

# グラディエントフローによる 格子ゲージ理論のエネルギー運動量テンソル

九州大学 大学院理学研究院 教授

鈴木 博



## 研究の背景

自然界の基本構成要素である素粒子は、ゲージ理論という高い対称性を持つ場の量子論で記述されます。場の量子論とは自由度が無限大の量子力学ですが、私たちは無限大を直接扱えないので、まず理論を有限の自由度で近似し（この操作を「正則化」と言います）、計算の最後でこの正則化を外すことで理論を定義します。本来は連続的な時間と空間とを離散的な格子目で近似する正則化は「格子ゲージ理論」と呼ばれますが、これは素粒子の強い相互作用（量子色力学）の非摂動論的ダイナミクスを解析できる今のところ唯一の正則化で、強い相互作用の物理の解明にこれまで驚くべき成功を収めてきました。

しかし一方で、格子ゲージ理論にはその構成上、連続的な時間や空間に関係した対称性と相性が悪いという欠点があります。時間と空間の対称性は、エネルギーや運動量と関連したエネルギー運動量テンソル（EMT）という物理量の存在を意味します。そしてEMTは、エネルギーや運動量だけでなく、回転に付随した角運動量やスピン、またスケールの変換に付随したスケール次元などの基本的物理量を構成するものになります。こうした理由から、格子ゲージ理論におけるEMTの構成は古くからの重要な、しかし難しい問題でした。

## 研究の成果

この研究では、グラディエントフローという手法を用いて、格子ゲージ理論におけるEMTの全く新しい構成法を考案しました。グラディエントフローとは、ゲージ理論の力学変数を一種の熱拡散方程式に従って仮想的な時間の方向に発展させるものです。場の量子論では、一般に計算結果が無限大となり、有限の物理量を得るには

「くり込み」と呼ばれる操作が必要です。実はグラディエントフローは、このくり込みを行った量を自動的に与える、という不思議な性質を持っています。くり込まれた有限の量が正則化によらないことに注目すると、この手法を用いて異なった正則化の間を橋渡しする可能性が示されます。ゲージ理論には次元正則化という時間や空間の対称性と相性のよい正則化があり、EMTの表式もよく理解されています。この表式とグラディエントフローによる有限な表式を解析的計算で結びつけたのが、私たちの構成法です。

なお、この研究は、EMTとグラディエントフローという、一見まったく無関係な概念を結びつけた点に意外性があるのですが、この研究の問題意識や着想は国内外の研究者の方々からの示唆によって得られたものです。こうした研究交流を可能にして頂いた科研費にはたいへん感謝しております。

## 今後の展望

私たちの構成法の本格的応用はまだ始まったばかり（図1、図2）で、今後、時間と空間の対称性に関連した物理、例えば、強い相互作用をする理論の熱力学、輸送係数、バリオンのスピン・運動量構造、共形場理論の物理などへの応用が大いに期待されます。

## 関連する科研費

平成18-21年度 基盤研究 (C) 「格子ゲージ理論の新しい可能性」

平成23-27年度 基盤研究 (C) 「超対称性理論の非摂動論的定式化と数値シミュレーション」

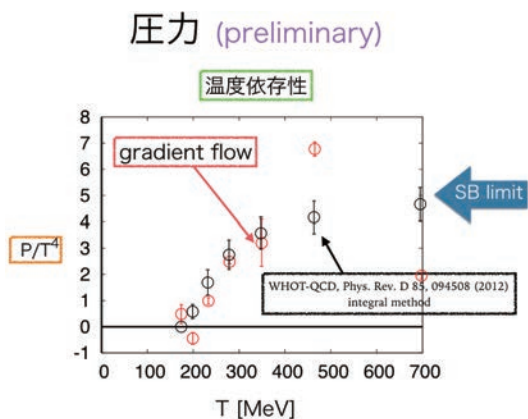


図1 WHOT QCD collaborationによる量子色力学の熱力学量に対するpreliminaryな結果。黒丸が従来の結果、赤が新しい定式化によるもの。（横軸：温度、縦軸：温度で規格化した圧力）

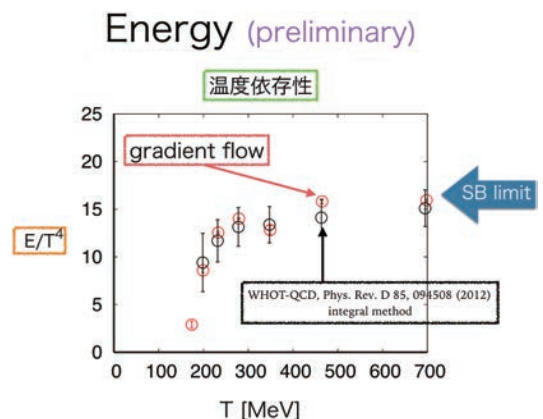


図2 図1と同じ。（横軸：温度、縦軸：温度で規格化したエネルギー密度）