

エドワード・ウィッテン氏の講演「ブラックホール熱力学への招待」レビュー: 情報パラドックス論争における意義と研究への影響

I. 序論: ブラックホール、情報、そしてウィッテン氏の「招待」

A. ブラックホールと量子情報の根源的謎

ブラックホールは、一般相対性理論と量子力学という現代物理学の二大支柱が交錯し、その整合性が試される特異な「実験室」として、長らく理論物理学者の探求心を刺激してきた。古典的には「ノーヘア定理」¹により、ブラックホールは質量、電荷、角運動量という限られた物理量しか持たない、特徴のない天体とされてきた。しかし、量子力学の観点からは、ブラックホールもまた微視的な状態を持つ複雑な系であり、エントロピーや温度といった熱力学的性質を有することが期待される。

この期待を裏付けるように、1970年代初頭にベッケンシュタインとホーキングによってブラックホールの熱力学が提唱された。しかし、ホーキングによる1975年の画期的な計算³は、ブラックホールが蒸発する際に情報を喪失するという衝撃的な結論を導き出した。これは、量子力学の基本原則であるユニタリティ(情報保存則)と真っ向から対立するものであり、「ブラックホール情報パラドックス」³として知られる深刻な問題を提起した。このパラドックスの解決は、量子重力理論の構築に向けた最重要課題の一つと認識されている。この長きにわたる論争は、特にレオナルド・サスキンドとスティーブン・ホーキングの間で激しく繰り広げられ、「ブラックホール戦争」として知られるようになった⁶。

B. エドワード・ウィッテン氏の「ブラックホール熱力学への招待」: 目的と文脈

エドワード・ウィッテン氏は、超弦理論をはじめとする理論物理学の広範な分野で指導的な役割を果たしてきた碩学である。同氏による講演シリーズ「ブラックホール熱力学への招待」および関連する講義ノート(arXiv:2412.16795)¹は、2023年ハンブルク理論物理学賞受賞を記念して2025年1月に行われたものである¹。

ウィッテン氏自身が述べるように、この講演の目的は「この主題における古くからのアイデアと新しいアイデアのいくつかへの導入を提供することであり、そこでは多くのことが理解され、また多くのことが理解されていない」¹というものである。この言葉は、確立された知識のレビューと、依然として解明されていない研究課題への目配せという二重の性格を示唆している。講義ノートは127ページ、30の図を含む詳細なものであり、複数回の改訂を経ており⁹、慎重に準備され、進化し続ける内容であることが伺える。

C. ウィッテン氏の「招待」に見る総合と道標

ウィッテン氏が、極めて専門的で難解な内容であるにもかかわらず「招待」という形式を選んだことは、注目に値する。これは、複雑かつ急速に進化するこの分野の知見を整理統合し、次世代の研究者を導こうとする意図の表れと解釈できる。単に確立された事実を概観するのでは

なく、近年の飛躍的進展をもたらした概念的枠組みを丹念に辿り、依然として謎に包まれた領域を指し示すことで、高度なレベルでの知的探求への参加を促しているのである。

ウィッテン氏は現代の超弦理論の主要な設計者の一人であり、その講演の主題であるブラックホール熱力学における「新しいアイデア」は、AdS/CFT対応やホログラフィー原理といった超弦理論由来の概念と深く結びついている。したがって、この「招待」は、ブラックホール物理学によって照らし出される量子重力の未解決問題に取り組む上で不可欠となる、洗練された共通理解を確立しようとする試みであり、特に超弦理論に立脚した視点からの主題へのいざないと捉えることができる。この講演シリーズは、ウィッテン氏が考える、この分野の核心的ツールキットと概念的枠組みを提示するものと言えよう。

本稿では、ウィッテン氏のこの講演および講義ノートの内容をレビューし、情報パラドックス論争におけるその意義を分析し、関連する研究への影響を考察し、さらに科学コミュニティにおける反応をまとめることを目的とする。

II. ウィッテン氏の「ブラックホール熱力学への招待」の解読（[arXiv:2412.16795](#)に基づく）

ウィッテン氏の講義ノート⁹は、ブラックホール熱力学の基礎から最先端の話題までを網羅する包括的な内容となっている。その構成は、歴史的発展と概念的深化を辿る論理的な流れを示しており、古典的な熱力学のアナロジーから量子情動的アプローチ、そしてホログラフィー原理に基づく現代的理解へと読者を導く。

A. 基礎の柱：ベッケンシュタイン、ホーキングからユークリッド経路積分へ

講義ノートは、ブラックホール熱力学の foundational pillars (基礎の柱) の解説から始まる。

- ベッケンシュタインのエントロピー提案: まず、ジェイコブ・ベッケンシュタインによる、ブラックホールのエントロピーがその事象の地平面の面積に比例するという画期的な提案が紹介される⁴。これは、ブラックホールに「毛がない」とするノーヘア定理に反して、ブラックホールに明確な熱力学的性質を与えるものであった。
- ホーキング放射: 次に、スティーブン・ホーキングによるブラックホール放射の発見が詳述される⁴。これにより、ブラックホールは絶対零度ではなく有限の温度を持ち、熱的な粒子を放出して蒸発することが示された。これはブラックホールを静的な天体から動的な放射系へと変貌させ、その温度を確立した。
- ウンルー効果: ホーキング放射とのアナロジーとして、ウンルー効果（真空中で加速する観測者が熱的放射を観測する現象）が議論される⁴。これは、曲がった（あるいは加速した）時空における量子場の熱的性質についての理解を深める上で重要な概念である。
- ブラックホール熱力学へのユークリッド的アプローチ: ブラックホールの温度やエントロピーを計算するための強力な手法であるユークリッド経路積分法（ギボンズ＝ホーキングの方法）が解説される⁴。この手法は、熱力学的な分配関数をユークリッド化された時空に

おける重力作用と結びつける。

これらの基礎的トピックは、講義ノートの目次¹⁰や講演の概要⁴からも、ウィッテン氏が重視していることがわかる。

B. 量子情報が主戦場へ：フォン・ノイマンエントロピーとページ曲線

古典的な熱力学的アナロジーから一歩進んで、ウィッテン氏は量子情報理論の概念を導入する。

- フォン・ノイマンエントロピー：量子エンタングルメントの尺度であるフォン・ノイマンエントロピーが導入される⁴。これは、古典的な熱力学エントロピーとは区別されるべき重要な概念である。ウィッテン氏は、特定の文脈においてベッケンシュタイン＝ホーキングエントロピーがエンタングルメントエントロピーとして解釈できる可能性を示唆している（「ベッケンシュタイン＝ホーキングエントロピーとエンタングルメントエントロピー」¹⁰）。
- ページ曲線：情報が保存される場合にホーキング放射のエントロピーが時間とともにどのように振る舞うかを示すページ曲線が紹介される³。これは、情報パラドックスを解決しようとする量子重力理論にとって重要な検証基準となる。

講義ノートの目次¹⁰には、「フォン・ノイマンエントロピー」および「ページ曲線」に関する独立したセクションが設けられており、これらの概念の重要性が強調されている。ページ曲線は、情報パラドックスと近年のブレークスルーを理解する上で中心的な役割を果たす³。

C. ホログラフィック革命：リュー＝タカヤナギ公式

講義の核心部分の一つが、リュー＝タカヤナギ(RT)公式とその一般化に関する解説である⁴。

- この公式は、共形場理論(CFT)におけるエンタングルメントエントロピーを、その双対な反ド・ジッター(AdS)時空における極小曲面の面積と結びつけるホログラフィックな処方を与える。
- ウィッテン氏は、その発見的動機、本来の設定、導出、そしてさらなる発展について詳述している¹⁰。arXiv論文の要旨⁹や講演の概要⁴でも、RT公式が主要なトピックとして挙げられている。

D. その他の主要トピック

講義ノートでは、上記以外にも以下のような重要なトピックが扱われている。

- ブラックホール蒸発におけるグレイボディ因子とポテンシャル障壁¹⁰。
- リンドラー時空の熱力学とサーモフィールドダブル状態¹⁰。
- ベッケンシュタイン限界¹⁰。
- レニーエントロピーとブラックホールの一般化エントロピー¹⁰。
- 「ホホワイトホールとは何か？」についての議論⁴。

E. フォン・ノイマンエントロピーとリュー＝タカヤナギ公式への戦略的重点

ウィッテン氏がフォン・ノイマンエントロピーとリュー＝タカヤナギ公式を特に重視していることは、単に学術的な興味からだけではない。これらのツールこそが、情報パラドックスの解決、特にページ曲線を半古典的重力(ただし量子重力に由来する規則を用いた)から導出するという近年の目覚ましい進展において、決定的な役割を果たしてきたからである。

情報パラドックスは、本質的に量子情報の運命に関わる問題である³。フォン・ノイマンエントロピーは、この量子情報とエンタングルメントを精密に測定する手段を提供する。そして、フォン・ノイマンエントロピーの観点から定式化されたページ曲線は、情報保存の試金石となる³。一方、リュー＝タカヤナギ公式とその共変的一般化(HRT)は、ホログラフィック理論においてフォン・ノイマンエントロピーを幾何学的に計算する方法を与える¹⁰。近年のブレークスルー(2019年以降、³および³で詳述)は、「量子極小曲面」(QES)という、RT/HRTのアイデアを洗練させた概念を用いて、ホーキング放射のエントロピーを正しく計算し、ページ曲線を再現することに成功した。

したがって、ウィッテン氏が「招待」においてこれらの特定のトピックに焦点を当てるのは、ブラックホールの蒸発と情報に関する我々の理解にパラダイムシフトをもたらしたと言える理論的機構を提示していることに他ならない。彼は、成功を収めた枠組みを系統的に解説しているのである。

III. 「ブラックホール戦争」の影における講演の意義

ウィッテン氏の講演は、ブラックホール情報パラドックスを巡る長年の論争、いわゆる「ブラックホール戦争」という文脈において、特筆すべき意義を持つ。

A. 「ブラックホール戦争」の概観: ホーキングの量子力学への挑戦

「ブラックホール戦争」とは、主にスティーブン・ホーキングと、レオナルド・サスキンドおよびゲラルド・トフットとの間で繰り広げられた、ブラックホール蒸発における情報喪失問題を巡る根本的な論争を指す⁶。ホーキングは、ブラックホールが蒸発する際に情報は完全に失われ、これは量子力学のユニタリティ(情報保存則)を破ると主張した⁶。これに対し、サスキンドとトフットは、情報保存は量子力学の根幹をなす原理であり、これが破れることはあり得ないと反論した⁶。この論争は、一般相対性理論(ブラックホールの因果構造)の帰結と量子力学の基本原則との間の深刻な対立を浮き彫りにした⁵。

B. 超弦理論とAdS/CFT対応: 「戦争」における新たな武器

この論争において、ウィッテン氏の専門分野である超弦理論が新たな視点とツールを提供した。特に、超弦理論から生まれたAdS/CFT対応(反ド・ジッター空間における重力理論と、その境界上の共形場理論との間の双対性)⁷は、ホログラフィー原理の具体的な実現例を与え、ブ

ブラックホール情報問題を考察する上で極めて重要な役割を果たした。

AdS/CFT対応の核心は、境界上の共形場理論が定義上ユニタリーであるという点にある。もしこの双対性が厳密に成り立つならば、AdS空間内の重力理論もまたユニタリーでなければならず、これはAdS時空内のブラックホールにおいては情報が保存されることを示唆する。この理論的枠組みは、情報保存を支持する強力な論拠となった。

C. ウィッテン氏の講演：情報保存を支持する「戦後」の総括

ウィッテン氏の講演は、フォン・ノイマンエントロピーや、AdS/CFT対応と本質的に不可分なリュー＝タカヤナギ公式といったツールに焦点を当てることで、暗黙的かつ明示的に情報保存の観点を支持している。ページ曲線に関する議論³や、その導出（導入的な講義ノートでは詳細に踏み込まないまでも、その基礎が築かれている）は、情報が決して失われないとする現代のコンセンサス³の中心にある。

サスキンドの著書「ブラックホール戦争」⁶は、この対立と、最終的にホーキングが情報喪失の主張を撤回し、情報保存の考えが優勢になった経緯を描いている。ウィッテン氏の講演内容は、この帰結と軌を一にするものである。

D. 「戦争」から精密化への「技術競争」への移行

「ブラックホール戦争」は、情報が保存されるというコンセンサスが形成されることで、概ね終結したと言える。ウィッテン氏の講演が示唆するのは、情報が失われるか否かという根本的な論争から、情報がどのように保存され、取り出されるのかという技術的な課題へと焦点が移行したことである。彼が提示する「新しいアイデア」とは、この「どのように」という問いに答えるために開発された洗練された数学的技術群なのである。

当初の「戦争」は、情報喪失かユニタリティかという概念的な戦いであった⁶。超弦理論とAdS/CFT対応は、ユニタリティを支持する強力な理論的証拠を提供した¹³。その後、研究の最前線は、情報が取り出される具体的なメカニズムと計算を明らかにすることへと移った。ウィッテン氏の講演は、フォン・ノイマンエントロピー、リュー＝タカヤナギ公式、ページ曲線といった、まさに近年のブレークスルーにおいてホーキング放射のエントロピーを計算し、それがページ曲線に従うことを示すために用いられた手段を強調している³。これは、もはや原理そのものではなく、精密かつ計算可能な詳細が問われていることを示している。「戦争」は、これらの計算を洗練させ、その完全な含意（例えば、ブラックホール内部の性質、レプリカ・ワームホールの役割など）を理解するための高度に技術的な探求へと進化したのであり、ウィッテン氏はこの新たな段階に向けて研究者を装備させていると言える。

IV. ウィッテン氏のアプローチに触発された研究の潮流

ウィッテン氏が講演で提示したアプローチ、特にAdS/CFT対応とエンタングルメントエントロピーの概念は、ブラックホール物理学および量子重力理論の研究に広範かつ深遠な影響を

与え続けている。

A. ホログラフィック・エンタングルメントエントロピーの普遍的影響

リュー＝タカヤナギ公式（およびその共変的一般化であるHRT公式）は、量子情報理論と重力理論を結びつける研究において、今や不可欠なツールとなっている。ウィッテン氏によるこの公式の明快な解説¹⁰は、その重要性を改めて浮き彫りにする。この公式は、量子場理論におけるエンタングルメント構造の理解、量子情報概念を用いた時空幾何学の探求、エンタングルメントの制約からの重力ダイナミクスの導出といった広範な研究分野に影響を与えている。

B. 量子極小曲面とページ曲線の導出

リュー＝タカヤナギ公式を量子補正を含めて一般化した量子極小曲面（QES）の概念は、情報パラドックスの解決に向けて画期的な進展をもたらした。エンゲルハート、アルムヘイリ、マロルフ、マックスフィールド、およびペニントンといった研究者たちは、2019年にQESを用いて蒸発するブラックホールのページ曲線を導出し、半古典的重力の枠組み内で（ただし量子重力に由来する正しい規則を用いれば）情報が保存されうること示した金字塔的成果を上げた³。ウィッテン氏の講義ノートは、フォン・ノイマンエントロピーとリュー＝タカヤナギ公式を網羅することで、これらのQES計算を理解するための概念的基盤を提供している。QES公式自体は、2014年にエンゲルハートとウォールによって提案されたものである³。

C. レプリカ・ワームホールとブラックホール内部

QESを用いたページ曲線の導出は、しばしば「レプリカ・ワームホール」と呼ばれる時空幾何学を含むユークリッド経路積分計算を伴う。これは、系の複数のコピーを繋ぐ時空であり、従来予想されていたよりも複雑なエンタングルメント構造を示唆し、ブラックホール内部の理解に新たな光を当てる可能性を秘めている。ウィッテン氏の導入的講義ノートは、レプリカ・ワームホール自体に深く踏み込むものではないかもしれないが、ユークリッド的アプローチ¹⁰やエントロピー計算への注力は、この方向性の研究にとって基礎となるものである。¹³ (nLab) は、ベッケンシュタイン＝ホーキングエントロピーと、ペニントンらおよびアルムヘイリらによるレプリカ・ワームホールに関する近年の主張との関連で言及している。

D. ウィッテン氏の講義ノートが参照する研究と影響

ウィッテン氏の講義ノート（arXiv:2412.16795）自体は比較的新しい（初版2024年12月、最新版2025年5月）⁹ため、直接的な引用はまだ限定的であるが、その影響はすでに現れ始めている。¹³、¹⁵、¹⁶は、ウィッテン氏のノートを引用する論文の例である。例えば、¹⁶（「シュヴァルツシルトブラックホールの量子相対エントロピーと面積則」）や、¹⁵（「重力崩壊によるブラックホール形成時の重力エントロピーと熱力学第二法則」）に関する論文の参考文献が挙げられる。

しかし、これらのノートで提示されている「アプローチ」の真の影響は、ノート自体の発表以前から存在している。これらのノートは、ウィッテン氏自身がその構築に大きく貢献してきたAdS/CFT対応のブラックホールへの応用という、20年以上にわたる研究プログラムを教育的

に集約し、高いレベルで裏付けるものとして機能する。ウィッテン氏は超弦理論とAdS/CFT対応の基礎を築いた人物の一人であり、彼のノートで展開されるアイデア(RT公式、重力におけるエンタングルメントエントロピーなど)は、この講演のために新たに考案されたものではなく、彼が築き上げた成熟した研究分野における中心的概念である。したがって、これらのノートを引用する論文は、ノートそのものだけに影響を受けているのではなく、ウィッテン氏が要約し推進している研究全体の方向性に影響を受けていると言える。これらのノートは、この広範なプログラムにとって、権威ある便利な参考文献となっているのである。

E. 表1: ウィッテン氏の講演における主要概念と影響力のある研究分野におけるその顕現

以下の表は、ウィッテン氏の講義ノートで取り上げられている主要な概念と、それらが情報パラドックスの理解にどのように貢献し、どのような影響力のある研究分野を生み出してきたかをまとめたものである。この表は、ウィッテン氏が提示する理論的ツールの具体的な応用と影響力を明確に示し、抽象的なアイデアが情報パラドックスという難問に取り組む上でいかに実用的かつ生産的であるかを浮き彫りにする。

ウィッテン氏の講演における主要概念 (arXiv:2412.16795)	ウィッテン氏の枠組みにおける簡単な解説	影響力のある研究分野 / 発展	情報パラドックスへの主要な示唆
ベッケンシュタイン＝ホーキングエントロピー ⁽⁴⁾	ブラックホールのエントロピーが事象の地平面の面積に比例するという提案。当初は熱力学的アナロジー。	ブラックホール熱力学の基礎、一般化された熱力学第二法則。	ブラックホールが情報を持ちうることを示唆するが、その微視的起源は不明。
ホーキング放射 ⁽⁴⁾	ブラックホールからの熱的粒子放出。ブラックホールが蒸発することを示唆。	ブラックホールの蒸発プロセス、情報パラドックスの提起。	純粋状態から混合状態への遷移を示唆し、ユニタリティ問題を提起。
ユークリッド経路積分 ⁽⁴⁾	ブラックホールの熱力学的量を計算するための重力作用を用いた手法。	ブラックホールの温度とエントロピーの導出、熱的状态の理解。	熱力学的性質を第一原理的に計算する枠組みを提供。
フォン・ノイマンエントロピー ⁽³⁾	量子系のエンタングルメントの尺度。ホーキング放射のエントロピーを精密に定義。	ページ曲線の定式化、量子情報理論の重力への応用。	情報が保存される場合の放射エントロピーの振る舞いを予測し、検証の標的を提供。

リュー＝タカヤナギ公式 (⁴)	AdS/CFT対応における境界CFTのエンタングルメントエントロピーとバルクAdSの極小曲面の面積との関係。	ホログラフィック・エンタングルメントエントロピー、AdS/CFTにおけるブラックホール物理、時空の出現。	エンタングルメントエントロピーを幾何学的に計算する手段を提供し、ベッケンシュタイン＝ホーキングエントロピーの微視的解釈に道を開く。
ページ曲線 (³)	蒸発するブラックホールからの放射のフォン・ノイマンエントロピーが時間とともに示すべき振る舞い(情報保存の場合)。	量子極小曲面(QES)を用いた導出、レプリカ・ワームホール。	その再現は情報保存の強力な証拠と見なされる。近年の研究でQESを用いて導出された。
量子極小曲面(QES) (RT公式の発展として示唆 ³)	リュー＝タカヤナギ公式を一般化し、バルクの量子補正を含む極小曲面。	ページ曲線の導出、ブラックホール内部と放射とのエンタングルメント(「島」の概念)。	ブラックホール内部の情報が放射にエンコードされるメカニズムを示唆し、情報保存と整合する形でページ曲線を再現。

V. コミュニティの反響: ウィッテン氏の研究方向性への反応

ウィッテン氏のような指導的物理学者の講演や著作は、常に科学コミュニティ内で活発な議論と多様な反応を引き起こす。今回の「ブラックホール熱力学への招待」も例外ではない。

A. 教育的価値と入門としての評価

ウィッテン氏の講義ノートは、その明晰さと包括性から、この難解なトピックへの「穏やかな導入」⁴および「より深い研究のための貴重な出発点」⁴として、特に若手研究者や他分野の研究者から好意的に評価されている。EPJ Plus誌のハイライト記事⁴は、この講義ノートが「この挑戦的な分野に参入しようと望む誰にとっても貴重な出発点となるだろう」と述べている。これは、ウィッテン氏の教育者としての一面と、複雑な概念を系統的に整理し提示する能力の高さを示している。Quoraのスレッド¹⁷でも、ウィッテン氏の論文は高く評価されており、この講義ノートも同様に質の高いものと期待されていることが伺える。

B. 超弦理論の文脈における議論と批判

一方で、より広範な理論物理学の文脈、特に超弦理論の進展と現状に対する議論の中で、ウィッテン氏のアプローチが取り上げられることもある。物理学ブログ「Not Even Wrong」の著者であるピーター・ウォイト氏は、ウィッテン氏や他の著名な弦理論家が近年、ブラックホール物理学やAdS/CFTといった「(超弦理論の当初の統一の目標とは)ほとんど、あるいは全く繋がりのないトイモデル」¹⁸の研究に注力しているように見えると指摘し、これが超弦理論が当初

掲げた「万物の理論」としての目標から後退している兆候ではないかと示唆している。

ウォイト氏のブログのコメント欄では、ウィッテン氏が「ツイスター理論、ブラックホール熱力学、非可換幾何学は興味深いアイデアの三例であり、これらは弦理論の代替あるいは競合と見なす向きもあったが、実際には弦理論の描像の一部として吸収された」¹⁸と述べたことに対し、特にブラックホール熱力学や非可換幾何学が完全に弦理論に「吸収された」わけではないという反論も見られる¹⁸。これは、超弦理論の枠組み内部での整合性や説明能力の高さ(ウィッテン氏の講演が示すようにブラックホール問題においては顕著)と、より広範な物理学の諸分野との関係性や、当初の野心的な目標達成度合いに対する外部からの(あるいは内部からの異論を含む)評価との間に存在する緊張関係を反映している。

C. 研究コミュニティにおけるニュアンスのある受容

これらの反応を総合すると、ウィッテン氏の「ブラックホール熱力学への招待」は、その教育的価値と、ブラックホール情報パラドックスに関する現代的理解を整理し提示する上での重要性において、広く認識されていると言える。特に、AdS/CFT対応やホログラフィック・エンタングルメントエントロピーといった、超弦理論から生まれた強力なツールが、情報パラドックスの解決にどのように貢献してきたかを示す上で、この講演は決定的な役割を果たしている。

しかし同時に、超弦理論全体の進むべき方向性や、その成果の評価を巡る議論は依然として活発であり、ウィッテン氏の現在の研究焦点もその文脈で多様な解釈と評価の対象となっている。ウィッテン氏の講演が、ブラックホールという特定の(しかし極めて重要な)問題領域における超弦理論の成功を際立たせる一方で、一部の批評家にとっては、それが本来のより大きな統一目標からの逸脱を象徴するものと映る可能性もある。これは、健全な科学的言説の一部であり、分野の進展に伴って常に生じるダイナミクスである。

VI. 結論: ウィッテン氏の「招待」が示す道筋

エドワード・ウィッテン氏による講演「ブラックホール熱力学への招待」および関連する講義ノートは、ブラックホール情報パラドックスという現代物理学の最も深遠な謎の一つに対する我々の理解の現在地を、包括的かつ洞察に富んだ形で提示するものである。

本稿で詳述したように、ウィッテン氏の解説は、ベッケンシュタイン＝ホーキングエントロピーといった古典的基礎から、フォン・ノイマンエントロピー、ページ曲線、そしてリュー＝タカヤナギ公式といった現代的ツールへと至る知的な旅路を辿る。この構成自体が、情報パラドックスの解決に向けた道筋が、量子情報理論と、超弦理論に由来するホログラフィー原理(特にAdS/CFT対応)の洞察によって切り拓かれてきたことを雄弁に物語っている。

「ブラックホール戦争」という激しい論争を経て、情報保存が広く受け入れられるようになった現在、ウィッテン氏の講演は、このコンセンサスを支える理論的枠組みを明示し、情報がどのように保存され、取り出されるのかという、より精密な問いへと研究の焦点を導く役割を果たし

ている。リュー＝タカヤナギ公式や量子極小曲面といった概念は、まさにこの「どのように」という問いに答えるための強力な武器であり、これらがページ曲線の導出といった具体的な成果に繋がったことは、このアプローチの正当性を強く裏付けている。

ウィッテン氏の「招待」は、単なる過去の業績のレビューではなく、未来の研究への道標でもある。「多くのことが理解され、また多くのことが理解されていない」という彼の言葉は、この分野に残された広大な未開拓領域を示唆しており、提示されたツールキットが、ブラックホールの内部構造、時空の微視的自由度、そして量子重力の究極的理論といった、さらなる謎の解明に向けた探求の出発点となることを期待させる。

研究コミュニティからの反応は、この講演の教育的価値と、現代的視点の集約としての重要性を認めつつも、超弦理論のより広範な目標との関連においては多様な意見が存在することを示している。しかし、ブラックホール情報パラドックスという特定の、しかし根源的な問題に対する理解を深める上で、ウィッテン氏が示したアプローチとツールが極めて強力かつ生産的であったことは、広く共有された認識と言えるだろう。

総じて、ウィッテン氏の「ブラックホール熱力学への招待」は、この分野の過去、現在、そして未来を繋ぐ重要な知的貢献であり、今後長きにわたり、研究者たちが参照し、議論し、そして新たな発見へと進むための灯台となるであろう。

引用文献

1. Edward Witten: Invitation to Black Hole Thermodynamics, session 1/ colloquium, 6月 12, 2025にアクセス、
<https://webcast.desy.de/category/video/edward-witten-invitation-to-black-hole-thermodynamics-session-1-colloquium/10393901ec77f757e4a8100cac5f52ec/37>
2. Invitation to Black Hole Thermodynamics, 6月 12, 2025にアクセス、
https://www.vk.uni-hamburg.de/uploads/event/pdf_de/112684/Masterclass_Witten_Kolloquium.pdf
3. THE BLACK HOLE INFORMATION PARADOX A ... - MIT Physics, 6月 12, 2025にアクセス、
https://physics.mit.edu/wp-content/uploads/2023/09/PhysicsAtMIT_2023_Engelhardt_Feature.pdf
4. A gentle introduction to black hole thermodynamics - EPJ, 6月 12, 2025にアクセス、
<https://www.epj.org/epjplus-news/2895-epjplus-highlight-a-gentle-introduction-to-black-hole-thermodynamics?mb=0>
5. Black hole information paradox - Wikipedia, 6月 12, 2025にアクセス、
https://en.wikipedia.org/wiki/Black_hole_information_paradox
6. en.wikipedia.org, 6月 12, 2025にアクセス、
https://en.wikipedia.org/wiki/The_Black_Hole_War#:~:text=4%20References-,Overview,universe%2C%20the%20conservation%20of%20information.
7. The Black Hole War - Wikipedia, 6月 12, 2025にアクセス、

- https://en.wikipedia.org/wiki/The_Black_Hole_War
8. Edward Witten: Invitation to Black Hole Thermodynamics, session 1/ colloquium - Media, 6月 12, 2025にアクセス、
<https://videos.desy.de/video/edward-witten-invitation-to-black-hole-thermodynamics-session-1-colloquium/2/10393901ec77f757e4a8100cac5f52ec>
 9. [2412.16795] Introduction to Black Hole Thermodynamics - arXiv, 6月 12, 2025にアクセス、<https://arxiv.org/abs/2412.16795>
 10. arxiv.org, 6月 12, 2025にアクセス、<https://arxiv.org/html/2412.16795v1>
 11. www.littlebrown.com, 6月 12, 2025にアクセス、
<https://www.littlebrown.com/titles/leonard-susskind/the-black-hole-war/9780316032698/#:~:text=The%20Black%20Hole%20War%20is,is%20a%20hologram%20projected%20from>
 12. The Black Hole War: Susskind, Leonard: 9780316016414 - Amazon.com, 6月 12, 2025にアクセス、
<https://www.amazon.com/Black-Hole-War-Stephen-Mechanics/dp/0316016411>
 13. Bekenstein-Hawking entropy in nLab, 6月 12, 2025にアクセス、
<https://ncatlab.org/nlab/show/Bekenstein-Hawking+entropy>
 14. High Energy Physics - Theory Dec 2024 - arXiv, 6月 12, 2025にアクセス、
<http://arxiv.org/list/hep-th/2024-12?skip=300&show=500>
 15. The Quantum Relative Entropy of the Schwarzschild Black Hole and the Area Law - PMC, 6月 12, 2025にアクセス、
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11941741/>
 16. The Quantum Relative Entropy of the Schwarzschild Black Hole and the Area Law - MDPI, 6月 12, 2025にアクセス、<https://www.mdpi.com/1099-4300/27/3/266>
 17. What are some examples of the best written research papers in scientific journals? - Quora, 6月 12, 2025にアクセス、
<https://www.quora.com/What-are-some-examples-of-the-best-written-research-papers-in-scientific-journals>
 18. Fantasy, Faith and Physics | Not Even Wrong - Columbia Math Department, 6月 12, 2025にアクセス、<https://www.math.columbia.edu/~woit/wordpress/?p=13538>