

学術変革領域A「極限宇宙」第1回市民講演会

量子情報から極限宇宙へ
-量子ビットから創発する宇宙
(素粒子理論の視点)

高柳 匡 (領域代表)
京都大学基礎物理学研究所



①はじめに

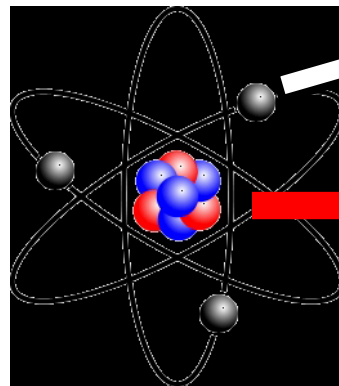
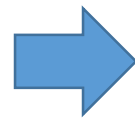
素粒子論とは？

物質を細かく分け、最小単位を探求する学問が、**素粒子物理**。その理論が**素粒子論**。

⇒究極にミクロな物理法則の探求。

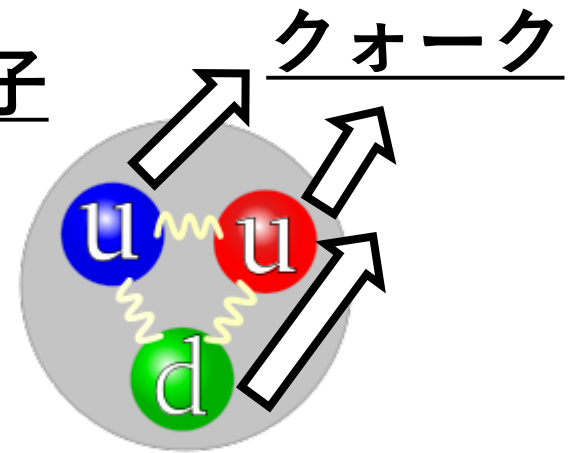


物質



原子 = 電子 + 原子核

電子



陽子

自然界に働く 4 つの力

電気・磁気の力

静電気や磁石の力。

原子核に働く力
(強い力・弱い力)

これがないと原子核も存在できない。

万有引力(重力)

物が落下する力。
太陽と地球が引き合う力。
ブラックホールも生まれる。

4つの力の統一

① 電磁気力

② 強い力 (核力)



湯川秀樹(1949年)

③ 弱い力 (β -崩壊)

場の量子論(ミクロな理論)
として統一的に扱える



朝永振一郎(1965年)

ゲージ理論
(標準理論)



南部陽一郎、小林誠、益川敏英(2008年)

④ 重力(万有引力)

マクロな物理法則は
一般相対性理論

量子論(ミクロな理論)
として扱えるならば…

究極の物理法則!

力を全て統一した理論?
= 量子重力理論?

融合されるべき

極限宇宙の目的の一つ： 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

宇宙創成を解明するには、量子重力理論が必要不可欠！

とりあえず、ミクロな宇宙を拡大したい ➡ 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

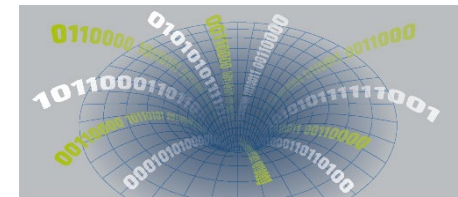
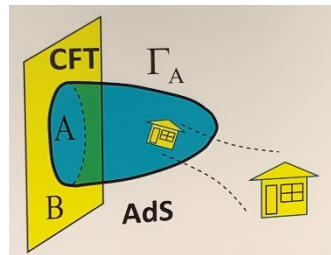
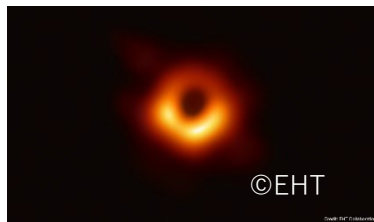
量子重力理論



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
～時空のミクロナ幾何構造



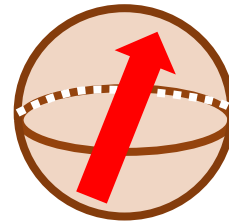
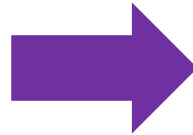
ホログラフィー原理はブラックホールや初期宇宙など重力理論の時空を拡大する。

マイ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

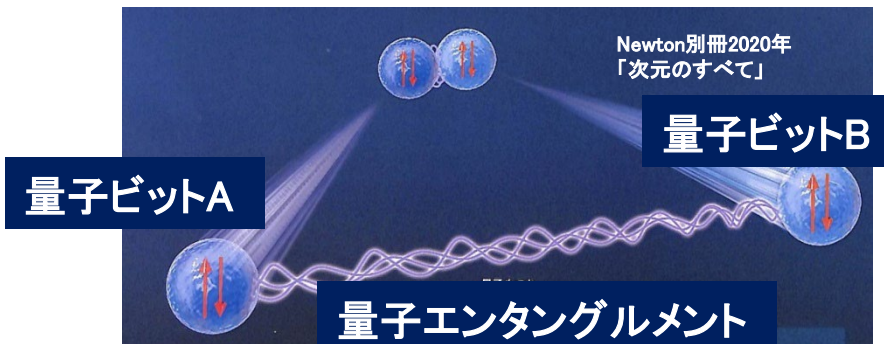


$$a|0\rangle + b|1\rangle$$

マクロな世界

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)



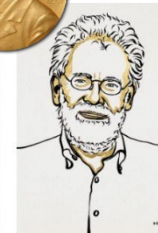
The Nobel Prize in Physics
2022



III. Niklas Elmehed ©
Nobel Prize Outreach
Alain Aspect

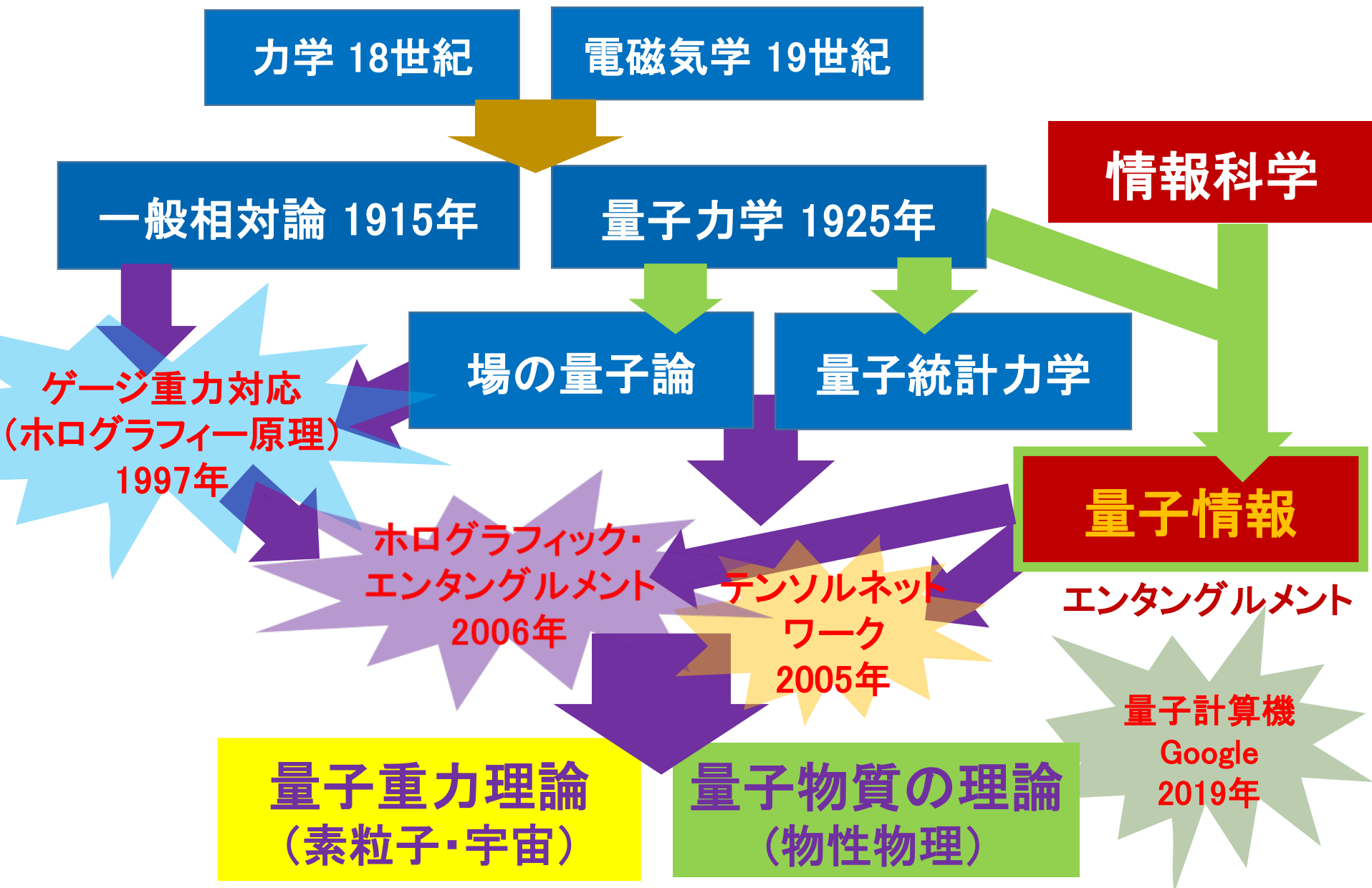


III. Niklas Elmehed ©
Nobel Prize Outreach
John F. Clauser



III. Niklas Elmehed ©
Nobel Prize Outreach
Anton Zeilinger

物理学の発展における位置づけ



講演内容

- ① はじめに
- ② 量子エンタングルメント
- ③ ブラックホールとエントロピー
- ④ ホログラフィー原理と量子エンタングルメント
- ⑤ ブラックホールの情報問題への応用
- ⑥ 量子情報から創発する宇宙
- ⑦ 極限宇宙とは？
- ⑧ おわりに

② 量子エンタングルメント

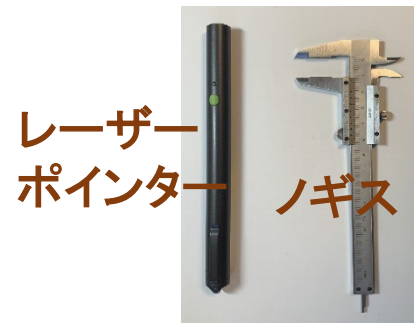
粒子と波の二重性 光の正体について考えてみる。

(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 μm)
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！

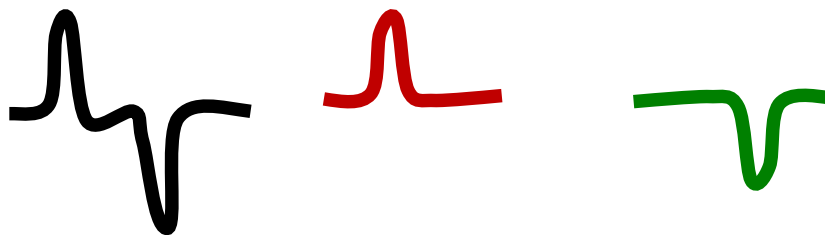
量子論の状態 $|\Psi\rangle = a|f\rangle + b|g\rangle$

ケット
とよばれる表記
(状態を表す)

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

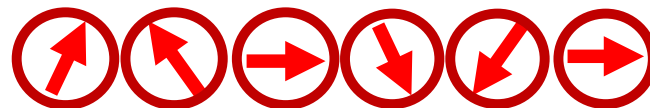
扱う情報: 古典情報
情報量: ビット(二進法)

0 1 0 1 1 0

森前氏
の講演

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)

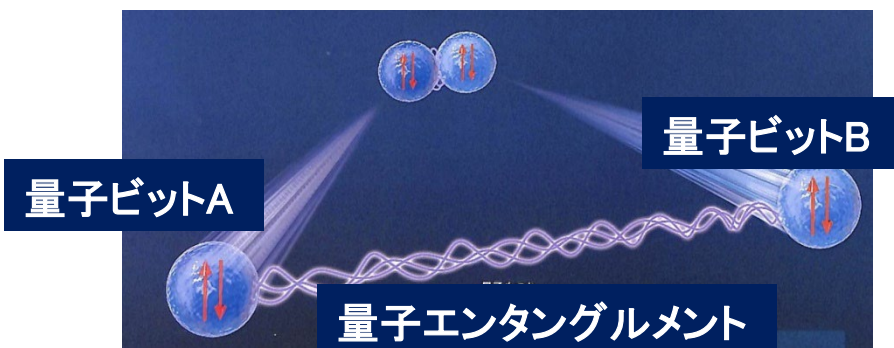
AとBの2つの量子ビットがある系を考える。

次のベル状態を考える:

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

この時、Aのスピンを測定するだけで、Bのスピンの状態も分かってしまう!

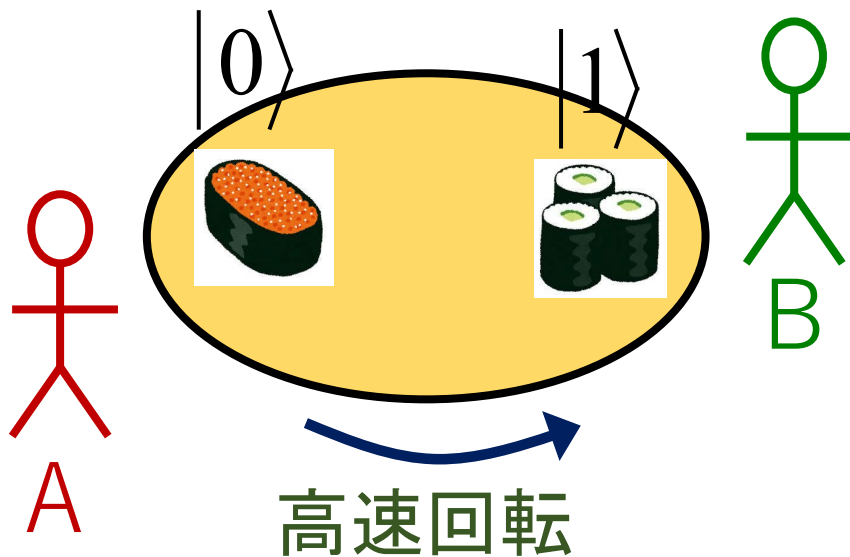
このAB間の相関が、量子エンタングルメント(量子もつれ)である。



全体の状態は決まっているが、一部に制限すると不確定!

「もつれ」のイメージ

例：“速すぎる回転寿司”に行ったAさんとBさん



Aが「イクラ $|0\rangle$ 」を取ると、
Bは必ず「かっぱ巻き $|1\rangle$ 」。

AとBがもつれている
(相関している)

しかし本当は、上記の例は古典的な相関である。達人であれば、イクラをさっと取ることができるので。

一方、ミクロな世界の量子論では、どんな達人でも一方を選ぶのは不可能となる。これが「量子もつれ」。

ベルの不等式(CHSH不等式) スピンは、 $|S_{A,B}^{(1,2)}| \leq 1$ とする。

古典論では、2粒子AとBのスピンについて次の不等式が成り立つ。

$$\left| \left\langle S_A^{(1)} \cdot (S_B^{(1)} - S_B^{(2)}) + S_A^{(2)} \cdot (S_B^{(1)} + S_B^{(2)}) \right\rangle \right| \leq 2$$

量子論では、もつれた状態を考えることで、この不等式は破れる！

ベル状態は不等式を最大に破る！

ベルの不等式の実験検証

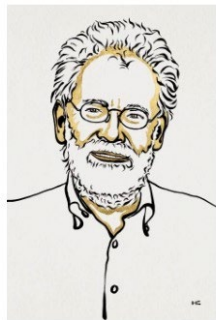
The Nobel Prize in Physics
2022



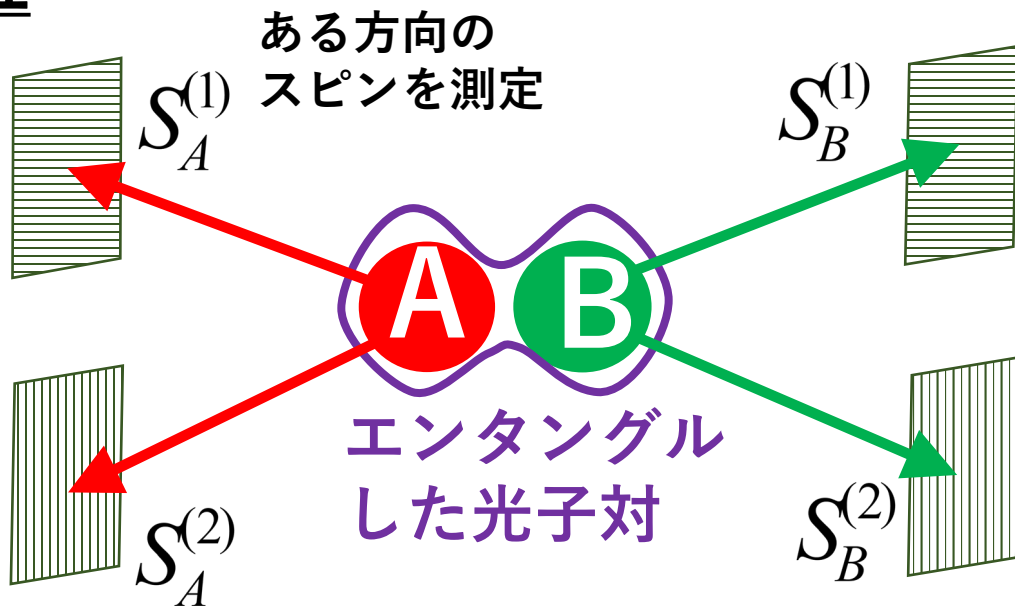
Ill. Niklas Elmehed ©
Nobel Prize Outreach
Alain Aspect



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



Ill. Niklas Elmehed ©
Nobel Prize Outreach
Anton Zeilinger



エンタングルメント・エントロピー (EE)

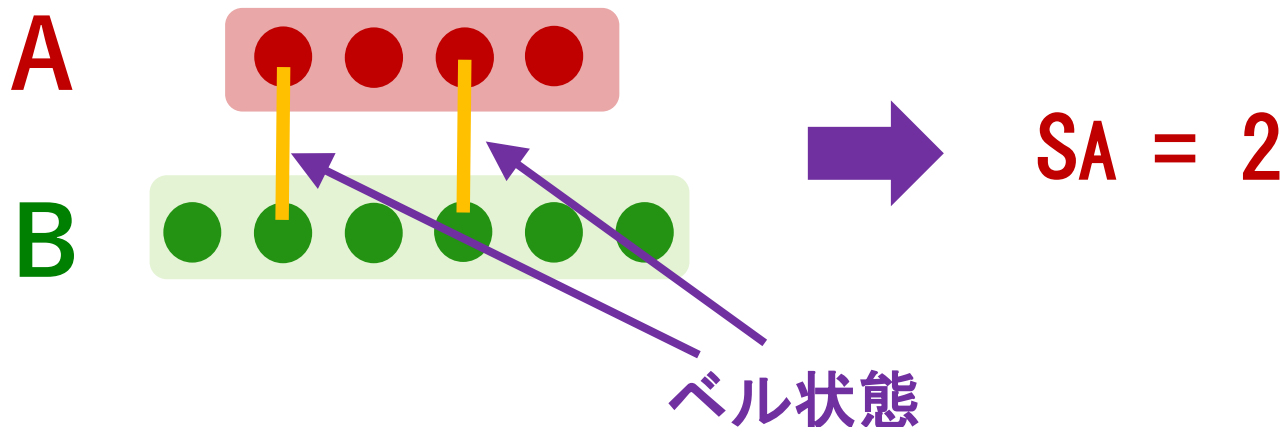
量子エンタングルメントの大きさを測る量

➡ 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生じる情報の曖昧さ

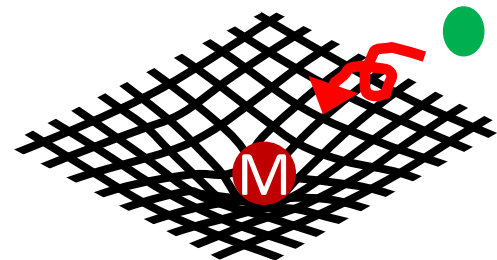


③ ブラックホール(BH)とエントロピー

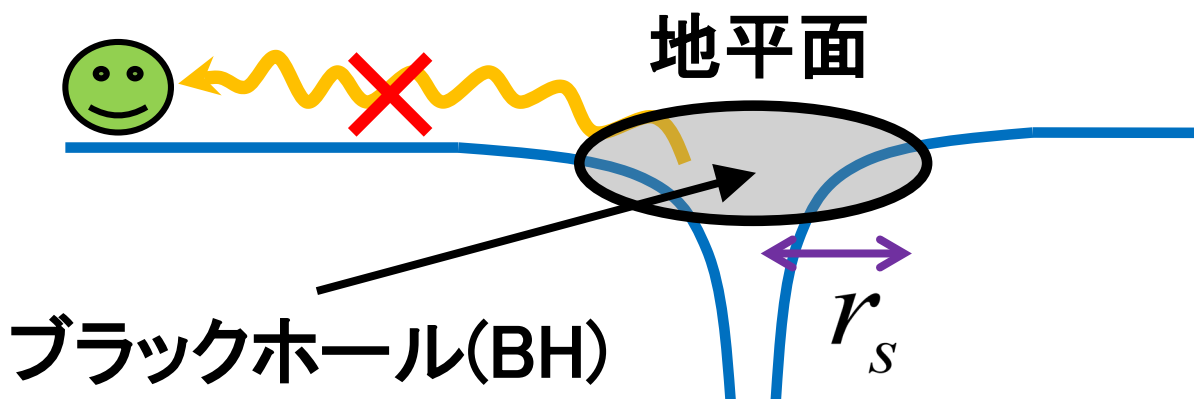
ブラックホール時空

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

一般相対論に従い
時空が曲がる！



➡ 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

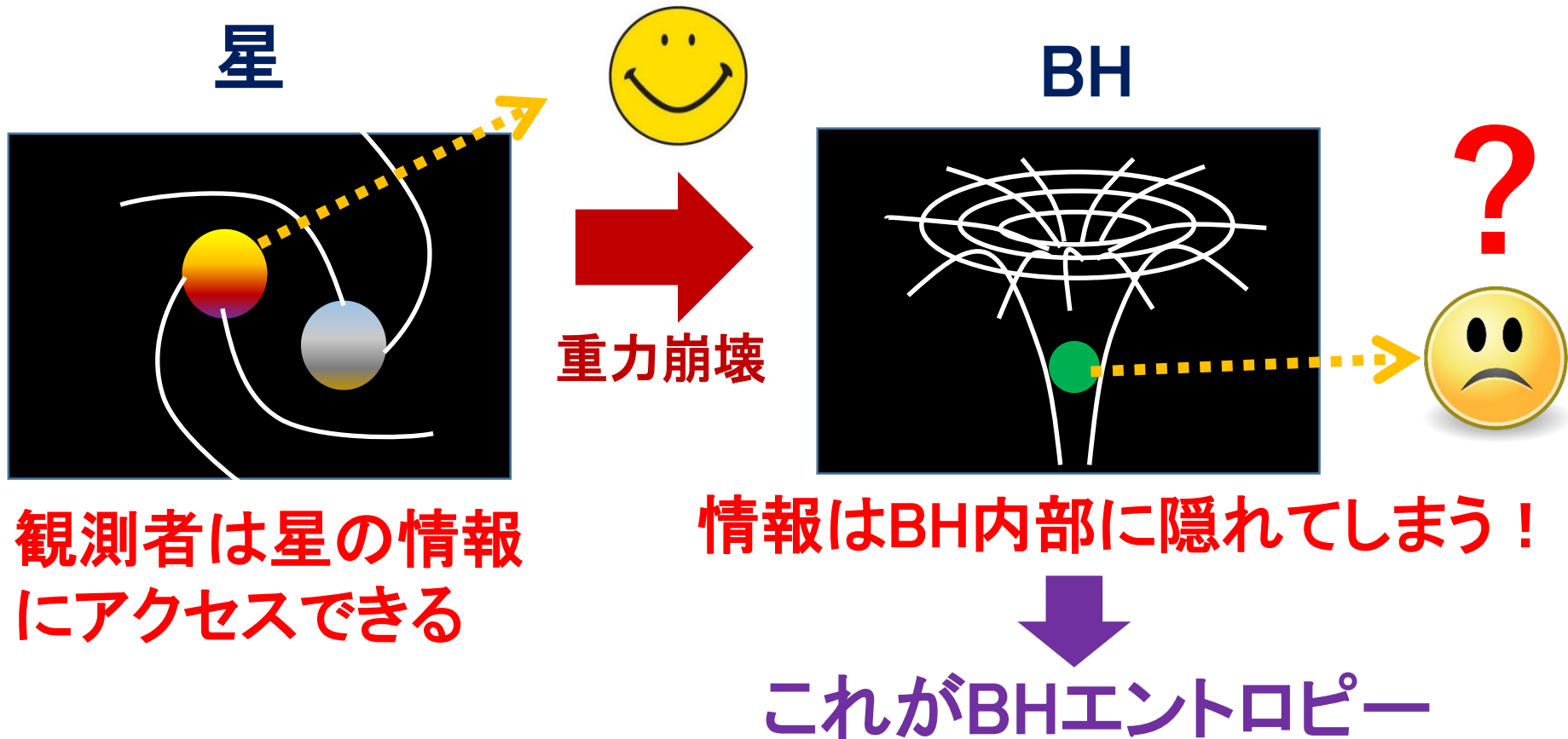
$$\rightarrow r_s = 3\text{km}$$

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

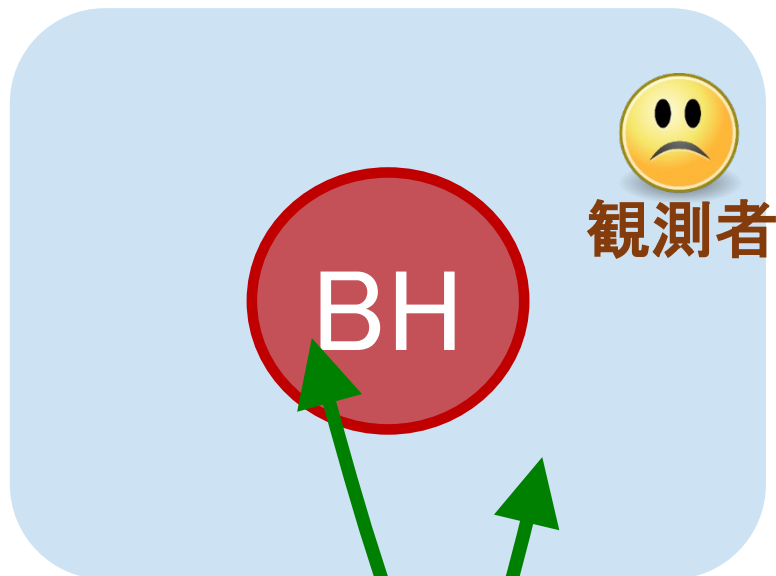
理解するには
量子重力理論
が必要！

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！

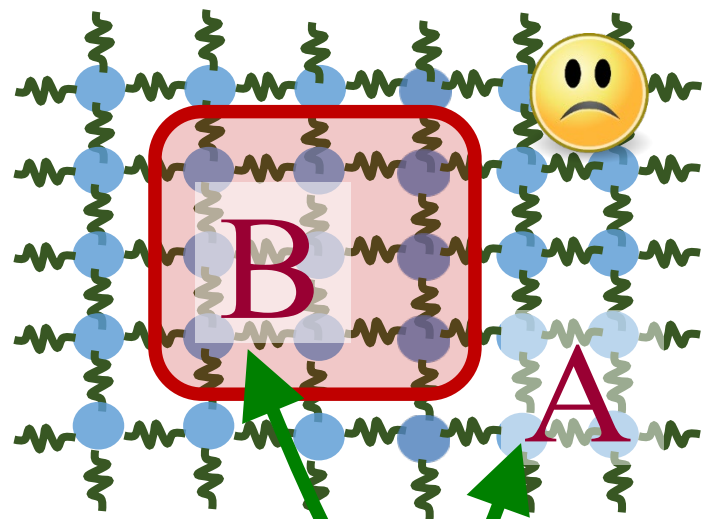
量子多体系エンタングルメントとブラックホールの類似性

ブラックホール時空



エンタングルしている！

量子物質(スピン系)



エンタングルしている！

BHエントロピー SBH

時空

面積則

エンタングルメント・エントロピー SA

物質

面積則

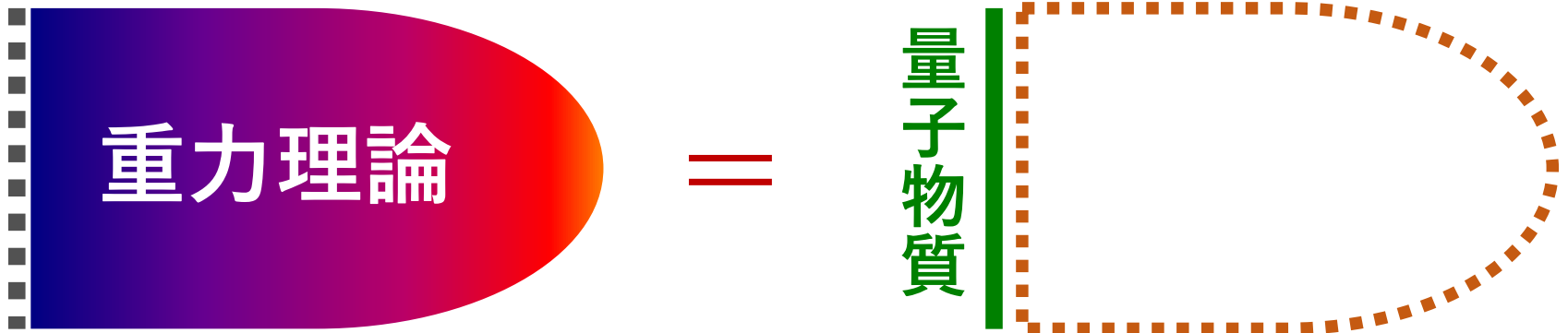
④ ホログラフィー原理と量子エンタングルメント

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！

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]

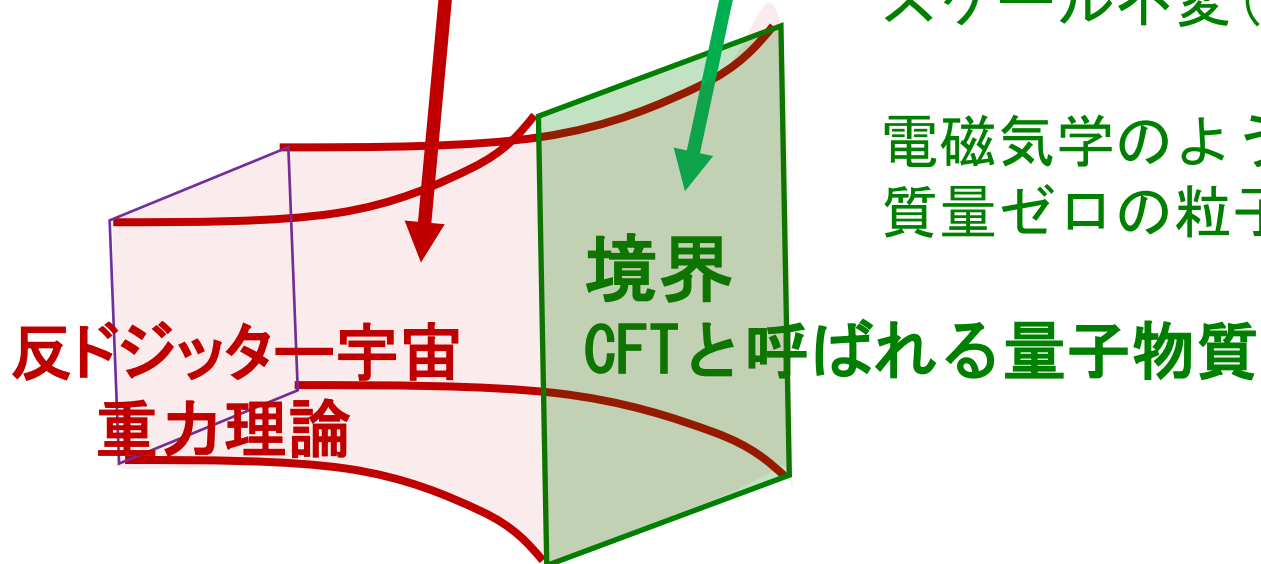
D+1次元反ドジッター宇宙
(AdS時空)における重力理論

=

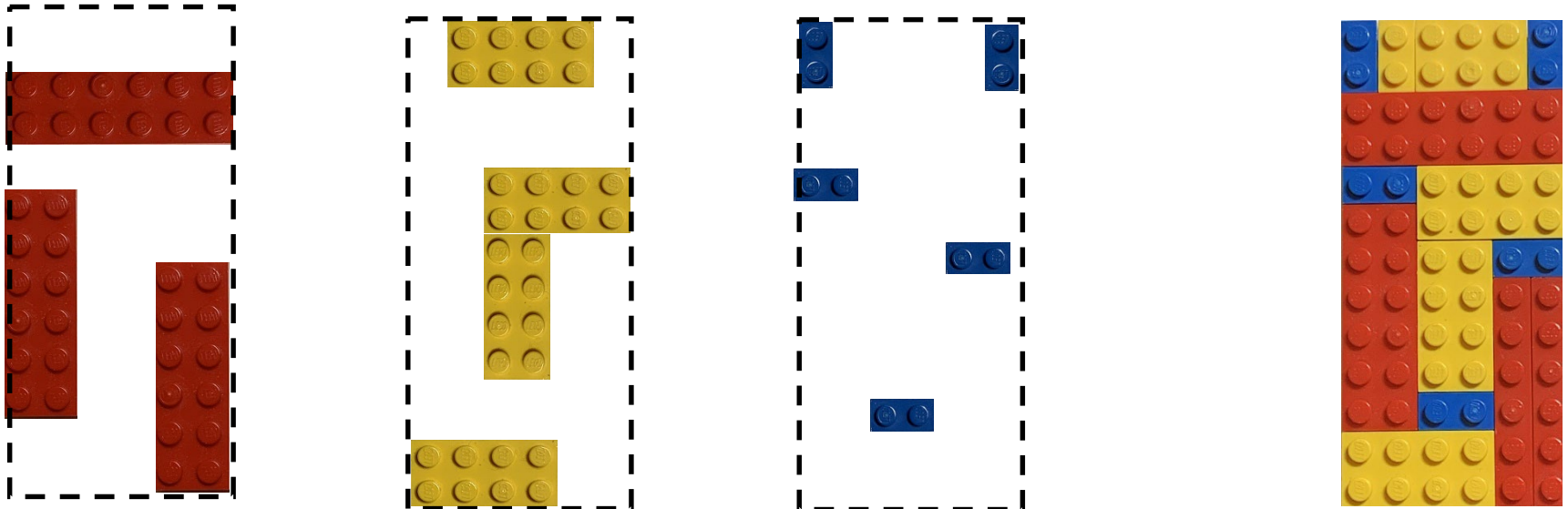
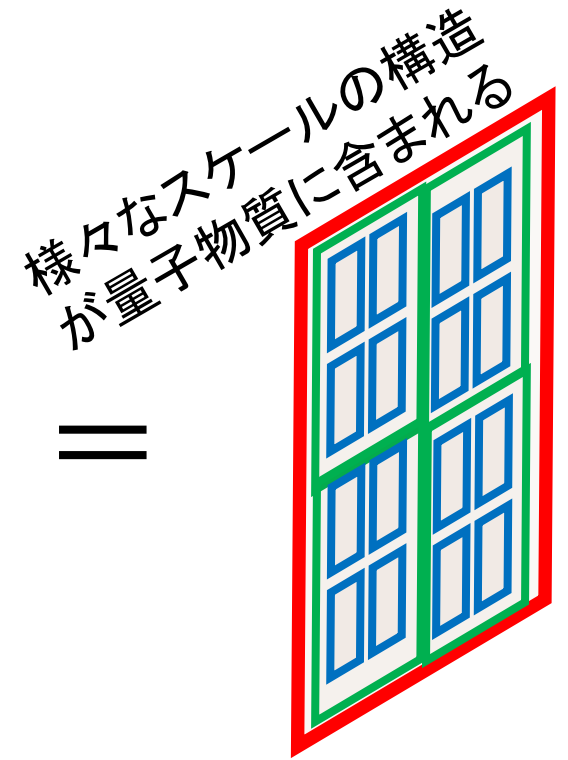
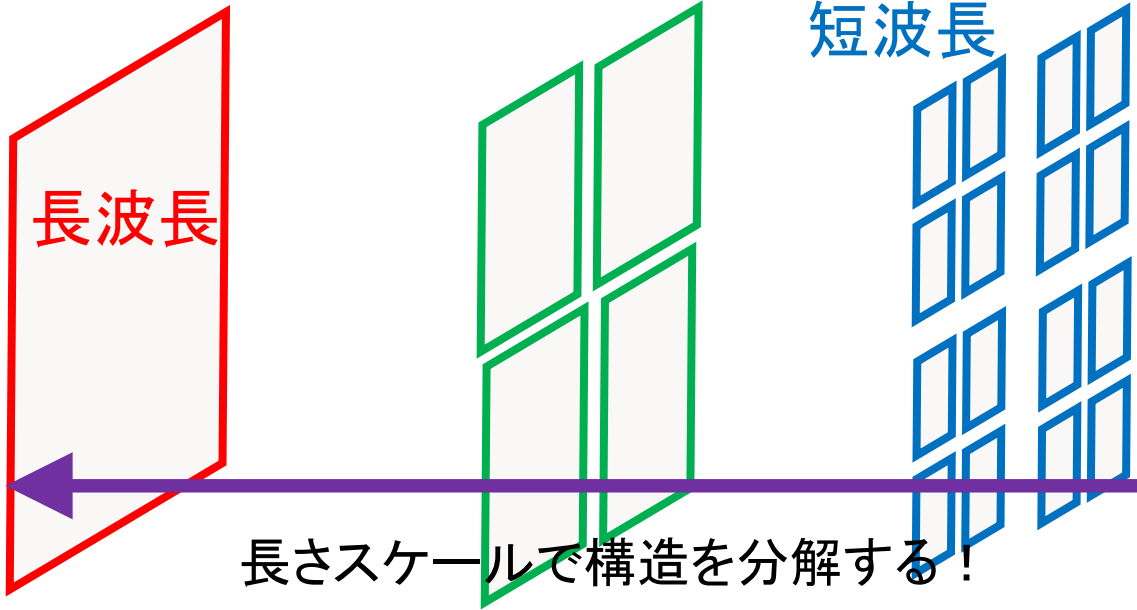
D次元時空における
ゲージ理論(共形場理論)

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)



ゲージ重力対応のメカニズムのイメージ

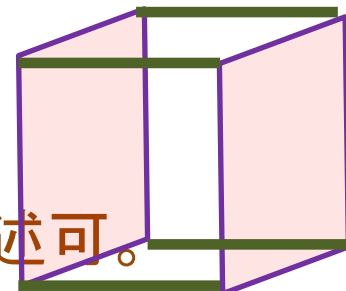


宇宙の3つのタイプ

[1] 宇宙定数=0 (曲率=0)

→ 平坦な宇宙 (ミンコフスキー時空)

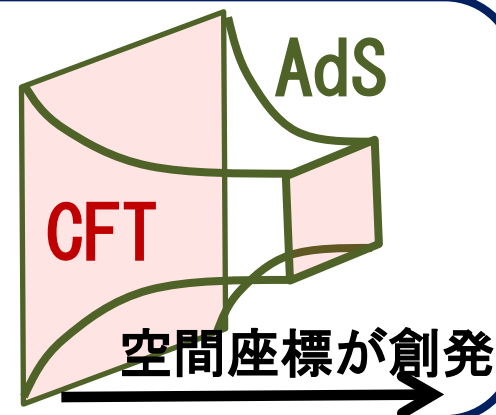
現在の宇宙は、ほぼ平坦。超弦理論で量子重力を記述可。



[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！

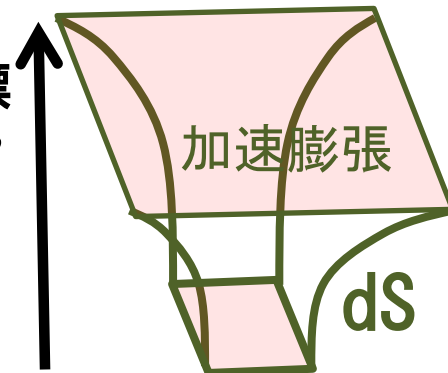


[3] 宇宙定数>0 (曲率>0)

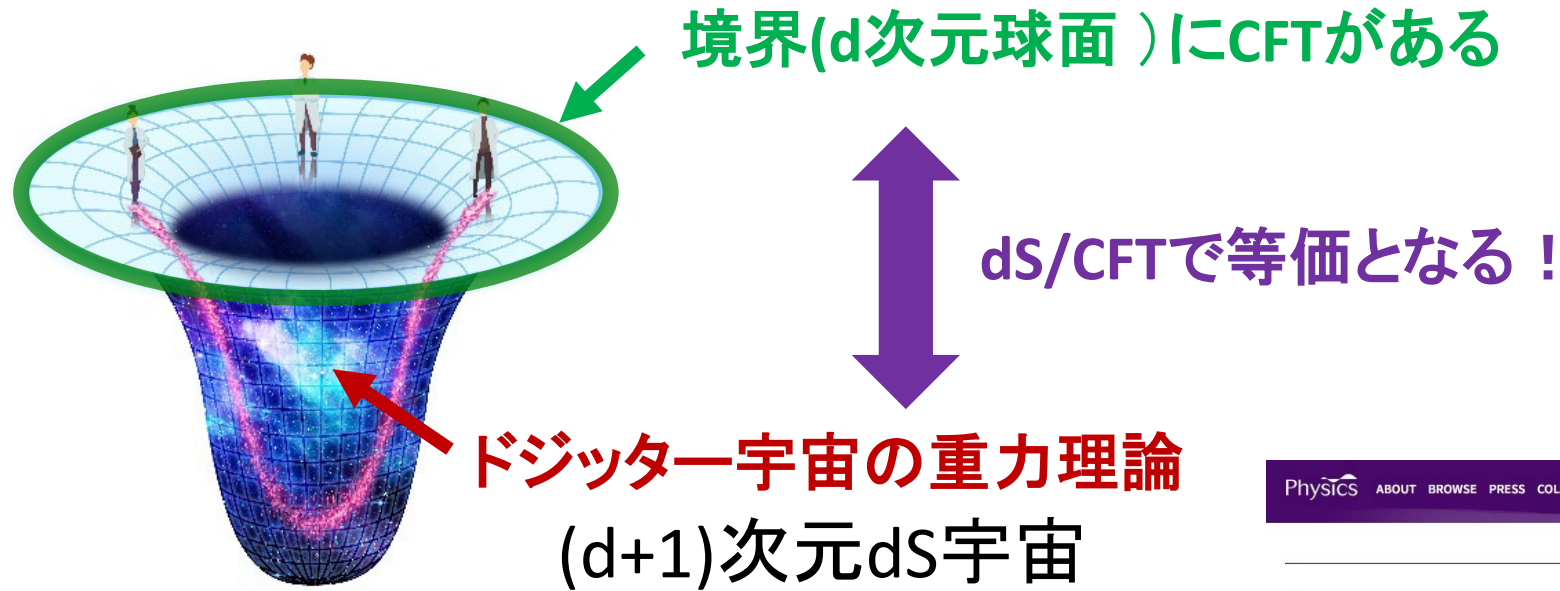
→ ドジッター宇宙 (de-Sitter Space)

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)]

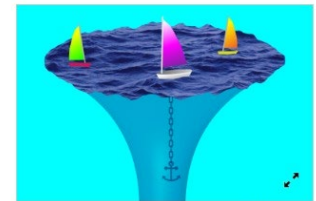


VIEWPOINT

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)

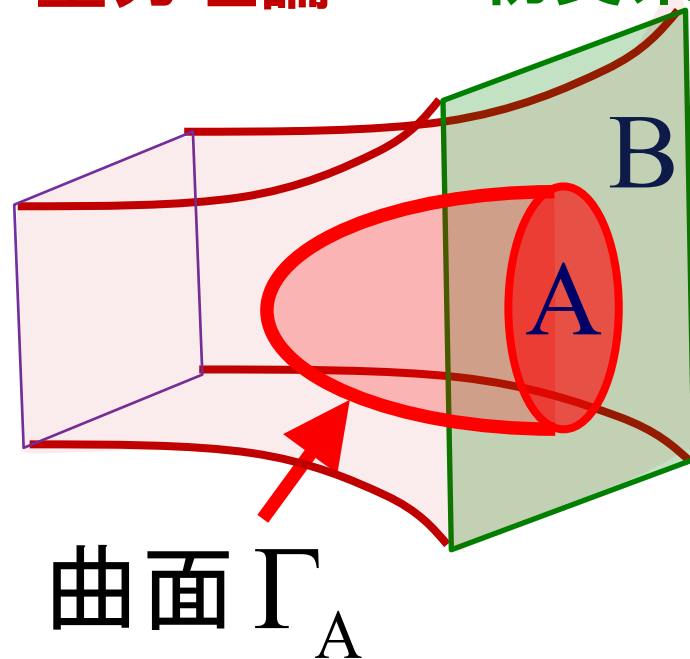
ホログラフィックなエンタングルメント・エントロピー [笠-高柳 2006]

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

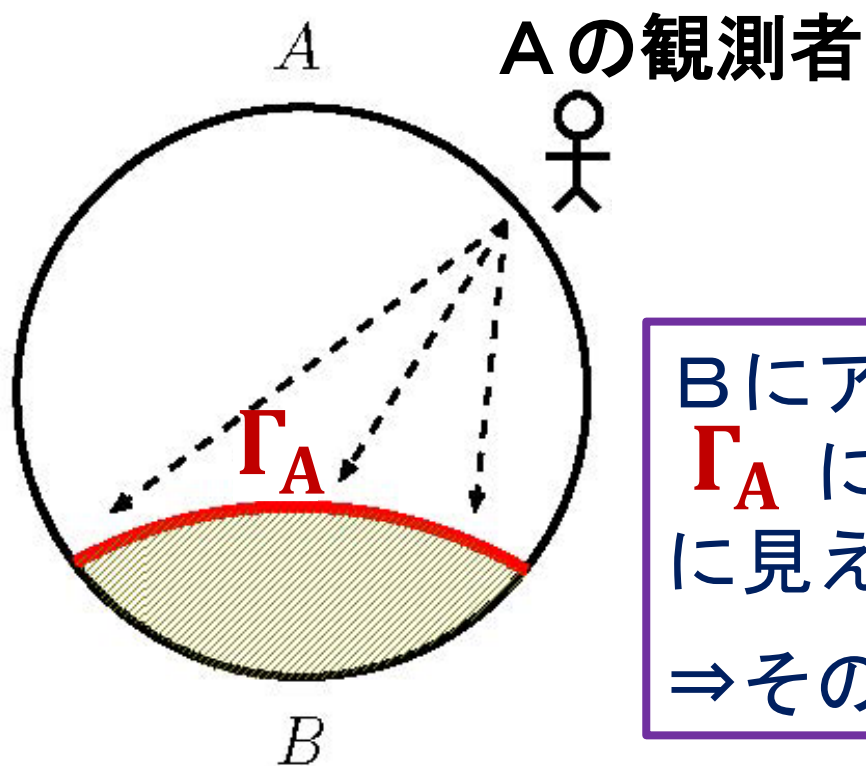


エンタングルメント・エントロピー
($\approx A$ に含まれる量子情報量)

➡ 「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」

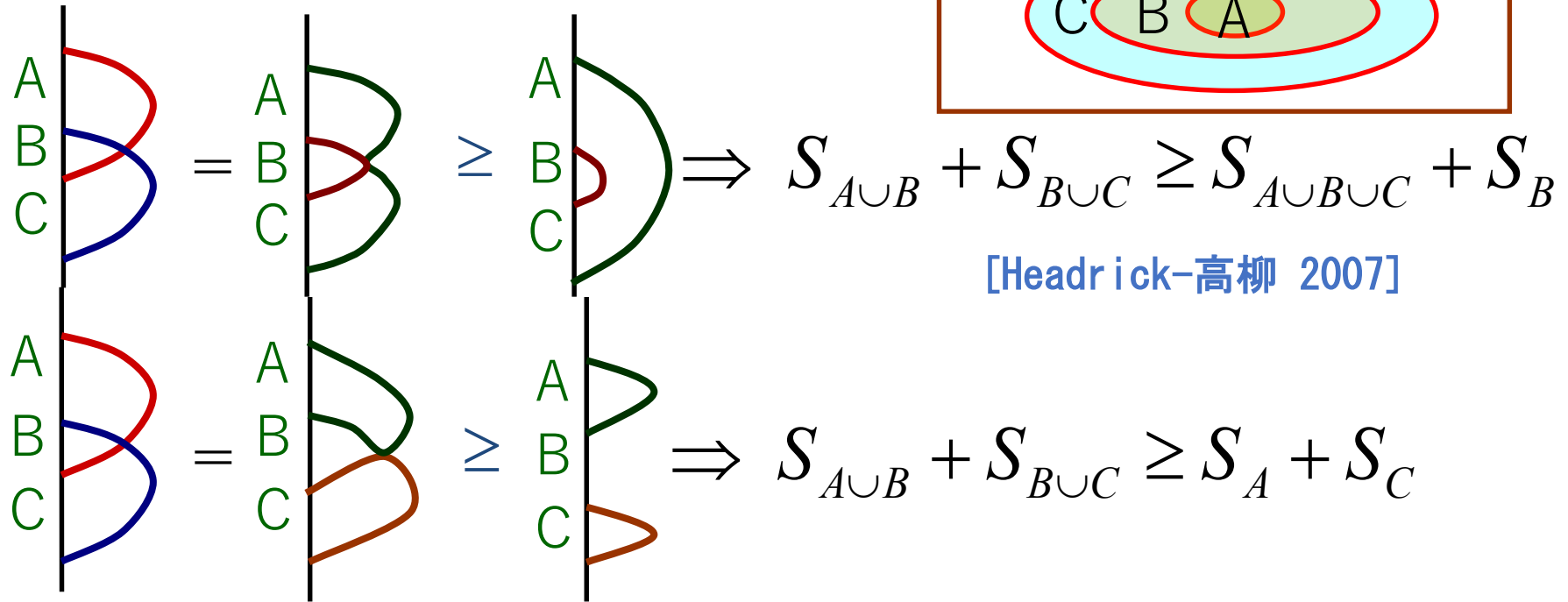
どのようにこの公式を見出したか？



Bにアクセスできない観測者は
 Γ_A にブラックホールがあるように見え、斜線の領域が隠される。
⇒そのBHのエントロピーがEE！

適用例：強劣加法性の証明

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

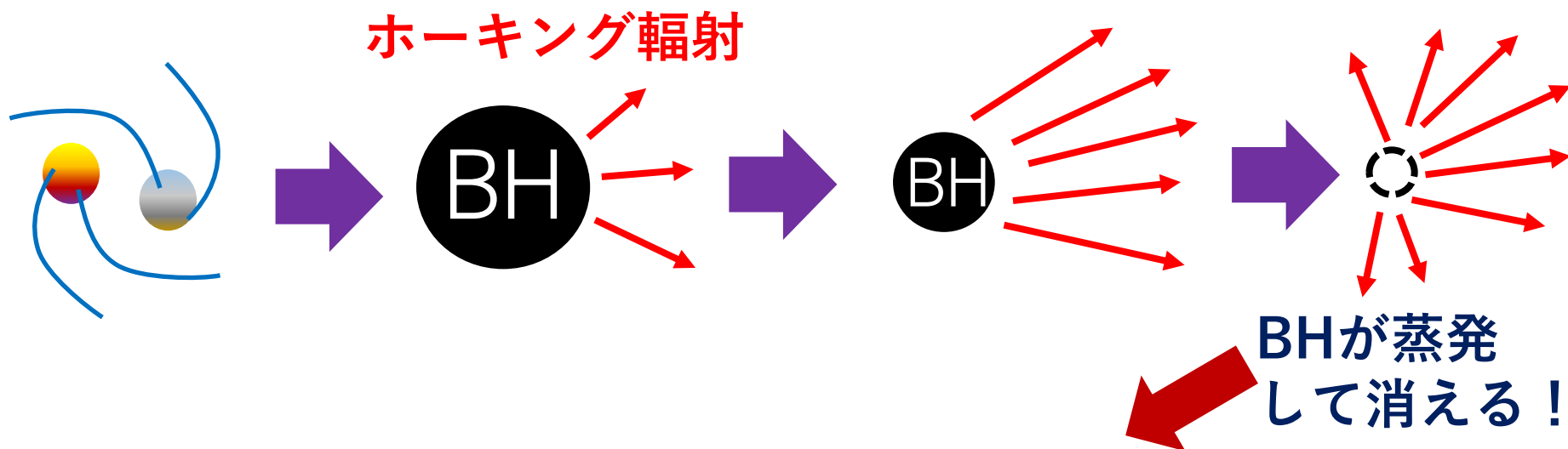


「量子情報の不等式＝幾何学の三角不等式」となる！

⑤ 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

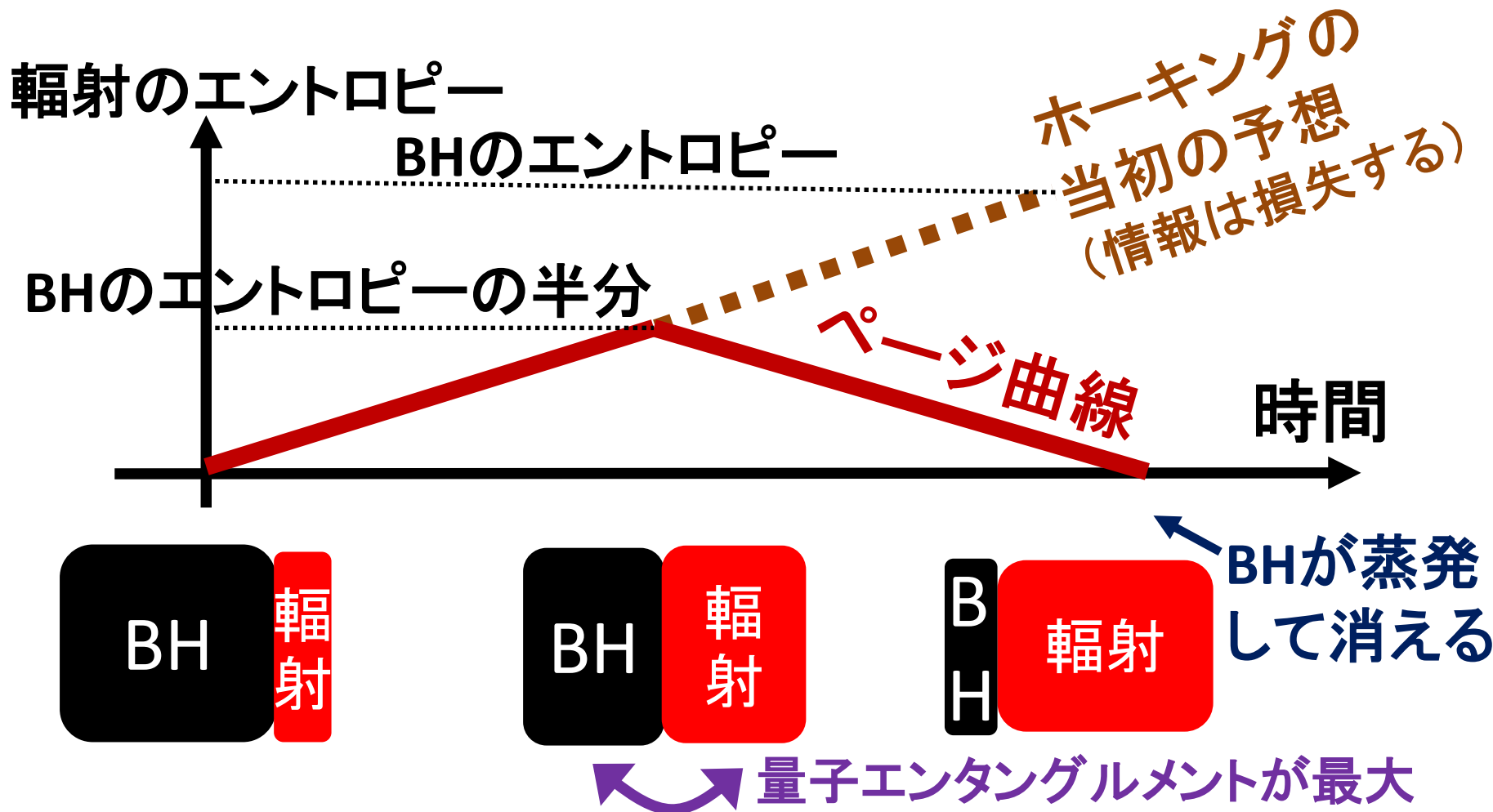
ホーキングが発見したように、実はブラックホールは温度を持ち、黒体輻射(ホーキング輻射)を行う。この輻射で次第にエネルギーを失い、最終的には消えてしまう(蒸発する)と考えられる。



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！

エンタングルメント・エントロピーのページ曲線

BHの蒸発で、情報が損失しない(全系が純粋状態)とすると、エンタングルメント・エントロピーはページ曲線に従うべき。



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エンタングルメント・エントロピー(EE)を、
共形場理論と重力理論が隣接する系に一般化する。

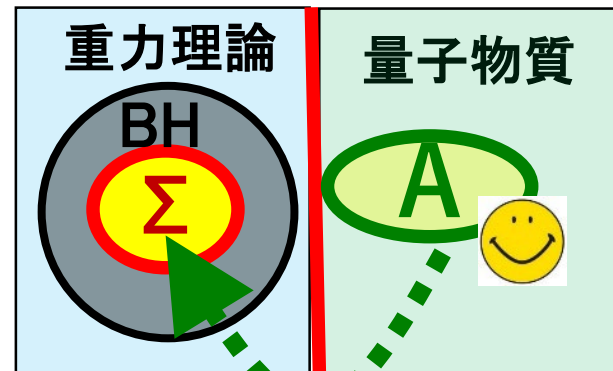
アイランド公式 [Penington, Almheiriら 2019]

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

↑
輻射のEE

↑
重力エントロピー

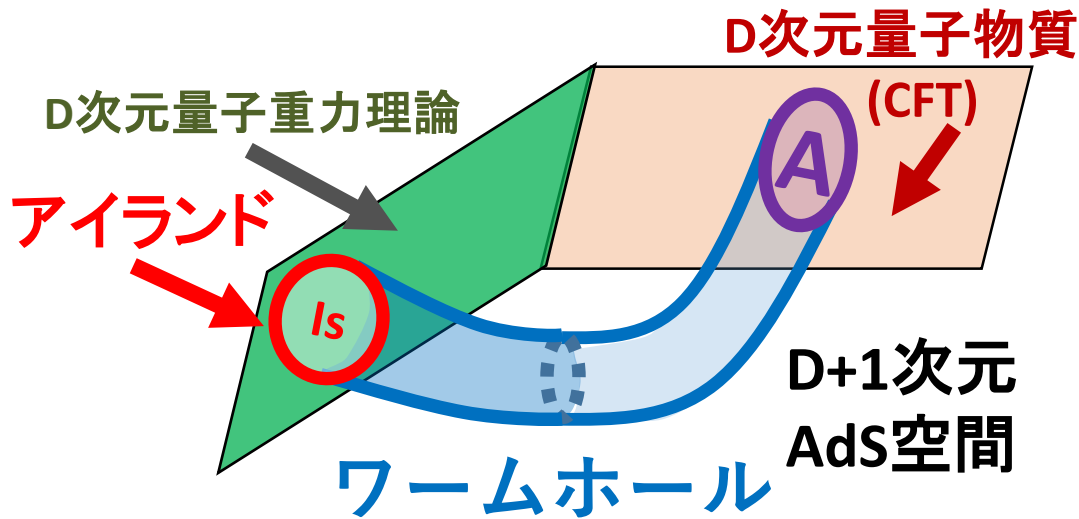
↑
量子物質の
エンタングルメント



↑
アイランドΣを観測できる！

蒸発が進むとBH内部に**抜け穴(アイランド)**が開いて、
中の情報をホーキング輻射から取り出せるようになる。
→ページ曲線を再現。

アイランド公式の直感的な理解



⑥ 量子ビットから創発する宇宙

前述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。

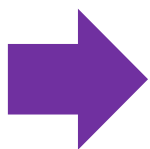
$$S_A = \frac{\Gamma_A \text{の面積}}{4l_P^2}$$

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

ベル状態
プランクスケールのミニ宇宙

プランク長



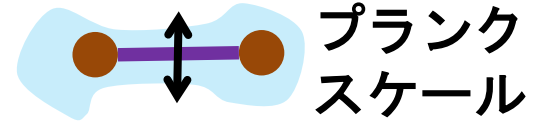
量子ビットは時空全体に満ちているのでは？
→量子ビットから宇宙は創発する？

このように、重力理論の時空が、量子ビットの集合体と解釈できることが示唆される。

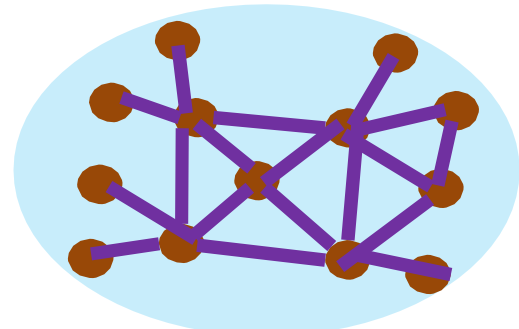
1量子ビットのエンタングルメント



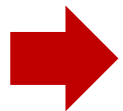
ミクロな宇宙



多数の量子ビット



マクロな宇宙



これを実現する模型がテンソルネットワーク！

[Swingle 2009]

テンソルネットワーク (TN)

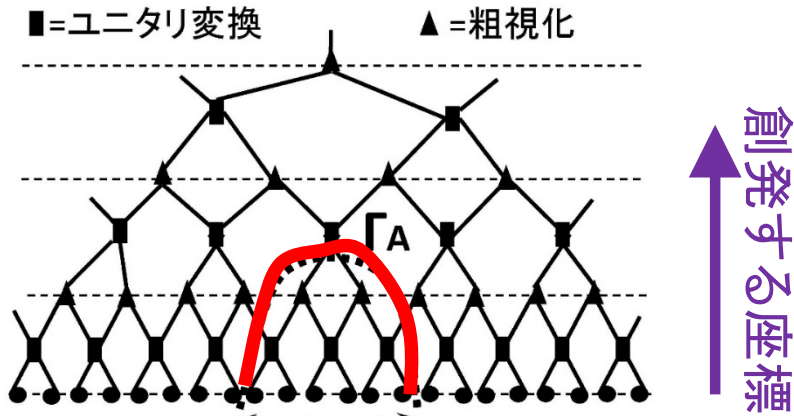
[DMRG: White 92,.. CTM: 西野-奥西 96,
PEPS: Verstraete-Cirac 04, ...]

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実現

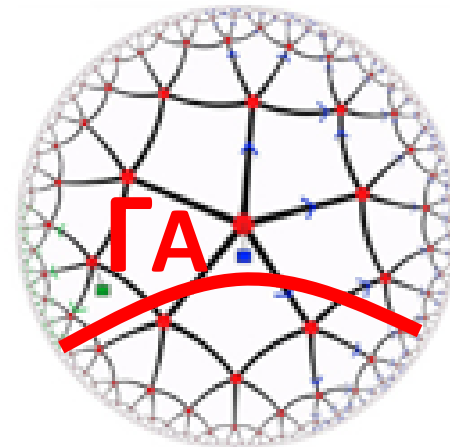


SAはネットワークの最小断面積！

[例2] HaPPY模型

[Patawski-吉田-Harlow-Preskill 2015]

→量子誤り訂正符号を利用



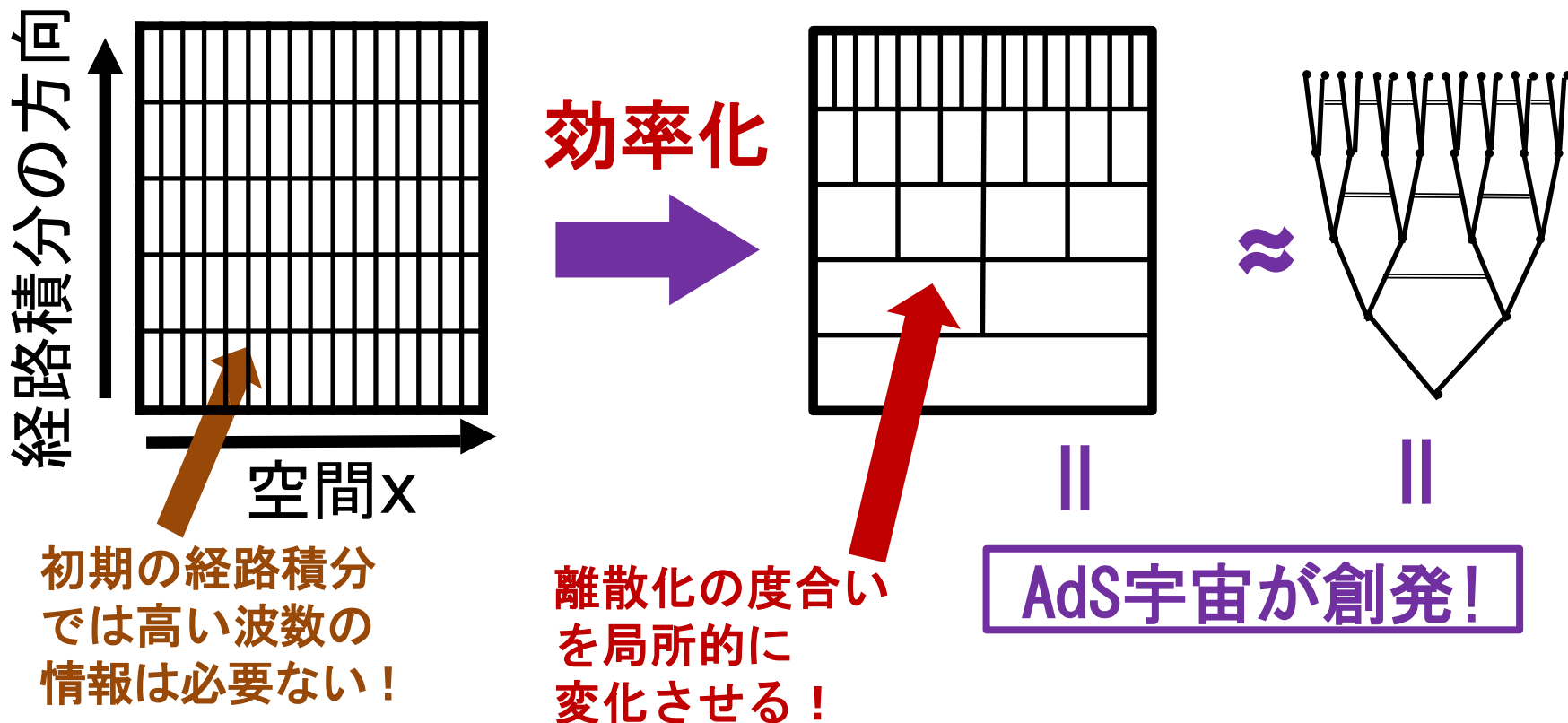
量子ビットの幾何学構造 = 反ドジッター空間

テンソルネットワークの連続極限をとって場の理論を考えたい！

例3: 経路積分の効率化

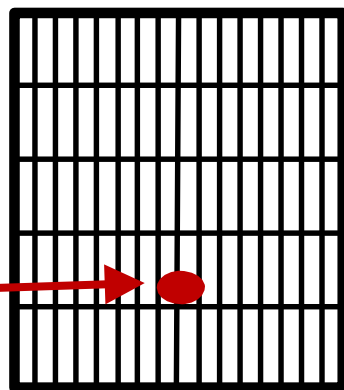
[Caputa-Kundu-宮地-渡邊-高柳 2017]

量子状態を経路積分と呼ばれる手法で表す際に、
その中で計算コストが最小なものを選ぶ！

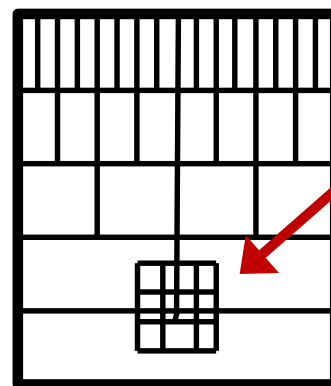
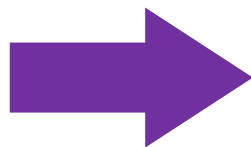


興味深い事実：計算効率を最大にすると重力理論が得られる！

経路積分



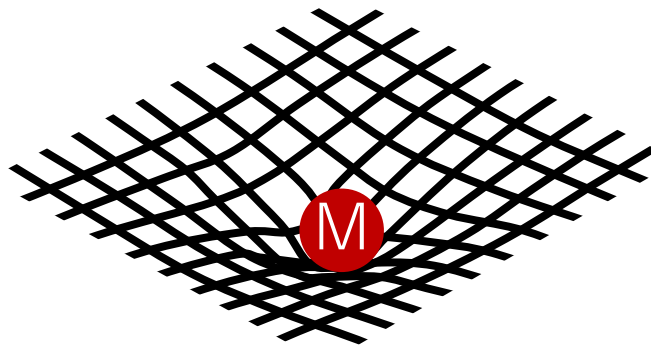
効率化



離散化を細かく
する必要がある

物体を置く
(エネルギー源)

エネルギー源 (= 情報源)
が背景の時空を曲げる
⇒ 一般相対論の本質!



最新の研究成果 [Boruch-Caputa-Ge-高柳 2021]

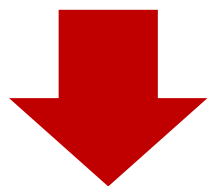
経路積分の効率化 = 宇宙の波動関数 (Hartle-Hawking 波動関数) の最大化 !

重力理論は、最速の“量子コンピューター”?

⑦「極限宇宙」とは？

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3つの問い

① 空間の極限 B

[ブラックホール(BH)の量子論]

問い: BHの蒸発で、BH内部の情報
はどこに消えるのか?

量子重力理論

② 時間の極限 C

[宇宙創成のメカニズム]

問い: 宇宙はどのように
無から生まれたのか?

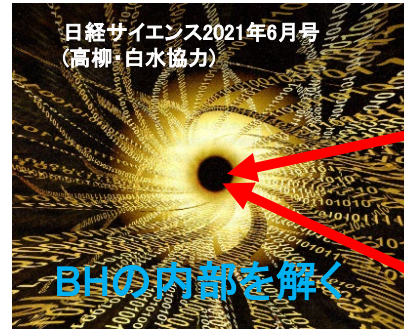
ゲージ重力対応

③ 物質の極限 D

[量子物質のダイナミクス]

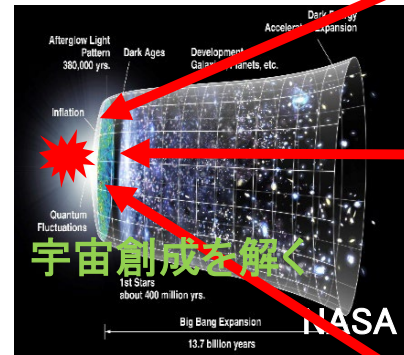
問い: 量子物質のダイナミクス
如何にすれば解けるか?

量子カオス



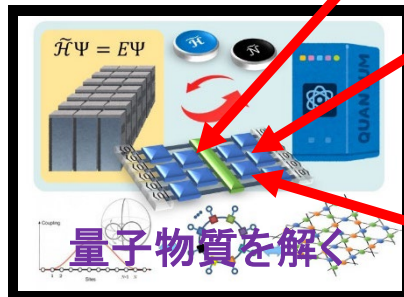
量子通信

量子誤り
訂正符号



量子
もつれ

量子計算
複雑性



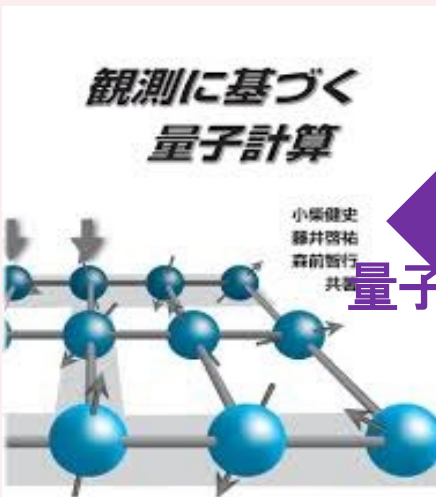
量子
計算機

例: 量子スピン液体、QCD物質

量子情報(Σ)の視点を用いて解き明かす!

極限宇宙の研究の広がり

量子情報



量子計算

ブラックホール
エネルギー条件

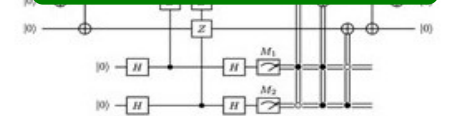
宇宙論・相対論

ブレインワールド宇宙論

どちらも量子スピン系

超弦理論・場の量子論

量子計算の活用

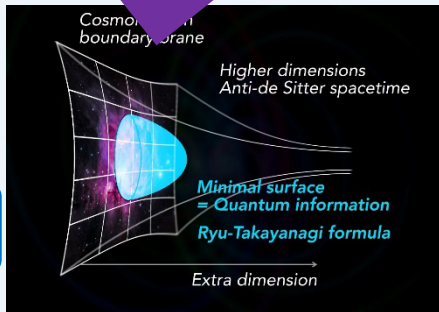


量子エンタングルメント

ゲージ重力対応

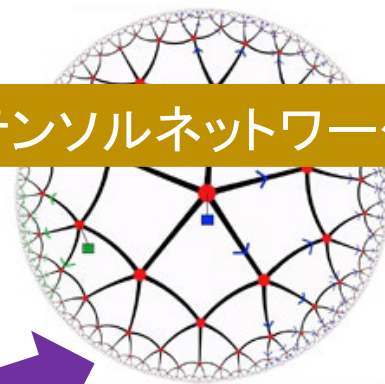


同じ理論体系



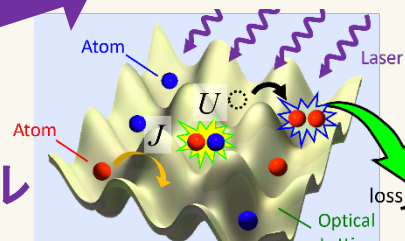
物性物理

テンソルネットワーク



時空創発

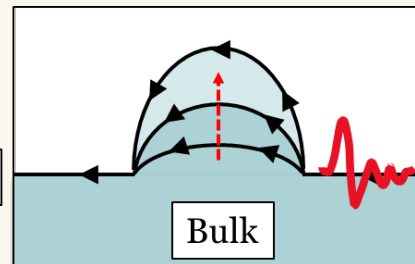
物性モデル



冷却原子実験

物性モデル

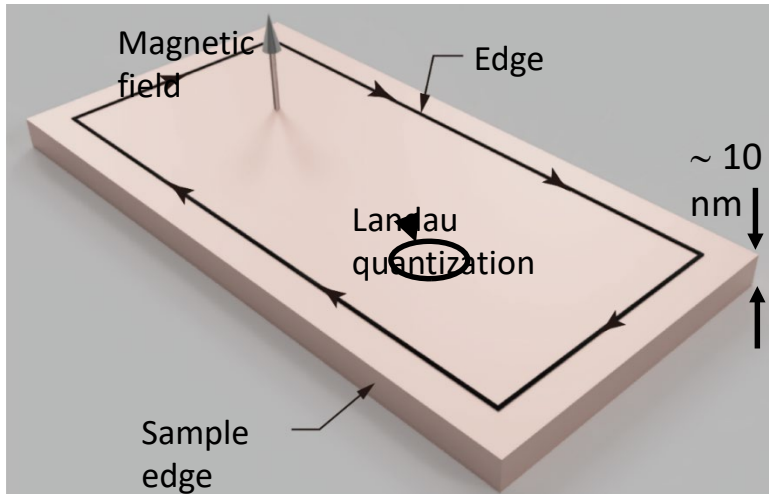
Edge



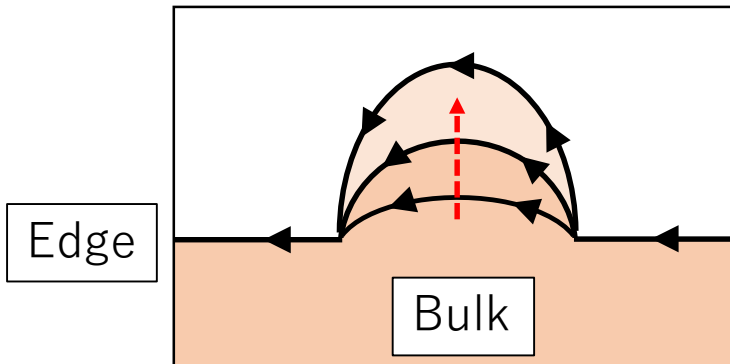
量子ホール実験

例:量子宇宙を模した量子ホール効果実験[東北大遊佐グループ]

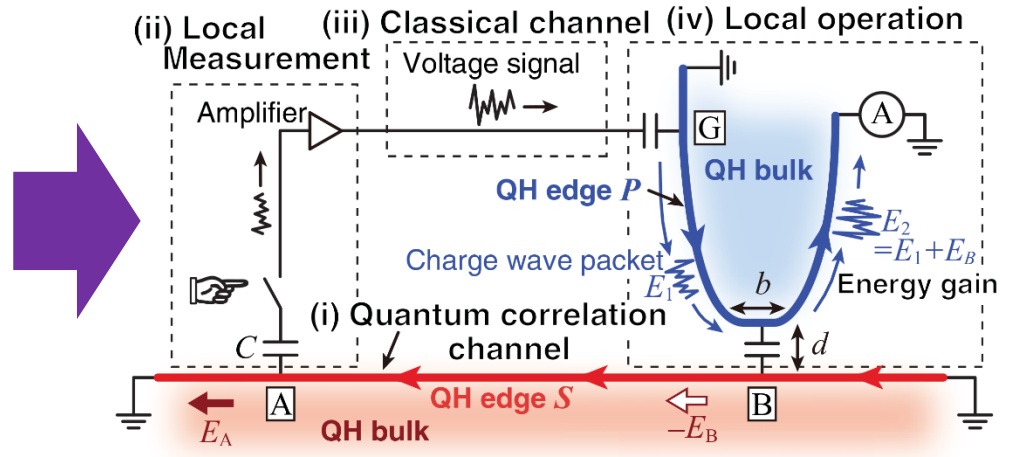
量子ホール効果



膨張宇宙のトイ模型



量子エネルギーテレポーション



Theory for Quantum Energy Teleportation in QHE
Hotta, Matsumoto, Yusa, PRA 2014.



Theory for Expanding Universe in QHE:
Hotta-Nambu-Sugiyama-Yamamoto-Yusa,
Phys. Rev. D 105, 105009

極限宇宙の概念図

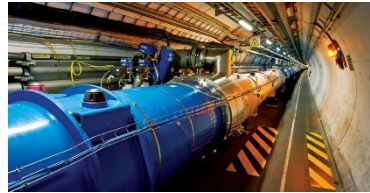


対象のスケールは大きく異なるが、量子情報の視点に立つと
全て量子ビットの集合体として物理法則が統一的に理解できる！

⑧ おわりに

従来の物理学の考え方

顕微鏡・加速器

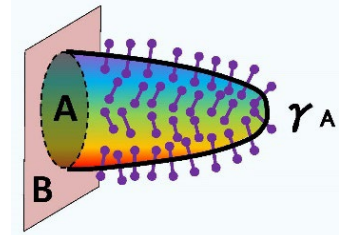


物質 = 素粒子の集まり

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？

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



創発

参考文献(物理を専攻する大学生・大学院生向け)

(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

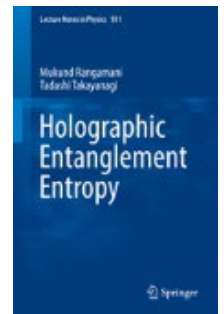


(2-2) 拙著 「量子エンタングルメントから創発する宇宙」
(基本法則から読み解く物理学最前線 23)
共立出版 2020年



(2-3) T. Nishioka,
“Entanglement entropy: holography and renormalization group”
Rev.Mod.Phys. 90 (2018) 3, 035007 [arXiv:1801.10352]

(2-4) M. Rangamani and T. Takayanagi,
“Holographic Entanglement Entropy”
Lecture Notes in Physics, Springer, 2017 [arXiv:1609.04645]



(2-5) T. Nishioka, S. Ryu and T. Takayanagi
“Holographic Entanglement Entropy: An Overview”
J.Phys.A 42 (2009) 504008 [arXiv: 0905.0932]

ご清聴ありがとうございました！

(今回のスライド・動画は、当領域HPで公開予定)

当領域では今後も講演会を企画予定です。

公開イベント情報は当領域のHPで随時
アナウンスいたします。乞うご期待。

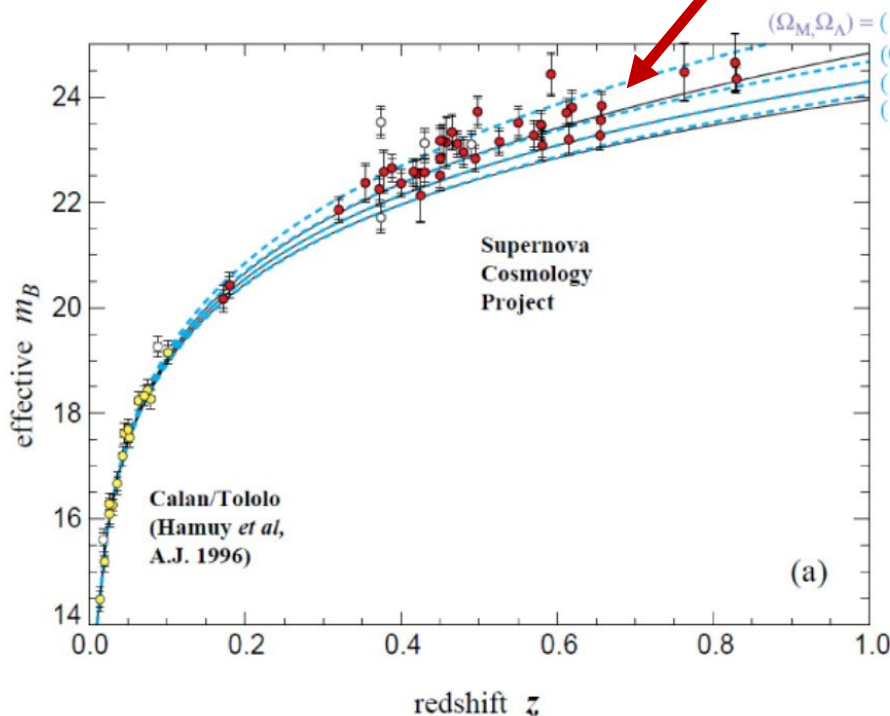
アンケートへのご回答もよろしくお願いいたします。

加速膨張宇宙の証拠

明るさが決まっているIa型の超新星を観測して、「見かけの明るさ(超新星までの距離)」と「遠ざかる速度(赤方偏移)」の測定で、宇宙の加速度(宇宙定数、ダークエネルギー)が求まる。

加速膨張(ドジッター宇宙 $\Lambda > 0$)の証拠!

距離指数(超新星までの光学距離の対数)



赤方偏移(超新星の遠ざかる速度)



加速膨張
減速膨張

加速で、距離が長くなり
過去の速度は遅くなる。



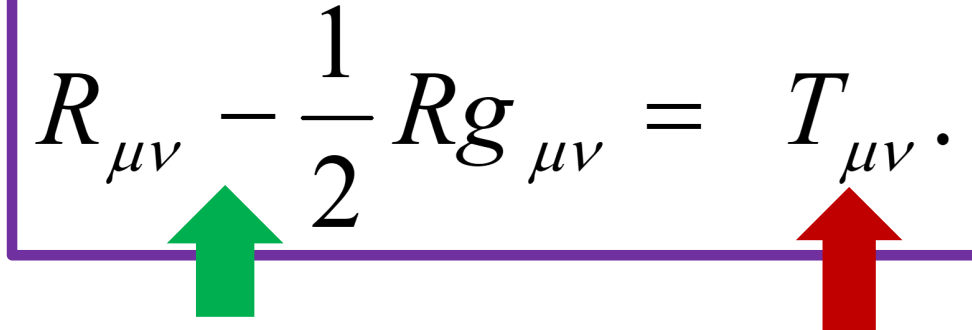
The Nobel Prize in Physics 2011
Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt,
Adam G. Riess

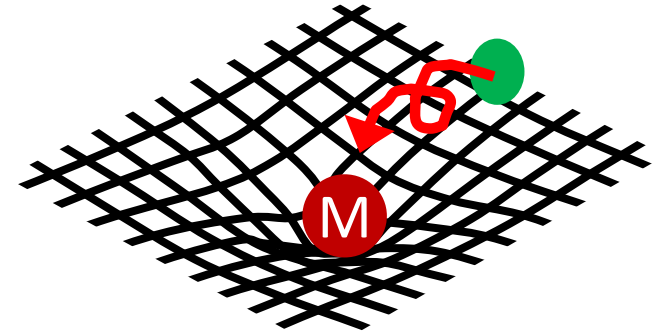
S. Perlmutter et al., "Measurement of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae", *Astrophys. J.*, 517, 565-586, (1999)

ダークエネルギー（宇宙定数）

物質のエネルギーにより
宇宙の時空が曲がり、
重力が生じる

アインシュタイン方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}.$$
A purple-bordered box containing the Einstein field equation. A green arrow points upwards to the $R_{\mu\nu}$ term, and a red arrow points upwards to the $T_{\mu\nu}$ term.



宇宙の曲がり具合 「物質」のエネルギー
(時空の曲率)

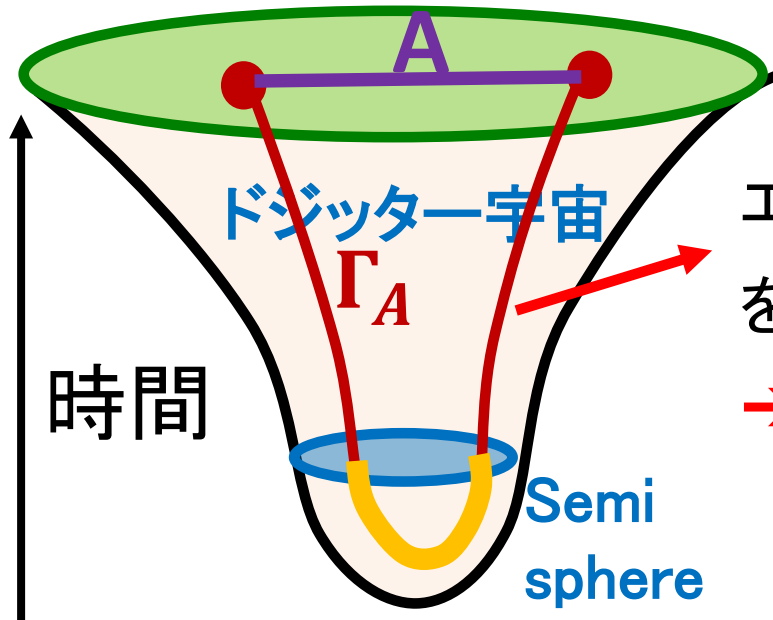


- **ダークエネルギー（宇宙定数 Λ ）** → 7割程度
- **ダークマター（正体不明の物質）** → 3割程度
- **通常物質** → 5%程度

ホログラフィーで「時間」はどのように創発するか？

[土井-Harper-Mollabashi-瀧-高柳 2022]

CFTがある境界



エンタングルメント・エントロピー S_A
を与える「A」が、時間的測地線になる！

→ S_A の値に虚数部分が現れる！
(正しくは擬エントロピーと呼ぶ)

エンタングルメント・エントロピーの実部分 → 空間座標の創発
エンタングルメント・エントロピー虚数部分 → 時間座標の創発