

## 小特集 宇宙における微粒子プラズマ

### 3. 宇宙における構造形成過程への星間塵の役割

釜谷 秀幸

(京都大学大学院理学研究科)

(原稿受付：2005年10月25日)

This article reviews the various roles of interstellar dusts. The emphasis is on the structure formation in the Milky Way. Typical effects of the dusts are thermal processes to control the evolution of the interstellar medium and the coagulation to form planets. It is noted that the interstellar dusts are not only ubiquitous but also affects the star and planet formation. Other current astrophysical problems concerning dusts are discussed briefly.

#### Keywords:

interstellar medium, dust, grains, star formation, planet formation, thermal process, galaxy evolution

#### 3.1 序論

我々の知る宇宙は様々な階層から成立している。大きなスケールでは、もちろん宇宙という入れ物自体を論じることになる。徐々に階層を下っていくと、銀河の集団からなる宇宙の大規模構造、そして銀河団、宇宙のもっとも基本的構成要素と言える大小の様々な銀河がある。銀河の内部構造としては恒星や星間物質もある。さらに、多くの恒星には惑星系も付随しているであろう。最終的には、惑星環境、つまり生命の有無も含めて、多種多様で複雑な宇宙を、各階層で彩っているのである。

こういった宇宙における構造形成を考えるには、大きなスケールでは暗黒物質という、電磁波ではその正体を直接検出できないが、重力相互作用にてその存在が確実である未知の物質が大きな役割を果たす。この暗黒物質に関しては、他の解説文や書籍にその解説を任せるとするが、宇宙の大規模構造や銀河本体の形成には、暗黒物質の役割は多大であることを強調しておきたい。

さて、本稿ではもう少し小さなスケールにおける宇宙の構造形成の理解について紹介する。宇宙の大規模な構造を理解するためには、それを実証的に検証できるという意味で、たしかに銀河が基本的構成要素となる。しかし、銀河と言え恒星の集団である。銀河を理解するためには、銀河内部での構造の成り立ちを把握する必要に迫られるのである。銀河内部の構造形成史を把握することは、宇宙物理学の根幹を成す物理および化学の素過程の理解と絡み合ってくるために、学問を完成するという意味で重要である。

では、銀河内部における構造形成とはどのようなプロセスが考えられるのであろうか？銀河内部の主な構成要素を見つめてみると、様々な星団および恒星、HI雲、分子雲、超新星残骸等と多種多様である。この多様性は、星間での物理過程が決して静的なものではなく、ダイナミックに輪廻を繰り返していることを十分に示唆する。なぜなら、恒星は分子雲から生まれ、その最後には超新星爆発に

代表される現象を介して星間物質として星間に戻っていくためである。こういった、銀河内部における構造形成史はどのような過程が働いた結果なのであろうか？

そこで、本稿では、銀河内部の構造形成プロセスに特化し、できるだけ平易に紹介していきたいと思う。その際、特に、星間塵の役割を詳らかにしていきたい。具体的には、我々の天の川のような銀河内部における構造形成、星間物質の進化や恒星形成、そして惑星形成における星間塵の役割を紹介する。これらの構造は、我々の生存環境に直接かわるものである。この意味では、星間塵の存在と生命誕生の秘密との間の道筋の一部を紹介することとなる。銀河内部の話ではあるが、引き続き、大きな空間スケールから徐々にダウンサイジングすることで、話を展開していく。

#### 3.2 星間物質の重要性

星間物質とは読んで字の如く、恒星と恒星の間に充満している気体である。主な構成要素 (Table 1) は、星形成の現場となる分子雲、体積の大部分を占めている1万度前後の拡散成分、10万度もの高温成分などと言われている。しかし実際には、星間物質自体も非常に多様な存在形態をとっている。

その例として興味深い観測事実が報告されている。直接的に構造形成に絡んでくる星間物質の成分は、中性水素原子を主な成分とする星間物質 (HIガスと呼ぶことにする)である。この星間物質は、約6,000度、密度で単位体積あたり約1個程度の状態で存在していると考えられている。もちろん、このHIガスが冷え、自己重力が系の進化を

Table 1 Physical parameters of typical interstellar medium.

相	温度	密度	体積占有率
コロナガス相 (HCM)	~100万度	~0.003 個/cc	~0.1??
暖かいガス相 (WIM+WNM)	~数千度	~0.3 個/cc	~0.9 以上
冷たいガス相 (CNM)	~100度	~30.0 個/cc	~0.1 以下

author's e-mail: kamaya@kusastro.kyoto-u.ac.jp

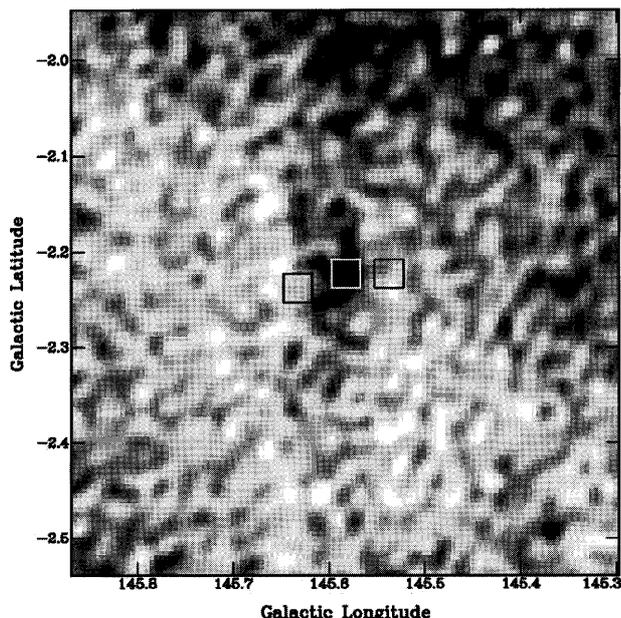


Fig. 1 HI distribution of HI medium. The dark region is the low temperature HI region [1].

支配するようになる分子雲となり、その内部で恒星が形成されていることになる。このような基本的とさえいえる HI ガスの構造さえシンプルではなかったのである [1, 2].

観測結果を Fig. 1 に示す。この図は HI ガスの分布が天球面へ射影されたものである。一目で、星間物質の分布が一樣ではまったくないことをわかっていただけたと思う。この天域のある領域の振動数に対するスペクトルも見てみることにする (Fig. 2)。幅広い輝線成分は、実は代表的な HI の 21 cm 輝線である。広がって見えているのは、HI ガスの温度が 10,000 度弱と暖かいためである。その輝線の中にスパイク状の吸収が見られる。これも、HI による吸収である。この意味することは、現実の宇宙では、暖かい星間物質と冷たい星間物質が入り混じって存在しているということである。

このように複雑な星間物質を特徴付ける、良い物理的性質はないのであろうか？ もう 20 年ほど前の論文になるが、マイヤーズ氏がまとめた Fig. 3 が良いヒントを与えてくれる [3]。横軸は密度、縦軸は温度で、図中の左上から右下にかかる幾つかの実線は等圧線である。左上から、コロナガス成分、HI ガス成分 (図では暖かい星間物質のうちの一つとされている)、右下が分子雲となっており、分子雲は自己重力により収縮しつつあるために、温度の低さの割りに密度が大きくなっており、その結果、その圧力は大きくなっている。右上は、生まれたばかりの恒星周辺のガスが星からの輻射により加熱され、膨張している星間物質である。これは分子雲成分とは異なり、密度の割りに温度が高くなっているためである。分子雲などの例外はあるにしろ、空間の大部分を占めるコロナガス成分や HI ガス成分などは、非常に大雑把に見て、お互いに圧力平衡にあって良いと考えられる。圧力の分散の原因は、衝撃波による場合もあると考えられるし、星間磁場さえ重要になってくると期待される。実際、我々の太陽のごく近傍でも、単純

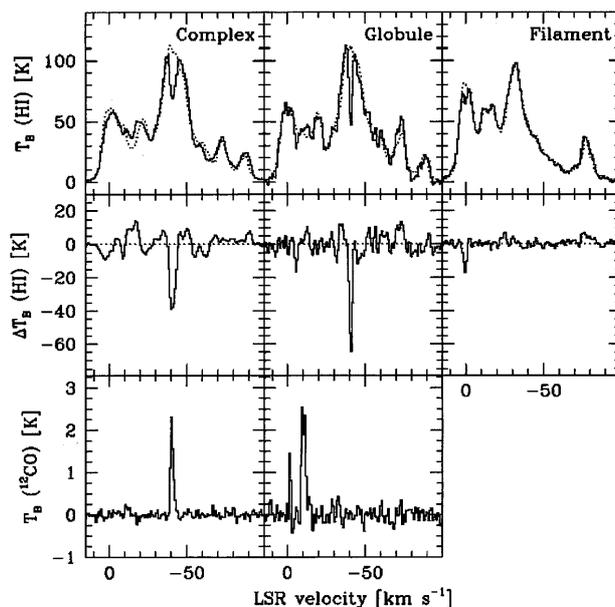


Fig. 2 HI spectrum in some regions of sky. The solid lines of the top panels show the spike of the HI absorption. The dotted lines in the same panels are the usual HI emission. The middle panels depict the difference between the on and off source of the HI absorption. The lower panels show the detection of CO molecule that is discussed precisely in [2]. The vertical axis is the brightness temperature that means simply the brightness. The horizontal axis is the frequency translated to the velocity.

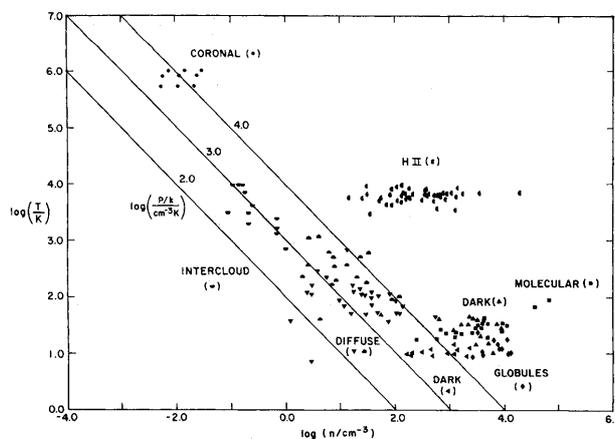


Fig. 3 The rough pressure equilibrium model of global interstellar medium is depicted [3]. Exceptions are molecular clouds and HII region around massive stars.

な圧力平衡モデルが成り立っていない領域があることも報告されている。星間のダイナミクスがダイレクトに反映された結果であるので、この圧力の大きな分散の起源については、今後も大いに研究が進められていくことと思う。

星間物質の圧力には確かに分散があるものの、大雑把には圧力平衡にある。この性質を決めている大きな原理は何であろうか？ 圧力は、もちろん平均分子量も重要であるが、概ね密度と温度を観測的に定めれば決定される。詳細な観測の原理は別書にゆずらざるおえないが、問題はどのようにしてこのように大雑把にでもバランスのとれた温度および圧力の系列が存在するのか？である。古典的には、100度

位の星間物質（低たい成分と呼ぶ）と 10,000 度位の星間物質（暖かい成分と呼ぶ）とが圧力平衡にあることを要請するモデルがある。それぞれの成分は熱平衡状態にある。熱平衡状態にあるということは、加熱と冷却が釣り合っている様を言う。加熱源は、太陽より重い恒星からの放射や、宇宙線粒子などが候補として考えられている。冷却は、星間物質自身のエネルギー遷移の際に放出される光子の脱出として起きる。

さて、いよいよ星間塵の役割の説明に入る。もちろん様々な星間塵の役割はあるが、ここでは星間物質の温度を評価する場合、星間塵の存在は過熱機構として働くことを紹介する。星間物質の加熱機構として、紫外線光による光電離加熱が知られている。たとえば、水素の電離エネルギーは 13.6 eV で、そのエネルギー以上の光子がやってくるならば、中性水素から電子が離脱することになる。この電子は、周囲のプラズマと十分に相互作用し緩和しているわけではないので、1 粒子あたりでみると平均より大きな値を当初は持っている。その後、周囲の星間物質とこの電子が相互作用し緩和していくことで、結果として光子のエネルギーが星間物質の熱エネルギーに転換することになる。

このように、電離された電子が、星間物質の熱平衡を論じる際には重要になる場合がある。さらに、同様な機構が星間塵にも働くことが知られている。星間塵は、一つの単純なものを見方を許すと、非常に大きな分子、もしくは分子の集合体として捉えることができる。そうすると、星間塵のイオン化エネルギーは水素の電離エネルギーより十分に小さいことがわかる。このことは、水素の電離光子以下のエネルギーを持った光子でも、星間に星間塵より非熱的エネルギーを有した電子を供給することが可能であることを意味する。星間では、水素の電離光子よりエネルギーの小さい光子のほうがふんだんに存在する。よって、星間で光子エネルギー分布にもよるのであるが、星間塵より供給された電子による星間物質の過熱が重要になる場合があるのである。一言でまとめれば、「星間塵は、外部放射場のスペクトルと放射強度に応じて、星間物質の主要な過熱媒体となる」ということである。

この節の最後に、星間空間では熱不安定と構造形成と絡んでくることを強調しておきたい。一般の宇宙物理学の啓蒙書では、星間における構造形成の際には、星間物質の自己重力が重要であると紹介されている。その理由として、宇宙とは空間スケールの大きな現象の集積であり、重力が遠達力として重要であることがあげられている。しかし、重力だけが本当に星間で構造形成に重要なのであろうか？ この節の最初の方で紹介したように、星間には、実はごく小さい構造が検出されている。その小さいサイズの構造は星間物質の自己重力不安定で作り出すことが簡単ではないことも指摘されている。では、いったい何が起きてそのような小さな構造が出現できるのであろうか？

期待されている物理機構は星間物質の熱不安定である。熱不安定とは、熱平衡にあった星間物質が加熱率と冷却率とのバランスが崩れ、冷却が進む場合には、どんどん星間

物質の温度が上がるとともに密度も大きくなる現象である。即ち、熱不安定を介しての構造形成は可能である。自己重力不安定の場合には大きな空間構造を形作るのに有利であるが、熱不安定は自己重力的に安定な小さな空間構造の出現を促す。星間物質の熱的状态が星間塵の影響を受けている限り、熱不安定の発生や進化における星間塵の役割も吟味されつづけることになる。こういった熱不安定が星間物質の輪廻の際に重要であることが、近年、日本のグループ（小山と犬塚）により強調された[4]。観測的にも、高い角分解能を有した望遠鏡が作られていくに当たり、こういった小さい空間スケールからの空間構造の出現はさらに実証的に論じられていくことになるはずである。このとき、日本も大きな役割を果たしている ALMA（アタカマ・大ミリ波サブミリ波干渉計計画）が決定的な観測事実を提供してくれることになるはずである。

### 3.3 星形成への役割

まず、恒星形成の概観をまとめ直す。多くの場合に現状では、星間物質のうち拡散成分が自己重力的に不安定となり、分子雲が形成されると期待されている。万が一、自己重力的には安定な小さなクランプの集合体が凝集して分子

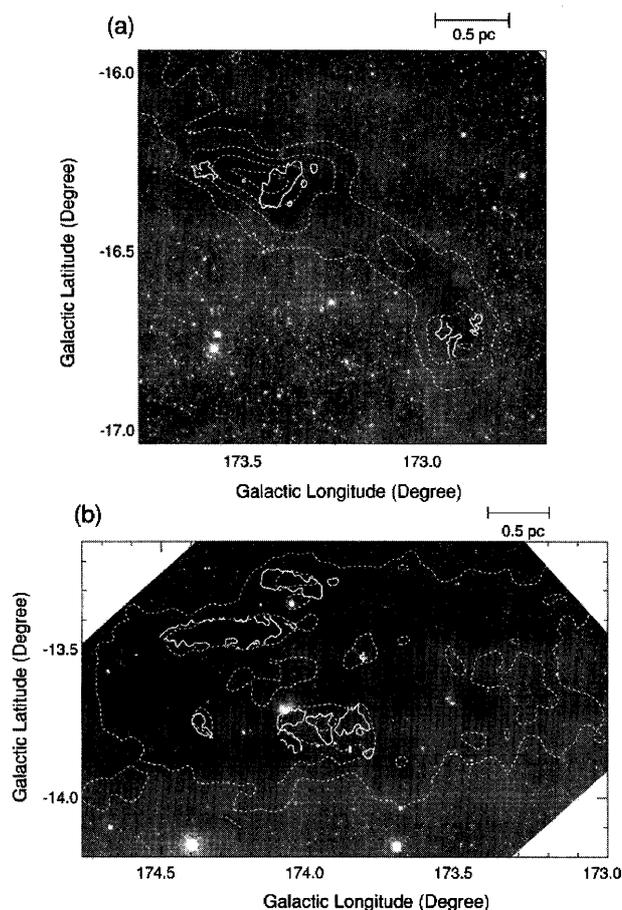


Fig. 4 Some examples of molecular clouds and their cores [5]. The contours depict the distribution of the molecular gas. The background images are the night sky in the visual band. Obviously, we find the dark regions in the sky where there are the molecular clouds.

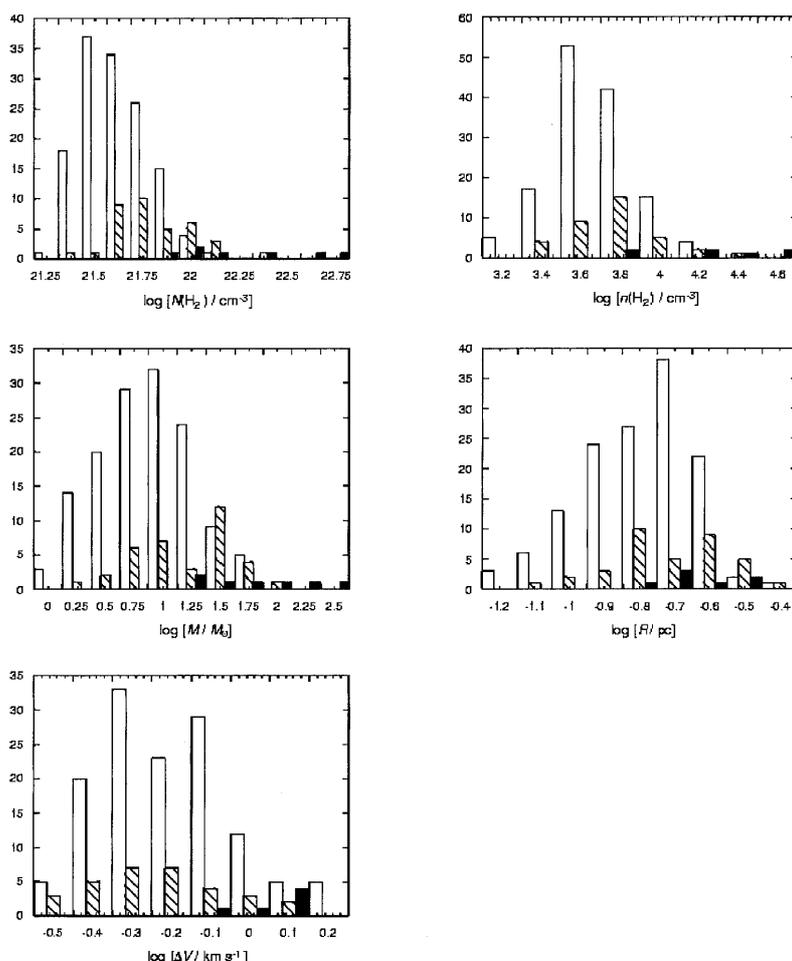


Fig. 5 Typical property of the molecular cloud cores [6]. Five histograms are presented. Those are column density (upper left), number density (upper right), mass (middle left), size (middle right), and velocity dispersion (bottom).

雲を形成したとしても、最終的に系として自己重力的な天体になっている必要はある。なぜならば、マイヤーズの図で示されているように、分子雲は見かけの圧力が大きいため、自己重力でその膨張を押さえ込まない限り存在できないからである。

この分子雲の中で、分子雲コアと呼ばれるさらに密度の高い領域が生まれる (Fig. 4) [5]。この分子雲コアが星形成の直接の現場となる。この分子雲コアとは実際に普遍的存在であることが観測的にも示されており、その基本的物理量がまとめられている (Fig. 5) [6]。分子雲と分子雲コアの平均的な大きさや密度を Table 2 にまとめておく。さらに、この分子雲コアの角運動量はゼロではないため、最終的には原始星と原始惑星系円盤の系が誕生することになる。その後の惑星系形成の段階は、次節において改めて紹介したい。いずれにしても、分子雲の自己重力が最終的に重要となることで星形成は進んで行くのである。

さて前節では自己重力不安定の知識を既知のものとして議論してきた。ここでは、もう少し詳しくその物理過程を把握した上で恒星の形成にかかわる星間塵の役割を考えてみる。自己重力不安定は、星間物質の圧力勾配力が自己重力に打ち負けることで生じる。断熱の場合を考えてみる。ある領域の星間物質がその自己重力で少し収縮したとす

Table 2 Physical parameters of typical molecular clouds and complex.

		巨大分子雲	暗黒星雲
分子雲複合体	サイズ (pc)	20~80	6~20
	水素分子密度 (1/cc)	100~300	100~1千
	質量 (太陽質量)	8万~200万	1千~1万
個別的分子雲	サイズ (pc)	3~20	0.2~4.0
	水素分子密度 (1/cc)	1千~10万	100~1万
	質量 (太陽質量)	1千~10万	5.0~500
分子雲コア	サイズ (pc)	0.5~3.0	0.1~0.4
	水素分子密度 (1/cc)	1万~100万	1万~10万
	質量 (太陽質量)	10~1千	0.3~10

る。そうすると、その領域に含まれていた星間物質は断熱圧縮のため暖かくなる。収縮しているのであるから密度は大きくなる。その双方が相俟って、収縮した星間物質の圧力が大きくなる。圧力が大きくなるならば、収縮した領域は反発しもとの大きさに戻ろうとする。この一連の過程は自己重力的に安定である場合を概観したことと同じである。自己重力的に不安定であるということは、今説明した過程の逆を考えればよい。つまり、自己重力により収縮した場合、収縮した領域内の圧力があまり大きくなり、常に重力収縮が進んでいく、これが自己重力不安定の概観と

なる。

自己重力により星間物質が断熱的に収縮した場合を考え直してみる。自己重力により収縮が進み続けることで星間の構造形成は進むことができる。収縮するのであるから、必ず密度は上がり続けなければならない。一方、自己重力収縮が継続するためには圧力が上がりすぎては困る。結果として、星間物質が自己重力により収縮し続けるためには、断熱加熱を和らげるための冷却機構が重要となってくる。では、星間物質の冷却機構とはどのようなものなのであろうか？

少し温度の高い、一万度程度の星間物質を考えてみる。この星間物質の主成分は水素である。水素は電離再電離を繰り返しており、ある電離平衡に達しているとする。そうすると、同時に、水素の電子が様々に励起された軌道をとっていることになる。もちろん、適度な遷移、再励起がバランスした状況になっている。このとき、電子のエネルギー状態が上位のエネルギー状態から下位のそれに遷移する際に光子を放出することになる。この放出される光子が系からエネルギーを持って逃げ去ることで、星間物質は冷却できるのである。

では、分子雲中における実際の冷却媒体はどのようなものなのであろうか？ 分子雲とは主に水素分子から構成されている。しかし、観測によると分子雲の温度は極めて小さい。よく知られているように、水素分子はその構造の対称性が高いために、双極子モーメントがなく、それに伴う光子の放射は期待できない。また、4重極モーメントに関わる放射の確率はごく小さい。よって、分子雲中で自己重力により構造形成が進むためには、水素分子以外の冷却媒体が必要である。さて、分子雲中の分子は水素分子だけであらうか？ もちろん、応えは否である。分子雲中には、一酸化炭素やアンモニアなど、様々な分子が存在している。高分子さえ分子雲中に発見されている。分子雲中で構造形成が進む場合、実は、こういった分子のエネルギー遷移に伴う光子の離脱が重要となっているのである。さらに重要なこととして、分子雲を構成する分子ガスの自己重力収縮は、断熱性が回復する密度に収縮するまで、概ね等温過程であることが知られている。

次に星間塵の分子雲中での構造形成に及ぼす役割の一つを紹介する。分子雲中で分子ガスが自己重力収縮する結果、恒星は誕生する。その途中、分子ガスの密度はどんどん大きくなることを述べた。もちろん、この分子ガスには星間塵も含まれている。分子ガスの密度が大きくなると、星間塵に対して次の2つの過程が考えられる。一つ目は、媒質の密度が大きくなるとともに星間塵の数密度も大きくなり、星間塵による自己遮蔽が効き、その結果、外部からの輻射による星間塵の過熱効率が小さくなることである。この結果、星間塵はどんどん冷えることになる。二つ目は、密度が大きくなることで、分子ガスと星間塵との衝突率が大きくなることである。この結果、もし分子ガスの温度が星間塵の温度より高ければ、星間塵は分子ガスとの衝突により加熱されることになる。

改めて、分子ガスの温度が星間塵の温度より高い場合を

考えてみる。星間塵はそれ自体で冷えようとする。そのエネルギー源は、外部輻射場が非常に弱いとするならば、その周囲にある分子ガスのエネルギーである。分子ガスからは衝突により星間塵へとエネルギーが受け渡される。この経過を眺めると、密度の非常に大きな進化段階では、星間塵の存在は分子ガスの冷却を促進する役割を果たし得ることがわかる。もちろん、もとのエネルギーは分子雲内部の収縮に伴う重力エネルギーである。また、分子ガスの温度と星間塵の温度が何らかの原因で逆転している場合には、星間塵の存在は分子ガスに対して過熱を促すこととなる。

この節の最後に、有名な磁場の凍結問題についてコメントをまとめたい。磁場の凍結問題とは、でき上がった恒星の磁場強度が、分子ガスが磁場に常に凍結した場合に期待される磁場の強さよりも極端に小さい矛盾のことである。これは、分子雲から星形成にいたる適当な段階で磁場の散逸が起こったことを意味する。磁場の散逸過程の履歴と分子雲中で恒星が形成されている履歴とはお互いに関連づいていることを示唆しているのである。ここでは、収縮中の分子ガスの初期段階の磁場の散逸について述べる。この段階の磁場の散逸は、収縮に伴い曲げられた磁力線の張力を利用するものである。分子ガスは低温といっても、ほんの少しではあるが電離している。その電離状態を宇宙線流束や輻射によるイオン化過程を踏まえて評価し、イオンと中性水素分子間の運動量交換を考えることで、分子ガスからの磁場の散逸率が評価できるのである。このとき、もし代表的なイオンが星間塵であったならば、中性分子と荷電粒子との相互作用が大きくなり、その結果、磁場の散逸率は小さくなることになる。このように、磁場の散逸率の評価にさえ星間塵は重要な役割を果たす可能性があるのである。

### 3.4 惑星系形成における重要性

最後の章として、惑星系形成における星間塵の役割を紹介する。まず、惑星系形成の標準的なモデルを概観してみ

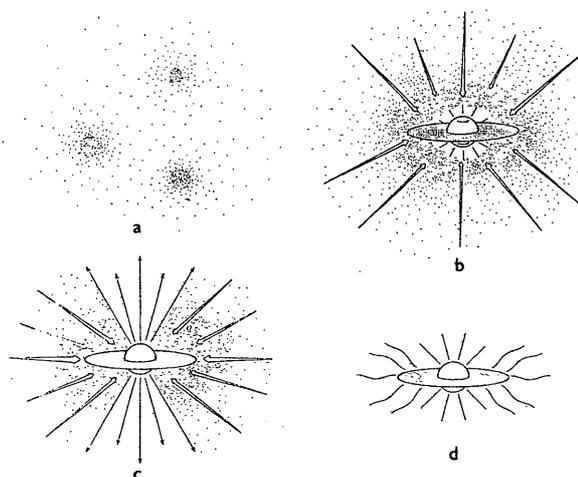


Fig. 6 Schematic view of the star formation processes [7]. In the cores (a), stars are formed via the accretion of the molecular gas (b-c). Finally, we can observe protostars (d).

る[7]. Fig.6に示しているように、単独星形成は、分子雲から分子雲コアが誕生し、その内部で恒星が生まれる。その恒星は周囲に星周円盤をまとうことになる。この円盤の成分として、もちろん星間塵が含まれる。問題は、この星周円盤の星間塵がどのようにして惑星へと形作られていくか?である。

これより、惑星が作られる星周円盤のことを原始惑星系円盤と呼ぶことにする。この原始惑星系円盤で、どのような物理過程が働けば惑星ができるのであろうか? まず、原始惑星系円盤が、回転面に垂直方向に静水圧平衡にあると、簡単のために仮定する。星間塵はこの円盤中に万遍なく舞い散っているとす。回転角方向へは、中心星の重力により公転しているものとする。そうすると、円盤面垂直方向へは、原始惑星系円盤を構成する気体からの摩擦を、星間塵は被るだけである。よって、回転面方向への重力成分があるために、星間塵はじわじわと回転面に集積することになる。回転面に星間塵が集積すると、そこでは自己重力不安定が働き、微惑星が誕生することになる。

いったん微惑星が誕生できると、微惑星の合体成長を経て原始惑星が形成される。さらに、原始惑星が合体していくとより大きな惑星へと成長していく。このようにして、地球のような岩石質の惑星が誕生するのである。まとめると、星間塵の集積という過程が、惑星形成という構造形成に結びつくのである。星間塵自体は、様々なサイズが期待されているものの、 $1,000 \text{ \AA}$ 位のごく小さい微粒子である。一方、地球のサイズは $6,000 \text{ km}$ 程と考えるならば、このダイナミックレンジの大きさには驚愕さえ覚える。これは、直感的には、果たして都合よく星間塵を惑星まで成長させることができるのか?と不安にさせさせる。実際、星間塵の合体成長が簡単ではないことを、次の段落で紹介しておきたい。詳しくは、井田と小久保の一般解説書が入門に適していると思う[8]。

ポイントは、「効率よく微惑星が形成されるかどうか?」である。先ほどと同様に回転し静水圧平衡にあるガスと星間塵が混在する円盤を考えてみる。運動方程式を思い浮かべていただくと直ぐに判断できるが、ガスには圧力勾配力が働き、星間塵には働かない。この事実は、相互の摩擦を介した運動量交換の効果を無視するならば、ガスと星間塵の回転角方向の速度に差が生じることになる。そうすると、ケルビン・ヘルムホルツ的な流体力学不安定が生じる。原始惑星系円盤ガスのレイノルズ数は概ね1より十分大きいため、この不安定が発生することにより、原始惑星系円盤ガスは乱流状態になる。つまり、原始惑星系円盤ガスが乱流状態にあるために、星間塵は常に巻き上げられ続け、円盤面中央に集積することが非常に困難なのである。

星間塵が円盤面に集まらない限り、微惑星形成に必要な自己重力不安定は起こらず、結果、微惑星形成も期待できない。このままでは、地球型惑星は形成されないことになってしまうのである。この問題を解決するために、星間塵が拡散している回転流体の基本的性質が再検討され続けている[9]。この微惑星形成の困難は古典的に知られていたものではあったが、最近の系外惑星の検出ラッシュに刺激されてか、現代の惑星形成論でもっともホットな話題の一つとなっている。今後の展開が非常に楽しみな研究分野である。

最後に、木星のような大気をまとった惑星の誕生に関して言及しておきたい。木星の中心部には、地球型惑星のように原始惑星の合体で成長した核が存在する。その核がある程度大きくなると、原始惑星系円盤のガスが核の重力により引き付けられて、その核は大気をまとめることが可能となる。星間塵の構造形成へのかかわり方の観点からは、木星のようなガス惑星の形成にも星間塵は大きな役割を果たしていることになるのである。

### 3.5 まとめ

星間塵は星間の至る所に存在する物質である。それは、観る天体の減光という形で普遍的に存在することがわかる。興味深いことに、このちっぼけな星間塵は宇宙における構造形成に大きな役割を果たしている。ときには星間物質の加熱機構の役割を担い、ときには分子ガスの冷却機構の役割を担う。星間物質から恒星という構造形成が起きるためには、星間塵はその熱収支を司る機会を持つという意味で非常に重要なのである。さらに挙句には、星間塵は惑星形成の素でもある。星間塵の誕生なしには、惑星の誕生もありえないのである。今後は、星間塵の誕生にまつわる研究が大いに重要になってくるものと考えている。

### 参考文献

- [1] S.J. Gibson *et al.*, *Astrophys. J.* **540**, 851 (2000).
- [2] P.D. Klaassen *et al.*, *Astrophys. J.* **631**, 1001 (2005).
- [3] P. Myers *Astrophys. J.* **225**, 380 (1978).
- [4] H. Koyama and S. Inutsuka, *Astrophys. J. Lett.* **564**, L97 (2002).
- [5] T. Ohnishi *et al.*, *Astrophys. J.* **575**, 905 (2002).
- [6] K. Tachihara *et al.*, *Astron. Astrophys.* **385**, 909 (2002).
- [7] F.H. Shu, F.C. Adams and S. Lizano, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **25**, 23 (1987).
- [8] 井田 茂, 小久保英一郎: 一億個の地球 (岩波書店) (1999).
- [9] N. Ishitsu and M. Sekiya, *Icarus* **165**, 181 (2003).