

# 高温高密度における宇宙初期及び中性子星コアのクォーク構造の解明

## Quark structure at high temperature and high density in the early universe and the core of a neutron star

プロジェクト代表者: 吉永尚孝(理工学研究科・教授)

Naotaka Yoshinaga (Faculty of Science, Professor)

### 1 研究概要

核子を構成するクォークやグルーオンは量子色力学(QCD)で記述できるが、QCD によると高温、または高バリオン密度で、核子物質が相転移を起こし、クォークが核子としての閉じ込め状態から解放されてクォーク・グルーオンプラズマ状態になると言われている。最近の高エネルギー実験により、金と鉛などの衝突によって生成されている物質の性質を、その物質の粘性がゼロと仮定した流体模型でうまく記述できることがわかってきた。QCD を第一原理的に解く数値計算手法である格子 QCD は、高バリオン密度系に対する物理量の計算が原理的に不可能であるという問題点を抱えている。また、その方法ではクォークの動力学量を計算するのが非常に困難である。そのため、格子 QCD に代わって、高バリオン密度系に適用でき、動力学量を計算することができる新しい模型が渴望されてきた。本研究では、クォーク多体系を記述する枠組みとして分子動力学法の理論的模型を提案すると共に、ハドロン・クォーク相転移やクォークの動力学量を詳細に調べた。

### 2 研究結果

この研究では、最初にクォーク多体系に対する分子動力学模型の理論的な枠組みを考案した。特に3種類の物質、すなわち、ゼロ温度有限バリオン密度物質、有限温度有限バリオン密度物質、有限温度ゼロバリオン物質についてシミュレーションを行い、結果を解析した。ゼロ温度有限バリオン密度物質に対しては、クォークを擬似的にフェルミオンとして扱うためにパウリポテンシャルを導入し、パウリ原理を再現した。また、カラー依存相互作用、核力を再現するためのメソン交換相互作用、そして、クラスター内のクォークの運動を扱うための重心エネルギーの取り扱いについても調べた。異なる  $u$ ,  $d$ ,  $s$  クォークの比率から成る物質に対して、摩擦冷却方程式を解き、基底状態のバリオン物質のよく知られている状態方程式をメソン交換力に関するパラメータを調節することにより再現した。図は  $ud$  クォーク物質 に対する有限温度・有限密度の相図を示している。

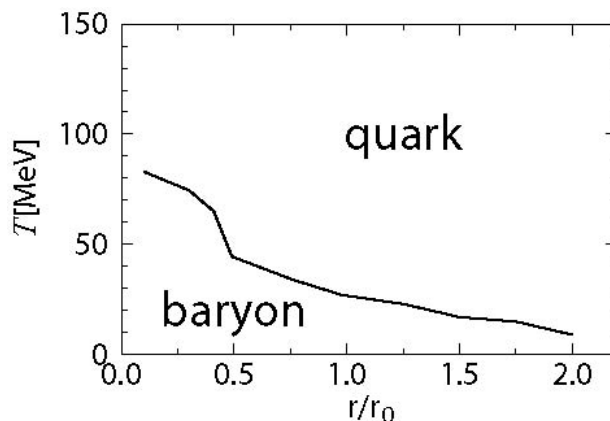


図  $ud$  クォーク物質に対する有限温度・有限密度の相図

本計算では、バリオン・クォーク相転移が起こる際に、クラスター内のクォークの運動量が解放される状態方程式のソフトニングの現象が見られた。また、バリオン・クォーク相転移はクォークの波束が重なり合うことに引き起こされるメカニズムが示された。有限温度有限バリオン密度物質に対しては、熱平衡状態を作るための理論的な枠組みと、熱力学量の解析方法について調べた。この計算では、バリオン・クォーク相転移の臨界温度として、比熱の変化がもっとも大きい点を定義し、それを用いて相図を描いている。有限温度ゼロバリオン物質に対しては、輸送係数の計算方法を用いて、今特に注目されている粘性係数が計算されている。格子 QCD による粘性係数の計算は、クォークの自由度を凍結したクエンチ近似格子 QCD でのみ行われているが、クォークの自由度が重要と思われるため、本計算は物理的意義が高いと思われる。粘性係数をエントロピーで割った比は、物質が液体的であるか気体的であるかを示す重要な量となっている。本計算で、その比は非常に小さい値をとり、クォーク物質が液体的であることを示した。これは従来からクォーク物質は気体であるとする説を覆すものとなっている。

### 3 まとめ

今回の研究では、分子動力学を様々なクォーク物質に適応しその状態を調べた。特に、他のモデルでは計算することのできないクォークの粘性係数を分子動力学法を使って微視的に求めることに初めて成功したと言える。

### 4 参考文献

1. *Stability and structure of quark matter in a molecular dynamics framework*

Y. Akimura, T. Maruyama, N. Yoshinaga and S. Chiba,  
Nucl. Phys. **A749**, 329 (2005)

2. *Molecular dynamics simulation for the baryon-quark phase transition at finite baryon density*

Y. Akimura, T. Maruyama, N. Yoshinaga and S. Chiba,  
Euro. Phys. Jour. **A25**, 405 (2005)