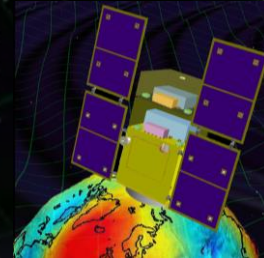
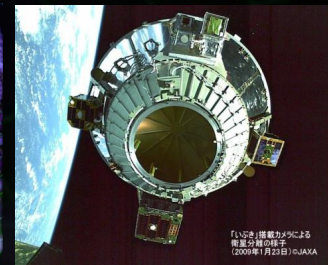
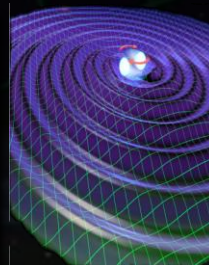
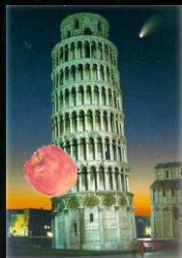


日本物理学会 2014年秋季大会 原始重力波シンポ

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.

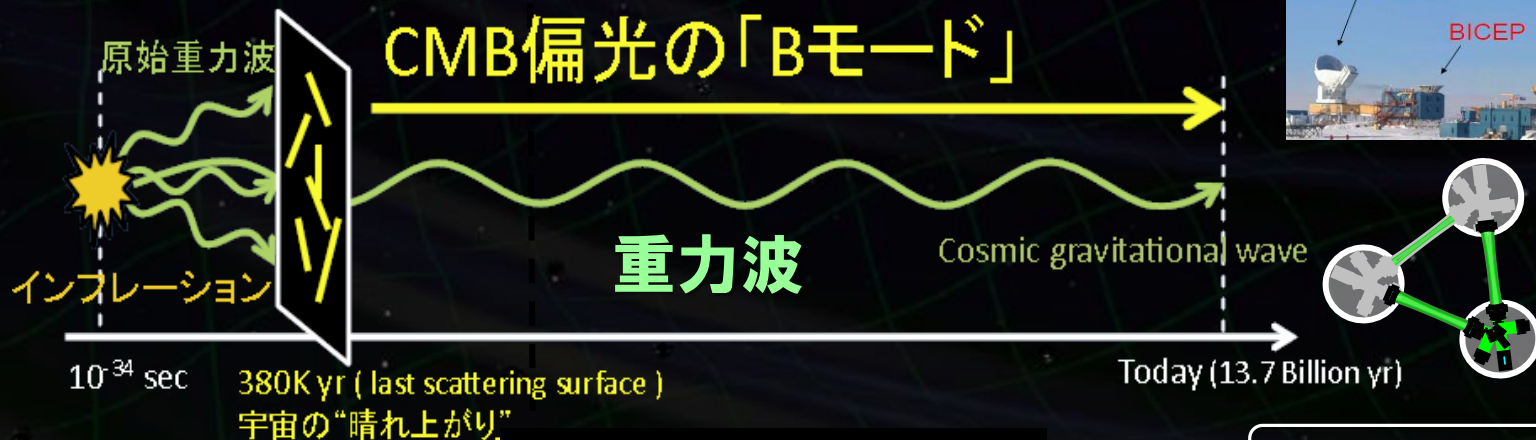
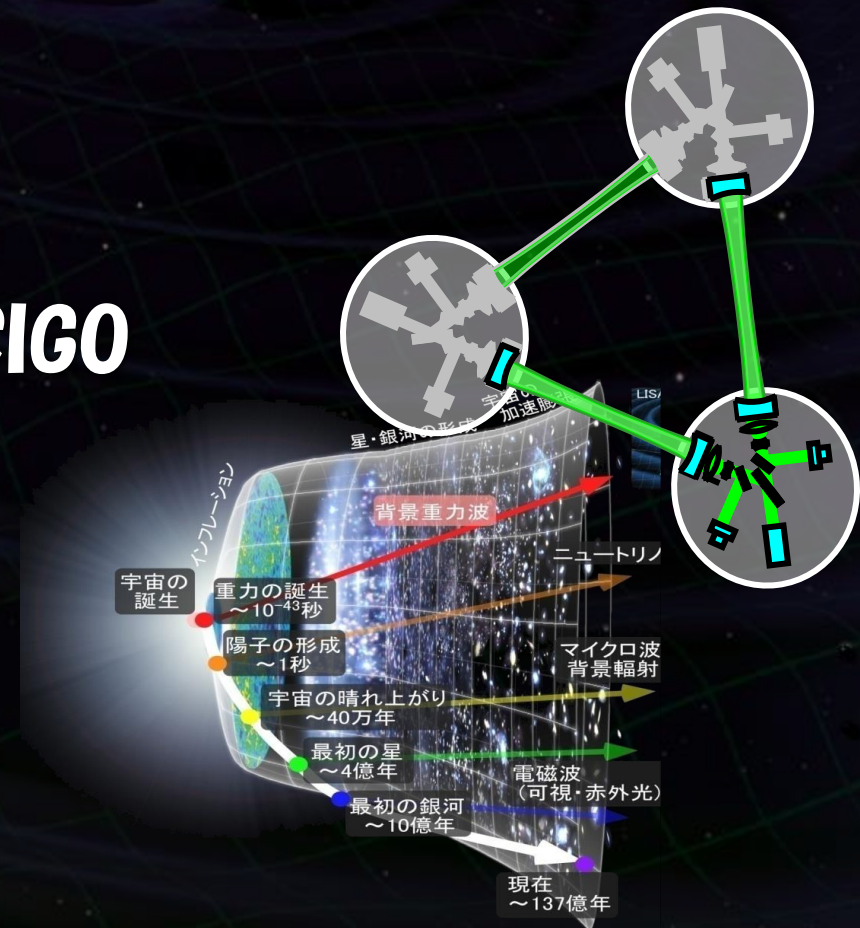
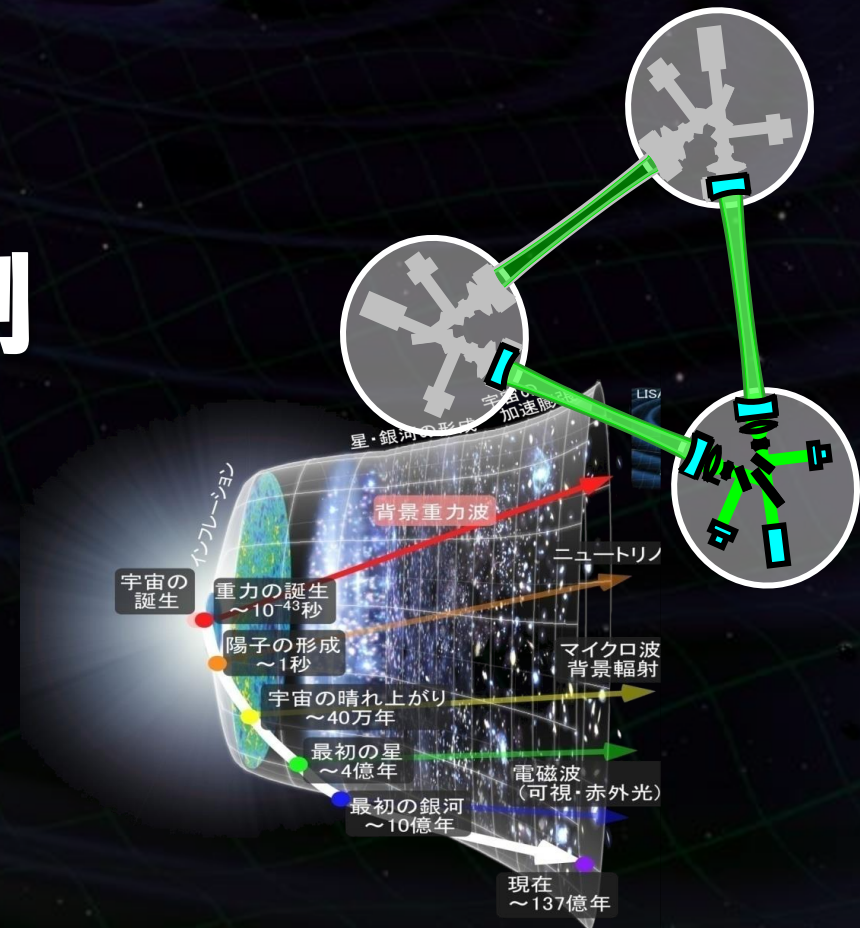


図: 田島氏談話会資料より(2011 京都大学)

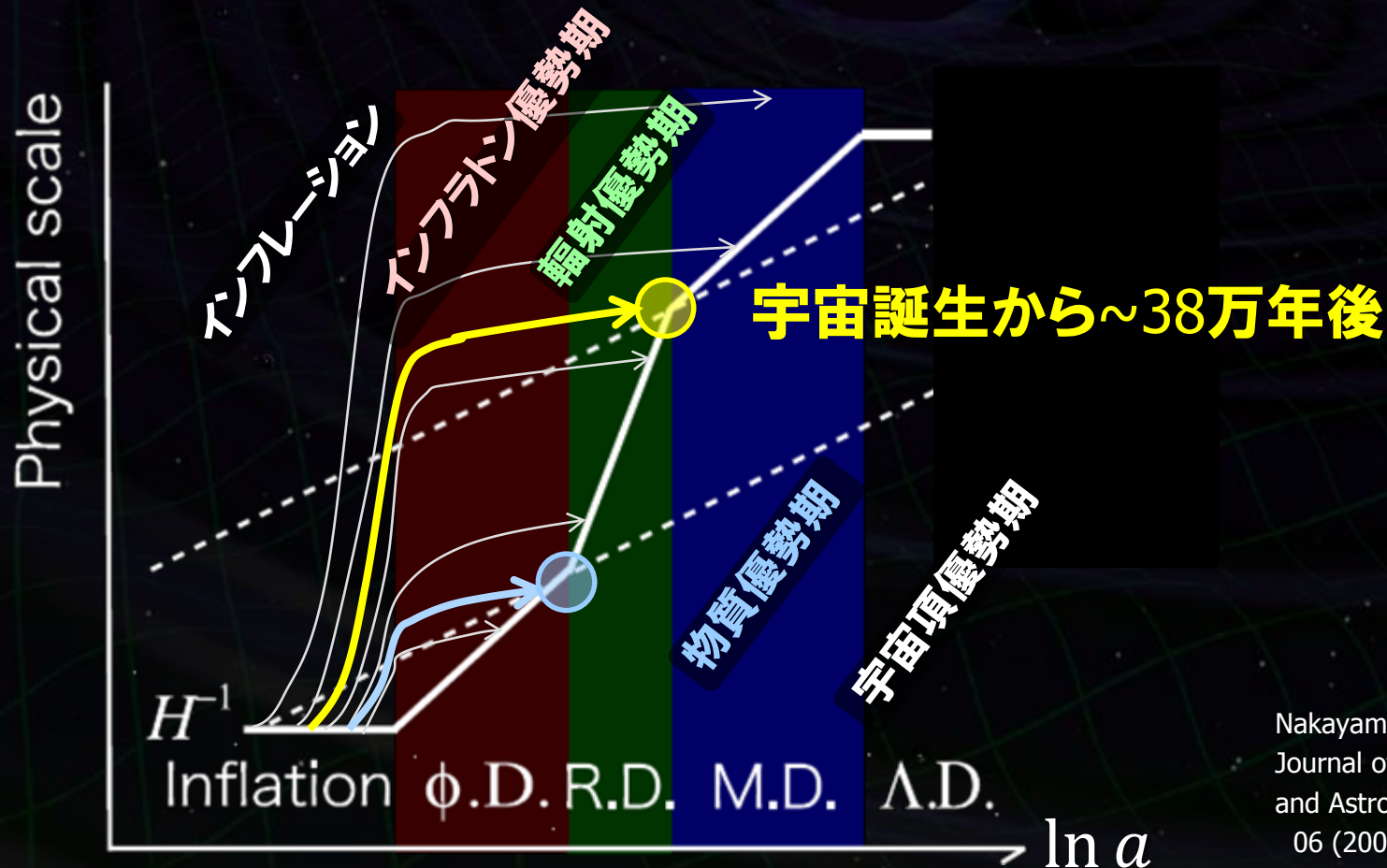
- 原始重力波の観測
- 宇宙重力波望遠鏡DECIGO
- ミッションの現状



原始重力波の観測

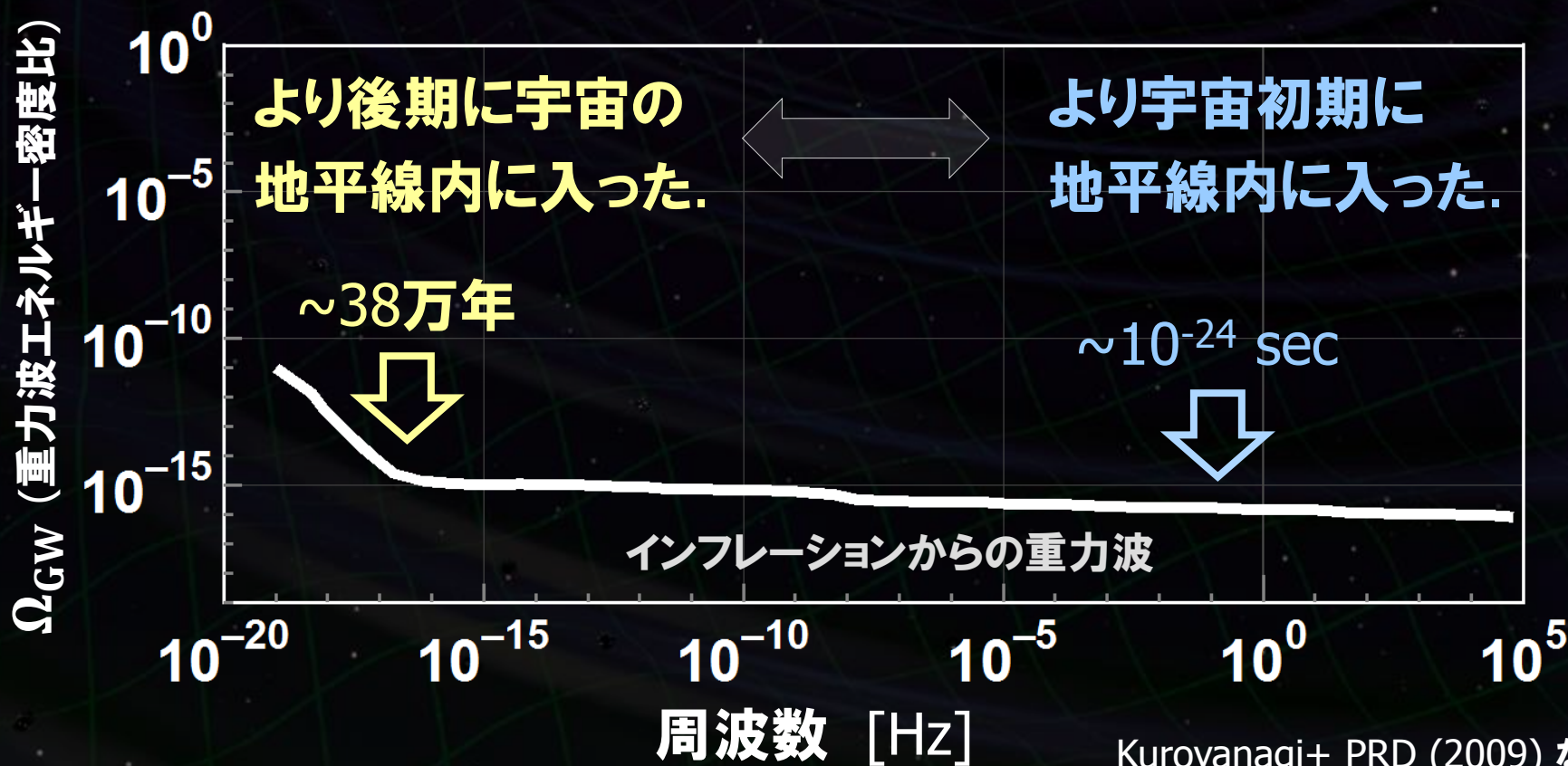


計量の量子揺らぎとして生成 → 初期に生成された重力波ほど、長くインフレーションで引き延ばされ、最近に宇宙の地平線内へ。



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。



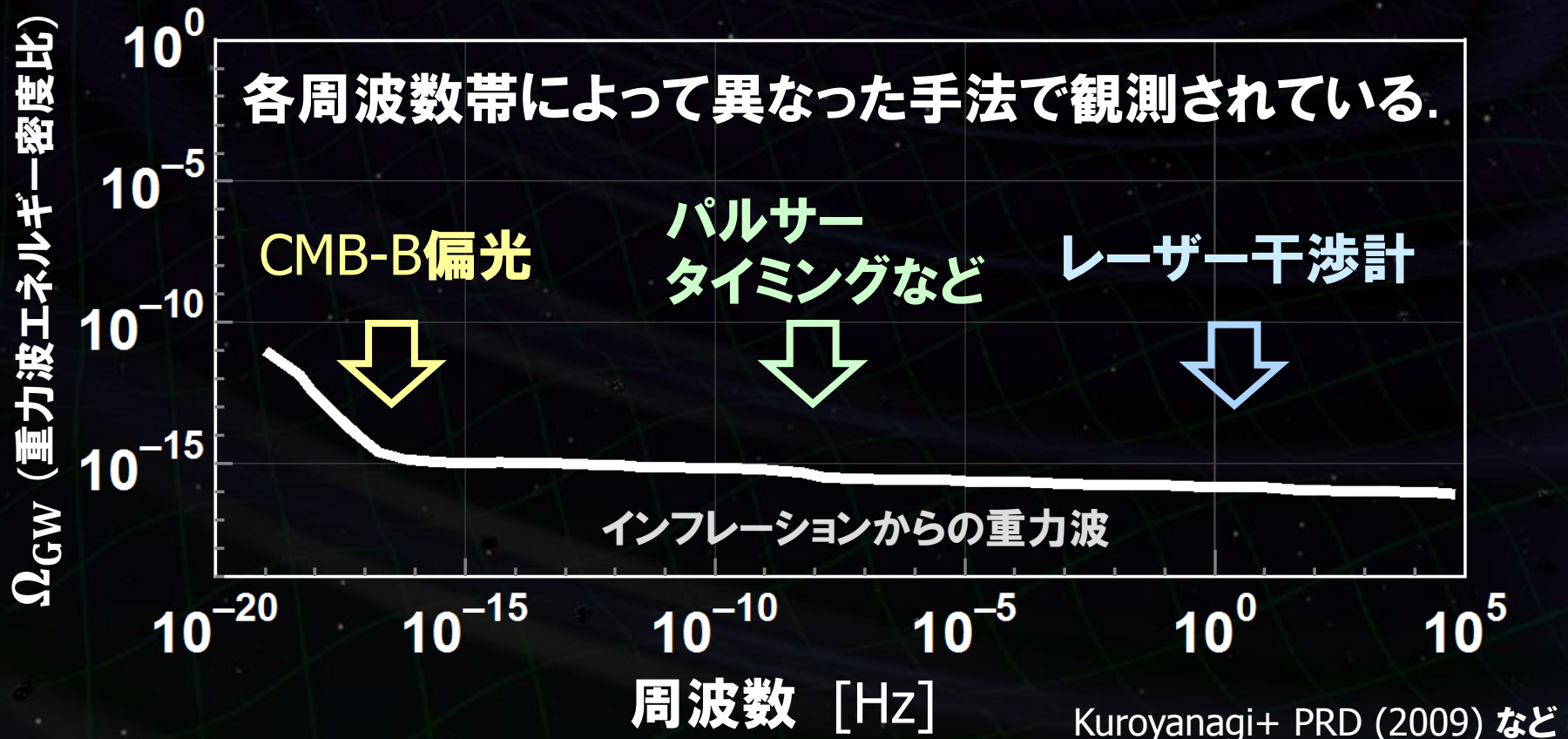
重力波のエネルギー密度比

重力波のエネルギー密度

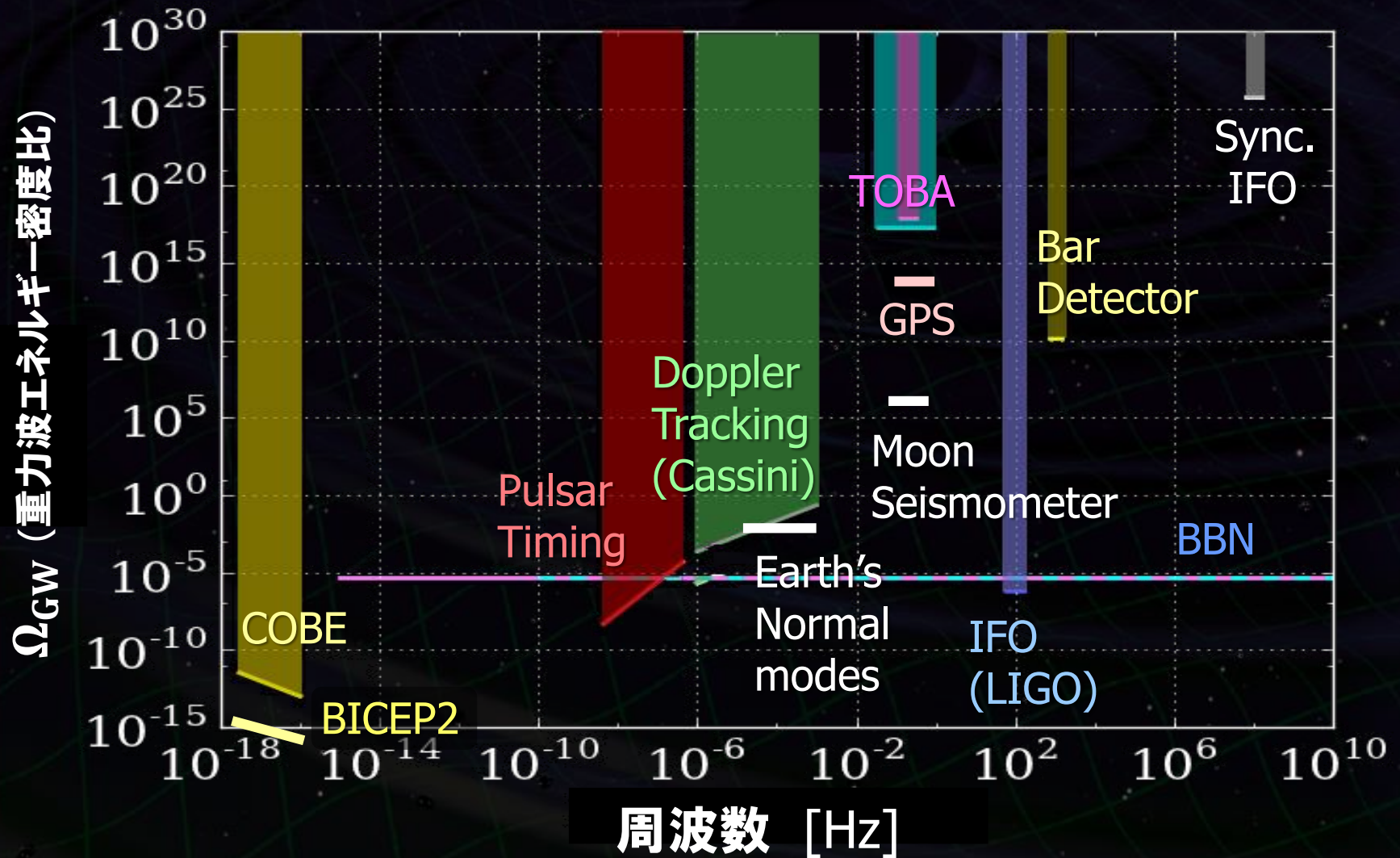
$$\Omega_{\text{GW}}(f) = \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}(f)}{d \ln f}$$

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

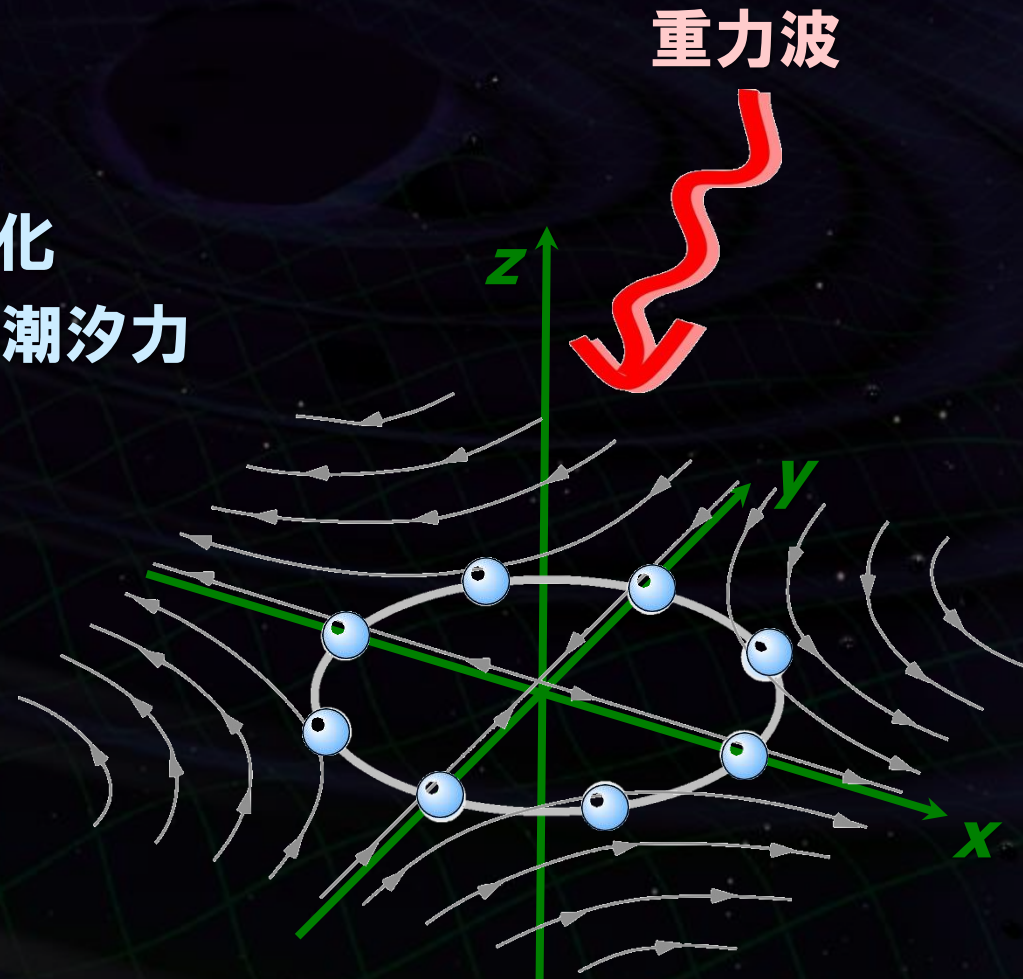
- 自由質点間の距離の変化
- 大きさを持った物体への潮汐力

重力波の振幅 h :
無次元の歪み量

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

δL : 距離変動

L : 2点間の距離



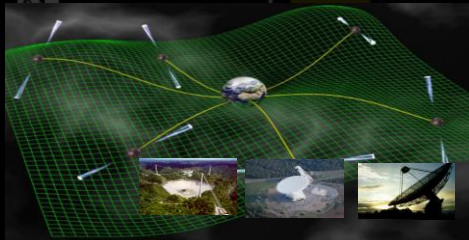
$h = 10^{-24} \rightarrow 1\text{m}$ の距離が 10^{-24}m 伸縮.

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)

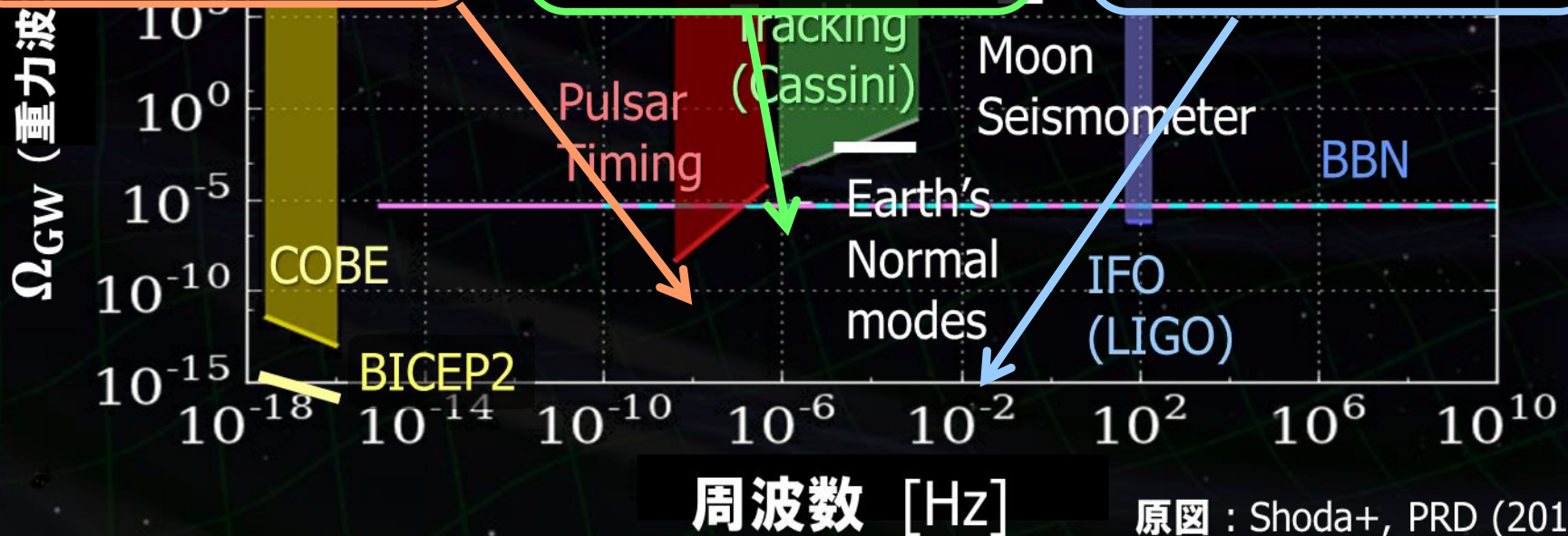
宇宙機・人工衛星との電波通信を利用。



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)

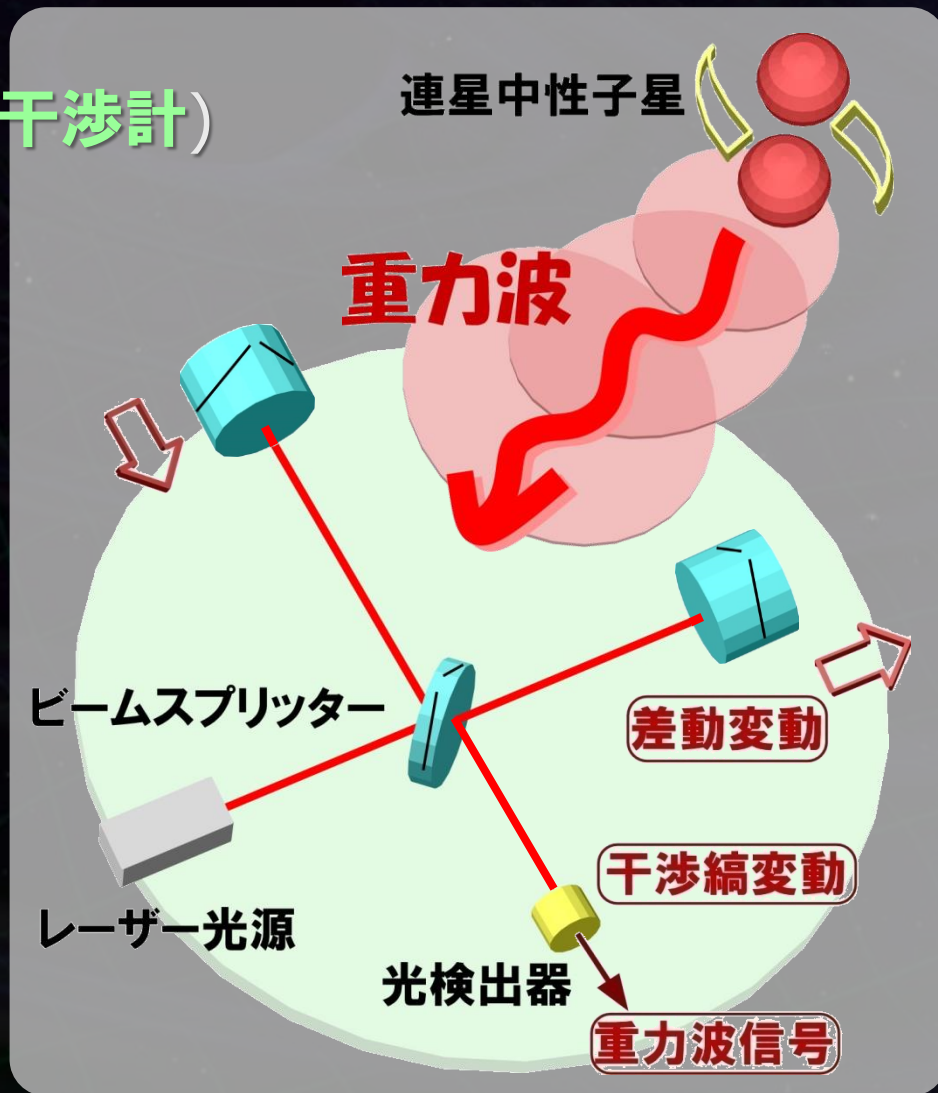
レーザー干渉計 (マイケルソン干渉計)

- 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渉.
- 光検出器で観測.

重力波が入射



腕の長さの差動変動を
干渉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


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

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

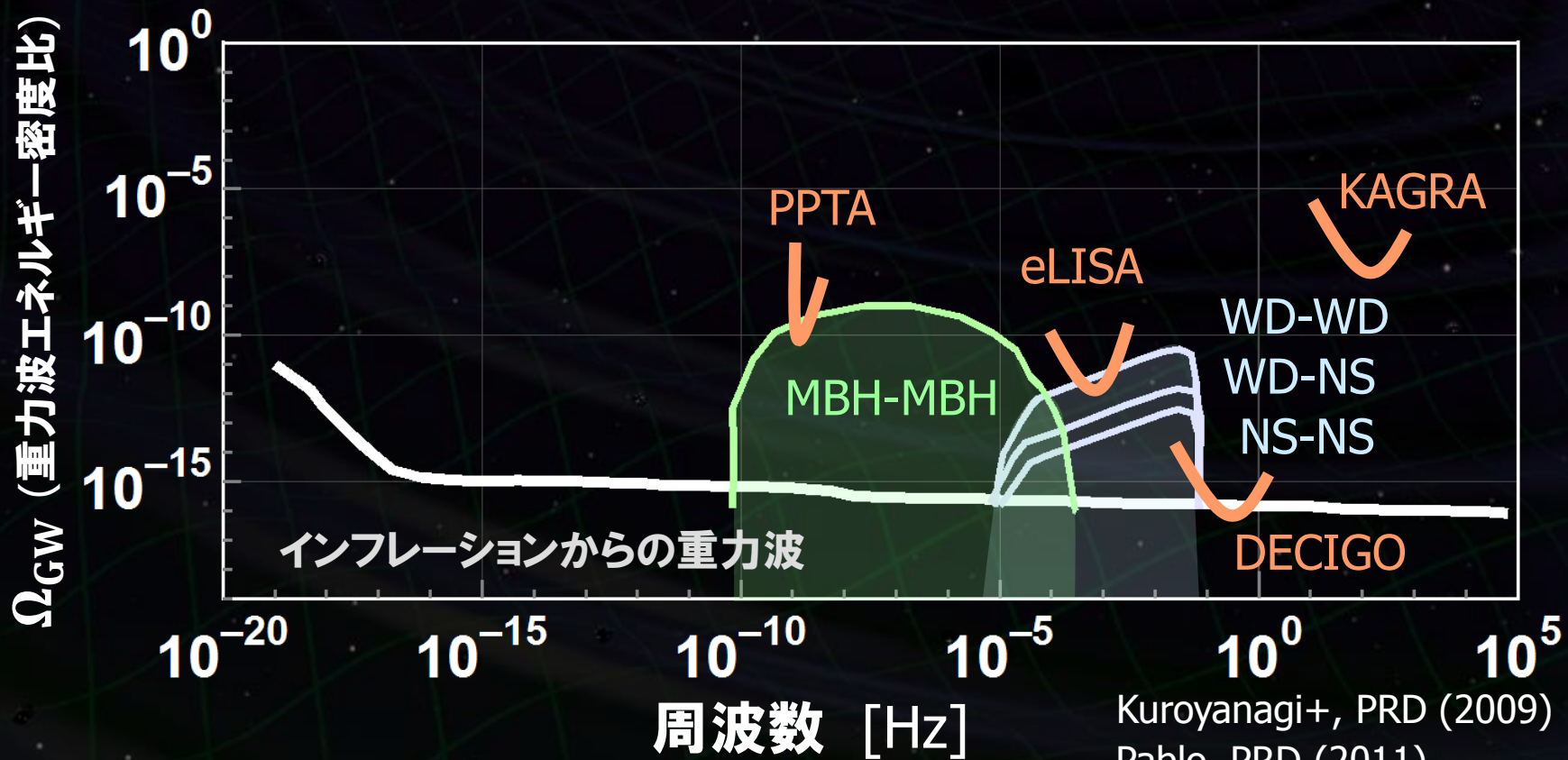


高周波数では振幅は小さくなる

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。



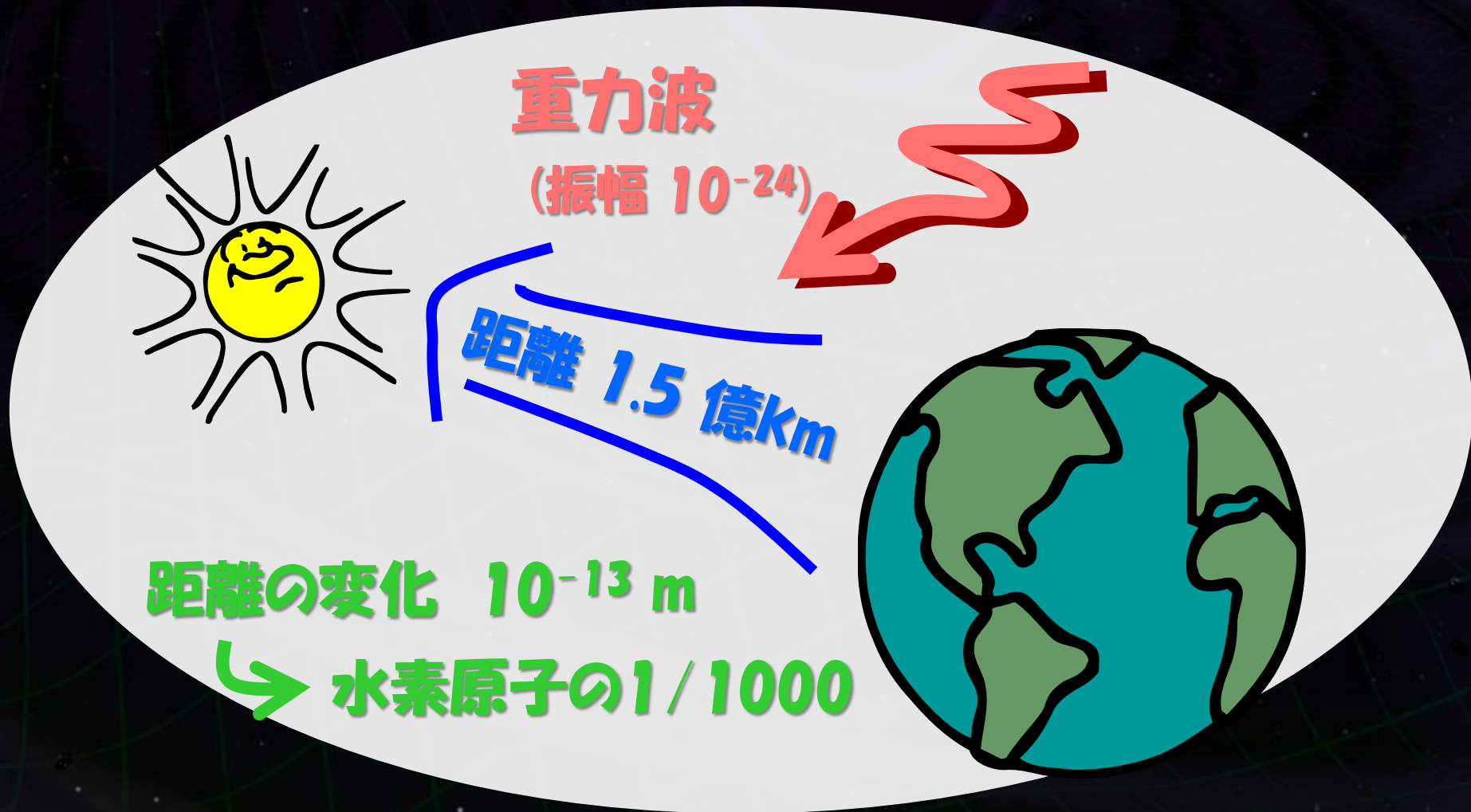
- さまざまな周波数帯で原始重力波観測を観測することで宇宙の進化の情報を得ることが可能.
- インフレーションからの重力波観測には低周波数が有利.
- 0.1Hz以下の周波数帯では, フォアグラウンド重力波が存在.



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.

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

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.

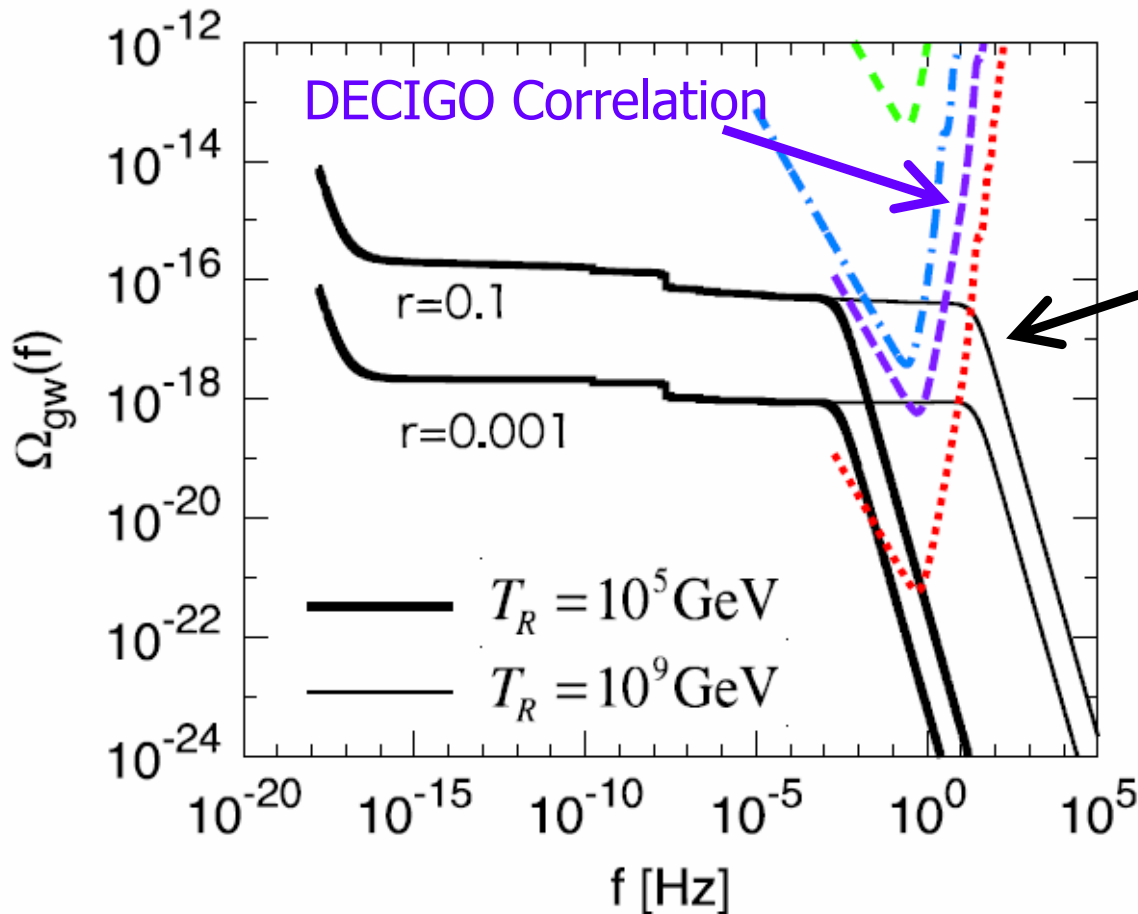
観測周波数と宇宙の時代が対応.
高周波数 → より初期宇宙以降の
情報.

- Reheating温度(物質の種の形成)
- 宇宙の熱進化史

⇒ **最後のDark Ageの観測 :**
地上加速器 と CMB-B偏光の間の時代をみる.

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

Power spectrum : Evolution history of the Universe.

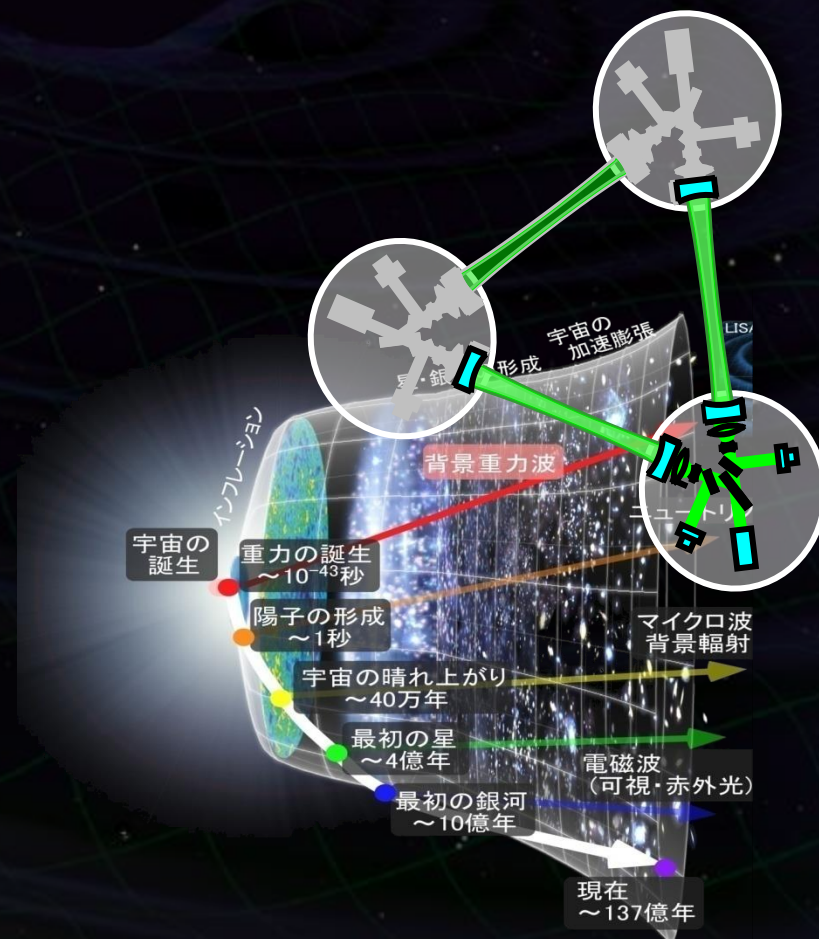


- Spectrum Power.
- Energy scale of inflation
- Cut-off freq.
- Energy scale of Reheating

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

DECIGO (でさいご)

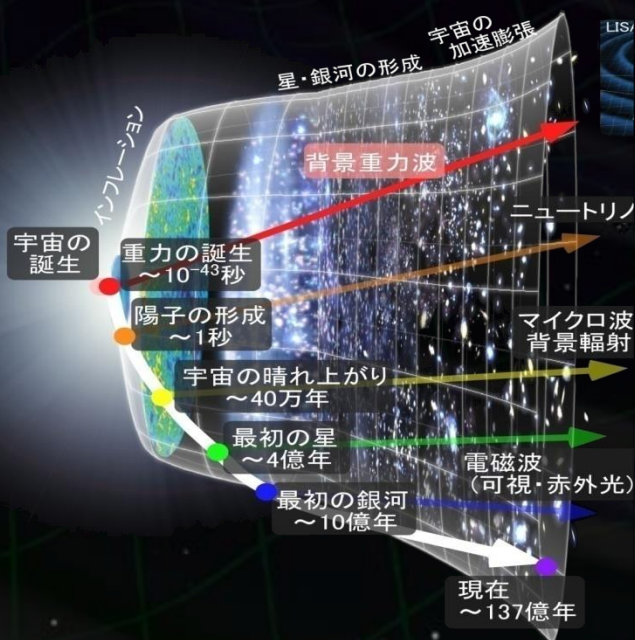
- 宇宙重力波望遠鏡 -



DECIGO (DECI-hertz interferometer
Gravitational wave Observatory)

宇宙のはじまりを直接観測する。

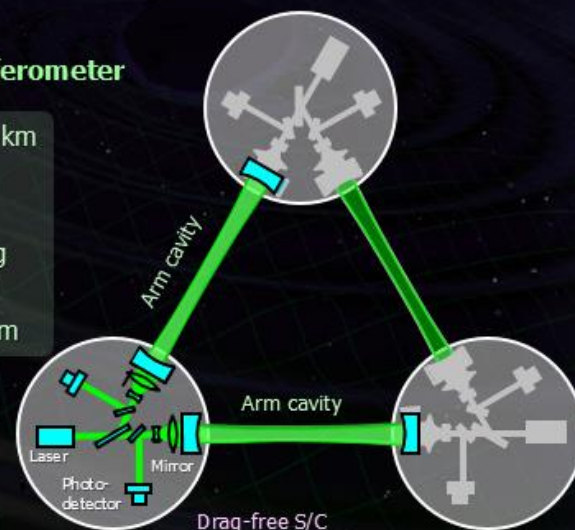
**ビッグバン宇宙論において、空間・物質の種が、
いかに形成されたかを観測によって解き明かす。**



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

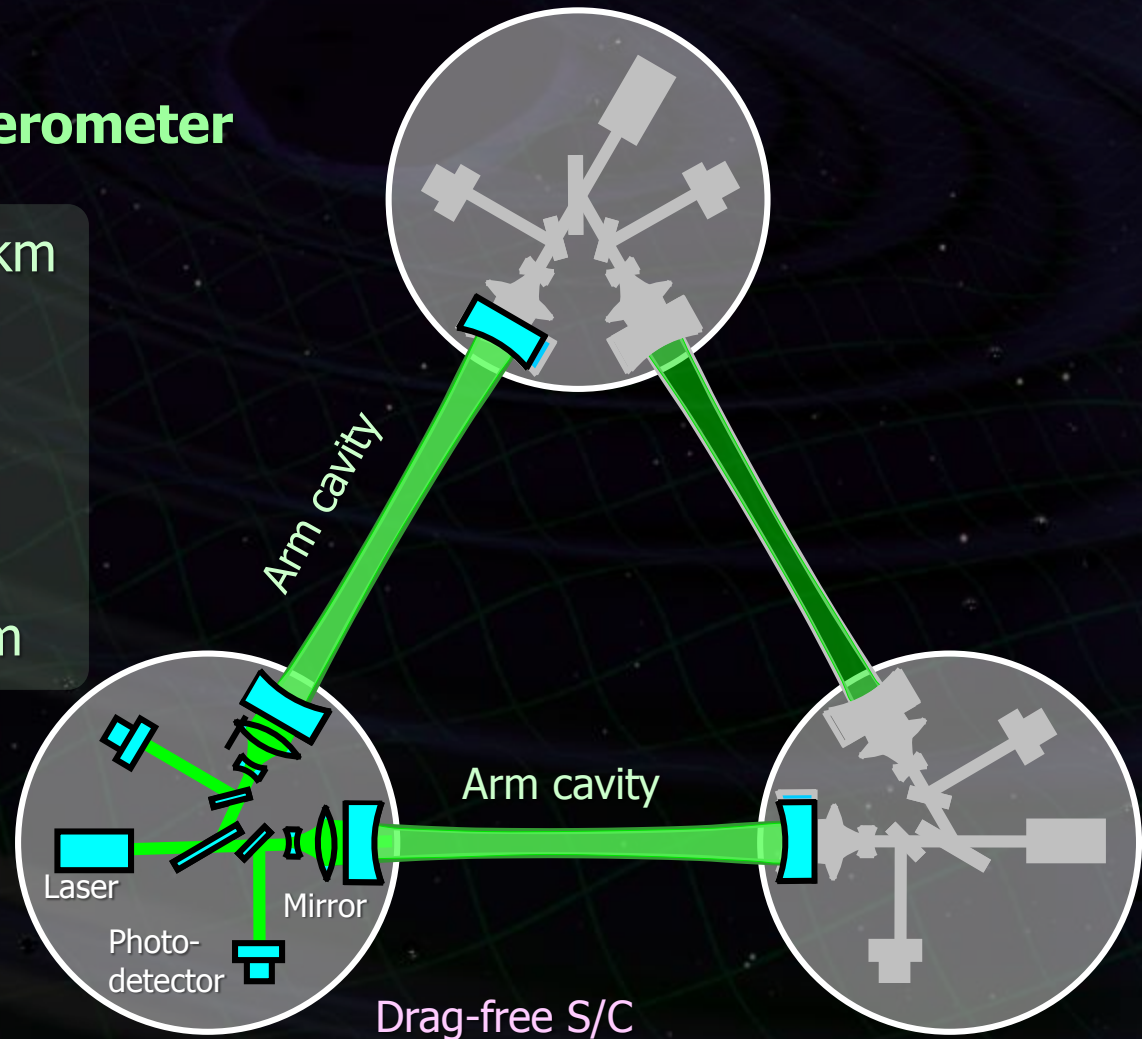
S/C: drag free
3 interferometers



Interferometer Unit: Differential FP interferometer

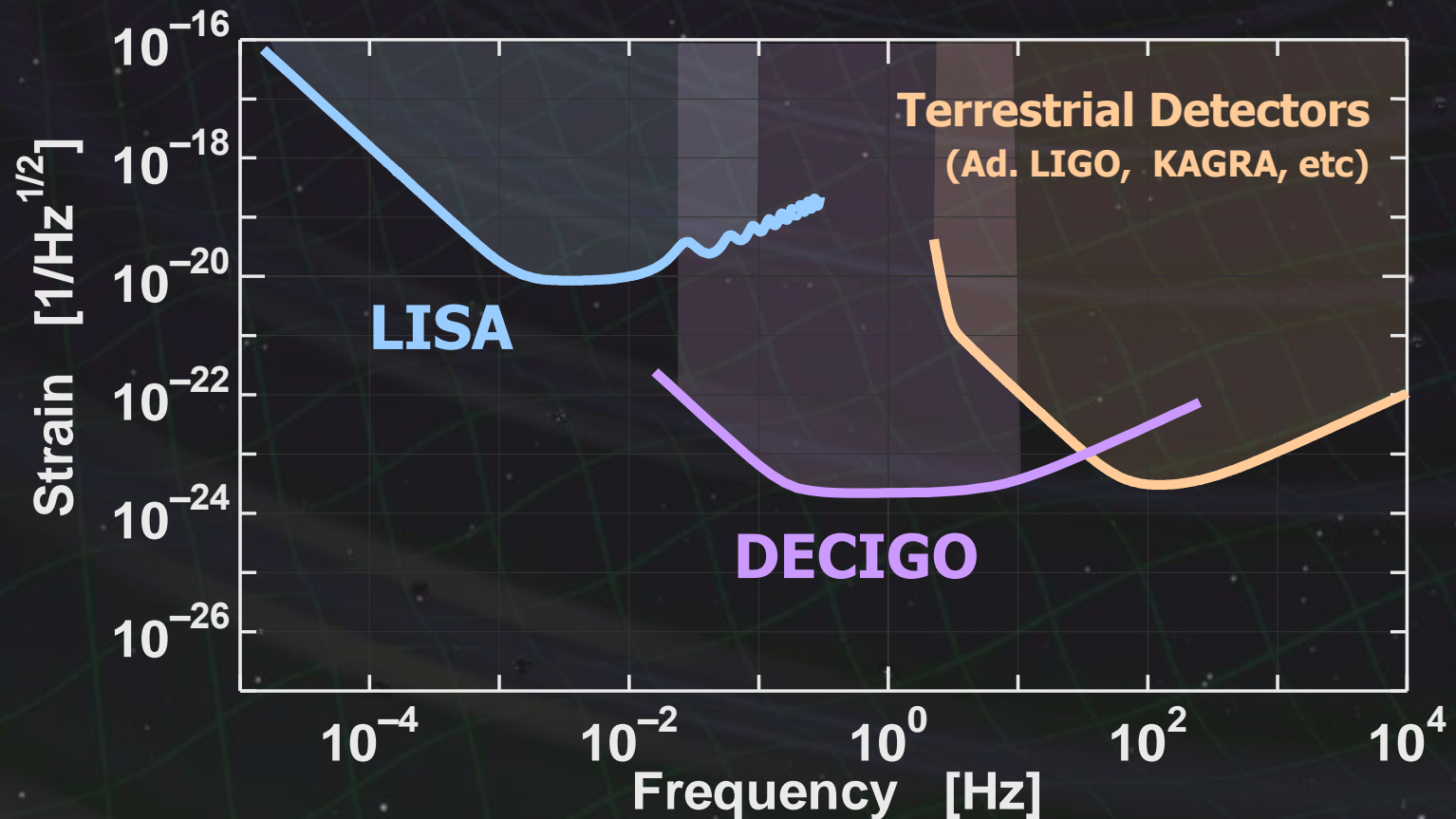
Arm length:	1000 km
Finesse:	10
Mirror diameter:	1 m
Mirror mass:	100 kg
Laser power:	10 W
Laser wavelength:	532 nm

S/C: drag free
3 interferometers



DECIGO (Deci-hertz interferometer Gravitational wave Observatory)

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

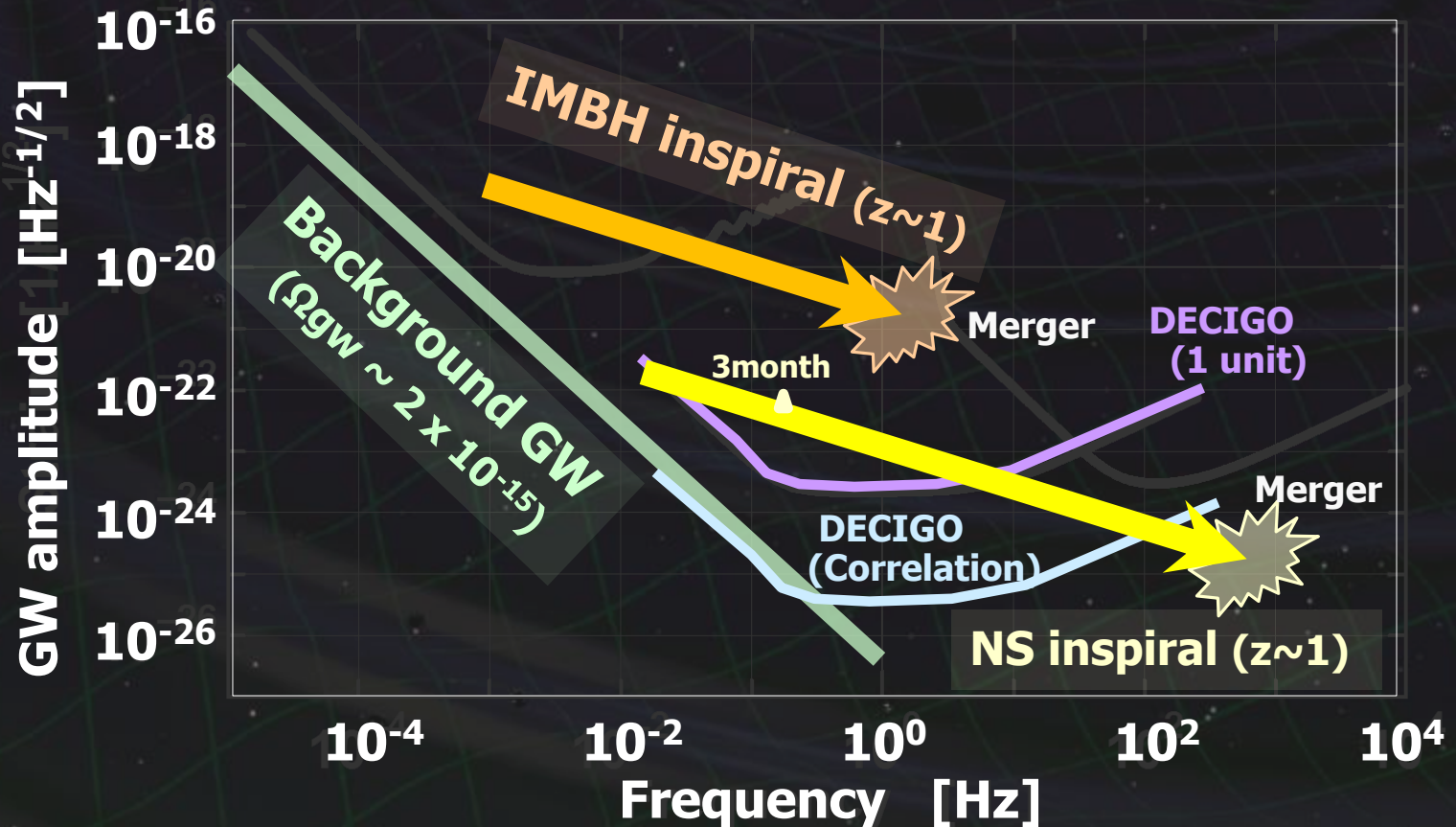


DECIGOの主な観測ターゲット

中間質量BH の連星合体
中性子星連星
背景重力波



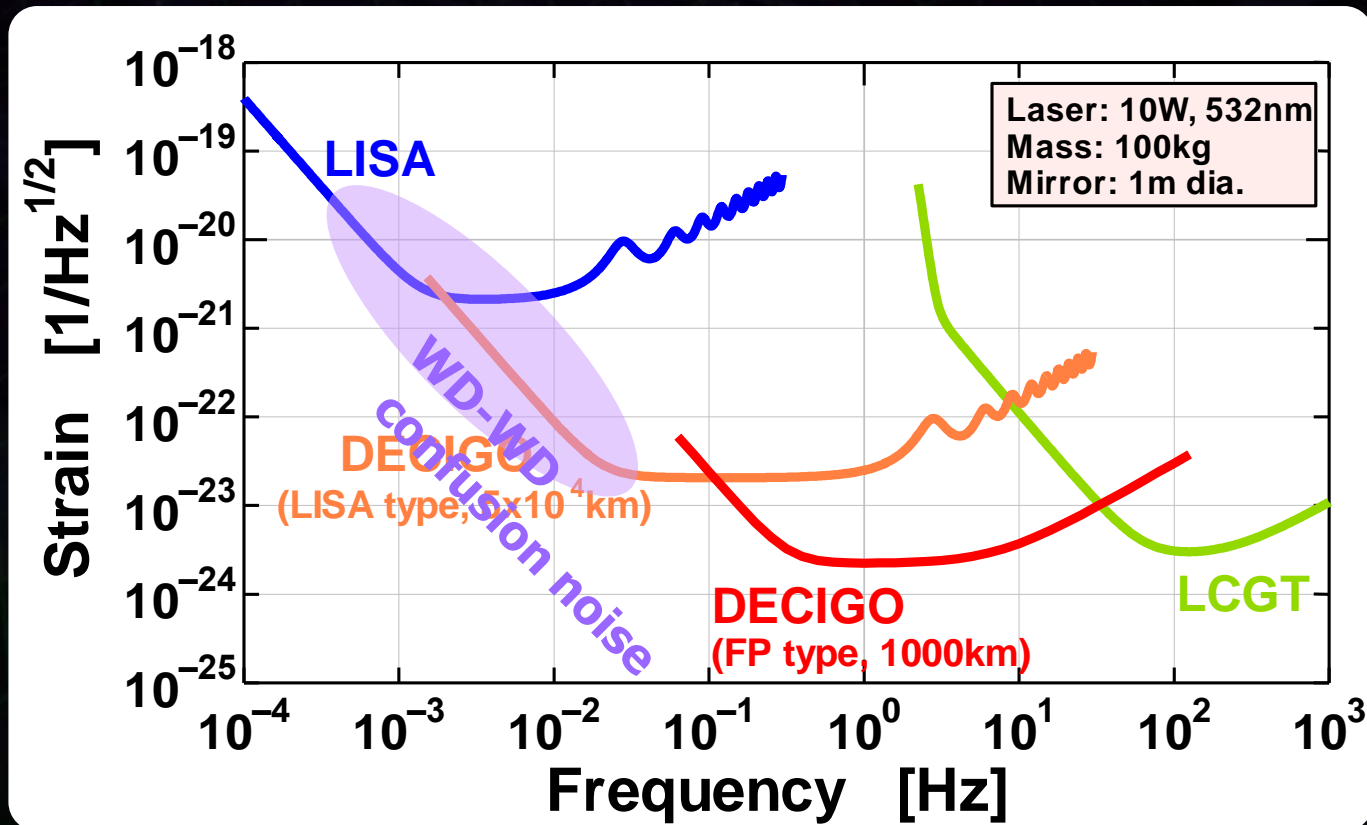
大質量BHと銀河の形成
宇宙論パラメータ (Inflation, Dark energy)
基礎物理法則



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

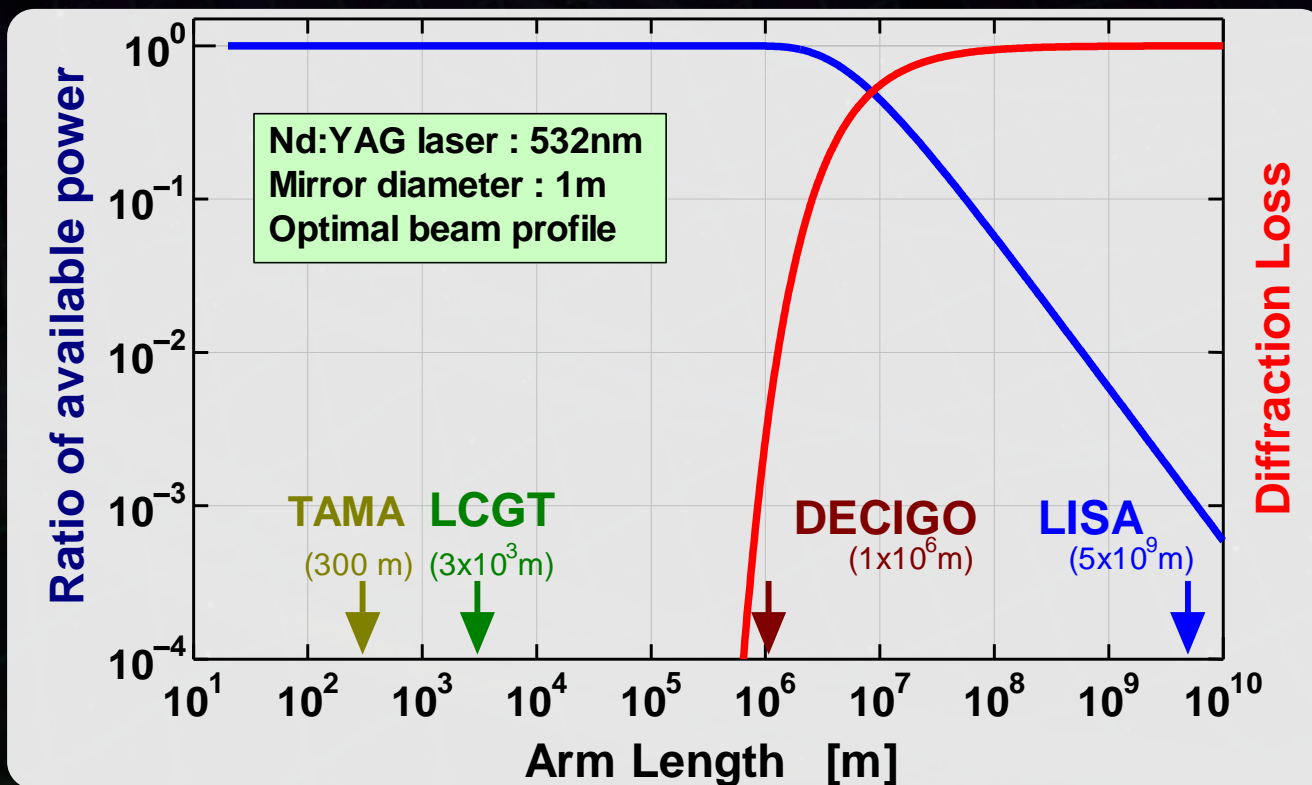
Mirror diameter: 1m

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)

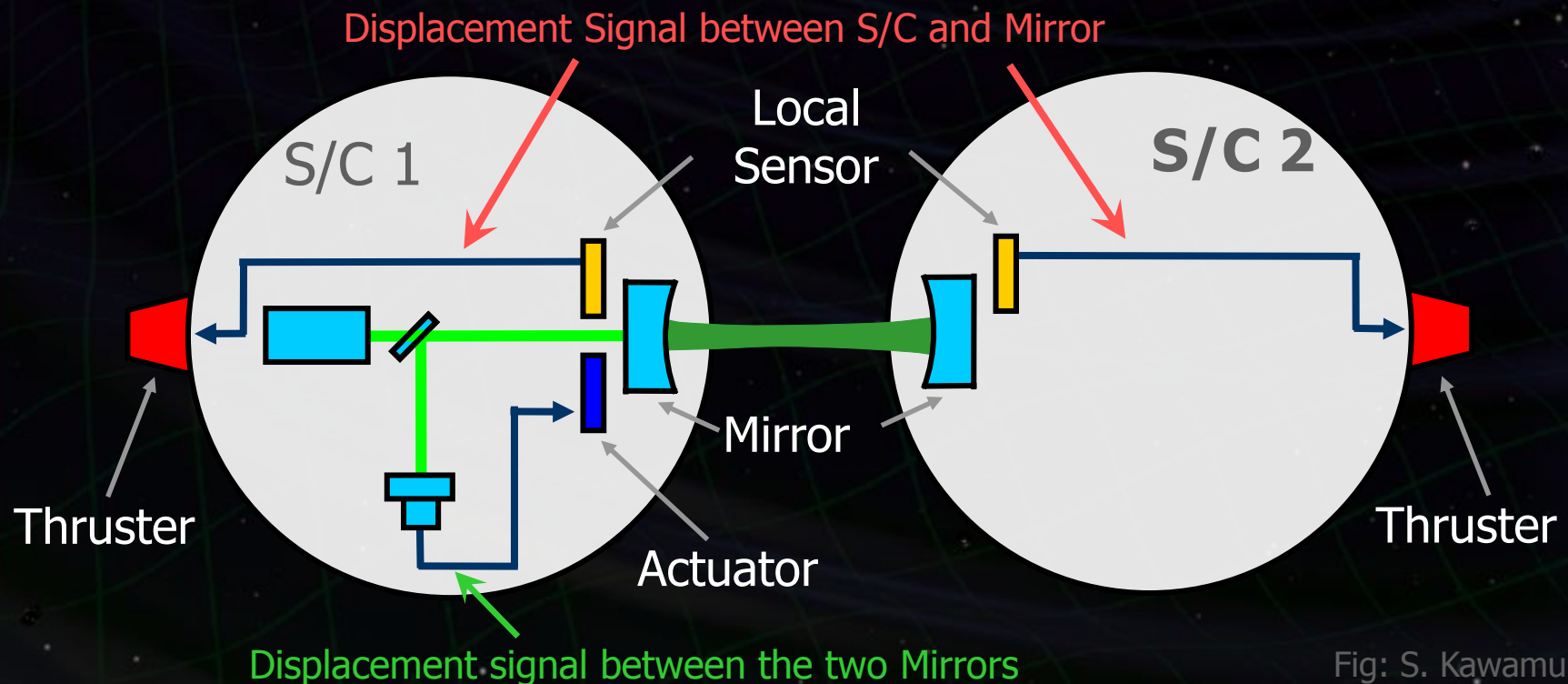


Fig: S. Kawamura

測距雑音

Shot noise $3 \times 10^{-18} \text{ m/Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)

⇒ x 10 of KAGRA in phase noise

Other noises should be well below the shot noise

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

Stab. Gain 10^5 , CMRR 10^5

加速度雑音

Force noise $4 \times 10^{-17} \text{ N/Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)

⇒ x 1/50 of LISA

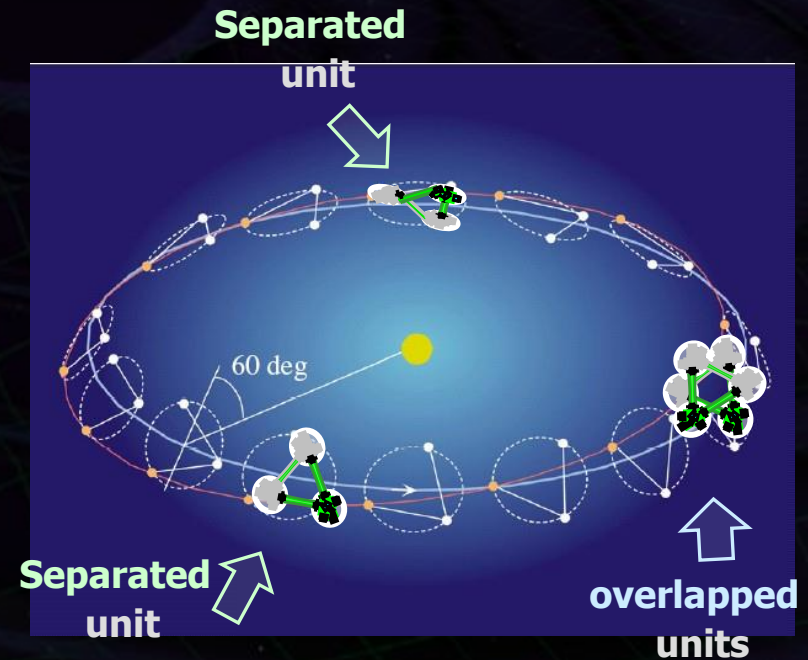
External force sources

Fluctuation of magnetic field, electric field,
gravitational field, temperature, pressure, etc.

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

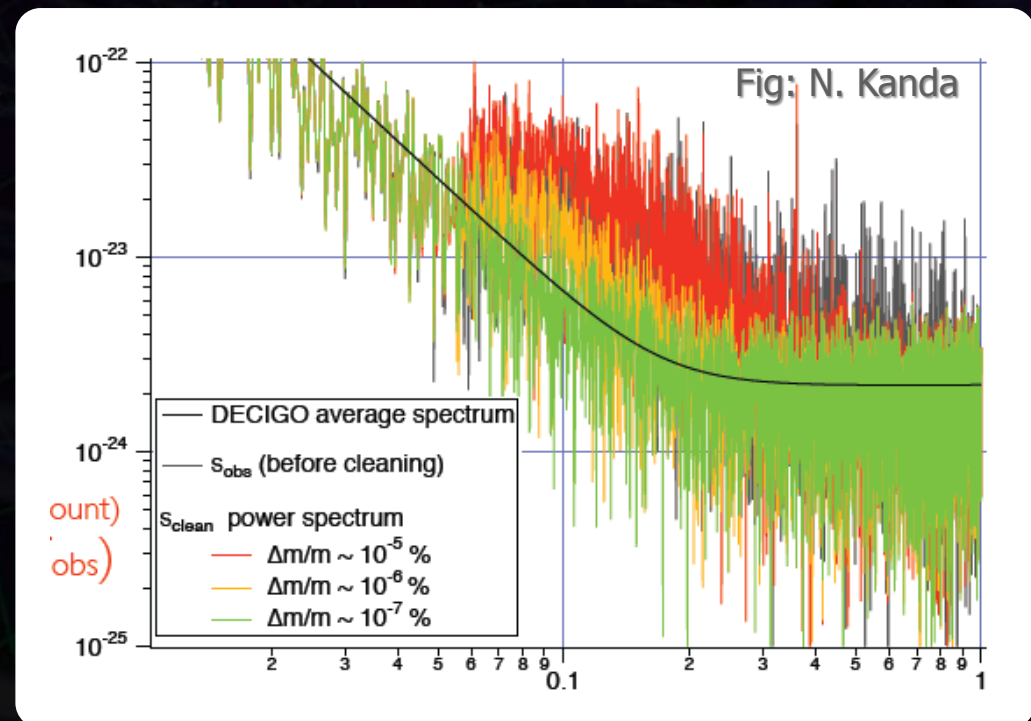
DECIGOの観測周波数帯: WD binary foreground **はない**.
 → 宇宙論的観測にひらけた「窓」

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

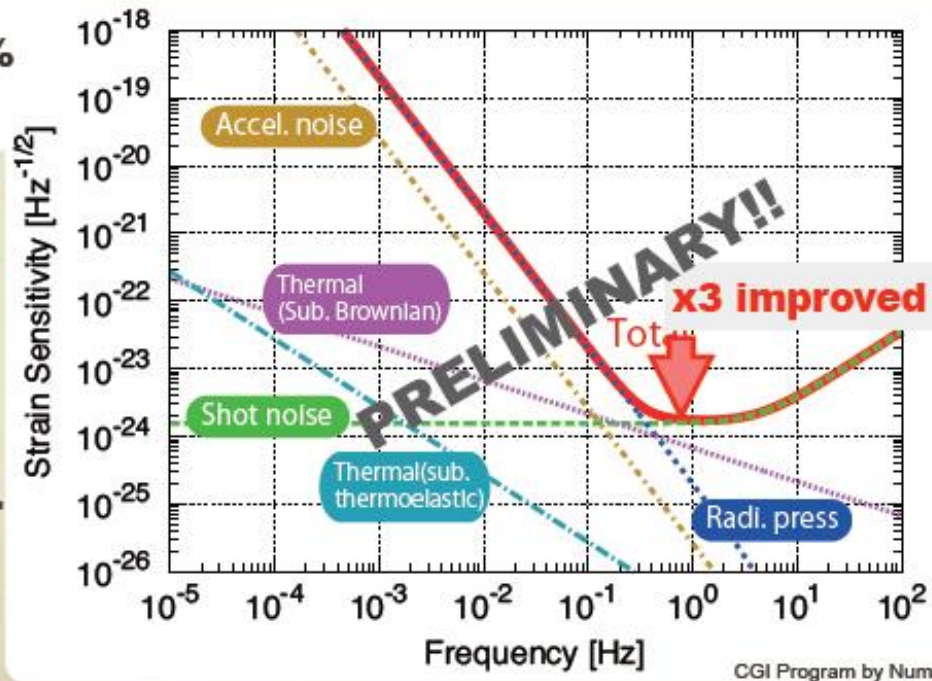
- Arm length: **1,500 km**
- Laser power: **30 W**
- Laser wavelength: **532 nm**
- Mirror diameter: **1.5 m**
- Mirror mass: **100 kg**
- Mirror reflectivity: **77.3%**
- Cavity g-param: **0.1**

Preliminary
 Parameters tuned

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

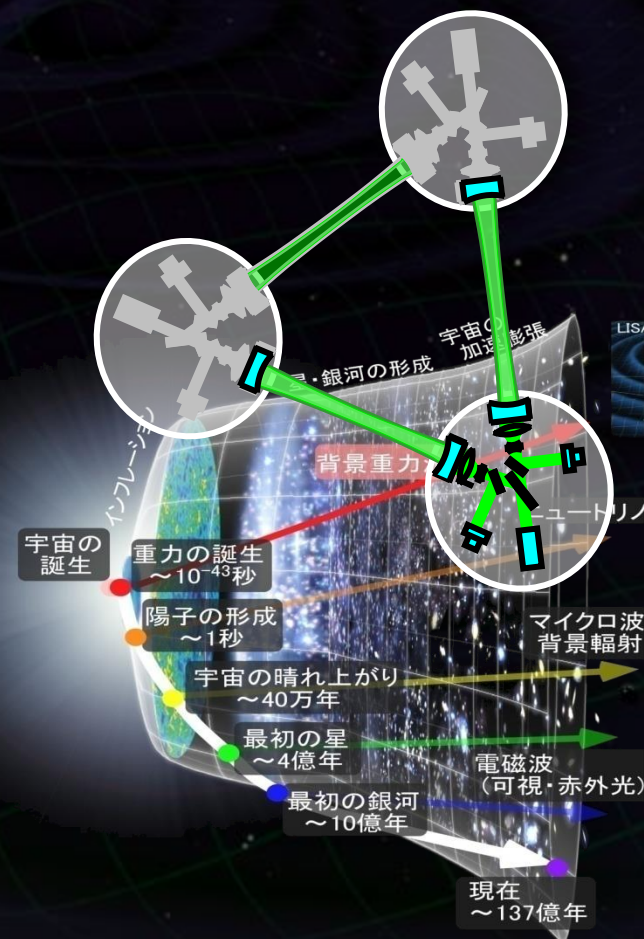
Next:

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



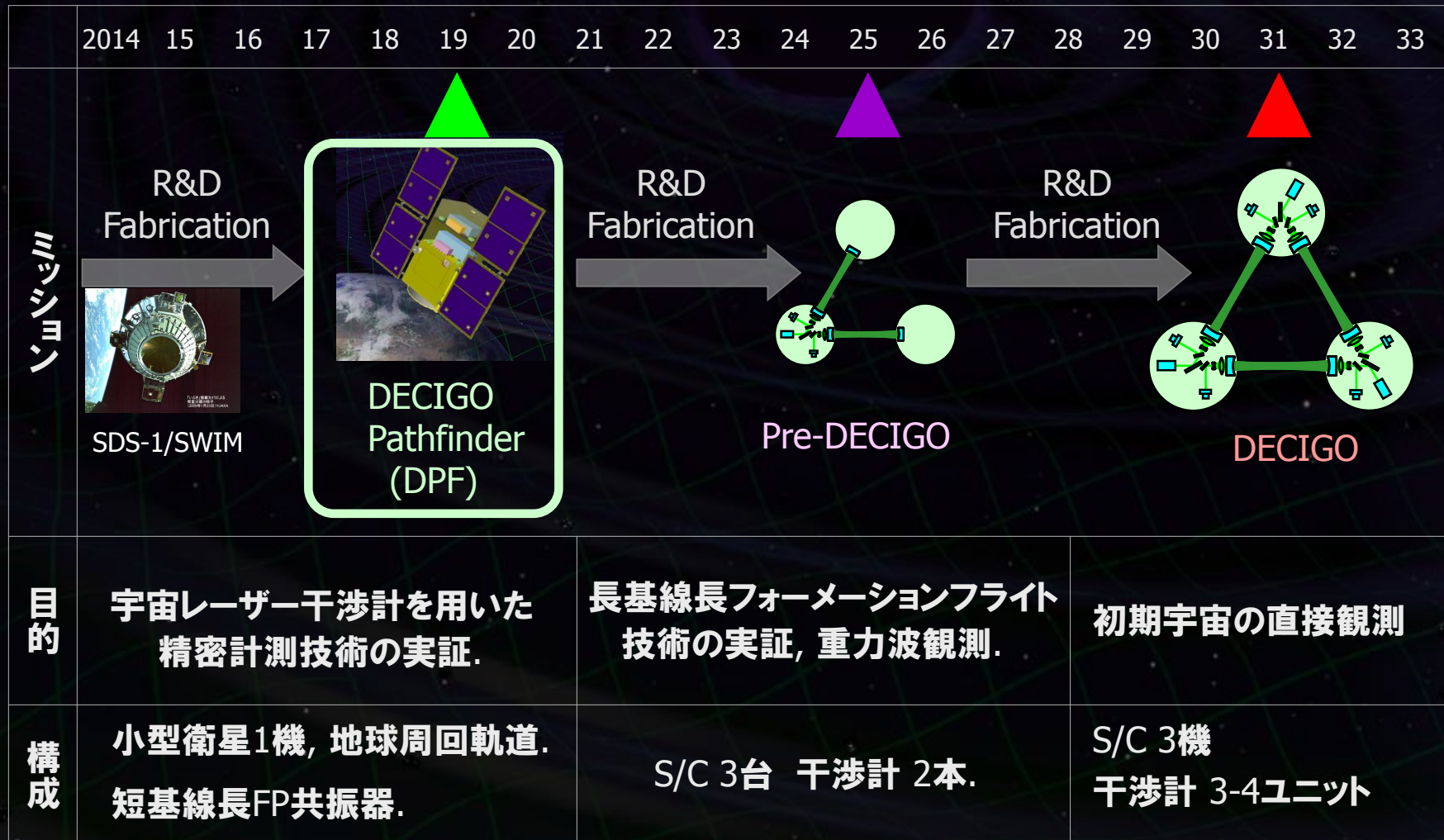
開発の現状

- 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.

	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.

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)

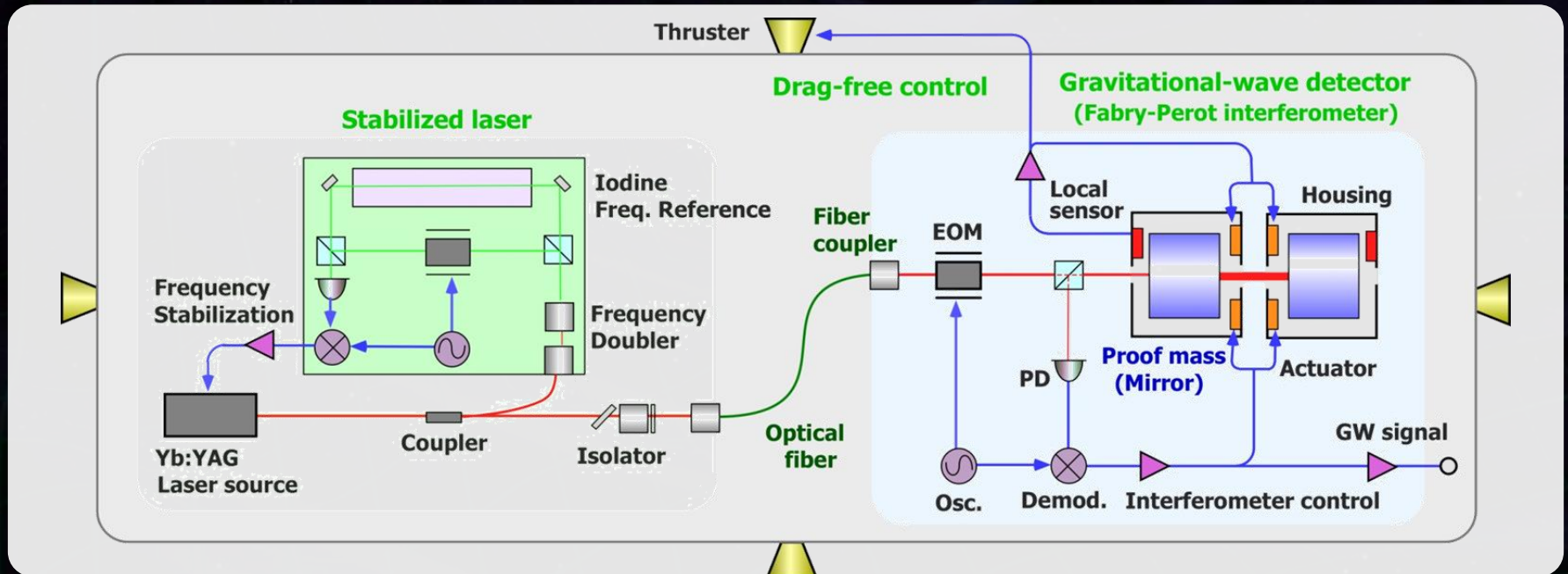
地球周回軌道 (高度 500km)

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

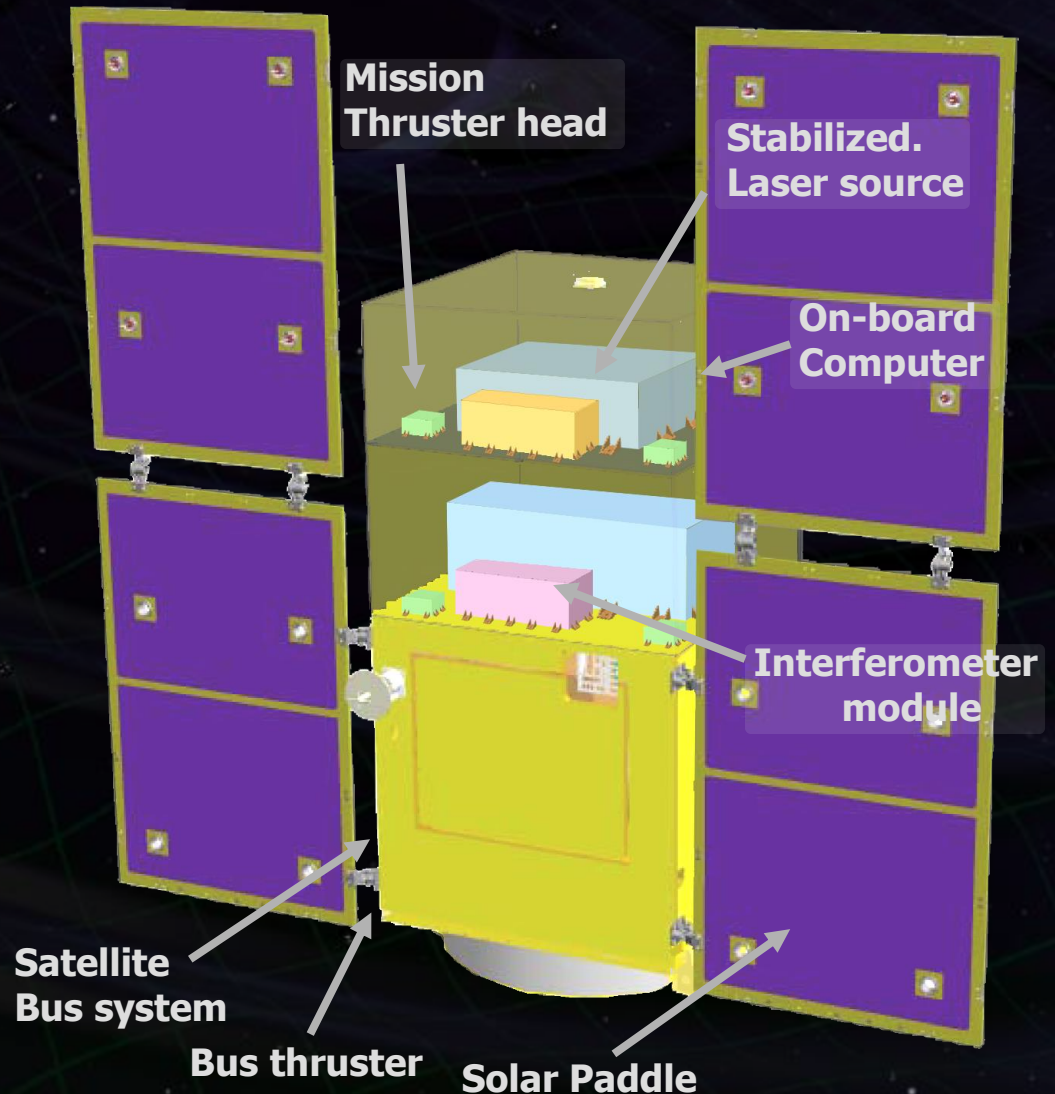
Power Supply
SpW Comm.



Satellite Bus

(‘Standard bus’ system)

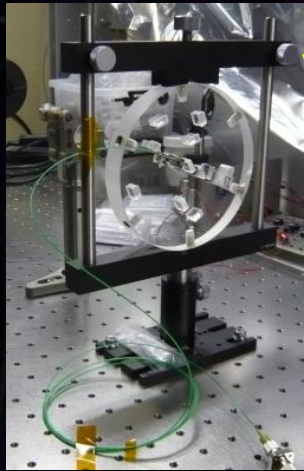
Size :
950x950x1100mm
Weight : 230kg
SAP : 960W
Battery: 50AH
Downlink : 2Mbps
DR: 1GByte
1N Thrusters x 4



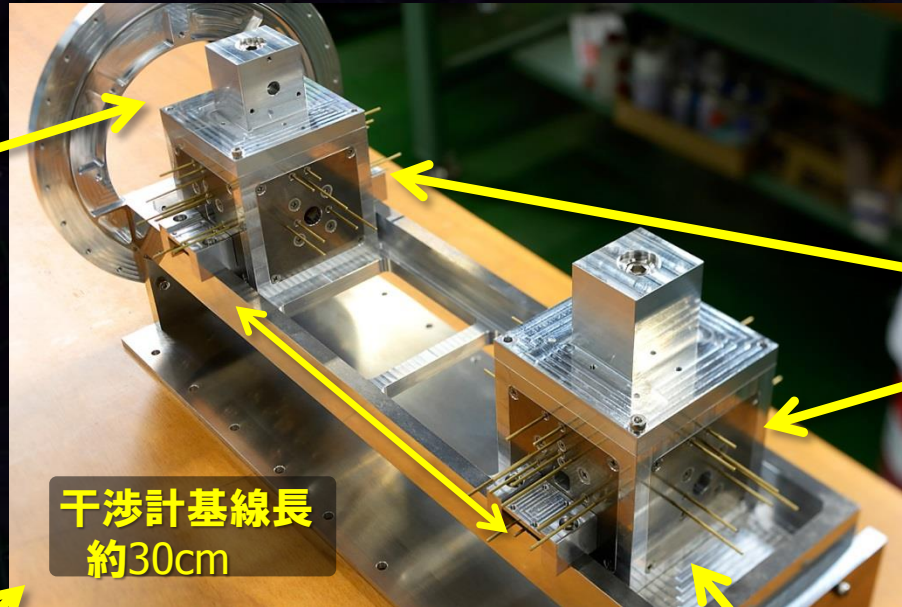
干渉計モジュール

入出射光学系

シリケートボンディングにより一体化



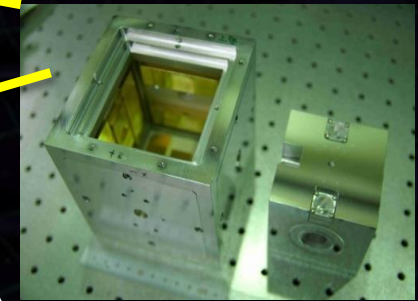
干渉計モジュール



干渉計基線長
約30cm

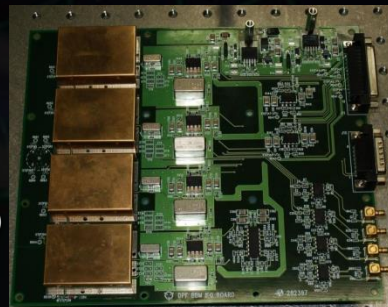
試験マスモジュール

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

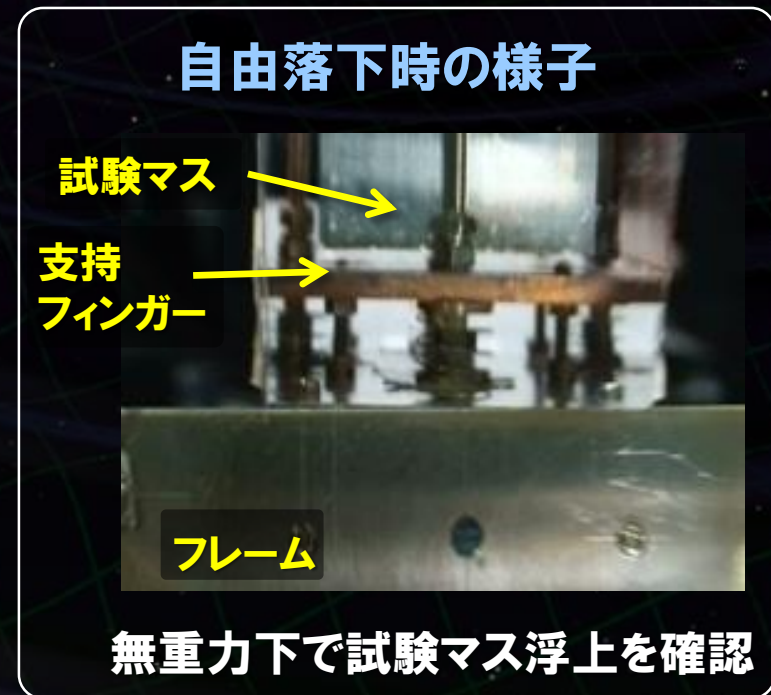
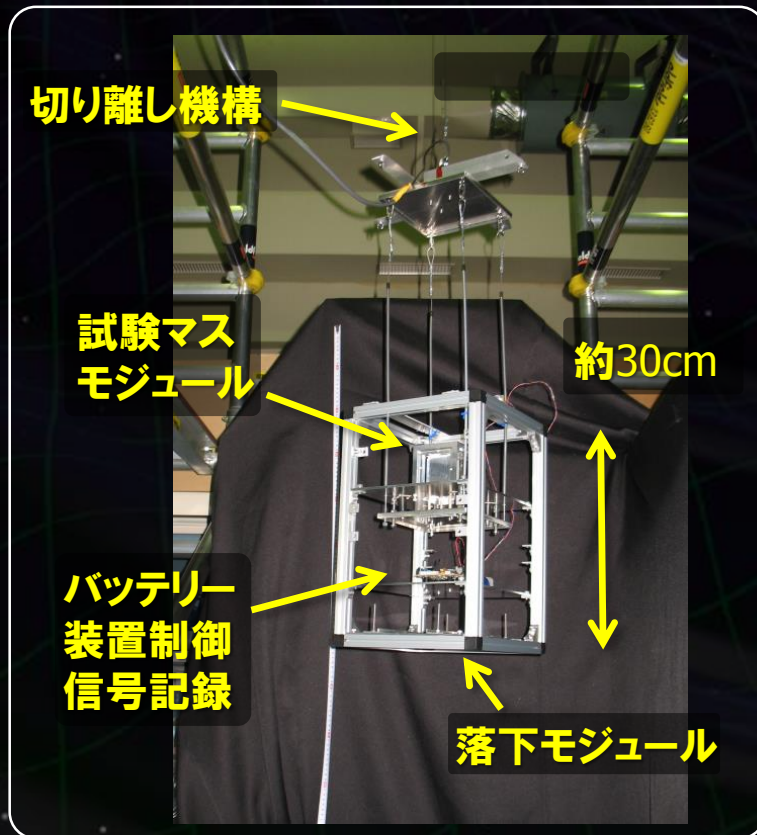


SpW信号処理・ 制御ボード

SpW FPGA +
16bit AD/DA
干渉計の制御



- 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.

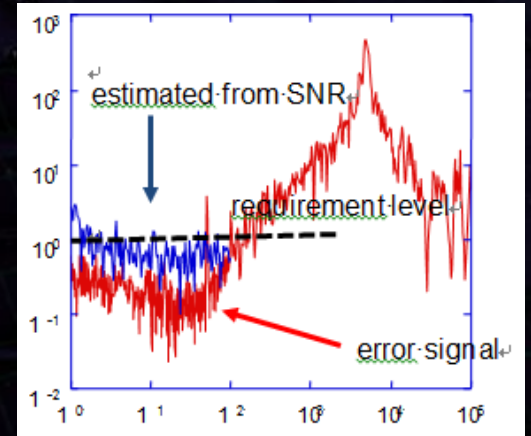
周波数安定化モジュール

・周波数安定化モジュールBBM1 (~2011, 電通大)

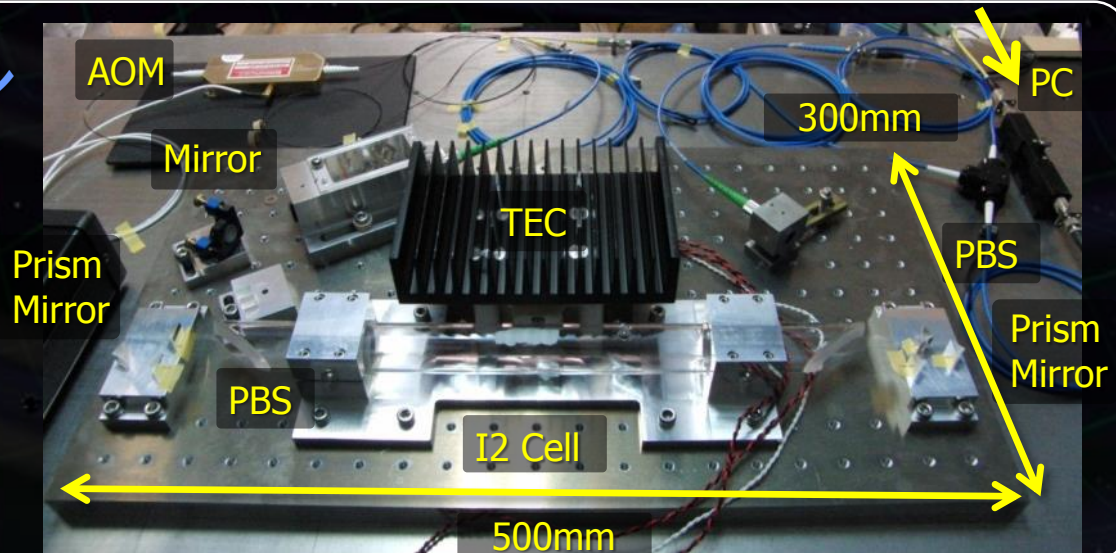
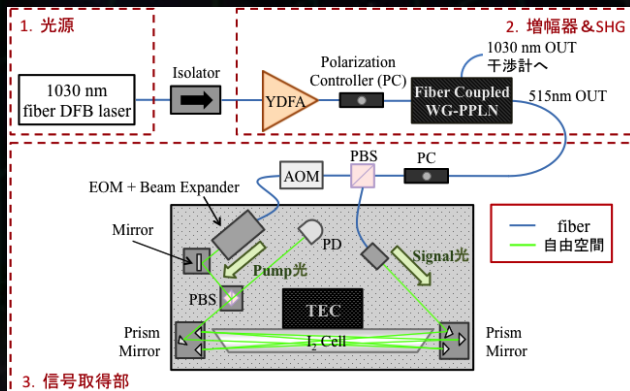
- ヨウ素セルを用いた周波数安定化.
- 安定度要求 ($0.5 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$)を満たす.

・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

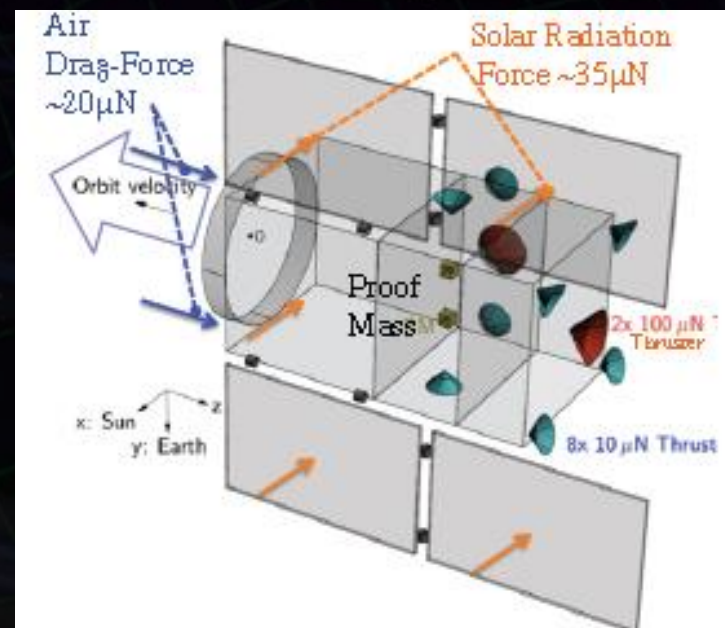


・ミッションスラスタ構成

- 準定常成分 **100 μN スラスタ 2台**
大気ドラッグ, 太陽輻射圧
- 変動成分 **10 μN スラスタ 8台**
大気圧変動, 太陽輻射変動

ミッションスラスタ仕様

推力	0.5-100 μN x2 (可変)
	0.5-10 μN x 8 (可変)
分解能	0.1 μN
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_{μv} : 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

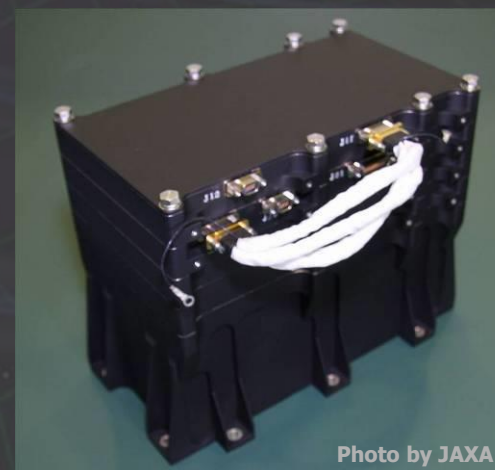


Photo by JAXA

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

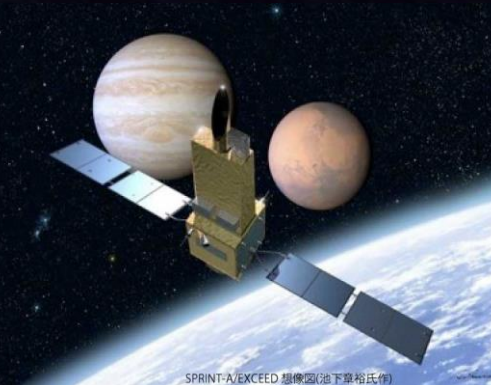
2号機 ERG (SPRINT-B) (~2015/16年)

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.



SPRINT-A/EXCEED 想像図(池下尊裕氏作)

小型科学衛星1号機 SPRINT-A/EXCEED

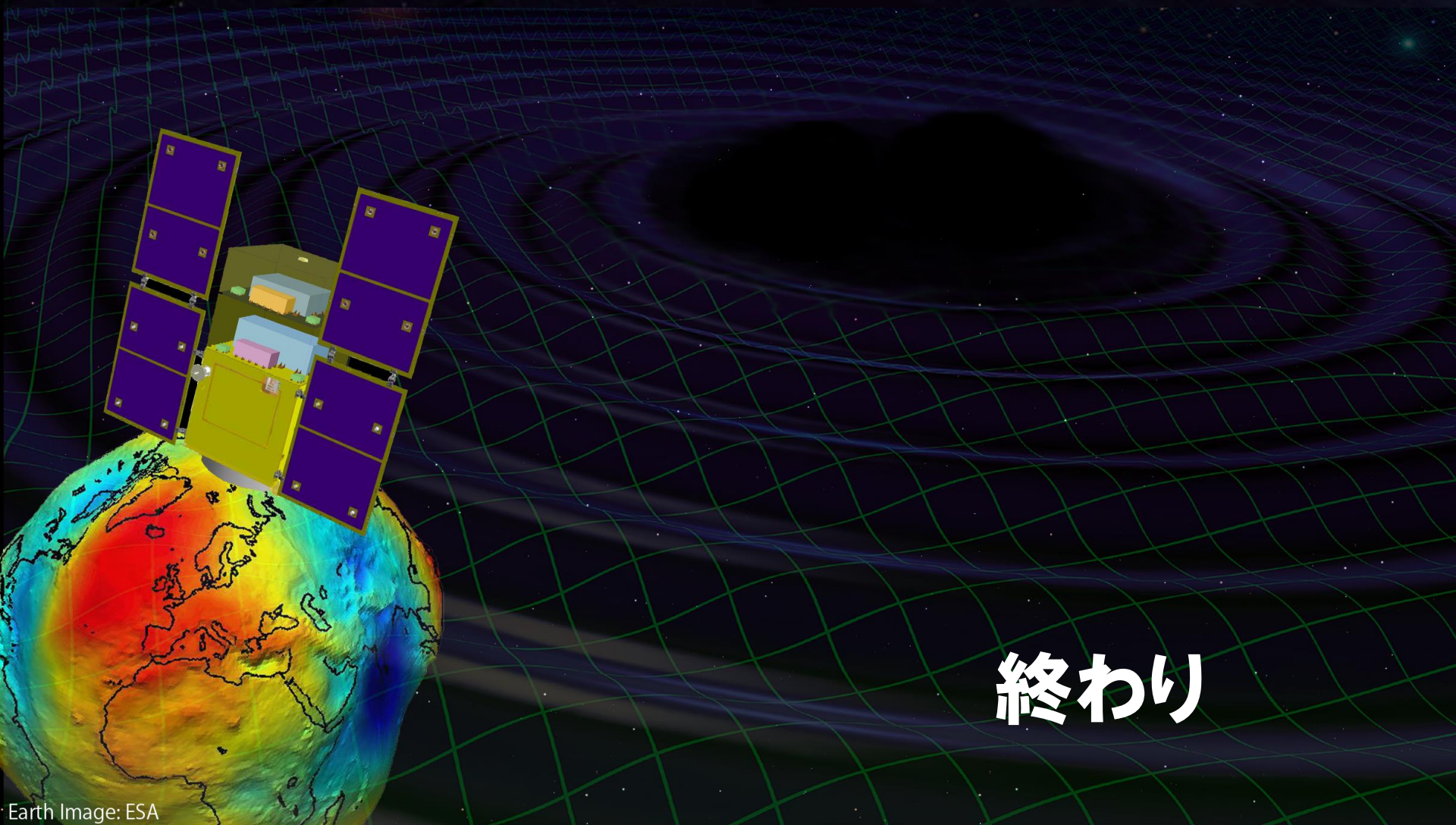


Epsilon Rocket Booster
Photo by JAXA



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

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)

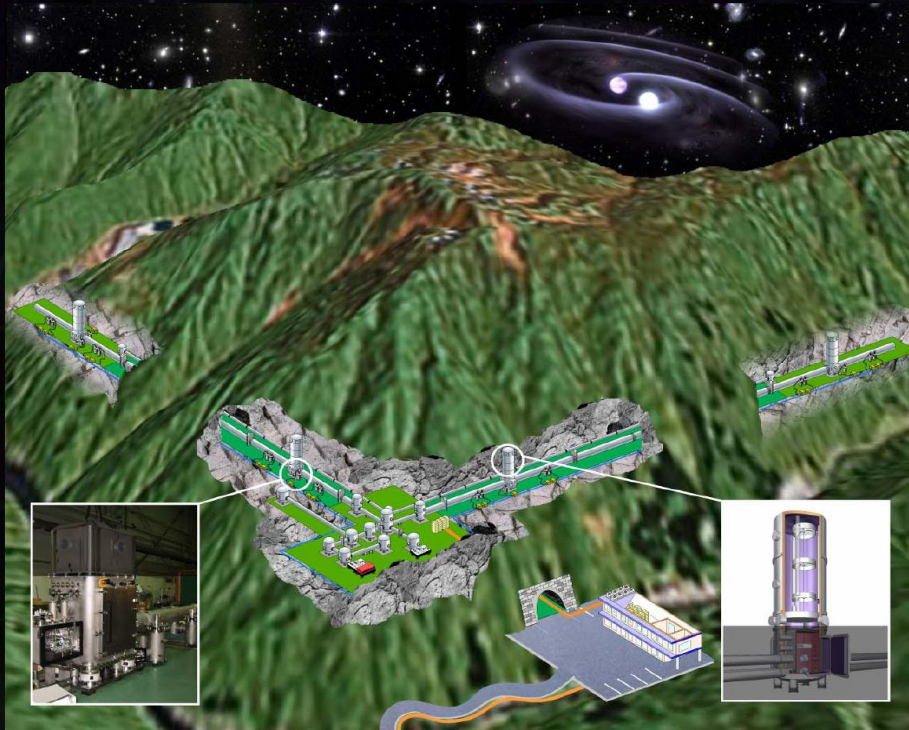
分類	ミッション・事業名称	状況	第2期中期計画				第3期中期計画				第4期中期計画				第5期中期計画				備考					
			FY20	FY21	FY22	FY23	FY24	FY25	FY26	FY27	FY28	FY29	FY30	FY31	FY32	FY33	FY34	FY35		FY36	FY37	FY38	FY39	
戦略的に実施する 中型計画	はやぶさ2	開発中	▲PJ準備 ▲PJ移行		▲打上				▲小惑星到着 ▲地球帰還															
	ASTRO-H	開発中	▲PJ移行 ▲PDR ▲COR1-2		▲打上				...															
	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 ▲SOR ▲POR		▲打上				...															
	BepiColombo	開発中	▲COR		▲打上				▲打上				▲水星到着											
	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	異種対応事業の状況に応じて、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。																					

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

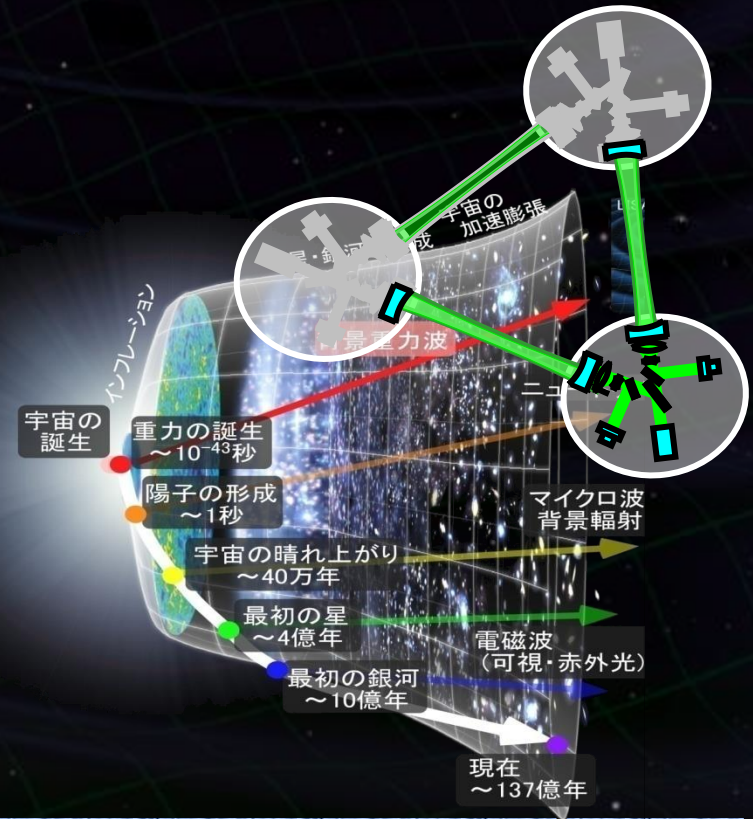


DECIGO (~2030)

Space observatory

→ 低周波数の重力波

目標: 宇宙論的な知見など



• KAGRAとDECIGOの関係.

- 重力波を用いる、という手段は同じだが、違いも多い。
 - * 目指すサイエンス (高エネルギー天体现象 / 宇宙論).
 - * 実現時期 (2017年 / 2030年).
 - * 根幹となる技術 (試験マス支持, レーザー光源, 衛星技術).
 - * 開発体制.
- JGWCの合意 : まずKAGRAで初検出を実現し, DECIGOで展開する.

• 宇宙科学分野を取り巻く状況の変化.

- JAXA 宇宙科学ロードマップの策定. 各分野の将来計画の議論.
- 宇宙線分野に関係するのは、EUSO, DECIGOなど.

私見

長期的視野に立って、

宇宙線/重力波コミュニティの裾野の拡大と発展を目指すべき.

•JGWC (Japan Gravitational Wave Community) : 325名



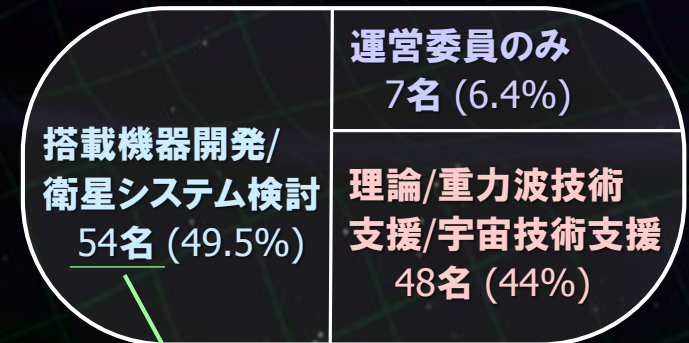
•DPF WGメンバー : 109名 (DECIGO WG 148名)

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

DPF WG 109名



このうち 11名が
KAGRAのコアメンバー

代表: 中村 (京都大)

副代表: 安東 (東大理), 瀬戸 (京大理)

運営委員会

川村 (東大宇宙線研), 安東 (東大理), 瀬戸 (京大理), 中村 (京大理), 坪野 (東大理), 佐藤 (法政大理工), 田中 (京大基研), 船木 (JAXA), 沼田 (Maryland), 神田 (阪市大理), 井岡 (KEK), 高島 (JAXA), 横山 (東大理), 阿久津 (国立天文台), 中澤 (東大理)

Pre-DECIGO

佐藤 (法政理工)

検出器

阿久津
(国立天文台)
沼田 (Maryland)

サイエンス・データ

田中 (京大基研)
瀬戸 (京大理)
神田 (阪市大理)

衛星

船木 (JAXA)

DECIGO パスファインダー
リーダー: 安東 (東大理)

Design phase

Mission phase

干渉計

佐藤 (法政理工),
上田 (国立天文台),
麻生 (東大理)

レーザー

武者 (電通大)
植田 (電通大)

衛星システム/ ドラッグフリー

佐藤 (法政理工),
坂井 (JAXA)

スラスタ

船木 (JAXA)

信号処理

阿久津
(国立天文台)

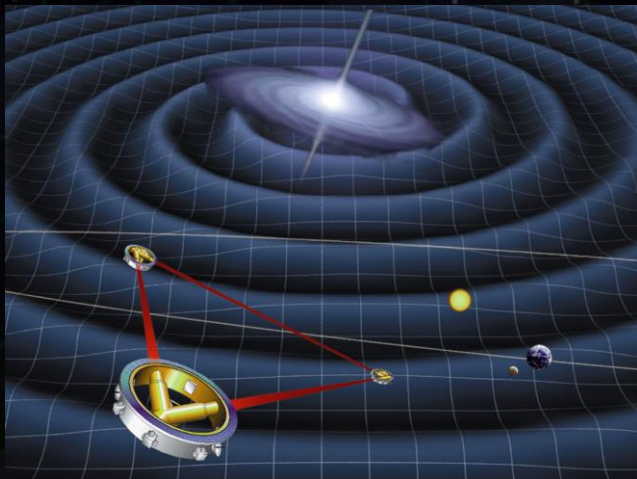
データ解析

神田
(阪市大理)

eLISA

(Laser Interferometer Space Antenna)

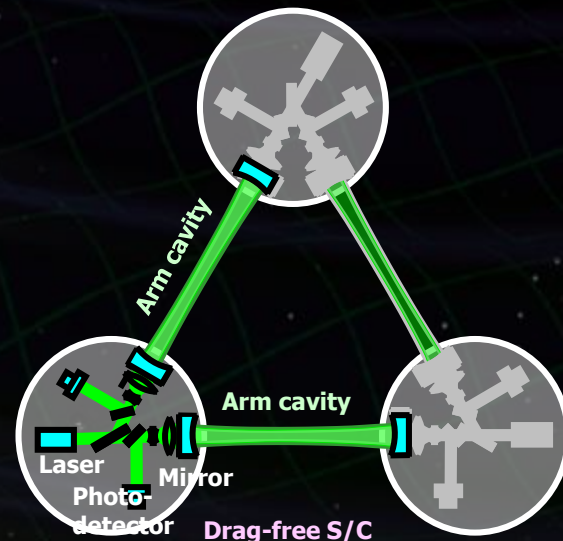
- 観測対象: 超巨大BH, 連星系.
1mHz付近の確実な重力波源.
- 基線長: 100万km.
S/C 3機による編隊飛行.
- 測距方式: 光トランスポンダ.



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).



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

•ESA

- LISA Pathfinderは 2015年7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.
~200億円規模と言っている → NASA, 中国, 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への部分参加と、主導ミッションの両方の可能性を検討。

•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落選後の戦略検討中。DECIGOの最短での実現を目指す。
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。

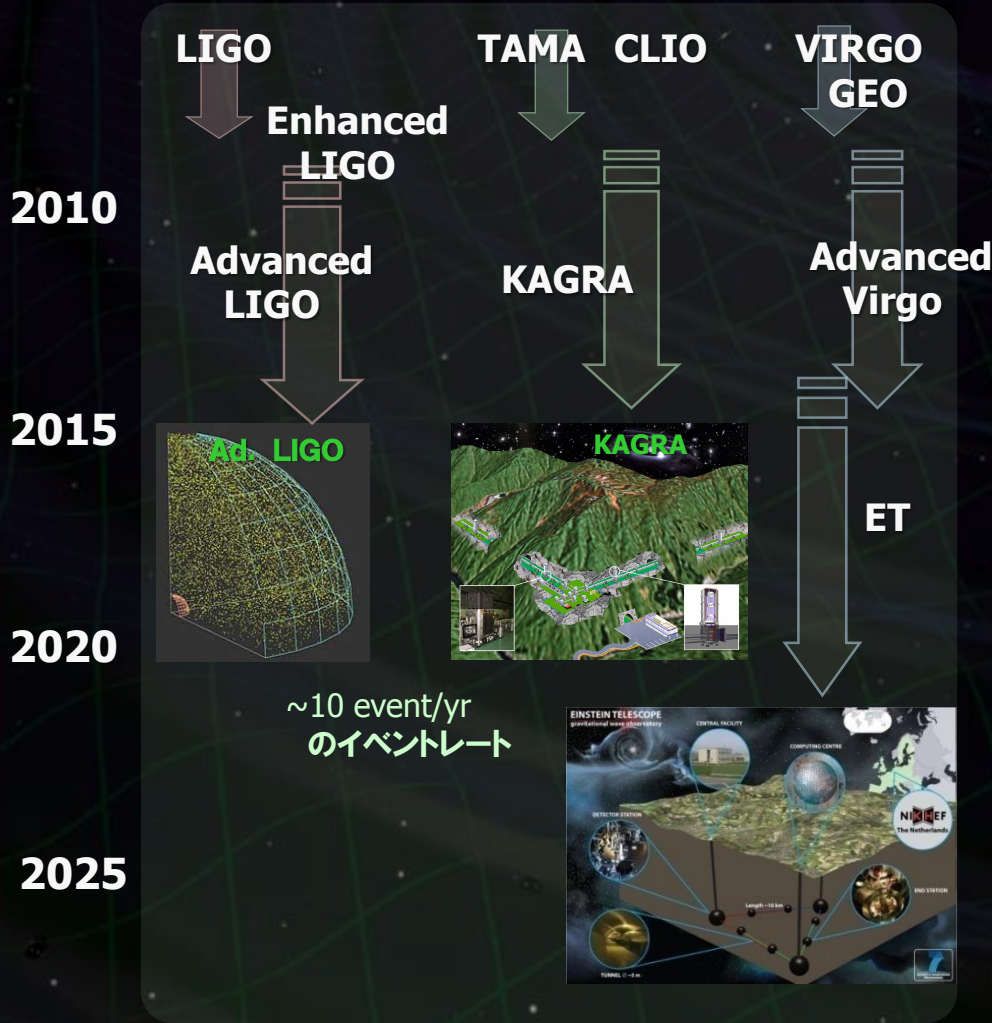
・地上重力波望遠鏡

- 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.

重力波天文学のロードマップ

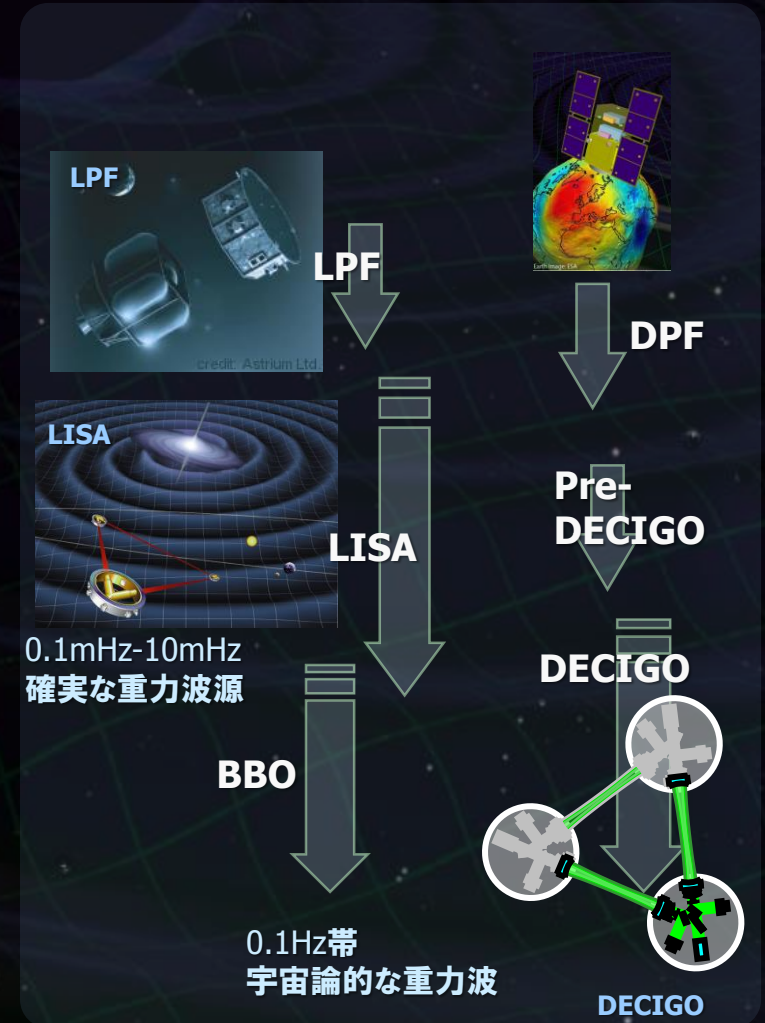
地上望遠鏡

より遠くを観測 (10Hz-1kHz)



宇宙望遠鏡

低周波数帯の観測 (1Hz以下)



天文学・宇宙物理学は何を目指している？

- 天体や天文現象、宇宙のことを調べ、理解すること。
- 私たちの頭上にある 月・惑星・恒星から遠くの銀河などを対象にする。

- 宇宙の誕生と成り立ちを知る。
- 極限状態の物理を知る。
- 地球・生命の誕生と歴史を知る。

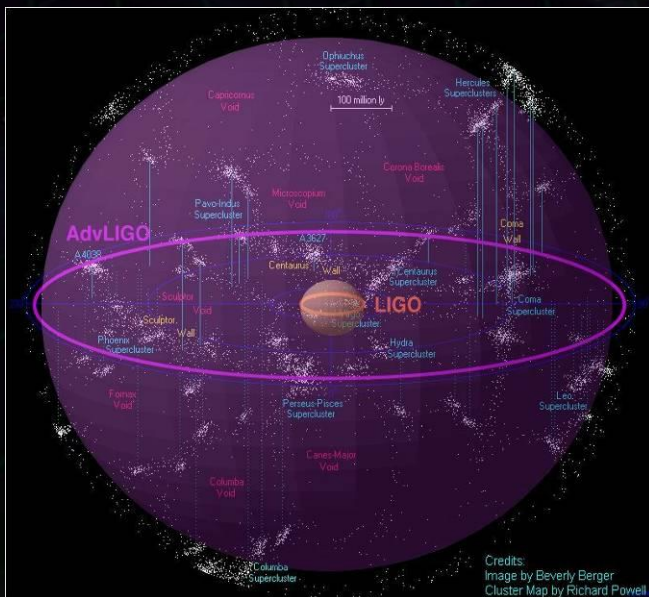
→ 重力波観測は、これらに貢献する可能性!

第一世代の検出器 --- 近傍銀河までの観測範囲を持つ

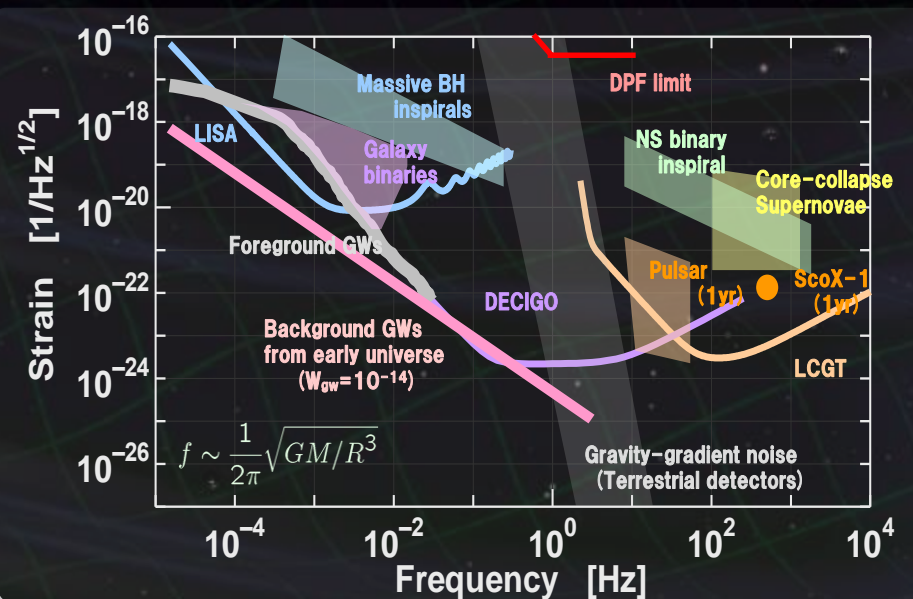
ただ... そのような重力波イベントは稀 (10^{-5} - 10^{-3} event/yr)

⇒ 次世代の重力波望遠鏡

高感度化 (KAGRAなど)
→ より多くの銀河をカバーする



観測帯域を広げる (LISA/DECIGO)
→ 定常的・大振幅の重力波



重力波検出器の種類



重力波コミュニティでの議論.

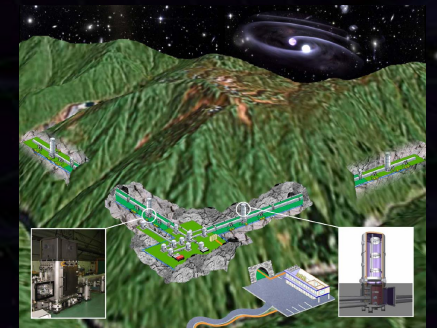
- ・国内の重力波研究分野 JGWC(注1) でのコンセンサス:
「まずKAGRAにより重力波初検出を行い、
その後DECIGOで天文学として展開する。」
- ・地上望遠鏡とは異なった観測時期、目指すサイエンス(注2).

*注1 JGWC : Japan Gravitational Wave Communityの略.

*注2 観測周波数に応じて異なった観測対象になる. 電磁波観測における電波-光赤外-X線などの関係と同じ.

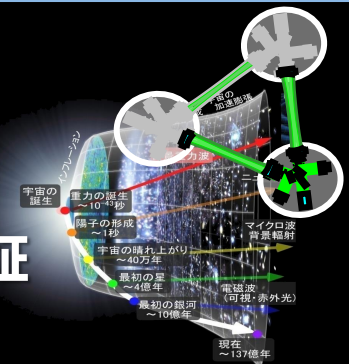
KAGRA : 地上重力波望遠鏡.

- 目的: 重力波天文学の創成.
- 主に200Mpc程度以内にある中性子連星合体などの高エネルギー天体現象の観測.
- 建設中, 2017年本格観測開始.



DECIGO : 宇宙重力波望遠鏡.

- 目的: 宇宙における物質起源への知見・宇宙論.
- 電磁波では直接観測できない初期宇宙の観測など.
- 2030年前後の実現に向け、前哨衛星DPFでの技術実証
→ DPFをイプシロン搭載小型ミッションとして提案中.



•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

• 重力波の初検出 → 新しい天文学の創生.

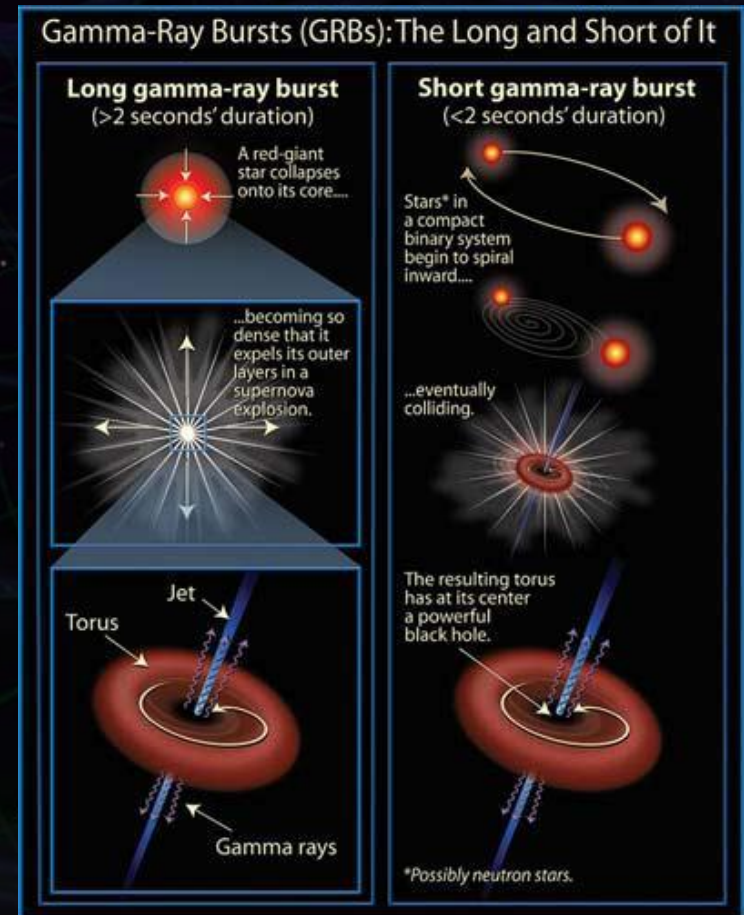
- 連星中性子星 : 確実に存在, 波形予測可能.
- ガンマ線バーストの起源, 未知の発見.
- 相対性理論/重力法則の検証.

• 高密度核物質の直接探査.

- 中性子星の状態方程式の情報.
- r-過程 → 元素組成・宇宙の化学進化.

• 宇宙論・銀河形成史に対する知見.

- 宇宙論パラメータへの制限.
- 超巨大ブラックホールの形成過程



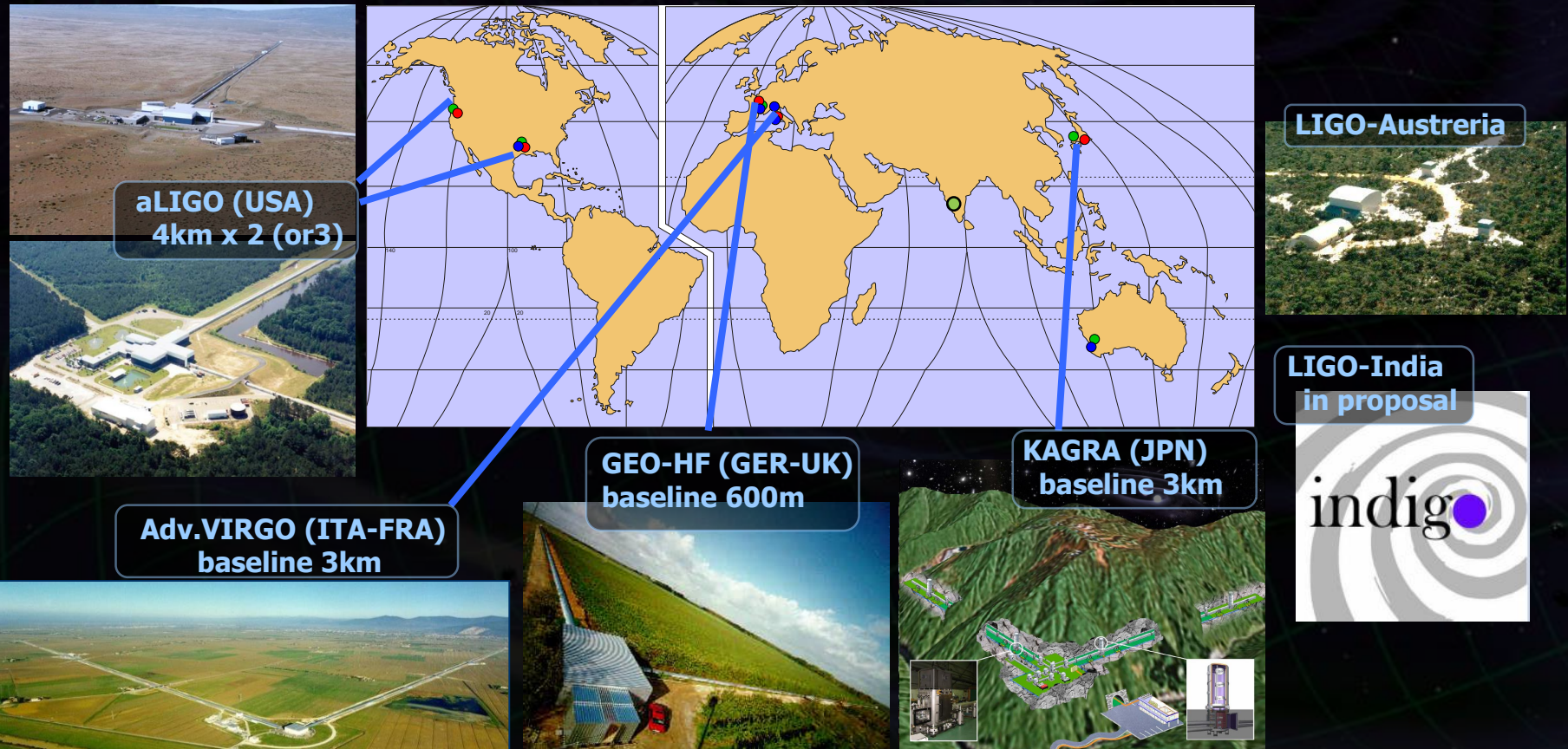
From encyclopedia of science

第2世代 重力波望遠鏡

国際観測ネットワークが形成される (現在から 約5年後)

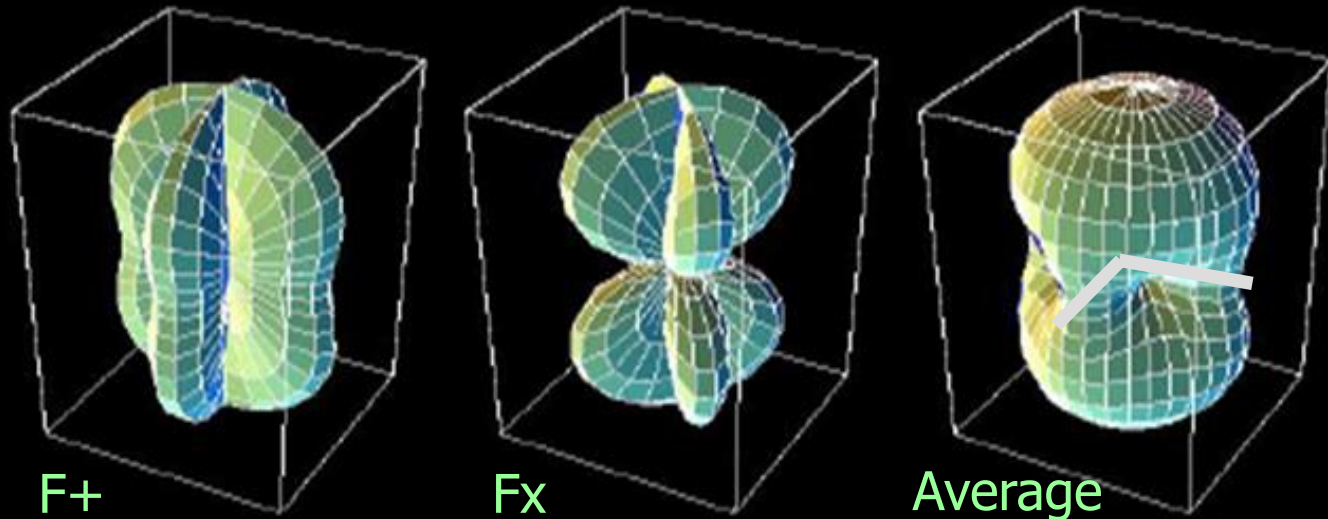
→ 重力波天文学

(重力波の検出, 波源位置の特定, 波源の物理情報, ...)



干渉計型重力波検出器: 指向性・偏波依存性が小さい.

干渉計のアンテナパターン



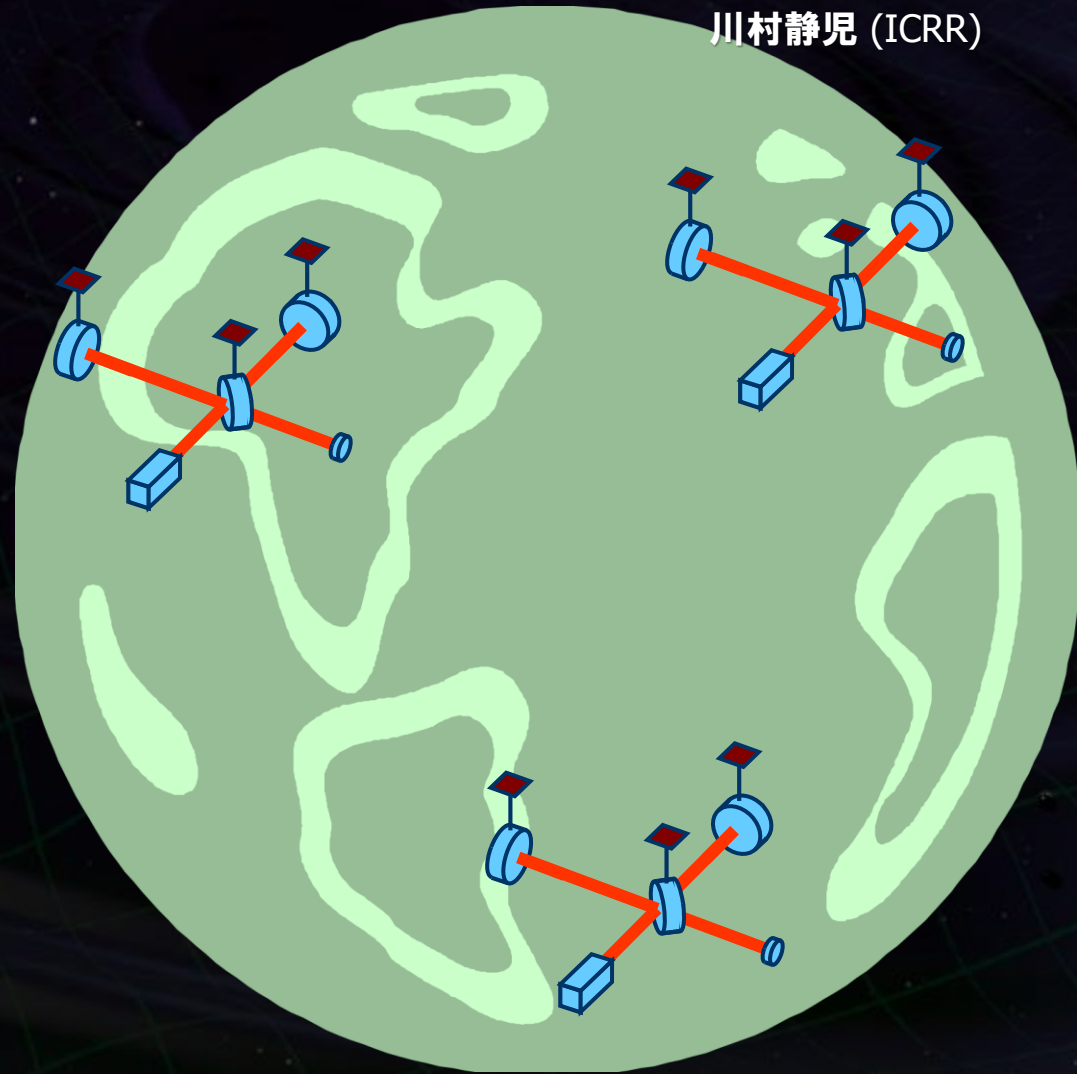
⇒ 1台の干渉計で重力波源を特定することはできない.

アニメーション：
川村静児 (ICRR)

複数台で同時観測



到着時間の差から
波源の方向が分かる！



海外望遠鏡との比較

	2 nd -generation detectors		3 rd generation	
	aLIGO	Ad. VIRGO	KAGRA	ET
観測開始	~ 2016	~ 2016	~ 2017	~ 2026
サイト	地上 Hanford 2台 Livingstone 1台	地上 Pisa 1台	地下 Kamioka 1台	地下 3台
基線長	4 km	3 km	3 km	10 km
観測レンジ (*1)	306 Mpc	243 Mpc	273 Mpc (*2)	3 Gpc
干渉計方式	RSE広帯域	RSE狭帯域	RSE可変帯域	RSE Xylophone
熱雑音の低減	大ビーム径, 低機械損失鏡 熱レンズ効果の補正		低温化	低温化
防振系	能動防振系	受動防振系	受動防振系	受動防振系

(*1) 連星中性子性合体现象に対する観測可能距離, 最適方向, 最適偏波, SNR>8.

(*2) 現在、設計の更新作業が進められており, 変更の可能性はある。

KAGRAスケジュールと予算

FY2010

FY2011

FY2012

FY2013

FY2014

FY2015

FY2016

FY2017

「最先端研究基盤整備事業」
(~98億円) → iKAGRA基盤設備

ほぼ終了

科研費 特別推進研究
(~5億円) → 低温・高感度化, 人件費

申請中

建設

トンネル掘削経費 (~37億円)

ほぼ終了

概算要求 (~20億円)
→ 設備準備

予算・主旨

研究協力

新学術領域研究

(~8億円, ~3億円 for GW) → マルチメッセンジャー天文学

拠点形成事業 (<1億円) → 国際協力

KAGRA構成



Upgrade



目標

施設・望遠鏡基盤の整備

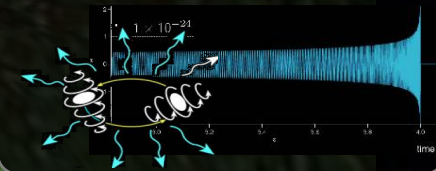
重力波の検出と天文学

15サブシステム

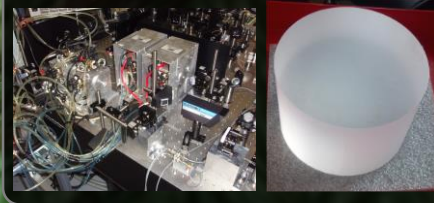
- Tunnel
- Facility
- Vacuum system



- Data Management
- Data Analysis
- Geophys. IFO



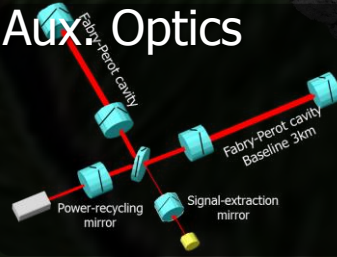
- Laser source
- Mirror



- Seismic iso.
- Cryogenic sys.



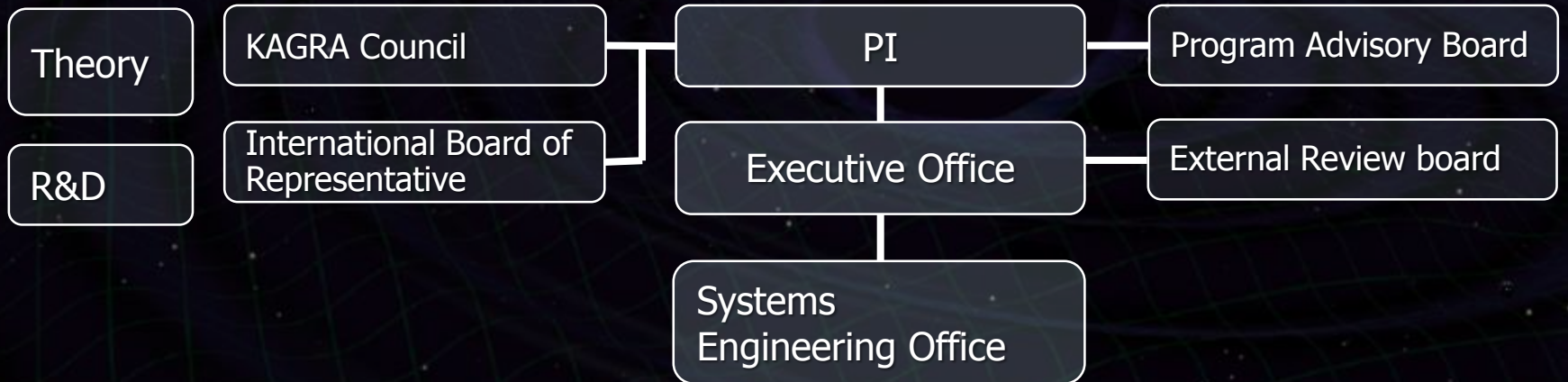
- Main IFO.
- In/Output Optics.
- Aux Optics



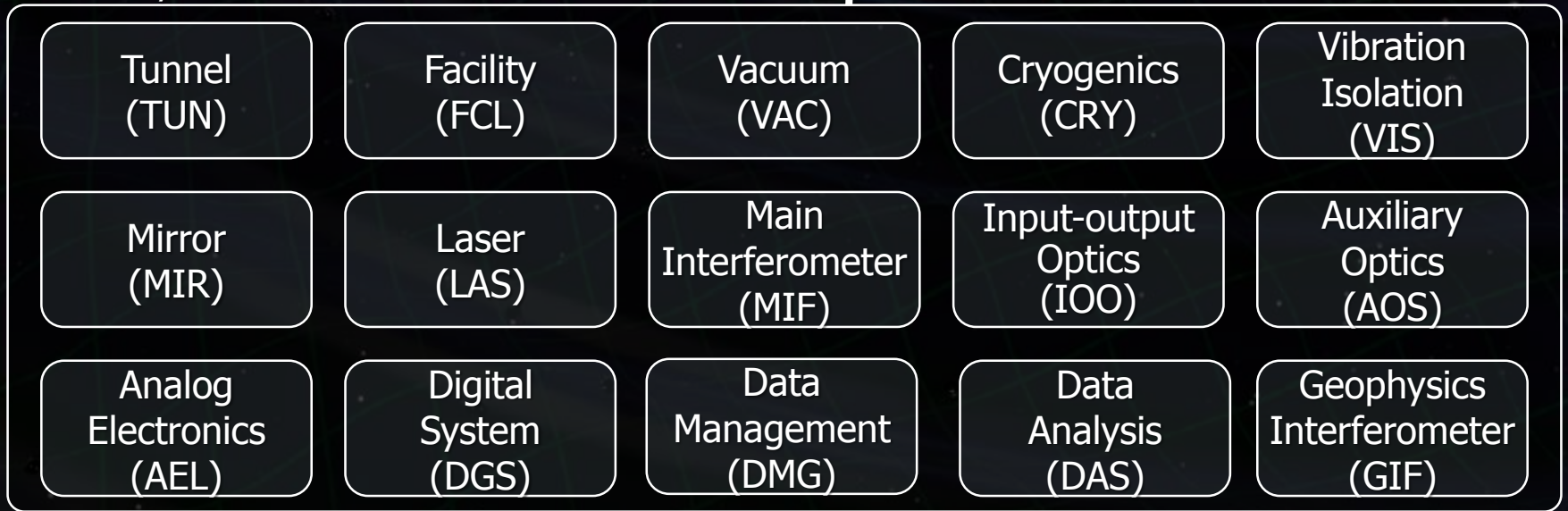
- Analog Elec.
- Digital Elec.



KAGRA Organization PI: T.Kajita (ICRR), PM: Y.Saito (KEK)



15 Subsystems

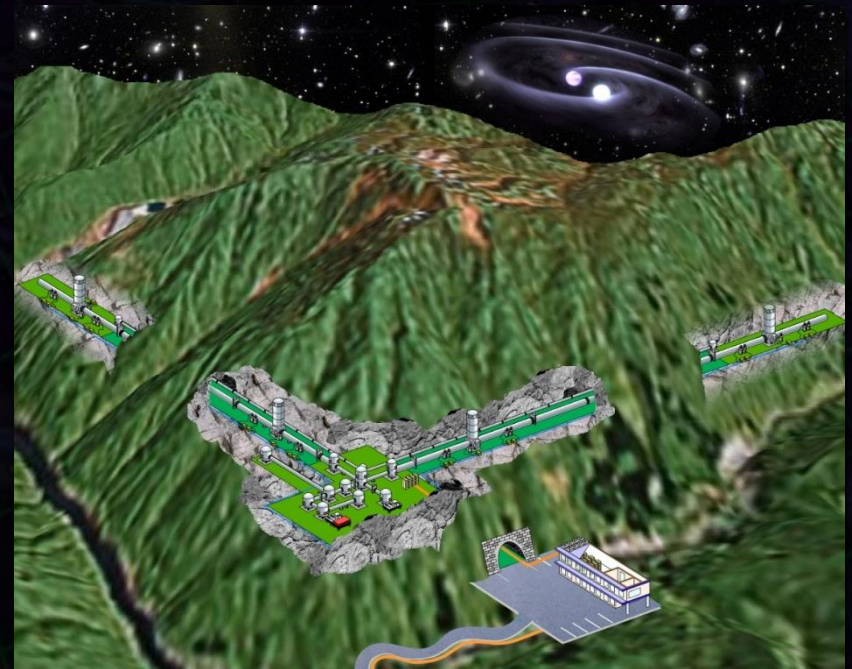


あんどう まさき

安東 正樹 (東京大学 理学系研究科 物理学専攻 /
国立天文台 重力波プロジェクト推進室 准教授)

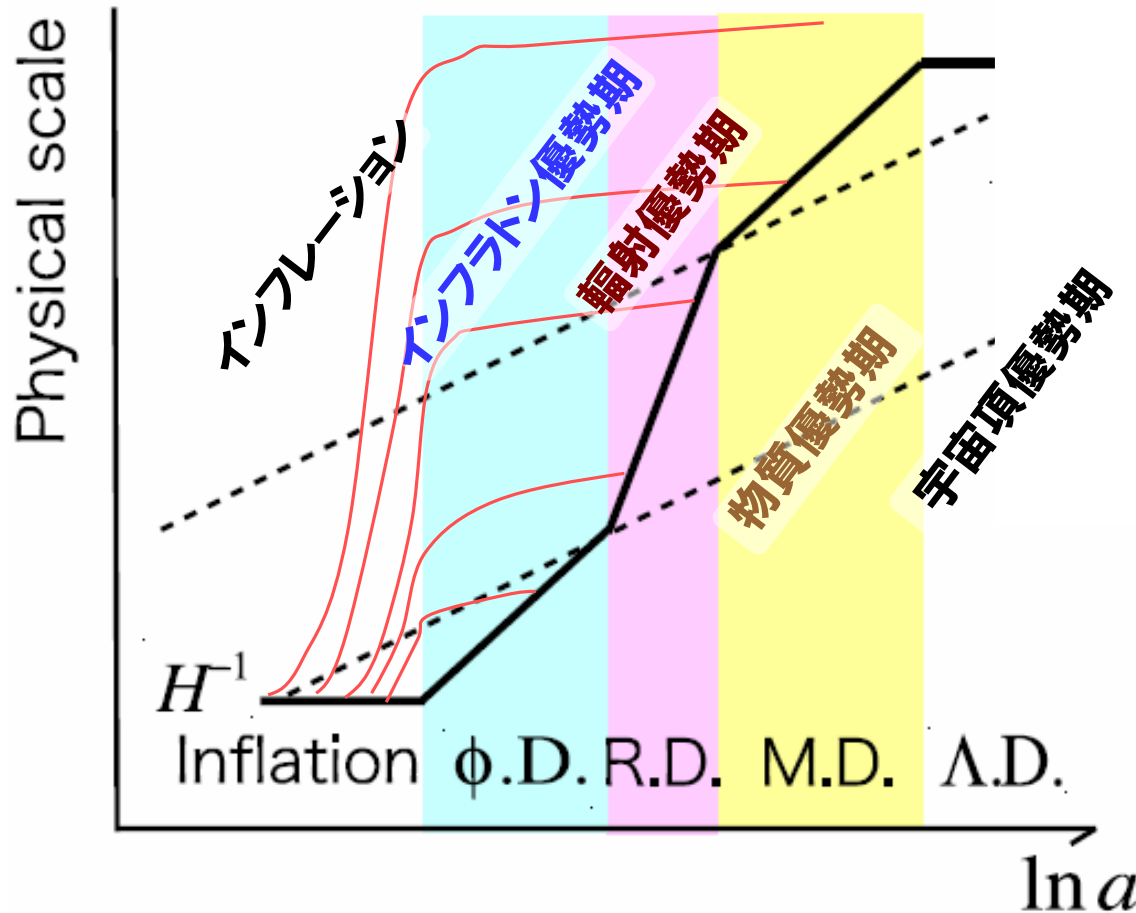
‘重力波天文学’ を研究.

- 滋賀県 草津市 出身.
- 高校・大学は京都.
- 大学院・PD・助教は東京で.
- 2009.1 京大.
- 2012.6 国立天文台.
- 2013.4 東京大 / 国立天文台併任.



インフレーションからの重力波

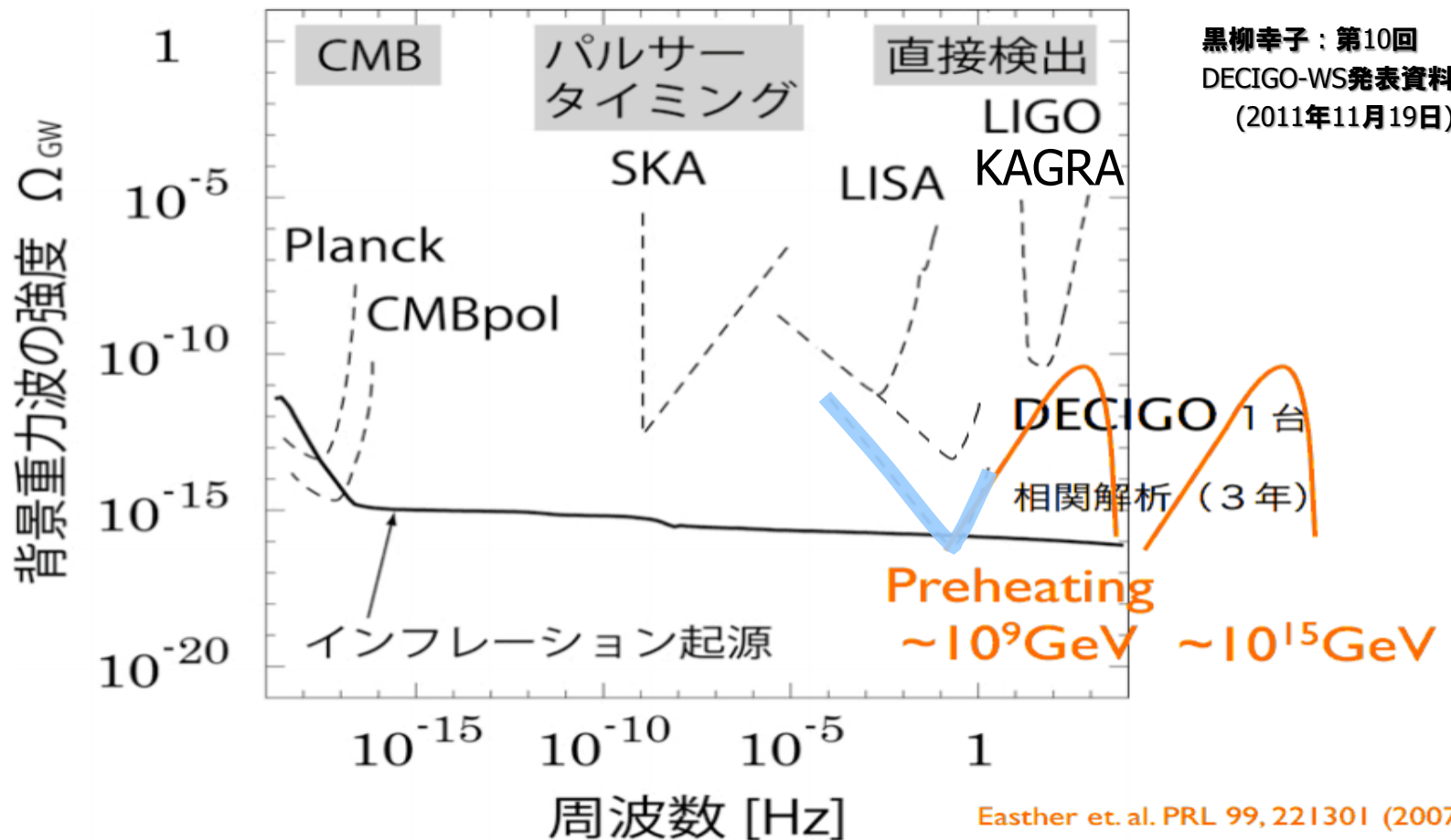
初期に生成された重力波ほど、より長くインフレーションで引き延ばされ、より最近に宇宙の地平線内に入る。



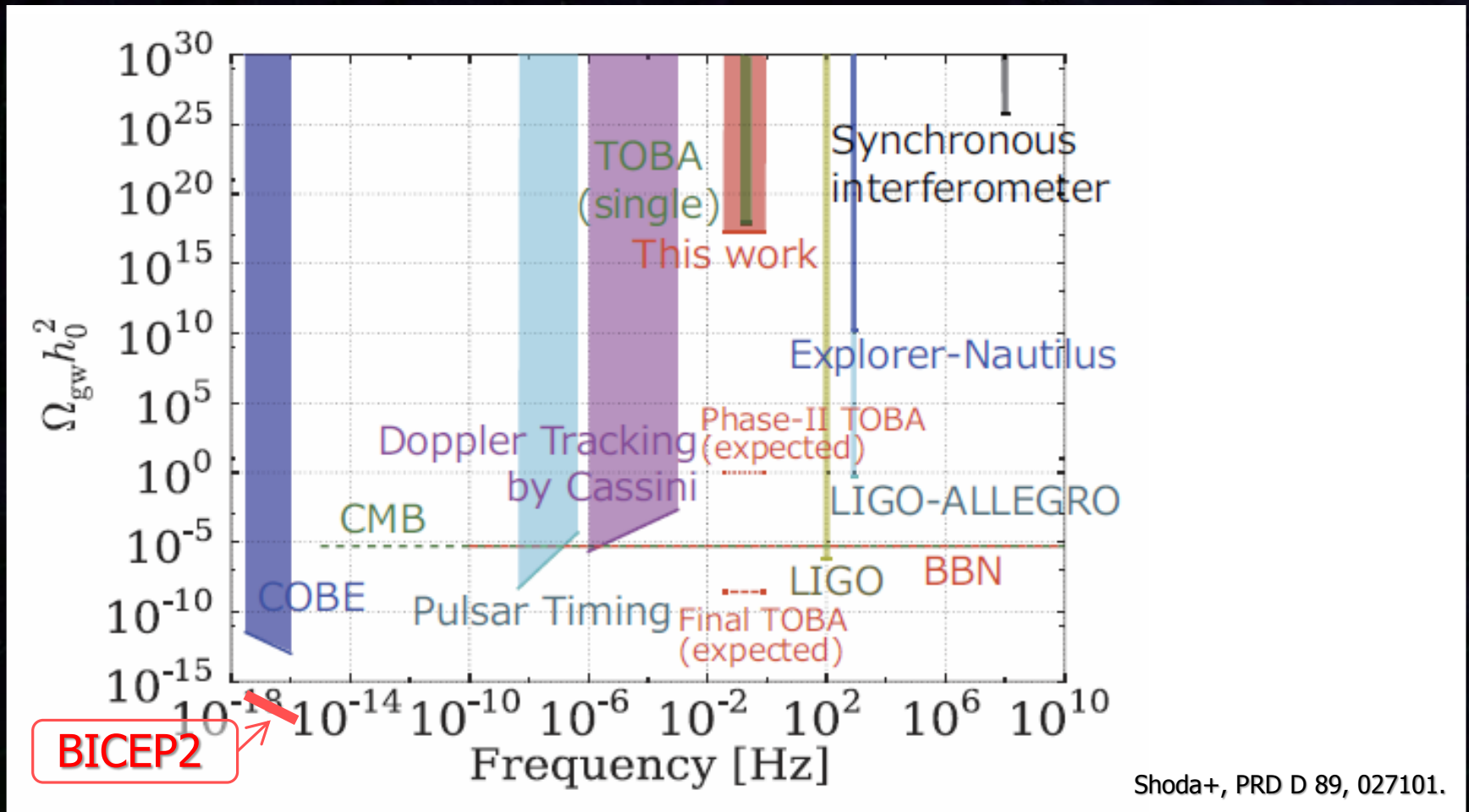
Nakayama+,
Journal of Cosmology
and Astroparticle Physics
06 (2008) 020.

初期宇宙からの重力波

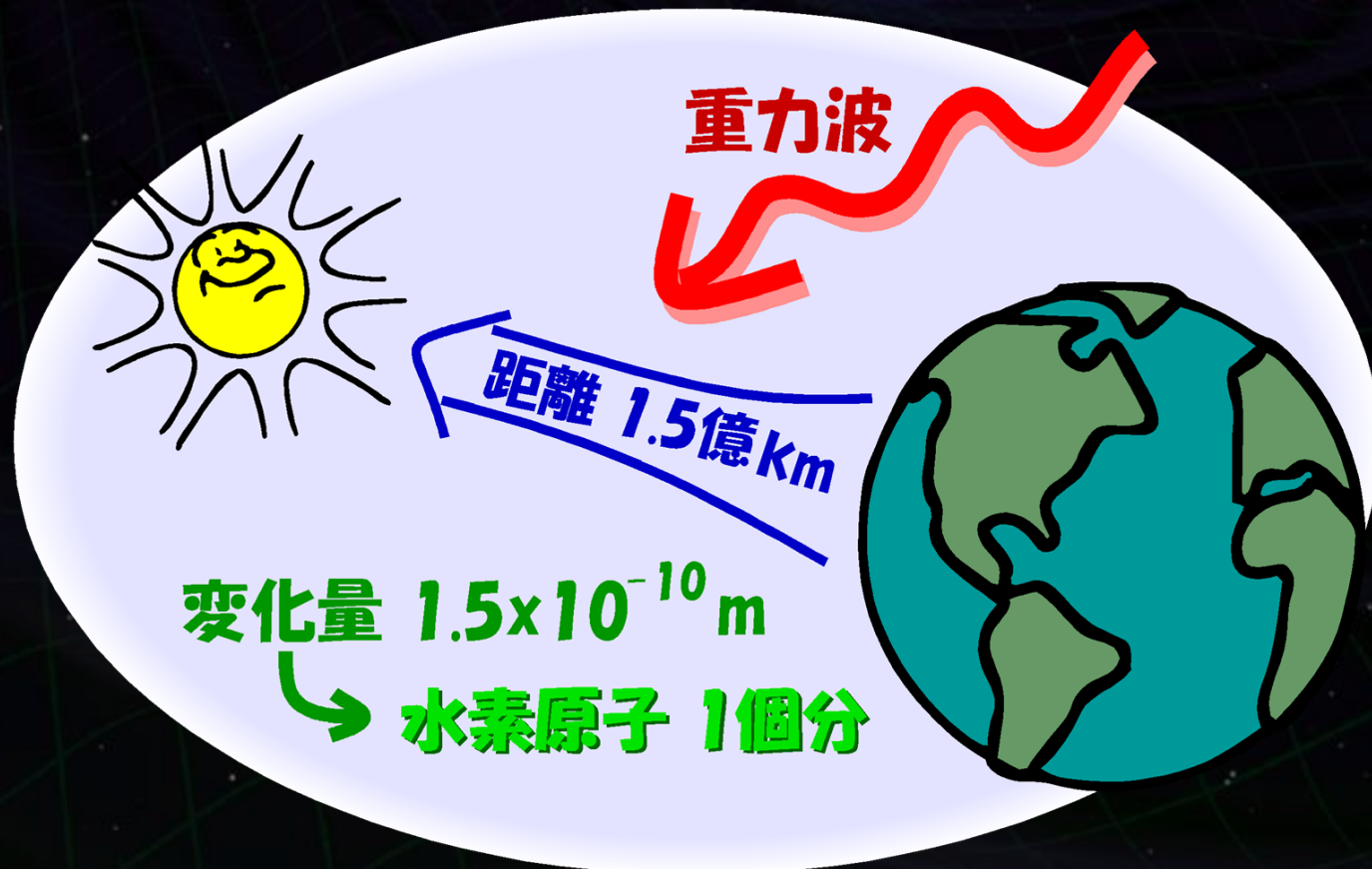
初期の方が宇宙のサイズ(因果律を持つ領域)が小さい。
→ 初期に地平線内入ってきた重力波ほど高周波。



背景重力波探査の現状



重力波の効果：2点間の固有距離の変化



• 重力波のエネルギー密度

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

重力波の密度

宇宙の臨界密度

等価な重力波スペクトル

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

ハッブル定数

• CMBの テンソル・スカラー比

インフレーションのエネルギースケールに対応

$$V^{1/4} = 1.06 \times 10^{16} \left(\frac{r}{0.01} \right)^{1/4} \quad [\text{GeV}]$$

$$r = \frac{(\text{Tensor mode energy})}{(\text{Scalar mode energy})}$$

重力波による天文学!!!



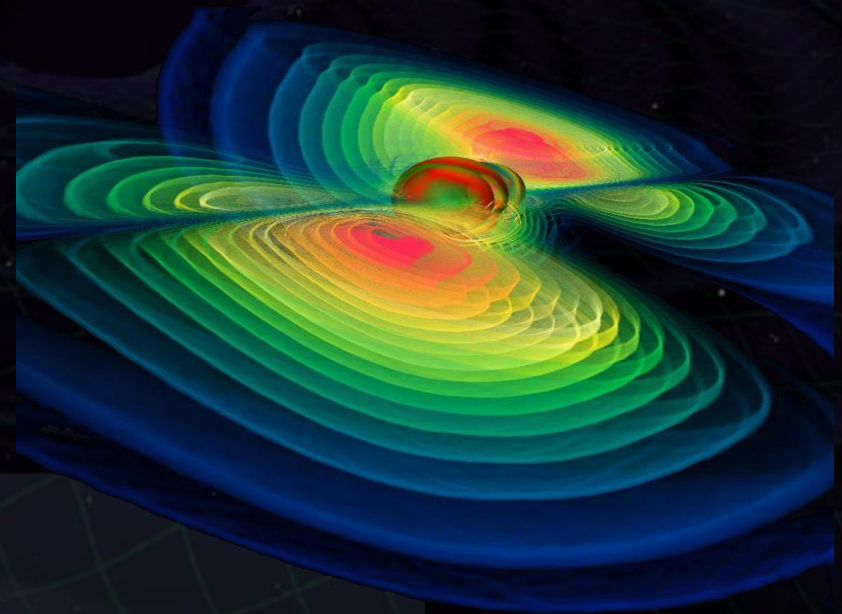
重力波の特徴

- ・質量の加速度運動から放射
- ・物質に対して 強い透過力

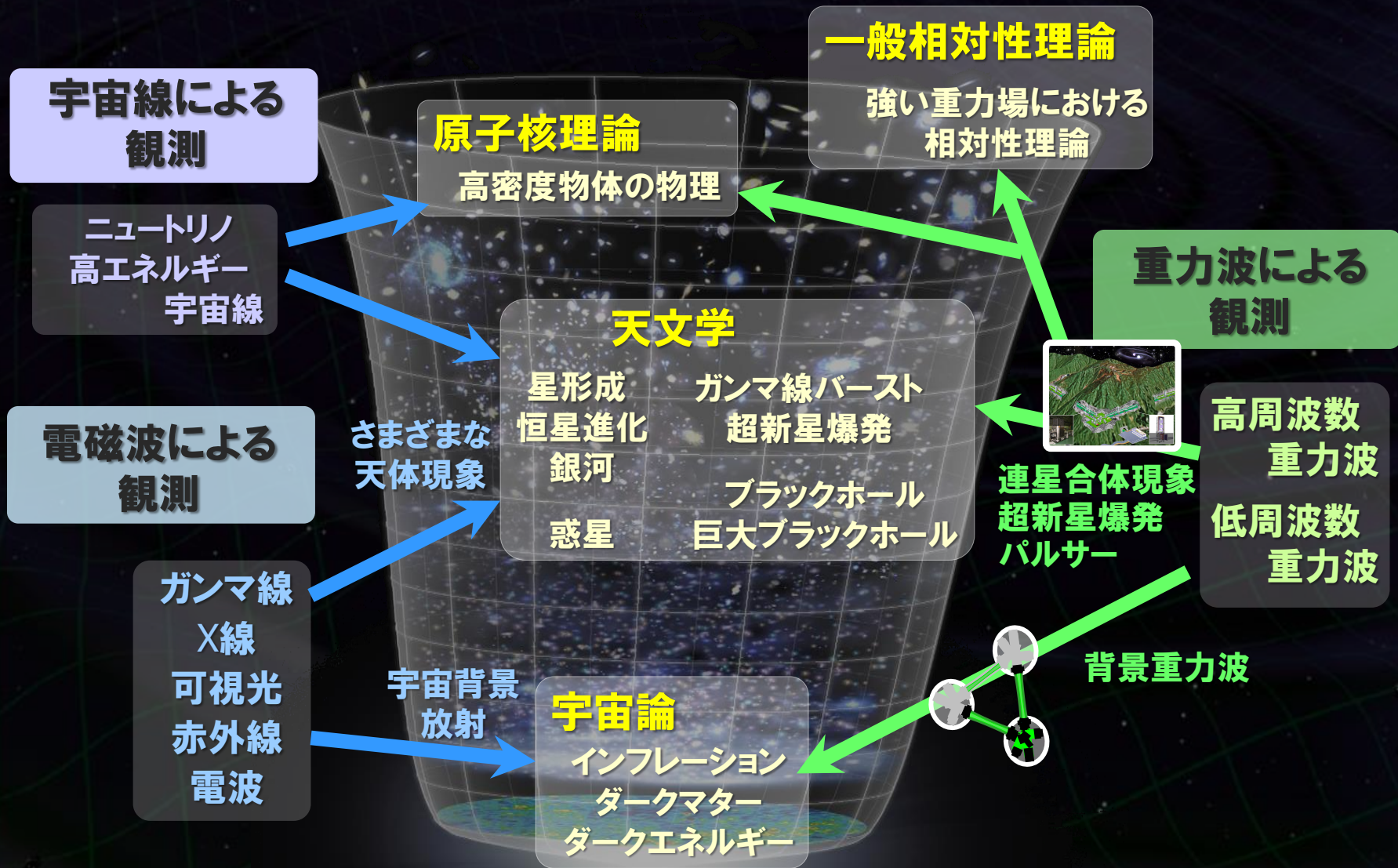


宇宙を観測する新しい手段

- ・電磁波と相補的・独立な観測
- ・電磁波などでは見ることの出来ない現象
(初期宇宙, 高エネルギー天体現象の内部)



重力波で宇宙を探る



背景画: NASA/WMAP Science Team

第1世代 重力波検出器

検出の試み：1960年代より行われる

2000年前後より、大型干渉計型検出器が観測を開始

レーザー干渉計型：5台, 共振型検出器：3台



⇒ 国際的観測ネットワーク：1年を超える観測データ
→ 科学的成果（上限値, 理論モデルへの制約など）

連星中性子星合体イベント：50kpc~20Mpcの観測レンジ

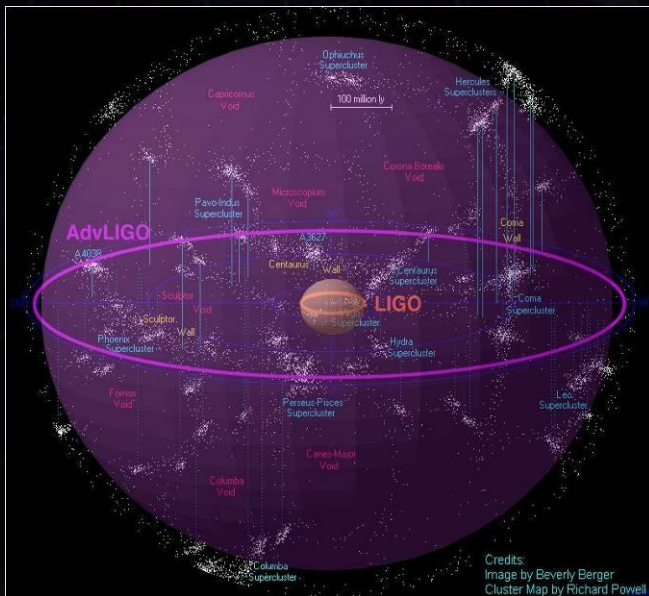
→ 我々の銀河, 近傍銀河でイベントがあれば検出可能

第一世代の検出器 --- 近傍銀河までの観測範囲を持つ

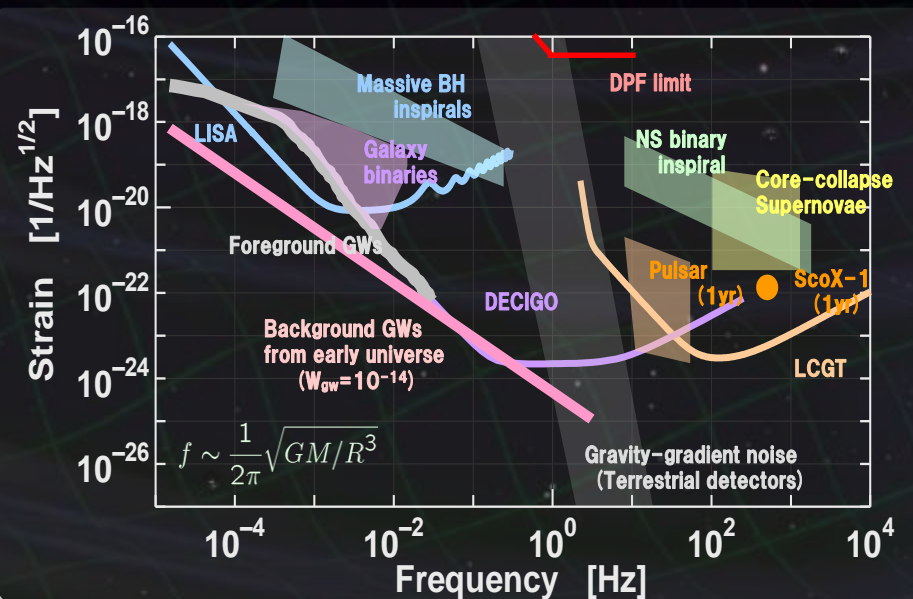
ただ... そのような重力波イベントは稀 (10^{-5} - 10^{-3} event/yr)

⇒ 次世代の重力波望遠鏡

高感度化 (KAGRAなど)
→ より多くの銀河をカバーする



観測帯域を広げる (LISA/DECIGO)
→ 定常的・大振幅の重力波



KAGRA (かぐら)

- 大型低温重力波望遠鏡 -



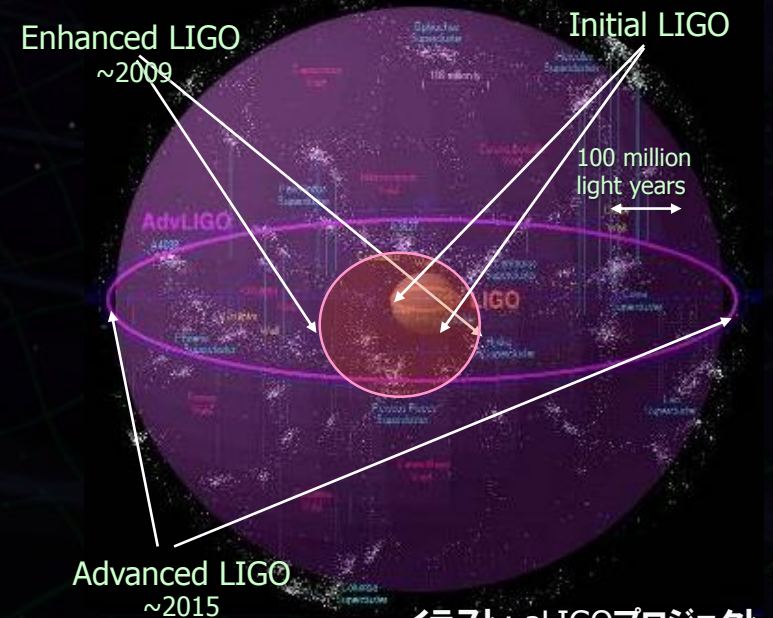
約1桁感度を向上した 第2世代の地上重力波望遠鏡

高感度化→より多くの銀河をカバー



感度が10倍向上

→ イベントレートは 10^3 倍



第2世代望遠鏡では、検出頻度 ~ 10 event/year

かぐら (KAGRA)

日本の大型重力波検出器 (本格観測 2017年-)
一年間に10回程度のイベント観測が期待できる。



重力波天文学

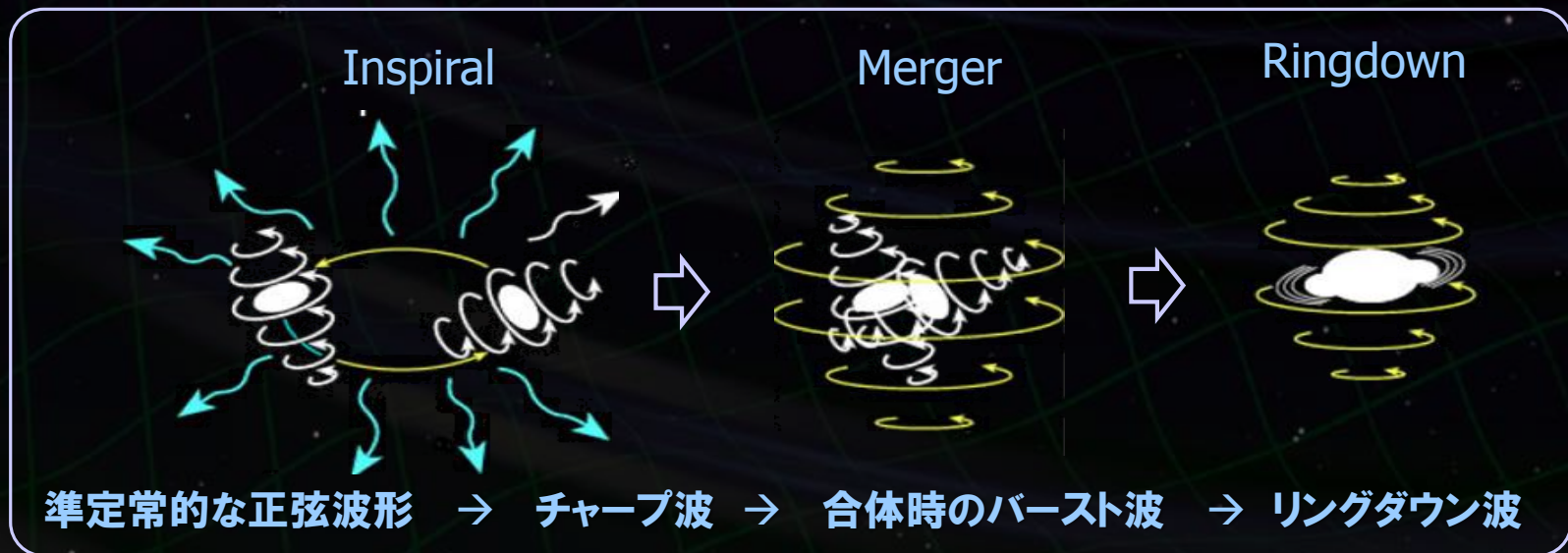
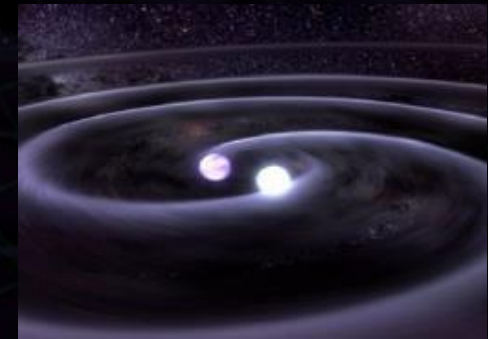


- ホスト機関：
東京大学 宇宙線研究所
- 副ホスト機関：
国立天文台
高エネルギー加速器研究機構
- 国内外の研究機関
東京大, 大阪市大, 東工大,
大阪大, 京都大, 産業技術総
合研究所, 情報通信研究機構,
電気通信大, 山梨英和大 など。

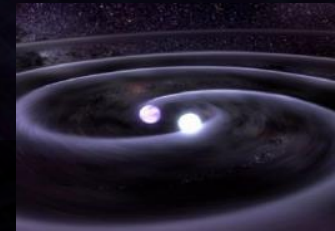
連星中性子星の合体

・連星中性子星の合体: 現在もっとも有力な重力波源.

- 電波パルサー観測により、存在が確認.
- 頻度の見積もりが可能.
- 地上重力波望遠鏡の観測周波数帯の信号.
- 波形予測が可能.
- 波形の情報から、さまざまな科学的知見.



連星中性子星合体からの重力波観測



観測レンジ

感度曲線 → 観測可能距離 270 Mpc

(SNR 8, 最適方向・偏波)

銀河の個数密度 :

$$\rho = 1.2 \times 10^{-2} \text{ [Mpc}^{-3}\text{]}$$

R. K. Kopparapu et.al.,
ApJ. 675 1459 (2008)

銀河あたりのイベントレート:

$$\mathcal{R} = 118_{-79}^{+174} \text{ [events/Myr]}$$

V. Kalogera et.al.,
ApJ, 601 L179 (2004)



KAGRAの観測レート 9.8 events/yr

(1年間の観測での検出確率 99.9%以上)

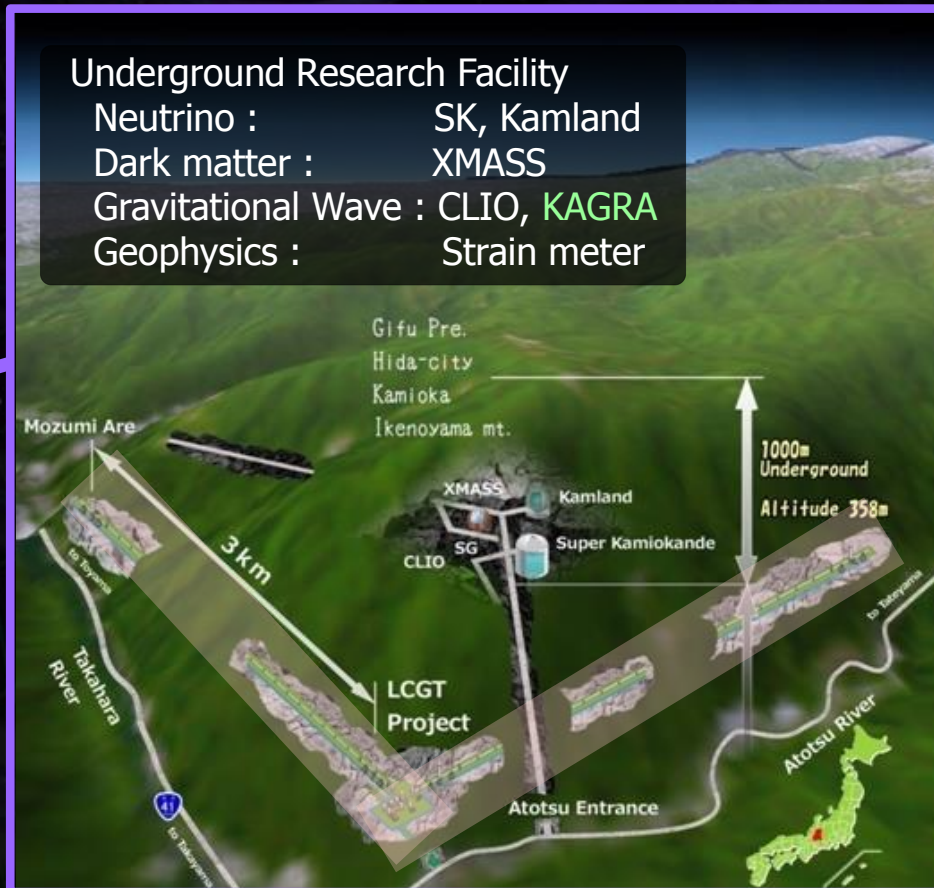
岐阜県・神岡町 の地下サイトに建設

Facility of the Institute of Cosmic-Ray Research (ICRR), Univ. of Tokyo.



富山大学から
車で約1時間

Map by Google



Underground Research Facility

Neutrino : SK, Kamland

Dark matter : XMASS

Gravitational Wave : CLIO, **KAGRA**

Geophysics : Strain meter

掘削工事の完了

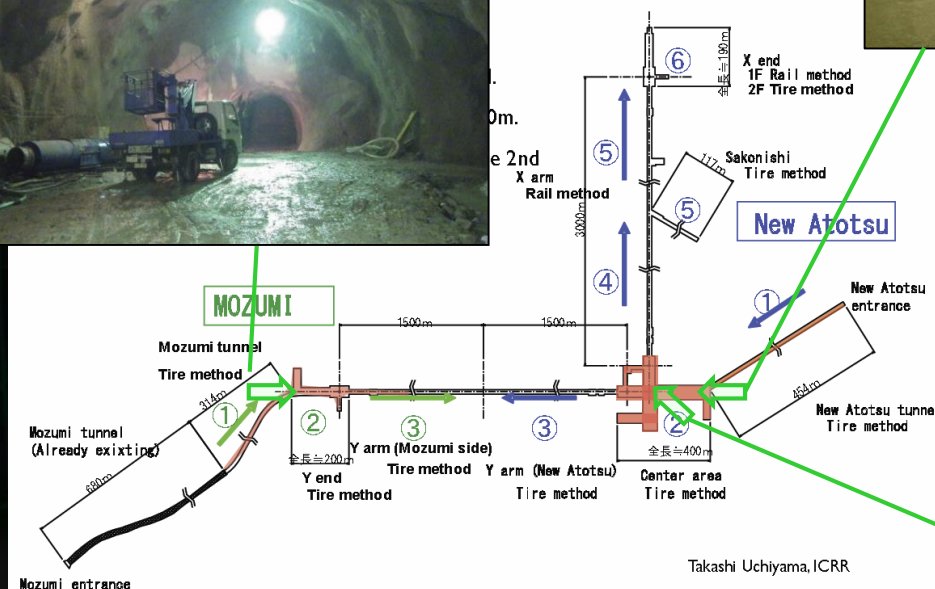
茂住口：
Y腕トンネル



新跡津口：センタールーム



Report for the KAGRA
2012/12/17. JGW-G12

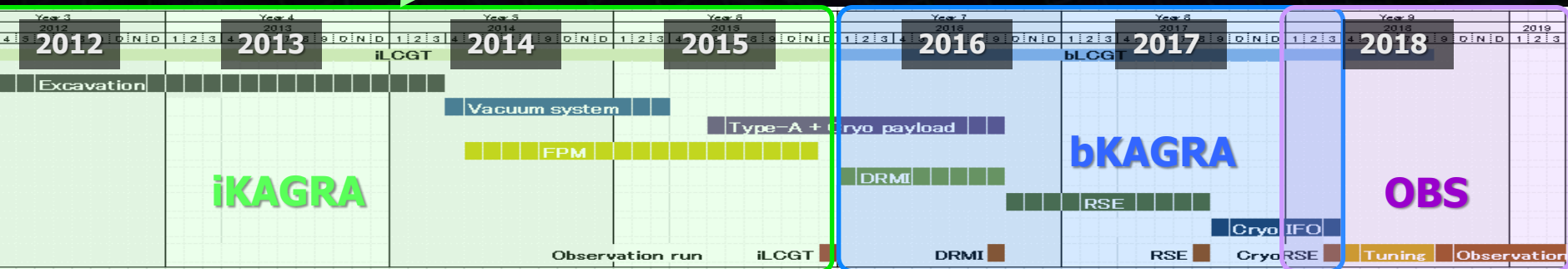


KAGRAスケジュール

• **iKAGRA** (2010.10 – 2015.12)

3-km FPM interferometer

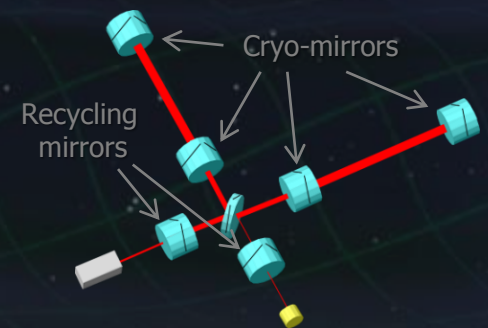
- Baseline 3km room temp.
- Operation of total system with simplified IFO and VIS.



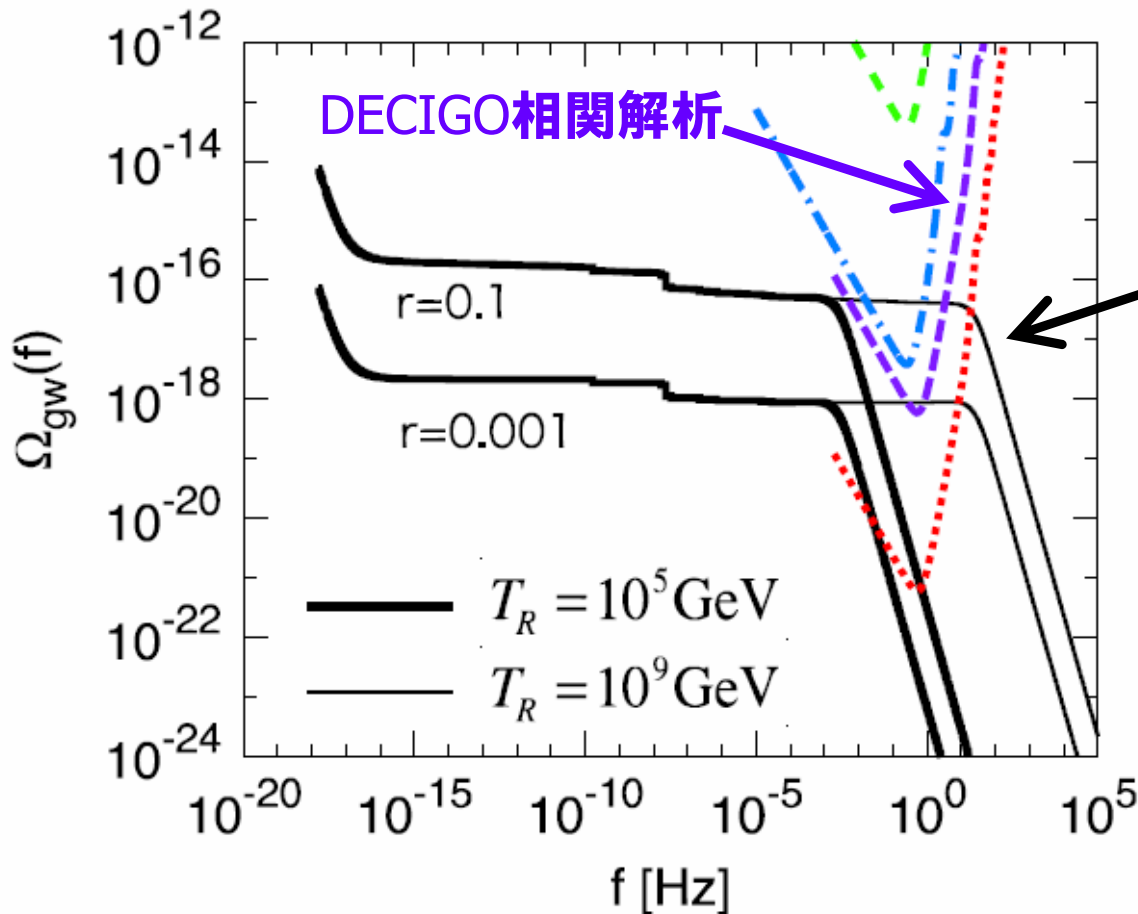
• **bKAGRA** (2016.1 – 2018.3)

Operation with full config.

- Final IFO+VIS configuration
- Cryogenic operation.



背景重力波のエネルギー密度 : テンソルスカラー比(r)に比例.
 重力波のスペクトル : 宇宙の進化の歴史を反映.



- **スペクトルの大きさ.**
 → インフレーションの
 エネルギースケール.
- **折れ曲がりの周波数**
 → 再加熱の
 エネルギースケール
 'いつビッグバンが
 起こったか'.

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

光共振型マイケルソン干渉計
アーム長: 1000 km
レーザーパワー: 10 W
レーザー波長: 532 nm
ミラー直径: 1 m

DECIGO

(DECI-hertz interferometer
Gravitational wave Observatory)

宇宙重力波望遠鏡 (~2030)

→ 他では得られない豊富なサイエンス

宇宙の成り立ちに関する知見

インフレーションの直接観測

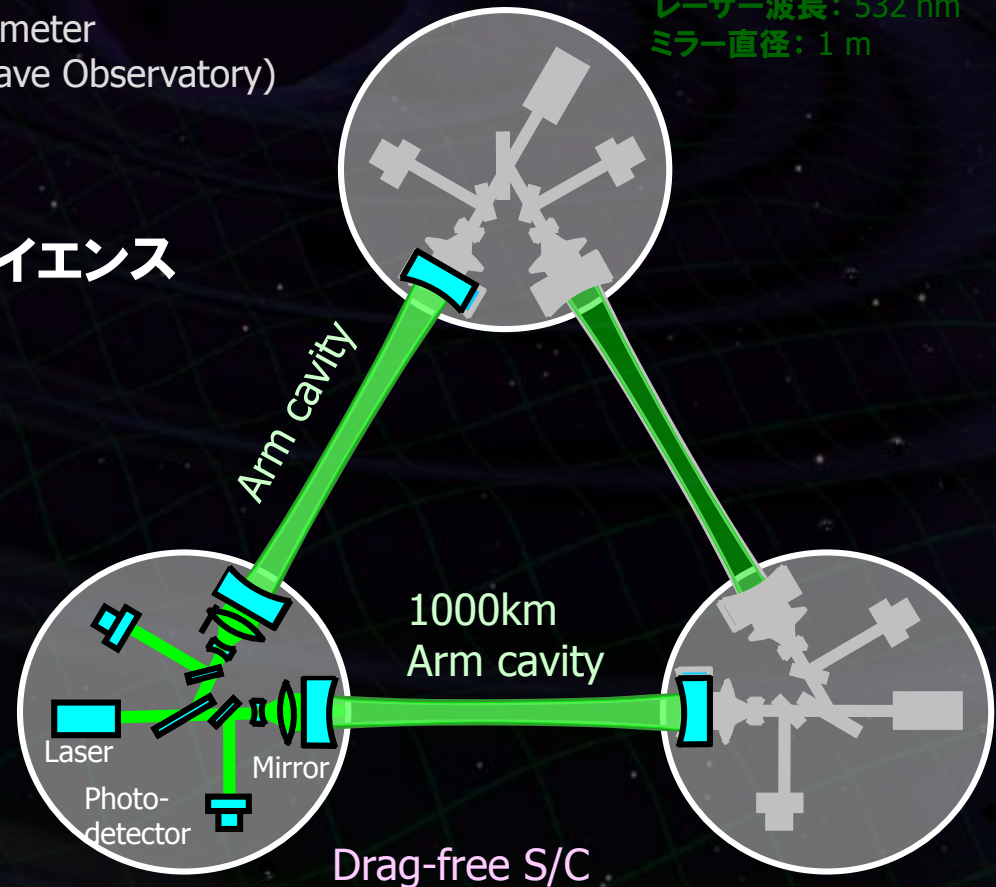
ダークエネルギーの性質

ダークマターの探査

銀河形成に関する知見

ブラックホール連星の観測

宇宙の基本法則に関する知見



互いに1000km離れた3機のS/C
非接触保持された鏡間距離を
レーザー干渉計によって精密測距

太陽公転軌道
最大4ユニットで相関をとる

DECIGOパスファインダー (DPF)

- DECIGOの最初の前哨衛星
- DECIGOで必要とされる主要技術のうち、1機の衛星で可能な要素の宇宙実証。



400kg級 衛星一機 500km 地球周回軌道

- 基線長30cm干渉計による干渉計技術実証.
- 安定化レーザー光源の動作.
- ドラッグフリーの実現.
- 総合的・連続的な観測運用.

