



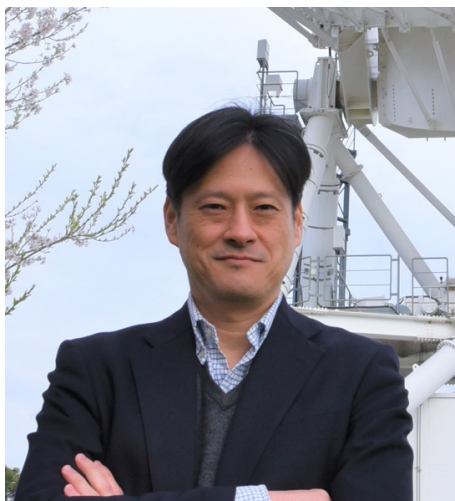
2025 年 11 月 4 日
11 月 7 日(改訂)
公益財団法人 仁科記念財団
<https://www.nishina-mf.or.jp>

2025 年度（第 71 回）仁科記念賞

受賞者と業績

1) 本間 希樹 Mareki Honma

国立天文台 水沢 VLBI 観測所 教授



業績題目

「超長基線電波干渉計に基づく超大質量ブラックホール・シャドウ撮像への貢献」

“Contributions to imaging the shadow of supermassive black holes
with very long baseline interferometry”

業績要旨

一般相対論が予想するブラックホールを「事象の地平線」のスケールで観測・検証することは、基礎物理学・宇宙物理学における一つの大きな課題であった。2019 年に Event Horizon Telescope (EHT) Collaboration は、波長 1 ミリメートル帯の超長基線電波干渉計によって、楕円銀河 M87 の巨大ブラックホールをこれまでにない高解像度で観測し、事象の地平線の存在が引き起こすブラックホール・シャドウとそれを囲むリング状構造を発見した。本間氏は、早くから日本でブラックホール・シャドウ観測の研究グループを組織し、ハーバード大

学の Shepherd Doeleman 教授をはじめとする米国の研究者らと共同観測実験を先駆的に進めてきた。EHT プロジェクトが立ち上がると、本間氏は、国際チームの日本グループの代表として一貫してプロジェクトを牽引した。チリに建設された Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) のアンテナ群を一つの巨大アンテナとして結合して EHT の観測局に組み込むために、光伝送装置の開発を主導し、観測の成功に導いた。また、本間氏は、早くからデータ科学分野の研究者の協力を得てスパースモデリングを用いた新しいデータ解析法を開拓し、EHT の観測データからブラックホール・シャドウを描き出す解析で、日本のグループを率いて大きく貢献した。EHT による観測は、我々の銀河の中心にある巨大ブラックホールの観測にも発展し、M87 と同様の成果が得られている。

業績詳細

一般相対論が予想するブラックホールを「事象の地平線」のスケールで観測・検証することは、基礎物理学・宇宙物理学における一つの大きな課題であった。しかし、巨大なブラックホールは我々から遥か遠方にあり、また、「事象の地平線」の大きさは極めて小さいため、それはこれまで不可能であった。実現のためには、これまでにない高い空間解像度と十分な感度を持つ望遠鏡が必要であり、超長基線干渉計 (VLBI: Very Long Baseline Interferometer) による電波観測を波長 1 mm 程度で実施することが実質的に唯一の方法であった。世界中の電波望遠鏡を結合して地球サイズの口径をもつ巨大電波望遠鏡を構成すれば 20μ 秒角の解像度を実現できる。これは月の上においた 4 cm の物体を見分けることができる能力である。それを国際協力によって実現したのが EHT (Event Horizon Telescope) プロジェクトである (図 1)。その観測の結果、おとめ座銀河団にある楕円銀河 M87 で、事象の地平線の存在が引き起こすブラックホール・シャドウとそれを囲むリング状構造を発見した (図 2) [1]。リング状に輝く部分は、 6.5×10^9 太陽質量のブラックホールに降着するガスからの放射が強い重力レンズ効果によって光子球付近に像を結んだものであり、内側の暗い領域は「事象の地平線」の効果で光が到達できないために生じたブラックホール・シャドウである。この結果は、初めてブラックホールの存在を視覚的に示したものである。本間氏はこの 300 名を超える研究者からなる国際共同プロジェクトに日本グループの代表として国際協力に主要な役割を果たすとともに、装置開発とデータ解析の両面でこの成果に大きく貢献した。

本間氏は、早くから「事象の地平線」に伴うブラックホール・シャドウの観測に着目してきた。国内の VLBI プロジェクト (VERA) で成果を挙げるなど、VLBI による観測で科学成果を挙げるとともに技術的経験を積んできた。本間氏は、ハーバード大学の Shepherd Doeleman 氏が率いる米国のグループのブラックホール・シャドウ観測計画に、国立天文台がチリに設置した ASTE 望遠鏡を組み合わせることを提案し、初期観測実験に貢献した。こうして培った協力関係は EHT Collaboration につながり、その初期から日本グループの

代表として国際協力に大きな役割を果たしてきた。2011 年に ALMA が運用を開始すると、大きな開口面積を持つ ALMA のアンテナ群を結合して一つの巨大アンテナとして EHT の観測局に加えることで、観測能力を大幅に向上する計画 (ALMA Phasing Project : APP) が進められた。本間氏は、APP において、日本が分担した信号の光伝送装置の開発を主導し、評価、設置、実用化を自ら率いて行い、EHT の観測実現に技術的に大きく貢献した。

本間氏は EHT Collaboration において、上で述べた国際協力の推進と観測装置の開発に加え、画像化技術の革新にも大きく貢献した。様々な基線長で観測されるフーリエ空間の可視度データから天体画像を再生するアルゴリズムとしては、50 年以上にわたって CLEAN 法が主に用いられてきた。これは、観測基線長分布をフーリエ変換して得られる合成ビームを用いて逆畳み込みをするもので、必然的に最大基線長が合成ビームの幅、即ち、解像度を決める。しかし、EHT Collaboration の目指すブラックホール・シャドウの撮影では解像度が不十分となる可能性があったため、新たな手法の開発が求められていた。本間氏は、データ科学分野の専門家との共同研究を通じ、スパースモデリングを世界に先駆けて画像化に導入し、その有効性を実証した [2]。スパースモデリングは日本発のソフトウェア SMILI や米国主導の eht-imaging に必須技術として組み込まれた。

M87 の観測データの画像化にあたっては、バイアスを排して慎重な解析を行うために EHT Collaboration の中に 3 つのアルゴリズムによる解析チームが設けられた。本間氏は、日本チームを率いて、その中の一つのスパースモデリングを用いる解析を主導した。それぞれの解析チームは、膨大なパラメータスペースと系統誤差を丁寧に検討し、互いに参照することなく独立に画像化を行った。それぞれの結果はすべてブラックホール・シャドウの存在を明確に示しており、巨大ブラックホールが存在することの初めての強い観測的証拠となった。このように、本間氏はデータ解析でも史上初のブラックホール・シャドウの撮像に重要な貢献をなした [3]。

上記の結果は、観測局数を増やした追観測の結果でも確認されている [4]。また、M87 の成果に引き続き、EHT Collaboration は我々の銀河の中心 (Sgr A*) にあるブラックホールについても観測を行い、ブラックホール・シャドウとそれを取り巻くリング状構造を描き出すことに成功した [5]。今後、観測周波数を高めることや観測局数を増やすことで解像度と感度の向上が見込まれ、ブラックホールに伴う基礎的物理現象の理解に貢献することが期待される。

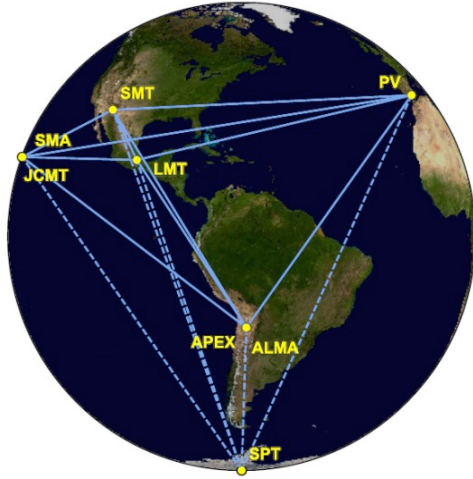


図 1. EHT を構成する望遠鏡群。
これらの望遠鏡を VLBI 技術で結
合して波長 1 mm での高分解能観
測を実現し、ブラックホール・シ
ャドウの観測に成功した [1]。

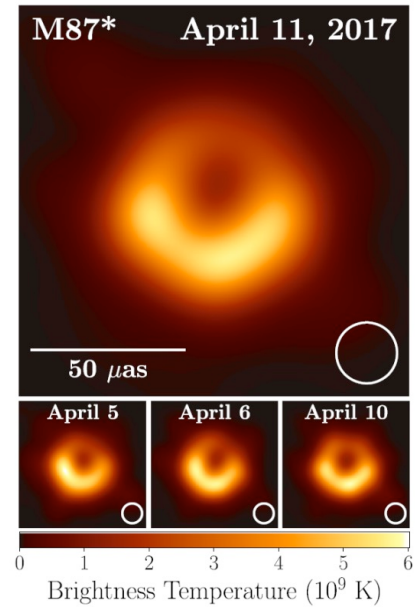


図 2. EHT によるおとめ座銀河
団の M87 銀河の観測結果。リン
グ状に輝く部分は、周囲の降着ガ
スからの放射が強い重力レンズ
効果によって光子球付近に像を
結んだものであり、内側の暗い領
域がブラックホール・シャドウで
ある [1]。

参考文献

- [1] The Event Horizon Telescope Collaboration, “First M87 Event Horizon Telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole”, *The Astrophysical Journal Letters*, **875**: L1 (17pp), (2019).
- [2] M. Honma, K. Akiyama, M. Uemura, and S. Ikeda, “Super-resolution imaging with radio interferometry using sparse modeling”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **66** (5), 95 (1-14), (2014).
- [3] The Event Horizon Telescope Collaboration, “First M87 Event Horizon Telescope results. IV. Imaging the central supermassive black hole”, *The Astrophysical Journal Letters*, **875**: L4 (52pp), (2019).
- [4] The Event Horizon Telescope Collaboration, “The persistent shadow of the supermassive black hole of M87 I. Observations, calibration, imaging, and analysis”, *Astronomy and Astrophysics*, **681**, A79 (2024).

[5] The Event Horizon Telescope Collaboration, “First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way”, The Astrophysical Journal Letters, **930**: L12 (21pp), (2022).

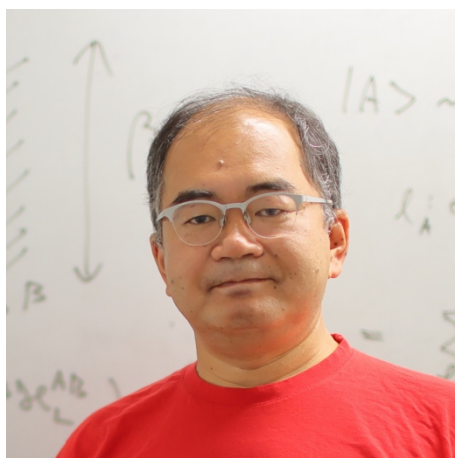
2) 田崎 晴明 Hal Tasaki

学習院大学 理学部 教授



押川 正毅 Masaki Oshikawa

東京大学 物性研究所 教授



業績題目

「量子スピン系の数理的研究」

“Theoretical and mathematical studies of quantum spin systems”

業績要旨

量子スピン系は磁性体を記述する模型として長く研究されてきたが、1980年代以降、量子多体系のトポロジーの観点から新たな展開が生まれた。その契機は「スピン S が整数の一次元反強磁性 Heisenberg 模型の基底状態は一つで、励起エネルギーはギャップをもつ」という Haldane 予想である。1987年に Affleck-Kennedy-Lieb-田崎は AKLT 模型を提案し、数理的に厳密な解析から AKLT 模型では Haldane 予想が成り立つことを示し、基底状態に対する明快な物理的描像を与えた。そして、 $S=1$ 量子スピン系の端に $S=1/2$ の自由スピンが生じる、トポロジカル相に特徴的な性質を明らかにした。田崎氏はさらに Kennedy-Tasaki(KT)変換とよばれる非局所変換により基底状態では隠れた対称性が破れていることを示した。押川氏は1992年に KT 変換を一般のスピン S に拡張し、隠れた対称性の破れの有無が S の偶奇によって分かれることを指摘した。2010年代に入って押川氏は Pollmann 氏らと共に、 S が奇数の量子スピン系が対称性に保護されたトポロジカル相となることを明らかにした。これら一連の成果は、Haldane 予想の理解を飛躍的に深めるとともに、トポロジカル相研究という今日の潮流を切り開く契機の一つとなった。また、Haldane 予想と深く関係する Lieb-Schultz-Mattis 定理に対して、押川氏は一次元系の整合条件としてより一般的な形の定式化を行い、高次元空間への拡張に初めて成功した。このように、田崎氏と押川氏は、量子スピン系を中心とする多体系に対する数理的に厳密な解析により、その本質的理解に深く貢献した。

業績詳細

物質の磁氣的性質は固体中の原子が一つずつ持っている磁気モーメントの方向が揃うことによって生じる。磁気モーメントが $\cdots\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow\cdots$ のように全て同じ向きに揃った物質を強磁性体といい、 $\cdots\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow\cdots$ のように反平行に揃った物質を反強磁性体という。鉄やコバルトなどは強磁性体であり、反強磁性体の例にはマンガン酸化物や銅酸化物などがある。

磁性体を記述する理論模型として、格子上に配置した量子スピンが相互作用する量子スピン系は長い研究の歴史を持っている。量子スピン系は典型的な量子多体系であり、単純な相互作用の形からは想像が難しい、集団として非自明な振る舞いを示すことがしばしばある。そのような量子多体系に対しては摂動展開などの近似的な解析手法は必ずしも有効でないため、近似に依らない厳密な理論は大きな価値を持っている。田崎氏と押川氏の量子スピン系に関する数理的研究はその代表例であり、量子スピン系などの量子多体系の研究に

おけるトポロジー概念を導入した近年の研究の発展に重要な足跡を残している。

反強磁性 Heisenberg 模型は量子スピン系の代表的な模型であり、隣り合う格子点の量子スピンが逆向きになるとエネルギーが下がるように相互作用している。2次元正方格子や3次元立方格子の反強磁性 Heisenberg 模型の基底状態は反強磁性長距離秩序を持っており、量子スピンが回転対称性を自発的に破って特定の方向（例えば上向きと下向き）を向いている。その方向からのゆらぎを量子化したスピン波励起が、エネルギー・ギャップ（粒子の質量に相当）を持たない低エネルギー励起（南部ゴールドストーンモード）となる。一次元空間では量子ゆらぎの効果が強いために基底状態は反強磁性長距離秩序を持つことはできないが、1931年に H. A. Bethe 氏はスピン $S=1/2$ の一次元反強磁性 Heisenberg 模型の厳密解を書き下し、その厳密解に対するその後の研究から基底状態と励起状態の間にはエネルギー・ギャップが無いことが明らかになった。このことから、一般のスピン S の1次元量子スピン系に対しても、 $S=1/2$ の場合と同様にエネルギー・ギャップの無い励起モードが存在するだろうと考えられていた。

ところが1980年代初めに F. D. M. Haldane 氏は、「一次元量子スピン系の性質はスピン S が半整数と整数で定性的に異なり、整数スピンの反強磁性 Heisenberg 模型の基底状態は一つで、基底状態と励起状態のエネルギーの間にはギャップがある」と主張した。この Haldane 予想は当時の研究者の常識とは異なっていたため、当初は懐疑的な反応で迎えられた。その正しさが広く認められるようになる契機となったのは、1987年に Affleck-Kennedy-Lieb-Tasaki(AKLT)論文において AKLT 模型が提案され、その厳密な解析によって物理的描像が明らかになってからである [1]。AKLT 模型は $S=1$ の反強磁性 Heisenberg 模型を少し変形した模型であり、二つの模型の基底状態は定性的に同じ性質を持ち、同じ相（Haldane 相と呼ばれる）に属していると考えられる。AKLT 模型は厳密に解くことができ、基底状態は唯一でスピン相関は短距離的であり、励起モードがエネルギー・ギャップを持つことが明らかにされた [1]。AKLT 模型の基底状態波動関数は AKLT 状態とよばれる。この状態では、 $S=1$ の量子スピンは仮想的な二つの $S=1/2$ 量子スピンの合成で表され、隣接する格子点の $S=1/2$ スピンは一重項状態にある（図1）。この AKLT 状態は、近年の量子情報理論を応用した量子多体系研究に用いられる行列積状態やテンソル積状態とよばれる波動関数の先駆けとなっている。また、有限系の AKLT 状態の端には $S=1/2$ の量子スピンが余ることから、 $S=1$ の量子スピン系の端に $S=1/2$ のスピンの存在することを示唆する。したがって、十分に長い有限系の基底状態は4重縮退する。AKLT 状態のように、系内部の励起にはエネルギー・ギャップがあり、系の端には量子数が分数化した自由度が局在して存在することは、対称性に保護されたトポジカル相（Symmetry Protected Topological Phase, SPT 相）に特徴的な性質であり、今日の SPT 相の概念を先取りするものであった。

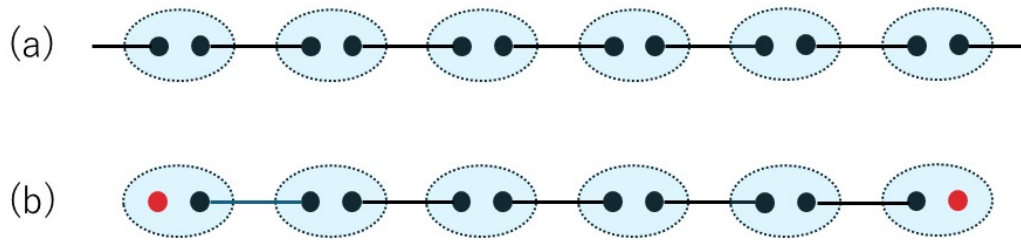


図 1 : (a) AKLT 状態の模式図。黒丸は $S=1/2$ のスピンを表し、楕円は二つの $S=1/2$ スピンの合成による $S=1$ スピンを示している。二つの黒丸を結ぶ実線はスピン一重項($S=0$)を表す。(b) 有限長の AKLT 状態の両端には $S=1/2$ のスピン (赤丸) が余っている。

1992 年に田崎氏は Kennedy-Tasaki (KT)変換とよばれる非局所ユニタリ変換を用いることにより、Haldane 相に属する $S=1$ の量子スピン模型の基底状態は、 $Z_2 \times Z_2$ の隠れた対称性の破れによって特徴づけられることを示し、上述の 4 重縮退を説明した [2]。Haldane 相は string 秩序変数とよばれる非局所秩序変数を持つことが知られており、KT 変換は string 秩序変数を強磁性秩序変数に変換し、Haldane 相が無秩序相とは異なる相であることを明確にした。押川氏はこの KT 変換を一般のスピン量子数 S に拡張して AKLT 状態の一般化を論じ、 S が奇数の Haldane 相では隠れた $Z_2 \times Z_2$ 対称性が破れているのに対して、 S が偶数のときには破れていないことを見出した [3]。この S の偶奇による違いは、後年、Haldane 相を SPT 相として見直すことにより理解された。押川氏は Pollmann 氏らとの 2010 年と 2012 年の共著論文[4]において、Haldane 相を保護する対称性を詳細に検討し、 S が偶数の AKLT 状態は、各格子点の自由度が独立な直積状態と連続的につながっており、トポロジカルに自明な相にあることを示した。また、押川氏らは Haldane 相の本質は量子もつれを特徴づけるエンタングルメント・スペクトルの二重縮退であることを明らかにした。田崎氏らの AKLT 模型から押川氏らの SPT 相の研究に至って、Haldane 予想にまつわる物理は完全に理解されたといえる。

S が奇数の一次元量子スピン系では、基底状態は離散対称性を破って縮退するか、あるいはエネルギー・ギャップの無い励起が存在する。このことは 1961 年の Lieb-Schultz-Mattis (LSM)論文の議論を用いて 1986 年に I. Affleck 氏と E. H. Lieb 氏によって示され、LSM 定理とよばれている。この定理は S が整数の一次元量子スピン系には適用できないので、Haldane 予想が成立する余地が生まれたわけである。同時に LSM 定理は、基底状態がただ一つで励起エネルギーにギャップがあるための必要条件を与えている。1997 年に押川氏は、山中雅則氏、I. Affleck 氏との共同研究において、磁場中の一次元量子スピン系や一次元多粒子系に LSM 定理を応用し、さらに 2000 年の論文[5]で LSM 定理を初めて高次元量子多体系へ拡張した。ここでは、基底状態が一つで励起ギャップが生じ得るのは粒子密度が整数のときである、という整合条件として LSM 定理が一般的に定式化された。これらは量子多体系の基底状態に対して厳密な制限を与える重要な結果となっている。

以上のように、田崎氏と押川氏は量子多体系の典型例である量子スピン系に関して多くの数理的に厳密でかつ先駆的な結果を得て、その後の研究の発展の基礎となる重要な貢献を果たした。

参考論文

- [1] I. Affleck, T. Kennedy, E. H. Lieb, and H. Tasaki, “Rigorous results on valence-bond ground states in antiferromagnets”, Phys. Rev. Lett. **59**, 799 (1987); “Valence bond ground states in isotropic quantum antiferromagnets”, Commun. Math. Phys. **115**, 477 (1988).
- [2] T. Kennedy and H. Tasaki, “Hidden $Z_2 \times Z_2$ symmetry breaking in Haldane-gap antiferromagnets”, Phys. Rev. B **45**, 304 (1992).
- [3] M. Oshikawa, “Hidden $Z_2 \times Z_2$ symmetry in quantum spin chains with arbitrary integer spin”, J. Phys.: Condens. Matter **4**, 7469 (1992).
- [4] F. Pollmann, A. M. Turner, E. Berg, and M. Oshikawa, “Entanglement spectrum of a topological phase in one dimension”, Phys. Rev. B **81**, 064439 (2010); F. Pollmann, E. Berg, A. M. Turner, and M. Oshikawa, “Symmetry protection of topological phases in one-dimensional quantum spin systems”, Phys. Rev. B **85**, 075125 (2012).
- [5] M. Oshikawa, “Commensurability, excitation gap, and topology in quantum many-particle systems on a periodic lattice”, Phys. Rev. Lett. **84**, 1535 (2000).