

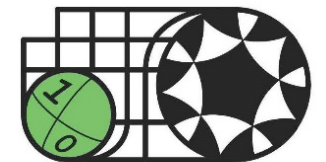
# 高柳の研究室紹介

「超弦理論、ホログラフィー原理、量子情報」

高柳 匡



京都大学基礎物理学研究所  
重力量子情報研究センター



Center for Gravitational Physics and  
Quantum Information

Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University

# 我々の研究グループの紹介



京大基礎物理学研究所(基研)



当研究所開催の国際会議  
Quantum Information, Quantum Matter  
and Quantum Gravity(2023年9月)



基研素粒子論グループ  
(元気な大学院生を毎年募集)



高柳のグループの勉強会

# 基研素粒子論グループの構成(2023年度)

Webpage: <https://www.yukawa.kyoto-u.ac.jp/contents/labs/highenergy>

教員: 9名 (教授3 + 准教授4 + 助教2)

特定教員: 1名 (特定准教授)

格子ゲージ理論(hep-lat): 青木, 伊藤

素粒子現象論(hep-ph): 高山

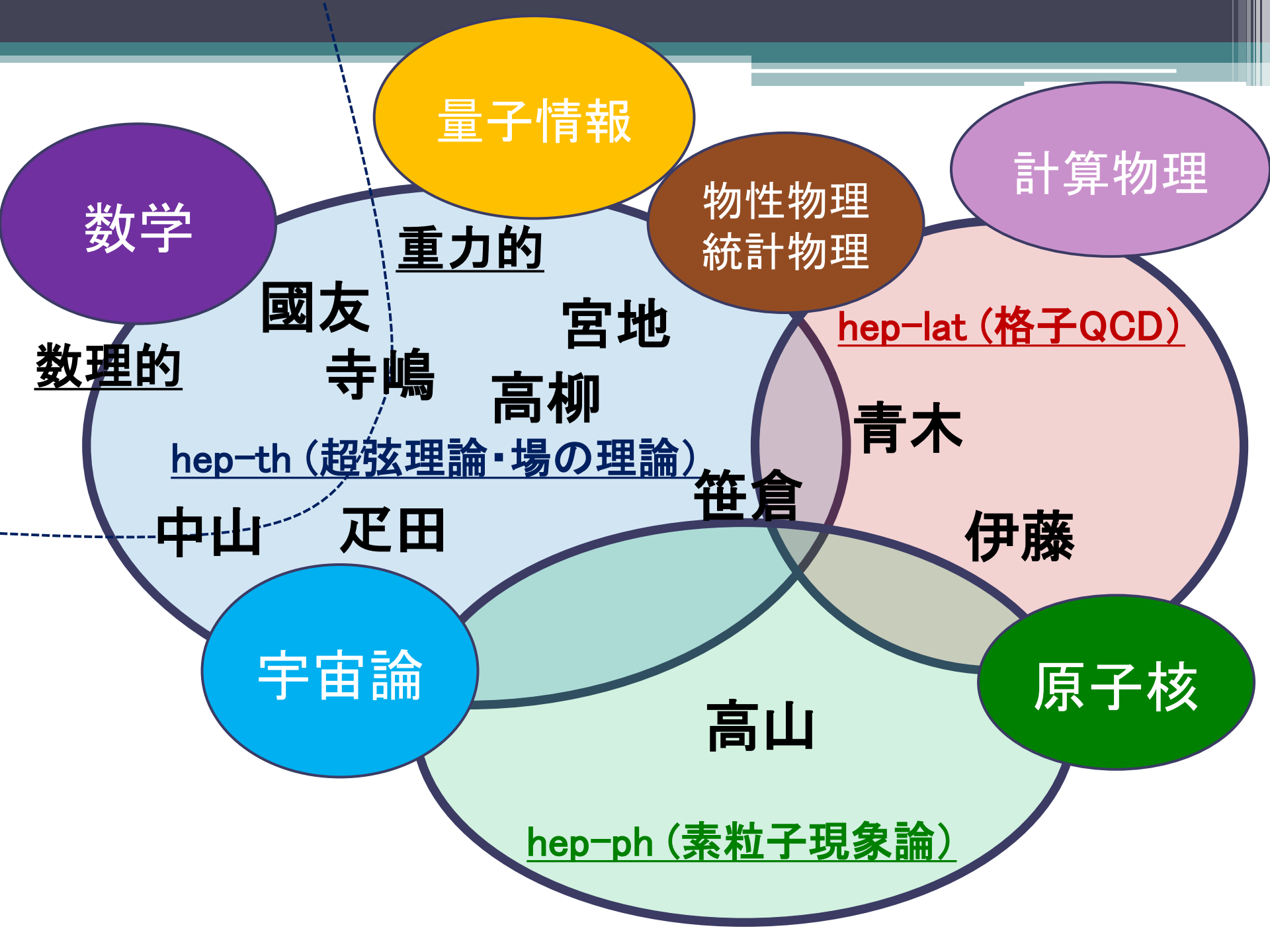
場の理論・弦理論(hep-th): 他の全員

ポスドク研究員: 7名

大学院生: 19名(博士課程12名、修士課程7名)

正式名: 京都大学大学院理学研究科物理・宇宙物理専攻

物理学第二分野 基礎物理学研究所 素粒子論グループ



量子情報

計算物理

物性物理  
統計物理

hep-lat (格子QCD)

数学

重力的

國友

宮地

数学的

寺嶋

高柳

青木

hep-th (超弦理論・場の理論)

笹倉

中山

疋田

伊藤

宇宙論

高山

原子核

hep-ph (素粒子現象論)

# 内容

## ① はじめに

⇒我々の研究分野「超弦理論」の簡単な紹介

## ② ブラックホールの物理(1970~)

⇒ブラックホールのエントロピー

## ③ 超弦理論で探るブラックホール(1995~)

⇒超弦理論が正しい証拠、AdS/CFT対応

## ④ 量子エンタングルメントとホログラフィー

⇒最近、超弦理論で最もホットな話題の一つ

## ⑤ おわりに

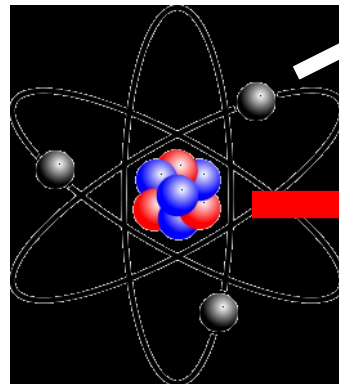
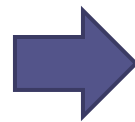
# ①はじめに

ひも理論（超弦理論, Superstring Theory）とは？

物質を細かく分けて行って、最小単位を探求する  
学問が、素粒子物理。



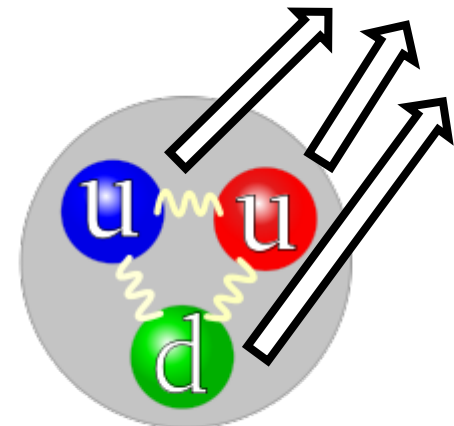
物質



原子 = 電子 + 原子核

電子

クォーク



陽子

この素粒子の考え方は、物質間に働く

- (1) 電磁気力 (静電気、磁石の力)
- (2) 強い力 (核力、QCD)
- (3) 弱い力 (ベータ崩壊、ニュートリノ)

という3種類の力を考えた場合は、うまくいく。

これらの力を統一的に説明する理論は、**標準模型**と呼ばれており、現在では、ほぼ確立している。

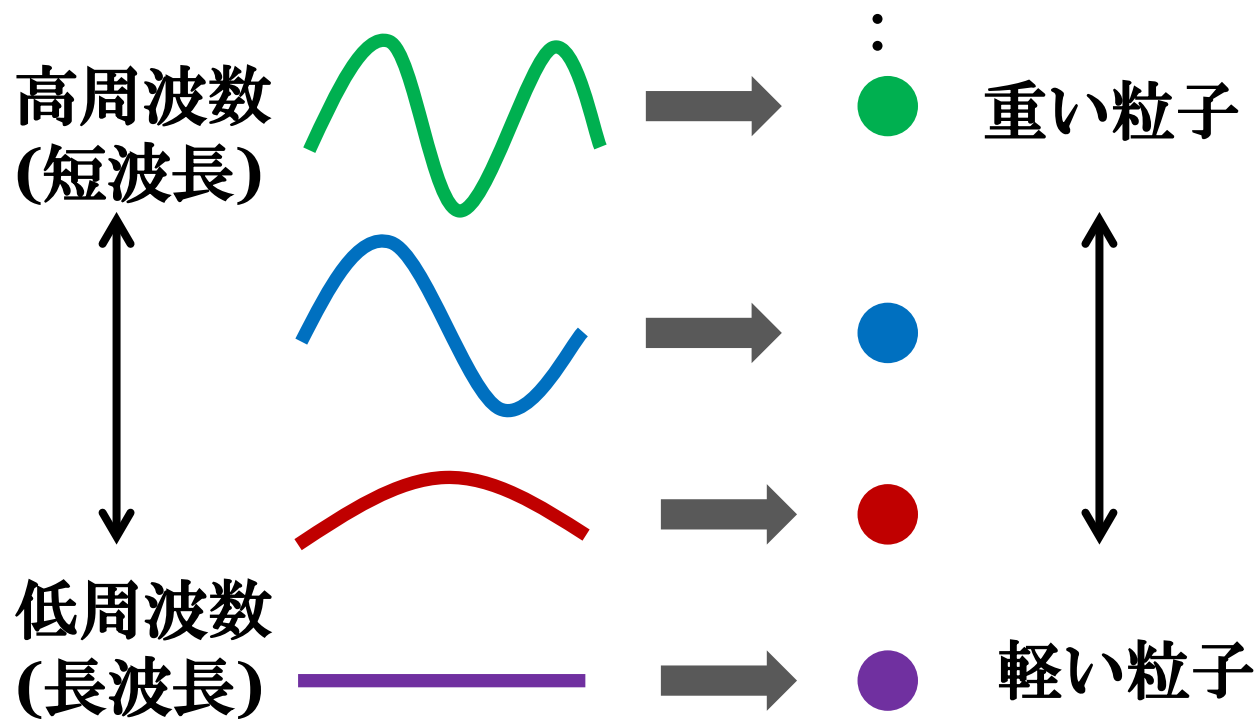
しかし、4つ目の力である、**重力（万有引力）**をマイクロな立場で理解しようとするとな問題が生じる。[非常にマイクロ：プランク長  $= 10^{-35} m$ ]

### 「マイクロ = 高エネルギー」の極限

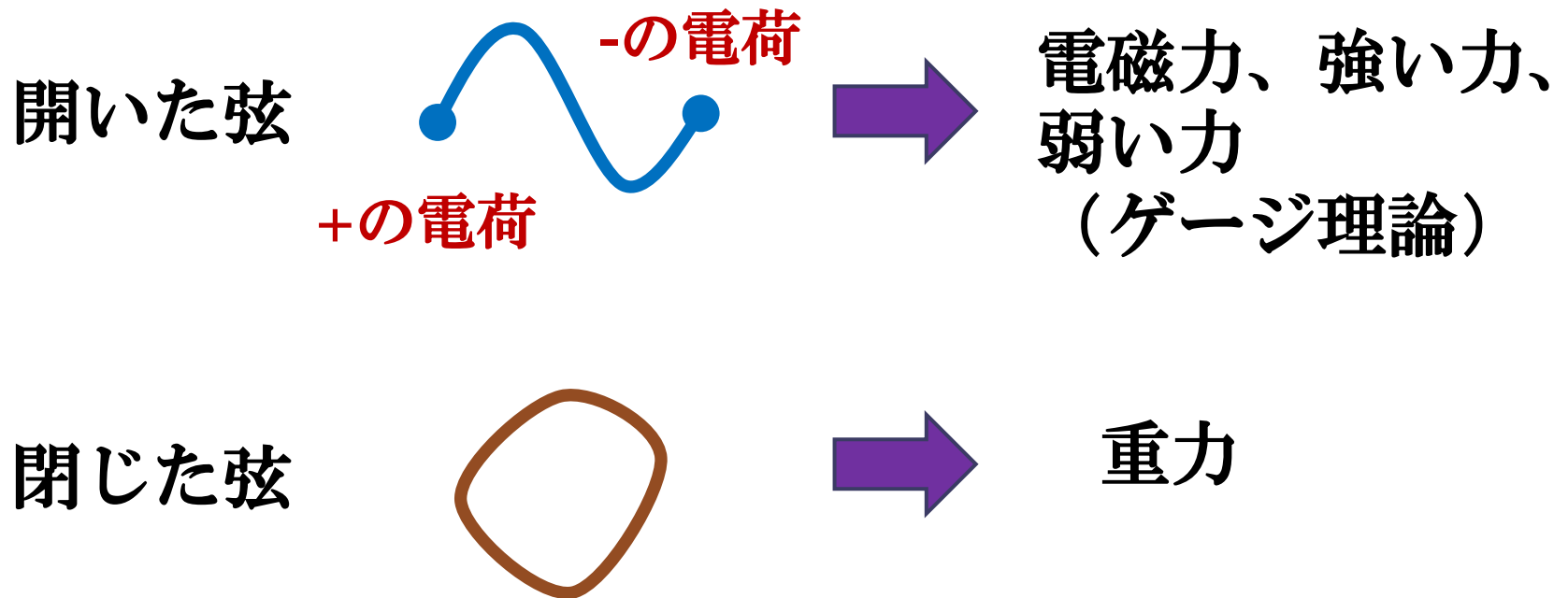
- ⇒ 重力の相互作用だけは、急速に大きくなり物理量が発散してしまう。  
(繰り込みが不可能)
- ⇒ サイズがゼロの粒子ではなく、有限の大きさの物体が物質の最小単位であればよい。



この問題を解決するために、「物質の最小単位は粒子ではなく、ひも（弦）である」という大前提に立った理論が**ひも理論**である。

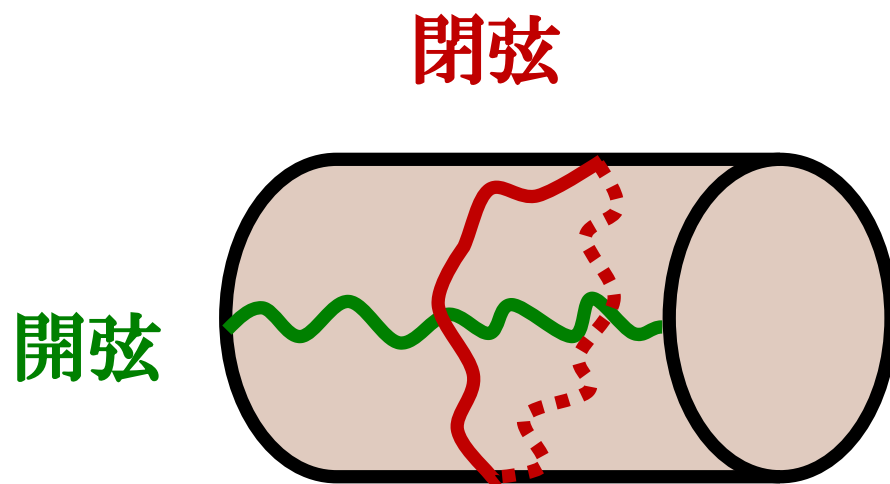


さらに驚くべきことは、ひも理論は、**4つの力が自然に統一**される、



という大変魅力的な理論である。

ひもの双対性：「閉じた弦＝開いた弦」



ゲージ理論と重力理論は同じルーツ？

でも、ひも理論は本当に正しいのだろうか？

正しい物理理論  $\Rightarrow$  物理現象を正しく説明する

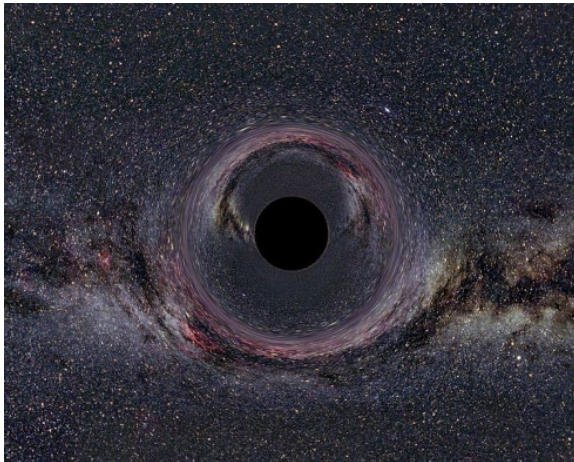
そこで、ひも理論を用いて初めて説明できるような物理現象（重力のミクロな性質）を探そう！

 **ブラックホールの物理**に着目する！  
（ひも理論の良い「(思考)実験室」）

## ② ブラックホールの物理

### (2-1) ブラックホールとは？

半径が小さく、非常に重い天体。強い重力で引き付けるため、光ですら出てくることができない。



アインシュタインの一般相対論に従うと、  
ブラックホールの半径  $r_s$  の中では、すべて  
物質が内部に吸い込まれる。

ブラックホールの中は見えない！

$$R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab} = T_{ab}$$



光すら抜け出せない！

一般相対論に従い  
時空が曲がる！

ブラックホール  
(質量  $m$ )

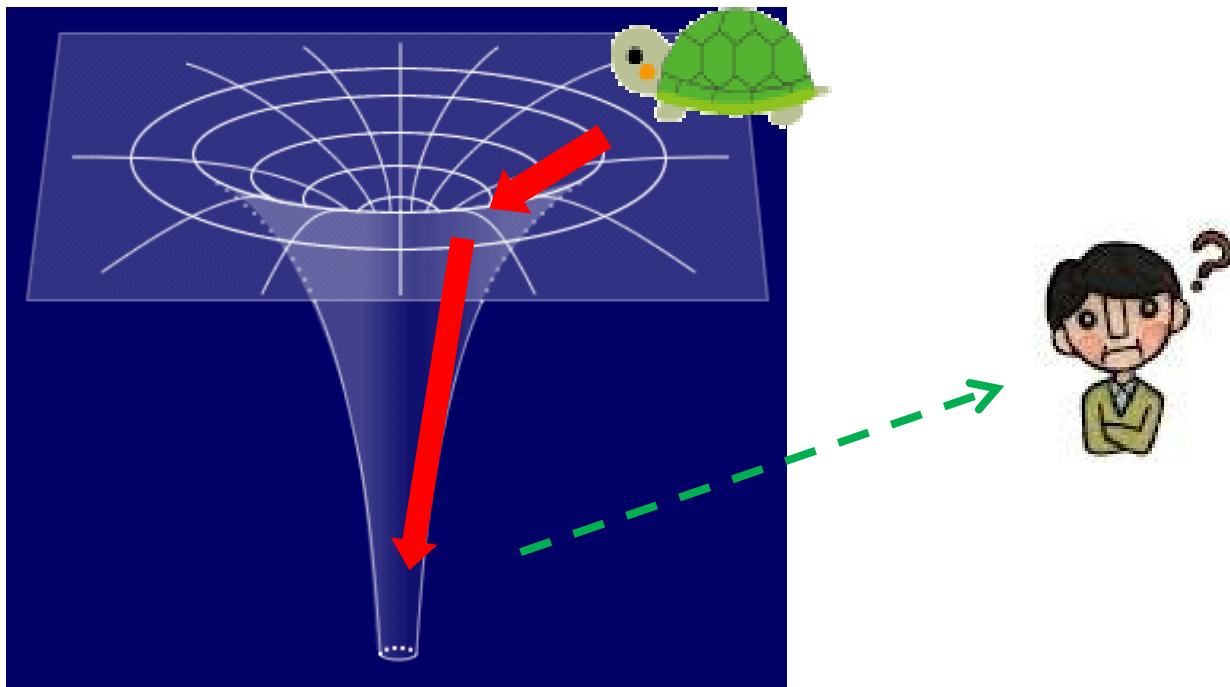
$$r_s = 2G_N m / c^2$$

$G_N$  : 重力定数

(ニュートン定数)

## (2-2) ブラックホールのエントロピーと熱力学

ブラックホールに、いったん物体が入ってしまうと、その物体の情報（粒子数、スピンなど）は分からなくなってしまう。



統計物理では、そのような「見えなくなった情報」の量をエントロピー ( $S$ と書く)と呼ぶ：

$$S = \log W .$$

$W$ =識別できない(量子)状態の数

密度行列  $\rho$  を用いると、

$$S = -\text{Tr}[\rho \log \rho].$$

とフォンノイマン・エントロピーの形にかける。



# ブラックホールのエントロピー (Bekenstein-Hawking公式)

[1972-1976]

$$S_{BH} = \frac{k_B \cdot c^3}{4G_N \cdot \hbar} \cdot A_{BH}$$

⇒ ブラックホールの熱力学

$A_{BH}$ =ブラックホールの面積 ⇒ 幾何学

$G_N$ =重力定数 ⇒ 重力

$\hbar$ =プランク定数 ⇒ 量子力学

$k_B$ =ボルツマン定数 ⇒ 統計物理・量子情報

量子重力  
の理論が  
必要！

BHエントロピーは体積ではなく面積に比例する！

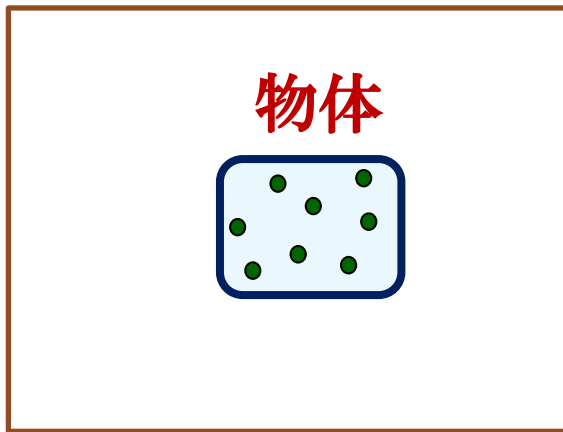
➡ 重力理論の自由度は面積に比例する！

つまりブラックホールのエントロピーは、  
体積ではなく、面積に比例する！

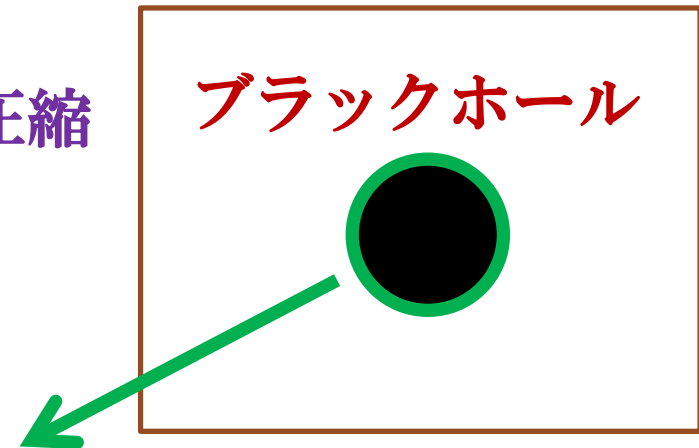
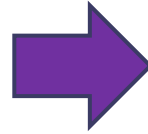
通常物質の熱力学では、エントロピーや  
エネルギーは、常に体積に比例するので、  
とても不思議である！

➡ ブラックホールの持っている自由度は、  
見た目よりも次元低い！

「ホログラフィー原理」へと発展する。



サイズを圧縮



ブラックホールの情報は、  
すべて表面蓄えられている。

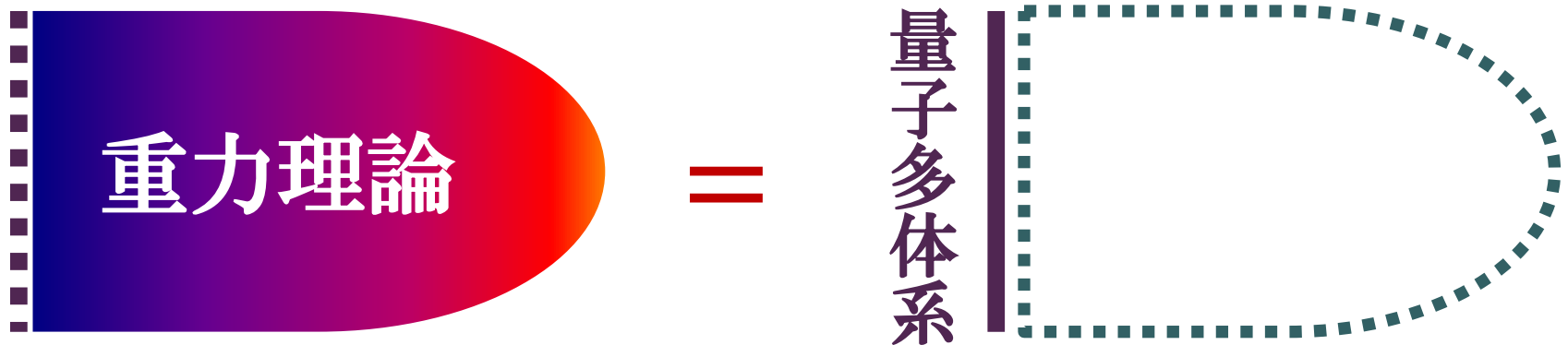
2次元面から、3次元立体画像  
を再現する「ホログラム」と  
似ている（しかし原理は異なる）



このように重力理論では、自由度が1次元低く見える。この現象を重力の本質と捉えて、原理とみなしたものを**ホログラフィー原理**と呼ぶ。

## ホログラフィー原理

重力理論 = 境界上の量子多体系



## ③超弦理論で探るブラックホール

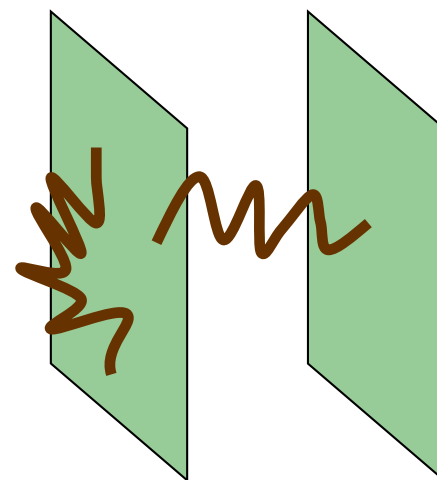
### (3-1) ブラックホールエントロピーのミクロな解釈

ブラックホールを生成するには、とても重い物質が必要になるが、ひも理論においてそのような物質の良い候補が「**Dブレーン**」と呼ばれるものである。

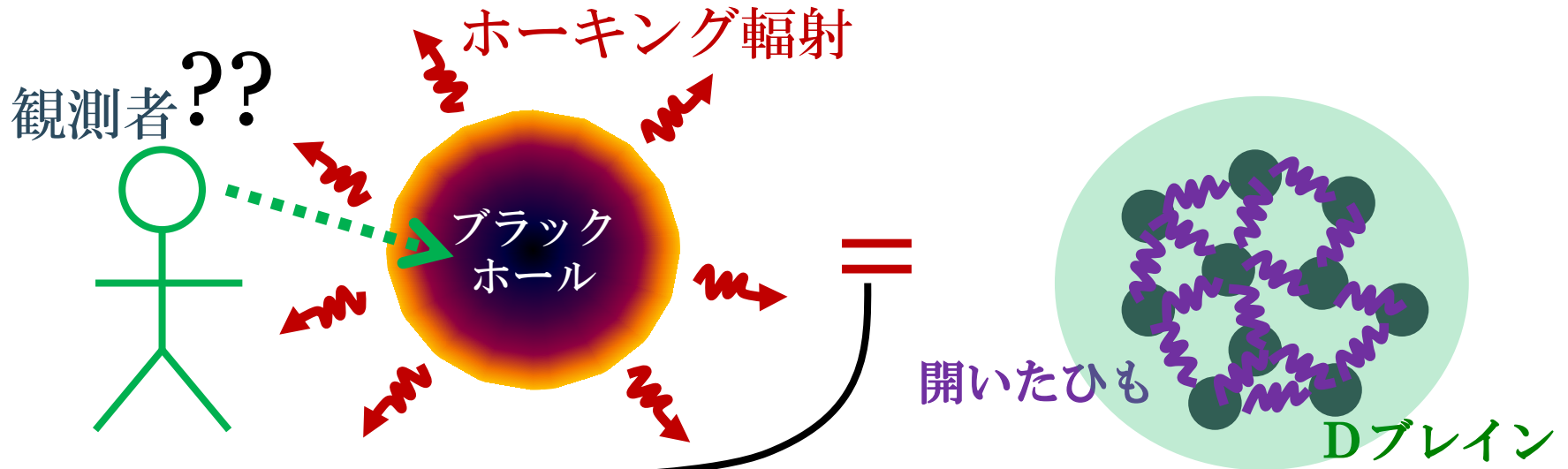
#### **Dブレーン**

=開いたひもが張り付く物体

≡閉じたひもの凝縮したもの



# ブラックホール = Dブレーン+ひもの集合体



ひも理論は、  
ブラックホールを  
拡大する顕微鏡の  
役割を果たしている。

ひもの状態数は、予想される  
エントロピーと一致する！

1996 ストロミンジャー、ヴァッファ  
+ その後の多数の研究成果

## (3-2)超弦理論のホログラフィー原理

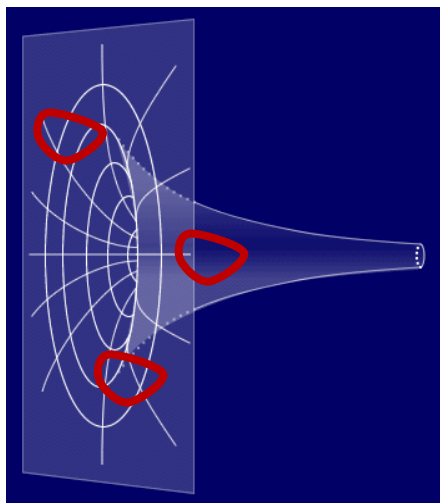
Dブレーインの考察から超弦理論のホログラフィー原理が理解できる。これをAdS/CFT対応と呼ぶ。

(1997 マルダセナ)

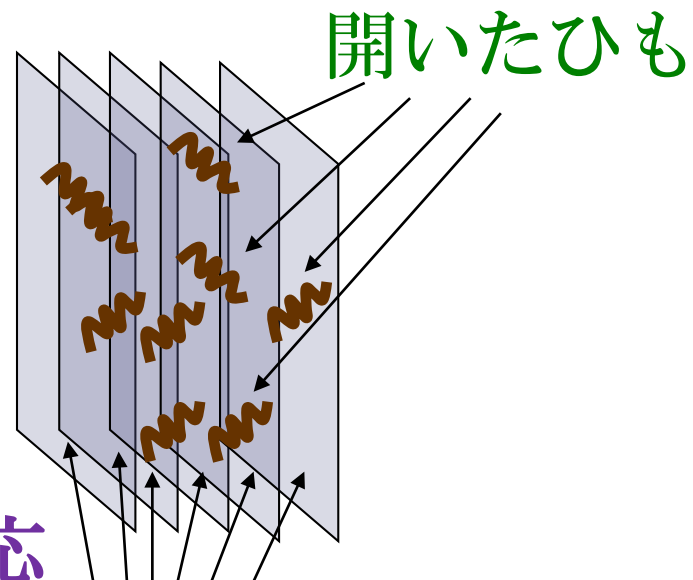
**曲がった時空の重力理論** = **物質(Dブレーイン)を記述**  
**[(d+1)次元]** **するミクロな理論**  
**[d次元]**

**閉じたひもの理論** = **開いたひもの理論**

閉じたひもの理論  
= AdS空間の重力理論



等価  
AdS/CFT対応



多数のDブレーン  
(ゲージ理論、CFT)

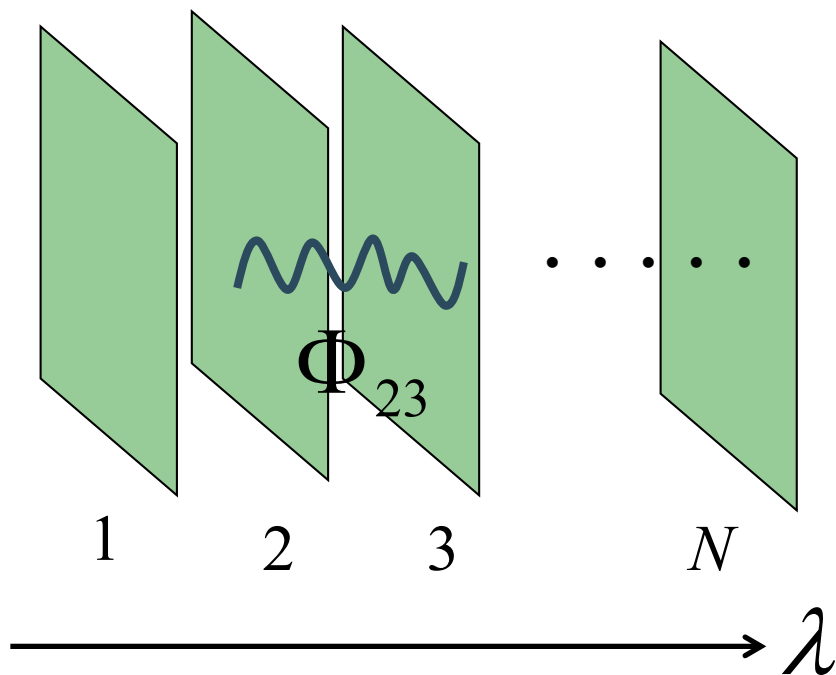
↓  
ブラックホールの熱力学  
[幾何学的]

等価

↓  
物質の熱力学  
[量子論的]



## N枚のDブレーイン



## N×N 行列

$$\Phi \approx \begin{bmatrix} \lambda^{(1)} & & & \\ & \lambda^{(2)} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda^{(N)} \end{bmatrix}$$

The matrix  $\Phi$  is shown to be approximately equal to a diagonal matrix with elements  $\lambda^{(1)}, \lambda^{(2)}, \dots, \lambda^{(N)}$ . The symbol  $\Phi_{ab}$  is also present above the matrix.

Dブレーインの理論

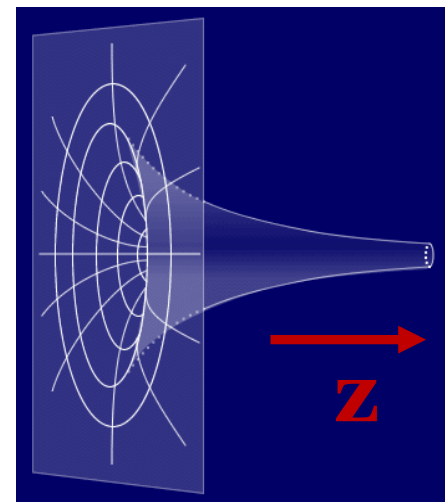
⇒ 行列場  $\Phi_{ab}(x)$  の理論 (ゲージ理論)

# AdS/CFT対応(ゲージ重力対応)

## AdS空間 (反ドジッター空間)

負の宇宙定数を持ち、最大の対称性を持つ空間  
= 双曲面(Hyperbolic space)の一方向を  
時間にしたもの

$$ds^2 = R^2 \left( \frac{dz^2 - dt^2 + d\vec{x}^2}{z^2} \right)$$



## CFT(共形場理論)

長さのスケールに依存しない理論。質量がゼロの粒子の量子論。

簡単な例を挙げると、4次元の電磁気場(マックスウェル理論)など。

AdS/CFT対応では、いわゆる(非可換)ゲージ理論であることが多い。

## AdS/CFT対応の原理[GKPW関係式]

$$Z_{\text{重力}} = Z_{\text{CFT}}$$

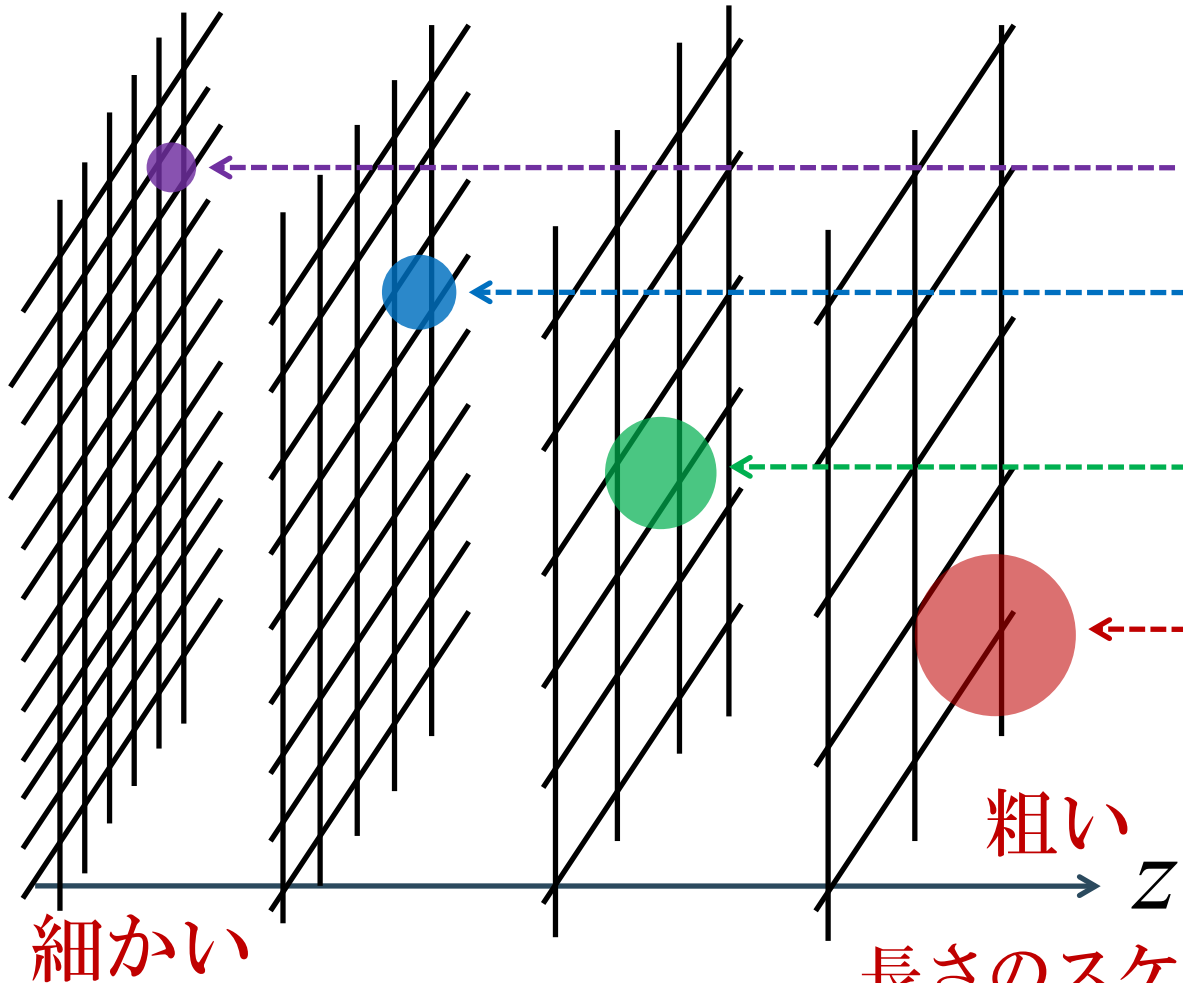
重力理論の分配関数

$$Z_{BH} = e^{-F_{BH} / T}$$

ゲージ理論(CFT)  
の分配関数

$$Z_{\text{CFT}} = e^{-F_{\text{CFT}} / T}$$

# ホログラフィーの本質の1つ：ふるいの仕掛け



長さのスケール（粗視化）

## ④量子エンタングルメントとホログラフィー

### 量子エンタングルメントとは？

ミクロな物理  $\Rightarrow$  量子力学

量子力学の基本的なアイデア：

**粒子 = 波**

例：電磁波 = 光子

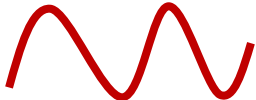



**量子状態 = ヒルベルト空間におけるベクトル**

波は「重ね合わせ」できる。

$$\text{ある状態 } |\Psi\rangle = |\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$$

スピンが上                      スピンが下

このような状態では、スピンが上である確率も下である確率も50パーセントずつで、どちらかとは断言できない。

一方、古典力学（ニュートン力学）では、どちらかの状態しか許さない。

## 量子エンタングルメント（量子もつれ合い）

2つのスピン(AとBとする)があると、次のように様々な状態を考えることができる。

[例 1] 古典的な状態(直積状態)

$$|\Psi\rangle = |\uparrow\rangle_A \otimes |\downarrow\rangle_B$$

Aは必ず上向きで、Bは必ず下向きであり、両者に相関なし。(量子エンタングルメントなし。)



## [例 2] 量子論的状态(エンタングルした状态)

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |\uparrow\rangle_A \otimes |\downarrow\rangle_B \pm |\downarrow\rangle_A \otimes |\uparrow\rangle_B \right)$$

二つの反対の状态が半々の確率で混じっている。

この時、Aスピンを観測して上向であれば、Bスピンは必ず下向であることになる(逆も成り立つ)。

このようなAとBの相関が**量子エンタングルメント**。

AとBの対を**1ビットのエンタングルメント対**と言う。

(EPR対)

## エンタングルメント・エントロピー

この量子エンタングルメントという考え方は、とても抽象的。物理学で利用するには、定量的にあらわすことが必要。

⇒ 量子エンタングルメントの強さを測る量がエンタングルメント・エントロピー。

エンタングルメント・エントロピー

= AとBの間のエンタングルメント対の数

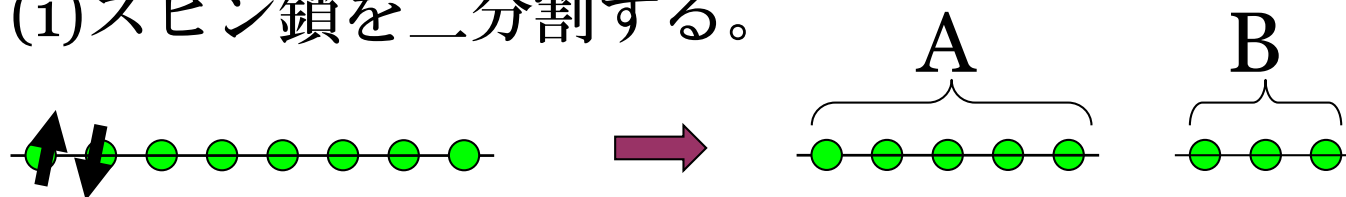
= Bを観測しない時に識別不可なAの状態の数

# エンタングルメント・エントロピーの定義

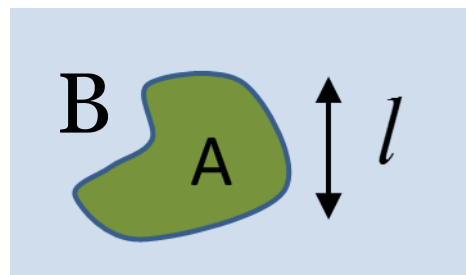
多体系の量子力学において、全体系を部分系AとBに二分割する。それに応じて、ヒルベルト空間は、二つの直積に分かれる。

$$H_{tot} = H_A \otimes H_B$$

具体例： (1) スピン鎖を二分割する。



(2) 場の理論の空間を二分割する。



このときAに制限された密度行列をBに関してトレースをとることで、次のように定義する:

$$\rho_A = \text{Tr}_B[\rho_{tot}].$$

(例: 純粋状態では、 $\rho_{tot} = |\Psi\rangle\langle\Psi|$  と波動関数で書ける。)

エンタングルメント・エントロピーは、 $\rho_A$ に関するフォンノイマン・エントロピーとして

$$S_A = -\text{Tr}[\rho_A \log \rho_A] \quad \text{と定義される。}$$

# エンタングルメント・エントロピーの計算公式 [笠-高柳 2006]

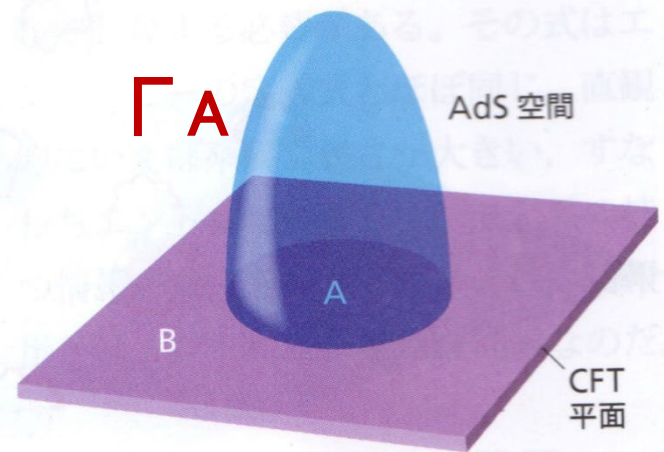
我々の研究で、ミクロな情報量に相当するエンタングルメント・エントロピーが、ホログラフィー原理(AdS/CFT対応)を用い

$$S(\rho_A) = \min \left[ \frac{\text{Area}(\Gamma_A)}{4G_N} \right]$$

と幾何学的に計算できることが分かった!

ここで $\Gamma_A$ は、領域Aの境界 $\partial A$ に端を持つ、面積最小曲面(極小曲面)。

コメント:この公式はBHエントロピー公式の一般化と思える。



量子もつれで立ち上がる空間 CFT平面(紫色)を領域AとBに分け、両者を量子もつれ状態にするとエンタングルメント・エントロピーが生じる。笠・高柳公式を踏まえてこの状況を領域Aから見ると、領域AからAdS空間にエンタングルメント・ウェッジと呼ぶ領域(青色)が形成されたと解釈できる。

日経サイエンス2021年6月号

hep-th論文(超弦理論・場の理論)の1年間  
被引用数ランキング(2019年)

AdS/CFTの原著論文⇒

[Maldacena 1997]

AdS/CFTの対応原理⇒

[Witten 1998]

AdS/CFTの対応原理⇒

[Gubser-Klebanov-Polyakov 1998]

ホログラフィック  
エンタングルメント⇒

[笠-高柳 2006]

Top Cited Articles during 2019 in hep-th  
The 100 most highly cited papers during 2019 in the hep-th archive

1. [1144](#) citations in 2019

**The Large N limit of superconformal field theories and supergravity**

Juan Martin Maldacena (Harvard U.). Nov 1997. 21 pp.

Published in *Int.J.Theor.Phys.* **38** (1999) 1113-1133, *Adv.Theor.Math.Phys.* **2** (1998) 231-252

HUTP-97-A097, HUTP-98-A097

DOI: [10.1023/A:1026654312961](#), [10.4310/ATMP.1998.v2.n2.a1](#)

e-Print: [hep-th/9711200](#) | [PDF](#)

[References](#) | [BibTeX](#) | [LaTeX\(US\)](#) | [LaTeX\(EU\)](#) | [Harvmac](#) | [EndNote](#)  
[ADS Abstract Service](#); [AMS MathSciNet](#); [OSTI.gov Server](#); [Link to citations by year and arXiv category](#)

2. [679](#) citations in 2019

**Anti-de Sitter space and holography**

Edward Witten (Princeton, Inst. Advanced Study). Feb 1998. 39 pp.

Published in *Adv.Theor.Math.Phys.* **2** (1998) 253-291

IASSNS-HEP-98-15

DOI: [10.4310/ATMP.1998.v2.n2.a2](#)

e-Print: [hep-th/9802150](#) | [PDF](#)

[References](#) | [BibTeX](#) | [LaTeX\(US\)](#) | [LaTeX\(EU\)](#) | [Harvmac](#) | [EndNote](#)  
[ADS Abstract Service](#); [AMS MathSciNet](#); [ATMP Server](#)

3. [531](#) citations in 2019

**Gauge theory correlators from noncritical string theory**

S.S. Gubser, Igor R. Klebanov, Alexander M. Polyakov (Princeton U.). Feb 1998. 14 pp.

Published in *Phys.Lett.* **B428** (1998) 105-114

PUPT-1767

DOI: [10.1016/S0370-2693\(98\)00377-3](#)

e-Print: [hep-th/9802109](#) | [PDF](#)

[References](#) | [BibTeX](#) | [LaTeX\(US\)](#) | [LaTeX\(EU\)](#) | [Harvmac](#) | [EndNote](#)  
[ADS Abstract Service](#); [AMS MathSciNet](#)

4. [472](#) citations in 2019

**Holographic derivation of entanglement entropy from AdS/CFT**

Shinsei Ryu, Tadashi Takayanagi (Santa Barbara, KITP). Mar 2006. 5 pp.

Published in *Phys.Rev.Lett.* **96** (2006) 181602

NSF-KITP-06-11

DOI: [10.1103/PhysRevLett.96.181602](#)

e-Print: [hep-th/0603001](#) | [PDF](#)

[References](#) | [BibTeX](#) | [LaTeX\(US\)](#) | [LaTeX\(EU\)](#) | [Harvmac](#) | [EndNote](#)  
[ADS Abstract Service](#); [AMS MathSciNet](#)

# アインシュタイン方程式とエンタングルメント

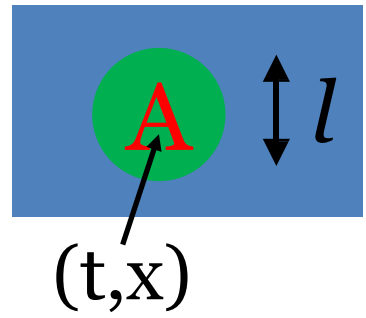
$$\Delta S_A \cong \Delta H_A$$

エンタングルメント・エントロピーの第一法則  
 $H_A = -\log \rho_A$ : モジュラーハミルトニアン

[Blanco-Casini-Hung-Myers 2013,  
Prudenziati-沼澤-野崎-高柳 2013]



$$\left( \partial_t^2 - \partial_l^2 - \partial_x^2 - \frac{3}{l^2} \right) \Delta S_A(t, \vec{x}, l) = \langle O \rangle \langle O \rangle$$

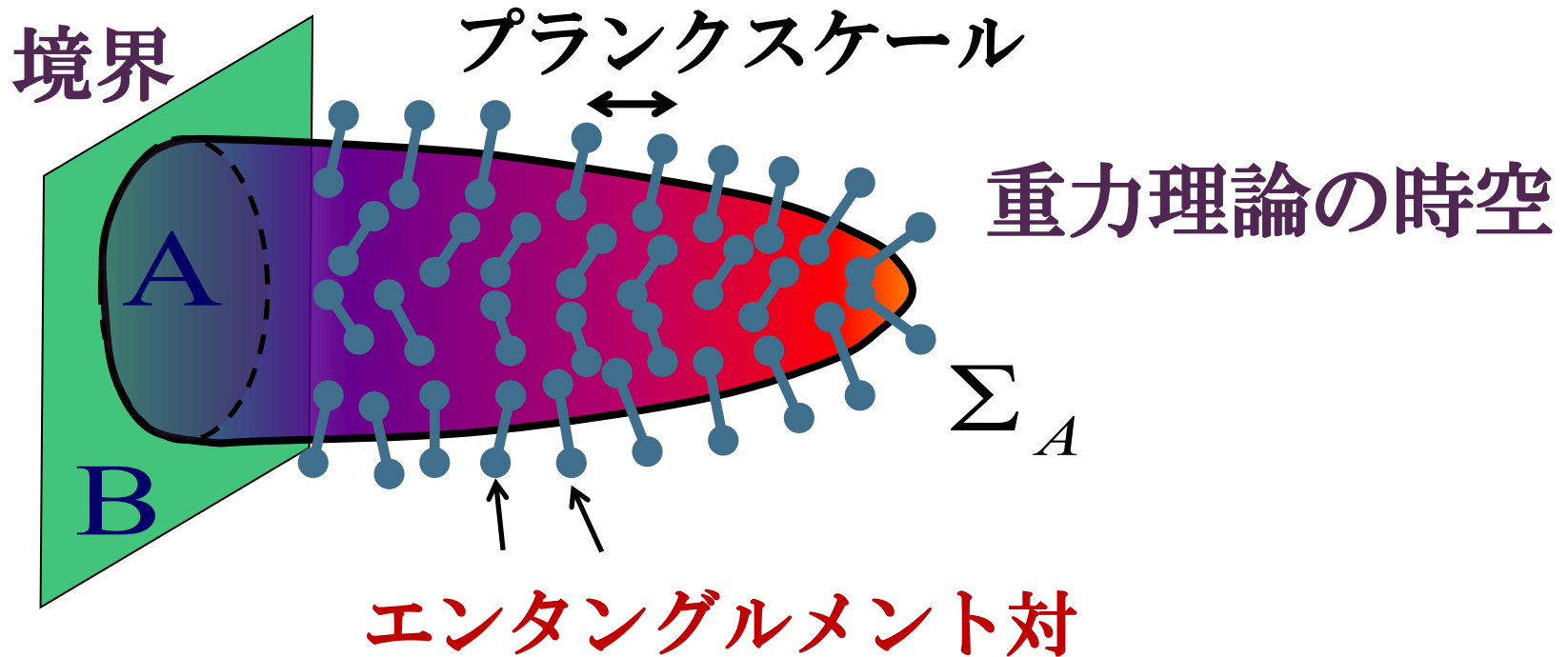


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$$

➡ 第一法則はアインシュタイン方程式の一次摂動と一致！

[Lashkari-McDermott-Raamsdonk 2013, ... , Sarosi-宇賀神 2017, ...]

⇒重力理論の時空に「エンタングルメント対」が満ちているという描像を示唆している。



$$S_A = \frac{\Sigma_A \text{の面積}}{[\text{プランク長}]^2}$$
$$= [\Sigma_A \text{と交差するエンタングルメント対の数}].$$



さらに発展させると以下の予想に到達する：

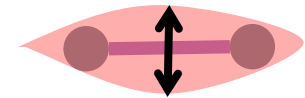
[2009~現在、複数の研究者]

重力理論の「宇宙」

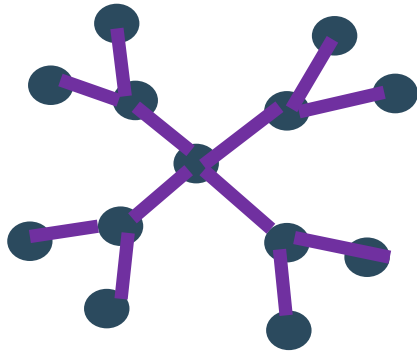
= 量子エンタングルメントのネットワーク



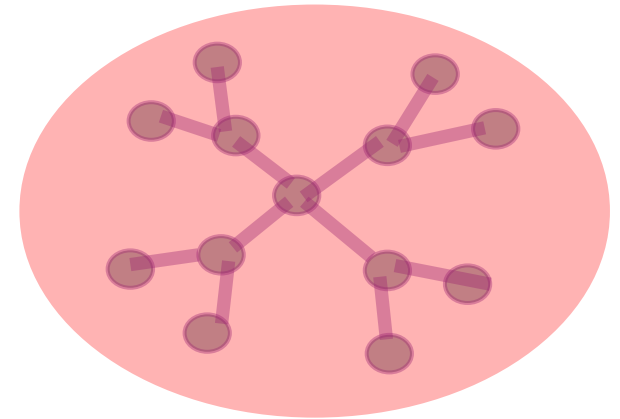
ミクロな宇宙



プランクスケール



マクロな宇宙

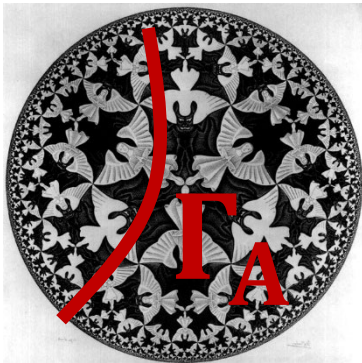


いわば、**時空の「素粒子」 = 量子エンタングルメント。**

# AdS/CFTとテンソルネットワーク

テンソルネットワーク=量子状態を幾何学的に記述する手法  
量子多体系の数値計算で、変分法のansatzとして考案された。

双曲面のタイル張り  
(エッシャー「天使と悪魔」)

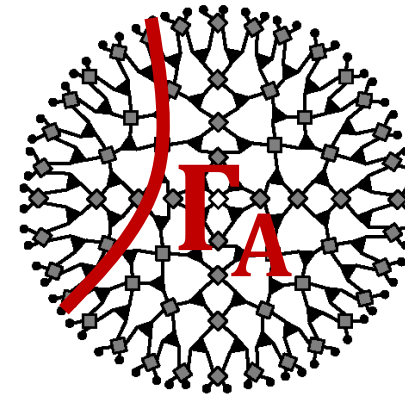


AdS空間の重力理論

量子エンタングルメントのネットワーク  
テンソルネットワーク

?  
=

[Swingle 2009,..]



量子多体系

宇宙は、量子エンタングルメントの  
ブロックで作られている！  
“It from Qubit”



# 経路積分の効率化

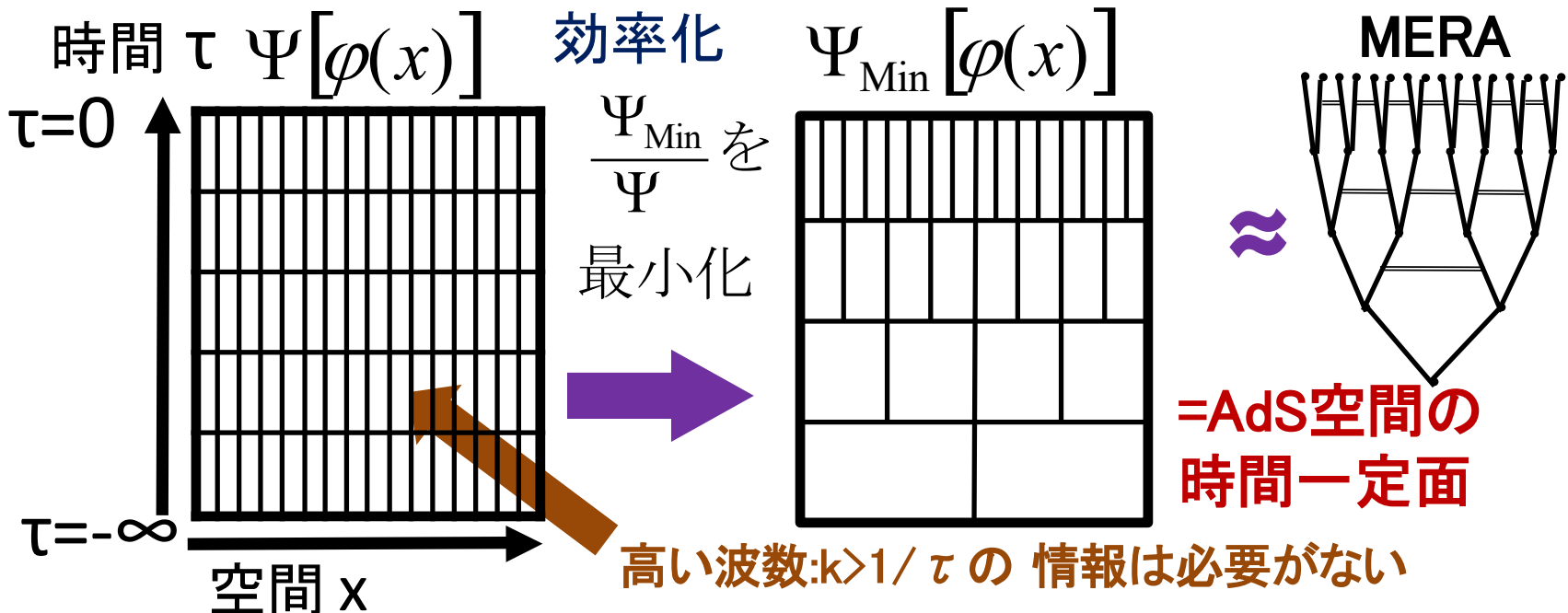
[Caputa-Kundu-宮地-渡邊-高柳 2017,..]

テンソルネットワーク → 量子多体系の基底状態を変分法で求める。  
(これだと実際の連続的な場の理論を記述するのが難しい)

基底状態を求める方法 ⇒ 経路積分: 虚時間経路積分

$$\lim_{\beta \rightarrow \infty} e^{-\beta H} |\psi\rangle = |\psi_0\rangle$$

$$\Psi[\varphi(x)] = \int \prod D\phi(x, \tau) e^{-S_{CFT}(\phi)} \cdot \delta(\varphi(x) - \phi(x, \tau = 0))$$



## 経路積分の効率化を具体的にどうやるか？

離散化の格子間隔の局所的な変化を計量で表す：

$$ds^2 = e^{2\omega(x,z)} (dx^2 + dz^2).$$

CFTの性質より波動関数は次の性質を持つ：

$$\Psi[\phi, \omega] = e^{N[\omega]} \cdot \Psi[\phi, \omega = 0]$$

**$N[\omega]$ を最小とする計量が最も効率的な経路積分。**

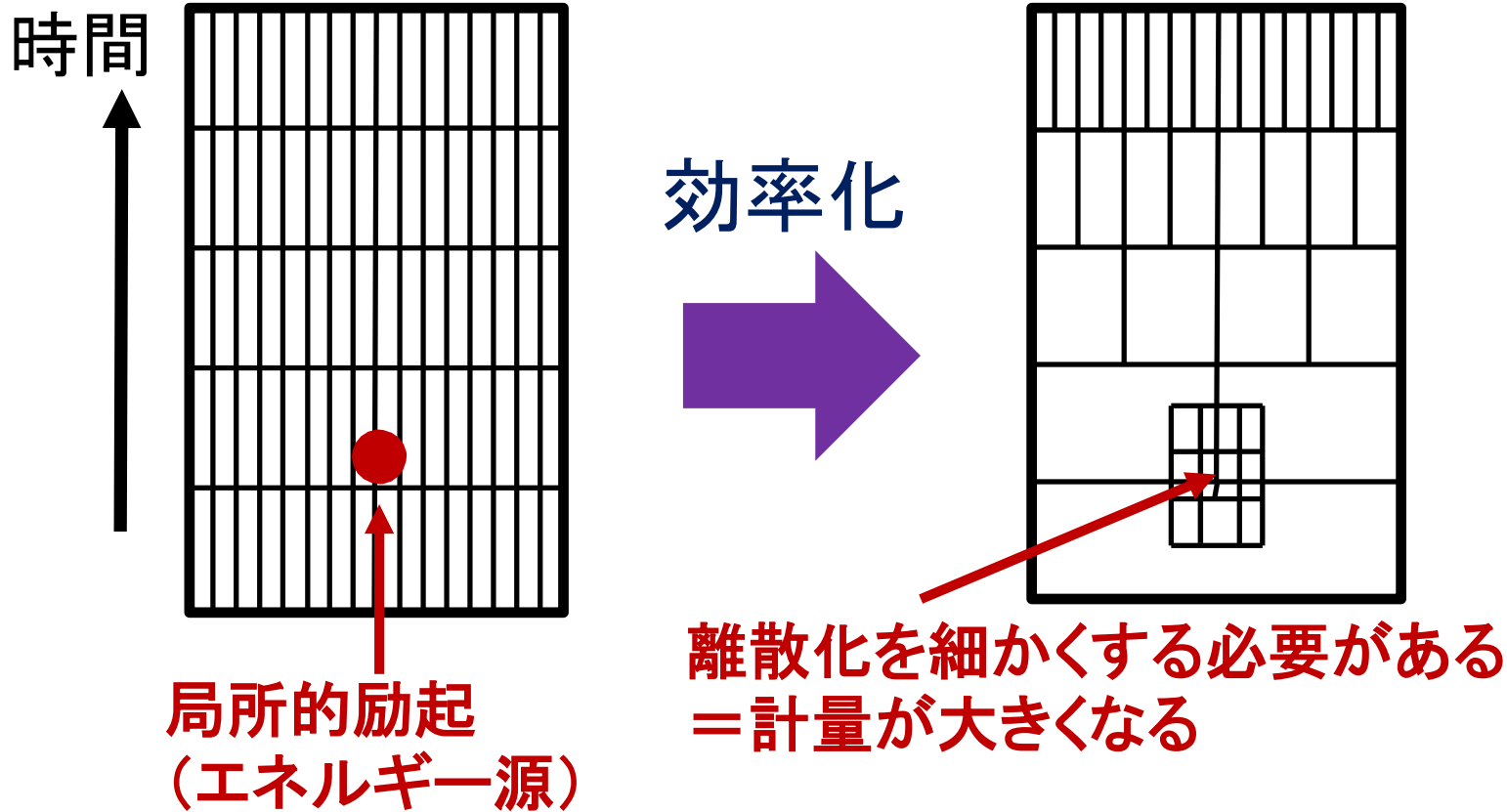
( $N$  = 「量子計算の複雑性」の一種 [Cf. Susskind 2014-] )

**2次元CFTでは、 $N[\omega]$ はリュービル作用と等しい。**

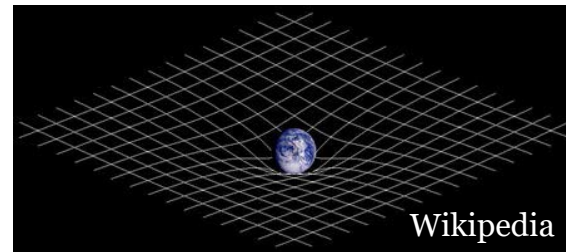
$$N_{2D}[\omega] = \frac{c}{24\pi} \int dx dz \left[ (\partial_x \omega)^2 + (\partial_z \omega)^2 + e^{2\omega} \right]$$

**➡  $N$ が最小となるのは、 $e^{2\omega(z)} = z^{-2}$ つまりAdSの計量の時！**

経路積分の途中で演算子を挿入して励起すると：

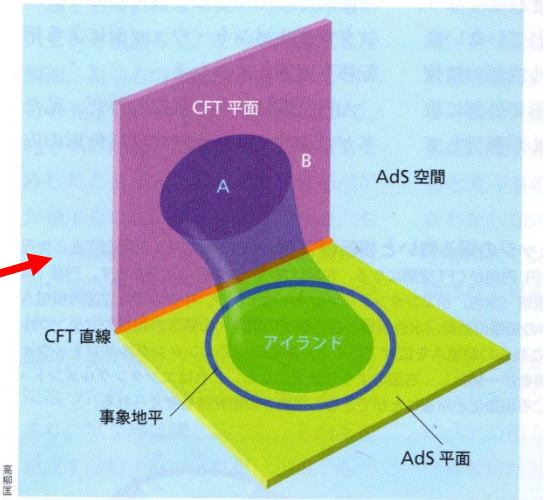


まさに一般相対性理論！  
CFTの量子情報から  
重力理論の時空が創発！



## 最近の研究

- 余次元2のゲージ重力対応の発見
- AdS/BCFT対応の研究
- Moving MirrorモデルによるBHの蒸発とページ曲線の導出
- 擬エントロピーの様々な量子多体系における解析
- ドジッター宇宙のホログラフィー
- :

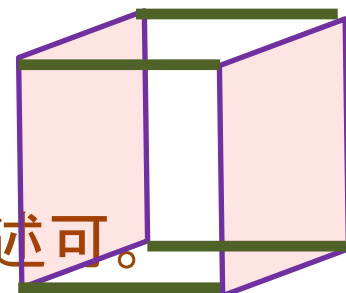


# 宇宙の3つのタイプ

## [1] 宇宙定数=0 (曲率=0)

→ 平坦な宇宙 (ミンコフスキー時空)

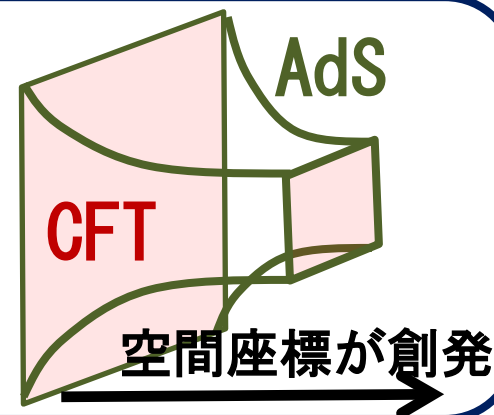
現在の宇宙は、ほぼ平坦。超弦理論で量子重力を記述可。



## [2] 宇宙定数<0 (曲率<0)

→ 反ドジッター宇宙 (Anti de-Sitter Space)

今紹介したゲージ重力対応が適用される！

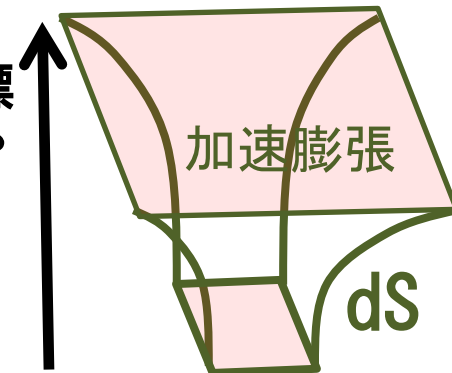


## [3] 宇宙定数>0 (曲率>0)

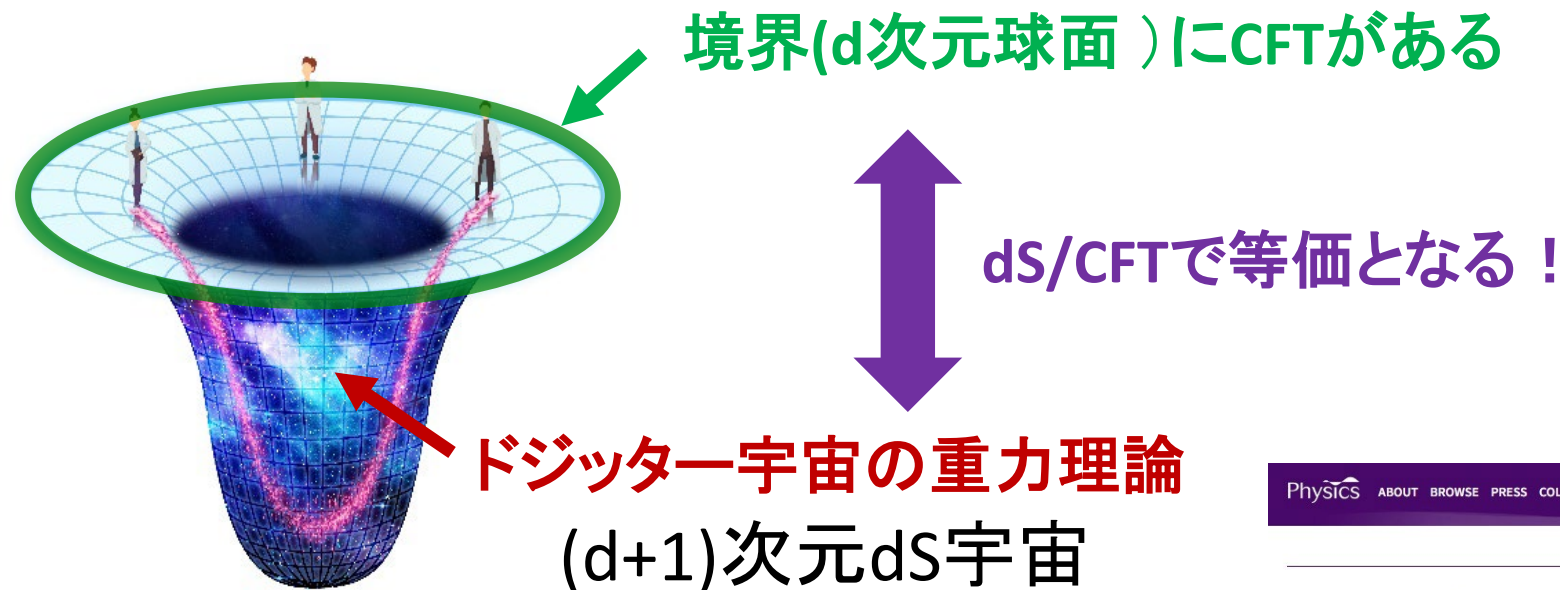
→ ドジッター宇宙 (de-Sitter Space)

宇宙創成を記述。ホログラフィーが成立するか？

時間座標  
が創発？

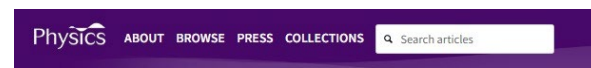


# ドジッター宇宙のホログラフィー: dS/CFT対応 [Strominger 2001]

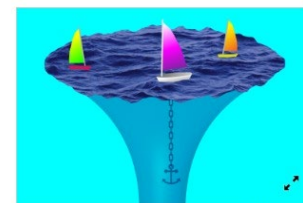


しかし、これまでdS宇宙に対応するCFTの具体例に関して理解が乏しかった。  
一般相対論のdSに対応するCFTも未知だった。

➡ 我々の最新成果:  
3次元dS宇宙に対応するCFTの具体例を発見!  
[西岡-疋田-瀧-高柳 (Phys.Rev.Lett. 129 (2022) 4, 041601)]



VIEWPOINT  
Steps toward Quantum Gravity in a Realistic Cosmos  
Jordan Cotler  
Society of Fellows, Harvard University, Cambridge, MA, USA  
July 18, 2022 • Physics 15, 107  
Theorists have modeled an expanding spacetime—akin to our Universe—by taking inspiration from a string theory framework in which spacetime is emergent.



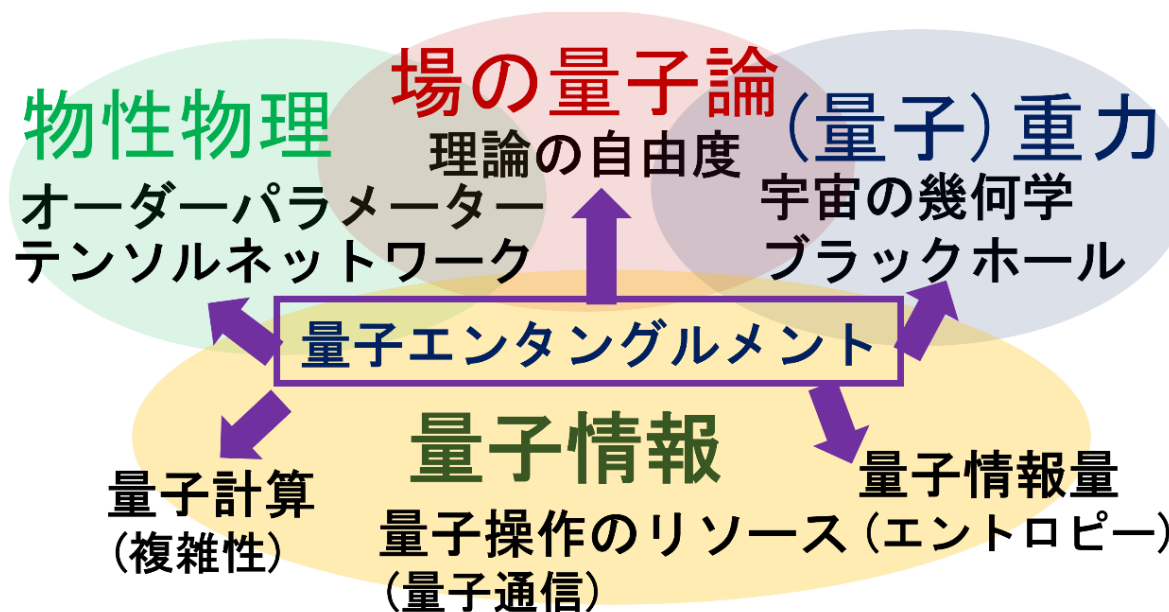
左記論文をViewpointとして紹介した米国物理学会の雑誌Physicsの記事(2022年7月)



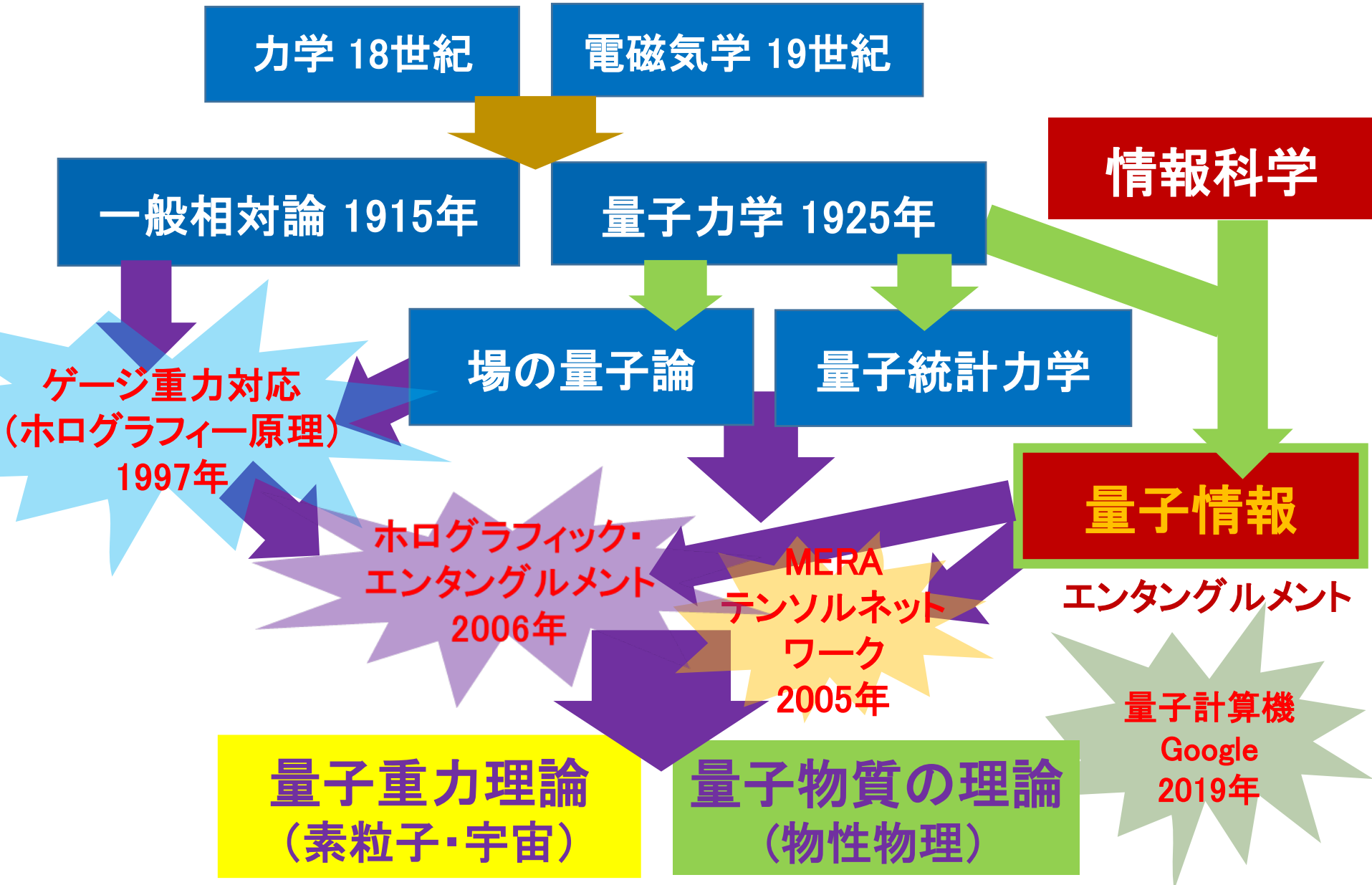
## ⑤おわりに

量子多体系や場の量子論  $\rightarrow$  幾何  $\rightarrow$  (量子)重力理論  
経路積分 ホログラフィー原理

この背後にあるのは、  
「量子系のエンタングルメント」=「量子系の幾何学」



# 物理学の発展における位置づけ



重力理論(一般相対論)は、最速の“量子コンピューター”？



重力理論の時空は量子ビットの集合体？

しかし、ホログラフィー原理は、現在のところ「宇宙」が宇宙定数が負である反ドジッター時空の場合しか扱えない。

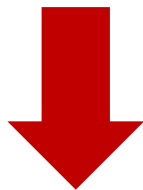
現実の宇宙ではむしろ宇宙定数は非負であると考えられており、従来のゲージ重力対応を、例えばドジッター宇宙やビックバン宇宙などへ大きく拡張することが求められる。

その際、「重力理論を量子ビットの幾何学」という新しいアプローチは重要な鍵となるだろう。

また、高柳は、**学術変革領域研究A「極限宇宙」**というプロジェクトの代表を務めています。 Webpage: <https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~extremeuniverse/>

従来の物理学:「空間」「時間」「物質」の観点で自然法則を記述。

しかし、ミクロな世界では、量子性による「波の重ね合わせ」が大きい極限的状况では、従来の考え方では困難に直面する。



時空の座標の値が揺らぎ、従来の幾何学が適用不可！  
量子物質のとりうる自由度が増大し、数値解析が困難！

この極限的状况を「**極限宇宙**」と呼ぶ！

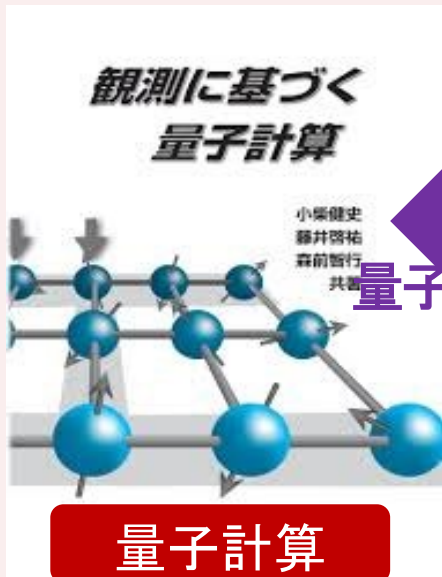
極限宇宙 = 自然界における基本的な3つの極限。

①空間の極限   ②時間の極限   ③物質の極限

これらは「物理学の究極の問題」と言える。

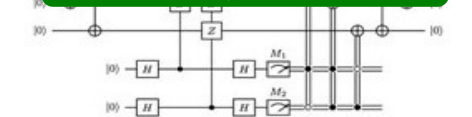
# 極限宇宙の研究の広がり

量子情報



超弦理論・場の量子論

量子計算の活用



量子エンタングルメント

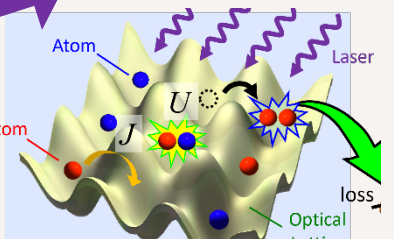
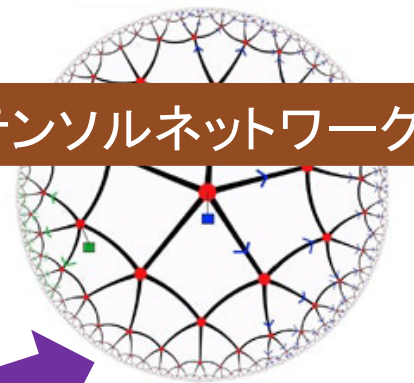


時空創発

物性モデル

物性物理

テンソルネットワーク

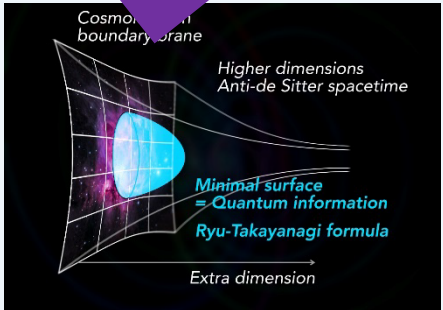


冷却原子実験

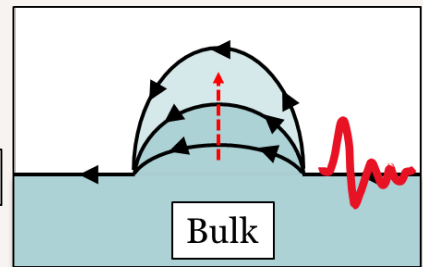
同じ理論体系

物性モデル

宇宙論・相対論



Edge



量子ホール実験

ブレインワールド宇宙論

# 極限宇宙の概念図



対象のスケールは大きく異なるが、量子情報の視点に立つと  
全て量子ビットの集合体として物理法則が統一的に理解できる！

# 参考文献

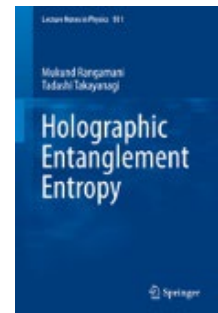
(2-1) 拙著「ホログラフィー原理と量子エンタングルメント」  
臨時別冊・数理科学 SGC106 (SDB Digital Books 25)  
サイエンス社 2014年



(2-2) 拙著「量子エンタングルメントから創発する宇宙」  
(基本法則から読み解く物理学最前線 23)  
共立出版 2020年



(2-3) M. Rangamani and T. Takayanagi,  
“Holographic Entanglement Entropy”  
Lecture Notes in Physics, Springer, 2017 (axiv:1609.04645)



以上が高柳の研究室紹介です。

ご清聴ありがとうございました。