

# 太陽系外の惑星形成はどこまでわかったか?

## (2) 原始惑星系ディスクの理論

観山正見\*

### 第1章 はじめに

近年の光学・赤外線、サブ mm 及び電波の観測技術の向上によって、飛躍的に星生成領域の観測的情報が増えてきた。特に、主系列星の前の段階である T タウリ型星の観測が進み、そのスペクトルがほぼ全波長にわたって得られるようになった。それで、T タウリ型星の多くでは、近赤外から遠赤外において異常な excess (過多) がある事が判明した。これは、星の周辺に約 100 AU 程度のダストディスクが存在し、そのディスクが熱輻射していることで説明される。主星が若い星であるため、このディスクは惑星形成の母胎であると考えられる。このことで、全世界の星形成・惑星形成の科学者が T タウリ型星の観測に注目している。太陽系外の惑星形成についての研究に対して多大な情報を与えてくれるからである。これを太陽系の惑星形成に関するデータと比較する事によって、星形成及び惑星形成の理論的・観測的研究は飛躍的に発展しようとしている。また、今後の電波干渉計、赤外・サブ mm 波衛星そして大型望遠鏡等と観測媒体の充実で、観測データそのものも飛躍的に、惑星形成に関する情報を提示しようとしている。まさに、惑星形成の研究に対して新時代が来ようとしているのである。

このような状況で、この解説では今までの観測事実を簡単に紹介して、それらが惑星形成理論からいかに理解されるか、またいかなる理論的問題点が残されているのかを紹介する。特に問題点としては、このディスクからのスペクトルを説明するモデル構築があげられる。それは原始惑星系のディスクの質量や温度分布を与えることから、惑星形成論にとって極めて重要である。しかし、後に述べるように、スペクトルを説明する無矛盾なディスクの構造や進化の理論は未だできていない現状である。従来までのディスクモデルでは、主星の輻射によってディスクが照らされているとする受動的モデルや、ディスク内の粘性による熱化による輻射とする能動的モデルが提唱されているが、十分なものではない。そこで、最後には、いままでは考慮されていなかった重要な点を指摘して、今後の研究の方向を探ってみたい。

\* 国立天文台 Shoken Miyama: Formation of Planetary Systems other than the Solar System (2) Theory of Proto-Planetary Disks

分子雲

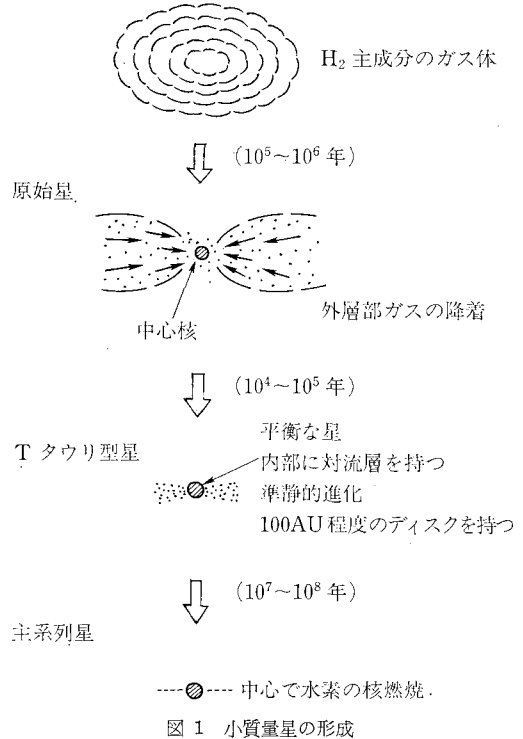


図1 小質量星の形成

### 第2章 星の形成

注目の太陽系外の惑星形成に話を進める前に、星の形成について簡単に復習しておこう。質量の小さい星 ( $3 \sim 0.5 M_{\odot}$ ) は、分子星の状態から主系列星に至るまで以下の4段階を経ると考えられる(図1を参照されたい)。

#### 2.1 分子雲

水素分子を主成分とするガス体で、特に密度の濃い部分(水素分子密度が  $10^4 \sim 10^5$  個/cm<sup>3</sup>)をコアと呼び、その質量はタウラス分子雲では典型的には  $2 \sim 3 M_{\odot}$  である。観測によると、それらのコアのほとんどは、重力的に安定・不安定の限界近くに存在する事がわかっている。従って何らかのトリガー機構が働くことこれらの雲は収縮を開始する。圧力が作用しないと、収縮に必要な時間は密度を  $\rho$  として自由落下時間  $\approx (G\rho)^{-1/2} \approx 10^5 \sim 10^6$  年である。

#### 2.2 原始星

収縮を開始した分子雲は、中心に断熱的核を形成し、

それに向かって回りのガスが降り積もっている構造を呈する。このとき、中心の核の近傍ではガスは超音速で落下するが、中心核の表面で急激に減速され衝撃波面を形成する。そこでは、ガスの運動エネルギーが急激に熱化されて明るく輝く。この様に、放出するエネルギーの大部分を、重力収縮するエネルギーの熱化で輝く星を原始星と定義する。実際には、この中心核を直接見る事はできず、それから発する連続光は、外層に存在する分子ガス雲内のダストによって吸収・再放出されて、赤外線天体として観測される。この原始星の進化の時間スケールは、ガスの降り積もりの時間によって決定されるから、質量  $M$ 、音速を  $c_s$  とすると、降着時間  $\approx M/(c_s^3/G) \approx 10^5$  年程度となる。ここでは、 $1M_\odot$  の星で温度が  $10\text{K}$  のガス雲とした。

原始星段階の星の大きな特徴に、ガスの円盤とそれと垂直方向に  $\text{CO}$  で観測される超音速ガス流（分子双極流）がある。光学でも観測可能なジェットを有するものもある。これらの発生機構については種々の理論があるが、落下する分子ガスの重力エネルギーを、一部の流体に集中させて外向きの流れを作り出しているものと思われる。

2.3 Tタウリ型星

原始星段階の外層部に存在した降着ガス雲が消失し、ほとんど中心核のみとなって、光学で観測可能となった星をTタウリ型星と呼ぶ。タウラス領域にあるT星から名前をとったものである。HR図上では、同じ質量の主系列星より明るく、表面温度が低い位置に存在する。理論的には、星の内部のほぼ全域で対流層があり、有名なHR図の林トラック上を準静的に進化する星と認識される。通常の星は、外側に星の内部より冷たい大気を持つためさまざまな吸収線がみられるのに対して、この星は、さまざまな輝線を放出することが特徴で、さらに変光星としても知られている。最近では、X線観測衛星のEINSTEINによる発見から、Tタウリ型星には大別して“古典的 (classical) Tタウリ型星”と“裸の (naked) Tタウリ型星”の2種類があることがわかってきた。

Tタウリ型星の段階では、中心温度が低いため水素の核融合はまだ起こらないが、重水素は核燃焼すると考えられる。進化した星と異なって、核反応が十分でなくそのためリチウムの輝線が観測されることも大きな特徴である。このステージの滞在時間は星の質量によって異なるが  $1M_\odot$  の場合約  $10^7$  年である。

2.4 前期主系列星及び主系列星

Tタウリ星の段階をすぎると星内部の対流層は消失して、表面からの輻射によるエネルギー放射でゆっくりと進化する。 $1M_\odot$  の星では約  $10^8$  年かけて徐々に収縮し、中心の温度が上昇して、ついに水素の核燃焼が始まって

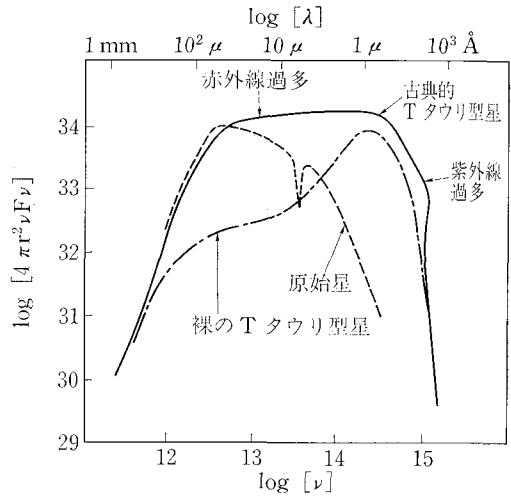


図2 原始星・Tタウリ型星のスペクトル

主系列星となる。

以上が簡単に述べた小質量星の星の形成過程である。次章ではいよいよ最近のTタウリ型星に対して観測で得られたスペクトルとその解釈について議論を進める。

第3章 Tタウリ型星のスペクトルとその解釈

紫外線からサブミリ波までの観測によって、個々の原始星やTタウリ型星のスペクトルが完全に把握されるようになった。図2に原始星、“古典的Tタウリ型星”及び“裸のTタウリ型星”についてスペクトル ( $\nu F_\nu$ ) を振動数の関数として示した。 $F_\nu$  は輻射のフラックスである。後で分類に有効な指標を挙げておく。“若い星のスペクトル指標”と呼ぶことにするが、

$$n = \frac{d(\log \nu F_\nu)}{d(\log \nu)}$$

を波長が  $1\mu$  から  $10\mu$  で定義する。

原始星の場合は、上に述べたように原始星外層部の冷たいダストからの輻射が中心となるから、遠赤外線域でピークを持つスペクトルを持つ。従って、波長が  $1\mu$  から  $10\mu$  では、スペクトル指標は  $n < 0$  である。シリケートダストによる  $10\mu$  近くの吸収が特徴的である。

一方、Tタウリ型星については、遠赤外線をサーベイしたIRAS衛星やX線観測をしたEINSTEIN衛星などの成果もあって新しく同定が進み、 $H_\alpha$  の等価幅が  $5\text{\AA}$  以上と以下で、“古典的Tタウリ型星”と“裸のTタウリ型星”に分類される。それぞれのスペクトル及び観測的特徴と簡単な解釈をまとめると

“古典的Tタウリ型星”

1.  $H_\alpha$  の等価幅が  $5\text{\AA}$  を越える。この幅は、Tタウリ型星の活動性を表す指標と考えられる。
2. 近赤外から遠赤外にかけて、異常な excess を示

す。すなわち  $1\mu$  から  $100\mu$  にかけてスペクトル  $\nu F_\nu$  は振動 ( $\nu$ ) 数の関数として平坦である。従ってスペクトル指標は  $n \approx 0$  であって、原始星とはっきり区別される。この赤外線 excess は T タウリ型星近傍に存在するダストディスクからの熱輻射と解釈される。

3. 紫外部の excess が存在するものもある。また、種々の輝線や吸収線が連続光によってカシミがかかったようになるベーリング現象も存在する。これらの現象は、ディスク内でガスが主星に向かって降り落ちていて、星の表面で星とディスクの回転速度の差から境界層が形成され、そこでガスが急激に熱化している現象と理解される。
4. HR 図から推察される年齢は、一般的に“古典的 T タウリ型星”の方が“裸の T タウリ型性”より若い。大体  $3 \times 10^5 \sim 3 \times 10^6$  年のものが多い。
5. 主星が可視光で観測可能なところから、ディスクは幾何学的に薄いディスクであると予想される。

“裸の T タウリ型星”

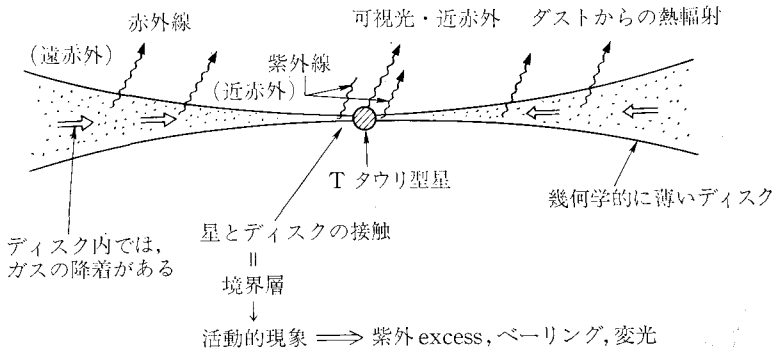
1.  $H_\alpha$  の等価幅が  $5 \text{ \AA}$  を越えない。
2.  $10\mu$  から  $100\mu$  の遠赤外部の excess が消失している。スペクトル指標では、 $n \approx 0 \sim 3$  である。

3. 紫外部の excess 等がみられず、ガスの降り積もりは小さいと予想される。
4. 年齢は、“古典的 T タウリ型星”より古く  $10^6 \sim 10^8$  年に分布している。

以上の事から、T タウリ型星の全体像について描いてみると図3のようになる。まず“古典的 T タウリ型星”の場合であるが、T タウリ型星の周りを幾何学的に薄いディスクがとりまいている。薄いため T タウリ型星が直接見え、可視光や近赤外のスペクトル部分が作られる。このディスクは、水素ガスで構成されているが、その中には微小のダスト粒子を含む。このダスト粒子の熱輻射が赤外線 excess を作っていると考えられる。特にディスクの外縁部は温度が低いため遠赤外線を放出する。

次に、ディスク自体の回転はケプラー回転をしていると予想される。一方、星自体は、その半径でのケプラー回転速度に比べて非常にゆっくりと回転している。そこで、ディスク内にガスが落ち込む流れがあると、ディスクと星の表面の接触点が生じ回転速度が急激に減少する境界層が存在する。“古典的 T タウリ型星”の場合は、実際落ち込む流れがあって、この境界層でガス流体の激しい熱化が起こり、紫外線 excess やベーリング現象さらに光度の時間変動を引き起こしているものと思われる。

古典的 T タウリ型星



裸の T タウリ型星

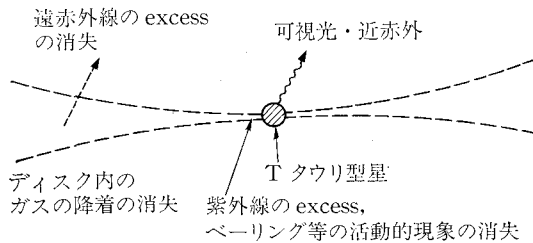


図3 T タウリ型星の想像図

一方，“裸の T タウリ型星”においては，星自体からの放射が優位となって，赤外線 excess 現象があまり顕著でなくなる（図 2 参照）．さらに，紫外線 excess やベーリング現象も少ないから，ガスの降着も少ない事が予想される．

“古典的 T タウリ型星”は，全体的に“裸の T タウリ型星”より年齢的に若いので，一個の T タウリ型星の進化において前者が若いステージであり，後者が後のステージであるとするのは自然である．もし，これが事実だとすると，両者のスペクトル変化は，従来の太陽系形成モデル（京都モデル）によって非常にうまく説明する事ができる．この京都モデルによると

1. 星の形成と共に，水素ガスを主成分とする原始惑星系ディスクが形成される．
2. ディスク内のダストは，その赤道面方向に合体・成長しながら沈殿する．我々の，太陽系の場合では 1 AU では 1 cm あまりのダストボールになる．
3. 沈殿したダストは層を作り，限界密度を越えると重力不安定性の結果分裂して微惑星を形成する．1 AU では，約  $10^{18}$  g 程度の質量である．
4. 微惑星は互いの合体・成長を繰り返して，内惑星や外惑星中心核を作る．

この理論において，“古典的 T タウリ型星”を (1) のステージに，“裸の T タウリ型星”を (2)～(4) のステージに当てはめれば良いのである．つまり，ダストからの熱放射は，ダストの表面積に比例するから，それが成長する事によって質量当たりの放出率は減少する．従って，ダストが微惑星や惑星になっていけば，もちろん放出には効かないのである（ダストボールでもこのことは同じ）．とにかく，裸の T タウリ型星の周辺には惑星が形成されているかも知れないのであるが，残念ながら直接確認する手段はない．

では，これで何もかもうまく説明できたのであろうかというところ，それがちっともうまくないのである．

#### 第 4 章 原始惑星系ディスクのモデル

T タウリ型星のスペクトルの変化は，ダストの成長で説明できるが，“古典的 T タウリ型星”のスペクトルの形自体はいかに説明されるのであろうか．これの特徴は，スペクトル指数  $n$  が 0，すなわち  $\nu F_{\nu}$  が  $\nu$  に依存しない平坦なスペクトルをしていることであった．実はこの説明が大変なのである．今までに，主星からの放射をディスクのダストが吸収・再放出するとした受動的ディスクモデルと，ディスク自体が熱的に輝いているとする能動的ディスクモデルがあった．

能動モデルの代表は，中性子星近傍の降着円盤のモデルでよく使われるリndenベルとプリングルによる標準

モデルである．これをまず適用してみよう．このモデルでは，

1. ディスクの回転則は，ケプラー回転とする．すなわち  $\Omega \propto r^{-s}$  とすると  $s=1.5$  である．
2. ディスクの半径  $[r, r+dr]$  間で放射で失われるエネルギーは，温度を  $T_D$  とすると  $4\pi r dr \sigma T_D^4$  である．これが，この距離の間をガスが降下するとき粘性等で消失する運動エネルギー  $\dot{J} \cdot d\Omega$  に等しいとする．ここで， $\dot{J}$  はガスに作用するトルクであり， $d\Omega$  はこの半径間での角速度変化である．
3. 定常なアクリーション（降着）を仮定すると，トルクは， $\dot{J} = \dot{M} r^2 \Omega$  と表され，定常であるから降着率  $\dot{M}$  は一定である．

以上から，温度分布を求めると  $T_D \propto r^{-3/2}$  となる．つまり，ケプラー回転の場合温度分布は，動径方向に  $r^{-3/4}$  で減少することになる．

一般的に，温度分布が  $T_D \propto r^{-q}$  として，光学的に厚いディスクだと仮定すると，観測されるスペクトルは簡単に求められて，スペクトル指数  $n$  は，

$$n = 4 - \frac{2}{q}$$

で得られる．従って，標準モデルのケプラー回転の場合の  $q=3/4$  を代入すると， $n=4/3$  となって，観測される  $n=0$  を全く説明しないのである．つまり，標準モデルは，簡単に否定されたのである．

そこで，パークレイのアダムスとシュー達は，今述べた  $q=1/2$  であれば  $n=0$  となることに注目した．つまり回転則が，ケプラーではなく  $\Omega \propto r^{-1}$  である回転ディスクが存在すると主張するのである．すなわち，ディスクが中心星の重力ばかりでなく自己重力が無視できない系であるとするモデルである．彼らは，図 4 (a) のように幾何学的に薄いディスクを仮定して，個々の天体についてスペクトルを詳細に合わせるように種々のディスクの物理量を決定した．その代表例を表にした．

アダムス・シュー達によるディスクモデル

ソース名	ディスクの半径	ディスクの質量	中心星の明るさ	ディスクの明るさ
T Tau	120 AU	$0.1M_{\odot}$	$5.1L_{\odot}$	$11.9L_{\odot}$
DG Tau	75 AU	$0.3M_{\odot}$	$0.61L_{\odot}$	$5.49L_{\odot}$
HL Tau	100 AU	$1.0M_{\odot}$	$1.0L_{\odot}$	$5.0L_{\odot}$

彼らのモデルは，一見代表的“古典的 T タウリ型星”のスペクトルを大変よく説明する．しかし，大きな問題点を含む．それは表にも示された通り，導出されたディスクの質量が大きいことである．ディスクが自己重力的であることと，その回転則とは首尾一貫しているのであるが，この様に大きな質量のディスクは，重力的に安定

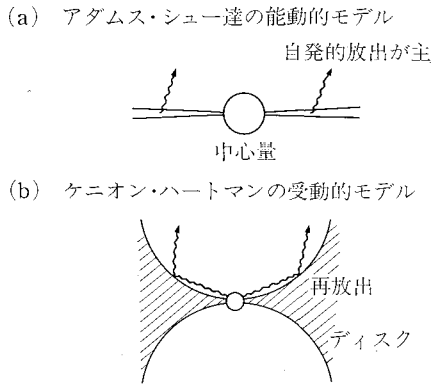


図4 古典的Tタウ型星のモデル

に存在しないと予想される。密度分布にも依るが、 $1M_{\odot}$ の質量の主星の場合その限界質量は約  $0.1M_{\odot}$  であるといわれる。従って、HL Tau 等の場合は明らかにこの限界質量を越えていて、ディスクは不安定となり数多くの塊（惑星？）に分裂しているはずである。これは、元々軸対称のディスクであるとして議論を進めてきたことに矛盾を生じることになる。

それでは、受動的モデルはどうであろうか？ 主星の輻射をディスクで再放出するモデルであるが、まず最初に考慮しなくてはならないことは、図2でもわかる通り、近赤外から遠赤外にかけての excess が異常に大きいことである。つまり、ディスクからの輻射が主星のそれに比べて同等かそれ以上ある点である。そこでケニオンとハートマンは、図4(b)のように広がったモデルを考察した。これでも、ディスクからの輻射の寄与は、全体の50%程度であるが、スペクトルの形は大体説明する。しかし、このモデルにも問題点が存在する。まず、Tタウ型星であるから、幾何学的に薄くないと可視光で観測できなくなる。また、“古典的Tタウ型星”の滞在時間程度長時間にわたって、ダストを図にあるように巻き上がらせておく方法が考えにくいのである。ダストは、乱流などが無い限り、大体  $10^4 \sim 10^5$  年で赤道面に沈殿してしまうのである。

以上の様に、スペクトルの説明だけでなく、原始惑星ディスクの全体像を矛盾無く説明できるモデルは未だ存在しないのが現状である。それでは、何とか方法はないのであろうか。残念ながら、未だ完全な解決策はないのである。しかし、まだいろいろ考え落としがあるようである。

## 第5章 残された可能性

いままでに紹介した理論には考慮されていない、重要なポイントが実は数点存在する。一つは、星が連星系を

なしている場合もあるという点である。良く知られているように、恒星の70%以上では、その伴星を発見できる。90%以上であるという研究者もある。従って、星の形成時においてもほとんどの星が連星系、もしくは3重星などであると考えなければならない。実際、Tタウ型星についての観測は、(1)月の掩蔽を使った観測、(2)赤外線カメラによる観測、(3)赤外線スペックルによる観測などで、連星系に関する情報が近年やっと得られるようになって来た。その結果、数例のTタウ型星は実際伴星を持つ事が確認され、今後の観測で数は更にも多くなるものと予想される。

驚いた事に、Tタウ型星の代表星である T Tau は、最近の観測で3重星である事が明らかになってきた。図5では VLA が得られた電波のマップの上に、3つの星の位置が示してある。OP が光学で観測される T Tau で、OS は光学で観測された伴星で IR は赤外線スペックルで確認された天体である。これらの、星の見かけの距離は 100 AU 以下であり (!), ディスクのサイズと同程度なのである。T Tau 以外にも、100 AU 程度の距離で連星系をなすTタウ型星が現在のところ数例見つかった。T Tau の場合は、この CP と IR のスペクトルの和で平坦スペクトルを説明するという説（舞原俊憲氏）も出てきた。

この様な伴星の存在は、ディスクに多大な影響を与えると考えられる。実際、平坦スペクトルを説明するためには、非定常でありかつディスクの外縁部（低温部）での大量のエネルギー放出を必要とするが、Tタウ型星の伴星の存在によってディスク外縁部で非線形・非軸対称のゆらぎを励起し、それが衝撃波に発展し熱化が起こるモデルが考えられる。定性的には、平坦スペクトルを説明するのに都合が良さそうである。現在我々は、シミュレーションを実行してスペクトル分布がどうなるか調

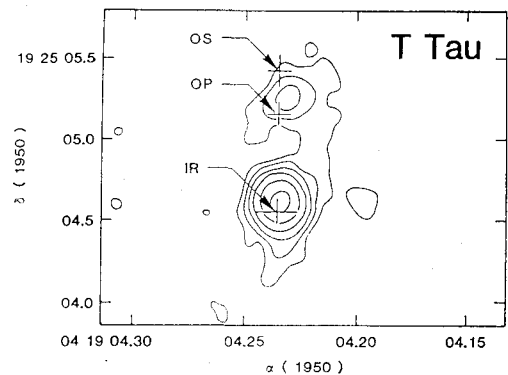


図5 VLA 2cm の電波マップの上に、T Tau 星 (OP) が示されている。OS は光学で発見された伴星。IR は赤外線スペックルで確認された。(I. Appenzeller & R. Mundt, A. Ap. Rev. (1989) 1, 291 より)

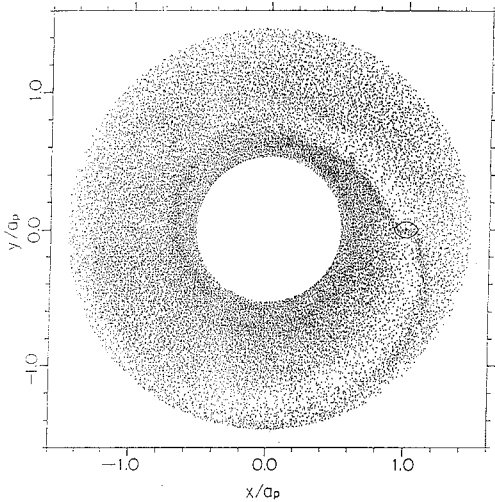


図 6 原始木星の成長過程。右のレモン型の中心が原始木星。原始太陽系のディスクを回転軸から見ている。(M. Sekiya & S. M. Miyama, Prog. Theor. Phys. Suppl. 96 (1988) 274 より)

べている最中である。結果は迄うご期待である。

別の可能性もある。それは、ディスクの中に既に巨大惑星が形成されている場合である。我々は以前、木星形成のシミュレーションを実行した。図 6 にその 1 例を示したが、図に示されている通り、巨大惑星の存在でディスク内にギャップとそれに付随した衝撃波面が形成される。ディスク内に別の非軸対称の波動も誘起されている。これから、“古典的 T タウリ型星”には、既に複数の巨大惑星が存在していて、ディスクの特に外側を励起しているとするモデルも考えられる。これもスペクトルを説明する可能性がある。特に、いくつかの T タウリ型星では偏光観測がなされていて、偏光の大きさの時間変動が報告されている。これは、ディスク内に非軸対称な構造が存在することを示すもので、このことから非軸対称な物体または非線型波動が励起している可能性があり、上にあげたモデルが興味深くなってくる。

この様に、現在までの理論では、T タウリ型星において伴星の効果や巨大惑星の効果を考慮したものは殆どなくこれから調べる事が必要なテーマであると考えられる。

### 第 6 章 おわりに

以上述べてきたように、ディスクのスペクトルの観測から、多くの事が分かったと同時に、また多くの謎が出てきたわけであり、ますます研究意欲がわくテーマなのである。とくに、ここ 1~2 年のモデルづくり、および観測との比較が今後の方向を大きく決めると考えられ興味深い問題である。また、今後数年間の内に特に赤外観

測は飛躍的に進むと考えられ、理論との比較検討がますます活発にできるようになると考えられる。

ここでは、ディスクのスペクトラムを中心に考察してきたが、この他に、ディスク内のアクリーションのメカニズムや、またそのアクリーションがなぜ“裸の T タウリ型星”段階で止まったのかという問題が残されている。これらの問題解決は、惑星形成の議論に直接関係し、進展がみられると系外の惑星形成研究が飛躍的に進むと考えられる。もしそうなれば、我々の太陽系の場合と比較する事によって、それこそ比較惑星形成論を構築できると期待しているのである。

(以上の解説は、1990 年度理論天文学懇談会シンポジウムの集録原稿を加筆修正したものです。)

## 新刊紹介

### ほくらの夢の星空——

小惑星「北海道」発見物語

渡辺和郎 著

北海道新聞社 1991 年 2 月 28 日発行、1500 円

(B5 変型、142 頁)

国際天文学連合 (IAU) 小惑星中央局発行の小惑星回報 (MPC) 1991 年 1 月発行分を見ると、これまでに 4722 個の小惑星が確定している。そして、小生のノートによると我が国で発見された小惑星は 1900 年 3 月 6 日に、当時の東京天文台で平山 信氏により発見された 498 番 Tokio 以来 197 個に達している。小惑星発見の過去を振り返ってみると、発見の殆んどはプロの天文台での成果であった。しかし、1978 年以来、その様子に変化が見られるようになってきた。すなわち、日本の天文アマチュアのこの方面への進出とその貢献度の高さである。

本書は、口径わずか 16 cm のライトシュミット鏡を主な観測機とし、北海道に住むアマチュアの小惑星発見への連携プレーの物語りである。著者は、札幌市青少年科学館に勤務する天文技術員であり、北海道新聞に 30 回にわたり連載された文章を改訂してまとめたものである。

随所に写真が挿入され、きびしい北海道の冬の夜の観測が偲ばれる。尚、本書は全国の書店では発売されない由、直接下記の発行所に御問い合わせ頂きたい。

〒060 札幌市中央区大通り西 3

北海道新聞社出版営業部

Tel. 011-221-2111 (代)

(香西洋樹)