

重力波天文学に向けた 小型衛星による検証実験

イラスト/KAGAYA

安東 正樹

(東京大学理学系研究科)

川村 静児(国立天文台)、中村 卓史(京大理)、坪野 公夫(東大理)、瀬戸 直樹(Caltech)、長野 重夫(NICT)、田中 貴浩(京大理)、石川 毅彦(JAXA)、植田 憲一(電通大)、武者 満(電通大)、佐藤 孝(新潟大工)、細川 瑞彦(NICT)、森脇 成典(東大新領域)、高島 健(JAXA-ISAS)、沼田 健司(NASA)、平林 久(JAXA-ISAS)、高野 忠(JAXA-ISAS)、藤本 真克(国立天文台)、樽家 篤史(東大理)、姫本 宣朗(東大理)、柳 哲文(阪市大理)、中尾 憲一(阪市大理)、原田 知広(京大理)、井岡 邦仁(京大理)、佐合 紀親(阪大理)、疋田 涉(京大基研)、佐藤 修一(国立天文台)、苔山 圭以子(お茶大人間文化)、福嶋 美津広(国立天文台)、國森 裕生(NICT)、山崎 利孝(国立天文台)、大河 正志(新潟大工)、橋本 樹明(JAXA-ISAS)、高橋 忠幸(JAXA-ISAS)、青柳 巧介(早大理工)、我妻 一博(東大宇宙線研)、阿久津 智忠(東大理)、浅田 秀樹(弘前大理工)、麻生 洋一(東大理)、新井 宏二(国立天文台)、新谷 昌人(東大地震研)、池上 健(産総研)、石徹白 晃治(東大理)、市来 淨與(国立天文台)、伊藤 洋介(Univ. of Wisconsin)、井上 開輝(近大理工)、成崎 俊一(理研)、江里口 良治(東大総合文化)、大石 奈緒子(国立天文台)、大橋 正健(東大宇宙線研)、大原 謙一(新潟大理)、奥富 聡(東大宇宙線研)、鎌ヶ迫 将悟(東大宇宙線研)、河島 信樹(近大理工)、川村 麻里(新潟大理)、神田 展行(阪市大理)、雁津 克彦(京大理)、木内 建太(早大理工)、桐原 裕之(東大宇宙線研)、工藤 秀明(東大理)、黒田 和明(東大宇宙線研)、郡 和範(Harvard-Smithsonian Center)、古在 由秀(くま天文台)、小島 康史(広島大理)、小林 史歩(Penn. State Univ.), 西條 統之(Observatoire de Paris)、阪上 雅昭(京大総合)、阪田 紫帆里(お茶大人間文化)、佐々木 節(京大基研)、柴田 大(東大総合文化)、真貝 寿明(福盛財団)、杉山 直(国立天文台)、宗宮 健太郎(AEI)、祖谷 元(早大理工)、高橋 弘毅(阪市大理)、高橋 龍一(国立天文台)、高橋 竜太郎(国立天文台)、田越 秀行(阪大理)、田代 寛之(京大理)、谷口 敏介(Univ. of Illinois at Urbana-Champaign)、千葉 剛(日大文理)、辻川 信二(東大理)、常定 芳基(東工大)、徳成 正雄(東大宇宙線研)、内藤 勲夫(無所属)、中川 憲保(東大宇宙線研)、中野 寛之(阪市大理)、中村 康二(国立天文台)、西澤 篤志(京大総合)、丹羽 佳人(京大総合)、野沢 超越(新潟大理)、端山 和(国立天文台)、平松 尚志(東大理)、二間瀬 敏史(東北大理)、前田 恵一(早大理工)、松原 英雄(JAXA-ISAS)、水澤 広美(新潟大理)、養 泰志(Caltech)、宮川 治(Caltech)、三代木 伸二(東大宇宙線研)、向山 信治(東大理)、森澤 理之(京大基研)、山元 一広(東大宇宙線研)、横山 順一(東大理)、吉田 至順(早大理工)、吉野 泰造(無所属)

重力波とその検出 (1)

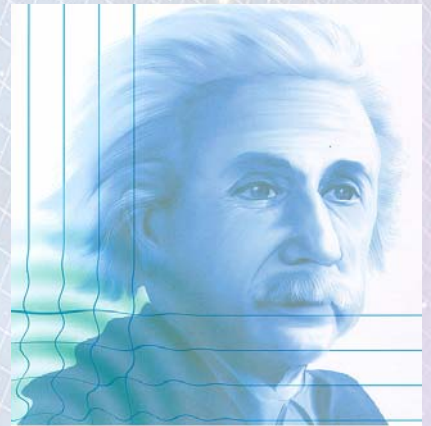
● 重力波 (時空のさざなみ)

一般相対性理論, アインシュタイン方程式

⇒ 波動解 (光の速度で伝播する時空の歪み)

連星パルサーの公転周期の観測により**存在証明**

(重力波放射による連星公転エネルギーの損失を確認)



A.Einstein
(TAMAプロジェクトパンフレットより)

質量の加速度運動により生成

(⇔ 電磁波: 電荷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)

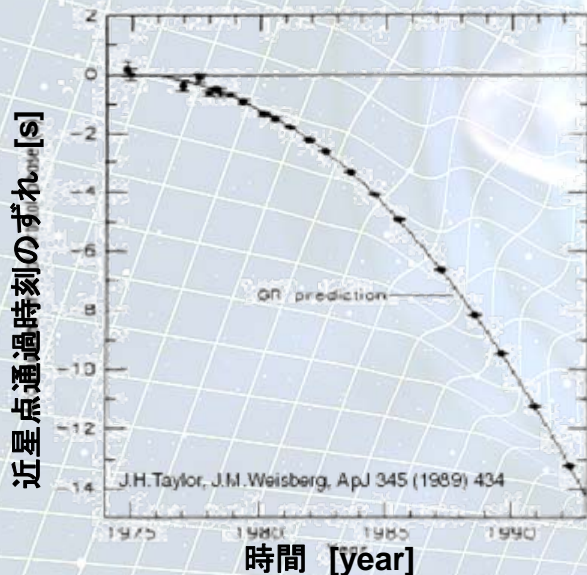


「重力波天文学」の可能性

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

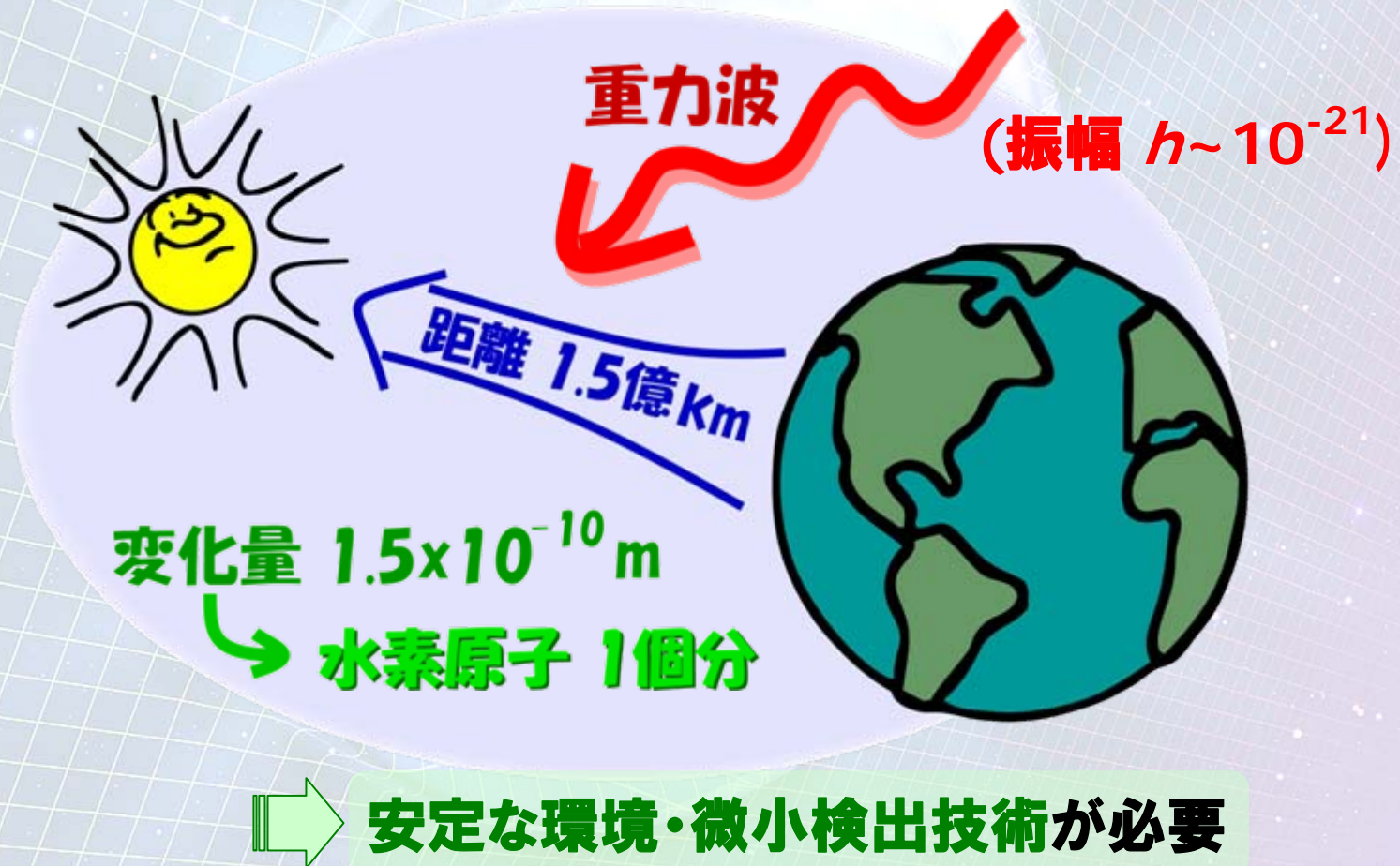
電磁波では見ることのできない初期宇宙



重力波とその検出 (2)

●しかし...

効果が非常に小さいため、**まだ直接検出はされていない**



重力波とその検出 (3)

●世界の重力波検出器

稼働中の検出器

レーザー干渉計型 : 6台 (4プロジェクト)

共振型検出器 : 4台



重力波天文学へ向けて

● 重力波天文学にむけて

稼働中の地上重力波検出器：

我々の銀河，近傍銀河での連星中性子星合体イベントを検出可能

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

| | 現在 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 |
|------------------------------------|---------------------|------|---|--------------------------|-------------------------------------|
| 地上検出器 (10-1kHz) | 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 |

宇宙空間での重力波観測のための
最初のステップ



衛星搭載用の
小型重力波検出器の開発

宇宙重力波検出器

●宇宙での重力波検出

LISA

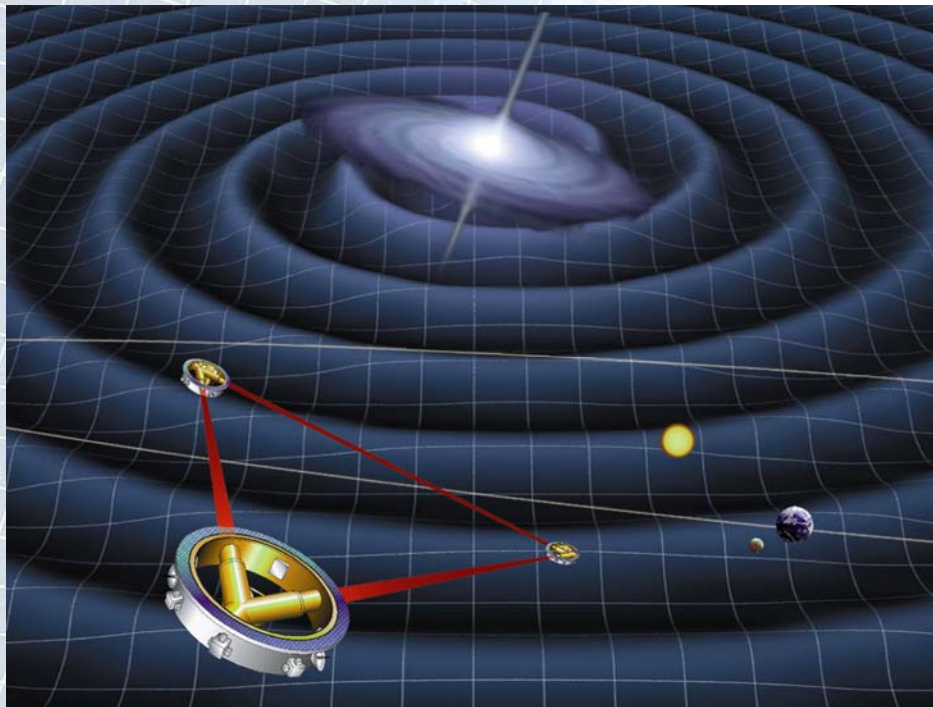
(Laser Interferometer Space Antenna)

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



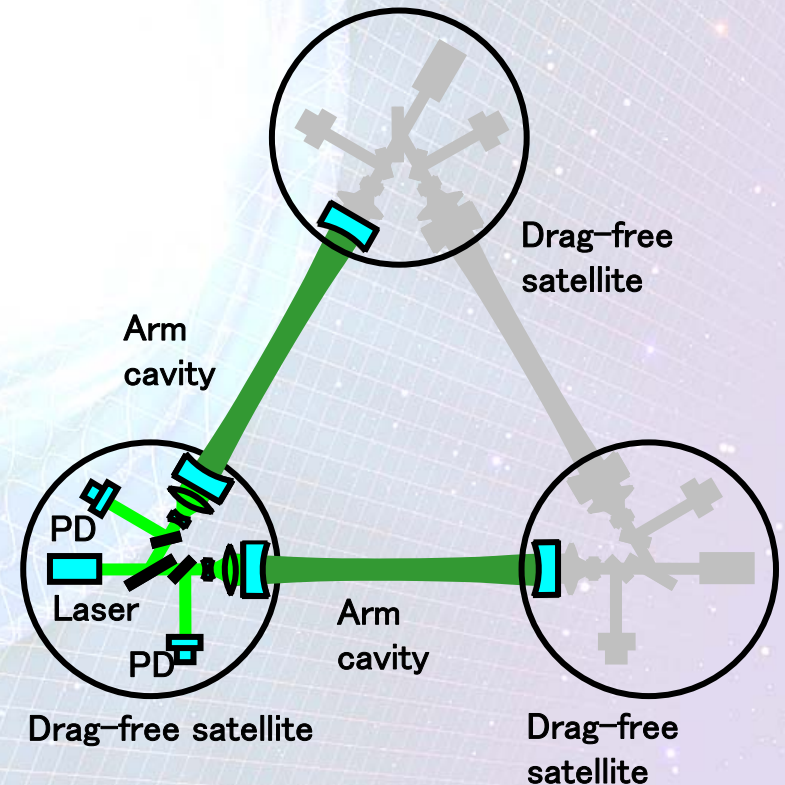
DECIGO

(Deci-hertz Interferometer
Gravitational Wave Observatory)

3台のS/Cで**基線長1000kmの干渉計**を構成

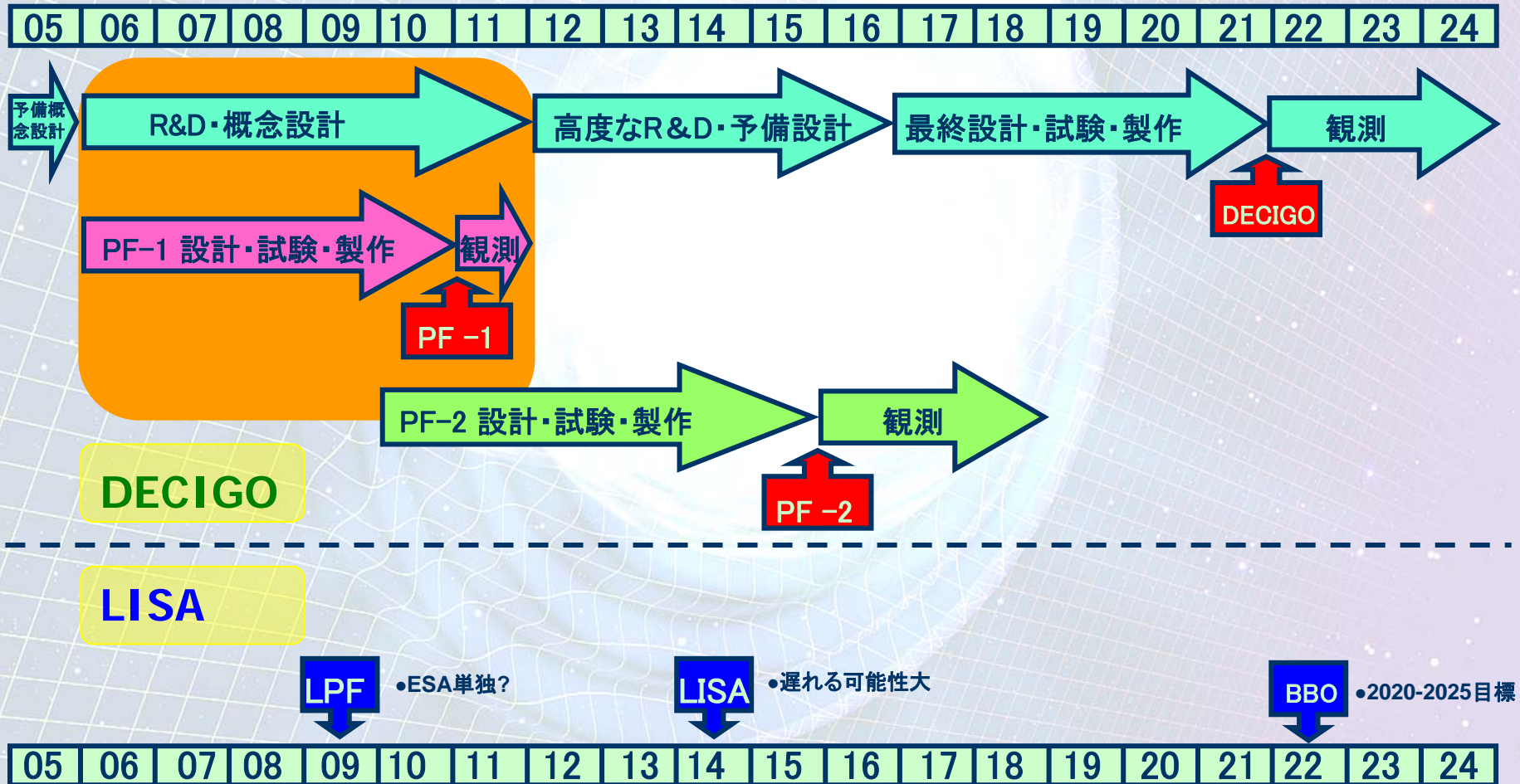
ターゲット: **0.1Hz 前後**の周波数帯

打ち上げ: 2025年頃



DECIGO (1)

DECIGO road map



衛星搭載重力波検出器 (1)

● 衛星搭載用 超小型重力波検出器

(DECIGO-PFのさらに前段階)

試験マスの重力波による差動回転をフォトセンサーによって検出
80mm立方 x 2つのスペースに収める

特徴

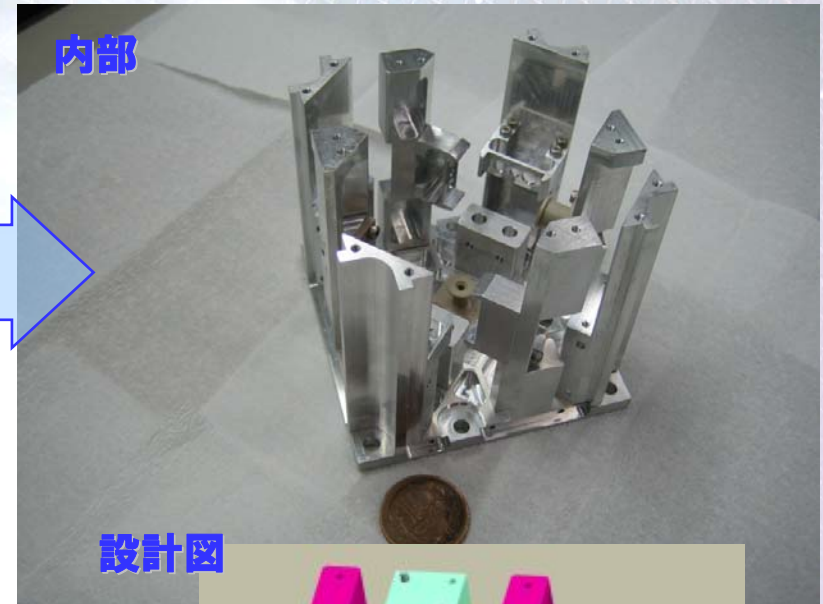
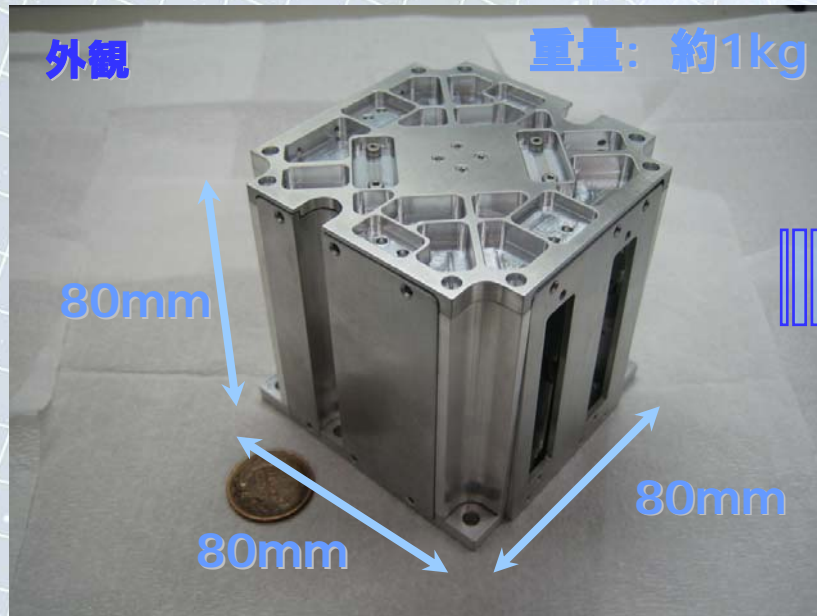
実際に宇宙で重力波観測を行なう世界で初めての検出器になる
地面振動の影響を受けないため、低周波数帯の重力波観測が期待できる
(これまで重力波観測が行なわれていない 0.1-1 Hz周波数帯での観測)

目的

宇宙空間での重力波観測とそのデータの解析
宇宙空間でのアンテナ制御技術の検証実験
人工衛星内の振動・温度・磁気環境の計測
一連の計画の遂行に伴う経験と実績の蓄積

衛星搭載重力波検出器 (2)

● 検出器プロトタイプ



外形: 80mm立方

重量: 約1kg

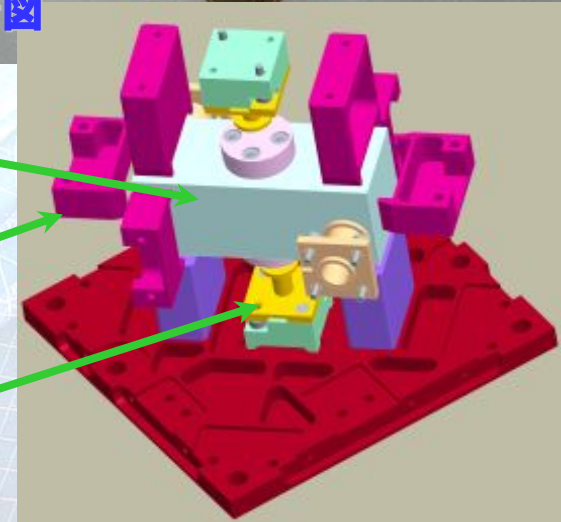
材質: 主にアルミニウム

試験マス: 50x20x20mm
アルミニウム製

試験マス

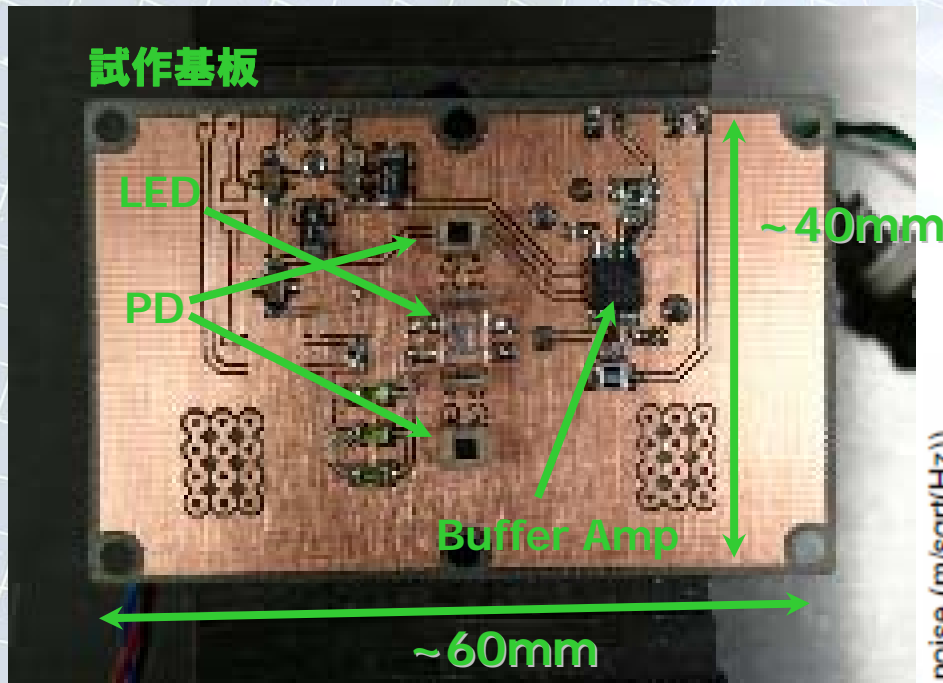
フォトセンサー

制御用コイル



衛星搭載重力波検出器 (3)

● フォトセンサー

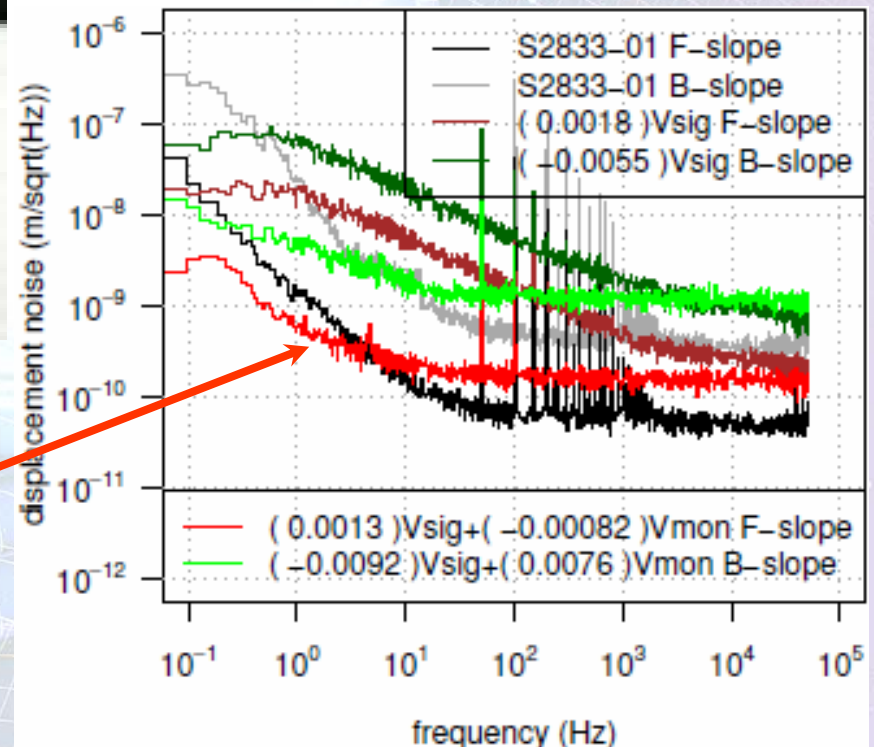


LEDの光を対象物に当てる
→ 反射光強度から変動量を測定
非接触での高感度測定が可能
表面実装素子を使用 → 小型化できる

感度の測定 (赤線)

$10^{-9} \text{ m/Hz}^{1/2}$

以下の変位感度が実現されている



まとめ

● 重力波天文学にむけて

本格的な天文学のためには、宇宙での観測が不可欠
そのためには、

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

衛星搭載用の超小型重力波検出器を開発中

技術試験だけではない....

実際に宇宙で重力波観測を行なう世界で初めての検出器になる
これまで重力波観測が行なわれていない

0.1-1 Hz周波数帯での重力波観測が期待できる

重力波観測以外への発展

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・制御技術の組み合わせ

➡ 基礎物理実験 (重力逆二乗則, 空間の等方性, 等価原理 etc.)
物性計測 (機械的損失・熱振動の測定 etc.), 衛星環境測定など