

Spacetime Thermodynamics and Black Hole Membrane Paradigm

京大理 素粒子論研究室 横倉祐貴

E-mail: yokokura@gauge.scphys.kyoto-u.ac.jp

ブラックホールは、Hawking 輻射により、熱浴と熱平衡状態になることのできる熱力学的物体である。そのエントロピー S_{BH} は表面積に比例し、温度 T_{BH} はその ADM mass M_{BH} により一意に決まる。通常の熱力学の第一法則は任意の非平衡過程で使用可能であるが、しかしブラックホールの第一法則 $T_{BH}dS_{BH} = dM_{BH}$ はそうではなく、global timelike Killing ベクトルが存在する準静的過程だけにしか適用できない [1]。

Gibbons-Hawking の議論 [2] によれば、ブラックホール古典解 1 つが有限の統計力学的エントロピーを生む。このことは Einstein 方程式の 1 つの解が 1 つの熱力学的状態に対応することを示唆する。Jacobson [3] はこの考えを推し進め、「Einstein 方程式は状態方程式である」ことを示した。しかし Jacobson の用いた観測者は代表的な熱力学的対象であるブラックホールに適用することができない。それはエネルギーを評価する観測者が horizon の中にいるからである。

この 2 つの問題に対して、私は event horizon 近くの外の観測者を用いてエネルギーを評価し、それを利用して、任意の非平衡過程で使用可能なブラックホールの熱力学第一法則を、Einstein's gravity と f(R) gravity において構築した [4]。このとき示量変数はエネルギーのみであり、また Hawking 輻射はエネルギー運動量テンソルを通して考慮している。event horizon から一定の短い距離だけ離れた timelike な運動をする観測者を用いることで、常にその観測者にとっての局所的な物質のエネルギー流と局所的なブラックホール温度を定義することができる。その観測者はブラックホールの Membrane Paradigm の “stretched horizon” 上の観測者に対応し、得た式はダイナミカルな過程で生じる重力エネルギーを含み、その係数は Membrane Paradigm の粘性係数と一致している [5]。また、f(R) gravity の場合には、Einstein's gravity の場合に現れない余分な項が現れ、それは非平衡過程においてのみ現れる項である。私は運動方程式から第一法則を導出したが、論理を逆にすれば、非平衡過程のブラックホールに適用可能な Jacobson の議論が正しくできる。

References

- [1] J. M. Bardeen, B. Carter and S. W. Hawking, Commun. Math. Phys. **31**, 161 (1973).
- [2] G. W. Gibbons and S. W. Hawking, Phys. Rev. D **15**, 2752 (1977).
- [3] T. Jacobson, Phys. Rev. Lett. **75**, 1260 (1995).
- [4] Y. Yokokura, arXiv:1106.3149 [hep-th].
- [5] S. Chatterjee, M. Parikh and S. Sarkar, arXiv:1012.6040 [hep-th].