

赤外線分光から探る星間ガス中の ケイ素および鉄の欠乏



岡田 陽子

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部赤外・サブミリ波天文学研究系

〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: okada@ir.isas.jaxa.jp

星間ダストの組成を、気相の輝線の観測から探った研究を紹介します。ダストの主な構成元素である、ケイ素と鉄のイオンからの輝線を、赤外線宇宙天文台 (ISO) と Spitzer 宇宙望遠鏡で観測し、銀河系内の星形成領域において、気相のケイ素が冷たい星間空間よりずっと多く、ケイ素を含むダストが破壊されている観測的な証拠を得ました。また、気相の鉄の増え方はケイ素ほど多くなく、鉄を含むダストのほうが破壊されにくいこともわかりました。これらの結果から、ダストの組成についての議論を行いました。

1. はじめに

ダスト (固体微粒子) は、天文学のあらゆる局面に顔を出します。1930年、Trumpler によって星間ダストの存在が確認されて以来¹⁾、遠くの天体からの光を正しく求めるために、ダストによる減光曲線の研究が行われてきました。現在でも、ダストは邪魔なもの、その影響を補正すべきものというイメージがあるかもしれません。しかし実際には、ダストは星間物質の質量の1%を占めるに過ぎないにもかかわらず、星間物質の化学変化や熱収支を支配し、星形成や銀河進化に大きな影響を与えるということがわかっています。そこで、ダストそのものの性質や進化を探る研究が重要になってくるのです。

ダストの性質には、化学組成や大きさの分布、形などがあります。本稿では特に星間ダストの組成に注目した研究を紹介します。星間ダストの組成としてもっとも代表的なものの一つにシリケートがあります。シリケートとは、ケイ素の酸化物を含むケイ酸塩鉱物の総称で、古典的にはマグネ

シウムと鉄を含むものをもっとも一般的に考えられています (図1)。星間ダストは普通、実際に手にとっては調べられませんし、固体なので気体よりその組成を調べるのはたいへんですが、いくつか方法があります。

そのうちの 하나가、気相の元素組成比を用いて間接的にダストの組成を推定する方法です。分光観測による吸収線や輝線の解析から気相の組成比を求め、総量に対して足りない分がダストに取り込まれていると考えます。この方法では、ダストの化学式までは求められませんが、比較的解釈の容易な気相のスペクトル線を用いて、主要な元素がどのような環境でどのくらいダストに取り込まれているかを調べることができ、ダストの組成のパターンやダスト破壊のメカニズムについての情報を得ることができます。これまでこの方法を用いて行われてきた研究としては、紫外線の吸収線を用いた、近傍の広がった星間空間での組成比の研究があります²⁾⁻⁵⁾。衝撃波などによりダストが破壊されていると考えられるこのような環境では、ケイ素、マグネシウム、鉄の固相と気相の組

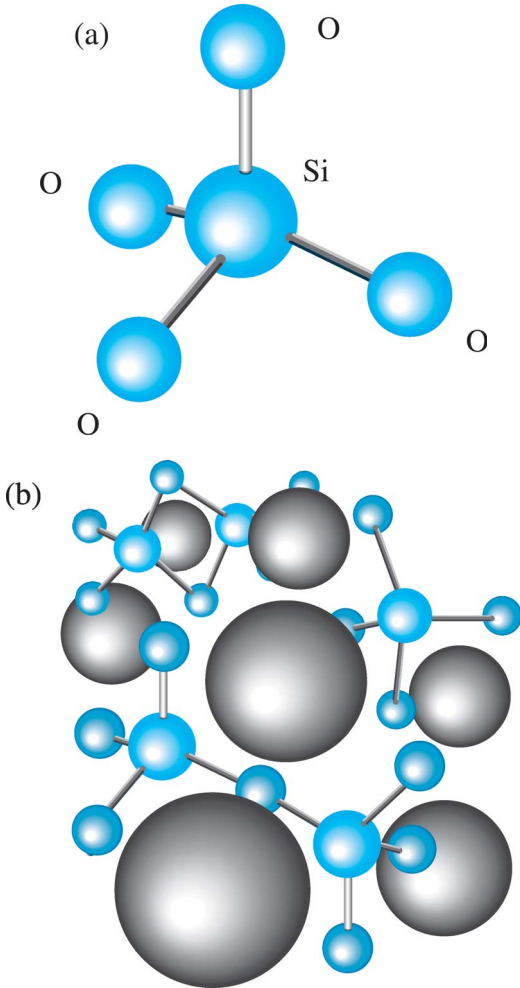


図1 非晶質シリケートの構造の模式図（高橋英則氏提供）。(a) シリケートの骨格をなす SiO_4 の四面体，(b) 非晶質シリケート．黒丸が鉄やマグネシウムなどの金属イオン，青い丸の構造は，(a) で示す SiO_4 を基本としたケイ素と酸素の構造．

成比は同じではなく，ケイ素がもっとも気相に戻りやすく，マグネシウムもそれに近いが，それに比べ，鉄は気相に戻りにくいという結果が得られています．一方，星形成領域のような密度の高い星間空間での組成比は，紫外線の観測では探ることができません．星形成領域は非常に活動的な領域で，ダストの進化の現場でもあると考えられます．そのような領域での組成比を調べるために，

赤外線による分光観測を用いた研究を行っています．次章以降では，二つの赤外線衛星を用いた銀河系内の星形成領域の分光観測から，太陽組成の中で存在量が多く，ダストを形成している元素として考えられるケイ素と鉄の気相の組成比と，ダストの組成について探った，私たちの研究を紹介します．

2. ISO による観測

1995年に打ち上げられたヨーロッパの人工衛星，赤外線宇宙天文台 (Infrared Space Observatory; ISO) は，中間赤外線と遠赤外線の広い波長範囲を同時に分光できる優れた分光器を搭載しています．この衛星により，複数の輝線や連続光を用いた研究が広くできるようになりました．私たちは，励起星のスペクトル型が異なる三つの星形成領域を，ISOの中間赤外および遠赤外分光器を用いて1次元マッピング観測しました．その結果，これらの領域でのさまざまな物理状態を明らかにしましたが^{6,7}，ここでは本稿のテーマである，気相の元素組成比について詳しく説明します．

三つのうち二つの星形成領域では，ケイ素の一階電離イオンからの輝線 ($[\text{SiII}] 35$ ミクロン) が検出されました．そこで，この輝線と別の元素からの輝線の比をとることで，ケイ素の気相の組成比を相対的に求めようとしてきました．ところが，ケイ素が一階電離する電離ポテンシャルは水素より低いので，35 ミクロンの輝線は電離領域と中性領域の両方から放射されます．したがって，この35 ミクロンの放射がどの領域からどれくらいの割合出ているのかを推定したうえで，それぞれの領域で組成比を求める必要があります．まず，ここでは，電離領域での組成比は，窒素の一階電離イオンからの輝線 ($[\text{NII}] 122$ ミクロン) を使って求めました．窒素はほとんどダストに取り込まれないと考えられているので，組成比を求める際の参照元素として適切であり，また一階電離する電離

ポテンシャルは水素より少しだけ高いので、[NII] 122 ミクロンは低電離の電離領域を代表する輝線だからです。一方、[SiII] 35 ミクロン輝線を強く放射する中性領域は、光解離領域と呼ばれる領域です。これは、紫外線によって分子が解離して原子になり、また水素より電離ポテンシャルの低い原子がイオンになっている領域で、星形成領域の電離領域と分子雲の境界に存在します。この領域でのケイ素の元素組成比を求めるための参照輝線としては、酸素原子からの輝線 ([OI] 146 ミクロン) を使いました。

二つの領域のうち、へびつかい座 ρ 領域は、励起星のスペクトル型が B2 であり、電離領域がほとんど形成されていないので、話が簡単です。[SiII] 35 ミクロン輝線はすべて光解離領域から放射されていると考えて、観測された [OI] 146 ミクロンとの強度比を、光解離領域モデルと比較して、組成比を導出しました。その結果、太陽組成の 10% 程度のケイ素が気相中存在することがわかりました。冷たい星間空間では気相のケイ素は太陽組成の数%と考えられているので^{8),9)}、へびつかい座 ρ 領域の光解離領域では、ケイ素を含むダストが一部破壊され、気相のケイ素の組成比が増えているということが示唆されます。

もう一つの領域、Sharpless 171 (S171) では、電離領域と光解離領域が混在します。そこで、[SiII] 35 ミクロン輝線と、[NII] 122 ミクロン輝線の相関を調べてみたところ、ほとんどの観測点でよい相関を示すことがわかりました (図 2)。さらに、図 2 で 35 ミクロンの放射がこの相関に比べて強くなっている 2 点は、ちょうど電波の一酸化炭素の観測からわかる分子雲の表面付近と一致していて、光解離領域のケイ素イオンが、35 ミクロンの放射を強く出していると解釈することができます。したがって、図 2 の相関に乗っている [SiII] 35 ミクロンの放射は、電離領域から相関を超えて余分に強くなっている分が光解離領域からの放射であると考えられます。こうして気相で

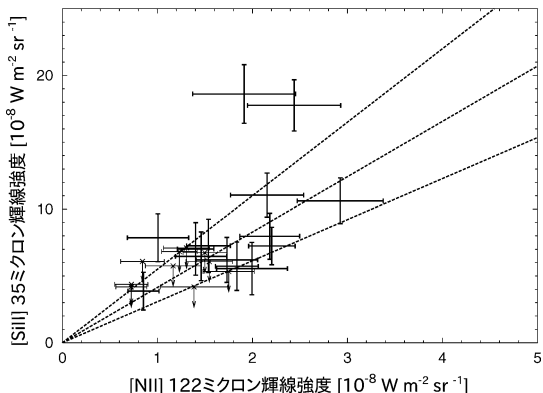


図 2 S171 領域における、[NII] 122 ミクロン輝線と [SiII] 35 ミクロン輝線との相関。点線は、電子密度が 70 cm^{-3} より小さく (他の輝線から求められた S171 の電子密度の範囲)、電子温度が 10^4 K のときの電離領域における輝線強度比の計算結果で、上からケイ素の組成比が太陽組成の 40%, 30%, 20% の場合。

のケイ素の組成比を導出すると、電離領域では太陽組成の 30%、光解離領域では太陽組成の 15% 程度であることがわかりました。したがって、ここでも気相でのケイ素の組成比は冷たい星間空間より多く、ケイ素を含むダストが一部破壊されている観測的証拠が得られました。

3. Spitzer 宇宙望遠鏡による観測

ISO によって、私たちが調べたいいくつかの星形成領域で、気相のケイ素の組成比が、通常の冷たい星間空間での組成比より大きくなっているという結果が得られました。それ以外にも同じようにケイ素の組成比が大きいという研究結果が発表されましたが¹⁰⁾⁻¹⁵⁾、一方、ある領域では大きな組成比は観測されないという報告もされていました¹⁶⁾。そこで、ケイ素の組成比がどのような環境で大きくなっているのかをさらに調べることで、ダストを構成する主要な元素の一つである鉄の組成比を調べることを目的に、Spitzer 宇宙望遠鏡の公募観測を行いました。鉄は、一階電離イオンが 26 ミクロンに、二階電離イオンが 23 ミクロンに輝線をもちますが、いずれもケイ素イオンの輝線

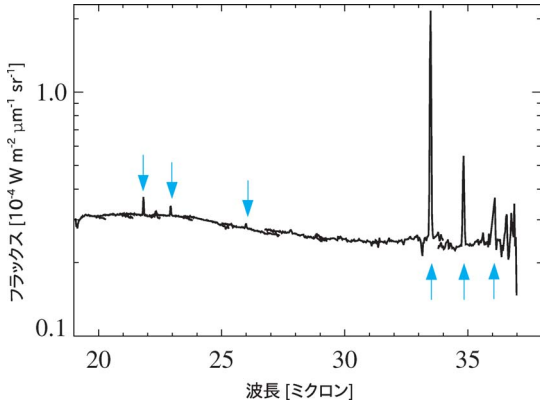


図3 Spitzer 宇宙望遠鏡による星形成領域 G48.930-0.286 のある観測点でのスペクトル。矢印で示した波長では輝線が検出されており、短波長側から [ArIII] 22 ミクロン, [FeIII] 23 ミクロン, [FeII] 26 ミクロン, [SiII] 33 ミクロン, [SiII] 35 ミクロン, [NeIII] 36 ミクロン。

よりずっと弱く、ISO では非常に高密度の領域でしか検出できていませんでした。しかし、Spitzer 宇宙望遠鏡では、抜群の感度により、ほとんどの領域の半分以上の観測点でこれらの輝線を検出することができました (図3)。

観測は、Spitzer 宇宙望遠鏡に搭載された赤外分光器 (Infrared Spectrograph; IRS) の、主に長波長側の高分散分光モード (波長範囲は 19 から 37 ミクロン, 分解能 600 程度) を用いて行いました。観測はすでに終了しており、その大半にあたる 11 個の星形成領域のデータを解析しました。観測し

た領域は過去の観測の有無により 2 種類のグループに分けることができます。一つのグループ (グループ A) は、ISO など過去の観測によって、組成比を求めるための参照輝線である [NII] 122 ミクロンや [OI] 146 ミクロンなどの強度がすでに求められている領域です。そのような領域については、Spitzer 宇宙望遠鏡で [SiII] 35 ミクロン, [FeII] 26 ミクロン, [FeIII] 23 ミクロンの輝線強度もしくは上限値を求め、それらの過去の観測と比較することでケイ素と鉄の組成比を求めました。もう一つのグループ (グループ B) は、過去の輝線観測がない領域で、銀河系内のさまざまな場所にある非常に活発な大質量星形成領域です。このグループについては、Spitzer 宇宙望遠鏡の観測だけで議論できるケイ素と鉄の相対的な組成比を中心に、グループ A の結果とも併せて考察を行いました。

表1は、グループ A の結果をまとめたものです。鉄もケイ素と同様、一階電離ポテンシャルが水素より低く、[FeII] 26 ミクロン輝線は電離領域と光解離領域の両方から放射されます。したがって、[SiII] 35 ミクロンと [FeII] 26 ミクロンの輝線が、すべて電離領域から放射された場合とすべて光解離領域から放射された場合の両極端の場合について、組成比を求めています。また、[FeIII] 23 ミクロンは電離領域からの放射なので、同じ Spitzer 宇宙望遠鏡の観測で得られ、電離

表1 Spitzer 宇宙望遠鏡による観測のグループ A から求めたケイ素と鉄の気相の組成比。太陽組成を 100% としている。

領域	電離領域起源を仮定			光解離領域起源を仮定	
	Si ⁺ /N ⁺	Fe ²⁺ /S ²⁺ *1	Fe ⁺ /N ⁺	Si ⁺ /O ⁰	Fe ⁺ /O ⁰
S171 (電離領域が支配的)	16-31%	<3%	1-2%	34-106%	2-11%
S171 (光解離領域が強い)	27-71%	<1%	2-7%	14-29%	1-4%
G333.6-0.2	20-55%	2-11%	<7%	—*2	—*2
さそり座σ	11-34%	<21%	<9%	—*2	—*2
NGC 1977	—*3	—*3	—*3	9-60%	3-13%

*1 ともに電離領域のみから放射される輝線から導出。
 *2 光解離領域のパラメーターが未定のため、導出できず。
 *3 励起星が B1 型で電離領域はごく小さいと考えられている。

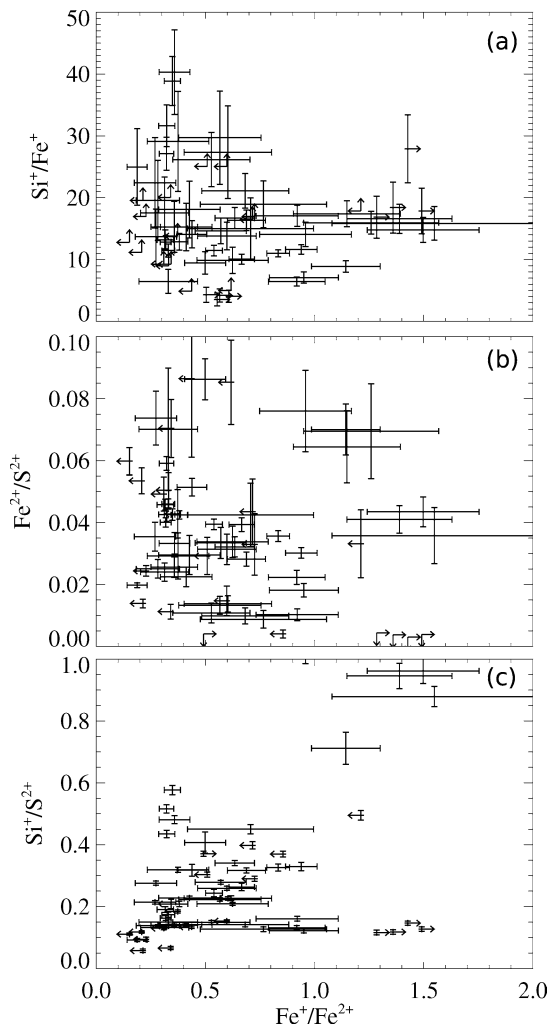


図4 [FeII] 26 ミクロンと [FeIII] 23 ミクロンの比から求めた Fe^+/Fe^{2+} に対する組成比. 太陽組成が1である. (a) [SiII] 35 ミクロン/[FeII] 26 ミクロンから求めた Si^+/Fe^+ . (b) [FeIII] 23 ミクロン/[SiII] 33 ミクロンから求めた Fe^{2+}/S^{2+} . (c) [SiII] 35 ミクロン/[SiII] 33 ミクロンから求めた Si^+/S^{2+} . 電離領域起源を仮定した計算である.

領域のみから放射される [SiII] 33 ミクロンとの比をとり、電離領域での組成比として表にあげています。ここからわかることは、いずれもケイ素は太陽組成の数十%が気相にあるのに対し、鉄は数%しかない領域が多く、ケイ素は冷たい星間空間での気相の組成比に比べて明らかに多くなって

いるが、鉄はそれについていないということです。

グループ B を含めた全体としては、図4のような結果が得られました。図4の横軸は、[FeII] 26 ミクロンと [FeIII] 23 ミクロンから求めた、一階電離イオンと二階電離イオンの比で、観測点における電離状態の指標となっています。図4はいずれも、電離領域起源を仮定した場合の組成比で、領域ごとに区別せず、マッピング観測の観測点を同時にプロットしたものです。これらの結果を詳しく検討し、イオンごとの電離ポテンシャルの差や、光解離領域の影響を考慮しても、多くの星形成領域で、鉄の気相の元素組成比は太陽組成の数%以内であるのに対し、ケイ素は数十%まで増えており、ケイ素を含むダストが鉄を含むダストより破壊されている、という結論が得られました。

4. 星間ダストについての考察

シリケートの種類としては、ケイ素とマグネシウムが主成分のもの、ケイ素と鉄が主成分のものが考えられます。紫外線で観測されるような拡がった星間空間で、ケイ素と鉄の気相への戻り方が異なるのは、鉄よりマグネシウム主体のシリケートが圧倒的に多く、鉄は別の種類のダストに含まれるためであると解釈できます。超新星爆発などによる衝撃波によってシリケートが破壊され、より壊れにくい鉄を含むダストが相対的に多く生き残るのです。ところが、赤外線で観測される星形成領域では、電離領域では普遍的に、また密度が高く温度の低い光解離領域においても、ケイ素が多く気相に存在する領域があることがわかってきました。そのような領域で衝撃波による破壊が起こりやすいとは考えにくいのですが、一方でシリケートは簡単には壊れません。そこで、衝撃波で破壊されるのではなく、一部のケイ素がシリケートより破壊されやすいダストに含まれており、励起源からのエネルギーの高い光子によってケイ素が気相に放出されるのではないかと考えまし

た。このようなダストの形態としては、ケイ素がダストの中心核ではなく外側を覆う表層（マントル）に含まれているという提案¹⁷⁾や、ケイ素が有機物分子の固まりに取り込まれていて、紫外線によってそれがばらばらになる際にケイ素原子が放出されるという提案¹⁸⁾がなされています。また、過去の観測による結果を集めてみると、より早期型星に付随する光解離領域のほうが、気相のケイ素の組成比が大きい、つまりケイ素を含むダストがより壊れているという傾向が見られます。これらのことから、励起源からのエネルギーの高い光子によって、弱い結合エネルギーでダスト中に存在しているケイ素が引きはがされ気相に放出されるのではないかと考えられるのです。

星間ダストのモデルは、星間空間での減光や偏光などとともに、このような組成比のパターンも説明できるものでなくてはなりません¹⁹⁾。私たちは、ここで紹介した気相の組成比を用いたアプローチだけでなく、赤外線に現れるいろいろなスペクトルフィーチャーを使うなど、別の手法も合わせて星間ダストの組成、そして進化を追究していきたいと考えています。

謝 辞

この研究は東京大学大学院理学系研究科天文学専攻における筆者の博士論文研究の一部です。修士課程、博士課程を通して指導して下さった尾中 敬教授には、心よりお礼申し上げます。また、当時研究室に在籍されていた方、共同研究者の方には有意義な議論を多くしていただき、また本稿へのコメントもいただきました。ありがとうございました。ぐんま天文台の高橋英則氏には、図1を作成していただき、たいへん感謝しております。最後に、このような研究紹介の機会を与えて下さった国立天文台の今西昌俊氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Trumpler R. J., 1930, PASP 42, 214
- 2) Cartledge S. I. B., et al., 2006, ApJ 641, 327
- 3) Jones A. P., 2000, Journal of Geophysical Research 105, 10257
- 4) Sofia U. J., et al., 1994, ApJ 430, 650
- 5) Fitzpatrick E. L., 1996, ApJ 473, L55
- 6) Okada Y., et al., 2003, A&A 412, 199
- 7) Okada Y., et al., 2006, ApJ 640, 383
- 8) Savage B. D., Sembach K. R., 1996, ARA&A 34, 279
- 9) Tielens A. G. G. M., Hollenbach D., 1985, ApJ 291, 722
- 10) Haas M. R., et al., 1991, ApJ 374, 555
- 11) Mizutani M., et al., 2004, A&A, 423, 579
- 12) Stolovy S. R., et al., 1995, ASP Conf. 73, 469
- 13) Colgan S. W. J., et al., 1993, ApJ 413, 237
- 14) Fuente A., et al., 2000, A&A 354, 1053
- 15) Rosenthal D., et al., 2000, A&A 356, 705
- 16) Young Owl, R. C., et al., 2002, ApJ 578, 885
- 17) Walmsley C. M., et al., 1999, A&A 342, 542
- 18) Klotz A., et al., 1995, A&A, 304, 520
- 19) Zubko V., et al., 2004, ApJS 152, 211

Interstellar Depletion of Silicon and Iron Probed by Infrared Spectroscopy

Yoko OKADA

Department of Infrared Astrophysics, Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510, Japan

Abstract: We present a study on chemical compositions of interstellar dusts probed by observations of emission lines of silicon and iron ions with two infrared astronomical satellites, the Infrared Space Observatory and the Spitzer Space Telescope. We found that an abundance of gas-phase silicon abundance in the observed Galactic star-forming regions is much larger than that in the cool interstellar medium. This fact indicates the observational evidence of Si-bearing dust destruction. On the other hand, the abundance of the gas-phase iron does not exceed that in the cool interstellar medium as silicon does. We discuss the chemical compositions of the dust on the basis of these results.