HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study of Local Bulk Operator inside the Horizon of BTZ Black Hole [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	塩原, 堅司
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第14359号
Issue Date	2021-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81936
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kenji_Shiohara_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（理　学）　氏　名　　塩　原　堅　司

学 位 論 文 題 名

Study of Local Bulk Operator inside the Horizon of BTZ Black Hole
（BTZ ブラックホールのホライズン内部における局所的なバルク演算子に関する研究）

現在の素粒子論において、重力を含めた基本相互作用を統一的に記述する量子重力理論の解明が一つの大きな目標になっている。量子重力理論へのアプローチとして、AdS/CFT 対応と呼ばれる、異なる理論間の非自明な対応関係に基づいた研究が活発に行われている。すなわち、負の曲率を持つ anti de-Sitter(AdS)時空における、バルクの重力理論が無限遠境界上の共形場理論(Conformal Field Theory;CFT)として記述されることが期待されている。特に、バルクのスカラー場を境界上の CFT の情報を用いて記述する、“バルクの再構成”と呼ばれる研究では、複数の方法が提案されており、ブラックホールのホライズン内部におけるスカラー場についても言及されている。ホライズン内部を境界上の CFT の情報を用いて構成する研究は、ブラックホールの諸問題を解決するために重要である。境界上の CFT がホライズン内部の完全な情報を持っており、ホライズンの内部と外部が滑らかに接続されている場合、ホライズンに firewall は存在しない。

以上の背景に基づいて、ブラックホール時空において量子化したスカラー場を構成することは、バルクの物理およびブラックホールの諸問題への理解に繋がることが期待される。本研究では、BTZ ブラックホールのホライズン内部においてスカラー場の正準量子化を行った。具体的にはバルク演算子を境界上の正準交換関係に従う生成消滅演算子によって展開し、その展開係数として Klein-Gordon 方程式のモード解を割り当てた。一般的に、曲がった時空の KG 方程式のモード解は厳密解が得られないため、スカラー場を構成できる例は限られている。そこで、３次元 AdS 時空のブラックホール解である BTZ ブラックホールを背景時空として選んだ。BTZ ブラックホール計量は 3 次元 AdS 時空の計量から座標変換で得られることが知られており、BTZ ブラックホールのモード解を同様の座標変換で求めた。また、得られたスカラー場を用いて、ホライズン内部の情報を持った観測量として、ホライズン内部と外部の 2 点間の相関関数を求めた。BTZ ブラックホールのホライズン内部と外部の 2 点間の相関関数は、ホライズン外部の 2 点間の相関関数から、時間の複素方向への解析接続を行うことで得られることが知られている。しかしながら、ホライズン外部における時間変数 t と空間変数 r の役割が内部では入れ替わるため、解析接続によって得られる相関関数が適切な観測量であるかどうかは明らかでない。ホライズン内部において量子化したスカラー場を用いて相関関数を計算し、解析接続による結果と一致するかどうかを確かめる必要があった。

ホライズン内部の量子化したスカラー場の構成方法は、Papadodimas and Raju(JHEP 10 (2013) 212 [hep-th/1211.6767])によって提案されている。しかし、彼らの解析はホライズン付近のみであり、ブラックホール時空全体において無矛盾なスカラー場を構成できることは示されていない。本研究で、彼らが提案したホライズン内部のスカラー場を外部のものと滑らかに繋げる接続条件を採用し、ホライズン付近だけでなく内部の深い領域においても正準量子化を行い、スカラー場を構成した。また、内部のスカラー場を構成する準備として、外部のスカラー場についても正準量子化を行った。

外部のスカラー場については、新しい方法で量子化を行った。BTZ ブラックホールは 4 つの領域から構成されており、領域ⅠとⅢがホライズン外部、領域ⅡとⅣが内部である（図 1)。通常、領域ⅠとⅢのそれぞれの領域において量子化が行われるが、領域ⅠとⅢを合わせた１つの Hilbert

空間上において量子化を行った。この方法では、領域Ⅰと Ⅲは同じ空間内の離れた領域として定義され、ホライズンにおいてスカラー場が滑らかに接続することが保証されている。領域Ⅰと Ⅲの量子化したスカラー場がそれぞれの境界上の演算子によって構成されることを示した。

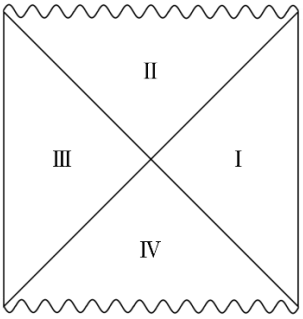

図 1. BTZ ブラックホール

さらに、外部のスカラー場の結果を用い、ホライズンでの接続条件を課すことで滑らかに接続する内部のスカラー場を構成した。ホライズン内部には領域Ⅰと Ⅲから粒子が入るため、内部のスカラー場は領域Ⅰと Ⅲの生成消滅演算子と同じ演算子で構成される。これらの演算子に割り当てられる適切なモード解は、座標変換で得られるモード解を含めた計 4 組のモード解の線形結合であることを示した。さらに本研究の重要な解析結果の一つとして、内部の深い領域においてモード解の線形結合の係数に一意に定まらない関数が含まれており、スカラー場に不定性があることを示した。原因として、BTZ ブラックホールの KG 方程式がホライズンにおいて特異性を持っていることが考えられる。つまり、スカラー場は接続条件によってホライズンのすぐ内側までは外部と滑らかに接続されているが、さらに内部の深い領域へ進む際に、スカラー場の時間発展が一意に定まらず、無数に分岐していると考えられる。このことは、一般のブラックホール時空においても起きうる問題であり、ブラックホールの諸問題を理解するためには無視できない結果である。ホライズン内部のスカラー場を境界上の CFT 演算子として一意に定義するためには、この不定性を取り除く必要があり、処方として内部の深い領域における“正の振動数解”の条件を提案した。

また、不定性を取り除いたスカラー場を用いて、ホライズン内部と外部の 2 点間の相関関数を積分形で示した。積分は実行できていないが、得られた相関関数は解析接続によって得られるものと一致しないことがわかった。