

4次元ミンコフスキ空間での熱平衡 Killing Flows and Thermodynamics in Minkowski Space

中村 匡^{1*}

Tadas Nakamura^{1*}

¹ 福井県立大学

¹Fukui Prefectural University

宇宙プラズマの大規模現象を考えると、局所的熱平衡を仮定して、それからのずれに対応して熱流などを考察するのはひとつの有効なアプローチである。しかし、相対論的效果を考えると熱平衡状態というのは自明ではない。たとえば、相対論的回転をする物体の熱平衡状態では、中心より周辺部のほうが局所的な温度が高いことは昔から知られている。これは、エネルギーと質量が等価であるため、遠心力によってエネルギーが周辺部に「溜まる」ためである。このような状況では、局所的な温度が低いところから高いところへ向かって自発的に熱がながれるということも起こり得る。

したがって、相対論的状况での熱の物理を考えるには、大域的な熱平衡がどのような状況になっているかを知る必要がある。過去の連合大会等で4次元回転運動に対応する熱平衡等について報告してきたが、今回はこれを一般化して、平坦な4次元空間で起こり得る熱平衡状態を網羅的に論じる。

直感的にいうと、熱平衡が可能なのは流体の各要素が剛体運動している場合である。これは幾何学的には、その空間のKilling Flowに沿って各要素が運動することに対応するが、4次元のMinkowski空間では線形独立な10のKilling Flowが存在することが知られている。これらを単純な要素であらわすと、4つは並進運動に、6つは4次元回転運動に対応するものであるが、可能なKilling Flowはこの10種の線形重ね合わせで多様なパターンが存在する。Letaw and Pfautsch (1981)は、その幾何学的性質からこれらのFlowが6種類のカテゴリーに分類されることを示した。これらのうち、単純な並進運動と回転運動に対応する2種類のKilling Flowで起こり得る熱平衡が過去の連合大会等で報告したものであるが、それに加えて回転と並進の組み合わせで得られる4種類のFlowについてが今回の話題である。

これら4種類のFlowの興味深い性質のひとつにStatic Limitの存在がある。Static Limitとは、ある座標系で時間に対応する座標軸がspacelikeになり、光速を越えないかぎり、座標系に固定された一点にとどることができなくなる境界をさす。回転座標系でのLight CylinderやKerrブラックホールのエルゴ領域の境界などがその例である。本研究では、平坦な空間(Minkowski空間)のStatic Limitを横断する熱平衡について論じるが、等価原理によると、一般の空間でもローカルには近似的に平坦な空間となる座標系をとることができるはずなので、ここでの結果は一般の空間でStatic Limitがある場合の熱平衡に応用できる。たとえば、本研究の結果に基づいてKerrブラックホールのエルゴ領域に落下していく流体の熱力学について考察することもできる。

キーワード: 相対論効果, 熱力学, キリングフロー, ブラックホール

Keywords: relativity, thermodynamics, Killing flow, black holes