

論文内容の要旨

論文題目：

Interstellar Depletion and Chemical Composition of Interstellar Dust
Probed by Infrared Spectroscopy
(赤外線分光から探る星間ガス中の元素欠乏と星間ダストの化学組成)

氏名：岡田 陽子

星間物質はガスとダストから構成されており、分子雲からの星形成、進化した星からの質量放出、超新星爆発による重元素の放出などを通して星と相互作用し、物質を交換している。ダストは質量としては小さいが、物質の化学的な状態などを支配し、星間物質全体の進化に重要な役割を果たしている。本論文では、星間物質の進化を解明するため、ダストの化学組成と環境の物理量との関係に焦点をあてた。いずれも中間・遠赤外線分光を用いた2つの手法により、環境に応じて様々な化学組成を持つ星間ダストが存在することを示し、ダストを変成、進化させる鍵となる環境のパラメータを解明した。

ダストの組成を探る一つ目のアプローチは、ダストの化学組成をガスの輝線から探る方法である。これは、ある元素のガス相における組成比を輝線から求め、あるべき全体の組成比に比べて足りない分がダストに取り込まれているとする考え方である。本論文では、ダストの主要な成分のひとつと考えられているシリケートを構成する Si と Fe について、この手法に基づいて組成比の解析を行なった。紫外線分光観測による同様の手法が行なえないような密度の高い星形成領域において、赤外線宇宙天文台 (ISO) およびスピッツァー望遠鏡 (*Spitzer*) を用いて中間・遠赤外線分光観測を行なった。

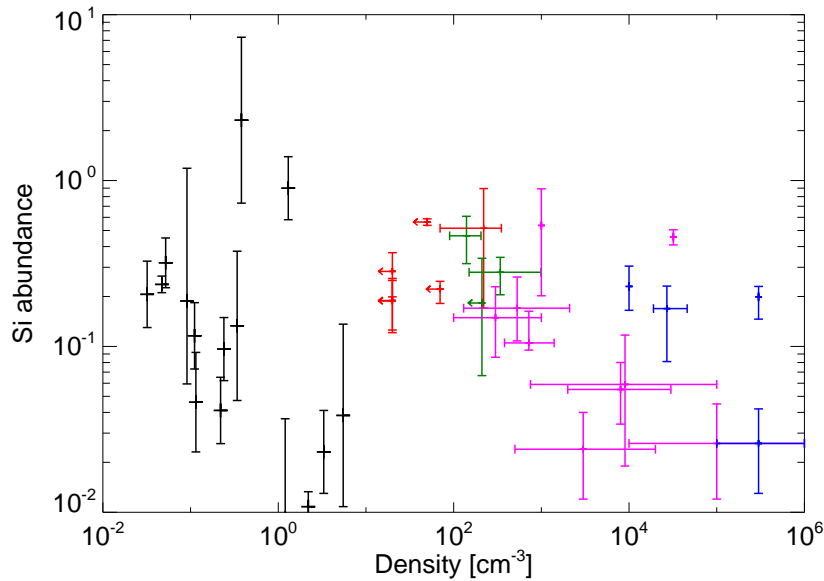


図 1: 密度に対する Si の組成比。黒のプロットは Tarafdar et al. (1983) と Bohlin et al. (1978) による紫外線観測の結果、色つきのプロットは、本論文で解析したデータおよび過去の論文からの赤外線観測の結果。赤は電離ガスのみから [Si II] 35 μm が放射されているもの、ピンクは光解離ガスのみから放射されているもの、緑と青は [Si II] 35 μm の起源が分離できない場合で、緑が [Si II] 35 μm がすべて電離ガスから放射されていると仮定した場合、青がすべて光解離ガスから放射されていると仮定した場合。

ISO による観測では、3つの星形成領域について [Si II] 35 μm から Si の組成比を求めると同時に、広い波長範囲の遠赤外分光を使って、電離領域および分子雲との境界領域である光解離領域における密度や輻射場強度などの環境の物理量の詳細な研究も行なった。Spitzer による観測では、8つの星形成領域について、[Si II] 35 μm の観測に加え、高感度を生かして [Fe II] 26 μm の上限値から Fe の組成比に厳しい制限を加えた。Si と Fe のそれぞれのガス相における太陽組成に対する組成比を求めるための参照輝線としては、電離ガスについては [N II] 122 μm もしくは 205 μm 、光解離ガスについては [O I] 146 μm もしくは 63 μm を用い、本論文で研究を行なったデータや過去の観測などからこれらの輝線強度が得られた Sharpless 171、 σ Sco、G333.6-0.2 north、 ρ Oph の4つの領域で、ガス相における Si の組成比が太陽組成の 20–50% であることを示した。Si はダストに多くとりこまれており、冷たい星間空間では太陽組成の 5% 程度しかガス相に存在しないことがわかっているため、この結果は星形成領域において Si を含むダストが破壊されていることの観測的証拠である。一方、[Fe II] 26 μm

は観測されたどの領域でも検出されず、冷たい星間空間での値 (太陽組成の 0.5%) と矛盾しなかった。[Si II] $35\ \mu\text{m}$ と [Fe II] $26\ \mu\text{m}$ の上限値の比から、Si/Fe の組成比の下限を求めると、観測を行なった多くの領域で、冷たい星間空間での値 (太陽組成の 10 倍) を上回り、最大で太陽組成の 90 倍にもなることがわかった。これらの結果は、少なくとも一部の Si と Fe が異なる種類のダストに含まれていることを示唆している。星形成領域では、Si の数十%がガス相に存在しているのに対し、Fe のほとんどはダストに残っていると考えられる。さらに過去の研究や *ISO* アーカイブデータを用い、Si のガス相における組成比は、密度と逆相関を持ち (図 1)、励起源の有効温度と相関を持つ一方、輻射場強度とは相関しないことが示された。この結果は、励起源からの紫外光が Si を含むダストを数十%破壊し、その破壊過程には紫外線の硬さが重要であることを示唆している。Si の組成比の密度に対する逆相関は、紫外線観測が行なわれるような密度の低い拡がった星間 cloud においても報告されているが、本論文で示した赤外線観測で得られた相関とは重ならない (図 1)。これは、紫外線観測と赤外線観測がトレースする領域で、ダストを破壊する主なメカニズムが異なっているためであると考えた。紫外線観測でトレースされる拡がった星間 cloud では、超新星爆発による衝撃波がダスト破壊を担っており、紫外線は硬くないので、ダストの破壊にはあまり効いていない。一方、星形成領域では密度が高いため、衝撃波がすぐに減衰し、励起源からの硬い紫外線によってダストが破壊される。本論文では、数十%の Si が含まれているダストの組成として、結合エネルギーが古典的なシリケートより小さい、2 eV 程度のダストを示唆した。この成分は、星間ダストのモデルで考慮されるべきだと考える。

ダストの組成を探る二つ目の方法は、スペクトルに現れる特徴的な幅の広いダストフィーチャーを調べることである。本論文では、正体のわかっていない 2 つのフィーチャーに注目した。まず $65\ \mu\text{m}$ フィーチャーは *ISO* により発見され、惑星状星雲において Ca を含む結晶質シリケートの一種である diopside がその担い手として提案されている。本論文では、*ISO* アーカイブデータを用いて多数の遠赤外線スペクトルを解析し、多くの星形成領域でこのフィーチャーを検出した。フィーチャーの担い手の候補として、 $65\ \mu\text{m}$ 付近にフィーチャーを持つ、結晶質の氷と、diopside を検証した。その結果、スペクトルのフィッティングからは氷ではなく diopside が支持された。結晶質シリケートは進化した星や若い星の星周では観測されているが、星間空間では短いタイムスケールで非晶質化すると考えられており、もし $65\ \mu\text{m}$ フィーチャーの担い手が diopside だとすると、初めて星間空間で広く結晶質シリケートを検出したことになる。しかし、ダスト温度とフィーチャー強度の逆相関は揮発性の物質を示唆しており、diopside を支持しなかった。従って、氷以外の揮発性物質の存在が示唆された。もうひとつのダストフィーチャーは、*ISO* によって Carina 領域で発見された $22\ \mu\text{m}$ フィーチャーである。本論文では *Spitzer* を用いて Carina 領域における $22\ \mu\text{m}$ フィーチャーの空間分布を高空間分解能で調べた。その結果、 $22\ \mu\text{m}$ フィーチャーは電離フロントで検出され、そこでこのフィーチャーの担い手であるダストが生成されている可能性が示唆された。担い手については同定できなかったが、似

たようなフィーチャーが8つのスターバースト銀河でも観測されていることから、このフィーチャーは大質量星形成に関連しているかもしれないと考えられる。

本論文では、ダストの組成はその環境の物理量に応じて、様々に変化していることを示した。ダストは星間空間の様々な場所で変成を受け進化している。本論文では、様々な環境下で、ダストの性質の空間分布および環境との相関を調べ、観測的にダスト進化への洞察を深めた。さらに本研究を発展させ、星間物質の進化を解明するためには、*ASTRO-F*、*SOFIA*、*SPICA*、*Herschel*、*JWST*などの、高感度、高空間分解能の将来ミッションによる観測が強く望まれる。同時に、様々な種類のダストの性質を調べる実験室のデータもさらに必要である。