Quantum Information Entropy in Physics @ YITP, March 22-25, 2022

Holography and Quantum Entanglement
ホログラフィーと量子エンタングルメント
(Tutorial)

Tadashi Takayanagi
高柳　匡

YITP, Kyoto U.
京都大学基礎物理学研究所

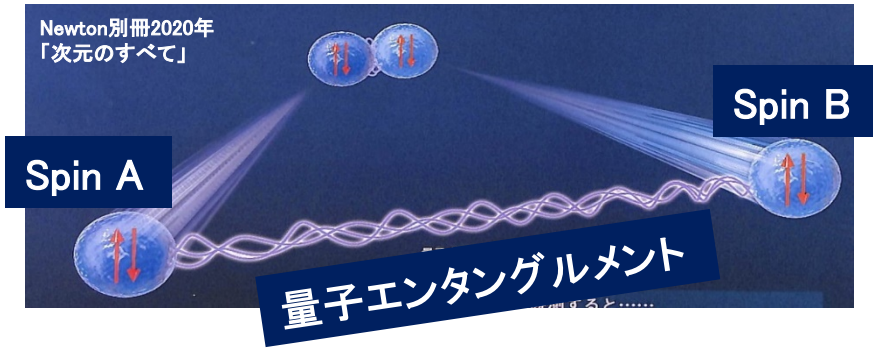
It from Qubit
Simons Collaboration

Grant-in-Aid for Transformative Research Areas A
Extreme Universe

YITP
YUKAWA INSTITUTE FOR THEORETICAL PHYSICS

① はじめに：エンタングルメント・エントロピー

量子エンタングルメント➔二体間の量子相関



純粋状態|Ψ>がエンタングルしている ↔ $\left|\Psi\right\rangle_{AB} \neq \left|\Psi_1\right\rangle_A \otimes \left|\Psi_2\right\rangle_B .$

直積に書けない

エンタングルメントの最小単位 ➡ **ベル状態** $\left|\Psi_{Bell}\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\underbrace{\left|\uparrow\right\rangle_A \otimes \left|\downarrow\right\rangle_B + \left|\downarrow\right\rangle_A \otimes \left|\uparrow\right\rangle_B}\right]$

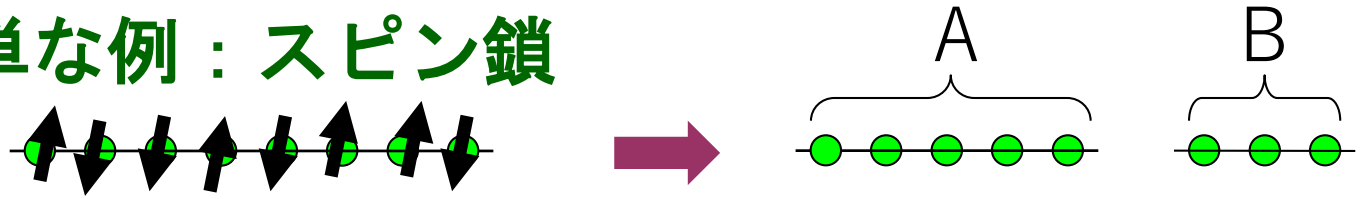
系全体は明確に決まった状態だが、部分に限定すると状態は曖昧！

エンタングルメント・エントロピー(EE)

エンタングルメントの度合＝ベル対の数≒ＥＥ

まず量子系を部分系ＡとＢに分割する: $H_{tot} = H_A \otimes H_B$.

簡単な例：スピン鎖



Aの縮約密度行列 ρ_A （Bにアクセスできない観測者）

を $\rho_A = \mathrm{Tr}_B\left[\left|\Psi_{tot}\right\rangle\left\langle\Psi_{tot}\right|\right]$ と導入することで、

エンタングルメント・エントロピー S(ρA) が定義される:

$$S(\rho_A) = -\mathrm{Tr}[\rho_A \log \rho_A]$$

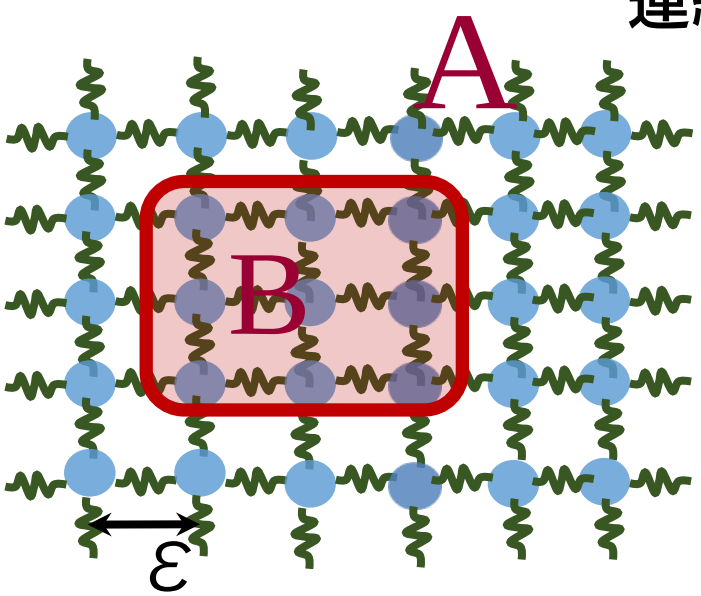
≈ ＡＢ間のベル対の数

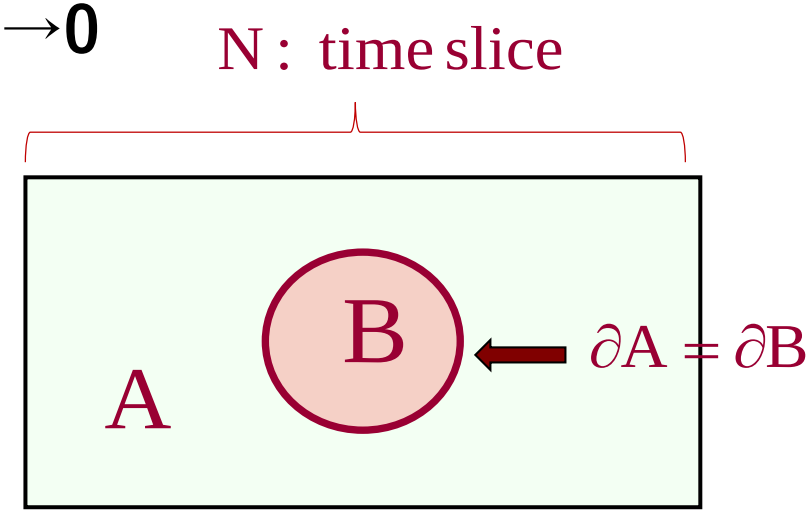
LOCC Buscemi氏、沙川氏の講演

量子多体系（場の量子論）のエンタングルメント・エントロピー

EEは、以下のように幾何学的に定義される。

連続極限 ε →0





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

量子多体系

場の量子論（QFT）

エンタングルメント・エントロピーは物理の多方面で活躍！

[1] 物性物理・統計物理[➔沙川氏・古川氏の講演]

エンタングルメント・エントロピー (EE)

エンタングルメント・スペクトラム (ES)

→量子的秩序変数

（与えられた量子状態を数値計算で求めるコスト）

→非平衡過程のダイナミクスを捉えるエントロピー

（通常の熱化過程：EEが時間発展で線形に増加）

→数値実験の「観測量」の役割

（central chargeやトポロジカル相の決定など）

→量子多体系の効率的な解析法

（Tensor Networkによる変分法など）

物性実験によるEEの測定

Example1: Ultracold bosonic atoms in optical lattices

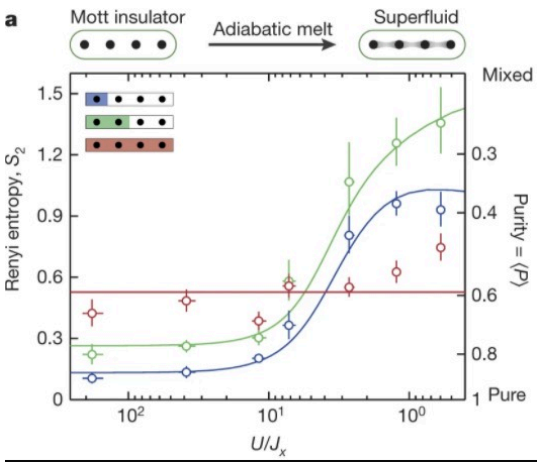
Published: 02 December 2015

Measuring entanglement entropy in a quantum many-body system

Rajibul Islam, Ruichao Ma, Philipp M. Preiss, M. Eric Tai, Alexander Lukin, Matthew Rispoli & Markus Greiner

Nature **528**, 77–83 (2015) | Cite this article

$$H = -J\sum_{\langle i,j\rangle} a_i^\dagger a_j + \frac{U}{2}\sum_i n_i(n_i-1) \qquad (4)$$



Example2: Trapped-ion quantum simulator

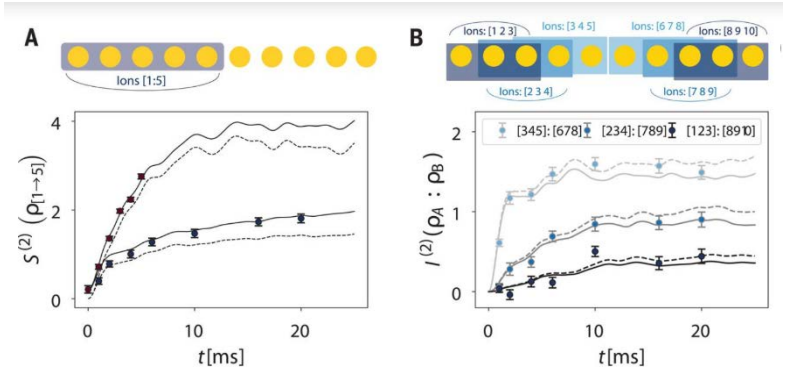
Science
Current Issue First release papers Archive About Sub
REPORT

Probing Rényi entanglement entropy via randomized measurements

TIFF BRYDGES, ANDREAS ELBEN, PETAR JURCEVIC, BENOÎT VERMERSCH, CHRISTINE MAIER, BEN P. LANYON, PETER ZOLLER, RAINER BLATT, AND CHRISTIAN F. ROOS Authors Info & Affiliations

SCIENCE • 19 Apr 2019 • Vol 364, Issue 6437 • pp. 260-263 • DOI: 10.1126/science.aau4963

$$H_{\mathrm{XY}} = \hbar\sum_{i<j} J_{ij}\left(\sigma_i^+\sigma_j^- + \sigma_i^-\sigma_j^+\right) + \hbar B\sum_j \sigma_j^z$$



[2] 場の量子論 (QFTs)

エンタングルメント・エントロピー(EE)

➔場の量子論の普遍的な自由度

例1：強劣加法性(SSA)からのC定理やF定理の証明。

例2:「局所的場の量子論≈面積則 」➔幾何学的視点

[3] 超弦理論(String Theory)・量子重力(Quantum Gravity)

◦ 重力理論の特徴：ブラックホールの存在➔ **BHエントロピー**

一般化

◦ ホログラフィー原理(AdS/CFT対応・ゲージ重力対応)

➔ホログラフィック・エンタングルメント・エントロピー

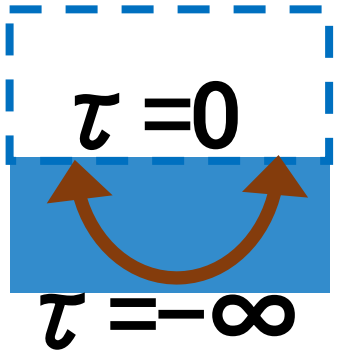
「場の量子論のエンタングルメント＝重力理論時空の幾何」

一般化

◦ ブラックホールの情報問題 **➔アイランド公式**

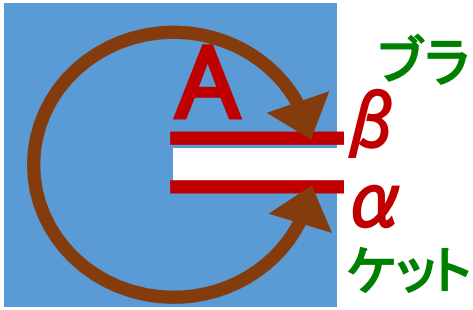
場の量子論のエンタングルメント・エントロピーの計算（レプリカ法）

$|\Psi\rangle =$

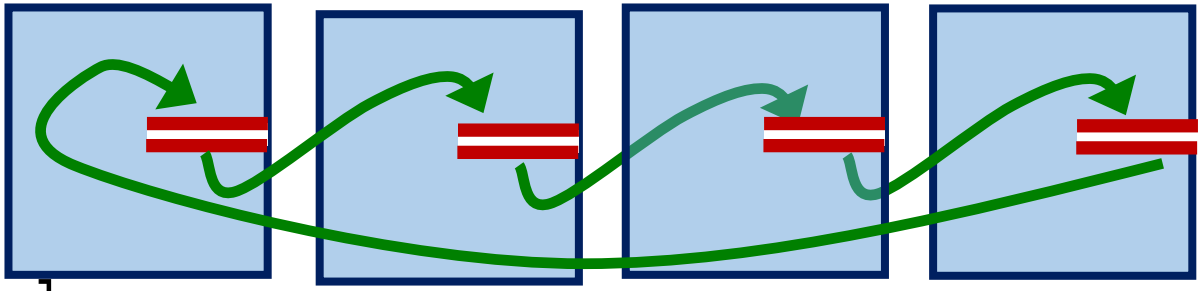


$$\rho_A = \mathrm{Tr}_B[\overset{\text{ケット}}{|\Psi\rangle}\overset{\text{ブラ}}{\langle\Psi|}] =$$

$$(\rho_A)_{\alpha\beta}$$



$$\mathrm{Tr}[(\rho_A)^n] =$$

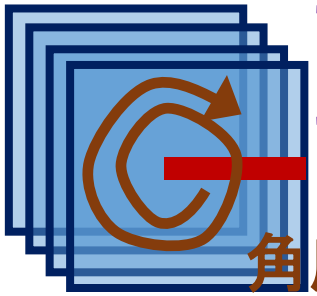


$$S^{(n)}(\rho_A) = \frac{1}{1-n}\log\left[\mathrm{Tr}[(\rho_A)^n]\right].$$

レンニ・エントロピー

$$EE = S(\rho_A) = \lim_{n\to 1} S^{(n)}(\rho_A).$$

＝

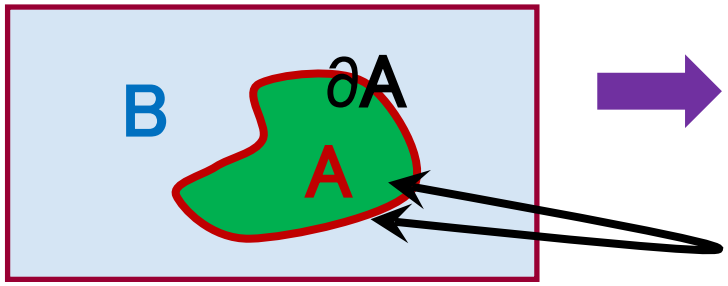


n枚のシート（レプリカ）の経路積分（＝分配関数）

角度＝2πn

エンタングルメント・エントロピーの面積則

時刻一定面



量子系全体のヒルベルト空間が

$H_{tot} = H_A \otimes H_B$ と分割される。

強くエンタングルしている

[Bombelli-Koul-Lee-Sorkin 1986, Srednicki 1993]

面積則

(d+1)次元の場の量子論の基底状態における
エンタングルメント・エントロピーは領域Aの境界 ∂A
の面積に比例して発散する:

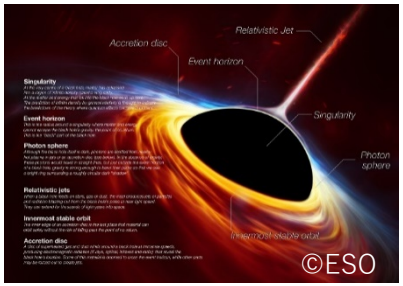
$$S(\rho_A) \sim \frac{\mathrm{Area}(\partial A)}{\varepsilon^{d-1}} + (\text{より低次の発散項}).$$

ここで ε は離散化した際の格子間隔(紫外カットオフ)。

② ブラックホールとエントロピー

(2-1) ブラックホール時空

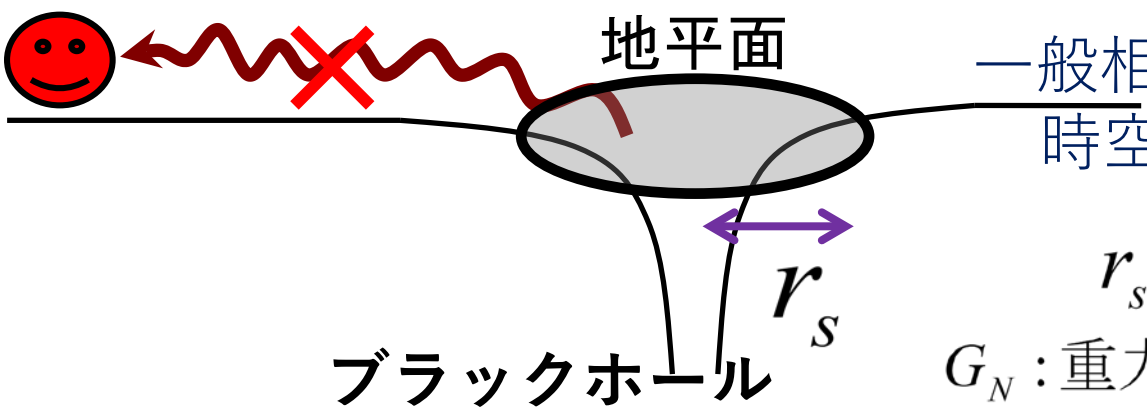
半径が小さく、非常に重い天体。強い重力で引き付けるため、光ですら内部から出てくることができない。⇒ブラックな天体



➡ 一般相対論に特有の現象！

アインシュタイン方程式

$$R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab} = 8\pi G_N T_{ab}$$



一般相対論に従い
時空が曲がる！

$$r_s = 2G_N M$$

G_N : 重力定数（ニュートン 定数）

M : ブラックホールの質量

ブラックホール（4次元シュワルツシルド解）の計量と温度

$$ds^2 = -\left(1-\frac{r_s}{r}\right)dt^2 + \frac{dr^2}{1-\frac{r_s}{r}} + r^2 d\Omega^2$$

2次元球面

地平面　r=rs 近傍では、

$$ds^2 \approx -\left(\frac{r-r_s}{r_s}\right)dt^2 + \left(\frac{r_s}{r-r_s}\right)dr^2 + r_s^2 d\Omega^2$$

$$\xi \equiv 2\sqrt{r_s(r-r_s)}$$

$$\approx \underbrace{-\frac{\xi^2}{4r_s^2}dt^2 + d\xi^2}_{\text{リンドラー時空}} + r_s^2 d\Omega^2$$

ユークリッド化

$$ds^2 = d\xi^2 + \frac{\xi^2}{4r_s^2}d\tau^2$$

$$\rightarrow \tau \sim \tau + 4\pi r_s$$

温度 $T_{BH} = \frac{1}{4\pi r_s} = \frac{1}{8\pi G_N M}$

を持つ（ホーキング温度）⇒BH熱力学

(2-2) ブラックホールのエントロピー

ホーキング温度の式 $T_{BH} = \dfrac{1}{4\pi r_s} = \dfrac{1}{8\pi G_N M}$

はブラックホールが熱力学の性質を持つことを示唆している。

そこで、アインシュタインの式 $E_{BH} = M \qquad (c = 1)$
と熱力学第一法則 $dE_{BH} = T_{BH}\, dS_{BH}$ から

$$S_{BH} = \int \frac{dM}{T_{BH}} = 4\pi G_N M^2$$ を得る。

これは丁度、 $\dfrac{\mathrm{Area}(\Sigma)}{4G_N} = \dfrac{4\pi r_s^2}{4G_N}$ に等しい！

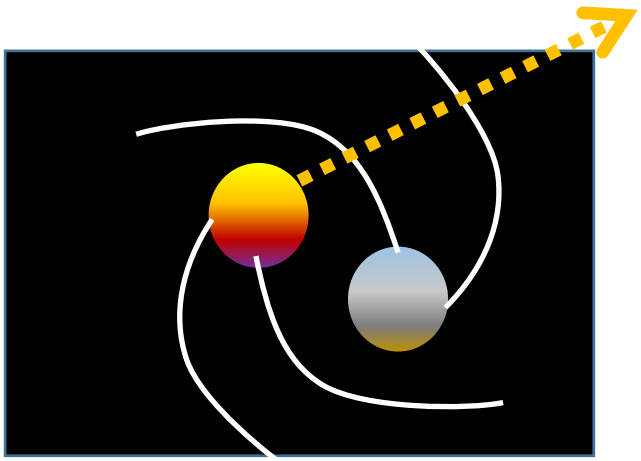
これがブラックホールのエントロピーである。

（外部の観測者が知りえないBH内部の量子情報量を表す）

ブラックホール・エントロピーの直観的意味

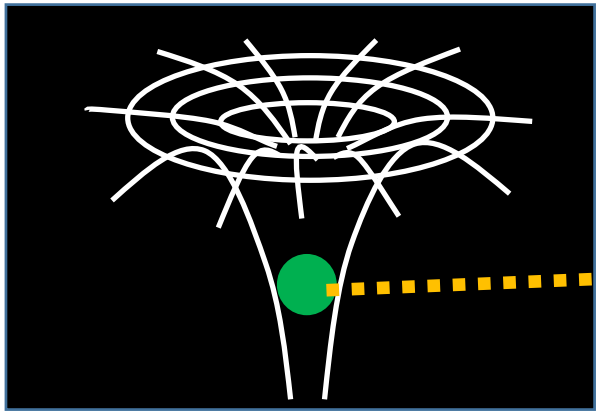
ブラックホールが星などの重力崩壊で形成されると、外部の観測者は、ブラックホール内部の情報にアクセスできなくなる。

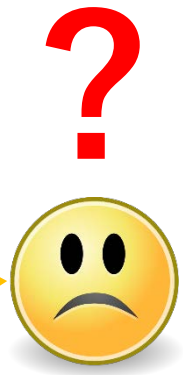
星



重力崩壊

BH





観測者は星の情報にアクセスできる

情報はBH内部に隠れてしまう！

これがBHエントロピー

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！

ブラックホールのエントロピー公式の驚き

（1）エントロピーが体積ではなく、面積に比例！

⇒ホログラフィー原理の動機(後述)

（2）古典重力理論（一般相対性理論）

なのに、エントロピーを持っている！

スカラー場やフェルミオン場の古典論を考えても

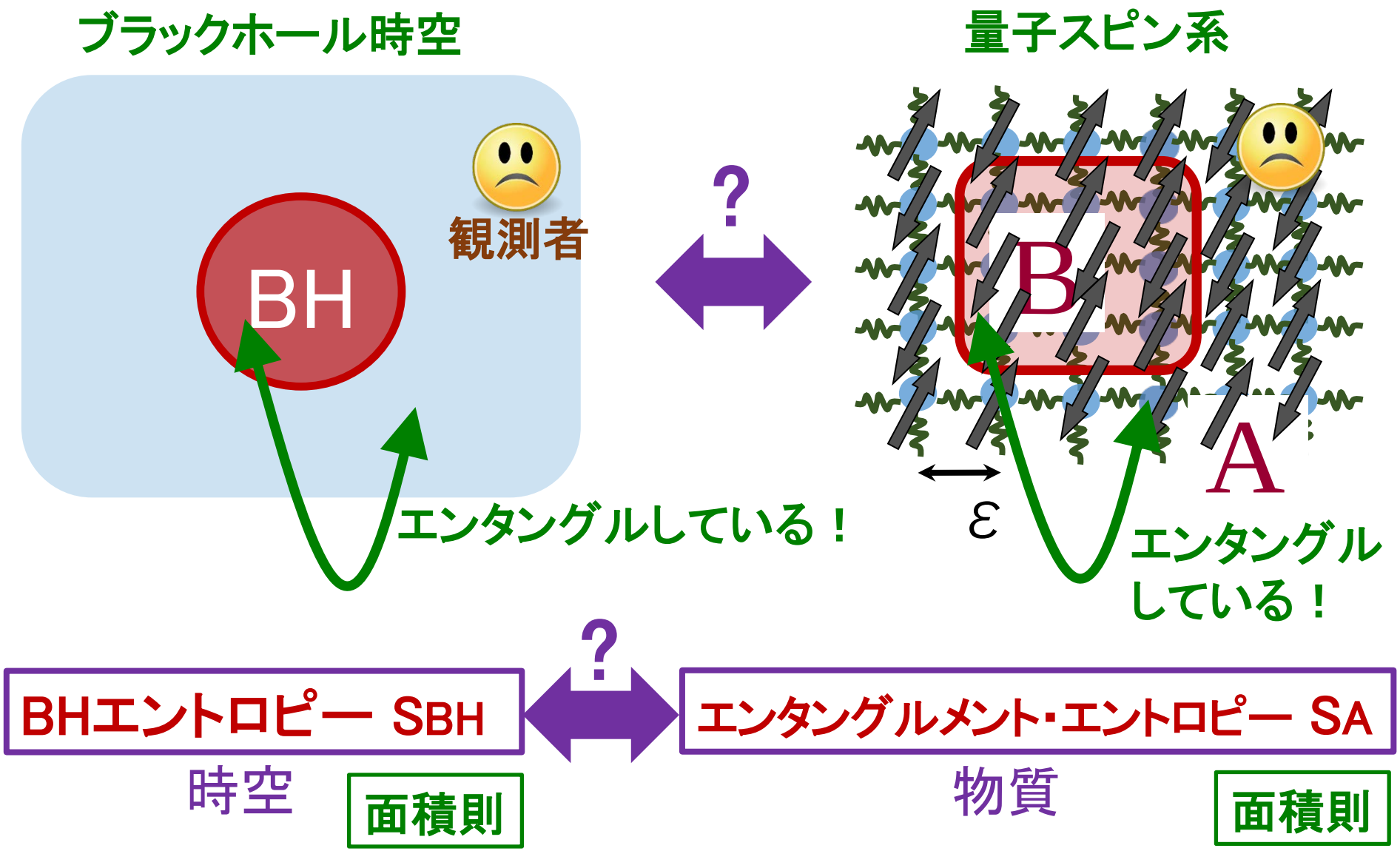
エントロピーはゼロ。

統計物理ではエントロピーは量子化して初めて現れる！

⇒ 重力理論(Einstein-Hilbert 作用)のトポロジカルな寄与

“エッジモード”

量子多体系エンタングルメントとブラックホールの類似性



内容

① はじめに：エンタングルメント・エントロピー

② ブラックホールとエントロピー

③ ホログラフィック・エンタングルメント・エントロピー

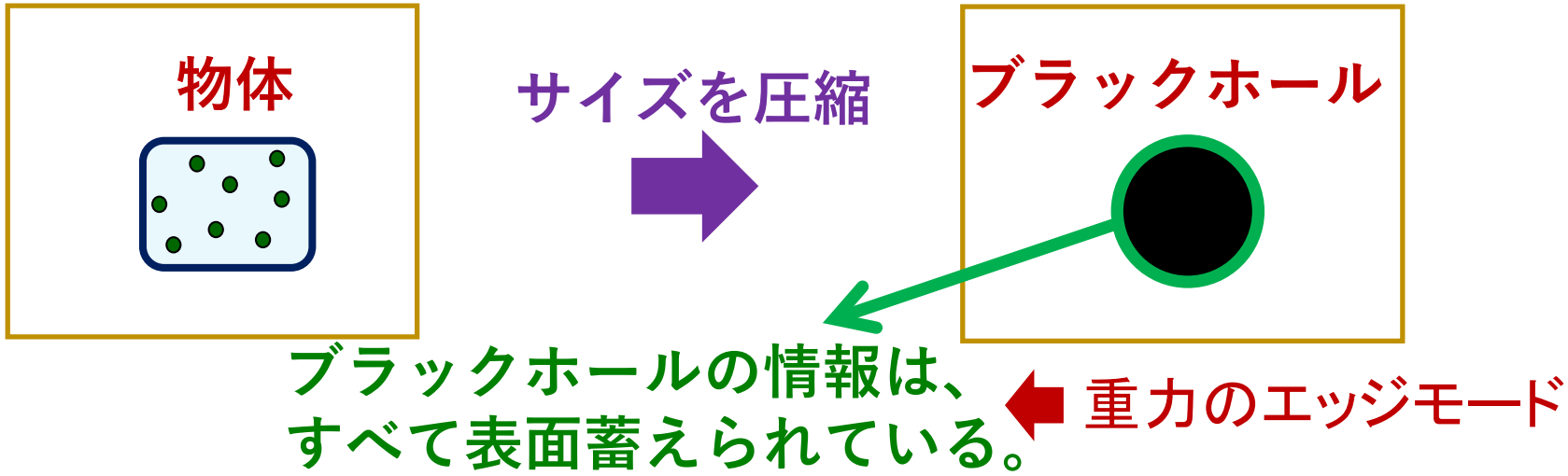
④ ブラックホールの蒸発とエンタングルメント

⑤ おわりに

③ ホログラフィック・エンタングルメント・エントロピー

(3-1)ブラックホールからホログラフィー原理へ

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！

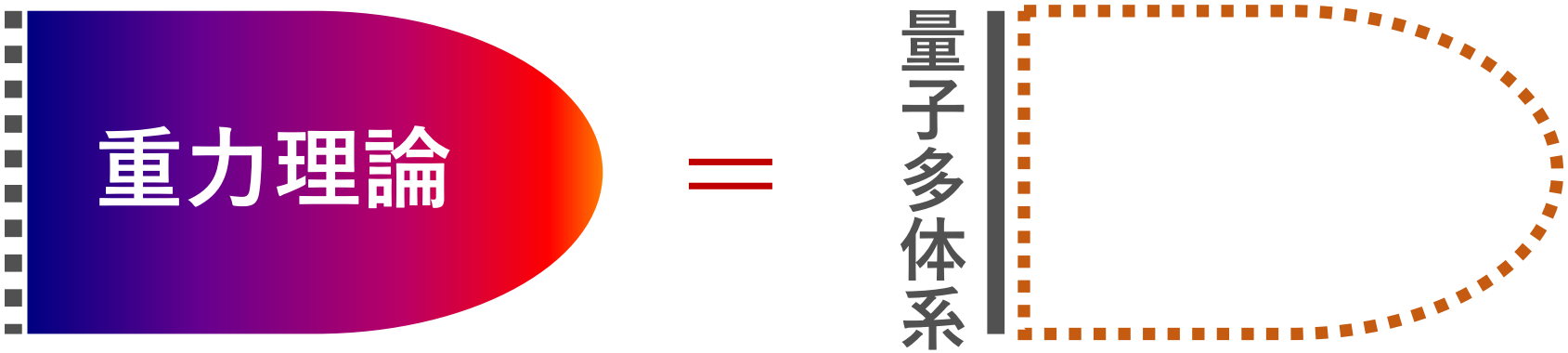


２次元フィルムから、３次元立体画像を再現する
「ホログラム」と似ている（しかし原理は全く異なる）

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。['t Hooft 93, Susskind 95]

ホログラフィー原理

重力理論　＝　境界上の量子多体系



本当であれば、難しい量子重力の問題を、量子多体系の問題に帰着できる！

(3-2) ゲージ重力対応(AdS/CFT対応)

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]

AdS/CFT

D+1次元反ドジッター時空(AdS空間)における重力理論（超弦理論）

＝

D次元空間におけるゲージ理論(CFT)

一般相対論近似

CFT=共形場理論（量子臨界点の理論）

負の宇宙項を持つ一般相対論

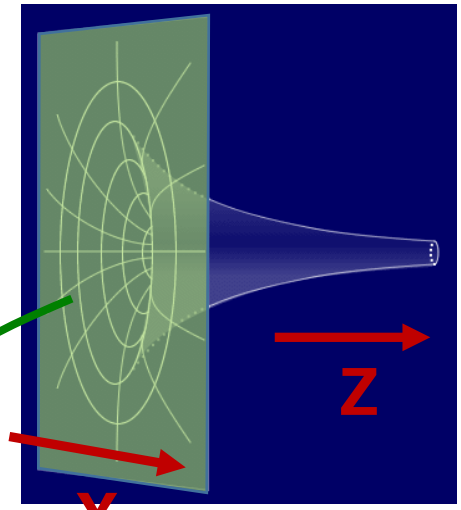
＝

強結合多自由度(ラージN)のゲージ理論

AdS空間（反ドジッター空間、Anti de Sitter Space）

負の宇宙定数（曲率）を持ち最大対称性を持つ空間＝双曲面(Hyperbolic space)

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



AdSの境界
＝CFTが存在

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)。
より一般に、量子色力学(QCD)のようなゲージ理論となる。

AdS/CFTの基本的関係式：

分配関数の一致

$$Z_{AdS\,重力} = Z_{CFT}$$

ゲージ重力対応とブラックホールの情報損失パラドクス

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される。

（しかしその詳細の理解は進展中。最近ページ曲線がゲージ重力対応から導出されて話題となっている。後で触れる。）

(3-3) ホログラフィック・エンタングルメント・エントロピー(HEE)

講演者と笠との共同研究で、CFTのEEがAdS/CFT対応を用いると極小曲面(Minimal surface) Γ_A の面積で表されることが示された:

HEE公式 (RT/HRT公式) [Ryu-TT 06]

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

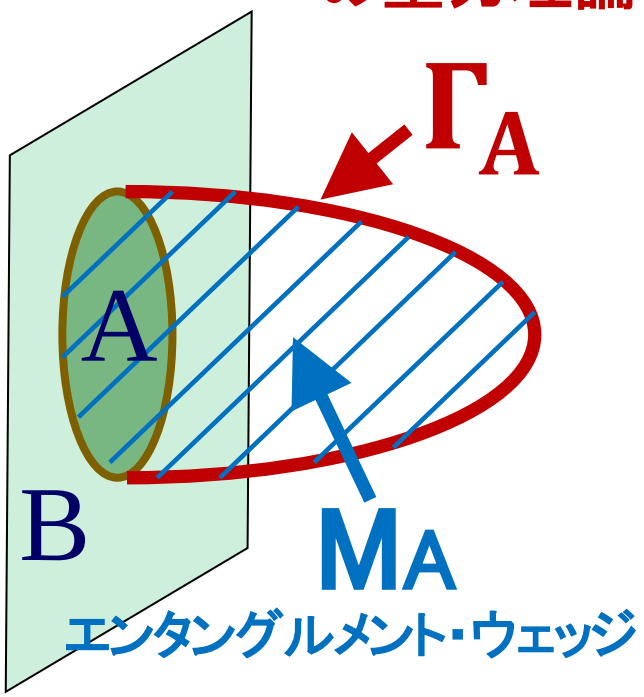
重力理論の量子補正を加味

[Faulkner-Lewkowycz-Maldacena 13]

$$S_A = \min_{\Gamma_A}\left[\frac{\mathrm{Area}(\Gamma_A)}{4G_N} + \underbrace{S_{bulk}(M_A)}_{\text{バルクのEE}}\right]$$

AdS/CFT対応

境界のCFT ＝ バルク(AdS)の重力理論



※時間に依存する背景では、極小曲面の代わりに極値曲面(Extreme surface)を使う。

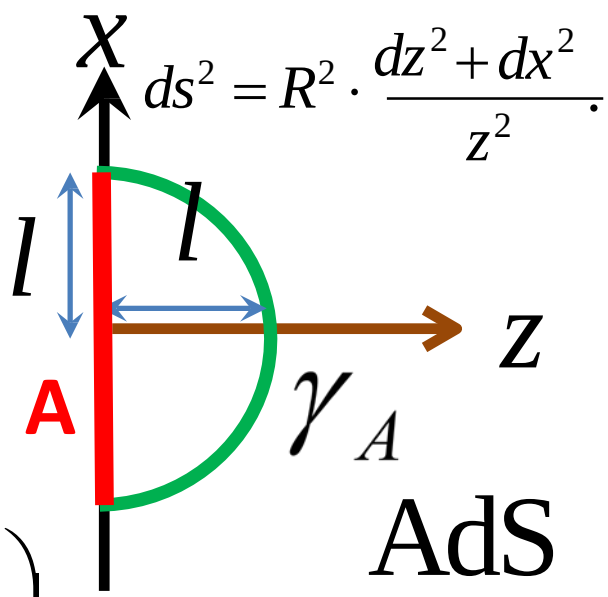
[Hubeny-Rangamani-TT 07,･･･.Engelhardt-Wall 14,..]

簡単な具体例: AdS3/CFT2 （CFT2は一次元量子臨界点）

AdS3/CFT2において ホログラフィックなEEは、2点間の測地距離Lと等しい：

$$L = 2R\int_a^l dz \frac{l}{z\sqrt{l^2 - z^2}} = 2R\log\frac{2l}{a}.$$

$$c = \frac{3R}{2G_N^{(3)}} \Rightarrow \quad S_A = \frac{L}{4G_N} = \frac{c}{3}\log\left(\frac{2l}{a}\right).$$



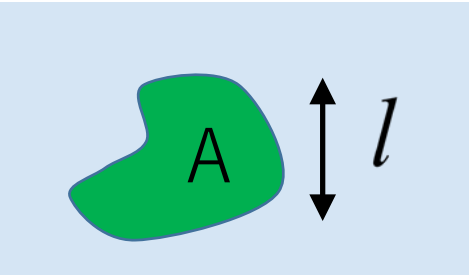
[Central charge：
Brown-Henneaux 86]

[場の理論の計算結果
Holzhey-Larsen-Wilczek 94を再現]

2次元CFTのより複雑な部分系AのEEや、高次元のCFTのEEでは、ホログラフィックEEは、面積則など既知の結果を再現するのみならず、強結合のCFTに関する多くの予言を与える。

HEEの一般的振る舞い(AdSd+2/CFTd+1)

[Ryu-TT 06,…]



$$S_A = \frac{\pi^{d/2} R^d}{2G_N^{(d+2)}\Gamma(d/2)}\left[p_1\left(\frac{l}{\varepsilon}\right)^{d-1} + p_3\left(\frac{l}{\varepsilon}\right)^{d-3} + \cdots \right.$$

$$\left. \cdots + \begin{cases} p_{d-1}\left(\frac{l}{\varepsilon}\right) + p_d & (\text{if } d+1 = \text{odd}) \\ p_{d-2}\left(\frac{l}{\varepsilon}\right)^2 + q\log\left(\frac{l}{\varepsilon}\right) & (\text{if } d+1 = \text{even}) \end{cases} \right],$$

面積則の発散

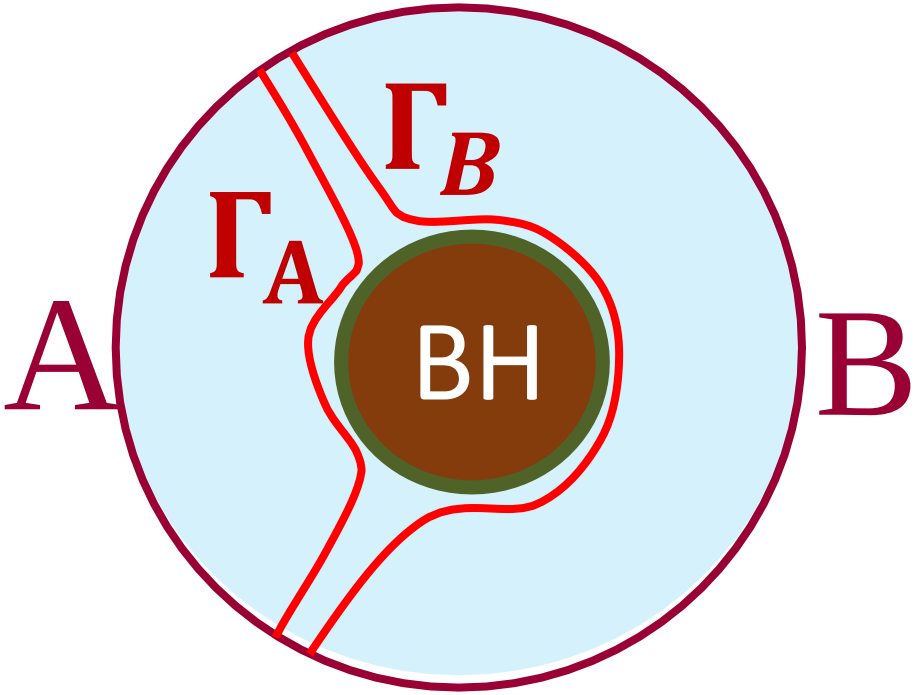
where $p_1 = (d-1)^{-1}, p_3 = -(d-2)/[2(d-3)], \ldots.$

$\ldots\ldots \quad q = (-1)^{(d-1)/2}(d-2)!!/(d-1)!!$.

奇数次元のCFTでは
定数項(F関数)が普遍的

偶数次元のCFTではlog発散の
係数が普遍的→Central charge

混合状態の例：有限温度状態（⇔AdSブラックホール）

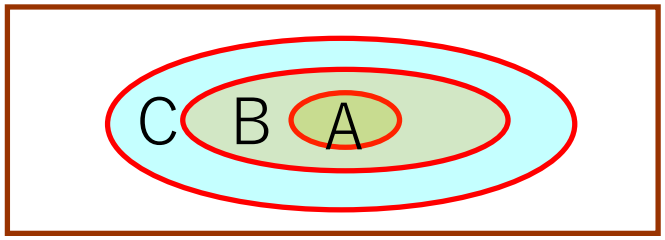


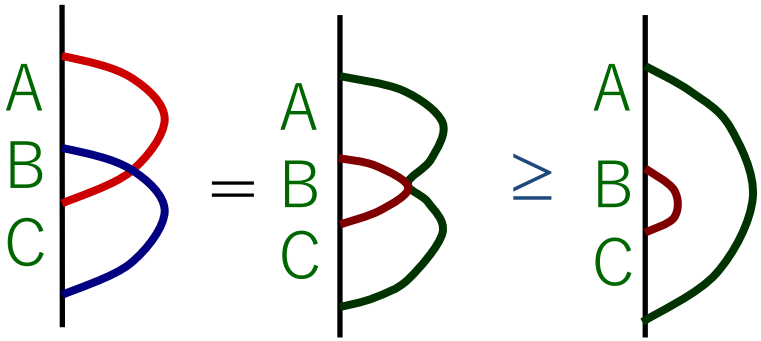
$$\rho_{AB} = e^{-\beta H}$$

Γ_A と Γ_B はトポロジーが異なる ➡ $S(\rho_A) \neq S(\rho_B)$

強劣加法性(Strong Subadditivity)の証明

量子情報の基本となる不等式の強劣加法性が幾何学的に証明できる！ [Lieb-Ruskai 73]





$$\Rightarrow S_{AB} + S_{BC} \geq S_{ABC} + S_B$$

[Headrick-高柳 2007]

「量子情報の不等式＝幾何学の三角不等式」となる！

実は、より強い不等式(Monogamy of Mutual Information)が古典重力極限では導かれる: $I(A;BC) \geq I(A;B) + I(A;C)$

[Hayden-Headrick-Maloney 2011]

量子重力効果で一般に破れる

相互情報量：$I(A;B) \equiv S_A + S_B - S_{AB}$

量子エンタングルメントとアインシュタイン方程式

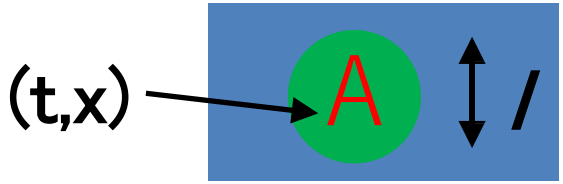
$$S(\rho_A + \Delta\rho_A \| \rho_A) = \Delta S_A - \Delta H_A \approx 0, \quad (\rho_A \equiv e^{-H_A}).$$

相対エントロピー（Buscemi氏,沙川氏の講演）

EEの第一法則

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

[Casini–Huerta–Myers 13, Bhattacharrya–野崎–宇賀神–高柳 13]



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

[野崎–沼澤–Prudenziati–高柳 13]
[de Sitter space: de Boer–Haehl–Heller–Myers 16]

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

➡ EEの第一法則は、摂動的アインシュタイン方程式と等価

[Raamsdonk et.al. 13, 非線形レベルの議論: Faulkner et.al 17, 宇賀神–Sarosi 17]

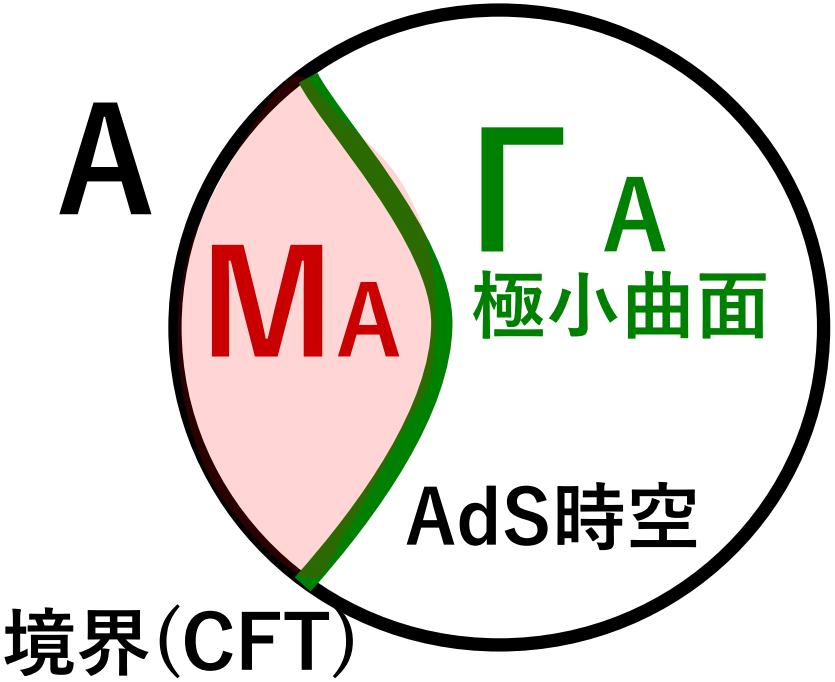
エンタングルメント・ウェッジ(EW)

ゲージ理論(CFT)の領域Aに対応するAdS時空の領域は？

⇒エンタングルメント・ウェッジ M_A と呼び、

「Aと「Aに囲まれる領域」で与えられる。

$$\rho_A \quad \text{in CFT} \quad \Leftrightarrow \quad \rho_{MA} \quad \text{in AdS gravity}$$

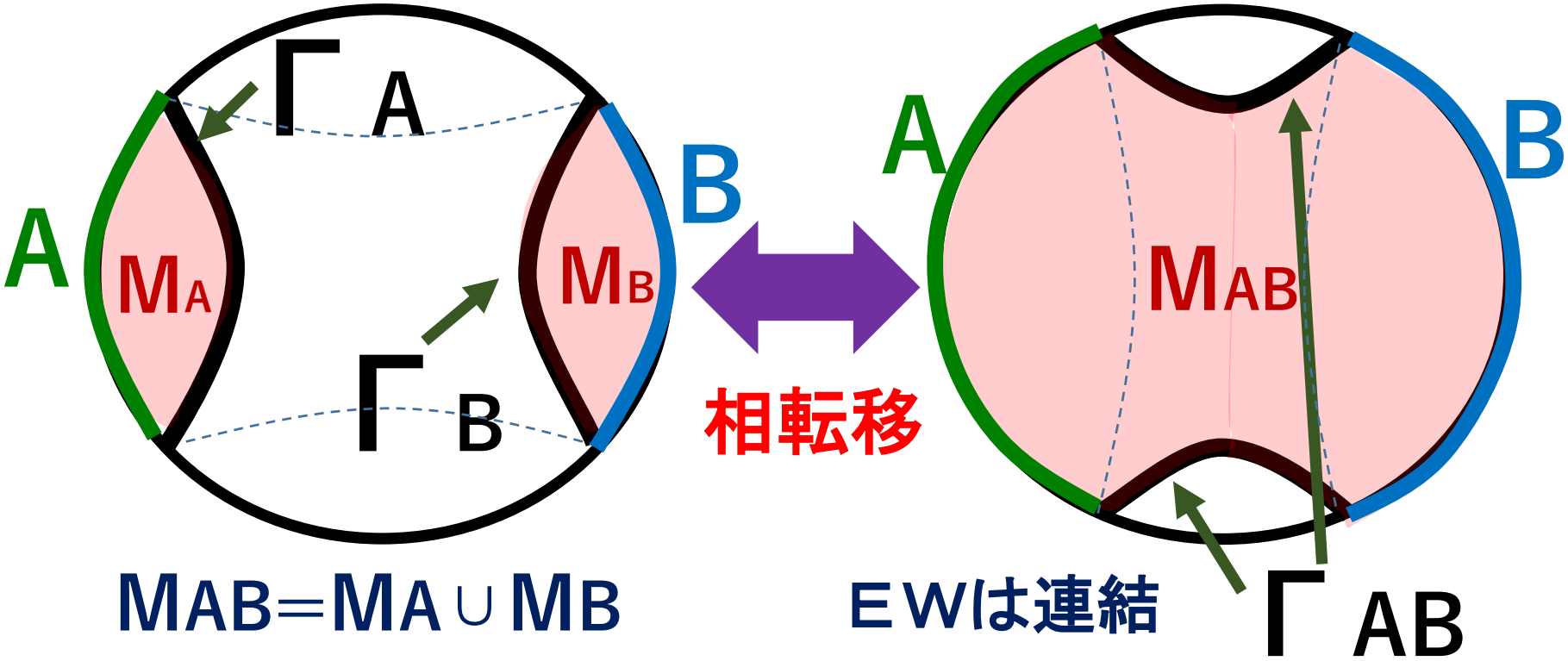


[Czech-Karczmarek-Nogueira-Raamsdonk 2012, Wall 2012, Headrick-Hubeny-Lawrence-Rangamani 2014, Jafferis-Lewkowycz-Maldacena-Suh 2015, Dong-Harlow-Wall 2016,…]

領域A∪BのエンタングルメントウェッジM_{AB}と相転移

(i)AとBが離れている

(ii)AとBが近い



$M_{AB}=M_A\cup M_B$

EWは非連結

$I(A;B)=0$

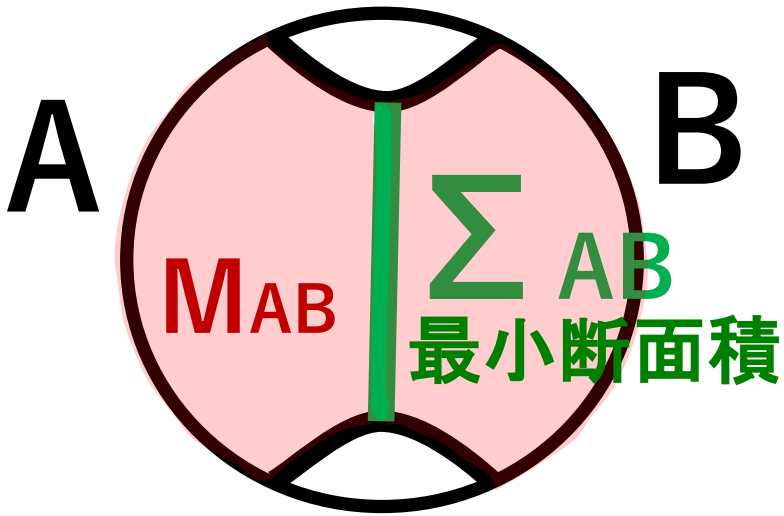
EWは連結

$I(A;B)>0$

EW断面積と純粋化エンタングルメント

ＥＷの断面積を次式で定義する:

$$E_W(\rho_{AB}) = \frac{\mathrm{Area}(\Sigma_{AB})}{4G_N}$$



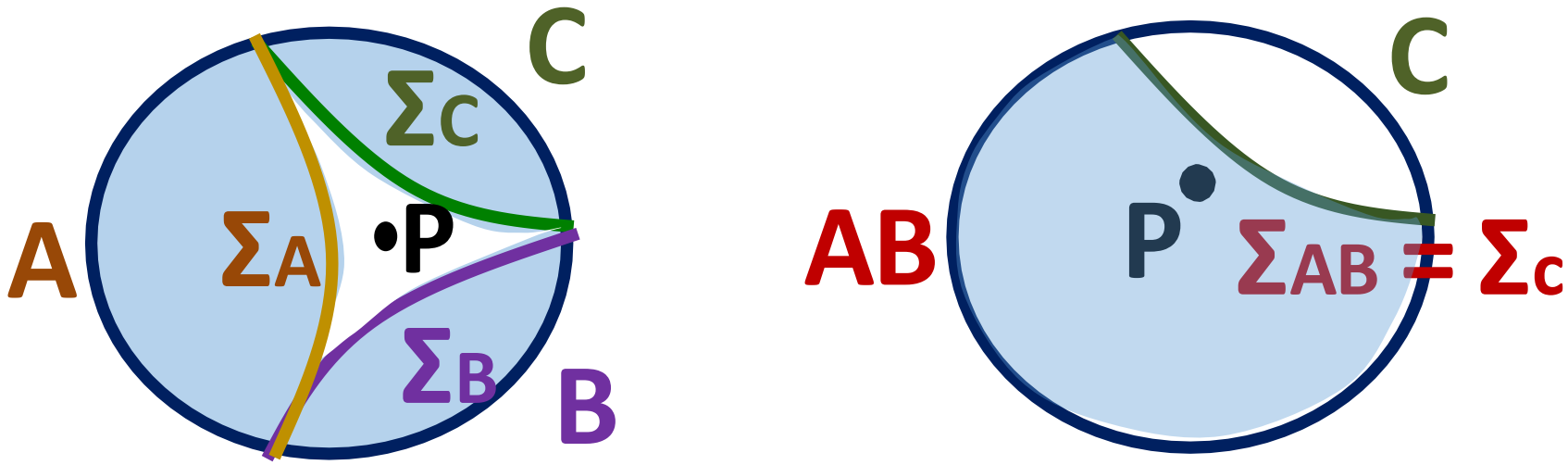
この量はCFTの**純粋化エンタングルメント(Entanglement of Purification)**と呼ばれる量と等しいと予想される。

$$E_W(\rho_{AB}) = E_P(\rho_{AB})$$

純粋状態で表した場合の最小のエンタングルメント・エントロピー

[梅本-高柳 2017,　Nguyen-Devakul-Halbasch-Zaletel-Swingle 2017,
CFTによる検証：Caputa-宮地-梅本-高柳 2018]

量子誤り訂正符号とEW



P点の情報はρ_{AB}から再現できるが、ρ_A, ρ_B, ρ_C からは再現できない！ ➡ 量子誤り訂正符号の性質

[Almheiri-Dong-Harlow 2014]

物理空間 = 全てのCFT状態 = 量子重力

∪

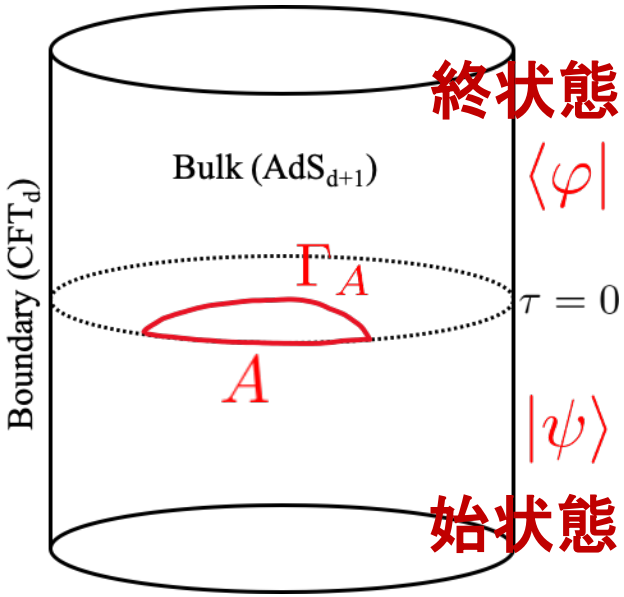
符号空間 = 低エネルギーCFT状態 = 一般相対論

量子誤り訂正符号で保護されている　　古典的な時空が創発

擬エントロピーとゲージ重力対応 [中田−瀧−玉岡−魏−高柳, 2020]

虚時間で時間発展している重力理論の空間で、極小曲面の面積は、CFTの何を計算するのか？

答え: $$\boxed{S(\mathcal{T}_A^{\psi|\varphi}) = \min_{\Gamma_A} \frac{\mathrm{Area}(\Gamma_A)}{4G_N}}$$



擬エントロピー (Pseudo Entropy)

$$S(\mathcal{T}_A^{\psi|\varphi}) = -\mathrm{Tr}\left[\mathcal{T}_A^{\psi|\varphi} \log \mathcal{T}_A^{\psi|\varphi}\right]$$

始状態　終状態

$$\mathcal{T}^{\psi|\varphi} := \frac{|\psi\rangle\langle\varphi|}{\langle\varphi|\psi\rangle}$$

遷移行列

$$\left(\mathcal{T}_A^{\psi|\varphi} := \mathrm{Tr}_{\bar{A}}\mathcal{T}^{\psi|\varphi}\right)$$

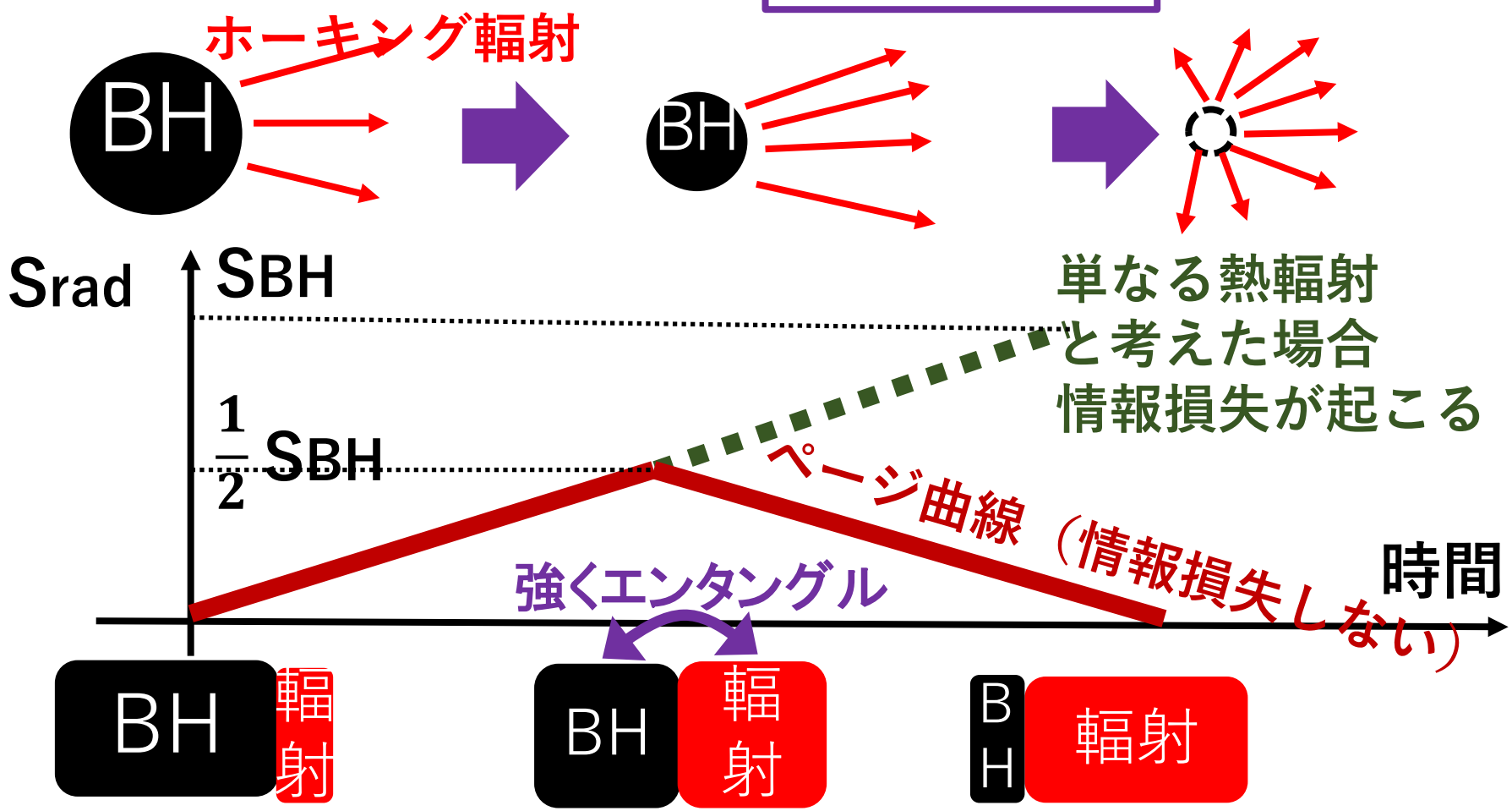
縮約した遷移行列
（一般にエルミートではない）

④ ブラックホールの蒸発とエンタングルメント

ページ曲線　BHと輻射の間のEEの時間発展Srad(t)を考える

[Page 1993]　系全体が純粋状態でユニタリー発展すると仮定

$$S_{rad}(t)=S_{BH}(t)$$



アイランド公式によるページ曲線の導出

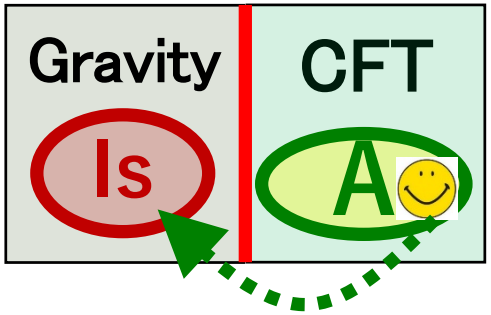
アイランド公式 [Penington 2019, Almheiri et.al. 2019]

$$S_A = \mathrm{Min}\left[\frac{\mathrm{Area}(\partial I_s)}{4G_N} + S_{A\cup I_s}\right]$$

部分系AのEE
→輻射のEE

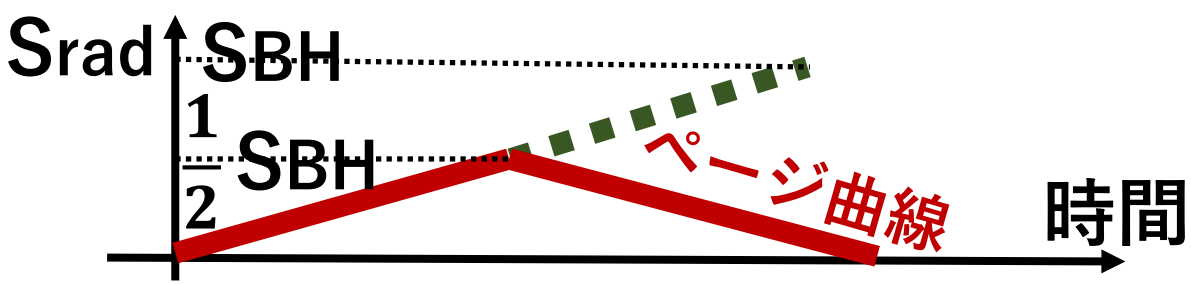
アイランドの
BHエントロピー

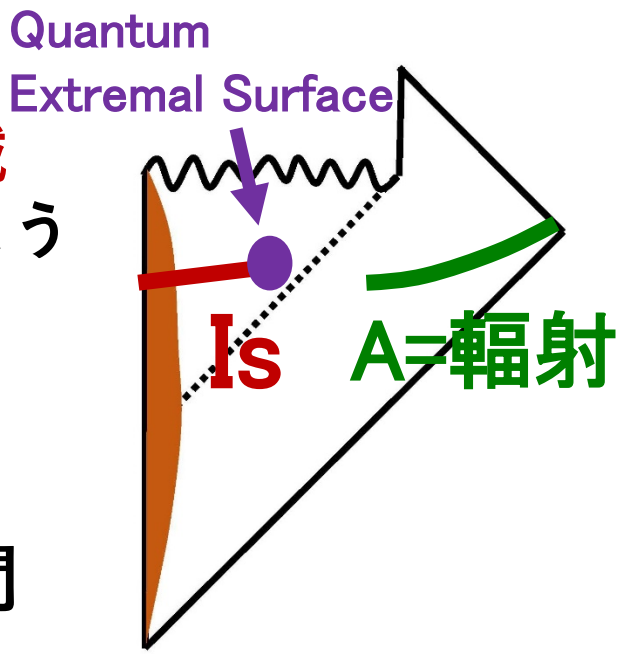
場の量子論的
エンタングルメント



アイランド内部を
観測できる！

BH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り、ページ曲線を再現できる。



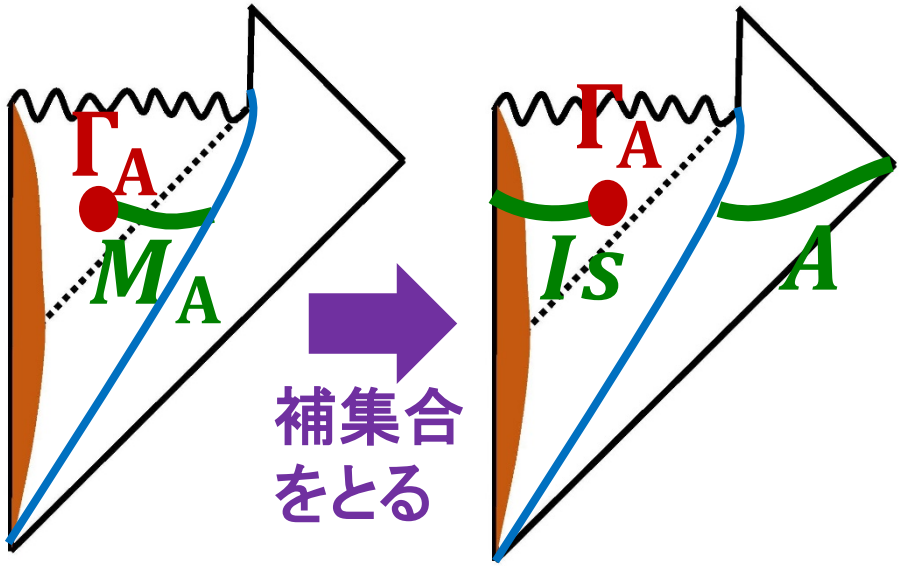


アイランド公式の導出法

(1) HEEの量子補正

$$S_A = \underset{\Gamma_A}{\mathrm{Min}}\left[\frac{\mathrm{Area}(\Gamma_A)}{4G_N} + S^{Bulk}_{M_A}\right]$$

CFTのEE　古典重力の寄与　バルクのEE

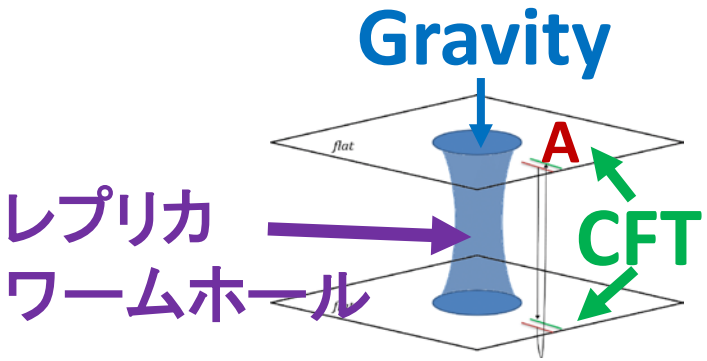


→ AdS/CFT を平坦時空などへ一般化するとアイランド公式 を得る。

(2) レプリカ・ワームホール

[Penington–Shenker–Stanford–Yang 19,
Almheiri–Hartman–Maldacena–Shaghoulian–Tajdini 19]

→ 2次元(JT)重力ではアイランド公式
が導出できる。



(3) ダブルホログラフィー (AdS/BCFT+ブレーンワールド)

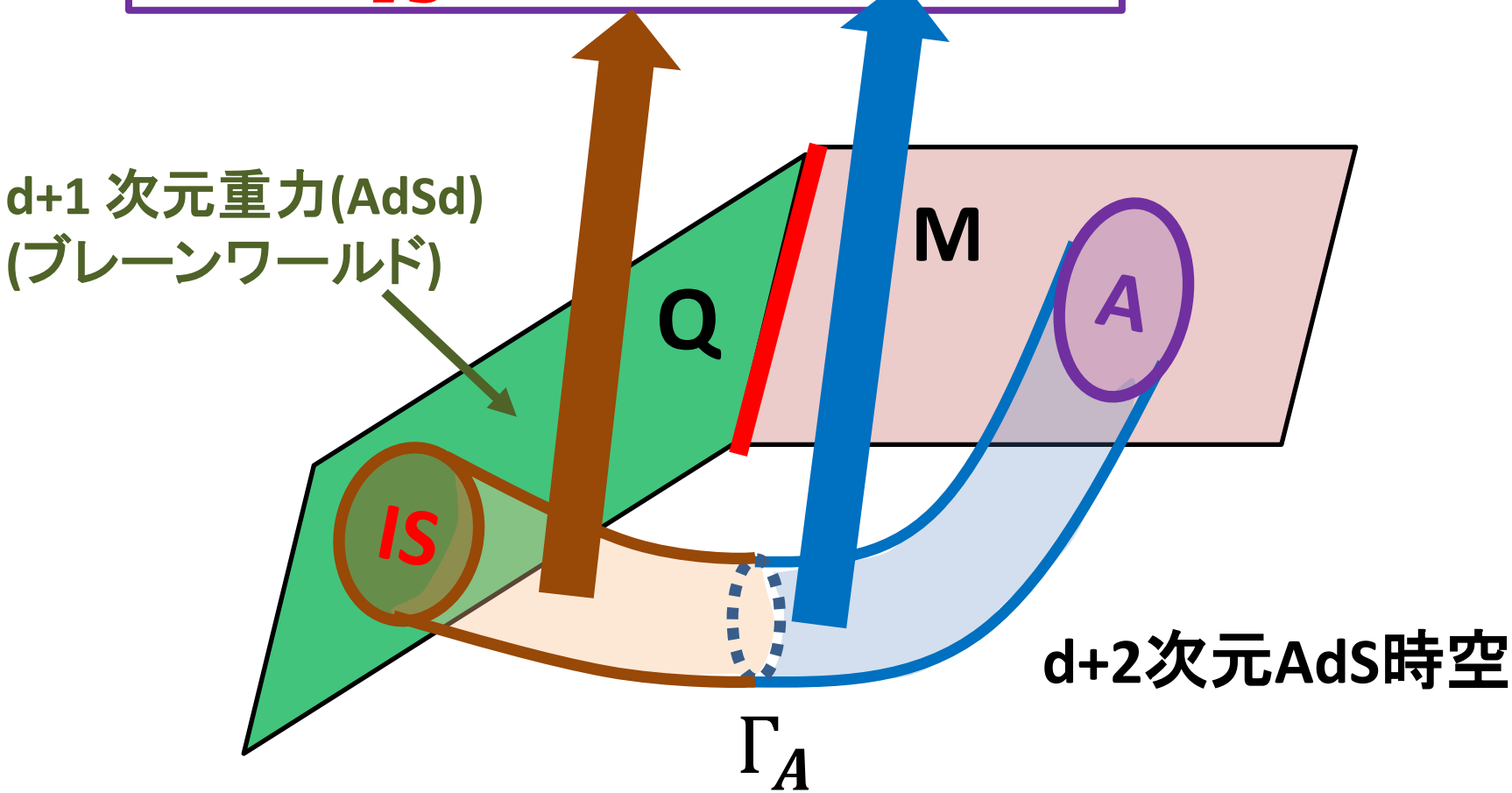
→ 多少定性的な議論であるが、任意の次元に適用できる。

HEE in AdS/BCFT [高柳 2010] → アイランド公式

[Island/BCFT duality:
鈴木-高柳　2202.08462]

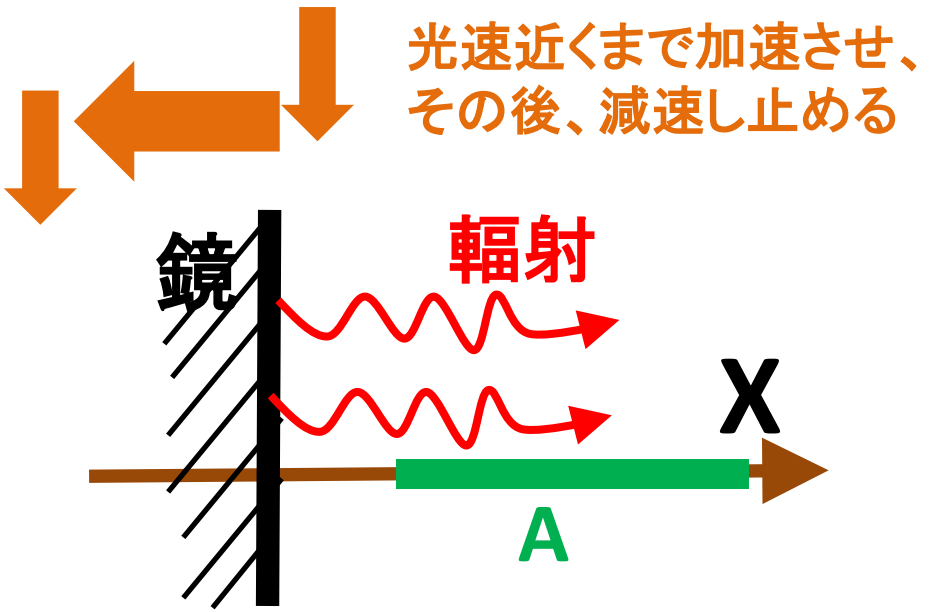
Induced gravity entropy

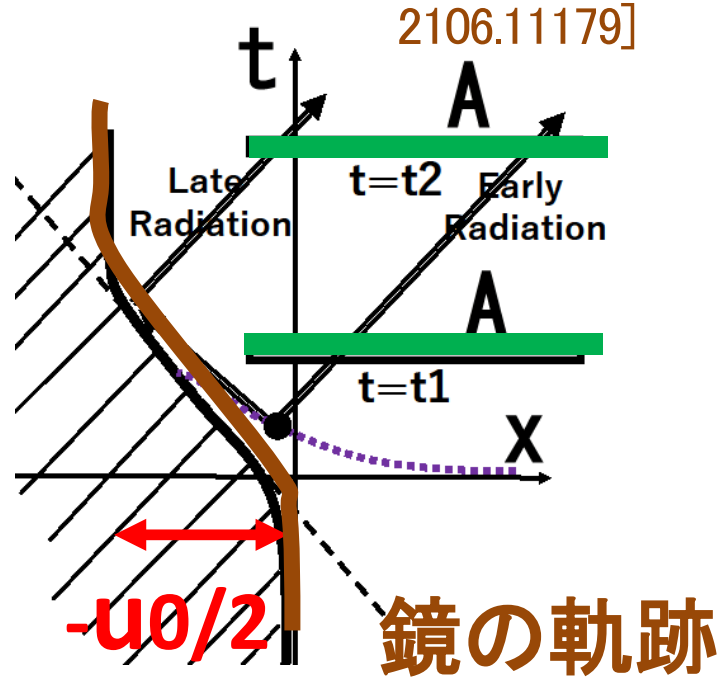
$$S_A = \underset{Is}{\mathrm{Min}}\left[\frac{Area(\partial Is)}{4G_N} + S_{A\cup Is}\right]$$



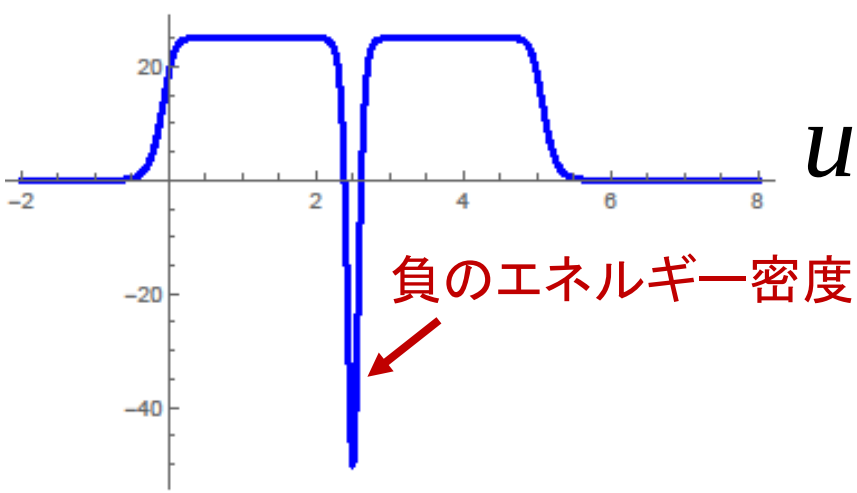
ブラックホールの蒸発を記述する動く鏡の模型

[Akal–魏–楠亀–芝–高柳, 2106.11179]

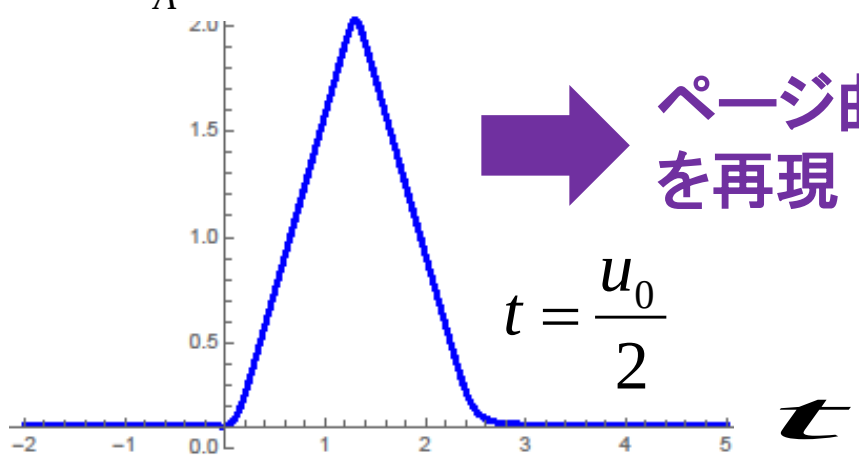




エネルギーフラックス



S_A/c エンタングルメント・エントロピー



ページ曲線を再現！

$$t = \frac{u_0}{2}$$

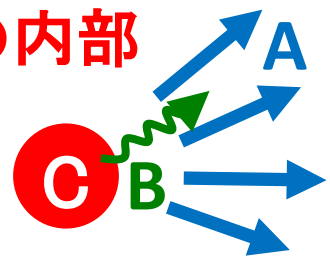
$$\beta = 1,\ \varepsilon = 0.1,\ u_0 = 5$$

Firewall問題(AMPSパラドクス)とアイランド

A =BHが半分蒸発するまでに出た輻射

B =その直後に出た輻射

C =ブラックホールの内部



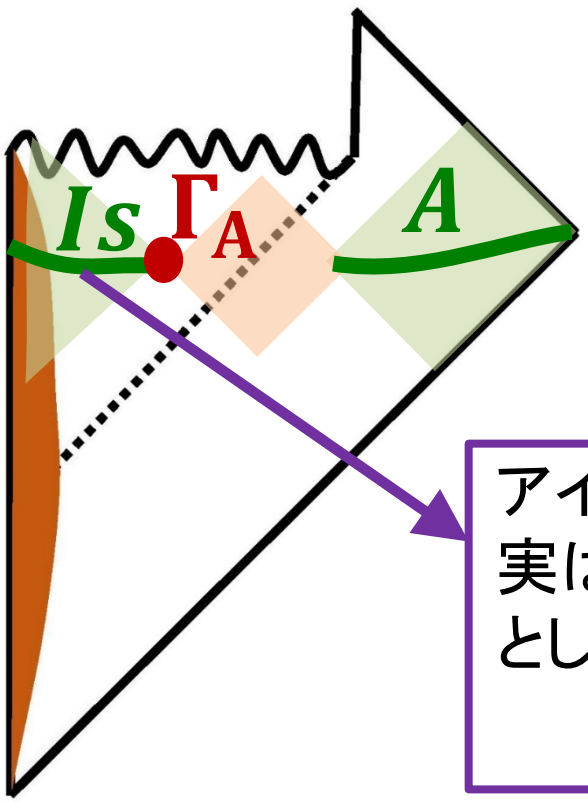
AとBはMax Entangled
(∵輻射EEは減少←Page曲線)

BとCはMax Entangled
(∵Hawking輻射は対生成)

Firewall問題

量子エンタングルメント
のモノガミー性に反する！
(量子ビットは同時に二つの
量子ビットとエンタングルできない。)

解決！



アイランドのエンタングルメント・ウェッジから
実は、「C=BHの内部とA=輻射は、ヒルベルト空間
として独立ではない」ことが分かる！

$$H_{全体} \neq H_A \otimes H_B \otimes H_C$$

⑤ おわりに

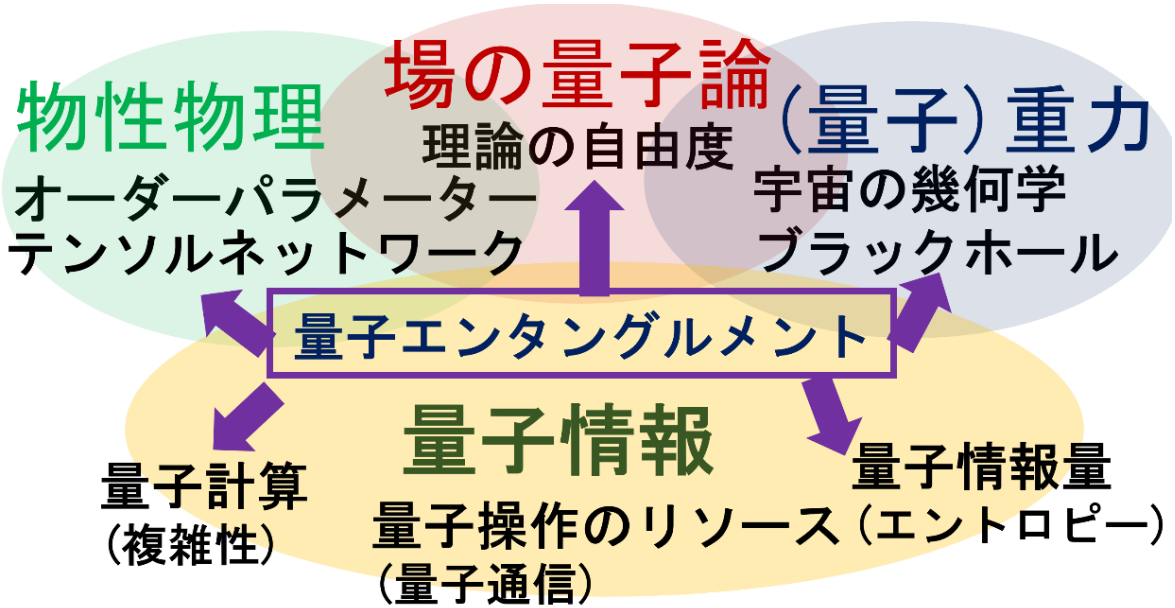
本講演では量子情報理論と重力理論の深い関係を概説した。

量子多体系や場の量子論 ➡ 幾何 ➡ (量子)重力理論

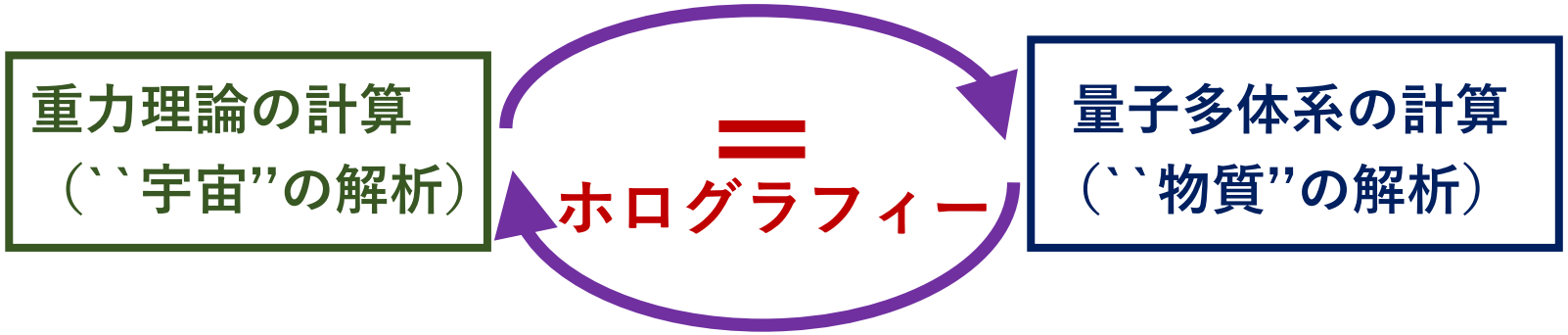
経路積分　ホログラフィー原理

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」



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。**そこで、より現実的な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。**

そのためには、現在でもブラックボックスであるAdS/CFT対応の基礎原理を理解する必要がある。その際、本講演で紹介した量子エンタングルメントを用いたアプローチは重要な鍵となるだろう。

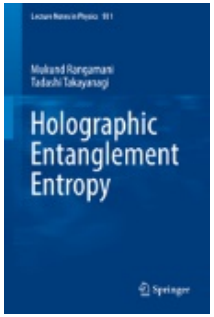
参考文献

(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) 堀田昌寛著 「量子情報と時空の物理」
臨時別冊・数理科学 SGC149 (SDB Digital Books 72)
サイエンス社 2019年

(2-4) M. Rangamani and T. Takayanagi,
``Holographic Entanglement Entropy"
Lecture Notes in Physics, Springer, 2017 (axiv:1609.04645)



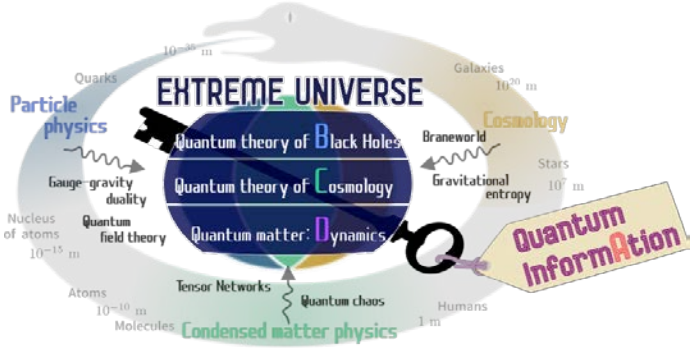
学術変革領域研究A「極限宇宙(Extreme Universe)」の紹介

[世話人の宇賀神さん、手塚さん、中田さん、講演者のBuscemiさん➔メンバー]

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

Grant-in-Aid for Transformative Research Areas A
Extreme Universe

当領域のコンセプト(中田さん作)



第一回領域会議 今月7-8日

第一回領域スクール 今月3-5日

月例領域コロキウム(第4回今月30日)

Date:
March 30th, 10:00–11:00
Speaker:
Prof. Robert Raussendorf (The University of British Columbia)
Title:
A gauge theory of measurement-based quantum computation

当領域の公開イベントにご興味がある方は、
以下のサイトでExU Online Event MLに登録ください:

https://docs.google.com/forms/d/1gApd5ioPZlklqygK1et77dyqm5hWytczJsSyBHnDCWA/viewform?ts=614330ea&edit_requested=true#responses