

特集／時空と熱力学

熱力学と重力の意外に深い関係

ブラックホール熱力学の多彩な広がり

太田 信義

1. ブラックホールと熱力学

物理学の理論として、力学や電磁気学のように基本的な法則が与えられていて、物体の間に働く力、作用が決まっている理論がある。これに対して熱力学は、熱に関する性質を基礎として出発し、その性質がなぜ成り立つかは問わずに、そこから得られる結論だけで理論を構成するやり方をとる。現象論と呼ばれる手法である。現在では熱力学の基礎は量子統計力学により与えられているが、熱力学はそれを導く微視的理論がどのようなものであるかを問うことなしに、適用範囲を誤らなければ必ず成立する。したがって模型などに依らない普遍的な有効性を持つのである。

現在、重力理論はアインシュタインの一般相対論で定式化されており、惑星の近日点移動や重力による光の曲がりなどの観測事実により、その予言ははっきりと確かめられており、疑いもなく基礎理論として確立していると考えてよい。したがって、その解であるブラックホールを考えたとき、熱力学的性質が成り立っているというのは大きな驚きをもって受け止められたに違いない。

詳しいことは前田氏の見事な解説にまとめられているが、アインシュタインの一般相対性理論には、ブラックホールを与えるシュヴァルツシルト

解がある。この解においては、事象の地平線（ホライズン）と呼ばれるところがあり、その内部から外部へは情報が伝わらないことはよく知られている。これは、ブラックホールの系はいわゆる混合状態となってエントロピーが発生することを示唆する。その具体的な最初の兆候はブラックホール解発見から50年以上経った1971年、ホーキングによって発見された。彼は弱いエネルギー条件と宇宙検閲仮説により、ブラックホールを含む古典的過程では、ホライズンの面積が減らないことを示したのである。このことは、ホライズンの面積が熱力学のエントロピーと類似していることを示唆している。続いて1972年、ベケンシュタインは思考実験に基づき、ブラックホールはホライズンの面積 A に比例するエントロピー S を持つことを提唱した。しかし彼は比例定数を決定することはできなかった。さらに1973年、バーディー、カーター、ホーキングは、ブラックホールが熱力学法則と類似した4つの法則を満たすことを示した。

以上はブラックホールが温度を持つことを示唆するが、彼らは $T=0$ と考えていた。なぜなら、有限温度だと輻射が出るはずだが、ブラックホールからは何も出てこないはずだからである。これは1つのパズルとして残されていたが、1975年、ホーキングがブラックホールは、半古典的に輻射