
第23回 ICEPPシンポジウム 特別講義

重力波天文学入門 (3)

安東 正樹

(東京大学 / 国立天文台)

1. 一般相対性理論と重力波

- * 重力波の性質, 放出
- * 存在証明

2. 重力波の観測

- * 観測の原理
- * LIGOによる初観測
- * KAGRA

⇒ 3. 相対論の検証と初期宇宙の観測

- * 一般相対性理論の検証
- * 初期宇宙の観測

観測された重力波信号による 一般相対性理論の検証

一般相対性理論の検証

一般相対性理論

* これまでの全ての**検証実験・観測をクリア**。

→ 宇宙の法則を記述する**基本理論**。

* その一方, **究極の理論ではない**。

- 初期宇宙, BH中心部での特異点。

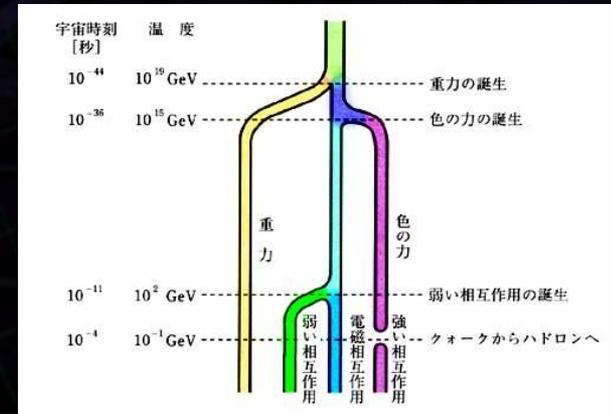
- 量子力学との統合. 他の力との統一。

→ 一般相対性理論を内在するより一般的な理論を求め,
一般相対性理論の検証, ほころびの探査が重要。

重力波の観測による一般相対性理論の検証

大きく2つの方法: **発生源による検証**, **伝播による検証**。

現代の宇宙像 日本物理学会編



重力波発生源による検証

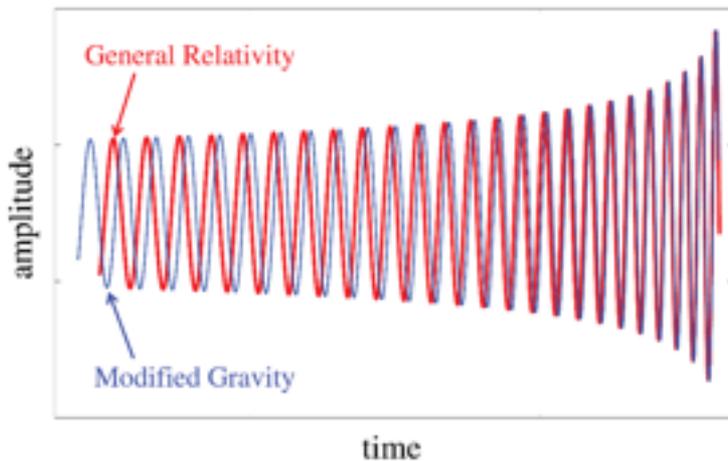
- 重力波形をパラメータ化して表現:

Parameterized post-Einstein (ppE) Formalism

- *インスパイラル: 波形の位相変化をポストニュートン展開.
- *合体, リングダウン: 数個のパラメタで表現.

-ppE waveform

[Yunes & Pretorius (2009)]



ppE parameter

n -th post-Newtonian (PN)
correction relative to GR

$$\Psi^{(\text{insp})} = \Psi_{\text{GR}}^{(\text{insp})} + \beta (\pi \mathcal{M} f)^{(2n-5)/3}$$

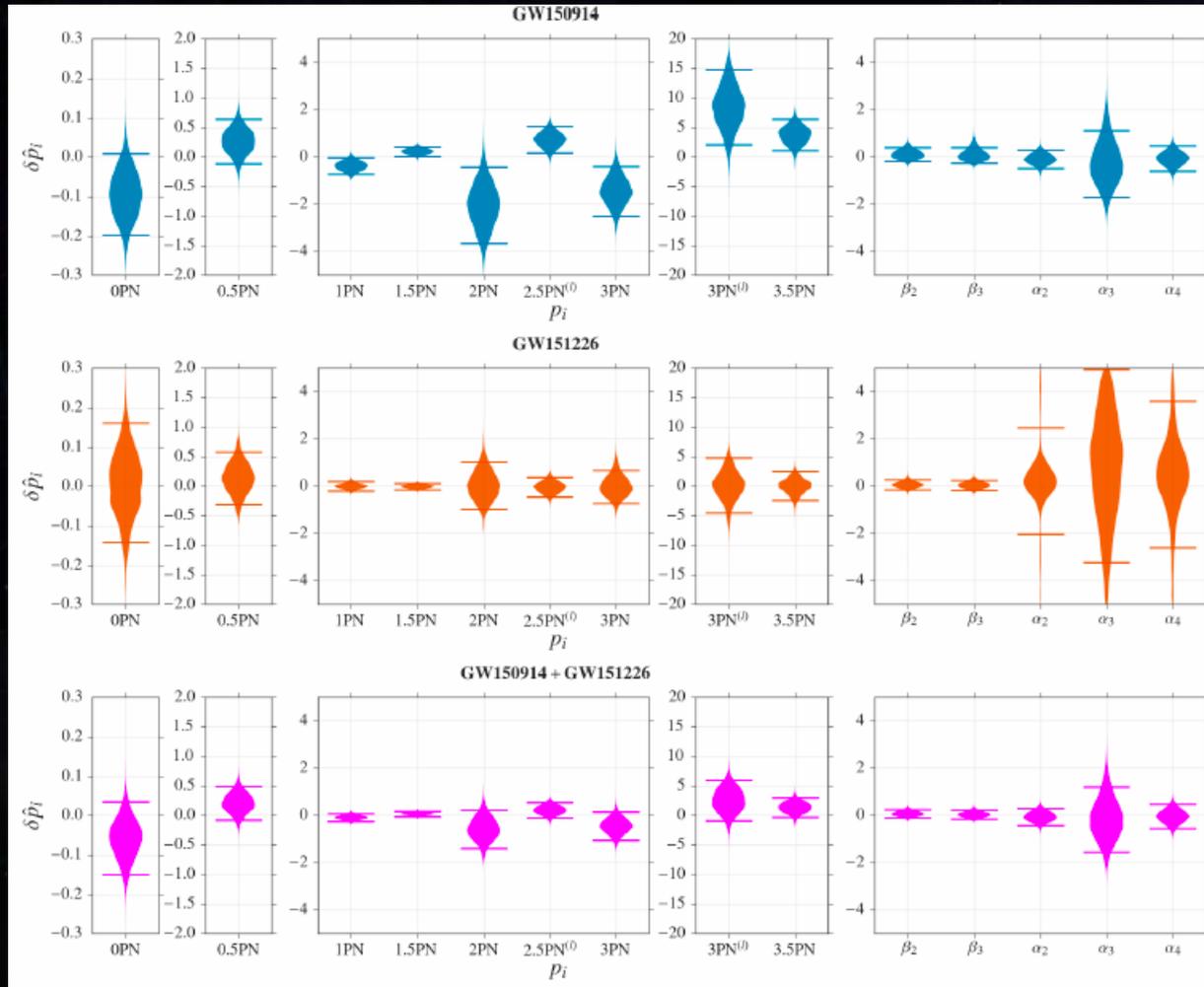
$$\Psi^{(\text{merg,ring})} = \Psi_{\text{GR}}^{(\text{merg,ring})}$$

(due to the lack of BH binary merger
simulations in non-GR theories)

K. Yagi, presentation at GPPAW2016

観測された波形を用いた ppE検証結果

- 一般相対性理論からの破れは見つかっていない。



arXiv:1606.04856v2

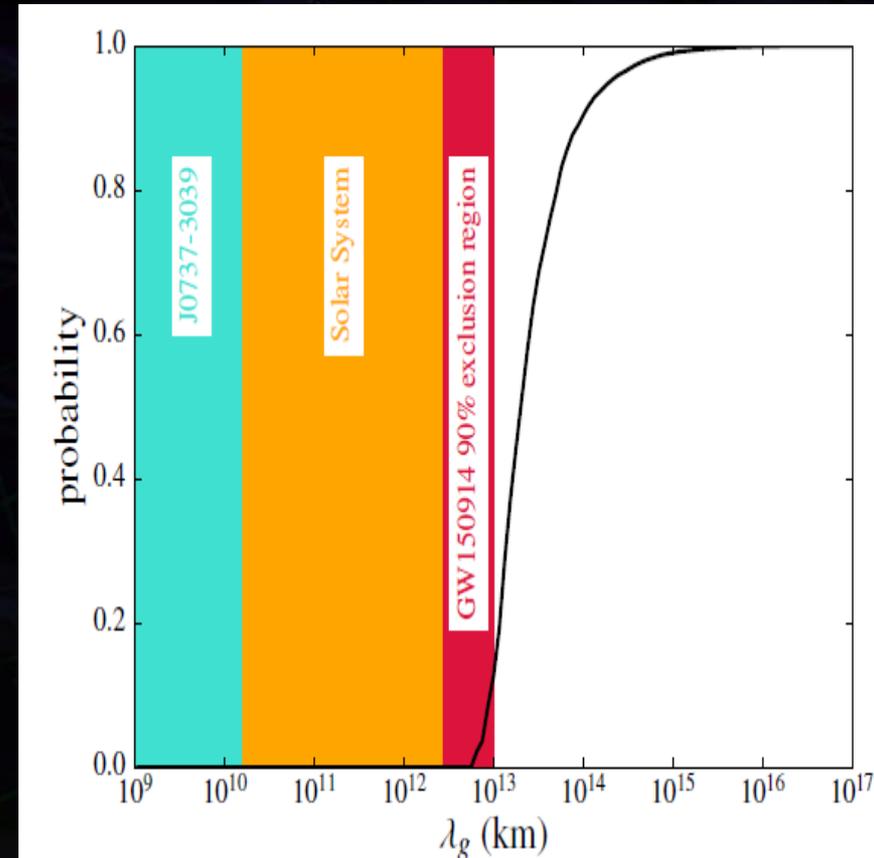
重力子の質量への制限

- 重力子の質量への上限值
もし重力波を量子化した重力子に質量があるならば、重力波信号が13億光年を伝搬する間に、伝搬速度の周波数依存性から波形がずれてくるはず。



GW150914による上限値

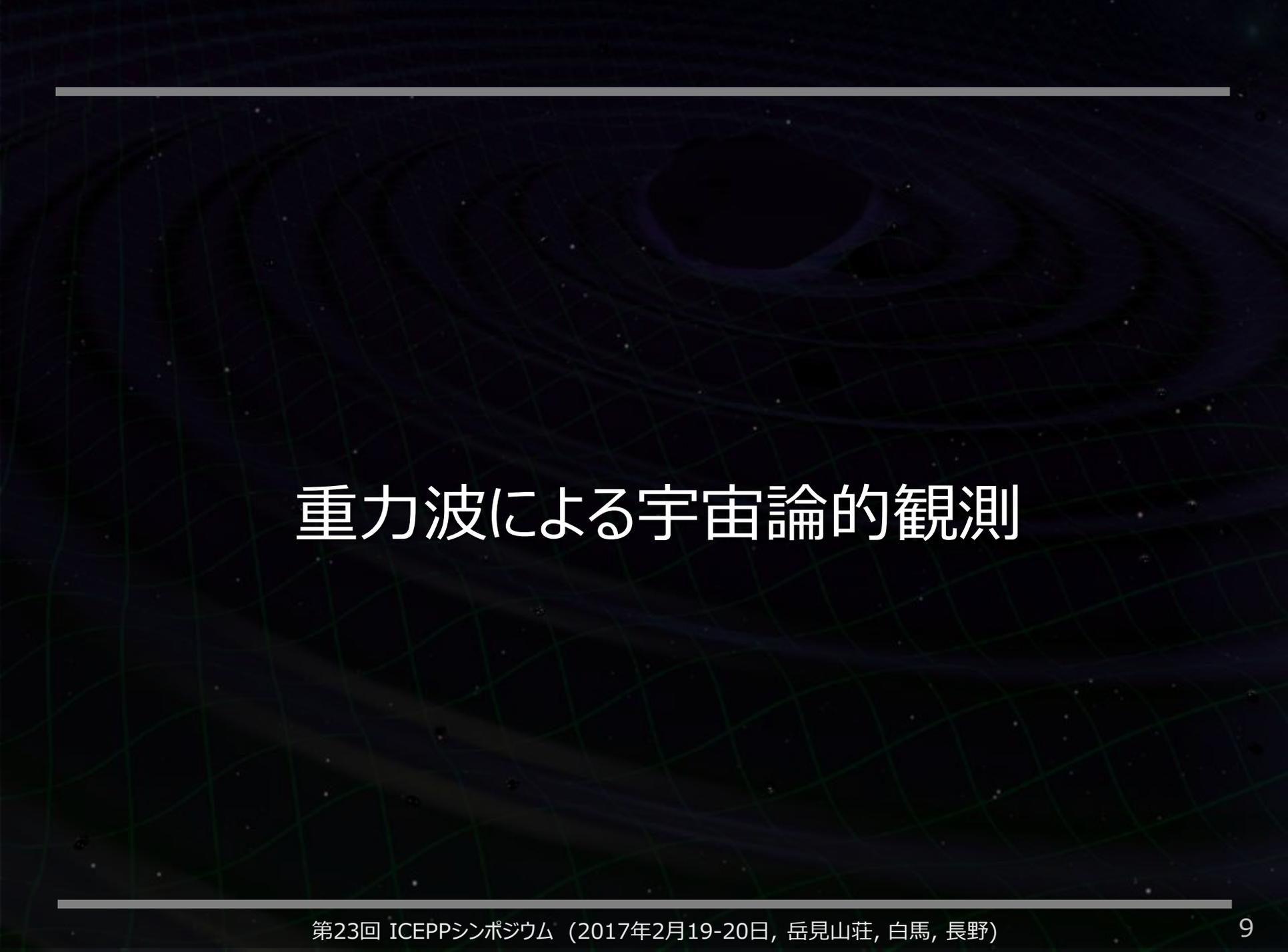
$$m_g \leq 1.2 \times 10^{-22} \text{ eV}/c^2$$



PRL 116, 221101 (2016)

相対論の検証：今後の期待

- ・現時点で、一般相対性理論からの破れは見つかっていない。
- ・今後の期待
 - * 発生源による検証
 - 観測面：
 - より多くのイベント観測 → 統計誤差を抑える。
 - より高SN比での観測 → 準固有振動モードの検証。
 - 理論面：修正重力理論に基づいた理論波形。
さまざまな重力理論での数値相対論計算。
 - * 伝播による検証
 - より多数・多様な重力波形の観測（合計質量, 質量比）。
 - 電磁波との同時観測（ガンマ線バースト, 超新星爆発）。



重力波による宇宙論的観測

重力波で宇宙を探る



背景画: NASA/WMAP Science Team

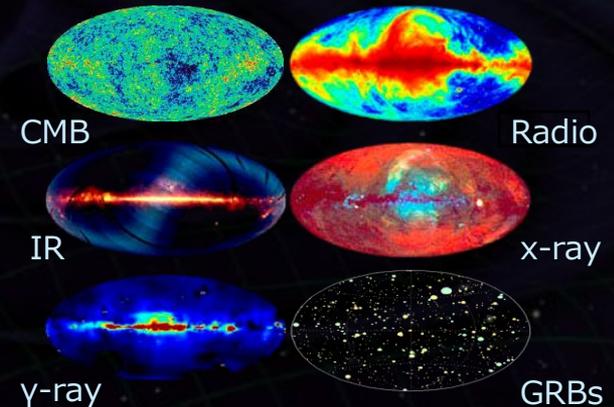
多波長での観測

・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

~ $1 / (\text{波源変動の時間スケール})$

→ 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。



重力波検出器の種類





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)

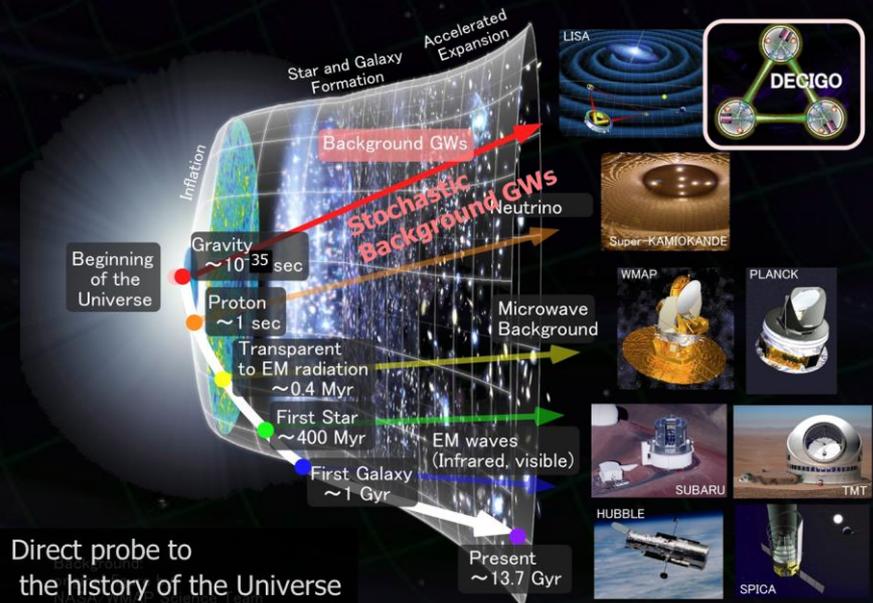
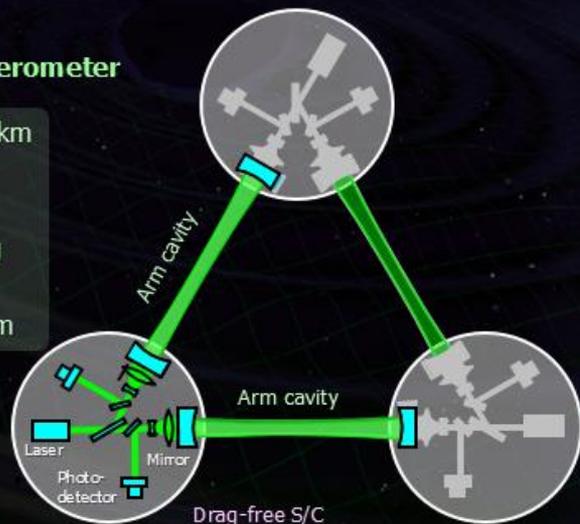
宇宙のはじまりを直接観測する。

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

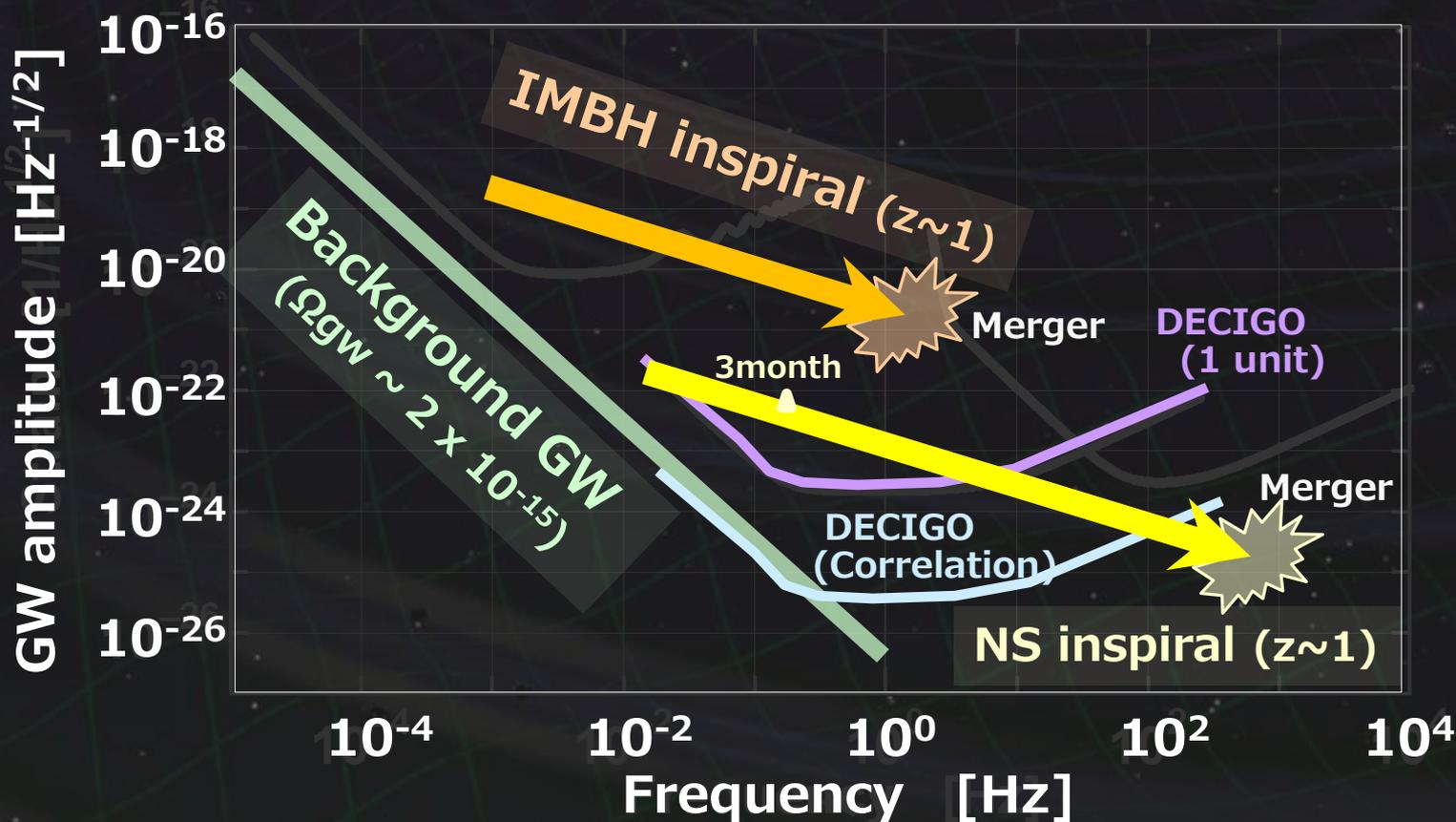


DECIGOの観測対象

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



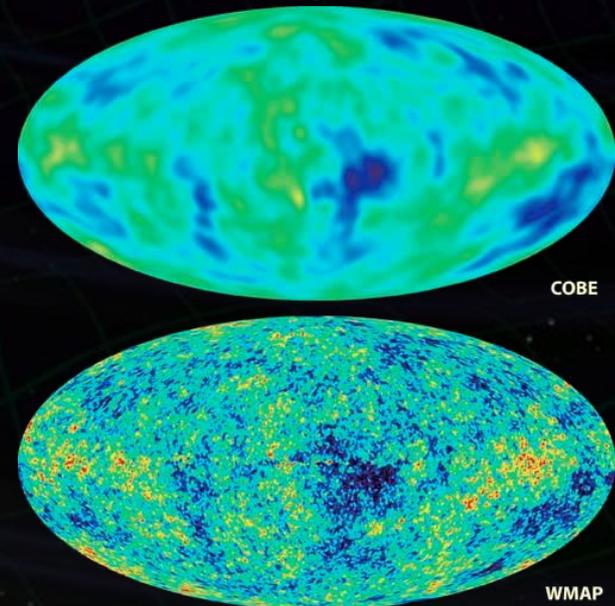
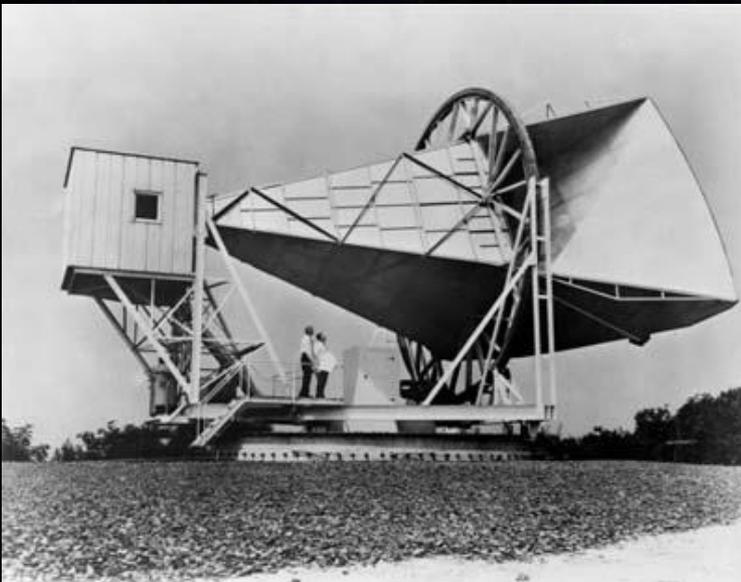
初期宇宙の観測



Background:
original figure by
NASA/WMAP Science Team

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)

- ・ 天球上の全ての方向からやってくる, ほぼ等方的なマイクロ波放射. 2.725Kの黒体放射スペクトル.
- ・ 1964年 ペンジアスとウィルソンが発見.
- ・ 宇宙誕生38万年後の宇宙の姿: 'ビッグバンの名残り火'.



CMBの観測

- CMBの観測から宇宙論的な情報が得られる。(参考: 高橋さん
昨年度のICEPPシンポジウム講演)

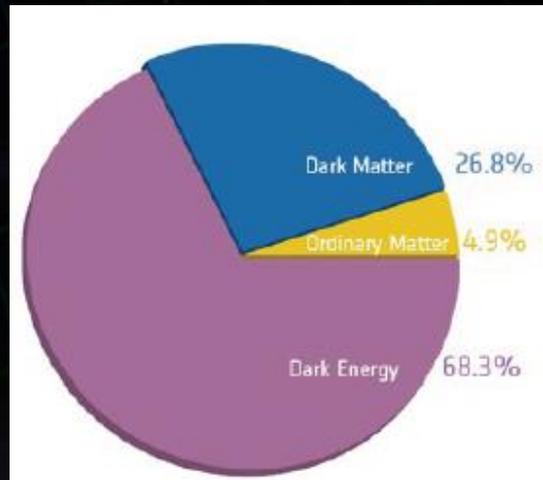
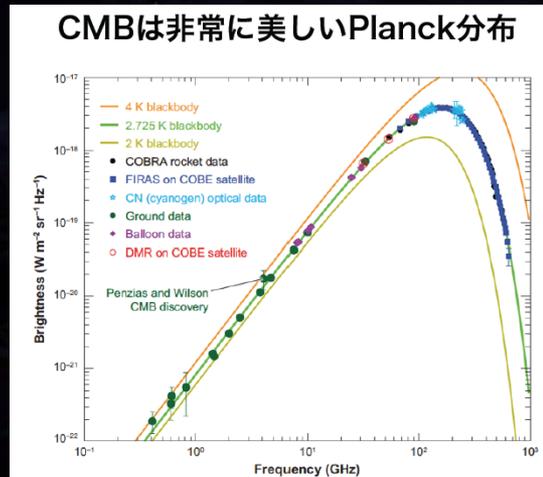
- * 黒体輻射

- ビッグバンの存在.

- * 温度揺らぎ

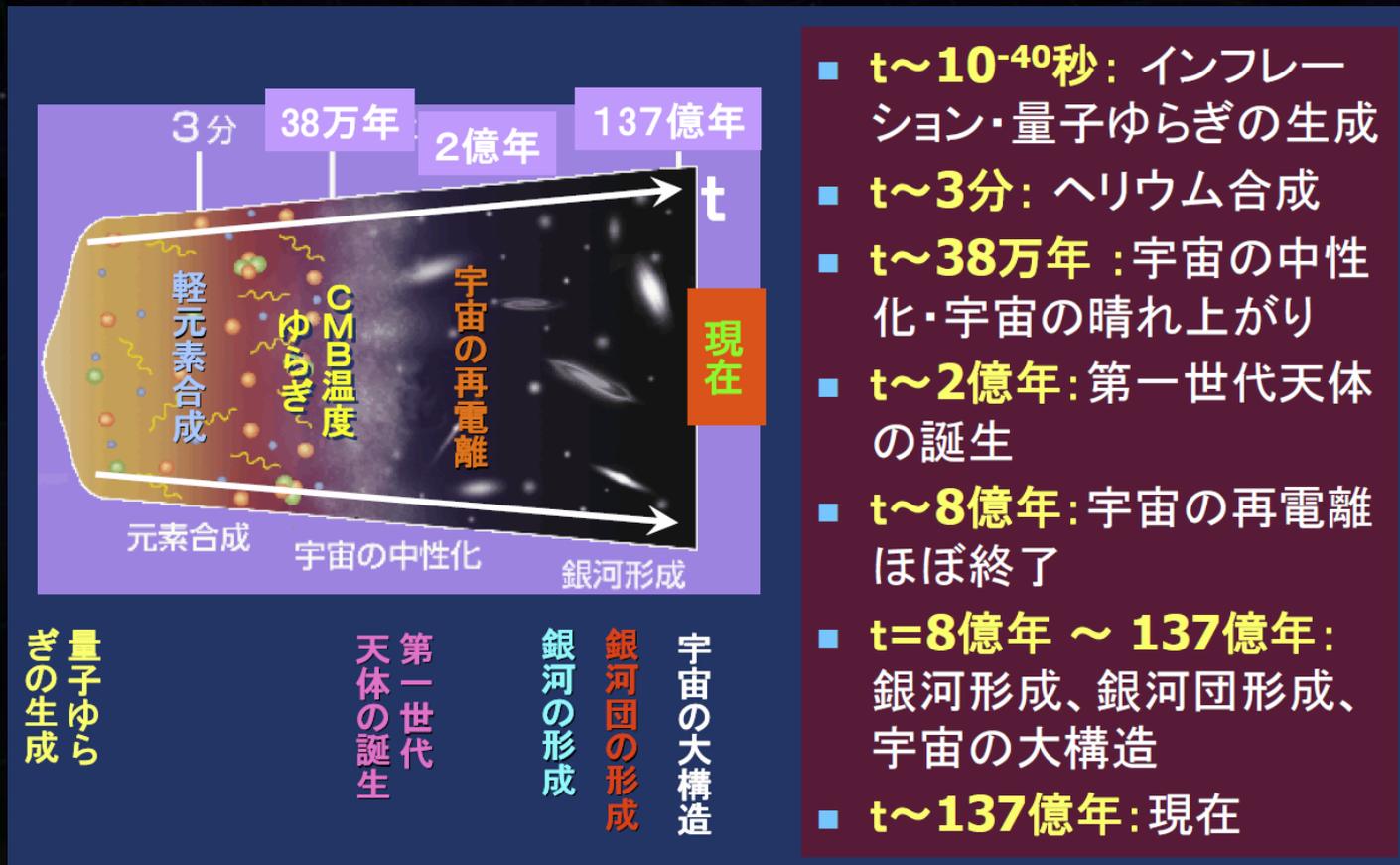
- 宇宙の組成, 進化史.

- インフレーションの存在.



宇宙の進化史

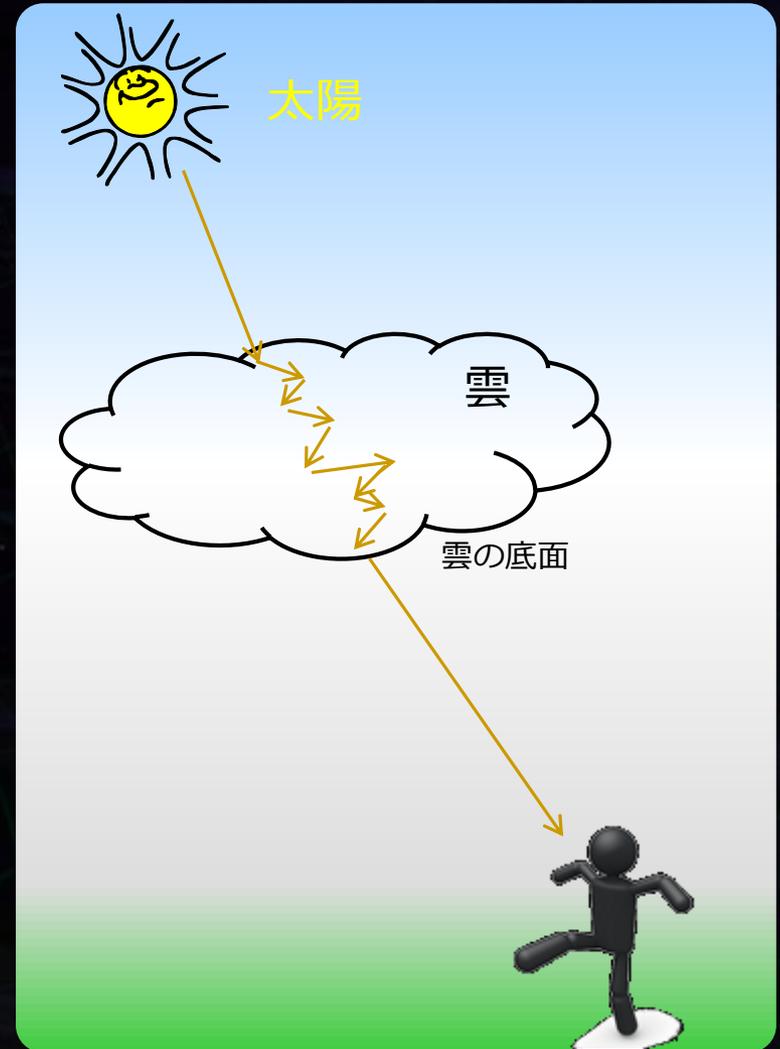
- CMBの観測などから、宇宙の進化史・組成への知見が得られている。



光(電磁波)の散乱

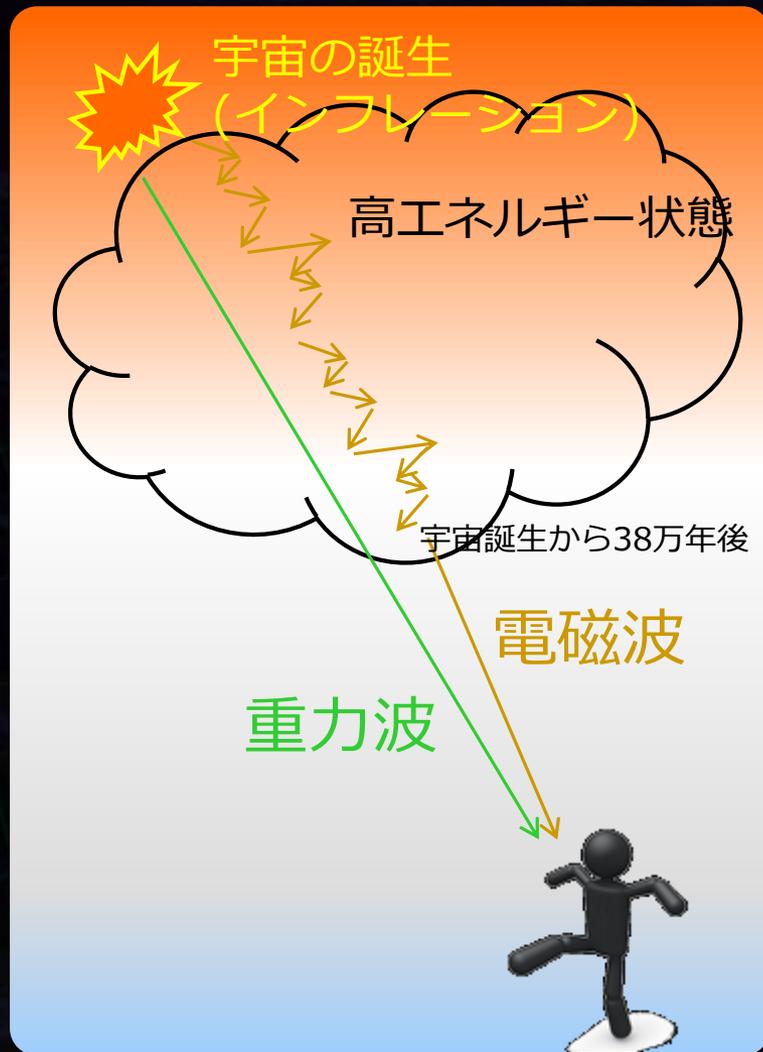
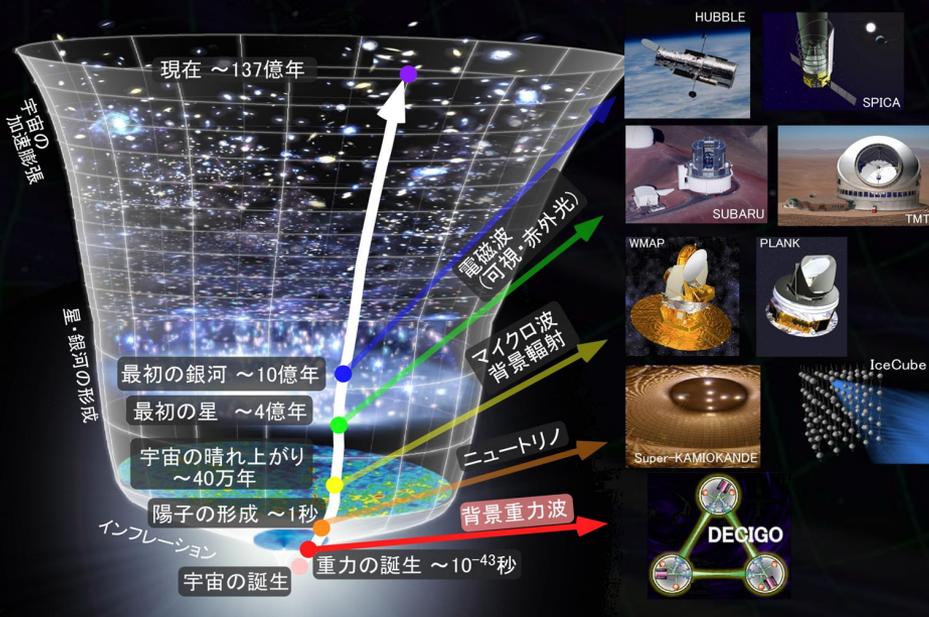
電磁波は, 散乱されてしまい
CMB以前の情報は持たない.

太陽からの光は雲の中で散乱
され, 元の情報(太陽の形)を失う.



初期宇宙の観測

重力波ならば、宇宙誕生直後の姿を直接観測できる。



インフレーションの重力波観測

BICEP2, LiteBIRD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.

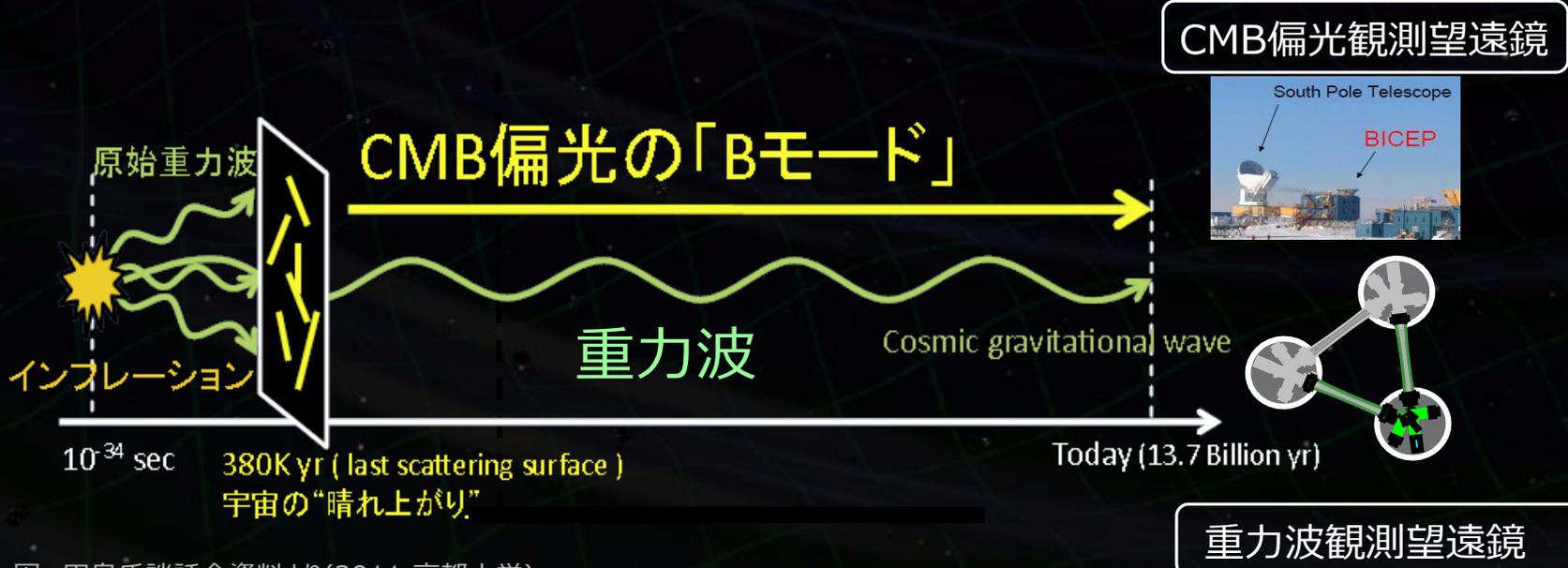
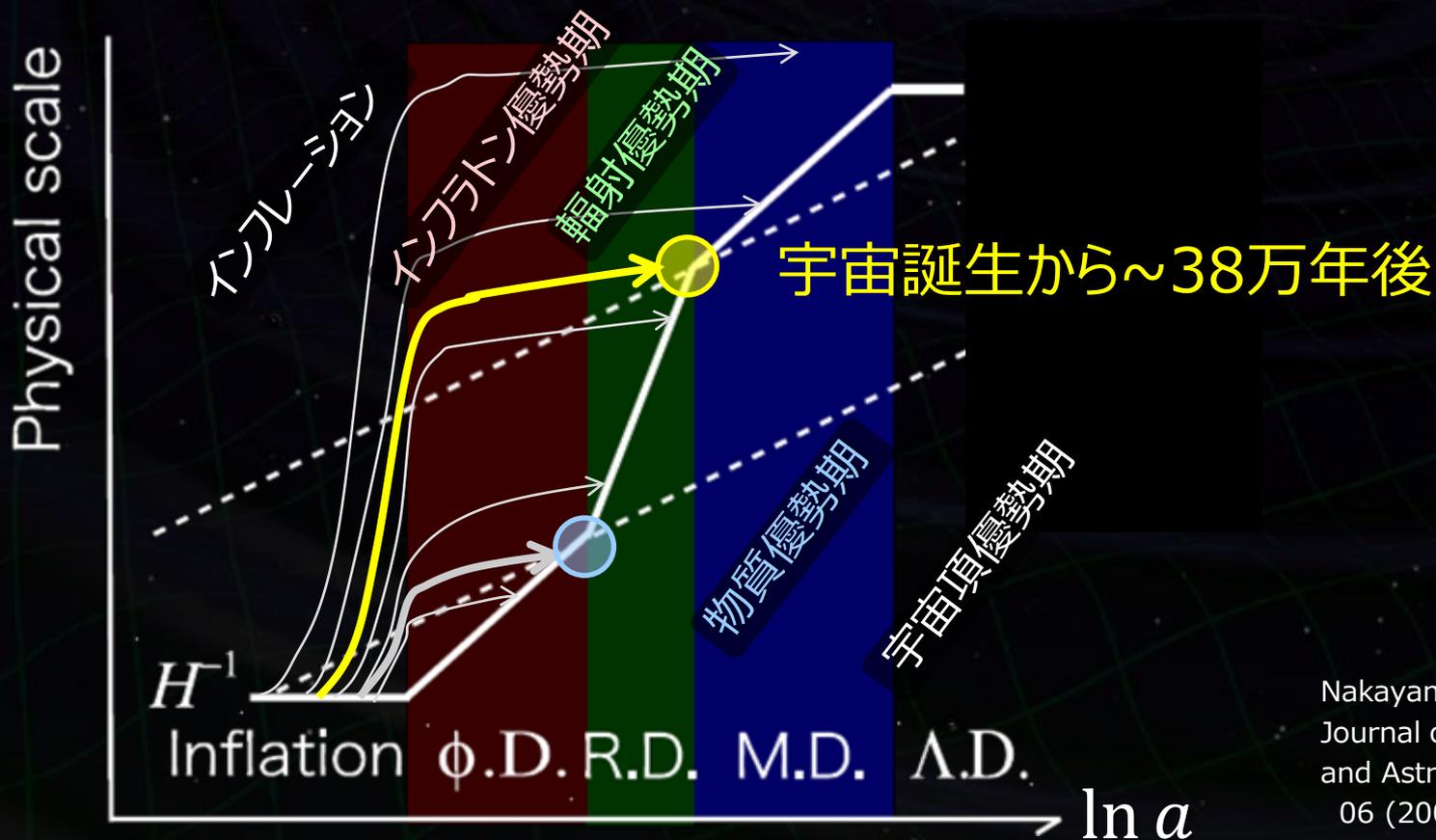


図: 田島氏談話会資料より(2011 京都大学)

インフレーションからの重力波

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.

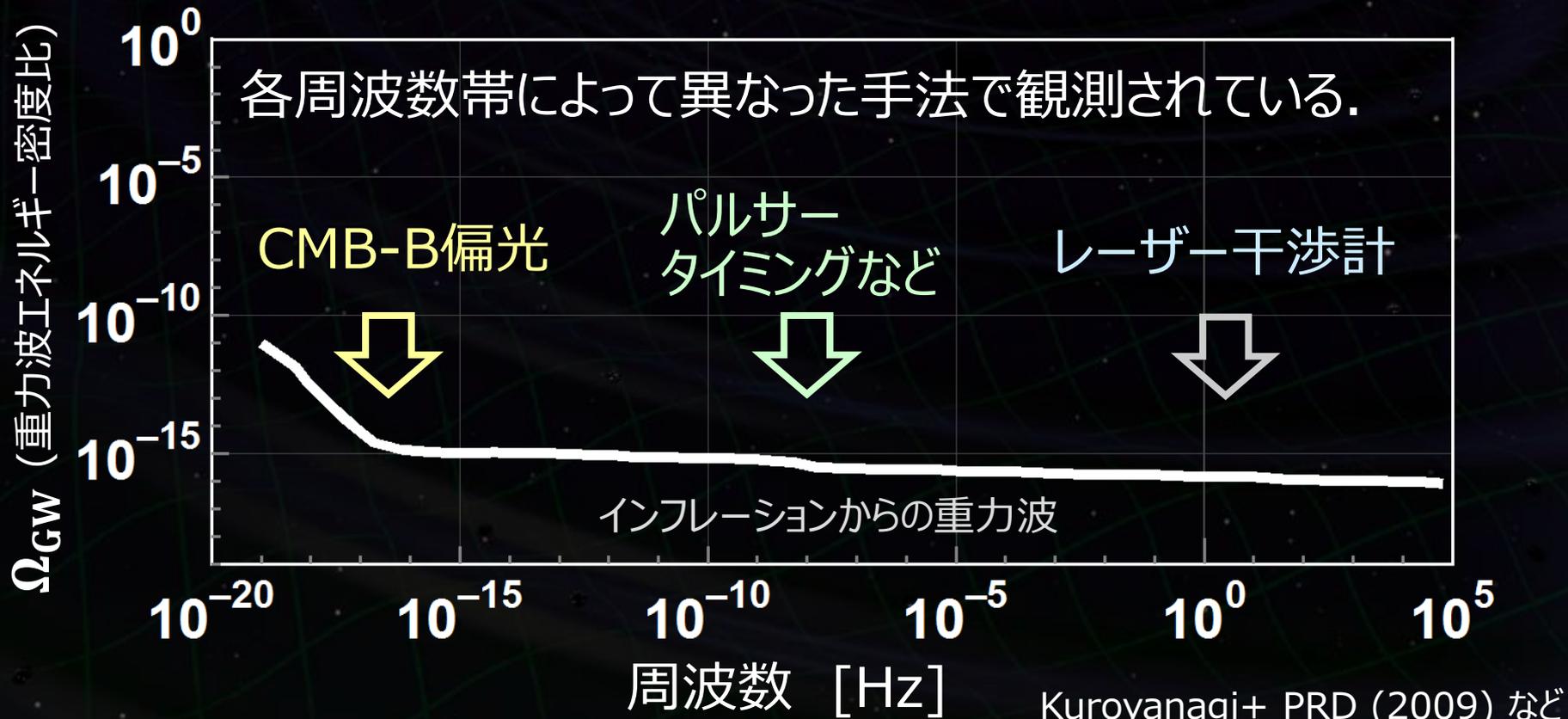
インフレーションからの重力波スペクトル

初期に地平線内入ってきた重力波ほど高周波。



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。

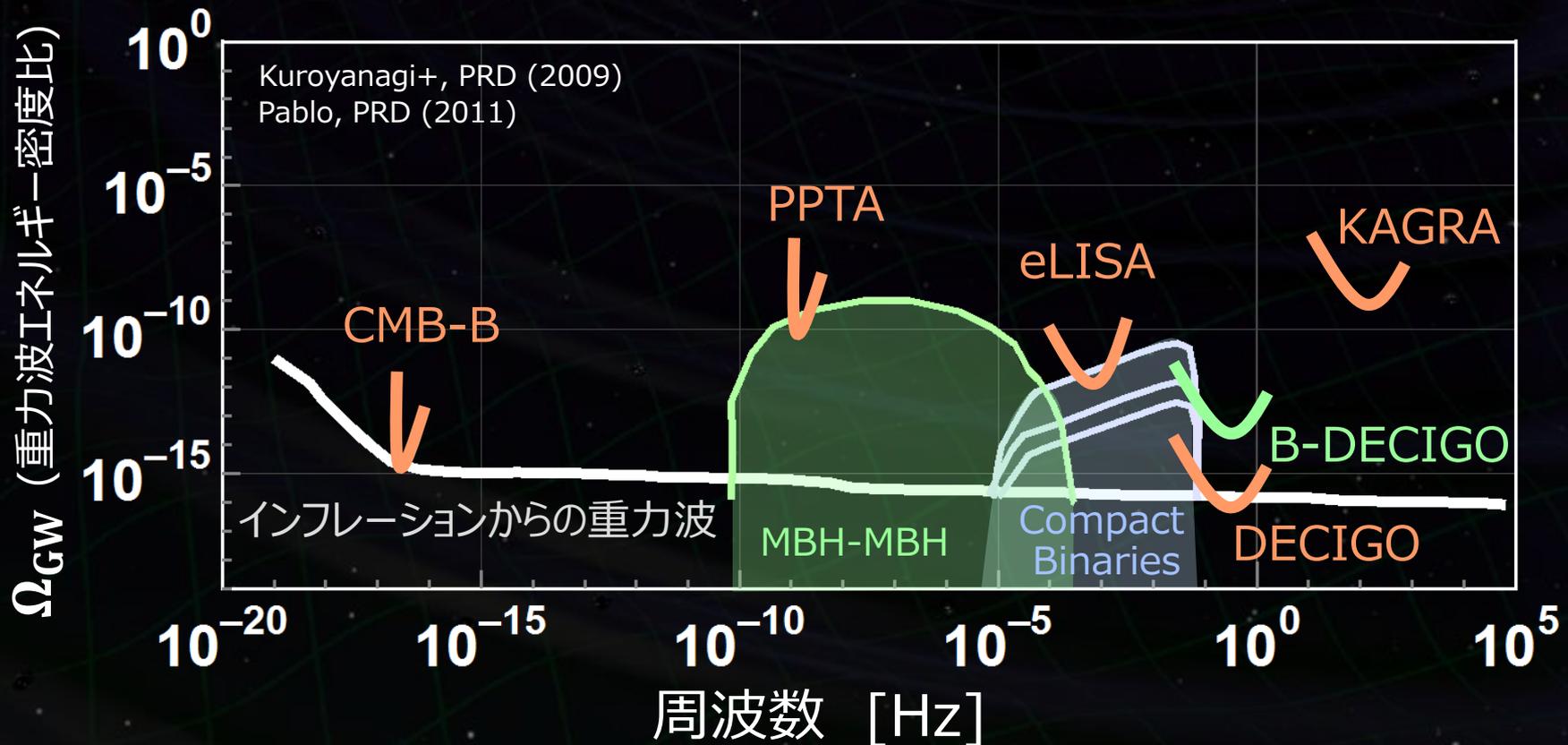


原始重力波観測の「窓」

DECIGOの最大の目的：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

→ 0.1Hzの周波数帯が好都合。



重力波エネルギー密度比と振幅

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

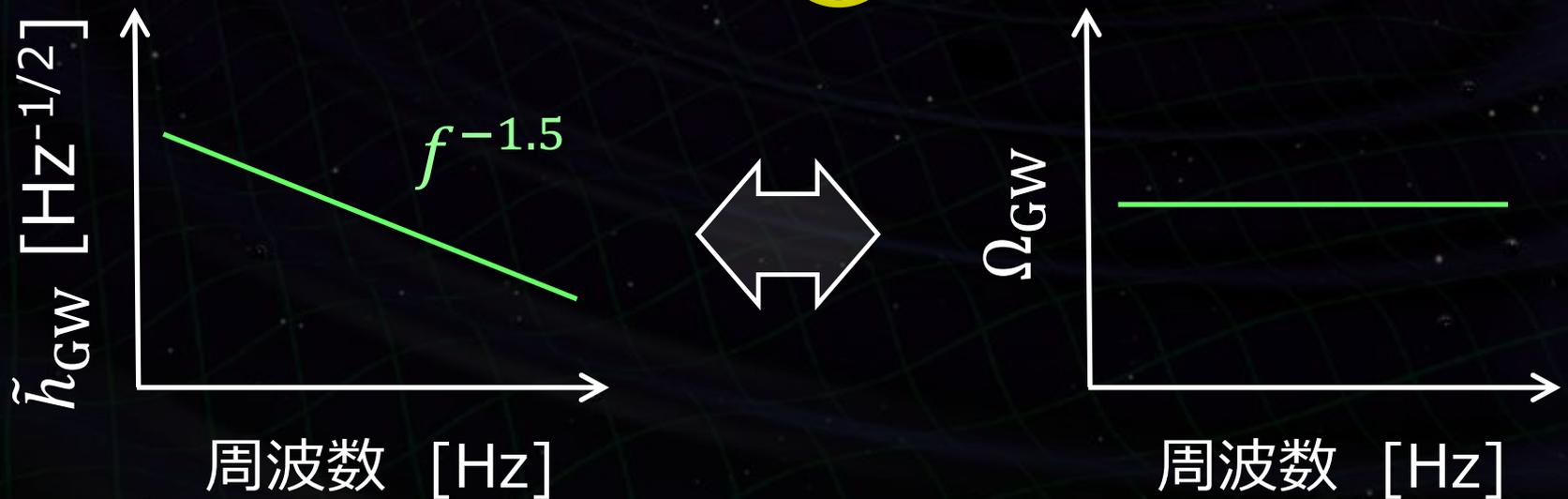
等価な重力波振幅

ハッブル定数

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

重力波エネルギー密度比と振幅

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



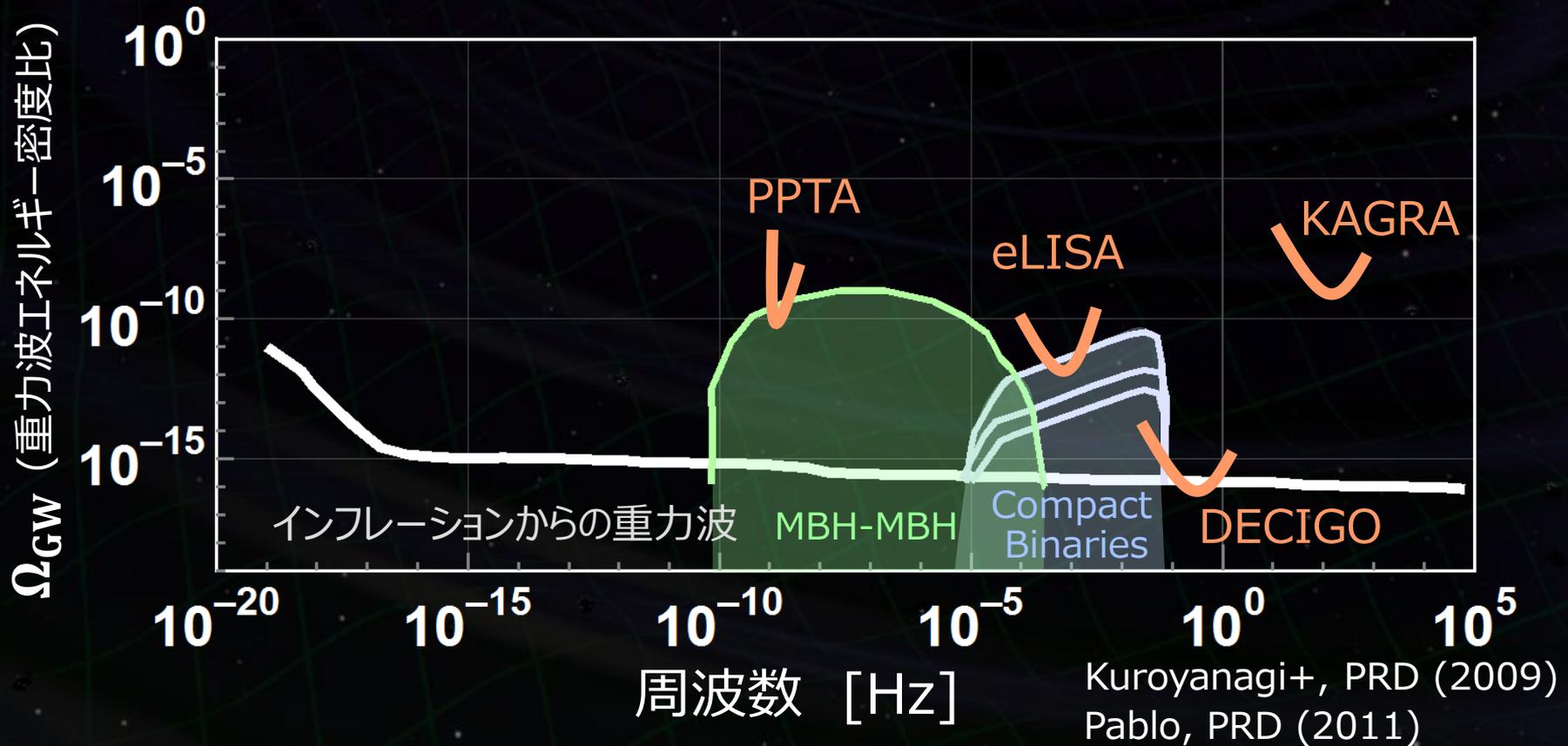
高周波数では振幅は小さくなる

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.



原始重力波観測の「窓」

- 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.

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

原始重力波観測の意義

- ・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.

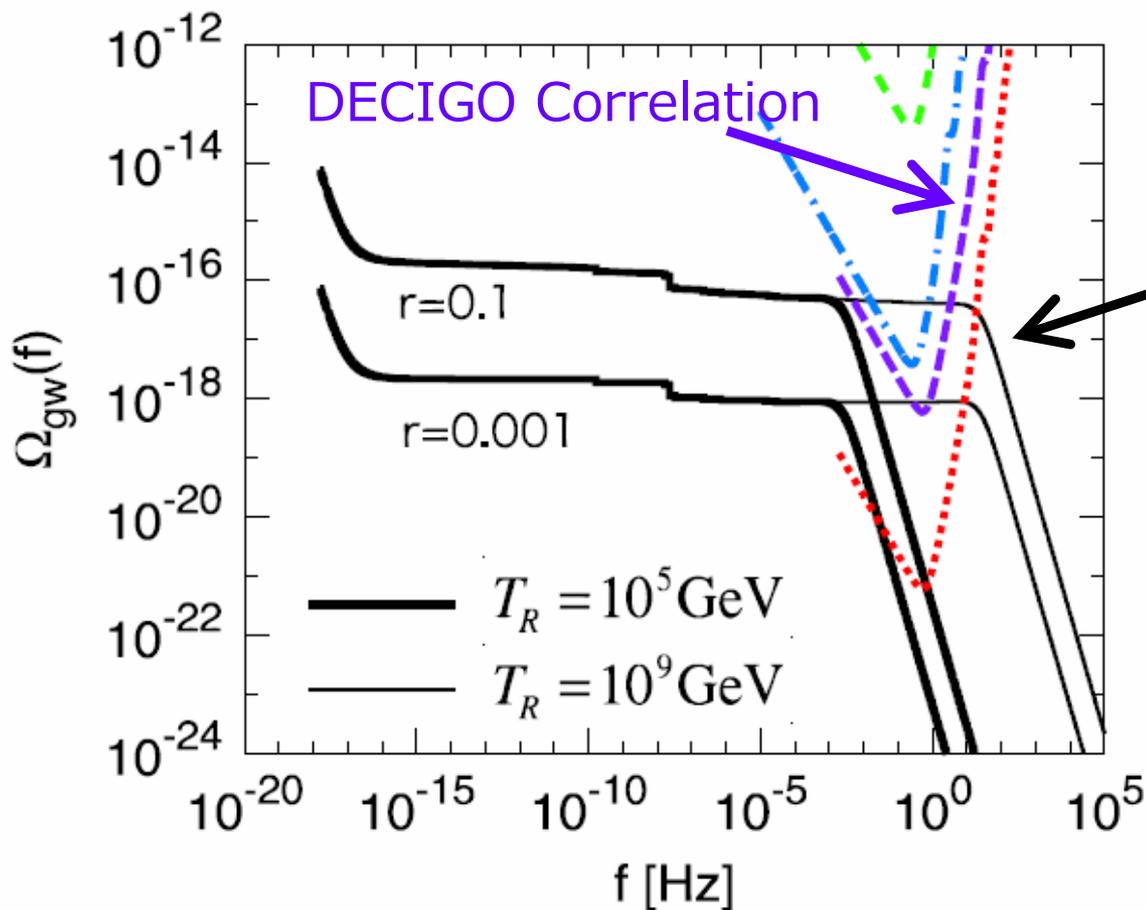
観測周波数と宇宙の時代が対応.
高周波数 → より初期宇宙の情報.
- Reheating温度(物質の種の形成)
- 宇宙の熱進化史 …

⇒ インフレーション期とBBN期間の情報
→ CMB-B偏光観測と相補的な観測.

GW from Inflation

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

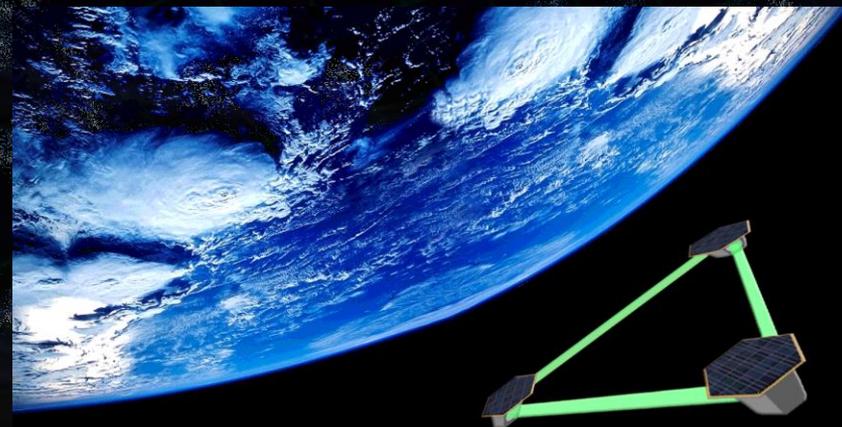
Power spectrum : Evolution history of the Universe.



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

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

宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO



宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO

• 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

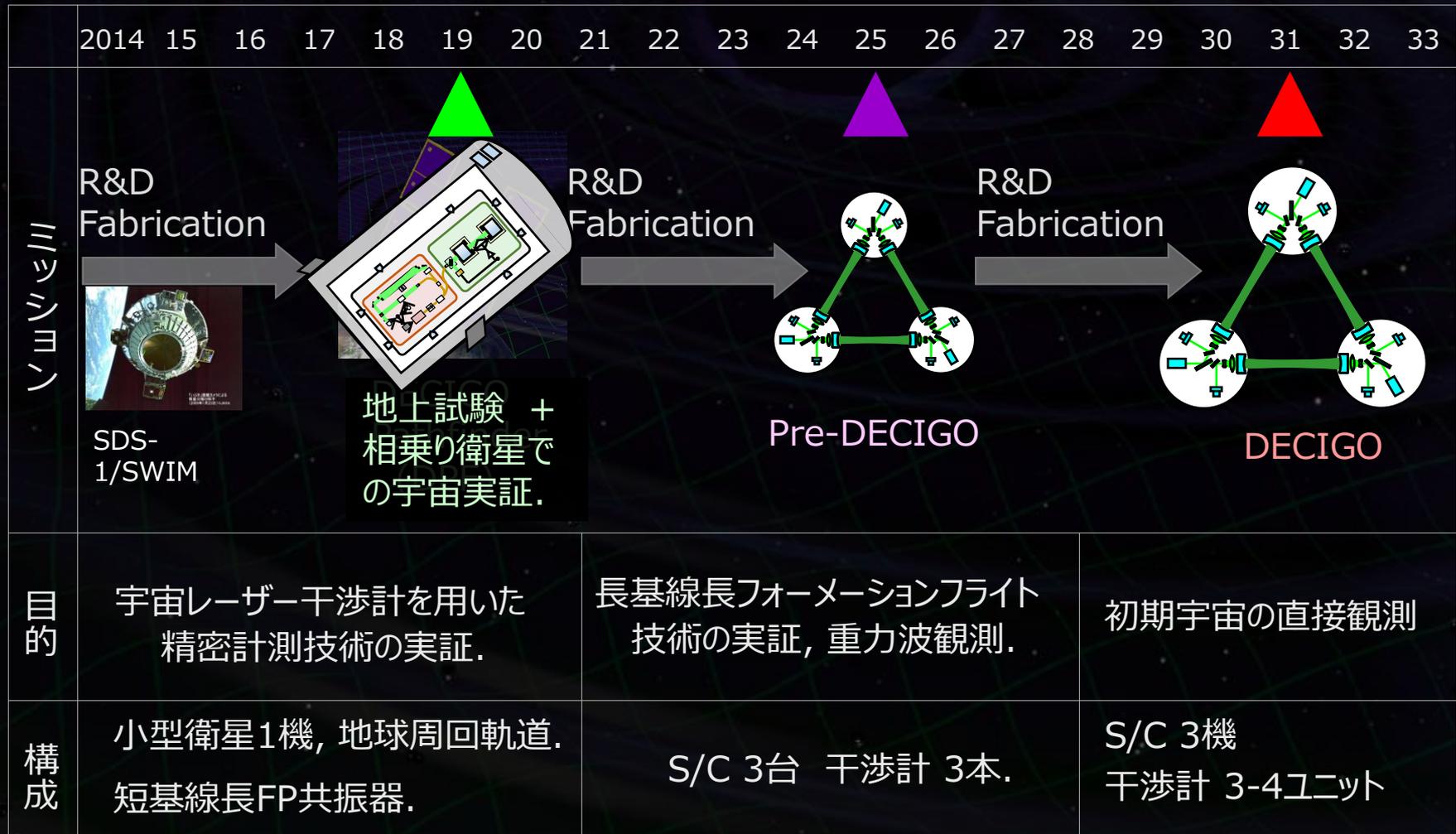
- (1) コンパクト連星合体の観測.
- (2) 中間質量BH連星合体の観測.
- (3) DECIGOへ向けた
フォアグラウンドの理解.



JAXA戦略的中型ミッションとしての実現を目指す (2020年代).

宇宙重力波望遠鏡のロードマップ

Figure: S.Kawamura



宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO

・科学的目的

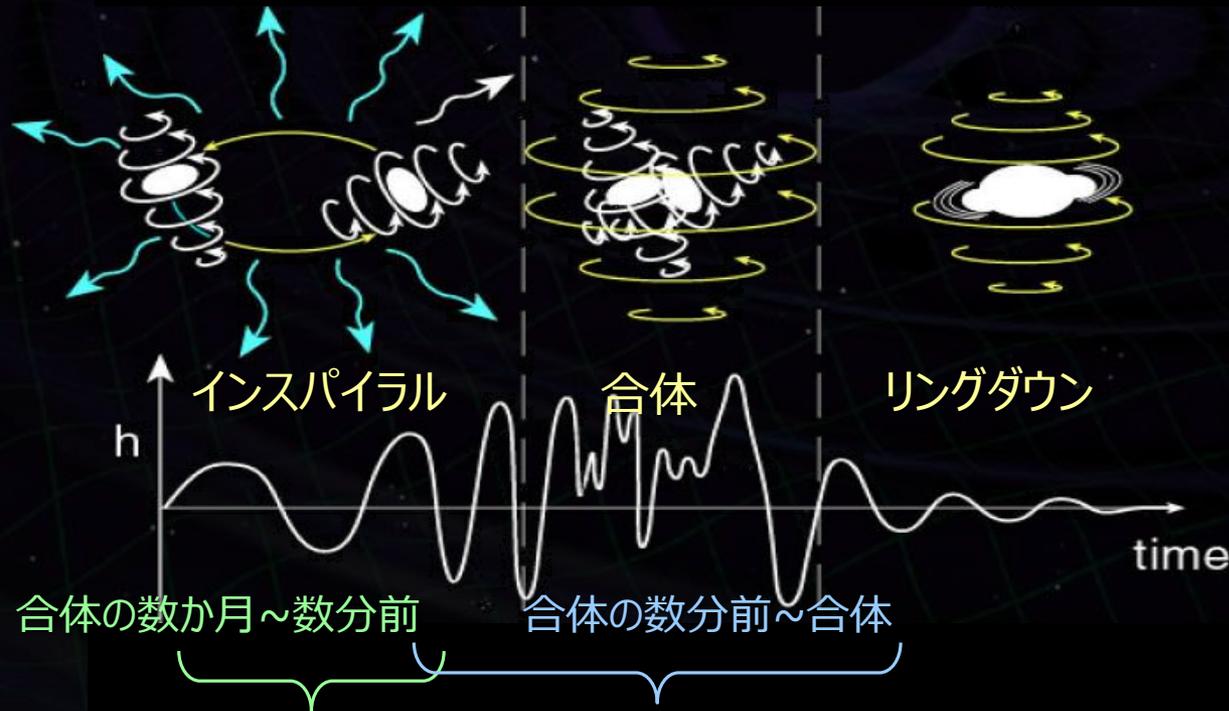
強重力・高密度天体からの重力波の観測による、
時空構造・銀河形成・高エネルギー天体現象の解明。

・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。

観測目標 (1) : 連星中性子星の合体

B-DECIGOでは, >100個/年 の連星合体イベントを観測.

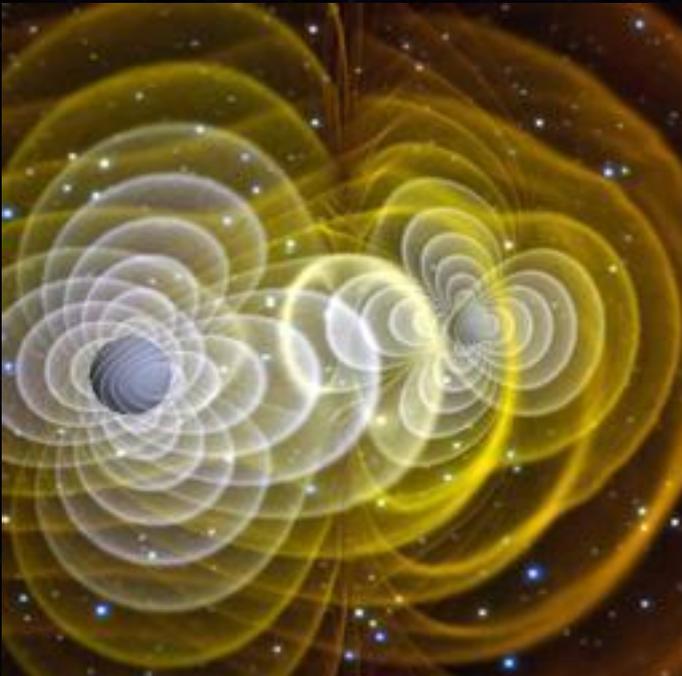


低周波数 → B-DECIGO
質量, 軌道, 方向, 合体予測.

高周波数 → 地上望遠鏡
状態方程式, 高エネルギー現象.

観測目標 (2) : 中間質量BHの合体

B-DECIGOでは, ほぼ宇宙全体の間中質量BH合体を見通す.



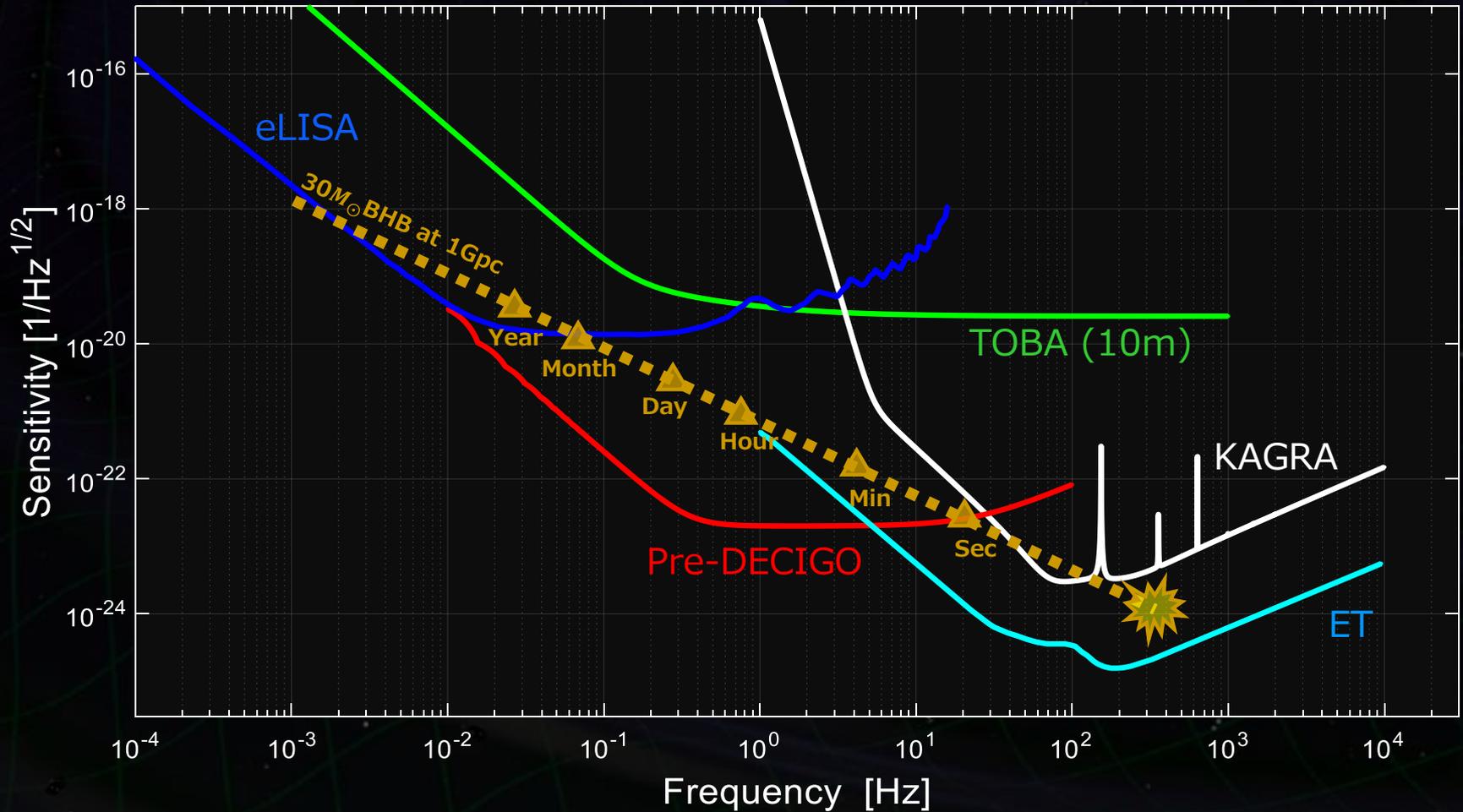
銀河中心の超巨大BH形成の謎.

(A) 大質量星の崩壊 → 降着

(B) BHの階層的合体

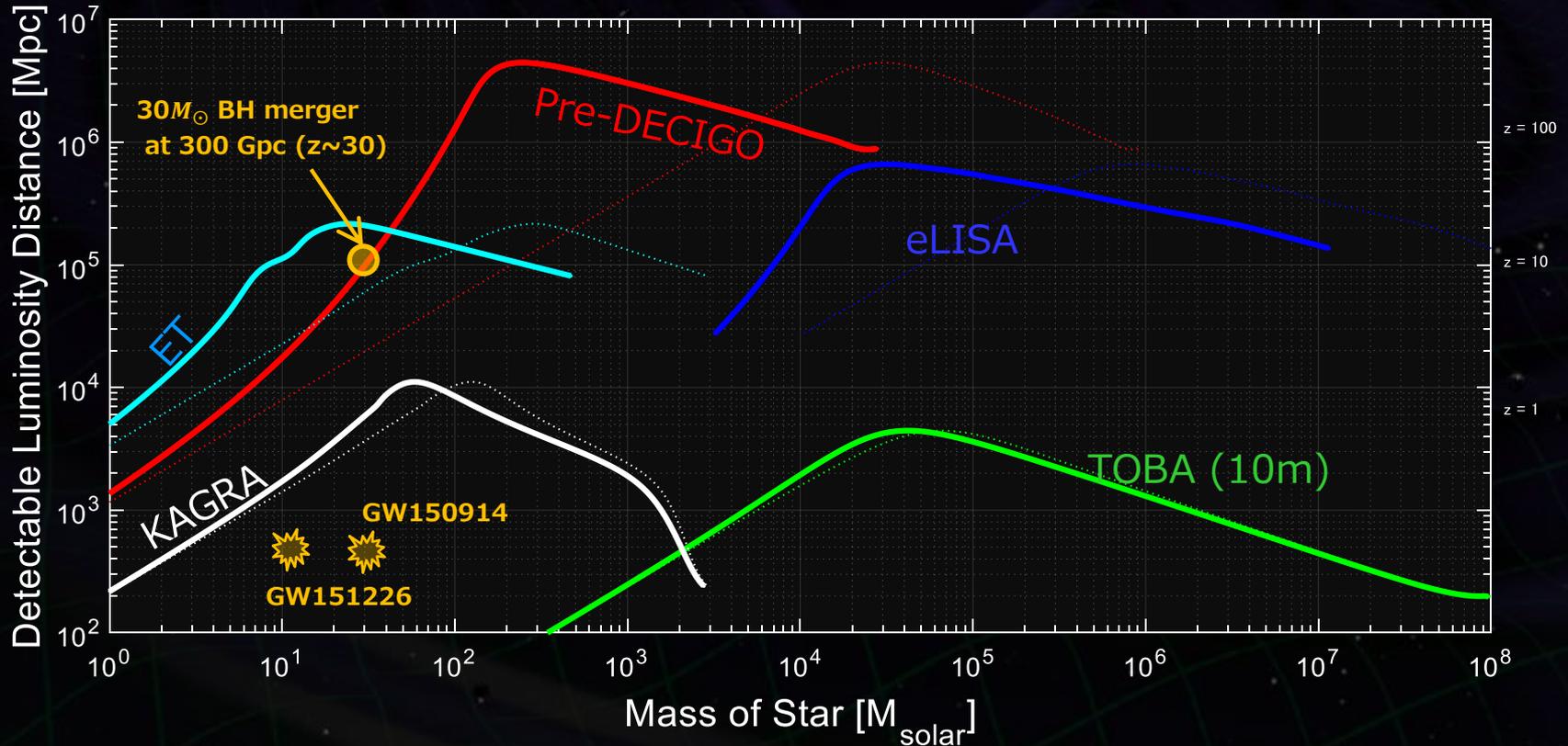
- **B-DECIGO** の観測によって,
決定的な証拠が得られる可能性.
- 他の手段ではできない独自の観測.

感度曲線



連星合体の観測可能距離

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)



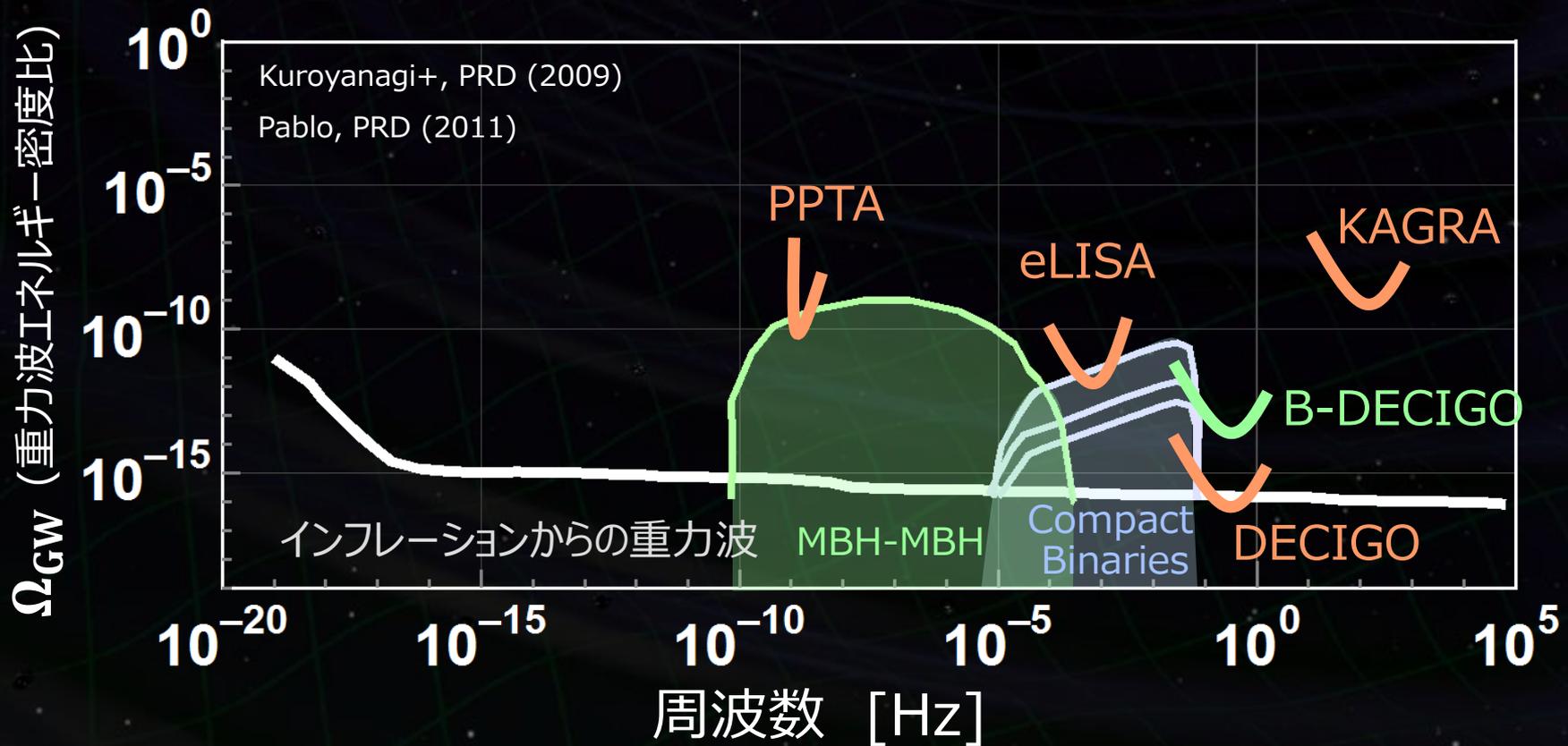
多くのサイクル数 ($\sim 10^5$) の観測 \rightarrow パラメータ推定精度の向上
連星の質量, 位置, 軌道, 合体時刻, (距離), ...

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.



まとめ

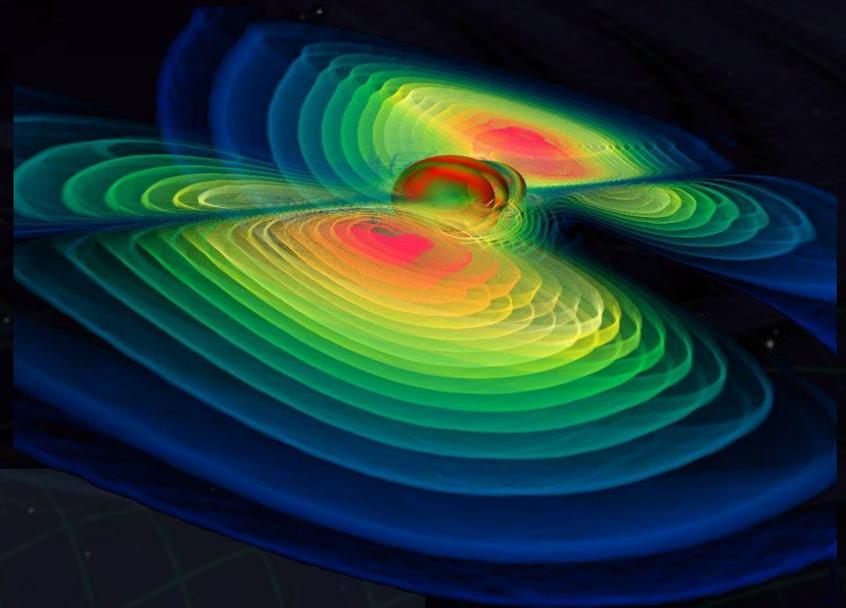
重力波の特徴

- ・質量の加速度運動から放射
- ・物質に対して 強い透過力

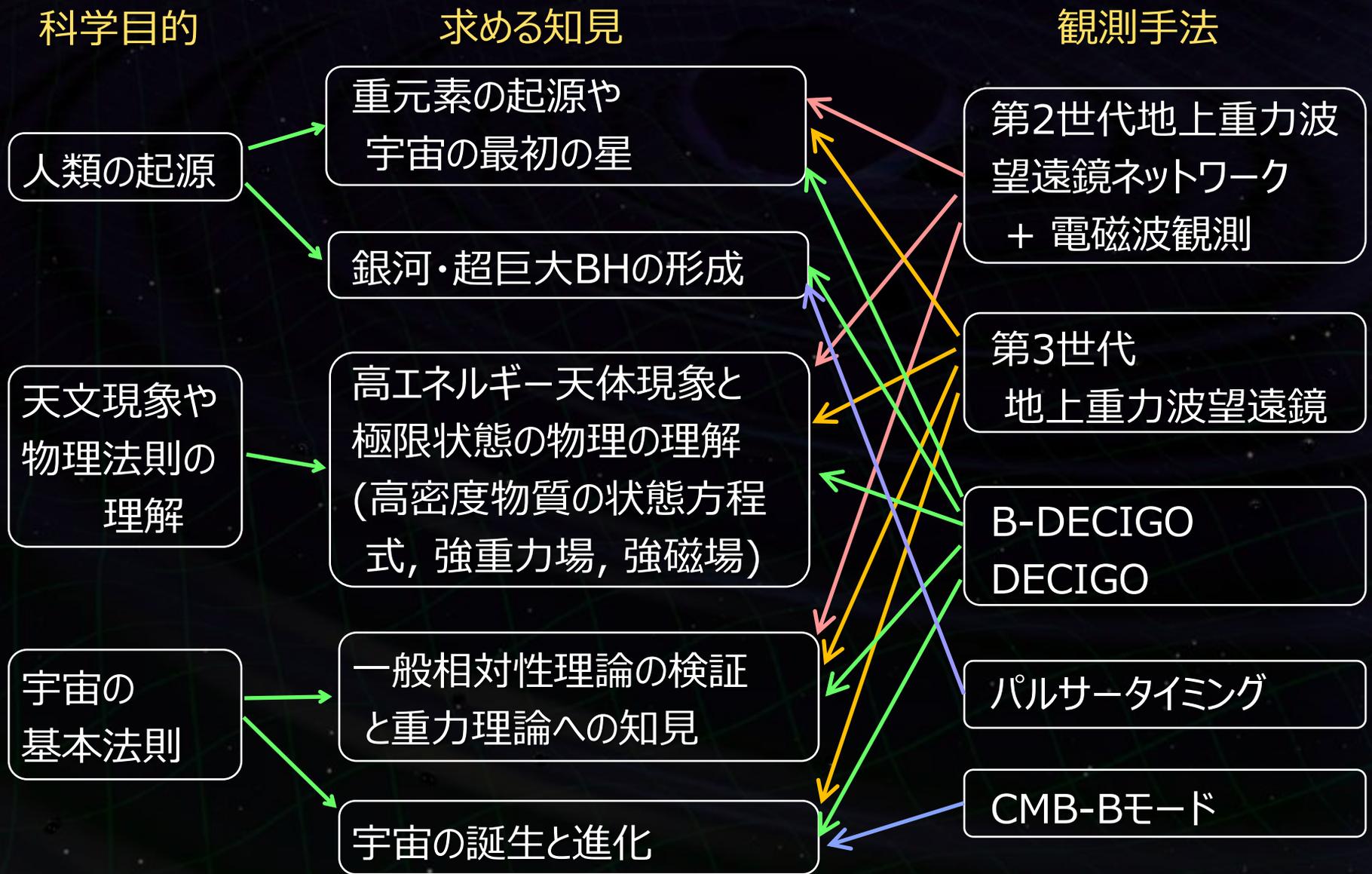


宇宙を観測する新しい手段

- ・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, ブラックホール,
高エネルギー天体現象の内部)



重力波天文学の科学的意義 (個人的観点)



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.
- *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)

- *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.

まとめ

- 一般相対性理論で存在が予言されてから100年を経て、LIGOの重力波望遠鏡によって**重力波の初観測が実現**。
- 観測されたのは、**ブラックホール連星の合体**。このような連星が存在すること、これまで知られていたものより質量が大きかったことなど、**宇宙に対する新たな知見が得られている。「重力波天文学」が確かに幕をあけた**。
- 岐阜県・**神岡**で建設が進められている日本の**重力波望遠鏡KAGRA**は、本格的な重力波天文学へ大きな意義。
- 宇宙重力波望遠鏡DECIGOが実現すれば、**宇宙が始まった瞬間**を直接観測することが期待できる。

終わり