

平成22年 6月11日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19740094
 研究課題名（和文） 宇宙初期のダストの物理化学進化とその観測および天体形成史に及ぼす効果の解明
 研究課題名（英文） Physical and chemical evolution of dust in the early universe and its effect on the observations and the star formation history
 研究代表者
 野沢 貴也（NOZAWA TAKAYA）
 東京大学・数物連携宇宙研究機構・特任研究員
 研究者番号：90435975

研究成果の概要（和文）：

宇宙初期の星間ダスト（星間塵）の供給源と考えられる超新星爆発において、放出されたガス中でのダストの形成と超新星残骸中での衝撃波によるダストの破壊を計算し、宇宙初期の超新星爆発時に星間空間へと供給されるダストの質量やサイズ分布を明らかにした。また得られた結果を基に、宇宙初期で期待されるダストによる可視紫外線領域の星間減光曲線を見積もった。さらに、超新星のタイプ（爆発時の外層の厚さの違い）によって、ダスト形成過程がどのように影響されるかを調べた。

研究成果の概要（英文）：

We investigated the formation of dust in the ejecta of supernovae that are considered to be sources of interstellar dust in the early universe. Then we studied the evolution of the newly formed dust in the shocked gas within the supernova remnants and revealed the size distribution and mass of the dust injected into the interstellar medium. Based on the results of these calculations, we estimated UV-optical extinction curves expected in the early universe. We also demonstrated how the formation process of dust depends on the type of supernovae through the varying thickness of their outer envelopes.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000	0	1,300,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	570,000	3,770,000

研究分野：星間物理学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：ダスト（星間塵）、超新星爆発、超新星残骸、可視光赤外線観測、物質進化

1. 研究開始当初の背景

近年の観測は、現宇宙年齢（約 137 億年）のわずか 10 分の 1 ほどの宇宙初期にも大量の星間ダストが存在することを示唆する。これら宇宙初期におけるダストの形成場所は、星の進化のタイムスケールから大質量星の進化の結果として起こる超新星爆発時に放出されるガス中に限られると考えられる。

ダストは、それ自身の熱放射やその表面上での水素分子の形成を通じてガスを効率的に冷却し、低質量星の形成を促進する。それゆえダストの存在は、金属に極めて乏しいガスから形成される太陽の数十から数百倍ほどの質量をもつ種族 III 星から、我々の銀河で観測される典型的質量が太陽質量程度の種族 II 星への星形成モードの転換に重要な役割を果たす。この星形成モードの転換がいつ実現されるかは、宇宙の星形成史を理解する上で重要な課題の一つになっている。

またダストは星の光を吸収し、吸収によって得たエネルギーを熱放射として放出する。それゆえ宇宙初期の星間および銀河間空間中に存在するダストは、種々の観測から宇宙初期の星形成率を評価する上で大きな影響を及ぼす。ダストによる減光量や熱放射量はダストの化学組成やサイズ分布、存在量に強く依存する。一方、宇宙初期のダストのサイズ分布や存在量は超新星爆発による供給と星間衝撃波による破壊のバランスによって決定される。

このように、宇宙初期のダストは天体の形成・進化および観測に様々な効果を与える。これらのダストの影響を評価して宇宙の進化を考察するためには、ダストの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種々のダストのサイズ分布や存在量の時間進化を明らかにすることが必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究課題では、

(1) 星間ダストの主要な形成場所と考えられる超新星爆発時に放出されたガス中でのダスト形成過程

(2) 超新星放出ガスと星間物質との衝突によって生じる星間衝撃波およびリヴァース衝撃波中でのスパッタリングによるダストの破壊過程

の計算を行い、超新星によるダスト供給量、衝撃波によるダストの破壊効率を明らかにする。そしてダストの形成と破壊の両素過程

を統合的に取り扱うダスト進化モデルを構築し、宇宙初期の星間空間中のダストのサイズ分布や存在量を赤方偏移の関数として見積もる。さらに、得られた結果から、

(3) 宇宙初期に存在するダストによる減光量と熱放射量の見積もり

(4) 大質量種族 III 星から低質量種族 II 星への星形成モードの転換時期の推定

を行い、宇宙初期のダストが種々の観測および天体形成史に及ぼす効果を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

研究代表者は、本研究課題に着手する以前の研究において、宇宙初期のダストの供給源である種族 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組成、サイズ、形成量の前駆星の質量依存性を明らかにした。この研究成果を基にして、本研究目的を遂行するために以下の研究を進める。

(1) 種族 III 超新星爆発におけるダスト形成計算結果に基づいて、リヴァース衝撃波によるダストの破壊計算を実行し、最終的に超新星爆発によって星間空間中に供給されるダストの組成・サイズ分布・放出量、前駆星の質量・爆発のエネルギー・星間ガスの密度依存性を明らかにする。

(2) 超新星爆発時におけるダストの形成と超新星残骸中でのダストの破壊を一貫して取り扱った計算の結果と、若い超新星残骸の赤外からサブミリメートル領域の現存する観測結果とを比較し、超新星爆発時のダスト凝縮過程および超新星残骸中でのダストの物理進化過程を考察する。

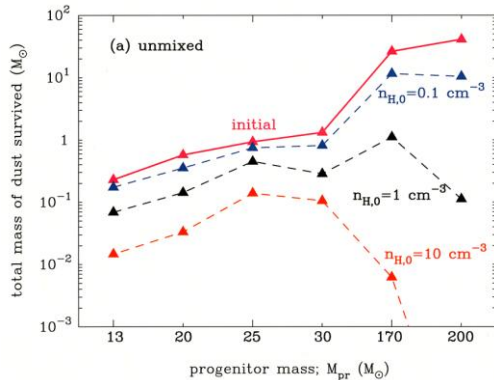
(3) 種族 III 超新星爆発だけでなく、その前駆星が様々な金属量を持つ超新星およびその進化段階の間に星の外層を失った超新星に対してダスト形成計算を実行し、形成されるダストの組成、サイズ、量の前駆星の金属量依存性および超新星のタイプ（外層の厚さ）による依存性を明らかにする。

(4) 宇宙の階層的構造形成シナリオに基づいて、ダストの形成と破壊を統合的に取り扱う宇宙初期のダスト進化コードを開発する。そして超新星爆発時に形成されるダストの組成、サイズ、量と星間衝撃波中でのダストの破壊効率を基に、宇宙初期のダストのサイズ分布と存在量の時間進化を計算する。

4. 研究成果

(1) 種族III超新星爆発時に形成される種々のダストのサイズ分布や形成量に基づいて、超新星残骸内を伝搬するリヴァース衝撃波によるダストの破壊計算を行った。その結果、以下のことを明らかにした。

- ① 衝撃波によって掃かれた高温のガス中では、スパッタリングによりサイズの小さいダストが支配的に破壊され、0.01-0.1ミクロン以上のサイズの大きいダストのみが星間空間へと放出される。
- ② それゆえ、超新星残骸中でのダストの破壊効率は、形成時でのダストのサイズ分布に大きく依存し、初期平均サイズが大きいダストほど破壊効率は小さい。
- ③ ダストの破壊効率はまた星間空間の密度に依存し、8-40太陽質量の星から起こる重力崩壊型超新星では、10-0.1/ccの星間水素密度に対して、0.01-1太陽質量のダストが星間空間に供給される（下図参照）。
- ④ 生き残るダストの一部は、フォーワード衝撃波後面に形成された密度の高いガス中に捕獲され、そのダストの組成は超金属欠乏星で観測されるFe, Mg, Siの存在量を再現できる可能性がある。

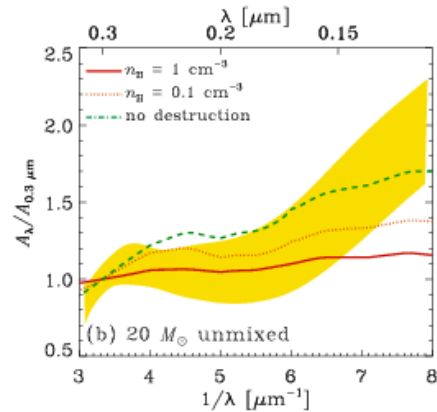


特に③のダスト放出量は、観測されている宇宙初期の大量の星間ダストの存在を説明するのに十分であり、超新星は実際に宇宙初期の重要なダストの供給源であることを示す。

(2) 上記(1)で得られた星間空間に放出される各ダスト種のサイズ分布と質量比を基に、ダストによる紫外可視光領域の星間減光曲線を計算し、高赤方偏移銀河での観測結果と比較した。結果は、下図とともに以下の①、②としてまとめられる。

① 星間空間中の密度が高いほど放出されるダストの半径は大きくなるため、密度の増加とともに減光曲線は波長に依存しなくなる。

② 計算された減光曲線は、赤方偏移 6.4 のクエーサーに対して観測された紫外線域の減光曲線と不確定性の範囲内で一致する。



特に②の結果は、宇宙初期では超新星爆発が星間ダストの供給源として主要な役割を果たしており、典型的サイズが大きいダストが支配的に存在していることの証拠を与える。

(3) 特異な Ib 型超新星 2006jc によって放出されたガス中でのダスト形成計算を行い、その結果を赤外天文衛星 AKARI による観測など種々の観測結果と比較し、形成されるダストの質量や温度について検討した。その結果、

- ① この超新星では爆発後およそ 50 日という早い時期に炭素質のダストが形成される。ただし、形成するダストの平均半径は 0.01 ミクロン以下と小さい。
- ② 観測されたダストの温度進化は、超新星内部での輻射吸収によるダスト加熱モデルで得られた温度進化と良く合う。また観測と理論の比較から見積もられたダスト形成量の上限値は、0.5 太陽質量である。
- ③ 新しく形成したダストに加えて、親星の進化末期の恒星風中で凝縮したより低温のダストが超新星周囲に存在する。
- ④ 星の進化理論とのモデルとの比較から、超新星 2006jc は太陽の 40 倍以上の質量の星が、一生の間に度重なる質量放出活動を経て超新星爆発に至った。

ことを明らかにした。これらの研究成果は、

- ① 超新星爆発の際の外層の厚さによって、形成するダストの凝縮日数やサイズは大きく影響される。
- ② ダストの凝縮時期および星周ダストの存在は、親星の爆発時の質量や爆発前の進化過程に重要な制限を与えることができる。
- ③ AKARI や SUBARU、MAGNUM、かなた望遠鏡など日本の最先端の観測機器と理論モデルのコラボレーションにより実現された。などの大きな意義と重要性を持つ。

(4) 赤外天文衛星 AKARI によって観測された超新星残骸 G292.0+1.8 の赤外スペクトルエネルギー分布と超新星衝撃波により加熱された星周ダストからの熱放射スペクトルの計算結果とを比較した。その結果、

- ① G292.0+1.8 の星周空間に存在するダストはシリケート質である。
- ② 星周ガスは均一に分布していて、水素原子密度で 0.5 /cc に対応する密度を持つ。

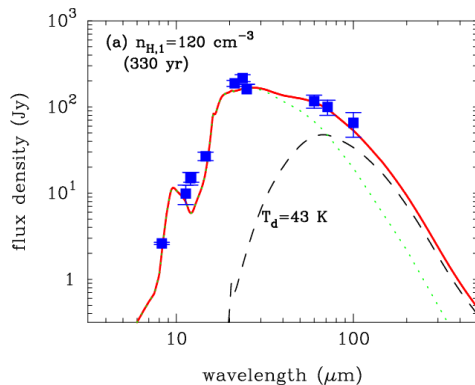
ことを明らかにした。本研究により、衝撃波によるダストの破壊・加熱・熱放射計算と赤外観測結果との比較は、星周密度構造や超新星親星の質量放出活動を探る有用なプローブとなることを示す。

(5) 重力崩壊型超新星のうち、その進化段階での質量放出により外層の水素をほとんど失った IIb 型超新星爆発でのダスト形成計算およびその後の超新星残骸中でのダストの進化計算を行った。その結果、

- ① IIb 型超新星で形成されるダストの平均半径は 0.01 ミクロン以下で、外層を失っていない II-P 型超新星のものに比べて一桁以上小さい。
- ② ダストのサイズが小さいため、形成されたすべてのダストはリヴァース衝撃波に掃かれた高温のガス中で破壊され、星間空間に放出されない。

ことを明らかにした。これより、超新星爆発によるダストの供給過程は超新星のタイプ（外層の厚さ）に大きく影響されること、また IIb 型超新星は星間ダストの主な供給源として寄与しないことを初めて示した。

さらに、これらのダストの形成・破壊計算を基に導出したダスト熱放射スペクトルは、その爆発が IIb 型と同等とされた Cassiopeia A 超新星残骸の赤外スペクトルを矛盾なく再現できることを示した（下図参照）。



ここで、計算された熱放射スペクトル（赤実線）は、衝撃波中で加熱されている 0.008 太陽質量の高温ダスト（緑点線）と衝撃波に掃かれていない 0.072 太陽質量の低温ダスト（黒破線）からなる。その後の遠赤外線観測は、0.06-0.075 太陽質量の低温ダストの存在を確認しており、本研究で予測した低温ダスト量と良く一致する。それゆえ本計算コードは、超新星残骸中でのダストの進化過程を考察する上で極めて有用なツールである。

(6) 超新星衝撃波による星間ダストの破壊計算を実行し、ダストの破壊効率とサイズ分布の変化を明らかにした。ダストの形成・破壊を整合的に取り扱った宇宙初期のダスト進化モデルは現在構築中である。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 15 件）

- ① Takaya Nozawa, Takashi Kozasa, Nozomu Tominaga, and 4 coauthors
“Formation and Evolution of Dust in Type IIb Supernovae with Application to the Cassiopeia A Supernova Remnant”,
The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 713, 2010, pp. 356-373
- ② Takaya Nozawa, Takashi Kozasa, Hideyuki Umeda, and 8 coauthors
“Origin and Nature of Dust in the Early Universe”
ASP conference series, Cosmic Dust -Near & Far-, 査読有, Vol. 414, 2009, pp. 247-265
- ③ Takashi Kozasa, Takaya Nozawa, Nozomu Tominaga, and 3 coauthors
“Dust in Supernovae: Formation and Evolution”
ASP conference series, Cosmic Dust -Near & Far-, 査読有, Vol. 414, 2009, pp. 43-63
- ④ Takaya Nozawa, Takashi Kozasa, Nozomu Tominaga, and 8 coauthors
“Early Formation of Dust in the Ejecta of Type Ib SN 2006jc and Temperature and Mass of the Dust”,
The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 684, 2008, pp. 1343-1350

- ⑤ Hiroyuki Hirashita, Takaya Nozawa, Tsutomu T. Takeuchi, Takashi Kozasa “Extinction Curves Flattened by Reverse Shocks in Supernovae”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Vol.384, 2008, pp.1725-1732
- ⑥ Takaya Nozawa, Takashi Kozasa, Asao Habe, and 5 coauthors “Evolution of Dust in Primordial Supernova Remnants: Can Dust Grains Formed in the Ejecta Survive and Be Injected into the Early Interstellar Medium?” The Astrophysical Journal, 査読有, Vol.666, 2007, pp.955-966

[学会発表] (計19件)

- ① 野沢 貴也 (口頭発表)
「Cas A 超新星残骸中のダストの一生」
日本天文学会 2010 年春季年会
2010 年 3 月 24 日
広島大学東広島キャンパス (広島県広島市)
- ② 野沢 貴也 (口頭発表)
「爆燃 Ia 型超新星爆発時におけるダスト形成」
日本天文学会 2009 年秋季年会
2009 年 9 月 14 日
山口大学吉田キャンパス (山口県山口市)
- ③ Takaya Nozawa (invited talk)
「Formation and Evolution of Dust in Hydrogen-Poor Supernovae」
Current Problems in Extragalactic dust
29 July 2009
Copenhagen, Denmark
- ④ 野沢 貴也 (口頭発表)
「Cas A 超新星残骸中のダストの進化と熱放射」
日本天文学会 2009 年春季年会
2009 年 3 月 24 日
大阪府立大学中百舌鳥キャンパス (大阪府堺市)
- ⑤ Takaya Nozawa (invited talk)
「Nature and Origin of Dust in the Early Universe」
Cosmic Dust - Near and Far -
15 September 2008
Heidelberg, Germany

- ⑥ Takaya Nozawa (contributed talk)
「Evolution of Newly Formed Dust in Population III Supernova Remnants and Its Impact on the Elemental Composition of Population II.5 stars」
IAU Symposium 255 Low-metallicity Star Formation: From the First Stars to Dwarf Galaxies
16-20 June 2008
Rapallo, Italy
- ⑦ 野沢 貴也 (口頭発表)
「Ib 型超新星 2006jc におけるダスト形成とダストの温度・質量」
日本天文学会 2008 年春季年会
2008 年 3 月 24 日
国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都渋谷区)

- ⑧ Takaya Nozawa (contributed talk)
「Evolution of Dust in Primordial Supernova Remnants and Its Influence on the Elemental Composition of Hyper-Metal-Poor Stars」
Origin of Matter and Evolution of Galaxies - from the dawn of Universe to the formation of Solar system -
4 December 2007
Sapporo, Japan
- ⑨ 野沢 貴也 (口頭発表)
「種族 III 超新星残骸中のダストの進化と次世代星の元素組成への影響」
日本天文学会 2007 年秋季年会
2007 年 9 月 28 日
岐阜大学 (岐阜県岐阜市)

[その他]
ホームページ等

<http://db.ipmu.jp/ipmu/ipmuno/publications/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
野沢 貴也 (NOZAWA TAKAYA)
東京大学・数物連携宇宙研究機構・特任研究員
研究者番号：90435975
- (2) 研究協力者
小笹 隆司 (KOZASA TAKASHI)
北海道大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号：90263368