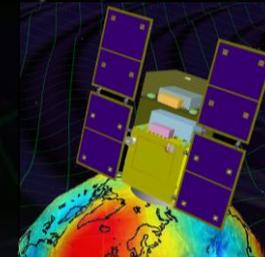
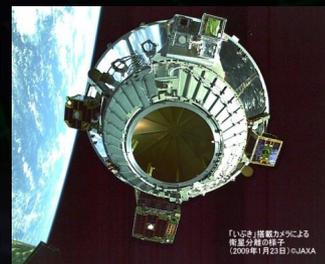
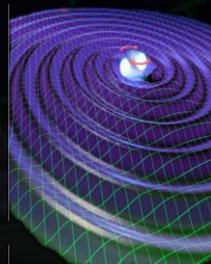
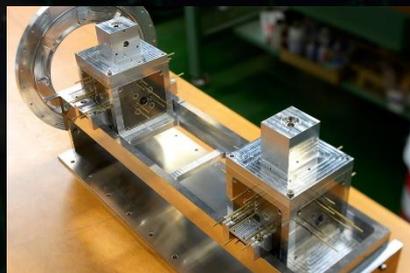
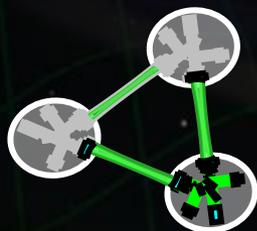
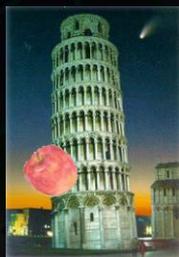


# DECIGO戦略と取りまく状況

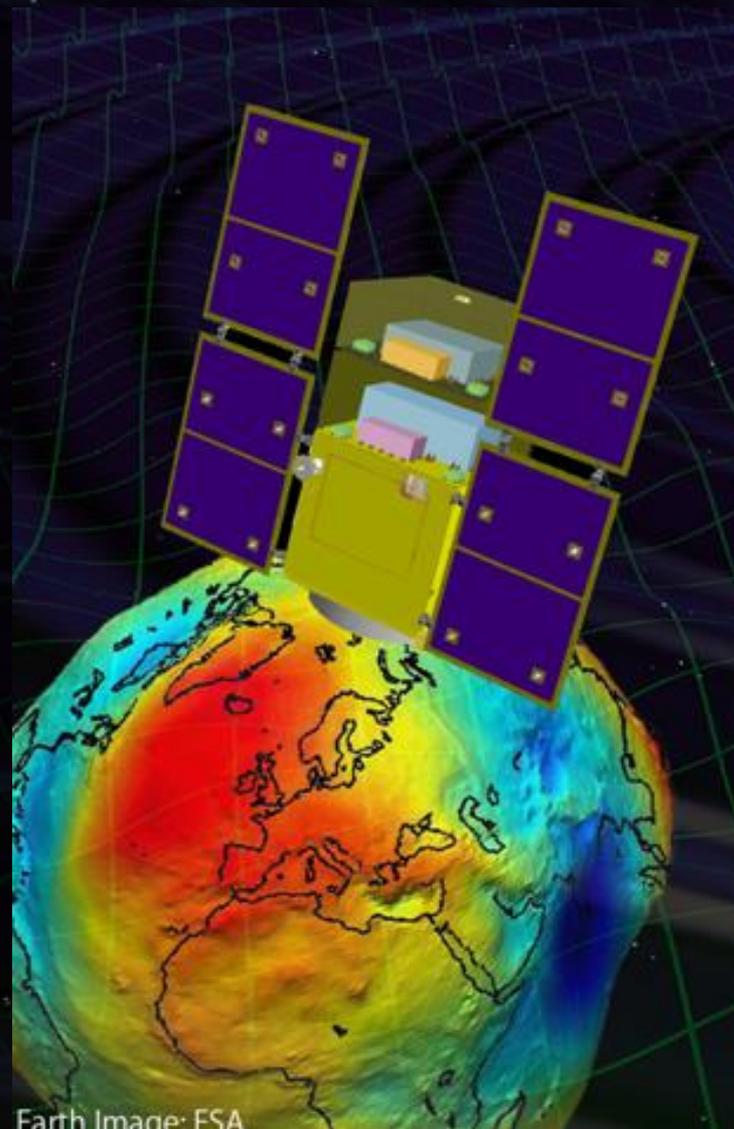
安東 正樹 (東京大学 / 国立天文台) + DECIGO WG



# DECIGO WG Members



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, 穀山涉, 苔山圭以子, 古在  
由秀, 小鳶康史, 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, 疋田涉, 姫本宣朗, 平林久, 平松尚志  
, 福嶋美津広, 藤田龍一, 藤本真克, 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)



Earth Image: ESA

# 背景

# 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO



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

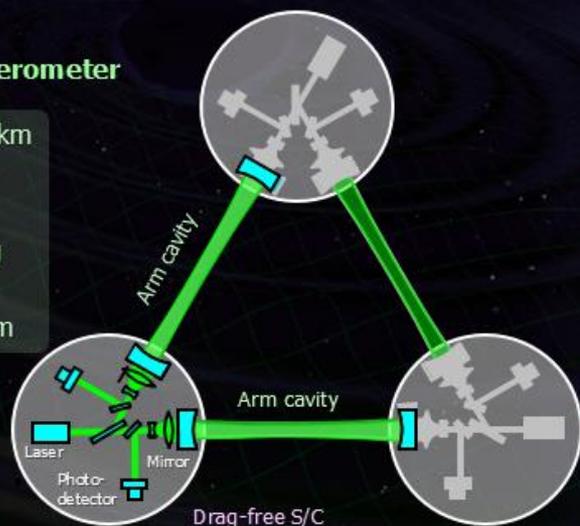
宇宙のはじまりを直接観測する。

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

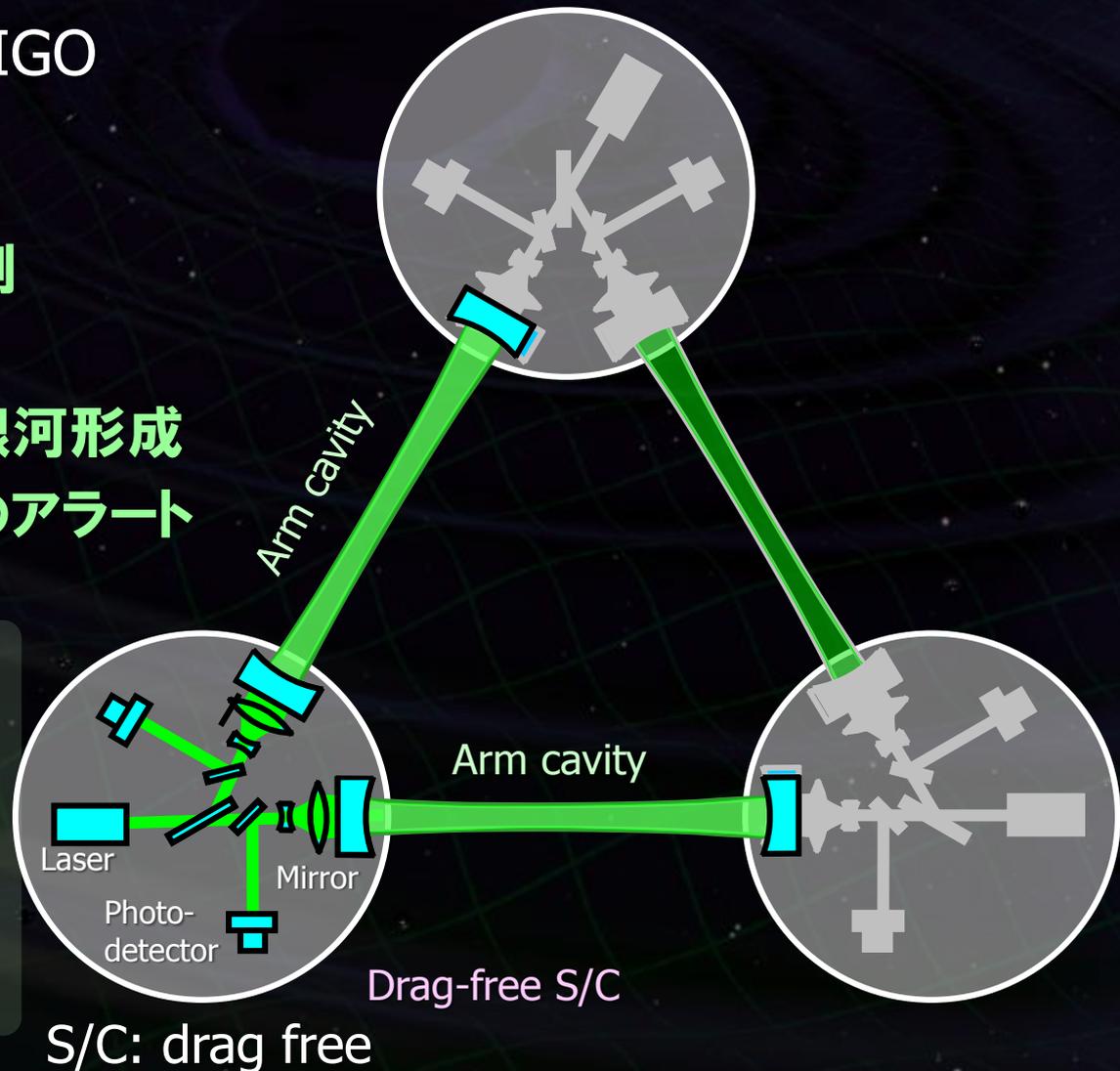


Direct probe to  
the history of the Universe

## 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO

- 初期宇宙の直接観測
- 遠方中性子星連星観測  
→ 宇宙論パラメータ
- 中間質量BH合体 → 銀河形成
- 地上重力波望遠鏡へのアラート

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

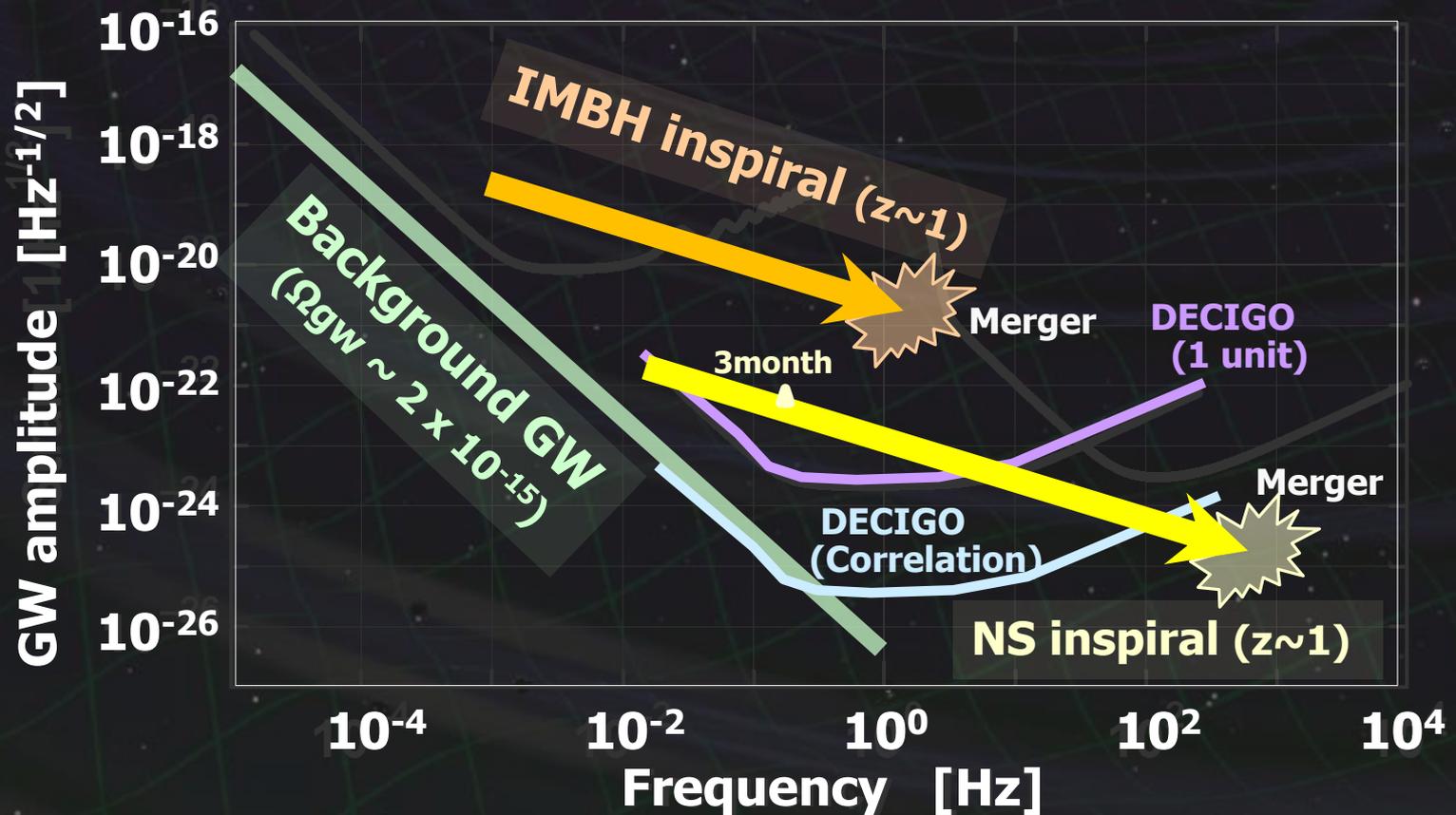


# DECIGOの観測対象

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



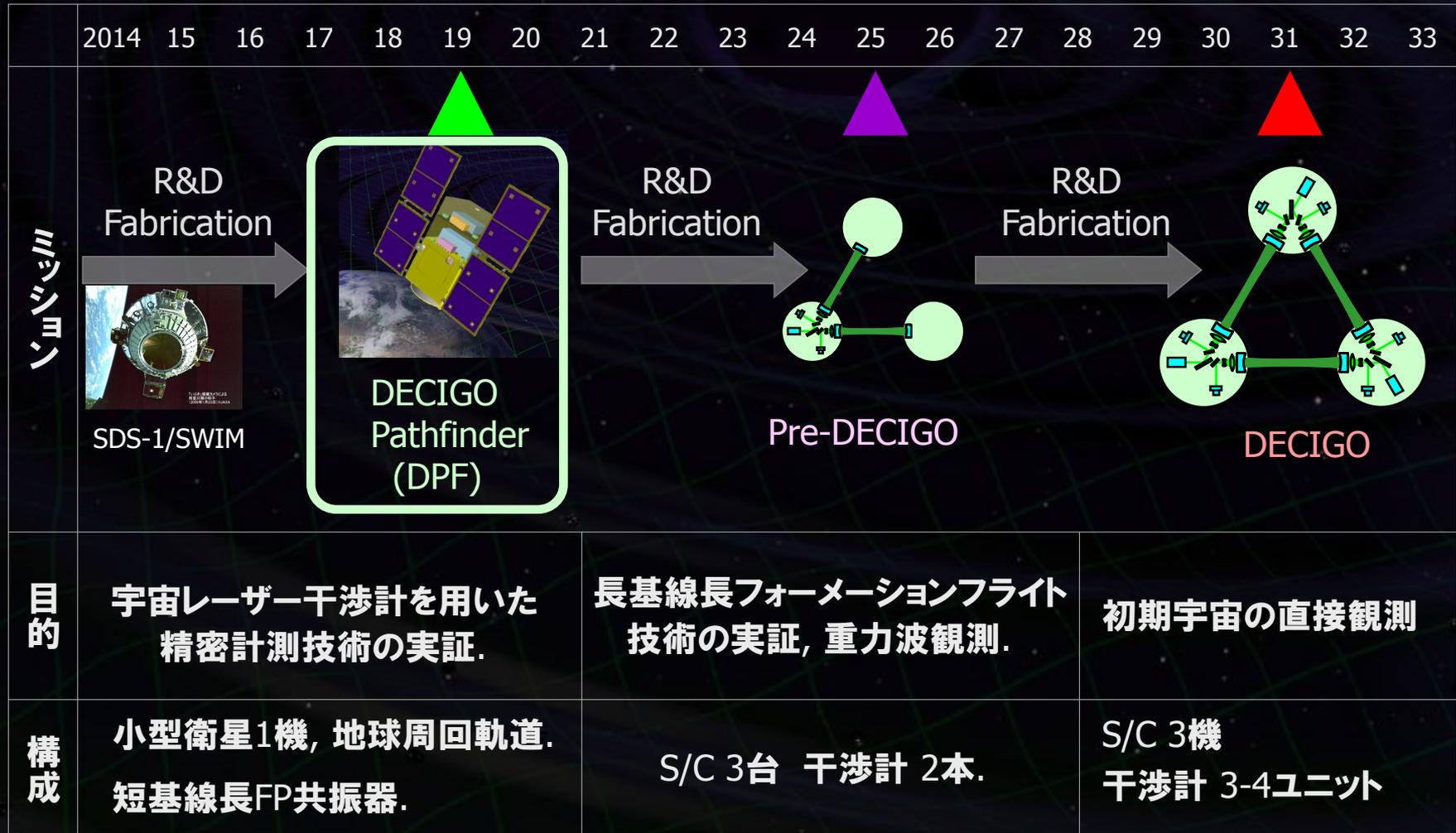
# 初期宇宙の観測



Background:  
original figure by  
NASA/WMAP Science Team

# 以前(~2014)までのDECIGOロードマップ

Figure: S.Kawamura



- JAXA・イプシロン搭載小型計画に応募していた。
  - 2014年2月末締め切り。
  - 理学4ミッション (光赤外, X線, 重力波, 月科学)  
工学3ミッション の応募。
  - 選定の流れ：
    - 第1段階: 理学委員会, 工学委員会でそれぞれ0-2を選定。
    - 第2段階: 宇宙研のサポートにより洗練させ, 再提出。
      - 理学委員会, 工学委員会でそれぞれ0-1を選定。
    - 第3段階: JAXA内での議論を受け, 0-1ミッションを選定。



2014.4.28 DPFは第1段階で落選

- DPF WGとして戦略経費のサポートを受け、WG活動  
→ 2008年に続き、2014年に ミッション提案。  
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が採択されたことから、KAGRAが重力波コミュニティの最優先プロジェクトとなった。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。

## • 今後の見通し

- 少なくとも今後3-5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.**

## 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

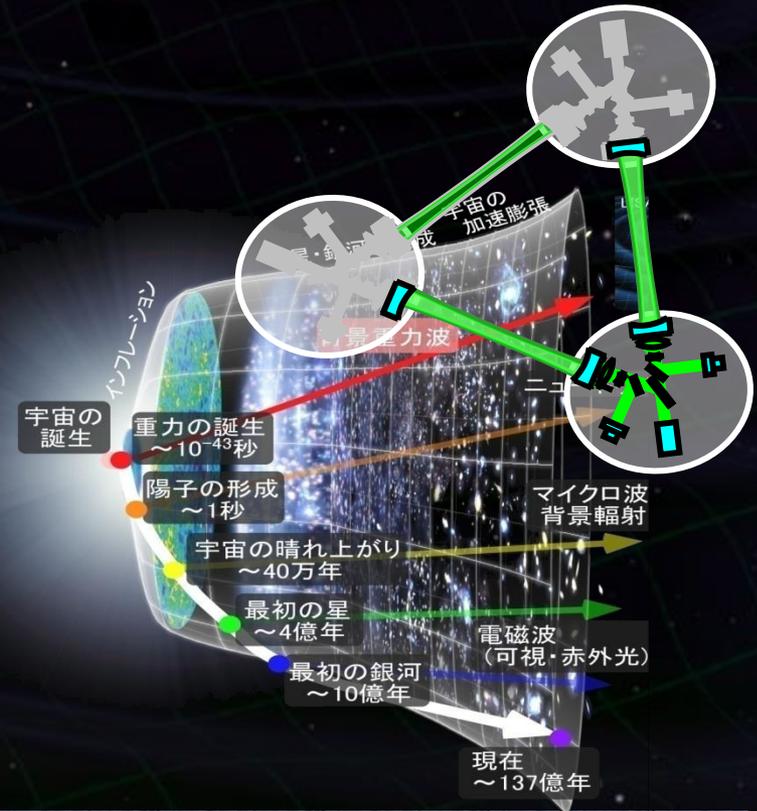


## DECIGO (~2031)

Space observatory

→ 低周波数の重力波

目標: 重力波天文学の展開



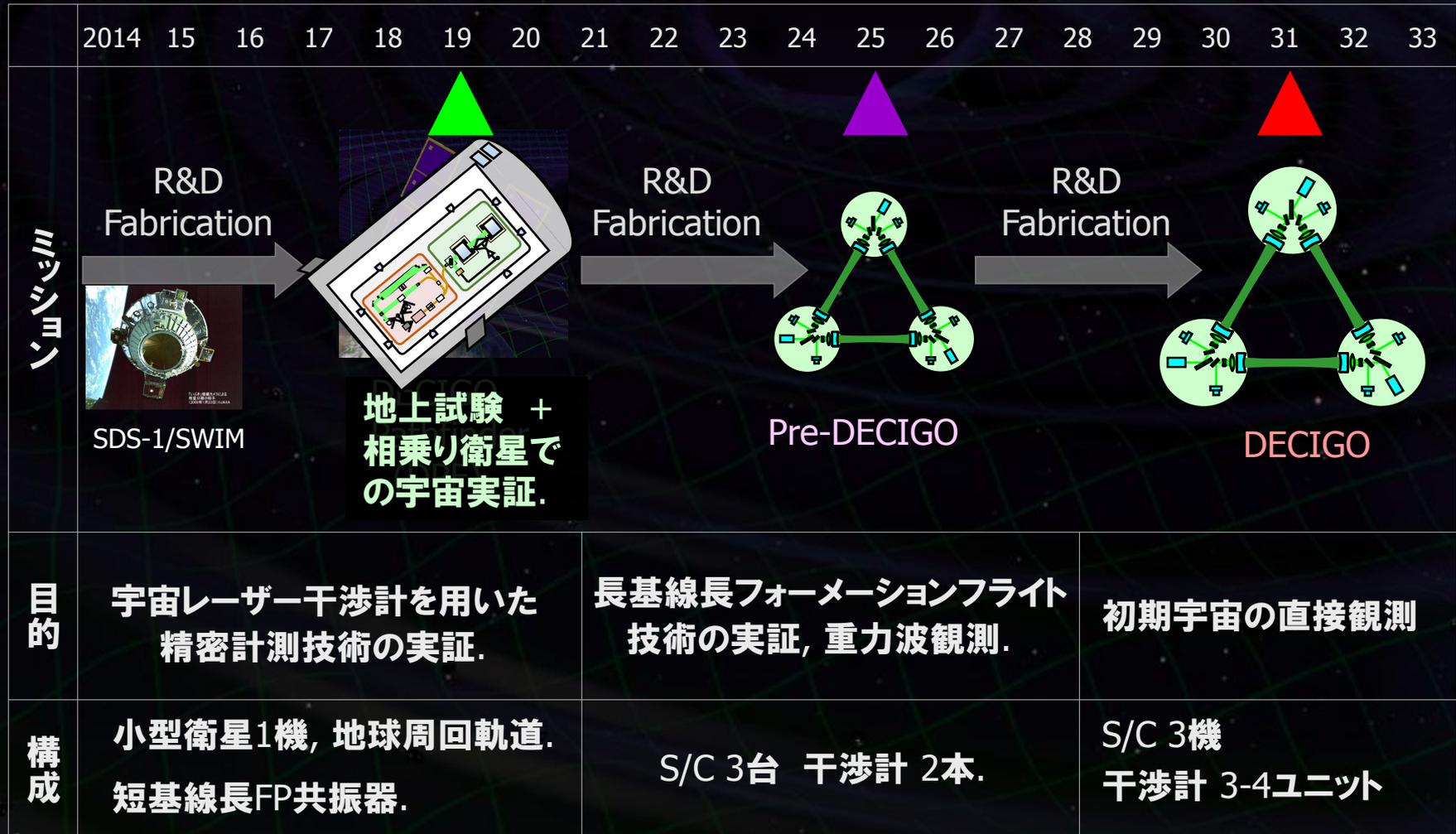
- JGWC (Japan Gravitational Wave Community) :
  - **メンバー総数** : 325名 (2014年時点)
  - **情報の交換** (セミナー/会議情報, 公募情報, ...)
  - **長期的なコミュニティ戦略の議論**.



# DECIGOへ向けた戦略

# DECIGO実現へのロードマップ

Figure: S.Kawamura



- **今後5年程度**: サイエンス/ミッション検討, 根幹技術開発.
  - 根幹技術は個々に技術成熟度向上をはかる (~5年).
  - 相乗り衛星等の機会の模索.
  - 航空機実験などによる実証, 環境試験.
- **今後10年程度**: Pre-DECIGO(仮)の実現を目指す.
  - 重力波観測を目的としたサイエンスミッション.
  - DECIGOの1/10スケール.
  - JAXA中型ミッション (300億円). 国際協力の可能性.
- **その後**, DECIGOの実現を目指す.
  - 初期宇宙の観測をミッション目標とする.
    - そのためのミッション要求・システム要求の明確化必要.
  - 国際協力戦略は要検討.

## • DPF体制

### - JAXA宇宙理学委員会 :

Pre-DECIGO(仮)に相当するWGとして再定義の上で継続との希望を提出している (DPF WGは, 継続/終了審査を受ける必要がある).

### - DECIGO組織体制 : 再検討の必要あり.

## • 国際協力体制 :

### - まず国内単独での実現を検討 (~1年).

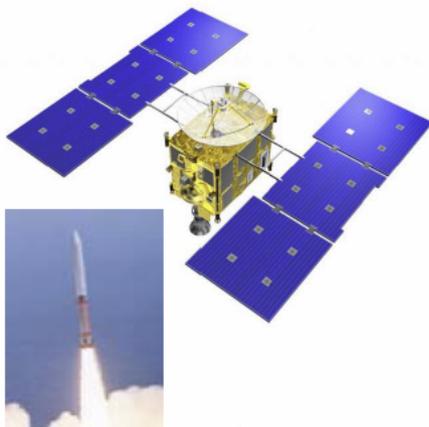
→ もう少し継続か.

### - 国際協力の方策を模索.

内閣府・宇宙政策委員会・宇宙科学・探査部会 資料より (2013年9月19日)

## Ⅲ. 今後の宇宙科学・探査プロジェクトの推進方策

宇宙科学における宇宙理工学各分野の今後のプロジェクト実行の戦略に基づき、厳しいリソース制約の中、従来目指してきた大型化の実現よりも、中型以下の規模をメインストリームとし、中型(H2クラスで打ち上げを想定)、小型(イプシロンで打ち上げを想定)、および多様な小規模プロジェクトの3クラスのカテゴリーに分けて実施する。



2000年代前半までの  
典型的な科学衛星ミッション  
M-Vロケットによる打ち上げ

戦略的に実施する中型計画(300億程度)  
世界第一級の成果創出を目指し、各分野のフラッグ  
シップ的なミッションを日本がリーダーとして実施する。  
多様な形態の国際協力を前提。

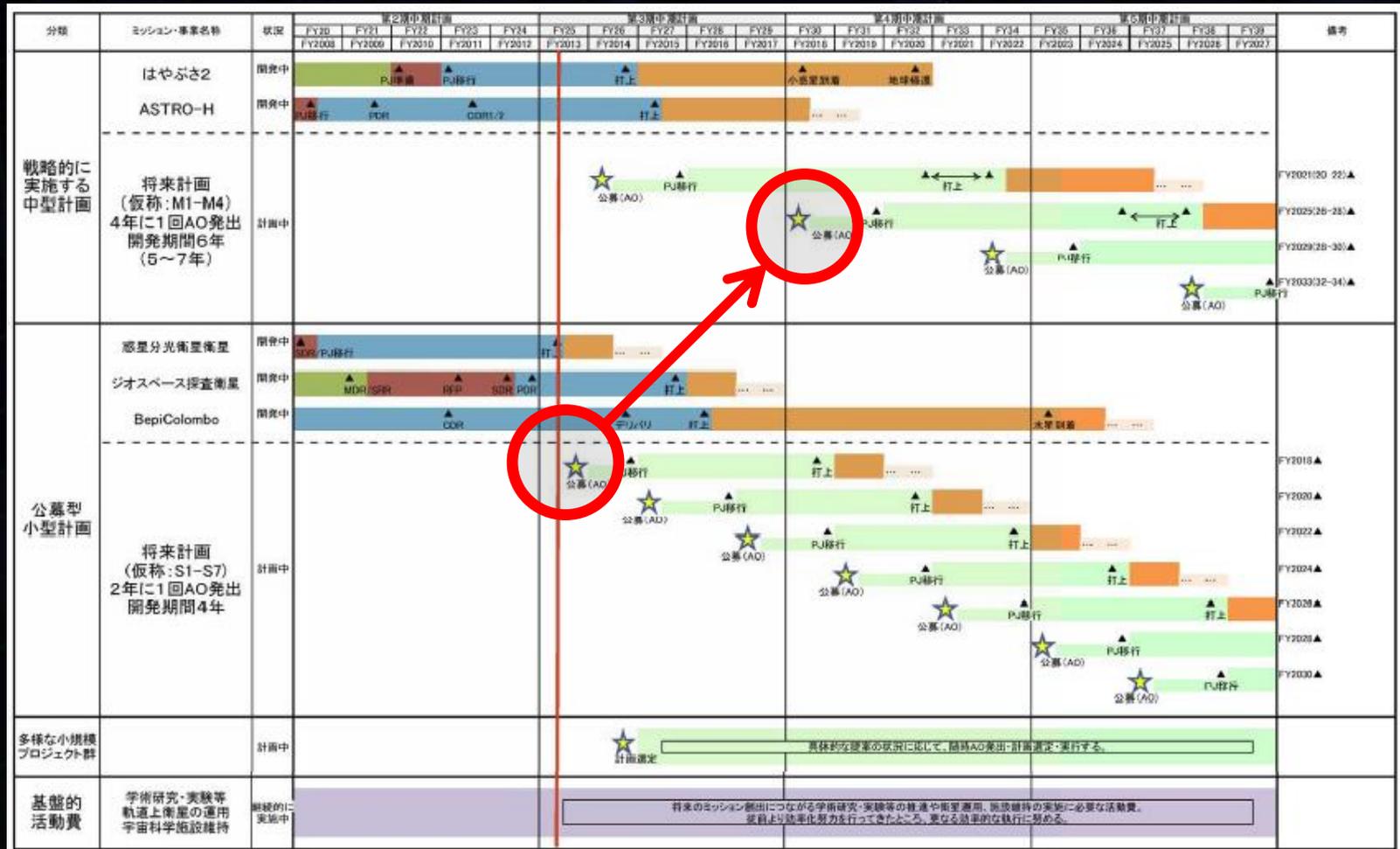
公募型小型計画(100-150億規模)  
高頻度な成果創出を目指し、機動的かつ挑戦的に実施  
する小型ミッション。地球周回/深宇宙ミッションを機動的  
に実施。現行小型衛星計画から得られた経験等を活か  
し、衛星・探査機の高度化による軽量高機能化に取り組  
む。等価な規模の多様なプロジェクトも含む。

多様な小規模プロジェクト群(10億/年程度)  
海外ミッションへのジュニアパートナーとしての参加、海外  
も含めた衛星・小型ロケット・気球など飛翔機会への参  
加、小型飛翔機会の創出、ISSを利用した科学研究など、  
多様な機会を最大に活用し成果創出を最大化する。

# JAXAによる宇宙科学・探査ロードマップ

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)



## •ESA

- 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。  
GOATで検討が進められている → **中間報告**が出ている。
- LISA Pathfinderは 2015年12月に打ち上げ予定。  
<http://sci.esa.int/lisa-pathfinder/56583-lisa-pathfinder-arrives-at-launch-site/>
- 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。
- 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。
- **11月に国際協力の枠組みを相談する最初の会合**が開かれる。

\* **European members :**

Pierre Binetruy (Paris), Philippe Bouyer (Bordeaux), Mike Cruise (Birmingham), Reinhard Genzel (MPE Munich), Michael Perryman ((chair), Bernard Schutz (AEI Potsdam), Stefano Vitale (Trento)

\* **US members :**

Mark Kasevich (Stanford,) Bill Klipstein (JPL), Guido Mueller (Florida)

\* **NASA observer :**

Robin (Tuck) Stebbins

\* **Japanese observer :**

Masaki Ando (Tokyo)

\* **ESA staff :**

Fabio Favata, Head, Programme Coordination Office (ESA science directorate)

Frederic Sifa, Head, Future Missions Office (ESA science directorate)

Martin Gehler: Future Missions Office

Oliver Jennrich, Science Support Office (formerly RSSD, ESA-ESTEC),  
formerly LISA project scientist

- GOAT#4 後, 2015.6.15付けで取りまとめ.  
→ ESA SPCに提出, 議論された.
- 現在はGOATページで 公開されている  
<http://www.cosmos.esa.int/web/goat>

## • 内容:

Executive summary	1
1 Introduction	3
2 Scientific objectives	7
3 Detection technologies	15
4 Scientific performance trade-off	17
5 Technology developments	23
6 Data analysis	27
7 Schedule	31
8 Costs	33
9 Future activities of the Committee	35

## • 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かった。
- eLISAへの部分参加を第一に考慮する。主導ミッションの可能性はその結論の後に検討。→ 参加をほぼ決めている様子(?)。

## • 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 : 2つのサイトでの干渉計の全体動作を実現.  
→ 2015年 初期観測を実施中. 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, BS等のインストールがすすめられている.
- 日本 KAGRA : 施設整備がほぼ完了. インストール進行中.  
2015年12月に初期観測運転.

## •Pre-DECIGOの検討

- サイエンス面, 技術面の両方から検討が進められている.
- 今年度中にある程度 取りまとめられることが目標.
- メーカーへの検討依頼は今年度は見送りになる見込み.

## •地上開発・実証

- 外部資金のサポート：科研費・基盤(A), JAXA戦略経費.
- レーザー光源：BBMの開発進行中.
- 干渉計：DPF開発からの再定義は進んでいない.  
→ Pre-DECIGO検討の様子をみつつ進める.
- 微小力測定：ねじれ振り子装置の開発を開始.
- ドラッグフリー・スラスト：地上実証機の開発進行中.
- 相乗りミッション：メーカーとの検討会合を数回持った.  
→ HTV相乗りが有望との感触. ただし直近に機会はない.

# 議論

- **DECIGOに向けた戦略**
- **国際戦略方針**
- **Pre-DECIGOの目標・感度設定**
- **Pre-DECIGO名称**
- **組織体制**
- **その他、なんなりと**

- DECIGO/Per-DECIGOにおける国際戦略のポイント：

LISAに参加することはDECIGOにとって有益か？

× DECIGO実現が遅くなるのではないかという懸念.

○ DECIGO/Pre-DECIGOは国際協力になる可能性があるので、協力実績を作り上げておくことは重要.

(参考)

\* JAXA 中型ミッション 上限300億円.

\* DPF見積もりは 85億 + 打ち上げ経費 だった.

\* Pre-DECIGO のシステム検討 (コスト評価)は進行中.  
DPF三機分とすると

255億円 + 打ち上げ経費 (70億?)

→ 無駄の削除, 軌道の検討などでの削減が必要.

- **これまでの方針：国内の方針が決まるまで付かず離れず。**
- **その後の状況**
  - JAXAとしては国際方針を進めたい様子が見られる。
    - \* ESA L3の検討チーム(GOAT)に安東を派遣。
      - 9月にESAで日本の状況を説明。
    - \* 一方で「是非、ボトムアップの提案を進めて下さい」との意見ももらっている。
  - LISAで国際分担の議論が始まりつつある。
    - \* GOATの中間報告書が ESA SPCに提出された。
    - \* 11月にワークショップ開催。
    - \* 部分的な参加の可能性は表明している。

## • 新たな国際戦略方針

### \* 従来から変更しない点

- Pre-DECIGOについて、従来の方針通り、国内(+少しの国際協力)で実現できる可能性を検討。
- 基礎開発検討を進めるとともに、相乗りミッション等の機会を模索する。

### \* 新たに加える点

- 国内活動と並行して、国際ミッションへの参加の可能性も探る。国際的な実績を積むとともに、それをベースにした資金獲得と開発の推進を目標とする。
- 具体的には、コンポーネントレベルでの LISA への参加と、JAXA 国際協力経費枠での予算獲得の可能性を検討。

## • Pre-DECIGOの目標

- NS連星合体：地上重力波望遠鏡との協調観測.
- 中間質量BH連星の合体：独自のサイエンス.
- Foregroundの理解.

## → いくつかの意見

- より低周波数?: ETなどとの差別化, サイエンス価値の向上.
- より簡略化?: 観測しさえできれば, 新たな窓が開ける.

## • 名称

- 既にDECIGOの名称は認知されているので、変更は混乱をまねく.
- 'Pre' はアピーリングではない?

## ・科学的目的

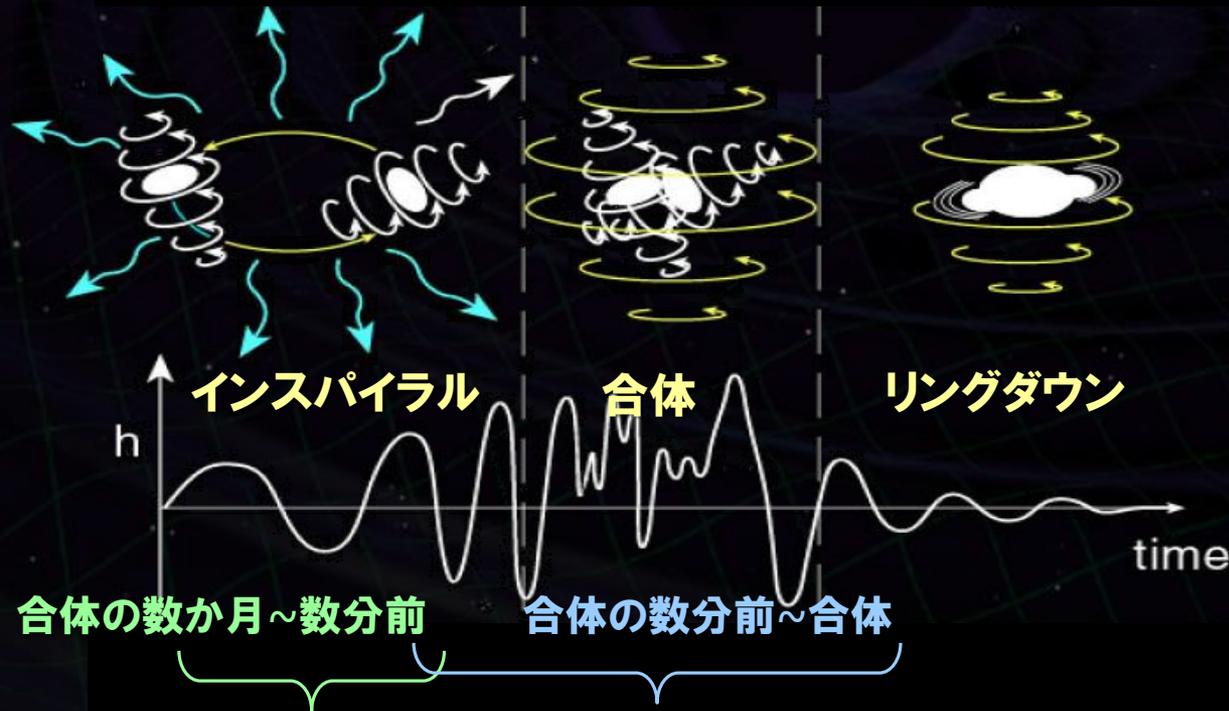
強重力・高密度天体からの重力波の観測による、  
時空構造・銀河形成・高エネルギー天体現象の解明。

## ・観測目標

- (1) 連星中性子星合体现象の観測。 [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。

# 観測目標 (1) : 連星中性子星の合体

Pre-DECIGOでは, ~100個/年 の連星中性子星イベントを観測.



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.

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

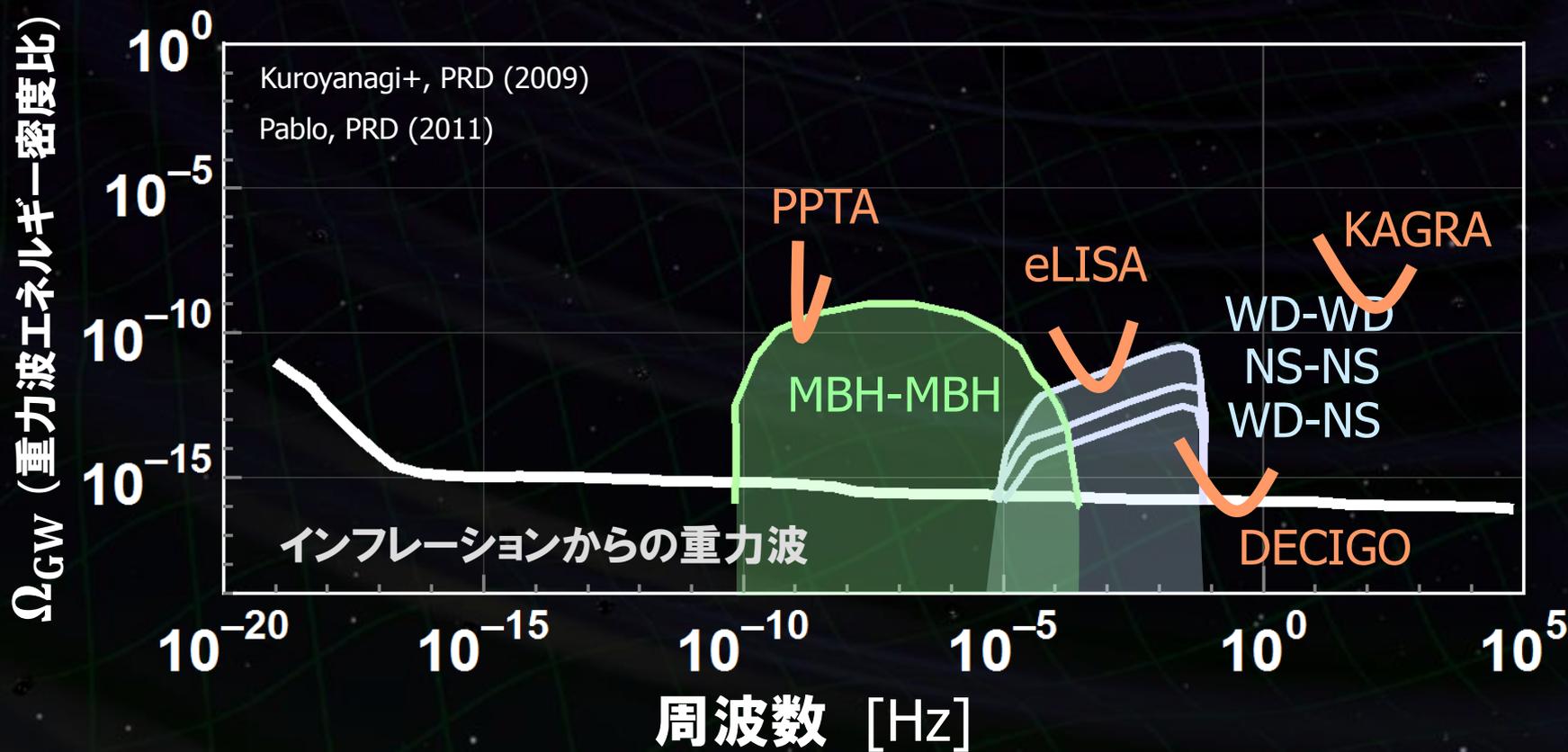
- Pre-DECIGO の観測によって、  
決定的な証拠が得られる可能性.
- 他の手段ではできない独自の観測.

# 観測目標 (3) : 前景重力波の理解

多くの連星系からの重力波 → 分離できない.

⇒ 原始重力波観測に対する **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.



# DECIGO組織体制 (~2014)



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 (京大理), 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), 河野 (JAXA), 武者 (電通大)

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)

