

# 量子重力の対称性

Symmetry of Quantum Gravity

大栗 博司

カリフォルニア工科大学 ウォルター・バーク理論物理学研究所

東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構

# C01 究極理論からの加速宇宙の解明

C01 Group aims to develop methods to make **top-down predictions** from superstring theory and to give guidance to experiments and observations.



## C01 究極理論からの加速宇宙の解明

素粒子物理学の究極の目標は、自然界の最も基本的な法則を発見し、この世界の成り立ちを根源から理解することにある。超弦理論は素粒子の標準模型を導出するために必要な要素をすべて備えており、さらに重力を含む量子理論として数学的な整合性を持つので、究極の統一理論の最も有望な候補である。宇宙開闢直後に急激な加速膨張期があったとするインフレーション模型は初期宇宙の理論として最も有望なものであるが、これが超弦理論から導かれるものであるか、またその場合には、インフラトン場のポテンシャルなど模型の様々なパラメータにどのような制限がつくのかを明らかにする。これは、本領域の LiteBIIRD や Simons Array で観測を目指す宇宙背景マイクロ波放射の偏光に予言を与える。また、超弦理論以外の量子重力の可能性にも目を向け、修正重力理論に基づく初期宇宙観測への予言を追究する。さらに、インフレーション期に起きた宇宙の量子ゆらぎの研究からも、素粒子の標準模型を超える統一理論に重要なヒントが与えられると期待される。宇宙の加速膨張の原因とされるダークエネルギーに関する焦眉の課題は、状態方程式のパラメータ  $w$  が  $-1$  かどうかである。もし  $w$  が  $-1$  でなければ、そのようなエネルギーを生み出す機構を理論的に説明することが必要になる。もし  $w = -1$  であれば、ダークエネルギーの正体はアインシュタインの予言した宇宙項に他ならず、超弦理論の課題は、なぜその値が不自然に小さいかを説明することになる。本領域の SuMIRe プロジェクトの目的の一つは、まさにこの  $w$  の値やその時間発展を定めるものであり、超弦理論や修正重力の研究と協奏して、ダークエネルギーの正体に迫る。本研究では、超弦理論からのトップダウンの予言能力を高め、それによって本領域の実験や観測分野に指針を与えることを目指す。

大栗博司	計画研究C01代表	Caltech/Kavli IPMU
山本一博	研究分担者	広島大学
野村泰紀	研究分担者	Kavli IPMU
早田次郎	研究分担者	神戸大学

 検索

### ニュース

- [38th ESA Antenna Workshop LNPC 2017](#)
- [日本天文学会 2017年秋委大会 超広視野主焦点カメラHSCによる大規模観測データが全世界に公開されました](#)
- [計画研究代表者羽澄昌史が科学ミチル「宇宙の始まりを解き明かせ！」に出演しました](#)

素粒子物理学の究極の目標は、自然界の最も基本的な法則を発見し、この世界の成り立ちを根源から理解することにある。超弦理論は素粒子の標準模型を導出するために必要な要素をすべて備えており、さらに重力を含む量子理論として数学的な整合性を持つので、究極の統一理論の最も有望な候補である。

.....

本研究では、超弦理論からの**トップダウンの予言能力**を高め、それによって本領域の実験や観測分野に指針を与えることを目指す。

# トップダウンの予言能力

Ordinary quantum field theory  
cannot make top-down predictions.

**通常の場合の量子論はトップダウンの予言能力を持たない。**

# トップダウンの予言能力

You can write down any low energy effective theory and expect it to have a UV completion as far as it is consistent within the low energy approximation.

**通常の場合の量子論はトップダウンの予言能力を持たない。**

任意の低エネルギー・ラグランジアンは、  
低エネルギーの範囲で期待される整合性を持っていれば、  
何らかの高エネルギー理論の有効理論になっている。  
  
高エネルギー実験や精密測定で検出されるズレも、  
有効理論への補正としてパラメトライズできる。

# トップダウンの予言能力

Can superstring theory make top-down predictions?

**超弦理論はトップダウンの予言能力を持つか？**

# トップダウンの予言能力

Since quantum gravity is tightly constrained and it has unusual UV/IR relations, there may be non-trivial IR predictions from UV completion.

## 超弦理論はトップダウンの予言能力を持つか？

量子重力理論は理論の制限が強く、また、  
低エネルギー現象と高エネルギー現象との関係も  
通常の場合の量子論と異なる。そのため、  
低エネルギーの範囲で期待される条件以外にも、  
有効理論に制限がつくかもしれない。

# Swampland Question

Given an effective theory of gravity, how can one judge whether it is realized as a low energy approximation to a consistent quantum theory with **ultra-violet completion**, such as string theory?

Vafa : hep-th/0509212

Vafa + Ooguri: hep-th/0605264

量子重力理論では、低エネルギーの範囲で  
期待される条件以外にも、有効理論に制限  
をつけることができるか。

Are there non-trivial constraints on low energy effective theory of consistent quantum theory of gravity, beyond those expected in the low energy approximation?

量子重力理論では、低エネルギーの範囲で  
期待される条件以外にも、有効理論に制限  
をつけることができるか。

Are there non-trivial constraints on low energy effective theory of consistent quantum theory of gravity, beyond those expected in the low energy approximation?

**今日の話：**

**このような条件が存在することを示す。**

**Today's Talk: Existence theorem for such constraints**

# 対称性とは

**Global symmetry** acts non-trivially on the Hilbert space.

**Gauge symmetry** acts trivially on the Hilbert space and depends on low energy description (e.g., Seiberg duality).

グローバル対称性は非自明に作用する。

ゲージ対称性は物理的状态に自明に作用し、

低エネルギー理論の記述に依存する

(たとえば、ダイバーグ双対性)。

# 量子重力の対称性

I am going to prove that there is no global symmetry in low energy effective theory of consistent quantum theory of gravity.

低エネルギーの整合性から期待されない条件：

量子重力理論の低エネルギー有効理論は  
グローバル対称性を持たない。

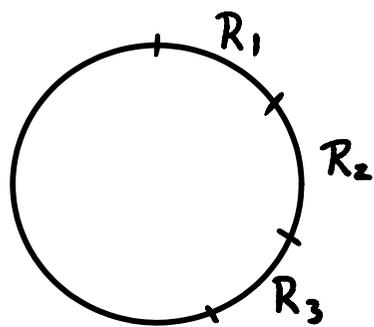
in preparation with D. Harlow

Definition: Global symmetry in QFT

- (1) maps a local operator to a local operator.
- (2) faithfully represented.
- (3) commutes with the energy-momentum tensor.
- (4) obeys generalized Noether theorem  
(applicable to discrete symmetry)

## グローバル対称性の定義

- (1) 局所作用素を局所作用素に写像する
- (2) この写像は対称性を忠実に表現する
- (3) エネルギー・運動量テンソルと可換
- (4) 抽象化されたネーター定理 (離散対称性にも当てはまる)



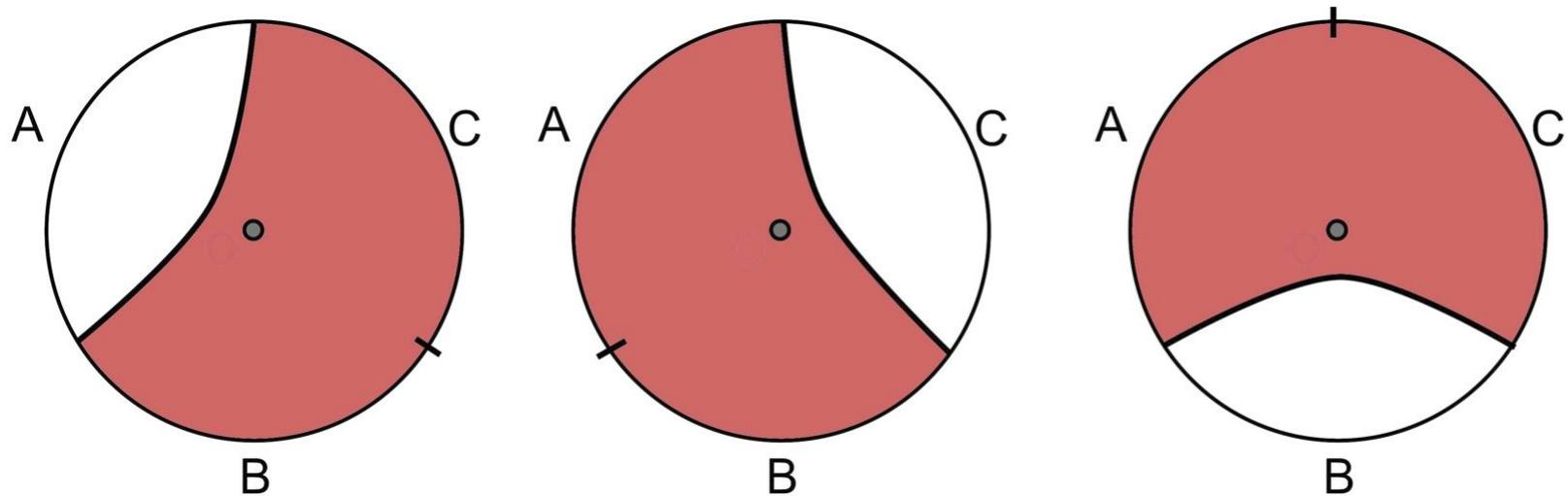
$$U(g, \prod_i R_i) = \prod_i U(g, R_i)$$

$$U^\dagger(g, R) \mathcal{O}(x) U(g, R)$$

$$= \begin{cases} U^\dagger(g) \mathcal{O}(x) U(g), & x \in R \\ \mathcal{O}(x), & x \in \text{interior of } \bar{R} \end{cases}$$

AdS/CFT 対応においては、量子重力の局所的な励起状態は、CFT の特別なタイプの量子もつれを持つ状態に対応する。

In AdS/CFT correspondence, low energy states in the bulk are in a particular type of entanglement.



CFT の異なる部分空間が「量子秘密鍵」を共有しており、その量子もつれは「量子誤り訂正符号」と同じタイプ。

# 重力理論がグローバル対称性を持つとCFTの局所性と矛盾する

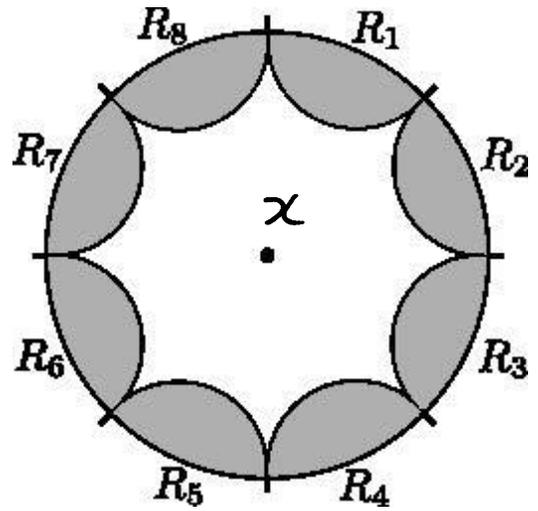
重力理論がグローバル対称性  $G$  を持つとすると、AdS の中に、  
この対称性を忠実に表現する局所作用素がある。

Assume that there were  
global symmetry  $G$  in AdS.

# 重力理論がグローバル対称性を持つとCFTの局所性と矛盾する

重力理論がグローバル対称性  $G$  を持つとすると、AdS の中に、この対称性を忠実に表現する局所作用素がある。

Assume that there were global symmetry  $G$  in AdS.



仮定 (4) により、

$$U(g) = \prod_i U(g, R_i)$$

なので、対称性はその局所作用素と交換してしまう。

Symmetry generator would commute with any local operator.

# Contradiction

## Weak Gravity Conjecture

In any low energy effective theory described by the Einstein gravity + Maxwell field + finite number of matters, if it has an UV completion, there must be a particle with mass  $m$  and charge  $Q$  such that:

# 弱い重力予想

アインシュタイン重力理論 + マックスウェル理論 + 有限種類の物質場からなる低エネルギー理論が、整合性のある量子重力理論に昇華できるためには、質量  $m$  と電荷  $Q$  が以下の不等式を満たす粒子が存在しなくてはならない。

$$m \leq \frac{|Q|}{\sqrt{G}}, \quad G : \text{Newton constant}$$

Arkani-Hamed, Motl, Nicolis, Vafa: hep-th/0601001

$$\exists (m, Q) \text{ s.t. } m \leq \frac{|Q|}{\sqrt{G}}$$

- (1) ブラックホール物理からの期待
- (2) 超弦理論からこれまで導かれた低エネルギー理論では  
すべて成り立っている
- (3) ホログラフィー原理からの説明

- (1) black hole physics
- (2) true in all known string theory construction
- (3) holographic motivations

in preparation with D. Harlow

In all cases,

$$m < \frac{Q}{\sqrt{G}} \quad (\text{no "="}) \quad \text{unless BPS.}$$

この「強い」弱い重力予想が成り立つと、フラックスで  
支えられたAdSは、超対称性を持たなければ不安定。

Vafa + H.O.: 1610.1533

If we assume the sharpened version of the weak gravity  
conjecture, all anti-de Sitter spaces supported by fluxes  
are unstable without supersymmetry.

観測されたダーク・エネルギーの値と素粒子の標準模型を仮定して、

これを3次元時空にコンパクト化すると、

ニュートリノのタイプ（マヨラナかディラックか）

や質量によって、安定した dS や AdS が得られる。

Compactifications of the Standard Model of Particle Physics generate dS or AdS in 3 dimensions depending on types and masses of neutrinos.

Arkani-Hamed Dubovsky, Nicolis, Villadoro: hep-th/0703067

これを「強い」弱い重力予想と組み合わせると、

超対称性を持たない安定した AdS を生成するような

マヨラナ・ニュートリノの質量に制限が加わる。

Combining this with the sharpened WGC puts constraints on neutrinos.

Vafa + H.O.: 1610.1533

最近のより精密な分析では、現在の宇宙のダーク・エネルギーの値に

$(\text{ニュートリノ質量})^4$  という下限がつくことが示された。

$(\text{dark energy}) > (\text{neutrino mass})^4$

Ibanez, Martin-Lozano, Valenzuela: 1706.05392

量子重力理論は理論の制限が強く、  
低エネルギー現象と高エネルギー現象との関係も  
通常の場合の量子論と異なるので、  
低エネルギーの範囲で期待される条件以外にも、  
有効理論に制限がつく。実験や観測に関係のある  
制限も得られるかもしれない。

The UV/IR connection may imply surprising IR predictions on observable phenomena from UV completion of quantum gravity.