

2019/03/12 銀河進化と遠方宇宙@神奈川大学

位置天文による 低周波重力波の 性質の検証

[宇宙論班EAVNサイエンス]

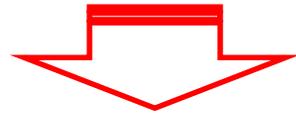
山内 大介

神奈川大学工学部物理学教室

なぜ VLBI ?

□ SKA-Japanコンソーシアム

- ✓ SKA1の参加 → Band5c, VLBIバックエンド, AIV



VLBIコミュニティとの連携が今後さらに重要に！

- ✓ 2018年度SKA-JP SWGサイエンスターゲット:

EAVN (East Asia VLBI Network)

- ◆ NOTE:2018/4/4 EAVN勉強会 [秦さん(天文台水沢)]

素朴な疑問・・・

そもそもVLBIで宇宙論
なんて出来るの？

VLBI で宇宙論が出来るか？

□ VLBI は何が得意？

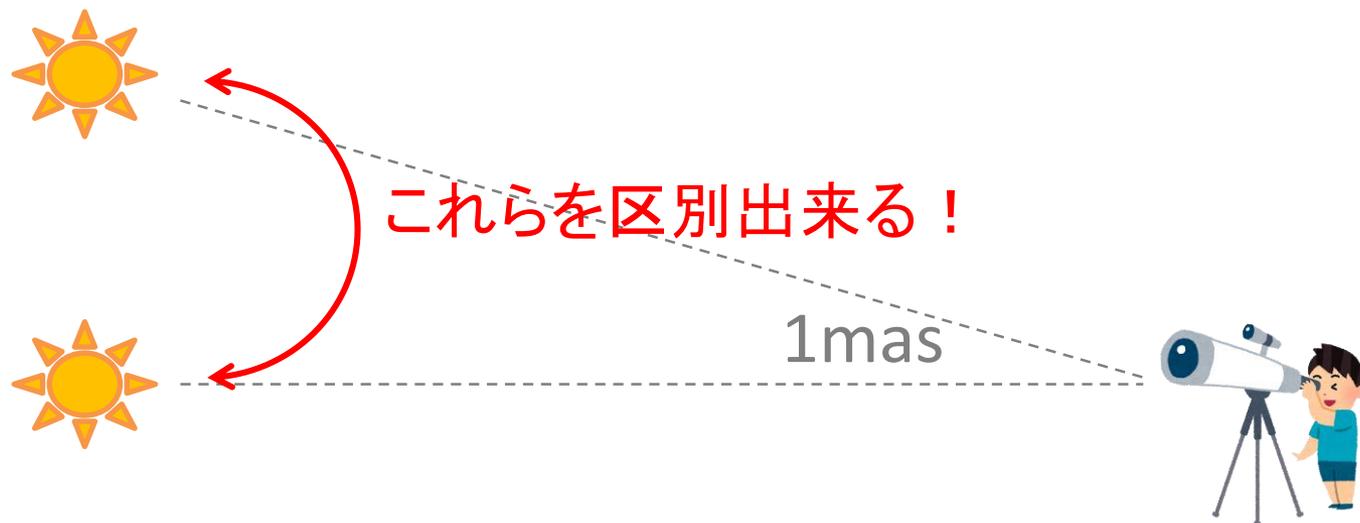
	感度(μJy)	空間分解能(mas) @10GHz
EAVN	100	1
SKA1	70	30
SKA2	5	2

感度は
やや悪い

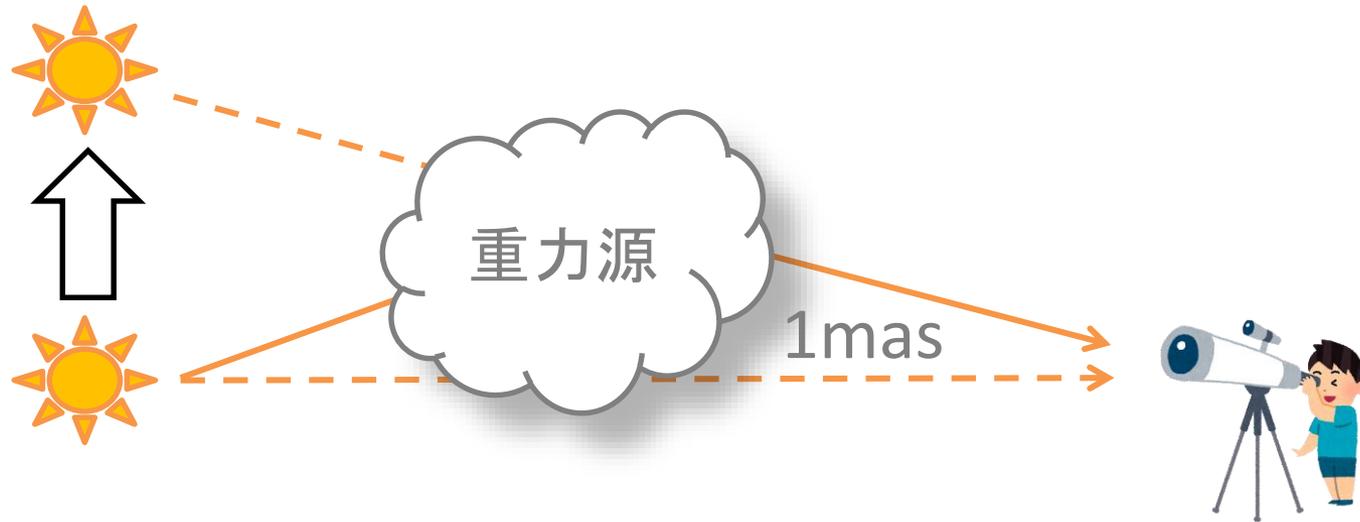
空間分解能
が良い！

→ 位置精度で勝負できることを探す

星の位置が決まると何が嬉しい？



星の位置が決まると何が嬉しい？



手前に重力源があると・・・

- 星の光路が曲げられる（～重力レンズ）
- 1masのズレを生む重力源を区別出来る(?)

パルサータイミングとの違い



手前に重力源があると・・・

- 星の光が遅れて到達する（～重力赤方偏移）
- 1msのズレを生む重力源を区別出来る

対応している？

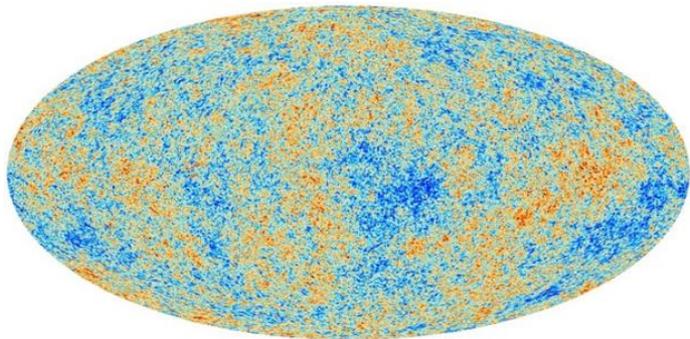
CMB

ザックス・ボルフェ効果

最終散乱面の時間のズレ

重力レンズ効果

揺らぎの位置のズレ



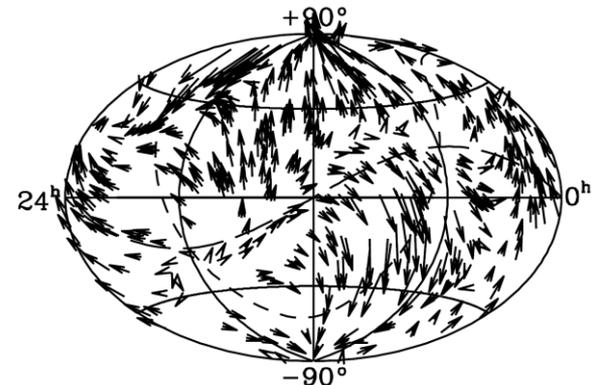
今回

パルサータイミング

パルスの時間のズレ

VLBI

星の位置のズレ
(正確には角速度)



重力源は？

◆ 仮定：観測時間 $\sim O(10\text{年})$

✓ ソースになりえる条件は...

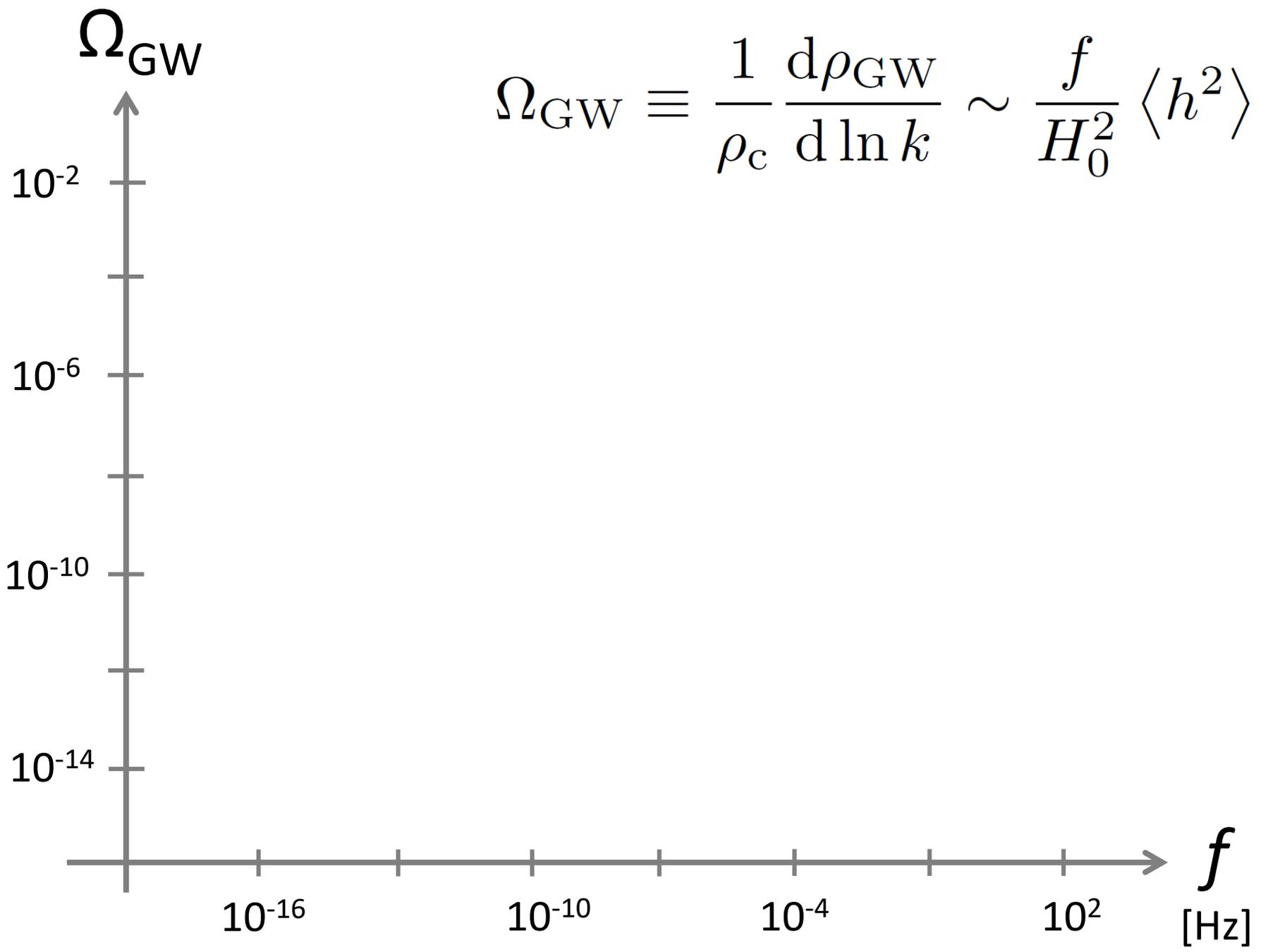
角周波数 $\omega \sim O(1/10\text{年}) \sim 10^{-10}\text{Hz}$ の重力源

✓ 最もシンプルなソースは

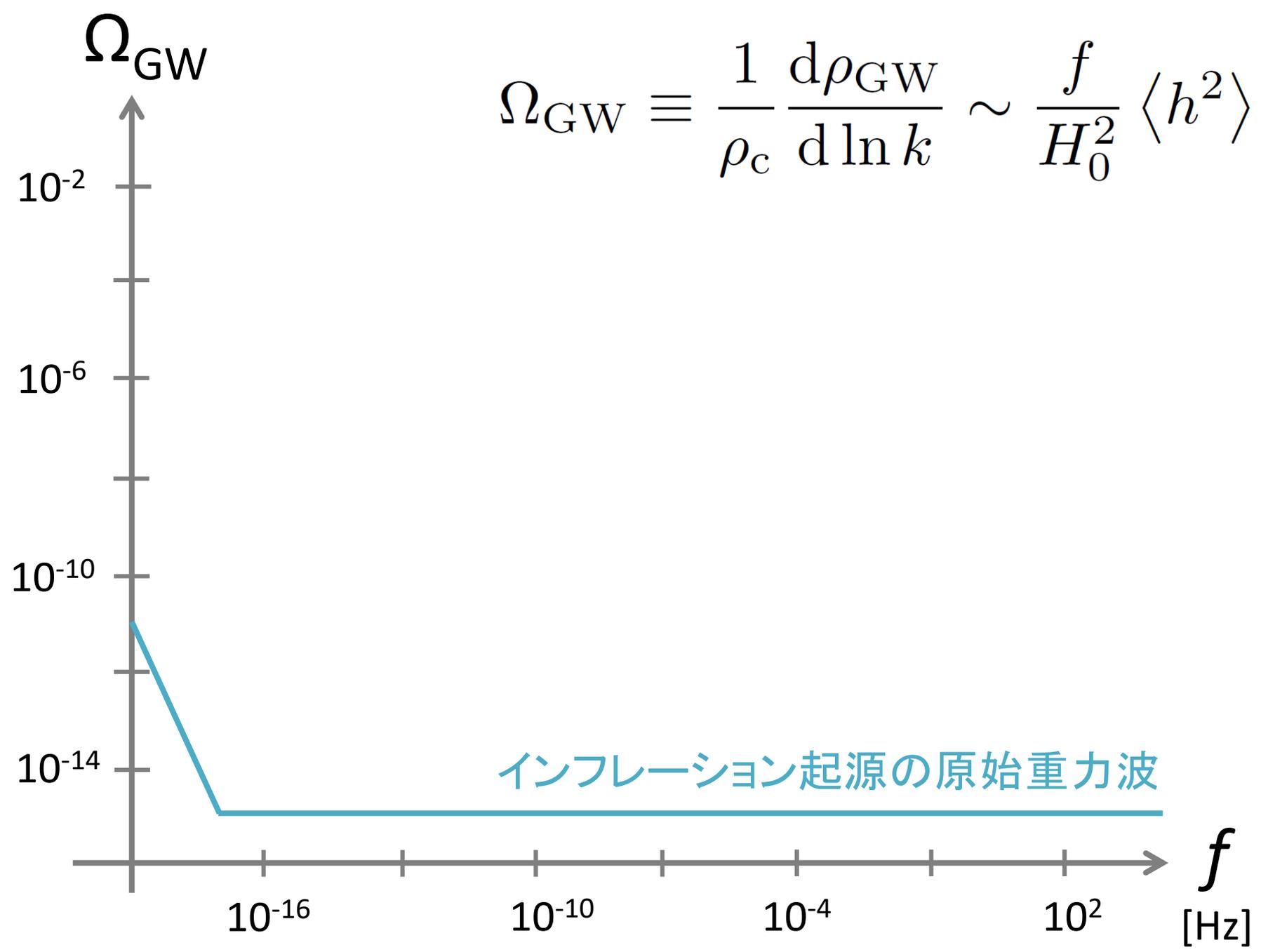
角周波数 $\omega \sim O(1/10\text{年}) \sim 10^{-10}\text{Hz}$ の
背景重力波

天球上のあらゆる方向からやってくる等方重力波

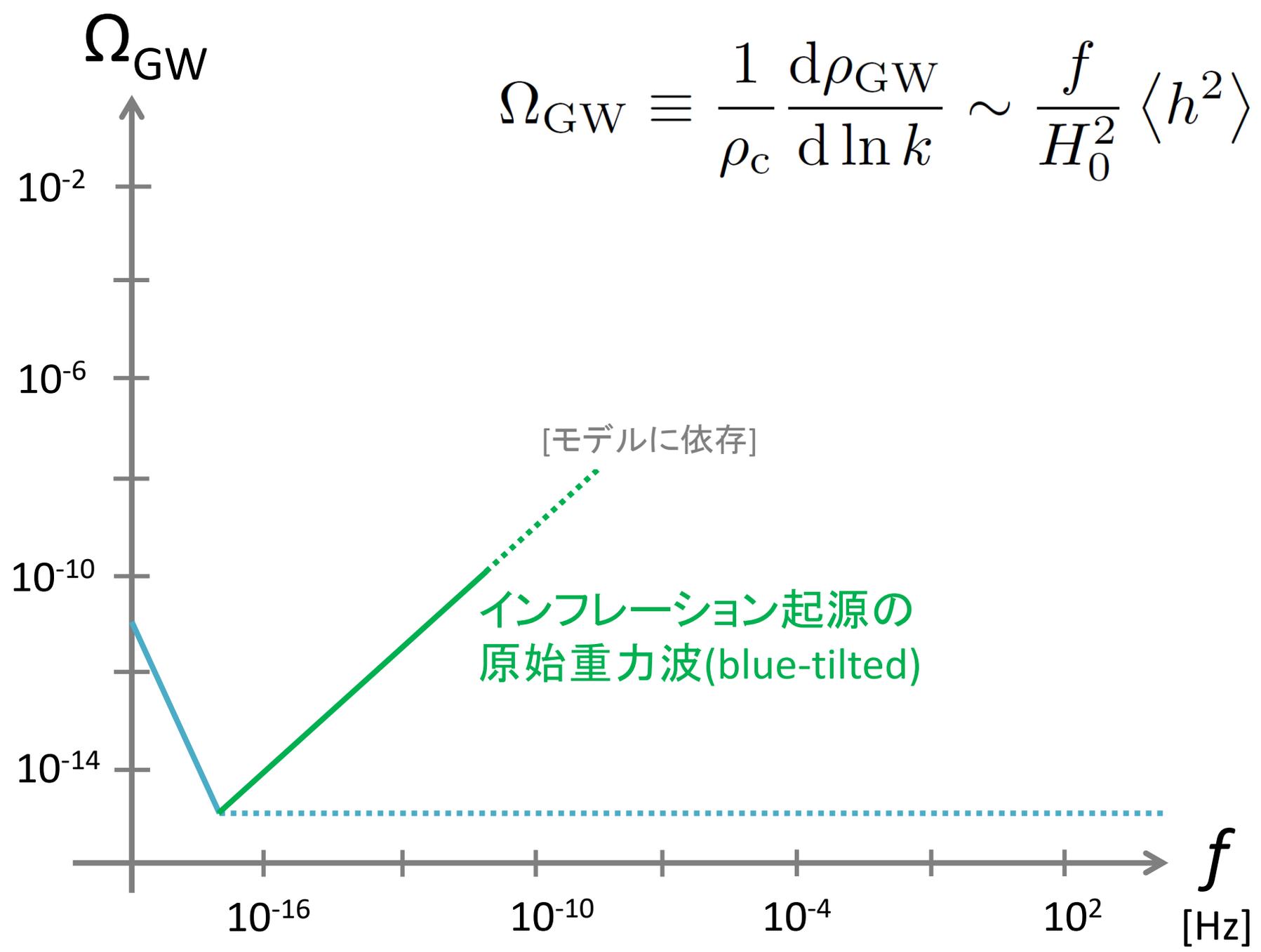
$$\Omega_{\text{GW}} \equiv \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}}{d \ln k} \sim \frac{f}{H_0^2} \langle h^2 \rangle$$



$$\Omega_{\text{GW}} \equiv \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}}{d \ln k} \sim \frac{f}{H_0^2} \langle h^2 \rangle$$

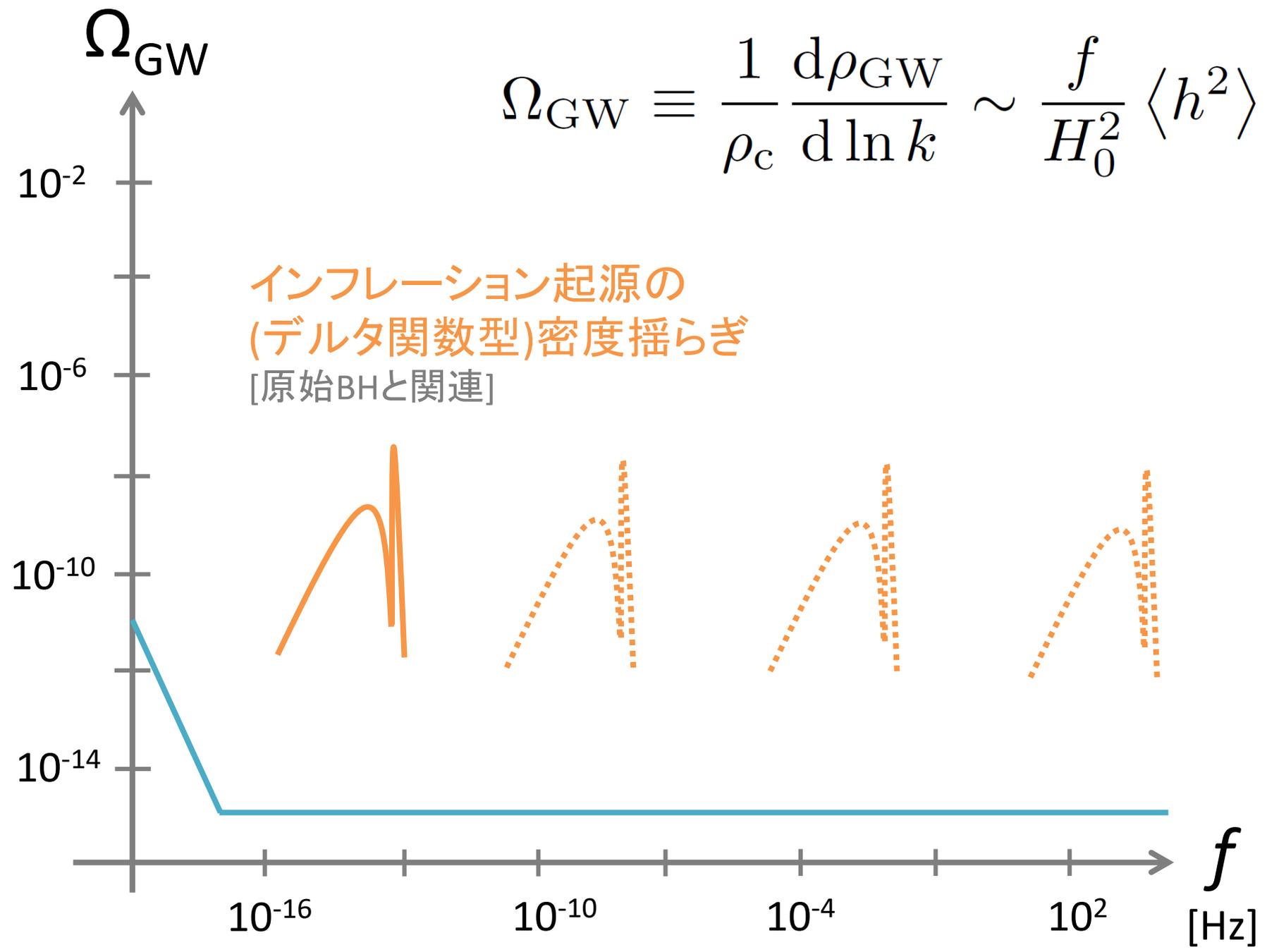


$$\Omega_{\text{GW}} \equiv \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}}{d \ln k} \sim \frac{f}{H_0^2} \langle h^2 \rangle$$

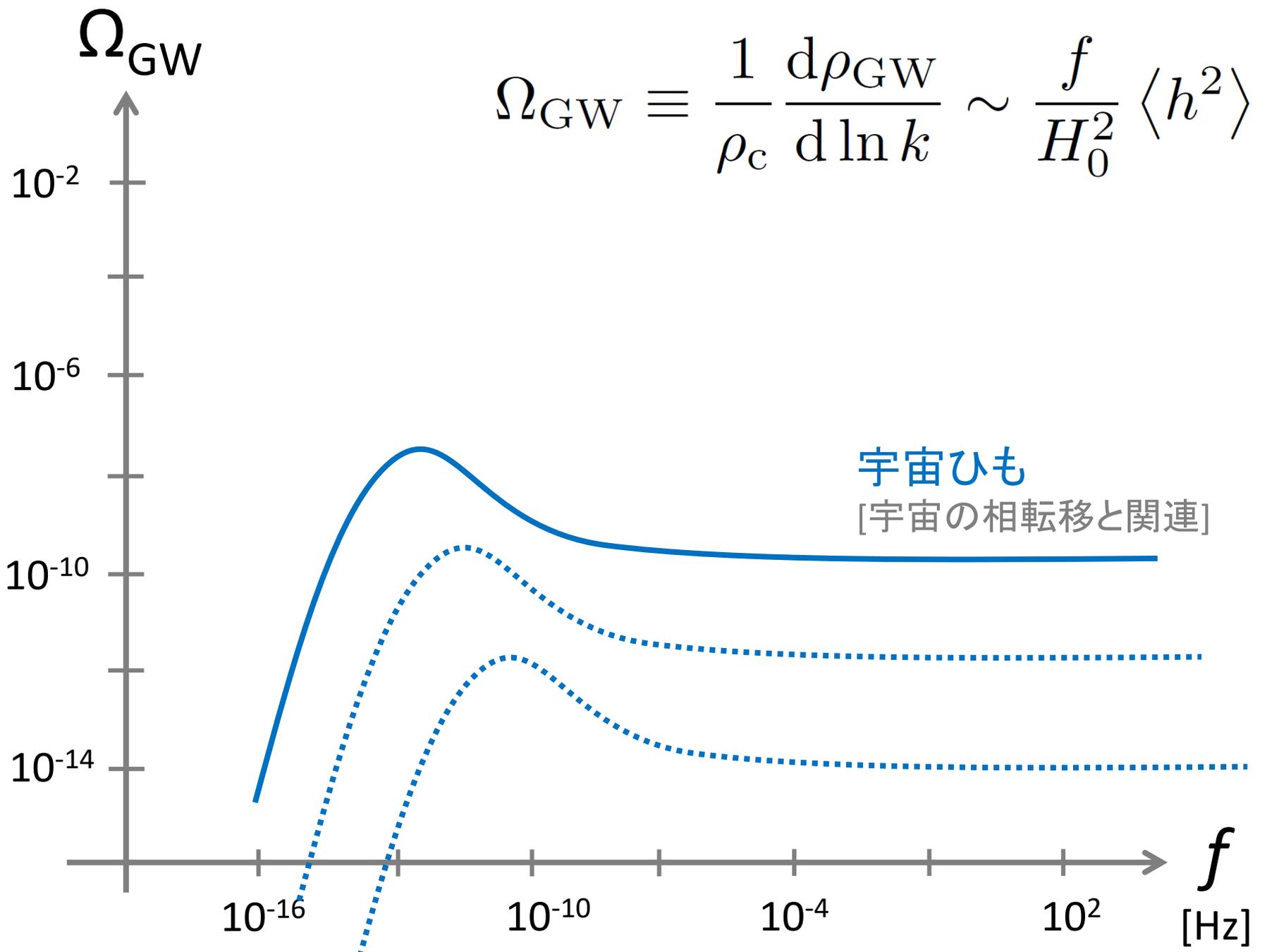


$$\Omega_{\text{GW}} \equiv \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}}{d \ln k} \sim \frac{f}{H_0^2} \langle h^2 \rangle$$

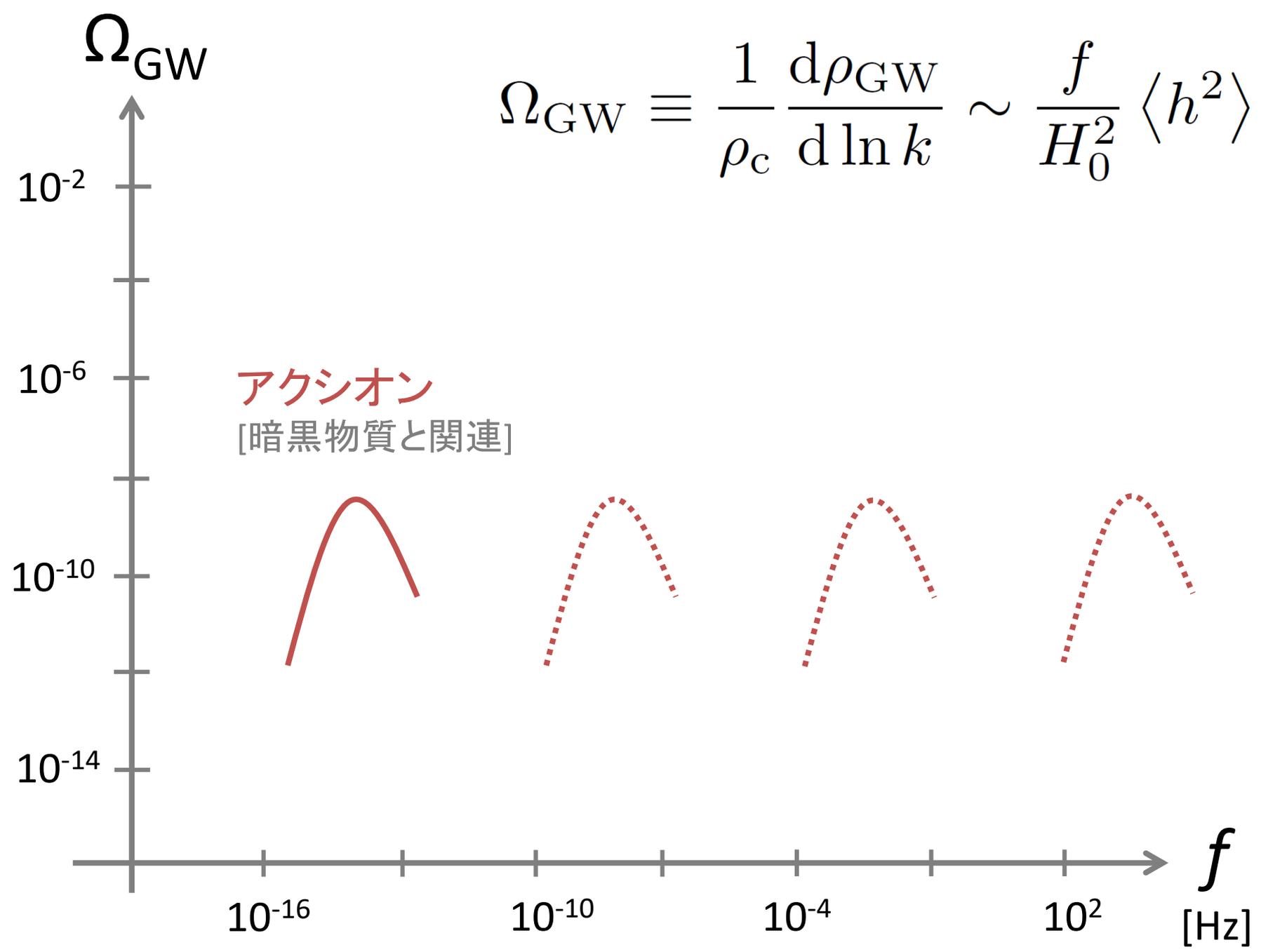
インフレーション起源の
(デルタ関数型)密度揺らぎ
[原始BHと関連]



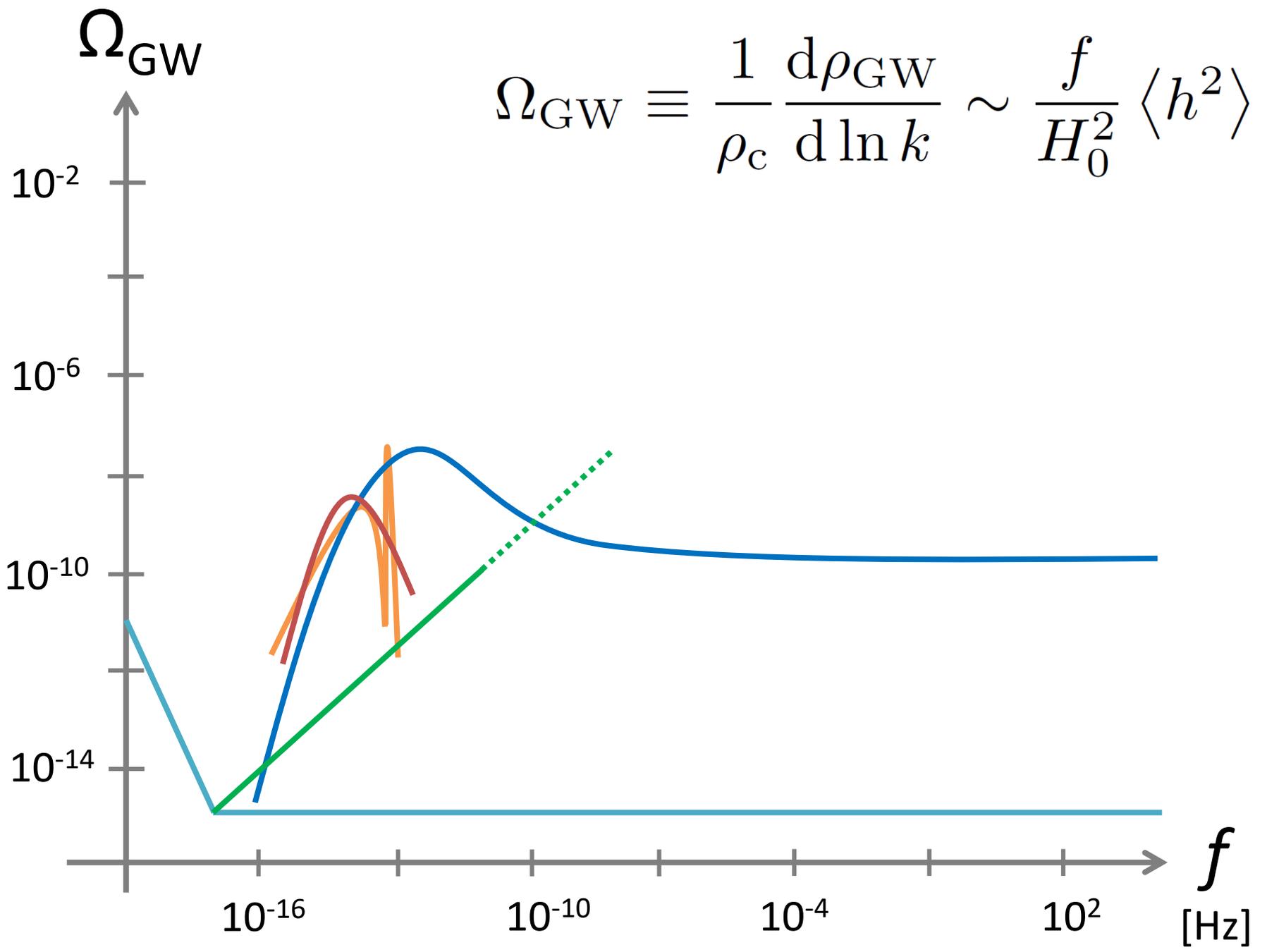
$$\Omega_{\text{GW}} \equiv \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}}{d \ln k} \sim \frac{f}{H_0^2} \langle h^2 \rangle$$



$$\Omega_{\text{GW}} \equiv \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}}{d \ln k} \sim \frac{f}{H_0^2} \langle h^2 \rangle$$



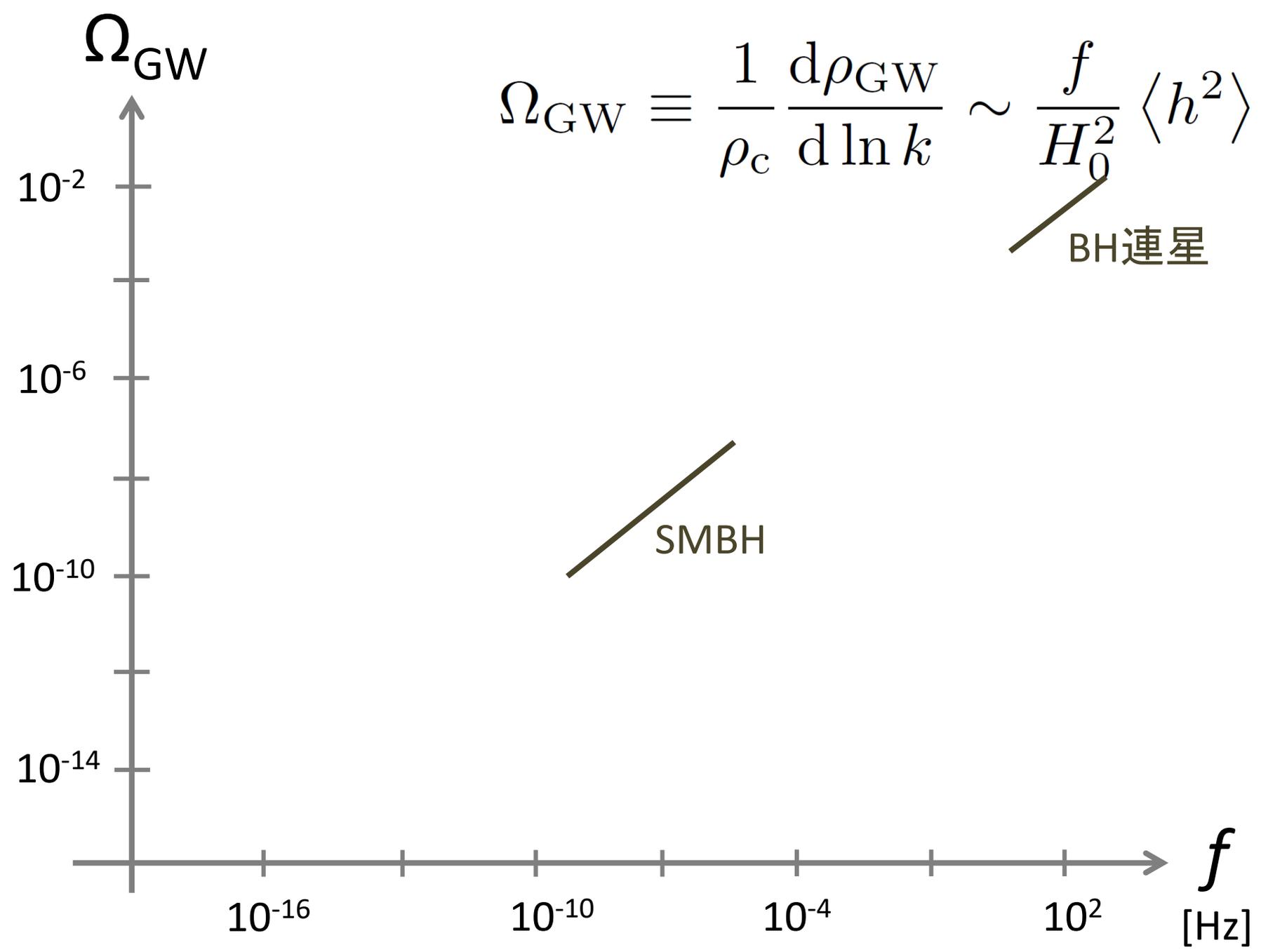
$$\Omega_{\text{GW}} \equiv \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}}{d \ln k} \sim \frac{f}{H_0^2} \langle h^2 \rangle$$

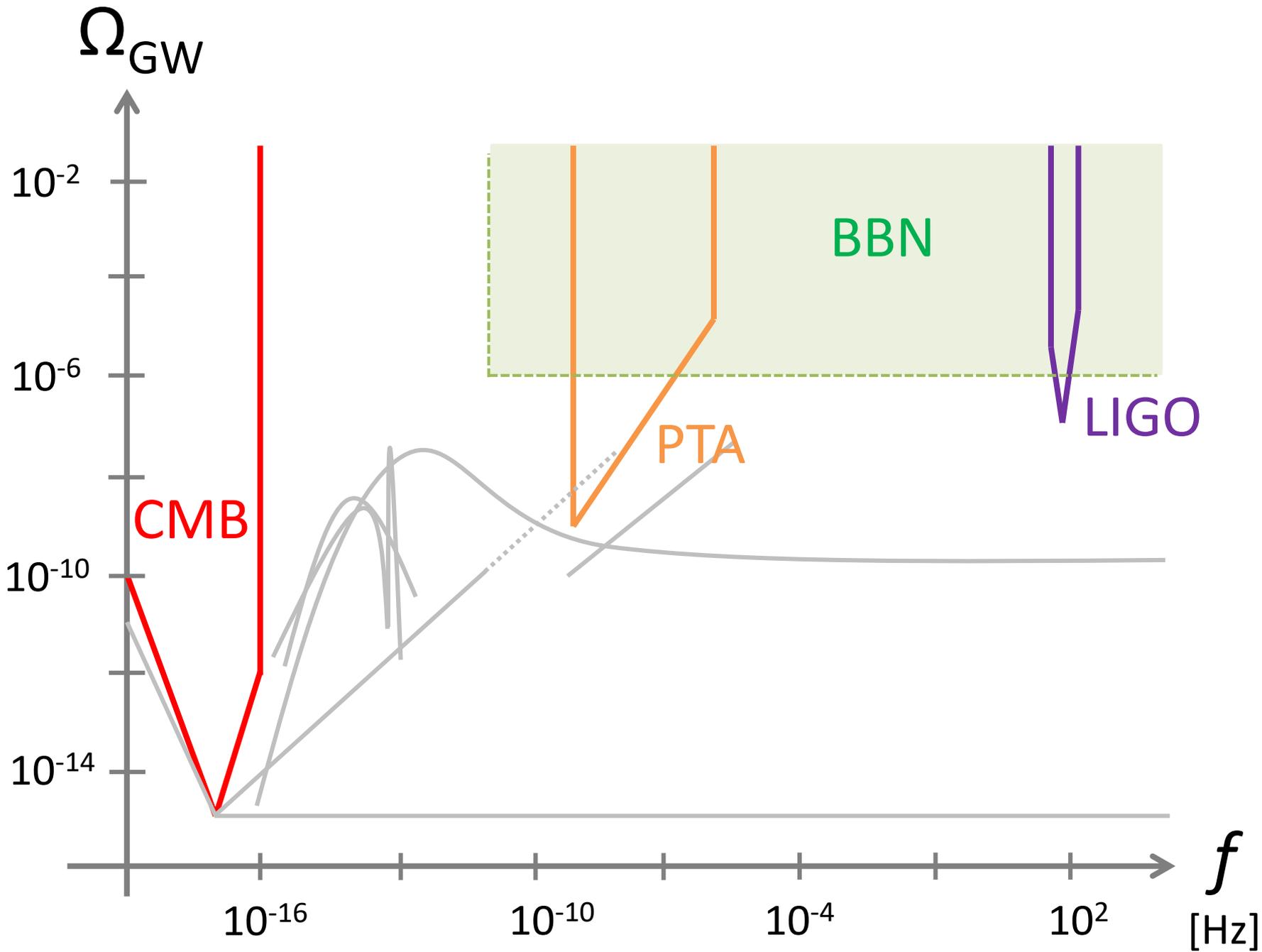


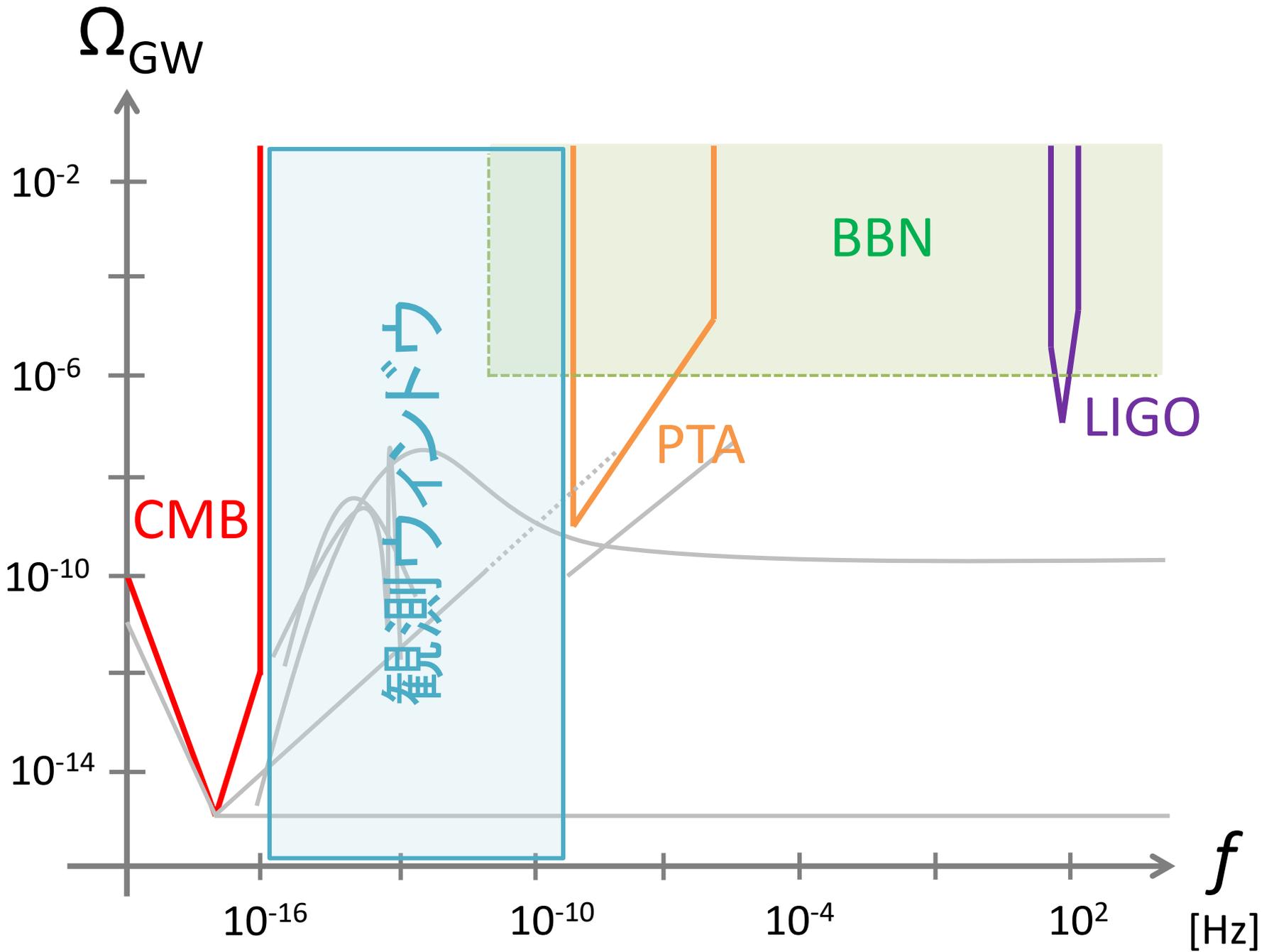
$$\Omega_{\text{GW}} \equiv \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}}{d \ln k} \sim \frac{f}{H_0^2} \langle h^2 \rangle$$

BH連星

SMBH







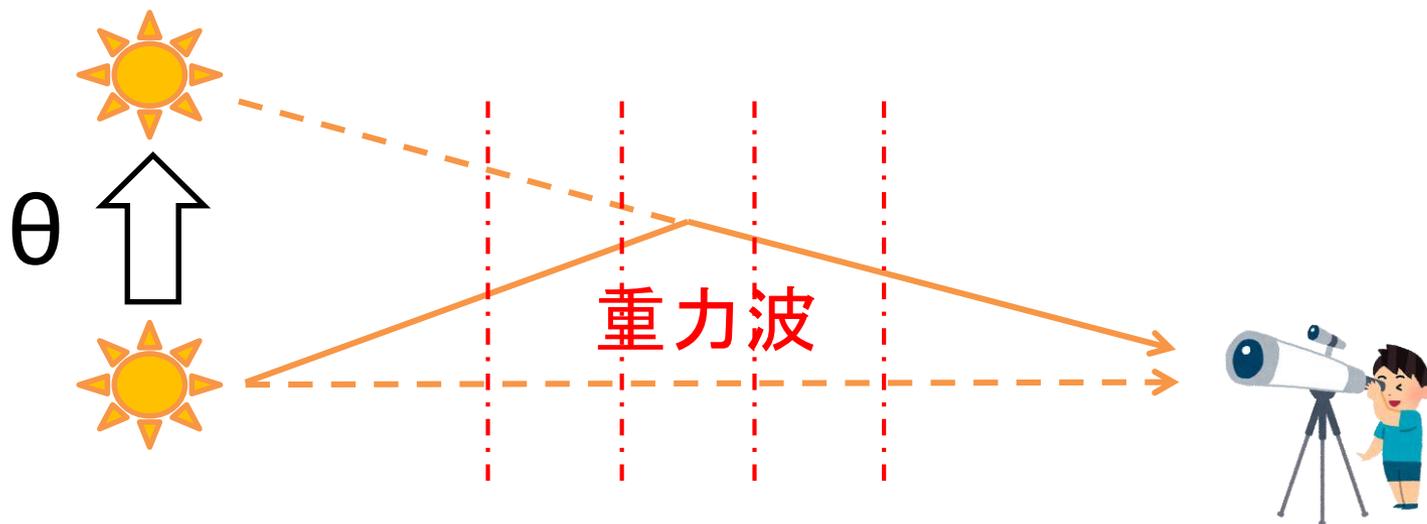
VLBI による 背景重力波の探査

背景重力波が誘起する星角速度

□ 天球面上での見かけの星の位置の変位

$$\theta \sim \sqrt{\langle h^2 \rangle} \sim \frac{H_0}{f} \sqrt{\Omega_{\text{GW}}}$$

⇒ 角速度 $\omega \sim \frac{\theta}{T} \sim f\theta \sim H_0 \sqrt{\Omega_{\text{GW}}}$



背景重力波が誘起する星角速度

□ まじめに計算すると… $= \Omega_{\text{GW}}^{\text{tot}}$

$$\frac{6}{5} P_{\ell=2} = 4\pi \int_{f < 1/T} H_0^2 \Omega_{\text{GW}}(f) d \ln f$$

角速度場

パワースペクトル

[$\ell=2$ モード]

観測時間 T [s]以上のタイム

スケールで速度場を変動

させうる重力波の和

大角度速度場の相関が
 $f < 1/T$ の Ω_{GW} の上限を与える

背景重力波が誘起する星角速度

□ まじめに計算すると・・・

$$\Omega_{\text{GW}}^{\text{tot}} = \frac{6}{5} \frac{1}{4\pi} \frac{P_2}{H_0^2} = 0.00042 \frac{P_2}{(1 \mu\text{as}/\text{yr})^2}$$

⇒ 典型的に観測期間10yr, 位置精度100 μas が必要

大角度速度場の相関が
 $f < 1/T$ の Ω_{GW} の上限を与える

観測量との関係



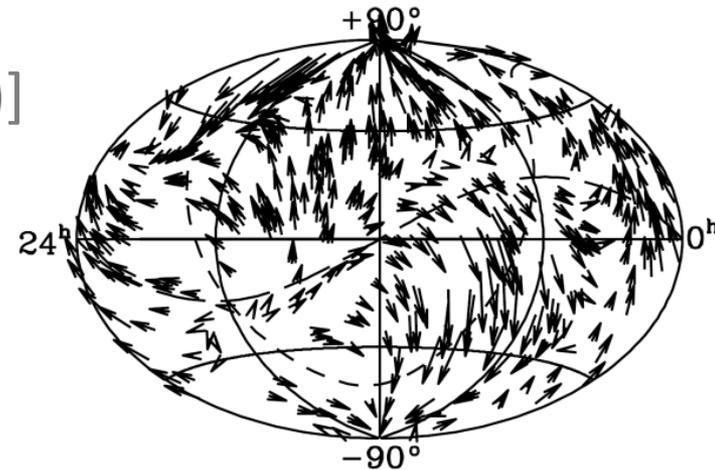
$$\int_{f < 1/T} \Omega_{\text{GW}}(f) d \ln f \lesssim \frac{\Delta\theta^2}{NT^2 H_0^2}$$

現在のVLBIによる制限

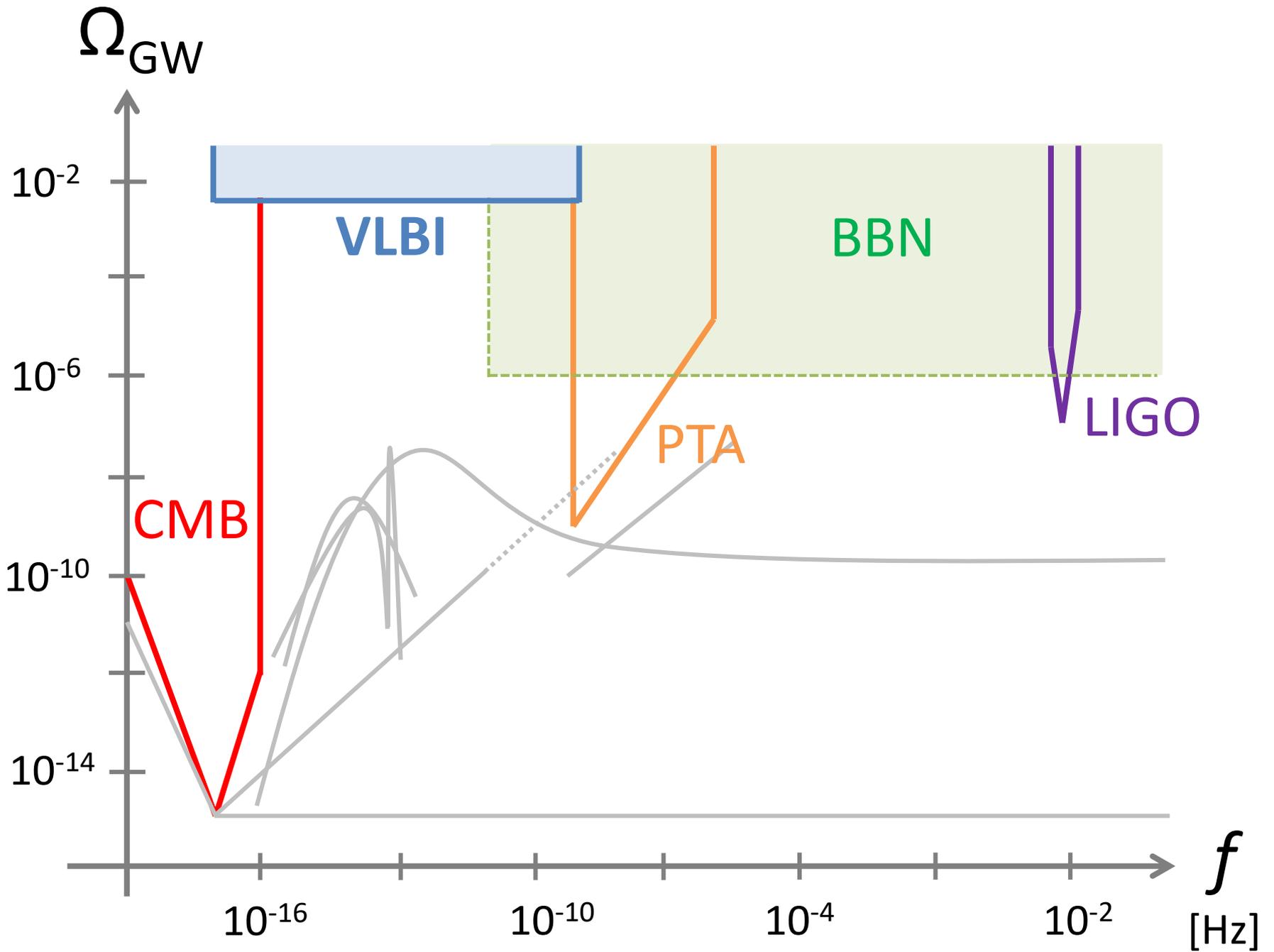
$$P_2 < 1.83^2 (\mu\text{as}/\text{yr})^2$$

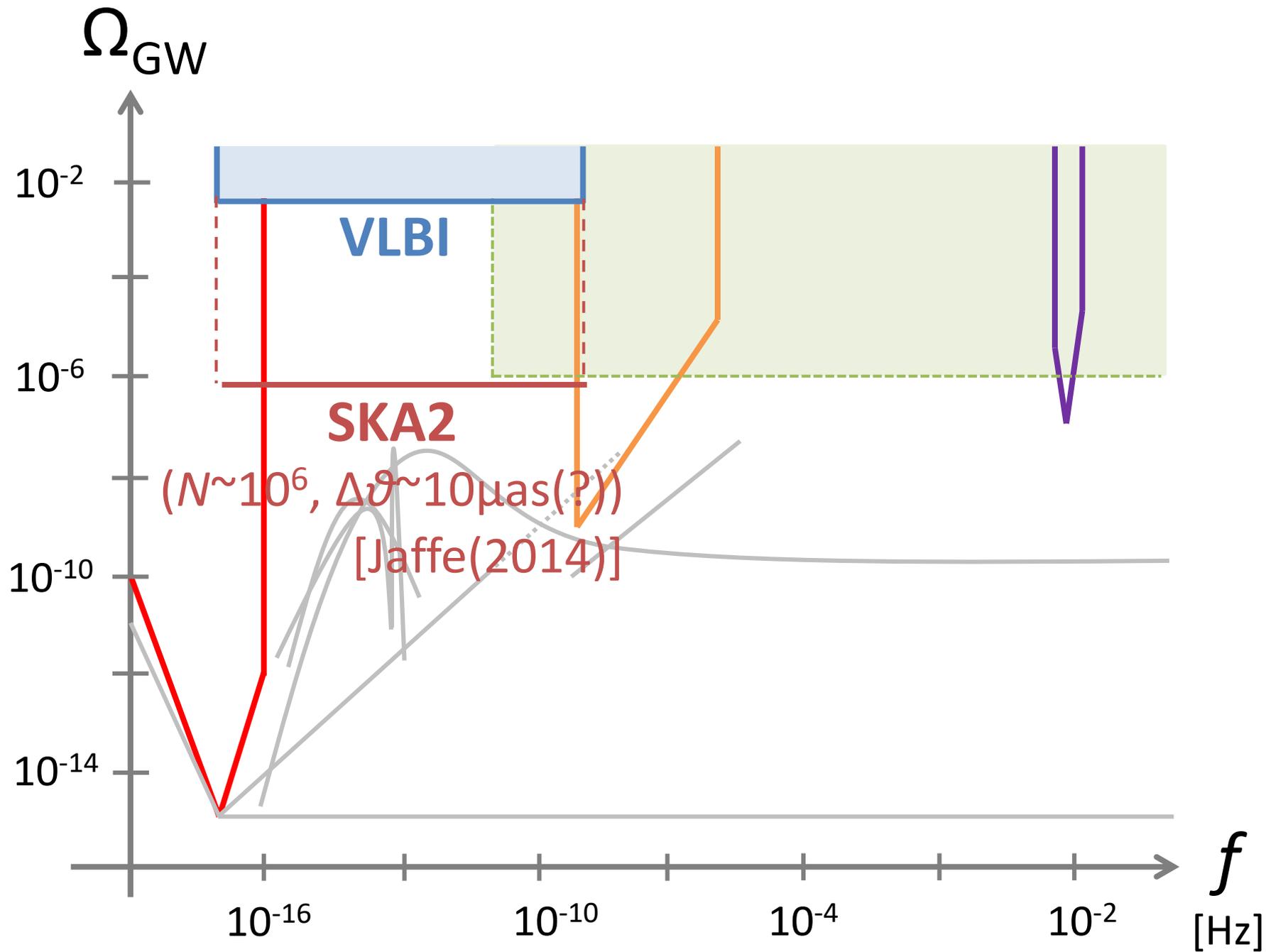
[Darling+Truebenback+Paine(2018)]

[観測天体数	$N=711$
	角度分解能	$\Delta\vartheta=200\mu\text{as}$
	観測時間	$T=1/3\text{yr}$



$$\Omega_{\text{GW}} < 0.0064 \text{ (95\%CL) } [f < 1 \times 10^{-9} \text{Hz}]$$





EAVN の *VLBI* による
背景重力波の探査

EAVNサイエンス

□ 何をするか？

① シンプル

同じ手法による Ω_{GW} の探査

② 拡張

観測量の組み合わせで
背景重力波の性質の新しい探査

EAVNサイエンス ① シンプル

◆ EAVNが既存の結果に匹敵するためには:

	Darling+(2018)	EAVN
観測天体数 N	711	???
角度分解能 $\Delta\vartheta$	200 μas	$\sim 200 \mu\text{as}$ (?)
観測時間 T	1/3 yr	> 1 yr

必要条件: $O(10^3)$ 天体を $O(100)\mu\text{as}$ で数年間観測

→ 1日1天体の位置を定常的に観測?

EAVNサイエンス ② 拡張

◆ パルサータイミングで出来ないことをする

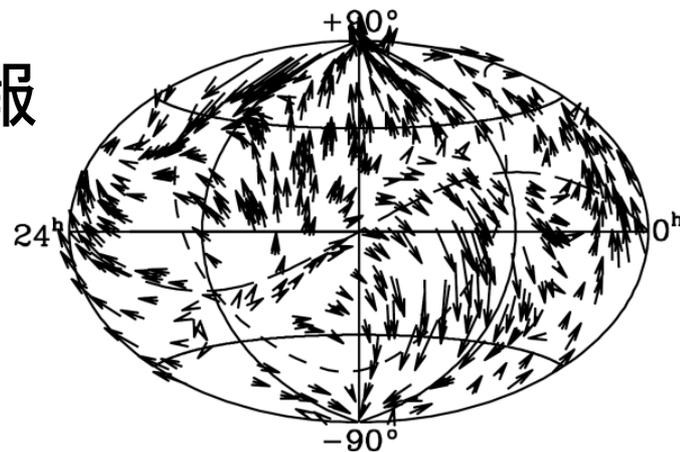
✓ パルサータイミング

時間方向のみの**1次元**情報

✓ VLBIによる位置天文

点球面上の**2次元**情報

E-/B-モード分解

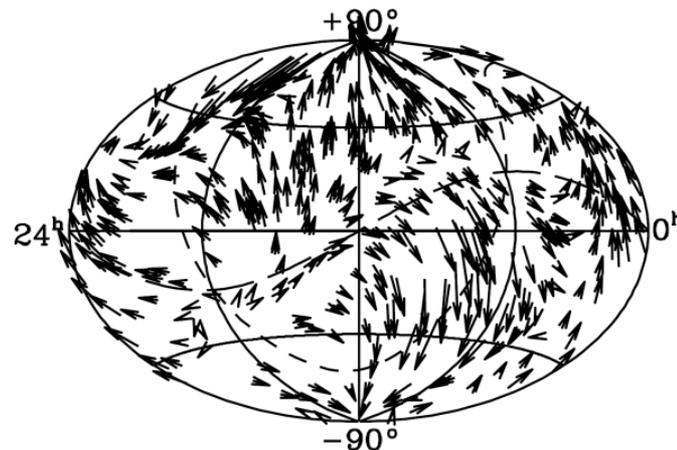


EAVNサイエンス ② 拡張

◆ 通常の重力子の場合

$$\text{分散関係 } \omega^2 = c^2 k^2$$

$$P_I^{EE} = P_I^{BB}$$



◆ 重力子の分散関係が異なる場合

$$\text{分散関係 } \omega^2 = c_g^2 k^2 + m_g^2 + \dots$$

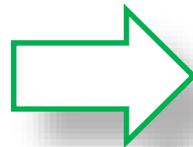
$$P_I^{EE} \neq P_I^{BB}$$

EAVNサイエンス ② 拡張

通常重力子の場合

$$\frac{6}{5} P_{\ell=2} = 4\pi \int_{f < 1/T} H_0^2 \Omega_{\text{GW}}(f) d \ln f$$

P_2 の上限



Ω_{GW} の上限

EAVNサイエンス ② 拡張

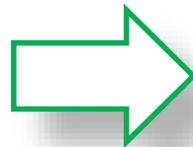
分散関係が異なる場合

$$P_{\ell=2}^{\text{QQ}} = 4\pi \int_{f < 1/T} \alpha_{\ell=2}^{\text{QQ}}(f) H_0^2 \Omega_{\text{GW}}(f) d \ln f$$

周波数に依存した係数

P_2^{EE} の上限

P_2^{BB} の上限



Ω_{GW} の上限

+ 重力子の性質

まとめ

まとめ

**VLBIでも宇宙論に
興味のある物理は探れる！**

EAVNサイエンス まとめ

「大角度の天体角速度相関関数の
E/Bモード測定による背景重力波の探査」

要求観測天体数	$O(10^3)$
要求角度分解能	$O(100)$ [μas]
要求観測時間	$O(1)$ [yr]

- ◆ 想定される重力波源: 初期宇宙起源ソース
(原始揺らぎ、宇宙ひも、アクシオン)