

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22684004

研究課題名(和文) 大質量星および超新星による星間ダストの供給・破壊過程の統一的解明

研究課題名(英文) Understanding the formation and destruction processes of dust grains by massive stars and supernovae

研究代表者

野沢 貴也 (Nozawa, Takaya)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任研究員

研究者番号：90435975

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,300,000円、(間接経費) 1,890,000円

研究成果の概要(和文)：超新星放出ガス中でのダスト形成および超新星残骸中でのダスト進化の計算を行い、観測結果との比較から、II型およびIa型超新星によって星間空間に供給されるダストの組成、サイズ、量を明らかにした。特に、II型超新星は太陽質量の0.1-1倍のダストを生成することができるが、Ia型超新星は星間ダストの主要な供給源にはなり得ないことを示した。また、天文学的ダスト形成環境における非定常ダスト凝縮過程を世界で初めて定式化し、巨大質量星の星風中でのダスト形成条件や形成されるダストの平均半径を系統的に調べた。さらに、星間ダストのサイズ分布進化モデルを構築し、その結果に基づいて銀河の減光曲線の時間発展を予測した。

研究成果の概要(英文)：We investigated the formation of dust in the ejecta of supernovae and the destruction of dust in the supernova remnants. Comparing the results of the calculations to the observations, we revealed the composition, size, and amount of dust grains ejected from the supernovae. In particular, we showed that Type II supernovae can produce a sub-solar mass of dust in the ejecta, while Type Ia supernovae are not likely to be the major sources of interstellar dust. In addition, we formulated the non-steady-state formation process of dust in astrophysical environments, and examined the formation condition of dust grains and their average radius in mass-loss winds of very massive stars. We also constructed the evolution model of grain size distribution and predicted the time development of interstellar extinction curves in galaxies.

研究分野：数物

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 大質量星 超新星残骸 可視光赤外線観測 物質進化 減光曲線

1. 研究開始当初の背景

大質量星およびその進化の結果として起こる超新星は、星間ダストの進化に重要な役割を果たす。大質量星は、その星風中や超新星爆発時に放出されたガス中でダストを生成し、一方でその強力な輻射や超新星衝撃波によって星間ダストを破壊する。これらの大質量星の活動は、星間空間中に存在するダストの組成やサイズ分布、存在量を刻々と変化させ、結果として星間ダストによる光の吸収量や熱放射量に大きな影響を与える。それゆえ、観測から銀河の形成・進化を解明するためには、大質量星によるダストの形成・破壊素過程を整合的に取り扱い、星間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。

大質量星による主要なダスト供給過程は、超新星放出ガス中でのダストの生成と考えられる。ダスト形成の理論計算は、重力崩壊型超新星爆発時に太陽の0.1-1倍の質量のダストが凝縮することを示す。また、高赤方偏移のクエーサーで観測された大量のダストを説明する上でも、超新星が0.1-1太陽質量のダストを放出しなければならないことが示唆されている。一方、近傍の超新星や超新星残骸の赤外観測からは、ダストの形成量は太陽質量の1000分の1以下と見積もられており、理論計算と比べて2桁以上も小さい。このダスト形成量のギャップは、宇宙初期から現在に至る星間ダスト供給源としての超新星の役割に大きな問題を投じており、早急に解明されるべき研究課題である。

その一方で、星間ダストの重要な形成場所として着目されているのが大質量星の星風中である。大質量星星風中でのダスト形成は、超新星周囲のダストによるこだま放射をはじめ、SN2008SやNGC3000Tで代表されるダストに埋もれた大質量星の発見など、数多くの観測によって支持されている。これらの種々の観測は、大質量星がその進化途中段階の質量放出活動によっても星間ダストの供給に寄与し得ることを示唆するが、ダストの凝縮過程や形成条件、形成量についての詳細な研究はこれまで全くなされていない。

大質量星星風中で形成されたダストは、その後すぐに超新星爆発により生じた衝撃波により破壊を受ける。また超新星放出ガス中で凝縮したダストの一部は、星間空間に放出される際に超新星残骸内のリヴァースおよびフォワード衝撃波により掃かれた高温のガス中で破壊される。さらに超新星衝撃波は、放出ガス中で形成されたダストだけでなく、既存の星間ダストを高範囲にわたって破壊しその存在量やサイズ分布を変化させる。ダストの破壊効率はその組成やサイズに依存するため、大質量星の進化に伴うダストの供給量や星間ダストの破壊効率を明らかにするためには、ダストの形成と破壊の首尾一貫した取り扱いが必須である。

2. 研究の目的

本研究課題では、(1) 大質量星周辺領域における星間ダストの蒸発と輸送、(2) 大質量星星風中でのダストの生成とその後の超新星衝撃波による破壊、(3) 超新星爆発時に放出されたガス中でのダストの凝縮と超新星残骸中での破壊、(4) 超新星衝撃波による星間ダストの破壊、の研究を行い、大質量星の進化に伴うダストの形成・破壊素過程を系統的に調べる。また本計算結果と関連する観測との比較・検討から、大質量星および超新星によるダストの供給量と星間ダストの破壊効率を明らかにし、大質量星が星間ダストの進化に及ぼす効果を解明する。

3. 研究の方法

申請者がこれまでに構築したダスト形成・破壊コードを駆使して、大質量星の進化に伴うダストの形成・破壊過程の統一的理解を目指す。具体的には以下の研究を行う。

(1) 大質量星の輻射による星間ダストの蒸発・輸送過程を中心星の光度や有効温度の関数として計算し、大質量星による星間ダストの蒸発量、ダストの空間分布や温度分布の初期サイズ依存性、および星間ダストの銀河間空間への輸送可能性を系統的に調べる。

(2) 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風中でのダスト形成計算を実行し、ダストが形成する条件、形成されるダストの組成やサイズ分布、量を明らかにする。また輻射輸送計算からダストの熱放射スペクトルを計算し、関連する観測結果との比較から大質量星星風中でのダスト凝縮効率を議論する。

(3) 前駆星の質量、金属量、爆発時のエネルギーや水素外層の質量が異なった超新星爆発のモデルに基づき、Nozawa et al. (2003)で構築したコードを用いてダスト形成計算を実行し、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やサイズ分布、量を系統的に明らかにする。

(4) 超新星爆発によって生じた星間衝撃波によるダストの破壊計算を行い、星間ダストの破壊効率の組成・サイズ依存性を明らかにする。また、超新星残骸中で加熱されたダストからの熱放射スペクトルを計算し、近傍の超新星残骸の赤外観測との比較から、星間ダストの物理進化過程を明らかにする。

(5) ダストの形成と破壊の両素過程を整合的に取り扱うダスト進化モデルを構築し、星間ダストによる減光量や熱輻射量を見積もる理論的枠組みを整える。

4. 研究成果

(1) Ia型超新星におけるダスト形成

白色矮星の暴走的な熱核融合反応で起こるIa型超新星爆発時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、Ia型超新星で形成され得るダストの総質量は太陽質量の10分の1ほどであるが、その半径は0.01ミクロン以下と比較的小さいことを明らかにした。また、Ia型超新星の周囲のガス密度が星間空間で典型的な $0.1-1\text{ cm}^{-3}$ である場合、形成されたダストはそのサイズが小さいため、衝撃波に掃かれた高温ガス中で全て破壊されることがわかった(図1参照)。本結果により、Ia型超新星は星間ダストの主要な供給源としては機能しないことを予測した。

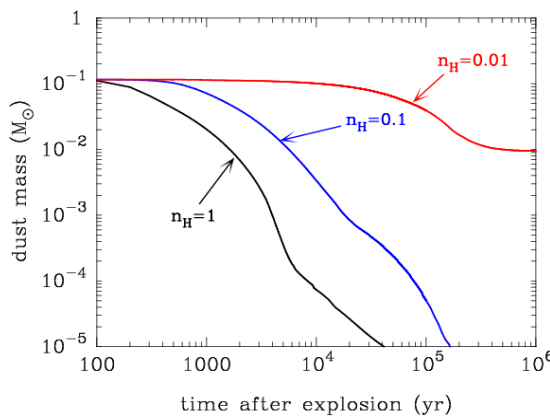


図1: Ia型超新星爆発時に形成されたダストの衝撃波中での破壊によるダスト量の時間進化。

若いIa型超新星残骸ティコーとケプラーについて遠赤外線観測衛星ハーシェルによる観測を行った。Ia型超新星では、爆発時の放出ガス中で多量の鉄のダストが凝縮すると考えられていたが、この観測から大量のダスト形成の証拠は確認できなかった。上記の我々のダスト形成計算においても、Ia型超新星爆発時に鉄のダストは形成されないと予測しており、この観測結果は我々の理論計算結果といくつかの点で一致する。これら理論的・観測的研究から、Ia型超新星は星間ダストの主要な供給源ではないことがほぼ確定的となった。

(2) 重力崩壊型超新星で形成されるダストの組成、サイズ、質量の観測的研究

ハーシェル宇宙望遠鏡による超新星SN 1987Aの遠赤外線観測を行い、SN 1987A中に太陽質量の0.4-0.7倍に相当する低温のダストからの熱放射を検出した(図2参照)。この大量のダストの発見は、II型超新星が星間ダストの主要な生成源である有力な証拠を与えただけでなく、これまで問題になって

いた理論と観測のダスト形成量の見積もりの差を解決するものとなった。また、この検出されたダストが超新星爆発時の放出ガス中で形成されたものであることを確かめるため、研究代表者を中心としてダストからの熱放射を空間的に分解して捉える観測をALMA Cycle0に提案した。この観測提案は優先度の高い観測として採択されたが、天候の不順ため最終的に観測は実施されなかった。

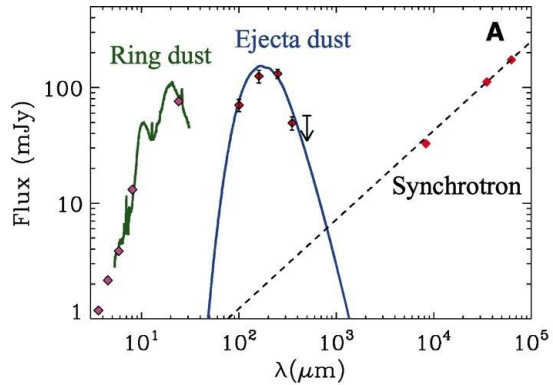


図2: ハーシェルによって観測されたSN 1987Aの低温ダストからの熱放射スペクトルエネルギー分布(Ejecta dustとラベルされたもの)。

明るいII型超新星SN 2010jlの爆発の1-2年後の可視・近赤外線分光観測を行い、1000分の1太陽質量ほどの新たに生成された炭素質ダストからの熱放射を捉えた。また水素輝線の減光波長依存性から、形成されたダストの半径は0.01ミクロン以下と小さいこと、さらにその親星の質量放出率が0.02太陽質量/年よりも高いことも明らかにした。本観測結果は、超新星で形成されるダストの組成、サイズ、質量を同時に特定した極めて少ない観測例の一つであり、またII型超新星が、その親星の大規模な質量放出の結果作られた厚い星周ガス中で起こった超新星であることを決定づけた。

(3) ダスト形成過程の定式化

II型超新星で形成される炭素質ダストのサイズや質量が、炭素原子ガスの付着確率や凝縮するダストの形状にどのように依存するかを調べた。その結果、ダストの形成量はこれら微視的な特性に依存しないが、形成されるダストの有効半径は、付着確率が小さいほど、またダストの形状が球形に近いほど小さくなることがわかった。爆発時に形成されたダストはその後リヴァース衝撃波により掃かれ、サイズが小さいほど効率的に破壊される。それゆえ本結果は、超新星から最終的に星間空間に放出されるダスト量を明らかにする上では、ダスト形成過程におけるこれら微視的特性の理解が不可欠であることを示す。

天文学的なダスト形成環境で見られる希薄なガス中でのダスト凝縮過程を調べるため、形成時の化学反応を考慮した非定常ダスト形成過程を世界で初めて定式化した。また様々なガスの初期密度・冷却率で計算した結果から、形成されるダストの平均半径と凝縮率は、ダスト形成時での過飽和比が増加するタイムスケールとガスが衝突するタイムスケールの比によって一意的に決定されることを明らかにした(図3参照)。さらにこの非定常ダスト形成の定式を用いて、初代星の候補である巨大質量星の超赤色巨星段階における星風中でのダスト形成計算を行い、その寿命の間に太陽質量程度の炭素質ダストが形成され得ることを明らかにした。

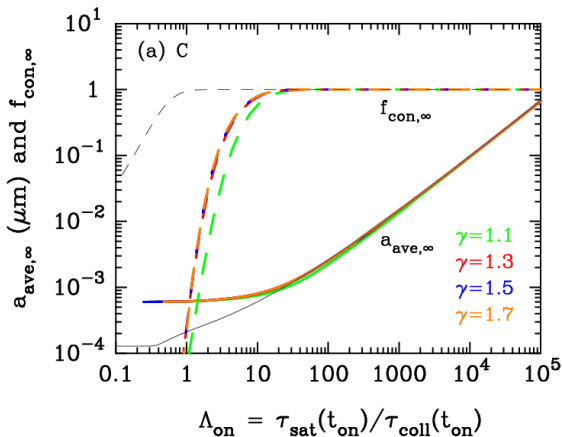


図3: 過飽和比の増加タイムスケールとガスの衝突タイムスケールの比の関数としての形成される炭素質ダストの凝縮効率と平均半径。

(4) 超新星衝撃波による星周・星間ダストの破壊

赤外線天文衛星 AKARI の観測データベースを基に、超新星爆発から 10-100 年が経過した非常に若い超新星残骸の赤外線探査を行った。その結果、近傍銀河 NGC 1313 で起こった II 型超新星 SN 1978K から強い中間赤外線放射を検出し、この赤外放射は、超新星親星の恒星風中で形成されたダストが、現在超新星衝撃波に掃かれ加熱されることによって説明できることを示した。また、ダスト破壊モデル計算との比較の結果、星周ダストの典型的初期サイズは 0.3 ミクロンで、組成はシリケート質、その形成量は太陽質量の 1000 分の 1 以上であることも明らかにした。

超新星により駆動された星間衝撃波中での星間ダストの破壊計算を系統的に行い、衝撃波によるダストの破壊効率、およびサイズ分布の変化についての超新星親星の質量・金属量依存性を明らかにした。これらの計算結果は、次に述べる星間ダストサイズ分布進化モデルを構築する上での重要な基礎データとして適用される。

(5) ダスト進化モデルと銀河の減光曲線

超新星・AGB 星でのダスト形成、衝撃波によるダスト破壊、星間空間での重元素降着によるダスト成長、ダスト同士の合体・破碎過程を首尾一貫して取り扱うダストサイズ分布進化モデルを構築し、銀河の進化に伴う星間ダストのサイズ分布、および星間減光曲線の時間進化を計算した。その結果、銀河の初期段階では、星間ダストの平均半径は大きく、減光曲線は波長依存しないフラットなものであるが、銀河の後期段階ではダストの破碎・成長が起こり、全体としてダストの平均半径が小さくなって減光曲線は急になることを明らかにした(図4参照)。

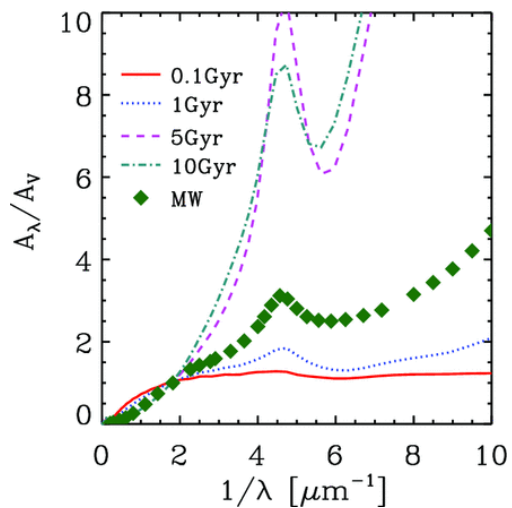


図4: ダストのサイズ分布進化モデルに基づく星間減光曲線の進化の理論予測。図中のは、天の川銀河の平均の減光曲線を示す。

銀河系の星間減光曲線に基づいて、星間ダストの組成やサイズ分布を決定する包括的な研究を行い、星間ダストの主な成分は -3.5 の冪乗サイズ分布を持つ炭素質ダストとシリケート質ダストであることを確かめた。またダストの最大半径の決定には、近赤外域の減光曲線が重要であることを示し、その観測された曲線の傾きから、半径の上限値は 0.2 から 0.3 ミクロンの範囲に制限されることを突き止めた。

(6) 低金属量星形成ガス中でのダスト成長と宇宙最初の低質量星の形成

低金属量星形成ガス雲中での重元素ガス降着によるダストの成長を調べ、金属量が太陽の 10 万分の 1 ほど低い収縮ガス中でも、中心の密度が十分に高くなるとダスト成長が効率的に起こり得ることを明らかにした。これにより、宇宙最初の低質量星の形成は、従来の研究で主張されていた初期のダスト量ではなく、ガス雲中の重元素の初期存在量によって左右されることを示した。

ダスト成長を考慮した収縮ガス雲の熱進化の数値計算を行い、成長したダストの熱放射によるガスの冷却によって、ガス雲は太陽質量の0.1倍程度のガス塊へ分裂することを明らかにした(図5参照)。これらの結果は、現在最も金属量の低い星の一つとして知られている SDSS J102915+172927 の形成過程を説明でき、第一世代星の超新星爆発時におけるダストの形成が小質量星形成に不可欠であることを証明した。

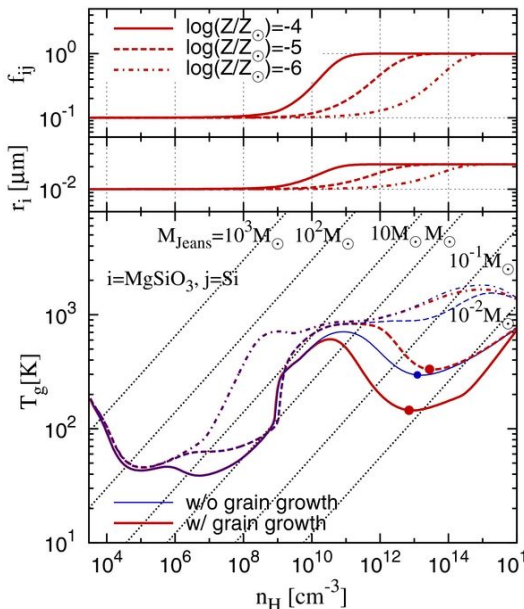


図5：低金属量ガス雲での MgSiO₃ ダストの成長による凝縮効率(上図)・半径(中図)の増加。下図は、ダスト成長がある場合(赤)・成長がない場合(青)の中心ガス密度の関数としてのガスの温度進化。曲線上の は、ガス雲が低質量のガス塊へ分裂する点を示す。

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30件)

Takaya Nozawa, Takashi Kozasa
 “Formulation of Non-steady-state Dust Formation Process in Astrophysical Environments”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 2013, Vol. 776, 24 (17pp)
 DOI: 10.1088/0004-637X/776/1/24

K. Maeda, T. Nozawa, D. K. Sahu, and 15 coauthors
 “Properties of Newly Formed Dust Grains in the Luminous Type II_n Supernova 2010jl”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 2013, Vol. 776, 5 (16pp)
 DOI: 10.1088/0004-637X/776/1/5

Takaya Nozawa, Masataka Fukugita
 “Properties of Dust Grains Probed with Extinction Curves”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 2013, Vol. 770, 27 (13pp)
 DOI: 10.1088/0004-637X/770/1/27

Takaya Nozawa, Takashi Kozasa, Ken'ichi Nomoto
 “Can the Growth of Dust Grains in Low-Metallicity Star-Forming Clouds Affect the Formation of Metal-Poor Low-Mass Stars?”, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有, 2012, Vol. 756, L35 (5pp)
 DOI: 10.1088/2041-8205/756/2/L35

Masaomi Tanaka, Takaya Nozawa, Itsuki Sakon, and 7 coauthors
 “A Search for Infrared Emission from Core-Collapse Supernovae at the Transitional Phase”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 2012, Vol. 749, 173 (12pp)
 DOI: 10.1088/0004-637X/749/2/173

Gomez, H. L., Clark, C. J. R., Nozawa, T., and 13 coauthors
 “Dust in Historical Galactic Type Ia Supernova Remnants with Herschel”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 2012, Vol. 420, 3557-3573
 DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.20272.x

David W. Fallest, Takaya Nozawa, Ken'ichi Nomoto, and 4 coauthors
 “On the Effects of Microphysical Grain Properties on the Yields of Carbonaceous Dust from Type II Supernovae”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 査読有, 2011, Vol. 418, 571-582
 DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.19506.x

Takaya Nozawa, Keiichi Maeda, Takashi Kozasa, and 3 coauthors
 “Formation of Dust in the Ejecta of Type Ia Supernovae”, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 2011, Vol. 736, 45 (13pp)
 DOI: 10.1088/0004-637X/736/1/45

[学会発表](計27件)

野沢 貴也(口頭発表)
 「種族III巨大質量星の赤色超巨星星風中における炭素質ダスト形成」
 日本天文学会2014年春季年会

2014年3月20日
国際基督教大学(東京都三鷹市)

Takaya Nozawa (contributed talk)
「Dust Formation in Stellar Winds of Very Massive Population III Stars」
The Life Cycle of Dust in the Universe - Observations, Theory, and Laboratory Experiments
19 November 2013
ASIAA, Taipei, Taiwan

Takaya Nozawa (contributed talk)
「Non-Steady-State Dust Formation in the Ejecta of Type Ia Supernovae」
The 6th meeting on Cosmic Dust
6 August 2013
Center for Planetary Science, Kobe, Japan

Takaya Nozawa (invited talk)
「Dust in the Ejecta of Supernovae」
Frascati Workshop 2013: Multifrequency Behavior of High Energy Cosmic Sources
30 May 2013
Mondello, Palermo, Italy

Takaya Nozawa (invited talk)
「Dust Synthesis in Supernovae and Reprocessing in Supernova Remnants」
Dust in Core-Collapse Supernovae near & far: understanding its formation and evolution
6 November 2012
Monte-Verita, Ascona, Switzerland

野沢 貴也 (口頭発表)
「天文学的ダスト形成環境における非定常ダスト形成過程の定式化」
日本天文学会 2013 年秋季年会
2013年9月11日
東北大学川内北キャンパス(宮城県仙台市)

野沢 貴也 (口頭発表)
「極めて金属量の低い星形成ガス雲中でのダストの成長と低質量星の形成」
日本天文学会 2012 年秋季年会
2012年9月19日
大分大学旦野原キャンパス(大分県大分市)

Takaya Nozawa (invited talk)
「Supernovae as Sources of Interstellar Dust」
4th Southern Cross Astrophysics Conference Series: Supernovae and their Host Galaxies
21 June 2011
Sydney, Australia

〔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・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任研究員
研究者番号: 90435975