

## 星間磁気雲の収縮と星への進化

羽部朝男\*・富阪幸治\*\*

星間雲は銀河内における星の誕生の地である。星間雲ではこれをつらぬいている磁場が星形成に大変重要な役割を果たすと考えられている。磁場を持った分子雲の自己重力収縮過程と星への進化の研究は近年極めて重要なテーマとなっている。しかし、この過程は大変複雑であり、これらの研究には数値シミュレーションが有力な研究手段であると考えられている。最近のスーパーコンピューターの発展は大規模な数値シミュレーションを可能にしており、今後の発展が期待される。

### I. スーパーコンピューターで調べる磁気雲の重力収縮

最近、磁場の振動が分子雲を支えたり、その中で星形成を促したりする動的な役割が注目されている。ここではこのような場合の一つとして、非線形トーションアルフヴェン波によって分子雲のストリーマの自己重力収縮をトリガーする可能性を検討するために行った数値シミュレーションについて述べる。

#### 1. 分子雲における星形成と磁場

星は分子雲から形成されている。しかし、それがどの様におこなわれるのか、その過程はまだ明らかではない。星形成過程の解明は、それ自体の意義にとどまらず星間物質の構造や銀河の形成や進化の理解にとっても重要である。

はじめに分子雲における星形成過程と磁場の役割について述べておこう。星の平均密度はおよそ  $1 \text{ g/cm}^3$  である。これに対して星形成が行われている分子雲は密度の高い星間雲とはいえ、その平均密度は  $10^{-21} \sim 10^{-20} \text{ g/cm}^3$  にすぎない。そのため星形成過程は、なんらかの原因で分子雲が自らの重力で収縮する過程をとまらう。また、単位質量当りの角運動量は星のほうが分子雲よりかなり小さいので、分子雲の収縮過程で自分の角運動量を外へ輸送しなければならない。分子雲の自己重力収縮で最終的にどれくらいの質量の星がどれほど出来るのか、それを決める物理過程はどのようなものか、などを明らかにすることが研究の目標となる。磁場は、収縮を開始した分子雲での角運動量輸送過程や自己重力収縮してできた回転ディスクの分裂過程、部分電離したガス中を磁場が拡散することによる分子雲の自己重力による分裂過程などで重要な役割を果たすと期待され、このような過程が

研究されている。これらの過程は大変複雑なので研究を進める上で数値シミュレーションの役割は大きい。

磁場の無い回転する星間雲の自己重力収縮過程の研究では、観山ら(1984)の3次元数値シミュレーションを用いた研究が星間雲の分裂過程の理解を深めることに大きな寄与をした。これに対し磁場を持つ分子雲の場合にはガスの運動、自己重力と共に磁場の時間発展を同時に解かなければいけない。そのため、大規模な数値シミュレーションとなる。そのため数値シミュレーションによる研究はまだ多くない。しかし、梅村氏の記事(天文月報1990年1月号)にあったように最近のスーパーコンピューターは1980年代はじめの全国共同利用大型計算機センターの大型計算機の1000倍以上の計算速度にまで発展したため、数値シミュレーションによる研究の発展の可能性が開けている。

さて、分子雲の磁場の大きさは数  $\mu\text{G}$  から数十  $\mu\text{G}$  と示唆されている。また、この磁場は絶えず振動している可能性が示唆されている。この可能性は、分子雲の各部分が無秩序運動し、しかも寿命は長いことから示唆される。無秩序運動と分子雲の重力がほぼビリアル平衡にある。しかし、この無秩序速度は分子雲の音速よりかなり大きいので、超音速運動となりすぐ散逸してしまい分子雲の寿命はかなり短くなる。ところが、磁場があれば、この速度はアルフヴェン速度以下となり、分子雲がビリアル平衡となることが可能となる。このことは磁場を通して分子雲の各部分が互いに動的に相互作用しているという新しい可能性を示唆する。最近、見つかった分子雲のストリーマとそこでの星形成もこのような例と考えることが出来る。つぎに磁場のピンチ効果による磁気分子雲のストリーマの自己重力収縮のトリガー過程を数値シミュレーションをもちいて調べた我々の研究について述べよう。

#### 2. 磁場のピンチ効果による磁気分子雲のストリーマの自己重力収縮のトリガー

星形成が盛んである  $\rho \text{ Oph}$  分子雲などには、ストリー

\* 北大理 Asao Habe, \*\* 新潟大教育 Kohji Tomisaka:  
The Contraction of a Magnetized Interstellar Cloud  
and Evolution to a Star

マと呼ばれる密度の高い細長い領域がある。このストリーマは大きな星形成領域から伸びており、その長さは 20 pc ほどである。その方向と大局的磁場の方向はそろっている。東大の内田と名古屋大学のグループは一酸化炭素の観測によってストリーマ構造の詳細を明らかにした(図1)。それによればストリーマのなかで高密度のガスが互いに回転しながら絡み合っている様子が明らかにされた。さらに、ストリーマに沿って赤外線星(原始星)も観測されている。内田らによれば、分子雲における大きな星形成領域の形成がストリーマ形成の原因と考えられる。つまり、ストリーマの形成は、

1. 磁場と回転を持った分子雲が自己重力収縮して中心に密度の高い回転するコアが形成される。
2. このコアが形成される過程で、これはその外側の

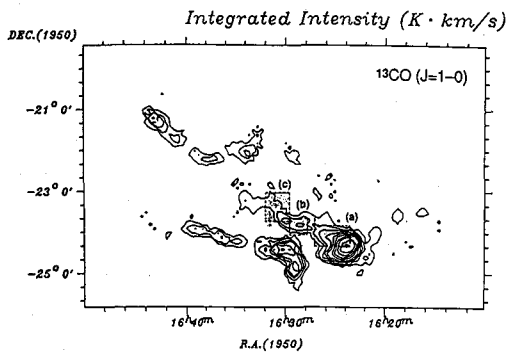


図1 ρOph 分子雲におけるストリーマ (Uchida, Y., et al., 1989, preprint より転載)

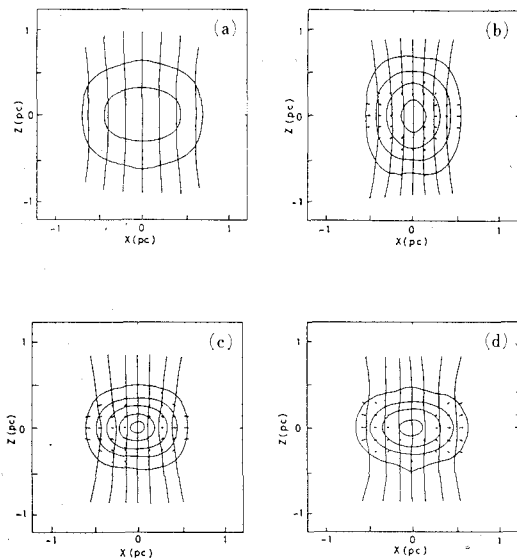


図2 トロイダル磁場でピンチされた磁気雲の時間発展。この磁気雲はピンチされた後、たて磁場の圧力によって押し戻されている。

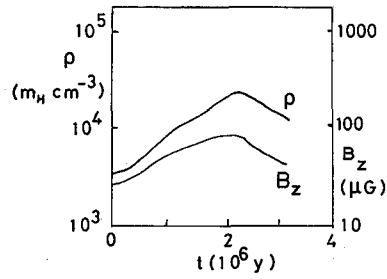


図3 図2に示した磁気雲の中心密度と磁場の時間発展。トロイダル磁場でピンチされた磁気雲の中心密度と中心のたて磁場が一度上昇してから減少することが示されている。

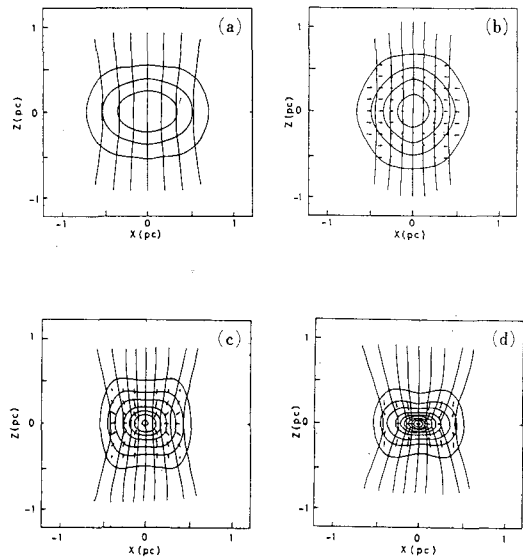


図4 トロイダル磁場でピンチされた磁気雲の時間発展。この磁気雲はピンチされた後、磁気雲の自己重力が十分に大きくなって磁気雲の中心部分が重力崩壊している。

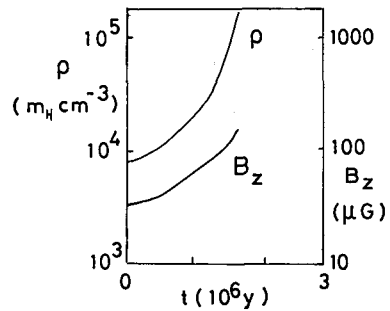


図5 図4に示した磁気雲の中心密度と中心のたて磁場の時間発展。トロイダル磁場でピンチされた磁気雲の中心密度と磁場が上昇して、磁気雲の中心部分が重力崩壊し始め密度が急速に上昇している様子が示されている。

ガスより速く回転するようになるので、分子雲の磁場を捻りあげる。これによって、コアには逆にトルクが働きコアの回転は減少する。このようにして、磁場を通してコアの角運動量が外側に輸送される。このため、コアはさらに重力収縮を続け、コアでやがて星形成が行われ大きな星形成領域が出来る。

3. 一方、磁場は捻りあげられてコイル状となるが(これをトロイダル磁場と呼ぶ)、このトロイダル磁場は分子雲中を非線形トーションナル・アルフヴェン波(もとの磁場を回転軸とする方向に磁場をひねりながら伝わるアルフヴェン波)として伝わる。このとき、分子雲はトロイダル磁場によってピンチされ(ちょうど輪ゴムのようにトロイダル磁場は縮もうとする。この縮み方をピンチと言う)密度の高い細長い領域がつくられる。

さらに、この非線形トーションナル・アルフヴェン波が星間雲の中の密度の高い部分(クランプと呼ぶ)に伝わりこれをピンチして自己重力収縮を促すと期待される。これが可能ならストリーマに沿った原始星の形成を説明できる。

我々(羽部, 内田, 池内, 1990)は、この可能性について検討するために数値シミュレーションをおこなった。数値計算の方法は磁場と自己重力を考慮したスムース・パーティクル法である。この方法は多数の広がりを持った粒子を用いて流体力学計算を行なう。第一段階のシミュレーションとして、磁場とガスの圧力によって力学平衡にあるクランプのまわりにトロイダル磁場を仮定し、トロイダル磁場でクランプがピンチされた時どのようなクランプで自己重力収縮がおこるのかについて調べた。図2はトロイダル磁場が小さくクランプが振動を繰り返して自己重力収縮しなかった場合の結果である。図3は、この時の密度と磁場の時間変化を示している。図4と図5は、トロイダル磁場によってピンチされたクランプが自己重力不安定となって重力崩壊する過程を示している。数値計算の結果は、より強いトロイダル磁場によってクランプは自己重力不安定となりやすく、またより質量が大きいほどトロイダル磁場によって自己重力不安定となりやすいという結果となった。シミュレーションの結果は、トロイダル磁場成分を持つクランプのギップスの自由エネルギーを用いて理解できることが解った。現在、非線形トーションナル・アルフヴェン波がクランプに伝わって自己重力収縮を引き起こす過程について数値シミュレーションを行っている。これによって、分子雲のなかでこのような過程で星形成が起る可能性が明らかになると期待される。今後、収縮を開始した分子雲での角運動量輸送過程や自己重力収縮してできた回転ディスクの分裂過程、部分電離したガス中を磁場が拡散することによる分子雲の自己重力による分裂過程などで磁場

が果たす役割を明らかにする数値シミュレーションが進展し、それによって星形成過程の理解が大きく進むと期待される。(羽部朝男)

## II. 星間雲から星への進化

### 1. はじめに

「星はどのような風に、どんな条件の雲から星ができるのか」という問いには、原始星、それを取り巻く円盤、さらにそれから吹き出す双極流などの観測から、多くの情報が集まっている。その情報を整理して物理的に理解するためには、計算機シミュレーションで星間雲から星への進化を再現してみても何が起っているのかをつかまなければならない。ここでは、「磁気星間雲の進化」という観点から、星生成プロセスについて数値シミュレーションで明らかになったことをまとめてみる。

星間雲の中でも高密度の領域は、しばしば回転楕円体やドーナツ型の形状をして見つっている。この中に、すでに原始星が形成されているのが見つっているものもある。回転楕円体やドーナツ型のこの形状は、重力に抗して磁場の力や遠心力が働いており、磁場や角運動量の向きと垂直な面にものが集まっていることを示していると考えられている(図1参照)。

磁場、回転、圧力で重力に抗して支えられる質量には上限(以下この質量を臨界質量と呼ぶ)がある。その上限よりも大きい質量を持った星間雲(超臨界雲)は動的に自由落下時間程度で収縮を起こしてしまう。臨界質量より小さい質量を持つ星間雲(準臨界雲)は動的な時間スケールよりもゆっくりと進化し最終的には星間雲の中心でこの臨界条件を越えて動的収縮、星の形成と進むと考えられている。本稿では、まず重力を磁場、圧力、遠心力で支えている平衡状態はどのような特徴を持つかを明らかにし、次に準臨界雲の進化について、主にはじめのゆっくりした(準静的)進化の数値シミュレーションによる研究の現状について述べる。

### 2. 星間雲の力学平衡状態

ここでは等温の星間雲を考える。圧縮性のある磁場を持った媒質に対して $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 力、圧力勾配、遠心力、重力が釣り合う場合の平衡解を求めることは、核融合研究において(プラズマの閉じこめの場合の)Grad-Shafranov方程式と呼ばれているベクトルポテンシャルに関する方程式を解くことに帰着するが、ここでの問題はさらに重力ポテンシャルに対するポアソン方程式を同時に解くことを要求する。このような非線形問題はコンピューターによる数値計算のよってしか解くことができない場合がほとんどであり、楕円型方程式をスーパーコンピューターの性能を100%生かして高速に解く技法の開発とあいまって発展してきた(ICCG法、ベクトル化技法)。

半径  $R_{cl}$  一様密度の球対称の「親」の星間雲を仮想的に考え、それを  $B_0$  の強さの磁場が貫いており、剛体回転 ( $v\phi = r\Omega_{cl}$ ) しているとす。この「親」の星間雲は重

力でつぶれて釣り合った状態へ移行する。図1は「親」の星間雲とそれが緩和してできた平衡状態の例である。磁場の方向に主につぶれて、磁場は赤道部分でぐれ  $r$ -方向に磁場の力が働いていることがみてとれる。

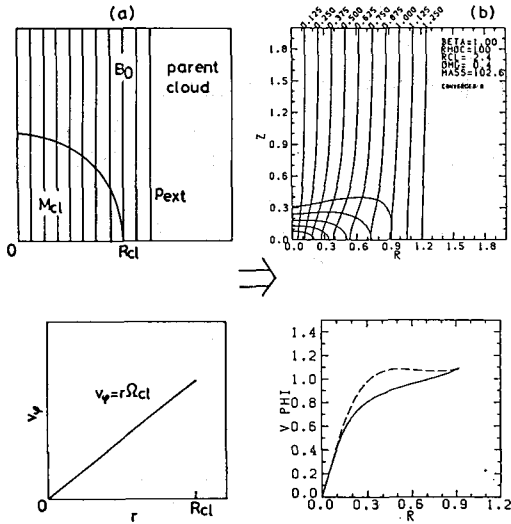


図1 左の図は「親」の星間雲、右の図はそれがそれぞれの磁束管の中の質量と角運動量を保存して収縮してできる力学平衡状態を示す。上の図は、星間雲を対称軸 ( $z$  軸) を含む面で切ったときの等密度面と磁力線を示す。下は赤道面での回転速度 (実線) と星間雲の表面での回転速度 (破線) を示す。

図2の一本の線は、磁場の強さ、「親」の雲の半径、回転、外部の圧力を決めたととき、釣り合ってきた平衡状態の中心密度と質量の関係である。これから、ある磁場の強さと角運動量で自己重力に抗して支えることのできる質量には最大値 (臨界質量: 縦線のマークを付けた) があることが分かる。それぞれの線は、磁場の強さを変えた場合に当たっており、磁場を強くする ( $\beta_0$  を小さくする) とその臨界質量が増大することが分かる。この結果から、臨界質量は二つの無次元量 (1) 星間雲の中心での質量と磁束の比と (2) 比角運動量と質量の比で決まっていることが分かる。準臨界雲では、この無次元量は、プラズマ・ドリフトによって前者が増加し、磁場による角運動量の外部への輸送によって後者が減少する。そのいずれもが臨界質量を減少させる効果を持つので、最初、準臨界であった星間雲が、臨界質量が減少することによって超臨界となると、もはや星間雲を磁場や回転で支えることは不可能となり動的な収縮に転ずる。

3. 準静的進化

最初星間雲はプラズマ・ドリフト磁場を失い、磁場による角運動量の外部への輸送によって角運動量を失って

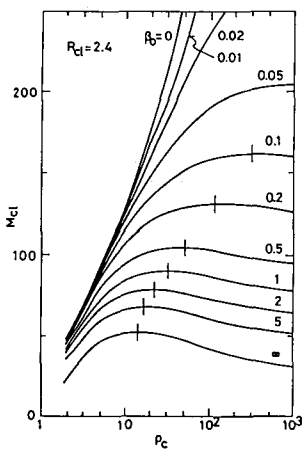


図2 「親」星間雲の半径、角速度、外部の熱圧力と磁気圧の比 ( $\beta_0$ ) を固定したときの、中心密度 ( $\rho_c$ ) と質量 ( $M_{cl}$ ) の関係。ある磁束の大きさで支えられる質量に上限があることが分かる。臨界質量のところに縦線を付けた。  $\beta_0$  を減少させる (磁場を強くすると)、支えられる質量が増加することが分かる。(Astrophys. J., 335, 239 より転載)

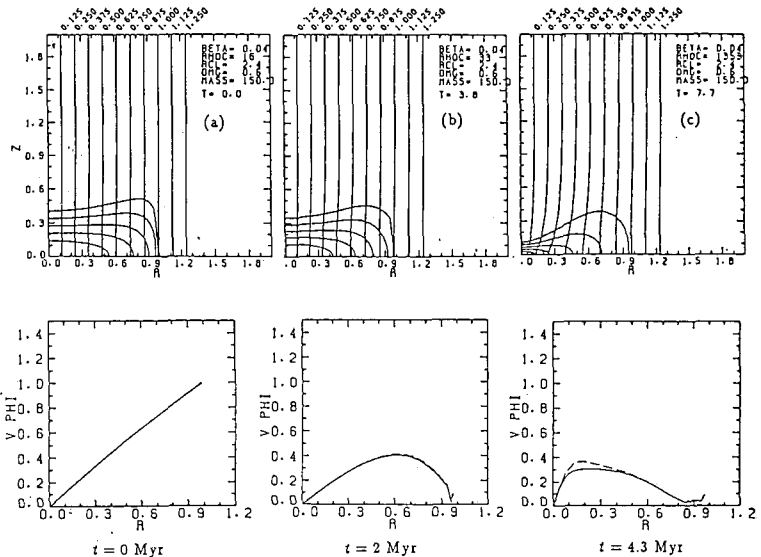
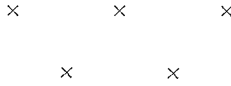


図3 プラズマ・ドリフトと磁場による回転の減速による回転磁気星間雲の進化。(a), (b), (c) はそれぞれ  $t=0$ ,  $t=200$  万年,  $420$  万年後の状態を示している。等密度面は、 $\log \rho = [(\log \rho_c) / 5]n$  ( $n=0 \sim 4$ ) に対して引いてある。中心部で収縮が顕著に起こっていること、磁場によって  $v\phi$  が外側でも減速を受けていることが分かる。

行く。このプロセスは系の動的な時間スケールに比べて非常にゆっくりとしているので、磁気流体力学 (MHD) の数値シミュレーションを行うよりも、前節で述べた平衡解をいくつもつないで行く方が現実的である (準静的進化)。図 3 に、中心で 30000 個/cc 程度の密度を持つ代表的星間雲の進化を示す。

(a) は  $t=0$  初期の平衡解である。(b) は 200 万年後の状態で、プラズマ・ドリフトによって中心部の質量磁束比が増加する (初期の 1.25 倍まで増加) のにもなって中心密度が初期の 2 倍まで増加していることが分かる。それにもなって対称軸付近が収縮していることが分かる。(c) が平衡解が求められた最後の状態で、430 万年である。星間雲はこの後動的な収縮を起こす。計算機にシミュレーションの上ではこの進化は 30 分から 1 時間で起こるのだが、実際には、普通の星間雲は何 100 万年で準静的な進化領域を通り過ぎ、動的収縮に移る。この後の進化を知るためには、この (c) を初期状態として MHD 数値シミュレーションを行うことが必要であろう。

(富阪幸治)



# 天体物理学基礎理論

加藤正二  
宇宙物理学講座 第1巻

A5判・上製函入 定価五二五〇円(正価五〇〇〇円)

近年、観測のいちじるしい進歩によって、宇宙で営まれている現象は予想以上に動的で、ドラマチックなものであることが分かってきた。本書は、プラズマ物理学、電磁流体力学、相対性理論、その他の駆使によって、恒星や銀河におけるこれら動的現象を理解するのに必要な基礎理論を俯瞰的に叙述するものである。学生諸氏には参考書としての、また専門の研究者諸氏には既得知識の整理・補充のための、活用を期待する。なお予備知識としては流体力学、電磁気学、熱力学、相対性理論、等の初歩的基礎を要求しているが、式の追跡には特別の知識を必要としないよう配慮されている。

国内送料はすべて当社負担 当社は取次店を経由しません  
小売書店卸価格は定価の70% 直接小売分消費税は当社負担

〒160 東京都新宿区新宿1-7-10-804 **ごとう書房** ☎ 03-354-8391 振替東京0-77869

## 誠報社 ならではのスペシャルプラン 1991年の皆既日食ツアー

東急観光  
誠報社の共同企画

# HAWAII



主催：東急観光株式会社  
●お申し込み、お問い合わせは 誠報社

1991年ハワイ皆既日食ツアー  
第1次募集500名様は好評のうち  
満席になりました。

**第2次募集準備中 近日発表予定**

安全で最適なロケーション確保!!

誠報社では五島プラネタリウムをはじめ、ハワイ観光事業に絶大な実績を誇る東急グループの協力を得て、皆様に満足していただける日食ツアーを実施いたしたくすでに第2次募集用のホテルは確保済みです。

# MEXICO



主催：株式会社日本交通公社  
●お申し込み、お問い合わせは 誠報社

1991年メキシコ皆既日食ツアー  
旅行代金 ¥588,000 <全日程朝食付>  
7月7日(日)~7月14日(日) 6泊8日  
40名様募集中!!

カリフォルニア半島サンホセデルカボにホテル確保!!  
ロサンゼルスから現地への安全・確実な飛行機チャーター便確保!!  
数多くの日食ツアーを手がけた日本交通公社のスタッフが経験に基づいて企画した本格的日食ツアーを実施いたします。  
チャーター便とホテルを確保してある希少なツアーです。  
利用ホテル：皆既帯直下の半島最大級の豪華新装リゾートホテルをデポジット済の上、確保  
ホテルプラザロスゴロリアス <サンホセデルカボ> 4泊

天体望遠鏡  
専門店

**(株) 誠報社**

〒101 東京都千代田区三崎町3-6-5 原島ビル2F  
TEL. (03)234-1033(代) FAX. (03)234-1038