
2018年度第1回 CRC将来計画タウンミーティング

宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO

安東 正樹 (東京大学 / 国立天文台)

DECIGO/B-DECIGO collaboration

※ 以前のPre-DECIGOから改名.

• 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

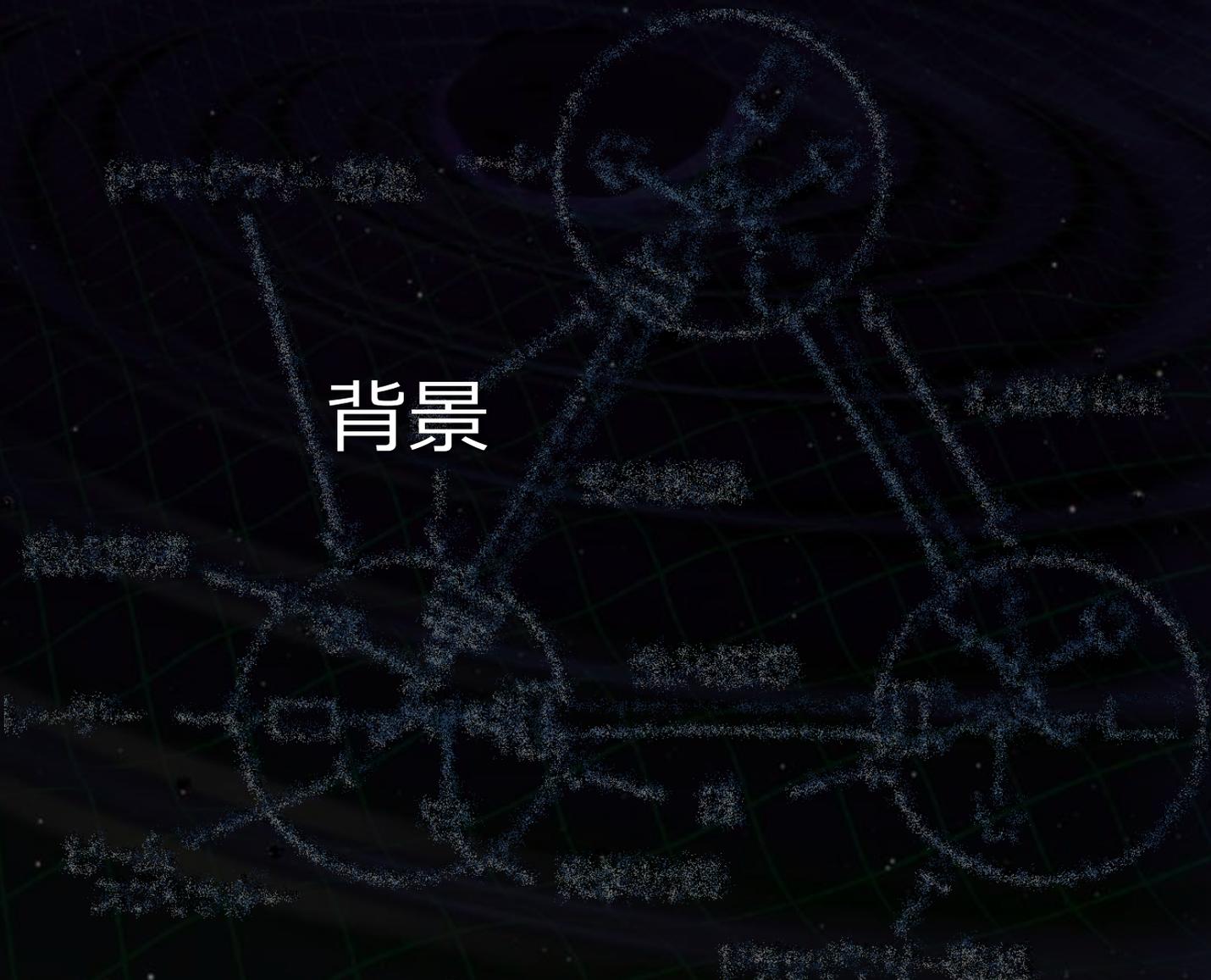
- (1) コンパクト連星合体の観測.
- (2) 中間質量BH連星合体の観測.
- (3) DECIGOへ向けた
フォアグラウンドの理解.



JAXA戦略的中型ミッションとしての実現を目指す (2020年代).

今回の内容

- 背景: 重力波天文学の幕開け
- **B-DECIGO** (JAXA中型計画) の科学的意義と現状.
- コミュニティでの議論・位置づけ.



背景

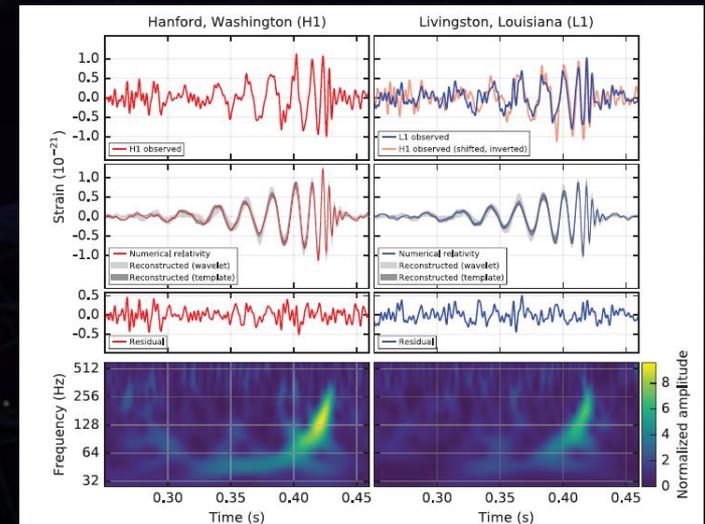
地上重力波望遠鏡：重力波天文学の幕開け

- 2015年：米国の地上重力波望遠鏡 **aLIGO** による重力波初観測。
質量 $\sim 30M_{\odot}$ の**連星ブラックホール**の合体。
→ 相対論の検証, 連星ブラックホールの存在実証。
- 2017年：欧州 **AdVirgo** が観測開始。LIGOとの3台同時観測。
→ **方向決定精度**の向上 ($\sim 30\text{deg}^2$)
連星中性子星合体イベントの初観測 (GW170817)
電磁波対応天体の発見との同時観測。
→ さまざまな新たな知見 (次ページ)。
- 2019-20年：日本 **KAGRA** による観測開始。
→ 波源のパラメータ推定精度の向上。
- 2020年代：LIGO-India の観測開始。

LIGOによる重力波の初観測

Courtesy Caltech/MIT/LIGO Laboratory

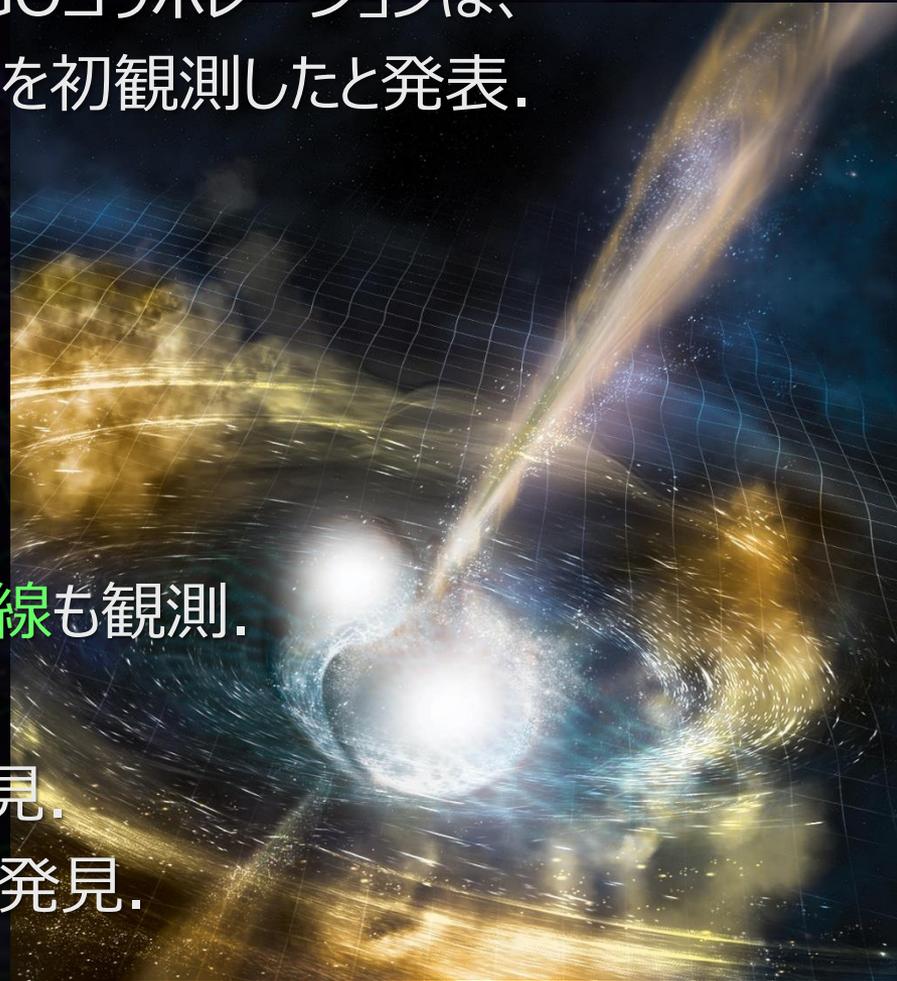
- 2016年2月11日 米国の重力波観測所 LIGO (ライゴ) が重力波の初観測を発表：地球から13億光年遠方での連星ブラックホール合体からの重力波信号を観測。



- 2017年 ノーベル物理学賞：
R.ワイス, B.V.バリッシュ, K.S. ソーン
「LIGOと重力波観測への重要な貢献」

連星中性子星合体からの重力波の初観測

- 2017年10月16日, LIGO-VIRGOコラボレーションは、連星中性子星合体からの重力波を初観測したと発表.
- 信号は 2017年8月17日に到来
→ GW170817と名付けられた.
- 方向特定 (30deg^2) → 電磁波によるフォローアップ観測も実現.
 - * 重力波検出の1.7秒後にガンマ線も観測.
 - * 光赤外望遠鏡による追観測
→ 約11時間後に対応天体発見.
 - * 紫外, X線, 電波でも対応天体発見.



[ApJ Letters 848:L12 (Oct 20, 2017)]

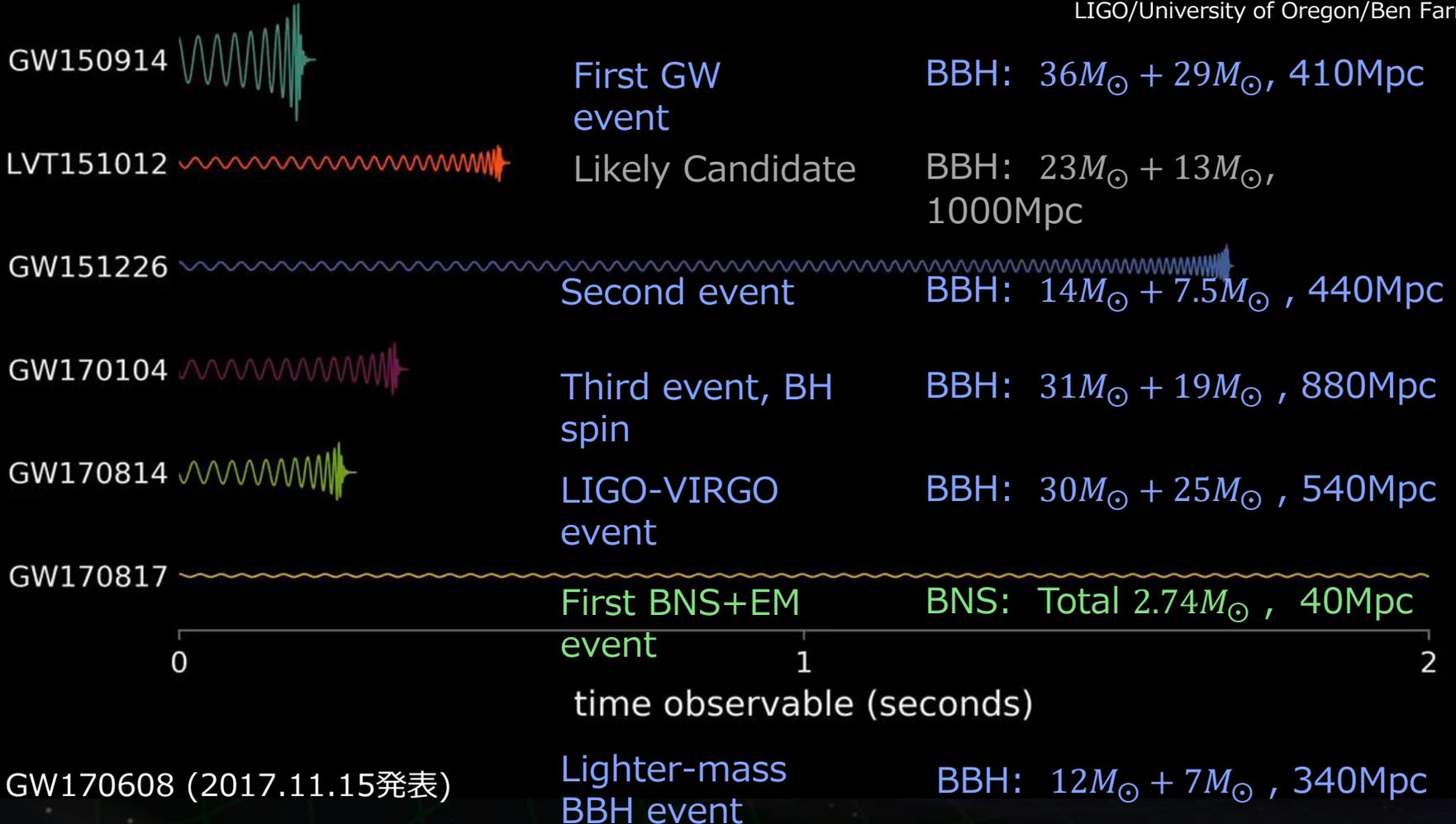
分かったこと、新たな疑問

- **短ガンマ線バースト**の起源.
 - 連星中性子星合体と同時に観測された.
 - しかし、暗すぎるという新たな疑問も生じた.
 - **重元素**の起源
 - 数値シミュレーションによる光度曲線の予想と一致.
 - どの程度が連星中性子星合体起源かは、多くの観測例が必要.
 - **合体後に何ができたのか**は不明.
 - ブラックホールか中性子星か.
 - 中性子星の**状態方程式**に対する知見.
 - **基礎物理**や**宇宙論**に対する知見も得られた.
 - 全く新しい手法で知見が得られた.
- ↓
- さらに多く、より**精度の高い**観測が必要.

これまで発表された重力波観測例

連星ブラックホール合体 5つ (+候補 1つ), 連星中性子星合体 1つ

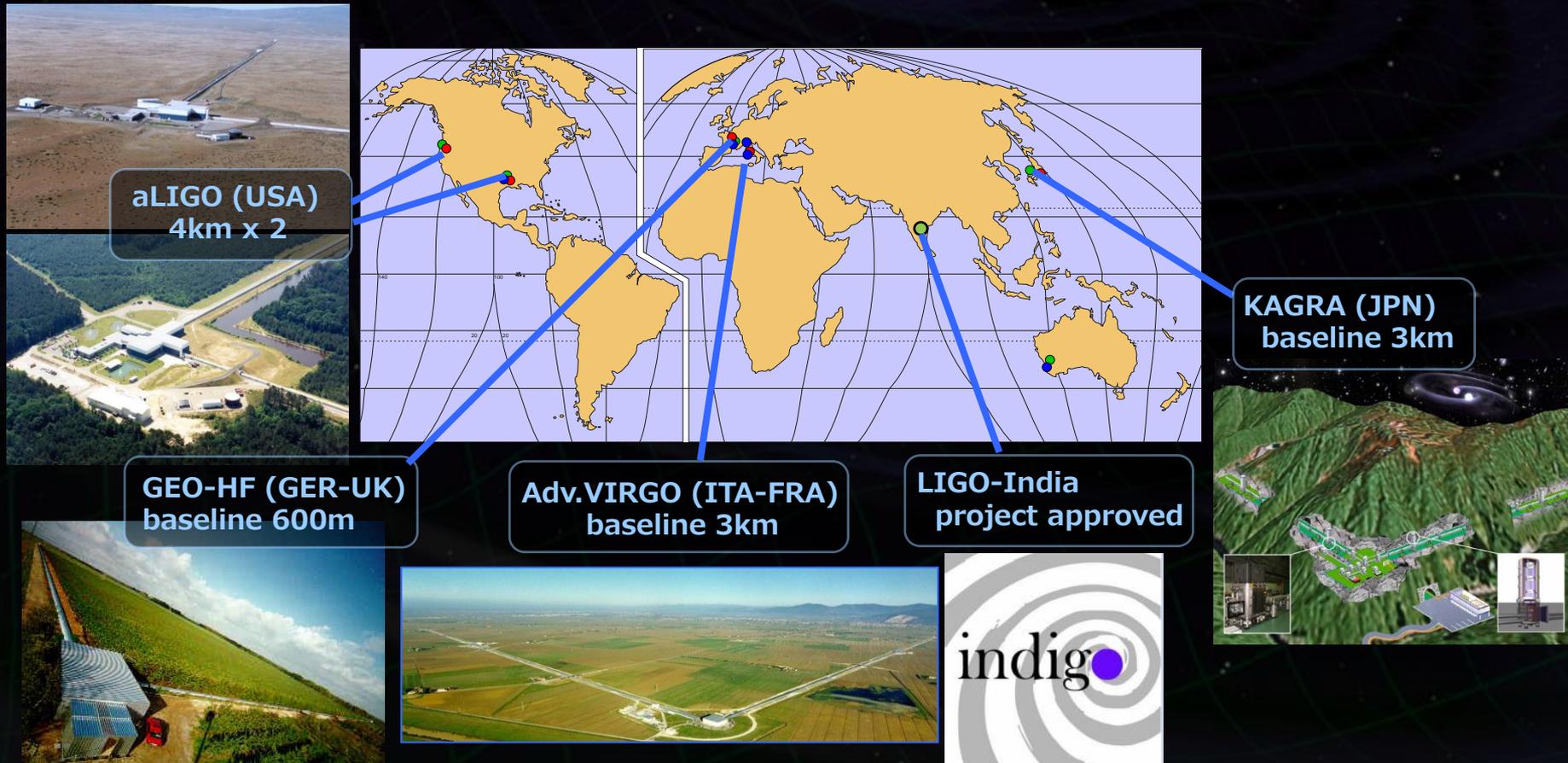
LIGO/University of Oregon/Ben Farr

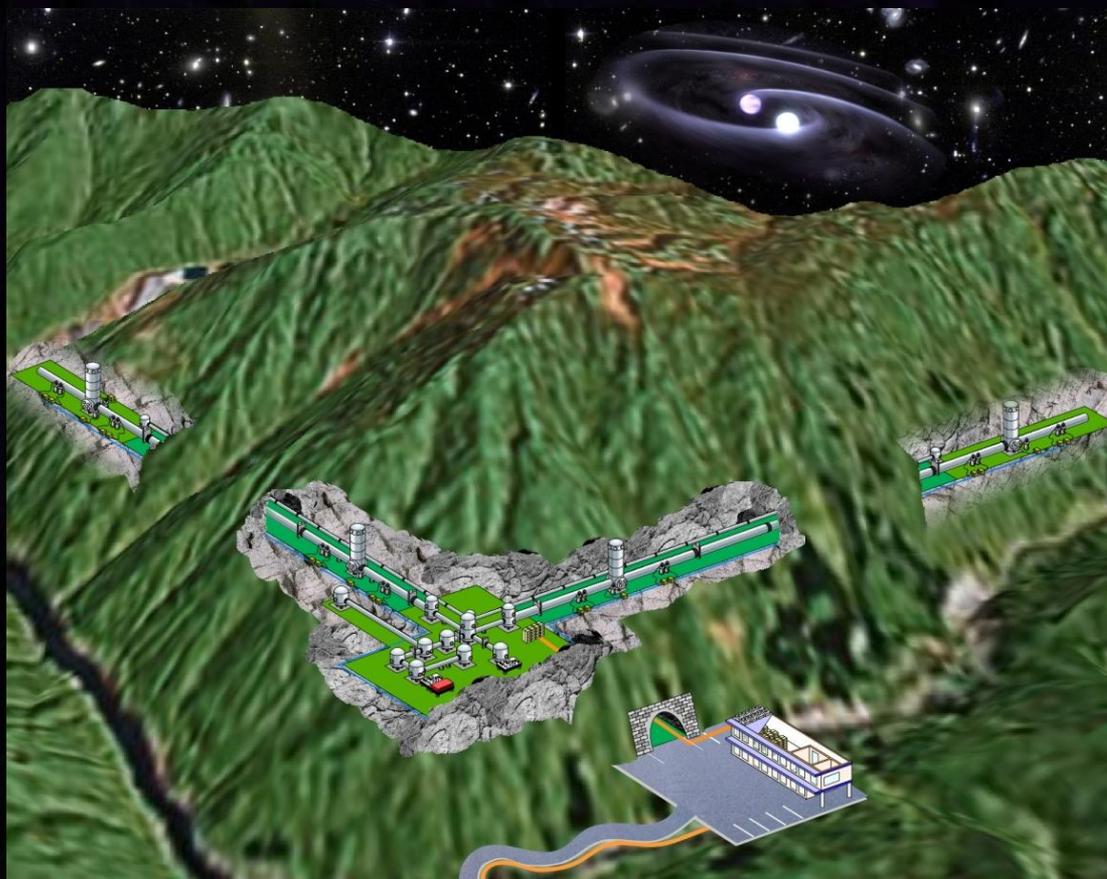


第2世代 重力波望遠鏡

国際観測ネットワークが形成される (現在から 約3-5年後)

→ 重力波天文学 (重力波の検出, 位置, 天文情報, ...)





大型低温重力波望遠鏡

かぐら (KAGRA)

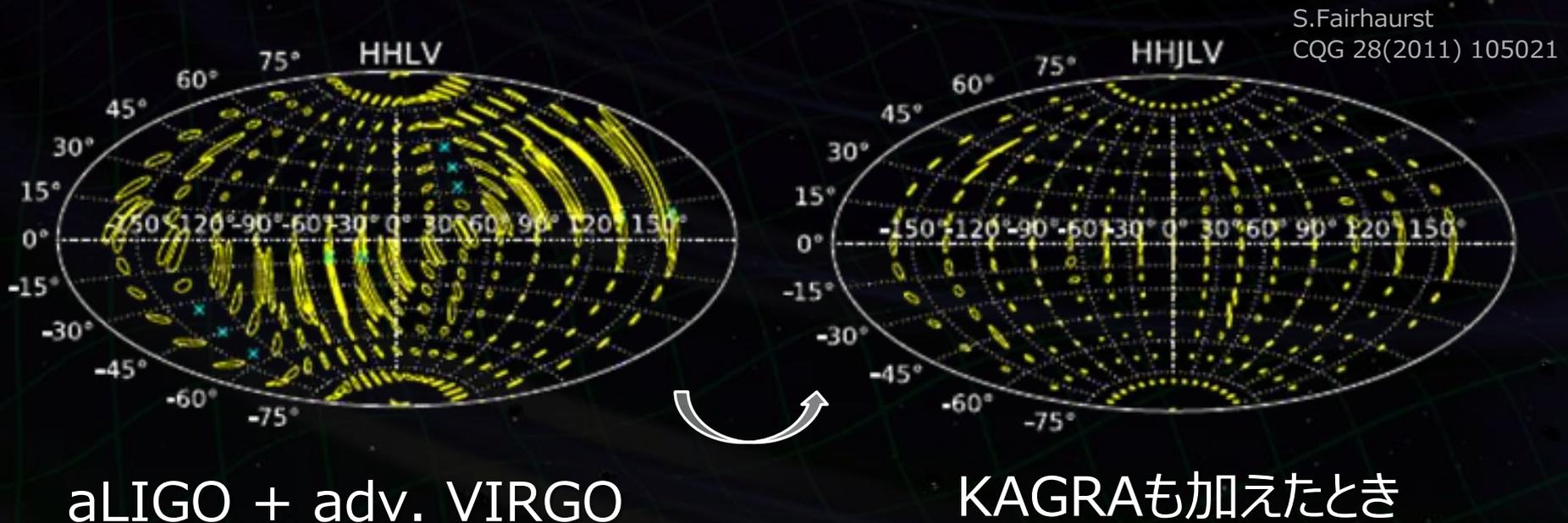
岐阜県・神岡で建設中の
次世代重力波検出器
(本格観測 2018年-)



重力波天文学の創成

重力波源の方向特定精度

- 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.

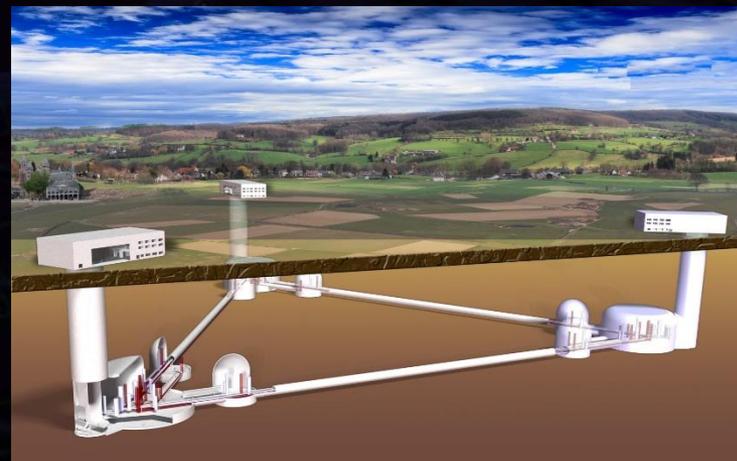


第3世代 重力波望遠鏡

第3世代の地上重力波望遠鏡 (2030年代観測開始)

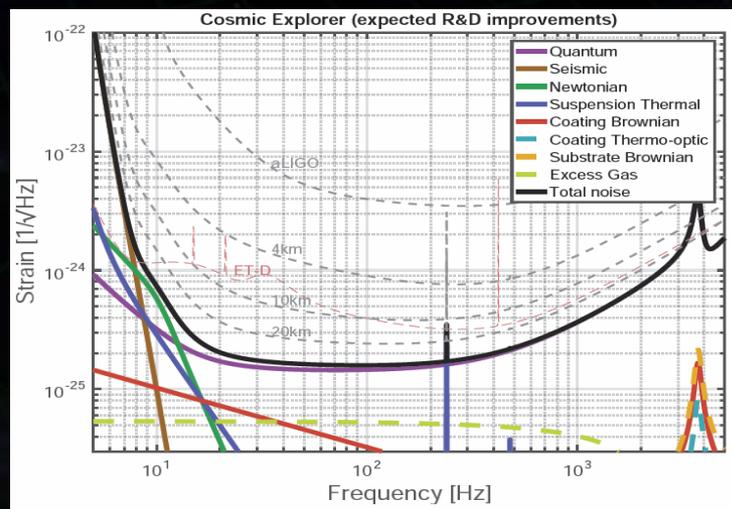
* 欧州: ET (Einstein Telescope)

感度: さらに一桁の改善,
長基線長 $\sim 10\text{km}$,
地下サイトに建設, 低温干渉計



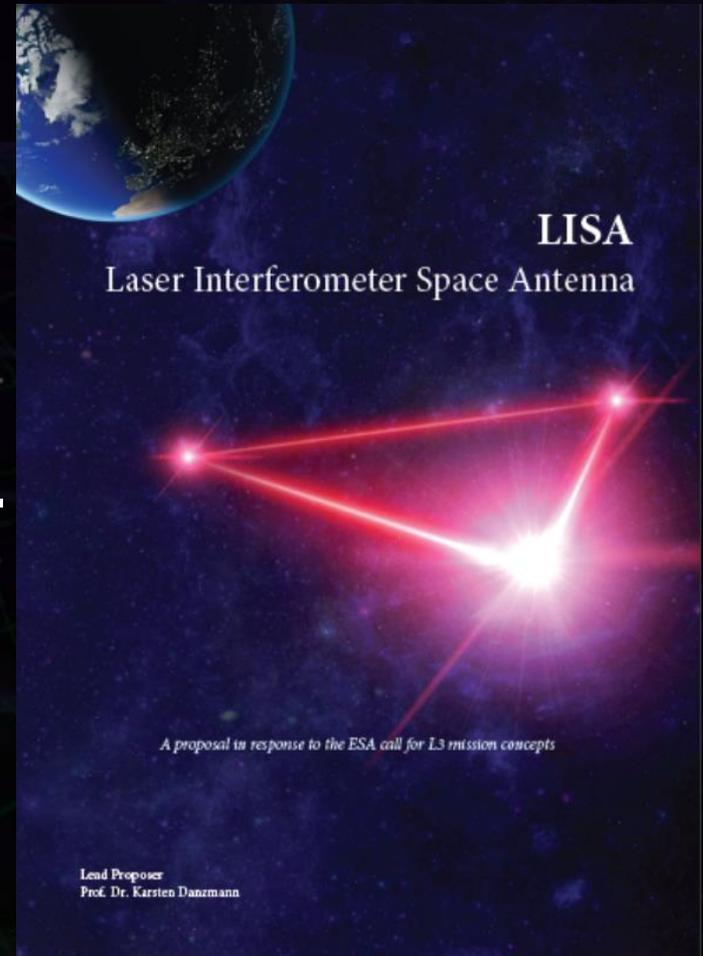
* 米国: CE (Cosmic Explorer)

感度: さらに一桁の改善,
長基線長 $\sim 40\text{km}$,
地上サイトに建設, 低温(?)干渉計



宇宙重力波望遠鏡 LISA

- **欧州**: ESA L3 (2034年)として重力波ミッション選定.
 - * その実現手段の検討 (GOAT 2013-14年).
 - * ミッション公募 (2017.1)
→ **LISA方式が採択** (2017.7).
- **米国**: LISAに参加する方針で議論.
- **中国**: 急速に立ち上がっている.
 - * 国の主導・サポート
 - * Taiji, TianQin の2つの提案.



<https://www.elisascience.org/articles/elisa-mission/lisa-mission-proposal-l3>



宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO

KAGRA (~2017)

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

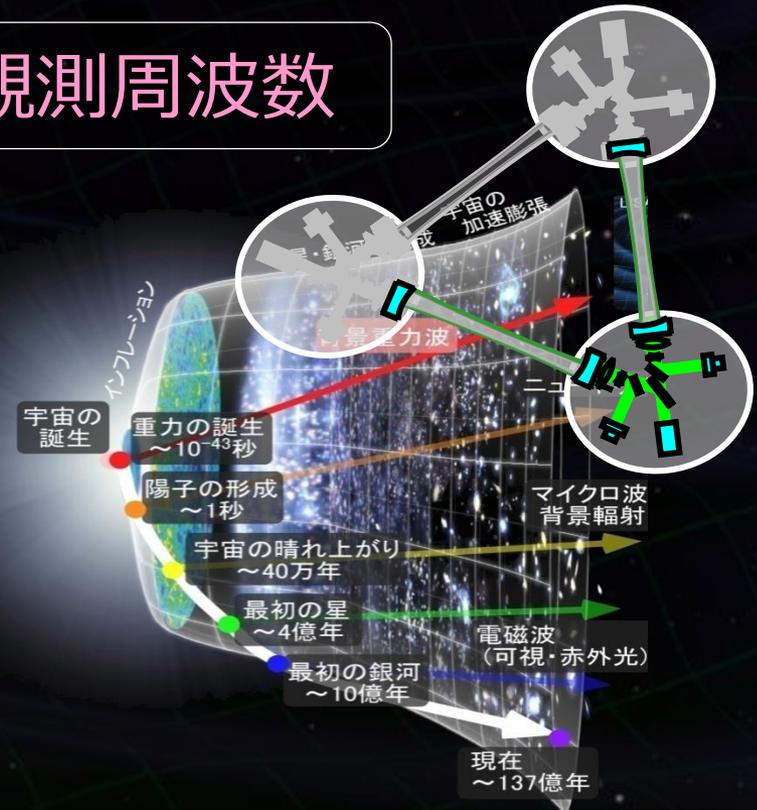
B-DECIGO (~2020年代後半)

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

異なった科学目標・観測周波数



B-DECIGOのミッション要求と構成

ミッション要求：

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

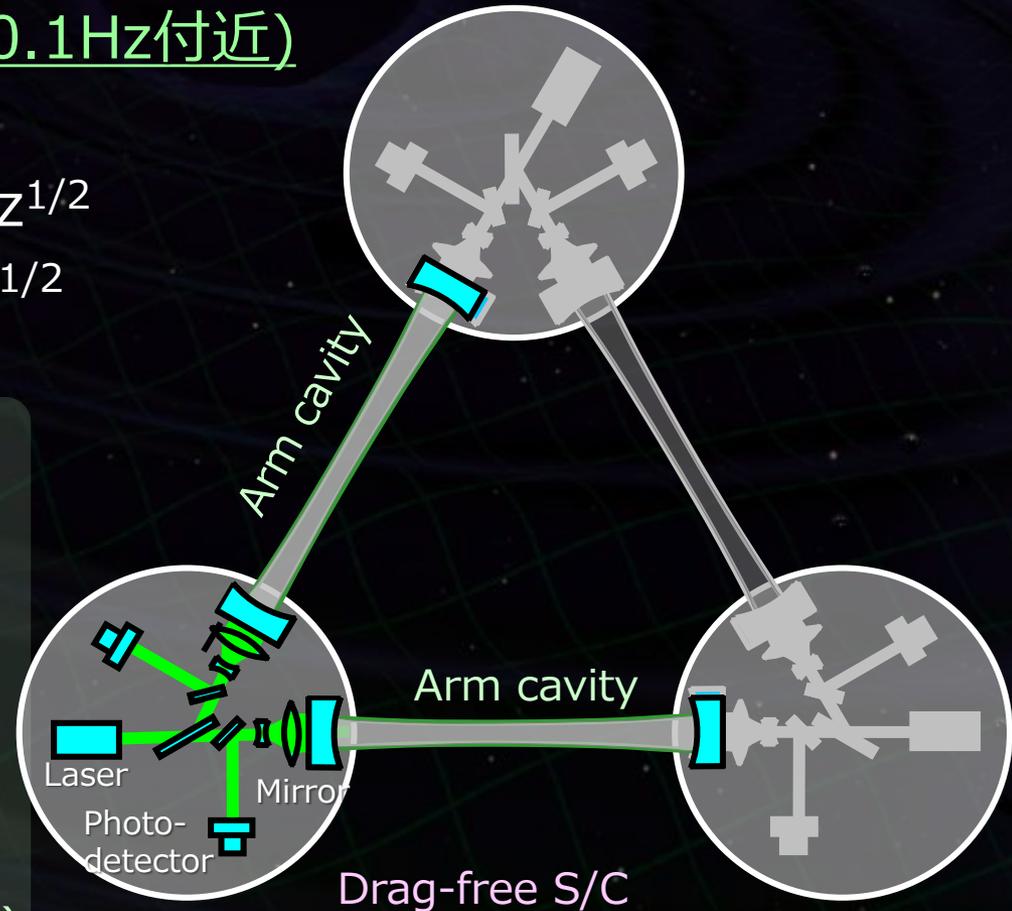


* 変位感度 $2 \times 10^{-18} \text{ m/Hz}^{1/2}$

* 力の雑音 $1 \times 10^{-17} \text{ N/Hz}^{1/2}$

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?)



※ 以前のPre-DECIGOから改名.

• 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

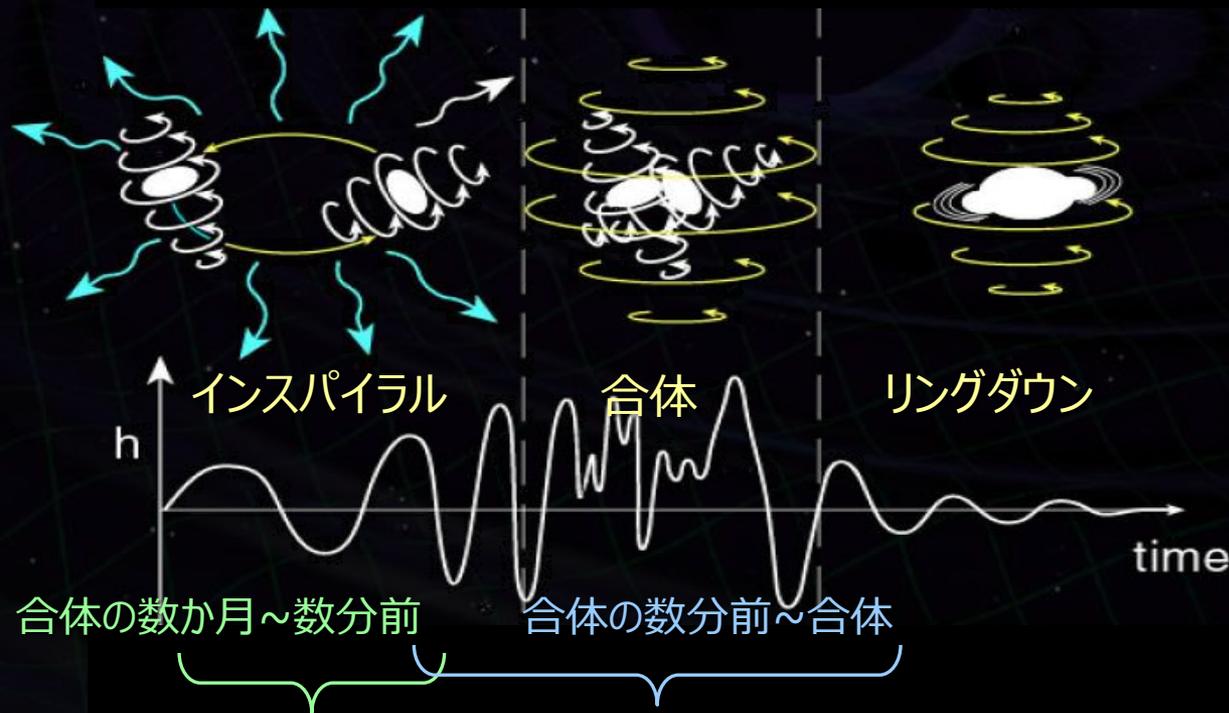
• 観測目標

- (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).

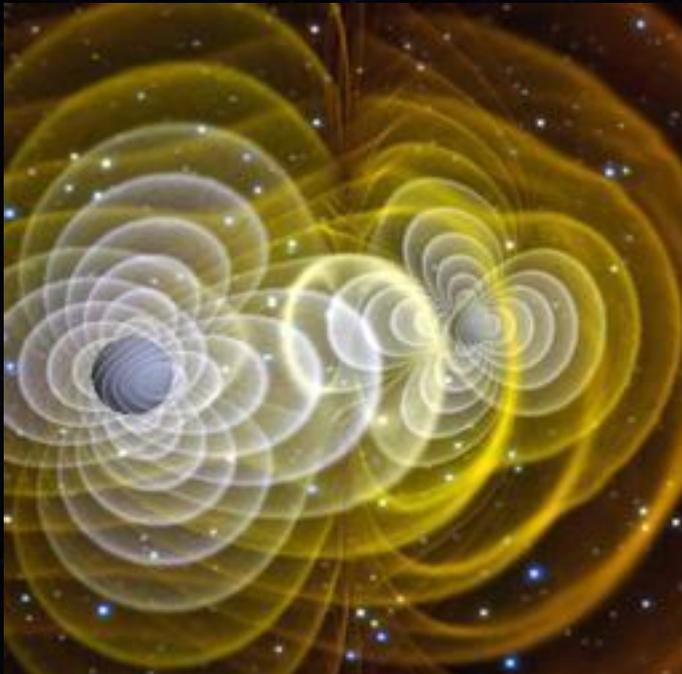
B-DECIGOでは, $\sim 10^5$ 個/年 の連星合体イベントを観測.



低周波数 → B-DECIGO
質量, 軌道, 方向, 合体予測.

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, ほぼ宇宙全体の間中質量BH合体を見通す.



銀河中心の超巨大BH形成の謎.

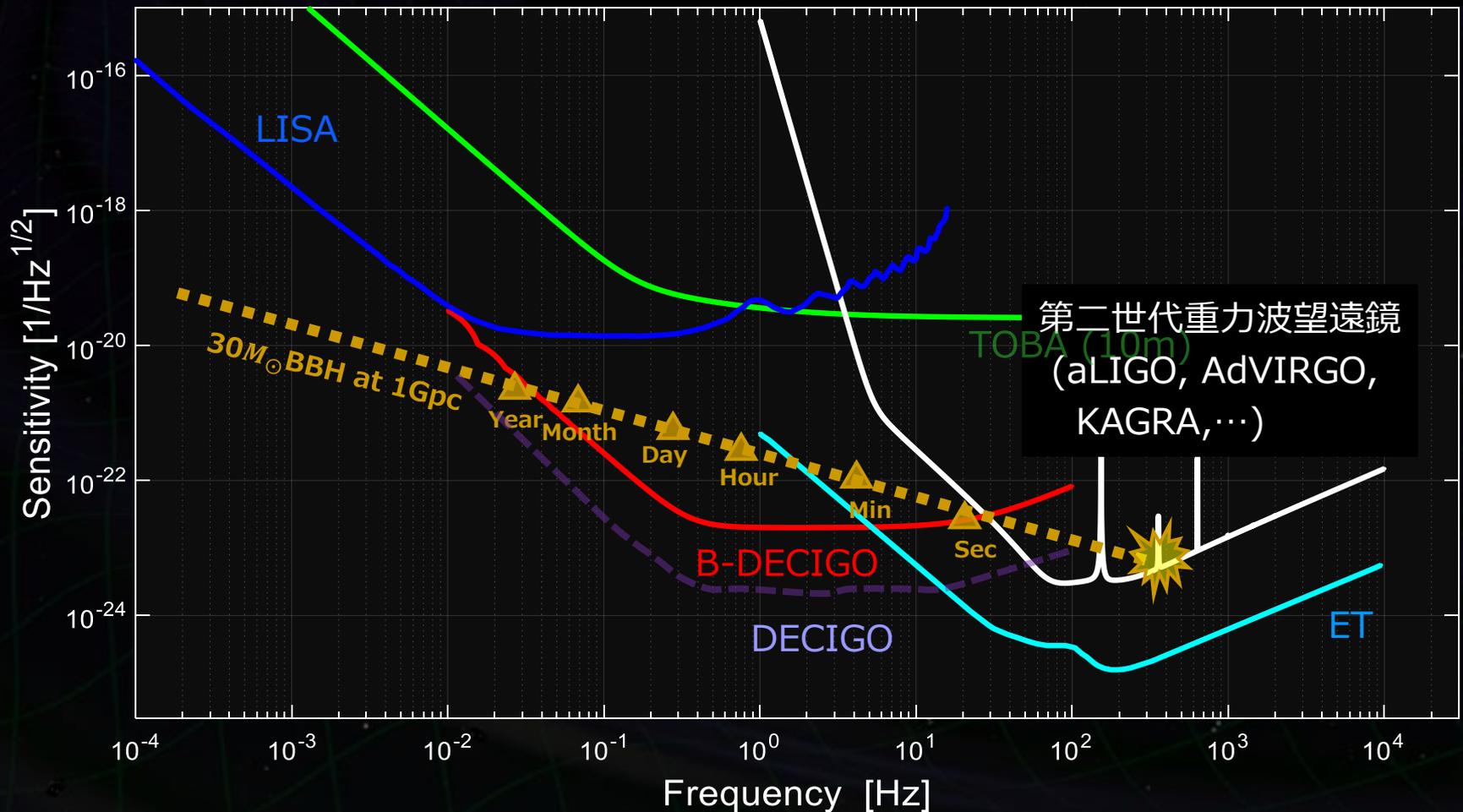
(A) 大質量星の崩壊 → 降着

(B) BHの階層的合体

- **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.

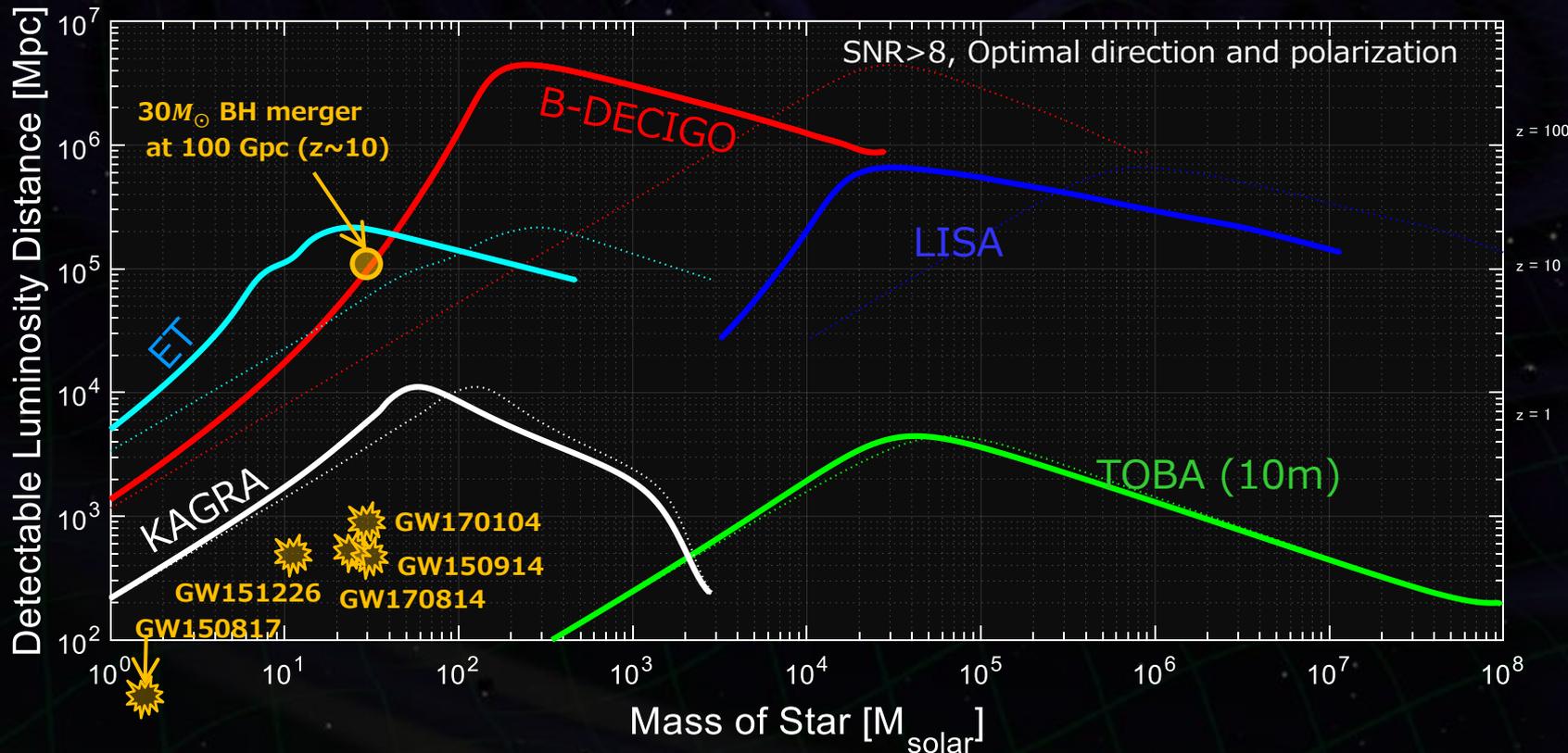
感度の比較

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



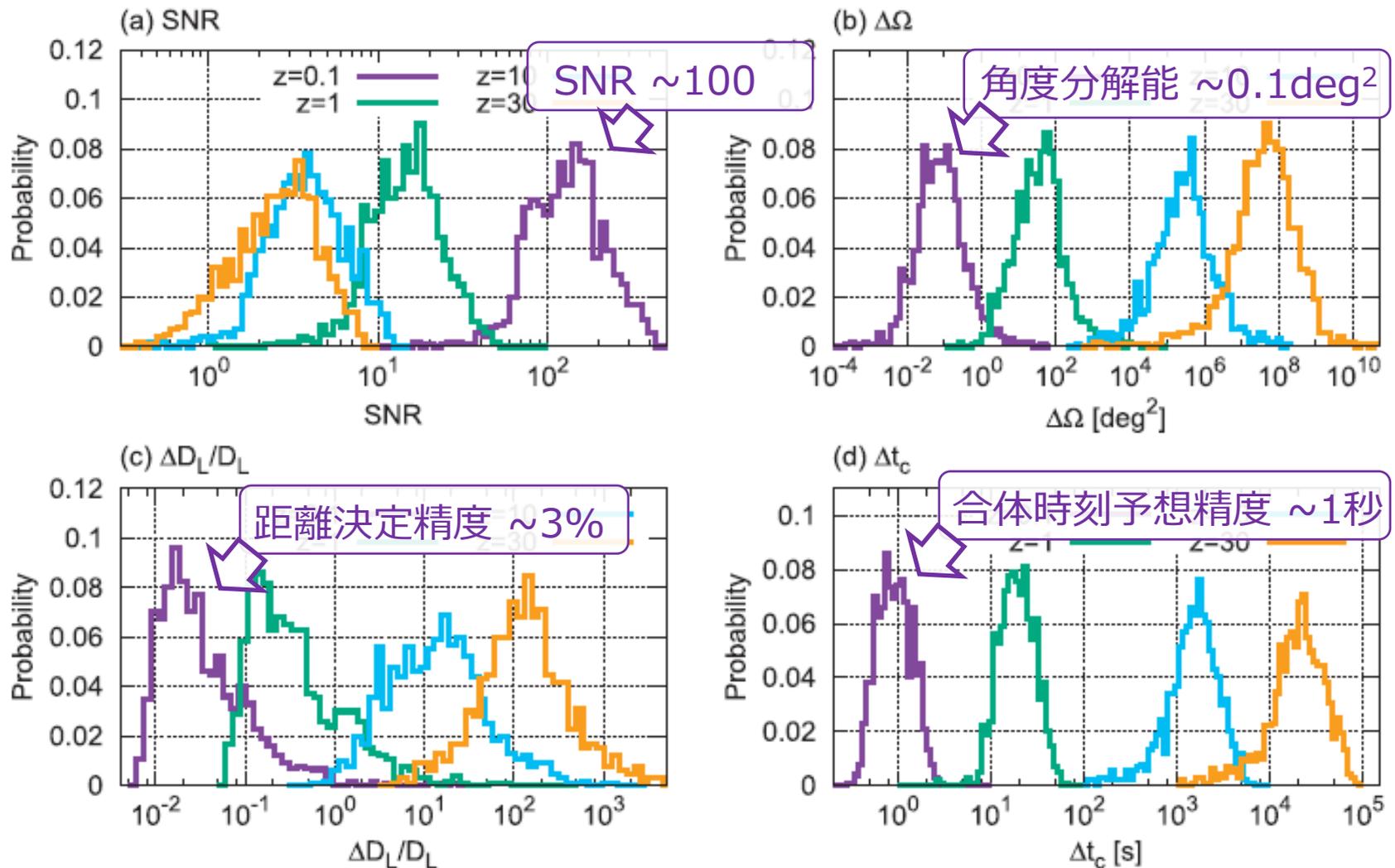
B-DECIGOでの合体観測頻度:

連星中性子星 $\sim 100 \text{ yr}^{-1}$, 連星ブラックホール $\sim 10^5 \text{ yr}^{-1}$



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), ...

B-DECIGOのパラメータ推定精度



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

B-DECIGOによる重力波と電磁波の同時観測

- 合体前に方向と合体時刻を予測。
→ 連星中性子星合体/GRB/Kilonovaの発生前・直後の電磁波観測も可能。
これまでになかった天文観測の可能性。

(例1) 合体直前からの光度曲線・スペクトル変化の観測。

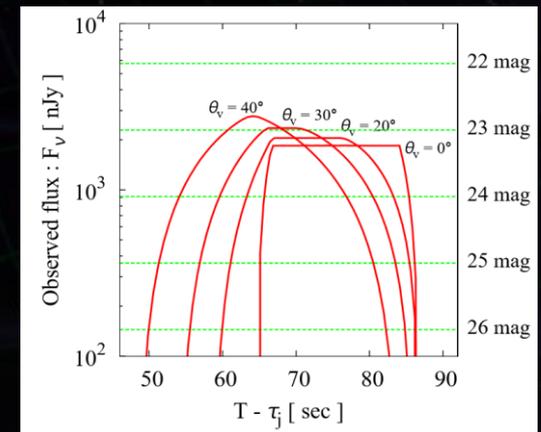
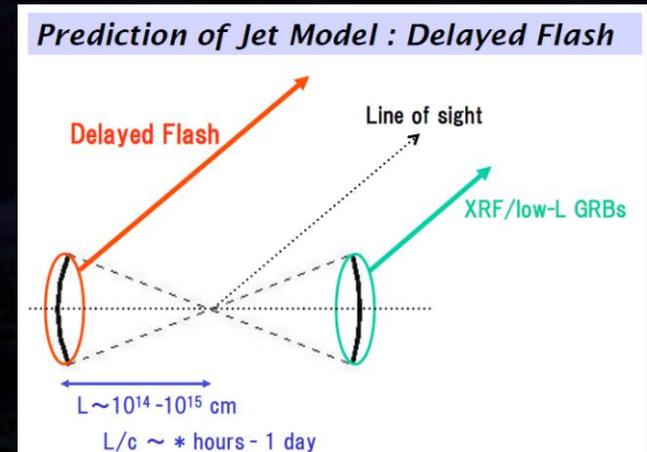
(例2) GRBで、反対側に放射されるジェットからのDelayed Flash。

山崎氏(青学大): <https://arxiv.org/abs/1711.06856>

(例3) 連星中性子星合体が、Fast Radio Burstsの起源という説(合体後1msec)。

戸谷氏(東京大): <https://arxiv.org/abs/1710.02302>

- 宇宙の加速膨張測定, 基礎物理測定。



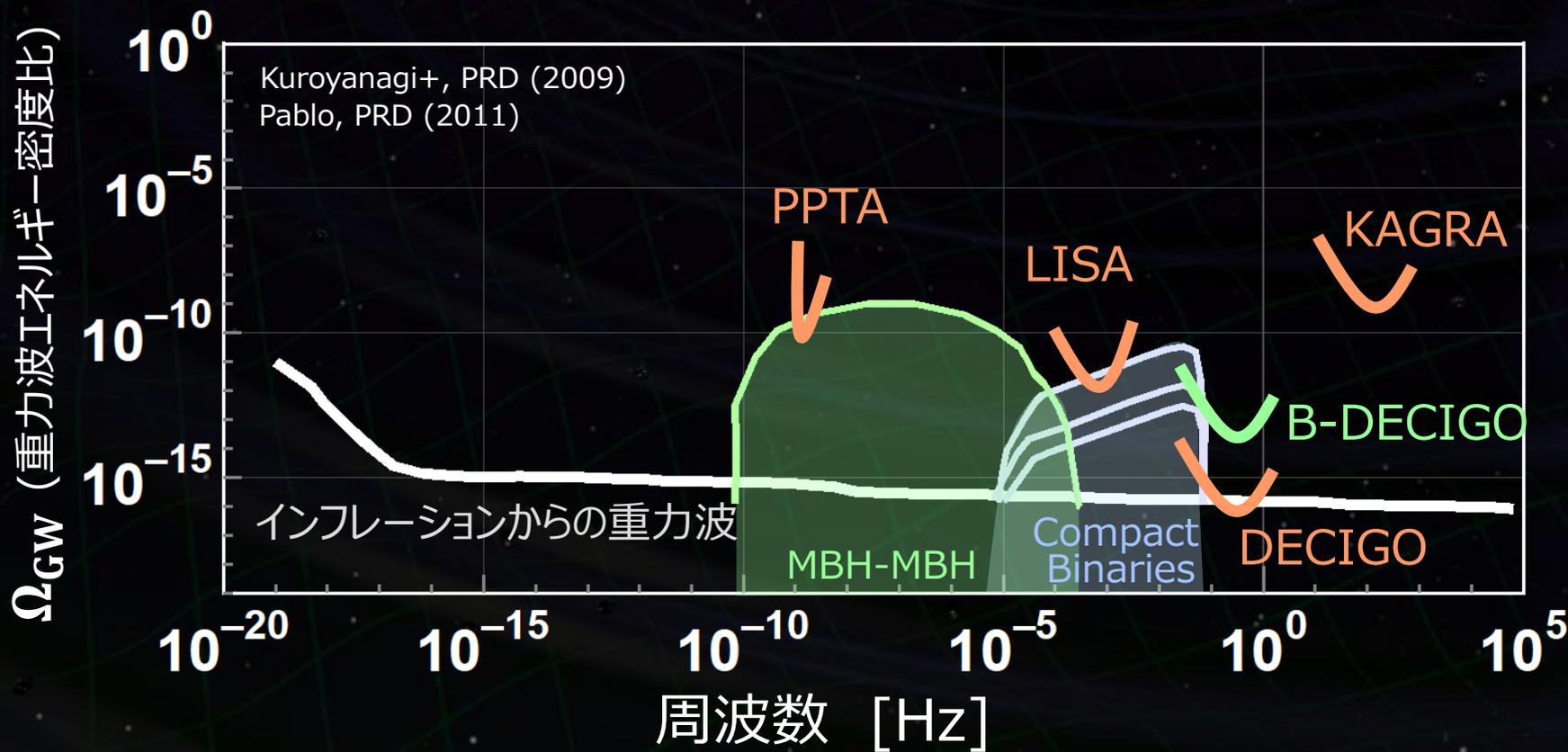
山崎氏 講演資料 (2017.11.21) より
<https://arxiv.org/abs/1711.06856>

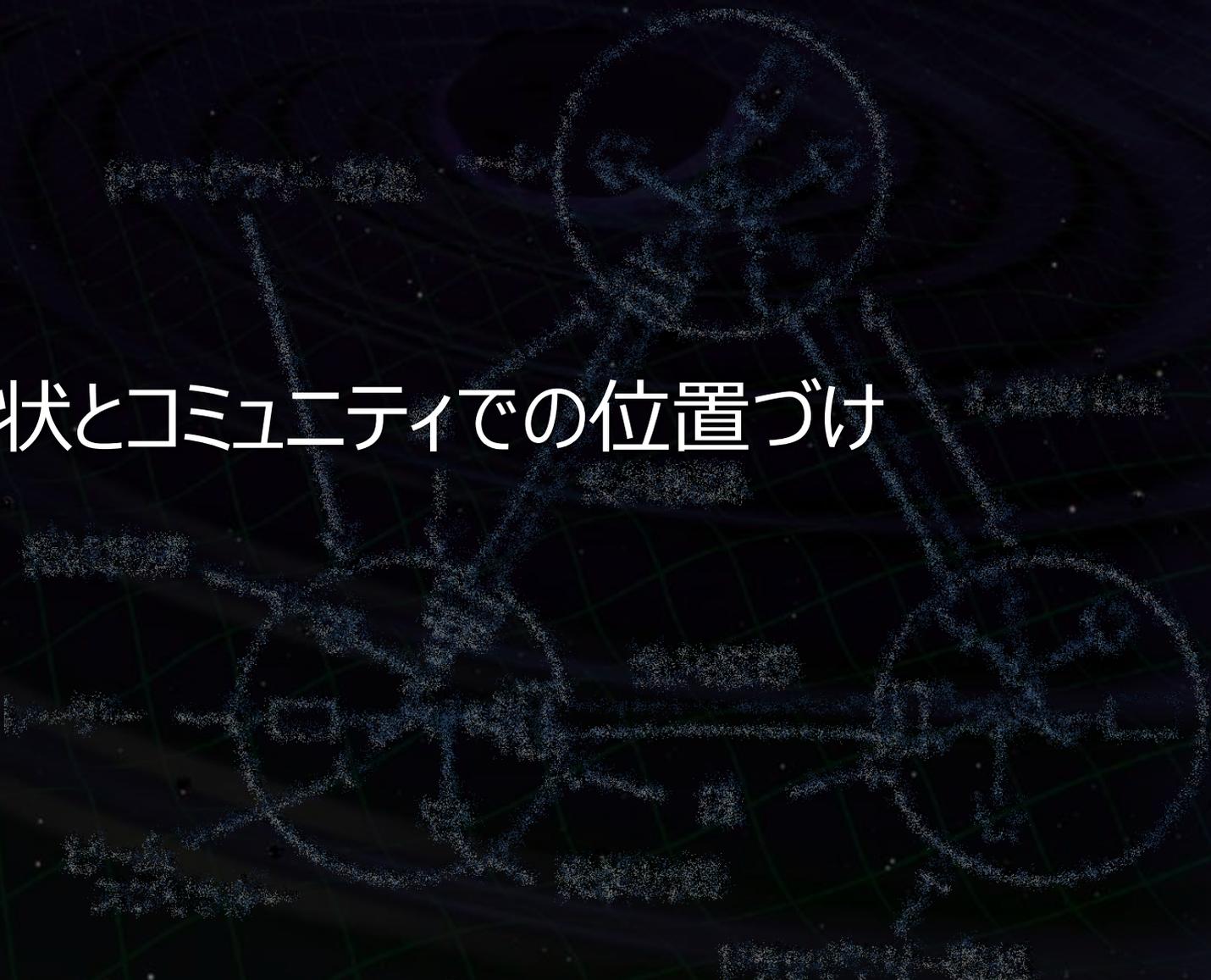
観測目標 (3) : 前景重力波の理解

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.





現状とコミュニティでの位置づけ

活動の現状

- 2001年：宇宙重力波望遠鏡DECIGOが提案される。
その後のコラボレーション内議論を経て、前段階として DPF
とともに **Pre-DECIGO** ミッションが定義される。
- 2007年頃：JAXA戦略経費などで基礎コンポーネント開発。
レーザー干渉計, 試験マスモジュール, 安定化光源,
低雑音スラスタ, ドラッグフリーなど。
- 2015年：LIGOによる重力波初観測を受けて、B-DECIGOの
サイエンス目標を再定義、ミッション検討を本格化。
→ 2016年に **B-DECIGO**に名称変更 (DPF WGは終了)。
- ミッション検討：科学目標, システム検討, 組織の再編。
- 技術検討：主要技術課題の洗い出しと実証計画の策定。

B-DECIGO検討の見通し

- 2022年までにミッション提案できるよう準備を進める。
 - ミッション提案 (MDR: ミッション定義審査) に必要な準備.
 - ミッション要求・システム要求へのブレークダウン.
 - JAXA/メーカーを含めた, 衛星システム検討. コスト見積.
 - 搭載機器について, 技術開発計画の立案と実施.

現在の活動: 安定化レーザー光源, レーザー干渉計テストベンチ開発, 外力雑音評価セットアップ, スラスタ評価, 軌道・ドラッグフリー設計, ドラッグフリー実証モデル開発.

DECIGO組織体制 (再編検討中)

代表：中村 (京都大)

副代表：安東 (東大理), 瀬戸 (京大理), 川村 (名古屋大)

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 (京大理), 船木 (JAXA), 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), 河野 (JAXA), 武者 (電通大)

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)

Design phase

B-DECIGO

リーダー：安東 (東大理)

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)

スラスター

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)

これまでの経緯

- ・CRCでの議論:
 - 「CRC将来計画シンポジウム」 (2010年9月)
 - 「宇宙線分野の現状と将来計画」 (2011年6月)
 - 「CRC将来計画タウンミーティング」
(2014年3・7月, 2015年1・12月, 2017年12月).
- ・2015年2月 JAXA RFI (研究領域の目標・戦略・工程表)提供.
→ マスタープラン2017に B-DECIGOをCRCから推薦
- ・2018年7月 日本学術会議 天文宇宙分科会 大型計画 LOIに
「宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO」として提出.

日本学術会議・学術の大型研究計画 マスタープラン2020

天文学・宇宙物理学の大型計画

→ https://alma-intweb.mtk.nao.ac.jp/~fukagwms/scj_astphys/loi.html

重力波研究コミュニティ

・国内の重力波研究者コミュニティ

JGWC (Japan Gravitational Wave Community) : 325名



コンセンサス (2018年6月総会で再確認):

「日本の重力波コミュニティ(JGWC)では、まず**KAGRA**による重力波の観測を最優先とし、その後、宇宙重力波望遠鏡**DECIGO**またはその前哨ミッションによる重力波天文学の展開を目指す、という方針に合意している。」

日本の重力波コミュニティの現状と今後

・現状:

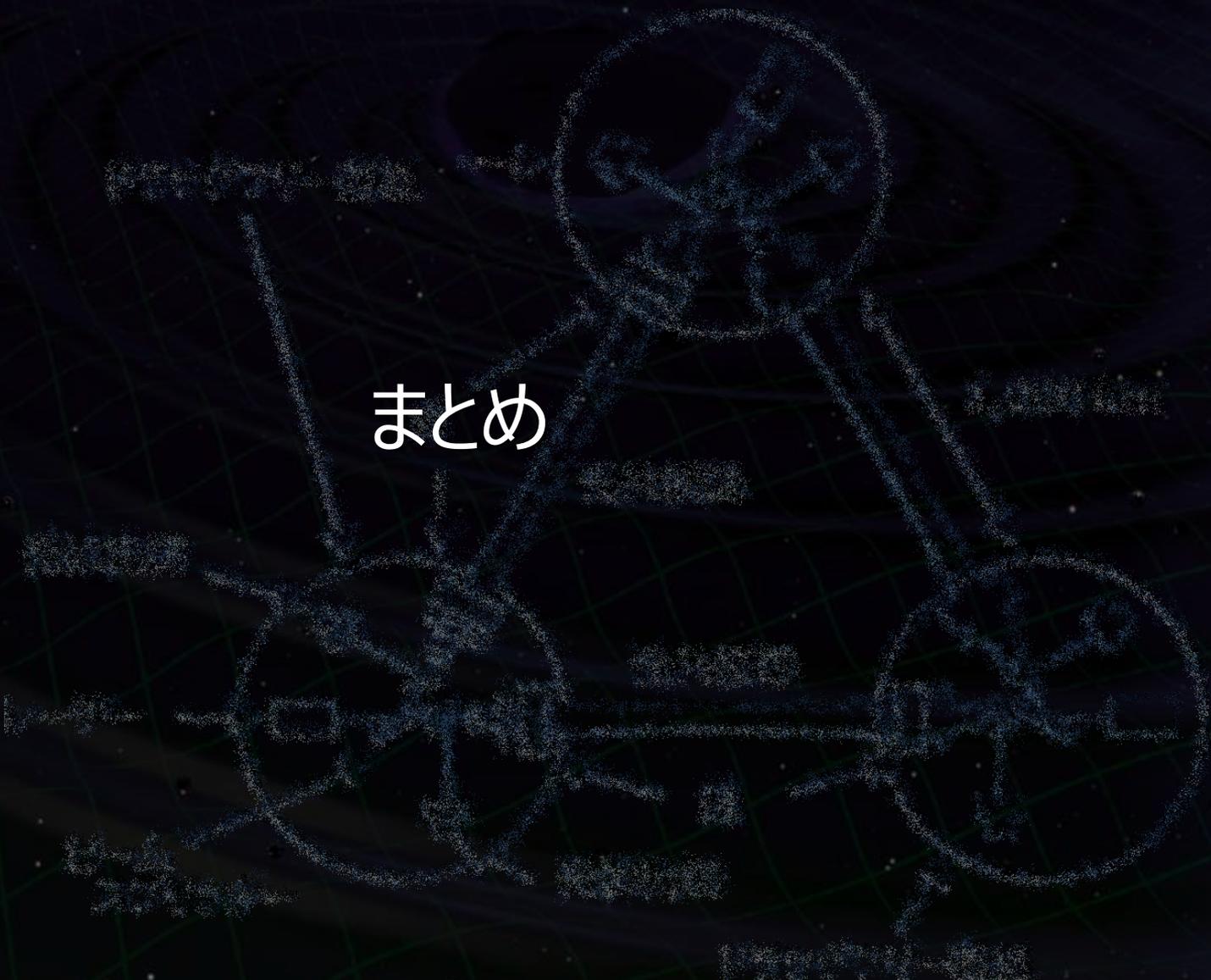
- **KAGRA**建設中. 2019-20年の観測開始見込み (LIGO/Virgoとの同時観測).
- **B-DECIGO**は, 小規模に検討・基礎開発を進めている.

・今後:

- **KAGRA**: 観測開始後, 感度向上と観測運転を繰り返す. アップグレード計画については観測開始以降に議論を開始.
- **B-DECIGO**: 次回公募でミッション提案できるように準備を進める.
- **LISA**コンソーシアムへ参加. コンポーネントの提供. 技術協力.

B-DECIGOとLISAへの参加

- LISAコンソーシアム(LISAの研究者コミュニティ)への参加 (次講演).
 - * 日本からは2つが参加申請 (それぞれ10-15名程度).
 - (1) 理論グループ: 代表・佐合さん (九州大)
 - (2) 実験グループ: 代表・和泉さん (JAXA)
 - * 日本のコミュニティからLISAに参加する意義
 - 国際的なビジビリティの向上 → 将来の国際協力への布石.
 - 宇宙重力波望遠鏡での研究成果, 実質的な経験の蓄積
→ B-DECIGOを進めるうえでの重要な知見.
- B-DECIGOの推進とLISAコンソーシアムへの参加の2つの活動は,
連携を取りながら進める. 技術面や国際協力について相乗効果が大きい. 一方, 人員規模, 予算規模・予算枠, 開発の時間スケールが異なり両立可能.



まとめ

今後の展開の可能性

・地上望遠鏡 (10 Hz-数 kHz)

- *2015年 : aLIGOによる重力波初観測.
- *2017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.
- *2030年代 : 第3世代望遠鏡 ET, CE の稼働.

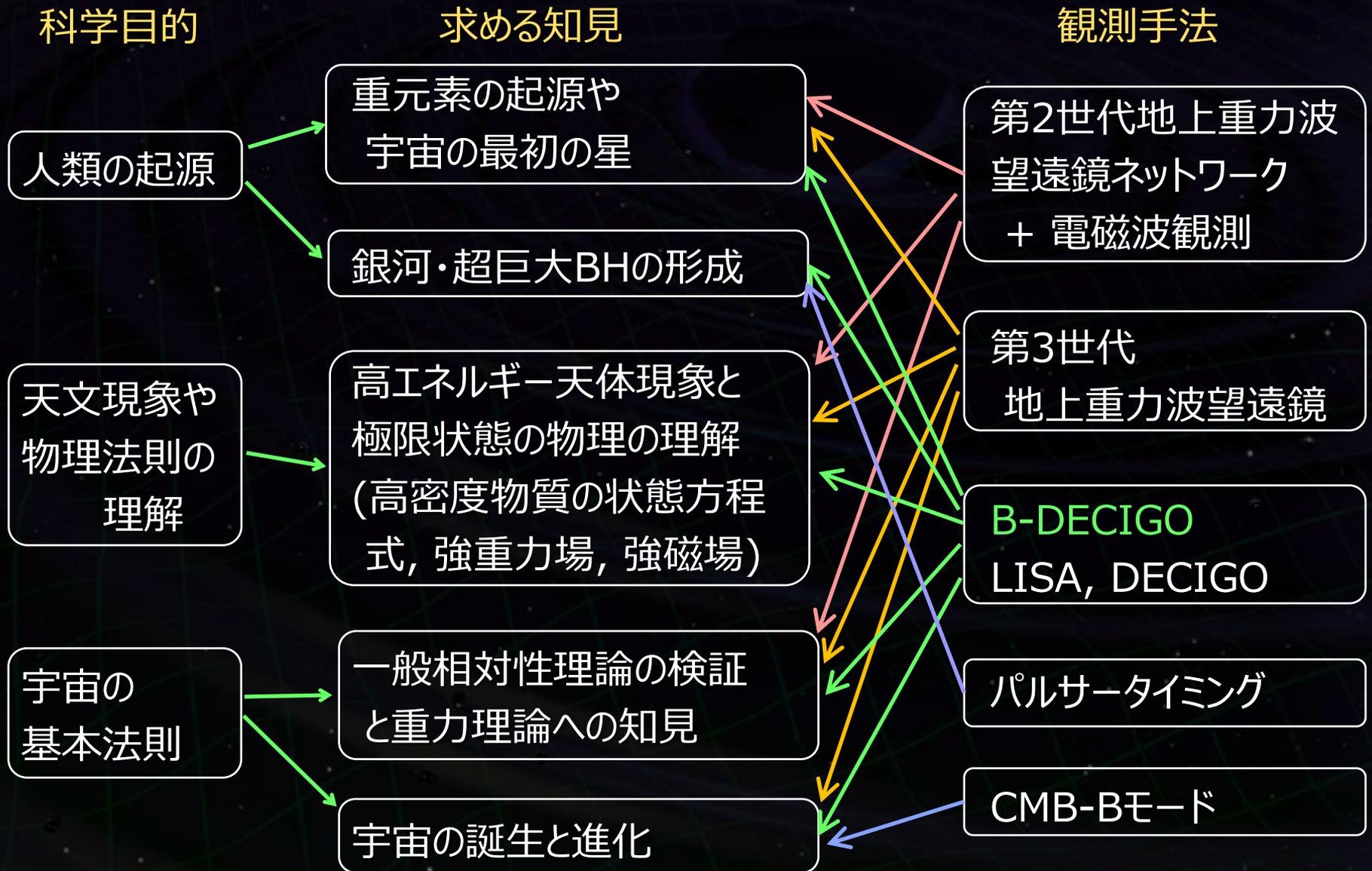
・宇宙望遠鏡 (0.1-10 Hz)

- *2020年代末 : B-DECIGO による観測.
- *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.

重力波天文学の科学的意義 (個人的観点)



まとめ

- **B-DECIGO** は, 重力波観測・天文学において新たな可能性を切り拓く宇宙重力波望遠鏡.
 - 観測周波数帯 **0.1-1Hz**: 地上重力波望遠鏡, 欧州の宇宙重力波望遠鏡LISAと相補的な科学的目標.
 - 多くのイベントレートが期待できる:
 - 連星中性子星 $\sim 100 \text{ yr}^{-1}$, 連星ブラックホール $\sim 10^5 \text{ yr}^{-1}$
 - 連星合体の事前予測が可能 ($z=0.1$ のイベントに対して, 角度分解能 **0.1deg²**, 合体時刻 **1秒**).
 - 電磁波望遠鏡による合体の瞬間の観測.
 - 将来の**DECIGO**による初期宇宙観測のための知見.
- 従来の提案を再定義し, ミッション検討・根幹技術開発を進める.
- JAXA戦略的中型ミッションとして **2020年代後半**の実現を目指す.



終わり