


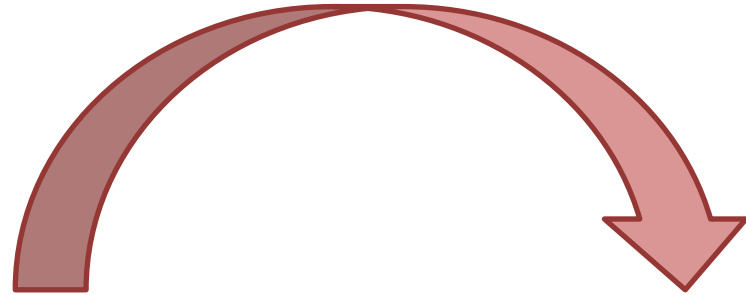


# 宇宙論観測で探る重力理論

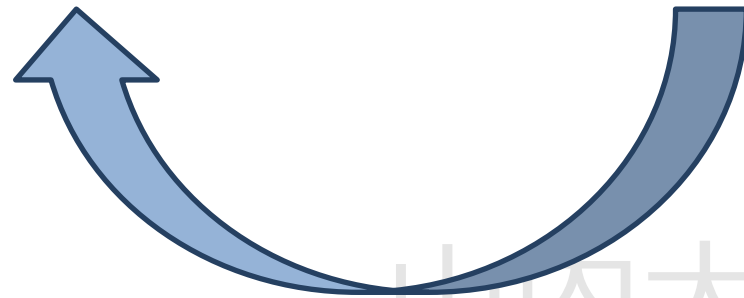


山内大介  
(神奈川大学)

どうやって制限するか？



宇宙論 **観測** で探る 重力 **理論**



どうやって結びつけるか？

山内大介  
(神奈川大学)

# レビュー論文

## Cosmological gravity probes: connecting recent theoretical developments to forthcoming observations

Shun Arai<sup>1</sup>, Katsuki Aoki<sup>2</sup>, Yuji Chinone<sup>3,4</sup>, Rampei Kimura<sup>5</sup>, Tsutomu Kobayashi<sup>6</sup>, Hironao Miyatake<sup>1,4,7</sup>, Daisuke Yamauchi<sup>8</sup>, Shuichiro Yokoyama<sup>1,4</sup>, Kazuyuki Akitsu<sup>9</sup>, Takashi Hiramatsu<sup>6</sup>, Shin'ichi Hirano<sup>10</sup>, Ryotaro Kase<sup>11</sup>, Taishi Katsuragawa<sup>12</sup>, Yosuke Kobayashi<sup>13</sup>, Toshiya Namikawa<sup>4</sup>, Takahiro Nishimichi<sup>2,4</sup>, Teppei Okumura<sup>4,14</sup>, Maresuke Shiraishi<sup>15</sup>, Masato Shirasaki<sup>16,17</sup>, Tomomi Sunayama<sup>13,18</sup>, Kazufumi Takahashi<sup>2</sup>, Atsushi Taruya<sup>2,4</sup>, and Junsei Tokuda<sup>19,20</sup>

- [arXiv:2212.09094](https://arxiv.org/abs/2212.09094) (今週の火曜日)
- ぜひご確認ください！

# 重力理論そのものの 網羅的な紹介

1	Introduction	
2	Theories of gravity	7
2.1	Scalar-tensor theories	8
2.1.1	Horndeski theory	8
2.1.2	Degenerate higher-order scalar-tensor theories	9
2.1.3	$f(R)$ gravity	11
2.2	Massive gravity and bigravity	12
2.2.1	dRGT massive gravity	12
2.2.2	Extensions of dRGT massive gravity	14
2.2.3	Translation breaking theories	15
2.2.4	Lorentz-violating massive gravity	16
2.2.5	Massive bigravity theory	16
2.3	Vector-tensor theories	16
2.4	Metric-affine gravity	19
2.5	Cuscuton and minimally modified gravity	22
2.6	Evading solar-system tests	24
2.6.1	Vainshtein screening	24
2.6.2	Chameleon and symmetron	27
2.7	Positivity bound	29
2.7.1	Non-gravitational positivity bound	29
2.7.2	Gravitational positivity bound	31
2.7.3	Implications of gravitational positivity bound	32
3	Observables for testing gravity	33
3.1	Basic equations for testing modified gravity against $\Lambda$ CDM model	34
3.2	Cosmic Microwave Background	38

将来観測との  
つながり

3.2.1	Summary of the status and schedule of ongoing and future CMB experiments	39
3.2.2	CMB Polyspectra and Inflation	42
3.2.3	CMB Lensing	44
3.3	Large-Scale Structure	46
3.3.1	Summary of the recent, ongoing, or upcoming photometric and spectroscopic surveys	46
3.3.2	Galaxy clusters	49
3.3.3	Galaxy clusters	51
3.3.4	Galaxy clusters	54
3.3.5	Galaxy clusters	55
3.3.6	Galaxy clusters	57
3.3.7	Galaxy clusters	59
4	Linear perturbations in modified gravity	61
4.1	Perturbations in scalar-tensor theories	62
4.2	Perturbations in massive gravity theories	66
4.3	Perturbations in vector-tensor theories	68
4.4	Perturbations in metric-affine gravity	69
4.5	Perturbations in cuscuton and minimally modified gravity	70
5	Numerical tools for theoretical predictions	70
5.1	Boltzmann code	70
5.1.1	Overview	70
5.1.2	Formalism	72
5.1.3	Demonstrations	75
5.2	Predicting non-linear structure formation	77
5.2.1	Overview	77
5.2.2	Emulation	78
5.2.3	DarkEmulator: halo model meets emulation	79
5.2.4	Extending the halo model to non-linear scales	81
6	Outlook	82
7	Summary	88

各重力理論での  
線形摂動論

数値計算手法

どの理論を  
探査すべきか

# 1.重力理論の 観測的検証のレビュー

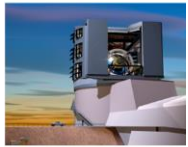
宮武さん(宇宙大規模構造), 西澤さん(重力波)トーク

# 超精細宇宙観測時代

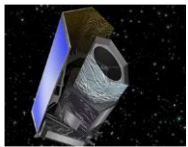
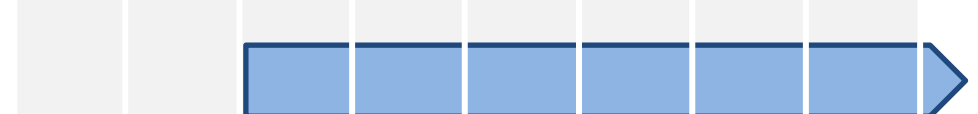
2022 2024 2026 2028 2030



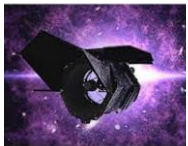
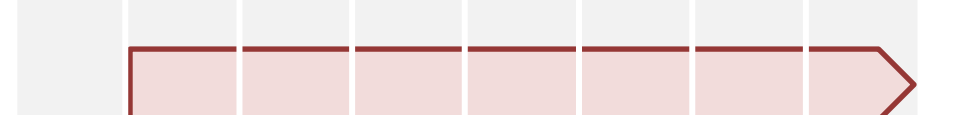
すばる望遠鏡  
(可視・赤外)



Rubin望遠鏡  
(可視光)



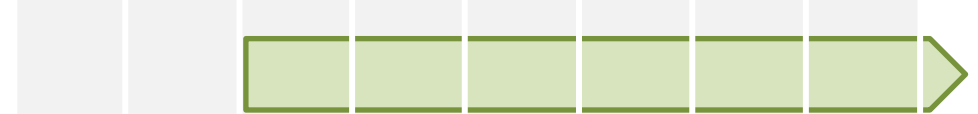
Euclid宇宙望遠鏡  
(可視・近赤外線)



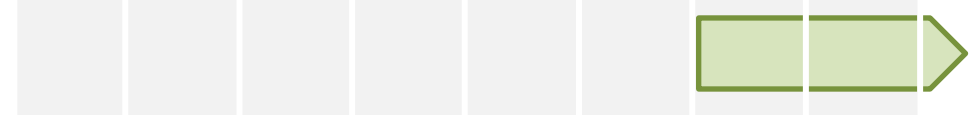
Roman宇宙望遠鏡  
(近赤外線)



Simons Observatory  
(CMB)



LiteBIRD衛星  
(CMB)



Square Kilometre  
Array天文台 (電波)

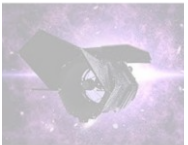
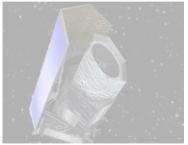


# 宮武さん(宇宙大規模構造), 西澤さん(重力波)トーク 超精細宇宙観測時代

2022 2024 2026 2028 2030



すばる望遠鏡  
(可視・赤外線)



SKA Array

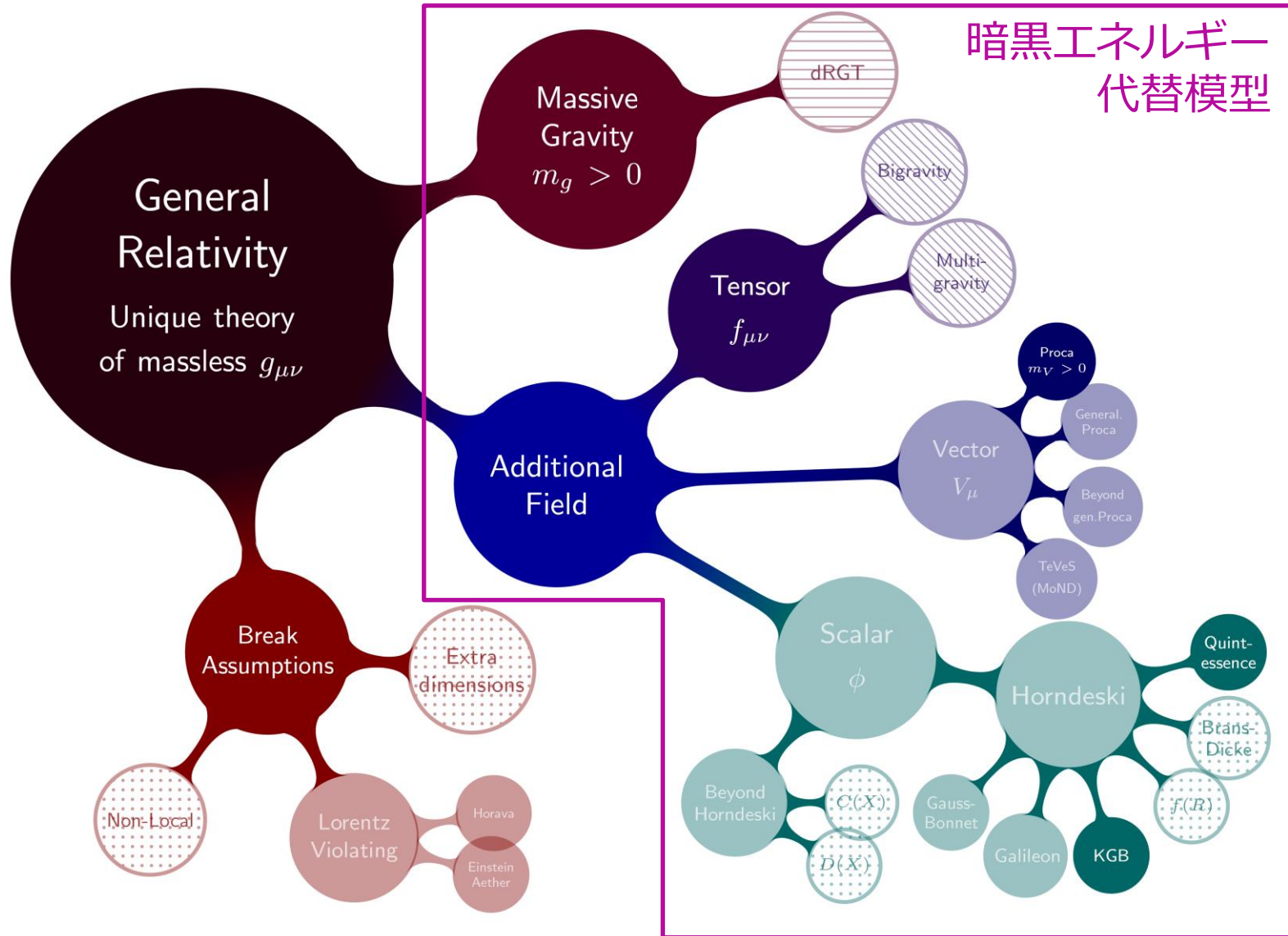
大統計の宇宙論データが  
得られる状況が迫っている！



今後重要になるテーマの1つ

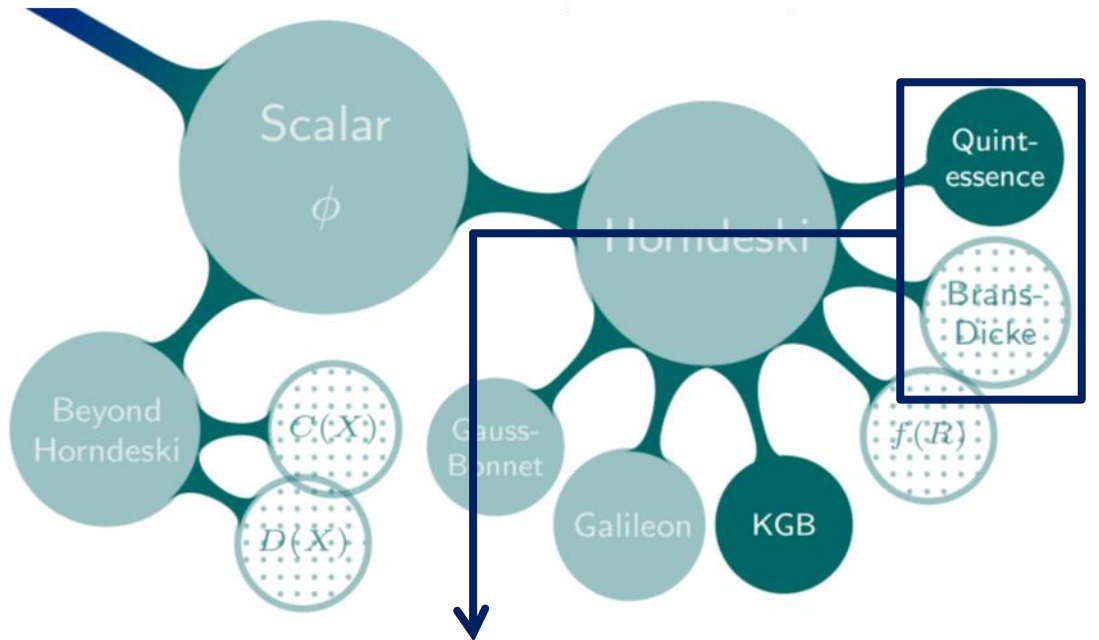
**宇宙論スケールにおける  
一般相対性理論の検証**

# 重力理論のランドスケープ





# 近年の重力理論のひろがり(例)



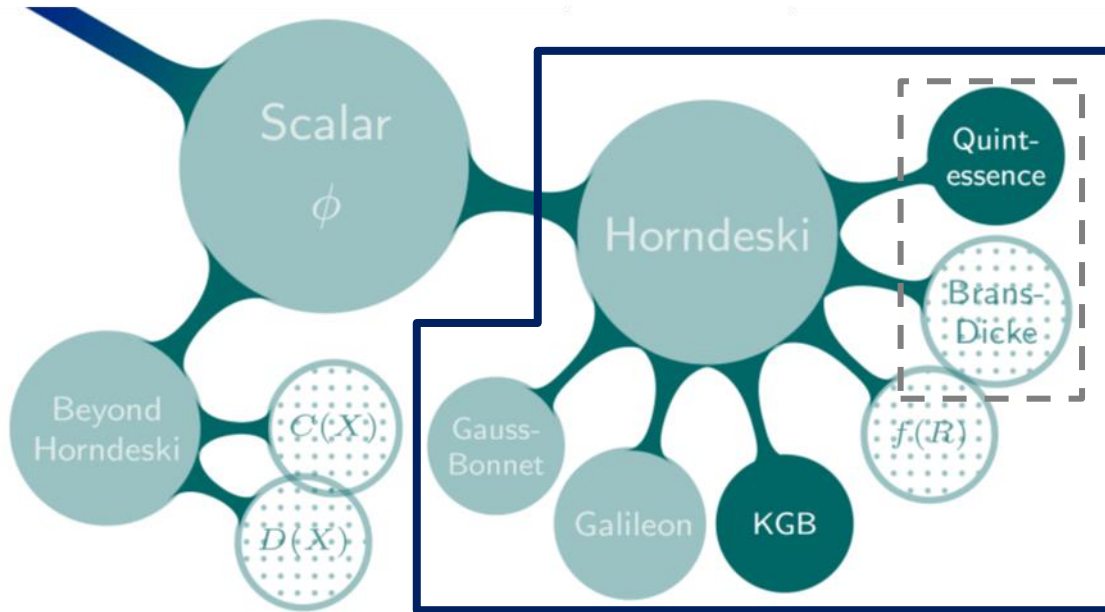
個々のモデル  
ごとの議論

◆ 古くから知られた理論 : 1つの定数パラメータ

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \left[ \phi R - \frac{\omega}{\phi} (\partial\phi)^2 \right]$$

[Brans+Dicke, Phys.Rev.124,925(1961),...]

# 近年の重力理論のひろがり(例)



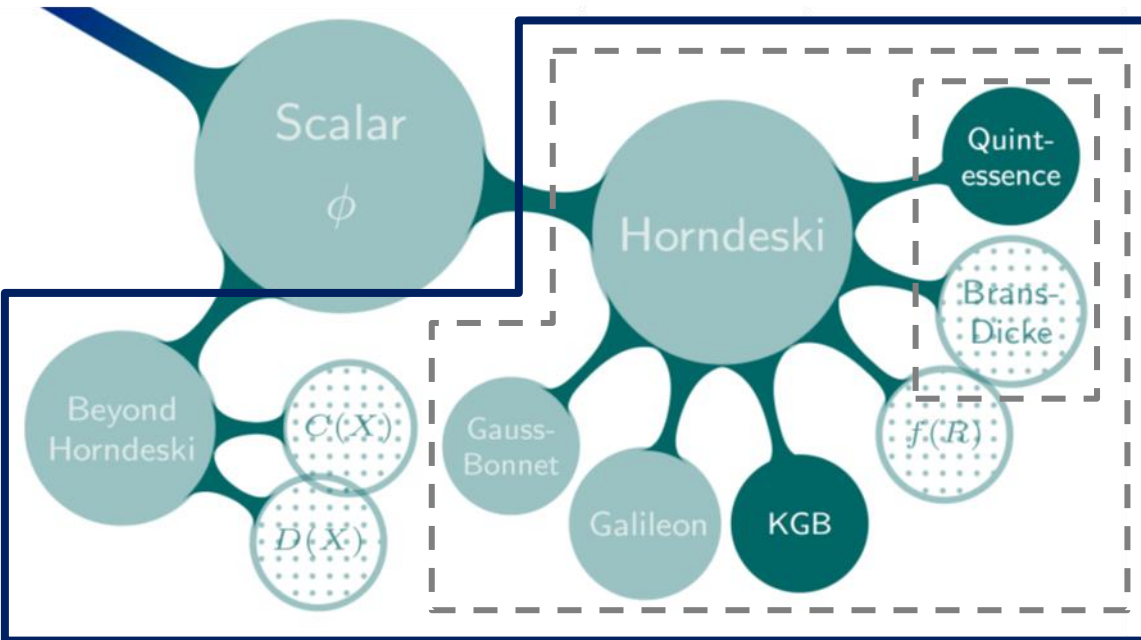
俯瞰的な理解が  
可能になった

## ◆ ホルンデスキー理論 : 4個の関数自由度

$$\mathcal{L} = P(\phi, X) - Q(\phi, X)\square\phi + G_4(\phi, X)R - \frac{\partial G_4}{\partial X} (\nabla_\mu \nabla_\nu \phi)^2 + \dots$$

[Horndeski, Int. J. Theor. Phys. 10, 363 (1974),  
Deffayet+, PRD84, 063039 (2011),  
Kobayashi+, PTP126, 511 (2011)]

# 近年の重力理論のひろがり(例)



理論の安定性の  
理解の進展

◆ 縮退高次スカラーテンソル理論 : 15個の関数 !

$$\mathcal{L} = \dots + f(\phi, X)R + A_1(\phi, X) (\nabla_\mu \nabla_\nu \phi)^2 + \dots$$

[Langlois+Noui, JCAP02,034(2015),  
Crisostomi+, JCAP04,044(2016),  
Ben Achour+, PRD93,124005(2016)]

# 今日のテーマ

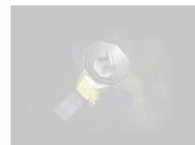
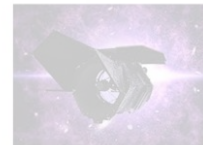
どうやって

## 重力理論の膨大な理論空間

と

## 目の前に迫る大統計の観測データ

を結びつけ、  
制限につなげるのか？



# Take-Home Message

理論から  
決まる

(Th1) 理論模型

(Th2) 有効理論

(Obs3) 現象論的  
関数

(Obs2) 現象論的  
パラメータ

(Obs1) 観測量

観測から  
決まる

◆日本は**理論構築(Th1)**  
と**観測(Obs1)**が得意

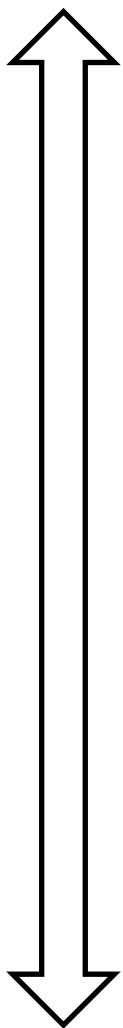
⇒ **理論と観測の協働**  
**(Th×Obs)がカギ!**

◆本日の目標：  
**階層性が存在する**  
ことを共有したい

◆階層を結びつける  
(or 飛び越える?)  
ことが求められる

# 2.重力理論の 観測的検証における 階層構造

理論から  
決まる



(Th1) 理論模型

我々の  
知らない理論

(Th2) 有効理論 (準)線形作用ベースで修正

(Obs3) 現象論的  
関数 運動方程式ベースで修正

(Obs2) 現象論的  
パラメータ 観測量ベースで修正

(Obs1) 観測量

観測から  
決まる

# (Obs2) 現象論的パラメータ

: 観測量ベースで修正



## ◆ 宇宙のハッブル膨張率

$$H^2(a) = H_0^2 \left[ \frac{\Omega_{m,0}}{a^3} + \Omega_{DE,0} \exp \left( -3 \int_1^a [1 + w_{DE}(a')] d \ln a' \right) \right]$$

暗黒エネルギーの状態方程式

## ◆ 密度揺らぎ $\delta$ の成長率

$$\delta(a, \mathbf{k}) = \exp \left( \int_0^a f(a') d \ln a' \right) \delta_*(\mathbf{k})$$

線形成長率



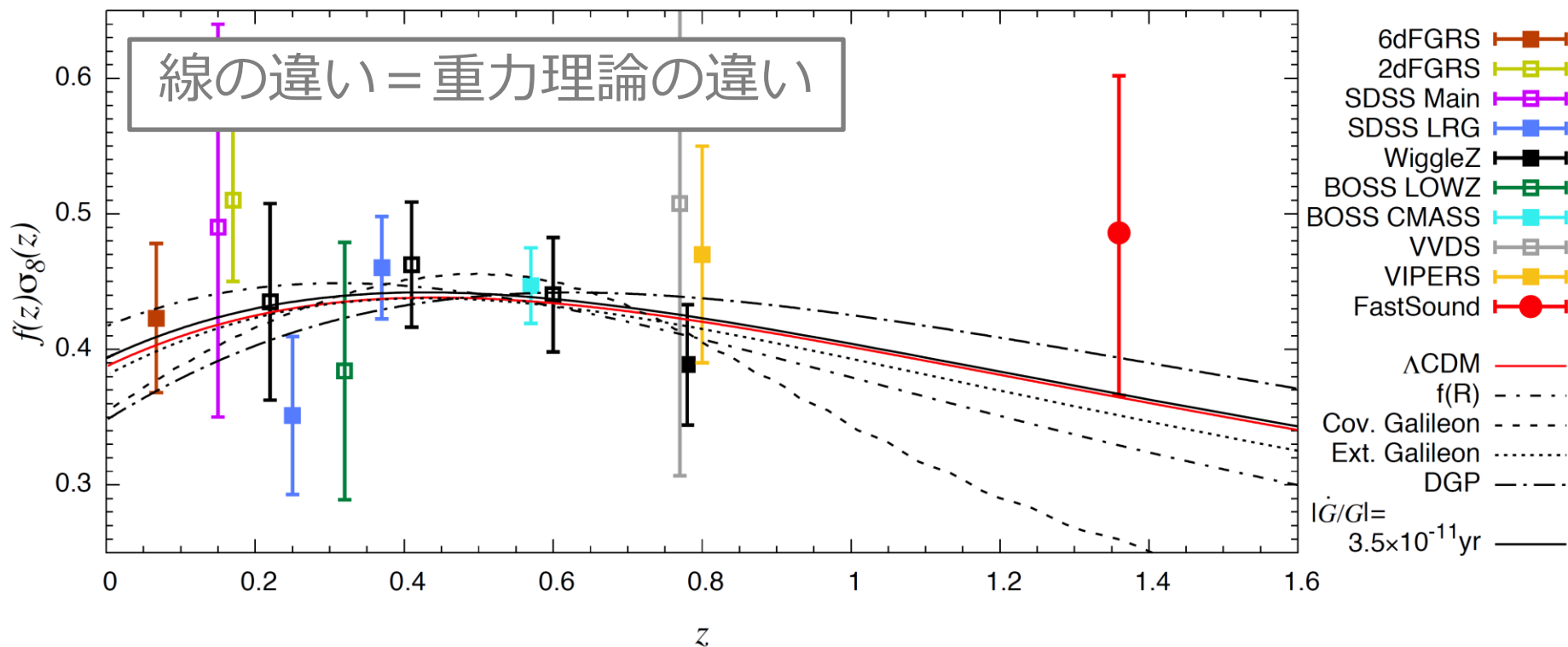
# (Obs2) 現象論的パラメータ

: 観測量ベースで修正



## ◆ 密度揺らぎの成長率 $f$ による重力理論の検証

FastSound [Okumura+] PASJ68,3,38(2016)



# Q.状態方程式と成長率だけで十分？

A.十分ではない。

$\Lambda$ CDMと全く同じ $w$ ,  $f$ を予言するモデルを構築可



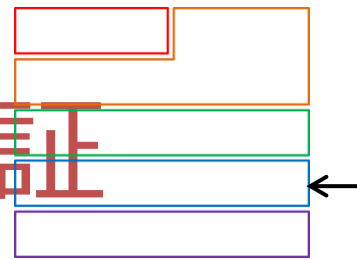
**密度揺らぎの非線形成長の情報**が有用

$$\delta(a, \mathbf{k}) = \delta_1(a, \mathbf{k}) + \int \frac{d^3 \mathbf{p}}{(2\pi)^3} \boxed{F_2(a, \mathbf{p}, \mathbf{k} - \mathbf{p})} \delta_1(a, \mathbf{p}) \delta_1(a, \mathbf{k} - \mathbf{p}) + \dots$$

非線形成長の情報

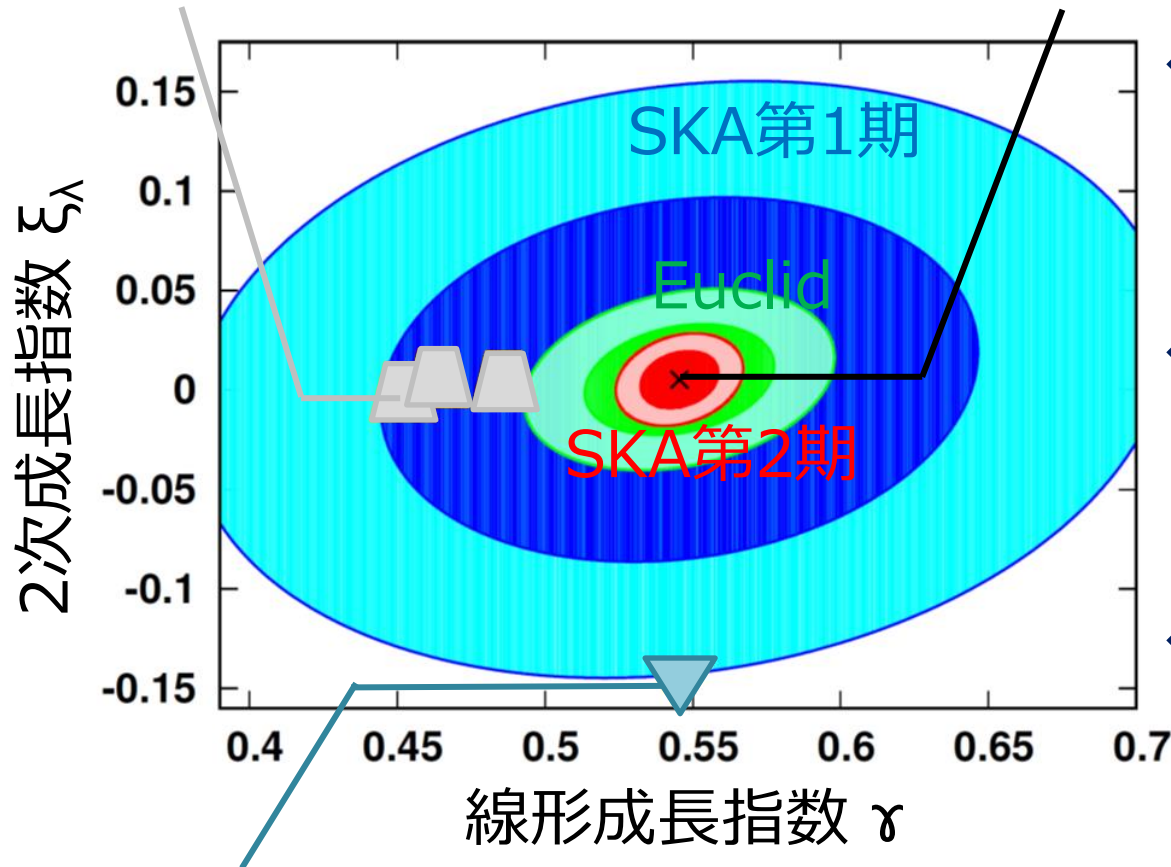
[Takushima+(2014,2015),DY+(2017),Namikawa+(2018),  
Hirano+(2018),Hirano+DY+(2020),DY+Sugiyama(2022),  
DY+Ishimaru+Takahashi+Matsubara 2211.13453]

# (Obs2) 非線形成長による検証



$n$ KGB重力理論

$\Lambda$ CDM+一般相対論



- ◆ 背景+線形レベルで  $\Lambda$ CDMと区別がつかないモデルが存在
- ◆ 将来の宇宙観測で非線形成長を計測し、モデルを峻別可能
- ◆ 重力理論との直接的関係は見えにくい

ホルンデスキー理論

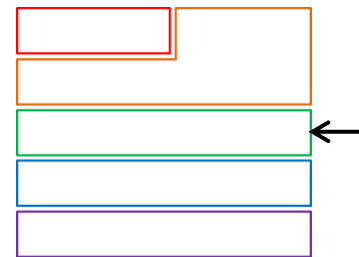
(状態方程式 $w$ , 線形成長率が $\Lambda$ CDMと一致する模型)

DY+, PRD96, 123516 (2017)

Namikawa+, PRD98, 043530 (2018)

# (Obs3) 現象論的関数

: 運動方程式ベースで修正



## ◆ 密度揺らぎの重力理論への依存性: $\mu$

$$\ddot{\delta} + 2H\dot{\delta} + \frac{1}{a^2} \nabla^2 \Phi = 0$$

重力ポテンシャル(計量の00成分)

重力理論に依存

ポアソン方程式  $\nabla^2 \Phi = 4\pi G a^2 \rho \delta$

現象論的関数  $\mu(a, k)$

# (Obs3) 現象論的関数

:運動方程式ベースで修正



## ◆ 重力レンズ効果の重力理論への依存性 : $\Sigma$

$$\nabla^2(\Phi + \Psi) = 8\pi G a^2 \rho \delta$$

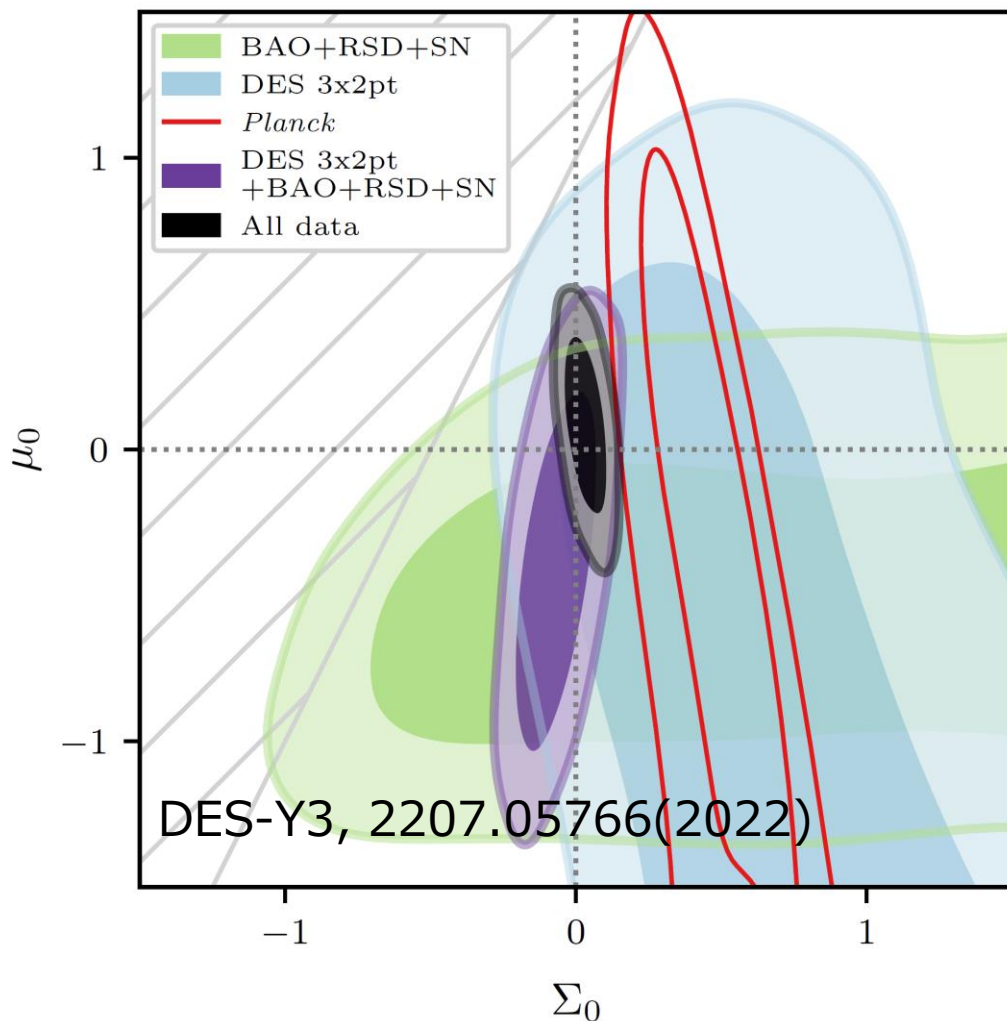
重力ポテンシャル(計量のij成分)

現象論的関数  $\Sigma(a, k)$

- ✓ 運動方程式を現象論的関数 $\mu$ と $\Sigma$ で修正
- ✓ 時間依存性・波数依存性は手で仮定

# (Obs3) 現象論的関数

: 運動方程式ベースで修正



◆ 時間/波数依存性の仮定が必要

$$\mu(a) = 1 + \mu_0 \frac{\Omega_{\text{DE}}(a)}{\Omega_{\text{DE},0}}$$

$$\Sigma(a) = 1 + \Sigma_0 \frac{\Omega_{\text{DE}}(a)}{\Omega_{\text{DE},0}}$$

◆ 観測データとの関連は見通しが良い

◆ 重力理論との直接の関係は見えにくい

# (Th2) 有効理論

: 線形理論を作用ベースで補正



- ◆ 線形摂動における物理的意味を明白に、作用ベースで修正を加える

[例] 摂動の2次までの作用

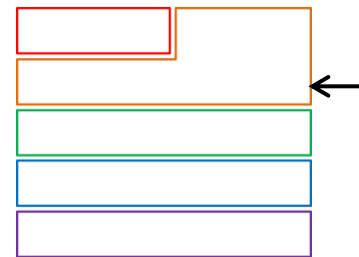
$$\mathcal{L} = \frac{1}{16\pi G} \left[ (1 + \alpha_T)^{(3)} R + \delta K^i_j \delta K^j_i - \delta K^2 + \dots \right]$$

元の理論の詳細によらずに

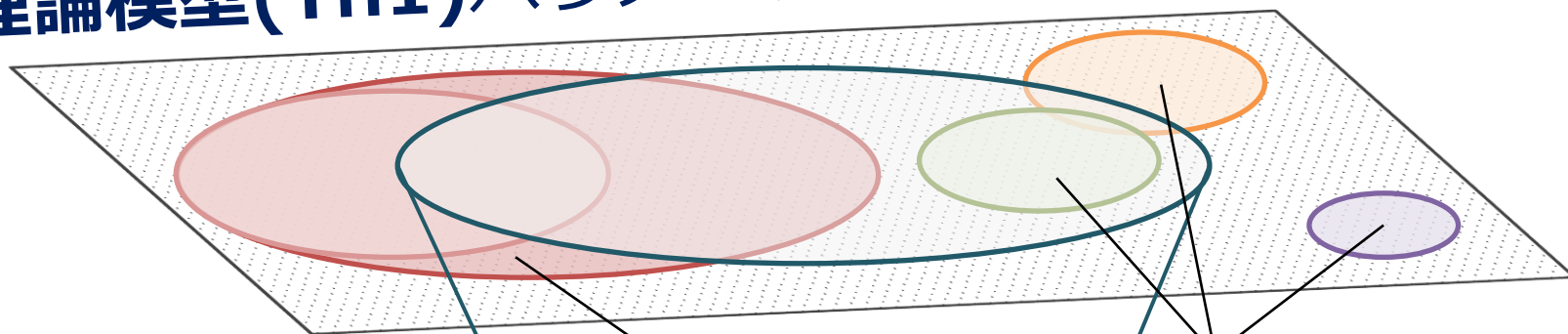
(重力波の音速)/(光速)に対応!

# (Th2) 有効理論

: 線形理論を作用ベースで補正

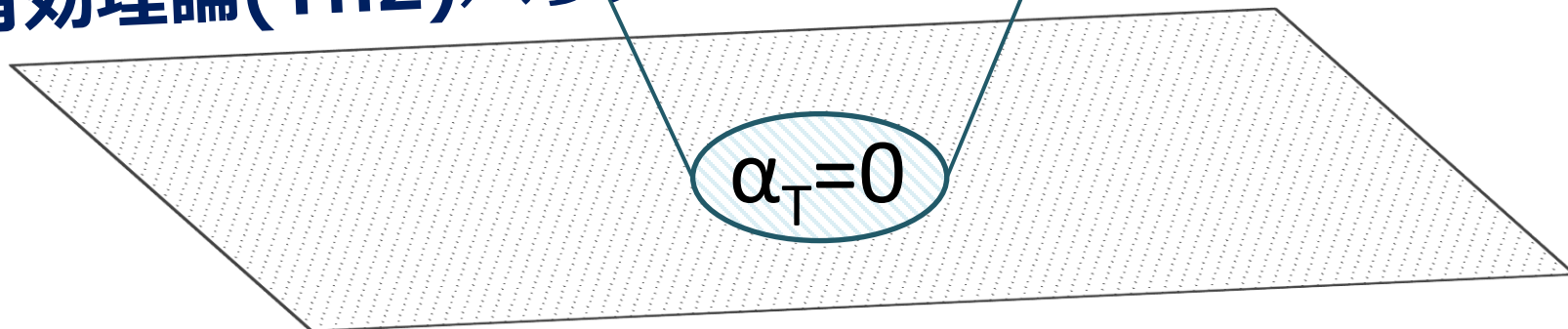


理論模型(Th1)パラメータ空間



既存の理論模型

有効理論(Th2)パラメータ空間





# (Th2) 有効理論

: 線形理論を作用ベースで補正



◆ 複雑な理論であっても、いくつかの有効理論パラメータで線形理論を記述可能

縮退高次スカラー・テンソル理論	ホルンデスキー理論	ブランスディック理論	$\alpha_K(t)$ <i>Kineticity</i>	スカラー場摂動の運動項	
			$\alpha_M(t)$ <i>Planck-Mass run rate</i>	プランク質量の時間変化率	
		$\alpha_T(t)$ <i>Tensor speed excess</i>	重力波音速の光速からのズレ		
	縮退高次スカラー・テンソル理論	ホルンデスキー理論	ブランスディック理論	$\alpha_B(t)$ <i>Braiding</i>	スカラー場摂動と計量摂動の混合
				$\alpha_H(t)$ <i>beyond-Horndeski</i>	ホルンデスキー理論を超える項
				$\beta_1(t)$ <i>beyond-GLPV</i>	高階微分を含む項

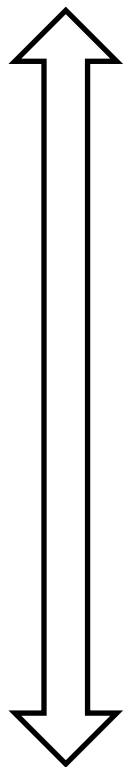
スカラー・テンソル理論 Bellini+, JCAP07,050(2014), Langlois+, JCAP05,033(2017), ...  
ベクトル・テンソル理論 Aoki+, JCAP01,056(2022), 流体 Aoki+, JCAP08,072(2022)

# 3. 理論と観測の協奏



# 現状(私見)

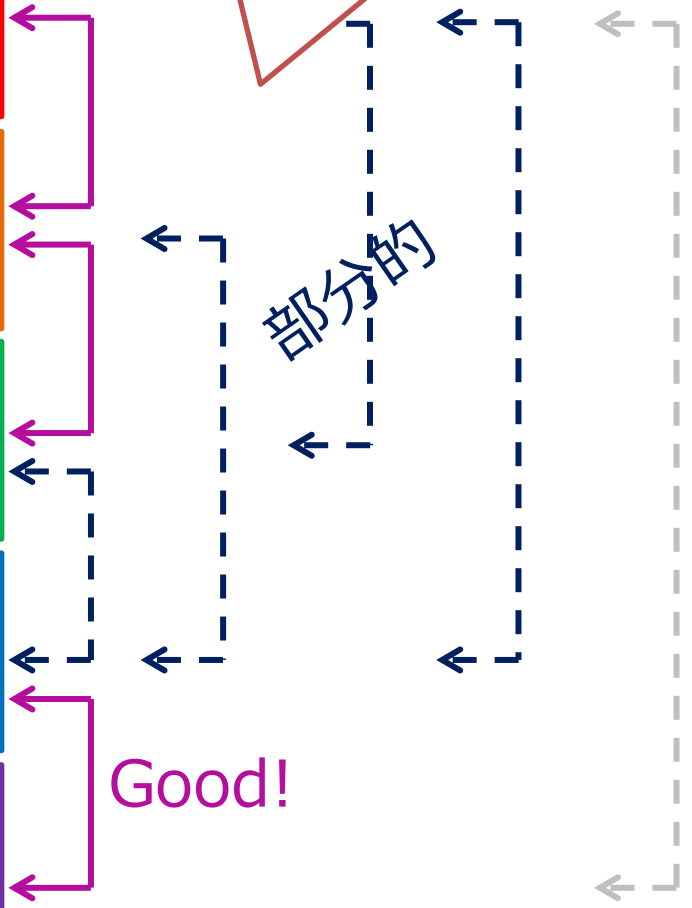
理論から  
決まる



観測から  
決まる



それぞれの階層を  
結びつけていくことが  
今後重要になる(はず)



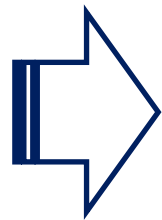
# (Th2) 有効理論

→ (Obs3) 現象論的関数



□ 計量摂動とスカラー場摂動の相互作用項の場合

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = -2M_{\text{Pl}}^2 a H \alpha_B \Phi \nabla^2 \varphi$$



$$\mu = 1 - \frac{\alpha_B}{1 - \frac{3}{2}\Omega_m + \alpha_B + \frac{d \ln \alpha_B}{d \ln a}}$$

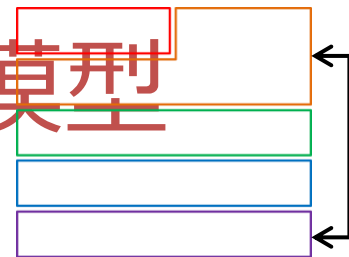
有効理論(Th2)と現象論的関数(Obs3)が結びつけられる！

ホルンデスキー理論：Pogosian+, PRD94, 104014(2016), Gleyzes+, JCAP02, 056(2016)

DHOST理論：Hirano+DY+, PRD99, 104051(2019), PRD102, 103505(2020)

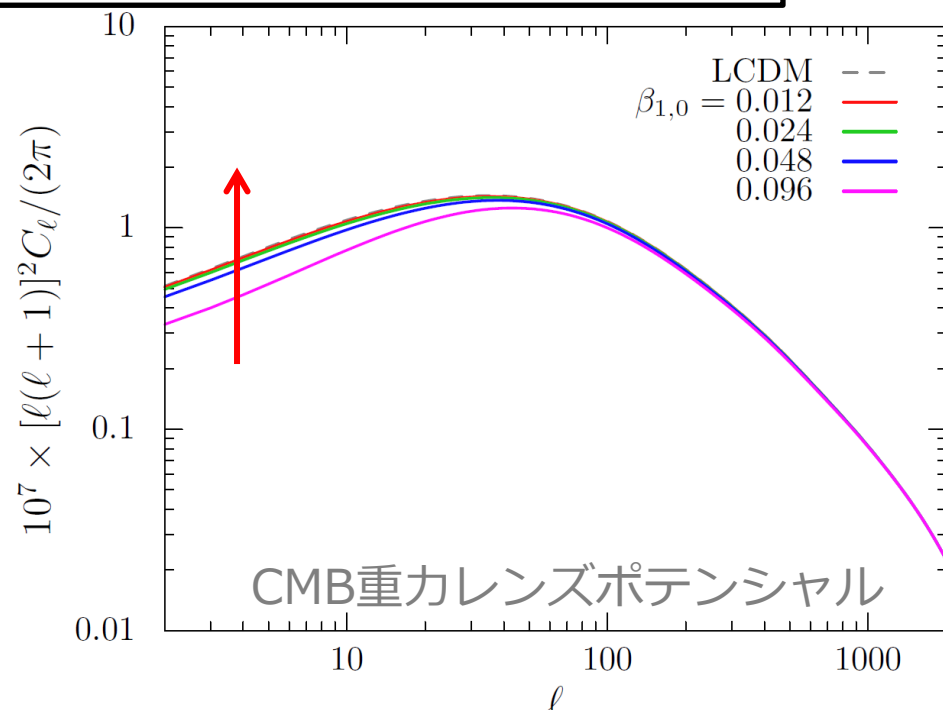
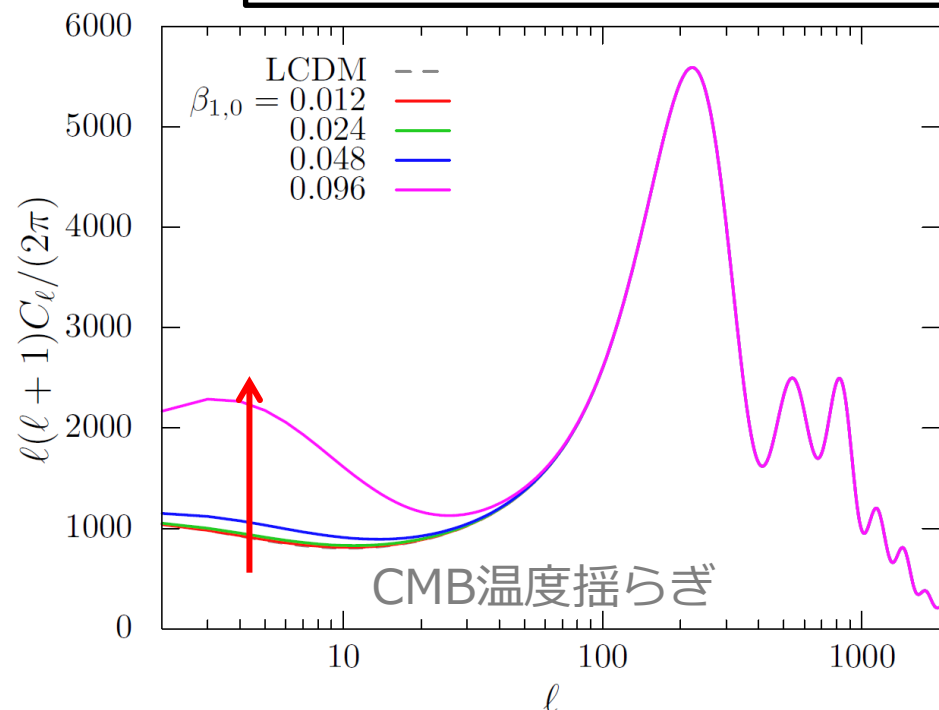
ベクトル・テンソル理論：Aoki+, JCAP01, 056(2022), ...

# (Th2) 有効理論, (Th1) 理論模型 → (Obs1) 観測量[CMB]



- ◆ 有効理論/理論模型からCMBスペクトルを導く  
ボルツマンコード"**CMB2nd**"の開発[平松(立教)]

縮退高次スカラーテンソル理論を解ける**世界で唯一**のコード



Hiramatsu+**DY**, PRD102,083525(2020), Hiramatsu, JCAP10(2022)035  
Hiramatsu+Kobayashi, JCAP07, 040 (2022),...

# 理論と観測の協奏で迫る重力理論 ワーキンググループ

--Testing Gravity **TH×OBS** Working Group

□発足：2020年8月

□目的：複数の多波長広域宇宙論サーベイが実施・計画され、**理論モデルの即時検証体制**が望まれている。世界最高精度の宇宙論データが今後増えていく今、**観測と理論のつながりを強化すること**を目指し、将来観測につなげていく

□世話人：宮武、横山、新居(名古屋)、山内(神奈川)

□参加者：55名

# レビュー論文が完成！

## Cosmological gravity probes: connecting recent theoretical developments to forthcoming observations

Shun Arai<sup>1</sup>, Katsuki Aoki<sup>2</sup>, Yuji Chinone<sup>3,4</sup>, Rampei Kimura<sup>5</sup>, Tsutomu Kobayashi<sup>6</sup>, Hironao Miyatake<sup>1,4,7</sup>, Daisuke Yamauchi<sup>8</sup>, Shuichiro Yokoyama<sup>1,4</sup>, Kazuyuki Akitsu<sup>9</sup>, Takashi Hiramatsu<sup>6</sup>, Shin'ichi Hirano<sup>10</sup>, Ryotaro Kase<sup>11</sup>, Taishi Katsuragawa<sup>12</sup>, Yosuke Kobayashi<sup>13</sup>, Toshiya Namikawa<sup>4</sup>, Takahiro Nishimichi<sup>2,4</sup>, Teppei Okumura<sup>4,14</sup>, Maresuke Shiraishi<sup>15</sup>, Masato Shirasaki<sup>16,17</sup>, Tomomi Sunayama<sup>13,18</sup>, Kazufumi Takahashi<sup>2</sup>, Atsushi Taruya<sup>2,4</sup>, and Junsei Tokuda<sup>19,20</sup>

□ [arXiv:2212.09094](https://arxiv.org/abs/2212.09094)

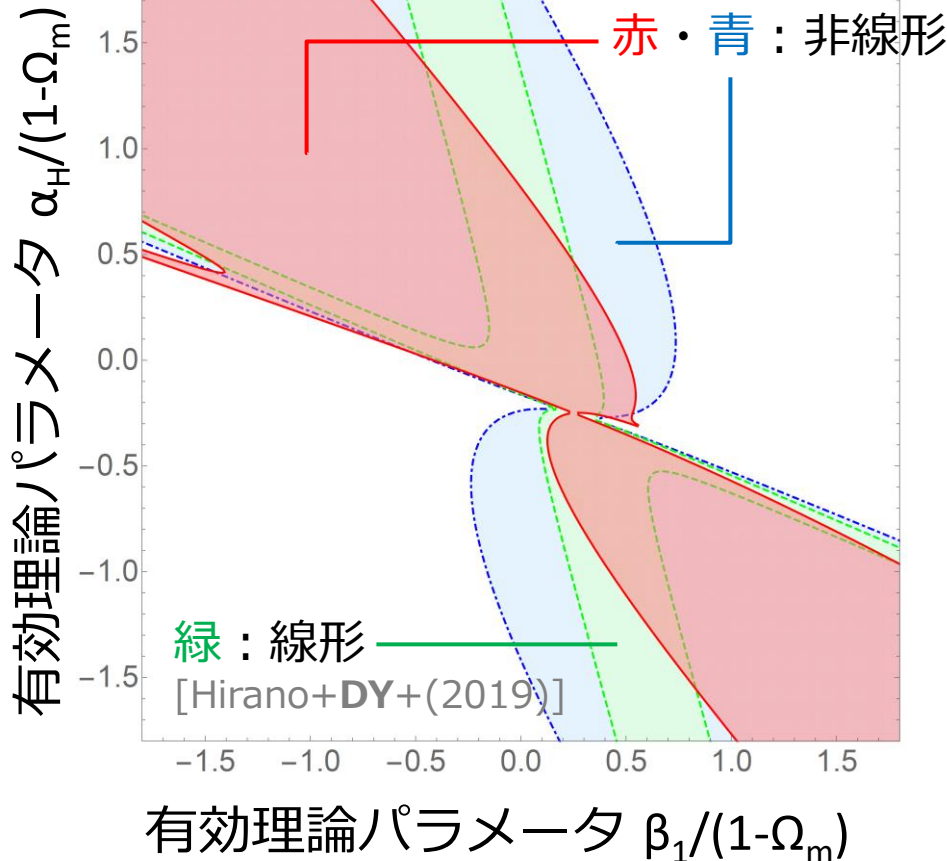
□ ぜひご確認ください！



# 理論と観測の協奏の一例



線形+非線形密度揺らぎの観測によって  
制限される有効理論パラメータ領域  
[赤・青・緑の重なった部分]



◆観測：非等方銀河3点相関関数の解析(Obs1)

+

◆理論：密度揺らぎ非線形成長の予言(Th1+Th2)



新しい研究の方向性  
「非等方銀河3点相関関数  
による重力理論の検証」

DY+Sugiyama,PRD105,063515(2022),  
Sugiyama+DY+,in prep.

# まとめ

理論から  
決まる

(Th1) 理論模型

(Th2) 有効理論

(Obs3) 現象論的  
関数

(Obs2) 現象論的  
パラメータ

(Obs1) 観測量

観測から  
決まる

◆日本は**理論構築(Th1)**  
と**観測(Obs1)**が得意

⇒ **理論と観測の協働  
(Th×Obs)がカギ!**

◆階層性を結びつける  
ことが今後重要に

◆Testing Gravity  
TH×OBS WGが活動

◆今後もっと**宇宙論観測**  
**による重力理論の検証**  
**が重要に!**