

# Implications of the weak gravity conjecture in anomalous quiver gauge theories

阿部慶彦  
(京大)

共同研究者

檜垣徹太郎(慶大), 高橋礼

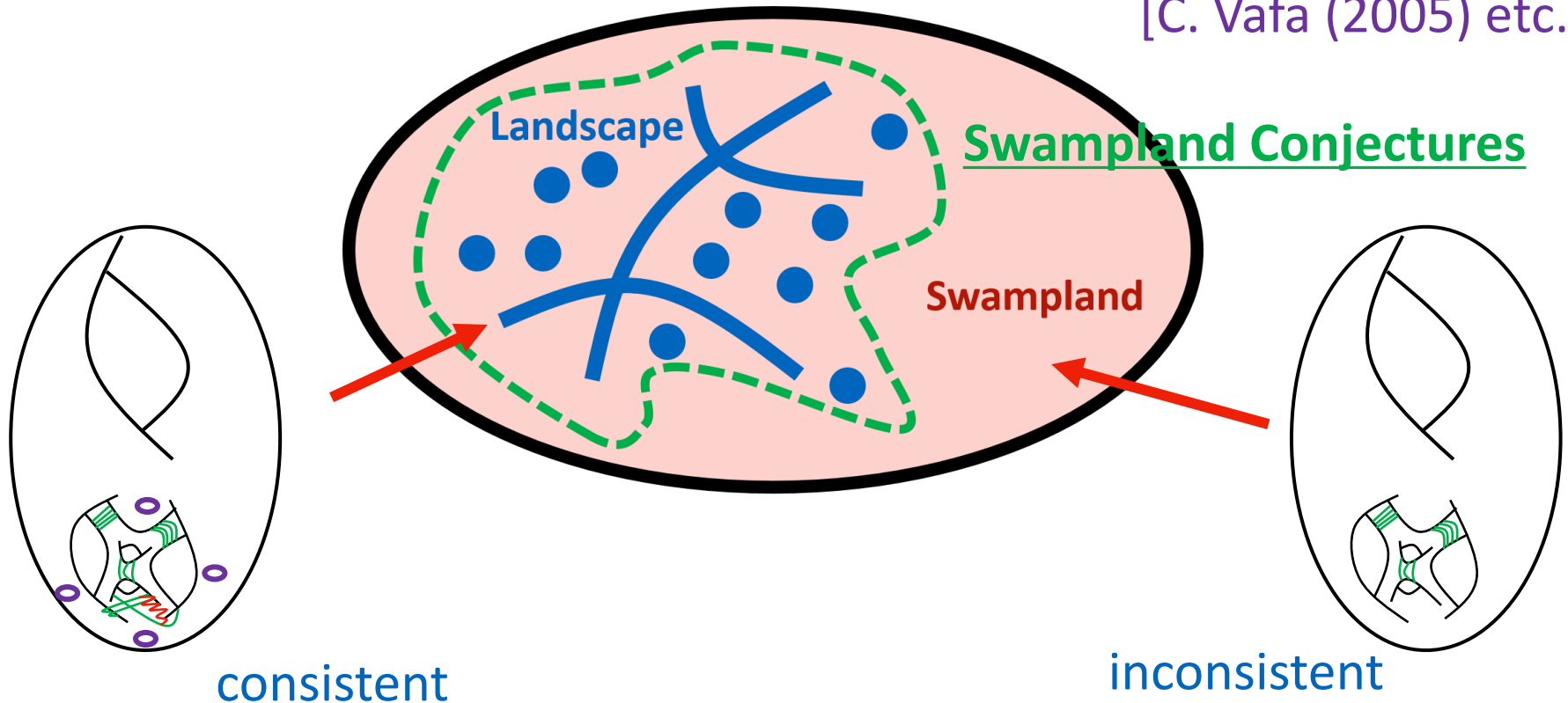
Ref. arXiv:2004.14917 [hep-th]  
(to be published in PRD)

# イントロダクション

量子重力(QG)の真空の選択則は何か？

## Landscape vs. Swampland

[C. Vafa (2005) etc.]



# イントロダクション

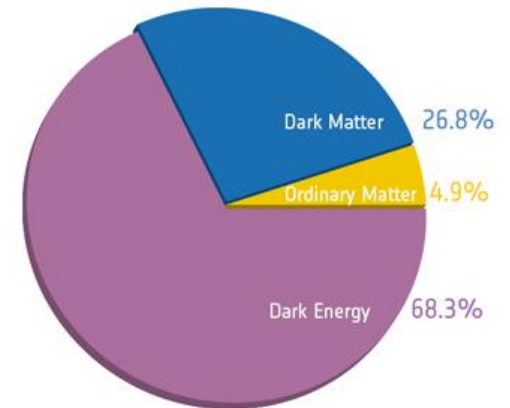
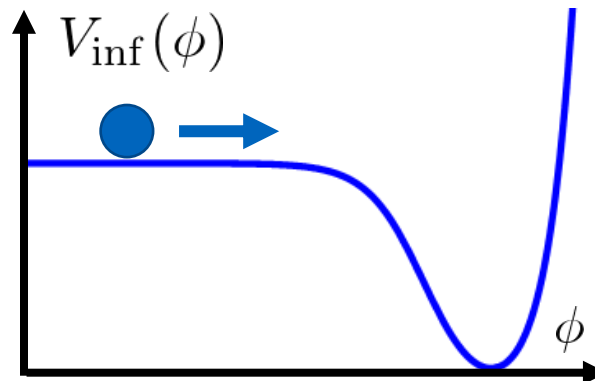
QG(ストリング理論...)

と

SMやmodel building  
を結びたい

- SMのゲージ群やmatter contentsに対する条件
- Inflation modelやスカラーポテンシャルに対する条件
- Dark sectorに対する条件

mass → charge → spin →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ 2/3 1/2 <b>u</b> up	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2 <b>c</b> charm	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2 <b>t</b> top	0 0 0 <b>g</b> gluon	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 <b>H</b> Higgs boson
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2 <b>d</b> down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2 <b>s</b> strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ -1/3 1/2 <b>b</b> bottom	0 0 1 <b><math>\gamma</math></b> photon	
QUARKS	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 <b>e</b> electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 <b><math>\mu</math></b> muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 1/2 <b><math>\tau</math></b> tau	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 <b>Z</b> Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2 <b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 <b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 <b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ $\pm 1$ 1 <b>W</b> W boson	GAUGE BOSONS



# Weak Gravity Conjecture

[Arkani-Hamed-Motl-Nicolis-Vafa (2006)]

# Weak Gravity Conjecture

- Long-range U(1)( $e$ : gauge coupling)について

∃ a **stable particle** w/ mass  $m$ , charge  $q$

$$eq \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{m}{M_{\text{Pl}}}$$

条件を満たす粒子が**1つ**でもあればOK  
存在要求の命題

- “重力は最も弱い力”

$$F_{\text{gauge}} = \frac{(eq)^2}{4\pi r^2} \geq F_{\text{gravity}} = \frac{m^2}{8\pi M_{\text{Pl}}^2 r^2}$$

# Weak Gravity Conjecture

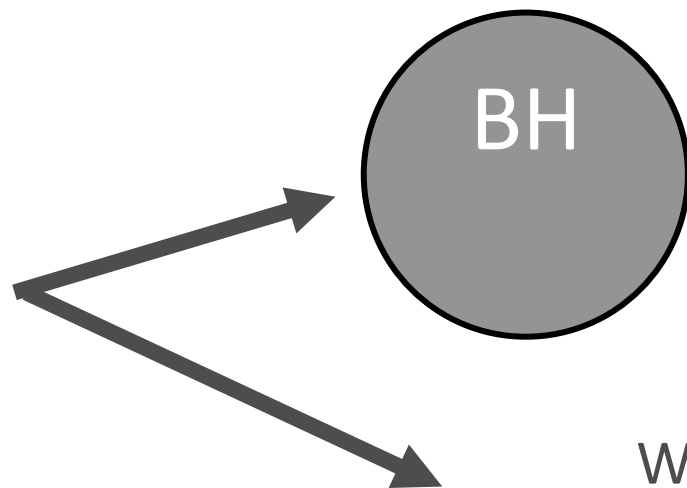
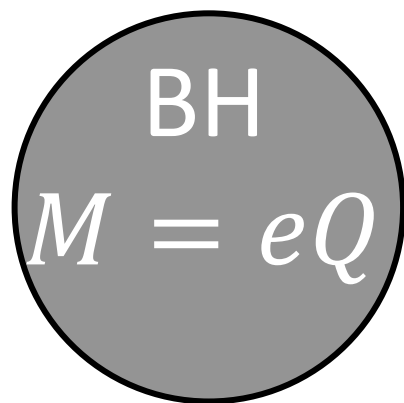
## Evidence

- 安定な extremal BH が崩壊する条件

$M_{\text{Pl}}/\sqrt{2} = 1$  の unit

Extremal Bound:  $M_{\text{BH}} \geq eQ_{\text{BH}}$

Naïveにはゲージ斥力でBH  
がはじけ飛んで naked  
singularity が現れない条件



$$M - m \geq e(Q - q)$$

Weak Gravity Conjecture

$$eq \geq m$$

対称性などで守られていない extremal BH は  
何かしら崩壊チャンネルを持つべし！

# Weak Gravity Conjecture

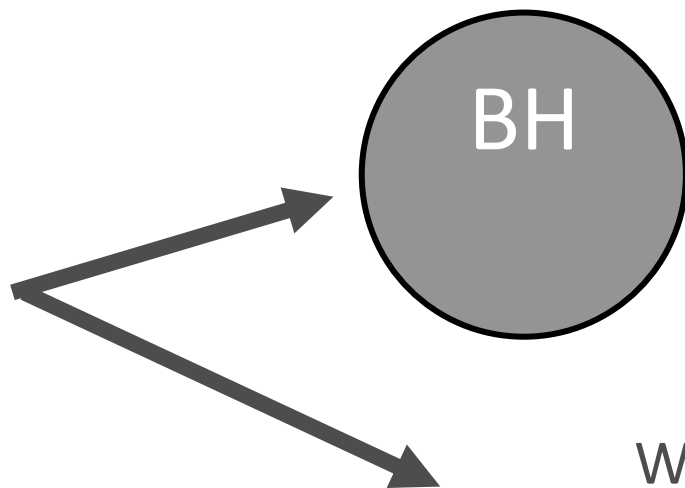
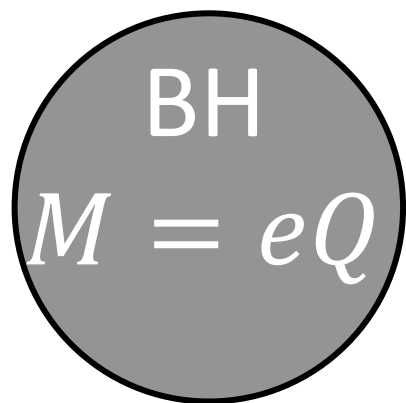
## Evidence

- 安定な extremal BH が崩壊する条件

$$M_{\text{Pl}}/\sqrt{2} = 1 \text{ の unit}$$

$$\text{Extremal Bound: } M_{\text{BH}} \geq eQ_{\text{BH}}$$

Naïveにはゲージ斥力でBH  
がはじけ飛んで naked  
singularity が現れない条件



$$M - m \geq e(Q - q)$$

Weak Gravity Conjecture

$$eq \geq m$$

- Entropy bound, remnants
- String Model Examples

# Weak Gravity Conjecture

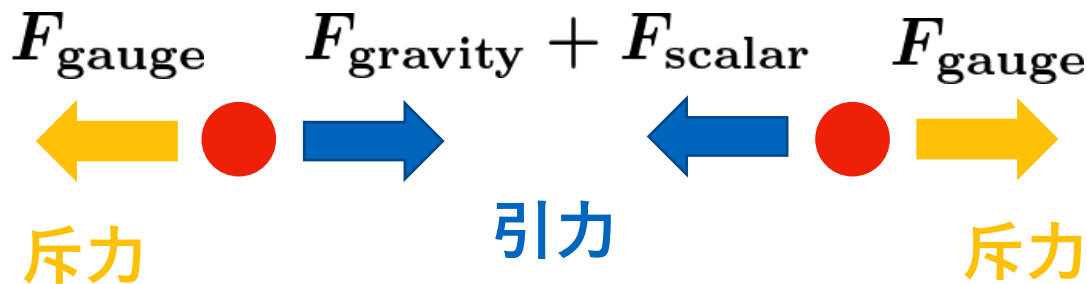
- WGC -> 重力が一番弱い力 [Arkani-Hamed-Motl-Nicolis-Vafa (2006)]

**Q:** 他の相互作用がある場合は？  
Yukawa相互作用、スカラーポテンシャル、...



- Scalar weak gravity conjecture (SWGGC) [E. Palti (2017), Lust-Palti (2017) etc.]

$$(qg)^2 \geq \frac{m^2}{2M_{\text{Pl}}^2} + g^{ij}(\phi)y_i y_j \quad y_i = \partial_{\phi^i} m(\phi)$$





# 疑問と動機

- (S)WGC

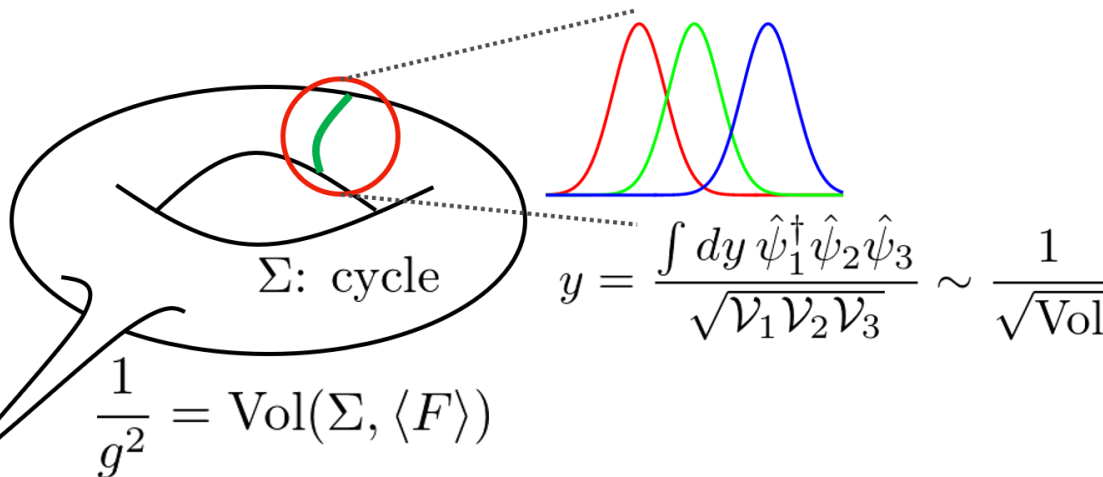
- ▶ 相互作用について

- $U(1)^k$  ゲージ理論
- 湯川相互作用
- アクシオン
- 相互作用の数

- ▶ スケールはどうなっている？

- Deep IR? Long-range force?
- Tree level? Loop effects?
- SSB

- UVの理論(ストリング理論など)についての示唆



- ブレーンの数や配位
- Moduliのポテンシャルの制限

# 疑問と動機

## • (S)WGC

### ➤ 相互作用について

- $U(1)^k$  ゲージ理論
- 湯川相互作用
- アクシオン
- 相互作用の数

## • UVの理論(ストリング)

### ➤ スケールはどうなっている？

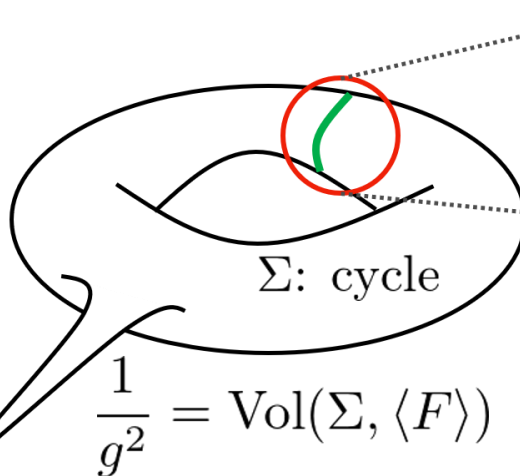
- Deep IR? Long-range force?

effects?

一般的に場の理論的な言葉で考えてみる。  
(bottom-up)

示唆

- ブレーンの数や配位
- Moduliのポテンシャルの制限



$$y = \frac{\int dy \hat{\psi}_1^\dagger \hat{\psi}_2 \hat{\psi}_3}{\sqrt{\mathcal{V}_1 \mathcal{V}_2 \mathcal{V}_3}} \sim \frac{1}{\sqrt{\text{Vol}}}$$

# Our Work

Abe-Higak-Takahashi, arXiv:2004.14917 [hep-th]

# モチベーション

- 対称性の数と場の数はどのくらいあっていい？
  - $U(1)$ 対称性とゲージ場はどのくらいある？
  - 場の種類(axionなど)はどのくらいいる？

**主張**

$$k = \#(U(1)\text{'s})$$

$U(1)^k$ のchiralなゲージ理論を考える



Anomaly-freeな $U(1)$ が  
WGCを破りうる



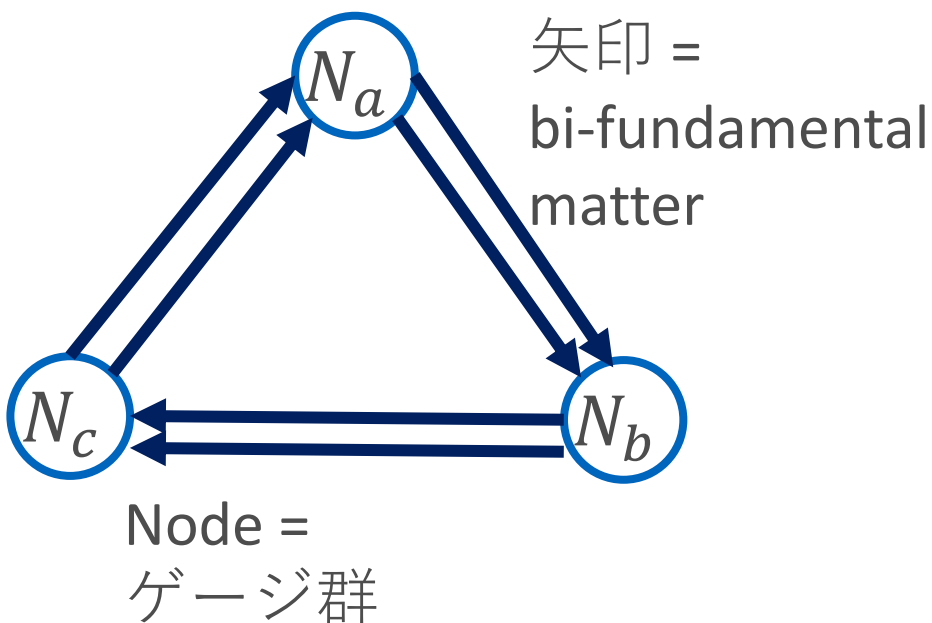
ゲージ群の数 $k$ に上限がある

WGCが対称性の数、場の数に対して制限を与える

# モチベーション

## Quiver gauge theory and anomalous U(1)'s

$U(N_a) \times U(N_b) \times U(N_c)$  (形式的に)



$$\mathcal{A}_{\text{non-abelian}} = 0$$

$$\mathcal{A}_{U(1) \times \text{gravity}^2} = 0$$

$$\partial_\mu j^{\mu, a} = \sum_{b \neq a} x_b F^{(b)} \tilde{F}^{(b)}$$

U(1)の線形結合をとってAnomaly-free U(1)

$$\partial_\mu j_{\text{anomaly-free}}^{\mu} = 0$$

# モチベーション

## Quiver gauge theory and anomalous U(1)'s

$$U(1)_{\text{anomaly-free}} = \sum_i \frac{c_i}{N_i} U(1)_i$$

Anomaly-free  $U(1)$  gauge coupling [Blumenhagen et al. (2003)]

$$\frac{1}{e^2} = \sum_i \frac{N_i c_i^2}{g_i^2} \sim \frac{k}{\tilde{g}^2}$$

U(1)ゲージ群の数が多い

⇒ anomaly-free U(1)のゲージ結合が小さくなる

WGCは？

# モチベーション

## Quiver gauge theory and anomalous U(1)'s

$$U(1)_{\text{anomaly-free}} = \sum_i \frac{c_i}{N_i} U(1)_i$$

Anomaly-free  $U(1)$  gauge coupling [Blumenhagen et al. (2003)]

$$\frac{1}{e^2} = \sum_i \frac{N_i c_i^2}{g_i^2} \sim \frac{k}{\tilde{g}^2}$$

U(1)ゲージ群の数が多い

⇒ anomaly-free U(1)のゲージ結合が小さくなる

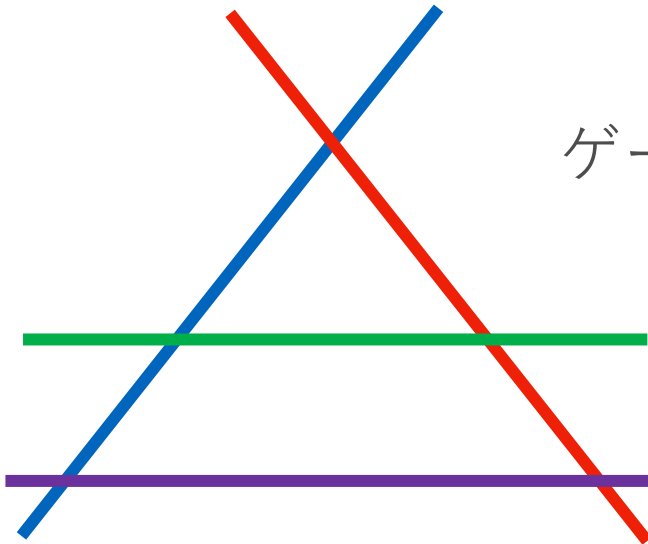
⇒  $k$ に上限

WGFCは？

$$e q \sim \frac{\tilde{g}}{\sqrt{k}} \gtrsim \frac{m}{M_{\text{Pl}}}$$

# モチベーション

Qu ストリング的な描像



ゲージ群  $\leftrightarrow$  ブレーン  
ゲージ群の数  $k$   $\leftrightarrow$  ブレーンの枚数

“準安定”な場合、  
ブレーンは何枚置いてもいい？

WGC > ダメ！

$\Rightarrow k$ に上限

$$e q \sim \frac{\tilde{g}}{\sqrt{k}} \gtrsim \frac{m}{M_{\text{Pl}}}$$



# モチベーションとやったこと

- 対称性の数と場の数はどのくらいあっていい？
  - $U(1)$ 対称性とゲージ場はどのくらいある？
  - 場の種類(axionなど)はどのくらいいる？

$U(1)^k$ のchiralなゲージ理論を考察する

# モチベーションとやったこと

- 対称性の数と場の数はどのくらいあっていい？
  - $U(1)$ 対称性とゲージ場はどのくらいある？
  - 場の種類(axionなど)はどのくらいいる？

$U(1)^k$ のchiralなゲージ理論を考察する

- SWGCを考えて制限を課す

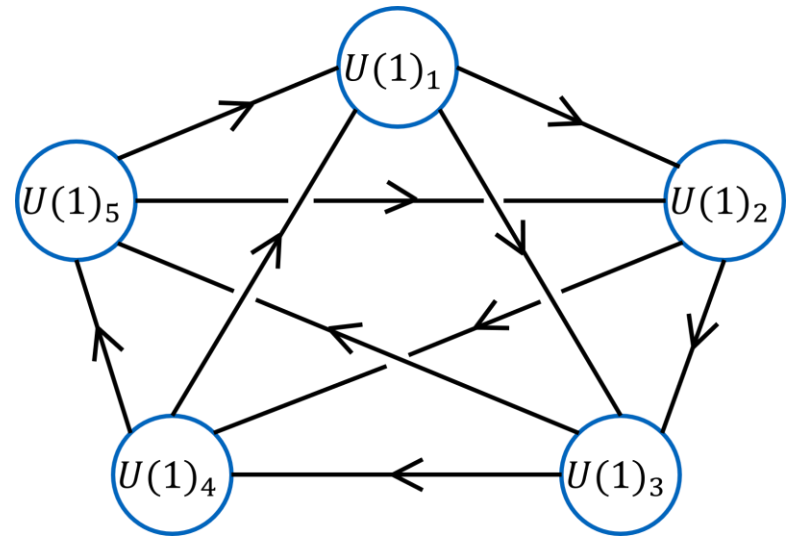
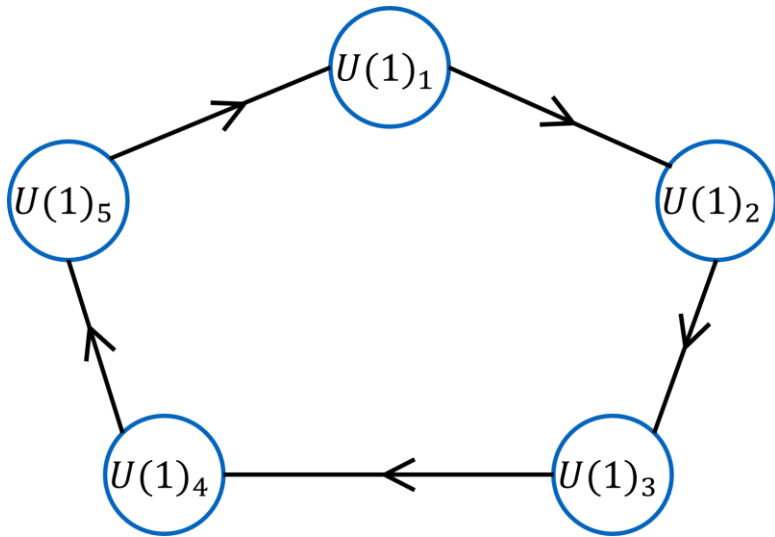
$$(qg)^2 \geq \frac{m^2}{2M_{\text{Pl}}^2} + g^{ij}(\phi)y_i y_j$$

- Dimensional reduction:  $S^1/\mathbb{Z}_2$  orbifold
  - Gravitonを落として、chiralな4D理論が得られる
  - couplingについて、SWGCを通して制限や情報を得たい

# Quiver Gauge Theories and WGC

Nodesにの入れ替えして $\mathbb{Z}_k$ 対称性を持つ $U(1)^k$ 模型を考える

- $U(1)^{2l-1}$



$$U(1)_{\text{anomaly-free}} = \sum_{i=1}^{2l-1} U(1)_i$$

ゲージ結合

$$\frac{1}{e^2} = \sum_i \frac{1}{g_i^2}$$

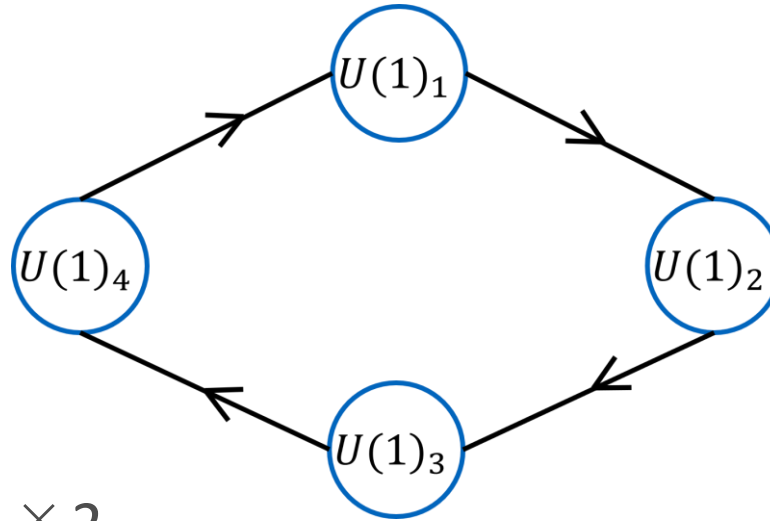


$$e \sim \frac{1}{\sqrt{k}}$$

# Quiver Gauge Theories and WGC

Nodesにの入れ替えして $\mathbb{Z}_k$ 対称性を持つ $U(1)^k$ 模型を考える

- $U(1)^4$



Anomaly-free  $U(1) \times 2$

$$U(1)_X = cU(1)_1 + U(1)_2 + cU(1)_3 + U(1)_4$$

$$U(1)_{X'} = -\frac{1}{c}U(1)_1 + U(1)_2 - \frac{1}{c}U(1)_3 + U(1)_4$$

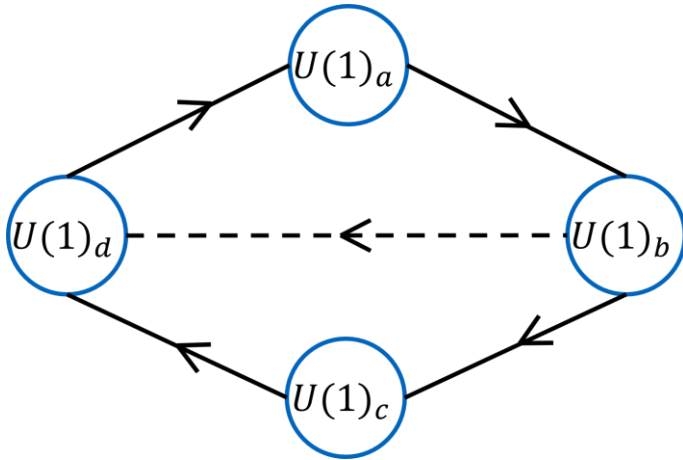
ゲージ結合

$$\frac{1}{e_X^2} = \frac{c^2}{g_1^2} + \frac{1}{g_2^2} + \frac{c^2}{g_3^2} + \frac{1}{g_4^2},$$

$$\frac{1}{e_{X'}^2} = \frac{1/c^2}{g_1^2} + \frac{1}{g_2^2} + \frac{1/c^2}{g_3^2} + \frac{1}{g_4^2}$$

# Constraints of SWGC

- $U(1)^4$  model



Fields	$q_X$	$q_{X'}$
$\psi_{ab}$	$-1 + c$	$-1 - 1/c$
$\psi_{da}$	$1 - c$	$1 + 1/c$
$\psi_{bc}$	$1 - c$	$1 + 1/c$
$\psi_{cd}$	$-1 + c$	$-1 - 1/c$
$\varphi$	0	0

neutral

Lagraingian

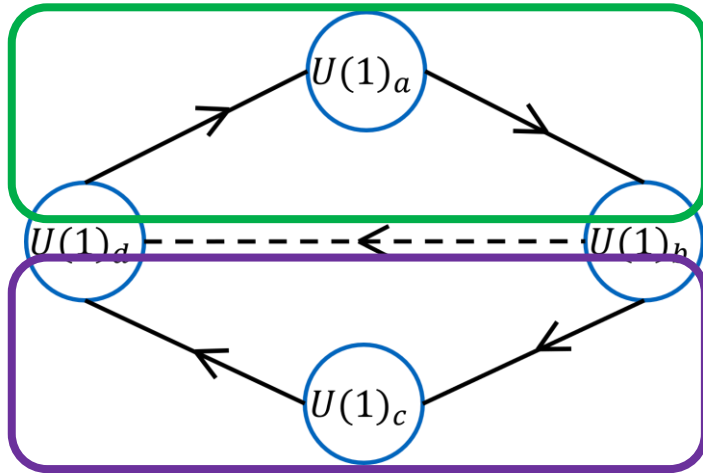
$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \sum_{I=ab,bc,cd,da} i\bar{\psi}_I \not{D} \psi_I - |\partial_\mu \varphi|^2 - \frac{1}{4e_X^2} (F_{\mu\nu}^{(X)})^2 - \frac{1}{4e_{X'}^2} (F_{\mu\nu}^{(X')})^2 \\
 & - \left[ y\varphi \overline{\psi_{ab}^C} \psi_{da} + y'\varphi^\dagger \overline{\psi_{bc}^C} \psi_{cd} + \text{h.c.} \right] + \dots
 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{e_X^2} = \frac{c^2}{g_a^2} + \frac{1}{g_2^2} + \frac{c^2}{g_c^2} + \frac{1}{g_2^2}$$

$$\frac{1}{e_{X'}^2} = \frac{1/c^2}{g_a^2} + \frac{1}{g_2^2} + \frac{1/c^2}{g_c^2} + \frac{1}{g_2^2}$$

# Constraints of SWGC

- $U(1)^4$  model



Fields	$q_X$	$q_{X'}$
$\psi_{ab}$	$-1 + c$	$-1 - 1/c$
$\psi_{da}$	$1 - c$	$1 + 1/c$
$\psi_{bc}$	$1 - c$	$1 + 1/c$
$\psi_{cd}$	$-1 + c$	$-1 - 1/c$
$\varphi$	0	0

neutral

Lagraingian

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \sum_{I=ab,bc,cd,da} i\bar{\psi}_I \not{D} \psi_I - |\partial_\mu \varphi|^2 - \frac{1}{4e_X^2} (F_{\mu\nu}^{(X)})^2 - \frac{1}{4e_{X'}^2} (F_{\mu\nu}^{(X')})^2 \\
 & - \left[ y\varphi \overline{\psi_{ab}^C} \psi_{da} + y'\varphi^\dagger \overline{\psi_{bc}^C} \psi_{cd} + \text{h.c.} \right] + \dots
 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{e_X^2} = \frac{c^2}{g_a^2} + \frac{1}{g_2^2} + \frac{c^2}{g_c^2} + \frac{1}{g_2^2}$$

$$\frac{1}{e_{X'}^2} = \frac{1/c^2}{g_a^2} + \frac{1}{g_2^2} + \frac{1/c^2}{g_c^2} + \frac{1}{g_2^2}$$

# Constraints of SWGC

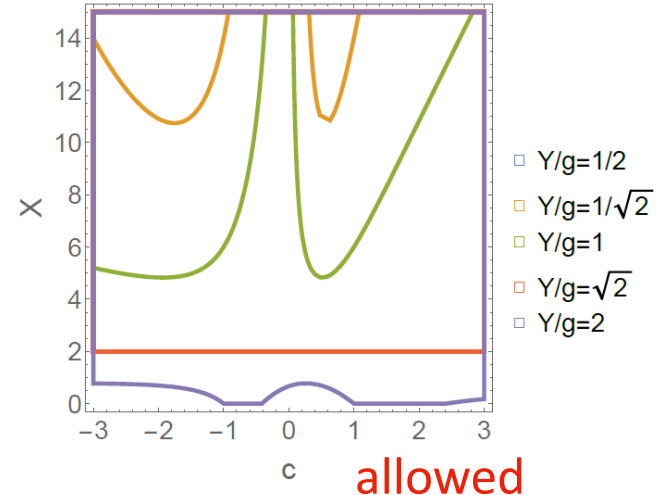
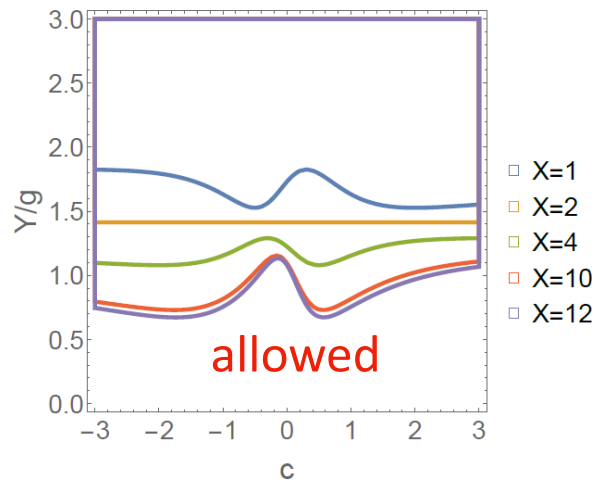
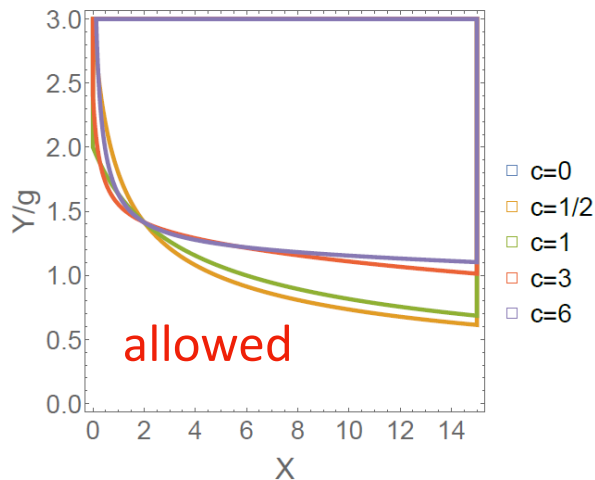
- $U(1)^4$  model  
SWGC条件

$$\left(-1 + c\right)^2 e_X^2 + \left(1 + \frac{1}{c}\right)^2 e_{X'}^2 \geq \frac{M^2}{2M_{\text{Pl}}^2} + \frac{y^2}{2}$$

# Constraints of SWGC

- $U(1)^4$  model  
SWGC条件

$$\left(-1 + c\right)^2 e_X^2 + \left(1 + \frac{1}{c}\right)^2 e_{X'}^2 \geq \frac{M^2}{2M_{\text{Pl}}^2} + \frac{y^2}{2}$$



$$X := g_2^2/g_a^2 + g_2^2/g_c^2$$

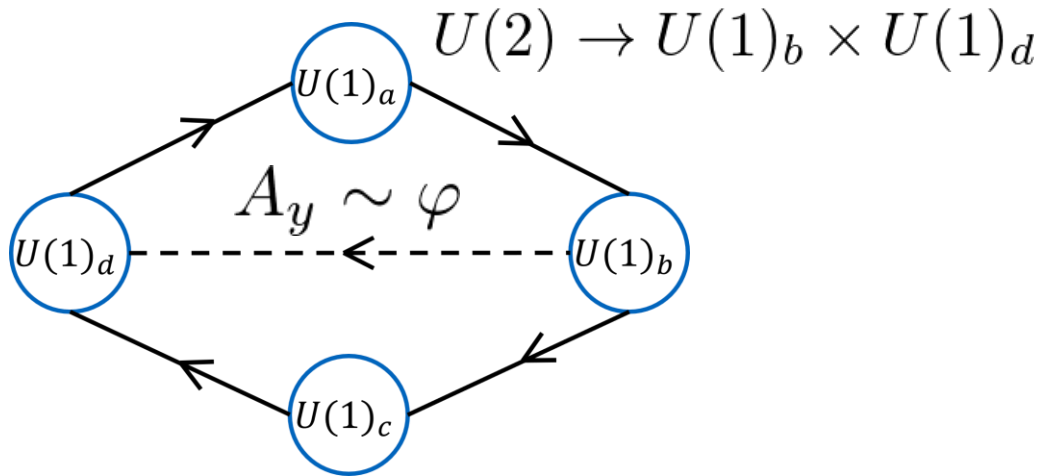


# $U(1)^4$ model from $S^1/\mathbb{Z}_2$ and SWGC

- $U(1)^4$  model from  $S^1/\mathbb{Z}_2$

$$ds^2 = e^{-\sigma} g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + e^{2\sigma} dy^2$$

~~$g_{\mu y}$~~



Fields	$U(2)$	$U(1)_a$	$U(1)_c$
$A_M$	adj	0	0
$\Psi_a$	$\mathbf{2}_{1/2}$	-1	0
$\Psi_c$	$\bar{\mathbf{2}}_{-1/2}$	0	+1
$A_M^{(a)}$	0	adj	0
$A_M^{(c)}$	0	0	adj

スカラー場 ~ 余剰次元の“W-boson”

⇒ Yukawa coupling と gauge coupling に関係がつく

$$y = \frac{g_2}{\sqrt{2}}$$

# $U(1)^4$ model from $S^1/\mathbb{Z}_2$ and SWGC

- SWGC condition

$$\frac{(1-c)^2}{(c^2/2)X+2} + \frac{(1+1/c)^2}{(1/2c^2)X+2} \gtrsim \frac{1}{4}$$

$$X := g_2^2/g_a^2 + g_2^2/g_c^2$$

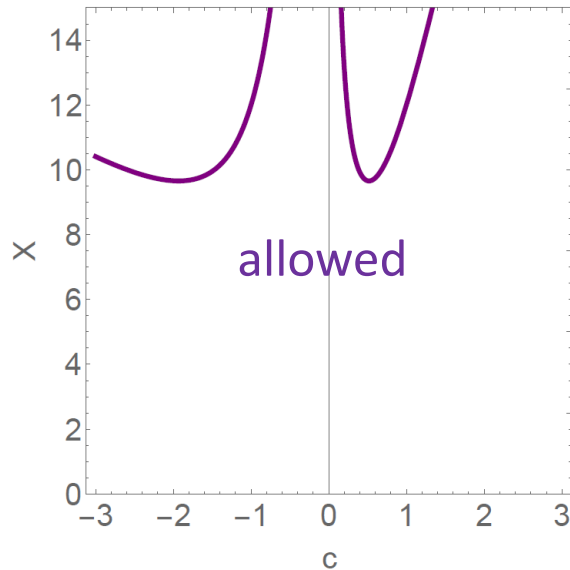
- Anomaly-free  $U(1) \times 2$  のゲージ斥力
- Yukawa相互作用の引力 (spin-independent force)
  - \* spin-dependent force は長距離力ではない
  - >  $\varphi$  の実1自由度がSWGCに寄与する。
- 重力相互作用

# $U(1)^4$ model from $S^1/\mathbb{Z}_2$ and SWGC

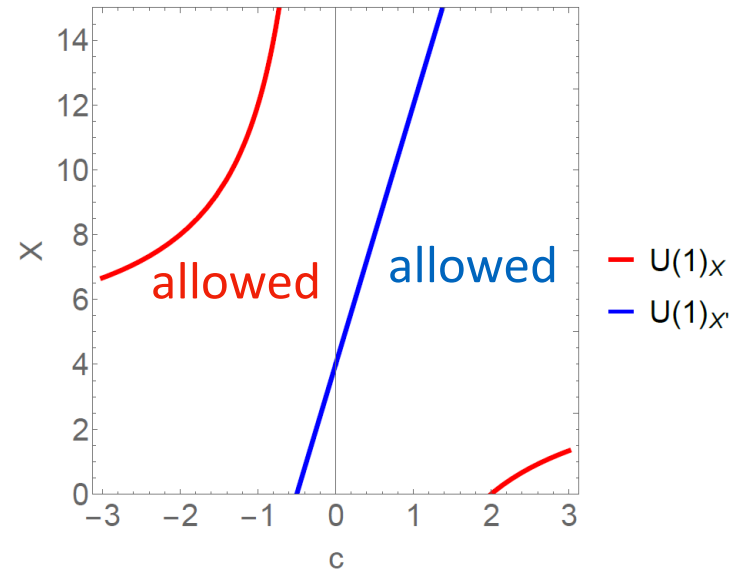
- SWGC condition

$$\frac{(1-c)^2}{(c^2/2)X + 2} + \frac{(1+1/c)^2}{(1/2c^2)X + 2} \gtrsim \frac{1}{4}$$

$$X := g_2^2/g_a^2 + g_2^2/g_c^2$$



—  $U(1)_{X+U(1)_{X'}}$



—  $U(1)_X$   
—  $U(1)_{X'}$

# Axions

- Anomalous  $U(1)$ 's  $\rightarrow$  axion coupling と axion の存在

$$S_{\text{axion}} = \sum_i \int d^4x \left[ -\frac{1}{2} \frac{m_i^2}{g_i^2} \left( \sum_I B_{iI} \partial_\mu a^I + A_\mu^{(i)} \right)^2 + \sum_I \frac{C_{iI} a^I}{32\pi^2} \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} F_{\mu\nu}^{(i)} F_{\rho\sigma}^{(i)} \right]$$

$$S_{\text{anomaly}} + \delta_\Lambda S_{\text{axion}} = 0$$

$$A_\mu^{\text{anomalous}} \sim \sum_i b_i A_\mu^{(i)}, \quad A_\mu^{\text{anomaly-free}} \sim \sum_i c_i A_\mu^{(i)}$$

$b_i(\partial^\mu a) A_\mu^{(i)}$   $(b_i, c_i)$  は関係づいている

ゲージ群の数の制限



axion の数の制限

“species bound”

# まとめ

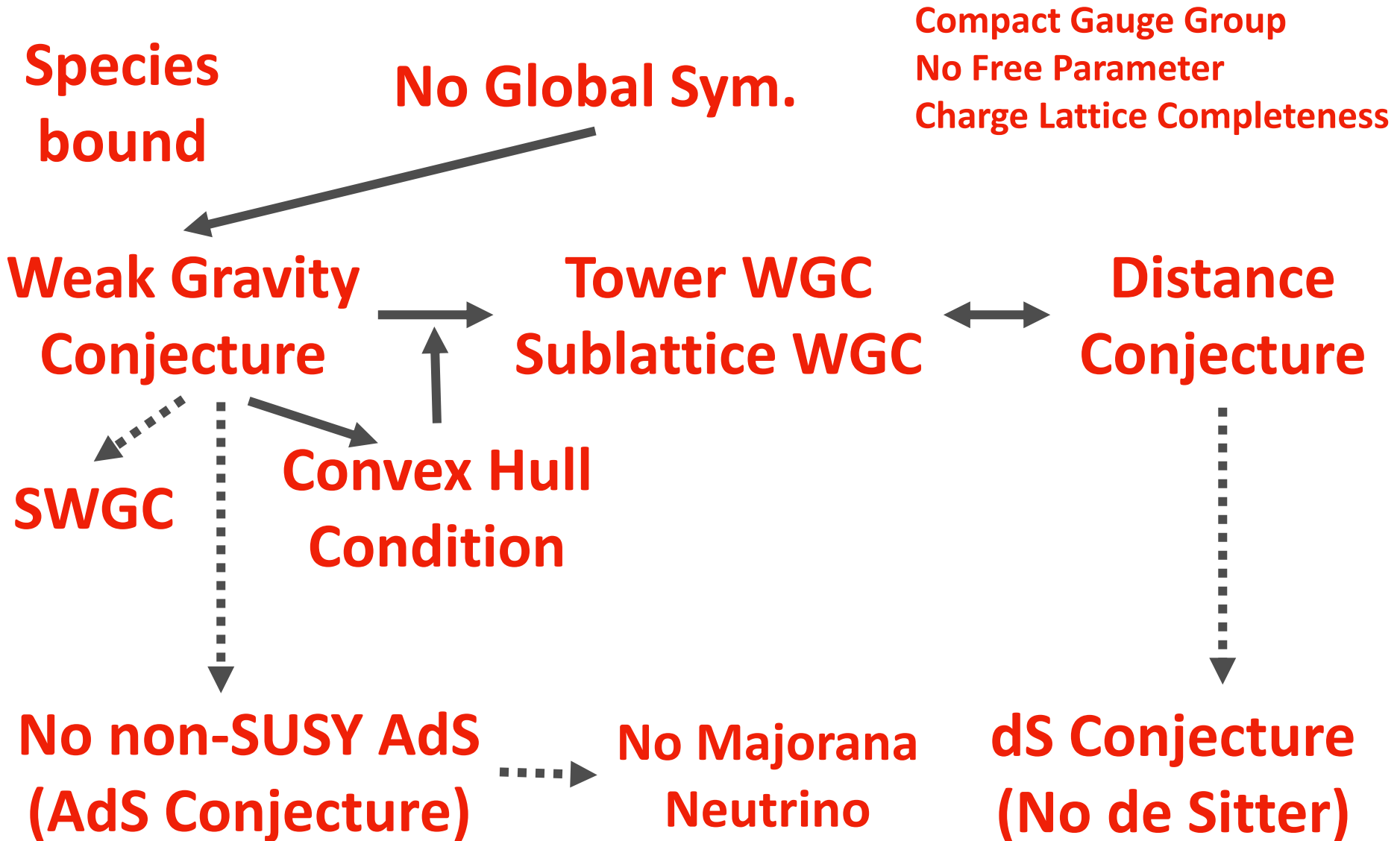
## Implications of WGC in anomalous quiver gauge theories

WGCがchiralな $U(1)^k$ ゲージ理論に対して  
 $k$ に形式的な上限を与える

- 場の理論の立場から、 $U(1)^k$  quiver gauge理論でanomaly-free  $U(1)$ に関するSWGCGを考えた。
- 5D模型とdimensional reductionを考えて、couplingに対するSWGCGの制限を見た。
- スカラーポテンシャルやstrong SWGCGの関係はどうなっているか？
- アクシオンについて具体的に結合はどうなっているか？

# Backup

# Web of Swampland Conjectures



# No Global Symmetry

[Banks-Dixon (1988), Banks-Seiberg (2010)]

- QGには”Symmetry”は存在しない
  - Global sym. = “true” sym. Gauge sym. = gauge “redundancy”
- Gauge sym. => OK
- Approximate sym. => OK [近似精度はno comment]
  - SSBもダメ
- Emergent/Accidental global sym. => OK
- Discrete global sym. => Not OK
- Global p-form sym. => Not OK

## No “Exact” Global Symmetry

SU(N) pure Yang-Mills Theory => **Swampland**  
Adj. matterはcenterがexact global sym.

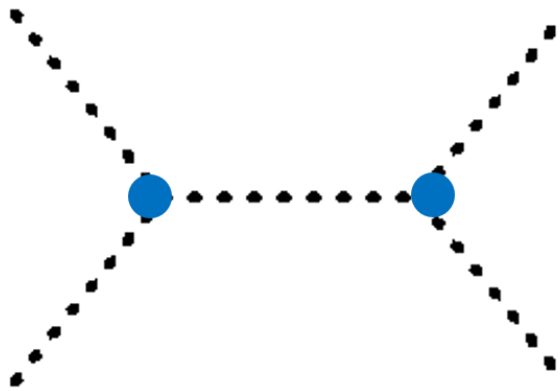


# Strong Scalar Weak Gravity Conjecture

[Gonzalo-Ibanez (2019)]

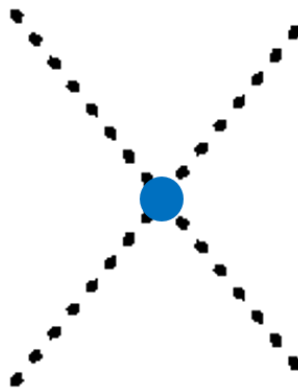
- SWGC -> Potentialの条件式

$$2(V''''')^2 - V''V'''' \geq \frac{(V'')^2}{M_{\text{Pl}}^2}$$



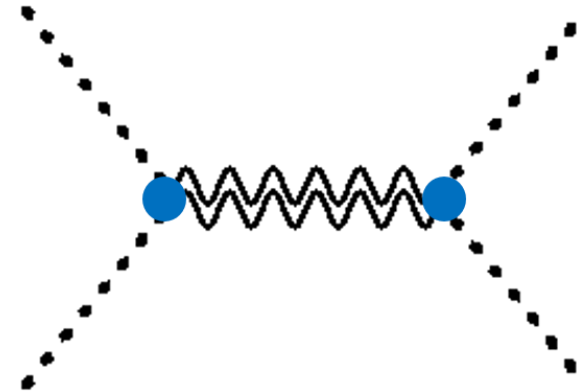
Propagationを伴う引力

—



Contact斥力

$\geq$



重力の引力

# Weak Gravity Conjecture for Axion

- WGC

[Arkani-Hamed-Motl-Nicolis-Vafa (2006)]

BH (点粒子のお化け) + 1-form gauge field

$$\left( \frac{e^2 q^2}{G_N} \right)^{1/2} \geq (\text{mass})$$

- WGC for Axion

p-brane (広がったobject) + p+1 form gauge field

$$\left( \frac{e^2 q^2}{G_N} \right)^{1/2} \geq (\text{Tension})$$

p+1 form field  $\sim$  axion (dim. red.)

$$f_a \sim \Delta a$$

$$S_{\text{inst}} \leq \frac{M_{\text{Pl}}}{f_a} \rightarrow f_a \leq \frac{M_{\text{Pl}}}{S_{\text{inst}}}$$

$$\Delta a \lesssim M_{\text{Pl}}$$

# Scalar Weak Gravity Conjecture (SWGGC)

[Lust-Palti (2017)]

- WGC with Scalars and dimensional reduction

重力 + U(1)ゲージ理論をreduction

$$S_{5D} = \int_{\mathcal{M}^4 \times S^1} d^5 X \sqrt{-G_5} \left[ \frac{1}{2\kappa_5^2} R^{(5)} - \frac{1}{4g_5^2} F_{MN} F^{MN} - |D_M H|^2 - M_H^2 |H|^2 \right]$$

重力  $G_{MN}$  + U(1)ゲージ場  $A_M$  + 複素スカラー場  $H$



$S^1$ コンパクト化

$$S_{4D}^0 = \int_{\mathcal{M}^4} d^4 x \sqrt{-g_4} \left[ \frac{1}{2\kappa_4^2} R^{(4)} - \frac{1}{2\kappa_4^2} (\partial_\mu \varphi)^2 + \mathcal{I}_{IJ} F_{\mu\nu}^I F^{J\mu\nu} - \frac{1}{2r^2 g_5^2} (\partial_\mu a)^2 - |D_\mu h|^2 - m^2 |h|^2 \right]$$

重力  $g_{\mu\nu}$  + U(1)ゲージ場  $A_\mu$  + 複素スカラー場  $h$

+ graviphoton(U(1)ゲージ場)  $A_\mu'$

+ radion moduli  $\varphi$  + Wilson loop moduli  $a$

- 4D scalar weak gravity conjecture  
 $\Rightarrow$  5D weak gravity conjecture

# Anomalous $U(1)$ Symmetries

- Axions and Stückelberg coupling

$$S_{\text{axion}} = \sum_{i \in U(1)_{\text{anomaly}}} \int d^4x \left[ -\frac{1}{2} \frac{m_i^2}{g_i^2} \left( \sum_{I \in \text{axions}} B_{iI} \partial_\mu \theta_I + A_\mu^{(i)} \right)^2 + \sum_{I \in \text{axions}} \frac{C_{iI} \theta_I}{32\pi^2} \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} F_{\mu\nu}^{(i)} F_{\rho\sigma}^{(i)} \right]$$

$$\theta_I \mapsto \theta_I - D_{Ii} \Lambda_i, \quad A_\mu^{(i)} \mapsto A_\mu^{(i)} + \partial_\mu \Lambda_i$$

$$S_{\text{anomaly}} = \sum_{i \in U(1)_{\text{anomaly}}} \int d^4x \left[ \sum_{I \in \text{axions}} \Lambda_i \frac{C_{iI} D_{Ii}}{32\pi^2} \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} F_{\mu\nu}^{(i)} F_{\rho\sigma}^{(i)} \right]$$

$$S_{\text{anomaly}} + \delta_\Lambda S_{\text{axion}} = 0$$

$$S_{\text{axion}} = \sum_{i \in U(1)_{\text{non-anomalous}}} \int d^4x \left[ -\frac{1}{2} \frac{m_i^2}{g_i^2} \left( \sum_{I \in \text{axions}} B'_{iI} \partial_\mu \theta_I + A_\mu'^{(i)} \right)^2 \right]$$

massive

# Weak Coupling Conjecture

[Buratti-Calderon-Mininno-Uranga (2020)]

- Statement: WCC

離散的な  $\mathbb{Z}_k$  ゲージ対称性とゲージ結合  $e$  の  $U(1)$  ゲージ対称性を持つ QG では、ゲージ結合は次のスケールリングに従う：

$$e \sim \frac{1}{k^\alpha}, \quad \alpha \sim \mathcal{O}(1)$$

$U(1)$ ,  $\mathbb{Z}_k$  に charged な BH と particle 系を考える

Cf. Species bound

BH

●

$$m, q \quad \frac{1}{\Lambda} \sim \frac{1}{\beta m} \gtrsim \frac{km}{M_{\text{Pl}}^2} \Rightarrow m^2 \lesssim \frac{M_{\text{Pl}}^2}{k}$$

質量のスケールリングが一般に次のようであるとする：

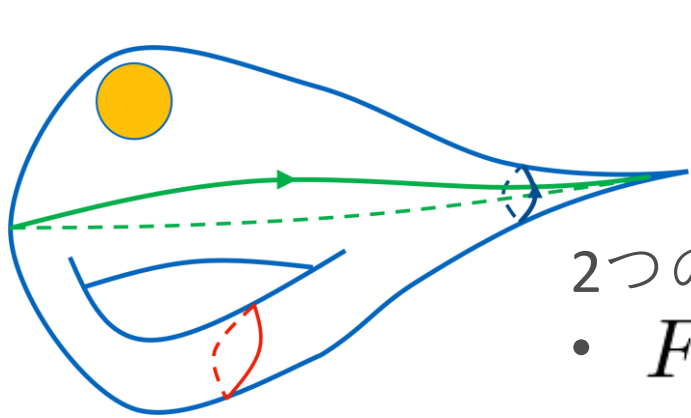
$$m \sim k^{-\alpha} M_{\text{Pl}}, \quad m \sim qeM_{\text{Pl}}$$

$$\Rightarrow e \sim k^{-\alpha}$$

# Weak Coupling Conjecture

[Buratti-Calderon-Mininno-Uranga (2020)]

- 3-form symmetries in IIA (massive IIA)



$$\int_{\tilde{\Sigma}_i} F_4 = k \bar{e}_i, \quad \int_{\Sigma_i} B_2 = \phi_i$$

axion

2つの4-form field strength

- $F_4$

- $F_{4,\tilde{i}} = \int_{\tilde{\Sigma}_i} F_8$

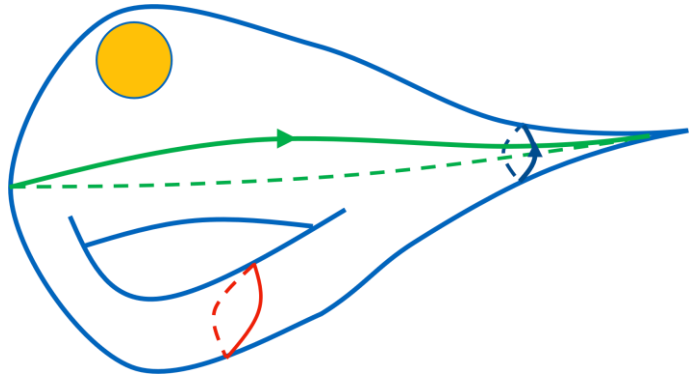
2つの3-form対称性があるが、axionとの結合で一方の対称性が破れる

$$\int (F_0 \wedge B_2 \wedge F_8 + B_2 \wedge F_4 \wedge F_4) \sim m \sum_i \phi_i F_{4,\tilde{i}} + k \left( \sum_i \bar{e}_i \phi_i \right) F_4$$

# Weak Coupling Conjecture

[Buratti-Calderon-Mininno-Uranga (2020)]

- 3-form symmetries in IIA (massive IIA)



$$m \sum_i \phi_i F_{4, \tilde{i}} + k \left( \sum_i \bar{e}_{\tilde{i}} \phi_i \right) F_4$$



線形結合をとる

$$Q_{U(1)} = kQ' - mQ,$$

$$Q_{\perp} = mQ' + kQ \Leftarrow \mathbb{Z}_k$$

=> 場がmassiveに

=> higher-form fieldはmassless

結合定数

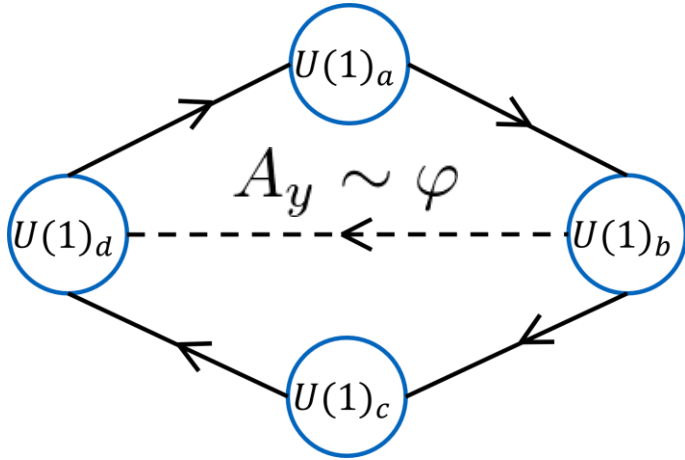
$$\frac{1}{e^2} = k^2 \sum_i (\bar{e}_{\tilde{i}})^2 \frac{1}{g_{6, \tilde{i}}^2} + m^2 \frac{1}{g_2^2}$$

$$e \sim \frac{1}{k^{15/4}}$$

# $U(1)^4$ model from $S^1/\mathbb{Z}_2$ and SWGC

- $U(1)^4$  model from  $S^1/\mathbb{Z}_2$

$$ds^2 = e^{-\sigma} g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + e^{2\sigma} dy^2$$



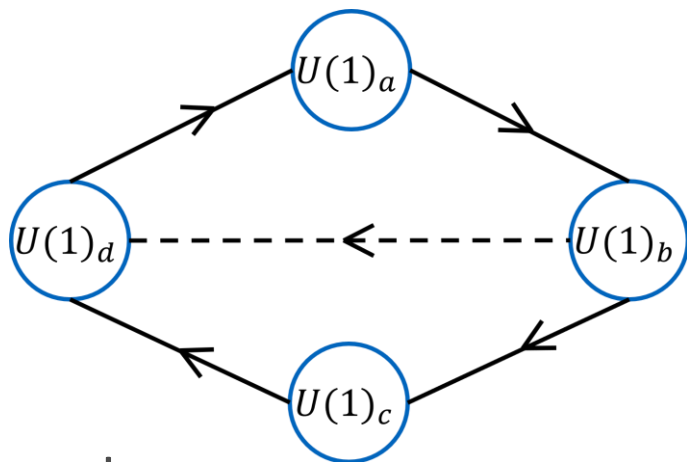
Fields	$U(2)$	$U(1)_a$	$U(1)_c$
$A_M$	adj	0	0
$\Psi_a$	$\mathbf{2}_{1/2}$	-1	0
$\Psi_c$	$\bar{\mathbf{2}}_{-1/2}$	0	+1
$A_M^{(a)}$	0	adj	0
$A_M^{(c)}$	0	0	adj

$$S_{5D} = \int_{M_4 \times S^1/\mathbb{Z}_2} d^4x dy \sqrt{-G_5} \left[ \frac{1}{2\kappa_5^2} R_5 - \frac{1}{2\hat{g}_2^2} \text{tr}(F_{MN})^2 - \frac{1}{4\hat{g}_a^2} (F_{MN}^{(a)})^2 - \frac{1}{4\hat{g}_c^2} (F_{MN}^{(c)})^2 + \bar{\Psi}_a (i\Gamma^M D_M - M_a) \Psi_a + \bar{\Psi}_c (i\Gamma^M D_M - M_c) \Psi_c \right]$$



# $U(1)^4$ model from $S^1/\mathbb{Z}_2$ and SWGC

- $U(1)^4$  model from  $S^1/\mathbb{Z}_2$



Fields	$U(2)$	$U(1)_a$	$U(1)_c$
$A_M$	adj	0	0
$\Psi_a$	$\mathbf{2}_{1/2}$	-1	0
$\Psi_c$	$\overline{\mathbf{2}}_{-1/2}$	0	+1
$A_M^{(a)}$	0	adj	0
$A_M^{(c)}$	0	0	adj

Zero modes

$$A_\mu = \begin{pmatrix} A_\mu^{(b)} \\ A_\mu^{(d)} \end{pmatrix}, \quad A_y = \begin{pmatrix} i\varphi/\sqrt{2} \\ -i\varphi^\dagger/\sqrt{2} \end{pmatrix}, \quad A_\mu^{(a)}, \quad A_\mu^{(c)}$$

$$\Psi_a = \begin{pmatrix} \psi_{a1R} \\ \psi_{a2L} \end{pmatrix}, \quad \Psi_c = \begin{pmatrix} \psi_{c1R} \\ \psi_{c2L} \end{pmatrix}$$

Yukawa coupling と gauge coupling に関係がつく

$$y = \frac{g_2}{\sqrt{2}}$$