

# 銀河中心ブラックホールの合体形成モデルと重力波観測

真貝寿明 (大阪工大)

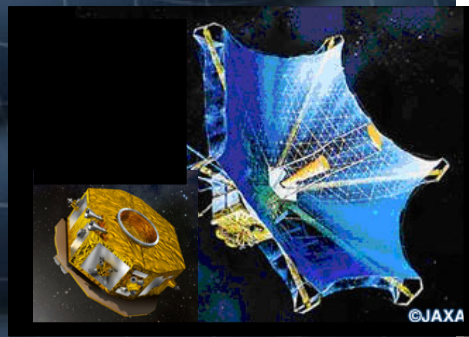
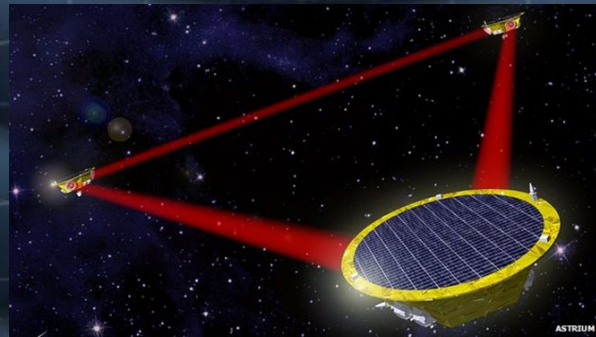


<http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai>

SMBH起源問題は、重力波観測によって決着されると考えられている。

宇宙空間では、地上では観測できない低周波の重力波観測 ( $> 10^3 M$ ) が可能。

SMBHがIMBH経由で合体形成されたとするモデルで、LISA, DECIGO, INOなどでのイベントレートを計算した。



# 銀河中心ブラックホールの合体形成モデルと重力波観測

真貝寿明 (大阪工大)



<http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai>

## Interplanetary Network of Optical Lattice Clocks

光格子時計を宇宙空間に3機配置して、ドップラー追跡法による重力波検出

岩波「科学」2017-12

Int. J. Mod. Phys. submitted

戎崎俊一 (理研)

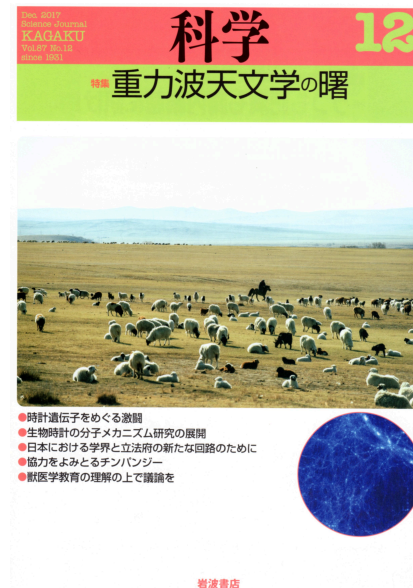
香取秀俊 (東京大/理研)

牧野淳一郎 (神戸大/理研)

野田篤司 (JAXA)

真貝寿明 (大阪工大)

玉川徹 (理研)



SMBH起源問題は、重力波観測によって決着されると考えられている。

宇宙空間では、地上では観測できない低周波の重力波観測 ( $>10^3\text{M}$ ) が可能。

SMBHがIMBH経由で合体形成されたとするモデルで、LISA, DECIGO, **INO**などでのイベントレートを計算した。



# 銀河中心ブラックホールの合体形成モデルと重力波観測

真貝寿明 (大阪工大)



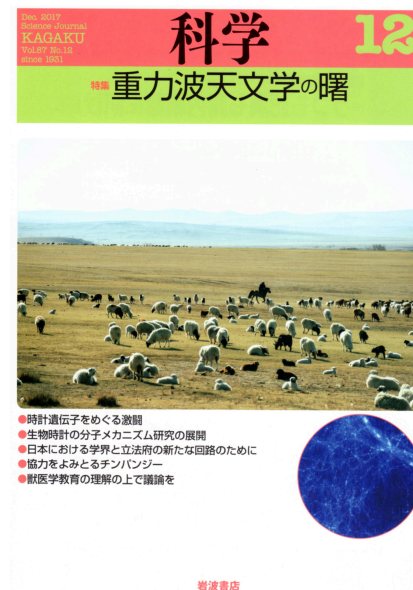
<http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai>

## Interplanetary Network of Optical Lattice Clocks

光格子時計を宇宙空間に3機配置して、ドップラー追跡法による重力波検出

岩波「科学」2017-12  
Int. J. Mod. Phys. submitted

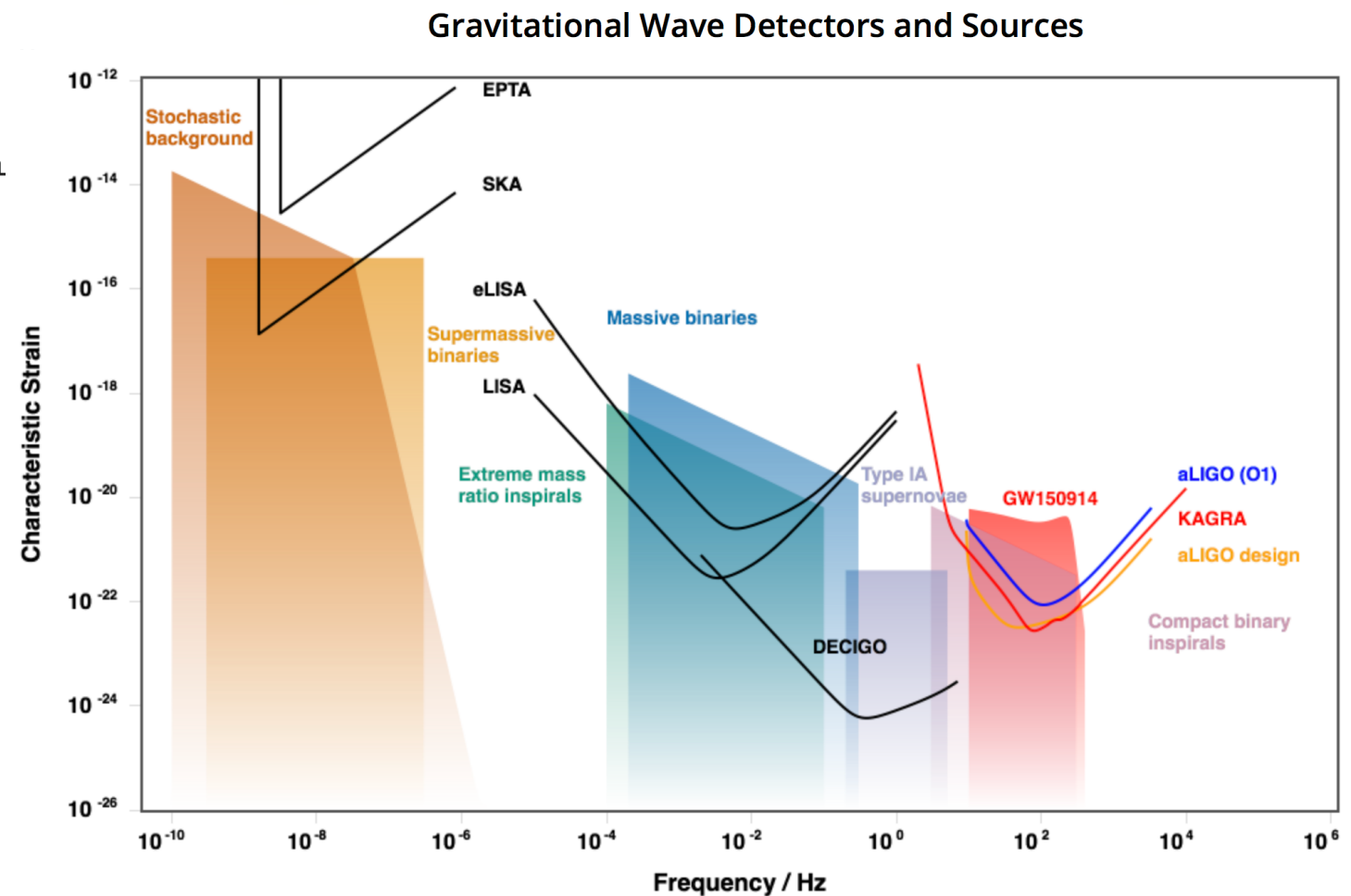
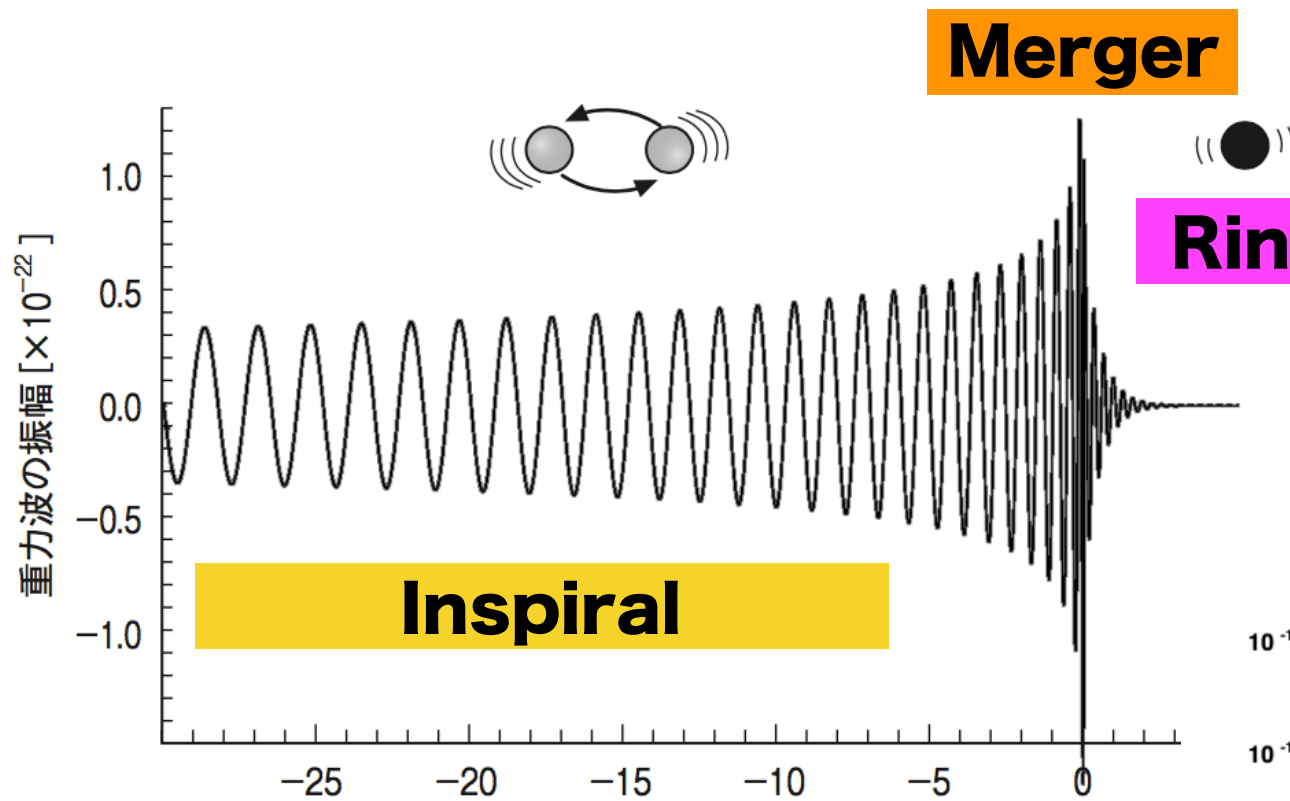
戎崎俊一 (理研)  
香取秀俊 (東京大/理研)  
牧野淳一郎 (神戸大/理研)  
野田篤司 (JAXA)  
真貝寿明 (大阪工大)  
玉川徹 (理研)



伊能忠敬  
(1745-1818)

SMBHがIMBH経由で合体形成されたとするモデルで, LISA, DECIGO, **INO**などでのイベントレートを計算した.

# 1. Introduction



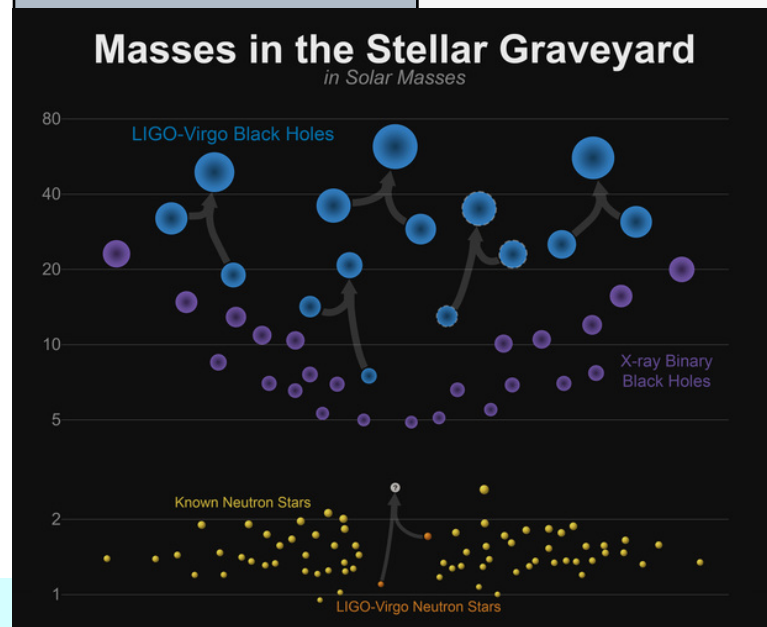
<http://rhcole.com/apps/GWplotter/>



## 1. Introduction

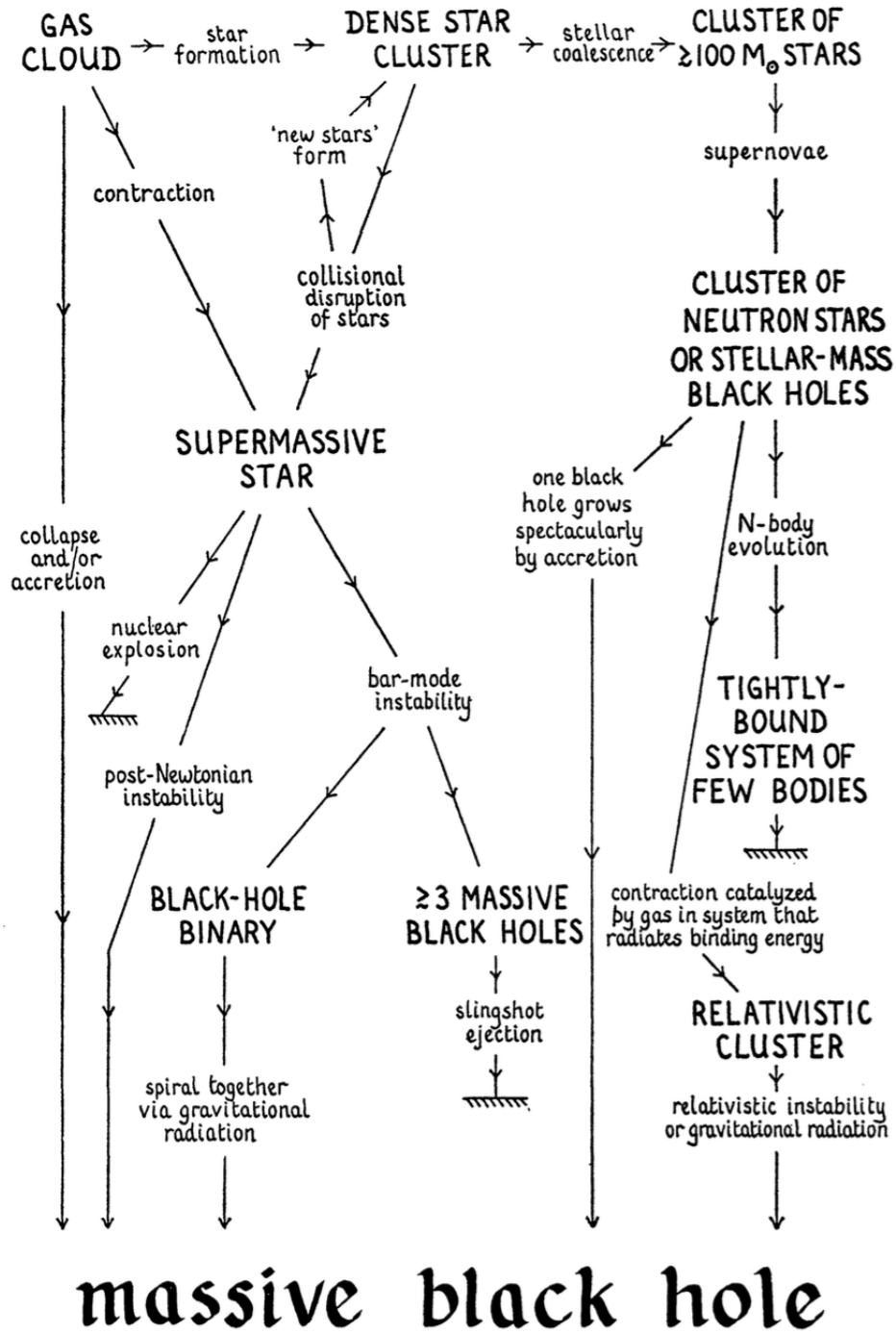
## List of Detected GW events

	ref.	$M1+M2=M_f$ , $M_{diff}/M_{total}$	spin $a_{final}$	Mpc $z$	SNR	deg <sup>2</sup>
<b>GW150914</b>	PRL116, 061102 (2016/2/11)	$36.2+29.1=$ <b>62.3</b> $+3.0$ <b>4.59%</b>	0.68	410Mpc 0.09	<b>23.7</b>	600
<b>LVT151012</b>	(2016/2/11)	$23+13=35+1.5$ <b>2.78%</b>	0.66	1000Mpc 0.20	9.7	
<b>GW151226</b>	PRL116, 241103 (2016/6/15)	$14.2+7.5=20.8+0.9$ <b>4.15%</b>	0.74	440Mpc 0.09	13.0	850
<b>GW170104</b>	PRL118, 221101 (2017/6/1)	$31.2+19.4=$ <b>48.7</b> $+1.9$ <b>3.75%</b>	0.64	880Mpc 0.18	<b>13</b>	1300
<b>GW170608</b>	ApJ 851, L35 (2017/12/18)	$12+7=18.0+1.0$ <b>5.2%</b>	0.69	340Mpc 0.07	13	520
<b>GW170814</b>	PRL119,141101 (2017/10/6)	$30.5+25.3=$ <b>53.2</b> $+2.6$ <b>4.66%</b>	0.70	540Mpc 0.11	<b>18</b>	60
<b>GW170817</b>	PRL119, 161101 (2017/10/16)	$1.36\sim 1.60 + 1.17\sim 1.36$ $= 2.74 + ?$	?	40Mpc	32.4	28

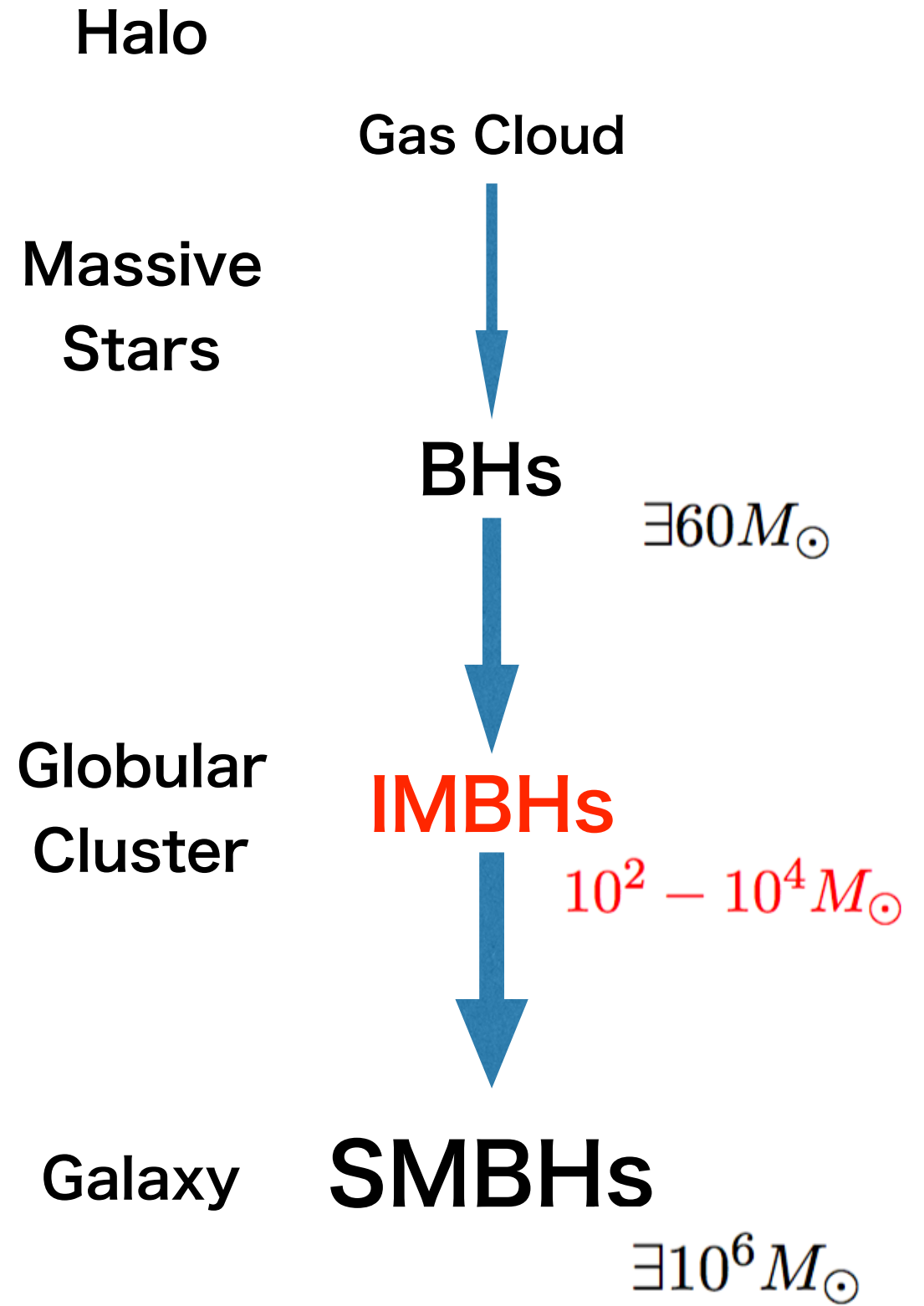


<https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20171016a>

# 1. Introduction

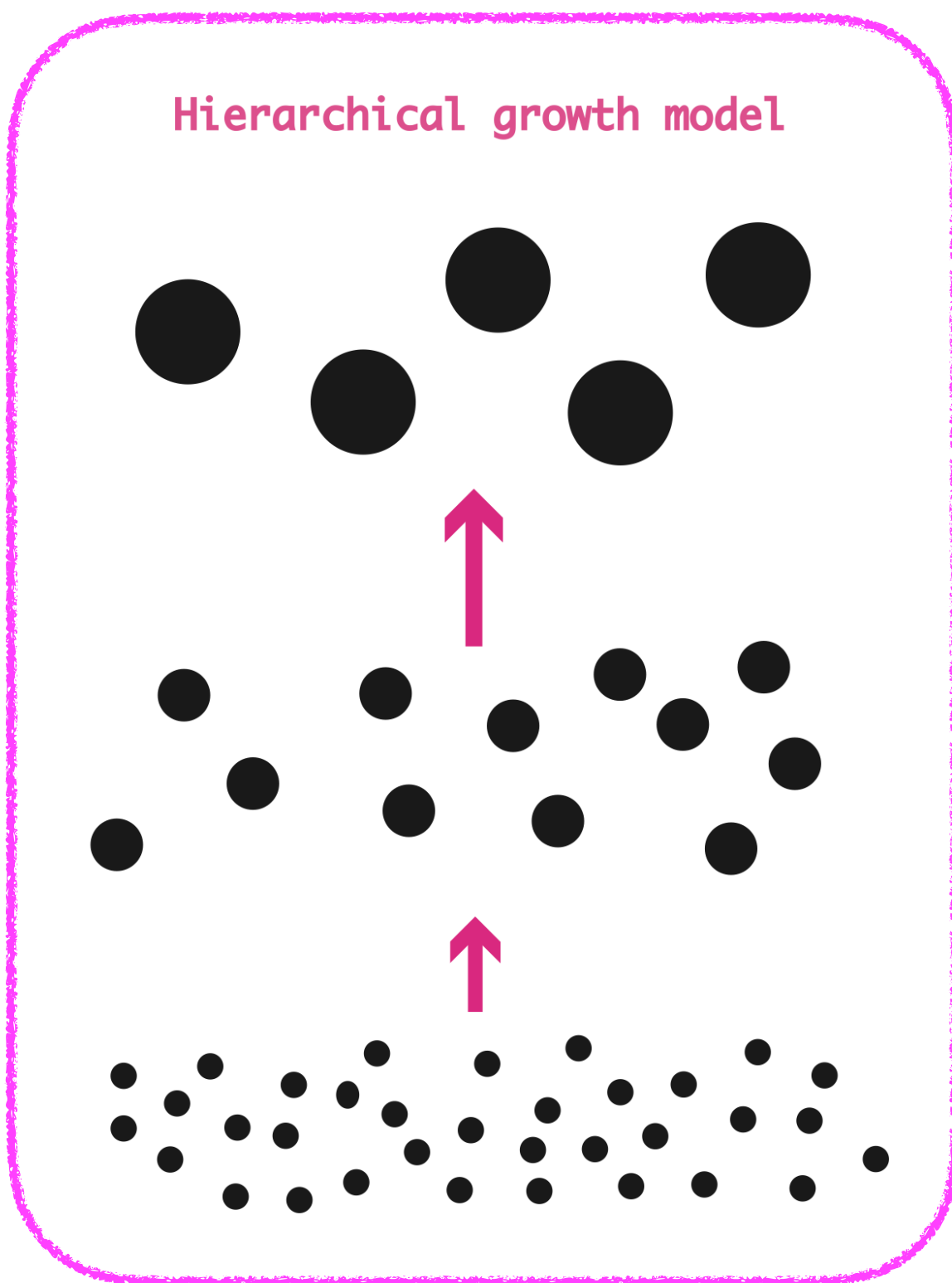


Rees, M.J. 1978. Observatory 98: 210



Ebisuzaki +, ApJ, 562, L19 (2001)

# 1. Introduction



銀河にはいくつBHがあるのか?  
宇宙にはいくつ銀河があるのか?

宇宙にBH合体はいくつ  
生じるか

我々は1年間にいくつ観測  
できるか

重力波で観測可能な距離?  
ground-base / space

宇宙モデル?  
BH spin? Signal-to-Noise?



## 2. Previous Works:

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 835:276 (8pp), 2017 February 1

© 2017. The American Astronomical Society. All rights reserved.

doi:10.3847/1538-4357/835/2/276



CrossMark

### Gravitational Waves from Merging Intermediate-mass Black Holes. II. Event Rates at Ground-based Detectors

Hisa-aki Shinkai<sup>1</sup>, Nobuyuki Kanda<sup>2</sup>, and Toshikazu Ebisuzaki<sup>3</sup>

#### ★1つの銀河内のBH合体数の見積もり

巨大分子雲質量関数

分子雲成長の最大核  $M_{c,max} = 0.20M_c^{0.76}$

銀河SMBHと銀河質量関係

$$\begin{aligned} M_{SMBH} &= 2 \times 10^{-4} M_{galaxy} \\ &= 10^{-3} M_{bulge} \end{aligned}$$

等質量BHのヒエラルキー合体

#### ★宇宙全体の銀河分布の見積もり

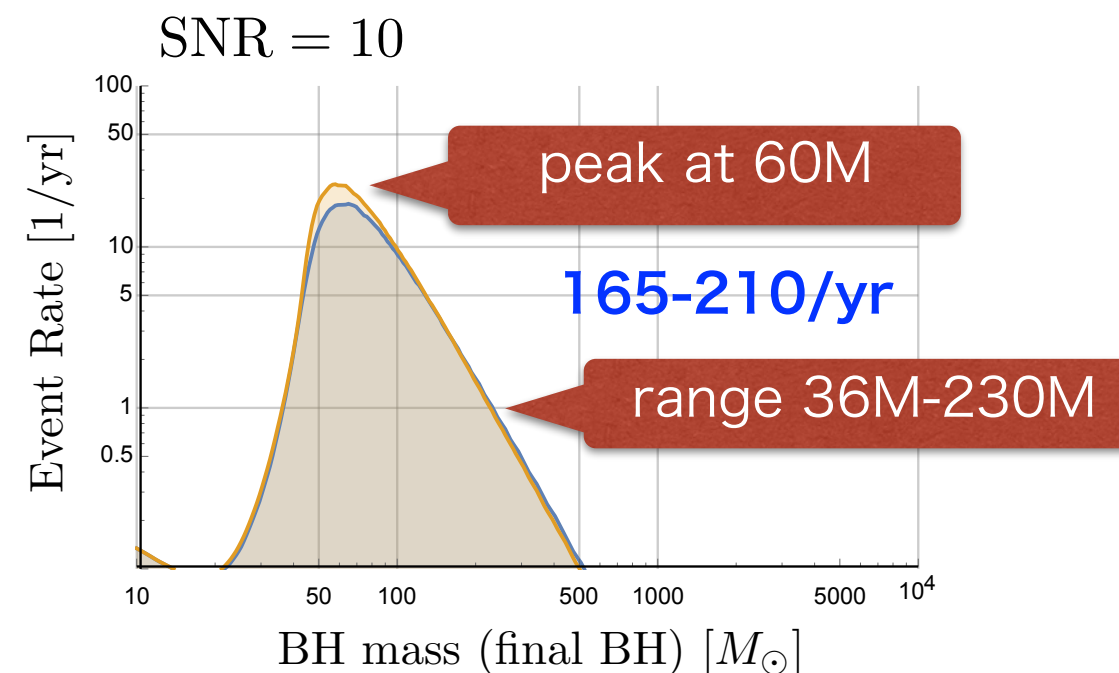
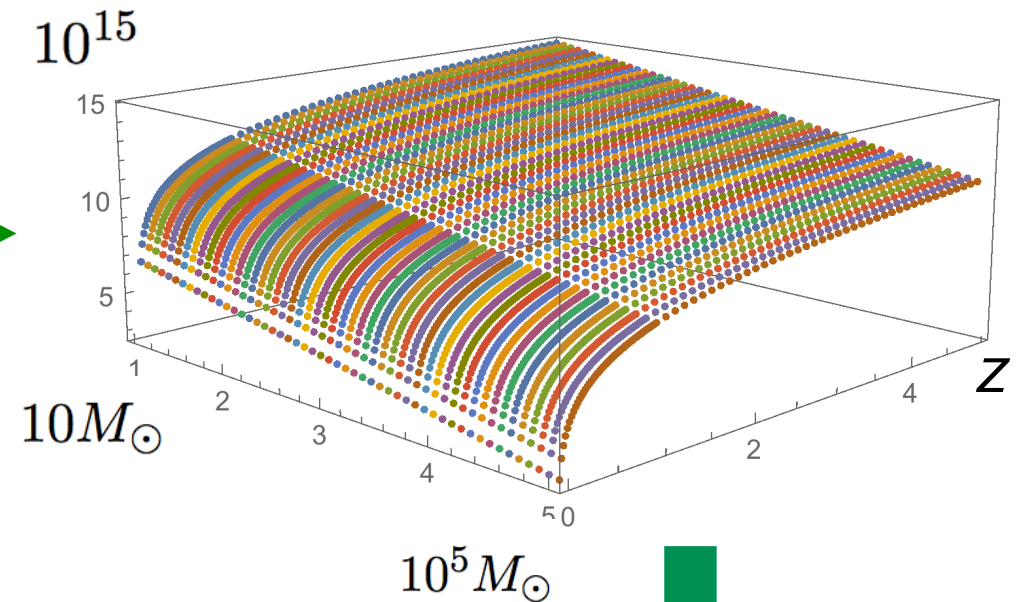
ハローモデルによる銀河質量分布

星形成率の時間進化

#### ★標準宇宙膨張モデル

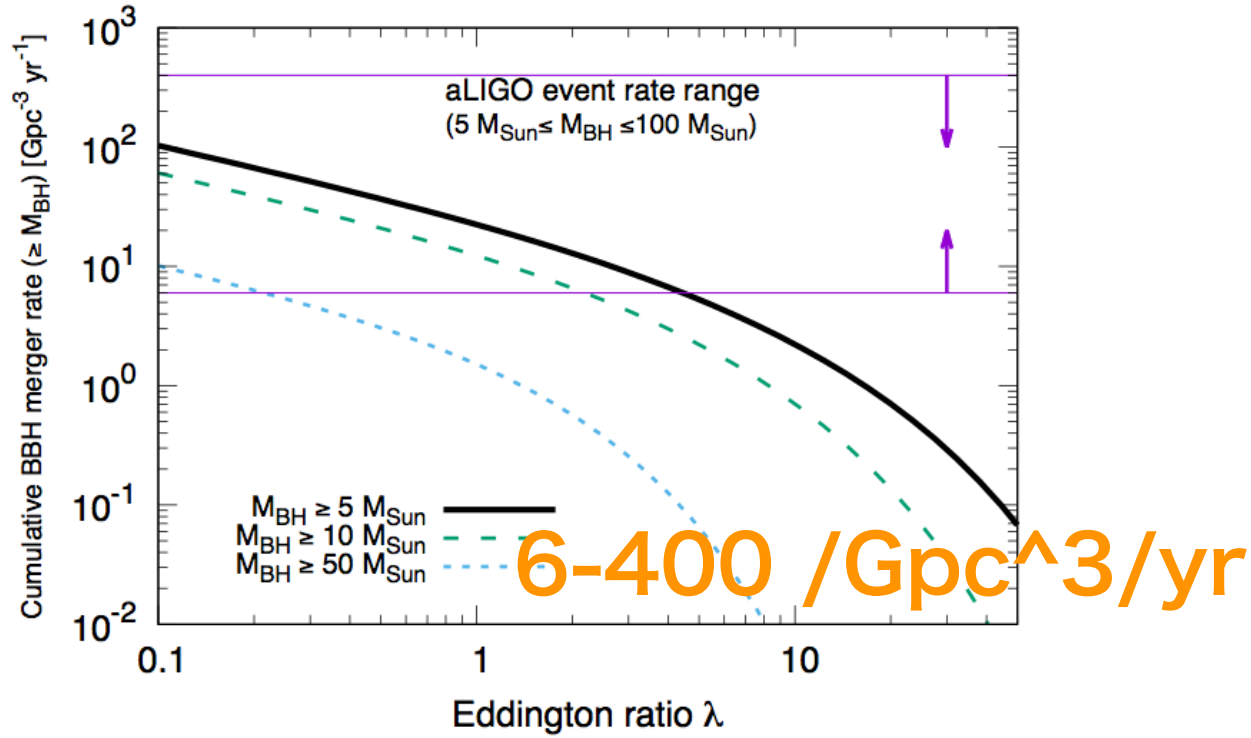
#### ★BH合体のリングダウンモード

#### ★第2世代地上重力波干渉計 KAGRA

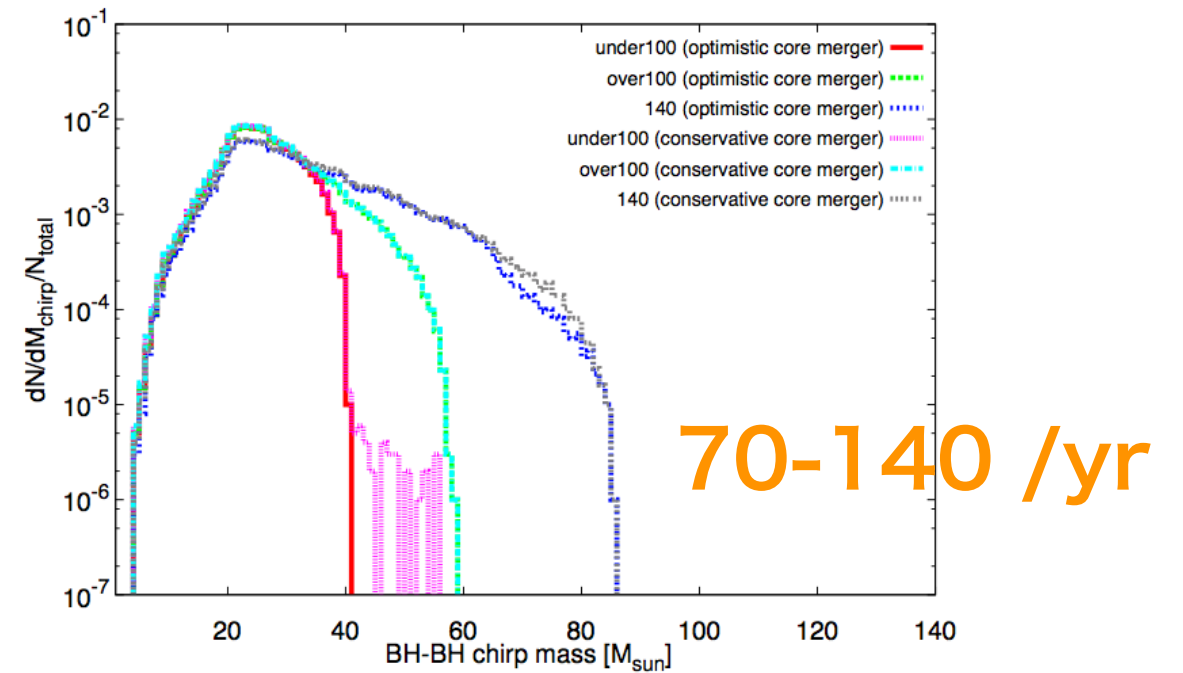


# Event Rates at bKAGRA/aLIGO

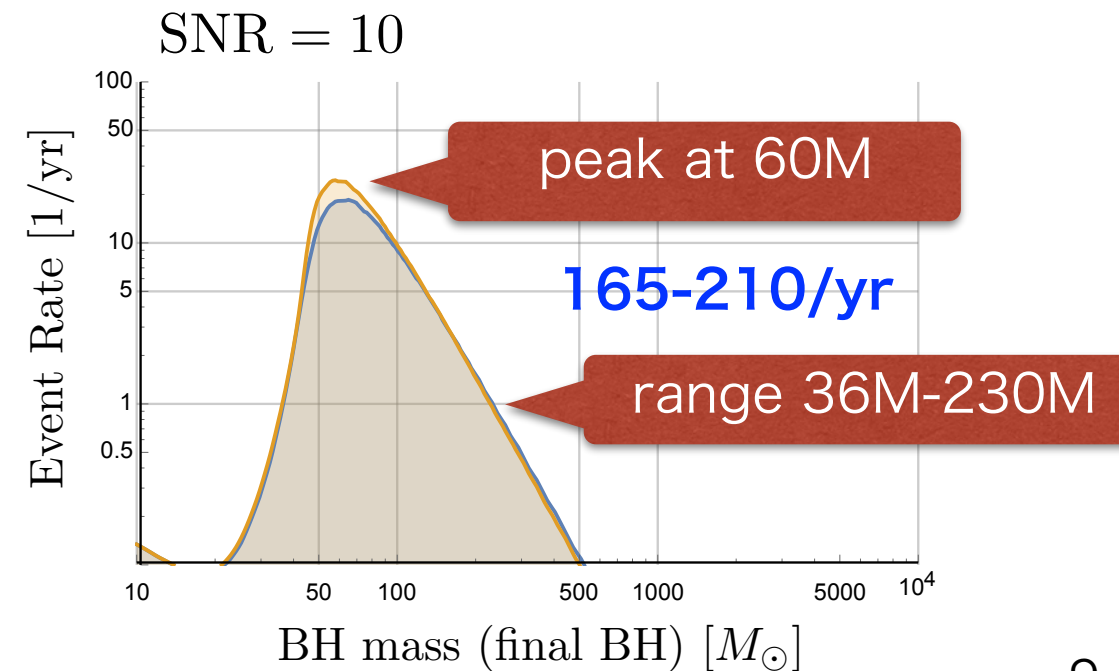
Inoue+ MNRAS461(16)4329



Kinugawa+ MNRAS456(15)1093

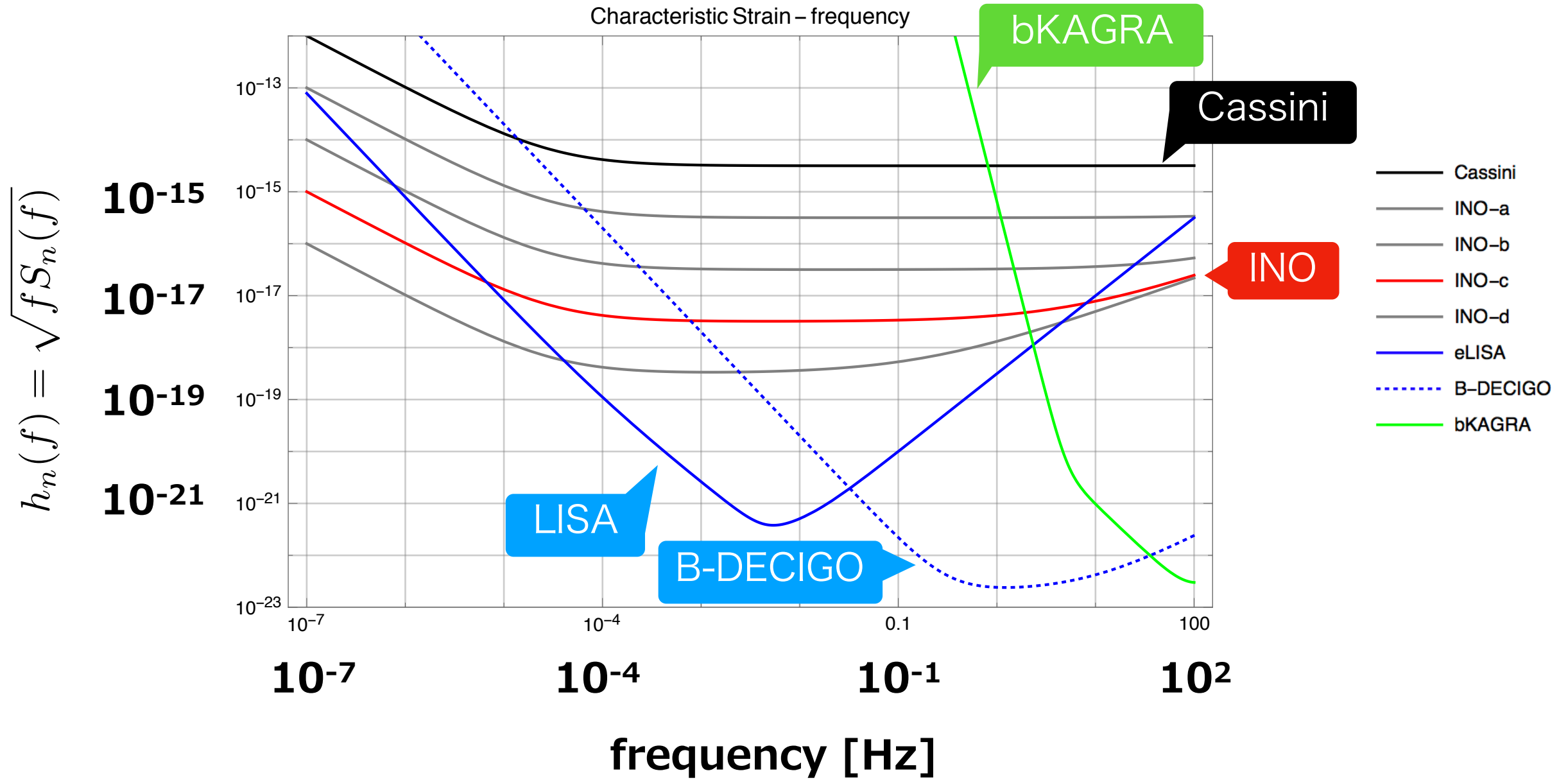


Mass distribution	$R/(\text{Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1})$		
	PyCBC	GstLAL	Combined
	Event based		
GW150914	$3.2^{+8.3}_{-2.7}$	$3.6^{+9.1}_{-3.0}$	$3.4^{+8.8}_{-2.8}$
LVT151012	$9.2^{+30.3}_{-8.5}$	$9.2^{+31.4}_{-8.5}$	$9.1^{+31.0}_{-8.5}$
GW151226	$35^{+92}_{-29}$	$37^{+94}_{-31}$	$36^{+95}_{-30}$
All	$53^{+100}_{-40}$	$56^{+105}_{-42}$	$55^{+103}_{-41}$
	Astrophysical		
Flat in log mass	$31^{+43}_{-21}$	$29^{+43}_{-21}$	$31^{+42}_{-21}$
Power law (-2.35)	$100^{+136}_{-69}$	$94^{+137}_{-66}$	$97^{+135}_{-67}$



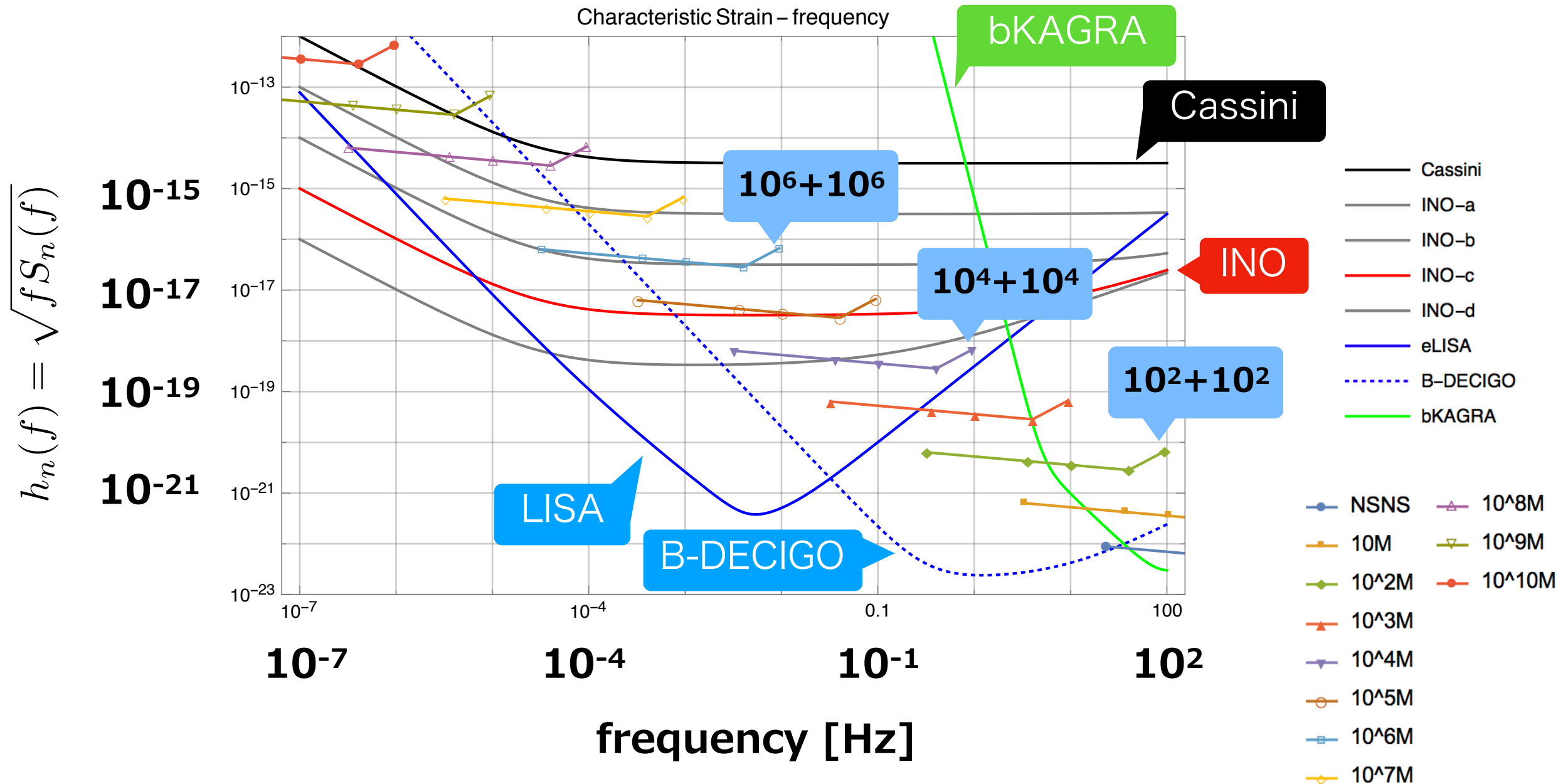
LIGO group PRX6(2016)041015

### 3. 重力波の検出計画と感度曲線

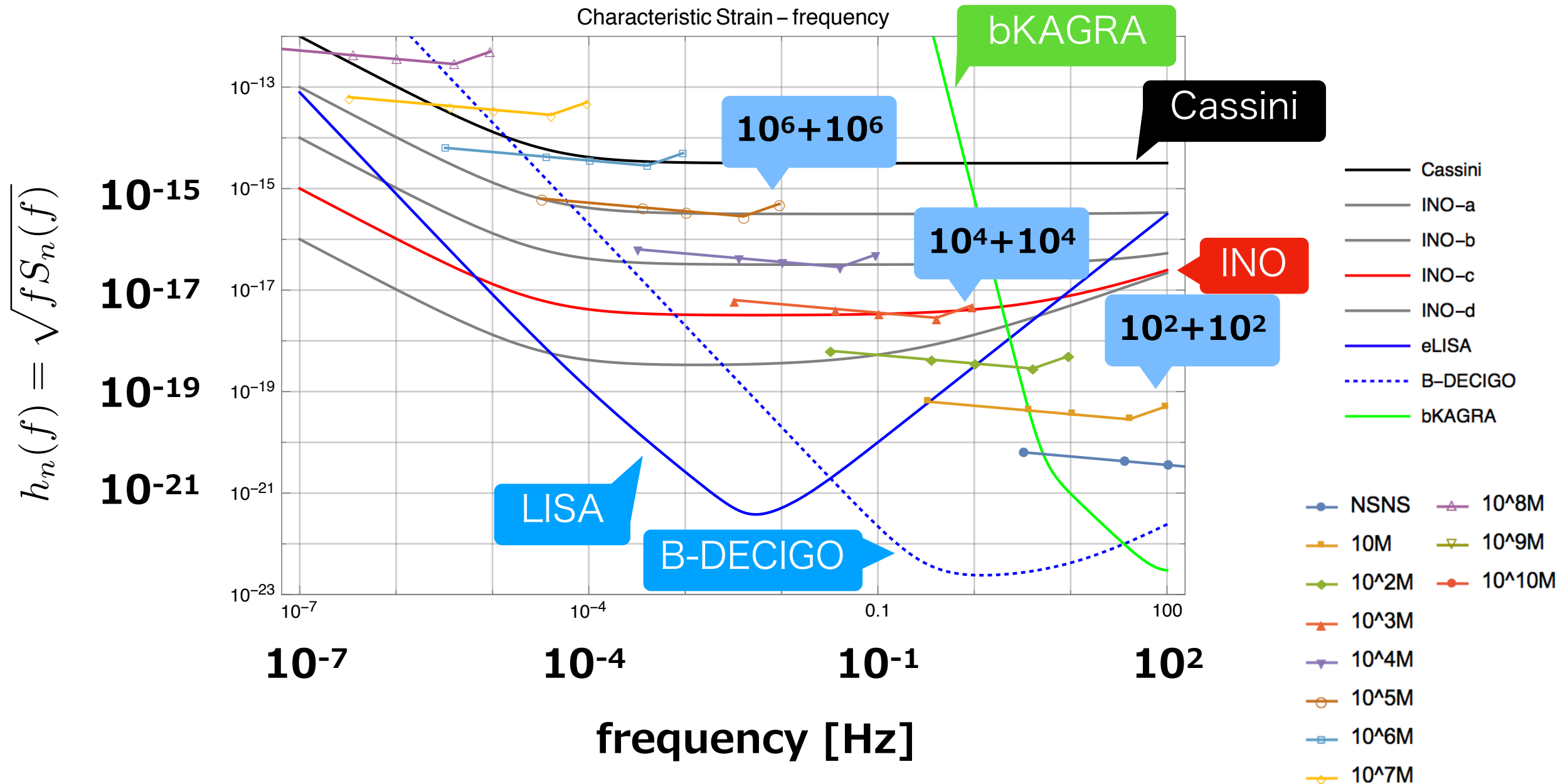




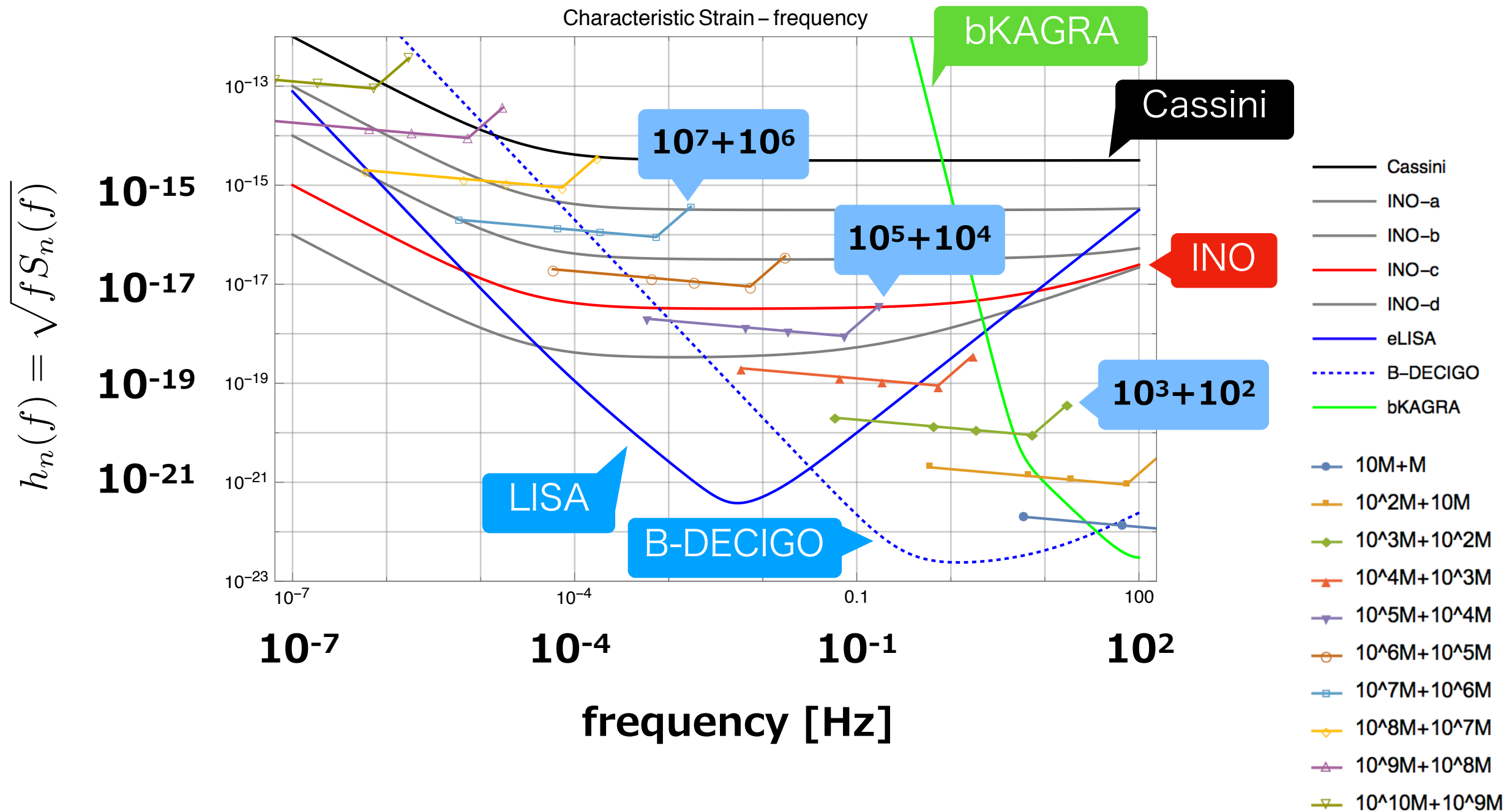
### 3. 重力波の検出計画と感度曲線 + 等質量BH合体@ 1 Gpc



### 3. 重力波の検出計画と感度曲線 + 等質量BH合体@ 100 Mpc

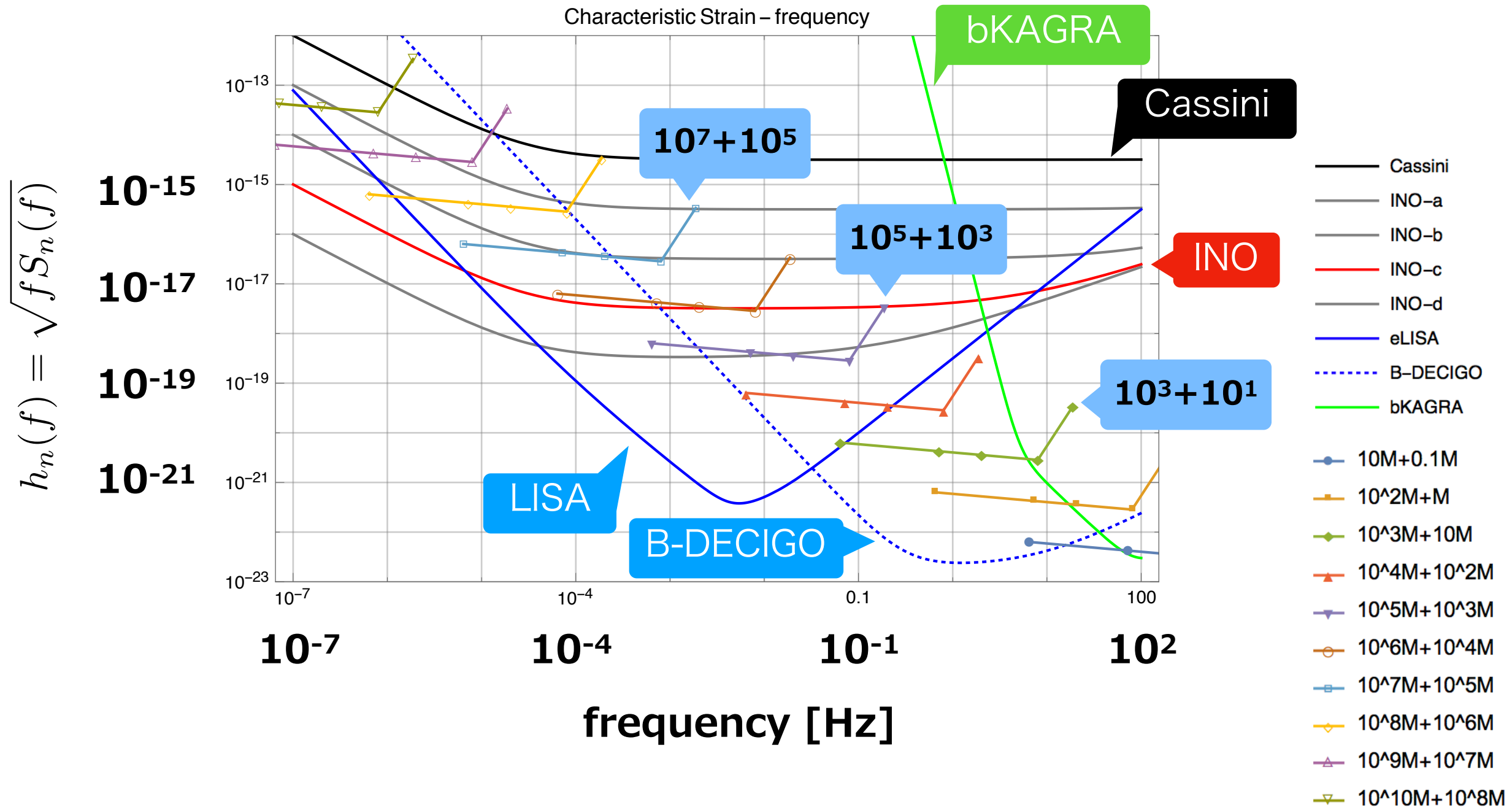


### 3. 重力波の検出計画と感度曲線 + 質量比10のBH合体@ 1 Gpc





### 3. 重力波の検出計画と感度曲線 + 質量比100のBH合体@ 1 Gpc



## 4. 今回のモデル

### ★1つの銀河内のBH合体数の見積もり

巨大分子雲質量関数

分子雲成長の最大核  $M_{c,\max} = 0.20M_c^{0.76}$

銀河SMBHと銀河質量関係

$$\begin{aligned} M_{\text{SMBH}} &= 2 \times 10^{-4} M_{\text{galaxy}} \\ &= 10^{-3} M_{\text{bulge}} \end{aligned}$$

等質量BHのヒエラルキー合体

**あるM以下のBHは  $M^{-1}$  を仮定しない**

### ★宇宙全体の銀河分布の見積もり

ハローモデルによる銀河質量分布

星形成率の時間進化

### ★標準宇宙膨張モデル

### ★BH合体の~~リングダウン~~モード

**インスパイラル**

### ★~~第2世代地上重力波干渉計 KAGRA~~

**宇宙空間 LISA, DECIGO, INO**

## 4. 今回のモデル

### ★1つの銀河内のBH合体数の見積もり

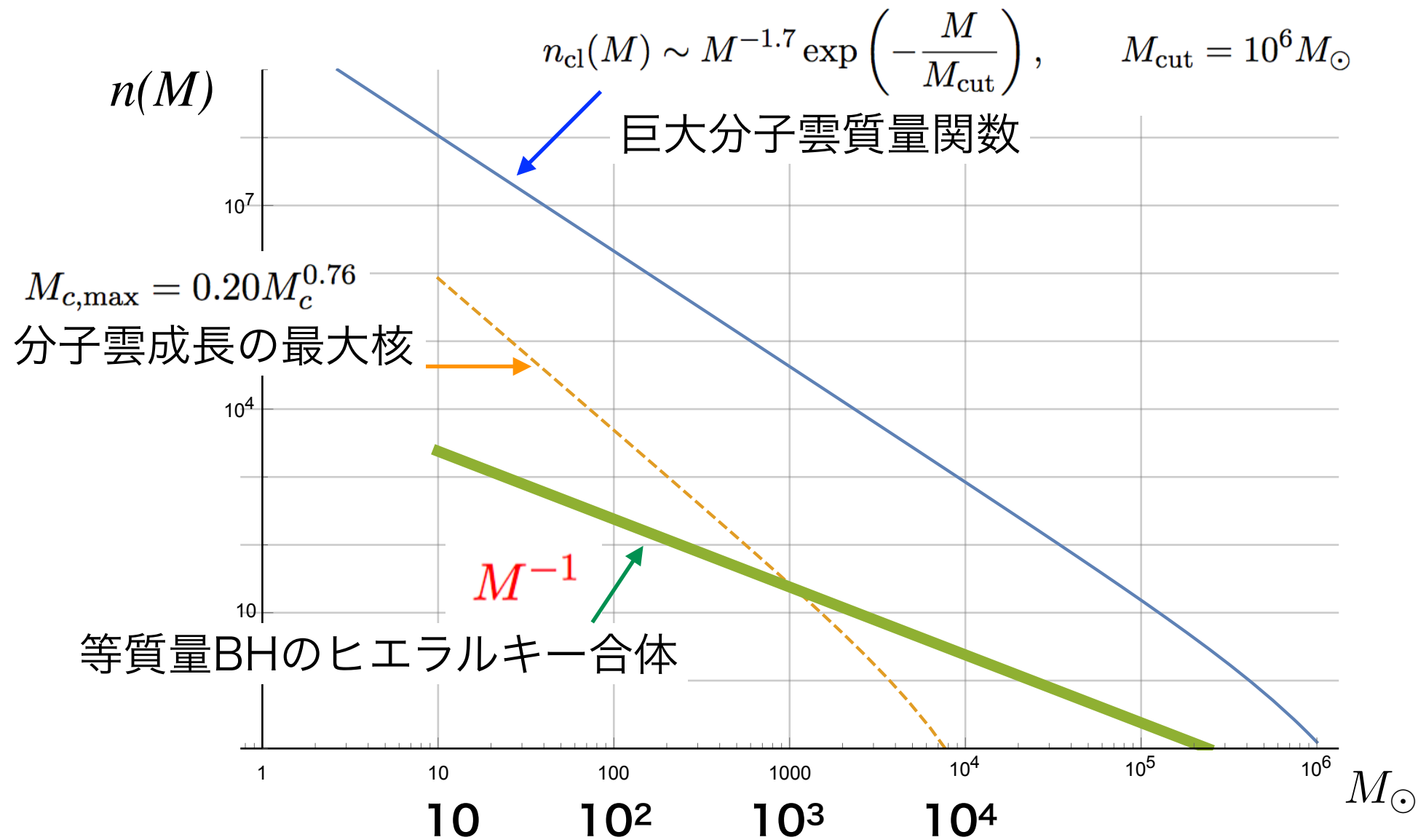
巨大分子雲質量関数

分子雲成長の最大核

銀河SMBHと銀河質量関係

等質量BHのヒエラルキー合体

$10^{12} M_{\text{sun}}$  galaxy





## 4. 今回のモデル

### ★1つの銀河内のBH合体数の見積もり

巨大分子雲質量関数

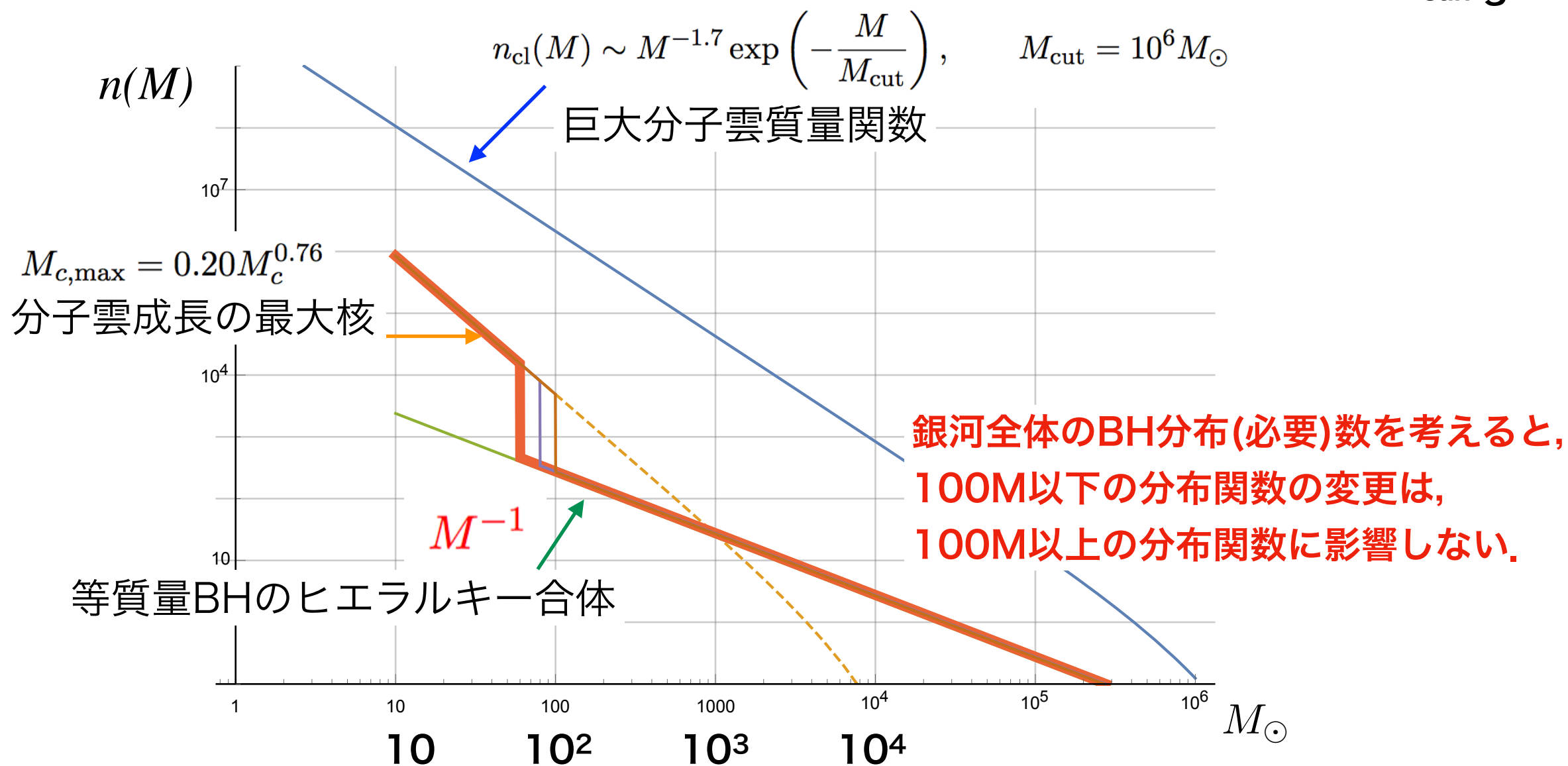
分子雲成長の最大核

銀河SMBHと銀河質量関係

等質量BHのヒエラルキー合体

**60M, 100M以下のBHは  $M^{-1}$  を仮定しない**

$10^{12} M_{\text{sun}}$  galaxy



## 4. 今回のモデル

### ★1つの銀河内のBH合体数の見積もり

巨大分子雲質量関数

分子雲成長の最大核  $M_{c,max} = 0.20M_c^{0.76}$

銀河SMBHと銀河質量関係

$$\begin{aligned} M_{SMBH} &= 2 \times 10^{-4} M_{galaxy} \\ &= 10^{-3} M_{bulge} \end{aligned}$$

等質量BHのヒエラルキー合体

**60M, 100M以下のBHは  $M^{-1}$  を仮定しない**

### ★宇宙全体の銀河分布の見積もり

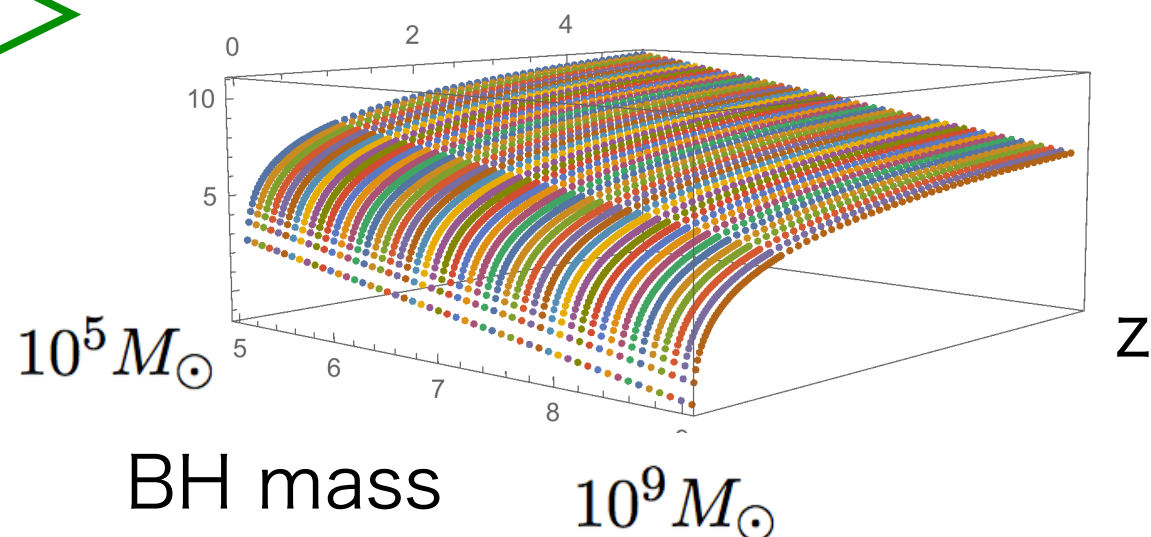
ハローモデルによる銀河質量分布

星形成率の時間進化

### ★標準宇宙膨張モデル

### ★BH合体のインスパイラルモード

### ★宇宙空間 LISA, DECIGO, INO



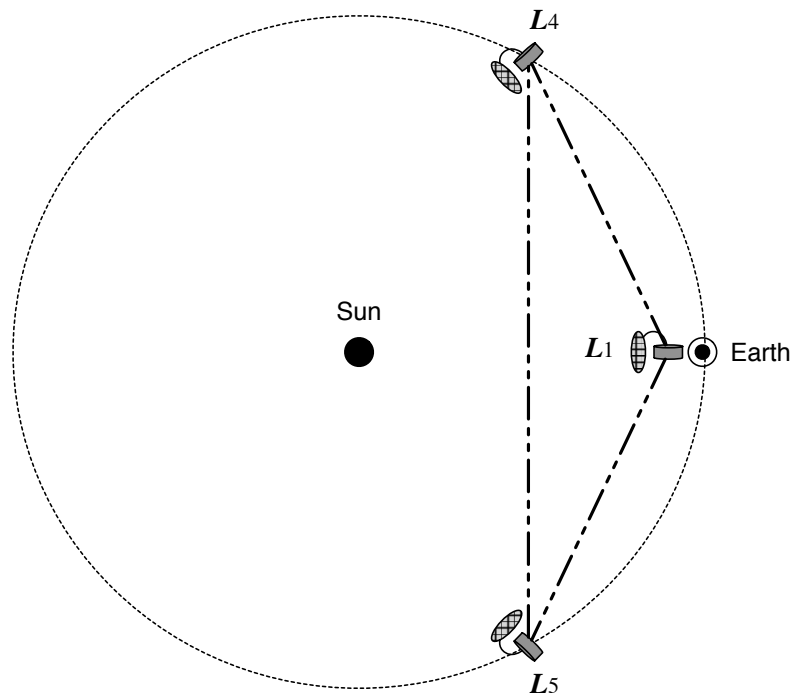
検出器のノイズカーブが与えられたら、観測可能距離**D**が、シグナルノイズ比 **$\rho$** に応じて決まる

$$D = \frac{2}{5} \sqrt{\frac{5}{6}} \frac{c}{\pi^{2/3}} \left( \frac{GM_c}{c^3} \right)^{5/6} \left[ \int_{f_{min}}^{f_{max}} \frac{f^{7/3}}{S_n(f)} df \right]^{1/2} \frac{1}{\rho}$$

観測可能距離**D**が決まれば、観測されるイベントレート・質量プロファイルが決まる

# 4. INO : Interplanetary Network of Optical Lattice Clocks

戎崎俊一（理研），香取秀俊（東京大/理研），野田篤司（JAXA），  
牧野淳一郎（神戸大/理研），真貝寿明（大阪工大/理研），玉川徹（理研）



## 光格子時計

原子をレーザーの定在波の腹に捕獲

多数原子の遷移周波数を読み取る

超分極と多重極効果を相殺する魔法周波数

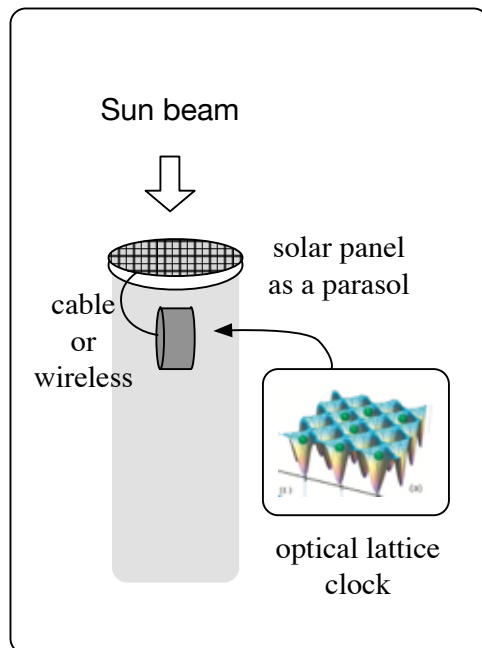
光格子時計は  $\Delta t/t = 10^{-19}$  を視野に入れる

## 基線長 1AU, ドップラー追跡

時間の進み方を比較することで重力波検出

x 干渉計, x ドラッグフリー航法

現在の技術で, Cassiniよりも3桁よい感度が可能



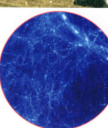
岩波科学2017-12

IJMPD submitted

pdfは真貝のwebより取得できます。



- 時計遺伝子をめぐる激戦
- 生物時計の分子メカニズム研究の展開
- 日本における学界と立法府の新たな回路のために
- 協力をよみとるチンパンジー
- 獣医学教育の理解の上で議論を

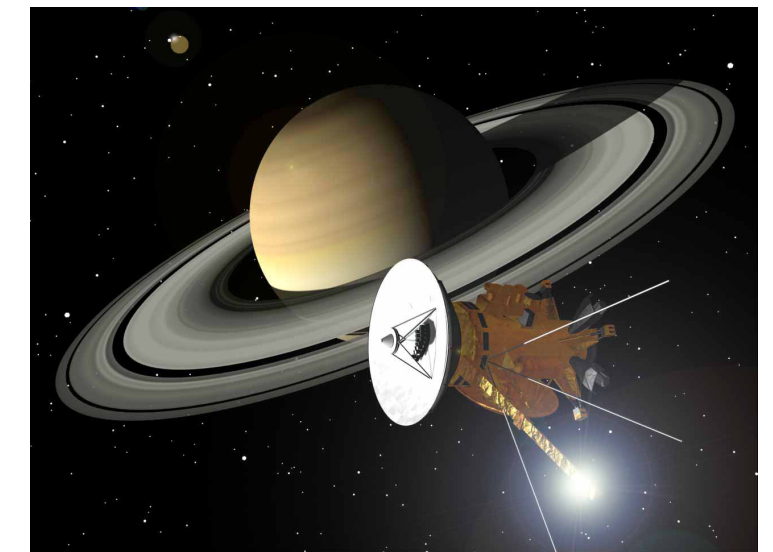


# 4. INO Doppler tracking of Cassini Saturn Explorer

## Cassini 2001-2002 (Armstrong, LRR 2006)



G. Cassini (1625-1712)



Cassini (1997-2017)

Armstrong et al. ApJ, 599, 806 (2003)

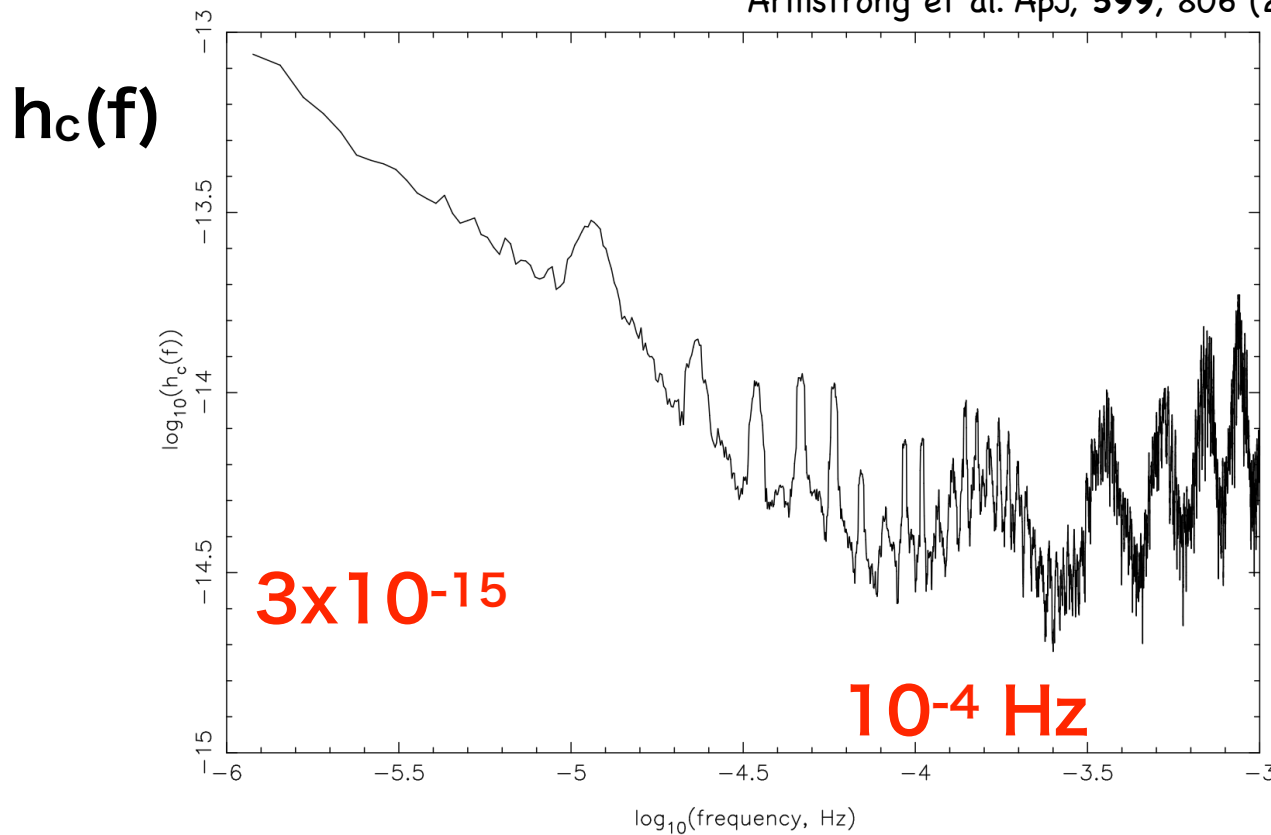
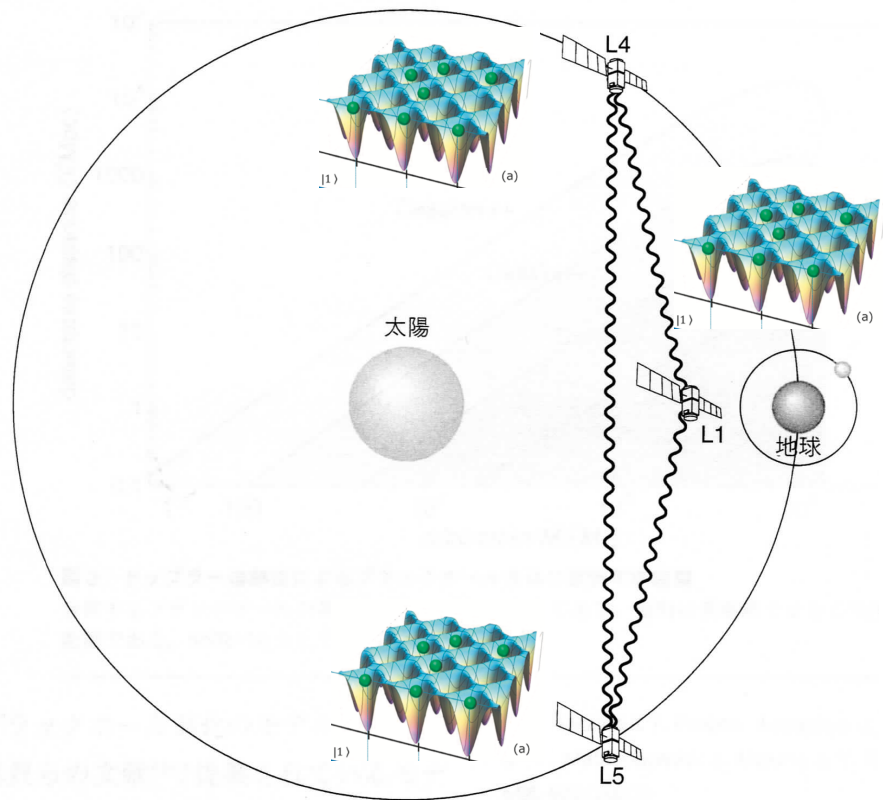


Table 4: Required improvement in subsystems to improve overall Doppler sensitivity by a factor of 10 relative to Cassini-era performance.

Noise source	Comment ( $\sigma_y$ at $\tau = 1000$ s)	Required improvement	
Frequency standard	currently FTS + distribution $\simeq 8 \times 10^{-16}$	$\simeq 8X$	<b>atomic clock</b>
Ground electronics	currently $\simeq 2 \times 10^{-16}$	$\simeq 2X$	<b>troposphere</b>
Tropospheric scintillation	currently $\simeq 10^{-15}$ under favorable conditions	$\simeq 10X$	<b>plasma</b>
Plasma scintillation	Cassini-class radio system probably adequate for calibration to $\simeq 10^{-16}$	$\simeq 1X$	<b>radiation pressure of Sun</b>
Spacecraft motion	currently $\simeq 2 \times 10^{-16}$	$\simeq 2X$	<b>control technology</b>
Antenna mechanical	currently $\simeq 2 \times 10^{-15}$ under favorable conditions	$\simeq 20X$	



# 4. INO Improvement of Doppler sensitivity (1)



**1 AU baseline** ▶  **$10^{-5}\text{Hz}$**

▶ **monitor the time by Opt Lattice Clocks in 3 satellites** need to make it portable

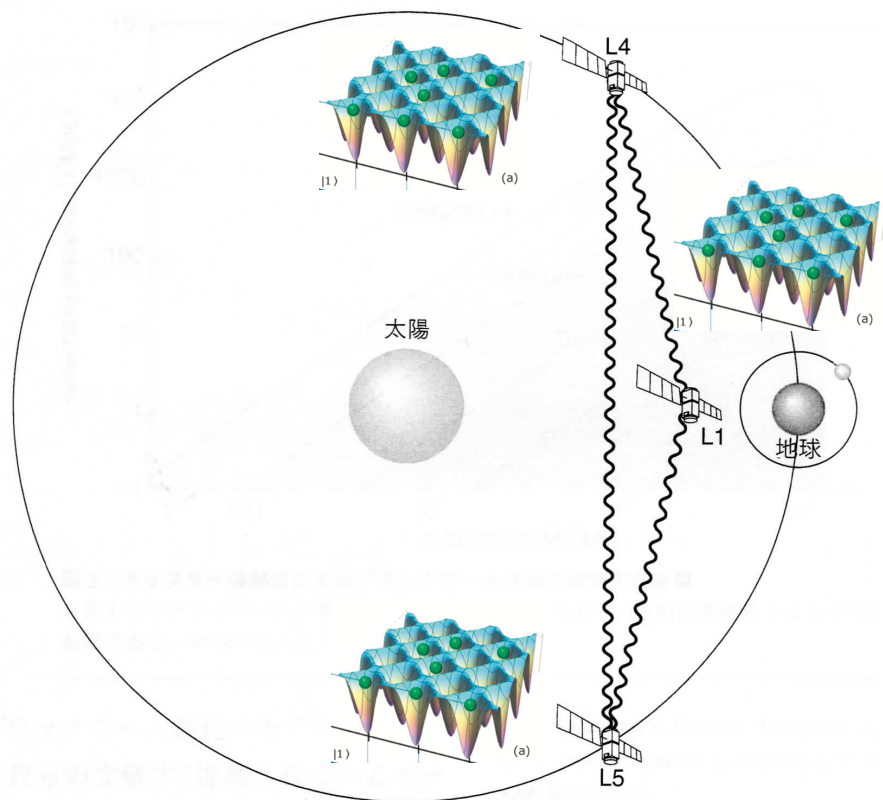
**If radio transmission, use two frequency ranges (double tracking) to check phase differences due to interplanetary plasma**

▶ **If light transmission, no effects from plasma.** need R&D

**Table 4:** Required improvement in subsystems to improve overall Doppler sensitivity by a factor of 10 relative to Cassini-era performance.

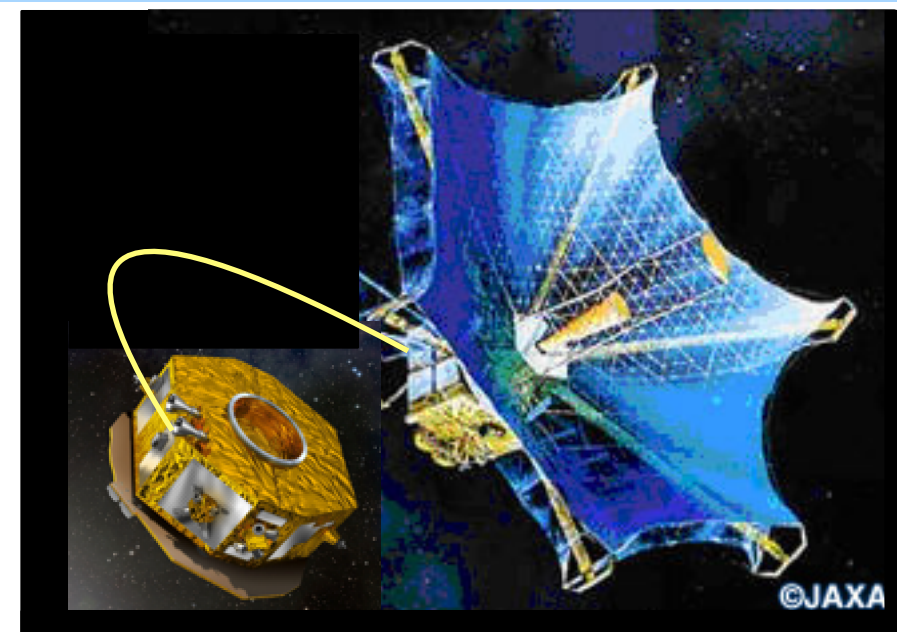
Noise source	Comment ( $\sigma_y$ at $\tau = 1000$ s)	Required improvement	
Frequency standard	currently FTS + distribution $\simeq 8 \times 10^{-16}$	$\simeq 8X$	<b>atomic clock</b> ▶ <b>Opt. Lattice Clock</b>
Ground electronics	currently $\simeq 2 \times 10^{-16}$	$\simeq 2X$	
Tropospheric scintillation	currently $\simeq 10^{-15}$ under favorable conditions	$\simeq 10X$	<b>troposphere</b> ▶ <b>in space</b>
Plasma scintillation	Cassini-class radio system probably adequate for calibration to $\simeq 10^{-16}$	$\simeq 1X$	<b>plasma</b> ▶ <b>light transmission</b>
Spacecraft motion	currently $\simeq 2 \times 10^{-16}$	$\simeq 2X$	<b>rad. pressure</b> ▶ <b>solar panel parasol</b>
Antenna mechanical	currently $\simeq 2 \times 10^{-15}$ under favorable conditions	$\simeq 20X$	<b>control technology</b>

# 4. INO Improvement of Doppler sensitivity (2)



**1 AU baseline** ▶  **$10^{-5}$  Hz**

rad. press.  $F=P/c$   
 $P=1.3 \text{ kW/m}^2$   
**1000 kg, 10 m<sup>2</sup>**  
 acceleration  
 $a=5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$   
 $\Delta P/P \doteq 1/1000$   
 $\Delta a/a \doteq 10^{-11}$   
 ▶ **solar panel parasol**  
 $\Delta g/g \doteq 10^{-12}$

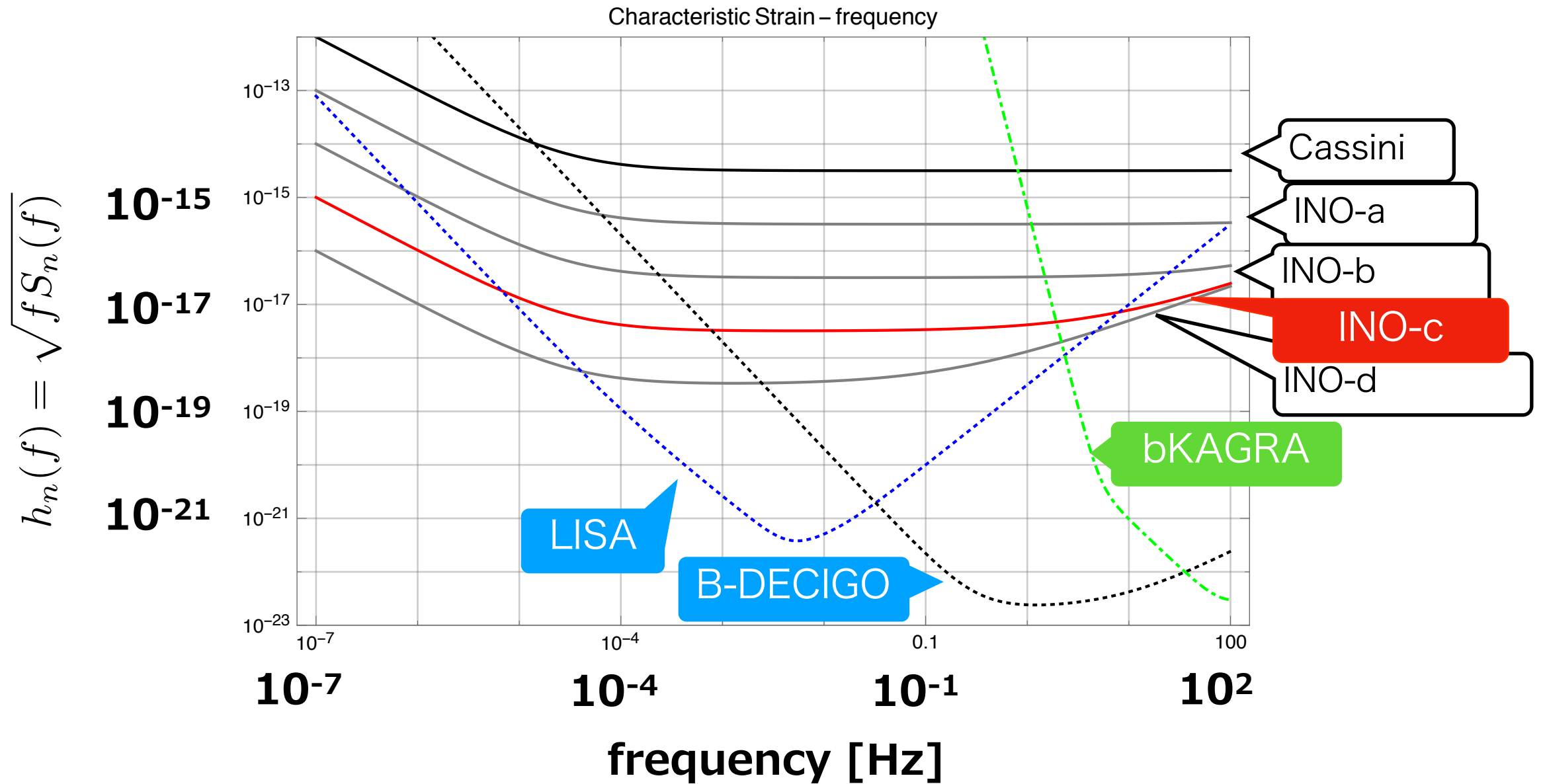


**Table 4:** Required improvement in subsystems to improve overall Doppler sensitivity by a factor of 10 relative to Cassini-era performance.

Noise source	Comment ( $\sigma_y$ at $\tau = 1000$ s)	Required improvement	
Frequency standard	currently FTS + distribution $\simeq 8 \times 10^{-16}$	$\simeq 8X$	<b>atomic clock</b> ▶ <b>Opt. Lattice Clock</b>
Ground electronics	currently $\simeq 2 \times 10^{-16}$	$\simeq 2X$	
Tropospheric scintillation	currently $\simeq 10^{-15}$ under favorable conditions	$\simeq 10X$	<b>troposphere</b> ▶ <b>in space</b>
Plasma scintillation	Cassini-class radio system probably adequate for calibration to $\simeq 10^{-16}$	$\simeq 1X$	<b>plasma</b> ▶ <b>light transmission</b>
Spacecraft motion	currently $\simeq 2 \times 10^{-16}$	$\simeq 2X$	<b>rad. pressure</b> ▶ <b>solar panel parasol</b>
Antenna mechanical	currently $\simeq 2 \times 10^{-15}$ under favorable conditions	$\simeq 20X$	<b>control technology</b>

# 4. INO Improvement of Doppler sensitivity (3)

**With current technologies, we can obtain 3-order less than Cassini !**



← sensitivity  $f^{-1}$

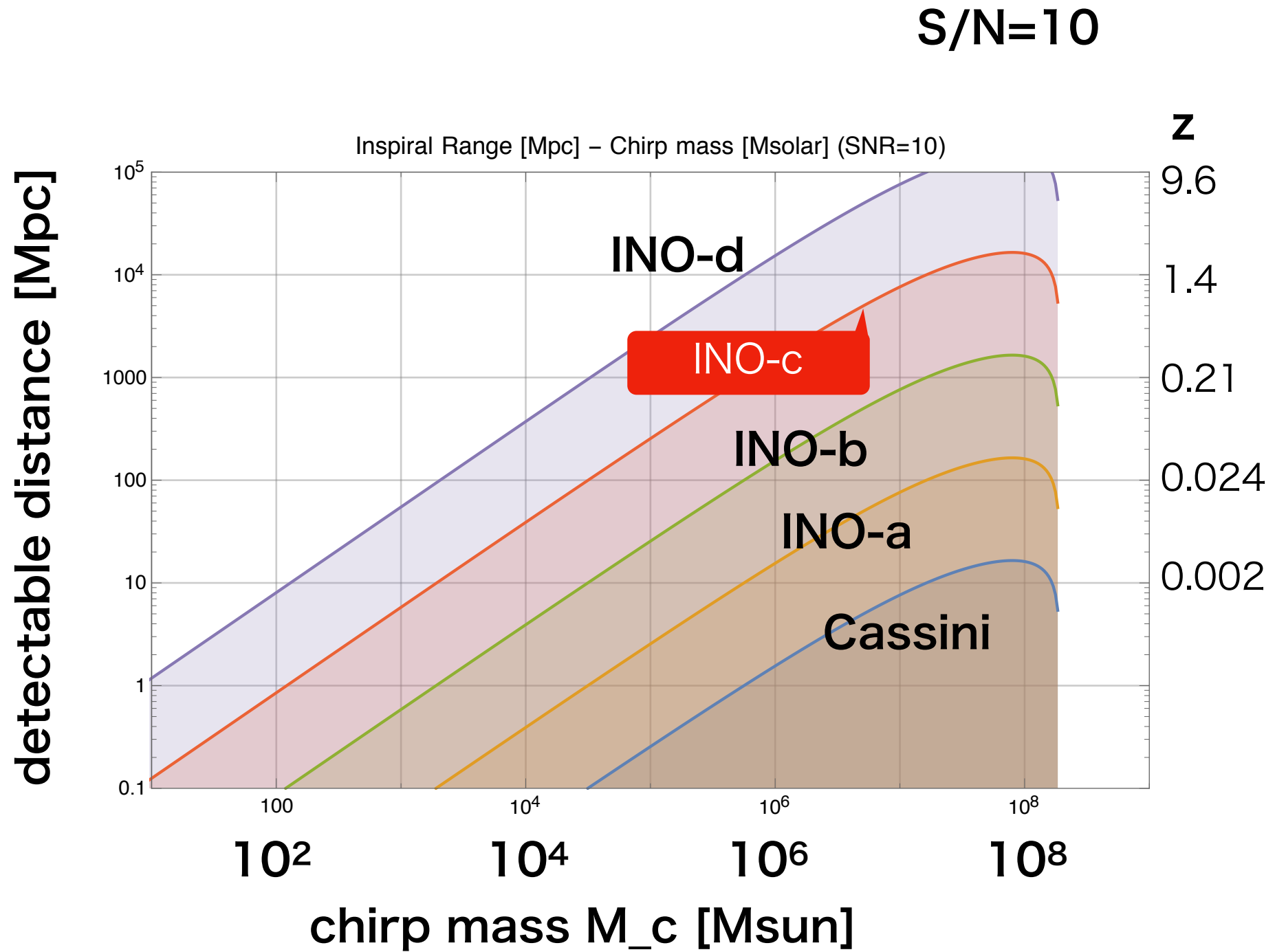
satellite control perturbation

→ sensitivity  $f^{2/3} + 10^{-18}$

Opt. Lattice Clock limitation

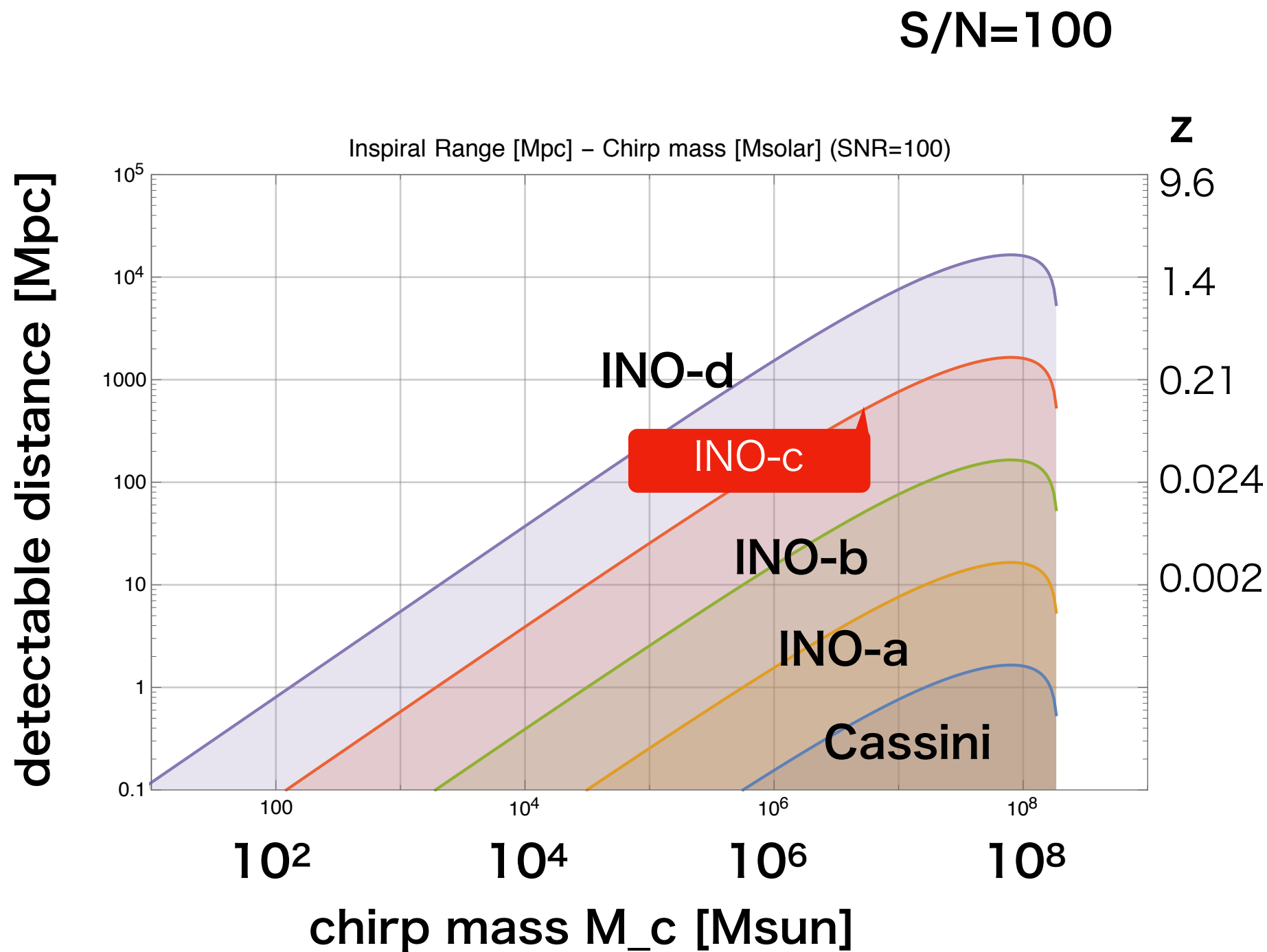
4. INO

GW obs. using Optical Lattice Clocks : detectable distance



4. INO

GW obs. using Optical Lattice Clocks : detectable distance





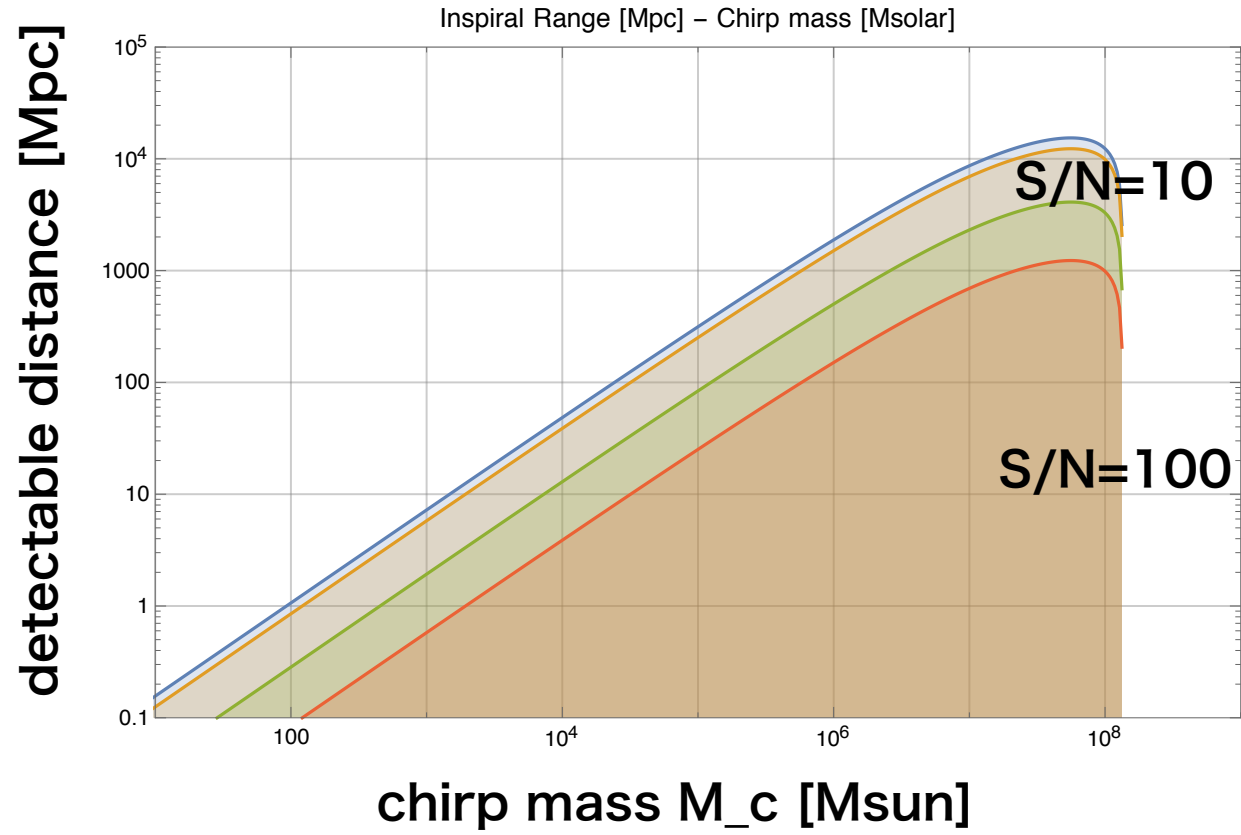
4. INO

GW obs. using Optical Lattice Clocks : detectable distance

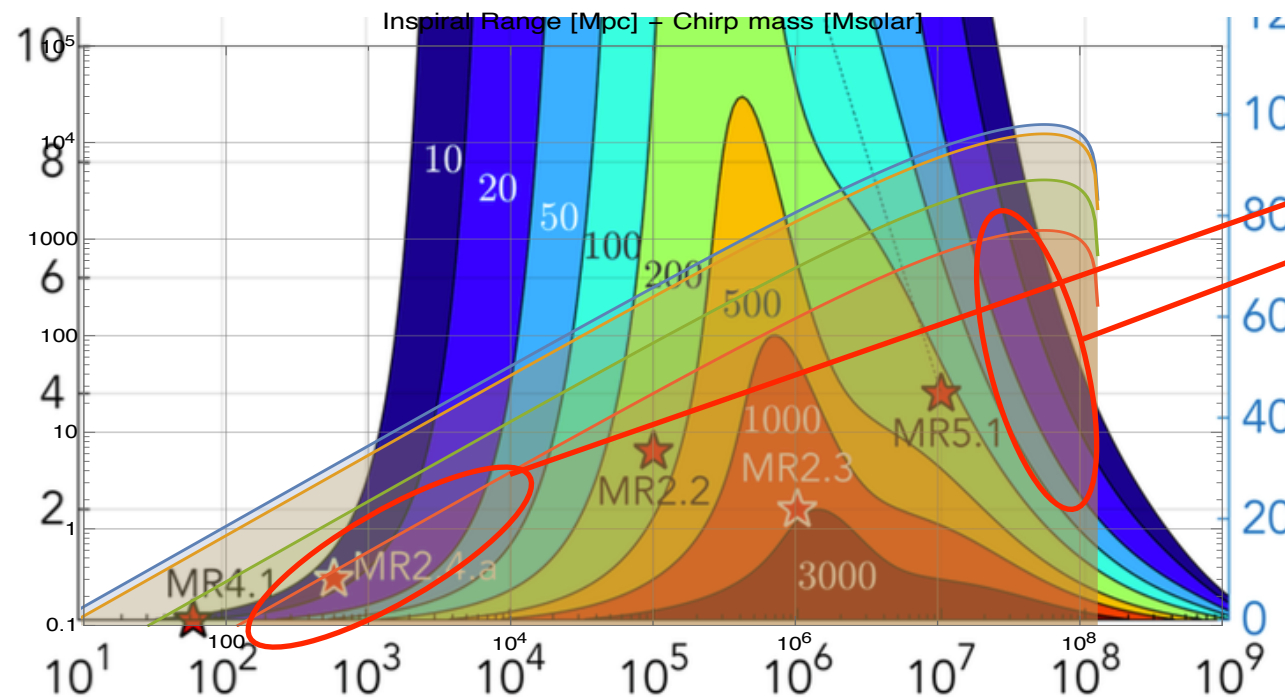
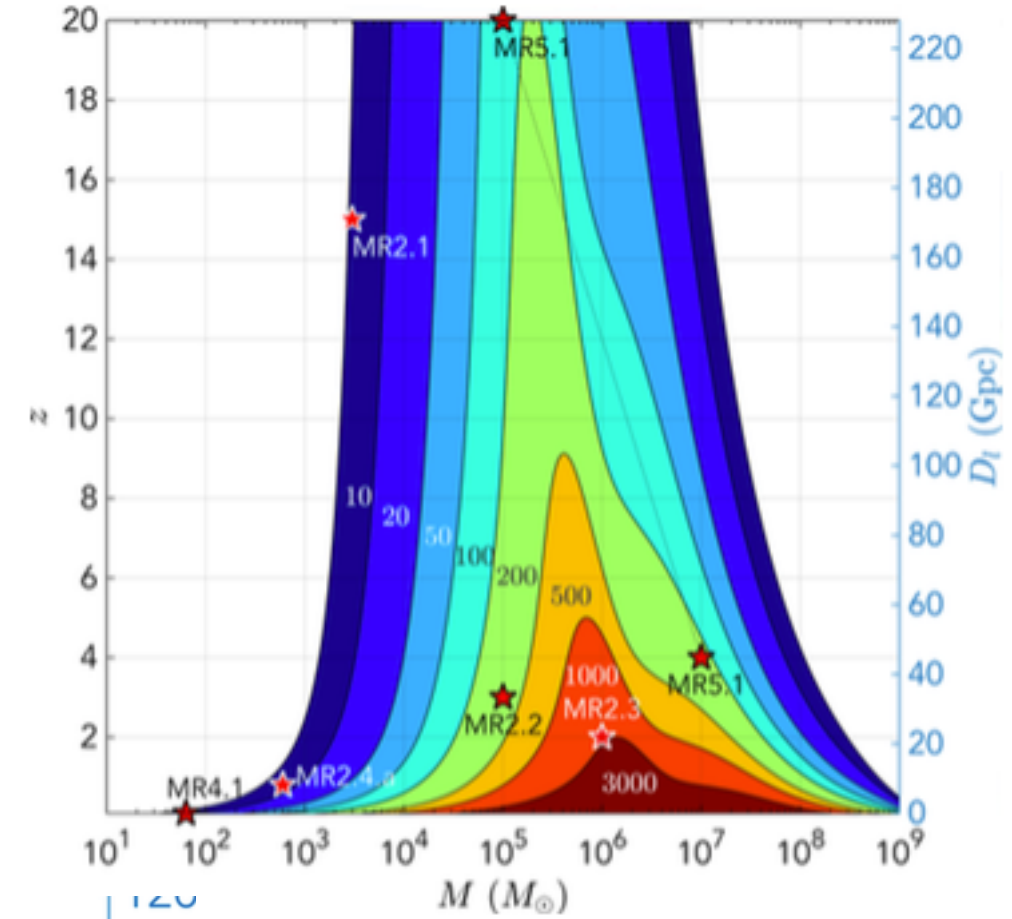
$q=0.2$

mass ratio  $q=0.2$

INO-c



LISA 1702.00786

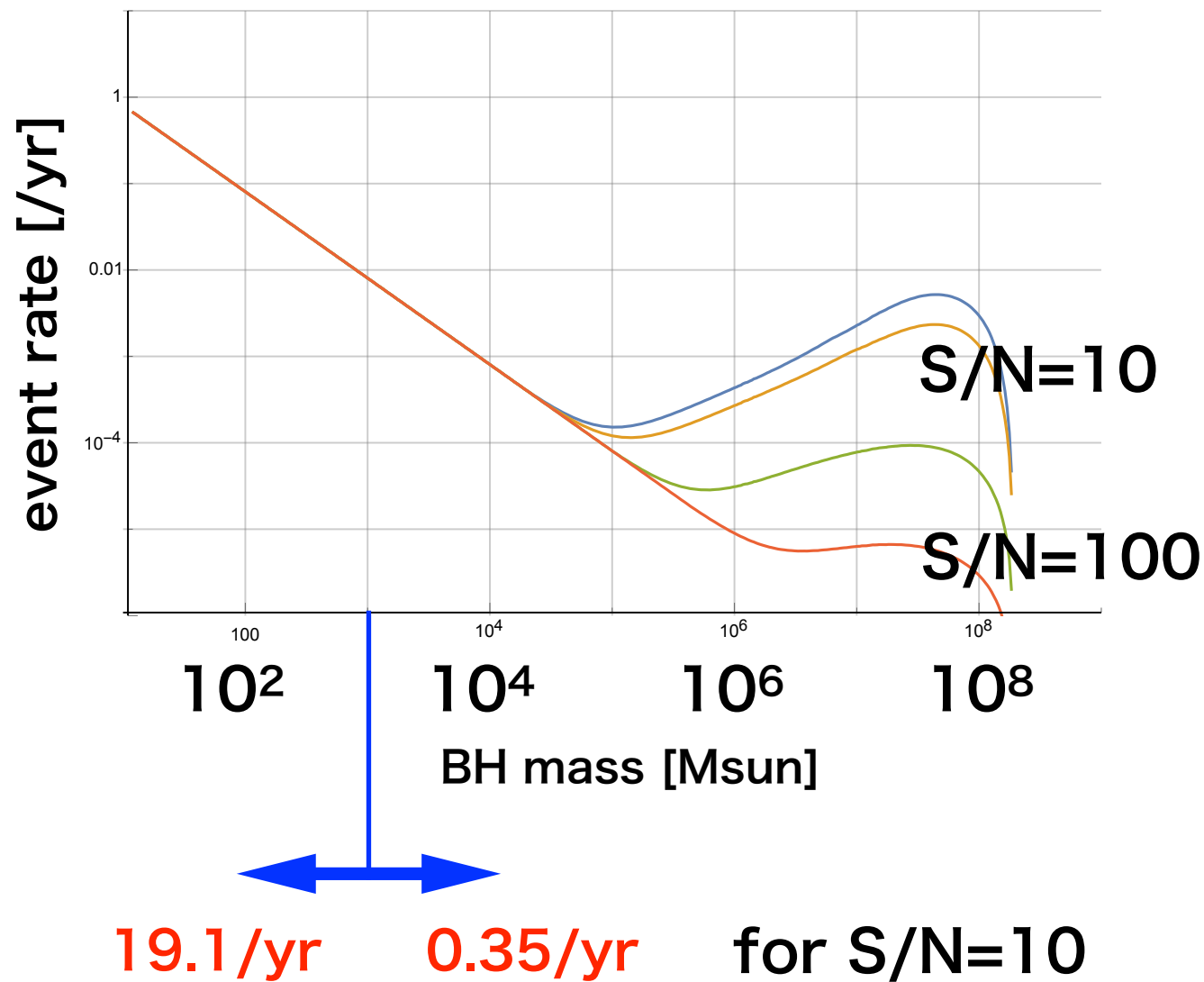


INO-c is better than LISA

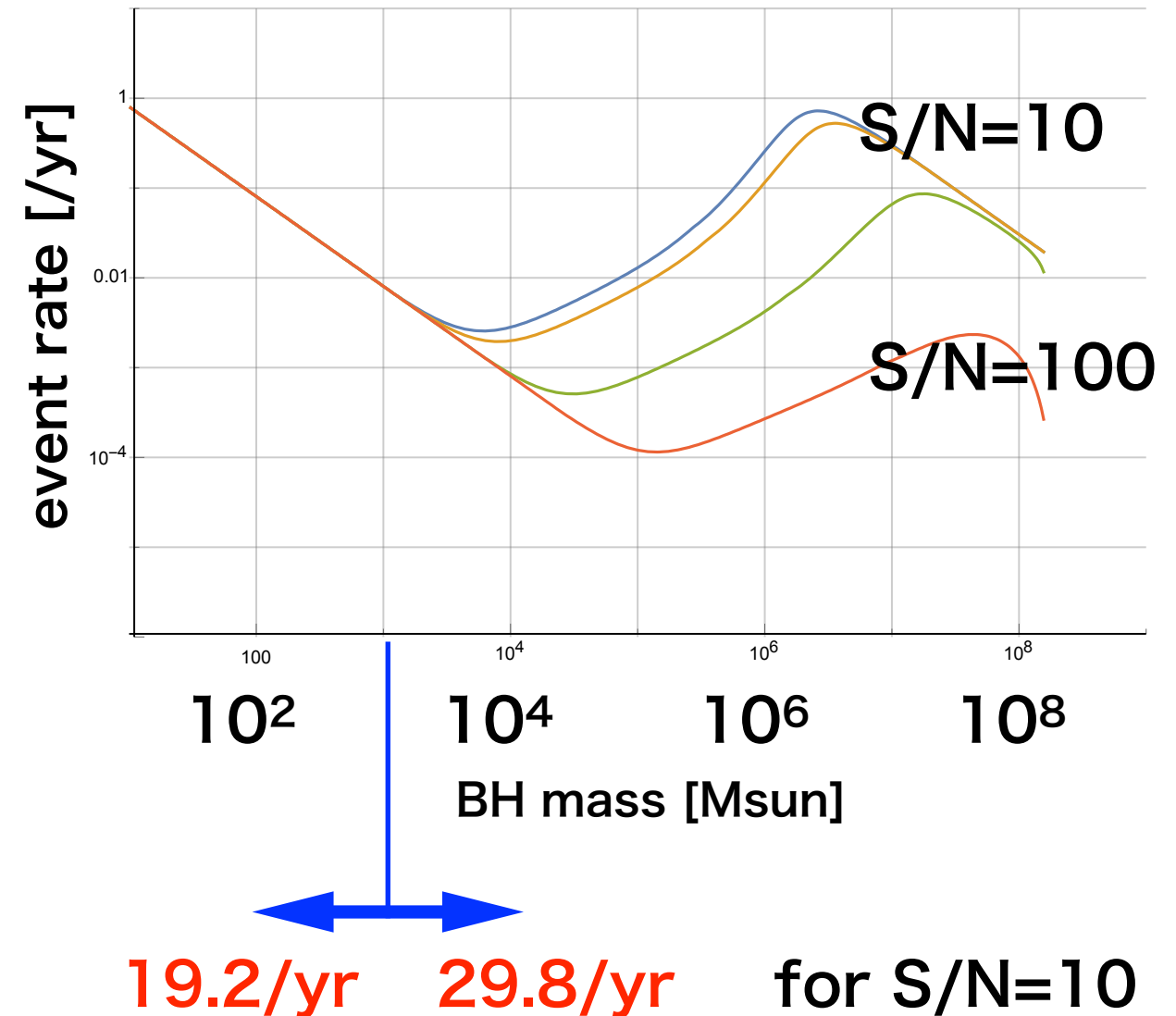
# 4. SMBH formation model : IMBHs' hierarchical mergers

## Event Rate

INO-c

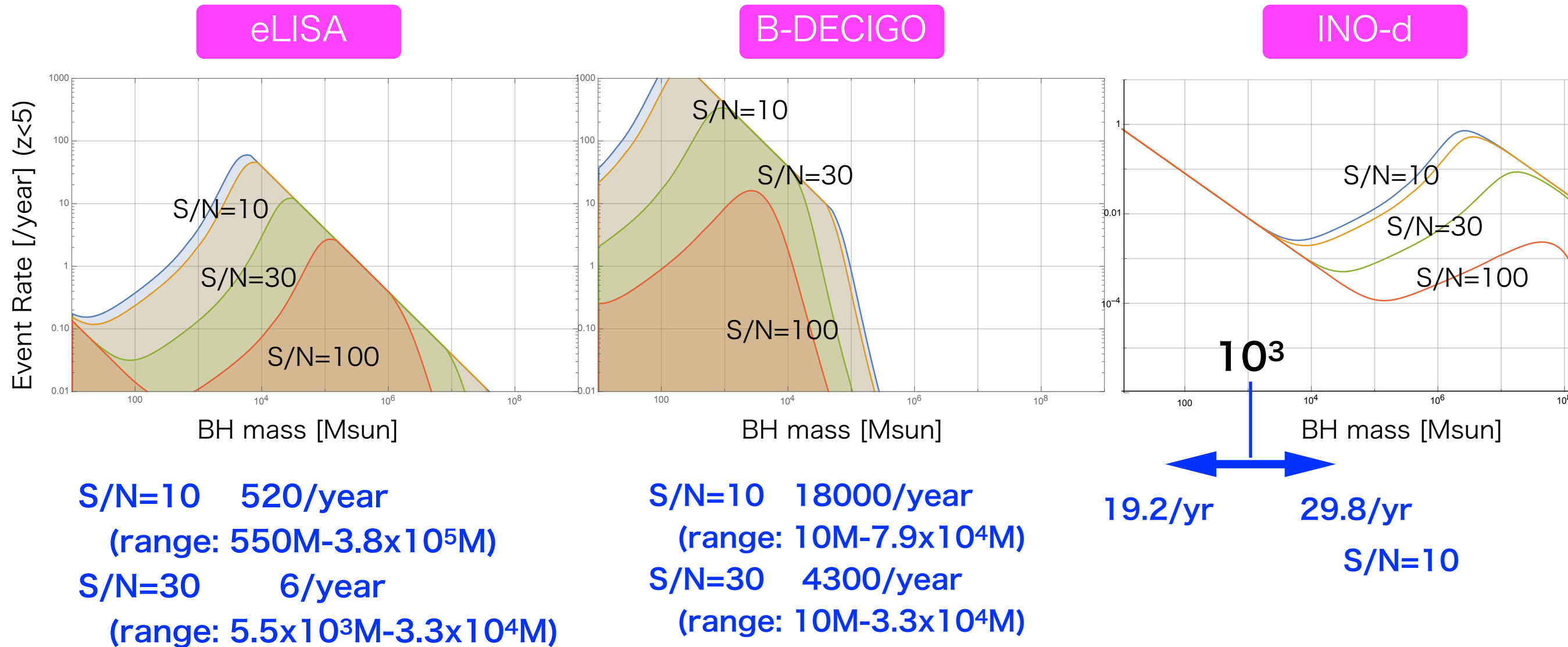


INO-d



# Summary

SMBH形成をIMBHを経たヒエラルキー合体成長モデルと考え、宇宙空間でのイベント数、観測される質量プロファイルを計算した。



今後、モデルに含まれるさまざまなパラメータごとに同様の解析を行い、観測開始後の統計と合わせて、モデルの制限ができるように準備を進める。