2018/03/03-03/04 第二回若手による重力･宇宙論研究会@YITP

GW170817後の
スカラーテンソル理論

山内　大介（神奈川大学）

Langlois, Saito, **DY**, Noui, arXiv:1711.07403

世界へ、そして未来へ
神奈川大学

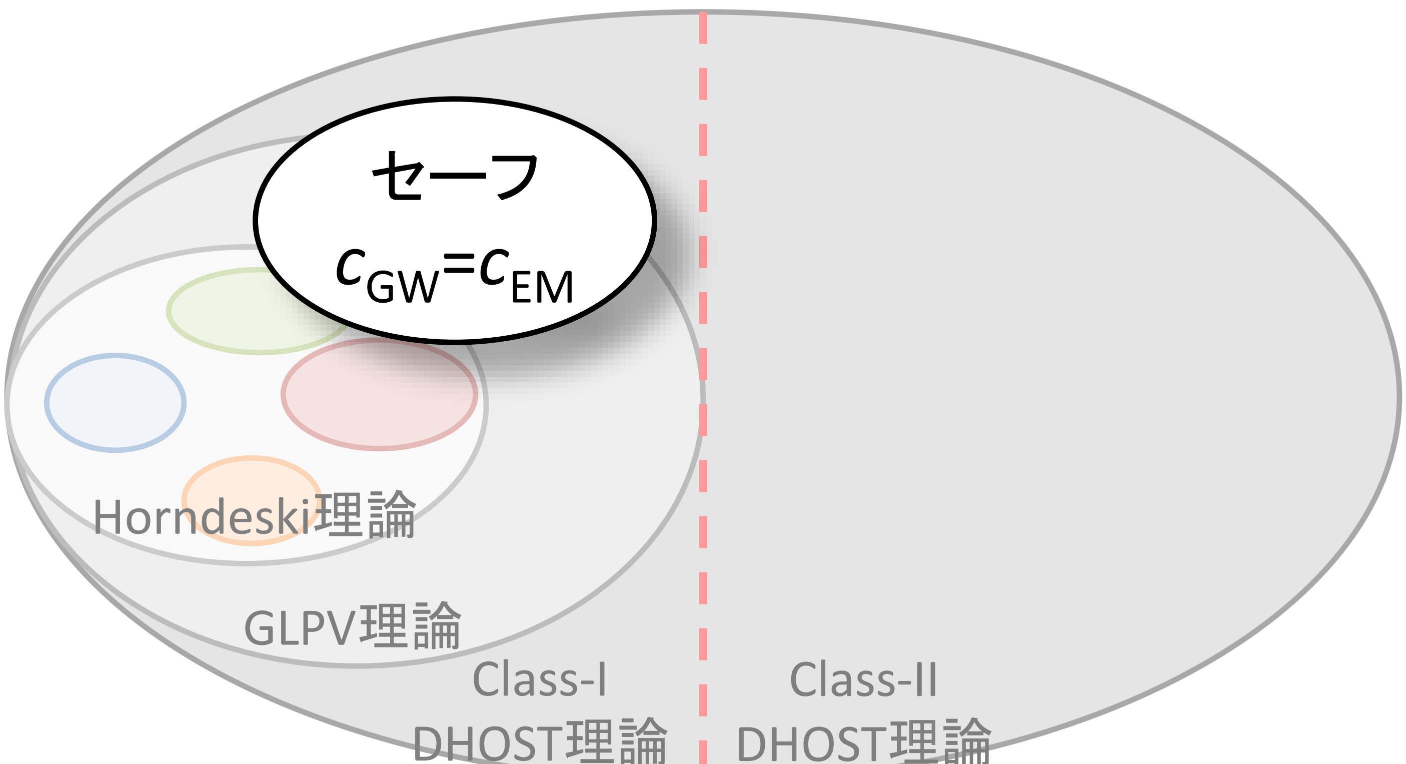
まとめ:
GW170817後のスカラーテンソル理論

- だいたい死んだ

まとめ：
GW170817後のスカラーテンソル理論

ロだいたい死んだ・・・が、結構生き残っている

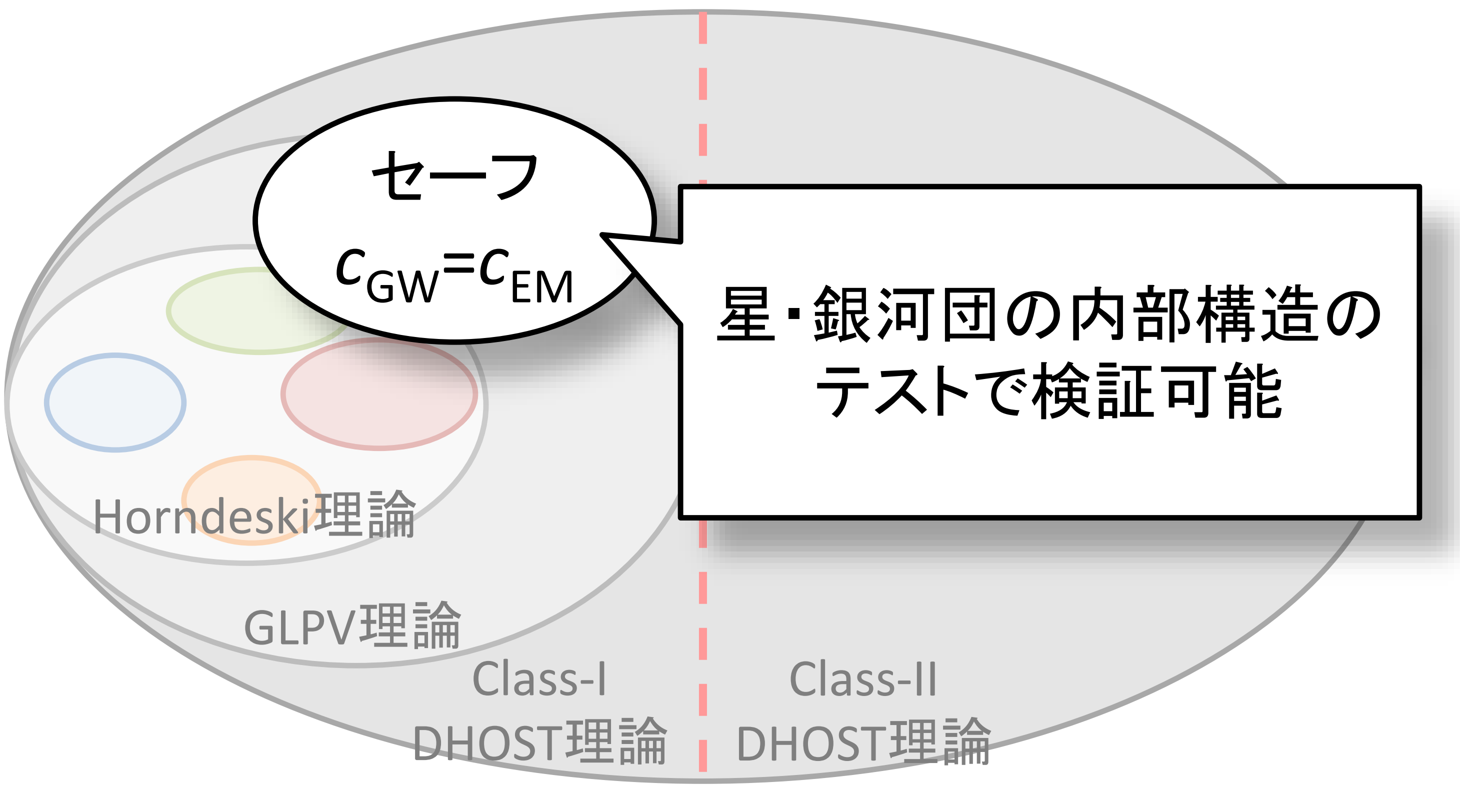
[重力波の音速と電磁気の速度が一致を示唆]



まとめ:
GW170817後のスカラーテンソル理論

□だいたい死んだ・・・が、結構生き残っている

[重力波の音速と電磁気の速度が一致を示唆]



イントロダクション

なぜ修正重力理論か？

- 加速膨張の発見

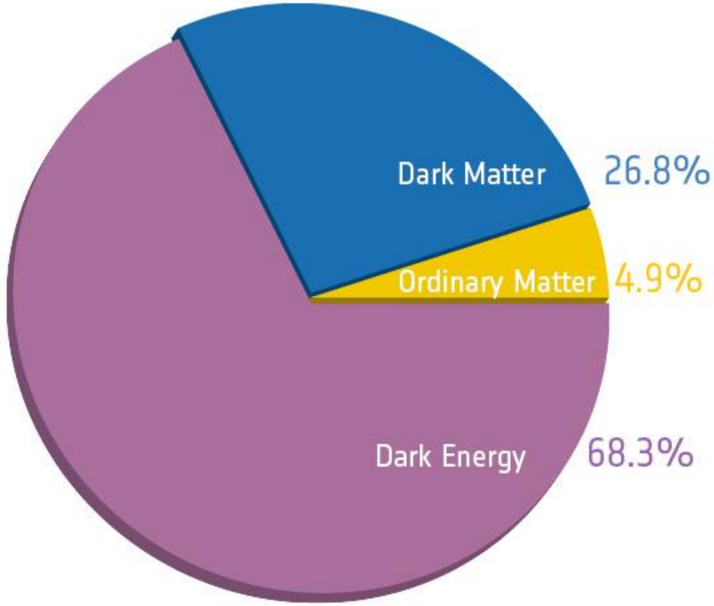
  :我々の宇宙への理解は不完全であることの証拠

- 宇宙論的な距離・時間の重力の物理にヒントがあるかも？

  -- 暗黒エネルギー or 修正重力理論？

  - 小スケール:太陽系スケールや地球上の実験によるテスト
  - 大スケール : 宇宙論的な観測によってテスト出来る

[Planck2013]



修正重力理論

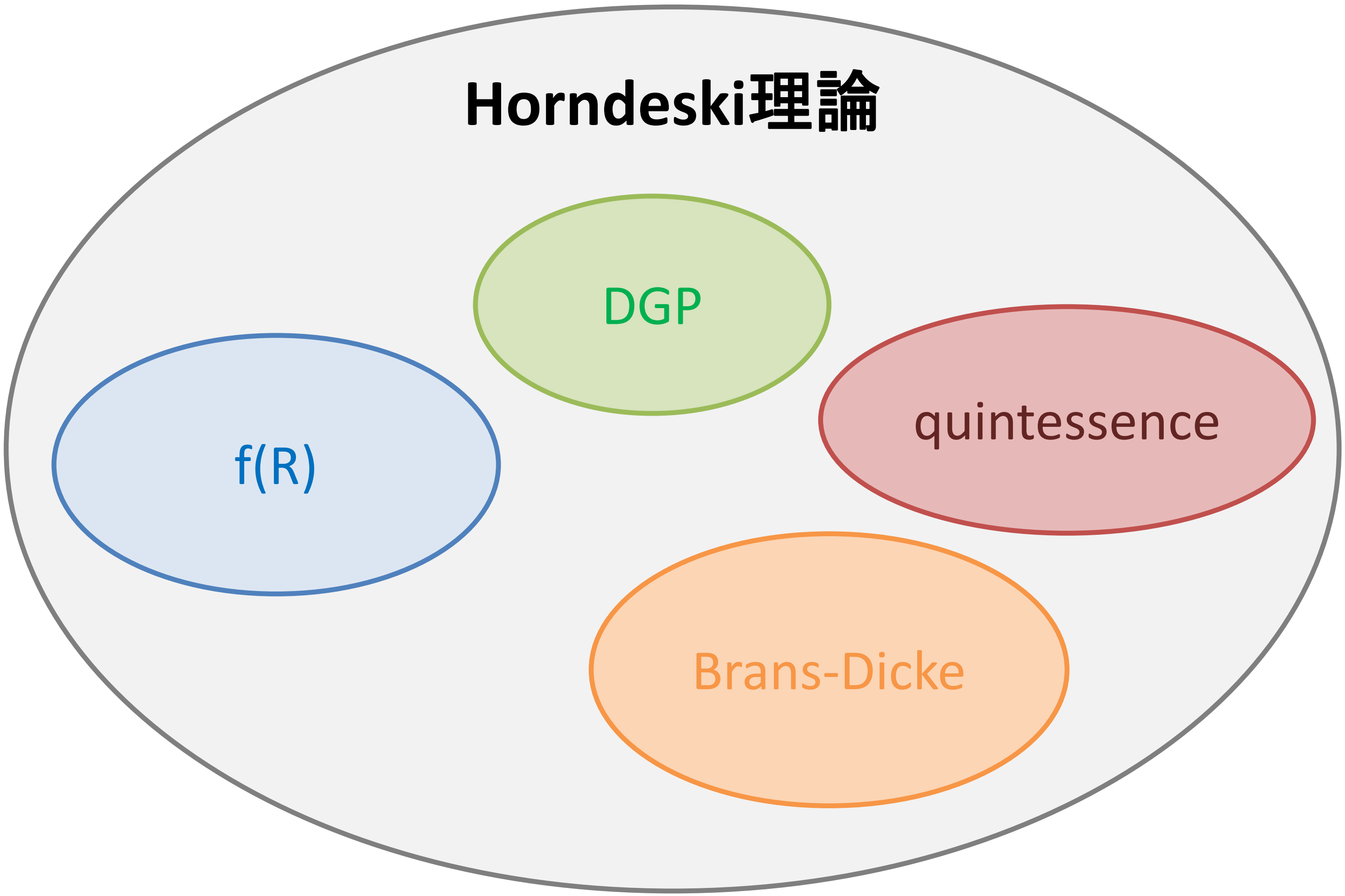
- ➢一般相対論 : 質量なし, スピン2
- ➢修正重力理論 : 加速膨張を実現しうる
  「新しい自由度」を導入

f(*R*), DGP, Galileons, quintessence, massive gravity, …

✓スカラー・テンソル理論

- 重力は計量場 $g_{\mu\nu}$とスカラー場ϕが媒介
- 重力の修正の本質的な部分を捉えることが出来る

スカラー・テンソル理論の拡がり



[Horndeski (1974),Deffayet+Gao+Steer+Zahariade (2011),
Kobayashi+Yamaguchi+Yokoyama (2011)]

Horndeski理論

- 「**運動方程式で場の2階微分までしか含まない**」最も一般的なスカラー・テンソル理論

✓ **自明に**計量2自由度とスカラー場1自由度

$$
\begin{aligned}
\mathcal{L} =& G_2(\phi, X) - G_3(\phi, X)\Box\phi \\
&+ G_4(\phi, X)R + \frac{\partial G_4}{\partial X}(\phi, X)\left[(\Box\phi)^2 - (\nabla_\mu\nabla_\nu\phi)^2\right] \\
&+ G_5(\phi, X)G_{\mu\nu}\nabla^\mu\nabla^\nu\phi \\
&- \frac{1}{6}\frac{\partial G_5}{\partial X}(\phi, X)\left[(\Box\phi)^3 - 3\Box\phi\,(\nabla_\mu\nabla_\nu\phi)^2 + 2\,(\nabla_\mu\nabla_\nu\phi)^3\right]
\end{aligned}
$$

✓ 一般に4つのϕと$X=(\nabla\phi)^2$の任意関数を含む

[Gleyzes+Langlois+Piazza+Vernizzi (2014)]

Horndeskiを超えた模型は存在するのか？

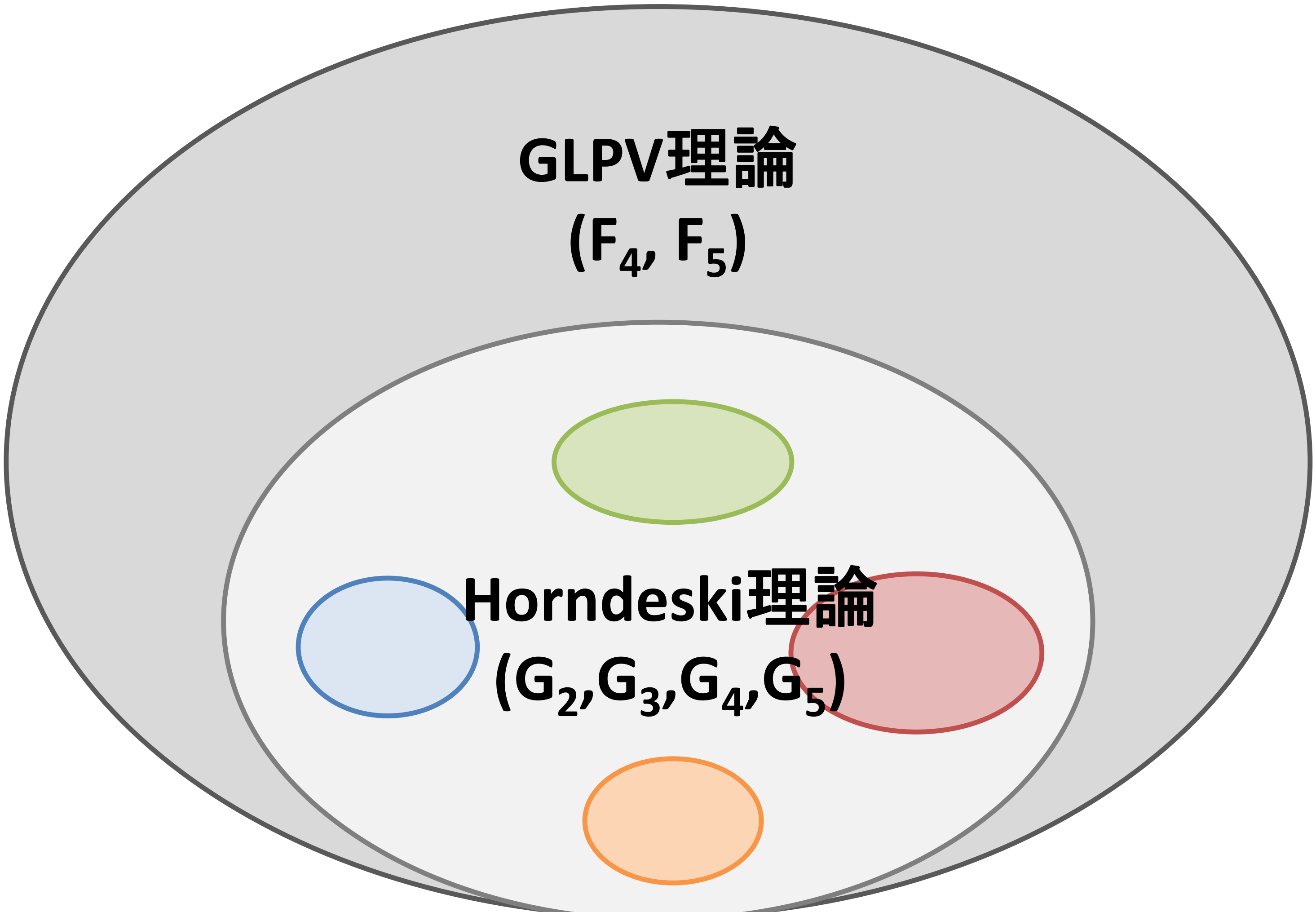
- 高微分理論でありつつ、計量2自由度+スカラー1自由度
- **Beyond-Honrdeski理論 (GLPV理論)**
  - ✓ 高階微分方程式を導く(つまり不安定)・・・が、
  - ✓ 初期条件の数が増えないような特別な時間一定面 (：ϕ=一定面)を導入するとうまくいく
- スカラー場ϕを復活させると

$$\mathcal{L}_{\rm GLPV} = \mathcal{L}_{\rm Horndeski} + \mathcal{L}_{\rm beyond}$$

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\rm beyond} =& F_4(\phi, X)\epsilon^{\mu\nu\rho}{}_{\sigma}\epsilon^{\mu'\nu'\rho'\sigma}\nabla_\mu\phi\nabla_{\mu'}\phi\nabla_\nu\nabla_{\nu'}\phi\nabla_\rho\nabla_{\rho'}\phi \\ &+ F_5(\phi, X)\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma}\epsilon^{\mu'\nu'\rho'\sigma'}\nabla_\mu\phi\nabla_{\mu'}\phi\nabla_\nu\nabla_{\nu'}\phi\nabla_\rho\nabla_{\rho'}\phi\nabla_\sigma\nabla_{\sigma'}\phi\end{aligned}$$

[Gleyzes+Langlois+Piazza+Vernizzi (2014)]

スカラー･テンソル理論の拡がり

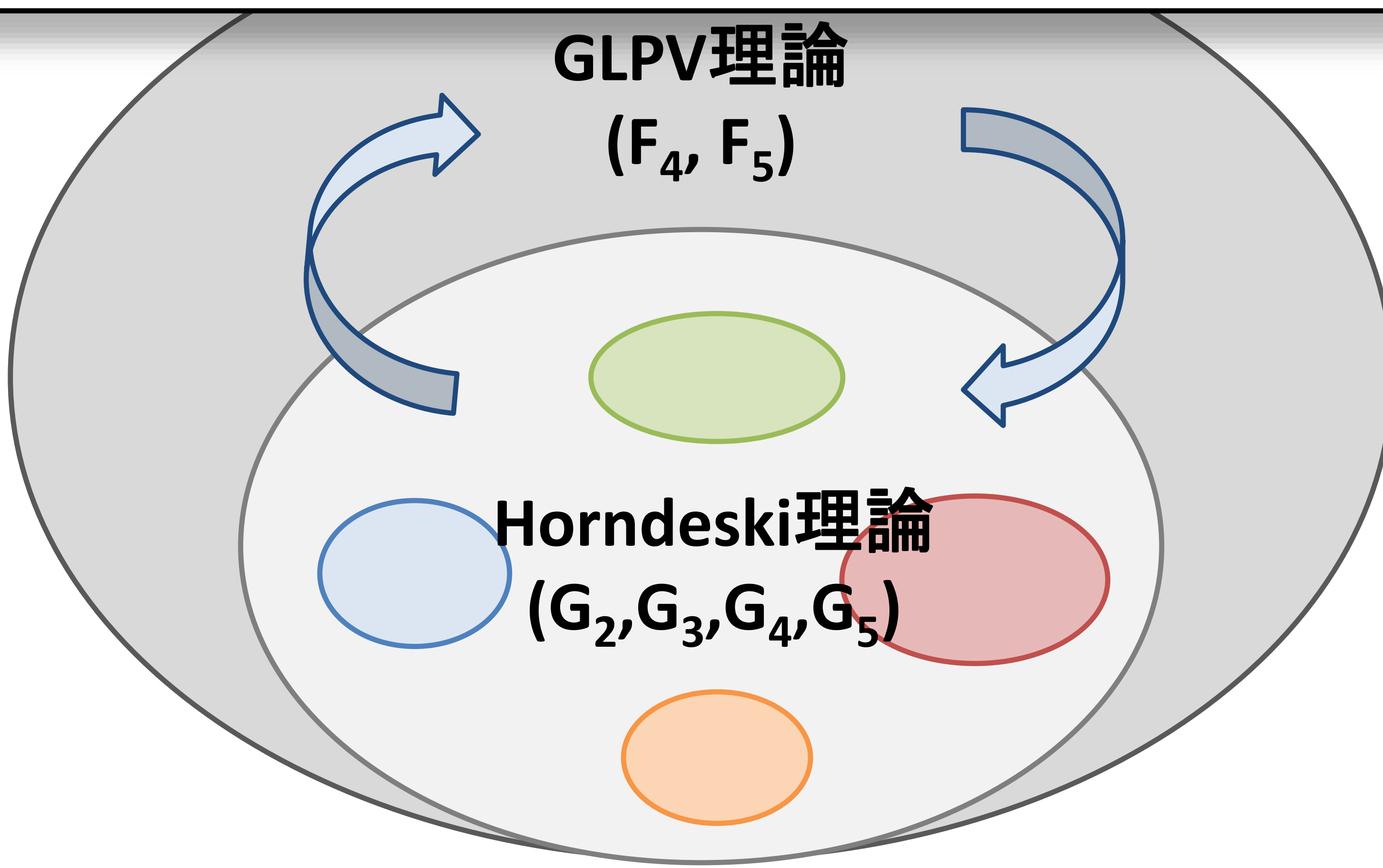


[Gleyzes+Langlois+Piazza+Vernizzi (2014)]

スカラー･テンソル理論の拡がり

Xに依存する disformal変換

$$g_{\mu\nu} \to \tilde{g}_{\mu\nu} = g_{\mu\nu} + D(X)\partial_\mu\phi\partial_\nu\phi$$



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

➢計量+スカラー場の運動項を縮退させると安定化

$$\mathcal{L}_{\mathrm{DHOST}} = P(\phi, X) + Q(\phi, X)\Box\phi + F(\phi, X)R + \mathcal{L}^{(2)}_{\mathrm{DHOST}} + F_3(\phi, X)G_{\mu\nu}\nabla^\mu\nabla^\nu\phi + \mathcal{L}^{(3)}_{\mathrm{DHOST}}$$

✓ ∇∇Φ の2次 [Langlois+Noui (2015)]

$$\mathcal{L}^{(2)}_{\mathrm{DHOST}} = A_1 \left(\nabla_\mu\nabla_\nu\phi\right)^2 + A_2 \left(\Box\phi\right)^2 + A_3 \Box\phi\nabla^\mu\phi\nabla^\nu\phi\nabla_\mu\nabla_\nu\phi + A_4\nabla^\mu\phi\nabla_\nu\phi\nabla_\mu\nabla^\rho\phi\nabla_\rho\nabla^\nu\phi + A_5 \left(\nabla^\mu\phi\nabla^\nu\phi\nabla_\mu\nabla_\nu\phi\right)^2$$

✓ ∇∇Φ の3次

[Ben Achour+Crisostomi+Koyama+Langlois+Noui+Tasinato (2016)]

$$\mathcal{L}^{(3)}_{\mathrm{DHOST}} = B_1 \left(\Box\phi\right)^3 + B_2 \Box\phi \left(\nabla_\mu\nabla_\nu\phi\right)^2 + B_3 \left(\nabla_\mu\nabla_\nu\phi\right)^3 + \cdots$$

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

➢ …定

□ Horndeski/GLPV理論との対応

$$F = G_4\,, \quad A_1 = -A_2 = 2G_{4X} + XF_4\,,$$
$$A_3 = -A_4 = 2F_4\,, \quad A_5 = 0\,.$$

…) …HOST

✓ ∇∇Φ … [Langlois+Noui (2015)]

$$\mathcal{L}^{(2)}_{\rm DHOST} = A_1 \left(\nabla_\mu\nabla_\nu\phi\right)^2 + A_2 \left(\Box\phi\right)^2 + A_3\,\Box\phi\nabla^\mu\phi\nabla^\nu\phi\nabla_\mu\nabla_\nu\phi + A_4\nabla^\mu\phi\nabla_\nu\phi\nabla_\mu\nabla^\rho\phi\nabla_\rho\nabla^\nu\phi + A_5\left(\nabla^\mu\phi\nabla^\nu\phi\nabla_\mu\nabla_\nu\phi\right)^2$$

✓ ∇∇Φ の3次

[Ben Achour+Crisostomi+Koyama+Langlois+Noui+Tasinato (2016)]

$$\mathcal{L}^{(3)}_{\rm DHOST} = B_1\left(\Box\phi\right)^3 + B_2\,\Box\phi\left(\nabla_\mu\nabla_\nu\phi\right)^2 + B_3\left(\nabla_\mu\nabla_\nu\phi\right)^3 + \cdots$$

[Langlois+Noui (2015),
Ben Achor+Crisostomi+Koyama+Langlois+Noui+Tasinato(2016)]

縮退条件

✓ ∇∇Φ の2次の縮退条件
→ 2種類ある

2次の任意関数は3つ：
$F(\phi,X)$, $A_1(\phi,X)$, $A_3(\phi,X)$

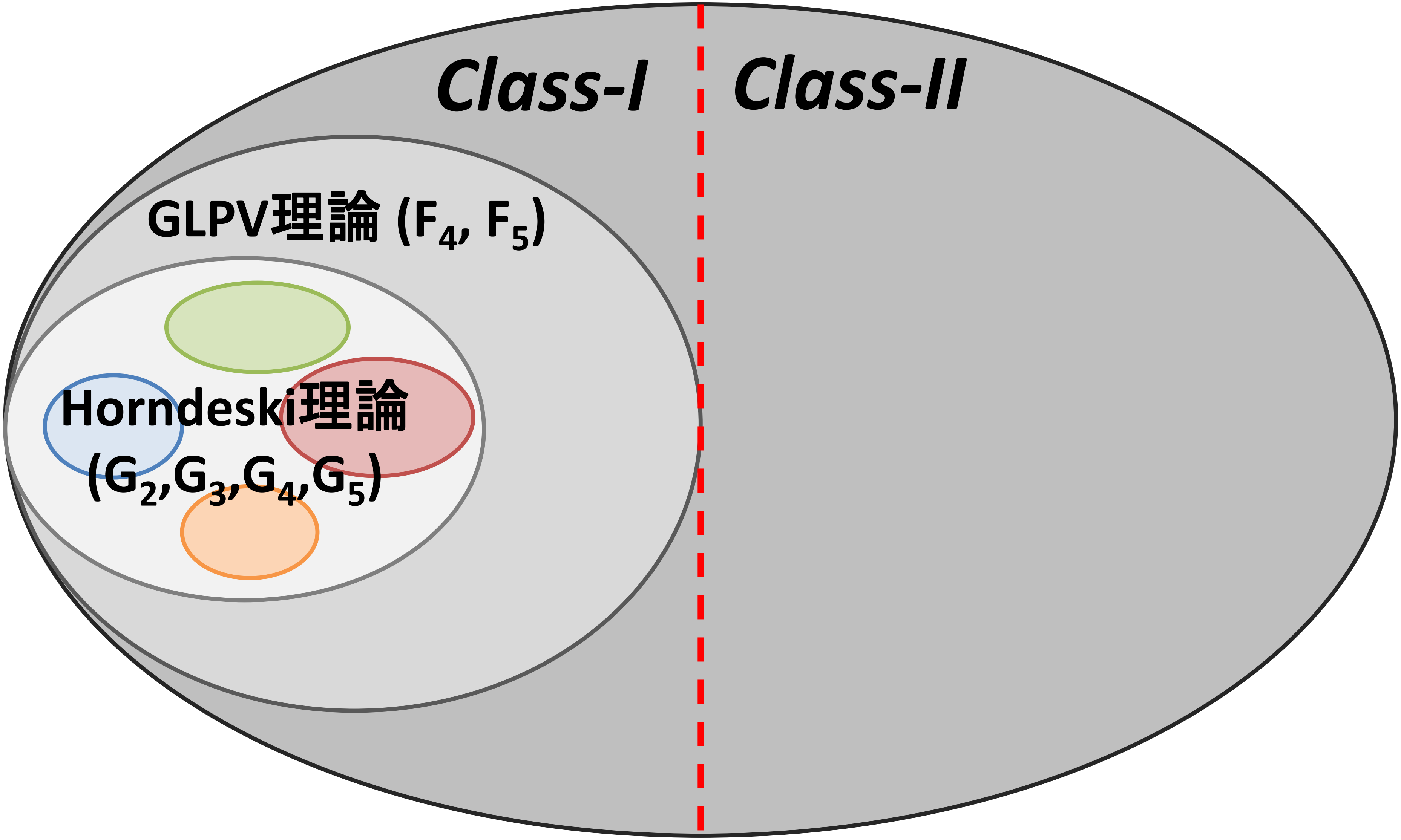
□Class-I : Horndeski/GLPVを含む

$$\begin{cases} A_2 = -A_1 \\ A_4 = \dfrac{1}{8(F-A_1X)^2}\Big[4F\left(3(A_1-2F_X)^2-2A_3F\right)-A_3X^2\left(16A_1F_X+A_3F\right) \\ \qquad +4X\left(3A_1A_3F+16A_1^2F_X-16A_1F_X^2-4A_1^3+2A_3FF_X\right)\Big] \\ A_5 = \dfrac{2A_1-A_3X-4F_X}{8(F-A_1X)^2}\Big[A_1\left(2A_1+3A_3X-4F_X\right)-4A_3F\Big] \end{cases}$$

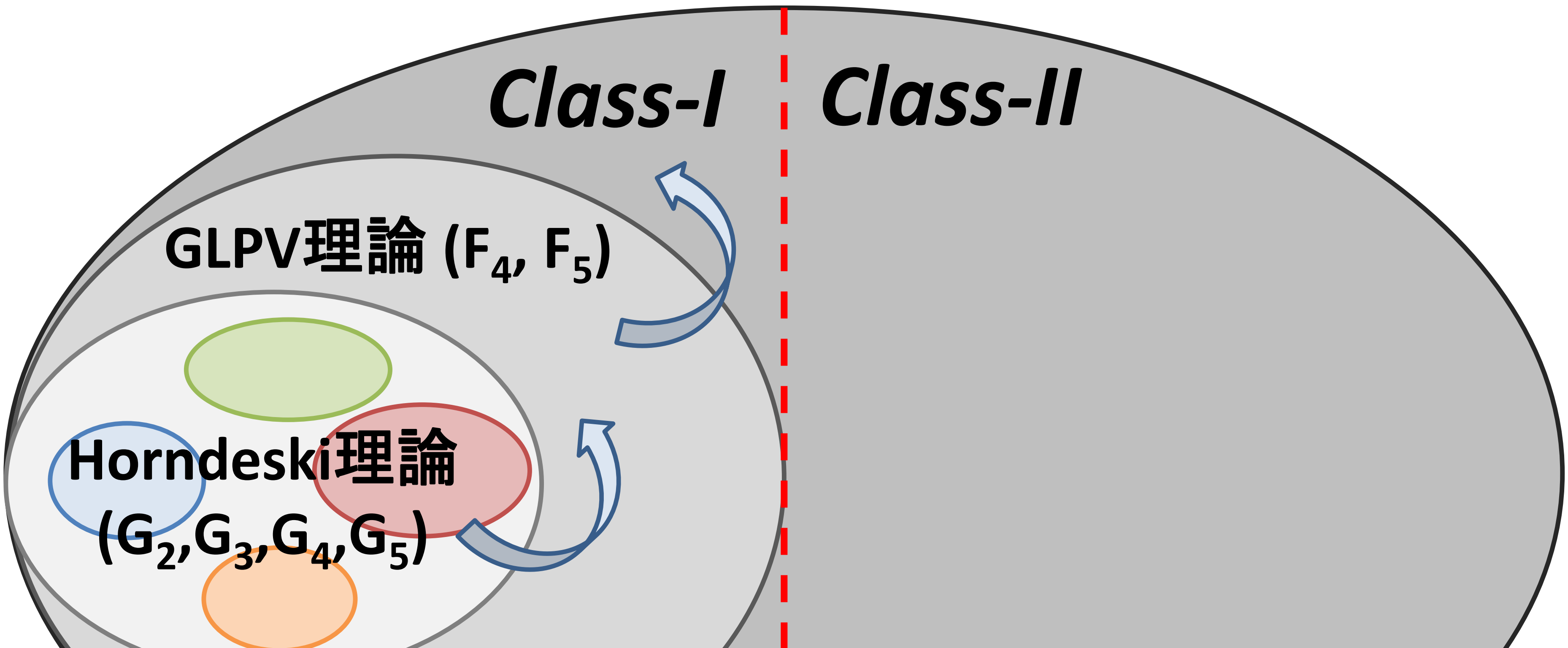
□Class-II ・・・(略)

✓ ∇∇Φ の3次 ・・・ (略)

スカラー･テンソル理論の拡がり



スカラー・テンソル理論の拡がり

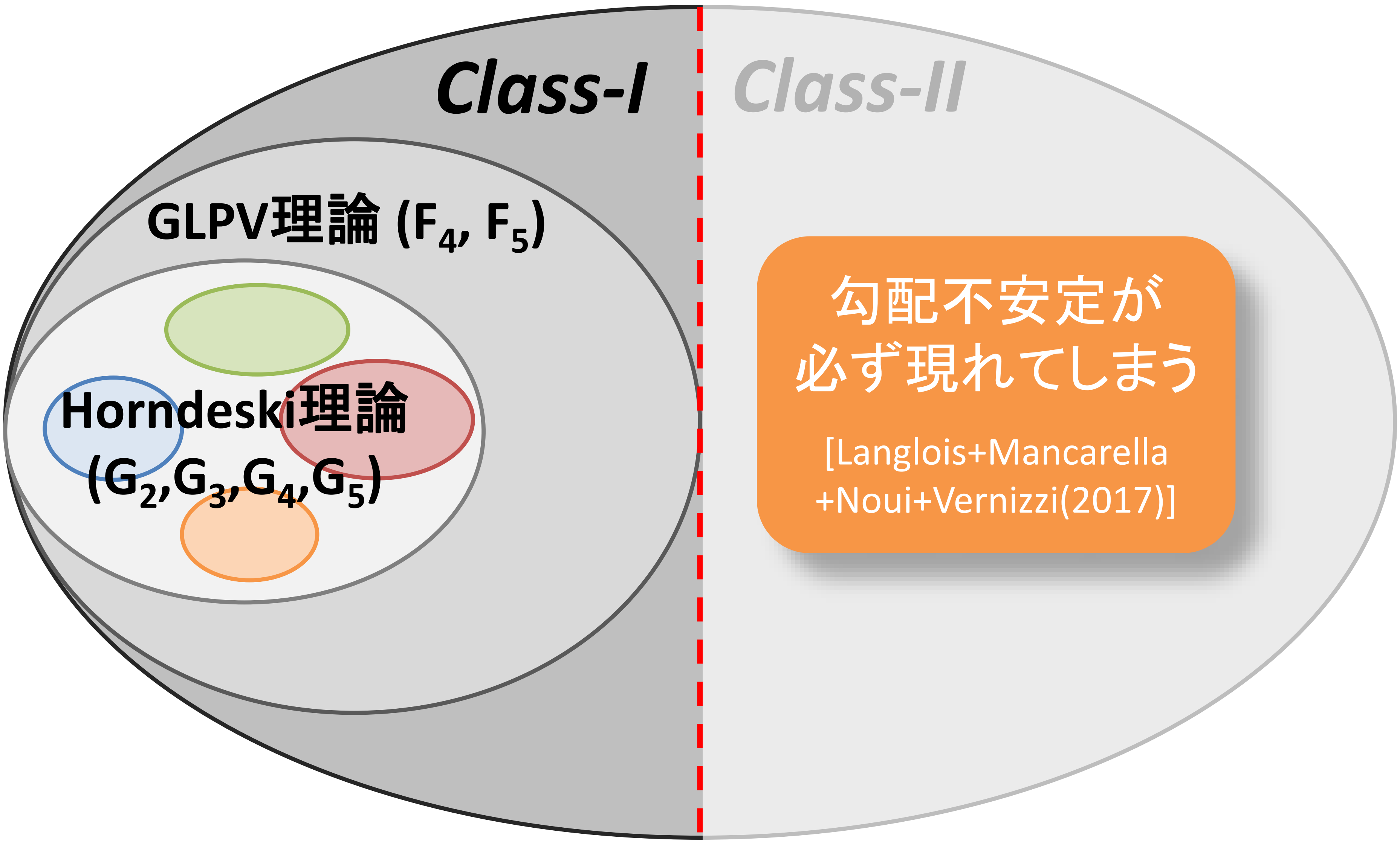


Xに依存するconformal-disformal変換

[Crisostomi+Koyama+Tasinato(2016), Ben Achour+Langlois+Noui(2016)]

$$g_{\mu\nu} \to \widetilde{g}_{\mu\nu} = C(X) g_{\mu\nu} + D(X) \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi$$

スカラー・テンソル理論の拡がり



バインシュタイン機構

遮蔽機構の必要性

- スカラー場は第五の力を媒介してしまう･･･
- 太陽系スケールの重力のテスト:

例えば $|\Psi/\Phi - 1| < O(10^{-4})$

重力源の周辺ではスカラー場は
抑制を受けなければいけない！

= 遮蔽機構

- 遮蔽機構の存在:

「**修正重力理論が最低限満たすべき条件**」の1つ

･･･カメレオン機構、バインシュタイン機構、など

$$\mathrm{d}s^2 = -\left(1 + 2\Phi(\boldsymbol{x})\right)\mathrm{d}t^2 + \left(1 - 2\Psi(\boldsymbol{x})\right)\mathrm{d}\boldsymbol{x}^2$$

✓一般相対論

$$\nabla\Phi = \nabla\Psi = G_N M/r^2$$

✓スカラー･テンソル理論

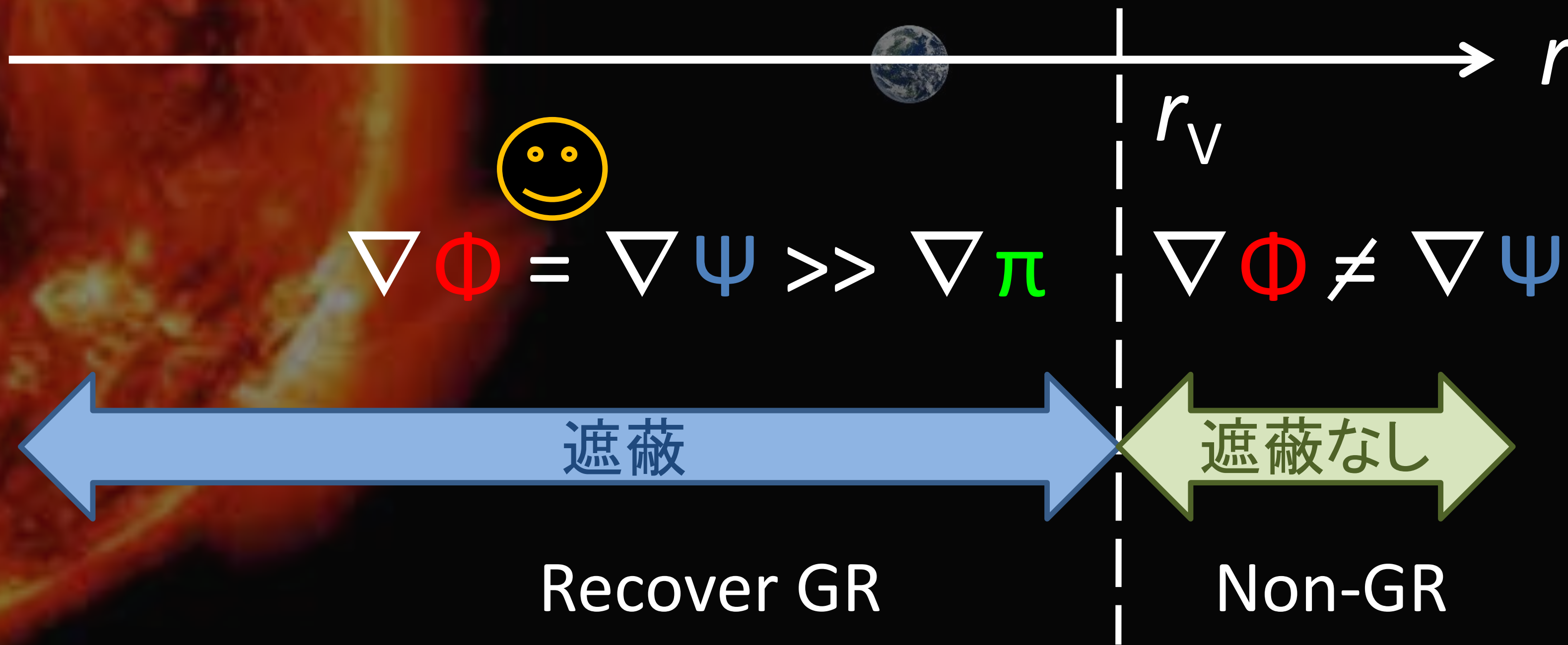
スカラー自由度がダイナミクスに影響

: $\phi(x) = \phi_0 + \pi(x)$

⇒ $\nabla\Phi \neq \nabla\Psi$!!!

$$\mathrm{d}s^2 = -\left(1 + 2\Phi(\boldsymbol{x})\right)\mathrm{d}t^2 + \left(1 - 2\Psi(\boldsymbol{x})\right)\mathrm{d}\boldsymbol{x}^2$$

スカラー自由度を含む修正重力理論は、
小スケールでスカラー場が媒介する力(∇π)
を抑制するための機構が必要。



例: 3次ガリレオンスカラーテンソル理論

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2}(\partial\pi)^2 + \frac{1}{4\Lambda^3}(\partial\pi)^2\Box\pi - \frac{1}{M_{\rm Pl}}\pi\rho$$

◆ 球対称を仮定 → πのEoMはπ'/rの代数方程式になる :

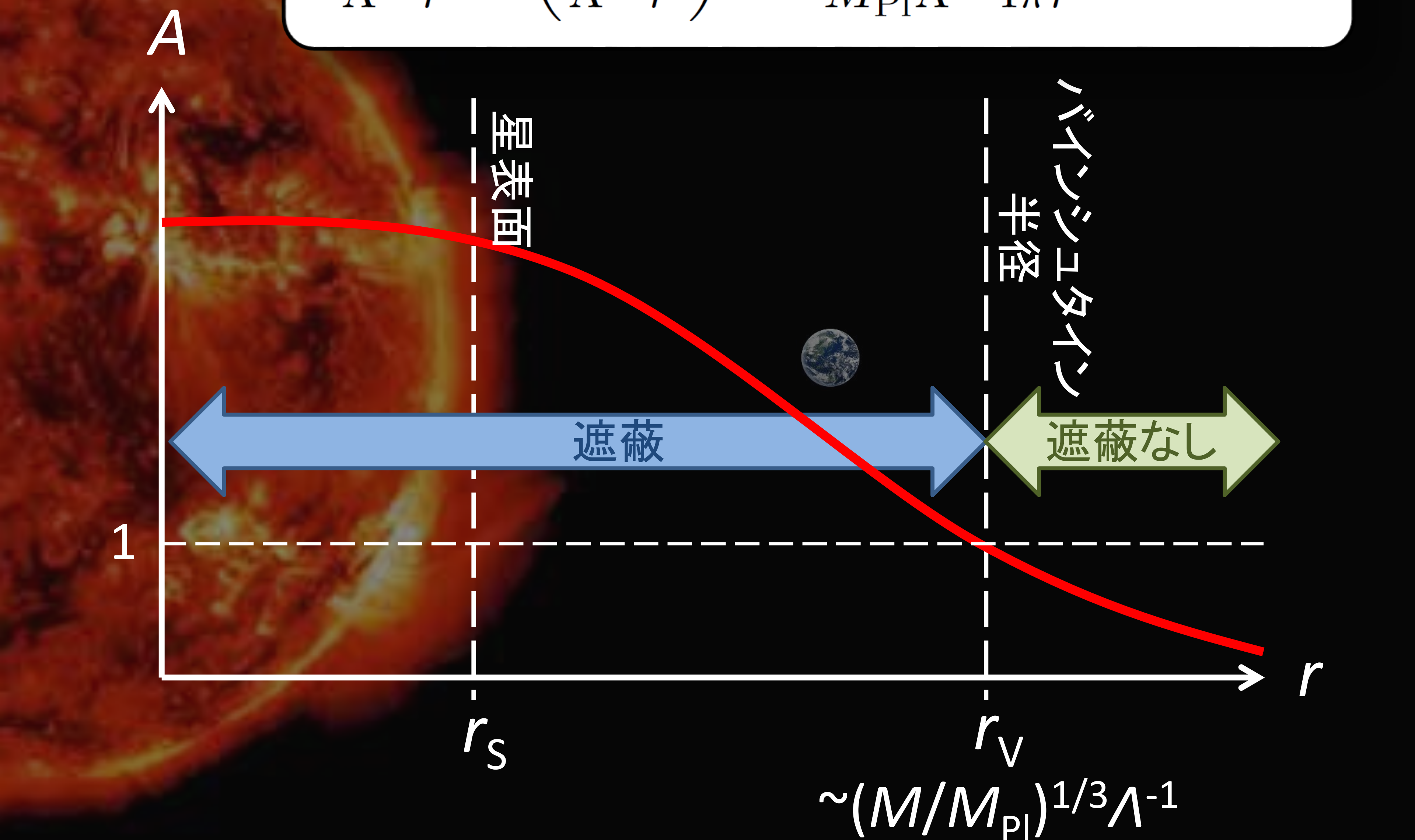
$$\frac{1}{\Lambda^3}\frac{\pi'}{r} + \left(\frac{1}{\Lambda^3}\frac{\pi'}{r}\right)^2 = \frac{1}{M_{\rm Pl}\Lambda^3}\frac{M(r)}{4\pi r^3}$$

◆ ニュートン則

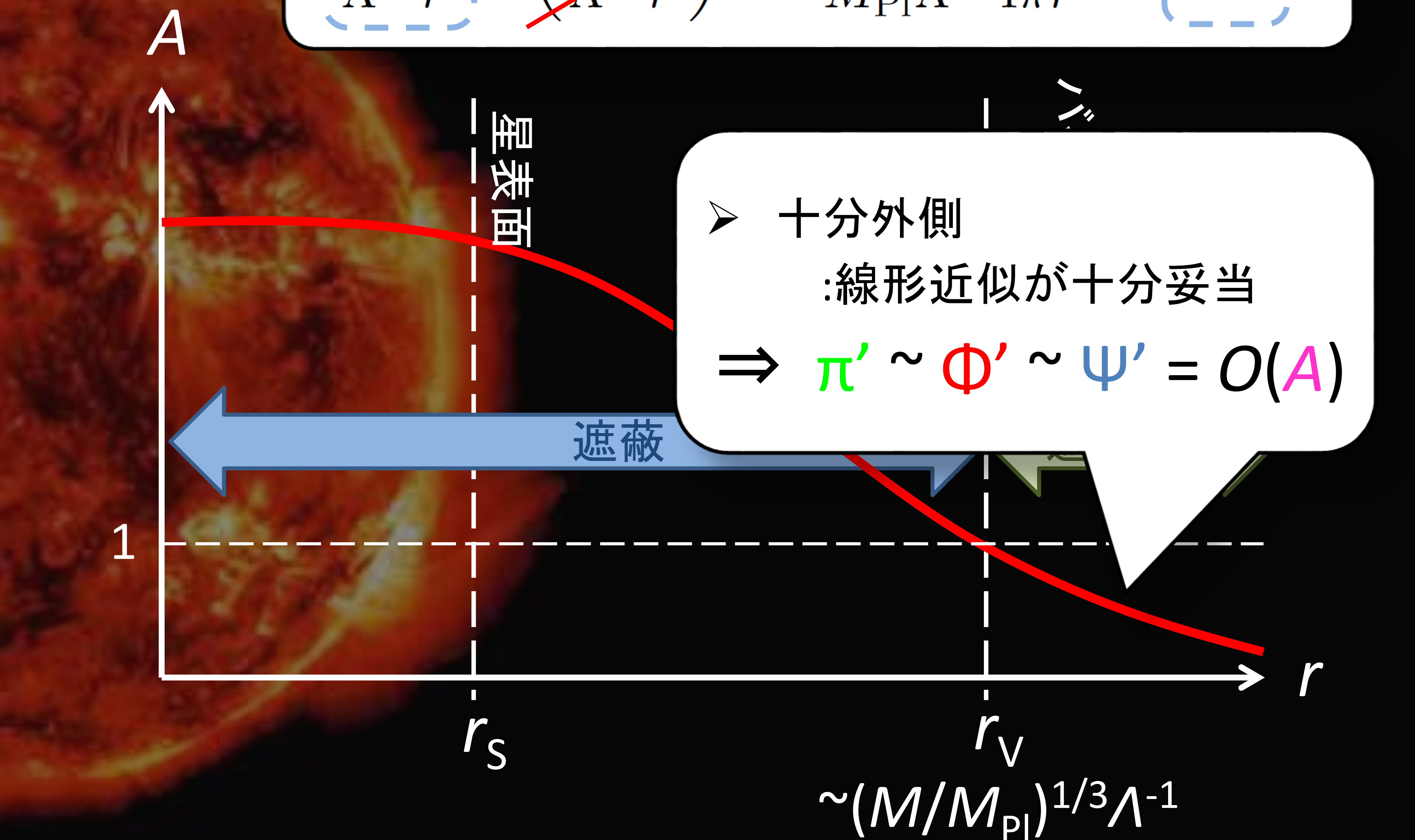
$$\left\{\begin{aligned} \Phi' &= \frac{G_{\rm N}M(r)}{r^2} \boxed{- \frac{\pi'}{M_{\rm Pl}}} \\ \Psi' &= \frac{G_{\rm N}M(r)}{r^2} \boxed{+ \frac{\pi'}{M_{\rm Pl}}} \end{aligned}\right.$$

第5の力

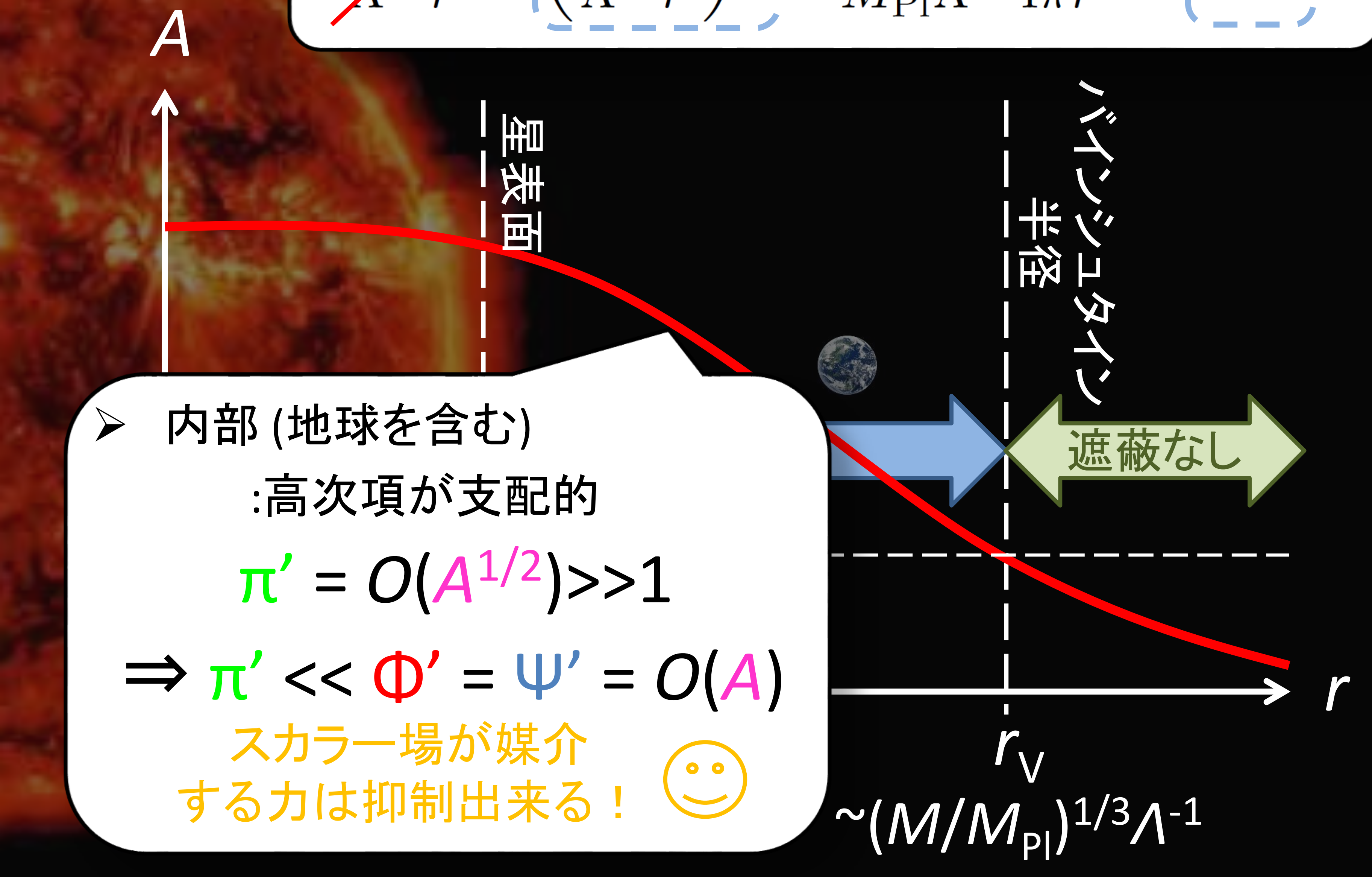
$$\frac{1}{\Lambda^3}\frac{\pi'}{r} + \left(\frac{1}{\Lambda^3}\frac{\pi'}{r}\right)^2 = \frac{1}{M_{\rm Pl}\Lambda^3}\frac{M(r)}{4\pi r^3} \equiv A(r)$$



$$\boxed{\frac{1}{\Lambda^3}\frac{\pi'}{r}} + \cancel{\left(\frac{1}{\Lambda^3}\frac{\pi'}{r}\right)^2} = \frac{1}{M_{\rm Pl}\Lambda^3}\frac{M(r)}{4\pi r^3} \equiv \boxed{A(r)}$$



$$\cancel{\frac{1}{\Lambda^3}\frac{\pi'}{r}} + \boxed{\left(\frac{1}{\Lambda^3}\frac{\pi'}{r}\right)^2} = \frac{1}{M_{\rm Pl}\Lambda^3}\frac{M(r)}{4\pi r^3} \equiv \boxed{A(r)}$$



- 内部 (地球を含む)

:高次項が支配的

$$\pi' = O(A^{1/2}) >> 1$$

$$\Rightarrow \pi' << \Phi' = \Psi' = O(A)$$

スカラー場が媒介
する力は抑制出来る！ ☺

例からわかること

- ナイーブには、スカラー・テンソル理論は

$$\nabla \pi \sim \nabla \Phi \underset{\neq}{\sim} \nabla \Psi$$

:第5の力がニュートン則と同じオーダーで寄与

- スカラー場の非線形微分相互作用が大きくなることで、重力源周辺でスカラー場自身を遮蔽することが出来る！

$$(\nabla^2 \pi)^n \nabla \pi \sim \nabla \pi << \nabla \Phi = \nabla \Psi$$

Horndeski理論での バインシュタイン機構

$$x(r) = \frac{1}{\Lambda^3}\frac{\pi'(r)}{r}$$

$$A(r) = \frac{1}{M_{\rm Pl}\Lambda^3}\frac{M(r)}{4\pi r^2}$$

- スカラー場運動方程式→ xの代数方程式

$$\mathcal{O}(1)A + 2\Big[\mathcal{O}(1) + \mathcal{O}(1)A \qquad\qquad \Big]x + \mathcal{O}(1)x^2 - \mathcal{O}(1)x^3 = 0$$

- 外部解 (x<<1, A<<1) → x〜O(A)：第5の力伝搬
- 内部解 (x>>1, A>>1) → $x^2 = \mathcal{O}(1)A$

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}r} = \dfrac{G_{\rm N}M}{r^2} \\ \dfrac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}r} = \dfrac{G_{\rm N}M}{r^2} \end{cases}$$

Horndeskiでも遮蔽機構が働く！

→ 太陽系スケールのテストをパス

[Narikawa+Kobayashi+Saito+**DY** (2013)]

GLPV理論での
バインシュタイン機構

$$x(r)=\frac{1}{\Lambda^3}\frac{\pi'(r)}{r}$$

$$A(r)=\frac{1}{M_{\rm Pl}\Lambda^3}\frac{M(r)}{4\pi r^2}$$

- スカラー場運動方程式→ xの代数方程式

$$\mathcal{O}(1)A+2\left[\mathcal{O}(1)+\mathcal{O}(1)A+\boxed{\mathcal{O}(1)\alpha_* rA'}\right]x+\mathcal{O}(1)x^2-\mathcal{O}(1)x^3=0$$

- □外部解 (x<<1, A<<1) → x～O(A)：同じ
- □内部解 (x>>1, A>>1) → $x^2=\mathcal{O}(1)A+\boxed{\mathcal{O}(1)\alpha_* rA'}$

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}r}=\dfrac{G_{\rm N}M}{r^2}+\dfrac{G_{\rm N}\Upsilon_1}{4}\dfrac{\mathrm{d}^2M}{\mathrm{d}r^2}\\[2mm] \dfrac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}r}=\dfrac{G_{\rm N}M}{r^2}-\dfrac{5G_{\rm N}\Upsilon_2}{4r}\dfrac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}r}\end{cases}$$

構造内部でのみ補正が現れる [Kobayashi+Watanabe+**DY** (2014)]

ニュートン則破れてるけどいいの？

→ 当然よくない。
→ 新しい重力理論への制限

$$\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}r} = \frac{G_\mathrm{N} M}{r^2} + \frac{G_\mathrm{N}\Upsilon_1}{4}\frac{\mathrm{d}^2 M}{\mathrm{d}r^2}$$
$$\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}r} = \frac{G_\mathrm{N} M}{r^2} - \frac{5G_\mathrm{N}\Upsilon_2}{4r}\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}r}$$

✓ 非相対論的なとき→Φに制約

- 星が作れなくなる [Saito+**DY**+Mizuno+Gleyzes+Langlois (2015)]
  → $\Upsilon_1 > -2/3$
- 水素燃焼する星の質量 [Sakstein(2015)]
  → $\Upsilon_1 < 0.027$

✓ 相対論的なとき→Φ, Ψに制約

- X線と重力レンズから推定した質量の差異 [Sakstein+ (2016)]
  → $\Upsilon_1 = -0.11^{+0.93}_{-0.67}$, $\Upsilon_2 = -0.22^{+1.22}_{-1.19}$

ニュートン則破れてるけどいいの？

$$\frac{d\Phi}{dr} = \frac{G_N M}{r^2} + \frac{G_N \Upsilon_1}{4}\frac{d^2 M}{dr^2}$$

→ 当然よくない。
→ 新しい重力理論への制限

✓ 非相対論的なとき→Φに制約

□ 星が作れなくなる

→ $Y_1 > -2/3$

□ 水素燃焼する星の質量

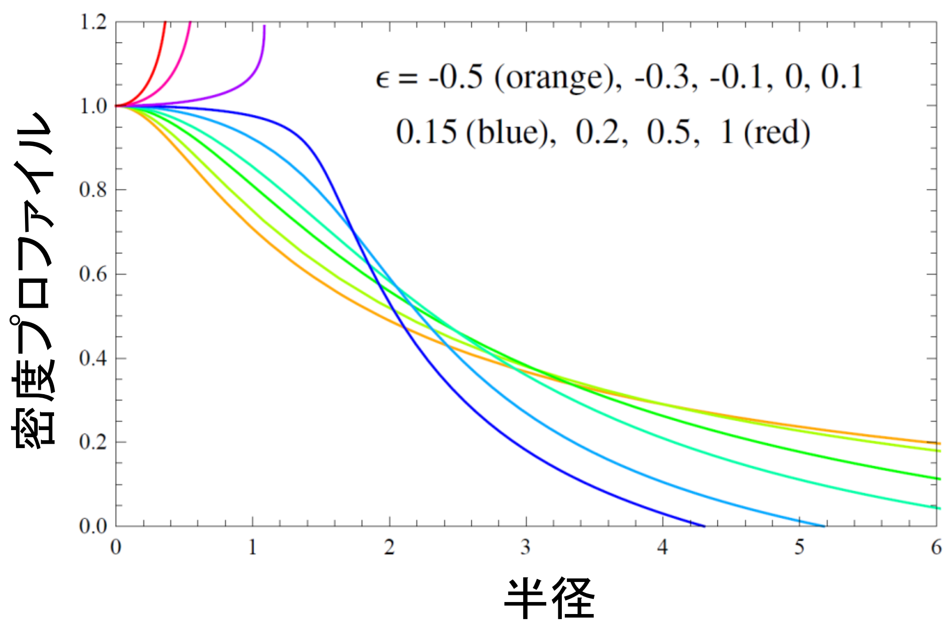
→ $Y_1 < 0.027$

✓ 相対論的なとき→Φ, Ψに制約

□ X線と重力レンズから推

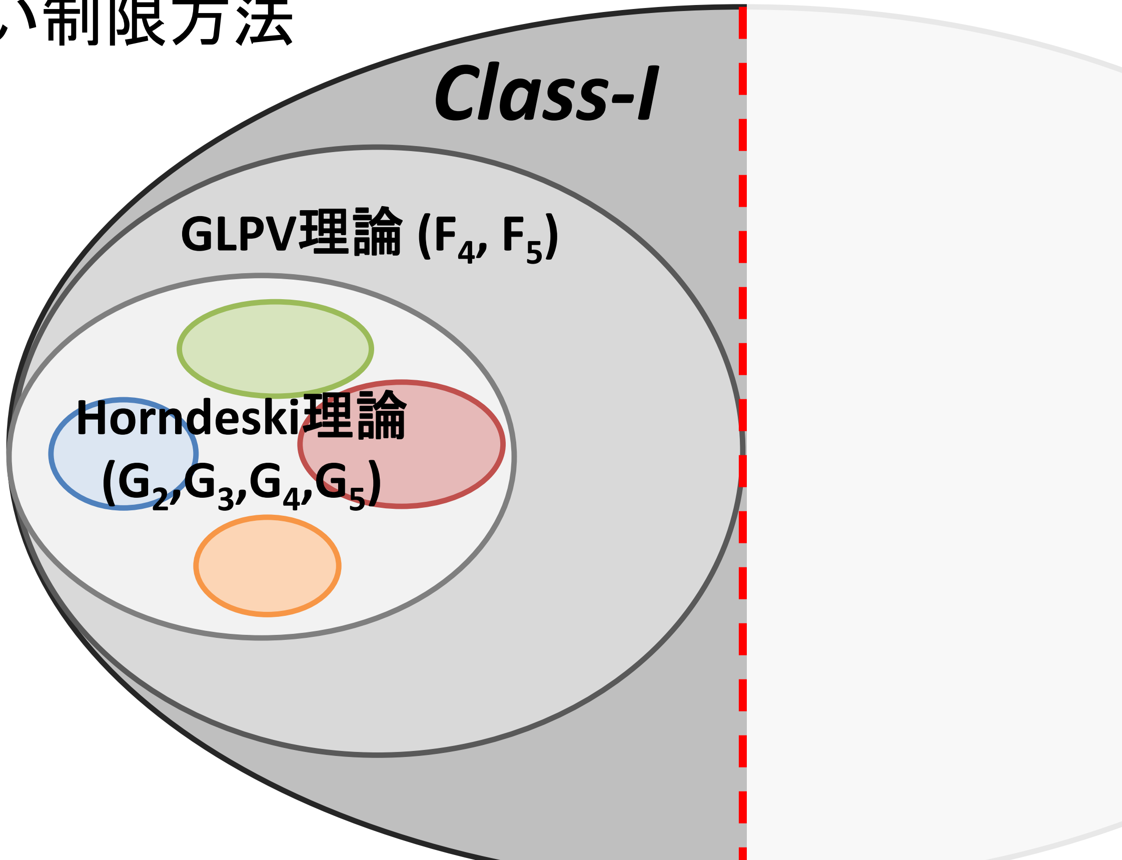
→ $Y_1 = -0.11^{+0.93}_{-0.67}$

- 静水圧平衡 dP/dr = -ρ dΦ/dr
- ポリトロープ状態方程式
- $\varepsilon = -Y_1/4 > 1/6$で密度が発散



ここまでのまとめ

- Horndeski→GLPV→DHOST
- 遮蔽機構が最低限必要
- 遮蔽機構の破れ→新しい制限方法



GW170817後の スカラー・テンソル理論

GW170817後の修正重力理論

✓重力波の音速(“c_{GW}”)と電磁気の速度(“c_{EM}”)が高い精度での一致

$$-3\times10^{-15} < (c_{GW} - c_{EM})/c_{EM} < 6\times10^{-16}$$

[Abbott+(2017)]

- 満たすためには・・・

☐(15桁にわたる)ファインチューニング

☐“c_{GW}”と“c_{EM}” が「常に厳密に」一致を要請：$c_{GW}=c_{EM}$

$c_{\mathrm{GW}}=c_{\mathrm{EM}}$を課したDHOST理論

➢重力波摂動の2次作用

[Langlois+Mancarella+Noui+Vernizzi (2017)]

$$\mathcal{L}_{\mathrm{GW}}^{(2)} = \frac{1}{8} a^3 M^2 \left[\dot{\gamma}_{ij}^2 - (1+\alpha_{\mathrm{T}}) \frac{(\partial_k \gamma_{ij})^2}{a^2} \right]$$

ここで、$\alpha_{\mathrm{T}} = \frac{2X}{M^2} \left[A_1 + F_{3\phi} - 3H^2 (B_2 + B_3) \right]$

- “c_{GW}”と“c_{EM}” が**「常に厳密に」**一致することを要請
  → $\alpha_{\mathrm{T}}=0$

$c_{GW}=c_{EM}$を課したDHOST理論

$$\alpha_{\mathrm{T}} = \frac{2X}{M^2}\left[A_1 + F_{3\phi} - 3H^2\left(B_2 + B_3\right)\right]$$

□ “c_{GW}”と“c_{EM}” が**「常に厳密に」**一致することを要請

✓ どんな宇宙論背景においても$\alpha_T=0$ → $B_2+B_3=0$

$B_2+B_3=0$と縮退条件を同時に満たす3次の項はない！

→ $F_3= 0$, $B_i = 0$

c_{GW}=c_{EM}を課したDHOST理論

$$\alpha_{\mathrm{T}} = \frac{2X}{M^2}\left[A_1 + \cancelto{0}{F_{3\phi} - 3H^2(B_2 + B_3)}\right]$$

- “c_{GW}”と“c_{EM}” が**「常に厳密に」**一致することを要請

  → A_1 = 0が必要

  - ユニタリーゲージ(ϕ=t)を取ると、より明らか:

$$\mathcal{L}^{\mathrm{DHOST}}_{\phi=t} = (F - XA_1)\,K_{ij}K^{ij} + F^{(3)}R + \cdots$$

[Langlois+Saito+**DY**+Noui (2017)]

$c_{\rm GW}=c_{\rm EM}$を課したDHOST理論

$$\mathcal{L}^{\rm DHOST}_{c_{\rm GW}=c_{\rm EM}} = P + Q\Box\phi + FR + A_3\,\Box\phi\nabla^\mu\phi\nabla^\nu\phi\nabla_\mu\nabla_\nu\phi + \frac{1}{8F}\left[48F_X{}^2 - 8(F - XF_X)A_3 - X^2A_3^2\right]\nabla^\mu\phi\nabla_\nu\phi\nabla_\mu\nabla^\rho\phi\nabla_\rho\nabla^\nu\phi + \frac{1}{2F}(4F_X + XA_3)\,A_3\,(\nabla^\mu\phi\nabla^\nu\phi\nabla_\mu\nabla_\nu\phi)^2$$

任意関数は2つ(+2つ):

$F(\phi,X)$, $A_3(\phi,X)$, [$P(\phi,X)$, $Q(\phi,X)$]

$c_{GW}=c_{EM}$を課したHorndeski/GLPV理論

- 生き残っているGLPV理論

$$A_1 = 2G_{4X} + XF_4 = 0\,, \quad G_5 = F_5 = 0\,.$$

$$\Downarrow$$

$$\mathcal{L}^{\rm GLPV}_{c_{\rm GW}=c_{\rm EM}} = G_2(\phi,X) - G_3(\phi,X)\Box\phi + F(\phi,X)R - \frac{4}{X}F_X(\phi,X)\nabla^\mu\phi\nabla^\nu\phi\left[\Box\phi\nabla_\mu\nabla_\nu\phi + \nabla_\mu\nabla^\rho\phi\nabla_\rho\nabla_\nu\phi\right]$$

- 生き残っているHorndeski理論：$G_2(\phi,X)$, $G_3(\phi,X)$, $G_4(\phi)$

多くの模型は死んでしまった・・・

$c_{\mathrm{GW}}=c_{\mathrm{EM}}$を課したDHOST理論

- バインシュタイン機構は正しく働く？

[Langlois+Saito+**DY**+Noui (2017)]

$c_{\rm GW}=c_{\rm EM}$を課したDHOST理論

➢バインシュタイン機構は正しく働く？

→ $c_{\rm GW}=c_{\rm EM}$でも遮蔽の破れが起こる！

$$\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}r}=\frac{G_{\rm N}M}{r^2}+\Xi_1 G_{\rm N}\frac{\mathrm{d}^2M}{\mathrm{d}r^2}$$
$$\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}r}=\frac{G_{\rm N}M}{r^2}+\Xi_2 G_{\rm N}\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}r}+\Xi_3 G_{\rm N}\frac{\mathrm{d}^2M}{\mathrm{d}r^2}$$

cf) GLPVのとき
$$\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}r}=\frac{G_{\rm N}M}{r^2}+\frac{G_{\rm N}\Upsilon_1}{4}\frac{\mathrm{d}^2M}{\mathrm{d}r^2}$$
$$\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}r}=\frac{G_{\rm N}M}{r^2}-\frac{5G_{\rm N}\Upsilon_2}{4r}\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}r}$$

[Langlois+Saito+**DY**+Noui (2017)]

$c_{\mathrm{GW}}=c_{\mathrm{EM}}$を課したDHOST理論

- バインシュタイン機構は正しく働く？

→ $c_{\mathrm{GW}}=c_{\mathrm{EM}}$でも遮蔽の破れが

$$\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}r} = \frac{G_{\mathrm{N}}M}{r^2} + \Xi_1 G_{\mathrm{N}} \frac{\mathrm{d}^2 M}{\mathrm{d}r^2}$$

$$\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}r} = \frac{G_{\mathrm{N}}M}{r^2} + \Xi_2 G_{\mathrm{N}} \frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}r} + \Xi_3 G_{\mathrm{N}} \frac{\mathrm{d}^2 M}{\mathrm{d}r^2}$$

ポイント1:
GLPVにはなかった
破れの項が表れた

cf) GLPVのとき

$$\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}r} = \frac{G_{\mathrm{N}}M}{r^2} + \frac{G_{\mathrm{N}}\Upsilon_1}{4}\frac{\mathrm{d}^2 M}{\mathrm{d}r^2}$$

$$\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}r} = \frac{G_{\mathrm{N}}M}{r^2} - \frac{5G_{\mathrm{N}}\Upsilon_2}{4r}\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}r}$$

[Langlois+Saito+**DY**+Noui (2017)]

$c_{\mathrm{GW}}=c_{\mathrm{EM}}$を課したDHOST理論

$$\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}r} = \frac{G_{\mathrm{N}} M}{r^2} + \Xi_1 G_{\mathrm{N}} \frac{\mathrm{d}^2 M}{\mathrm{d}r^2}$$

$$\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}r} = \frac{G_{\mathrm{N}} M}{r^2} + \Xi_2 G_{\mathrm{N}} \frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}r} + \Xi_3 G_{\mathrm{N}} \frac{\mathrm{d}^2 M}{\mathrm{d}r^2}$$

- パラメータはF, F_X, A_3, A_{3X}だけで書ける:

$$8\pi G_{\mathrm{N}} = \frac{2}{4F + 4F_X \dot{\phi}^2 - 3A_3 \dot{\phi}^4}$$

$$\Xi_1 = -\frac{(4F_X + A_3\dot{\phi}^2)^2}{16 F A_3}, \quad \Xi_2 = \frac{2F_X \dot{\phi}^2}{F}, \quad \Xi_3 = \frac{16F_X^2 - A_3^2 \dot{\phi}^4}{16 F A_3}.$$

[Langlois+Saito+**DY**+Noui (2017)]

$c_{\mathrm{GW}}=c_{\mathrm{EM}}$を課したDHOST理論

$$\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}r} = \frac{G_{\mathrm{N}} M}{r^2} + \Xi_1 G_{\mathrm{N}} \frac{\mathrm{d}^2 M}{\mathrm{d}r^2}$$

$$\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}r} = \frac{G_{\mathrm{N}} M}{r^2} + \Xi_2 G_{\mathrm{N}} \frac{\mathrm{d} M}{\mathrm{d}r} + \Xi_3 G_{\mathrm{N}} \frac{\mathrm{d}^2 M}{\mathrm{d}r^2}$$

➢性質:

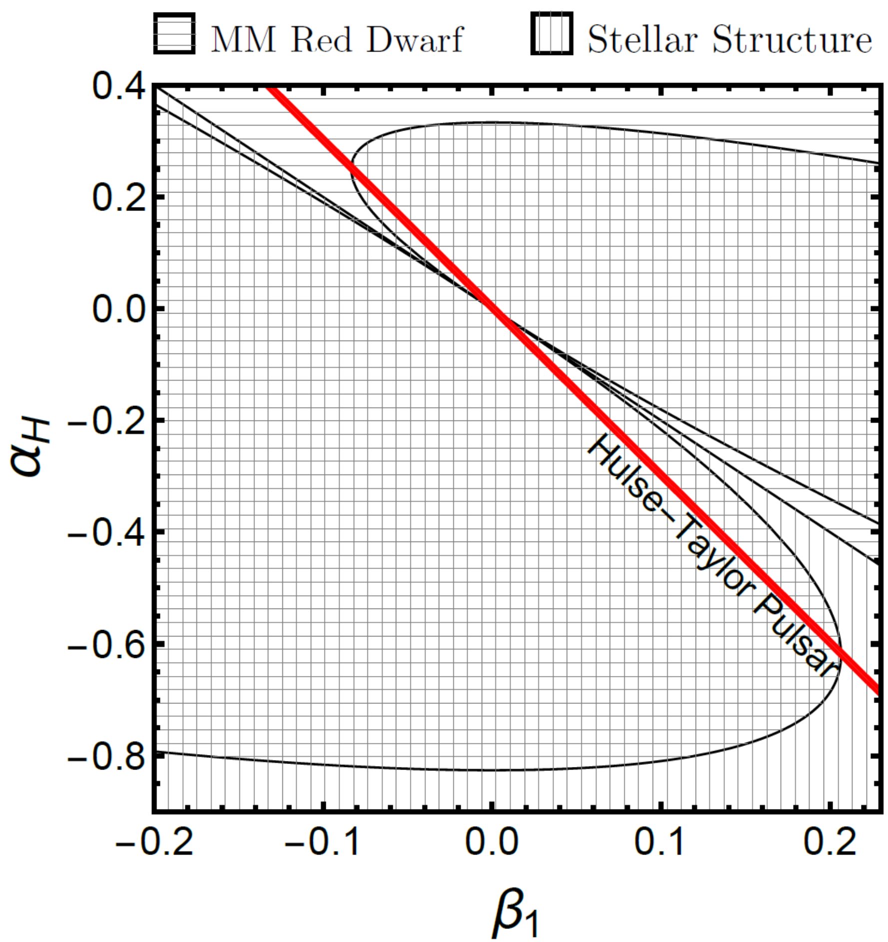
[1] $\Xi_{1,2,3}$ の間に整合性条件がある

$$\Xi_3^2 - \Xi_1^2 = \frac{1}{2}\Xi_1\Xi_2$$

[2] $\dot{\phi} = 0$ であっても $\Xi_1, \Xi_3 \neq 0$

[3] $4F_X - 3A_3\dot{\phi}^2 = 0$ のとき $\Xi_1, \Xi_3 = 0$

破れを通じた制限



[Dima+Vernizzi(2017)]

$$\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}r} = \frac{G_\mathrm{N} M}{r^2} + \Xi_1 G_\mathrm{N} \frac{\mathrm{d}^2 M}{\mathrm{d}r^2}$$

$$\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}r} = \frac{G_\mathrm{N} M}{r^2} + \Xi_2 G_\mathrm{N} \frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}r} + \Xi_3 G_\mathrm{N} \frac{\mathrm{d}^2 M}{\mathrm{d}r^2}$$

ニュートン則の修正
→ 星内部構造に影響を及ぼす

- 星構造の安定性
  [Saito+**DY**+Mizuno+Gleyzes+Langlois (2015)]
  → $\Xi_1 > -1/6$
- 赤色矮星の質量 [Sakstein(2015)]
  → $\Xi_1 < 0.4$
- (ニュートン定数の差異)

破れを通じた制限

□破れが全て観測的に棄却されると･･･

$$\Xi_1 = \Xi_2 = \Xi_3 = 0$$

$$\Downarrow$$

$$A_I = 0\,, \quad F_X = 0$$

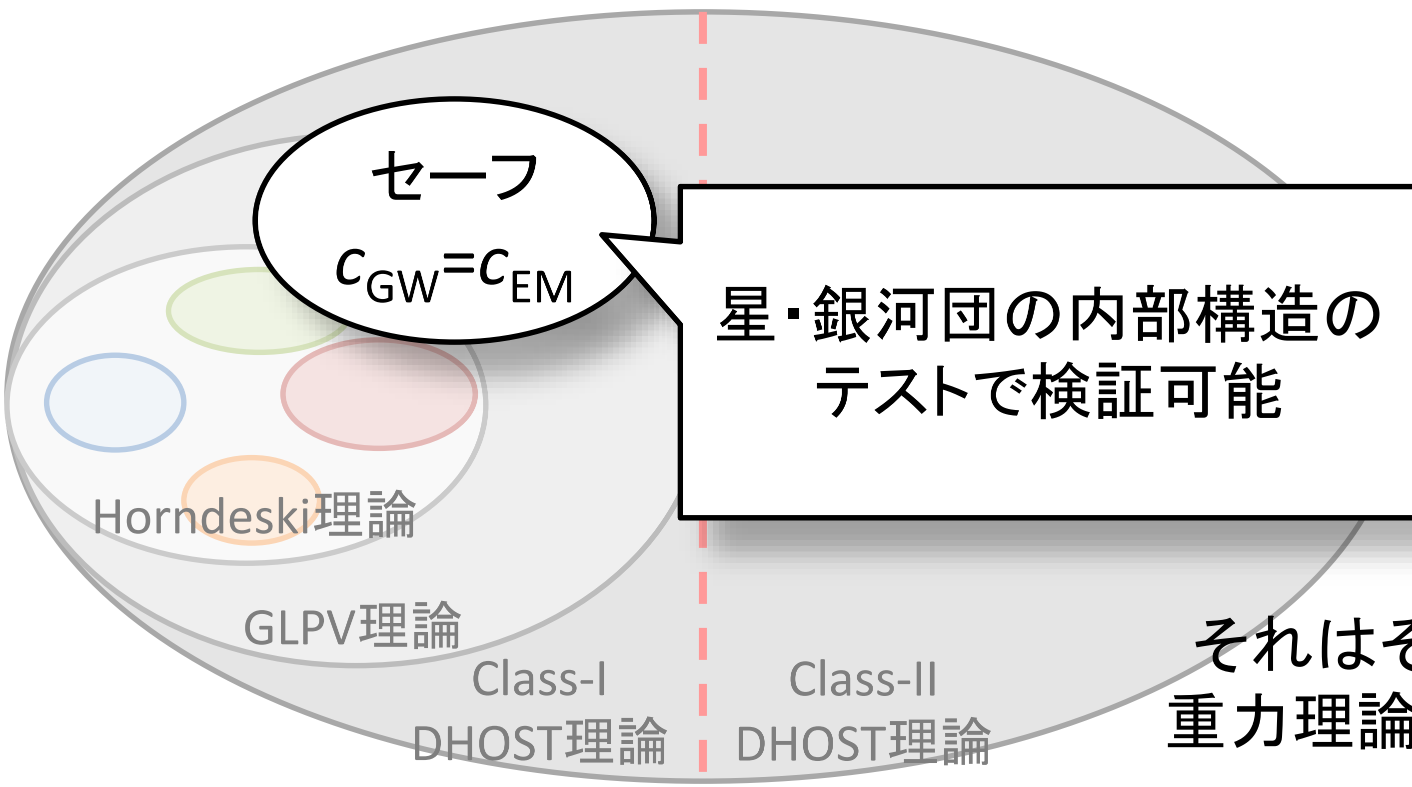
$$\Downarrow$$

$$\mathcal{L}^{\Xi_i=0}_{c_{\rm GW}=c_{\rm EM}} = P(\phi, X) - Q(\phi, X)\Box\phi + F(\phi)R$$

まとめ：
GW170817後のスカラーテンソル理論

□だいたい死んだ・・・が、結構生き残っている

[重力波の音速と電磁気の速度が一致を示唆]



それはそれとして
重力理論は楽しい

これから：物質場との結合

- これまで物質場のことは忘れていた

  → どのように重力場と物質場が結合するか？

[conformal-disformal変換で重力セクターは移り変わる]

$$\widetilde{g}_{\mu\nu} = C(\phi, X) g_{\mu\nu} + D(\phi, X) \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi$$

- 例) バリオン → 最小結合
  ダークマター → coformal-disformal変換した計量に結合

⇒ 赤方偏移空間歪み(RSD)の解釈が変わる!

[Kimura+Suyama+Yamaguchi+**DY**+Yokoyama (2017)]