

# ブラックホールに対するホログラフィック原理の 数値的検証

伊 敷 吾 郎 〈筑波大学, 京都大学基礎物理学研究所〉

西 村 淳 〈高エネルギー加速器研究機構〉

花 田 政 範 〈京都大学基礎物理学研究所〉

百 武 慶 文 〈茨城大学〉

ブラックホールが熱力学的性質をもつ、という話をご存じだろうか。例えば、ブラックホールに対してエントロピーを定義することができ、実際ブラックホールの合体などの過程において、そのエントロピーが増大することは、古くから知られている。また、ブラックホールの周辺で粒子と反粒子が対生成するような量子効果を考えると、いわゆるホーキング輻射をとおして、ブラックホールが少しずつエネルギーを放出していることがわかる。この性質をもとに温度を定義することもできる。

通常、熱力学的に振る舞う系は、非常に多くの力学的自由度からなっており、その系を巨視的に見ることによって初めて熱力学的性質が現れる。ではブラックホールの場合、その力学的自由度は何なのか。そもそも、アインシュタイン方程式の解として導かれるブラックホールが、どうしてエントロピーをもつのか。その起源は何なのか。

この問いに答えるには、ブラックホールの内部構造を理解する必要がある。しかしブラックホールの中心には特異点が存在するため、重力の古典論である一般相対性理論では答えることができない。それ故この問題は、一般相対性理論を超えた重力の量子論的定式化の言わば試金石として、現在に至るまで盛んに議論されてきた。

超弦理論は、重力を含む4つの基本的な相互作用と物質粒子を統一的に、量子論的に記述する理論である。しかし、従来の超弦理論は摂動論的に定式化されたものにすぎず、ブラックホールの熱力学的性質を理解するのは困難に見えた。ところが1990

年代に入って状況は一変する。超弦理論におけるソリトン解が発見され、それがブラックホールを表すことがわかったからだ。

特に1997年、Maldacenaはこのような考えを発展させて、ブラックホールの内部構造を超対称ゲージ理論で記述できると主張した。この超対称ゲージ理論は、ソリトン解のまわりの超弦の励起に対する有効理論として導かれる。また、この超対称ゲージ理論が定義される時空は平坦であり、ブラックホールが存在する時空よりも低い次元をもつ。このためMaldacenaの主張は、ブラックホールなどをホログラムのように記述できるとするホログラフィック原理を具体的に実現するものとも見なせる。この考え方を応用して、様々なゲージ理論の強結合領域における性質を、ブラックホールの古典論的計算から明らかにする研究も精力的に行われている。

Maldacenaのもともとの主張を検証するには、超対称ゲージ理論の強結合領域での解析が必要となるため、一般には非常に難しい。これまでに得られている証拠の多くは、高い対称性や可解性のおかげで解析的な計算が可能な場合に限られていた。しかし、より一般的な場合に対して第一原理に基づく検証を行うには、超対称ゲージ理論の数値シミュレーションが最も直接的な方法であり、2007年頃からそうした研究が発展してきた。特に最近の研究では、これまでほとんど手がかりがなかった、ブラックホールが小さく、その地平面付近でも重力の量子論的な効果が無視できない場合について検証がなされた。

## —Keywords—

**ブラックホールの熱力学：**  
ブラックホールに対して、エントロピーや温度を形式的に定義すると成り立つ、熱力学と類似した法則。ベッケンシュタインによって提唱された。例えばブラックホールのエントロピーとして、事象の地平面の面積に比例する量を定義すると、合体などの過程においてその量が常に増大するという、熱力学第二法則と類似した法則が成り立つ。

**ホーキング輻射：**  
ブラックホールが発していると考えられる熱的な放射。1974年、ホーキングが理論的にその存在を示した。放出される粒子のエネルギー分布は、ある温度の黒体が発する輻射と同じ形をしており、そのことからブラックホールの温度(ホーキング温度と呼ぶ)を定義できる。この温度と熱力学第一法則からエントロピーを導くことにより、それが事象の地平面の面積に比例することが再確認されると同時に、比例係数が決定された。

**ホログラフィック原理：**  
ブラックホールなどを含む曲がった時空において、一定の領域内の情報が、その領域の境界にすべて書き込まれているという原理。弦理論のように整合性のある量子重力理論がもつべき一般的な性質として、't HooftとSusskindが1990年代に提唱した。

**超対称ゲージ理論：**  
超対称性をもったゲージ理論。超対称性とは、時空の並進に対する不変性を拡張した対称性であり、ボゾン場とフェルミオン場を入れ替えるような変換のもとでの不変性を表す。変換を引き起こす生成子(超電荷)の数により、超対称性の高さが特徴づけられる。