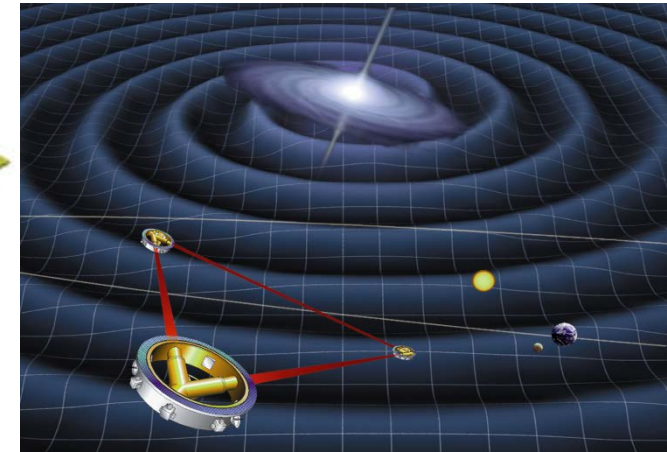
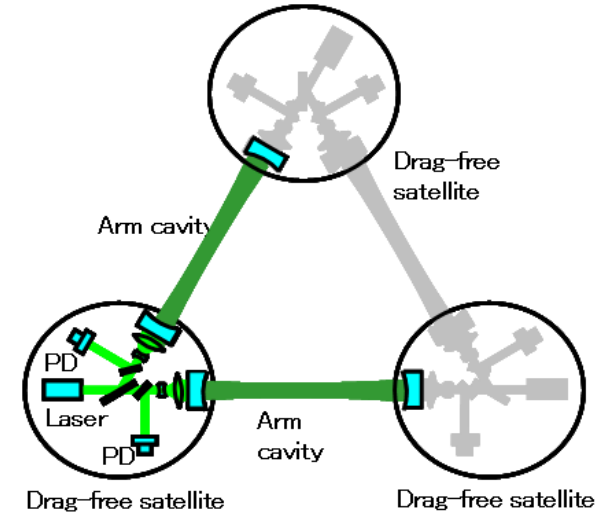
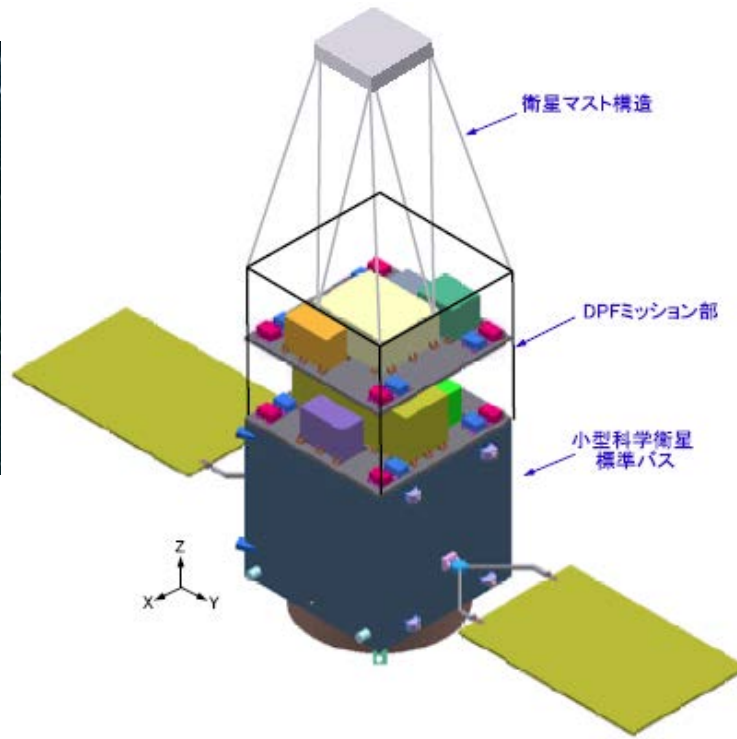
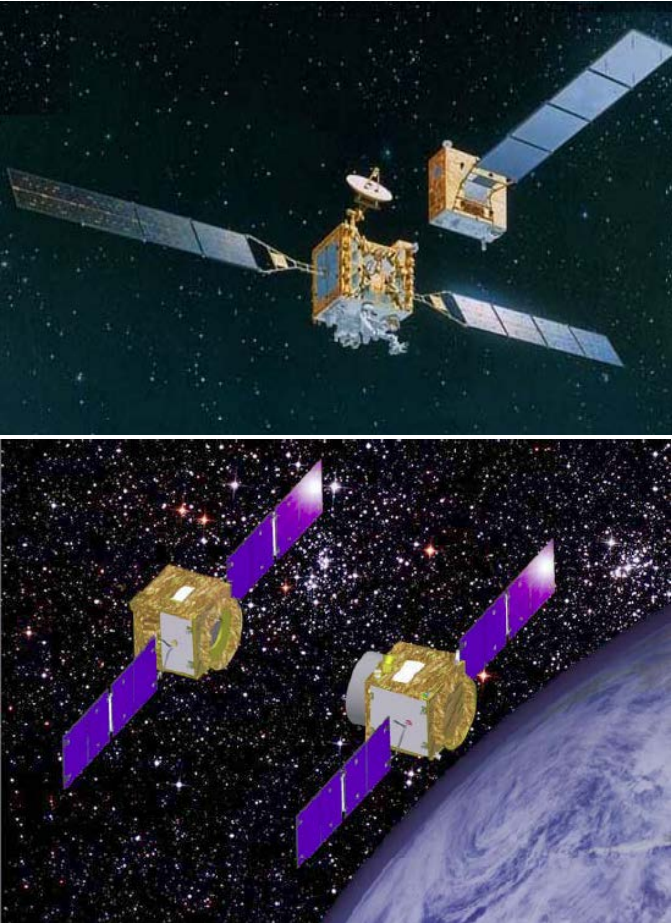
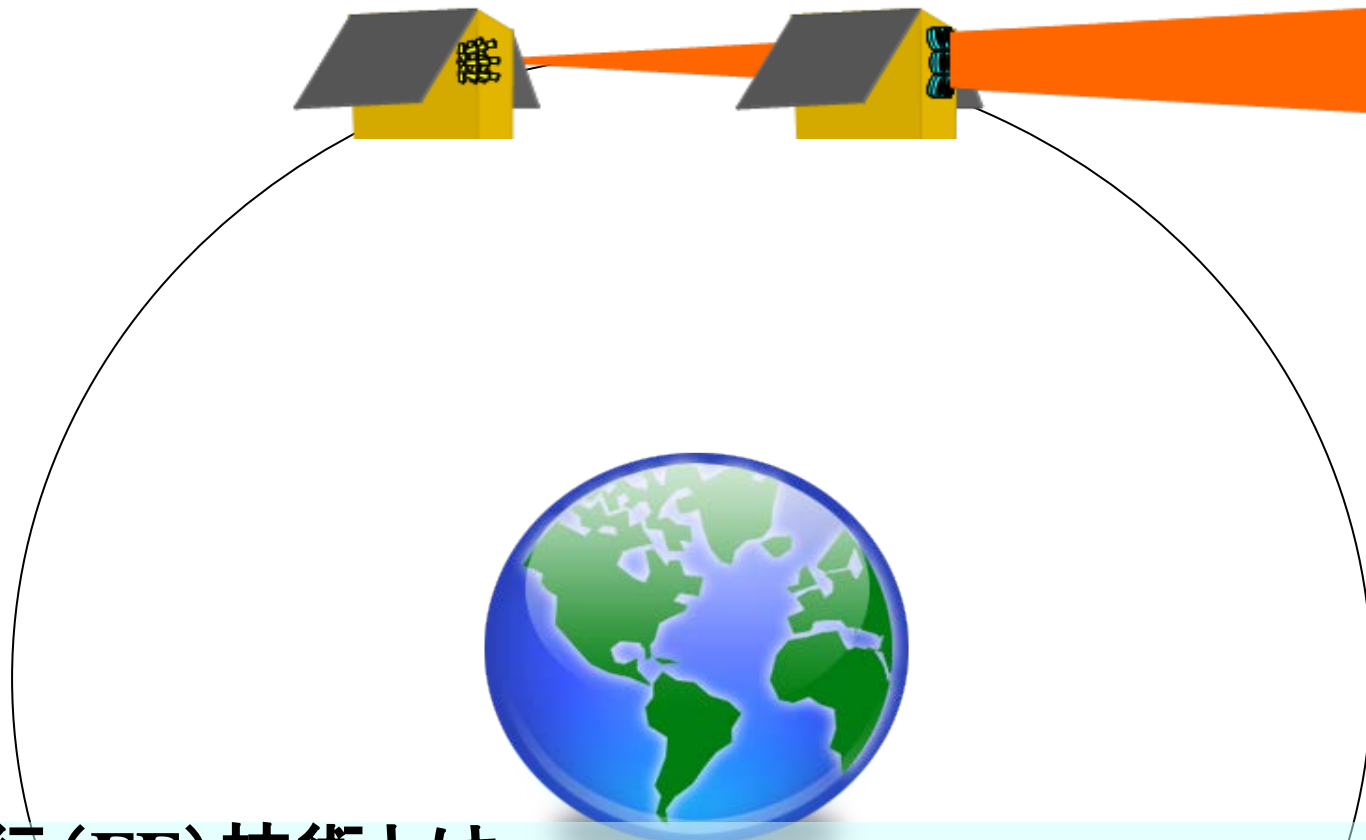


# DECIGOの実現を目指した 高精度フォーメーションフライト(FF)技術の研究



平成25年10月27日  
DECIGO workshop  
@東京大学理学部

JAXA研究開発本部  
河野功



## 編隊飛行 (FF) 技術とは……

複数の宇宙機が一定の形態を保って飛行する技術 (図はアロングトラックFF)

→衛星サイズという物理的制約を打破できる画期的な技術

→長焦点距離の大型望遠鏡、超長基線干渉計等

**最先端の宇宙科学／宇宙利用ミッション**が提案されている。

科学者からの要請は強いが、高精度FFが難しく、実現していない。

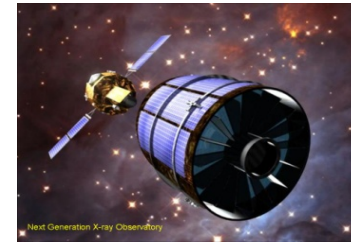
→世界初の高精度FF技術の軌道上実証を行うことで、

**最先端ミッション実現**への道を切り拓く。

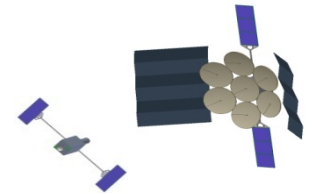
# FF技術が必要な最先端ミッション

(1)FFにより長焦点距離を実現するミッション

X線望遠鏡、 $\gamma$ 線望遠鏡、  
静止地球観測



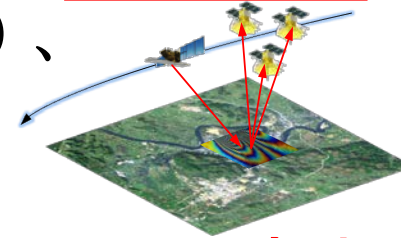
X線望遠鏡



静止地球観測

(2)FFにより長基線干渉計を実現するミッション

SAR干渉計、太陽系外惑星観測(赤外線干渉計)、  
宇宙機間VLBI



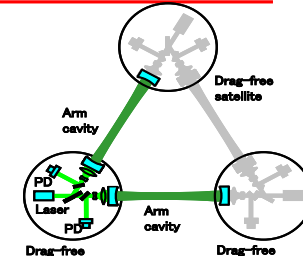
SAR干渉計



赤外線干渉計

(3)FFによる掩蔽を利用するミッション

太陽コロナ観測、  
太陽系外惑星観測(オカルター)



重力波望遠鏡



オカルター

(4)FFによる長基線間の距離を計測するミッション

重力波望遠鏡(DECIGO)

(5)FFによって機器間の距離を取るミッション

超大型アンテナ、太陽光発電衛星



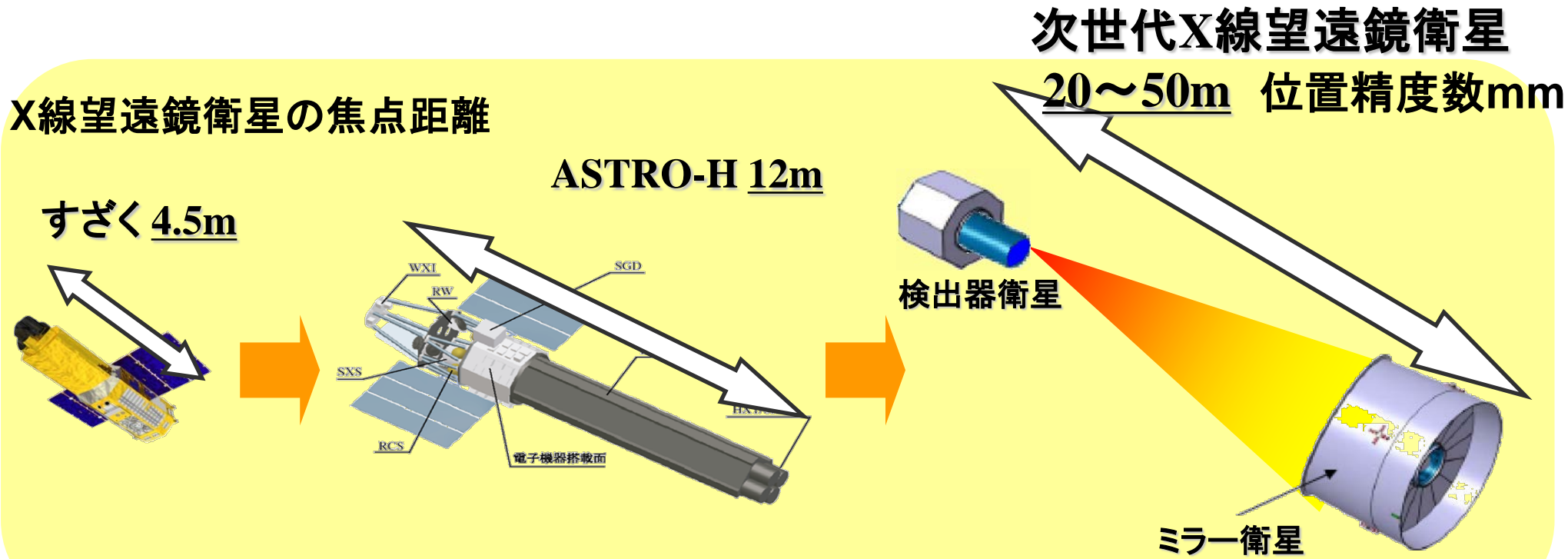
太陽光発電衛星

赤字は提案ミッションの実証成果の応用を目指し、  
共同研究等を実施中

# 高性能観測のために長焦点距離望遠鏡が必要なX線望遠鏡ミッション

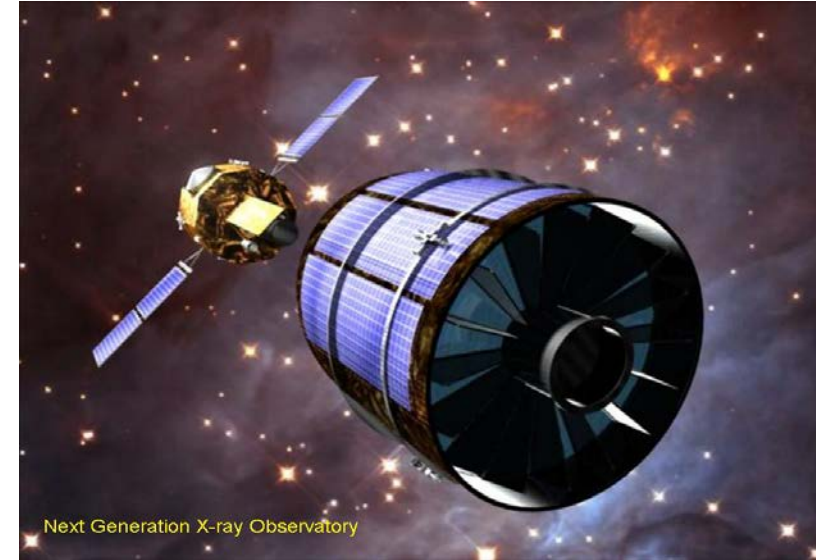
X線望遠鏡は、高性能化(高分解能、高感度、高エネルギー観測)のために、焦点距離を長く伸ばす必要がある。次世代X線望遠鏡衛星では、焦点距離は20m~50mとされ、1機の衛星で実現するには無理がある。

→FF技術により、衛星サイズを上回る長焦点距離が実現できる。

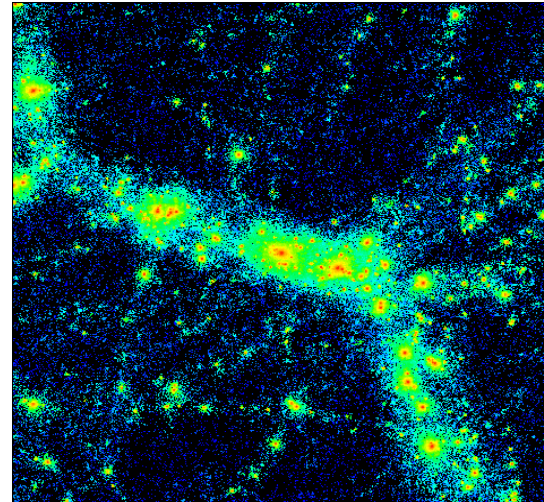
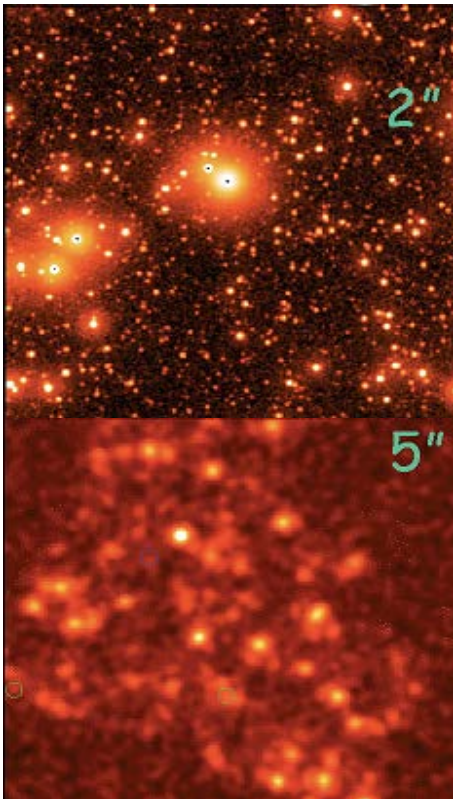


# X線望遠鏡 (XEUS)

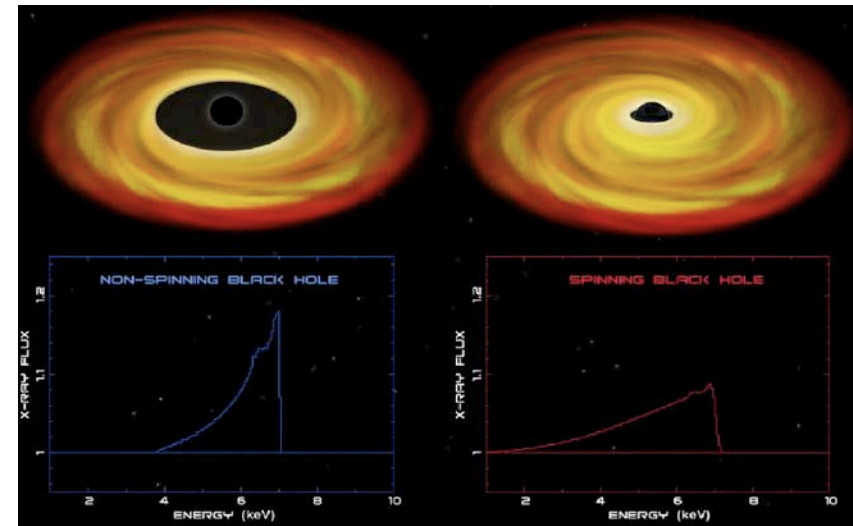
XEUS (長焦点距離) により高エネルギー (曲げにくい)、高感度 (大面積)、高分解能の観測が可能になるので、宇宙初期から現在に至るまでの宇宙の大規模構造の進化やブラックホール近傍の時空構造を解明し、宇宙の進化や歴史、宇宙を支配する根本法則に迫る観測を行うことが期待されている。



FFにより望遠鏡を構成するXEUS



宇宙の大規模構造の進化

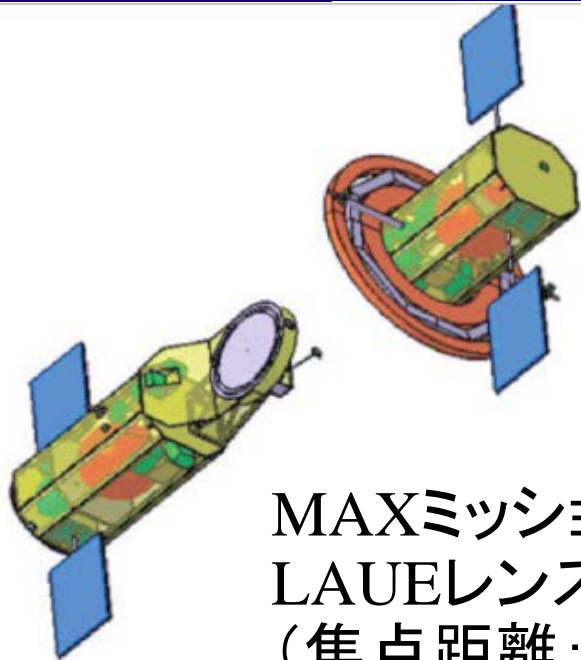


BH直近の時空構造

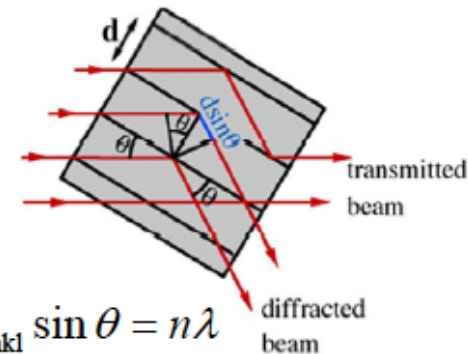
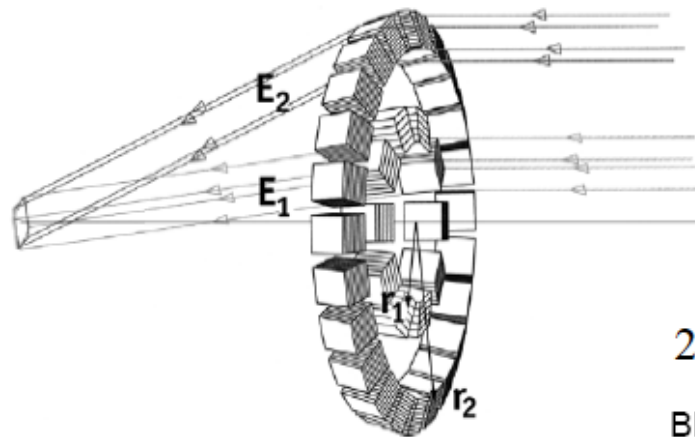
XEUSの高分解能X線像(上)  
従来衛星によるX線像(下)



# γ線望遠鏡

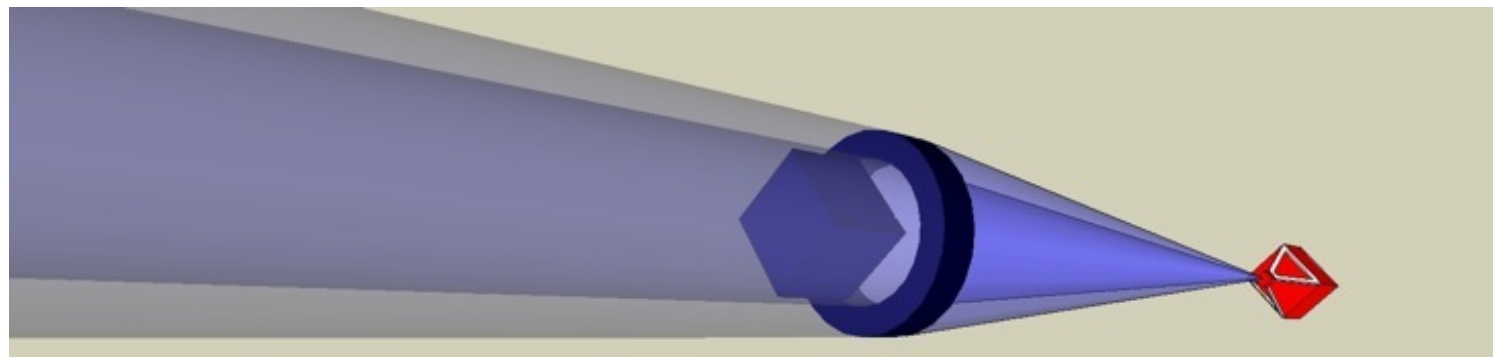


MAXミッション:  
LAUEレンズとFFの宇宙実証  
(焦点距離: 85m)



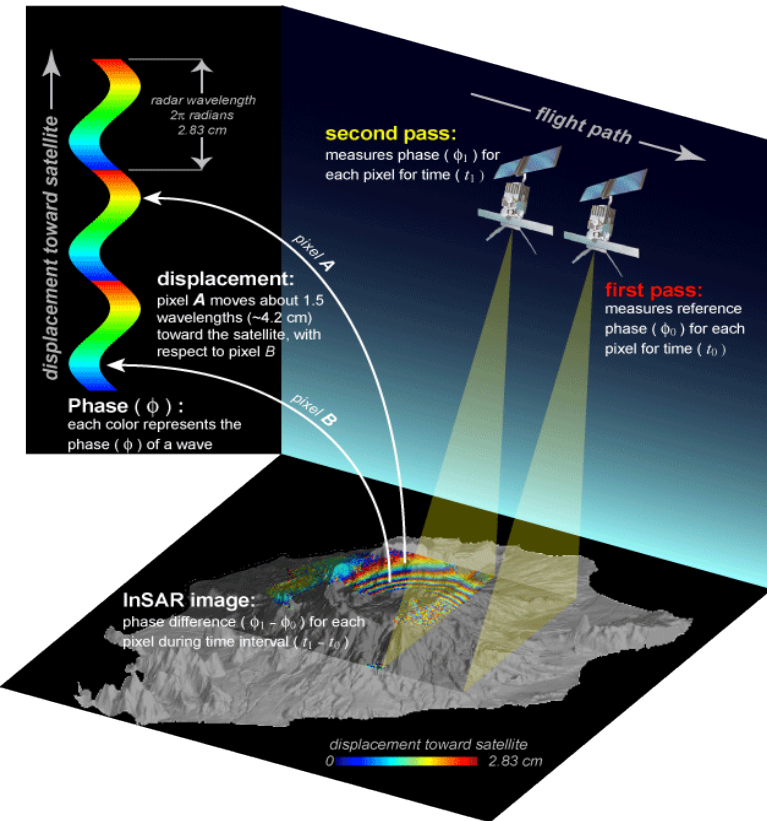
$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$   
BRAGG diffraction in a crystal

LAUEレンズ



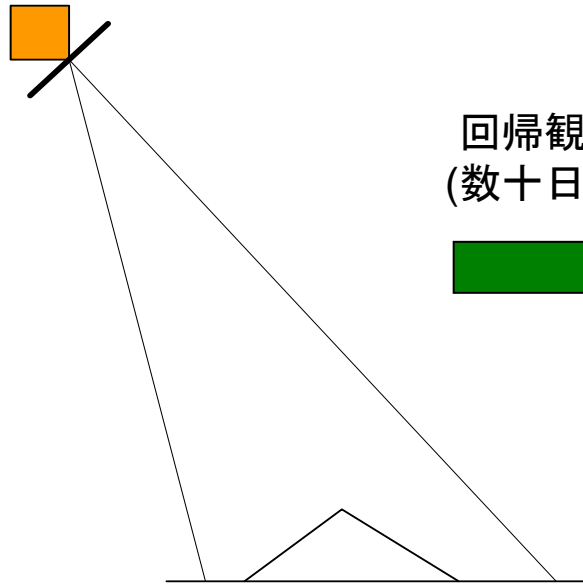
DUALミッション:  
Compton All-Sky TelescopeとLAUEレンズを組合せて  
全天観測と高感度観測の両立を目指す

# FF干渉SARによる高精度観測



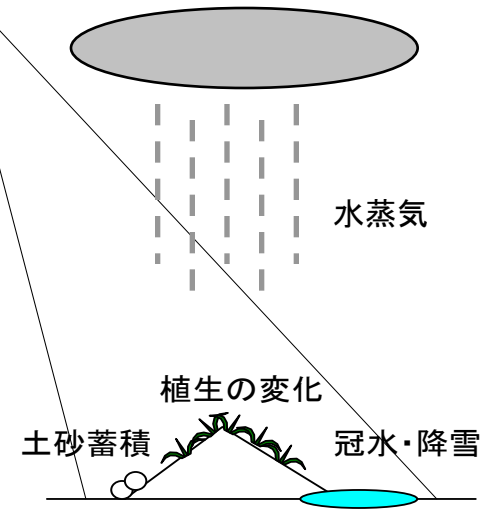
干渉SAR(InSAR)

1回目の観測



2回目の観測

回帰観測  
(数十日後)



数十日の回帰周期の間に地表面が変化してしまい、  
(気象条件による水蒸気遅延の変化の影響もある)  
観測条件、周波数によって2観測間の干渉性が低下。  
最悪、干渉しない場合がある。  
(特に波長が短い周波数での観測は注意が必要)

フォーメーションフライト(FF)の複数のSAR衛星により、  
同時観測を行うことで、上記課題を解決する

# 高精度静止地球観測

静止軌道上から**常時1m**の分解能で  
地表を高精度観測

焦点面にフォーメーションフライト  
(副鏡等の光学系により変動)

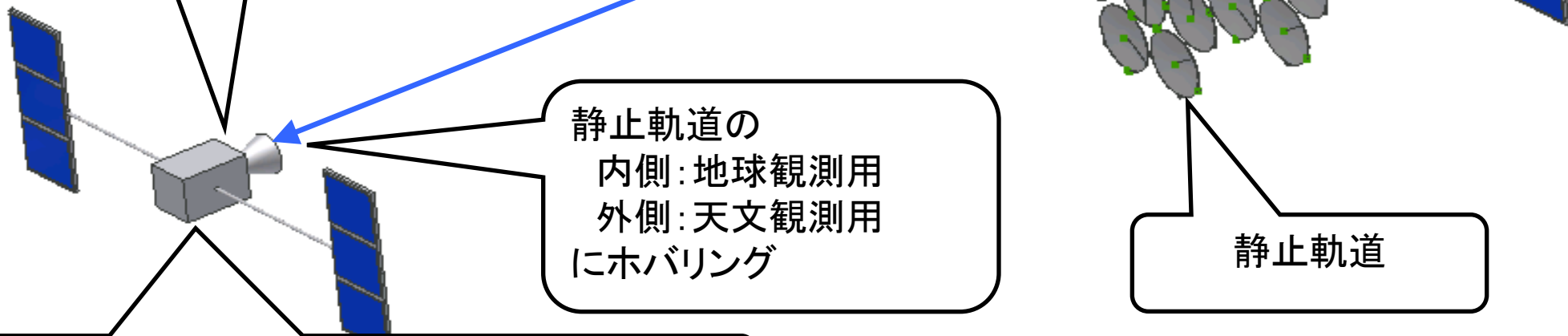
焦点距離300m

静止軌道の  
内側:地球観測用  
外側:天文観測用  
にホバリング

直径30mの分割鏡

静止軌道

潮汐力は、イオンエンジンでキャンセル





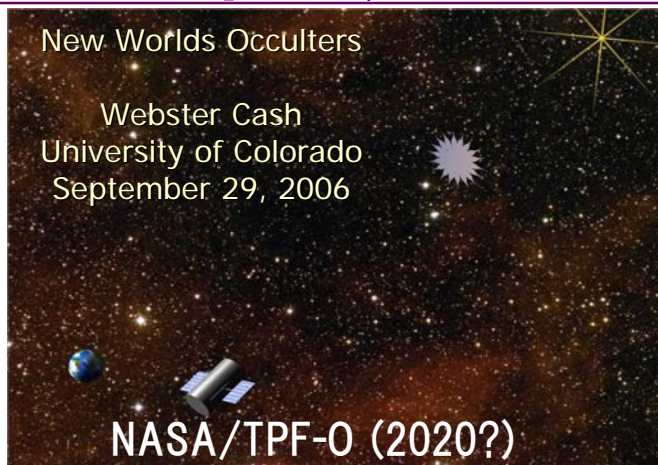
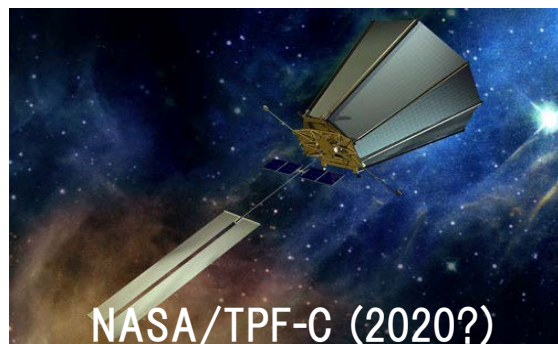
# 太陽系外地球型惑星直接観測

単一望遠鏡(コロナグラフ)

オカルター

干渉計

可視光

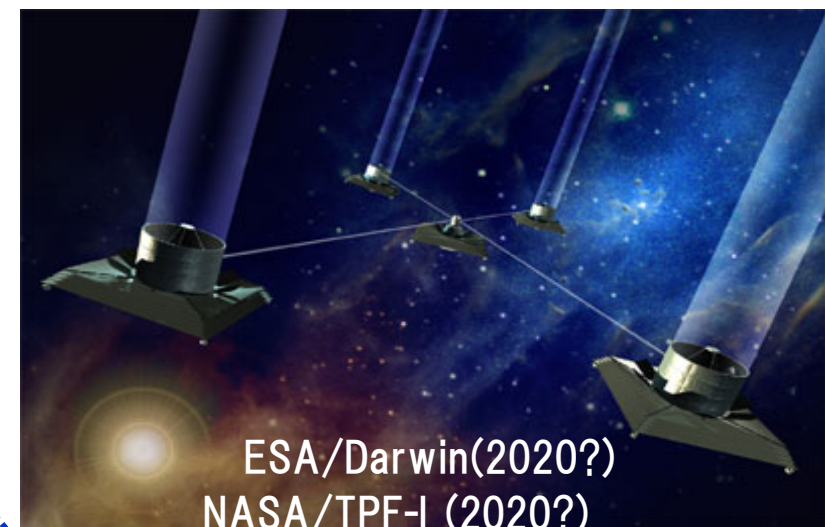


赤外線



地球型  
まで

木星型  
のみ



TPF=Terrestrial Planet Finder

6-18  $\mu\text{m}$

# 重力波望遠鏡

## 宇宙での重力波検出ミッション

### LISA

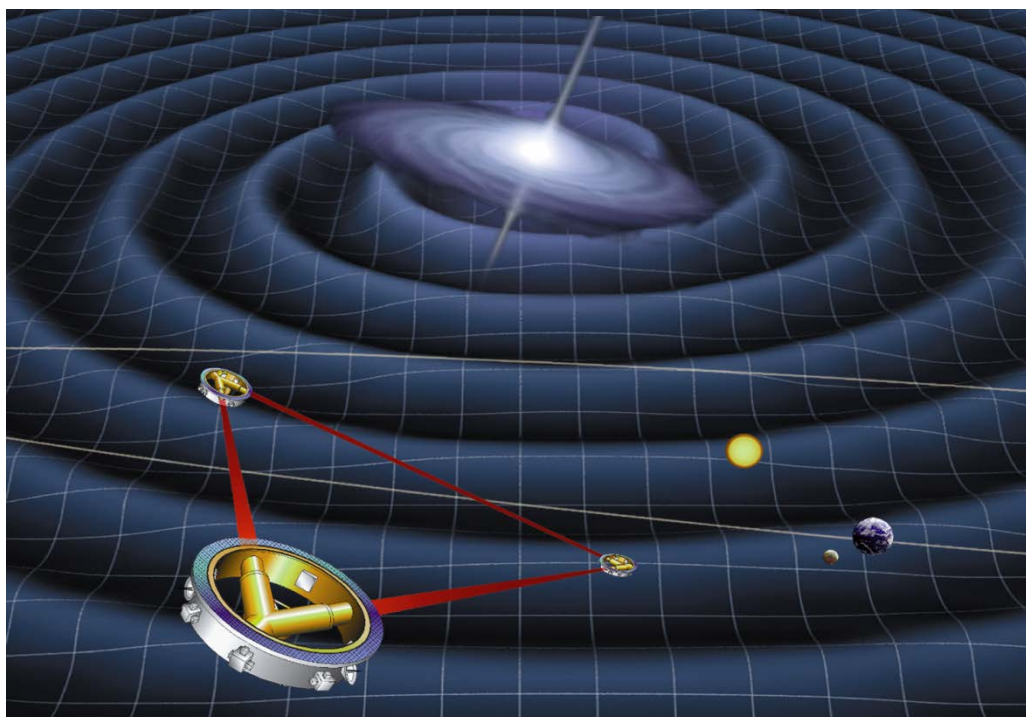
(Laser Interferometer Space Antenna)

3台のS/Cで基線長500万kmの干渉計を構成

ターゲット: 1mHz 前後の周波数帯

ESA/NASA共同プロジェクト

打ち上げ: 2014年以降



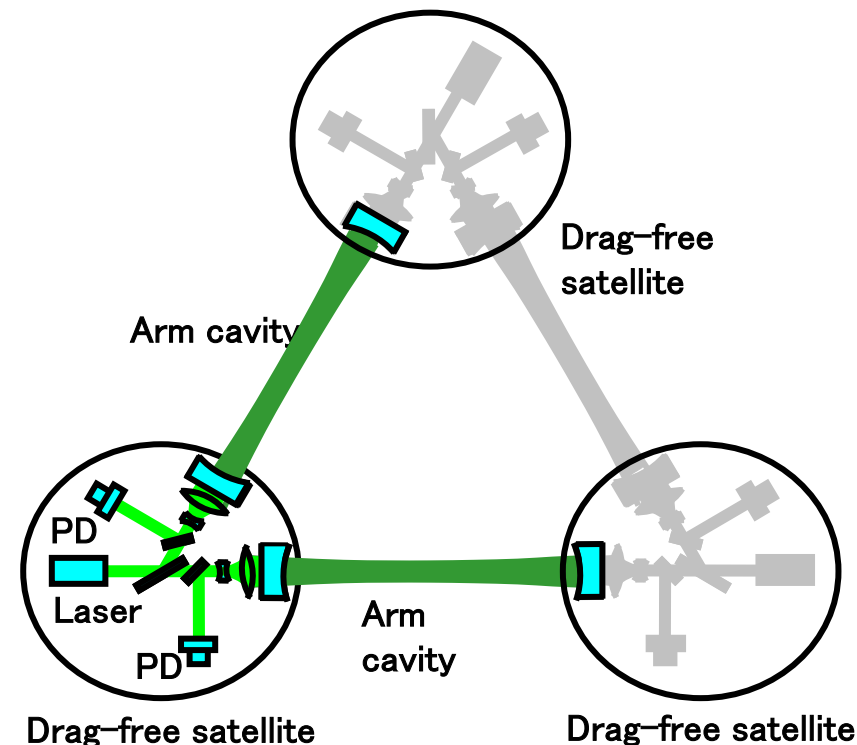
### DECIGO

(Deci-hertz Interferometer  
Gravitational Wave Observatory)

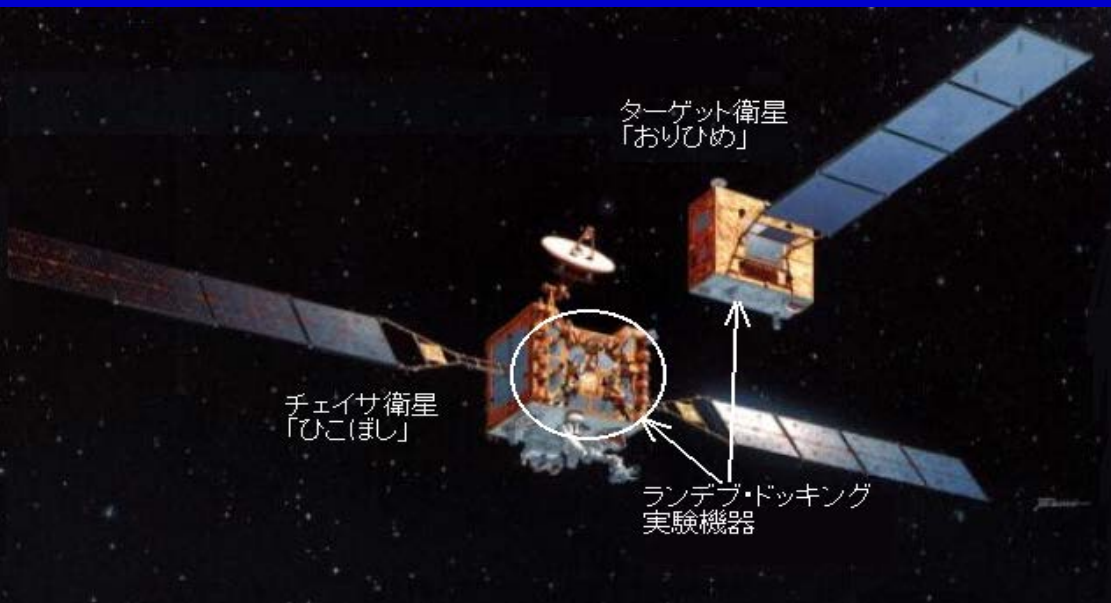
3台のS/Cで基線長1000kmの干渉計を構成

ターゲット: 0.1Hz 前後の周波数帯

打ち上げ: 2025年頃



# 宇宙ランデブ衛星「おりひめ」「ひこぼし」



## 世界初の軌道上合体ロボット衛星 「おりひめ」「ひこぼし」

無人宇宙機によるランデブ・ドッキング(RVD)実験、ロボット実験を実施

→国際宇宙ステーション(ISS)への補給機(HTV)などに利用

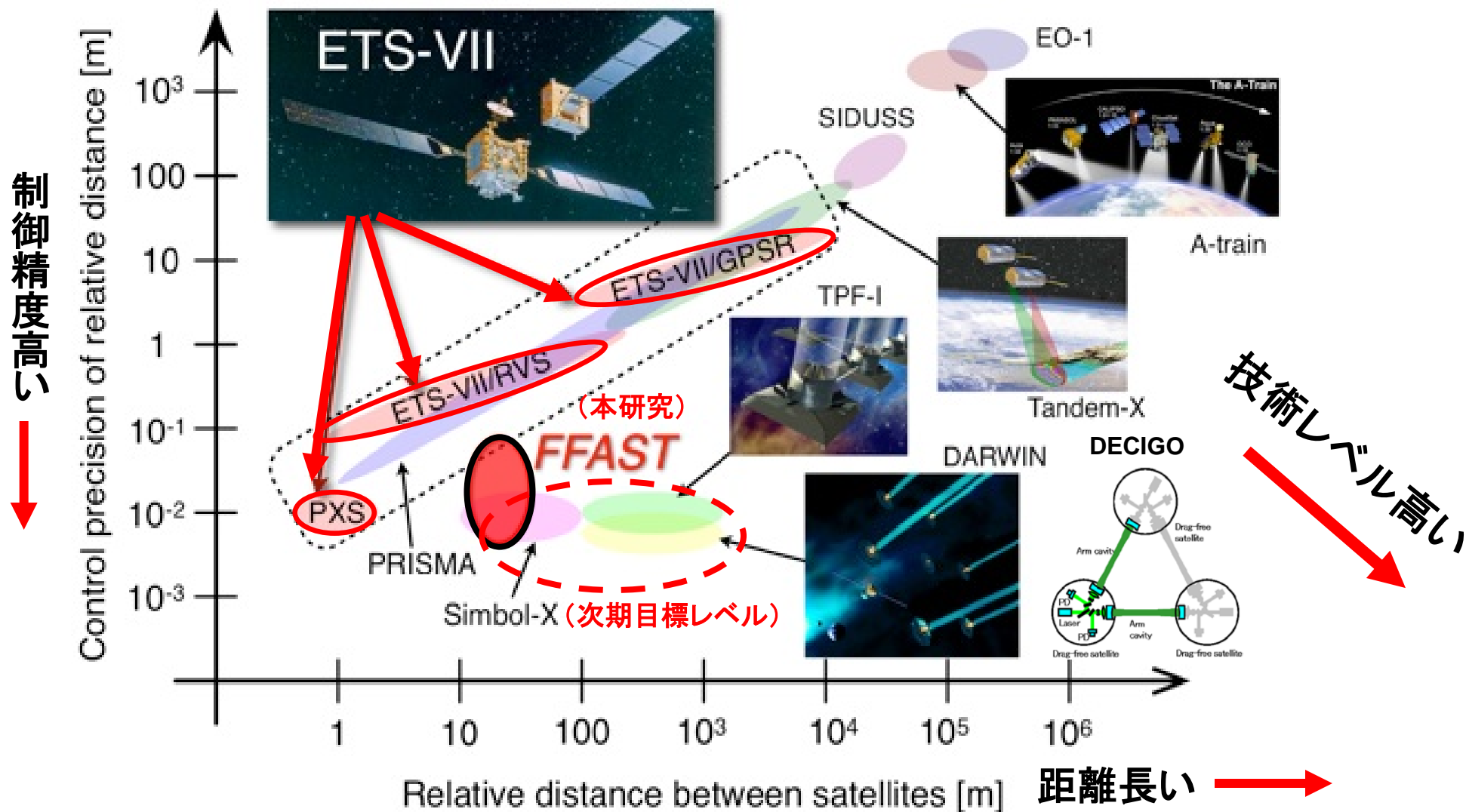
→世界最高性能のRVD、FF技術を活用して、DECIGO等の最先端ミッションの実現を目指す

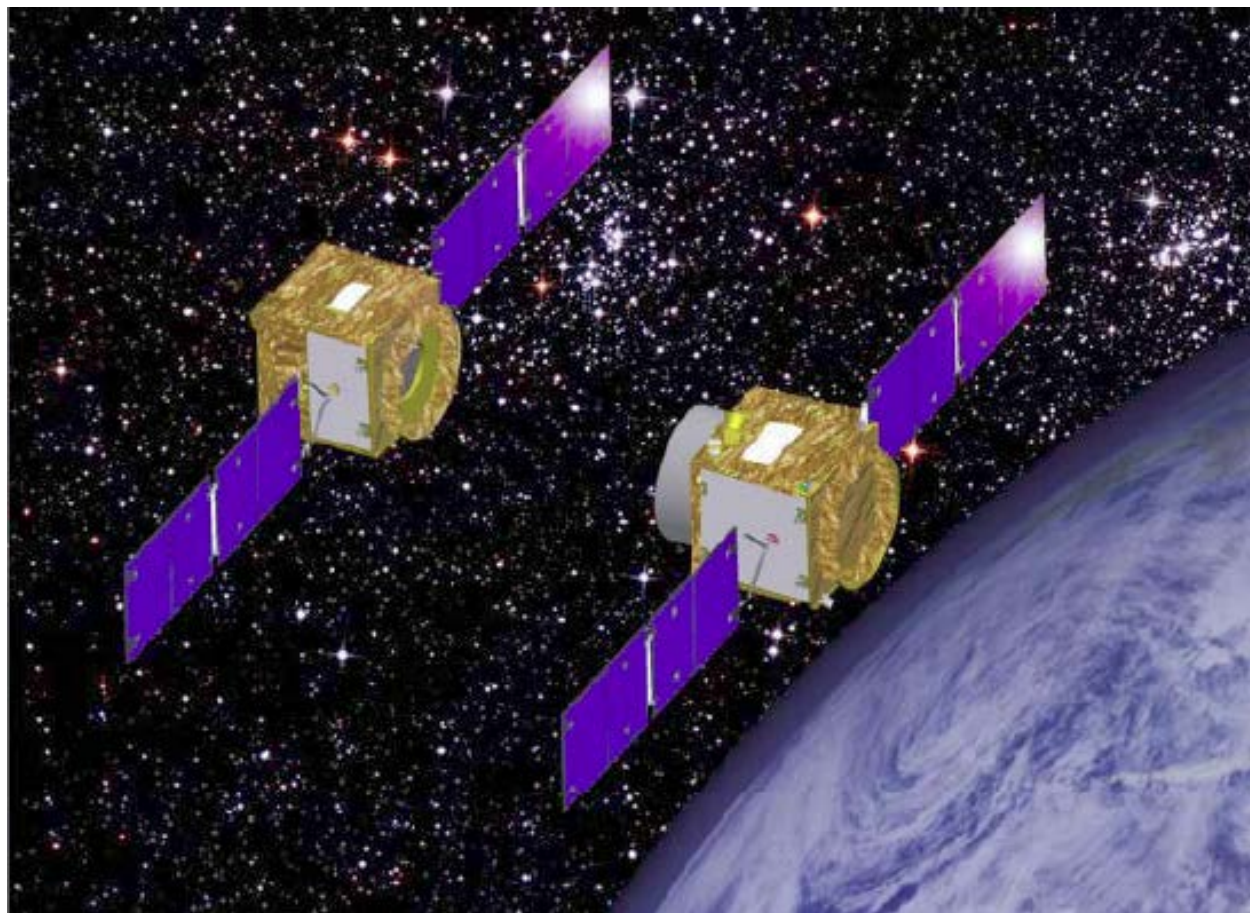
# FF技術開発ロードマップ

現状技術:ETS-VII (20~30cm@30m:世界最高レベル)

→5年後 : FFAST(3mm~5cm精度@20m) (本研究の目標レベル)

→10年後: 大型X線望遠鏡(0.3mm~1mm精度@35m)(次期目標レベル)





**世界初のFFによるX線望遠鏡システム**  
**理学ミッション: 10~80keVの硬X線による広域走査観測**  
**工学ミッション: 高精度FF制御系の軌道上実証実験**

## ミッション名：FRONT

編隊飛行 (FF)・相対軌道・航法工学実証ミッション

(**FRONT**—**F**ormation flying, **R**elative **O**rbit and **N**avigation **T**echnology demonstration mission)

## ミッション

### 【理学ミッション】

2機の小型衛星により、世界初のFFを応用した長焦点距離の硬X線望遠鏡 (FFAST) ミッションを実施する。

### 【工学ミッション】

高精度編隊飛行 (FF) 技術、相対軌道決定、相対航法センサの工学実証実験

主ミッション: 高精度FF技術実証・・・FFASTミッションを実現するために必要な高精度編隊飛行 (FF) 技術の**実ミッションによる実証。**

**将来ミッション (XEUS、DECIGO等) に必要な、さらなる高精度のFF技術の実証。  
(精密編隊飛行 (FF) 技術実証)**

副ミッション1: 高精度相対軌道決定技術実験・・・高精度FF運用等に必要となる、**AVLBI**による高精度・準実時間・相対軌道推定技術の実験。

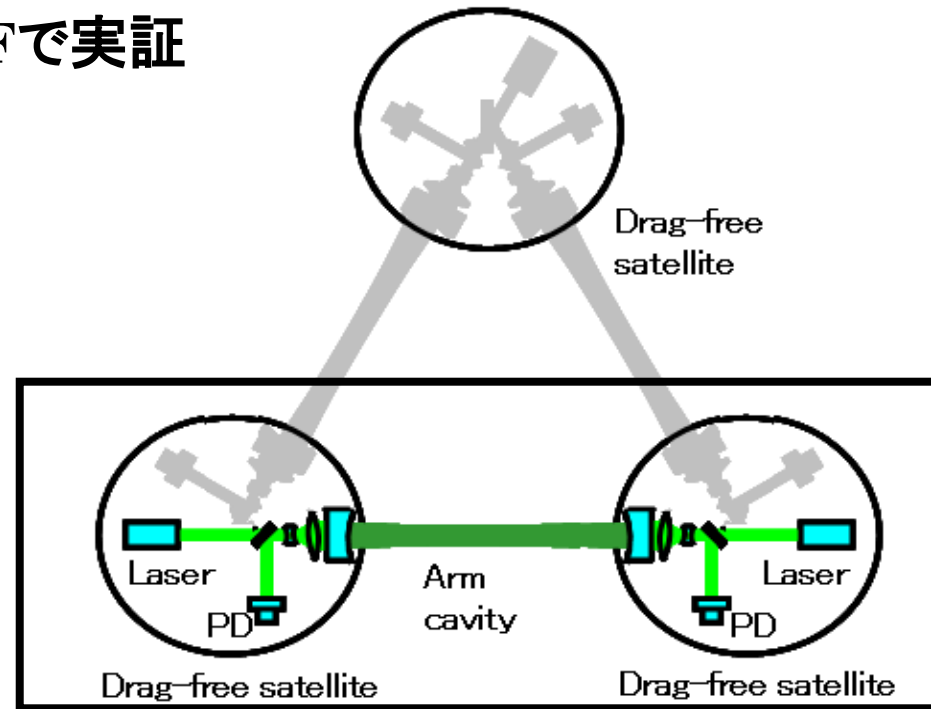
副ミッション2: 有人宇宙船の国際化画像相対航法実験。

# DECIGOのFF技術実証

3つの重要技術

- ・高安定レーザ
- ・ドラッグフリー制御
- ・高精度FF技術

} DPFで実証



この部分の技術実証が行えないか？  
衛星間の相対位置を0.1mm以下で  
制御することを目指す。

# FRONTのサクセスレベル

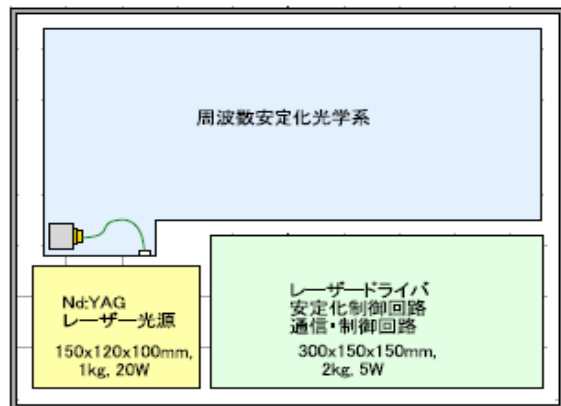
**DECIGO**に必要な精密FF技術実証については、エクストラサクセスとして定義する

	ETS-VII	FRONT フルサクセス	FRONT エクストラサクセス
ミッション	自動ランデブ・ドッキング	FFAST実現 (高精度FF技術実証)	次世代ミッションに向けた 技術実証 (精密FF技術実証)
制御精度	1cm@ドッキング時	3mm@20m	1mm@20m(TBD) <b>Mission-in-the-Loopで</b> <b>0.1mmオーダ(目標)</b>
画像航法センサ	1mm@ドッキング時	0.2mm@20m	0.1mm@20m(TBD)
制御ロジック	(ベース)	センサ/アクチュエータ特 性を考慮した最適化	最適化をさらに進める
アクチュエータ	20Nスラスト	1Nスラスト	イオンスラスト等の精密ス ラストを検討
ミッションとの協調	ドッキング機構の中央に画 像センサ	X線ミラー内部に画像セン サ	ミッション計測値を制御系 にFB利用
ダイナミクス	(ベース)	外乱低減化 ケプラー軌道	相対外乱の差を最小化、 制御利用(TBD)



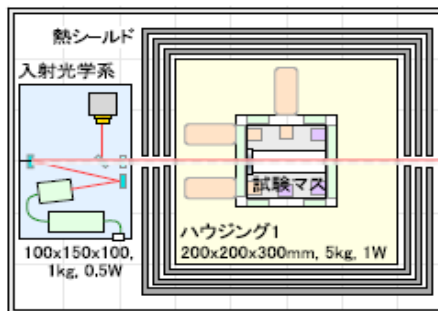
# FRONT搭載機器(レーザ干渉計)

安定化レーザ光源モジュール 500×400×200, 15kg, 25W



干渉計モジュール

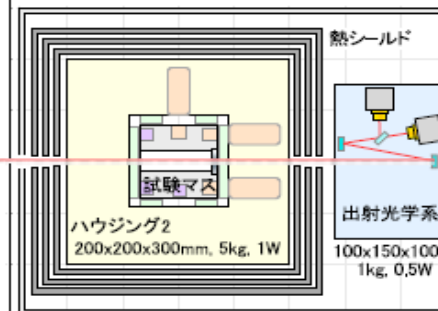
480×300×300mm, 5.6kg  
(ハウジング含めて, 12kg, 2W)  
熱シールド・封入容器



主干渉計

干渉計モジュール

480×300×300mm, 5.6kg  
(ハウジング含めて, 12kg, 2W)  
熱シールド・封入容器



電源・熱  
制御モジュール

120×150×150mm  
0.7kg, 12W

信号処理モジュール  
中央処理演算器

150×200×200mm  
0.7kg, 1.8W

信号処理モジュール  
中央処理演算器

150×200×200mm  
0.7kg, 1.8W

干渉計制御モジュール

180×150×200mm  
3.5kg, 2.4W

ハウジング制御モジュール

180×150×200mm  
3.5kg, 6W

ハウジング制御モジュール

180×150×200mm  
3.5kg, 6W

干渉計制御モジュール

180×150×200mm  
3.5kg, 2.4W

電源・熱  
制御モジュール

120×150×150mm  
0.7kg, 12W

ドラッグフリー・  
スラスト制御モジュール

180×150×200mm  
6kg, 13.5W

レーザセンサ制御モジュール

180×150×200mm  
3.5kg, 4.8W

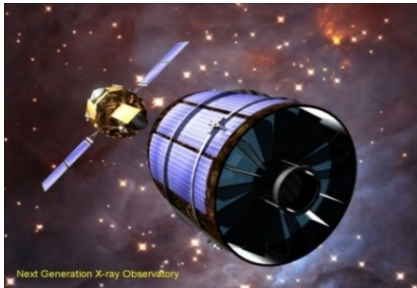
レーザセンサ制御モジュール

180×150×200mm  
3.5kg, 4.8W

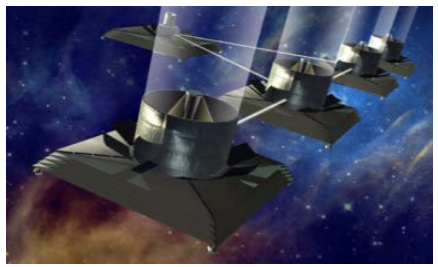
ドラッグフリー・  
スラスト制御モジュール

180×150×200mm  
6kg, 13.5W

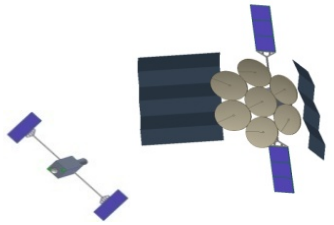
高精度FF技術のフライト実証に加え、世界初のFFによる硬X線望遠鏡**FFAST**を**ミッションとして実施する**。この中で**FF-InSAR**に必要なFF技術の実証も行う。**次世代X線望遠鏡(XEUS級)**や**赤外線干涉計**は2~3倍の高精度化で、**直接開発可能なレベルまで実証を行う**。**重力波望遠鏡DECIGO**の実現に必要な**超高精度FF技術の開発と実現性の実証**を行う。→**全てのミッションの実現を視野に入れる**。



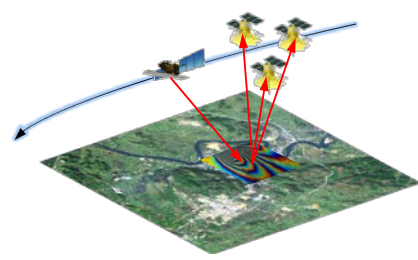
次世代X線望遠鏡



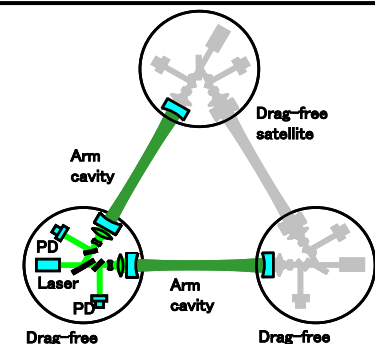
赤外線干涉計  
TPF-I



静止地球観測

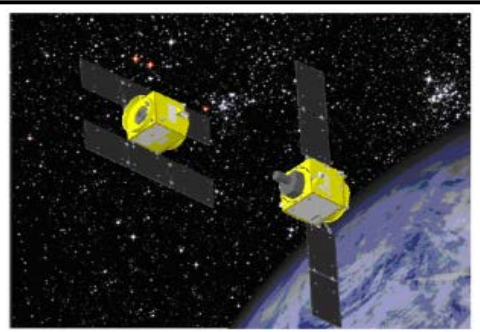


FF-InSAR



重力波望遠鏡

**XEUS pathfinder**  
高精度化  
(2~3倍)



X線望遠鏡  
FFAST

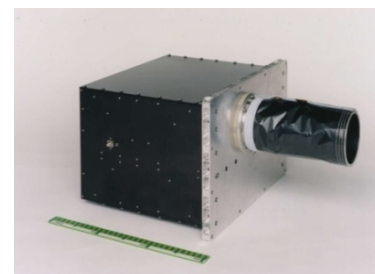
実ミッションとして実施

画像航法センサ  
(BBM以上の高精度化検討)

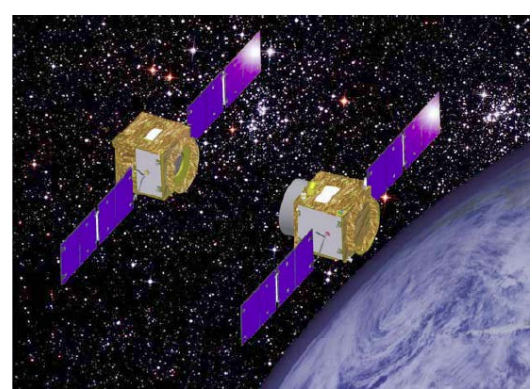
直接応用

GPS搬送波相対航法  
(本ミッションで実証)

長距離化  
高精度化  
→機能実証  
**DECIGO pathfinder**



レーザ航法センサ  
(ETS-VIIにて実証)



高精度FF技術  
実証ミッション

# ΔVLBIによる高精度・準実時間相対軌道推定実験

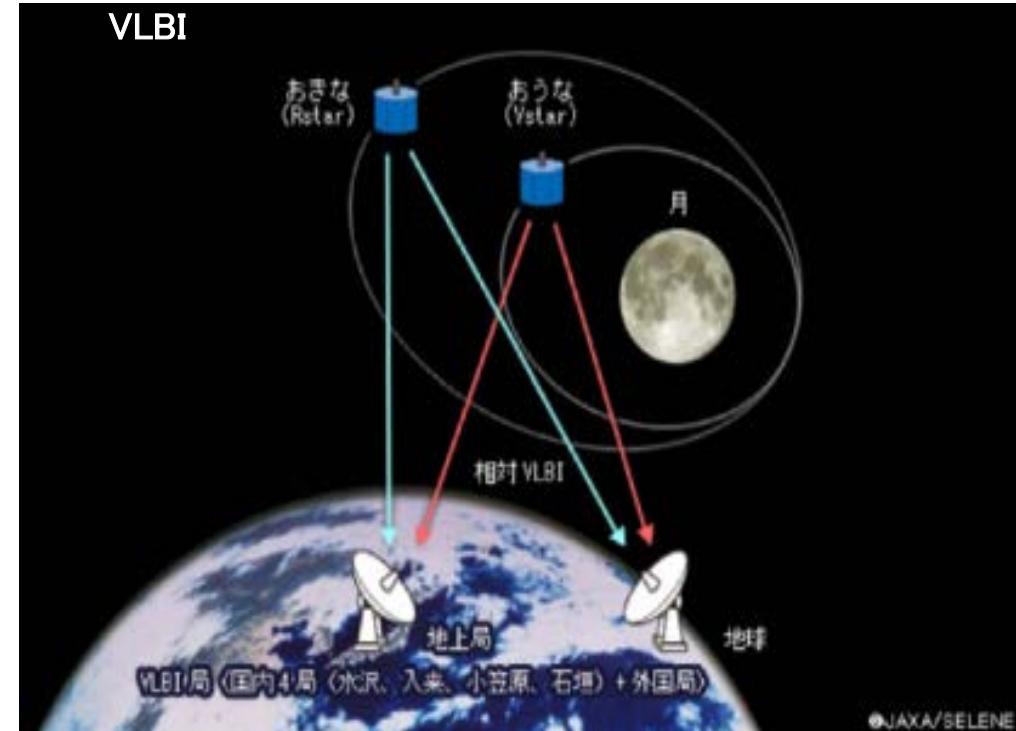
・ΔVLBIによる高精度・準実時間・相対軌道推定の実現性を確認するために、以下の実験を行う。

・母衛星／娘衛星がGPS時刻に同期して送信するX帯の信号を、水素メーザを具備するVLBI観測局(3局以上)で受信し、それを準リアルタイムでデータ処理局に伝送し、干渉処理を行う事で、高精度・準実時間に母衛星／娘衛星間の相対軌道を推定する。

・目標精度：距離20mを相対位置1cm以内。

・高精度化、準実時間計測の実現性確認。誤差源の確認等を目的とする。

→ これにより、FF-InSAR や **DECIGOの高精度FF運用**に必要な高精度相対軌道推定技術の実現性を確認できる。



# ΔVLBI技術の高精度FF運用への応用

FF-InSAR、DECIGO等の高精度FF運用への適用を目指し、ΔVLBIによる高精度・準実時間の相対軌道推定の実現性の確認を行う。

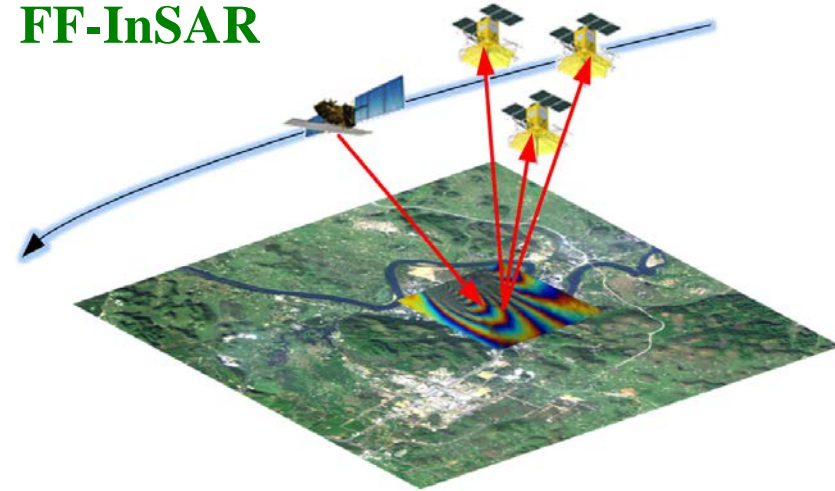
## 【FF-InSAR】

- ・FF-InSARミッションの高精度観測のためには、FFしている衛星間の相対位置(距離:1~数km)を1cm以内で事後推定する必要がある。
- ・ΔVLBIによる高精度相対軌道推定を実現する。

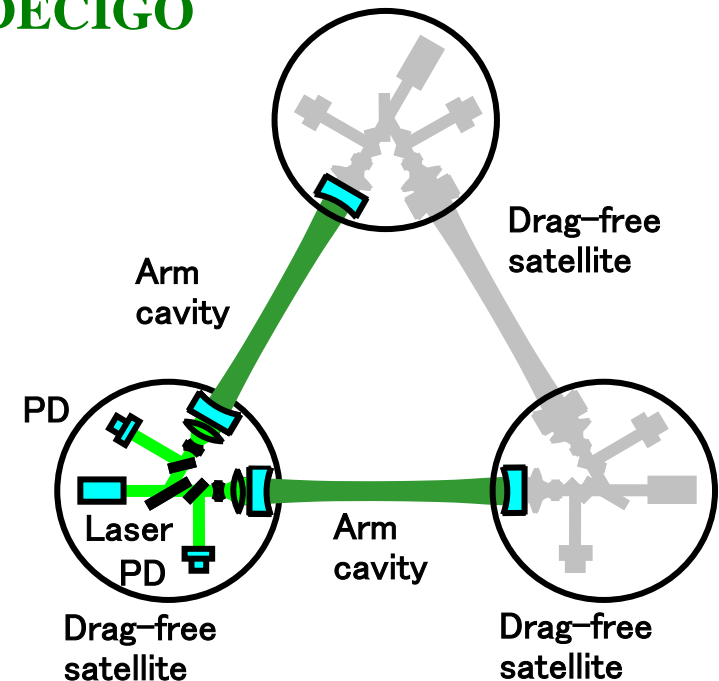
## 【DECIGO】

- ・DECIGOによる重力波検出ミッションの実現のためには、**高安定レーザの干渉範囲**の要求から、衛星間の相対位置を距離方向:10m以内、距離垂直方向:5m以内に保持制御する必要がある。
- ・オンボードの自動制御系は、長距離化、高精度化したレーザ航法センサを使用するが、保持範囲を外さないための**バックアップ計測手段**として、また範囲外からの**復帰運用**の手段として、ΔVLBI技術を応用した準実時間の高精度相対軌道推定法の適用時可能性を確認する。

FF-InSAR

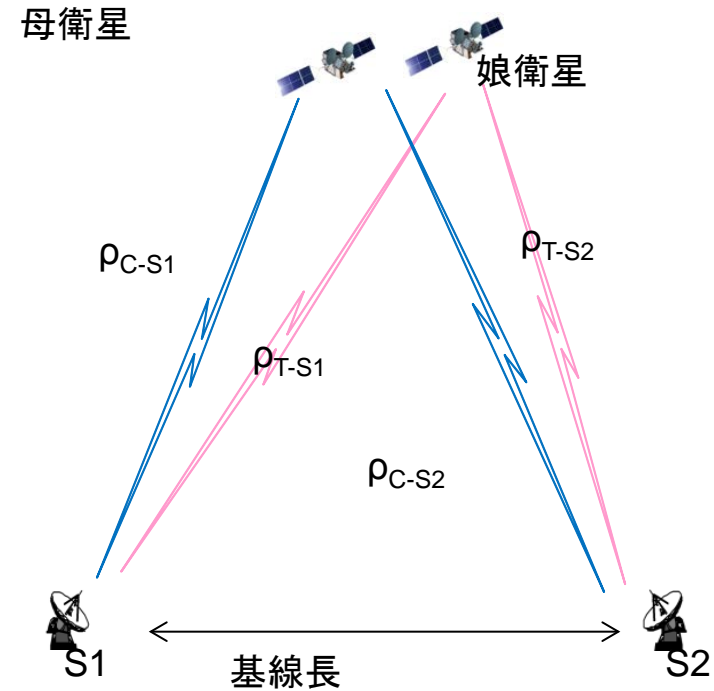
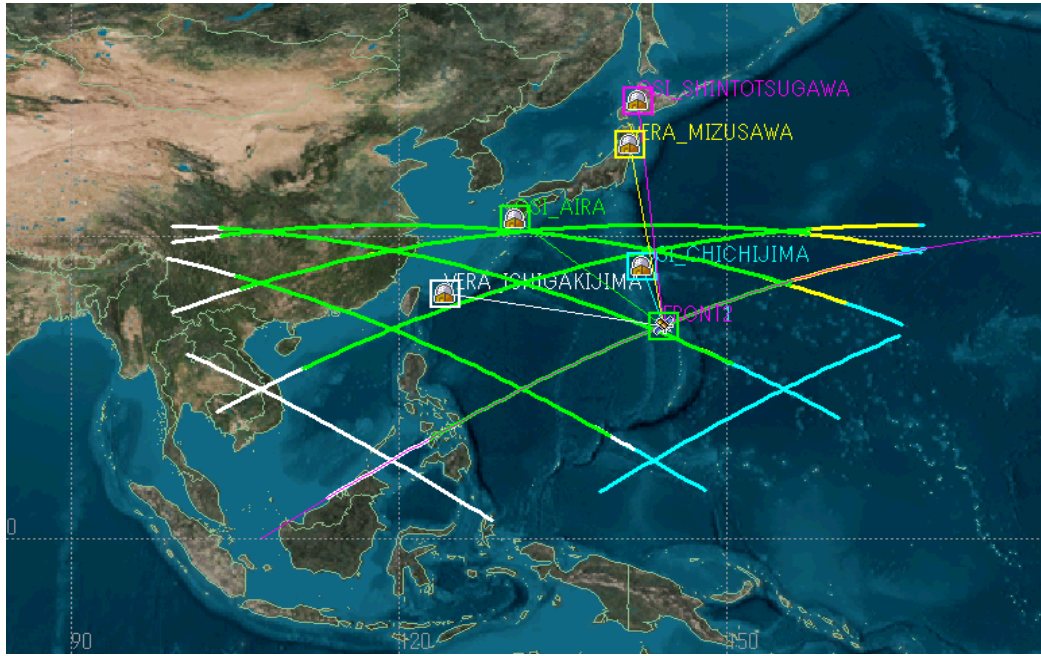


DECIGO



# ΔVLBIによる高精度・準実時間相対軌道推定実験

## ➤ STKを用いた簡易感度解析の例

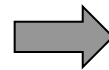


複数局同時可視頻度: 5~6回/1日、複数同時可視時間: 約4~9分間

基線長: 1300~2300 km

$$\Delta\rho_T = \rho_{T-S1} - \rho_{T-S2}$$

$$\Delta\rho_C = \rho_{C-S1} - \rho_{C-S2}$$

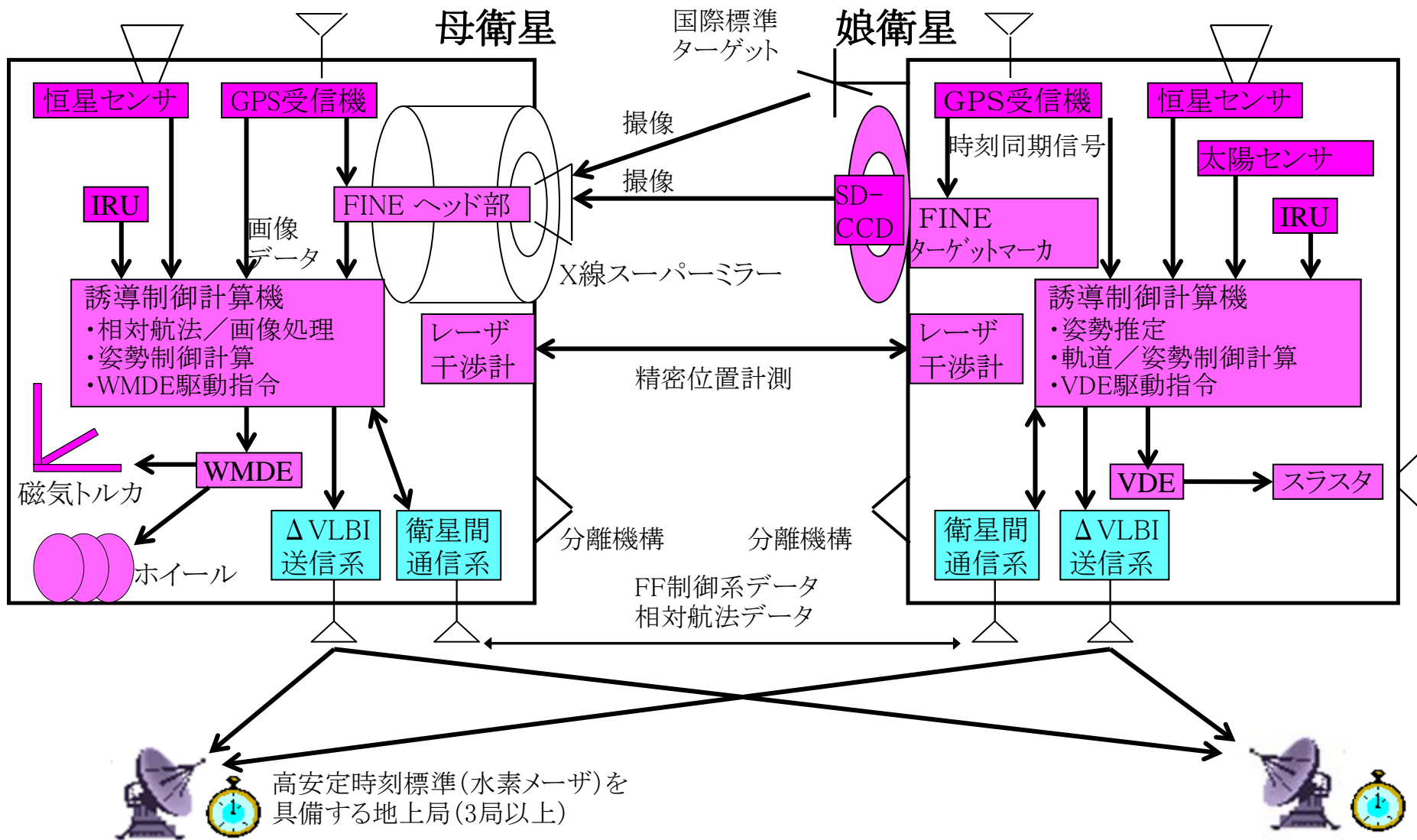


$\Delta(\Delta\rho) = \Delta\rho_T - \Delta\rho_C$  : 観測量

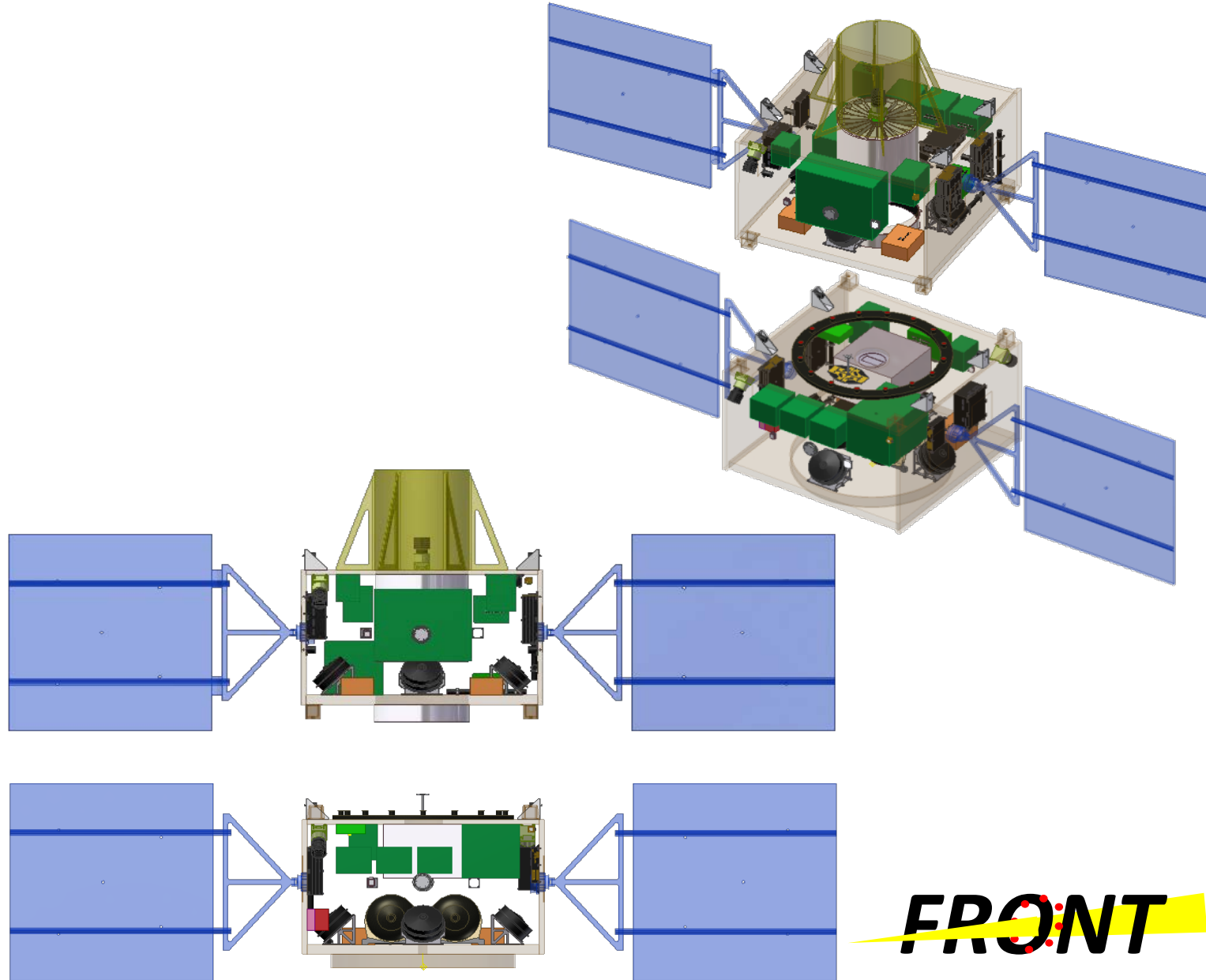
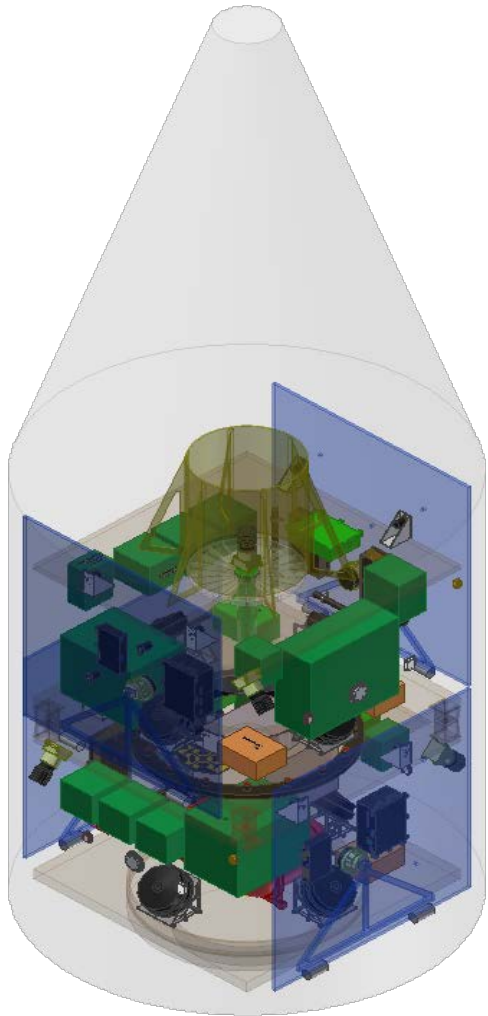
Chaserのalong, cross, radial方向に1 mの変位を与え、観測量に対する感度を解析。

観測量の感度は0.5程度。10psの精度で位相計測できれば、およそ1cmの精度で相対軌道推定が可能。

## 検討のベースライン

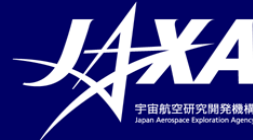


# FRONT衛星システム設計

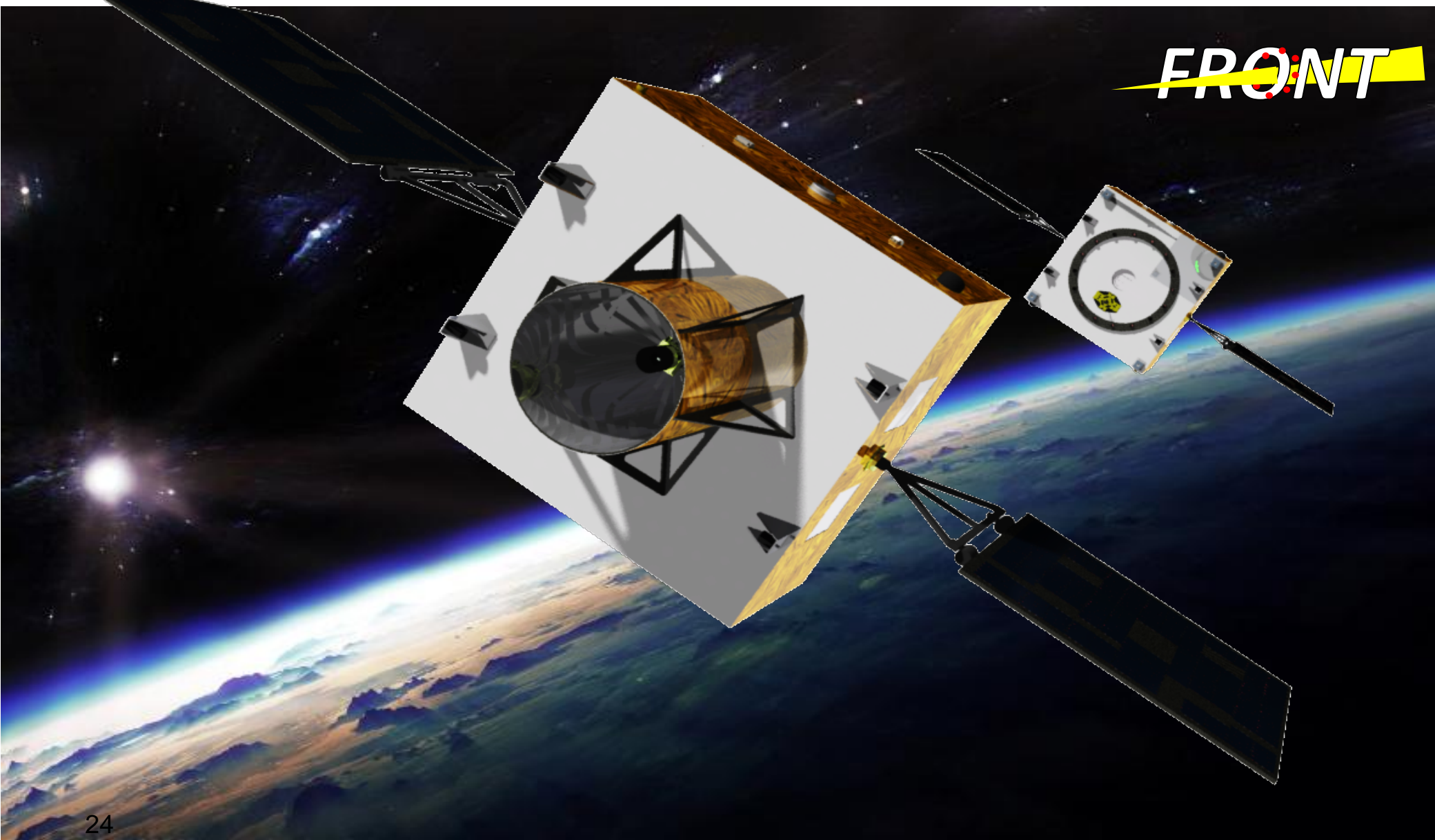


**FRONT**

# FRONT衛星 軌道上飛行イメージ

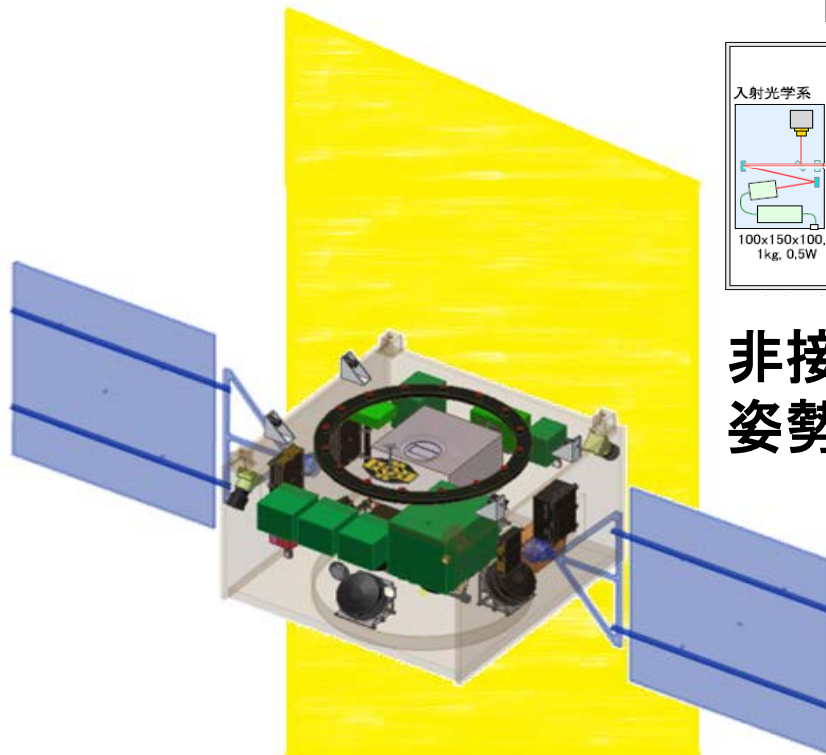


**FRONT**



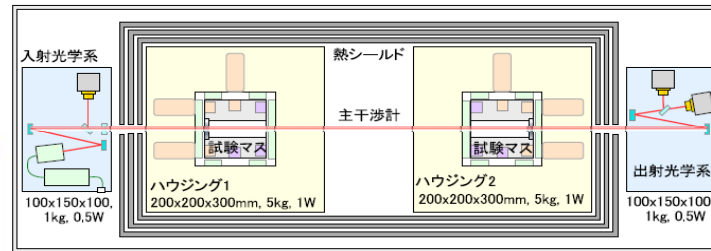


遮蔽板のウェイクに入れて  
大気抵抗、太陽輻射圧軽減



パドルやホイール、  
高ゲインアンテナ等の  
擾乱源を分離

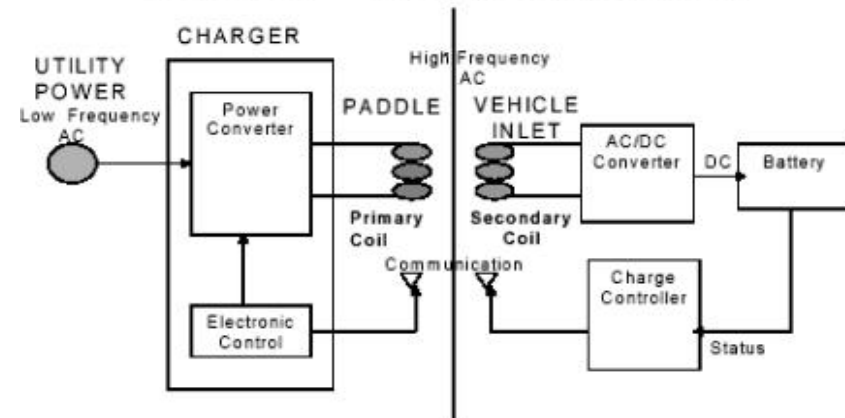
## 高精度観測モジュール



非接触で電力供給  
姿勢制御

非接触電力供給機  
(力伝達機能の付加を検討)

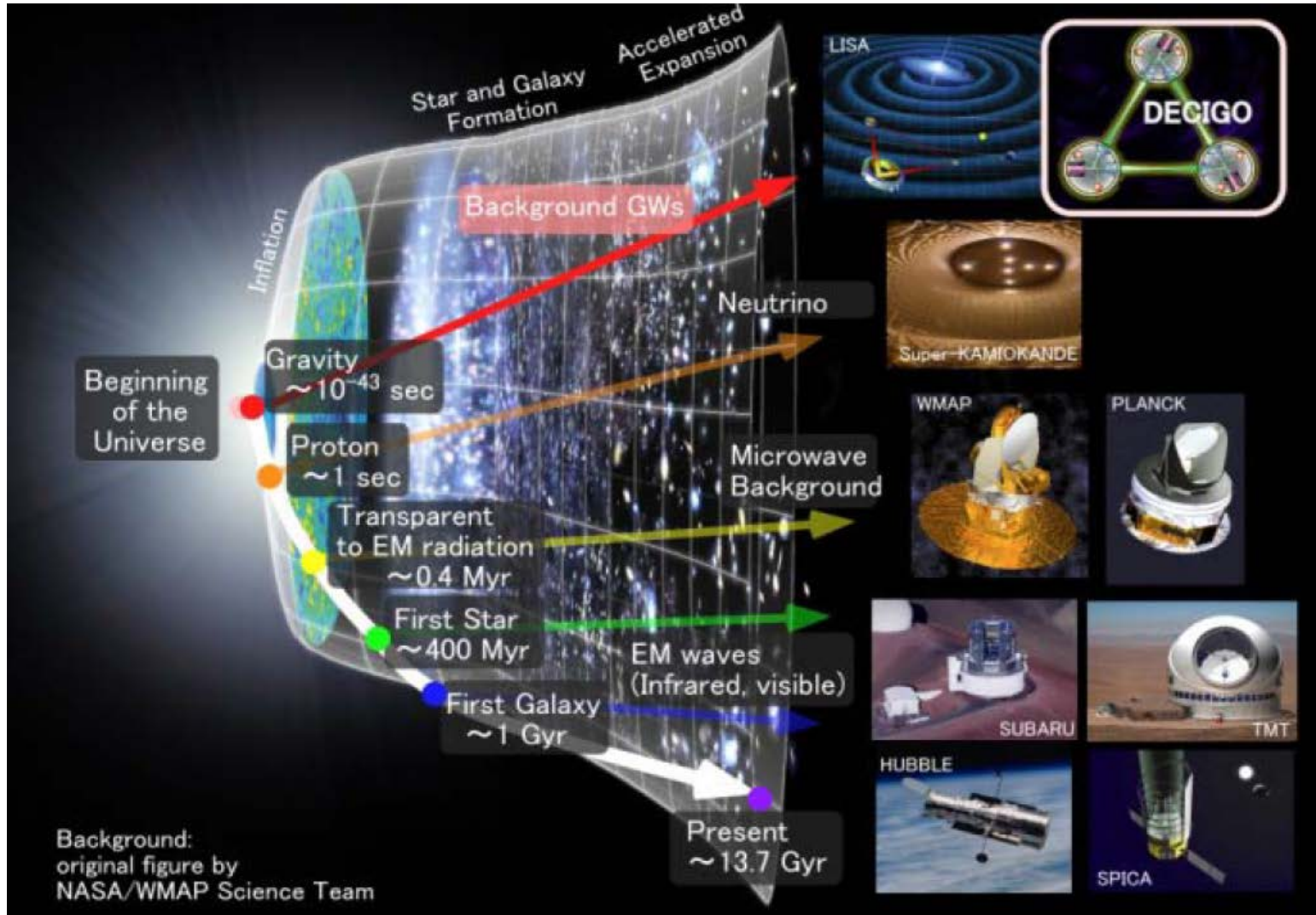
Inductive Charging System



# FFによる重力波望遠鏡DECIGOの意義

重力波による観測により、宇宙の開闢直後（プランク時  $10^{-43}$  秒後）からのインフレーション宇宙の直接観測ができる。

→ ノーベル賞につながる発見が期待できる



- ・フォーメーションフライト(FF)は**衛星サイズという物理的制約を打破できる**画期的な技術。
- ・世界初のFFによるX線望遠鏡システムであるFFASTにより、高精度FF制御系の技術開発を目指している。
- ・DECIGOの実現のためには、FFASTにより軌道上実証を目指している技術を、距離で5桁以上、精度で1桁以上高精度化して、超高精度FF技術を開発する必要がある。
- ・DECIGOに必要な超高精度FF制御系の技術実証を少しでも行うべく、FRONTの検討を行い、提案を行った。
- ・皆様方のご意見を伺って、**DECIGOの実現を目指して**、超高精度FF技術開発を行う計画です。ご指導、ご協力のほど、よろしくお願い申し上げます。