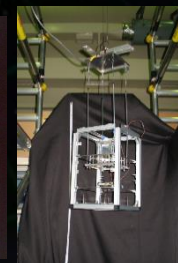
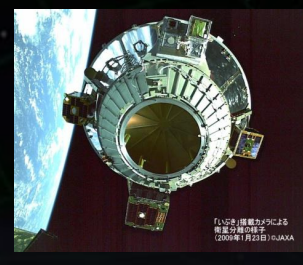
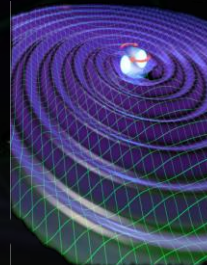
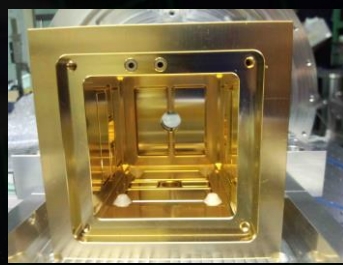
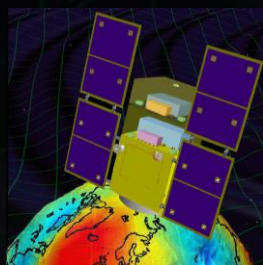


# 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO

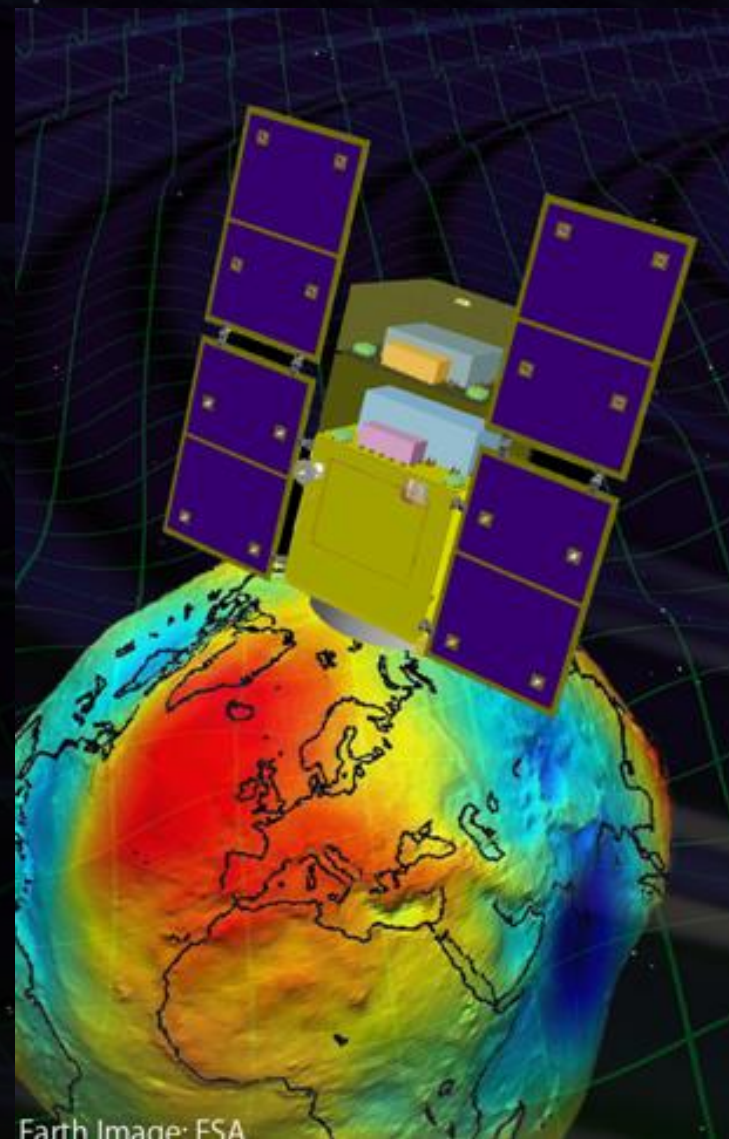
安東 正樹 (東京大学 / 国立天文台)

DECIGO collaboration





安東正樹, 川村静児, 瀬戸直樹, 中村卓史, 坪野公夫, 佐藤修一,  
田中貴浩, 船木一幸, 沼田健司, 神田展行, 井岡邦仁, 高島健  
, 横山順一, 阿久津智忠, 武者満, 上田暁俊, 青柳巧介, 我  
妻一博, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二, 新谷昌人, 池上健  
, 石川毅彦, 石崎秀晴, 石原秀樹, 和泉究, 市來淨與, 伊東  
宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 植田憲一, 牛場崇文, 歌島昌由,  
江口智士, 江尻悠美子, 榎基宏, 戎崎俊一, 江里口良治, 大  
石奈緒子, 大河正志, 大橋正健, 大原謙一, 大淵喜之, 岡田  
健志, 岡田則夫, 奥富弘基, 河島信樹, 川添史子, 河野功,  
木内建太, 岸本直子, 國中均, 國森裕生, 黒田和明, 黒柳幸子  
, 小泉宏之, 洪鋒雷, 郡和範, 穀山渉, 苔山圭以子, 古在  
由秀, 小嶋康史, 固武慶, 小林史歩, 権藤里奈, 西條統之  
, 齊藤遼, 坂井真一郎, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀親  
, 佐々木節, 佐藤孝, 柴田大, 柴田和憲, 正田亜八香, 真貝寿明  
, 末正有, 杉山直, 鈴木理恵子, 諏訪雄大, 宗宮健太郎,  
祖谷元, 高野忠, 高橋走, 高橋慶太郎, 高橋弘毅, 高橋史宜  
, 高橋龍一, 高橋竜太郎, 高森昭光, 田越秀行, 田代寛之  
, 田中伸幸, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 陳たん, 辻  
川信二, 常定芳基, 豊嶋守生, 鳥居泰男, 中尾憲一, 中澤知  
洋, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中山宜典,  
西澤篤志, 西田恵里奈, 丹羽佳人, 能見大河, 橋本樹明, 端  
山和大, 原田知広, 疋田渉, 姫本宣朗, 平林久, 平松尚志  
, 福嶋美津広, 藤田龍一, 藤本眞克, 二間瀬敏史, 細川瑞彦  
, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英雄, 松本伸之, 道村唯太, 宮川治  
, 宮本雲平, 三代木伸二, 向山信治, 森澤理之, 森本睦子  
, 森脇成典, 八木絢外, 山川宏, 山崎利孝, 山元一広,  
吉田至順, 吉野泰造, 柳哲文, 若林野花 (2015.5時点)



- 宇宙重力波望遠鏡 **B-DECIGO** (旧称 Pre-DECIGO)の提案.
  - \* 0.1Hz付近の重力波観測により, 新たな宇宙物理・宇宙論的な知見を得る独自のミッション.
  - \* 3つの宇宙機のフォーメーションフライトによって基線長 100km のレーザー干渉計型重力波望遠鏡を構成.
  - \* JAXA中型ミッションとしての実現を目指す.
- 本講演では,
  - \* B-DECIGOの目的と科学的意義.
  - \* 技術的実現性の検討の現状についてお話する.





# 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO のサイエンス



# LIGOによる重力波の初観測

- ・2016年2月11日 米国の重力波観測所 **LIGO (ライゴ)** 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。  
→ 重力波天文学の幕開け。



2016年2月11日 新聞各紙の朝刊



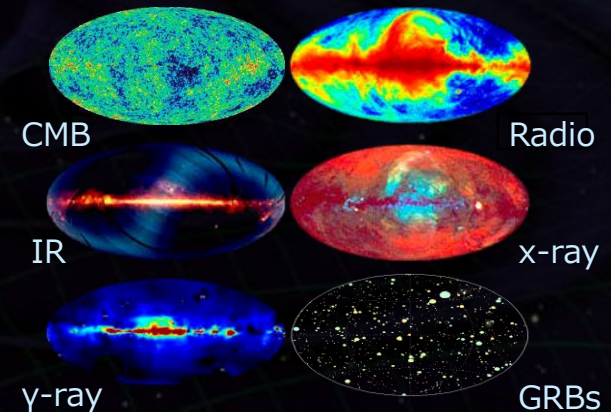
Courtesy Caltech/MIT/LIGO Laboratory

## ・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：

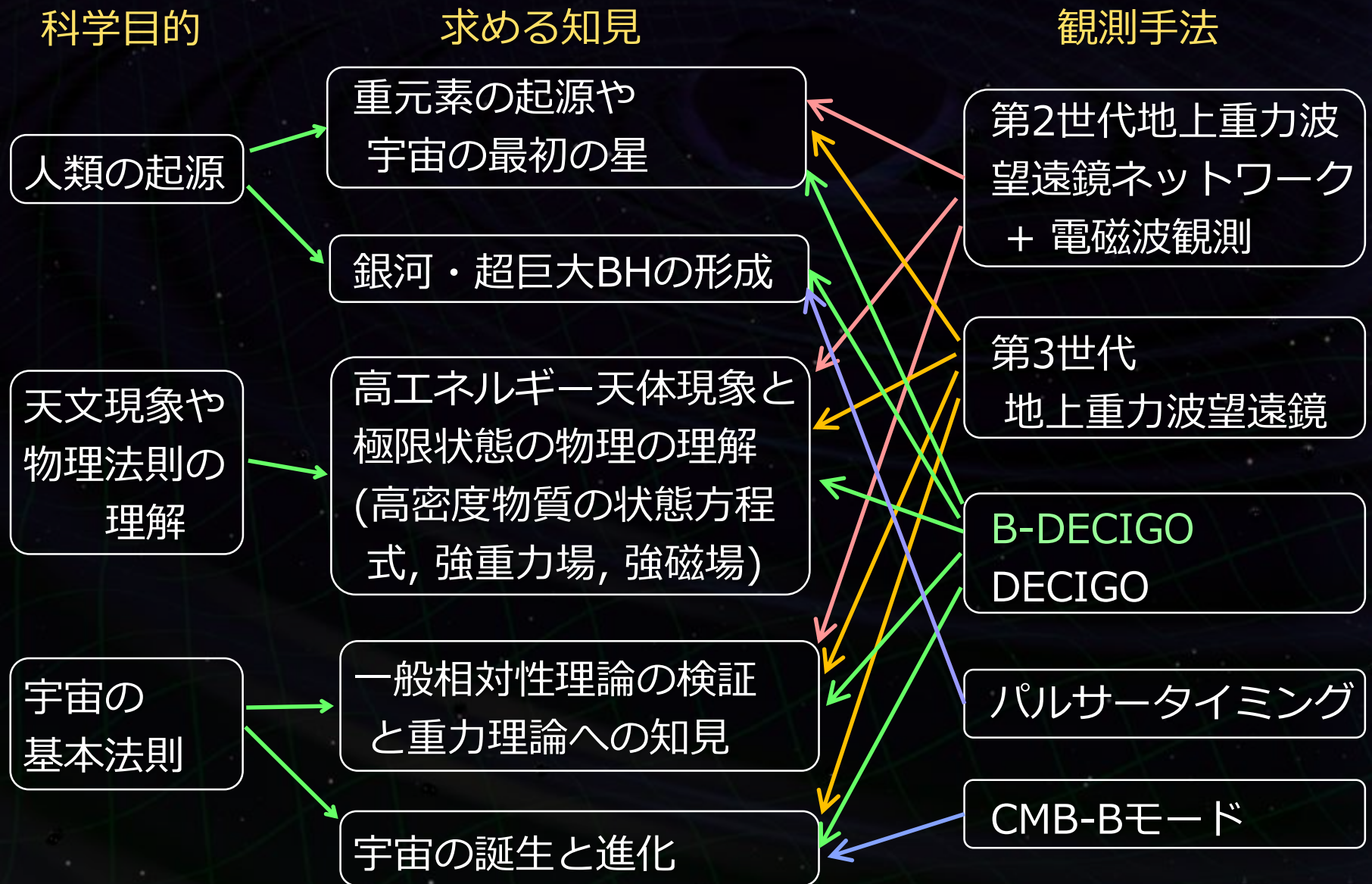
放射される重力波の周波数

～  $1 / (\text{波源変動の時間スケール})$

→ 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。





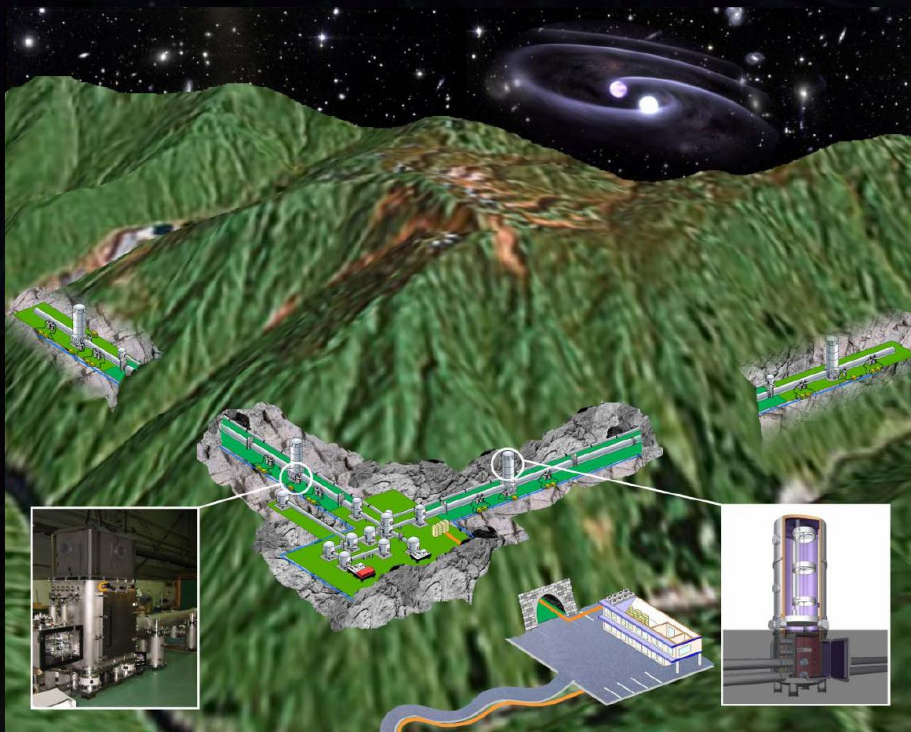


## KAGRA (~2018)

地上重力波望遠鏡

→ 高周波数の重力波イベント

目標: 重力波の検出, 天文学

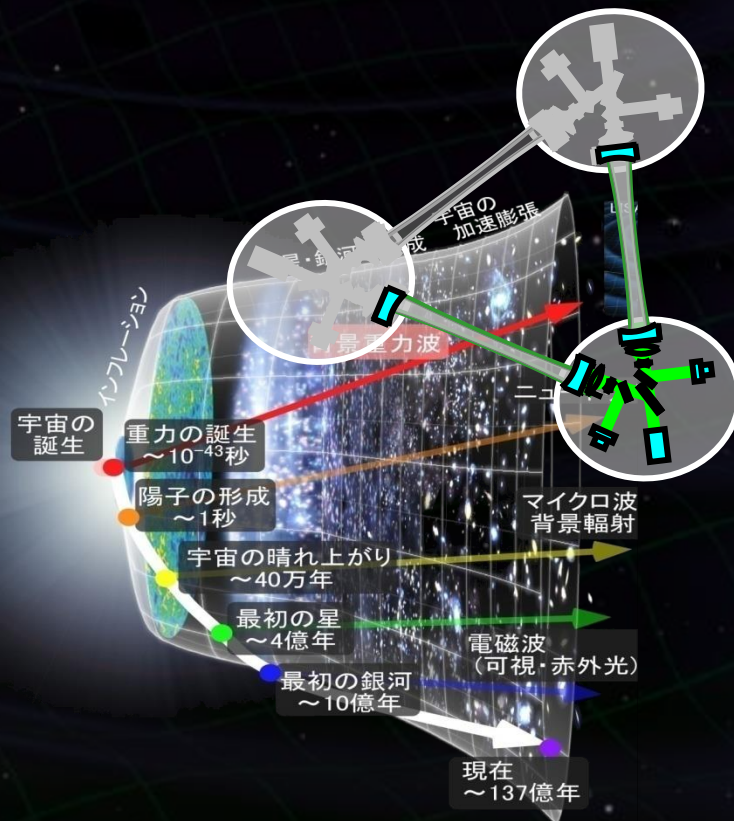


## B-DECIGO (~2020年代末)

宇宙重力波望遠鏡

→ 低周波数の重力波

目標: 重力波天文学の展開





## ・B-DECIGO

- 3機の宇宙機で構成された宇宙重力波望遠鏡
- 重力波感度  $2 \times 10^{-23} \text{ Hz}^{-1/2}$  at 0.1Hz.

絵: 佐藤修一

## ・観測目標

- (1) コンパクト連星合体の観測.
- (2) 中間質量BH連星合体の観測.
- (3) DECIGOへ向けた  
フォアグラウンドの理解.



JAXA戦略的中型ミッションとしての実現を目指す (2020年代).

## ・科学的目的

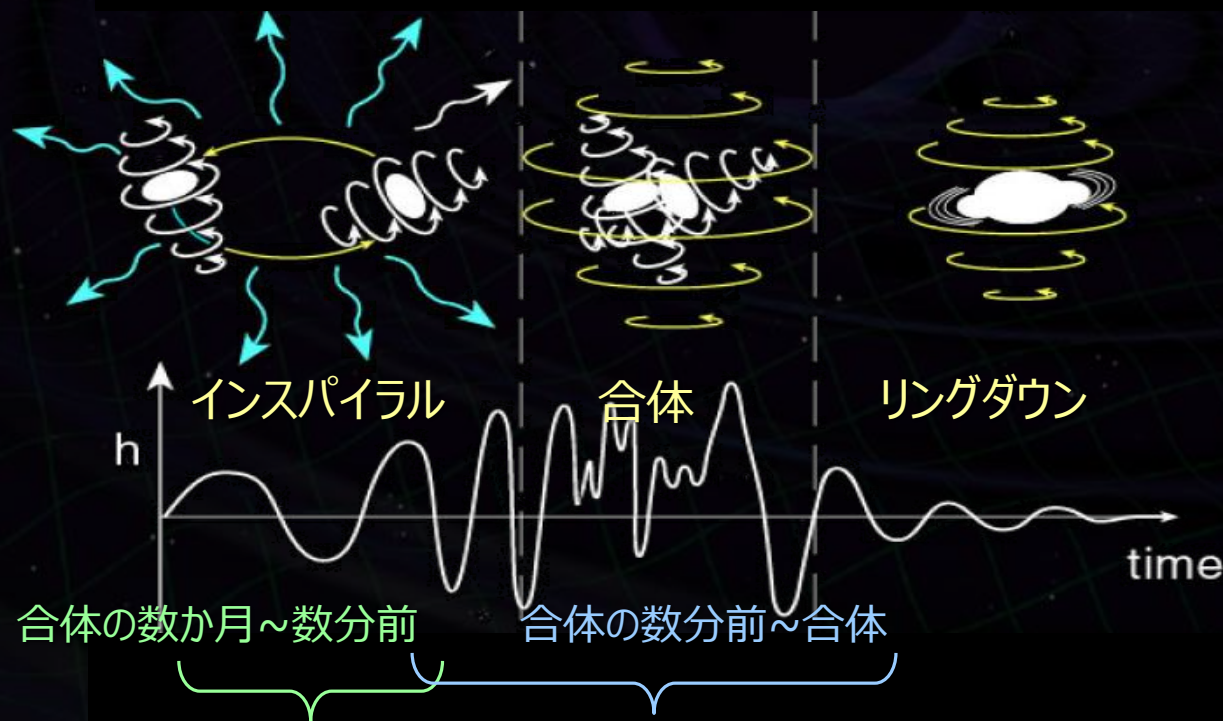
強重力・高密度天体からの重力波の観測による,  
時空構造・銀河形成・高エネルギー天体現象の解明.

## ・観測目標

- (1) コンパクト連星合体現象の観測. [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.



B-DECIGOでは,  $\sim 10^5$  個/年 の連星合体イベントを観測.

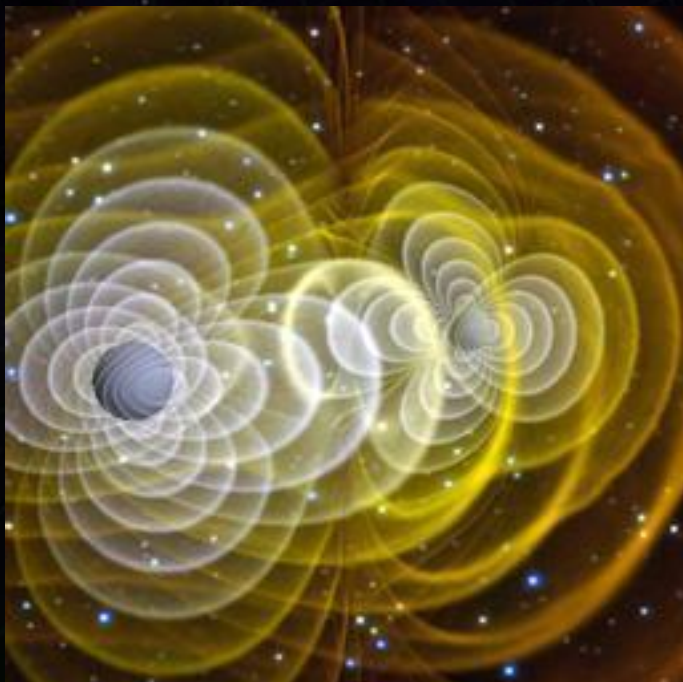


低周波数 → B-DECIGO  
質量, 軌道, 方向, 合体時刻.

高周波数 → 地上望遠鏡  
状態方程式, 高エネルギー現象.

B-DECIGOでは, ほぼ宇宙全体の中間質量BH合体を見通す.

( $z \sim 10$  以上,  $30 - 10^4 M_{\odot}$  の連星ブラックホール合体)



銀河中心の超巨大BH形成の謎.

(A) 大質量星の崩壊 → 降着

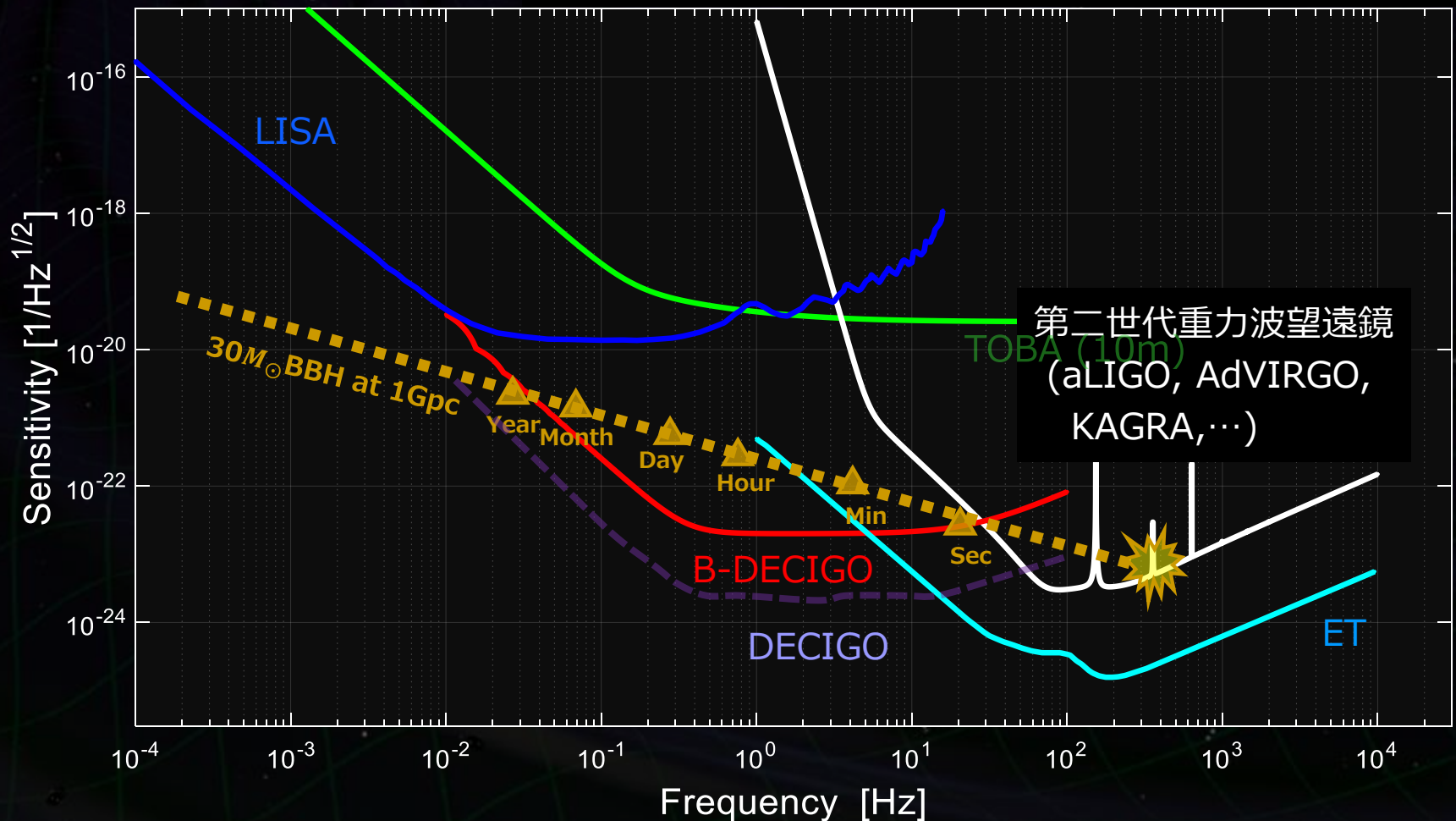
(B) BHの階層的合体

- **B-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.

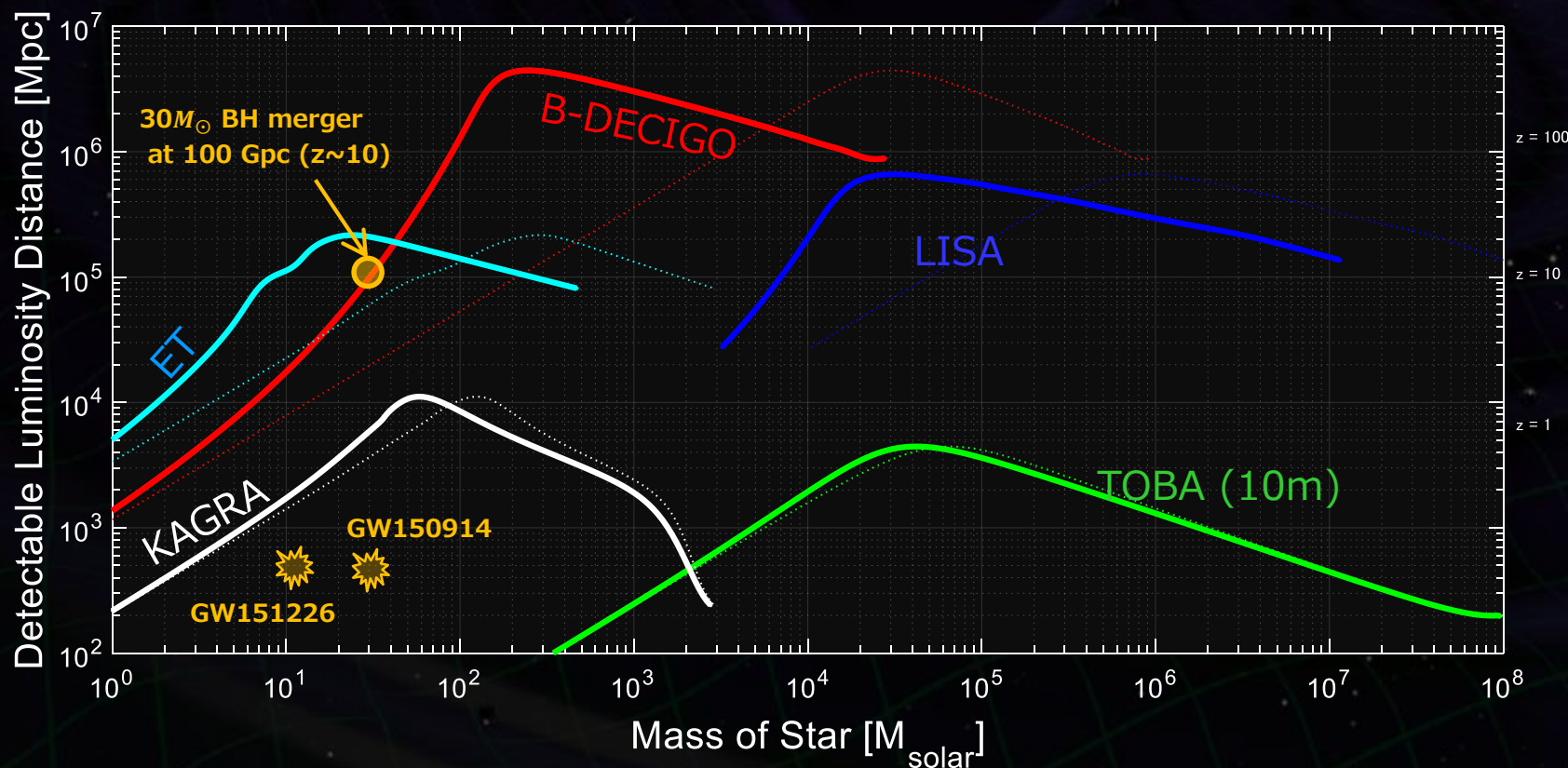


# 感度の比較

T. Nakamura et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 093E01 (2016)



30 $M_{\odot}$  BH連星合体 : 100 Gpc ( $z \sim 10$ ) の観測距離.  
(合体前 15日 0.1Hz, 47分前 1Hz)

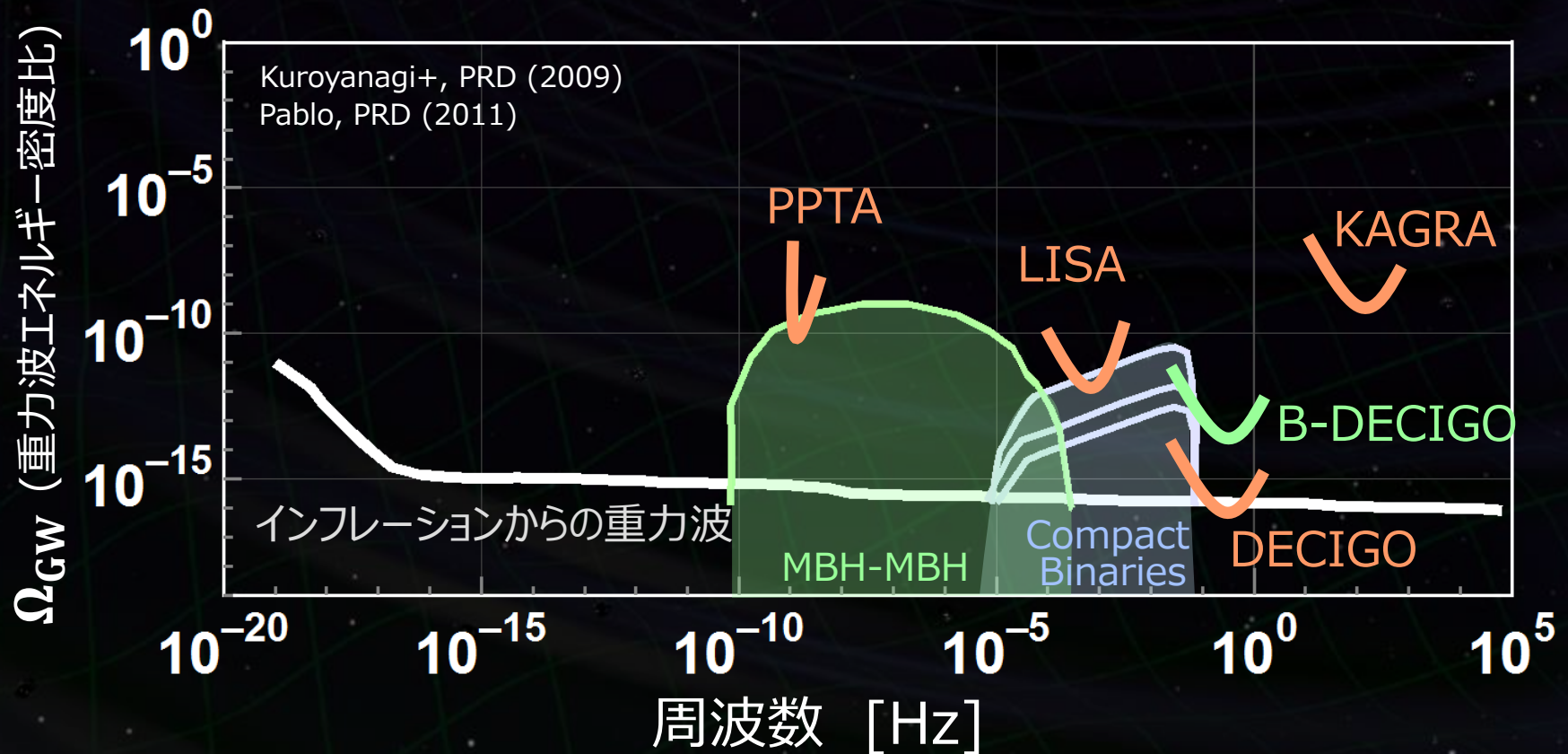


多くのサイクル数 ( $\sim 10^5$ ) の観測  $\rightarrow$  パラメータ推定精度の向上  
連星の質量, 位置, 軌道, 合体時刻, (距離), ...



# 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.



## ・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.
- \*その後 : 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)

- \*2020年代 : B-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 : LISAの打ち上げ. 低周波数重力波の観測.





# ミッションの検討と技術開発

ミッション要求：

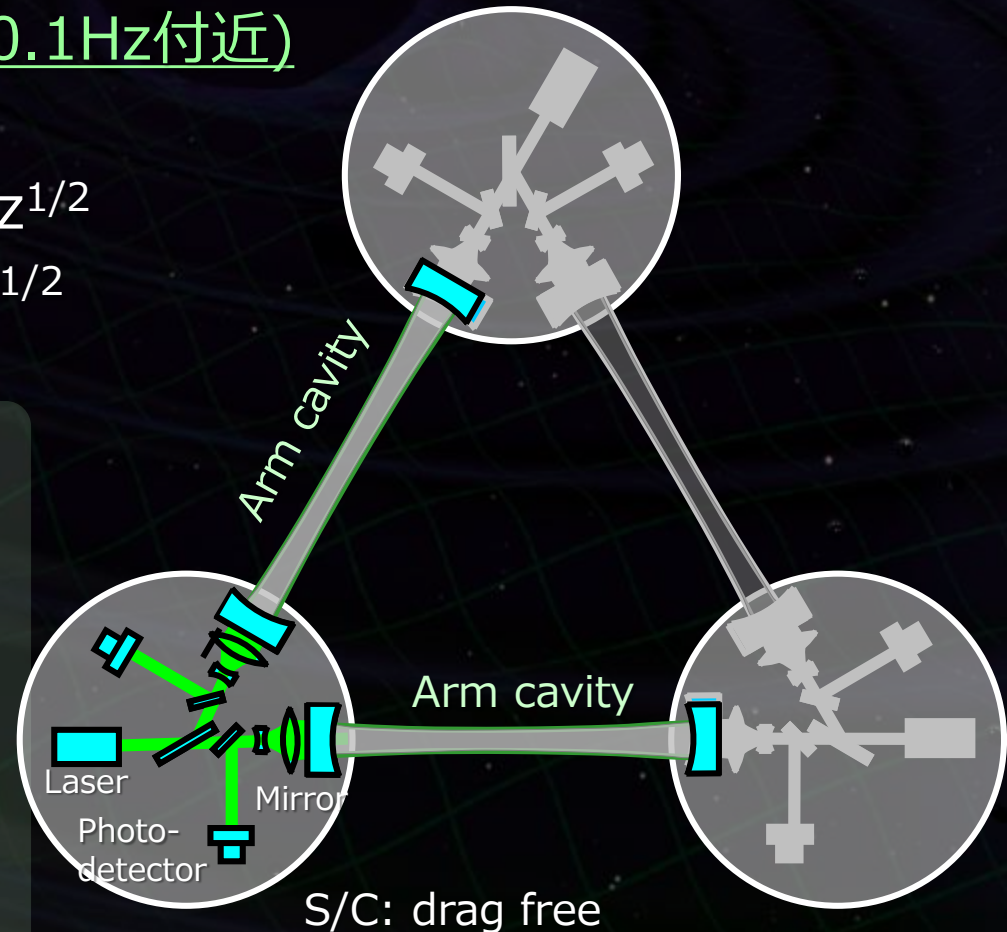
歪み感度  $2 \times 10^{-23} \text{ Hz}^{-1/2}$  (0.1Hz付近)



\* 変位感度  $2 \times 10^{-18} \text{ m/Hz}^{1/2}$

\* 力の雑音  $1 \times 10^{-16} \text{ N/Hz}^{1/2}$

Arm length: 100 km  
Finesse: 100  
Mirror diameter: 30 cm  
Mirror mass: 30 kg  
Laser power: 1 W  
Laser wavelength : 515 nm  
Orbit : TBD  
(Record-disk around the Earth)





- 長基線長レーザー干渉計技術 (変位感度  $< 2 \times 10^{-18} \text{ m/Hz}^{1/2}$ )
  - 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  $< 1 \times 10^{-16} \text{ N/Hz}^{1/2}$ )
  - 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.
  - 受動的な外乱低減技術.
- 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

- 長基線長レーザー干渉計技術 (変位感度  $< 2 \times 10^{-18} \text{ m/Hz}^{1/2}$ )
  - \* 本番と同等の光学系構成での機能実証+初期軌道捕捉の機能実証.
  - \* 大口径鏡の製作, もしくは曲率補正手法の開発.
  - \* 低周波数帯 (0.1Hz) での要求変位感度(センサ系)の実証.
  - \* 安定化レーザー光源のEM製作・性能評価.
- 外力雑音の低減 (試験マスへの力の雑音  $< 1 \times 10^{-16} \text{ N/Hz}^{1/2}$ )
  - \* 航空機実験などによる実機構成での機能実証.
  - \* ねじれ振り子等による雑音源評価・要求値実現.
- 衛星変動の低減
  - \* ドラッグフリーのシミュレーション.
  - \* 軌道設計、シミュレーション.
  - \* 衛星ドラッグフリーの地上実証, およびそれを補助する機構の開発, 感度実証.
  - \* 微小推力雑音スラストの性能評価.
  - \* 航空機・微小重力下におけるドラッグフリーの動作実証.
- 衛星システム設計
  - \* 衛星システム(構造・リソース)検討, 信号処理, 地上系構成.
  - \* 軌道設計, 初期ミッションシーケンス, 打ち上げ手段, コスト見積もり



- ・ 2007年より継続してきたDPF WG を総括の上, 終了  
(審査の上, 2016年12月 宇宙理学委員会で承認).  
→ B-DECIGO WGとして再定義して活動する方針.  
(設立申請書準備中)
- \*WG目的: それ自体で十分な科学的価値を持つ重力波  
望遠鏡として **B-DECIGO** の実現を目指す.
  - ミッションの目的・目標の設定, ミッション要求値等へのブレー  
クダウンなど, 次回の中型ミッション公募に応募できる準備.
- \* 根幹技術の地上実証, 宇宙実証の機会の検討.
- \* 体制の構築, コミュニティとの調整, 国際協力の枠組み構築.

# まとめ





- 宇宙重力波望遠鏡 **B-DECIGO**.

- \* 独自の大きな科学的成果が期待できる**宇宙ミッション**.

- 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.

- \* ミッションの検討, 根幹技術開発を進めている.

- \* JAXA中型ミッションとしての実現を目指す.

- 2020年代に実現.

## 関連ポスター講演

P-017 B-DECIGOの軌道設計

P-018 DECIGO/B-DECIGOのための安定化光源

P-019 DECIGOが狙うインフレーション起源の背景重力波

P-020 DECIGO搭載スラスタの微小推力雑音計測に向けたスラストスタンドの開発



終わり