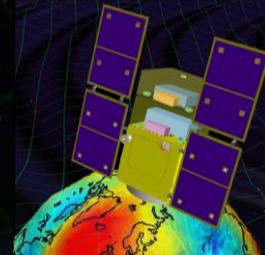
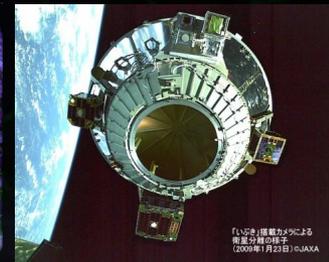
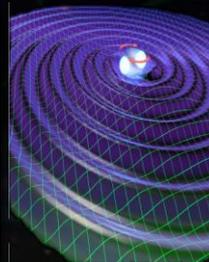
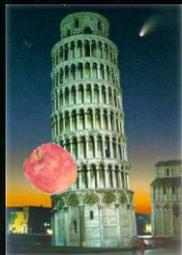


日本物理学会 2014年秋季大会 原始重力波シンポ

# レーザー干渉計による 原始重力波観測

安東 正樹 (東京大学 / 国立天文台) + DECIGO WG



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.

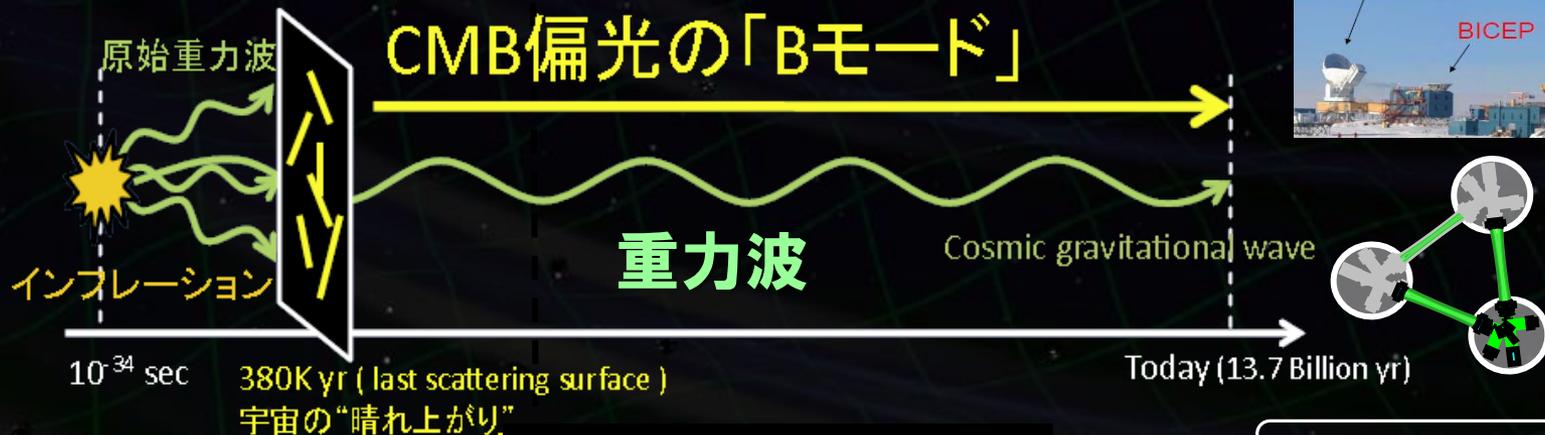
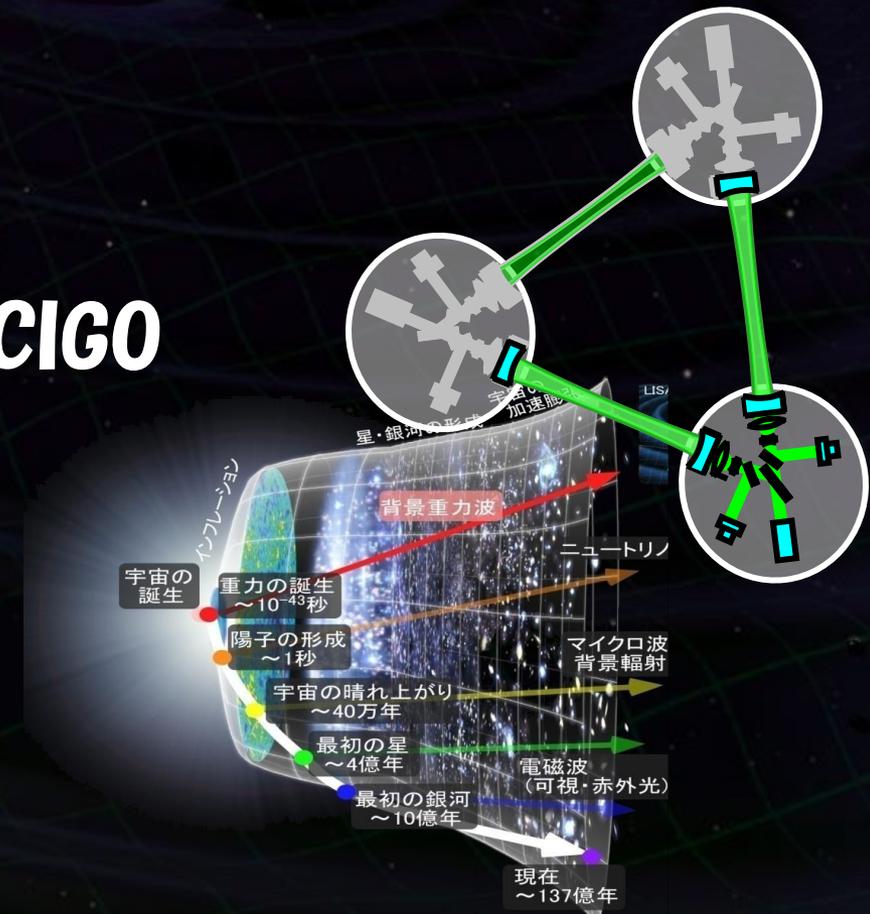


図: 田島氏談話会資料より(2011 京都大学)

- 原始重力波の観測
- 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO
- ミッションの現状

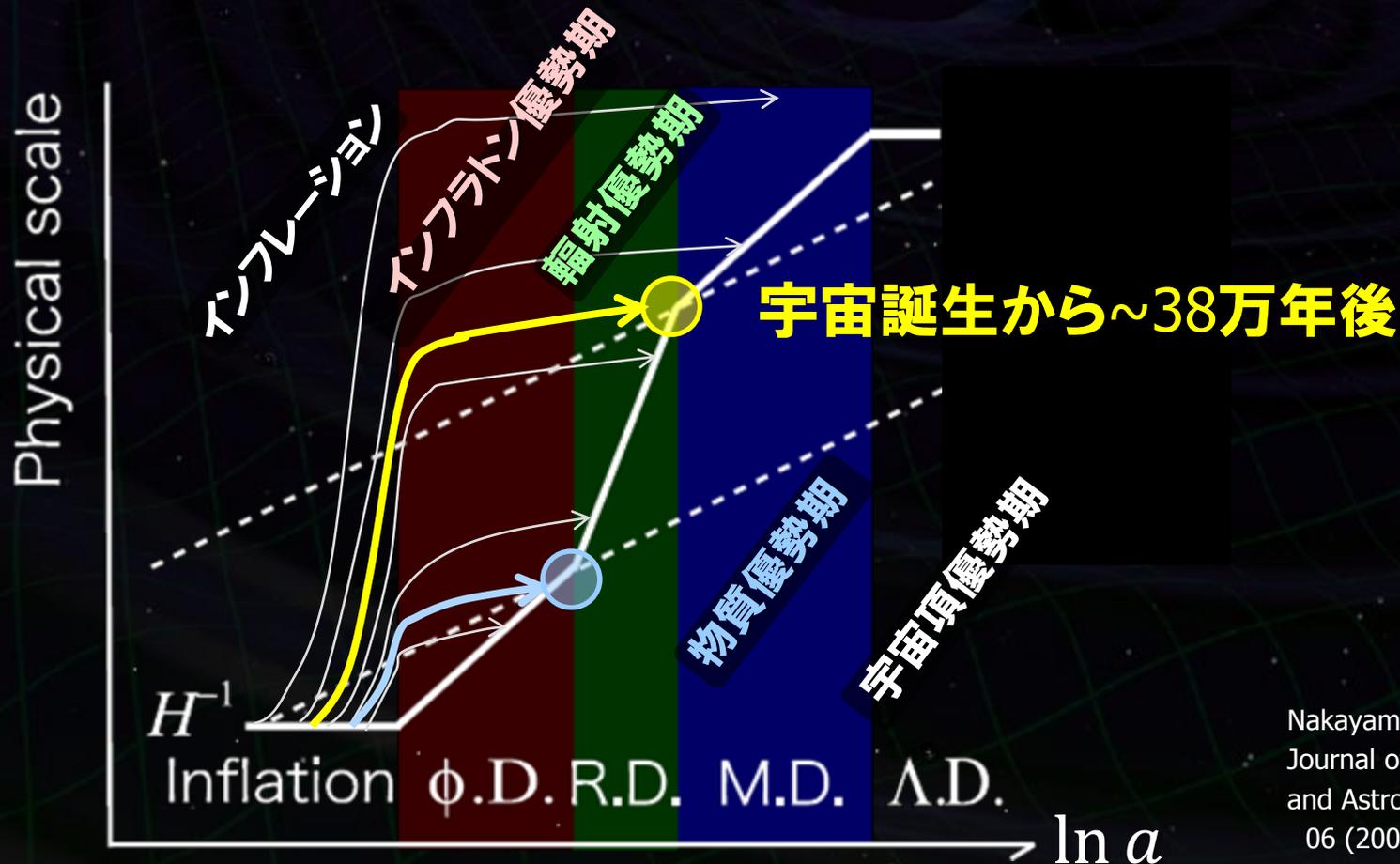


## 原始重力波の観測



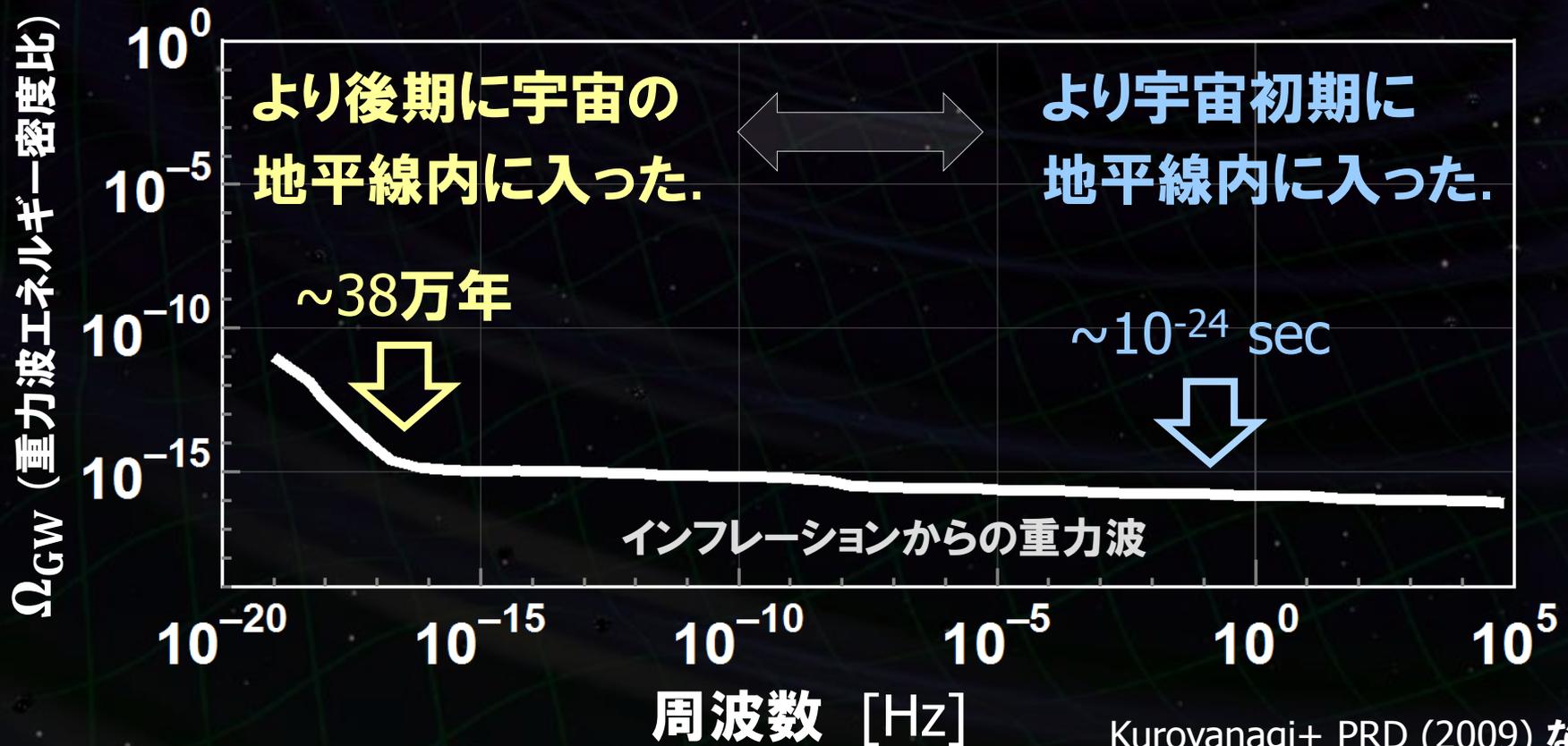
# インフレーションからの重力波

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.

初期の方が宇宙のサイズ(因果律を持つ領域)が小さい。  
→ 初期に地平線内入ってきた重力波ほど高周波。



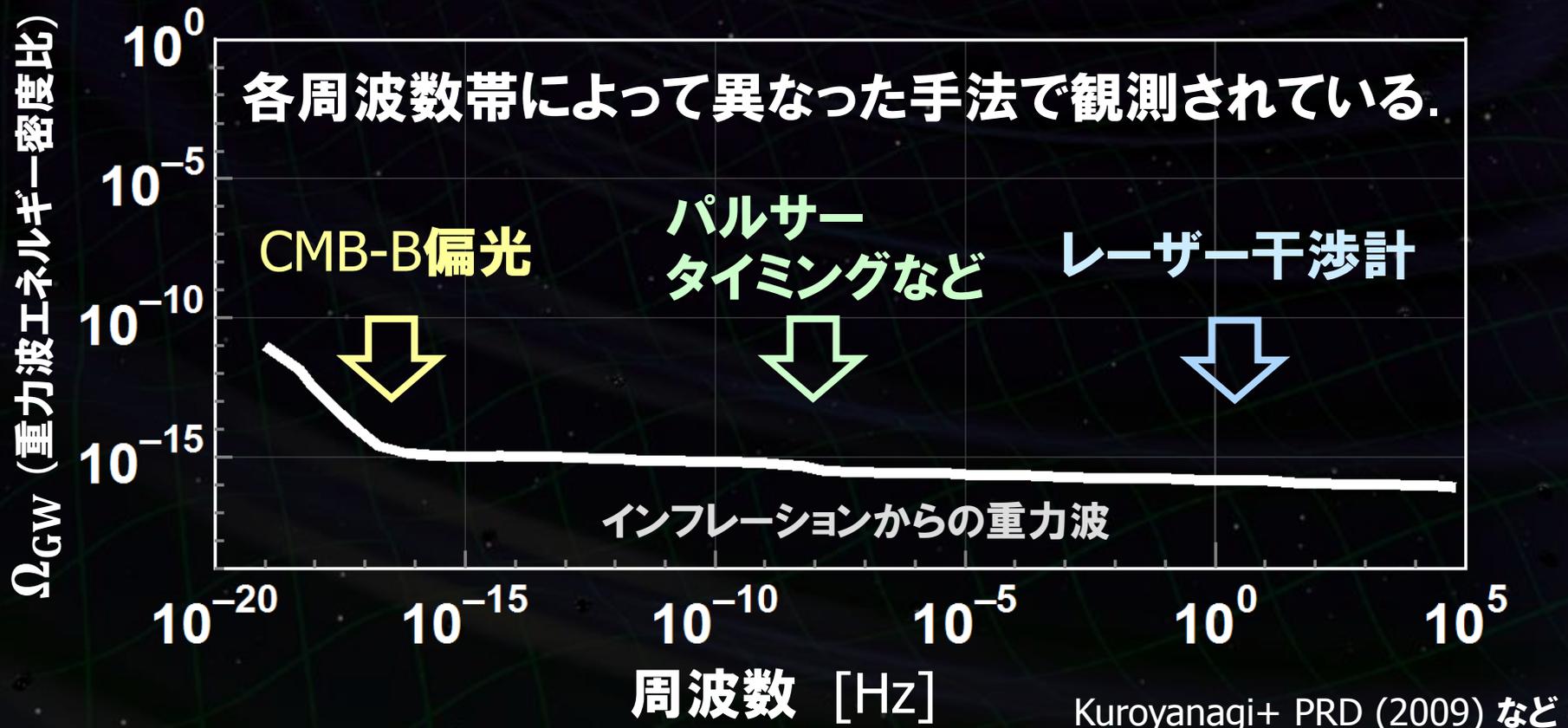
重力波のエネルギー密度比

重力波のエネルギー密度

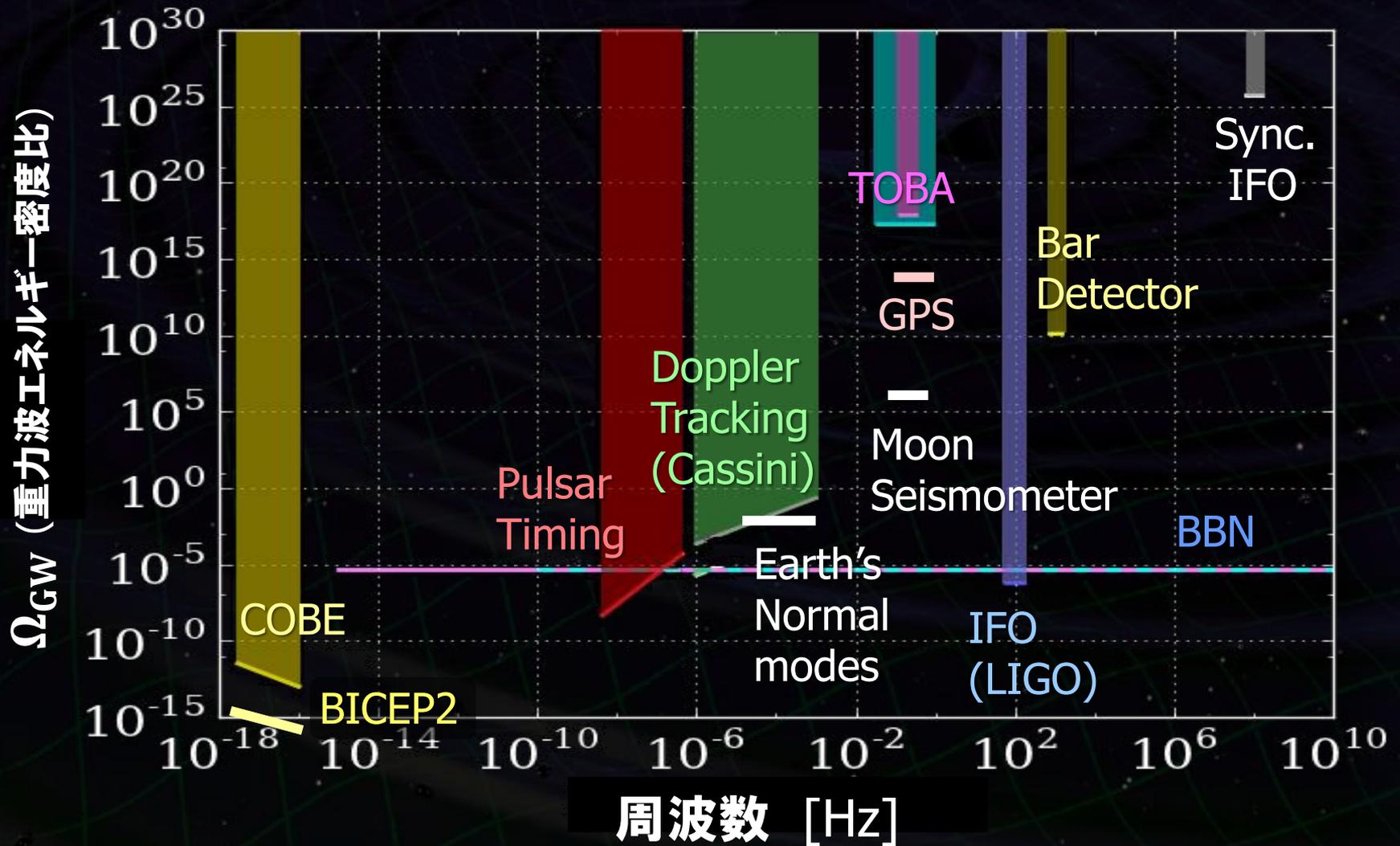
$$\Omega_{\text{GW}}(f) = \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}(f)}{d \ln f}$$

宇宙の臨界密度

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)

## 重力波の効果

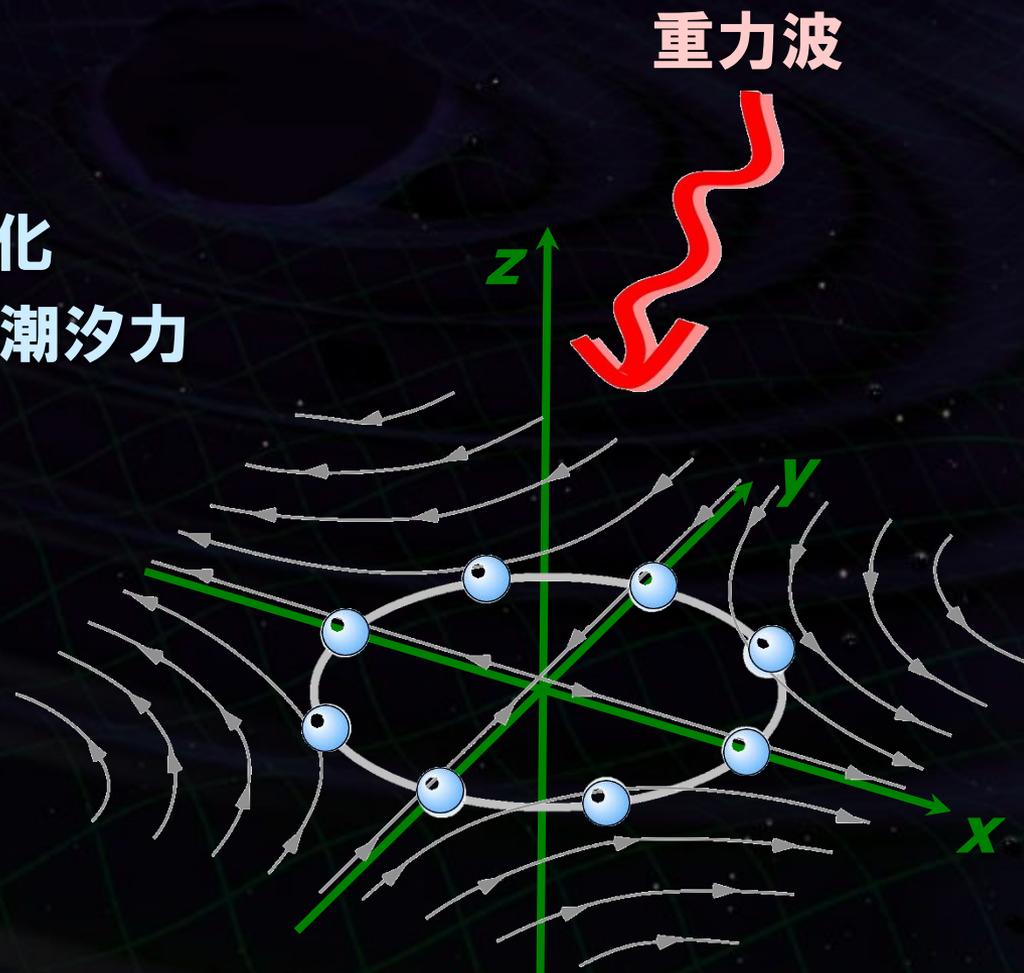
- 自由質点間の距離の変化
- 大きさを持った物体への潮汐力

重力波の振幅  $h$  :  
無次元の歪み量

$$h \sim \delta L / L$$

$\delta L$  : 距離変動

$L$  : 2点間の距離



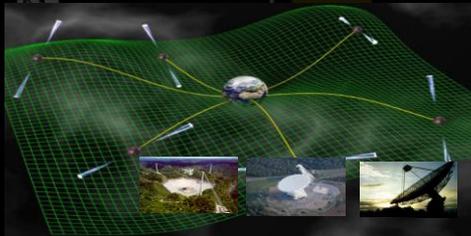
$h = 10^{-24} \rightarrow 1\text{m}$ の距離が $10^{-24}\text{m}$ 伸縮.

# 重力波観測方式の比較

## パルサータイミング

( $\sim 10^{-9} - 10^{-8}$  Hz)

電波パルサーを精度の良い時計として利用。



## ドップラートラッキング

( $\sim 10^{-4} - 1$  Hz)

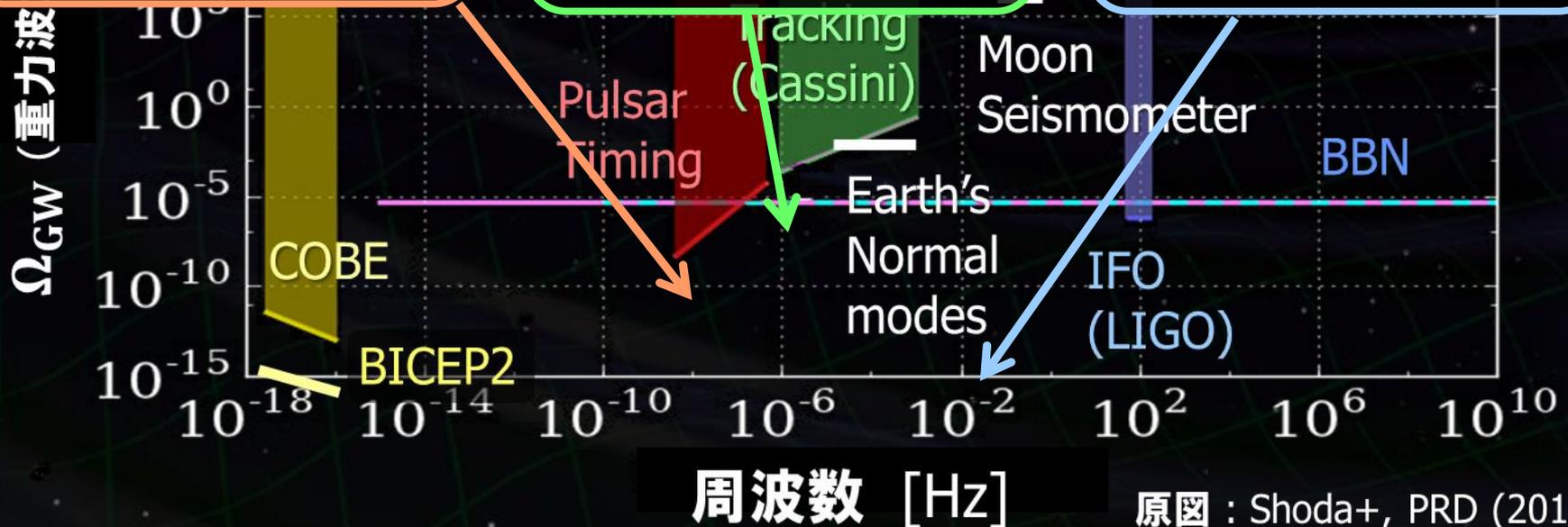
宇宙機・人工衛星との電波通信を利用。



## レーザー干渉計

( $\sim 10^{-4}$  Hz - 1 kHz)

試験質量(鏡)間距離のレーザー干渉計測距。



原図 : Shoda+, PRD (2013)

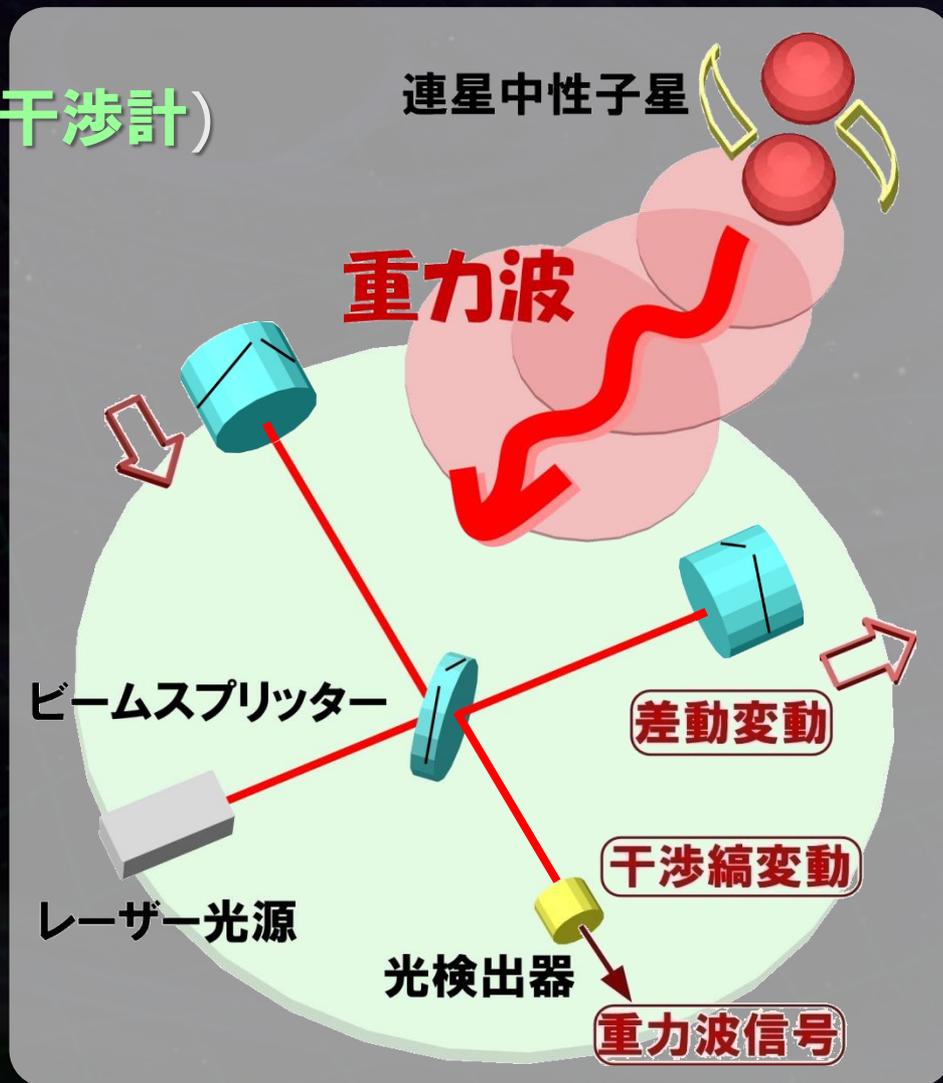
## レーザー干渉計 (マイケルソン干渉計)

- レーザー光源からの光を直交する2方向に分岐.
- 懸架された鏡で打ち返し干涉.
- 光検出器で観測.

重力波が入射



腕の長さの差動変動を  
干涉光量の変動として検出



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


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

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

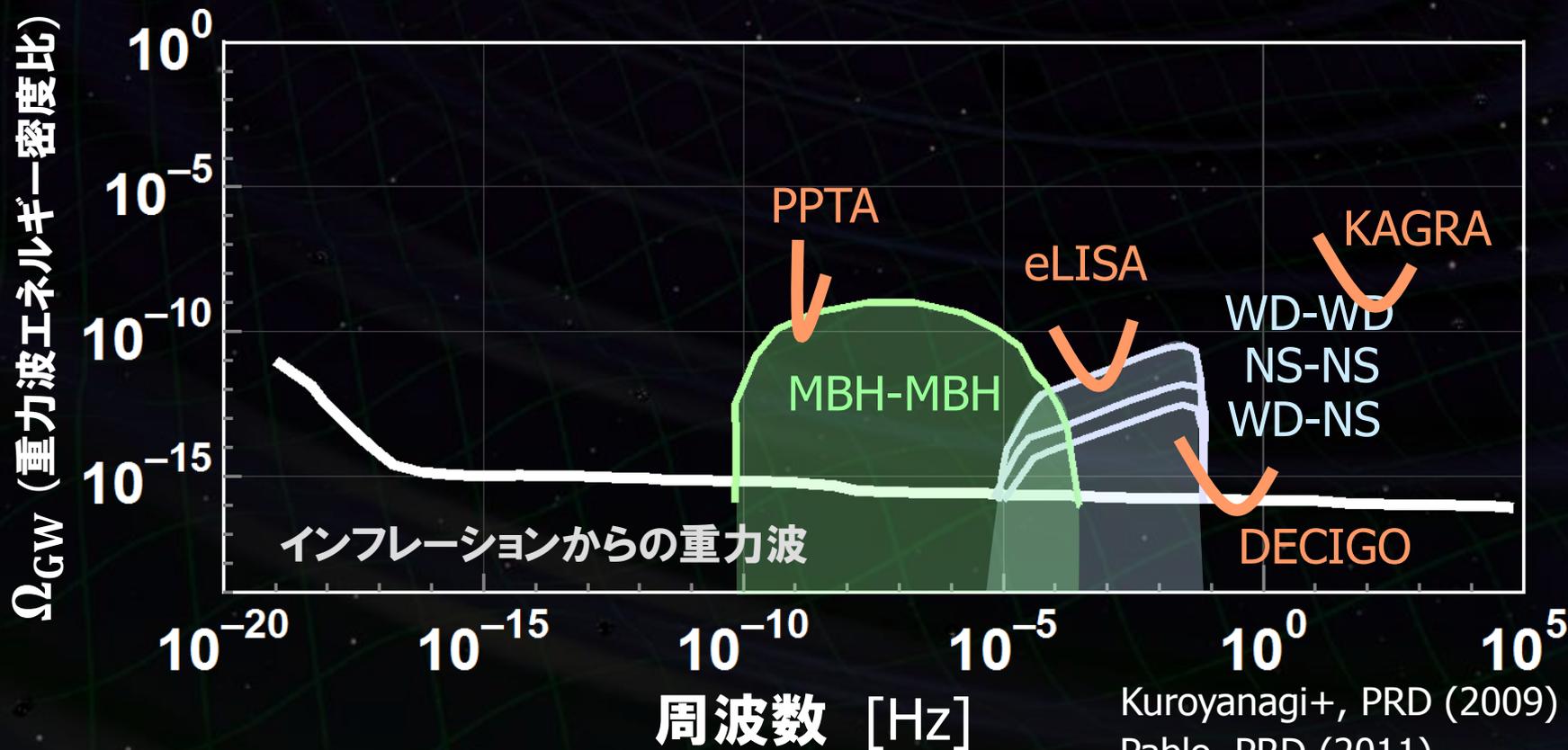


高周波数では振幅は小さくなる

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.



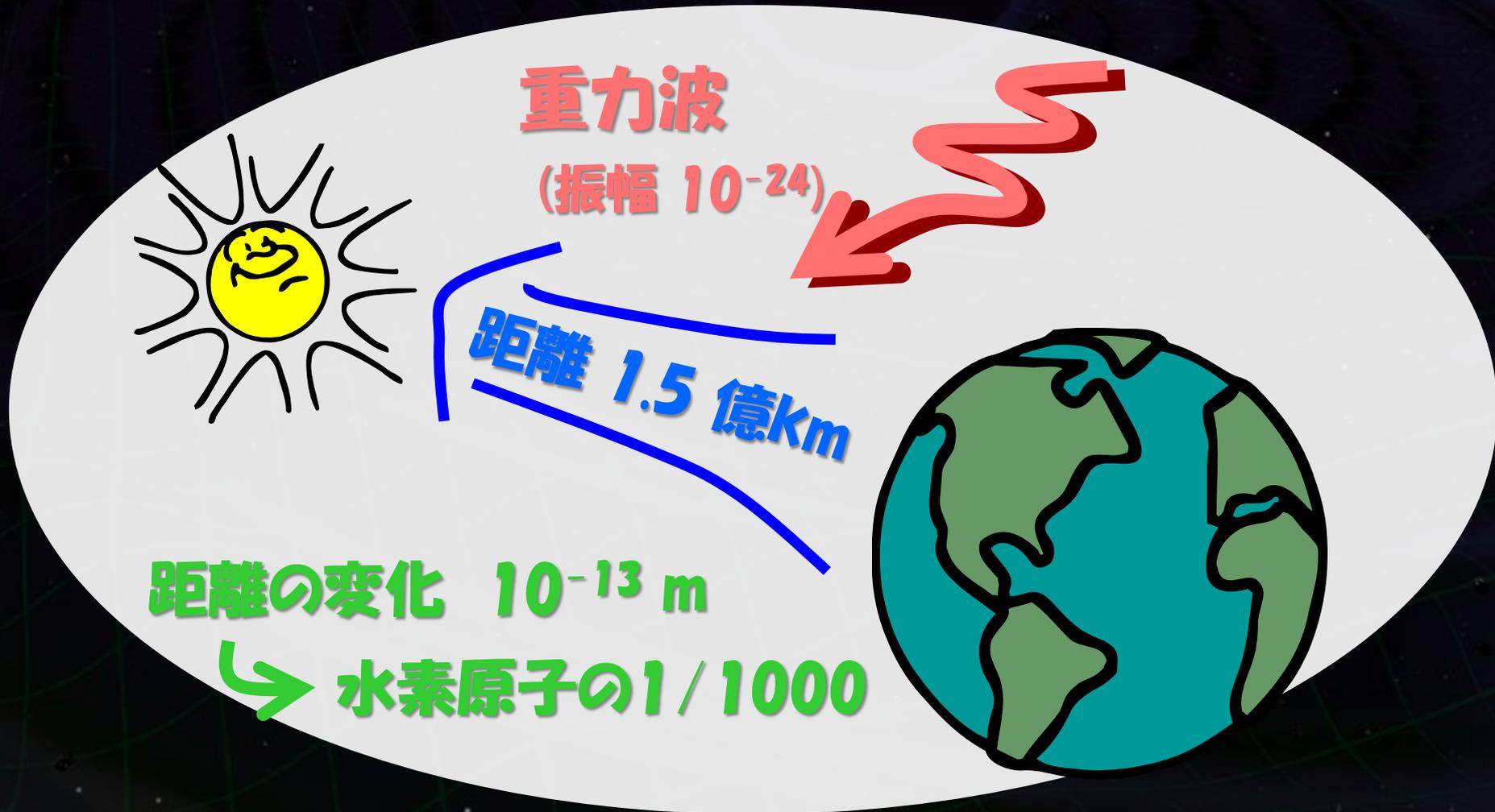
- さまざまな周波数帯で原始重力波観測を観測することで宇宙の進化の情報を得ることが可能.
- インフレーションからの重力波観測には低周波数が有利.
- 0.1Hz以下の周波数帯では, フォアグラウンド重力波が存在.



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.

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

## 重力波の効果：2点間の固有距離の変化



- 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.



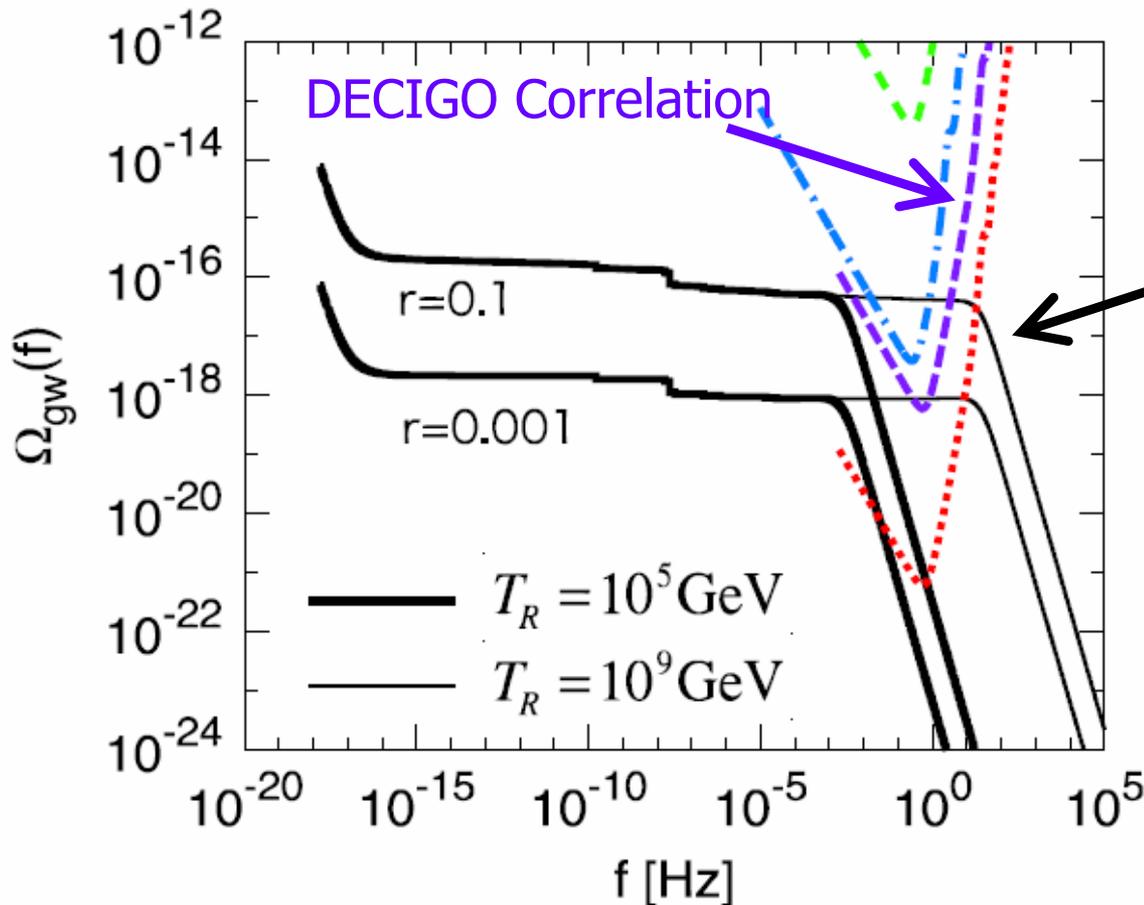
CMB Bモード偏光から  
もある程度推定可能.

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 ....

⇒ 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.

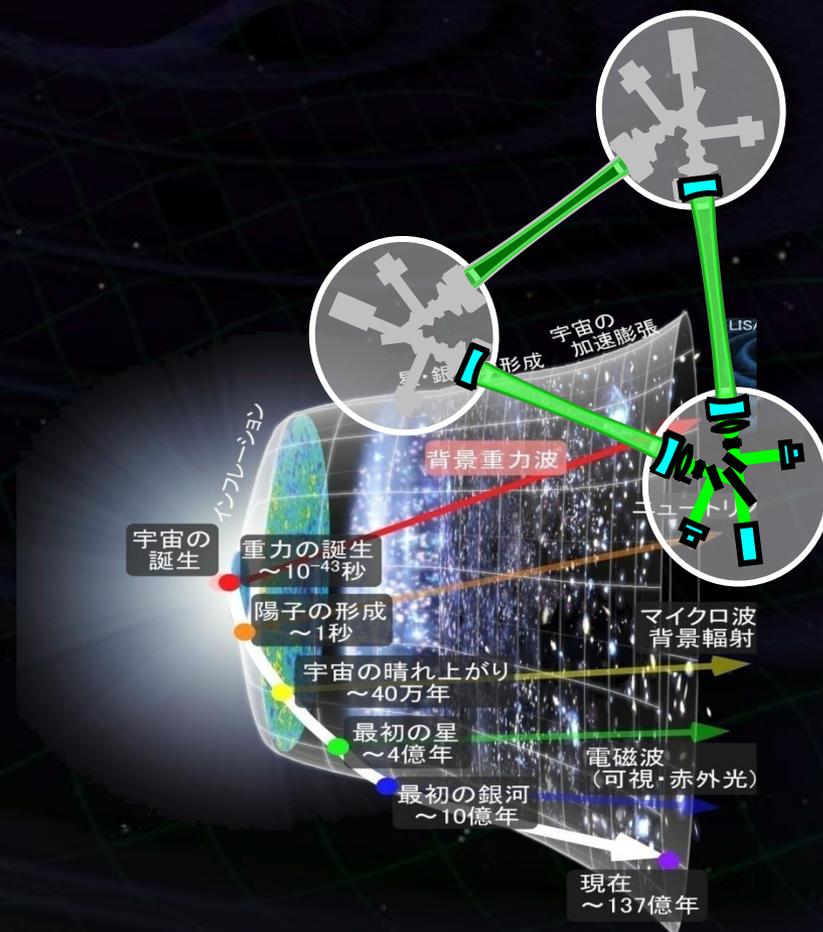


- Spectrum Power.  
→ Energy scale of inflation
- Cut-off freq.  
→ Energy scale of Reheating

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

# DECIGO (でさいご)

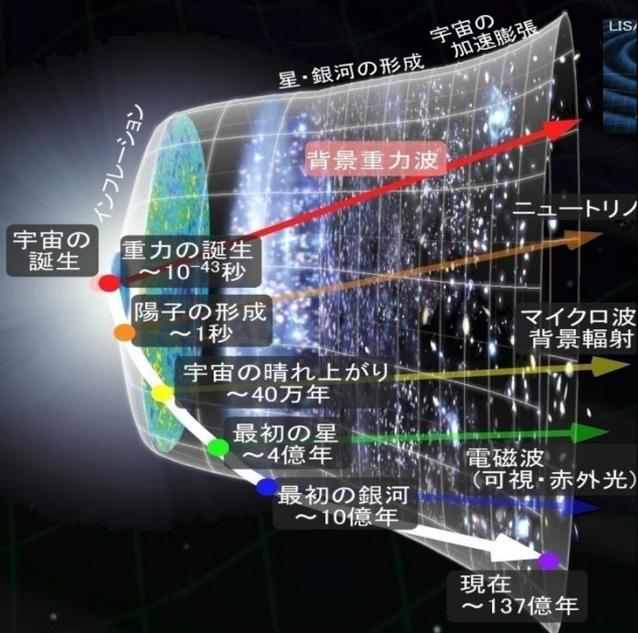
## - 宇宙重力波望遠鏡 -



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

**宇宙のはじまりを直接観測する.**

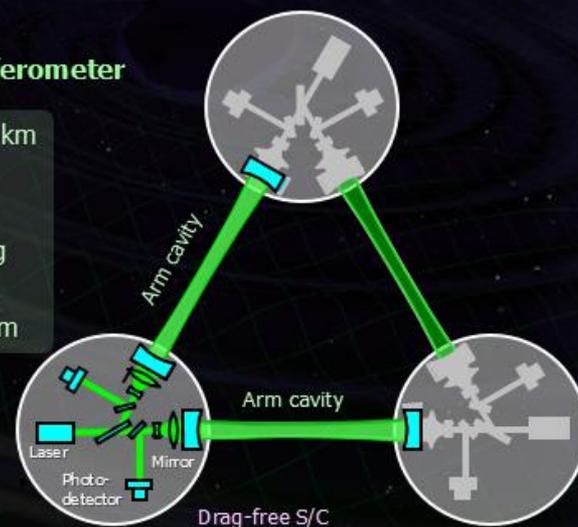
ビッグバン宇宙論において、空間・物質の種が、  
いかに形成されたかを観測によって解き明かす。



**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

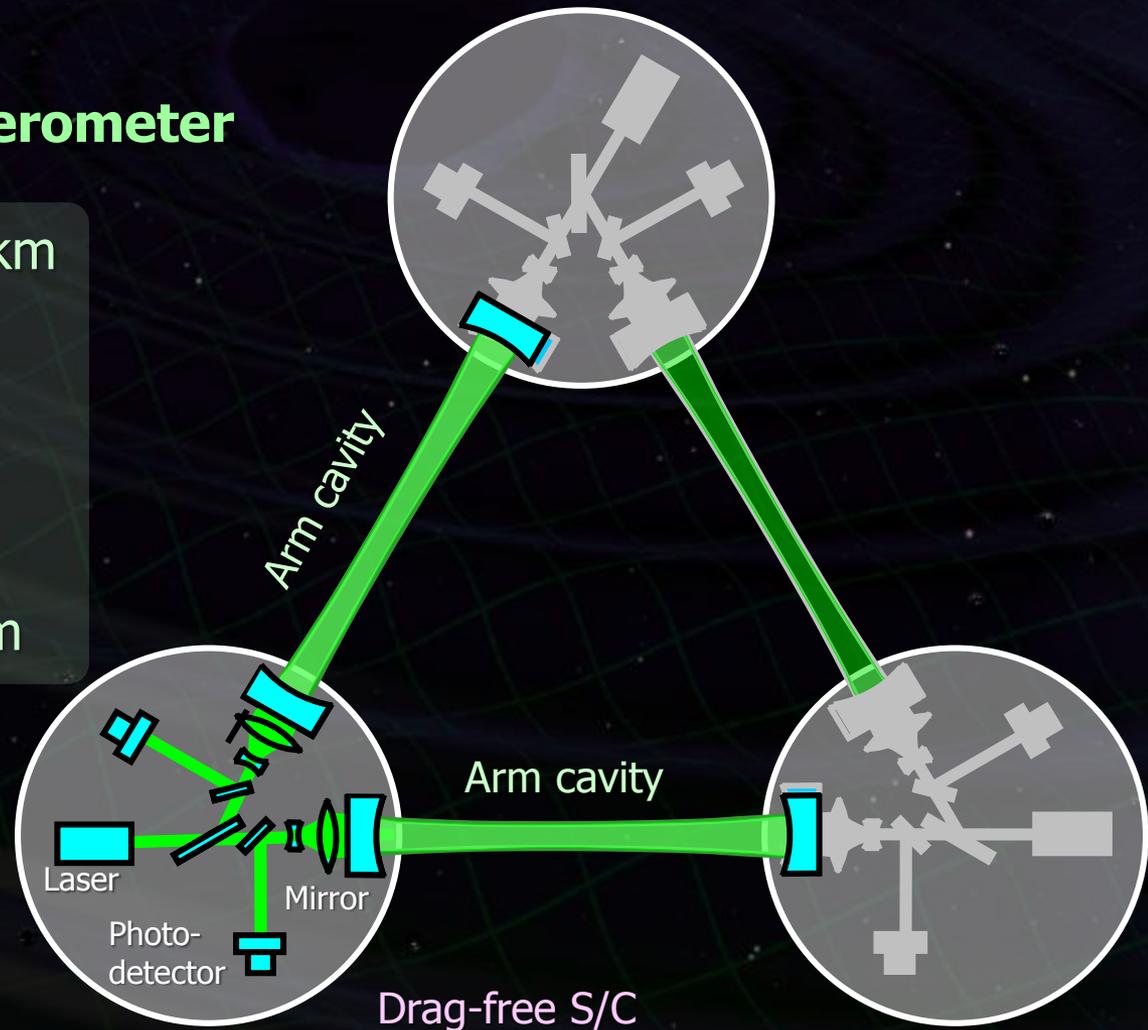


## Interferometer Unit:

### Differential FP interferometer

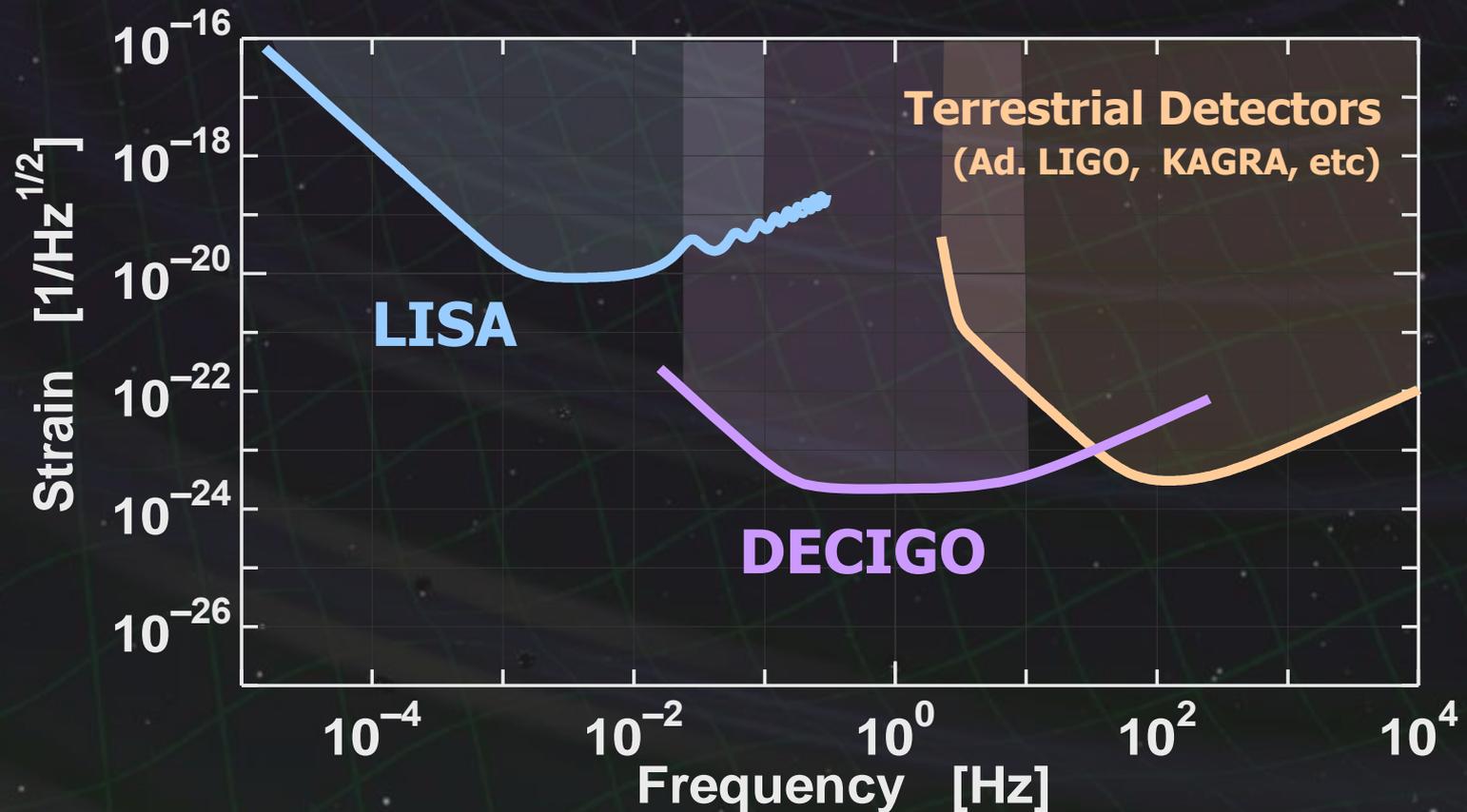
Arm length:	1000 km
Finesse:	10
Mirror diameter:	1 m
Mirror mass:	100 kg
Laser power:	10 W
Laser wavelength:	532 nm

S/C: drag free  
3 interferometers



DECIGO (Deci-hertz interferometer Gravitational wave Observatory)

観測周波数  $\sim 0.1$  Hz  $\Rightarrow$  eLISA と 地上望遠鏡  
の間の周波数帯

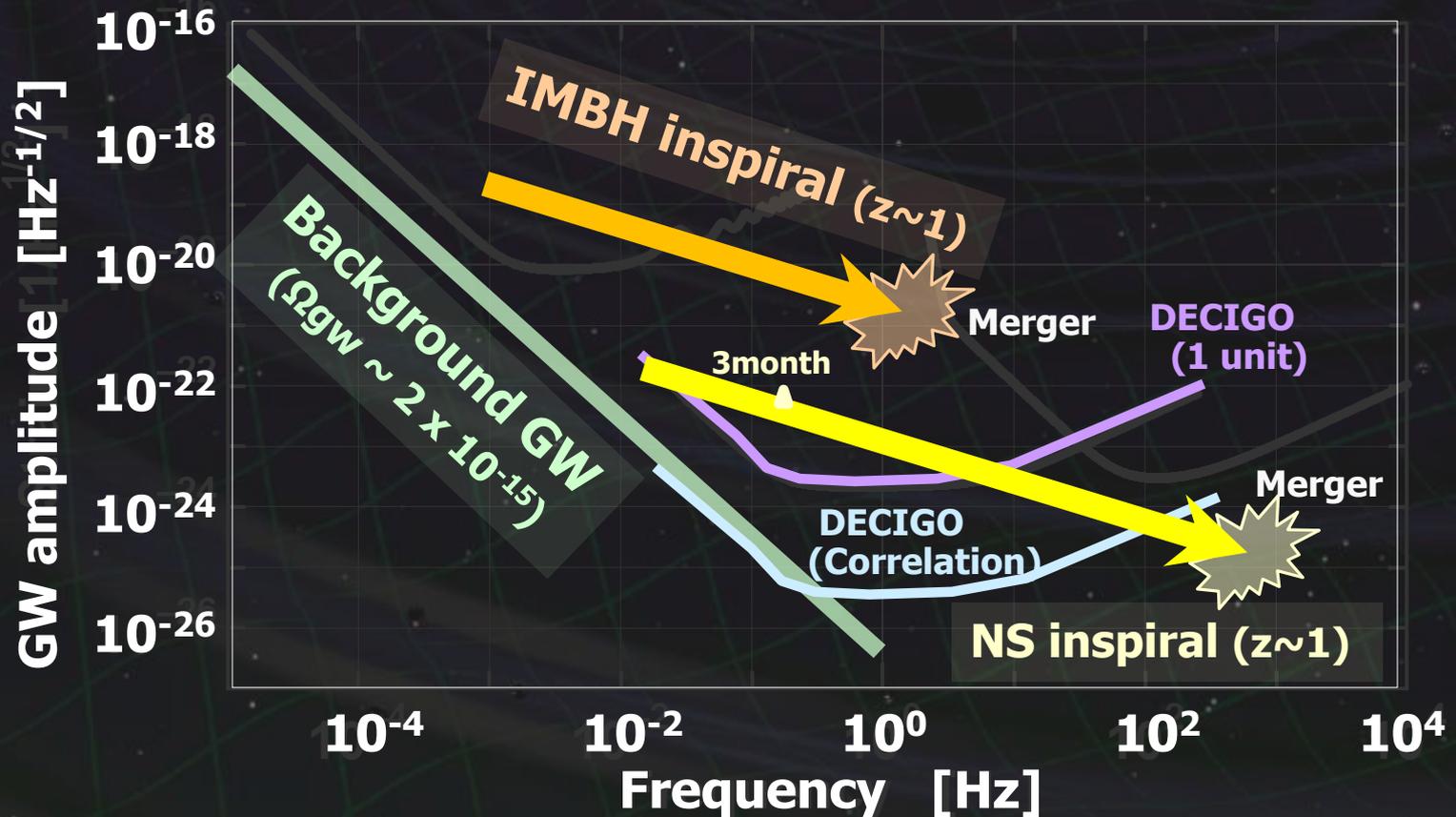


# DECIGOの主な観測ターゲット

中間質量BH の連星合体  
中性子星連星  
背景重力波



大質量BHと銀河の形成  
宇宙論パラメータ (Inflation, Dark energy)  
基礎物理法則

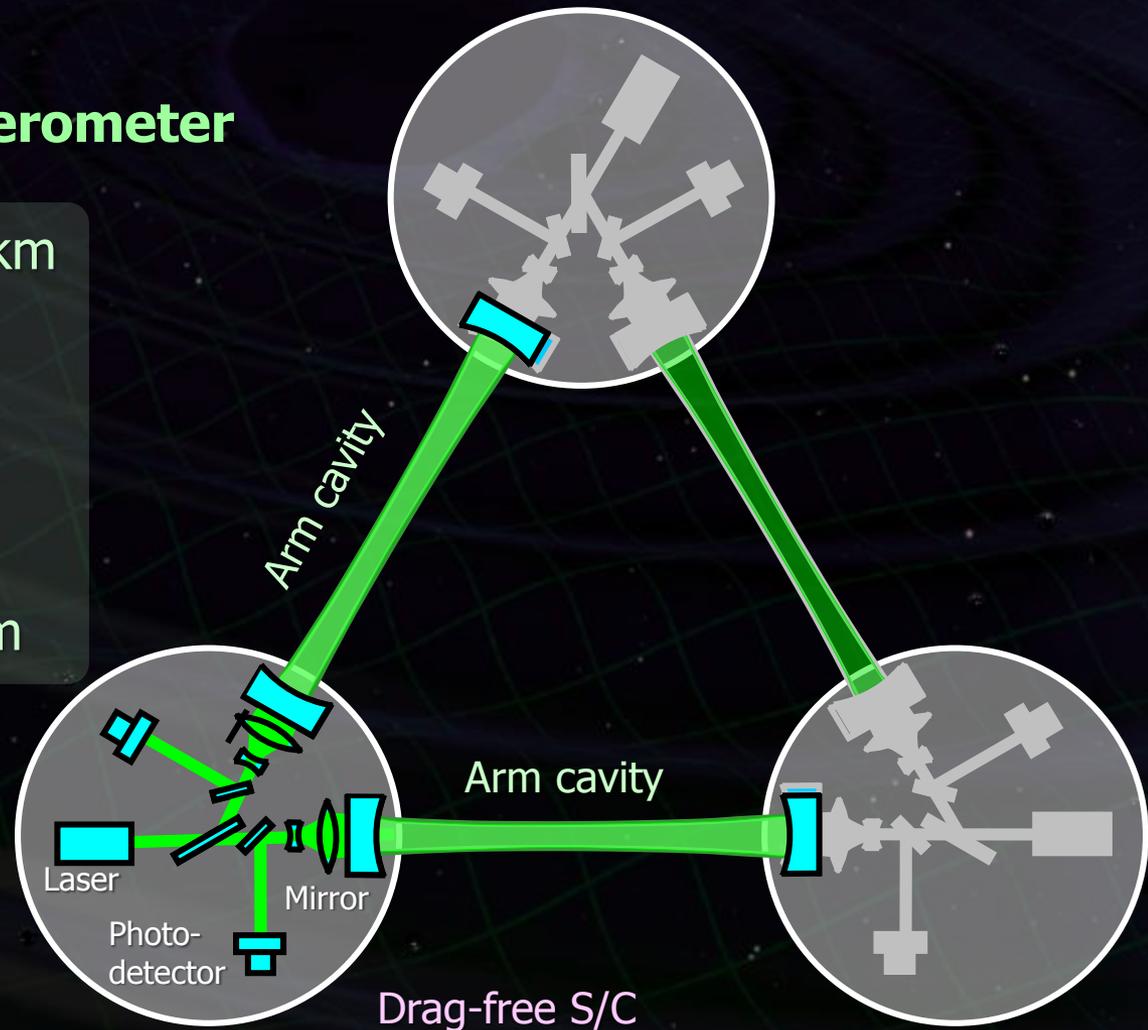


## Interferometer Unit:

### 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

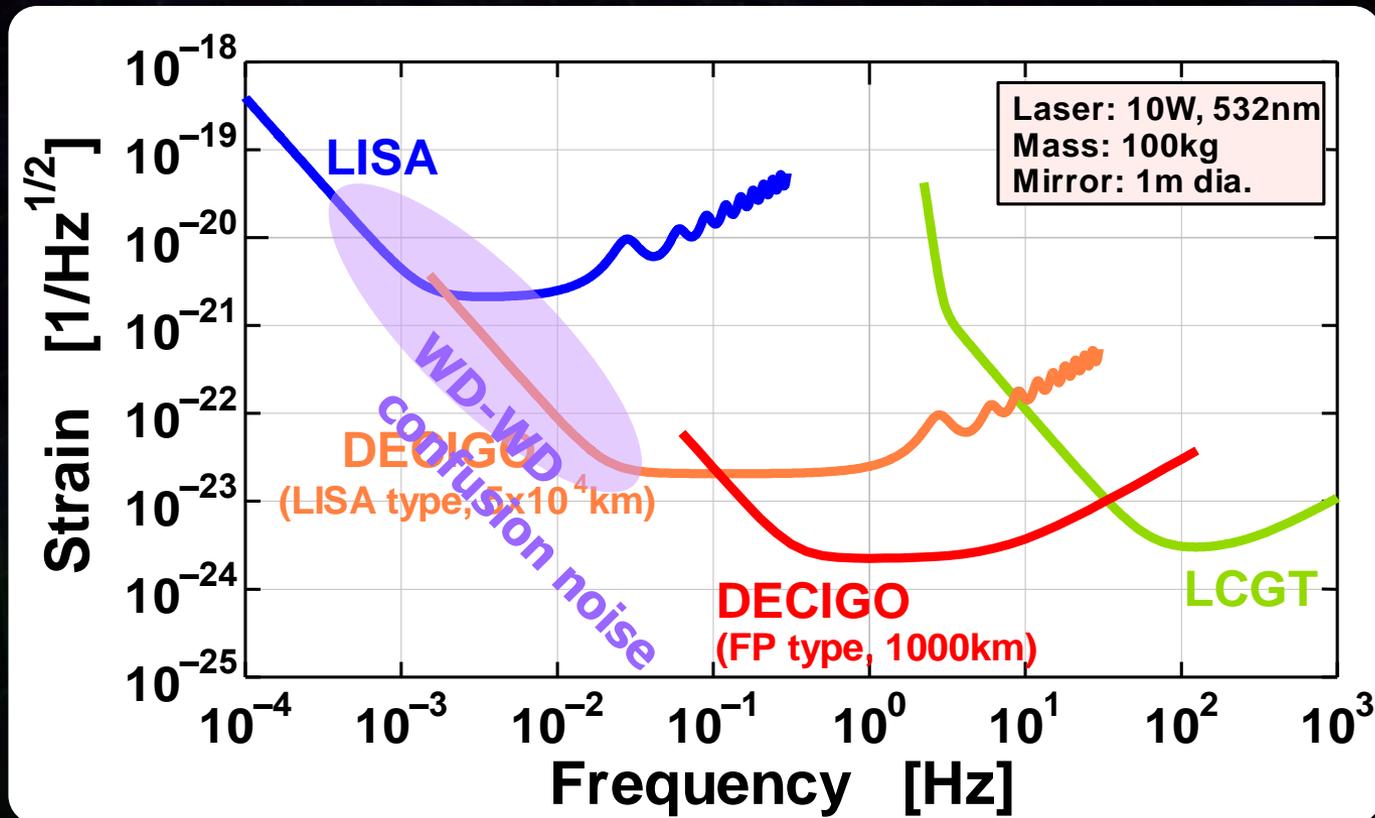
S/C: drag free  
3 interferometers



## 光トランスポンダー方式 VS 直接干渉方式

### 感度曲線と期待できるサイエンスの検討

➡ 決定要因: 連星による confusion noise



## 干渉計基線長：回折損失で制限されている

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

Laser wavelength : 532nm

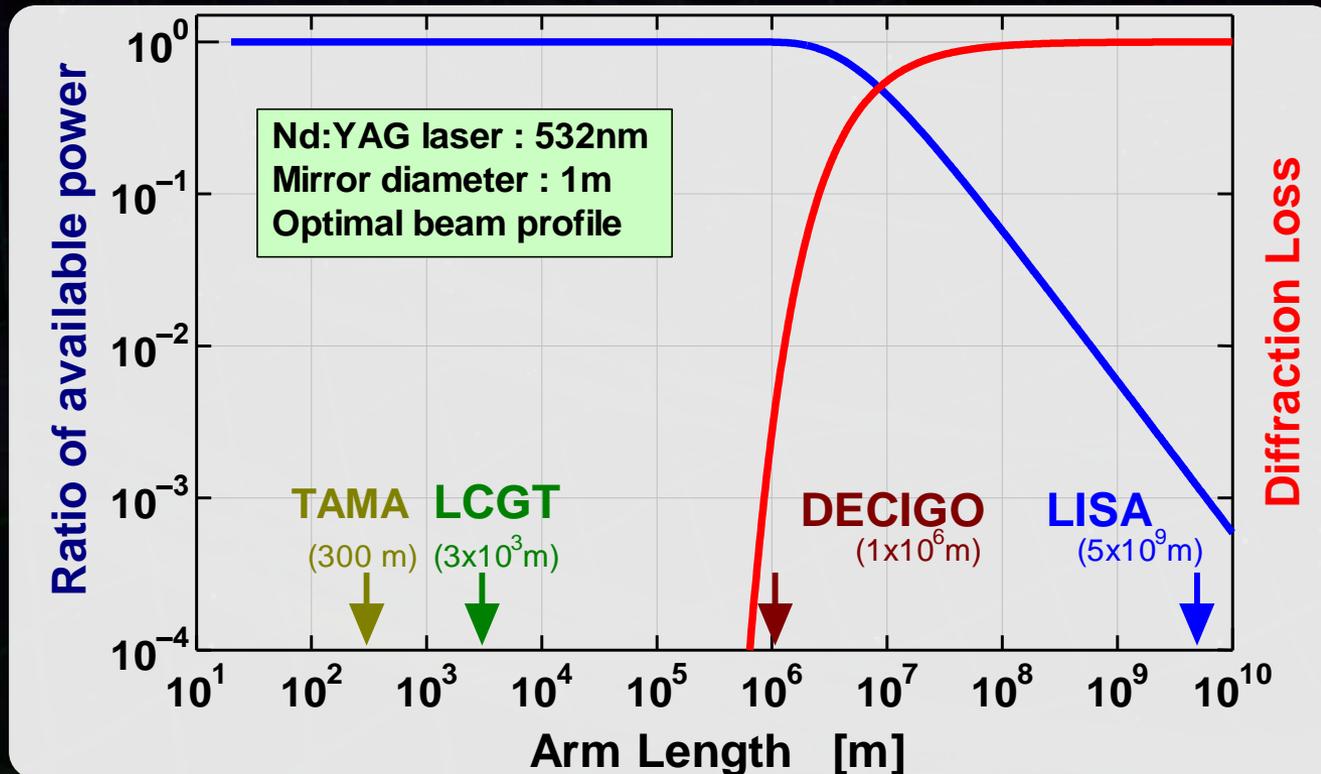
Mirror diameter: 1m

Optimal beam size



1000 km

がほぼ最大値



## 鏡間の距離 (光共振器長) の制御

干渉計出力信号 → 鏡の位置制御 (+レーザー周波数)

鏡と S/C の相対位置・角度変動

ローカルセンサ → S/C スラスタ (ドラッグフリー制御)

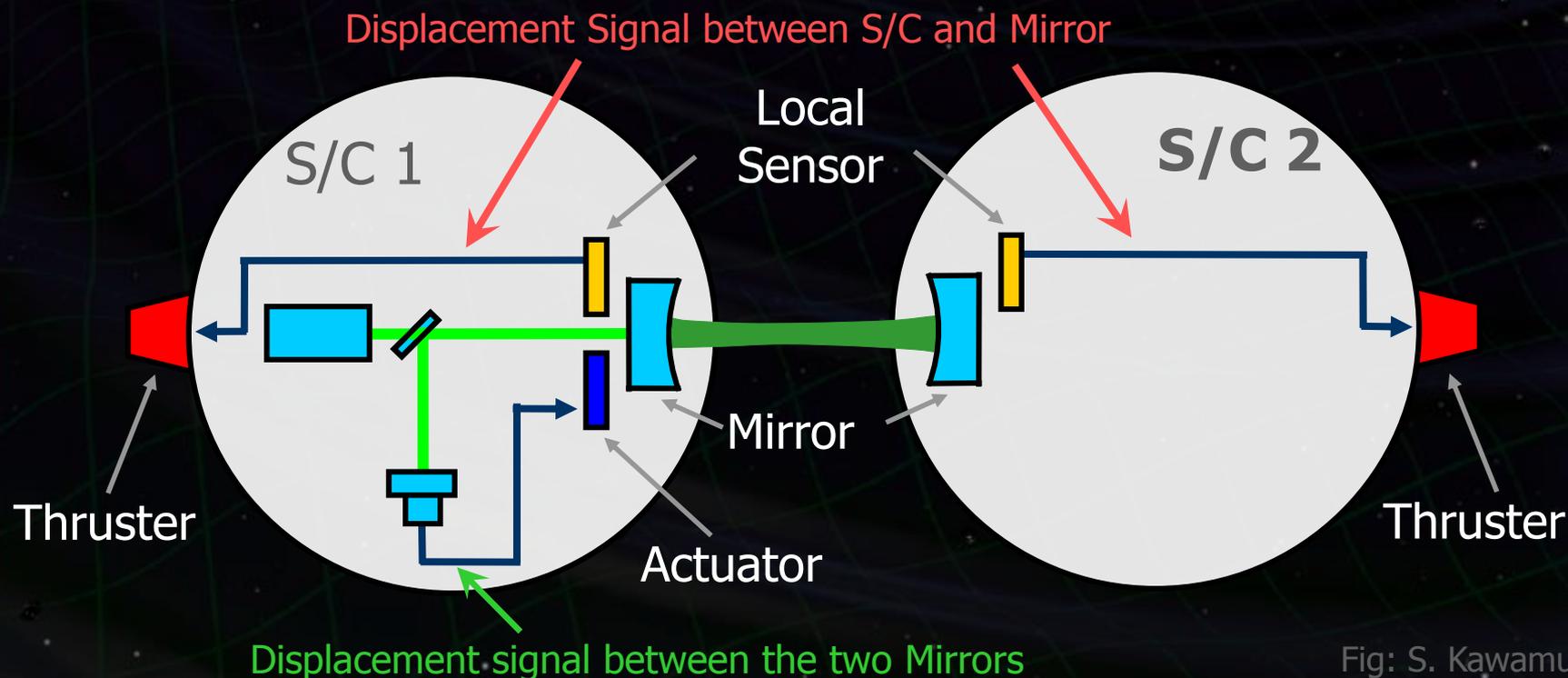


Fig: S. Kawamura

## 測距雑音

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

⇒ KAGRA より 10倍緩い要求.

他の雑音源は散射雑音以下に抑えられなければならない

Laser freq. noise:  $1 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$  (1Hz)

Stab. Gain  $10^5$ , CMRR  $10^5$

## 加速度雑音

試験マスへの外力雑音  $4 \times 10^{-17} \text{ N/Hz}^{1/2}$

(0.1 Hz) ⇒ x 1/50 of LISA

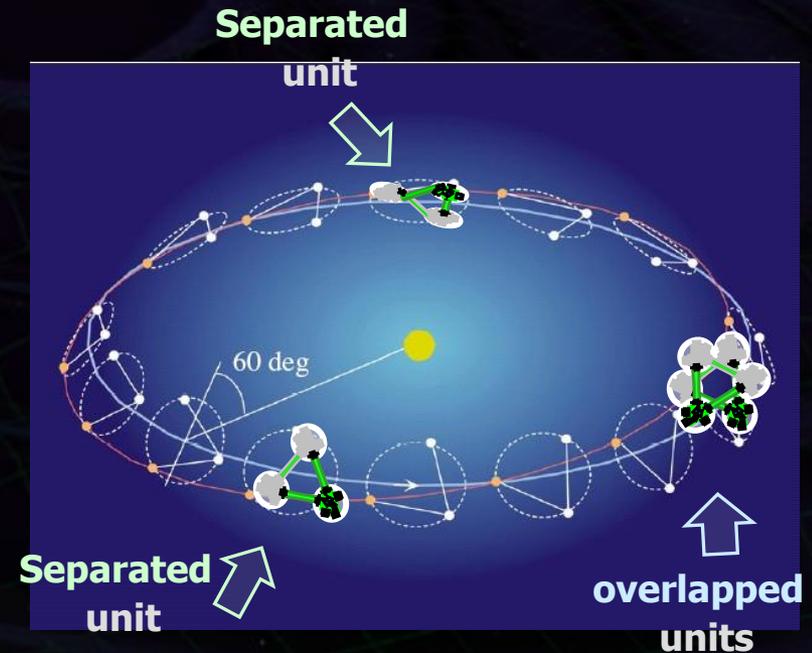
## 外乱雑音源

磁場変動雑音, 電場雑音, 重力場変動雑音,  
温度変動, 熱輻射, 残留気体の衝突, ....

## 軌道の候補

候補：太陽周りのレコード盤軌道

Relative acc.  $4 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2$   
(Mirror force  $\sim 10^{-9} \text{ N}$ )



## 編隊構成

4つの干渉計ユニット

2 overlapped units → Cross correlation

2 separated units → Angular resolution

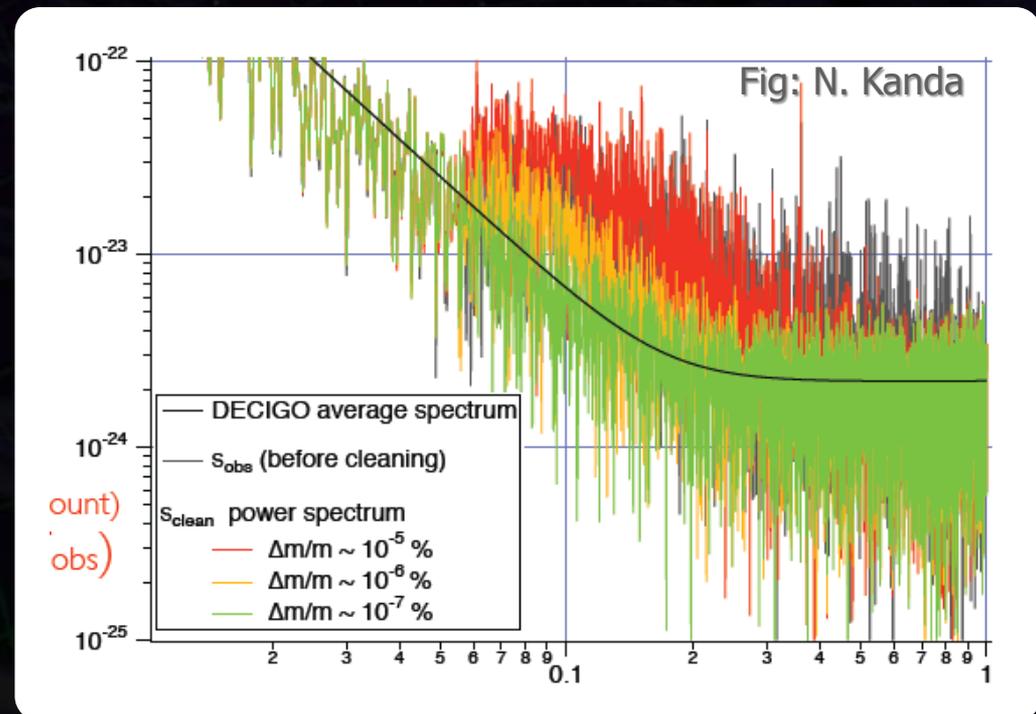
DECIGOの観測周波数帯: WD binary foreground はない。  
 → 宇宙論的観測にひらけた「窓」

DECIGOは  $\sim 10^5$  個の  
 連星中性子星を観測。

⇒ **GWBへのフォアグラウンドになり得る。**

原理的にはそれらを特定し、差し引くことが可能。

ただし、高い精度要求  
 $\Delta m/m < \sim 10^{-7} \%$



## Considering “Conceptual design”

By T.Akutsu

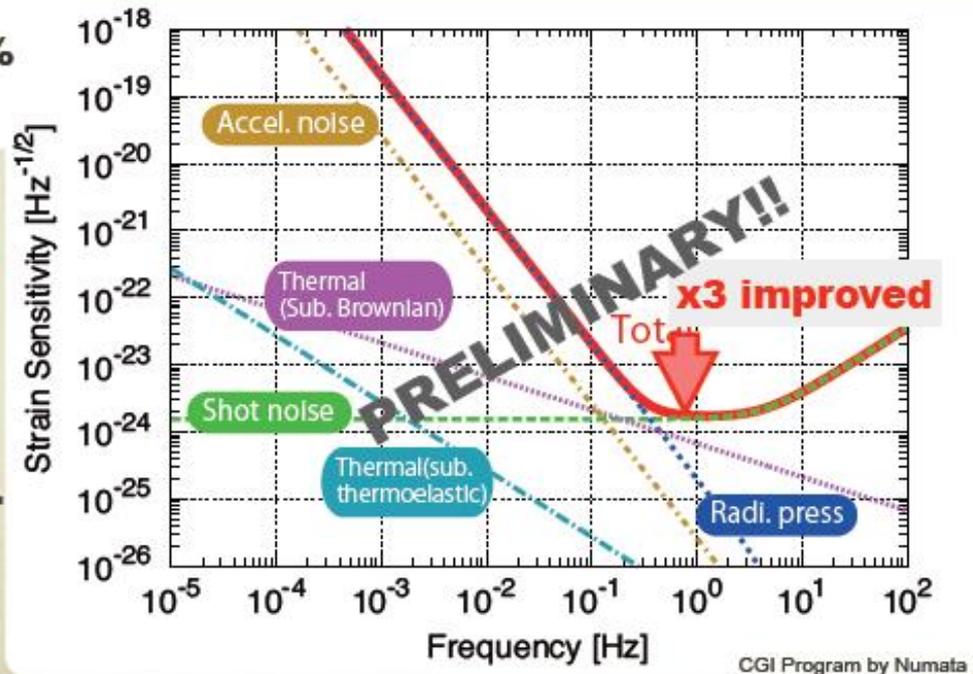
- Arm length: **1,500 km**
- Laser power: **30 W**
- Laser wavelength: 532 nm
- Mirror diameter: **1.5 m**
- Mirror mass: 100 kg
- Mirror reflectivity: **77.3%**
- Cavity g-param: 0.1

Preliminary  
 Parameters tuned

This is the first step to considering the **conceptual design**.

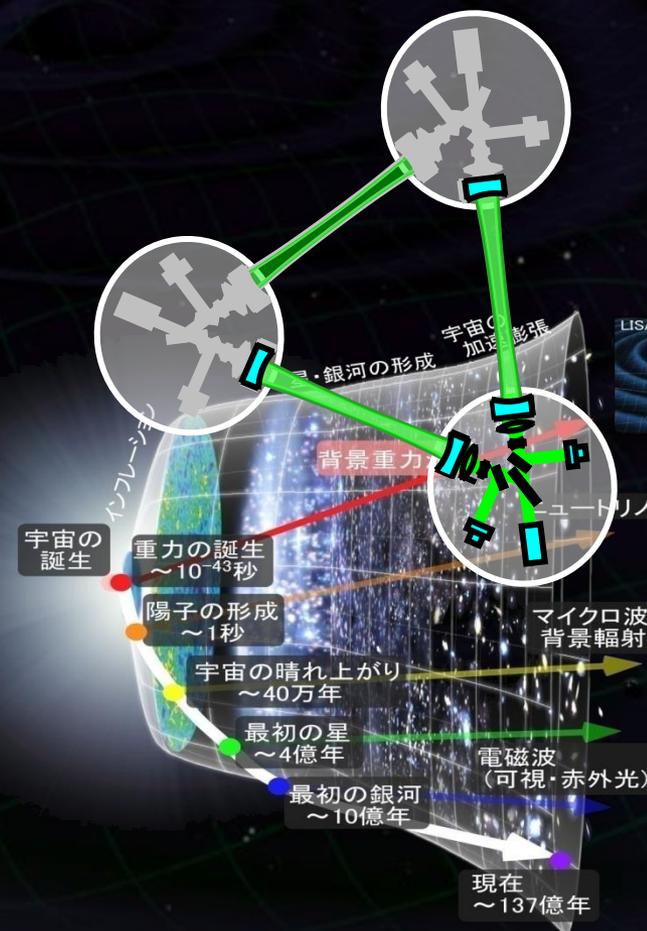
**Next:**

- ➔ Confirm the calculations.
- ➔ Find the realistic way to realize this!



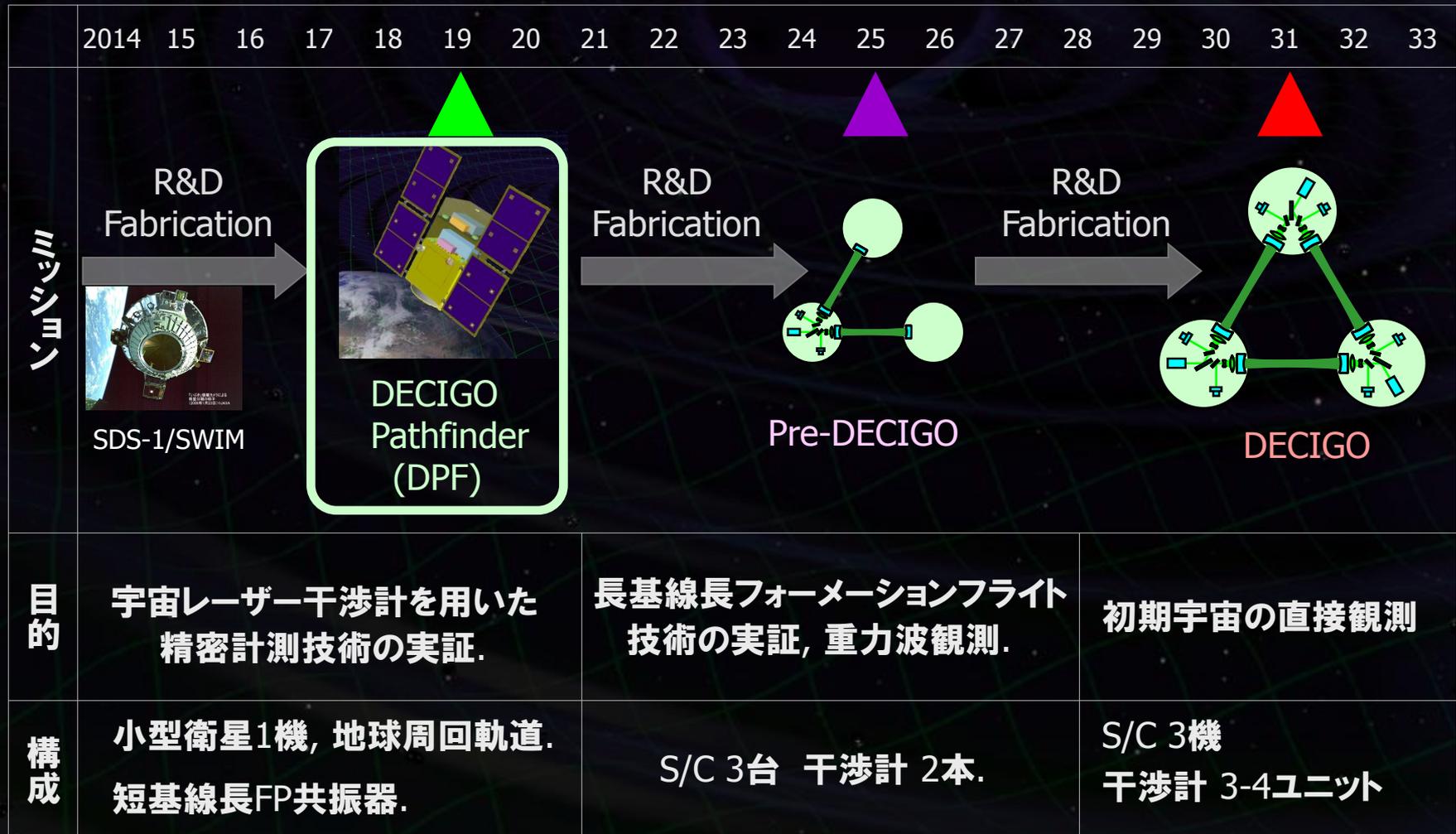
# ミッションの現状

- DECIGO Pathfinderを中心に -



# DECIGO実現へのロードマップ

Figure: S.Kawamura



## • 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。

⇒ DPFによる宇宙実証.

### (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。

⇒ Pre-DECIGOによる宇宙実証.

## 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。



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)

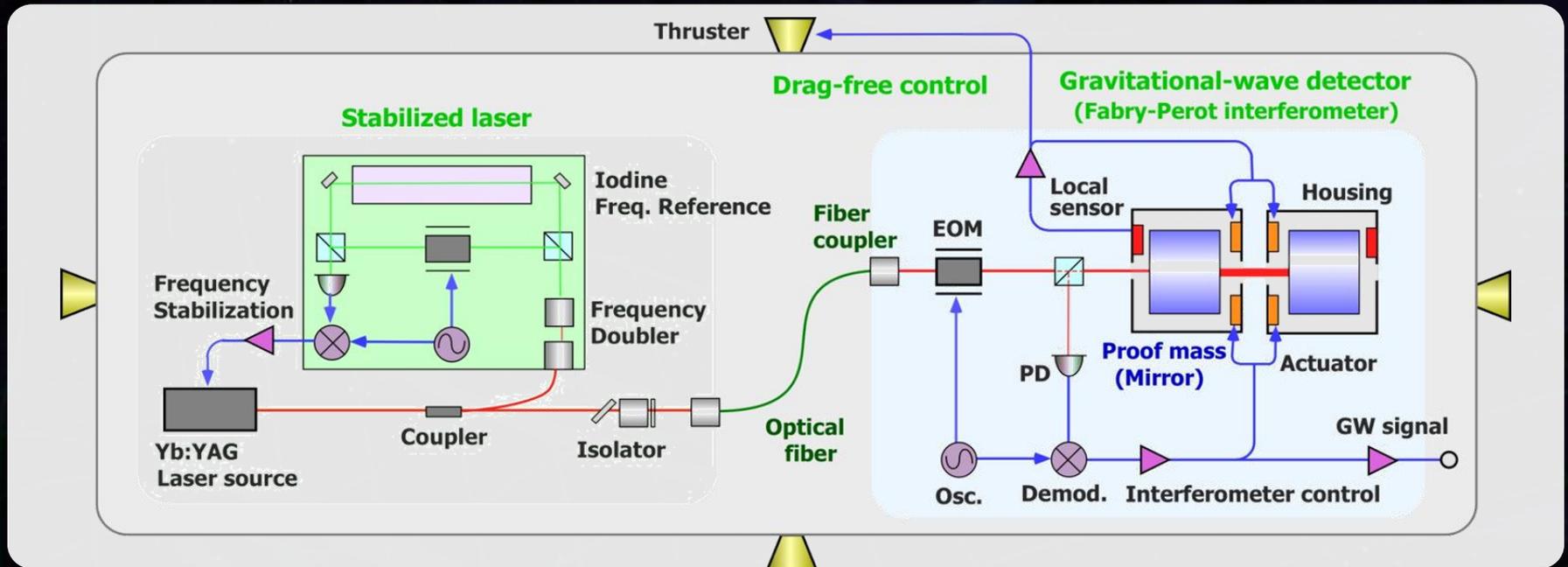
地球周回軌道 (高度 500km)

Earth Image: ESA

# 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

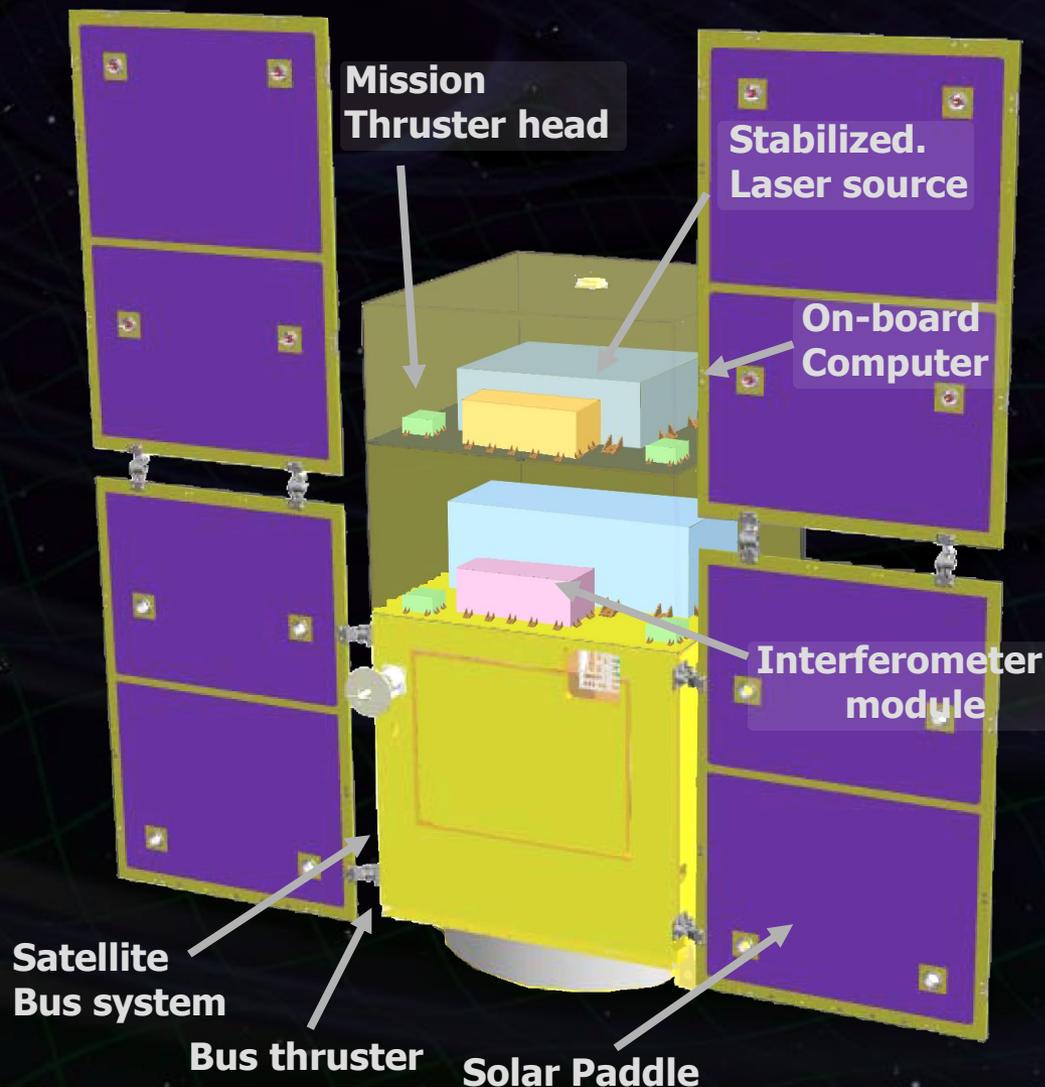
Size : 950mm cube  
Weight : 220kg  
Power : 150W  
Data Rate: 800kbps  
Mission thruster x10

Power Supply  
SpW Comm.

## Satellite Bus

(‘Standard bus’ system)

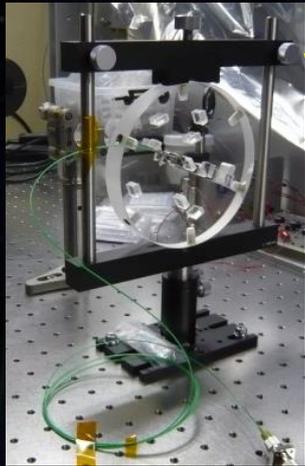
Size :  
950x950x1100mm  
Weight : 230kg  
SAP : 960W  
Battery: 50AH  
Downlink : 2Mbps  
DR: 1GByte  
1N Thrusters x 4



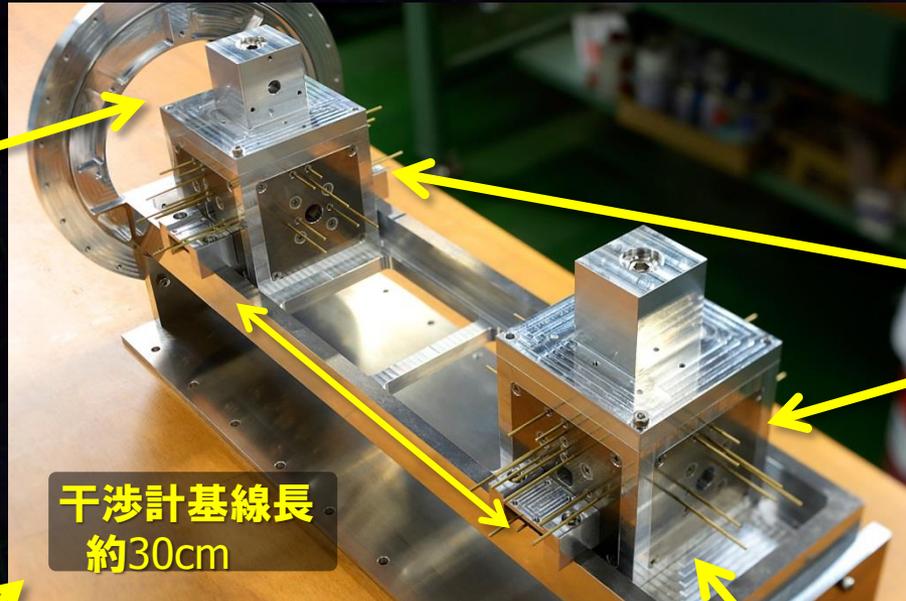
# 干渉計モジュール

## 入出射光学系

シリケートボンディングにより一体化



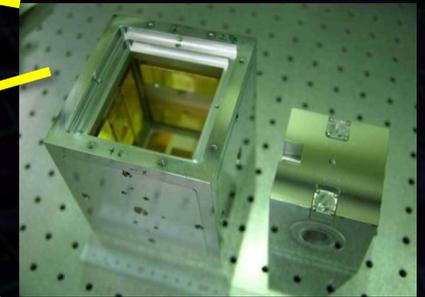
## 干渉計モジュール



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



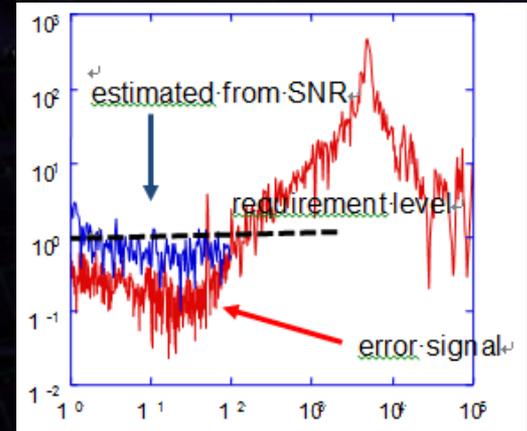
# 周波数安定化モジュール

## ・周波数安定化モジュールBBM1 (~2011, 電通大)

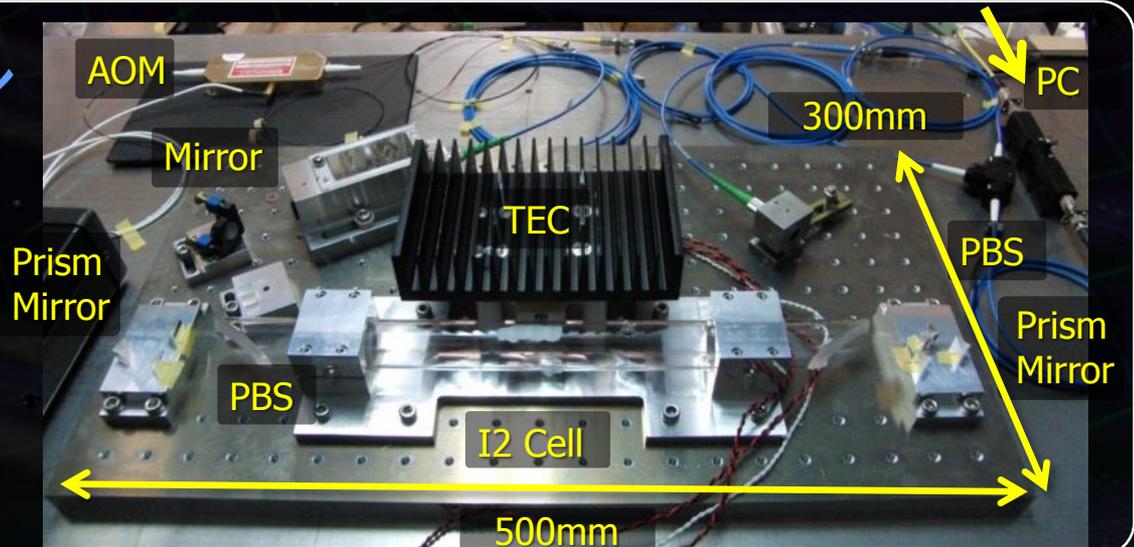
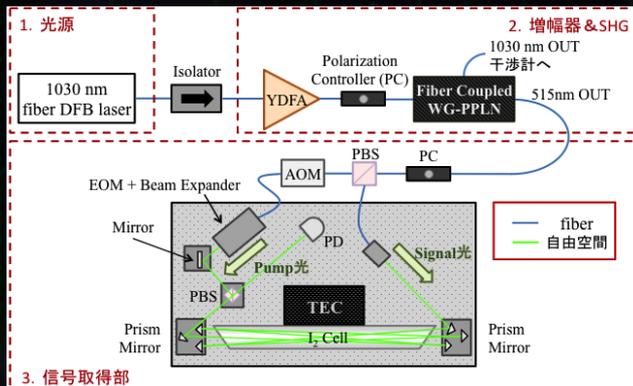
- ヨウ素セルを用いた周波数安定化.
- 安定度要求 ( $0.5 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ )を満たす.

## ・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



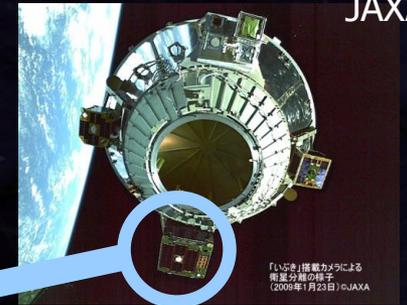
# SWIMによる宇宙実証

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

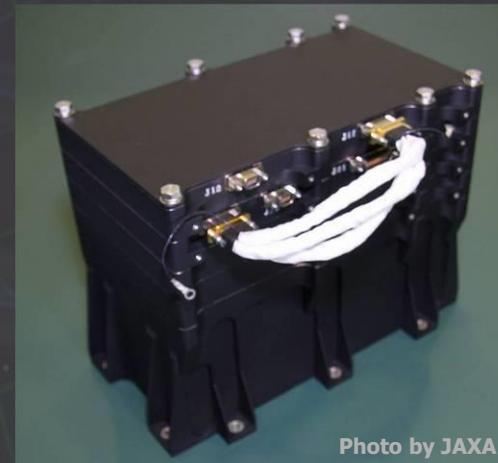


Photo by JAXA

SDS-1  
Bus System

Power +28V  
RS422 for CMD/TLM  
GPS signal

Power ±15V, +5V  
SpW x2 for CMD/TLM

## JAXAのイプシロン搭載小型衛星

1号機 ひさき (SPRINT-A) (2013年)

UV望遠鏡による惑星観測

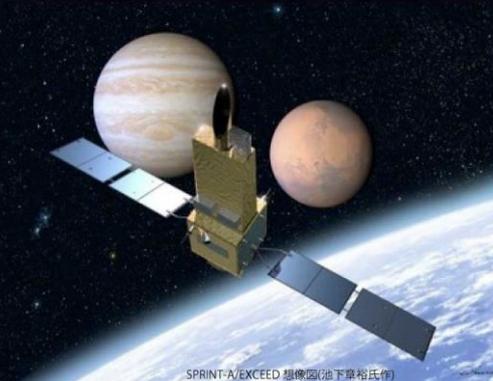
2号機 ERG (SPRINT-B) (~2015/16年)

地球周辺の磁気圏観測



DPF: 小型科学衛星3号機 を目指していた

ことしの公募では落選.



小型科学衛星1号機 SPRINT-A/EXCEED



Epsilon Rocket Booster  
Photo by JAXA

- ミッション提案の結果として、2014年のイプシロン搭載小型ミッションの選考において、DPFのミッション提案は採択されなかった。

## • 重要な要因

- DPFは2007年よりWG活動を続けてきた。2010年にKAGRAが採択 → 重力波コミュニティの最優先プロジェクト。最優先ではないDPFの実現性に懸念が示されるのは避けがたい。
- 宇宙科学におけるイプシロン搭載ミッションの位置づけが、時間とともに変化していた。DPFの構成も状況に応じて変化させてきたが、目的と手段の最適化には至らなかった。

# JAXAのミッション計画



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)

分類	ミッション・事業名称	状況	第2期中期計画				第3期中期計画				第4期中期計画				第5期中期計画				備考					
			FY20	FY21	FY22	FY23	FY24	FY25	FY26	FY27	FY28	FY29	FY30	FY31	FY32	FY33	FY34	FY35		FY36	FY37	FY38	FY39	
戦略的に実施する 中型計画	はやぶさ2	開発中	▲PJ準備 ▲PJ移行		▲打上				▲小惑星到着 ▲地球帰還															
	ASTRO-H	開発中	▲PJ移行 ▲PDR		▲打上				▲打上															
	将来計画 (仮称:M1-M4) 4年に1回AO発出 開発期間6年 (5~7年)	計画中				★公募(AO)	▲PJ移行				★公募(AO)	▲PJ移行	▲打上											FY2021(20-22)▲ FY2025(26-28)▲ FY2029(30-33)▲ FY2033(32-34)▲
公募型 小型計画	惑星分光衛星衛星	開発中	▲SOR/PJ移行		▲打上																			
	ジオスペース探査衛星	開発中	▲MDR/SOR ▲RSP ▲SDR ▲POR		▲打上																			
	BepiColombo	開発中	▲CDR		▲打上 ▲打上				▲打上 ▲打上				▲打上 ▲打上											
将来計画 (仮称:S1-S7) 2年に1回AO発出 開発期間4年	計画中				★公募(AO)	▲PJ移行				★公募(AO)	▲PJ移行	▲打上											FY2019▲ FY2020▲ FY2022▲ FY2024▲ FY2026▲ FY2028▲ FY2030▲	
多様な小規模 プロジェクト群	計画中				★計画決定	異議がなされる状況に応じて、随時AO発出・計画決定・実行する。																		
基盤的 活動費	学術研究・実験等 軌道上衛星の運用 宇宙科学施設維持	継続的に 実施中	有米のミッション選出につながる学術研究・実験等の推進や衛星運用、施設維持の実施に必要な活動費。 従前より効率化努力を行って来たところ、更なる効率的な執行に努める。																					

## • 今後の見通し

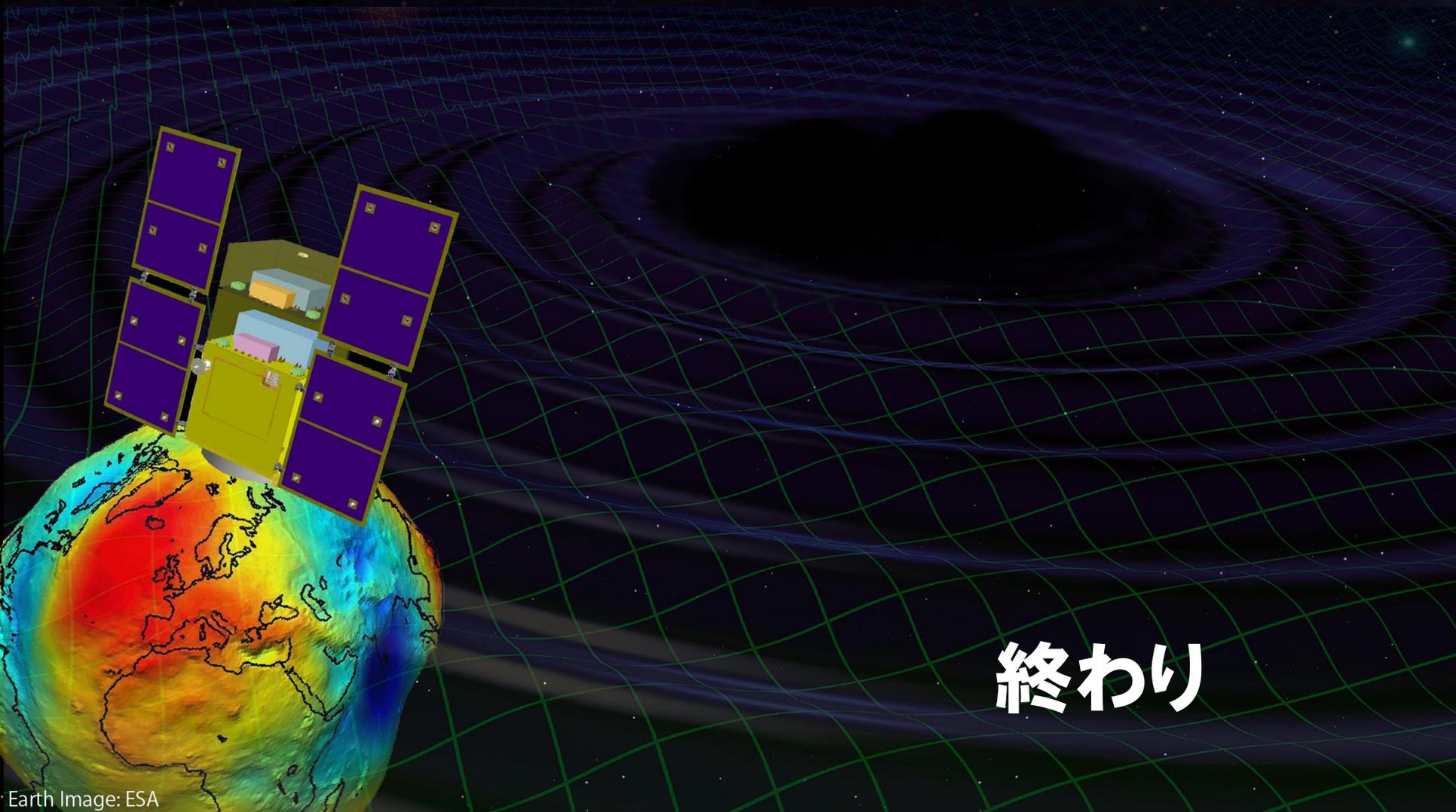
- 少なくとも今後3年間程度は, KAGRAを最優先とする状況が変化することはない. → 今回の落選理由を考慮すると, **次機イプシロンミッションに採択される可能性は低い.**
- DPFの構成は, 長年の一連のミッション検討における歴史的経緯を引きずっている部分もあり, 必ずしも洗練されていない.

⇒ DECIGOに向けた戦略の**見直しが必要.**



# まとめ

- DECIGOは、他では得られない大きな科学的意義をもつ。  
必ずいつかは実現されるはずである。
- 2014年に募集のあった、イプシロン搭載小型ミッションの  
選考において、前哨衛星DPFの提案は採択されなかった。
- 搭載機器の開発を継続するとともに、現在、戦略の再検討  
を進めている。



終わり

Earth Image: ESA