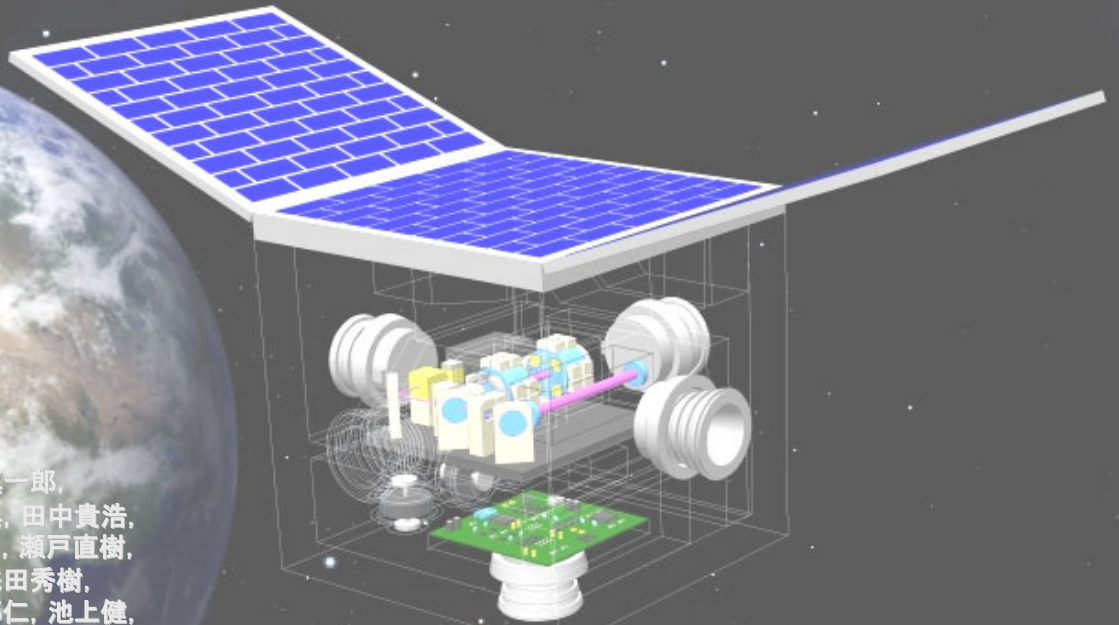
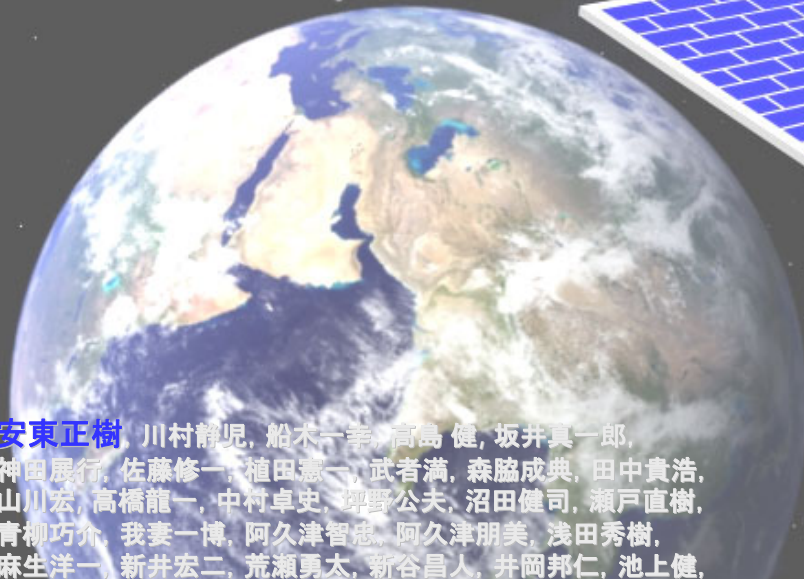


小型重力波検出器 DECIGOパスファインダー



安東正樹, 川村静児, 船木一孝, 高島 健, 坂井真一郎,
神田展行, 佐藤修一, 植田憲一, 武者満, 森脇成典, 田中貴浩,
山川宏, 高橋龍一, 中村卓史, 柳野公夫, 沼田健司, 瀬戸直樹,
青柳巧介, 我妻一博, 阿久津智恵, 阿久津朋美, 浅田秀樹,
麻生洋一, 新井宏二, 荒瀬勇太, 新谷昌人, 井岡邦仁, 池上健,
石川毅彦, 石徹白晃治, 市来淨與, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 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, 奥富聡, 小野里光司, 鎌ヶ迫将悟, 河島信樹, 川添史子, 雁津克彦, 木内建太, 桐原裕之, 工藤秀明, 國中均, 國森裕生, クラウス・ヴェル
ナー, 黒田和明, 小泉宏之, 郡和範, 穀山涉, 苔山圭以子, 古在由秀, 小嶋康史, 固武慶, 小林史歩, 西條統之, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀
親, 佐々木節, 佐藤孝, 柴田大, 真貝寿明, 杉山直, 宗宮健太郎, 祖谷元, 高野忠, 高橋走, 高橋忠幸, 高橋弘毅, 高橋竜太郎, 高森昭光, 田越
秀行, 田代寛之, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 辻川信二, 常定芳基, 徳田充, 徳成正雄, 豊嶋守生, 内藤勲夫, 中尾憲一, 中川憲保, 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, 橋本樹明, 端山和大, 原田知広, 疋田涉, 姫本直
朗, 平林久, 平松尚志, 福嶋美津広, 藤本真克, 二間瀬敏史, 細川端彦, 堀澤秀之, 洪鋒雷, 前田恵一, 松原英雄, 三浦純一, 菱泰志, 宮川治,
三代木伸二, 向山信治, 森岡友子, 森澤理之, 森本睦子, 柳哲文, 山崎利孝, 山元一広, 横山順一, 吉田至順, 吉野泰造

概要

● DECIGOパズファインダー(DPF)の概要

DECIGO-PF

衛星：100cm立方, 100kg級, 1機, 地球周回軌道

フリーマスで構成された基線長10cmのFP共振器

レーザー光源とその安定化システム

ドラッグ・フリーの組み込み

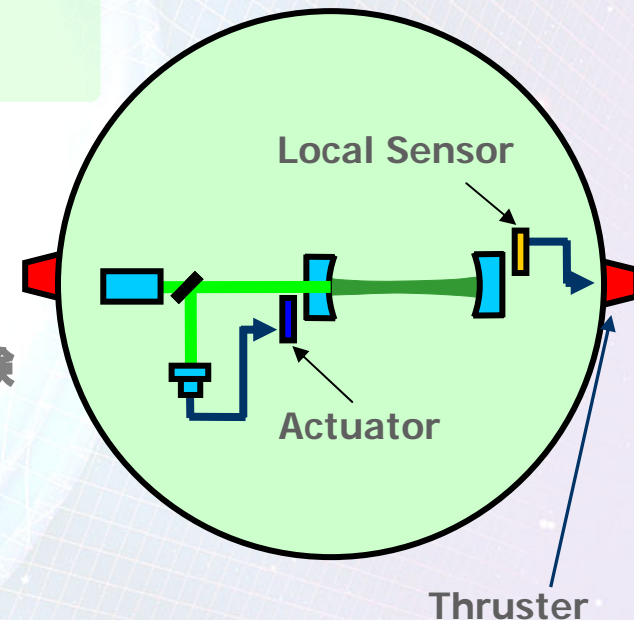


DECIGOのための宇宙実証試験

- (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

重力波の観測

- (5) 小型重力波検出器による低周波数の重力波の観測 (6ヶ月間)
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



目次

1. 重力波とその観測

重力波とその観測の現状

DECIGO

2. DECIGOパスファインダー

概要, 科学的意義

サブシステム

計画と体制

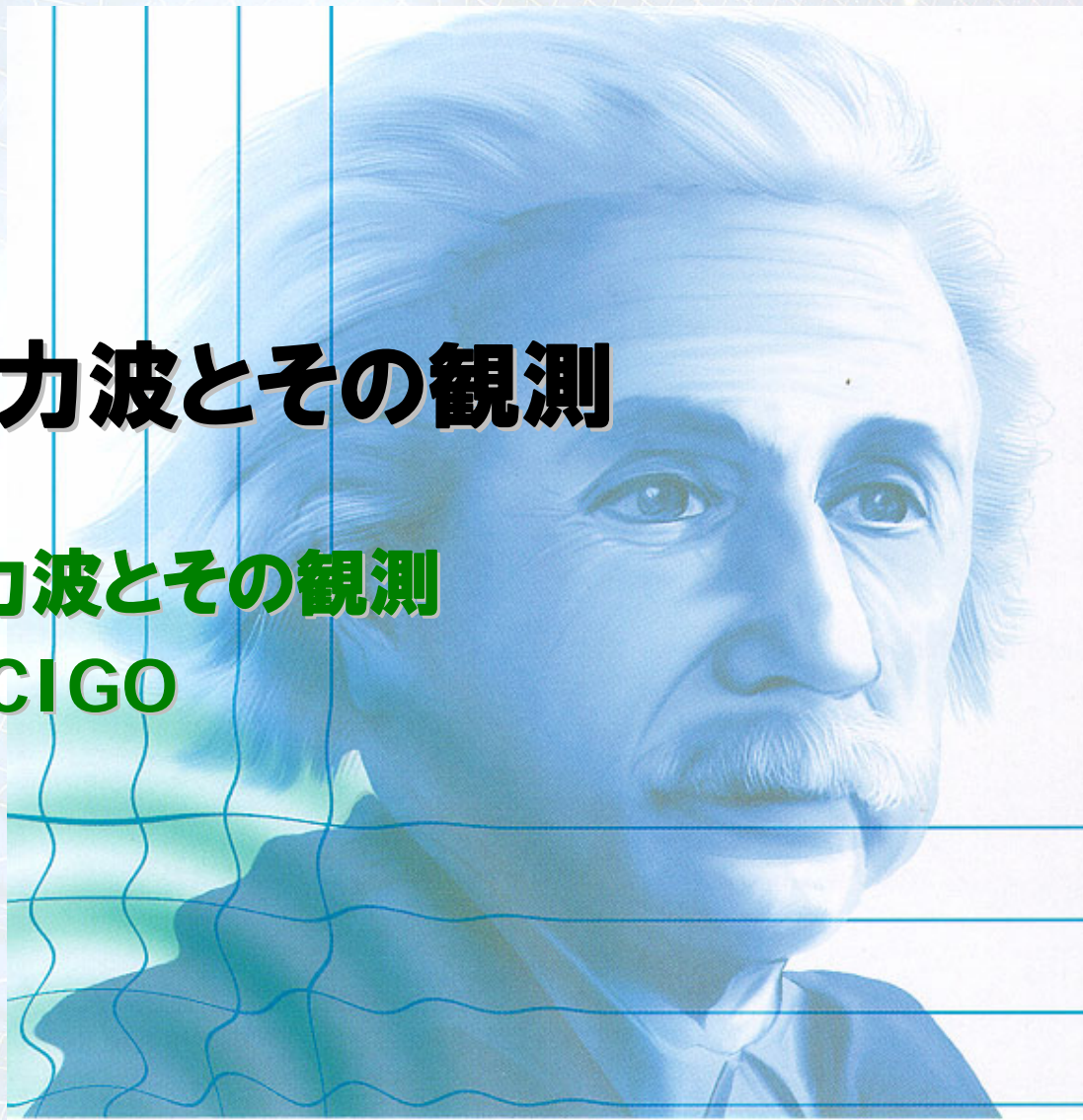
3. まとめ

DPFの位置づけ, 意義

波及効果

1. 重力波とその観測

重力波とその観測
DECIGO



重力波とその観測 (1)

● 重力波 (時空のさざなみ)

重力波

A. Einstein

光速で伝播する時空の歪み
一般相対性理論から導かれる
(アインシュタイン方程式の波動解)

1916年: アインシュタインが予言
1989年: 連星パルサーの観測
によって存在を証明

質量の加速度運動により生成
強い透過力
(物質との相互作用が小さい)



「重力波天文学」

電磁波による天文学とは質の異なった情報
天体内部のダイナミックな運動の観測
電磁波では見ることのできない初期宇宙

電磁波

J.C. Maxwell

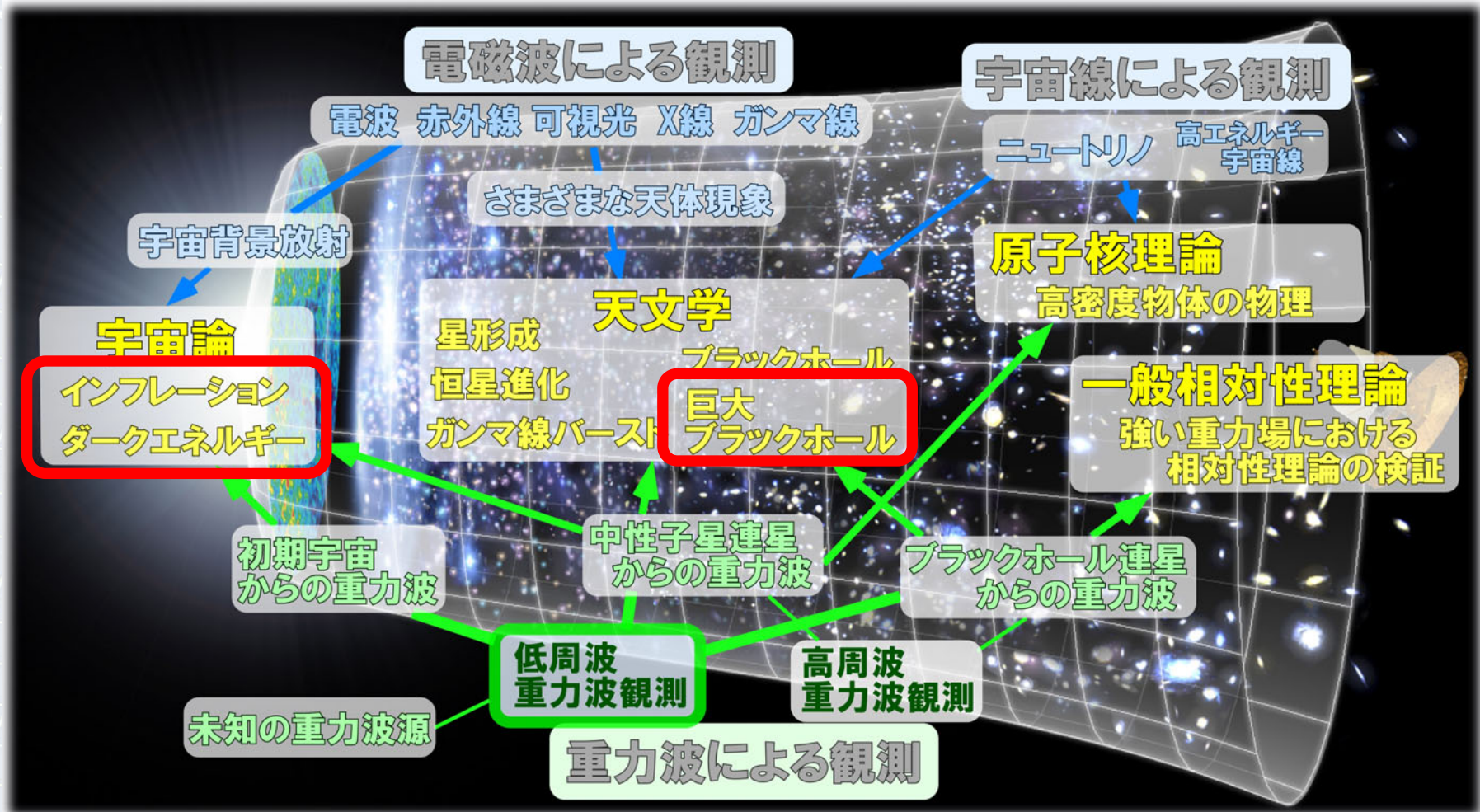
光速で伝播する電磁場の変動
電磁気学から導かれる
(マクスウェル方程式の波動解)

1864年: マクスウェルが予言
1888年: ヘルツの実験で発見

電荷の加速度運動により生成
通信・観測などで広く利用されている

重力波とその観測 (2)

●重力波による天文学



重力波とその観測 (3)

● 重力波の検出

重力波の効果

自由質点間の距離の変化

大きさを持った物体への潮汐力

横波

四重極特性 (直交する方向で差動に変動)

2つの偏光 (+モード, xモード)



これらの性質を利用して検出

共振型検出器

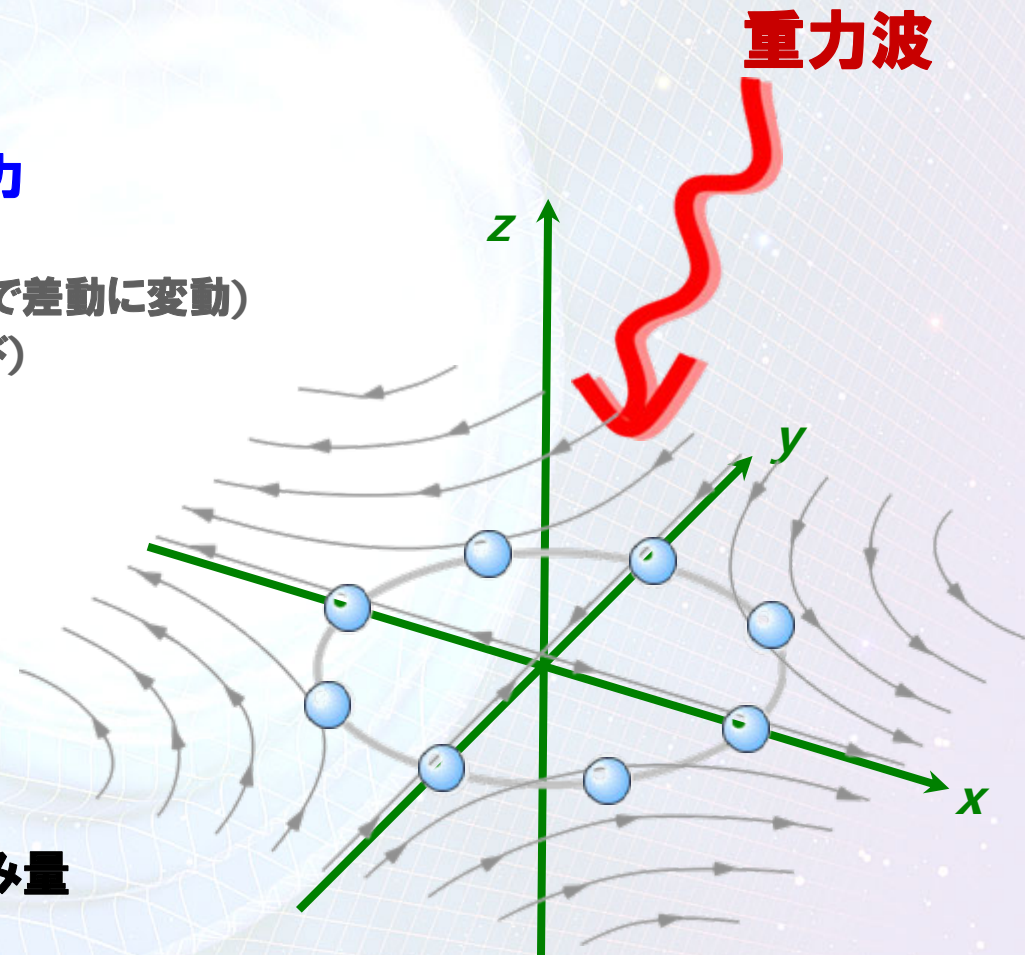
自由質点型検出器

(レーザー干渉計型)

重力波の振幅 h : 無次元の歪み量

$$h = 10^{-21}$$

→ 1mの距離が 10^{-21} m 伸縮する



重力波とその観測 (4)

● 重力波観測の現状

検出の試み：1960年代より行われる

現在, 大型検出器が稼働中

レーザー干渉計型：5台, 共振型検出器：4台



稼働中の重力波検出器

連星中性子星合体イベント：50kpc～14Mpcの観測レンジ

→ 我々の銀河, 近傍銀河でイベントがあれば検出可能

ただ... そのようなイベントは極めて稀 (10^{-5} event/yr/gal)



本格的な天文学のためには、

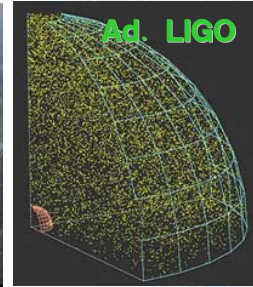
高感度化 → より多くの銀河をカバーする

多周波数での観測 → さまざまな対象を観測, 定常的な重力波の観測

重力波の周波数 ~ (変動速度)/(系のスケール)

重力波とその観測 (5)

● 将来計画



現在

2010

2015

2020

2025

地上検出器
10-1kHz
より遠くを見る

LIGO(米)
TAMA(日)

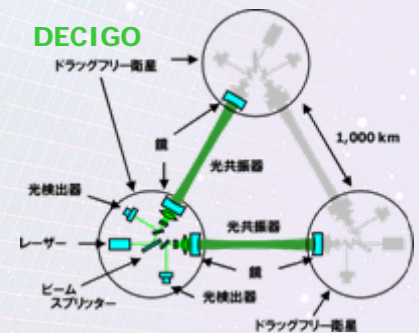
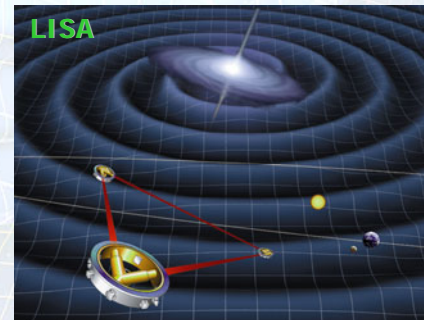
Ad. LIGO
LCGT
~10 event/yr
のイベントレート

宇宙検出器

長基線長がとれる
地球重力場変動の影響がない

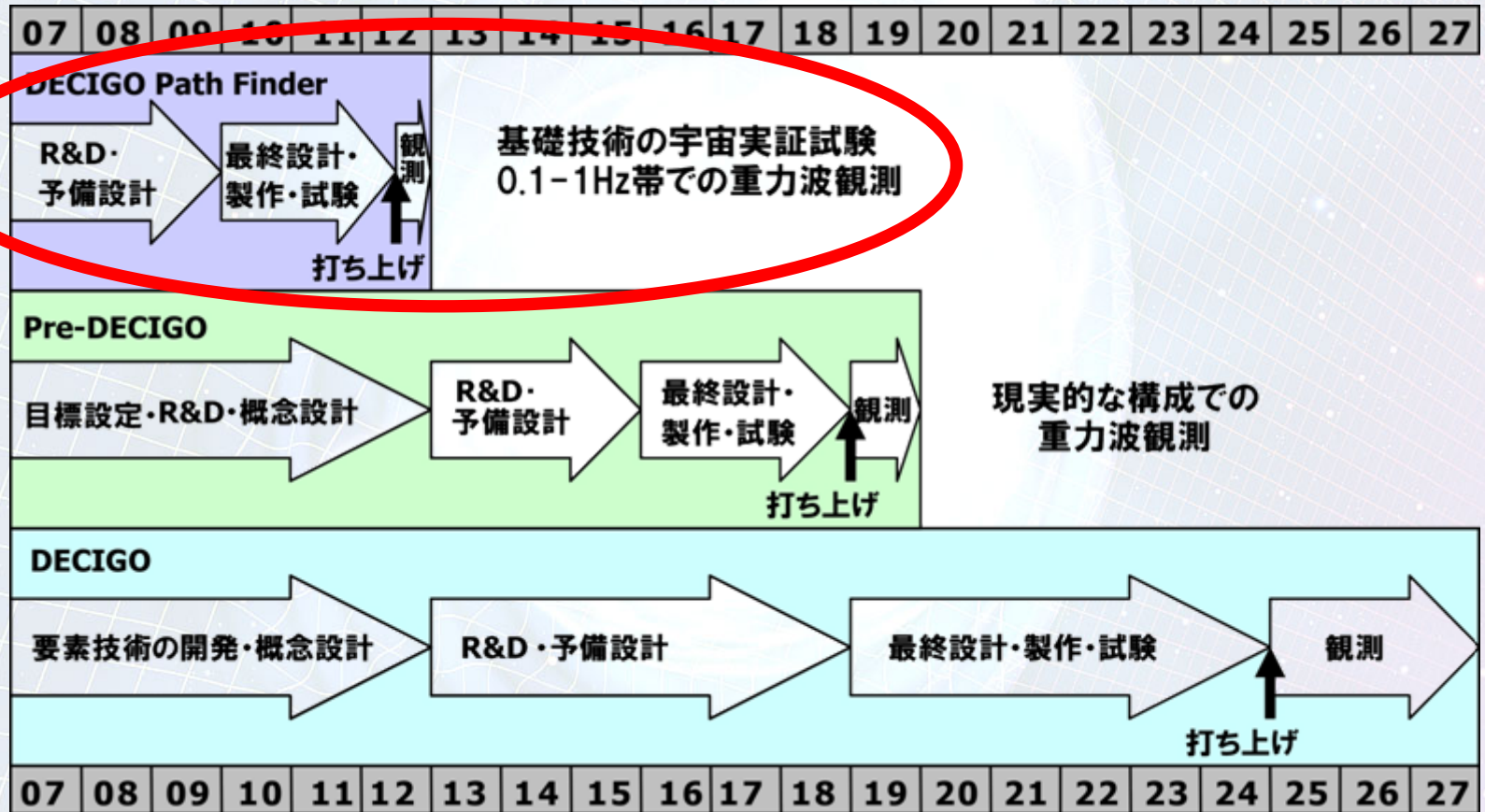
LISA(NASA/ESA)
0.1mHz-10mHz
確実な重力波源

BBO
DECIGO
0.1Hz帯
宇宙論的な重力波



重力波とその観測 (8)

● DECIGOのロードマップ



LPF

LISA

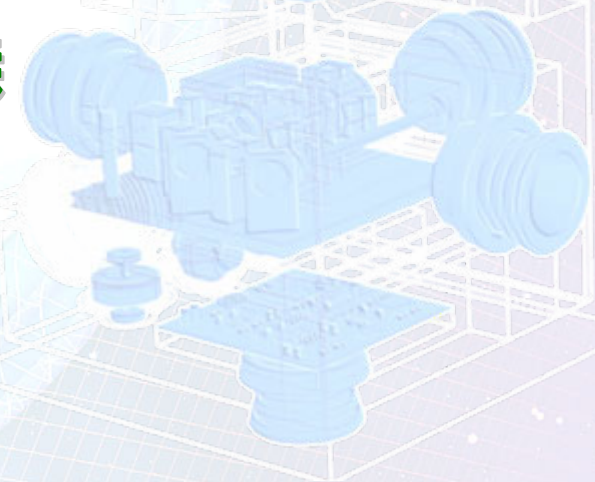
Ad. LIGO
LCGT

2. DECIGOパスファインダー

概要, 科学的意義
サブシステム詳細
計画と体制

2. DECIGOパスファインダー

概要, 科学的意義
サブシステム詳細
計画と体制



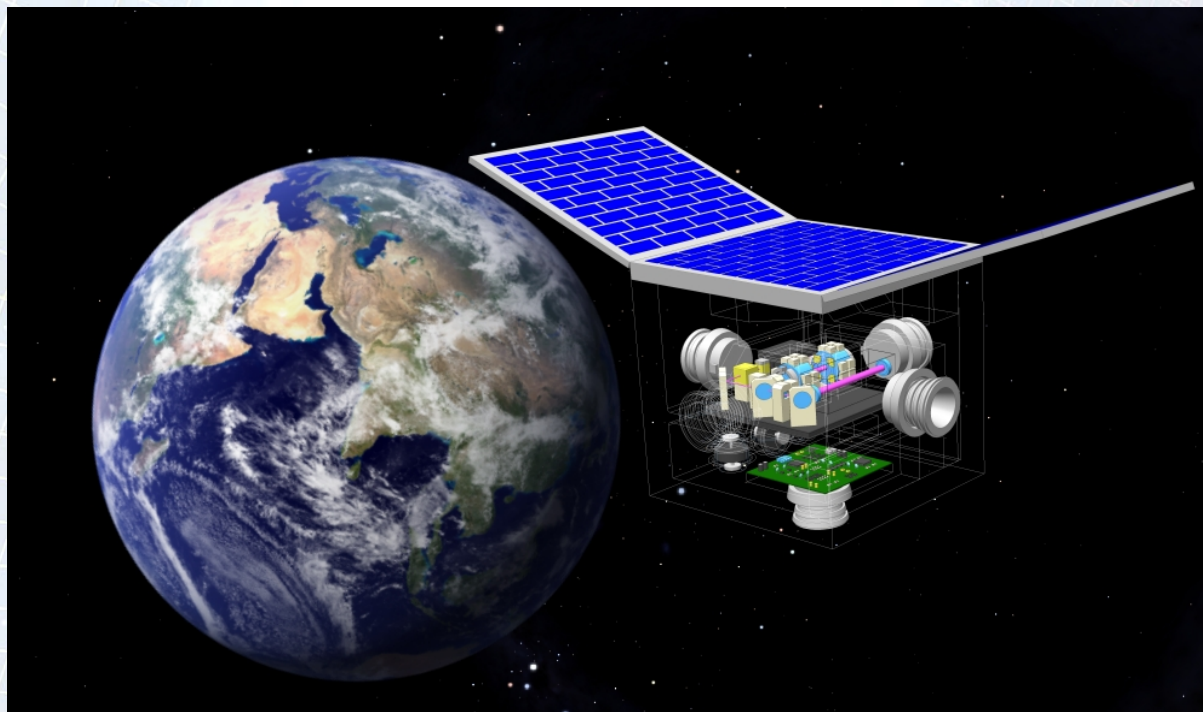
DECIGO-PF (1)

● DECIGO-PF

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



最初の前哨衛星: DECIGO パスファインダー (DPF)
(DECIGOの1つの腕を1台の衛星内に搭載)



DECIGO-PF (2)

● DECIGOパズファインダー(DPF)の概要

DECIGO-PF

衛星：100cm立方, 100kg級, 1機, 地球周回軌道

フリーマスで構成された基線長10cmのFP共振器

レーザー光源とその安定化システム

ドラッグ・フリーの組み込み



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

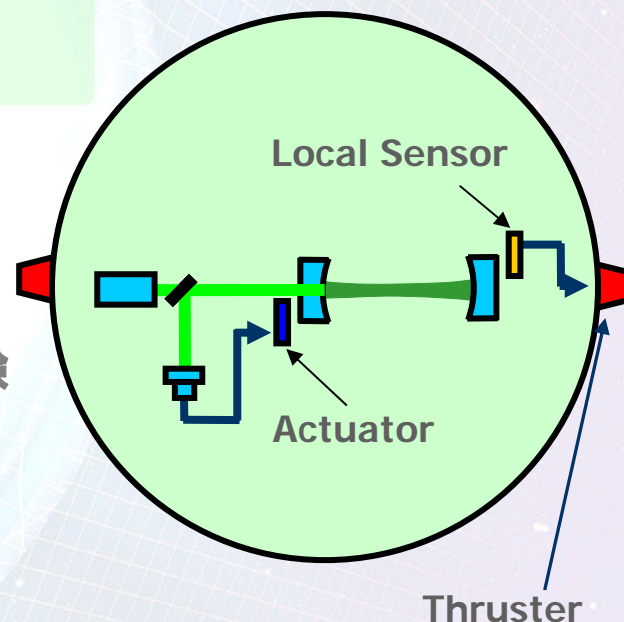
重力波の観測

- (5) 小型重力波検出器による低周波数の重力波の観測 (6ヶ月間)

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-PF (3)

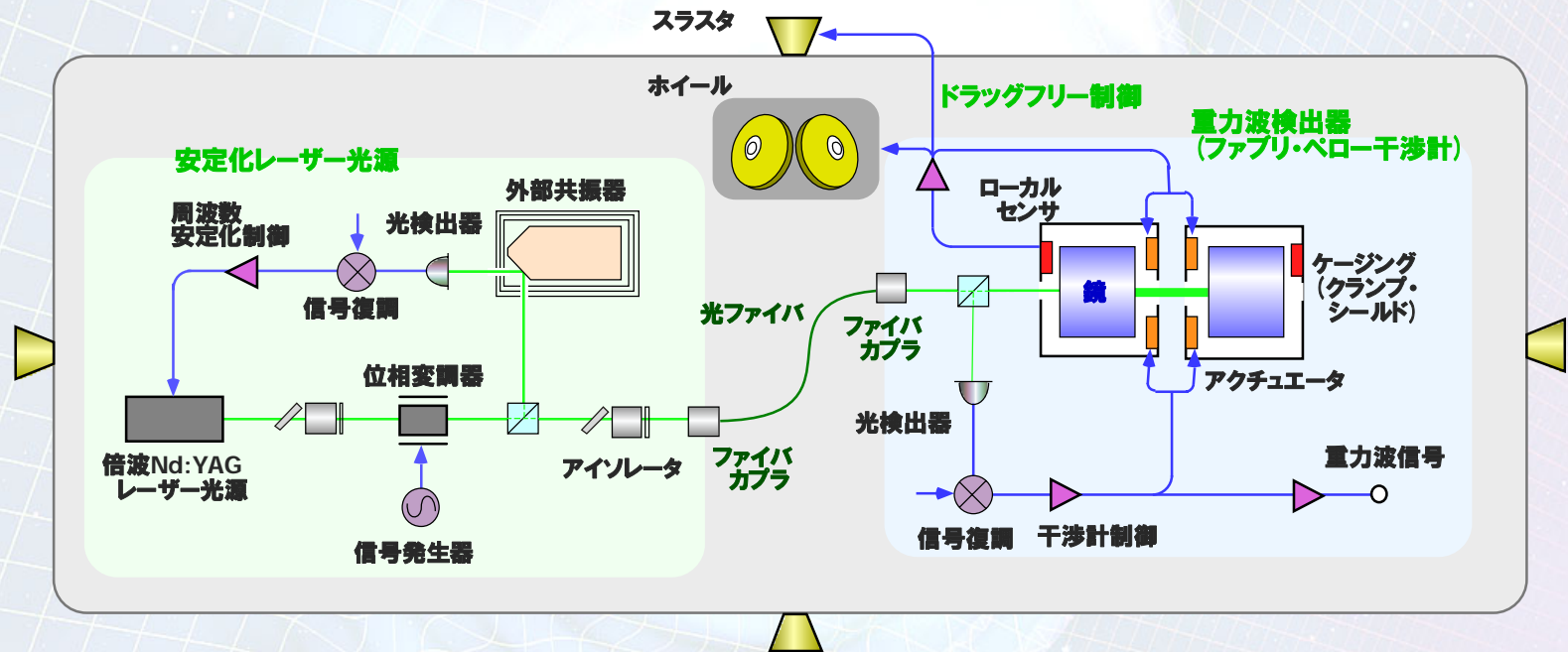
● DPFミッション機器構成

ミッション機器重量 : 20-100kg
ミッション機器空間 : 40-70 cm立方

ドラッグフリー

ローカルセンサで相対変動検出

→ スラスト・ホイールにフィードバック



レーザー光源

Nd:YAGレーザー

出力 25mW

外部共振器による周波数安定化

ファブリ・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-PF (4)

● DPF軌道

軌道を選択

実現性の高さ (コスト, 打ち上げ機会)

運用のやり易さ (電力の供給, 通信)

地球重力場などによる雑音



太陽同期極軌道 (昼夜境界線)
高度 750km



地球の影に入らない

→ 連続的な電力供給

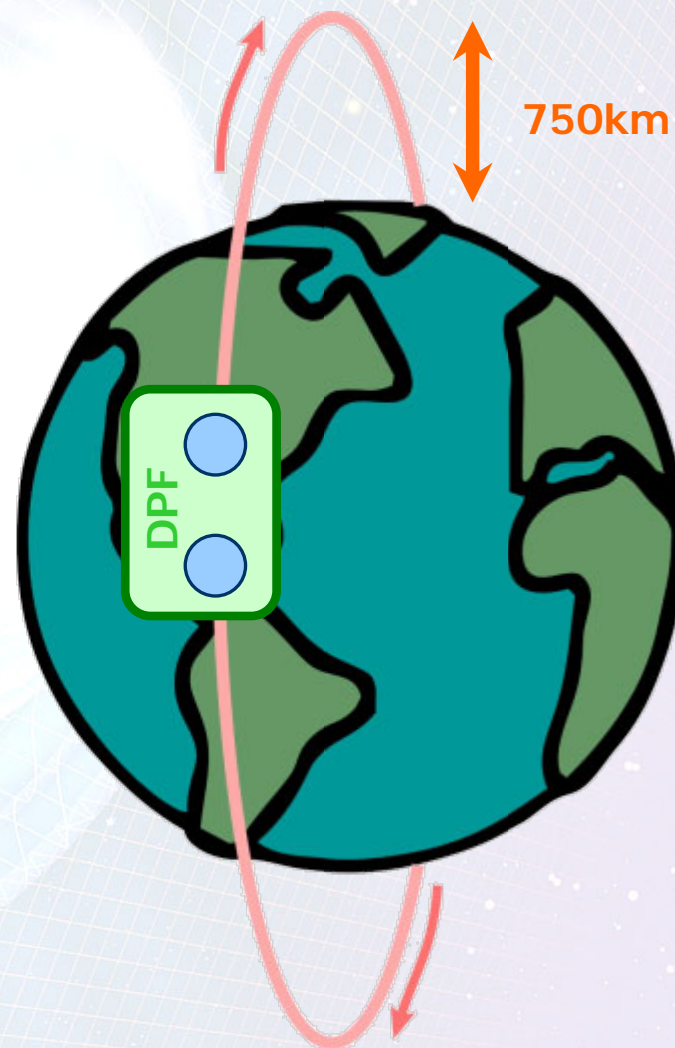
運用のやり易さ (電力の供給, 通信)

高度は高い方がよい

地球の影響をできるだけ低減

(重力場, 地磁気, 残留大気)

ただし、必ずしもこの軌道でなくても良い



DECIGO-PF (5)

●DPF雑音源の見積り

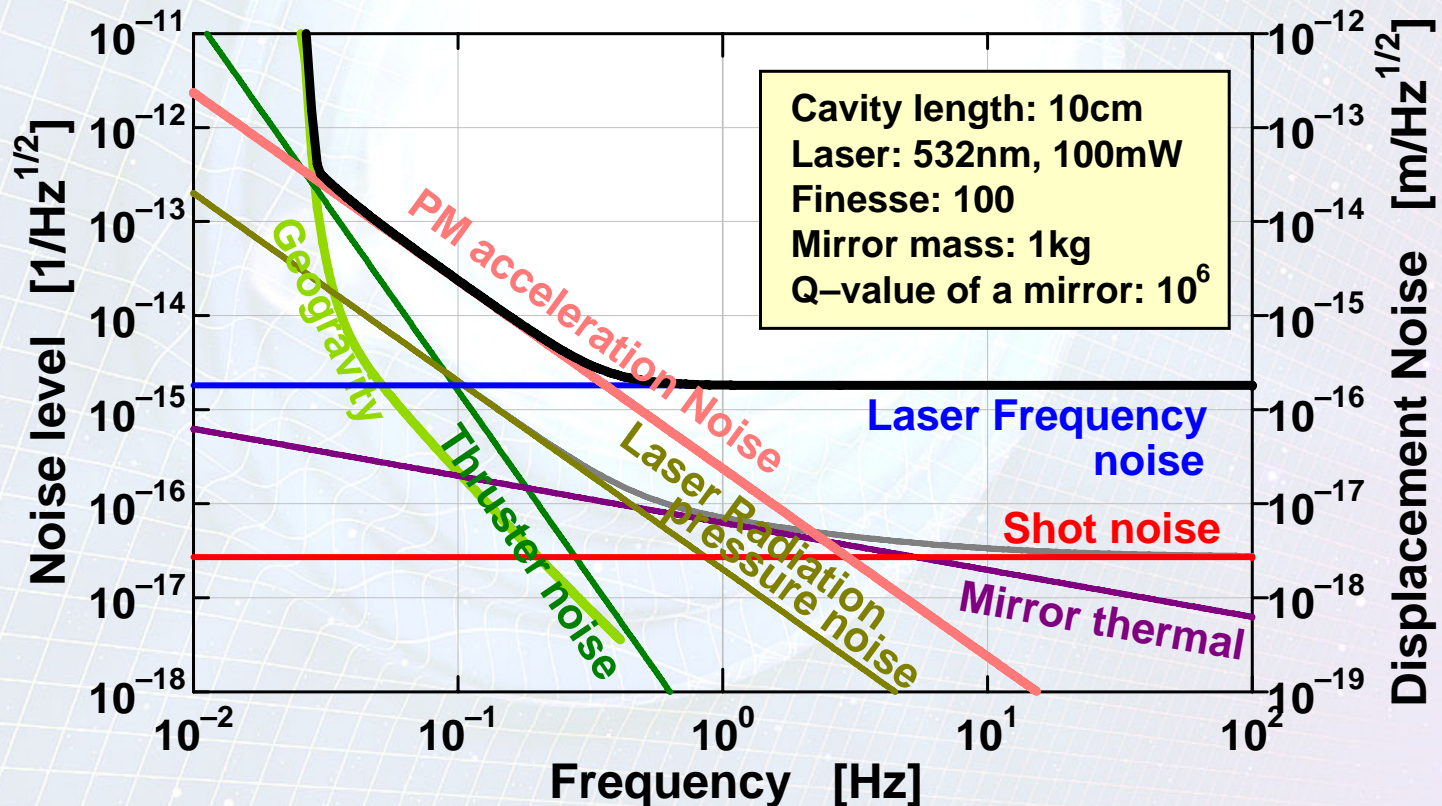
外乱・雑音要因	力の大きさ [N]	鏡の相対加速度 [m/s ²]	干渉計加速度雑音 [m/s ² /√Hz]	干渉計変位雑音 [m/√Hz]
試験質量に直接働く外乱				
重力	太陽	6.0×10^{-3}	7.9×10^{-15}	
	月	3.3×10^{-5}	1.7×10^{-14}	
	衛星	1.5×10^{-9}	9.9×10^{-10}	
	地球	7.8	3.3×10^{-12}	3.0×10^{-16}
電磁力	衛星磁場	1.2×10^{-14}		1.5×10^{-16}
	ローレンツ力	3.5×10^{-14}		6.9×10^{-18}
その他	残留気体分子			8.6×10^{-16}
	宇宙線の衝突	1.1×10^{-17}		1.8×10^{-18}
	熱輻射			1.5×10^{-16}
衛星に働く外乱				
	太陽輻射圧	1×10^{-5}		1.6×10^{-18}
	地球大気の摩擦	7×10^{-6}		
	衛星スラスタ	1×10^{-4}		6.3×10^{-17}
干渉計の雑音				
	散射雑音			2.7×10^{-18}
	レーザー輻射圧	5×10^{-8}	8.2×10^{-17}	
	鏡の熱雑音			2.0×10^{-17}
	光源周波数雑音			1.8×10^{-16}
合計 (2乗和の平行根)			9.4×10^{-16}	1.8×10^{-16}

DECIGO-PF (6)

● 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: 熔融石英
温度 : 293K

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



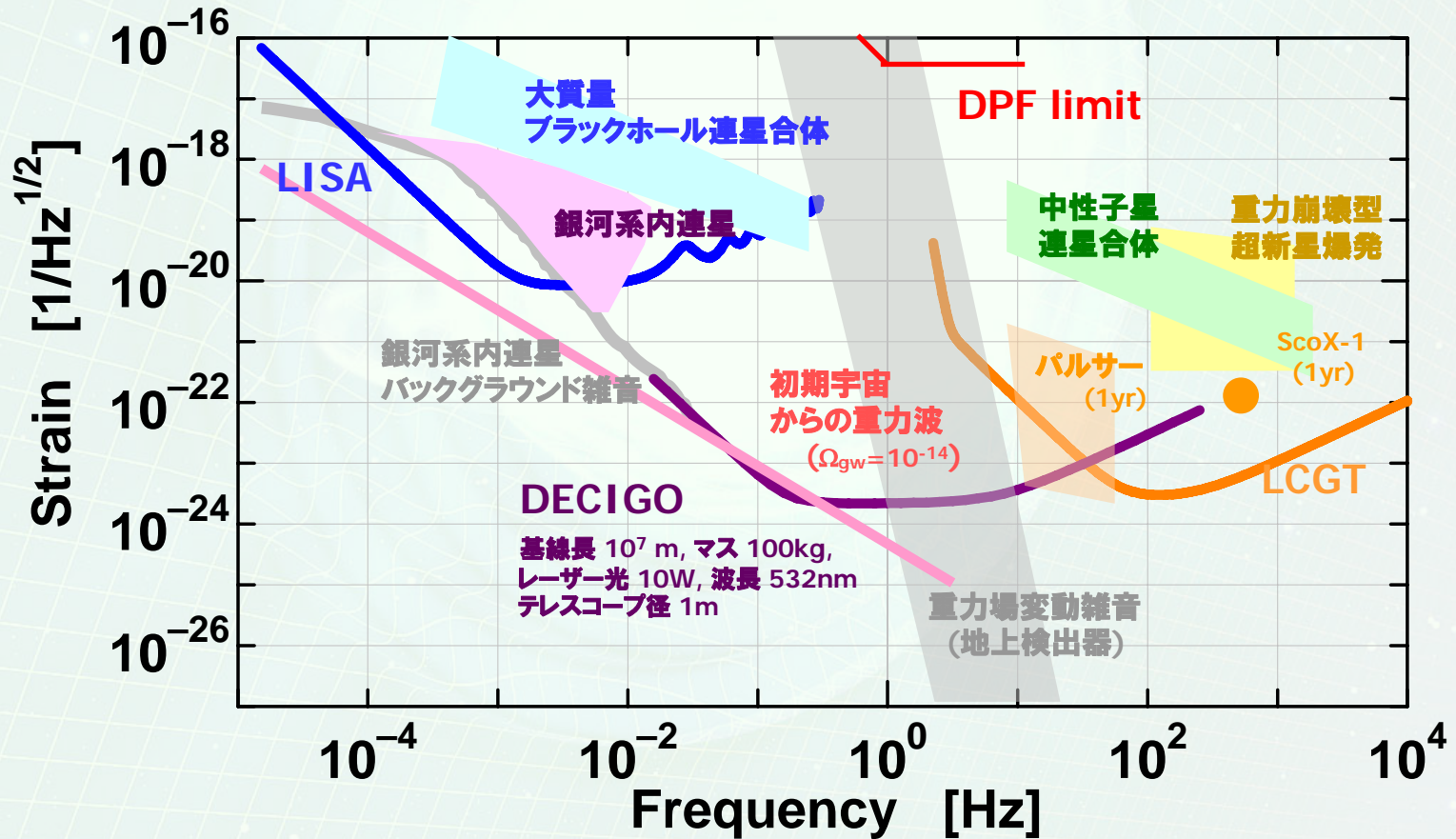
DECIGO-PF (7)

●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、この周波数帯での観測はない

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-PF (8)

● DPFで期待できる重力波源

BH準固有振動からの重力波

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

$$f \sim 3 \times 10^{-4} \left(\frac{10^8 M_\odot}{m} \right) \text{ [Hz]}$$

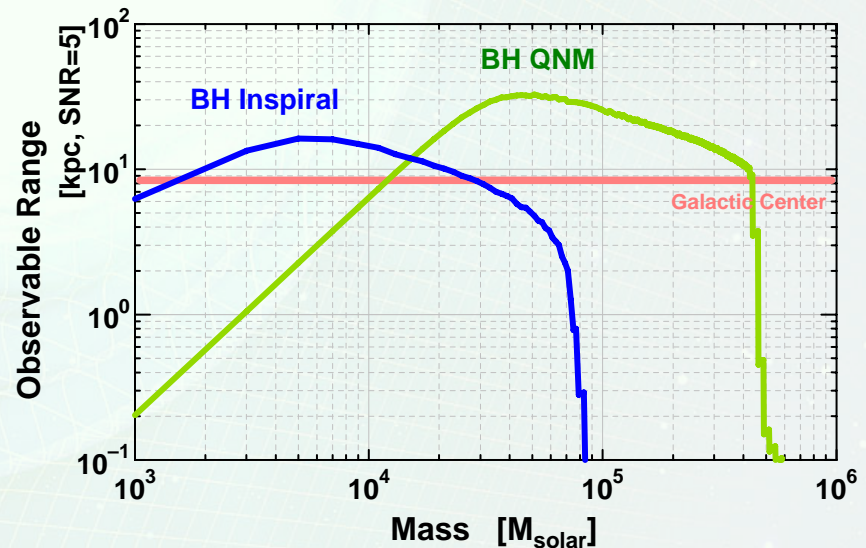
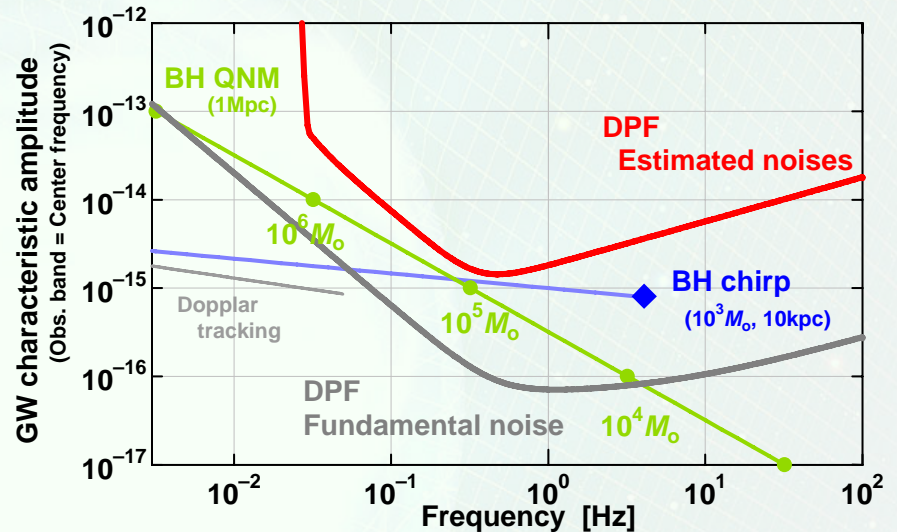
中間質量ブラックホール合体

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

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

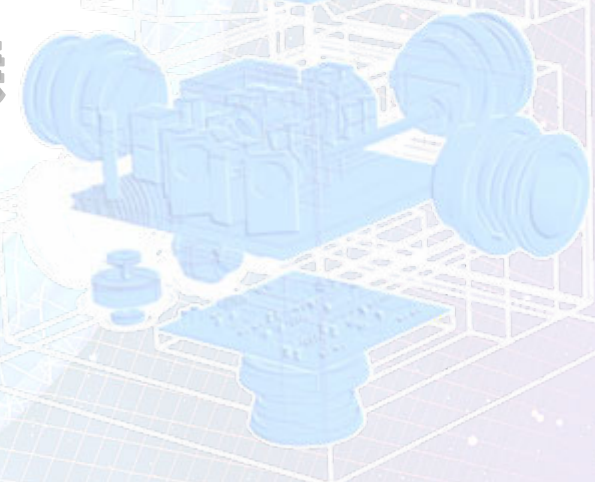
観測時間(~数千秒)の積分
 テンプレートによるデータ処理 \rightarrow SNRをかせぐ

DPFでは、我々の銀河中心での
 イベントを SNR~5 で検出できる



2. DECIGOパスファインダー

概要, 科学的意義
サブシステム詳細
計画と体制



DPFサブシステム (1)

● DPFサブシステム構成

DPFをサブシステムに分割

→ 各サブシステムで仕様・要求値を検討



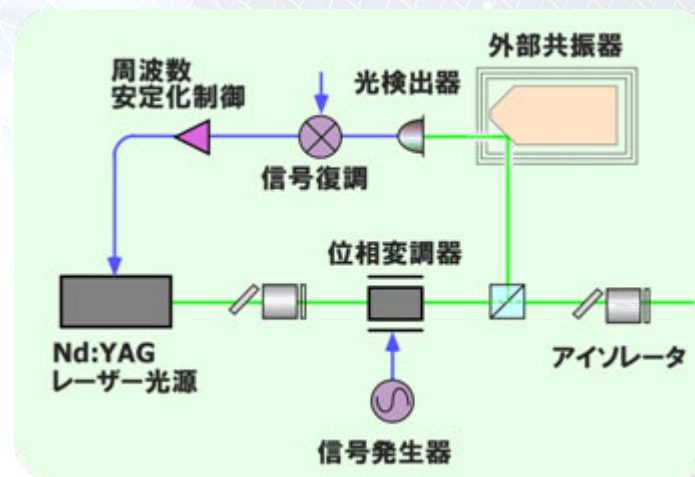
DPFサブシステム (2)

安定化レーザー光源

干渉計にレーザー光を供給

大きさ, 重量, 消費電力, 耐被爆,
機械的安定性, 寿命, 冗長性
雑音特性 $1\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ (0.1-1 Hz)

⇒ **固体レーザー光源**
+ **外部共振器による安定化**



レーザー光源

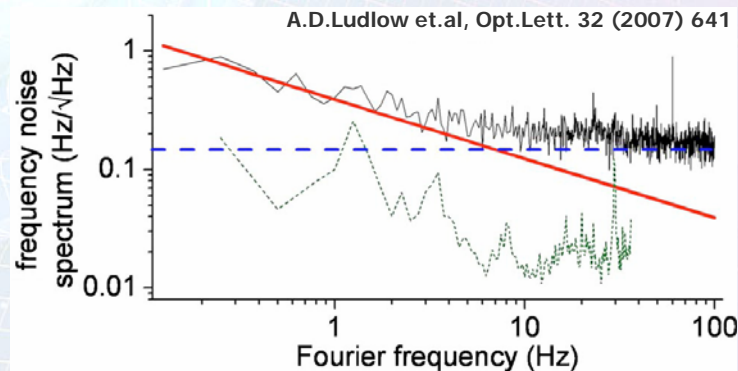
半導体レーザー励起Nd:YAGレーザー
衛星搭載仕様 (TESAT Spacecom社)
波長: 1064nm, 出力: 25mW,
体積: 1/, 消費電力: 10W



武者氏資料より

周波数安定化

地上実験: $1\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ は実現されている
低周波防振, **0.5mKの温度安定度**
→ 衛星内の振動, 温度環境が重要



DPFサブシステム (3)

● 干渉計

重力波検出器の本体部分

慣性空間に浮かんだ試験マス(鏡)間の
距離をレーザー干渉計で計測する
ファブリー・ペロー干渉計

→ DECIGOのミニチュア

干渉計基線長制御

鏡に働く外乱 (重力, 電磁力など) を抑圧
干渉計が動作することが必要

<< レーザー光の波長 ($1\ \mu\text{m}$)

余計な雑音の影響を避ける

➡ 要求値: $\sim 10^{-10}$ m 程度

(地上での重力波検出器: 10^{-13} m 程度)

鏡 (試験マス)

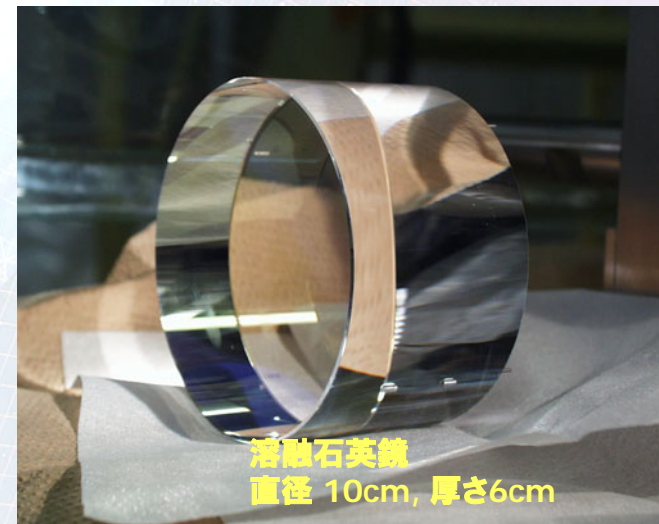
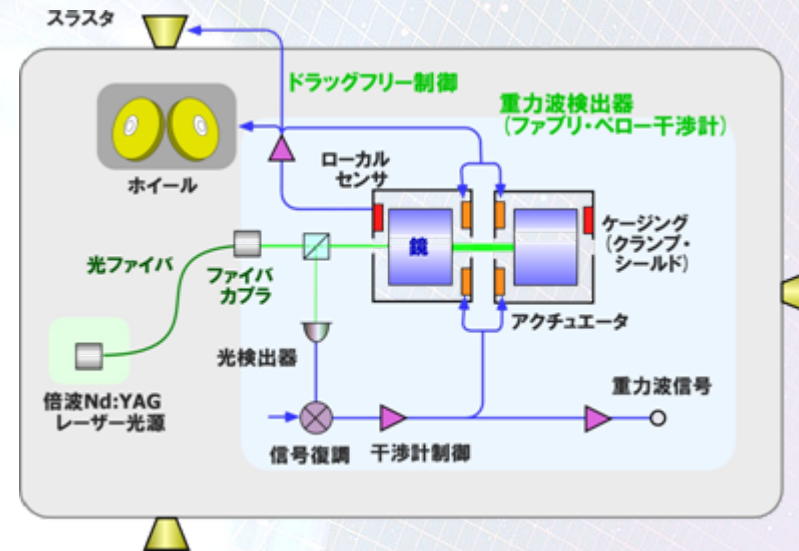
光学特性: 共振器を構成できるだけの性能
光損失, 散乱, 透過性など

機械特性: 機械強度, 雑音の影響

低磁化率, 高密度, 高質量, 高強度

➡ 熔融石英によるモノシリックミラー

質量: 1 kg, 円柱形 ($\phi 100, t 60\text{mm}$)



DPFサブシステム (4)

●ハウジング

ミッション機器を収めるフレーム

シールド, 温度安定化 (~1mK)

試験マス(鏡) を収める器

衛星脱ガスの影響排除

クランプ・リリース機構

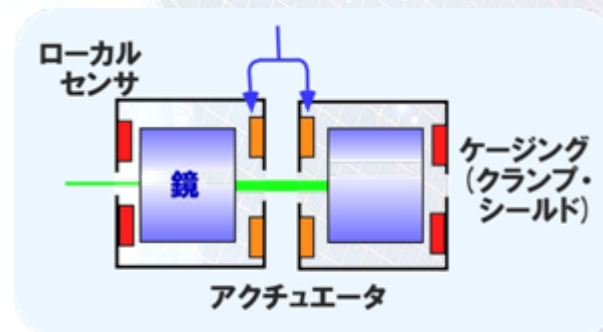
打ち上げ時の耐衝撃性, ソフトリリース

繰り返し動作, 信頼性

ローカルセンサ, アクチュエータ

衛星-試験マス相対変動を検出・駆動 (非接触)

→ 静電型センサ/アクチュエータ, フォトセンサ



LPF クランプ・
リリース機構
デザイン

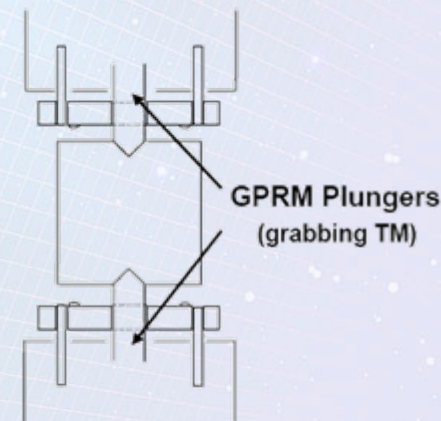
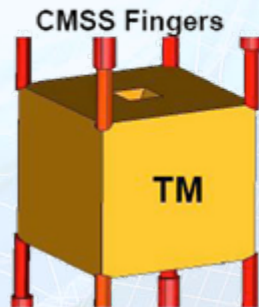
強力なクランプ
微調節用ポジションナ

CMSS Fingers
supporting Test Masses
during Launch and
Ground Handling

GPRM Plungers
(in recessed position)

CMSS

Load up to 3000 N



TM held in center position by the GPRM

R.Gemdt, W.Fichter et al,
6th Int. LISA Symp. (2006)

DPFサブシステム (5)

●ドラッグフリー制御

衛星変動:

(重力・電磁力などを介して) → 試験マス変動

⇒ 試験マスを基準に衛星位置を制御し
衛星に働く外力の影響を抑える

試験マスが衛星にあたらないこと

衛星変動が干渉計に雑音を及ぼさないこと

→ 衛星へのDC的な力

(太陽輻射圧 $10 \mu\text{N}$) を打ち消す

衛星にかかる外乱

(太陽輻射圧雑音 $2.5 \times 10^{-9} \text{ N/Hz}^{1/2}$)

よりも衛星変動を安定化する



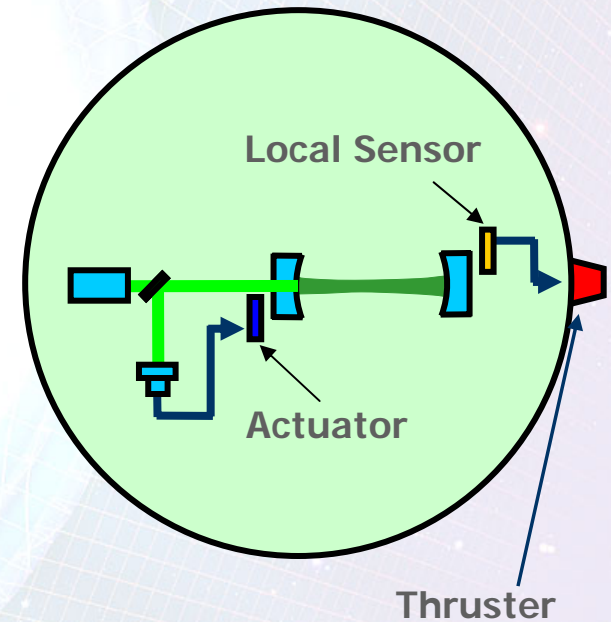
ドラッグフリー制御に対する要求

0.1 Hzでの制御ゲイン $K > 40$

制御帯域 10 Hz 以上

ただし、スラスト推力雑音: $\delta F_{\text{thruster}} < 10^{-7} \text{ N/Hz}^{1/2}$

衛星-試験質量間カップリング係数: $K < 10^{-6}$ とする



DPFサブシステム (6)

●スラスト

スラストに対する要求値

- 最大推力 $100 \mu\text{N}$ (推力可変)
- 推力雑音 $\delta F_{\text{thruster}} < 10^{-7} \text{ N/Hz}^{1/2}$
- 応答速度 10 Hz以上
- トータルインパルス : 10^4 Ns
(半年以上の運用寿命)



スラスト仕様見積り (船木氏)

- 重量: 4 kg
(イオンスラスト, 推進剤, 制御回路, 電源)
- 電力: 20W
(現状での値 → さらに1/5程度は可能)

船木氏資料より

100 μN 級スラストの候補

スラストタイプ

Ion Thruster



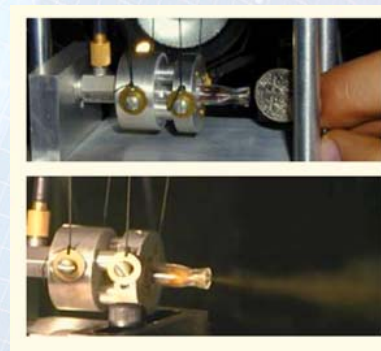
- 推力制御: 電圧/ガス圧など
- 応答速度: <500ms ?
- 推力ノイズ
その原因: 電流・熱・ハルブ・放電

FEEP Thruster



- 電圧
- <10ms
- $0.1\text{mN/Hz}^{1/2}$
- 電流・熱・放電

Cold Gas Jet



- ガス圧
- <100ms
- $500\text{mN/Hz}^{1/2}$
- 流れ・ハルブ

DPFサブシステム (7)

観測とデータ取得・処理

DPFでの観測と得られるデータ

連続観測による時系列データ

→ 波形を解析し、重力波信号を探す

理想: 常時データ取得 (検出確率 \propto 稼働率)

観測周波数帯 (0.1 ~ 1Hz), 制御帯域 (~10Hz)

よりも十分高いサンプリングレート

データレート

目安: 約 600 kbps

主な信号 16bit, 32ch, 1kHz = 512 kbps

モニタ信号 16bit, 128ch, 32Hz = 32 kbps

メモリ容量

目安: 約 6.5 GByte

(必要なら ダウンサンプリング・圧縮で1/100 にする)

1日分のデータを保持する

600 kbps x (24x60x60) sec / 8 = 6.5 GByte

計算能力

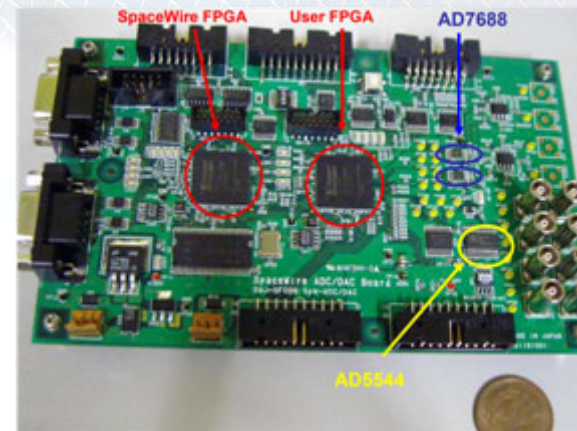
軌道上で波形解析 → イベント候補を選別

マッチド・フィルタリング: 波形テンプレートとデータの相関

連星BH合体: 継続時間 ~ 数千秒

テンプレート数: 10^5 個

→ リアルタイム解析には 10Mflops の計算能力が必要



データ取得試験用ボード
ADC: 16bit, 16ch, 2kHz

(参考)

衛星通信能力: 80Mbps

衛星可視時間: 20min/day

→ 平均 1.1 Mbps

(参考)

マイクロプロセッサ性能

SH-3 (300MHz)

700 Mflops, 173 MIPS

SH-4 (200MHz)

1.4 Gflops, 360 MIPS

CPU性能

Pentium III (1GHz)

700 Mflops

DPFサブシステム (8)

● 衛星バス

衛星バス (ミッション機器が利用可能なもの) に対する要求値

重量	20 kg (~100 kg)	(詳細はTBD)
サイズ	40 cm立方 (~70 cm立方)	
電力	50 W (~100W)	
通信	600 kbps avg. (~1.2Mbps avg.)	← 全観測データの地上転送
信号処理	10 Mflops	← リアルタイムでの信号解析
記録容量	6.5 GByte (~20 GByte)	← 1日分の観測データ保持

衛星運動・制御に対する要求値

重力波検出器の雑音とならないことが重要

力学特性	並進	姿勢
衛星運動	N/A (軌道運動)	地球鉛直方向に対して 1.2°
衛星変動雑音	$1 \times 10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$	$3 \times 10^{-9} \text{ rad/Hz}^{1/2}$
加速度雑音	$4 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$	$1 \times 10^{-7} \text{ rad/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$
衛星-試験マスの 相対位置	0.1 mm	0.3 mrad
磁気特性		温度特性
一様磁場	N/A	安定度 10^{-3} K
磁場勾配	10^{-7} nT/m	温度変動 $10^{-3} \text{ K/Hz}^{1/2}$
磁場変動	$10^{-7} \text{ nT/Hz}^{1/2}$	真空度 10^{-6} Pa

要検討事項:
衛星の局所変動
衛星の非対称性
衛星の熱変形
大気ドラッグ変動
各自由度間の
カップリング

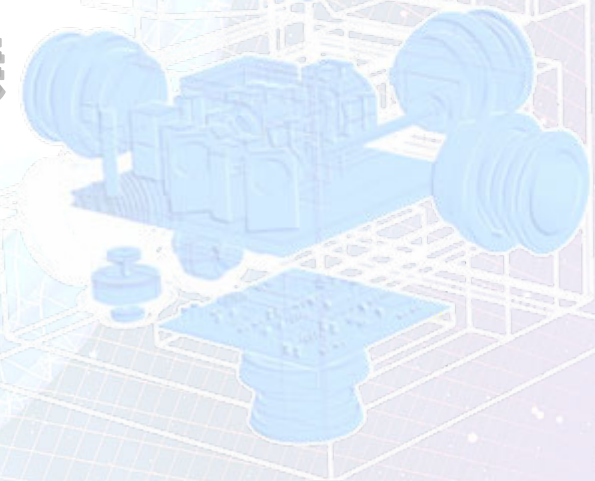
DPFサブシステム (9)

● ミッションシーケンス (案)

1. 高度750kmの太陽同期軌道へ投入
2. 衛星バス系動作確認
3. 3軸姿勢制御状態へ移行 (太陽方向, 地球鉛直方向を基準)
4. ミッション機器 サブシステム動作確認
(温度安定化, レーザー光源, 光源周波数安定化, ローカルセンサ, データ取得系)
5. 試験マスをリリース
→ ローカルセンサ, アクチュエータで試験マス制御, 安定化
6. スラスタ動作試験, 推力・推力雑音確認
7. ドラッグフリー制御試験 (姿勢制御系は保ったまま)
8. 干渉計制御
9. 制御系の調整, 安定度・感度の向上
10. 重力波の連続観測 6ヶ月程度の定常運用

2. DECIGOパスファインダー

概要, 科学的意義
サブシステム詳細
計画と体制



計画と体制 (1)

● 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の作製, 動作, 衛星本体とインターフェース部の基本設計

→ DECIGOパスファインダーの基本設計

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, 感度の向上実験 → 要求値を満たすよう改良

→ エンジニアリングモデルの設計

3年目： エンジニアリングモデルの製作

各開発要素 (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)

→ 重力波観測装置部のエンジニアリングモデルの製作, 各種試験

→ 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

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

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

→ 半年間の重力波観測

計画と体制 (2)

● 既存技術のまとめ

(1) 衛星のドラッグフリー制御

- スラスタ : 100 μ N級スラスタは実現可能. 雑音特性の評価は必要.
- 姿勢制御 : 「れいめい」などでの実績. ホイールの雑音特性評価が必要.
- 制御則 : 原理的な問題はない. シミュレーションによる確認が必要.

(2) レーザー光源・安定化

- レーザー光源 : 宇宙用Nd:YAGレーザー光源は入手可能.
- 周波数安定化 : 地上では必要な安定度が実現されている. 振動・温度環境が重要.

(3) レーザー干渉計制御

- 光学素子 : 地上干渉計での実績. 機械強度の試験が必要.
- 干渉計制御 : 地上干渉計での実績.

(4) クランプ・リリース機構

- クランプ・リリース : 他プロジェクトでは解決. 技術の導入, 試験が必要.
- ローカルセンサ : 手法は確立されている.
- 試験マスアクチュエータ : 手法は確立されている.
- 温度安定化 : 地上では実現可能. 宇宙で実現するための設計と試験が必要.

(5) 重力波の観測

- 地上観測 : 豊富な観測実績 (100Hz以上)
- 信号取得・処理 : データレート, 信号処理能力とも実現可能な範囲.

計画と体制 (3)

●重点開発項目

今後2年間で、主要な要素技術を確立する。

(1) 衛星のドラッグフリー制御

100 μ N級スラストの試作と雑音特性などの評価, 改良.
シミュレーションによる制御トポロジー検証.

(2) レーザー光源・安定化

宇宙仕様を想定した周波数安定化実験と改良.

(3) レーザー干渉計制御

干渉計構成コンポーネントの試験.
干渉計デザインと各種雑音源の評価.

(4) クランプ・リリース機構

クランプ・リリースの試作と評価.
ハウジングデザインと試験 (温度安定化, 真空度).

(5) 重力波の観測

信号取得・処理系の試作と試験.
重力波源とデータ解析手法の研究.

計画と体制 (4)

● DPF研究体制・開発コスト

開発期間 : 5年半

開発コスト : 8億円

を見込む

(打上げ費用は含まず)

さまざまな機関から 59名 が参加

取り組み

平成19年度 文部科学省科学研究費
特定領域研究 の柱として申請中

東京大学 理学系研究科

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,
穀山 涉, 樽家 篤史, 姫本 宣朗

国立天文台 重力波プロジェクト推進室

川村 静児, 新井 宏二, 佐藤 修一,
森本 睦子, 若山 圭以子, 高橋 龍一,
森岡 友子, 固武 慶, 山崎 利孝,
川添 史子

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

高橋 忠幸, 高島 健, 坂井 真一郎,
船木 一幸, 西山 和孝, 國中 均

大阪市立大学 理学研究科

神田 展行, 石原 秀樹, 中尾 憲一,
徳田 充

電気通信大学 レーザー新世代研究センター

武者 満, 植田 憲一

東京大学 新領域創成科学研究科

森脇 成典, 川浪 徹

カリフォルニア大学

瀬戸 直樹

新潟大学 自然科学系

佐藤 孝

京都大学 生存圏研究所

山川 宏

東海大学 工学部

堀澤 秀行

東京大学 工学系研究科

小泉 宏之

コロンビア大学

麻生 洋一

東京大学 総合文化研究科

柴田 大

マックスプランク重力物理研究所

(アルバートアインシュタイン研究所)

高橋 弘毅, 宗宮 健太郎

産業技術総合研究所 計測標準研究部門

池上 健, 洪 鋒雷

大阪大学 理学研究科

田越 秀行

弘前大学 理工学部

浅田 秀樹

東京大学 宇宙線研究所

三代木 伸二, 徳成 正雄, 阿久津 朋美

テキサス大学 重力波天文学センター

端山 和大, 中野 寛之

情報通信研究機構

新世代ネットワーク研究センター

細川 瑞彦, 長野 重夫

京都大学 理学研究科

中村 卓史, 田中 貴浩, 井岡 邦仁

東京大学

ビッグバン宇宙国際研究センター

横山 順一

京都大学 大学院 人間・環境学研究科

阪上 雅昭

カリフォルニア工科大学

宮川 治

計画と体制 (5)

●平成19年度 特定領域研究申請中

「宇宙空間を利用した低周波重力波天文学の開拓」 代表: 川村静児 (NAO)

DECIGOのための基礎研究 + DECIGOパスファインダー + PTA
総額 20 億円

DPF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

大口徑ミラーの開発

DPF で 8億円 (本体 6億円 + 各要素の供給 2億円)

参加機関 (研究代表者)

国立天文台, 東京大学, 電気通信大学, 新潟大学,
宇宙航空研究開発機構, 早稲田大学, 情報通信研究機構,
京都大学, 大阪市立大学

計画と体制 (6)

● 関連する他計画

LPF (LISA Path Finder)

LISAのための技術試験衛星

2009年打ち上げ予定

重量 1,900kg, 1機, L1点に投入

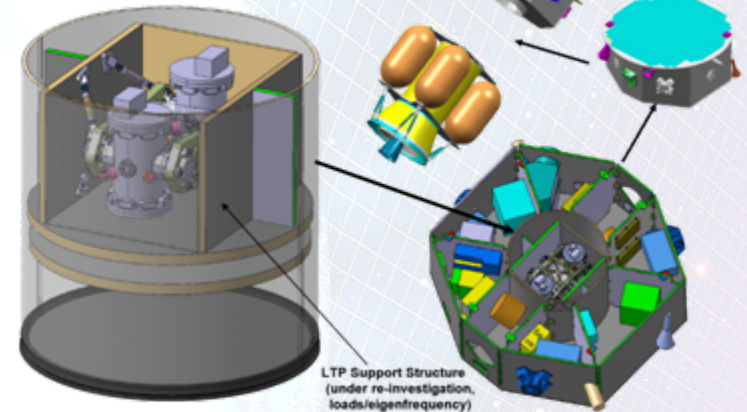
2つの試験マスを搭載

→ ドラッグフリー制御

マツハツエンダー干渉計を搭載

感度 $3 \times 10^{-14} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ (1mHz)

Earth Observation, Navigation & Science
LTP Accommodation on
LISA Pathfinder (LPF) Spacecraft



Page 19 6th Int. LISA Symp., June 23, 2006 R. Genzel, W. Fichter / LTP + LPF/DFACS Team, EAD

GOCE (Global recovery and Climate Experiment)

地球重力場観測衛星

2007年打ち上げ予定

重量 1,200kg, 1機, 高度285km極軌道

3組の3軸サーボ制御加速度計 (静電型)

差動変動 → 重力勾配の観測

同相変動 → ドラッグフリー制御

感度 $3 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ (5mHz-0.1Hz)



GOCE Web pageより

3. まとめ

**DPFの位置づけ, 科学的意義
波及効果**

まとめ

●重力波天文学

重力波の観測によって...

電磁波では観測できない現象を観測する、
既存の天文学と相補的な「**重力波天文学**」が期待できる

⇒ 地上での大型・高感度検出器 (Advanced LIGO, LCGT)
宇宙空間での観測 (LISA, **DECIGO**)

ほかの手段とは全く独立な情報

初期宇宙, ダークエネルギー, 超巨大ブラックホールの形成

DECIGO実現のためには、

入念な地上試験と 宇宙空間での実証試験 が不可欠



小型衛星を利用した実証試験 : DPF

技術試験だけではない....

実際に **0.1-1 Hzの周波数帯での重力波観測** を行う

→ 他では得られない貴重な観測データ

まとめ

● 他分野への波及効果

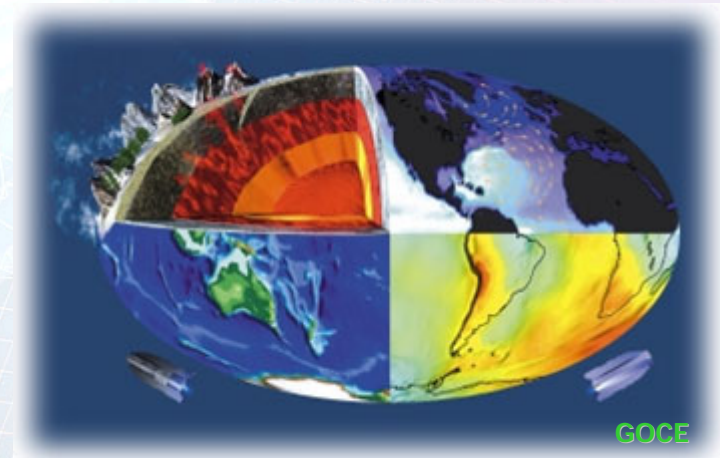
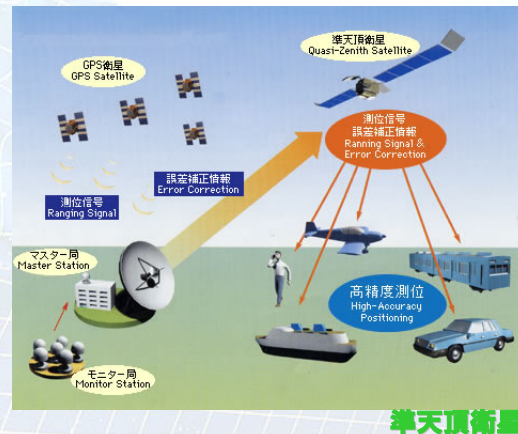
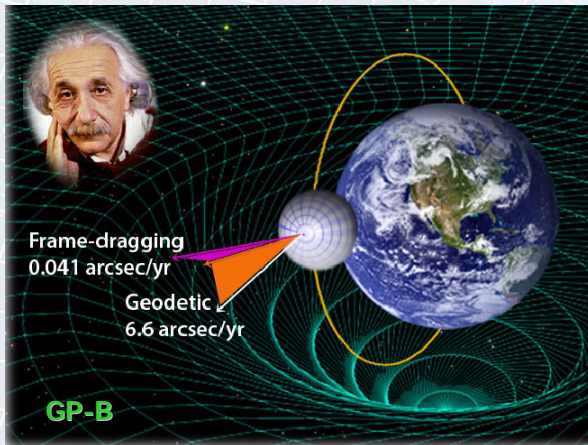
DPFで用いられる技術要素:

安定な宇宙環境 (微小重力, 大気の影響・地面振動が無い) と、
精密計測・制御技術 (安定化レーザー光源, 干渉計による精密制御・計測)
ドラッグフリー技術

の組み合わせ

➡ **さまざまな応用の可能性がある**

基礎物理実験 (重力逆二乗則, 空間の等方性, 等価原理),
物性計測 (機械的損失・熱振動の測定), **地球観測**, **衛星環境測定**
時刻・周波数基準
フォーメーションフライト



まとめ

ご理解と、ご協力をお願いします

