

我々の宇宙のための 超弦理論

山崎雅人



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

2023年12月22日, KEK

String theory is - - - -

"part of 21-st century physics that fell
by chance into the 20-th century"

(Daniele Amati, 1970s)

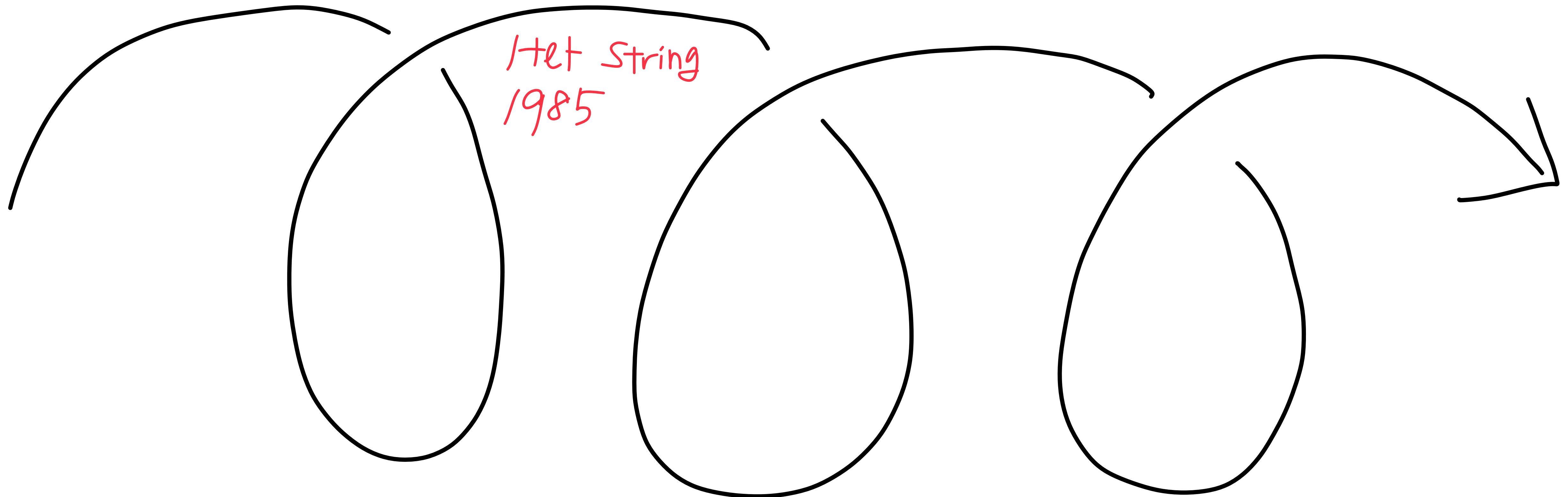
Veneziano
1968

Green
Schwarz
1984

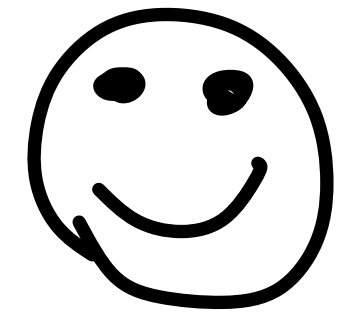
M-theory
1995

AdS/CFT
1998

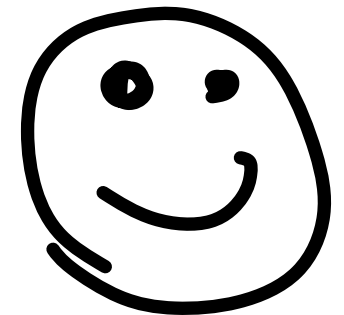
Ryu
Takayangi
2006



超弦理論の成果の例



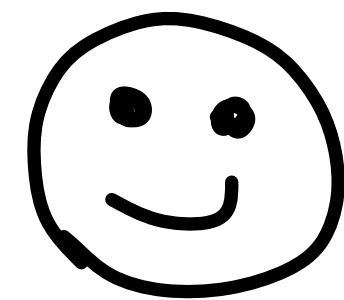
ブラックホールのエントロピーを再現



場の理論の非摂動効果の深い理解を与える



ホログラフィーの概念の幅広い影響

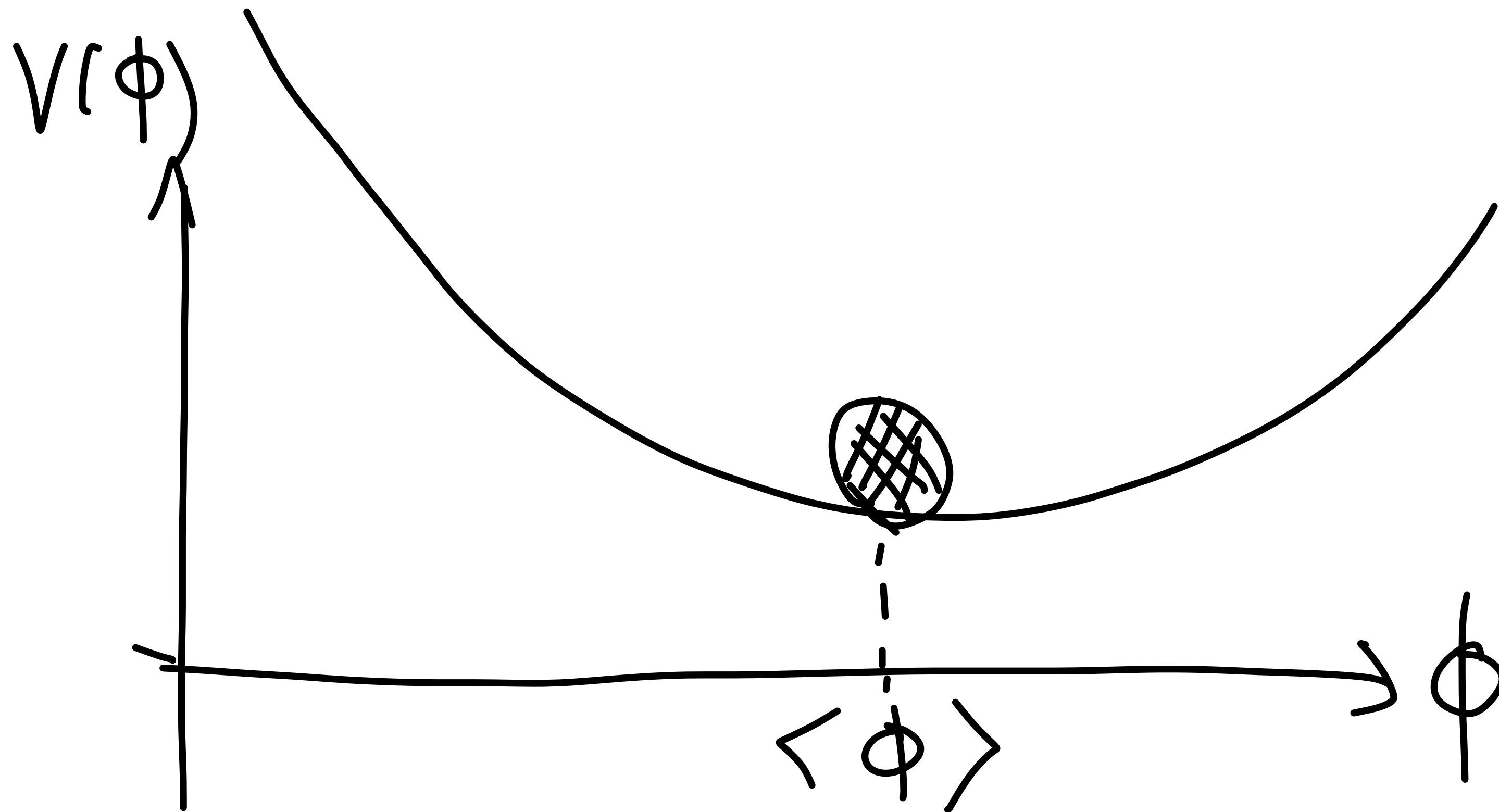


新しい数学の創出

超弦理論からどんな宇宙が期待されるのか？



超弦理論には「free parameterがない」



パラメータの値は力学的に決まる

有効場の理論の考えはmisleading??

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \frac{\mathcal{O}_n}{\Lambda^{\Delta(n)+4}}$$

higher-dim. operator
"BSM"

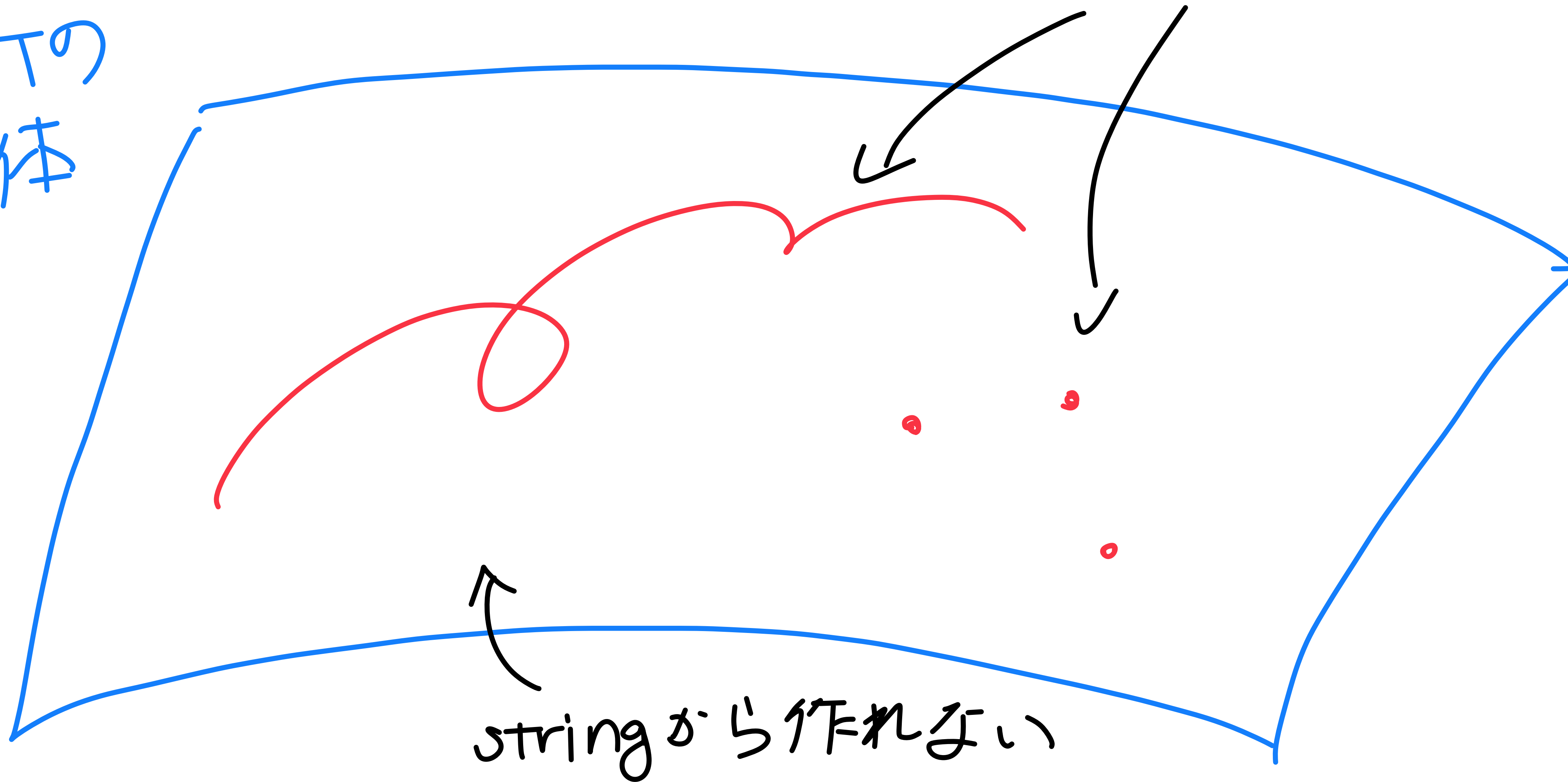
∞ の係数

しかしこれらは勝手には選べない

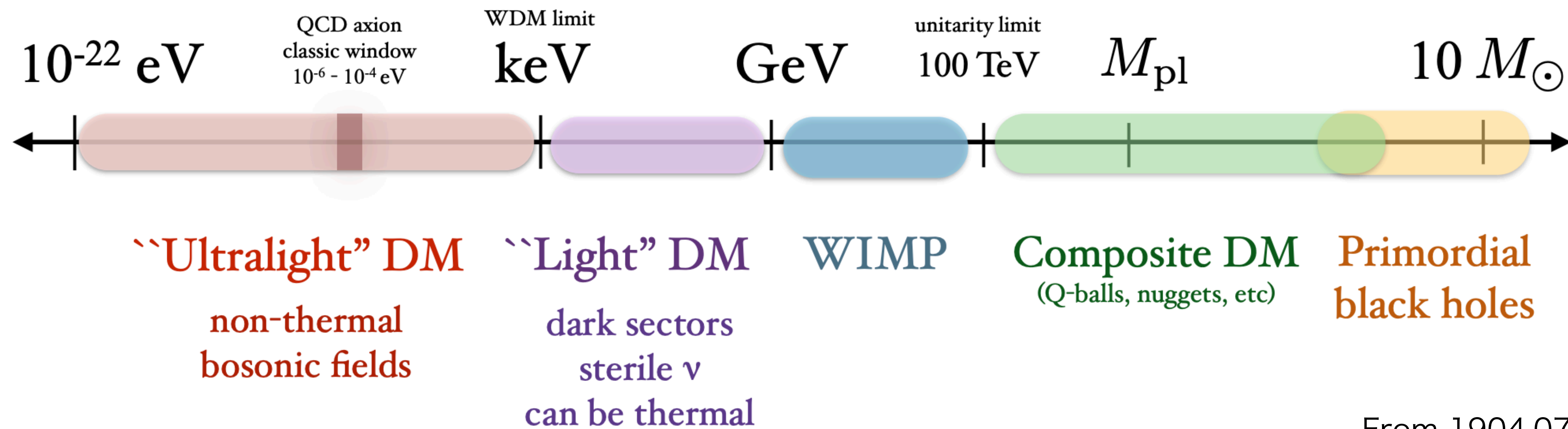
**何がNatural・可能であるかは
有効場の理論と超弦理論で異なる**

EFTの
全体

stringからつくれる



「ほとんど全て」のEFTは超弦理論で実現できない？



From 1904.07915

有効場の理論を超えた指導原理が今こそ必要

超弦理論の出番？

「理論屋にも一流と二流がいて、やっかいなことに、二流が一流の50倍いる。見分けは簡単で、自分は何でもわかっていると思いつ込んでいるのが、二流の理論屋。つまり、自分の理論の適用限界を意識していない。一流の理論屋は、自分の理論の適用限界を知って、それ以外のことを自分は知らないと認める。」

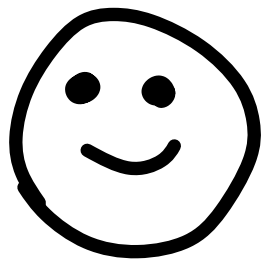
(小柴さん)

1980年代の期待?

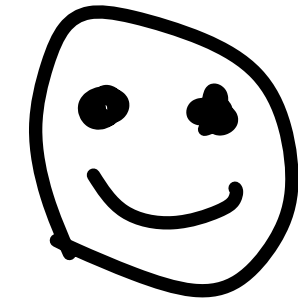
Heterotic

$E_8 \times E_8$

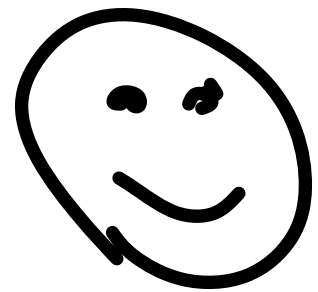
\rightsquigarrow axion (B-field)



SUSY GUT!



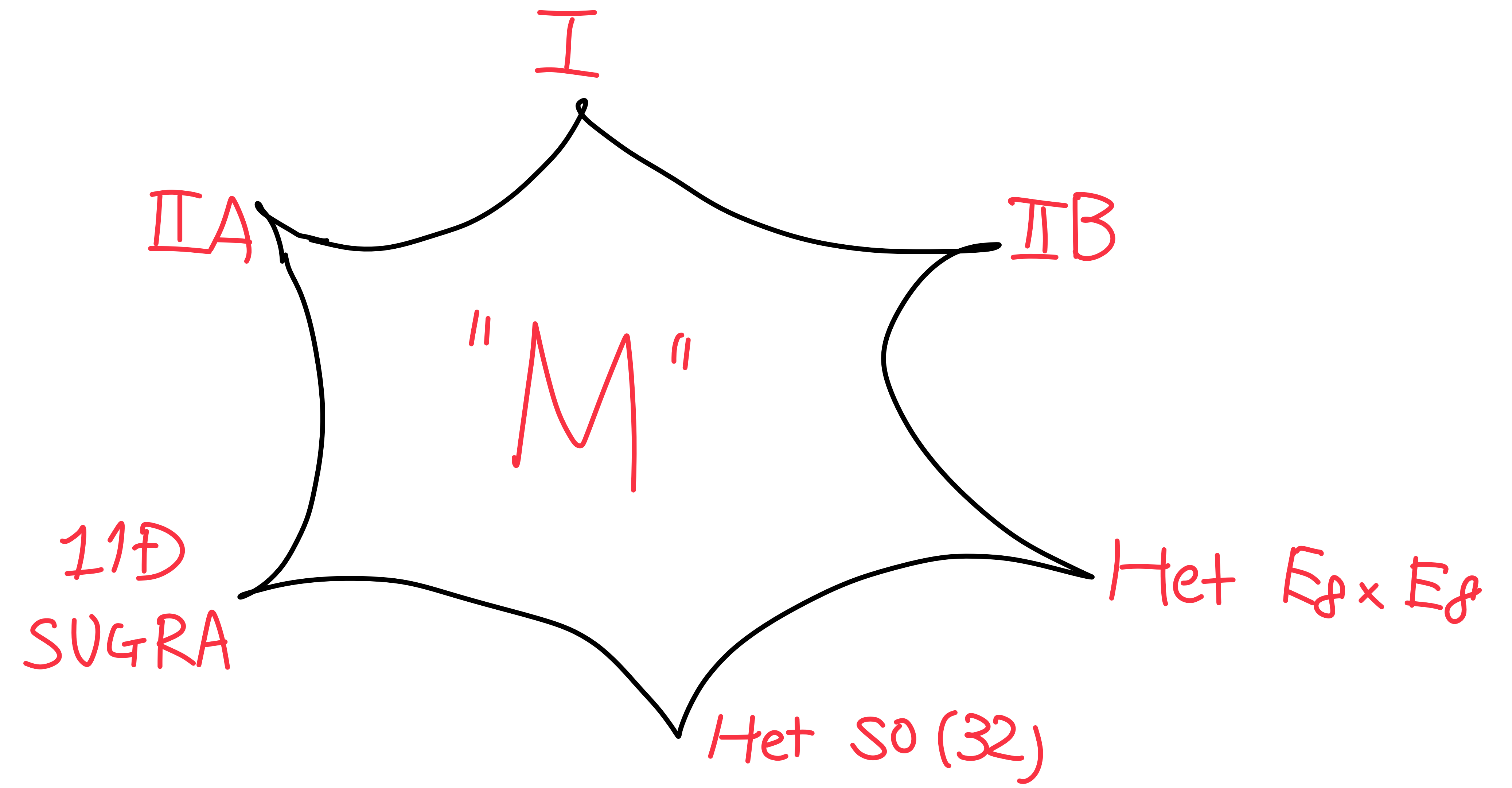
hidden sector



$E_8 \rightarrow SU(5) \rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1)$
MSSM

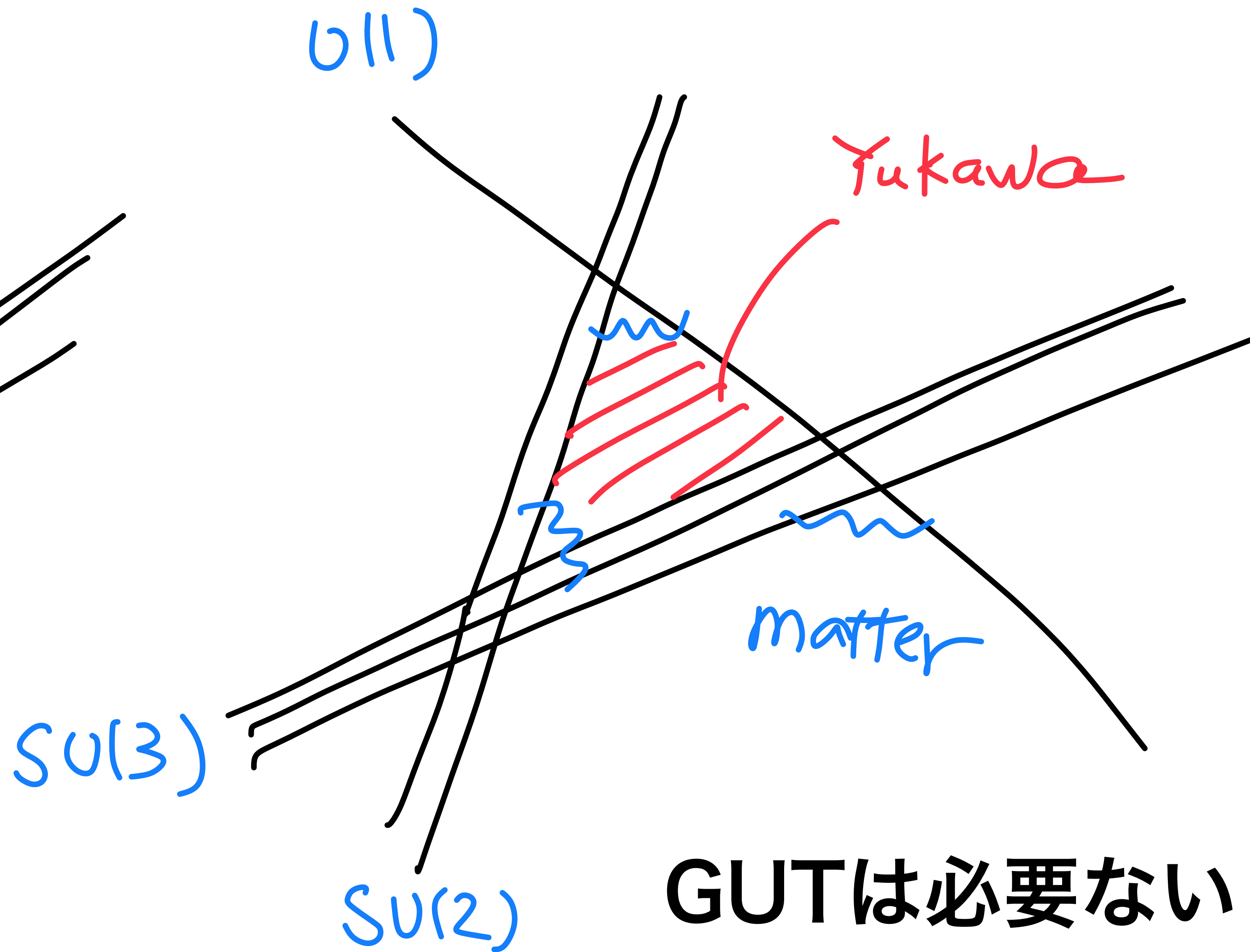
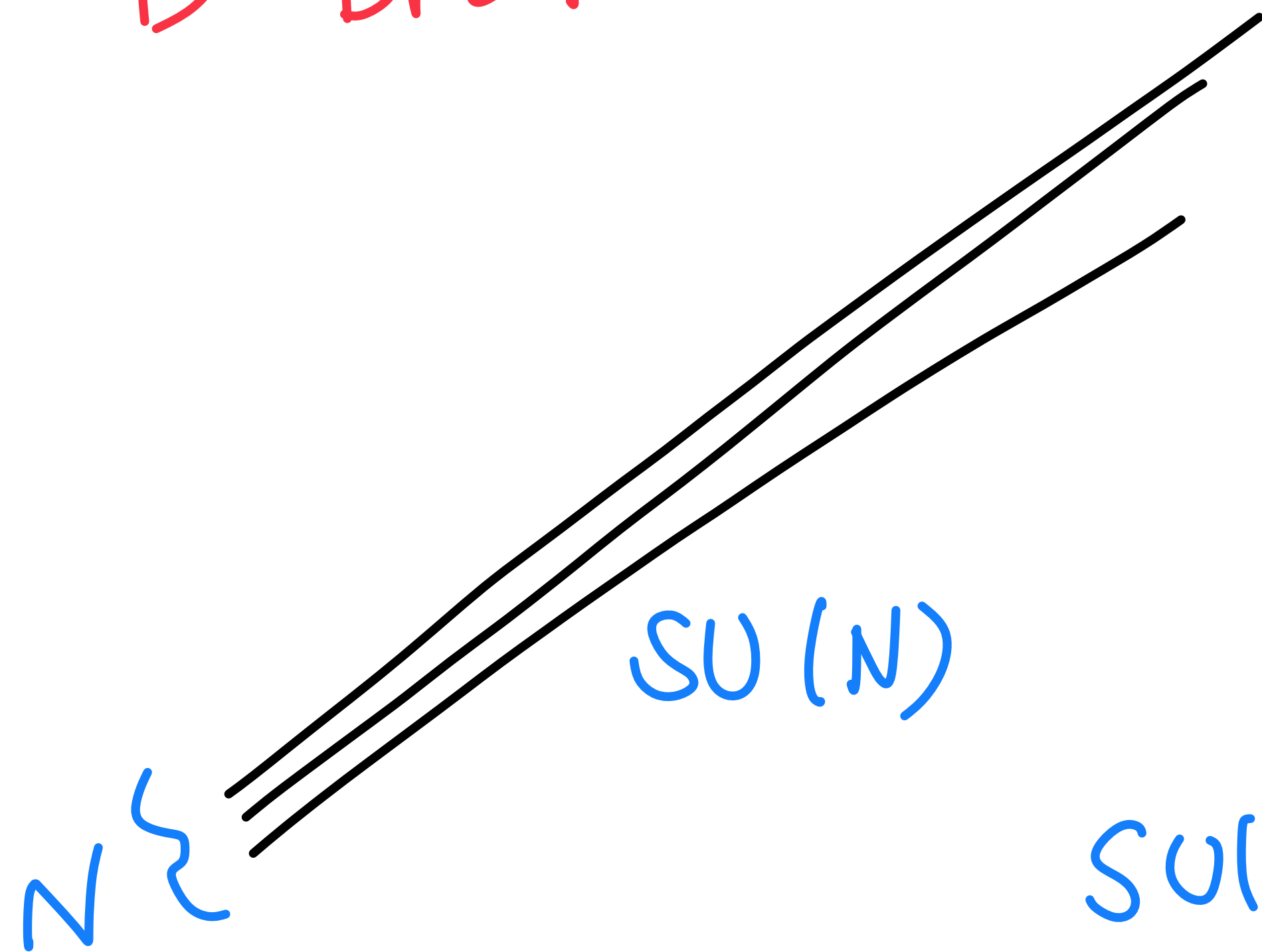
WIMP DM, ~~SUSY~~, ...

M-theory "democracy"

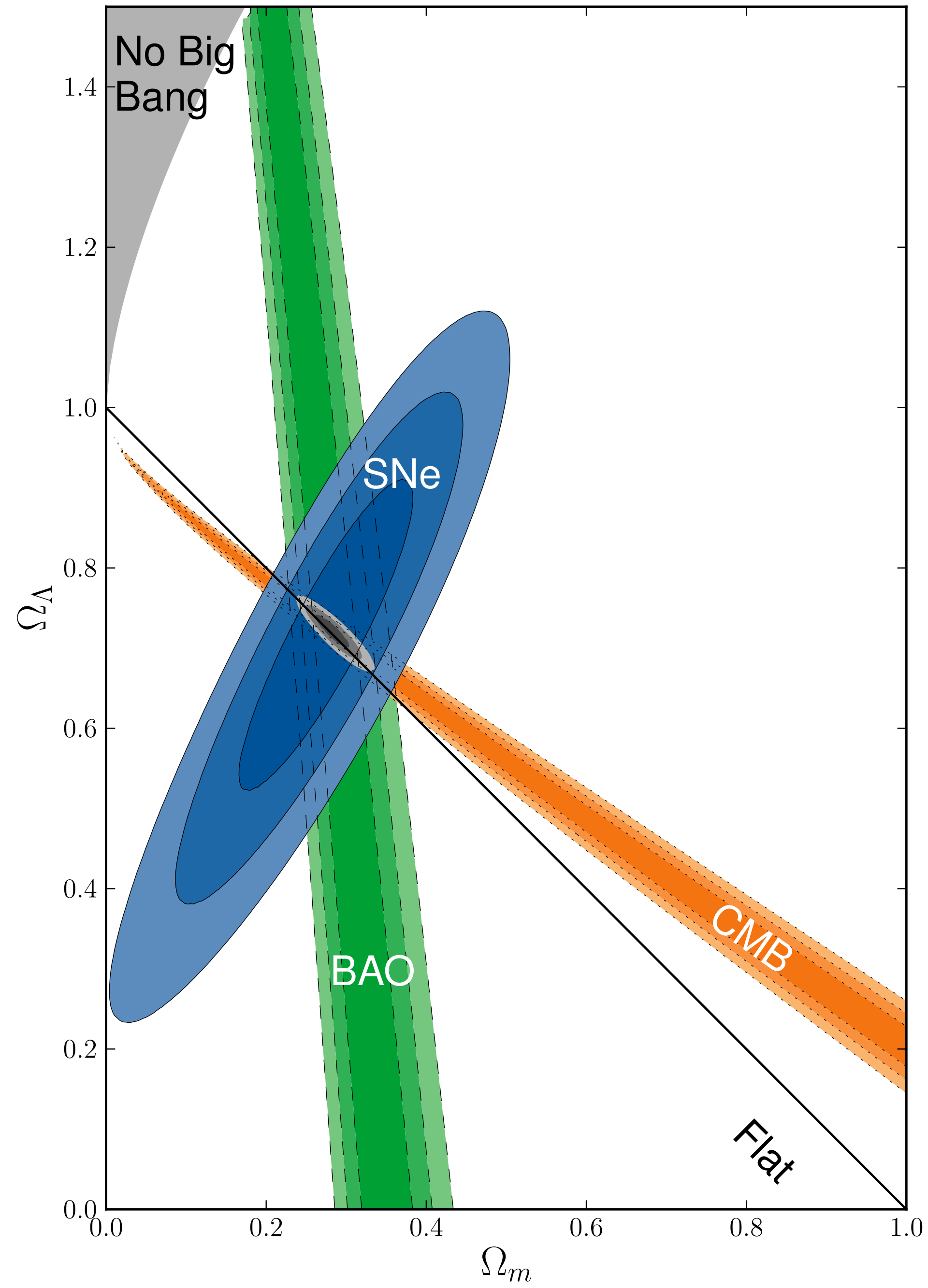


Type II:

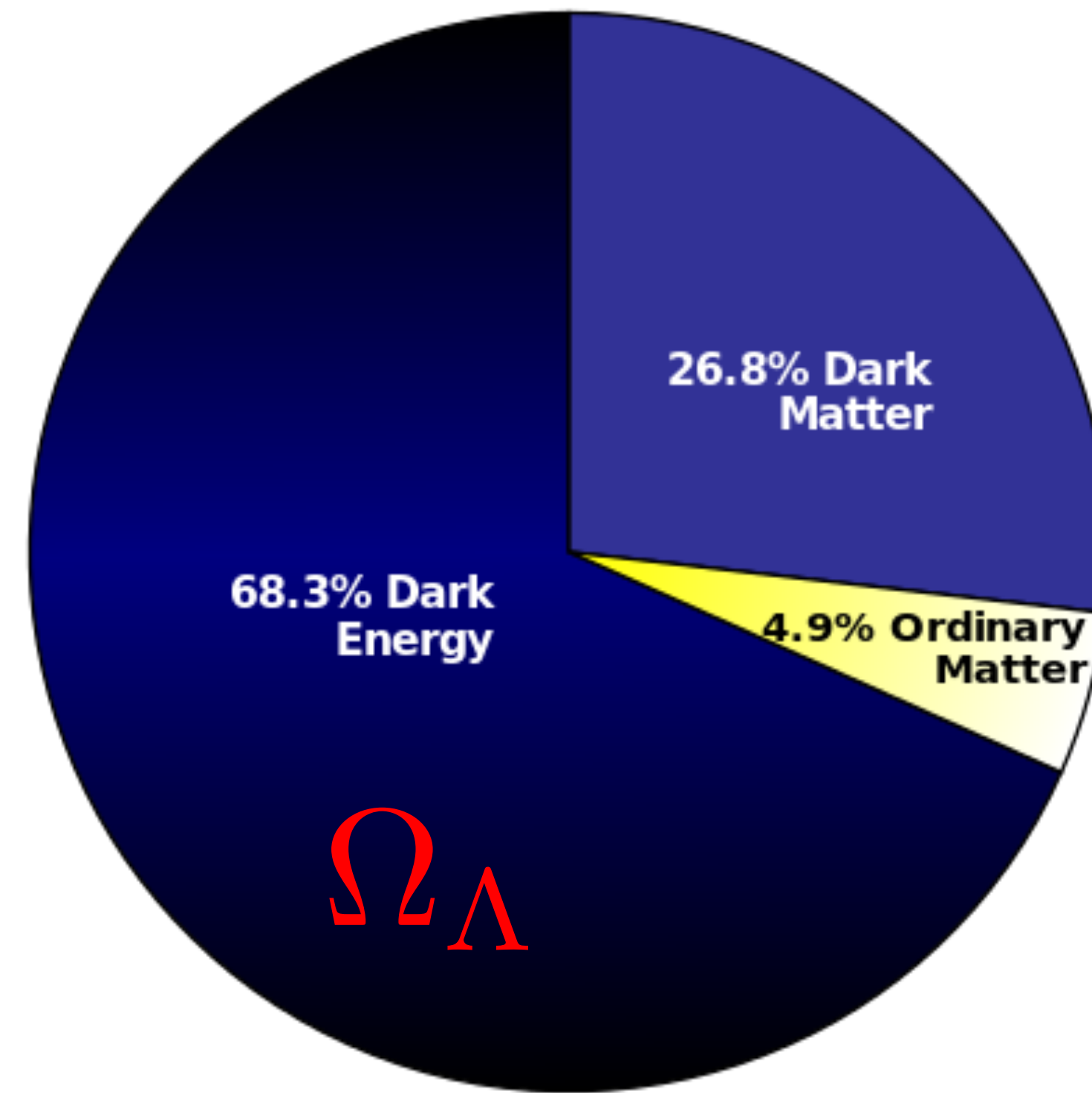
D-branes



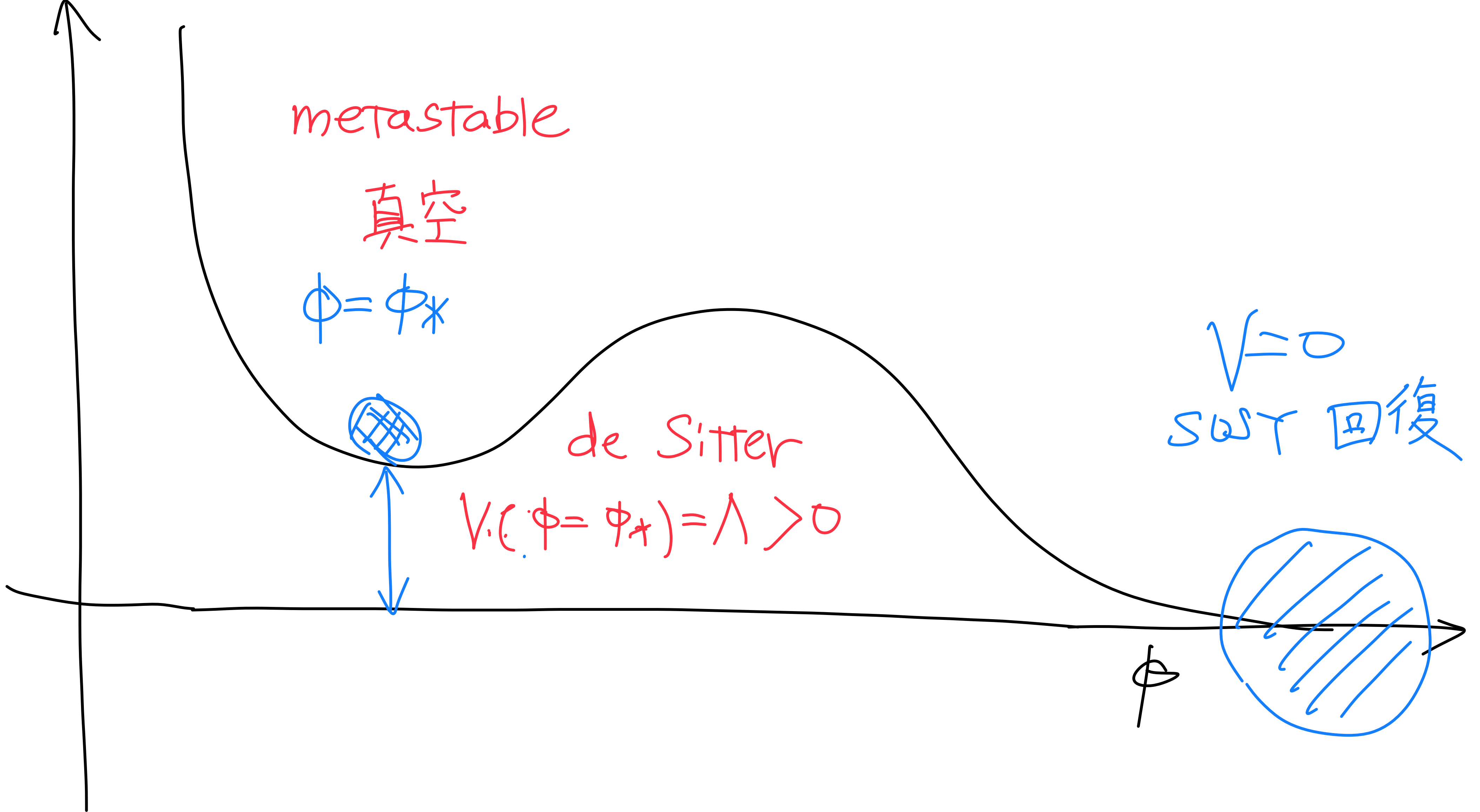
GUTは必要ない？



$\Lambda > 0!$



$V(\phi)$



metastable

真空

$\phi = \phi_*$

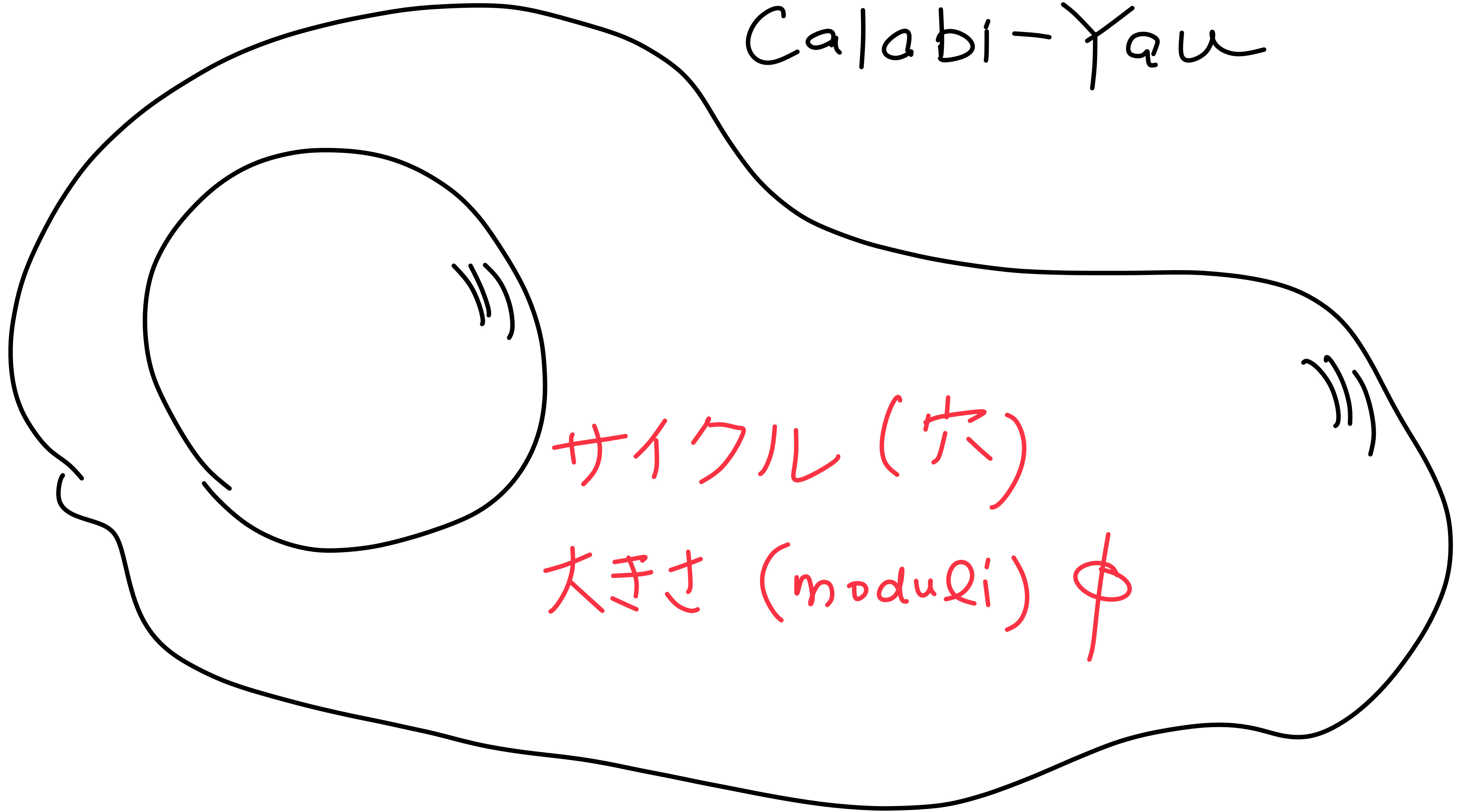
de Sitter

$V(\phi = \phi_*) = \Lambda > 0$

$V=0$
SUSY 回復

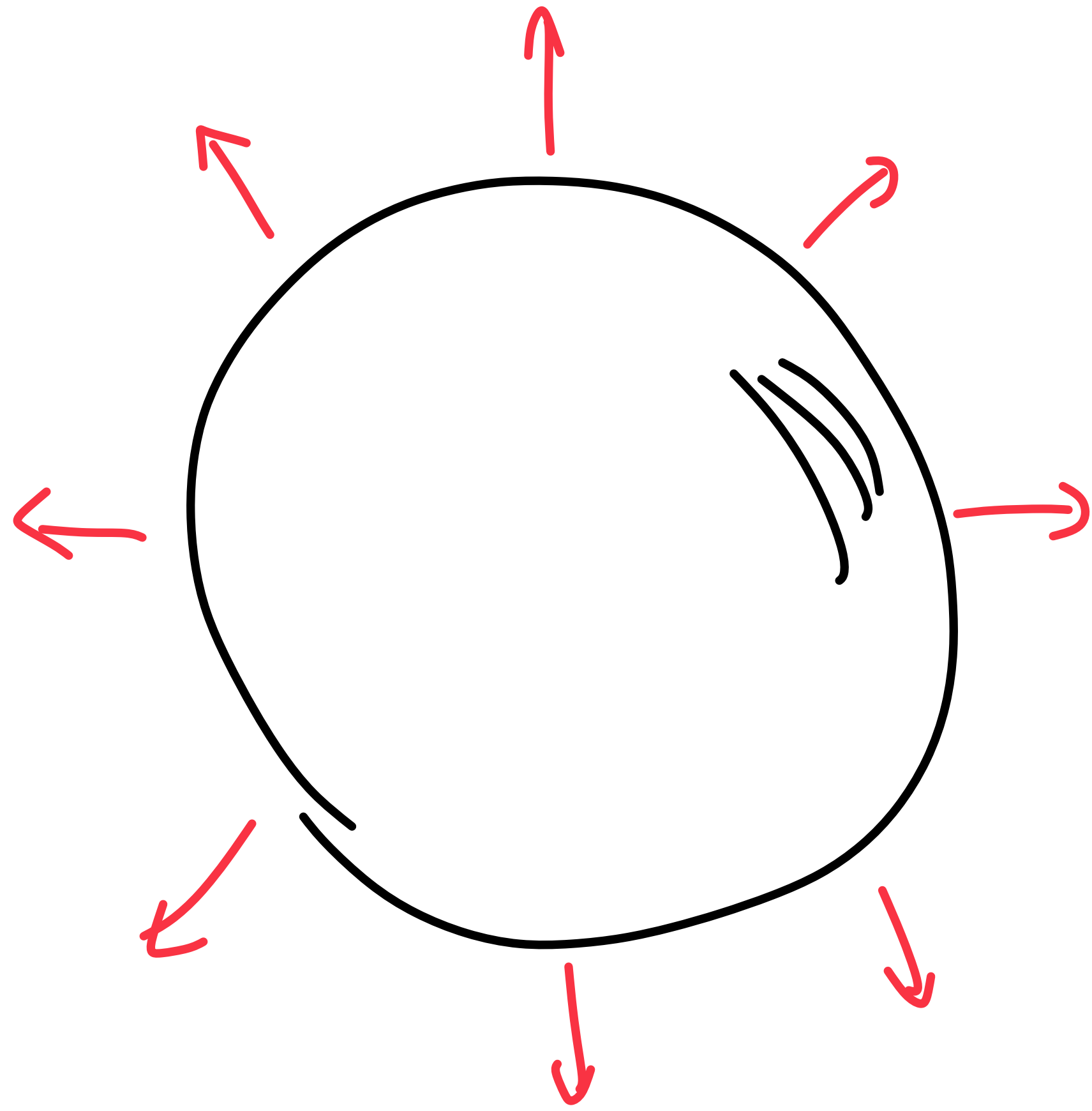
ϕ

Calabi-Yau



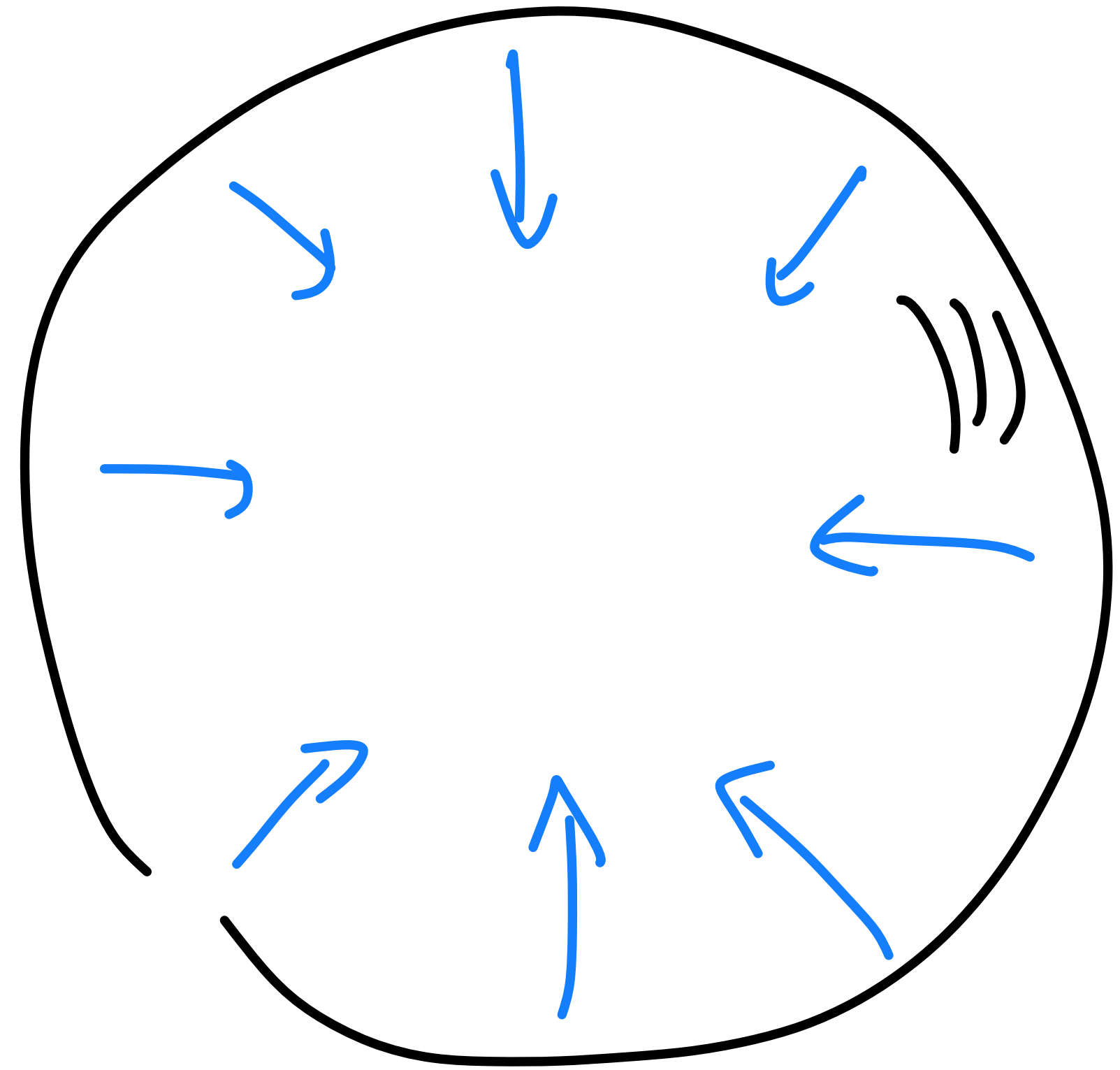
サイクル (穴)

大きさ (moduli) ϕ



magnetic flux

($n \in \mathbb{Z}$: "D-braneの枚数")



重力

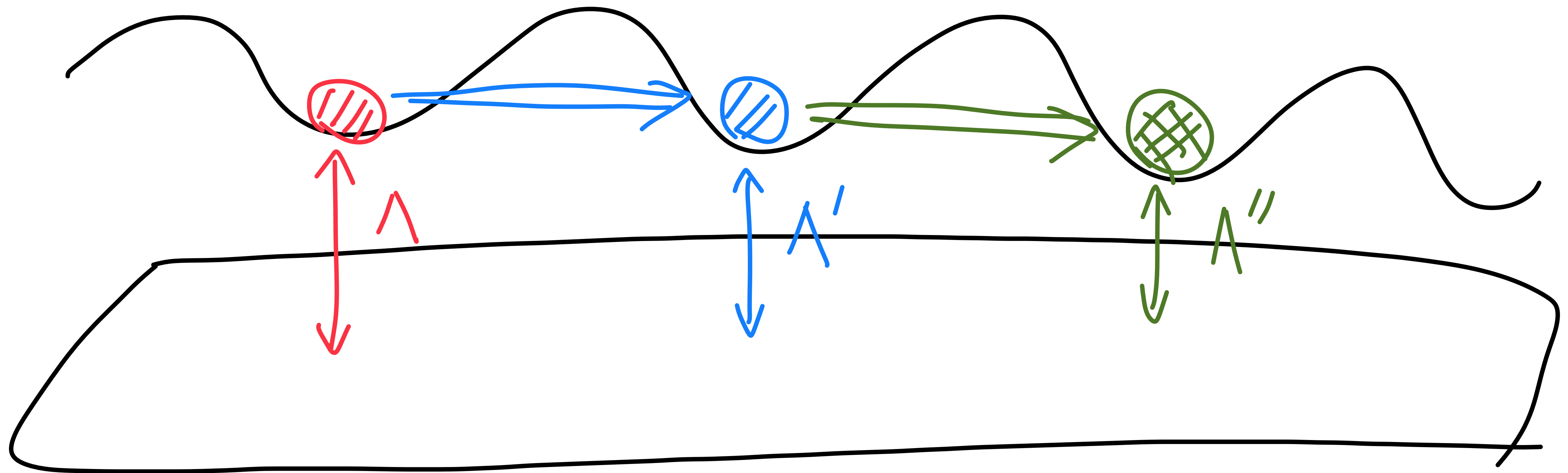
Flux vacua

- # cycles $\sim \mathcal{O}(100)$
- 各 cycle に 10^4 まで flux が入るとすると

$10^{\mathcal{O}(400)}$ 通り? ,

[10^{272000} from F-theory? Taylor-Wang '15]

マルチバース？人間原理？



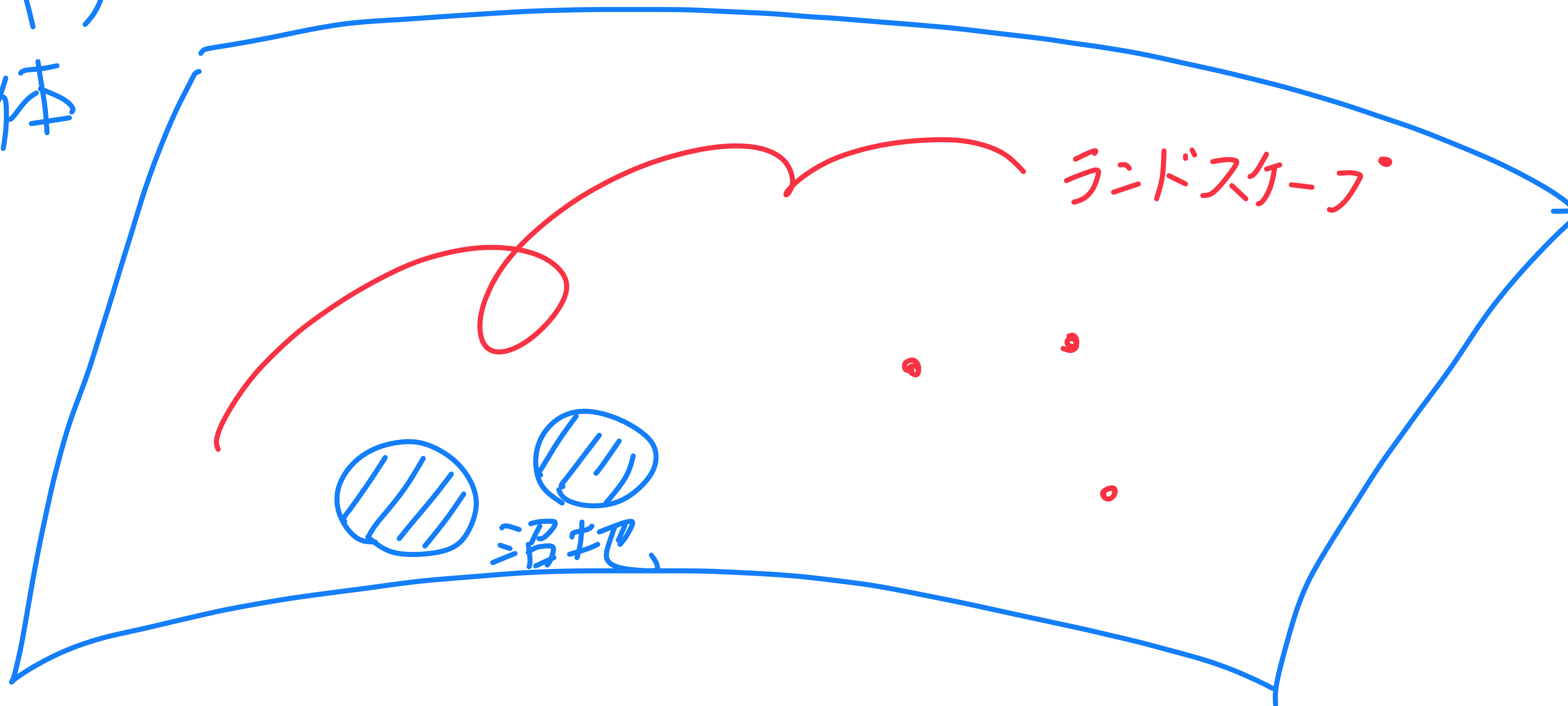
ランドスケープ (landscape)



スワンプランド、沼地 (swampland)



EFTの
全体



ほとんど全て沼地？論争は続いている

超弦理論を動機にした研究の例

「量子重力に大域対称性は存在しない」

$$\phi \leftrightarrow -\phi \quad \mathbb{Z}_2 \text{ sym}$$

例：ダークマター

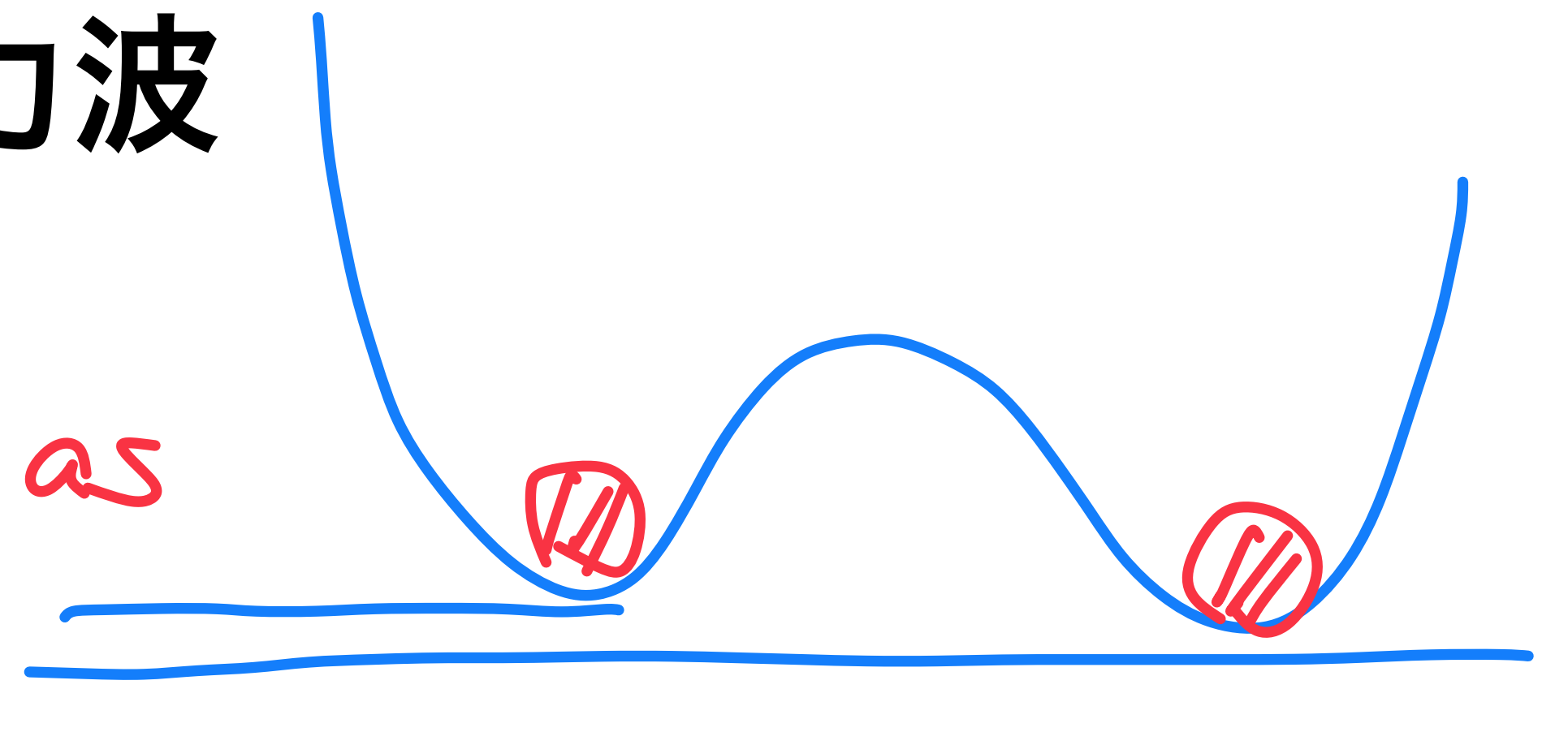
$$\mathcal{L} \supset \frac{\phi \partial_{SM}}{\Lambda_{QG}}$$

$$V = \lambda (\phi^2 - v^2)^2$$

例：ドメインウォールからの重力波

$$\mathcal{L} \supset \frac{\phi^5}{\Lambda_{QG}}$$

ΔV : bias
↕



摂動的な重力

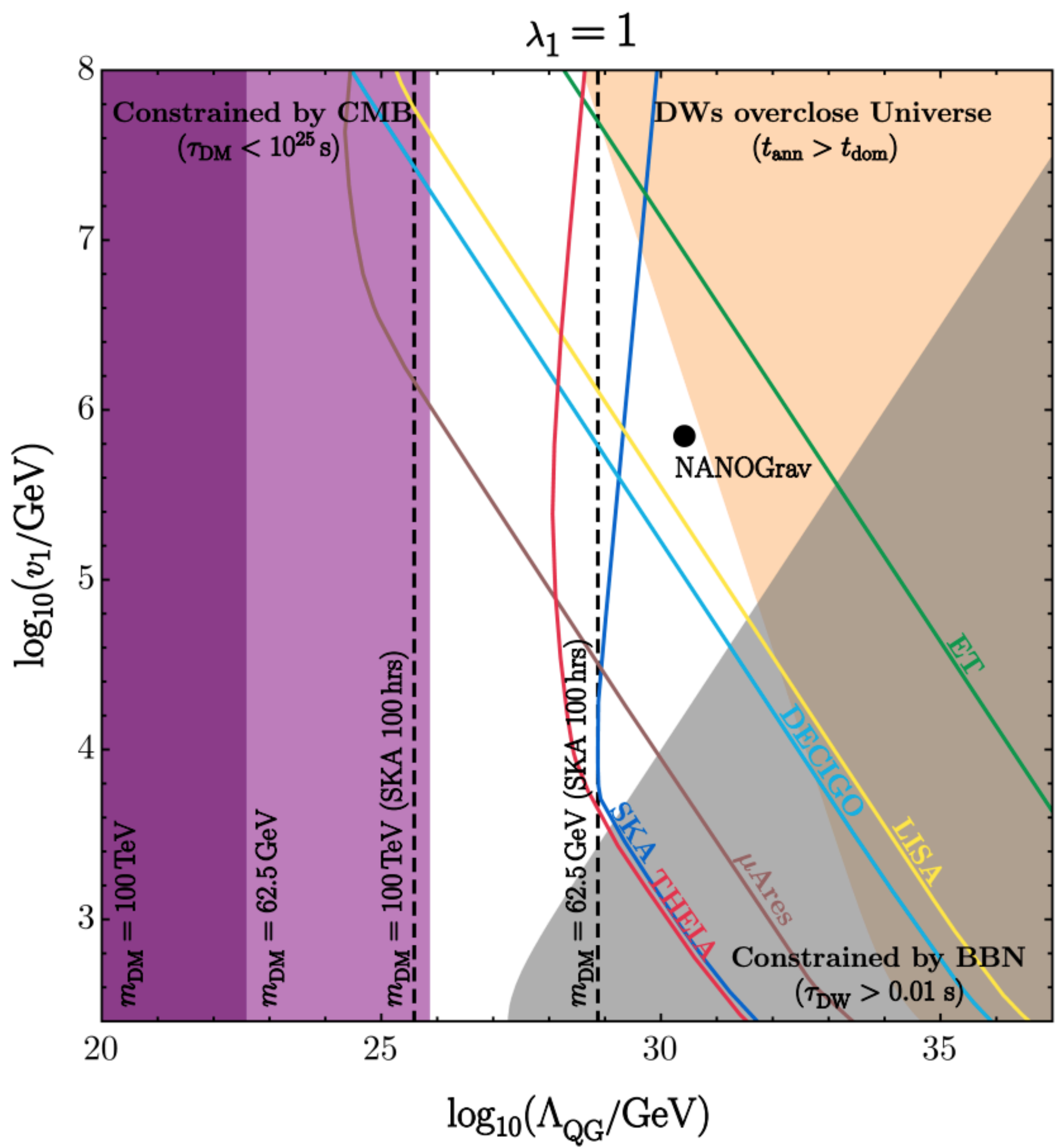
$$\mathcal{L} = \frac{1}{M_{pl}} \mathcal{O}_{dim-5}$$

非摂動的な重力

$$\mathcal{L} = \frac{e^{-S}}{M_{pl}} \mathcal{O}_{dim-5}$$

\uparrow
 Λ_{QG}

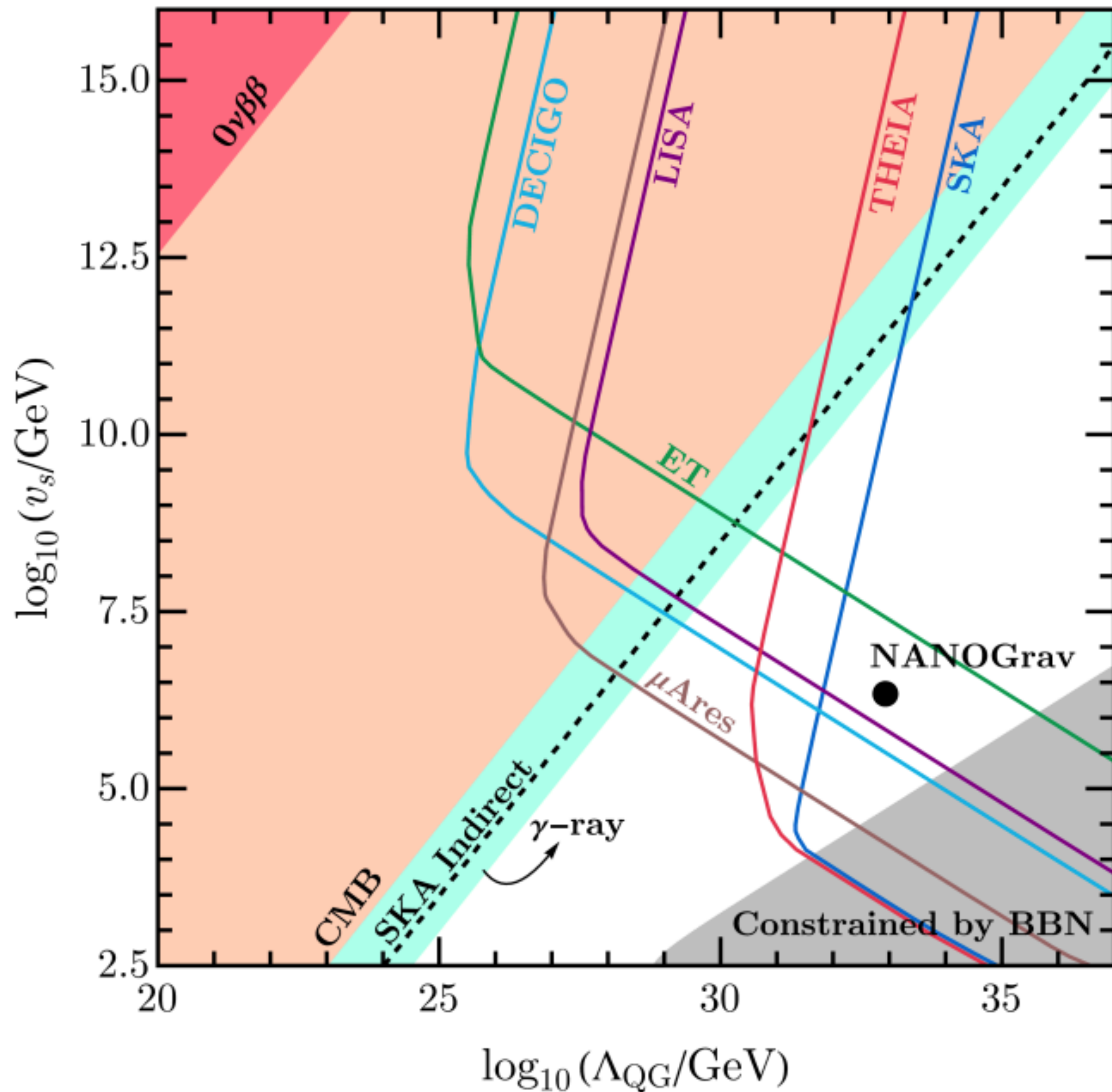
$$\Lambda_{QG} = M_{pl} e^S \gg M_{pl}$$



\mathbb{Z}_2 -breaking

- Scalar DM
 - GW from DW + bias
- $\Rightarrow \Lambda_{\text{QG}}$
- \mathbb{Z}_2 -breaking

$$m_{\text{DM}} = 1\text{GeV}$$



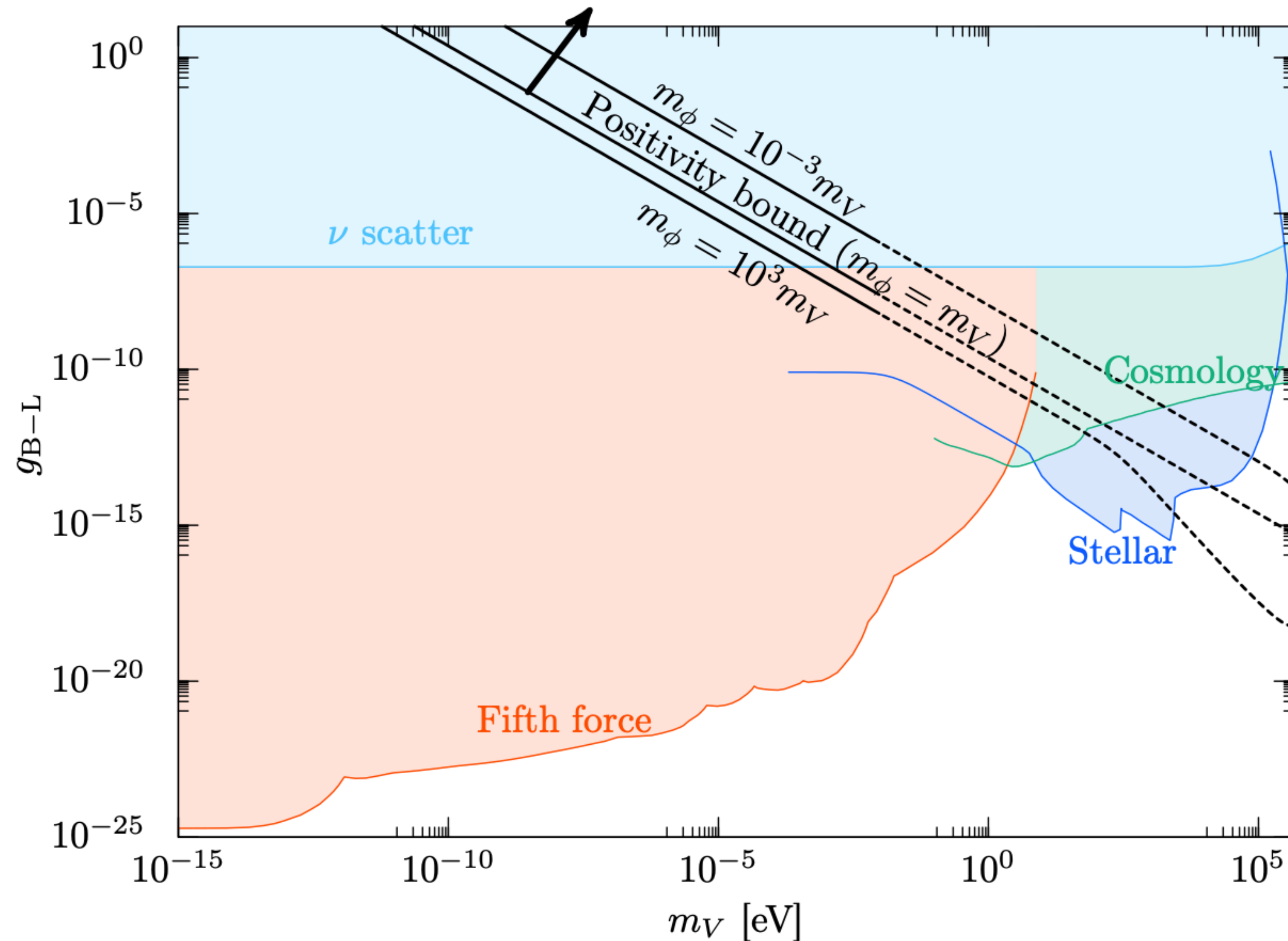
freeze-in

fermionic DM

(mixing w/ neutrinos)

GW from DW

別の例：「ダークセクターがどこまでダークであるのか」 Positivityからの（暫定的な）制限



[Aoki, ..., MY '23]

将来展望：

**超弦理論からこの宇宙について
学ぶことができるか？**

この宇宙から学ぶ

実験・観測へ

**非常に高いスケールの弱い効果であっても、
宇宙年齢では観測できることがある**

**沼地予想で「排除」されている領域で何かが見つかれば、
量子重力についても何か言える**

実験の皆さんも実は量子重力について調べているかも？

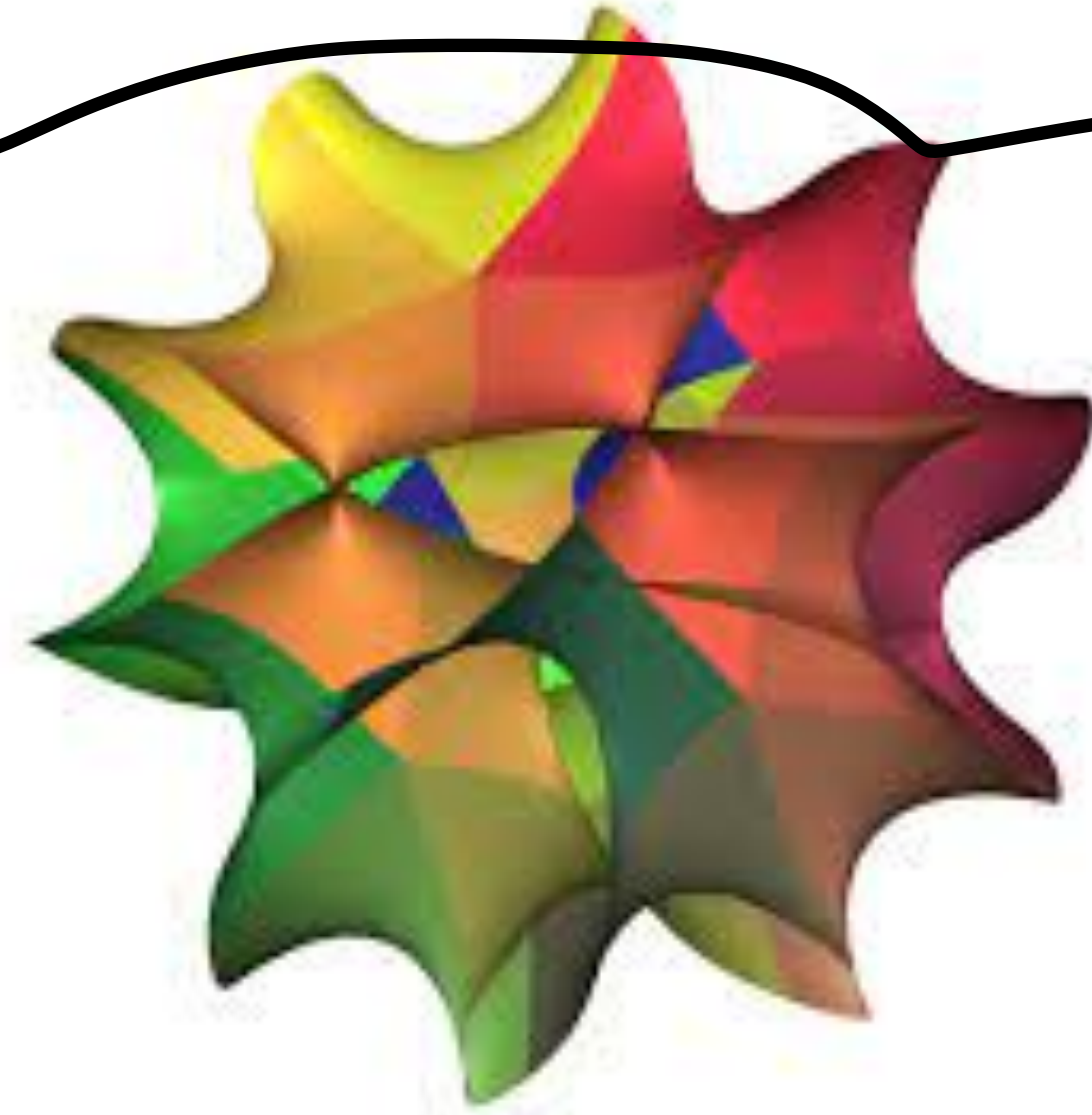
(cf. DickeとPenzias-Wilson)

超弦理論は我々の宇宙の可能性と
不可能性について議論する枠組みを与える

超弦理論は有効場の理論にとってかわる指導原理
(Fine-Tuning/Naturalness が刷新される?)

「誰でもユーザーとして使える」ものへと成長するべき

超弦理論そのものを理論的に
よく理解する必要がある



弦理論そのものへ

好き嫌いでも権威でもなく、**論争は、**
技術的な内容で客観的に解決できるはず

超弦理論の真空の「データサイエンス」

「情報」へ

弦理論の真空には巨大な可能性？

一般的なパターンはあるか？

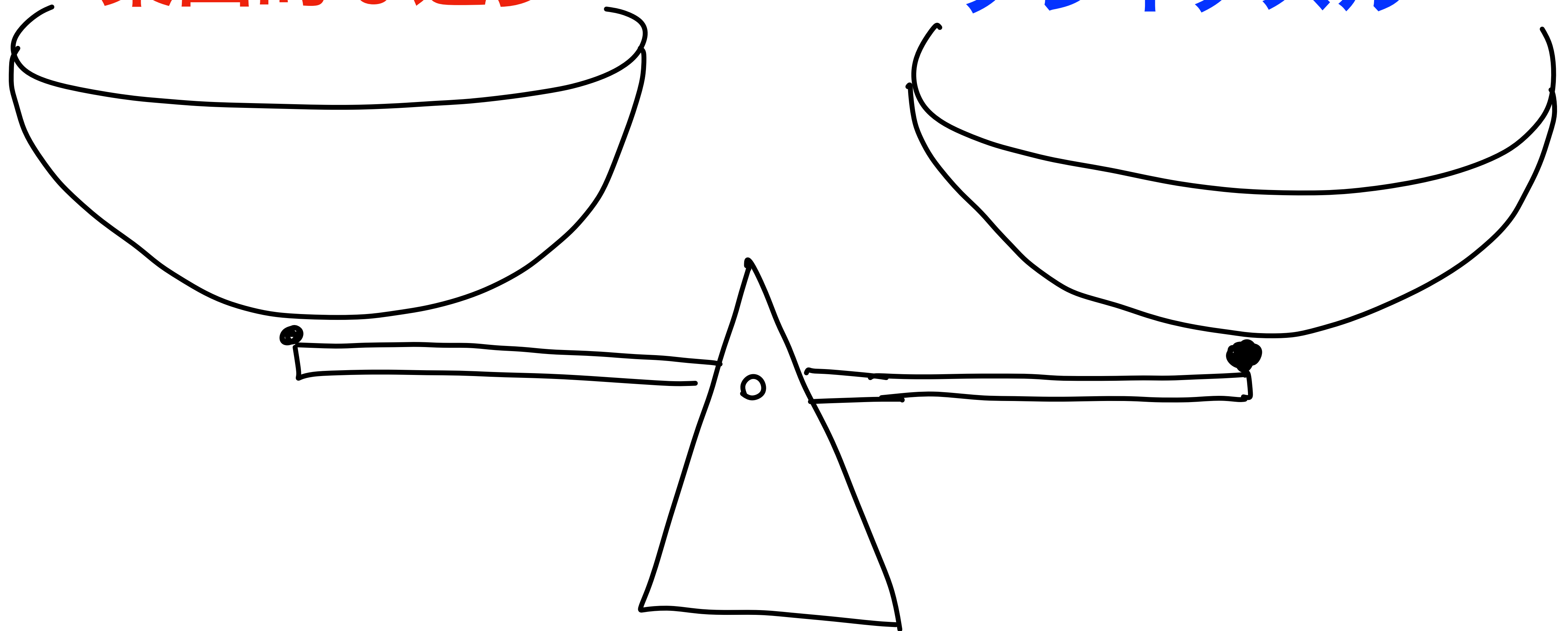
我々の宇宙に近いものは？

超弦理論の深い理解がなくてもできることは多い

「データ解析」： 実験の皆さんの出番？

多くの研究者による
集団的な進歩

一人の天才による
ブレイクスルー



**超弦理論の
根本原理**



**他分野への
応用・同化**

根本原理の見直し

**locality, global symmetry,
spacetime: emergent?**

数学へ

新しい数学が必要？

一般相対論：リーマン幾何学

量子力学：ヒルベルト空間論

超弦理論：「量子幾何学」

空間がなく，代数がある？空間は後から創発

超弦理論は巨大な分野へと成長

”theory of every-theory“



分野全体を総合的に俯瞰し、
その本質をまとめ上げる
ことのできる人材が必要



String theory is ...

“part of **21st-century physics**”

超弦理論の研究は、

21世紀の物理学にとっての重要なミッション

謙虚に：自然からも弦理論からも学ぶ

大胆に：現代物理学を書き換える