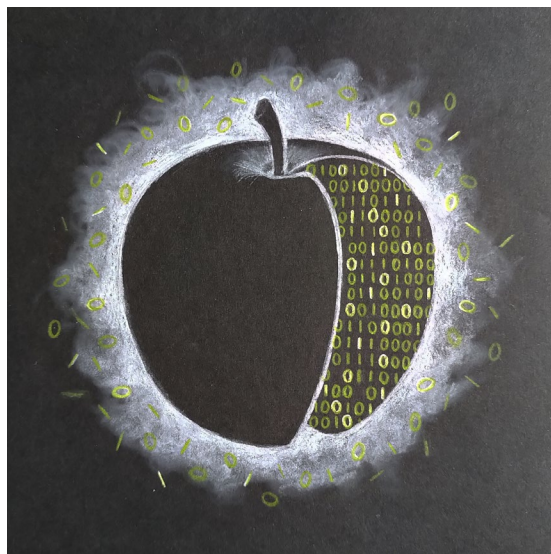


ブラックホールは 情報の玉手箱？



理化学研究所 数理創造研究センター*iTHEMS*
横倉祐貴

情報とは何か？

- スマホで写真をとって、**その情報**を保存する



理研和光キャンパスにて。
2025年4月吉日

- では、情報って何？

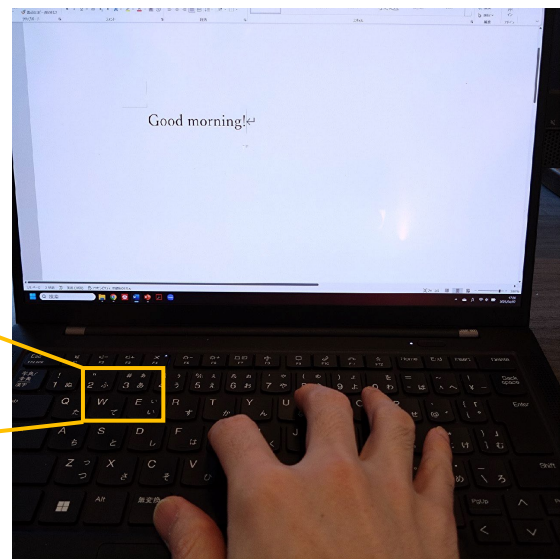
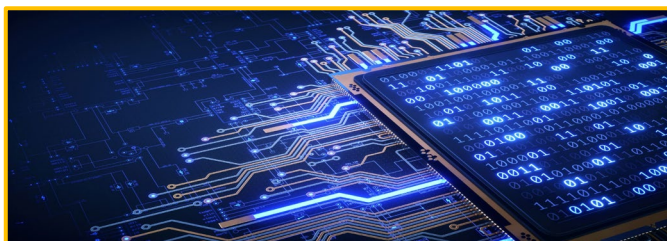
⇒物理学の（1つの）考え方は

物体の状態そのものが情報を担っている
⇒ **情報 = （物体の）状態**

←今回はこれを採用

「情報＝状態」の例

- 例：パソコンで“Good morning!”と打つ
⇒ “Good morning!”に相当する01文字列に変換される
⇒ それに従って回路の適切な部品の電圧が変化する



⇒ディスプレイに“Good morning!”が表示される

“Good morning!”の情報 = パソコンの1状態

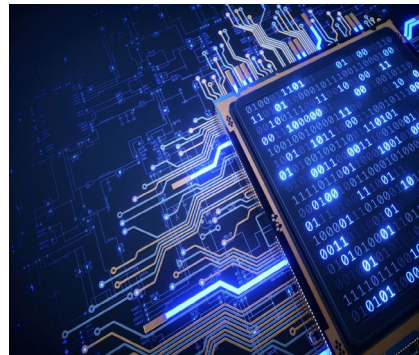
(⇒詳細は後で)

情報量をどんどん増やすと・・・

- 保存する情報の量を増やすためには、物体の取り得る状態のパターンの数を増やせばいい。

(⇒詳細は後で)

例：01状態の取れる素子の数を増やす



- **問題**：原理的に（与えられたサイズに対して）最大の情報量を貯められる物体は何だろうか？

⇒実はそれはブラックホールなんです。

今回のお話

- この講演は、情報量最大という性質に注目して、ブラックホールの正体を探っていくお話です。



- そのための準備として、物理学の考え方を紹介します
⇒宇宙を司る3つの法則



1. 量子力学

～「情報＝状態」の意味～



量子的状态（= 情報）

量子力学 = 原子などのミクロな世界を記述する法則
⇒物質は粒子と波の両性質を持つ新しいあるもの

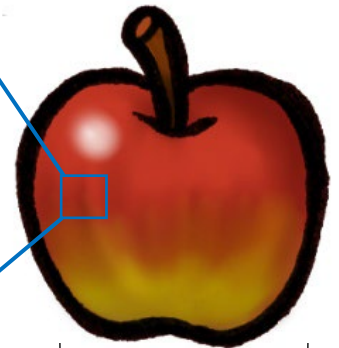


⇒物質の状態は“ゆらいでいる状態”として確定する

小さいものは
「量子力学」に従う
例：水素原子
 $\sim 10^{-10}m$



大きいものは
「古典力学」に従う



リンゴ
 $\sim 10^{-1}m$
 $= 0.1m = 10cm$

注： $10^{-10}m = 0.0000000001m = 1$ オングストローム

量子的状态 (= 情報)

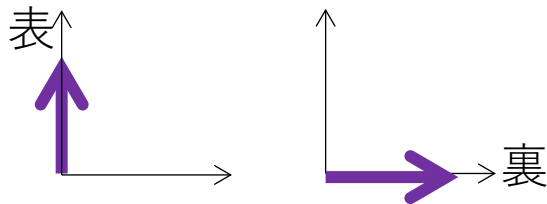
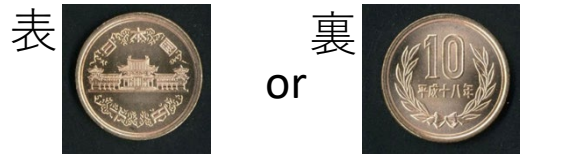
量子力学 = 原子などのミクロな世界を記述する法則
⇒ 物質は粒子と波の両性質を持つ新しいあるもの



⇒ 物質の状態は“ゆらいでいる状態”として確定する

例：“量子的な10円硬貨”

古典的な状態

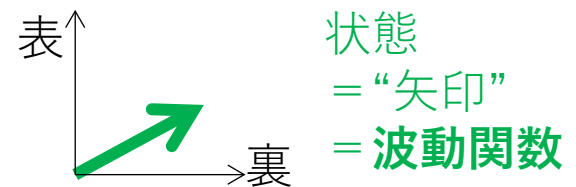


表か、裏のどちらか

量子的状態の例

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \text{表} + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \text{裏}$$

(wikipedia)



表でも、裏でもある状態
(重ね合わせの状態)

量子的状態（＝ 情報）

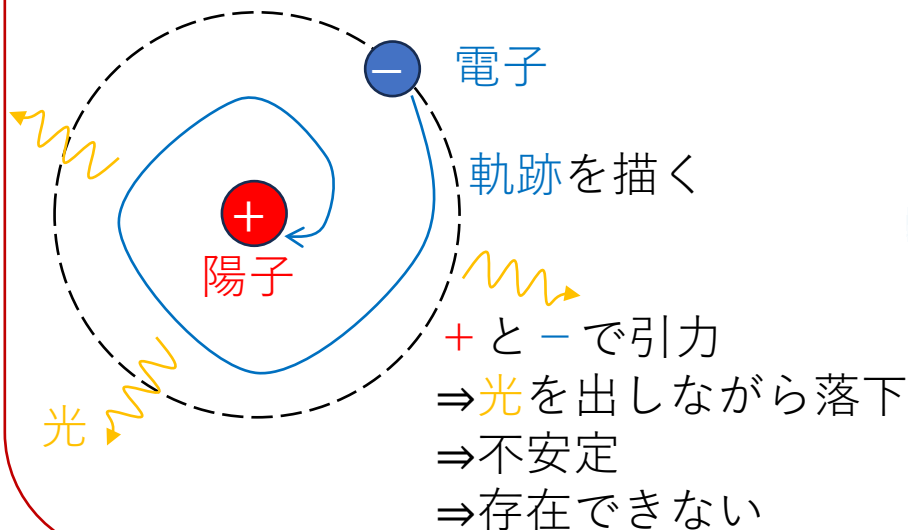
量子力学＝原子などのミクロな世界を記述する法則
⇒物質は粒子と波の両性質を持つ新しいあるもの



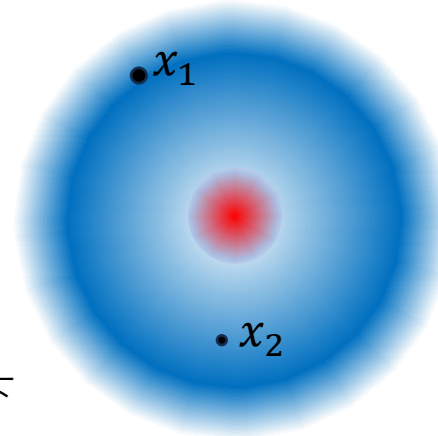
⇒物質の状態は“ゆらいでいる状態”として確定する

その効果の例：水素原子の安定性

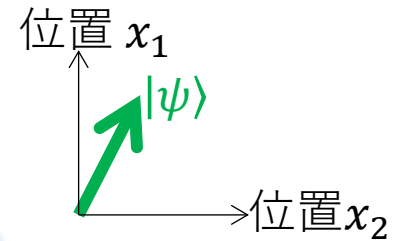
古典的状态



量子的状態



(ψ :ギリシャ文字の「プサイ」)



$$|\psi\rangle = c_1|\text{位置}x_1\rangle + c_2|\text{位置}x_2\rangle$$

ゆらいでいる状態 $|\psi\rangle$
⇒量子的斥力が生じる
⇒引力とバランス
⇒安定
⇒存在できる

2. 熱統計力学

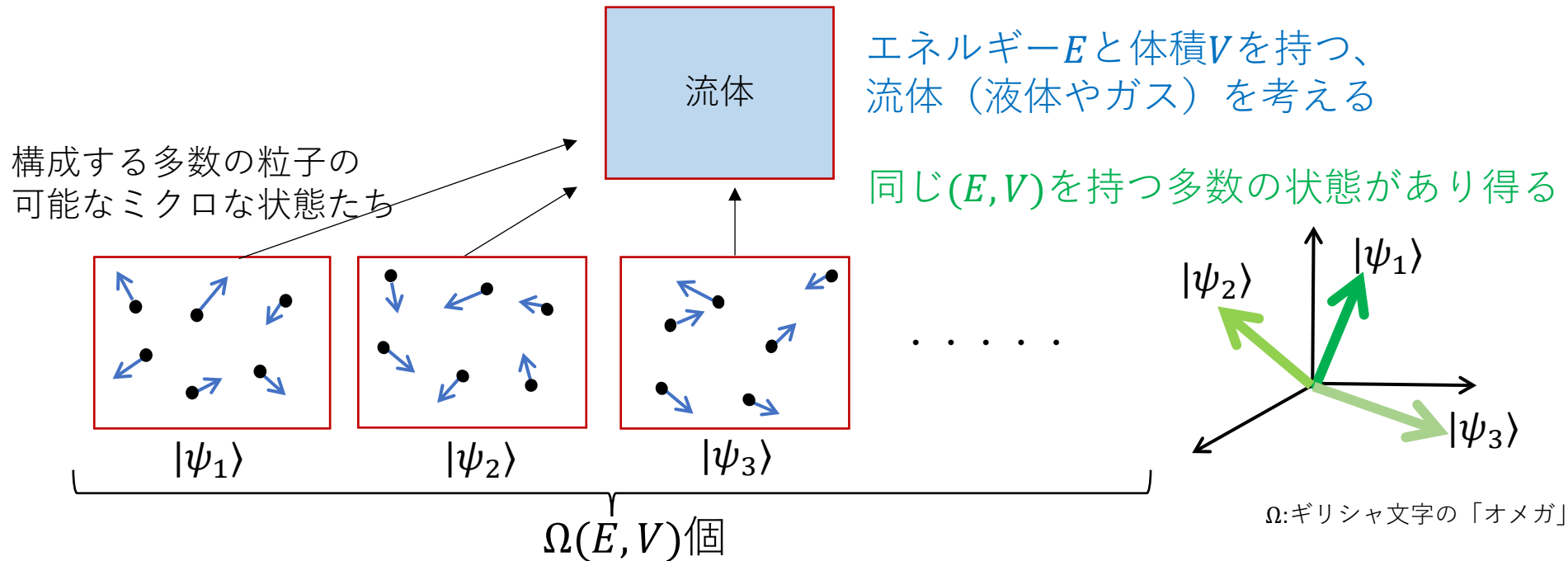
～情報の量について～



情報量 = 状態量 = エントロピー

- 情報 = 状態 = “矢印” $|\psi\rangle$
⇒ 情報量 = 状態の数

- マクロな物体を考えてみる



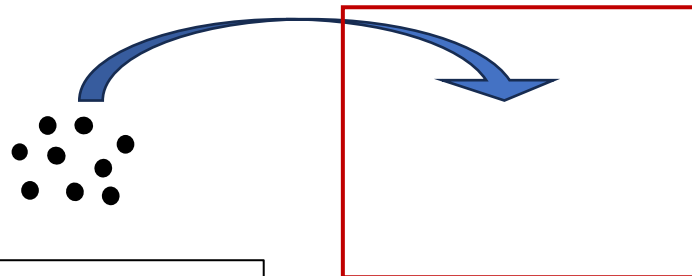
- 情報量（エントロピー）を次で定義する：

$$S(E, V) = \log \Omega(E, V)$$

Ω が大きくなると、
対数 $\log \Omega$ も大きくなる

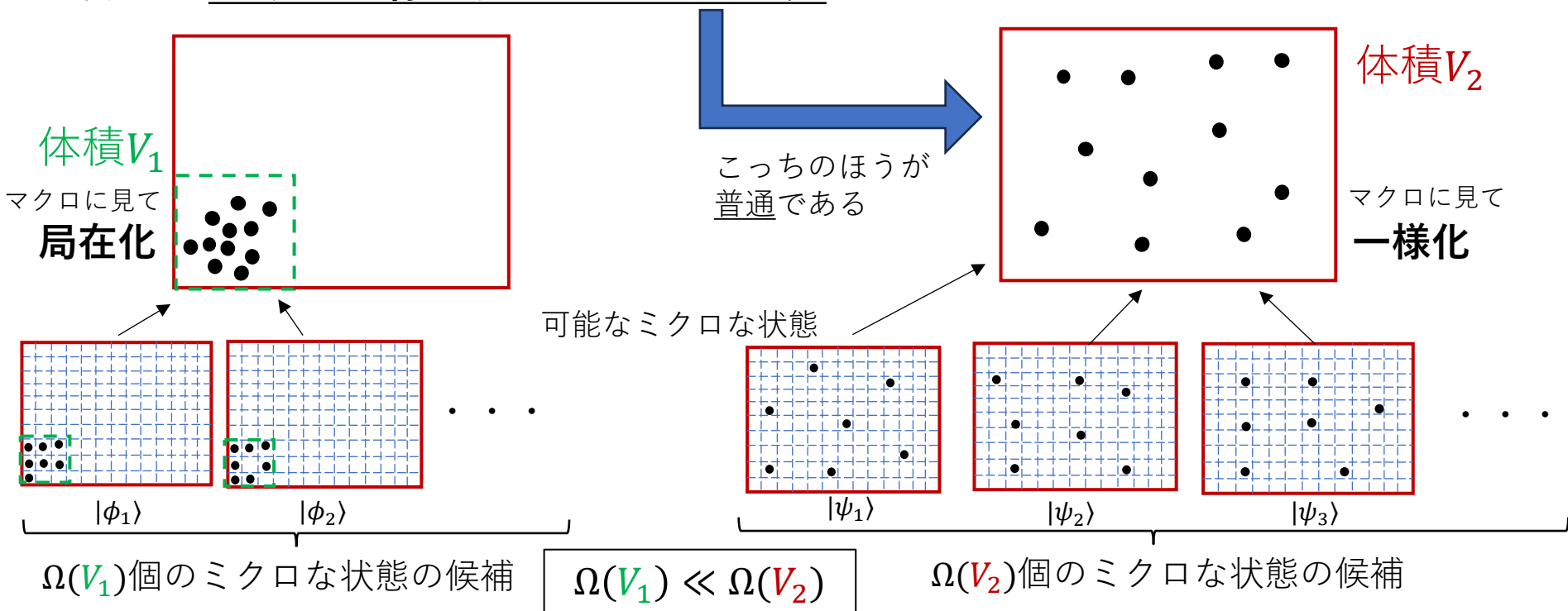
ありふれた状態（典型的な状態）

- N個の粒子を箱に適当に配置する



問1：どんな配置パターンがありふれているか？

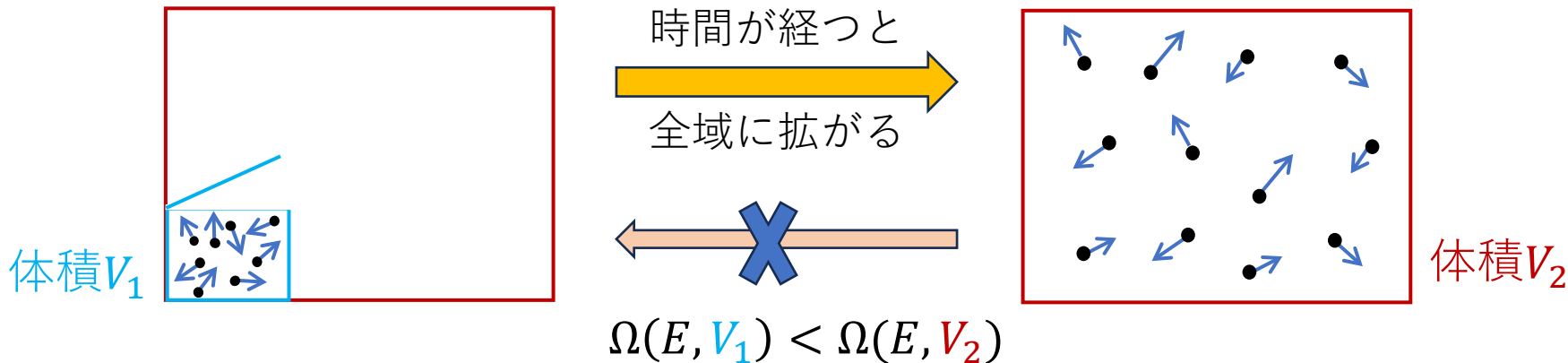
⇒ 答え：全域に一様に広がっている配置



⇒ 可能なミクロな状態の数 Ω が多いマクロな状態が（統計的に見て）典型的である

エントロピー増大則と時間の矢

問2：小箱 V_1 を開くと、動き回っている粒子たちはどうなるか？



⇒答：全域に広がる！そして、それが元に戻ることはない（経験上）。

⇒なぜか？

「状態数 Ω の多い方が統計的に生じやすいため、

時間経過で自然と生じるのはより大きな状態数 Ω をもつマクロな状態である」

エントロピー増大則と時間の矢

自然な時間変化

⇒より状態数 Ω の多い方向に向かう

=より典型的な状態に向かう

⇒エントロピー $S = \log \Omega$ が増える

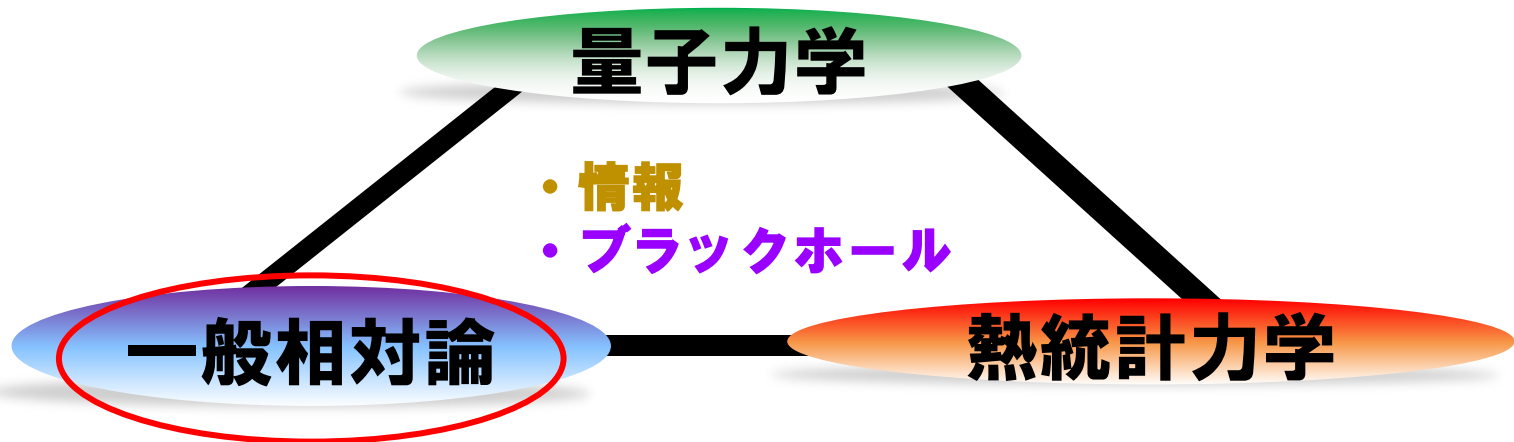
～時間は過去から
未来にのみ流れる



注：エントロピーが最大になると、マクロな変化は止まり、一定のマクロ状態になる（平衡状態）

3. 一般相対論

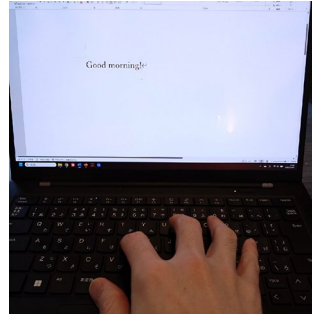
～情報のエネルギーについて～



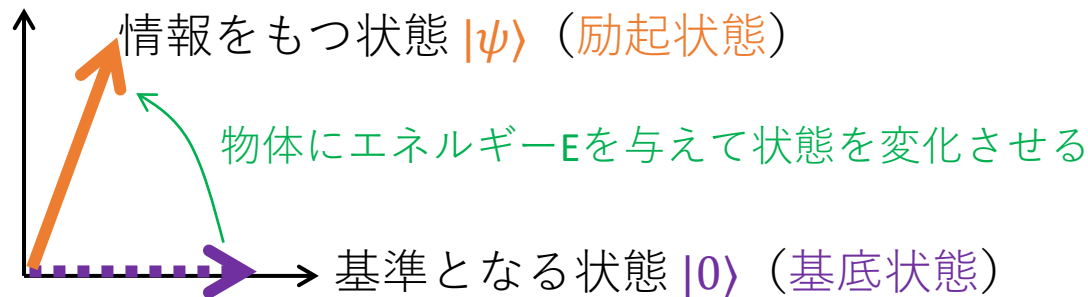
情報はタダではない。エネルギーが必要。

- 情報 = 基準からのずれ
⇒何かしらのエネルギーが必要

例
電力エネルギーを使い、
“Good morning”を作る



⇒エネルギーを使い、物質の状態 $|\psi\rangle$ を変化させれば良い



⇒情報はエネルギーを持つ

$$\langle \psi | \hat{H} | \psi \rangle = E > 0$$

エネルギーがあれば、質量がある。 そして、重力が生じる。

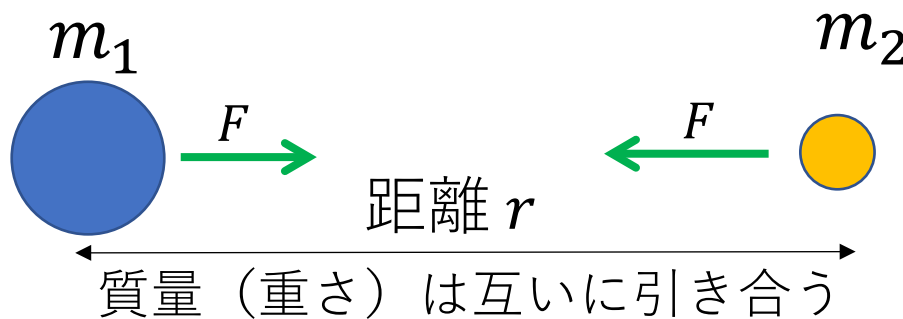
- アインシュタインの関係式

$$E = mc^2$$

エネルギー = 質量

光速： c =秒速30万キロ

- 万有引力（重力） = 質量を持つもの同士は引き合う



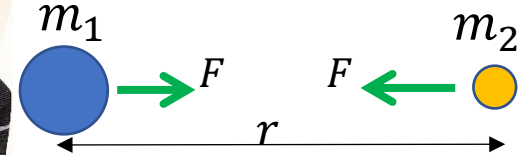
Newtonの重力の法則

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

⇒離れているのにどうやって力が伝わるの？

一般相対性理論

⇒重力＝時空の幾何(曲がり)



Einstein方程式

$$\text{時空の曲がり具合 } G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \text{ 物質のエネルギー}$$

光や物質があると、時空が歪む。

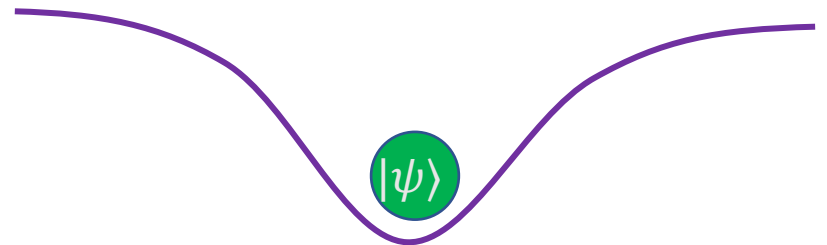
時空の歪みが光や物質がどのように動くかを教える。

⇒時空は固定された“容器”ではなく、物質共に“動く”物理的実体である！

この節のまとめ

- 情報はエネルギーを持つ $\langle \psi | \hat{H} | \psi \rangle = E > 0$
- エネルギー = 質量 $E = mc^2$
- 質量は重力を生む（万有引力） $F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$
- 重力 = 時空の曲がり $G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$

⇒情報は時空を曲げる！



**ここで、少しコーヒーにしましょう
質問 & 休憩タイムです**



4. ブラックホールのなぞ

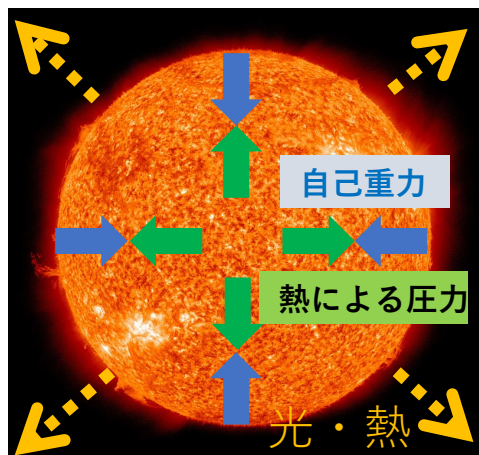
～未だにブラックホールは正体不明～



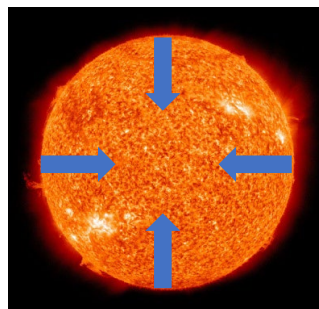
現在、私たちが「ブラックホール」だと観測的に認識しているもの

・星（=物質）の重力崩壊

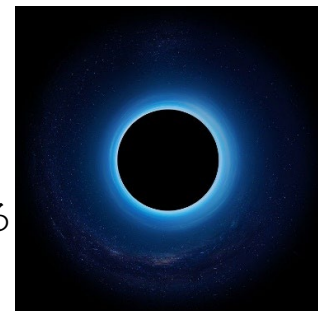
⇒ブラックホールは物質から作られる



圧力が止まると、
収縮する

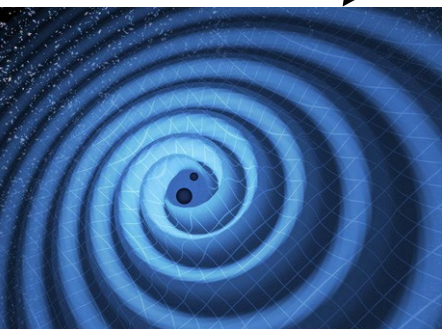


十分重い物体は
ブラックホールになる

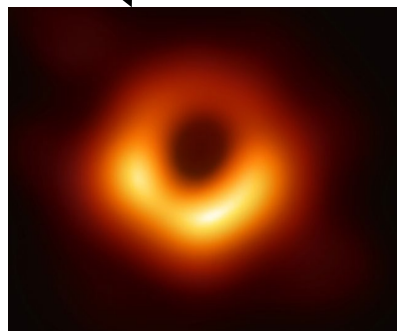


(Wikipedia)

・観測では重力波や撮影などを調べる



(LIGO Collaboration)

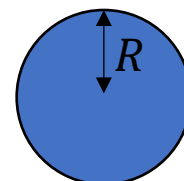


(Event Horizon Telescope)

⇒周囲はわかるが、
表面や内部は未だ
にわからない

ブラックホール

～非常に重力の強い
(=とても重い)
コンパクトな“物体”



質量M

$$C \equiv \frac{GM}{Rc^2}$$

が大きい

古典ブラックホール (意味：量子力学の効果を考えていない)



復習

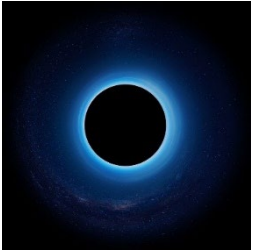
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

時空の曲がり具合

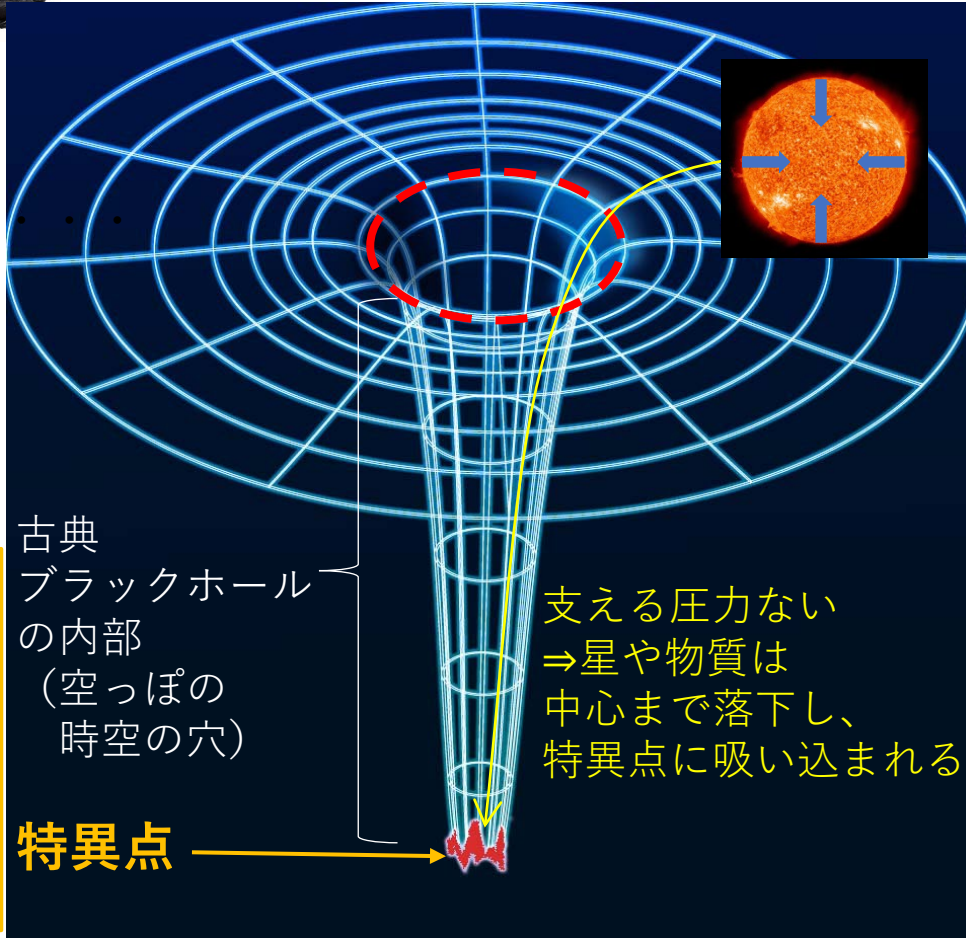
物質のエネルギー

だけを仮定すると、、、

重りがとても重く、
そして小さくなると・



=



古典
ブラックホール
の内部
(空っぽの
時空の穴)

支える圧力ない
⇒星や物質は
中心まで落下し、
特異点に吸い込まれる

特異点

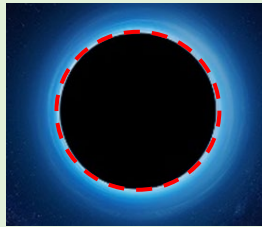
特異点 = エネルギー密度無限大の点
⇒エネルギーをいくらでも取り出せる
⇒エネルギー保存則を破る
⇒あり得ない！
⇒特異点は存在は許されない！（一般相対論の限界）

古典ブラックホール (意味：量子力学の効果を考慮していない)

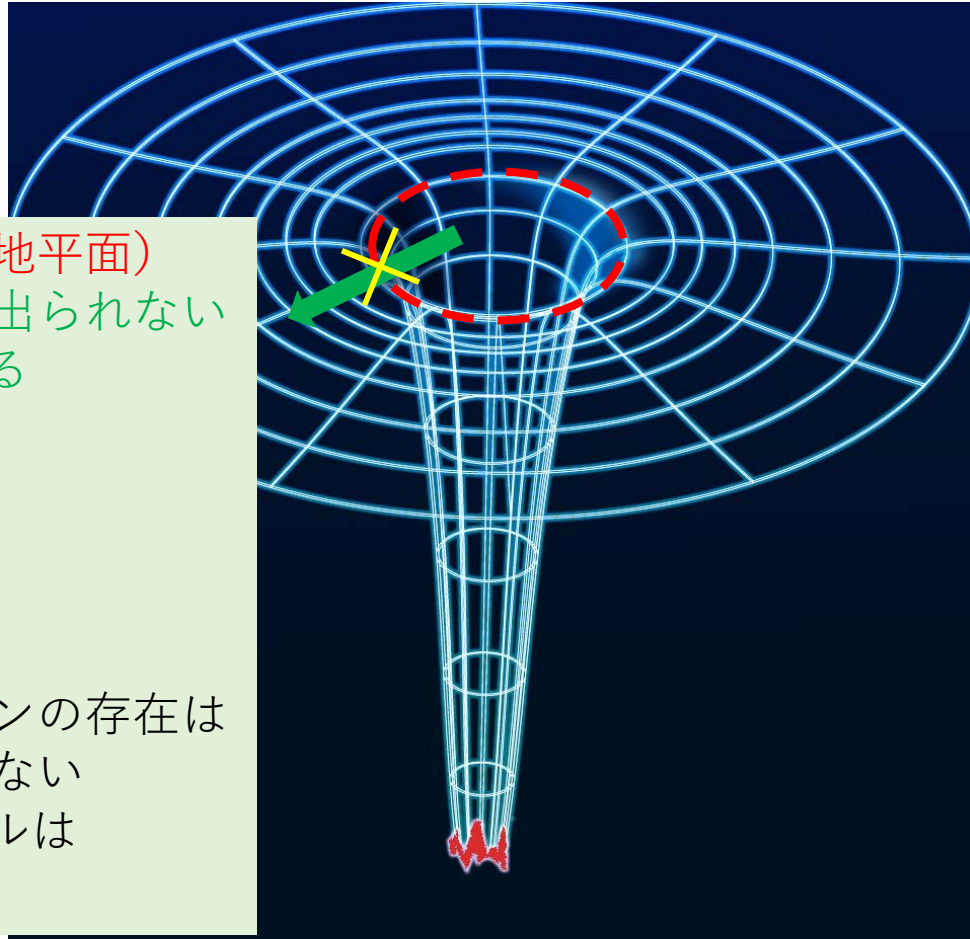
• 古典ブラックホール

= 光さえも永遠に外に出られない程強い重力をもつ真空の領域

ホライズン (事象の地平面)
に入ったら、光さえ出られない
⇒ 真っ黒な穴に見える



注：未だにホライズンの存在は
観測的に確定していない
⇒ 古典ブラックホールは
1つの仮説である



**古典ブラックホールに
量子力学の効果を足すと・・・**

ブラックホールは蒸発する

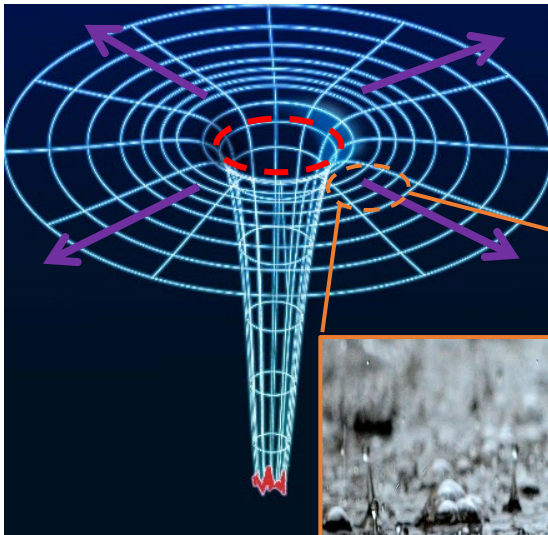
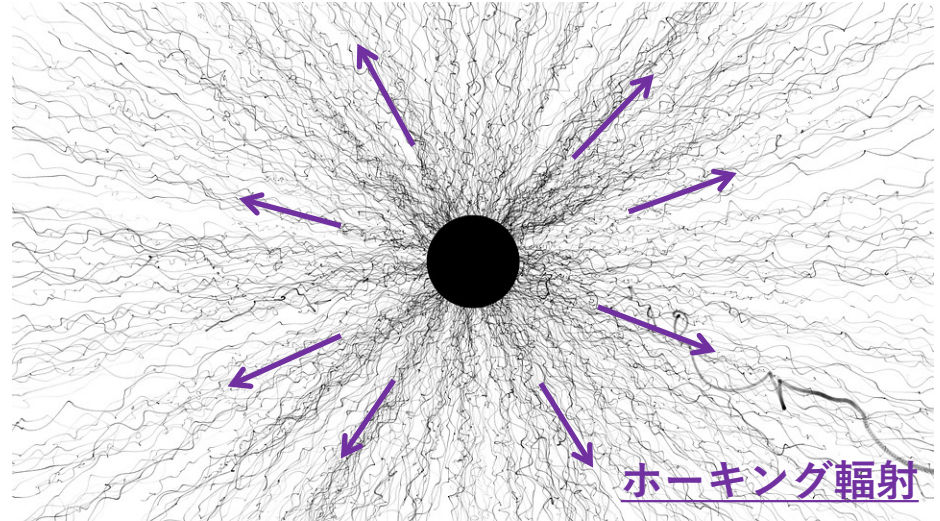
・ ホーキング放射

真空の量子ゆらぎ + 周囲の時空の曲がりのもつエネルギー

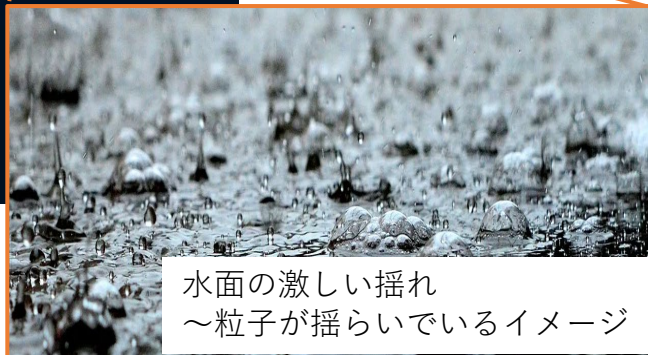
⇒ 光を生成

⇒ ブラックホールは微弱な光を放出

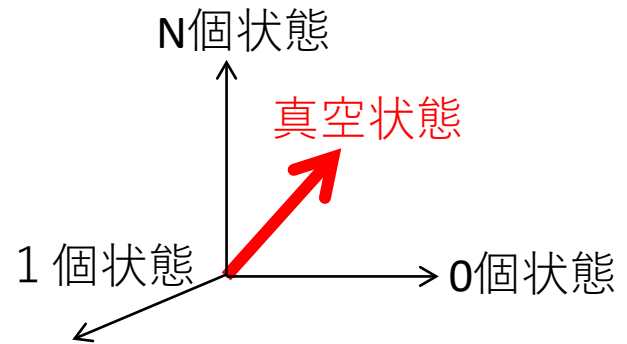
(注：実験・観測による確認は未だにない)



量子力学の真空状態では、
粒子のある状態とない状態が揺らいでいる



水面の激しい揺れ
～粒子が揺らいでいるイメージ



(参照: “量子的な10円硬貨”)

ブラックホールは蒸発する

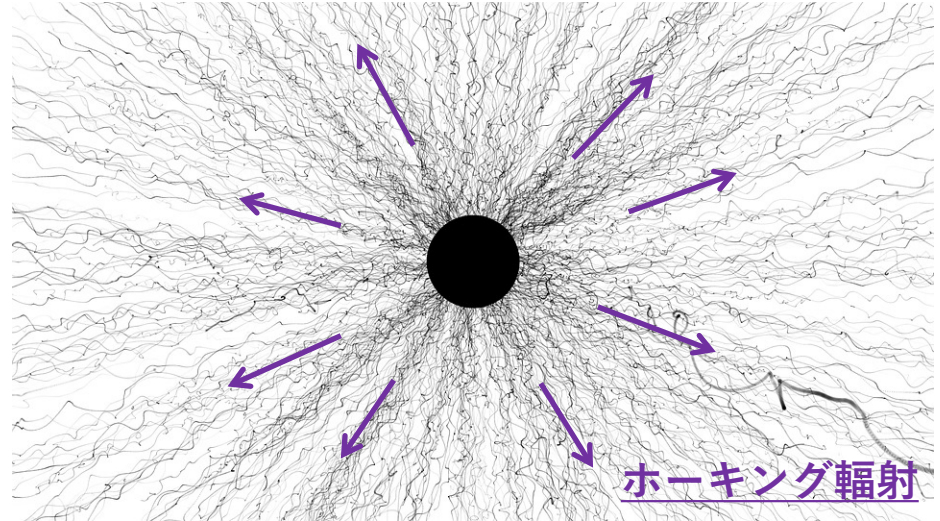
・ ホーキング放射

真空の量子ゆらぎ + 周囲の時空の曲がりのもつエネルギー

⇒ 光を生成

⇒ ブラックホールは微弱な光を放出

(注：実験・観測による確認は未だにない)



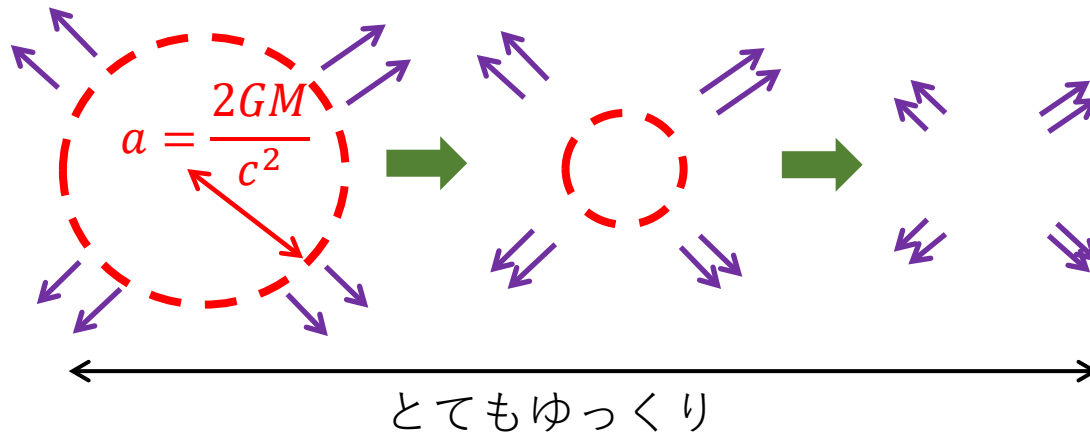
⇒ ブラックホールは光としてエネルギーを捨てる

⇒ ブラックホールの質量 M は減っていく

⇒ ブラックホールは有限の時間で蒸発する (たぶん)

$$E = mc^2$$

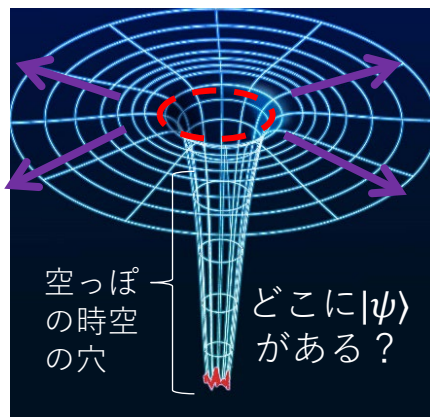
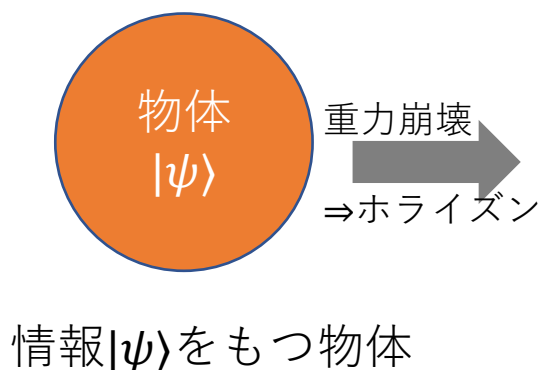
エネルギー = 質量



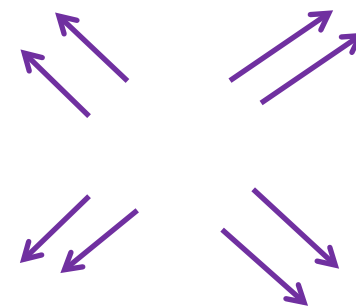
情報はどこに行った？

- 古典ブラックホール + ホーキング放射

ホライズンのせいで情報 $|\psi\rangle$ は出れない！



ホーキング放射
⇒蒸発



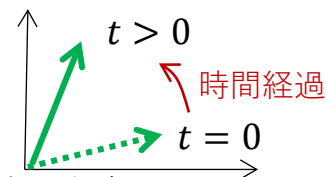
光はBH周辺で発生したので、情報 $|\psi\rangle$ について知らない

⇒物体のエネルギーは戻ってくるが、**情報 $|\psi\rangle$ は消える**

⇒量子力学の法則に矛盾する
(情報喪失問題)

Schrodinger 方程式

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = \hat{H} |\Psi(t)\rangle$$

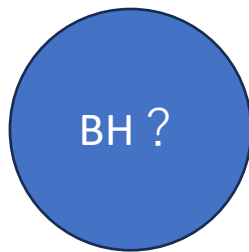


⇒情報の保存則

ブラックホールは未だに正体不明

- 1. 観測的にホライズンや内部は確認されていない
- 2. 古典ブラックホールは特異点を持ってしまう
- 3. 古典ブラックホールは情報喪失が起きる

⇒ブラックホールは観測的にも理論的にも未だにわからない



⇒世界中で様々な研究がされている

⇒僕もその一人です

5. 量子ブラックホール理論

～最先端研究の一端～

⇒ここは僕の研究です



ブラックホールの量子論的定義は何か？

(= 「これがそれである」と特徴づける方法)

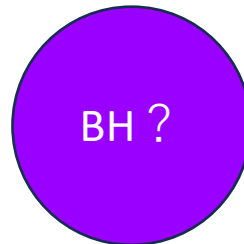
- 従来の古典的定義 (= 量子論を無視した定義)

「ブラックホール = ホライズン」

は理論的問題をもたらした。 { 特異点問題
情報喪失問題

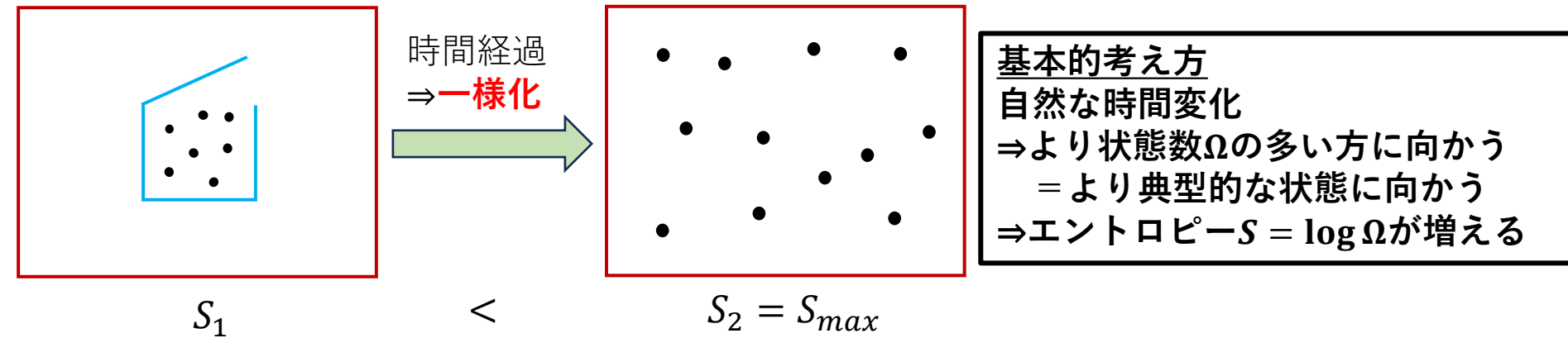
⇒ では、**量子論を考慮したブラックホールの定義は何か？**

⇒ これを考えることで、ブラックホールの正体を探り、
上記の問題の解決を図る！

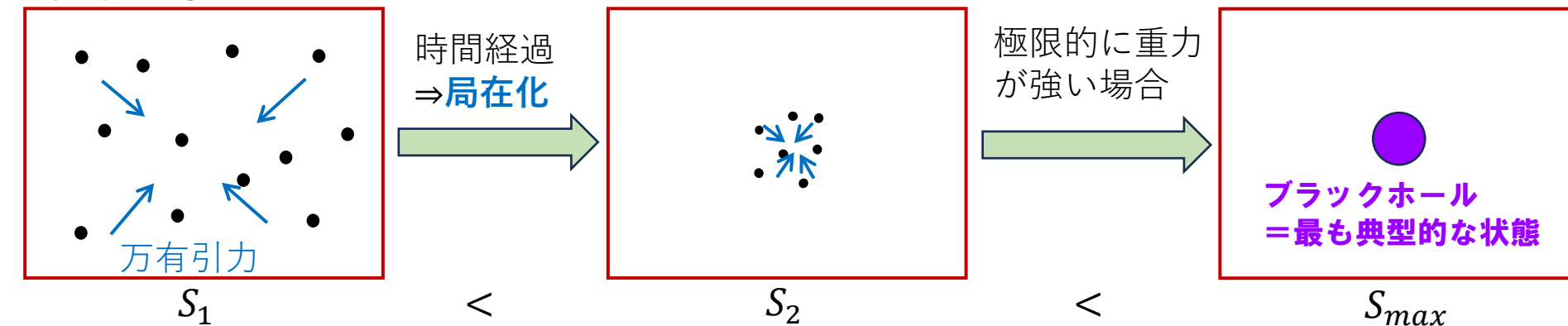


ブラックホール“らしさ”

- ・ **復習**：重力が無視できる場合の自然な時間発展



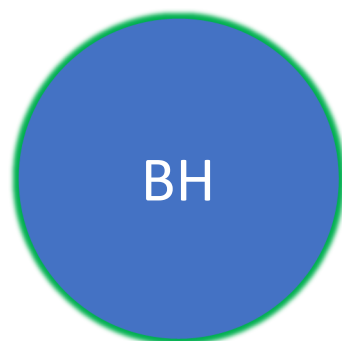
- ・ **重力が強い場合**、万有引力によりどんな物質も勝手に集まり、
極限的にはブラックホールになる



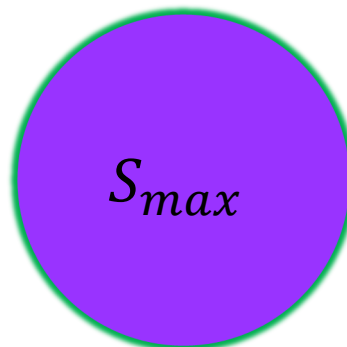
⇒この時間経過にてエントロピーが増大しているはず
⇒最大エントロピー S_{max} をもつことがブラックホールらしさでは？

量子論的なブラックホールの定義(仮説)

- ブラックホール = 与えられた表面積 A に対して最大のエントロピー S_{max} をもつ“物体/領域”



定義
≡



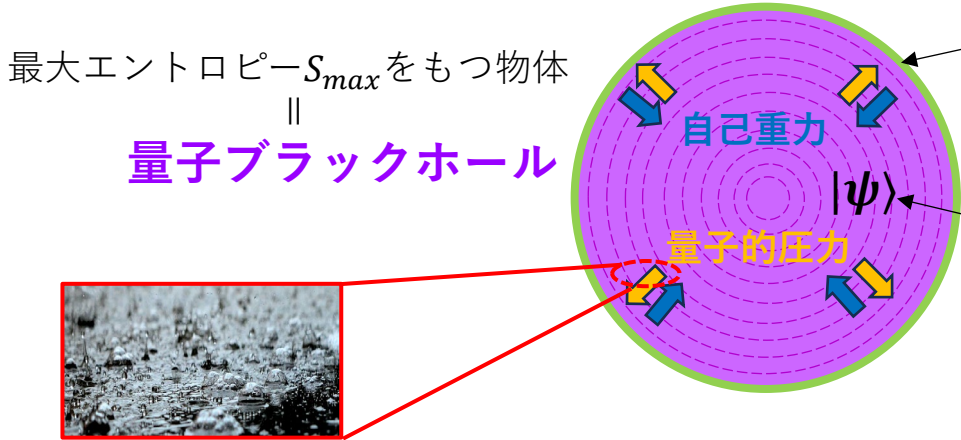
$$\text{表面積 } A = 4\pi R^2$$

コメント

- なぜ表面積 A を固定するの？
⇒内部がわからないので、外から測れるものである表面積 A を固定し、最大エントロピー S_{max} を考える

エントロピー最大の“物体”としてのブラックホールはどんなものか？

- 半古典的アインシュタイン方程式 (=物質は量子的に、重力は古典的に扱う)
- ⇒多数の励起した物質が強い自己重力で集まった**高密度な物体/領域**



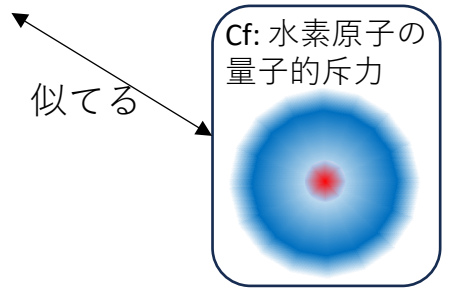
1. ホライズンの代わりに**表面**を持つ
2. 古典的な特異点がない！
3. 情報 $|\psi\rangle$ は**内部に一様に分布**
 ⇒情報の位置がわかる
 ⇒情報喪失の解決につながるはず

- 疑問：強い重力で中心に局在してしまうのでは？
- ⇒答：**真空の量子揺らぎ**で生じた**量子的圧力**が**自己重力**と**バランスし一様化**

なお、最大エントロピーの値 S_{max} は

$$S_{max} = \frac{A}{4\hbar G}$$

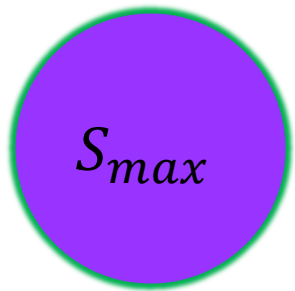
⇒このエントロピーは体積ではなく**表面積 A** に比例する
 これは従来の予言と一致している



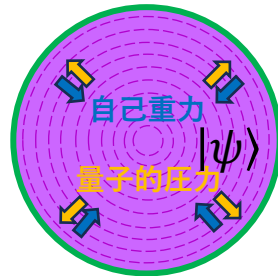
これは一体何を意味しているのか？

- エントロピー最大（表面積Aに対し）
 - ⇒最も典型的な（＝最も特徴のない）内部構造のはず
 - ⇒内部に特別な場所はない
 - ⇒（球対称な場合）半径方向に**一様**なはず
 - ⇒励起した物質が内部全体に広がる
 - ⇒中心に特異点は現れないし、情報 $|\psi\rangle$ も内部に保たれる！

- 導かれる！
1. ホライズンの代わりに**表面**を持つ
 2. 古典的な特異点がない！
 3. 情報 $|\psi\rangle$ は内部に一様に分布



=

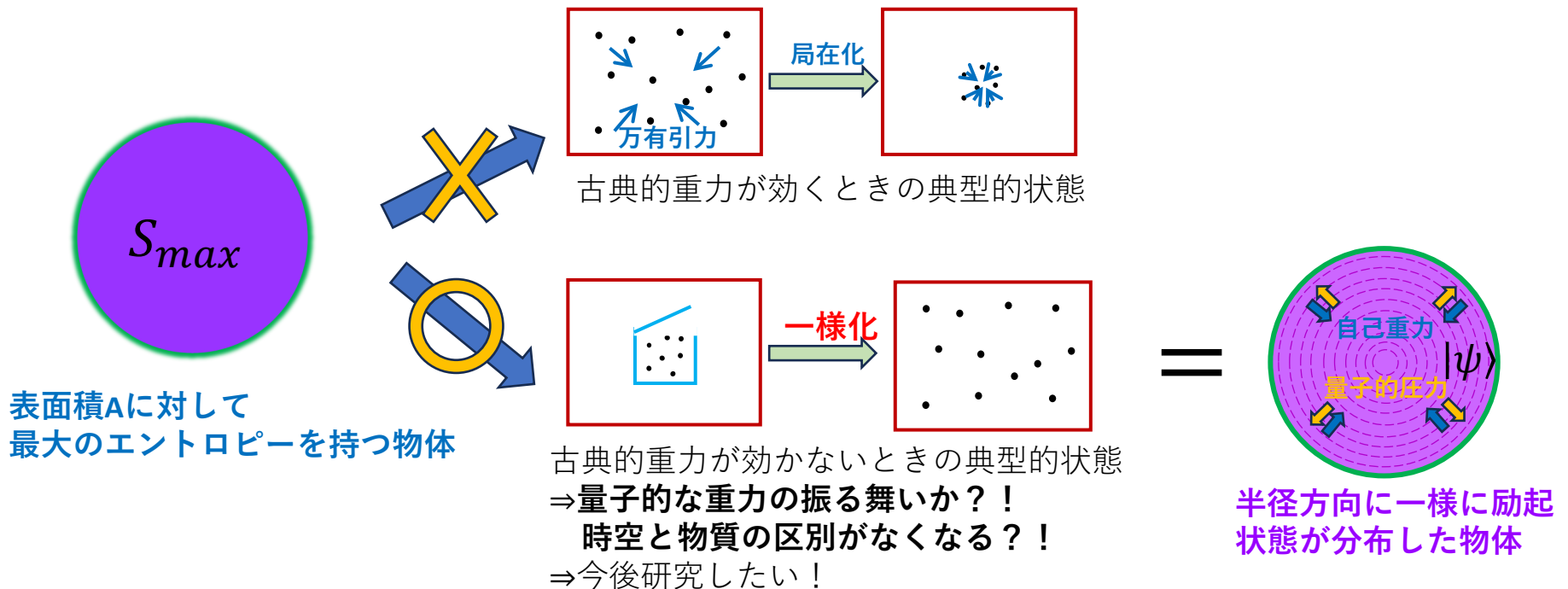


表面積Aに対して
最大のエンロピーを持つ物体

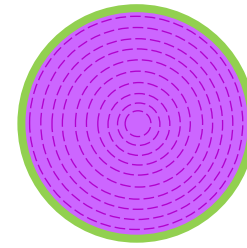
半径方向に一様に励起
状態が分布した物体
(僕が得た解)

これは一体何を意味しているのか？

- エントロピー最大（表面積Aに対し）
 - ⇒最も典型的な（＝最も特徴のない）内部構造のはず
 - ⇒内部に特別な場所はない
 - ⇒（球対称な場合）半径方向に**一様**なはず
 - ⇒励起した物質が内部全体に広がる
 - ⇒中心に特異点は現れないし、情報 $|\psi\rangle$ も内部に保たれる！

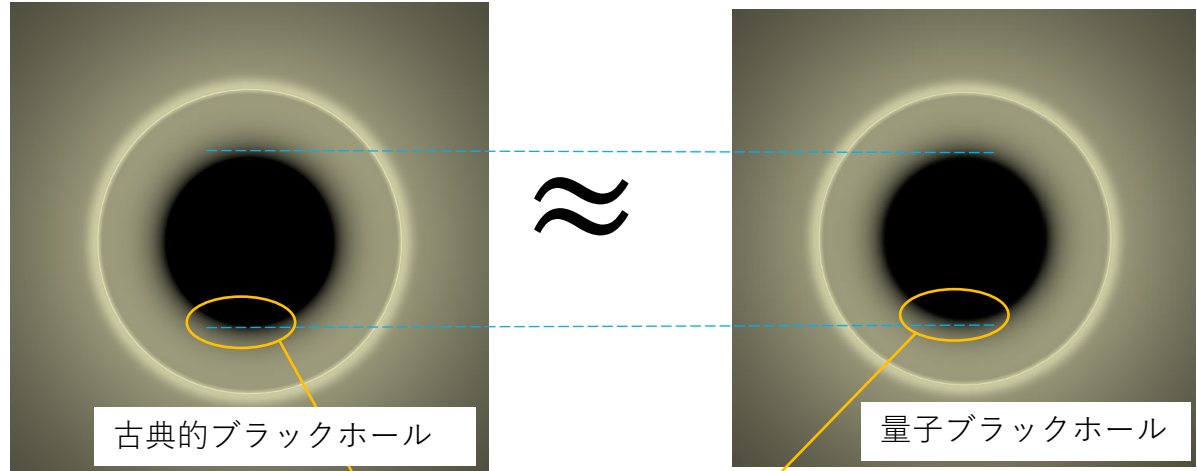


それは観測と整合的なのか？ ⇒ (今のところ) YES!

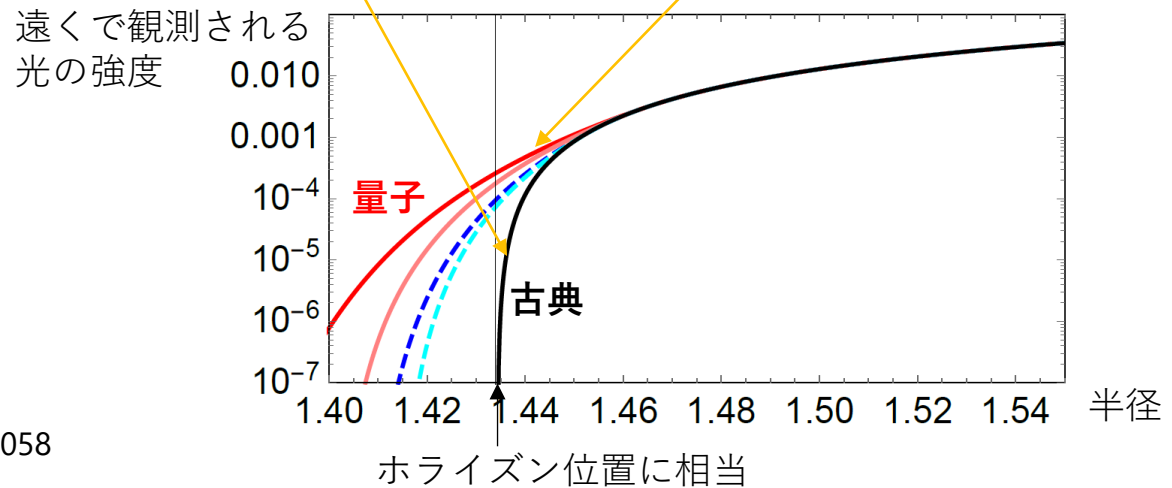


- この物体の撮像を調べてみると、、、

1) ホライズンはないが、
強い時間の遅れにより、
ほぼ真っ黒に見える
⇒ 現在の観測と整合的



2) 表面近傍では**わずかに明るい可能性**
⇒ 将来の観測の予言
(重力波は？ → 現在研究中)



未来へ

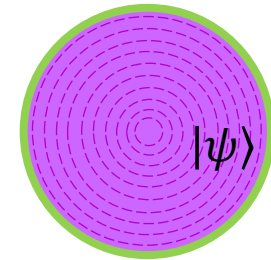
• 情報 = 状態 $|\psi\rangle$



⇒ 量子力学 + 熱統計力学 + 一般相対論を再考

(僕の理論)

⇒ ブラックホール^{定義} = エントロピー最大の物体



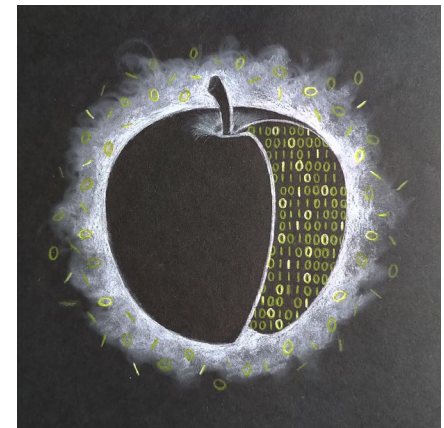
$$S_{max} = \frac{A}{4\hbar G}$$

⇒ ブラックホール = 情報の塊

今後は

⇒ ブラックホールの正体の解明へ

⇒ 「**情報として時空と物質が融合する**」を経て
「宇宙・時空とは何か？」の理解へ



ありがとうございました！