OUKA
Osaka University Knowledge Archive

Title	Canonical Correlations of Energy-Momentum Tensor and Transport Coefficients from Lattice Gauge Simulation
Author(s)	Kohno, Yasuhiro
Citation	大阪大学, 2013, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/27469
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

【35】

氏名	河野泰宏（こうのやすひろ）
博士の専攻分野の名称	博士（理学）
学位記番号	第　25816　号
学位授与年月日	平成25年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 理学研究科物理学専攻
学位論文名	Canonical Correlations of Energy-Momentum Tensor and Transport Coefficients from Lattice Gauge Simulation （格子ゲージシミュレーションによるエネルギー運動量テンソルのカノニカル相関と輸送係数の測定）
論文審査委員	（主査） 教授　浅川　正之 （副査） 教授　小川　哲生　　教授　保坂　淳　　准教授　阪口　篤志 准教授　佐藤　透

論文内容の要旨

近年の高エネルギー重イオン衝突実験で生成されたQCD物質の時空発展は、低粘性の相対論的流体模型で良く記述することができる。しかし、流体模型は状態方程式や輸送係数などのパラメータに依存しており、これらのパラメータは微視的理論（重イオン衝突ではQCD）により決定されるべき物理量である。

本論文では相対論的散逸流体理論として知られるIsrael-Stewart（IS）理論及びQCD物質の輸送係数に着目し、第一原理計算である格子ゲージシミュレーションを用いて

1）輸送係数間の比の測定による流体模型のパラメータの制限
2）粘性流の伝搬速度の解析
3）粘性流に対する緩和時間の評価

を行った。

はじめに、場の理論において久保公式に緩和時間近似を適用することで「剪断及び体積粘性係数と対応する各緩和時間の比」と「エネルギー運動量テンソルのカノニカル相関」の関係式を定式化した。エネルギー運動量テンソルのカノニカル相関は、格子ゲージシミュレーションの観測量であるが、紫外発散を含んでおり物理量として解釈するためには適切な正則化が必要となる。本論文では有限温度と零温度におけるカノニカル相関の差を物理量と定義することで正則化を実行した。

しかし、この正則化だけでは非負であるべき輸送係数間の比が負になる結果が得られた。この結果は、格子上で測定されるエネルギー運動量テンソルのカノニカル相関が、紫外領域において上述の正則化では除去できない温度依存項（contact term）を含んでいることを意味している。contact termについてはEuclid空間において演算子積展開（OPE）による解析結果が知られており、格子ゲージシミュレーションの観測量である熱力学量に関係づけられている。本論文では、contact termが定式化の出発点である久保公式にどの程度寄与するかを解析的に評価し、「contact termは久保公式には寄与せず、そこから導出される輸送係数間の比にも寄与しない」という結論を得た。

以上の議論に基づき、OPEの結果を利用して格子上のカノニカル相関から紫外発散とcontact termの寄与を除去することで、「剪断及び体積粘性係数と対応する各緩和時間の比」の温度依存性を決定した。この解析により、流体模型におけるパラメータに第一原理的に制限を与えることができた。

続いて輸送係数間の比の測定結果を用いて、IS理論における剪断粘性流と体積粘性流の伝搬速度 v_T、v_Lについて解析を行った。これら伝搬速度は上述の輸送係数間の比と熱力学量のみで記述される。解析の結果、各伝搬速度に対して $0.5 \leqq v_T^2 \leqq 0.6$ 及び $1.0 \leqq v_L^2 - c_s^2 \leqq 1.2$ という制限を得た（c_sは音速）。この解析から、体積粘性の効果も取り入れたＩＳ理論に基づく流体模型は因果律を破ることが明らかとなった。

最後に、比剪断粘性に対する仮定 $\eta/s=1/4\pi$ と上述の伝搬速度の解析結果から、粘性流に対する緩和時間 τ の見積もりとして $\tau \sim O(10^{-2}) - O(10^{-1})$fm を得た。この結果は重イオン衝突の典型的な時間スケール$\sim O(10^{1})$fmと比べて短い値であり、重イオン衝突で生成されるQCD物質の低粘性流体描像を支持するものである。

論文審査の結果の要旨

強い相互作用の基礎理論である量子色力学において、高温高密度において存在するクォークグルーオンプラズマ相は、近年の実験的研究により粘性の非常に小さい強結合系であることが明らかにされてきた。高エネルギー原子核衝突において生成されたクォークグルーオンプラズマの時間発展を巨視的に記述するためには粘性をゼロとした完全流体的記述が比較的よいとされているが、粘性も考慮するためには、粘性を取り入れた流体力学方程式である非相対論的Navier-Stokes方程式を素朴に相対論的にしただけでは、因果律が破れるなどの問題があることが知られている。そのため、これらの問題を回避するために、より多くの輸送係数を導入したIsrael-Stewartによる定式化などが試みられ、実際に数値計算による研究で使用されてきた。しかし、これらの定式化において新たに導入される輸送係数は、上述のようにクォークグルーオンプラズマは量子強結合系であるので第一原理計算によって計算されるべきものであるにもかかわらず、この論文以前には古典的輸送理論や摂動論による評価などしか行われてこなかった。

本論文ではIsrael-Stewart理論において新たに導入される、ずれ応力と体積応力のそれぞれに対する緩和時間という２つの輸送係数と、それらのずれ粘性と体積粘性との比という量に着目し、線形応答理論、緩和時間近似、格子ゲージ理論による大規模第一原理計算による結果を統合することにより、それらの値を初めてグルーオンプラズマ（クォークを含まない量子色力学）に対して第一原理に基づいて導出した。特に格子ゲージ計算においては、格子間隔や格子の大きさに対する依存性が小さいことを確かめるためにそれぞれのパラメーターについていくつかの格子を用意し、十分な統計を得るため各格子において最高で数十万～百万個のゲージ配位を生成して計算を行った。また、格子ゲージ計算は４次元ユークリッド空間で行われるのに対し、線形応答理論は４次元ミンコフスキー空間に対するものなので、その２つの計算の間の関係には十分留意する必要がある。本論文では、４次元ユークリッド空間において存在する温度に依存した接触項の効果は４次元ミンコフスキー空間での線形応答理論には現れないことを注意深い解析により示し、その上で適切な引き算操作により、格子ゲージ計算による結果から、これらの輸送係数の比を求めることに成功した。更に、この結果を用いてIsrael-Stewart理論における縦波、横波の伝播速度についても評価を行い、横波に対しては因果律は保たれるが、縦波に対して因果律が保たれない可能性を示した。この結論は、現在広く使われているIsrael-Stewart理論によるNavier-Stokes理論の拡張も、グルーオンプラズマに対して適用する際には因果律を保障しない可能性があるという意味で不十分である可能性を示唆し、重大である。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。