

小特集「プラズマと微粒子」研究の諸分野における進展

3. 宇宙物理での微粒子

3.1 銀河環境でのダストの進化

平下博之

台湾中央研究院天文及天文物理研究所

(原稿受付：2010年9月15日)

ダストとガス・プラズマとの相互作用は、銀河環境での、つまり星間ガス中でのダスト進化を考える上で重要である。本節では、この重要性をダストサイズの進化という観点から紹介することで、宇宙物理でも微粒子プラズマ物理が重要であるということを概観する。

Keywords:

dust, dusty plasma, interstellar medium, galaxies

3.1.1 銀河のダスト

夜空に見える天の川は、淡い光の帯であるが、望遠鏡で拡大すると星の光の集合で成り立っていることがわかる。天の川の帯状の構造は、我々が円盤状の星の集団の中にあるとして説明される。天の川をさらによく見ると、「川」の中に暗い部分が存在するのがわかる。これは、天の川の中にはガス成分（星間ガス）があって、ガス中のダストという固体微粒子（大きさは $0.1 \mu\text{m}$ 程度以下）が背景の星の光を吸収や散乱によって遮断するために起こる。吸収と散乱の和を減光と呼ぶが、減光については本小特集3.2の西山氏の記事に詳しく書かれている。

天の川は、宇宙にたくさん存在する銀河の一つであり、

特にガスやダストを比較的豊富に含む渦巻銀河に分類される。ダストは、その遠赤外（波長数十～数百 μm ）熱輻射を捉えるのが直接的な観測手段なので、遠赤外天文学の主目的はダストを見ることであると言っても過言ではない。遠赤外天文学は、日本も、2006年に赤外線天文衛星「あかり」[1,2]を打ち上げ、世界をリードする成果を多く挙げている研究分野である。我々[3]も、典型的な渦巻銀河である M81 の「あかり」で取られたデータを解析した。M81の遠赤外線画像（波長 $90 \mu\text{m}$ ）を図1に示す。渦巻状の構造は、可視光で見るとそっくりであり、特に可視域の $\text{H}\alpha$ 輝線との相関が非常に良い。 $\text{H}\alpha$ 線は電離水素が再結合するときを生じるから、電離光子を多く放射する大質量星の周辺

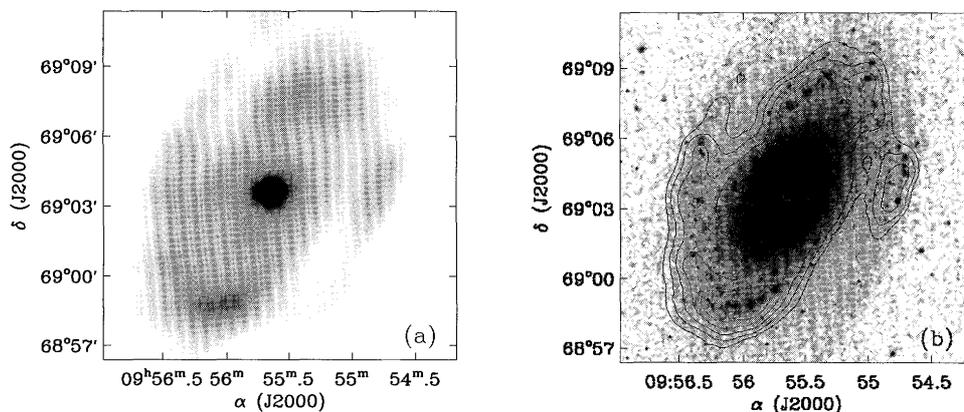


図1 (a)渦巻銀河 M81 のあかり衛星による $90 \mu\text{m}$ 遠赤外線画像 [3]。可視光の観測でお馴染みの渦巻状の構造が遠赤外線でも見える。遠赤外線はダストからの熱輻射を見ている。(b)(a)の遠赤外線強度（等高線）を可視 $\text{H}\alpha$ 輝線で撮られた画像と重ねたもの[3]。 $\text{H}\alpha$ 輝線は主に、大質量星からの輻射によって電離されたガスから発せられる。遠赤外線と $\text{H}\alpha$ 輝線の良い相関は、ダストが大質量星からの輻射や超新星爆発にさらされた環境にも存在することを示している。

星間ガスから生じる。大質量星が存在する環境では、超新星が引き起こす衝撃波でガスが加熱されたり、ダストが破壊されたりする、ある意味「過酷な」環境である。ダストは、X線を放射するような温度の高い電離プラズマとも同居している[4]という観測例もあり、ダストとプラズマとの共存は、銀河で普通に起こっていると言える。

図2にダストが銀河中で受ける様々な過程、いわばダストの一生とも言えるものを示す。まず、ダストは、星が合成した元素が星風や超新星等によって放出される際にケイ酸塩や固体炭素（例えば黒鉛）等の固体微粒子に凝縮することによって形成される。さらに、星間空間に放出されたダストは、超新星爆発に駆動された星間衝撃波中で高温プラズマ粒子の衝突を受けることで表面からダストの構成原子が弾かれるスパッタリングと呼ばれる過程で破壊される。このスパッタリングは、今回は立ち入らないが、重要なプラズマとダストとの相互作用の一つである。また、ダストは、比較的密度の高い星間雲中でダスト合体や重元素附着により成長したり、星に取り込まれたりする。

星間空間でのダストに関する重要な物理過程として特に筆者が注目しているのが、星間乱流とダストとの相互作用である。ダストとガス・プラズマとの力学的相互作用の例として、本節ではこの過程に焦点を当てる。また、気体成分は電離度の高い・低いに関わらずガスと呼ぶことにする。

3.1.2 星間乱流に駆動されたダスト進化

(1) ガスとダストの力学的相互作用

銀河スケールでは、ダストの分布はガスの分布を大体よくトレースしている。また、活発に星を形成し、超新星爆発が盛んに起こっているような銀河からは、銀河風というガスの吹き出しがX線などで観測されているが、同時にダストも吹き出ていることがM82等の銀河で観測されている[4]。つまり、ダストとガスは、銀河スケールでは力学的に良くカップルして動いていると思って良さそうである。これは、ダストとガスの間に運動量が効率よくやり取りされ

ていることを意味する。

概観のために単純化してガスとダストの力学的カップリングを評価してみよう。ダストは半径 a 、物質密度 s の球であるとし、ガスに対して相対速度 v を持っているとする。この場合、ダストは単位時間あたり $\pi a^2 v$ の体積内にあるガスを掃き、個々のガス粒子に凡そ $m_H v$ の運動量（ m_H は水素原子の質量で、ガスはすべて水素であるとする）を与える。すなわち、ダストから見るとガスからの抵抗力が働くことになる。ガスの数密度を n とすると、ダストがガスに単位時間あたりに与える運動量は $\dot{p} = (m_H v)(\pi a^2 v)n$ となる。ダストがガスに対して元々持っていた運動量は $(4\pi/3)a^3 s v$ であるから、これを \dot{p} で割ると、ダストが持っていた運動量をガスに与える（つまり、ダストとガスがカップルして動いていると見なせる）時間スケールが見積もられる。これをガス抵抗の時間スケール t_d と呼ぶことにする。典型的な数値として、 $s = 3 \text{ g cm}^{-3}$ を仮定すると、

$$\ell := v t_d \approx 8 \left(\frac{a}{0.1 \mu\text{m}} \right) \left(\frac{n}{1 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \text{ pc} \quad (1)$$

を得る[1 pc (パーセク) = 3.086×10^{18} cm]。ここで、 ℓ はガスとダストがカップルする空間スケールを表す。つまり、 ℓ より大きなスケールを考えると、ガス抵抗は有効にダストを引きずる。銀河の典型的な大きさは10 kpcで平均密度は $n \sim 1 \text{ cm}^{-3}$ 程度なので、銀河スケールではダストとガスは一緒に動いていると思って良さそうである。

(2) ダストの速度分散の獲得機構

星間ガスは、熱速度だけでは説明できない乱雑な速度成分を持っていることが知られており、乱流によると考えられている。ここで、空間スケールと典型的な速度分散が $v \propto \ell^p$ で関係づけられるような乱流的運動を考えよう。例えば、星間雲の観測からは $p = 0.38$ である[5]。式(1)より、大きなダストほど大きな空間スケールの運動とカップルするので、大きな速度の乱流に「振り回される」ことになる。一方、小さなダストは小さなスケール・小さな速度分散を持つ運動に引きずられてしまうために、典型的な速度分散は小さくなる。以上から、ダストが乱流と力学的に相互作用すると、大きなダストほど大きな速度分散を得ることがわかる。

実際は、星間乱流とダストとの相互作用はもっと複雑であり、幸運にも研究の題材には事欠かない。まず磁場がある。速度場だけでなく電磁場も乱れているのである。また、完全電離のガスよりは、むしろ温度が低く電離度が非常に低いガスが星間ガス中では質量の多くを占めている。この場合、中性原子・分子とイオンとの衝突の時間スケール以下のカスケード時間スケール($\sim \ell/v$)をもつ小スケール乱流は減衰する。特に、小さなスケールの運動と強く結びついている小さなダスト粒子についてこの減衰の効果は大きく、小さなダストの速度分散は抑えられる。次に、ダスト自体、電子の附着や星からの紫外光による光電効果で帯電している。つまり、イオンとのクーロン力や乱れた電磁場との相互作用も考慮しなければならない。特に帯電したダストは、そのジャイロ運動が磁気乱流のモード(Alfvén

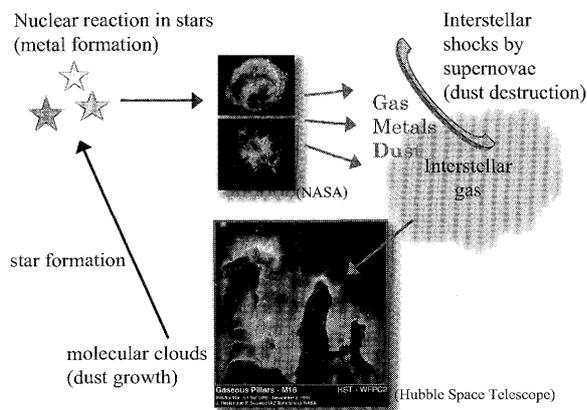


図2 ダストが星間空間で受ける過程。まず、ダストは星が死を迎える際の質量放出や超新星爆発等によって放出された元素が凝縮して形成される。星間空間に放出されたダストは、超新星起源の衝撃波による破壊や星間雲中での成長を経ながら、一部は新たにできる星に取り込まれる。本文で述べる星間乱流もダスト進化に重要である。

波や磁気音波)の周波数の整数倍になって、ジャイロ共鳴という共鳴を起こす。特に、小スケールでの乱流減衰の影響を受けない大きなダスト粒子でジャイロ共鳴が有効に働き、ダストが大きな速度分散を得ることがある。

(3) ダストサイズ分布の進化

ダストが乱流によって得る速度分散を、磁気乱流モデルに基づき、ガス抵抗やジャイロ共鳴の効果を考慮して見積もった計算が、Yanら[6]によって行われている。その結果によると、拡散星間雲成分 ($n \sim 0.1 - 1 \text{ cm}^{-3}$, $T \sim 10^4 \text{ K}$; n はガスの数密度, T はガスの温度) では、ジャイロ共鳴の効果によりダストは 10 km s^{-1} 程度の速度分散を得る。このような大きな速度でダスト同士がぶつかるとうダストは破碎される (shattering) が、ダスト破碎は大きなダスト粒子を破壊して大量の小さなダスト粒子を生じるので、小さなダスト粒子を生み出す機構として重要である。特に、野沢ら[7]によると、超新星爆発の際に生成されて星間空間に放出されるダストは、大きなダスト (半径 $\sim 0.1 - 1 \mu\text{m}$) に偏ったサイズ分布をすることが予言されている。これは、小さなダストが超新星に駆動された衝撃波中で選択的に破壊されるからである。一方、現実の星間ガス中には、 $0.1 \mu\text{m}$ より遥かに小さなダストも存在することが減光曲線等の観測によって知られている[8]。このような小さなダストの起源として我々が着目しているのが、ダストの破碎である。

我々[9]は、超新星で生成されて星間空間に放出されるダストのサイズ分布 (野沢ら[7]による) を初期条件にして、星間乱流モデルによって計算されたダストの速度 (Yanら[6]) を考慮することでダスト破碎の効果を扱い、ダストサイズ分布の進化を計算した。ダストの数密度を太陽と同じ重元素率 (\propto ダストを構成する元素の存在量) から見積もられるもので仮定し、 $n = 1 \text{ cm}^{-3}$, $T = 8000 \text{ K}$ の星間ガス乱流を考慮した。500万年経過したときのダストサイズ分布を図3に示す。 $n(a) da / n_{\text{H}}$ は、ダストの半径が a と $a + da$ の間にあるダストの水素原子核1個あたりの数密度を表す。図から、小さなダストが効率よく生成されている様子が見て取れる。特に、両対数グラフで $n(a)$ の傾きが -3 より急になると、小さなダストがダスト全体の総表面積を支配するようになるので、ダストの吸収・散乱係数が短波長 (典型的にダスト半径の 2π 倍程度以下) で上がる。実際、ダストの減光曲線 (すなわち、吸収+散乱の波長依存性) をミー理論に従い計算すると、紫外線域の減光量がダスト破碎が進むとともに大きくなっている様子が見て取れる (図4)。特に、宇宙初期 (宇宙年齢10億年以下) の、超新星が唯一のダスト源であったであろうと考えられる時代のクエーサーについて、観測された減光特性と、ダスト破碎後のものが誤差の範囲内で一致するようになるのは面白い。

3.1.3 宇宙物理と微粒子プラズマ物理

このように、ダストと星間ガスとの相互作用を考えていくと、星間乱流によるガスの抵抗力がダストの速度分散に寄与しているという発見があり、また、ダストと磁場との

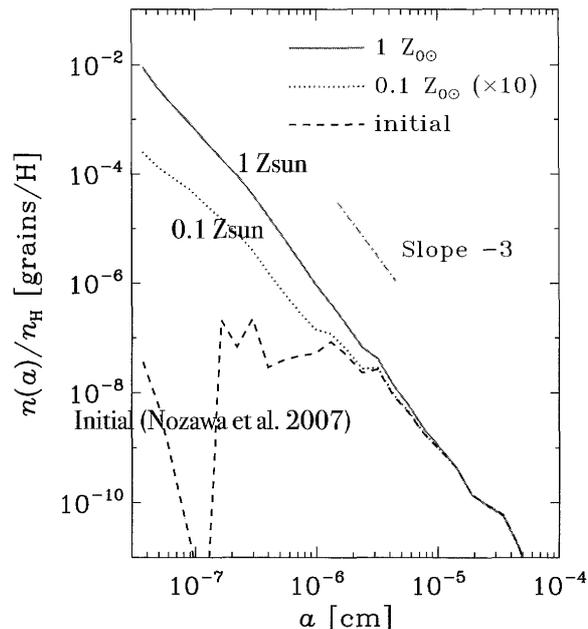


図3 超新星によって供給されたダスト[7]が、星間乱流により獲得した速度分散下で、ダスト同士の衝突により破碎されることによってサイズ分布 (ダスト半径 a の個数分布) がどのように変わるかを計算したもの[9]。ダストの数密度を、太陽と同じ重元素率とその $1/10$ の場合の2通りについて計算した。500万年の間 $n = 1 \text{ cm}^{-3}$, $T = 8000 \text{ K}$ の星間ガス乱流中でダスト破碎を受けた後の結果を示す。小さなダストの形成がダスト破碎によって起こっている様子が見て取れる。傾きが -3 より急になると表面積に対する小さなダストの効果が支配的になる。

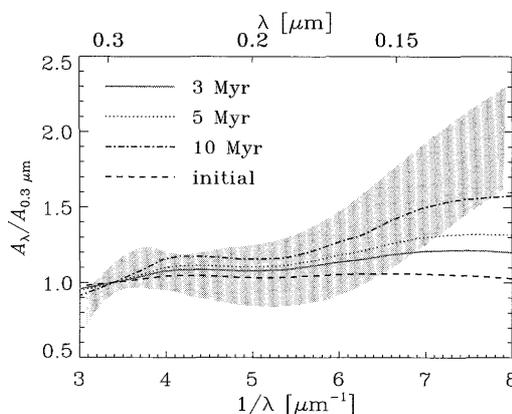


図4 減光曲線 (減光量は $0.3 \mu\text{m}$ で規格化) が、ダスト破碎とともにどのように変わるかを示す。ダスト破碎は図3と同じ (重元素率は太陽と同じ場合) 状況下で計算した。薄く塗りつぶされた部分は赤方偏移6のクエーサーについて観測された減光曲線[10]をプロットしている。 $\lambda \sim 0.1 - 0.2 \mu\text{m}$ の短波長でダスト破碎とともに減光量が大きくなっているのがわかる。

「絡み合い」がジャイロ共鳴を通して垣間見られた。微粒子プラズマ物理的知見が、天体物理にも重要であることがわかる。速度分散を得たダストは、衝突によって破碎されることで、小さなダストの形成を効率的に起こしダストの総表面積を増やすが、このようなダストの破碎は、宇宙年齢10億年以下の宇宙で既に起こっている可能性が、減光曲線の観測から指摘される (図4)。つまり、微粒子プラズマ物理の検証は、宇宙初期の天体に観測可能な形で開かれてい

るのである。

ダストの総表面積が重要になる星間物理の過程がいくつかある。まず、ダストは、その表面が水素分子形成の場所となり、水素分子輝線によるガスの輻射冷却を間接的に助ける。また、ダストがガスの熱エネルギーを赤外線ですすことにより、ガスの冷却を直接的に助けることも、星形成をしているような密度の高いガス雲では重要である。ガスの冷却は、ガスが重力収縮して星を形成するためには必要であるから、いわば、ダストの総表面積が星形成の鍵を握っているとも言える。ダストの総表面積を理解するためには、本節で解説したように微粒子プラズマ物理が必須である。微粒子プラズマ物理と天体物理の境界を開拓するのは、今後楽しい展開を生むに違いない。

参考文献

- [1] H. Murakami, H. Baba, P. Barthel *et al.*, Publ. Astron. Soc. Japan **59**, S369 (2007).
- [2] M. Kawada, H. Baba, P. Barthel *et al.*, Publ. Astron. Soc. Japan **59**, S389 (2007).
- [3] A.-L. Sun and H. Hirashita, Mon. Not. R. Astron. Soc. *in press*.
- [4] H. Kaneda, D. Ishihara, T. Suzuki *et al.*, Astron. Astrophys. **514**, A14 (2010).
- [5] R.B. Larson, Mon. Not. R. Astron. Soc. **194**, 809 (1981).
- [6] H. Yan, A. Lazarian and B.T. Draine, Astrophys. J. **616**, 895 (2004).
- [7] T. Nozawa, T. Kozasa and A. Habe, Astrophys. J. **666**, 955 (2007).
- [8] J.S. Mathis, W. Rumpl and K.H. Nordsieck, Astrophys. J. **217**, 425 (1977).
- [9] H. Hirashita, T. Nozawa, T. Kozasa and H. Yan, Mon. Not. R. Astron. Soc. **404**, 1437 (2010).
- [10] R. Maiolino, R. Schneider, E. Oliva *et al.*, Nature **431**, 533 (2004).