

相対論的酔歩と因果的熱力学

Relativistic Random Walk and Causal Thermodynamics

中村 匡[1]

Tadas Nakamura[1]

[1] 福井県大

[1] FPU

<http://mira.bio.fpu.ac.jp/tadas>

宇宙空間の高エネルギー粒子の酔歩は、統計加速や子拡散の問題で中心的役割を担う過程の一つである。時間スケールが粒子の速度拡散のスケールより十分に大きい場合は、この過程は実空間でのなんらかの拡散方程式によって記述されることが望ましい。非相対論極限の場合は、これは多くの場合、空間 2 階、時間 1 階の微分であらわされる双曲型の方程式で十分正確に記述される。この双曲型の方程式では、速度無限大の成分があらわれることはよく知られている。たとえば時刻 $t = 0$ で原点にデルタ関数の形の初期条件をあたえると、解はガウス関数になるが、これは x でもゼロにならない；つまり無限に速く伝搬する成分があるということである。

非相対論の範囲では、この無限大の伝搬速度はさしたる問題にはならない。これは速度空間での微視的物理学を単純化した極限であり、巨視的なタイムスケールで見ると無限とあつかってよい速度が存在するのは、理論的矛盾ではないからである。実際、有限の緩和時間を考慮して伝搬速度が有限になる拡散方程式は構築可能で、その緩和時間をゼロにもっていく極限で無限伝搬速度がでてくるといふ理論はよく知られている。ところが相対論の場合は、光速より速い情報伝搬は禁止されているので、無限速度で伝搬する成分があるという結果は、因果律を破ることになり、本質的な矛盾である。たとえば、双曲型の方程式だと非物理的な発散解が発生する問題などが指摘されている。

微視的物理学を考えて、なんらかの有限な緩和時間を仮定すれば、伝搬速度が有限に押えられる拡散方程式をつくることは可能だが、そうすると、個々の微視的過程の物理学を調べる必要があり、緩和時間より十分長い大規模現象にまで不要の計算を要求する事になる。したがって、微視的過程の如何にかかわらない、ユニバーサルな相対論的拡散方程式の構築が望まれる。

双曲型の方程式が無限の伝搬速度成分をもつという問題は、連続体の熱力学の相対論的拡張に関連して古くから議論されてきた。このような理論は、無限伝搬速度によって生じる因果律の破れをおぎなうのが目的であるので「因果的熱力学 (causal thermodynamics)」と呼ばれる。エネルギー・運動量の拡散流が、平衡状態からのずれの線形関数であらわされると仮定すると、得られる流体方程式は双曲型になり、粒子拡散と同様の無限伝搬速度の問題が生じる。これに対し、拡散流に 2 次の項まで含めるといふような解決策がいくつか提案されているが、いまだ決定打がなく、21 世紀になった現在でも議論が続いている。

本研究の目的は、この因果的熱力学の手法が、同じ問題をもつ双曲型方程式で記述される粒子拡散過程にも適用できるかをさぐることにある。これまでの結果では、因果的熱力学のいくつかの理論はそのままの形では粒子拡散には適用できないことが判明している。講演では現時点で得られている相対論的熱伝導の理論の問題点を概説し、また、非相対論極限では同じ方程式であらわされる熱伝導と粒子拡散の違いを考察する。