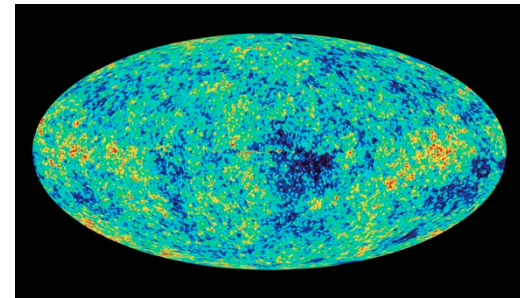
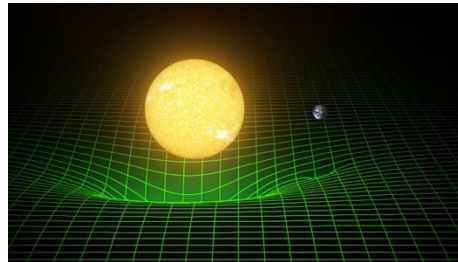
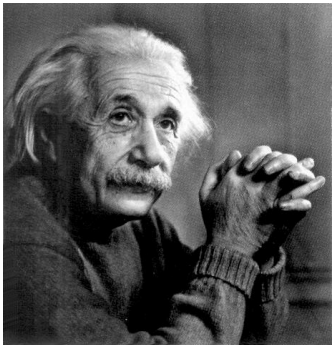


2018年7月22日 第48回天文天体物理若手夏の学校

宇宙を支配する重力法則は何か？



山口大学 創成科学研究科 理論宇宙物理学研究室

齊藤 遼

今日は

修正重力理論

について、お話しします。

今日は

修正重力理論

について、お話しします。

今日は

一般相対論

修正重力理論

について、お話しします。

今日の話の流れ

レビュー論文

Koyama, arXiv:1504.04623

Joyce+, arXiv:1407.0059

Heisenberg, arXiv:1807.01725

1. なぜ一般相対論の修正を試みるか？

2. 加速膨張の統一理論 – 高階微分スカラーテンソル理論

2.1 統一理論の理論的整合性

2.2 統一理論の観測的検証

重力波と第5の力

今日の話の流れ

レビュー論文

Koyama, arXiv:1504.04623

Joyce+, arXiv:1407.0059

Heisenberg, arXiv:1807.01725

1. なぜ一般相対論の修正を試みるか？

2. 加速膨張の統一理論 – 高階微分スカラーテンソル理論

2.1 統一理論の理論的整合性

2.2 統一理論の観測的検証

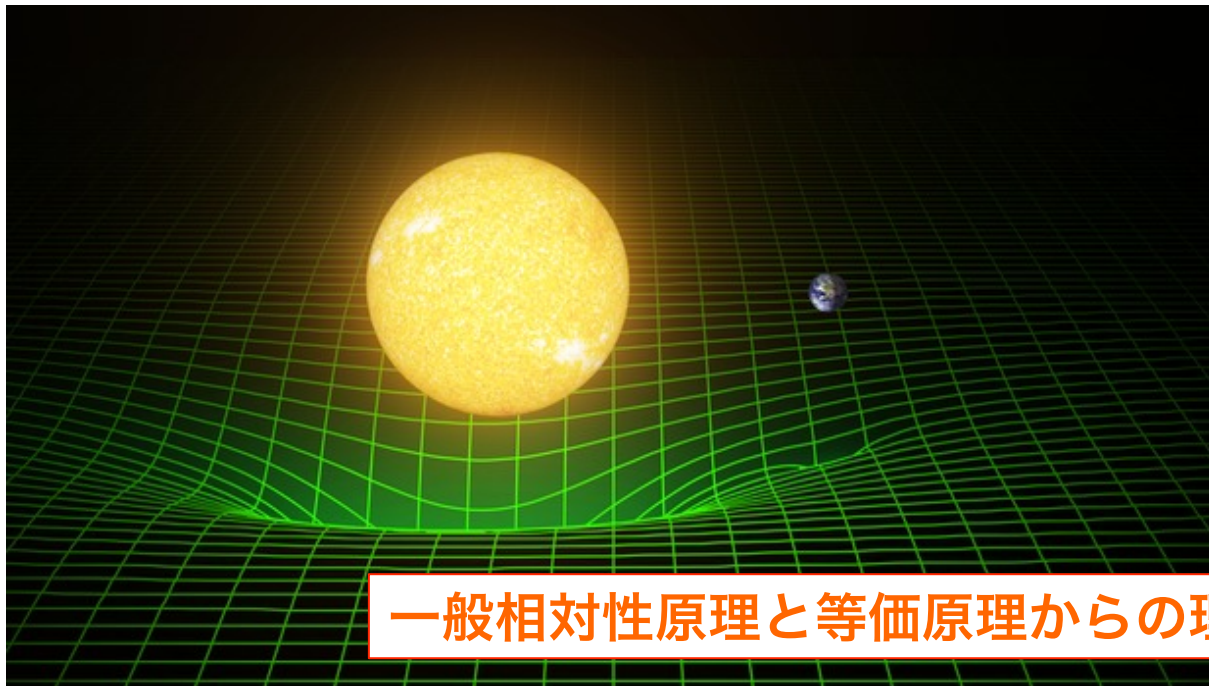
重力波と第5の力

一般相対論

Einstein (1916)

重力とは時空（時間＋空間）の歪み（曲がり）であり、モノの質量によって、時空の歪みが生み出される。

重いモノの周りでは、時間が遅れたり、モノが縮んだりする。



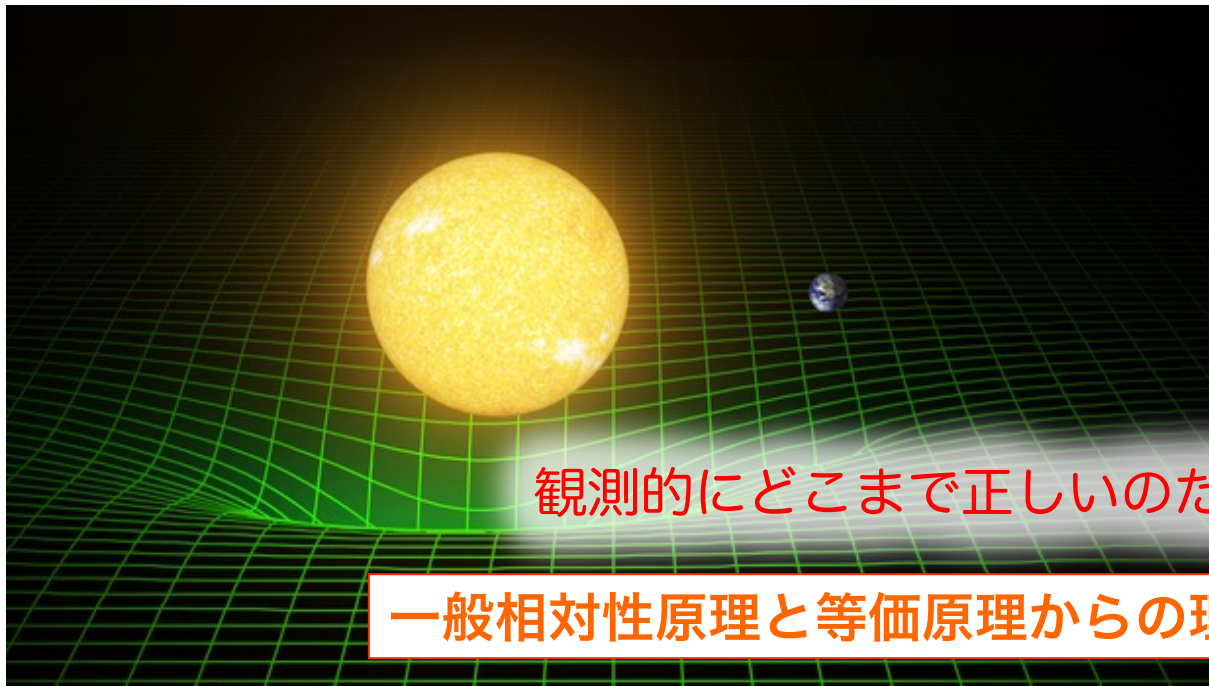
一般相対性原理と等価原理からの理論的帰結！

一般相対論

Einstein (1916)

重力とは時空（時間＋空間）の歪み（曲がり）であり、モノの質量によって、時空の歪みが生み出される。

重いモノの周りでは、時間が遅れたり、モノが縮んだりする。

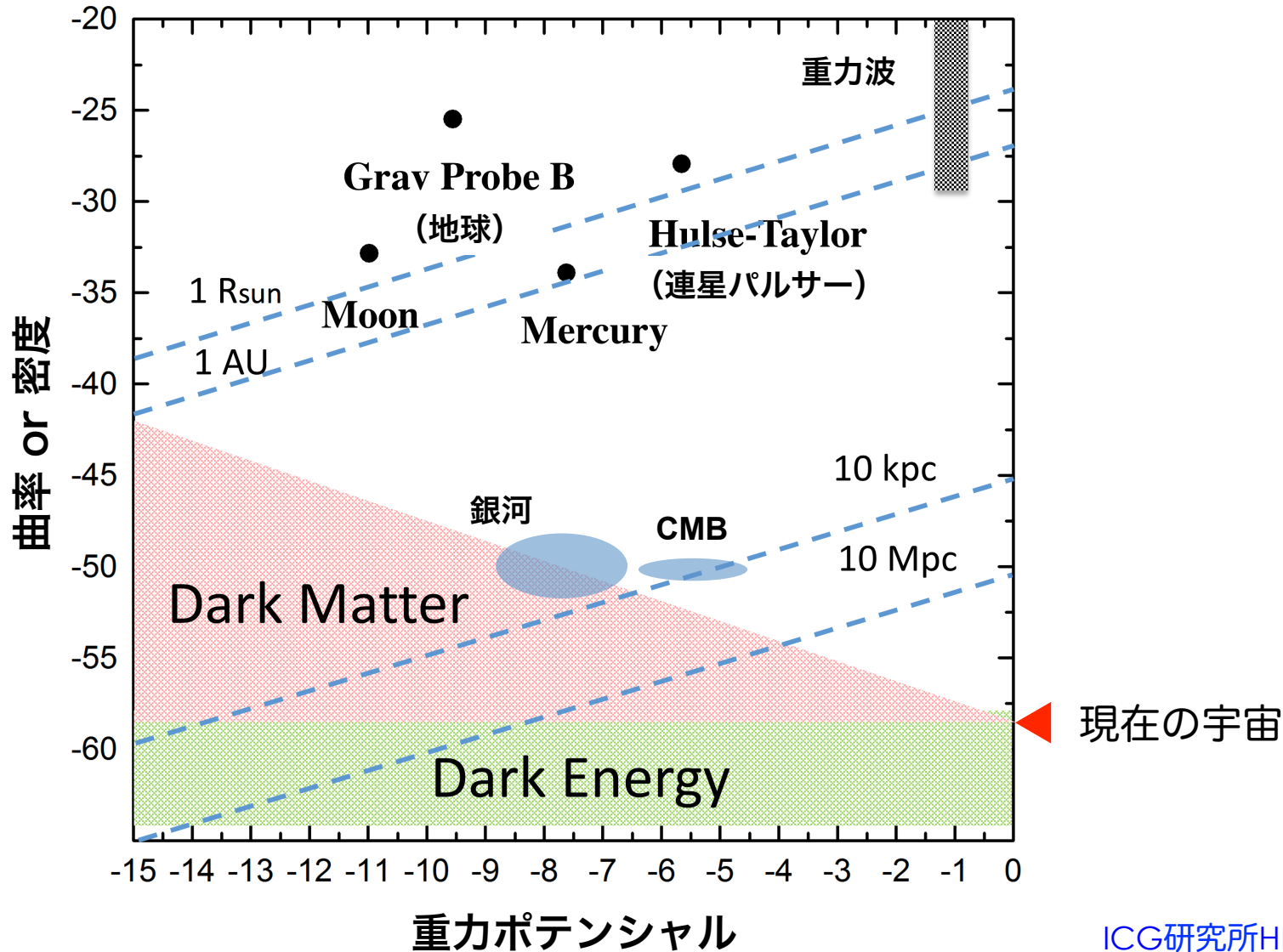


観測的にどこまで正しいのだろうか？

一般相対性原理と等価原理からの理論的帰結！

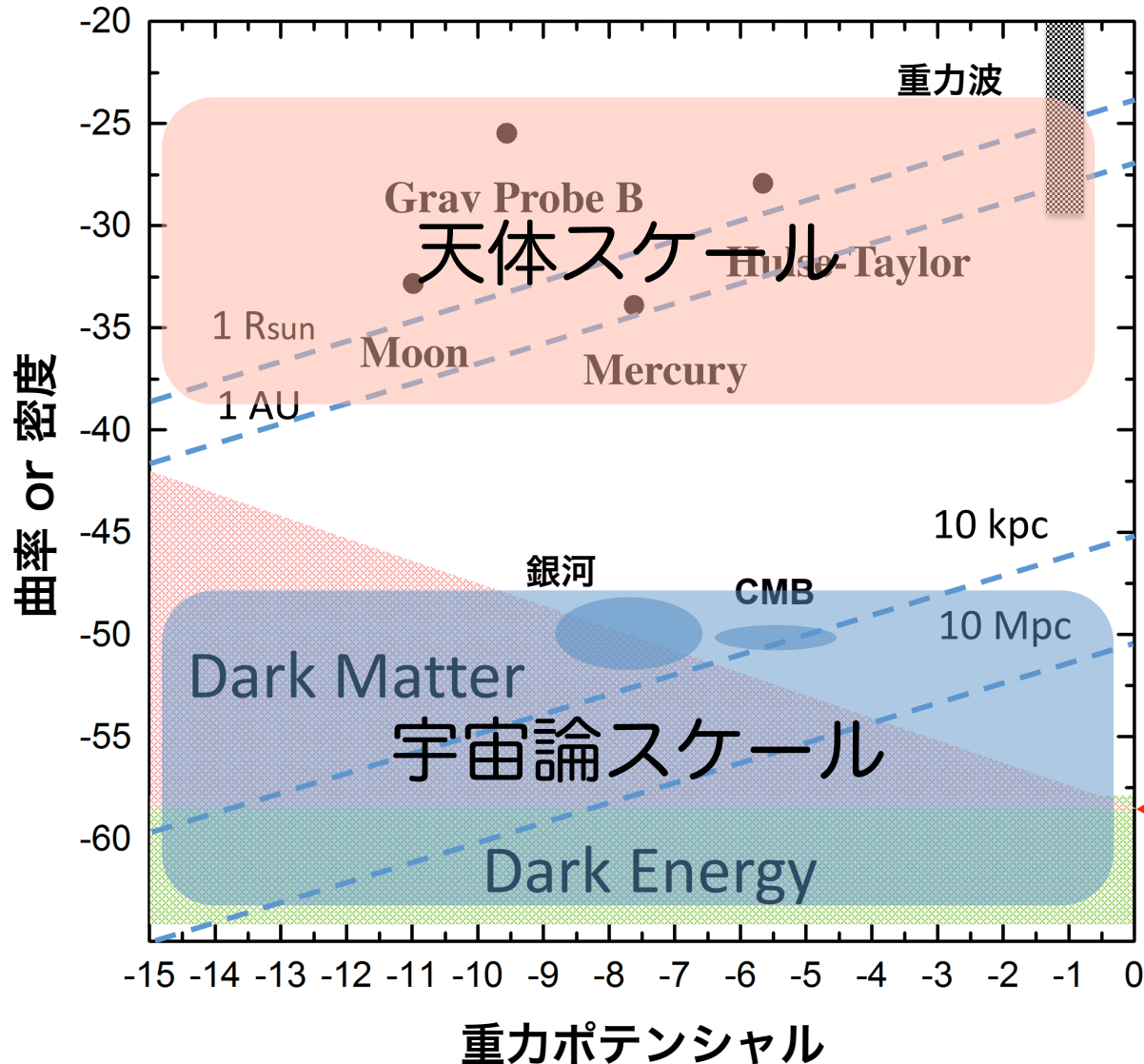
いろいろな環境における

一般相対論の検証



いろいろな環境における

一般相対論の検証



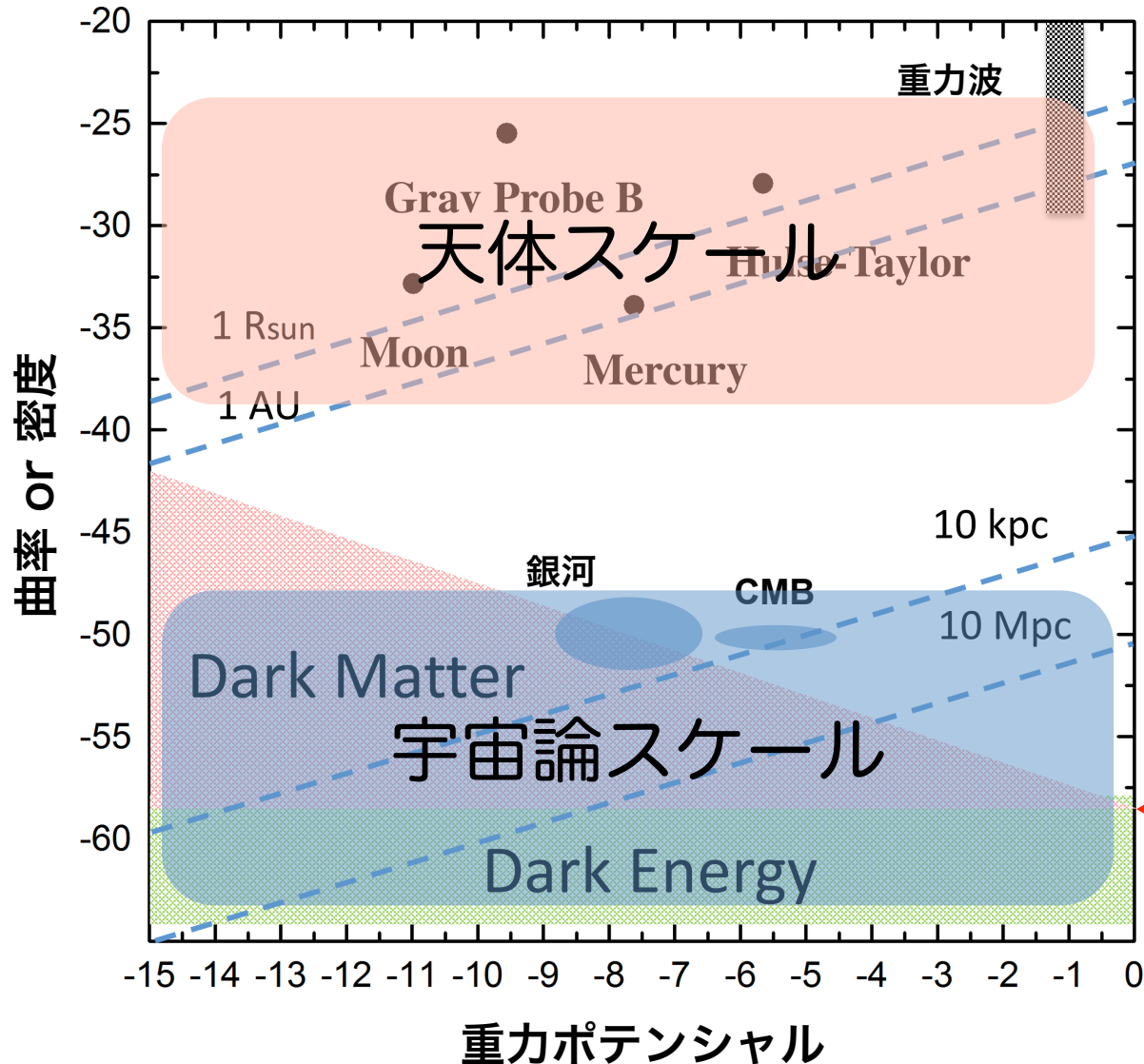
一般相対論でOK

OK...? 不確定要素多し

現在の宇宙

いろいろな環境における

一般相対論の検証



一般相対論でOK



非常に大きな外挿

OK...? 不確定要素多し

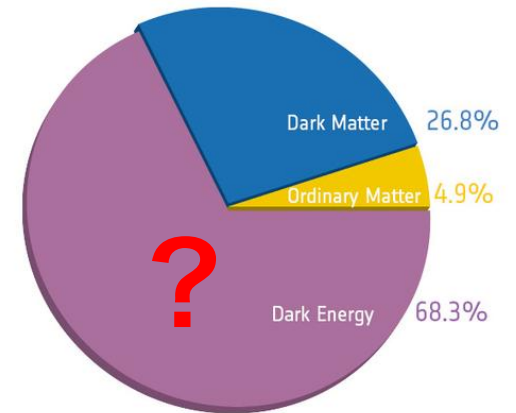
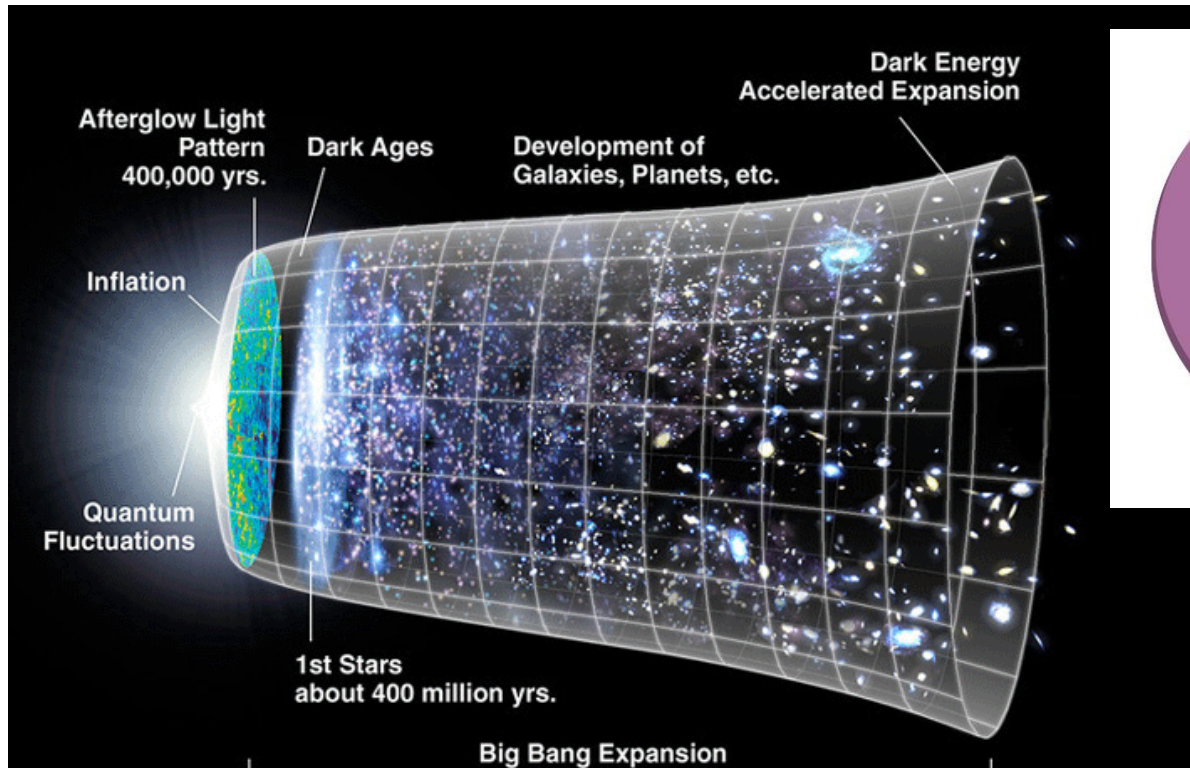
現在の宇宙

何かしらの

修正の必要性：宇宙の加速膨張

現在の宇宙は、加速膨張している。その説明には、何かしらの未検証の物理を導入する必要がある。

我々の基礎物理への理解が未だ不十分であることのサイン



宇宙の組成比

たくさんの候補



未知の負の圧力を持つ物質が存在？

暗黒エネルギー

現在の標準

宇宙項



宇宙論的なスケールでは、一般相対論が破綻？

修正重力理論

いずれも加速膨張を説明可能 & “自然な”導入法は知られておらず



理論・観測の両面で多角的な研究が必要

修正重力理論研究の目的

1. 様々な加速膨張モデルをどう区別するか？

一般相対論を修正すると何が起こるか？

着眼すべき観測量は何か？ できれば、新しい現象の発見と検証法の提案

例) ニュートン重力 → 一般相対論：宇宙膨張、重力波、時間の遅れ、、、

2. 整合性のチェック

一般相対論を修正すると何かマズいことはないか？

例えば

宇宙膨張解や天体解の存在・安定性

高密度環境（太陽系など）でのテストとの整合性

高エネルギー領域への拡張性

今日の話の流れ

レビュー論文

Koyama, arXiv:1504.04623

Joyce+, arXiv:1407.0059

Heisenberg, arXiv:1807.01725

1. なぜ一般相対論の修正を試みるか？

2. 加速膨張の統一理論 – 高階微分スカラーテンソル理論

2.1 統一理論の理論的整合性

2.2 統一理論の観測的検証

重力波と第5の力

一般相対論をどう修正するか？

Lovelockの定理（Einstein方程式の唯一性）

Einstein方程式は、計量の高々2回微分までで書かれた、4次元の局所的・共変的な作用から導かれる唯一の運動方程式である。

以上の何かしらの仮定を破る必要がある

by **Tessa Baker**

Einstein-Dilaton-Gauss-Bonnet

Cascading gravity

Lorentz violation
Hořava-Lifschitz

Conformal gravity

Strings & Branes

$$f\left(\frac{R}{\square}\right) \quad R_{\mu\nu} \square^{-1} R^{\mu\nu}$$

$$f(G)$$

Randall-Sundrum I & II

DGP

Some degravitation scenario

計量の高階微分を導入

2T gravity

高次元理論

非局所理論

$$f(R)$$

General $R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}$, $\square R$, etc.

Kaluza-Klein

修正重力理論

Vector
Einstein-Aether
Lorentz violation

Generalisations of SEH

余分な自由度を導入

Massive gravity

Bigravity

Gauss-Bonnet

TeV S

Lovelock gravity

Scalar-tensor & Brans-Dicke

Chern-Simons

Ghost condensates

Cuscuton

Galileons

the Fab Four

Chaplygin gases

KGB

Coupled Quintessence

Horndeski theories

Scalar

$f(T)$
Einstein-Cartan-Sciama-Kibble

Torsion theories

EBI

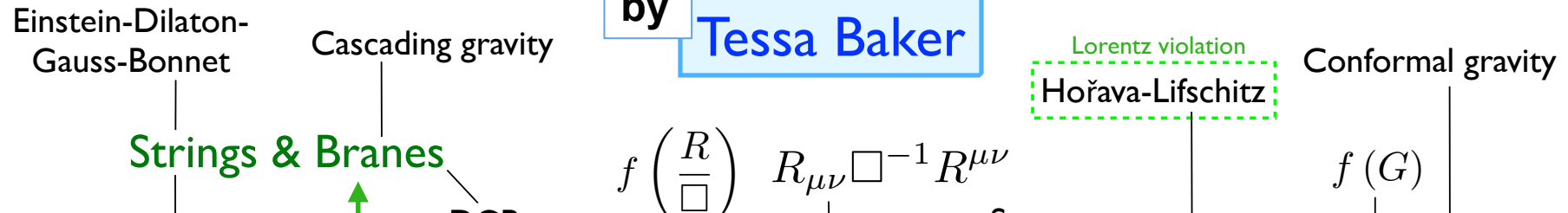
Bimetric MOND

Non-action Approaches

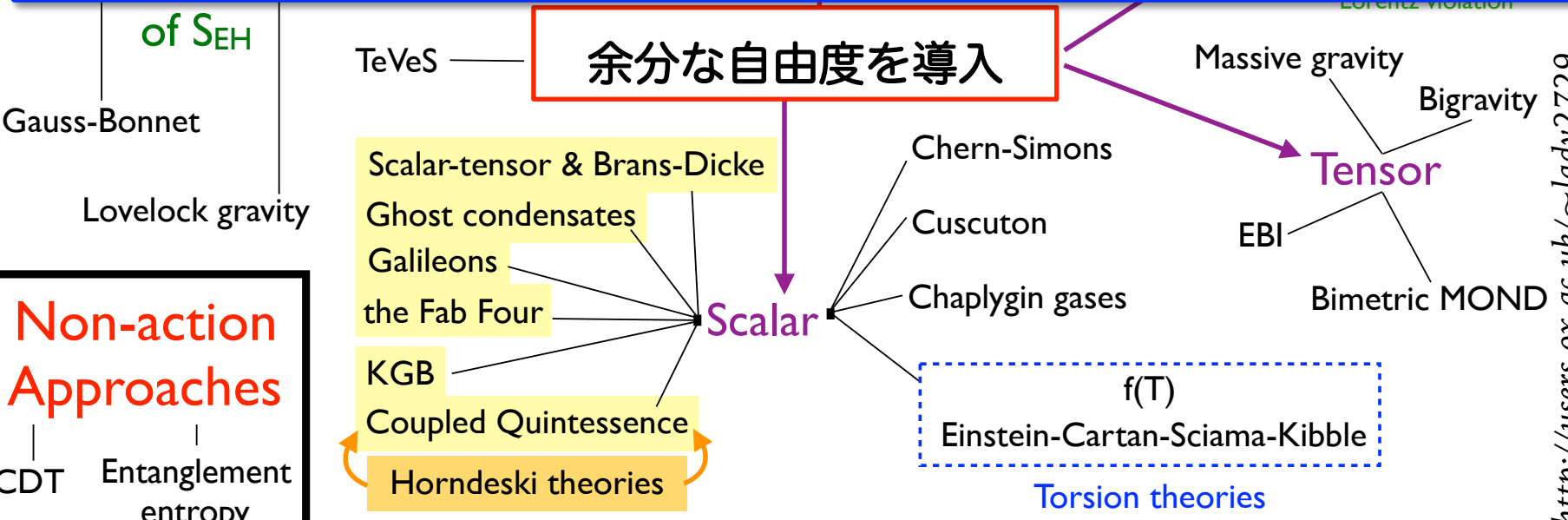
CDT

Entanglement entropy

by **Tessa Baker**



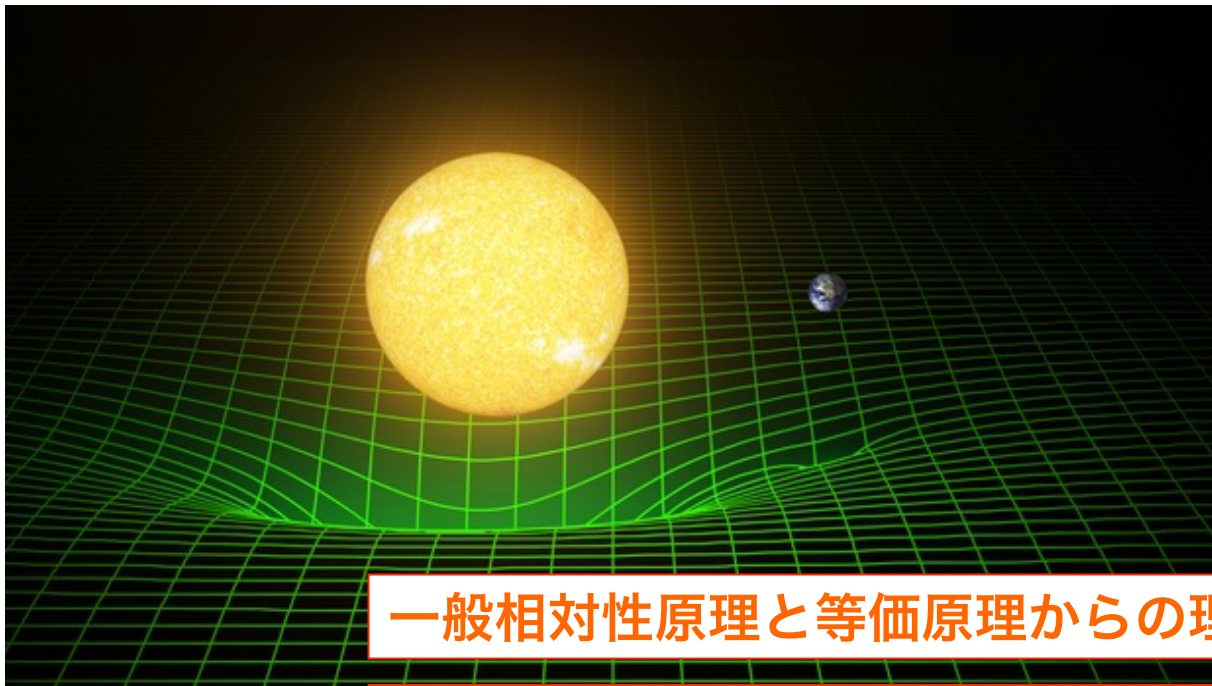
もっと系統的に加速膨張モデル (のエッセンス) を解析できないか?



Non-action Approaches
CDT
Entanglement entropy

加速膨張の統一理論のアプローチ

一般相対論の原理のうち、宇宙論的スケールで正しくない可能性のあるものは何か、、、？

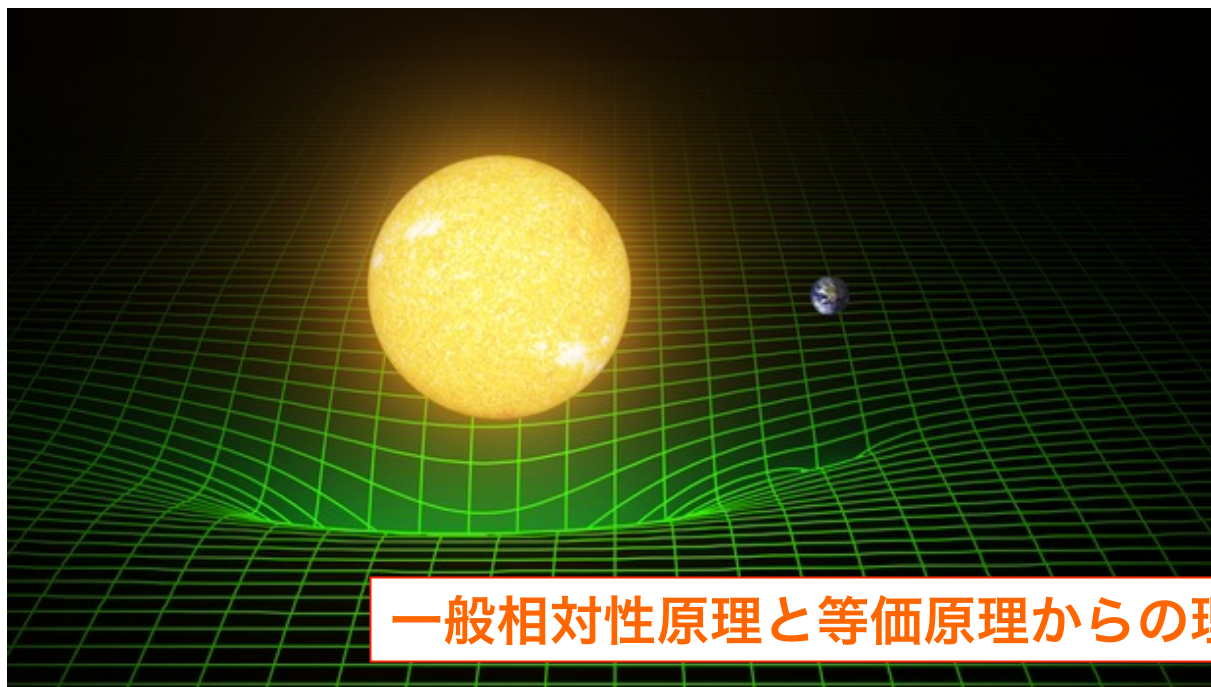


一般相対性原理と等価原理からの理論的帰結！

特別な観測者（座標系）は存在しない

加速膨張の統一理論のアプローチ

一般相対論の原理のうち、宇宙論的スケールで正しくない可能性のあるものは何か、、、？

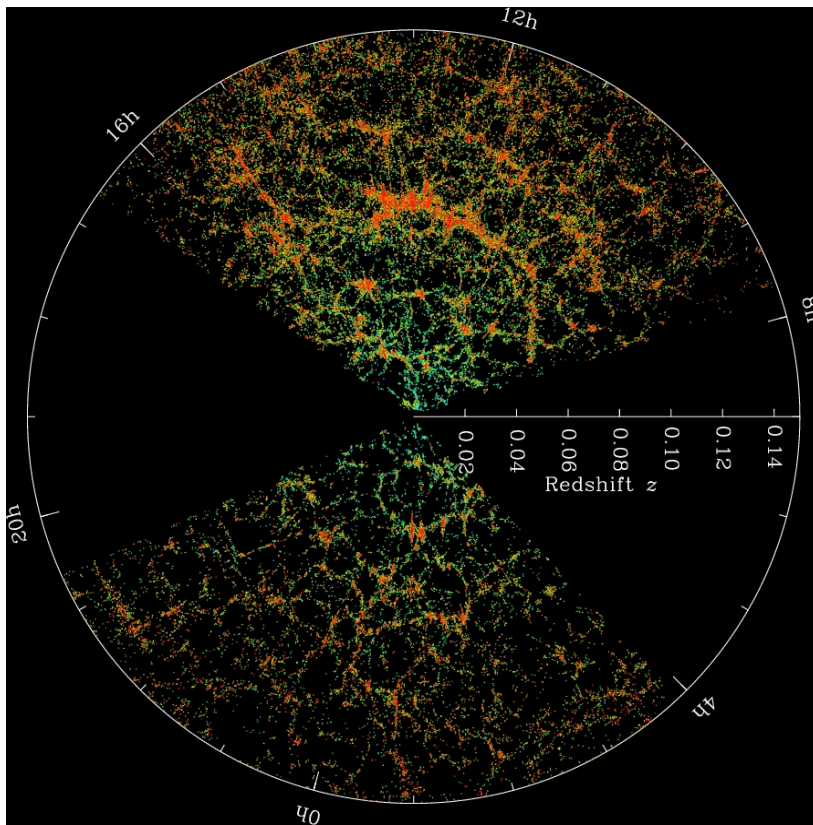


一般相対性原理と等価原理からの理論的帰結！

特別な観測者（座標系）は存在しない

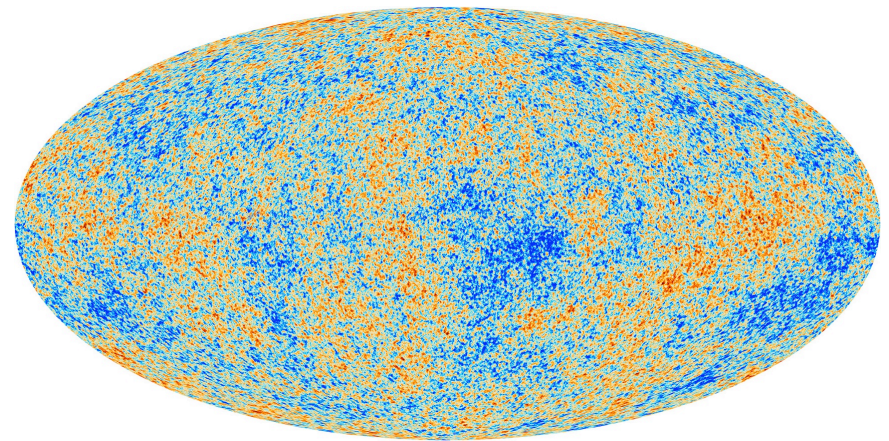
特別な観測者

宇宙が一様等方に見える観測者が存在する (CMB静止系)



銀河の地図 [SDSS project]

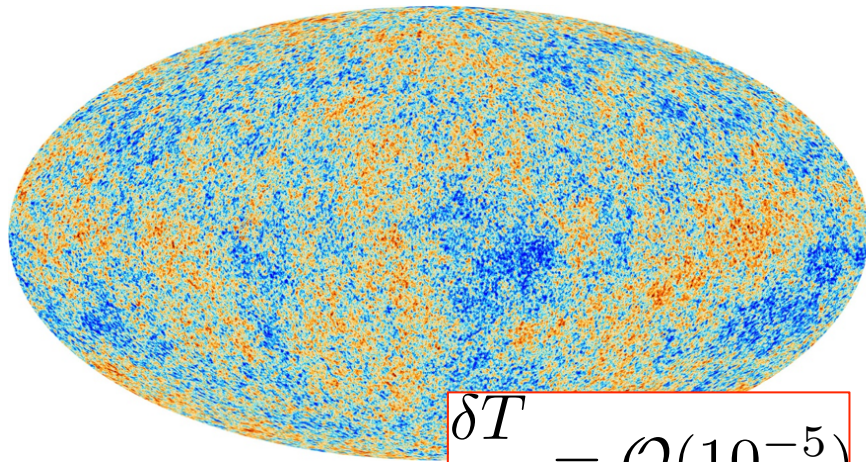
$$\frac{\delta T}{T} = \mathcal{O}(10^{-5})$$



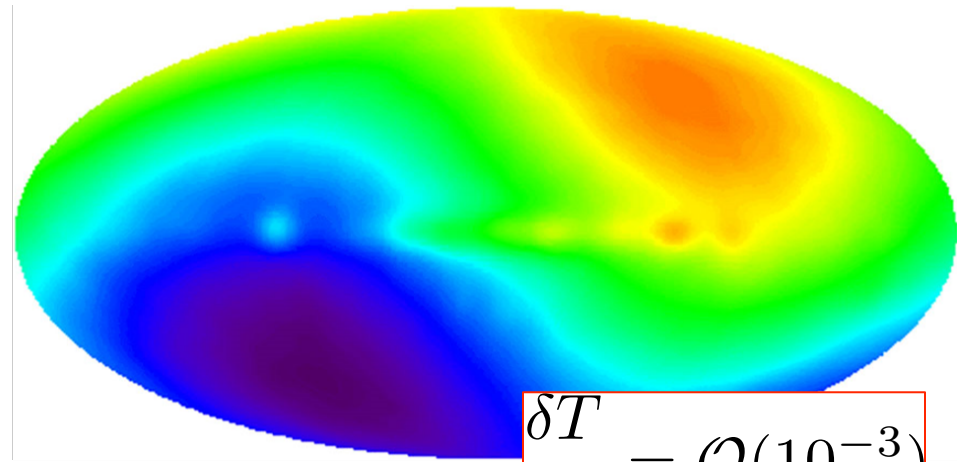
宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)
[Planck衛星]

特別な観測者

地球はCMB静止系に対して370km/sで運動している。



$$\frac{\delta T}{T} = \mathcal{O}(10^{-5})$$



$$\frac{\delta T}{T} = \mathcal{O}(10^{-3})$$

実際に観測される宇宙マイクロ波背景放射 (右)

[COBE衛星]

加速膨張の統一理論のアイデア



特別な観測者（座標系）は存在しない



1. 特別な観測者（座標系）がある
2. ただし、理論が幾何学量（計量）で書けることは保つ

この一般化の下で加速膨張を起こす整合的な理論はあるか？

膨張宇宙の幾何学

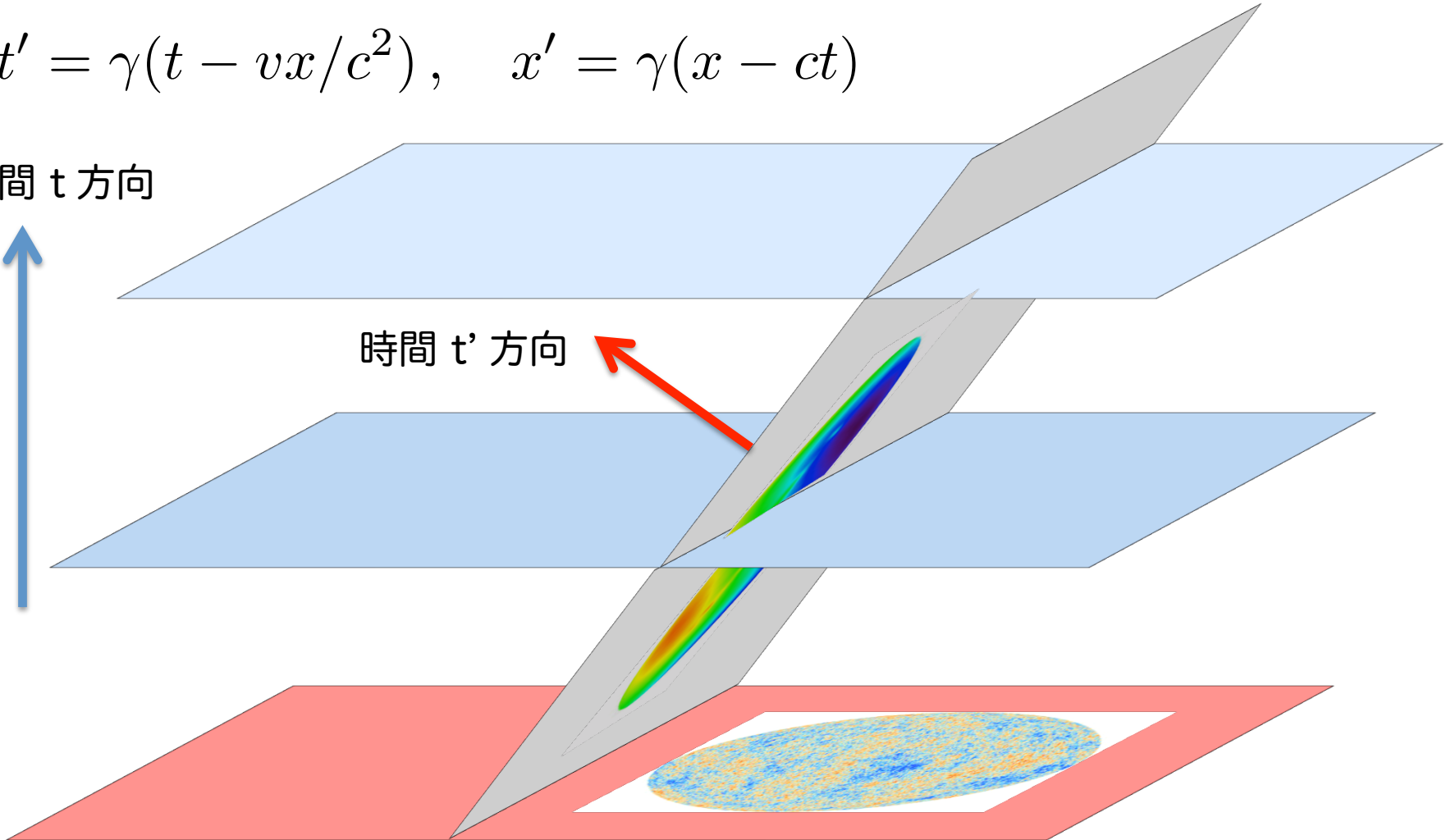
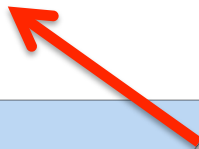
t' 一定：非一様等方

$$t' = \gamma(t - vx/c^2), \quad x' = \gamma(x - ct)$$

時間 t 方向



時間 t' 方向



t 一定面：一様等方

膨張宇宙の幾何学

内的曲率 ${}^{(3)}R_{\mu\nu\rho\sigma}$

加速/外的曲率 $a_\mu, K_{\mu\nu} \sim \nabla_\mu n_\nu$

時間 t 方向

n^μ ↑

ラプス関数 N

3+1分解

t 一定面：一様等方



加速膨張 (DE) の統一理論

1. 特別な“時間方向”がある (“空間”座標変換不変性は保つ)
2. 理論は幾何学量で書ける

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} L[\overset{\text{ラプス}}{N}, \overset{\text{加速}}{a}_\mu, \overset{\text{外部曲率}}{K}_{\mu\nu}, \overset{\text{内部曲率}}{({}^3R)}_{\mu\nu\rho\sigma}; t]$$

A unifying action of dark energy (DE)

[Gleyzes+ 13, 15]

多くの加速膨張モデルがこの理論で記述できる

*専門家への注

f(R)も含む。しかし、Massive gravityは条件1を満たさないため、入っていない。

加速膨張 (DE) の有効理論

[Gleyzes+ 13; Gubitosi + 13]

膨張時空まわりで作用を展開

$$S_{\text{EFT}} = \int d^3x dt a^3 \frac{M^2}{2} \left\{ \delta K_{ij} \delta K^{ij} - (1 + \alpha_L) \delta K^2 + H^2 \alpha_K \delta N^2 + 4H \alpha_B \delta K \delta N + (1 + \alpha_H) R \delta N + 4\beta_1 \delta K \delta \dot{N} + \dots \right\}$$

多くの加速膨張モデルの“宇宙論”を統一的に解析できる

CMB計算コード：EFTCAMB [Hu+ 14; Raveri+ 14]

今日の話の流れ

1. なぜ一般相対論の修正を試みるか？
2. 加速膨張の統一理論 – 高階微分スカラーテンソル理論
 - 2.1 統一理論の理論的整合性
 - 2.2 統一理論の観測的検証

重力波と第5の力

理論的整合性（安定性）

観測・実験と比較する前に、理論は以下の整合性（安定性）の条件を満たす必要がある。

基底状態がある

ハミルトニアンが下に有界

下に有界でないハミルトニアンを持つ系は量子力学的に不安定

宇宙の時計 - 理論の書き換え



時間一定面を定めるスカラー関数が存在する：

Clock場 $\phi(t, \boldsymbol{x}) = \text{一定}$

$$n^\mu \propto \underline{\nabla^\mu \phi}$$



$$N^{-2} \rightarrow \underline{(\nabla \phi)^2}$$

$$a_\mu, K_{\mu\nu} \sim \nabla_\mu n_\nu \rightarrow \underline{\nabla_\mu \nabla_\nu \phi}$$

高階スカラーテンソル理論

DEの統一理論は2階微分を含んだスカラーテンソル理論に等価：

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} L [\phi, \nabla\phi, \nabla^2\phi]$$

Ostrogradskyゴーストの問題

Ostrogradsky (1850)

初期条件

作用が高階微分（場の2階微分以上）を含むと、余分な自由度が現れる。この余分な自由度のハミルトニアンは下に有界でなく不安定性をもたらす。

整合的な高階スカラーテンソル理論

ラグランジアン関数形をうまく選べば、

2階微分を含んでも、余分な自由度を含まないようにできる

Horndeski

EOMが2階微分まで

[Horndeski 74]

GLPV

[Gleyzes+ 14]

DHOST

(Degenerate Higher-Order ST)

自由度が+1のみ

(高階微分に起因する余計な自由度がない)

[Langlois & Noui 15]

加速膨張の統一理論

Horndeski理論

[Horndeski 74] [Creminelli+ 05]
[Deffayet+ 09, Kobayashi+ 11]

最初の非自明な理論

$$L_2 = G_2(\phi, X),$$

$$X \equiv (\nabla\phi)^2$$

$$L_3 = -G_3(\phi, X)\square\phi,$$

$$L_4 = G_4(\phi, X)R + G_{4X} [(\square\phi)^2 - (\nabla_\mu\nabla_\nu\phi)^2],$$

$$L_5 = G_5(\phi, X)G_{\mu\nu}\nabla^\mu\nabla^\nu\phi - \frac{1}{6}G_{5X} [(\square\phi)^3 - 3\square\phi(\nabla_\mu\nabla_\nu\phi)^2 + 2(\nabla_\mu\nabla_\nu\phi)^3].$$

X微分

ラグランジアンを運動方程式が2階微分方程式になるように選ぶ

高階微分によって余分な自由度（初期条件）は生じない

✗ Ostrogradskyゴースト

Horndeski理論

[Horndeski 74] [Creminelli+ 05]
[Deffayet+ 09, Kobayashi+ 11]

最初の非自明な理論

$$L_2 = G_2(\phi, X),$$

$$X \equiv (\nabla\phi)^2$$

$$L_3 = -G_3(\phi, X)\square\phi,$$

$$L_4 = G_4(\phi, X)R + G_{4X} [(\square\phi)^2 - (\nabla_\mu\nabla_\nu\phi)^2],$$

$$L_5 = G_5(\phi, X)G_{\mu\nu}\nabla^\mu\nabla^\nu\phi - \frac{1}{6}G_{5X} [(\square\phi)^3 - 3\square\phi(\nabla_\mu\nabla_\nu\phi)^2 + 2(\nabla_\mu\nabla_\nu\phi)^3].$$

X微分

ラグランジアンを運動方程式が2階微分方程式になるように選ぶ

高階微分によって余分な自由度（初期条件）は生じない

✗ Ostrogradskyゴースト

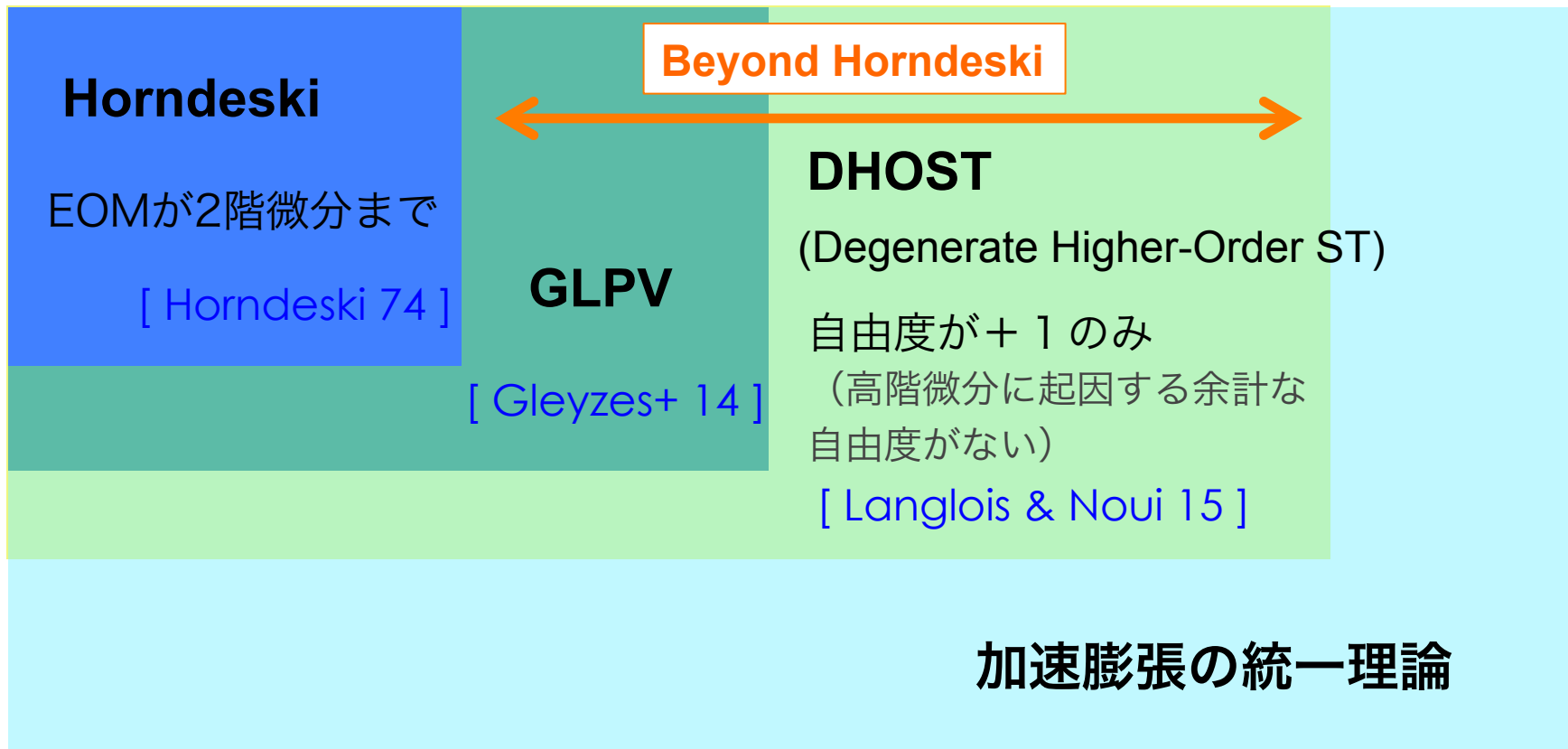
しかし、

実はさらなる一般化が可能 → **Beyond Horndeski**

統合的な高階スカラーテンソル理論

ラグランジアン関数の形をうまく選べば、

2階微分を含んでも、余分な自由度を含まないようにできる



DHOST理論

[Langlois & Noui 15]

縮退した

高階スカラーテンソル理論

DHOST = Degenerate Higher-Order Scalar-Tensor theories

4階の運動方程式, しかし**加速度項の係数行列が縮退**している :

縮退条件

$$\det \left(\frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \dot{Q}_m \partial \dot{Q}_n} \right) = 0 \quad \text{for any background}$$

* { Q_n }はスカラー場や計量

これでも

高階微分によって余分な自由度 (初期条件) は生じない

✗ Ostrogradskyゴースト

2次のDHOST理論

[Langlois & Noui 15]

$$\mathcal{L} = P + Q\Box\phi + FR + \sum_{I=1}^5 A_I L_I \quad \phi_{\mu\nu} \equiv \nabla_\mu \nabla_\nu \phi$$

$$L_1 = \phi_{\mu\nu}\phi^{\mu\nu}, \quad L_2 = (\Box\phi)^2, \quad L_3 = (\phi^\mu\phi^\nu\phi_{\mu\nu})\Box\phi,$$
$$L_4 = (\phi_{\mu\nu}\phi^\nu\phi^{\mu\sigma}\phi_\sigma), \quad L_5 = (\phi^\mu\phi^\nu\phi_{\mu\nu})^2.$$

縮退条件  関数に3つの条件

2つのクラス: Class I & Class II

理論は5つの関数パラメータを持つ: P, Q, F, A_1, A_3

* 3次への拡張 [Achour+ 16]

2次のDHOST理論

[Langlois & Noui 15]

$$\mathcal{L} = P + Q\Box\phi + FR + \sum_{I=1}^5 A_I L_I \quad \phi_{\mu\nu} \equiv \nabla_\mu \nabla_\nu \phi$$

$$L_1 = \phi_{\mu\nu}\phi^{\mu\nu}, \quad L_2 = (\Box\phi)^2, \quad L_3 = (\phi^\mu\phi^\nu\phi_{\mu\nu})\Box\phi, \\ L_4 = (\phi^\mu\phi^\nu\phi^{\mu\sigma}\phi_{\nu\sigma}), \quad L_5 = (\phi^\mu\phi^\nu\phi_{\mu\nu})^2.$$

Horndeski (\subset Class I)

$$P = G_2, Q = -G_3, F = G_4$$

$$A_1 = -A_2 = 2G_{4X} \text{ (Others 0)}$$

の条件

2つのクラス: Class I & Class II

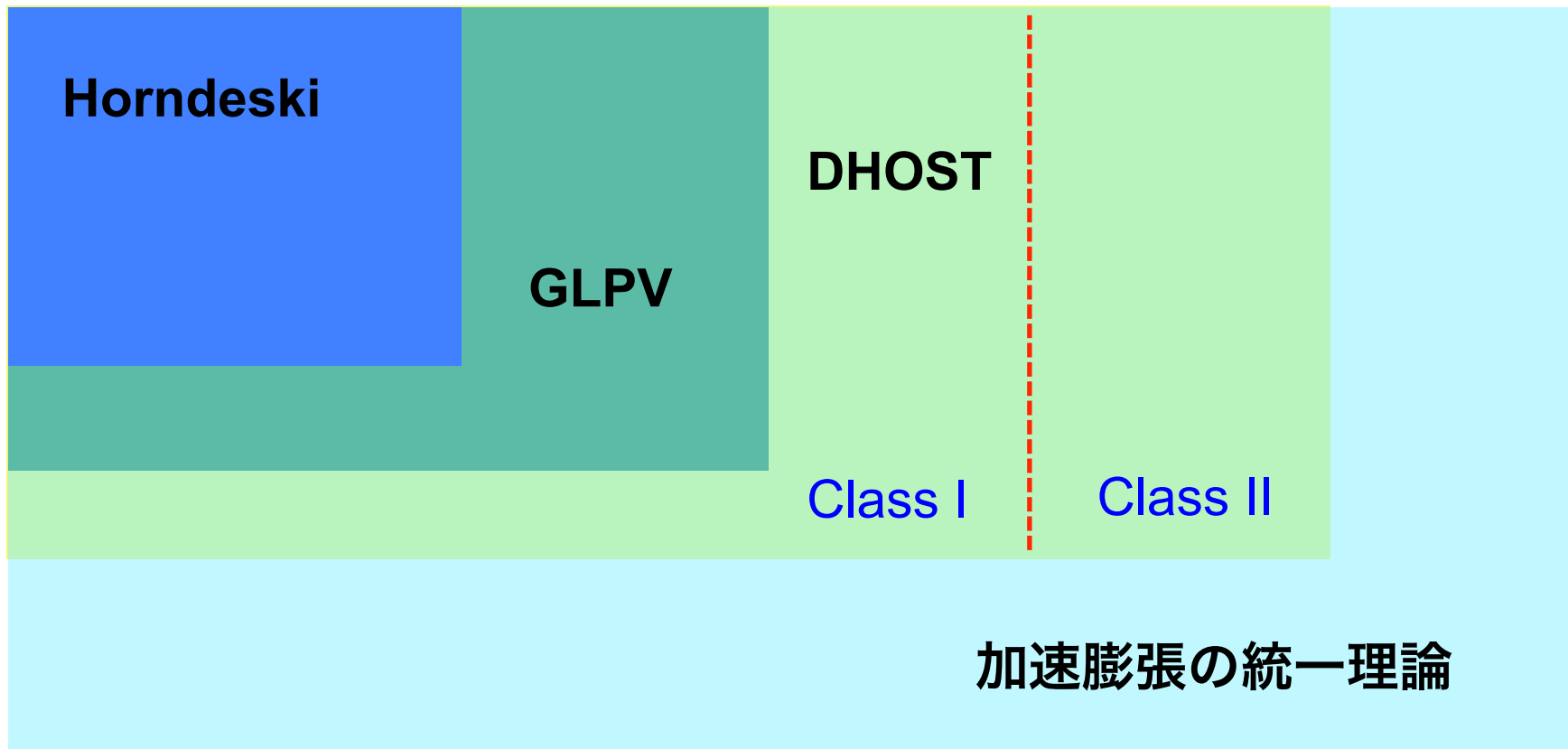
理論は5つの関数パラメータを持つ: P, Q, F, A_1, A_3

* 3次への拡張 [Achour+ 16]

整合的な高階スカラーテンソル理論

ラグランジアン関数の形をうまく選べば、

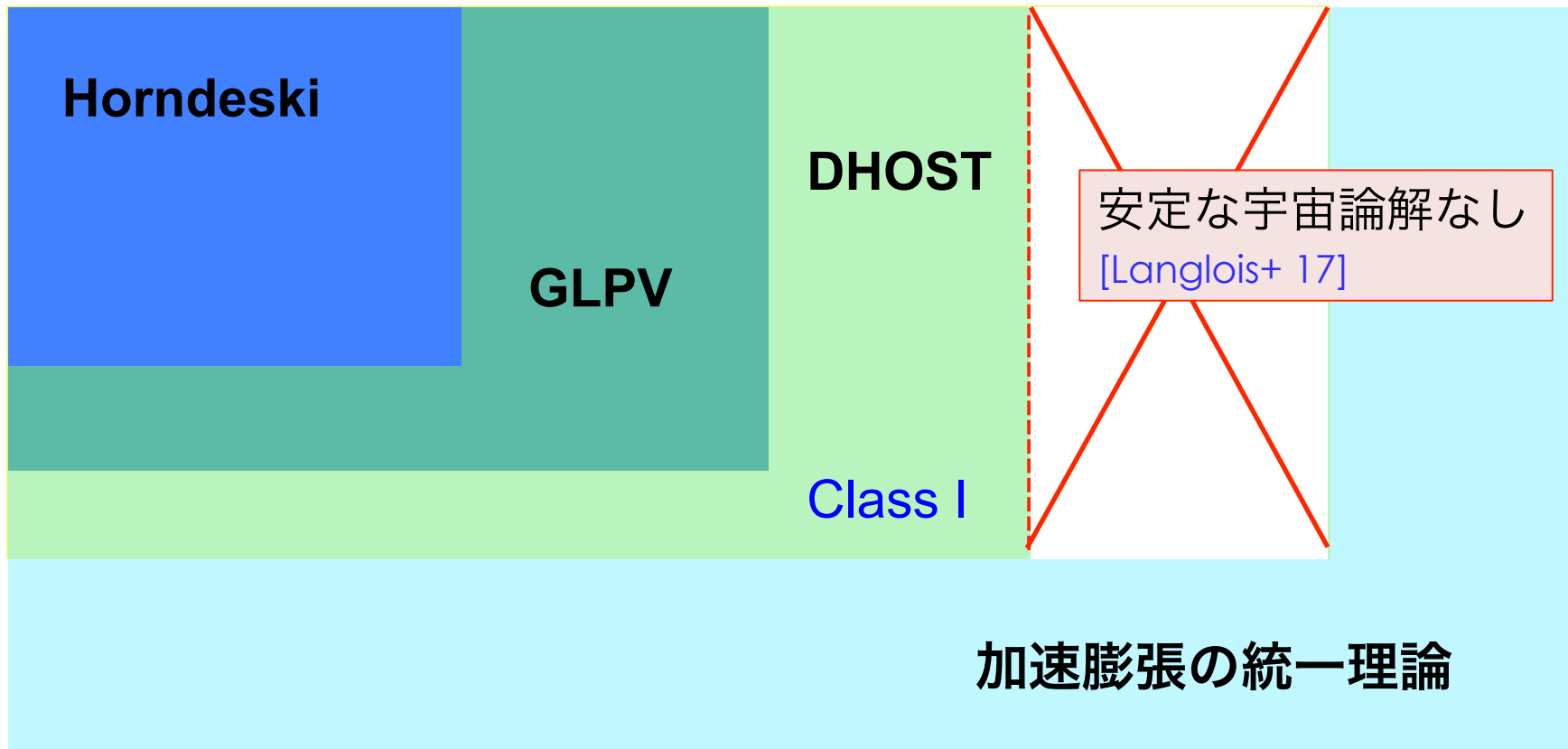
2階微分を含んでも、余分な自由度を含まないようにできる



統合的な高階スカラーテンソル理論

ラグランジアン関数の形をうまく選べば、

2階微分を含んでも、余分な自由度を含まないようにできる



ここまでのまとめ

1. なぜ一般相対論の修正を試みるか？

- 宇宙論スケールでの一般相対論の検証
- 加速膨張の原因？

2. 加速膨張の統一理論

- 特別な座標系の存在に基づくアプローチ
- 理論の整合性

DHOST = 縮退したスカラーテンソル理論

Class I

(\supset Horndeski)

~~**Class II**~~

安定な宇宙論解なし

今日の話の流れ

1. なぜ一般相対論の修正を試みるか？
2. 加速膨張の統一理論 – 高階微分スカラーテンソル理論
 - 2.1 統一理論の理論的整合性
 - 2.2 統一理論の観測的検証

重力波と第5の力

今日の話の流れ

1. なぜ一般相対論の修正を試みるか？
2. 加速膨張の統一理論 – 高階微分スカラーテンソル理論
 - 2.1 統一理論の理論的整合性
 - 2.2 統一理論の観測的検証

重力波と第5の力

GW170817 and GRB170817A

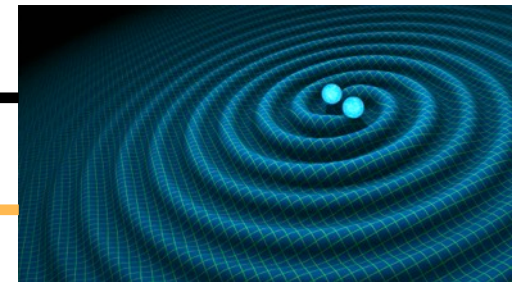
[LIGO/VIRGO collaboration 17]

重力波と電磁波の同時検出

重力波と電磁波の速さの一致：

$$-3 \times 10^{-15} < \frac{c_{\text{GW}} - c_{\text{EM}}}{c_{\text{EM}}} < 7 \times 10^{-16}$$

$$\Delta t_{\text{arrival}} = \mathcal{O}(1) \text{ sec}$$



中性子星連星

$$D_L = 40_{-14}^{+8} \text{ Mpc}$$

重力波の速さ

スカラー場（Clock場）によってローレンツ対称性が破れている：

理論の関数パラメータ

$$c_{\text{GW}}^2 = c_{\text{EM}}^2 \left[1 - \dot{\phi}_c^2 \left(\frac{A_1}{F} \right) \right]$$

理論への制限

$$A_1 \simeq 0$$

4つの関数パラメータ： $P, Q, F, \cancel{A_1}, A_3$

[Creminelli & Vernizzi 17, Ezquiaga & M. Zumalacarregui 17, Baker+ 17]

[Crisostomi & Koyama 17, Langlois, RS, Yamauchi, & Noui 17]

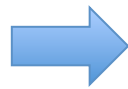
“Viable” DHOST理論

$$\mathcal{L} = P + Q\Box\phi + FR + \sum_{I=1}^5 A_I L_I \quad \phi_{\mu\nu} \equiv \nabla_\mu \nabla_\nu \phi$$

$$L_1 = \phi_{\mu\nu}\phi^{\mu\nu}, \quad L_2 = (\Box\phi)^2, \quad L_3 = (\phi^\mu\phi^\nu\phi_{\mu\nu})\Box\phi, \\ L_4 = (\phi_{\mu\nu}\phi^\nu\phi^{\mu\sigma}\phi_\sigma), \quad L_5 = (\phi^\mu\phi^\nu\phi_{\mu\nu})^2.$$

Horndeski:

$$P = G_2, Q = -G_3, F = G_4 \\ A_1 = -A_2 = 2G_{4X} \text{ (Others 0)}$$



$$G_{4X} = 0$$

高階微分の高次の項なし (A terms)

高次のHorndeskiは棄却され、Beyond Horndeskiのみ残る

今日の話の流れ

1. なぜ一般相対論の修正を試みるか？
2. 加速膨張の統一理論 – 高階微分スカラーテンソル理論
 - 2.1 統一理論の理論的整合性
 - 2.2 統一理論の観測的検証

重力波と第5の力

第5の力

スカラー場（Clock場）は、物質間に新たな力を媒介する：

$$\nabla^2 \phi + \dots = 4\pi G_s \rho$$

第5の力

意外と近くに加速膨張の起源に迫る
ヒントがあるかも??

高密度環境の重力法則にも影響（近傍の実験や観測にも）

しかし、その振る舞いは通常の重力場に比べて、豊かで複雑

遮蔽機構：スカラー場の**自己相互作用**による第5の力の遮蔽

例) カメレオン機構、K-Mouflage (kinetic screening) 機構、Vainshtein機構

ポテンシャル項

1階微分項

高階微分項

Vainshtein機構

Schwarzschild半径より大きなスケールで、第5の力は
高階微分項の非線形効果が重要になる。

$$\nabla^2 \phi + \nabla^2 \phi \left(\frac{\nabla^2 \phi}{\Lambda^2} \right)^2 = 4\pi G_s \rho$$

加速膨張のスケール $\Lambda^{-1} \sim H_0^{-1} \sim 1\text{Gpc}$

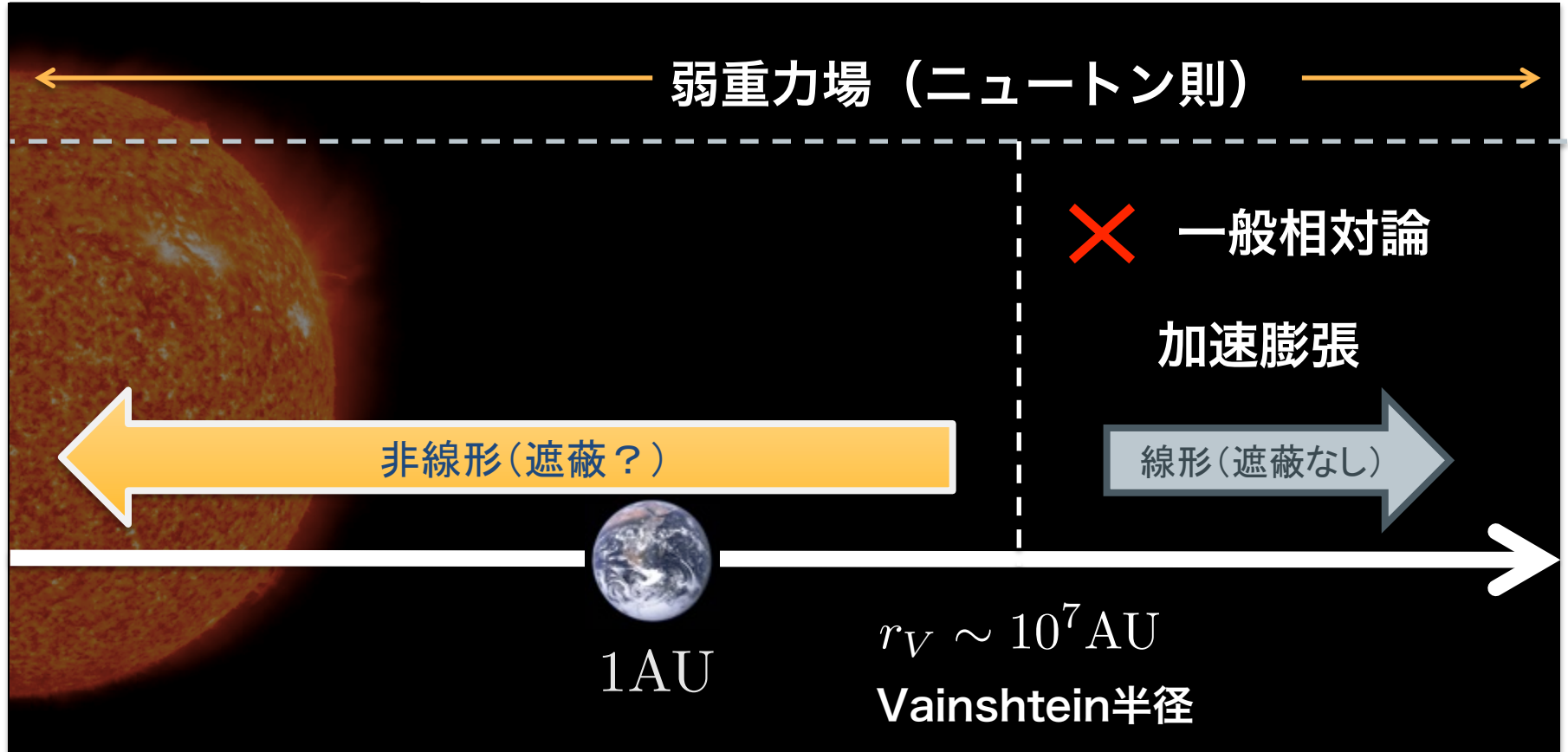
線形近似解 $\phi_L = GM/r$ は、以下のスケールで破綻：

$$\nabla^2 \phi_L / \Lambda^2 \equiv (r_V / r)^3 \gg 1 \quad ; \quad r_V \sim (r_S / H_0^2)^{1/3}$$

Vainshtein半径

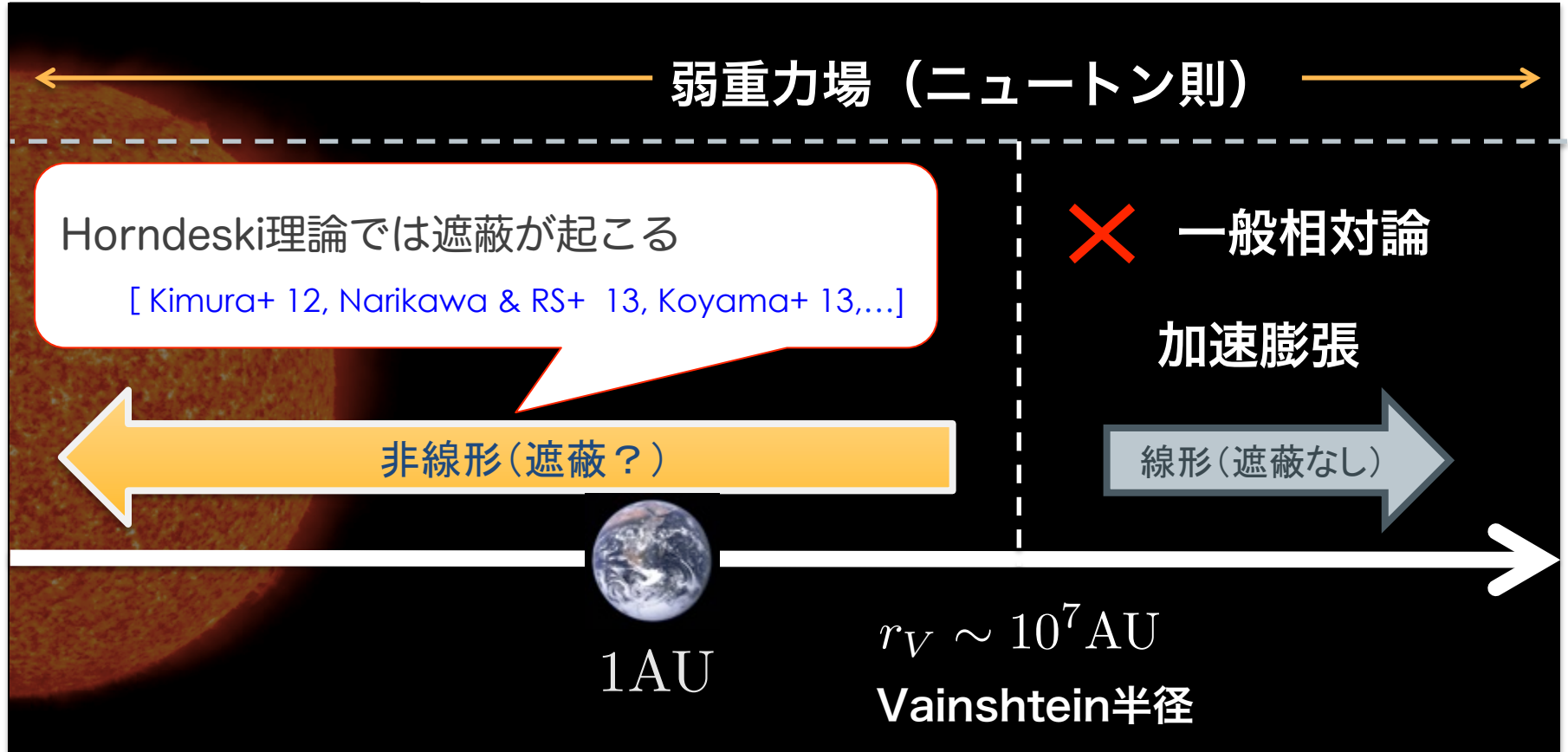
Vainshtein機構

Schwarzschild半径より大きなスケールで、第5の力は
高階微分項の非線形効果が重要になる。



Vainshtein機構

Schwarzschild半径より大きなスケールで、第5の力は
高階微分項の非線形効果が重要になる。



Vainshtein機構

Schwarzschild半径より大きなスケールで、第5の力は
高階微分項の非線形効果が重要になる。

しかし、(高次の) Horndeski理論は、重力波の制限から
棄却されていた...

Horndeski理論では遮蔽が起こる

[Kimura+ 12, Narikawa & RS+ 13, Koyama+ 13,...]

× 一般相対論

加速膨張

非線形(遮蔽?)

線形(遮蔽なし)



1AU

$r_V \sim 10^7 \text{ AU}$

Vainshtein半径

Vainshtein機構の破れ

[Kobayashi+ 15] (for GLPV理論)

[Crisostomi & Koyama 17]

[Langlois, RS, Yamauchi, & Noui 17]

[Dima & Vernizzi 18]

Beyond Horndeskiでは

Vainshtein機構が有限密度領域で働かなくなる

モデルパラメータ (Horndeski理論ではゼロ)

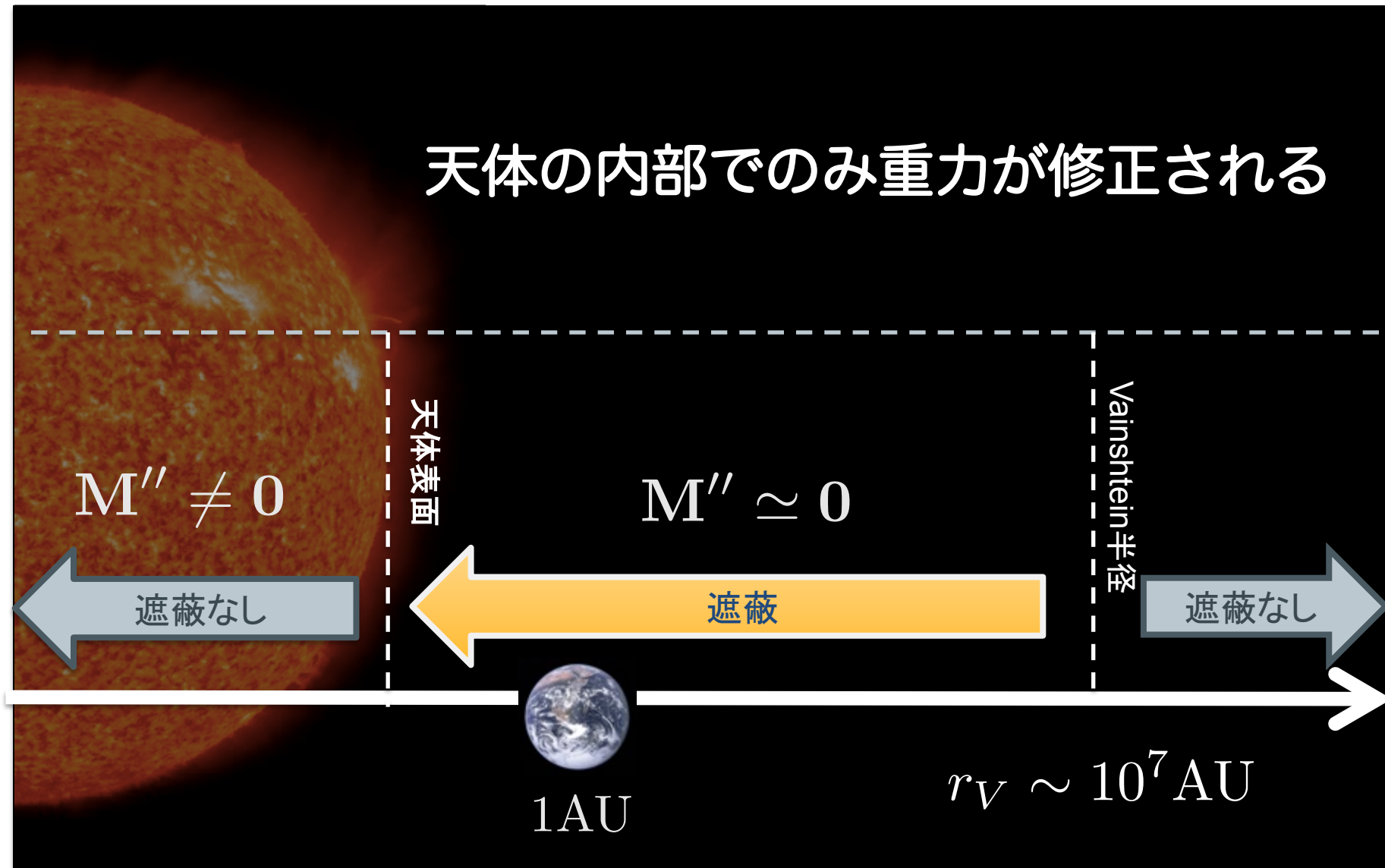
$$\frac{d\Phi}{dr} = G_N \left(\frac{M}{r^2} + \Xi_1 \frac{d^2 M}{dr^2} \right)$$

$$\frac{d\Psi}{dr} = G_N \left(\frac{M}{r^2} + \Xi_2 \frac{dM}{dr} + \Xi_3 \frac{d^2 M}{dr^2} \right)$$

$$ds^2 = -(1 + \underline{2\Phi})dt^2 + a(t)^2(1 - \underline{2\Psi})dx^2$$

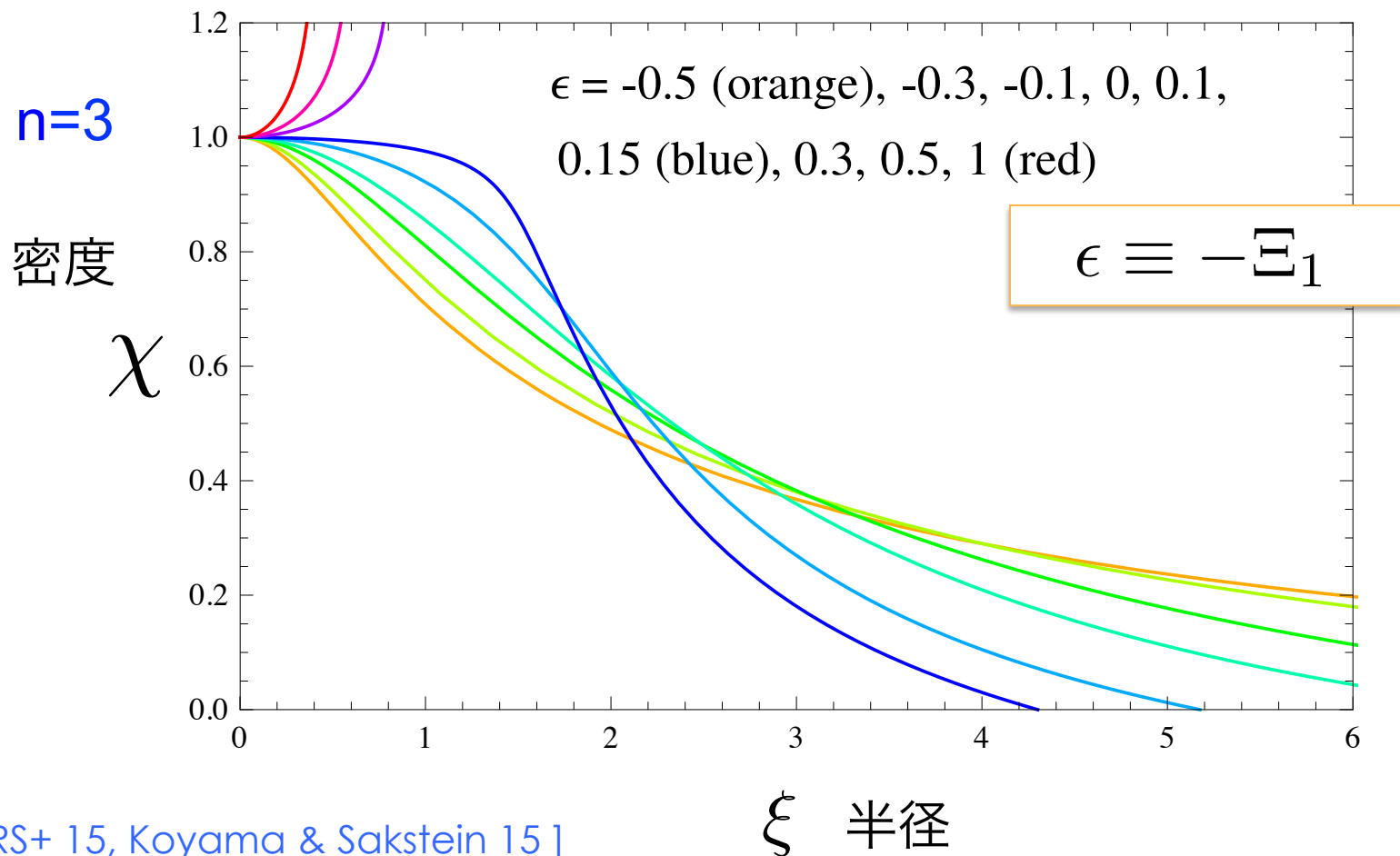
Vainshtein機構の破れ

天体の内部でのみ重力が修正される



例) 天体構造の変化：ポリトロープ

天体の状態方程式をポリトロープ ($P \propto \rho^{1+\frac{1}{n}}$) で近似して解析



三 パラメータへの制限

RS+ (2015)

星の存在条件

天体を観測することで、DHOSTを検証可能

加速膨張の原因？

$$\Xi_1 > -1/6$$

J. Sakstein (2015)

水素燃焼する最小質量 < 観測されている赤色矮星の最小質量

$$\Xi_1 < 7 \times 10^{-3}$$

R. K. Jain+ (2015)

白色矮星のチャンドラセカル質量 & 質量半径関係

$$-6 \times 10^{-2} < \Xi_1 < 4 \times 10^{-2} \quad (\text{相対論効果の再検討の必要あり})$$

Babichev, RS+ (2016)

J. Sakstein+ (2016)

弱重力レンズ効果 & 銀河団のX-ray mass

$$\Xi_1 = 0.028^{+0.23}_{-0.17} \quad \Xi_2 = 0.28^{+1.49}_{-1.53}$$

“Viable” DHOST理論の予言

- 重力定数が、重力波と重力ポテンシャルとで異なる：

$$(8\pi G_N)^{-1} \equiv (8\pi G_{\text{GW}})^{-1}(1 + \Xi_0)$$

- 4パラメータのうち、独立なのは2つだけ：

[Cf. Dima & Vernizzi 18]

$$\Xi_0 = -\alpha_H - 3\beta_1, \quad \Xi_1 = -\frac{(\alpha_H + \beta_1)^2}{2(\alpha_H + 2\beta_1)}$$

$$\Xi_2 = \alpha_H, \quad \Xi_3 = -\frac{\beta_1(\alpha_H + \beta_1)}{2(\alpha_H + 2\beta_1)} \quad \text{2つ制限すれば棄却できる}$$

$$\alpha_H \equiv 2F_X \dot{\phi}_c^2 / F, \quad \beta_1 \equiv (A_3 \dot{\phi}_c^2 - 4F_X) \dot{\phi}_c^2 / 4F$$

“Viable” DHOST理論の予言

- 重力定数が、重力波と重力ポテンシャルとで異なる：

$$(8\pi G_N)^{-1} \equiv (8\pi G_{\text{GW}})^{-1}(1 + \Xi_0)$$

- 4パラメータのうち、独立なのは2つだけ：

[Cf. Dima & Vernizzi 18]

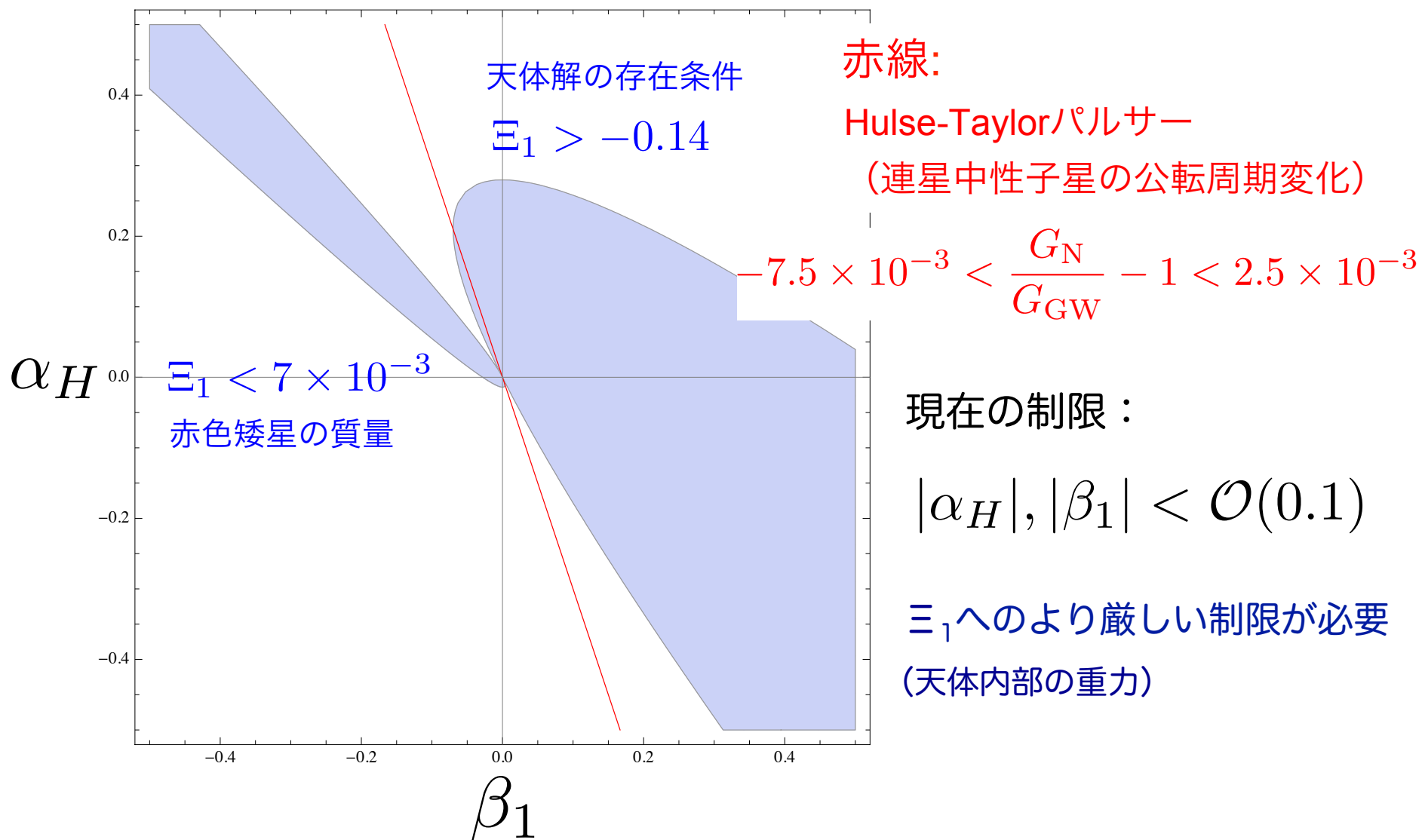
現在、最も厳しい制限

$$\Xi_0 = -\alpha_H - 3\beta_1, \quad \Xi_1 = -\frac{(\alpha_H + \beta_1)^2}{2(\alpha_H + 2\beta_1)}$$

$$\Xi_2 = \alpha_H, \quad \Xi_3 = -\frac{\beta_1(\alpha_H + \beta_1)}{2(\alpha_H + 2\beta_1)} \quad \text{2つ制限すれば棄却できる}$$

$$\alpha_H \equiv 2F_X \dot{\phi}_c^2 / F, \quad \beta_1 \equiv (A_3 \dot{\phi}_c^2 - 4F_X) \dot{\phi}_c^2 / 4F$$

三パラメータへの制限



Viabie DHOST理論：どこまで狭まるか？

もし全ての三パラメータがゼロだった場合、

$$F_X = 0, \quad A_3 = 0$$

Viabie DHOST理論:

$$L_{\text{viabie}}^{\text{DHOST}} = P + Q\Box\phi + F(\phi)R$$

3次のHorndeski理論 + 共形結合

さらなる制限



宇宙論からのテスト、
より一般の環境でのVainshtein機構、など

宇宙論によるテスト

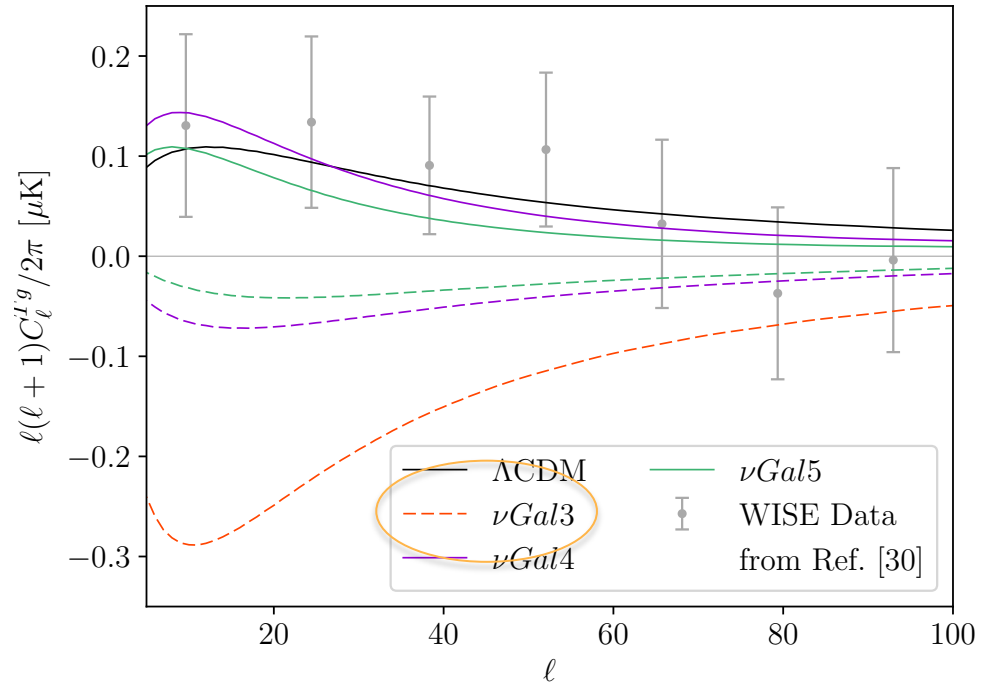
- 積分Sachs-Wolfe効果

CMBの赤方偏移効果

単純なモデルを7.5 σ で棄却

$$Q \square \phi \propto (\nabla \phi)^2 \square \phi$$

[Renk+ 17]



- Planck2018 VI [Planck collaboration 18]

仮定

$$\alpha_{M0} = -0.015^{+0.019}_{-0.017} \quad ; \quad \alpha_M \equiv \dot{F}/HF \quad (= \alpha_{M0} a^\beta)$$

まとめ

- 一般相対論の予言は悉く実験・観測で確かめられてきたが、
宇宙の加速膨張は未だ説明できない：

宇宙論的スケールでの一般相対性理論の破綻？

- **特別な座標系の存在 → 加速膨張の統一理論**
- さまざまな理論的・観測的制約, Viable DHOST理論：

$$L_{\text{viable}}^{\text{DHOST}} = P + Q\Box\phi + F(\phi)R$$

一般相対論の広範な有効性 & 残される加速膨張の謎