第64回 京都大学 11月祭

京大11月祭本部講演
2022年11月22日@京大総合体育館

量子情報から創発する宇宙
―理論物理学の究極の姿か？

高柳　匡

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

CGPQI
Center for Gravitational Physics and Quantum Information
Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University

YITP
YUKAWA INSTITUTE FOR THEORETICAL PHYSICS

京都大学基礎物理研究所

当研究所は、湯川秀樹博士の
ノーベル物理学賞を記念して、
1953年に日本初の共同利用研究所
として創設されました。

理論物理学全分野(素粒子、原子核、
宇宙、物性、量子情報)の第一線
の研究者が揃っています。

湯川記念室はどなたでも
見学できます。

基礎物理学研究所はココ

今は
ここ

基礎物理学研究所素粒子論グループ

基研素粒子論グループ
（元気な大学院生を毎年募集）

私のグループの勉強会
（外国人研究者も多いです）

当研究所開催の国際会議
It from Qubit School(2019年6月)

遠足の様子

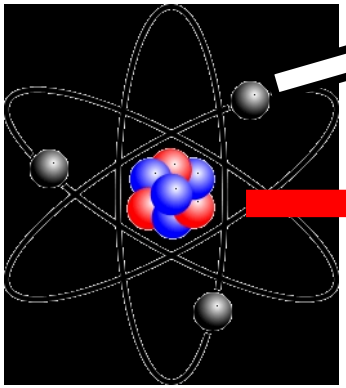
①はじめに

素粒子論とは？

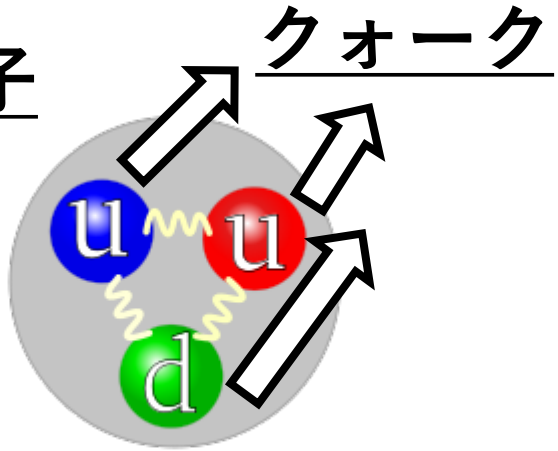
物質を細かく分け、最小単位を探求する学問が、
素粒子物理。その理論が素粒子論。

⇒究極にミクロな物理法則の探求。

物質



原子＝電子＋原子核



力も素粒子！

自然界に働く力

電気・磁気の力

静電気や磁石の力。

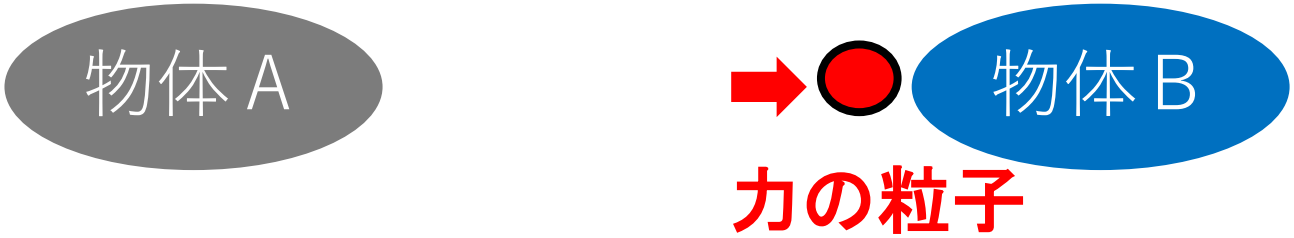
万有引力（重力）

物が落下する力。
太陽と地球が引き合う力。

原子核に働く力（強い力・弱い力）

これがないと原子も存在できない。

力もミクロに見ると、実は粒子の受け渡し！



例えば、　電気・磁気の力：光子

万有引力（重力）：　重力子

原子核の力：中間子

湯川秀樹博士

自然界に働く４つの力とその理論

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！

融合される？

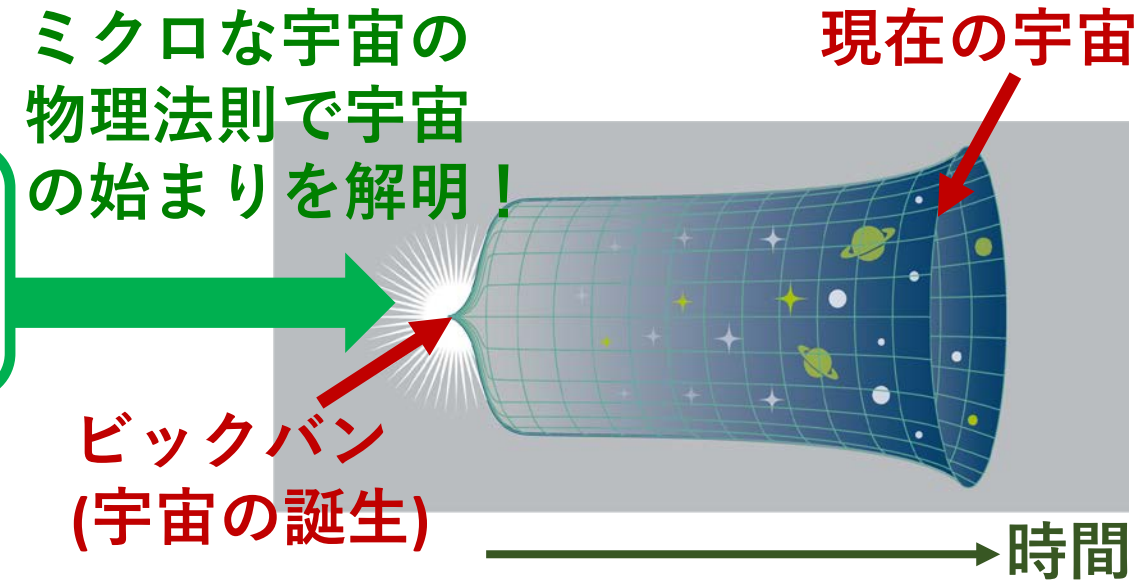
力を全て統一した理論？
＝量子重力理論？

我々がやりたいこと： 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

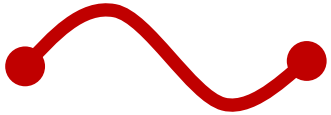


宇宙創成を解明するには、量子重力理論が必要！

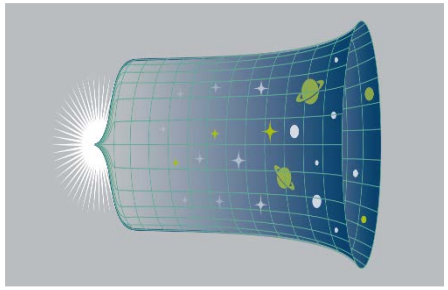
量子重力理論の最有力候補が「**超弦理論**」。
超弦理論では、万物を構成する最小単位は「ひも（弦）」。

［南部 後藤 1970,..米谷 Scherk-Schwarz 1974,..］

拡大 開いた弦

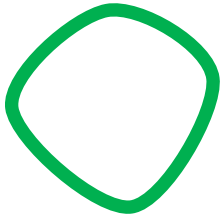


物質（電磁気力・核力）
ゲージ理論



閉じた弦

拡大



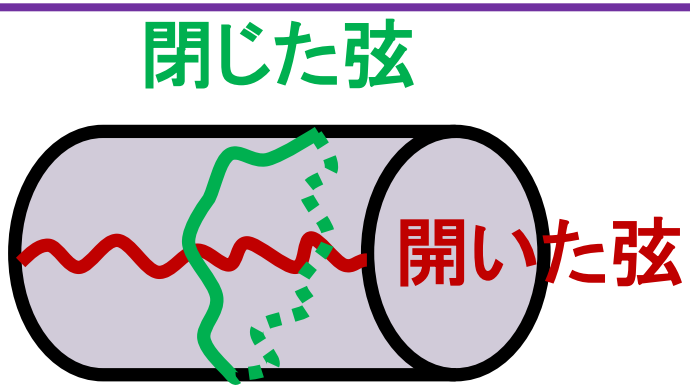
宇宙（重力）

しかし、超弦理論は、高度な数学に基づいた理論で、具体的にいろいろ計算するのが難しい。

➡ 宇宙創成を解明するには、さらにアイデアが必要！

そこで「ゲージ重力対応（ホログラフィー原理）」が登場！

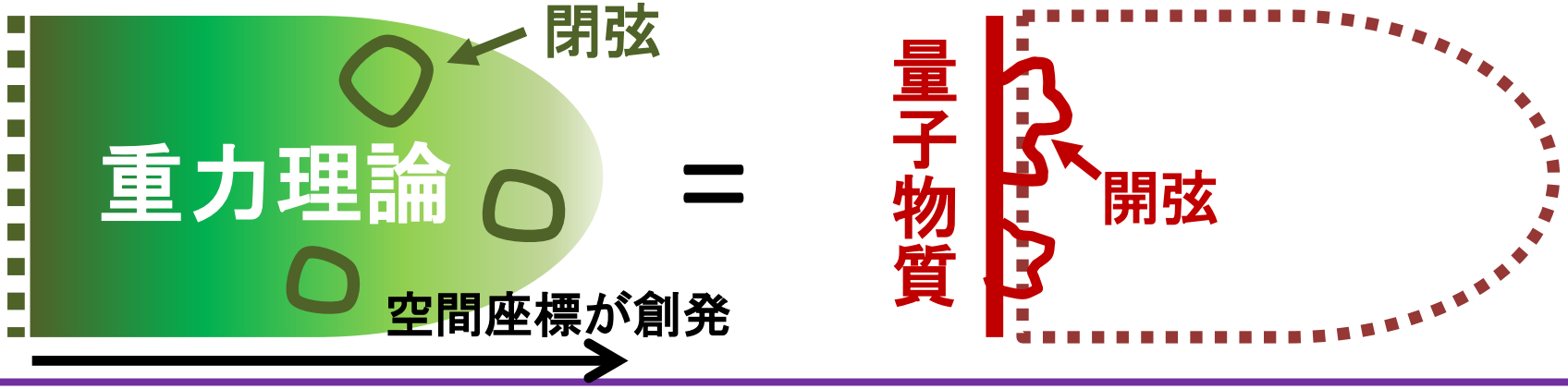
「開いた弦（物質）」も
「閉じた弦（宇宙）」も
弦の素材は同一！



ゲージ重力対応（ホログラフィー原理）

Maldacena 1997

ある時空の重力理論 ＝ 境界の量子物質（ゲージ理論）



顕微鏡は自然科学の研究で非常に基礎的で重要な実験装置

→ホログラフィー原理は、いわば、<u>理論物理学の顕微鏡</u>！

物性物理
生物・化学

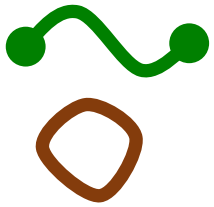
→ 光学顕微鏡
電子顕微鏡
など

→ 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
（超弦理論）

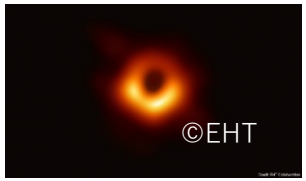


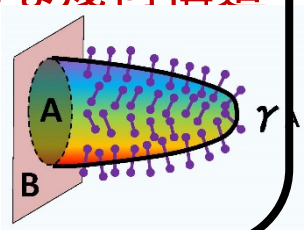
→ ホログラフィー原理
（ゲージ重力対応）

思考実験

**ホログラフィー原理は
ブラックホールのような
重力理論の時空を拡大する。**

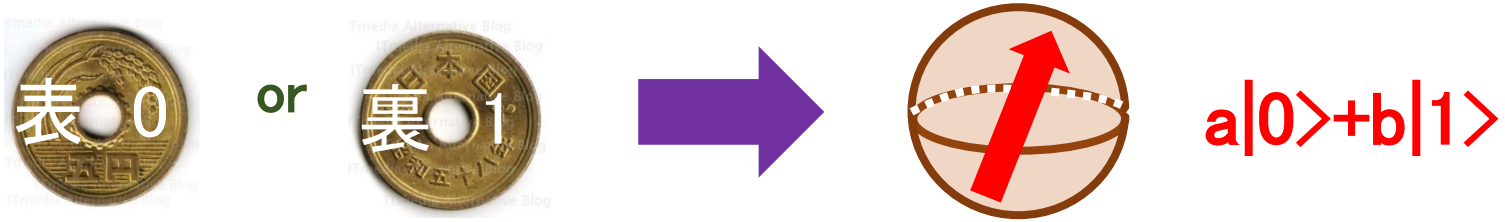
→ **量子ビット**
量子エンタングルメント
～時空のミクロな幾何構造





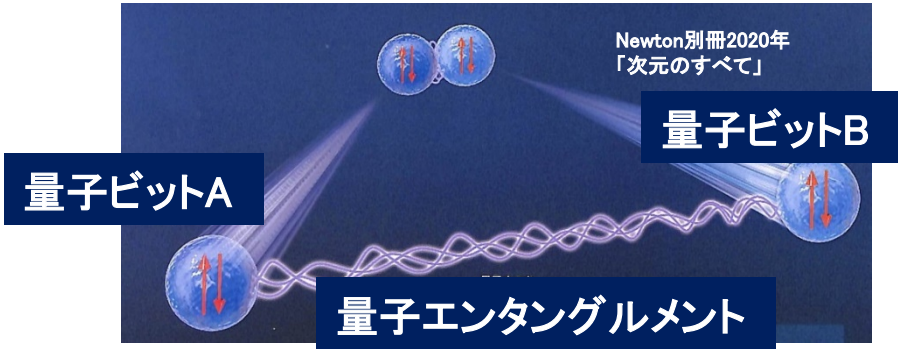
ミクロな宇宙の拡大すると見えてくるもの➡量子情報！

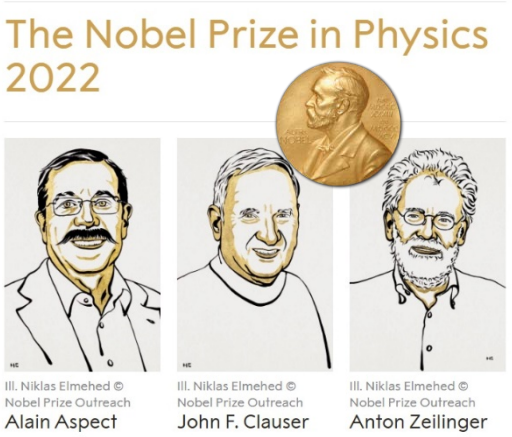
量子ビット＝ミクロな世界の1ビットの情報（スピン）



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）





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 おわりに

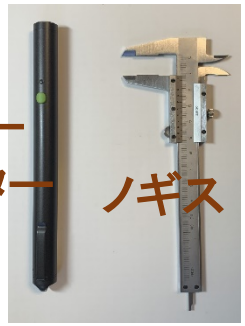
[参考文献]
拙著 「量子エンタングルメントから創発する宇宙」
(基本法則から読み解く物理学最前線 23)
共立出版 2020年

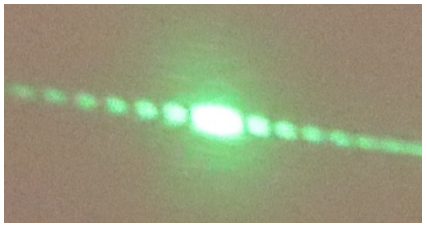
② 量子エンタングルメント

<u>粒子と波の二重性</u>　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(20μm)
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

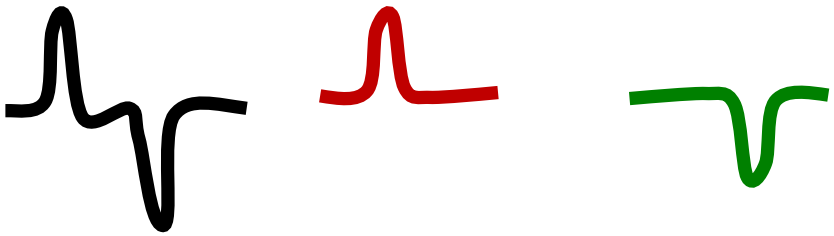
粒子 ＝ 波（波動関数）

➔ 波は「<u>重ね合わせ</u>」できる！

ケット
とよばれる表記
（状態を表す）

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

<u>波動関数</u> $\Psi(x) = a\,f(x) + b\,g(x)$ 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） $|0\rangle = |\uparrow\rangle$

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

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）

8ビットが1バイト

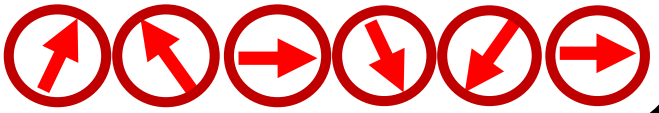
0 1 0 1 1 0

➡

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）

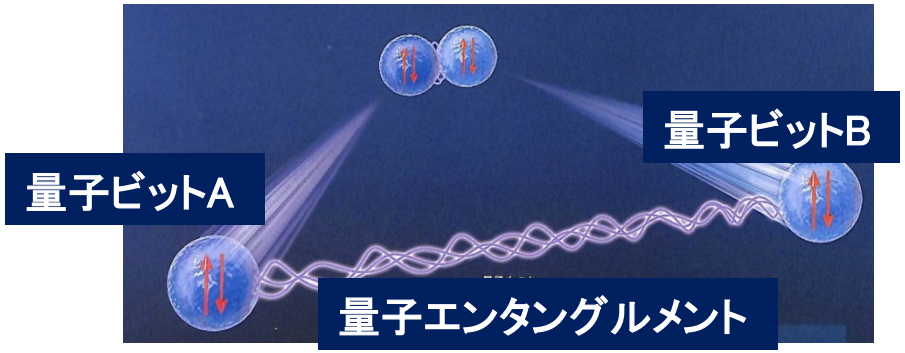
AとBの2つの量子ビットがある系を考える。

次の**ベル状態**を考える:

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

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！

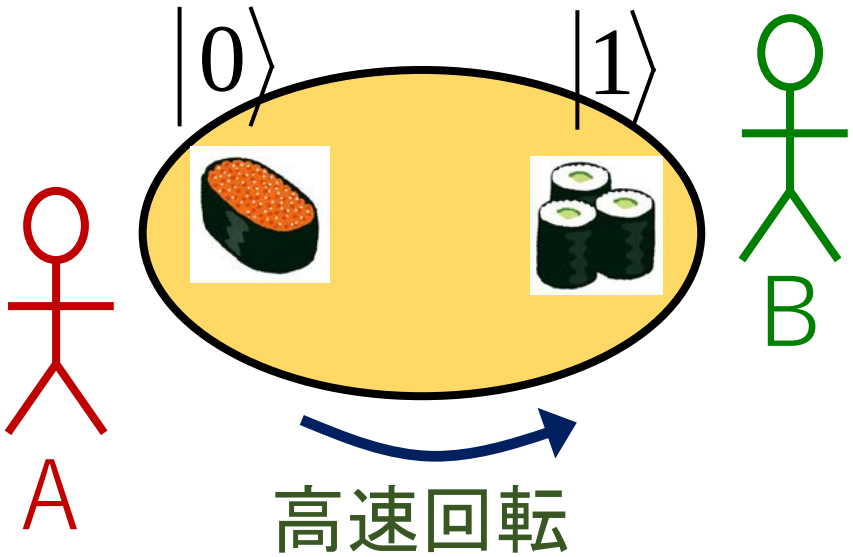
このAB間の相関が、**量子エンタングルメント（量子もつれ）**である。



全体の状態は決まっているが、一部に制限すると不確定！

「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



どちらかが「イクラ$|0\rangle$」を食べると、もう一方は必ず「かっぱ巻き$|1\rangle$」を食べる

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、$\left|S_{A,B}^{(1,2)}\right| \le 1$ とする。

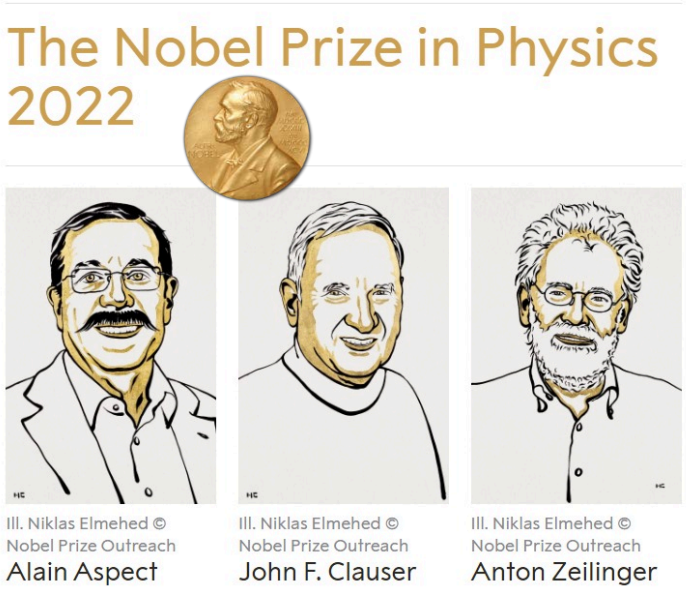
古典論では、２粒子AとBのスピンについて次の不等式が成り立つ。

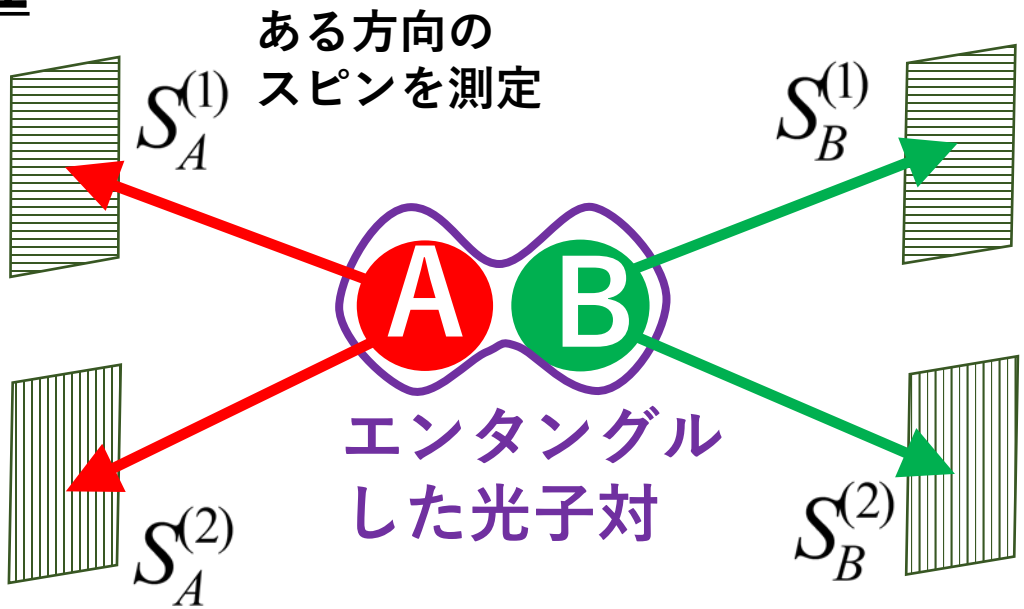
$$\boxed{\left|\left\langle S_A^{(1)} \cdot (S_B^{(1)} - S_B^{(2)}) + S_A^{(2)} \cdot (S_B^{(1)} + S_B^{(2)}) \right\rangle\right| \le 2}$$

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





ベルの不等式の破れの計算

$\vec{a}=(a_1,a_2,a_3)$ は、スピンの方向を表し、$|\vec{a}|=1$ である。

$$S_A=\sum_{i=1}^{3}a_i\sigma_i,\qquad S_B=\sum_{i=1}^{3}b_i\sigma_i,$$ とおく。

σ_i はパウリ行列: $\sigma_1=\sigma_x=\begin{bmatrix}0&1\\1&0\end{bmatrix},\quad \sigma_2=\sigma_y=\begin{bmatrix}0&-i\\i&0\end{bmatrix},\quad \sigma_3=\sigma_z=\begin{bmatrix}1&0\\0&-1\end{bmatrix}$

ベル状態 $|\Psi_{\mathrm{Bell}}\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|0\rangle_A\otimes|0\rangle_B+|1\rangle_A\otimes|1\rangle_B\right)$ に対して

$$\langle\Psi_{\mathrm{Bell}}|S_AS_B|\Psi_{\mathrm{Bell}}\rangle=a_1b_1-a_2b_2+a_3b_3$$ が成り立つ。

特に、$S_A^{(1)}=\sigma_1,\ S_A^{(2)}=\sigma_3,\ S_B^{(1)}=\frac{1}{\sqrt{2}}(\sigma_1+\sigma_3),\ S_B^{(2)}=\frac{1}{\sqrt{2}}(\sigma_3-\sigma_1).$

と選ぶと、$\left\langle S_A^{(1)}\cdot(S_B^{(1)}-S_B^{(2)})+S_A^{(2)}\cdot(S_B^{(1)}+S_B^{(2)})\right\rangle=2\sqrt{2}$

となり、ベルの不等式が破れる。

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

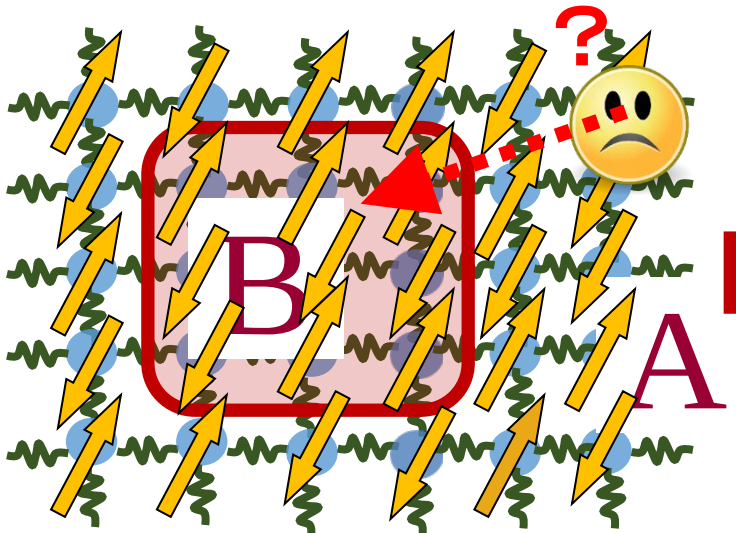
➡ エンタングルメント・エントロピー(EE)

AB間のエンタングルメント・エントロピー SA

＝ AB間に存在するベル状態の(平均の)数

(＝ Aのみしか観測できない場合に失う情報量)

量子スピン系



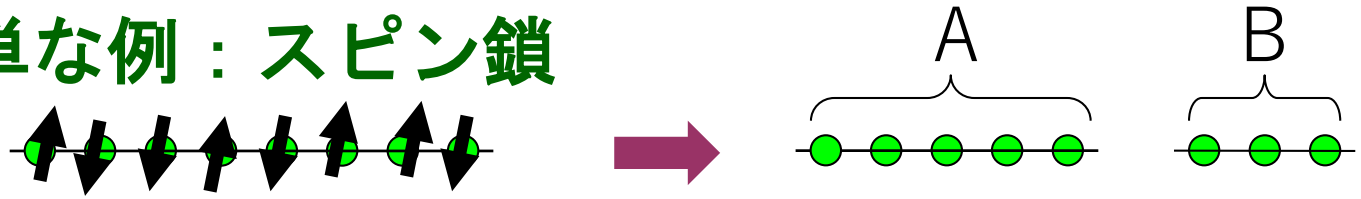
➡ ブラックホールと類似！(どっちも面積則)

エンタングルメント・エントロピーその２

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:

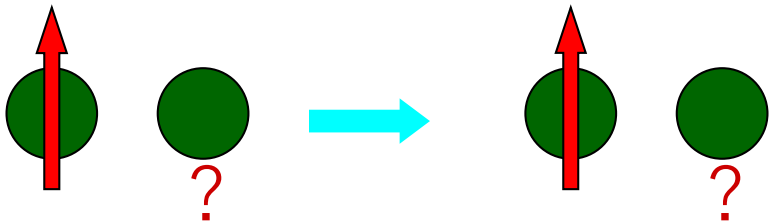
$$S(\rho_A) = -\mathrm{Tr}[\rho_A \log \rho_A]$$

≈ ＡＢ間のベル対の数

簡単な例：２量子ビット(＝２つスピンがある系)

(i) $$|\Psi\rangle = \frac{1}{2}\left[|\uparrow\rangle_A + |\downarrow\rangle_A\right]\otimes\left[|\uparrow\rangle_B + |\downarrow\rangle_B\right]$$

$$\Rightarrow \rho_A = \mathrm{Tr}_B\left[|\Psi\rangle\langle\Psi|\right] = \frac{1}{2}\left[|\uparrow\rangle_A + |\downarrow\rangle_A\right]\cdot\left[\langle\uparrow|_A + \langle\downarrow|_A\right] \approx \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

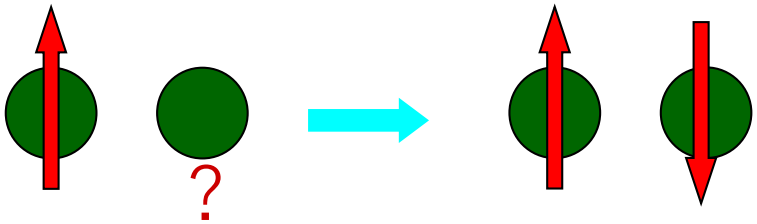


$S_A = 0$

エンタングルメント無し

(ii) $$|\Psi\rangle = \left[|\uparrow\rangle_A \otimes |\downarrow\rangle_B - |\downarrow\rangle_A \otimes |\uparrow\rangle_B\right] / \sqrt{2}$$

$$\Rightarrow \rho_A = \mathrm{Tr}_B\left[|\Psi\rangle\langle\Psi|\right] = \frac{1}{2}\left[|\uparrow\rangle_A\langle\uparrow|_A + |\downarrow\rangle_A\langle\downarrow|_A\right] \approx \begin{pmatrix} 1/2 & 0 \\ 0 & 1/2 \end{pmatrix}.$$



$S_A = \log 2$

最大エンタングル状態

③ ブラックホールとエントロピー

アインシュタイン方程式

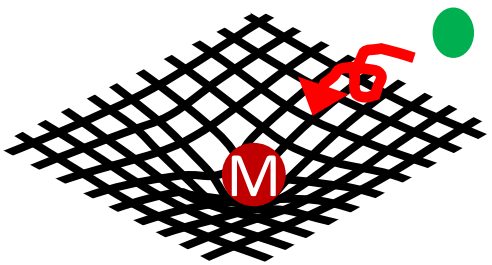
$$R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab} = 8\pi G_N T_{ab}$$

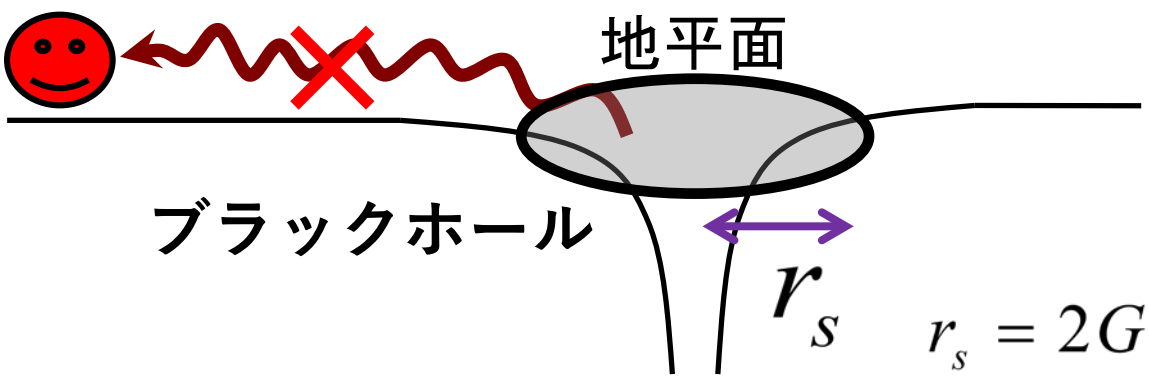
一般相対論に従い
時空が曲がる！

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

$$r_s = 2G_N M$$

G_N：重力定数（ニュートン定数）

M：ブラックホールの質量

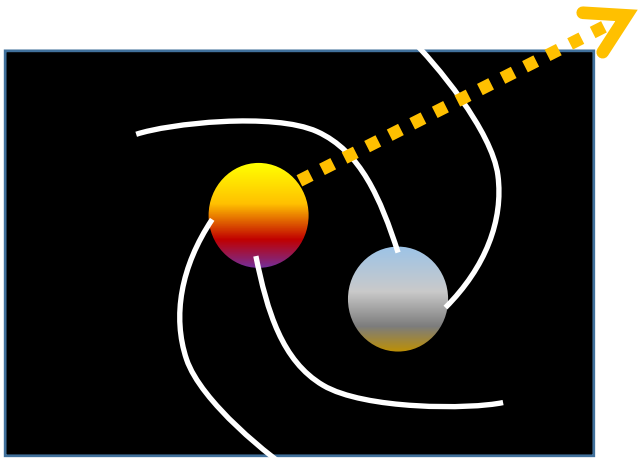
M=太陽質量
→r_s = 3km

M=地球質量
→r_s = 9mm

ブラックホール・エントロピーの直観的意味

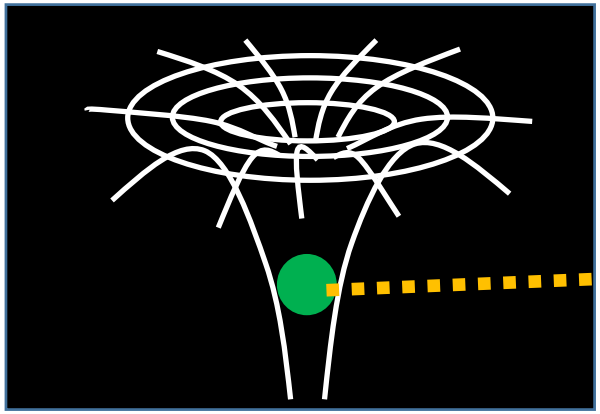
ブラックホールが星などの重力崩壊で形成されると、外部の観測者は、ブラックホール内部の情報にアクセスできなくなる。

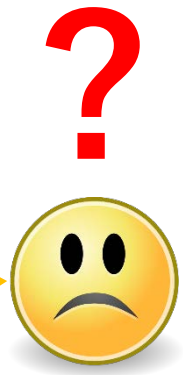
星



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

物理では、そのような「隠れて見えない情報」の量の対数を**エントロピー**(S)と呼ぶ：

$$\boxed{S = \log W\,.}$$

W=識別できないミクロな状態の数

例：コインが3枚ある場合、それぞれ裏か表の状態があるので、W=2×2×2=8 となり、S = log 8 = 3 である。

ブラックホールのエントロピー(Bekenstein-Hawking公式)

[1972-1976]

$$S_{BH} = \frac{k_B \cdot c^3}{4G_N \cdot \hbar} \cdot A_{BH}$$

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　⇒熱力学

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！

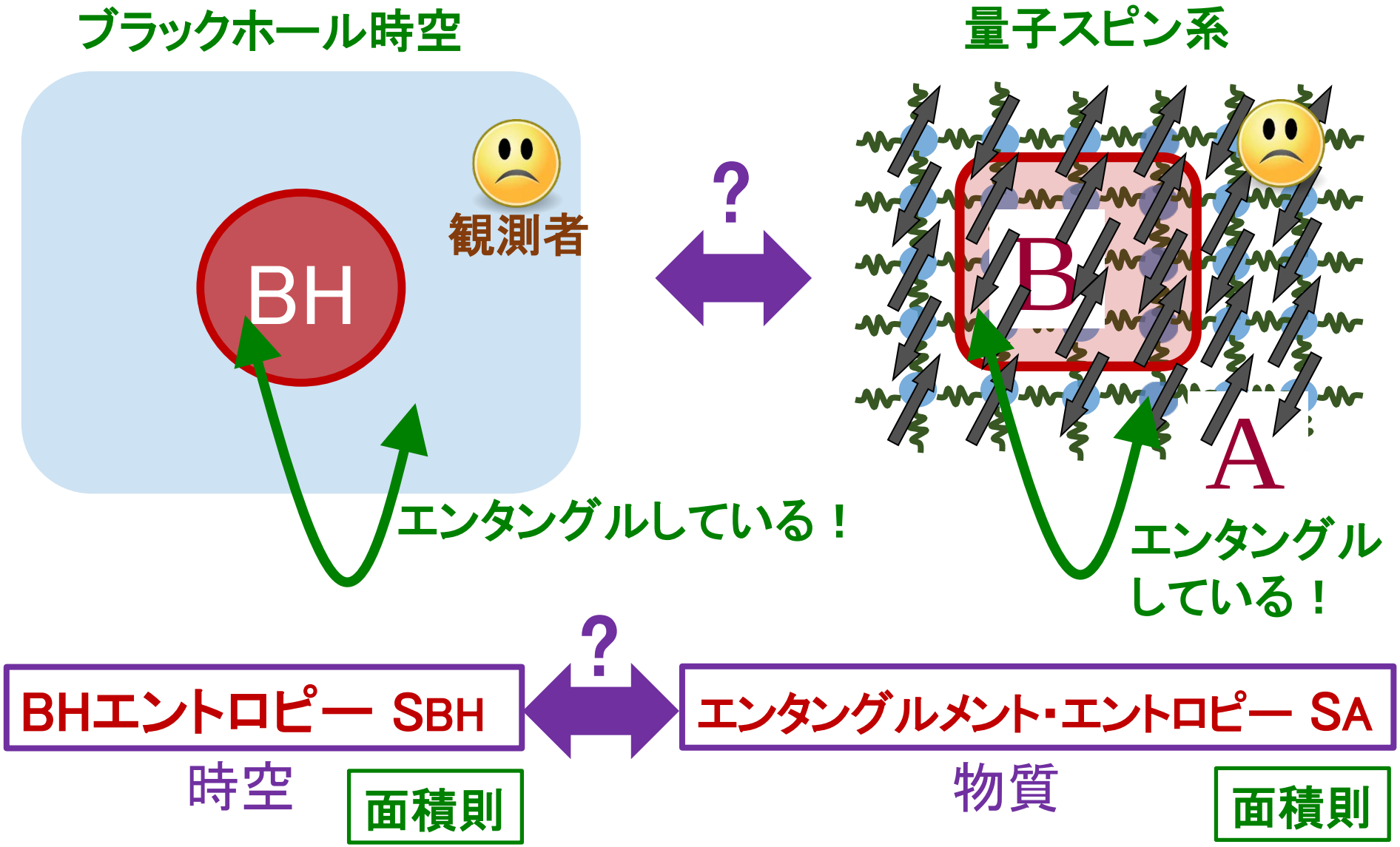
ブラックホールの熱力学

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	⟷	表面の重力の強さ
エネルギー	E	⟷	ブラックホールの質量
エントロピー	S	⟷	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:$Q=T\Delta S=\Delta E$）

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



④ ホログラフィー原理と量子エンタングルメント

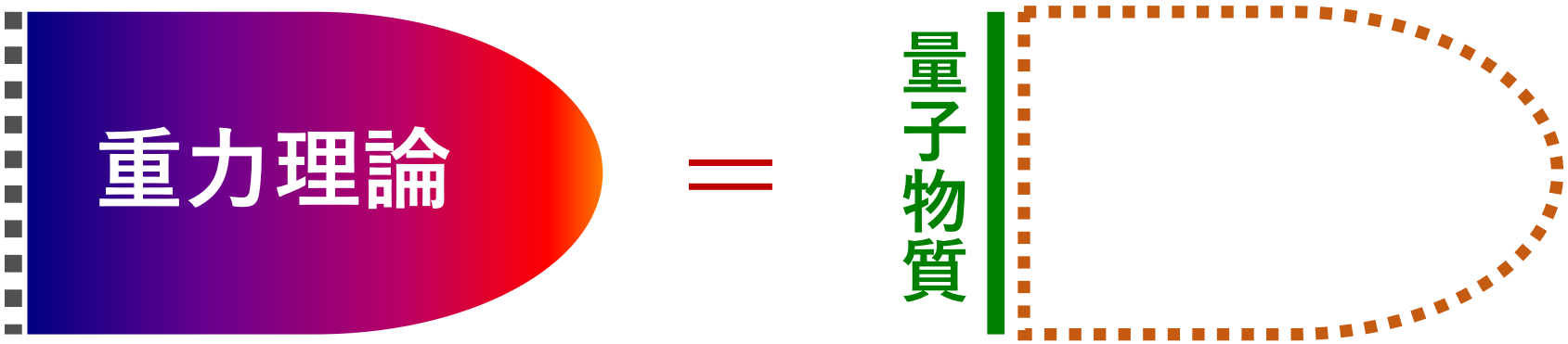
ホログラフィー原理とは？

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：

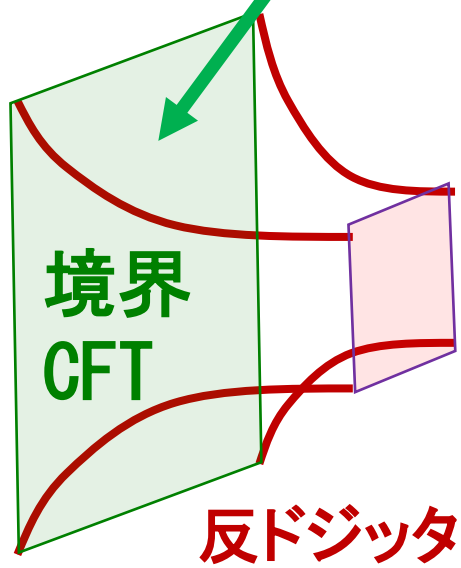
ゲージ重力対応(AdS/CFT対応) – [Maldacena 1997]

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)**

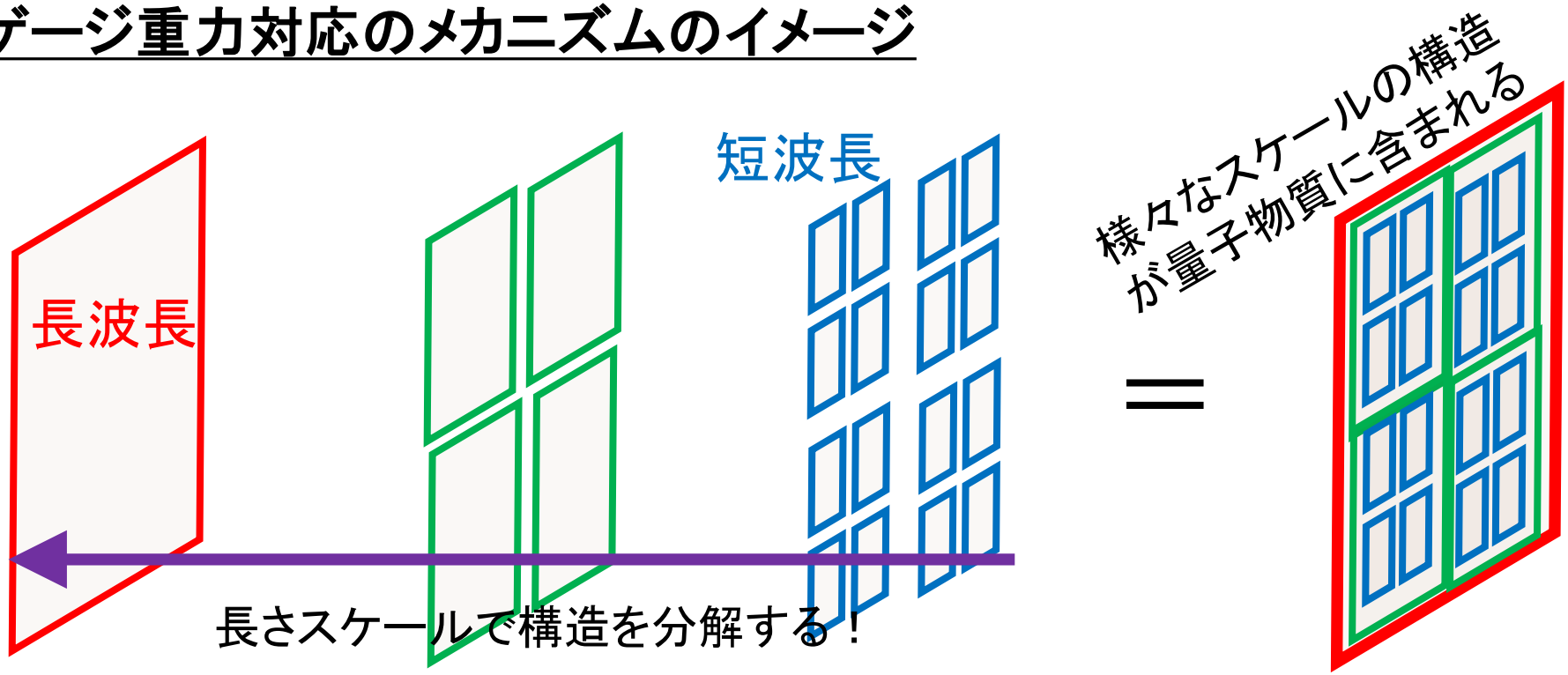
反ドジッター(AdS)宇宙
➔負の曲率を持つ宇宙

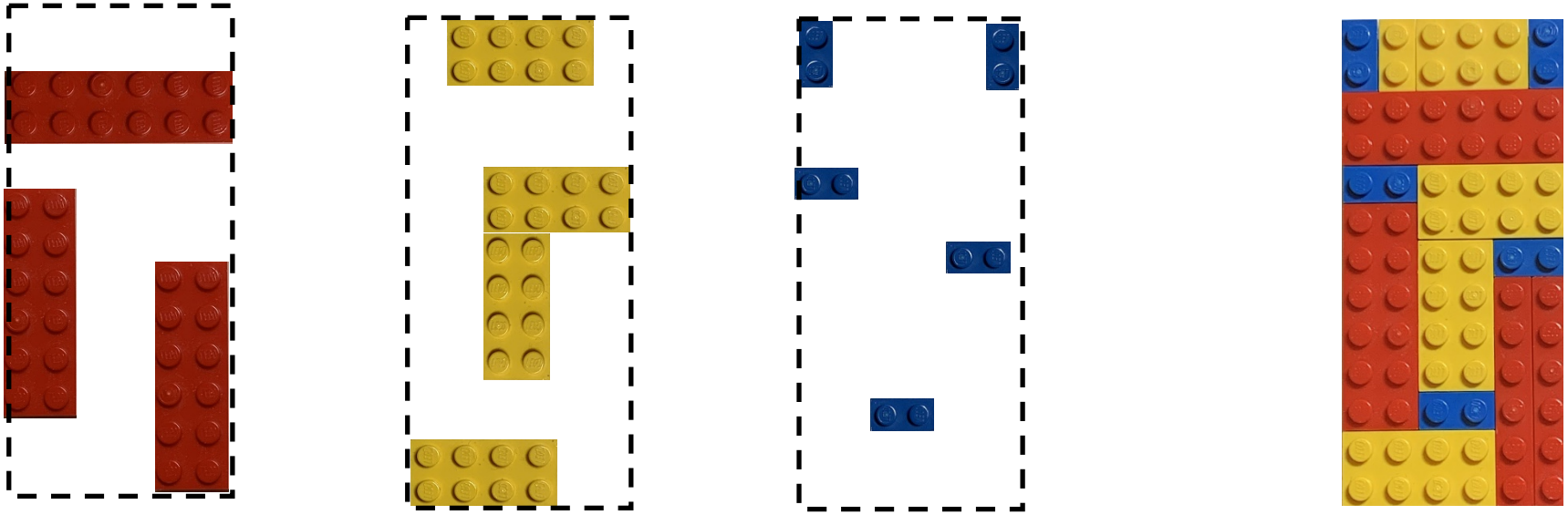
共形場理論(CFT)
➔量子臨界点の物質
スケール不変(自己相似)

電磁気学のように
質量ゼロの粒子の理論



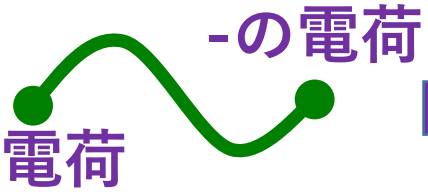
ゲージ重力対応のメカニズムのイメージ





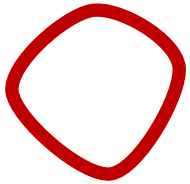
<u>超弦理論の視点</u>　物質の最小構成要素は弦である

開いた弦



物質の力（電磁力、強い力、弱い力）

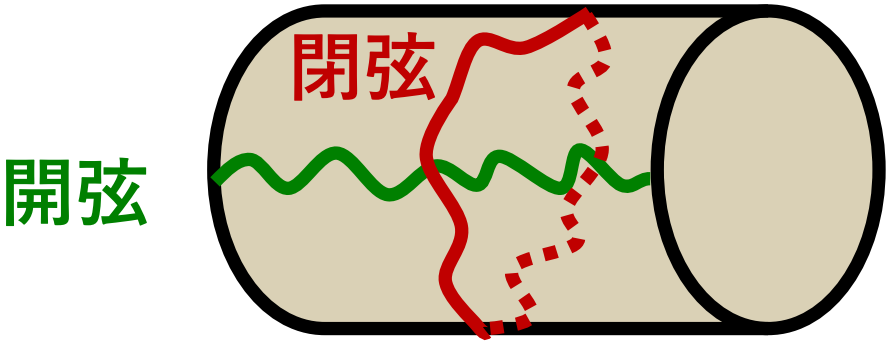
閉じた弦



万有引力（重力）

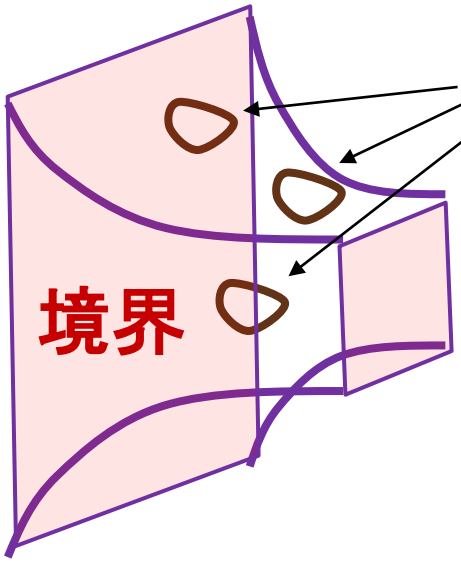
ひもの双対性 「閉じた弦＝開いた弦」

「電磁気力」と「重力」は実は同じものを別の見方で見ただけ！

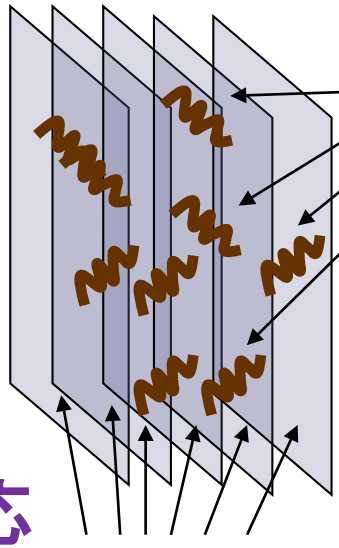


弦理論からのゲージ重力対応の理解

反ドジッター宇宙(AdS)
の重力理論



“物質”のミクロな理論



等価
ゲージ重力対応

多数のDブレーン
(ゲージ理論、CFT)

等価

ブラックホールの熱力学
[マクロな幾何学]

物質の熱力学
[ミクロな物理]

注意点1 ⚠

(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

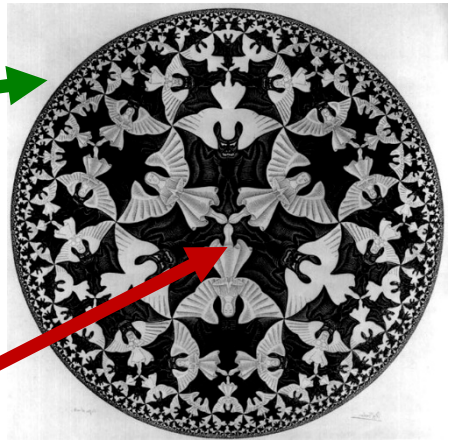
現実の宇宙に近いのは
ドジッター宇宙（Λ>0）だが、
そのホログラフィー原理は
発展途上（後で述べる）。

$$\underbrace{R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab}}_{\text{曲率}} + \Lambda g_{ab} = 8\pi G_N T_{ab}.$$

Λ<0
宇宙定数

質量

反ドジッター空間の幾何



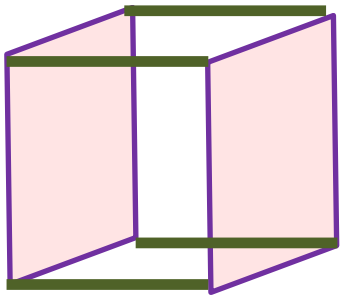
境界
（物質）

バルク
（重力）

宇宙の3つのタイプ（対称性が最大の場合）

[1] 宇宙定数＝0 (曲率=0)

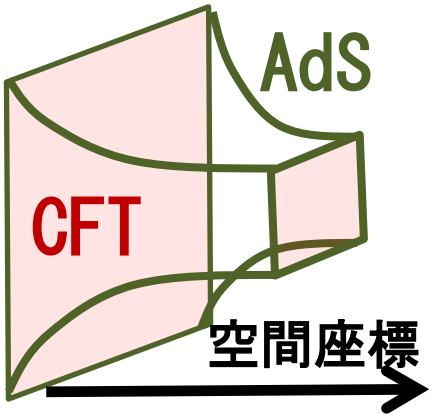
➔ 平坦な宇宙 (ミンコフスキー時空）



[2] 宇宙定数＜0 （曲率<0）

➔ 反ドジッター宇宙(Anti de-Sitter Space)

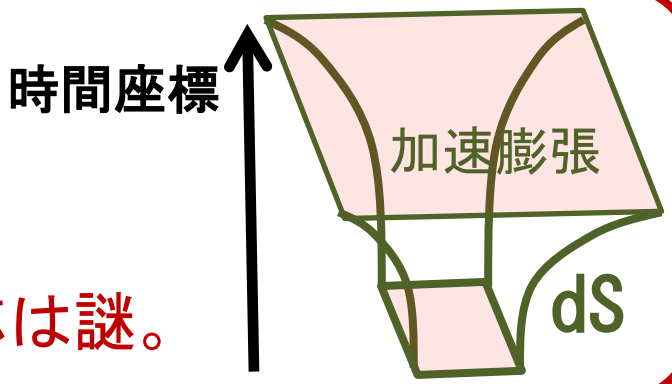
ゲージ重力対応が適用可！



[3] 宇宙定数＞0 （曲率>0)

➔ ドジッター宇宙(de-Sitter Space)

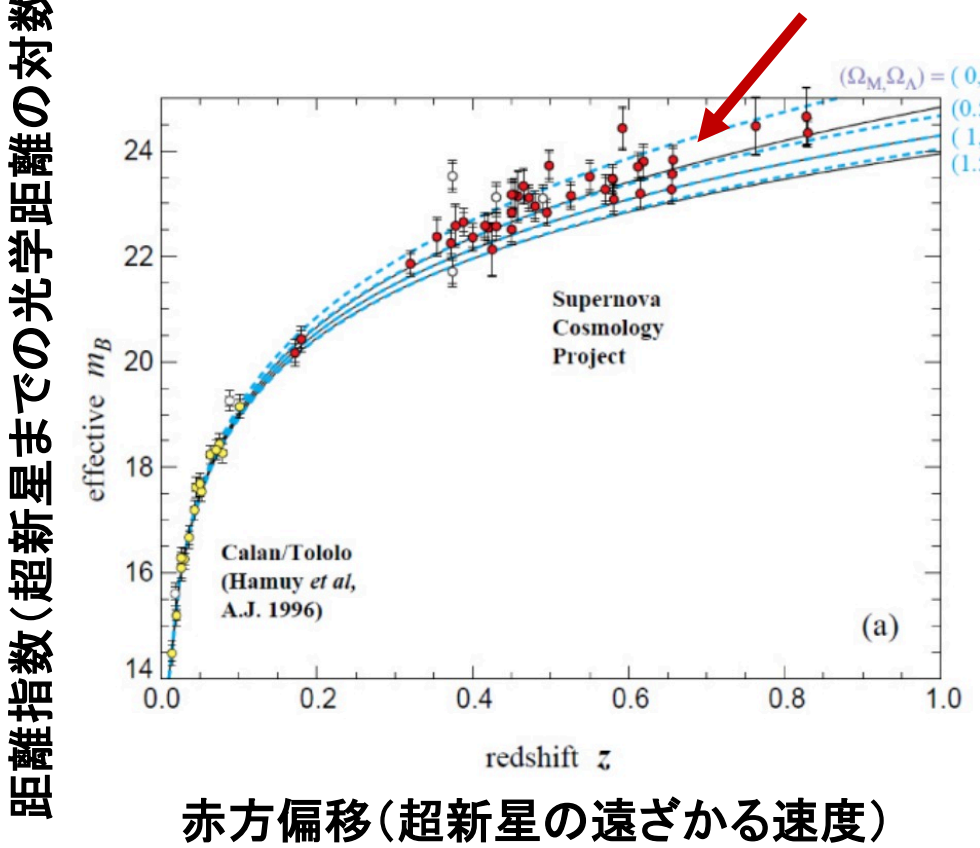
現実の宇宙はこれ。でもゲージ重力対応は謎。



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）」
を測定することで、宇宙の加速度（宇宙定数、ダークエネルギー）を
求めることができる。

加速膨張（ドジッター宇宙　Λ＞0）の証拠！



加速膨張　加速で、距離が長くなり過去の速度は遅くなる。

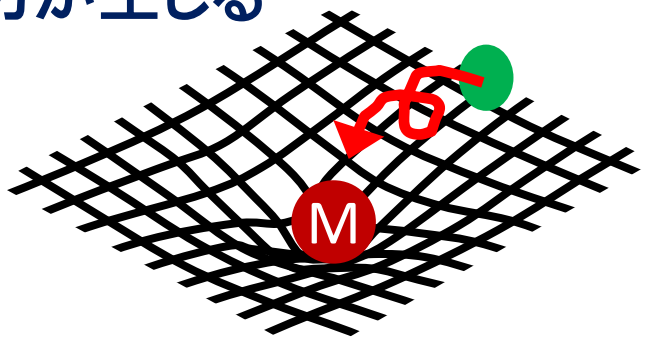
減速膨張

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

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

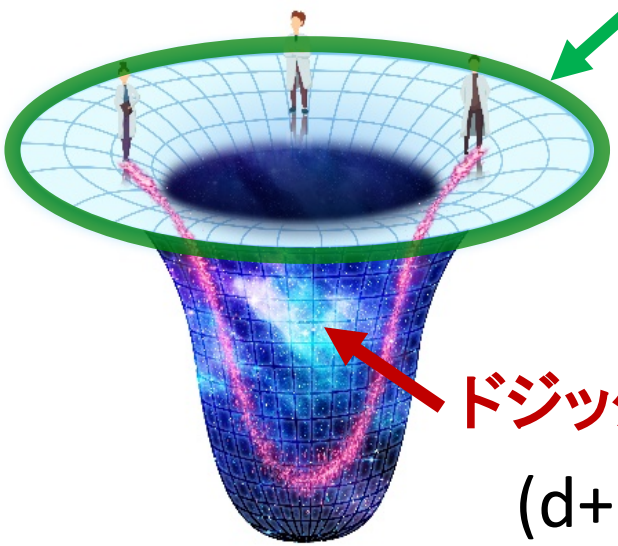
宇宙の曲がり具合
（時空の曲率）

「物質」のエネルギー

- 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
- 通常の物質→5%程度

ドジッター宇宙のホログラフィー：dS/CFT [Stromimger 2001]

境界(d次元球面)にCFTがある



dS/CFTで等価となる！

ドジッター宇宙の重力理論

(d+1)次元dS宇宙

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も知られていなかった。

➡ 我々は、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 2022 (Phys.Rev.Lett. 129 (2022) 4, 041601)]

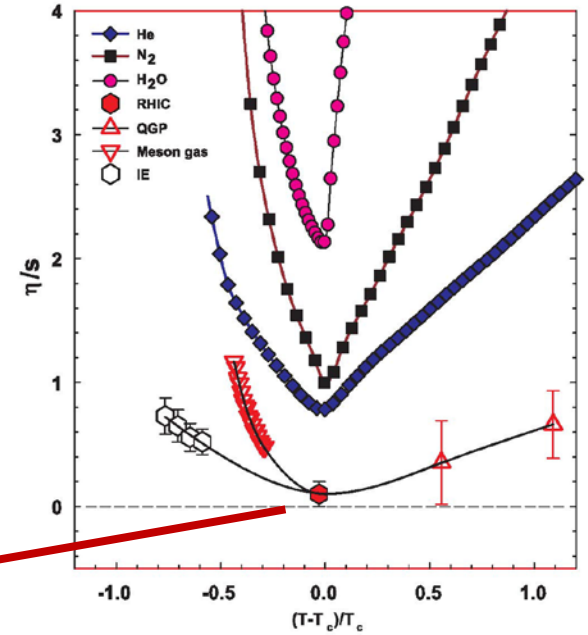
注意点2

“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]

さて、いよいよ次に、
ホログラフィー原理と量子情報の関係について考えてみよう！

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]

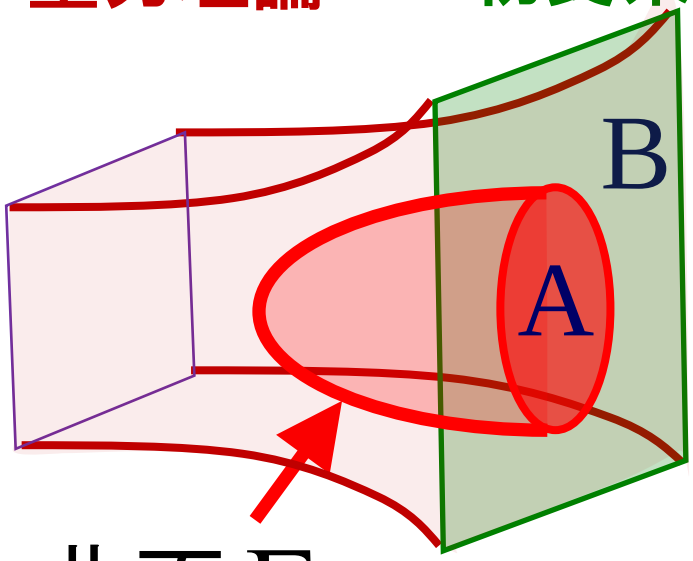
Γ_A をAを取り囲む曲面の中で面積が最小となるものとする。

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
(≈Aに含まれる量子情報量)

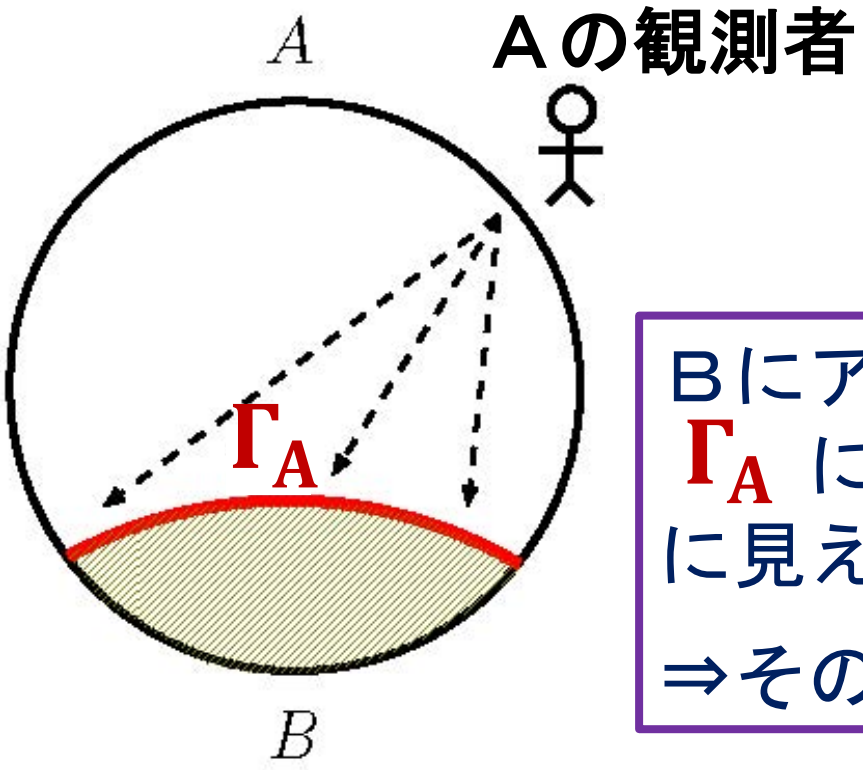


曲面 Γ_A

➡ 「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」≈「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？

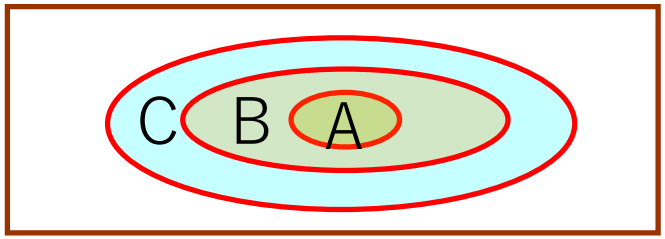


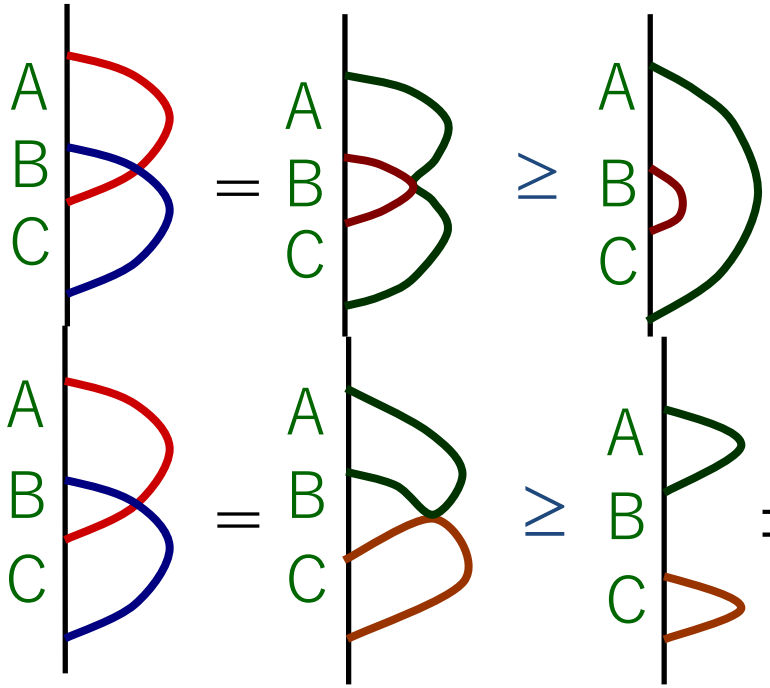
Ｂにアクセスできない観測者は Γ_A にブラックホールがあるように見え、斜線の領域が隠される。

⇒そのBHのエントロピーがEE！

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！





$$\Rightarrow S_{A\cup B} + S_{B\cup C} \geq S_{A\cup B\cup C} + S_B$$

[Headrick-高柳 2007]

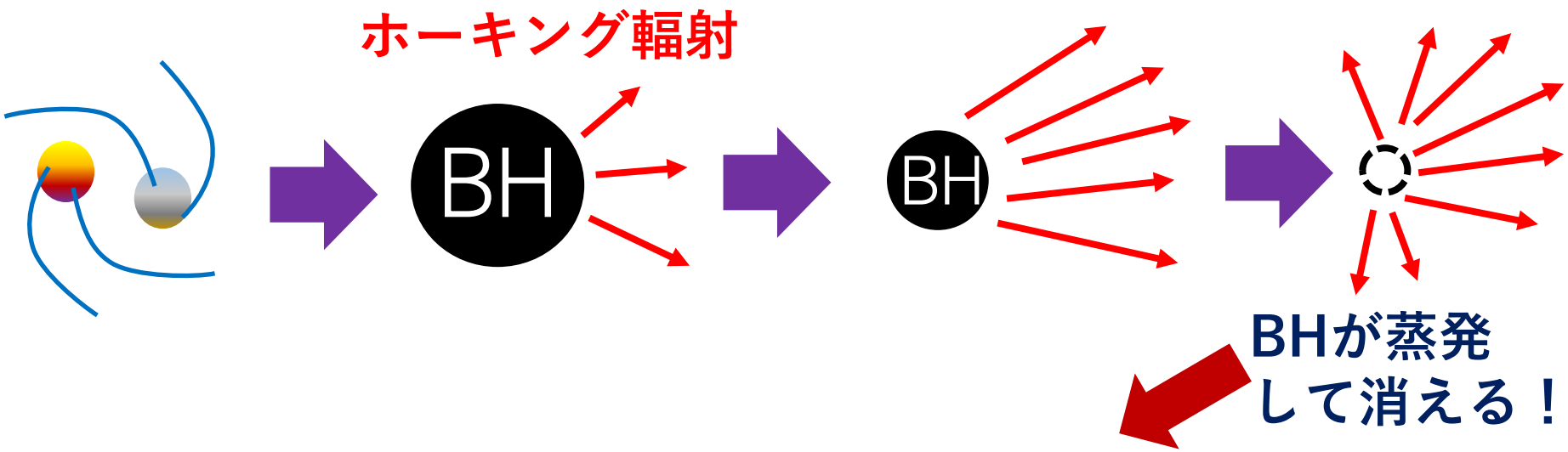
$$\Rightarrow S_{A\cup B} + S_{B\cup C} \geq S_A + S_C$$

「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

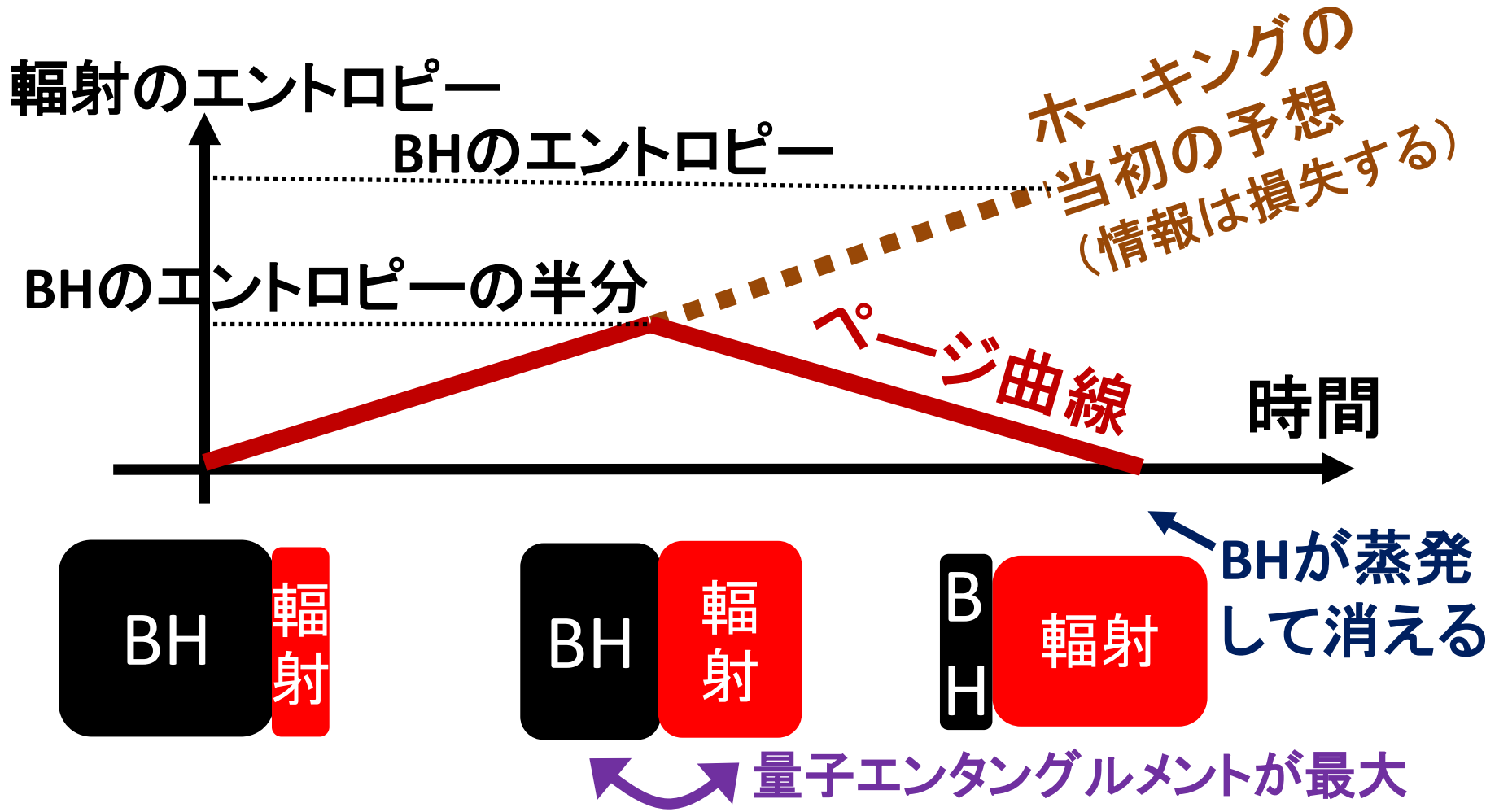
ホーキングが発見したように、実はブラックホールは温度を持ち、黒体輻射(ホーキング輻射)を行う。この輻射で次第にエネルギーを失い、最終的には消えてしまう(蒸発する)と考えられる。



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。



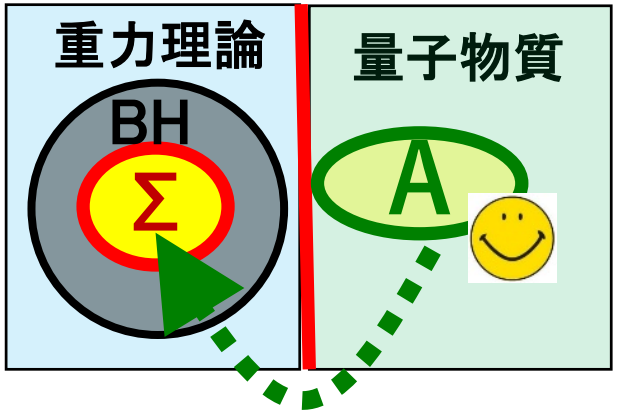
ブラックホール情報問題の解明の糸口

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]

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

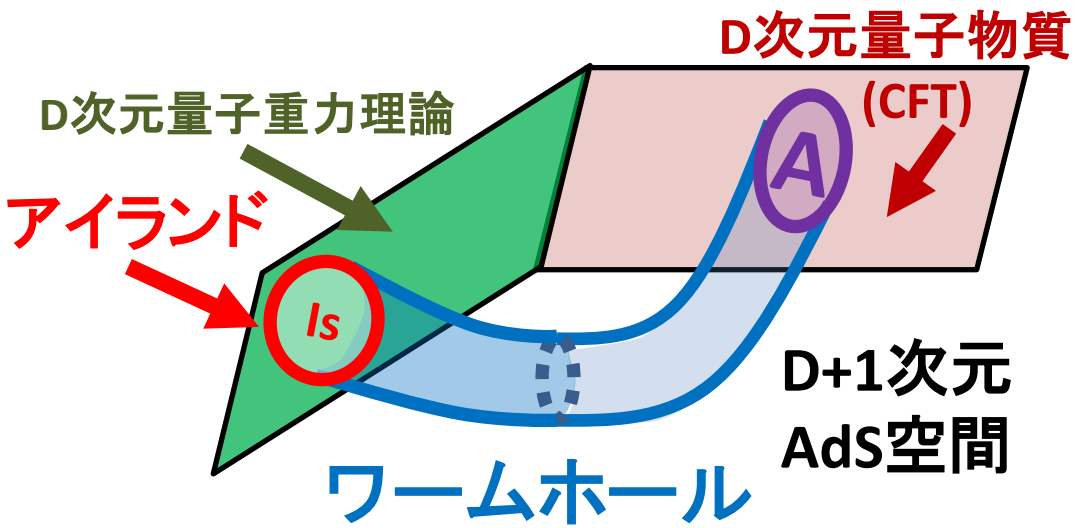
輻射のEE　重力エントロピー　量子物質のエンタングルメント



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



ブラックホールに「抜け穴」

物質の情報漏れ 新説に注目

ブラックホールのイメージ—NASA/JPL Caltech提供

スティーブン・ホーキング博士—NASA/Paul E. Alers提供

地球規模の電波望遠鏡網を活用して撮影した「イベント・ホライズン・テレスコープ」で観測した巨大ブラックホール EHT collaboration提供

ブラックホール同士が衝突する際に生じる重力波のイメージ—LIGO/T. Pyle提供

超弦理論

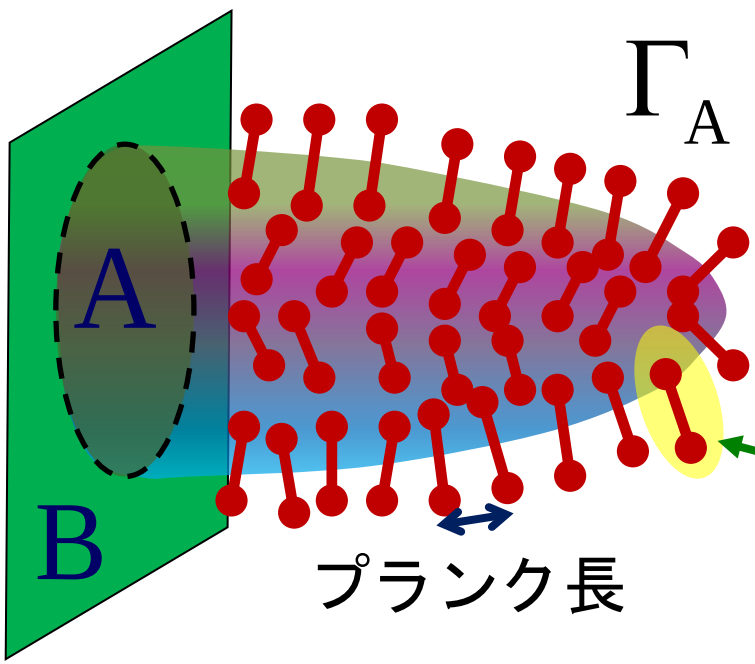
万物の根源は「ひも」

日経新聞[2021年7月4日26面]
高柳が取材を受けた最新記事
(ブラックホールの量子論と
アイランド公式の説明)

⑥ 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。

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

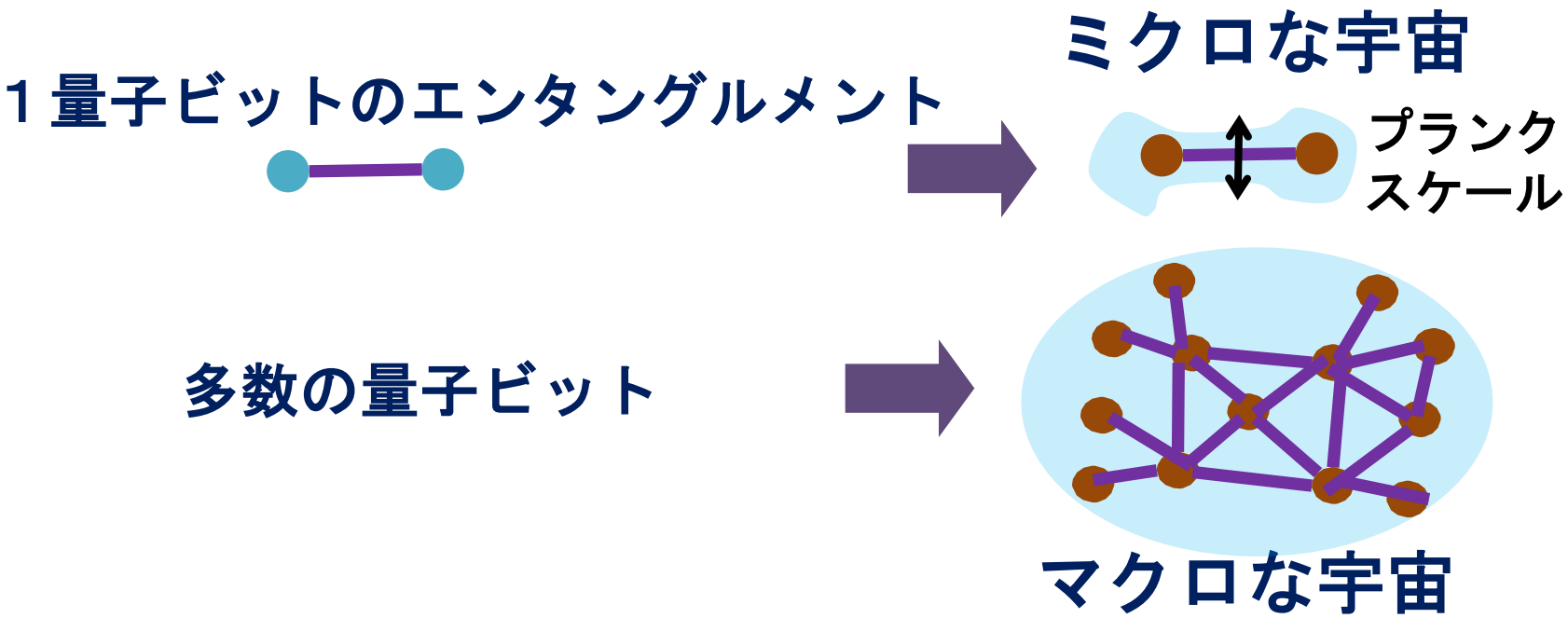


$$\text{プランク長}: l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1.6\times10^{-35} m$$

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

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。



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, …]

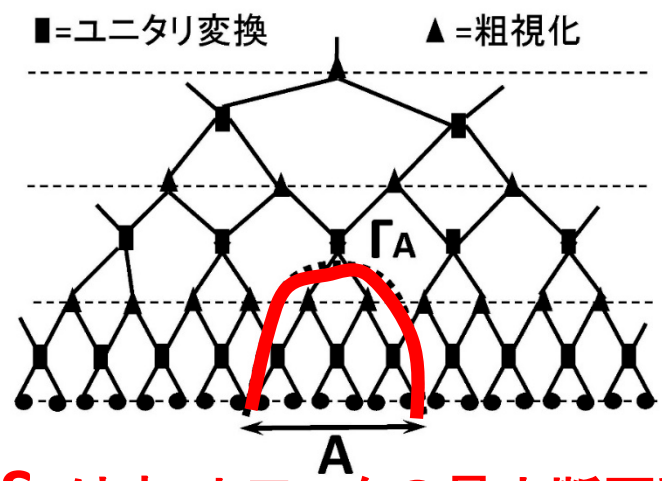
量子多体系の状態を精度よく表す波動関数の幾何学的記述法

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

→AdS宇宙の光円錐方向に対応



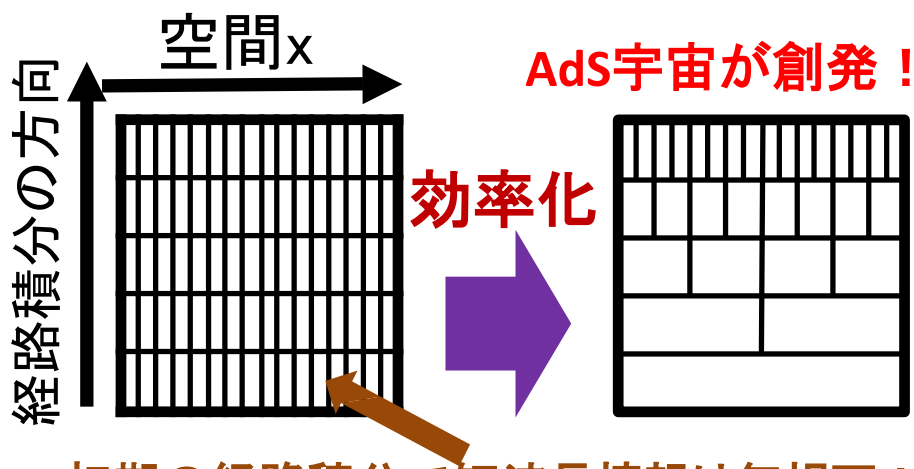
S_Aはネットワークの最小断面積！

[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

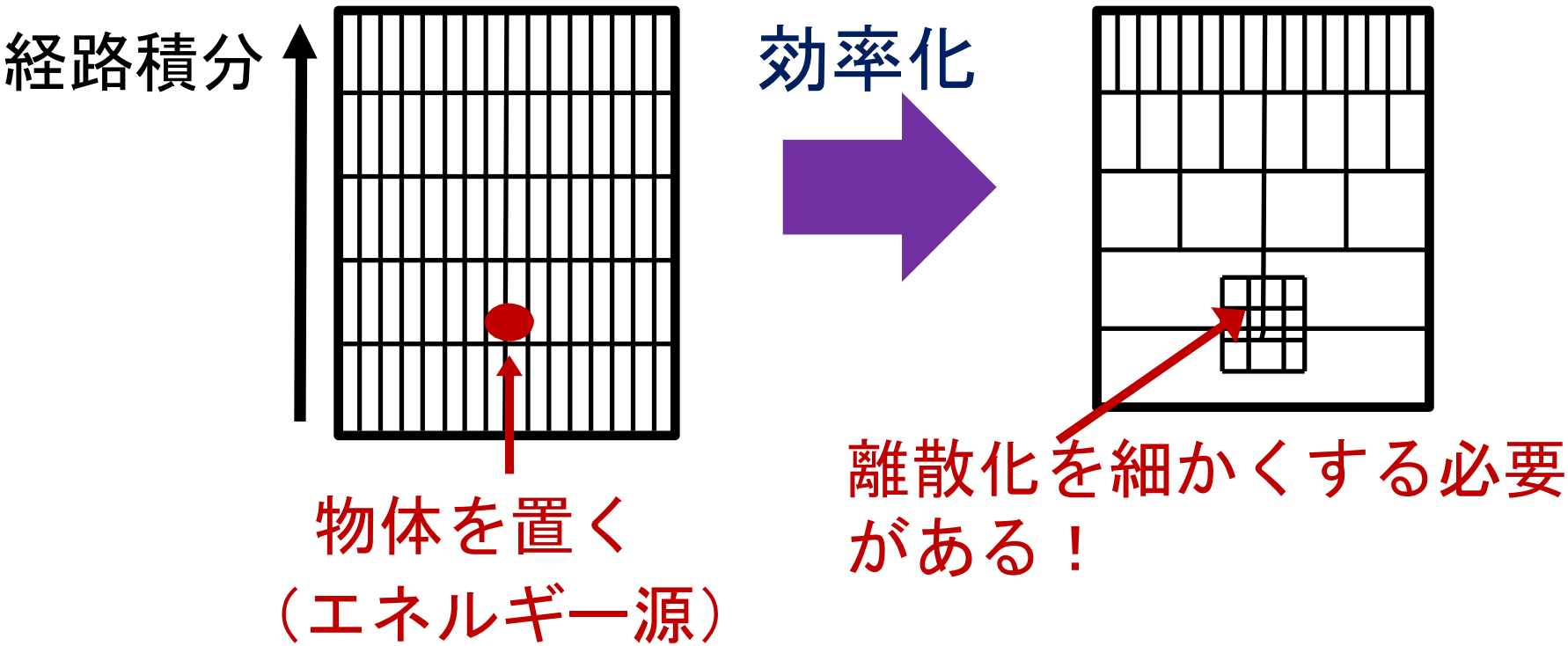
→AdS宇宙の時間一定面に対応



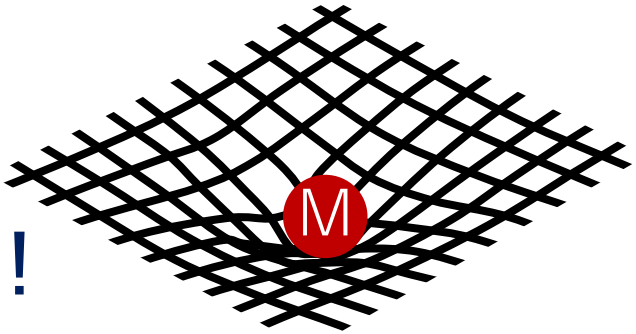
初期の経路積分で短波長情報は無視可！

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！

経路積分の効率化のダイナミクス



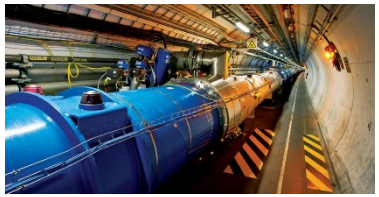
エネルギー源(＝情報源)
が背景の時空を曲げる
⇒一般相対論の本質！



⑦ おわりに

従来の物理学の考え方

顕微鏡・加速器

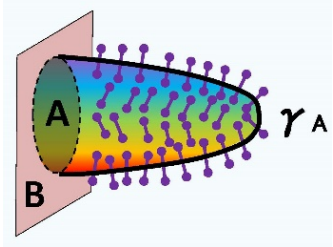


物質 ＝ 素粒子の集まり

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

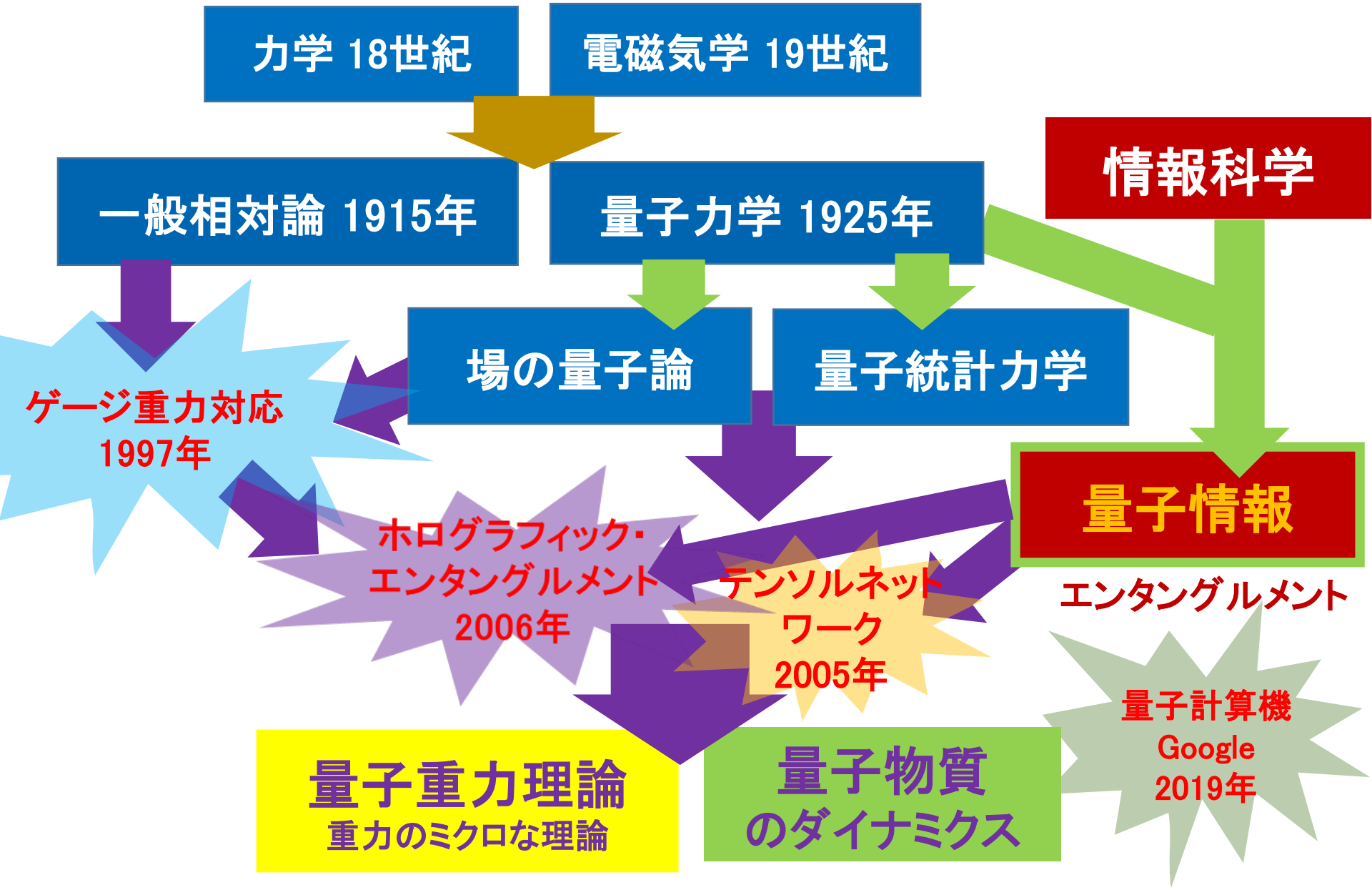
重力理論は、最速の“量子コンピューター”？
➔量子誤り訂正符号・量子計算へ新しい知見

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

関連する物理学の発展


力学 18世紀
電磁気学 19世紀
一般相対論 1915年
量子力学 1925年
情報科学
場の量子論
量子統計力学
ゲージ重力対応
1997年
ホログラフィック・
エンタングルメント
2006年
テンソルネット
ワーク
2005年
量子情報
エンタングルメント
量子計算機
Google
2019年
量子重力理論
重力のミクロな理論
量子物質
のダイナミクス

量子情報の話を専門家から聞きたい方へ
(+私の講演をさらに聞きたい方へ..)

https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~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
場所: オンライン(zoom)開催、無料

講演者:
森前智行 (京都大学基礎物理学研究所・准教授、
専門：量子情報理論)
高柳　匡 (京都大学基礎物理学研究所・教授、
専門：素粒子論)

スケジュールと講演タイトル:
10:00-11:00 森前智行「量子情報:量子計算と量子暗号」
11:10-12:10 高柳　匡「量子情報から極限宇宙へ:量子ビットから創発する宇宙」
講演終了後、12:30まで質問タイムを設けます。

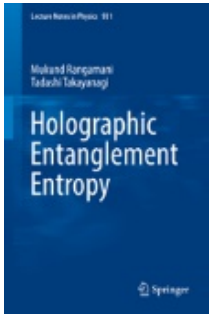
参考文献

(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) 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]