

学 位 論 文 題 名

Dust in the Early Universe: Formation in Population III  
Supernovae and Destruction in Interstellar Shocks

(宇宙初期のダスト：種族 III 超新星爆発時における  
形成と星間衝撃波による破壊)

学位論文内容の要旨

1. 背景

近年の観測は、宇宙初期にも大量のダストが存在することを示唆する。ダストは星の光を吸収し熱輻射として放出するため、高赤方偏移の観測から宇宙初期の星や銀河の形成率を評価する上で大きな影響を及ぼす。また理論的研究は、金属を含まないガスから形成される種族 III 星は  $100 M_{\odot}$  以上の大質量星であったと示唆するが、ダストの熱輻射による効果的なガスの冷却は  $1 M_{\odot}$  程度の典型的質量を持つ種族 II 星の形成を促す。それゆえ、宇宙初期に存在するダストは星や銀河の形成・進化史に重要な役割を果たす。

宇宙初期の星間空間中に存在するダストのサイズ分布や存在量は、超新星爆発時における形成と星間衝撃波による破壊のバランスで決定される。一方、ダストによる光の吸収量や熱輻射量は、ダストの化学組成やサイズ分布に大きく依存する。それゆえ本研究は、将来の観測から宇宙初期の星形成率を考察する際の基盤を構築するために、また大質量の種族 III 星から低質量の種族 II 星への星形成モードの転換がいつ起こるかを見積もるために、形成と破壊の両素過程を統合的に取り扱い、宇宙初期の星間空間中のダストの化学組成やサイズ分布、存在量の時間進化を明らかにすることを目的とする。

2. 種族 III 超新星爆発時におけるダスト形成

宇宙初期におけるダストの形成場所は、超新星爆発時に放出される ejecta 中に限られる。したがって本研究では、一連の研究の第一段階として、宇宙初期の超新星爆発時に形成されるダストの化学組成、サイズ分布、量の前駆星の質量依存性を明らかにするために、Umeda & Nomoto (2002) の種族 III 超新星爆発のモデルに基づいて、ダスト形成の計算を実行した。その結果、形成されるダストの種類やサイズは、ejecta 中の元素組成に大きく依存するが、前駆性の質量にはほとんど依存しないこと、前駆性の質量が  $8-40 M_{\odot}$  の core collapse 超新星ではその質量の 2-10% がダストとなり、前駆性の質量が  $140-260 M_{\odot}$  の大質量星の進化の結果として起こる pair-instability 超新星ではその質量の 7-30% がダストとして形成されること、などを明らかにした。

### 3. 各ダスト種の sputtering yield の評価

超新星爆発時に形成されたダストは、星間空間に放出された後、周囲の超新星爆発によって生じる星間衝撃波によって破壊される。衝撃波中ではガスは高温・高速であるため、ダストは sputtering によって支配的に破壊される。しかし sputtering による破壊効率、すなわち sputtering yield は、形成されたダスト種のほとんどに対して知られていない。それゆえ本研究は、過去の研究で解析的に導出された sputtering yield の準経験的公式を採用し、大量の実験データと EDDY の計算結果から必要なパラメータの値を決定して、各ダスト種の sputtering yield を評価した。このパラメータの決定により、様々な入射イオンに対しての各ダスト種の sputtering yield の予測が可能となり、sputtering yield はダスト種に依存して一桁程度の違いがあることがわかった。

### 4. 宇宙初期の星間衝撃波によるダストの破壊

星間衝撃波によるダストの破壊効率は、ダストの化学組成やサイズ分布だけでなく、超新星爆発の前駆星の質量や爆発のエネルギー、星間空間中のガスの密度にも依存すると考えられる。それゆえ本研究では、一連の研究の第二段階として、宇宙初期のダストの破壊効率のこれらのパラメータによる依存性を明らかにするために、得られた sputtering yield とダスト形成の計算の結果を用いて、星間衝撃波中のダストの破壊計算を実行した。sputtering によるダストの破壊は、ガスの温度・密度やダストとガスの相対速度にも依存する。したがって、衝撃波中のガスの温度・密度の時間進化とダストのサイズ分布を考慮したダストの運動を同時に取り扱って計算を行った。計算の結果、sputtering による破壊は sputtering yield だけでなく、ダストのサイズ分布に大きく依存することを明らかにした。さらに、各ダスト種の破壊効率の超新星爆発のエネルギーおよび星間空間中のガス密度依存性に対する近似式を導出した。

### 5. 星形成モードの転換時期の見積もり

大質量の種族 III 星から低質量の種族 II 星の星形成モードの転換がいつ起こるかを評価するためには、ダスト量および重元素量の時間進化を知る必要がある。本研究は、Umeda & Nomoto (2002) による超新星爆発時における重元素の放出量と、以上の計算で得られた超新星爆発時でのダストの形成量および宇宙初期のダストの破壊効率を基に、ダストの形成と破壊の素過程を統合的に取り扱う宇宙初期の化学進化モデルを構築し、宇宙初期の星間空間中のダスト・重元素の存在量を時間の関数として計算した。その結果、もし種族 III 星が大質量星に支配されていれば、その星形成モードの転換は、宇宙最初の星の形成からわずか数千万年以内に達成されることを明らかにした。これは結果的に、宇宙初期のダストの破壊は星形成モードの転換には影響を与えないことを示すが、ダストの形成と破壊を統合的に扱って、星形成モードの転換の時期の見積もったのは本研究が初めてである。

## 学位論文審査の要旨

主査	教授	小笹隆司
副査	教授	渡部重十
副査	教授	橋本正行
副査	助教授	羽部朝男
副査	助教授	橋元明彦

### 学位論文題名

## Dust in the Early Universe: Formation in Population III Supernovae and Destruction in Interstellar Shocks

(宇宙初期のダスト：種族 III 超新星爆発時における  
形成と星間衝撃波による破壊)

近年の観測結果は赤方偏移が 5 以上の宇宙初期でも大量のダストが存在することを示唆する。ダストはそれ自身の熱輻射や表面上でのガスの有効な冷却材である水素分子の形成を通して、星間ガスやガス雲のエネルギーバランスを支配し、星形成率や形成される星の質量を決定する宇宙の重要な構成要素である。また、ダストによる星の光の減光や赤化およびダストからの熱輻射は、宇宙背景輻射の観測から宇宙初期での星や銀河の形成率等を推定する際に大きな影響をおよぼす。ダストによる光の減光量や熱輻射量は、ダストの存在量だけでなくその化学組成やサイズに強く依存する。従って、宇宙初期の星間空間に存在するダストの化学組成、サイズ分布、存在量の知見は宇宙初期における星や銀河の形成・進化を解明する際に不可欠である。しかしながら、宇宙初期のダストの化学組成やサイズは我々の銀河系のものと同じであり、またその存在量をパラメーターとして星や銀河の形成等が議論されているのが現状である。宇宙初期のダストの形成場所は超新星爆発時に放出されたガス中に限定され、その化学組成やサイズは我々の銀河系のものと同じでない。また星間空間に放出されたダストは近傍の超新星爆発によって発生した星間衝撃波によって破壊される。宇宙初期に存在するダストの化学組成、サイズ分布、存在量を明らかにするためには形成と破壊の首尾一貫した取り扱いが必要である。

申請者は、先ず、宇宙初期の水素とヘリウムからなるガスから誕生した大質量星の進化の結果おこる種族 III 超新星爆発時に放出されたガス中で形成されるダストの種類、サイズ分布及び形成量の前駆星の質量と爆発エネルギー依存性を調べた。放出されたガス中の形成場所の元素組成に応じて種々のダストが形成されるが、形成されるダストの種類や各ダスト種のサイズ分布の振る舞いは前駆星の質量や爆発エネルギーに殆んど依存しない。前駆星の質量が 8-40 倍の太陽質量である重力崩壊型超新星ではその質量の 2-10 % の、前駆星の質量が 140-260 倍の太陽質量である pair-instability 型超新星ではその質量の 7-30 % のダストが形成されること等を明らかにした。次に、星間空間中に放出された各ダスト種の近傍の超新星爆発により発生した星間衝撃波の自由膨張段階から Sedov-Taylor 段階中での破壊過程を調べた。具体的には、星間衝撃波によって掃かれた高速・高温ガス中でのダストの破壊の計算に必要な各ダス

ト種のスパッタリングイールドを算出し、衝撃波によって掃かれた星間ガスの温度・密度の時間変化とガス中でのダストの運動を考慮して、熱的・非熱的スパッタリングによる各ダスト種のサイズの変化および破壊効率を計算した。その結果、各ダスト種の破壊効率はスパッタリングイールドだけでなく初期のサイズ分布に強く依存する。平均半径が  $0.2\mu\text{m}$  以上のダストは殆んど破壊されないことを明らかにした。また、星間衝撃波を発生した超新星の爆発エネルギーと星間ガス密度の関数として各ダスト種の破壊効率を与える近似式を導出した。更に、標準的な宇宙モデル ( $\Lambda$ -CDM モデル) の下で、ダストの化学進化を記述する one-zone closed box モデルを構築し、上記研究で得られた超新星爆発時でのダスト形成量と星間衝撃波による破壊効率を用いて宇宙初期に存在するダストの存在量の時間変化を議論して以下のことを明らかにした。第一世代星の形成開始直後から星間空間に存在するダスト量は急激に増加する。星間衝撃波によるダストの破壊が効果的になる形成開始後 2-3 千万年後までは星間空間に存在するダスト量と全金属量の比はほぼ一定で  $\sim 0.3$  であり、その後減少する。星間空間の全金属量は第一世代星形成後 1 千万年程度で太陽大気金属量の  $10^{-4}$  倍に達し、遅くともこの時期までに大質量星から低質量星への星形成モードの転換が起こり得る。

申請者の研究は宇宙初期の星間空間に存在するダストの性質を解明するために世界に先駆けて種族 III 超新星爆発時でのダストの形成と星間衝撃波による破壊を統合的に取り扱った斬新的なものである。得られた研究成果は理論的研究や現在計画が進行中である次世代大型望遠鏡による赤外線からサブミリメートル領域での観測結果から宇宙初期での星や銀河の形成・進化を解明する際の基盤となる。また、得られた結果および本研究中に開発された計算手法は宇宙初期だけでなく我々の銀河系の超新星や超新星残骸の研究にも適用され得るものであり、宇宙における天体形成や物質進化の研究の進展に大きく貢献するものである。

よって、申請者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格があるものと認める。