



宇宙科学談話会 2017年5月24日JAXA

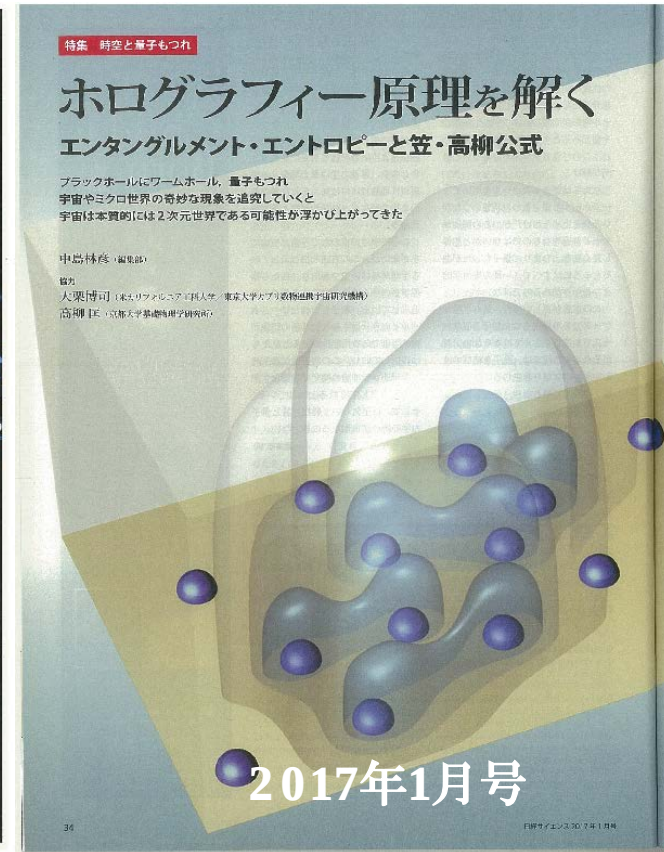
超ひも理論の最前線： 宇宙は量子ビットから 創られているのか？

高柳 匡

京都大学基礎物理学研究所



参考：関連する日経サイエンスの記事

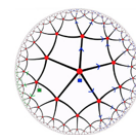


John A. Wheeler, 1990 (ブラックホールの命名者)

“**It from bit** symbolizes the idea that every item of the physical world has at bottom ? a very deep bottom, in most instances ? an immaterial source and explanation; that which we call reality arises in the last analysis from the posing of yes-or-no questions and the registering of equipment-evoked responses; in short, that **all things physical are information-theoretic in origin and that this is a participatory universe.**”



サイモンズ共同研究 「**It from Qubit**: Simons Collaboration on Quantum Fields, Gravity and Information」 (Stanford Univ. ,...Kyoto U.)



It from Qubit
Simons Collaboration

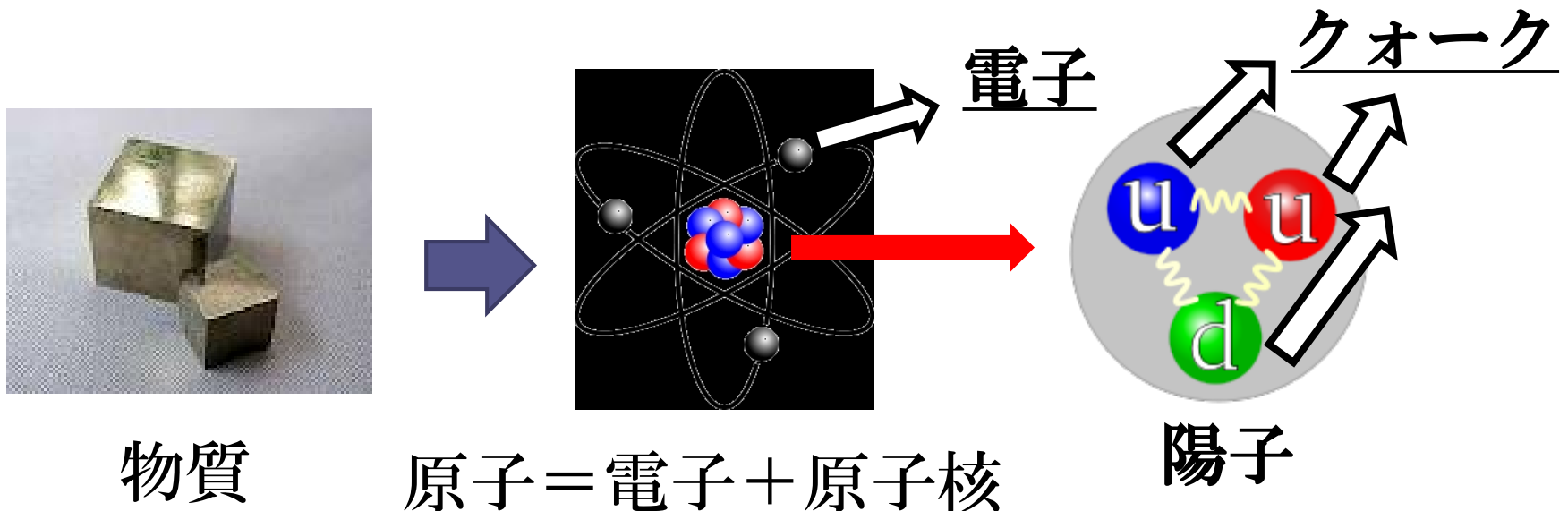
内容

- ①はじめに(超ひも理論とは？)
- ②ブラックホールに隠れた情報
- ③ひも理論とホログラフィー原理
- ④量子もつれとは？
- ⑤量子ビットから宇宙が生まれる？
- ⑥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、最小単位を探求する学問が、素粒子物理。つまり究極にミクロな物理。



この素粒子の考え方は、物質間に働く

- (1) 電磁気力 (静電気、磁力⇒原子の構造)
- (2) 強い力 (核力、QCD⇒原子核の構造)
- (3) 弱い力 (ベータ崩壊、ニュートリノ
⇒宇宙線(ミュー粒子)の崩壊)

という 3 種類の力を考えた場合は、うまくいく。

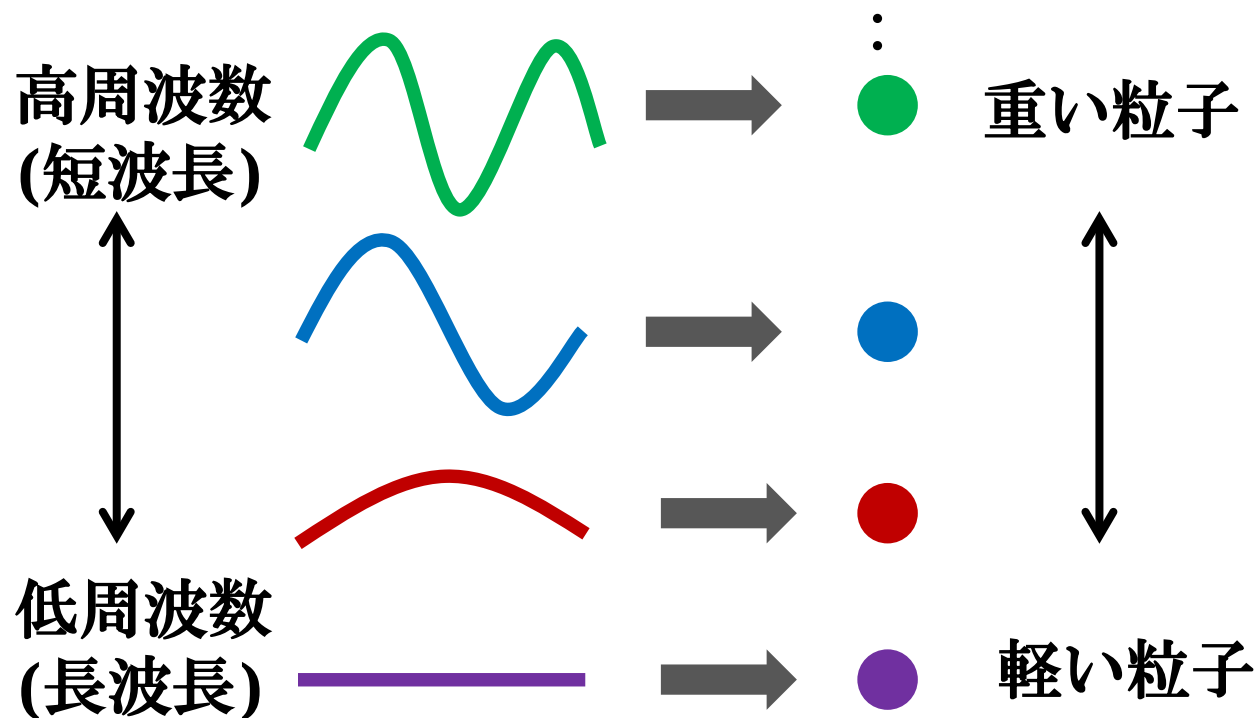
これらの力を統一的に説明するミクロな理論は、
標準模型と呼ばれており、現在では確立している。
(ミクロな理論＝量子論)

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

⇒ 素粒子間の力として重力を扱うと、粒子の大きさはゼロなので、物理量が無限大になってしまう。
[エネルギーは長さ(波長)に逆比例する]

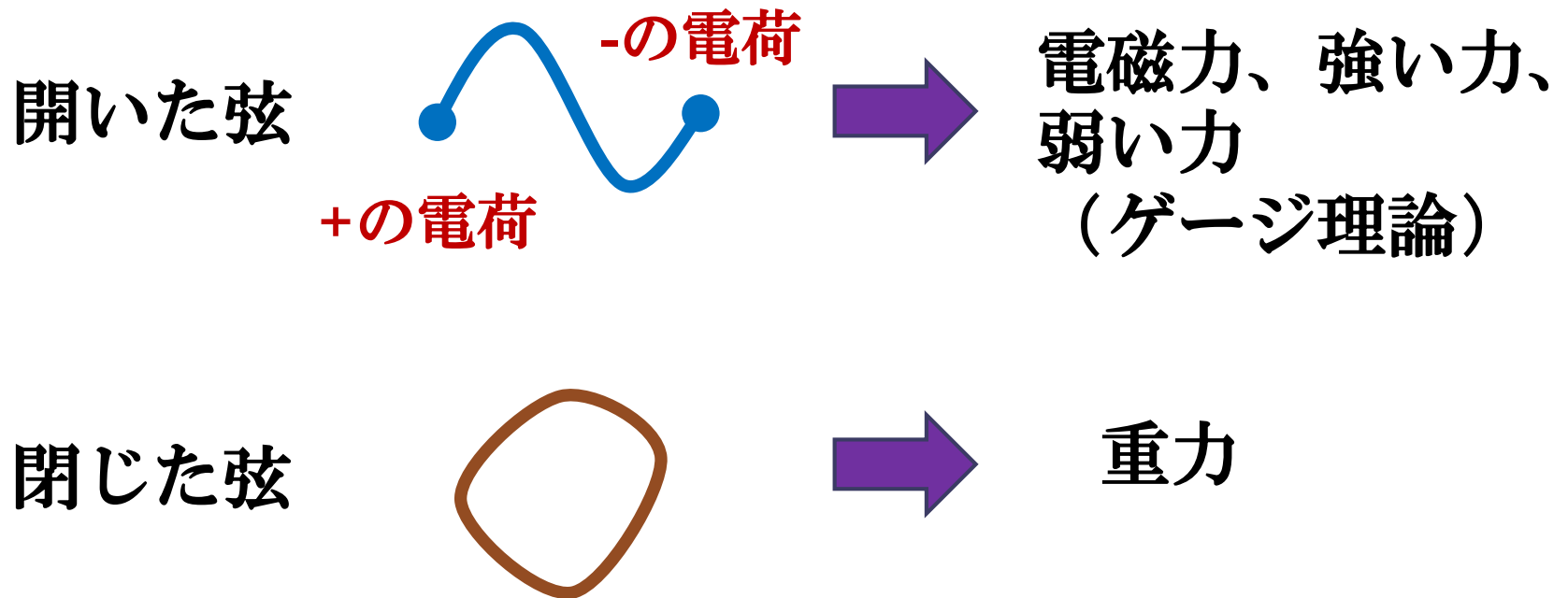
⇒ **サイズがゼロの粒子ではなく、有限の大きさの物体が物質の最小単位であればよい。**

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。[南部-後藤 1970]



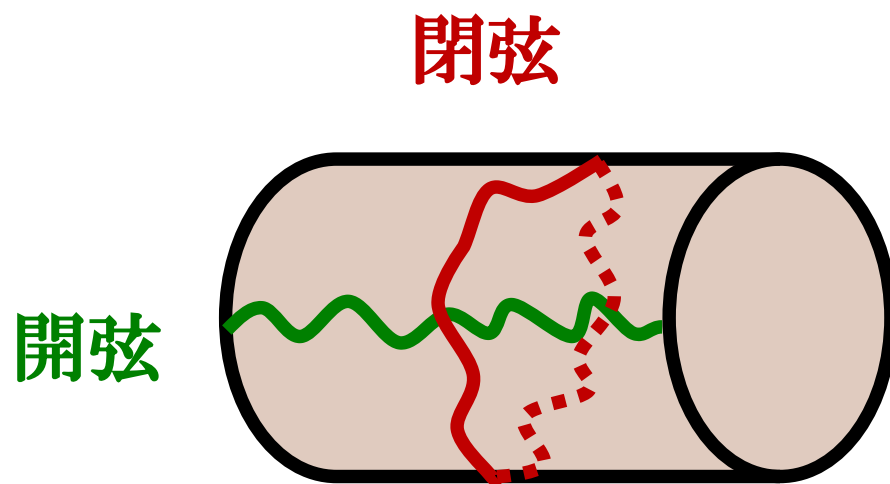
ボーナス：

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」

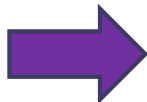


➡ 「電磁気力・核力」と「重力」は同じルーツ？

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」)

[加速器によるひも理論の検証は現実的でない]

②ブラックホールに隠れた情報

(2-1) ブラックホールとは？

非常に重く高密度な天体。
強い重力で引き付けるため、
光ですら外に出ない。



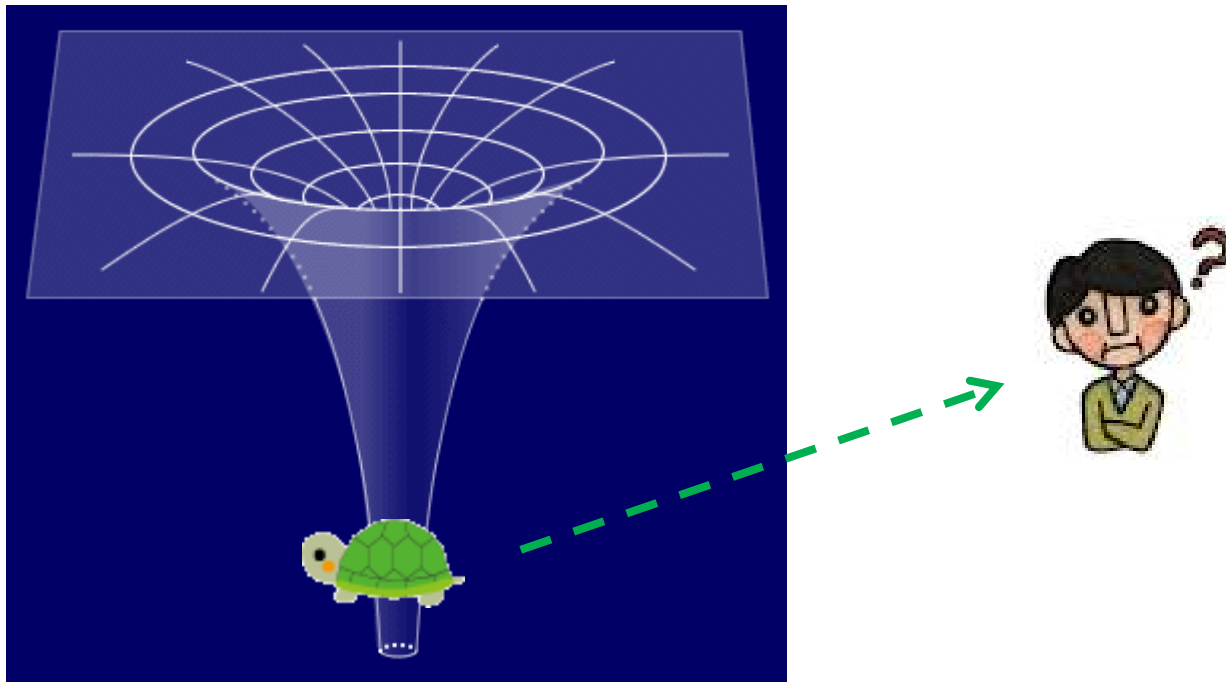
⇐アインシュタインの一般相対性理論

2つのブラックホールの合体
による重力波検出
⇒ GW150914 (LIGO, Virgo)



(2-2) ブラックホールのエントロピーと熱力学

重い星が重力崩壊してブラックホールが形成されるが、もとの星の情報は外から見えなくなる。



物理では、そのような「隠れて見えない情報」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

[少しアドバンストな記述法]

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。

このような動機で、ベッケンシュタインは、**ブラックホールにはエントロピーがある**と予想した。その後、ホーキングによって、次の公式が発見された：

$$S_{BH} = \frac{c^3}{\hbar} \times \frac{A}{4G_N}$$

A : ブラックホールの面積 (→ 幾何学)

G_N : ニュートン定数 (→ 重力、一般相対性理論)

$\hbar$: プランク定数 (→ 量子力学)

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。



ブラックホールの情報は、
すべて表面蓄えられている。

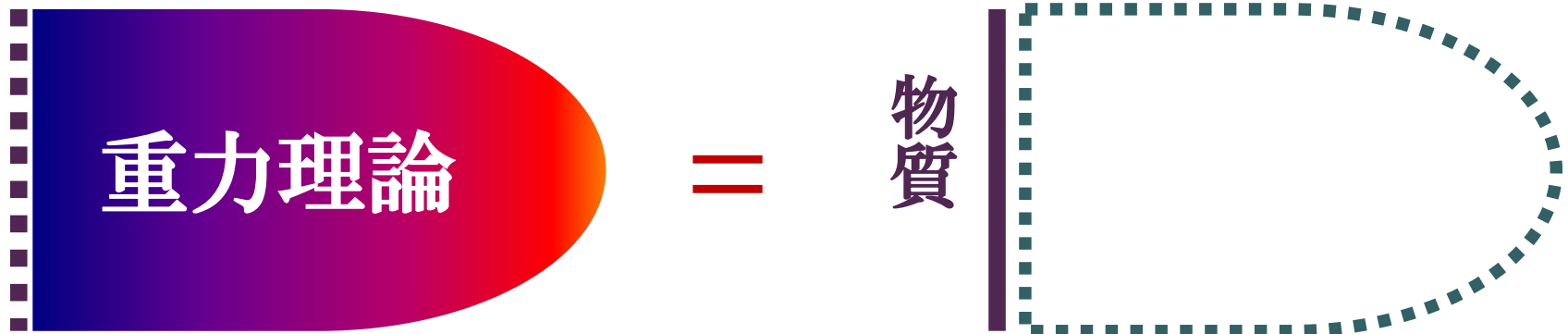
2次元面から、3次元立体画像
を再現する「ホログラム」と
似ている（しかし原理は異なる）



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 = 境界上の物質



(2-3)ブラックホールは蒸発する？

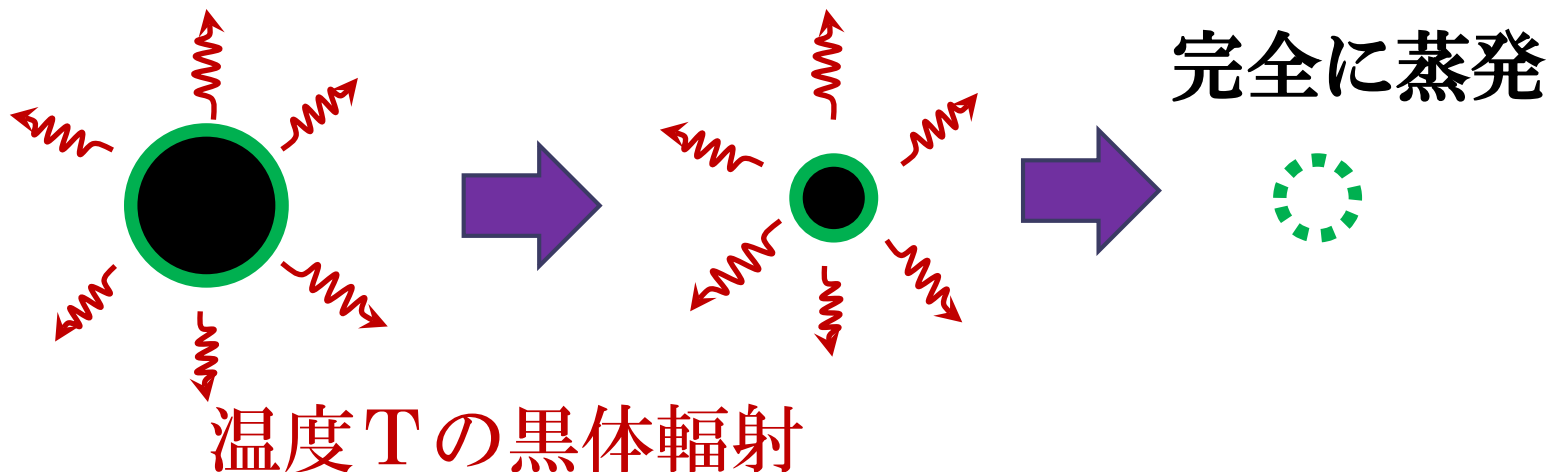
ブラックホールには、エントロピーがあることから予想されるように、熱力学と類似した性質がある。これを**ブラックホールの熱力学**と呼ぶ。

温度	T	$\longleftrightarrow$	表面の重力の強さ
エネルギー	E	$\longleftrightarrow$	ブラックホールの質量
エントロピー	S	$\longleftrightarrow$	ブラックホールの表面積

熱力学で知られる法則もブラックホールに対して成り立つ。(例えば第一法則: $TdS=dE$)

ブラックホールは、温度を持っているので、
電磁波(=光)を放射する（ホーキング輻射）。

注）一般相対論（古典論）では、ブラックホールからは光
すら抜け出せないが、この輻射は量子効果で起こる。



では、ブラックホールの中にあった情報はどこに行っただろうか？

本当に情報が消えてしまうと量子力学の原理（ユニタリー性）と矛盾してしまう！

 **ブラックホールの情報損失のパラドクス**

そこで重力をミクロに記述できる、「ひも理論」を用いてブラックホールを調べてみよう。

③ひも理論とホログラフィー原理

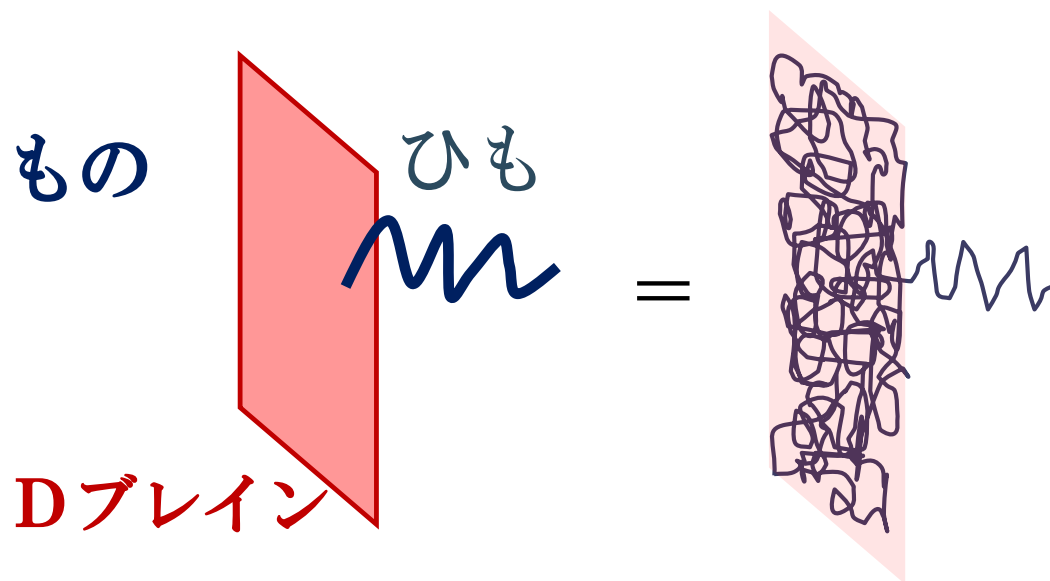
(3-1) ブラックホールのエントロピー

ブラックホールを作るために非常に重い物質が必要。
⇒ひも理論では「**Dブレーン**」が良い候補。

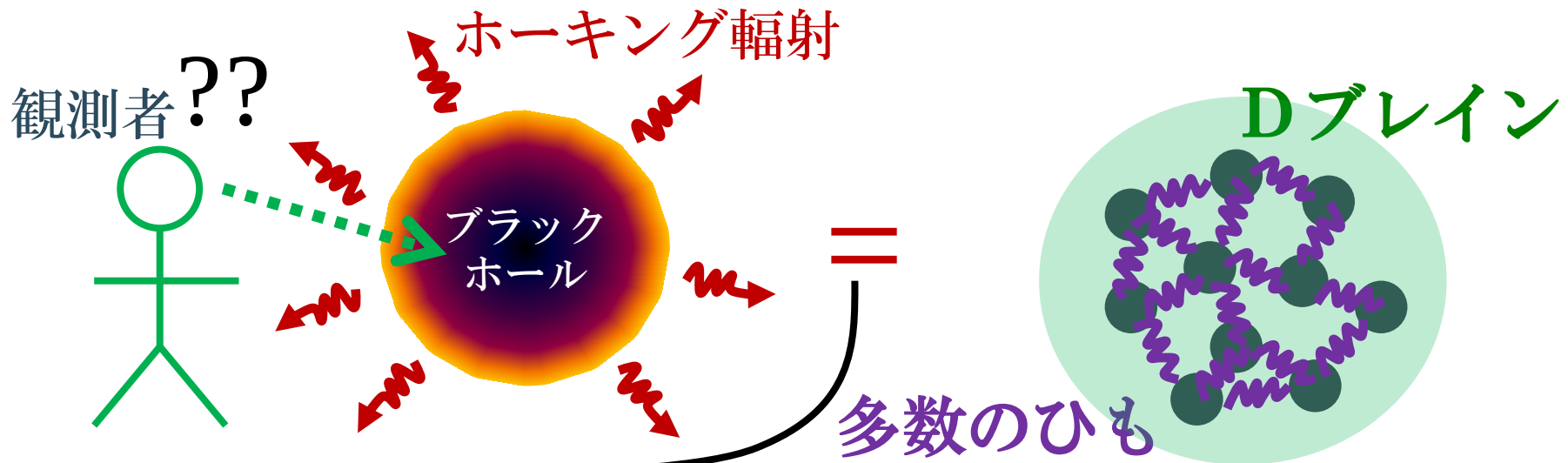
Dブレーン

=ひもの凝縮したもの

⇒ひもが張り付く



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！

1995 ストロミンジャー、ヴァッファ

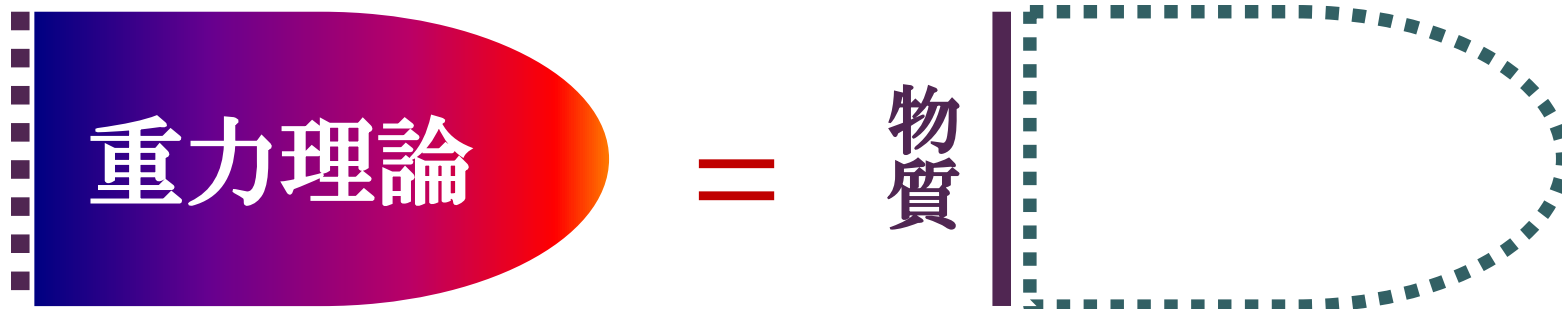
$$S_{BH} = 2\pi\sqrt{Q_1Q_5N} = \frac{A}{4G_N}$$

(3-2) ひも理論のホログラフィー原理

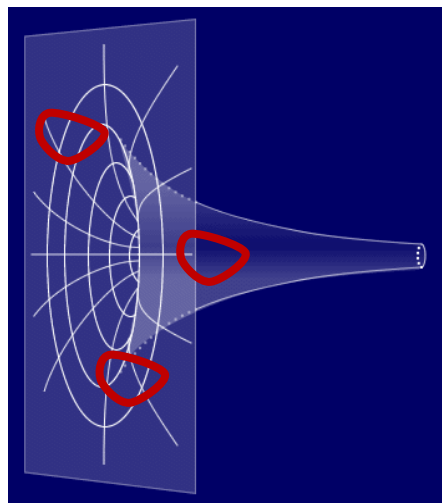
前述の考察を一般化して、ひも理論に対するホログラフィー原理が発見された。

[AdS/CFT対応, 1997 マルダセナ]

曲がった時空の重力理論
[空間 $(d+1)$ 次元+時間] = 物質(Dブレーン)を
記述するミクロな理論
[空間 d 次元+時間]

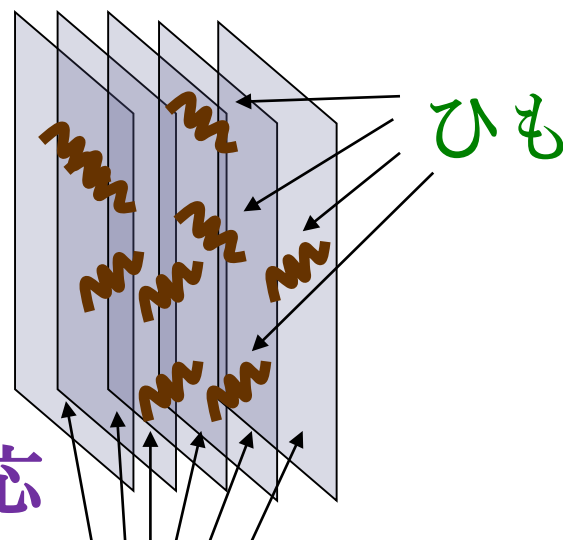


反ドジッター宇宙(AdS) の重力理論



等価
AdS/CFT対応

“物質”のミクロな理論



多数のDブレーン
(ゲージ理論、CFT)

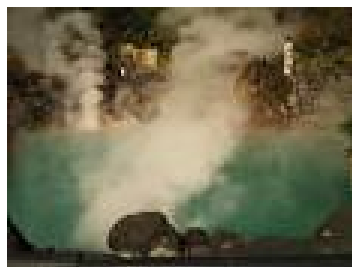
ブラックホールの熱力学
[幾何学的]

等価

物質の熱力学
[量子論的]

さて、ブラックホールの情報損失パラドクスに戻る。

ホログラフィー原理から、ブラックホールの蒸発も、通常の物質に起こるような「液体が気体に蒸発する現象」と同じになる。



従って、情報の損失は、実際には起こらないはずと結論付けられる。

(しかしその詳細は現在議論の的になっている。)

注意



(1) 反ドジッター宇宙⇒負の宇宙定数 Λ を持つ宇宙

ダークエネルギー

現実の宇宙に近いのは

ドジッター宇宙($\Lambda > 0$)だが、
そのホログラフィー原理は
未だ解明されていない。

$$\underbrace{R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab}}_{\text{曲率}} + \underbrace{\Lambda g_{ab}}_{\Lambda < 0 \text{ 宇宙定数}} = 8\pi G_N \underbrace{T_{ab}}_{\text{質量}}$$

曲率

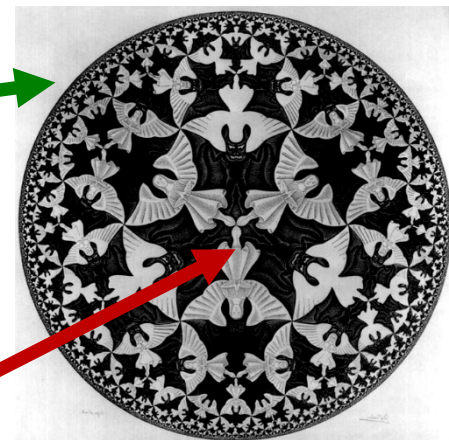
$\Lambda < 0$
宇宙定数

質量

反ドジッター空間の幾何

境界
(物質)

バルク
(重力)



注意



(2) “物質”⇒相互作用が非常に強い物質

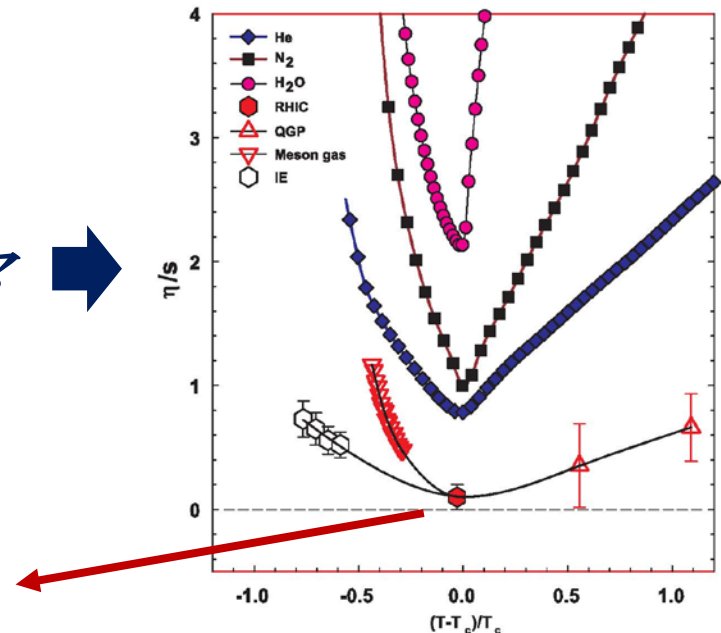
類似例：クォーク・グルーオンプラズマ
高温超伝導体
冷却原子系

金の原子核衝突実験で生じた
クォーク・グルーオンプラズマ
の粘性 η の測定結果

[Lacey et.al. 2006]

最小値はホログラフィー原理の
予言： $\eta/s=1/4\pi$ に近い！

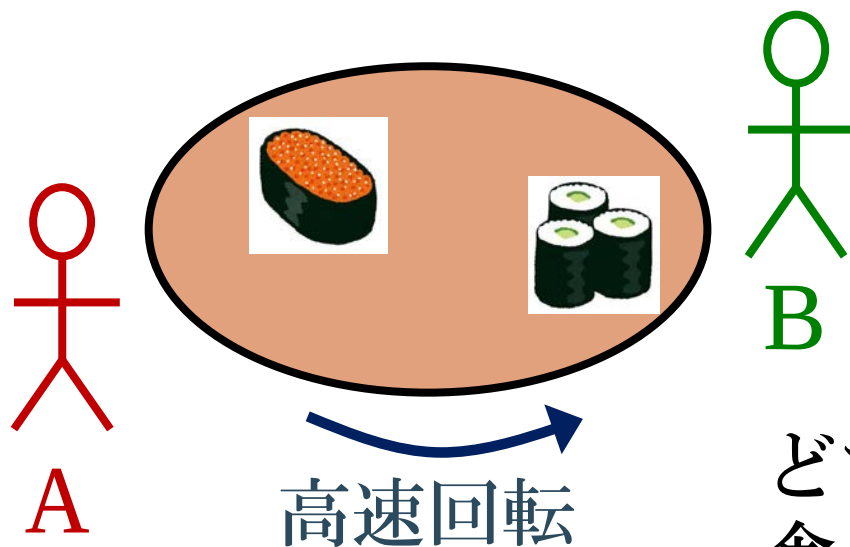
[Kovtun-Son-Starinets 2004]



④量子もつれとは？

「もつれ」とは？

速すぎる回転寿司に行ったAさんとBさんの例：



どちらかがイクラを
食べると、もう一方は
必ずかつぱ巻きを食べる

つまり、次の2つの状態が半々の確率で実現する。

「Aさんがイクラ、Bさんがかつぱ巻き」

+

「Aさんがかつぱ巻き、Bさんがイクラ」

この時、AさんとBさんの食べるものが強く相関している。⇒AとBは「もつれ」ている。

ミクロな理論である量子論に従うと、この「もつれた」状態が基本的な状態として現れる。

これを「量子もつれ」と呼ぶ。

量子論に基づく説明

量子論の基本的なアイデア：

粒子 = 波

例：電磁波＝光子



波は「重ね合わせ」できるので、次の状態も作れる。

$$\text{ある状態 } |\Psi\rangle_A = \underbrace{|0\rangle_A}_{\text{イクラ}} + \underbrace{|1\rangle_A}_{\text{かつぱ巻き}}$$

⇒ 「イクラを食べるAさん」 + 「かつぱ巻きを食べるAさん」

量子もつれの例

AさんとBさんの2人がいる状況を考える：

スピン上向き
(右回転) $|0\rangle = |\uparrow\rangle$

スピン下向き
(右回転) $|1\rangle = |\downarrow\rangle$

[例 1] 直積状態

$$|\Psi\rangle = |0\rangle_A \times |1\rangle_B$$

AとBの状態は独立に決まっており、
両者に相関なし。(量子もつれなし。)

[例 2] もつれた状態(EPR状態)

Einstein-Podolsky-Rosen 1935

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|0\rangle_A \times |1\rangle_B + |1\rangle_A \times |0\rangle_B \right)$$

二つの反対の状態が半々の確率で混じっている。

Aが0であれば、Bは必ず1であり、逆も成り立つ。

このようなAとBの相関が量子もつれ。

AとBの対をEPR対と呼び、量子もつれの単位
(量子1ビット) となる。

ポイント：全体 (A+B) の状態は決まっているが、
部分 (A or B) に制限すると不確定！

量子もつれの応用

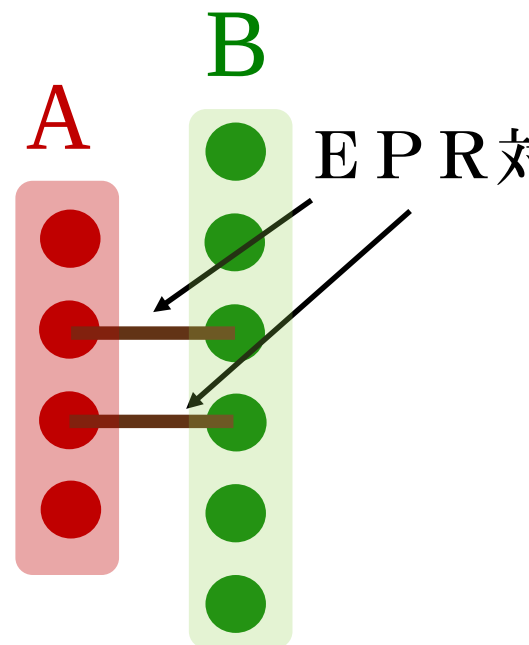
- 量子コンピューター
- 量子テレポーテーション
- 量子暗号
-
-

すべて、二つの系の間の量子もつれをリソースとして利用する。量子もつれの量が「通貨」になる。

もつれのエントロピー (エンタングルメント・エントロピー)

量子もつれの強さを表す量が、「もつれのエントロピー」であり、考えているもつれに相当する EPR 対の数として定義される。

もつれのエントロピー $S(A)$
= A と B の間の EPR 対の数
= B を観測しないと
識別不可な A の情報量



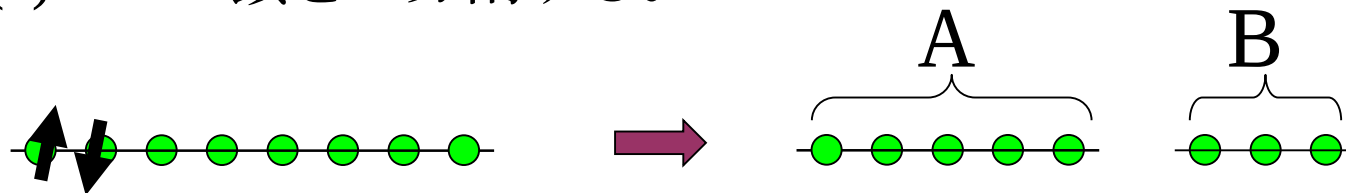
➡ $S(A) = \text{「B に隠れた情報量」}$ $S(A) = 2$

専門的な定義（量子論の知識を仮定）

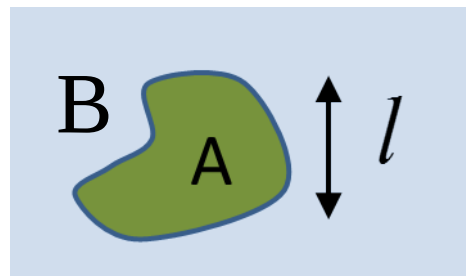
多体系の量子力学において、全体系を部分系AとBに二分分割する。それに応じて、ヒルベルト空間は、二つの直積に分かれる。

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

具体例： (1) スピン鎖を二分分割する。



(2) 場の理論の空間を二分分割する。



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：

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

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

もつれのエントロピーは、 ρ_A に関する
フォンノイマン・エントロピーとして

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

⑤量子ビットから宇宙が生まれる？

「もつれのエントロピー」のホログラフィー公式

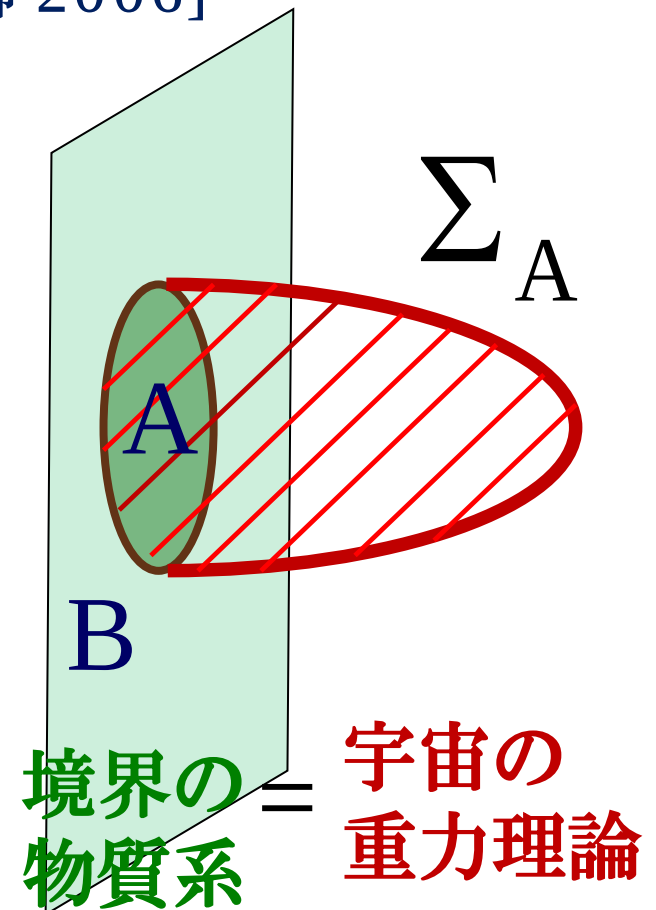
[笠-高柳 2006]

Σ_A をAを取り囲む曲面の中で、
面積が最小となるものとする。

$$S(A) = \frac{\Sigma_A \text{の面積}}{4G_N}$$

↑
物質の情報量

↑
宇宙の面積



コメント

(1) ベッケンシュタイン-ホーキングのブラックホール・エントロピー公式の大幅な一般化である。

(2) 様々な例で、量子論(場の理論)の計算と一致。

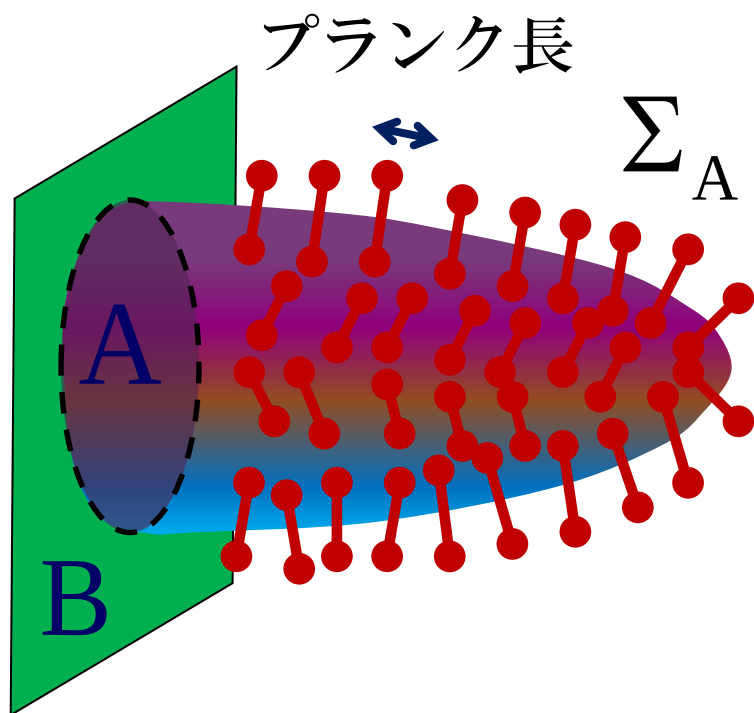
(3) ホログラフィー原理からの直接導出できる。

[2013 マルダセナ-ルコウィッツ]

(4) 基本的な性質(面積則、強劣加法性等)の確認。

“三角不等式”

さて、量子ビットの立場でこの公式を解釈すると、
プランク面積あたり**1ビット**の量子もつれが存在
することを意味する。



$$S(A) = \frac{\text{面積}[\Sigma_A]}{4G_N} = \frac{\text{面積}[\Sigma_A]}{4l_P^2}.$$

$$\text{プランク長: } l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$$

$$= 1.6 \times 10^{-35} m$$

$\Rightarrow 1 \text{ cm}^2$ の面積で 10^{65} 量子ビット

➡ 領域Aのサイズや位置を自由に変えられるので、
量子ビットは時空全体に満ちている！

もつれのエントロピーの熱力学と重力ダイナミクス

もつれのエントロピーも熱力学第一法則を満たす：

$$\Delta S(A) = \Delta H(A) \quad [H(A)=\text{モジュラーエネルギー}]$$

➡ $\left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} - \frac{\partial^2}{\partial \vec{x}^2} - \frac{3}{r^2} \right] \Delta S(A) = 0.$ (r=領域Aのサイズ
x=Aの重心位置)

➡ アインシュタイン方程式 $R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab} + \Lambda g_{ab} = 0$
の摂動方程式

従って、**量子もつれの熱力学=重力のダイナミクス**

このように、ホログラフィー原理は宇宙全体が、量子ビットの集合体と解釈できることを示唆する。

この解釈を具体的に実現するモデルがテンソルネットワークである。

テンソルネットワークは量子的な状態を幾何学的に記述する手法で、複雑な量子系を数値的に解析する強力な道具である。

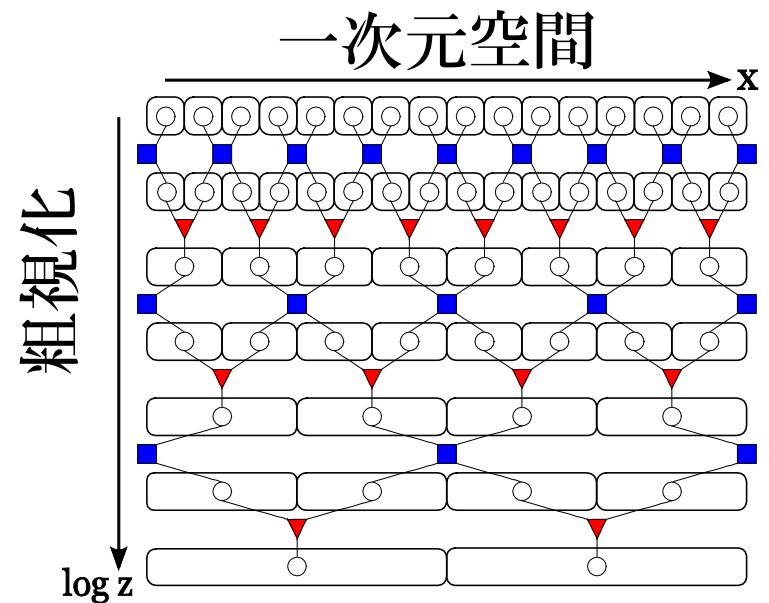


FIG. 2: Curved lines express a primitive “code” of the higher dimensional bulk geometry.

[MERA, Vidal 2005
, Swingle 2009]

重力理論の「宇宙」 = 量子もつれのネットワーク

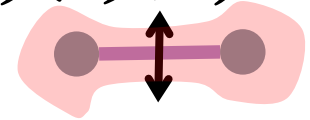
ER=EPR : 「AとBがもつれている」
⇔ 「AとBはワームホールで宇宙内でつながる」

1 ビットの量子もつれ

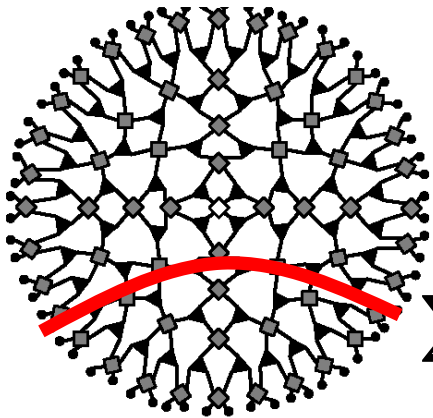


ミクロな宇宙

プランクスケール



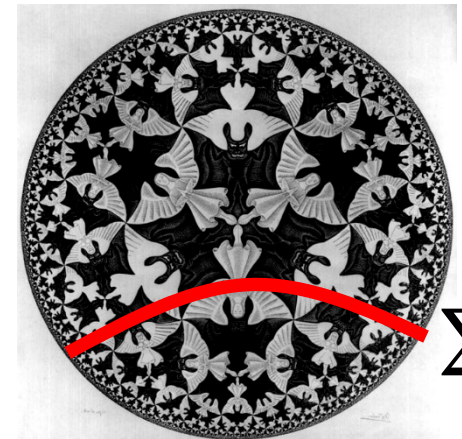
多数の量子もつれ[例:MERGAネットワーク]



Σ_A



反ドジッター
宇宙



Σ_A

⑥おわりに

以上では、**超ひも理論**を用いたブラックホールの考察より生まれたホログラフィー原理を説明した後に、最近の話題である量子もつれとの深い関わり合いを紹介した。

鍵となる対応：

情報量(量子ビット)=面積

量子もつれ=宇宙の幾何構造

量子もつれの時間発展=宇宙のダイナミクス

⇒宇宙は量子ビットから創られる？という予想

では、「我々の宇宙がどのように創られたのか？」

この問いに答えるには、従来のホログラフィー原理で仮定されている負の宇宙定数（負のダークエネルギー、反ドジッター宇宙）を超えて、より大きな枠組みを構築する必要がある。

最重要課題 ⇒ ドジッター宇宙と量子もつれ？

ご清聴ありがとうございました！