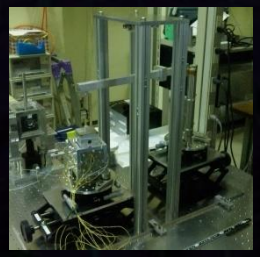
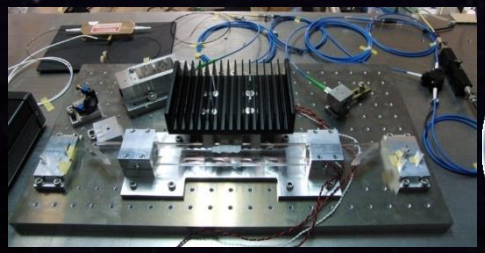
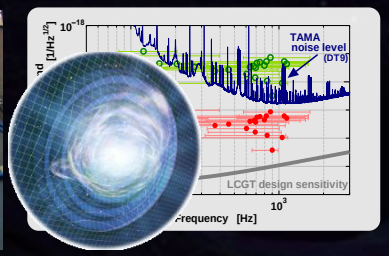
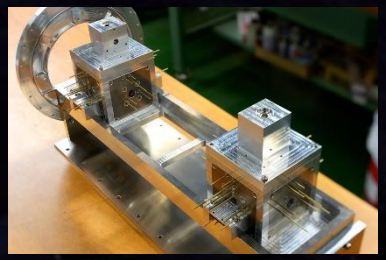
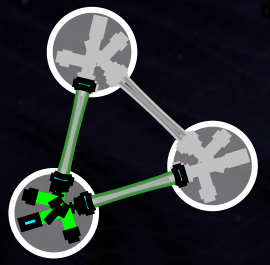
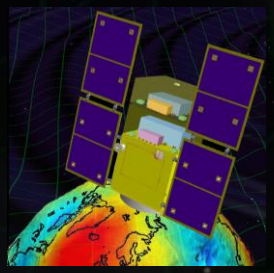




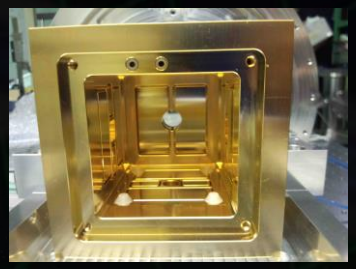



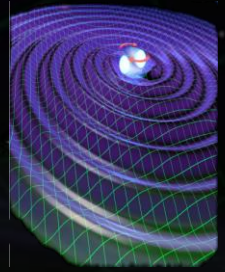
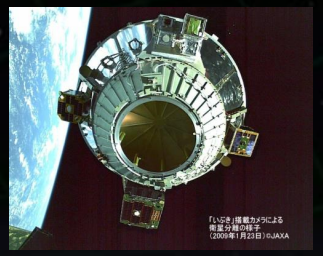
DECIGOとPre-DECIGO

安東 正樹 (東京大学 / 国立天文台)

DECIGO/DPF collaboration





前置き

LIGOによる重力波の初観測

DECIGO

・2016年2月11日 米国の重力波観測所 LIGO が
重力波の初観測を発表：地球から13億光年遠方
でのブラックホール連星合体からの重力波信号を観測.

2016年2月11日 新聞各紙の朝刊

Courtesy Caltech/MIT/LIGO Laboratory

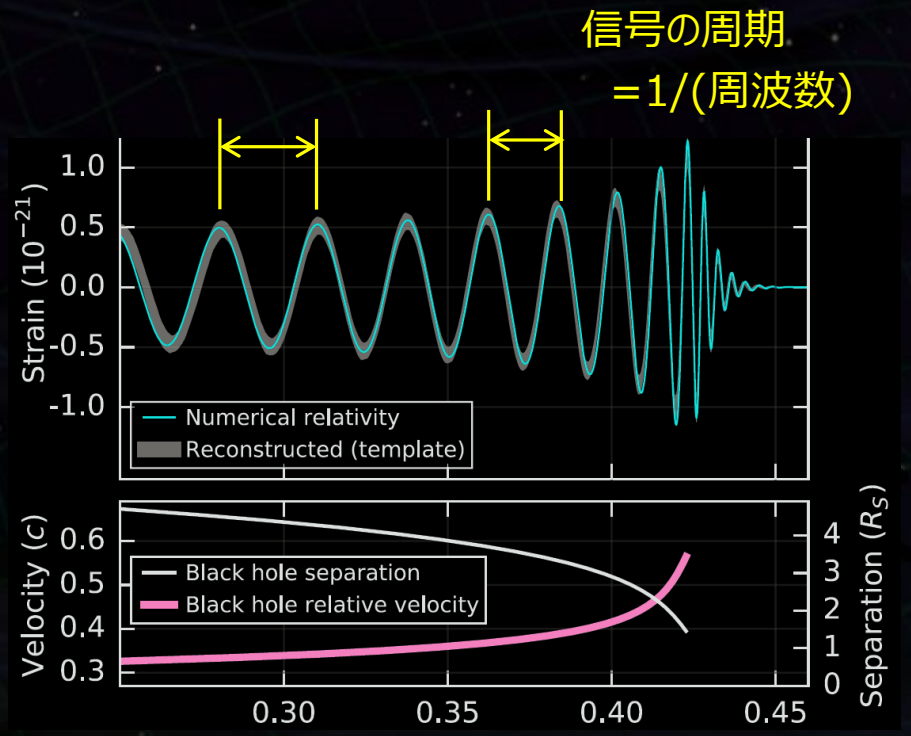
何が分かるのか？

DECIGO

・観測された重力波の波形から連星の情報が得られる.
  * 周波数, 周波数変化 → 2つの天体の質量, 軌道半径, …
  * 振幅 → 連星系までの距離. 軌道傾斜角,…
  * 合体後の減衰振動 → 合体後の質量, スピン.

⇩

・連星ブラックホールの質量:
  太陽質量の 29倍 と 36倍.
・合体後のブラックホールの質量:
  太陽質量の 62倍.
・連星系までの距離:
  13億光年 (410Mpc).



あまり分からなかったこと

・あまり分からなかったこと

＊ 波源の位置：LIGOの2台の時間差 7msec

＋ 干渉計指向性→ 590平方度

（すばるHSCの視野 約2平方度）.

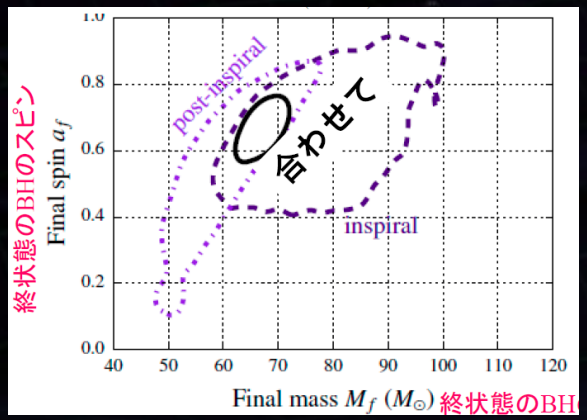
＊ スピン：インスパイラル軌道とリングダウン

のQ値からそれぞれ求まる.

→ 無矛盾であるという以上は言える

段階にはない.

arXiv:1602.03841
田中さん 日本物理学会資料より
(2016.3.22)



新たな謎

・新たな謎

＊ 30$M_\odot$のブラックホール連星の起源.

2つの可能性:

(1) 初代星などの進化.

(2) 多体散乱による連星形成.

→ スピンの情報，多数の観測による統計の蓄積で分かるかも.

＊ このようなBH連星の分布・合体頻度.

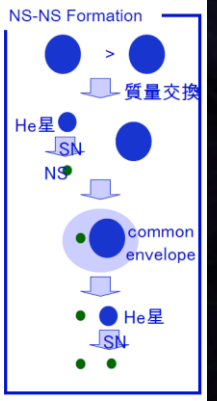
→ 今後の観測に期待.

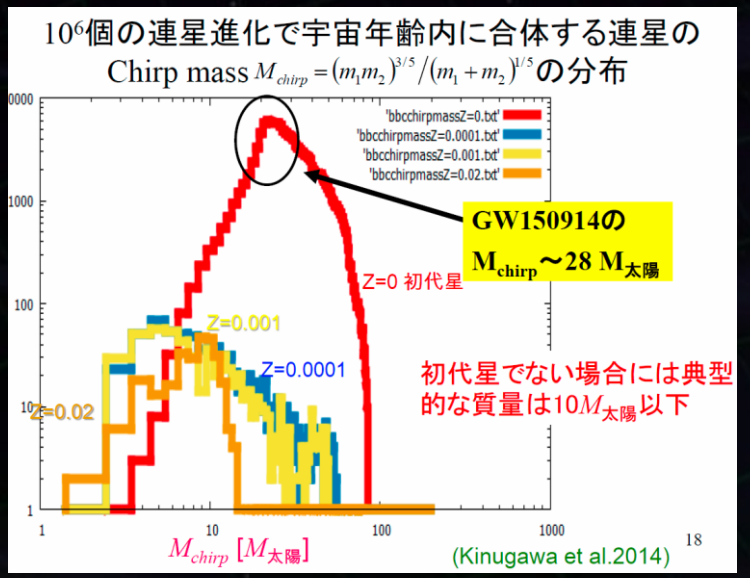
田中さん 日本物理学会資料より(2016.3.22)

初代星は大質量星が多い。進化過程での質量放出がefficientでないためNS連星を作ろうとすると超新星爆発の質量放出で連星が解体してしまう。

しかし、BH-BH連星なら形成される可能性が十分にある。

様々な仮定は必要だが、連星進化のシミュレーションをおこない、BH連星合体のイベントレートを評価





波源の位置特定と電磁波追観測

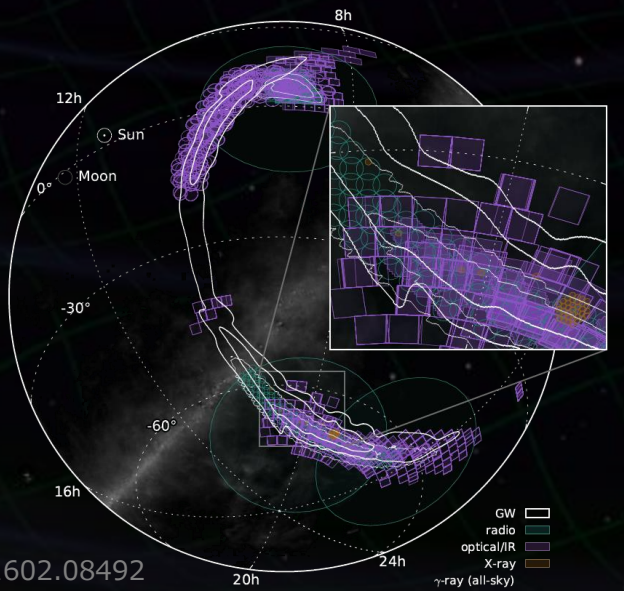
DECIGO

・重力波信号と同時に電磁波 (電波, 赤外線, 可視光, X線, ガンマ線)などによる追観測を行うことで,得られる知見は大幅に広がる.

・GW150914: LIGOの2台の重力波望遠鏡だけが信号を観測.

→ 位置特定精度 : 590平方度. 電磁波望遠鏡での追観測も行われたが, 関連した信号は確認されていない.

LIGOは, 事前に20以上の観測グループと協力の申し合わせ(MoU)をしていたGW150914の際には, イベント2日後に連絡 → 電磁波(電波, 可視・赤外線, X線, ガンマ線) と ニュートリノで追観測.



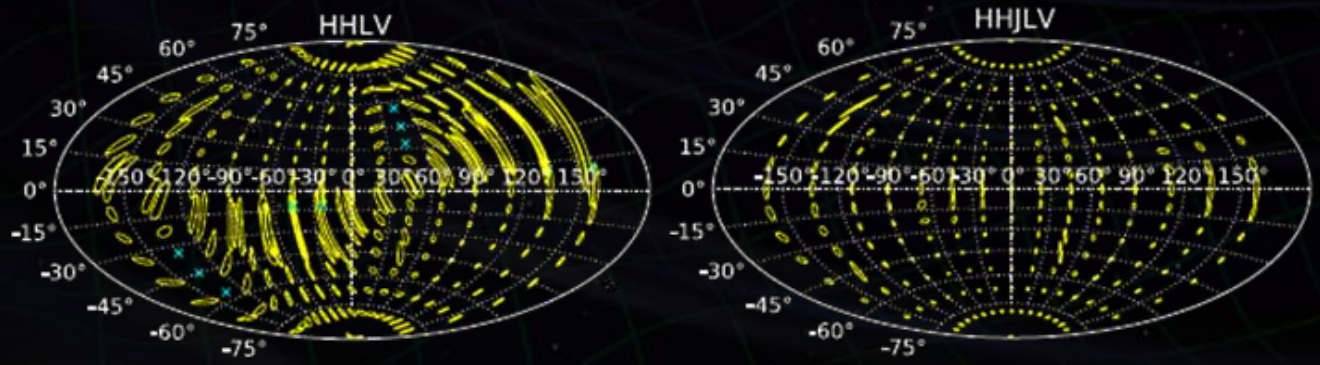
arXiv:1602.08492

重力波源の方向特定精度

NS-NS coalescence @180Mpc (95%CI)		
(1.4,1.4)Msun	LHV	LHVK
median of δΩ [Deg^2]	30.25	9.5

H: LIGO--Hanford
L: LIGO--Livingston
V: Virgo,
K: KAGRA
I: LIGO-Indea

From presentation by H. Tagoshi
J.Veitch+, PRD85, 104045 (2012)
Tagoshi+ (2014)



S.Fairhaurst
CQG 28(2011)
105021

観測ネットワークに KAGRA が加わる (aLIGO + adv. VIRGO)
→ 角度分解能が 3-4 倍向上.
干渉計稼働率 80%程度 → 4台目以降の存在も非常に重要.

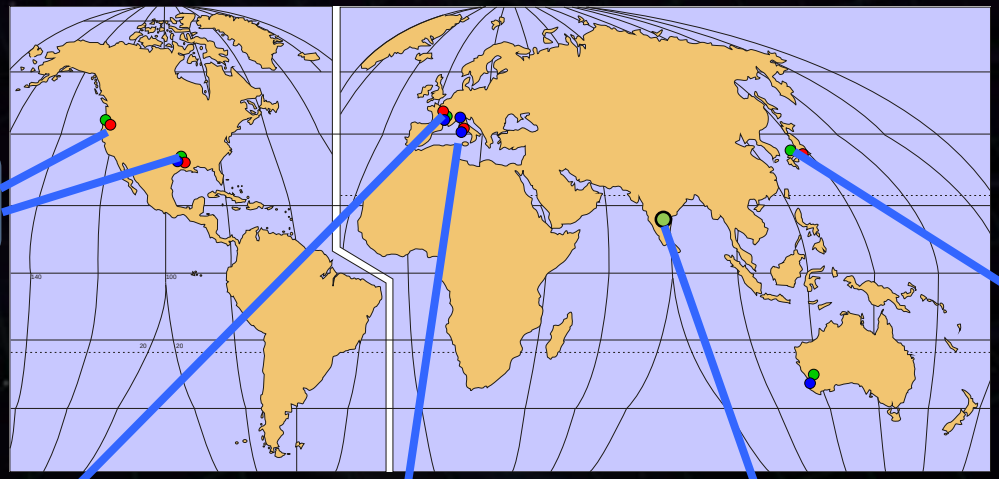
第2世代 重力波望遠鏡

DECIGO

国際観測ネットワークが形成される　(現在から 約3-5年後)

→ 重力波天文学 (重力波の検出, 位置, 物理情報, …)

aLIGO (USA)
4km x 2



KAGRA (JPN)
baseline 3km

GEO-HF (GER-UK)
baseline 600m

Adv.VIRGO (ITA-FRA)
baseline 3km

LIGO-India
project approved

indigo

大型低温重力波望遠鏡

DECIGO

大型低温重力波望遠鏡

かぐら (KAGRA)

岐阜県・神岡で建設中の
次世代重力波検出器
(本格観測 2018年-)

↓

重力波天文学の創成

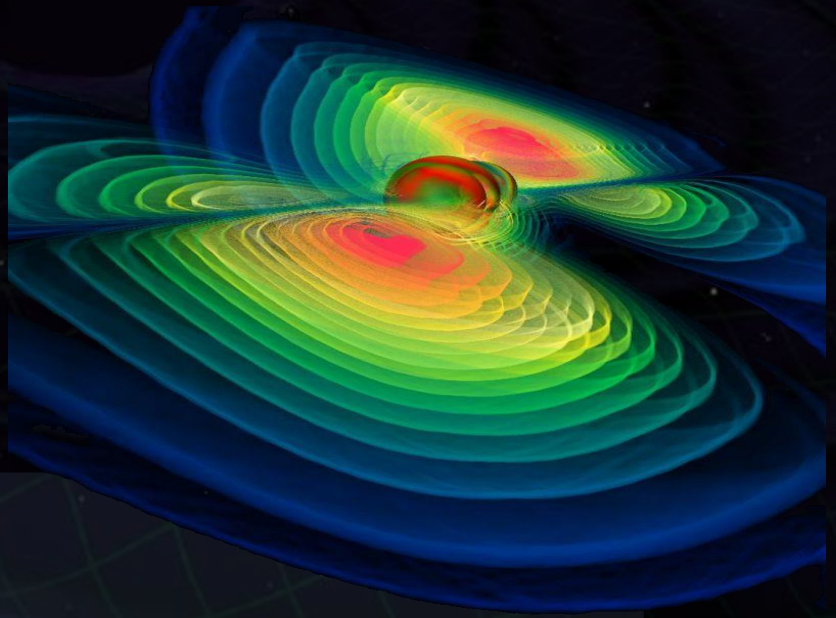
重力波による天文学

DECIGO

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

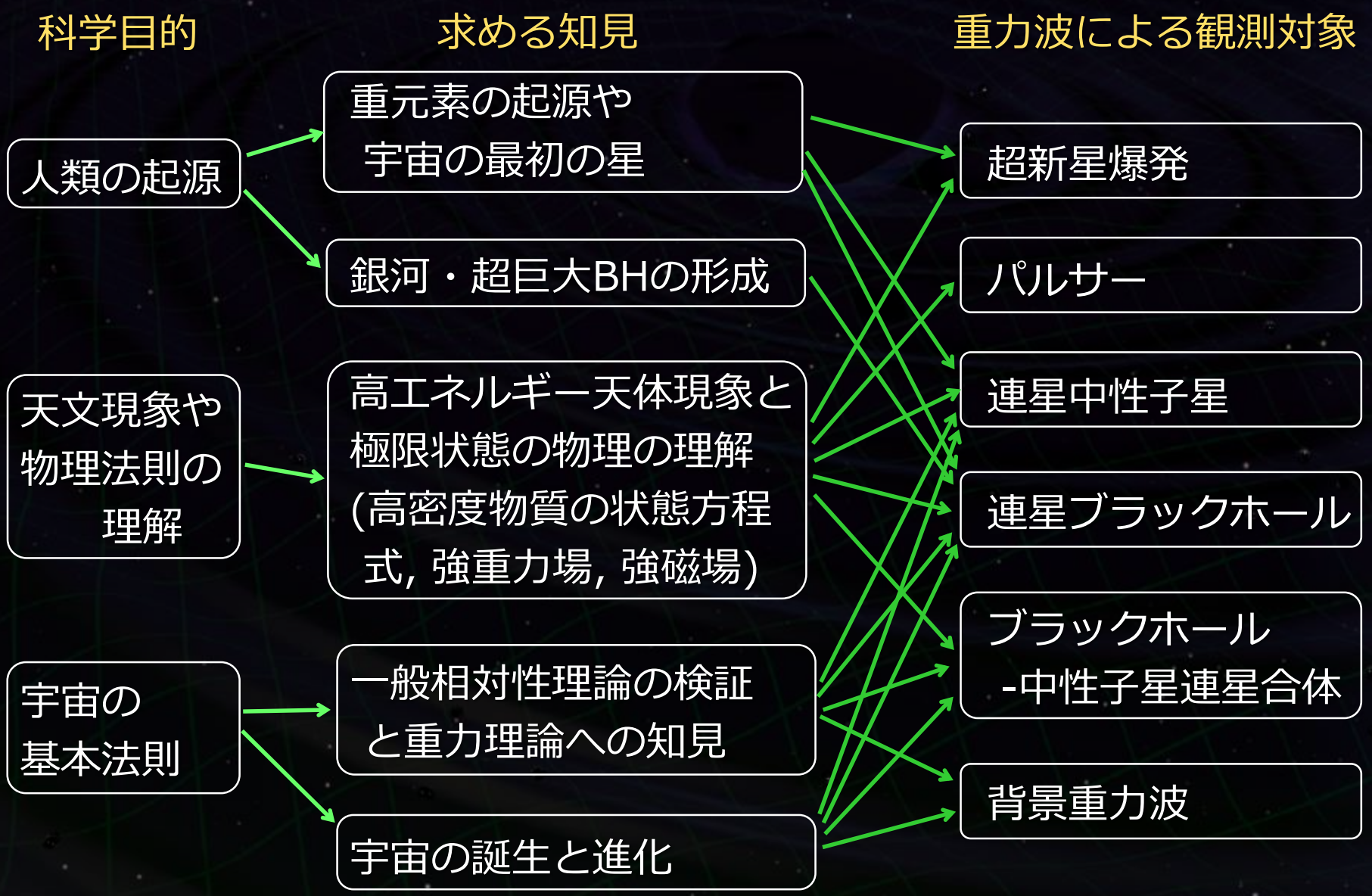
・電磁波と相補的・独立な観測

・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，時空構造

重力波天文学の科学的意義

DECIGO



重力波天文学の科学的意義

GWIC Roadmap
https://gwic.ligo.org/roadmap/

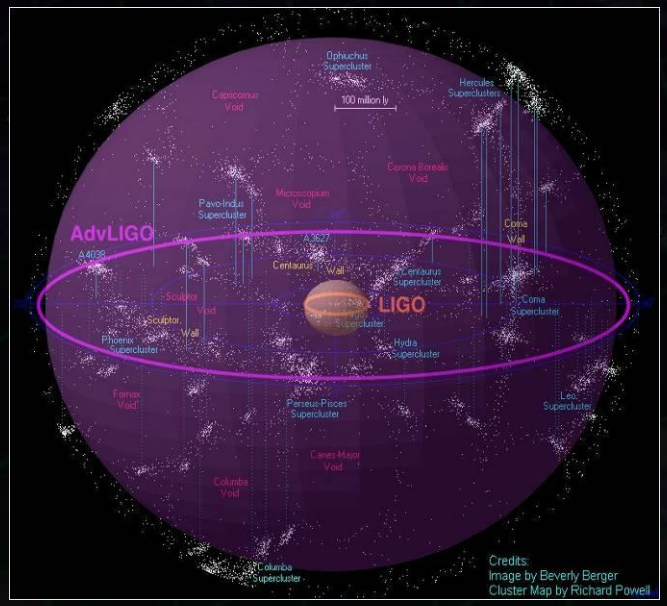
Time Frame	Decade 2010 - 2020		Decade 2020 - 2030			Decade 2030 - 2040	
Frequency Band	10 Hz - 1 kHz	3 - 30 nHz	1 Hz - 1kHz	0.1 - 100 mHz	1 - 30 nHz	1 Hz-1kHz	0.1-10Hz
Instruments Techniques	Enhanced and Adv LIGO-VIRGO GEO-HF	Pulsar timing (PPTA, EPTA, NanoGrav)	ET and other third generation	LISA	Pulsar timing (IPTA, SKA)	ET & other third generation	BBO
Fundamental Physics, General Relativity	test speed of GW relative to light, test polarizations of GW		test NS equation of state with pulsar GW	test polarizations of GW	test polarizations of GW	constrain the mass of the graviton from GW phasing of inspirals	cosmic backgrounds – tests of quantum era in universe
	effects of frame dragging, precessing BH mergers, black hole spectroscopy		Stochastic GW background at Ω_{GW} 10^{-12}	bound graviton mass	bound graviton mass	high precision tests of GR through waveform phasing	high precision tests of GR through waveform phasing
	test merger waveforms-strong field GR		strong field tests of gravity; models of black hole merger	black hole spectroscopy – no- hair tests	properties of cosmic strings	Stochastic GW background at Ω_{GW} of 10^{-13}	
	test NS equation of state with NS-BH inspirals		test NS equation of state with NS-BH inspirals	EMRIs – trace BH spacetime			
	complete dynamics of BH mergers		black hole spectroscopy, no-hair theorem, frame dragging	bound post inflation phase transitions			self-consistency test of slow-roll inflation
Cosmology	precision Hubble Const (NS-NS or NS-BH mergers with EM counterparts)		high precision cosmology (Hubble constant, dark matter, etc.)	precision Hubble Const (NS-NS or NS-BH mergers with EM counterparts)	Limit/detect GW from inflation era	precision Hubble Const (NS-NS or NS-BH mergers with EM counterparts)	precision Hubble Const (NS-NS or NS-BH mergers with EM counterparts)
			dark energy param. to 5-10% from 1000's of γ-bursts	dark energy parameters to 1% from 2-10 sources		Intermediate black holes and if they were galactic seeds	dark energy parameters to <1% from 10^5 sources
Astronomy	z=0 Merger rate of NS-NS systems (not found via EM)	merger rate of 10^8-10^9 M_S BH at z<2	Merger rate of BNS, BBH and BH-NS systems and test of population synthesis	merger rate of 3.10^4-10^7 M_S BH up to z=25	stochastic GW background, galactic merger rates, BH mass functions	merger rate of NS-NS, NS-BH and BH-BH systems at very high redshifts	z=0-5 evolution of merger rates of NS-NS and NS-BH
	merger rate of NS-BH systems (not yet discovered via EM); test binary stellar evolution theory (BSE)		correlations of BNS and NS-BH mergers with GRBs; GRB progenitors understanding short and long bursts	Spins and masses of SMBH in galactic nuclei growth mechanisms	GW from individual binary SMBH	GW from supernovae; coincident observation with neutrinos and cosmic rays	z=0-10 evolution of merger rates of BH-BH
	merger rate of BH-BH systems; test BSE		possible detection of unexpected sources; a new window on the Universe	EMRI rate for 3.10^4-10^7 M_S BH at z=0 – stellar remnants in galactic nuclei		Systematic study of glitching pulsars, flaring magnetars & em other transients	z=0-30 merger rate history of IMBH
	bound non-axisymmetries in msec pulsars		detect non-axisymmetries in msec pulsars	EMRI rate for 3.10^5-10^7 M_S BH at z<2 – Population III stellar remnants?			detect non-axisymmetries in 1-10s magnetars
	do IMBH exist?		do IMBH exist? Could they be seeds of galaxy formation	Masses, positions of all short-period accreting and non-accreting white dwarfs in MilkyWay; test BSE		Star formation history as a function of redshift, stellar mass function	Direct detection of expanding quadrupole in SNIa.
	detect non-axisymmetries in msec pulsars		do bars form in core collapse supernova events?	Effects of tides in white dwarfs			Non-axisymmetries in accreting WDs
	correlations of NS-NS mergers with GRBs		glitching pulsars, flaring magnetars				prediction of GRBs with 1yr notice.

今後の展開の可能性

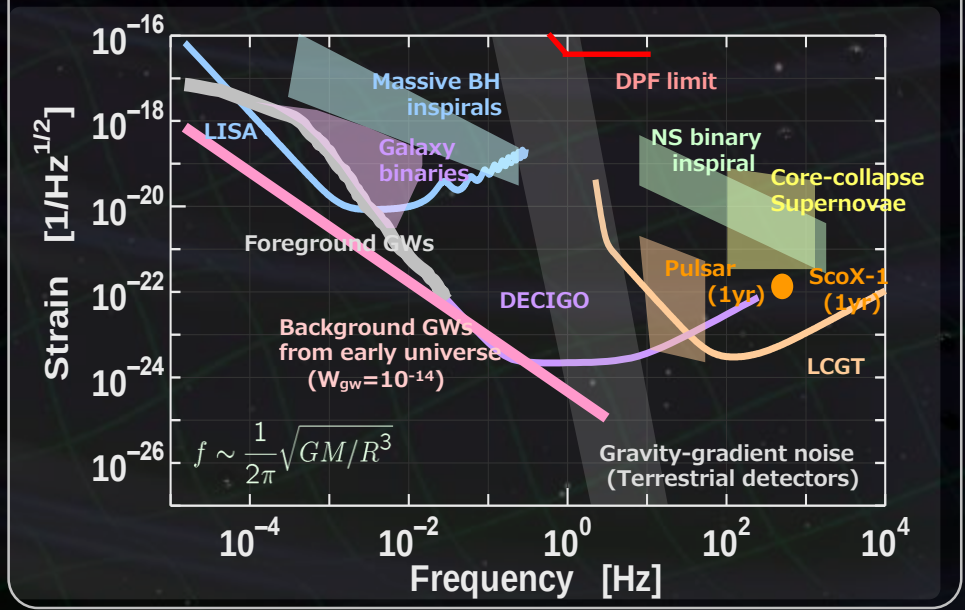
今後数年で，第2世代の検出器 (aLIGO, AdVIRGO, KAGRA, LIGO-India) による観測ネットワークが形成される.

⇨ その先の重力波天文学の可能性.

高感度化 (ET, CE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 と DECIGO

KAGRA (~2018)

Ground-based Detector

→ 高周波数 の重力波イベント

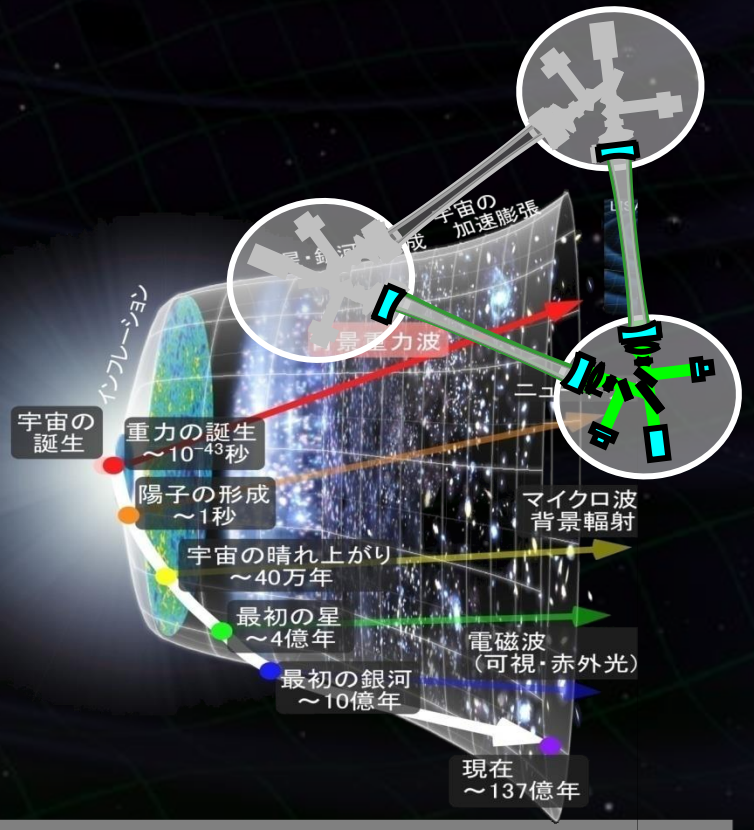
目標: 重力波の検出, 天文学

Pre-DECIGO (~2025/26)

Space observatory

→ 低周波数 の重力波

目標: 重力波天文学の展開



今後の展開の可能性

DECIGO

・地上望遠鏡 (10 Hz-数 kHz)

*2015年　：aLIGOによる重力波初観測.

*2016年-：第2世代望遠鏡 AdVIRGO, KAGRAによる
国際観測網. 電磁波望遠鏡との同時観測.

*2022年頃：LIGO-India の稼働.
第3世代望遠鏡 ET, CE の稼働.

・宇宙望遠鏡 (0.1-10 Hz)

*2025/26年　：Pre-DECIGOによる重力波観測.

*その後：　DECIGOによる初期宇宙からの重力波観測.

・宇宙望遠鏡 (0.1 – 100 mHz)

*2015年　：LISA Pathfinder打ち上げ.

*2034年　：eLISAの打ち上げ. 低周波数重力波の観測.

多波長での観測

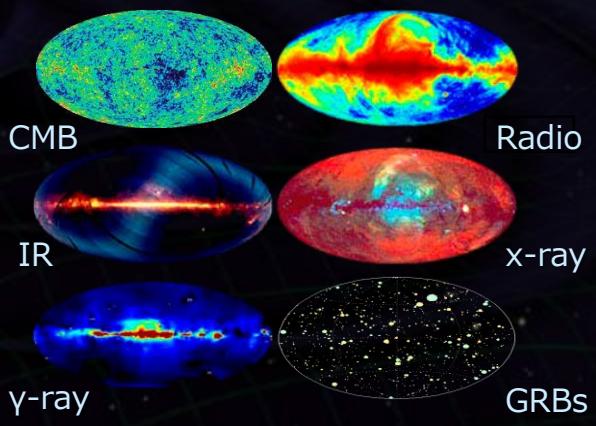
・電磁波観測：

様々な波長での観測

(電波, 赤外線, 可視光, X線, ガンマ線)

→ 対象のエネルギー・温度に対応し,

さまざまな宇宙の姿を観測.



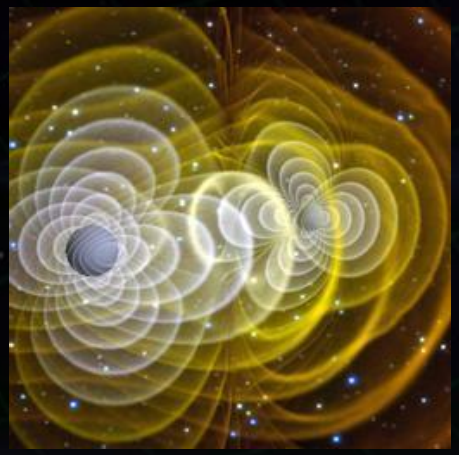
・重力波観測：

放射される重力波の周波数

～ 1/ (波源変動の時間スケール)

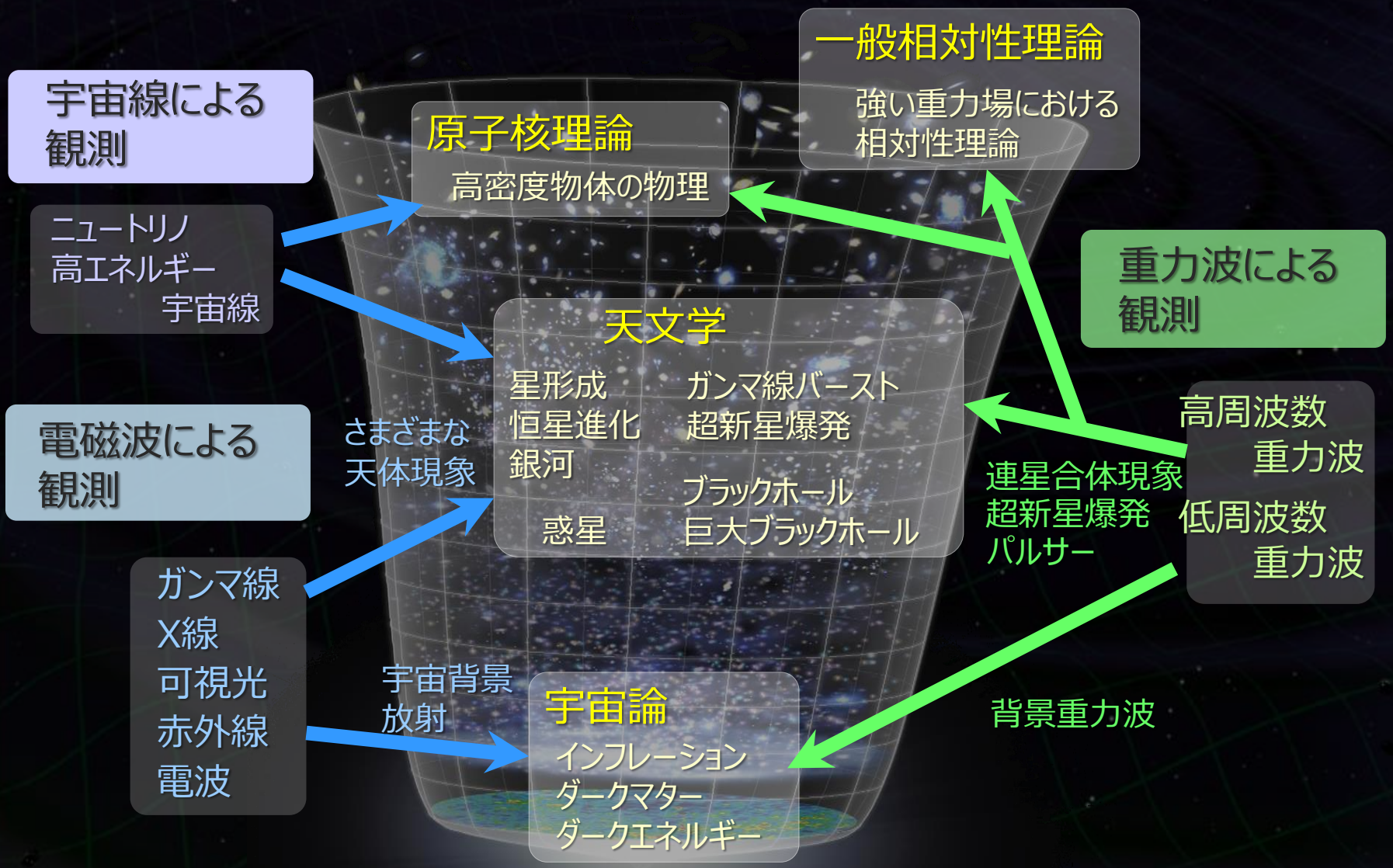
→ 観測対象の時間スケール・質量に対応し,

さまざまな宇宙の姿を観測.



重力波で宇宙を探る

DECIGO



背景画: NASA/WMAP Science Team

重力波検出器の種類

DECIGO

Early Universe

Sources

Binary merger $f \sim \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{GM}{R^3}}$

SMBH　IMBH　BH-BH NS-NS NS-BH

Quasi-static binary

SMBH　WD binary

Supernova

Pulsar

Wave Period

Age of the Universe

Years　Hours　Seconds　Mili-seconds

Frequency [Hz]

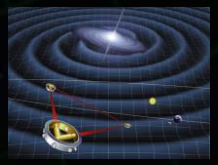
10^{-15}　10^{-12}　10^{-9}　10^{-6}　10^{-3}　1　10^{3}

Detectors

CMB B-mode

Pulsar timing

Doppler tracking

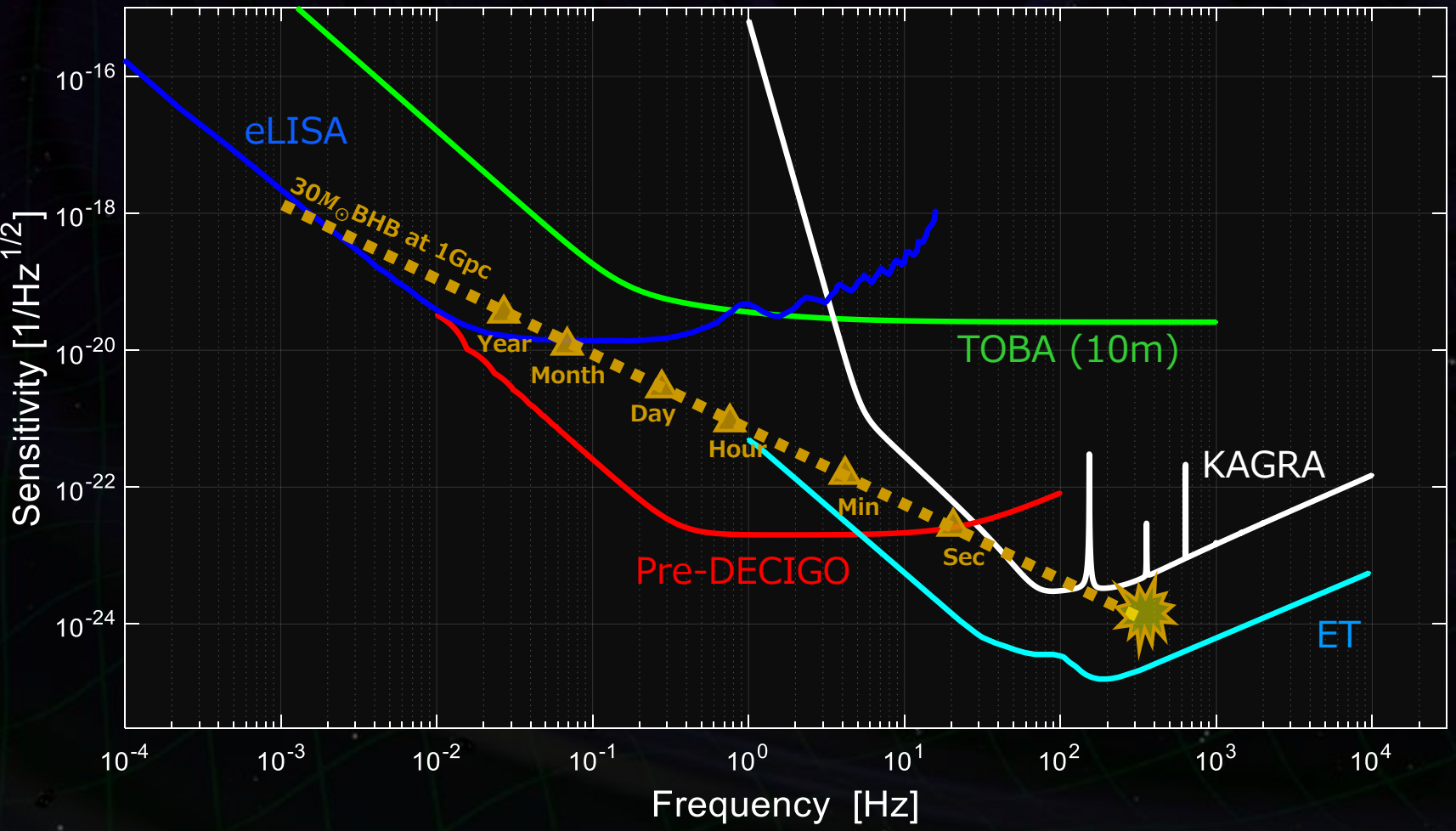


Space interferometer

Ground-based Interferometer

Resonant bar

感度曲線


eLISA
30M⊙ BHB at 1Gpc
Year
Month
Day
Hour
Min
Sec
TOBA (10m)
KAGRA
Pre-DECIGO
ET
Sensitivity [1/Hz^1/2]
Frequency [Hz]
10^-16
10^-18
10^-20
10^-22
10^-24
10^-4
10^-3
10^-2
10^-1
10^0
10^1
10^2
10^3
10^4

重力波天文学の科学的意義（個人的観点）

宇宙重力波望遠鏡
DECIGO

宇宙重力波望遠鏡 DECIGO

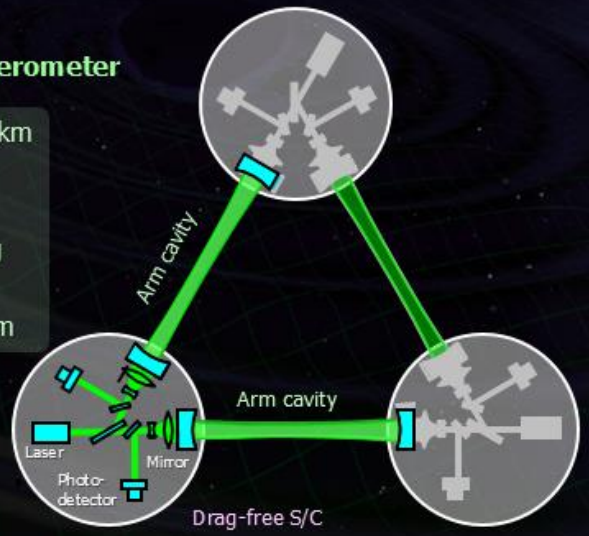
DECIGO (DECI-hertz interferometer Gravitational wave Observatory)

宇宙のはじまりを直接観測する.

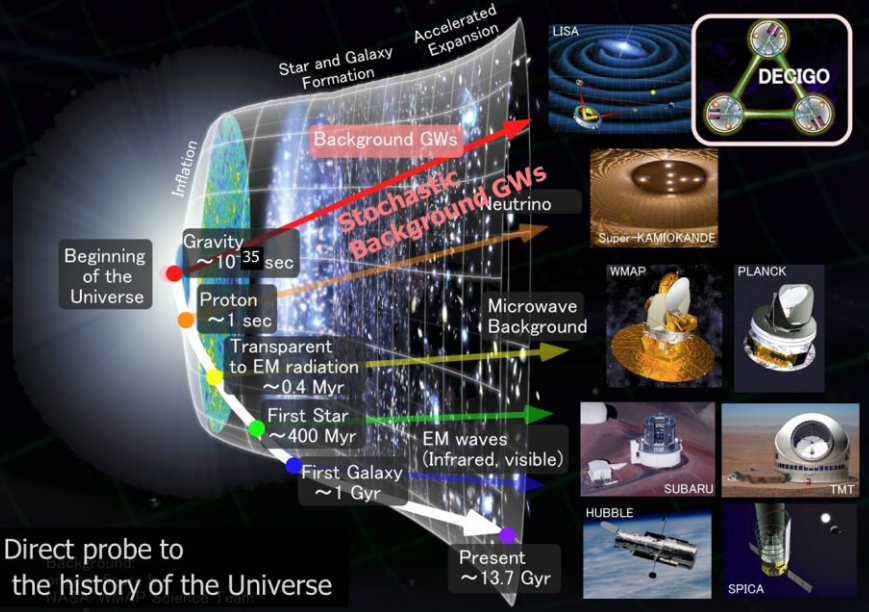
ビッグバン宇宙論において、空間・物質の種が,
いかに形成されたかを観測によって解き明かす.

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



Direct probe to
the history of the Universe

DECIGO概要

宇宙重力波望遠鏡 DECIGO

0.1Hz付近の重力波の観測を行う.

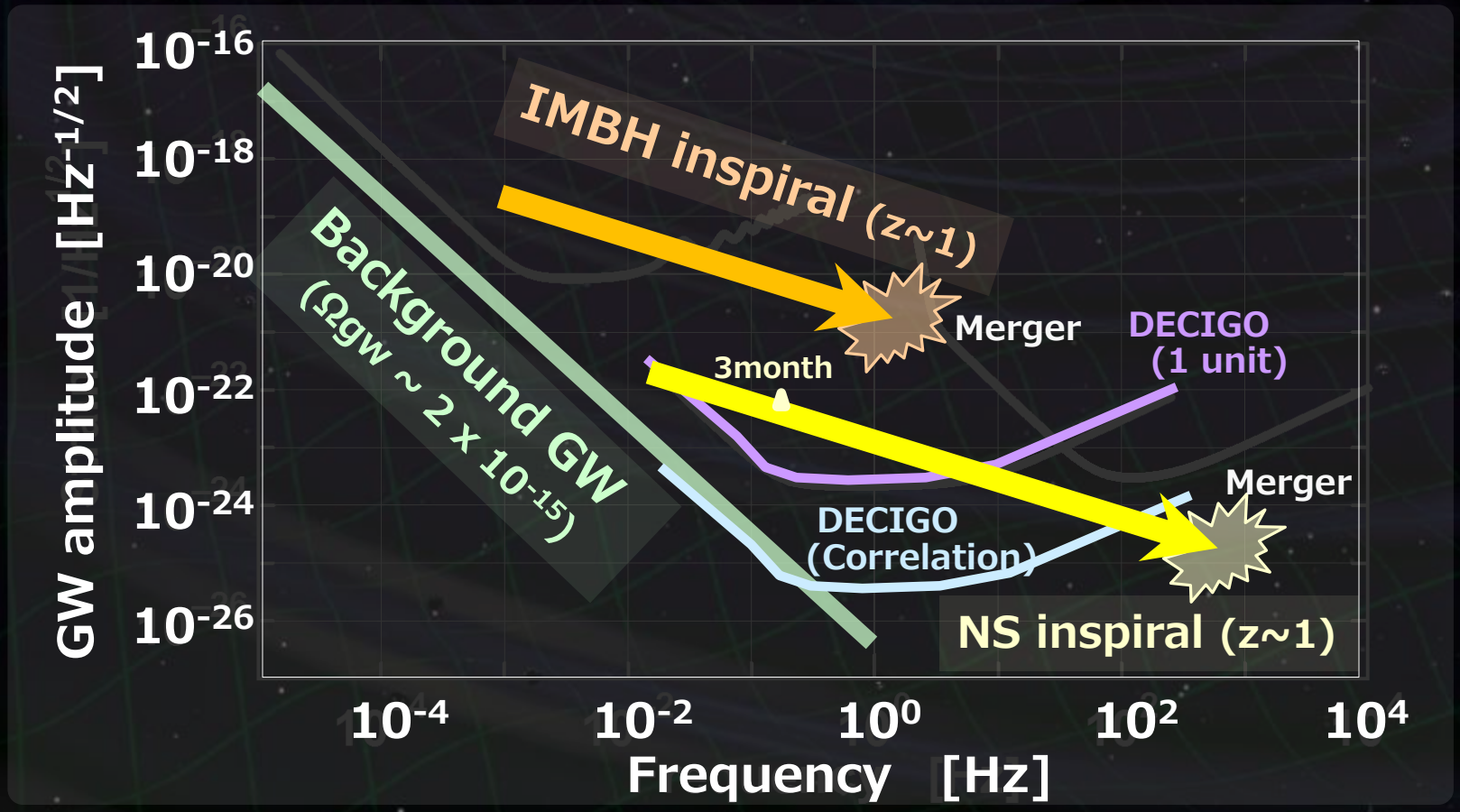
Arm length:	1000 km
Finesse:	10
Mirror diameter:	1 m
Mirror mass:	100 kg
Laser power:	10 W
Laser wavelength :	532 nm

DECIGOの観測対象

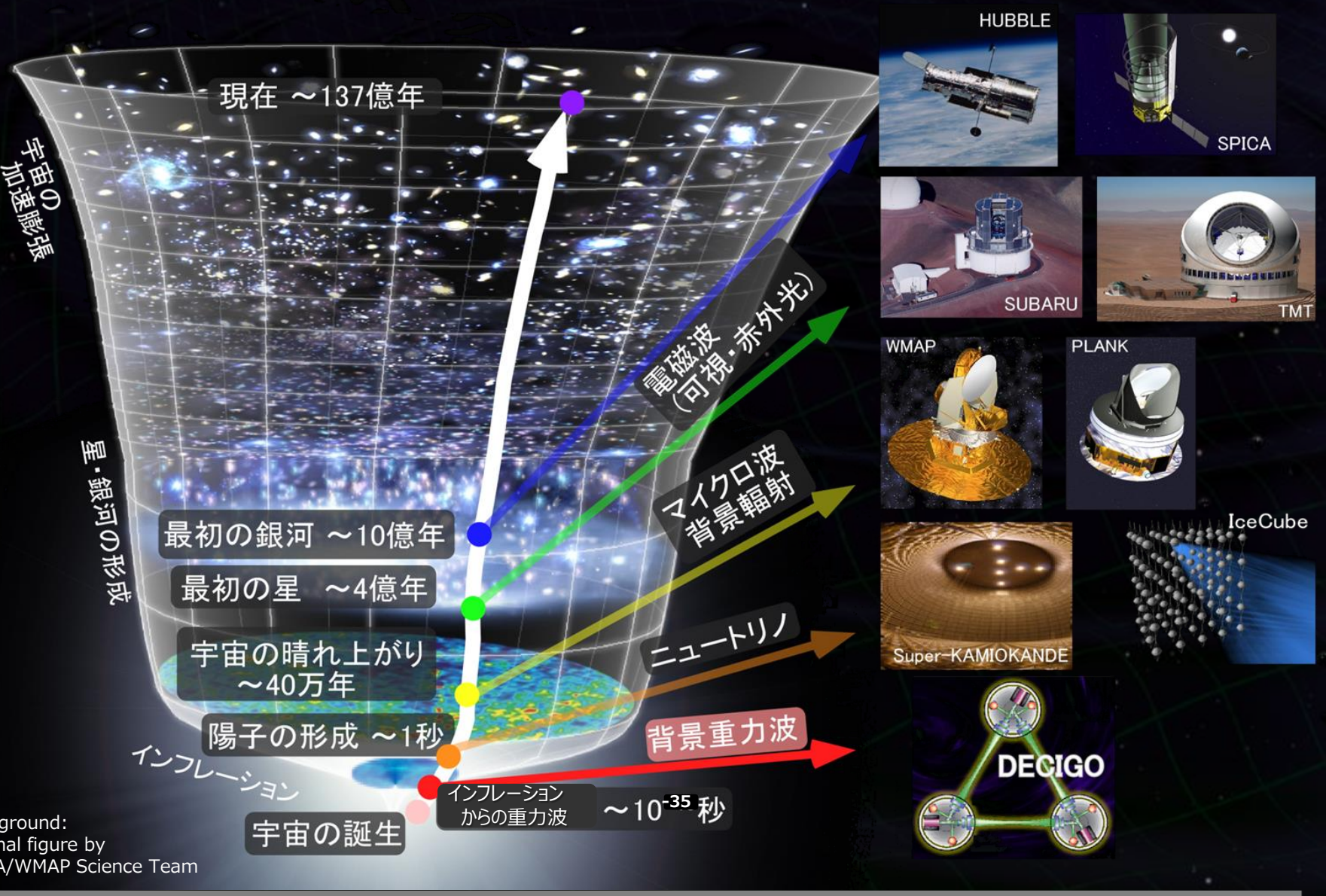
中間質量BH 連星の合体
中性子星 連星の合体
宇宙背景重力波

⇨

宇宙の成り立ちと進化
銀河・超巨大BHの形成



初期宇宙の観測



Background:
original figure by
NASA/WMAP Science Team

背景重力波の観測

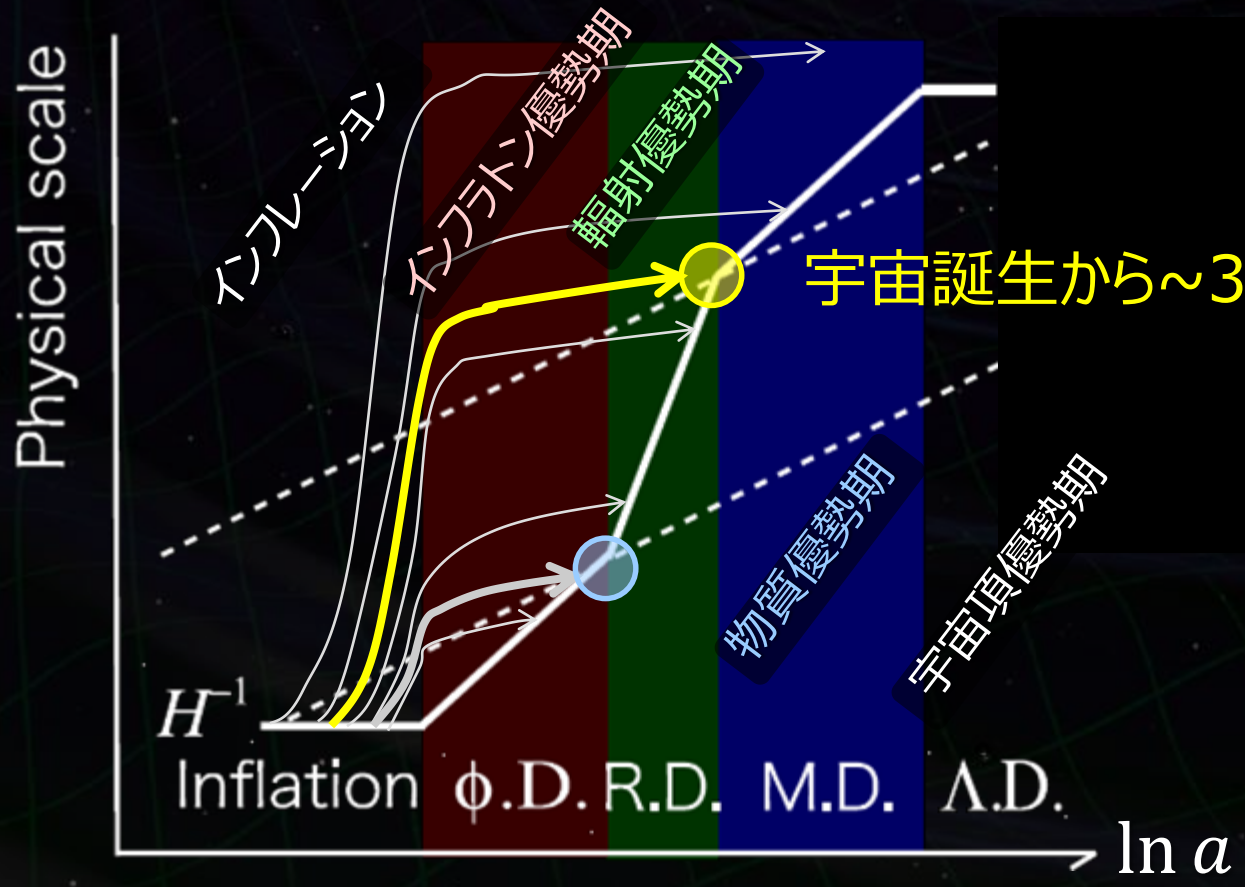
地平線内に入った重力波は，宇宙膨張とともに発展．
→ スペクトルの形は、宇宙進化の情報を持っている．

Kuroyanagi+ PRD (2009) など

インフレーションからの重力波

DECIGO

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.

重力波エネルギー密度比と振幅

DECIGO

重力波のエネルギー密度比

重力波のエネルギー密度

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

宇宙の臨界密度

⇨

等価な重力波振幅

ハッブル定数

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

重力波エネルギー密度比と振幅

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

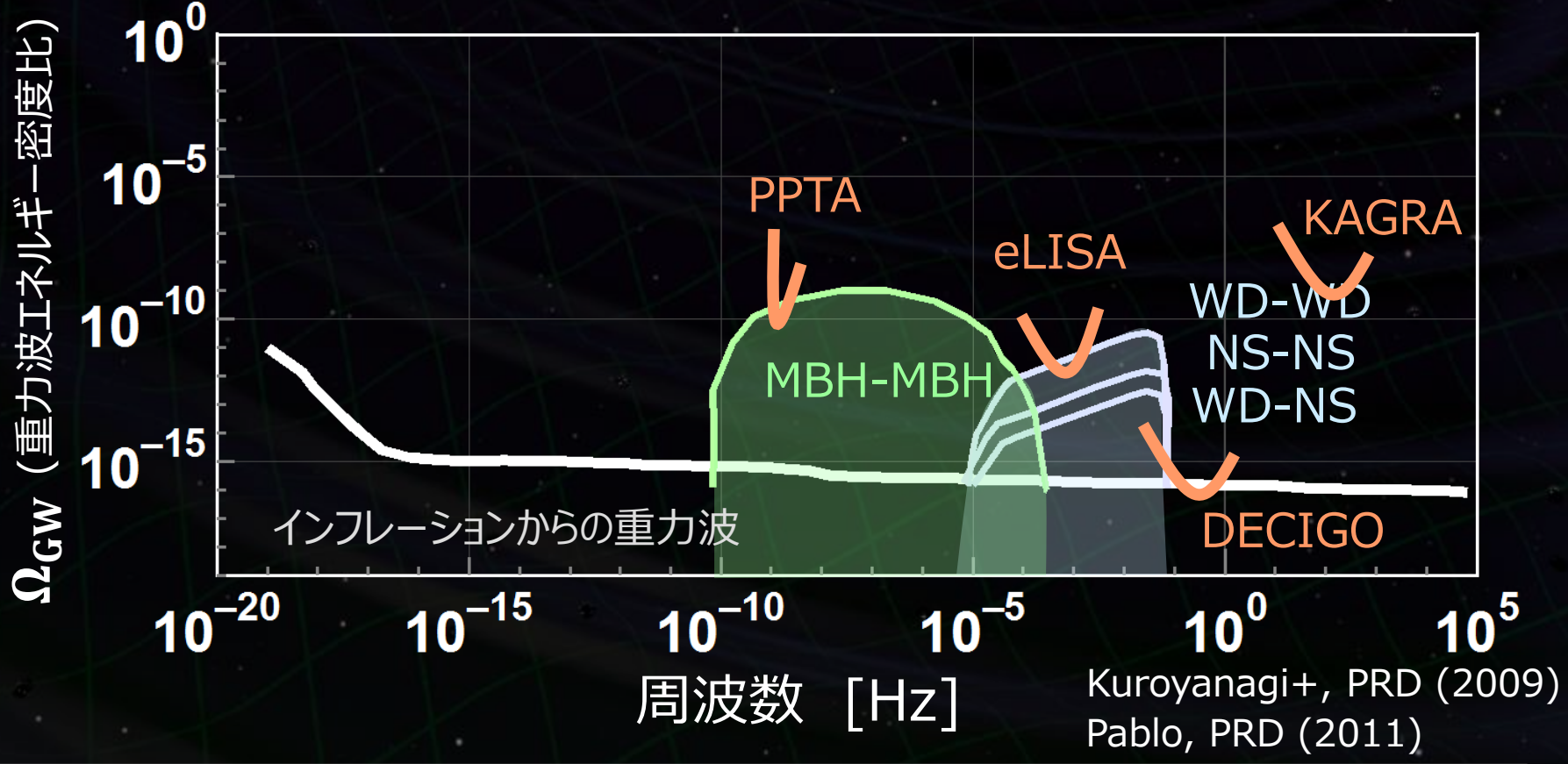
高周波数では振幅は小さくなる

原始重力波観測の「窓」

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.



Kuroyanagi+, PRD (2009)
Pablo, PRD (2011)

原始重力波観測の「窓」

DECIGO

・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.

$\Omega_{\mathrm{GW}} \sim 10^{-16} - 10^{-15}$

→ $\tilde{h}_{\mathrm{GW}} \sim 10^{-24}$ Hz$^{-1/2}$ (@ 0.1Hz)

インフレーションの重力波観測

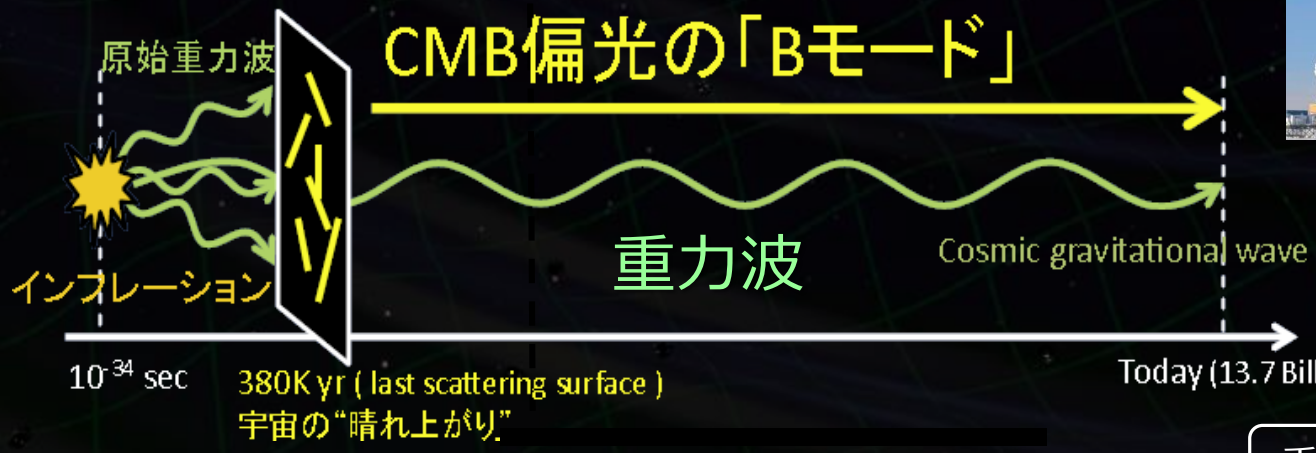
DECIGO

BICEP2など

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など

重力波望遠鏡を用いた
宇宙背景重力波の観測.



CMB偏光観測望遠鏡

重力波観測望遠鏡

図: 田島氏談話会資料より(2011 京都大学)

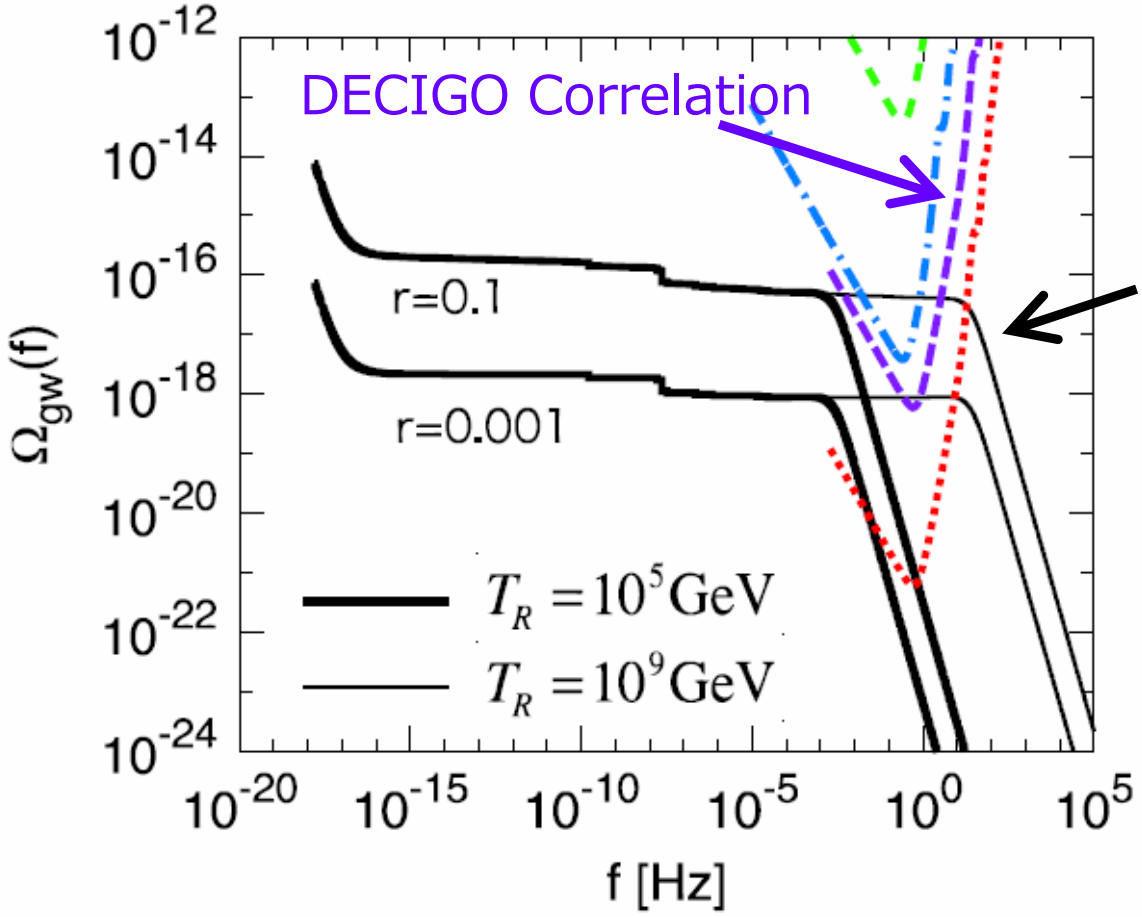
インフレーションからの重力波スペクトル

初期に地平線内入ってきた重力波ほど高周波.

Kuroyanagi+ PRD (2009) など

GW from Inflation

Energy density ∝ Tensor-Scalar Ratio (r).
Power spectrum : Evolution history of the Universe.



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

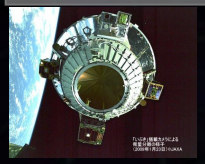
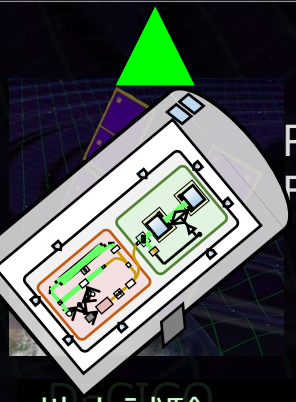
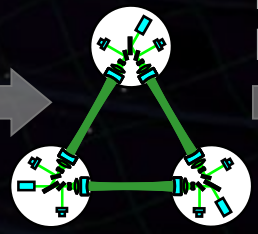
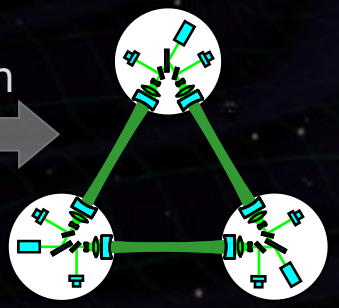
Nakayama+,
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 06 (2008) 020.

宇宙重力波望遠鏡
Pre-DECIGO

宇宙重力波望遠鏡のロードマップ

DECIGO

Figure: S.Kawamura

	2014 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33		
ミッション	R&D Fabrication  SDS-1/SWIM	 地上試験 ＋ 相乗り衛星での宇宙実証.	R&D Fabrication  Pre-DECIGO	R&D Fabrication  DECIGO
目的	宇宙レーザー干渉計を用いた精密計測技術の実証.	長基線長フォーメーションフライト技術の実証, 重力波観測.	初期宇宙の直接観測
構成	小型衛星1機, 地球周回軌道. 短基線長FP共振器.	S/C 3台　干渉計 3本.	S/C 3機 干渉計 3-4ユニット

宇宙重力波望遠鏡 Pre-DECIGO（仮）

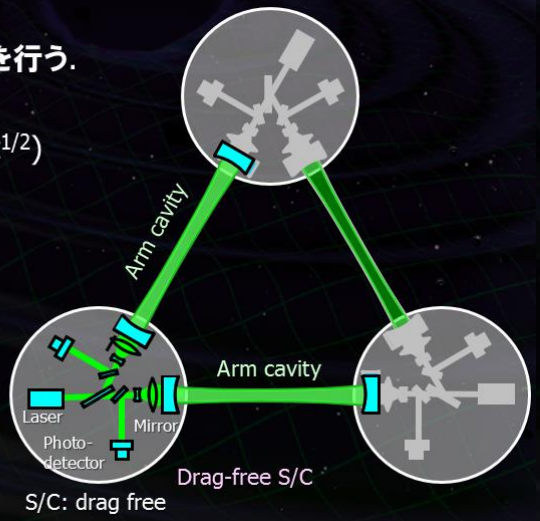
Pre-DECIGO

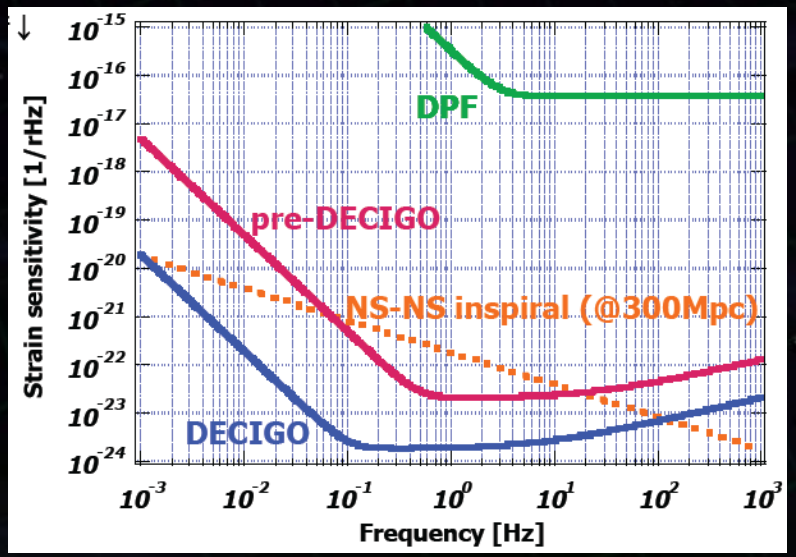
(Pre- DECI-hertz interferometer Gravitational wave Observatory)

時空構造・銀河形成・高エネルギー天体現象
の解明を目指す宇宙重力波望遠鏡.

＊0.1Hz付近の重力波の観測を行う.
＊歪み感度 2×10^{-23} $Hz^{-1/2}$
（変位感度 2×10^{-18} $m/Hz^{1/2}$）

Arm length:	100 km
Finesse:	30-100
Mirror diameter:	30 cm
Mirror mass:	30 kg
Laser power:	1 W
Laser wavelength:	515 (532) nm





宇宙重力波望遠鏡 Pre-DECIGO

DECIGO

・科学的目的

強重力・高密度天体からの重力波の観測による,
時空構造・銀河形成・高エネルギー天体現象の解明.

・観測目標

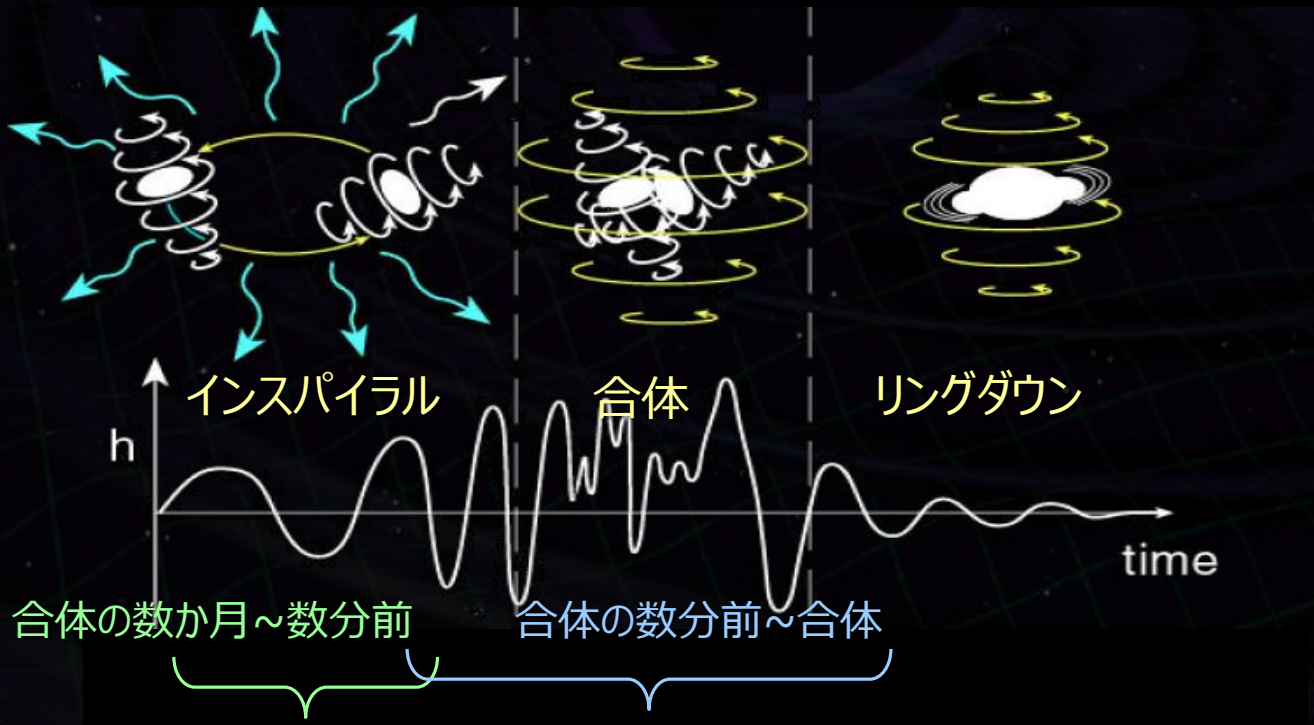
(1) コンパクト連星合体の観測. [確実な観測対象]
↑ 高エネルギー天体現象, 高密度天体の理解.

(2) 中間質量BH連星合体の観測. [独自の観測対象]
↑宇宙の時空構造と銀河形成の解明.

(3) DECIGOへ向けたフォアグラウンドの理解. [将来への知見]
連星中性子星のパラメータ推定と除去.

観測目標 (1)：連星中性子星の合体

Pre-DECIGOでは, >100個/年 の連星合体イベントを観測.

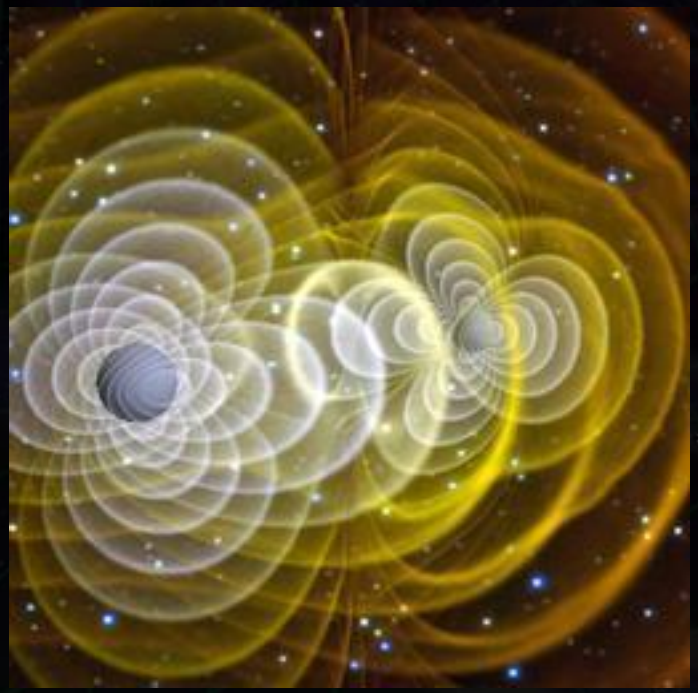


低周波数 → Pre-DECIGO
質量, 軌道, 方向, 合体予測.

高周波数 → 地上望遠鏡
状態方程式, 高エネルギー現象.

観測目標 (2)：中間質量BHの合体

Pre-DECIGOでは, ほぼ宇宙全体の中間質量BH合体を見通す.



銀河中心の超巨大BH形成の謎.

(A) 大質量星の崩壊 → 降着

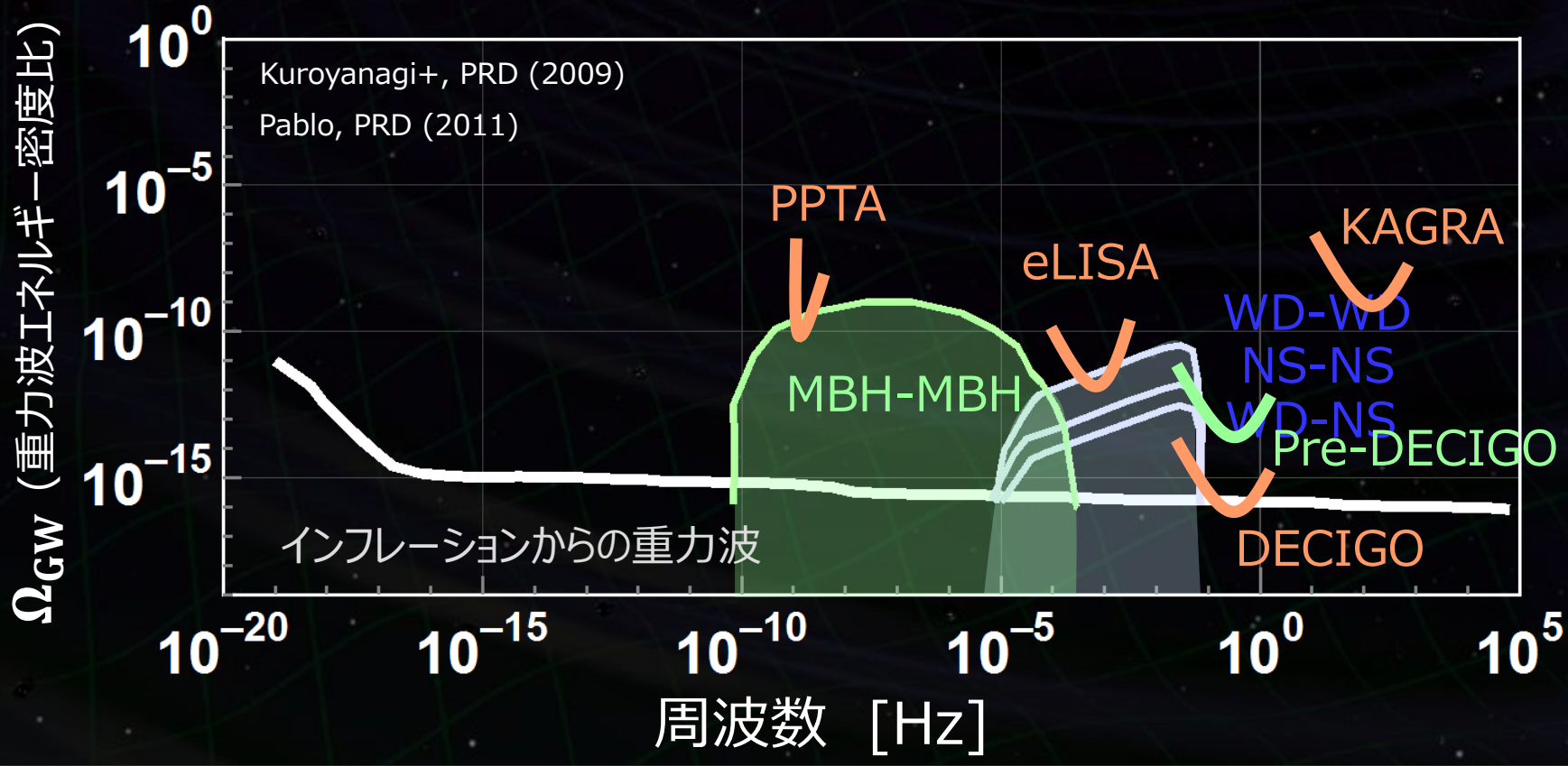
(B) BHの階層的合体

・Pre-DECIGO の観測によって,
決定的な証拠が得られる可能性.

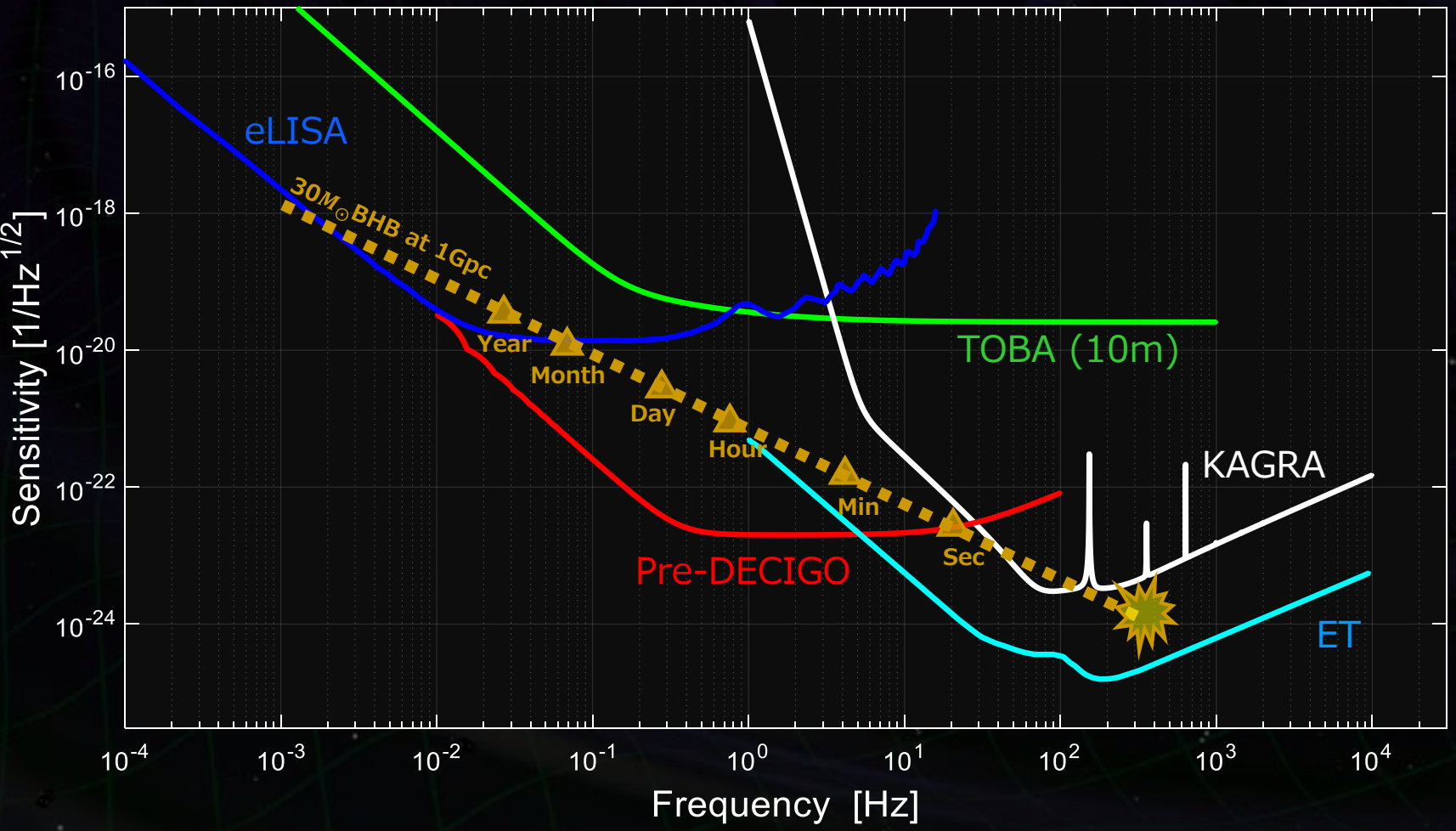
・他の手段ではできない独自の観測.

観測目標 (3)：前景重力波の理解

将来(DECIGO)の目的：原始重力波観測.
多くの連星系からの重力波 → 分離できない. 前景重力波雑音
→ ~100個の系でパラメータ推定を行い理解を進める.

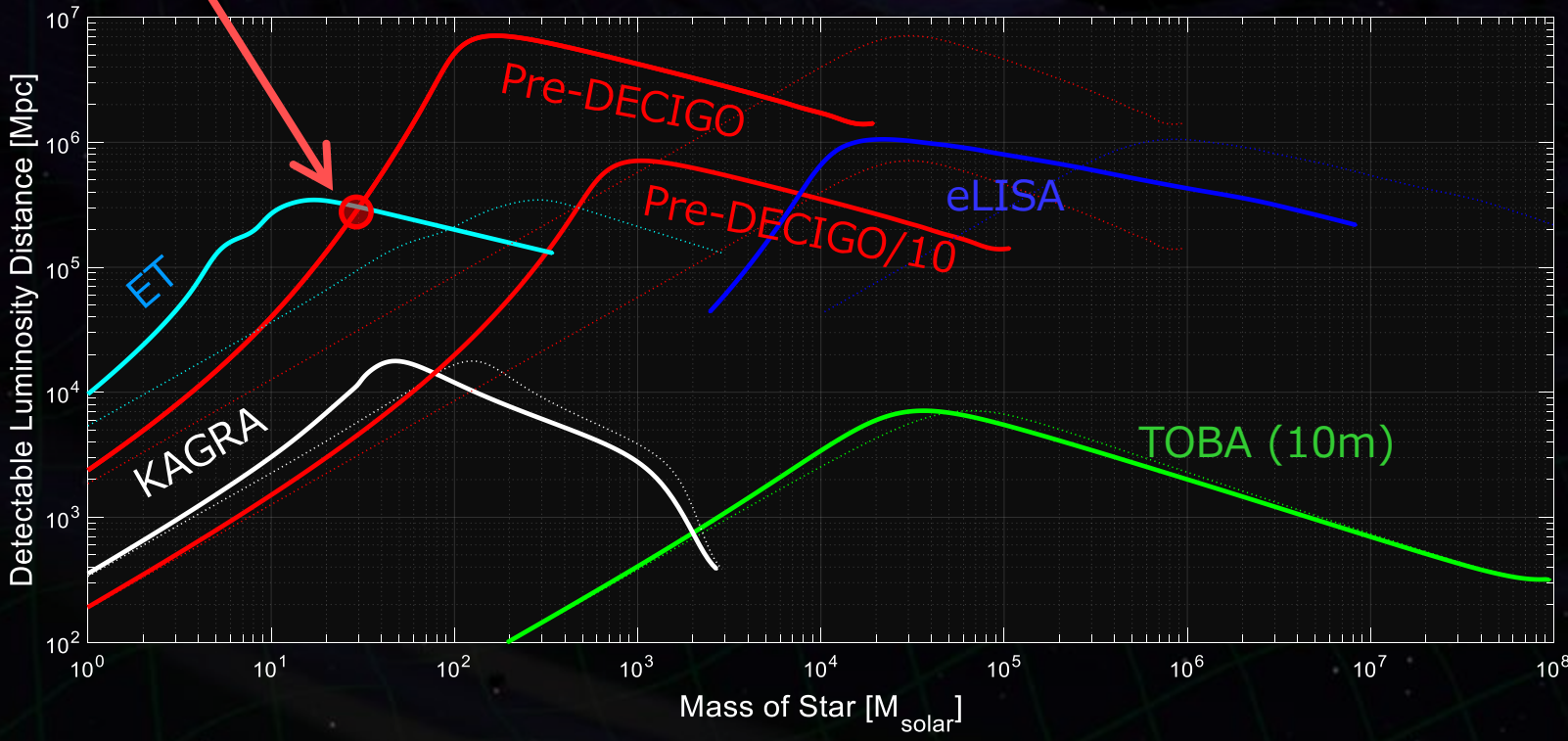


感度曲線


eLISA
30M⊙ BHB at 1Gpc
Year
Month
Day
Hour
Min
Sec
TOBA (10m)
KAGRA
Pre-DECIGO
ET
Sensitivity [1/Hz^1/2]
Frequency [Hz]
10^-16
10^-18
10^-20
10^-22
10^-24
10^-4
10^-3
10^-2
10^-1
10^0
10^1
10^2
10^3
10^4

連星合体の観測可能距離

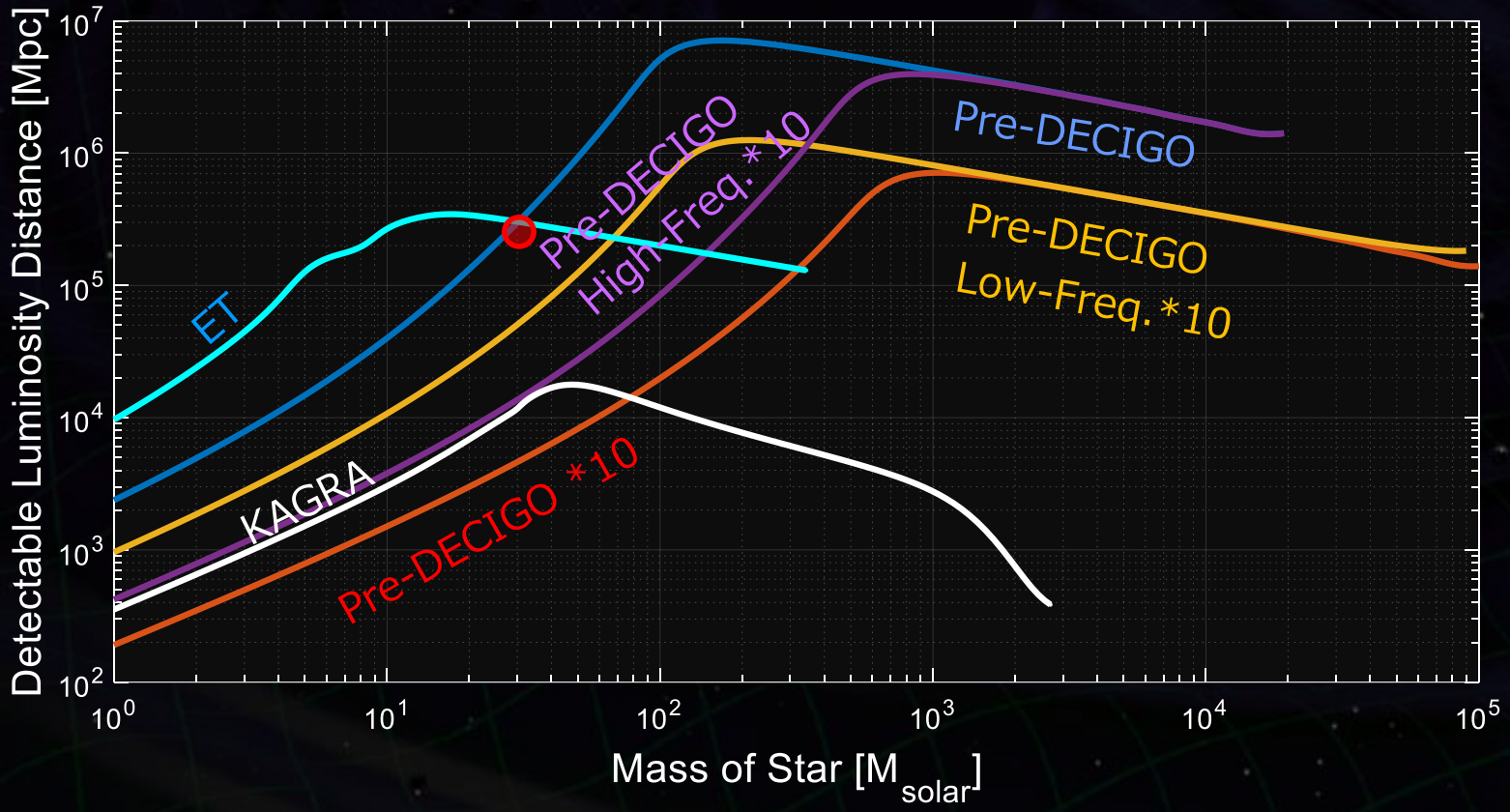
$30M_{\odot}$ BH連星合体：300 Gpc (z~30) の観測距離.
(合体前 15日 0.1Hz，47分前　1Hz)



多くのサイクル数 (~10^5)の観測 → パラメータ推定精度の向上
連星の質量, 位置, 軌道, 合体時刻, (距離), …

連星合体の観測可能距離

Pre-DECIGOの感度を妥協した場合の観測距離.



低周波数(外力雑音)悪化 → 観測宇距離は全体的に悪化.

高周波数(散射雑音)悪化 → $10^3\ M_\odot$ より軽い連星で悪化.

パラメータ推定精度

※ きちんと計算していない…

・合体時刻決定精度

~10秒のオーダー (?)

・位置決定精度

＊ Pre-DECIGO軌道：

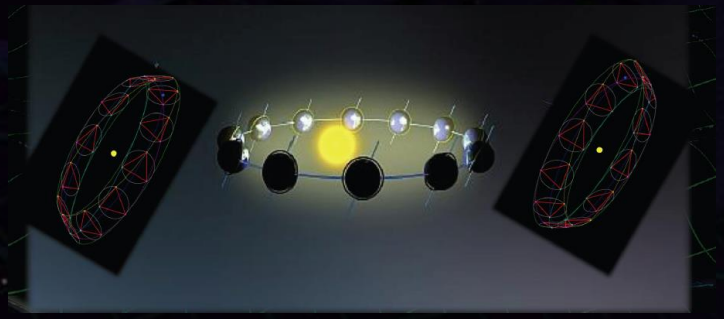
地球周回のレコード盤軌道

(高度2,000km, 周期 127分)

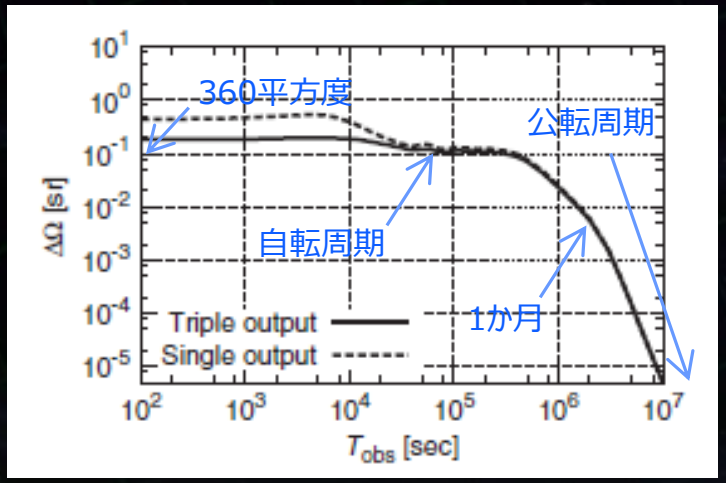
＊ 枝くんTOBA論文を参考に概算

TOBA	自転速度	0.47 km/s
	公転速度	30 km/s
Pre-DECIGO	自転速度	12 km/s
	公転速度	30 km/s

佐藤さん資料より



TOBAの角度分解能の計算結果.
Eda+ PRD 90, 064039 (2014)



Pre-DECIGOのサイエンス面検討課題まとめ

・期待できる科学的成果の検討
  - 観測対象となる重力波源，得られるサイエンスの検討．
  - 観測頻度と望遠鏡性能のトレードオフ検討．
  - 他の観測手法(地上重力波望遠鏡，電磁波望遠鏡)との
    共同観測などによって得られる科学的成果の可能性．

・データ解析手法の検討
  - 衛星軌道運動を考慮した波源パラメータ情報の取り出し．
  - 連星の特定と除去の手法．
  - 衛星からのデータ転送方針の検討．

Pre-DECIGOの検討

Pre-DECIGOのミッション要求と構成

ミッション要求：

歪み感度　2×10^{-23}　$Hz^{-1/2}$ (0.1Hz付近)

⇩

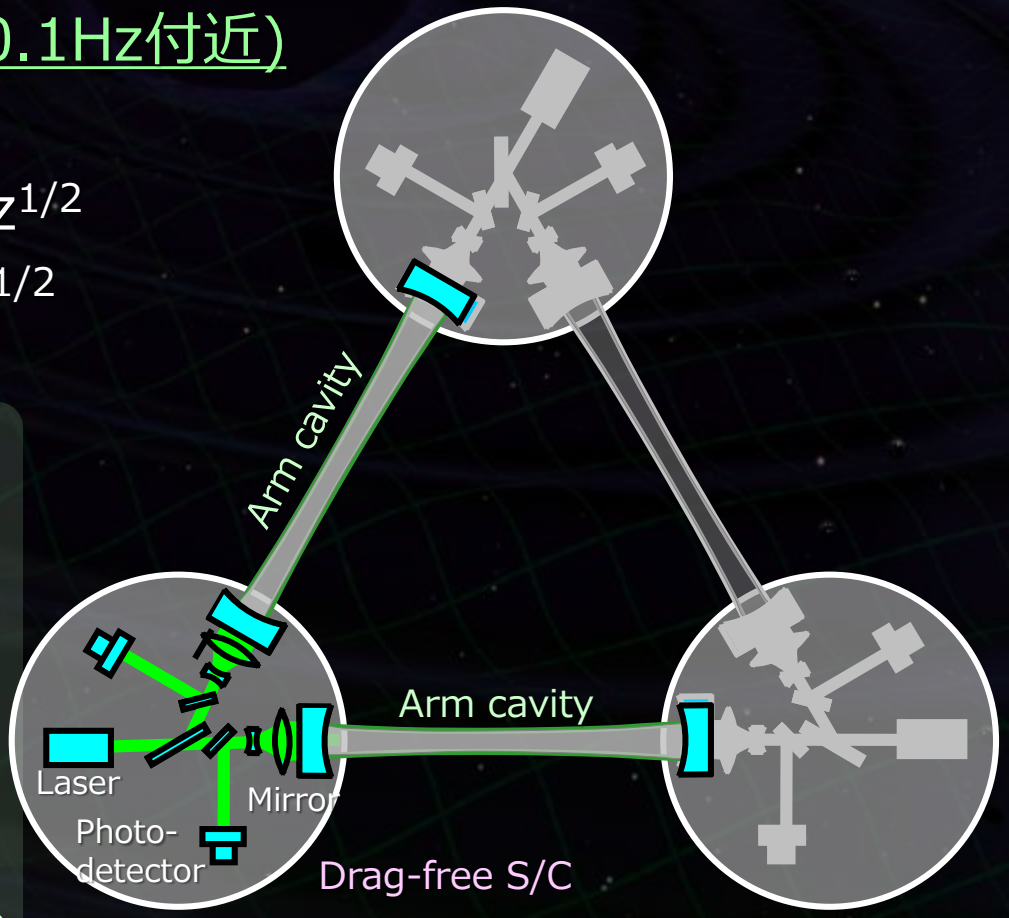
＊ 変位感度　2×10^{-18}　$m/Hz^{1/2}$

＊ 力の雑音　1×10^{-16}　$N/Hz^{1/2}$

Arm length:	100 km
Finesse:	30
Mirror diameter:	30 cm
Mirror mass:	30 kg
Laser power:	1 W
Laser wavelength :	515 nm

Orbit : TBD

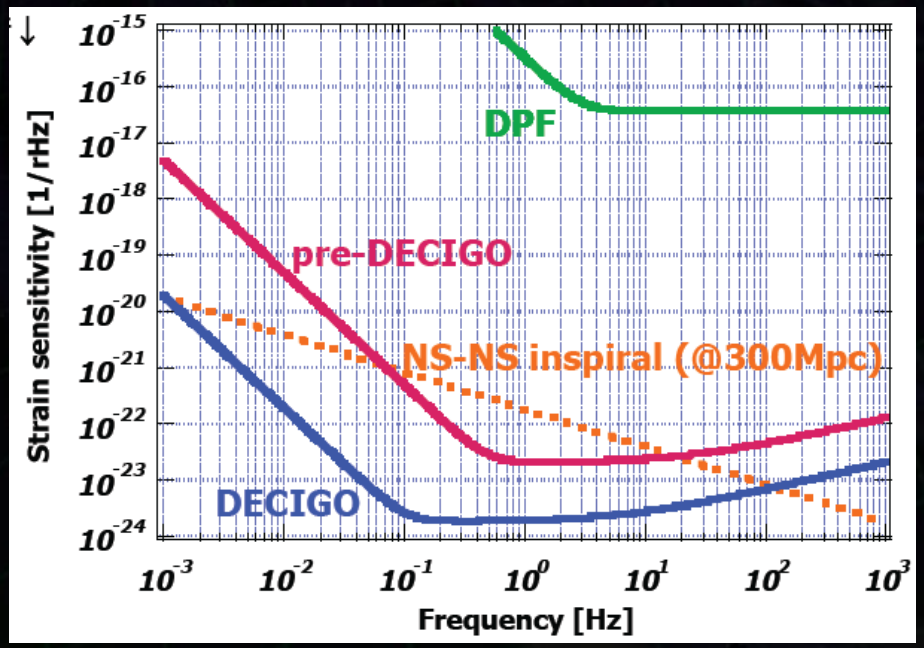
(Record-disk around the Earth?)



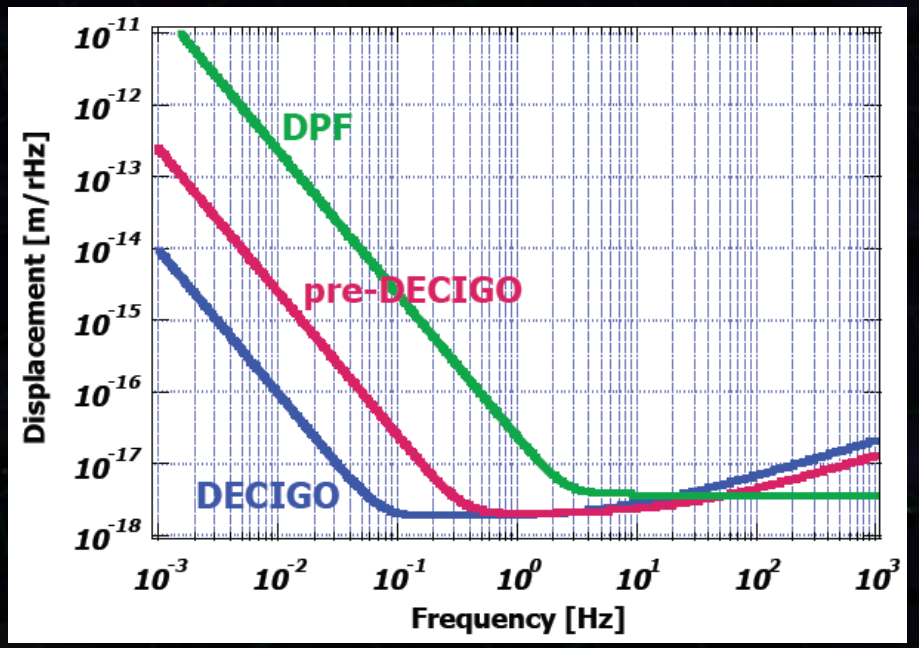
感度比較

散射雑音，力の雑音 のみを考慮した原理的な到達限界感度.

歪み(重力波振幅)感度



変位感度



資料: 佐藤さん (法政大)

Pre-DECIGOの技術的課題まとめ

DECIGO

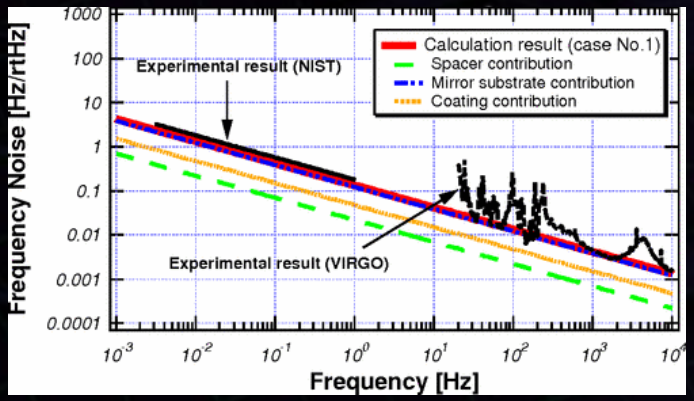
・長基線長レーザー干渉計技術 (変位感度 $<2\times10^{-18}$ m/Hz$^{1/2}$)
  - 双方向FP共振器の光学系設計. 安定化光源とその制御.
  - 100kmの長基線技術 (長曲率半径鏡, 鏡変形の補正).
  - 光軸・衛星姿勢の初期捕捉. 低周波数雑音.
・外力雑音の低減 (試験マスへの力の雑音 $<1\times10^{-16}$ N/Hz$^{1/2}$)
  - 重力, 磁場変動, 静電気力, 残留気体, 熱輻射,
    宇宙線衝突, 支持・制御起因の雑音, などあらゆる雑音源対策.
・衛星変動の低減
  - ドラッグフリー技術, 低雑音スラスタ技術, 衛星全体の信号処理.
  - 受動的外乱低減技術.
・衛星システム設計
  - 軌道設計, 初期ミッションシーケンス.
  - 衛星のリソース配分, 打ち上げ手段, コスト見積もり

変位感度の実証

・変位感度要求値 < 2×10^{-18} m/Hz$^{1/2}$ at 0.1Hz
　Pre-DECIGOの散射雑音 (光源 1W, フィネス 30) に対応.

＊固定鏡光共振器
世界最高水準の周波数安定化を
実現する光共振器の変位雑音に対応.
(周波数安定度 0.2Hz/Hz$^{1/2}$,
共振器長 0.25m, 波長 1064nm)

K.Numata+ PRL 93 (2004) 250602



＊長基線長(独立懸架)の共振器
地上望遠鏡(aLIGO, 4km)では
～10^{-20} m/Hz$^{1/2}$ (100Hz).

変位感度の地上実証

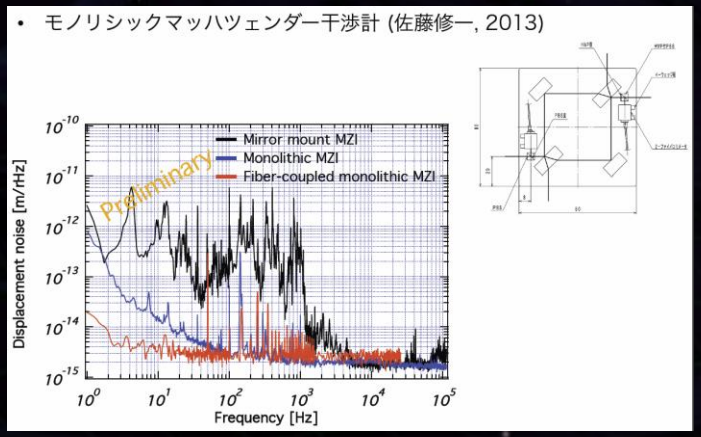
・状況証拠の組み合わせはある → より実際に近い形での実証.

*モノリシック光学系
感度要求, 宇宙実装の両方の
観点から有望で必須の技術.

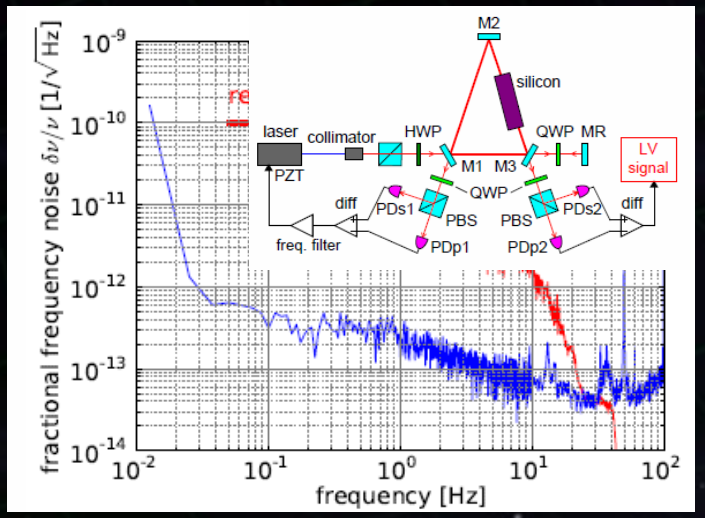
*共振器鏡の独立懸架 or 固定
実際に近い形での実証が可能か?

*ダブルパス構成
熱雑音・地面振動・温度変動
などを同相除去.
→ 光学読み取り系の実証は可能.

有富, 物理学会 (2016.3.21)



道村, 博士論文 (2014.10)



外力雑音の実証

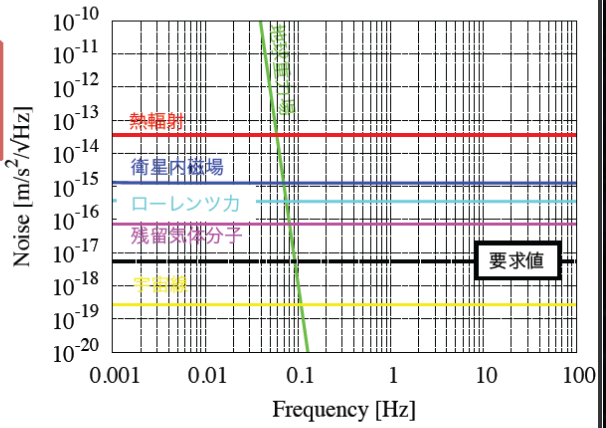
・試験マスへの力の雑音 $<1\times10^{-16}$ N/Hz$^{1/2}$ at 0.1Hz

(加速度雑音 $<3\times10^{-18}$ m/s^2/Hz$^{1/2}$ at 0.1Hz に対応)

加速度雑音まとめ

要求値：

$\delta a < 5.1\times10^{-18}$ [m/s^2/Hz$^{1/2}$] @0.1Hz



見積もられる雑音

雑音源	加速度雑音 [m/s^2/Hz$^{1/2}$]	
地球重力場	1.1×10^{-18}	○
残留気体分子	7.3×10^{-17}	→ 良い真空(P<10^{-8}[Pa])
宇宙線の衝突	2.7×10^{-19}	○
熱輻射	4.5×10^{-14}	→ 温度変動を抑える、低温？
衛星内磁場	1.2×10^{-15}	→ 磁場源の配置の工夫、磁気シールド
ローレンツ力	3.5×10^{-16}	→ 衛星速度変動を抑える(0.01%以下)

DECIGO Workshop 2015.10.18

など

有富+下田,
DECIGO Workshop
(2015.10.18)

衛星重力ミッション

DECIGO

3種類の観測手法，衛星ミッション

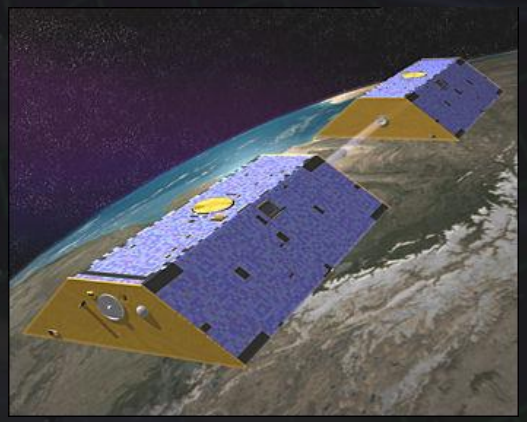
高軌道-低軌道衛星追跡 (SST High-Low)

・GPSなどの測位システムで衛星軌道を連続測定
・搭載加速度計データを用いて擾乱摂動を差し引く

CHAMP （GFZ, 2000-）

低軌道-低軌道衛星追跡 (SST Low-Low)

・2機の衛星間の距離変動から、重力場を観測
・搭載加速度計データを用いて擾乱摂動を差し引く



GRACE （NASA, 2002-）

衛星による重力勾配観測 (Satellite GG)

・衛星搭載の重力勾配計により、重力場を観測
・衛星擾乱を抑えるため、ドラッグフリー制御を行う

GOCE （ESA, 2009-）

地球重力モデル

地球重力ポテンシャルを
球面調和関数展開で表現

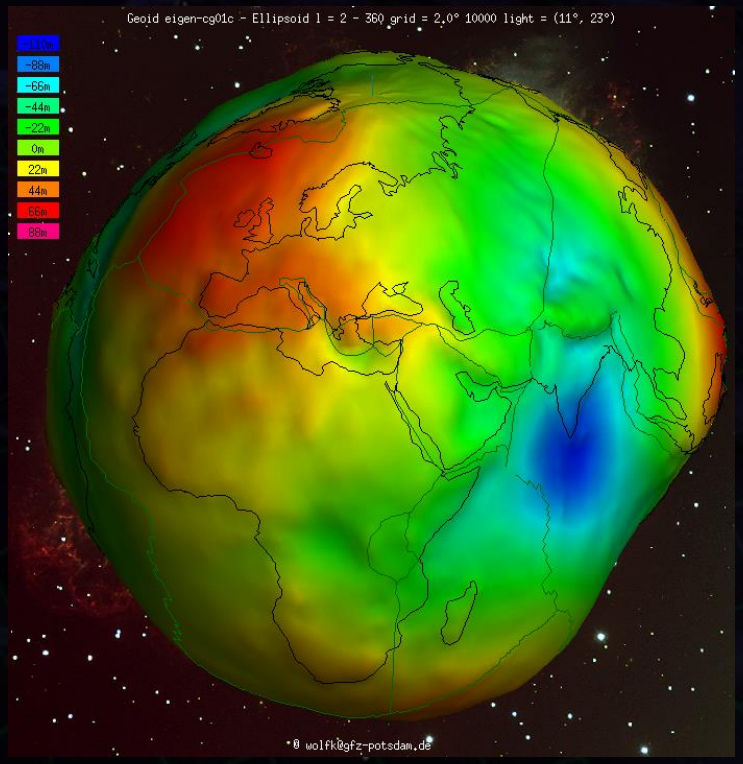
$$U(r,\lambda,\phi)$$

$$= \frac{GM}{r}\sum_{l=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{R}{r}\right)^{l} P_{lm}(\sin\phi)$$

$$\times [C_{lm}\cos(m\lambda) + S_{lm}\sin(m\lambda)]$$

G, M, R ：重力定数, 地球質量, 地球半径
r, λ, ϕ ：軌道半径, 経度, 緯度
P_{lm} ：Legendre陪関数

係数 C_{lm} , S_{lm} ：
地球内部の質量分布に依存する
衛星による測定などの観測から求める

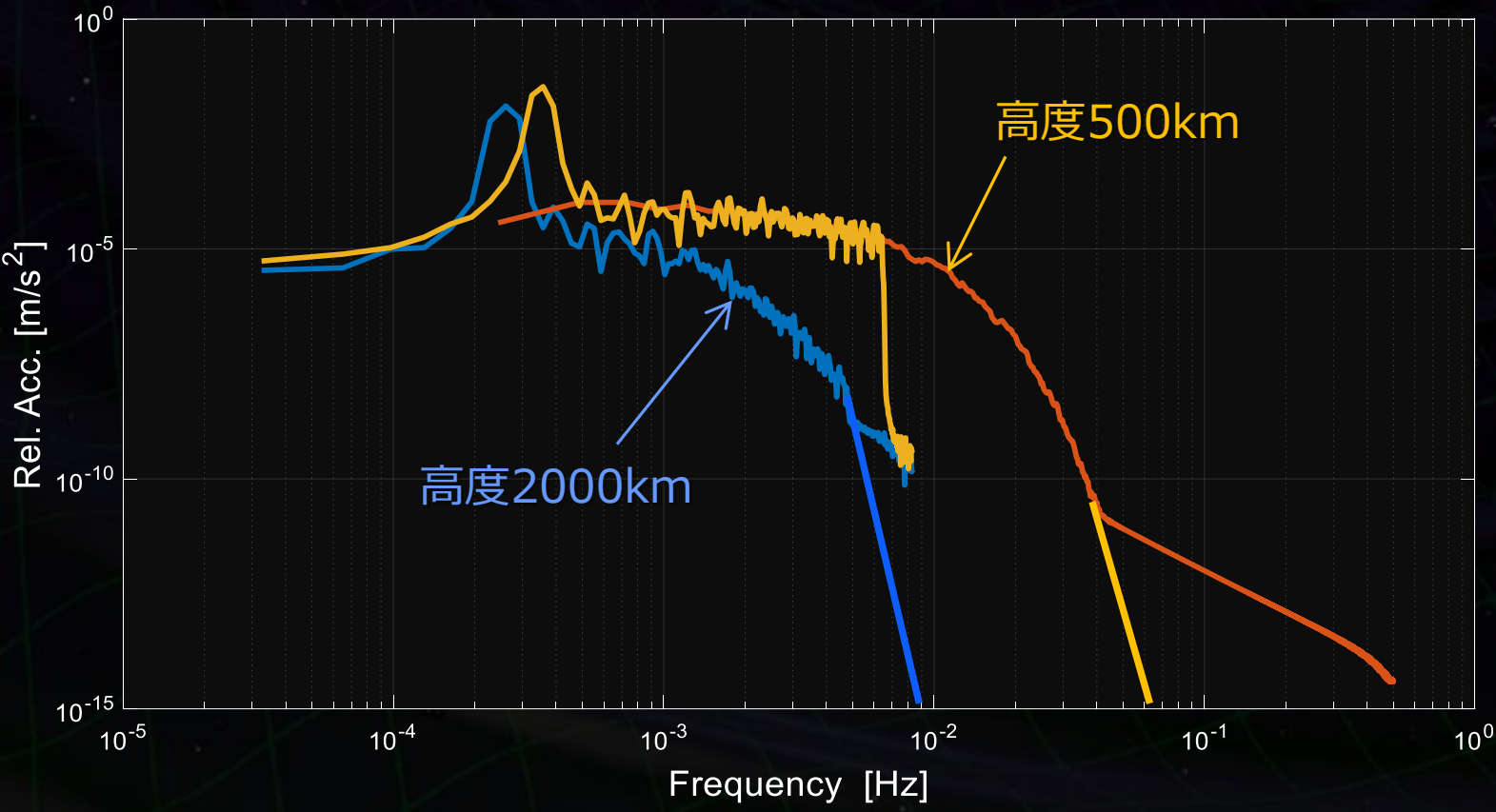


International Centre for Global Earth Models (ICGEM)
http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html

地球重力場の影響

・試験マスへの力の雑音 $<1\times10^{-16}$ N/Hz$^{1/2}$ at 0.1Hz

(加速度雑音 $<3\times10^{-18}$ m/s^2/Hz$^{1/2}$ at 0.1Hz に対応)



力雑音の地上実証

・地上実証特有の問題: 懸架系の熱雑音と地面振動

＊多段ねじれ振り子による懸架.

0.1Hzの周波数帯では, 通常の振り子懸架を用いると,
振り子の熱雑音, 地面振動の影響を避けることは困難.

→ 低共振周波数をもつ, ねじれ振り子で懸架.
多段化, 能動防振, 低温などが必要となる.

＊ 航空機による無重力落下実験.

無重力時間は 1回あたり 20秒と短いが, 実機に近い
形で実証できる可能性.

→ 真空やクランプリリース機構等は必要.
航空機の重力勾配雑音など懸念もある.

ねじれ振り子実験

DECIGO

- Phase-III TOBA：ねじれ振り子実験(@東京大)

  目標感度: $h \leq 10^{-15}\ \mathrm{Hz}^{-1/2}$ $(f = 0.1\ \mathrm{Hz})$ の重力波感度.

＊ 試験マス回転変動換算

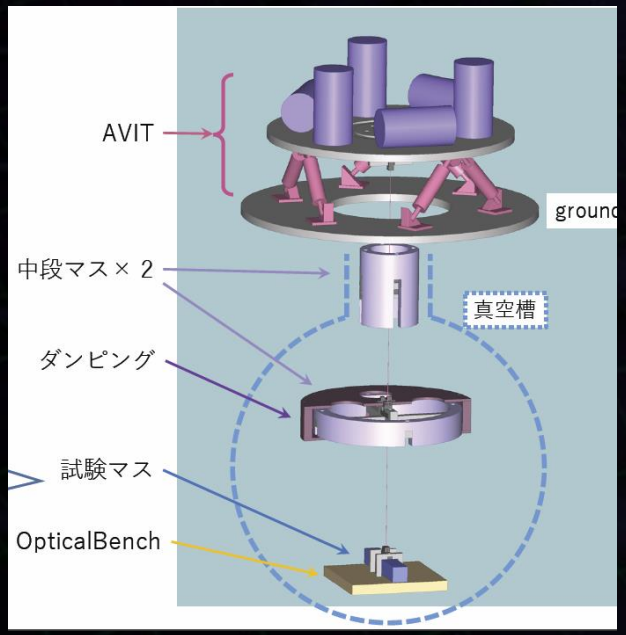
$$\delta\theta = \frac{\alpha}{2} h \cong \underline{5 \times 10^{-16}} \quad [\mathrm{rad/Hz^{1/2}}]$$

＊ 試験マス端点での差動変位換算

$$\delta x = L \cdot \delta\theta \cong \underline{1.5 \times 10^{-17}} \quad [\mathrm{m/Hz^{1/2}}]$$

＊ 端点での差動力換算

$$\delta F = \frac{\delta T}{L} \cong \underline{3.7 \times 10^{-17}} \cdot \left(\frac{0.3\ \mathrm{m}}{L}\right) \quad [\mathrm{N/Hz^{1/2}}]$$

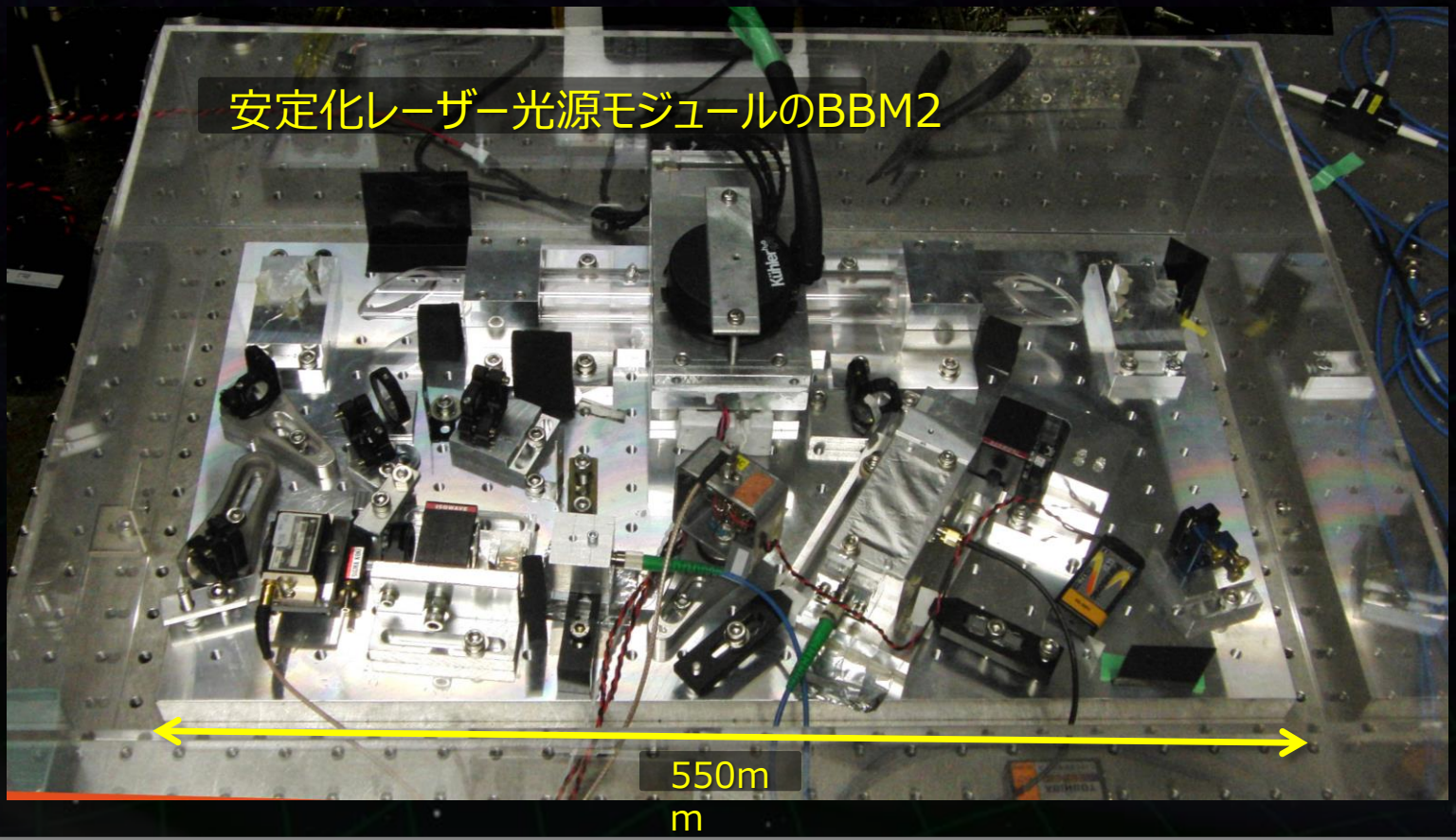


安定化レーザー光源

武者さん
(電通大)

・安定化レーザー光源BBM.

目的: ファイバ光学系を用いて小型・堅牢化したBBM3の製作と
BBMとの比較による絶対安定度評価. 環境試験.

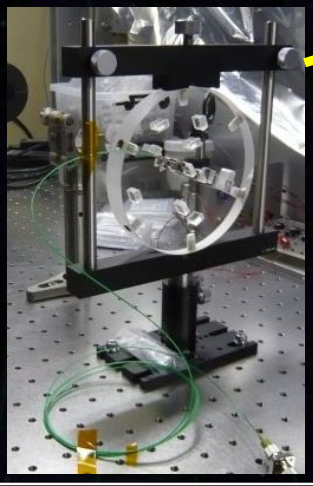


干渉計モジュール

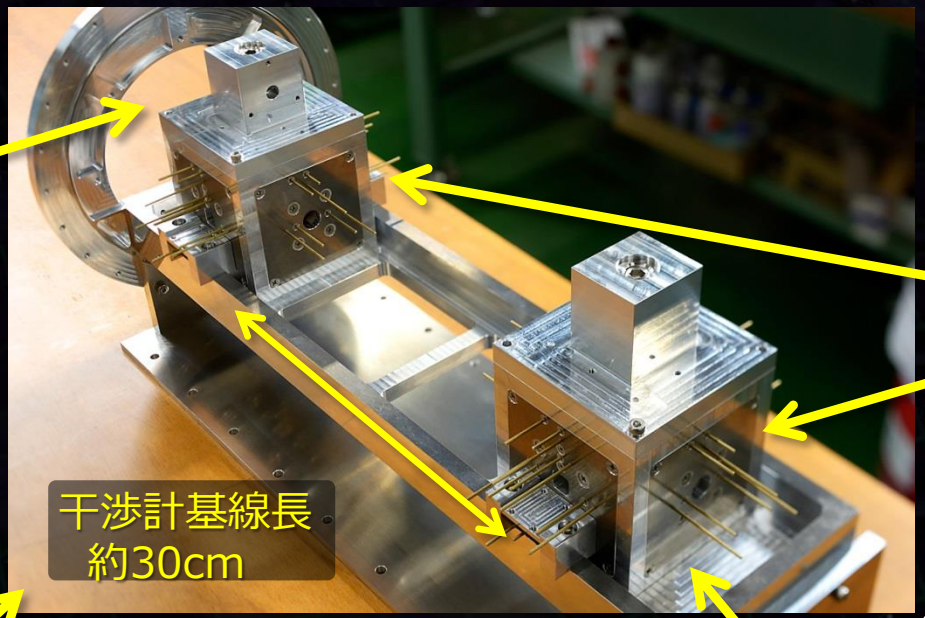
DECIGO

入出射光学系

シリケートボンディングにより一体化

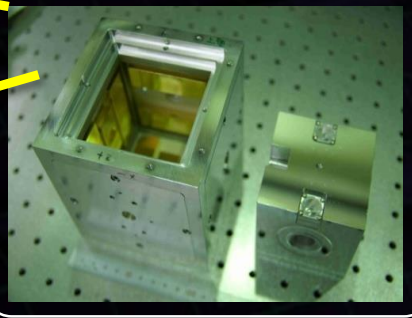


干渉計モジュール



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

レーザー干渉計

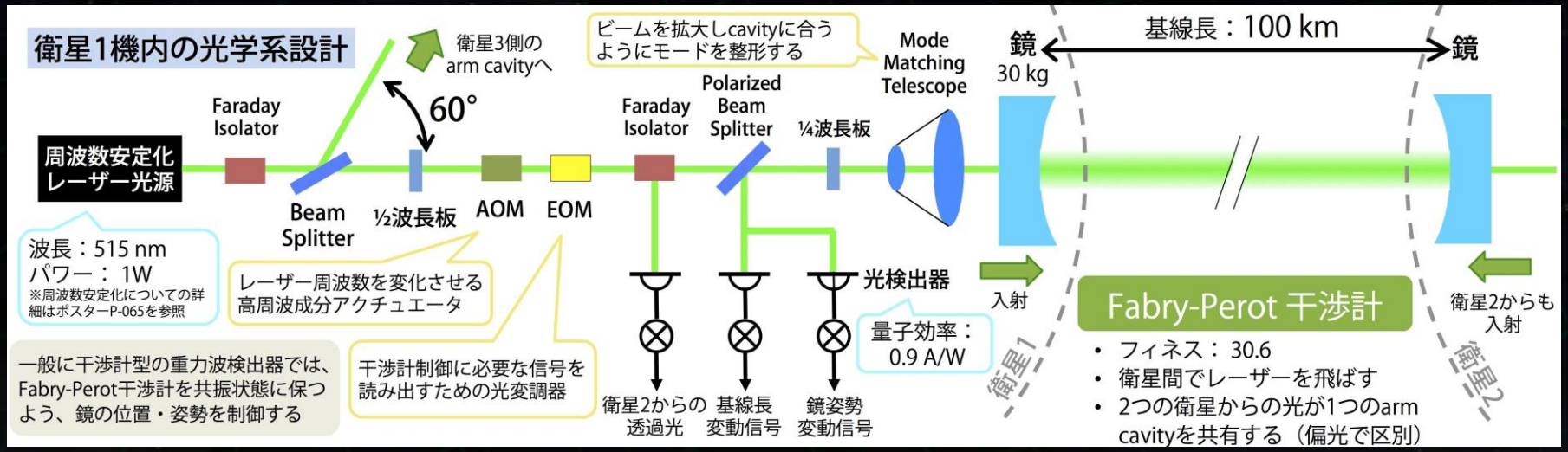
阿久津さん（国立天文台）

・レーザー干渉計の1本腕を取り出したBBM.

目的: 干渉計基本動作の実証，初期捕捉方式の試験.

実装: 全体で1mクラスに縮小・簡略化.

鏡は振り子で保持し，無重力環境を模擬．台座を駆動できるようにし，衛星を模擬．光学系はモノリシック化を進める．電気系・制御系は宇宙実装を想定した構成．鏡形状の計測と熱補償も行う.



長基線長FFにおける制御

補足

干渉計(FP共振器) の基線長制御

干渉計信号 → 鏡の位置(と光源周波数)制御

宇宙機と鏡の相対位置

ローカルセンサー信号 → スラスタ (ドラッグフリー制御)

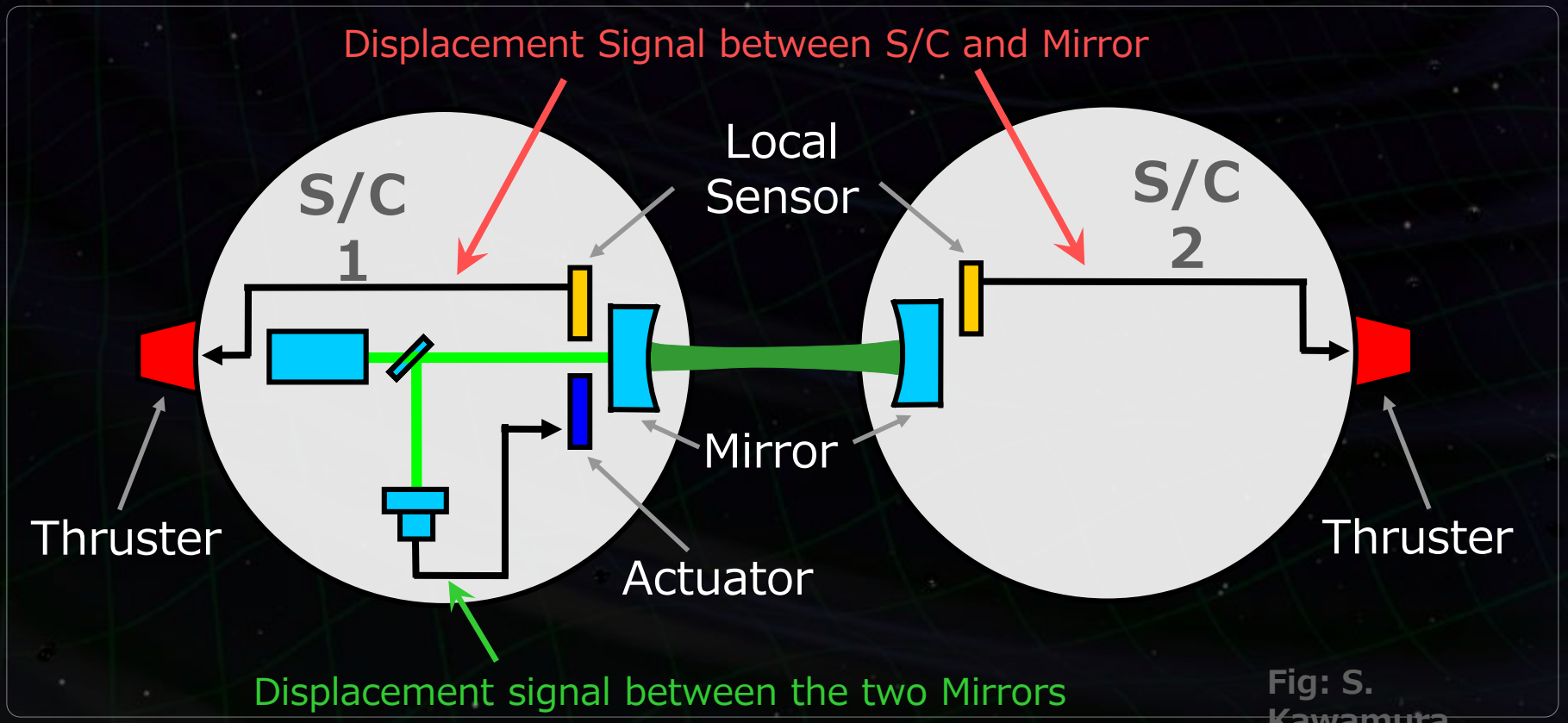
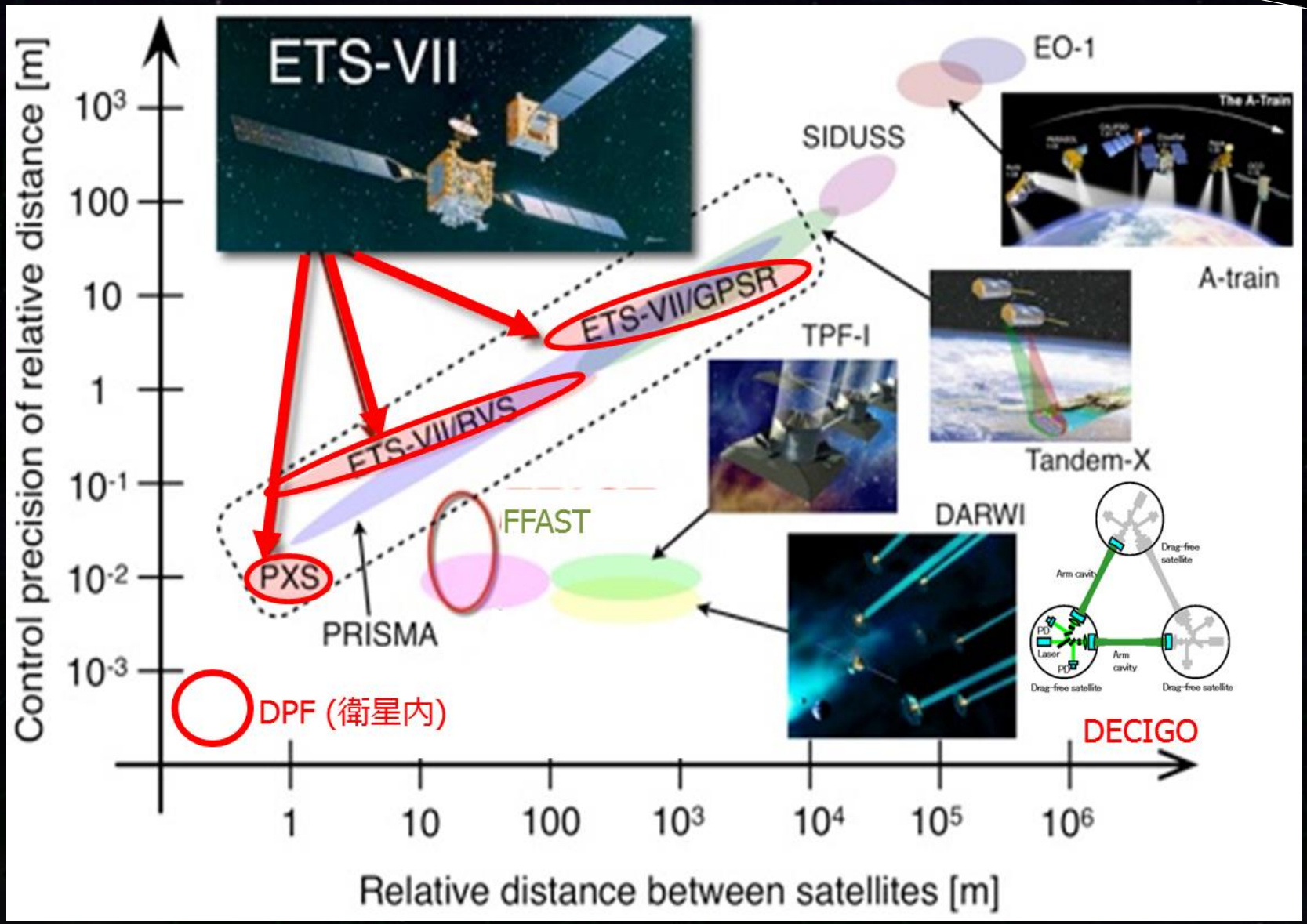


Fig: S. Kawamura

DECIGOのフォーメーションフライト技術

補足



SWIMによる宇宙実証

DECIGO

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

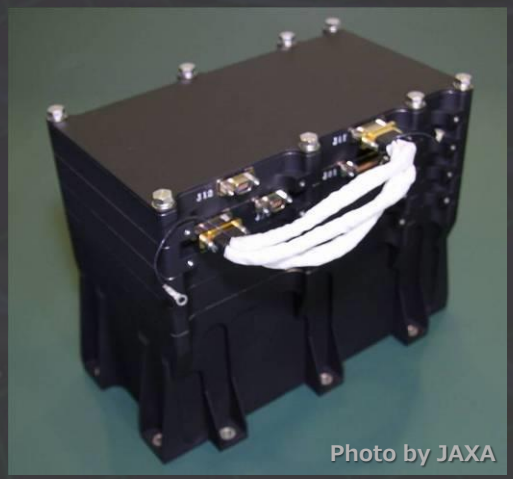
Photo：JAXA

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

SWIMmn　: 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

SDS-1 Bus System

Power +28V
RS422 for CMD/TLM
GPS signal

Power ±15V, +5V
SpW x2 for CMD/TLM

やっておきたいこと

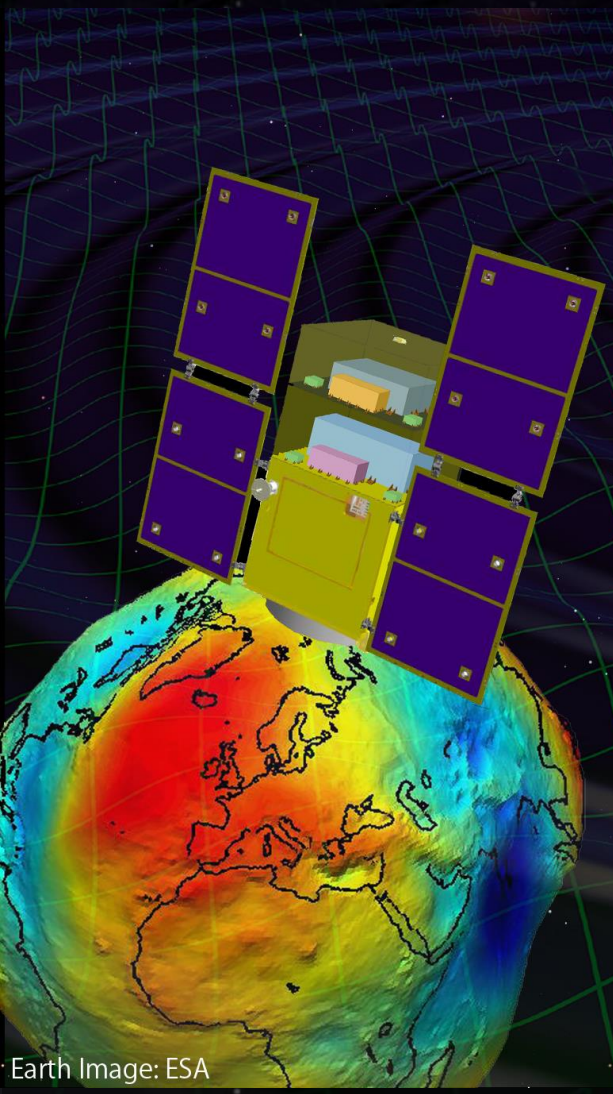
・Pre-DECIGOのサイエンス検討.
  *GW150914と同等の連星に対する意義.
    - パラメータ推定精度 (質量, スピン, 位置, 合体時刻, …)
    - 観測可能距離, 観測可能な連星数.
  *その他のサイエンスを網羅的に.
  *サイエンス価値と実現性のトレードオフ検討.

・地上での技術実証の可能性検討.
  *変位感度の実証.
  *航空機実験/ねじれ振り子での力の雑音実証.
  *その他: 軌道, 初期干渉計捕捉, ドラッグフリー, 衛星防振,…

まとめ

・DECIGOは，宇宙の始まりを直接観測する、
　という非常に大きな科学的価値をもつ計画である.

・宇宙重力波望遠鏡 Pre-DECIGO.
- 0.1-10Hzの周波数で独自の科学的成果が期待できる.
　地上重力波望遠鏡と相補的な観測，中間質量BH合体
　といった独自の観測，将来のDECIGOへの知見.
- JAXA中型ミッションとしての実現を目指す.
　＊ 最短で2018年ミッション提案 → 2025/26年実現.



Earth Image: ESA

終わり