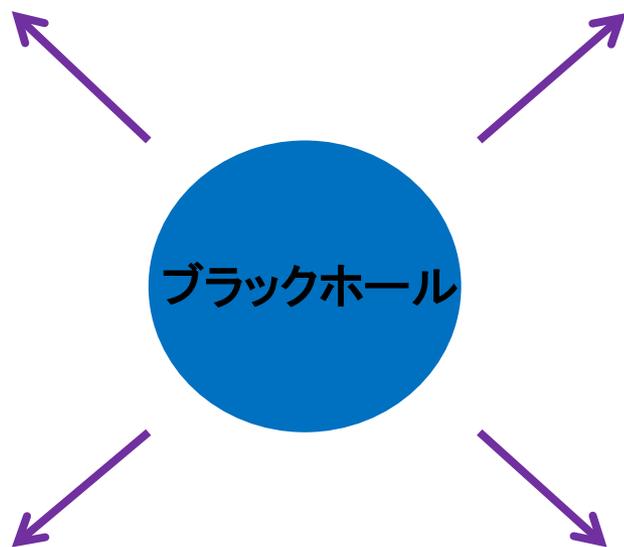


ブラックホールに 入ったリンゴはどこへ行く？

RIKEN iTHEMS

横倉祐貴



ブラックホールが蒸発しているとする

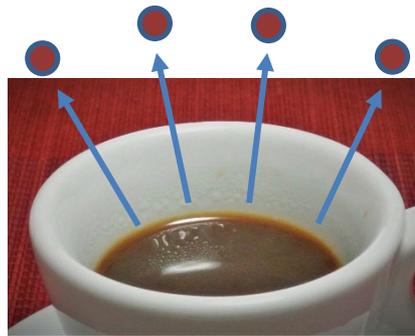
身の回りの蒸発現象の例： ブラックコーヒー



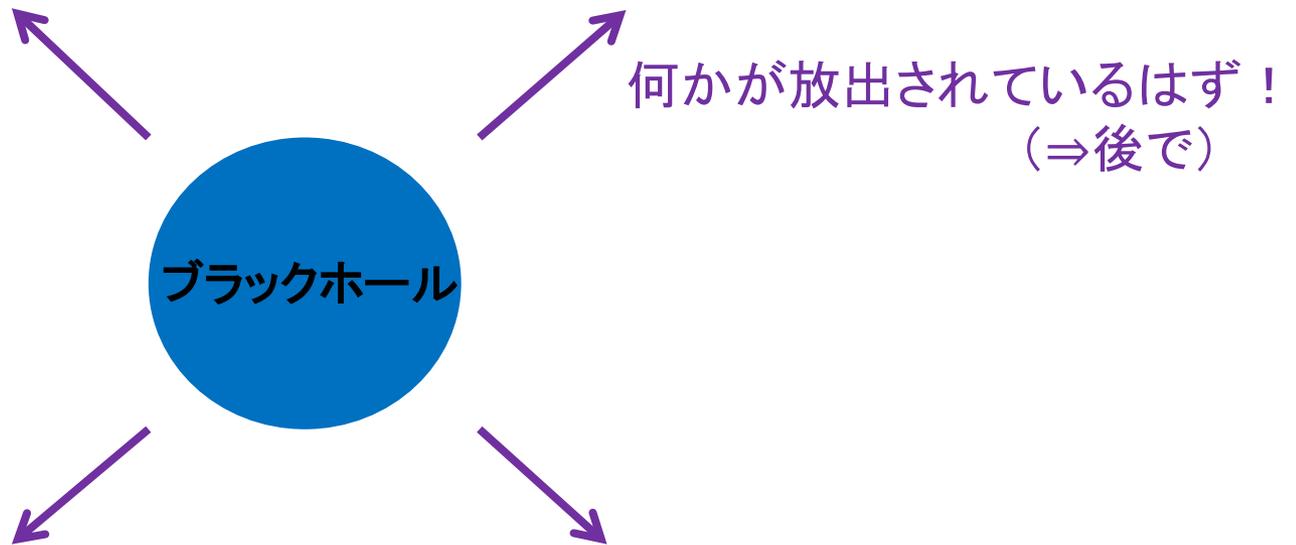
十分時間が経てば、



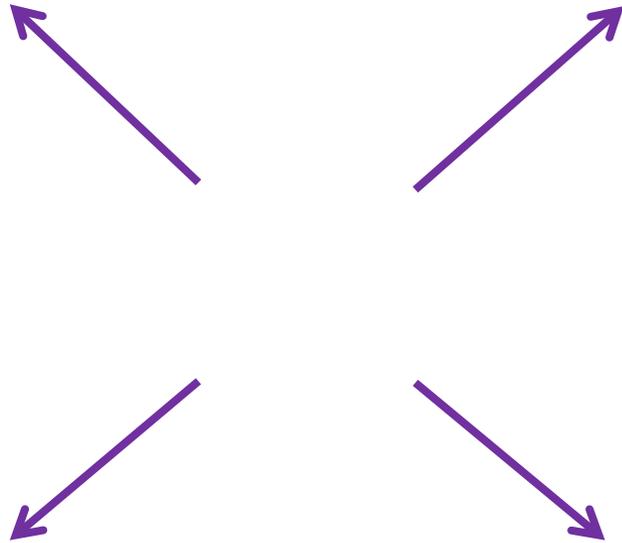
ブラックコーヒーは
蒸発する



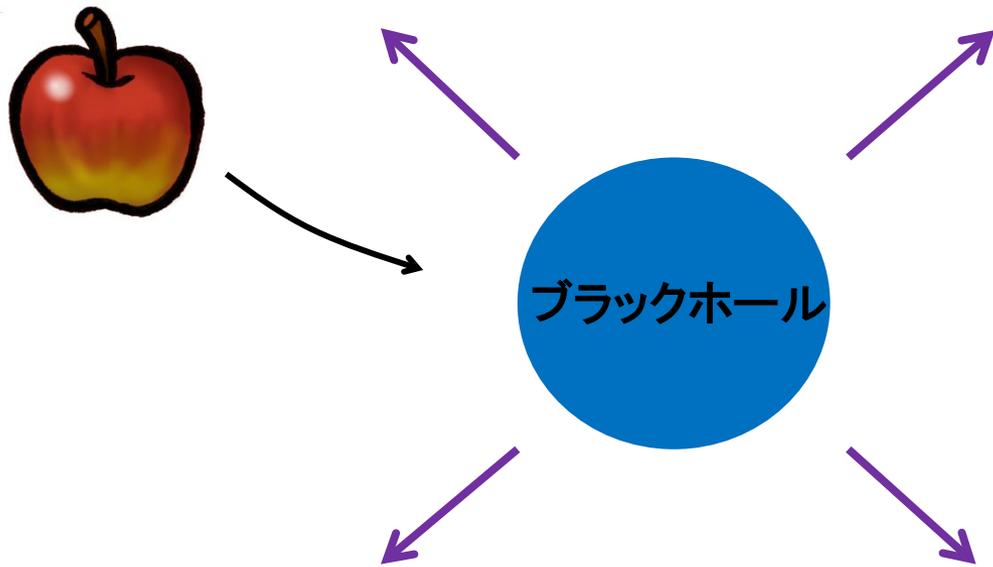
水分子+コーヒー成分
が外に出ていく



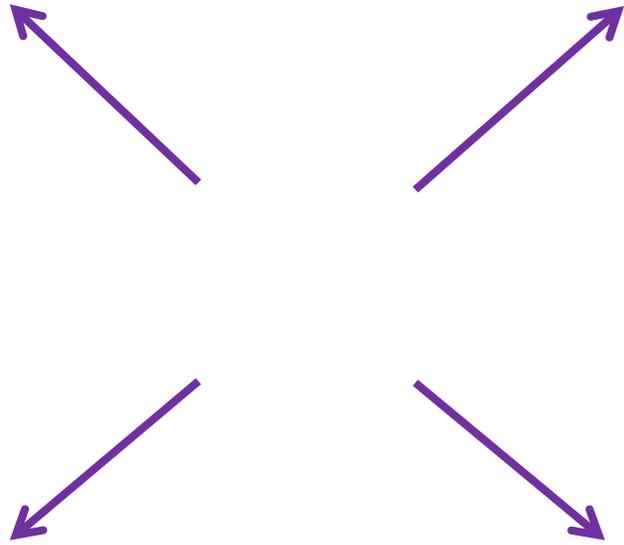
ブラックホールが蒸発しているとする
(⇒どうやって？⇒後で)



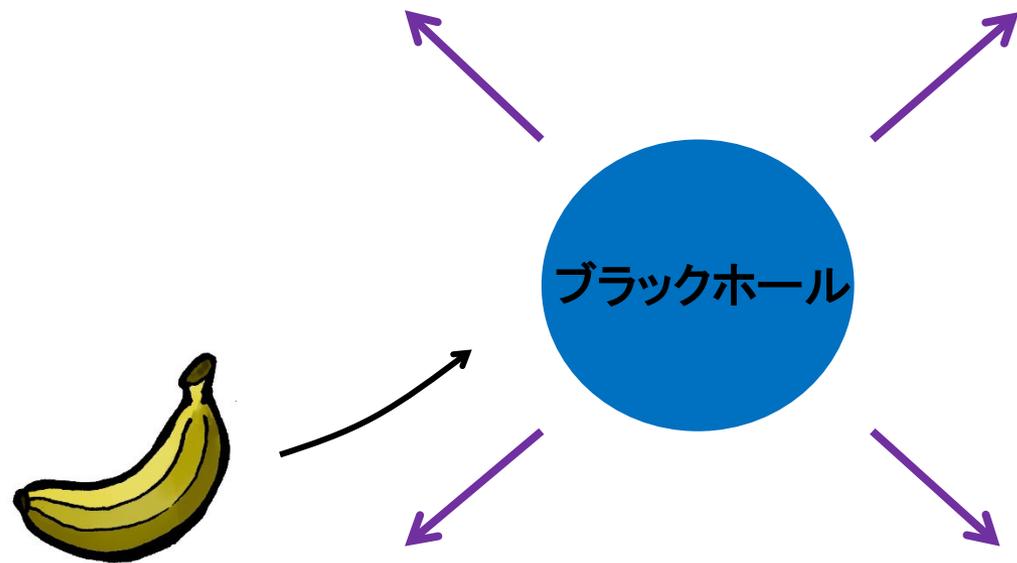
時間が経てば、完全に蒸発するとする



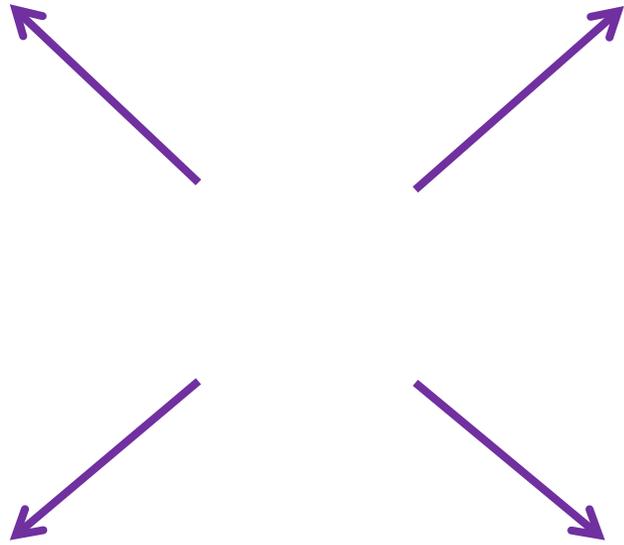
いま、リンゴをブラックホールに投げ入れて



完全に蒸発したとする

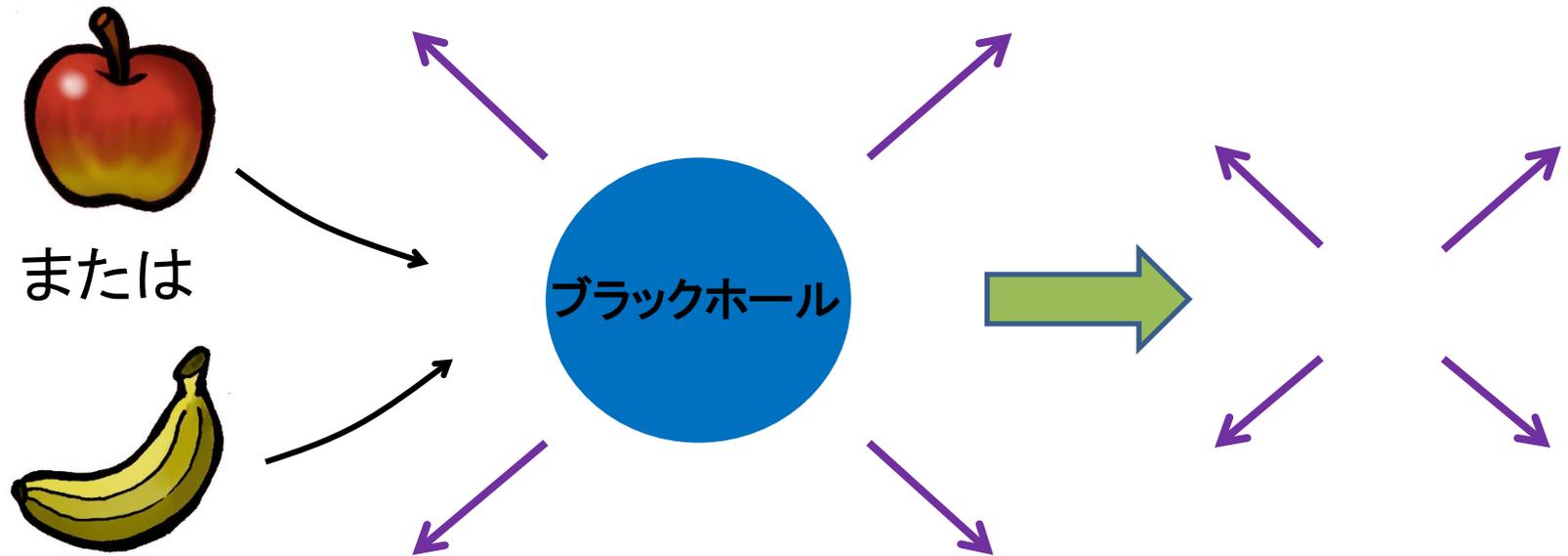


今度は、バナナをブラックホールに投げ入れて



完全に蒸発したとする

問題

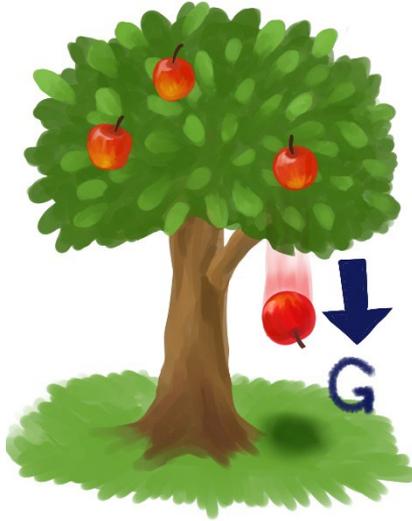


・蒸発後に、最初に入れたものがリンゴかバナナかを区別できるか？
つまり、放出された“何か”を調べることによって、最初に投げ入れた物体の情報を区別できるか？

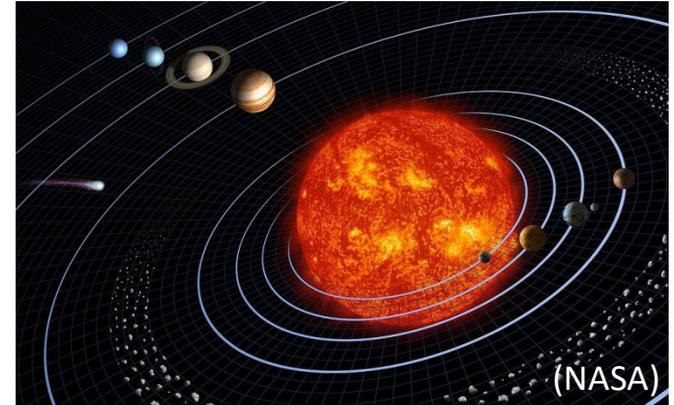
これを「情報問題」という

1. 重力と時空

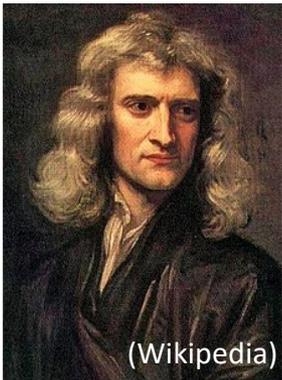
重力(万有引力)



リンゴの落下

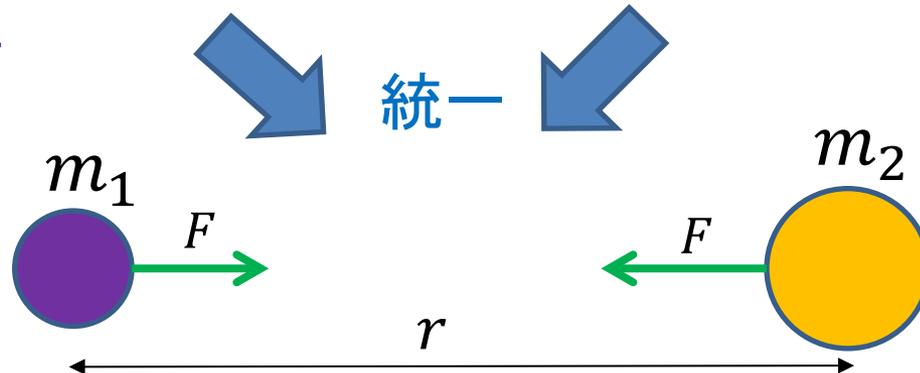


惑星の運動



(Wikipedia)

Isaac Newton
(1643~1727)



質量(重さ)は互いに引き合う

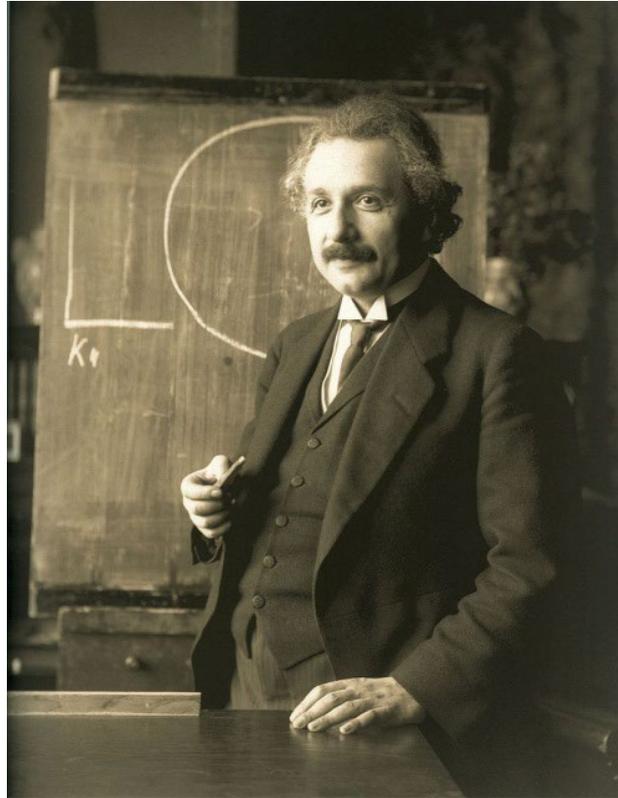
⇒でも、どうやって？

Newtonの
重力の法則

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

重いほど、近いほど、
重力は強い！

Albert Einstein



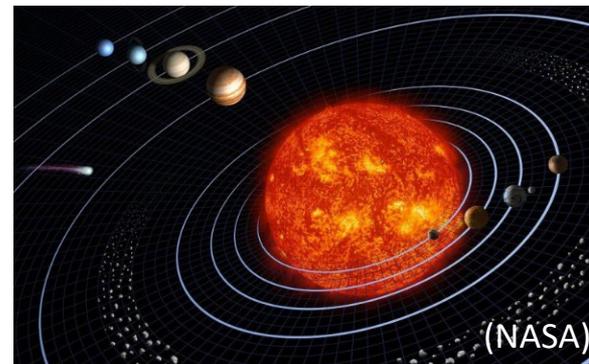
(Wikipedia)

(1879~1955)

一般相対性理論

⇒重力＝時空の幾何(曲がり)

Einstein
1916



一般相対性理論

⇒重力＝時空の幾何(曲がり)

Einstein
1916



Einstein方程式

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

光速: c =秒速30万キロ

時空の歪みが光や物質がどのように動くかを教える。

逆に、光や物質があると、時空が歪む。

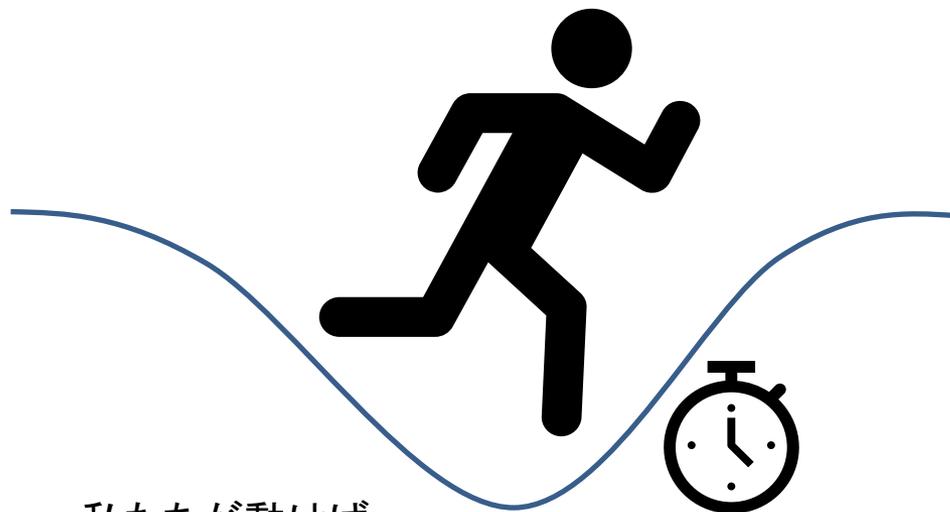
(注: 重力が強いと、時間がゆっくり進む。)

時空は物理的対象である ⇒時空は“箱”ではなく、“動くもの”だ

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



物が水面を叩く⇒水面のさざ波



私たちが動けば、
その周りの時間の流れ方が変化し、空間が曲がる！

⇒時空と物質は相互作用している！

2. 古典ブラックホール

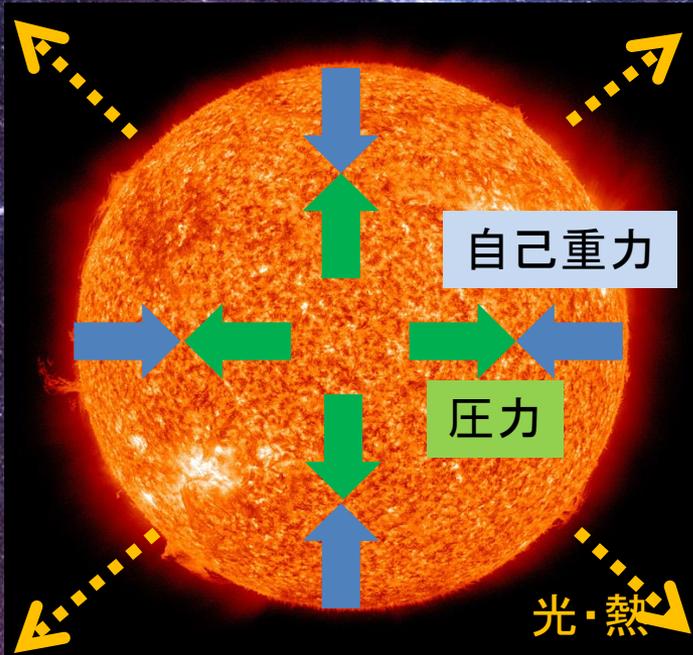
(意味: 量子力学の効果のない)

星の重力崩壊

復習

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

重いほど、近いほど、
重力は強い！



(Wikipedia)

1. 星は核燃料を燃やし、
圧力を生み、重力を支える

2. 燃料が消費しきると、
重力によりつぶれていく

3. 太陽の10倍程度の
重さの星ならば、完全
に崩壊し、ブラックホールになる

⇒ブラックホールは星から作られる！

(注：銀河の中心の巨大なブラックホールの起源は異なると考えられている)

古典ブラックホール

復習

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

時空の曲がり具合

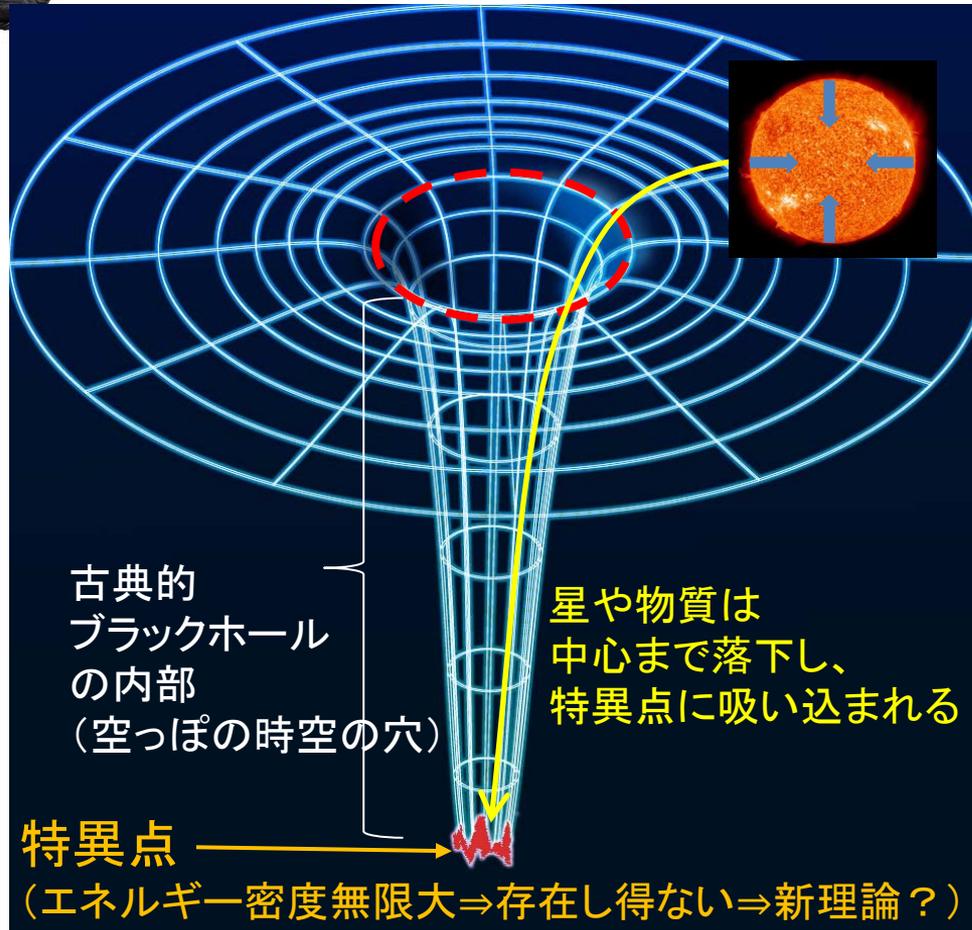
物質のエネルギー



重りがとても重く、
そして小さくなると……



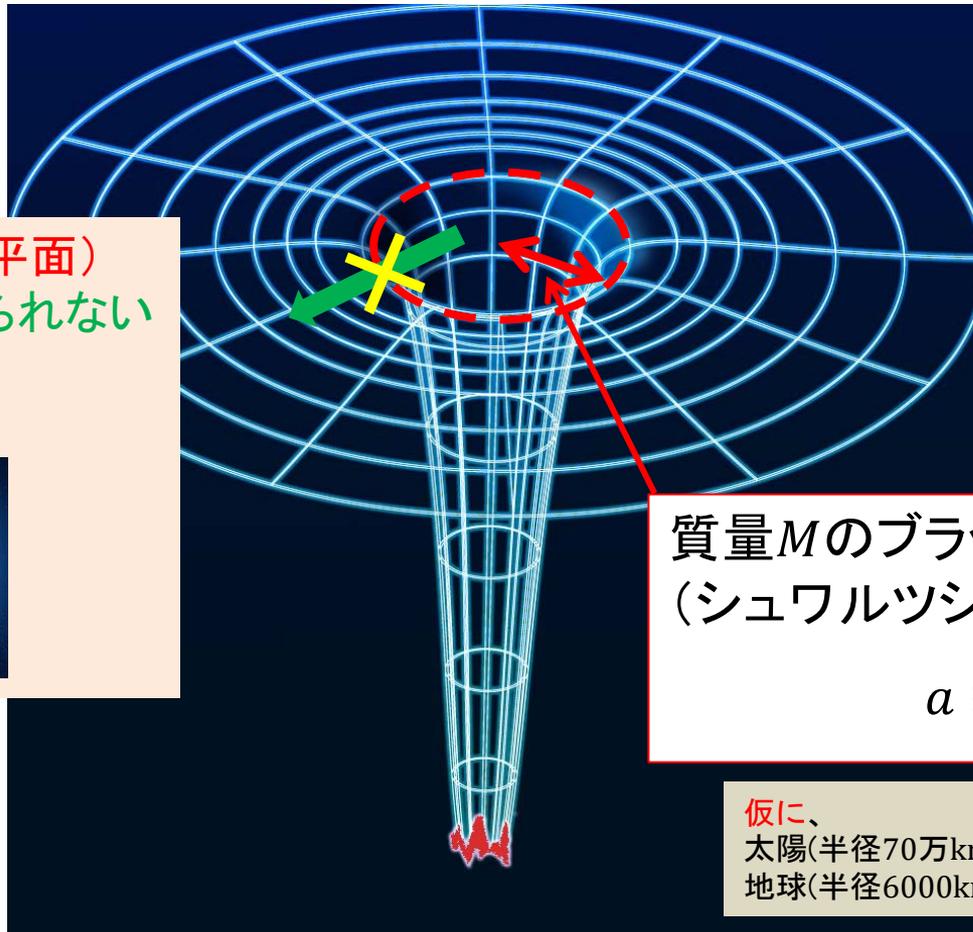
=



古典ブラックホール

- 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
⇒ ブラックホール



光速: c = 秒速30万キロ

質量 M のブラックホールの半径
(シュワルツシルト半径)

$$a \equiv \frac{2GM}{c^2}$$

仮に、
太陽(半径70万km)がBHになると $\Rightarrow a = 3\text{km}$
地球(半径6000km)がBHになると $\Rightarrow a = 1\text{cm}$

古典ブラックホールのまとめ

古典ブラックホール

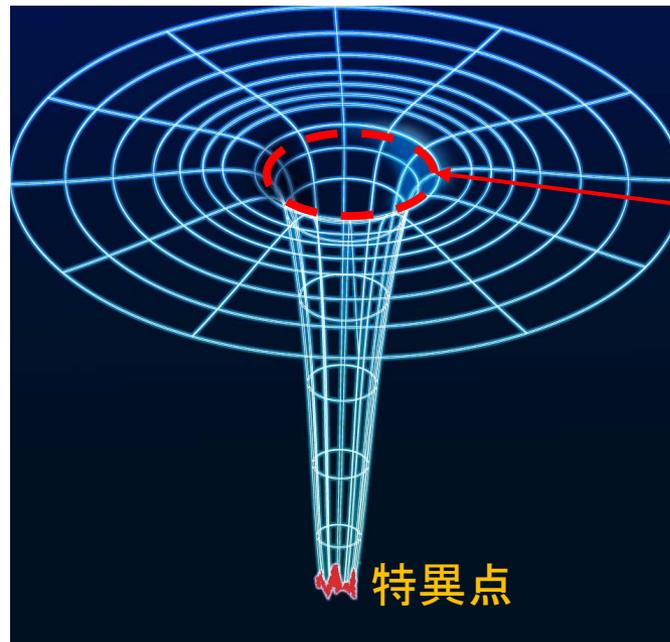
= **ホライズン**を持つ、回帰不可能な空っぽの時空の穴

⇒ 入った物体(星)は特異点に達し、永遠に閉じ込められる

⇒ 古典ブラックホールはただ大きくなる



=



質量 M のブラックホールの半径
(シュワルツシルト半径)

$$a \equiv \frac{2GM}{c^2}$$

しかし、話はそう単純ではない

先に進む前に、質問 & 休憩タイムです (約3分)



3. 量子力学

量子的状态

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

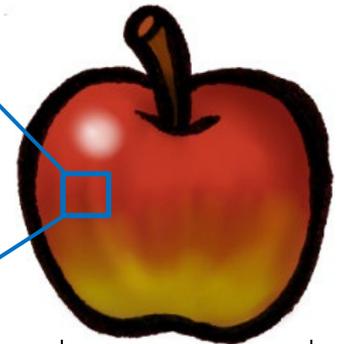


⇒物質の状态は“**ゆらいでいる**”

例：
水素原子の大きさ
 $\sim 10^{-10}m$



大きいものは
「古典力学」に従う



リンゴ
 $\sim 10^{-1}m$

量子的状态

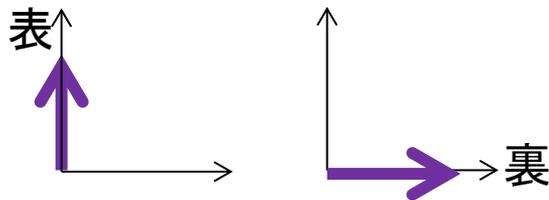
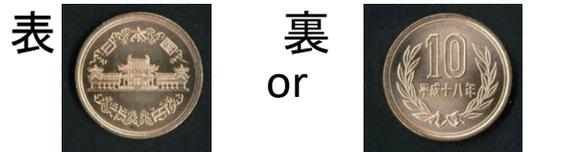
量子力学＝原子などのミクロな世界を記述する法則
⇒物質は粒子と波の両性質を持つ新しいあるもの



⇒物質の状態は“ゆらいでいる”

例：“量子的な10円硬貨”

古典的な状態

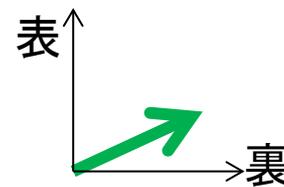


表か、裏のどちらか

量子的状態の例

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

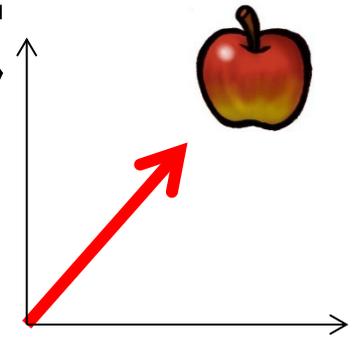
(wikipedia)



表でも、裏でもある状態
(重ね合わせの状態)

Schrodinger方程式

- リンゴの状態も“矢印”で表される



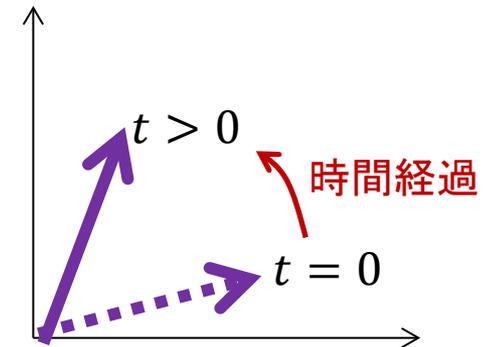
- Schrodinger方程式 = 量子力学の運動方程式

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

～状態がどのように時間変化するか

～“矢印”がどのように動くか

～ある時刻の“矢印”が最初の時刻でどの“矢印”から出発したのかがわかる



⇒ 量子的状態(矢印)が「情報」であり、

Schrodinger方程式は「情報の保存」を意味している

4. 情報問題

Stephen Hawking



(Wikipedia)

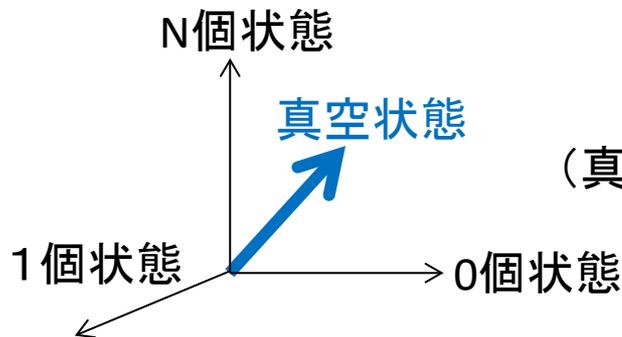
(1942~2018)

真空は何もないわけではない

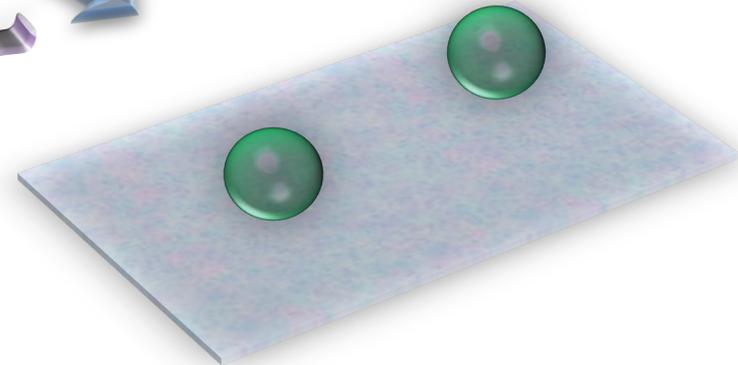
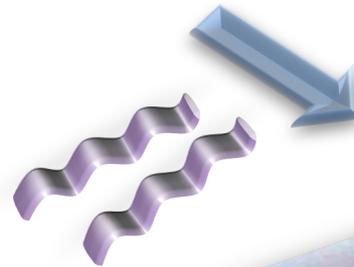
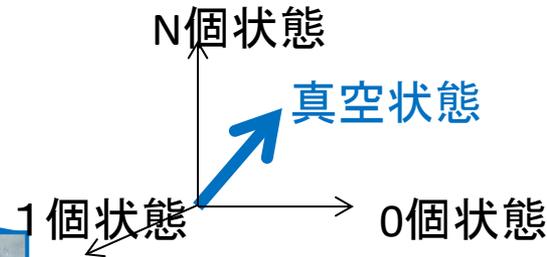
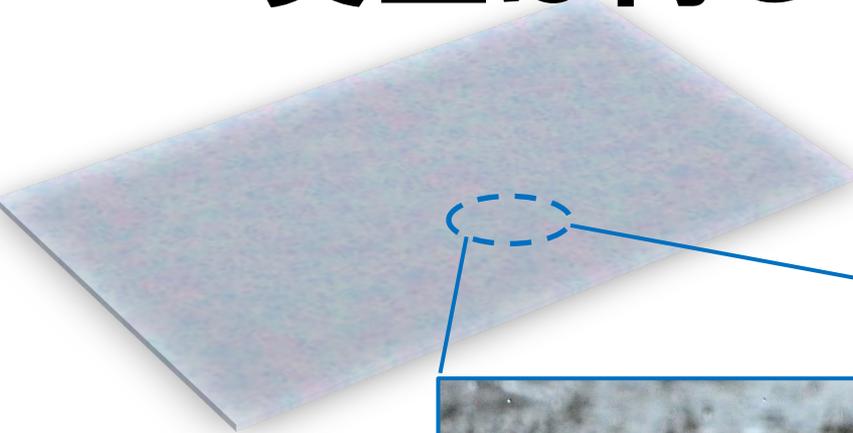


しかし、量子力学のミクロな世界では、
粒子のある状態とない状態が揺らいでいる

$$(\text{真空状態}) = (\text{粒子が0個の状態}) + (\text{粒子が1個の状態}) + \dots + (\text{粒子がN個の状態}) + \dots$$



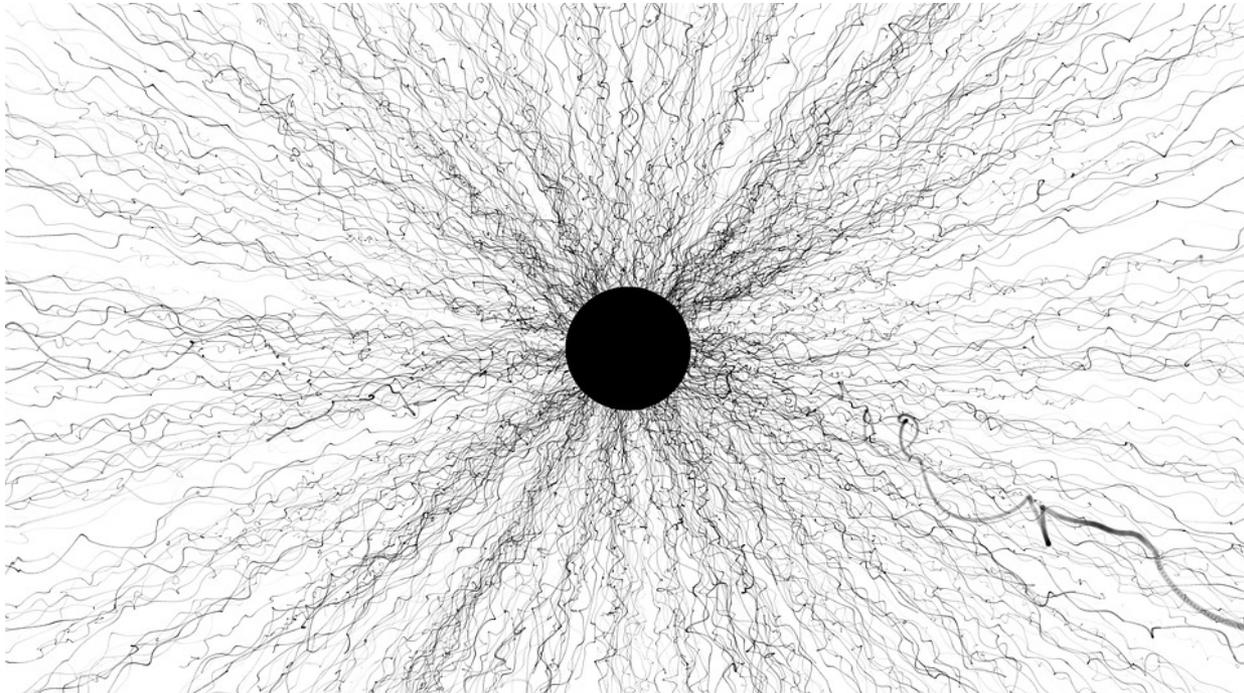
真空は何もないわけではない



もし重力が大きく変化すると、
実際に、**粒子**が作られることがある！
(真空からの粒子生成)

Hawking 輻射

- Hawkingは、1974年に理論的に次を導いた：
「ホライズン近くの真空の量子力学的なゆらぎにより、ブラックホールはエネルギーを光として、ゆっくり放出している」
(Hawking輻射という)



(注: 実験・観測による確認は未だにない)

ブラックホールは蒸発する

ブラックホールは光としてエネルギーを捨てる

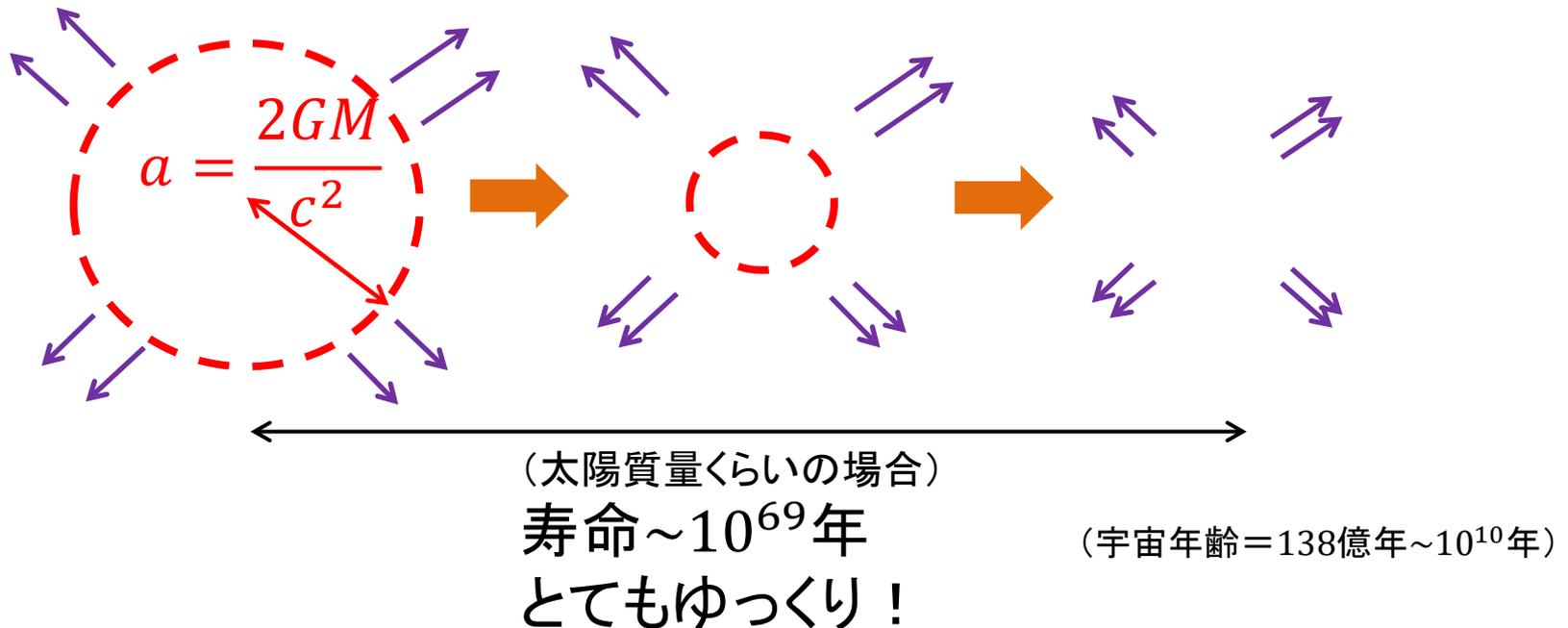
Einsteinの公式

$$E = mc^2$$

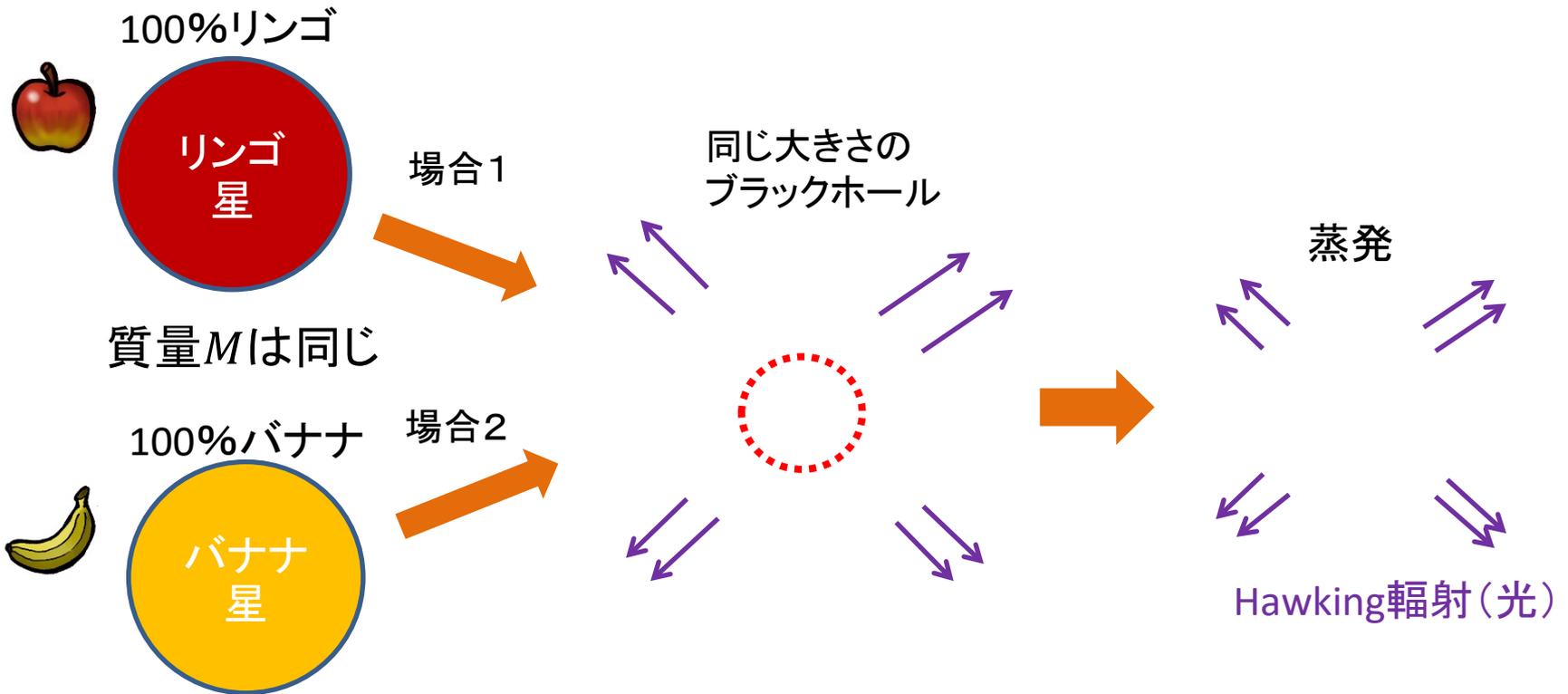
エネルギー = 質量

⇒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消えてしまう！

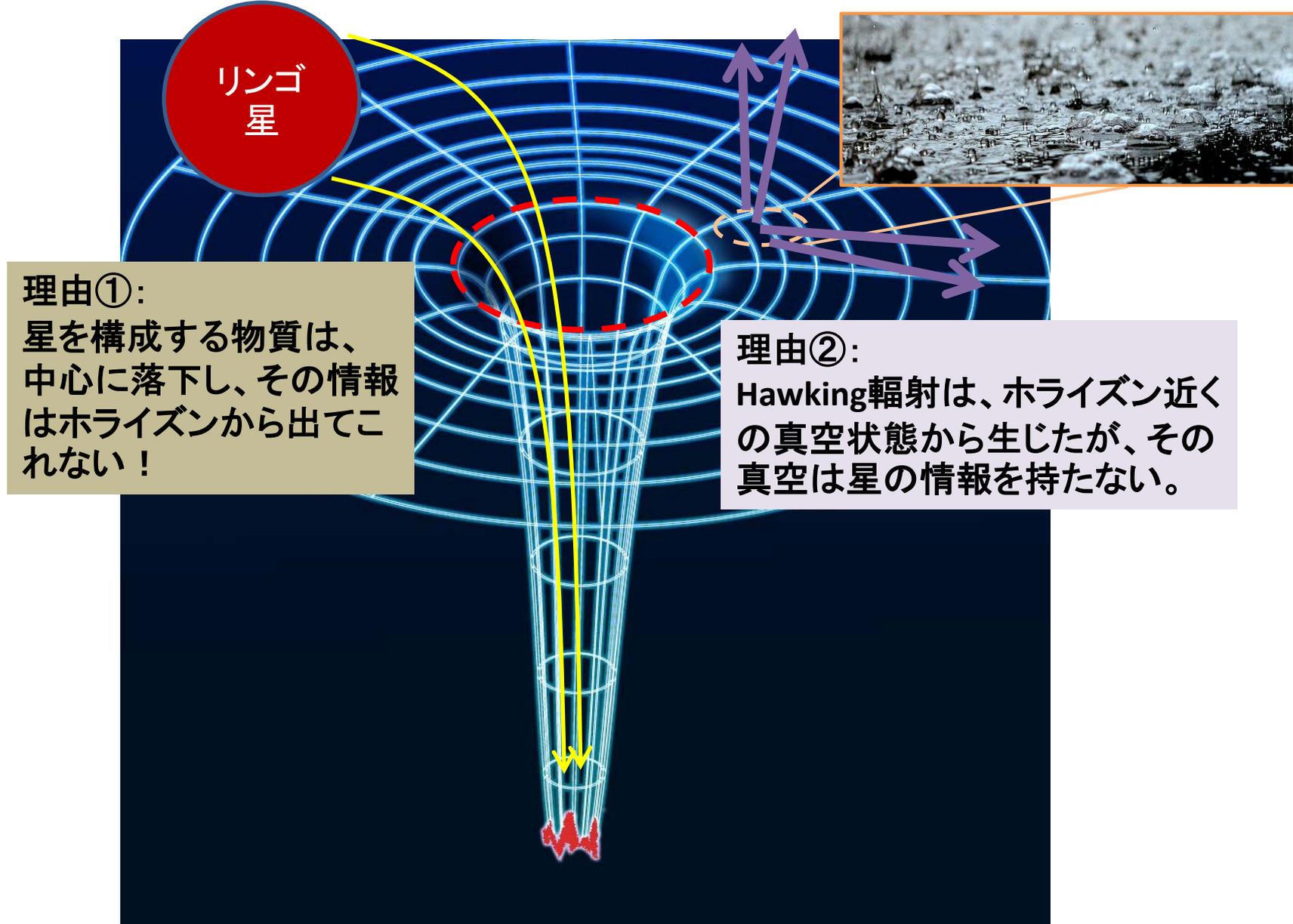


情報問題・再



⇒蒸発後に、Hawking放射を調べることで、最初がリンゴ星とバナナ星のどちらだったかわかるだろうか？

No! 区別できない！（当時の考え）



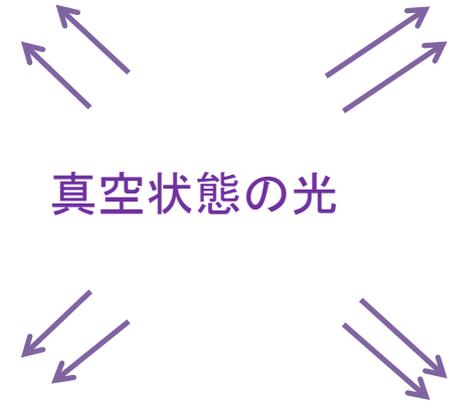
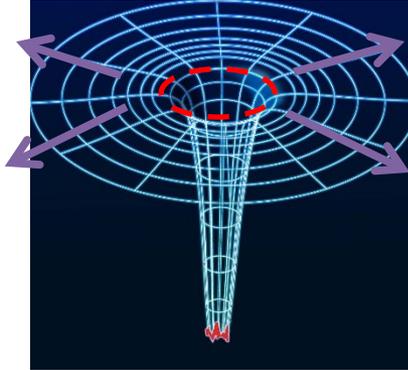
情報問題の意味

- 古典ブラックホール + Hawking 輻射



リング
星

リング状態
(本当の初期状態)



真空状態の光

⇒中に入れた物のエネルギーは戻ってくるが、
その情報は消える！

⇒「情報保存の法則」に反する

⇒(このままでは)古典ブラックホールは量子力学と矛盾！

(一般相対論VS量子力学)

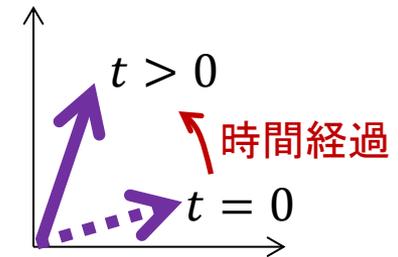
⇒実際には、情報は必ず保存するはず！！

⇒何かが間違っている・・・でも、どこが？(未解決問題)

(世界中の研究者たちが様々な手法で奮闘中！)

復習: Schrodinger 方程式

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



⇒情報の保存

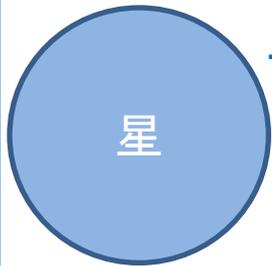
5. 量子ブラックホール

ここからは僕の研究です

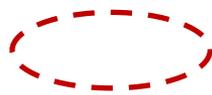
僕の疑問

ここまでの話

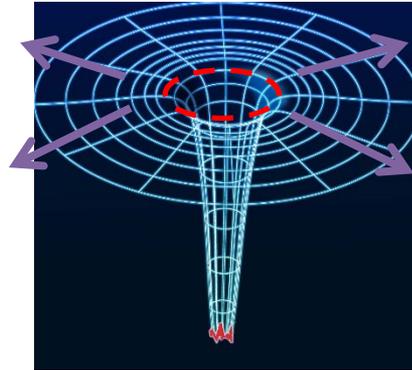
星の崩壊



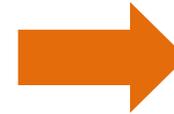
一般相対論



古典ブラックホール

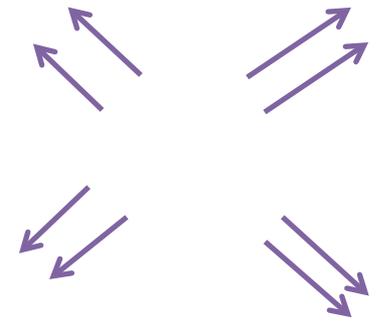


一般相対論



量子力学

蒸発⇒情報喪失



⇒本当にこれはできるのか？

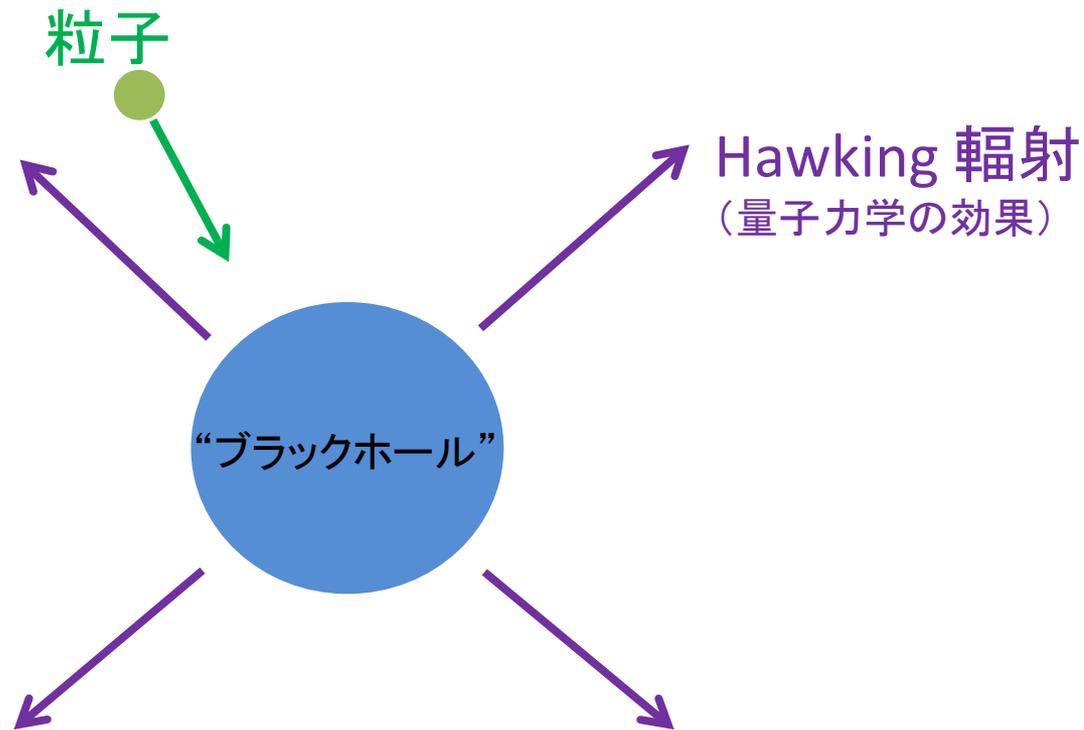
⇒そこで僕はもう一度、一般相対論 + 量子力学を解きました。

$$\begin{cases} G_{\mu\nu} = 8\pi G \langle \Psi | \hat{T}_{\mu\nu} | \Psi \rangle \\ i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi\rangle = \hat{H} |\Psi\rangle \end{cases}$$

注: 重力は古典的に扱っている

基本アイデア (1/3)

蒸発している“ブラックホール”に粒子を投げ入れてみる



⇒粒子はどうなる？

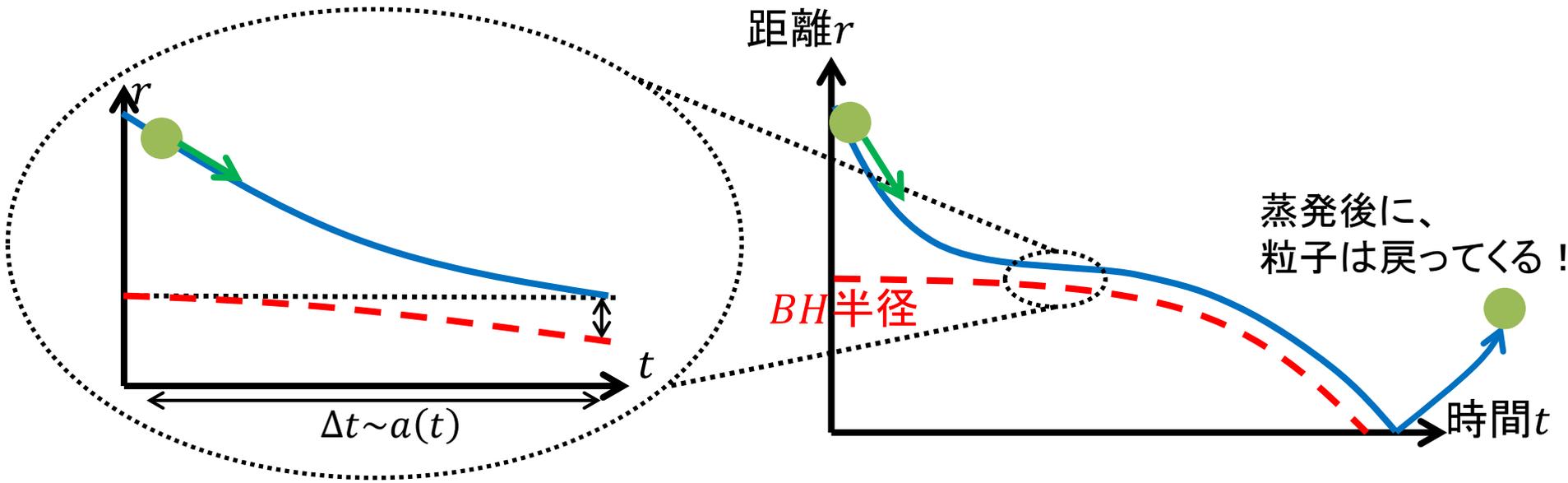
基本アイデア (2/3)

⇒粒子は“ブラックホール”の中に入らない！

Kawai, Matsuo, and Yokokura, *Int.J.Mod.Phys.A* 28 (2013) 1350050
<https://doi.org/10.1142/S0217751X13500504>

理由:

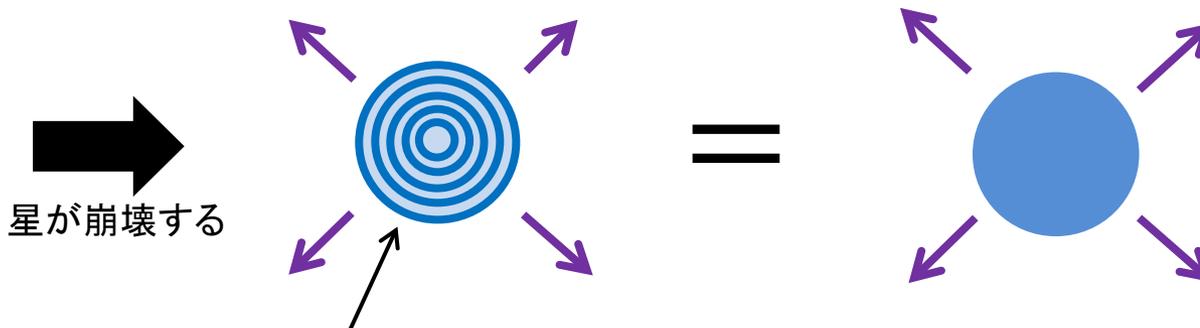
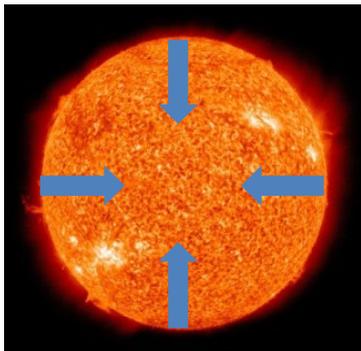
ブラックホールの蒸発変化と粒子の運動変化を同時に考えると、
粒子がブラックホールに近づく時間の間に、ブラックホールは蒸発によって小さくなるため、粒子は追いつかない。



基本アイデア (3/3)

Kawai and Yokokura, *Phys.Rev.D* 93 (2016) 4, 044011

<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.044011>



ホライズンのない
蒸発している高密度な星になる。
ただし外から見ると古典ブラックホール
とほとんど同じ！

これが量子ブラックホールである



=

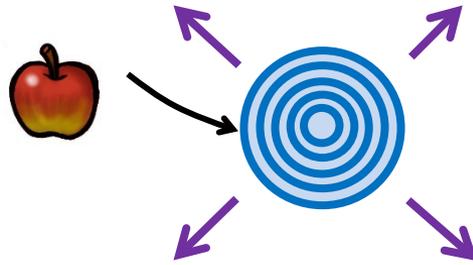


内部の時空を表す解

$$ds^2 = -\frac{2\sigma}{r^2} e^{-\frac{R^2-r^2}{2\sigma\eta}} dt^2 + \frac{r^2}{2\sigma} dr^2 + r^2 d\Omega^2$$

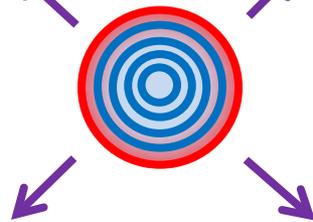
結局、リンゴの情報はどうなる？

- 量子ブラックホールは内部に構造を持つ



⇒量子ブラックホールはリンゴの情報を保つ

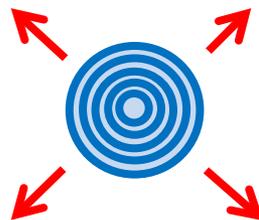
Kawai and Yokokura, *Universe* 6 (2020) 6, 77
<https://doi.org/10.3390/universe6060077>



⇒リンゴの情報は蒸発と共に戻ってくるだろう (予想)

ただし、一見するとリンゴに見えない形で。

(現在研究中)



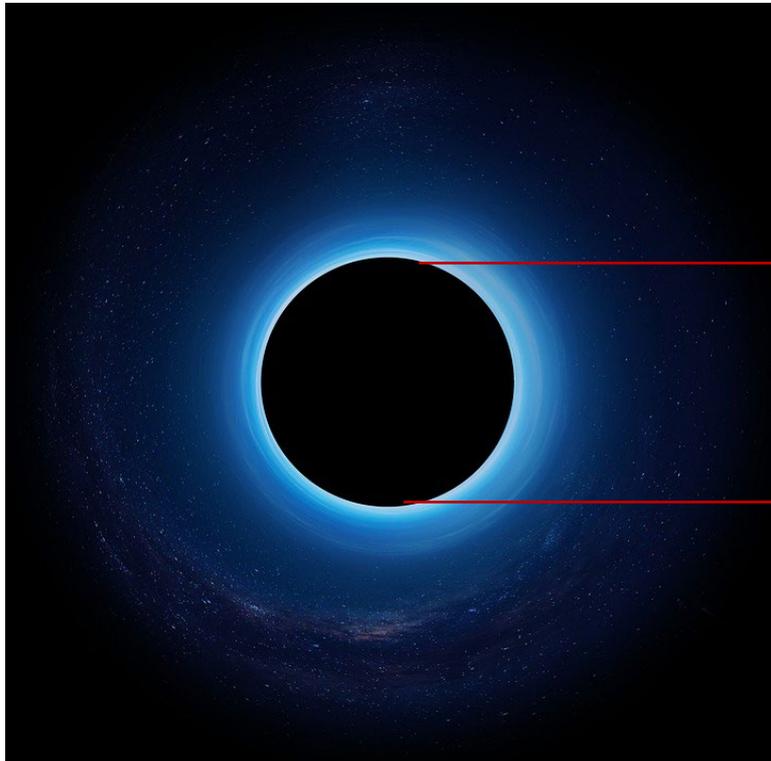
Kawai and Yokokura, *Phys.Rev.D* 93 (2016) 4, 044011
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.044011>

僕の量子ブラックホールのまとめ

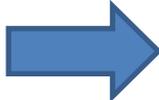
量子ブラックホール

= 物質が詰まった、蒸発している高密度な星

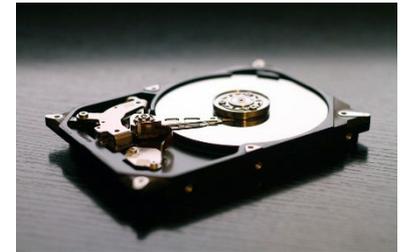
= 最大容量の情報とエネルギーを蓄えるデバイスになりうる? !



?



1000年後



未来へ

- Einstein「時空は物理的対象である」
- 情報問題「物質の情報はどこへ？」
- ブラックホールは宇宙で最も極限的領域
⇒時空と物質の融合が関係しうる
⇒ ブラックホールの中から「宇宙の始まり」
を探求できるかもしれない

ありがとうございました！