

公開シンポジウム「物理学のアプローチが開く世界とその展開」

2022年11月20日@日本学術会議講堂

量子ビットから生まれる宇宙

高柳 匡

京都大学基礎物理学研究所



①はじめに

何がやりたいのか？「量子重力理論を解明したい！」

[注] 量子〇〇理論＝ミクロな〇〇理論 の意味
(例:量子力学→ミクロな物体の運動の法則)

量子重力理論
＝ミクロな重力理論

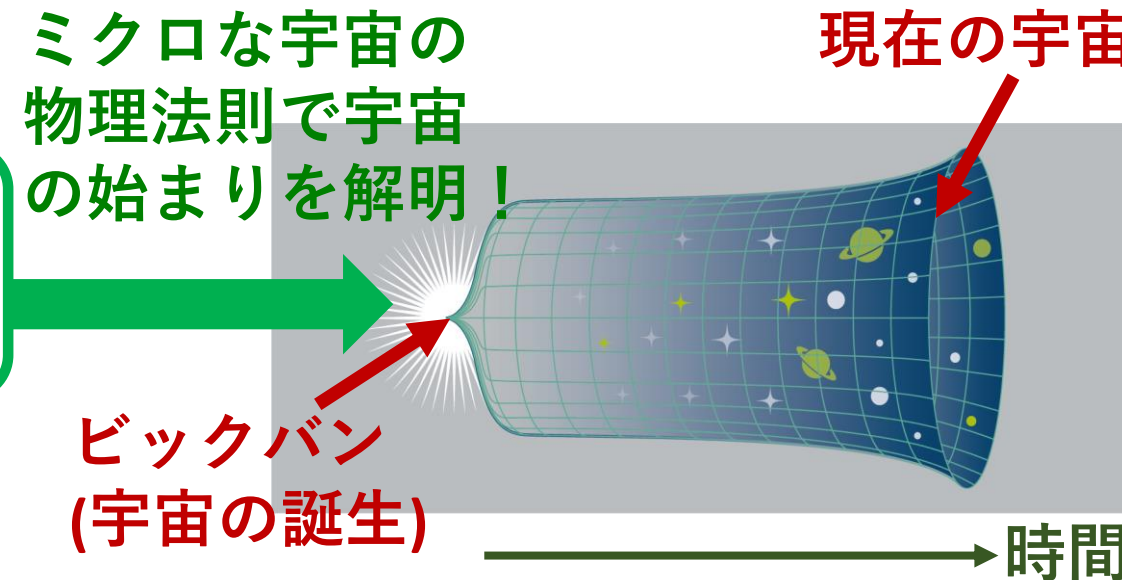
ミクロな宇宙の
物理法則で宇宙
の始まりを解明！

現在の宇宙

ビッグバン
(宇宙の誕生)

時間

量子重力理論の解明が宇宙創成を理解する鍵！



ミクロな宇宙を拡大して理解するために「顕微鏡」が必要。

→ **ホログラフィー原理**が、思考実験における**顕微鏡の役割**！

物性物理
生物・化学



光学顕微鏡
電子顕微鏡
など



電子・スピン・
結晶構造・細胞

高エネルギー物理



加速器



素粒子・原子核

量子重力理論



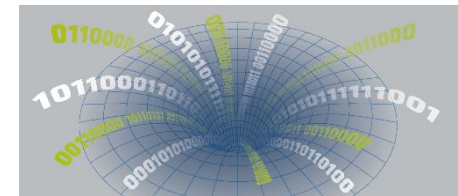
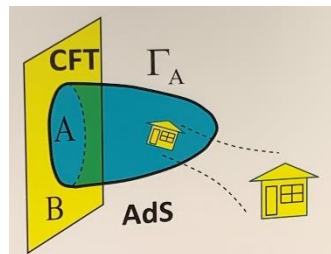
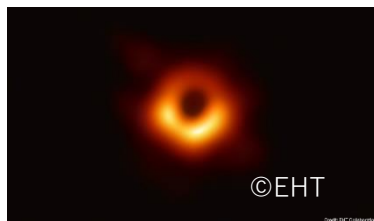
ホログラフィー原理
(ゲージ重力対応)



量子ビット

量子エンタングルメント

～時空のミクロな幾何構造



ホログラフィー原理はブラックホールや初期宇宙など重力理論の時空を拡大する。

ミクロな宇宙の拡大すると見えてくるもの → 量子情報！

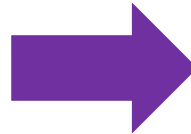
量子ビット = ミクロな世界の1ビットの情報(スピン)



or



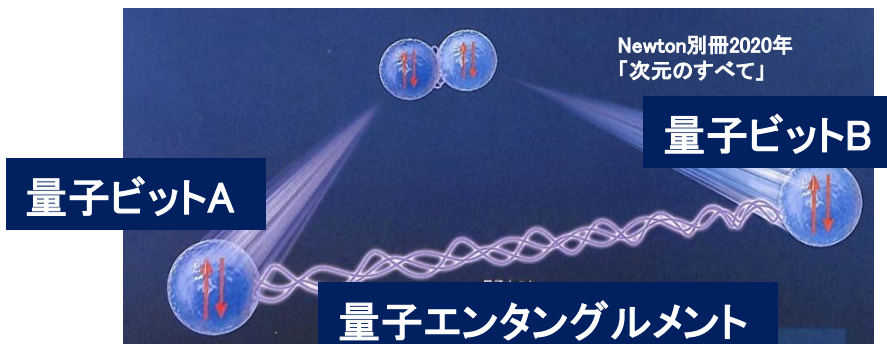
マクロな世界



$a|0\rangle + b|1\rangle$

ミクロな世界

量子エンタングルメント(もつれ) = 量子ビット間の絡み合い(相関)



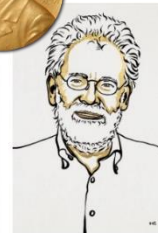
The Nobel Prize in Physics
2022



III. Niklas Elmehed ©
Nobel Prize Outreach
Alain Aspect



III. Niklas Elmehed ©
Nobel Prize Outreach
John F. Clauser



III. Niklas Elmehed ©
Nobel Prize Outreach
Anton Zeilinger

② 量子エンタングルメント

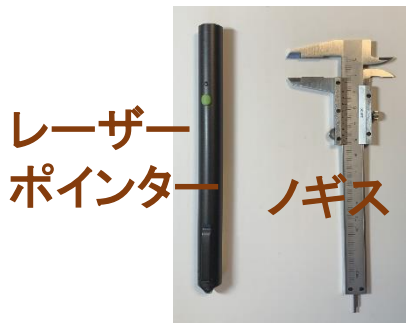
粒子と波の二重性 光の正体について考えてみる。

(A) 光の粒子説 [ニュートン,...]

→ 光は直進するから。(光子)

(B) 光の波説 [ホイヘンス,...]

→ 光は干渉・回折を起こすから。



アルミ箔二枚($20\mu\text{m}$)
のスリットをノギスで作
り、レーザーを入射させ
た像

実は、
どちらも正しい！

アインシュタイン
の光量子仮説 1905年



例えば、電子など、
ミクロな物質は何でも
粒子と波の二重性を持つ！

量子論の基本的性質：粒子と波の二重性

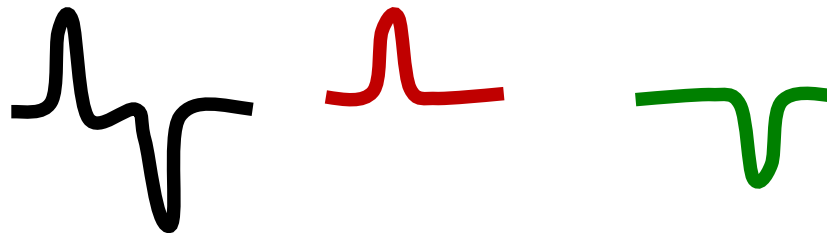
粒子 = 波（波動関数）



→ 波は「重ね合わせ」できる！

量子論の状態 $|\Psi\rangle = a|f\rangle + b|g\rangle$

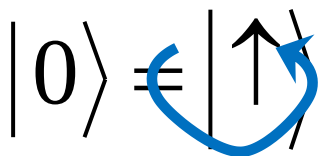
波動関数 $\Psi(x) = a f(x) + b g(x)$ 関数の足し算



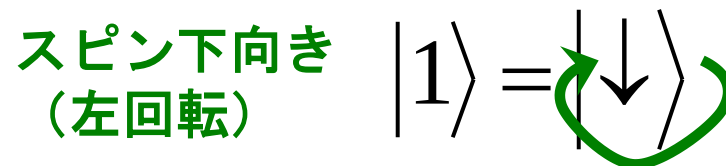
量子ビット

量子状態の例として、電子の持つスピン(自転)を考える。

スピン上向き
(右回転)



スピン下向き
(左回転)



スピン1つの状態 $|\Psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$  1量子ビット

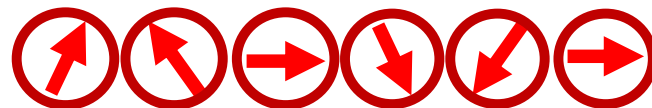
古典計算機

扱う情報: 古典情報
情報量: ビット(二進法)

0 1 0 1 1 0

量子計算機

扱う情報: 量子情報
情報量: 量子ビット



量子エンタングルメント(量子もつれ)

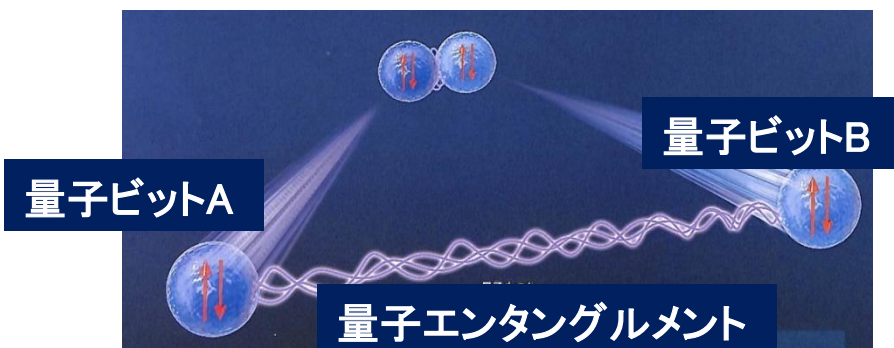
AとBの2つの量子ビットがある系を考える。

次のベル状態を考える:

$$|\Psi_{\text{ベル}}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A |0\rangle_B + |1\rangle_A |1\rangle_B)$$

この時、Aのスピンを測定するだけで、Bのスピンも分かってしまう！

このAB間の相関が、量子エンタングルメント(量子もつれ)である。



全体の状態は決まっているが、
一部に制限すると不確定！

エンタングルメント・エントロピー (EE)

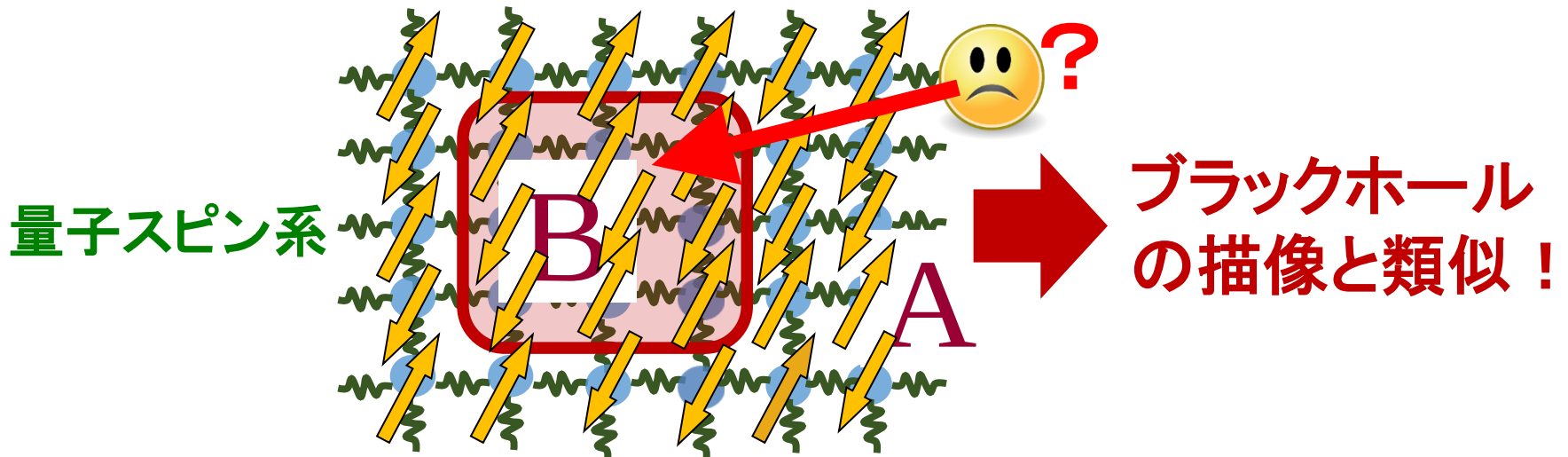
量子エンタングルメントの大きさを測る量

➡ エンタングルメント・エントロピー (EE)

AB間のエンタングルメント・エントロピー S_A

= AB間に存在するベル状態の数

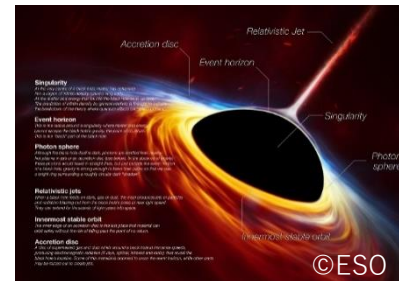
(= Bを観測できない場合に失う情報量)



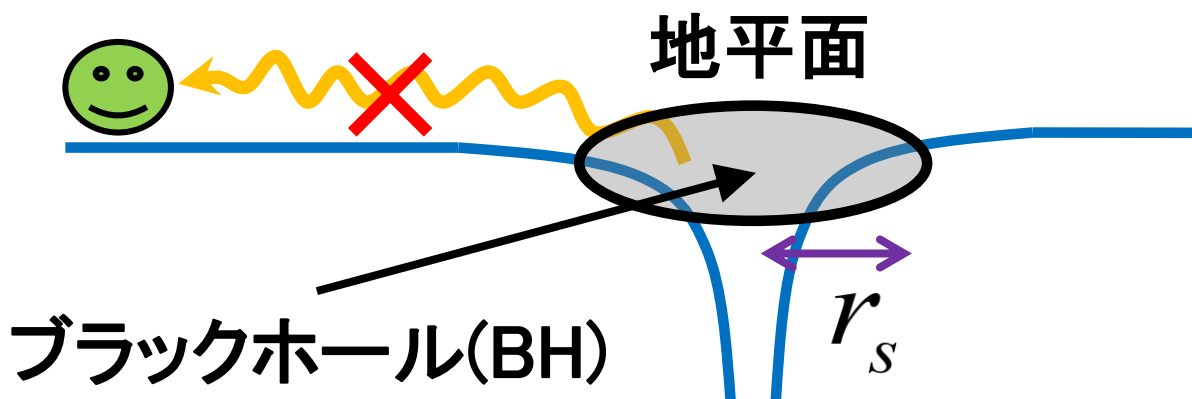
③ ブラックホール(BH)とエントロピー

ブラックホール時空

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、光ですら内部から出てくることができない。⇒ブラックな天体



➡ 一般相対論に特有の現象！



シュワルツシルド半径

$$r_s = 2G_N M$$

M=太陽質量

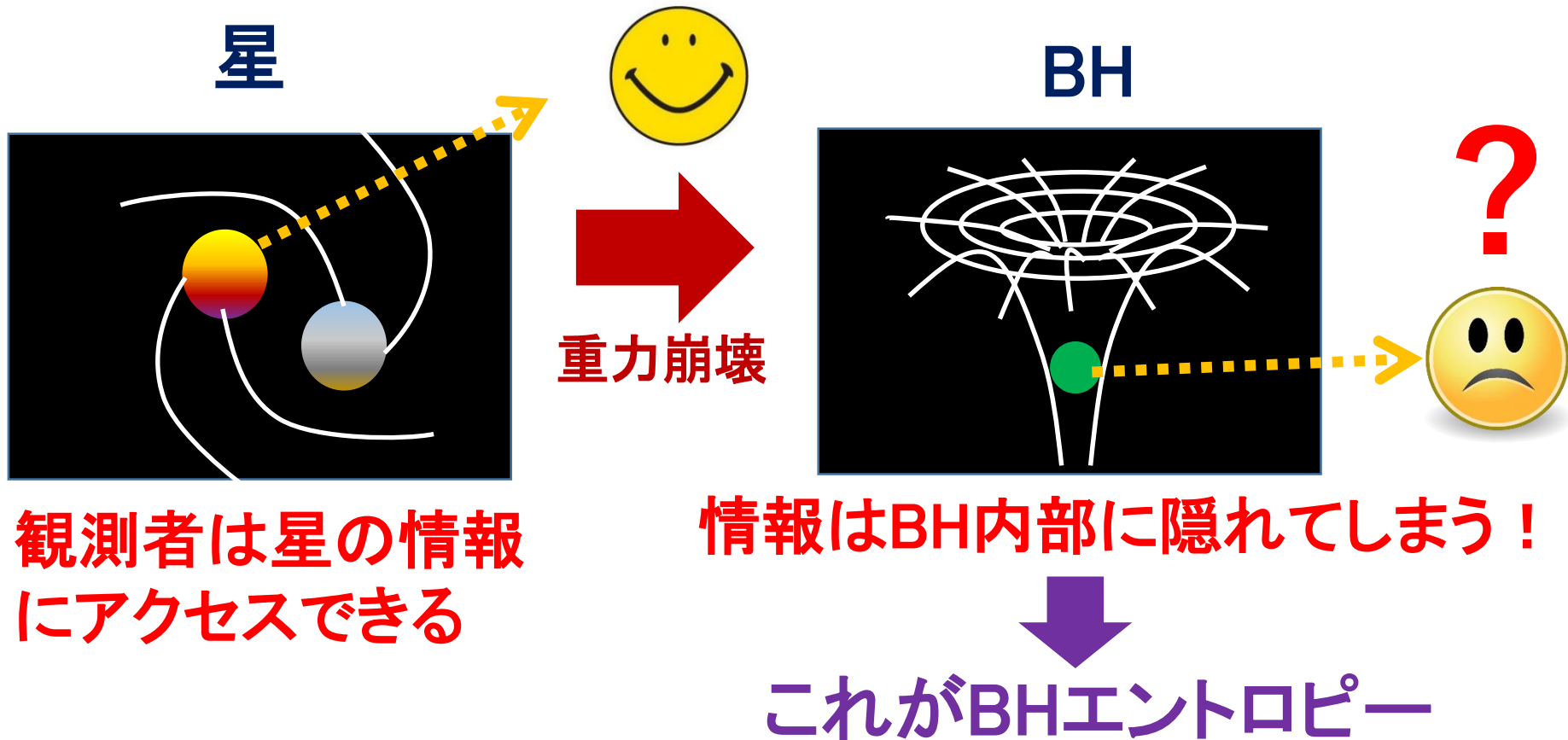
$$\rightarrow r_s = 3\text{km}$$

M=地球質量

$$\rightarrow r_s = 9\text{mm}$$

ブラックホール・エントロピーの直観的意味

ブラックホールが星などの重力崩壊で形成されると、外部の観測者は、ブラックホール内部の情報にアクセスできなくなる。



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

理解するには
量子重力理論
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！

④ ホログラフィー原理と量子エンタングルメント

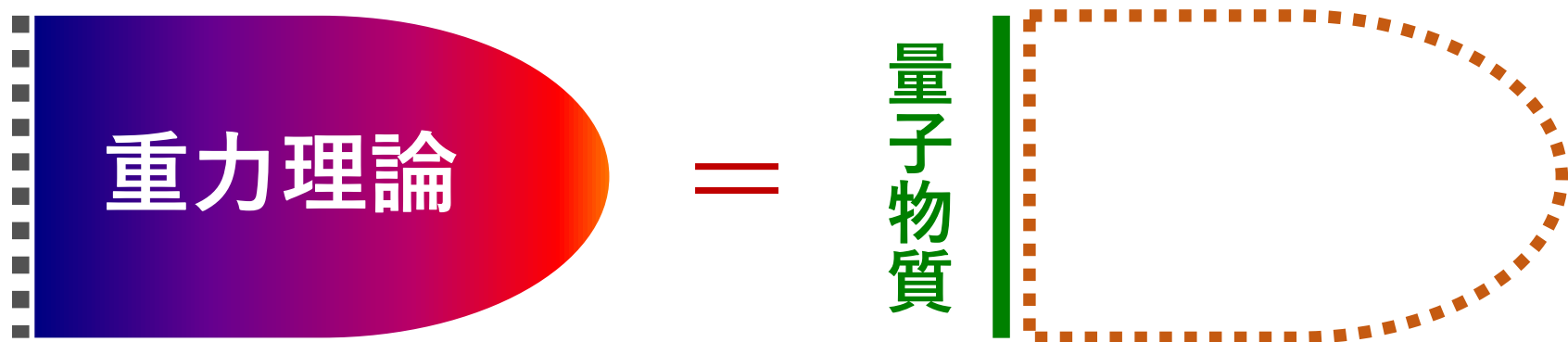
ホログラフィー原理とは？

ブラックホールのエントロピーは体積ではなく、面積に比例している！

このように重力理論を通常の物質に例えると自由度が1次元低く見える。これを**ホログラフィー原理**と呼ぶ。

ホログラフィー原理 ['t Hooft 93, Susskind 95]

重力理論 = 境界上の量子物質



本当であれば、難しい量子重力の問題を、量子物質の問題に帰着できる！

ホログラフィー原理で最もよく知られた例：

ゲージ重力対応(AdS/CFT対応) – [Maldacena 1997]

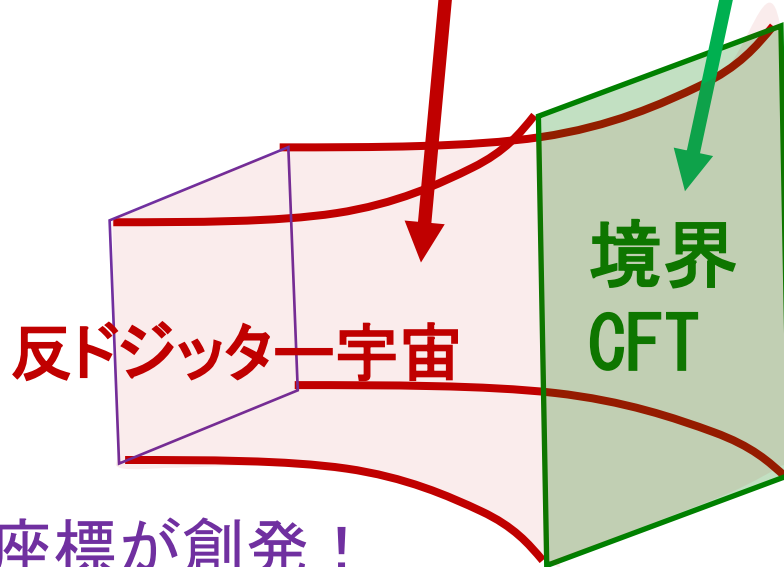
D+1次元反ドジッター宇宙
(AdS時空)における重力理論

=

D次元時空における
ゲージ理論(共形場理論)

反ドジッター(AdS)宇宙
→ 負の曲率を持つ宇宙

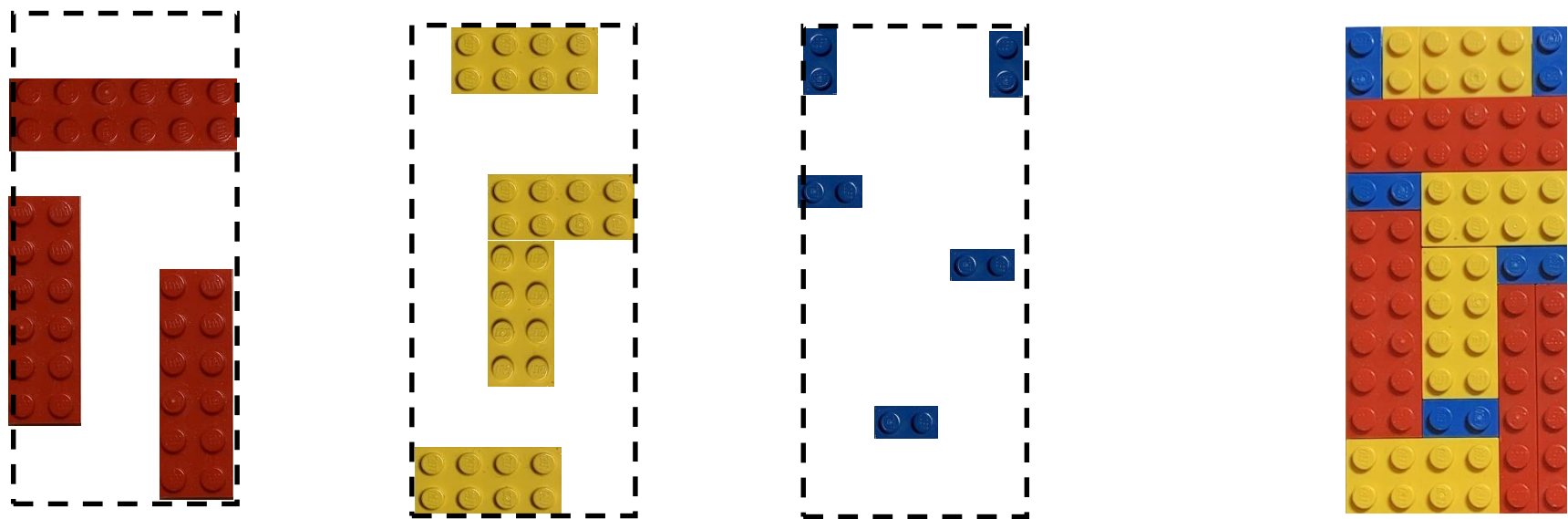
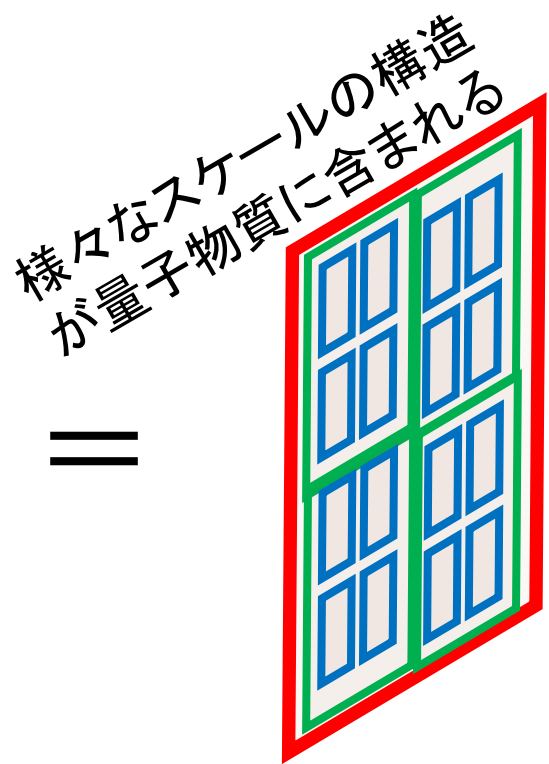
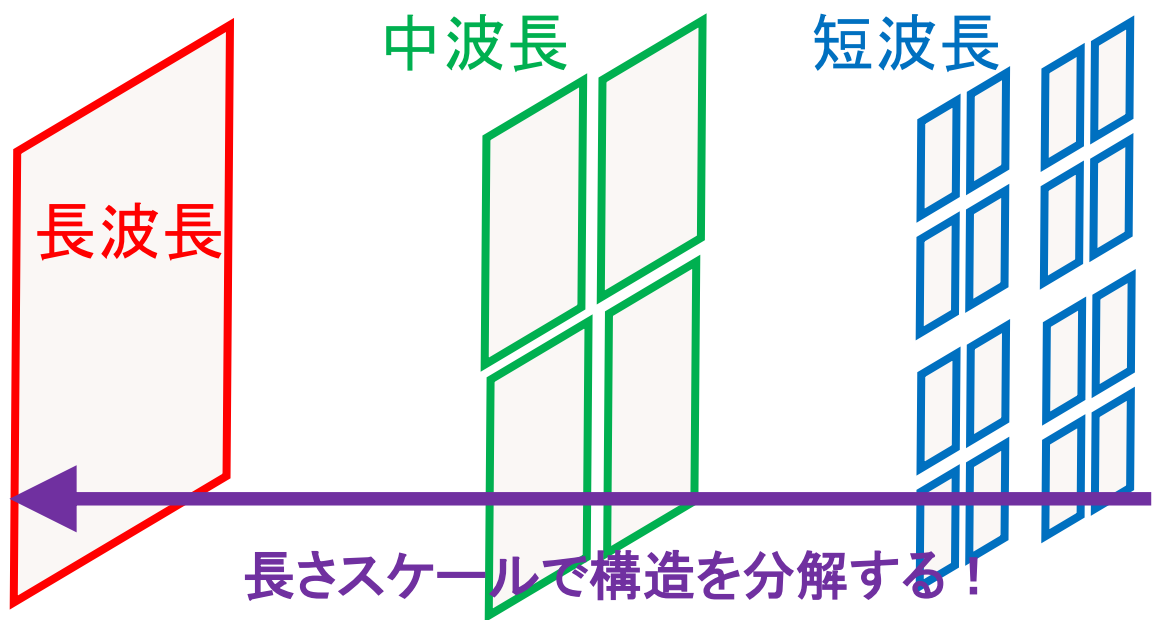
共形場理論(CFT)
→ 量子臨界点の物質
スケール不変(自己相似)



空間座標が創発！

例：電磁気学のように
質量ゼロの粒子の理論

ゲージ重力対応のメカニズムのイメージ



ホログラフィックなエンタングルメント・エントロピー [笠-高柳 2006]

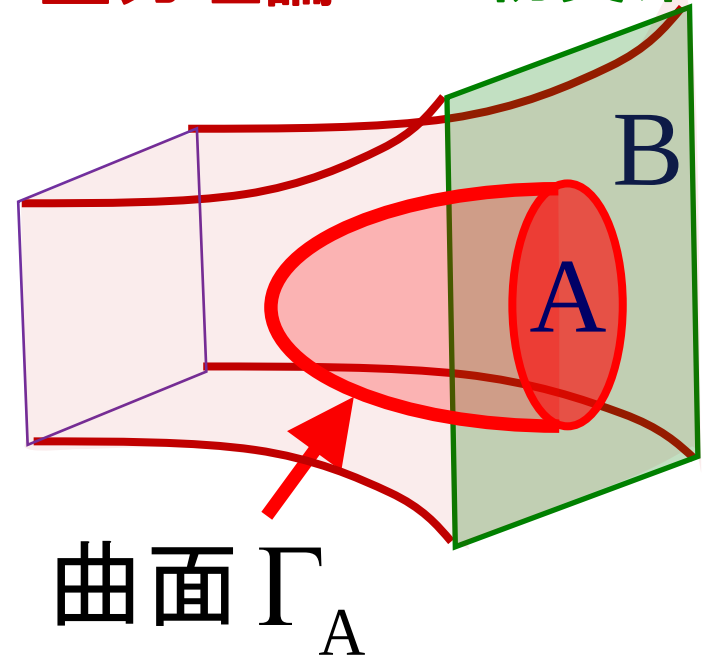
Γ_A を A を取り囲む曲面の中で
面積が最小となるものとする。

AdS宇宙の
重力理論 = 境界の
物質系

$$S_A = \frac{\Gamma_A \text{の面積}}{4G_N}$$

AdS宇宙
の断面積

エンタングルメント・エントロピー
($\approx A$ に含まれる量子情報量)

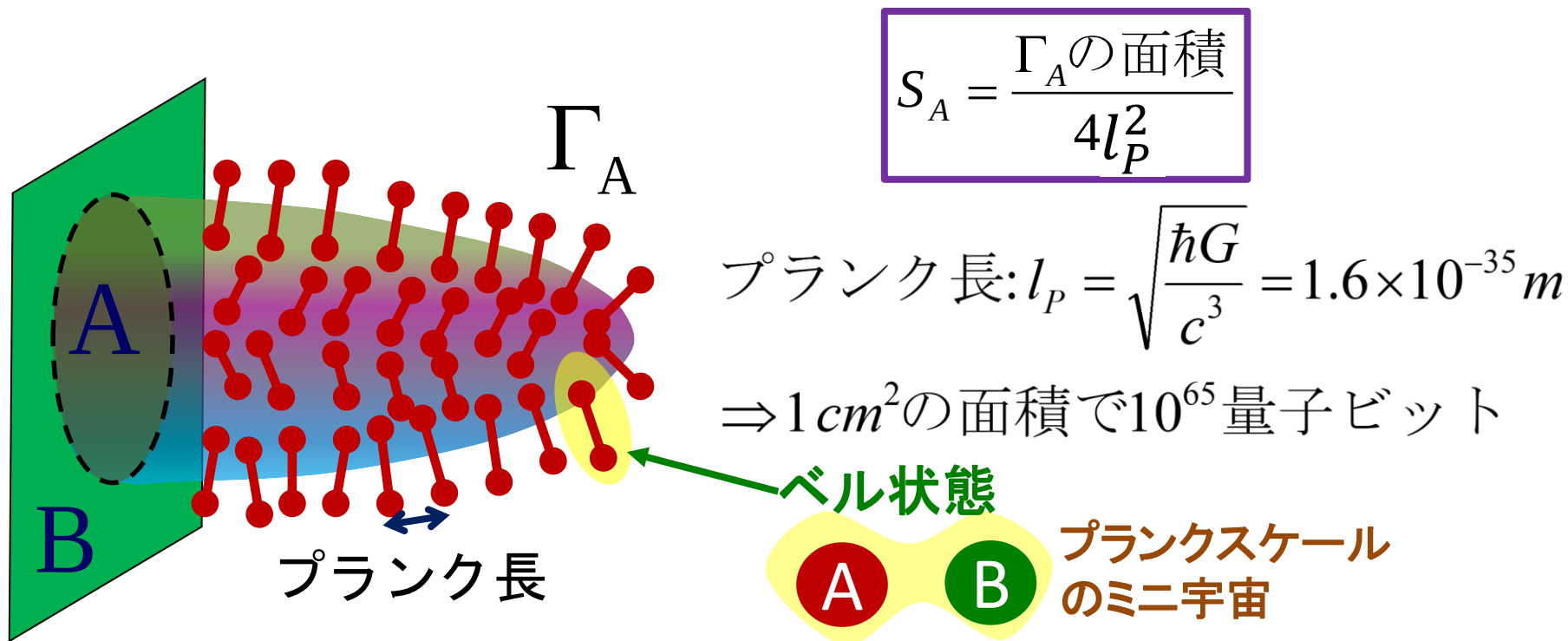


➡ 「ブラックホールのエントロピー公式」の大幅な拡張

「AdS宇宙のアインシュタイン方程式」 $\approx$ 「 S_A に対する熱力学第一法則」

⑤ 量子ビットから創発する宇宙

このエントロピー公式は、プランク面積あたり
1量子ビットのエンタングルメントの存在を意味する。



量子ビットは時空全体に満ちているのでは？
→テンソルネットワークはその具体的模型！

[Swingle 09]
大学院生単著

テンソルネットワーク (TN)

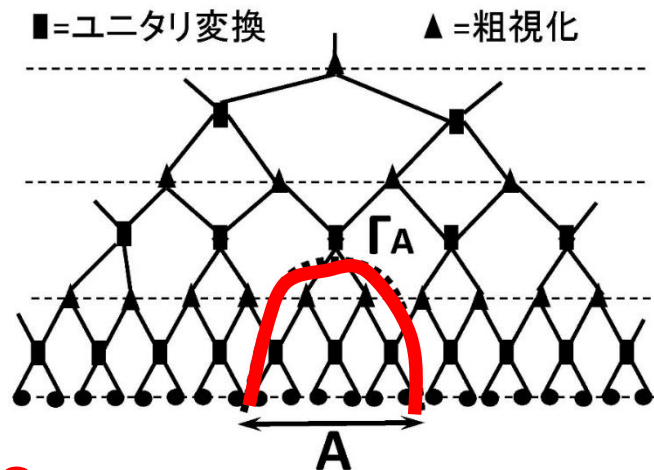
[DMRG: White 92,... CTM: 西野-奥西 96,
PEPS: Verstraete-Cirac 04, ...]

量子多体系の状態を精度よく表す波動関数の幾何学的記述法

ミクロな状態 = 量子エンタングルメントのネットワーク

[例1] MERA TN [Vidal 2005]

→ 量子臨界点の基底状態を記述

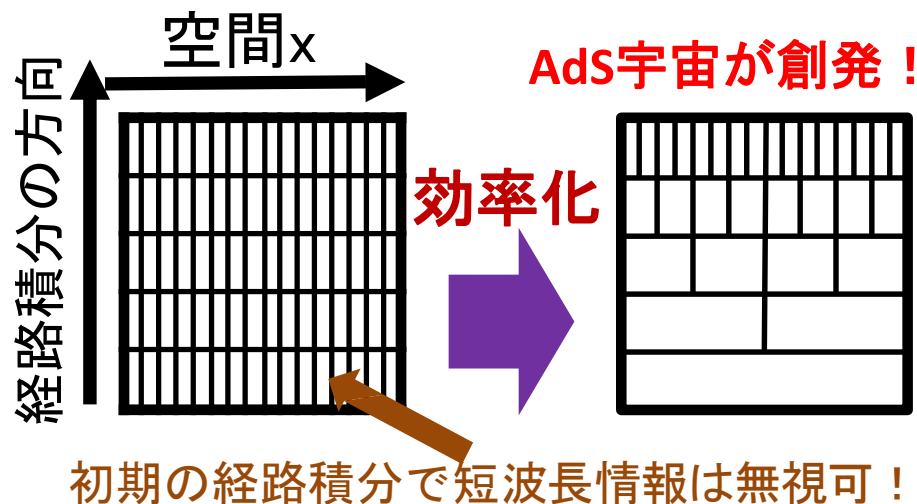


SAはネットワークの最小断面積！

[例2] 経路積分の効率化

[Caputa-Kundu-宮地-渡邊-高柳 2017]

→ 場の量子論 (CFT) に適用可

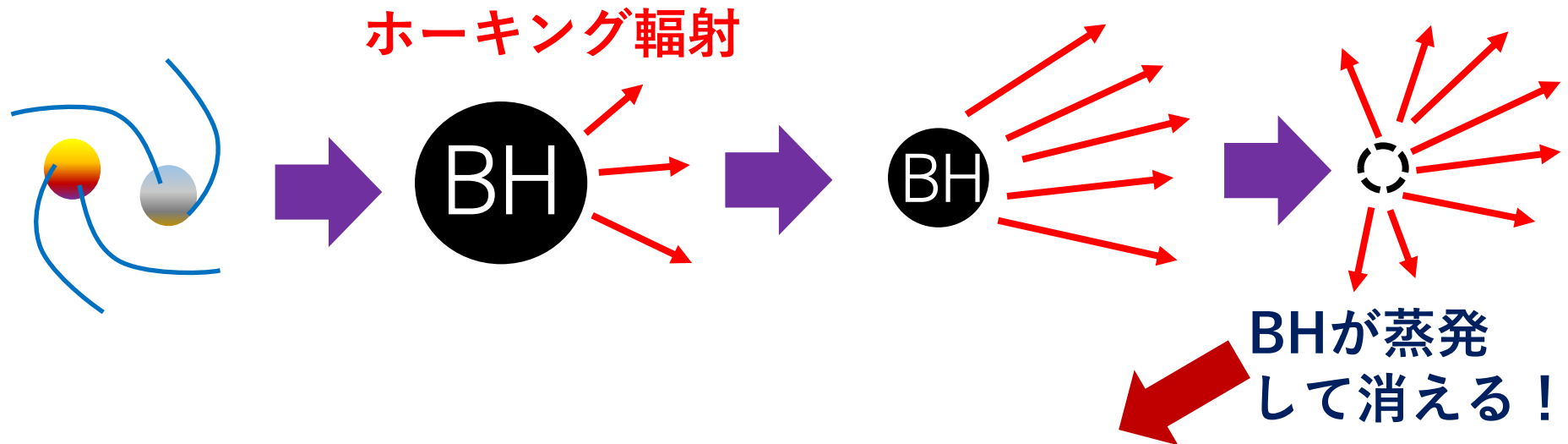


量子臨界点の効率的テンソルネットワーク計算を考えるとAdS宇宙が現れる！

⑥ ブラックホールの情報問題への応用

ブラックホール(BH)の情報損失問題

ホーキングが発見したように、実はブラックホールは温度を持ち、黒体輻射(ホーキング輻射)を行う。この輻射で次第にエネルギーを失い、最終的には消えてしまう(蒸発する)と考えられる。



**BHの内部に隠れていた情報も消えてしまう！
→量子力学のユニタリティー(情報の保存則)に反する！**

ブラックホール情報問題の解明の糸口

ホログラフィックなEEを量子物質と重力理論が隣接する系に一般化。

アイランド公式 [Penington, Almheiriら 2019]

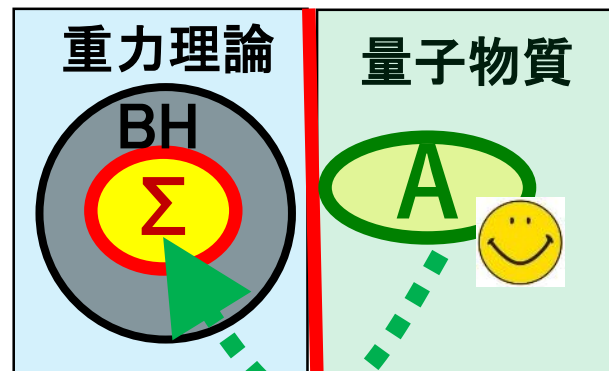
大学院生単著

$$S_A = \text{Min} \left[\frac{\text{アイランドの表面積}}{4G_N} + \text{物質のEE} \right]$$

輻射のEE

重力エントロピー 量子物質の
エンタングルメント

蒸発が進むとBH内部の**アイランド領域**の情報をホーキング輻射から取り出せるようになる。→BHに「抜け穴」があく！



アイランドΣを観測できる！



日経新聞[2021年7月4日26面]
(高柳取材協力)

⑦ おわりに

従来の物理学の考え方

顕微鏡・加速器

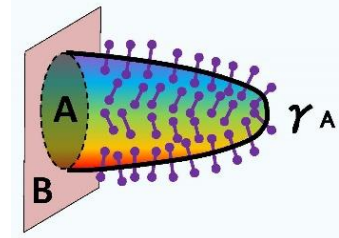


物質 = 素粒子の集まり

結晶

講演者らの研究成果
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！



本講演で紹介した新しい方向性

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”？

→量子誤り訂正符号・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



若手の方へのメッセージ: 理論物理学研究における重要な要素

*国際的環境

*異分野融合的な視点・環境

*若手ならではの先入観のない柔軟な思考

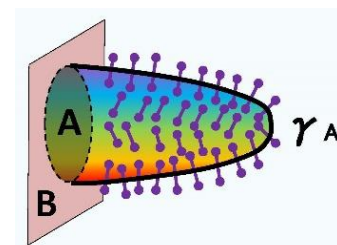
笠真生氏
(物性理論が専門、
現在プリンストン大教授)

高柳
(素粒子理論が専門)

カリフォルニア大
サンタバーバラ校
カブリ理論物理研究所



共同研究



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

ともにポスドク研究員
として所属。
分野の隔てが少ない研究所。

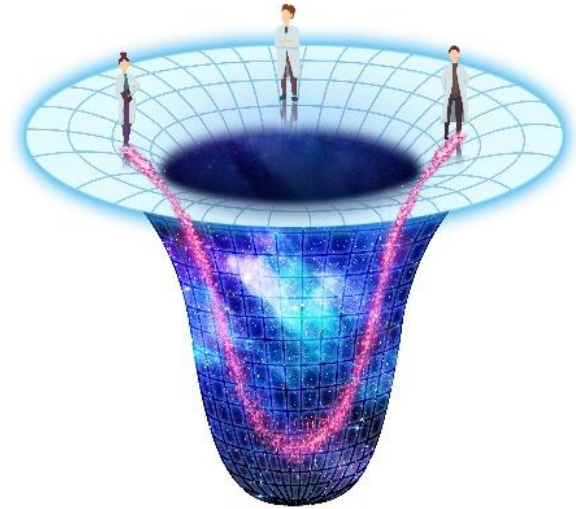
今後の問題：反ドジッター宇宙を超えたホログラフィー

[重要な例] ドジッター時空のホログラフィー (現実の宇宙に近い加速膨張宇宙)

d+1次元ドジッター時空の重力理論

→d次元球面上の非ユニタリCFTと双対?

[dS/CFT: Strominger 2001,...Maldacena 2002,.....]



最近の発展:

dS/CFTの具体例の構成

[西岡-疋田-瀧-高柳 Phys.Rev.Lett.129(2022)4, 041601]

上記論文をViewpointとして取り上げた
米国物理学会の雑誌Physicsの記事
(2022年7月)

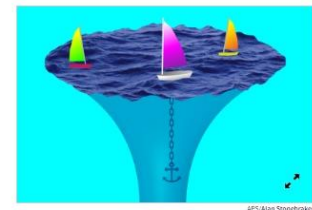


VIEWPOINT

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.



量子情報の話を聞きたい方へ (+当講演の内容をもう少し聞きたい方へ..)

<https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~extremeuniverse/>

～extremeuniverse/第一回市民講演会

(キーワード「極限宇宙市民講演会」、
高柳のHPにもリンク有)

日時: 2022年11月26日(土) 10時-12時半、
オンライン(zoom)開催、無料

[参考文献]

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

極 文部科学省 科学研究費助成事業 学術変革領域A「**極限宇宙**の物理法則を創る」

第一回市民講演会

量子情報で拓く**時**空と**物**質

日時: 2022年11月26日(土) 10時00分～12時30分
場所: オンライン開催
対象者: 当講演会にご関心のある全ての方
参加費: 無料
要参加登録 [「極限宇宙 市民講演会」](#) Q

10:00-11:00
森前 智行 准教授
京都大学 基礎物理学研究所
量子情報 -量子計算と量子暗号-

11:10-12:10
高柳 匡 教授
京都大学 基礎物理学研究所
量子情報から**極限宇宙**へ
-量子ビットから創発する宇宙-

12:10-12:30 質問タイム

限
宇
宙

問い合わせ:
学術変革領域A「極限宇宙」事務局
extun-v-off@yukawa.kyoto-u.ac.jp



ご清聴ありがとうございました！