

量子多体力オスとブラックホール諸問題

- 2015 Chaos in quantum channels (with Hosur, Qi, and Roberts) (JHEP)
- 2017 Efficient decoding for Hayden-Preskill protocol (with Kitaev)



- 物理学会誌 2019年10月号に解説記事

吉田 紅 (ペリメター理論物理研究所)

ブラックホール情報損失問題

- 量子力学と一般相対性理論は不整合？

ブラックホール情報損失問題

- 量子力学と一般相対性理論は不整合？
 - (a) 量子力学 「情報」は決して失われない。

$$|\psi(t)\rangle = e^{-iHt}|\psi(0)\rangle$$

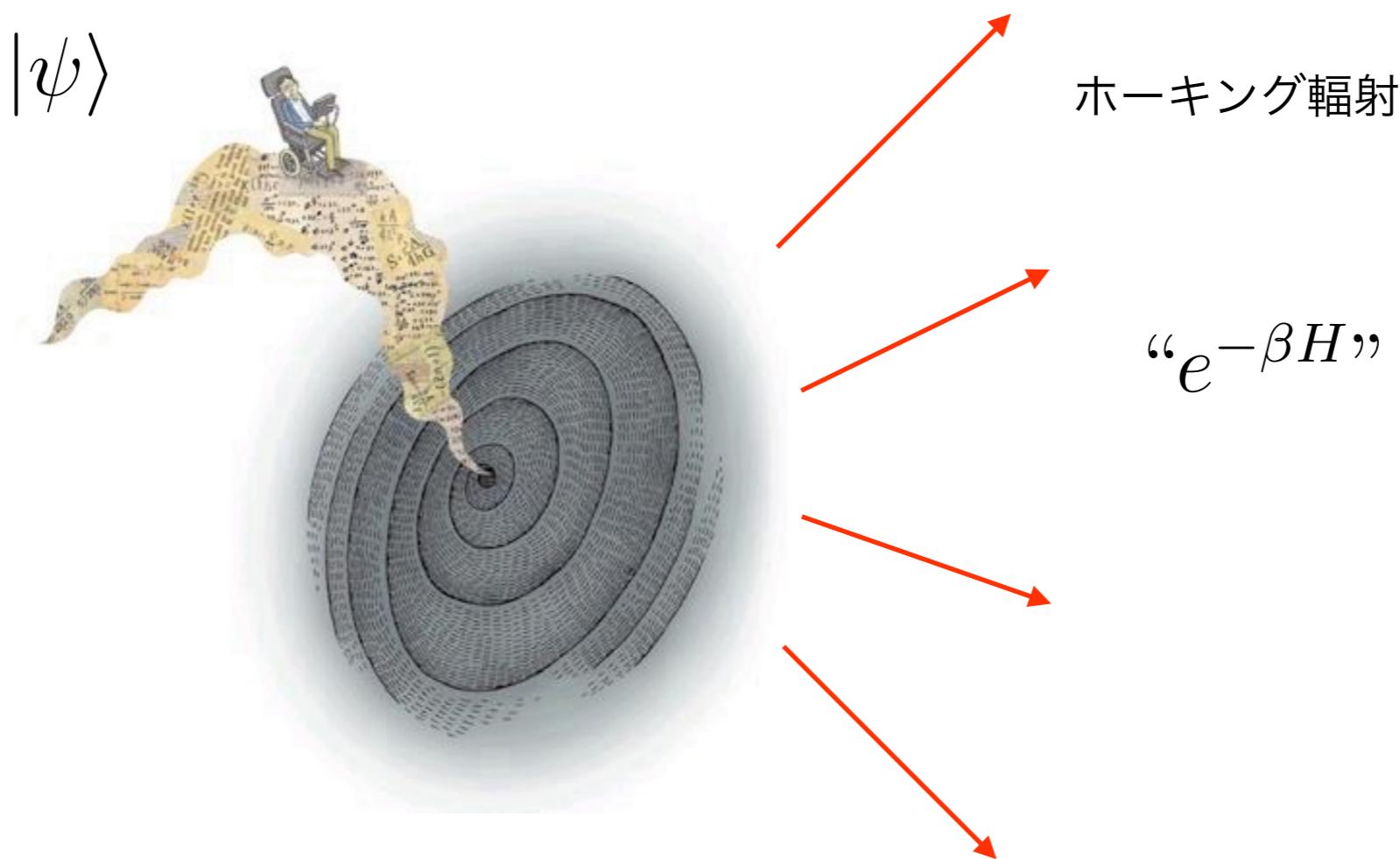
ブラックホール情報損失問題

- 量子力学と一般相対性理論は不整合？

(a) 量子力学 「情報」は決して失われない。

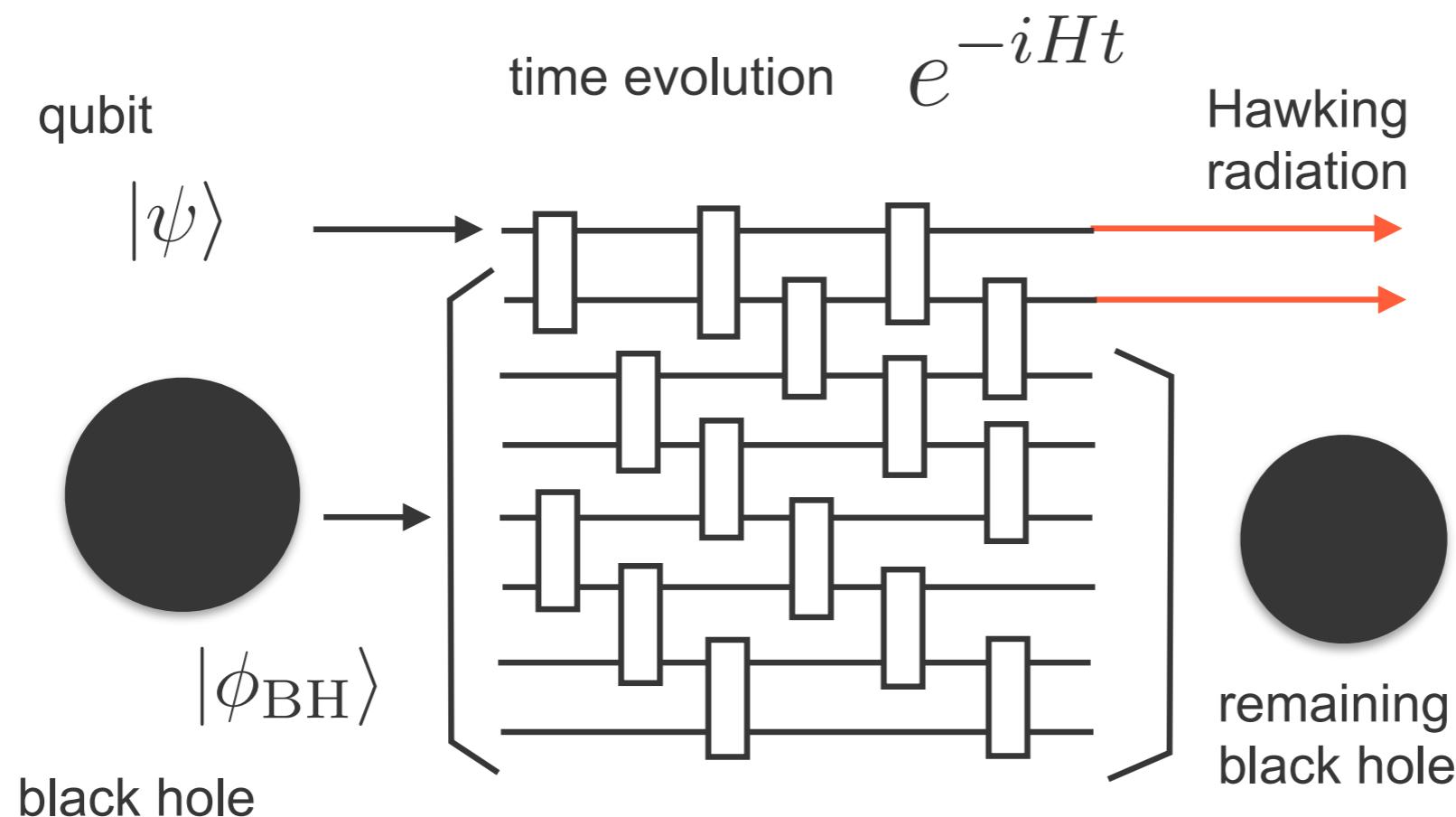
$$|\psi(t)\rangle = e^{-iHt}|\psi(0)\rangle$$

(b) 一般相対性理論 ブラックホールは「情報」を壊してしまう？



なぜ量子情報理論？

- 情報損失問題 = “物理系における情報理論的な問題”

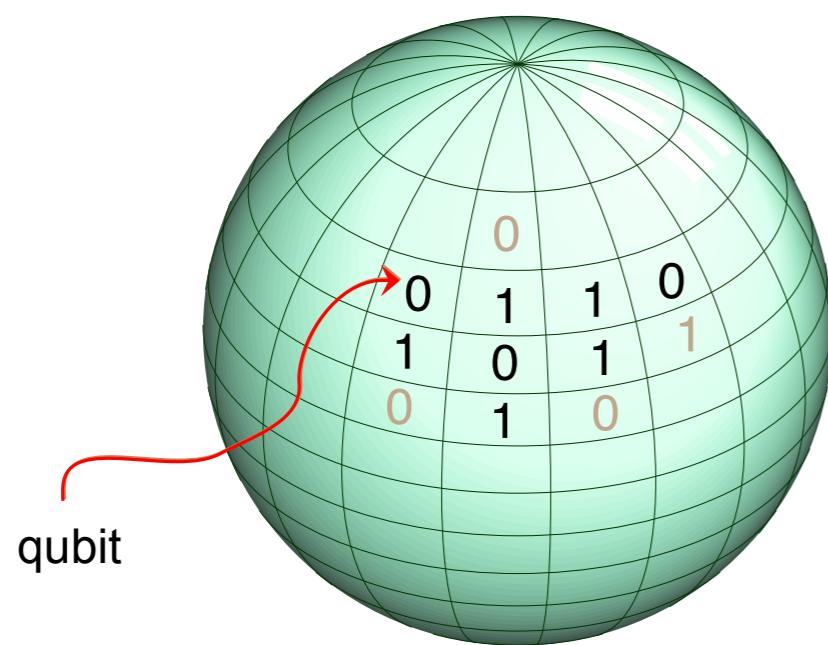


量子情報理論家にとっての「ブラックホール」

結論！

- 量子多体力オス（量子情報スクランブリング）という現象によって、「なぜ情報がブラックホールから出てくるのか」が証明できる。

仮定



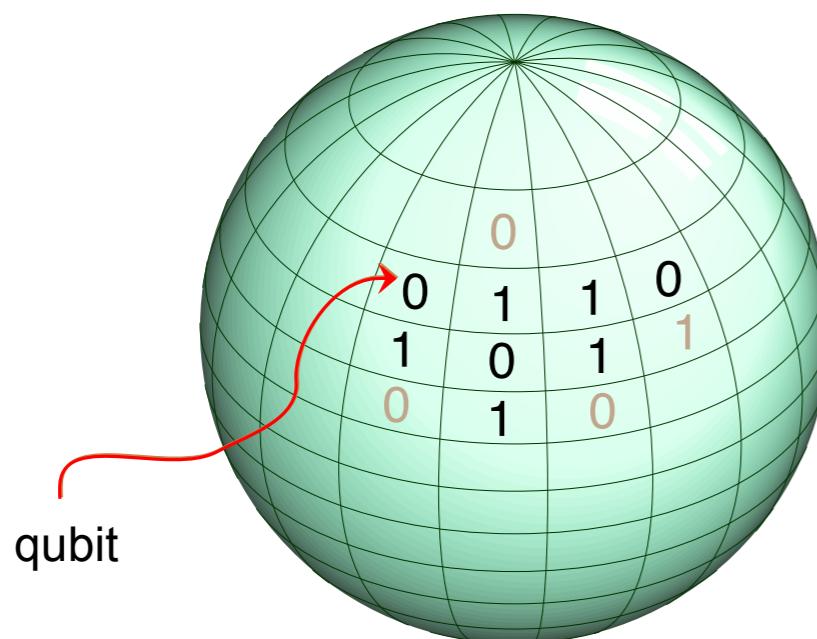
=

有限次元のLocalな量子力学系！

仮定

- ブラックホールのユニタリー性

ブラックホールがユニタリーであっても、特に「矛盾」はない。



=

有限次元のLocalな量子力学系！

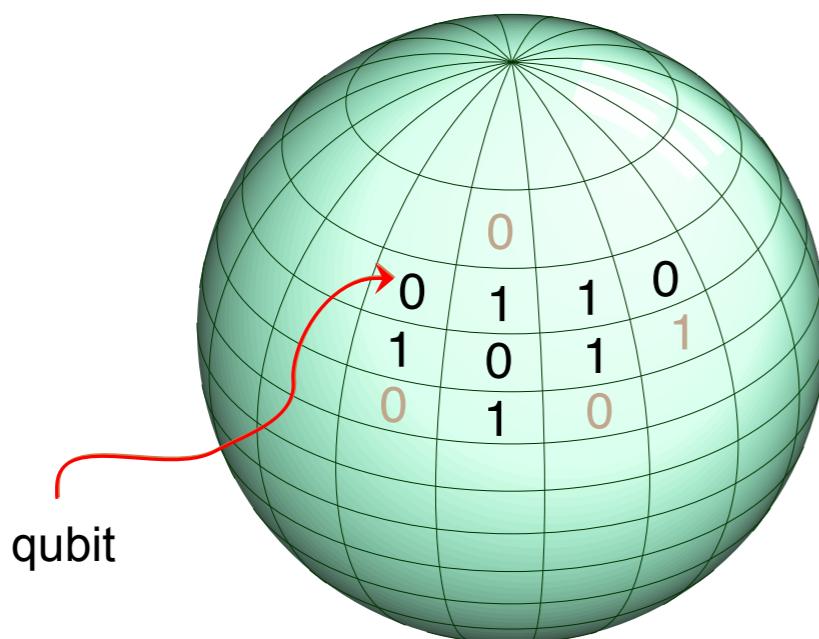
仮定

- ブラックホールのユニタリー性

ブラックホールがユニタリーであっても、特に「矛盾」はない。

- Bekenstein-Hawking エントロピー

ブラックホールのエントロピーは有限である。



=

有限次元のLocalな量子力学系！

仮定

- ブラックホールのユニタリー性

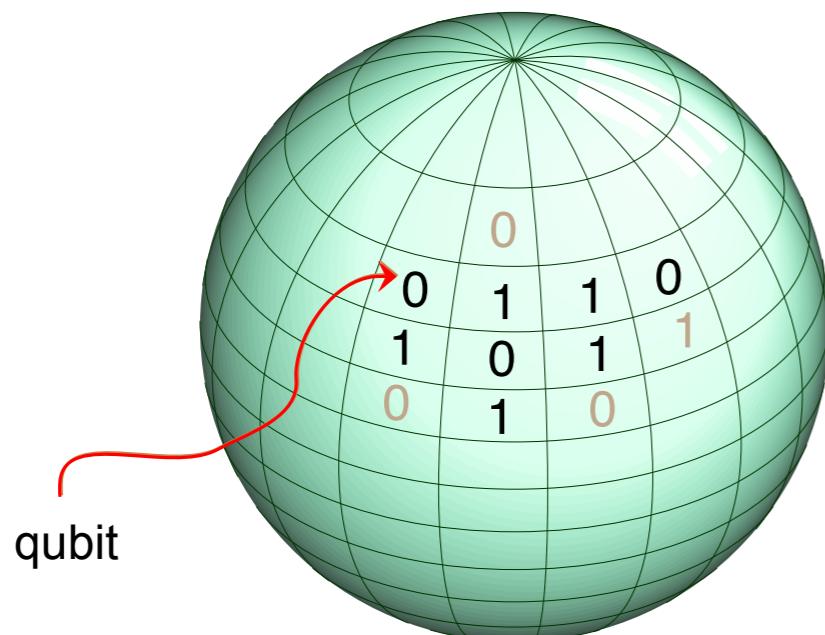
ブラックホールがユニタリーであっても、特に「矛盾」はない。

- Bekenstein-Hawking エントロピー

ブラックホールのエントロピーは有限である。

- Locality (局所性)

Non-local (非局所) な相互作用は存在しない。



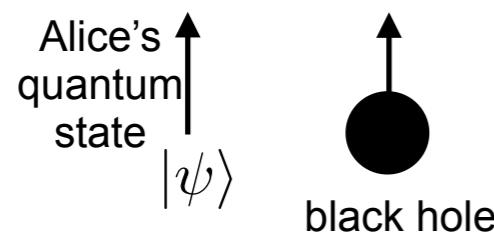
=

有限次元のLocalな量子力学系！

思考実験とToy Model

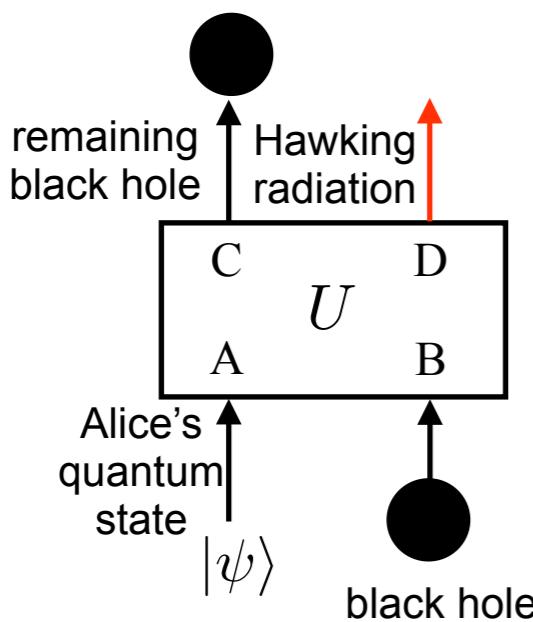
Pageの思考実験

- Aliceが量子状態をブラックホール (*n qubits*) に投げ入れる。Bobは、その量子状態をホーキング輻射から再構築しようとする。



Pageの思考実験

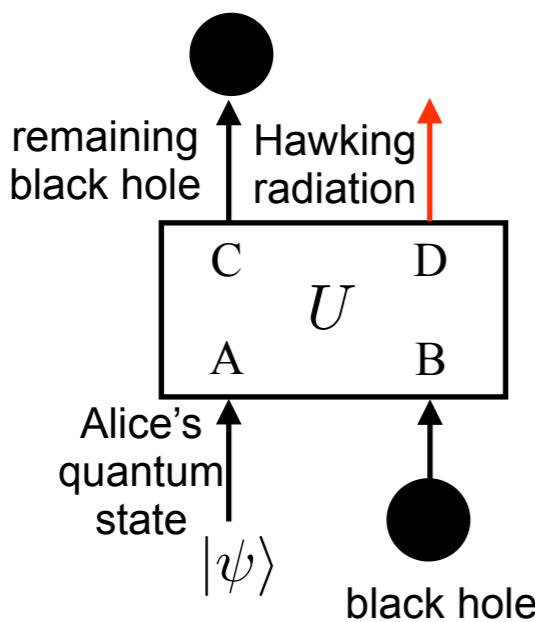
- Aliceが量子状態をブラックホール (*n qubits*) に投げ入れる。Bobは、その量子状態をホーキング輻射から再構築しようとする。
- もしブラックホールのユニタリー発展演算子Uが、"Chaotic"で"Random"であれば、ブラックホールが約半分 (*n/2 qubits*) になれば、Bobは量子状態を再構築することが可能となる。



Pageの思考実験

- Aliceが量子状態をブラックホール (*n qubits*) に投げ入れる。Bobは、その量子状態をホーキング輻射から再構築しようとする。
- もしブラックホールのユニタリー発展演算子 U が、"Chaotic"で"Random"であれば、ブラックホールが約半分 (*n/2 qubits*) になれば、Bobは量子状態を再構築することが可能となる。

• パラドックス

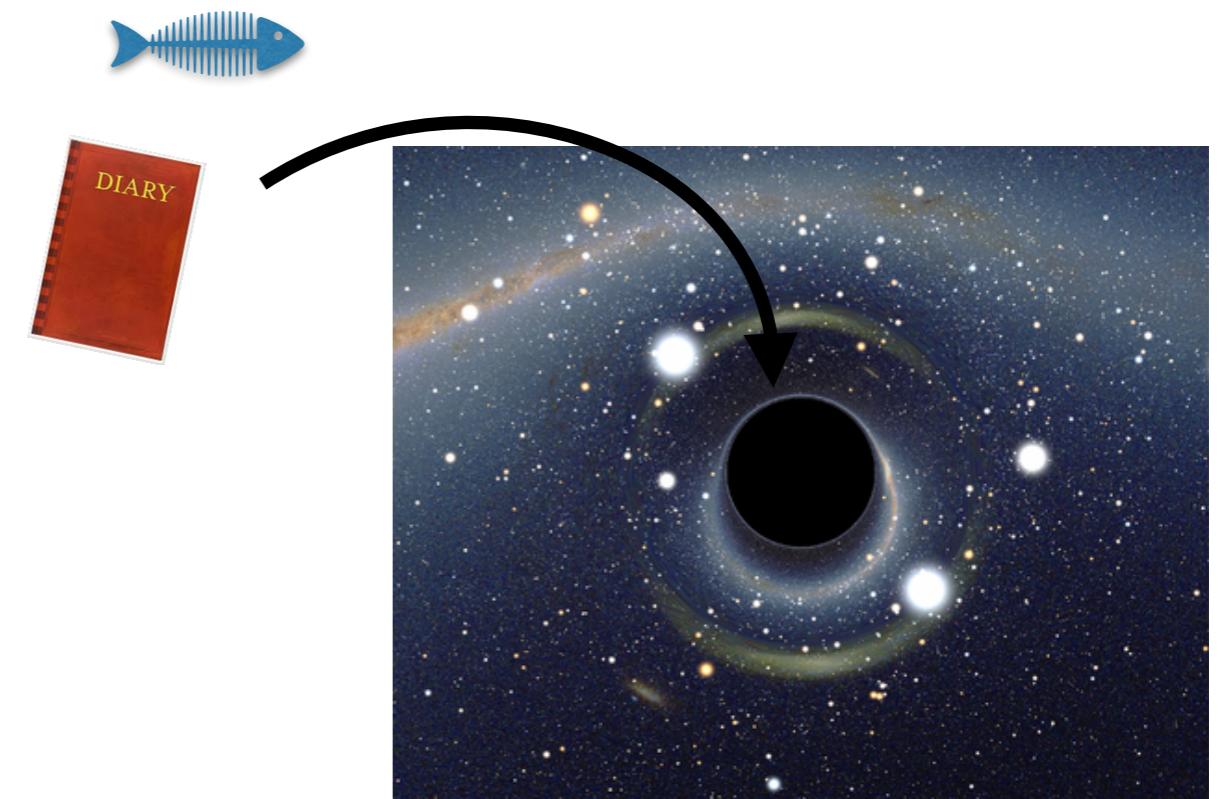


外の観測者：量子状態を再構築できる。

中の観測者：元々の量子状態が存在している。

No cloning theorem (クローン禁止定理) に反する？

Hayden-Preskill思考実験



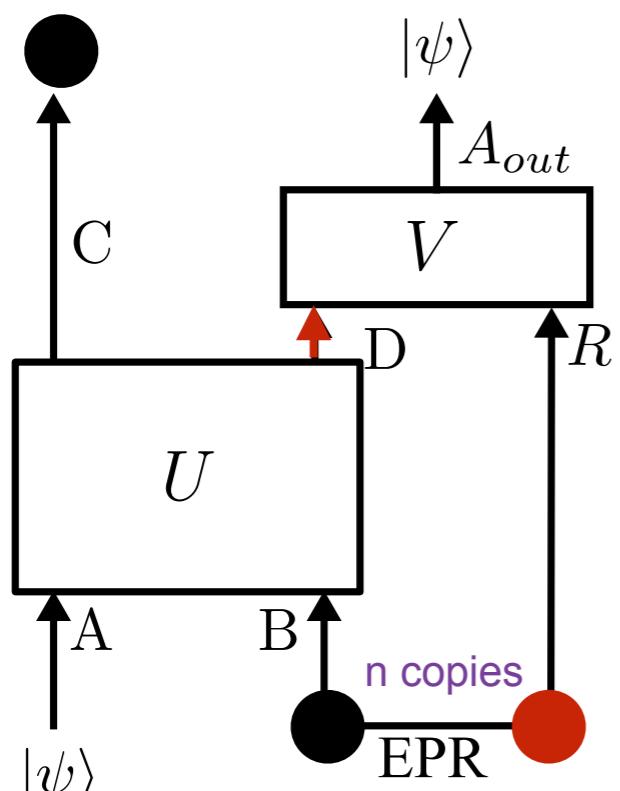
Hayden-Preskill思考実験

- Aliceは量子状態を「古いブラックホール」に投げ入れる。

C : Remaining BH

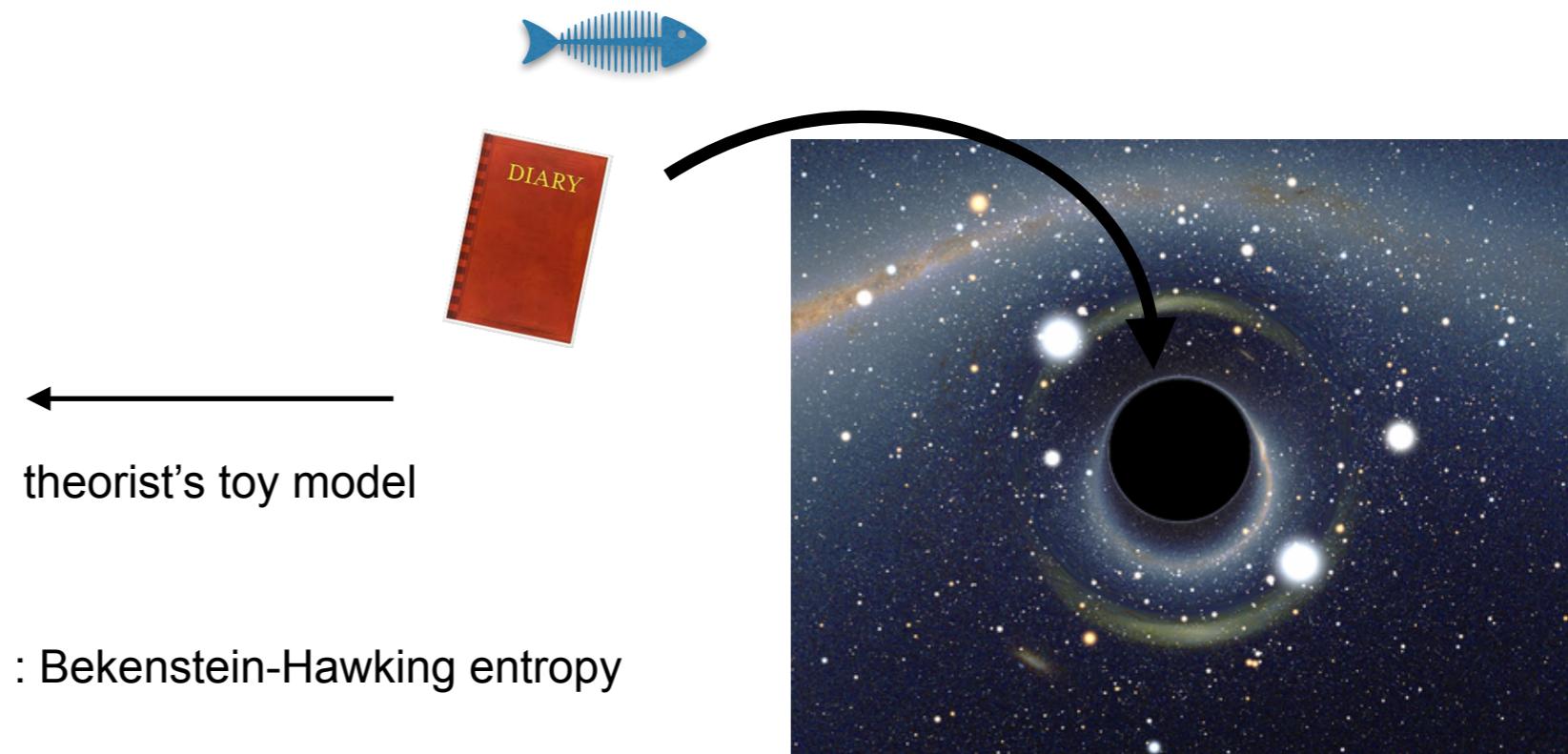
D : Late radiation

R : Early radiation



n : Bekenstein-Hawking entropy

(maximally entangled)



Hayden-Preskill思考実験

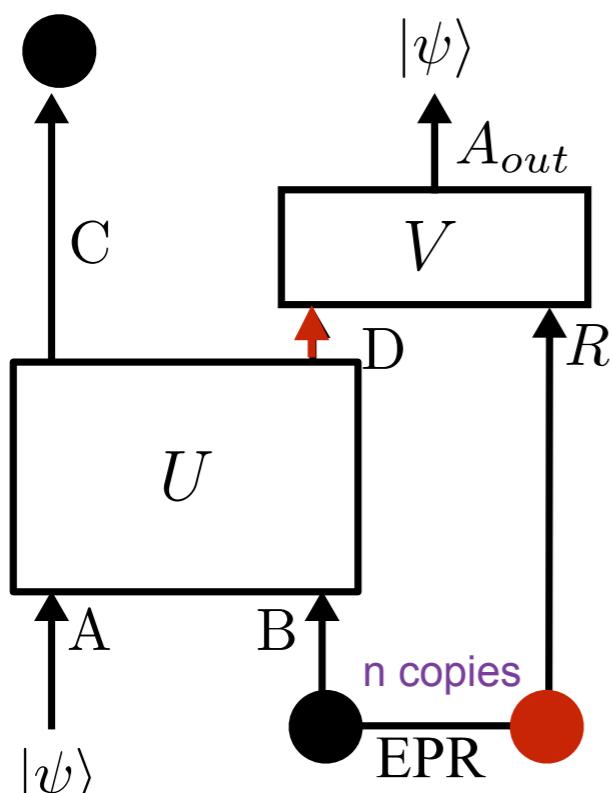
- Aliceは量子状態を「古いブラックホール」に投げ入れる。

Bob has an access to **both** early and late radiations !

C : Remaining BH

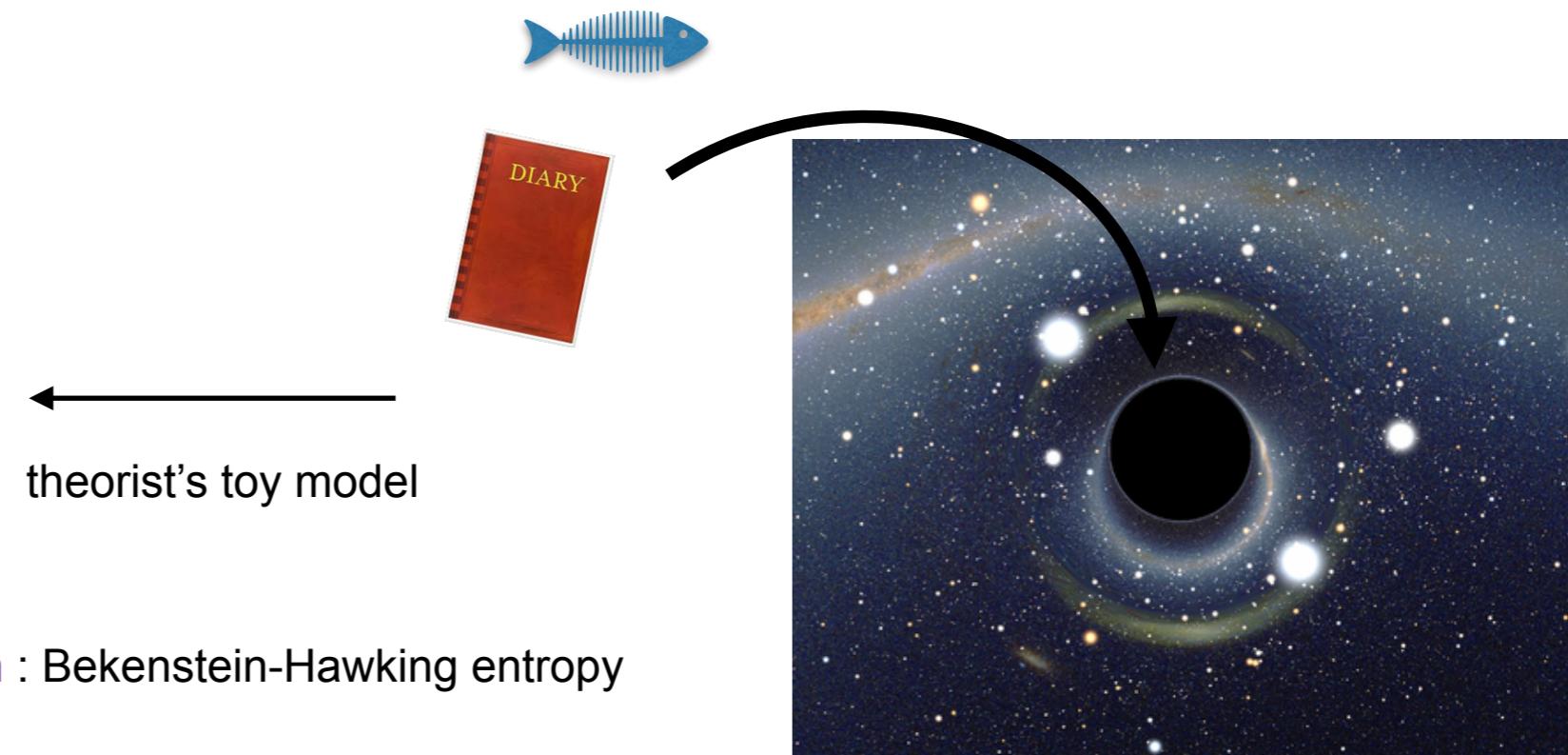
D : Late radiation

R : Early radiation



n : Bekenstein-Hawking entropy

(maximally entangled)



Hayden-Preskill思考実験

- Aliceは量子状態を「古いブラックホール」に投げ入れる。

Bob has an access to **both** early and late radiations !

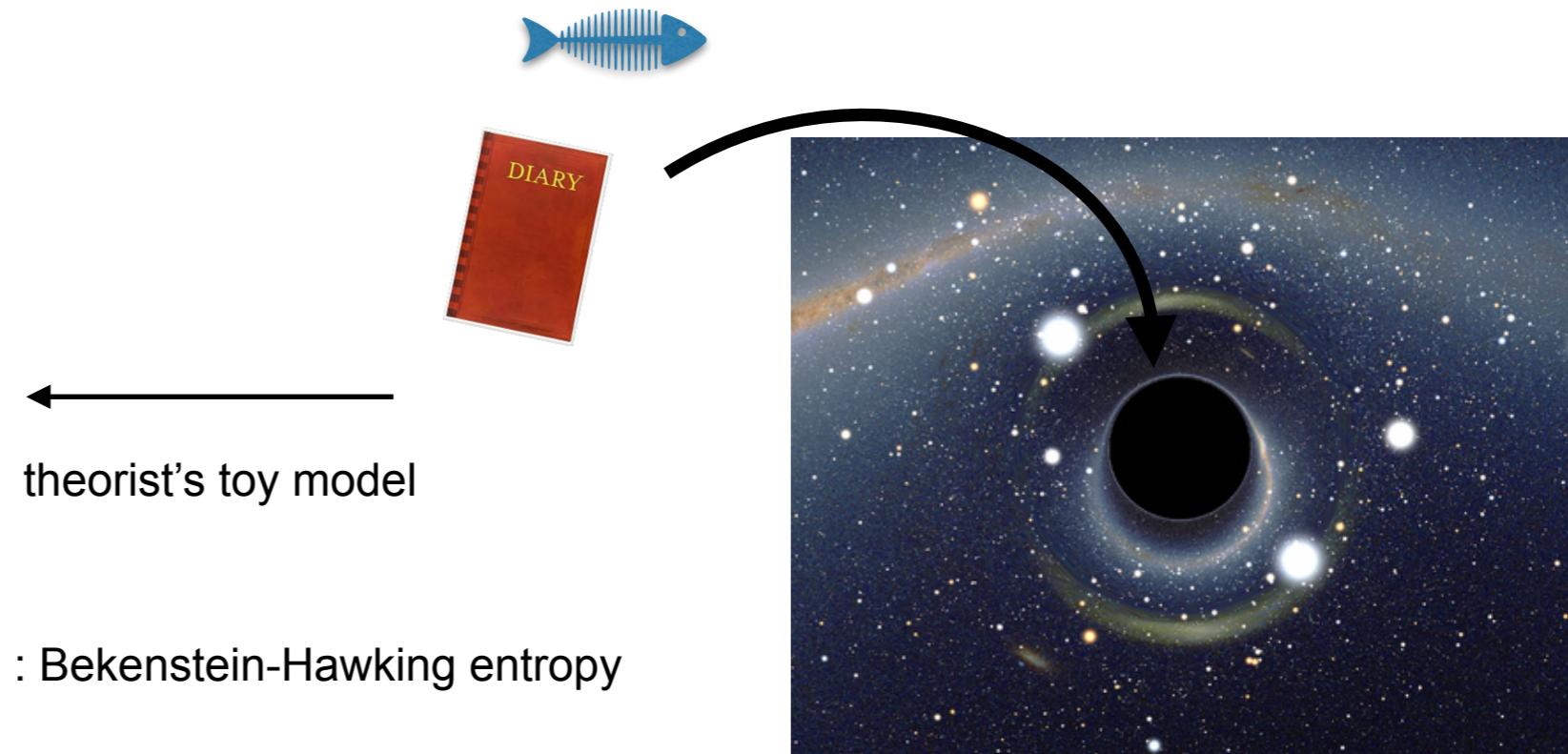
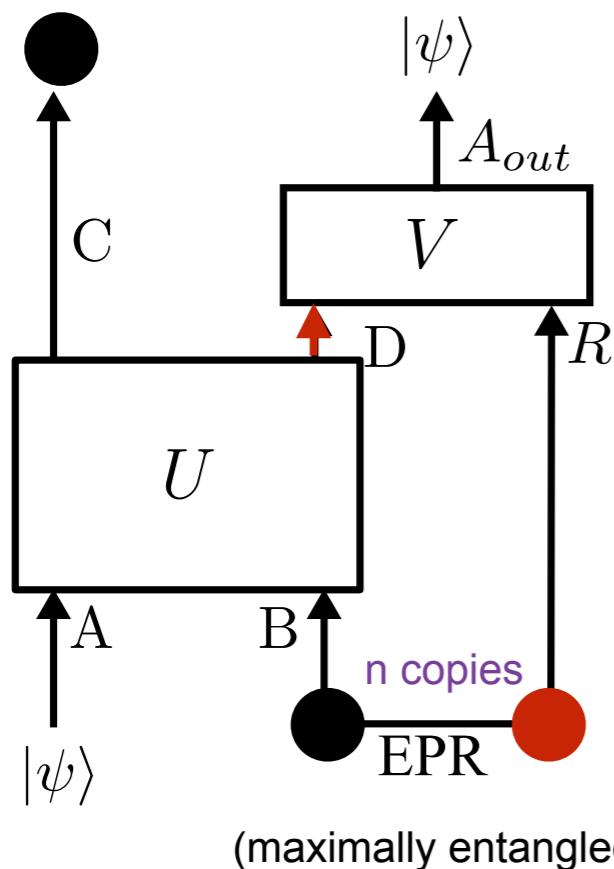
C : Remaining BH

D : Late radiation

R : Early radiation

- Bob needs to collect just a few qubits from D.

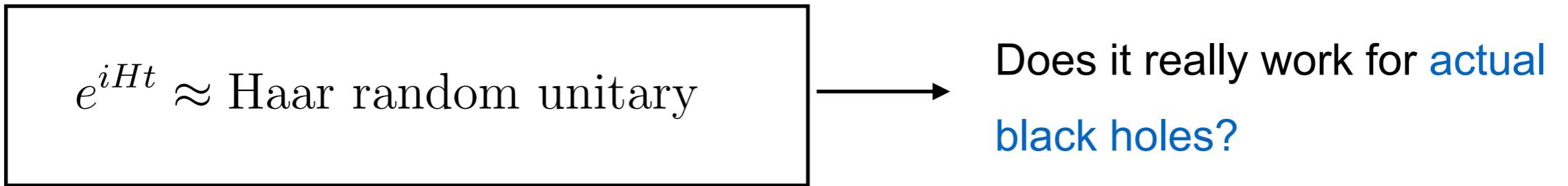
“Black hole as *mirrors*” (Hayden-Preskill 2007)



本当に情報を再構築できるのか？

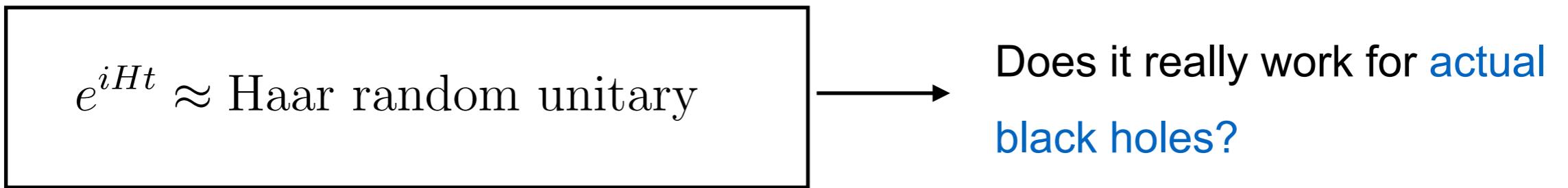
本当に情報を再構築できるのか？

- Hayden-Preskillの仮定: **Haar random unitary**

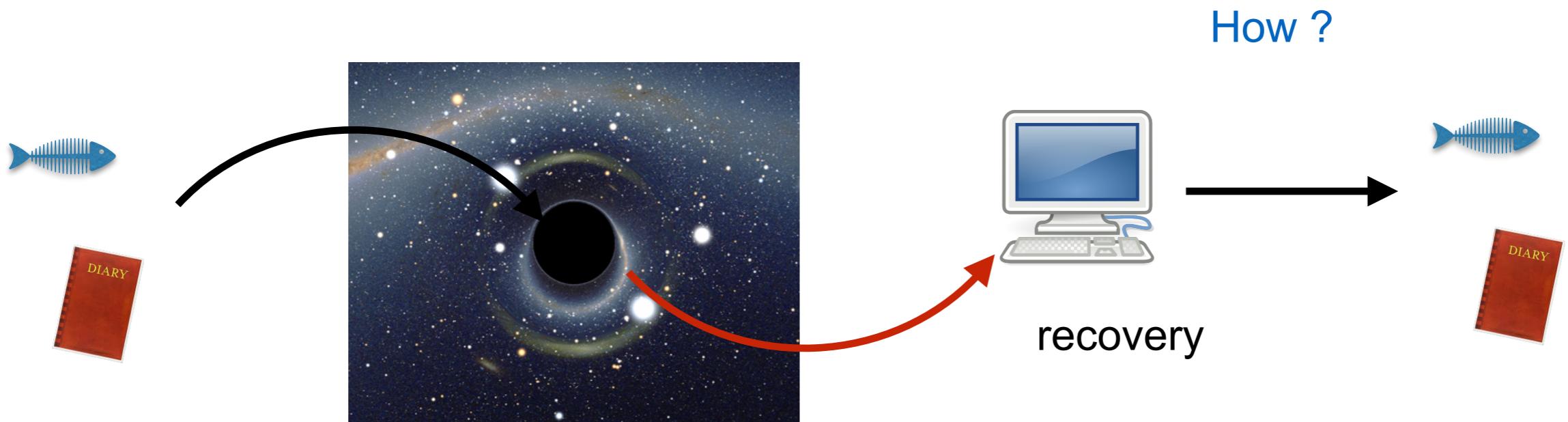


本当に情報を再構築できるのか？

- Hayden-Preskillの仮定: **Haar random unitary**



- 一体どうやって、量子状態を再構築する？



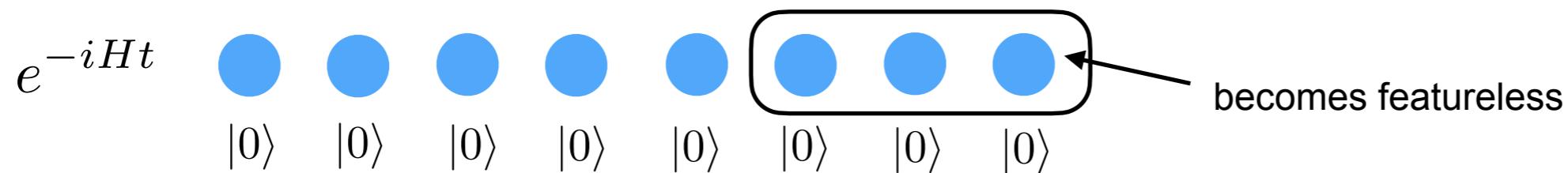
スクランブルリングとは何か？



エンタングルメントの成長（発展）？

- ・スクランブリングはエンタングルメントの発展？

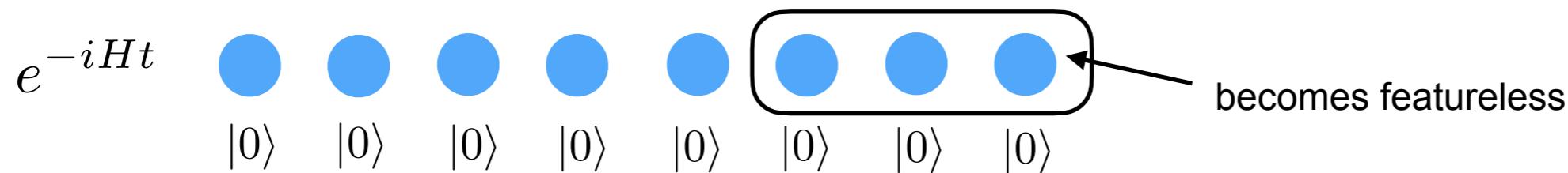
(Sekino-Susskind08, Lashkari-Stanford-Hastings-Osborne-Hayden13, ...)



エンタングルメントの成長（発展）？

- ・スクランブリングはエンタングルメントの発展？

(Sekino-Susskind08, Lashkari-Stanford-Hastings-Osborne-Hayden13, ...)

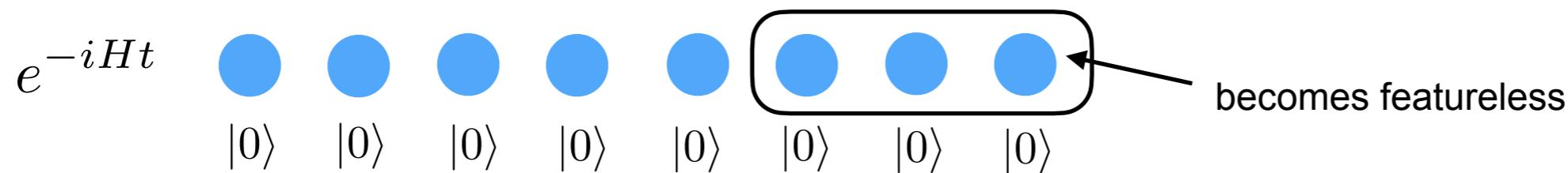


これは熱化 "thermalization" であって、スクランブリングではない。

エンタングルメントの成長（発展）？

- スクランブリングはエンタングルメントの発展？

(Sekino-Susskind08, Lashkari-Stanford-Hastings-Osborne-Hayden13, ...)



これは熱化 "thermalization" であって、スクランブリングではない。

- スクランブリングとエンタングルメントは違うもの！

Entanglement (tsunami) velocity is **smaller** than scrambling (butterfly) velocity (Hosur-Qi-Roberts-BY15)

No-go argument from causal structure of black hole spacetime (Shor18)

演算子の発展

• 演算子の発展

演算子の「サイズ」は、時間とともに大きくなる。

$$e^{-iHt} \quad \text{blue circle} \quad \text{blue circle} \quad \text{blue circle} \quad \text{blue circle} \quad \text{red circle} \quad \text{blue circle} \quad \text{blue circle} \quad \text{blue circle} \quad W(t)$$

演算子の発展

• 演算子の発展

演算子の「サイズ」は、時間とともに大きくなる。

$$e^{-iHt} \quad \text{blue circle} \quad \text{blue circle} \quad \text{blue circle} \quad \text{red circle} \quad \text{red circle} \quad \text{blue circle} \quad \text{blue circle} \quad W(t)$$

演算子の発展

• 演算子の発展

演算子の「サイズ」は、時間とともに大きくなる。

$$e^{-iHt} \quad \text{blue circle} \quad \text{blue circle} \quad \text{red circle} \quad \text{red circle} \quad \text{red circle} \quad \text{red circle} \quad \text{blue circle} \quad W(t)$$

演算子の発展

- 演算子の発展

演算子の「サイズ」は、時間とともに大きくなる。

$$e^{-iHt} \quad \text{blue circle} \quad \text{blue circle} \quad \text{red circle} \quad \text{red circle} \quad \text{red circle} \quad \text{red circle} \quad \text{blue circle} \quad W(t)$$

- 演算子と状態の写像 (Hosur-Qi-Roberts-BY15)

n -qubit Hilbert space

$2n$ -qubit Hilbert space

\hat{O}



$|\hat{O}\rangle$

Choi-Jamilkowski isomorphism

演算子の発展

- 演算子の発展

演算子の「サイズ」は、時間とともに大きくなる。

$$e^{-iHt} \quad \text{blue circle} \quad \text{blue circle} \quad \text{red circle} \quad \text{red circle} \quad \text{red circle} \quad \text{red circle} \quad \text{blue circle} \quad W(t)$$

- 演算子と状態の写像 (Hosur-Qi-Roberts-BY15)

n -qubit Hilbert space

\hat{O}

$2n$ -qubit Hilbert space



$|\hat{O}\rangle$

演算子の発展

演算子のエンタングルメントの発展

Choi-Jamilkowski isomorphism

Out-of-time order 相関関数

- Out-of-time order 相関関数 (Kitaev)

$V(0)$

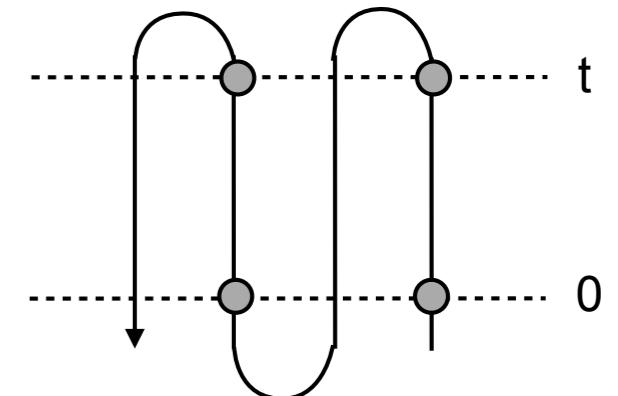


$\langle V(0)W(t)V(0)W(t) \rangle$

$W(t)$

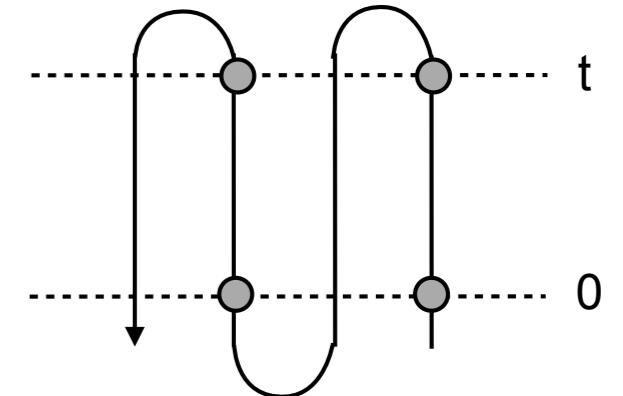
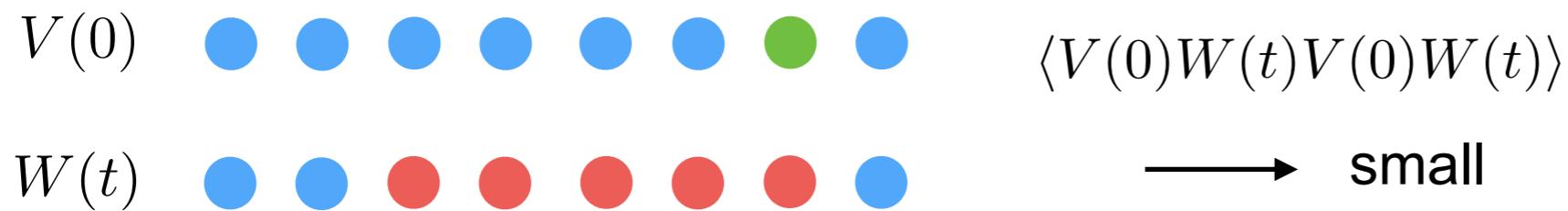


→ small



Out-of-time order 相関関数

- Out-of-time order 相関関数 (Kitaev)

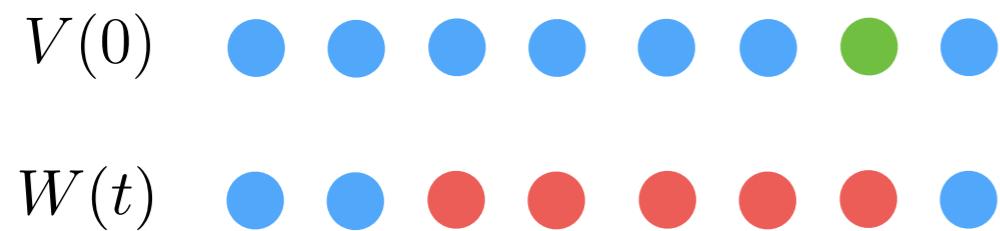


- 厳密なスクランブリングの定義 (BY-Kitaev)

$$\langle W(t)Z(0)Y(t)X(0) \rangle \approx \langle WY \rangle \langle Z \rangle \langle X \rangle + \langle ZX \rangle \langle W \rangle \langle Y \rangle - \langle W \rangle \langle Z \rangle \langle Y \rangle \langle X \rangle$$

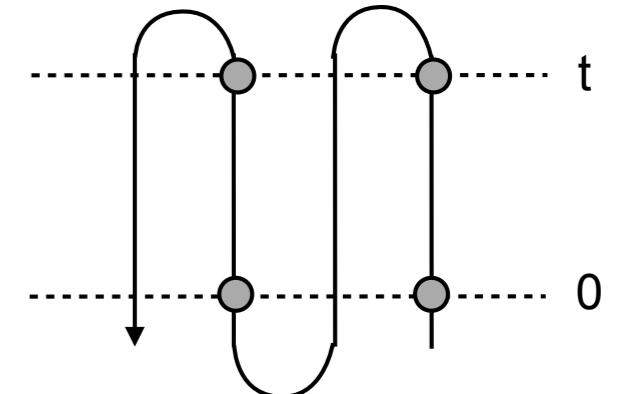
Out-of-time order 相関関数

- Out-of-time order 相関関数 (Kitaev)



$$\langle V(0)W(t)V(0)W(t) \rangle$$

→ small



- 厳密なスクランブリングの定義 (BY-Kitaev)

$$\langle W(t)Z(0)Y(t)X(0) \rangle \approx \langle WY \rangle \langle Z \rangle \langle X \rangle + \langle ZX \rangle \langle W \rangle \langle Y \rangle - \langle W \rangle \langle Z \rangle \langle Y \rangle \langle X \rangle$$

- ブラックホールとスクランブリング

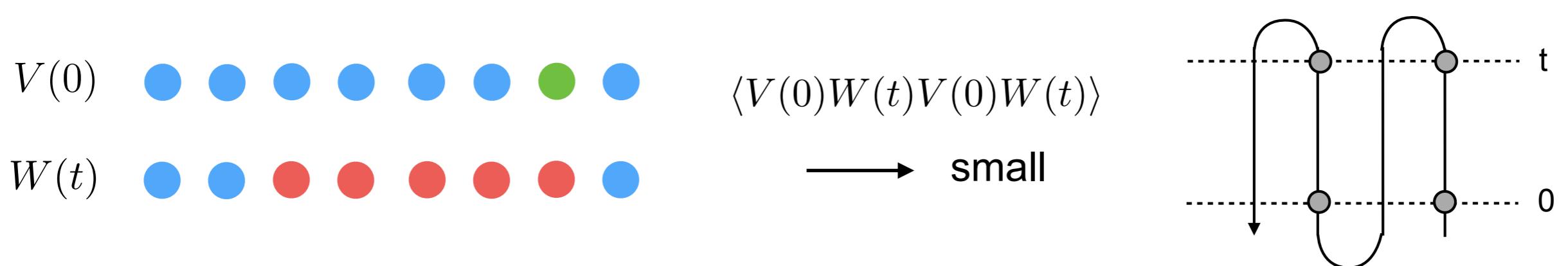
重力衝撃波

't Hooft (1980s) and Kiem-Verlinde-Verlinde (1990s)

Shenker-Stanford and Kitaev (2014) for AdS black hole

Out-of-time order 相関関数

- Out-of-time order 相関関数 (Kitaev)



- 厳密なスクランブリングの定義 (BY-Kitaev)

$$\langle W(t)Z(0)Y(t)X(0) \rangle \approx \langle WY \rangle \langle Z \rangle \langle X \rangle + \langle ZX \rangle \langle W \rangle \langle Y \rangle - \langle W \rangle \langle Z \rangle \langle Y \rangle \langle X \rangle$$

- ブラックホールとスクランブリング

重力衝撃波

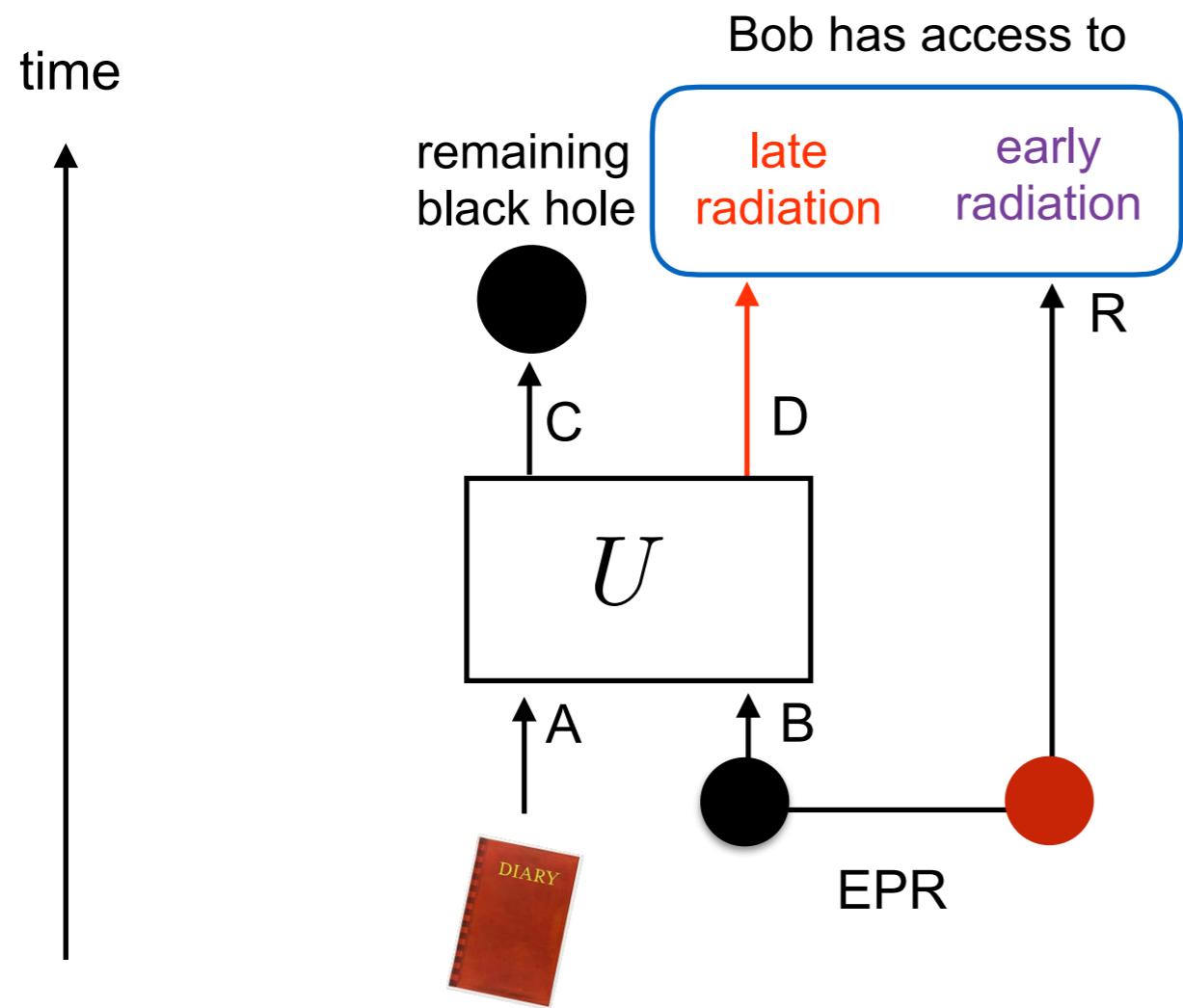
't Hooft (1980s) and Kiem-Verlinde-Verlinde (1990s)

Shenker-Stanford and Kitaev (2014) for AdS black hole

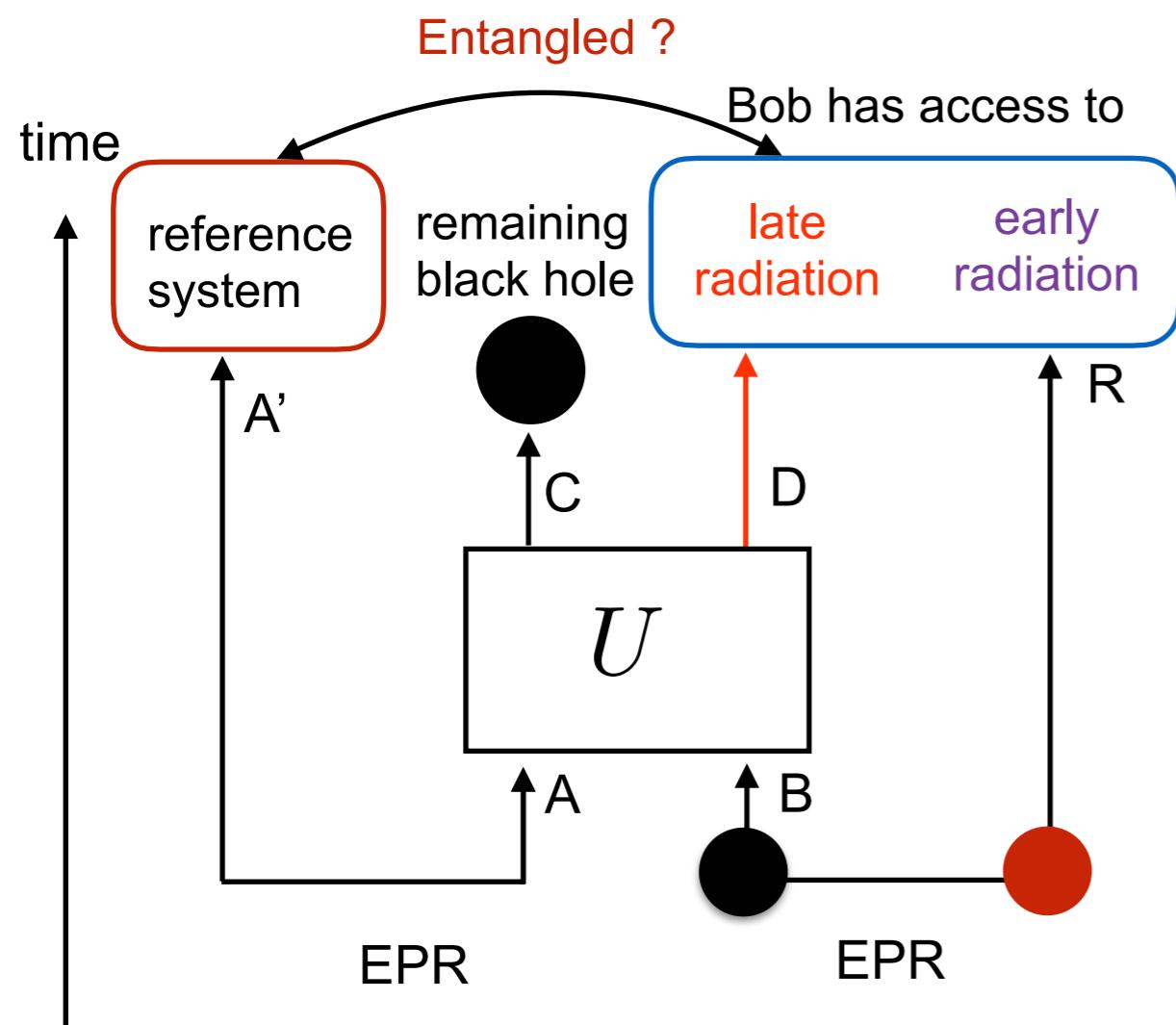
This goes **beyond** Hawking's semi-classical calculation

Decoupling 定理

Decoupling 定理



Decoupling 定理

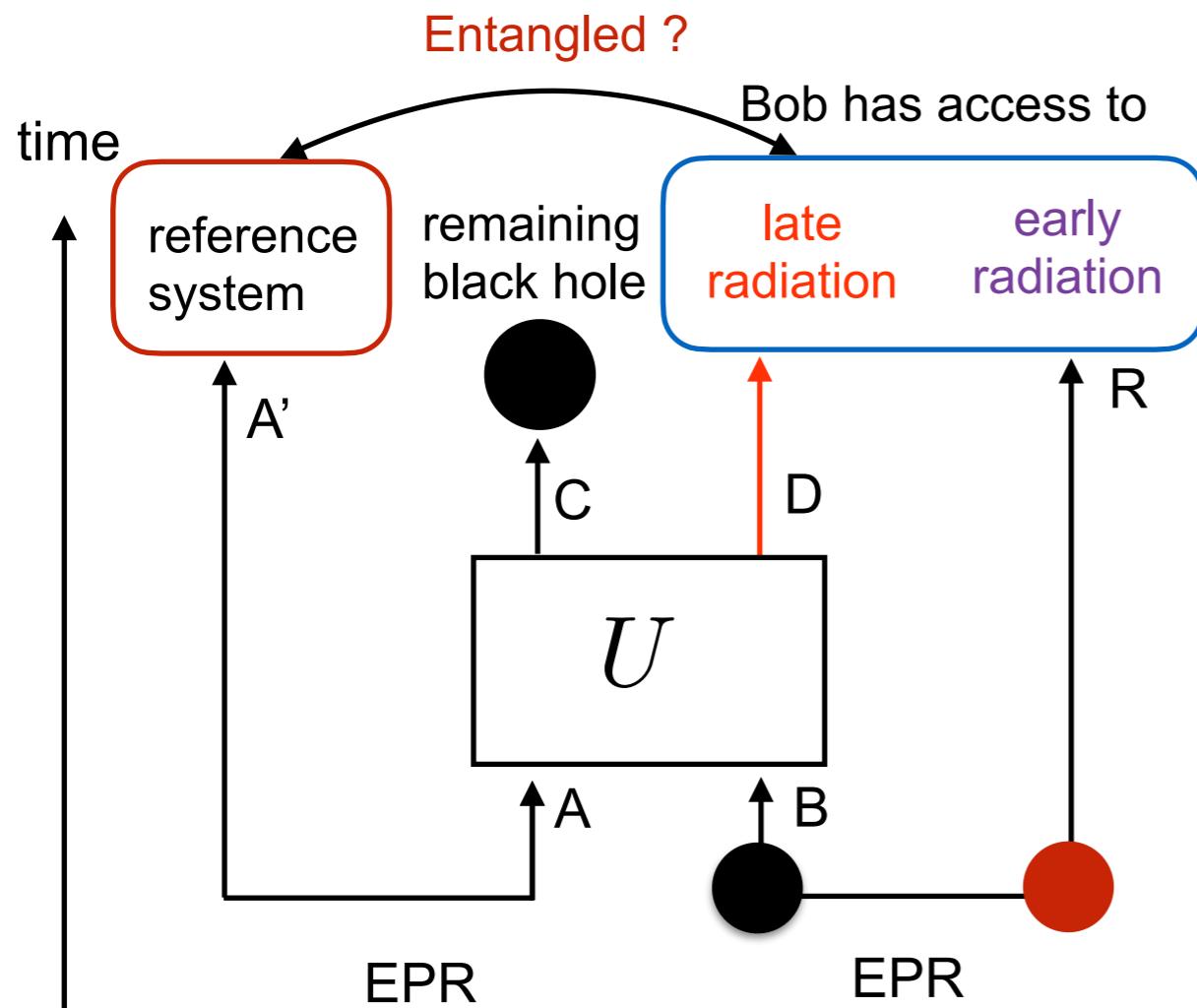


Decoupling 定理

Theorem 1. Suppose that the black hole's dynamics is scrambling and $d_D \gtrsim d_A$. Then, the subsystems A' and C are decoupled:

$$\rho_{A'C} \approx \rho_{A'} \otimes \rho_C. \quad \text{OTOCs } \langle O_A(0)O_D(t)O_A(0)O_D(t) \rangle \quad (1)$$

(BY-Kitaev17)

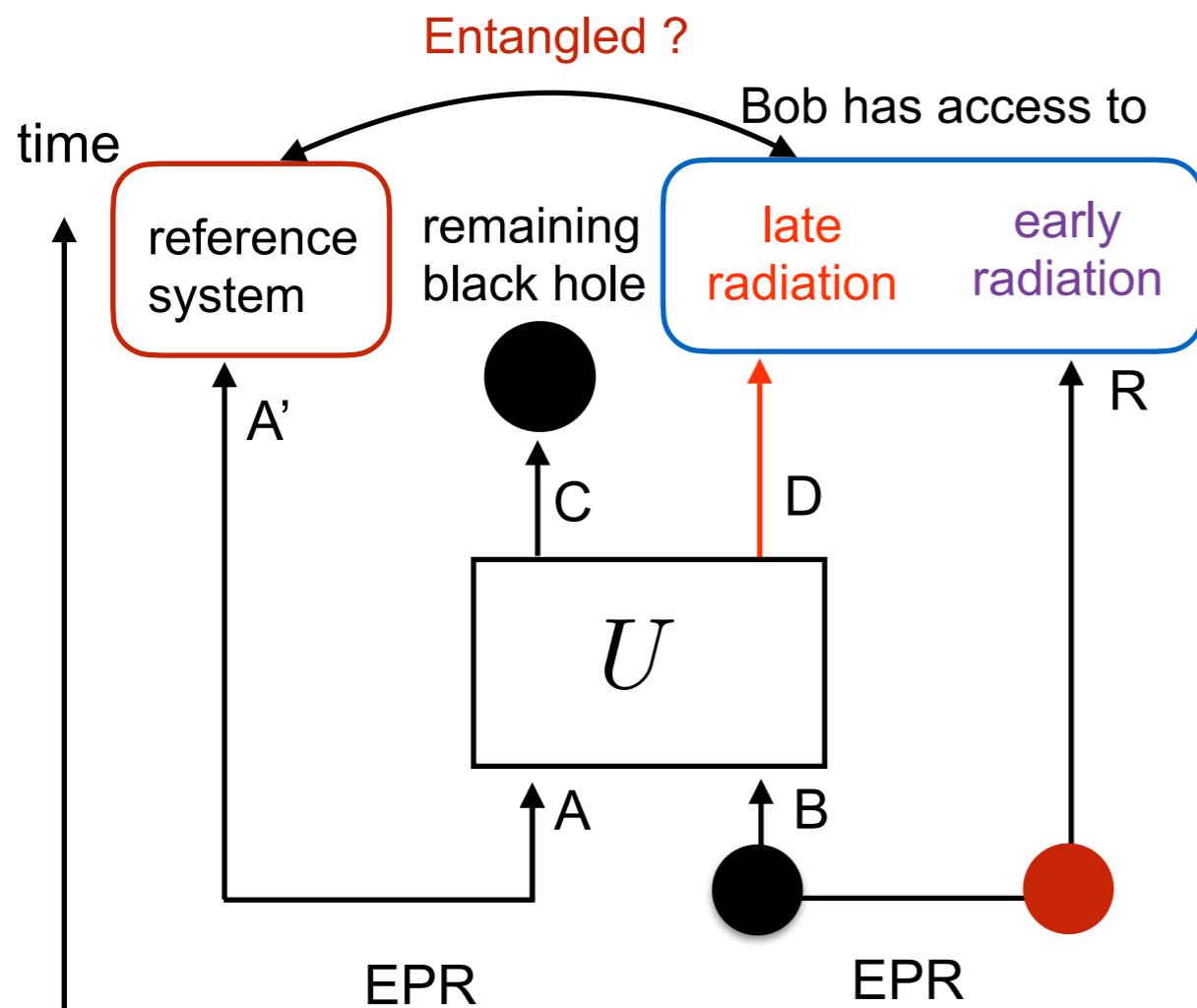


Decoupling 定理

Theorem 1. Suppose that the black hole's dynamics is scrambling and $d_D \gtrsim d_A$. Then, the subsystems A' and C are decoupled:

$$\rho_{A'C} \approx \rho_{A'} \otimes \rho_C. \quad \text{OTOCs } \langle O_A(0)O_D(t)O_A(0)O_D(t) \rangle \quad (1)$$

(BY-Kitaev17)



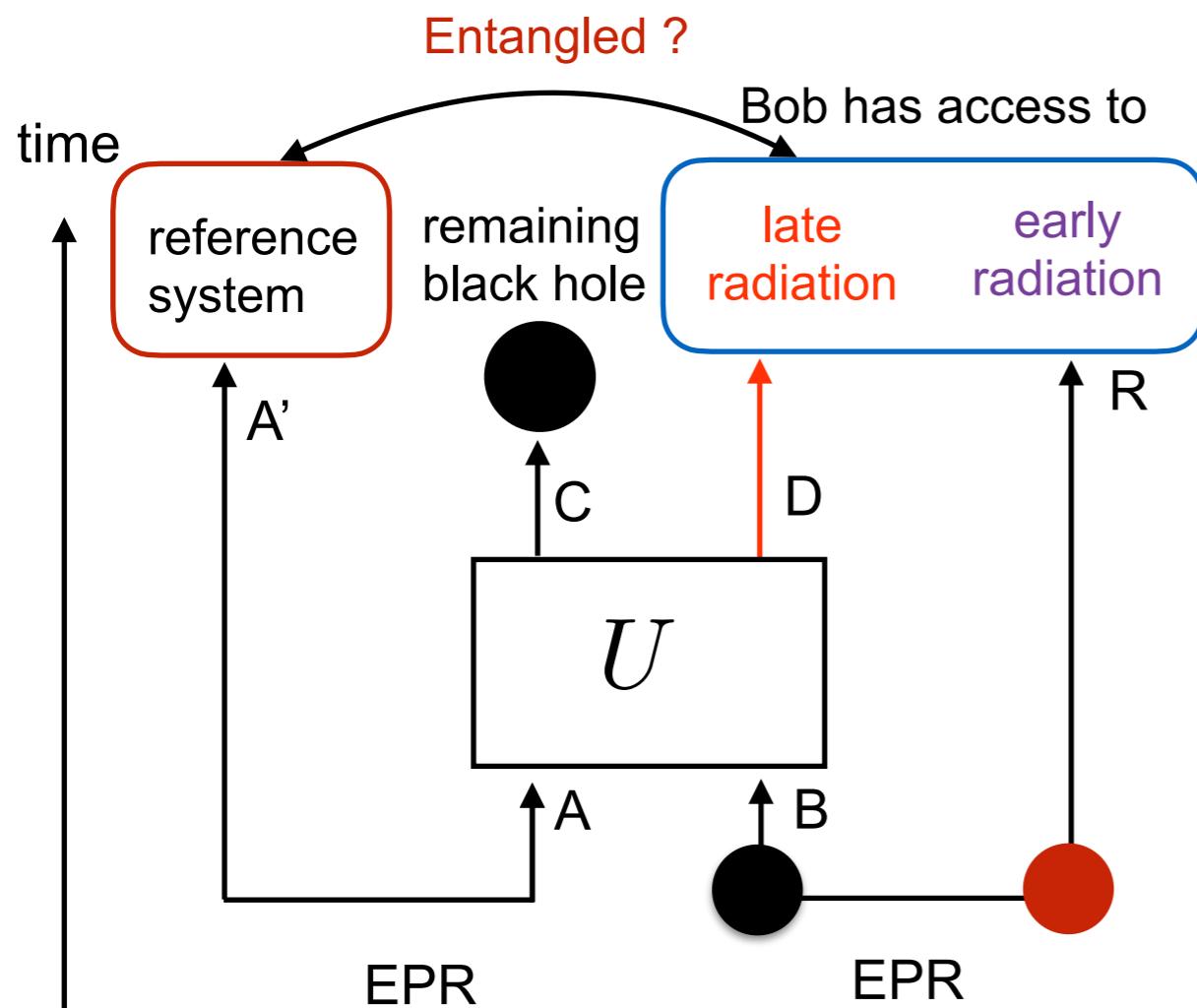
A' は DRとエンタングルしている。

Decoupling 定理

Theorem 1. Suppose that the black hole's dynamics is scrambling and $d_D \gtrsim d_A$. Then, the subsystems A' and C are decoupled:

$$\rho_{A'C} \approx \rho_{A'} \otimes \rho_C. \quad \text{OTOCs } \langle O_A(0)O_D(t)O_A(0)O_D(t) \rangle \quad (1)$$

(BY-Kitaev17)



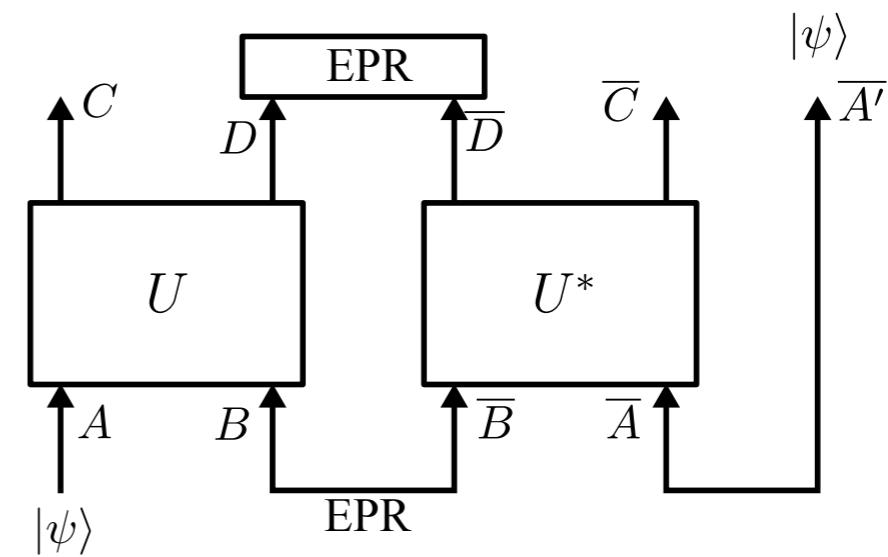
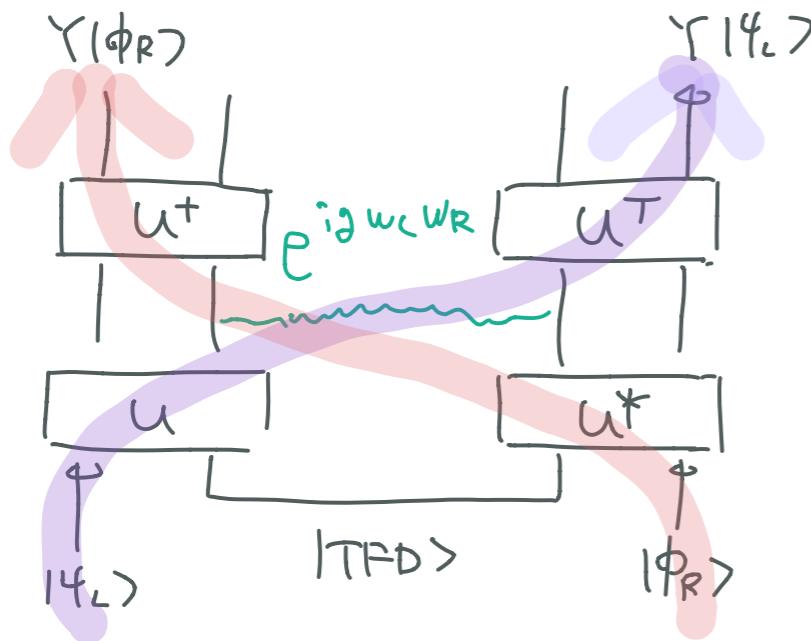
A' は DRとエンタングルしている。

Corollary

ブラックホールから情報を取
り出すことは可能である。

再構築の方法

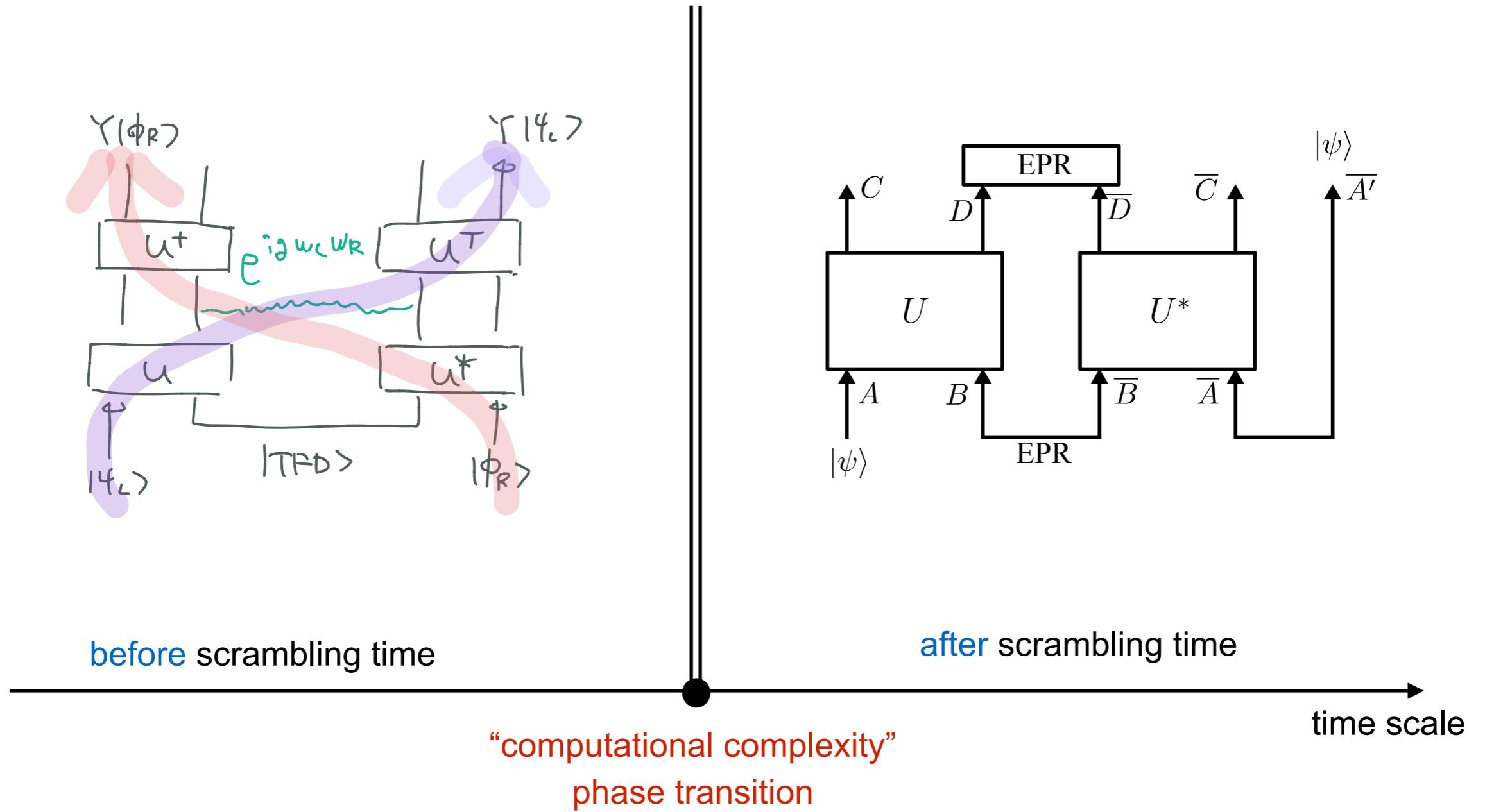
- Traversable wormhole (Gao-Jafferis-Wall)
- Decoding via Petz map (Kitaev-BY)



Google group (Brown-Gharibyan-Leichenauer-Lin-Nezami-Salton-Susskind-Swingle-Walter)
Our followup (Schuster-Kobrin-Gao-Cong-Khabiboulline-Linke-Lukin-Monroe-BY-Yao)

再構築の方法

- Traversable wormhole (Gao-Jafferis-Wall)
- Decoding via Petz map (Kitaev-BY)



Google group (Brown-Gharibyan-Leichenauer-Lin-Nezami-Salton-Susskind-Swingle-Walter)

Our followup (Schuster-Kobrin-Gao-Cong-Khabiboulline-Linke-Lukin-Monroe-BY-Yao)

With Chris Monroe group at U Maryland, in Nature (2019)

LETTER

<https://doi.org/10.1038/s41586-019-0952-6>

Verified quantum information scrambling

K. A. Landsman^{1*}, C. Figgatt^{1,6}, T. Schuster², N. M. Linke¹, B. Yoshida³, N. Y. Yao^{2,4} & C. Monroe^{1,5}

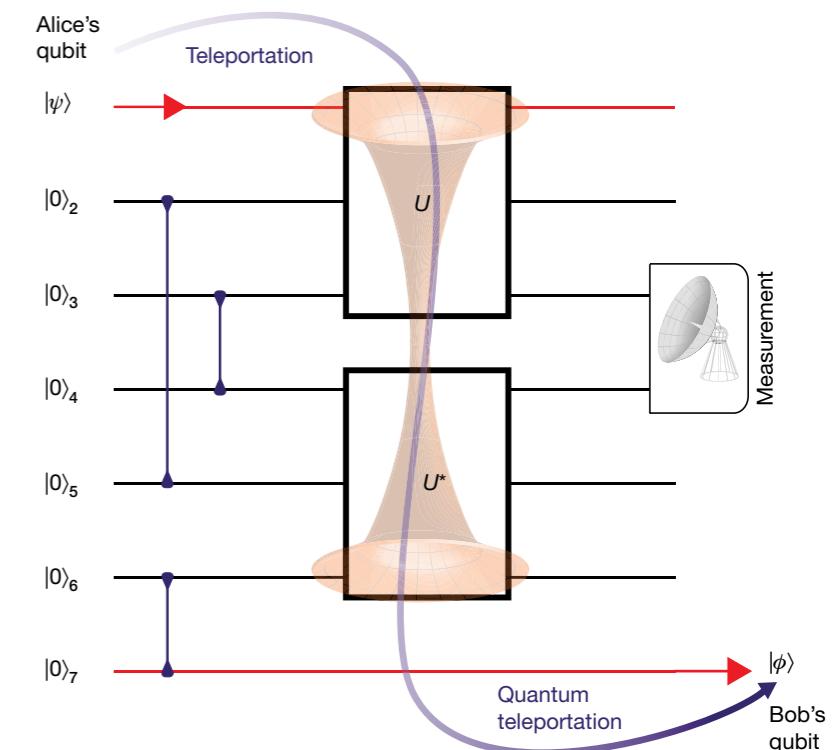
Quantum scrambling is the dispersal of local information into many-body quantum entanglements and correlations distributed throughout an entire system. This concept accompanies the dynamics of thermalization in closed quantum systems, and has recently emerged as a powerful tool for characterizing chaos in black holes^{1–4}. However, the direct experimental measurement of quantum scrambling is difficult, owing to the exponential complexity of ergodic many-body entangled states. One way to characterize quantum scrambling is to measure an out-of-time-ordered correlation function (OTOC); however, because scrambling leads to their decay, OTOCs do not generally discriminate between quantum scrambling and ordinary decoherence. Here we implement a quantum circuit that provides a positive test for the scrambling features of a given unitary process^{5,6}. This approach conditionally teleports a quantum state through the circuit, providing an unambiguous test for whether scrambling has occurred, while simultaneously measuring an OTOC. We engineer quantum scrambling processes through a tunable three-qubit unitary operation as part of a seven-qubit circuit on an ion trap quantum computer. Measured teleportation fidelities are typically about 80 per cent, and enable us to experimentally bound the scrambling-induced decay of the corresponding OTOC measurement.

For example, non-unitary time-evolution arising from depolarization or classical noise processes naturally lead the OTOC to decay, even in the absence of quantum scrambling. A similar decay can also originate from even slight mismatches between the purported forward and backwards time-evolution of $\hat{W}(t)$ (refs ^{6,16} and ²⁴). Although full quantum tomography can in principle distinguish scrambling from decoherence and experimental noise, this requires a number of measurements that scales exponentially with system size and is thus impractical.

In this work, we overcome this challenge and implement a quantum teleportation protocol that robustly distinguishes information scrambling from both decoherence and experimental noise^{5,6}. Using this protocol, we demonstrate verifiable information scrambling in a family of unitary circuits and provide a quantitative bound on the amount of scrambling observed in the experiments.

The intuition behind our approach lies in a re-interpretation of the black-hole information paradox^{9,10}, under the assumption that the dynamics of the black hole can be modelled as a random unitary operation \hat{U} (Fig. 1). Schematically, an observer (Alice) throws a secret quantum state into a black hole, while an outside observer (Bob) attempts to reconstruct this state by collecting the Hawking radiation emitted at a later time^{1,10}.

An explicit decoding protocol has been recently proposed^{5,6}, which



With Chris Monroe group at U Maryland, in Nature (2019)

LETTER

<https://doi.org/10.1038/s41586-019-0952-6>

Verified quantum information scrambling

K. A. Landsman^{1*}, C. Figgatt^{1,6}, T. Schuster², N. M. Linke¹, B. Yoshida³, N. Y. Yao^{2,4} & C. Monroe^{1,5}

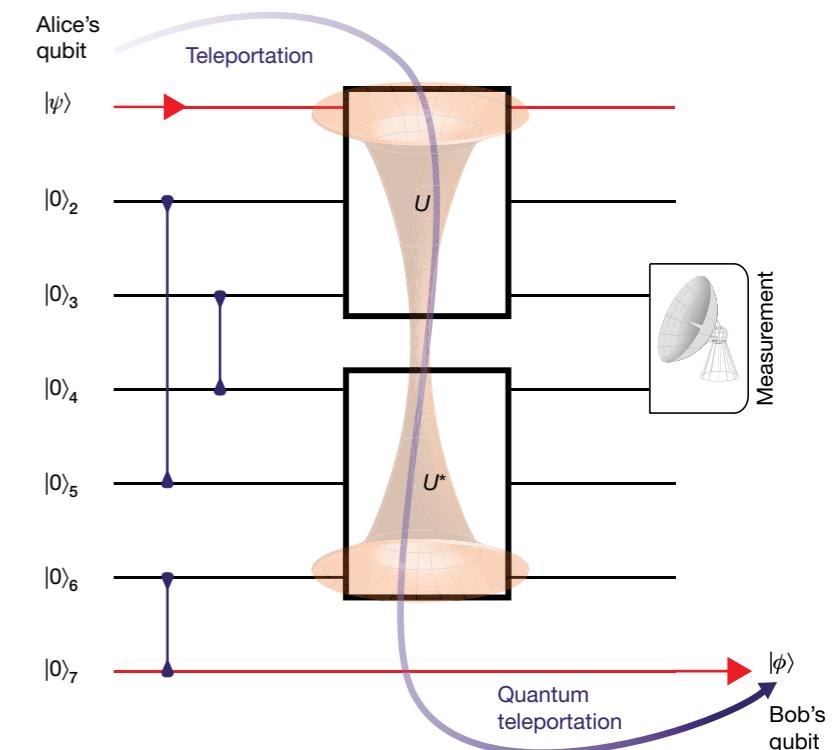
Quantum scrambling is the dispersal of local information into many-body quantum entanglements and correlations distributed throughout an entire system. This concept accompanies the dynamics of thermalization in closed quantum systems, and has recently emerged as a powerful tool for characterizing chaos in black holes^{1–4}. However, the direct experimental measurement of quantum scrambling is difficult, owing to the exponential complexity of ergodic many-body entangled states. One way to characterize quantum scrambling is to measure an out-of-time-ordered correlation function (OTOC); however, because scrambling leads to their decay, OTOCs do not generally discriminate between quantum scrambling and ordinary decoherence. Here we implement a quantum circuit that provides a positive test for the scrambling features of a given unitary process^{5,6}. This approach conditionally teleports a quantum state through the circuit, providing an unambiguous test for whether scrambling has occurred, while simultaneously measuring an OTOC. We engineer quantum scrambling processes through a tunable three-qubit unitary operation as part of a seven-qubit circuit on an ion trap quantum computer. Measured teleportation fidelities are typically about 80 per cent, and enable us to experimentally bound the scrambling-induced decay of the corresponding OTOC measurement.

For example, non-unitary time-evolution arising from depolarization or classical noise processes naturally lead the OTOC to decay, even in the absence of quantum scrambling. A similar decay can also originate from even slight mismatches between the purported forward and backwards time-evolution of $\hat{W}(t)$ (refs ^{6,16} and ²⁴). Although full quantum tomography can in principle distinguish scrambling from decoherence and experimental noise, this requires a number of measurements that scales exponentially with system size and is thus impractical.

In this work, we overcome this challenge and implement a quantum teleportation protocol that robustly distinguishes information scrambling from both decoherence and experimental noise^{5,6}. Using this protocol, we demonstrate verifiable information scrambling in a family of unitary circuits and provide a quantitative bound on the amount of scrambling observed in the experiments.

The intuition behind our approach lies in a re-interpretation of the black-hole information paradox^{9,10}, under the assumption that the dynamics of the black hole can be modelled as a random unitary operation \hat{U} (Fig. 1). Schematically, an observer (Alice) throws a secret quantum state into a black hole, while an outside observer (Bob) attempts to reconstruct this state by collecting the Hawking radiation emitted at a later time^{1,10}.

An explicit decoding protocol has been recently proposed^{5,6}, which



究極の目的：ブラックホールのユニタリ－性を観測的に確かめる。

結論と展望 (スクランブリング)

- 情報喪失問題への応用

再構築可能であることの証明

- 2015 Chaos in quantum channels (with Hosur, Qi, and Roberts) (JHEP)

再構築の方法

- 2017 Efficient decoding for Hayden-Preskill protocol (with Kitaev)

結論と展望 (スクランブリング)

- 情報喪失問題への応用

再構築可能であることの証明

- 2015 Chaos in quantum channels (with Hosur, Qi, and Roberts) (JHEP)

再構築の方法

- 2017 Efficient decoding for Hayden-Preskill protocol (with Kitaev)

- ファイアーウォール問題への応用

ブラックホールの内部自由度を具体的にどのように書き下せばよいのか？

- 2019 Firewall vs. Scrambling (JHEP)

結論と展望 (スクランブリング)

- 情報喪失問題への応用

再構築可能であることの証明

- 2015 Chaos in quantum channels (with Hosur, Qi, and Roberts) (JHEP)

再構築の方法

- 2017 Efficient decoding for Hayden-Preskill protocol (with Kitaev)

- ファイアーウォール問題への応用

ブラックホールの内部自由度を具体的にどのように書き下せばよいのか？

- 2019 Firewall vs. Scrambling (JHEP)

- ダークエネルギー問題への応用？

de Sitter空間におけるスクランブリング？