量子重力と沼地予想

山崎雅人
(東大カブリIPMU)

2019年10月1日
名大物理談話会

Cafe & Bar
Restaurant

“Powers of Ten” の長さのスケール

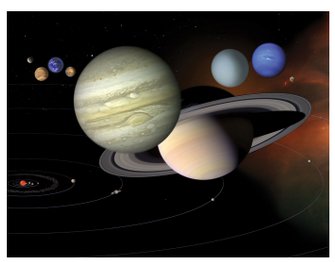
単位：m

10^{23} 10^{21} 10^{13} 10^{7} 10^{0} 10^{-5} 10^{-9} 10^{-10} 10^{-15}

銀河団

銀河

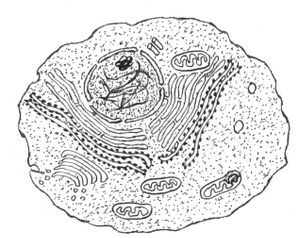
太陽系



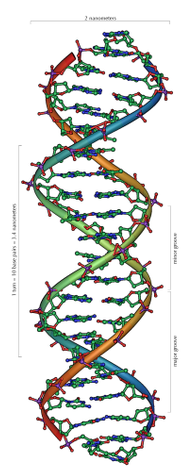
地球

人間

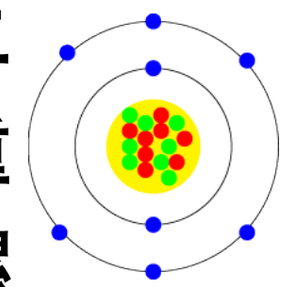
細胞



DNA二重螺旋

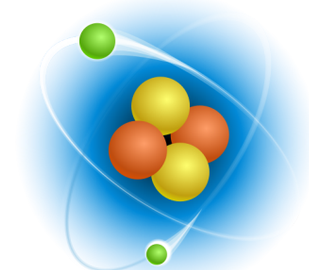


原子核



原子

クオーク

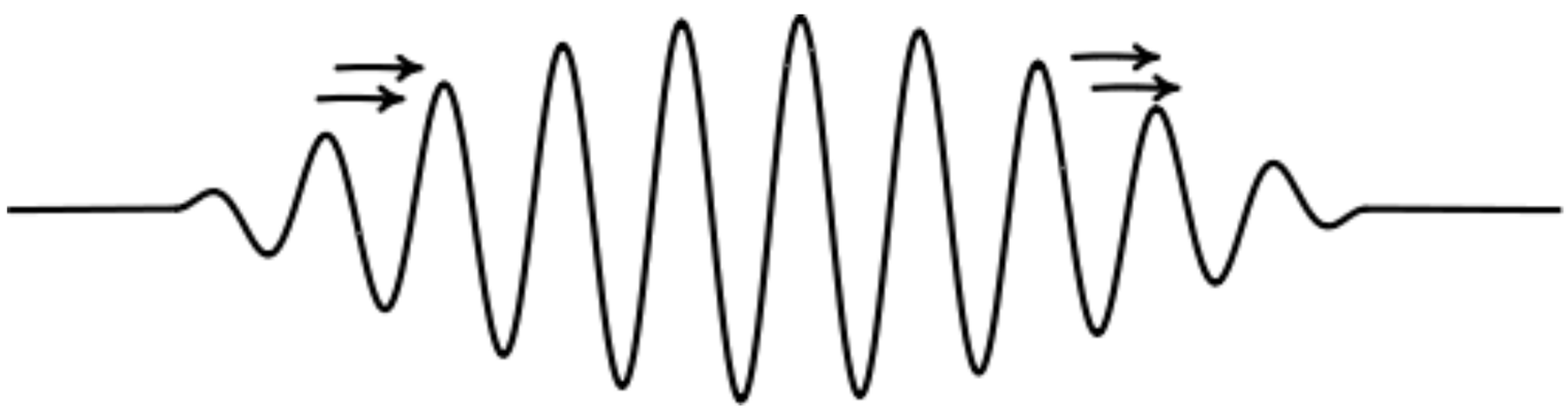


長さのスケールとエネルギースケール

$$(E = mc^2)$$

コンプトン波長 $\lambda = \dfrac{h}{mc} = \dfrac{hc}{E}$

$$\hbar c \sim 200(\mathrm{MeV} \cdot \mathrm{fm})$$



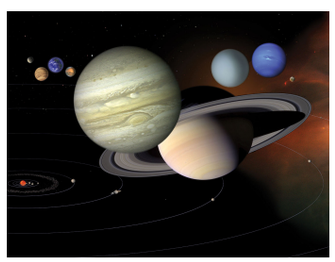
“Powers of Ten” のエネルギースケール

単位：eV

10^{-30} 10^{-28} 10^{-20} 10^{-14} 10^{-7} 10^{-2} 10^{2} 10^{3} 10^{8}

銀河団

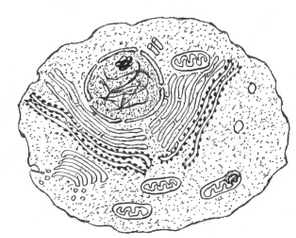
銀河系



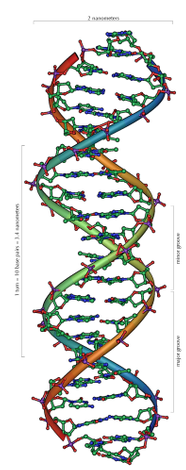
太陽系

地球

人間

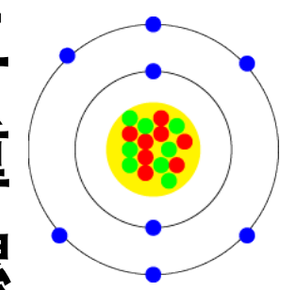


細胞

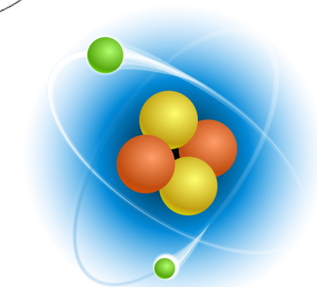


DNA二重螺旋

原子核



原子



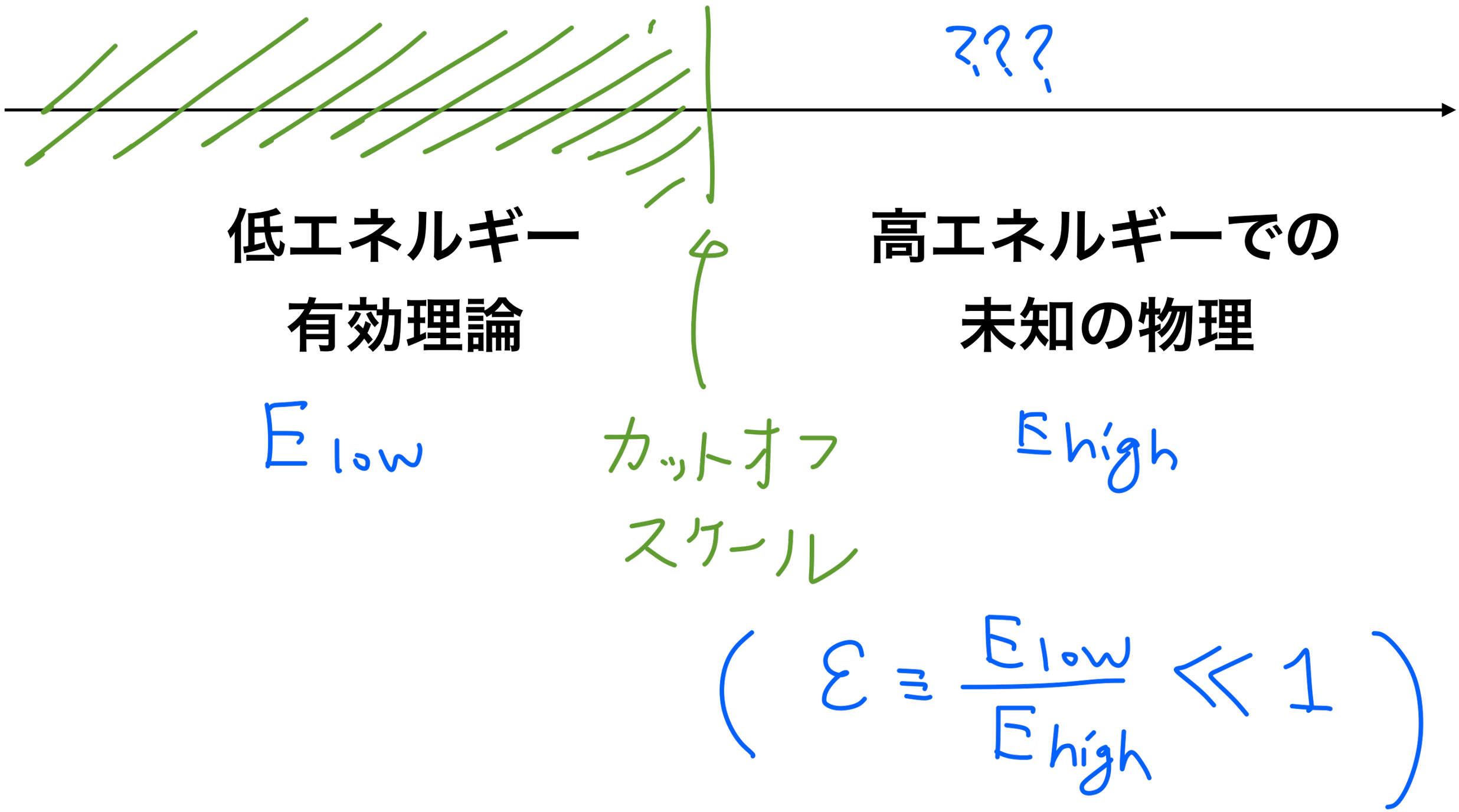
クォーク

CERN (Large Hadron Collider)
13 TeV (Run 2)

高いエネルギースケールの
ことを知らなくても暮らし
ていける？

物理学の階層構造

「繰り込み」・低エネルギー有効理論の思想



それでは、この階層構造に

”終わり”はあるのか？

物理学の階層構造の終焉

重力

日本経済新聞
4月11日
木曜日
発行所 日本経済新聞社
東京本社 ☎(03)3270-0251
〒100-8066 東京都千代田区大手町1-3-7
大阪本社 ☎(06)7639-7111
名古屋支社 ☎(052)243-3311
西部支社 ☎(092)473-3300
札幌支社 ☎(011)281-3211

る 3

首相の続投に道

イスラエル総選挙 10

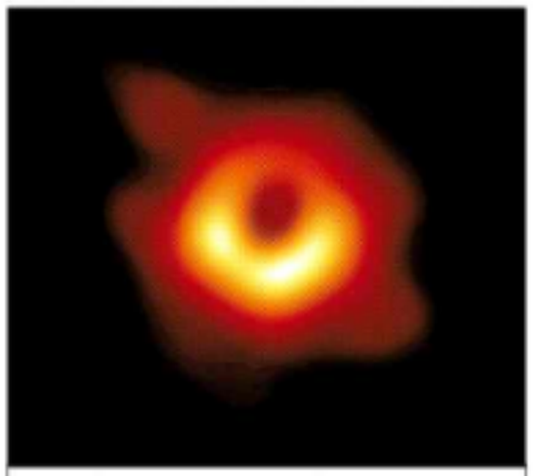
脱24時間踏み込む

ファミマ、セブン上回る規模 12

ブラックホール撮影成功

日米欧など、世界の望遠鏡連動

日米欧などの国際共同研究グループは10日、銀河の中心にある巨大ブラックホールの撮影に初めて成功したと発表した。世界の8つの電波望遠鏡を連動させ、極めて解像度の高い巨大望遠鏡に見立てて観測した。ブラックホールの存在は間接的な証拠からわかっていたが、目に見える形で姿をとらえたことはなかった。謎に包まれた天体の解明につながるノーベル賞級の成果で、データ解析に使われた技術は新素材の開発や医療にも役立つ。(関連記事2面に)



M87銀河の中心にある巨大ブラックホールを撮影した画像。中心の黒い部分がブラックホールの影(EHTコラボレーション提供)

存在、完全に証明

観測技術 応用に期待

ブラックホールは過去の研究で実在することは確実だとわかったが、周囲を回る星の動きなど間接的な根拠から存在を推定するのにとどまり、画像という「動かぬ証拠」にたどり着けなかった。想像で描かれてきたブラックホールの本当の姿が明らかになり、最後のピースが埋まったことで存在は完全に証明された。

現代の物理学理論の検証や銀河の成り立ちについても新たな知見が得られる可能性がある。研究に参加する国立天文台の本間希樹教授は記者会見で「今後のブラックホール天文学の新時代を切り開く成果だ」と強調した。

今回、研究グループはチリやメキシコ、米国、

5G 4社で1.6兆円投資

電波割り当て 新へ始動

次世代の高速通信規格「5G」が日本でも2020年春に始動する。NTTドコモなど国内通信4社は10日、総務省から電波の割り当てを受けた。基地局(3面きょうのことば)への投資を急ぎ、ドコモとKDDIは

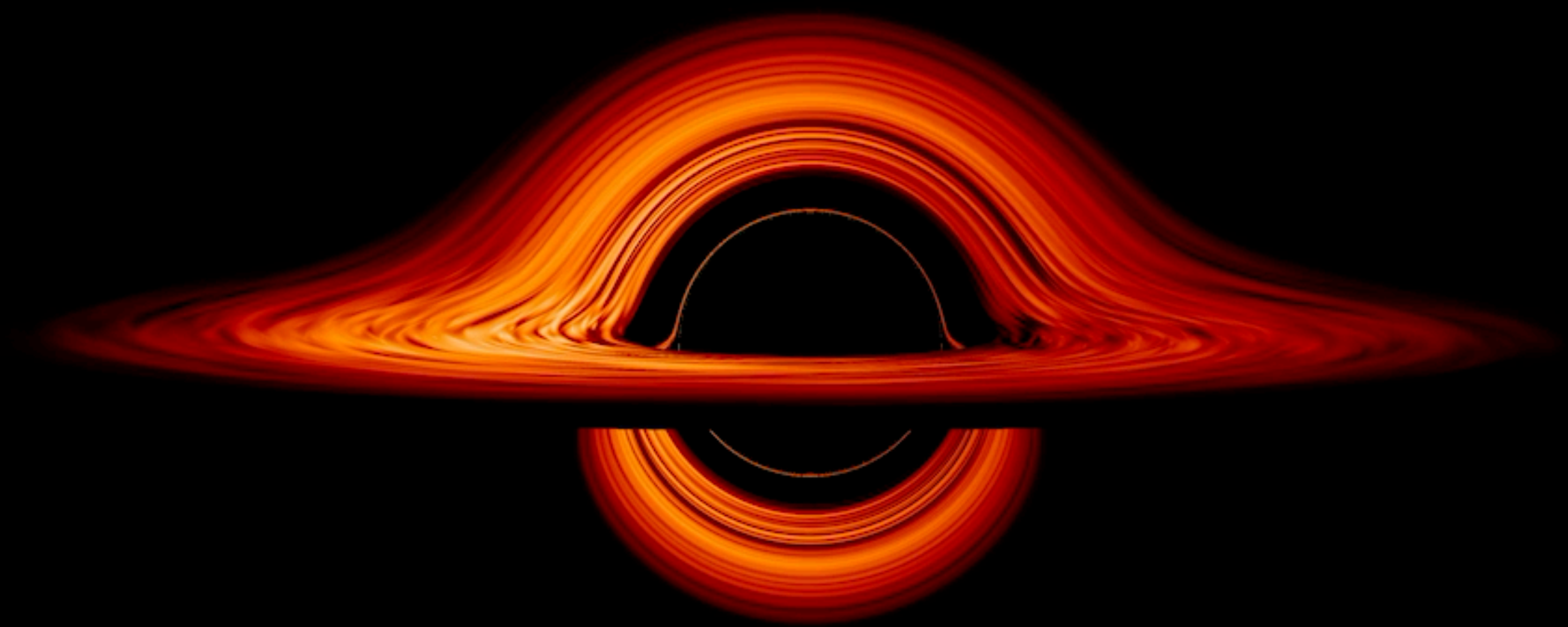
ドコモとKDDI、ソフトバンク、楽天モバイルの4社が電波の割り当てを受けた。総務省は割り当てに際し、全国を10キロメートル四方の4500区画に分けてその50%以上に5年以内に基地局を置く

置などで、2024年度までに合計でおよそ1兆6千億円を投資する。4Gなどに使ってきた電波を転用する投資も合わせると5年間で3兆円近くになるという。

5Gは通信速度は4Gの最大100倍になり、

5Gは幅広い産業を変える

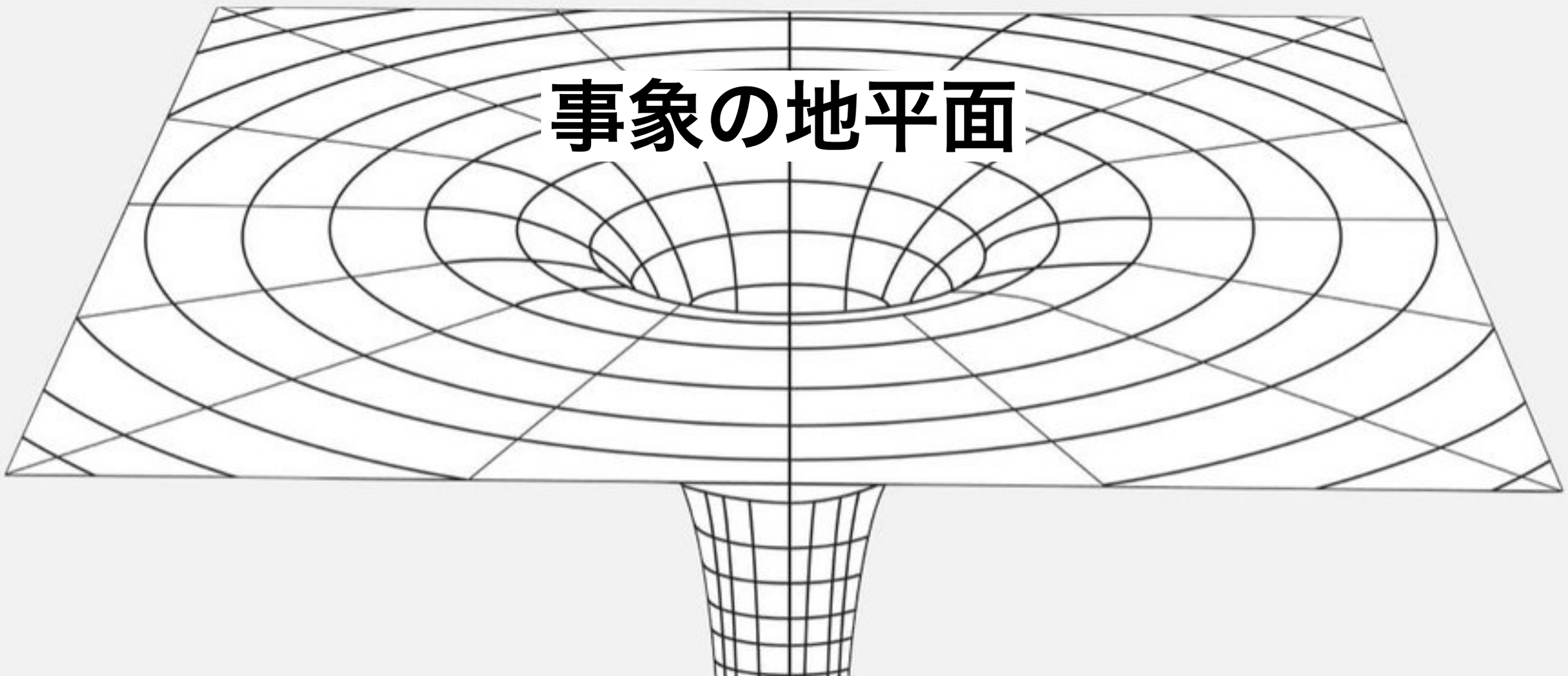
環境ステーション株式会社
不動産コンサルティングのNo.1企業を目指す
環境STATION



https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/nasa-visualization-shows-a-black-hole-s-warped-world

シュワルツシルト半径

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



質量が増えて

$$R_s \sim \frac{2GM}{c^2} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \sim \lambda = \frac{h}{mc}$$

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

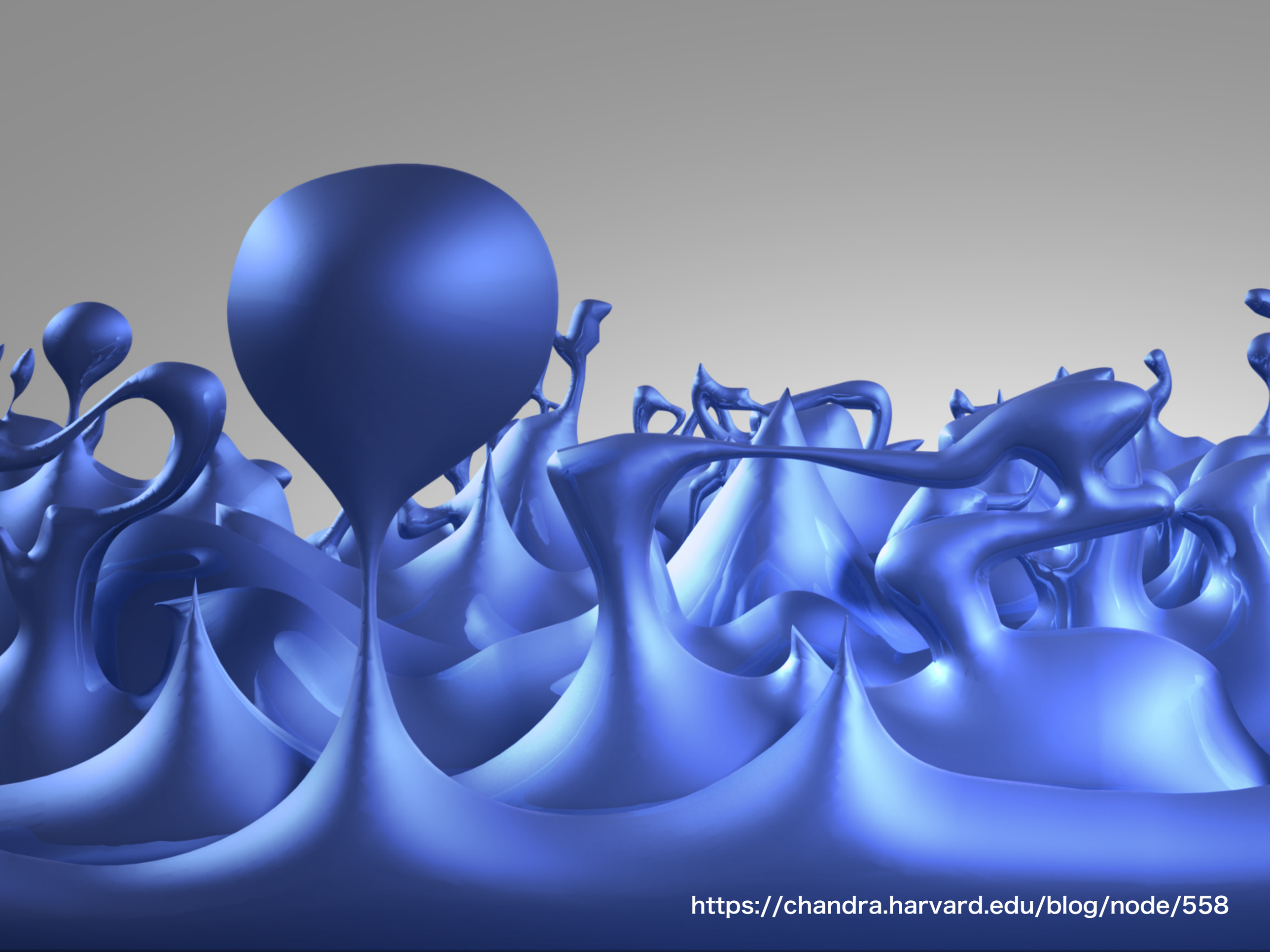
プランク質量

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

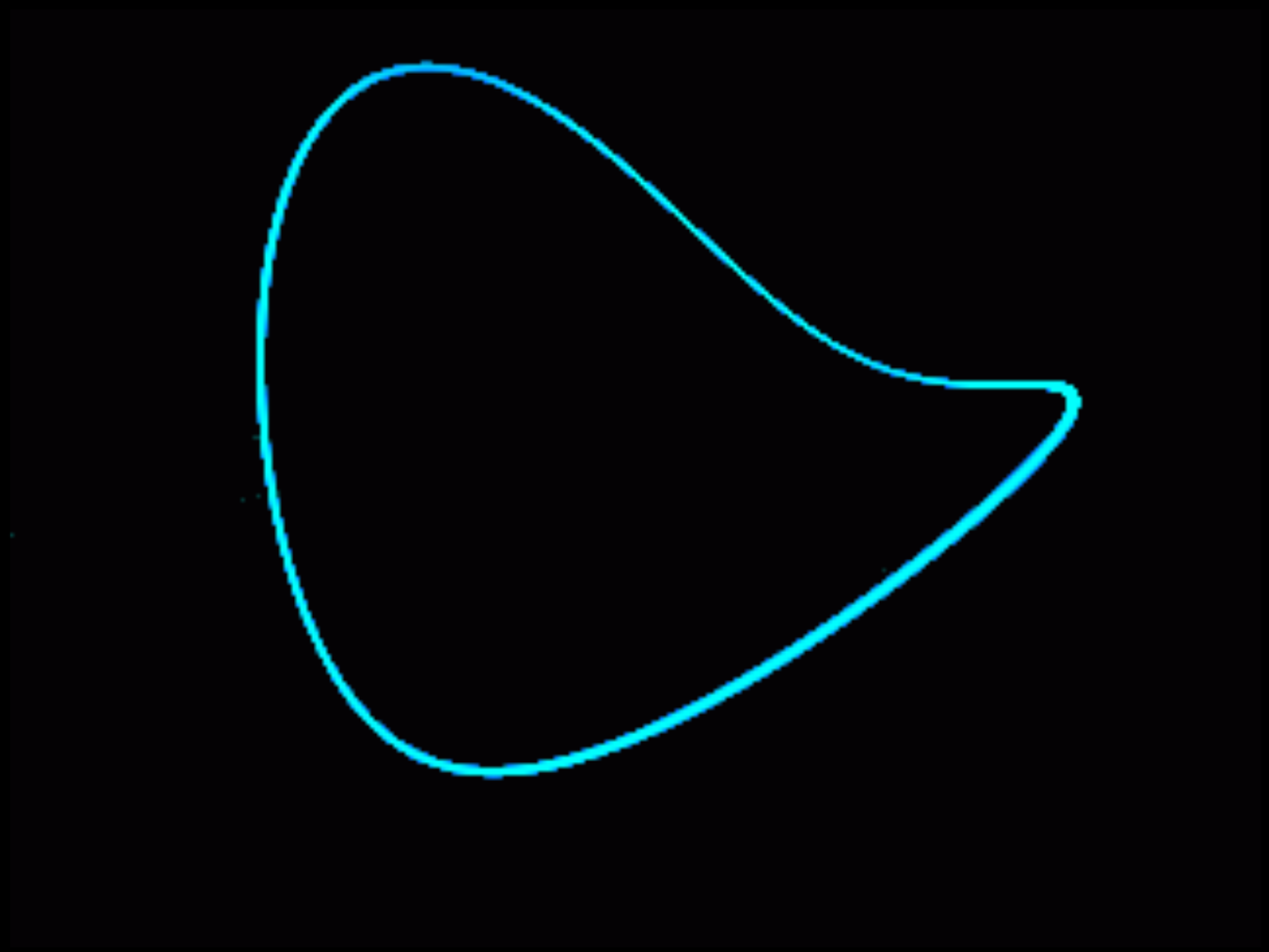
プランク長さ

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

量子力学と重力の両方が重要、
つまり量子重力の世界


https://chandra.harvard.edu/blog/node/558

量子重力の最有力候補：超弦理論



NATIONAL BESTSELLER

The Elegant Universe

Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory

Brian Greene

Pulitzer Prize Finalist

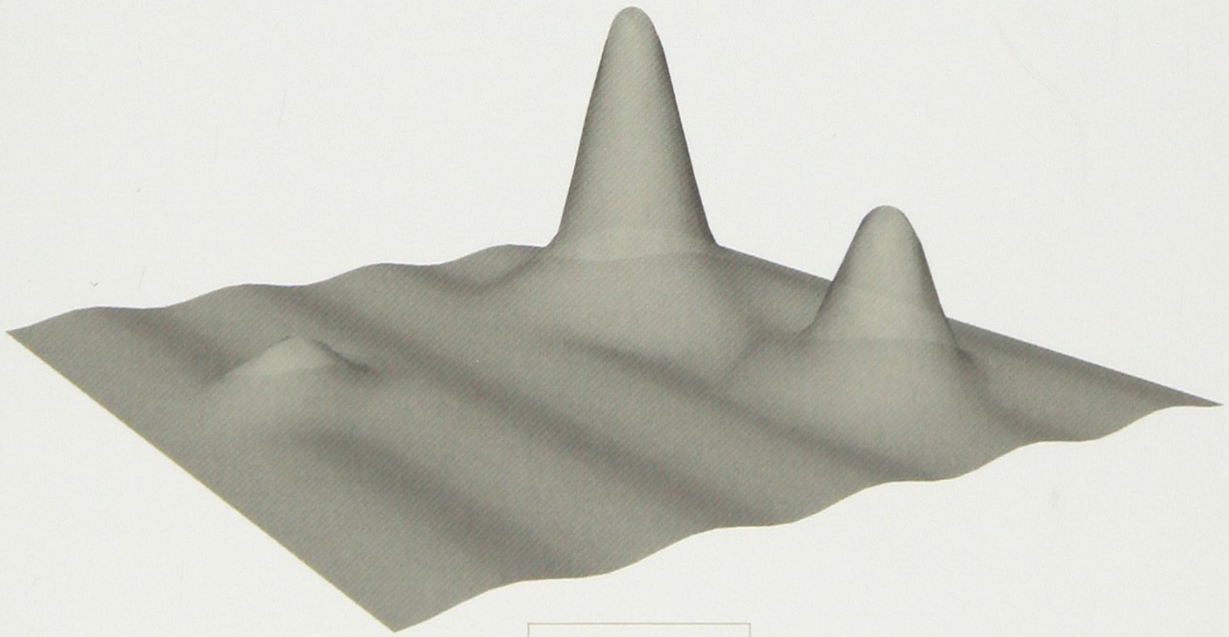
エレガントな宇宙

超ひも理論がすべてを解明する

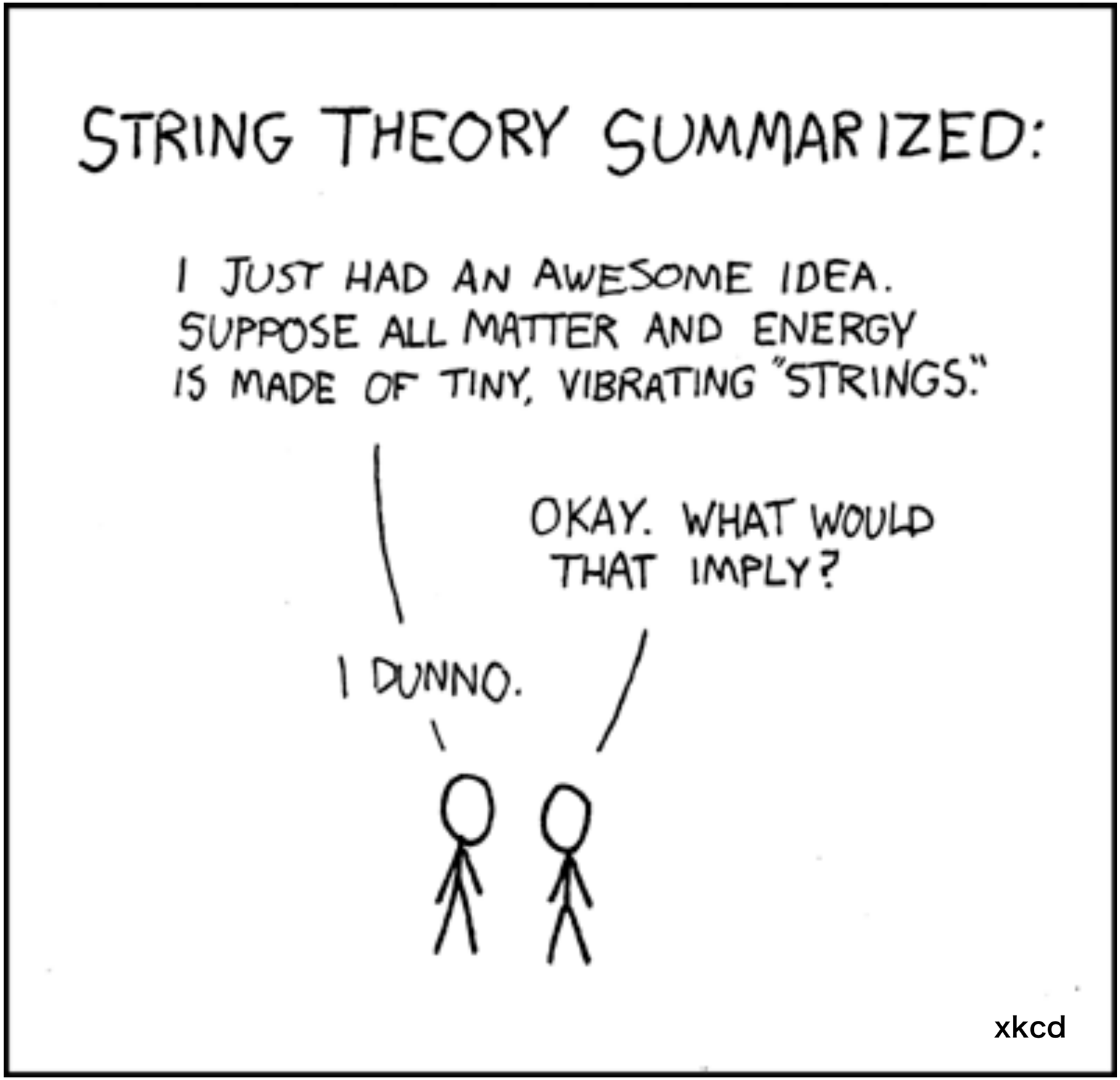
ブライアン・グリーン　林 一・林 大 訳

the elegant universe

superstrings, hidden dimensions, and the quest for the ultimate theory



草思社


STRING THEORY SUMMARIZED:
I JUST HAD AN AWESOME IDEA. SUPPOSE ALL MATTER AND ENERGY IS MADE OF TINY, VIBRATING "STRINGS."
OKAY. WHAT WOULD THAT IMPLY?
I DUNNO.
xkcd

沼地予想

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のでは？

スワンプランド、沼地
（swampland）

ランドスケープ
(landscape)

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いけない必要条件

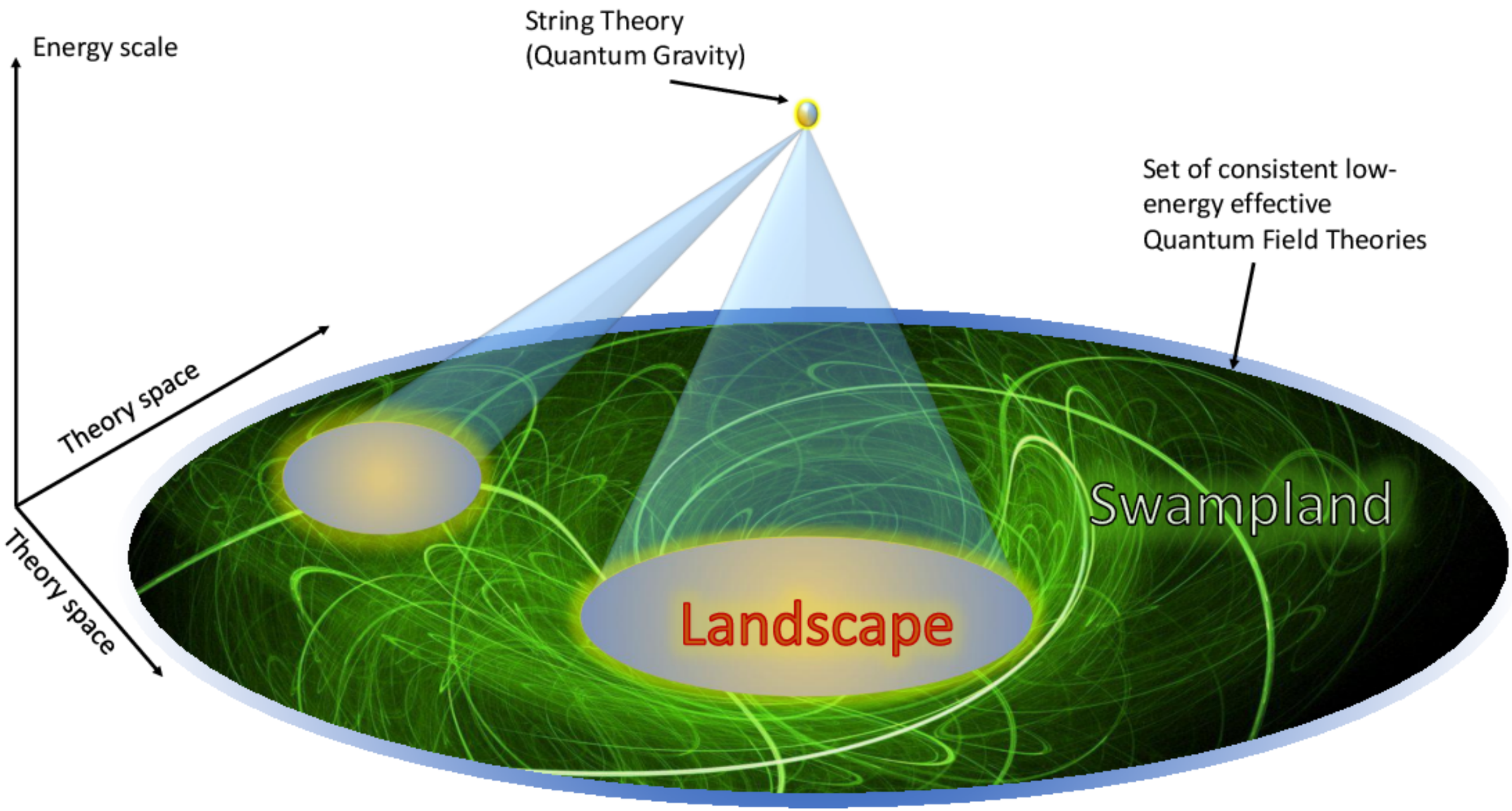


Figure by Palti

沼地予想の例：

「量子重力に対称性はない」

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。

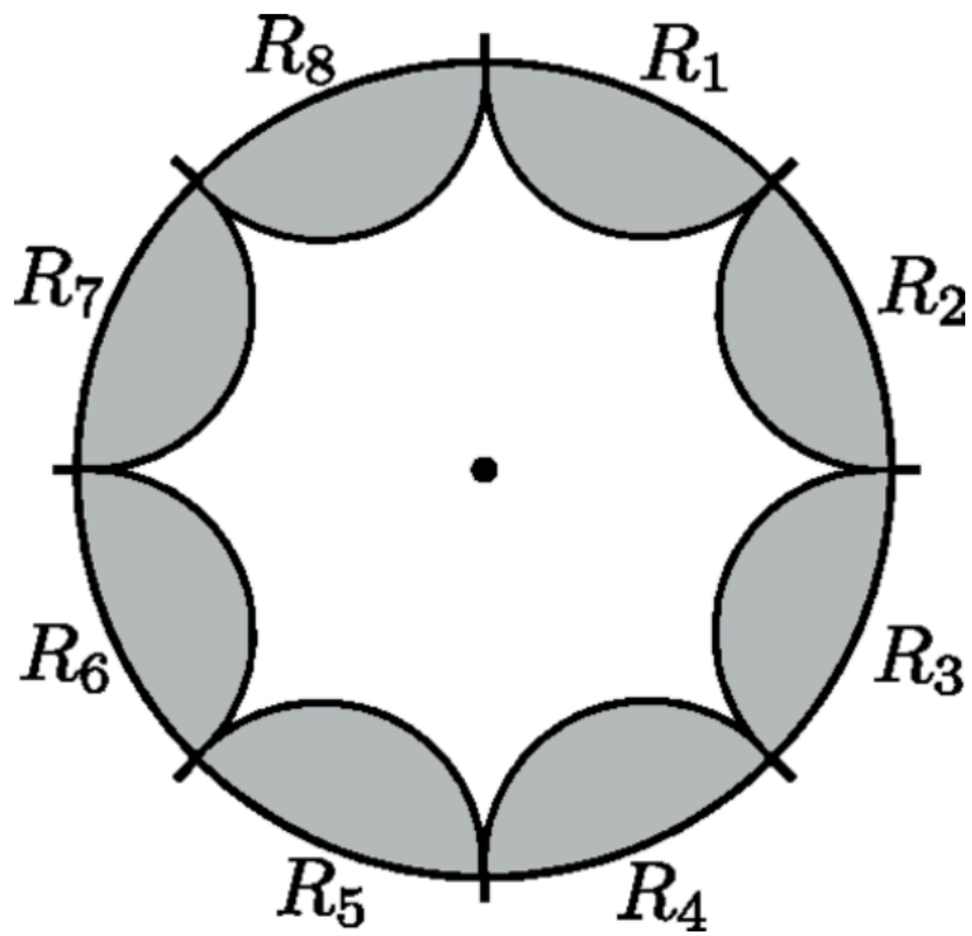


図1. 「量子重力理論は対称性を持たない」ことを背理法で証明する図。もし対称性があるとすると、それは図の灰色で塗られた

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

対称性は本質ではない？

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 ?

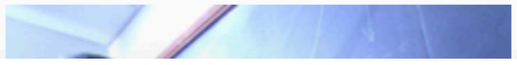
初回放送

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

注：二種類の「対称性」

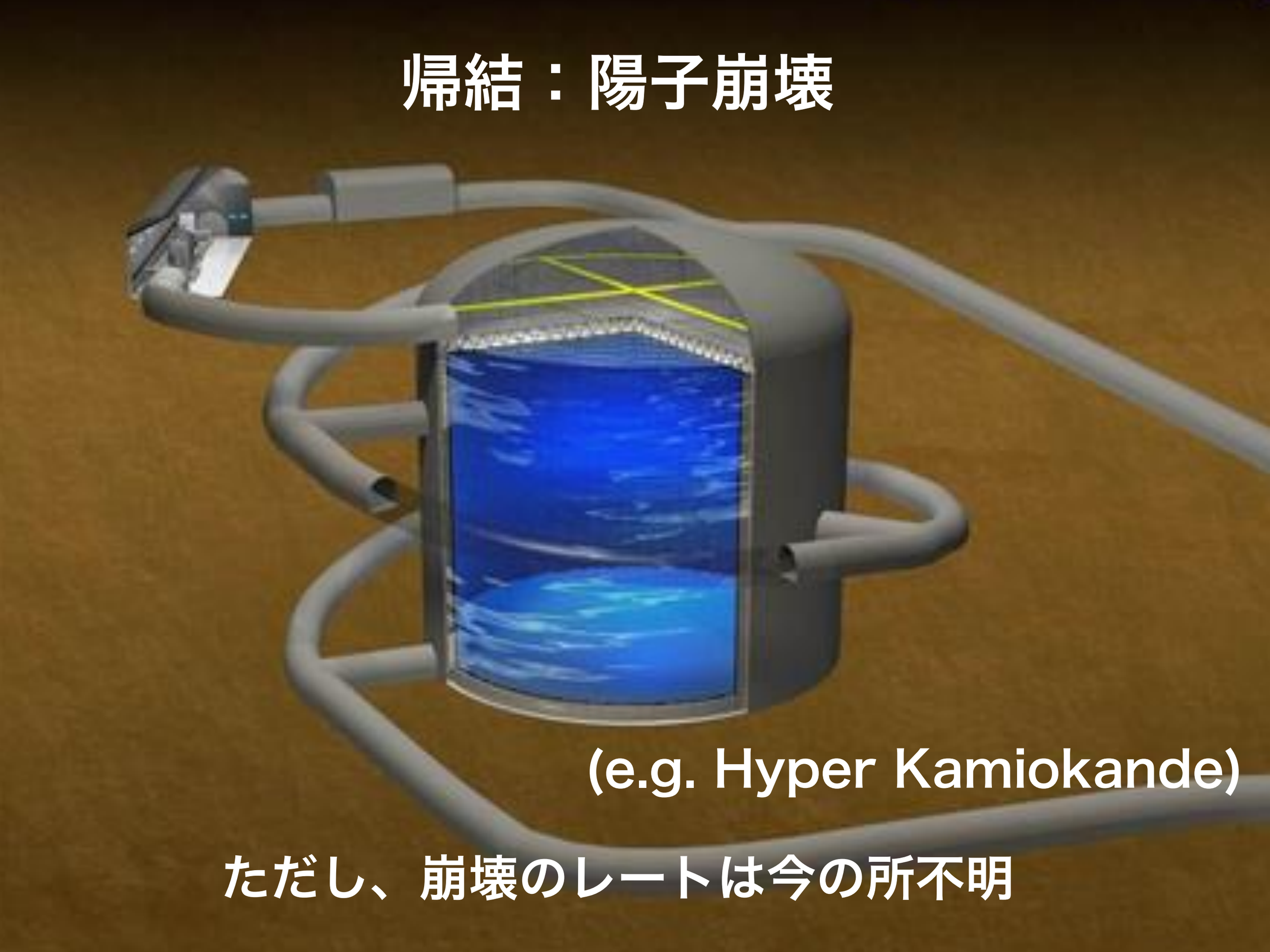
大域対称性：

物理的な「真の対称性」

局所（ゲージ）対称性：

ゲージ冗長性

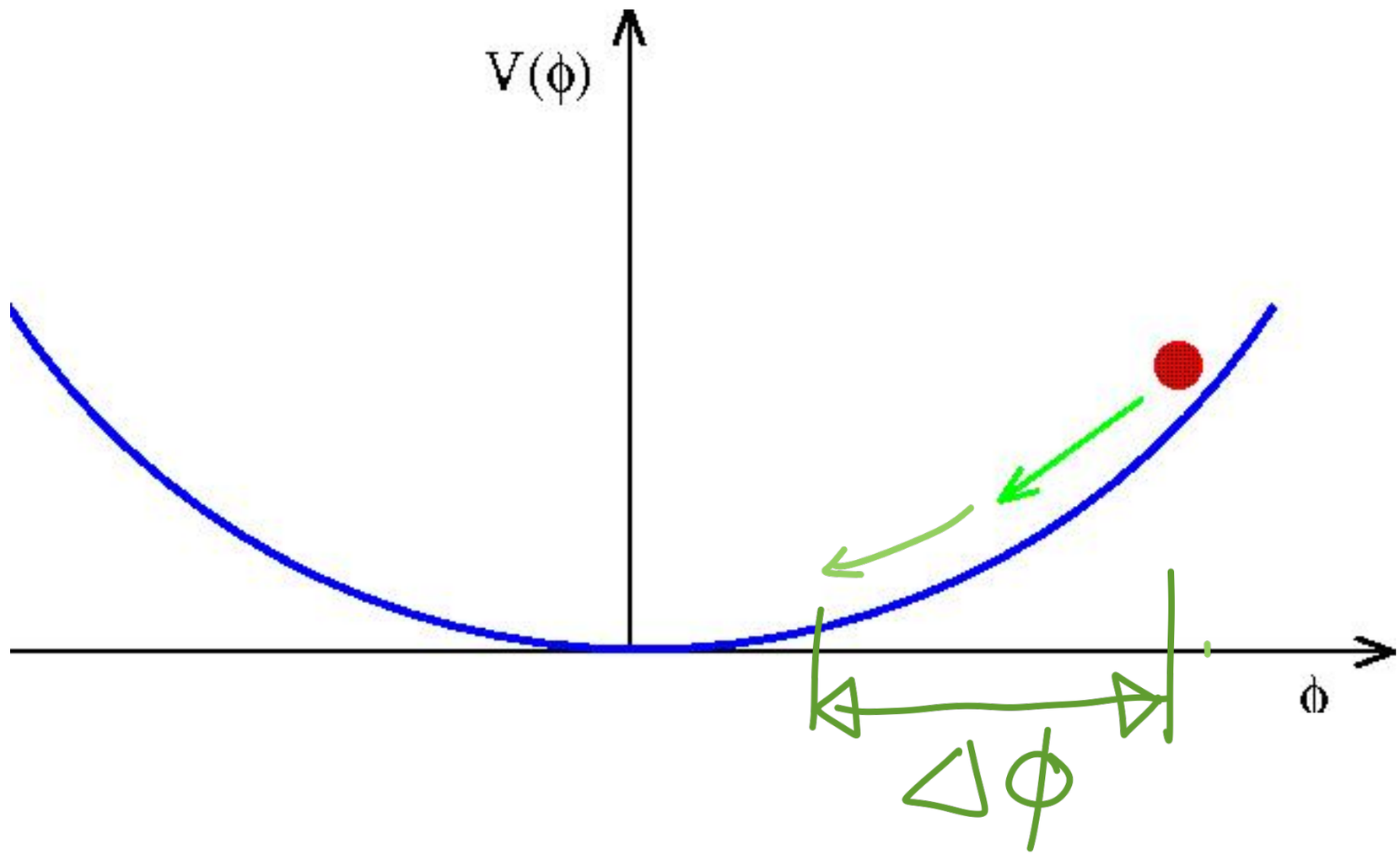
帰結：陽子崩壊



(e.g. Hyper Kamiokande)

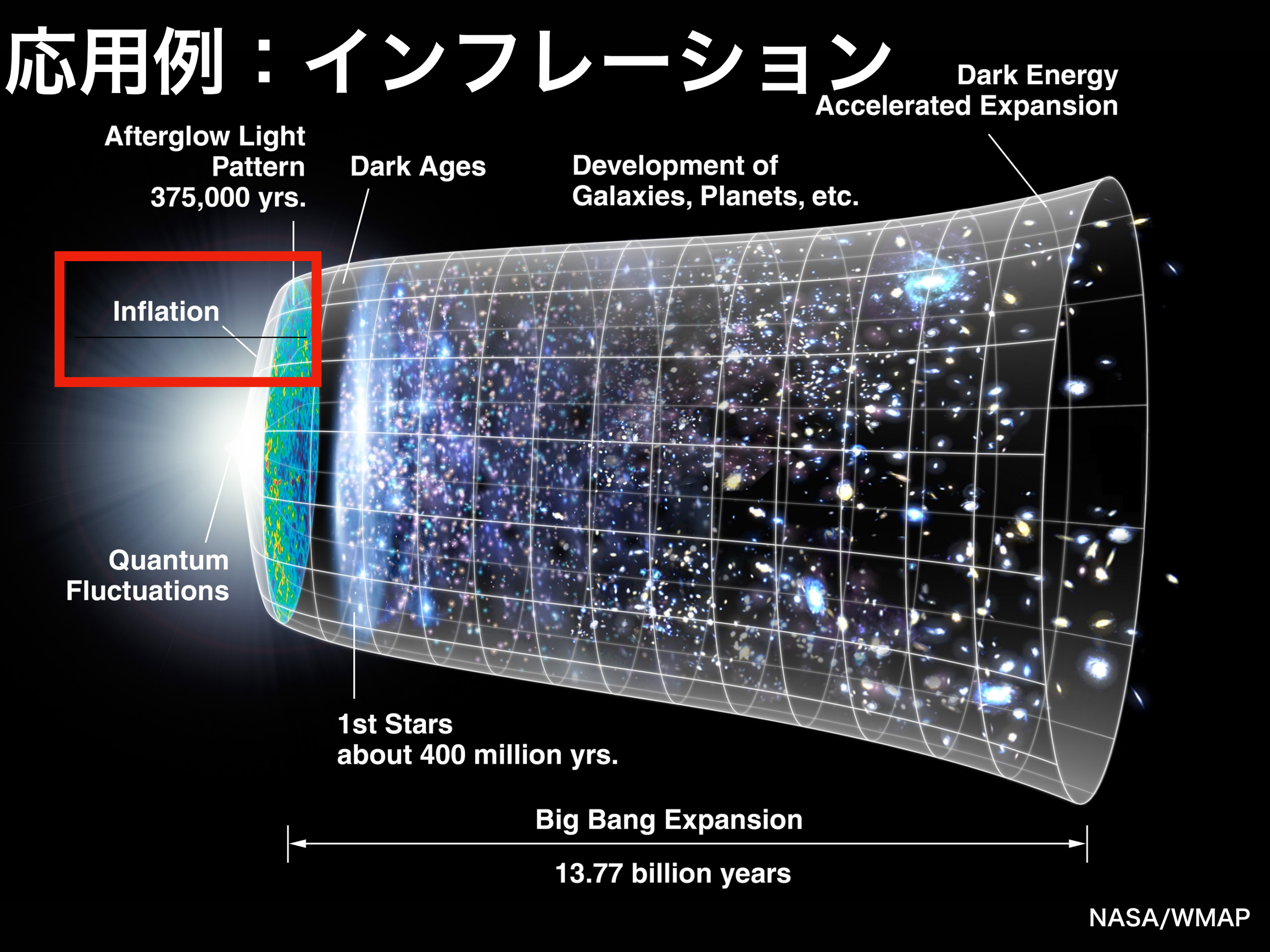
ただし、崩壊のレートは今の所不明

沼地予想の例：距離予想

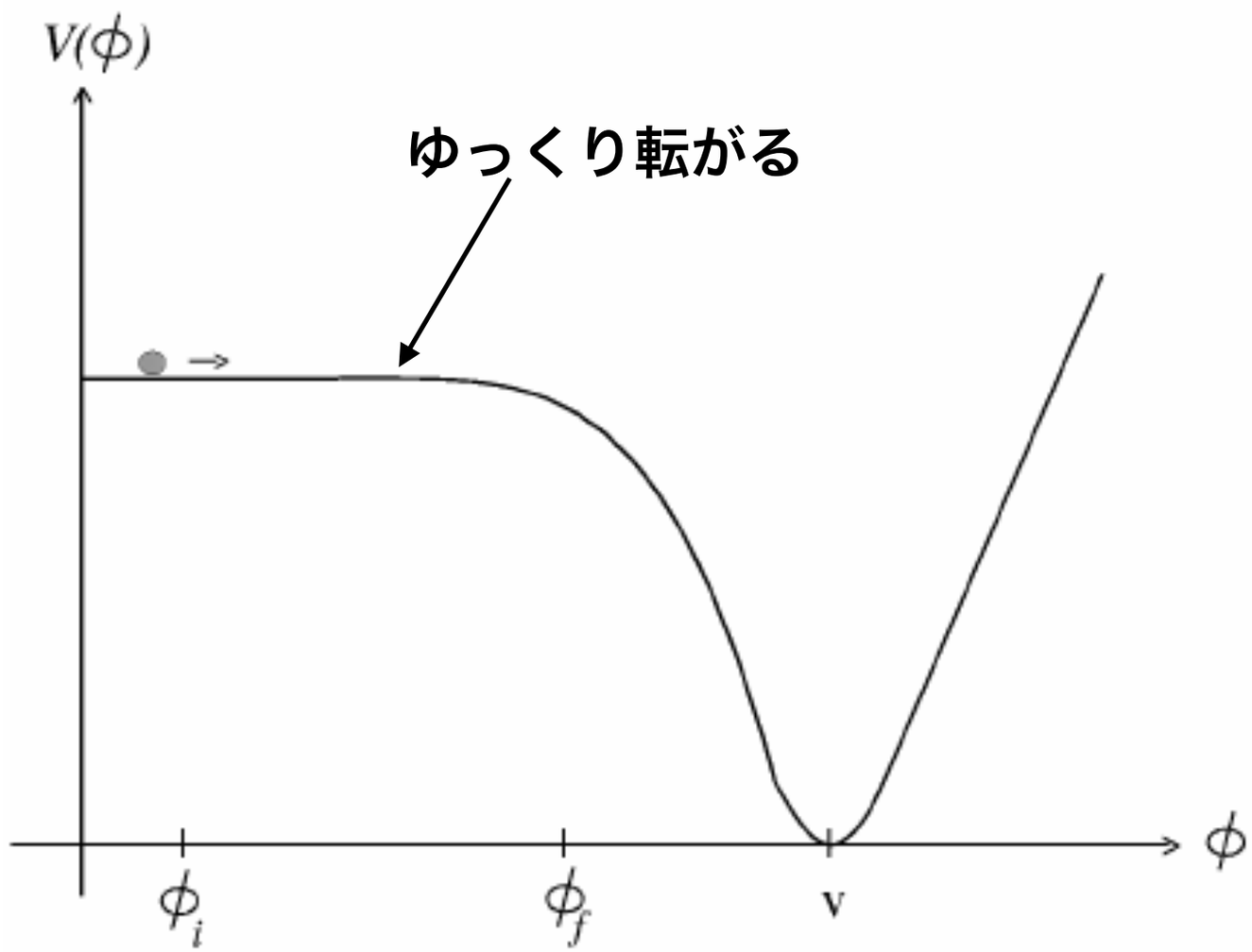


$$\Delta\phi \lesssim O(1) M_{\rm P}$$

応用例：インフレーション



インフレーションは、プランクスケールの物理に影響を受ける



$$\epsilon := \frac{M_{\rm P}^2}{2}\left(\frac{V'}{V}\right)^2 \ll 1$$

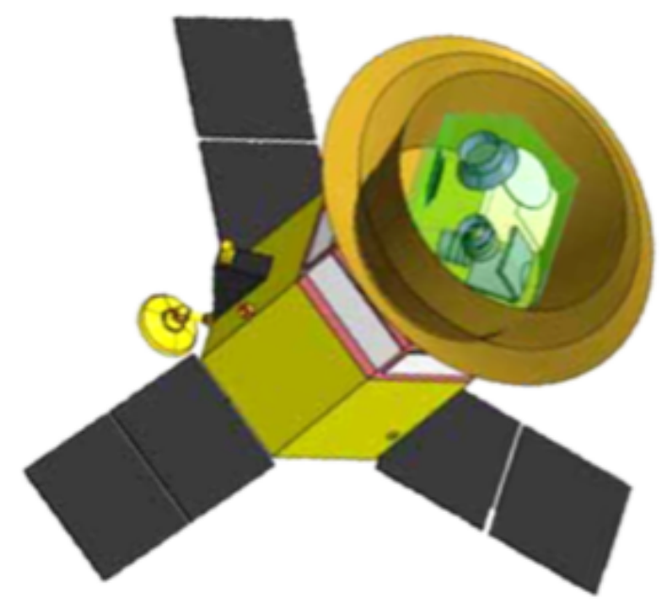
$$\delta V \sim V_0 + \frac{V_1}{M_{\rm P}} + \ldots$$

インフレーションに対するLyth Bound

$$\Delta\phi = O(1) M_{\rm P} \sqrt{\frac{r}{0.01}} \to r \lesssim O(0.01)$$

原始重力波（Bモード）の観測

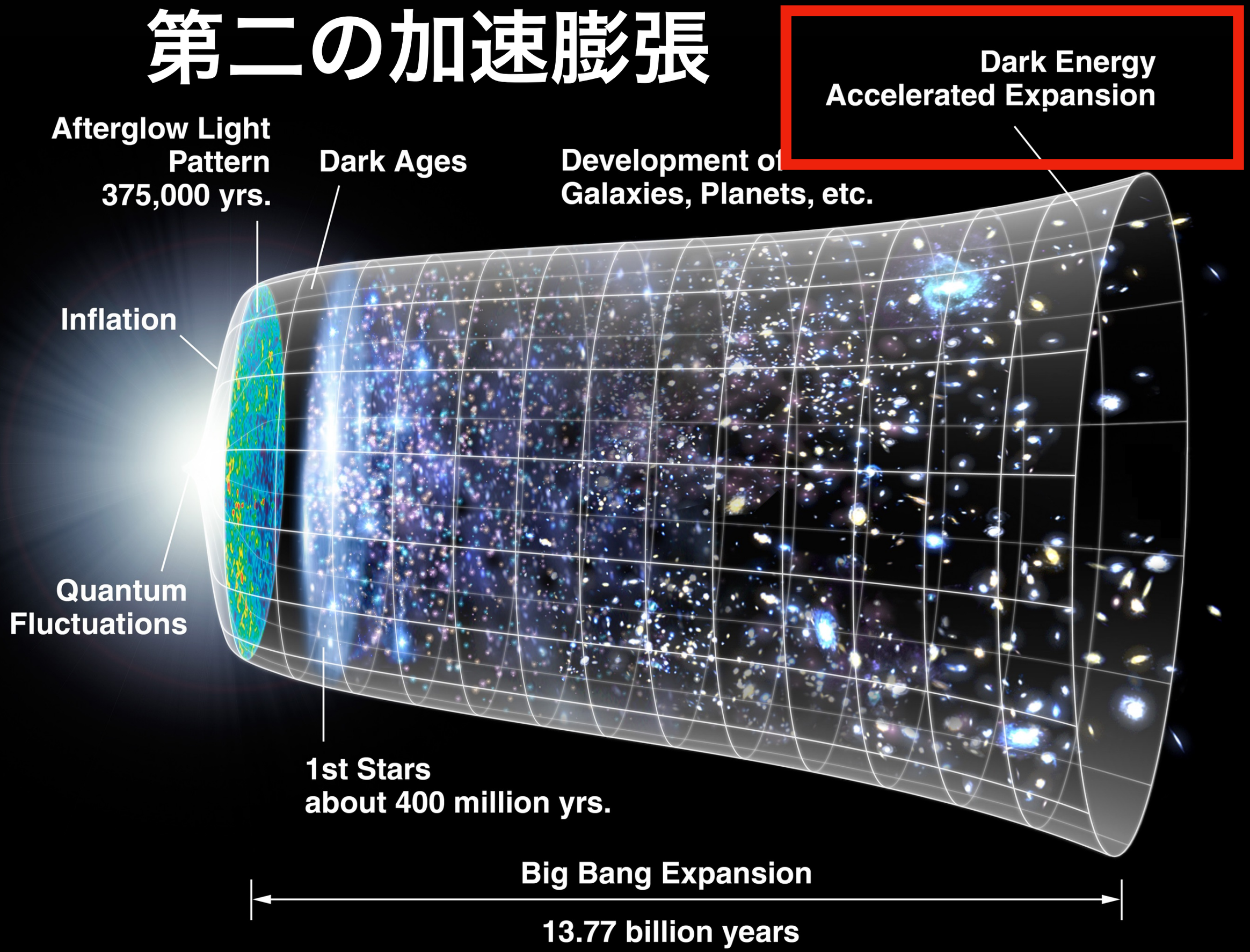
CMB-S4



Litebird

将来的に $r \sim O(0.001)$

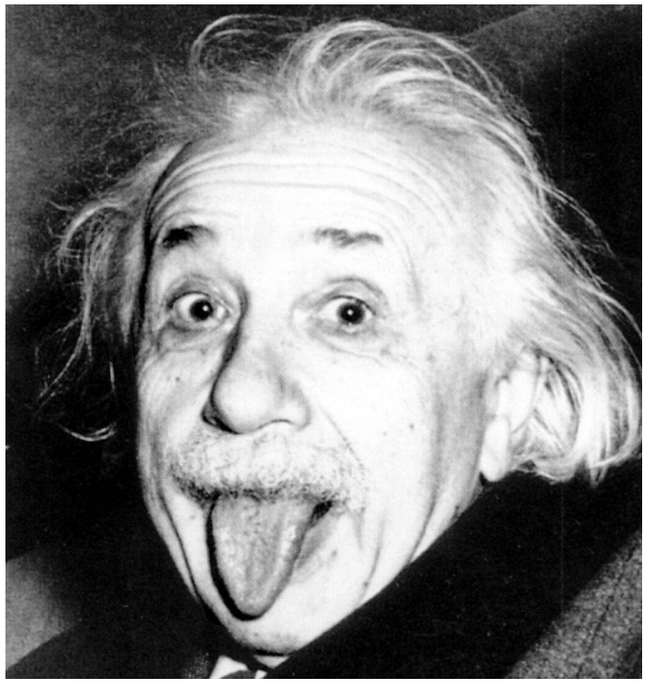
第二の加速膨張

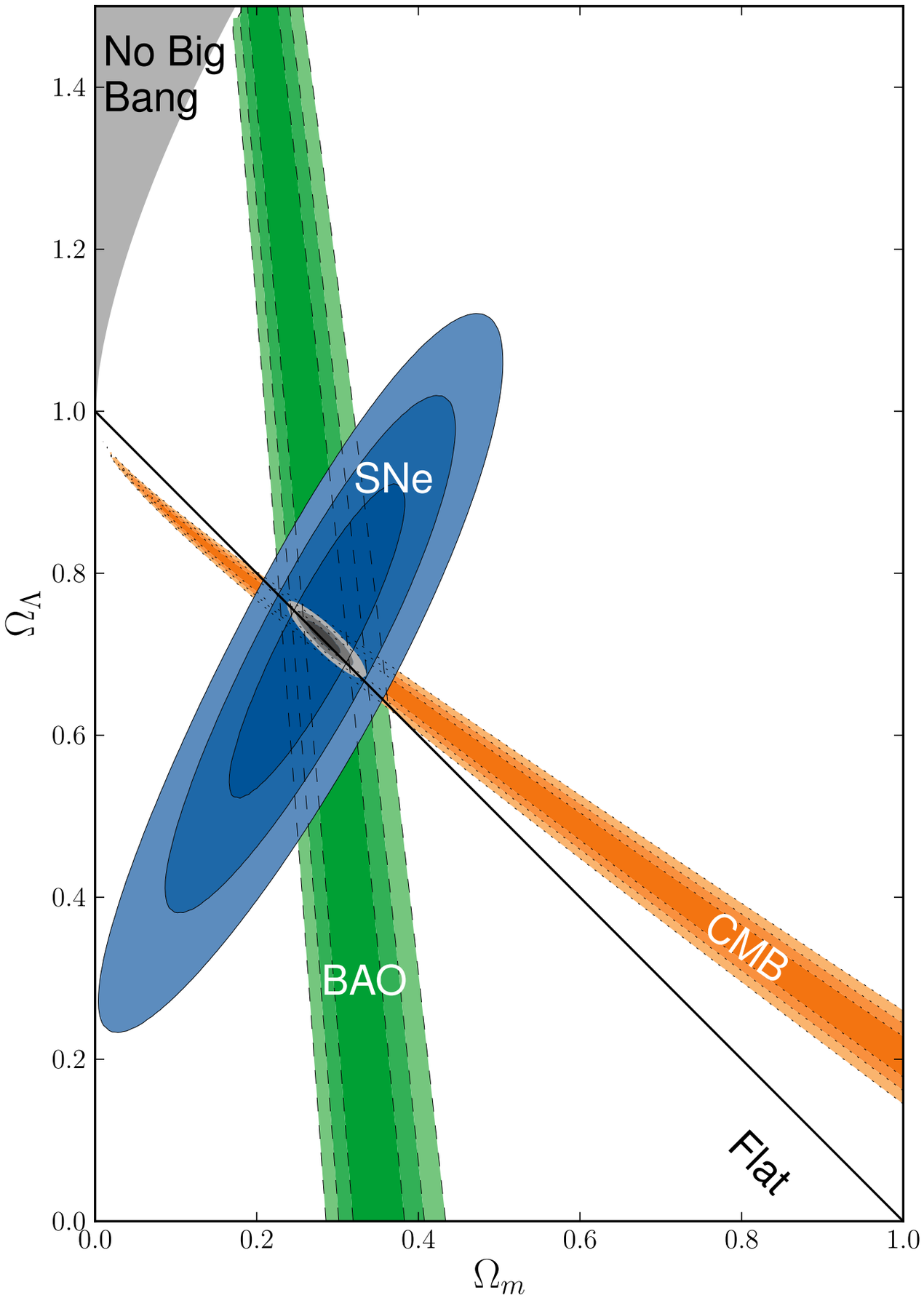


NASA/WMAP

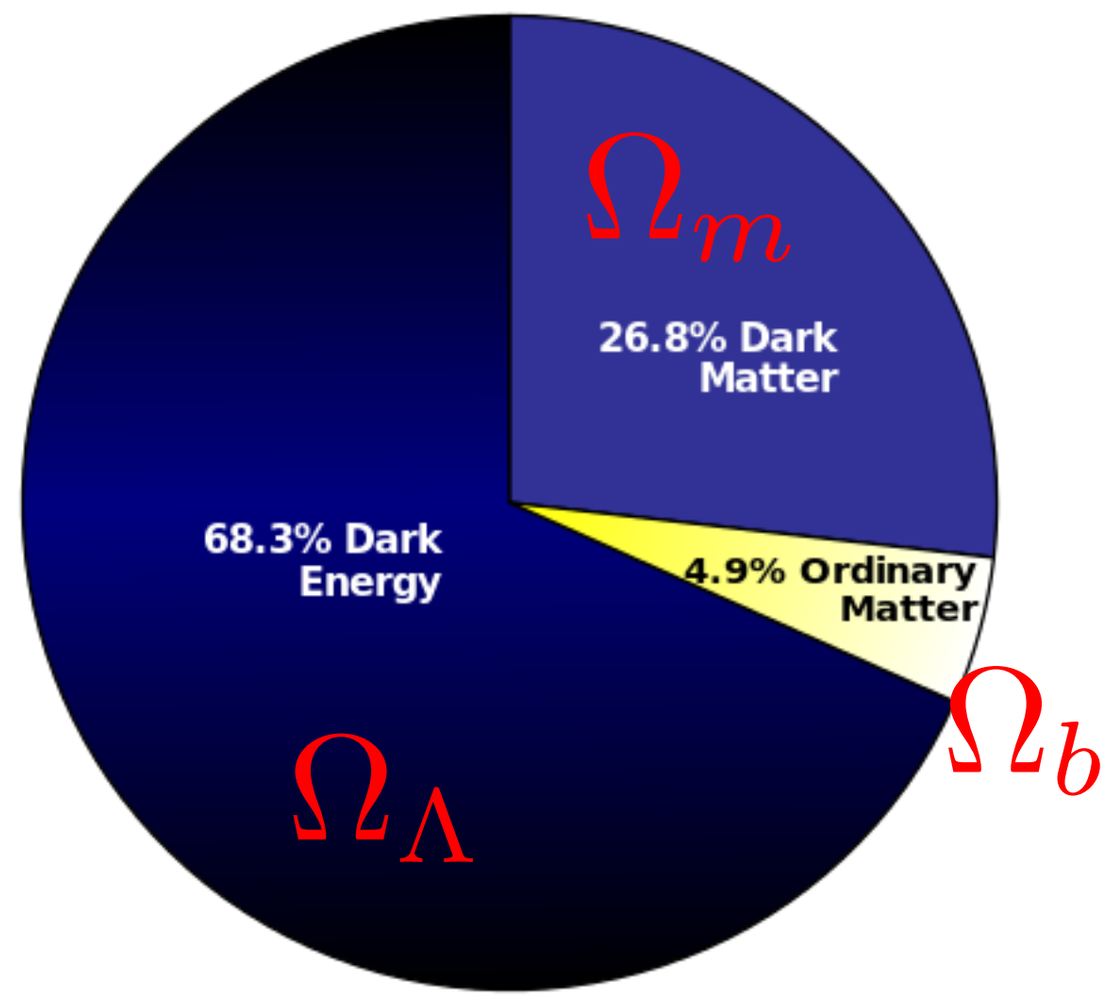
例：宇宙定数
(ダークエネルギー)

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




No Big Bang
SNe
BAO
CMB
Flat
Ω_Λ
Ω_m
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4

$\Lambda > 0\,!$


Ω_m
26.8% Dark Matter
68.3% Dark Energy
4.9% Ordinary Matter
Ω_Λ
Ω_b

宇宙項問題：21世紀に残された大難問の一つ

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

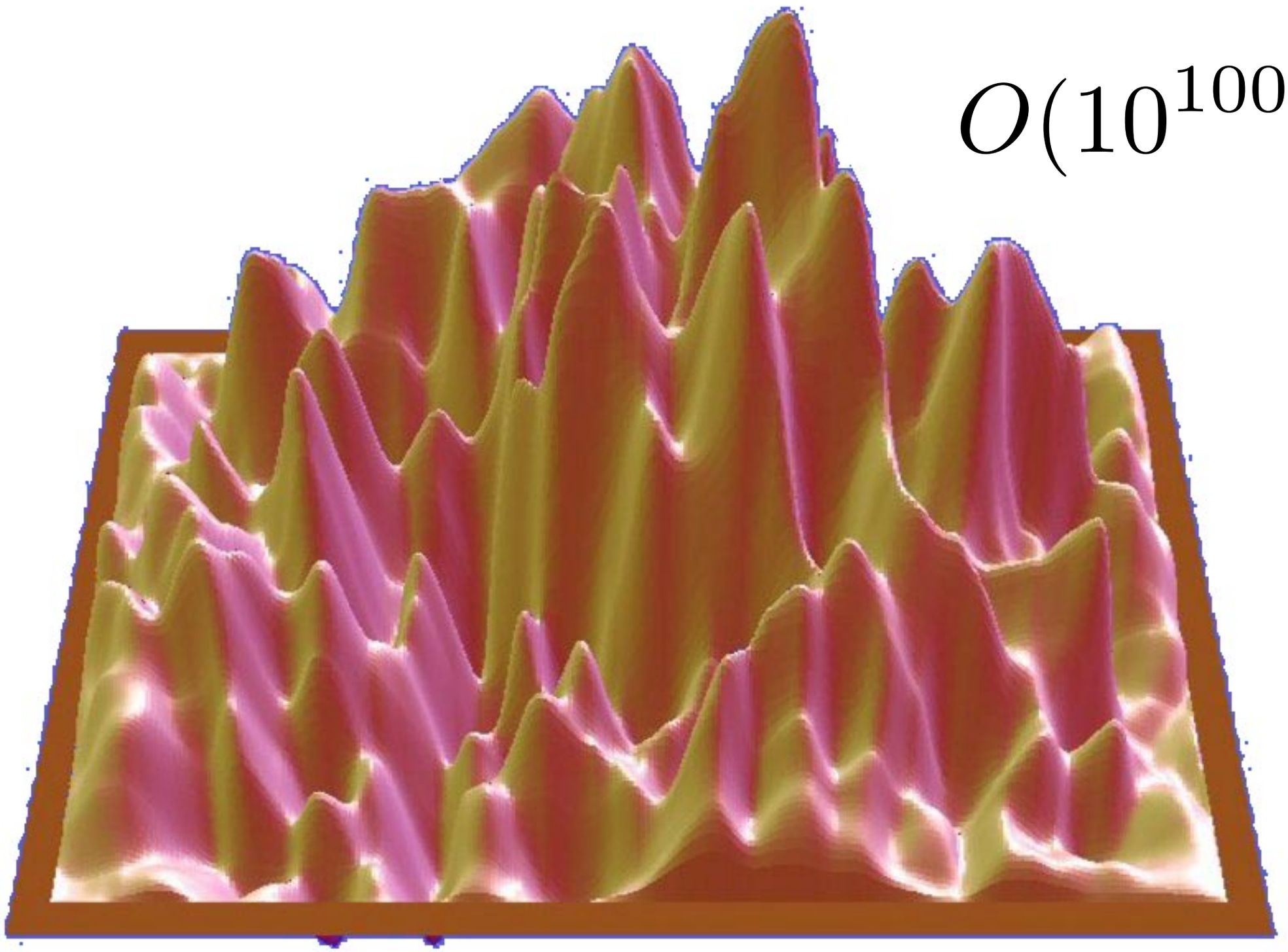
> Then the cosmological constant. it is not understood. I once
> planned to write a paper entitled: "200 wrong theories for the
> cosmological constant", with 200 references. Needless to say that
> most of these theories are also mutually exclusive. The right theory
> has not been found. You are wellcome to provide for the 201st
> reference in my paper.

’t Hooftのメール

超弦理論・量子重力は
宇宙定数について
何を教えるのか？

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）

もう一つの考え方：
沼地予想と不可能性

2018年6月,
Strings 2018, 沖縄
Auditorium
Strings 2018

"… this bound forbids de Sitter vacua"

Cornell University

the

arXiv.org > hep-th > arXiv:1806.08362

Search or A

(Help | Advanc

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)

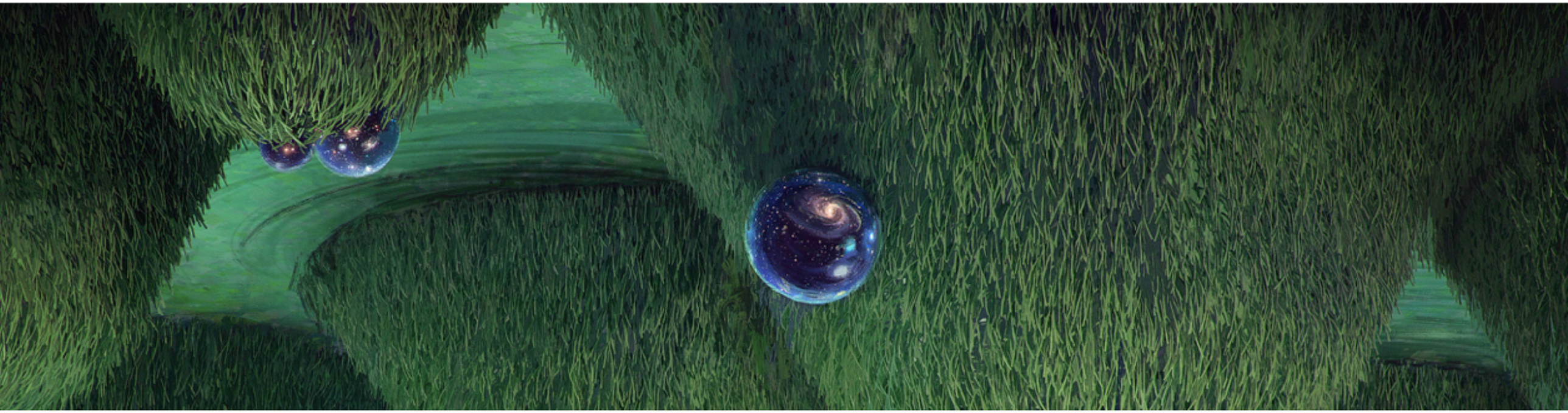
Which authors of this paper are endorsers? | Disable MathJax (What is MathJax?)

THEORETICAL PHYSICS

Dark Energy May Be Incompatible With String Theory

130

A controversial new paper argues that universes with dark energy profiles like ours do not exist in the "landscape" of universes allowed by string theory.



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 أعرض هذا باللغة العربية

LATEST NEWS

Sing Solo For Higher Fide

Are Some Fruits More

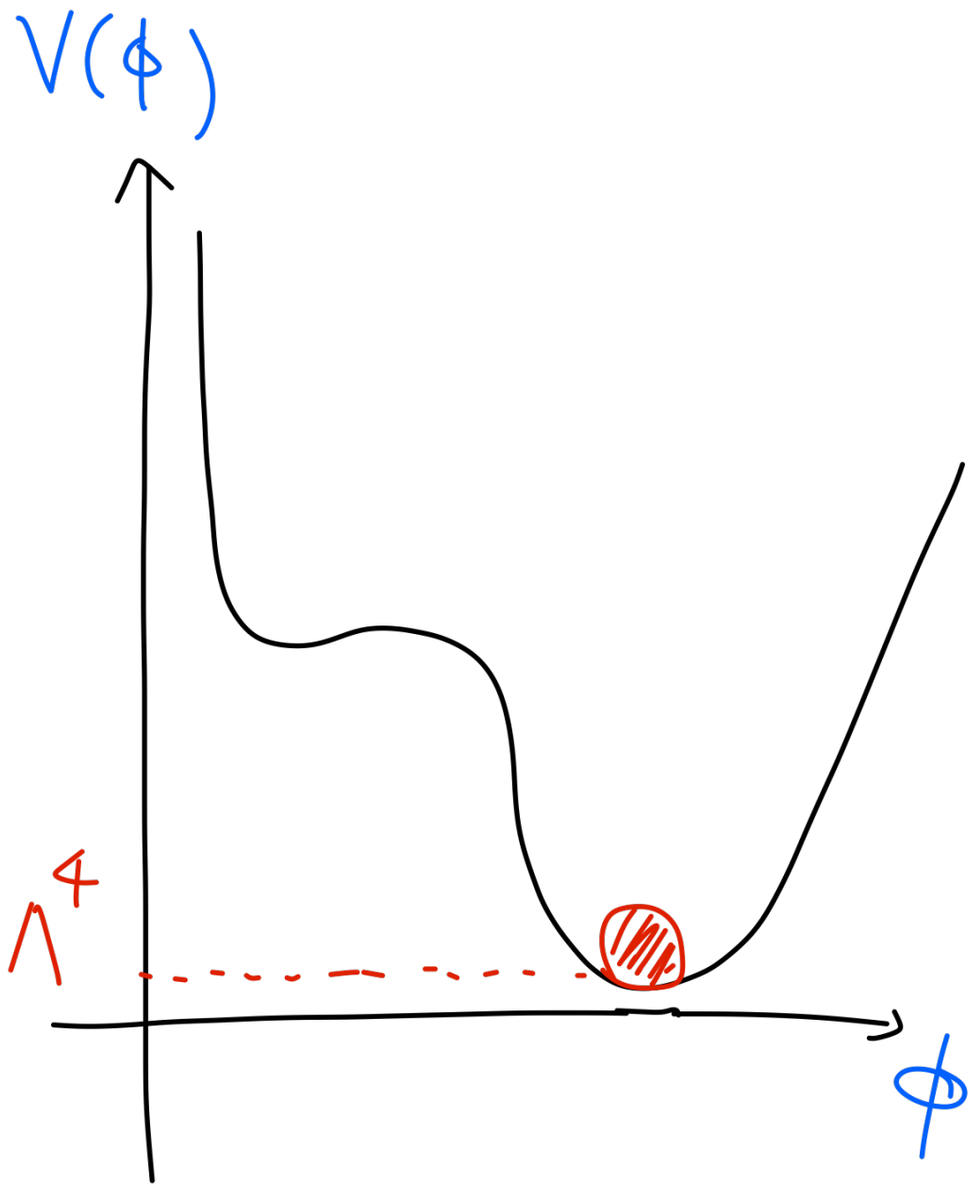
ド・ジッター沼地予想

$$M_{\rm Pl}|\nabla V| \geq c\,V$$

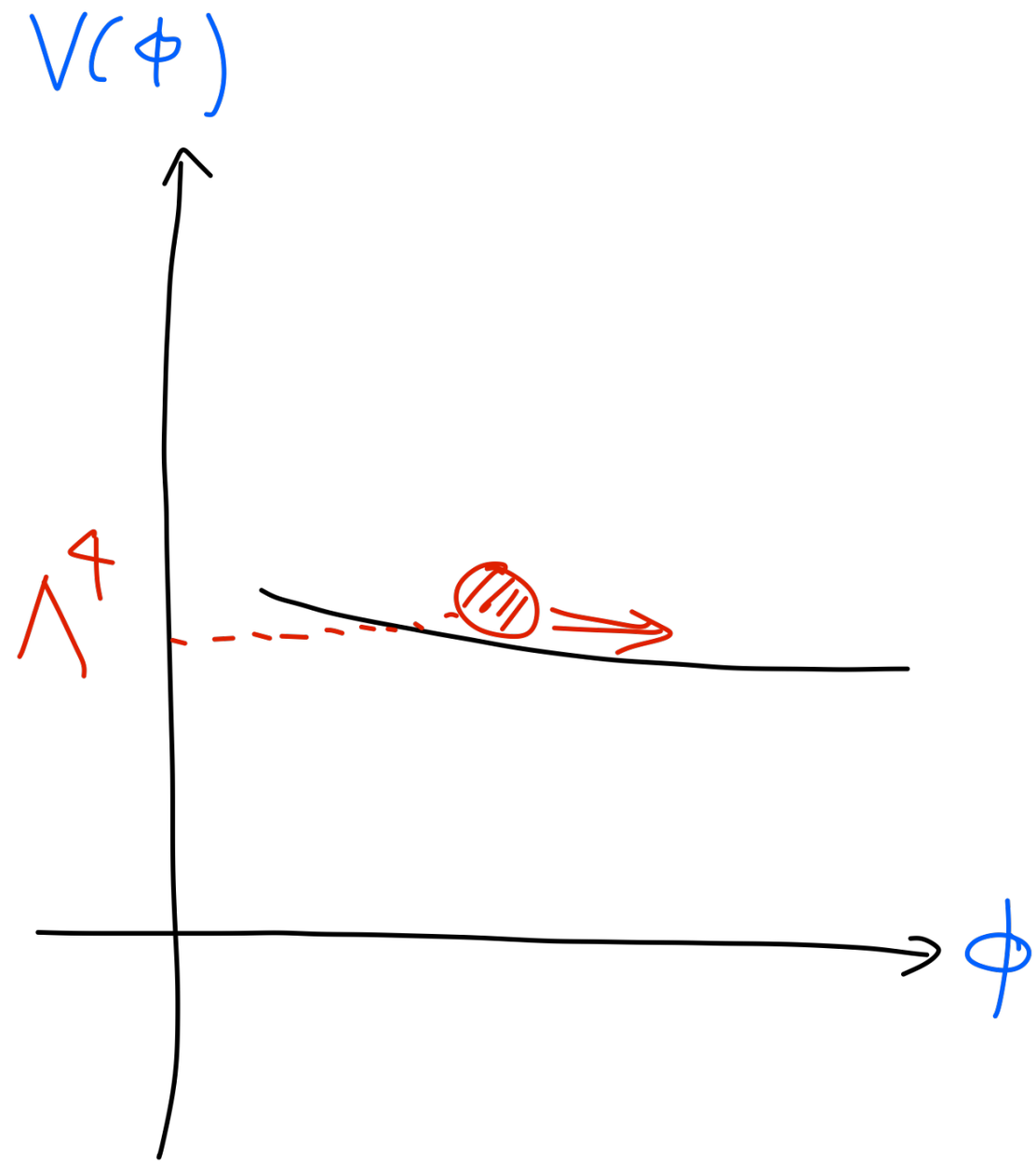
特に、（準）安定な正の宇宙定数をもつ宇宙を禁止する：

$$\nabla V = 0, \quad V > 0$$

宇宙「定数」



時間変化する
宇宙定数



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

Report number: IPMU-18-0143

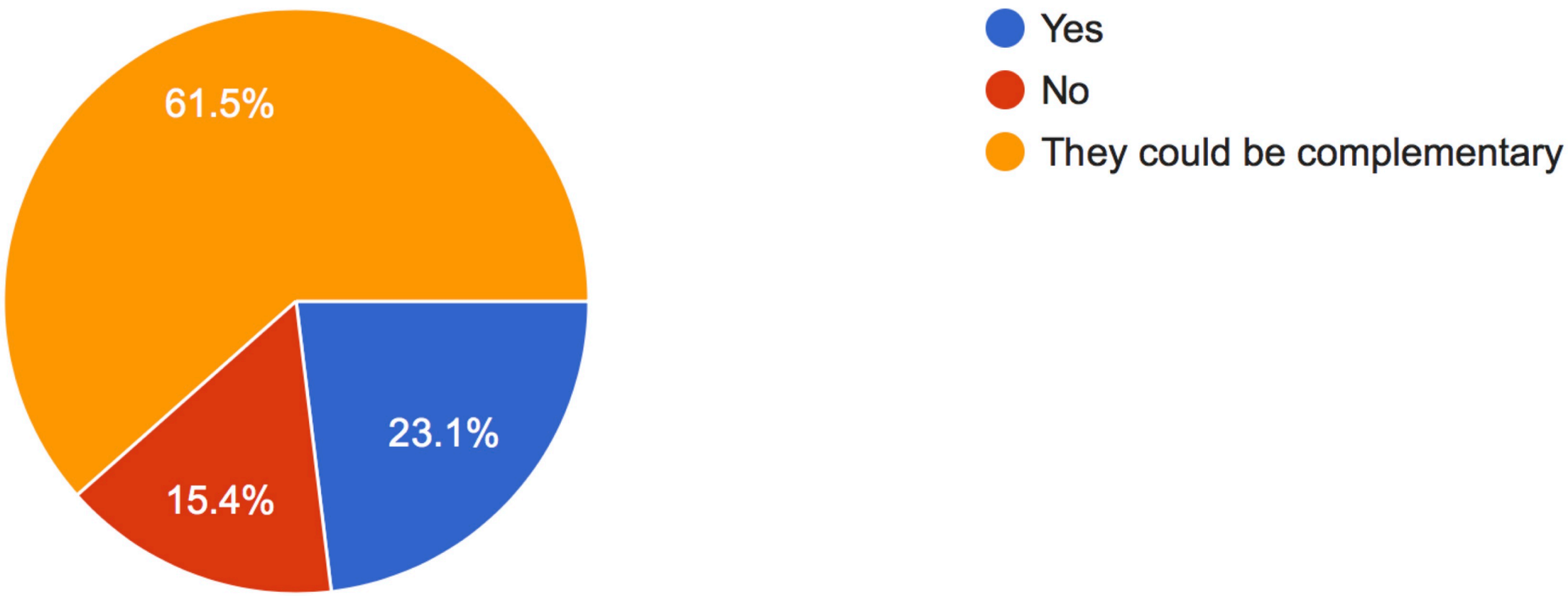
修正版の予想？？

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

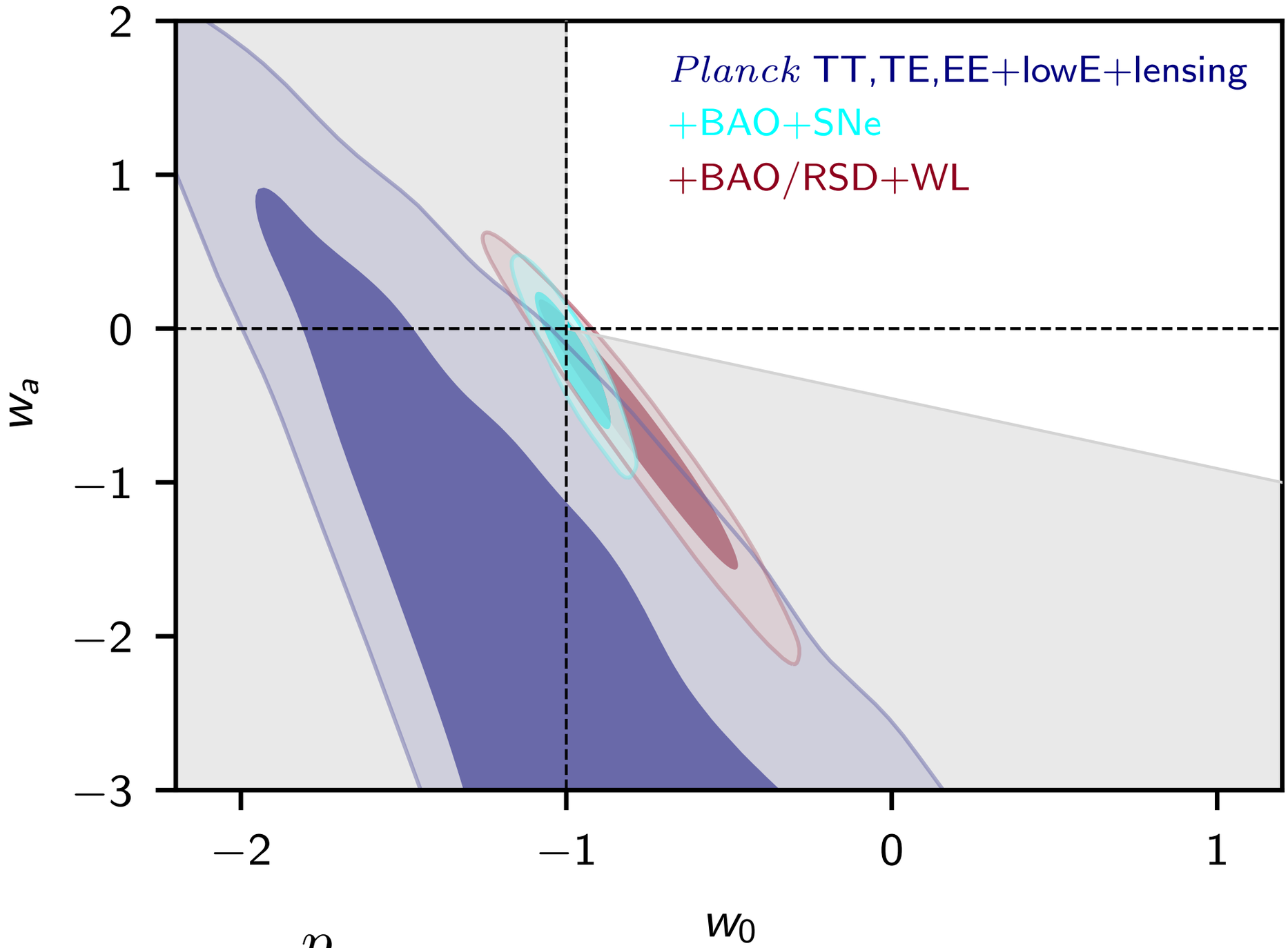
Do you believe that the swampland program could be a way to avoid anthropic arguments in string theory?

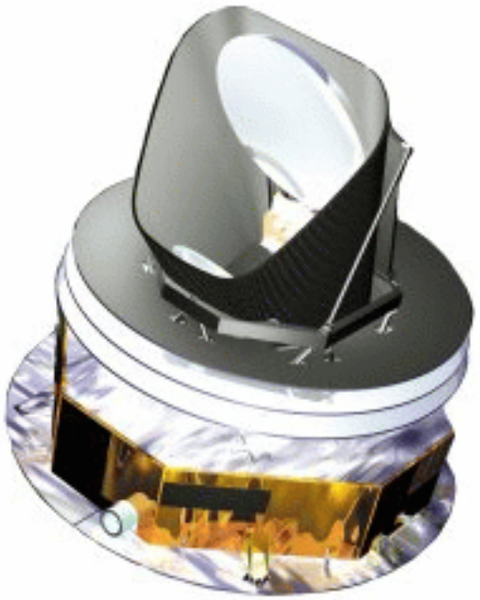
52 responses



もちろん、観測からの制限も重要

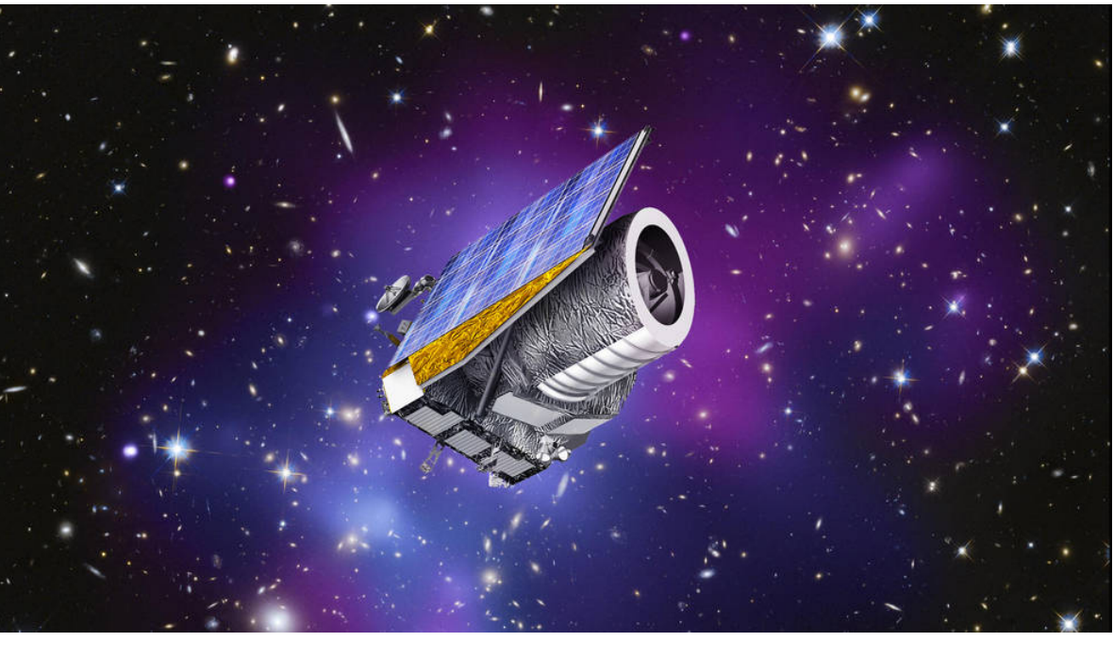
Planck 2018



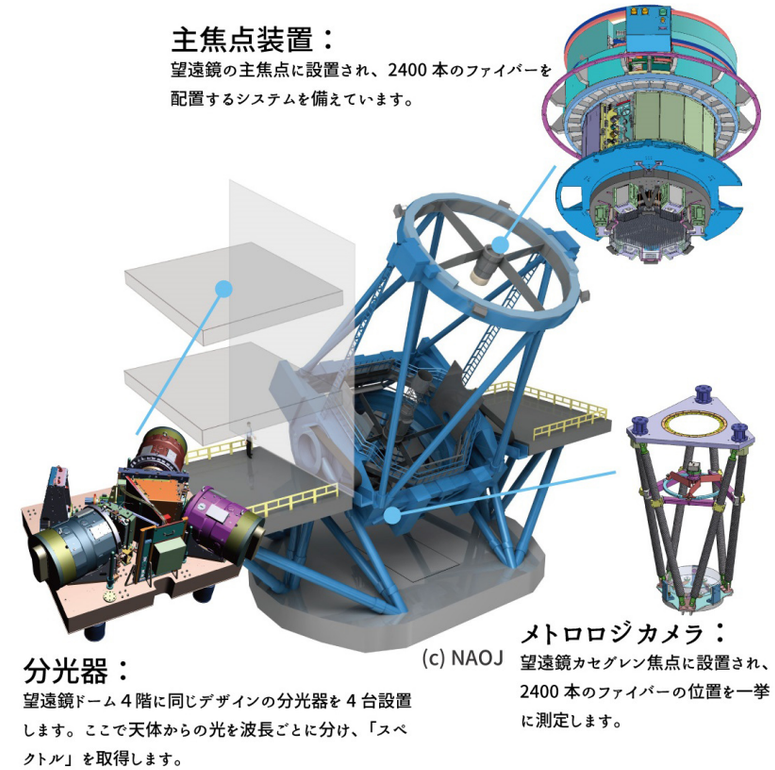


$$\frac{p}{\rho} = w(a) = w_0 + (1-a)w_a$$

将来の観測計画

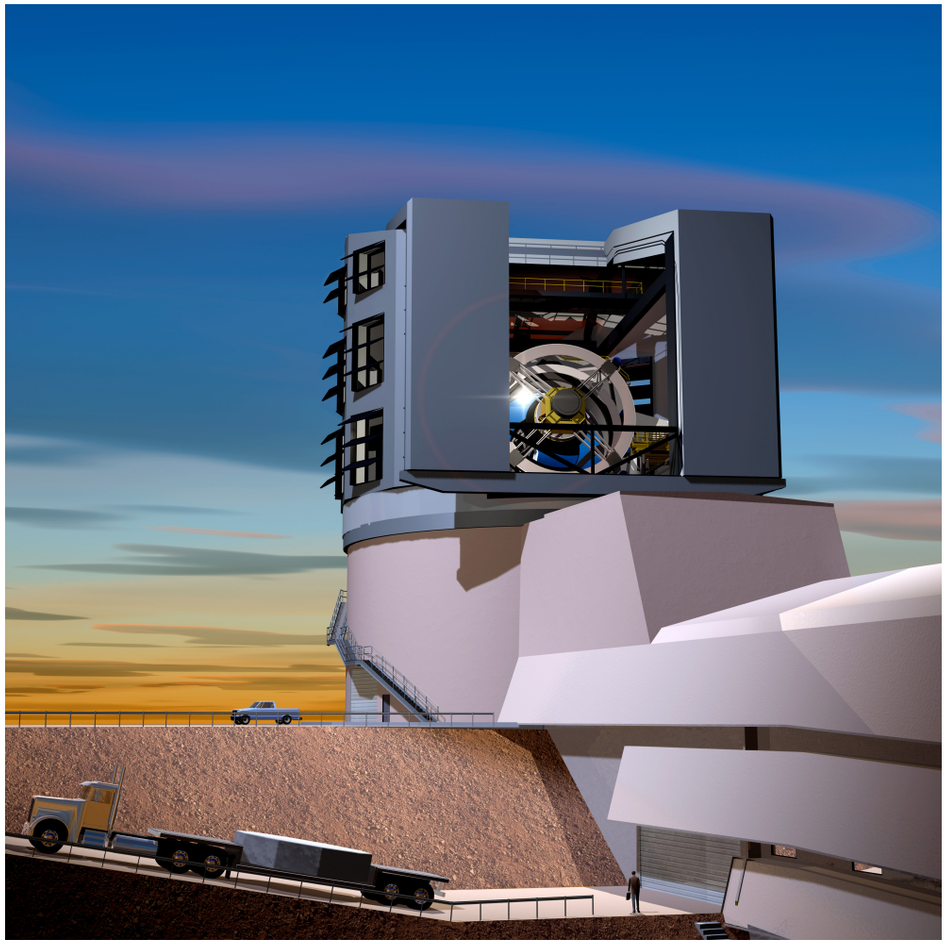


Euclid



Subaru-PFS

LSST



WFIRST

主人公

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

Book by Close

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：

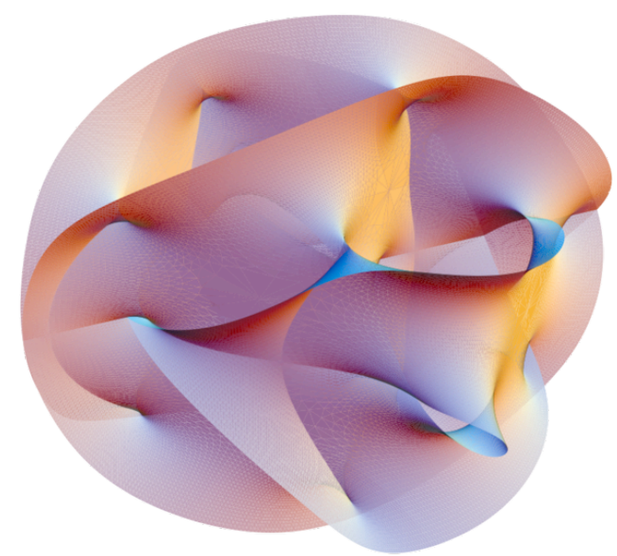
量子重力の不可能性を示唆

実験との

比較・制限

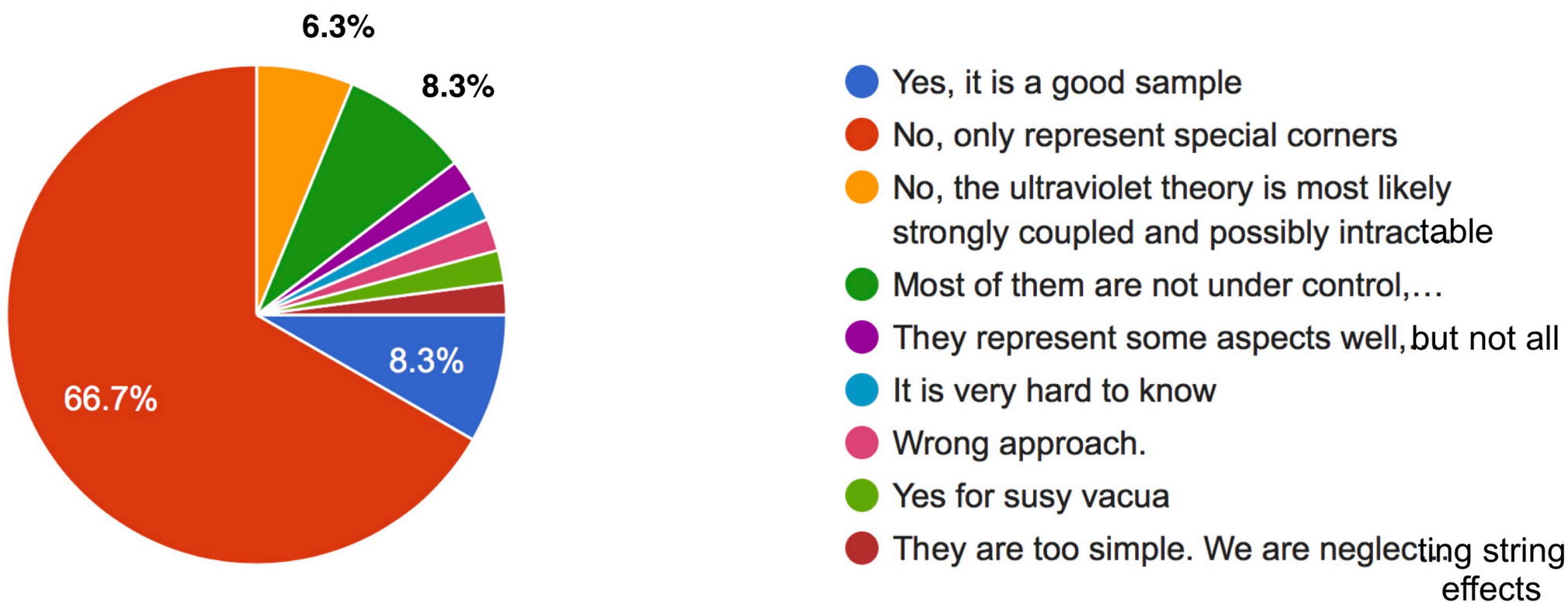
量子重力の

理論の進歩



Do you believe that the 4d string/M-theory/F-theory vacua constructed so far are representative of the landscape of the full theory?

48 responses



既知の超弦理論の真空は“氷山の一角”？

21世紀は量子重力にとって

特別な時代！