

超新星爆発時におけるダストの形成と供給

野 沢 貴 也

〈自然科学研究機構 国立天文台 理論研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: takaya.nozawa@nao.ac.jp



重力崩壊型超新星は、星間ダストの主要な供給源と考えられている。しかしながら、超新星から供給されるダストの性質や量についてはほとんどわかっていない。本研究では、超新星放出ガス中のダストの形成と衝撃波によるダストの破壊を整合的に計算し、星間空間に放出されるダストの組成・サイズ分布・量を明らかにした。また爆発時の水素外層の質量によってダストの供給量が異なること、本計算により若い超新星残骸の赤外線観測結果を説明できることも示す。最後に超新星でのダスト形成の観測の現状をまとめ、残されている課題について言及する。

1. 星間ダストとその起源

星間ダスト（星間塵）とは、星間空間中に存在する数マイクロメートル（ μm ）以下のサイズの固体微粒子である。ダストは、星からの紫外可視光線を吸収・散乱し、得たエネルギーを熱放射として赤外線で放出するため、星や銀河固有のスペクトルエネルギー分布を大きく変える。一方、ダストはその表面上での水素分子の形成を通してガスを冷却・収縮させ、星形成を促すとともに、ダスト自身は星の周りで形成される惑星の原材料ともなる。このように、ダストは観測から星や銀河の形成史を明らかにする上で大きな影響を及ぼすだけでなく、光やガスとの相互作用を介して星間空間のエネルギー収支を支配し、天体の形成過程にも重要な役割を果たす。

ダストと光やガスとの相互作用を伴う物理過程は、ダストの組成・サイズ分布・存在量に強く依存する。われわれの銀河系における星間ダストの存在量は、質量にして星間ガスの100分の1程度と見積もられている。古典的な星間ダストモデル¹⁾では、ダストの組成は炭素質とシリケート質の2種類の成分で構成され、それらのサイズ分布（個

数スペクトル）は $0.005\ \mu\text{m}$ から $0.25\ \mu\text{m}$ の範囲で冪乗分布に従うとされる。しかしながら、他の銀河でもわれわれの銀河系のものと同じ組成・サイズ分布・量のダストが存在しているかどうかは明らかではない。星間ダストの性質は、ガス相からの凝縮、衝撃波による破壊、ダスト同士の衝突による合体・破砕などさまざまな物理過程を経験しながら星形成活動に応じて変化するため、年齢・質量・星形成史が異なる銀河では、星間ダストの性質もまた異なっていてしかるべきである。それゆえ、星間ダストによる減光量とその波長依存性、およびダストが天体形成に果たす役割を正確に評価するためには、星間ダストの形成・進化史をきちんと追いつき、その組成・サイズ分布・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。

それでは、固体のダスト微粒子は宇宙のどこで形成されるのだろうか？ ガス相から固相の形成は、冷却しているガス中において原材料である原子や分子の衝突・付着成長による安定核の形成とその成長により起こる。ダストは、主に炭素、酸素、シリコン、マグネシウム、鉄などの重元素（ここで、重元素とはヘリウムより重い元素のこ

とを指す) からなるため、ダストが形成されるためにはガス中に重元素が豊富に存在する必要がある。例えば星間空間では、重元素ガスの密度は低すぎるため、ダストはガス相から凝縮することができない。宇宙環境においてダストの形成が実現される場所は、星内部で合成された重元素が星間空間へと放出されるガス中であり、主として、初期質量がおよそ太陽の10倍以下の星から進化した“漸近巨星分枝星(AGB星)の星風中”と太陽よりも10倍以上重い星が最終的に起こす“重力崩壊型超新星爆発時に放出されたガス(イジェクター)中”が有力なダストの形成場所となる。

さて、今世紀に入ってから、赤方偏移が5以上(宇宙年齢がおよそ10億年、現在の宇宙年齢の10分の1以下)の遠方銀河にも大量に星間ダストが存在することがわかってきた^{2),3)}。このような初期宇宙においては、AGB星からのダスト供給の寄与は小さいと考えられる。なぜなら低質量星の多くは、その10億年以下という宇宙年齢の間に主系列を脱してAGB星になることができないからである。それゆえ、宇宙初期におけるダストの主要な供給源は、寿命の短い大質量星から進化する超新星爆発に限られる。そこでわれわれは、宇宙初期から現在までの星間ダストの進化を明らか

にする第一歩として、超新星によって星間空間に放出されるダストの組成・サイズ分布・量の解明に取り組んできた。

2. 超新星放出ガス中でのダスト形成

では最初に、超新星イジェクター中でのダスト形成について、厚い水素外層を保持した重力崩壊型超新星爆発を例に取り述べる。初期質量が太陽のおよそ10倍より重い星は、主系列段階での水素燃焼を皮切りに中心部での核融合反応によって次々と重い元素を合成する。爆発の直前においては、星は鉄のコアを中心にもち、その外側にシリコン層、酸素層、ヘリウム層、最外層に厚い水素層をまとった層状の元素組成をもつ。そして重力崩壊に伴う爆発によって星が吹き飛ばされると、膨張のためイジェクターの温度は急激に下がり、ヘリウム層から内側(以下、ヘリウムコアと呼ぶ)に存在する重元素ガスは過飽和状態となり、ダスト微粒子へと凝縮する(図1参照)。

超新星爆発時に形成されるダストの組成・サイズ分布・量は、イジェクターの元素組成と密度・温度の時間進化により決定される。そこでわれわれは、初期質量が太陽の13, 20, 25, 30倍の星から起こった種族III超新星爆発の球対称モデル計算

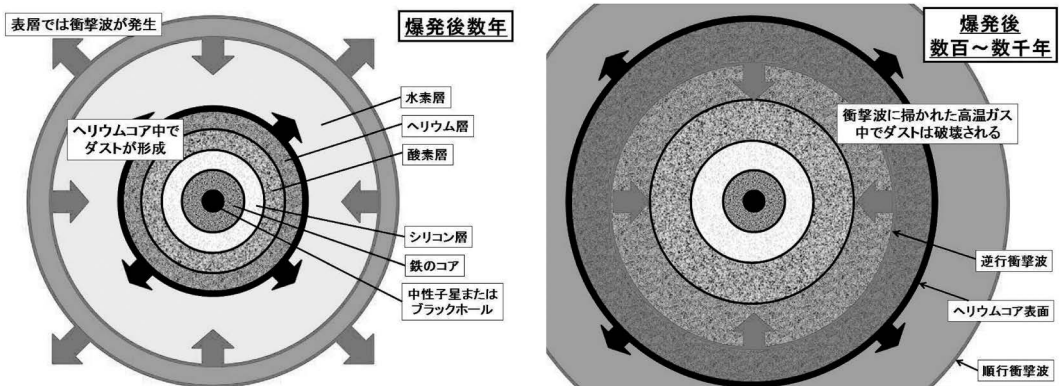


図1 厚い水素外層をもつ超新星イジェクター中でのダスト形成・進化の概念図。まず、ダストは重元素が豊富な内側のヘリウムコア中で爆発後数年に形成される(左図)。これらの形成されたダストは、爆発後数百年から数千年の間にイジェクター表層から内部に向かって進行する逆行衝撃波と衝突し、高温ガス中でスパッタリングによって破壊される(右図)。

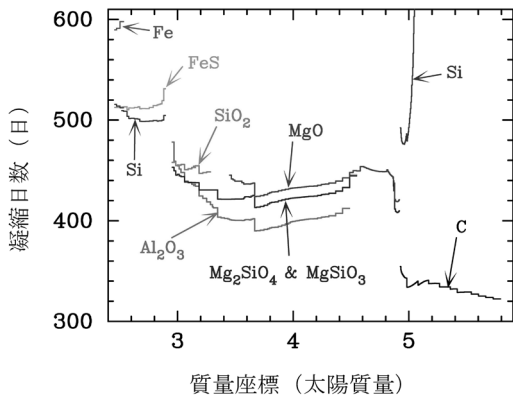


図2 質量座標の関数として示した初期質量が20太陽質量の種族III超新星イジェクターで形成されるダストの凝縮日数。このモデルのヘリウムコアの質量は6太陽質量で、これより外側の水素層には重元素がないためダストは凝縮しない。中心の2.4太陽質量以下の領域は、中性子星またはブラックホールに落ち込む。

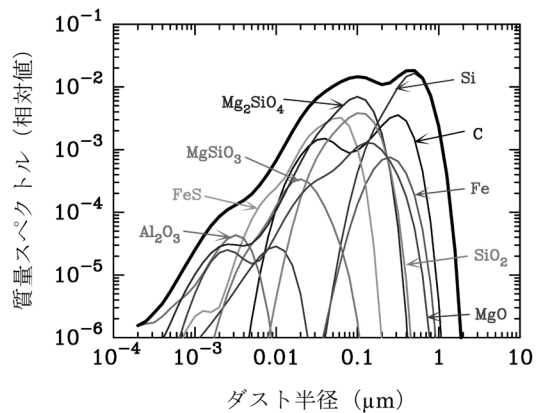


図3 初期質量が20太陽質量の種族III超新星イジェクターで形成される各ダスト種のサイズ分布。横軸はダストの半径、縦軸はダストの質量スペクトルを表す。太い実線は、すべてのダスト種を足し合わせたもの。

結果⁴⁾を適用して、超新星イジェクター中でのダスト形成を調べた⁵⁾。ダスト形成計算は、凝縮時の化学反応を考慮した定常均質核形成・成長理論⁶⁾に基づいて行った。これは、各時刻での核形成率(単位時間・単位体積当たり)に形成される熱力学的に安定な核の個数)とガスとの衝突・付着による安定核の成長を整合的に計算するものであり、これにより最終的に形成されるダストのサイズ分布と量を求めることができる。

図2は、初期質量が太陽の20倍の星から起こった超新星爆発時に形成されるダストの凝縮日数を示す。まず爆発後300日過ぎに、ヘリウムコアの一番外側のヘリウム層で炭素質ダストが形成される。次に400日くらいからより内側の酸素が豊富な領域でシリケートや酸化物ダストが凝縮する。爆発後500日から600日にかけては、シリコンが豊富な領域でシリコン・硫化鉄(FeS)のダスト、一番内側の鉄が豊富な領域で鉄のダストが形成される。ここでは、爆発によって各層間での元素の混合が起こらないと仮定しており、その結果各層の元素組成に応じてさまざまな組成のダストが形成される。

これらの形成されるダストのサイズ分布は、図3に示される。ダストの半径は、数オングストロームから数ミクロンまで広い範囲にわたり、その平均半径はダスト種によって異なる。これは主に、そのダストの材料となる重元素の密度(元素存在度)の違いを反映しており、例えばイジェクター中でその存在量が小さいAlを原料とするAl₂O₃ダストの半径は0.01 μm以下と非常に小さい。一方、炭素質ダスト、シリコン・鉄のダストの平均半径は0.1 μm以上と大きく、図中の太線で示されるように、すべてのダスト種を足し合わせたサイズ分布は0.1 μm付近にピークをもつ。すなわち、厚い水素外層をもつ超新星では、その半径が0.1 μm以上の比較的大きいダストが支配的に形成されるのである。

形成されるダストの全質量は、図4に与えられる。星の初期質量が大きいほどダストの形成量は大きくなり、13-30太陽質量の星に対して0.2から1.3太陽質量のダストが形成される。これは、元々の星の質量のうちおよそ2-5%がダストとして凝縮することを意味し、この値は星の初期質量や金属量に大きく依存しない⁷⁾。この数%というダスト形成効率はAGB星のものと比べると1桁

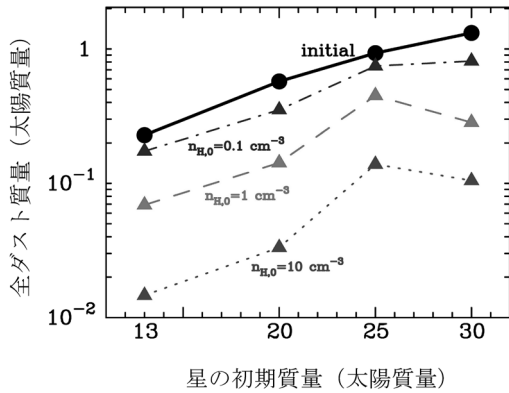


図4 初期質量が13, 20, 25, 30太陽質量の種族III超新星イジェクターで形成される全ダスト形成量(●で表示, 実線で連結). 衝撃波による破壊を生き延びる全ダスト量(▲で表示)は, 星間水素密度 $n_{H,0}=0.1, 1.0, 10 \text{ cm}^{-3}$ (それぞれ一点破線, 破線, 点線で連結)に対して示した.

以上も高いため, 本計算より超新星は非常に効率的なダスト生成工場ということがわかった.

3. 衝撃波によるダストの破壊

ここまでの話で, 超新星爆発時に放出されたガス中では, さまざまな組成・サイズのダストが大量に凝縮しうることを示した. しかし, これらの形成されたダストがそのまま超新星から放出されるわけではない. 実はダストが星間空間へと放出される前に, 超新星残骸内での“衝撃波による破壊”という大きな試練が立ちはだかっている.

2章で説明したように, ダストは重元素が豊富に存在する内側のヘリウムコア中で, 爆発の数百日後に形成される. その一方で, 高速で膨張するイジェクターの最外層では, 星間物質と衝突によって2種類の衝撃波—星間空間に向かって伝播する“順行衝撃波”とイジェクターを内側に向かって伝播する“逆行衝撃波”—が発生する(図1参照). 衝撃波によって掃かれたガスは高温プラズマとなり, 形成されたダストが逆行衝撃波を通過してこの高温プラズマに突入すると, ダストはガスとの抵抗により減速されながら破壊を受ける. このとき, ダスト自身が高温になって蒸発

するわけではなく, スパッタリングによってその表面が削り取られていく.

スパッタリングとは, エネルギーの高い粒子(ここでは主に水素イオンや酸素イオン)がダストに衝突し, 固体ダスト中の原子をはじき飛ばす物理過程である. その衝突がイオンの熱運動に支配されている場合は熱的スパッタリング, イオンとダストの高速の相対運動によって引き起こされる場合は非熱的スパッタリングとよばれる. スパッタリングによってダスト表面付近の原子が次々と失われるので, 実質的にダストの半径はどんどん小さくなる. スパッタリングによるダスト半径の減少率は, 衝突するイオンの種類・エネルギー・数密度, そしてダストの組成など数多くの量に依存する.

スパッタリングによるダストの破壊効率を見積もるため, われわれはさまざまなダスト組成に対するスパッタリングの実験データを集め, 衝突するイオンのエネルギーの関数としてダスト半径の減少率を導いた⁸⁾. 図5には, 熱的スパッタリングの結果を例として示す. 太陽組成をもつガス中では, スパッタリングによる破壊は 10^5 K より高い温度で効き始め, 10^7 K 付近で最も効率的となる. ただし 10^6 K より高温であれば, ダスト半径の減少率はガスの温度にあまりよらず, またダストの種類にも大きく依存しない. スパッタリングによるダスト半径の減少率は, 大雑把には水素の数密度が 1 cm^{-3} で $1 \mu\text{m}/100 \text{ 万年}$ である. また, 半径の減少率はダストの初期半径に依存せず, 同じガス温度・密度であれば, どのサイズのダストも同じ分だけその表面が削られていく.

さて, 最終的に超新星から放出されるダストの組成・サイズ分布・量を明らかにするためには, 超新星残骸内における高温プラズマ中でのダストの進化を追う必要がある. そこでわれわれは, ダスト形成計算で使用した超新星モデルおよび計算で得られた各ダスト種のサイズ分布・空間分布・形成量に基づいて, 超新星残骸内でのダストの運

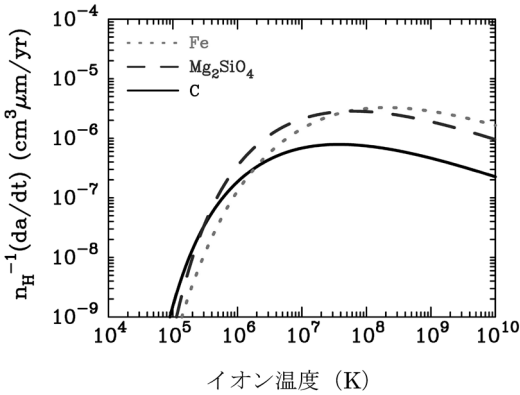


図5 衝突するイオン温度の関数としての熱的スパッタリングによるダスト半径の減少率. ダスト種は、炭素質ダスト (実線)、シリケート質ダスト (破線)、鉄ダスト (点線) を例として示した. ガスの組成は、太陽組成 (主に水素・ヘリウム) が仮定される.

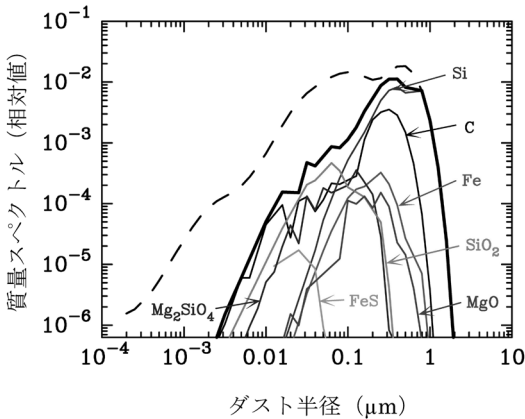


図6 超新星残骸内での破壊を生き延び、星間空間へと放出される各ダスト種のサイズ分布. 超新星のモデルは図3と同じで、ダストの破壊計算は星間空間の水素密度が 1 cm^{-3} に対して行った. 図の太い実線は、すべてのダスト種を足し合わせたもの. 破線はダスト形成時のサイズ分布を示す.

動と破壊を計算した⁹⁾. その結果、超新星残骸内でのダストの進化は、その初期半径によって大きく異なることがわかった.

例えば、 $0.01 \mu\text{m}$ 以下の小さい初期半径をもつダストは、ガスによる抵抗を受けて効果的に減速し、最終的には高温プラズマ中にとどまってそこ

で完全に破壊される. 一方、初期半径が $1 \mu\text{m}$ の大きいダストは、慣性が高いためほとんど減速されず、その表面を少し削られるのみで星間空間へと放出される. その結果、超新星残骸中では初期半径の小さいダストが選択的に破壊され、破壊後のダストのサイズ分布は形成時のものよりもさらに大きい半径に集中する (図6). これはすなわち、超新星からはサイズの大きいダストのみが放出されることを意味する.

では、最終的にどれほどの量のダストが破壊を生き延びて星間空間へ供給されるのだろうか? 図4には、超新星残骸内での破壊を生き残ったダストの全質量が与えられている. 超新星周囲の星間空間の密度が高いほど、より早い時期に逆行衝撃波がダスト形成領域に到達し、効率良くダストを破壊する. ただし、水素原子の数密度で $0.1\text{--}1 \text{ cm}^{-3}$ という典型的な星間密度であれば、形成されたダストのうち20–80%は生き残り、太陽質量の0.07–0.8倍もの量のダストが星間空間に放出される.

以上をまとめると、ダストのサイズ分布を考慮してダストの運動と破壊を統合的に計算した結果、超新星から放出されるダストは $0.1 \mu\text{m}$ より大きい半径のものに支配されることがわかった. ダスト種は主に、シリコン・炭素質ダストであるが、鉄やシリケートダストも放出される. 放出されるダストの量は、超新星親星の質量にもよるがおよそ0.1太陽質量である. つまり、超新星は一度の爆発で地球30万個分の質量に相当する固体微粒子を星間空間に放出する宇宙における重要な星間ダストの供給源なのである.

4. 厚い水素外層をもたない超新星によるダスト供給

冒頭で述べたように、これまでの計算は爆発時に厚い水素外層を保持している超新星に対しての結果であった (以下このような超新星をII-P型超新星と呼ぶ). しかし、金属量の高い星はその進

化後期段階において星表層からの質量放出が激しいと考えられており、また連星系をなしていれば伴星への質量輸送によって水素外層の多くを失うことが期待される。このような爆発時に外層をほとんどもたない超新星でも、ダストの形成・放出過程はII-P型超新星と同じなのだろうか？

この疑問に答えるべく、われわれは星の初期質量が太陽の18倍で爆発時にほとんど水素外層をもたないIIb型超新星のモデルに対してダスト形成計算を行った¹⁰⁾。計算の結果、ダストの総形成量は0.17太陽質量となり、これはII-P型超新星のものと同ほ同じくらいである。しかし形成されるダストの半径は、どのダスト種に対しても0.01 μm 以下とII-P型のもの比べてずっと小さくなった。これは、水素外層がないIIb型超新星では、ヘリウムコアの膨張速度はII-P型超新星と比べてずっと速く、その結果イジェクターの密度が急激に低くなり、個々のダストが十分に成長することができないためである。

われわれはまた、得られたダストのサイズ分布・形成量に基づいて、超新星残骸内でのダストの破壊計算を行った。その結果、ダストの初期半径が小さいこと、そして水素外層がない結果として逆行衝撃波が非常に早くヘリウムコア（ダスト形成領域）に到達してしまうことから、形成されたダストのほぼすべてが衝撃波の通過後数万年以内に破壊されてしまう。これらの計算より、爆発時の水素外層の厚さは形成されるダストのサイズに影響を与えること、またIIb型超新星は、II-P型超新星とは違い、星間ダストの主要な供給源とはなりえなさそうだということがわかった。

一方、銀河系内の超新星残骸Cassiopeia A（以下Cas A）は、こだま放射（ピーク光度付近の超新星放射の星間物質による散乱光）の観測から、その爆発はIIb型と同定されている¹¹⁾。そこでわれわれは、Cas Aの赤外線観測との比較を試みるため、上記のダスト進化計算において、衝撃波後方の高温プラズマ中で加熱されたダストからの熱

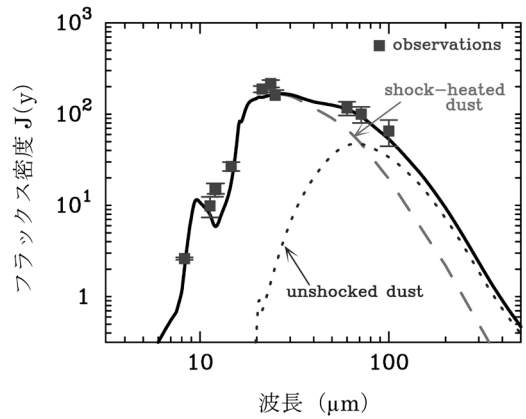


図7 IIb型超新星残骸における衝撃破中でのダストの破壊・加熱計算から得られたダスト放射スペクトルとCas A超新星残骸の赤外観測との比較。Cas Aの赤外線スペクトルは衝撃波に加熱された高温のダスト（破線）とまだ衝撃波によって掃かれていない低温のダスト（点線）からの寄与によって説明される。

放射スペクトルを計算した。その結果、Cas Aからの赤外線エネルギースペクトルは、衝撃波によって加熱された0.008太陽質量のダストとまだ逆行衝撃波に掃かれていない0.072太陽質量の低温のダストからの熱放射の重ね合わせによって説明できることを示した（図7）。特筆すべきなのは、われわれがこの低温ダストの存在を予測したすぐ後に赤外線天文衛星あかり（AKARI）やハーシェル宇宙望遠鏡（Herschel）が0.06-0.07太陽質量の低温ダストの存在を確認したのである^{12), 13)}。これより、われわれの理論計算は、イジェクターでのダスト形成から星間空間への放出過程まで、超新星での全体的なダストの進化をよく再現していることが証明されたといえる。ただしわれわれの計算が予想するように、現在Cas Aに存在するダストはいずれほぼすべて破壊されてしまうことであろう。

5. ダストの形成条件と形成されるダスト半径

さてこれまでの話では、超新星モデルに基づい

て実際にダスト形成計算を行い、爆発時の水素外層の質量（結果として、イジェクターのガス密度）に応じて形成されるダストの半径が異なることを示した。しかし、どれほどのガス密度でどれくらいの半径のダストが形成されるのかについて、より一般的な形で見積もっておくことは非常に有用であるだろう。

そこでわれわれは、非正常のダスト形成過程を定式化し、ガスの初期密度・冷却率をパラメーターとして系統的にダスト形成計算を行った¹⁴⁾。その結果、形成されるダストの平均半径は、ダスト形成時（ガスの温度で1,500-2,000 K）における“過飽和比が増加するタイムスケール”と“ガスの衝突のタイムスケール”の比 Λ_{on} によって一意的に決定されることを突き止めた。図8に示すように、 Λ_{on} が大きいほどダストの平均半径は大きくなる。 Λ_{on} は近似的に冷却のタイムスケールとガス密度の積に比例するため、これはガスがゆっくり冷えるほどまたガスの密度が大きいほど形成されるダストの半径が大きくなることを意味する。また、 Λ_{on} が1より小さいときにはダストは凝縮しない、すなわちダスト形成が起こるためには、 Λ_{on} は1より大きくなければならない。

また図8には、II-P型およびI Ib型超新星イジェクターに対応する Λ_{on} の範囲も示す。II-P型超新星のイジェクターで期待される Λ_{on} の範囲は2,000から50,000くらいで、図8の関係から炭素質ダストでもシリケートダストでも形成されるダストの半径は0.1 μm 程度になることがわかる。一方I Ib型超新星では、ガス密度が小さいことを反映して Λ_{on} の値は20から300と小さく、0.01 μm 以下の小さいダストしか形成されない。これらの結果は、実際に超新星のモデルを基にダスト形成計算を行った結果と一貫している。

ここで強調しておきたいのは、図8の結果は、超新星イジェクターだけでなくAGB星などの星風でのダスト形成にも適用できることである。実際いくつかの仮定に基づけば、形成されるダスト

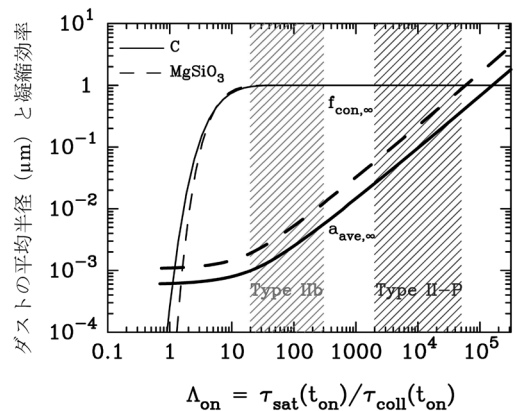


図8 形成されるダストの平均半径（太線）と凝縮効率（ダストに取り込まれる原料ガスの割合、細線）。横軸はダスト形成時での過飽和比の増加のタイムスケールとガスの衝突のタイムスケールの比 (Λ_{on})。実線、破線は、それぞれ炭素質ダストとシリケート (MgSiO_3) ダストに対応し、網掛けの領域は、II-P型およびI Ib型超新星のイジェクターで期待される Λ_{on} の範囲を示す。

の平均半径を質量放出率の関数として予測することもできる¹⁵⁾。いずれにしても、もし観測などから Λ_{on} の値を導くことができれば（ガスの密度と冷却率がわかれば）、図8の関係からダスト形成の可否、および形成されるダストの典型的サイズを推測することができるのである。ただし図8の計算は、ガスからダストへの凝縮過程のみを考慮しており、輻射の影響を考慮していない。もし星からの輻射が強く、光の吸収によってダストの温度がガスの温度より高くなってしまえば、凝縮よりも蒸発が効いてしまいダストの形成は大きく阻害されてしまうであろう。ダスト形成過程における輻射の影響は、筆者が鋭意取り組み中である。

6. まとめと超新星でのダスト形成研究の課題

本記事において、厚い水素外層をもつII-P型超新星は星間ダストの重要な供給源であり、比較的大きいサイズ（半径0.1 μm 以上）のダストを大量に（0.1太陽質量程度）放出することを説明

した。一方、IIb型のような水素外層をもたない超新星は、形成されるダストが小さく星間空間へと放出される過程でほぼすべて破壊されるため、星間ダストの供給源として機能しないことも示した。またダスト形成・進化計算とCas Aの赤外線観測との比較から、Cas A内に低温ダストが存在することを予言し、その後の観測によって実際に低温ダストの存在が確認されたことも述べた。

ここで最後に、超新星でのダスト形成の観測的研究についてももう少し述べておこう。図9は、重力崩壊型超新星・超新星残骸の赤外線の観測から見積もられたダスト形成量を示す。中間赤外線の観測から得られたダスト量(図中の▲)は、爆発後数年の超新星に対しては 10^{-5} - 10^{-3} 太陽質量、Cas AやCrabなどの1,000年以下の若い超新星残骸では 10^{-3} 太陽質量程度となっている。爆発後1,000年以上が経過した超新星残骸では、ダスト量が0.01太陽質量を超えるものも存在するが、これはイジェクターで形成されたダストではなく、順行衝撃波によって掃かれた星間ダストが主に寄与している可能性が高い。いずれにしても、中間赤外線の観測から導かれたダスト形成量は、理論モデルの予測(0.1-1太陽質量)よりも2桁

以上小さく、それゆえ超新星が大量のダストを生成するかどうかは長い間論争となっていた。

しかしこの問題は、*Herschel*衛星やアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計(ALMA)による遠赤外線の観測によって解決されることとなる。すなわち、中間赤外線では比較的高温のダストからの熱放射しか検出できておらず、低温の(大量の)ダストの検出を逃していたのである。*Herschel*衛星によるSN 1987A, Cas A, Crab超新星残骸の観測は、0.1-0.5太陽質量ほどの低温ダストからの熱放射を検出し^{13), 16), 17)}(図中の●), 特にSN 1987Aについては、ALMAによってそのダストの空間分布が明らかにされた¹⁸⁾。これらの観測より、大量のダストが超新星イジェクターで形成されたことが確定的となり、ダスト形成量も理論計算とも良く一致するので、超新星が大量のダストの生成工場であることは今では広く受け入れられている。しかし、これらの超新星残骸で観測された低温ダストはまだ逆行衝撃波によって掃かれておらず、これらのダストのどれほどの割合が星間空間に放出されるかはわからない。本記事で説明したように、ダストが生き延びるかどうかは形成時のダストのサイズ分布に強く依存するので、最終的なダスト放出量を明らかにするためには、形成されたダストのサイズを制限する観測が必要となる。

もう一つ残されている課題は、爆発後数年に中間赤外線の観測から見積もられたダスト量(10^{-5} - 10^{-3} 太陽質量)とSN 1987Aの爆発の25年後に遠赤外線観測されたダスト量(>0.1太陽質量)の間の大きな差について説明がなされていないことである。この問題は、超新星イジェクター中でいつ大量のダストが形成されたか、という問題に帰着する。もし理論計算が予測するように、爆発後数年のうちに大量のダストが形成されていれば、中間赤外線の観測はその一部しか検出していないことになり、形成された大部分のダストは低温のまま存在しているはずである。これを確かめ

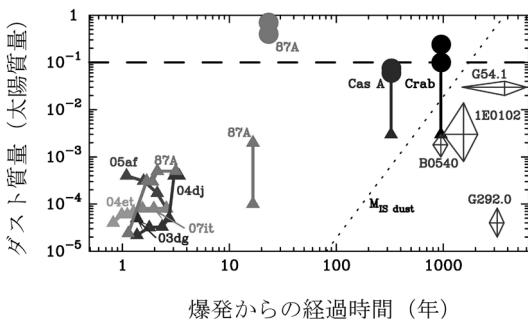


図9 赤外線の観測から見積もられた超新星・超新星残骸でのダスト形成量。▲は、*Spitzer*衛星による中間赤外線から求められたもの、●は*Herschel*衛星による遠赤外線の観測から得られたもの。斜めの点線は、ダストの破壊を無視したときの順行衝撃波により掃かれる星間ダスト量の時間進化。

るためには、遠赤外線での観測が不可欠であるが、残念ながらALMAの感度をもってしても、マゼラン雲より遠い銀河で起こった超新星の低温ダストを捉えることはできない。そこで、超新星でのダスト形成過程を観測的に明らかにするには、遠赤外線ですばらしい感度を有する次世代赤外線天文衛星SPICAを待たねばならない。

一方、ダスト形成の理論計算は、球対称の超新星爆発モデルに基づいており、そのイジェクターは比較的滑らかな密度構造をもっている。しかしながら、実際の超新星イジェクターは複雑な構造をなしているはずであり、ガスクランプの密度に応じて形成されるダストの凝縮日数やサイズは大きく異なると期待される。また上で述べたように、ダスト形成における輻射の影響を考慮することによって、ダストの凝縮日数が数年後よりも遅れる可能性もある。それゆえ、次世代天文衛星の観測結果を基に超新星におけるダストの形成・進化過程を解明するためには、多次元で計算された超新星爆発のモデルを適用し、ダストの形成・破壊・加熱・熱放射過程を統合的に取り扱う理論計算の基盤を整えておくことが必要不可欠である。

謝 辞

本稿の内容は、筆者の学位論文の一部および関連する学術論文を基にしています。学生時代から研究のさまざまな面でご指導いただいている小笹隆司氏に深く感謝いたします。また、共同研究者である梅田秀之氏、前田啓一氏、野本憲一氏、羽部朝男氏、富永望氏にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Mathis J. S., Rumpl W., Nordsieck K. H., 1977, ApJ 217, 425
- 2) Bertoldi F., et al., 2003, A&A 406, L55
- 3) Priddey R. S., et al., 2003, MNRAS 344, L74

- 4) Umeda H., Nomoto K., 2002, ApJ 565, 385
- 5) Nozawa T., et al., 2003, ApJ 598, 785
- 6) Kozasa T., Hasegawa H., 1987, Prog. Theor. Phys. 77, 1402
- 7) Kozasa T., et al., 2009, in ASP Conf. Ser. 414, Cosmic Dust—Near and Far, eds. Henning, T., Grün, E., Steinacker, J. (ASP, San Francisco) p.43
- 8) Nozawa T., Kozasa T., Habe A., 2006, ApJ 648, 435
- 9) Nozawa T., et al., 2007, ApJ 666, 955
- 10) Nozawa T., et al., 2010, ApJ 713, 356
- 11) Krause O., et al., 2008, Science 320, 1195
- 12) Sibthorpe B., et al., 2010, ApJ 719, 1553
- 13) Barlow M. J., et al., 2010, A&A 518, L138
- 14) Nozawa T., Kozasa T., 2013, ApJ 776, 24
- 15) Nozawa T., et al., 2013, in Proc. of the Life Cycle of Dust in the Universe: Observations, Theory, and Laboratory Experiments (LCDU2013), eds. Andersen A., Baes M., Gomez H., Kemper S., Watson D. (SIS-SA, Trieste) p. 23
- 16) Matsuura M., et al., 2011, Science 333, 1258
- 17) Gomez H. L., et al., 2012, ApJ 760, 96
- 18) Indebetouw R., et al., 2014, ApJ 782, L2

Formation and Evolution of Dust in Supernovae

Takaya NOZAWA

Division of Theoretical Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Core-collapse supernovae (SNe) are considered to be primary sources of interstellar dust. We calculate the formation of dust in the ejecta of SNe and the evolution of the newly formed dust in the SN remnants with the aim of revealing the composition, size distribution, and mass of dust that is injected into the interstellar medium. We show that Type II-P SNe with massive hydrogen envelopes are major sources of dust, ejecting a large amount (~ 0.1 solar mass) of dust with sizes larger than $0.1 \mu\text{m}$. On the other hand, hydrogen-poor SNe such as Type IIb SNe are not likely to be efficient sources of interstellar dust. We also show that our calculations can explain the infrared emission spectrum from young supernova remnant Cassiopeia A, supporting that our theoretical model well follows the overall evolution of dust in SNe. Finally we address the remaining issues to be pursued in the future investigations on dust formation in SNe.