

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400223

研究課題名(和文) 星周ダストをプローブとした大質量星の質量放出史と重力崩壊型超新星の多様性の解明

研究課題名(英文) Uncovering the mass-loss history of massive stars and the diversity of core-collapse supernovae through the circumstellar dust

研究代表者

野沢 貴也 (Nozawa, Takaya)

国立天文台・理論研究部・特任助教

研究者番号：90435975

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙初期の固体微粒子(ダスト)の起源に関する研究を行い、宇宙最初のダストは巨大質量星によって生成される可能性があること、また世界最先端のダスト進化モデルにより遠方銀河のダスト量と減光測を同時に説明できることを示した。一方Ia型超新星で観測される減光について考察し、その特異な減光測は主に星間ダストに起因すること、またその星間ダストの典型的サイズは銀河系のダストと比べて数倍小さいことを明らかにした。さらに隕石中で発見されるプレソーラー粒子に関して、そのサイズから形成時の物理環境を制限するとともに、星間空間での破壊や隕石母天体での同位体熱拡散に対して耐え得ることができる粒子サイズを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We investigate the origin of cosmic solid particles (dust grains) in the early universe. We find that very massive first stars could be the first sources of dust grains in the universe. We also show that large amounts of dust grains and flat extinction curves in high-redshift galaxies can be explained self-consistently by the state-of-the-art dust evolution model.

We study on the extinction of Type Ia supernovae, showing that the unusual extinction curves observed for Type Ia supernovae are predominantly caused by interstellar dust. We also demonstrate that typical sizes of the interstellar dust are a few times smaller than that in our Galaxy. On the other hand, we constrain the physical condition of supernova ejecta from the measured sizes of presolar grains which are discovered in meteorites. We also derive the sizes of presolar grains that can survive the destruction in the interstellar medium and the thermal diffusion of isotopes in parent bodies of meteorites.

研究分野：理論天文学

キーワード：ダスト 超新星爆発 減光曲線 大質量星 プレソーラー粒子 物質進化 可視光赤外線観測

1. 研究開始当初の背景

大質量星の進化末期における質量放出史および大質量星の進化の結果として起こる重力崩壊型超新星の観測スペクトルの多様性は、近代天文学において解明されるべき重要な研究課題である。特に質量放出は、その背景にある物理過程や星の質量との関連性は理論的にはほとんど理解されていないものの、星内部での元素合成や星表層の元素組成を変化させるとともに、超新星多様性を引き起こす主要な要因として考えられている。それゆえ、星の質量・質量放出・超新星多様性についての関係を観測的・現象論的に理解しておくことは、大質量星の進化とその終焉の解明だけでなく、恒星進化理論に基づいた星形成率の評価や化学進化の研究にも必要不可欠である。

大質量星の終末期の進化は、主系列期と比べてその進化のタイムスケールが極めて短いため、その時期の質量放出活動を観測的に直接究明することは困難である。それゆえ、超新星衝撃波と星周物質との相互作用時に放出される X 線や電波の観測から星周構造を類推し、それに対応した質量放出史を導く手法が一般にとられる (e. g., Dwarkadas & Gruszko 2012; Katsuda et al. 2014)。また超新星親星の質量は、爆発が起こる以前に撮られた画像から星の光度と有効温度を決定し、それらを H-R 図と比較することにより見積もられる (e. g., Smartt 2009)。しかし後者の研究では、星周ダストによる減光が考慮されていないため、星の見かけの光度を過少評価し、その結果超新星親星の質量を実際よりも小さく見積もっている可能性がある (Walmswell & Eldridge 2012)。

大質量星星周ダスト中のダスト形成は、主に超新星爆発の数年後に観測される星周ダストによる光の散乱や赤外線放射 (以下これらをまとめて「エコー放射」とよぶ) などから明らかになっている。星風中で形成されるダストのサイズ分布や量は、形成時のガスの密度に強く影響されるため、エコー放射の解析から得られたダストの性質は、ダスト形成時の密度環境、すなわち質量放出率を如実に反映する。また、星周ダストはその後超新星衝撃波に掃かれて加熱・破壊され、SN 1987A や Cassiopeia A など爆発後数十年から数百年が経過した超新星残骸の赤外線観測では、衝撃波によって加熱された星周ダストからの熱放射が捉えられている。衝撃波中でのダストの加熱効率もまたガスの密度に依存するため、観測から見積もられたダスト温度は星周構造を紐解く上で非常に有用なプローブとなる。それゆえ、星周ダストの物理素過程に伴う減光・熱放射と様々なタイプの超新星の可視赤外線観測との比較は、大質量星の質量放出活動を解釈する有効な手法であり、重力崩壊型超新星の多様性を解明する重要な手がかりを与える。

2. 研究の目的

本研究の目的は、(1) 大質量星星周ダスト中のダスト形成、(2) 超新星衝撃波による星周ダストの加熱・破壊の研究を行い、質量放出率の関数としての星風中でのダスト形成条件、および星周ガス密度の関数としての星周ダストの加熱・破壊効率、を明らかにする。また、輻射輸送計算コードを開発し、(3) 星周ダストによる超新星放射光のエコー放射と (4) 星周ダストの形成・破壊に伴う減光量や熱放射量を見積もる。そして、計算結果を様々なタイプの超新星の可視光赤外線の観測結果と比較することにより、星周ダストをプローブとして (5) 大質量星進化末期の質量放出史を明らかにし、(6) 質量放出活動と重力崩壊型超新星の多様性について議論する。

3. 研究の方法

大質量星星周ダストの形成、超新星衝撃波によるダスト破壊の研究を包括的に行い、本申請課題を遂行するための理論的枠組みを整える。また、ダストの減光・熱放射を取り扱う輻射輸送計算コードを開発し、これらのコードを駆使して得られた計算結果と既存の観測データとを比較することにより、大質量星の質量放出と超新星多様性について議論する。具体的には以下の研究を行う。

(1) 中心星の光度や質量放出率をパラメータとして大質量星星周ダスト中のダスト形成計算を実行し、ダストが形成する条件、および形成されるダストのサイズ分布や量を系統的に明らかにする。

(2) 様々なダスト初期サイズと星周ガス密度に対して、超新星衝撃波によるダスト破壊計算を実行し、星周ダストの破壊効率や生存量を超新星 (残骸) の爆発後の時間の関数として見積もる。

(3) 星周ダストによる超新星光のエコー放射の輻射輸送計算を行い、現存する観測結果との比較から、星周ダストの組成、サイズ分布、形成量を求める手法を確立する。

(4) 星風中でのダスト形成計算結果に基づき、質量放出率の関数としての星周ダストによる中心星の減光量を導出する。そして星周ダストによる減光が、爆発前の超新星親星の観測 (光度や有効温度) から得られた質量の見積もりにどの程度影響を与えるかを調べる。

(5) (4) の研究から得られた結果を基に、質量放出史と重力崩壊型超新星のタイプの多様性の関係を明らかにする。また同時に、星風中でのダスト形成効率と衝撃波によるダストの破壊効率についての議論も行う。

4. 研究成果

(1) 宇宙最初の巨大質量星による炭素質ダストの形成

今世紀に入ってから、宇宙初期（現在の宇宙年齢のおよそ 10 分 1 程度）にも大量の星間ダスト（星間塵）が存在することが確認されている。この発見以降、初期宇宙でのダストの起源は解明されるべき重要な研究課題となっており、これまで数多くの議論が展開されている。

本研究では、宇宙最初の星として有力視されている太陽の 500 倍もの初期質量をもつ種族 III 星に対して、その表面から放出されるガス中でのダスト形成の可能性を調べた。その結果、このような巨大質量星は、その寿命の間におよそ太陽質量程度の炭素質ダストを生成し得ることを明らかにした（図 1）。また一連の計算結果を基に、星風中におけるダスト形成条件や質量放出率の関数として形成されるダストの質量と平均サイズを予測する経験式を導いた。

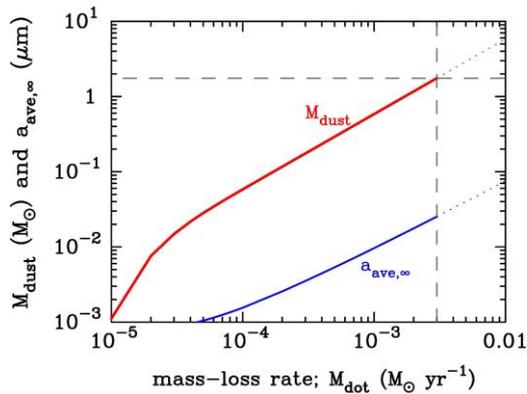


図 1 : 巨大質量星の質量放出率の関数としての形成され得る炭素質ダストの総質量 (M_{dust}) と平均半径 ($a_{\text{ave},\infty}$)。図より、星が 1 年あたり太陽の 300 分の 1 程度の質量のガスを放出する場合、そのガス中で 0.02 ミクロンの平均半径をもつ炭素質ダストが太陽質量の 1.7 倍もの量で形成されることを示す。

(2) 宇宙初期における大量のダストと特異な減光曲線の起源

高赤方偏移動ケータの減光曲線は、近傍の銀河のものとは異なることが知られている。また、このようなケータの母銀河中には大量の星間ダストが存在することも確認されている。これらの観測は、宇宙初期において星間ダストが急速に増加し、またそのダストの性質が現在の宇宙のものとは異なっていることを示唆する。

本研究では、ダストのサイズ分布を考慮した世界最先端の星間ダスト進化モデルに基づき、高赤方偏移動ケータの減光曲線とその母銀河のダスト量の進化について調べた。

その結果、ケータの母銀河中に密度の高い分子雲が豊富に存在していれば、ダスト表面上への重元素ガスの降着とダスト同士の合体成長が効率的に起こり、宇宙初期で観測された大量のダストの存在と特異な減光曲線を同時に説明できることを示した（図 2）。また、このような宇宙初期における炭素質ダストは、グラファイトではなく主に非晶質炭素であることも突き止めた。

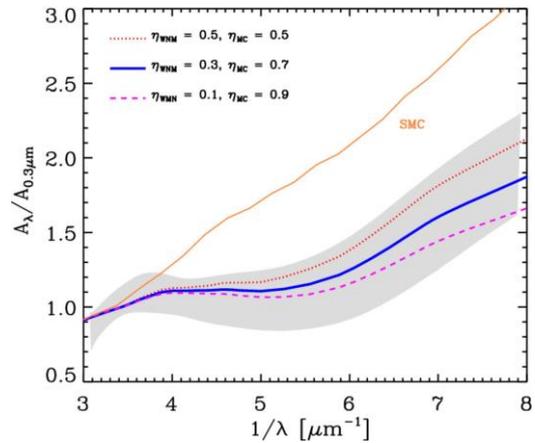


図 2 : 星間ダストのサイズ分布進化計算から得られた 1Gyr でのケータの紫外減光曲線。点線、太い実線、破線は、ケータ母銀河中の分子雲の質量割合がそれぞれ 0.5、0.7、0.9 として計算した結果、影付きの領域は赤方偏移動 6.2 のケータ J1048+4637 で観測された減光曲線のレンジを示す (Maiolino et al. 2004)。比較のため、小マゼラン雲の減光曲線は細い実線で示される。

(3) プレソーラー A1203 粒子のサイズから超新星放出ガスの物理条件を探る

プレソーラー粒子は、隕石中で発見され、太陽系外にその起源をもつと考えられる固体微粒子である。その代表的なものの一つにプレソーラー A1203 粒子があり、その多くは 0.5 ミクロンより大きくまたそのいくつかは同位体組成の特徴から超新星爆発時に形成されたと推測されている。

本研究では、この超新星起源の A1203 粒子の形成環境を調べるために、超新星放出ガスの様々な密度・冷却率に対してダスト形成計算を行った。その結果、隕石中で発見される 0.5 ミクロンより大きい A1203 粒子は、球対称の超新星爆発モデルによって予想されるよりも一桁以上密度の高いガス中で形成される必要があることがわかった（図 3）。これはつまり、超新星放出ガスは一様ではなく、非常に密度の高いガス塊として不均質に分布していることを意味する。このように、プレソーラー粒子の測定されたサイズに基づいてその形成環境に制限を与えたのは、本研究が初めてである。

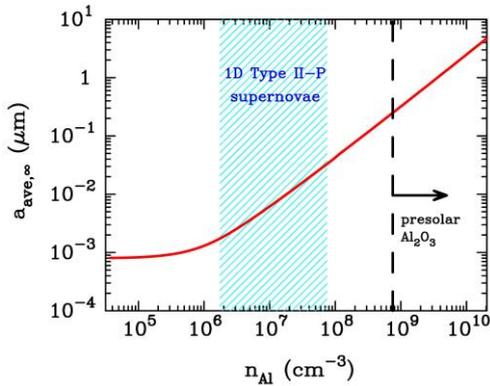


図3：凝縮時におけるAl原子の数密度の関数として計算したAl₂O₃粒子の平均半径（実線）。Alの数密度が高いほど、凝縮するAl₂O₃粒子のサイズは大きくなる。網掛けの領域は、球対称の典型的な超新星モデルから見積もられた放出ガス中のAl原子の密度範囲（Kozasa et al. 2009より）。隕石中で発見された直径0.5ミクロン（半径0.25ミクロン）以上のAl₂O₃が形成されるためには、球対称の超新星モデルが予想するよりも一桁以上高い密度（破線）が必要であることがわかる。

(4) Ia型超新星の特異な減光測を引き起こす星間ダストの性質

本研究課題は、大質量星から起こる重力崩壊型超新星の星周ダストをその形成過程・エコー放射から究明することを目指すものである。しかしこの解析・手法は、白色矮星から起こるIa型超新星の減光と星周（星間）ダストの関係についても議論が可能であるため、本研究の対象天体としてIa型超新星も含めることとした。

Ia型超新星は、その一様な絶対光度と放射スペクトルから、宇宙距離測定「標準光源」としてだけではなく、その視線方向上に存在するダスト減光の特徴を理解する上で非常に有用な天体である。しかし、これまでIa型超新星に対して導かれている減光曲線は、我々の銀河系内で見られるよりもずっと急であることが知られており、この特異な減光の起源は謎のままとなっている。

本研究では、Ia型超新星のこの特異な減光を引き起こすダストの性質を調べるため、様々なダストサイズ分布を考えて減光曲線の再現計算をした。その結果、星間ダストのべき乗サイズ分布の指数が -3.5 で、ダスト半径の上限値を銀河系ダストに対して提唱されている0.25ミクロンから2~4倍程度小さくすることにより、急な減光曲線が再現されることを明らかにした（図4）。これらの急な減光曲線を担うダストのサイズ分布を定量的に明らかにしたのは本研究が初めてであり、この結果から、Ia型超新星の母銀河の星間ダストは我々の銀河系のものよりも小さいことが分かった。

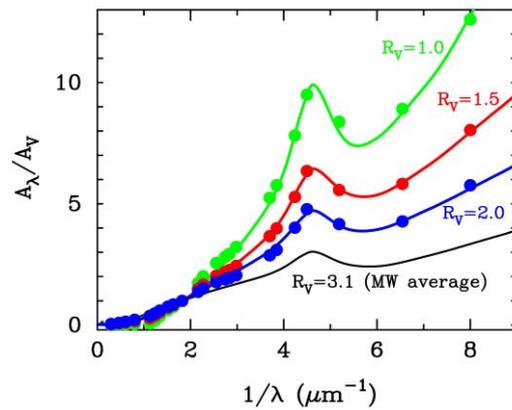


図4：古典的ダストモデルに基づいたIa型超新星で観測される急な減光曲線へのフィッティング計算の結果。 $R_V=1.0, 1.5, 2.0$ と記された緑、赤、青の曲線がIa型超新星で導かれている急な減光曲線で、それぞれダスト半径の最大値を0.13ミクロン、0.09ミクロン、0.06ミクロンとすることによってうまく説明される。参考のため、銀河系内で観測された減光曲線の平均は黒線($R_V=3.1$ と記されたもの)で示される。

(5) 重力崩壊型超新星による銀河系星間ダスト供給への寄与

重力崩壊型超新星および漸近巨星分枝星による星間ダスト供給量の相対寄与を調べるため、簡単なダスト進化モデルに基づいて星間ダスト量の時間進化計算を行った。その結果、各天体からの放出ガス中でのダスト凝縮効率が等しい場合、これら天体による星間ダストの供給量は銀河系においてほぼ同じであることがわかった（図5）。また、超新星爆発を起こす星の質量の上限値を100太陽質量から18太陽質量に変化させたとき、超新星からの全体的なダスト供給量は40%程度減少されることを明らかにした。

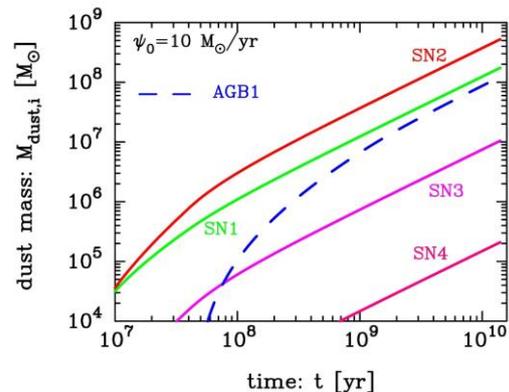


図5：超新星によるダスト放出量をパラメータとしたときの簡単なダスト進化モデルによる星間ダスト量の進化計算結果。破線（AGB1）および緑の実線（SN1）は、それぞれ放出ガス中でのダスト凝縮効率を0.01としたときの結果。

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 20 件)

- ① Takaya Nozawa
“Overall Dust Inputs from Core-collapse Supernovae in the Galaxy”, *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, 査読無, 2017, Vol. 88, 447-450
<http://adabs.harvard.edu/abs/2017MmSAI..88..447N>
- ② Takaya Nozawa
“Properties of Interstellar Dust Responsible for Extinction Laws with Unusually Low Total-to-selective Extinction Ratios of $R_v = 1-2$ ”, *Planetary and Space Science*, 査読有, 2016, Vol. 133, 36-46
DOI: 10.1016/j.pss.2016.08.006
- ③ Takashi Nagao, Keiichi Maeda, Takaya Nozawa
“Extinction Laws toward Stellar Sources within a Dusty Circumstellar Medium and Implications for Type Ia Supernovae”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 2016, Vol. 823, 104(10pp)
DOI: 10.3847/0004-637X/823/2/104
- ④ Keiichi Maeda, Takaya Nozawa, Takashi Nagao, Kentaro Motohara
“Constraining the Amount of Circumstellar Matter and Dust around Type Ia Supernovae through Near-Infrared Echoes”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 2015, Vol. 452, 3281-3292
DOI: 10.1093/mnras/stv1498
- ⑤ Takaya Nozawa, Shigeru Wakita, Yasuhiro Hasegawa, Takashi Kozasa
“Probing the Physical Conditions of Supernova Ejecta with the Measured Sizes of Presolar Al₂O₃ Grains”, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有, 2015, Vol. 811, L39(5pp)
DOI: 10.1088/2041-8205/811/2/L39
- ⑥ Takaya Nozawa, Ryosuke S. Asano, Hiroyuki Hirashita, Tsutomu T. Takeuchi
“Evolution of Grain Size Distribution in High-redshift Dusty Quasars: Integrating Large Amounts of Dust and Unusual Extinction Curves”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters*, 査読有, 2015, Vol. 447,

L16-20
DOI: 10.1093/mnrasl/slu175

- ⑦ Hajime Takami, Takaya Nozawa, Kunihiro Ioka
“Dust Formation in Macronovae”, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有, 2014, Vol. 789, L6(5pp)
DOI: 10.1088/2041-8205/789/1/L6
- ⑧ Takaya Nozawa, Sung-Chul Yoon, Keiichi Maeda, Takashi Kozasa, Ken'ichi Nomoto, Norbert Langer
“Dust Production Factories in the Early Universe: Formation of Carbon Grains in Red-supergiant Winds of Very Massive Population III Stars”, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有, 2014, Vol. 787, L15(5pp)
DOI: 10.1088/2041-8205/787/2/L17

[学会発表] (計 28 件)

- ① 野沢 貴也 (招待講演)
「高温プラズマ中でのスパッタリングによる宇宙固体微粒子の破壊」
「自然科学における階層と全体」シンポジウム
2018年2月20日
名古屋ルーセントタワー16F (名古屋市)
- ② 野沢 貴也 (招待講演)
「超新星ダストの形成と銀河ダストの物理化学進化—コンセンサスと課題—」
「星形成と銀河構造における磁場の役割」
2017年12月22日
鹿児島大学 (鹿児島市)
- ③ Takaya Nozawa (invited talk)
“Dust Formation Theory in Astronomical Environments”
FOE17 Fifty-One Erg
8 June 2017
Corvallis, Oregon, US
- ④ Takaya Nozawa (contributed talk)
“Properties of Interstellar Dust as Probed by Extinction Laws toward Type Ia Supernovae”
Multiple Faces of Interstellar Dust
16 September 2016
Garching, Germany
- ⑤ 野沢 貴也 (基調講演)
「TAO で紐解くダスト形成過程」
日本天文学会 2016 年春季年会
2016年3月16日
首都大学東京 南大沢キャンパス (東京都八王子市)

⑥ Takaya Nozawa et al. (invited talk)
“Dust Production Factories in the Early Universe”
Frascati Workshop 2015: Multifrequency Behavior of High Energy Cosmic Sources
25 May 2015
Mondello, Palermo, Italy

⑦ 野沢 貴也、浅野良輔、竹内努、平下博之
(口頭講演)
「高赤方偏移クエーサーの星間ダスト進化と減光曲線」
初代星・初代銀河研究会 2015
2015年1月20日、
東北大学 片平さくらホール (仙台市)

⑧ Takaya Nozawa, Keiichi Maeda,
Takashi Kozasa, et al. (invited talk)
“Dust Production in a Variety of Types of Supernovae”
The 7th Meeting on Cosmic Dust
7 August 2014
Osaka Sangyo University, Osaka, Japan

[その他]

寄稿

野沢 貴也
「超新星爆発時におけるダストの形成と供給」
天文月報、2015, Vol. 108, p274-282

ホームページ等

<http://th.nao.ac.jp/MEMBER/nozawa/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野沢 貴也 (NOZAWA, Takaya)
国立天文台・理論研究部・特任助教
研究者番号： 90435975