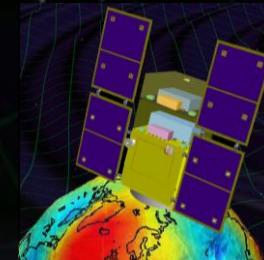
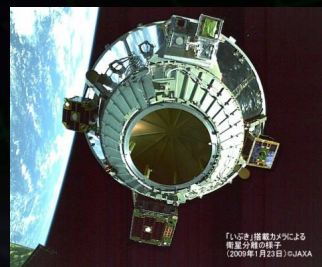
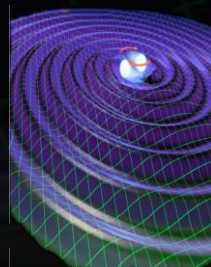
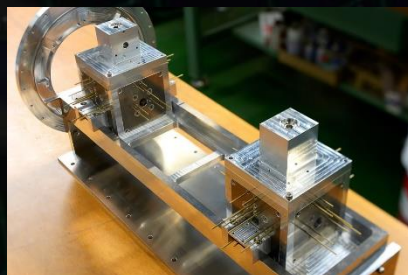
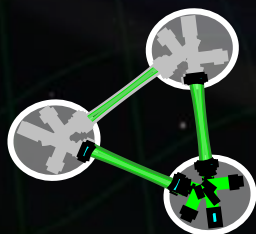


平成27年度 戦略的開発研究費

# 重力波観測望遠鏡 Pre-DECIGO のミッション検討

安東 正樹 (東京大学 / 国立天文台) + DPF WG



Q. 科学目標を従来のDPFの目標から大きく変更しているので、本来ならば宇宙理学委員会でWGの変更審査を受ける必要があると思われます。

A. その認識でいます。宇宙理学委員会に対しては、「再定義の上継続」の旨、回答させて頂いています。宇宙理学委員会の継続・終了審査の枠組みに沿った形で審査をお願いします。

WG再定義に先だって今回の申請をさせて頂いています。これは、(1) 次のミッション提案のタイミングに間に合わせるために早期の検討開始が必要 (2) WGのアクティビティを継続させ、これまで得られた知見の散逸を防ぐ、という意義を考慮しています。



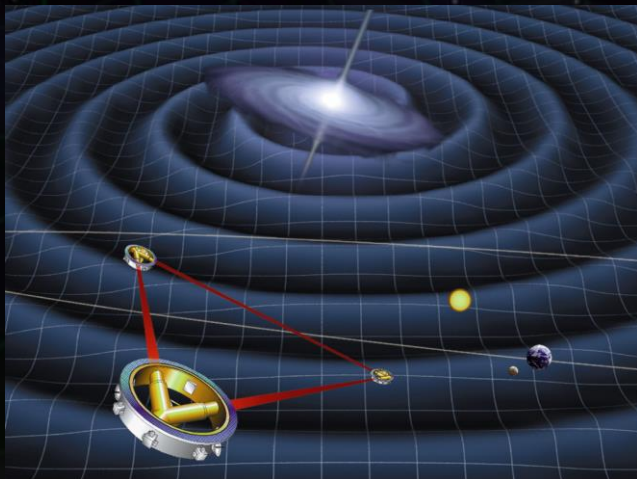
Q. ESA L3のSDT (Science Definition Team)にagency代表として参加していただいていると思います。海外の状況を考慮しても、LISA pathfinder, LISA (ESA L3), pre-DECIGO, DECIGOという4つのミッションが世界に並び立ち、その中の二つを日本だけで実施することが可能かつ最善であるとお考えでしょうか？

A. LPFは2015年10月に打ち上げられる技術実証機, DECIGO は, LISAやPre-DECIGOの次の世代の計画でタイミングが異なります。Pre-DECIGOとLISAは目指すサイエンス・波長が異なります。同時期に同様の技術が検討される可能性はあります。本申請によるミッション検討では, そのような国際体制の必要性・可能性を検討する機会にもなります。なお, Pre-DECIGO / DECIGO を日本単独で実現する, という表現はしていません。

## eLISA

(Laser Interferometer Space Antenna)

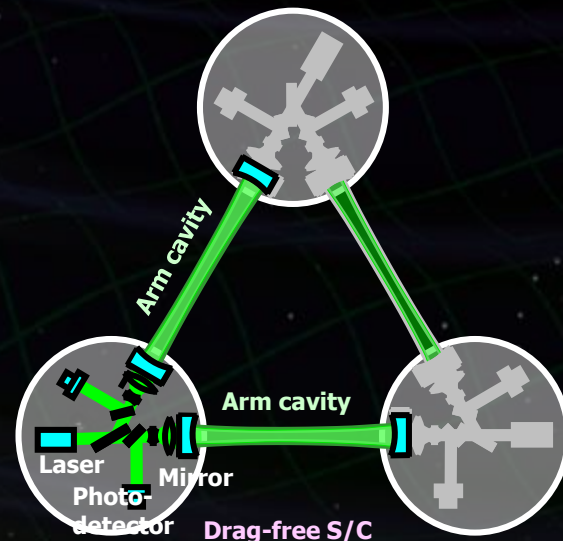
- 観測対象: 超巨大BH, 連星系.  
1mHz付近の確実な重力波源.
- 基線長: 100万km.  
S/C 3機による編隊飛行.
- 測距方式: 光トランスポンダ.



## Pre-DECIGO

(Deci-hertz Interferometer  
Gravitational Wave Observatory)

- 観測対象: IMBH, NS連星.  
0.1Hz付近の重力波.  
基線長: 100km. S/C 3機による  
フォーメーションフライト.
- 測距方式: FP干渉計 (直接干渉).





Q. [報告書について] 安定化レーザー光源開発と干渉計・試験マス開発のそれぞれの経費を何に使ったのか、もう少しブレークダウンして記述していただきたい。たとえば、メーカーに委託した場合は委託内容と委託先メーカー名、実験消耗品や部品の内容、旅費などに分けていただきたい。

A. 詳細は、支払い伝票を確認の上、改めて報告させていただきます。  
メーカー委託はしておらず、物品購入・旅費として執行しました。

## •研究の目的

- \* 宇宙重力波望遠鏡 Pre-DECIGO のミッション検討.
- \* 宇宙実証を目指した検討と搭載機器開発.

## •申請経費 : 880 万円

- |               |        |               |
|---------------|--------|---------------|
| * ミッションシステム検討 | 500 万円 | (安東, 佐藤)      |
| * 搭載機器BBM開発   | 250 万円 | (武者, 阿久津, 船木) |
| * 旅費          | 50 万円  |               |
| * 間接経費        | 80 万円  |               |



- **背景：ミッション概要と根幹技術**
- **開発方針・計画**
- **これまでの準備状況**



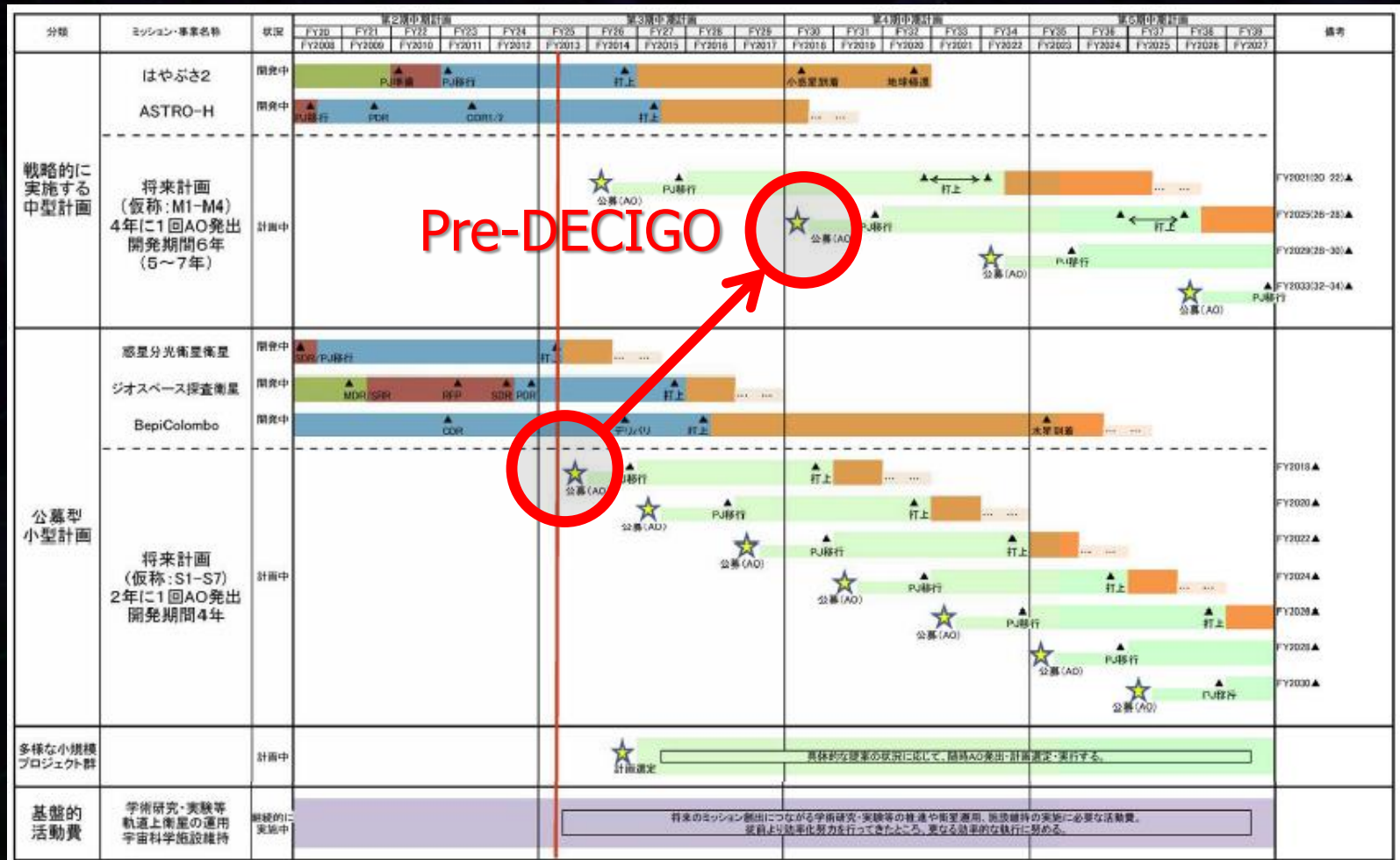
# 背景：ミッション概要と根幹技術



# JAXAロードマップでの位置づけ

From file submitted to the government by ISAS/JAXA

(内閣府・宇宙政策委員会・宇宙科学・探査部会 2013年9月19日).



## ・科学的目的

強重力・高密度天体からの重力波の観測による、  
時空構造・銀河形成・高エネルギー天体現象の解明。

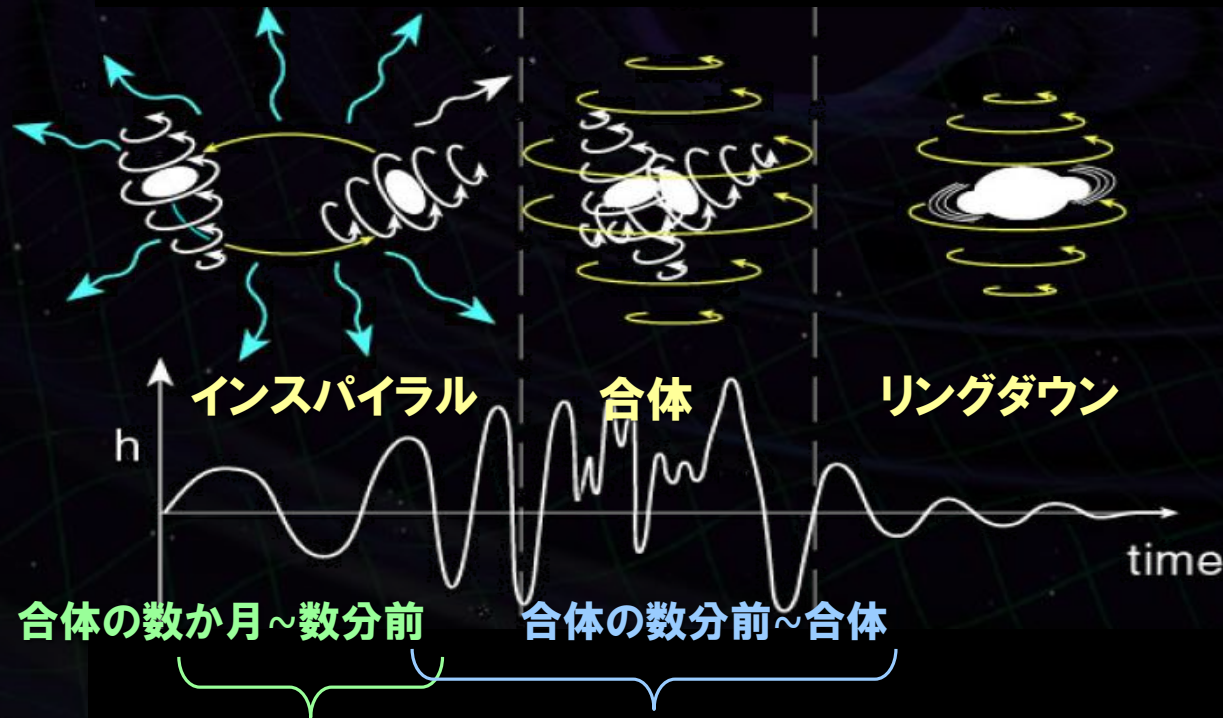
## ・観測目標

- (1) 連星中性子星合体现象の観測。 [確実な観測対象]  
↑ 高エネルギー天体現象, 高密度天体の理解。
- (2) 中間質量BH連星合体の観測。 [独自の観測対象]  
↑ 宇宙の時空構造と銀河形成の解明。
- (3) DECIGOへ向けたフォアグラウンドの理解。 [将来への知見]  
連星中性子星のパラメータ推定と除去。



# 観測目標 (1) : 連星中性子星の合体

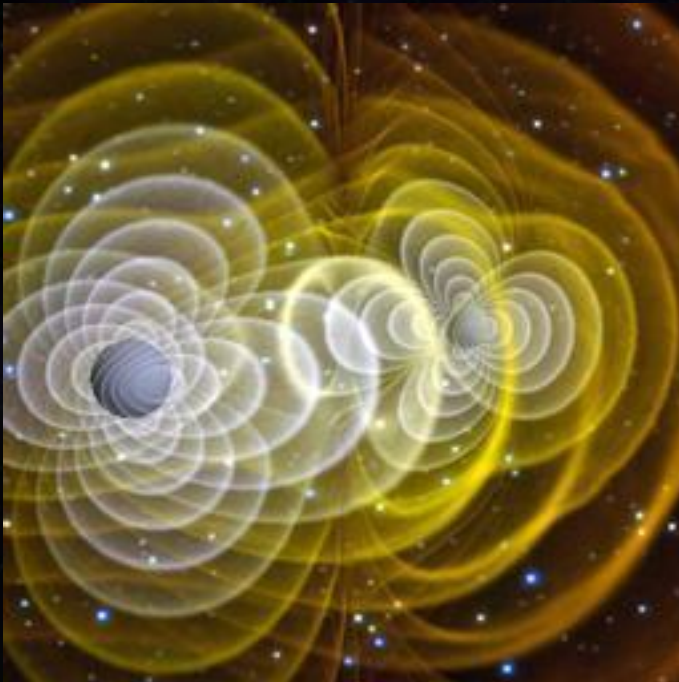
Pre-DECIGOでは, ~100個/年 の連星中性子星イベントを観測.



低周波数 → Pre-DECIGO  
質量, 軌道, 方向, 合体予測.

高周波数 → 地上望遠鏡  
状態方程式, 高エネルギー現象.

Pre-DECIGOでは、ほぼ宇宙全体の中間質量BH合体を見通す。



銀河中心の超巨大BH形成の謎.

(A) 大質量星の崩壊 → 降着

(B) BHの階層的合体

- Pre-DECIGO の観測によって、  
決定的な証拠が得られる可能性.
- 他の手段ではできない独自の観測.

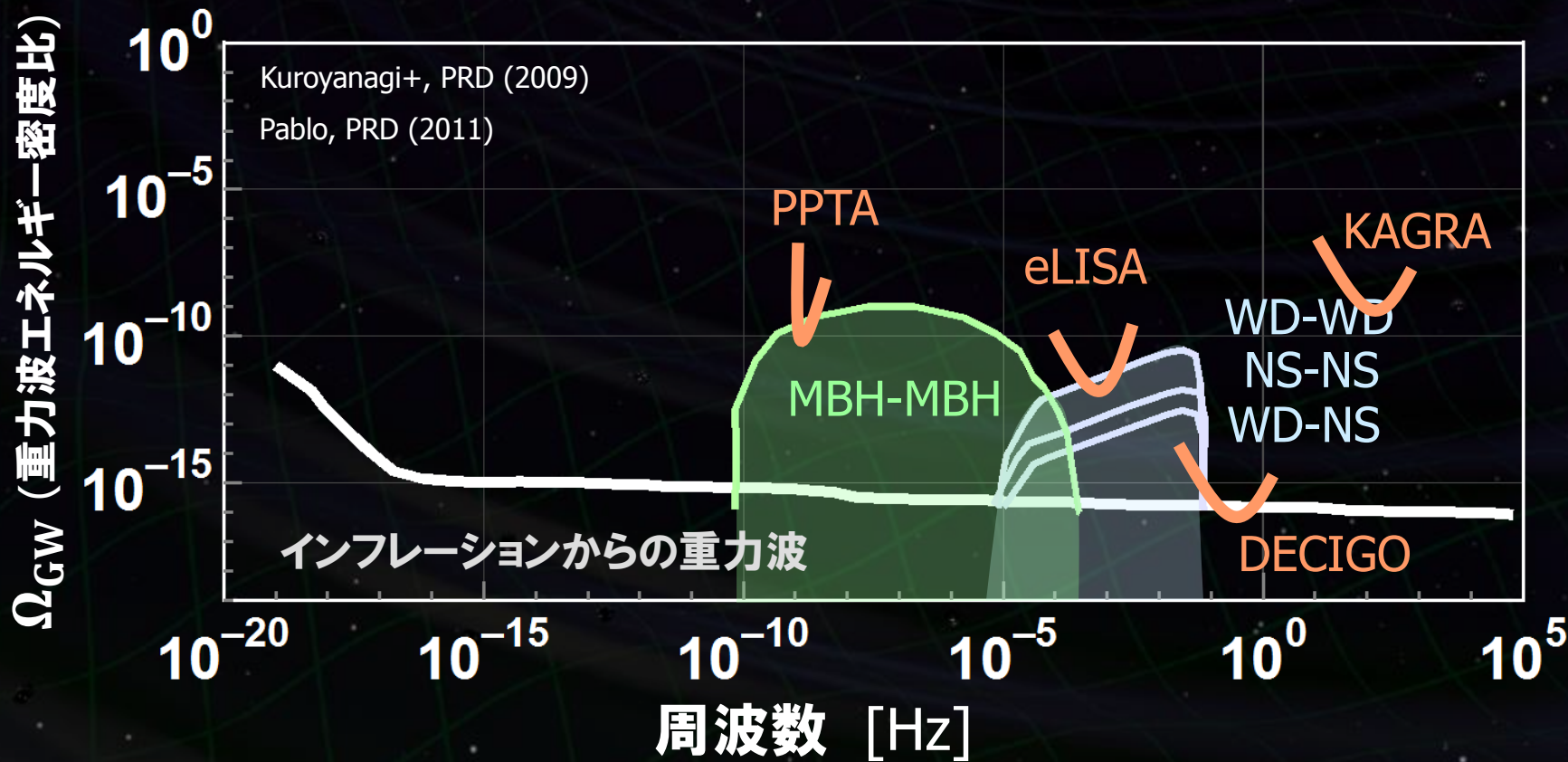


# 観測目標 (3) : 前景重力波の理解

多くの連星系からの重力波 → 分離できない.

⇒ 原始重力波観測に対する **前景重力波雑音**

→ ~100個の系でパラメータ推定を行い理解を進める.

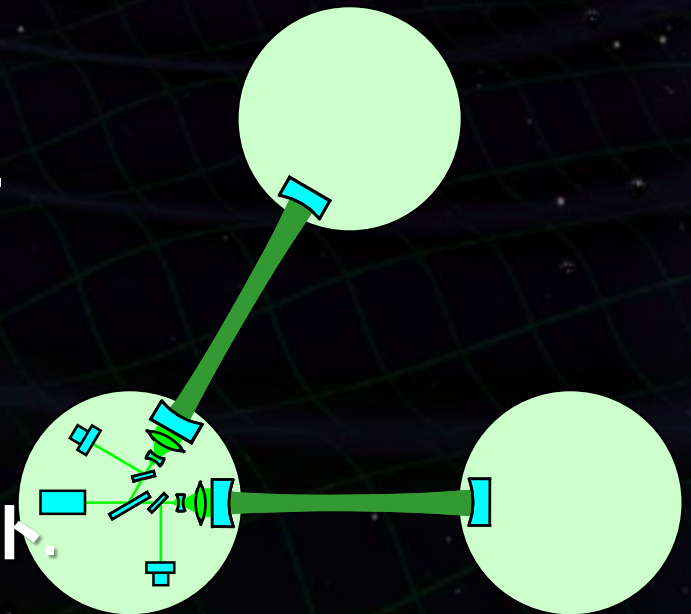


## ・ミッション要求

- 0.1Hz の周波数帯で  $10^{-23} \text{ Hz}^{-1/2}$  の歪み感度.
- 3年以上の観測期間.

## ・ミッション概念設計

- 3機の宇宙機によるレーザー干渉計.
- 基線長 : 100km  
光源 : 1W  
鏡口径 : 300mm.
- ドラッグフリー・フォーメーションフライト.
- 軌道 : (レコード盤軌道).





## (1) 高精度の宇宙レーザー干渉計技術.

- \* 試験マス鏡の非接触保持・制御モジュール
- \* 一体化された光学系
- \* 安定化レーザー光源

## (2) 長基線フォーメーションフライト技術.

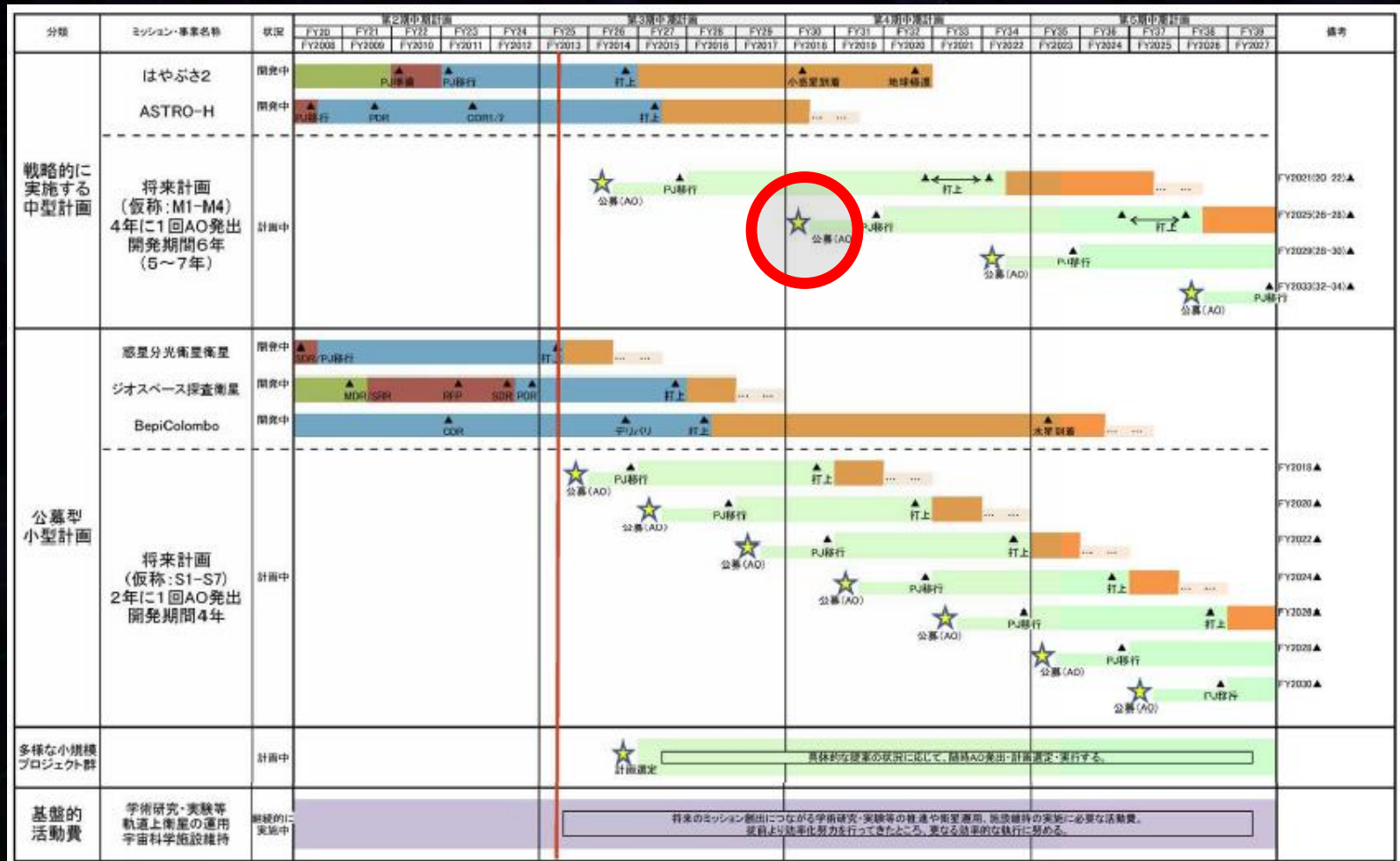
- \* ドラッグフリー制御  
(宇宙機の構造, 信号処理, 低雑音スラスタ)
- \* 長基線用の光学技術  
(鏡精度, ポインティング, 初期アライメント)

# 開発方針・計画



From file submitted to the government by ISAS/JAXA

(内閣府・宇宙政策委員会・宇宙科学・探査部会 2013年9月19日)



- **2018年度 (平成30年度) の ミッション提案**を目指す。
  - \* **今後 3年間 (2015 - 2017年度)**
    - サイエンスチームによる科学目標検討.
    - メーカーを交えたミッション実現性の検討.
    - 根幹要素技術開発と実証試験準備.                   を進める.
  - \* **その後の 2年間 (2018 - 2019年度)**
    - 試験マス等 : 航空機を用いた無重力実証試験.
    - 安定化レーザー光源 : 相乗り衛星等を用いた宇宙実証.
  - \* **2020 - 2024年度 : EM, FMの製作・試験.**
- **2025年頃 打ち上げ.**



# Pre-DECIGO開発計画



	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度以降
<b>サイエンス検討</b> 中村・田中 (京都大) 神田 (大阪市大)	全体設計・根幹要素技術開発			環境試験と無重力実験の実施		
	重力波源の理論的研究、およびミッション検討				無重力実験データの重力波探査解析	
<b>ミッションシステム検討</b> 安東 (東京大) 佐藤 (法政大)	衛星メーカーも交えたミッションの成立性検討			★ <b>ミッション提案</b>		
<b>航空機実験・相乗りミッション</b> 安東 (東京大)	相乗りミッションの可能性・システム検討			相乗りミッションの準備 (オプション)		
<b>干渉計・試験マス</b> 阿久津 (国立天文台)	振り子懸架されたBBMの開発	BBMの真空槽内での性能評価	EMの製作と各種環境試験	第1次航空機実験の準備と実施		EM開発・性能評価試験
<b>安定化レーザー光源</b> 武者 (電気通信大)	BBM3の開発と絶対安定度評価	EMの製作と各種環境試験	↑ 組み込み	第2次航空機実験の準備と実施		
<b>ドラッグフリー・スラスタ</b> 佐藤 (法政大) 船木 (JAXA)	2次元実験		航空機実験装置の開発および、制御システムシミュレーション検討		↑ 組み込み	
						FM開発・性能評価試験

# 予算計画

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度以降
サイエンス検討 中村・田中 (京都大) 神田 (大阪市大)	全体設計・根幹要素技術開発			環境試験と無重力実験の実施		
ミッションシステム検討 安東 (東京大) 佐藤 (法政大)	重力波源の理論的研究およびミッション検討			無重力実験データの重力波探査解析		
航空機実験・相乗りミッション 安東 (東京大)	相乗りミッションの可能性・システム検討			相乗りミッションの準備 (オプション)		
干渉計・試験マス 阿久津 (国立天文台)	振り子懸架されたBBMの開発	BBMの真空槽内での性能評価	EMの製作と各種環境試験	第1次航空機実験の準備と実施	第2次航空機実験の準備と実施	
安定化レーザー光源 武者 (電気通信大)	BBM3の開発と絶対安定度評価	各種環境試験				
ドラッグフリー・スラスト 佐藤 (法政大) 船木 (JAXA)	JAXA搭載機器基礎開発経費			航空機実験装置の開発および制御システムシミュレーション検討		

戦略的開発経費  
(本申請)

★ ミッション提案

科研費補助金：基盤(A)

EM開発・性能評価試験

FM開発・性能評価試験



## ・ミッション検討 (これまでの知見を元にミッションを再定義)

- \* ミッション目標と実現性のトレードオフ検討。  
→ ミッション要求値・システム要求値の明確化.
- \* 必要リソース, コストの第1次案 取りまとめ.
- \* 推進体制の構築.

## ・根幹搭載機器の開発

- \* Pre-DECIGOへ向けた, 前年度までの要素技術開発の再定義.
- \* 宇宙実証試験に向けたコンポーネント試験  
(他の研究経費によるものとは相補的な部分).

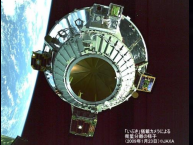
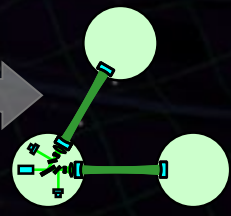
# これまでの準備状況



- **小型重力波観測衛星 (DPF) ワーキンググループとして活動.**
  - \* 2001年 DECIGO計画の考案.
  - \* 2005年 ロードマップの定義  
(DPF → Pre-DECIGO → DECIGO).
  - \* 2007年 DPF (DECIGO Pathfinder) WG設立
  - \* 2009年 小型科学衛星3号機にミッション提案 → 落選.
  - \* 2014年 イプシロン搭載小型ミッションに提案 → 落選.
- **2014年 DECIGOグループで方針を再検討.**
  - ロードマップを再定義.
  - 科研費・基盤(A)の申請 (採択).
  - 今回の戦略的開発経費の申請.

# 以前までのDECIGOロードマップ

Figure: S.Kawamura

	2014	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
ミッション	R&D Fabrication		R&D Fabrication		R&D Fabrication		R&D Fabrication		R&D Fabrication		R&D Fabrication		R&D Fabrication		R&D Fabrication		R&D Fabrication		R&D Fabrication	
																				
	SDS-1/SWIM		DECIGO Pathfinder (DPF)		Pre-DECIGO		DECIGO													
目的	宇宙レーザー干渉計を用いた精密計測技術の実証.						長基線長フォーメーションフライト技術の実証, 重力波観測.						初期宇宙の直接観測							
構成	小型衛星1機, 地球周回軌道. 短基線長FP共振器.						S/C 3台 干渉計 2本.						S/C 3機 干渉計 3-4ユニット							



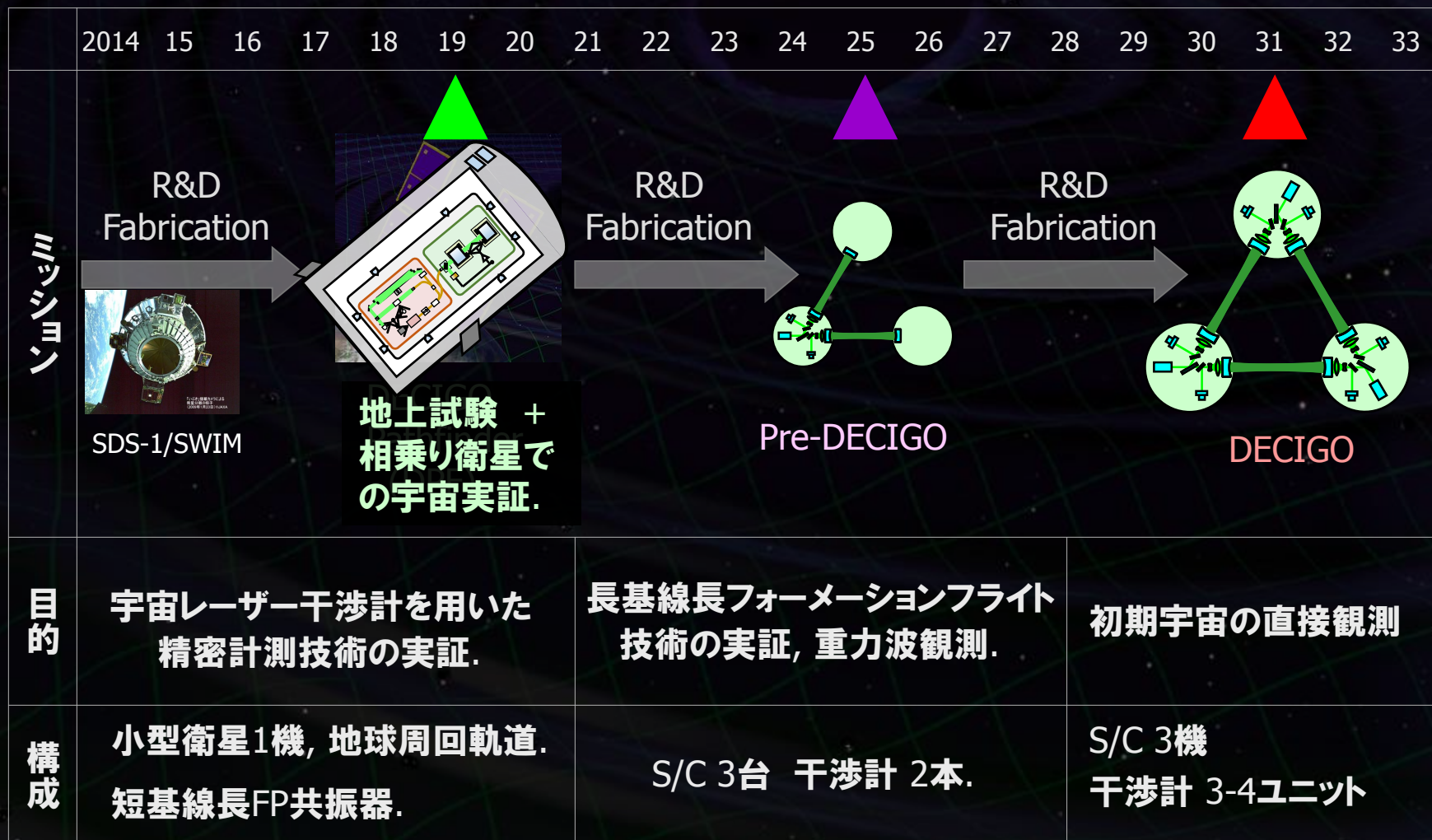
評価結果：原始重力波の直接観測という DECIGO 計画の目的は明確であり、その科学的価値は高い。 DPF 計画はその実現へ向けた 1 ステップとなると考えられる。ただし、DECIGO 計画あるいは DECIGO のサイエンスをどのように実現するのか、国際協力の可能性も含めた長期戦略を立てた上で DPF を進めることが不可欠であるかどうかを慎重に検討する必要があるが、そうした検討は未だ十分でない。また、我が国の重力波観測研究として進行中の KAGRA 計画と並行して DPF を確実に成功させるための研究開発組織の検討が十分な具体性を持ってなされていない。 さらに、DPF がもたらす地球重力場観測データについては、これまでに得られているデータと比較した地球科学的な視点からのアドバンテージがコストに対して十分に高くないという指摘があった。以上の理由により、第 1 段階審査において DPF はイプシロン 3 号機搭載小型衛星として採択できないとの結論を得た。 一方、前述の通り、DECIGO 計画の科学的重要性は高く評価されることから、本ミッション提案に含まれる技術実証の要素について、相乗りミッション等を利用した技術実証の可能性も含めてその実現のために多角的な検討を継続して進めることを期待したい。

- **DPFミッションの意義・位置づけ.**
  - DPFのミッション目標設定が適切か? サイエンス/コスト.
  - DPFの技術がどのようにDECIGOにつながるのか?
- **衛星規模の検討.**
  - より小型のミッションの組み合わせは可能か?
  - DPFではなく、Pre-DECIGOを目指す可能性は?
- **コミュニティ**
  - KAGRAとの関係.
  - 海外との協力, 役割分担, 日本が開発を行う意義.



# DECIGO実現へのロードマップ

Figure: S.Kawamura



- **今後5年程度**: DPF相当の技術を地上試験により実証.
  - 根幹技術の技術成熟度向上.
  - 航空機実験などによる実証, 環境試験.
  - 相乗り衛星等の機会の模索.
- **今後10年程度**: Pre-DECIGO(仮)の実現を目指す.
  - 重力波観測を目的としたサイエンスミッション.
  - DECIGOの1/10スケール.
  - JAXA中型ミッション (300億円). 国際協力の可能性.
- **その後**, DECIGOの実現を目指す.
  - 初期宇宙の観測をミッション目標とする.
    - そのためのミッション要求・システム要求の明確化必要.
  - 国際協力戦略は要検討.



## • DPF体制

- JAXA宇宙理学委員会： DPF WGは、継続/終了審査を受け、Pre-DECIGO(仮)に相当するWGとして再定義の見込み。
- DECIGO組織体制：再検討の予定。

## • 国際協力体制：

- まず国内単独での実現を検討 (~1年)。
- その後、国際協力の方策を模索。

## • 研究経費：

- 科研費・基盤(A)：航空機実験を中心とした地上開発・試験。
- JAXA戦略的開発経費：Pre-DECIGOのミッション検討。

# まとめ



- これまでDPFとしてミッション検討と根幹搭載技術開発を進めてきた。→ ミッション提案の形で取りまとめられている。
- 今回の戦略的開発経費によって、Pre-DECIGO検討を進める  
(これまでの知見をPre-DECIGO に向けたものへ再構成)。  
→ ミッションの科学的価値とのトレードオフ検討。  
必要とする開発項目・リソースを、より詳細に洗い出し。  
推進体制の再構築、国際協力の可能性検討。  
ミッション検討の早期にこれらを進めることで後の出戻りを低減。
- 相乗りミッションの検討とコンポーネント試験。
- 採択済の科学研究費補助金と相補的な活用。

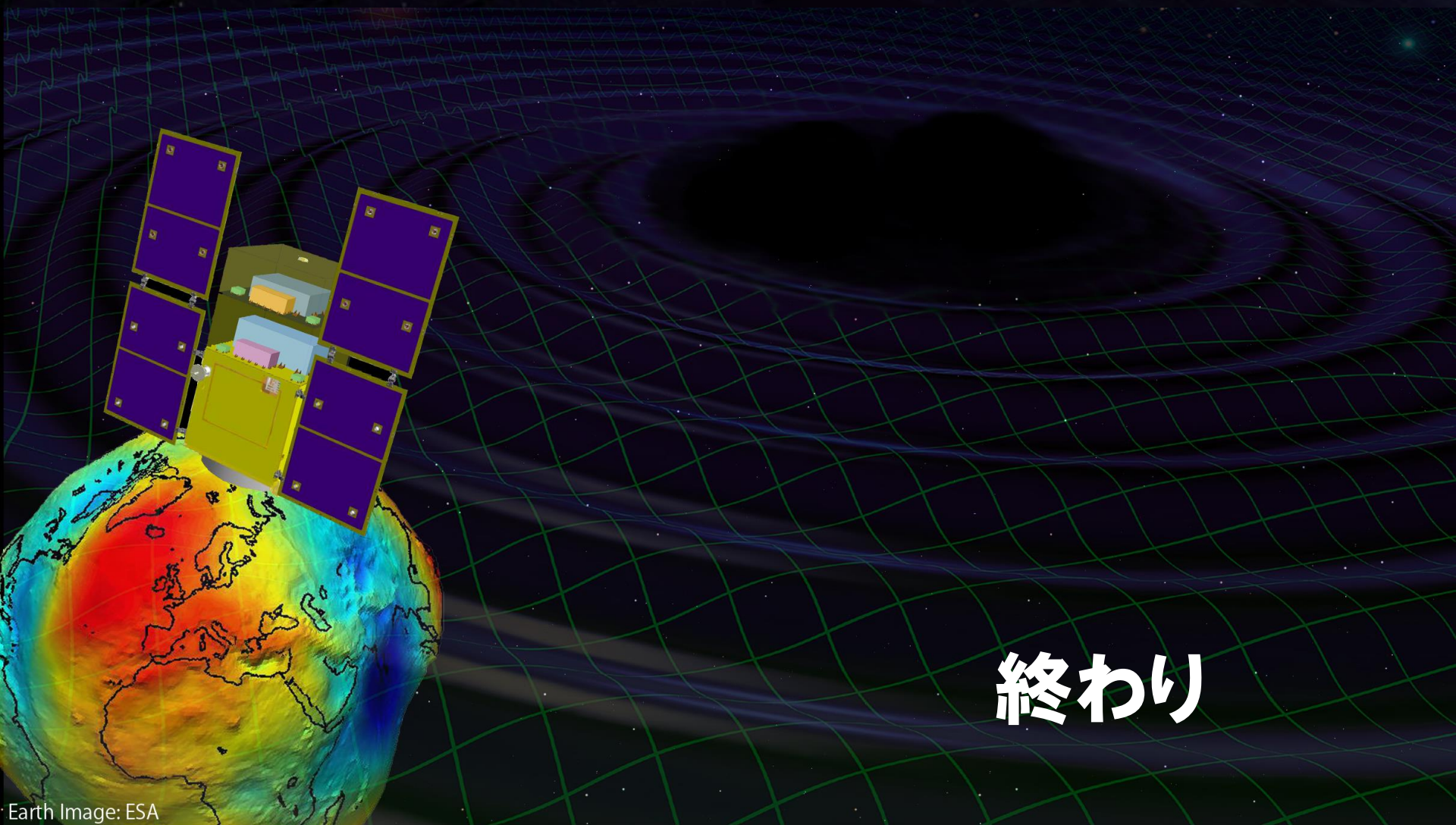
## •研究の目的

- \* 宇宙重力波望遠鏡 Pre-DECIGO のミッション検討.
- \* 宇宙実証を目指した検討と搭載機器開発.

## •申請経費 : 880 万円

- |               |        |               |
|---------------|--------|---------------|
| * ミッションシステム検討 | 500 万円 | (安東, 佐藤)      |
| * 搭載機器BBM開発   | 250 万円 | (武者, 阿久津, 船木) |
| * 旅費          | 50 万円  |               |
| * 間接経費        | 80 万円  |               |





Earth Image: ESA

終わり




# 補足資料



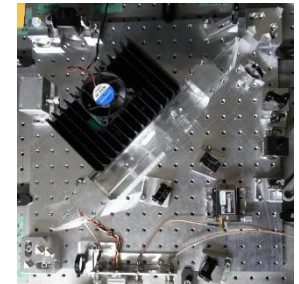
# 安定化光源の開発


ヨウ素安定化Nd:YAG laser( $\lambda=1064\text{nm}$ ) Desktop model



周波数安定度の向上 

ヨウ素安定化Yb:YAG laser( $\lambda=1030\text{nm}$ ) Breadboard model (BBM1)

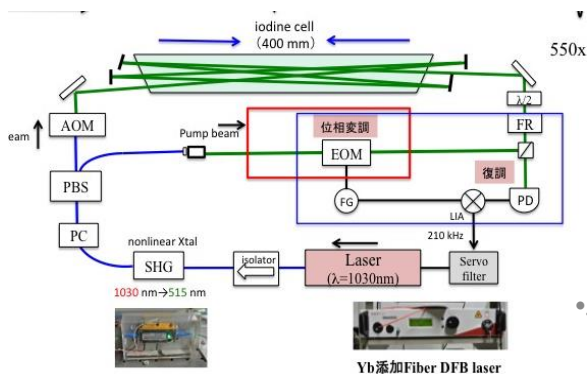
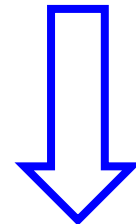


機械的安定度の向上  小型化

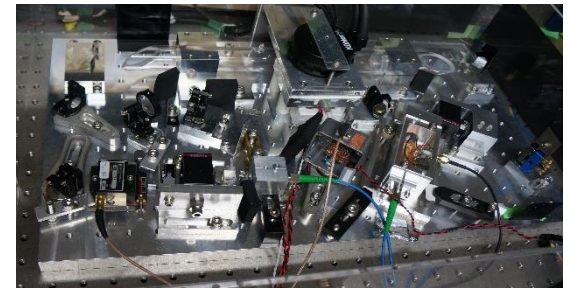
ヨウ素安定化Yb:fiber DFB laser ( $\lambda=1030\text{nm}$ ) Breadboard model (BBM2)

省エネ化 自動制御化

強度安定化



•JAXA戦略的開発経費ヒアリング (2015年4月7日, JAXA相模原キャンパス)



# 今後の予定

ヨウ素安定化Yb:fiber DFB レーザーの  
Breadboard model (BBM3) の製作

周波数安定度の向上 (信号のSNR 向上等)

各部のモジュール化、小型堅牢化

周波数安定度の評価(同安定度光源が2台必要)

強度安定化、周波数安定化を両立したシステム

FPGAを用いた制御完全自動化

他光源の試用(外部共振器型半導体レーザー)

高出力化への準備



# 干渉計BBM2 制御実験

干渉計モジュールに組み入れる前に、光学系だけで動作確認を行った。

← 1030 nm光源 (+ファイバーカップラ)

ファイバーEOM

入射光学系BBM2

キャビティー: 30cm

ピエゾステージと、レーザー周波数へfeedback

実験 by 春日さん  
光源 from 電通大(武者さん)  
ファイバーEOM from 坪野研(道村くん)

Length 制御がかかった

透過光

反射光

フィードバック信号

エラー信号

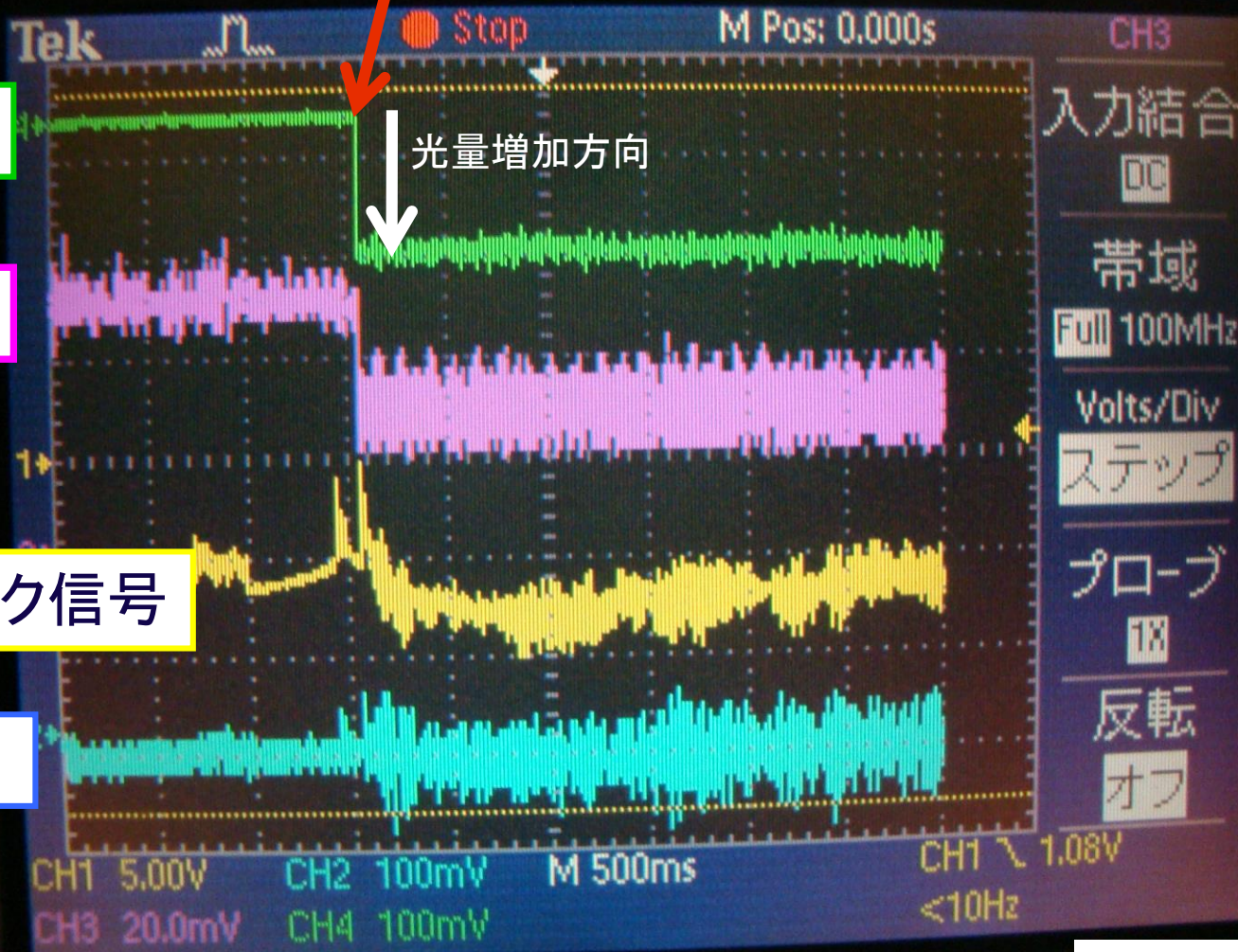
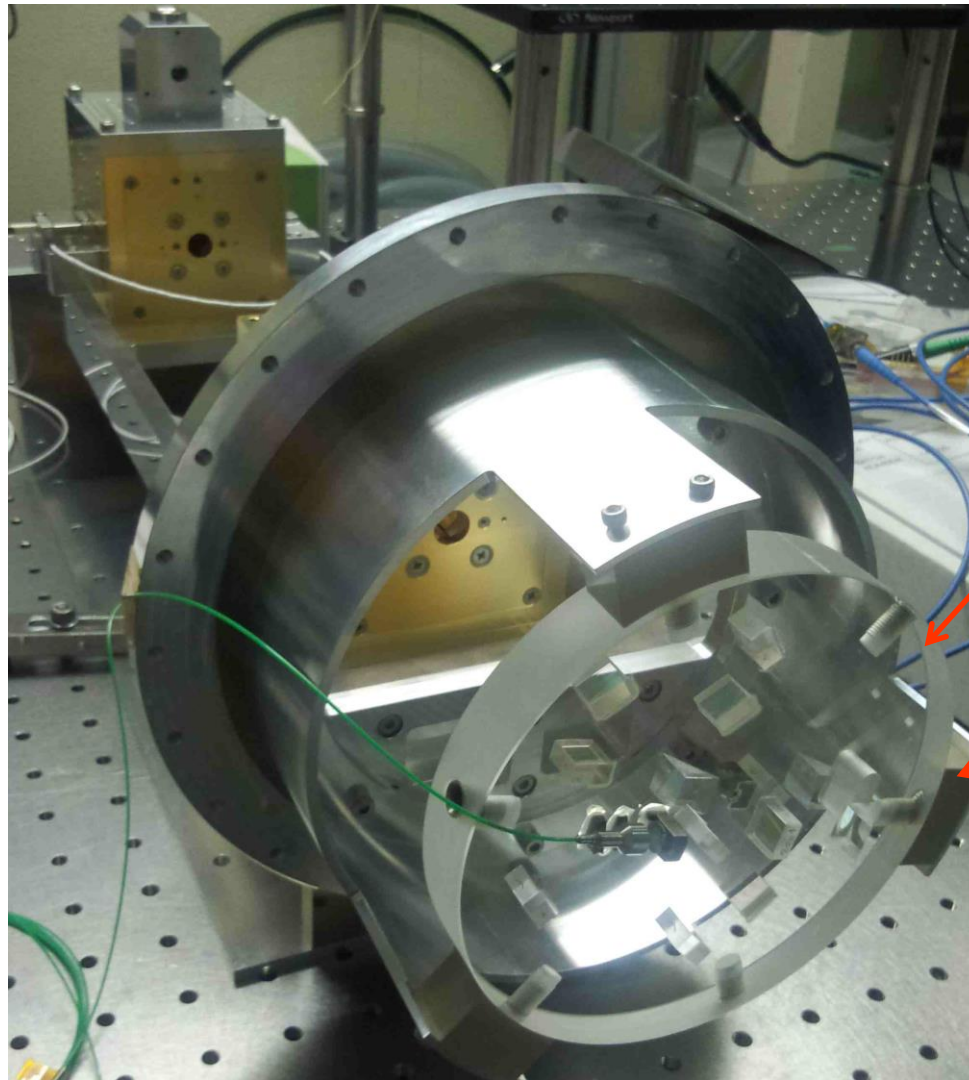


Fig. by E. Kasuga



# 干渉計モジュールへの組み入れ



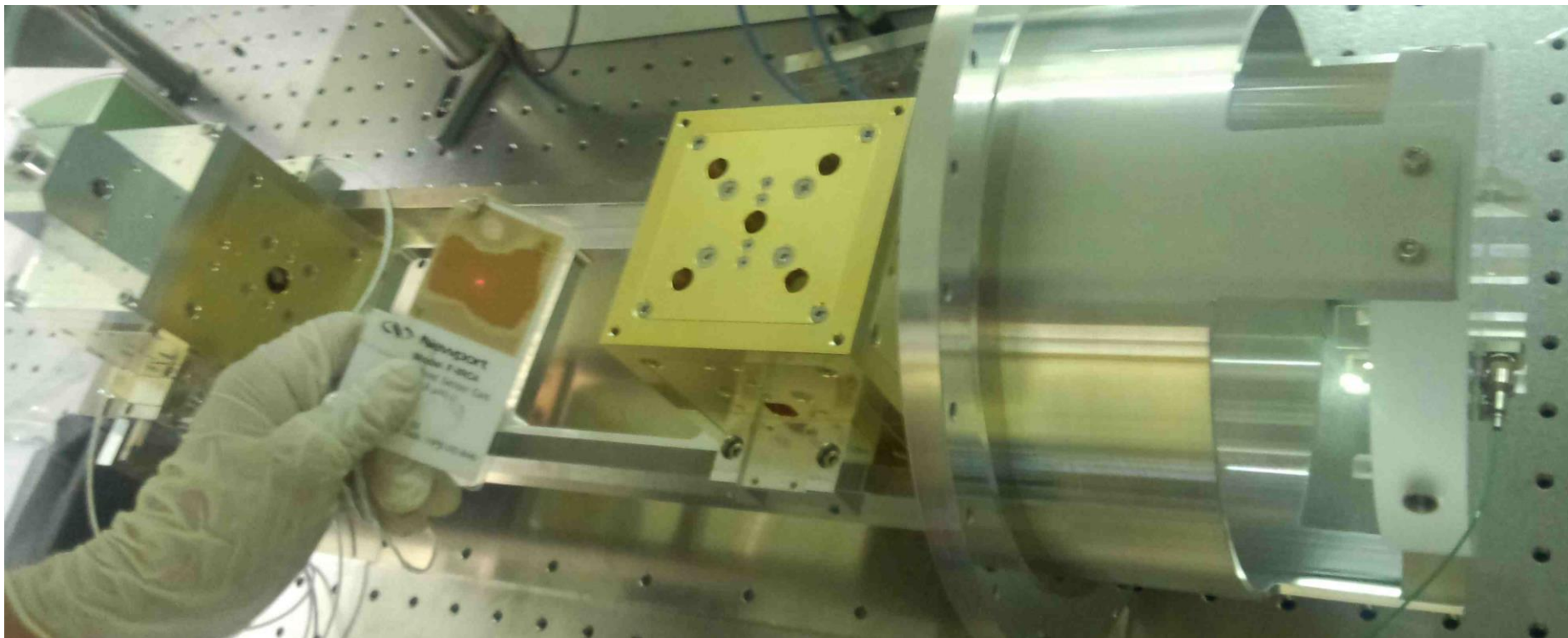
入射光学ベンチ

PEEK材attachment

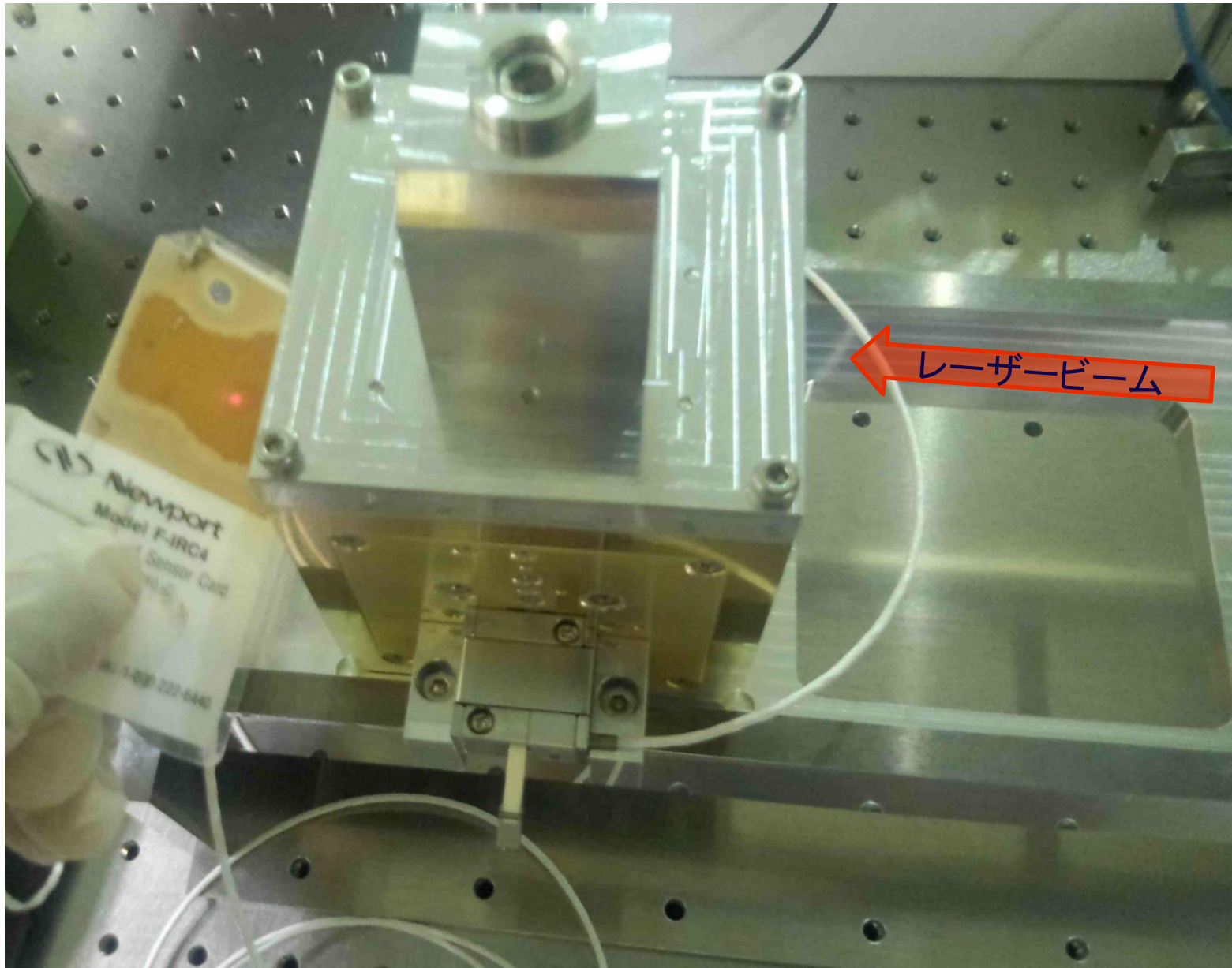
## 要試験項目

- ・ 振動・衝撃試験
- ・ 熱

(でもまだ壊したくない)







# 干渉計モジュール地上試験装置

宇宙に打ち上げる前に、地上で、  
干渉計モジュールの動作を検証できる必要がある。

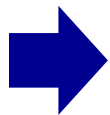


試験マス@宇宙空間を模擬

防振系の開発ということになる。

実際のDPFでの運用から必要なことを考えると、

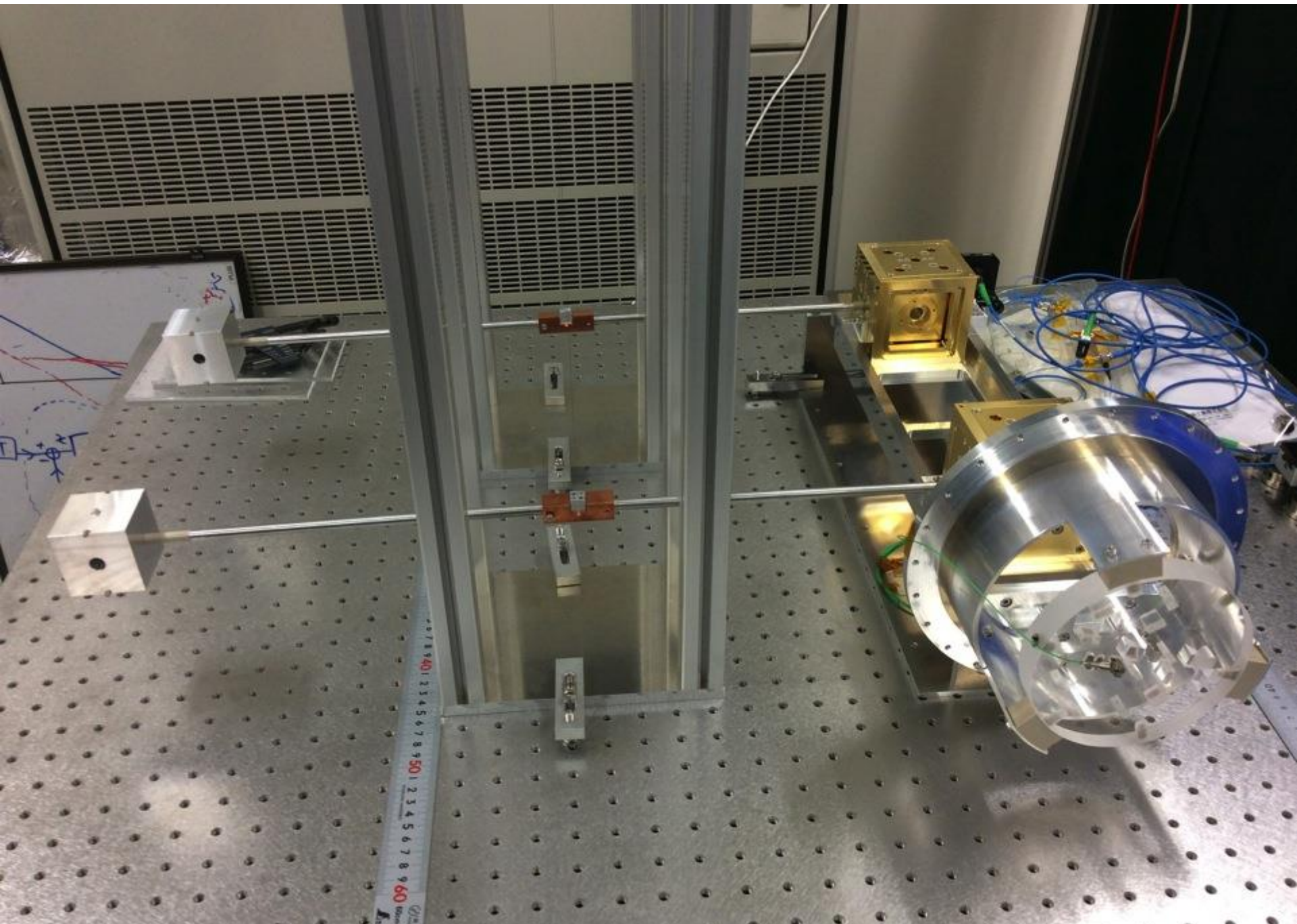
- ・ DC付近の制御: 地球周回軌道に載せる(衛星のスラスタ) + ローカル制御 (静電アクチュエータ)
- ・ 0.1Hz付近の制御: 差動はdrag-free飛行+同相はローカル制御



DC付近まで共振を下げるのは難しいが、  
0.03Hz程度に共振をもつような系にしておけば  
よいだろう

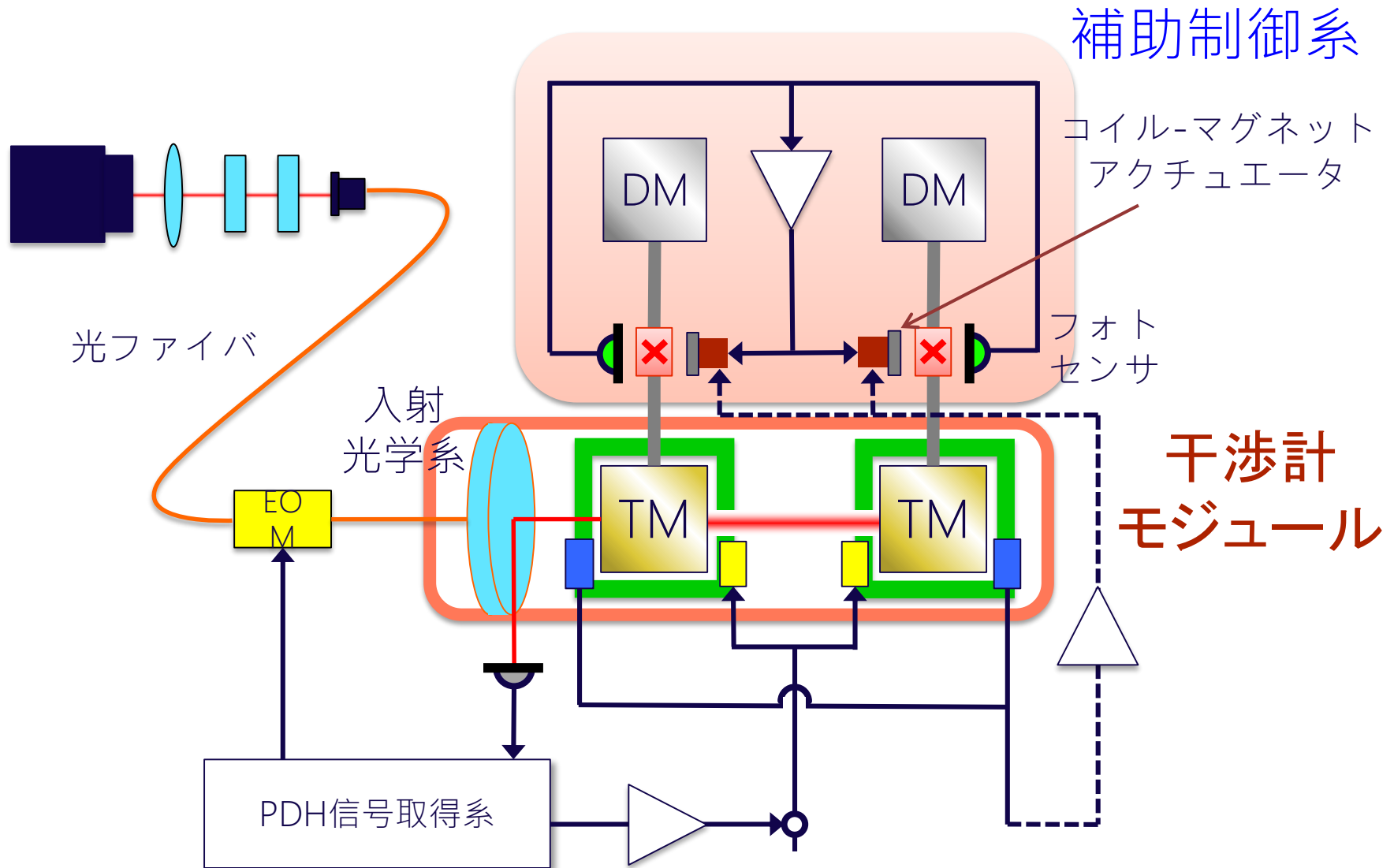
→ 単純に考えるとTorsion pendulum





# 地上実験での制御

(top view)



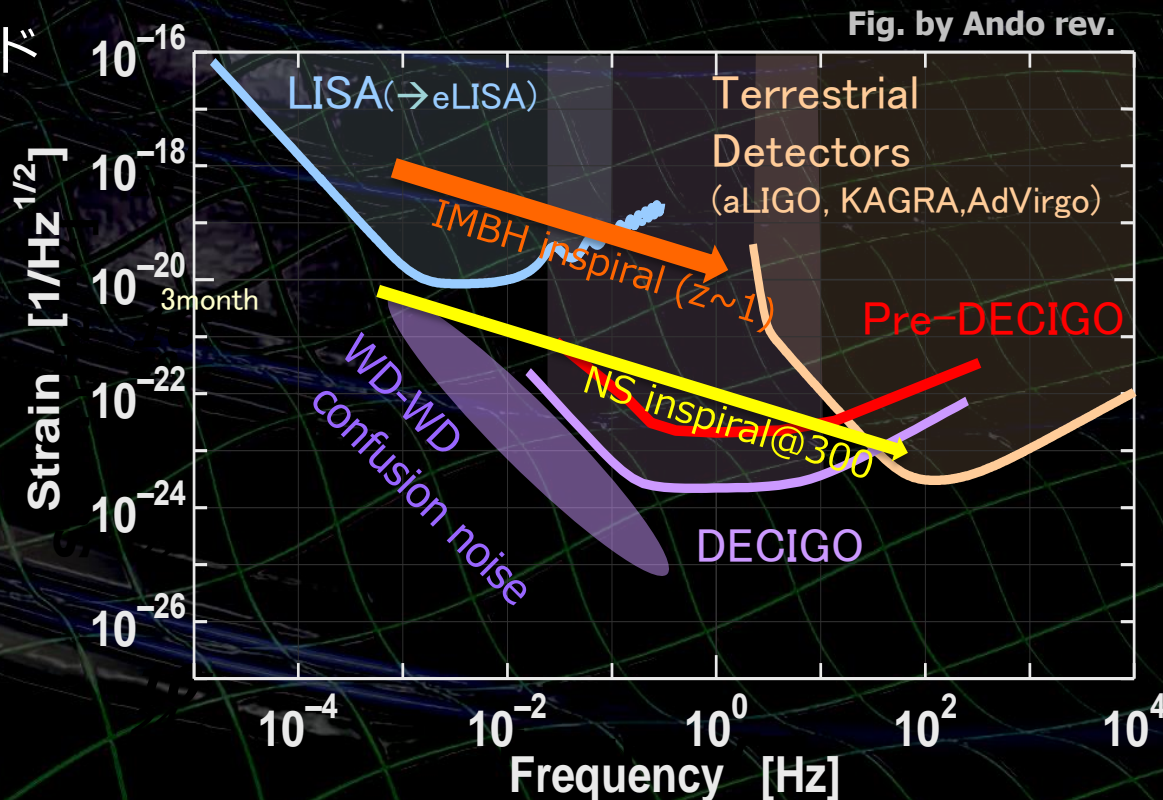


# 「Pre-DECIGO」のサイエンス

- ❖ NS-NS@2-300Mpc インスパイラル
  - ❖ 地上観測機器群との共同観測
  - ❖ 合体の時刻の予測、合体前の方向特定
- ❖  $10^3 M_{\odot}$  BH-BH 合体
  - ❖ 宇宙の時空構造と銀河形成の解明
- ❖ NS/WDフォアグラウンド
  - ❖ パラメータ推定と除去



DECIGOまで見据えた  
「シナリオ」が重要  
(検討中)



# 「Pre-DECIGO」の軌道設計

## ❖ 軌道設計の考え方

- ❖ フォーメーションフライトが成立すること
  - ❖ 3機の編隊を維持できればよい
  - ❖ 軌道投入したら軌道変更しないのが理想
- ❖ ドラッグとなる擾乱が少ないこと
  - ❖ 太陽輻射圧、天体（地球）重力、大気ドラッグ
- ❖ 通信が成立すること
  - ❖ 衛星運用
  - ❖ データ転送
- ❖ 遠すぎないこと
  - ❖ 推薬と時間の制限

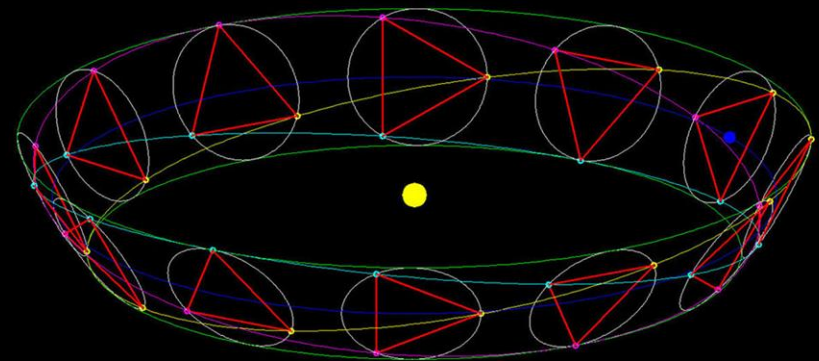
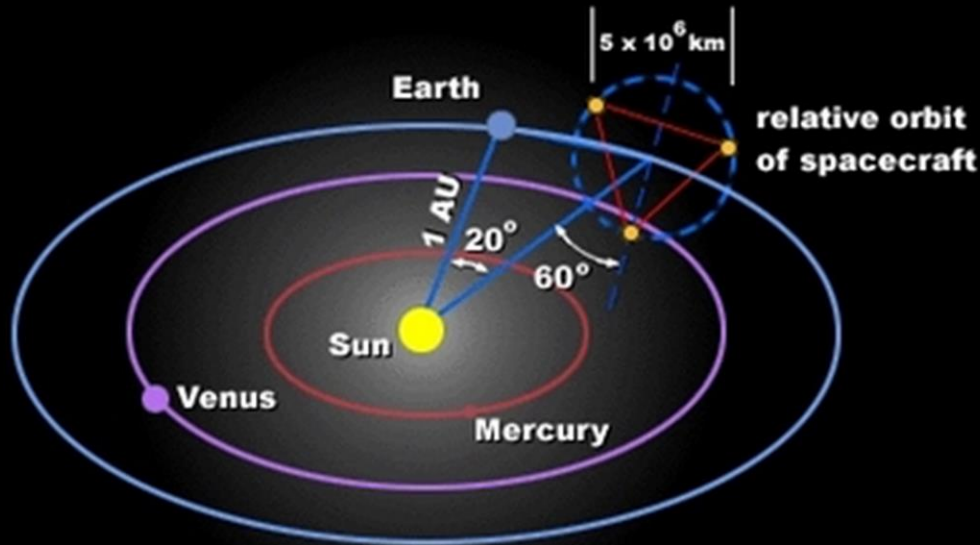
## ❖ 一般的な周回軌道のオプション

- ❖ 太陽周回軌道：LISA, eLISAなど
- ❖ 地球周回軌道：DPFなど
- ❖ ラグランジュ点周辺：SPICA（L2周りのハロー軌道）など



# • 「Pre-DECIGO」の軌道設計

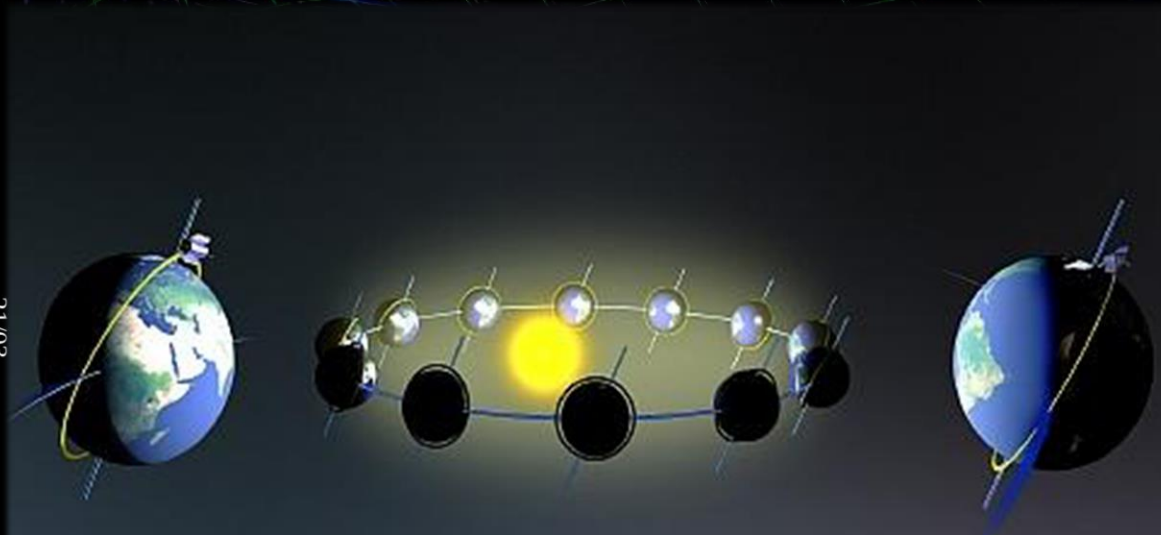
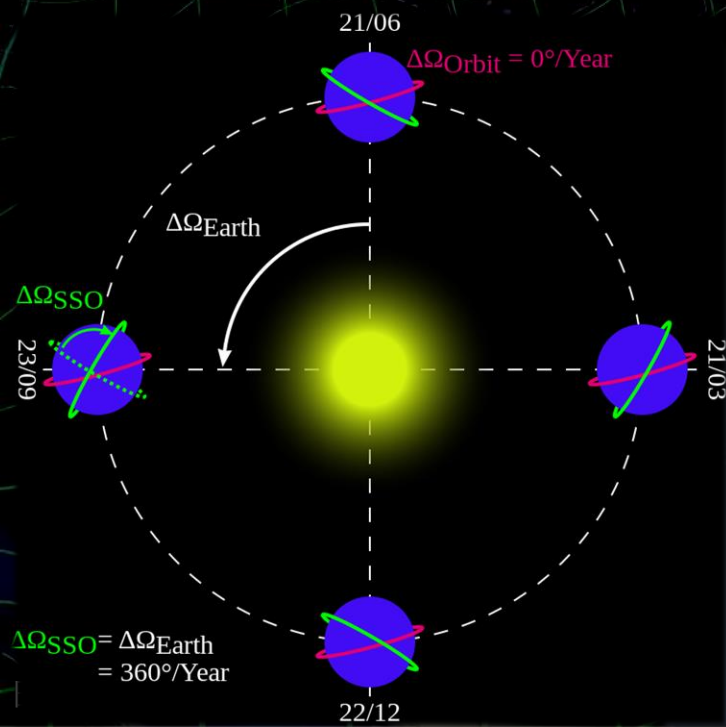
- ❖ LISA, eLISAの軌道
  - ❖ 太陽周回の「特殊な条件」の軌道
  - ❖ レコード盤 (Cartwheel) 軌道
    - ❖ Hillの方程式の成立する条件
- ❖ フォーメーションの回転中心が中心天体の周りの円軌道
  - ❖ フォーメーションの広がり十分小さい
- ❖ 分散体がレコードのように回転する解が存在する
- ❖ レコード盤の軌道面はフォーメーション中心の軌道面と $60^\circ$ の角度をなす
  - ❖ 各宇宙機は中心天体およびフォーメーション中心を1年で周回



# ● 「Pre-DECIGO」の軌道設計

## ❖ DPFの軌道

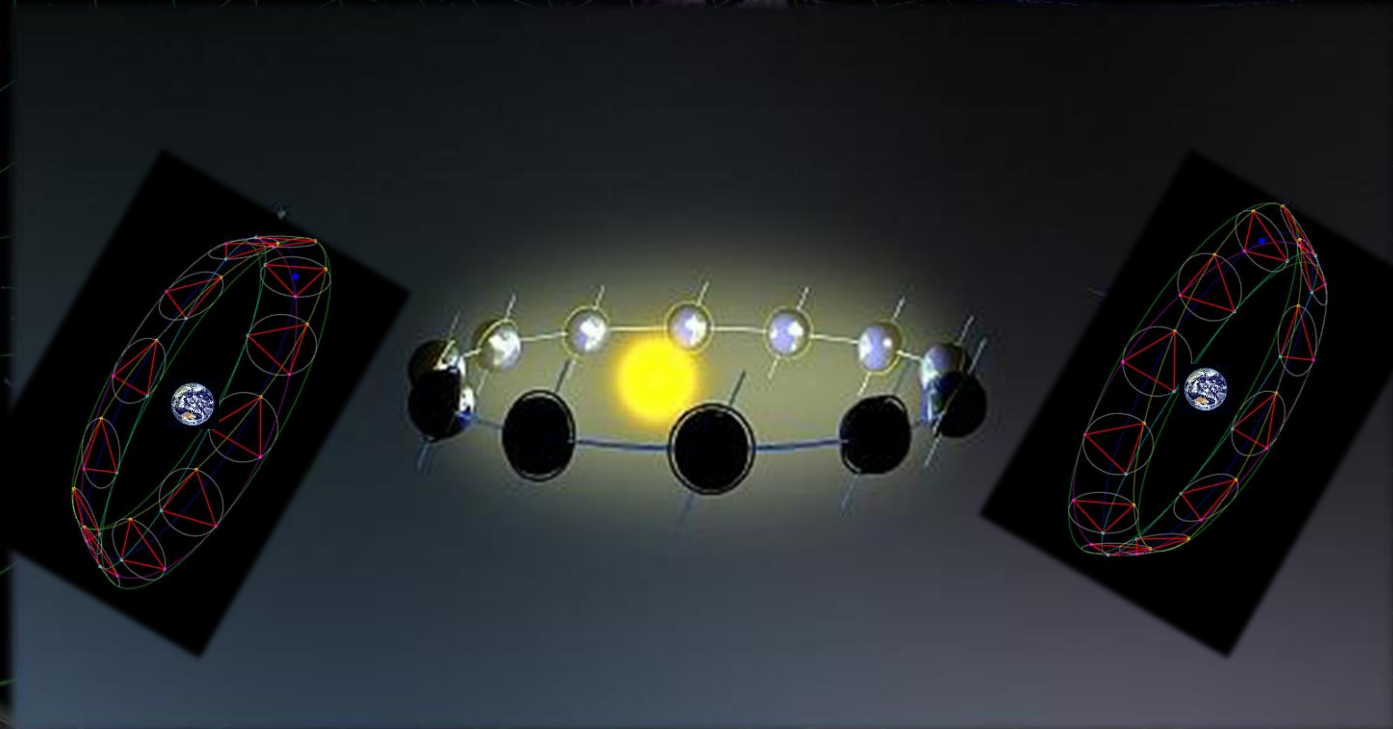
- ❖ 地球周回の「特殊な条件」の軌道
- ❖ 太陽指向極 (Dawn-Dusk) 軌道
  - ❖ Hillの方程式の成立する条件
- ❖ 中心天体 (地球) の理想球体からのずれJ2項を利用する
  - ❖ 軌道傾斜角と軌道高度の組み合わせ
  - ❖ 衛星の軌道面が中心天体を1年で周回
  - ❖ 軌道高度によっては日陰が発生する





# ● 「Pre-DECIGO」の軌道設計

- ❖ PreDECIGOの軌道（案）
  - ❖ 地球周回の「とても特殊な条件」の軌道
- ❖ 地球周回レコード盤軌道を満たす太陽指向極軌道
  - ❖ Hillの方程式の成立する条件
- ❖ 中心天体（地球）の理想球体からのずれJ2項を利用する
  - ❖ 軌道傾斜角と軌道高度の組み合わせ
- ❖ 衛星の軌道面が中心天体（太陽）を1年で周回
  - ❖ 全日照になるように軌道高度を選ぶ



# ドラッグフリー制御

## ドラッグフリー制御

要求：1mm@DC  
 $10^{-9}$  m/rHz@0.1Hz

(試験マスを参照に宇宙機を制御)

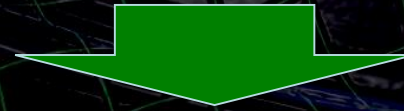
## 編隊飛行技術

要求：1 $\mu$ m@DC?  
?m/rHz@0.1Hz

(宇宙機 1 を参照に宇宙機 2 を制御)



何かを参照に宇宙機を位置・姿勢制御するという本質部分は共通



- ❖ 精密制御：地上検出器の場合と変わらない
- ❖ **スラストによる連続精密制御**：重力波では実績がない
- ❖ センサ・アクチュエータの精度が制御の精度を決める



# スラスタによる精密制御

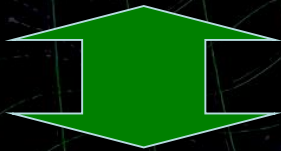
## ❖ DECIGO/Pre-DECIGOの観点から

- ❖ ドラッグフリー制御
- ❖ 編隊飛行技術
- ❖ 何をどこまで実証するか？

DECIGO/Pre-DECIGO



搭載機器基礎開発実験費



本来独立だが、うまくリンクするとよい

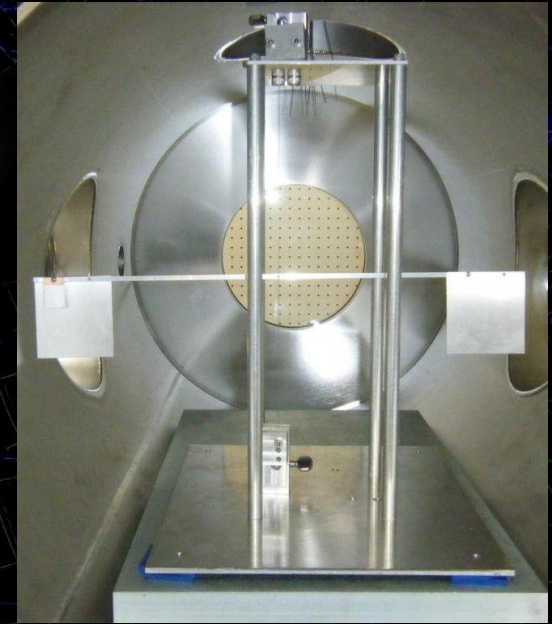
## ❖ 搭載機器基礎開発実験費@ISAS/JAXAの観点から

- ❖ 宇宙機の精密制御ミッションを想定
- ❖ 「衛星機体制御のためのスラスタ精密制御システムの開発」
  - ❖ 計画研究 A : スラスタ特性の高精度評価@ISAS
  - ❖ 計画研究 B : スラスタ精密制御の実証実験

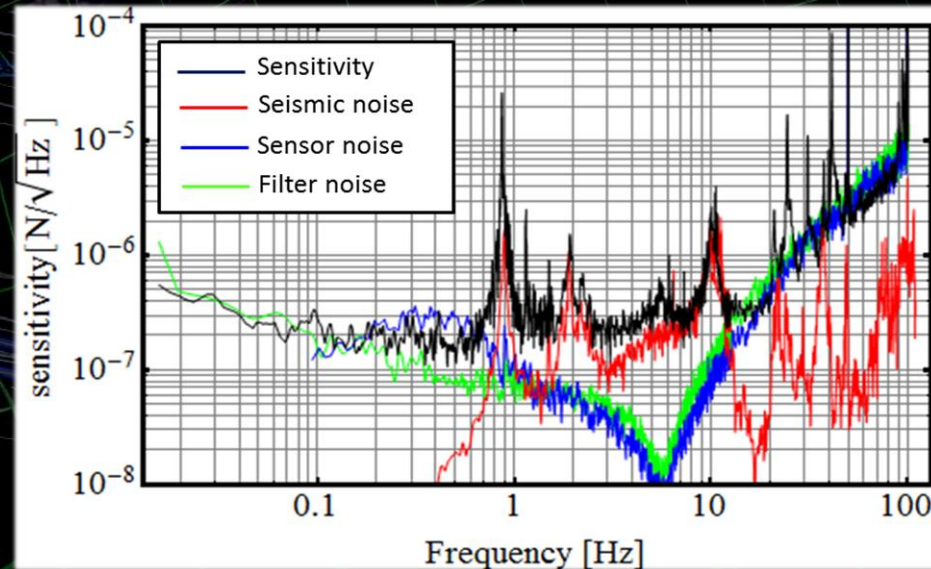
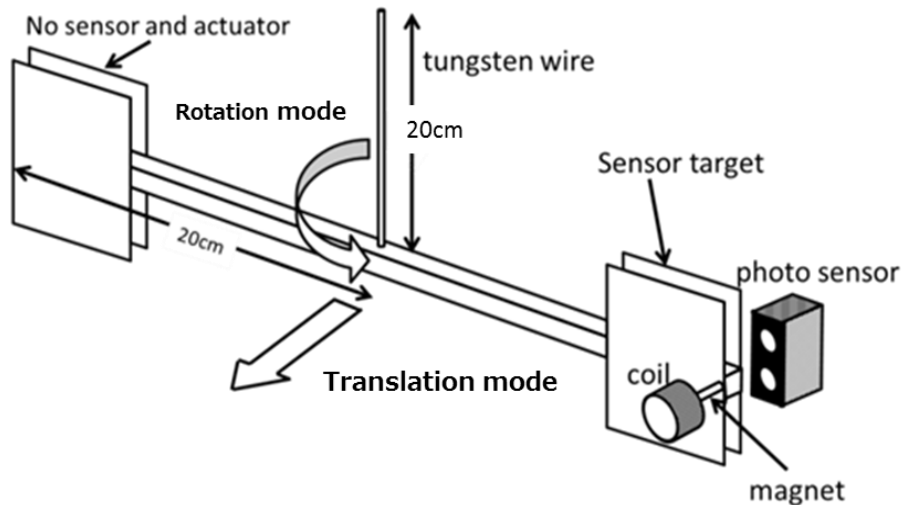
# 計画研究 A スラスタ特性の高精度評価@ISAS DECIGO

## ❖ A.1 高感度スラスタスタンドの構築・高感度化

- ❖ 現状のスラスタスタンド（スラスタ非搭載）の高感度化
  - ❖ 差動検出型へ変更
  - ❖ フォトセンサ+コイルマグネット
  - ❖ 推力雑音レベル $10^{-7}$  N/rHzの可測感度を実証
- ❖ スラスタ搭載型スラスタスタンドの設計・製作
  - ❖ スラスタ搭載（非接触スタンドアロン型）
  - ❖ 検出系防振（TBD）
  - ❖ 真空系（TBD）



## ❖ A.2 線形性・周波数応答・雑音特性の評価





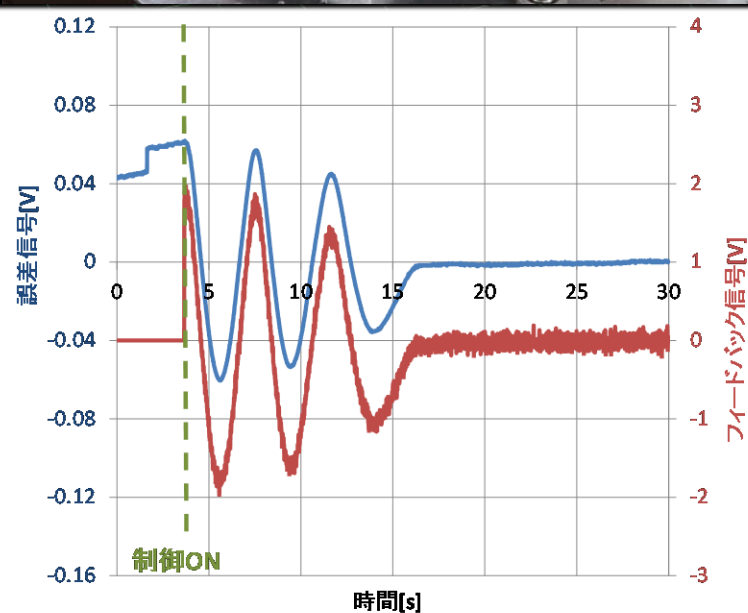
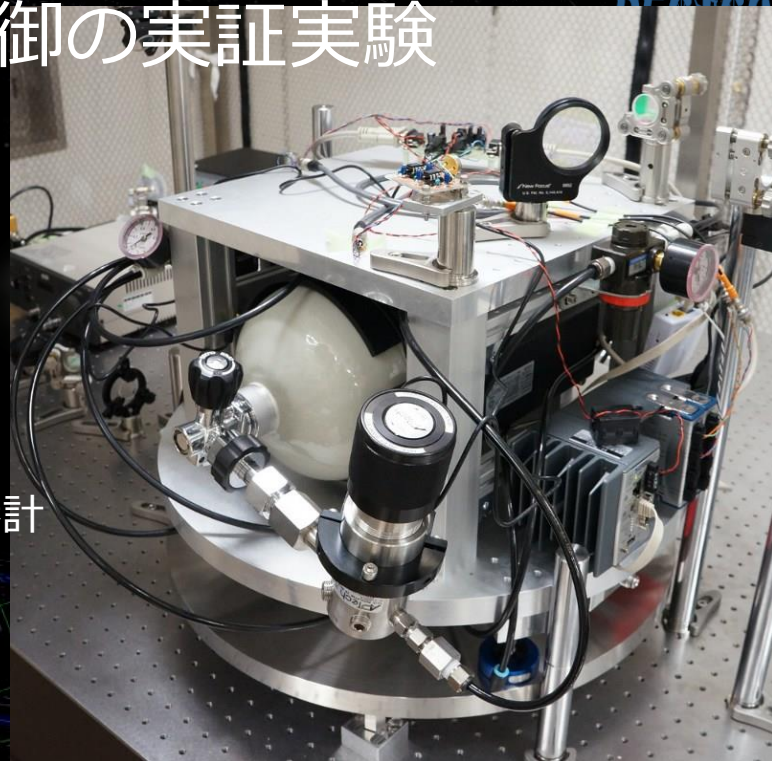
# 計画研究 B スラスタ精密制御の実証実験

## ❖ B.1 浮上プラットフォームの構築

- ❖ 基本構造の設計は捻れ振り子
  - ❖ 並進 1 自由度 + 姿勢 2 自由度
  - ❖ 非接触型スラスタ 2 台 (+ 4 台搭載)
- ❖ 制御系
  - ❖ センサ：フォトセンサ → マイケルソン干渉計
  - ❖ アクチュエータ：スラスタ
  - ❖ 制御：真空槽内独立

## ❖ B.2 スラスタを用いた制御実証実験

## ❖ B.3 スラスタを用いた精密制御特性の評価





# DECIGOの科学的意義





# 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO



**DECIGO** (DECI-hertz interferometer  
Gravitational wave Observatory)

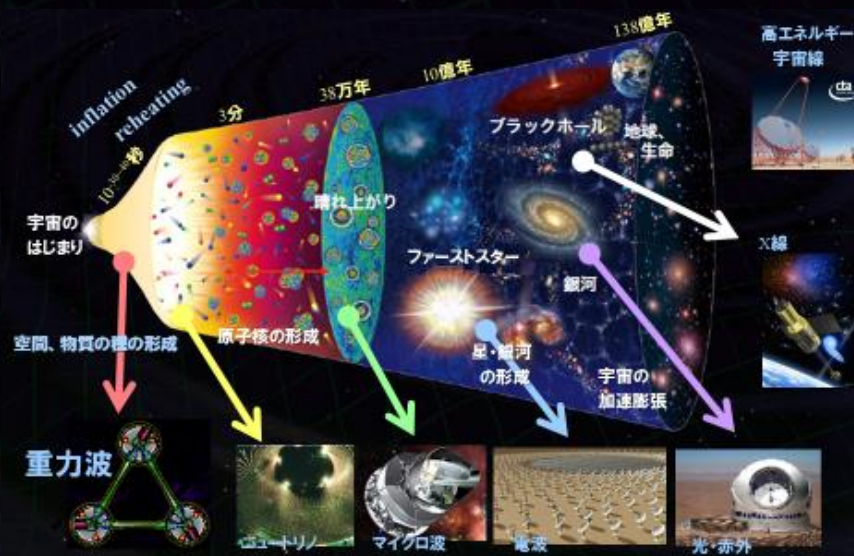
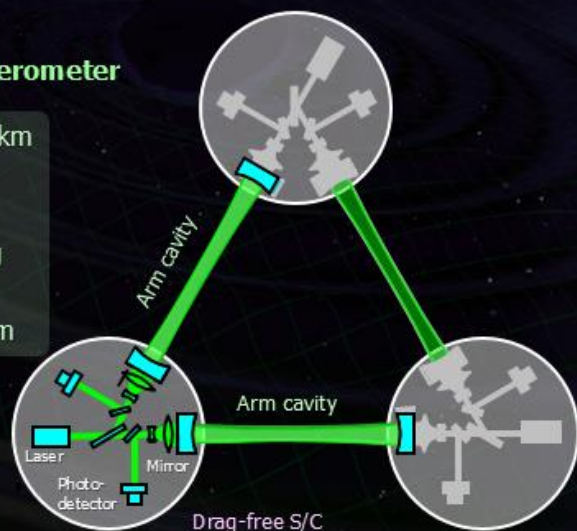
**宇宙のはじまりを直接観測する。**

**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



背景画: 福井康雄監修「宇宙史を物理学で読み解く  
-素粒子から物質・生命まで」(名古屋大学出版会)より

BICEP2, (POLARBEAR,...)

マイクロ波望遠鏡を用いた  
宇宙背景放射 B-mode偏光  
成分の観測.

DECIGO, (KAGRA, aLIGO,...)

重力波望遠鏡を用いた  
宇宙背景重力波の観測.

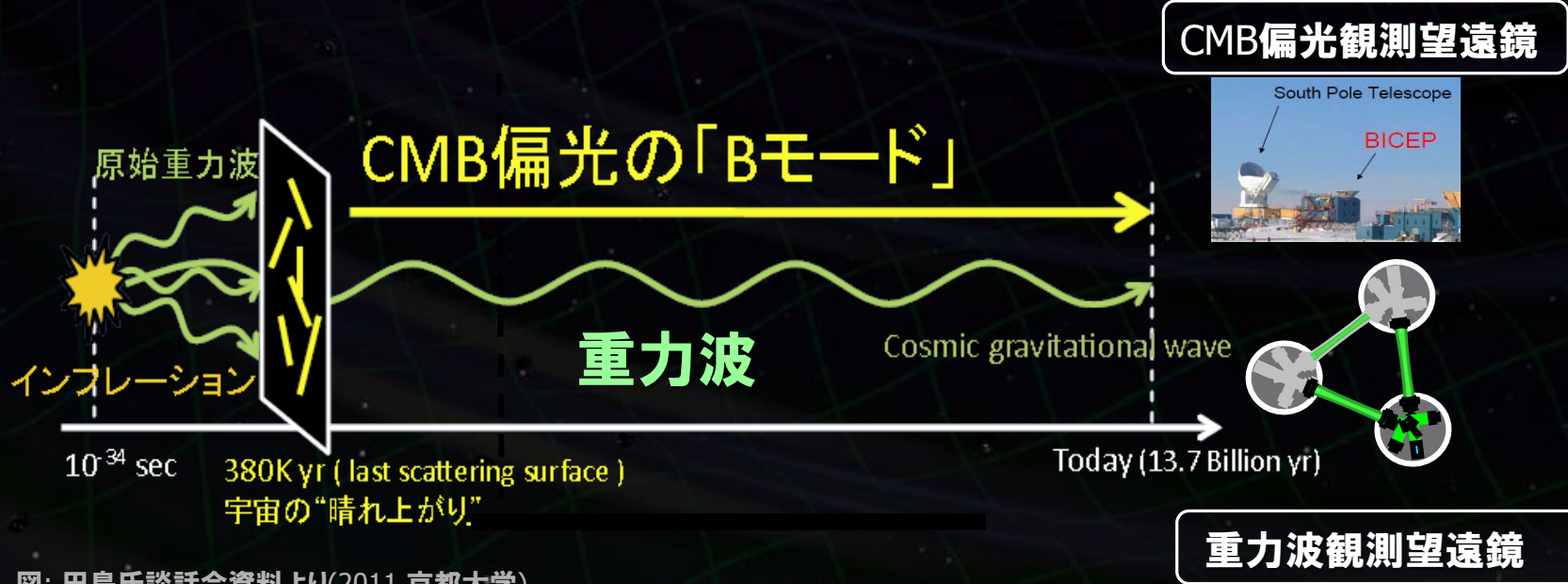
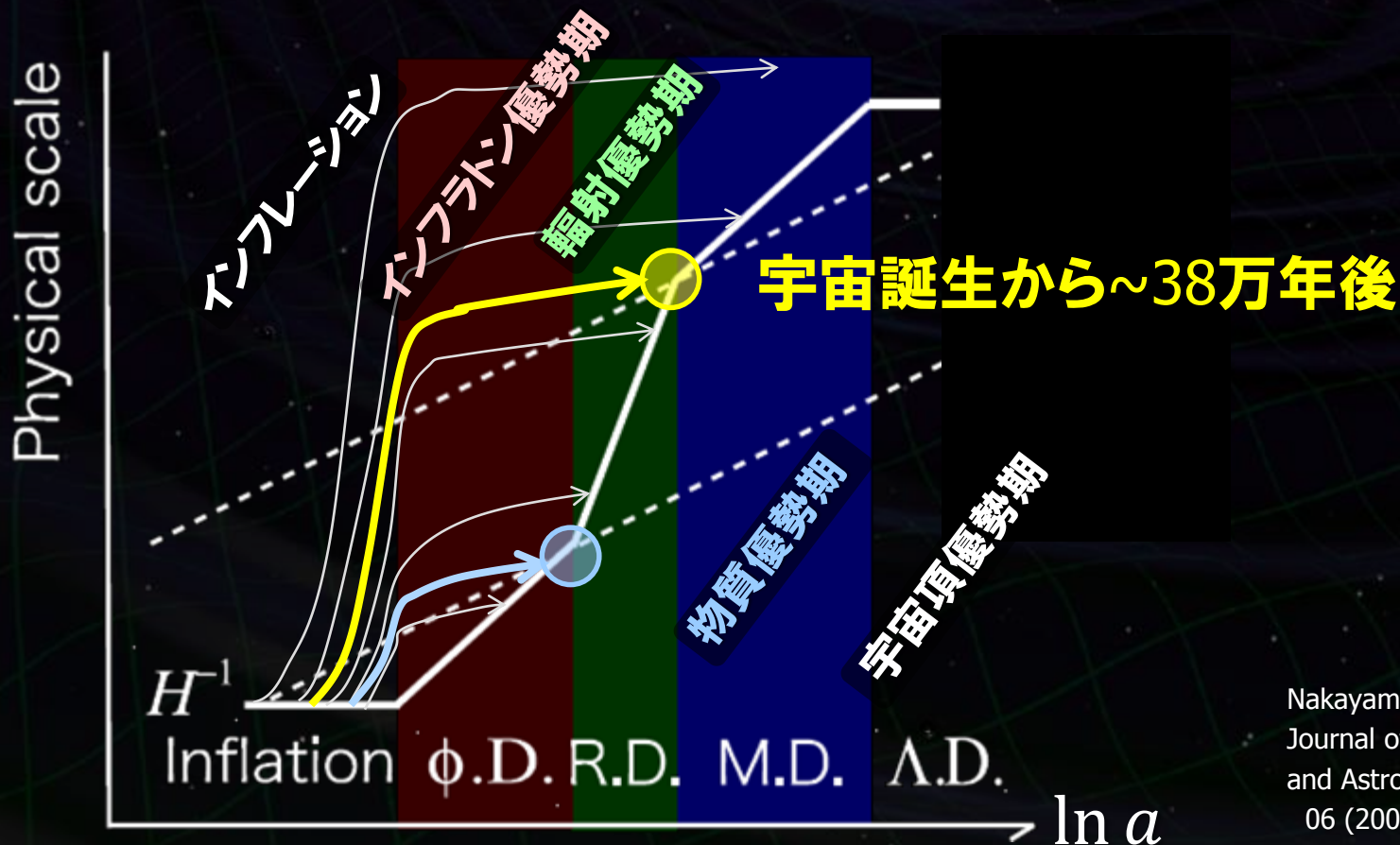


図: 田島氏談話会資料より(2011 京都大学)



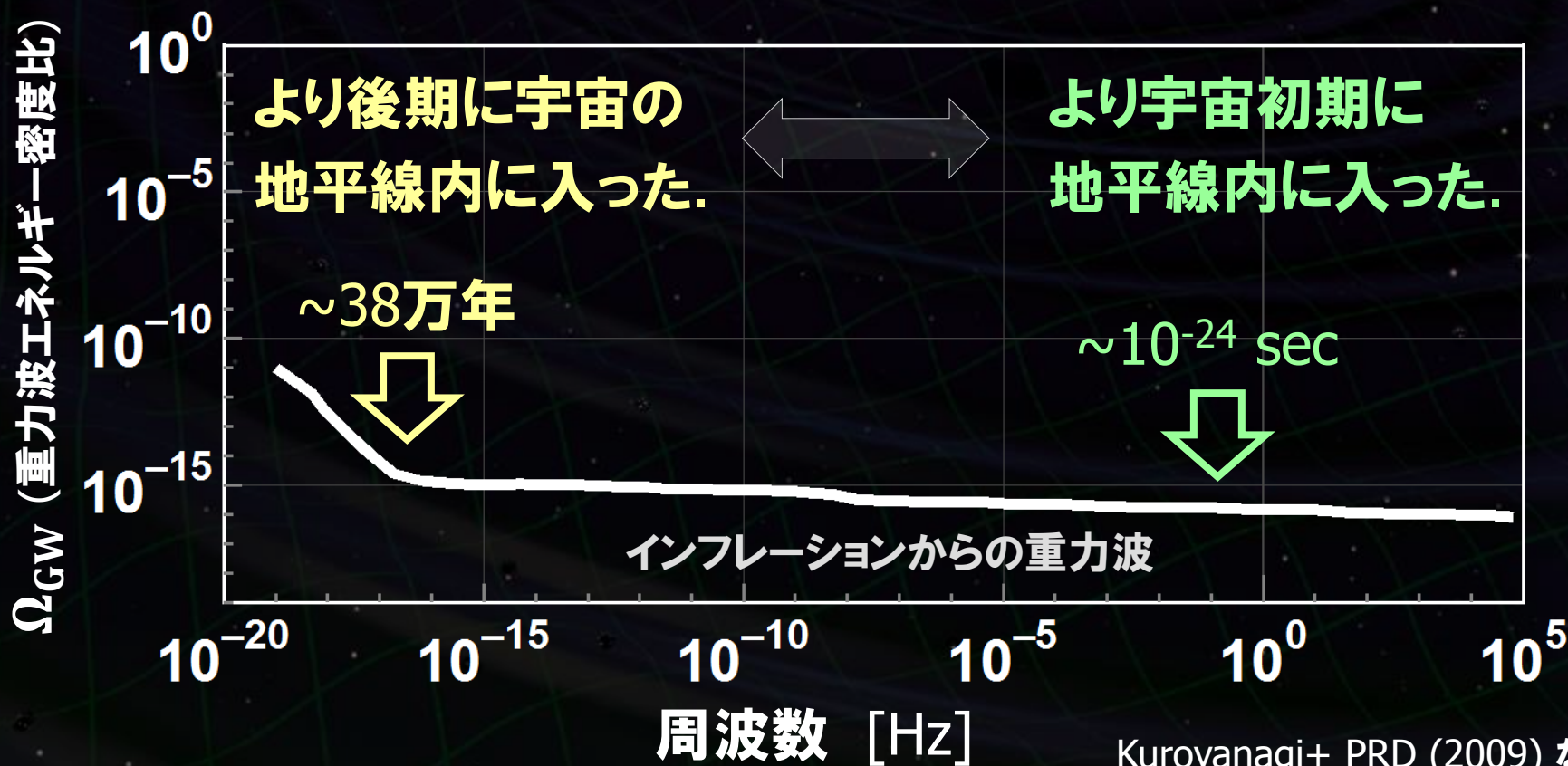
# インフレーションからの重力波

計量の量子揺らぎとして生成 → 初期に生成された重力波ほど、長くインフレーションで引き延ばされ、最近に宇宙の地平線内へ。



Nakayama+,  
Journal of Cosmology  
and Astroparticle Physics  
06 (2008) 020.

初期に地平線内入ってきた重力波ほど高周波.





重力波のエネルギー密度比


重力波のエネルギー密度

$$\Omega_{\text{GW}}(f) = \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}(f)}{d \ln f}$$

宇宙の臨界密度

等価な重力波振幅

ハッブル定数

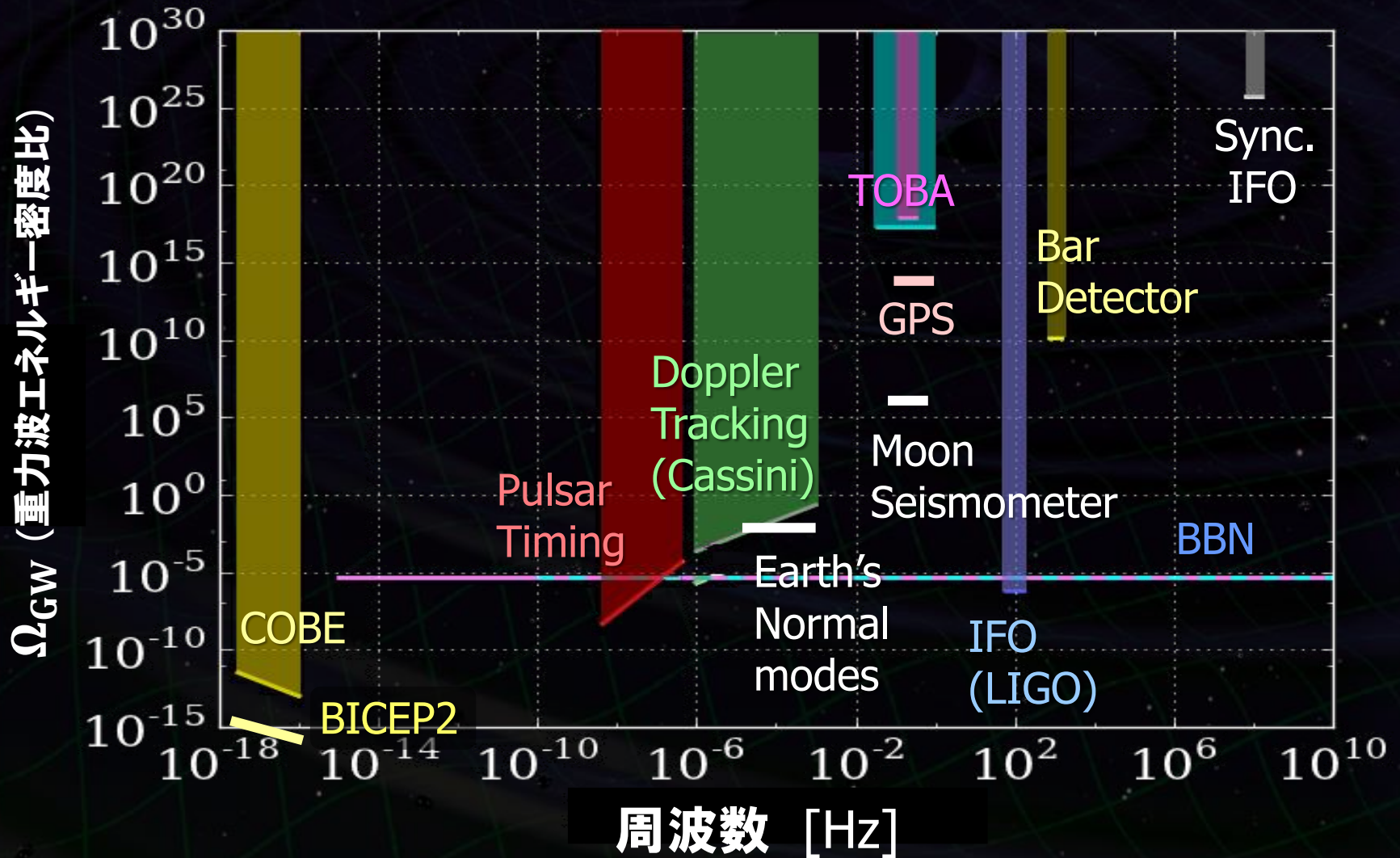

$$\tilde{h}_{\text{GW}}^2(f) = \frac{3H_0^2}{10\pi^2 f^3} \Omega_{\text{GW}}(f)$$

地平線内に入った重力波は、宇宙膨張とともに発展。  
→ スペクトルの形は、**宇宙進化の情報**を持っている。





# 背景重力波探査の現状

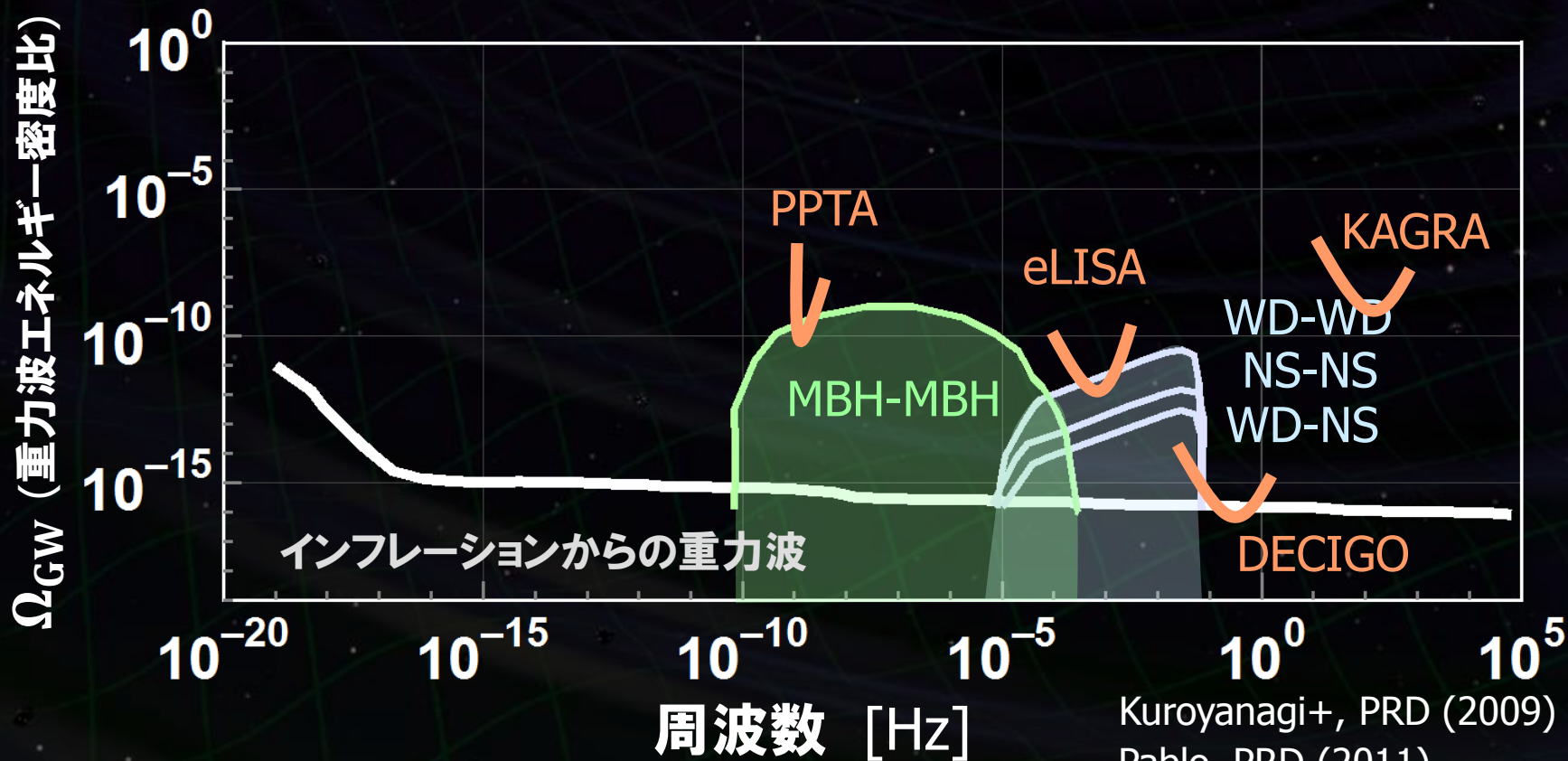


原図 : Shoda+, PRD (2013)

多くの連星系からの重力波 → 分離できない.

⇒  $10^{-10} - 0.1$  Hzの周波数帯で,

原始重力波観測に対する **Foreground雑音** となる.



Kuroyanagi+, PRD (2009)  
Pablo, PRD (2011)



$$\tilde{h}_{\text{GW}}^2(f) = \frac{3H_0^2}{10\pi^2 f^3} \Omega_{\text{GW}}(f)$$



高周波数では振幅は小さくなる

- さまざまな周波数帯で原始重力波観測を観測することで宇宙の進化の情報を得ることが可能.
- インフレーションからの重力波観測には低周波数が有利.
- 0.1Hz以下の周波数帯では, フォアグラウンド重力波が存在.



インフレーションからの重力波観測には,  
0.1 -1 Hzの周波数帯が良い.

$$\Omega_{GW} \sim 10^{-16} - 10^{-15}$$
$$\rightarrow \tilde{h}_{GW} \sim 10^{-24} \text{ Hz}^{-1/2} (@ 0.1\text{Hz})$$



- 重力波 – 強い透過力を持ち, 初期宇宙の情報を伝える.
- スペクトルの形 : 初期揺らぎ + 宇宙進化の歴史.



CMB Bモード偏光から  
もある程度推定可能.

観測周波数と宇宙の時代が対応.  
高周波数 → より初期宇宙の情報.  
- Reheating温度(物質の種の形成)  
- 宇宙の熱進化史 ....

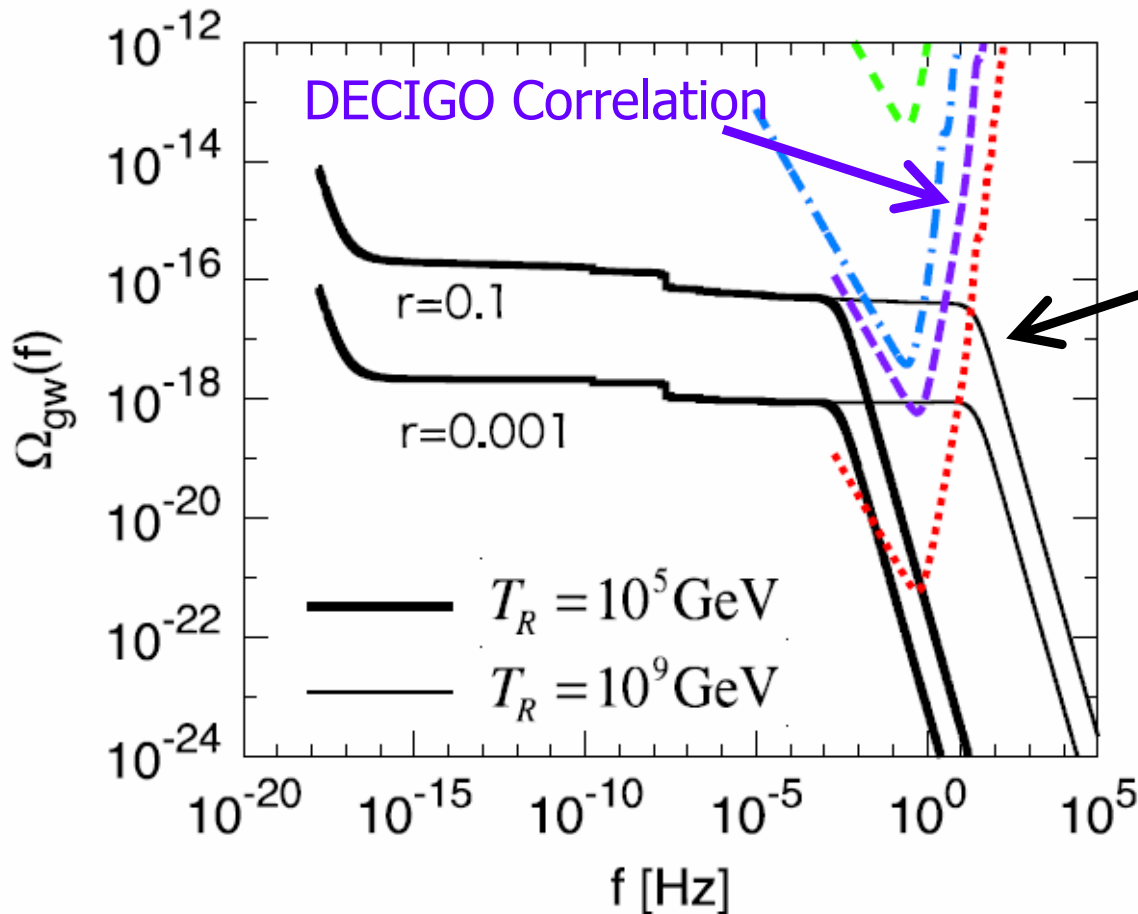
DECIGOが目指す 0.1Hzの周波数帯 :

インフレーション期とBBN期の間の情報

→ CMB-B偏光観測と相補的な観測.

Energy density  $\propto$  Tensor-Scalar Ratio ( $r$ ).

Power spectrum : Evolution history of the Universe.



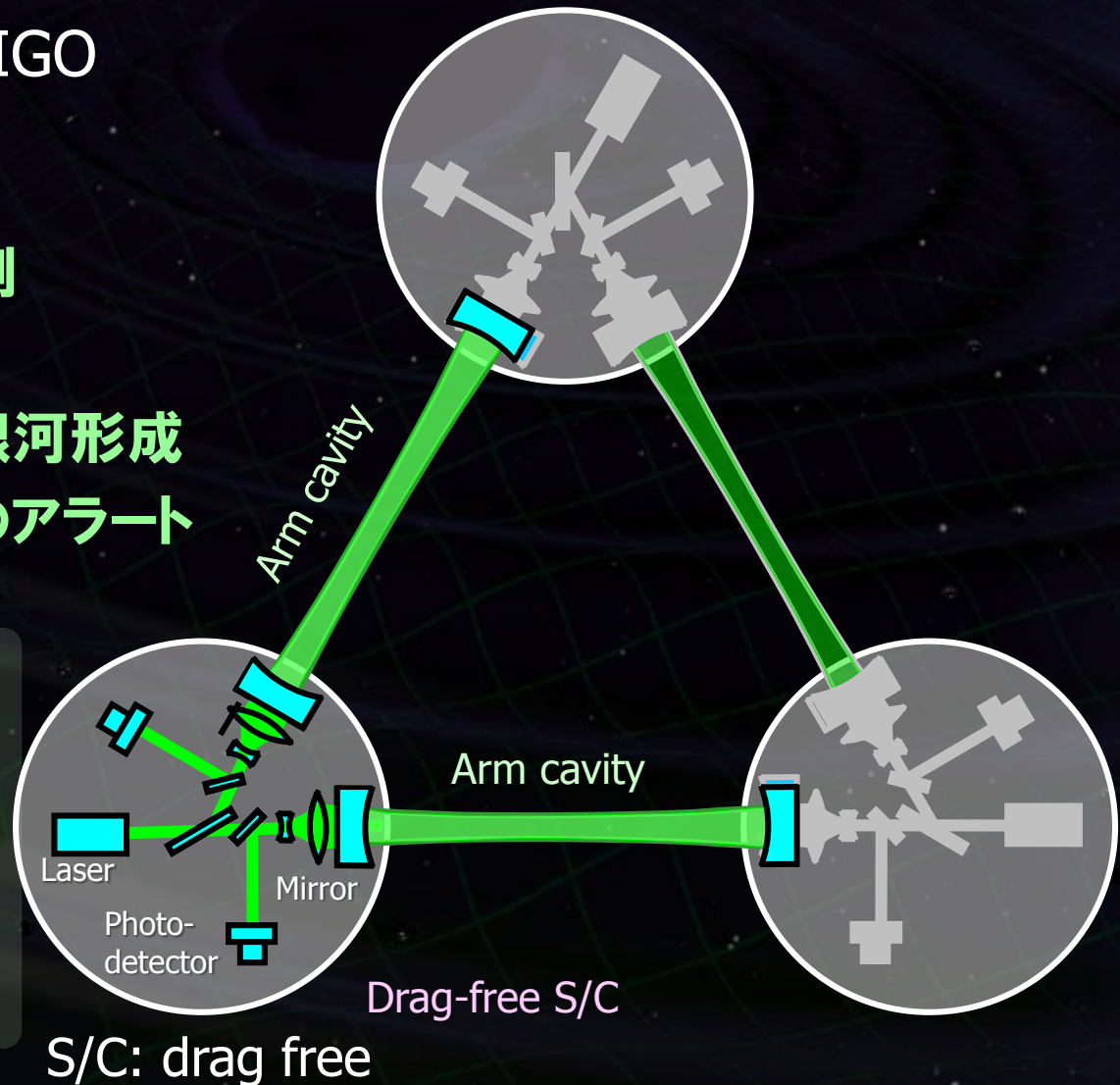
- Spectrum Power.
- Energy scale of inflation
- Cut-off freq.
- Energy scale of Reheating

Nakayama+,  
Journal of Cosmology  
and Astroparticle Physics  
06 (2008) 020.



## 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO

- 初期宇宙の直接観測
- 遠方中性子星連星観測  
→ 宇宙論パラメータ
- 中間質量BH合体 → 銀河形成
- 地上重力波望遠鏡へのアラート



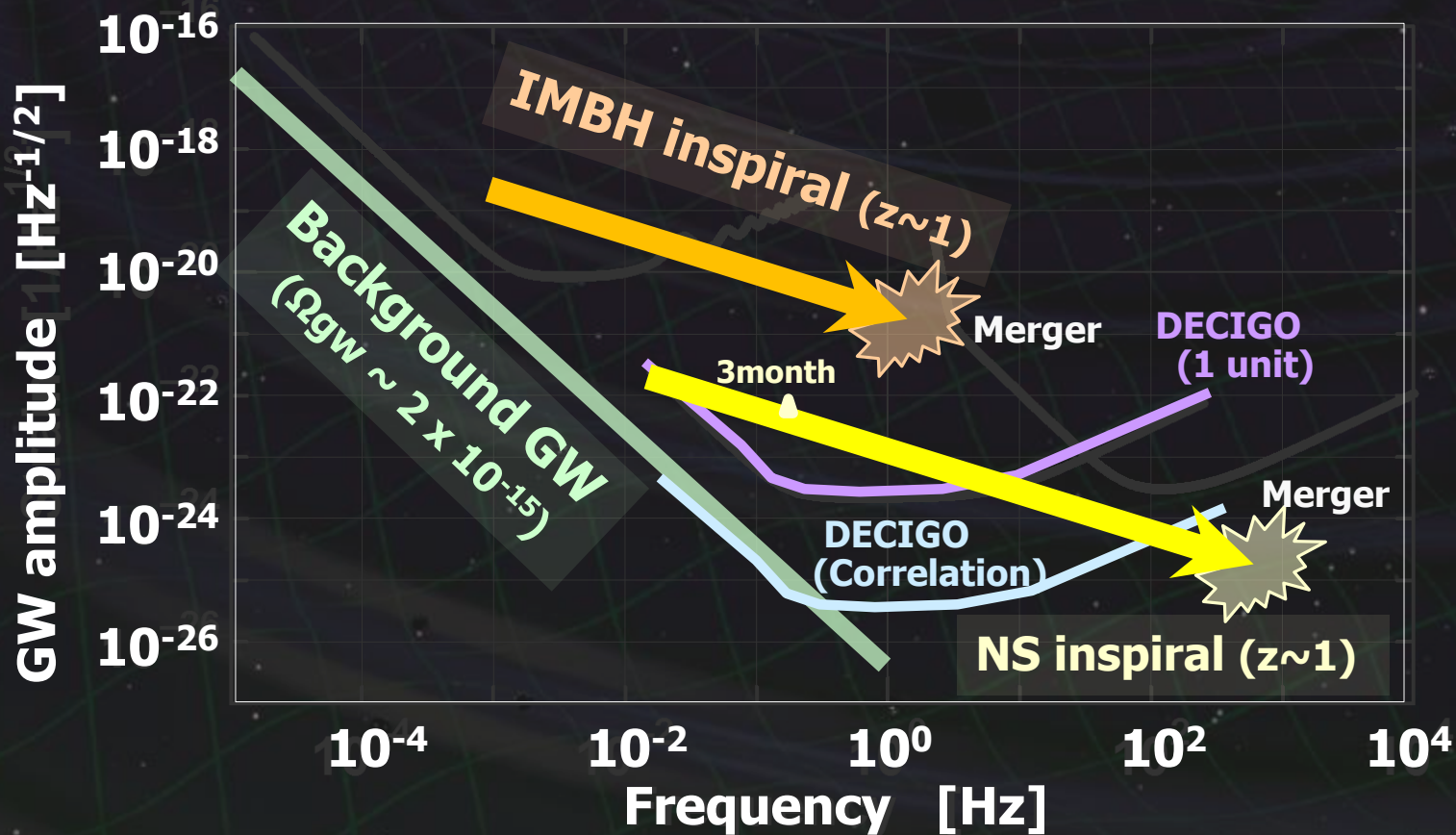
Arm length:	1000 km
Finesse:	10
Mirror diameter:	1 m
Mirror mass:	100 kg
Laser power:	10 W
Laser wavelength:	532 nm

# DECIGOの観測対象

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





# 初期宇宙の観測



Background:  
original figure by  
NASA/WMAP Science Team



# DPFのための検討・開発



# DECIGOのロードマップ

Figure: S.Kawamura



# 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	~ 5	~ 4	~ 3
コスト [億円]	~ 200	~ 100	~ 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



## 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。



小型衛星 1 機 (重量 400kg)  
地球周回軌道 (高度 500km)

Earth Image: ESA

	DPFの目標	Pre-DECIGOの目標	DECIGOの要求値
宇宙干渉計	宇宙空間では初めてのFP干渉計(30cm)動作. $10^{-16} \text{m/Hz}^{1/2}$ の変位感度. $10^{-15} \text{N/Hz}^{1/2}$ の外力雑音.	長基線長FF(100km).でのFP干渉計動作. $10^{-17} \text{m/Hz}^{1/2}$ の変位感度. $10^{-16} \text{N/Hz}^{1/2}$ の外力雑音.	感度 $3 \times 10^{-18} \text{m/Hz}^{1/2}$ . 外力雑音 $10^{-17} \text{N/Hz}^{1/2}$ . 基線長 1000km.
安定化レーザー光源	現在地上で実現されている最も良い安定度 $0.5 \text{Hz/Hz}^{1/2}$ の宇宙空間での実現.出力 100mW.	現在地上で実現されている最も良い安定度 $0.5 \text{Hz/Hz}^{1/2}$ の宇宙空間での実現.出力 1W.	安定度 $0.5 \text{Hz/Hz}^{1/2}$ . 出力 10W.
ドラッグフリー技術	全自由度制御で $1 \times 10^{-9} \text{m/Hz}^{1/2}$ の実現.	全自由度制御で $1 \times 10^{-9} \text{m/Hz}^{1/2}$ の実現. 長基線長FF 100km.	全自由度制御で $1 \times 10^{-9} \text{m/Hz}^{1/2}$ . 超基線長FF 1000km.

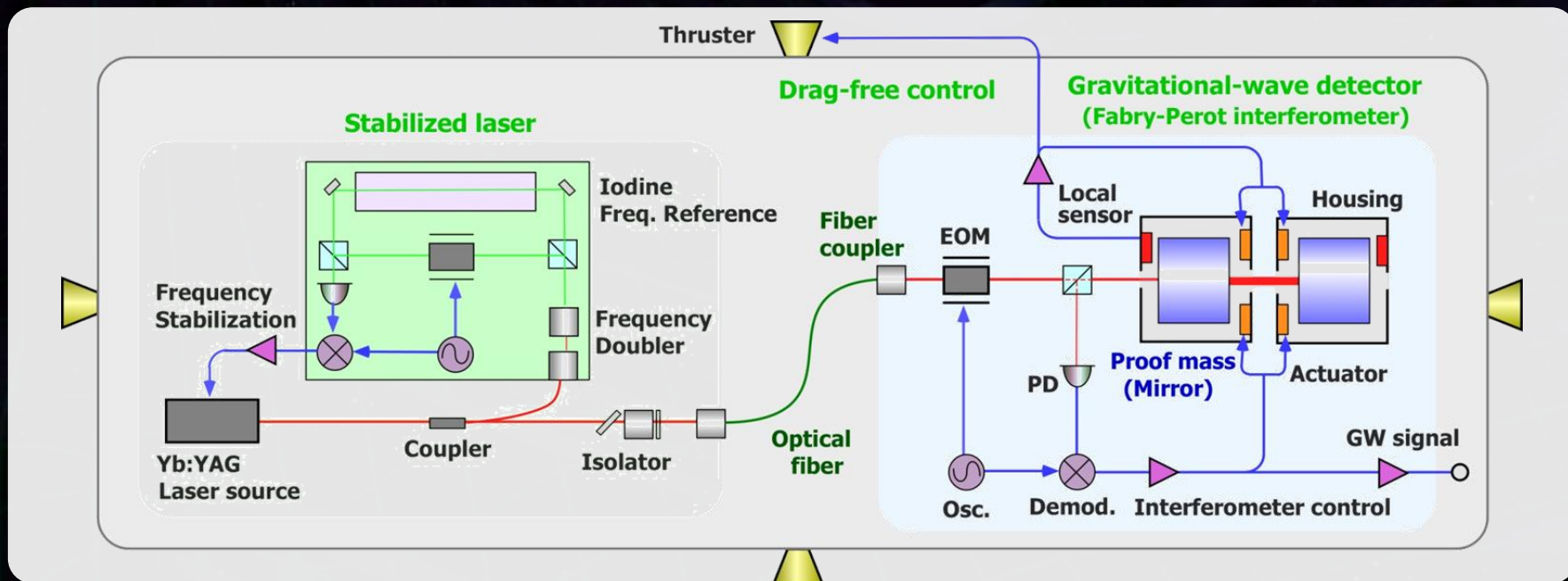


# DPFミッション機器構成

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

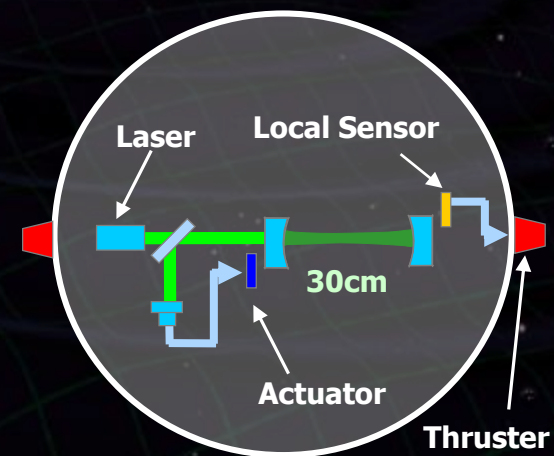
PDH法により信号取得・制御

## ・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

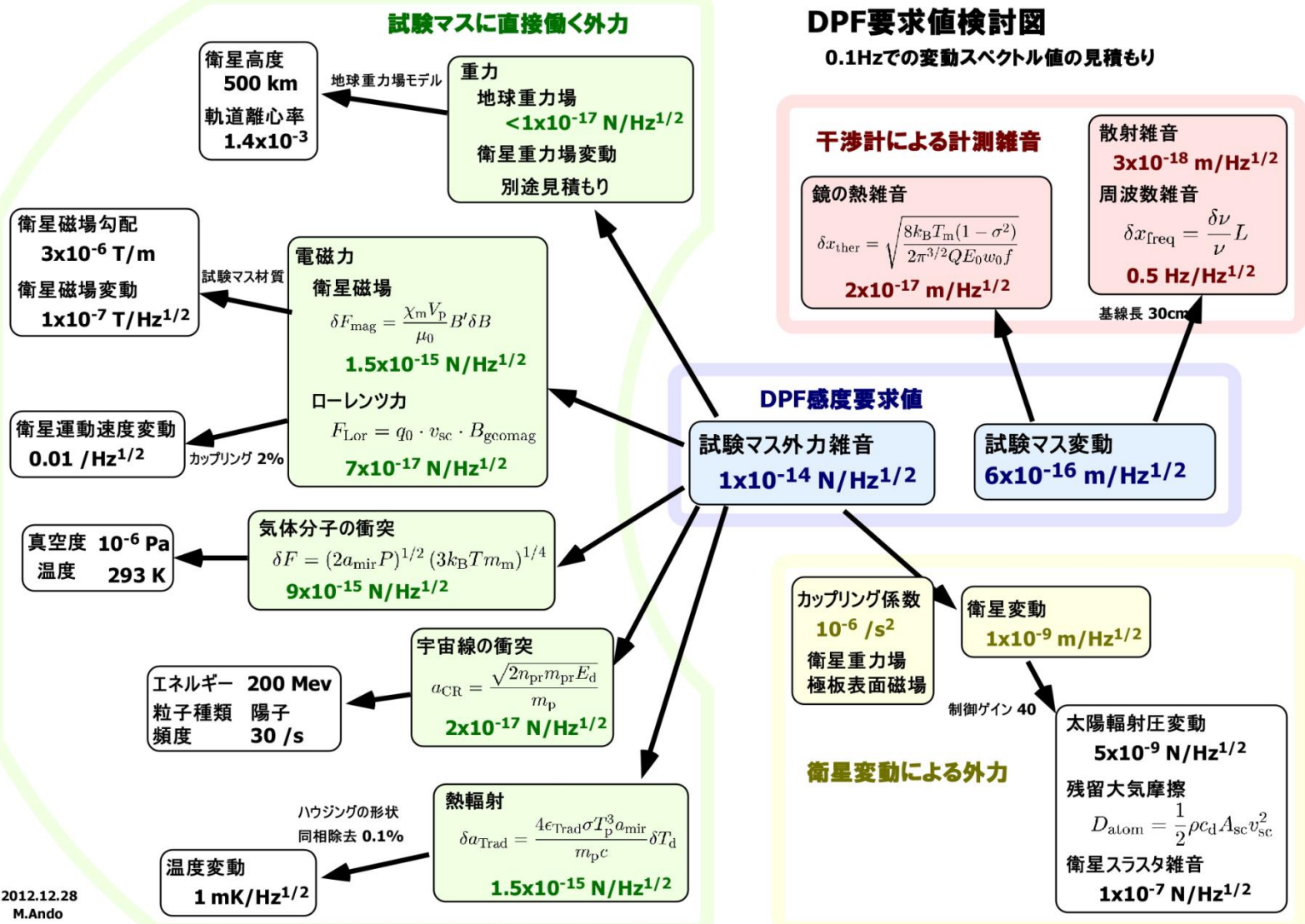
- 干渉計による測距感度  $6 \times 10^{-16} \text{ m/Hz}^{1/2}$  (0.1 Hz)
- 試験マスに働く外力雑音  $1 \times 10^{-14} \text{ N/Hz}^{1/2}$  (0.1 Hz)



# 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

# DPFシステム概要

## DPF Payload

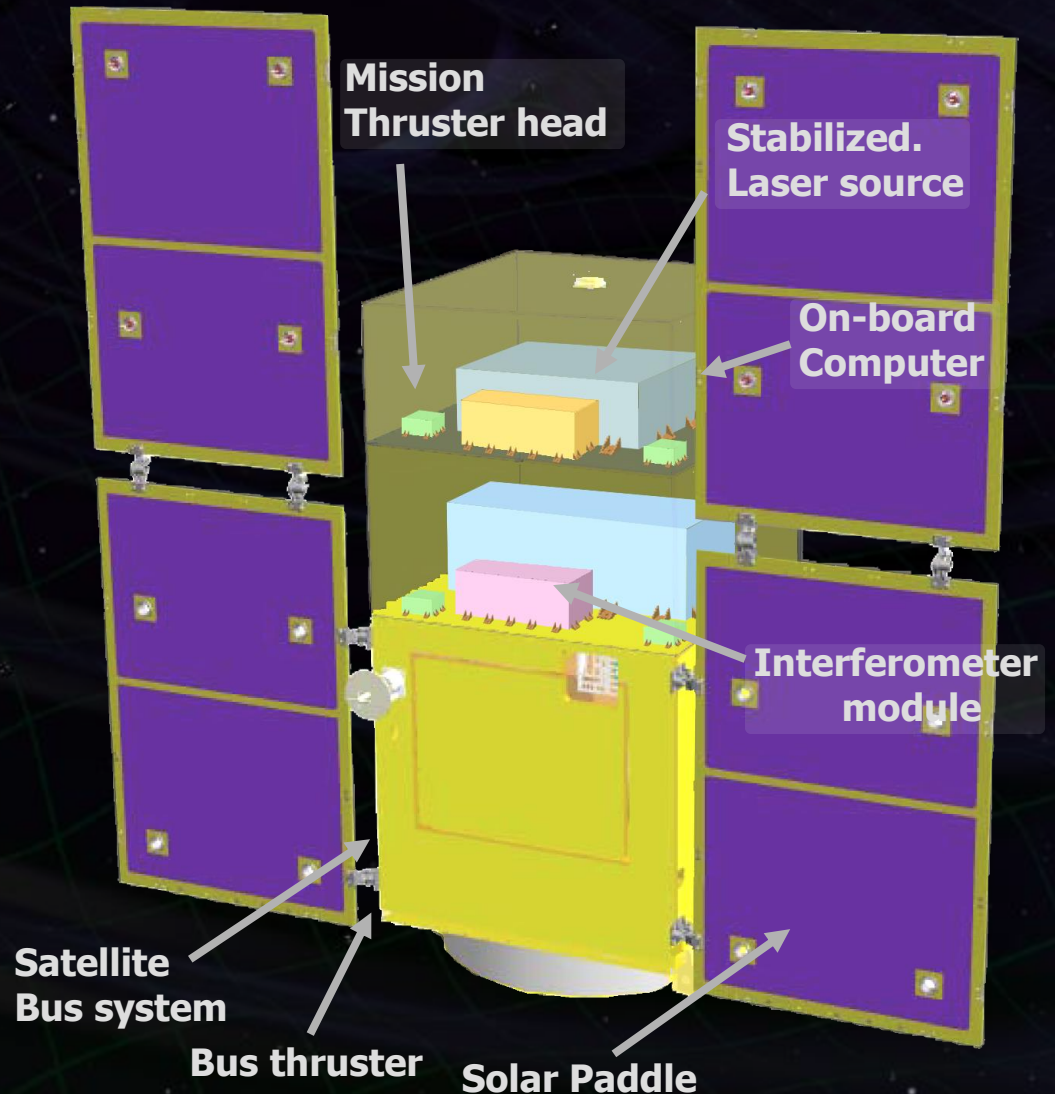
Size : 950mm cube  
Weight : 220kg  
Power : 150W  
Data Rate: 800kbps  
Mission thruster x10

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





# DPF質量検討

衛星質量 450kg (WET) (ミッション部バランスウエイト 46kgを含む)

DPF 機器構成	略号	台数	単体質量 (7材) [kg]	合計質量 (7材) [kg]
<b>ミッション部</b>				
<b>ミッション系 (1階層)</b>				
<b>46.00</b>				
干渉計モジュール		1	30.00	30.00
干渉計制御モジュール		1	5.00	5.00
ハウジング制御モジュール		1	5.00	5.00
レーザセンサー制御モジュール		1	5.00	5.00
<b>ミッション系 (2階層)</b>				
<b>70.00</b>				
安定化レーザ光源モジュール		1	15.00	15.00
電源・制御モジュール		1	5.00	5.00
信号処理モジュール		1	5.00	5.00
ドラッグフリー・スラスター制御モジュール		1	5.00	5.00
スラスターヘッド・制御モジュール (大2,小4)		1式	40.00	40.00
<b>ミッション機体系</b>				
<b>106.20</b>				
ミッション機体	M-STR	1式	36.57	36.57
ミッション部熱計装	M-TINT	1式	5.00	5.00
ミッション部電気計装	M-EINT	1式	3.00	3.00
ミッション部機械計装	M-MINT	1式	0.00	0.00
ミッション部フィン	M-FIN±X	2	3.27	6.54
ミッション部フィン	M-FIN±Y	2	4.43	8.87
バランスウエイト		1式	46.22	46.22
<b>バスシステム</b>				
<b>衛星マネジメント系</b>				
<b>SMU</b>				
システムマネジメントユニット	SMU	1	2.00	2.00
テレメトリコマンドインタフェースモジュール	TCIM	1	2.14	2.14
スバースワイヤルータ	SWR1, SWR2	2	1.72	3.44
アーダレコーダ	DR	1	2.05	2.05
<b>測位系</b>				
<b>RF</b>				
Sバンドアンテナ(±X方向)	S-ANT1, S-ANT2	2	0.18	0.35
Sバンドアンテナ(-Z方向)	S-ANT3	1	0.18	0.18
Sバンドアイブレイクサ	S-DIP1, S-DIP2	2	0.41	0.82
Sバンドスイッチ	S-SW	1	0.10	0.10
Sバンドハイブリッド	S-HYB	1	0.05	0.05
Sバンドトランスポンダ	S-TRP-A, S-TRP-B	2	3.35	6.70

電源系	EPF				1E.6D
太陽電池パドル	SAP1, SAP2 (3'x4')	1式	31.10	31.10	
	(セル部)		↑	↑	
	(TCM)		↑	↑	
パドル駆動モータ	SADM1, SADM2	0	0.00	0.00	
電力制御装置	PCU	1	5.00	5.00	
アレイパワーレギュレータ	APR	1	4.00	4.00	
SAPプロセッシングダイオード	SBD1, SBD2	2	0.40	0.80	
バッテリー(50Ah)	BAT (BAT_L)	1	25.70	25.70	
	(BAT_U)	1	↑	↑	
<b>通信装置制御系</b>					
<b>ACDB</b>					
姿勢制御用計算機	ACCP-A, ACCP-B	2	2.00	4.00	
リアクティブホイールアセンブリ	RWA1, RWA2, RWA3, RWA4	0	0.00	0.00	
電気トルク	MT0-X, MT0-Y, MT0-Z	0	0.00	0.00	
恒星センサ	STT	1	3.28	3.28	
<b>電圧監視装置</b>					
<b>FOG (Rd)</b>					
相対湿度センサ	CSAS1, CSAS2	2	0.04	0.08	
サンプリゼンセンサ	SPSH1, SPSH2	0	↑	↑	
地磁気センサ	MAS	0	0.00	0.00	
ACCSインタフェースモジュールMT0ZAHM	ACMDZ	0	0.00	0.00	
ACCSインタフェースモジュールRWAH/Homeworks II	ACSWH	0	0.00	0.00	
ACCSインタフェースモジュールSTTSOCERN	ACSTS	1	1.48	1.48	
ACCSインタフェースモジュールSACMNTS	ACSDN	0	0.00	0.00	
ACCSインタフェースモジュールAnalogMNTS	ACAMA	1	2.13	2.13	
ACCSインタフェースモジュールKUMPC	ACIRJ	1	2.80	2.80	
ACCSインタフェースモジュールVDRG/1A	ACMDI	1	2.50	2.50	
<b>推進系</b>					
<b>RCS</b>					
推進系	RCS	1式	14.2	14.20	
注排弁モジュール	RFV, QFD		↑	↑	
バルブモジュール	LAU, FLT, PBC		↑	↑	
推進タンク	TKM		↑	↑	
配管	PIPE		↑	↑	
配管ブラケット	—		↑	↑	
インキフェースコネクタブラケット	—		↑	↑	
4Nスラスターモジュール	4N-TRN	4	↑	↑	
<b>推進系</b>					
<b>16.00</b>					
推進		1	15.00	15.00	
<b>電気計装</b>					
<b>E-INT</b>					
ハーネスおよび中継コネクタブラケット	HN	1式	26.00	26.00	
<b>観測機系</b>					
<b>TGS</b>					
ヒータ制御装置	HCE	1	4.50	4.50	
熱計装	T-INT	1式	10.00	10.00	
<b>機体系</b>					
<b>STR</b>					
機体	STR	1式	50.11	50.11	
機械計装(バランスウエイト含まず)	M-INT	1式	1.58	1.58	
機械計装(バランスウエイト)		1式	0.00	0.00	
<b>ミッション部合計</b>					
<b>223.20</b>					
<b>バス部合計 (DRY)</b>					
<b>215.31</b>					
<b>積算</b>					
<b>15.00</b>					
<b>バス部合計 (WET)</b>					
<b>230.31</b>					
<b>合計 (DRY)</b>					
<b>438.51</b>					
<b>合計 (WET)</b>					
<b>453.51</b>					

# DPF電力検討

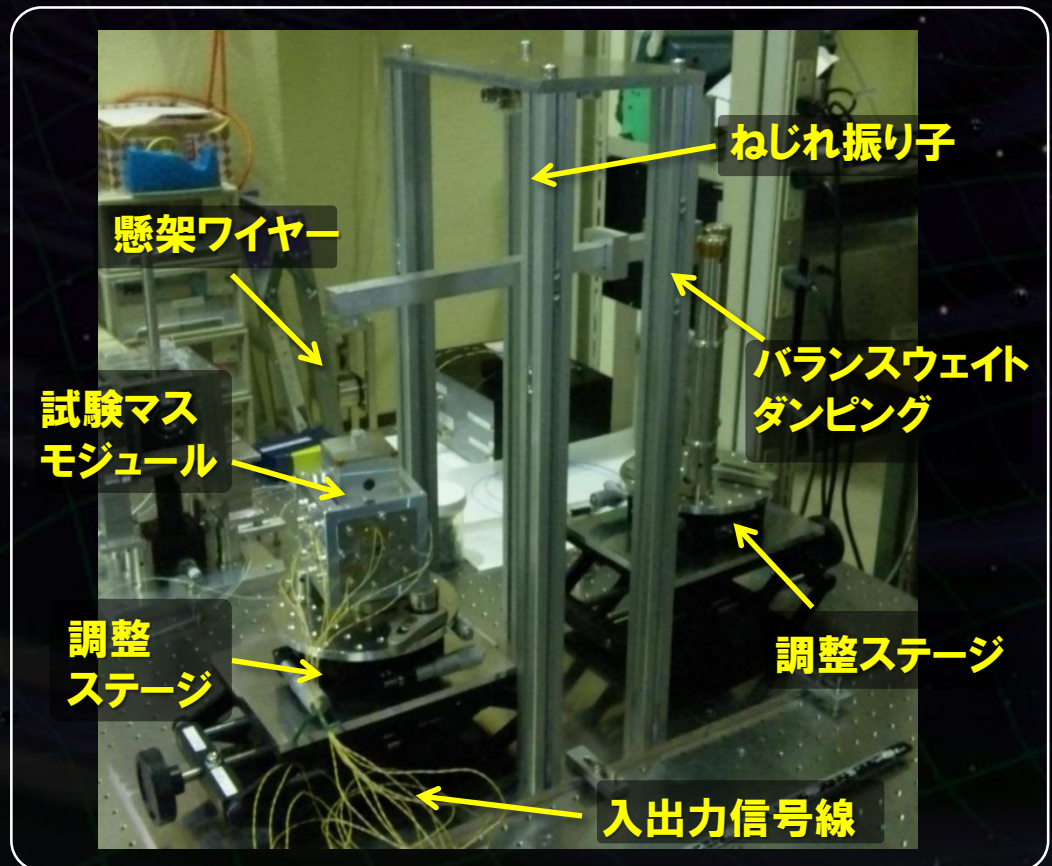
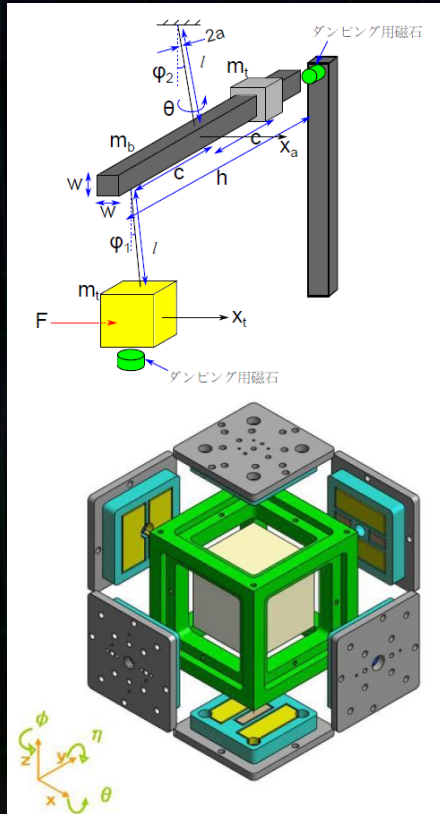


## 観測+地上伝送時 415W (ミッション部予備・ヒータ電力 50W)

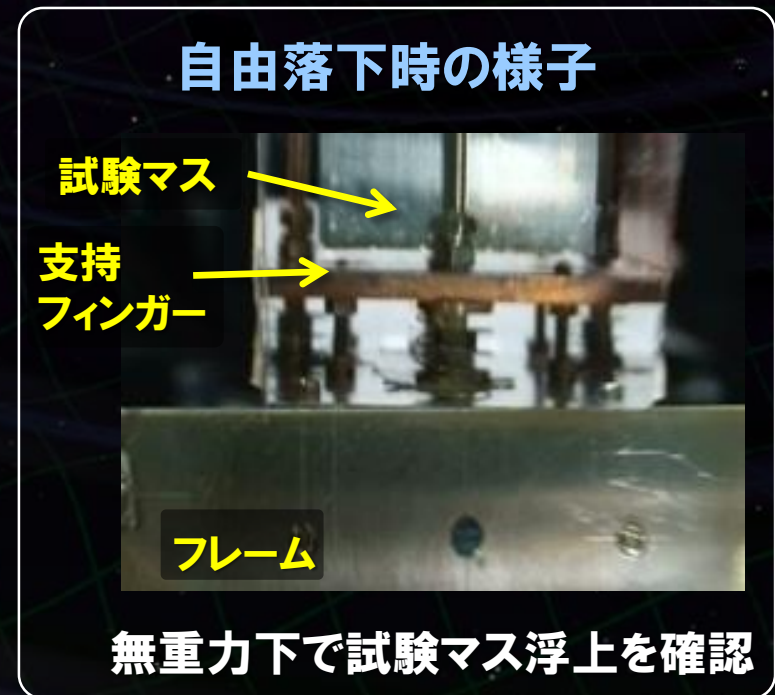
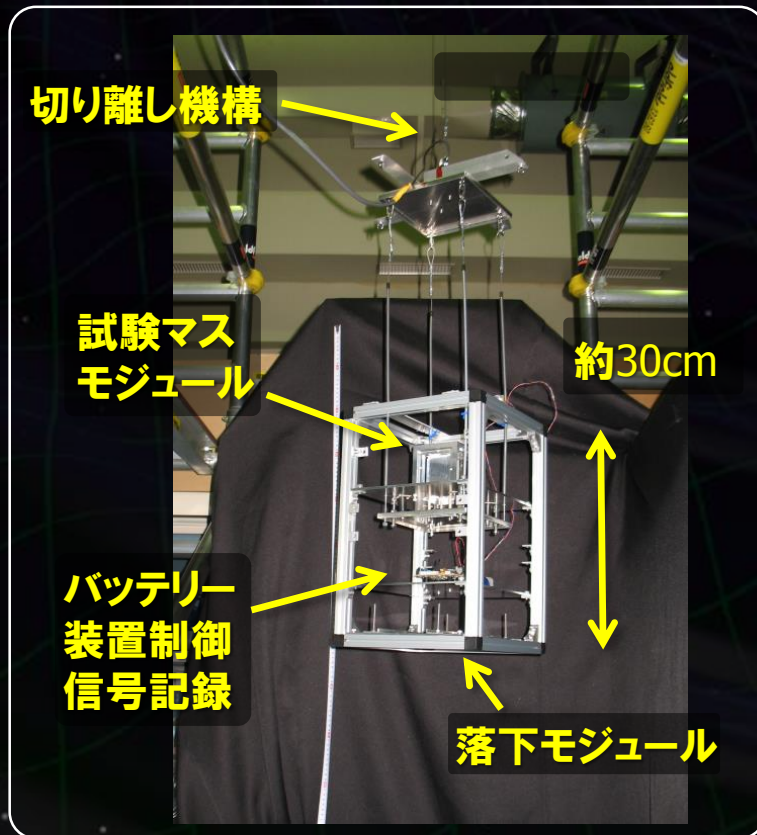
DPF衛星 (2012.03.23)	略号	台数	消費電力[W]	モード別消費電力[W]				備考
				観測		観測+伝送(地上)		
				日照	日陰	日照	日陰	
<b>ミッション機器</b>								
199.0								
干渉計モジュール		1	3.0	3.0	3.0		20.12/01/20付け 伝送系モジュール消費	
干渉計制御モジュール		1	4.0	4.0	4.0		20.12/01/20付け 伝送系モジュール消費	
パワングレイン制御モジュール		1	10.0	10.0	10.0		20.12/01/20付け 伝送系モジュール消費	
レーザセンサ制御モジュール		1	3.0	3.0	3.0		20.12/01/20付け 伝送系モジュール消費	
安定化レーザ光源モジュール		1	23.0	23.0	23.0		20.12/01/20付け 伝送系モジュール消費	
電圧・励磁制御モジュール		1	10.0	10.0	10.0		20.12/01/20付け 伝送系モジュール消費	
標準処理モジュール		1	12.0	12.0	12.0		20.12/01/20付け 伝送系モジュール消費	
フラッグアリア・スラスタ制御モジュール		1	3.0	3.0	3.0		20.12/01/20付け 伝送系モジュール消費	
スラスタ電力		1	20.0	20.0	20.0		20.12/01/20付け 伝送系モジュール消費	
(予備)		1	33.0	33.0	33.0		ミッション合計が150Wとなるように調整	
<b>システム</b>								
衛星システムソフトウェア								
システムマネジメントユニット	SMU	1	12.8	12.8	12.8		SPFRNT-Aベース	
データレコーダ	DR	1	13.9	13.9	13.9		SPFRNT-Aベース	
テレメトリコマンド・インタフェースモジュール	TCIM	1	14.0	14.0	14.0		SPFRNT-Aベース	
スペースワイヤルター	SWR	1	5.1	5.1	5.1		SPFRNT-Aベース	
<b>通信系</b>								
S/Fバンドトランスポンダ	S-TRP	1	13.0(待機)/30.4	13.0	30.4		SPFRNT-Aベース	
<b>電源系</b>								
EPS								
電力制御系	PCU	1	10.0	10.0	10.0		SPFRNT-Aベース	
アレイワイヤルレーザ	AWR	1	1.8(日陰時のみ)	1.8	0.0	1.8	0.0	SPFRNT-Aベース
<b>姿勢制御系</b>								
姿勢制御計算機	ADCP	1	12.8	12.8	12.8		SPFRNT-Aベース	
姿勢制御センサー	SCM	△					消費/スズは14台で80W(一定回転時)	
慣性センサー	INT	1	7.2	7.2	7.2		消費/スズは14台 定常時80W	
復元基準装置	IRU	3	2.2	8.8	8.8		*BCROS搭載品(JAE製) *標準/スズでは20W程度(MPC製TDG)	
AOC3インテグレーションモジュールFWA	ACFWH	△					消費/スズは14W	
AOC3インテグレーションモジュールAWG	ACMGE	△					消費/スズは15W程度	
AOC3インテグレーションモジュールRCS	ACVDI	1	11.0	11.0	11.0		AIRHARDベース(BTBYモード)	
AOC3インテグレーションモジュールSTT	ACSTB	1	7.0	7.0	7.0		SPFRNT-Aベース	
AOC3インテグレーションモジュールAnalog	ACANA	1	10.0	10.0	10.0		SPFRNT-Aベース	
AOC3インテグレーションモジュールFRU	ACIRJ	1	20.0	20.0	20.0		SPFRNT-Aベースで9.5Wに60%への二次電源供給機能追加で約20Wと想定	
<b>熱制御系</b>								
TCS								
ヒータ制御装置	HCE	1	10.5	10.5	10.5		SPFRNT-Aベース	
ヒータ		1区	30.0	30.0	30.0		システム 動作時未実施のため詳細は不明、未検討では衛星負荷電力の給電変化要因としてのパラメータ扱いとした。	
衛星負荷電力合計(ノミナル)				355.4W	353.9W	372.8W	371.3W	
衛星負荷電力合計				355.4W	353.9W	372.8W	371.3W	
衛星への電力伝送ロス				10.2W	2.9W	10.9W	3.2W	
APR受機ロス(日陰負荷分)				30.9W	0.0W	32.4W	0.0W	
日陰/日陰消費				396.5W	356.8W	418.1W	374.5W	



- 試験マスモジュール2自由度制御実験 (国立天文台)
  - 試験マスをねじれ振り子で懸架
  - 静電センサ・アクチュエータを用い、回転・位置を制御



- 無重力下での試験マス制御デモンストレーション (国立天文台)
  - 落下モジュール (構造, 電源, センサ, ロガーなど)
  - ~3m落下設備 (足場, 切り離し機構, クッションなど)



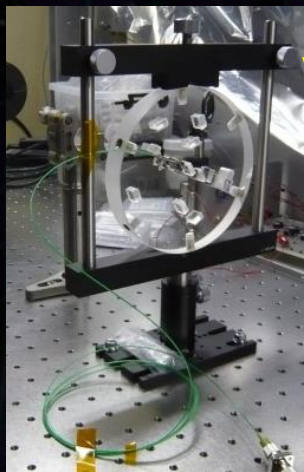
今後, 静電S/Aによる制御をめざす.



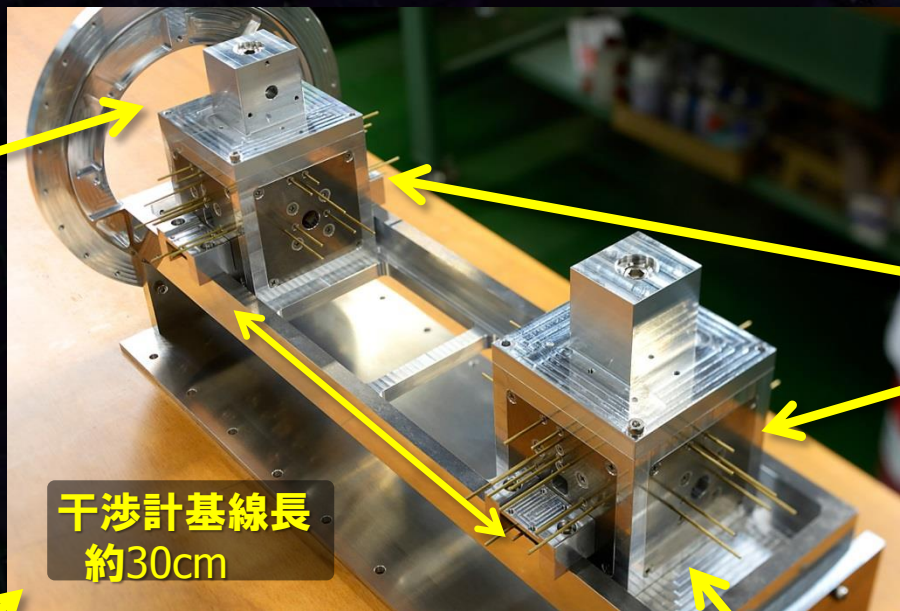
# 干渉計モジュールEM

## 入出射光学系

シリケートボンディングにより一体化



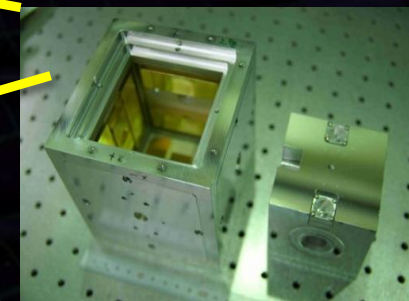
## 干渉計モジュール



干渉計基線長  
約30cm

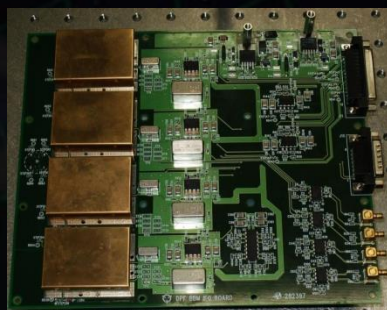
## 試験マスモジュール

試験マス、静電センサ・アクチュエータ、ローンチロック



## 4分割RF フォトディテクタ

4分割PD + 復調回路  
干渉計基線長・角度の  
変動を取得



## SpW信号処理・ 制御ボード

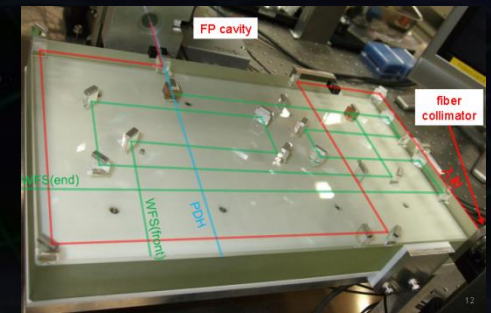
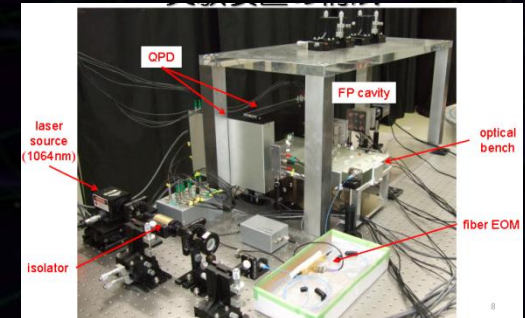
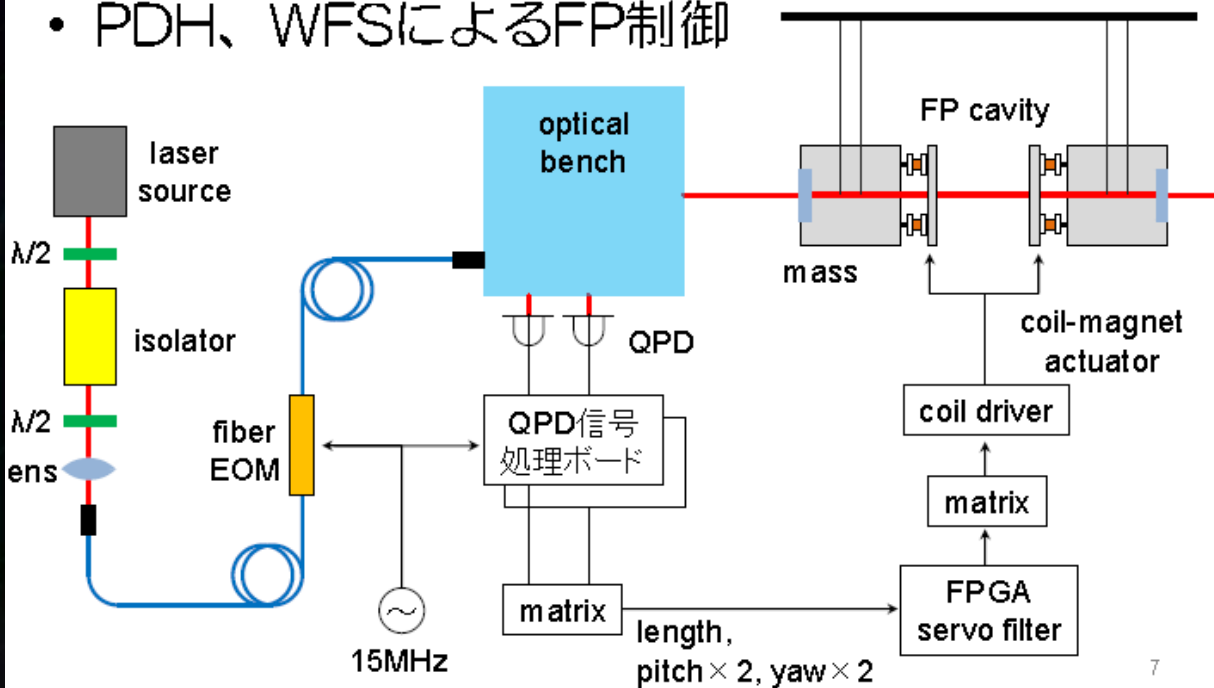
SpW FPGA +  
16bit AD/DA  
干渉計の制御



## 干渉計BBM 制御実験 (～2011, 東京大学)

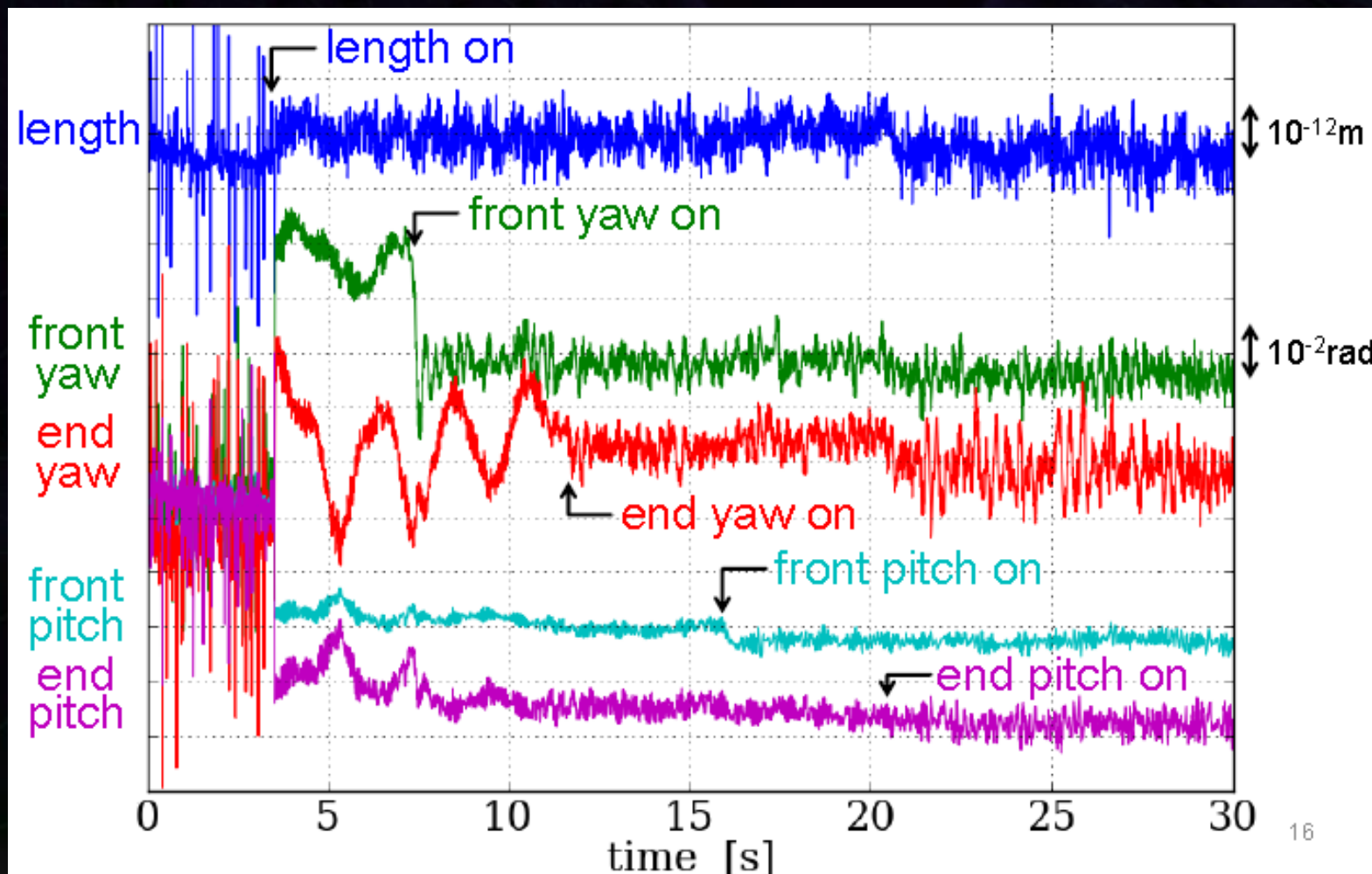
- 試験マスをワイヤーで懸架, アクチュエータは簡略化.
- 入出射用のモノリシック光学系BBM.
- QPD BBM + デジタルボードBBM による制御.

### • PDH、WFSによるFP制御



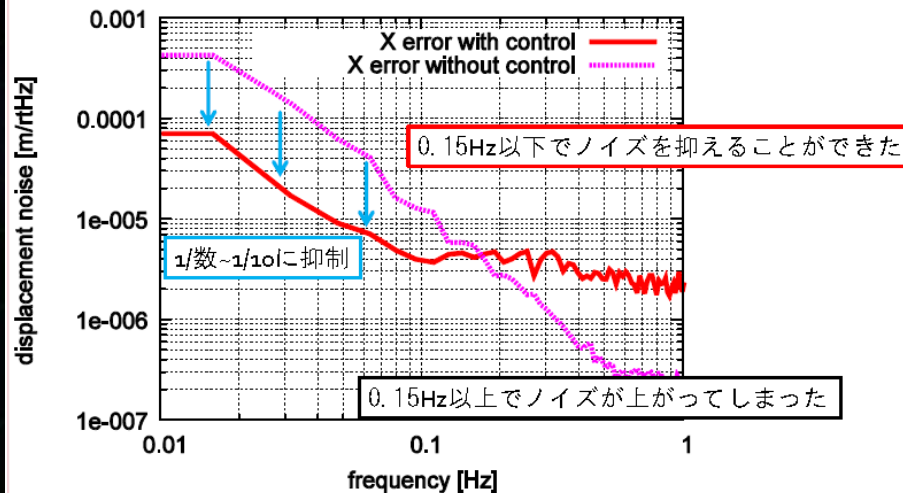


## 干渉計基線長, 角度変動の安定制御を実証

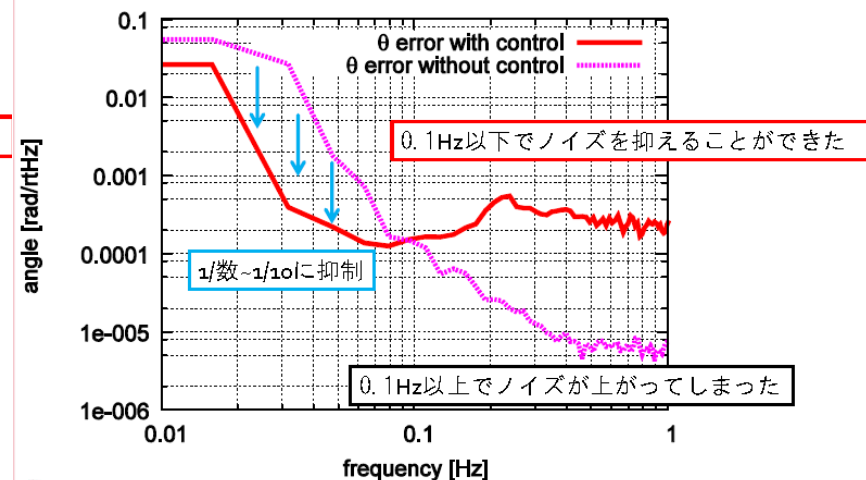


## ・試験マスモジュール2自由度制御実験 (~2012, NAOJ)

### 制御結果(並進)



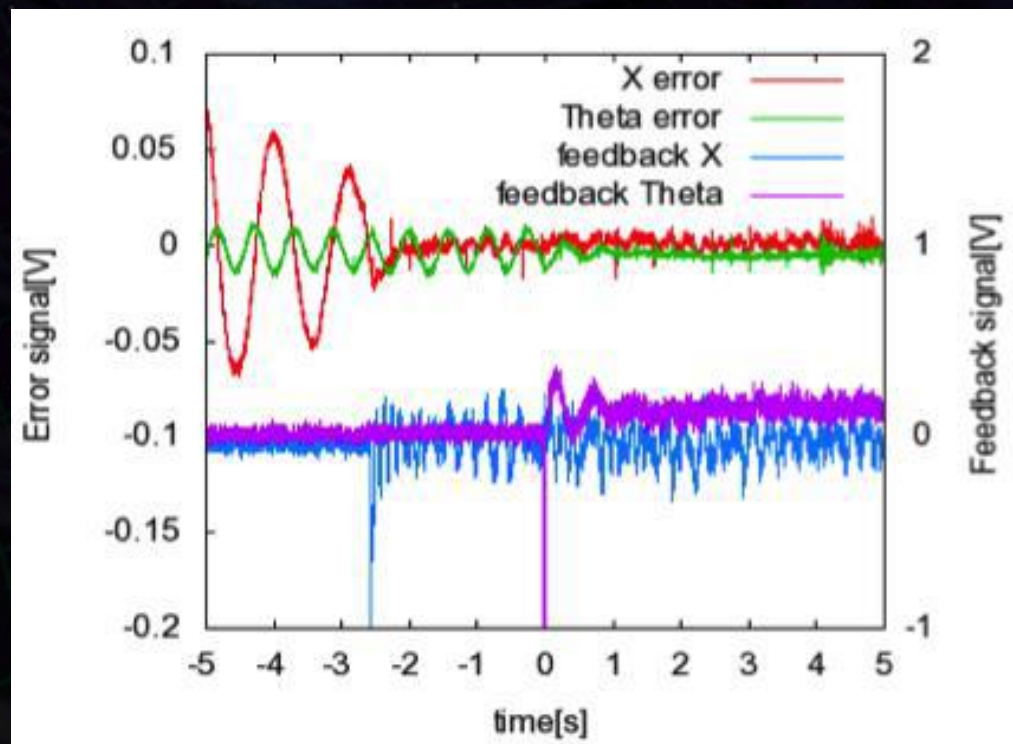
### 制御結果(回転)





## ・試験マスモジュール2自由度制御実験

- 試験マスの並進・回転の2自由度制御を実現.
- 0.1Hzでの残留変動  
並進  $3 \times 10^{-5} \text{ m/Hz}^{1/2}$ ,  
回転  $10^{-4} \text{ rad/Hz}^{1/2}$  .



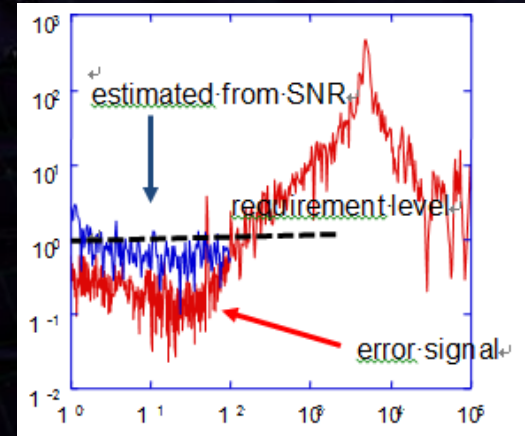
# 周波数安定化モジュール

## ・周波数安定化モジュールBBM1 (電通大)

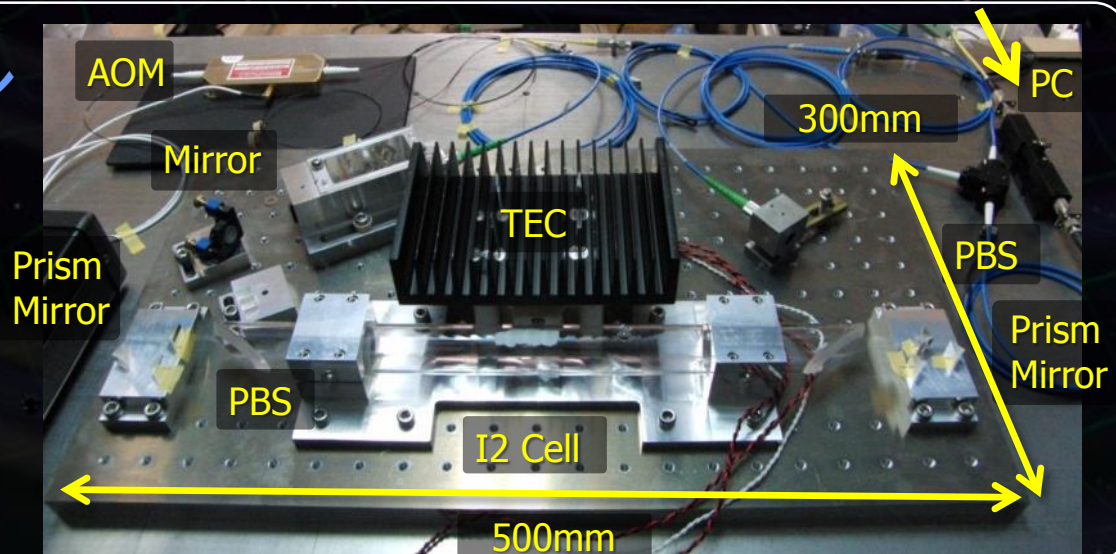
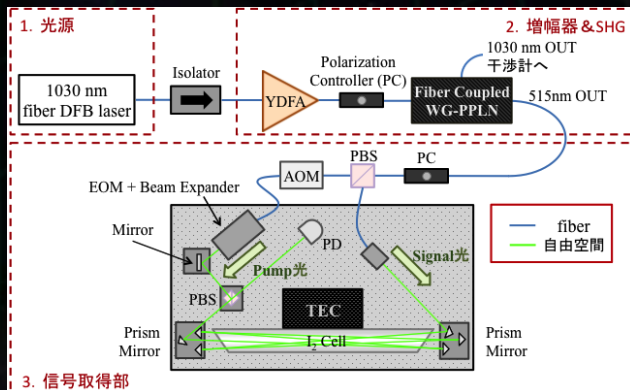
- ヨウ素セルを用いた周波数安定化.
- 安定度要求 ( $0.5 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ )を満たす.

## ・周波数安定化モジュールBBM2 (電通大)

- ファイバ素子を用い,小型・軽量・堅牢化.
- SpWデジタル制御ボードによる動作.



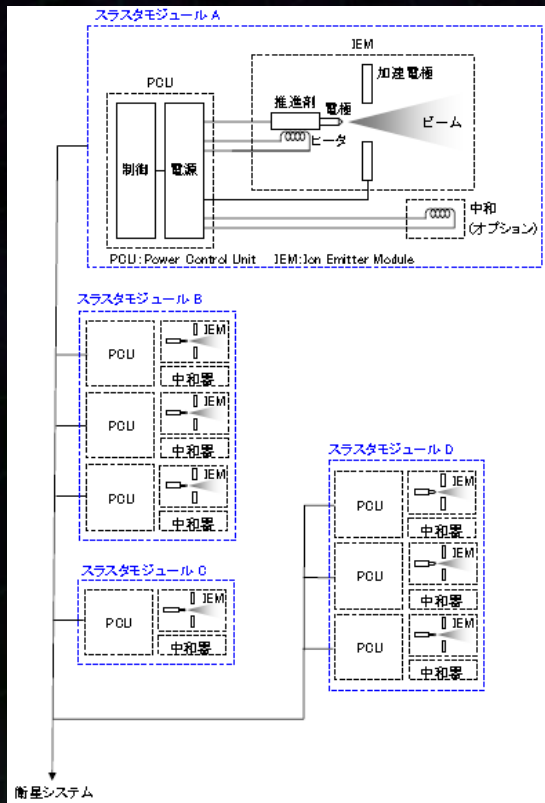
## レーザー周波数安定化モジュール





## ・ミッションスラスタ検討・開発 (ISAS/JAXA) 既存技術を利用 → FEEDスラスタ

### スラスタシステム構成

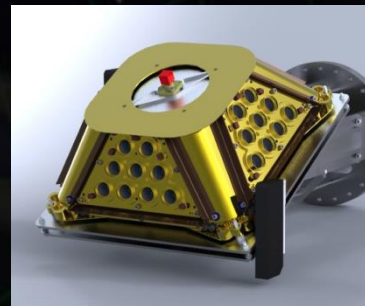


### AIT FEED (10 $\mu$ N)



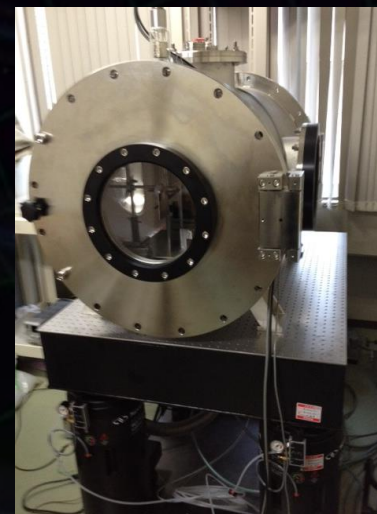
※ Flight Proven

### Cluster Type FEED (100 $\mu$ N)



### スラスタスタンド

微小推力雑音の測定装置。  
0.1 $\mu$ Nの測定分解能を実現。

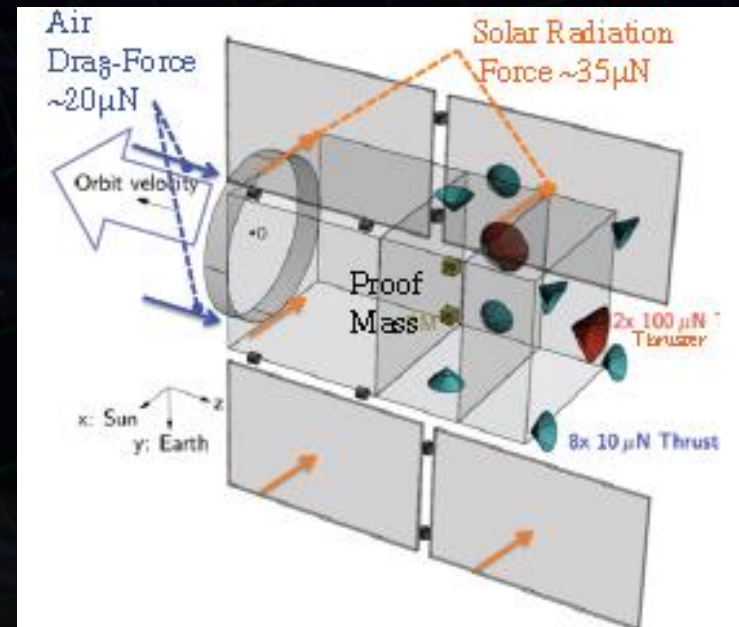


## ・ミッションスラスト構成

- 準定常成分 **100  $\mu\text{N}$ スラスト 2台**  
大気ドラッグ, 太陽輻射圧
- 変動成分 **10  $\mu\text{N}$ スラスト 8台**  
大気圧変動, 太陽輻射変動

### ミッションスラスト仕様

推力	0.5-100 $\mu\text{N}$ x2 (可変)
	0.5-10 $\mu\text{N}$ x 8 (可変)
分解能	0.1 $\mu\text{N}$
推力雑音	0.1 $\mu\text{N}/\text{Hz}^{1/2}$
制御応答	>10Hz
Isp	TBD
電力・質量	<40W, <40kg
運用寿命	4,300 時間





- SWIMで実証された回路構成を基に設計・製作

- FPGA, ADC, DAC, バッファアンプを一体化.
- チャンネル数を 16ch に増加.

➡ 搭載機器開発BBM/EMに組み込む.

干渉計EM, 試験マスモジュールBBM, 安定化レーザー

## デジタル制御ボード

FPGA x2

(SpW FPGA, User FPGA)

SDRAM 32MByte

SpW Port x2, RS232C

16ch 16bit ADC/DAC

Digital I/O 各10ch

バッファアンプ搭載.



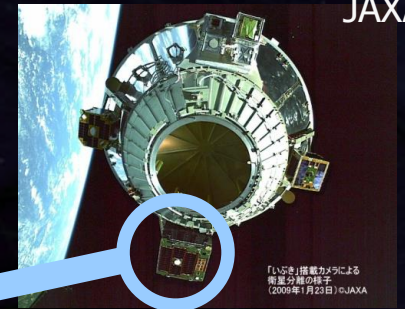
# SWIMによる宇宙実証

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



「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

### 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<sub>μv</sub> : 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

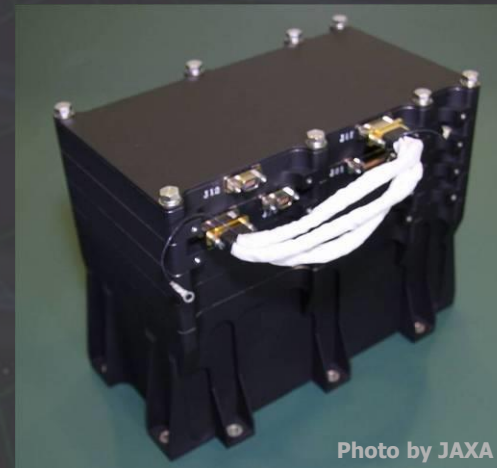


Photo by JAXA

SDS-1  
Bus System

Power +28V  
RS422 for CMD/TLM  
GPS signal

Power ±15V, +5V  
SpW x2 for CMD/TLM



# 周辺情勢



## •ESA

- LISA Pathfinderは 2015年10月に打ち上げ予定.
- NASAが手を引いたのち, ESA単独ミッションとして eLISAが提案されていた. 腕の数, 基線長などdescopeでコスト削減.
- L3 (2034年) として重力波ミッションが選定されている.  
eLISA方式が有力ではあるが、必ずしもその方式に限らない.
- eLISAグループは、L3より早期の実現と、構成を元に戻すことを目指し、国際協力の可能性を模索.  
~200億円規模 → NASA, 日本.



## •NASA

- NASA主導ミッションとしての重力波ミッションの可能性を模索。  
→ 妥当な解は見つかっていない。
- eLISAへの部分参加の可能性を検討。

## •中国

- ウーハンの重力研究所を中心に急激に立ち上がりつつある。
- eLISAへの参加, GRACE的なミッションの実現など, 多くの可能性を模索している。

## •日本

- DPF落選後の戦略再検討. Pre-DECIGOの実現を目指す。  
現時点では、国際協力に対しては立場を明確にしていない。

## ・地上重力波望遠鏡

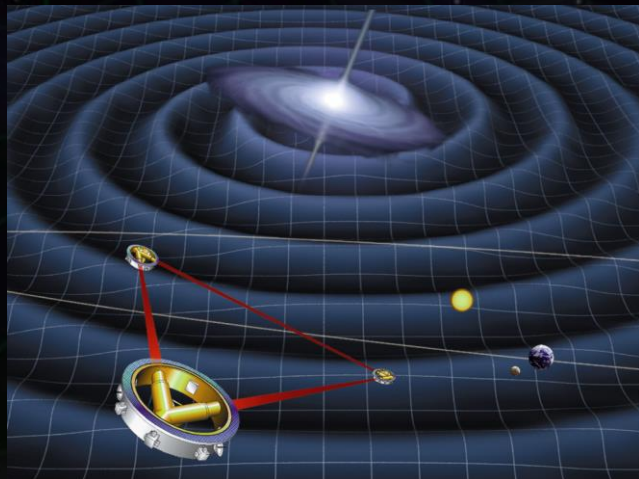
- 米国 aLIGO : 2014.5 リビングストンの干渉計の全体動作を実現. → 2015年に初期観測を行う. 2018年頃までに重力波の初検出が実現される可能性は十分にある.
- 欧州 VIRGO : インストール進行中.  
入射光学系の動作が実現されている.
- 日本 KAGRA : 施設整備が完了しつつある.  
2014年10月から本格的なインストール開始.  
2015年12月に初期観測運転.



## eLISA

(Laser Interferometer Space Antenna)

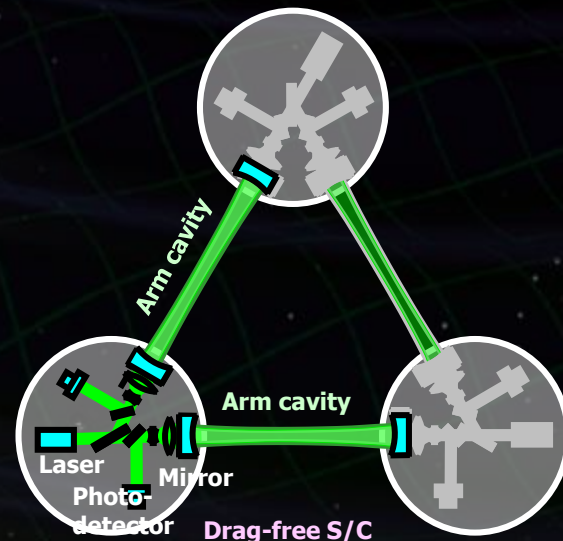
- 観測対象: 超巨大BH, 連星系.  
1mHz付近の確実な重力波源.
- 基線長: 100万km.  
S/C 3機による編隊飛行.
- 測距方式: 光トランスポンダ.



## DECIGO

(Deci-hertz Interferometer  
Gravitational Wave Observatory)

- 観測対象: 初期宇宙・宇宙論的知見.  
0.1Hz付近の重力波.  
基線長: 1000km. S/C 3機による  
フォーメーションフライト.
- 測距方式: FP干渉計 (直接干渉).



		<b>LPF</b> (LISA Pathfinder)	<b>DPF</b> (DECIGO Pathfinder)
<b>相違点</b>	<b>干渉計方式・感度</b>	MZ干渉計 ( $10^{-12}$ m/Hz <sup>1/2</sup> )	FP干渉計 ( $6 \times 10^{-16}$ m/Hz <sup>1/2</sup> )
	<b>レーザー安定化</b>	<b>外部共振器</b>	<b>ヨウ素吸収線</b>
	<b>投入軌道</b>	L1	LEO 500 km
	<b>衛星規模</b>	1,900 kg	400 kg
	<b>打ち上げ時期</b>	2015 年	2019 年
<b>類似・共通点</b>	<b>位置付け</b>	<b>将来の大型ミッションのための技術実証</b>	
	<b>試験マスモジュール</b>	<b>静電S/A, ローンチロック, 帯電キャンセル.</b>	
	<b>ドラッグフリー</b>	<b>低雑音スラスタによる 6自由度制御.</b>	

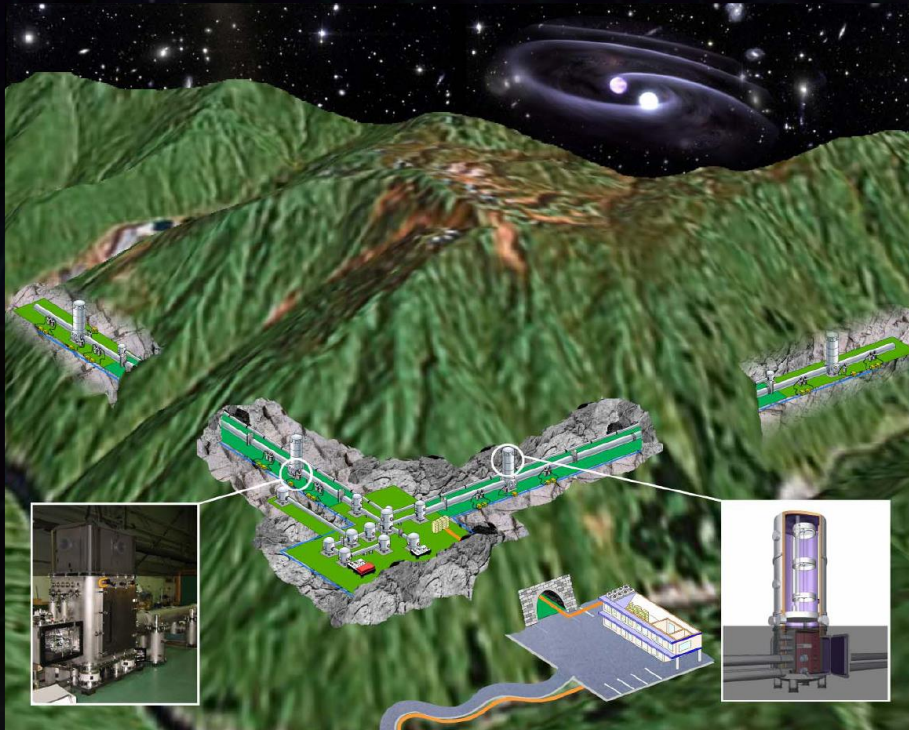


## KAGRA (~2017)

Ground-based Detector

→ 高周波数の重力波イベント

目標: 重力波の検出, 天文学

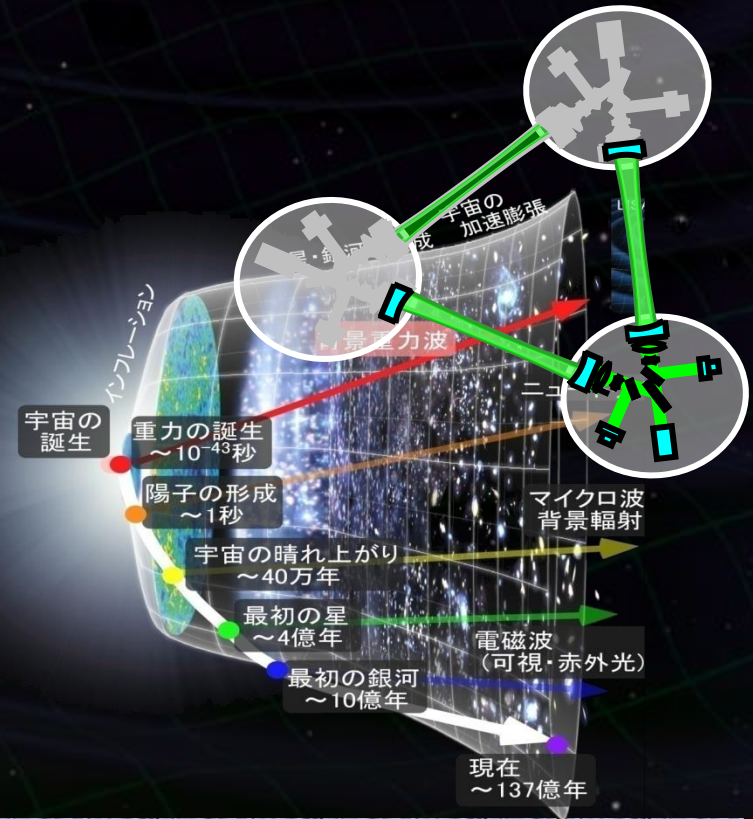


## DECIGO (~2031)

Space observatory

→ 低周波数の重力波

目標: 重力波天文学の展開

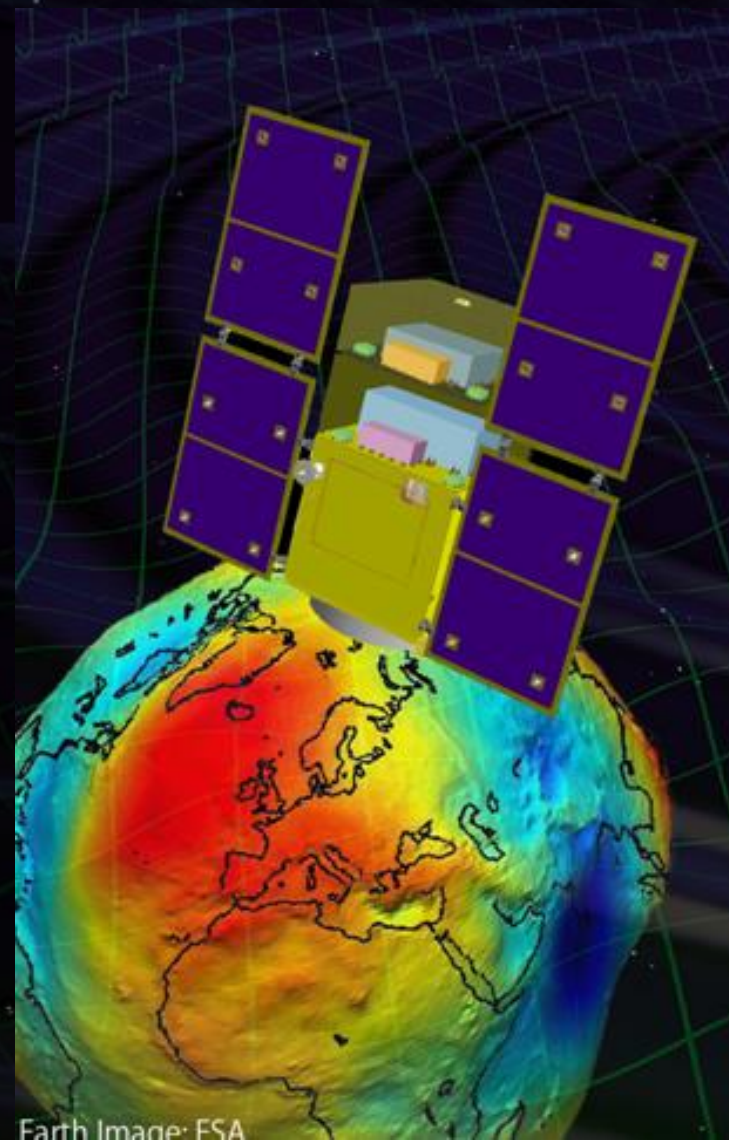




# DECIGO WG Members



安東正樹, 川村静児, 瀬戸直樹, 中村卓史, 坪野公夫, 佐藤修一, 田中貴浩, 船木一幸, 沼田健司, 神田展行, 井岡邦仁, 高島健, 横山順一, 阿久津智忠, 武者満, 上田暁俊, 麻生洋一, 新谷昌人, 坂井真一郎, 青柳巧介, 我妻一博, 浅田秀樹, 新井宏二, 池上健, 石川毅彦, 石崎秀晴, 石原秀樹, 和泉究, 市來淨與, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 植田憲一, 牛場崇文, 歌島昌由, 江口智士, 江尻悠美子, 榎基宏, 戎崎俊一, 江里口良治, 大石奈緒子, 大河正志, 大橋正健, 大原謙一, 大淵喜之, 岡田健志, 岡田則夫, 奥富弘基, 河島信樹, 川添史子, 河野功, 木内建太, 岸本直子, 國中均, 國森裕生, 黒田和明, 黒柳幸子, 小泉宏之, 洪鋒雷, 郡和範, 穀山涉, 苔山圭以子, 古在由秀, 小鳶康史, 固武慶, 小林史歩, 権藤里奈, 西條統之, 齊藤遼, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀親, 佐々木節, 佐藤孝, 柴田大, 柴田和憲, 正田亜八香, 真貝寿明, 末正有, 杉山直, 鈴木理恵子, 諏訪雄大, 宗宮健太郎, 祖谷元, 高野忠, 高橋走, 高橋慶太郎, 高橋弘毅, 高橋史宜, 高橋龍一, 高橋竜太郎, 高森昭光, 田越秀行, 田代寛之, 田中伸幸, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 陳たん, 辻川信二, 常定芳基, 豊嶋守生, 鳥居泰男, 中尾憲一, 中澤知洋, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中山宜典, 西澤篤志, 西田恵里奈, 西山和孝, 丹羽佳人, 能見大河, 橋本樹明, 端山和大, 原田知広, 疋田涉, 姫本宣朗, 平林久, 平松尚志, 福嶋美津広, 藤田龍一, 藤本真克, 二間瀬敏史, 細川瑞彦, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英雄, 松本伸之, 道村唯太, 宮川治, 宮本雲平, 三代木伸二, 向山信治, 森澤理之, 森本睦子, 森脇成典, 八木絢外, 山川宏, 山崎利孝, 山元一広, 吉田至順, 吉野泰造, 柳哲文, 若林野花



Earth Image: ESA



•JGWC (Japan Gravitational Wave Community) : 325名



•DPF WGメンバー : 109名 (DECIGO WG 148名)

DECIGO/DPF開発だけに

参加するメンバーも多い。

- 宇宙用干渉計開発・無重力実験
- 安定化レーザー開発
- スラスタ開発
- 衛星システム検討/ドラッグフリー



このうち 11名が  
KAGRAのコアメンバー