

定常熱伝導状態に関する新たな分布法則

熱伝導現象の巨視的な観点からの理解は、Newton や Fourier によって得られ、今日、Fourier 則として知られている。微視的な統計物理学的観点からの理解に対しては、例えば、線形応答理論や Boltzmann 方程式による熱伝導係数の導出などが知られてはいるもののそれ以上の理解はまだ不十分である。Fourier 則を再現するために微視的モデルが満たしてなければいけない条件でさえ完全に理解されているとはいえない。

統計力学的な手段で計算される熱伝導係数は、ある温度勾配に対して熱がどれほど流れるかを表す応答係数であり、平均熱流に対応する量である。それに対応する微視的な熱流の分布自身を理解することは、熱伝導状態に関する物理を深く理解することに直結し、熱輸送が関係する様々な分野の問題への応用が進むことが期待される。また熱伝導状態に限らず非平衡定常状態一般の統計物理学的理解につながる可能性がある。最近、大阪大学の湯川諭氏と、東京大学の島田尚氏、伊藤伸泰氏、理化学研究所の小串典子氏は熱伝導状態の微視的な理解に関連して、熱流の分布に関する新たな法則を発見した。今回発見されたのは、定常熱伝導状態における微視的な熱流の分布に関する法則であり、いくつかの定常熱伝導系に対し普遍的に存在しているものと考えられる。この研究は、日本物理学会が発行する英文誌「Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)」2009年2月号に掲載されている。

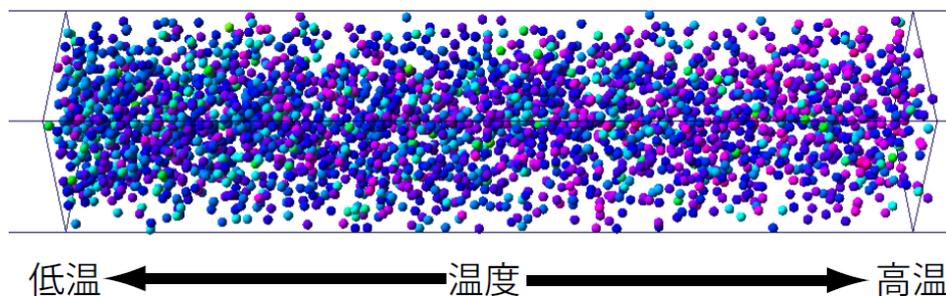


図 1. シミュレーションによる、熱伝導状態にある粒子系のスナップショット。球がそれぞれの粒子を表す。赤い粒子ほど運動エネルギーが（これに温度勾配方向の速度を乗じた、粒子が担う熱流の値も）大きく、青いものは運動エネルギーが小さい。

熱平衡状態で熱流分布を計算することは自明であるが、温度勾配のある場合の定常熱伝導状態での計算のための処方箋はない。そのため本研究では、計算機上で定常熱伝導状態を再現した。モデルは弾性的相互作用をする古典粒子系であり、気相状態のシミュレーションである。シミュレーションの結果の1例が、図1に示す、定常熱伝導状態での各粒子の運動エネルギーのスナップショットである。このような定常熱伝導状態における、系の中央に位置する断面を通過する微視的熱流の非平衡分布が本研究で詳細に調べられた。

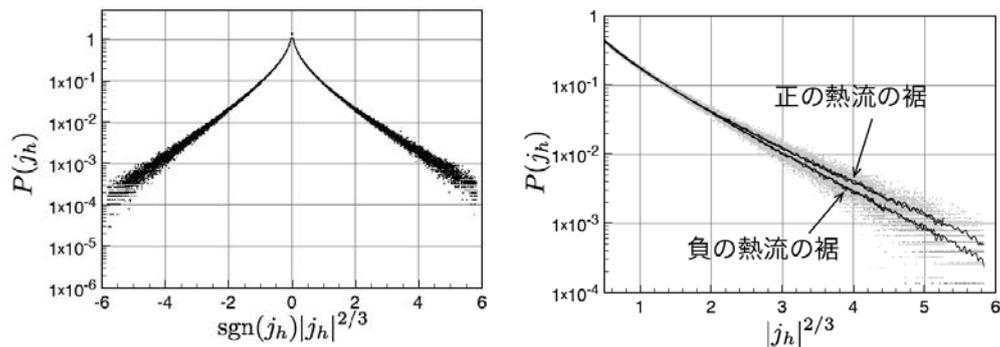


図 2. 微視的熱流分布。(a) 3つの温度勾配がある場合について、無次元化された熱流 j_h に対して、スケールされた分布関数 $P(j_h)$ を対数スケールでプロットした結果。(b) その結果を (疎視化して)、負の熱流の分布を折り返して正の熱流の分布に重ねて図示したもの。両者の裾の部分は、異なる温度の平衡分布に漸近している。

このようなシミュレーション解析から、定常熱伝導状態での非平衡熱流分布において、高温側から低温側に向かう熱流(正の熱流)と低温側から高温側に向かう熱流(負の熱流)で、それぞれの見かけの温度が異なるという結果が見出された。より正確には、微視的非平衡熱流分布の正と負の裾が、それぞれ異なる温度の平衡分布に一致するというものであり、正の裾は局所平衡温度より高い温度の平衡分布の正の裾に一致し、負の裾は、より低い温度の平衡分布の負の裾に一致する (図 2)。相互作用を全く行わない理想気体が温度の異なる境界から散乱されてくるような熱伝導状態を考えると、この法則は自明であり、正と負の裾はそれぞれ境界の温度に依存する平衡分布になる。ただしこの場合は正常な巨視的熱伝導を示さない。今回発見されたのは、正常な巨視的熱伝導状態を持つ系に対してであり、熱流分布がそのような性質を持つことは全く非自明である。実際、正負の裾の分布に対応する温度は両境界の温度とは一致しておらず、測定断面より平均自由行程の数倍程度離れた場所での局所平衡温度にそれぞれ一致する。

本研究は、熱伝導状態という一般的な現象で非平衡定常状態の分布の性質を明らかにした重要な成果として多くの研究者の注目を集めている。熱伝導に限らず、一般的な非平衡定常状態に関する理論研究の今後の発展が大いに期待される。

論文掲載誌: J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) No. 2, p. 023002

電子版: <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/78/023002/> (2月10日公開)

<情報提供: 湯川諭 (大阪大学)>