

氏 名 折 戸 学

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第263号

学位授与の日付 平成9年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 天文科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Cosmolgical Phase Transition and Inhomogeneous  
Primordial Nucleosynthesis

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 観山 正見  
教 授 藤本 眞克  
教 授 木下 宙  
助 教 授 梶野 敏貴  
教 授 定金 晃三（大阪教育大学）

## 論文内容の要旨

We study the quark-hadron phase transition in the early Universe and the effect of baryon density inhomogeneities that emerge from this transition on primordial nucleosynthesis. We try to make clear the relation between the QCD parameters and the astronomical observable and to find the observational constraints on these parameters. We calculate the amplitude of baryon-number fluctuations and the mean separation distance between fluctuations using the finite temperature

effective theory. We then analyze primordial nucleosynthesis in an environment with these inhomogeneous distribution of baryon density and compare the predicted elemental abundance with observation. Through the comparison of these calculation with the observation, we discuss the sensitivity of elemental abundance to the physical condition of baryon density inhomogeneities.

We first estimate the nucleation rate of hadron bubble during the supercooling epoch and study the evolution of baryon-number density at the constant-temperature coexistence epoch. We calculate the baryon permeability through the phase boundary using the chromoelectric flux tube model. In this calculation, we consider the temperature dependence of the constituent quark mass and that of the string tension suggested from lattice QCD simulation. We find that although the flux of baryons evaporating from QGP is strongly depend on the quark mass and string tension at critical temperature, this flux is still sufficiently small, suggesting that the baryon number is no easily transferred from QGP to hadron phase. For realistic value of quark mass and string tension The resultant amplitude of baryon density fluctuation is very huge and have a significant effect on primordial nucleosynthesis yields.

We then study the inhomogeneous primordial nucleosynthesis in order to compare with observational constraints. we consider the effects of fluctuation geometry on primordial nucleosynthesis. For the first time we consider condensed cylinder and cylindrical-shell fluctuation geometries in addition to condensed spheres and spherical shells. We also consider implications of the possible detection of a high D/H abundance in a Lyman- $\alpha$  absorption cloud at high redshift and implied chemical evolution effects of a high deuterium abundance. We find that a cylindrical shell geometry allows for an appreciably higher baryonic contribution to be the closure density ( $\Omega_b < 0.2$ ) than that allowed in spherical inhomogeneous or standard homogeneous big bang model. We also find that inhomogeneous primordial nucleosynthesis in the cylindrical shell geometry can lead to significant Be and B production.  $[Be] = 12 + \log(Be/H) \approx -3$  is possible while still satisfying all of the usually adopted light-element abundance constraints.

## 論文の審査結果の要旨

本論文は、宇宙QCD相転移による非一様バリオン密度揺らぎの発生機構を理論的に考察し、この物理過程がビッグバン元素合成にもたらす影響を定量的に研究するとともに、元素合成量の理論的予測値と天文観測値とを詳細に比較検討することによって宇宙論パラメータの一つである質量密度パラメータ $\Omega$ (バリオン)値を決定し、暗黒物質のバリオン起源説の実証を試みた研究を博士論文としてまとめたものである。論文は5章より構成されており、第1章でビッグバン宇宙論、相転移、元素合成理論、暗黒物質問題等の研究に関するこれまでの発展と問題点をレビューしている。第2章で宇宙QCD相転移のダイナミックスの考察と非一様バリオン密度揺らぎの発生機構の解明を試み、第3章で非一様ビッグバン元素合成の研究とその宇宙論に及ぼす影響について考察し、第4章で非一様元素合成モデルを検証するための種々の天文観測を提案している最後に、第5章で論文全体のまとめを行なっている。

これまでのビッグバン元素合成の研究では、元素合成過程は一様なバリオン密度分布のもとで起こったと仮定する。しかし、このモデルは小さな値 $\Omega$ (バリオン)=0.02-0.06を予言し、最近の銀河・銀河団・超銀河団の様々な宇宙スケールでの観測から示唆されている大きな $\Omega$ (バリオン)=0.1-0.3と明らかに矛盾する。本論文出願者は、ビッグバン元素合成の直前に起こったとされる宇宙QCD相転移に注目した。即ち、弱い一次QCD相転移が非平衡バリオン輸送過程のためにクォーク・グルーオン・プラズマ相とハドロン相とが共存するフラクタル的な空間構造に非一様バリオン密度揺らぎを作り出し、これまでの一様性の仮定を崩してしまう点である。そこで、出願者はまず、初期宇宙の高温度で有効なQCDモデルを用いて相転移中でのハドロン相の核化率、および、宇宙再加熱後のバリオン数輸送過程の時間発展を解くことによって、相転移終了時に非常に大きなバリオン密度揺らぎが作られることを定量的に明らかにした。次に、これを初期条件として元素合成を計算できるプログラムを自ら開発した。数多くの数値計算を繰り返した結果、現在の天文観測から得られている重水素、ヘリウム、リチウム量に対する制限を満たすような大きな値 $\Omega$ (バリオン)=0.1-0.2が可能であることが明らかにされた。種々の幾何学的な非一様密度構造での元素合成計算を調べたところ、ある平均間隔で分布する円筒の外殻上が高密度領域にあたる非一様構造が最も大きな $\Omega$ (バリオン)=0.2値を取りうることを明らかにした。さらに、この非一様モデルは、一様モデルに比べて千倍から一万倍も多量のベリリウム、ポロン等、重元素を初期宇宙のビッグバン元素合成で作ると予言する。

これらの研究は、より精密化された現実的な有効QCDモデルと宇宙論モデルとを結合して行なった宇宙相転移でのクォーク・ハドロン過程の研究の一つとして位置付けられ、この研究が契機となって今後ますます宇宙QCD相転移の研究が本格的に行なわれるものと期待できる。また、非一様ビッグバン元素合成モデルによって $\Omega=0.1-0.3$ を持つとされる暗黒物質のバリオン起源説をサポートする結果が得られたことは画期的なことであり、さらに、初期宇宙の物理過程を天文観測から明らかにしうる方法を提供したことで、銀河ハロー矮星や高赤方偏移を持つクエーサー吸収線系の天文観測をこれまで以上に強く動機付ける研究として、高く評価できる。

第3章および第4章の研究内容については、既に第一論文がAstro-physical Journal誌に掲載され、出願者を筆頭著者とする第2論文も同誌への掲載が受理されている。第2章の研究内容については現在学術専門誌への論文投稿を準備中である。これらの研究成果は幾つかの共同研究に基づいているが、研究の問題点の発掘および推進は出願者が中心となっていって行なわれてきたものであり、出願者の寄与が十分大きいものと認められ、本論文が天文科学において博士（理学）の学位を受けるにふさわしいものと判断し、審査委員全員により合格と判定した。