPFの目標	DECIGOの要求値
宇宙干渉計	宇宙空間で精密変動計測した例はない。地上では、 $10^{-19}\text{m}/\text{Hz}^{1/2}$ 程度は実現済。LPFでは、MZ干渉計で $10^{-12}\text{m}/\text{Hz}^{1/2}$ を目指す。	宇宙空間では初めてのFP干渉計動作。 $10^{-16}\text{m}/\text{Hz}^{1/2}$ の変位感度。 $10^{-15}\text{N}/\text{Hz}^{1/2}$ の外力雑音。	感度 $3 \times 10^{-18}\text{m}/\text{Hz}^{1/2}$. 外力雑音 $10^{-17}\text{N}/\text{Hz}^{1/2}$.
安定化 レーザー光源	地上では、時間・周波数基準として多くの研究 ($\text{数Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ の安定度)。重力波望遠鏡 $\text{数}10^{-6}\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ の相対安定度が実現されている。宇宙用では6桁程度悪い。	現在地上で実現されている最も良い安定度 $0.5\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ の宇宙空間での実現。出力 100mW 。	安定度 $0.5\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$. 出力 10W .
ドラッグ フリー技術	GOCE衛星では4自由度制御で $5 \times 10^{-9}\text{m}/\text{Hz}^{1/2}$ が実現されている。LPFは全自由度制御を計画。	全自由度制御で $1 \times 10^{-9}\text{m}/\text{Hz}^{1/2}$ の実現。	全自由度制御で $1 \times 10^{-9}\text{m}/\text{Hz}^{1/2}$.

- **長基線長の精密フォーメーションフライト技術.**
 - 複数の宇宙機を用いたフォーメーションフライト.
 - 長基線長での初期補足シーケンス.
 - 大口径光学系の宇宙実証.
 - 安定軌道(レコード盤軌道)への投入.
- **干渉計の感度.**
 - DPFから, 干渉計感度で2桁の向上が必要.
 - * 複数干渉計による同相雑音除去.
 - * 外来雑音の低減.
 - 10Wの高出力レーザー光源.
 - * リソースの問題, 排熱等の実装技術.
- **長期間観測運用.**
 - DPF : 地球周回軌道 ~1年
 - DECIGO : レコード盤軌道 ~5年.

補足: DECIGOのロードマップ

Figure: S.Kawamura



- DECIGOへ至るロードマップについては、
異なった2つの観点からの意見をもらう。

(A) ステップを踏むべき。

- 技術のジャンプを抑え、リスクを低減する。
- コミュニティの実績を作り、サポーターを増やす。

(B) 段階を減らし、規模の大きなものを進めるべき。

- 現実的な時間スケールでのDECIGOの実現を目指す。
- 小規模ミッションでも大きな労力を必要とするため、
ステップを多くすることは、疲弊やモチベーションの
低下につながる。

どちらの意見も正しいだろう。

現在は DPF → Pre-DECIGO → DECIGO としている。

- DPFは最初、DECIGOで必要とされる先端技術のうち、1機の衛星でできる範囲を全て宇宙実証するものとして、2005年に提案された。
- その後、小型科学衛星専門委員会との議論なかで、「単独での科学的成果」を求められた。また、その提言を受け、地球重力場観測ミッションPPM-Satを提案していた京大・福田先生のグループとの協力体制を築いた。
 - 重力波・地球重力場観測を目的に加えた。
- 今回、SE室との議論を受け、我々のグループの当初の目的を明確にすることにした。

DPF成功基準



		最低限の成功基準	所期の成功基準	所期の成果を超える成功基準
	DPF全体	各サブシステムの基本動作を確認する。	各サブシステムの期待性能での動作と、重力波・地球重力場観測。	性能の最適化と長期安定観測。
観測による成果	重力波観測	重力波観測データの取得。	地球周回時間(100分程度)を超える期間、所期の感度(歪み感度 2×10^{-15})での重力波観測データの取得。重力波振幅の上限値と雑音源の評価。	6ヶ月以上に渡る観測と重力波信号の探査。背景重力波の上限値と空間分布を求める。
	地球重力場観測	衛星変動の長周期成分から地球重力場を観測する。	試験マス-衛星変動信号と軌道情報から1mm程度のジオイド高分解能で地球重力場を観測し、観測精度を評価する。	全球に相当する重力場を重複観測し、データの再現性や重力場の時間変動を評価。
科学技術の確立	安定化レーザー光源	レーザー光源と安定化システムの動作と安定度を評価する。	レーザー光源を目標レベル ($0.5 \text{ Hz} / \text{ Hz}^{1/2}$)まで安定化する。	地上で達成されていないレベルの安定度を達成する。
	宇宙干渉計	ファブリ・ペロー干渉計を安定に制御し、基線長変動を測定する。ローンチ・ロック機構を動作させ、試験マスを衛星内に非接触保持する。	地球周回時間(100分程度)を超える間の干渉計の連続安定動作を実現。データを重力波振幅に換算するための校正測定。レーザーセンサを動作させ、 10^{-11} m/s^2 の高感度で試験マス-衛星間の加速度変動測定を行う。	雑音源の評価と制御系の最適化を行い、原理的に可能なレベルまで干渉計雑音を低減する。
	ドラッグフリー	低雑音スラスタの動作確認と雑音レベル評価。	試験マスと衛星の相対変動信号をミッションスラスタにフィードバックし、ドラッグフリー制御を実現。	ドラッグフリー制御によって、衛星変動を太陽輻射圧雑音レベルより小さいレベル($10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$)にまで抑圧する。

重力波により宇宙を見る

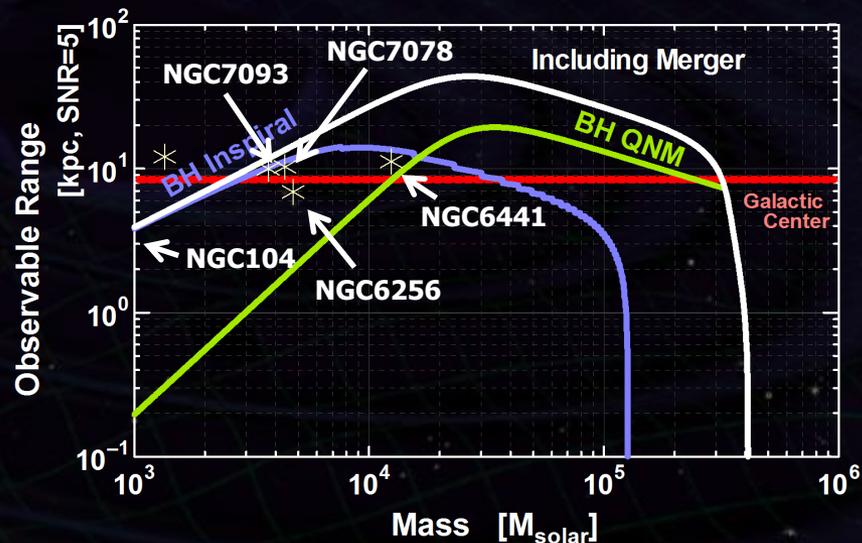
銀河系内のBH連星合体

→ 巨大BH形成への知見.

DPFの感度では

~30個の球状星団を観測可能

独自・野心的なサイエンス



重力で地球を見る

地球重力場の観測

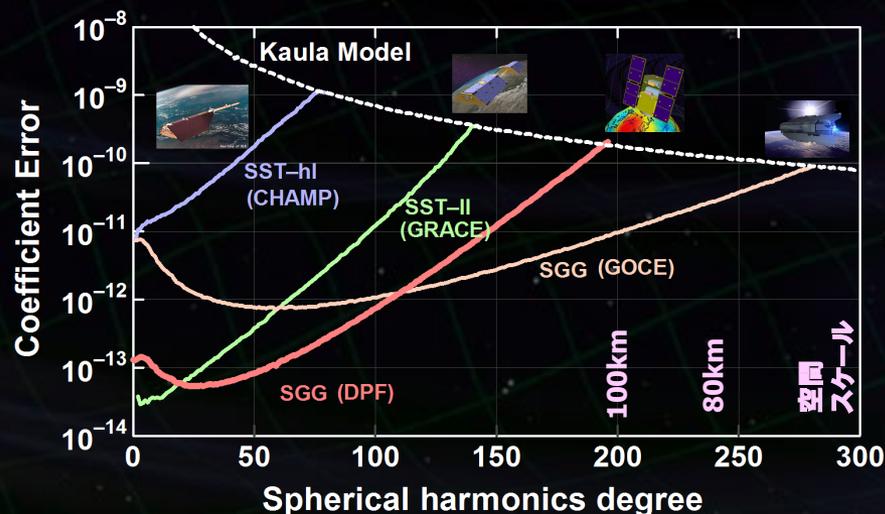
→ 地球形状・地球環境モニタ

他の海外ミッションに匹敵する感度

国際観測網への貢献, 独自の観測

(2012-2016に国際観測網にギャップ)

確実なサイエンス・国際貢献



宇宙干渉計による精密計測

補足

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

補足

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

DECIGO光源への道筋

周波数・安定度 ⇒ DPFと同程度 $\delta f/f < 10^{-15}$, $\delta P/P < 10^{-18}$

波長・出力 ⇒ $\frac{1}{2}(1030\text{nm} \rightarrow 500\text{nm})$, 0.02W \rightarrow 10W

DPFでは電力等の問題から小出力(安定化光源のみのテスト)

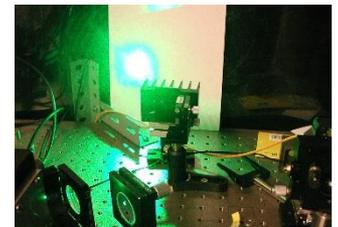
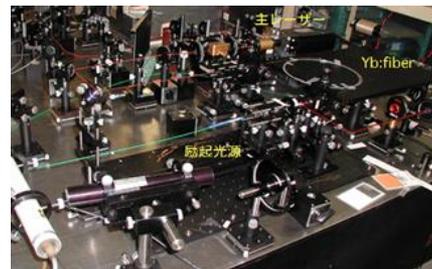
DPFの感度では高出力は必要ない(shot雑音限界で感度制限されていない)

10W出力へ

Yb: fiber amplifierを用いた出力増幅と
高効率波長変換

基本波14W

SHG 3W



10W出力は可能(予算次第)

ファイバ増幅器(高効率・高冷却特性・小型・高ビーム品質)

周波数雑音と強度雑音の安定化は実証済み

パワー50W程度で10W出力が見込める

宇宙での周波数安定化光源

高度計やLIDERから精密光学計測の道具としてレーザーへ

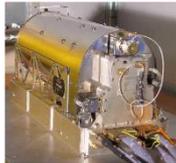
マイクロ波周波数基準

⇒

光周波数基準

Maser

Cs-clock



GALILEO



ACES



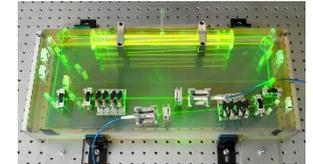
PHARAO

衛星搭載安定化光源は
今後必須の技術

計画中の宇宙安定化光源

- STAR (Space Time Astronomy Research) NASA

10⁻¹⁵での安定度(長期)を目標 --- ヨウ素安定化レーザーの開発



- SOC2 (Space Optical Clock) PTB, NPL等

宇宙空間での光格子時計の開発 --- 超狭線幅光源



- LPF (LISA Pathfinder)

宇宙重力波検出計画

ドラッグフリー制御の実現

補足

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, 地球観測
→ Gravity Probe-B, GOCE
LPF (2015) 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

ドラッグフリー衛星

補足

● 実現された衛星

● TRIAD I (DISCOS)	1972	94 kg	3 軸制御, 高度 750 km, ナビゲーション
● TRIAD II (TIP II)	1975	94 kg	1 軸制御, ナビゲーション
● TIP III	1976	94 kg	1 軸制御, ナビゲーション
● NOVA I	1981	170 kg	1 軸制御, 重力傾度姿勢安定, ナビゲーション
● NOVA III	1984	165 kg	1 軸制御, 重力傾度姿勢安定, ナビゲーション
● NOVA II	1988	174 kg	1 軸制御, 重力傾度姿勢安定, ナビゲーション
● Gravity Probe-B	2004	3,100 kg	3 軸制御, 高度 640 km 極軌道, 重力法則の検証
● GOCE	2009	1,052 kg	4 軸制御, 高度 250-280 km, 地球重力場観測

● 計画されているミッション

● LPF	2015	1,900 kg	全自由度制御, L1 軌道, LISA のための技術実証
● MICROSCOPE		200 kg	太陽同期円軌道 高度 800 km, 等価原理の検証
● DPF	2017-8?	350 kg	全自由度制御, 高度 500 km, 重力波などの観測
● LISA	2020-	1,380 kg	全自由度制御, 太陽周回軌道, 重力波観測
● STEP:		819 kg	太陽同期円軌道 高度 550 km, 等価原理の検証

GOCEによる軌道上実績

補足

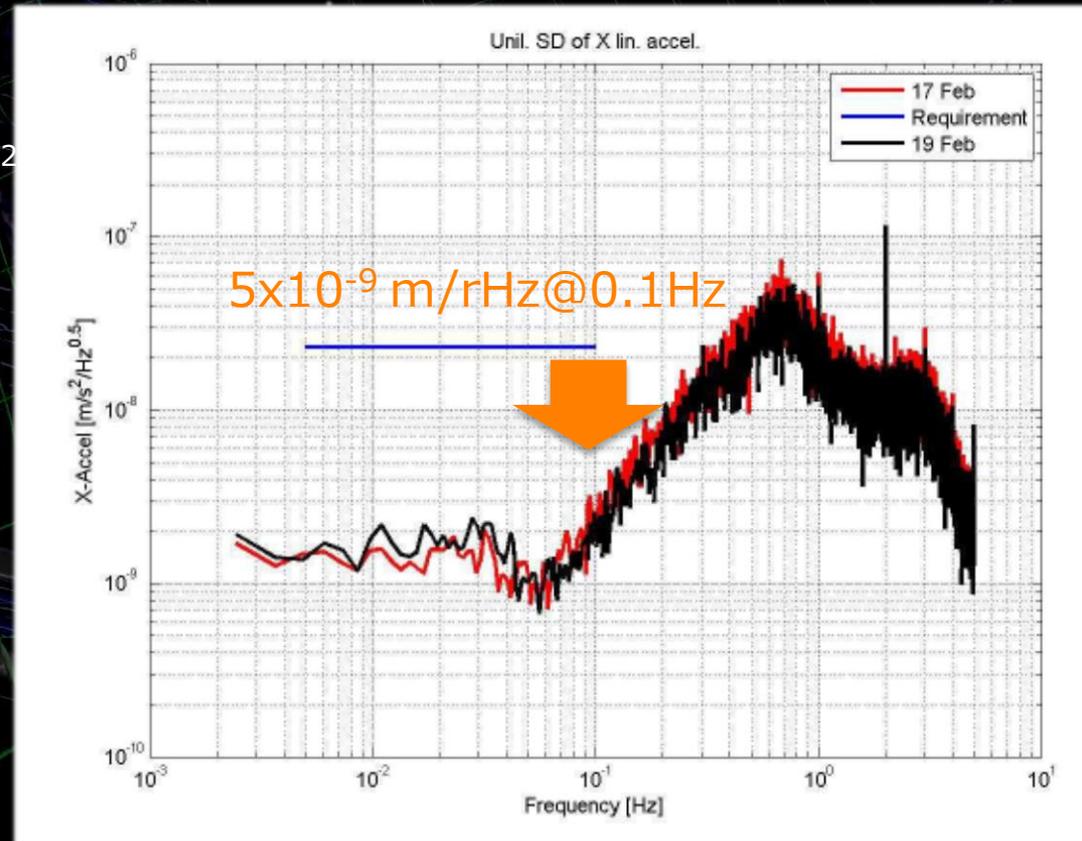
- DFAC(Drag Free and Attitude Control)の概要
 - 太陽同期極軌道：96.7°inclination
 - 軌道高度：250-280km
 - 4自由度制御
 - 並進1自由度（軌道方向）：イオンスラスト
 - 姿勢3自由度：MTR

- 軌道上安定化実績
 - 軌道方向並進

： $2 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$
($5 \times 10^{-9} \text{ m/rHz@0.1Hz}$)

- 姿勢

： $\sim 10^{-8} \text{ rad/s}^2/\text{rHz@0.1Hz}$



補足: DECIGOのための根幹技術実証

補足

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

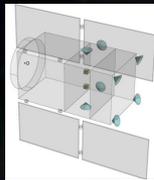


0.5 Hz/Hz^{1/2}
の周波数安定度

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

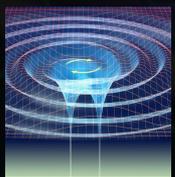


衛星変動安定度
 10^{-9} m/Hz^{1/2}

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・
重力波の観測



0.1 Hz以下での連続
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

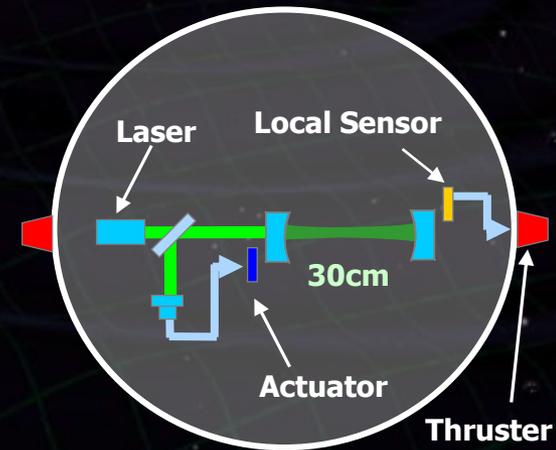
(3) DPFの概念設計

・重力波・地球重力場の観測

→ 歪み感度要求値 $2 \times 10^{-15} \text{ Hz}^{-1/2}$ (0.1 Hz)

搭載ミッション機器

- 2つの試験マスからなる、
基線長30cmレーザー干渉計。
- 安定化レーザー光源。
- ドラッグフリー制御。



重力勾配計：試験マス間の距離変動を精密計測

- 干渉計による測距感度 $6 \times 10^{-16} \text{ m/Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)
- 試験マスに働く外力雑音 $1 \times 10^{-14} \text{ N/Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)

干渉計感度

変位雑音 $6 \times 10^{-16} \text{ m/Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)

↳ x 200 of DECIGO in disp. noise

他の雑音

レーザー光源周波数雑音: $0.5 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$ (1Hz)

加速度雑音

力の雑音 $1 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)

↳ x 250 of DECIGO

衛星変動

変位雑音 $1 \times 10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)

外力雑音:

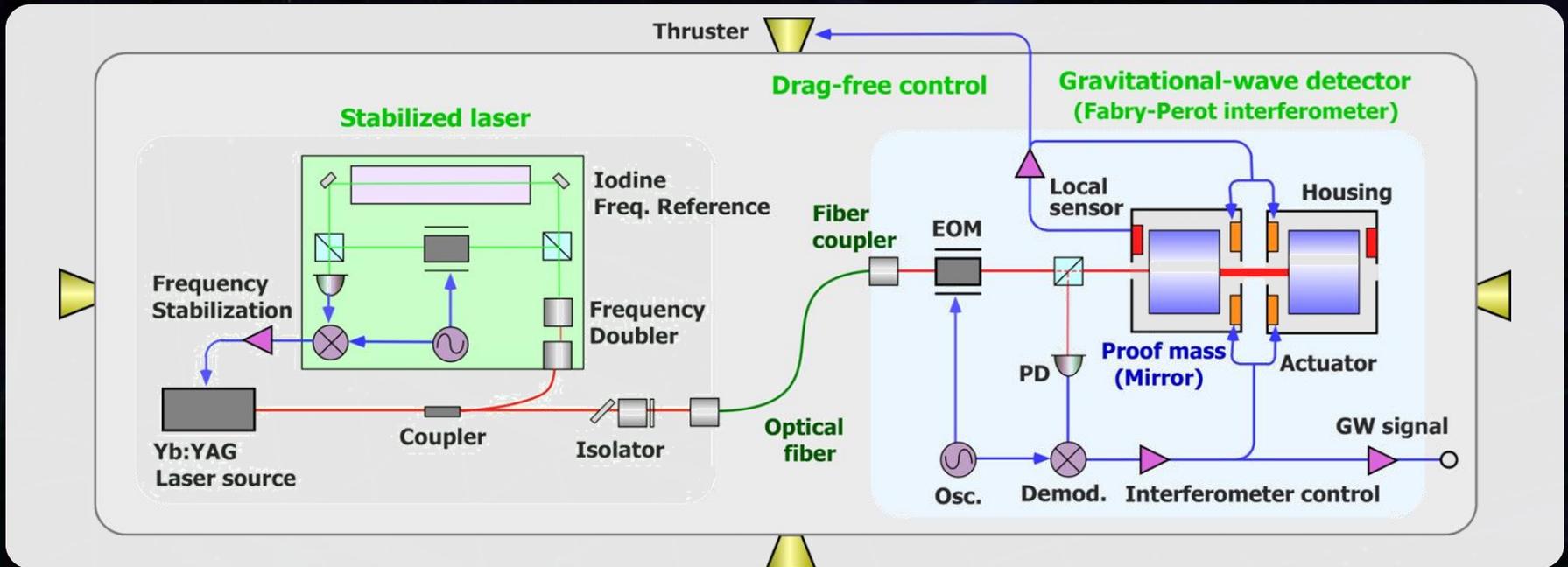
残留気体変動, 磁場勾配-変動, 熱輻射,
温度変動, 電場変動, 重力場変動, など.

DPFミッション機器構成

ミッション機器重量 : ~200kg
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

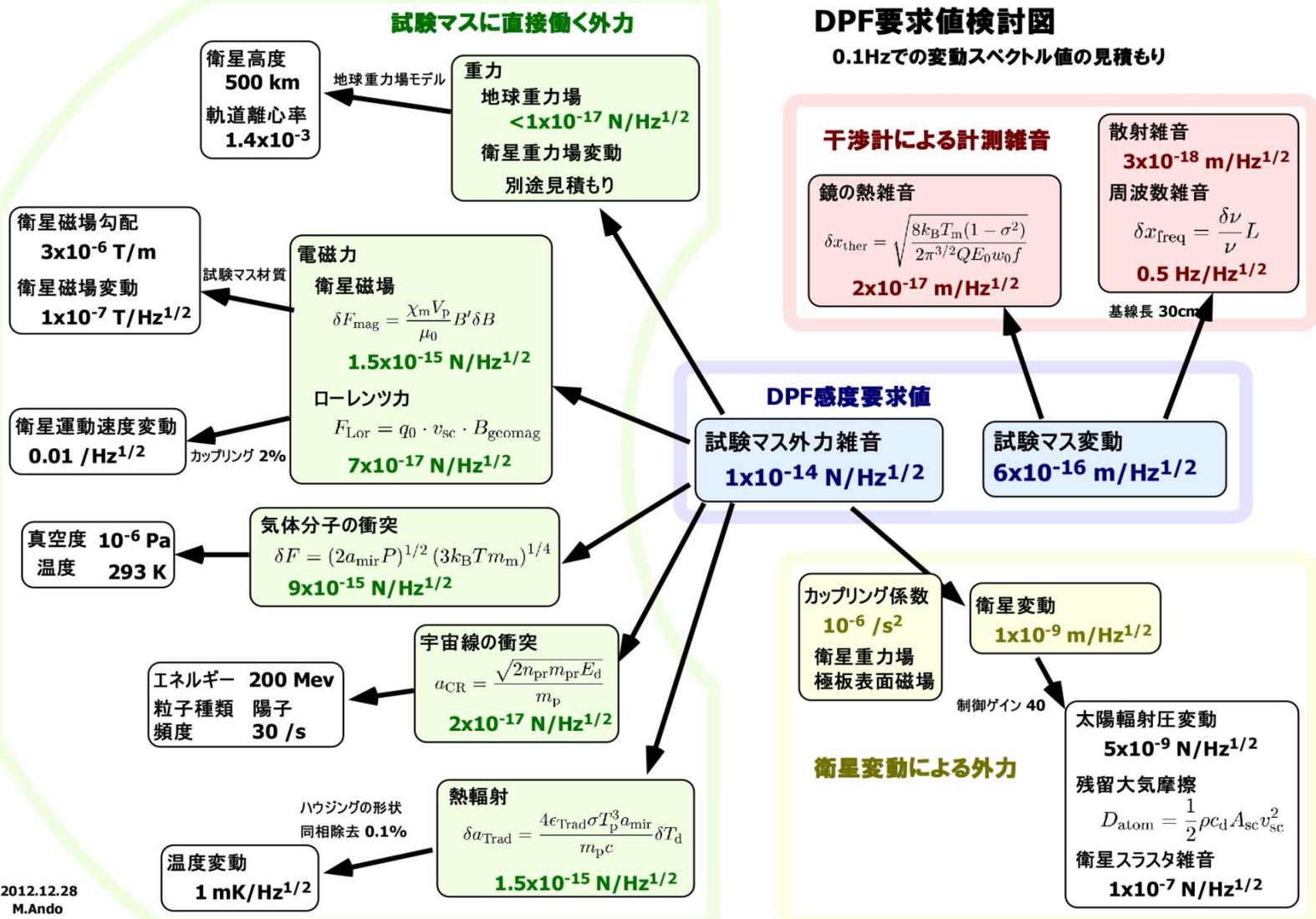
試験マス : 質量 数kg

PDH法により信号取得・制御

DPFシステム要求値

DPF要求値検討図

0.1Hzでの変動スペクトル値の見積もり



2012.12.28
M.Ando

感度要求値のブレークダウン

補足

※ スペクトルは
0.1 Hzでの値

歪み感度要求値
 $2 \times 10^{-15} \text{ Hz}^{-1/2}$

干渉計による測距感度
 $6 \times 10^{-16} \text{ m/Hz}^{1/2}$

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

干渉計分散雑音
 $3 \times 10^{-18} \text{ m/Hz}^{1/2}$

鏡自身の変動
 $2 \times 10^{-17} \text{ m/Hz}^{1/2}$

次ページへ

干渉計入力光量
100 mW

光源周波数雑音
 $0.5 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$

試験マス機械Q値
 10^6

レーザー光源への要求値

感度要求値のブレークダウン

補足

※ スペクトルは
0.1 Hzでの値

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

重力

地球重力場

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

衛星重力場カップリング

$< 1 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$

電磁気力

衛星磁場カップリング

$< 1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-2}$

ローレンツ力

熱輻射

粒子衝突

衛星内気体分子

宇宙線粒子

- DPFの感度見積もりについては、想定されうる全ての物理現象を網羅している。→ 重力・電磁気力・粒子衝突。
- それらの物理現象については、地上重力波望遠鏡での経験、LRFでの見積もり地上実験で得られた知見に基づいている。
- しかし、想定されていない雑音源が存在する可能性は否定できない。「おぼけがないことの証明」が難しいのと同様。
→ 地上試験・無重力実験も含めて、最大限の想定を行う。
- DPFでは、それらの雑音が無いことの総合試験を行う。
DECIGOのための試験項目を含めるかは、要検討。

DPFシステム概要

DPF Payload

Size : 950mm cube
Weight : 220kg
Power : 150W
Data Rate: 800kbps
Mission thruster x10

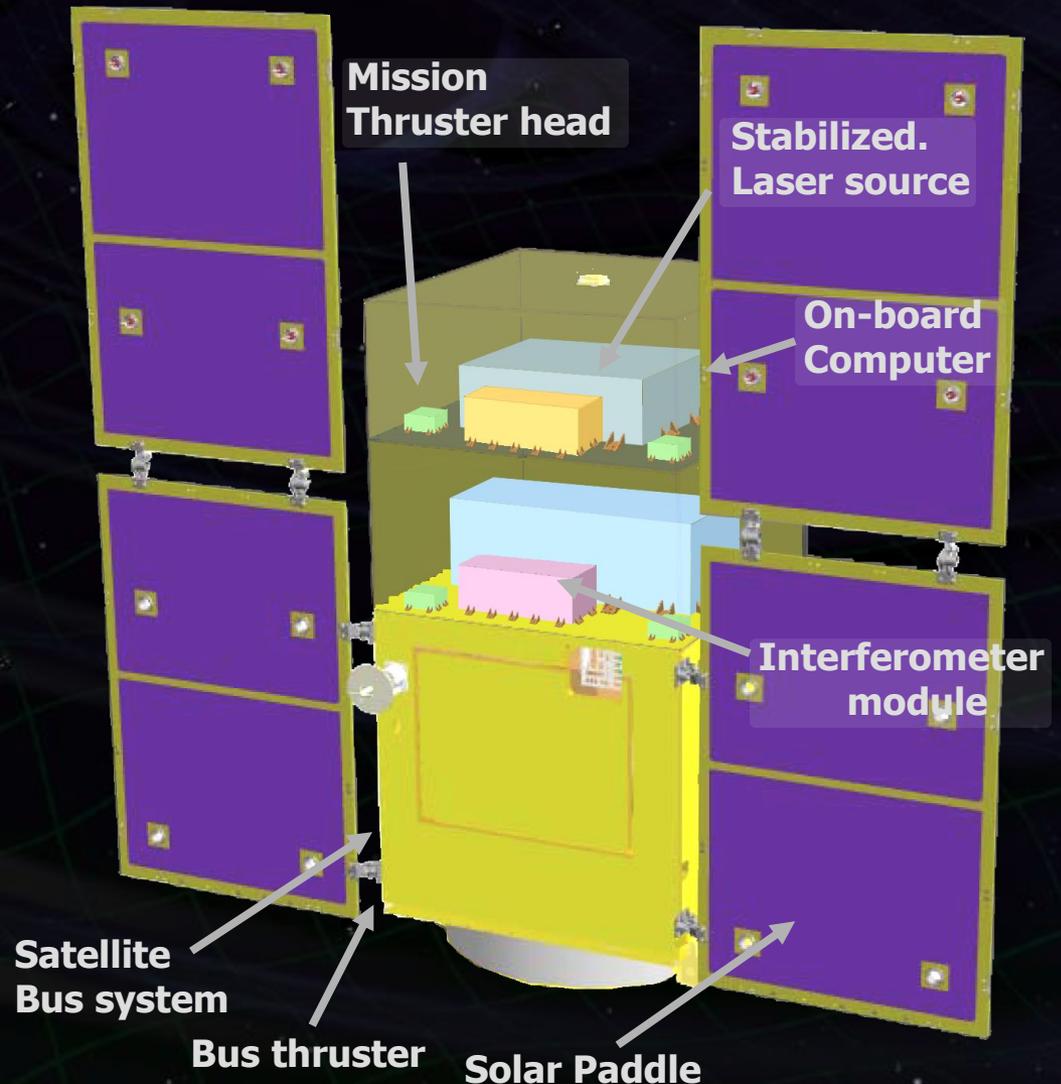
Power Supply
SpW Comm.



Satellite Bus

(‘Standard bus’ system)

Size :
950x950x1100mm
Weight : 230kg
SAP : 960W
Battery: 50AH
Downlink : 2Mbps
DR: 1GByte
1N Thrusters x 4



衛星スケールの検討

イプシロン搭載

	中型衛星 (ASTRO-X)	小型衛星 (SPRINT-X)	技術実証衛星 (SDS-X)	大学衛星 (Cube sat. etc)
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	~ 50
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) 観測データ取得 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

- **小型衛星標準バスを最大限に利用.**
 - 運用時はミッション部搭載スラストにより
ドラッグフリーを実現 → 姿勢・変動制御.
 - 大きな開口部はない.
- **バス系差分**
 - 低擾乱化のための変更.
 - * RW非搭載, ジャイロはFOGに変更)
 - * SAP取り付けの変更 (受動姿勢安定のため)
 - ドラッグフリー実現のための変更
 - * 重量バランス, SAP等の共振振動, 主放熱面の変更.
 - * 姿勢情報等の伝達 (ドラッグフリー制御の実装)
 - 搭載機器追加
 - * GPS受信機搭載 (地球重力場観測のため).

DPF主要緒元 (1/2)

全体構成

質量・寸法	450kg, 950 x 950 x 2000 mm
軌道	高度500 km 太陽同期極軌道 (全日照軌道)
姿勢	太陽同期, 地球指向姿勢

ミッション部

質量・寸法	220kg, 950 x 950 x 900 mm (フィン構造除く)
消費電力	150 W
レーザー干渉計	基線長30cm, 2-3kg試験マス x2, 変位感度 6×10^{-16} m/Hz ^{1/2}
レーザー光源	干渉計入力 25 mW, 波長 1060 nm ヨウ素飽和吸収線による安定化 周波数安定度 0.5 Hz/Hz ^{1/2}
スラスタ	100 μ N x 2台, 10 μ N x 8台 推力雑音 0.1 μ N/Hz ^{1/2}
ドラッグフリー	全自由度の制御, 変動安定度 10^{-9} m/Hz ^{1/2}
データレート	800 kbps, 観測データ量 圧縮後 600 MByte/day

バス部

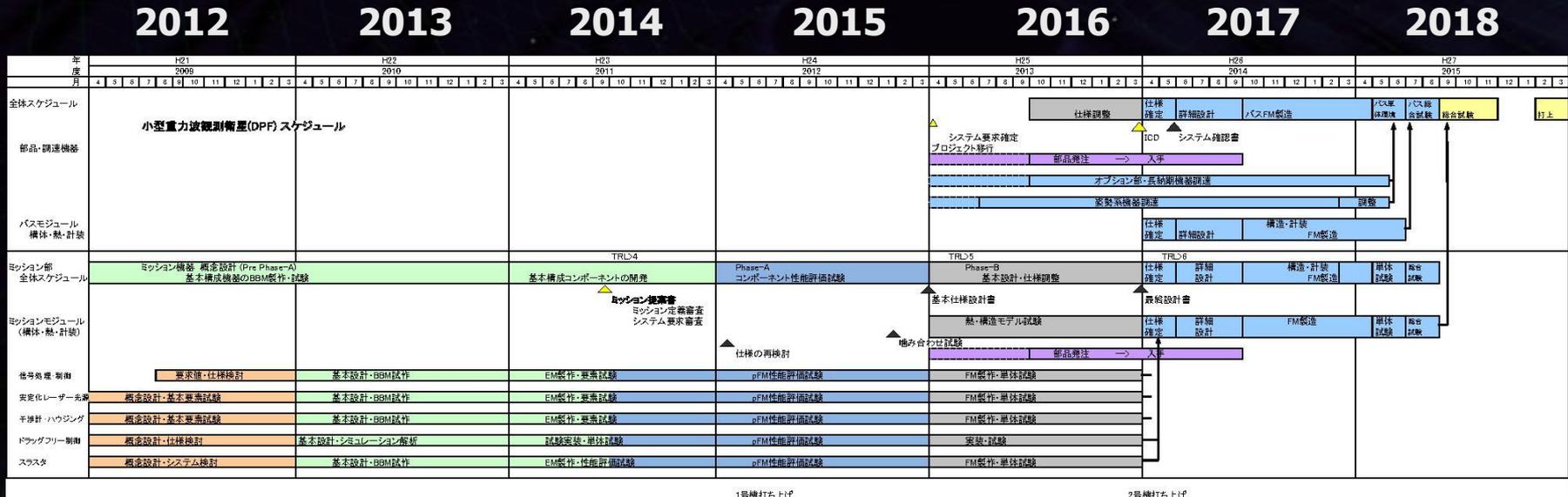
質量・寸法	230kg, 950 x 950 x 1100 mm
データ処理・通信	SpW準拠信号処理システム 記録容量 2 GByte, ダウンリンクレート 2 Mbps
電源	SAP 片翼 2枚, 発生電力 820W (22度傾斜) バッテリー 50Ah, ミッション供給 150W
姿勢	3軸制御 (初期軌道捕捉, ファイルセーフ時) スラスタ 4本搭載

※ 標準バス構成からの差分・要検討事項

- 低擾乱化 (RW非搭載, ジャイロはFOGに変更)
- SAP取り付けの変更 (受動姿勢安定のため)
- GPS受信機搭載 (地球重力場観測のため)
- 主放熱面の変更 (+Y面)
- 重量バランス, SAP等の共振振動 (ドラッグフリー制御系設計)
- 姿勢情報等の伝達 (ドラッグフリー制御の実装)

- DPFは、以前の小型科学衛星の枠組みに整合するように概念設計が行われている（標準バス、コストキャップ）。
 - 成立性を確認している。
- 一方、その枠組みに合わせるため、構造的な安定度が最適化されてはいない。
 - ドラッグフリー制御系の設計要求にしわ寄せ。

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)

将来の宇宙重力波望遠鏡DECIGOのための前哨衛星

1機の衛星で可能な宇宙実証をおこなう

→ DECIGOのみならず、宇宙・無重力環境
利用のための先端宇宙技術の確立。



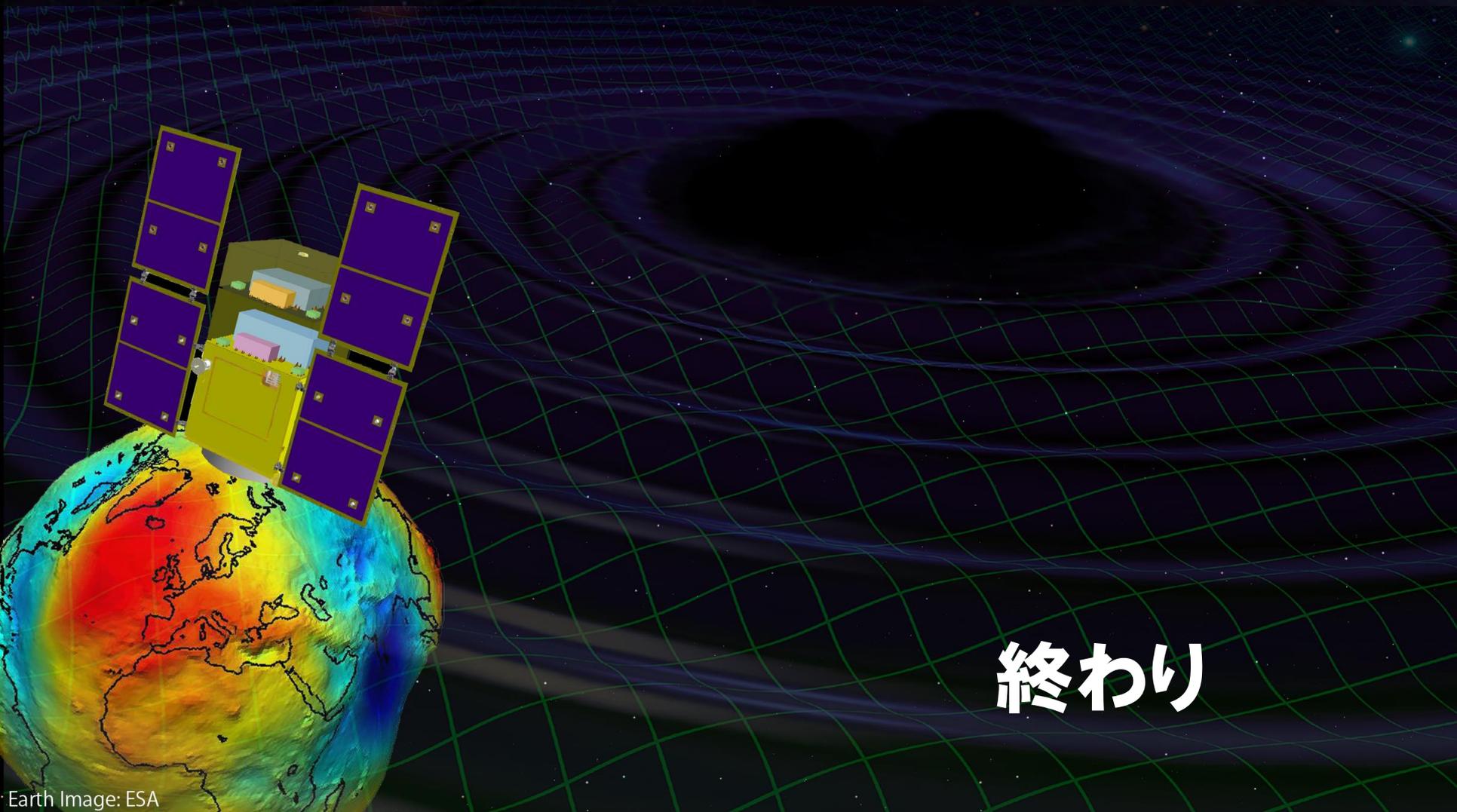
イプシロン搭載小型ミッション としての実現を目指す。

小型衛星 1機 (重量 400kg)

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

- DECIGOの科学的意義を認めてもらえるか？
- DECIGOの前哨衛星として、DPFの位置づけは適切か？
- この位置づけで、DPFのミッション意義はどの程度認められるか？
- DPFの実現性に説得力はあるか？



Earth Image: ESA

終わり