

弱い重力予想と現象論

野海 俊文

(神戸大、Wisconsin-Madison)

refs: 1802.04287 w/S. Andriolo, D. Junghans, G. Shiu
a paper in preparation w/Y. Hamada, G. Shiu

8th Aug 2018 @ PPP



Weak Gravity Conjecture (弱い重力予想)

量子重力理論では

各 U(1) ゲージ相互作用につき

$$g^2 q^2 \geq \frac{m^2}{2M_{\text{Pl}}^2}$$

を満たす粒子が少なくとも1つ存在する

[ArkaniHamed-Motl-Nicolis-Vafa 06']

Weak Gravity Conjecture (弱い重力予想)

量子重力理論では

各 U(1) ゲージ相互作用につき

$$U(1) \rightarrow g^2 q^2 \geq \frac{m^2}{2M_{\text{Pl}}^2} \leftarrow \text{重力}$$

を満たす粒子が少なくとも1つ存在する

[ArkaniHamed-Motl-Nicolis-Vafa 06']

Weak Gravity Conjecture (弱い重力予想)

量子重力理論では

各 U(1) ゲージ相互作用につき

$$g^2 q^2 \geq \frac{m^2}{2M_{\text{Pl}}^2} \xrightarrow{M_{\text{Pl}} \rightarrow \infty} 0$$

を満たす粒子が少なくとも1つ存在する

[ArkaniHamed-Motl-Nicolis-Vafa 06']

Weak Gravity Conjecture (弱い重力予想)

量子重力理論では

各 U(1) ゲージ相互作用につき

$$g^2 q^2 \geq \frac{m^2}{2M_{\text{Pl}}^2}$$

を満たす粒子が少なくとも1つ存在する

[ArkaniHamed-Motl-Nicolis-Vafa 06']

標準模型 QED では電子が自明に満たす：

$$10^{-2} \sim g^2 q^2 \geq \frac{m^2}{2M_{\text{Pl}}^2} \sim 10^{-44}$$

一見役立たずに思えるけれど、

その一般化はインフレーションや暗黒物質のモデルに

強い制限を与えることが知られている

このトークでは

Weak Gravity Conjecture が

- どのようにモチベートされるのか
- 現象論（インフレーション）とどう関わるのか

を自分の仕事も交えつつ紹介したいと思います

plan

1. Introduction: Landscape と Swampland
2. Weak Gravity Conjecture とその拡張
3. Inflation 模型への示唆
4. まとめと展望

1. Landscape と Swampland (沼地)



Landscape : 弦理論にはほぼ無限個の真空が存在する！？
余剰次元の形、ブレーンをどう配置するか、…



QFT 4

QFT 3

低エネルギーで様々な場の量子論的モデルを提供
(しかも量子重力と整合性が取れた形で！)

QFT 5

QFT 1

QFT 2

Landscape : 弦理論にはほぼ無限個の真空が存在する！？
余剰次元の形、ブレーンをどう配置するか、...

弦理論 = 量子重力を取り込んだ QFT 模型の生成機

Q. 全ての場の量子論的モデルを弦理論から再現できるか？

A. NO!!!

no global symmetry in string theory

string に現れる連続対称性はゲージ化されている！

- 世界面の理論を考えると…

保存カレントからゲージ粒子の頂点演算子が構成可能

[Banks-Dixon '88, …]

- AdS/CFT を仮定すると…

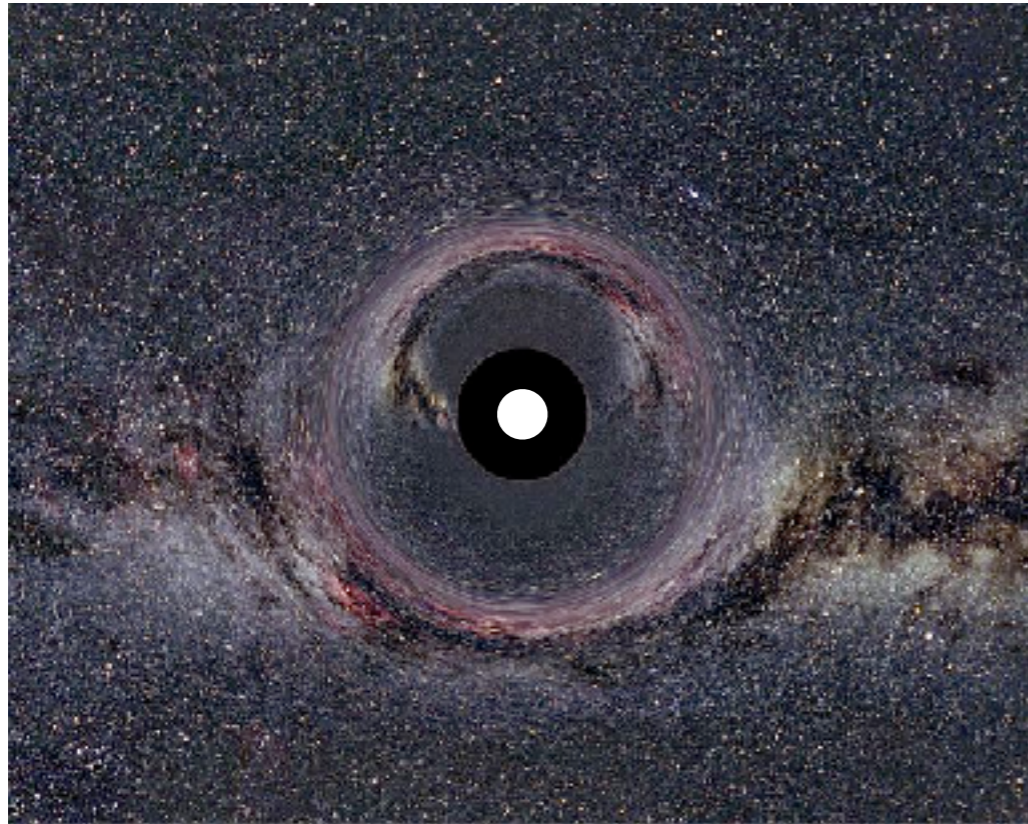
CFT の保存カレント $J^\mu \Leftrightarrow$ bulk AdS のゲージ場 A_M

最近は離散対称性にまで拡張する試みも [Harlow-Ooguri, …]

ブラックホールの思考実験をすると

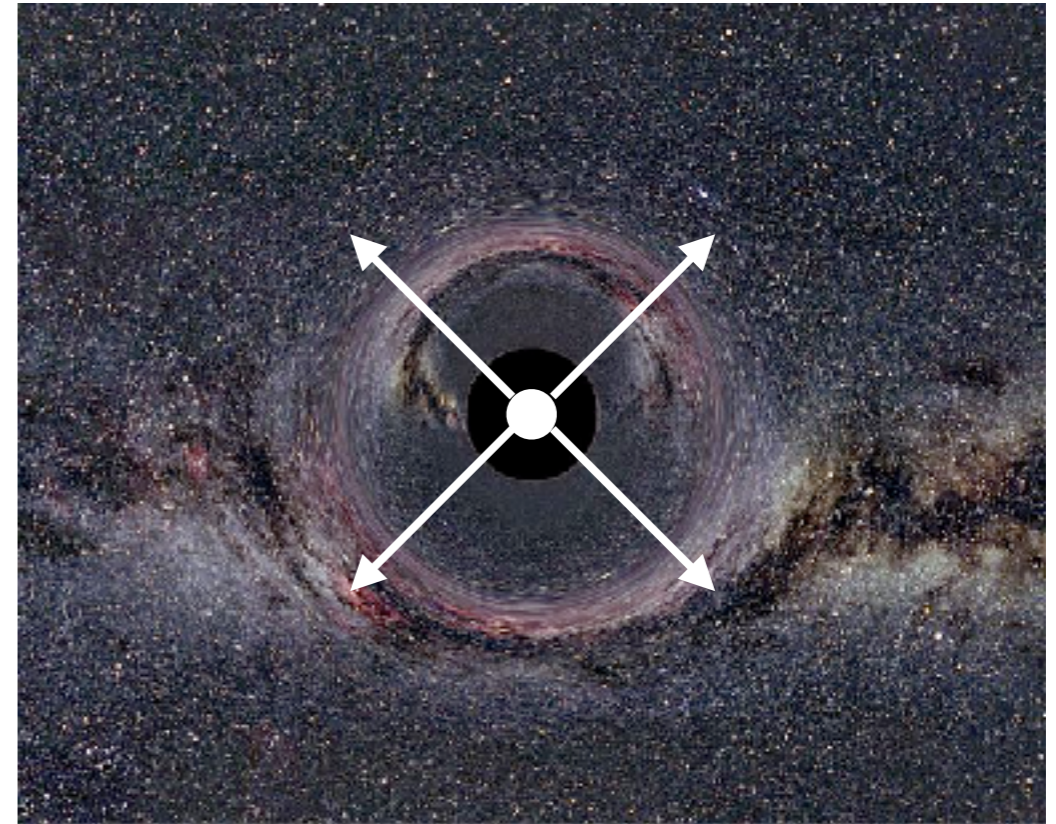
より一般に no global symmetry in 量子重力！？

global vs gauge in the BH context



global symmetry

ex. $B - L$



gauge symmetry

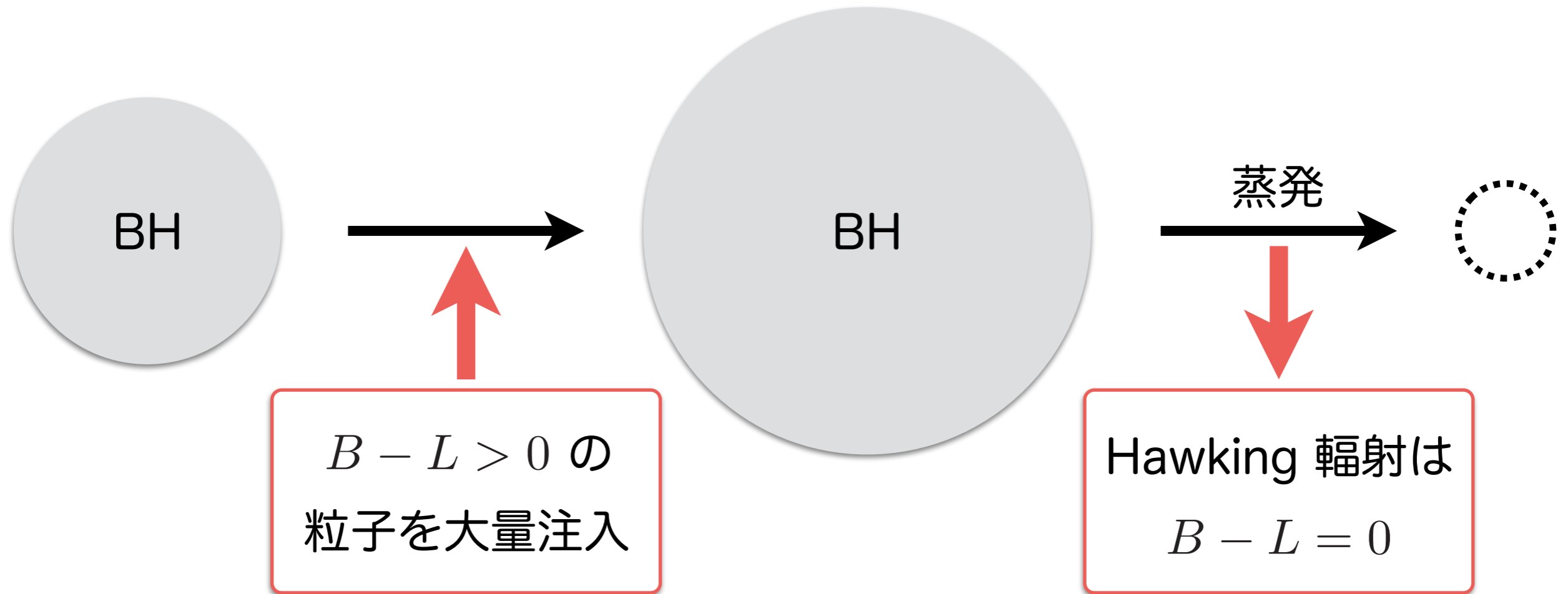
ex. $U(1)_{EM} Q$

no-hair theorem:

事象の地平線 \rightarrow global symmetry charge の情報はなくなる

cf. elemag charge は BH のまわりの電場を見ればわかる

no global symmetry in 量子重力



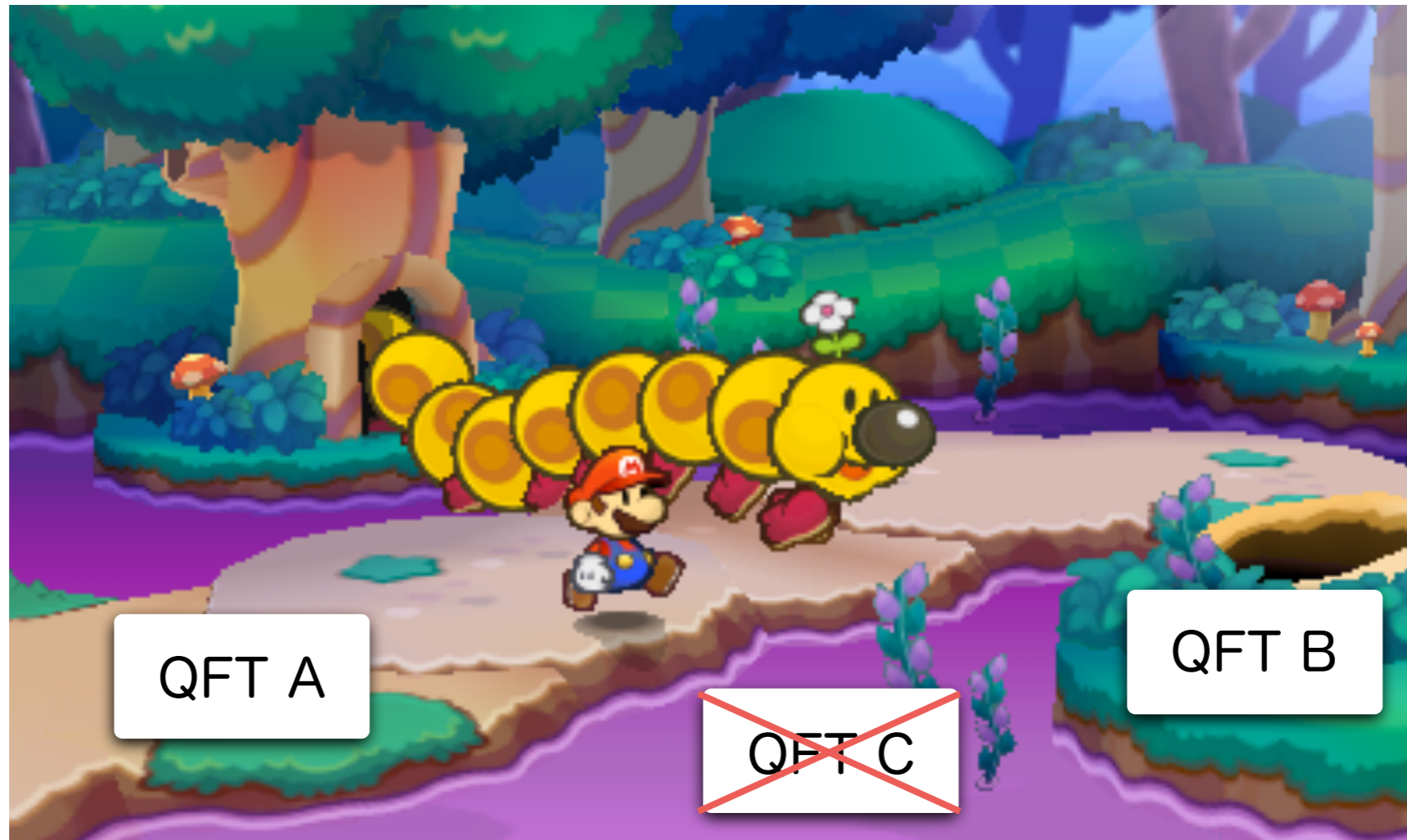
BH の蒸発を考えると、global symmetry charge は保存しない
→ global symmetry は存在したとしても近似的対称性！

cf. ゲージ対称性の場合には電場の影響で Hawking 輻射は中性でない

このように、弦理論（より一般に量子重力）を考えると
理論の持つ対称性や matter contents に非自明な制限
→ Landscape と Swampland [Vafa '06]

landscape :

量子重力と整合的な場の量子論的模型



swampland :

重力を考えなければ無矛盾な理論だが、
量子重力とは無矛盾に couple できない

Swampland program



- Landscape と Swampland の境界を決める条件な何か??
- その現象論的帰結は?? (量子重力への現象論的手がかり!)

plan

1. Introduction: Landscape と Swampland ✓
2. Weak Gravity Conjecture とその拡張
3. Inflation 模型への示唆
4. まとめと展望

2. Weak Gravity Conjecture とその拡張

Weak Gravity Conjecture

[ArkaniHamed-Motl-Nicolis-Vafa 06']

global symmetry = gauge symmetry @ $g = 0$

→ gauge coupling g への定量的下限はあるか??

Einstein-Maxwell 理論におけるブラックホール

1) sub-extremal BH: $g|Q| < M/\sqrt{2}M_{\text{Pl}}$

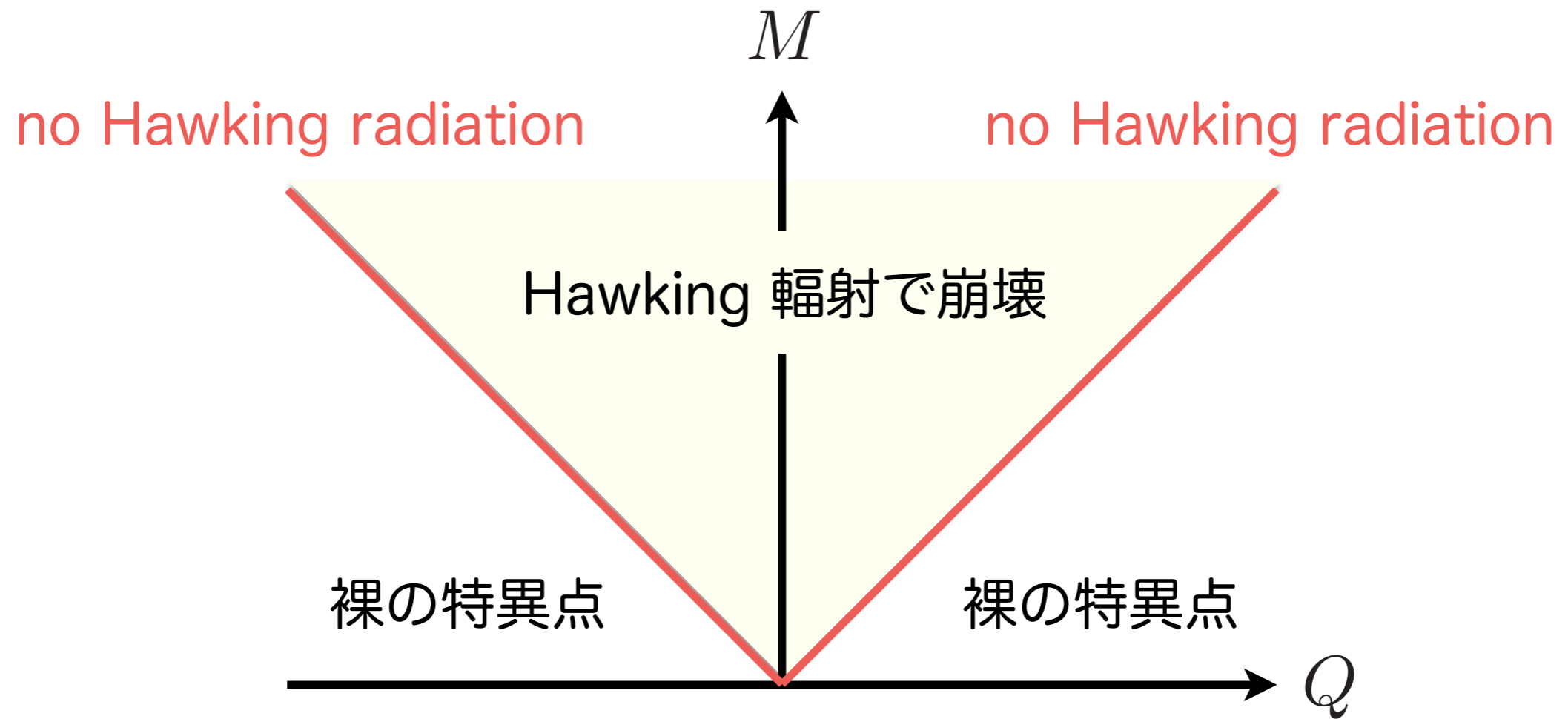
$T \neq 0$ の Hawking 輻射を出して extremal BH に崩壊

2) extremal BH: $g|Q| = M/\sqrt{2}M_{\text{Pl}}$

$T = 0$; Hawking 輻射を出さない

→ 別の崩壊機構を持たない限りは安定に存在し続ける

※ $g|Q| > M/\sqrt{2}M_{\text{Pl}}$ は裸の特異点 (cf. cosmic censorship)

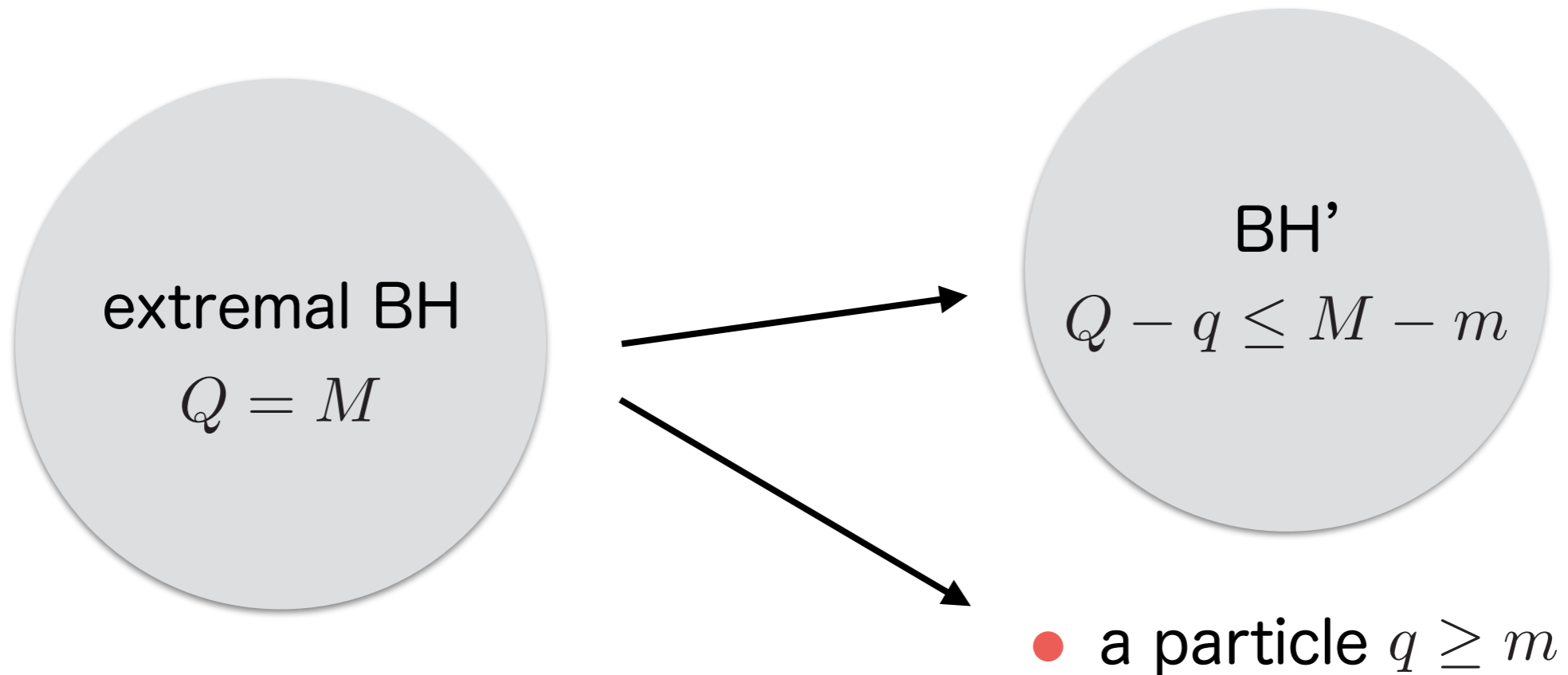


[ArkaniHamed-Motl-Nicolis-Vafa 06'] が提案した作業仮説：
 対称性 (ex. SUSY) で守られていない extremal BH は
 何かしらの崩壊チャンネルを持つべし！

- 対称性で守られていない安定状態が無数にあるのは不思議
- entropy bound (conjecture) との相性が悪い

Weak Gravity Conjecture

[ArkaniHamed-Motl-Nicolis-Vafa 06']



extremal BH が崩壊チャンネルを持ち、

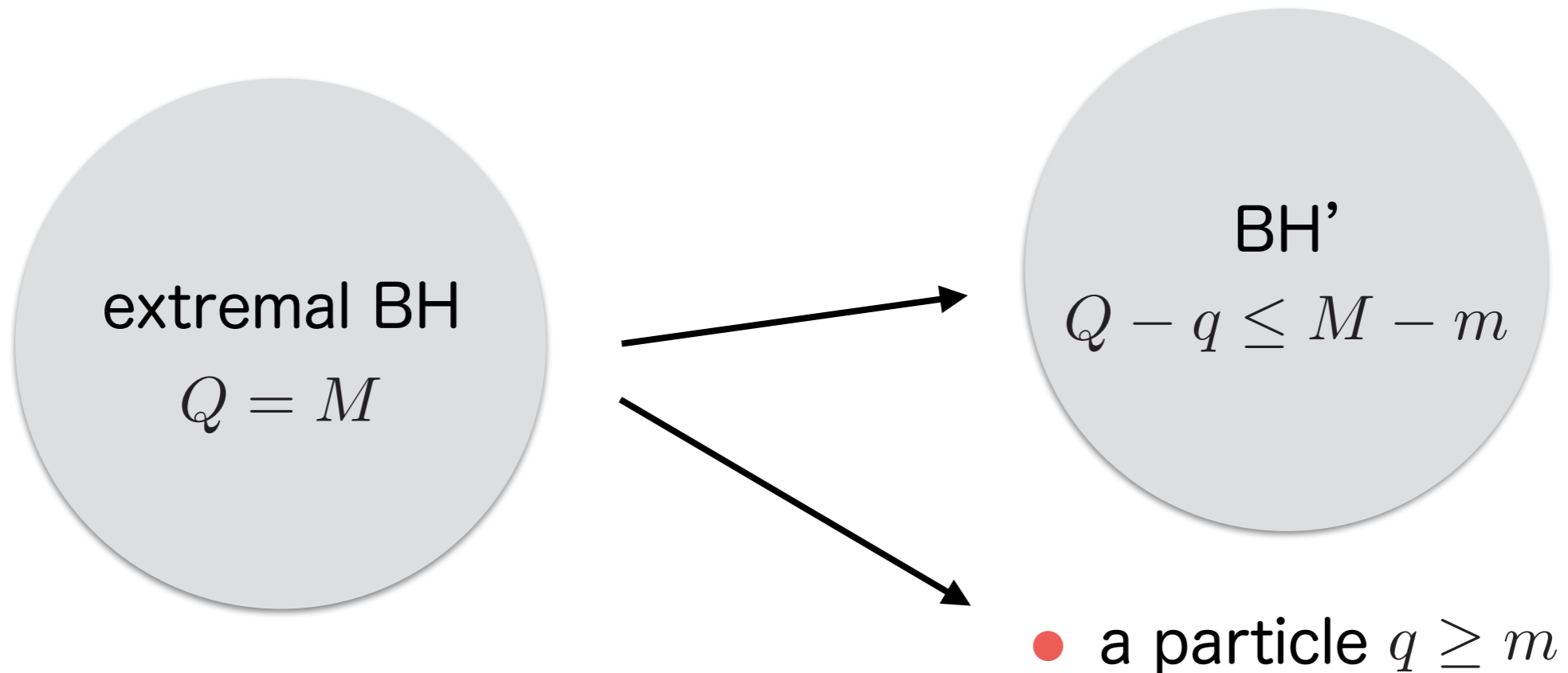
かつ崩壊した後のBHが裸の特異点を持たない

→ $q \geq m$ を満たす粒子が少なくとも1つ存在

簡単のため $Q_{\text{ext}} = M_{\text{ext}}$ な単位系

Weak Gravity Conjecture

[ArkaniHamed-Motl-Nicolis-Vafa 06']



extremal BH が崩壊チャンネルを持ち、

かつ崩壊した後のBHが裸の特異点を持たない

→ $gq \geq \frac{m}{\sqrt{2}M_{\text{Pl}}}$ を満たす粒子が少なくとも1つ存在

簡単のため $Q_{\text{ext}} = M_{\text{ext}}$ な単位系

- 弦理論の具体例で様々なチェック

[Brown et al '15, Heidenreich et al '15, Hebecker-Soler '17, Montero et al '17, ...]

- AdS/CFT を用いた理解

[Nakayama-Nomura '15, Harlow '15, Benjamin et al '16, Montero et al '16, ...]

- 今のところ反例は知られていない

Q. extremal BH が崩壊すべしという作業仮説はどうやねん??

Evidence of WGC from unitarity and causality

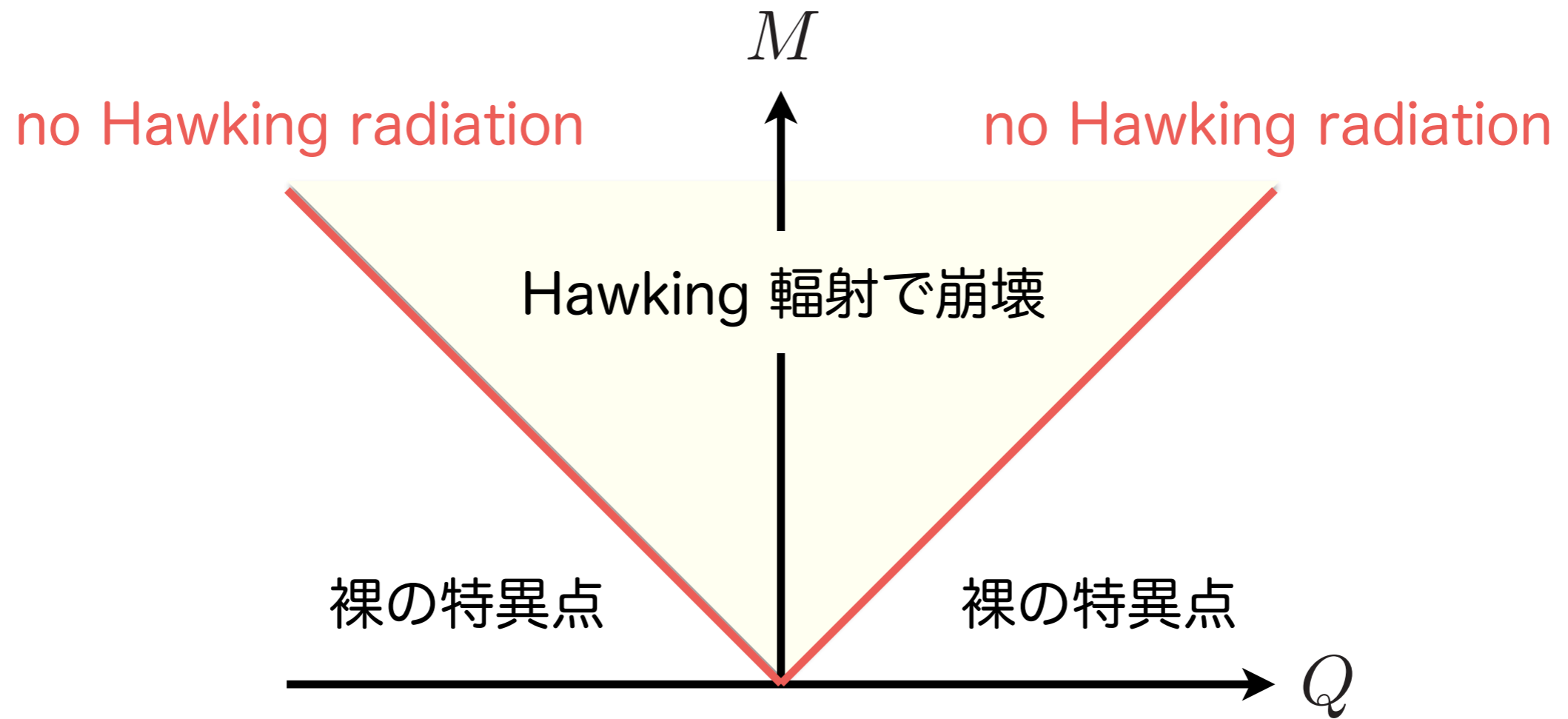
[Hamada-TN-Shiu '18]

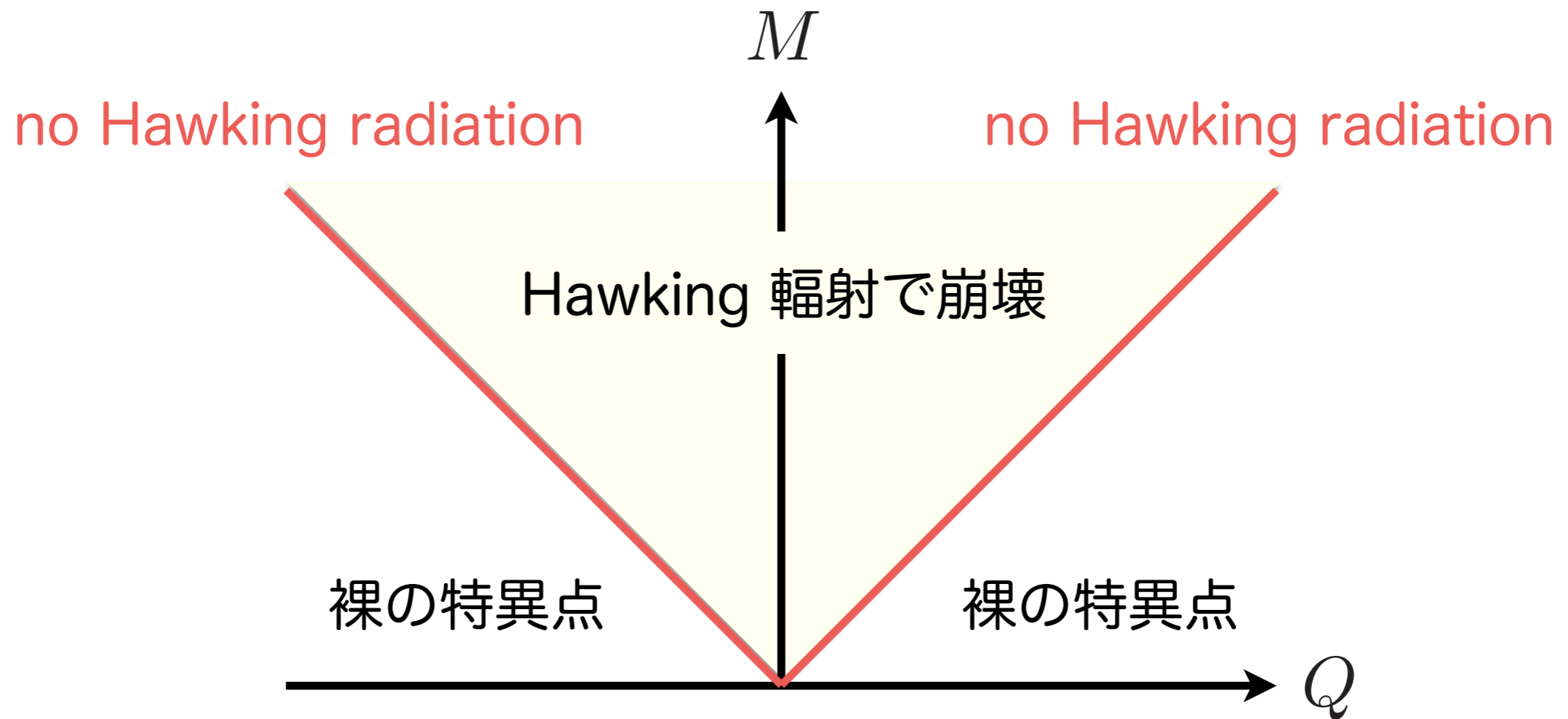
低エネルギー有効相互作用の
符号や大きさに制限 (ex. positivity bound)

Evidence of WGC from **unitarity and causality**

[Hamada-TN-Shiu '18]

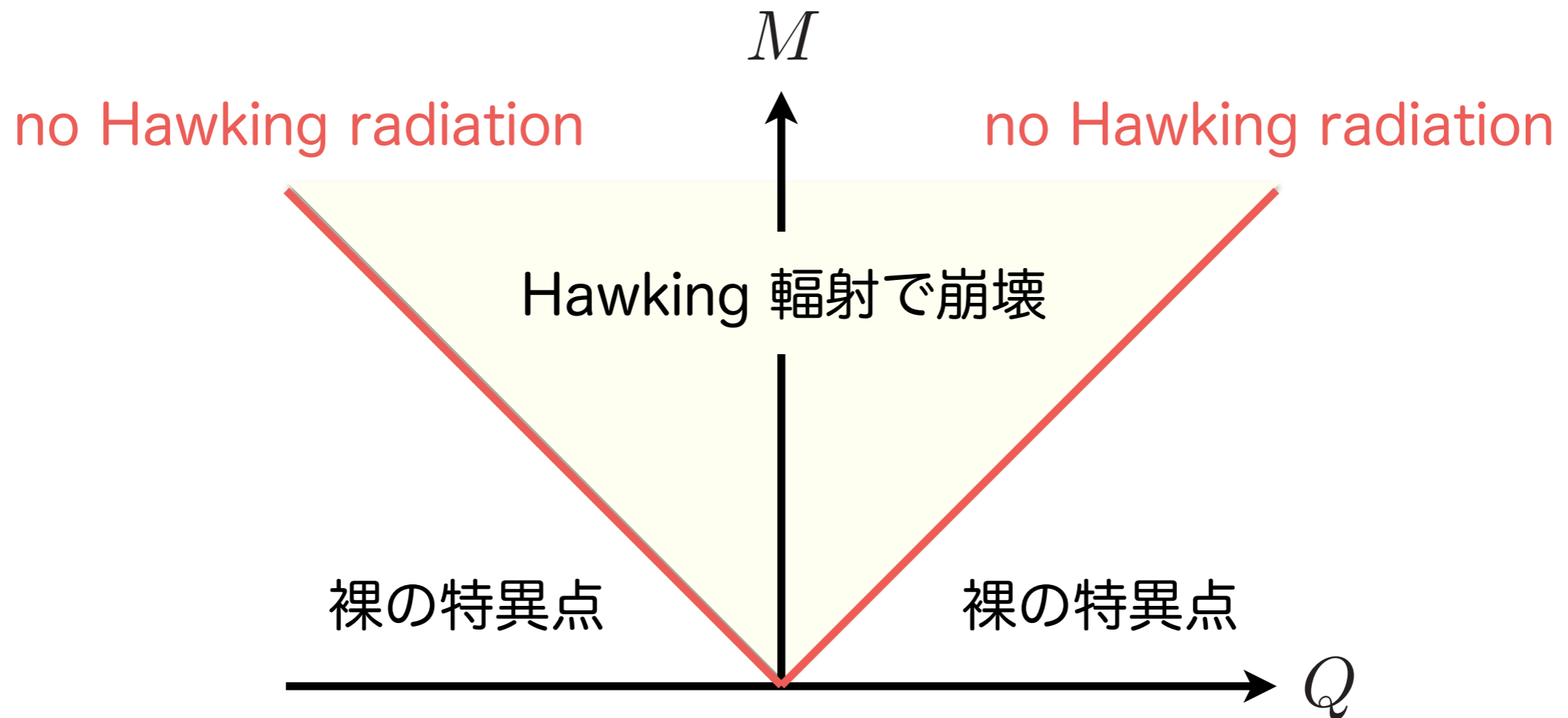
高階微分項の符号によっては $g|Q| > \frac{M}{\sqrt{2}M_{\text{Pl}}}$ を満たす BH が存在！
[Kats-Motl-Padi '06]





Einstein-Maxwell 理論への高階微分補正 ($2M_{\text{Pl}}^2 = 1, g = 1$)

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{4} R - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \alpha_1 (F_{\mu\nu} F^{\mu\nu})^2 \right. \\ \left. + \alpha_2 (F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu})^2 + \alpha_3 F_{\mu\nu} F_{\rho\sigma} W^{\mu\nu\rho\sigma} + \dots \right]$$

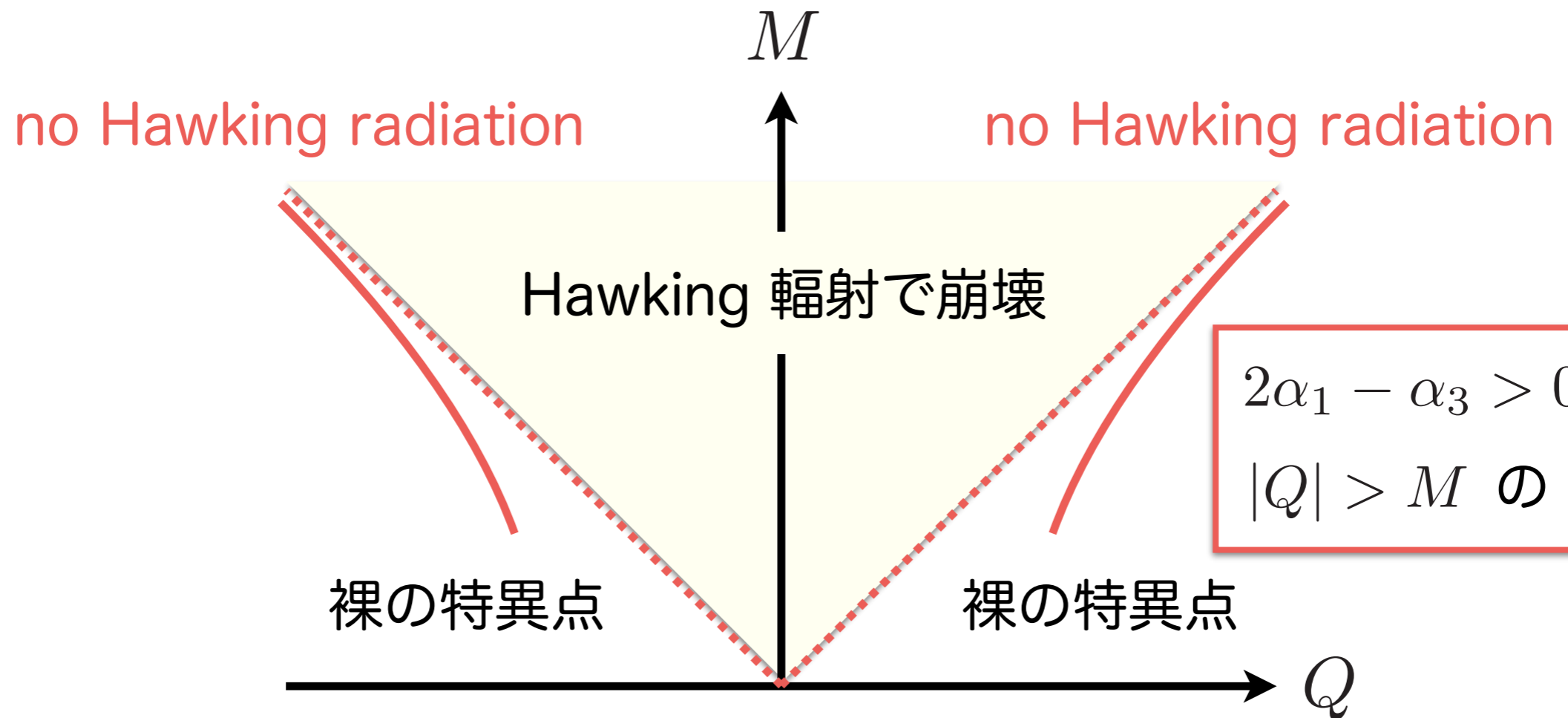


Einstein-Maxwell 理論への高階微分補正 ($2M_{\text{Pl}}^2 = 1, g = 1$)

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{4} R - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \alpha_1 (F_{\mu\nu} F^{\mu\nu})^2 \right. \\ \left. + \alpha_2 (F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu})^2 + \alpha_3 F_{\mu\nu} F_{\rho\sigma} W^{\mu\nu\rho\sigma} + \dots \right]$$

→ BH 解や事象の地平線の構造が修正される：

$$\frac{|Q|}{M} \leq 1 + \frac{2}{5} \frac{(4\pi)^2}{Q^2} (2\alpha_1 - \alpha_3) + \mathcal{O}(1/Q^4) \text{ なら裸の特異点なし!}$$



Einstein-Maxwell 理論へ的高階微分補正 ($2M_{\text{Pl}}^2 = 1, g = 1$)

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{4} R - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \alpha_1 (F_{\mu\nu} F^{\mu\nu})^2 + \alpha_2 (F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu})^2 + \alpha_3 F_{\mu\nu} F_{\rho\sigma} W^{\mu\nu\rho\sigma} + \dots \right]$$

→ BH 解や事象の地平線の構造が修正される：

$$\frac{|Q|}{M} \leq 1 + \frac{2}{5} \frac{(4\pi)^2}{Q^2} (2\alpha_1 - \alpha_3) + \mathcal{O}(1/Q^4) \text{ なら裸の特異点なし!}$$

$2\alpha_1 - \alpha_3 > 0$ を示せば WGC の存在証明！

Evidence of WGC from unitarity and causality

[Hamada-TN-Shiu '18]

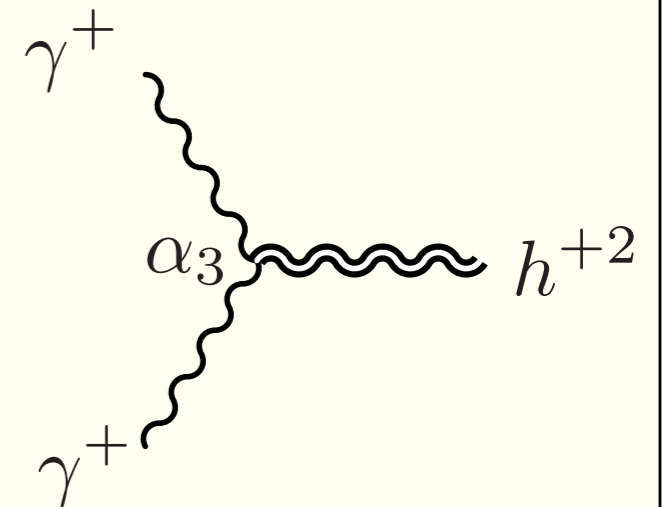
$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{4} R - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \alpha_1 (F_{\mu\nu} F^{\mu\nu})^2 + \alpha_2 (F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu})^2 + \alpha_3 F_{\mu\nu} F_{\rho\sigma} W^{\mu\nu\rho\sigma} + \dots \right]$$

① α_3 は対称性や causality でかなり縛られる

SUSY: $\alpha_3 = 0$, non-SUSY: $|\alpha_1|, |\alpha_2| \gg |\alpha_3|$

causality constraint

[cf. Camanho-Edelstein-Maldacena-Zhiboedov '14]



Evidence of WGC from unitarity and causality

[Hamada-TN-Shiu '18]

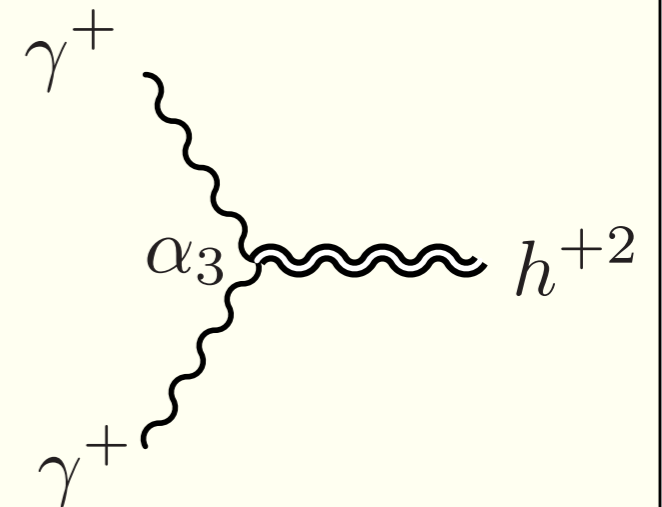
$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{4} R - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \alpha_1 (F_{\mu\nu} F^{\mu\nu})^2 + \alpha_2 (F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu})^2 + \alpha_3 F_{\mu\nu} F_{\rho\sigma} W^{\mu\nu\rho\sigma} + \dots \right]$$

① α_3 は対称性や causality でかなり縛られる

SUSY: $\alpha_3 = 0$, non-SUSY: $|\alpha_1|, |\alpha_2| \gg |\alpha_3|$

causality constraint

[cf. Camanho-Edelstein-Maldacena-Zhiboedov '14]



② α_1 の符号は unitarity で縛られる

ex. dilaton coupling

$$\frac{\phi}{f} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \rightarrow \text{dilaton を積分} \rightarrow \text{有効相互作用} \frac{1}{2m^2 f^2} (F_{\mu\nu} F^{\mu\nu})^2$$

仮に $|q| \geq m$ を満たす粒子がいなくても

dilaton や moduli などの効果で $2\alpha_1 - \alpha_3 \simeq 2\alpha_1 > 0$

→ $|Q| \geq M$ を満たす BH が存在

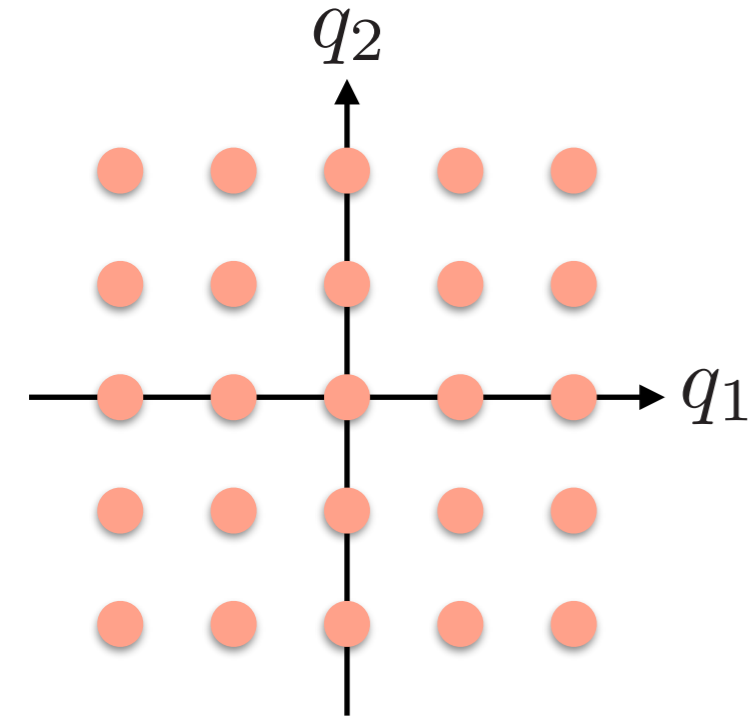
causality
↑
unitarity
↑

※ WGC および “extremal BH は崩壊すべし” の強い証拠

Weak Gravity Conjecture の拡張

Tower/(sub)Lattice Weak Gravity Conjecture

[Heidenreich et al '15 & '16, Montero et al '16, Andriolo-Junghans-TN-Shiu '18]

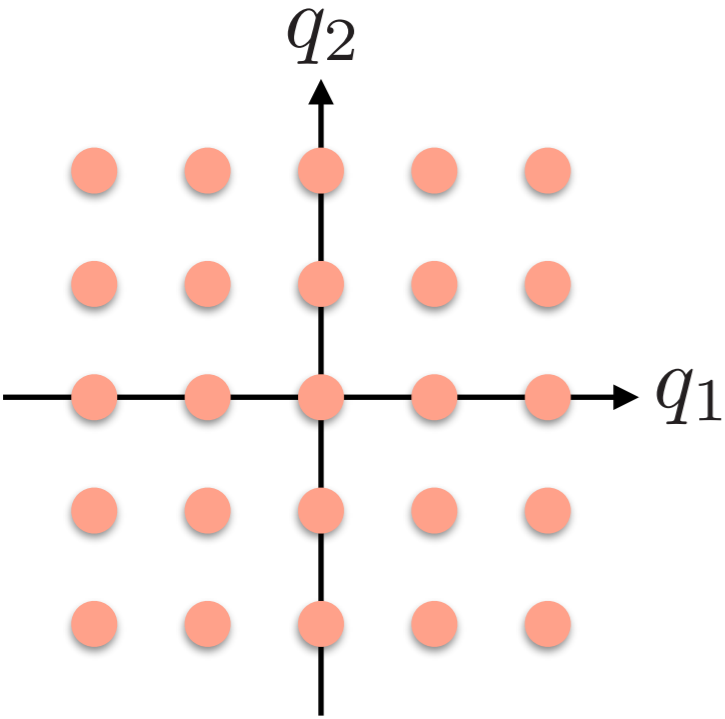


$|\vec{q}| \geq m$ を満たす粒子がタワー/格子状に無限個存在

- BH argument + KK reduction [Heidenreich et al '15]
- positivity + KK reduction [Andriolo-Junghans-TN-Shiu '18]
- modular invariance [Heidenreich et al '16, Montero et al '16]

Tower/(sub)Lattice Weak Gravity Conjecture

[Heidenreich et al '15 & '16, Montero et al '16, Andriolo-Junghans-TN-Shiu '18]



$|\vec{q}| \geq m$ を満たす粒子がタワー/格子状に無限個存在

- BH argument + KK reduction [Heidenreich et al '15]
- positivity + KK reduction [Andriolo-Junghans-TN-Shiu '18]
- modular invariance [Heidenreich et al '16, Montero et al '16]

p-form ゲージ場への一般化

p-form ゲージ場:

結合している (p-1)-dim object の張力に上限 $T \lesssim (g^2 M_{\text{Pl}}^{D-2})^{1/2}$

※ axion を 0-form ゲージ場とみなすと

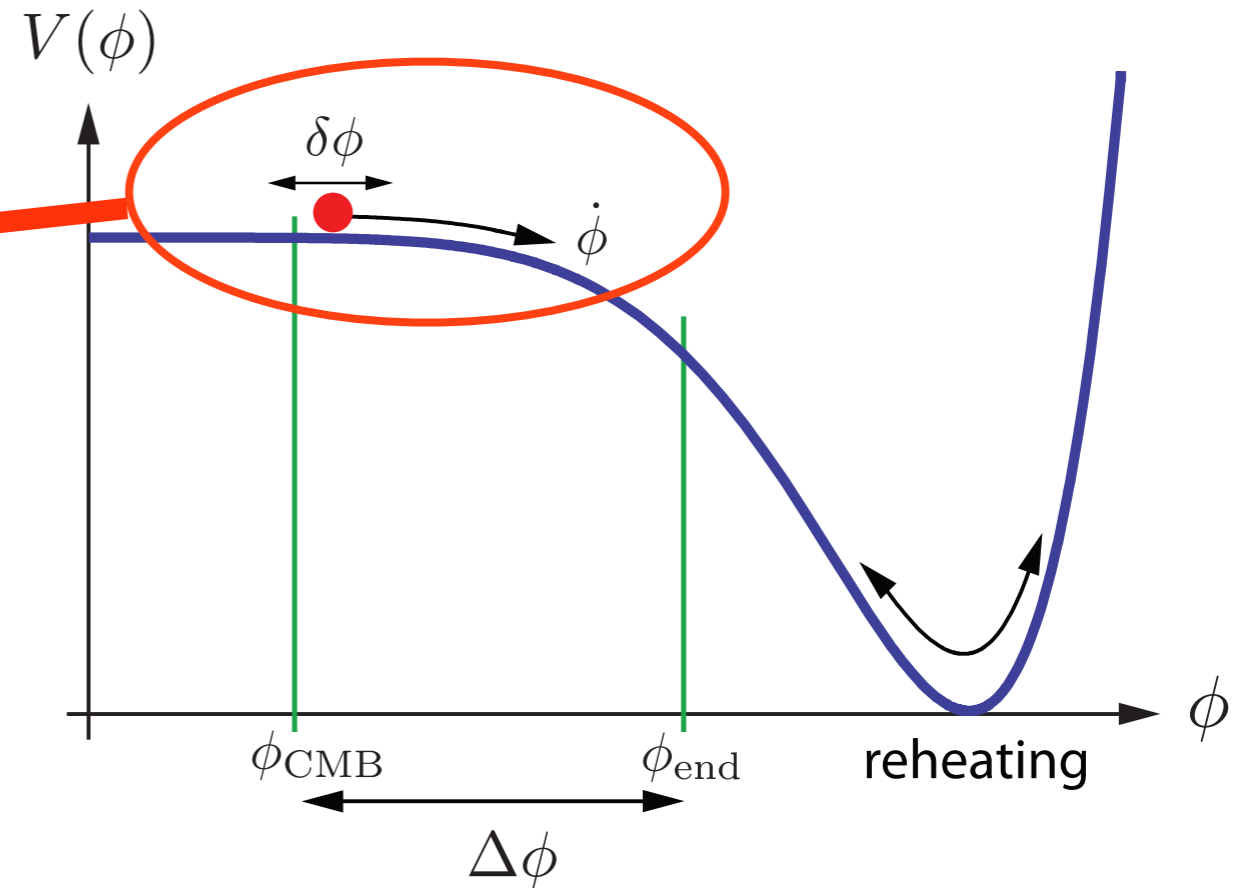
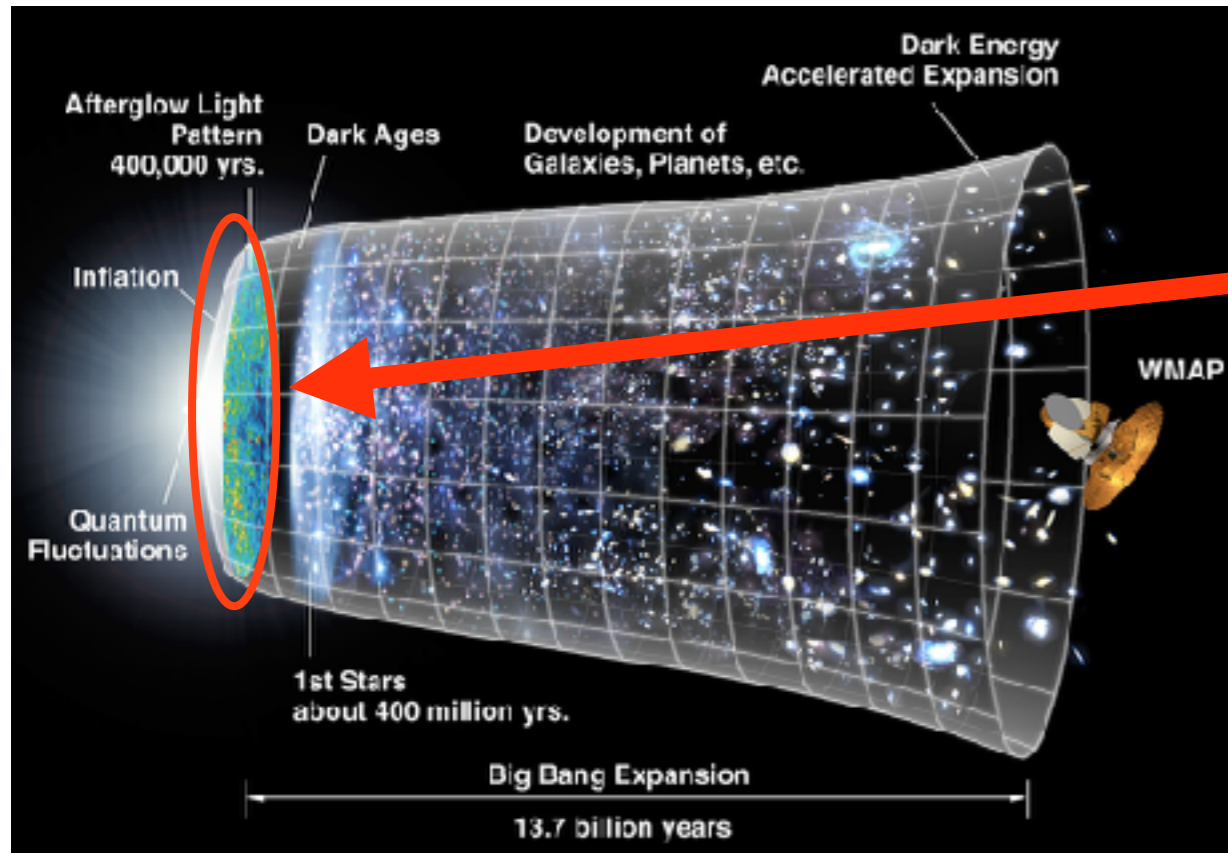
instanton action と axion decay constant に $S_{\text{inst}} \cdot \frac{f}{M_{\text{Pl}}} \lesssim 1$

plan

1. Introduction: Landscape と Swampland ✓
2. Weak Gravity Conjecture とその拡張 ✓
3. Inflation 模型への示唆
4. まとめと展望

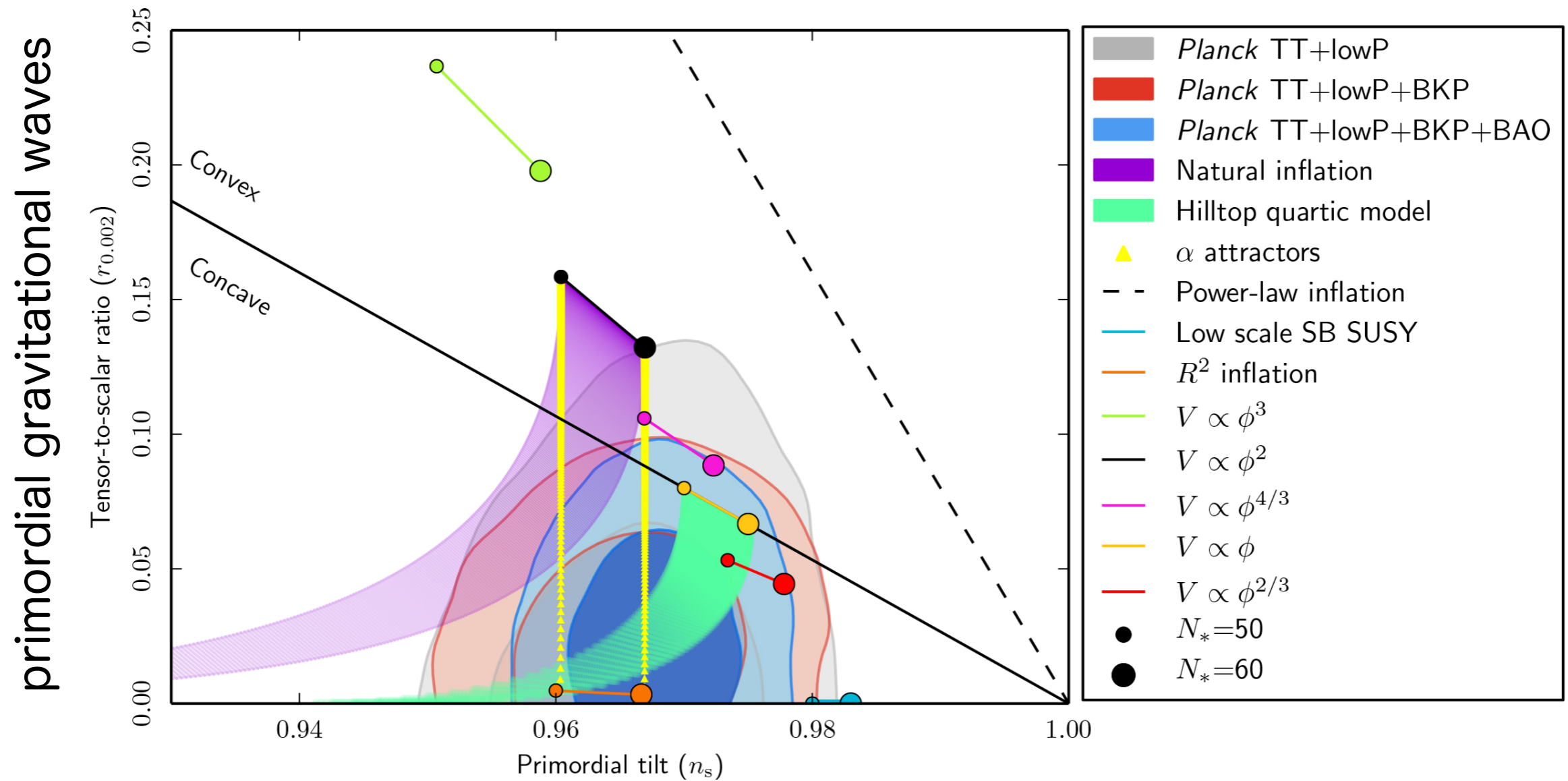
3. Inflation 模型への示唆

Inflation in a nutshell



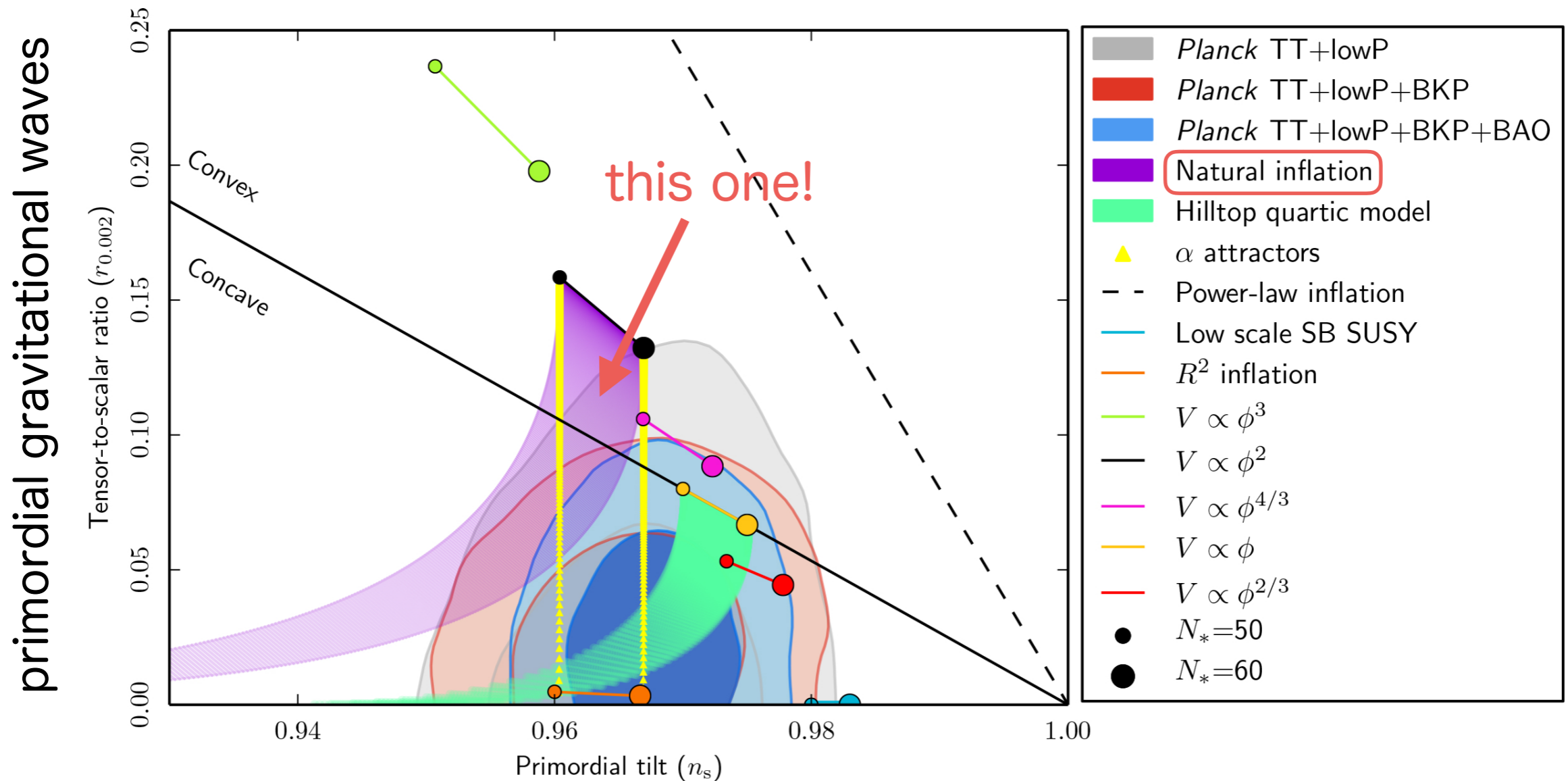
- 平坦なポテンシャルを持つスカラー場 “inflaton” を導入
- inflation 中の量子揺らぎ = CMB 温度揺らぎなどの構造の起源
- ※ CMB の観測などからインフラトンポテンシャル V がわかる

インフラトンポテンシャルへの観測的制限



deviation from scale invariance

インフラトンポテンシャルへの観測的制限



deviation from scale invariance

natural inflation は large field inflation の simple な模型

natural inflation: axion = inflaton

natural inflation [Freese-Frieman-Olinto '90]

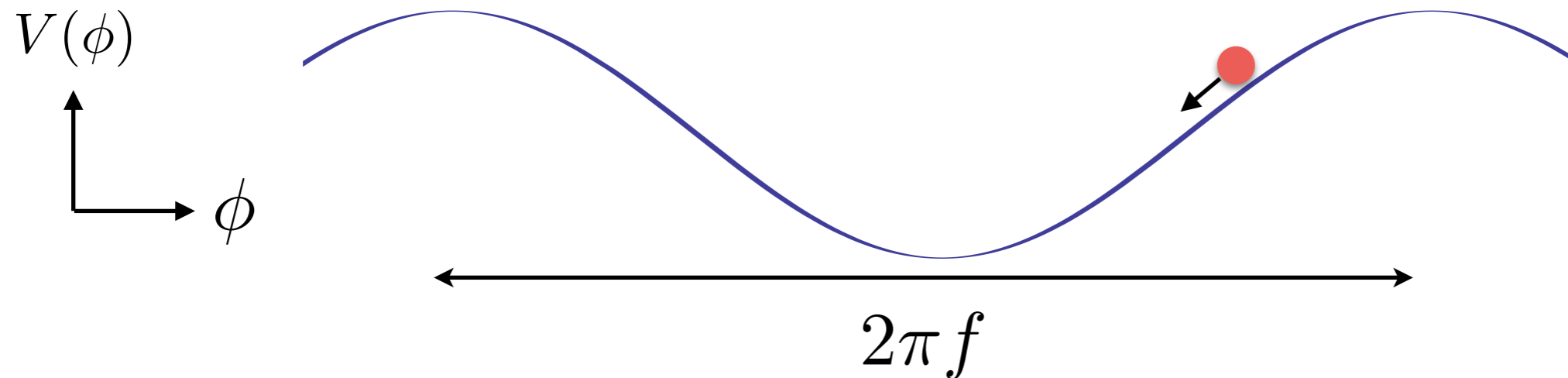
アクシオンの典型的 Lagrangian :

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2}(\partial_\mu\phi)^2 - V(\phi)$$

$$V(\phi) \propto e^{-S_{\text{inst}}} \left(1 - \cos \frac{\phi}{f}\right) + \sum_{n \geq 2} e^{-nS_{\text{inst}}} \left(1 - \cos \frac{n\phi}{f}\right)$$

- f : アクシオン崩壊係数 \sim (結合定数)⁻¹
- アクシオンポテンシャルは周期的 $\phi \rightarrow \phi + 2\pi f$
- S_{inst} : instanton 作用 \sim tension

slow-roll axion potential



インフレーション期を一定時間保つ

→ インフラトンポテンシャルが十分平坦 (slow-roll condition)

$$V(\phi) \propto e^{-S_{\text{inst}}} \left(1 - \cos \frac{\phi}{f} \right) + \sum_{n \geq 2} e^{-n S_{\text{inst}}} \left(1 - \cos \frac{n\phi}{f} \right)$$

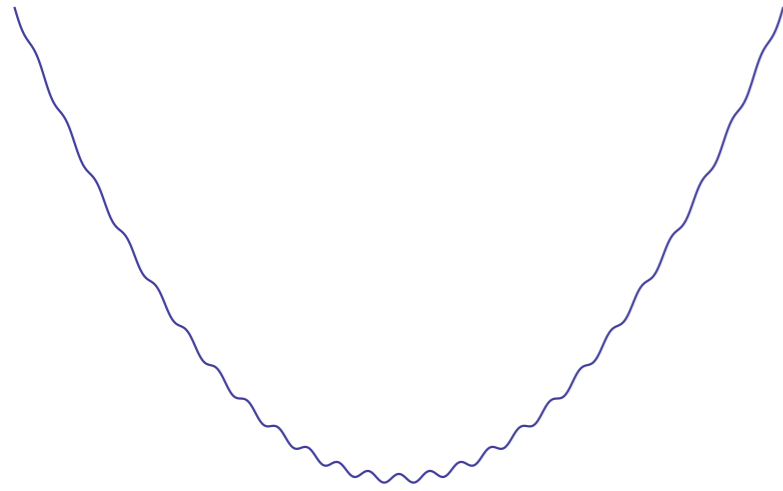
- negligible higher harmonics ($n \geq 2$) $\rightarrow S_{\text{inst}} > 1$

- long enough periodicity $\rightarrow f > M_{\text{Pl}}$

WGC は $S_{\text{inst}} \cdot \frac{f}{M_{\text{Pl}}} \lesssim 1$ を要求

→ simple な axion inflation 模型は禁止される

loophole と予言



axion monodromy

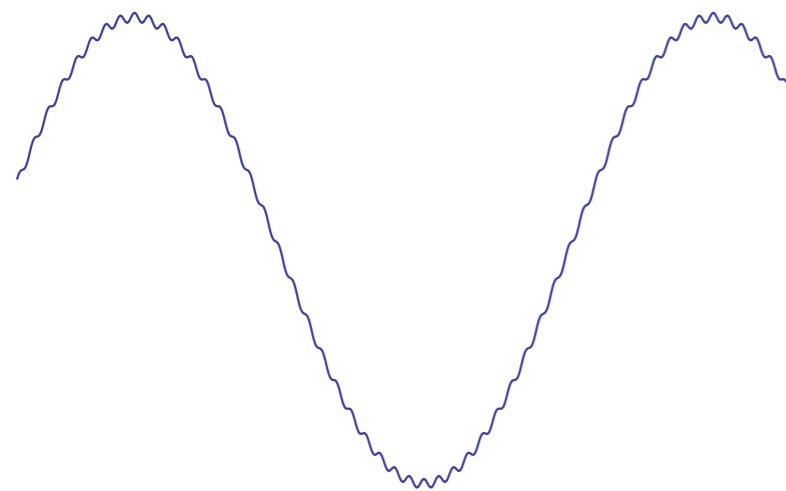
ポテンシャルを多価関数にする

$$V(\phi) = V_{\text{s.r.}}(\phi) + e^{-S_{\text{inst}}} \left(1 - \cos \frac{\phi}{f} \right)$$

spectator instanton

WGC を満たすためだけに instanton を導入

$$V(\phi) = e^{-S_{\text{inst}}} \left(1 - \cos \frac{\phi}{f} \right) + e^{-S'_{\text{inst}}} \left(1 - \cos \frac{\phi}{f'} \right)$$



- large field inflation を

$V_{\text{s.r.}}$ および $e^{-S'_{\text{inst}}} \left(1 - \cos \frac{\phi}{f'} \right)$ ($f' > M_{\text{Pl}}$) で実現

- WGC は $S_{\text{inst}} \cdot \frac{f}{M_{\text{Pl}}} \lesssim 1$ な instanton で満たされる

→ ポテンシャルの振動 → power spectrum の振動 & non-Gaussianity

Tower/(sub)Lattice WGC からの implication

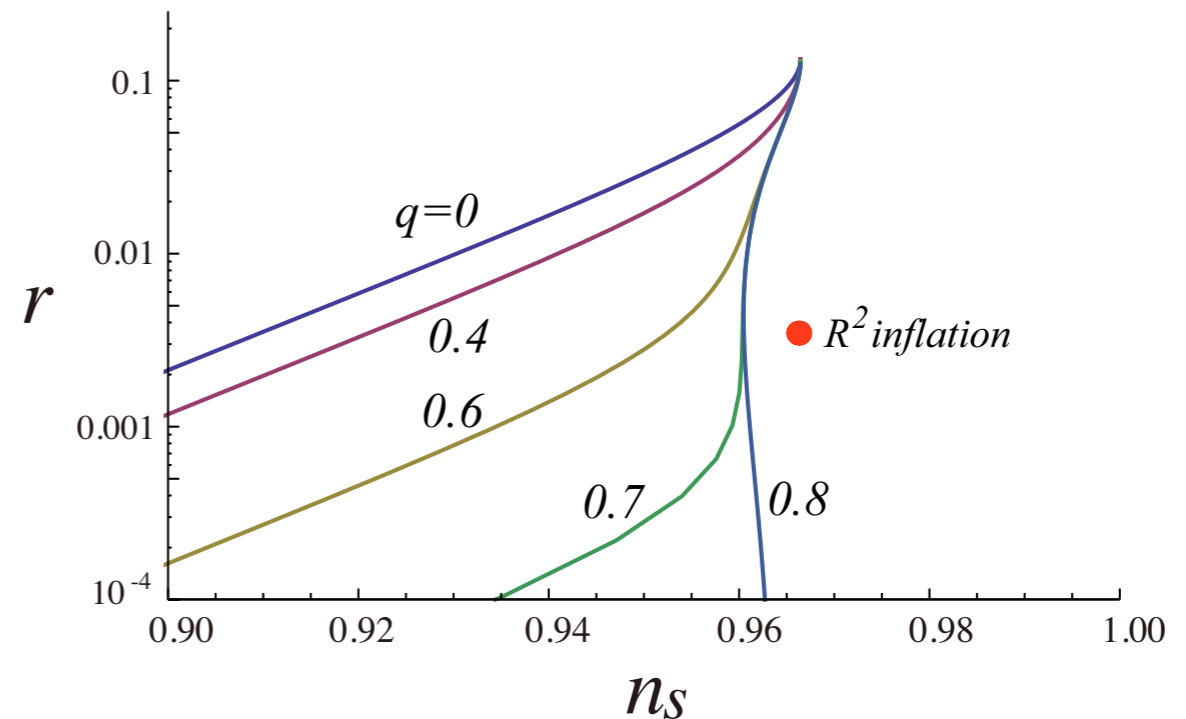
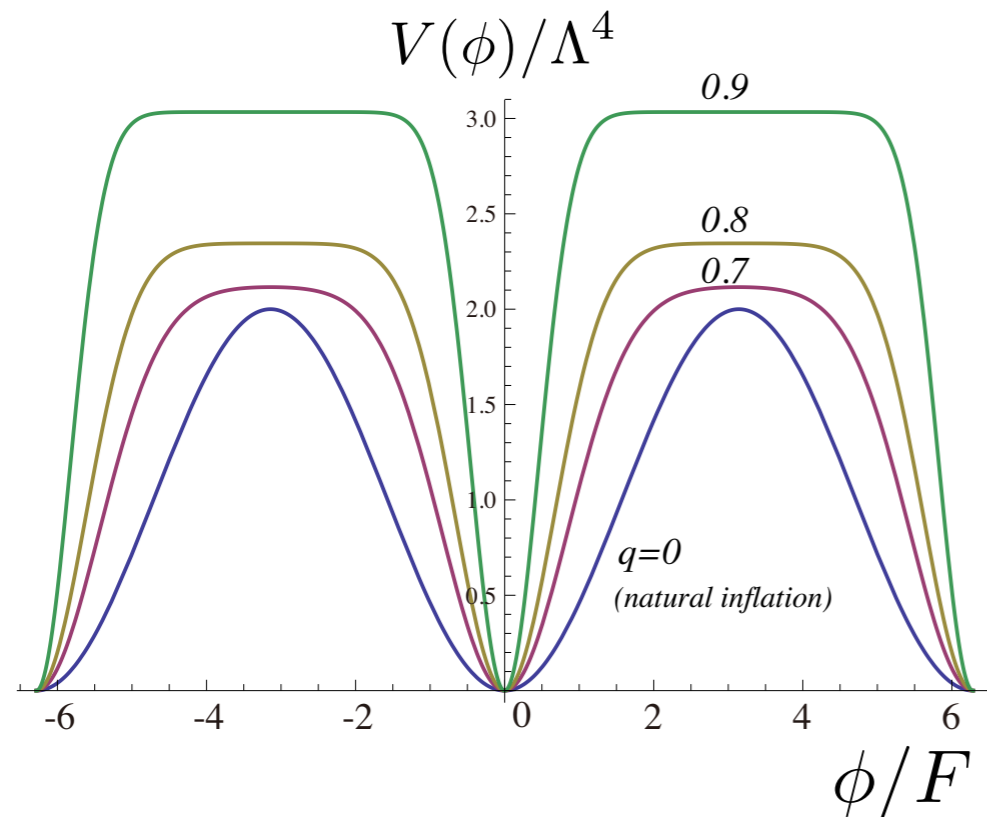
異なる崩壊係数を持つ instanton が多数存在すべし！

$$V(\phi) = \sum_i e^{-S_i} \cos\left(\frac{\phi}{f_i} + \delta_i\right) \quad (i: \text{instanton のラベル})$$

異なる崩壊係数を持つ instanton が多数存在すべし！

$$V(\phi) = \sum_i e^{-S_i} \cos\left(\frac{\phi}{f_i} + \delta_i\right) \quad (i: \text{instanton のラベル})$$

Elliptic Inflation [Higaki-Takahashi '15]

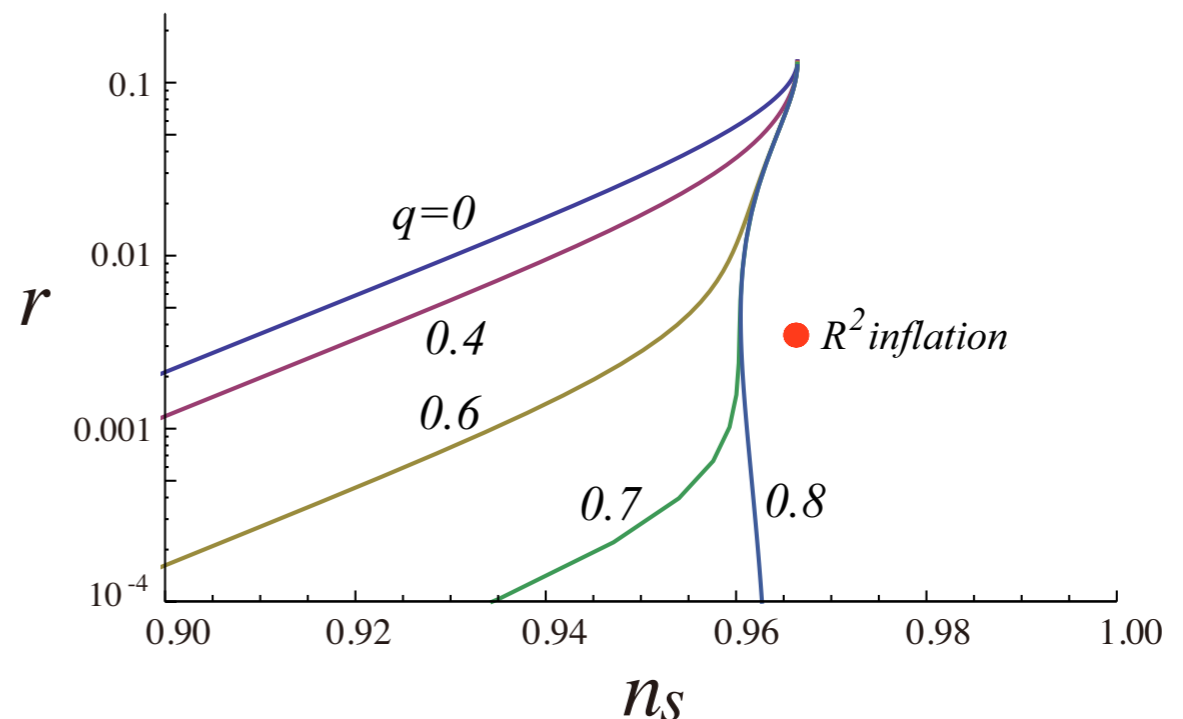
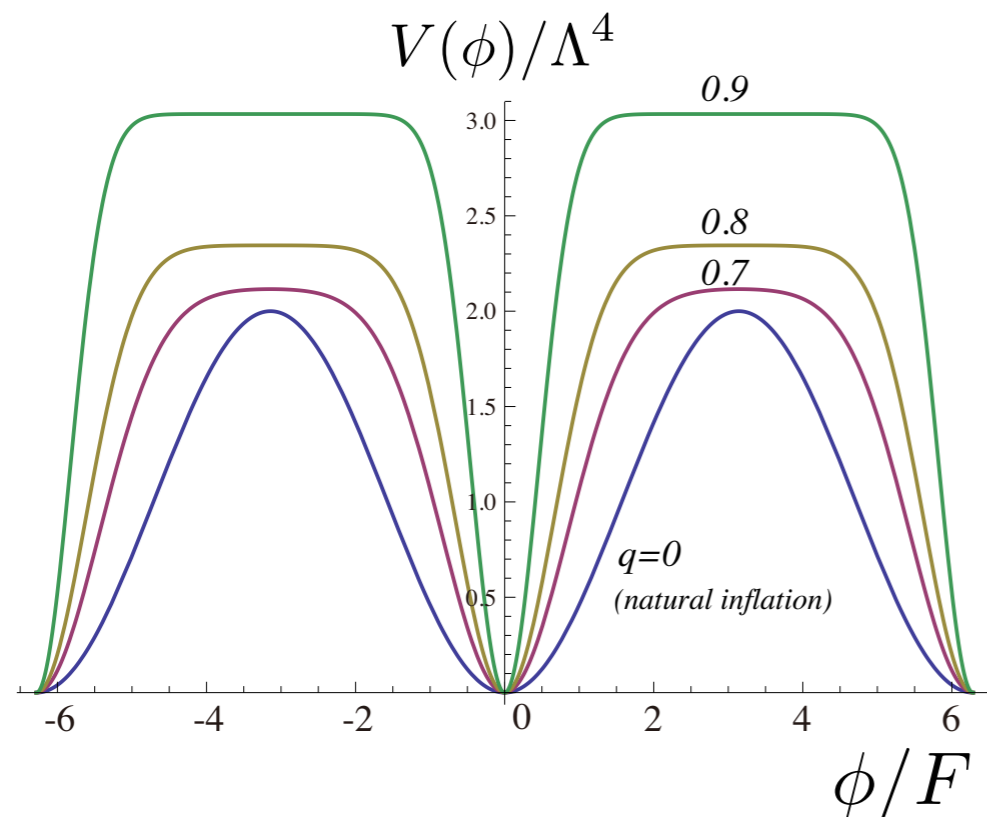


natural inflation と plateau inflation (small field) を interpolate

異なる崩壊係数を持つ instanton が多数存在すべし！

$$V(\phi) = \sum_i e^{-S_i} \cos\left(\frac{\phi}{f_i} + \delta_i\right) \quad (i: \text{instanton のラベル})$$

Elliptic Inflation [Higaki-Takahashi '15]



natural inflation と plateau inflation (small field) を interpolate

Tower/sub(Lattice) WGC に motivate されて

stringy setup を色々調べるのもありかも (既にやりつくしました? > 檜垣さん)

4. まとめと展望

Web of Weak Gravity Conjectures

no global symmetry

Weak Gravity Conjecture [ArkaniHamed-Motl-Nicolis-Vafa 06']

\exists a particle satisfying $gq \geq m/\sqrt{2}M_{\text{Pl}}$

Tower/(sub)Lattice Weak Gravity Conjecture

[Heidenreich et al '16, Montero et al '16, Andriolo-Junghans-TN-Shiu '18]

不等式を満たす粒子がタワー/格子状に無限個存在

※ axion への拡張は inflation の模型構築に効いてくる

今日扱わなかった話題・展望

WGC と dark matter

平坦過ぎるポテンシャルや小さ過ぎるゲージ相互作用は危険

→ ultra light axion DM (fuzzy DM), milicharged DM, ...

no non-SUSY AdS!? [Ooguri-Vafa '16]

SUSY で守られてない AdS は不安定じゃないかという conjecture

→ 素粒子標準模型と beyond (ex. Majorana neutrino mass はダメ??)

cf. extremal BH の near horizon limit = AdS なのでその不安定性とも関係

de Sitter space in quantum gravity/string theory

ありがとうございました！