

Success and Limitations of **Effective Field Theories**

山崎雅人
(東大IPMU)

統計物理学談話会, 2022年2月4日

統計物理学懇談会：とても多彩な話題

講演タイトル等からのキーワードの例
(すみません，チョイスはかなり適当です)

ウイルス，DNA，遺伝子，金融市場，言語，統計学，
深層学習，ブラックホール，量子計算機，超新星爆発，
地震，量子多体系…

統計物理学懇談会：とても多彩な話題

講演タイトル等からのキーワードの例
(すみません，チョイスはかなり適当です)

ウイルス，DNA，遺伝子，金融市場，言語，統計学，
深層学習，ブラックホール，量子計算機，超新星爆発，
地震，量子多体系…

統計物理学は
“theory of (almost) everything”???

物理学（自然科学）の二面性

多様性
(diversity)



普遍性
(universality)

物理学（自然科学）の二面性

多様性
(diversity)



普遍性
(universality)

しかし、そもそも多様性の中に
普遍性がなぜ存在するのか？

繰り込み群と

低エネルギー有効理論



繰り込み群・低エネルギー有効理論の思想： 『普遍性』の概念の一つの現れ・定式化

理論空間

場の理論 A



繰り込み群・低エネルギー有効理論の思想： 『普遍性』の概念の一つの現れ・定式化

エネルギースケール

“ミクロ”

高エネルギー

(UV)

場の理論 A

“マクロ”

低エネルギー

(IR)

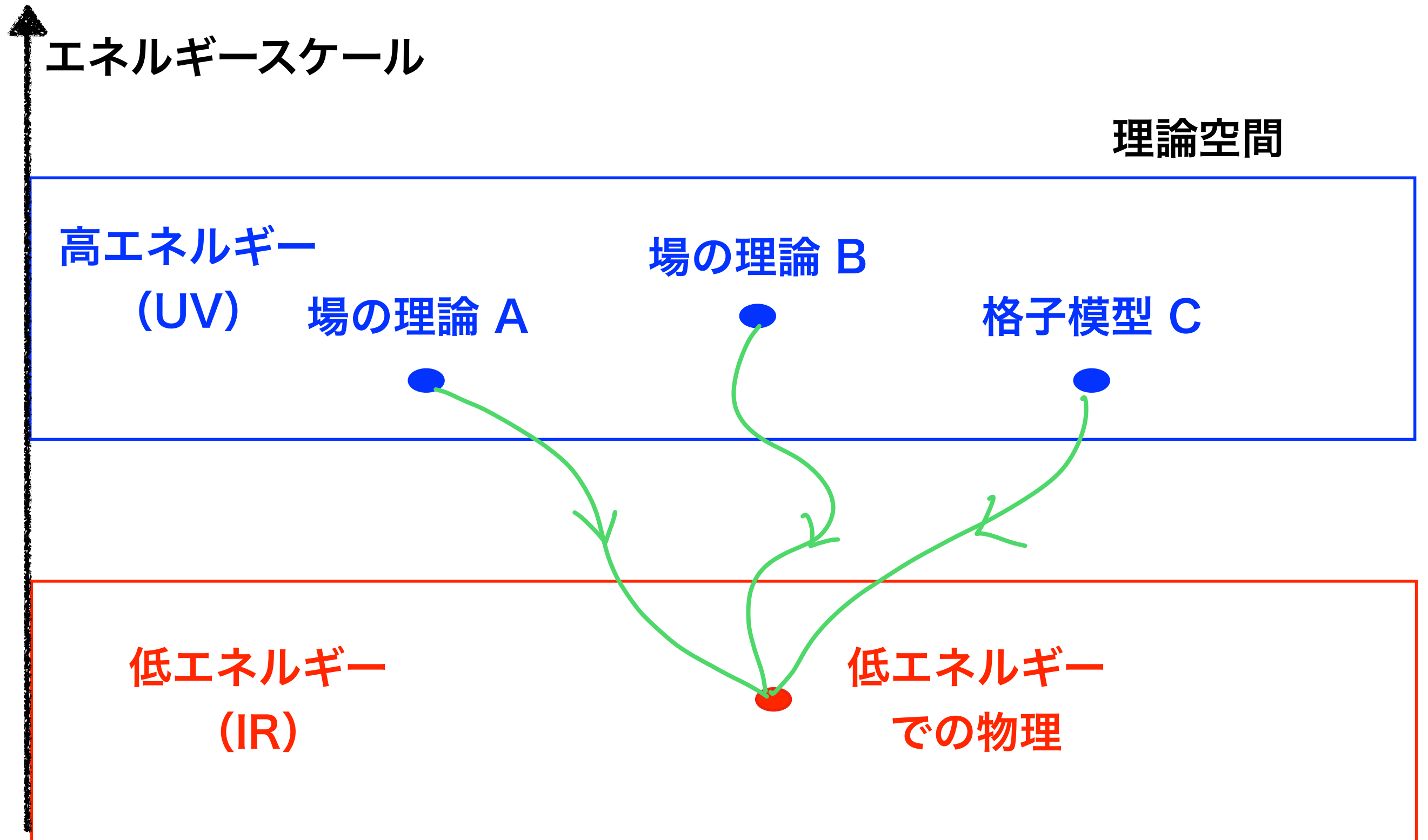
繰り込み群の流れ
「ズームアウト」

低エネルギー
での物理

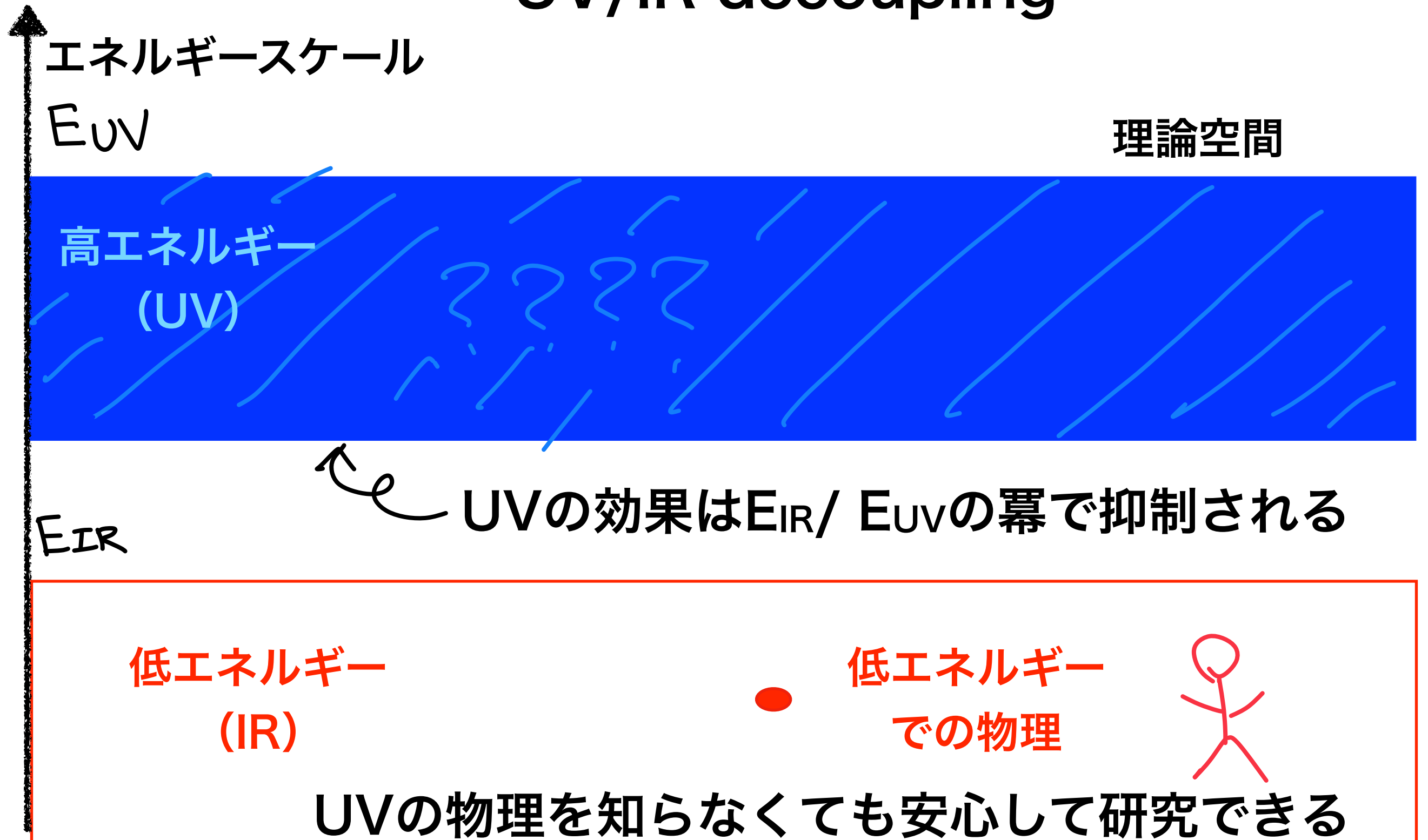
長さのスケールとエネルギースケール
 λ E

$$\lambda = \frac{h}{mc} = \frac{hc}{E} \quad (E = mc^2)$$

繰り込み群・低エネルギー有効理論の思想： 『普遍性』の概念の一つの現れ・定式化



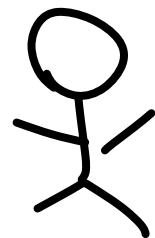
IRの物理はUVの物理の詳細によらず 少数のパラメーターで記述される “UV/IR decoupling”



UV/IRのdecouplingがあるので、
物理学を順々に調べていくことが可能になる

↑
エネルギースケール

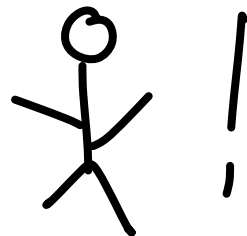
$\sim E_1$



UV/IRのdecouplingがあるので、
物理学を順々に調べていくことが可能になる

↑
エネルギースケール

$\sim E_2$

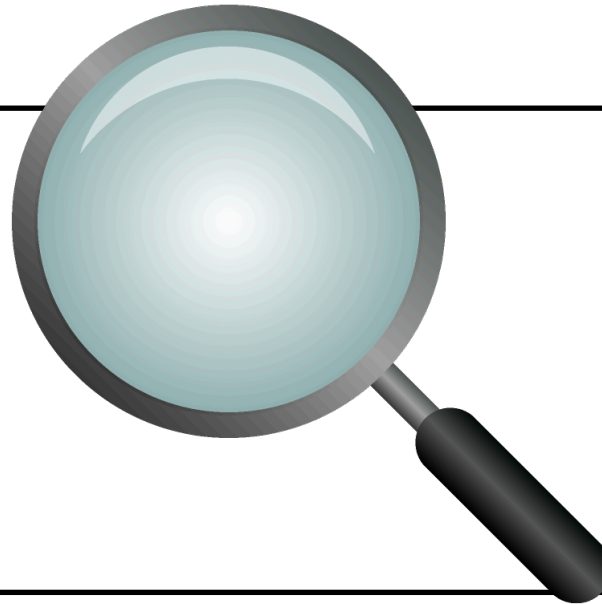
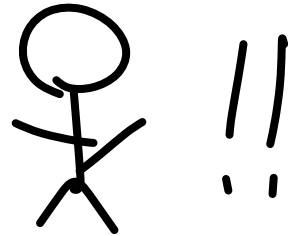


$\sim E_1$

UV/IRのdecouplingがあるので、
物理学を順々に調べていくことが可能になる

エネルギースケール

$\sim E_3$



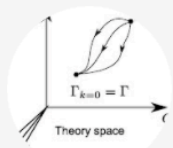
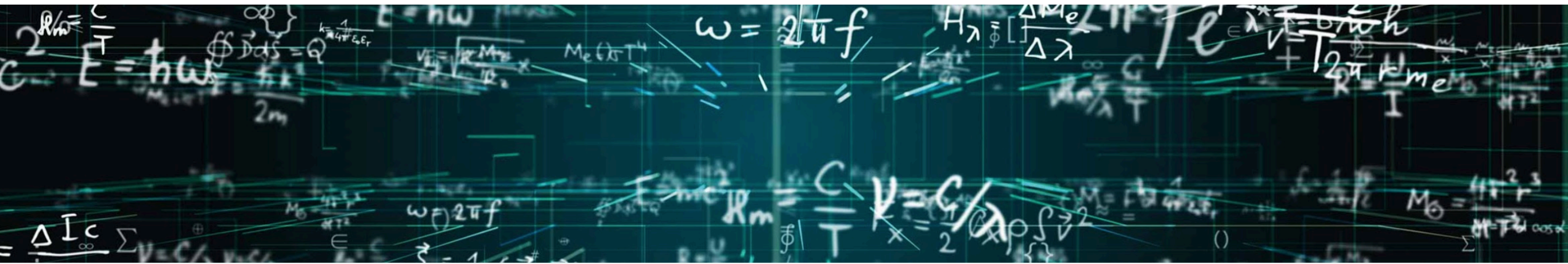
$\sim E_2$

物理学の階層構造

$\sim E_1$

「難しいことは先送り」して良い：
我々の知るところの
物理学が成立する根拠とさえ言える

有効場の理論の考え方は未知のUVの物理を 整理する指導原理として大成功



All Things EFT

チャンネル登録者数 1160人

登録済み

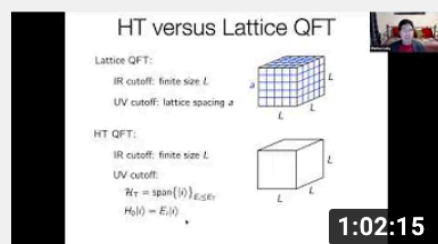


Steven Weinberg | On the Development of Effective Field Theory

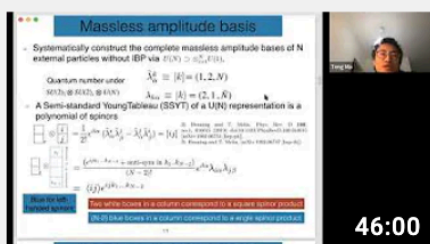
7,774 回視聴 • 1 年前

[All Things EFT 1 | Sep 30, 2020] Inaugural lecture of the series by Nobel laureate Steven Weinberg:
An overview of the emergence and development of the idea of effective field theory.

Winter Term 2022 ▶ すべて再生



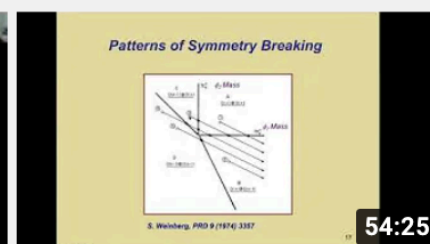
Markus Luty | The Effective Theory of Hamiltonian...



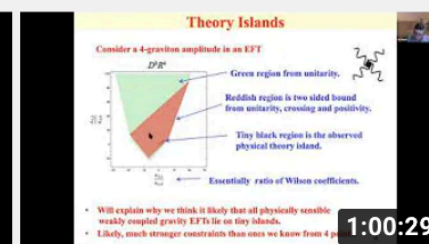
Teng Ma | Constructing on-shell operator basis for all...



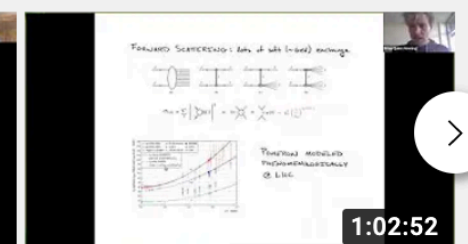
Matthew Schwartz | What is the S-matrix?



Michael Ramsey-Musolf | Was there an Electroweak...



Zvi Bern | Gravitational EFT Islands and the 4-Graviton...



Brian Henning | Towards a nonperturbative evaluation ...

物理学の階層構造はどこまで続くのか？



階層構造に「終わり」はあるのか？



CERN (Large Hadron Collider)
Energy Frontier

物理学の階層構造の終焉

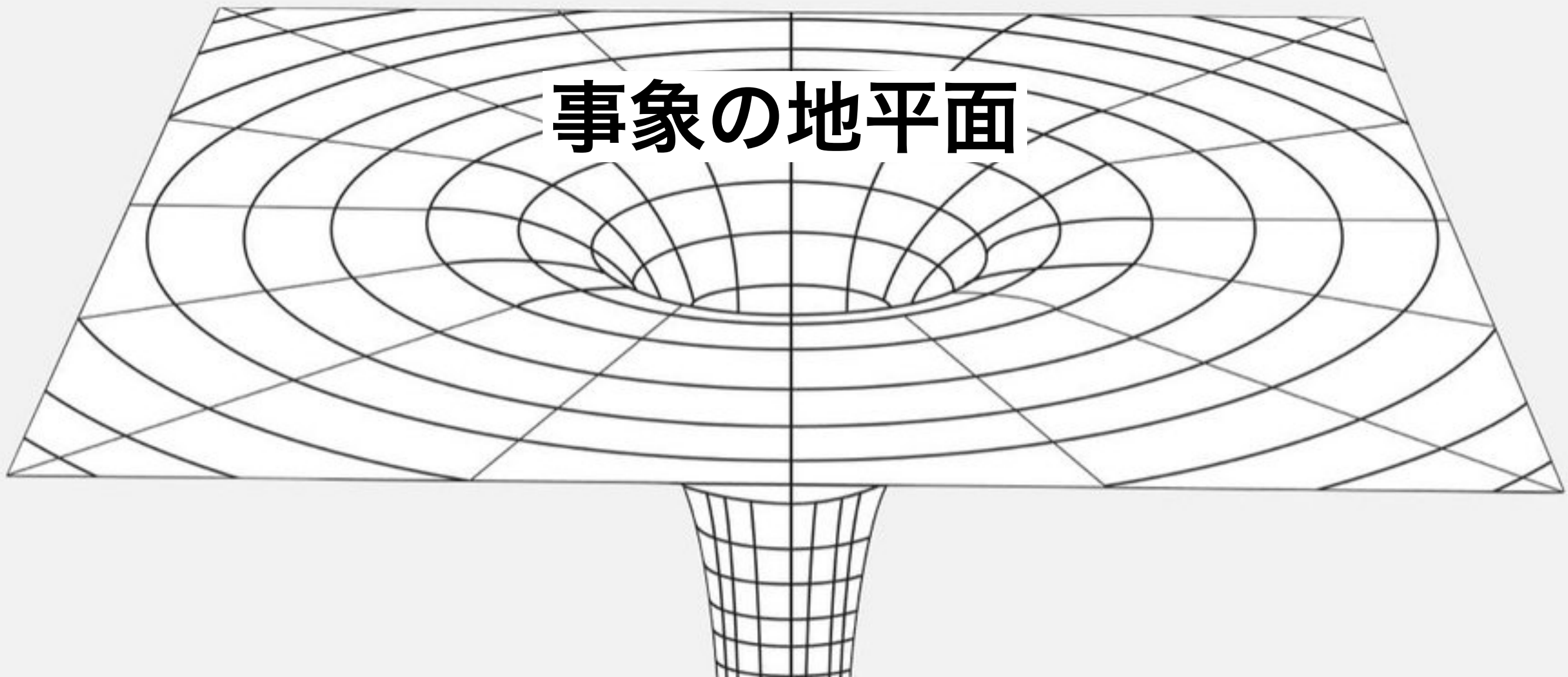
ブラックホール



シュワルツシルト半径

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

事象の地平面



質量が増えて

$$R_s \sim \frac{2GM}{c^2} \sim \lambda \sim \frac{h}{Mc}$$

となると、コンプトン波長よりもシュワルツシルト半径が大きくなり、それ以上細かい構造はブラックホールの地平面の向こうに隠されてしまう

プランク質量

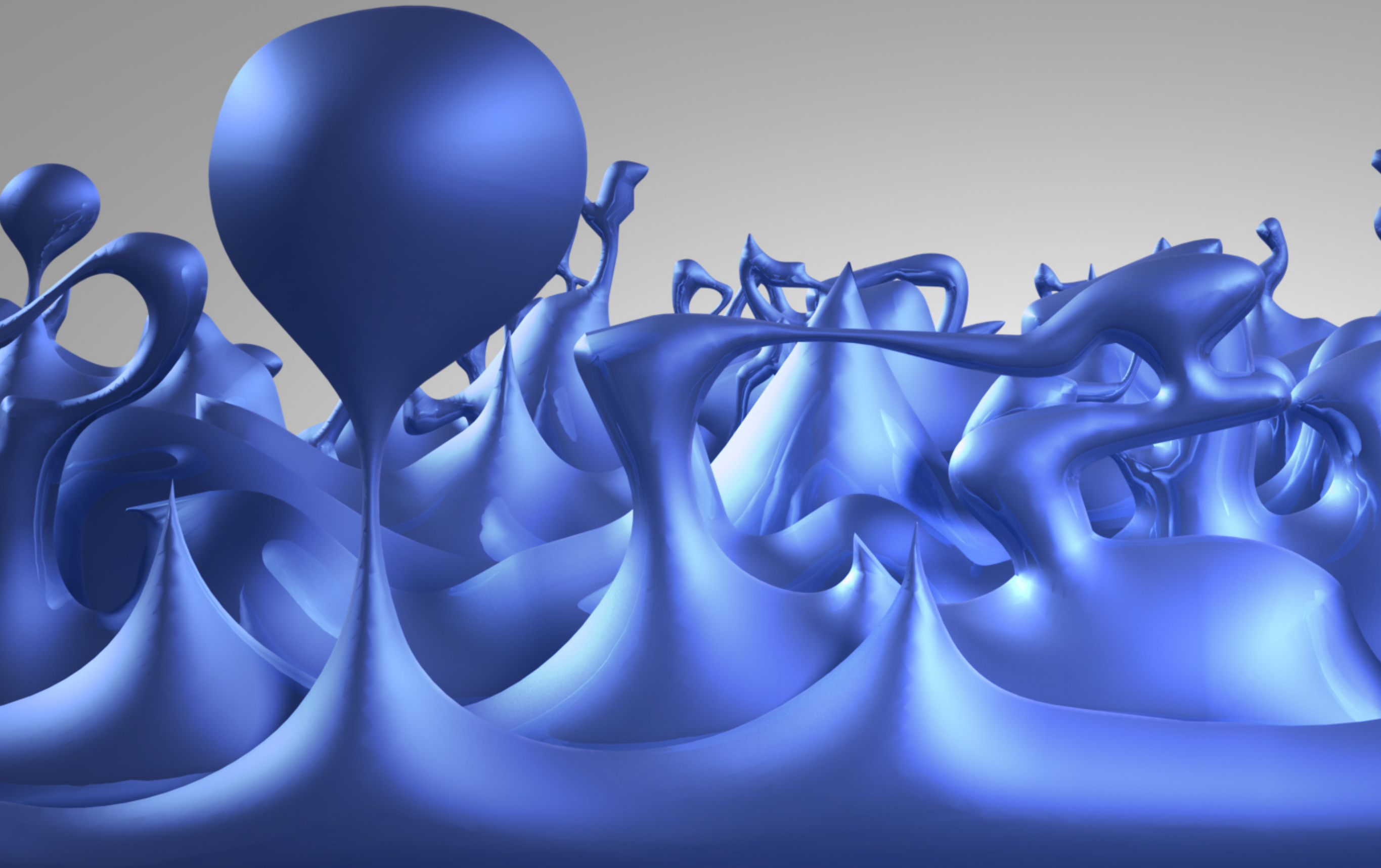
$$M \sim m_{\text{P}} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \sim 10^{28} \text{ eV}$$

プランク長さ

$$l_{\text{P}} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \sim 10^{-35} m$$

量子力学と重力の両方が重要、
つまり量子重力の世界

時空そのものが揺らぐ？



物理学の階層構造の”終着点”



量子重力は、「宇宙の玉ねぎ」の芯

**有効場の理論の枠組みは
プランクスケールで破綻するであろう**

これは物理学の根幹に関わる大問題 !!

物理学の階層構造がプランクスケールで
終わりを告げるのならば、
量子重力はもっと低いエネルギースケールでも無視できない？

もはや、プランクスケールの物理を知らないと、おちおち研究していただけない??

量子重力における “UV/IR mixing”

プランクスケール：原理的なエネルギーの「上限」

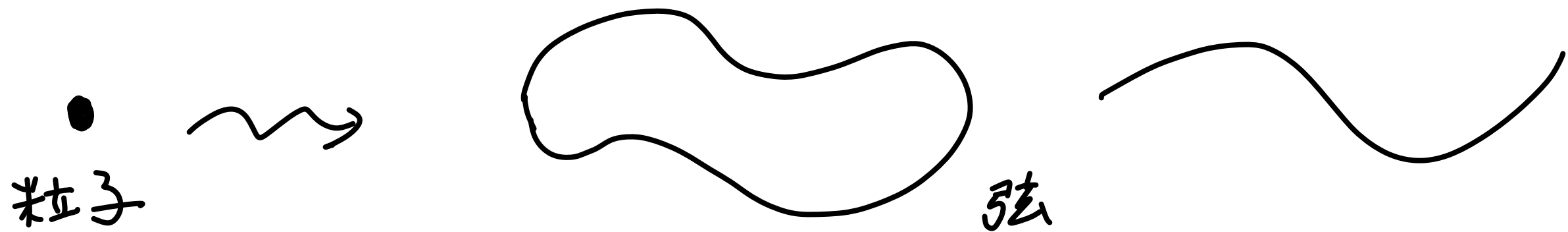
量子重力理論

量子重力と低エネルギー有効理論の
橋渡しが必要

低エネルギー
(IR)

「低エネルギー」での物理学に
量子重力から制限が加わる？

量子重力は難しいが、
超弦理論から分かっていることもある。



「粒子ではなく弦」
ある種の非局所性

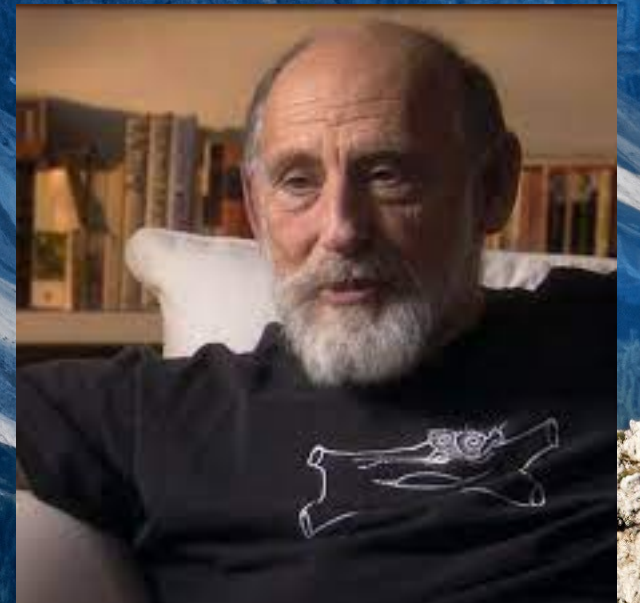
UV/IR mixing

スワンプランド、沼地 (swampland)



C.Vafa

ランドスケープ (landscape)



L. Susskind

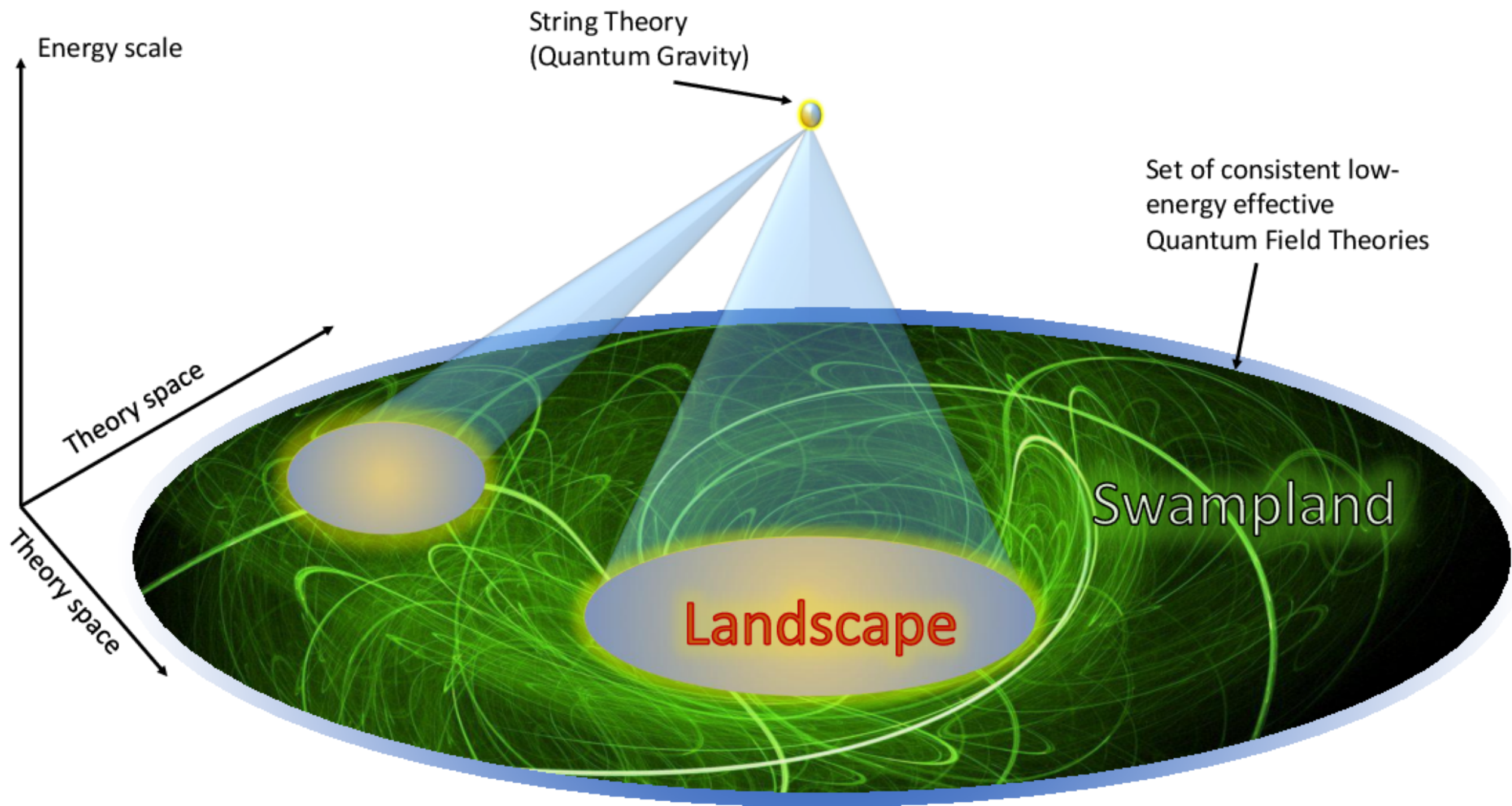
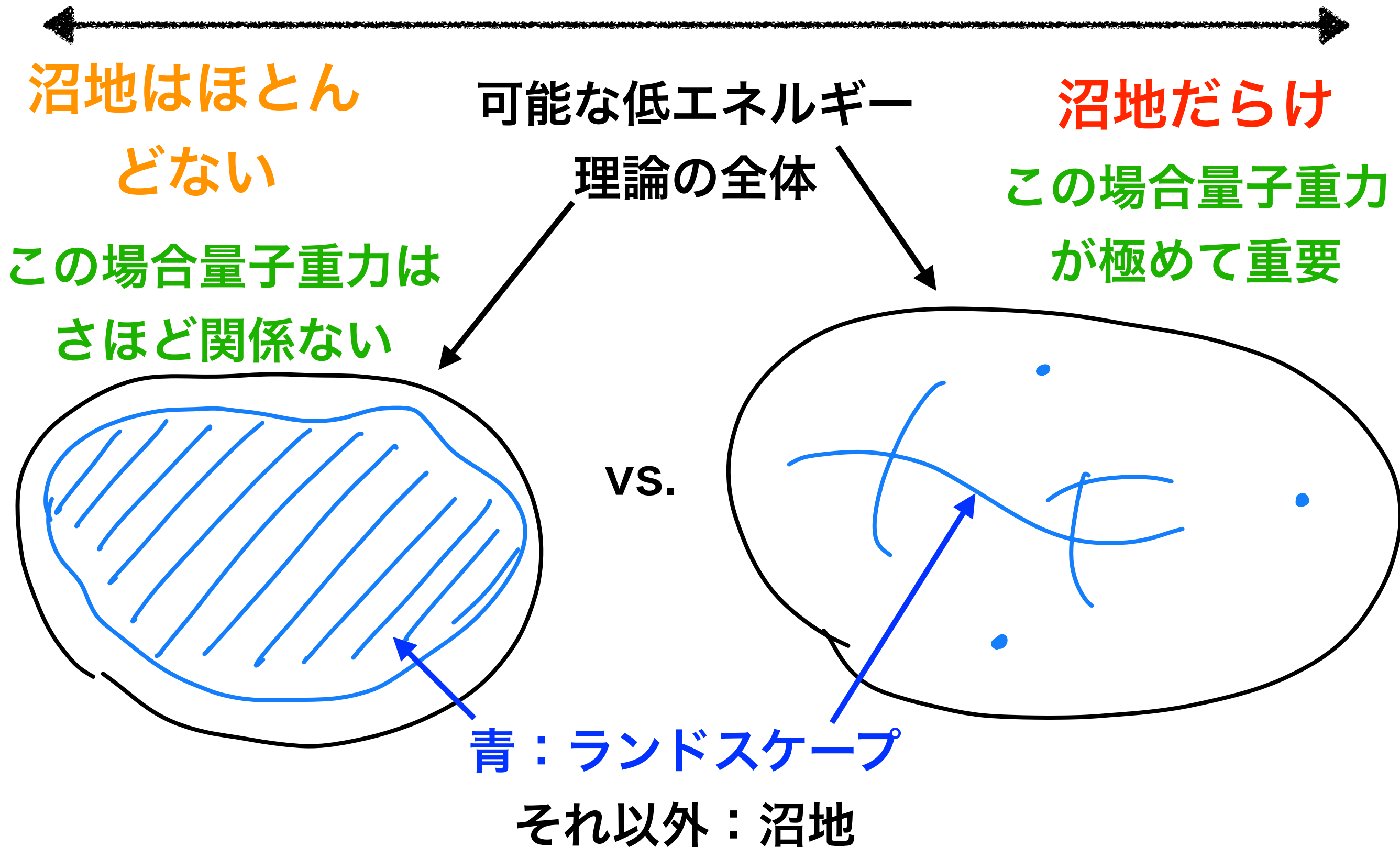


Figure by E. Palti

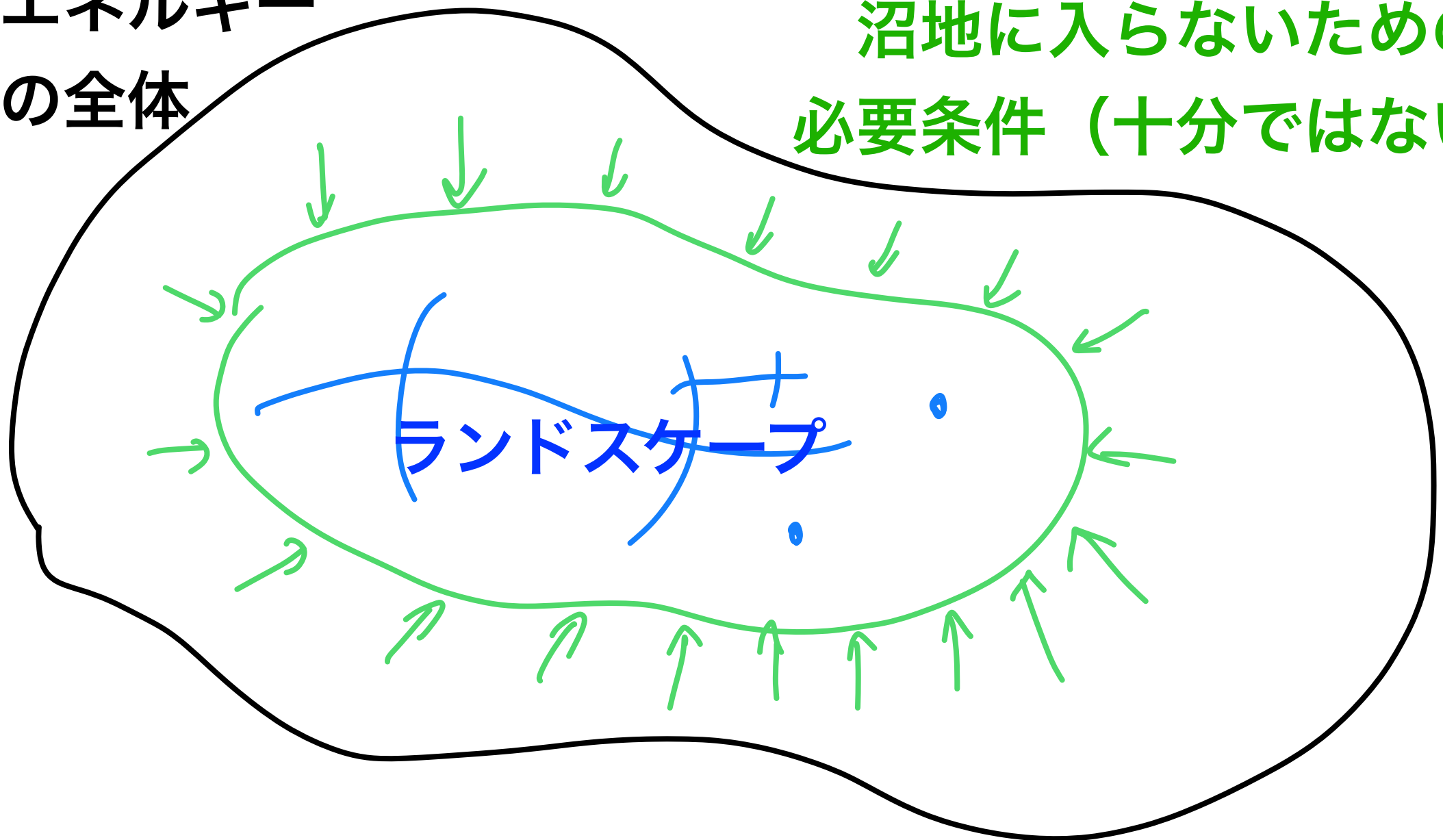
量子重力からの制限はどれだけ強い？



沼地予想：低エネルギー有効理論がプランクスケールでの量子重力の理論に由来するため
に、満たされていなければならない必要条件

可能な低エネルギー
理論の全体

沼地に入らないための
必要条件（十分ではない）



”外から網をかけて獲物を狙う”

沼地予想の例：

「量子重力に（大域）対称性はない」

量子重力には対称性はない — 大栗機構長らが証明

2019年6月19日

東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU）

1. 発表概要

東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU）の大栗博司（おおぐりひろし）機構長は、マサチューセッツ工科大学物理学教室の Daniel Harlow 助教と共同で、重力と量子力学を統一する理論では、素粒子論の重要な原理であった対称性がすべて破れてしまうことを、ホログラフィー原理を用いて証明しました。この証明にあたっては、量子コンピューターで失われた情報を回復する鍵とされる「量子誤り訂正符号」とホログラフィー原理との間に近年発見された関係性を用いるという新たな手法が用いられました。本研究成果は、素粒子の究極の統一理論の構築に大きく貢献するものであるとともに、近年注目される量子コンピューターの発展にも寄与すると期待され、アメリカ物理学会の発行するフィジカル・レビュー・レター誌（Physical Review Letters）に2019年5月17日付で掲載され、成果の重要性から注目論文（Editors' Suggestion）に選ばれました。

2. 発表内容

宇宙が始まった当初、「電磁気力」「強い力」「弱い力」「重力」の4つ

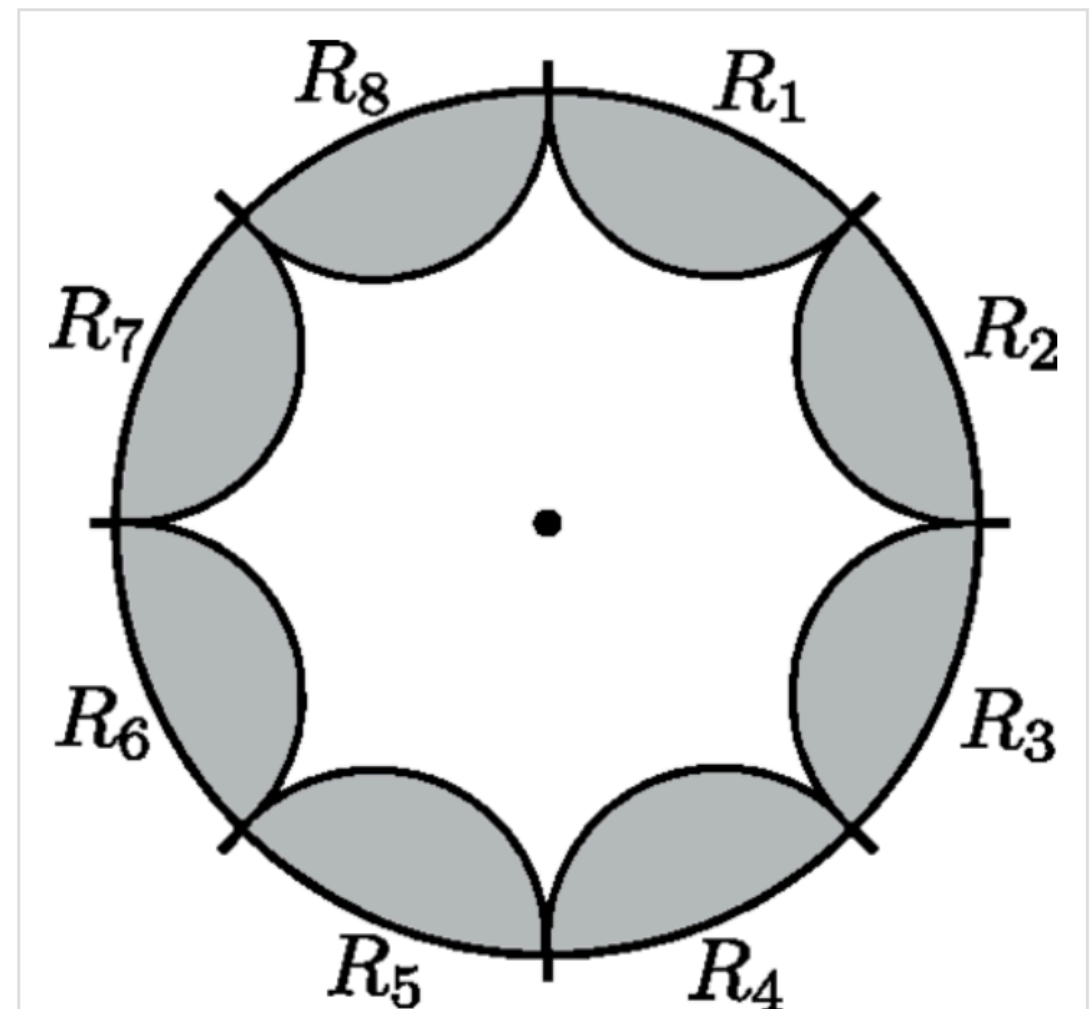


図1. 「量子重力理論は対称性を持たない」ことを背理法で証明する図。もし対称性があるとする、それは図の灰色で塗られた

対称性とは本質ではない？

NHKスペシャル

放送予定 再放送 これまでの放送 楽しむNスペ お問い合わせ

NHKスペシャル内を検索

すべてのジャンル

放送内容

- すべて
- 社会
- 国際
- 政治
- 経済
- 歴史・紀行
- 災害
- 自然・環境
- 文化・芸術・エンターテインメント
- 医療・健康
- 宇宙・科学・テクノロジー
- 討論
- 子ども
- 人物

文化・芸術・エンターテインメント

神の数式

第1回 この世は何からできているのか
～天才たちの100年の苦闘～

シェアする ?  

初回放送
2013年9月21日(土)
午後9時00分～9時58分

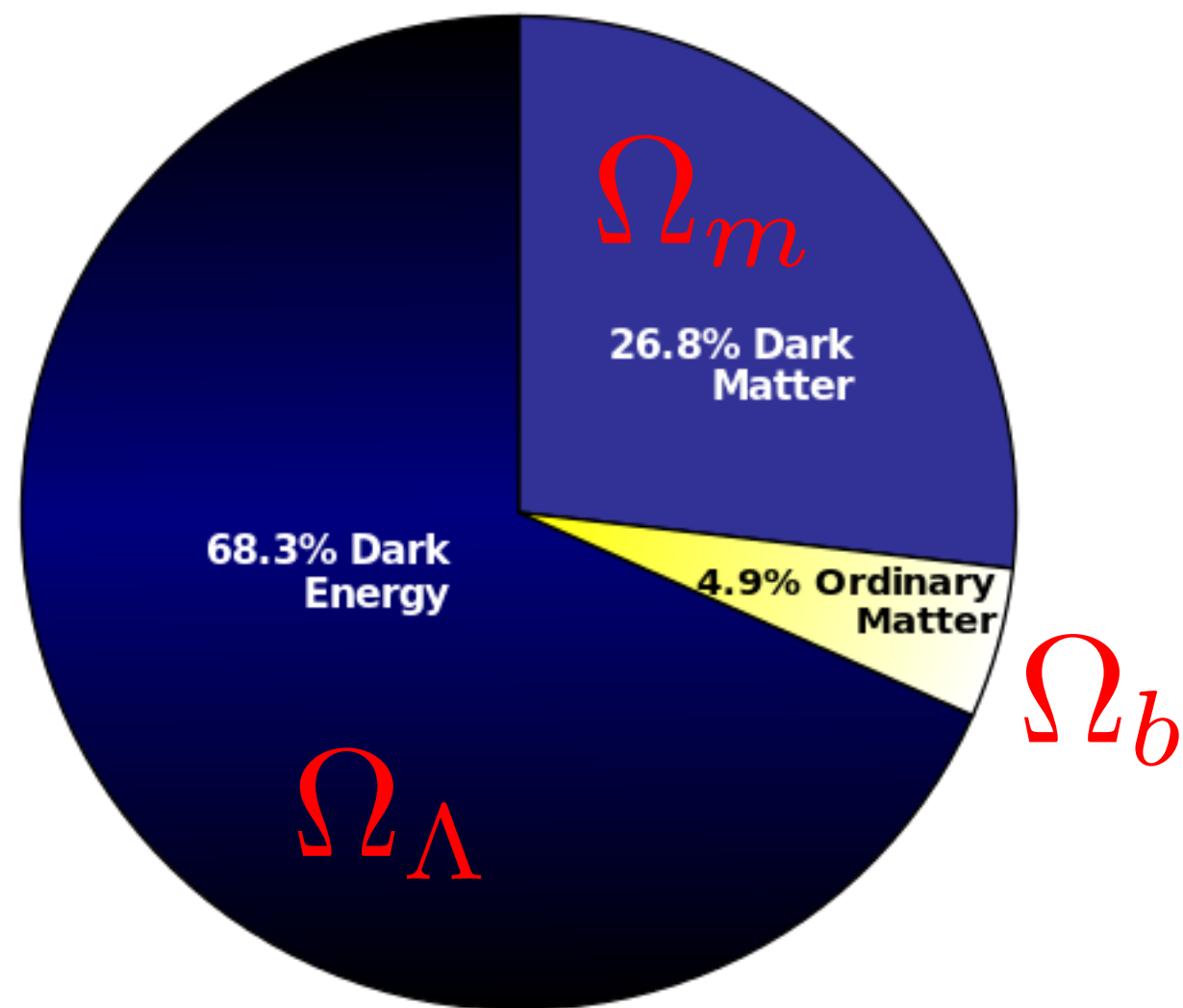
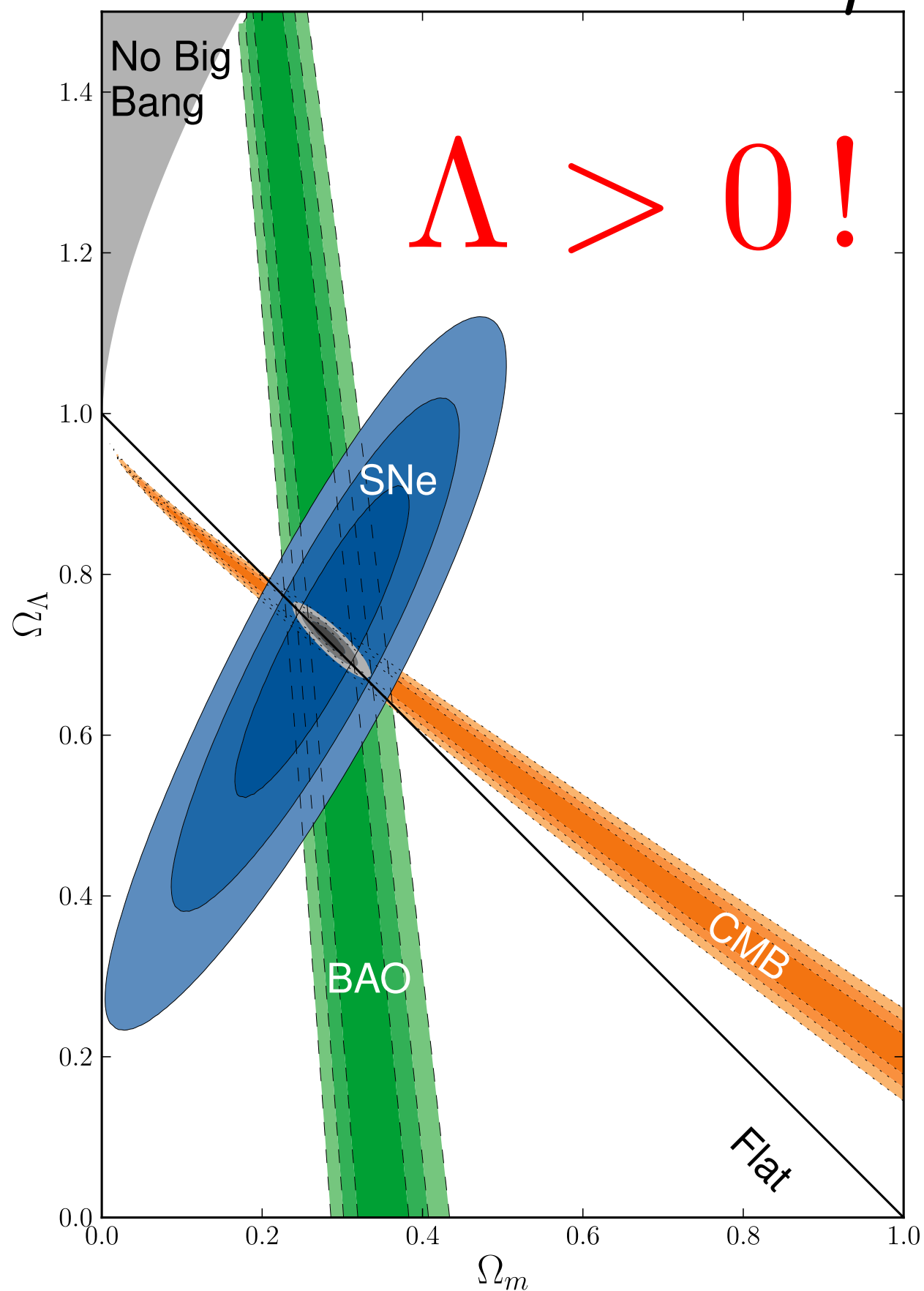
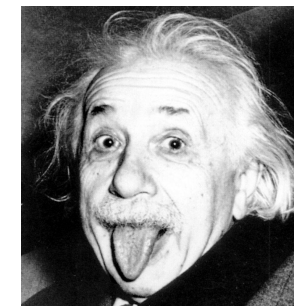
関連ジャンル
文化・芸術・エンターテインメント



2千年以上に及ぶ人類の思索の歴史。それは、全宇宙の謎を解く唯

対称性の破れ vs. 創発する対称性

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$



宇宙項問題：21世紀に残された 大難問の一つ

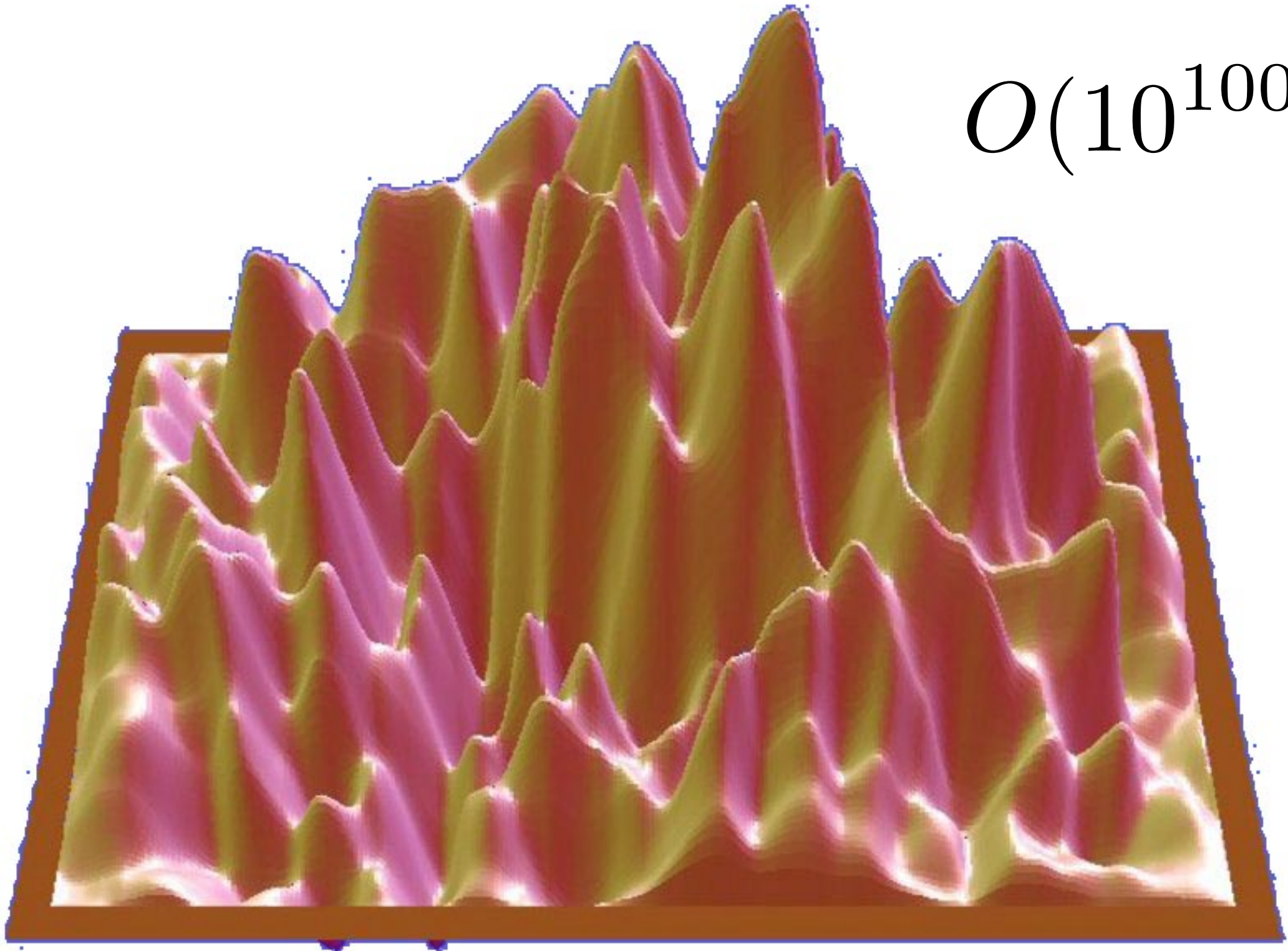
$$\Lambda^4 \sim O(10^{-120}) M_P^4 \ll M_P^4$$

一つの考え方： ランドスケープと人間原理



超弦理論のランドスケープ

$O(10^{100})?$





マルチバース (多重宇宙)

Subscribe

SCIENTIFIC
AMERICAN®

Cart 0

Sign In | Stay Informed

SHARE

SPACE

String Theory May Create Far Fewer Universes Than Thought

Some physicists claim the popular landscape of universes in string theory may not exist

By Clara Moskowitz on July 30, 2018 [عرض هذا باللغة العربية](#)



LATEST NEWS



Sing Solo For Higher Fide



Are Some Fruits More

“... this bound forbids de Sitter vacua”

High Energy Physics – Theory

De Sitter Space and the Swampland

Georges Obied, Hirosi Ooguri, Lev Spodyneiko, Cumrun Vafa

(Submitted on 21 Jun 2018 (v1), last revised 17 Jul 2018 (this version, v3))

It has been notoriously difficult to construct a meta-stable de Sitter (dS) vacuum in string theory in a controlled approximation. This suggests the possibility that meta-stable dS belongs to the swampland. In this paper, we propose a swampland criterion in the form of $|\nabla V| \geq c \cdot V$ for a scalar potential V of any consistent theory of quantum gravity, for a positive constant c . In particular, this bound forbids dS vacua. The existence of this bound is motivated by the abundance of string theory constructions and no-go theorems which exhibit this behavior. We also extend some of the well-known no-go theorems for the existence of dS vacua in string theory to more general accelerating universes and reinterpret the results in terms of restrictions on allowed scalar potentials.

Comments: 22 pages, 1 table; added references

Subjects: **High Energy Physics – Theory (hep-th)**

Cite as: **arXiv:1806.08362 [hep-th]**

(or **arXiv:1806.08362v3 [hep-th]** for this version)

Submission history

From: Georges Obied [[view email](#)]

[\[v1\]](#) Thu, 21 Jun 2018 18:00:01 UTC (21 KB)

[\[v2\]](#) Wed, 11 Jul 2018 03:22:04 UTC (22 KB)

[\[v3\]](#) Tue, 17 Jul 2018 08:44:22 UTC (22 KB)

[Which authors of this paper are endorsers?](#) | [Disable MathJax](#) ([What is MathJax?](#))

原論文での主張は強すぎる

arXiv.org > hep-th > arXiv:1809.00478

Search...

Help | A

High Energy Physics – Theory

Do We Live in the Swampland?

[Hitoshi Murayama](#), [Masahito Yamazaki](#), [Tsutomu T. Yanagida](#)

(Submitted on 3 Sep 2018 (v1), last revised 10 Oct 2018 (this version, v2))

A low-energy effective theory is said to be in the swampland if it does not have any consistent UV completion inside a theory of quantum gravity. The natural question is if the standard model of particle physics, possibly with some minimal extensions, are in the swampland or not. We discuss this question in view of the recent swampland conjectures. We prove a no-go theorem concerning the modification of the Higgs sector. Moreover, we find that QCD axion is incompatible with the recent swampland conjectures, unless some sophisticated possibilities are considered. We discuss the implications of this result for spontaneous breaking of CP symmetry. We comment on dynamical supersymmetry breaking as well as the issue of multi-valuedness of the potential.

Comments: 31 pages, 1 figure

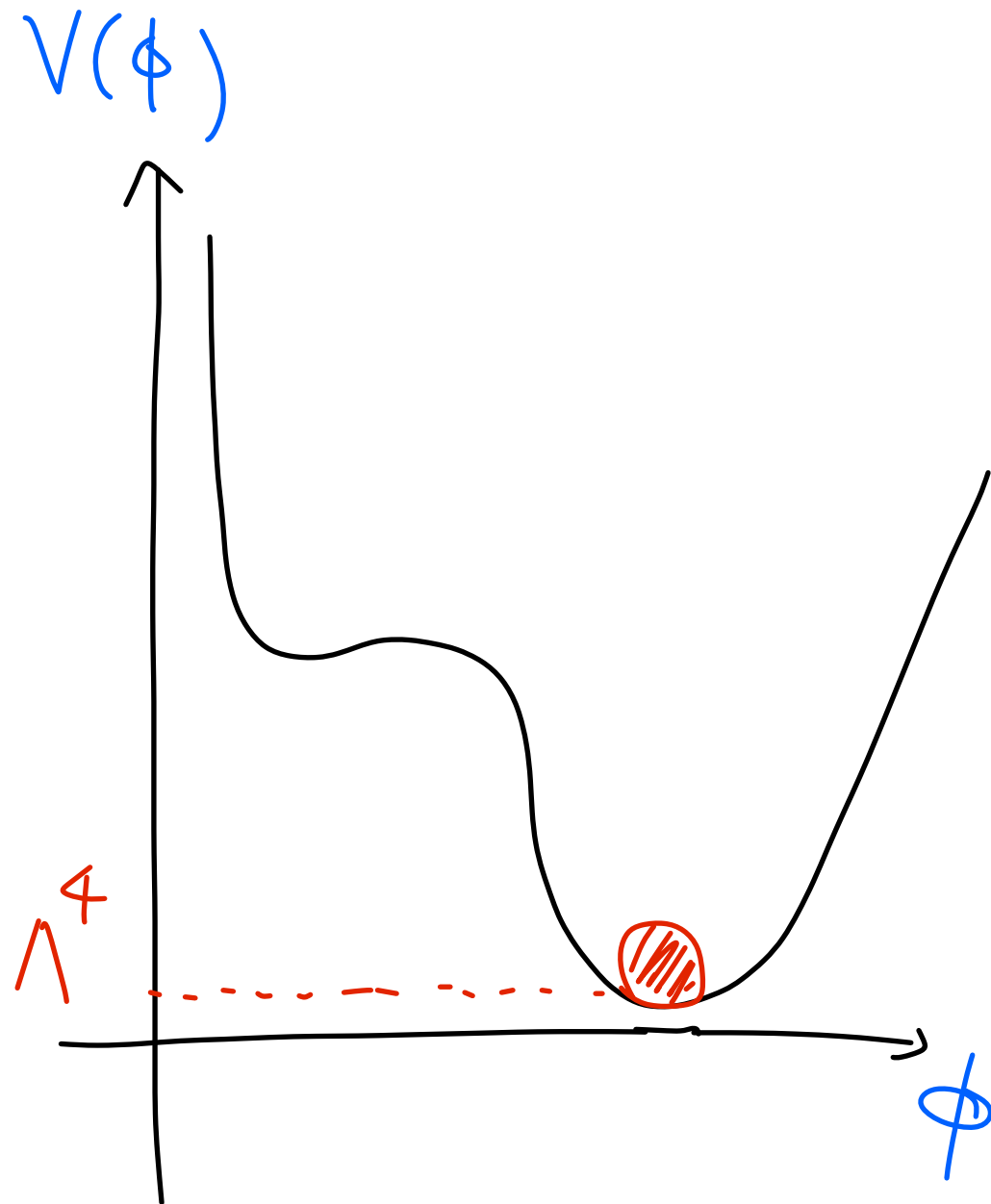
Subjects: **High Energy Physics – Theory (hep-th)**; High Energy Physics – Phenomenology (hep-ph)

DOI: [10.1007/JHEP12\(2018\)032](https://doi.org/10.1007/JHEP12(2018)032)

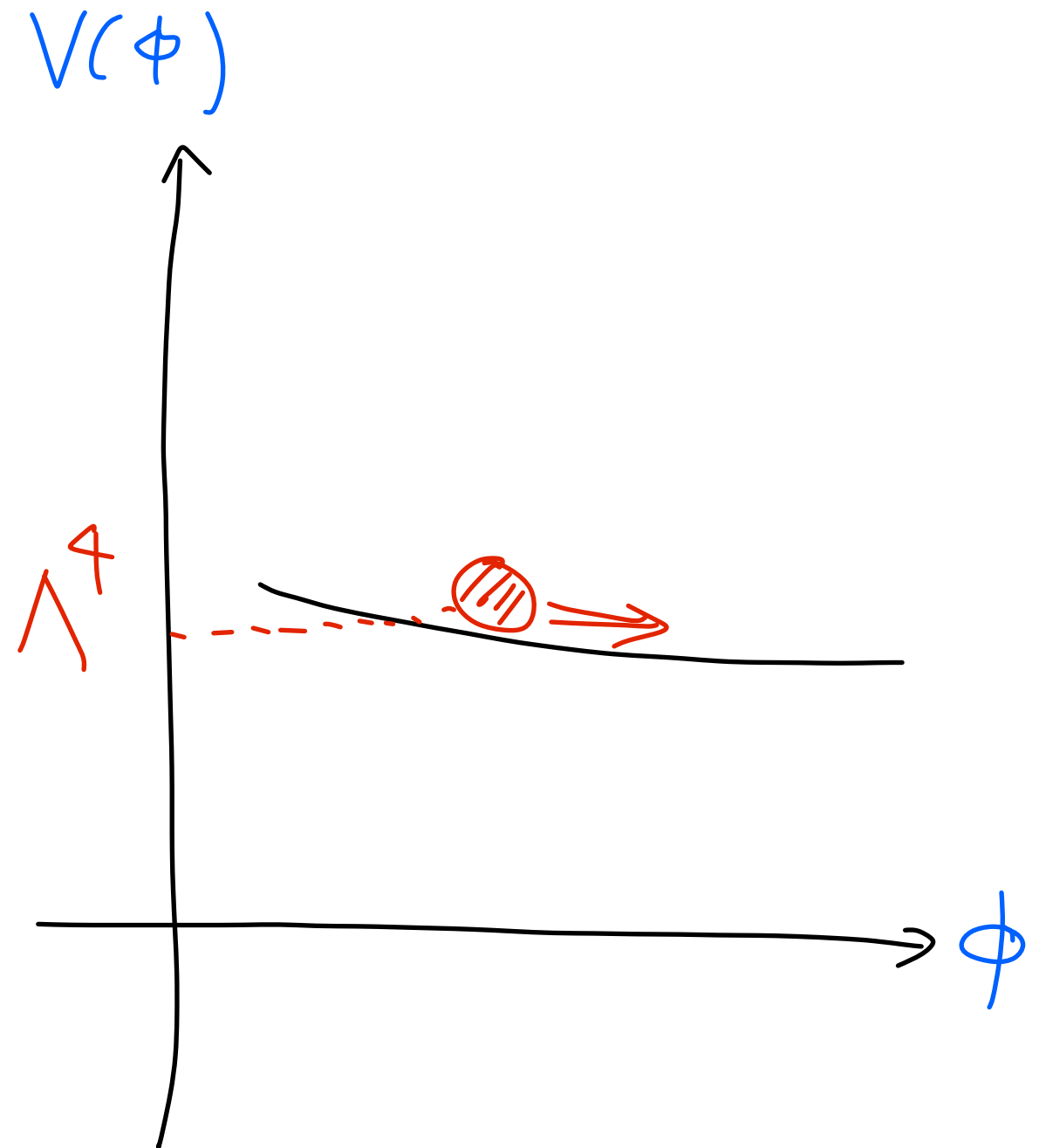
Report number: IPMU-18-0143

予想を修正...

宇宙「定数」



時間変化する 宇宙定数

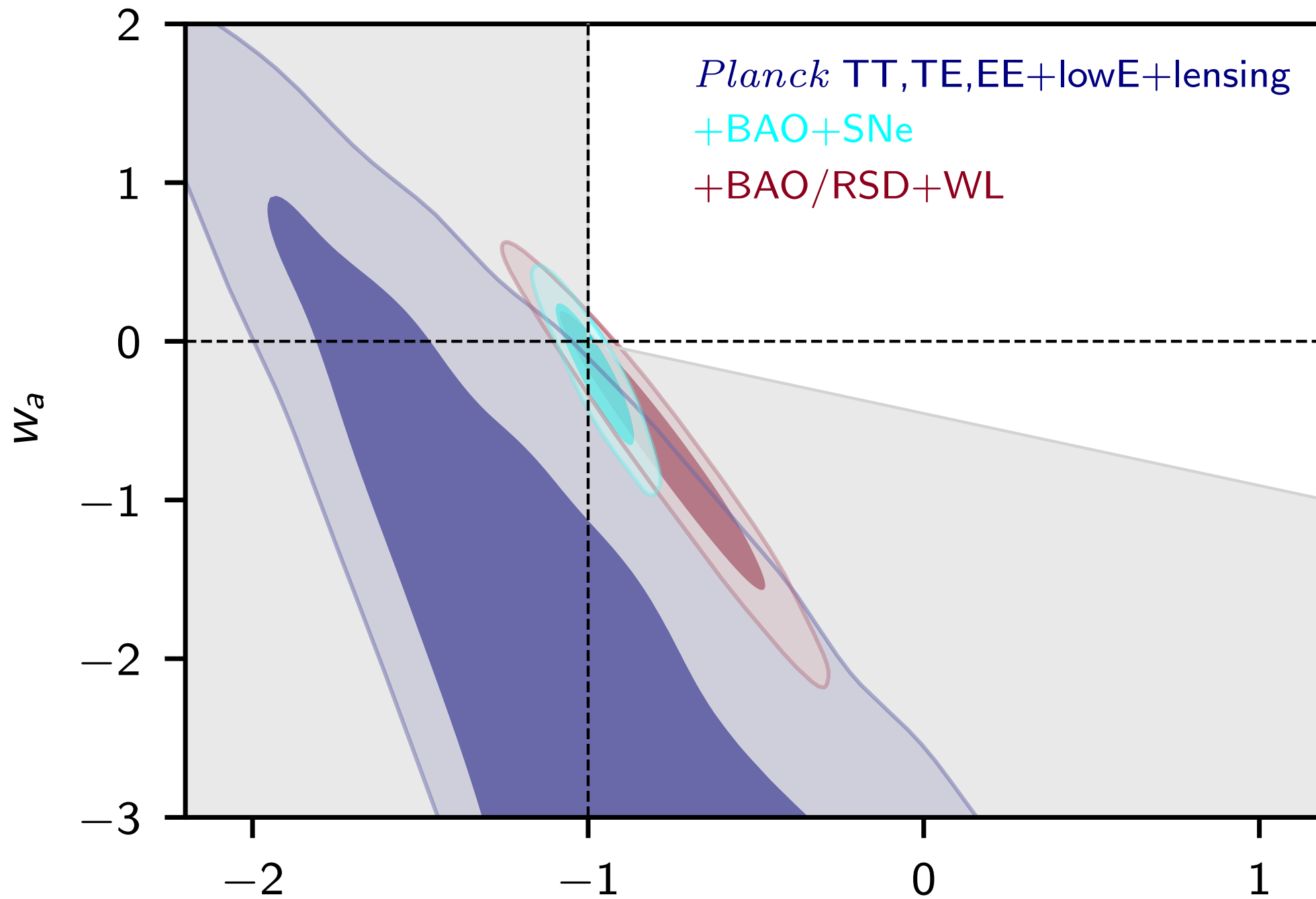
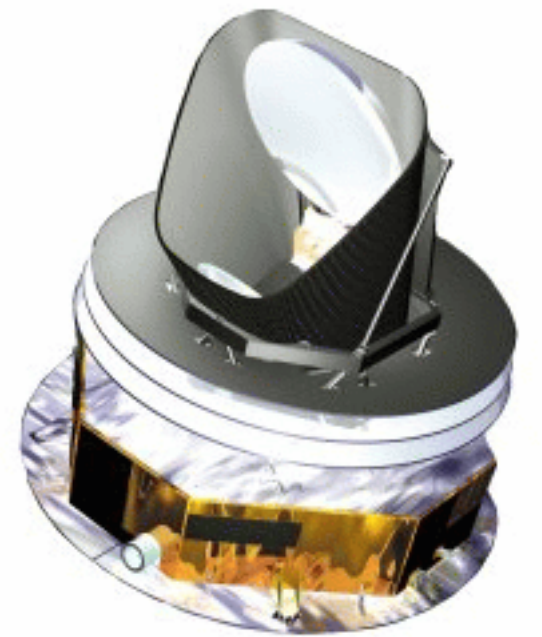


超弦理論において宇宙定数が正の宇宙
(**インフレーション、ダークエネルギー**)
は実現できるか？

現在も専門家の間で活発な議論

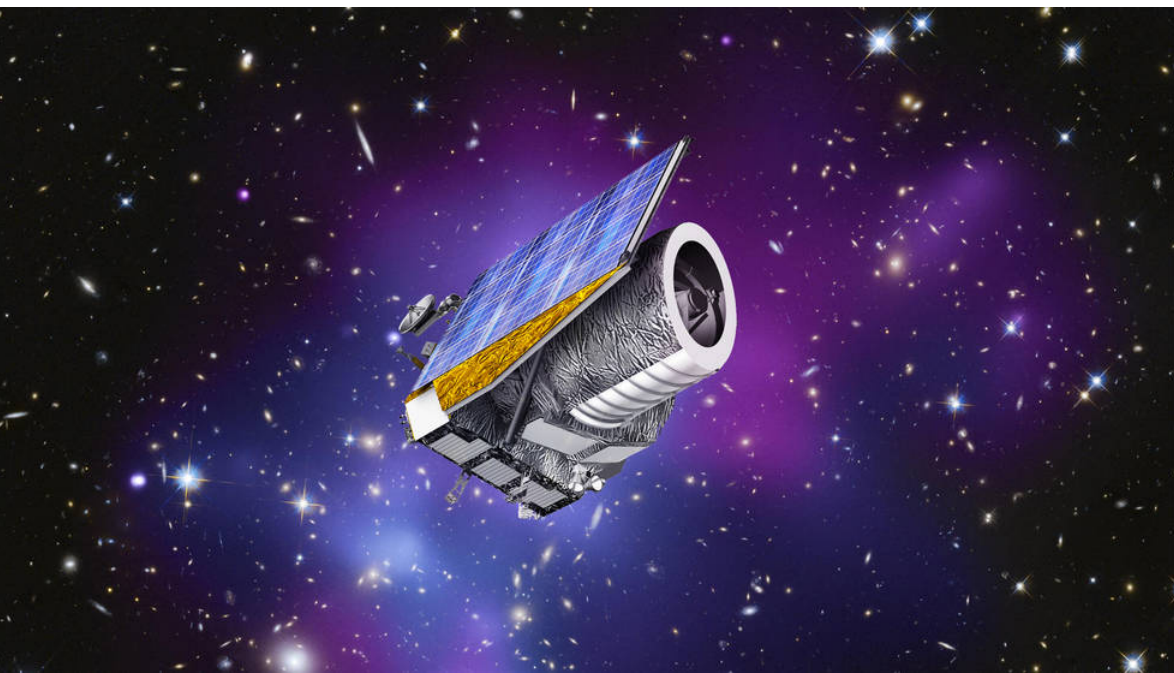
もちろん、**観測**からの制限も重要

Planck 2018

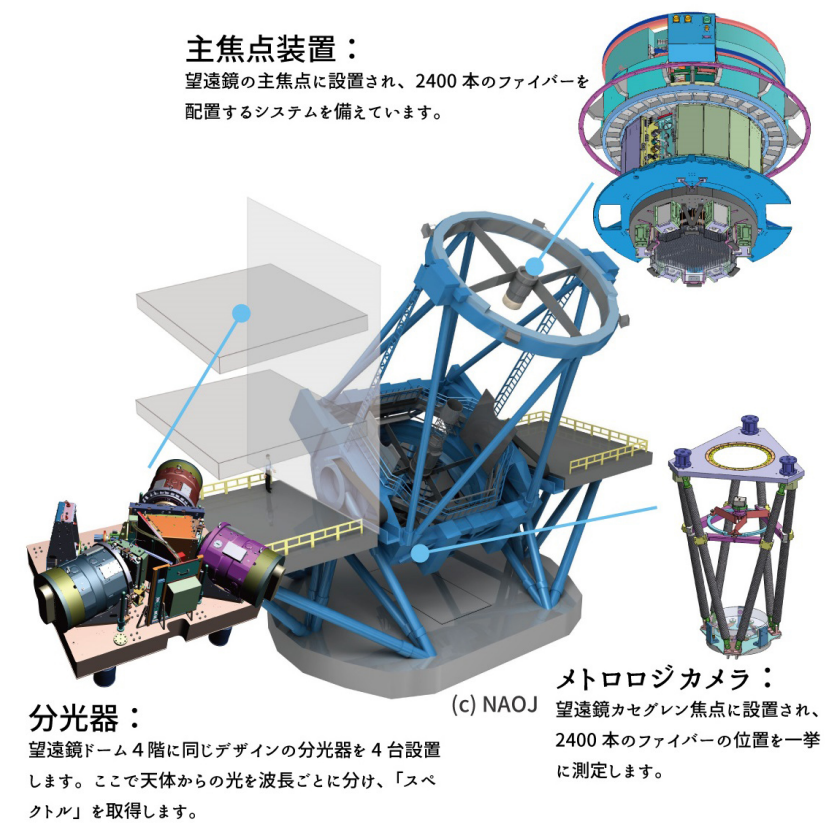


$$\frac{p}{\rho} = w(a) = w_0 + (1 - a)w_a$$

将来の観測計画の例

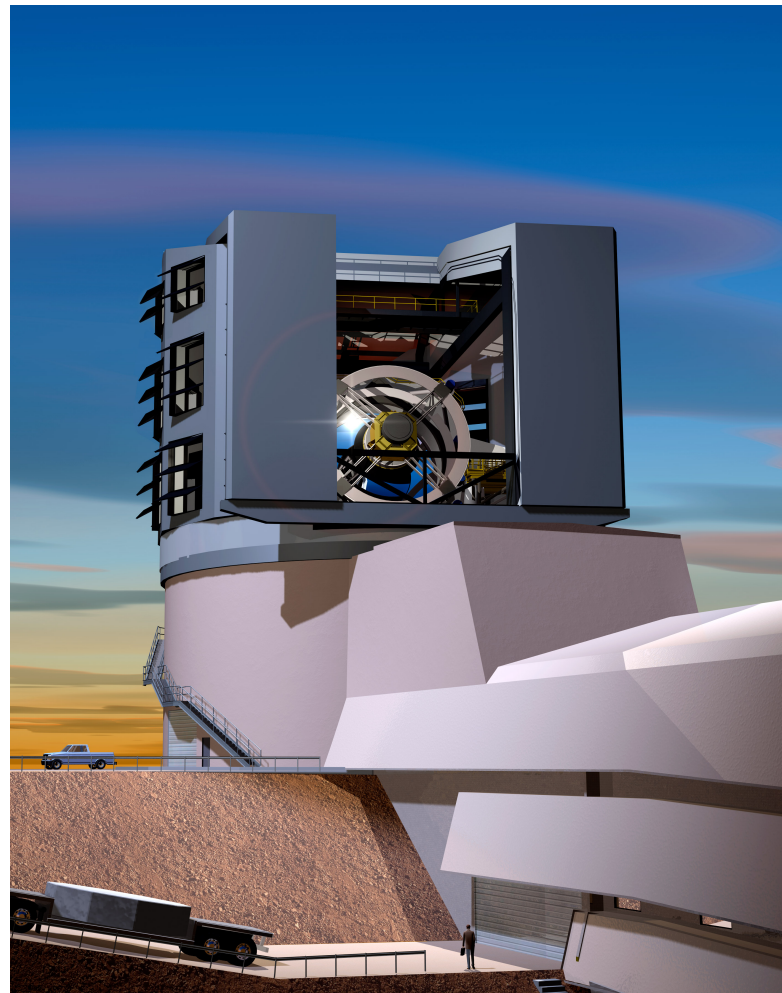


Euclid



Subaru-PFS

Vera Rubin Observatory (LSST)



WFIRST

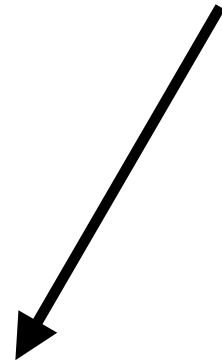
まとめ

有効場の理論の考え方：

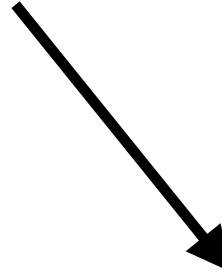
物理学における**普遍性**を担保し、
非常に大きな成功を収めてきた

しかしこの考えは**プランクケールで
破綻する！**

量子重力・超弦理論



ランドスケープ



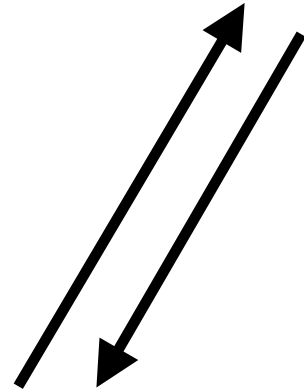
スワンプランド
(沼地)



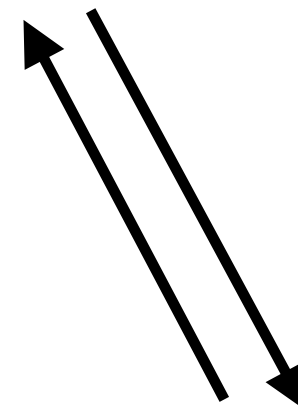
沼地予想により区別される。

沼地予想：

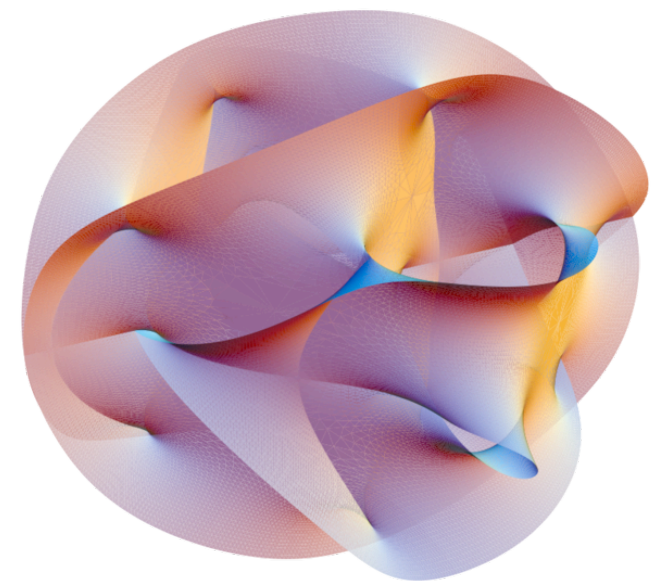
量子重力の不可能性を示唆



実験・観測との
比較・制限



量子重力の
理論の進歩



量子重力：

普遍性の根源への探究

既存の普遍性の概念を超えた

新しい普遍性を創出？