

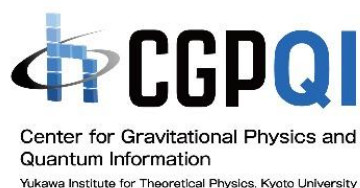
高柳の研究室紹介

「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



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: 8名 (教授3 + 准教授4 + 助教1)

特定教員: 1名 (特定助教)

格子ゲージ理論(hep-lat): 伊藤

素粒子現象論(hep-ph): 北野、高山

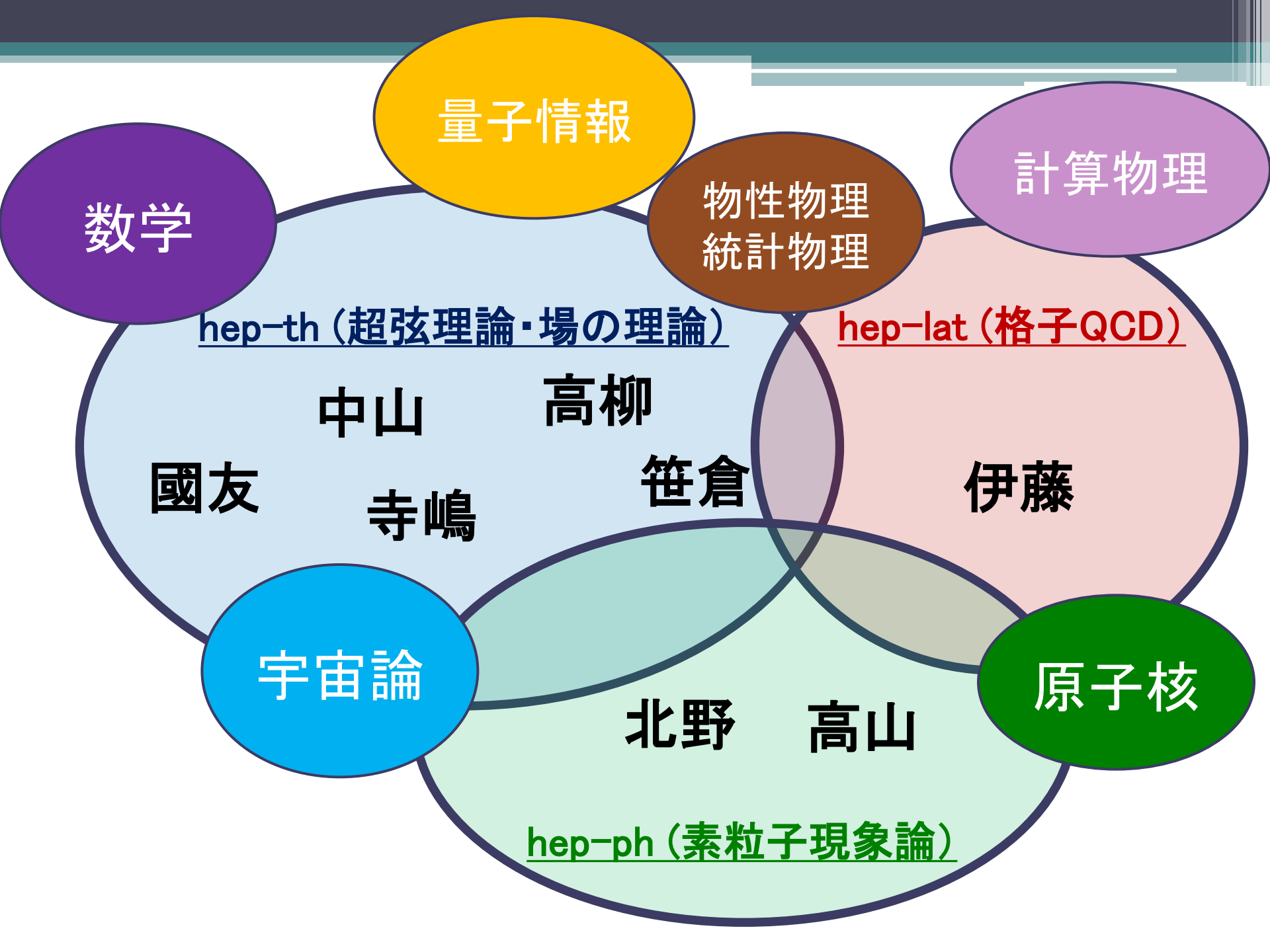
場の理論・弦理論(hep-th): 他の全員

ポスドク研究員: 12名

大学院生: 23名(博士課程16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



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

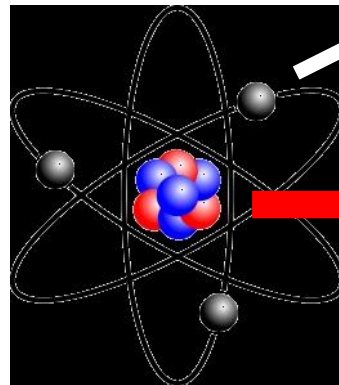
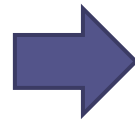
①はじめに

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。



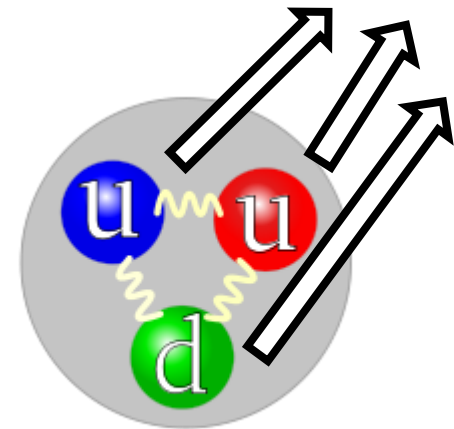
物質



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う問題が生じる。[非常にマイクロ：プランク長 $= 10^{-35} m$]

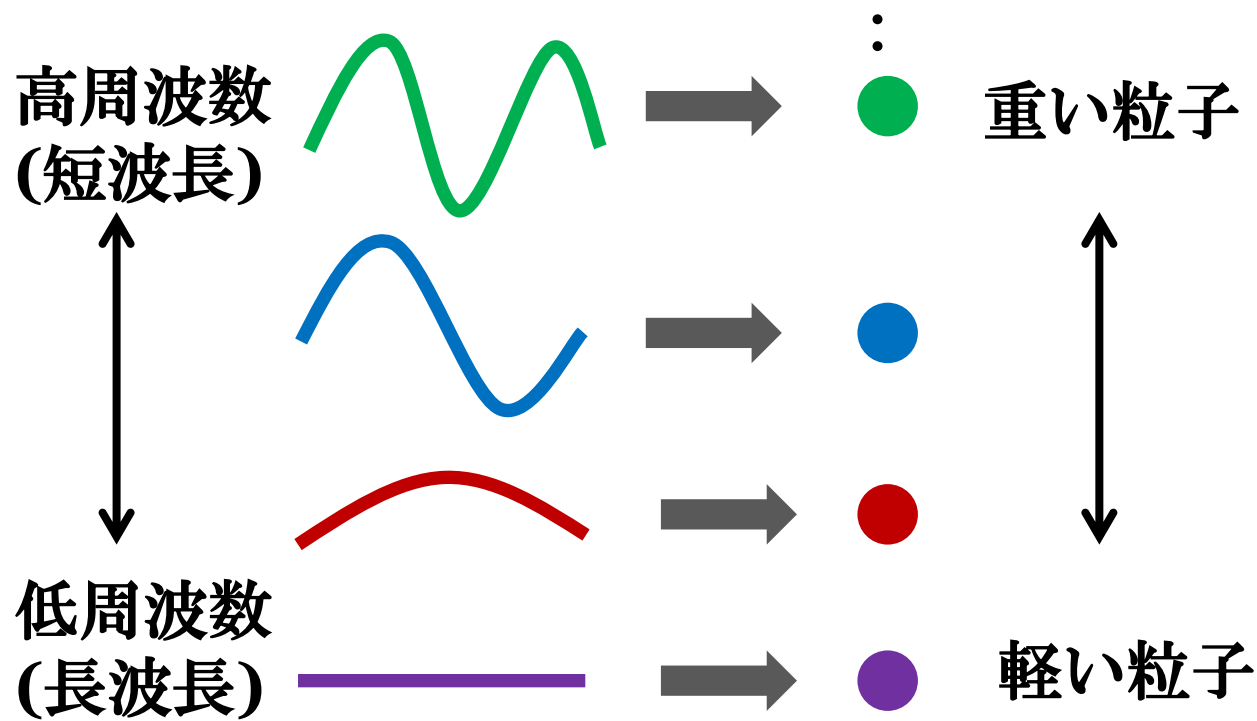
「マイクロ = 高エネルギー」の極限

⇒ 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。

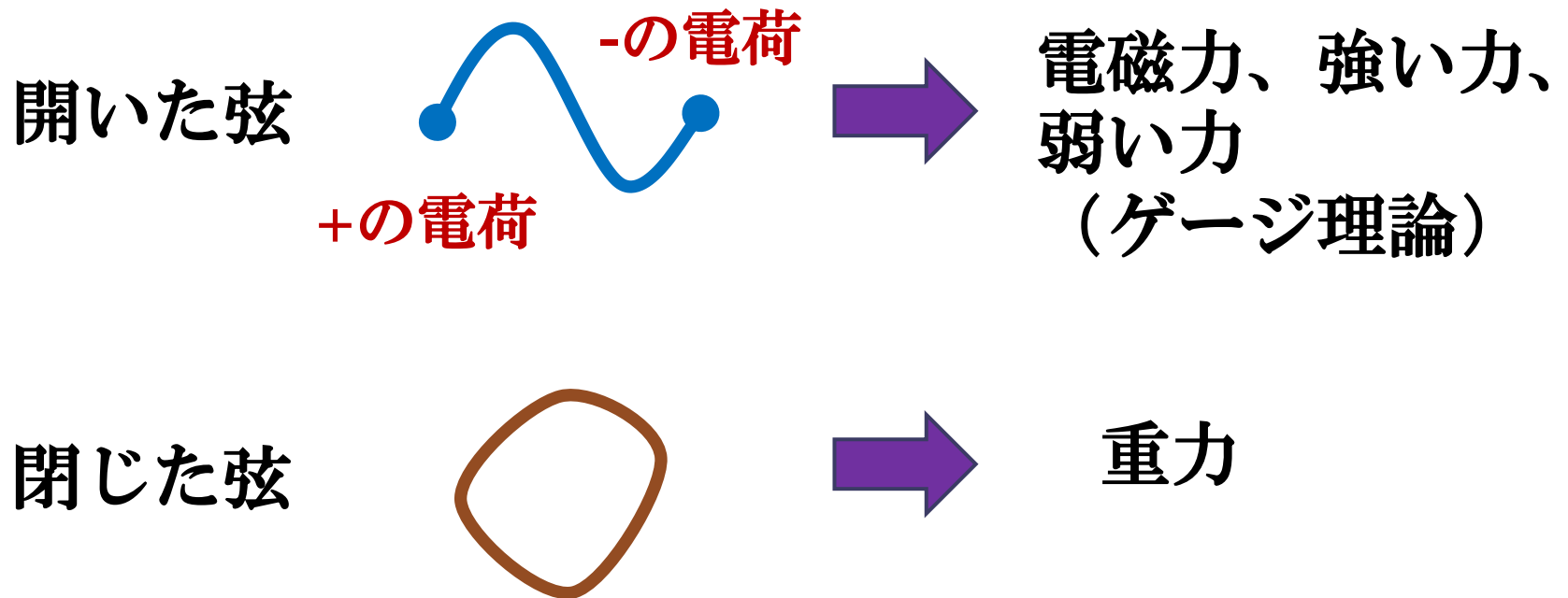
（繰り込みが不可能）

⇒ 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。

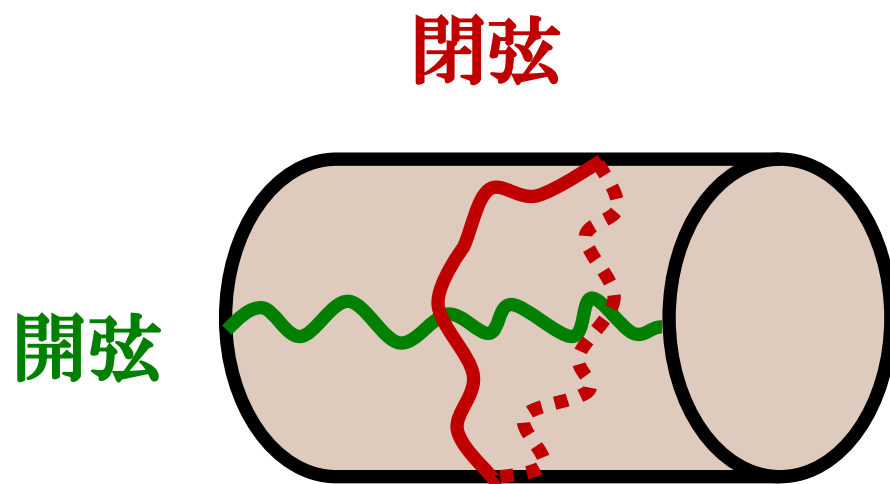


さらに驚くべきことは、ひも理論は、**4つの力が自然に統一**される、



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 ⇒ 物理現象を正しく説明する

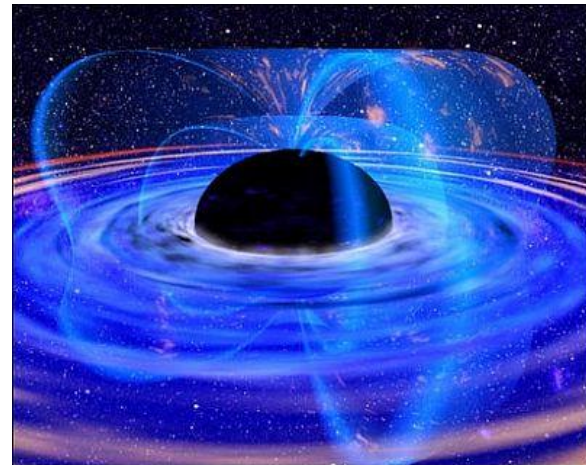
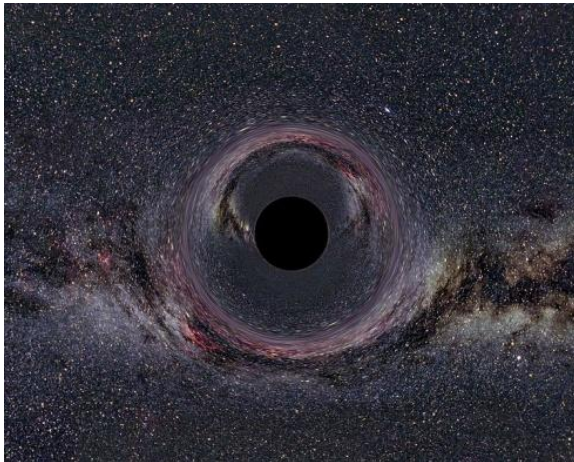
そこで、ひも理論を用いて初めて説明できるような物理現象（重力のミクロな性質）を探そう！

 **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)

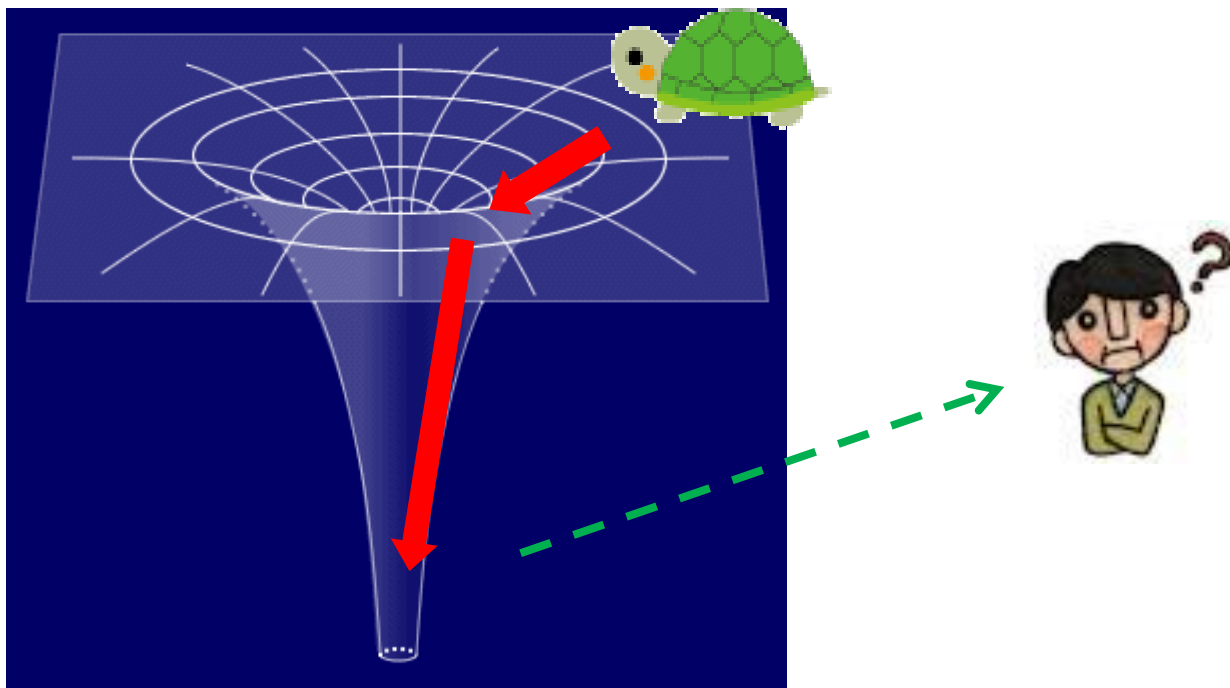
$$r_s = 2G_N m / c^2$$

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 ρ 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！

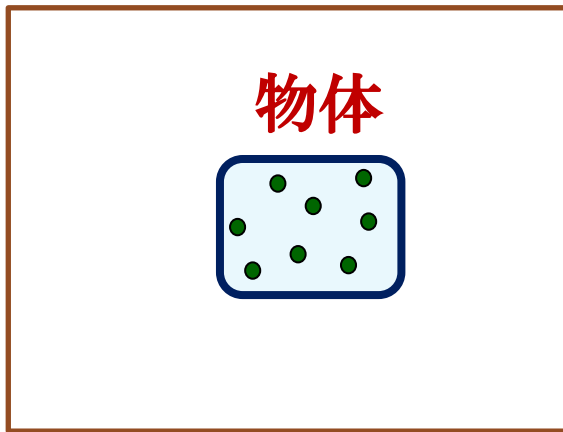
➡ 重力理論の自由度は面積に比例する！

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！

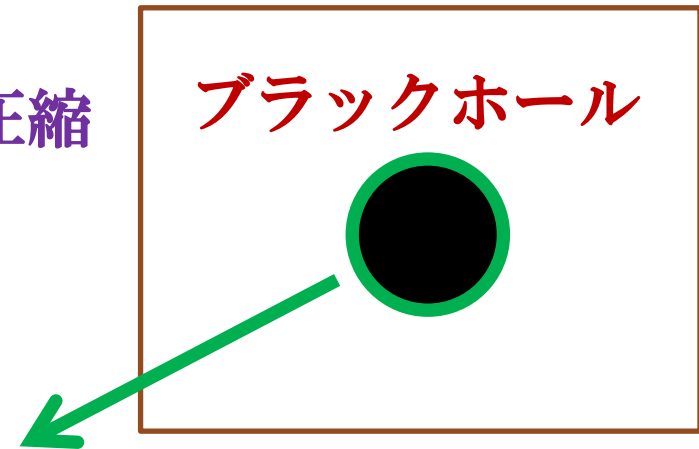
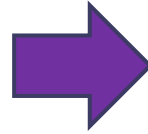
通常物質の熱力学では、エントロピーや
エネルギーは、常に体積に比例するので、
とても不思議である！

➡ 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。

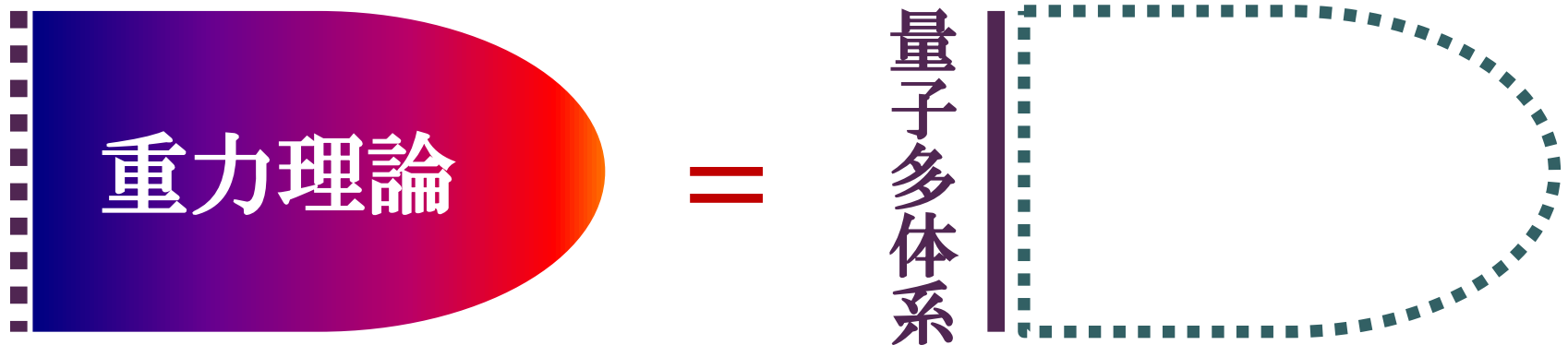
2次元面から、3次元立体画像
を再現する「ホログラム」と
似ている（しかし原理は異なる）



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

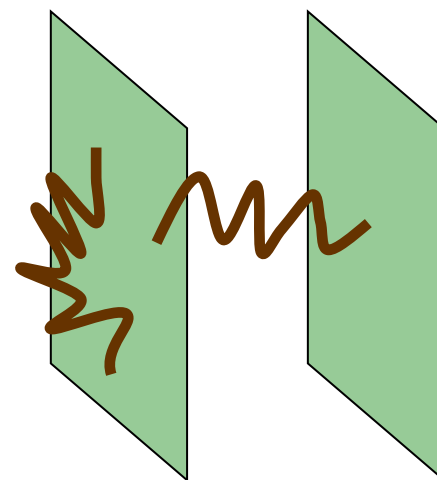
(3-1) ブラックホールエントロピーのミクロな解釈

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。

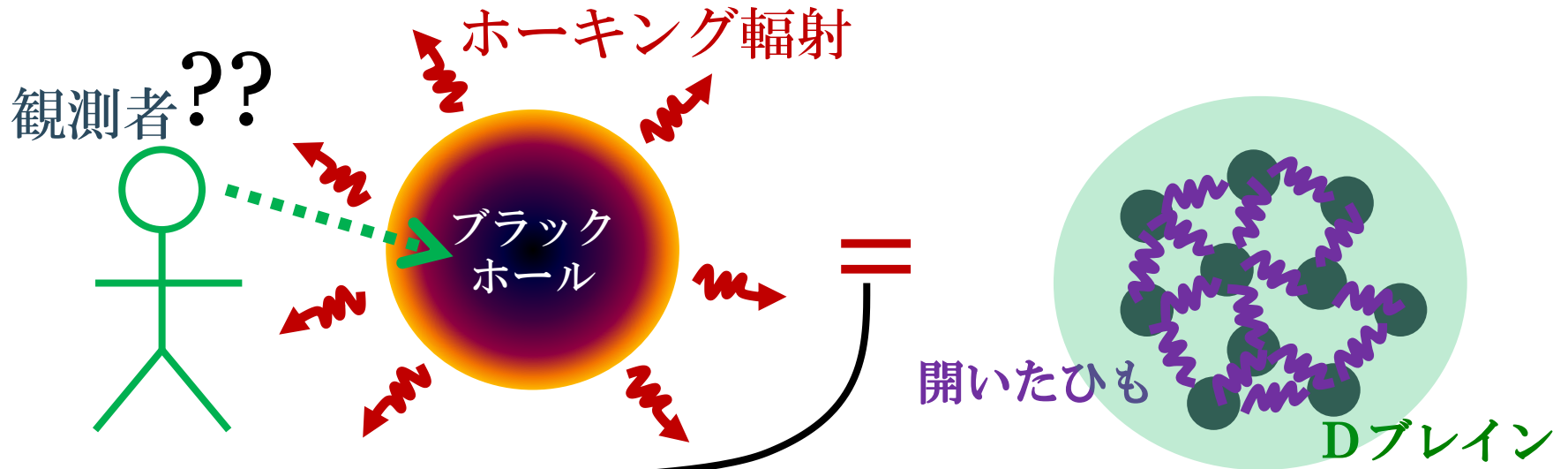
Dブレーン

=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

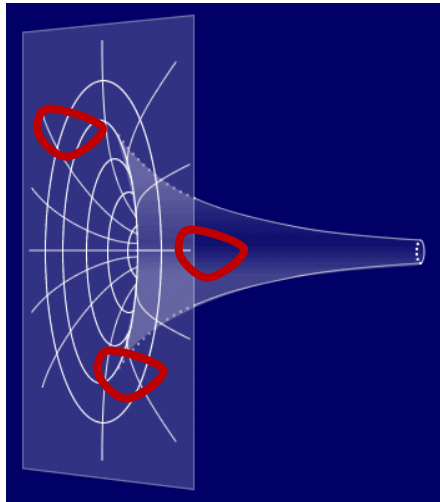
Dブレーインの考察から超弦理論のホログラフィー原理が理解できる。これをAdS/CFT対応と呼ぶ。

(1997 マルダセナ)

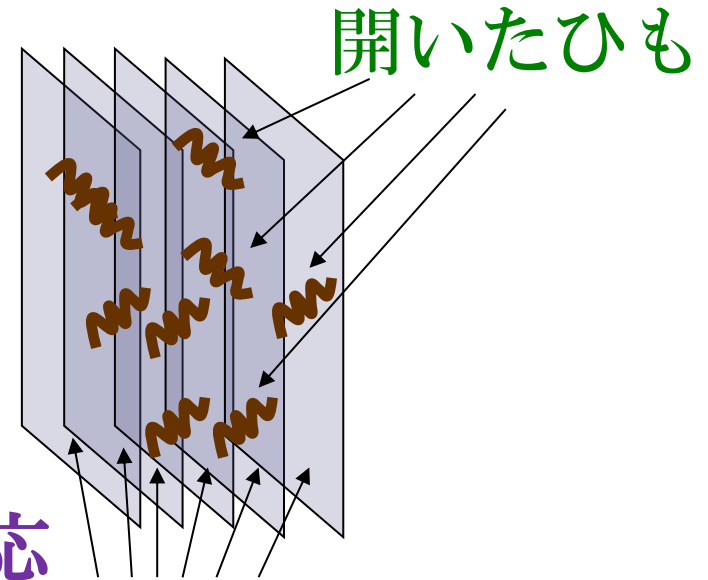
曲がった時空の重力理論 = **物質(Dブレーイン)を記述**
[(d+1)次元] **するミクロな理論**
[d次元]

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



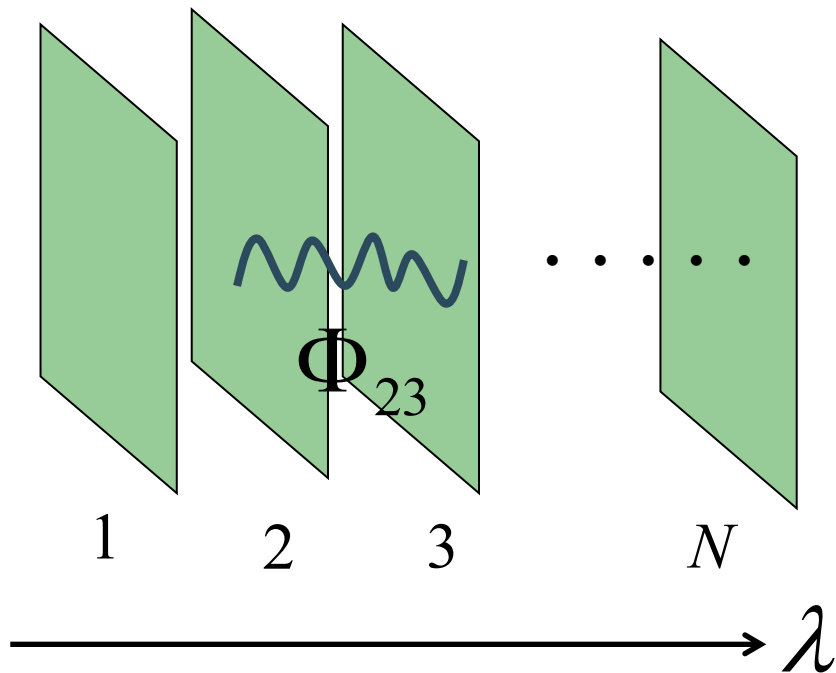
多数のDブレーン
(ゲージ理論、CFT)

↓
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

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

The matrix Φ is shown to be approximately equal to a diagonal matrix with elements $\lambda^{(1)}, \lambda^{(2)}, \dots, \lambda^{(N)}$. Above the matrix, the symbol Φ_{ab} is written.

Dブレーインの理論

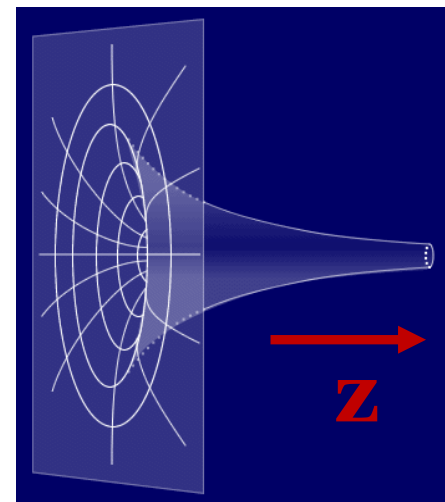
⇒ 行列場 $\Phi_{ab}(x)$ の理論 (ゲージ理論)

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]

$$Z_{\text{重力}} = Z_{\text{CFT}}$$

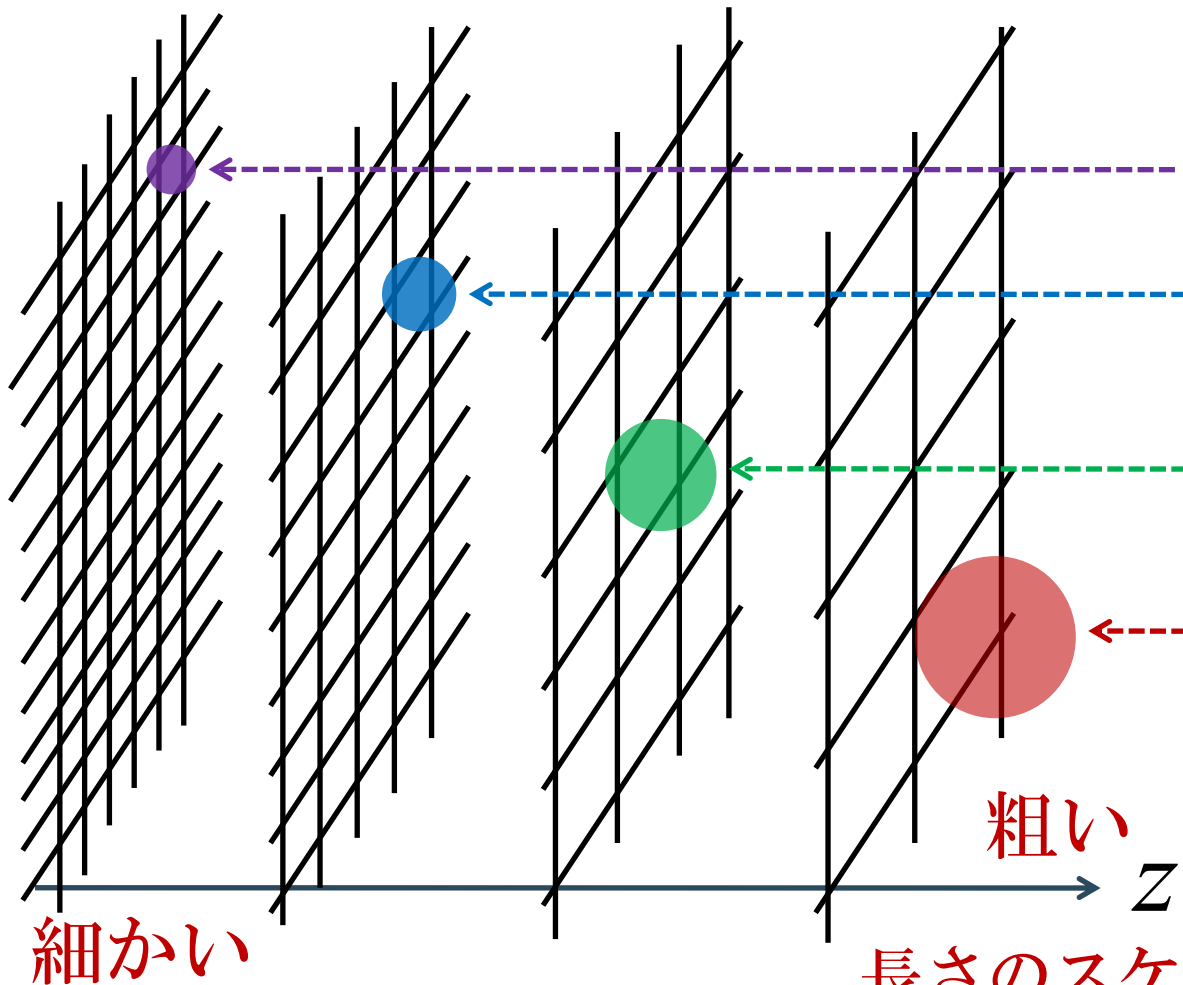
重力理論の分配関数

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

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

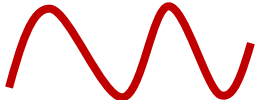



量子状態 = ヒルベルト空間におけるベクトル

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

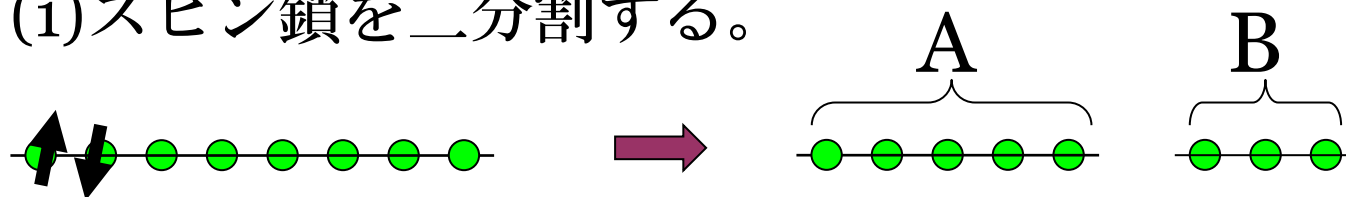
= Bを観測しない時に識別不可なAの状態の数

エンタングルメント・エントロピーの定義

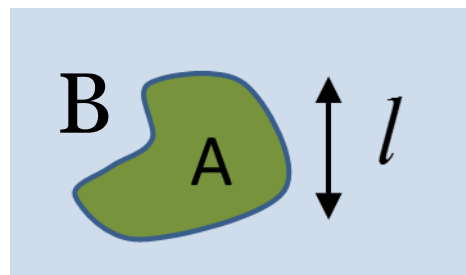
多体系の量子力学において、全体系を部分系AとBに二分割する。それに応じて、ヒルベルト空間は、二つの直積に分かれる。

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

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、 ρ_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]

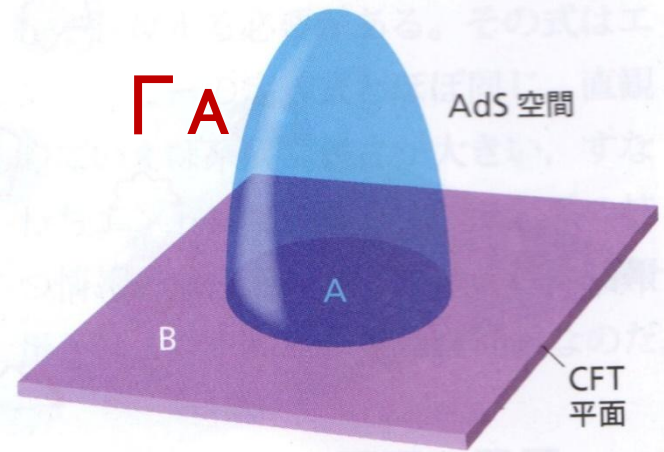
我々の研究で、ミクロな情報量に相当するエンタングルメント・エントロピーが、ホログラフィー原理(AdS/CFT対応)を用い

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

と幾何学的に計算できることが分かった!

ここで Γ_A は、領域Aの境界 ∂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

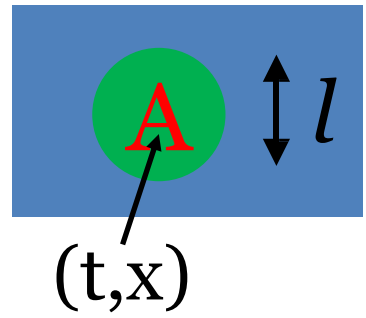
$$\Delta S_A \cong \Delta H_A$$

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]



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

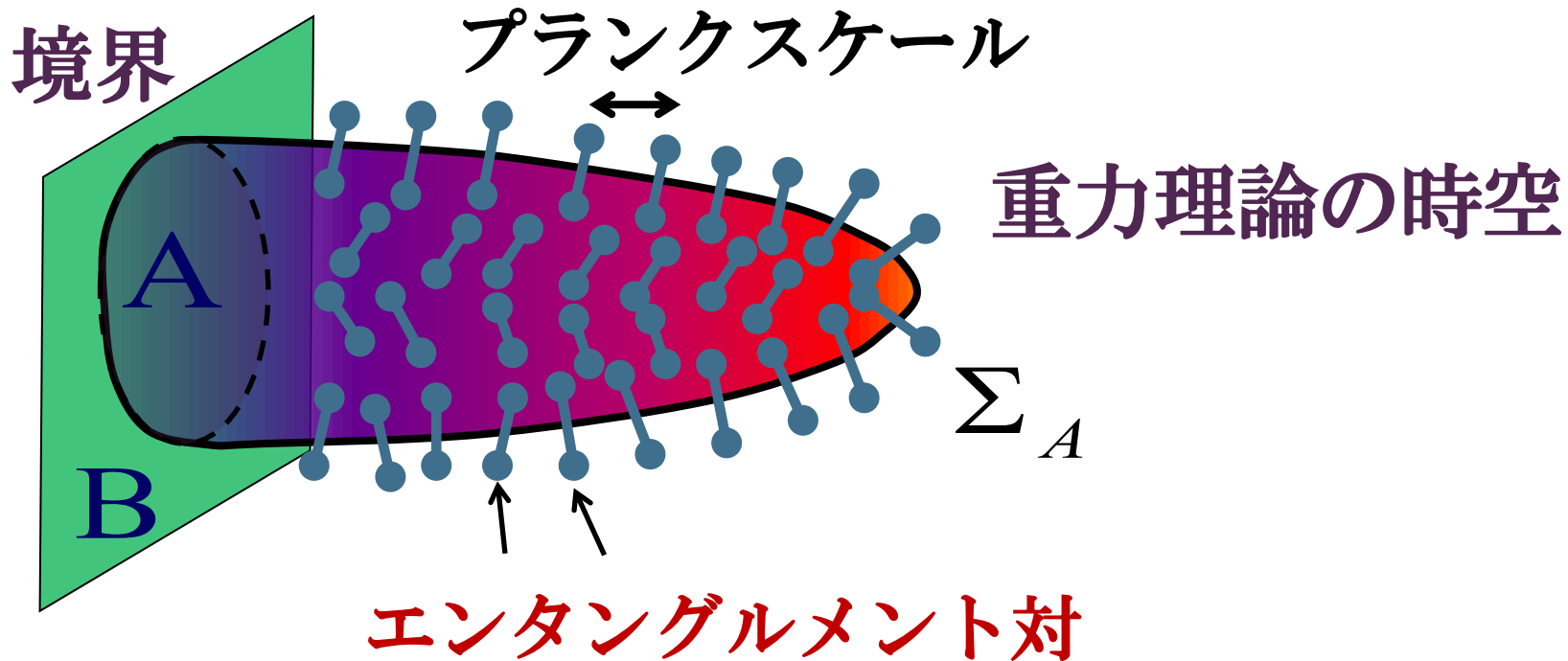


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}$$

➡ 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：

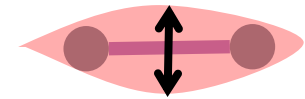
[2009~現在、複数の研究者]

重力理論の「宇宙」

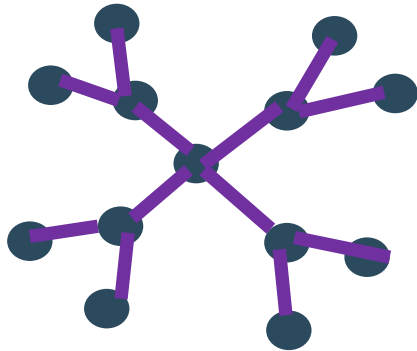
= 量子エンタングルメントのネットワーク



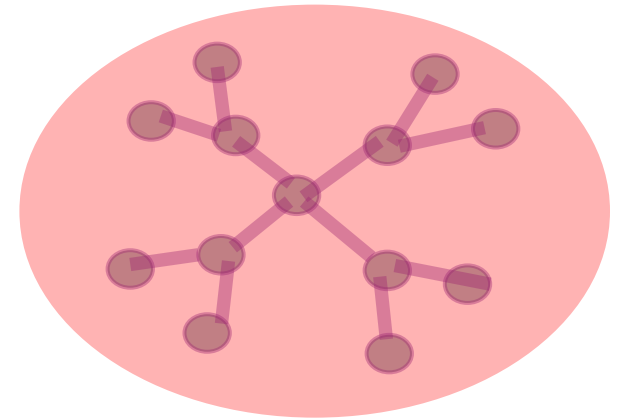
ミクロな宇宙



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」)

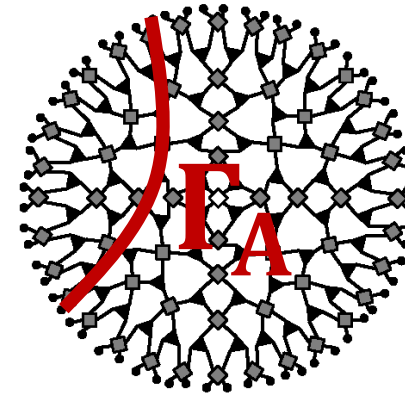


AdS空間の重力理論

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

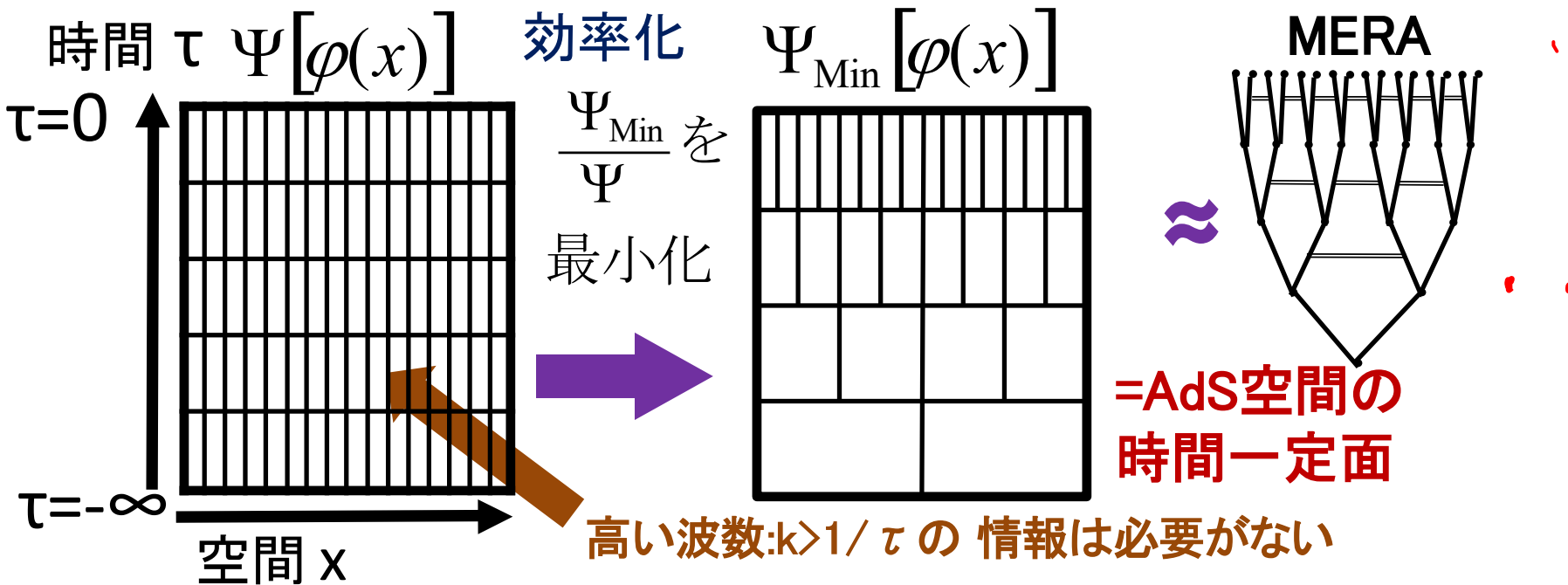
[Caputa-Kundu-宮地-渡邊-高柳 2017,..]

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。

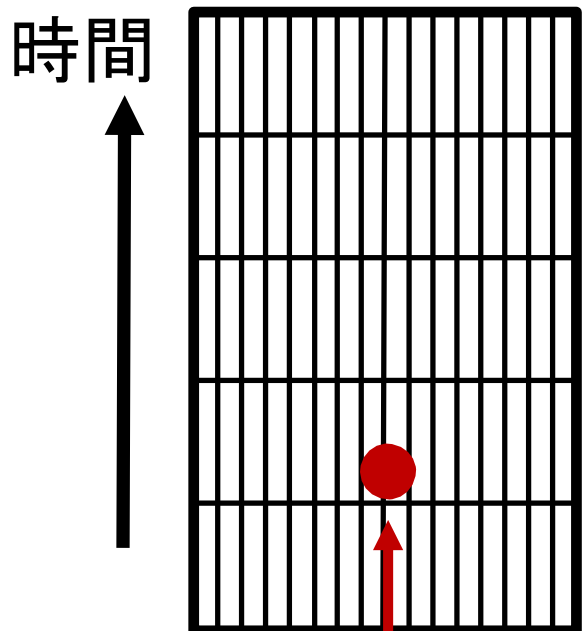
(N = 「量子計算の複雑性」の一種 [Cf. Susskind 2014-])

2次元CFTでは、 $N[\omega]$ はリュービル作用と等しい。

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

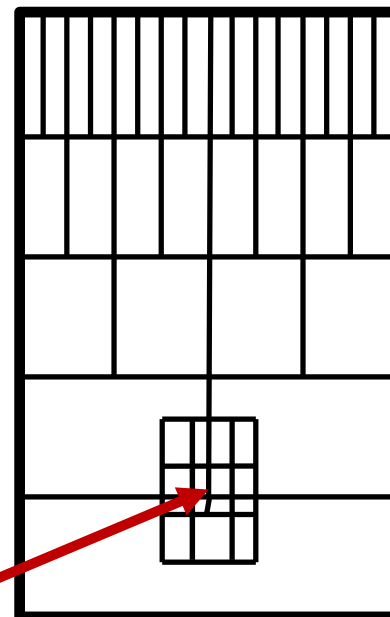
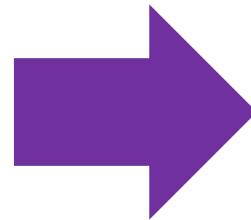
➡ N が最小となるのは、 $e^{2\omega(z)} = z^{-2}$ つまりAdSの計量の時！

経路積分の途中で演算子を挿入して励起すると：



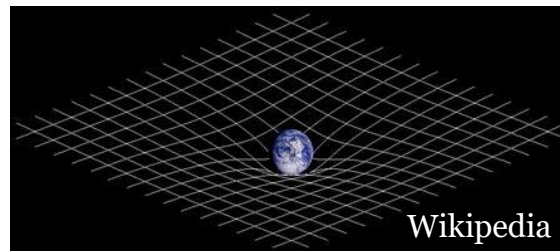
局所的励起
(エネルギー源)

効率化



離散化を細かくする必要がある
= 計量が大きくなる

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！



⑤ 最近の研究について

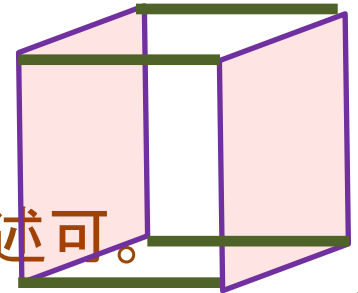
- AdS/BCFT対応の研究
- Moving Mirror模型によるBHの蒸発とページ曲線の導出
- 擬エントロピーの様々な量子多体系における解析
- ドジッター宇宙のホログラフィー (→後述する)
- 時間的な量子エンタングルメントとホログラフィー(→後述する)
-
-

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)

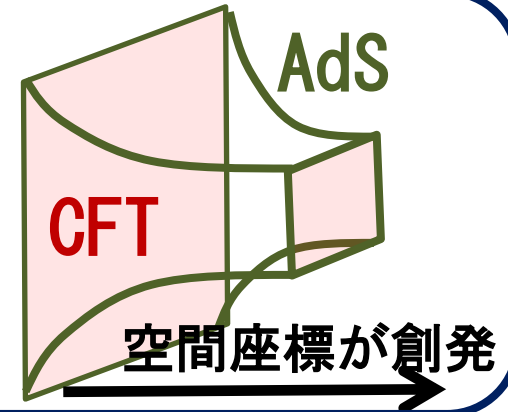
現在の宇宙は、ほぼ平坦。超弦理論で量子重力を記述可。



[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！

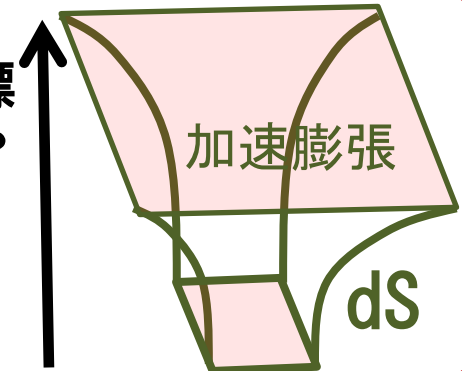


[3] 宇宙定数>0 (曲率>0)

→ 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？



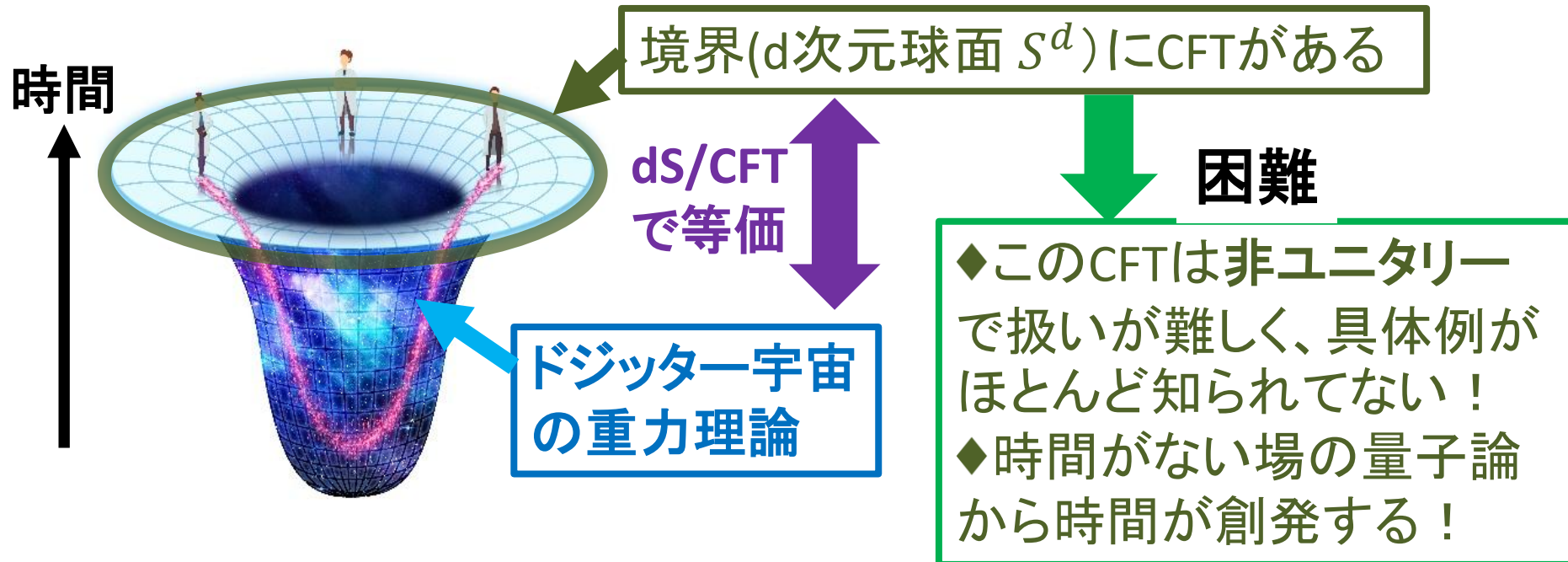
ハイライト1: 三次元ドジッター宇宙のホログラフィー原理

Y. Hikida, T. Nishioka, T. Takayanagi and Y. Taki,

PRL 129 (2022)4,041601 [Editor's suggestion、ViewpointとしてAPSの"Physics"に掲載]

JHEP 05 (2022)129

ドジッター宇宙のホログラフィー原理(dS/CFT対応)の困難



初めて、3次元dS宇宙に対応する2次元CFTの具体例を構成！
ドジッター宇宙の時間軸は、時間的エンタングルメントより創発。

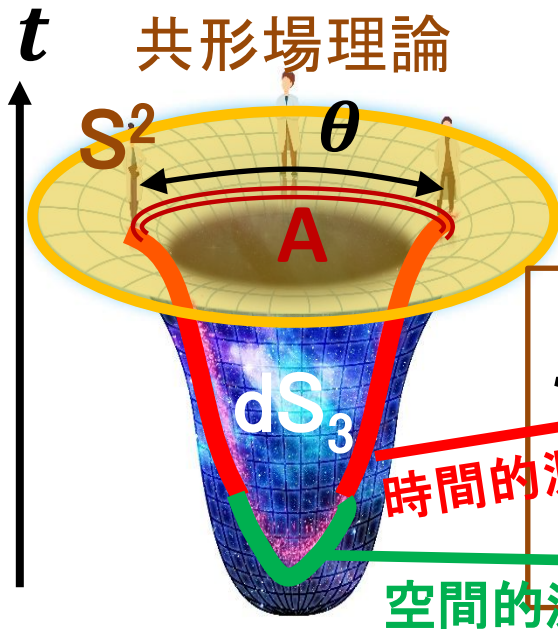
3次元ドジッター宇宙と等価になるCFTの具体例

◆対応するCFTは非ユニタリーで、SU(2)カレント代数のlevel $k \approx -2 + \frac{4iG_N}{L_{ds}}$.

→中心電荷は $c = \frac{3k}{k+2} \approx i \frac{3L_{ds}}{2G_N}$.

となりドジッター宇宙の分配関数と一致:

$$Z_{CFT} \approx e^{\frac{\pi L_{ds}}{2G_N} \sqrt{1-8G_N E}} = Z_{ds}$$



非ユニタリー性により
エントロピーに虚数成分
が現れ、時間が創発する！

$$S_A = i \frac{C_{ds}}{3} \log \left(\frac{2}{\epsilon} \sin \frac{\theta}{2} \right) + \frac{C_{ds}}{6} \pi.$$

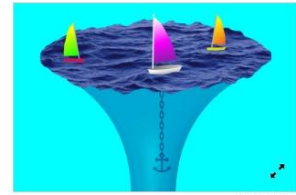
時間的測地線
空間的測地線



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.



[米国物理学会の雑誌PhysicsのViewpointに掲載(2022年7月)]

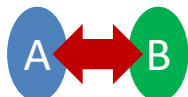
◆擬エントロピーからの摂動的アインシュタイン方程式の導出にも最近成功
→K.Fujiki, M.Kohara, K.Shinmyo, Y.k.Suzuki and T.Takayanagi, JHEP (2026) 04

ハイライト2: 時間的エンタングルメントと時間軸創発

K. Doi, J. Harper, A. Mollabashi, T. Takayanagi and Y. Taki, PRL 130 (2023) 3,031601

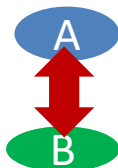
JHEP 05 (2023) 052

素朴な発想



空間的に離れた2つの系の量子相関→量子エンタングルメント
であるが、

時間的に離れた2つの系の量子相関→「時間的量子エンタングルメント」
も導入してみよう。



～因果関係の強さ

ホログラフィー原理からの動機

エンタングルメント・エントロピー = 宇宙の空間的曲面の面積

→反ドジッター宇宙の空間座標が量子エンタングルメントから創発する
が、時間座標はどのように量子情報から創発するのか？

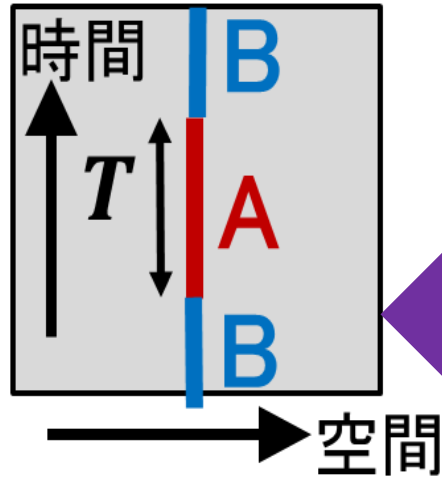
時間的エンタングルメント・エントロピー = 宇宙の時間的曲面の面積？

2次元共形場理論の時間的エンタングルメントとゲージ重力対応

2次元共形場理論における
時間的エンタングルメント・エントロピー

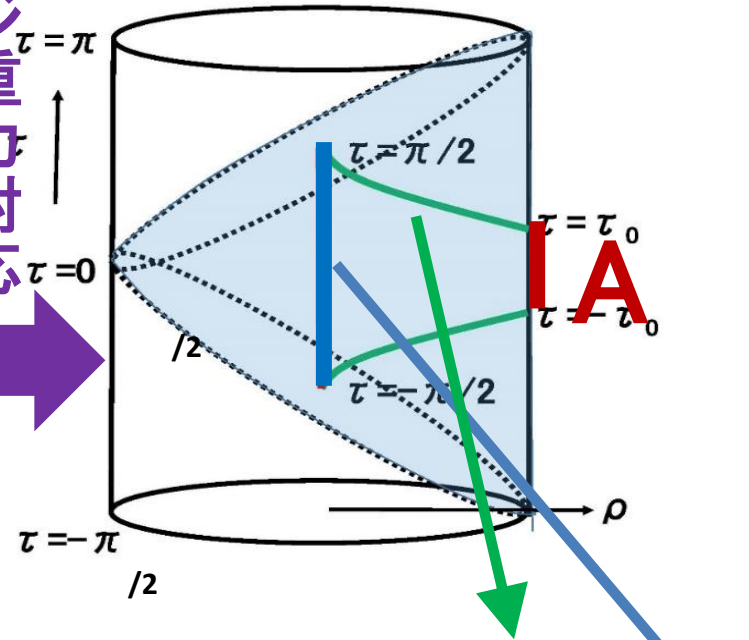
部分系を時間的にウィック回転。
非エルミートに密度行列を一般化。

$$\rho_A^\dagger \neq \rho_A \Leftrightarrow \text{因果関係}$$



ゲージ重力対応

3次元反ドジッター宇宙
の大域的座標における測地線



$$S_A = \frac{C}{3} \log \left[\frac{T}{\varepsilon} \right] + \frac{\pi}{6} iC = [\text{空間的測地線の長さ}] + i \times [\text{時間的測地線の長さ}].$$

時間的エンタングルメント・エントロピーの虚数部分から反ドジッター宇宙の時間軸が創発する！

⑥ おわりに

従来の物理学の考え方

顕微鏡・加速器

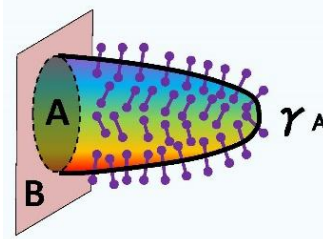


物質 = 素粒子の集まり

創発

高柳らの研究成果
とその最近の発展

「情報量 = 面積」の式
はBHに限らず、実は
一般の宇宙で成立！



我々の新しい方向性

ホログラフィー原理

重力理論は、“最速の量子コンピューター”？

→量子物質の解析、量子計算・暗号へ新しい知見

宇宙 = 量子情報(量子ビット)の集まり？

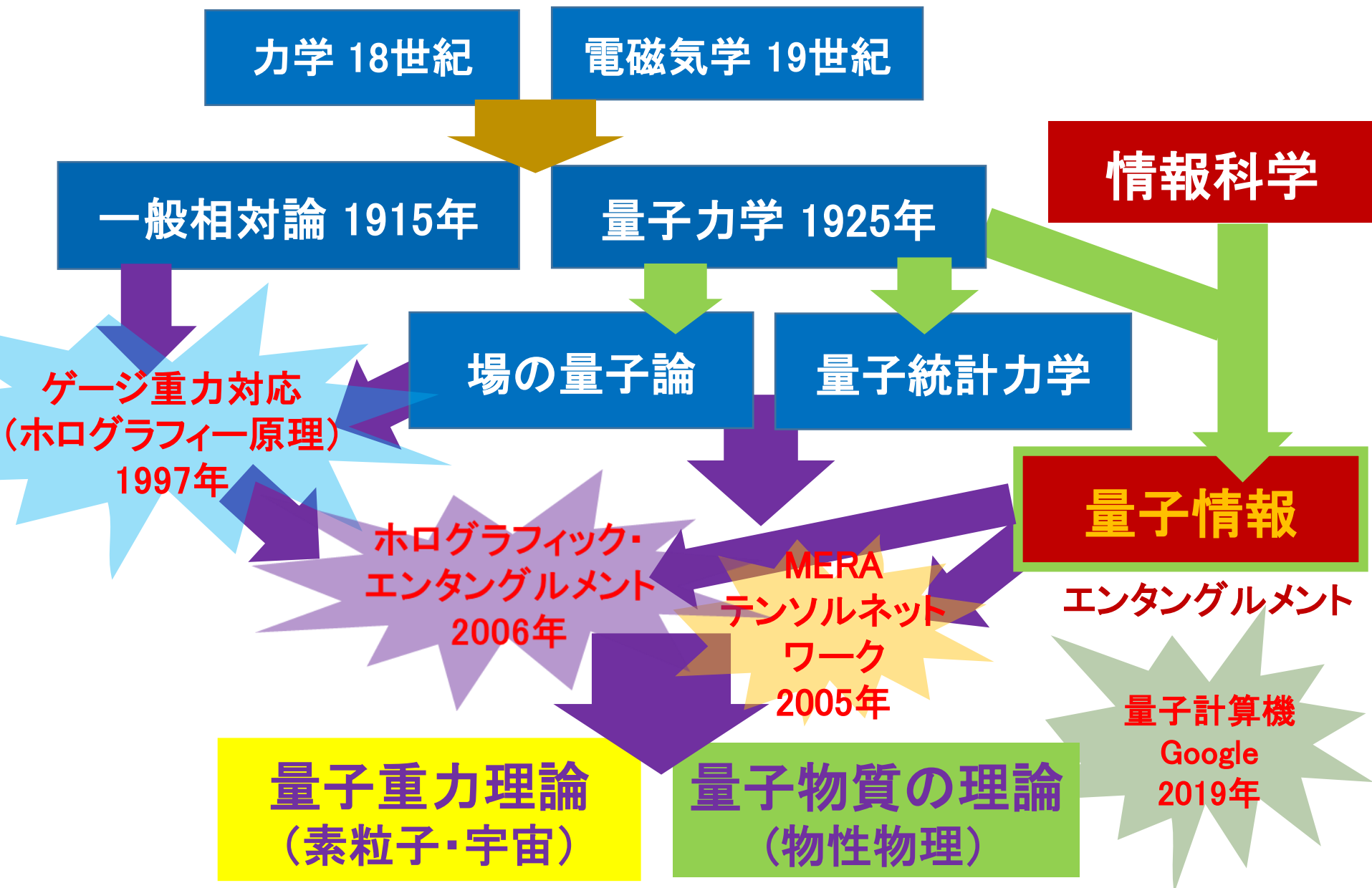
創発

重力理論の時空は量子ビットの集合体？

→量子重力理論を解明するための鍵



物理学の発展における位置づけ



参考文献

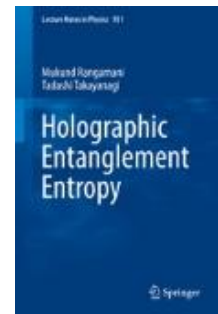
(2-1) 拙著「ホログラフィー原理と量子エンタングルメント」
臨時別冊・数理科学 SGC106 (SDB Digital Books 25)
サイエンス社 2014年



(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。