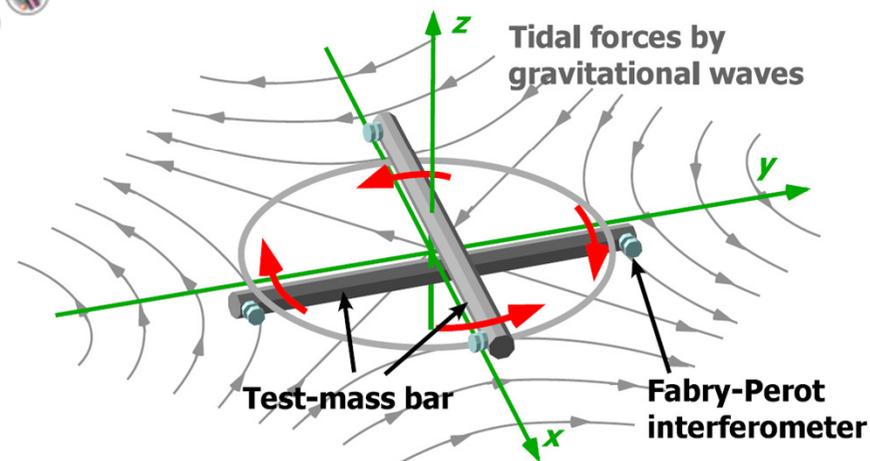
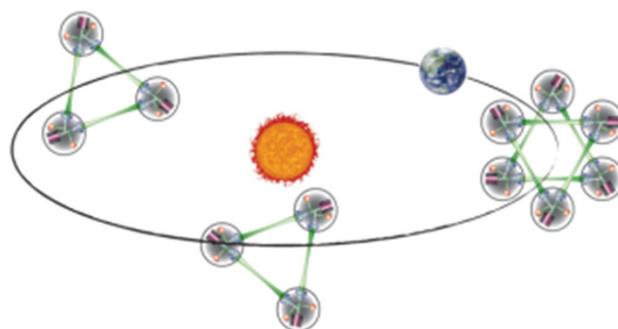


低周波重力波観測で 期待されるサイエンス

重力波研究交流会

2011年 12月13日



八木 絢外
(京大理, D3)

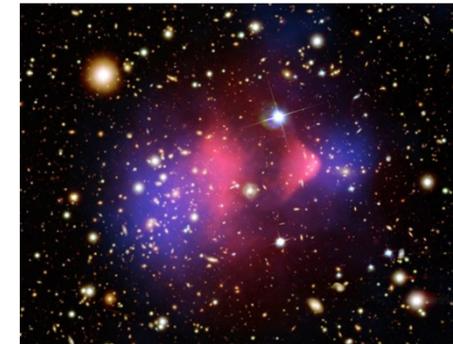
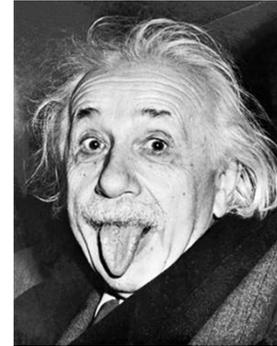
目次

§ 1 低周波でのサイエンス

1-1 概観

1-2 PBH DM探査

1-3 Graviton Mass

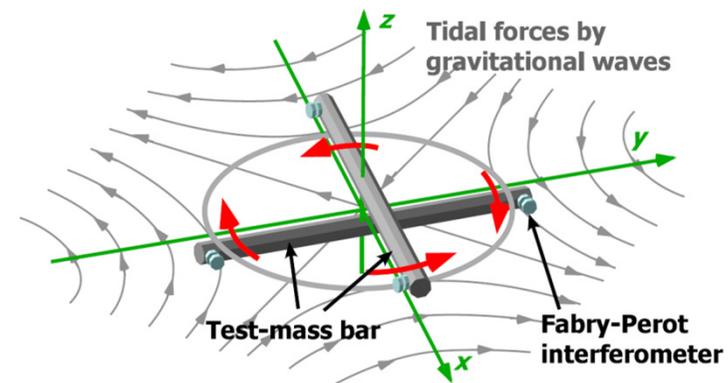


§ 2 TOBAでのサイエンス

2-1 DECOGO Band

2-2 より低周波へ

§ 3 まとめ

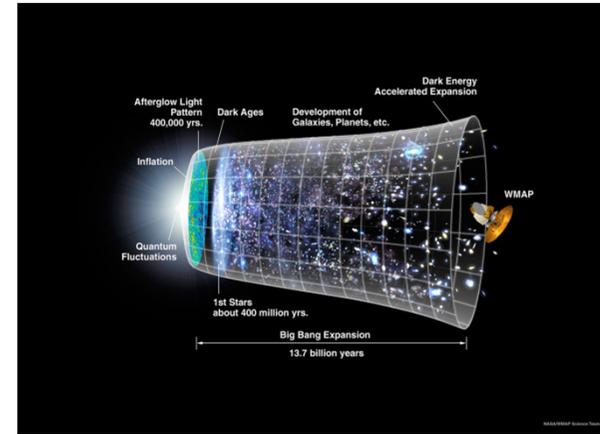


§1 低周波でのサイエンス

§1-1 概観

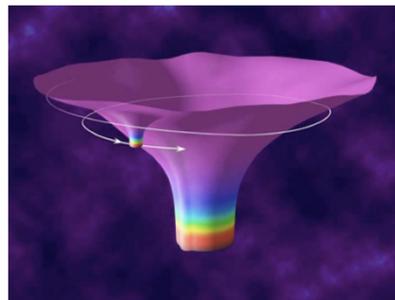
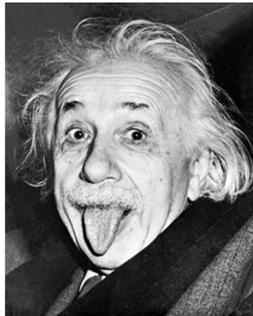
宇宙論

- ・ **初期宇宙**の検証
(Inflation, Reheating, Cosmic Strings, etc.)
- ・ **ダーク・エネルギー**、**非一様宇宙**
- ・ **ダーク・マター (DM)**



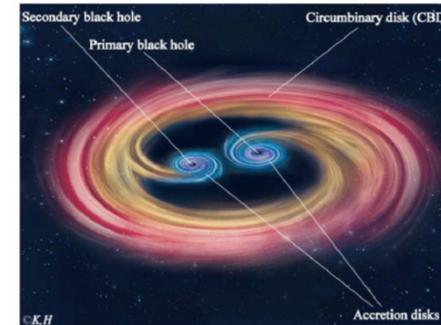
相対論

- ・ **重力理論**の検証
- ・ **時空構造**の探査



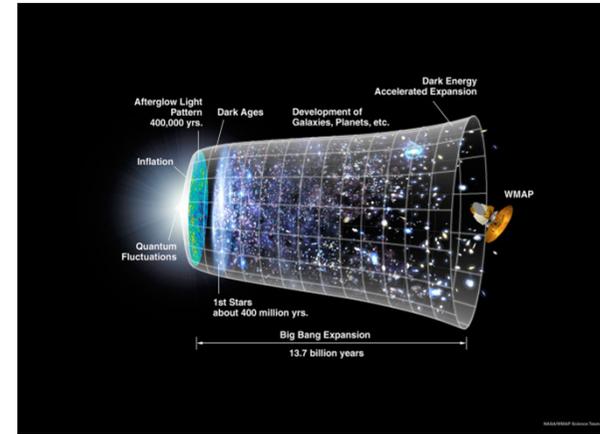
天体物理学

- ・ **SMBH形成過程**の解明
- ・ BH周りの**降着円盤**



宇宙論

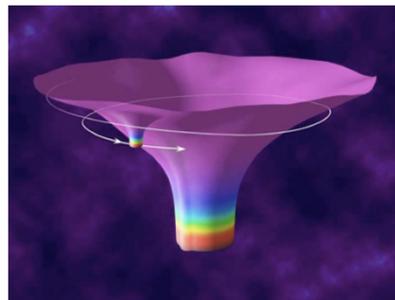
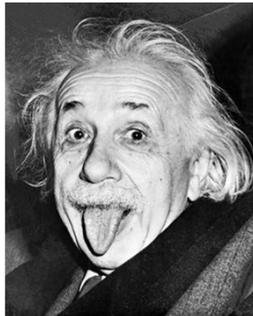
- ・初期宇宙の検証
(Inflation, Reheating, Cosmic Strings, etc.)
- ・ダーク・エネルギー、非一様宇宙
- ・ダーク・マター (DM)



TOBAで期待されるサイエンス

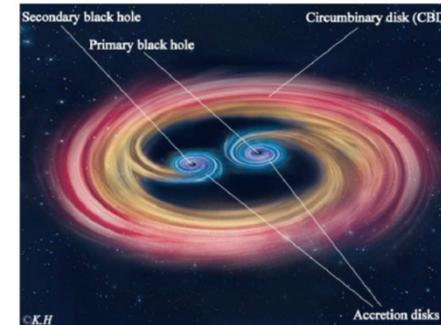
相対論

- ・重力理論の検証
- ・時空構造の探査



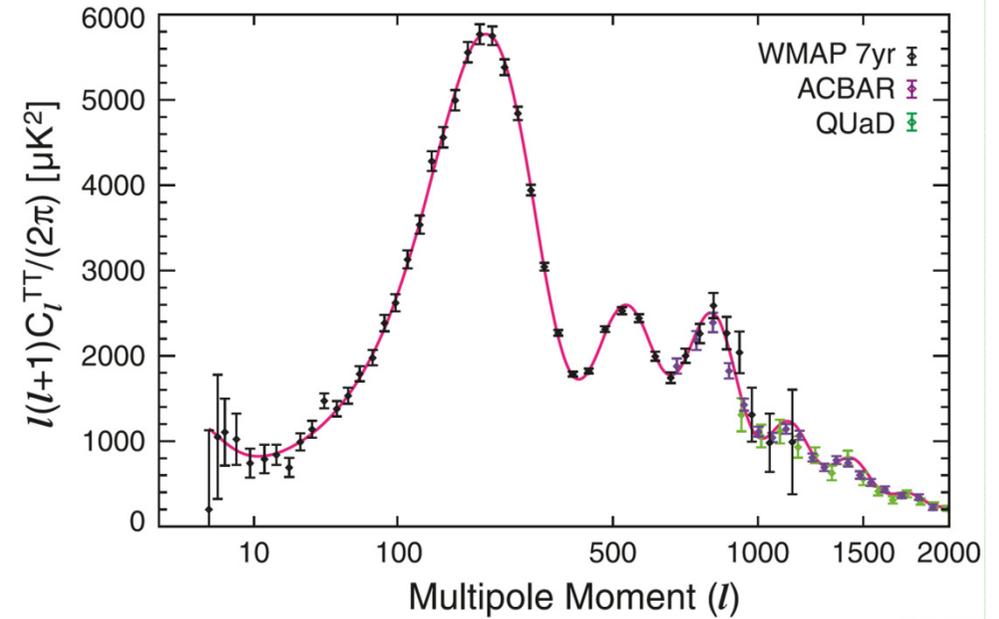
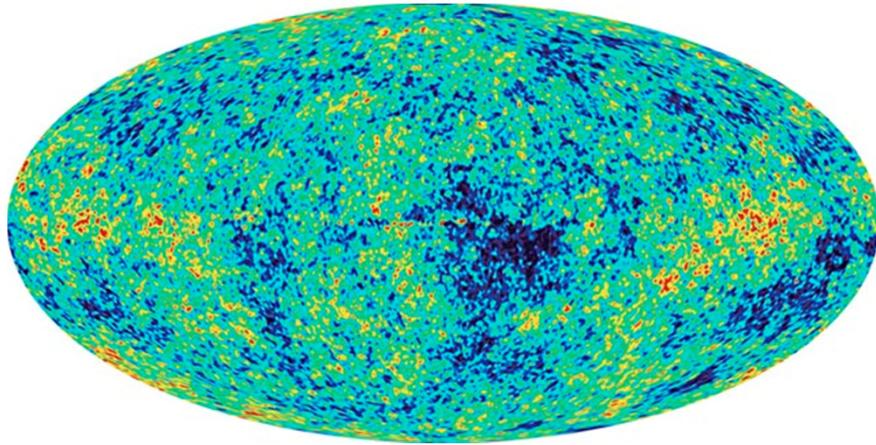
天体物理学

- ・SMBH形成過程の解明
- ・BH周りの降着円盤



§1-2 PBH DM 探查

CMB



[Komatsu+ (2010)]

CMB

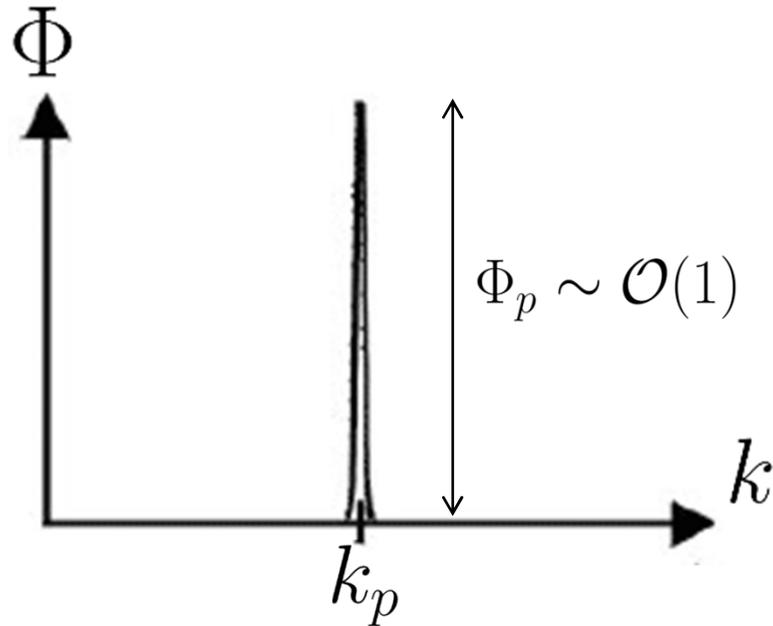


比較的**Large Scale**の情報

Small scaleでの揺らぎは、
様々な可能性が許される。

PRIMORDIAL BH(PBH) の生成

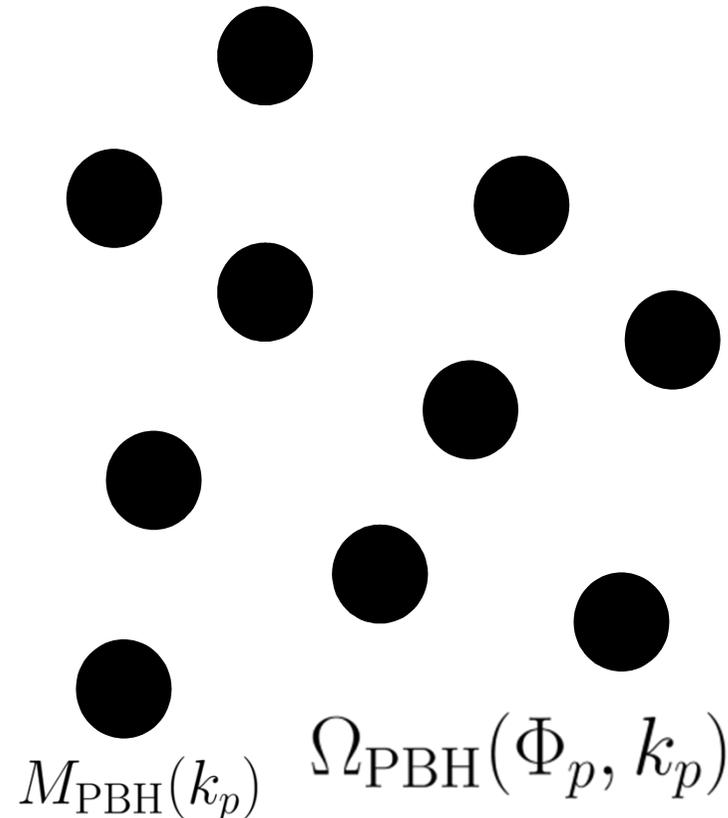
あるスケールで δ 関数的な
スカラー揺らぎ(密度揺らぎ)



例えば、slow-rollを破るような
Inflationで実現される(らしい)。

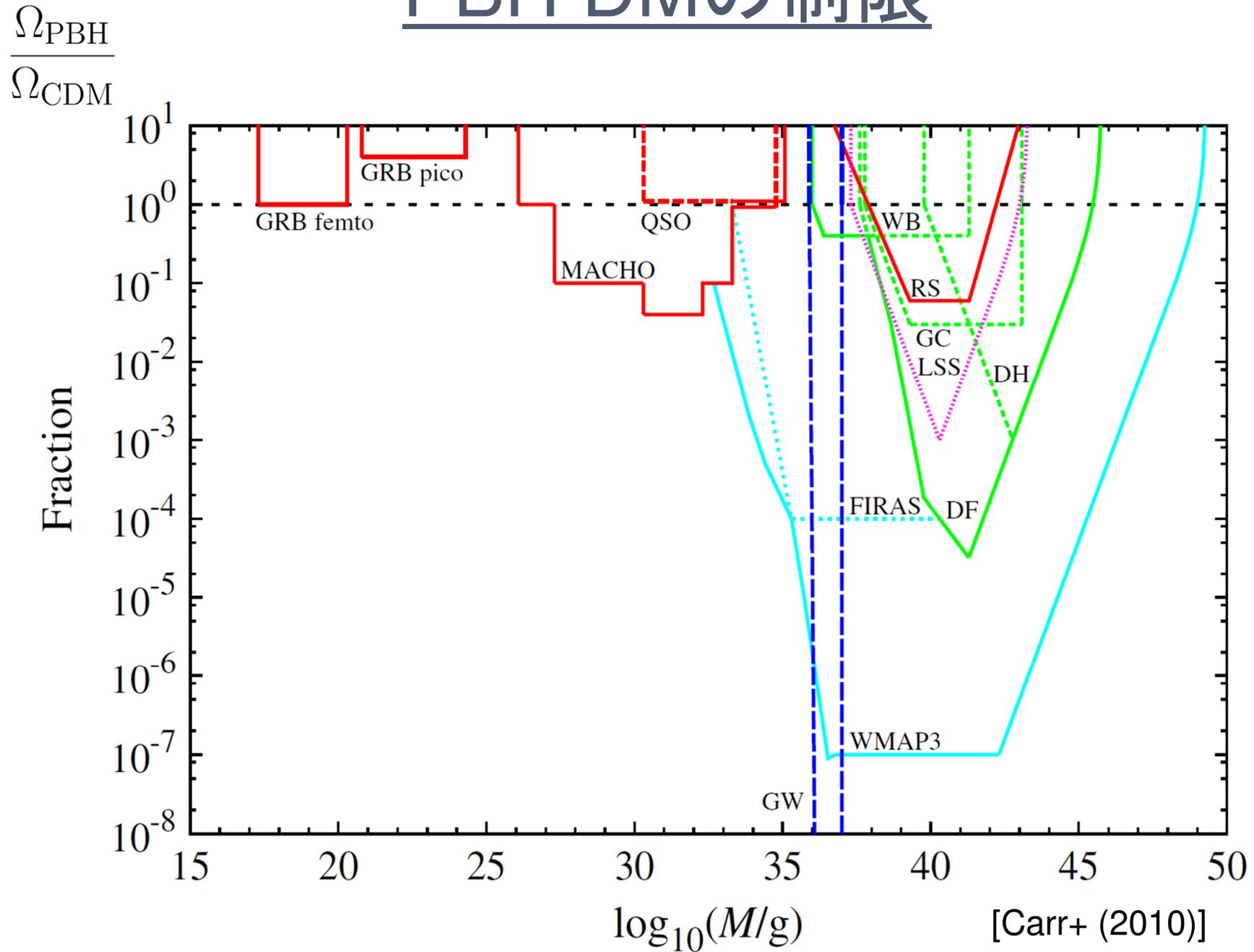
[Lyth & Liddle (2001),
Saito+ (2008)]

密度の濃い領域で重力崩壊
⇒ PBH生成

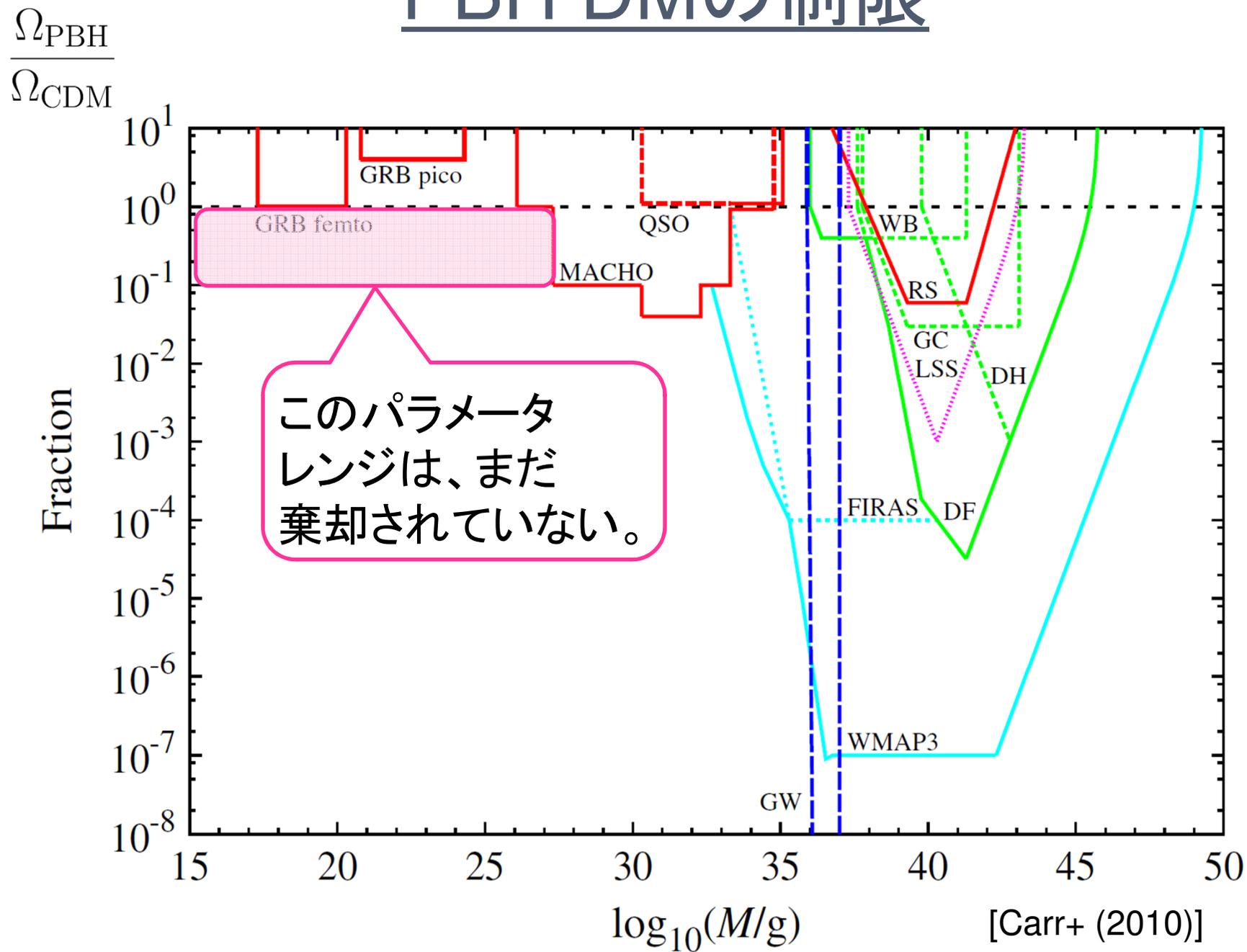


DMはPBHの可能性あり。

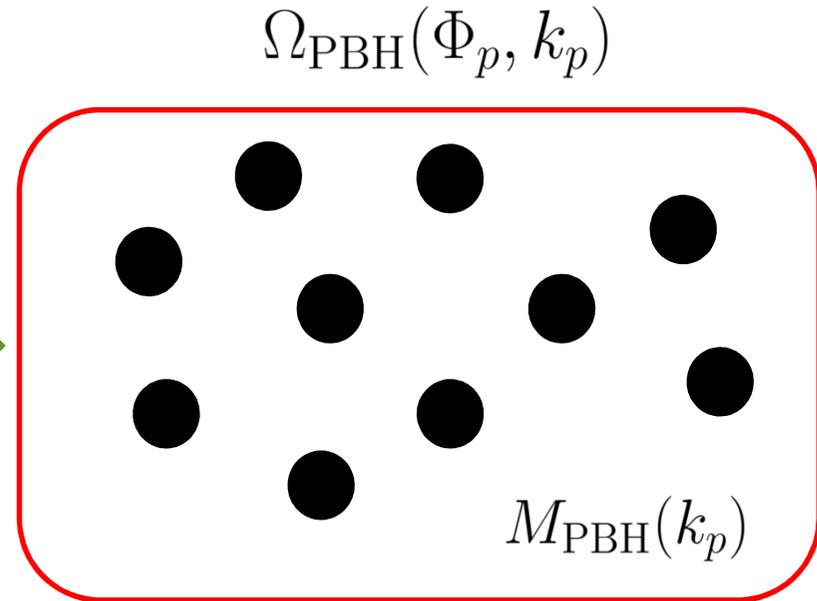
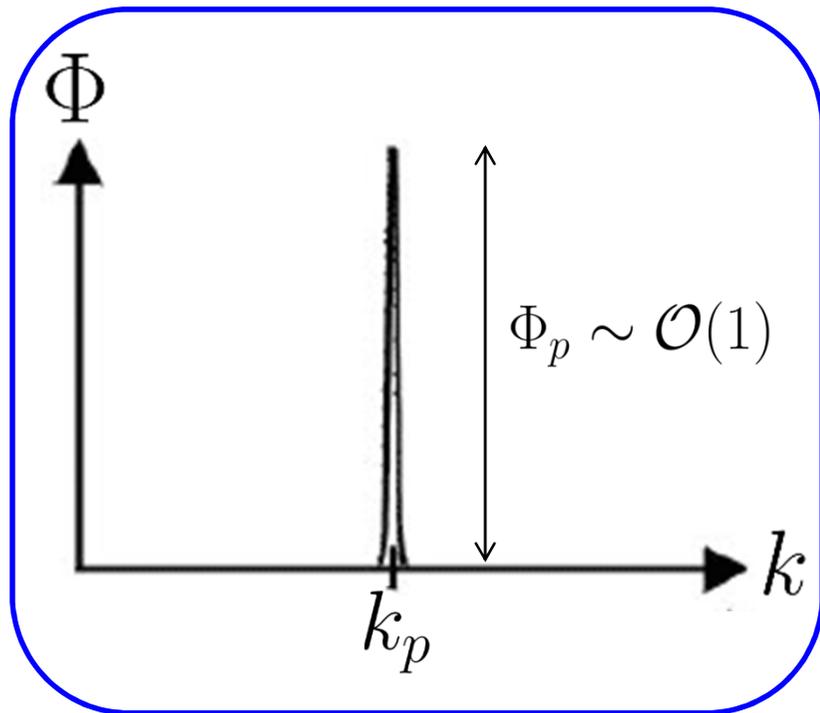
PBH DMの制限



PBH DMの制限



PBH DMとGWの関係



スカラー揺らぎは
(2次の) **テンソル揺らぎ**も生成。

$$\square h_{ij}^{(2)} = S_{ij}(\Phi^2)$$

周波数: $f_{\text{GW}}(k_p)$

振幅: $A_{\text{GW}}(\Phi_p)$

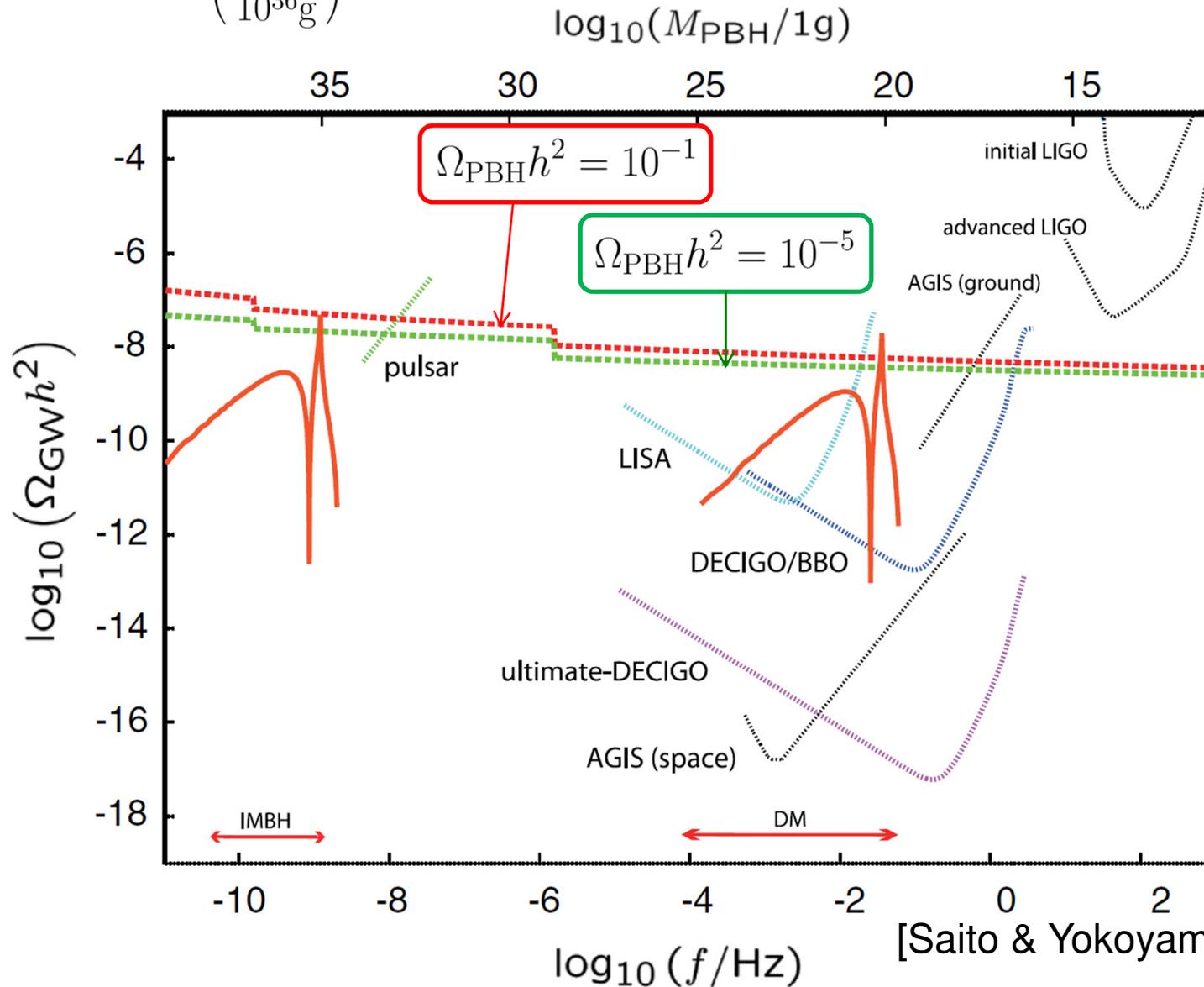


$$f_{\text{GW}} \leftrightarrow M_{\text{PBH}}$$

$$\Omega_{\text{GW}} \leftrightarrow \Omega_{\text{PBH}}$$

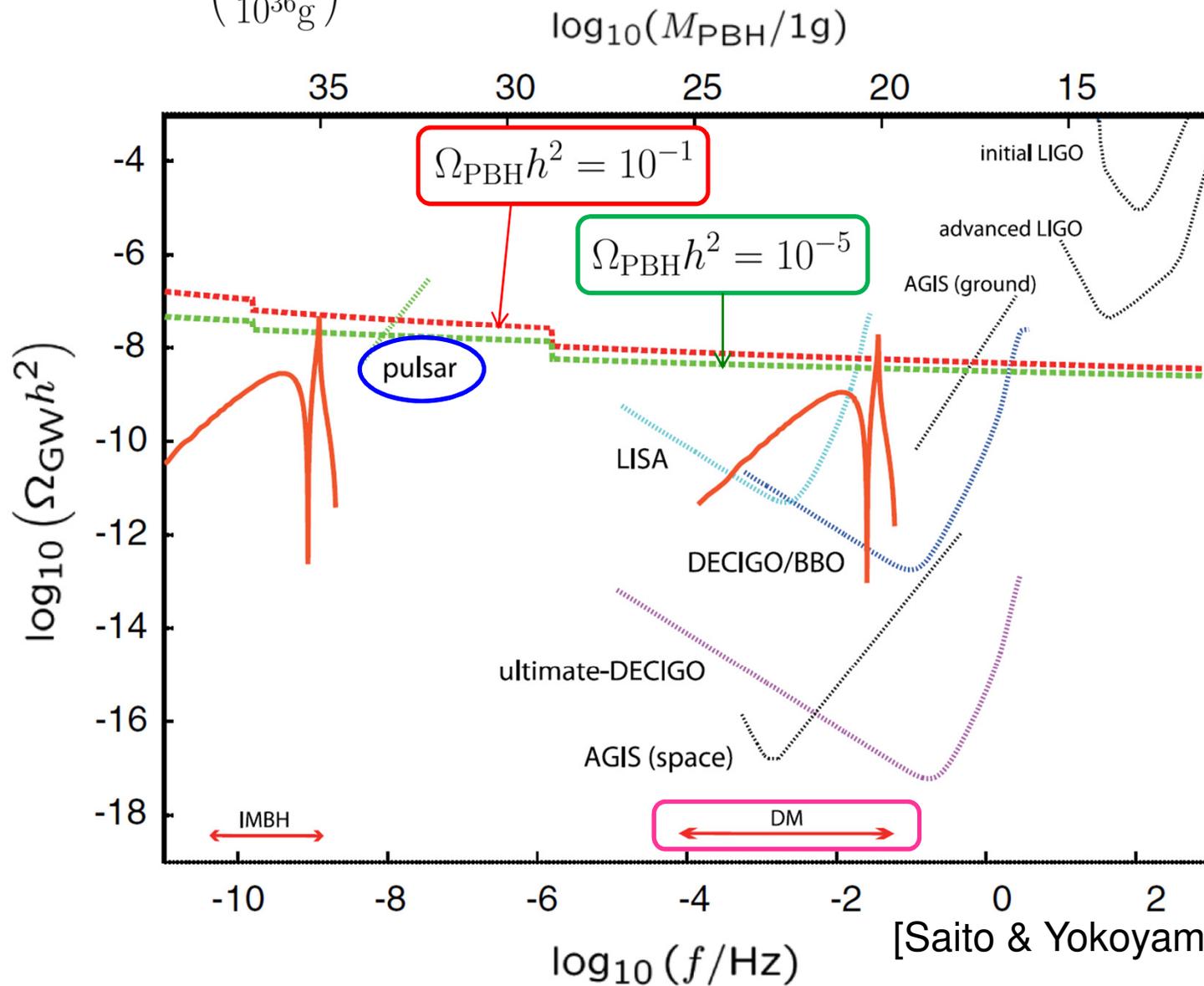
2次揺らぎによる背景重力波のスペクトル

$$f_{\text{GW}} = 4 \times 10^{-10} \text{Hz} \left(\frac{M_{\text{PBH}}}{10^{36} \text{g}} \right)^{-1/2}$$



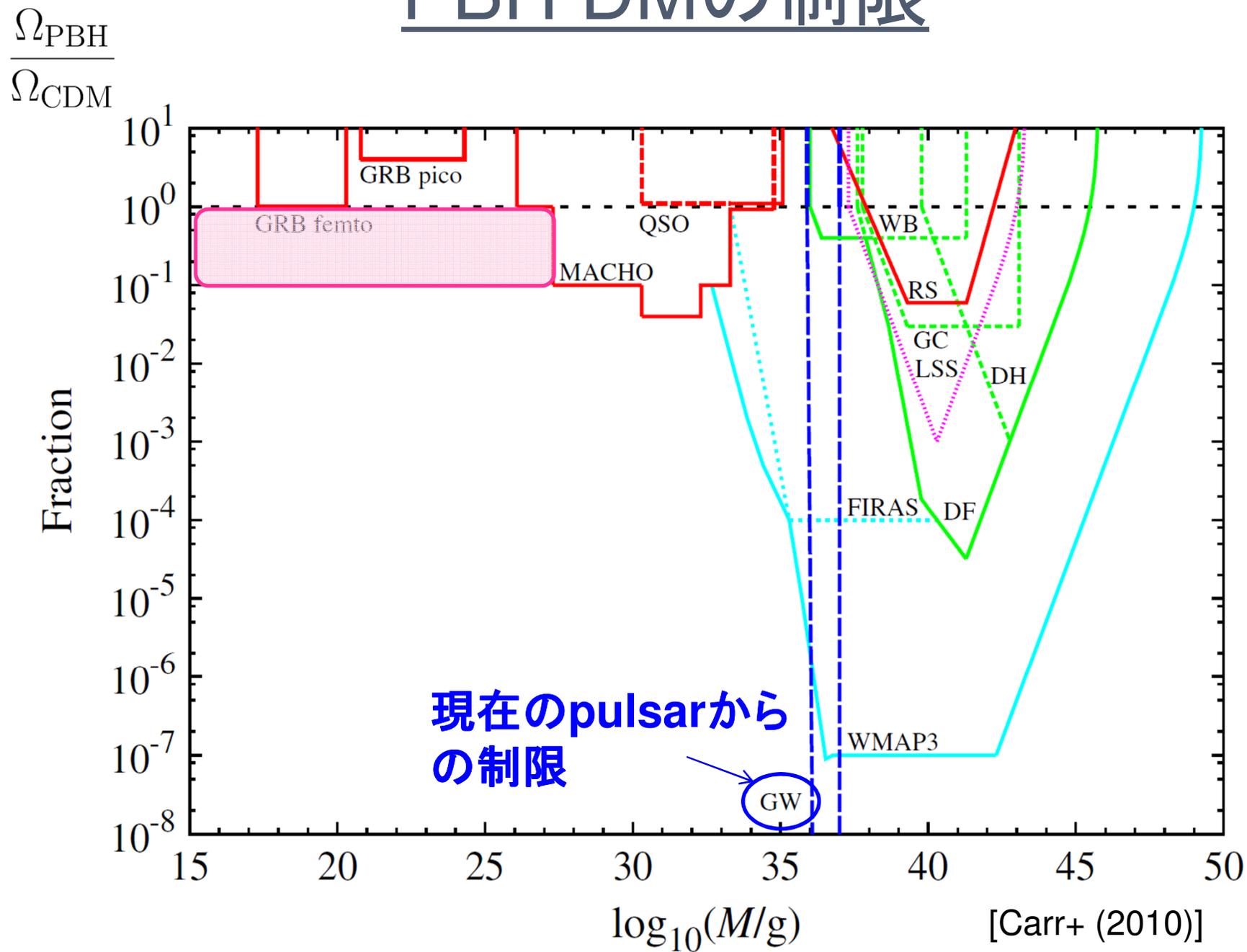
2次揺らぎによる背景重力波のスペクトル

$$f_{\text{GW}} = 4 \times 10^{-10} \text{Hz} \left(\frac{M_{\text{PBH}}}{10^{36} \text{g}} \right)^{-1/2}$$



[Saito & Yokoyama (2009)]

PBH DMの制限

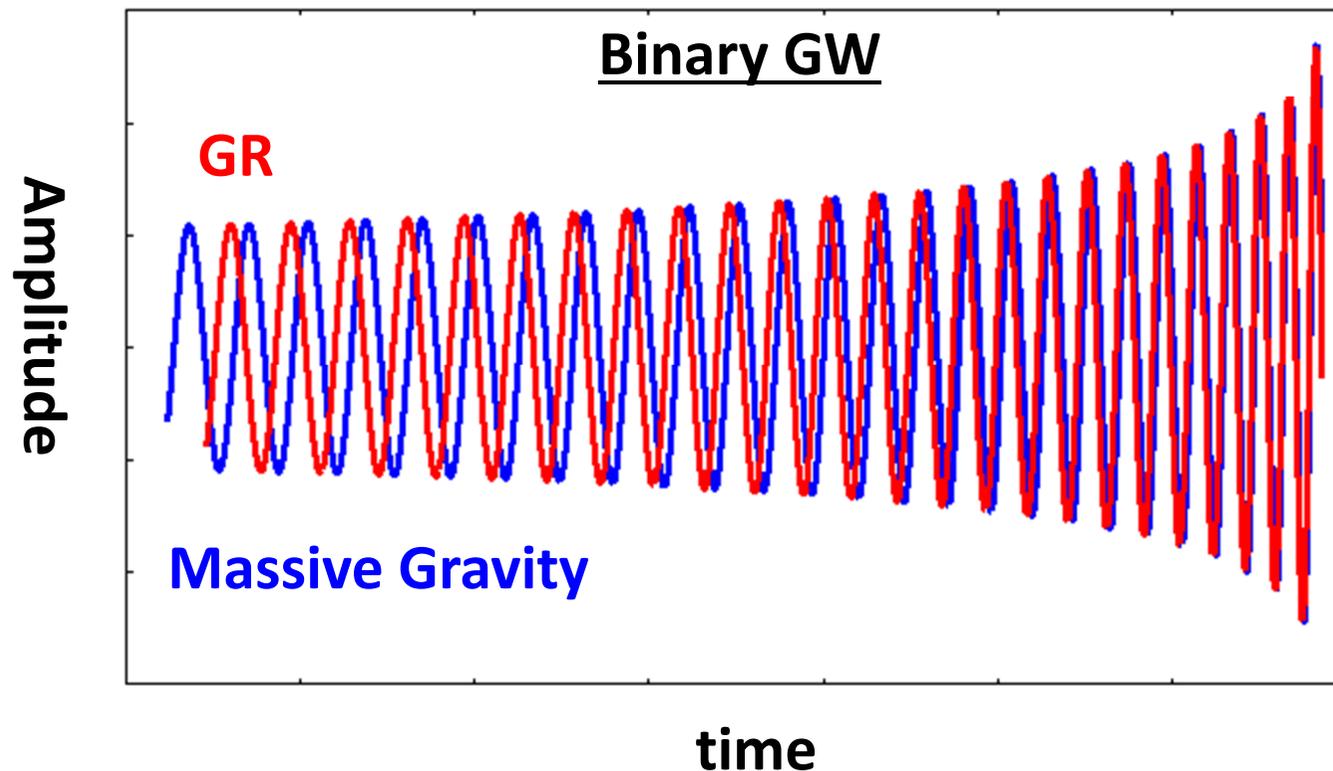


§1-3 GRAVITON MASS

▪ Gravitonが**有限の質量** m_g を持った理論。

▪ 重力波の**伝播速度**: $v_g \approx \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{c}{f_{GW} \lambda_{GW}} \right)^2 \right]$ $\lambda_{GW} = \frac{h}{m_g c}$

⇒ GWの伝播がG.R.からずれる。 **光速からのずれ**



Fisher解析 → Graviton Massへの制限

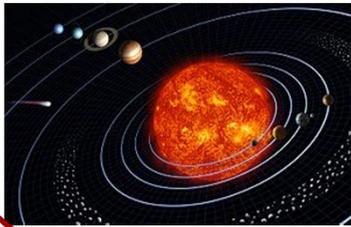
Graviton massへの制限

fが低い方が有利

$$v_g \approx c \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{c}{f_{gw} \lambda_g} \right)^2 \right]$$

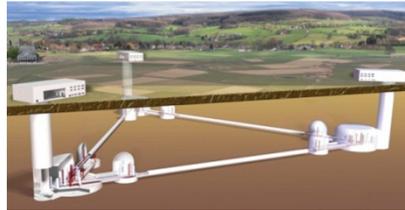
太陽系実験

Talmadge *et al.* (1988)
Keplerの第三法則の検証



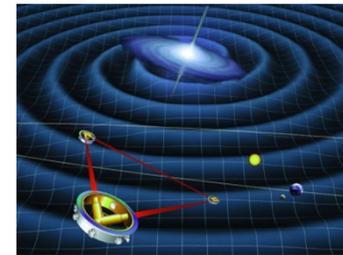
ET

Keppel & Ajith (2010)
(180+180)M_⊙, 1Gpc



New LISA

Berti *et al.* (2011)
複数個の連星



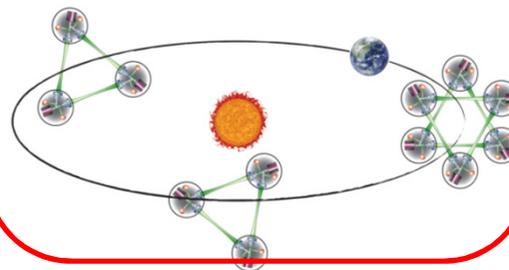
Adv. LIGO

Keppel & Ajith (2010)
(180+180)M_⊙, 1Gpc

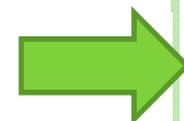


DECIGO

KY & Tanaka (2010)
(10⁵+10⁶)M_⊙, 3Gpc



GR



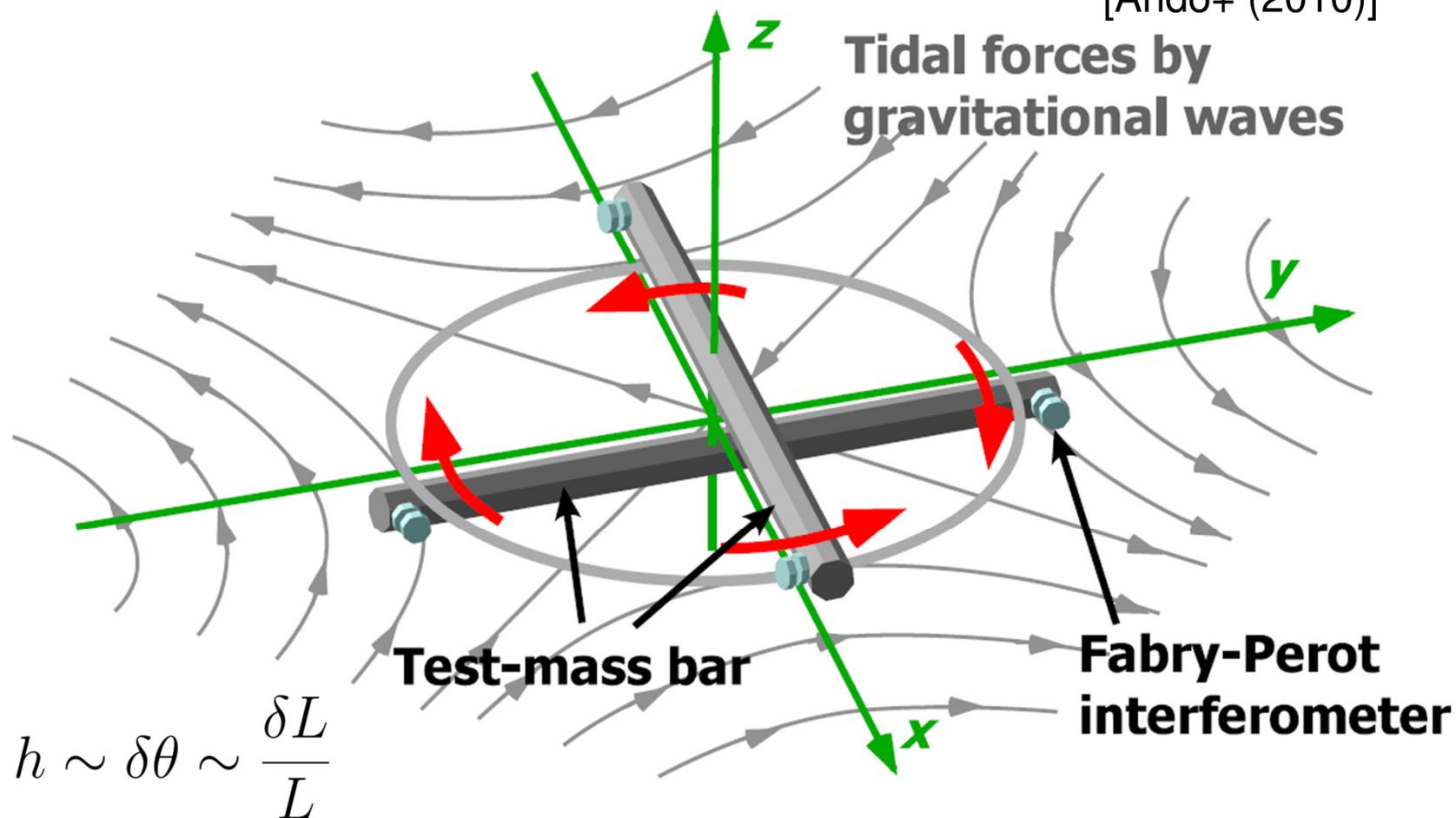
3 × 10¹⁷ 8 × 10¹⁸ 7 × 10¹⁹ 3 × 10²⁰ 4 × 10²¹ λ_g (cm)

§2 TOBAでのサイエンス

§2-1 DECIGO BAND

TORSION BAR ANTENNA (TOBA)

[Ando+ (2010)]



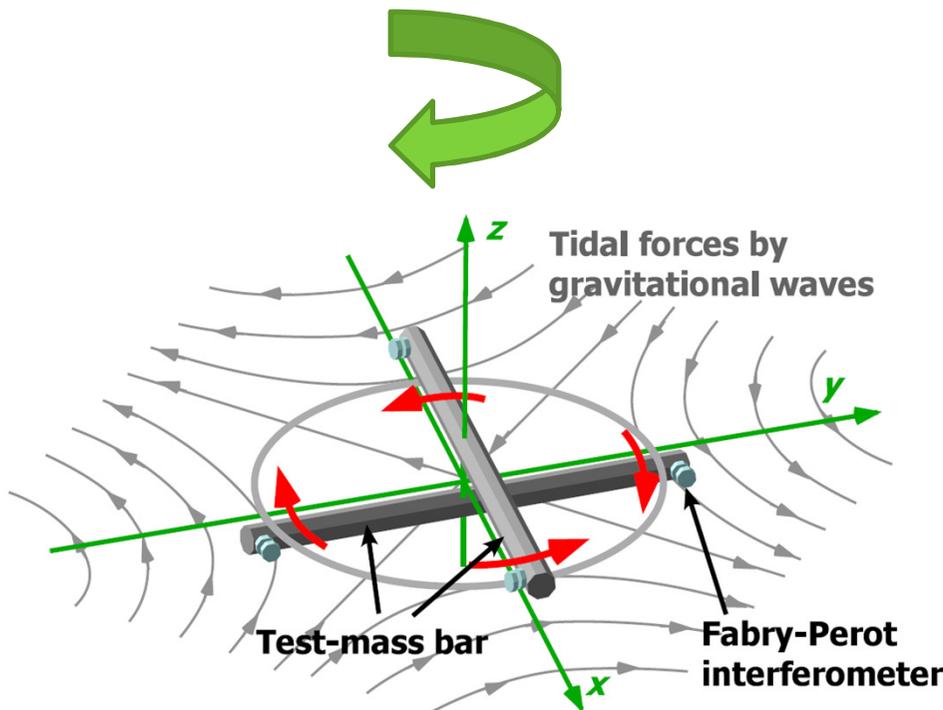
ねじれ方向の共振周波数: \sim mHz

➡ 地上で低周波観測が実現できる!!

$$\left[\begin{array}{l} \text{プロトタイプ} \\ \sqrt{S_n(f)} \simeq 2 \times 10^{-9} \text{Hz}^{-1/2} \\ (f = 0.2 \text{Hz}) \end{array} \right]$$

回転TOBA

$$\delta\theta \propto \left(\frac{\omega_{\text{GW}}}{2\omega_{\text{rot}}}\right)^2 [h_{\times} \cos(2\omega_{\text{rot}}t) + h_{+} \sin(2\omega_{\text{rot}}t)] \quad (\omega_{\text{GW}} \ll \omega_{\text{rot}})$$



[Ando+ (2010)]

低周波GWを**up-convert**



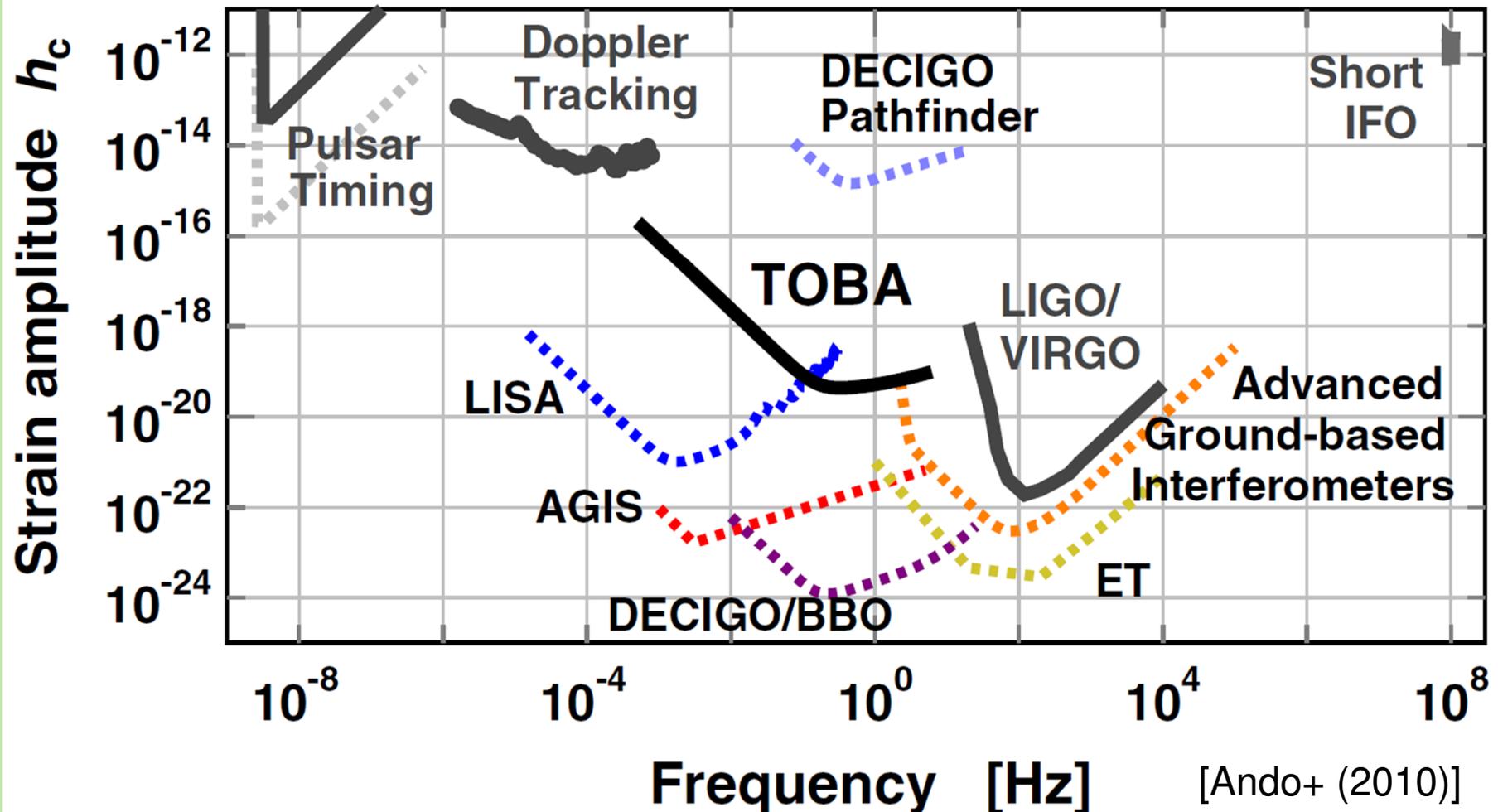
Practicalに様々な利点がある。

- ・観測を何回かに分けられる
- ・2つの**偏向モード**の分離
- ・原理的な感度は(ほぼ)変わらない。

以下では、**無回転TOBA**を考える。

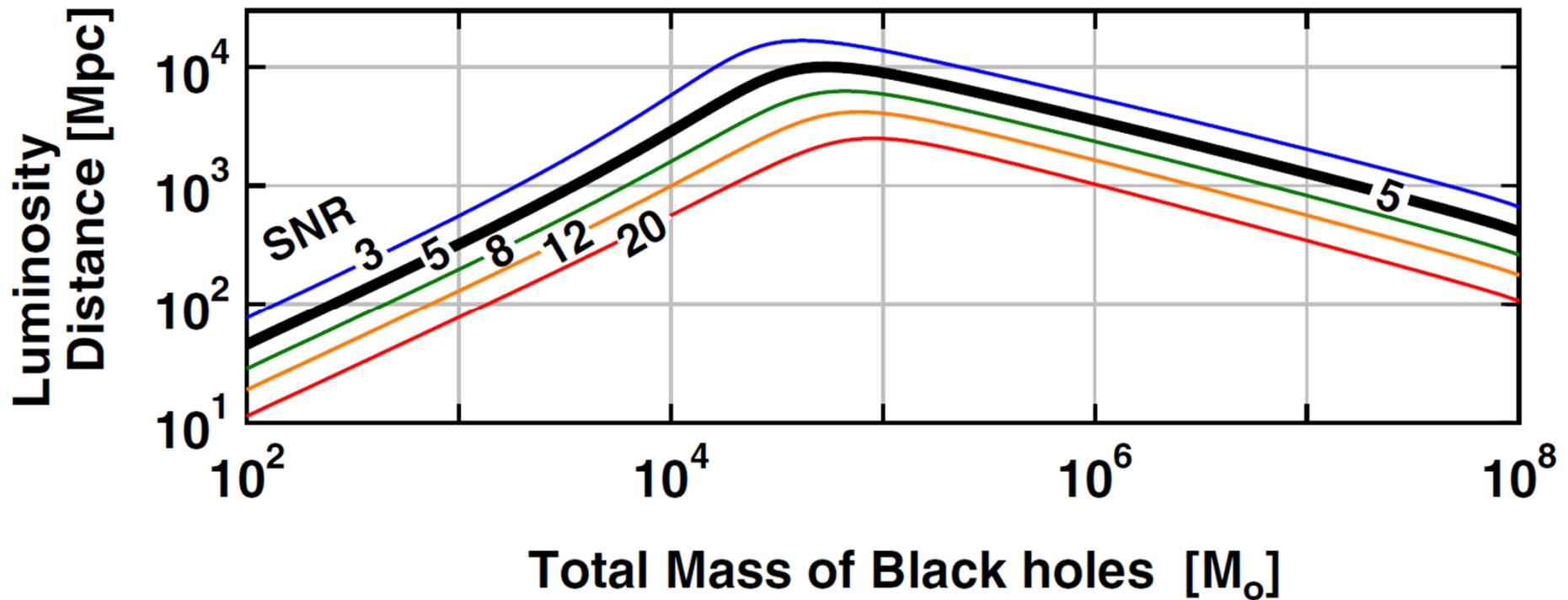
感度曲線

長さ: 10m, 直径: 0.6m, 質量: 7600kg,
温度: 4K, Laser Power: 10W

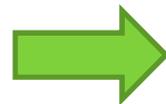


BH連星の観測可能距離

Equal mass, optimal direction



$$M \sim 10^5 M_{\odot}$$



$$D_L = 10 \text{ Gpc}$$

[Ando+ (2010)]

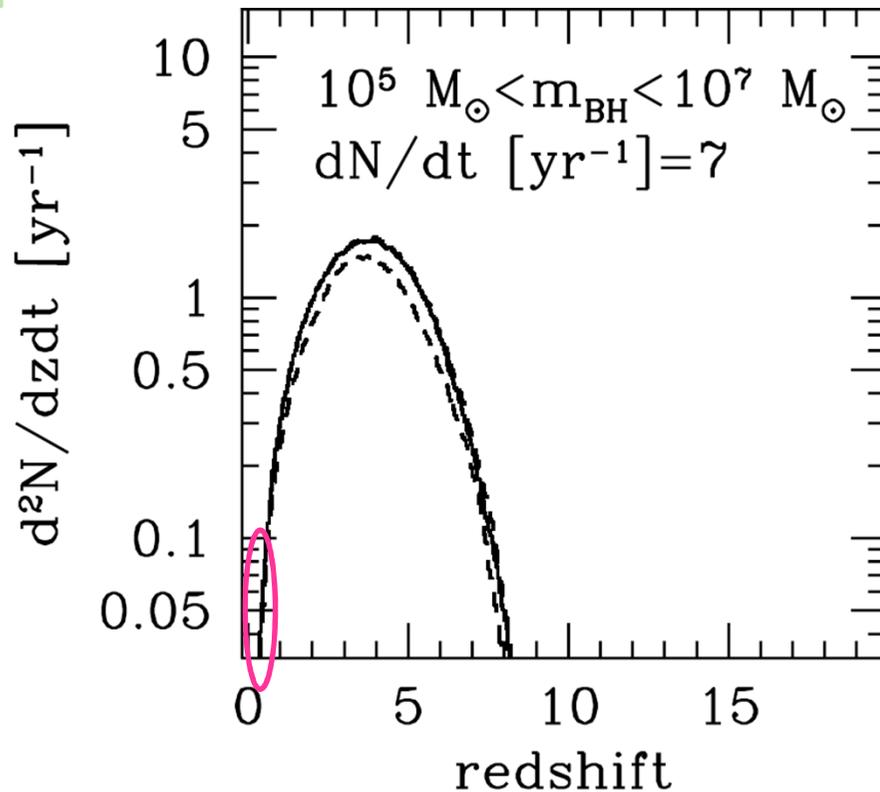
全天平均では、 $z \sim 0.7$

Event rateは？

MONTE CARLO MERGER TREE SIMULATIONS

[Sesana (2004)]

BH merger rateのz分布



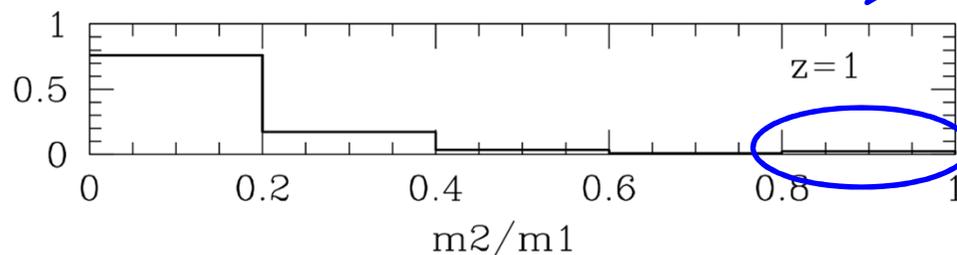
$z < 0.7$ には、

$(10^5 - 10^7) M_{\odot}$

の連星は、ほとんど存在しない。

等質量連星もほとんど存在しない。

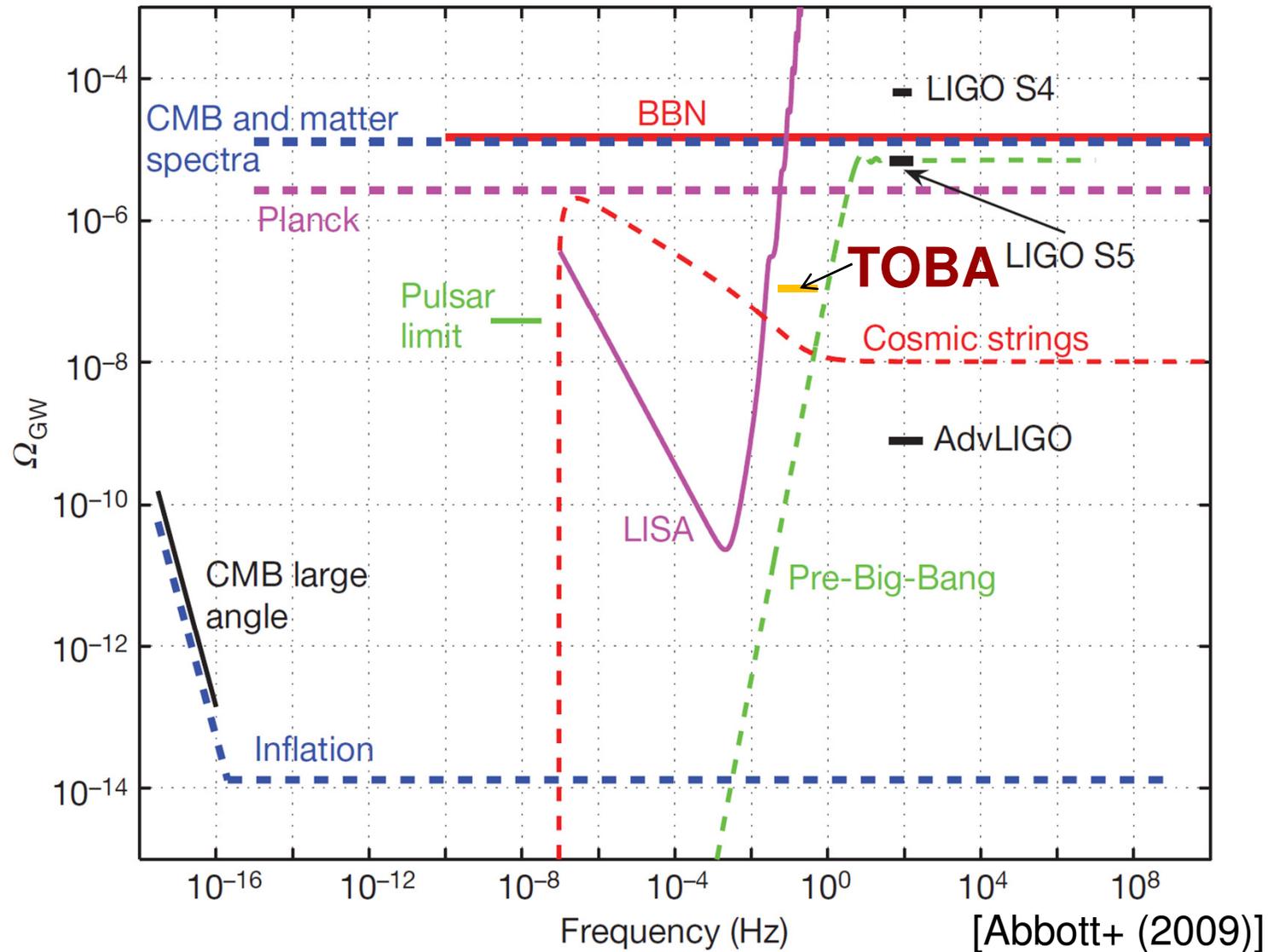
mass比分布 (Normalized)



BH連星chirp波の detectionは余り期待できない……

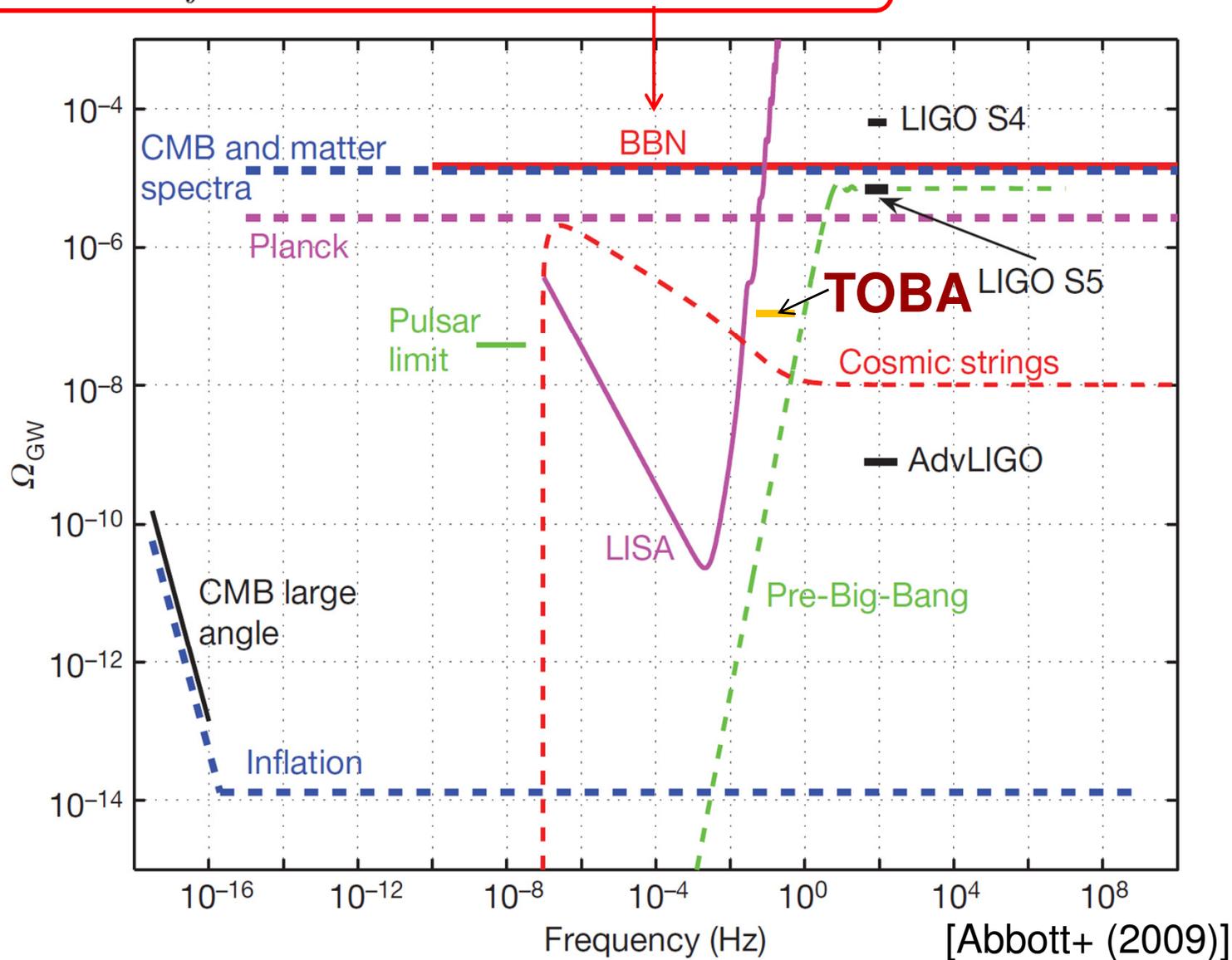
背景重力波に対する感度

$\Omega_{\text{GW}} \sim 10^{-7}$ (1年観測、TOBA2台)



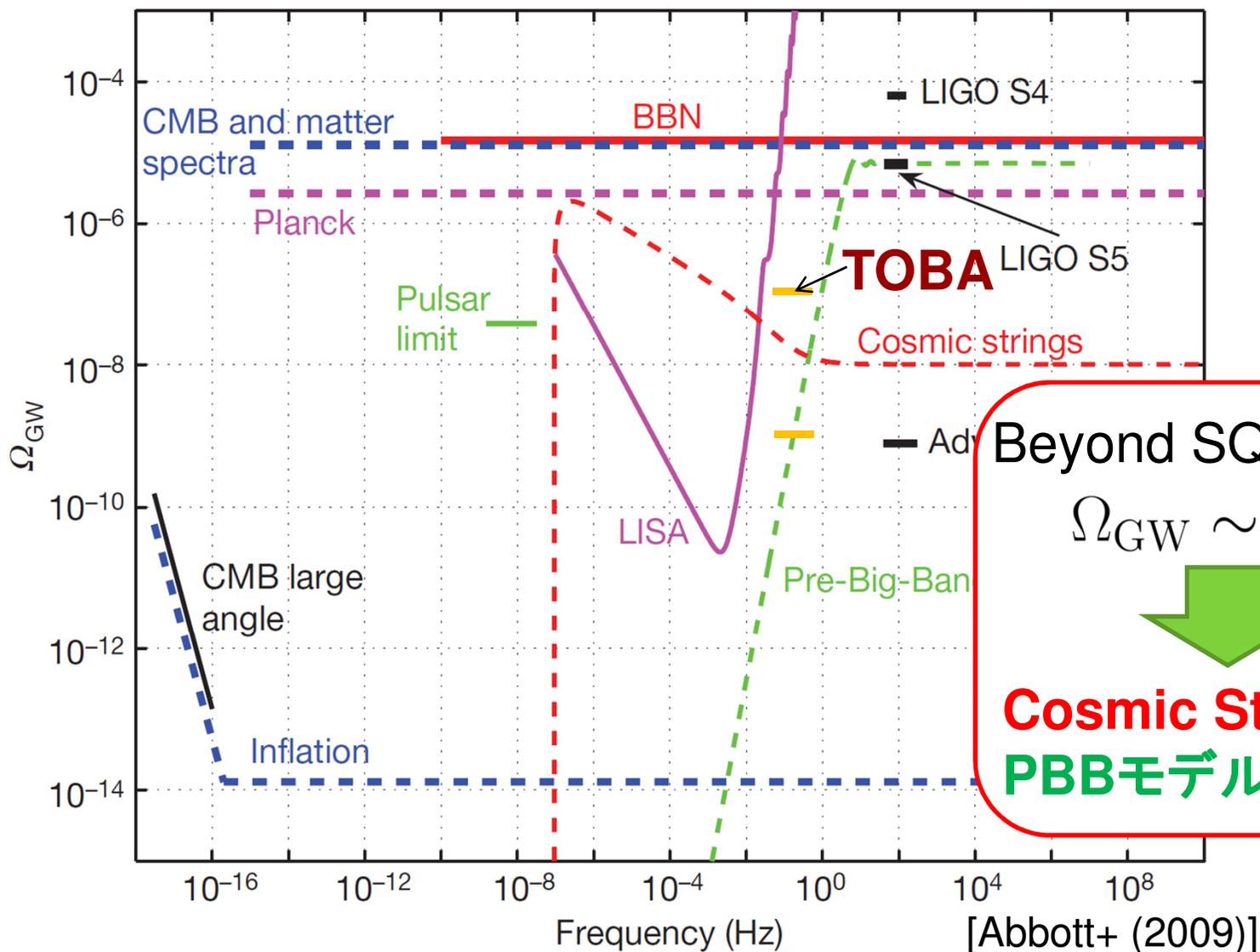
背景重力波に対する感度

$$\Omega_{\text{BBN}} = \int \Omega_{\text{GW}}(f) d(\ln f) < 1.3 \times 10^{-5}$$
 BBN boundには勝てる!



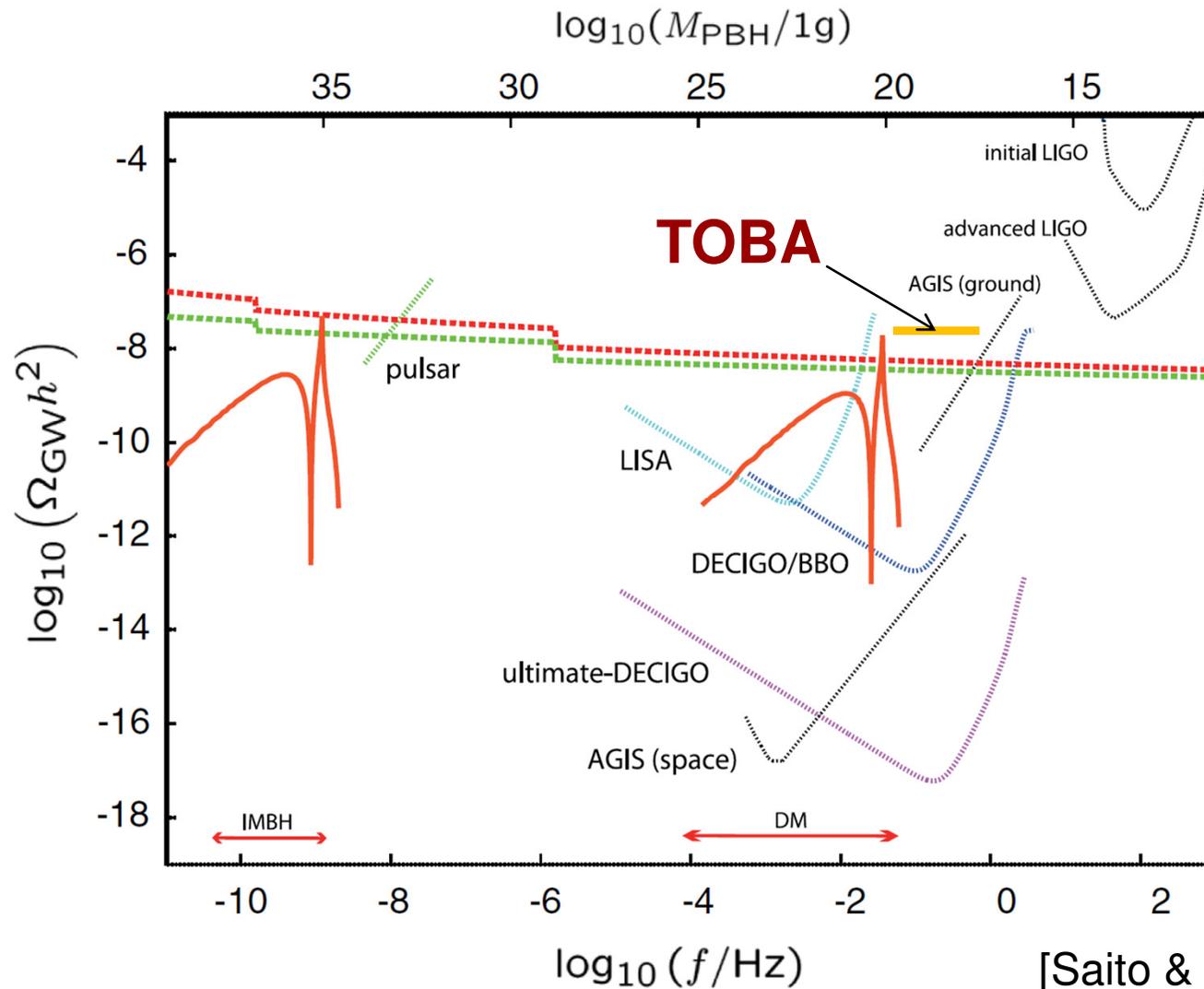
背景重力波に対する感度

$\Omega_{\text{GW}} \sim 10^{-7}$ (1年観測、TOBA2台)



背景重力波に対する感度 (PBH DM)

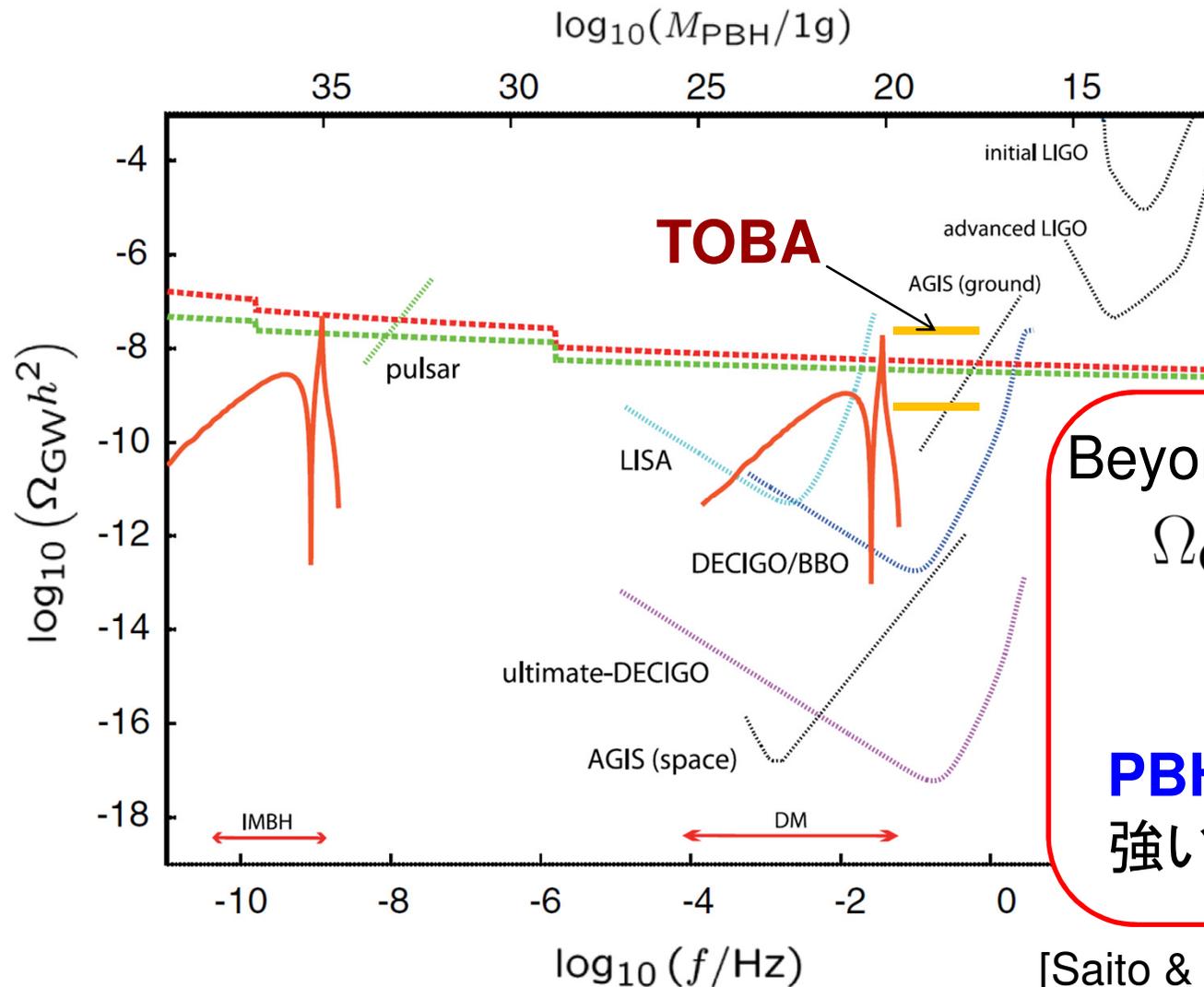
$$\Omega_{\text{GW}} \sim 10^{-7} \quad (\text{1年観測、TOBA2台})$$



[Saito & Yokoyama (2009)]

背景重力波に対する感度 (PBH DM)

$\Omega_{\text{GW}} \sim 10^{-7}$ (1年観測、TOBA2台)



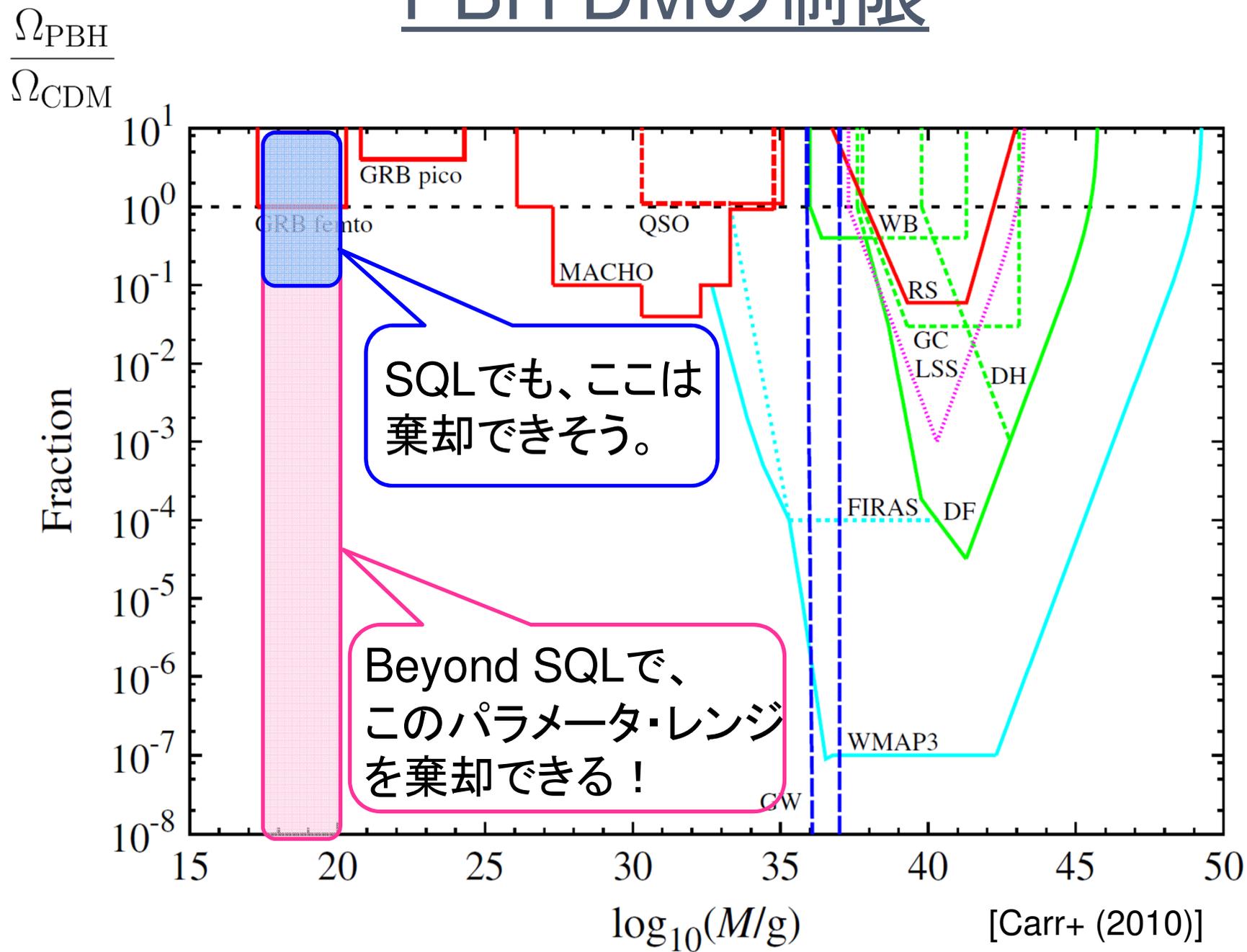
Beyond SQLで、
 $\Omega_{\text{GW}} \sim 10^{-9}$



PBH DMに対して、
強い制限！

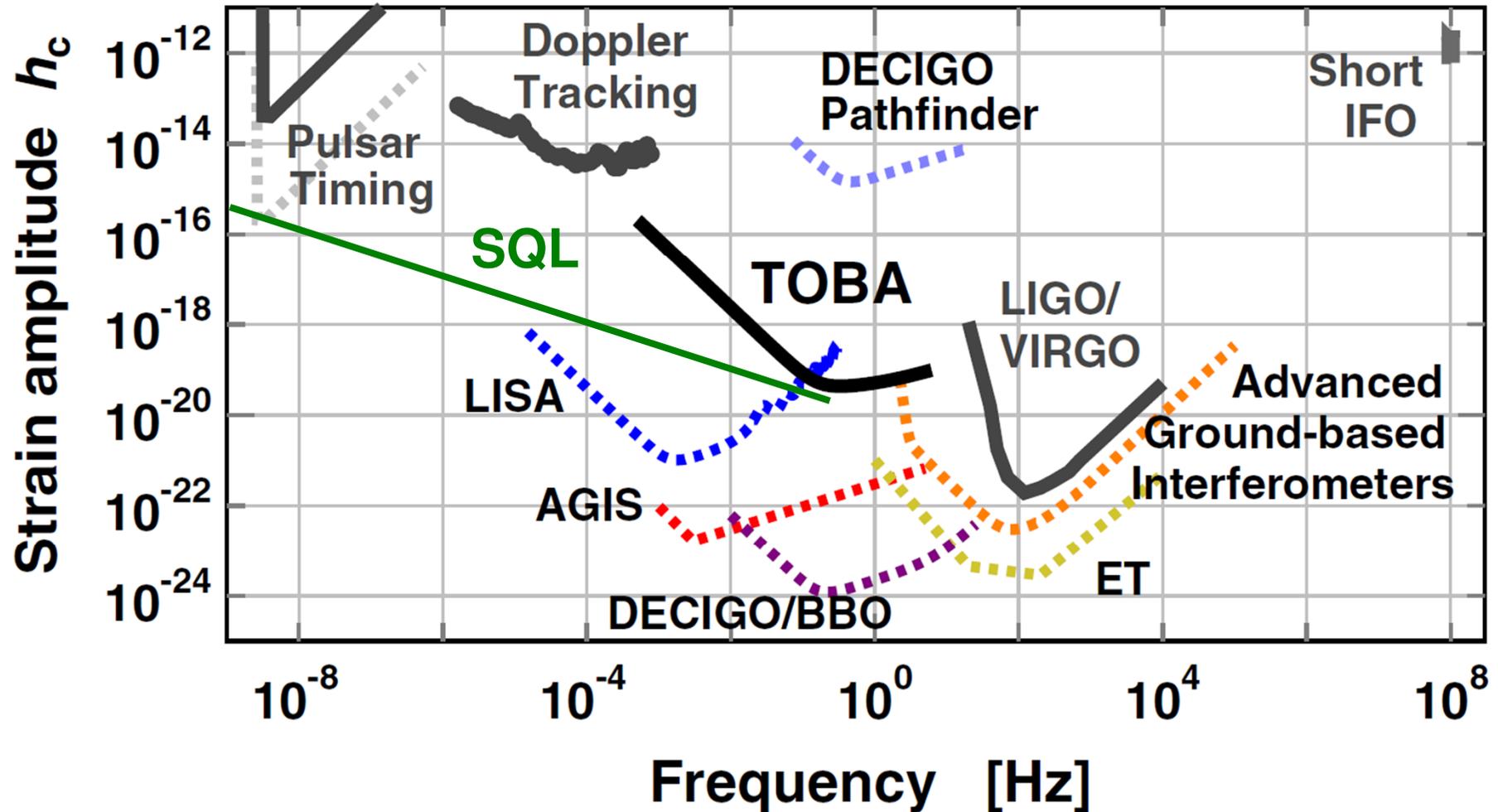
[Saito & Yokoyama (2009)]

PBH DMの制限



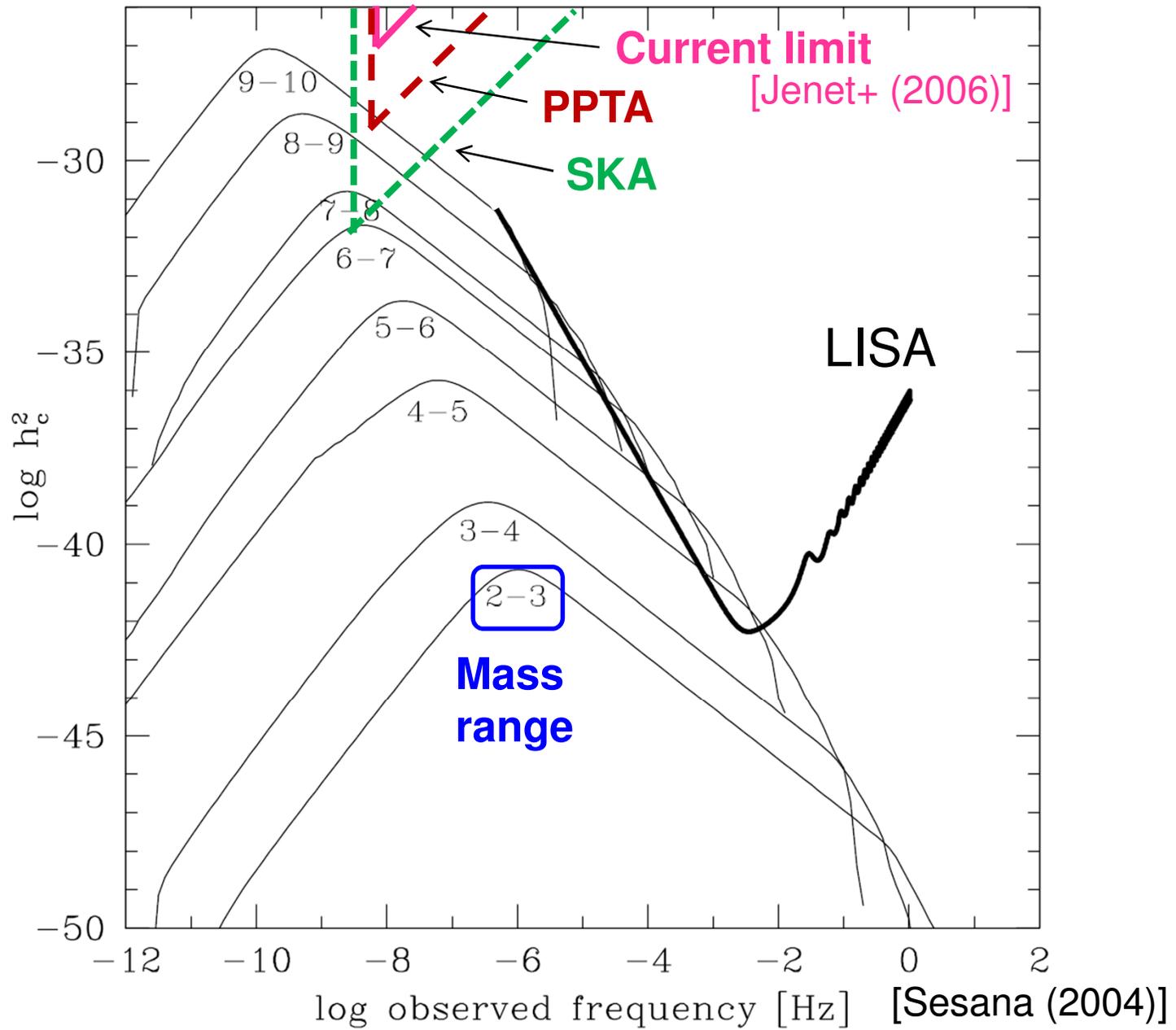
§2-2 より低周波へ

感度曲線

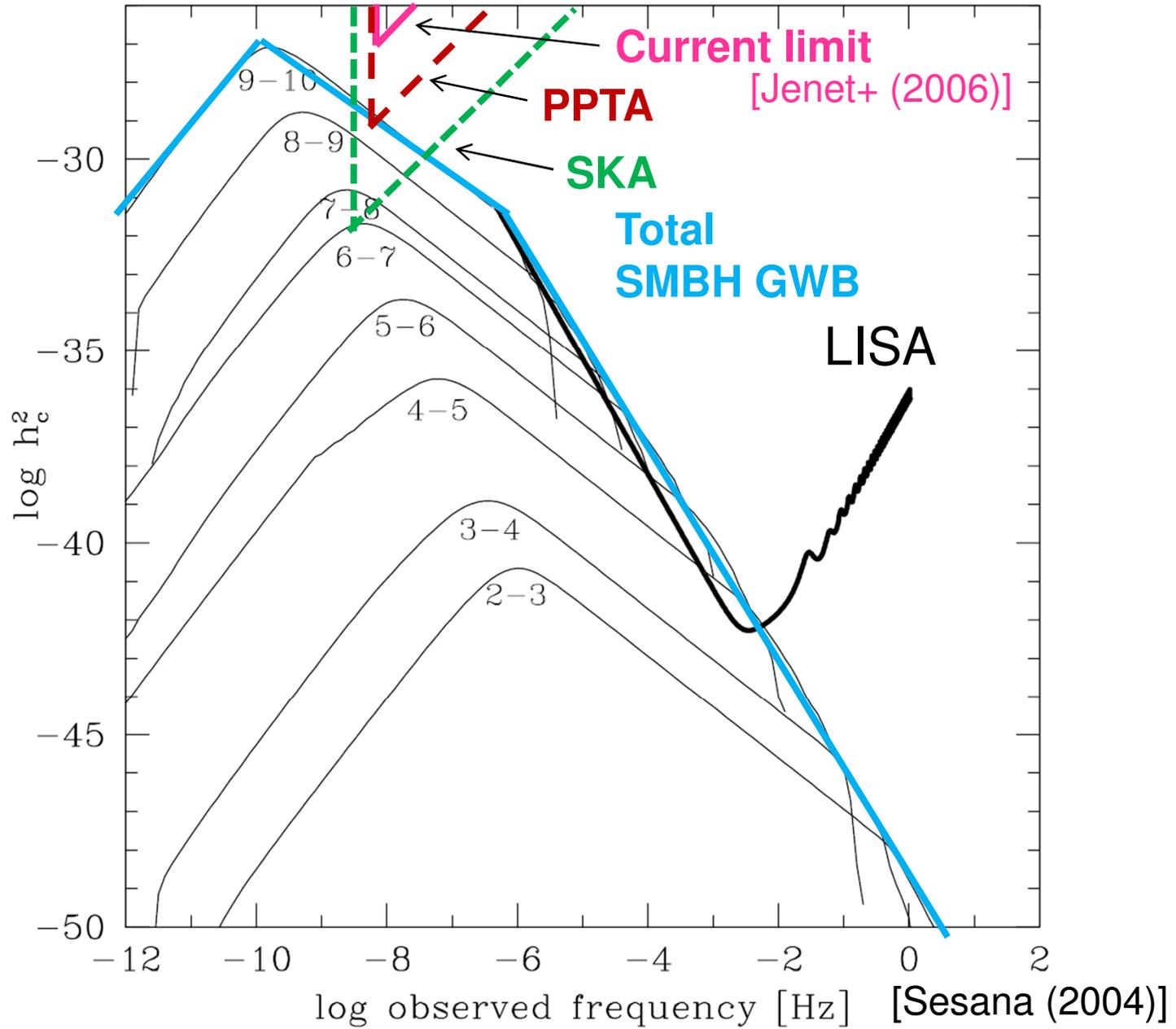


- ・防振を頑張れば、(原理的には)地上でOK.

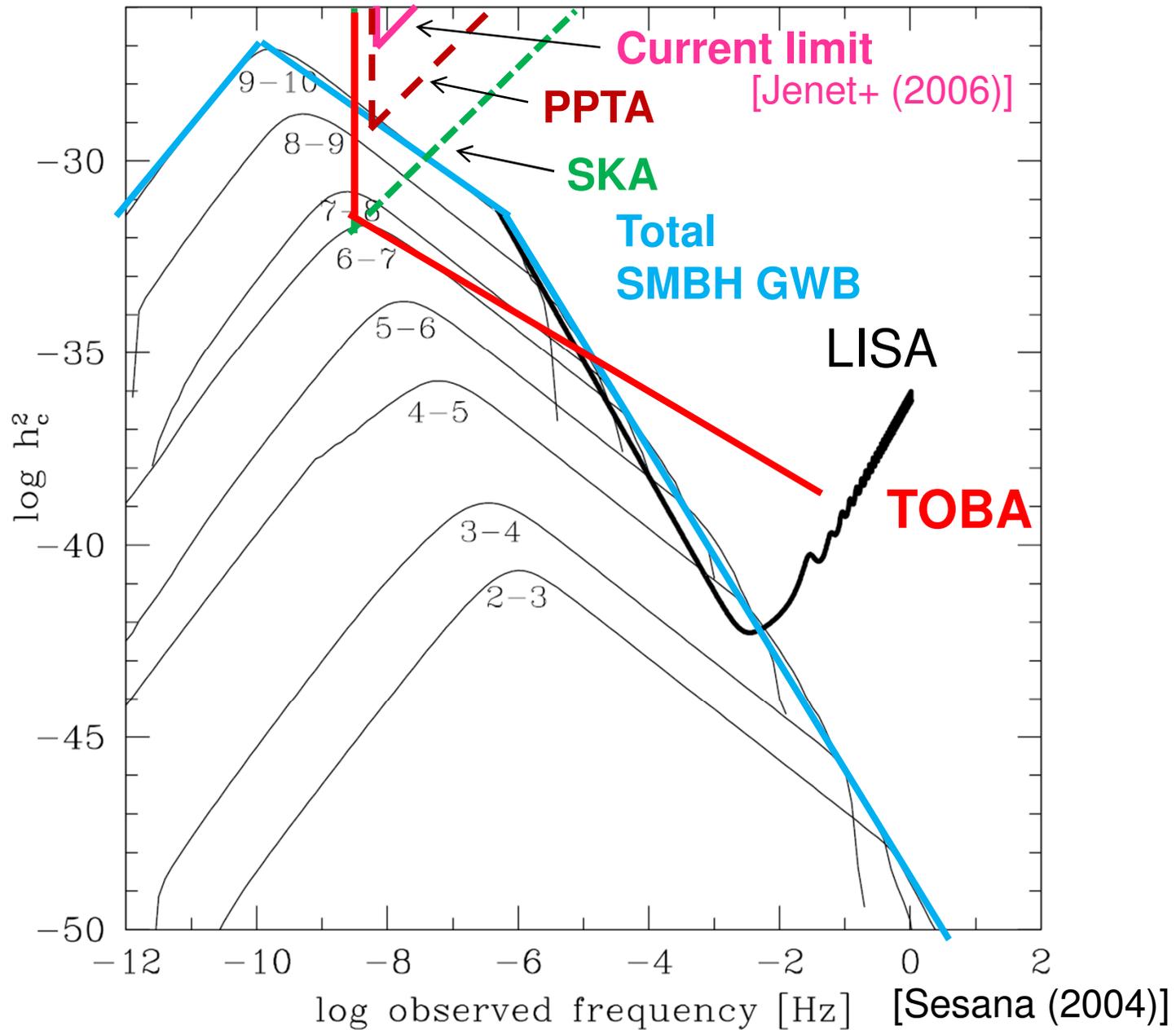
SMBH 背景重力波



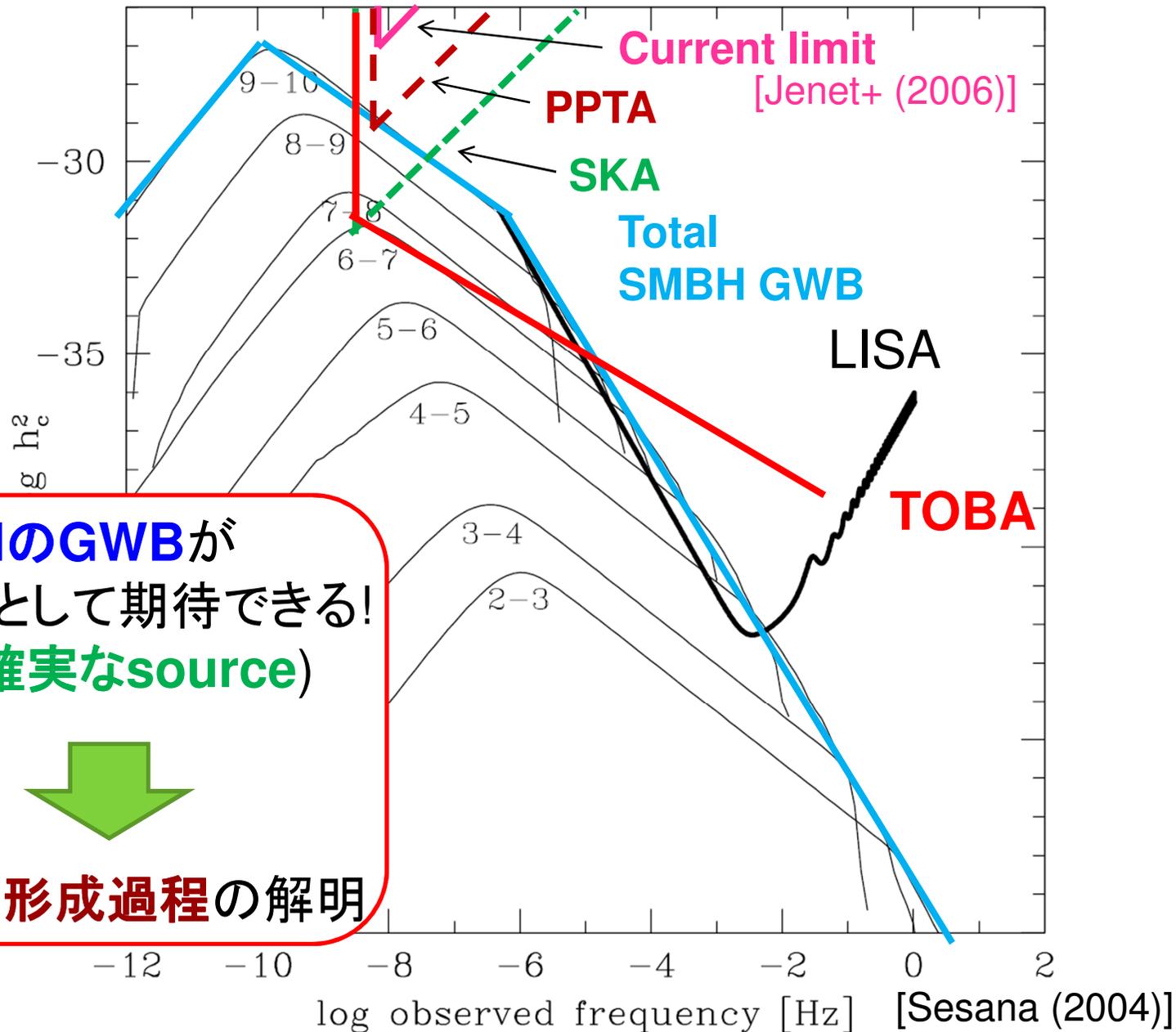
SMBH 背景重力波



SMBH 背景重力波



SMBH 背景重力波

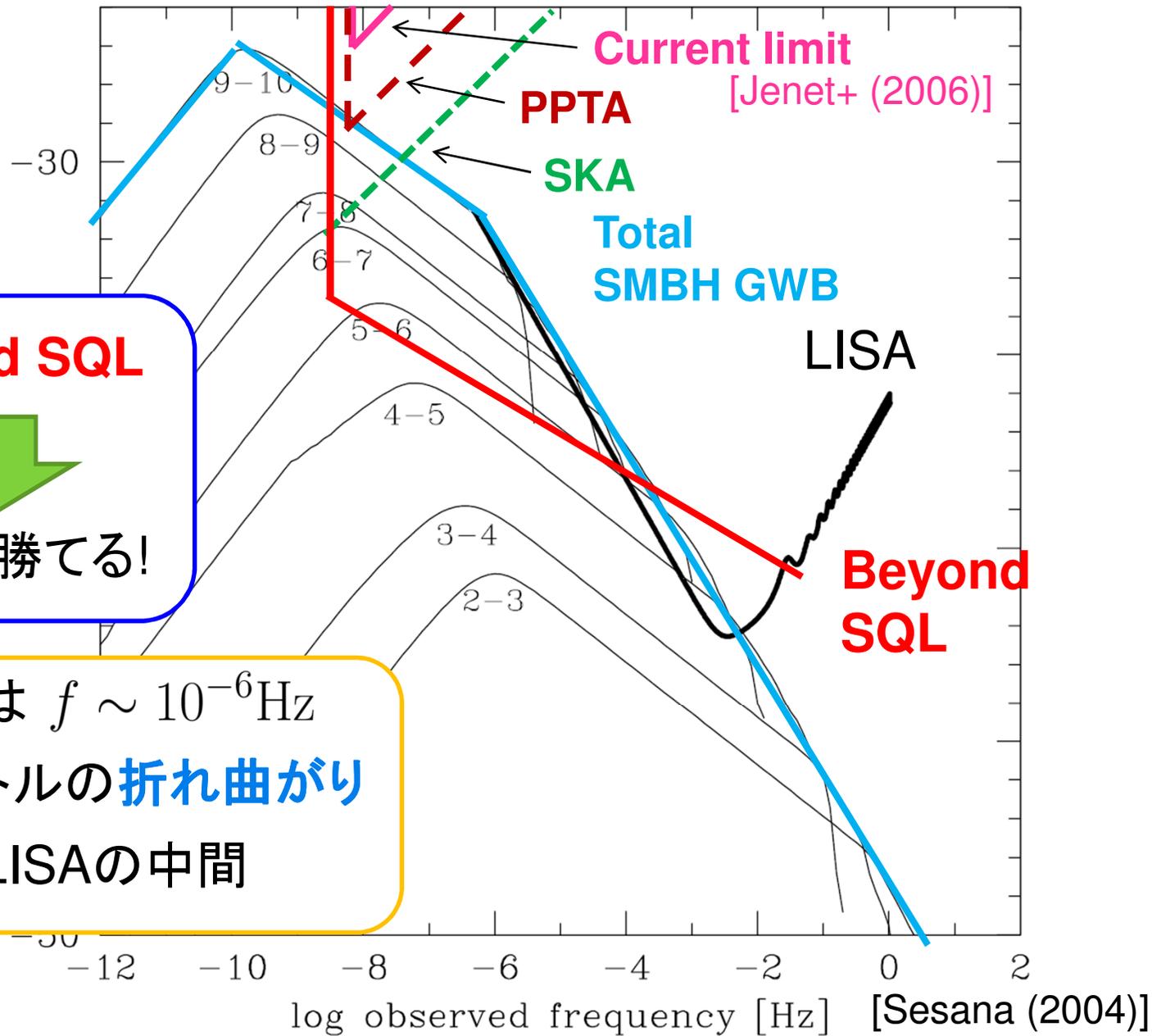


SMBHのGWBが
ソースとして期待できる!
(ほぼ**確実なsource**)



SMBH形成過程の解明

SMBH 背景重力波

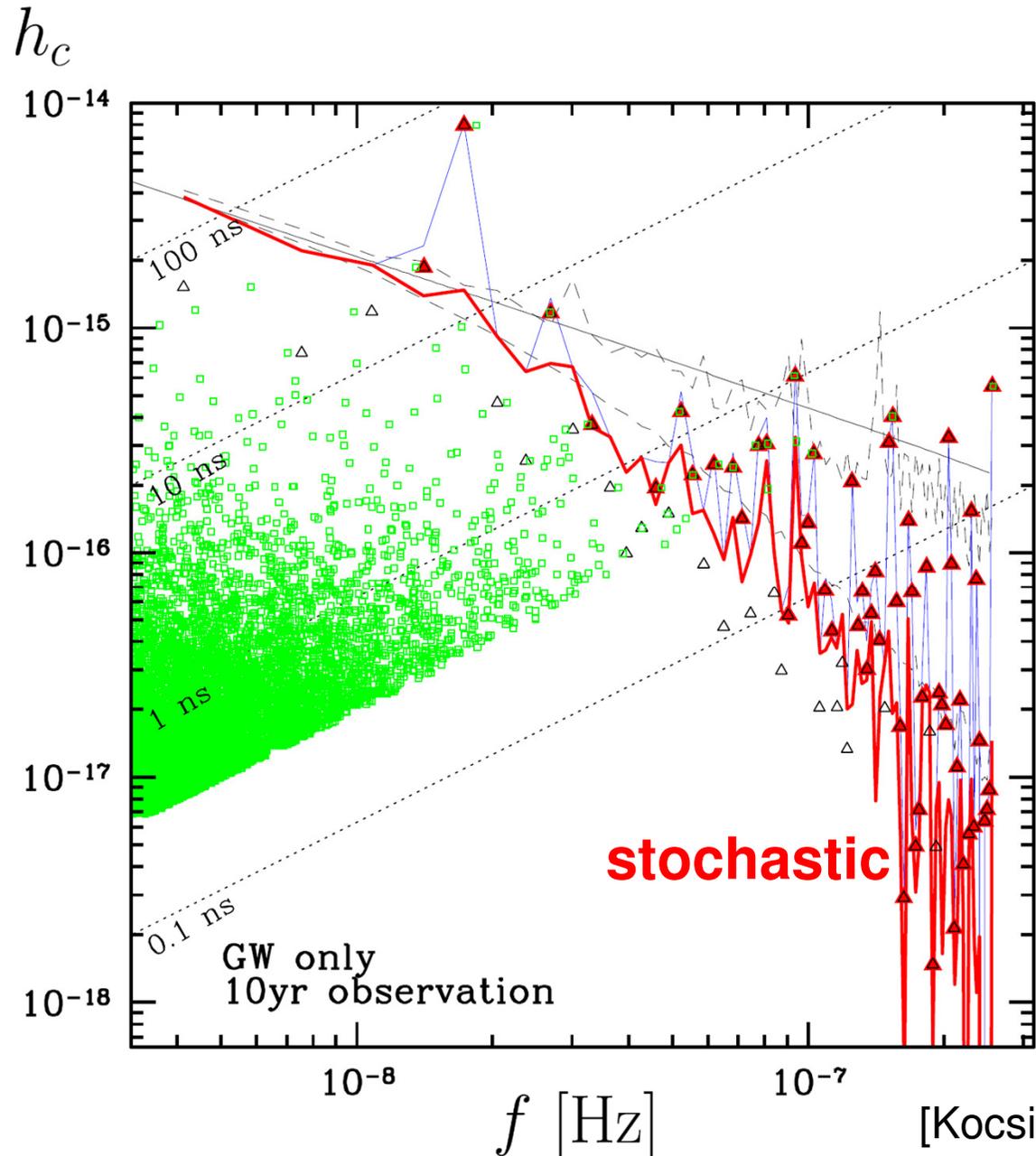


Beyond SQL



SKAに勝てる!

RESOLVE可能なSMBH連星からの連続波

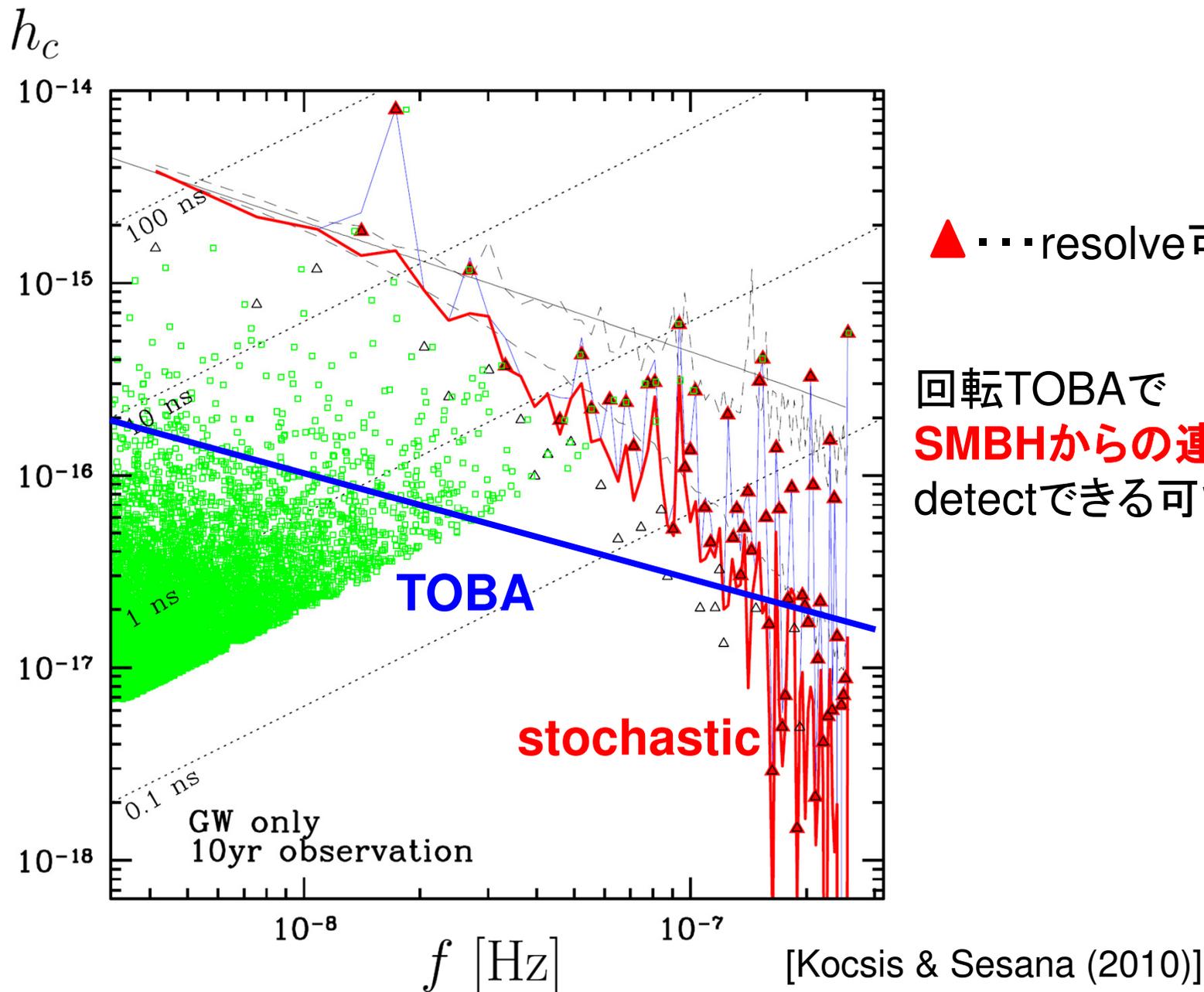


▲ resolve可能な連星

回転TOBAで
SMBHからの連続波が
detectできる可能性あり。

[Kocsis & Sesana (2010)]

RESOLVE可能なSMBH連星からの連続波



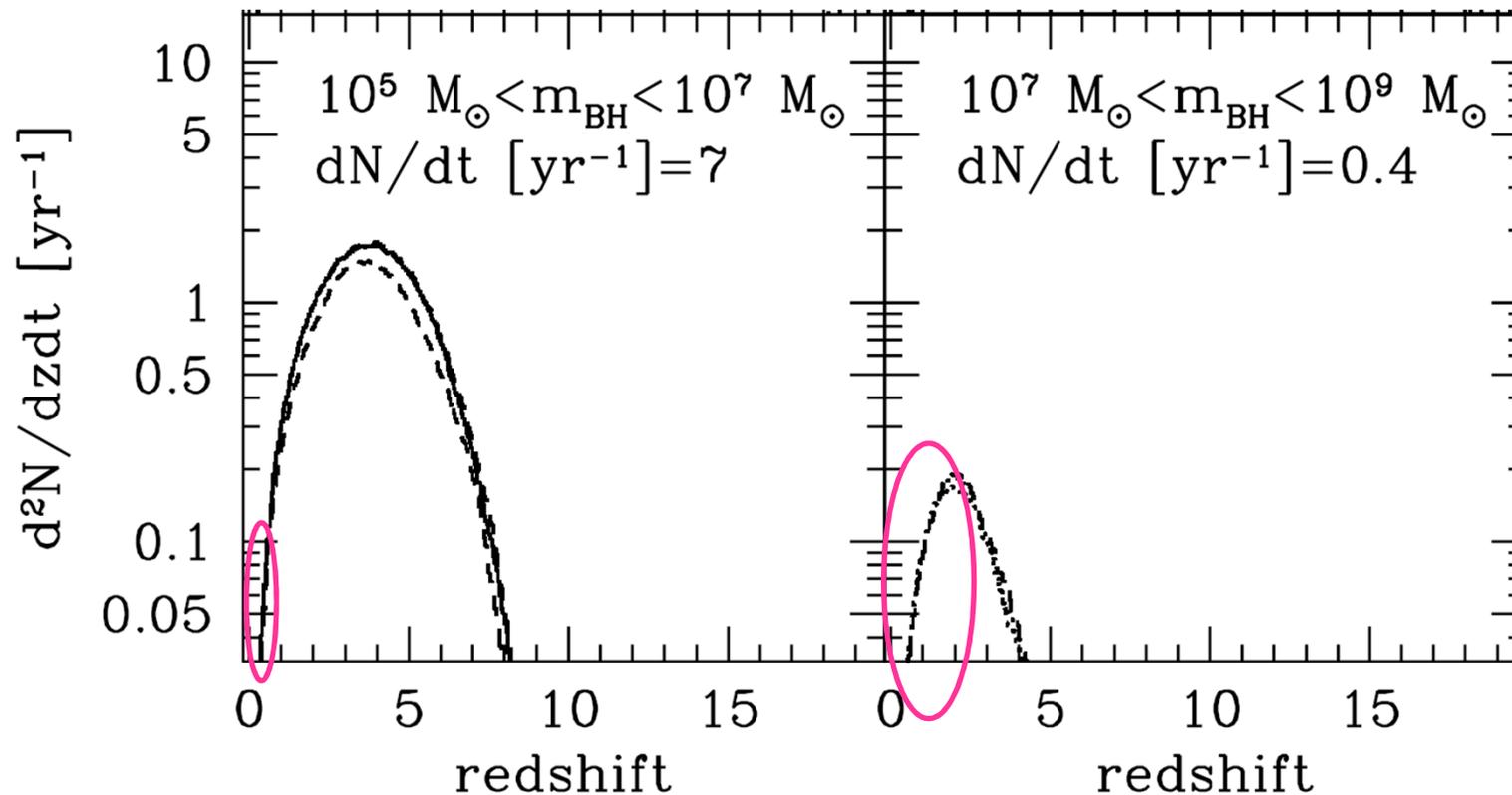
▲ ... resolve可能な連星

回転TOBAで
SMBHからの連続波が
detectできる可能性あり。

CHIRP波

BH merger rateのz分布

[Sesana (2004)]

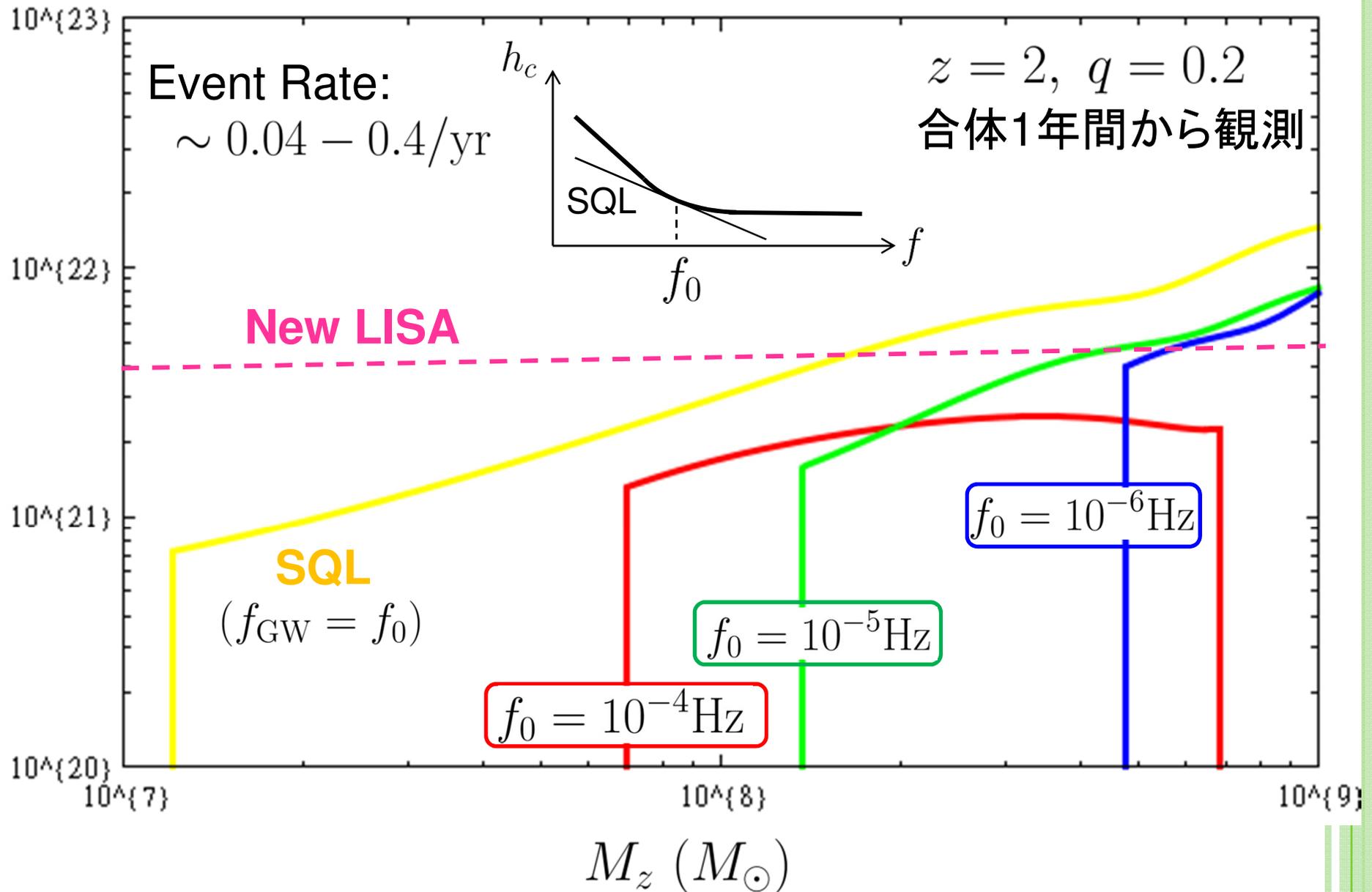


質量大 → より遠くまで「見える」
分布もlow zへシフト

→ Detection rate上がる!

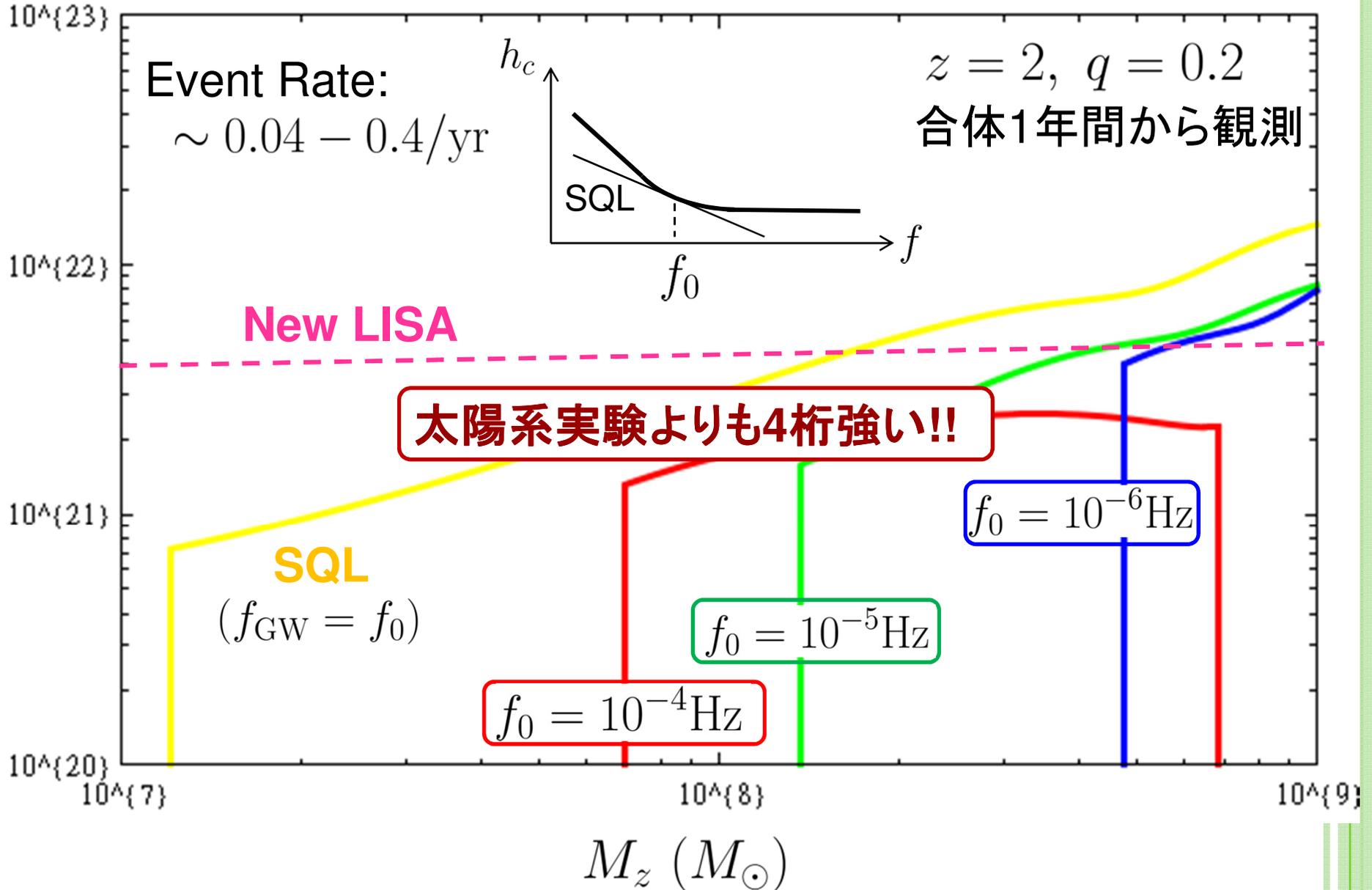
GRAVITON MASSの制限

$\lambda_g(\text{cm})$



GRAVITON MASSの制限

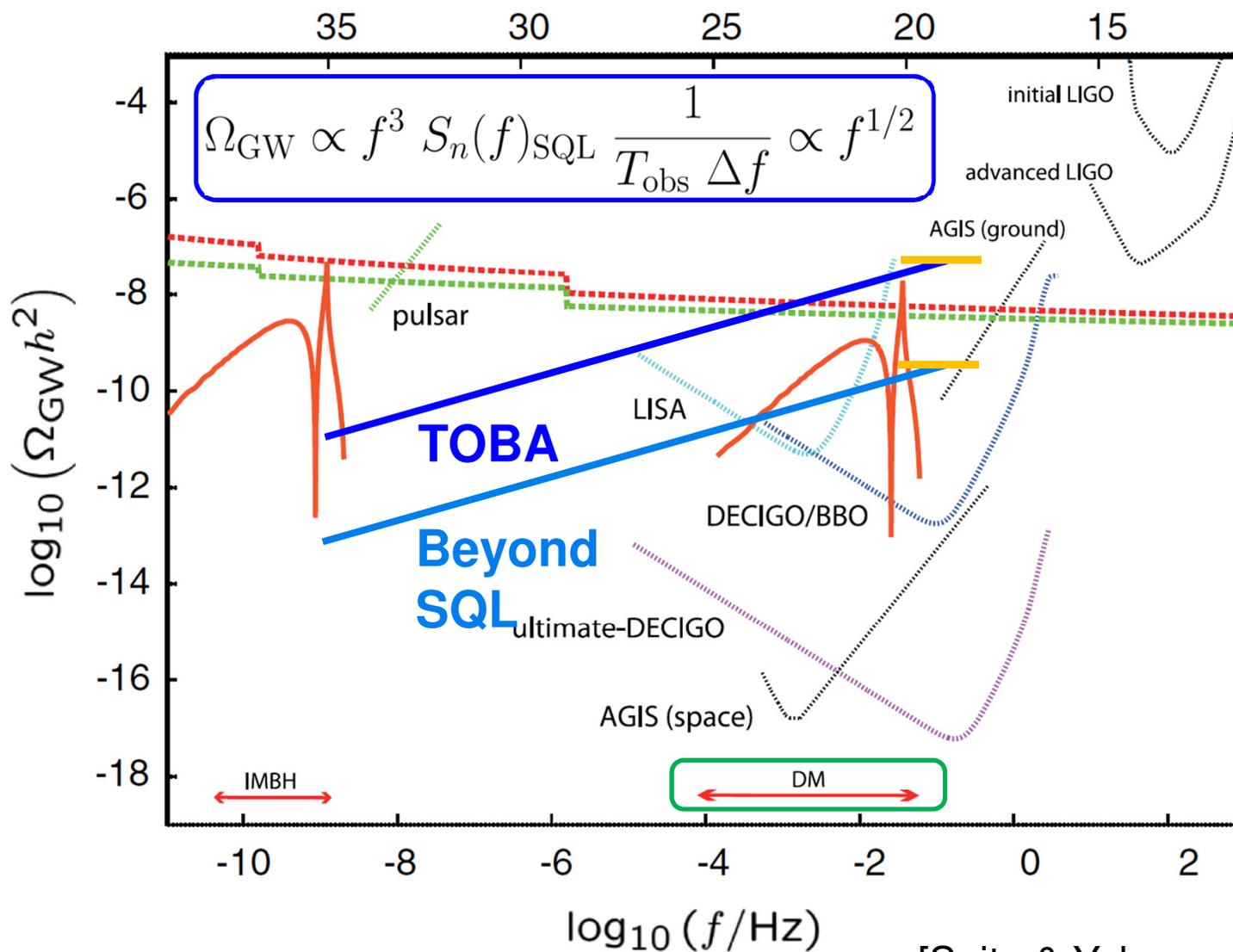
$\lambda_g(\text{cm})$



2次揺らぎによる背景重力波のスペクトル

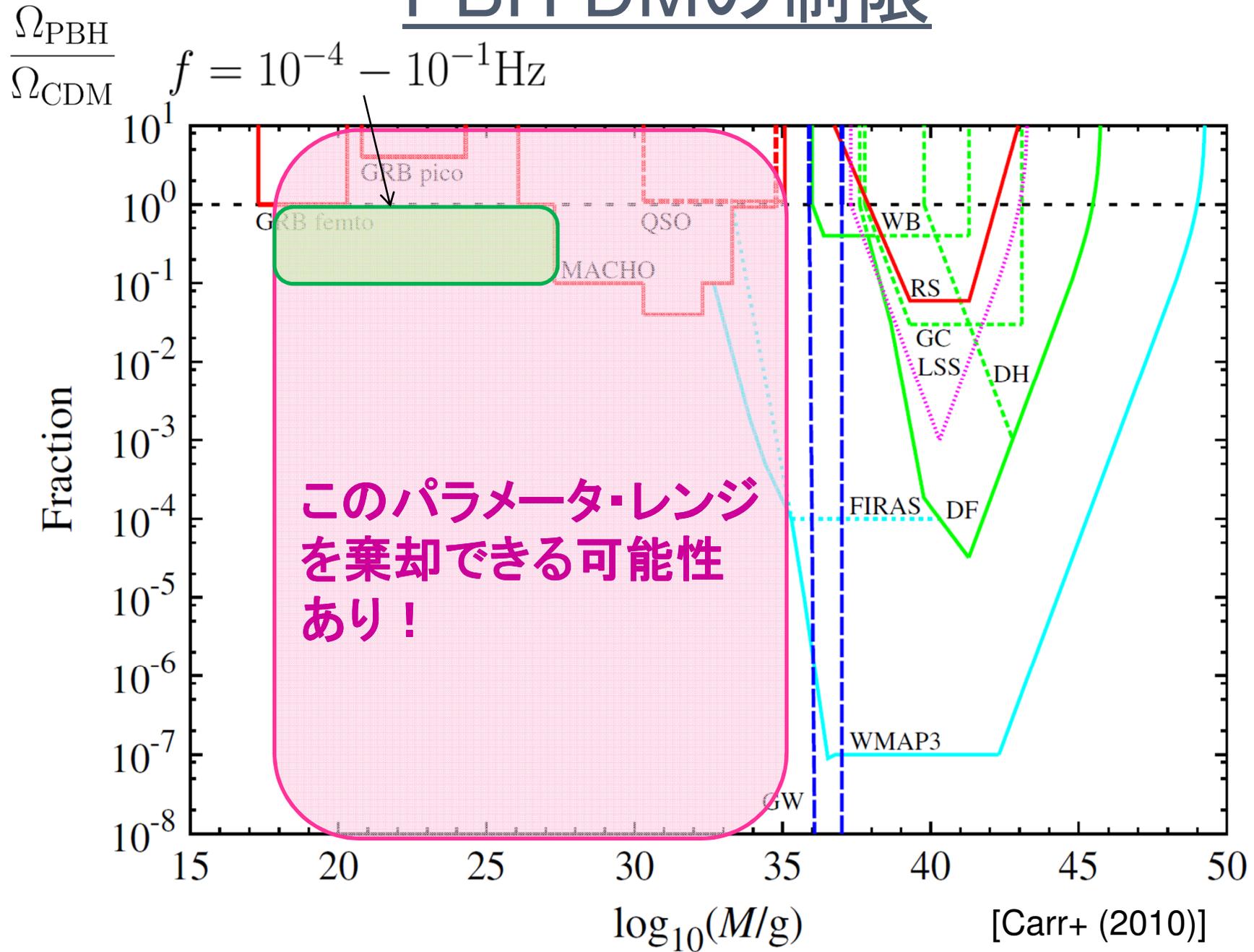
$$S_n(f)_{\text{SQL}} \propto f^{-2}, \Delta f \sim f$$

$$\log_{10}(M_{\text{PBH}}/1g)$$



[Saito & Yokoyama (2009)]

PBH DMの制限



§3 まとめ

・低周波でのGW観測 ⇒ 相対論、宇宙論、天体物理学
面白いサイエンスがいっぱい!!

・TOBA ⇒ (地上で)低周波GW観測が行える!!

$f = 10^{-4} - 10^{-1} \text{Hz}$ → PBH DMの制限!
確実なサイエンス

$f = 10^{-6} - 10^{-4} \text{Hz}$ → Graviton massへの制限
⇒ 太陽系実験よりも4ケタ強い!!
Rate: 0.04-0.4/yr

$f = 10^{-9} - 10^{-6} \text{Hz}$ → SMBH ほぼ確実なGW源
⇒ SMBH形成過程の解明

- ・DPFと同程度の予算で、より確実なGW観測ができそう。
- ・今から急げば、First Detectionも夢ではないのでは!?