



NAGOYA
UNIVERSITY



Kobayashi-Maskawa Institute
for the Origin of Particles and the Universe

DECIGOによる宇宙論的距离 での重力理論の検証

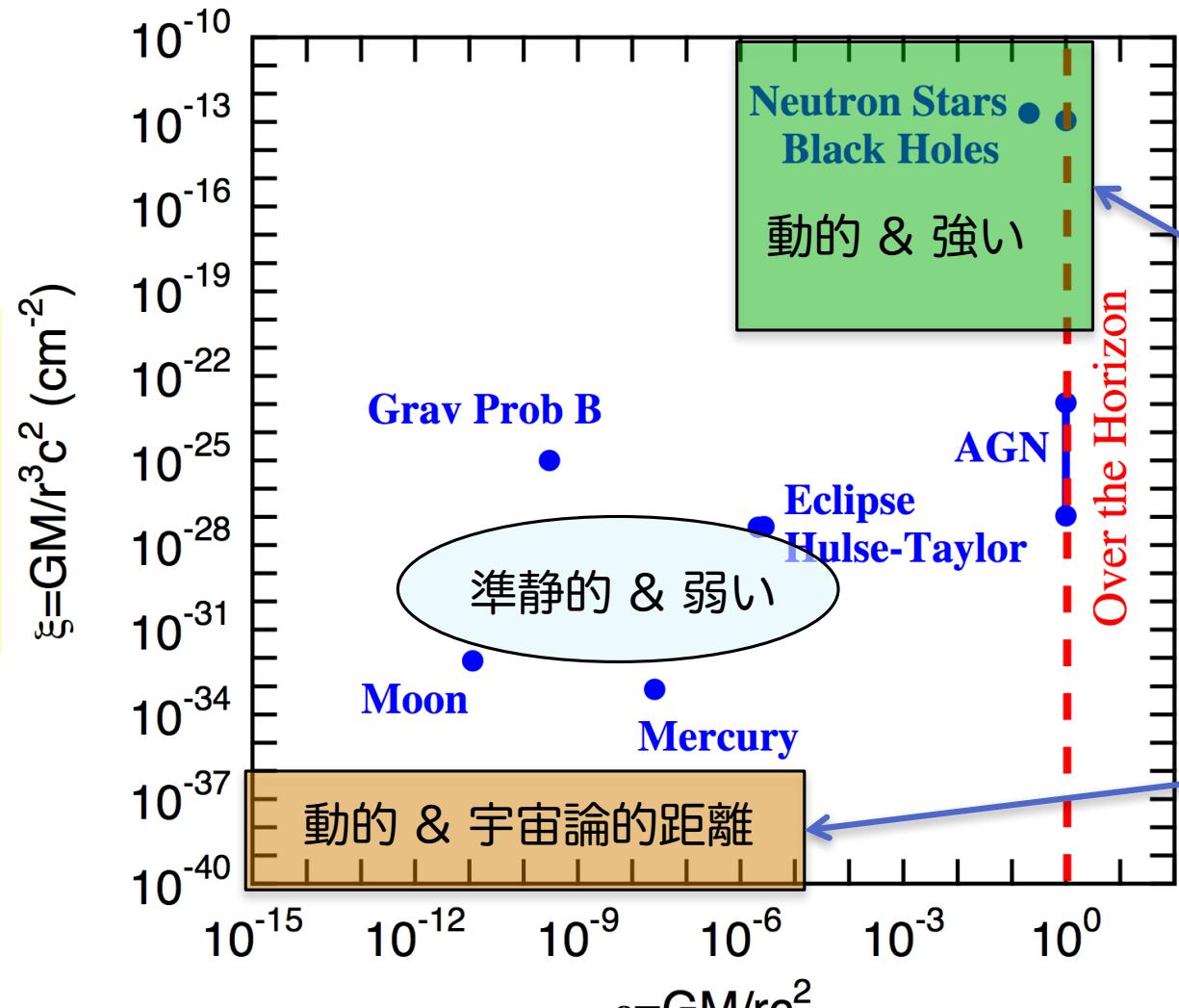
西澤篤志 (名古屋大学 KMI)

2018年11月1-2日 @ 名古屋大学
DECIGO ワークショップ

重力波による重力の検証

小スケール

時空の曲率



大スケール

重力ポテンシャル

Psaltis 2008
(modified)

重力波の生成

重力波の伝播

弱い重力 → 強い重力

重力波伝播を考える利点

1. 動的かつ宇宙論的距离スケールでの重力場を検証できる。
2. 重力理論の微小な修正効果であっても、長距離伝播することにより効果が増幅されて観測できる。
3. 重力波の伝播方程式は様々な重力波源や背景時空に適用できる。

重力波の一般化された伝播方程式

実効場の理論における、宇宙論的線形摂動でのテンソルモード
の運動方程式

Saltas et al. 2014

$$h_{ij}'' + (2 + \nu)\mathcal{H}h_{ij}' + (c_T^2 k^2 + a^2 \mu^2)h_{ij} = a^2 \Gamma \gamma_{ij}$$

ν, c_T, μ, Γ : 時間に依存する任意関数

重力波の一般化された伝播方程式

実効場の理論における、宇宙論的線形摂動でのテンソルモード
の運動方程式

Saltas et al. 2014

$$h_{ij}'' + (2 + \nu)\mathcal{H}h_{ij}' + (c_T^2 k^2 + a^2 \mu^2)h_{ij} = a^2 \Gamma \gamma_{ij}$$



C_T : 重力波の伝播速度

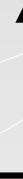
- ローレンツ対称性の破れ
- 等価原理の破れ
- 修正分散関係

重力波の一般化された伝播方程式

実効場の理論における、宇宙論的線形摂動でのテンソルモード
の運動方程式

Saltas et al. 2014

$$h_{ij}'' + (2 + \nu)\mathcal{H}h_{ij}' + (c_T^2 k^2 + a^2 \mu^2)h_{ij} = a^2 \Gamma \gamma_{ij}$$



μ : 重力子の質量

- 有質量重力理論
- コンパクト化された余剰次元

重力波の一般化された伝播方程式

実効場の理論における、宇宙論的線形摂動でのテンソルモード
の運動方程式

Saltas et al. 2014

$$h_{ij}'' + (2 + \nu)\mathcal{H}h_{ij}' + (c_T^2 k^2 + a^2 \mu^2)h_{ij} = a^2 \Gamma \gamma_{ij}$$

Γ : 重力波に対するソース項

- 余剰次元からのエネルギーの流入
- 他の場への非最小結合

重力波の一般化された伝播方程式

実効場の理論における、宇宙論的線形摂動でのテンソルモード
の運動方程式

Saltas et al. 2014

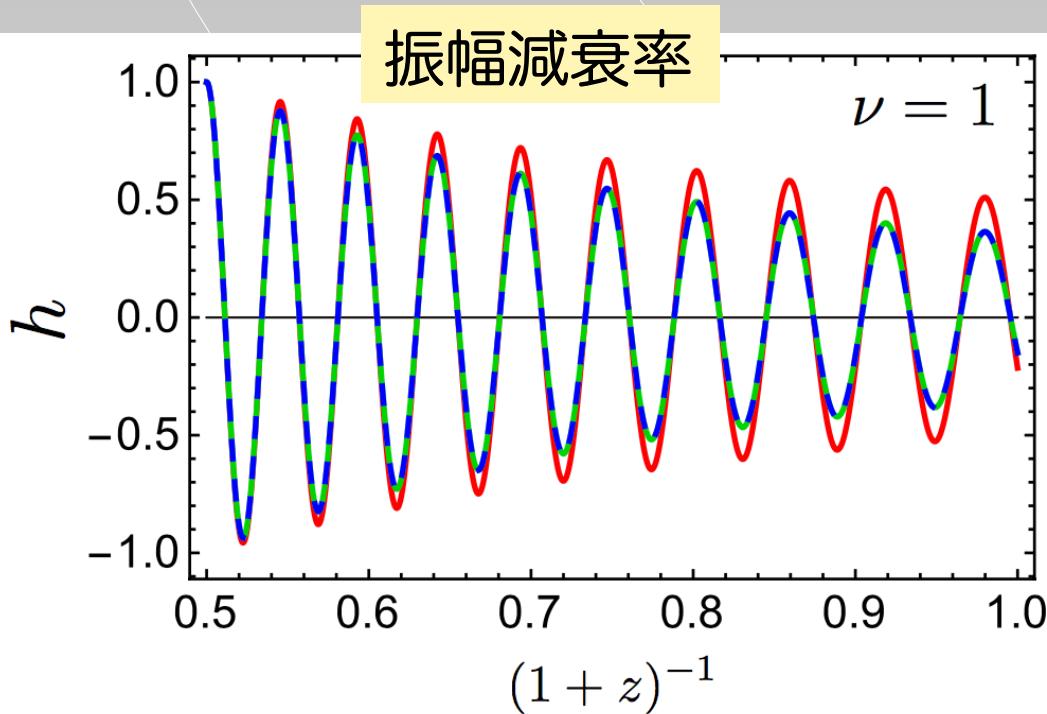
$$h_{ij}'' + (2 + \nu)\mathcal{H}h_{ij}' + (c_T^2 k^2 + a^2 \mu^2)h_{ij} = a^2 \Gamma \gamma_{ij}$$



$$\nu = \mathcal{H}^{-1} \frac{d \ln M_*^2}{dt}$$

: 実効プランク質量の時間変化率
(変動する重力定数)

- 重力の強さの時間変化
- 時空の実効的摩擦 (余剰次元への漏れ, 時空の量子効果)



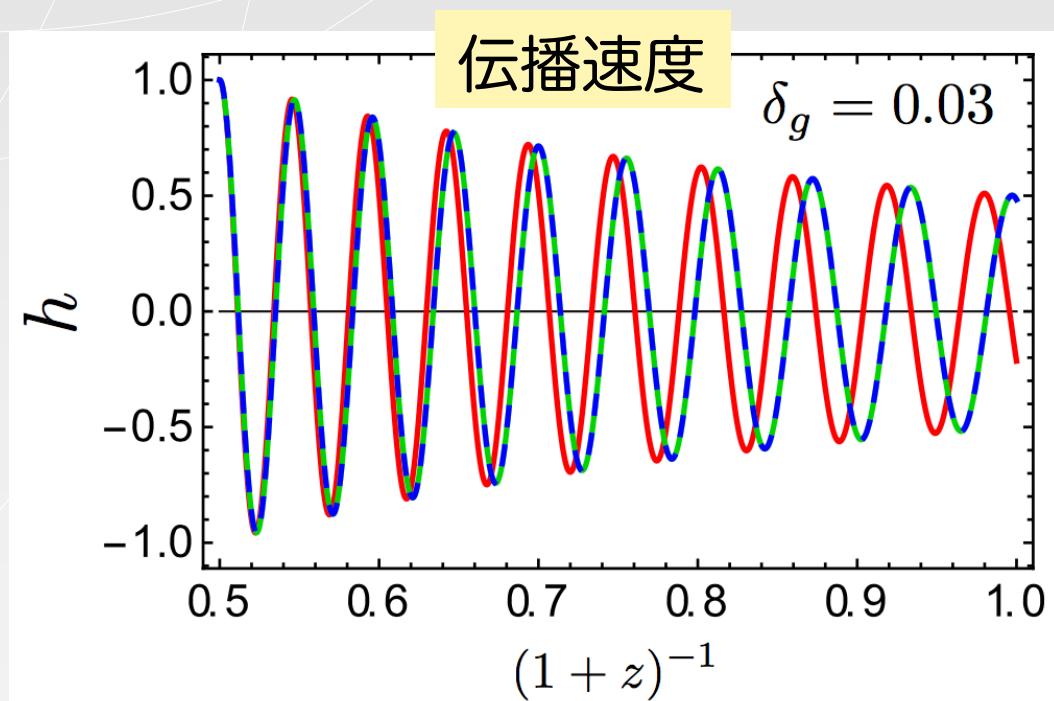
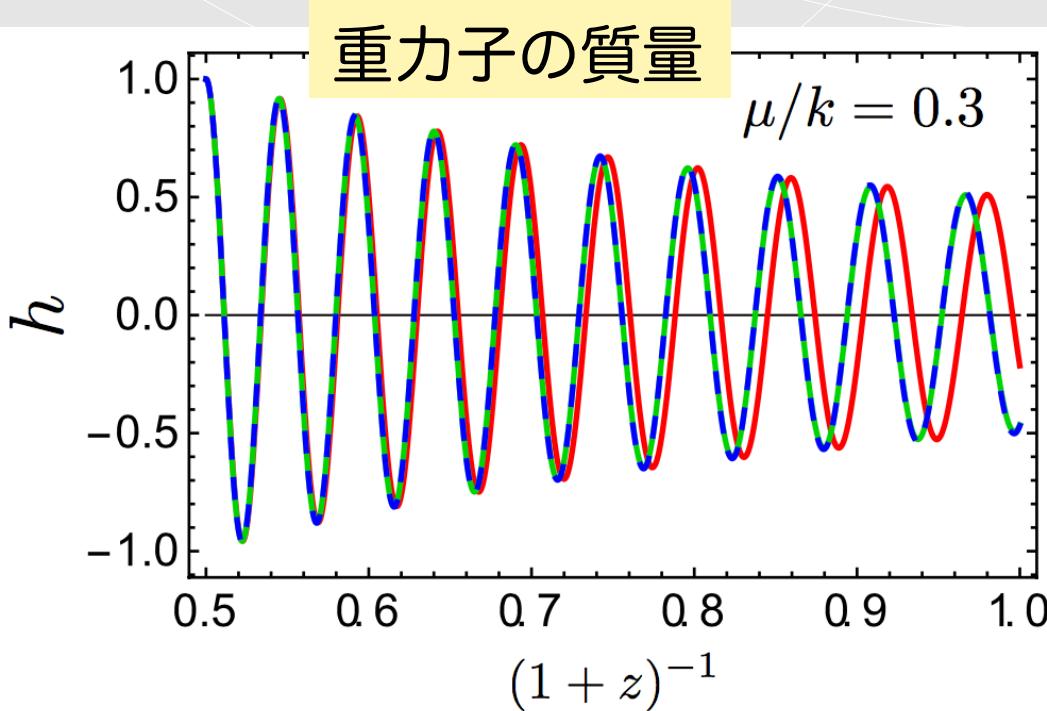
重力波源 at $z=1$

GR 解

MG の数値解

MG の WKB 解

Nishizawa 2018



重力波伝播による検証の現状

- これまでに 5つの BH 連星と 1つの NS 連星からの重力波が検出されている. LIGO Scientific Collaboration 2016-2017
- BH 連星からの重力波により重力子に制限が付けられている.
LIGO Scientific Collaboration 2017
 $m_g < 7.7 \times 10^{-23} \text{ eV}$
- GW170817/GRB170817A より重力波の伝播速度に強い制限が与えられた. LSC + Fermi + INTEGRAL, ApJL 848, L13
 $-3 \times 10^{-15} < \frac{c_{\text{gw}} - c}{c} < 7 \times 10^{-16}$
- 伝播速度が光速からずれるような修正重力理論はほぼ棄却された.
Baker et al. 2017, Creminelli & Vernizzi 2017, Sakstein & Jain 2017
Ezquiaga & Zumalacarregui 2017, Arai & Nishizawa 2018

重力波の振幅減衰率と重力定数

$$\alpha_T = c_T^2 - 1 = 0 \quad \text{とすると}$$

Nishizawa 2018

$$h = e^{-\mathcal{D}} h_{\text{GR}}$$



$$\mathcal{D} = \frac{1}{2} \int_0^z \frac{\nu}{1+z'} dz'$$

$$\nu = \alpha_M = H^{-1} \frac{d \log M_*^2}{dt}$$

$$e^{-\mathcal{D}} = \frac{M_*(z)}{M_*(0)} = \sqrt{\frac{G_{\text{gw}}(0)}{G_{\text{gw}}(z)}}$$

G_{gw} : 重力波に対する重力定数

波源までの実効的距離は $d_{\text{L,eff}}(z) = \sqrt{\frac{G_{\text{gw}}(z)}{G_{\text{gw}}(0)}} d_{\text{L}}(z)$

真の距離と比較するためには、赤方偏移の測定が必要

宇宙論的距离での等価原理を検証

宇宙加速膨張を修正重力で説明しようとすると、宇宙論的距离では等価原理が破れてしまう。

重力波 G_{gw} $\mathcal{L}_{\text{gw}} = \frac{1}{64\pi G_{\text{gw}}} \left\{ \dot{h}_{ij}^2 - a^{-2}(\nabla h_{ij})^2 \right\}$

銀河クラスタリング G_{matter}
 $k^2\Psi = -4\pi G_{\text{matter}}(k, \tau)\delta\rho_{\text{m}}$

一般相対性理論
では全て G_N

重力レンズ G_{light}
 $k^2(\Psi + \Phi) = -8\pi G_{\text{light}}(k, \tau)\delta\rho_{\text{m}}$

連星のパラメータ推定

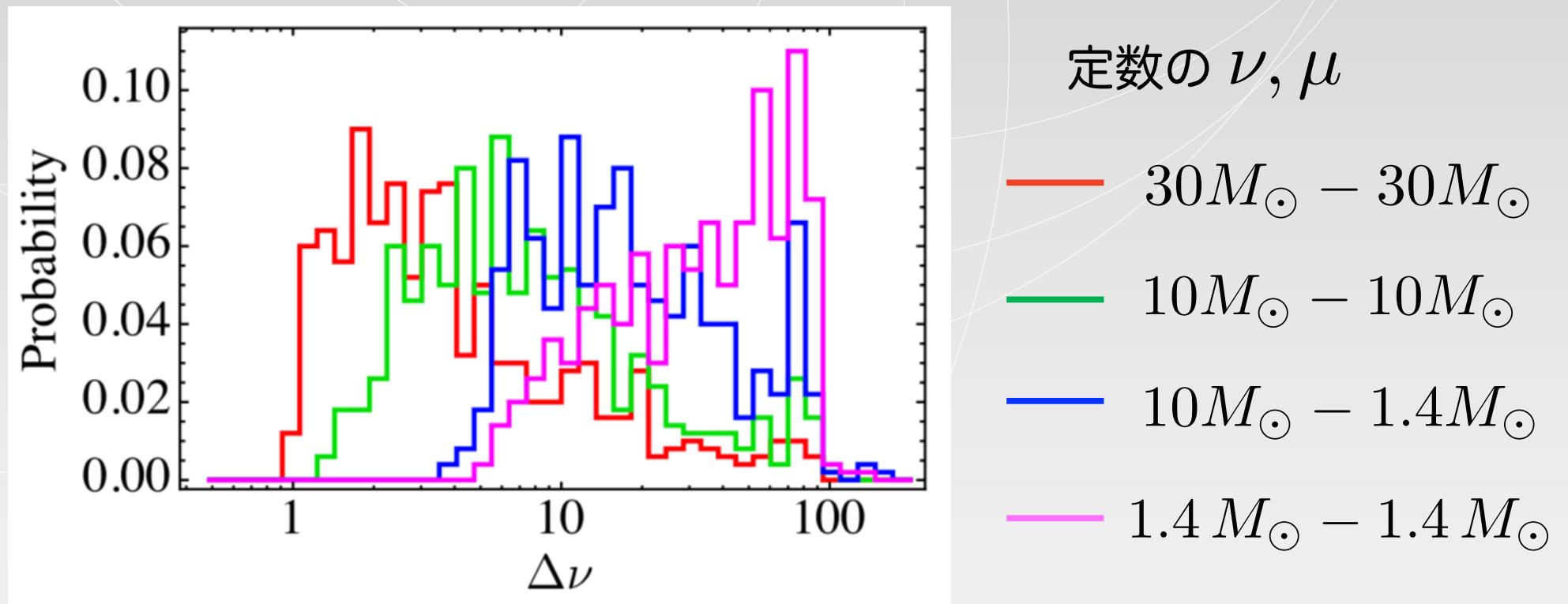
フィッシャー情報行列を用いて、パラメータ推定誤差を見積もる。

- 各500 個の連星を生成し、 $\text{SNR} > 8$ のものが検出されるとする。
- 連星の方向や傾き角: 一様ランダム
- 重力波波形:
 - 現象論的 IMR (Phenom-D) 波形 (BBH) Khan et al. 2016
 - ポストニュートンインスピラル波形 (BH-NS, BNS)
- 赤方偏移は母銀河の観測または電磁対応天体により決まると仮定。

第2世代検出器での測定誤差

Nishizawa 2018

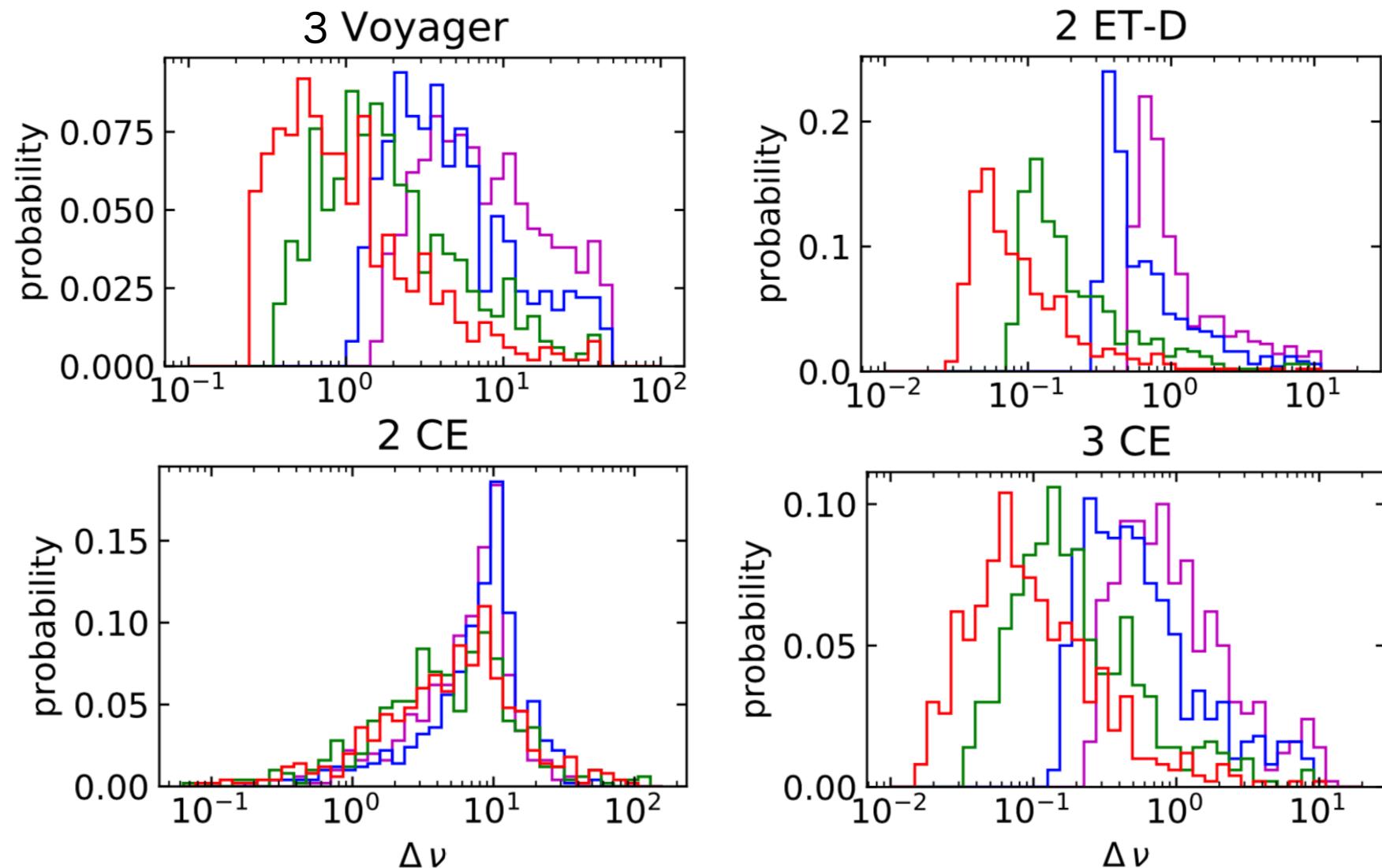
HLV network, redshift prior $\Delta z = 10^{-3}$



ν は $O(1)$ の誤差で測定可能.

$$[h''_{ij} + (2 + \nu) \mathcal{H} h'_{ij} + c^2 k^2 h_{ij} = 0]$$

第3世代検出器での測定誤差



ν は 0.02 の誤差まで測定可能.

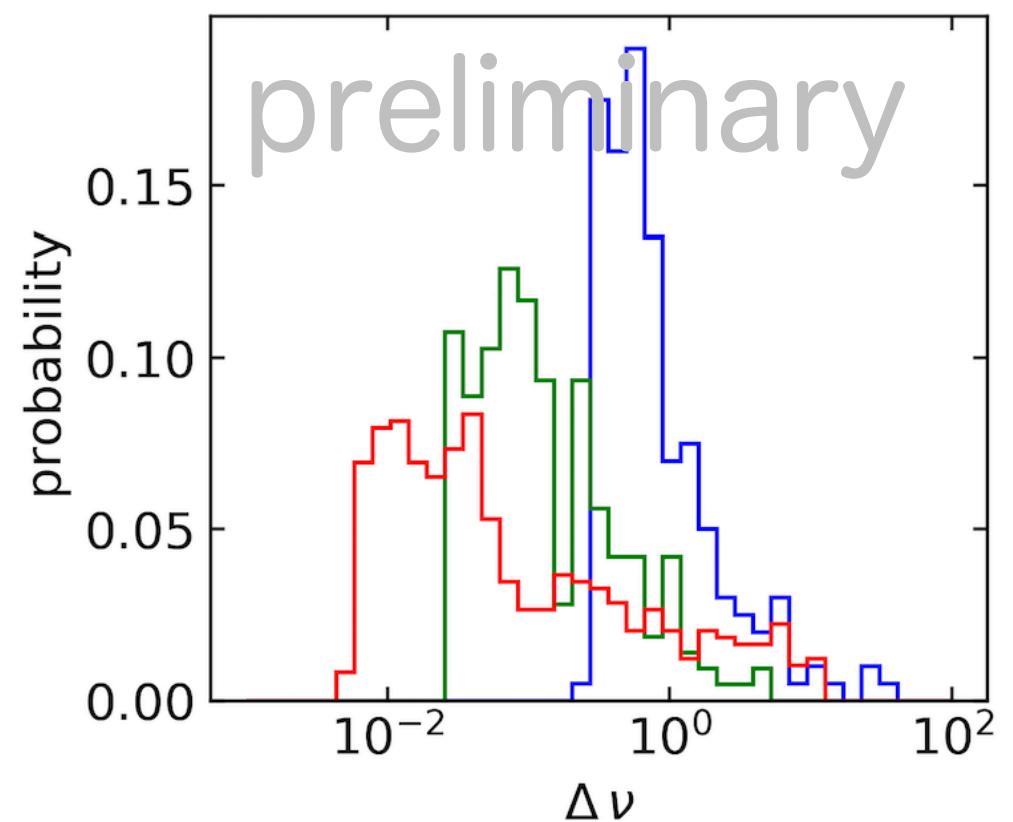
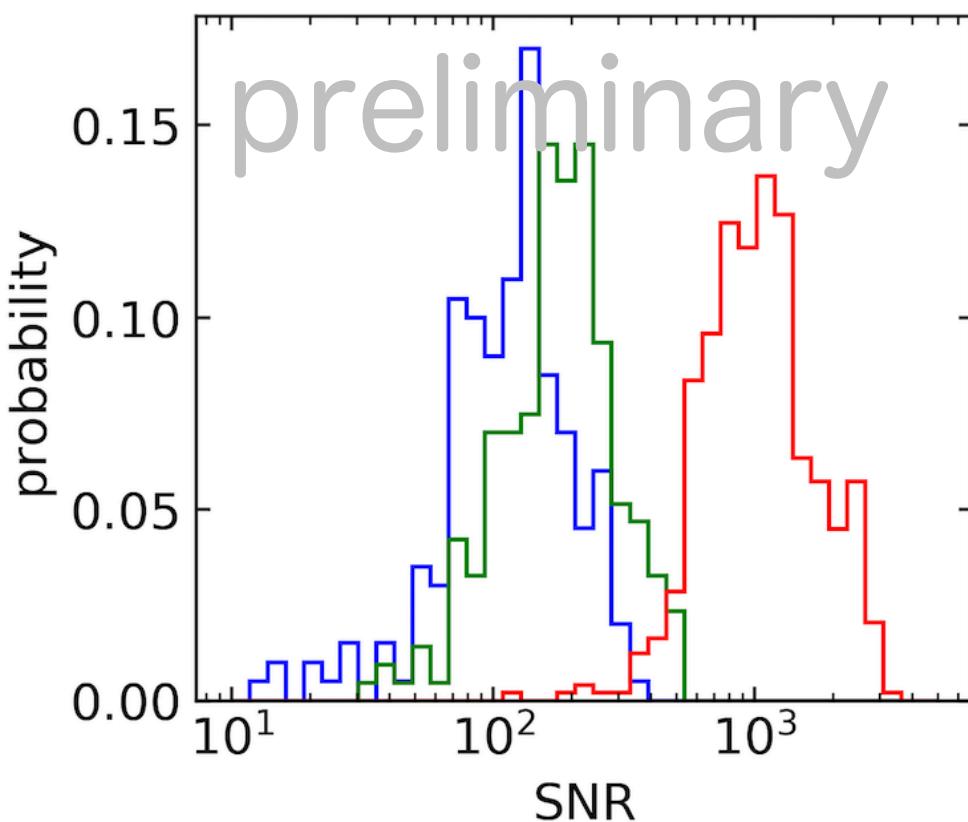
Nishizawa & Arai, in prep.

B-DECIGO での測定誤差

- 3000 M_{\odot} BBH
- 300 M_{\odot} BBH
- 30 M_{\odot} BBH

SNR が大きい方が ν の測定誤差も小さくなる。

→ ν は 0.008 の誤差まで測定可能。



Horndeski 理論

$$S = \int dx^4 \sqrt{-g} \left(\sum_{i=2}^5 \mathcal{L}_i + \mathcal{L}_m \right)$$

Horndeski 1974

Deffayet, Gao, Steer, and Zahariade 2011

Kobayashi, Yamaguchi, Yokoyama 2011

$$\mathcal{L}_2 = K(\phi, X) ,$$

$$\mathcal{L}_3 = -G_3(\phi, X)\square\phi ,$$

$$\mathcal{L}_4 = G_4(\phi, X)R + G_{4,X}(\phi, X) [(\square\phi)^2 - (\nabla_\mu\nabla_\nu\phi)(\nabla^\mu\nabla^\nu\phi)] ,$$

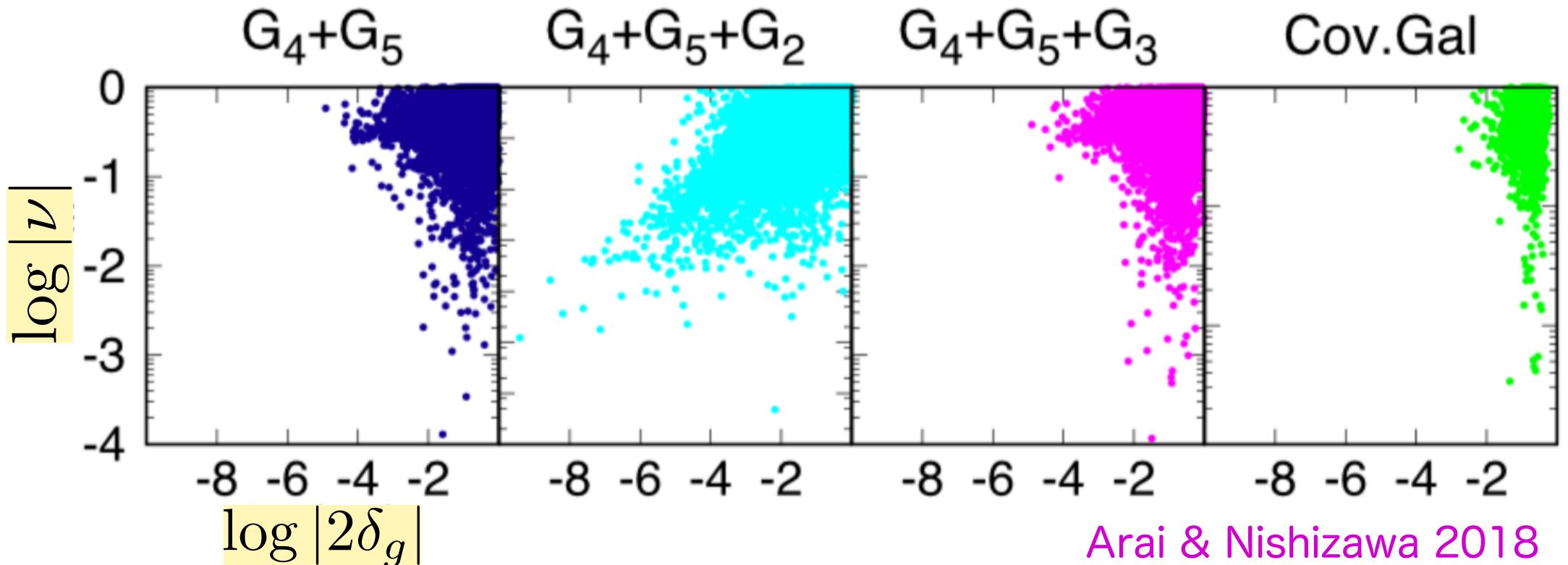
$$\mathcal{L}_5 = G_5(\phi, X)G_{\mu\nu}(\nabla^\mu\nabla^\nu\phi)$$

$$-\frac{1}{6}G_{5,X}(\phi, X) \left[(\square\phi)^3 - 3(\square\phi)(\nabla_\mu\nabla_\nu\phi)(\nabla^\mu\nabla^\nu\phi) + 2(\nabla^\mu\nabla_\alpha\phi)(\nabla^\alpha\nabla_\beta\phi)(\nabla^\beta\nabla_\mu\phi) \right]$$

- 2階微分まで最も一般的なスカラーテンソル理論
- 1種類のスカラー場の自由度 ϕ $X = -\nabla_\mu\phi\nabla^\mu\phi/2$
- 4つのスカラー場の任意関数 $G_2(K), G_3, G_4, G_5$

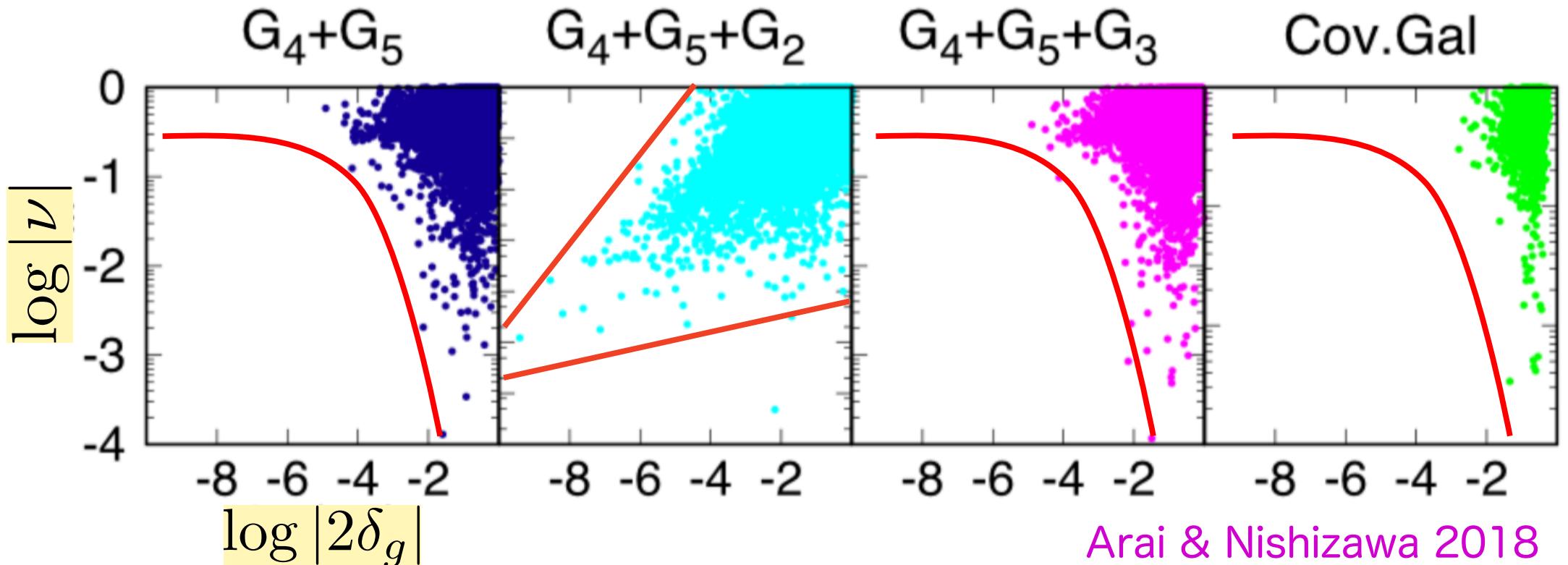
モデルの分類

Subclass of Horndeski theory	Parameters of $G_i^{(\text{app})}$	Models
(I) $G_4 + G_5$	$G_2, G_3 = 0$	self acceleration
(II) $G_4 + G_5 + G_2$	$g_2, g_{2X}, g_{2\phi\phi} \neq 0$	quintessence/nonlinear kinetic theory/ $f(R)$ theories
(III) $G_4 + G_5 + G_3$	$G_3 \neq 0$	cubic galileons
(IV) Cov.Gal	$g_{2X}, g_{3X}, g_{4XX}, g_{5XX} \neq 0$	covariant galileons



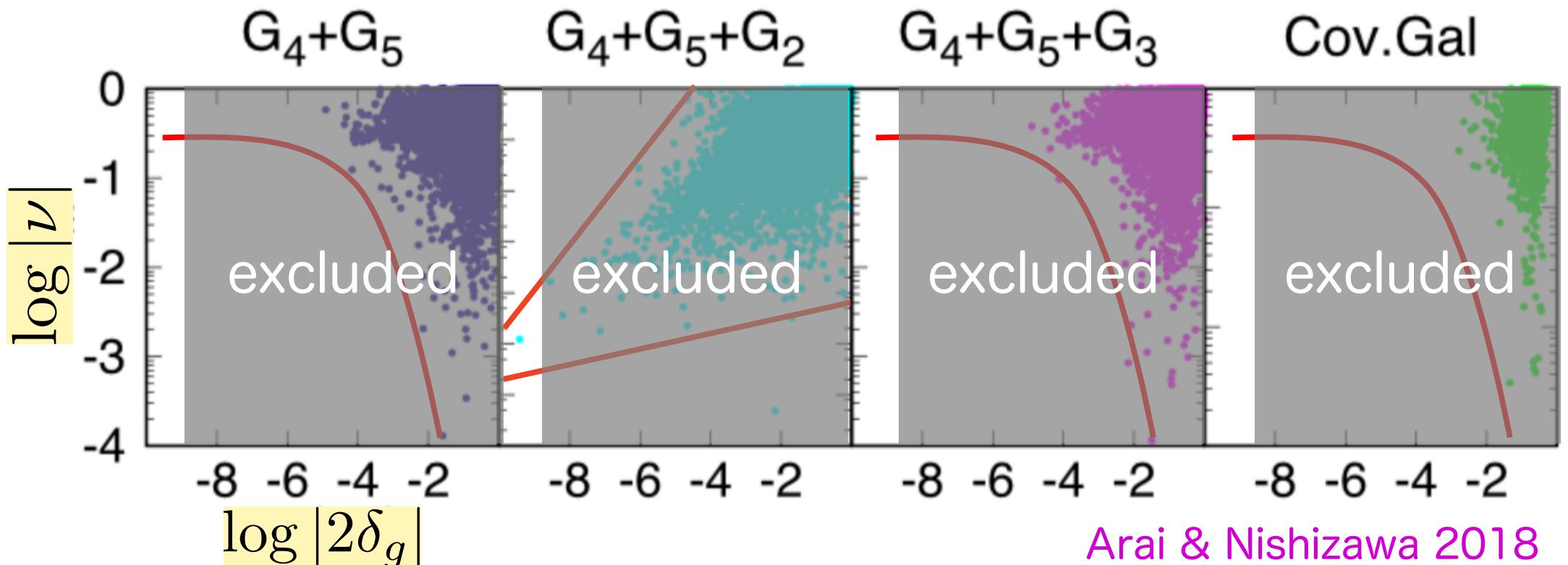
モデルの分類

Subclass of Horndeski theory	Parameters of $G_i^{(\text{app})}$	Models
(I) $G_4 + G_5$	$G_2, G_3 = 0$	self acceleration
(II) $G_4 + G_5 + G_2$	$g_2, g_{2X}, g_{2\phi\phi} \neq 0$	quintessence/nonlinear kinetic theory/ $f(R)$ theories
(III) $G_4 + G_5 + G_3$	$G_3 \neq 0$	cubic galileons
(IV) Cov.Gal	$g_{2X}, g_{3X}, g_{4XX}, g_{5XX} \neq 0$	covariant galileons



モデルの分類

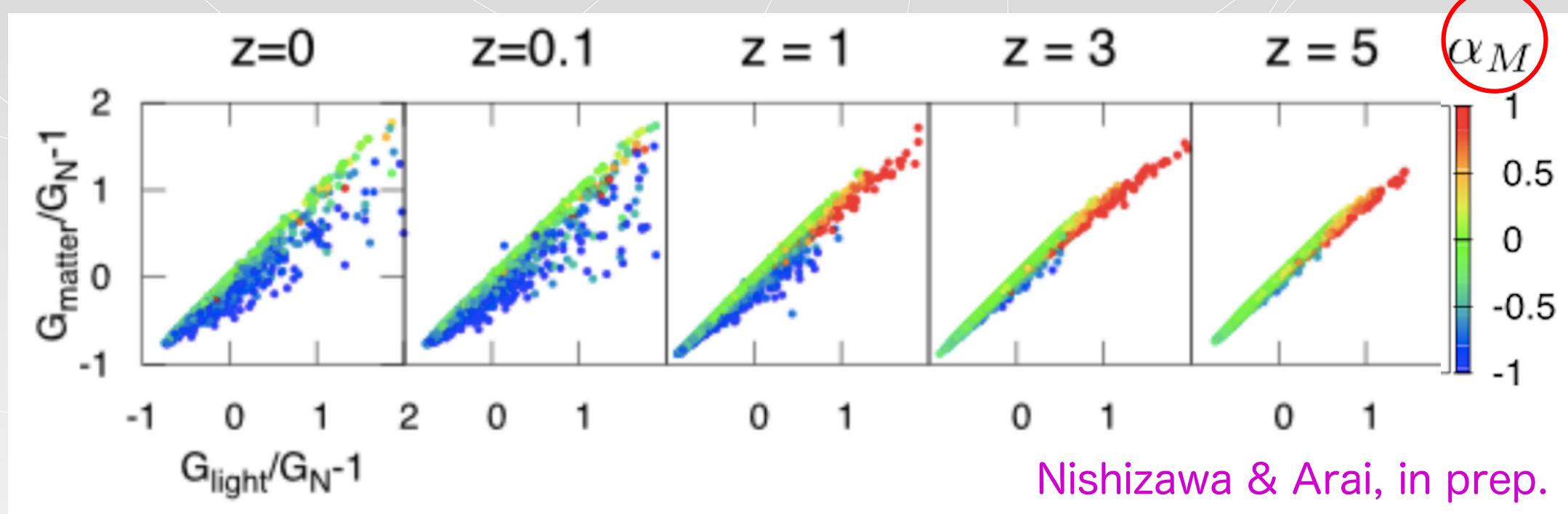
Subclass of Horndeski theory	Parameters of $G_i^{(\text{app})}$	Models
(I) $G_4 + G_5$	$G_2, G_3 = 0$	self acceleration
(II) $G_4 + G_5 + G_2$	$g_2, g_{2X}, g_{2\phi\phi} \neq 0$	quintessence/nonlinear kinetic theory/ $f(R)$ theories
(III) $G_4 + G_5 + G_3$	$G_3 \neq 0$	cubic galileons
(IV) Cov.Gal	$g_{2X}, g_{3X}, g_{4XX}, g_{5XX} \neq 0$	covariant galileons



振幅減衰率からの制限

$$\mathcal{L} = G_2(\phi, X) - G_3(\phi, X)\square\phi + G_4(\phi)R$$

$= \nu$



重力波観測で $\Delta\nu \sim \mathcal{O}(0.01)$ まで制限できれば、 $G_{\text{matter}} \neq G_{\text{light}}$ のモデルをほぼ棄却できる。

月のレーザー測距や連星パルサーからの制限

$$\dot{G}_N/G_N \lesssim 0.02 H_0$$

まとめ

- 宇宙論的距離における等価原理は実験的にあまり精度良く検証されていない。宇宙加速膨張を説明する重力理論の検証のために非常に重要な検証事項。
- 重力波伝播により振幅減衰率 ν を測定することで、重力波に対する重力定数を測定することができる。
- ν の測定精度:

現在の検出器ネットワーク (aLIGO や KAGRA など)

$$\Delta\nu \sim \mathcal{O}(1)$$

将来の検出器 (ET-D, CE, B-DECIGO など)

$$\Delta\nu \sim \mathcal{O}(0.01) \quad \longleftrightarrow \quad \dot{G}_N/G_N \lesssim 0.02 H_0$$