



Recent Progress in the Swampland Program

野海 俊文 (神戸大)

簡単な自己紹介：

2008-2013 大学院生@東京大学 駒場素粒子論研究室

※ D3の時にヒッグス粒子発見のニュースで盛り上がる

2013-2015 ポスドク@理化学研究所 橋本数理物理学研究室

2015-2016 ポスドク@香港科技大学 高等研究院

2016- 助教@神戸大学 宇宙論研究室

July 8th 2021 @ 高エネ勉強会



目次

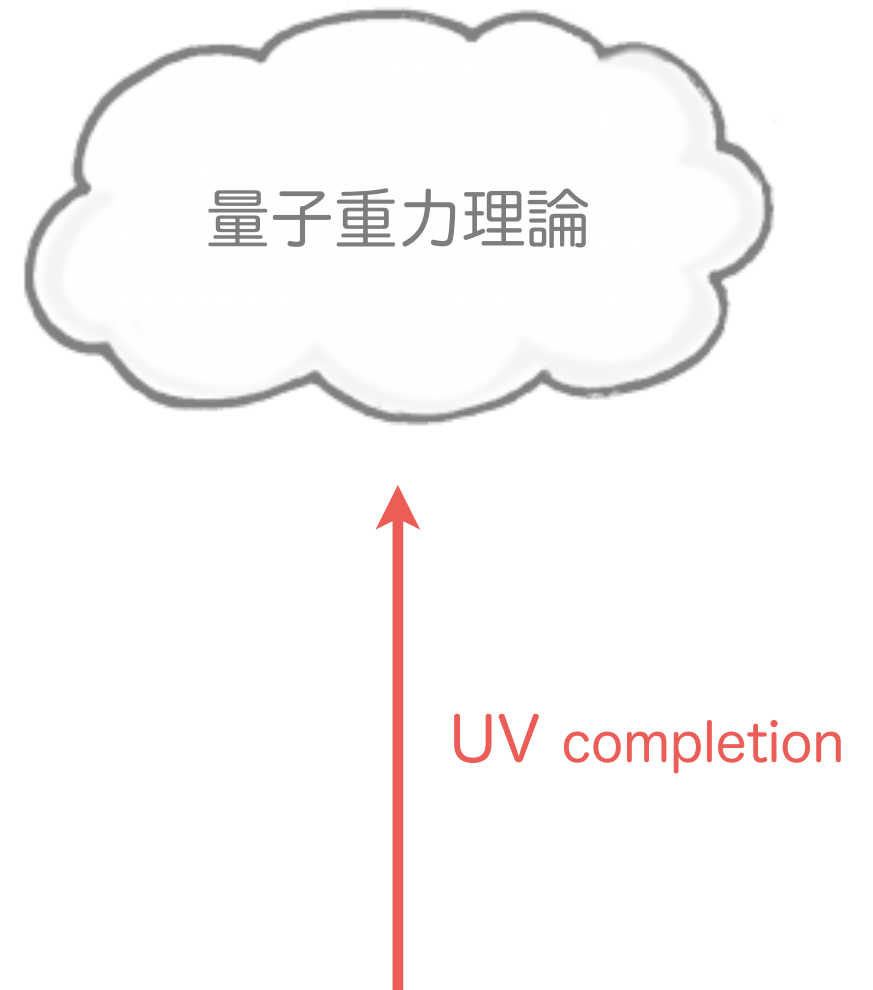
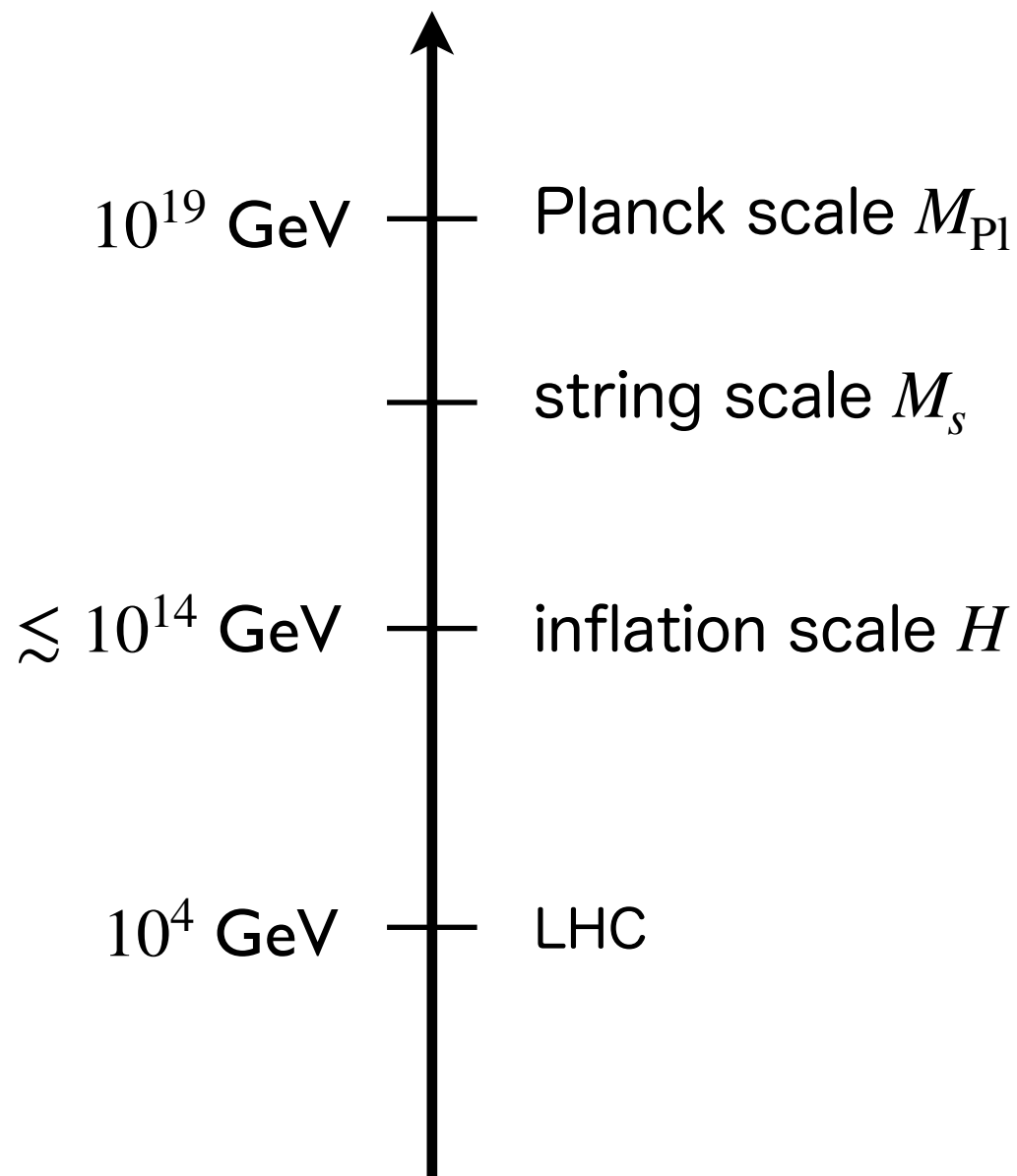
1. Landscape & Swampland
2. どのような物理を狙っているか
3. S-matrix bootstrap
4. まとめと展望

1. Landscape & Swampland

String Theory Landscape (cf. 小林さんのトーク)

低エネルギー有効理論としての場の量子論模型

典型的なスケール



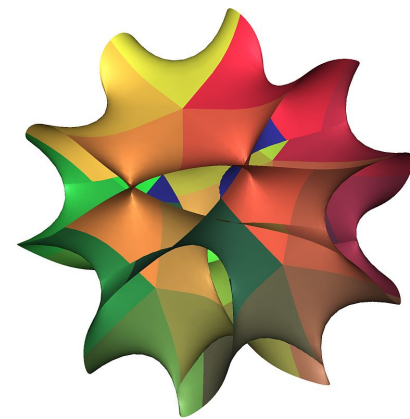
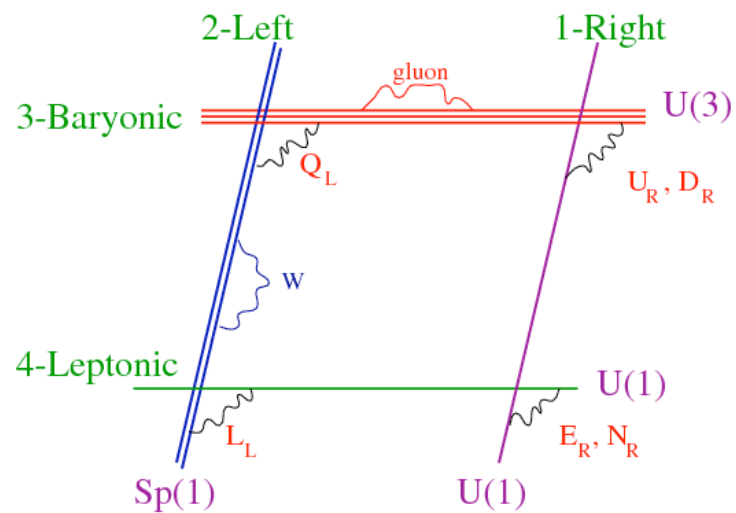
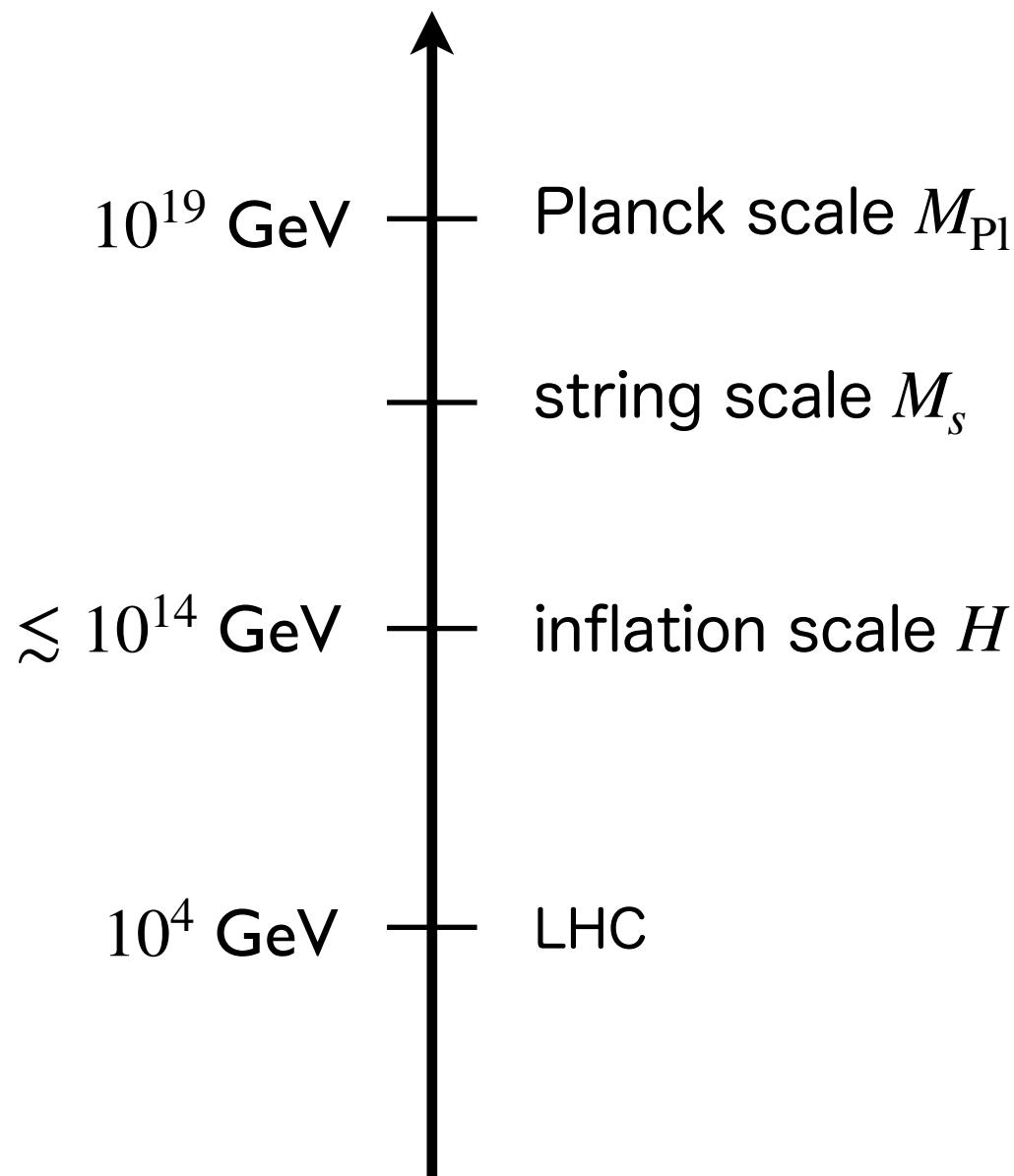
標準模型 + BSM + アインシュタイン重力

UV complete

UV incomplete!
(低エネルギー有効理論)

弦理論のコンパクト化に基づく現象論

典型的なスケール



弦理論 (10次元の理論)

余剰次元の形
ブレーンの配位

UV completion

標準模型 + BSM + アインシュタイン重力

UV complete

UV incomplete!
(低エネルギー有効理論)

弦理論 = 量子重力を適切に取り込んだ理論モデルの生成機

※ ほぼ無数の場の量子論モデルを構成可能

String Theory Landscape



QFT 1

QFT 2

QFT 4

QFT 3

QFT 5

Q. 全ての場の量子論モデルを弦理論で構成可能か？

A. NO!!!

no global symmetry in string theory

弦理論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（弦の量子力学）を考えると…

保存カレントが存在すると、弦のスペクトルにゲージ粒子が現れる

[Banks-Dixon '88, …]

- AdS/CFT 対応を仮定すると…

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

(重力を含まない理論)

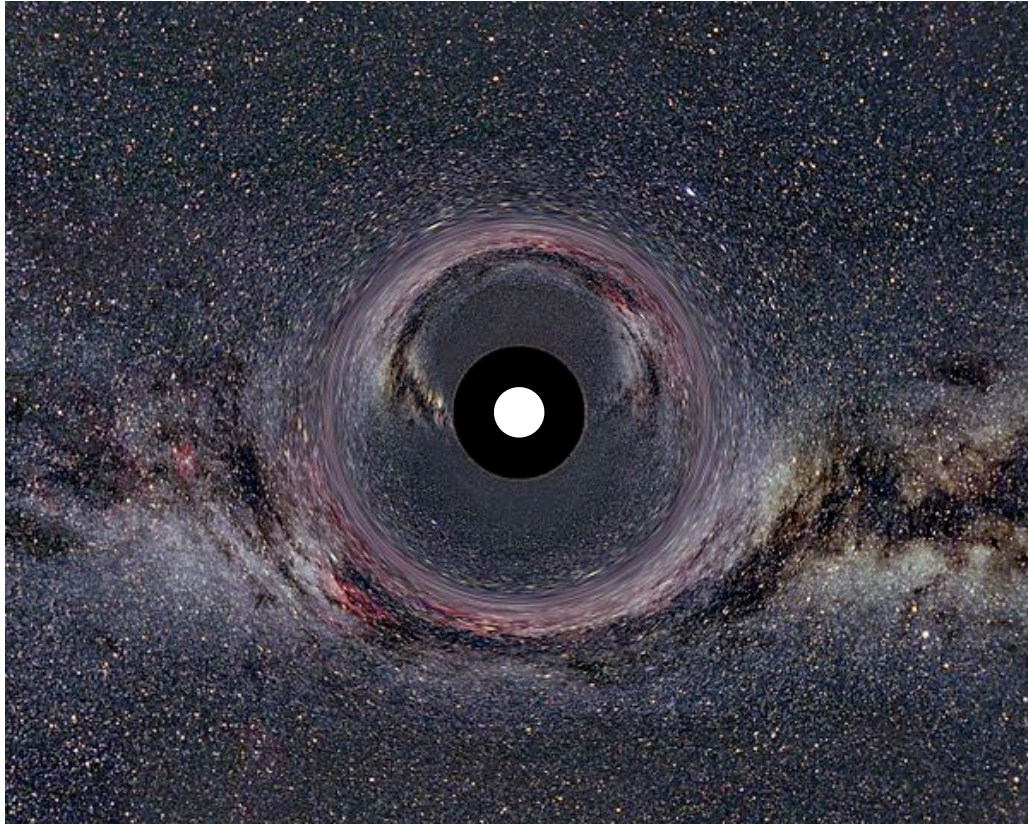
(曲がった時空上の量子重力)

最近では離散対称性にまで拡張する試みも [Harlow-Ooguri '18, …]

ブラックホールの思考実験をすると

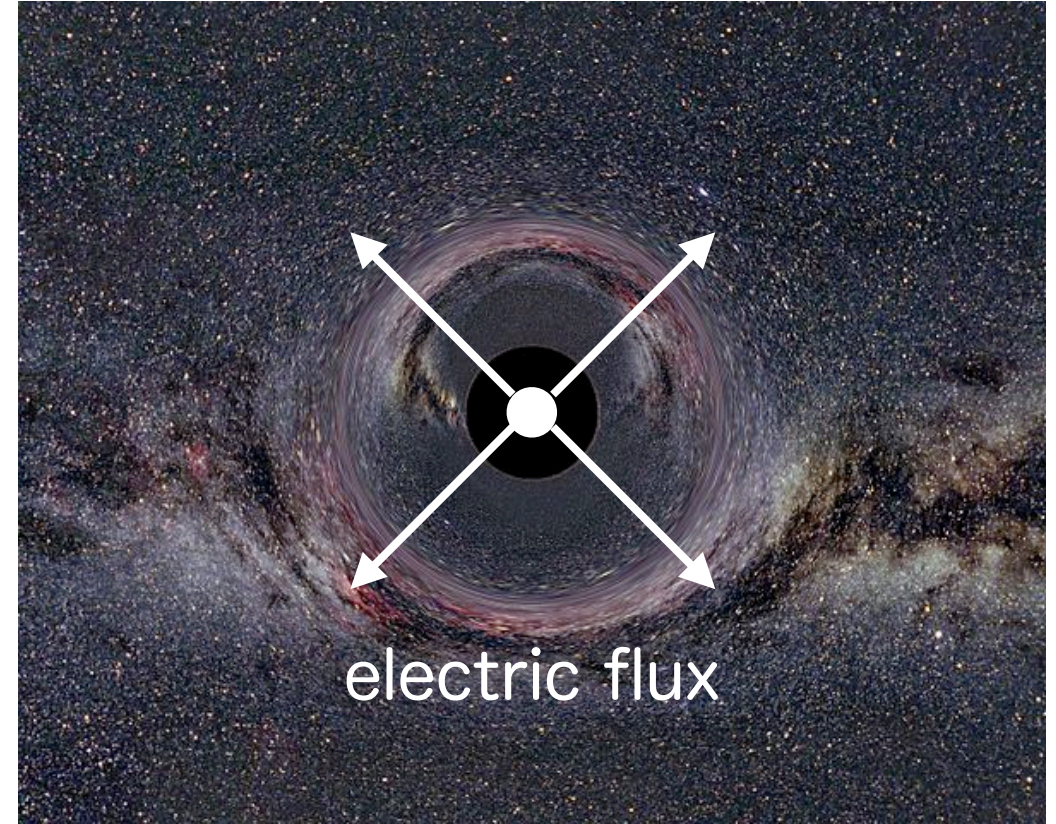
より一般に no (exact) global symmetry in 量子重力！？

global vs gauge in the BH context



global symmetry

ex. $B - L$



gauge symmetry

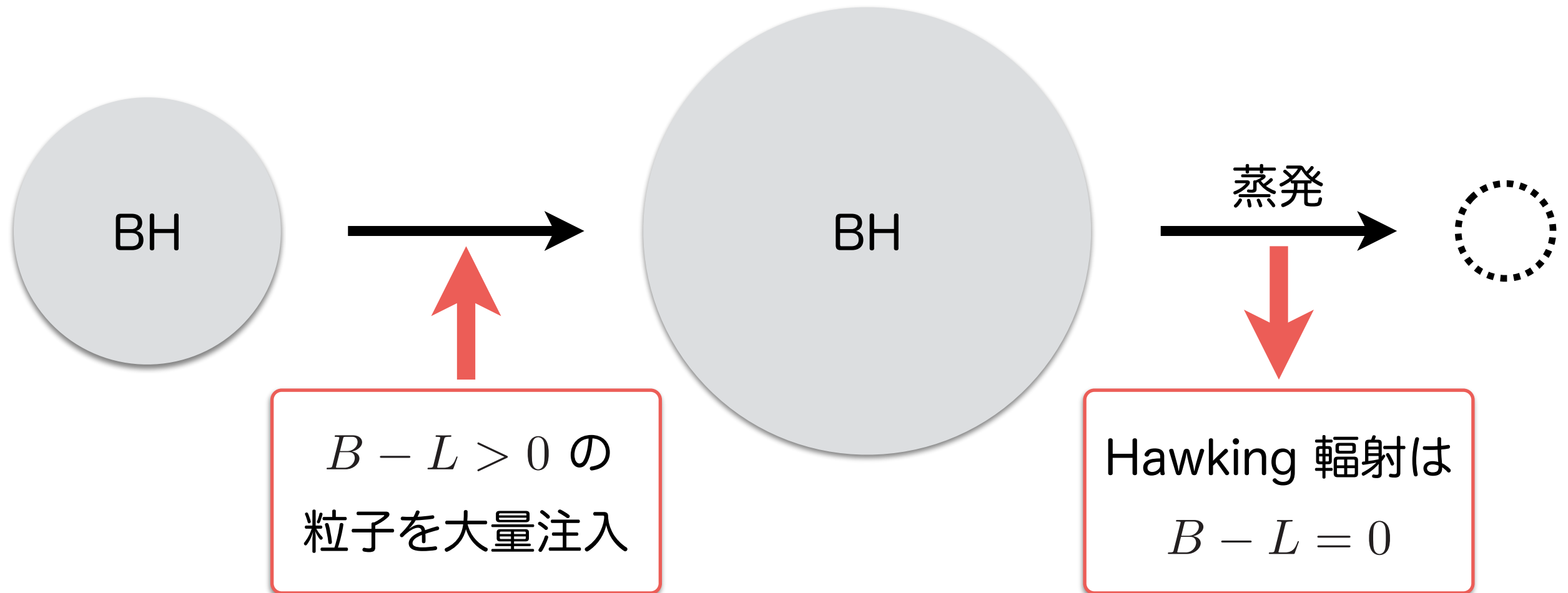
ex. $U(1)_{EM} Q$

no-hair theorem:

事象の地平線 \rightarrow global symmetry charge は外からわからない

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

このような議論を踏まえ、

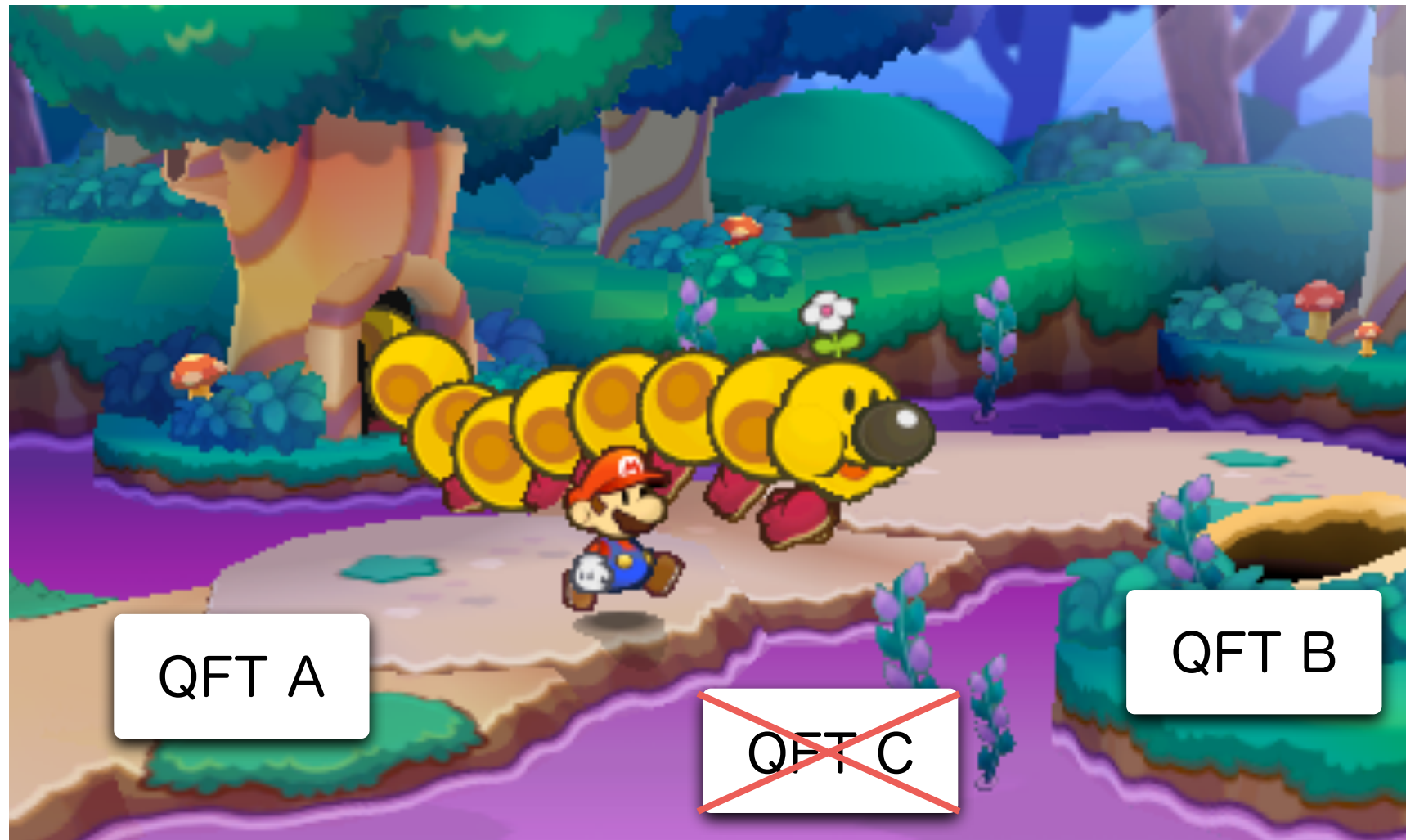
量子重力には (exact) global symmetry が存在しないと広く信じられている。

特に、(exact) global symmetry を持つ理論は (String) Landscape に含まれない。

→ このような量子重力特有の整合性条件を **スワンプランド条件** と呼ぶ [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!)

目次

1. Landscape & Swampland ✓
2. どのような物理を狙っているか
3. S-matrix bootstrap
4. まとめと展望

2. どのような物理を狙っているか

no global symmetry in 量子重力

量子重力における対称性は …

option 1: ゲージ対称性

荷電粒子はゼロでない相互作用定数 $g \neq 0$ でゲージ粒子と相互作用

※ $g = 0$ は禁止 → 定量的下限はないのか???

option 2: 近似的な広域対称性

低エネルギーで対称性が emergent するのは OK (実際によくある)

ある UV scale で対称性は explicit に破れているべし。

→ 対称性の破れのスケールはどこか???

このような定量的予言を与えないと現象論的には使えない!

Swampland Program では

- 弦理論のコンパクト化からの経験則
- ブラックホールに関する思考実験
- AdS/CFT 対応からの示唆
- ブートストラップ法 (cf. 次章で話します)

などを用いて、様々なスワンランド条件が提唱され、その現象論的帰結が議論されている。

[レビュー：Vafa et al '17, Palti '19, Valenzuela et al '21]

※ ただし、議論の適用範囲や精密性は千差万別。



この章で「予想」「Conjecture」と出てきたら、

「面白いけどまだまだ不確かな予想」と読み替えてください。

ちゃんとした導出に向けた議論については次の章を参照。

典型的な Swampland 予想の分類

タイプ1：相互作用定数に対する下限

- 質量 m の粒子が持つ無次元の相互作用定数 g (ex. ゲージ結合、湯川結合) に対し、

下限 $\frac{m}{M_{\text{Pl}}} \lesssim g$ を要求する (重力が弱いことを意味している)。

※ どの相互作用、どの粒子がこの不等式を満たすべきかは予想ごとに異なる。

※ 「… Weak Gravity Conjecture」と呼ばれることが多い。

- この亜種で、UV cutoff に対する上限を与えるものも： $\Lambda_{\text{UV}} \lesssim gM_{\text{Pl}}$

タイプ2：対称性の破れのスケールに上限

- ポテンシャルが平らな領域に対する上限 $\Delta\phi \lesssim M_{\text{Pl}}$

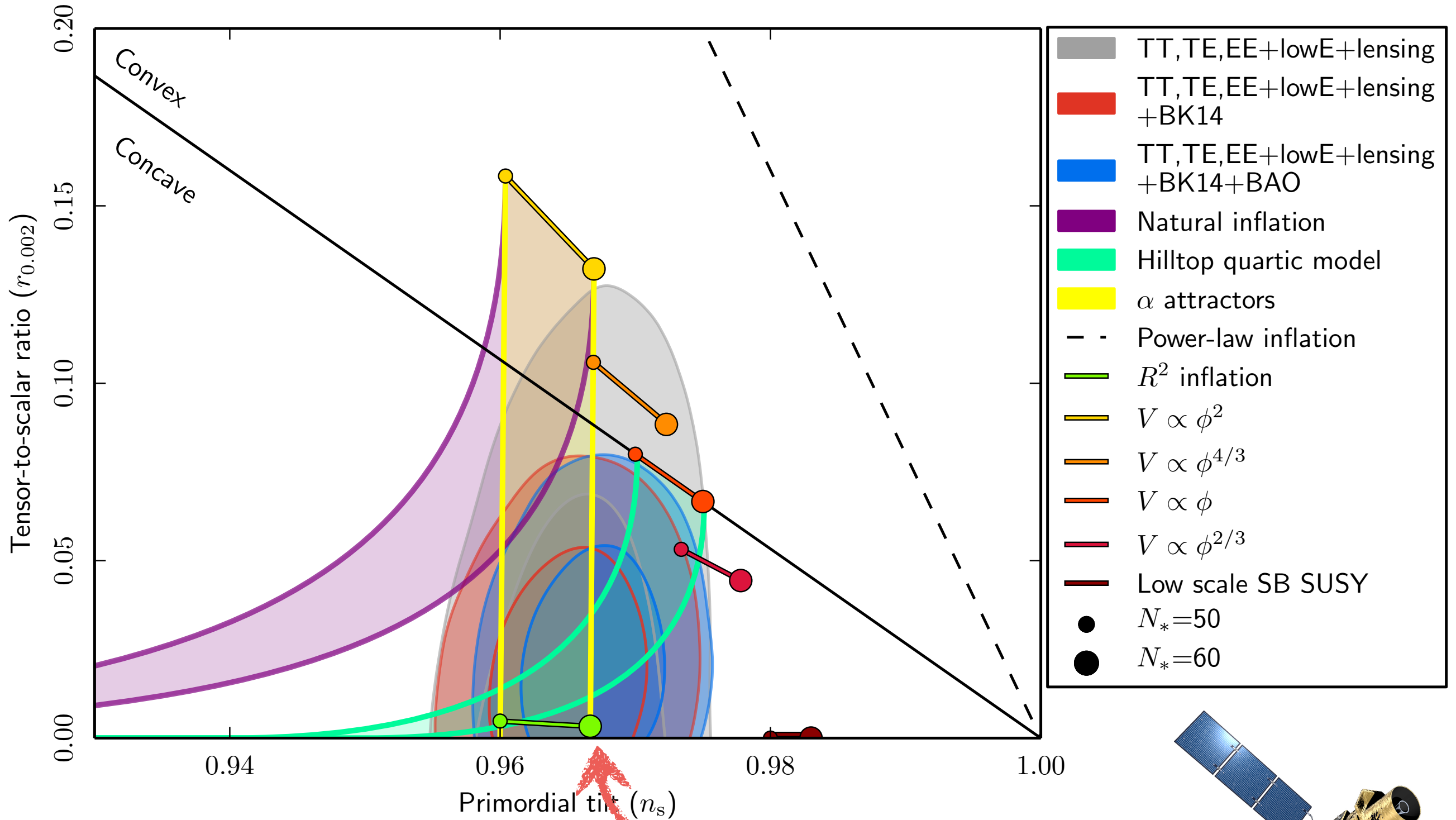
- この亜種で、ポテンシャルの傾きが満たす不等式を予想するものも。

この種の不等式から何が言えるかを考えてみる …

例として

- インフレーション（高エネルギー）
- 暗黒物質（相互作用が小さい）
- ニュートリノの質量（軽い）

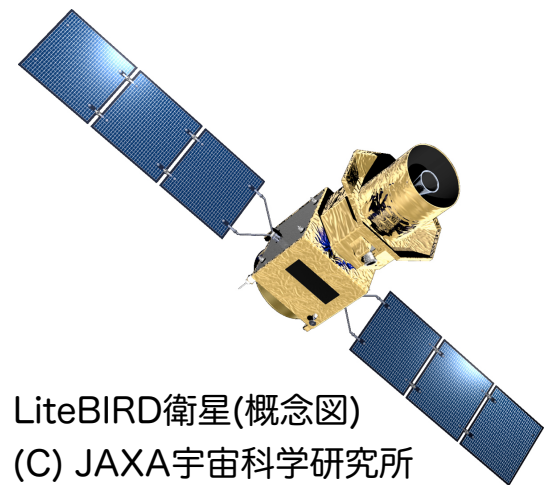
インフレーション (1)



$$\Delta\phi \simeq 15\sqrt{2r}M_{\text{Pl}}$$

$$r \simeq 0.003, \Delta\phi \simeq 1 \times M_{\text{Pl}}$$

LiteBIRD のターゲット



LiteBIRD衛星(概念図)
(C) JAXA宇宙科学研究所

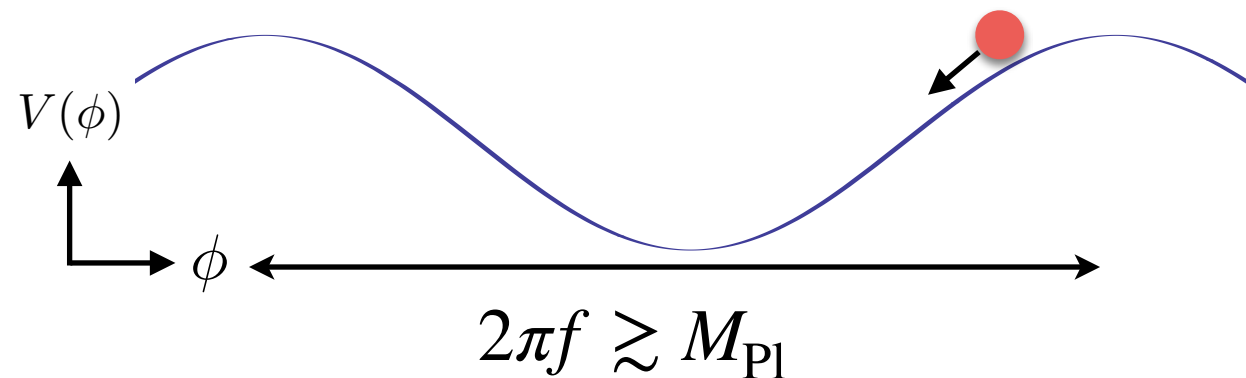
インフレーション (2)

Q. どのようなクラスの large field inflation $\Delta\phi \gtrsim M_{\text{Pl}}$ が実現可能か？

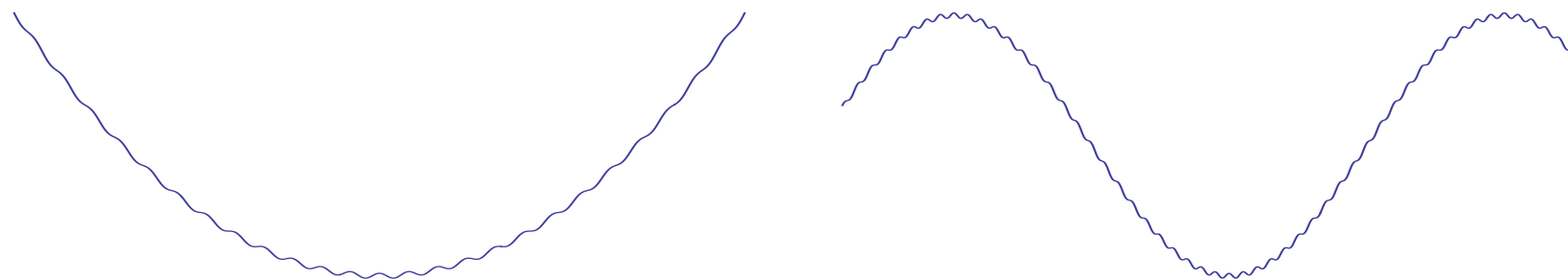
Q. tensor-to-scalar ratio に対する量子重力的な上限は存在するのか？

ex. アクシオンインフレーションに対する Weak Gravity Conjecture の予言

禁止されるポテンシャル：

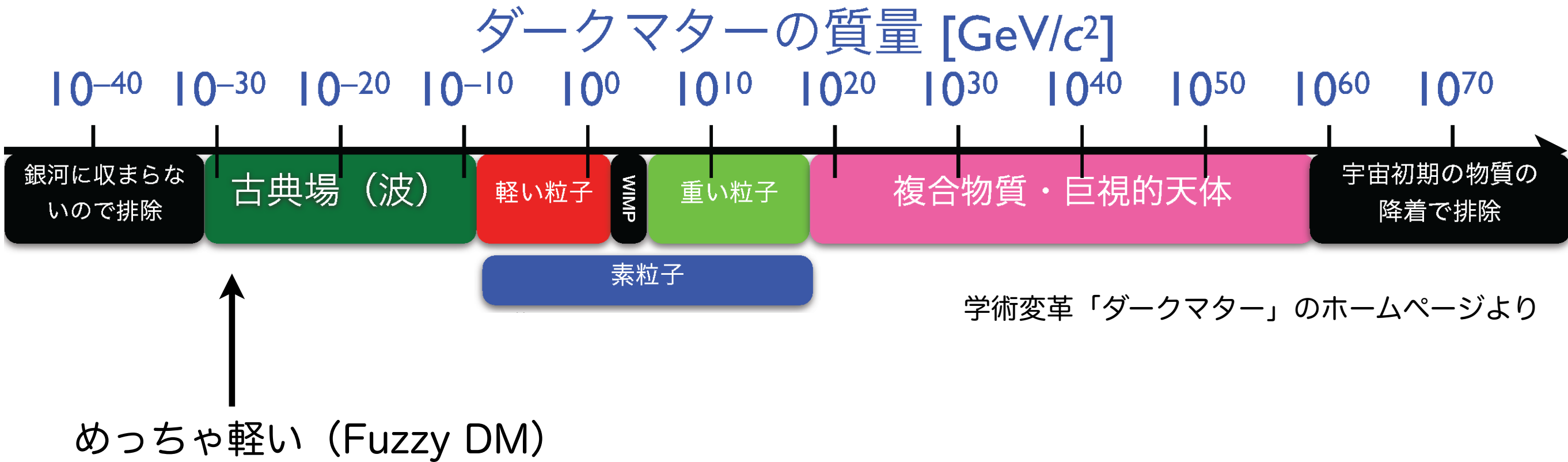


許されるポテンシャル：



ポテンシャルに小さな構造 → CMB power spectrum に小さな振動！

暗黒物質 (1)

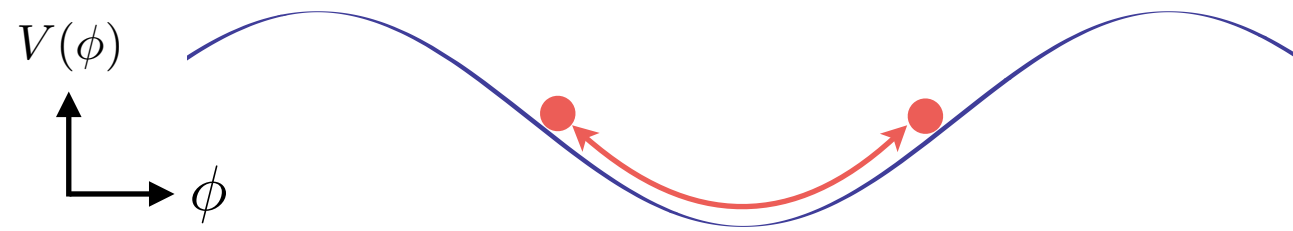


※ ほぼ全てに共通：標準模型粒子との相互作用がめっちゃ小さい

目標：スワンプランド条件を使って量子重力で許されるパラメータ空間を絞る！

暗黒物質 (2)

ex1. ultra light axion DM vs Weak Gravity Conjecture



非常に軽い → 非常に平坦

※ simple なポテンシャルだと fuzzy な領域 $10^{-22} \text{ GeV} \lesssim m \lesssim 10^{-21} \text{ GeV}$ は禁止

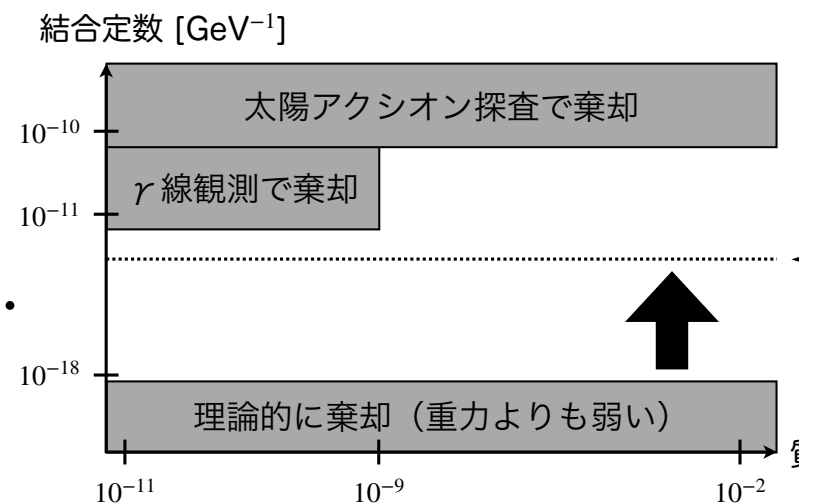
ex2. 標準模型粒子との相互作用



ex. アクシオン-光子結合、光子と暗黒光子の mixing、...

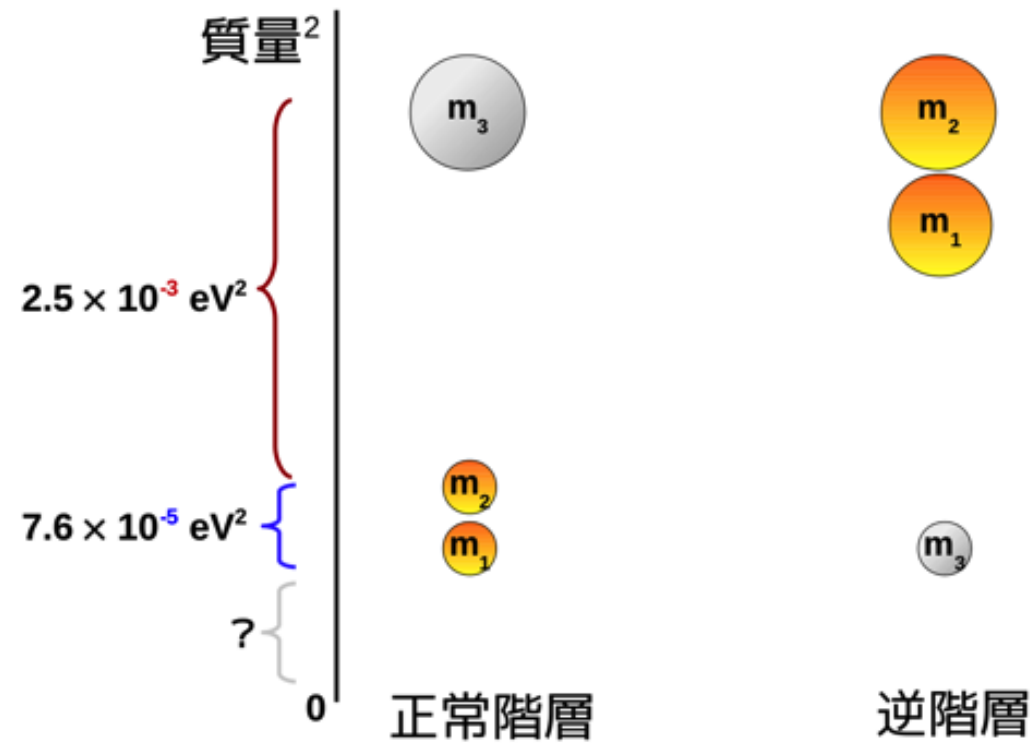
※ 「重力より強い」 だけではかなり緩い

→ より強い条件を出せないか？ (cf. 次章)



図：アクシオン探査のイメージ (一部の質量領域を抜粋した概略図)

ニュートリノと暗黒エネルギー (1)

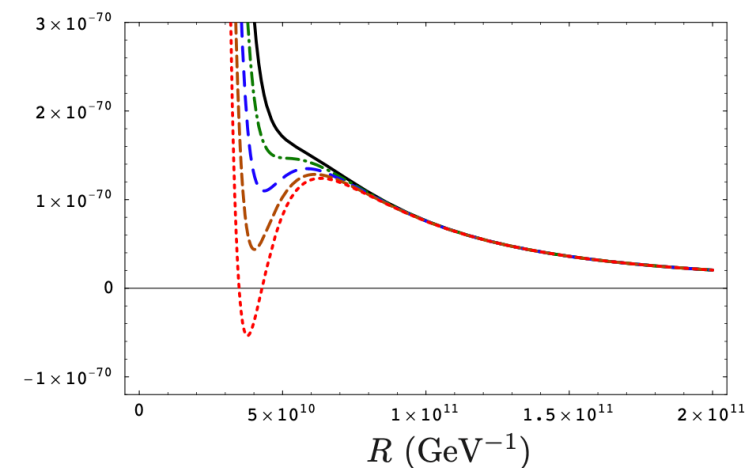
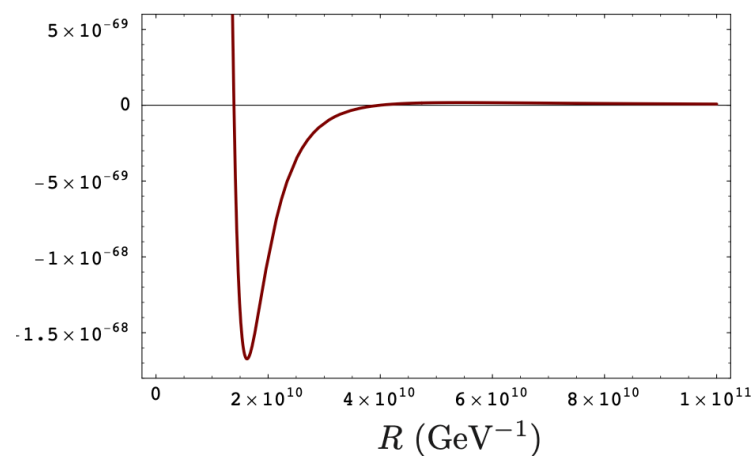
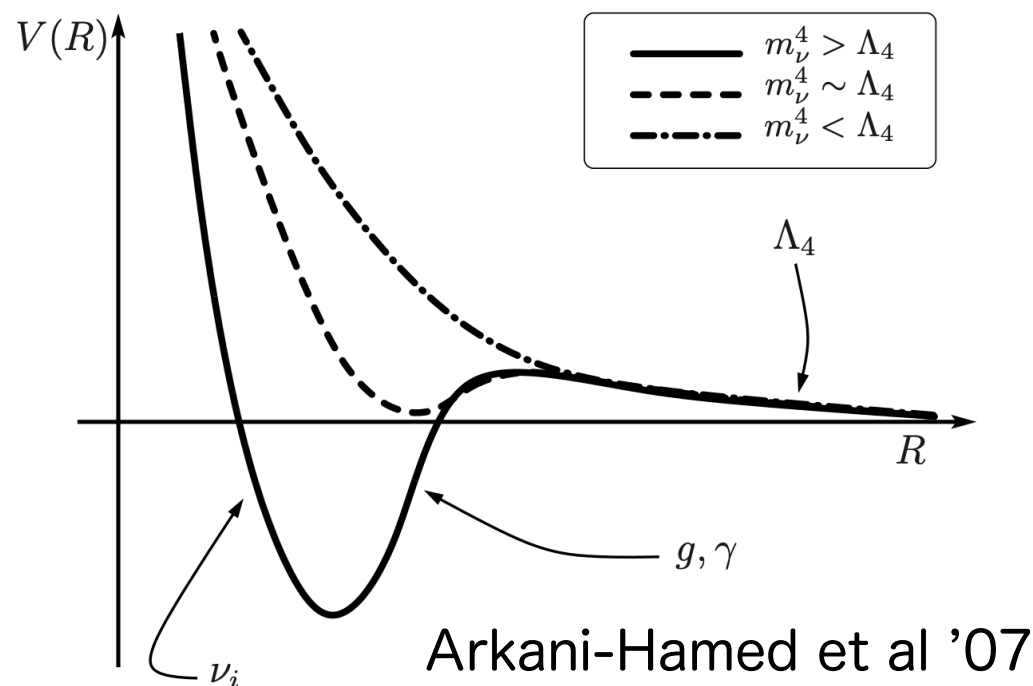


図は Hyper K のホームページより

ニュートリノの質量二乗差： $\Delta m_{12}^2 \sim (9 \text{ meV})^2$ 、暗黒エネルギー： $\Lambda_{\text{CC}} \sim (2 \text{ meV})^4$

→ ただの偶然？？？量子重力的な意味はあるのか？？？

ニュートリノと暗黒エネルギー (2)



(4次元) 標準模型を3次元にコンパクト化したときの radion ポテンシャル

ポテンシャルの形はニュートリノ質量の大きさ、質量タイプ、階層性に依存

→ ポテンシャルが満たすべきスワンプランド条件を解明できれば、

量子重力と無矛盾なニュートリノ質量が何かわかる。

※ 現状、色々提案はあるが、まだまだ controversial な状況。

そのほかのターゲット

そのほかにも

- 階層性問題
- 量子重力 vs ドジッター時空
- 超対称性の破れのスケール、…

など色々な方向が調べられている。

現状、眉唾な議論も少なくないが、

このようなスワンプランド条件をちゃんと出せたら面白い！

→ S-matrix bootstrap に基づくアプローチ

目次

1. Landscape & Swampland ✓
2. どのような物理を狙っているか ✓
3. S-matrix bootstrap
4. まとめと展望

3. S-matrix bootstrap

歴史上、散乱振幅のユニタリー性は大活躍！

- フェルミ相互作用の UV completion → ウィークボソン
- ウィークボソン散乱の UV completion → ヒッグス粒子
- 重力子散乱のユニタリー性を保とうとした結果が弦理論

散乱振幅の整合性から理論を決定：S-matrix bootstrap

※ 近年の研究のキーワードの1つが **Positivity Bounds**

ユニタリー性と散乱振幅の符号

ヒッグス粒子予言の歴史を思い出すと ...

$$W_L^- W_L^+ \rightarrow W_L^- W_L^+ \text{ scattering w/o Higgs: } \mathcal{M}_{\text{w/o}} \simeq -\frac{g^2}{4m_W^2} u \text{ @ high energy}$$

$$\text{Higgs exchange diagram: } \mathcal{M}_{\text{Higgs}} \simeq +\frac{g^2}{4m_W^2} u \text{ @ high energy}$$

$$\rightarrow \text{total amplitude: } \mathcal{M}_{\text{Higgs}} = \mathcal{O}(E^0)$$

$$\# \text{ もし } \mathcal{M}_{\text{w/o}} \simeq +\frac{g^2}{4m_W^2} u \text{ だったら}$$

Higgs exchange diagram ではキャンセルできてなかった。。。。

※ Higgs propagator を逆符号 (ghost) にすればキャンセルできる

Positivity bounds:

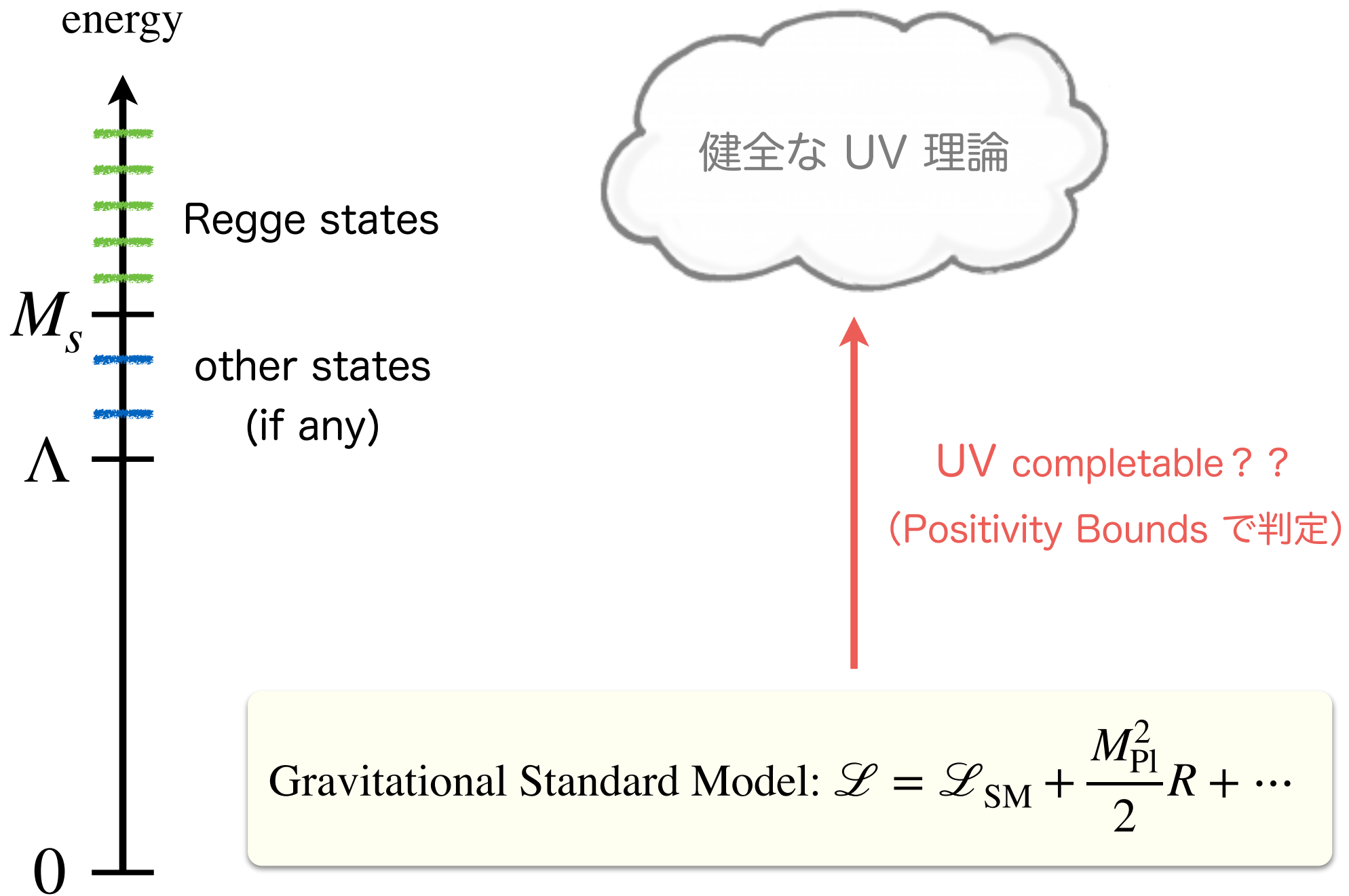
低エネルギー有効理論を unitary な UV 理論に埋め込めむための必要条件 (様々な不等式)

※ この辺りの詳細は野海、徳田順生 (神戸大)、青木勝輝 (京大) あたりがいつでもセミナーします!

gravitational Standard Model vs Positivity Bounds

[Aoki-Loc-TN-Tokuda '21]

Gravitational Standard Model

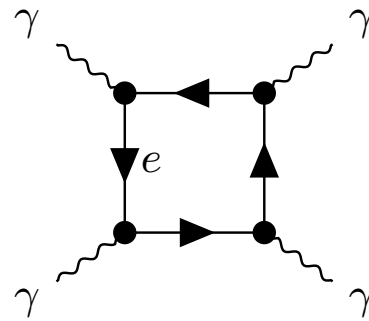


※ 健全な UV 理論の性質として何を要求すべきかは非自明

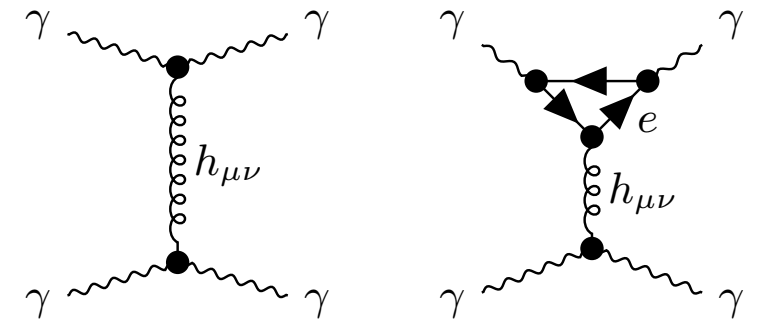
Positivity Bounds

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ scattering の分解 : $\mathcal{M} = \mathcal{M}_{\text{QFT}} + \mathcal{M}_{\text{GR}} + \mathcal{O}(M_{\text{Pl}}^{-4})$

\mathcal{M}_{QFT} : 重力を含まない寄与



\mathcal{M}_{GR} : 重力相互作用の leading order、つまり $\mathcal{O}(M_{\text{Pl}}^{-2})$



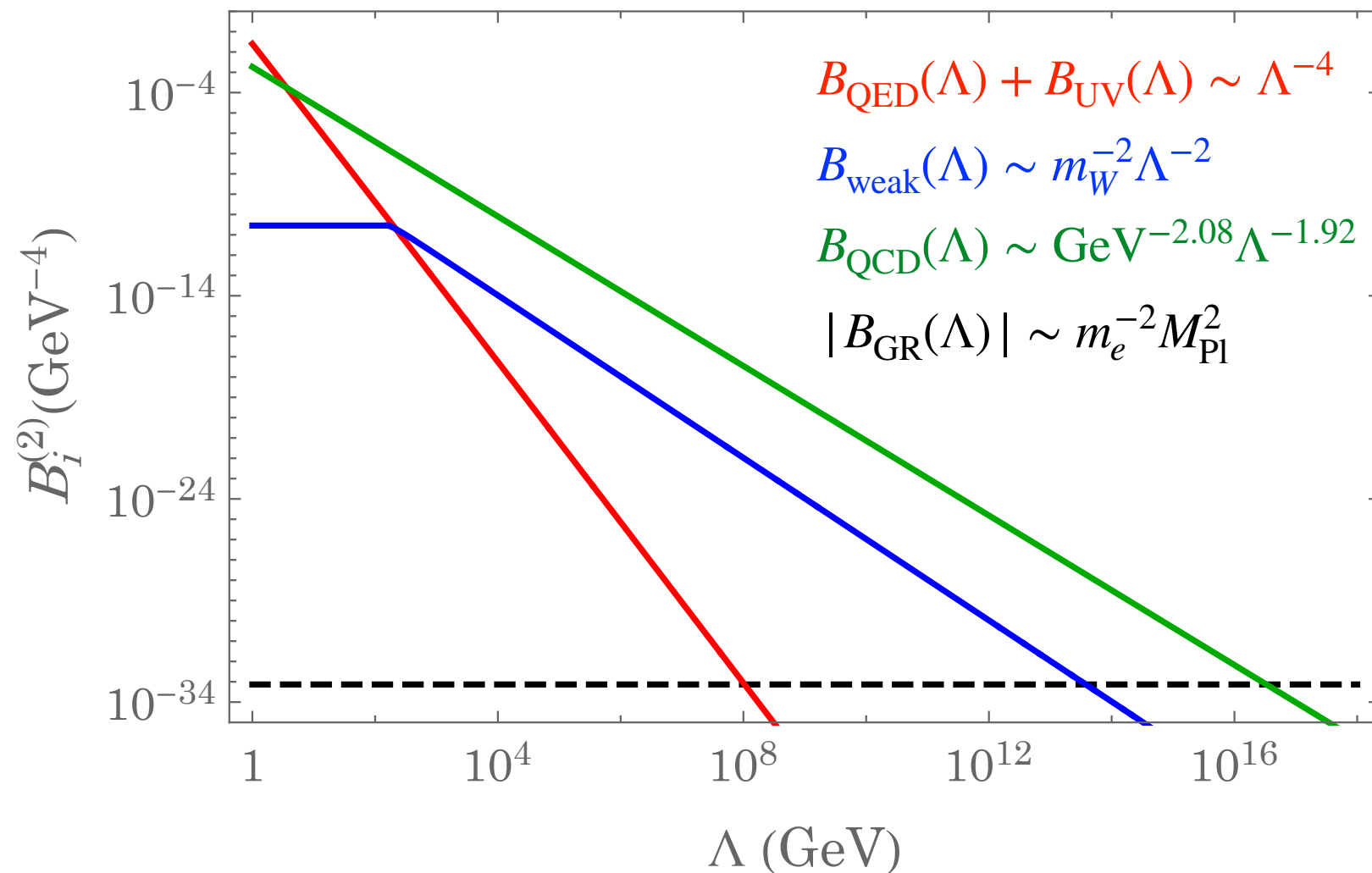
Positivity Bounds : $\frac{2}{\pi} \int_{\Lambda}^{\infty} \frac{\text{Im } \mathcal{M}_{\text{QFT}}(s,0)}{s^3} > - \mathcal{M}_{\text{GR}}(s,t) \Big|_{\mathcal{O}(s^2)}$

- cutoff scale Λ を含む不等式
- 右辺は正になっている
- 例えば QED では [Alberte-de Rham-Jaitly-Tolley '20, see also Aoki-Loc-TN-Tokuda '21]

$$\frac{64\alpha^2}{\Lambda^4} \left(\ln \frac{\Lambda}{m} - \frac{1}{4} \right) > \frac{22\alpha}{45\pi m_e^2 M_{\text{Pl}}^2} \Leftrightarrow \Lambda \lesssim \sqrt{emM_{\text{Pl}}} \sim 10^8 \text{ GeV.}$$

※ Weak Gravity Conjecture $\Lambda \lesssim eM_{\text{Pl}}$ よりも強い条件

Cutoff scale of gravitational SM

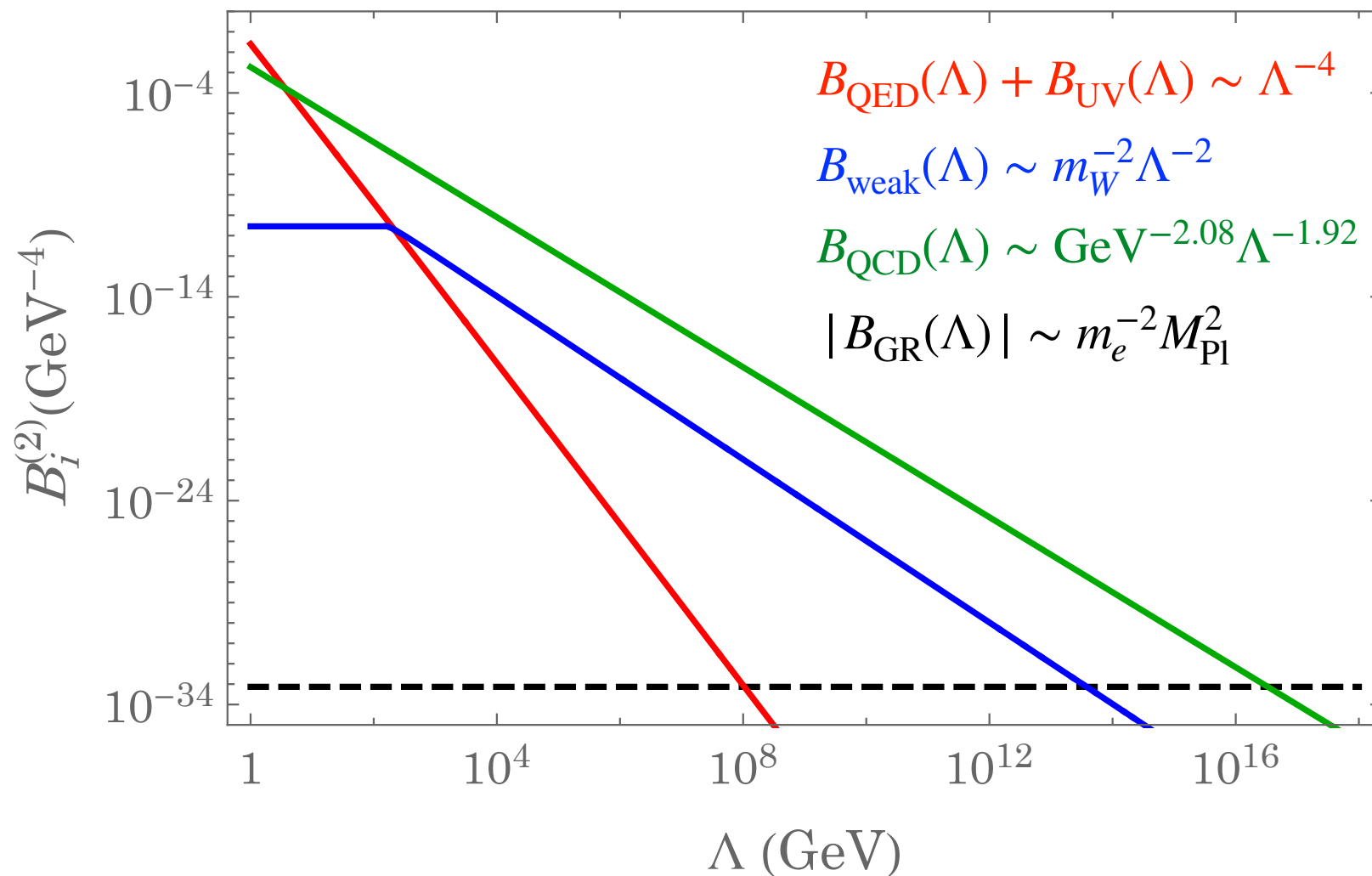


gravitational positivity:

$$B_{\text{QED}}(\Lambda) + B_{\text{UV}}(\Lambda) + B_{\text{weak}}(\Lambda) + B_{\text{QCD}}(\Lambda) > -B_{\text{GR}}(\Lambda)$$

→ this defines the cutoff of the gravitational SM $\Lambda \simeq 3 \times 10^{16}$ GeV.

A remark on EW theory w/o QCD



gravitational positivity implies: $B_{\text{weak}}(\Lambda) > -B_{\text{GR}}(\Lambda) \Leftrightarrow \frac{m_W}{M_{\text{Pl}}} < \sqrt{\frac{720}{11}} e \frac{m_e}{\Lambda}$

- Possible explanation for the hierarchy between the EW scale and the Planck scale??

- in terms of the Yukawa coupling, $\Lambda < \sqrt{\frac{1440}{11}} y_e \sin \theta_W M_{\text{Pl}}$ (weak gravity type)

4. まとめと展望

まとめと展望

1. Landscape & Swampland

- 量子重力に特有の整合性条件「スワンプランド条件」

2. どのような物理を狙っているか

- 典型的に $\frac{m}{M_{\text{Pl}}} \lesssim g$, $\Lambda_{\text{UV}} \lesssim gM_{\text{Pl}}$, $\Delta\phi \lesssim M_{\text{Pl}}$
- 高エネルギー、小さい相互作用、軽い質量に効く
- インフレーション、暗黒物質、ニュートリノ、暗黒エネルギー、...

3. S-matrix bootstrap

- Positivity Bounds : 有効理論が満たすべき散乱振幅の整合性条件
- QED cutoff $\sim 10^8$ GeV, SM cutoff $\sim 10^{16}$ GeV
- weak gravity 的条件は良く出る、より強いものが出ることもある
- 他の応用 : scalar potential [TN-Tokuda '21], DM [TN-Sato-Tokuda in progress], ...
- 重力理論における positivity bounds のより深い理解は不可欠

スワンプランド条件の解明を進められれば
量子重力（弦理論）と現実世界の架け橋に！

Thank you!