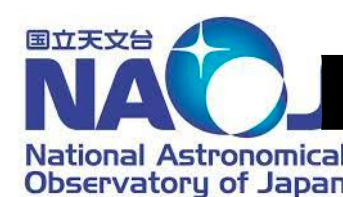


非等方銀河3点相関関数

を用いた

修正重力理論の検証



nori Sugiyama

共同研究者

理論パート: 山内大介, 小林努, 藤田智弘, 新居舜, 平野進一

解析パート: 斎藤俊, Florian Beutler, Hee-Jong Seo

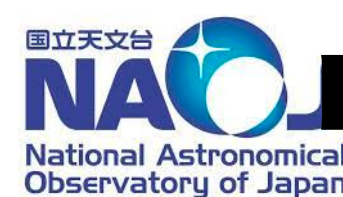
第10回観測的宇宙論ワークショップ@京都大学基礎物理学研究所 (オンライン)

11/17-19, 2021

非等方銀河3点相関関数

を用いた

修正重力理論の検証



nori Sugiyama

共同研究者

理論パート: 山内大介, 小林努, 藤田智弘, 新居舜, 平野進一

解析パート: 斎藤俊, Florian Beutler, Hee-Jong Seo

第10回観測的宇宙論ワークショップ@京都大学基礎物理学研究所 (オンライン)

11/17-19, 2021

非等方銀河3点相関関数 を用いた スカラーテンソル理論の検証



nori Sugiyama

共同研究者

理論パート: 山内大介, 小林努, 藤田智弘, 新居舜, 平野進一

解析パート: 斎藤俊, Florian Beutler, Hee-Jong Seo

第10回観測的宇宙論ワークショップ@京都大学基礎物理学研究所 (オンライン)

11/17-19, 2021

なぜ修正重力理論なのか？

宇宙のあらゆる場所，あらゆる時間，あらゆるスケールで
一般相対性理論は成り立っているのか？

なぜ修正重力理論なのか？

- 極小スケール

ひも理論: 極小スケールでは密度が高くなり，プランクスケールではブラックホールが生まれてしまい，量子重力効果が重要となる。

- 極強重力

重力波: 76ものコンパクト連星から統計的性質を調べる時代へ [arXiv:2111.03634]

ブラックホールシャドウの直接観測: EHT [arXiv:1906.11238]



(C) EHT Collaboration

- 極大スケール，宇宙の時間進化

宇宙論:

宇宙マイクロ波背景放射($z \sim 1000$)から，宇宙大規模構造($z=0-2$)まで

修正重力理論の基礎

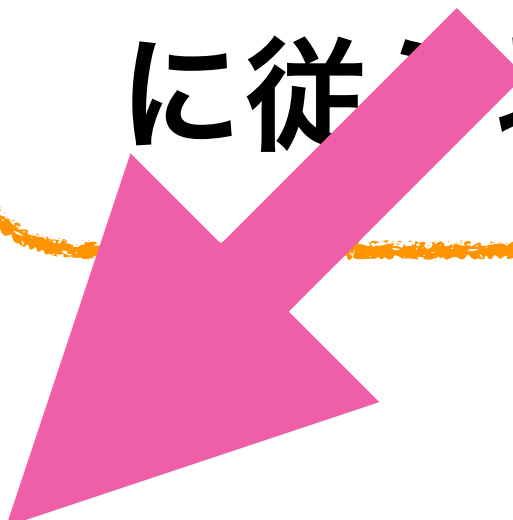
Lovelock's theorem:

(1) 4次元時空において(2) 計量テンソルが (3) 高々 2 次の運動方程式に従う場合, Einstein-Hilbert 作用となる.

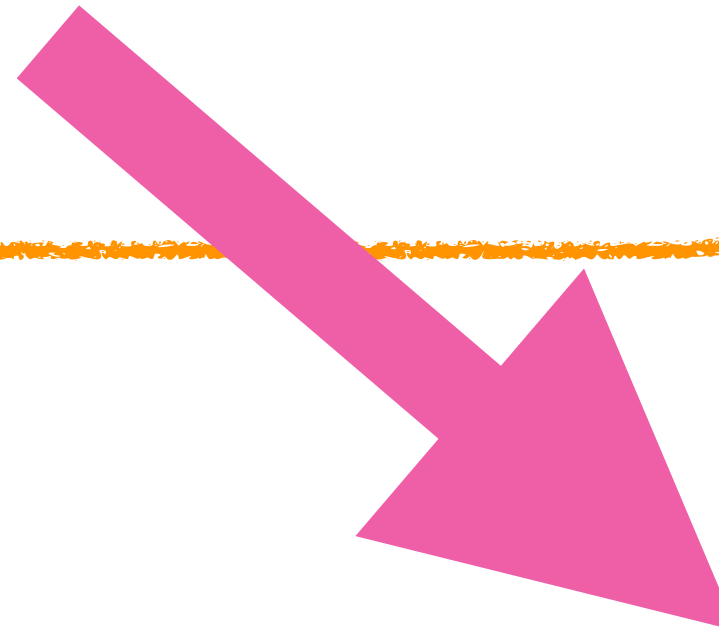
修正重力理論の基礎

Lovelock's theorem:

(1) 4次元時空において(2) 計量テンソルが (3) 高々 2 次の運動方程式に従う場合, Einstein-Hilbert 作用となる.



高次元(Brane world)



$f(R)$ 重力

修正重力理論の基礎

Lovelock's theorem:

(1) 4次元時空において(2) 計量テンソルが (3) 高々2次の運動方程式に従う場合, Einstein-Hilbert 作用となる。

高次元(Brane world)

$f(R)$ 重力

自由度を一つ足すこと = スカラーテンソル理論

($f(R)$ も多次元理論も一部はスカラーテンソルに帰着する)

スカラーテンソル理論の(本研究に関わる)歴史

2020: DHOST理論によるLSS consistency relationの破れ
(Crisostomi+2020; Lewandowski+2020)

2018: GLPV 理論によるバイスペクトル計算
(Hirano+2018)

2016: DHOST 理論の発見
(Langlois & Noui 2016; Crisostomi+2016;
Ben Achour+2016)

2015: GLPV (DHOSTの一部) 理論の発見
(Gleyzes+2015)

2014: Horndeski 理論によるマターバイスペクトルの計算
(Takushima+2014)

2011: Horndeski 理論の再発見
(Deffayet+2011; Kobayashi+2011)

1974: Horndeski 理論の発見
(Horndeski 1974)

1961: Brans-Dicke 理論

スカラーテンソル理論の(本研究に関わる)歴史

2020: DHOST理論によるLSS consistency relationの破れ
(Crisostomi+2020; Lewandowski+2020)

2018: GLPV 理論によるバイスペクトル計算
(Hirano+2018)

2016: DHOST 理論の発見
(Langlois & Noui 2016; Crisostomi+2016;
Ben Achour+2016)

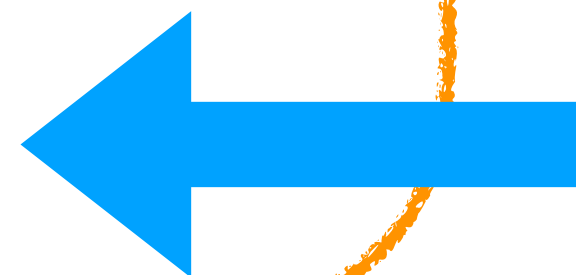
2015: GLPV (DHOSTの一部) 理論の発見
(Gleyzes+2015)

2014: Horndeski 理論によるマターバイスペクトルの計算
(Takushima+2014)

2011: Horndeski 理論の再発見
(Deffayet+2011; Kobayashi+2011)

1974: Horndeski 理論の発見
(Horndeski 1974)

1961: Brans-Dicke 理論



60年前

スカラーテンソル理論の歴史

2020: DHOST理論によるLSS consistency relationの破れ
(Crisostomi+2020; Lewandowski+2020)

2018: GLPV 理論によるバイスペクトル計算
(Hirano+2018)

2016: DHOST 理論の発見
(Langlois & Noui 2016; Crisostomi+2016;
Ben Achour+2016)

2015: GLPV (DHOSTの一部) 理論の発見
(Gleyzes+2015)

2014: Horndeski 理論によるマターバイスペクトルの計算
(Takushima+2014)

2011: Horndeski 理論の再発見
(Deffayet+2011; Kobayashi+2011)

1974: Horndeski 理論の発見
(Horndeski 1974)

1961: Brans-Dicke 理論

Horndeski 理論 :

2次の運動方程式を持つ

最も一般的なスカラーテンソル理論

$$\mathcal{L} = G_2(\phi, X) - G_3(\phi, X)\square\phi + G_4(\phi, X)R + G_{4X} [(\square\phi)^2 - \phi^{\mu\nu}\phi_{\mu\nu}] \\ + G_5(\phi, X)G^{\mu\nu}\phi_{\mu\nu} - \frac{G_{5X}}{6} [(\square\phi)^3 - 3\square\phi\phi^{\mu\nu}\phi_{\mu\nu} + 2\phi_{\mu\nu}\phi^{\nu\lambda}\phi_{\lambda}^{\mu}],$$

← **10年前**

← **47年前**

スカラーテンソル理論の歴史

2020: DHOST理論によるLSS consistency relationの破れ
(Crisostomi+2020; Lewandowski+2020)

2018: GLPV 理論によるバイスペクトル計算
(Hirano+2018)

2016: DHOST 理論の発見
(Langlois & Noui 2016; Crisostomi+2016;
Ben Achour+2016)

2015: GLPV (DHOSTの一部) 理論の発見
(Gleyzes+2015)

2014: Horndeski 理論によるマターバイスペクトルの計算
(Takushima+2014)

2011: Horndeski 理論の再発見
(Deffayet+2011; Kobayashi+2011)

1974: Horndeski 理論の発見
(Horndeski 1974)

1961: Brans-Dicke 理論

バイスペクトル (3点相関関数)

バイスペクトルは2次揺らぎから生じる

$$\langle \delta_2 \delta_1 \delta_1 \rangle \sim \langle \delta_1 \delta_1 \rangle \langle \delta_1 \delta_1 \rangle$$

ダークマターの密度場の2次揺らぎ (LCDM)

$$\delta_2(\mathbf{x}) = \underbrace{\frac{17}{21}[\delta(\mathbf{x})]^2}_{\text{Growth}} - \underbrace{\Psi \cdot \nabla \delta(\mathbf{x})}_{\text{Shift}} + \underbrace{\frac{2}{7} \left[\left(\frac{\partial_i \partial_j}{\partial^2} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \delta(\mathbf{x}) \right]^2}_{\text{Tidal}}$$

Growth

Shift

Tidal

E.g., Schmittfull et al. 2015

$f = \Omega_{\text{m}}^{1/2}$ の場合のみ 一般的には $f \sim \Omega_{\text{m}}^{6/11}$

ダークマターの2次揺らぎ

一般のLCDMの場合のダークマターの密度場の2次揺らぎ:

$$\delta_2(\mathbf{x}) \sim \left(1 - \frac{4}{21}\Omega_m^{3/572}\right) [\delta(\mathbf{x})]^2 - \Psi \cdot \nabla \delta(\mathbf{x}) + \frac{2}{7} \Omega_m^{3/572} \left[\left(\frac{\partial_i \partial_j}{\partial^2} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \delta(\mathbf{x}) \right]^2$$

$$\langle \delta_2(\mathbf{x}) \rangle = 0$$

Growth

Shift

Tidal

(Bouchet et al. 1992; Bouchet et al. 1995)

Horndeski 理論におけるダークマターの密度場の2次揺らぎ:

$$\delta_2(\mathbf{x}) = \left(1 - \frac{4}{21}\lambda\right) [\delta(\mathbf{x})]^2 - \Psi \cdot \nabla \delta(\mathbf{x}) + \frac{2}{7} \lambda \left[\left(\frac{\partial_i \partial_j}{\partial^2} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \delta(\mathbf{x}) \right]^2$$

(Takushima et al. 2014)

ダークマターの2次揺らぎ

Horndeski 理論におけるダークマターの密度場の2次揺らぎ:

$$\delta_2(\mathbf{x}) = \left(1 - \frac{4}{21}\lambda\right) [\delta(\mathbf{x})]^2 - \Psi \cdot \nabla \delta(\mathbf{x}) + \frac{2}{7}\lambda \left[\left(\frac{\partial_i \partial_j}{\partial^2} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \delta(\mathbf{x}) \right]^2$$

(Takushima et al. 2014)

$$\lambda \sim \Omega_m^\xi$$

Yamauchi et al. 2017

スカラーテンソル理論の(本研究に関わる)歴史

2020: DHOST理論によるLSS consistency relationの破れ
(Crisostomi+2020; Lewandowski+2020)

2018: GLPV 理論によるバイスペクトル計算
(Hirano+2018)

2016: DHOST 理論の発見

**(Langlois & Noui 2016; Crisostomi+2016;
Ben Achour+2016)**

2015: GLPV (DHOSTの一部) 理論の発見
(Gleyzes+2015)

2014: Horndeski 理論によるマターバイスペクトルの計算
(Takushima+2014)

2011: Horndeski 理論の再発見
(Deffayet+2011; Kobayashi+2011)

1974: Horndeski 理論の発見
(Horndeski 1974)

1961: Brans-Dicke 理論

← **5-6年前**

**Degenerate Higher-Order Scalar-Tensor
(DHOST) 理論:**

高次の運動方程式を持つものの
2次の自由度に帰着するスカラーテンソル理論

DHOST理論

2階微分を含むラグランジアン

$$L = \frac{a}{2} \ddot{\phi}^2 - V(\phi),$$

4階微分を含む運動方程式

$$a \overset{\dots}{\phi} - dV/d\phi = 0.$$

負の運動項を持つラグランジアン

$$L = -\frac{a}{2} \dot{q}^2 + \frac{a}{2} \dot{Q}^2 - U(q, Q).$$

$$q = (\phi + \psi)/\sqrt{2} \text{ and } Q = (\phi - \psi)/\sqrt{2}, \\ \psi = \ddot{\phi}.$$

(オストログラドスキー不安定性)

Kobayashi 2019

DHOST理論

2自由度(スカラーとテンソル)の2階微分を含むラグランジアン

$$L = \frac{a}{2}\ddot{\phi}^2 + b\ddot{\phi}\dot{q} + \frac{c}{2}\dot{q}^2 + \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - \frac{1}{2}\phi^2 - \frac{1}{2}q^2.$$

縮退条件

$$ac - b^2 = 0,$$

2階の運動方程式

$$\ddot{\phi} + \frac{b}{c}\dot{q} + \phi = 0. \quad \left(1 - \frac{b^2}{c^2}\right)\ddot{q} - \frac{b}{c}\dot{\phi} + \frac{1}{c}q = 0.$$

スカラーテンソル理論の(本研究に関わる)歴史

2020: DHOST理論によるLSS consistency relationの破れ
(Crisostomi+2020; Lewandowski+2020)

**2018: GLPV 理論によるバイスペクトル計算
(Hirano+2018)**

2016: DHOST 理論の発見
(Langlois & Noui 2016; Crisostomi+2016;
Ben Achour+2016)

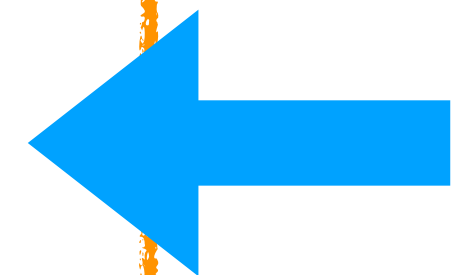
2015: GLPV (DHOSTの一部) 理論の発見
(Gleyzes+2015)

2014: Horndeski 理論によるマターバイスペクトルの計算
(Takushima+2014)

2011: Horndeski 理論の再発見
(Deffayet+2011; Kobayashi+2011)

1974: Horndeski 理論の発見
(Horndeski 1974)

1961: Brans-Dicke 理論

 **3年前**

バイスペクトル (3点相関関数)

DHOST 理論におけるダークマターの密度場の2次揺らぎ:

$$\delta_2(\boldsymbol{x}) = \underbrace{\left(\kappa - \frac{4}{21} \lambda \right)}_{\text{Growth}} [\delta(\boldsymbol{x})]^2 - \underbrace{\kappa}_{\text{Shift}} \Psi \cdot \nabla \delta(\boldsymbol{x}) + \underbrace{\frac{2}{7} \lambda}_{\text{Tidal}} \left[\left(\frac{\partial_i \partial_j}{\partial^2} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \delta(\boldsymbol{x}) \right]^2$$

Hirano et al. 2018

DHOST 理論はShift termの係数を変える。

スカラーテンソル理論の(本研究に関わる)歴史

2020: DHOST理論によるLSS consistency relationの破れ
(Crisostomi+2020; Lewandowski+2020)

2018: GLPV 理論によるバイスペクトル計算
(Hirano+2018)

2016: DHOST 理論の発見
(Langlois & Noui 2016; Crisostomi+2016;
Ben Achour+2016)

2015: GLPV (DHOSTの一部) 理論の発見
(Gleyzes+2015)

2014: Horndeski 理論によるマターバイスペクトルの計算
(Takushima+2014)

2011: Horndeski 理論の再発見
(Deffayet+2011; Kobayashi+2011)

1974: Horndeski 理論の発見
(Horndeski 1974)

1961: Brans-Dicke 理論

← 去年

Equality time consistency relation (IR cancellation)

$$\begin{aligned}\langle \delta(\mathbf{x}_1)\delta(\mathbf{x}_2) \rangle &\rightarrow \langle \delta_1(\mathbf{x}_1 - \Psi)\delta_1(\mathbf{x}_2 - \Psi) \rangle = \langle \delta_1(\mathbf{x}_1)\delta_1(\mathbf{x}_2) \rangle \\ \langle \delta(\mathbf{x}_1)\delta(\mathbf{x}_2)\delta(\mathbf{x}_3) \rangle &\rightarrow \langle \delta_1(\mathbf{x}_1 - \Psi)\delta_1(\mathbf{x}_2 - \Psi)\delta_1(\mathbf{x}_3 - \Psi) \rangle = \langle \delta_1(\mathbf{x}_1)\delta_1(\mathbf{x}_2)\delta_1(\mathbf{x}_3) \rangle = 0\end{aligned}$$

銀河3点相関関数の測定・解析の歴史

2021 : quadrupole 3点相関関数の解析手法の確立
(NS+2021)

2019 : quadrupole バイスpekトルの初検出
(NS+2019)

2018 : バイスpekトルによるBAOシグナルの検出
(Pearson & Samushia 2018)

2017: 3点相関関数によるBAOシグナルの検出
(Slepian+2017)

2017 : monopole+quadrupole パワースpekトルとmonopole バイスpekトルとのfull shape ジョイント解析
(Gil-Marín+2017)

2004 : SDSS銀河カタログによる3点相関関数の測定
(Kayo+2004)

2001 : IRAS銀河カタログによるバイスペkトルの測定
(Scoccimarro+2001)

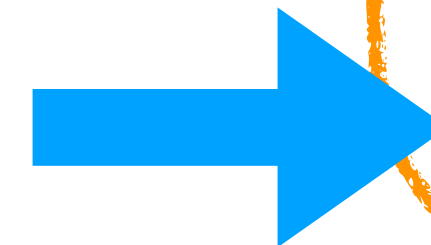
1991 : 3次元銀河カタログによる(初の?)バイスペkトルの測定
(Baumgart & Fry 1991)

1983 : 3次元銀河カタログによる(初の?)3点相関関数の測定
(Bean+1983)

1975 : 2次元銀河カタログによる初の3点相関関数の測定
(Peebles & Groth 1975)

銀河3点相関関数の測定・解析の歴史

46年前



2019 : quadrupole バイスpekトルの初検出
(NS+2019)

2018 : バイスpekトルによるBAOシグナルの検出
(Pearson & Samushia 2018)

2017: 3点相関関数によるBAOシグナルの検出
(Slepian+2017)

2017 : monopole+quadrupole パワースpekトルとmonopole バイスpekトルとのfull shape ジョイント解析
(Gil-Marín+2017)

2004 : SDSS銀河カタログによる3点相関関数の測定
(Kayo+2004)

2001 : IRAS銀河カタログによるバイスペkトルの測定
(Scoccimarro+2001)

1991 : 3次元銀河カタログによる(初の?)バイスペkトルの測定
(Baumgart & Fry 1991)

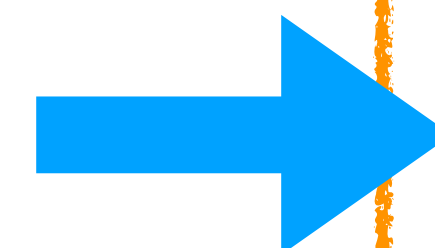
1983 : 3次元銀河カタログによる(初の?)3点相関関数の測定
(Bean+1983)

**1975 : 2次元銀河カタログによる初の3点相関関数の測定
(Peebles & Groth 1975)**

銀河3点相関関数の測定・解析の歴史

1986 : 杉山尚徳誕生

30-40年前
(数百個の分光銀河)



2019 : quadrupole バイスpekトルの初検出
(NS+2019)

2018 : バイスpekトルによるBAOシグナルの検出
(Pearson & Samushia 2018)

2017: 3点相関関数によるBAOシグナルの検出
(Slepian+2017)

2017 : monopole+quadrupole パワースpekトルとmonopole バイスpekトルとのfull shape ジョイント解析
(Gil-Marín+2017)

2004 : SDSS銀河カタログによる3点相関関数の測定
(Kayo+2004)

2001 : IRAS銀河カタログによるバイスペkトルの測定
(Scoccimarro+2001)

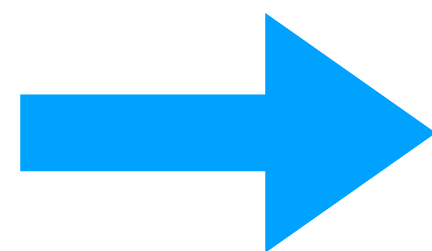
1991 : 3次元銀河カタログによる(初の?)バイスペkトルの測定
(Baumgart & Fry 1991)

1983 : 3次元銀河カタログによる(初の?)3点相関関数の測定
(Bean+1983)

1975 : 2次元銀河カタログによる初の3点相関関数の測定
(Peebles & Groth 1975)

銀河3点相関関数の測定・解析の歴史

3点関数は限られたスケール依存性のみを用いた測定
SDSSによる2点関数研究の全盛期



2019 : quadrupole バイスpekトルの初検出
(NS+2019)

2018 : バイスpekトルによるBAOシグナルの検出
(Pearson & Samushia 2018)

2017: 3点相関関数によるBAOシグナルの検出
(Slepian+2017)

2017 : monopole+quadrupole パワースpekトルとmonopole バイスpekトルとのfull shape ジョイント解析
(Gil-Marín+2017)

—

—

**2004 : SDSS銀河カタログによる3点相関関数の測定
(Kayo+2004)**

**2001 : IRAS銀河カタログによるバイスペkトルの測定
(Scoccimarro+2001)**

1991 : 3次元銀河カタログによる(初の?)バイスペkトルの測定
(Baumgart & Fry 1991)

1983 : 3次元銀河カタログによる(初の?)3点相関関数の測定
(Bean+1983)

1975 : 2次元銀河カタログによる初の3点相関関数の測定
(Peebles & Groth 1975)

銀河3点相関関数の測定・解析の歴史

2017 : 杉山知歩(長女)誕生

4年前 →

モノポール バイスpekトルのfull shape解析
バイspekトルが宇宙論解析の全面に出る時代へ

2021 : quadrupole 3点相関関数の解析手法の確立
(NS+2021)

2019 : quadrupole バイスpekトルの初検出
(NS+2019)

2018 : バイスpekトルによるBAOシグナルの検出
(Pearson & Samushia 2018)

2017: 3点相関関数によるBAOシグナルの検出
(Slepian+2017)

**2017 : monopole+quadrupole パワースpekトルと
monopole バイスpekトルとのfull shape ジョイント解析**
(Gil-Marín+2017)

2004 : SDSS銀河カタログによる3点相関関数の測定
(Kayo+2004)

2001 : IRAS銀河カタログによるバイspekトルの測定
(Scoccimarro+2001)

1991 : 3次元銀河カタログによる(初の?)バイspekトルの測定
(Baumgart & Fry 1991)

1983 : 3次元銀河カタログによる(初の?)3点相関関数の測定
(Bean+1983)

1975 : 2次元銀河カタログによる初の3点相関関数の測定
(Peebles & Groth 1975)

銀河3点相関関数の測定・解析の歴史

3-4年前 →

まだ モノポール情報のみ

2021 : quadrupole 3点相関関数の解析手法の確立
(NS+2021)

2019 : quadrupole バイスpekトルの初検出
(NS+2019)

2018 : バイスpekトルによるBAOシグナルの検出
(Pearson & Samushia 2018)

2017: 3点相関関数によるBAOシグナルの検出
(Slepian+2017)

2017 : monopole+quadrupole パワースpekトルとmonopole バイスpekトルとのfull shape ジョイント解析
(Gil-Marín+2017)

2004 : SDSS銀河カタログによる3点相関関数の測定
(Kayo+2004)

2001 : IRAS銀河カタログによるバイスペkトルの測定
(Scoccimarro+2001)

1991 : 3次元銀河カタログによる(初の?)バイスペkトルの測定
(Baumgart & Fry 1991)

1983 : 3次元銀河カタログによる(初の?)3点相関関数の測定
(Bean+1983)

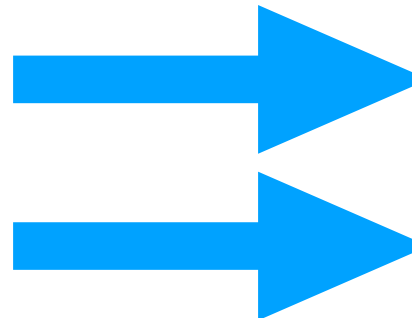
1975 : 2次元銀河カタログによる初の3点相関関数の測定
(Peebles & Groth 1975)

銀河3点相関関数の測定・解析の歴史

2021 : 杉山明来(次女)誕生

2019 : 杉山新(長男)誕生

今年
2年前



2021 : quadrupole 3点相関関数の解析手法の確立

(NS+2021)

2019 : 非等方 (quadrupole) バイスpekトルの初検出

(NS+2019)

2018 : バイスpekトルによるBAOシグナルの検出

(Pearson & Samushia 2018)

2017: 3点相関関数によるBAOシグナルの検出

(Slepian+2017)

2017 : monopole+quadrupole パワースpekトルとmonopole バイスpekトルとのfull shape ジョイント解析

(Gil-Marín+2017)

2004 : SDSS銀河カタログによる3点相関関数の測定

(Kayo+2004)

2001 : IRAS銀河カタログによるバイスpekトルの測定

(Scoccimarro+2001)

1991 : 3次元銀河カタログによる(初の?)バイスpekトルの測定

(Baumgart & Fry 1991)

1983 : 3次元銀河カタログによる(初の?)3点相関関数の測定

(Bean+1983)

1975 : 2次元銀河カタログによる初の3点相関関数の測定

(Peebles & Groth 1975)

非等方銀河3点相関関数解析

[1] 非等方成分の分解方法

[2] 窓関数補正

[3] 共分散行列

[4] 理論モデル

[1] バイスpekトルの多重極分解

パワースpekトルのルジャンドル分解

$$\begin{aligned} P(\mathbf{k}, \hat{n}) &= \sum_{\ell} P_{\ell}(k) \underbrace{\mathcal{L}_{\ell}(\hat{k} \cdot \hat{n})}_{\text{ルジャンドル関数}} \\ &\propto \sum_{\ell \ell'} P_{\ell}(k) \underbrace{\sum_{m m'} \delta_{\ell \ell'} \delta_{m m'} Y_{\ell m}(\hat{k}) Y_{\ell' m'}^*(\hat{n})}_{\text{red line}} \end{aligned}$$

バイspekトルのTripolar Spherical Harmonic 分解 (NS+2019)

$$B(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \hat{n}) \propto \sum_{\ell_1 \ell_2 \ell} B_{\ell_1 \ell_2 \ell}(k_1, k_2) \sum_{m_1 m_2 m} \underbrace{\begin{pmatrix} \ell_1 & \ell_2 & \ell \\ m_1 & m_2 & m \end{pmatrix}}_{\text{red line}} Y_{\ell_1 m_1}(\hat{k}_1) Y_{\ell_2 m_2}(\hat{k}_2) Y_{\ell m}(\hat{n})$$

[2] 窓関数補正

$$\delta_{\text{obs}}(\boldsymbol{x}) = \frac{W(\boldsymbol{x})}{\text{窓関数}} \delta(\boldsymbol{x})$$

窓関数

Wilson et al. 2017

$$\xi_{\text{model}}(r) = (2\ell + 1) \sum_{\ell_1 \ell_2} \begin{pmatrix} \ell_1 & \ell_2 & \ell \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^2 Q_{\ell_1}(r) \xi_{\ell_2}(r).$$

窓関数の2点相関関数

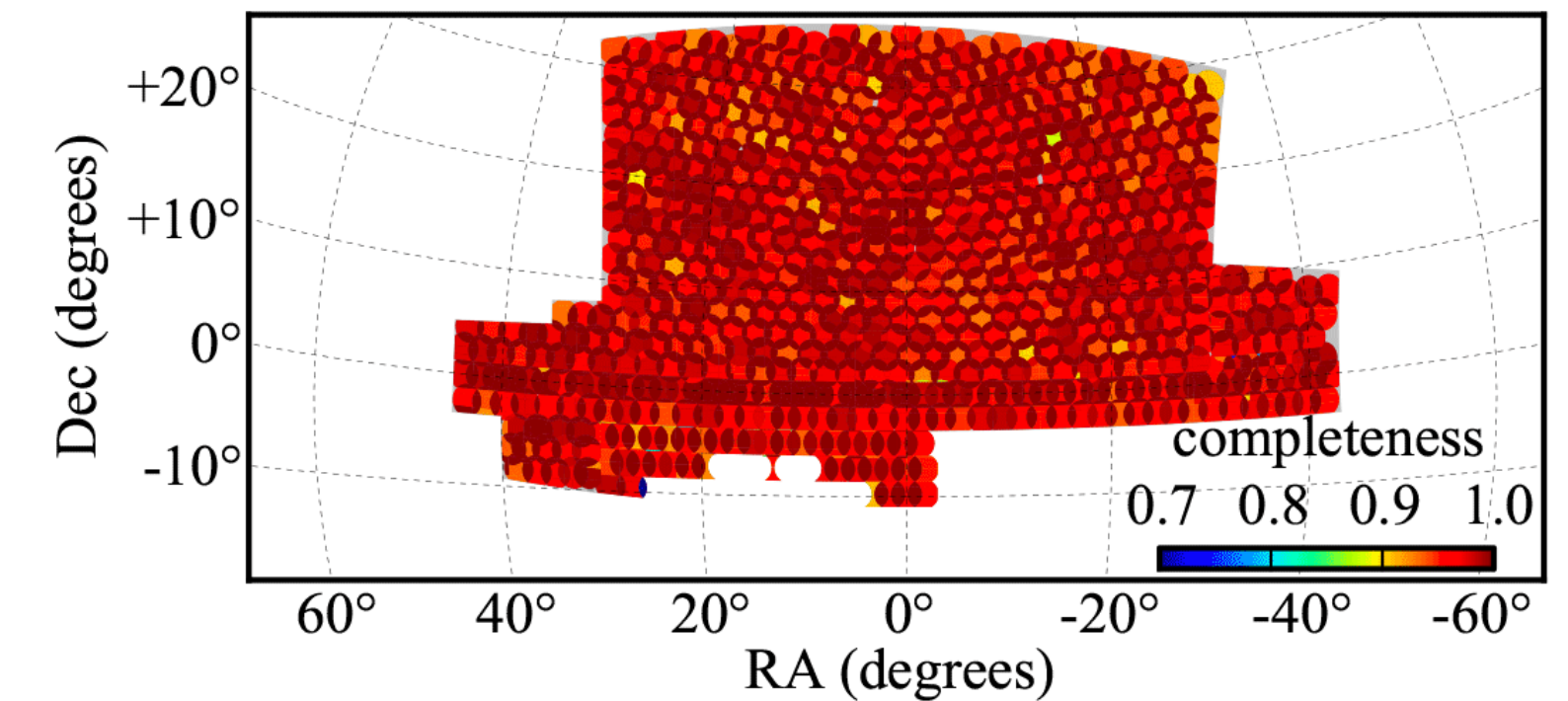
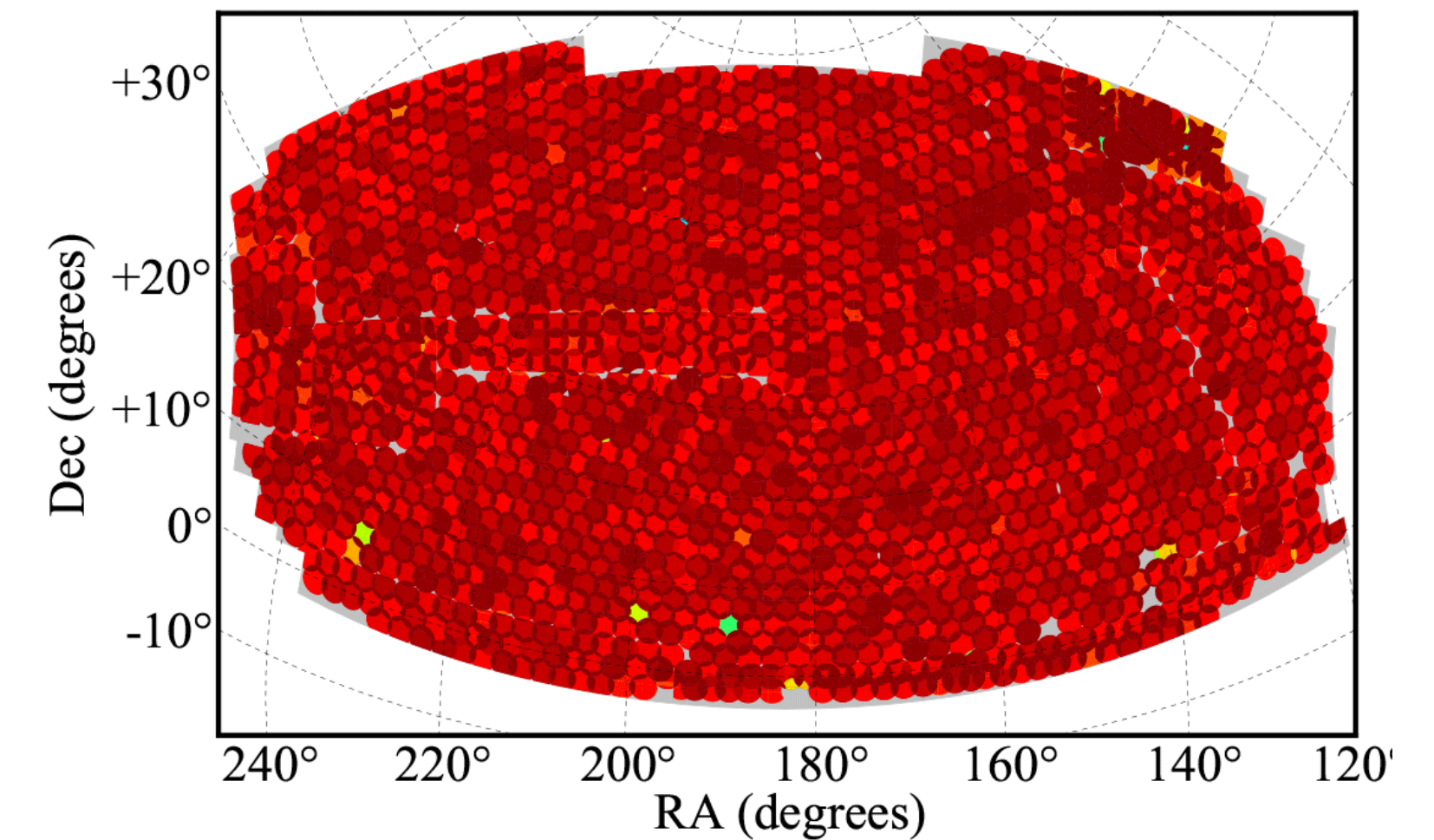
NS+2019

$$\begin{aligned} \zeta_{\ell_1 \ell_2 \ell}^{(\text{obs})}(r_1, r_2) &= (4\pi) \sum_{\ell'_1 + \ell'_2 + \ell' = \text{even}} \sum_{\ell''_1 + \ell''_2 + \ell'' = \text{even}} \\ &\times \left\{ \begin{matrix} \ell'_1 & \ell'_2 & \ell' \\ \ell_1 & \ell_2 & \ell \end{matrix} \right\} \left[\frac{h_{\ell_1 \ell_2 \ell} h_{\ell_1 \ell'_1 \ell'_1} h_{\ell_2 \ell'_2 \ell'_2} h_{\ell \ell' \ell''}}{h_{\ell'_1 \ell'_2 \ell'} h_{\ell''_1 \ell''_2 \ell''}} \right] \\ &\times \underbrace{Q_{\ell'_1 \ell'_2 \ell''}(r_1, r_2)}_{\text{窓関数の3点相関関数}} \zeta_{\ell'_1 \ell'_2 \ell'}(r_1, r_2), \end{aligned} \quad (65)$$

窓関数の3点相関関数

SDSS III BOSS DR12

DR12



[2] 窓関数補正

NS+2021

$$\delta_{\text{obs}}(\boldsymbol{x}) = \underline{W(\boldsymbol{x})} \delta(\boldsymbol{x})$$

窓関数

Wilson et al. 2017

$$\xi_{\text{model}}(r) = (2\ell + 1) \sum_{\ell_1 \ell_2} \begin{pmatrix} \ell_1 & \ell_2 & \ell \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^2 Q_{\ell_1}(r) \xi_{\ell_2}(r).$$

窓関数の2点相関関数

5-10%

NS+2019

$$\begin{aligned} \zeta_{\ell_1 \ell_2 \ell}^{(\text{obs})}(r_1, r_2) &= (4\pi) \sum_{\ell'_1 + \ell'_2 + \ell' = \text{even}} \sum_{\ell''_1 + \ell''_2 + \ell'' = \text{even}} \\ &\times \left\{ \begin{matrix} \ell'_1 & \ell'_2 & \ell' \\ \ell_1 & \ell_2 & \ell \end{matrix} \right\} \left[\frac{h_{\ell_1 \ell_2 \ell} h_{\ell_1 \ell'_1 \ell'_1} h_{\ell_2 \ell'_2 \ell'_2} h_{\ell \ell' \ell''}}{h_{\ell'_1 \ell'_2 \ell'} h_{\ell''_1 \ell''_2 \ell''}} \right] \\ &\times \underline{Q_{\ell'_1 \ell'_2 \ell''}(r_1, r_2)} \zeta_{\ell'_1 \ell'_2 \ell'}(r_1, r_2), \end{aligned} \tag{65}$$

窓関数の3点相関関数

$\Delta \bar{\zeta}_{\ell'_1 \ell'_2 \ell'} [\%]$	$\zeta_{000}^{(\text{obs})}$	$\zeta_{110}^{(\text{obs})}$	$\zeta_{202}^{(\text{obs})}$	$\zeta_{112}^{(\text{obs})}$
monopole ($\ell = 0$)				
$\Delta \bar{\zeta}_{000}$	94.94 (90.02)	2.16 (2.99)	-3.25 (-2.09)	2.75 (1.80)
$\Delta \bar{\zeta}_{110}$	9.33 (12.60)	103.22 (100.94)	3.81 (2.65)	-8.74 (-5.55)
$\Delta \bar{\zeta}_{220}$	-0.02 (-0.05)	-0.56 (-0.77)	2.31 (1.52)	0.03 (-0.02)
$\Delta \bar{\zeta}_{330}$	0.07 (0.11)	0.05 (0.07)	0.14 (0.06)	0.02 (0.00)
$\Delta \bar{\zeta}_{440}$	0.01 (0.01)	-0.01 (-0.02)	0.05 (0.03)	0.02 (-0.00)
$\Delta \bar{\zeta}_{550}$	-0.02 (-0.03)	-0.02 (-0.04)	0.02 (0.02)	0.01 (-0.00)
$\Delta \bar{\zeta}_{660}$	-0.03 (-0.04)	-0.03 (-0.05)	0.02 (-0.00)	-0.00 (0.00)
$\Delta \bar{\zeta}_{770}$	-0.02 (-0.03)	-0.02 (-0.04)	-0.00 (-0.00)	-0.00 (-0.00)
$\Delta \bar{\zeta}_{880}$	-0.02 (-0.03)	-0.02 (-0.02)	-0.00 (-0.00)	-0.00 (-0.00)
quadrupole ($\ell = 2$)				
$\Delta \bar{\zeta}_{022}$	-4.51 (-2.74)	1.16 (0.78)	0.76 (0.83)	3.28 (3.61)
$\Delta \bar{\zeta}_{112}$	5.08 (3.33)	-3.76 (-2.45)	5.02 (5.69)	97.83 (93.54)
$\Delta \bar{\zeta}_{202}$	-4.00 (-2.44)	0.93 (0.63)	84.57 (83.32)	2.64 (2.90)
$\Delta \bar{\zeta}_{132}$	-0.28 (-0.16)	-2.02 (-1.29)	0.10 (0.18)	0.38 (0.81)
$\Delta \bar{\zeta}_{222}$	0.10 (0.00)	0.29 (0.18)	0.04 (0.10)	0.43 (0.69)
$\Delta \bar{\zeta}_{312}$	-0.12 (-0.07)	-0.93 (-0.58)	2.81 (3.69)	0.23 (0.46)
$\Delta \bar{\zeta}_{242}$	-0.10 (-0.08)	-0.20 (-0.12)	0.72 (0.90)	0.35 (0.52)

[3] 共分散行列

データのビン数 vs. モックシミュレーション数

2+3点相関関数 vs. Patchy mock simulation

Monopole

$\zeta_{000} + \zeta_{110} + \dots$ **130 vs. 2048**

Quadrupole

$\zeta_{202} + \zeta_{112} + \dots$ **M2 ~ 1.06**

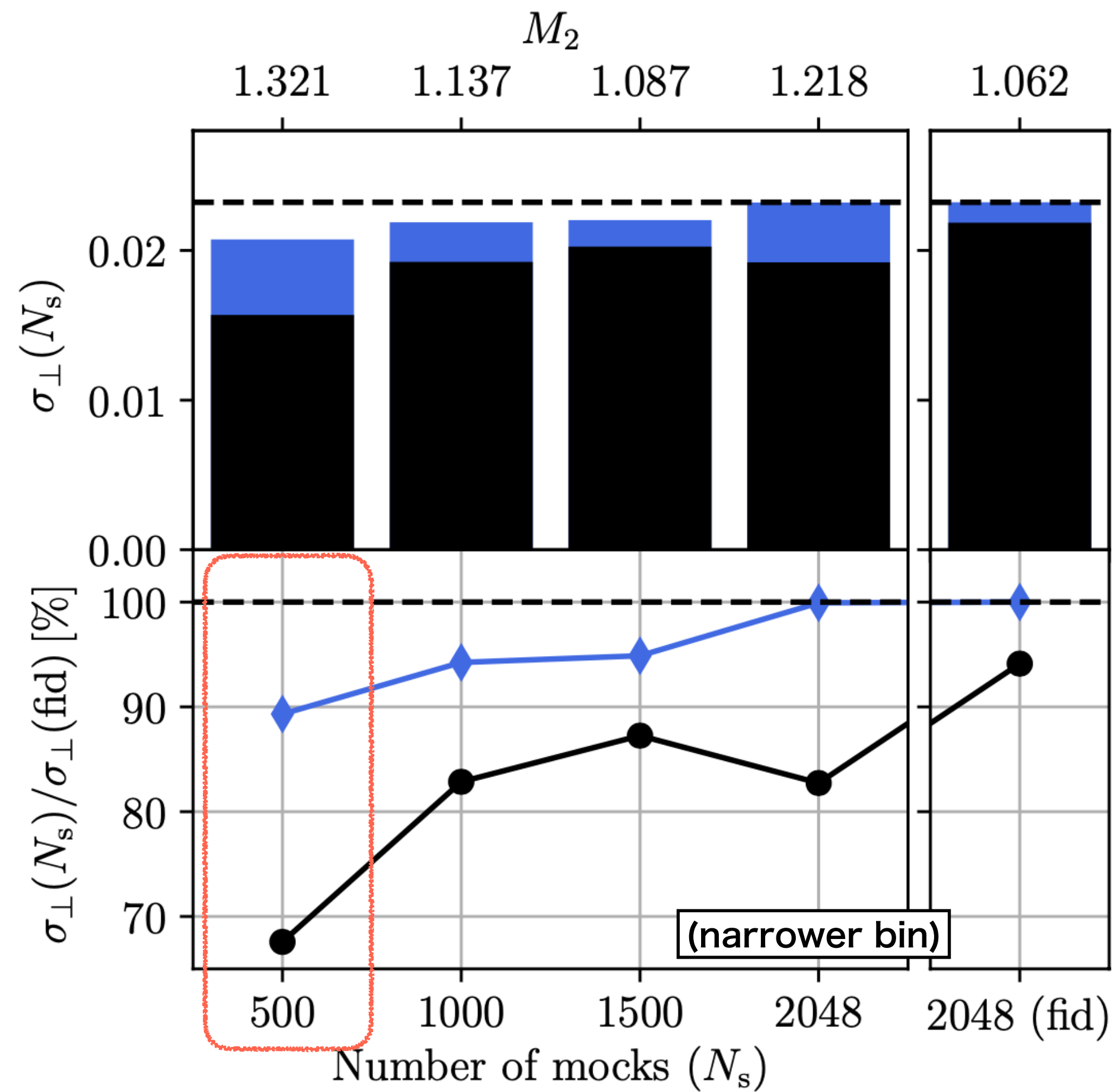
モックシミュレーション数の補正係数 M2:

$$M_2 = M_1 \sqrt{\frac{N_s - 1}{N_s - N_b - 2}} \quad M_1 = \sqrt{\frac{1 + B(N_b - N_p)}{1 + A + B(N_p + 1)}} \quad \begin{aligned} A &= \frac{2}{(N_s - N_b - 1)(N_s - N_b - 4)} \\ B &= \frac{N_s - N_b - 2}{(N_s - N_b - 1)(N_s - N_b - 4)} \end{aligned}$$

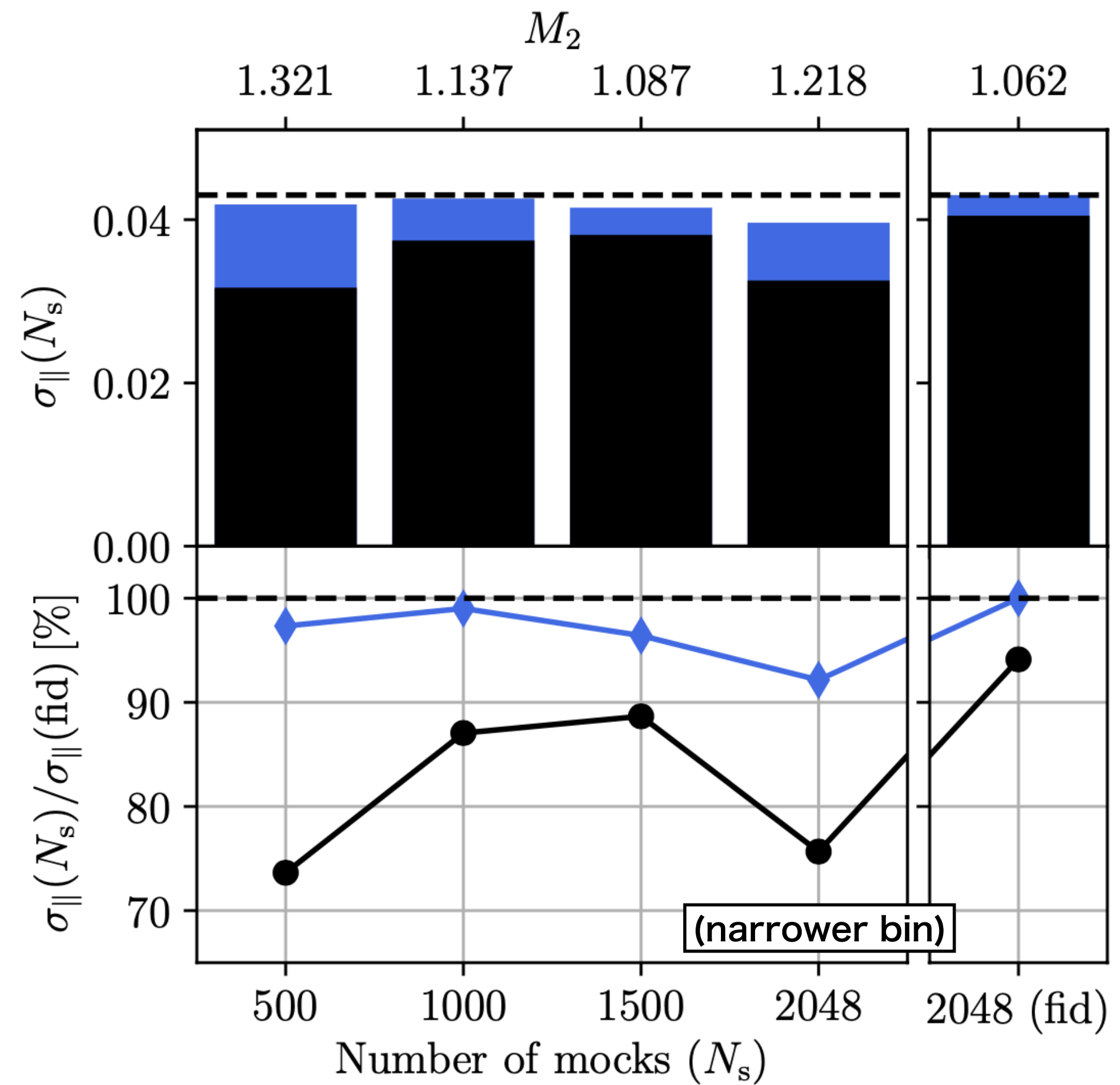
N_s = シミュレーション数; N_b = ビン数

[3] 共分散行列

角経距離



ハッブルパラメータ



[4] IR-resummed モデル

形状は線形パワースペクトルのままで、BAOシグナルの減衰のみを記述するモデル:
(Eisenstein et al. 2007)

$$P^{(\text{temp})}(\mathbf{k}) = \left[Z^{[1]}(\mathbf{k}) \right]^2 \left[\underbrace{\mathcal{D}^2(\mathbf{k}) P_{\text{w}}(k)}_{\text{BAOのみ}} + \underbrace{P_{\text{nw}}(k)}_{\text{BAOなし}} \right]$$

$$\mathcal{D}(\mathbf{k}) = \exp \left(-\frac{k^2(1 - \mu^2)\Sigma_{\perp}^2 + k^2\mu^2\Sigma_{\parallel}^2}{4} \right)$$

非線形性のInfra-red (IR) モード($k \ll p$)を resummationすることで、上記のモデルが導かれる
(Baldauf+ 2015; Blas+ 2016; NS+ 2021)

[4] IR-resummed モデル

$$\begin{aligned} & B^{(\text{temp})}(k_1, k_2) \\ &= 2 Z^{[1]}(k_1) Z^{[1]}(k_2) Z^{[2]}(k_1, k_2) \\ &\times \left\{ \mathcal{D}(k_1) \mathcal{D}(k_2) \mathcal{D}(k_{12}) P_w(k_1) P_w(k_2) \right. \\ &\quad + \mathcal{D}^2(k_1) P_w(k_1) P_{\text{nw}}(k_2) + \mathcal{D}^2(k_2) P_{\text{nw}}(k_1) P_w(k_2) \\ &\quad \left. + P_{\text{nw}}(k_1) P_{\text{nw}}(k_2) \right\} + 2 \text{ cyc..} \end{aligned}$$

NS+ 2021

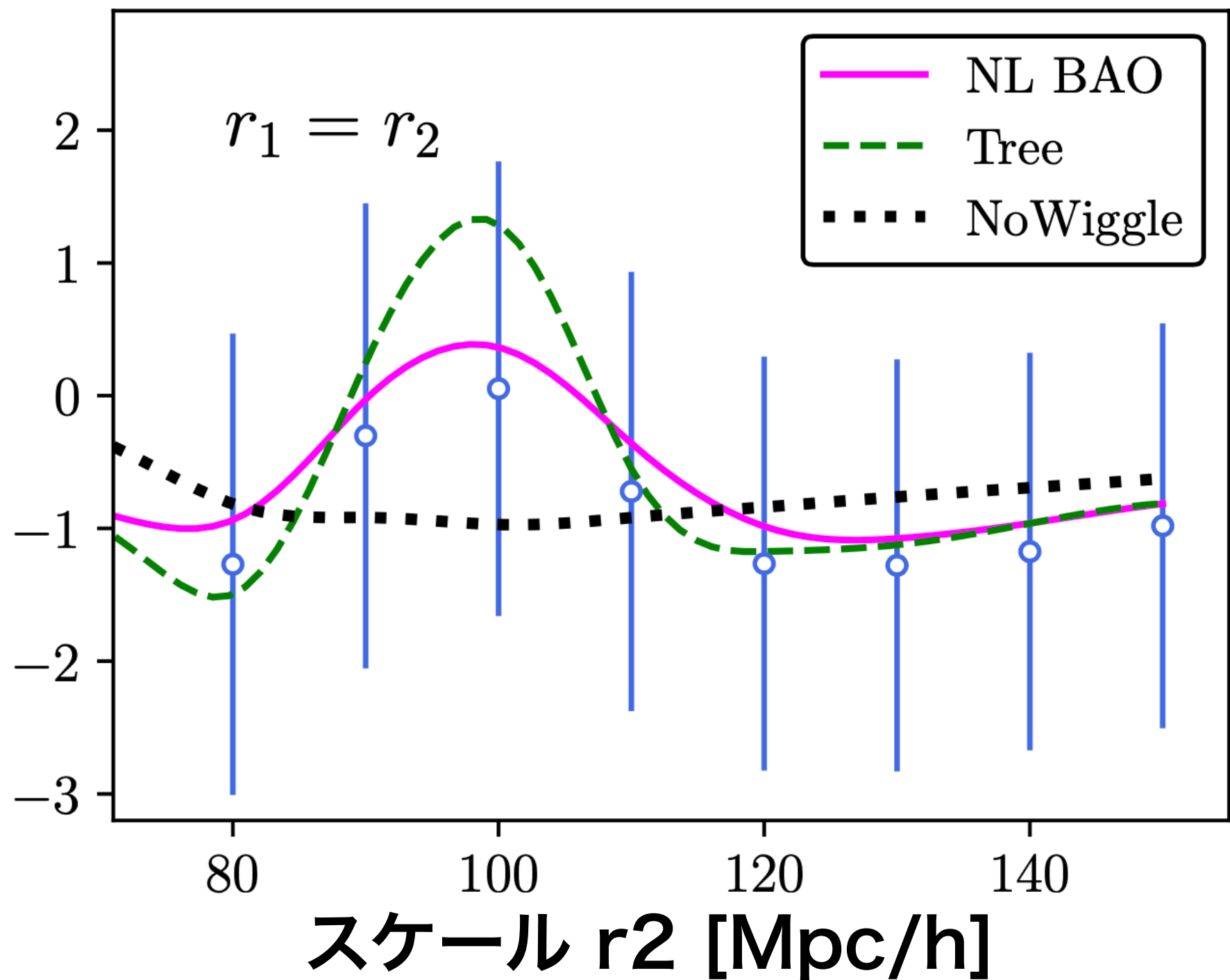
(see also Blas et al. 2016; Ivanov & Sibiriyakov 2018)

[4] IR-resummed モデル

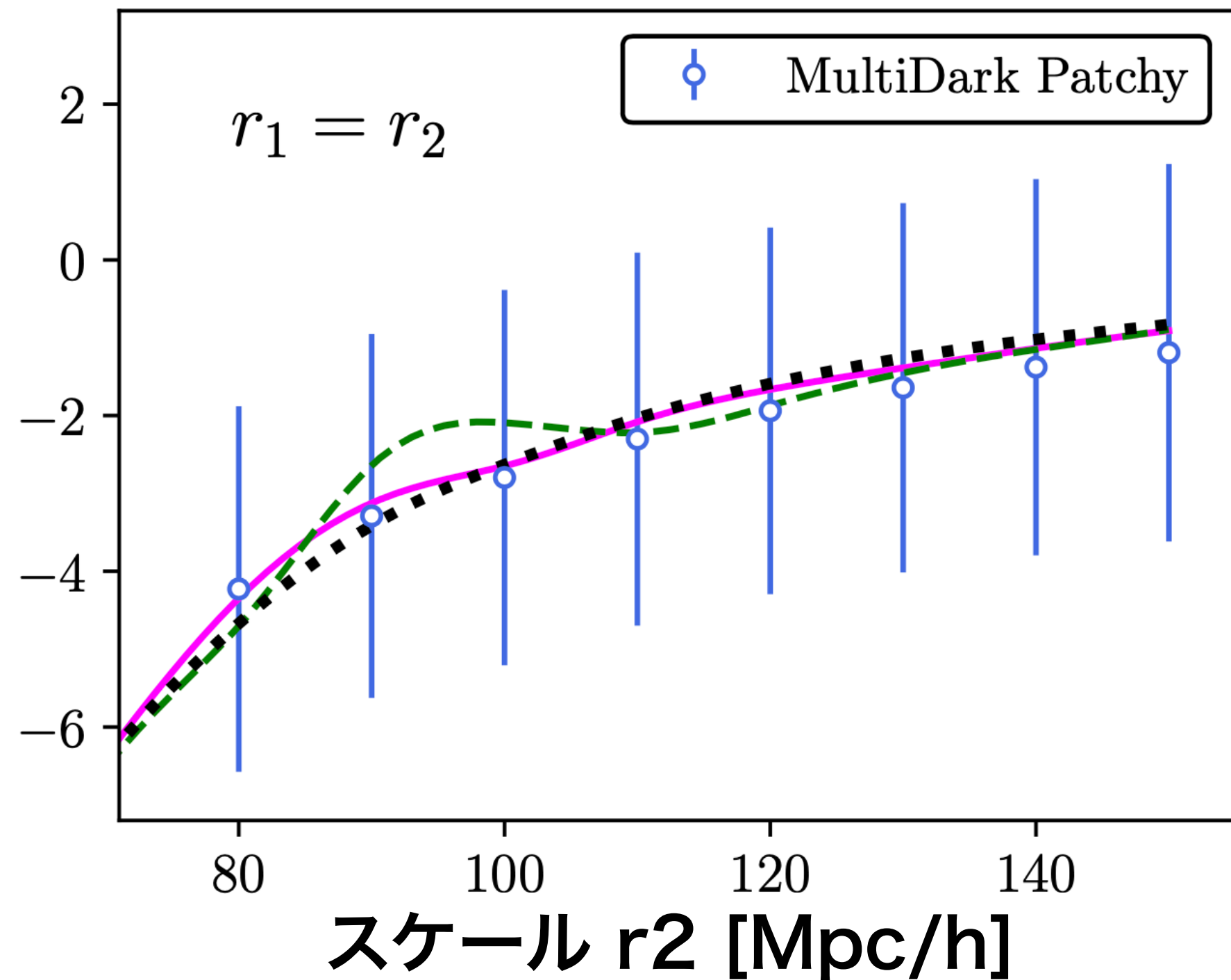
Patchy mock ($0.4 < z < 0.6$)						
	$1 - \langle \alpha_{\perp} \rangle$	$\langle \sigma_{\perp} \rangle$	$1 - \langle \alpha_{\parallel} \rangle$	$\langle \sigma_{\parallel} \rangle$	$\langle r_{\alpha_{\perp} \alpha_{\parallel}} \rangle$	$\langle \chi^2_{\min} \rangle / \text{dof}$
$\xi_{0,2}$	0.003	0.026 ± 0.007	-0.011	0.061 ± 0.020	-0.48 ± 0.05	$(55.5 \pm 10.5) / 55$
$\xi_{0,2} + \zeta_{(000),(202)}$	-0.001	0.023 ± 0.006	-0.014	0.043 ± 0.010	-0.16 ± 0.19	$(239.9 \pm 23.3) / 250$
$\xi_{0,2} + \zeta_{(000),(202)} \text{ (Tree)}$	-0.004	0.024 ± 0.007	-0.008	0.037 ± 0.009	-0.11 ± 0.22	$(242.1 \pm 23.1) / 250$

2.27±3.33

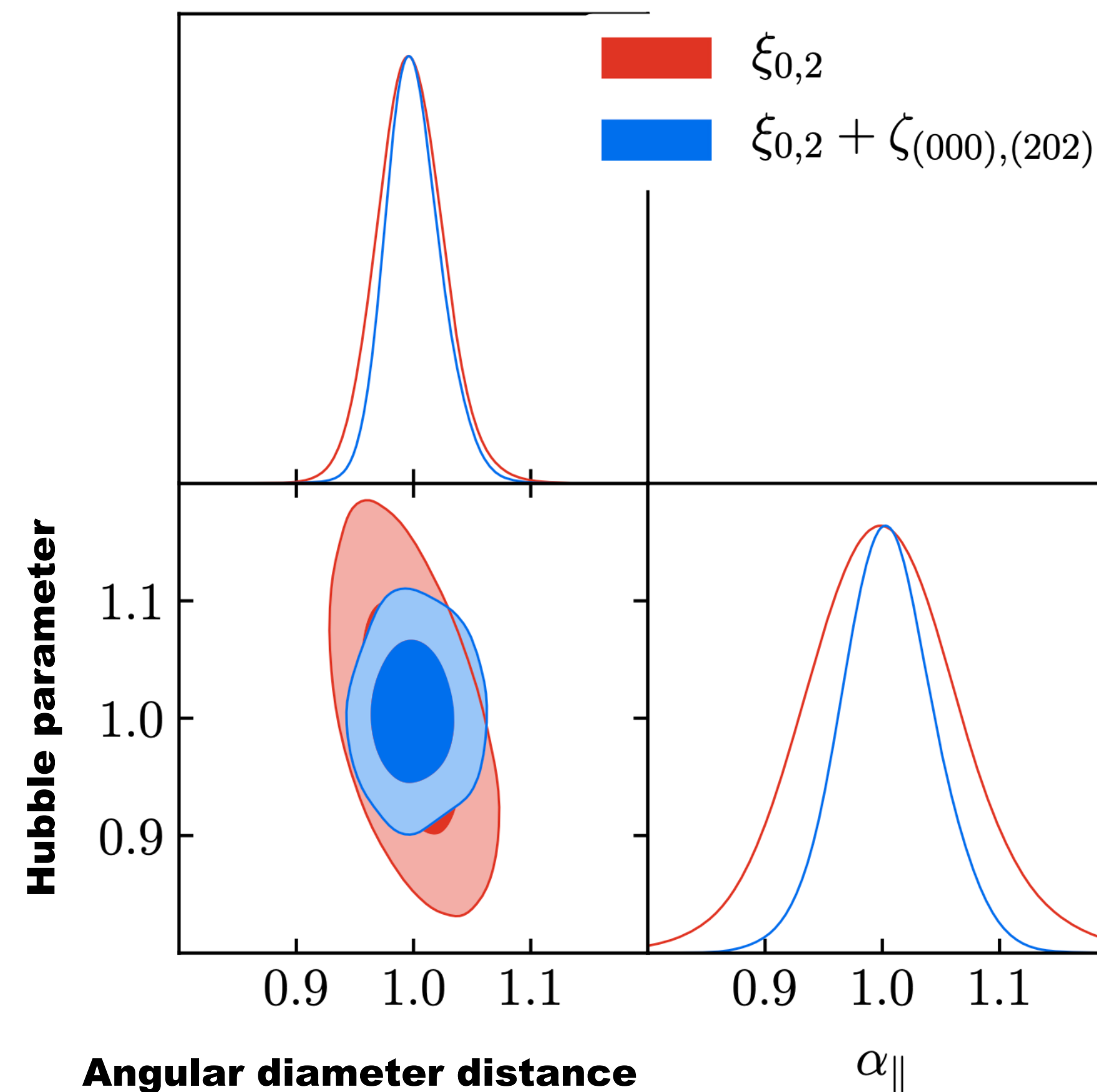
Monopole 3点相関関数 $\zeta_{000}(r_1, r_2)$



Quadrupole 3点相関関数 $\zeta_{202}(r_1, r_2)$



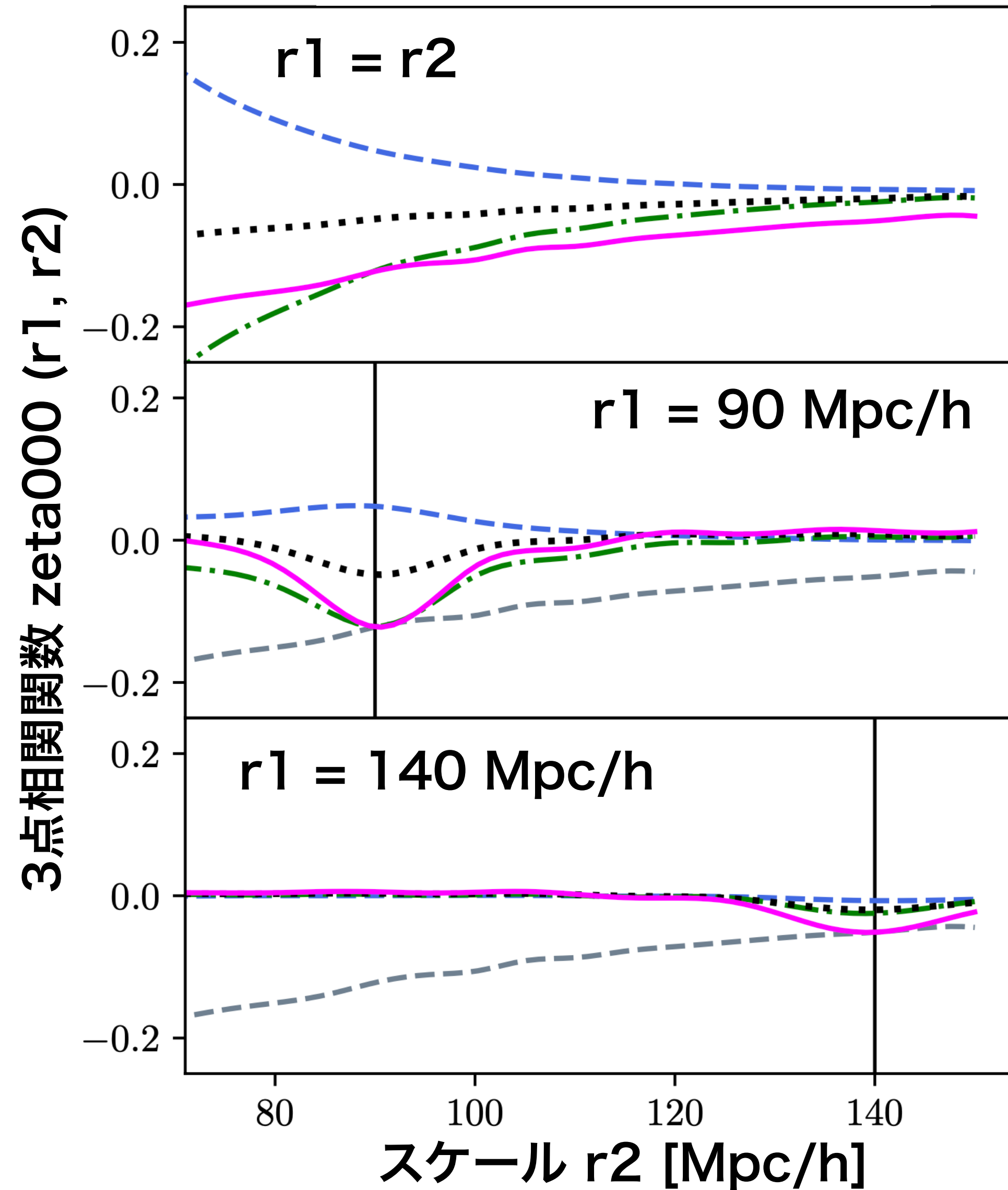
非等方銀河3点相関関数解析



**Quadrupole 3PCFを加えることで、
ハッブルパラメータの制約が30%程度改善する。**

3点相関関数における非線形効果

BAOがない場合

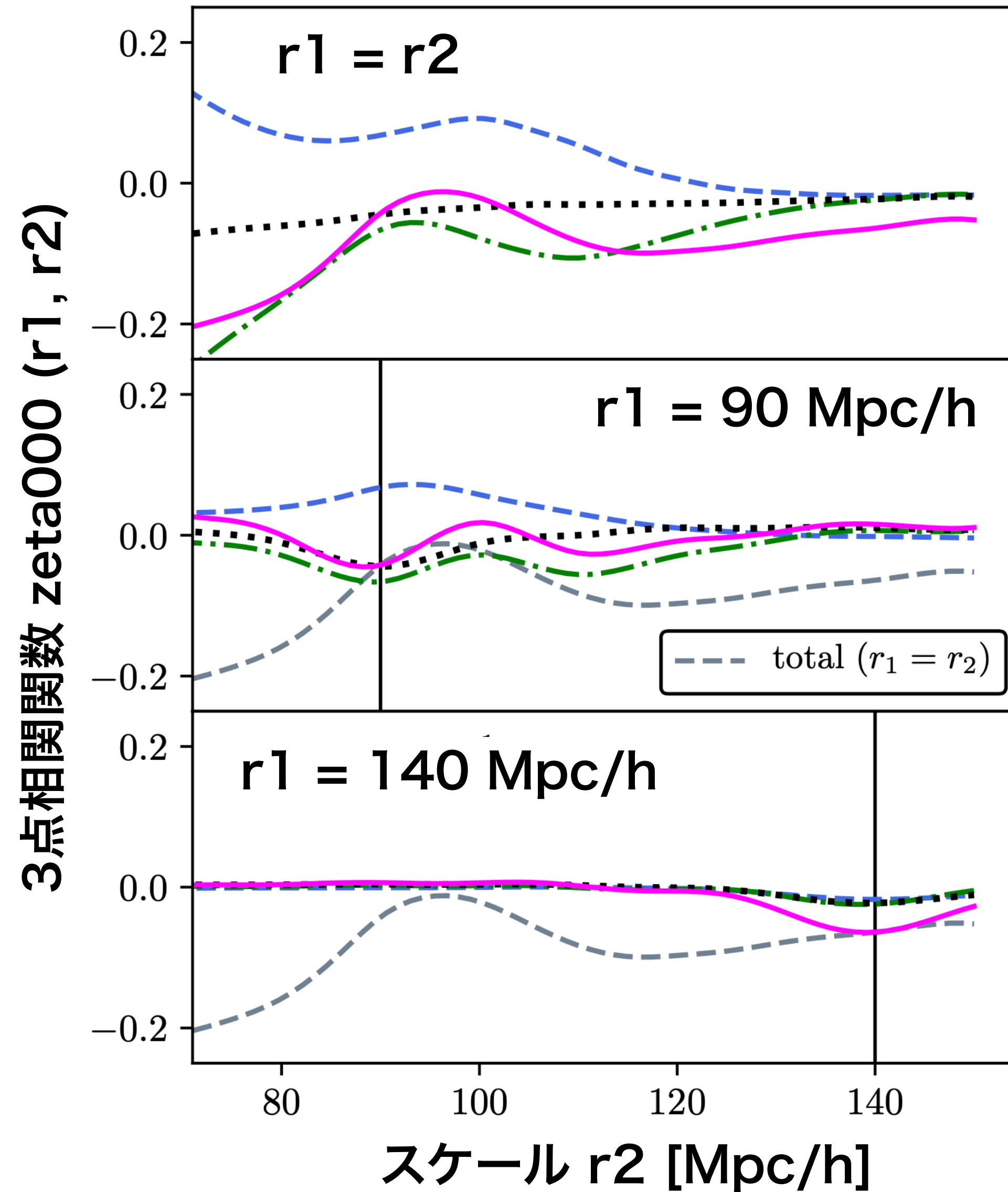


Growth
Shift
Tidal
Total

NS+2021

3点相関関数における非線形効果

BAOがある場合

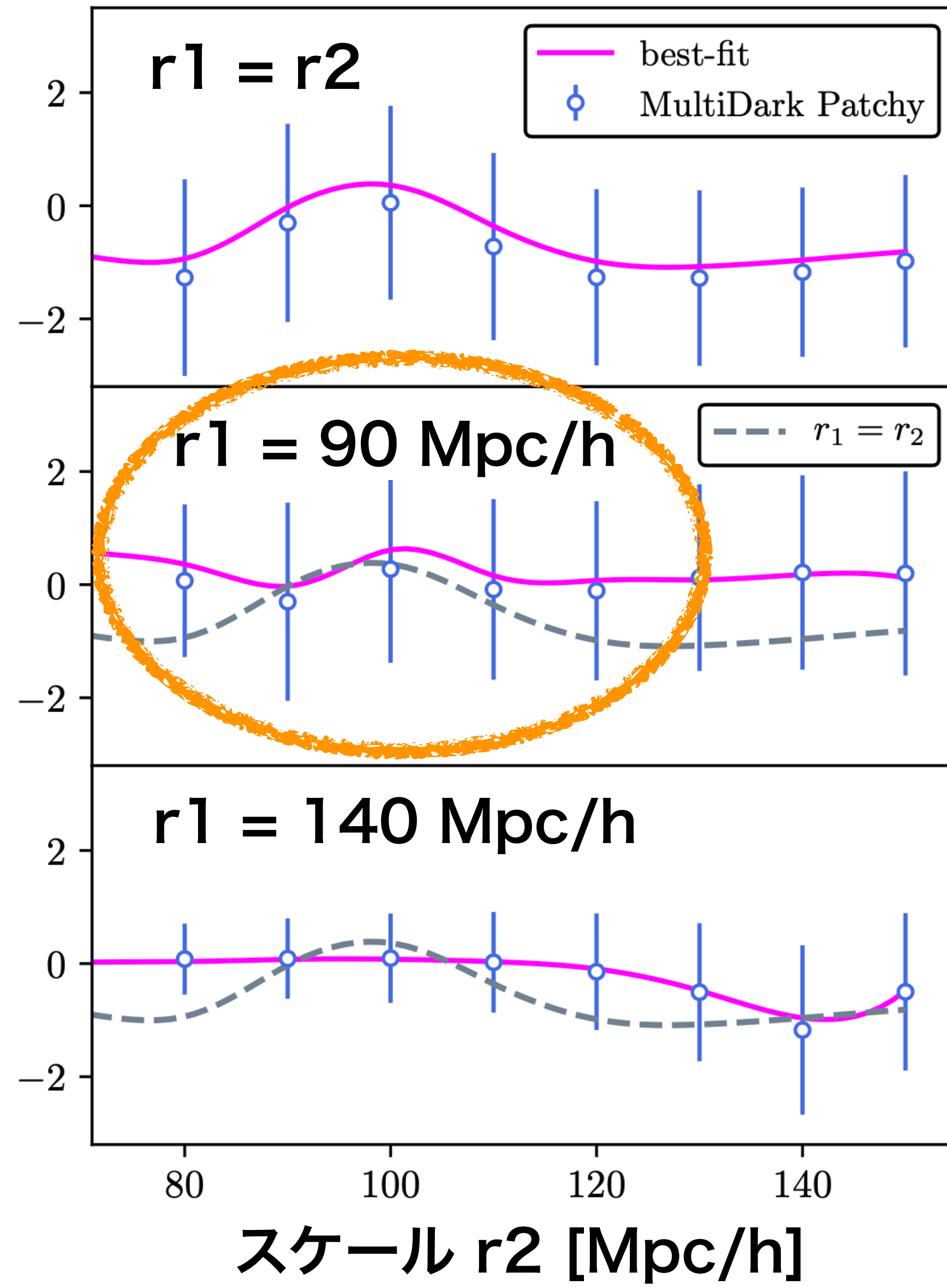


Growth
Shift
Tidal
Total

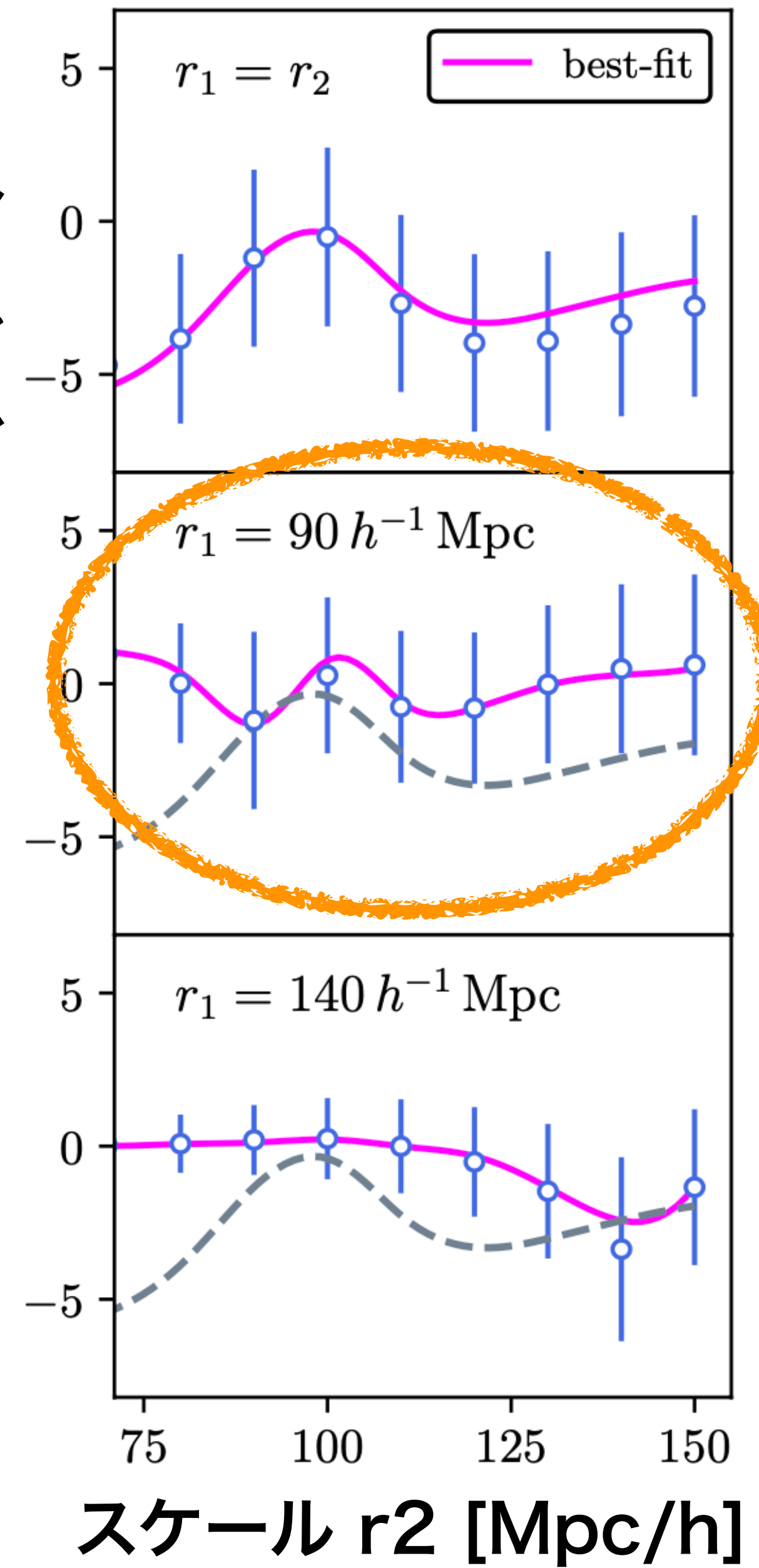
NS+2021

シミュレーション結果との比較

3点相関関数 $\zeta_{000}(r_1, r_2)$



3点相関関数 $\zeta_{110}(r_1, r_2)$



シミュレーション
理論計算

非等方銀河3点相関関数を用いた**DHOST**理論の検証

2020: DHOST理論によるLSS consistency relationの破れ
(Crisostomi+2020; Lewandowski+2020)

2018: GLPV 理論によるバイスペクトル計算
(Hirano+2018)

2016: DHOST 理論の発見
(Langlois & Noui 2016; Crisostomi+2016;
Ben Achour+2016)

2015: GLPV (DHOSTの一部) 理論の発見
(Gleyzes+2015)

2014: Horndeski 理論によるマターバイスペクトルの計算
(Takushima+2014)

2011: Horndeski 理論の再発見
(Deffayet+2011; Kobayashi+2011)

1974: Horndeski 理論の発見
(Horndeski 1974)

1961: Brans-Dicke 理論

2021 : quadrupole 3点相関関数の解析手法の確立
(NS+2021)

2019 : quadrupole バイスペクトルの初検出
(NS+2019)

2018 : バイスペクトルによるBAOシグナルの検出
(Pearson & Samushia 2018)

2017: 3点相関関数によるBAOシグナルの検出
(Slepian+2017)

2017 : monopole+quadrupole パワースペクトルとmonopole バイスペクトルとのfull shape ジョイント解析
(Gil-Marín+2017)

2004 : SDSS銀河カタログによる3点相関関数の測定
(Kayo+2004)

2001 : IRAS銀河カタログによるバイスペクトルの測定
(Scoccimarro+2001)

1991 : 3次元銀河カタログによる(初の?)バイスペクトルの測定
(Baumgart & Fry 1991)

1983 : 3次元銀河カタログによる(初の?)3点相関関数の測定
(Bean+1983)

1975 : 2次元銀河カタログによる初の3点相関関数の測定
(Peebles & Groth 1975)

非等方銀河3点相関関数を用いた**DHOST**理論の検証

問題点 1) 非線形バイアスパラメータ

$$\delta_2(\boldsymbol{x}) = \underbrace{\left(\kappa - \frac{4}{21}\lambda + \frac{1}{2}\mathbf{b}_2 \right)}_{\text{非線形バイアス}} [\delta(\boldsymbol{x})]^2 - \boxed{\kappa} \Psi \cdot \nabla \delta(\boldsymbol{x}) + \underbrace{\left(\frac{2}{7}\lambda + \mathbf{b}_{s2} \right)}_{\text{非線形バイアス}} \left[\left(\frac{\partial_i \partial_j}{\partial^2} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \delta(\boldsymbol{x}) \right]^2$$

非等方銀河3点相関関数を用いた**DHOST**理論の検証

問題点 1) 非線形バイアスパラメータ

$$\delta_2(\mathbf{x}) = \underbrace{\left(\kappa - \frac{4}{21}\lambda + \frac{1}{2}\mathbf{b}_2 \right)}_{\text{非線形バイアス}} [\delta(\mathbf{x})]^2 - \underbrace{\boxed{\kappa}}_{\text{Shift}} \Psi \cdot \nabla \delta(\mathbf{x}) + \underbrace{\left(\frac{2}{7}\lambda + \mathbf{b}_{s2} \right)}_{\text{非線形バイアス}} \left[\left(\frac{\partial_i \partial_j}{\partial^2} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \delta(\mathbf{x}) \right]^2$$

答え 1) 非等方3点相関関数から2次の速度場を制限すればいい

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_2(\mathbf{x}) / (aHf) = \left(\kappa_\theta - \frac{8}{21}\lambda_\theta \right) [\delta(\mathbf{x})]^2 - \underbrace{\boxed{\kappa_\theta}}_{\text{Shift}} \Psi \cdot \nabla \delta(\mathbf{x}) + \underbrace{\frac{4}{7}\boxed{\lambda_\theta}}_{\text{Tidal}} \left[\left(\frac{\partial_i \partial_j}{\partial^2} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \delta(\mathbf{x}) \right]^2$$

非等方銀河3点相関関数を用いた**DHOST理論**の検証

問題点 2) σ_8 との縮退

$$\begin{array}{ll} f & \rightarrow f\sigma_8 \\ \kappa & \rightarrow \kappa\sigma_8 \end{array} \qquad \begin{array}{ll} \kappa_\theta & \rightarrow \kappa_\theta\sigma_8 \\ \lambda_\theta & \rightarrow \lambda_\theta\sigma_8 \end{array}$$

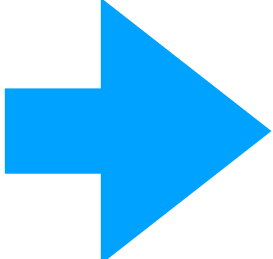
非等方銀河3点相関関数を用いた**DHOST理論**の検証

問題点 2) **sigma8**との縮退

$$\begin{array}{ll} f & \rightarrow f\sigma_8 & \kappa_\theta & \rightarrow \kappa_\theta\sigma_8 \\ \kappa & \rightarrow \kappa\sigma_8 & \lambda_\theta & \rightarrow \lambda_\theta\sigma_8 \end{array}$$

答え 2) **sigma8**に依存しない新たなパラメータを定義

$$E_f = \frac{f\sigma_8}{\kappa\sigma_8}, \quad E_s = \frac{\kappa_\theta\sigma_8}{\kappa\sigma_8}, \quad E_t = \frac{\lambda_\theta\sigma_8}{\kappa\sigma_8}$$

Horndeski  $E_f = f, \quad E_s = 1, \quad E_t = \lambda_\theta$

非等方銀河3点相関関数を用いた**DHOST理論**の検証

問題点 3) パラメータの時間依存性を解きにくい

$$\ddot{\kappa}_\delta + [4f + (2 + \varsigma)]H\dot{\kappa}_\delta + H^2 \left(2f^2 + \frac{3}{2}\Omega_m\Xi \right) \kappa_\delta = H^2 S_\alpha$$
$$\ddot{\lambda}_\delta + [4f + (2 + \varsigma)]H\dot{\lambda}_\delta + H^2 \left(2f^2 + \frac{3}{2}\Omega_m\Xi \right) \lambda_\delta = \frac{7}{2}H^2 S_\gamma.$$

Hirano et al. 2018

非等方銀河3点相関関数を用いた**DHOST**理論の検証

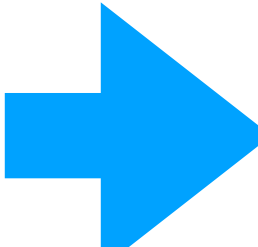
問題点 3) パラメータの時間依存性が解きにくい

$$\ddot{\kappa}_\delta + [4f + (2 + \varsigma)]H\dot{\kappa}_\delta + H^2 \left(2f^2 + \frac{3}{2}\Omega_m \Xi \right) \kappa_\delta = H^2 S_\alpha$$
$$\ddot{\lambda}_\delta + [4f + (2 + \varsigma)]H\dot{\lambda}_\delta + H^2 \left(2f^2 + \frac{3}{2}\Omega_m \Xi \right) \lambda_\delta = \frac{7}{2}H^2 S_\gamma.$$

Hirano et al. 2018

答え 3) 時間依存性を**Omega_m**を用いて近似

$$E_f \sim \Omega_m^{\xi_f}, \quad E_s \sim \Omega_m^{\xi_s}, \quad E_t \sim \Omega_m^{\xi_t}$$

LCDM  $\xi_f = \gamma = 6/11, \quad \xi_s = 0, \quad \xi_t = 15/1144$

Yamauchi & NS 2021

非等方銀河3点相関関数を用いた**DHOST理論**の検証

問題点 4) 非線形パワースペクトルは使えないのか？

Song et al. 2015のように、パワースペクトルの非線形性から、
一貫して非線形重力効果を検証できそうな気がする。

非等方銀河3点相関関数を用いた**DHOST**理論の検証

問題点 4) 非線形パワースペクトルは使えないのか？

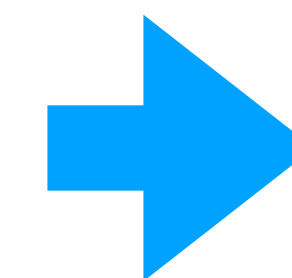
Song et al. 2015のように、パワースペクトルの非線形性から、
一貫して非線形重力効果を検証できそうな気がする。

答え 4) 現状はできない。1loopで発散するから。

ループの効かない大スケール非等方(2+3)点相関関数を使うべき

$$\frac{P_{\delta\delta}^{(13)}(k)}{P_L(k)} \rightarrow -\frac{2(d_{\alpha\alpha\Theta} + d_\zeta)}{3(2\pi)^2} \int_{p \gtrsim k} dp p^2 P_L(p).$$

Hirano et al. 2020



EFTofLSS in MG

非等方銀河3点相関関数を用いたDHOST理論の検証

具体的なパラメータ制限は現在研究中！

Hitomi プロジェクト

naonori / hitomiPublic

Unwatch1Star0Fork0

<> CodeIssuesPull requestsActionsProjectsWikiSecurityInsights...

beta

Go to fileAdd fileCode

About

naonori Add files via upload17 days ago9

env	Add files via upload	29 days ago
src	Add files via upload	17 days ago
struct	Add files via upload	17 days ago
LICENSE	Initial commit	29 days ago
README.md	Add files via upload	17 days ago
install.sh	Add files via upload	29 days ago

README.md

Hitomi

Main developer:	Naonori Sugiyama <nao.s.sugiyama@gmail.com>
Author:	Naonori Sugiyama <nao.s.sugiyama@gmail.com>
Licence:	MIT

The purpose of the Hitomi project is to provide a comprehensive set of codes for cosmological analysis of anisotropic galaxy distributions using two- and three-point statistics: two-point correlation function (2PCF), power spectrum, three-point correlation function (3PCF), and bispectrum.

Specifically, this set of codes is divided into seven phases:

Public repository for the Hitomi Code

ReadmeMIT License

Releases

No releases published
Create a new release

Packages

No packages published
Publish your first package

Languages

Python 48.3%

Cython 2.2%

Makefile 0.1%

C++ 47.9%

Shell 1.5%

Implemented:
既に実装済みのもの

Possible but not yet:
論文では計算したが、
まだ実装していないもの

Not yet:
これから実装したいもの

Hitomi プロジェクト

- beta版ですが、実は既に公開しているので、誰でも使ってください。
(<https://github.com/naonori/hitomi.git>)
- 非等方3点統計の研究をここまで包括的行なっているのはHitomiプロジェクトだけ！
Hitomiを使えばすぐに世界最先端の銀河宇宙論研究を行うことが可能です！
- “not yet” 項目を埋めてくれる研究を(一緒に)してくれたら嬉しいです。
- 新たなシミュレーションデータから、パワースペクトル以上の統計的性質を知りたい人
(DarkQuest, Uchuu, ELG mock, PNGs, tidal force, etc.)
- 銀河宇宙論解析の一連の流れを一度やってみたい人、学生などに学ばせたい人。

Hitomi プロジェクト

データ解析について

- 3点関数から修正重力理論を解析したい人.
- 3点関数特有の観測的不定性を調べたい人.
- 3点関数からBAO/RSD 解析を行いたい人.
- 3点関数から原始非ガウス性の解析をしたい人

Hitomi プロジェクト

データ解析について

- 3点関数から修正重力理論を解析したい人.
- 3点関数特有の観測的不定性を調べたい人.
- 3点関数からBAO/RSD 解析を行いたい人.
- 3点関数から原始非ガウス性の解析をしたい人.



Reconstruction

Hitomi プロジェクト

理論モデルについて

- 3点関数の小スケールまで適用可能なモデルを自分で作って、データ解析まで適用したい人.
- 共分散行列のモデルを通じて4点, 5点, 6点関数まで挑みたい人
-> 3, 4, 5次のバイアスなど.

Hitomi プロジェクト

その他の解析

- 統計的非等方性の検証 [Sugiyama+2018a]
- 運動学的スニアエフ-ゼルドビッチ効果(kSZ) [Sugiyama+2018b]
- + one (galaxy-galaxy lensing?)

まとめ

[1] 非等方銀河3点相関関数を用いたDHOST理論の検証

[2] Hitomi プロジェクト