

銀河の散逸構造 [I]

野 桜 俊 也*・池 内 了*

1. 序

銀河というときすぐ思い浮かべるのが渦状銀河であり、その整った模様は我々の好奇心をそそる。写真で渦巻状に見えるのは明るく若い星や、それらがつくるH II領域、つまり最近星形成の起こった領域である。何故この様な模様になるのであろうか。その原因を知ることは銀河で起こっている物理過程を解明することであり、銀河の進化を考える上でも重要である。

渦状腕 (Spiral Arm) は銀河円盤のほぼ全域にわたる大きさの規則的模様であるが、このような空間構造を大域的構造と呼ぶことにする。大域的構造としては、この他に輪状のものや棒状のものがある。以下では、まず銀河の大域的構造の原因として従来考えられているモデルについて簡単にまとめ、次に我々の提唱する散逸構造について詳しく解説し、従来の考え方との対比を行う。

2. 大域的構造をつくる——従来のモデル——

現在、渦状構造の原因として一般的に受け入れられているのは、次の2つのモデルである。

(I) 密度波理論+銀河衝撃波

(II) 棒状ポテンシャル中のガス運動

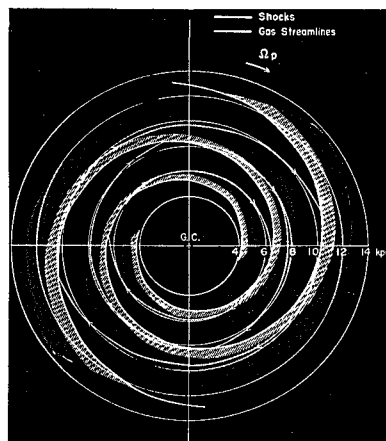
さらに、最近注目されつつあるモデルとして。

(III) 星形成領域の確率的伝搬 (Stochastic Self-Propagating Star Formation)

がある。

モデル (I) では、まず銀河円盤の回転軸に対して軸対称で重力平衡にある星の系を考える。この系に於て、星の密度、及び星の重力ポテンシャルの渦状の歪みが自己無撞着に存在し得ることを示したのが密度波理論である。さらに、このポテンシャルの谷へ星間ガスが流れ込むと衝撃波が生じ、ガスの密度が上がって星の形成が促される。従って若い星は渦巻状に分布して輝く、と考えるわけである (図1)。この理論は現在、スタンダードな理論と一般に認められているが、密度波を励起させる機構、何故2本腕か、理論では先行型、引きずり型どちらでもよいのに現実に引きずり型しかないのは何故か、などの疑問が、未だ完全に答えられていない。

モデル (II) は、星の系が渦巻状のポテンシャルをつくっている必要はなく、軸対称から少し棒状に歪んでい



The spiral structure of our galaxy and the process of star formation in such a galaxy.

図1 渦巻状のポテンシャルの中で、ガスは図の矢印のように流れ、渦巻状衝撃波 (太線) を生じる。そこで生まれた星が斜線部の領域で輝いている。

(Lin & Lau SIAM '79 60 97)

るだけでよい、とするものである。棒状のポテンシャルにガスが流れ込むと、渦巻状の衝撃波が生じるのである。このモデルは棒渦巻状銀河に対して特に説得力がある (図2)。これら (I), (II) は、遠達力である重力の作用+ガス・ダイナミクスによる大域的構造の発現、という従来の天文学での正統的な考え方と言える。

モデル (III) は、重力ポテンシャルを直接には扱わない。星の形成という局所的過程自体が伝染病のように周囲へ広がっていく、という考え方である。星の形成が、ある地点から周囲へ確率的に伝搬していくとすると、若い星の分布は不規則につながり、ミミズのような模様が成長する (図3.a)。それを銀河の微分回転でねじってやれば、見事に多数腕の渦巻構造が出来上がる、というわけである (図3.b)。このモデルは、複雑なガス・ダイナミクスを扱わないため、非常にわかりやすいが、「あまりにも単純過ぎる」という批判もある。つまり構造発生の物理過程を全て一様な伝搬確率に押し込めてしまっているからである。それにしても、「現実とよく似た不規則、不均一な腕」が出来ることや、「Dwarf galaxiesのみかけ上の性質の多様性は、少数体の確率的ゆらぎに帰せられる」という説明など、観測的にも理論的にも魅力的なモデルである。

* 北大理 Toshiya Nozakura, Satoru Ikeuchi: Self-Organized Structures in Galaxies

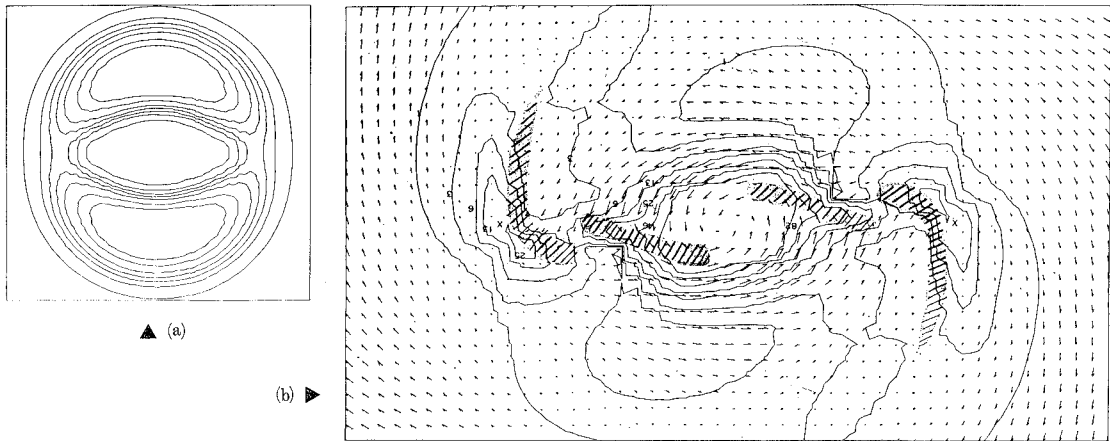


図 2 (a) のように棒状に歪んだポテンシャルが回転している。この時、ガスの流れは (b) の斜線部に示されるような渦状の衝撃波を生じている。(Spørensen, Matsuda & Fujimoto A & SS '76 43 491)

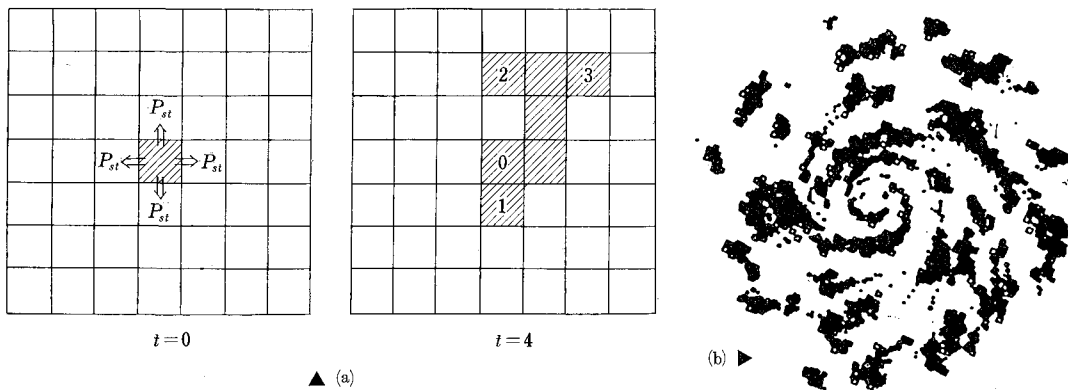


図 3 (a) 斜線部は過去 $\tau=10$ 以内に星の形成のあった cell
 左図: $t=0$ 星形成は周囲の cell へそれぞれ確率 P_{st} で伝播する。
 右図: $t=4$ 現在の星形成領域は cell 2 と 3 で、cell 1 からは周囲へ伝播しなかった。
 (b) (a) のシミュレーションを 7351 cells で行い、微分回転を入れた結果。(Seiden & Gerola ApJ '79 233 56)

3. 大域的構造をつくる——非線型モデル方程式による散逸構造——

我々のモデルを一言で言うと次のようになる。

(IV) 非線型モデル方程式による散逸構造

何のことかさっぱりわからないと思うので、まず考え方を紹介してから、次節で詳しく説明する。

基本的な考え方はモデル (III) に近い。銀河の大域的構造を考えるのに、モデル (I) や (II) のような全体を包む重力ポテンシャルやガス・ダイナミクスという大仕掛は必ずしも必要ではない。局所的な物理過程が部分的な構造を決め、それが空間伝播によりつながれば、大構造もできるであろう、と考えるのである。モデル (III) ではこの考えを、銀河における星形成を確率過程として直接シミュレーションする、という方法で調べたが、我々の方法がこれと異なるのは、

(A) 局所的物理過程として、より現実的な「星間物質の循環的相変化」を考え、当面、それをモデル化した非線型方程式を用いる。

(B) モデル方程式の解析的取り扱いによって、大域的構造発生の原因、条件を明らかにしつつ。

(C) 数値シミュレーションを併用して、より多様な構造の発現の物理的洞察を得る。

という点である。従って、単に銀河の渦状構造をつくるのが目的でなく、物理的条件や根拠を明らかにすること——それは種々の銀河のタイプの特性や進化を明らかにすることにつながる——をねらっている。

3-1 非線型モデル方程式

上記 (A) については、次のように設定する。

星間ガスはいくつかの状態 (相) にわかれており、超新星 (SN) を駆動力として、それら各相の間を時間的に移り変わっていると考える。超新星残骸 (SNR) に

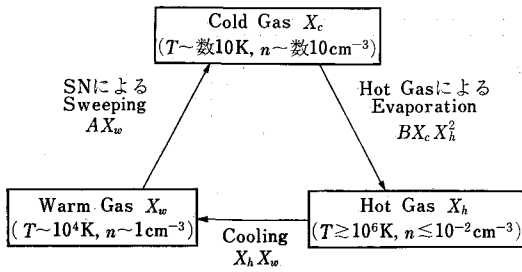


図 4 星間物質の循環的相変化過程

よって周囲の暖いガス ($T \sim 10^4 \text{K}$, $n \sim 1 \text{cm}^{-3}$) が掃かれて衝撃波のフロントで冷却し、冷たい Shell になる。Shell は重力不安定によってこわれて H I 雲 ($T \sim \text{数} 10 \text{K}$, $n \sim \text{数} 10 \text{cm}^{-3}$) になる。このようにして出来た H I 雲は、新たな SNR にとり込まれると、蒸発して熱いガス ($T \geq 10^6 \text{K}$, $n \leq 10^{-2} \text{cm}^{-3}$) となり、熱いガスは輻射冷却して暖いガスに戻る、という循環である。この過程を「星間物質の循環的相変化」(Cyclic Phase Change Process of ISM) と呼ぼう (図 4)。

このような星間物質の系の時間的振舞いを解くことが、数年来行なわれてきたが、それは各相の密度、温度を変数として、SNR の膨張則、ガスの冷却関数、H I 雲の蒸発関数 etc. を含む非常に複雑な方程式系 (これを以後、Exact Cyclic Phase Change Equation と呼ぶ) である。このままでは、空間構造を調べるのは困難なので、当面、これを単純化してモデル方程式にしておもうと考える。このモデル方程式系が、物理的に ECPCE と同じ振舞いを示すならば、それをを用いて星間物質の各相の空間分布=銀河の構造を調べる、という我々の方法は正当化されるであろう。

このように考えて、「星間物質の循環的相変化」を次のモデル方程式で表わす。

$$\begin{aligned} dX_c(t)/dt &= AX_w(t) - BX_c(t)X_h^2(t) \\ dX_h(t)/dt &= BX_c(t)X_h^2(t) - X_h(t)X_w(t) \\ dX_w(t)/dt &= X_h(t)X_w(t) - AX_w(t) \end{aligned} \quad (1)$$

これがモデル (IV) の「非線型モデル方程式」の部分である。式 (1) は、各相の密度 (X_c : H I 雲, X_h : 熱いガス, X_w : 暖いガス) のみを変数としている。従って、各相変化過程における温度や SN rate への依存性は、全て effective に各項の関数形として近似されるか、パラメーター A , B に入っていると思うわけである。暖いガスの SNR による Sweeping 項は AX_w と表しており、最終的に暖いガスが Sweep される率はその密度、温度にあまり強く依存しない、という結果を用いている。H I 雲の蒸発項は $B X_c X_h^2$ と表しており、蒸発を引き起こす熱伝導度の温度依存性が大きく ($T^{5/2}$)、熱い領域が大きい程著しく蒸発が多いという点を X_h^2 と

いう非線型効果として考慮している。非常に粗い近似と思われるだろうが、この単純なモデル方程式 (1) が ECPCE の結果を定性的によく再現していることについては後で示す。

3-2 散逸構造

それではモデル方程式で書かれた局所的物理過程の空間的伝搬をどのように表せばよいであろうか。我々はこのような伝搬が、拡散型、即ち $D \nabla_r^2 X_i(\mathbf{r}, t)$ (D_i は拡

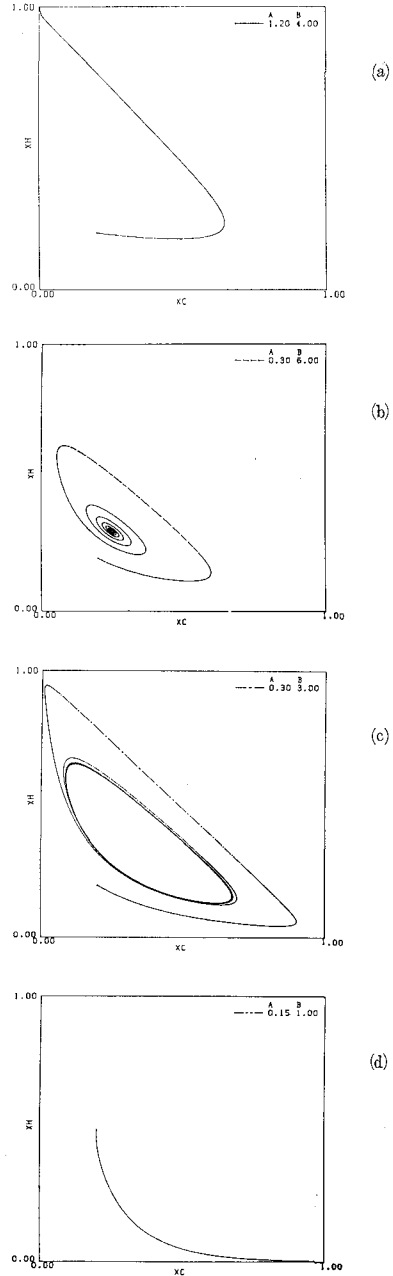


図 5 方程式系 (1) の 4 種類の時間構造 (本文参照)

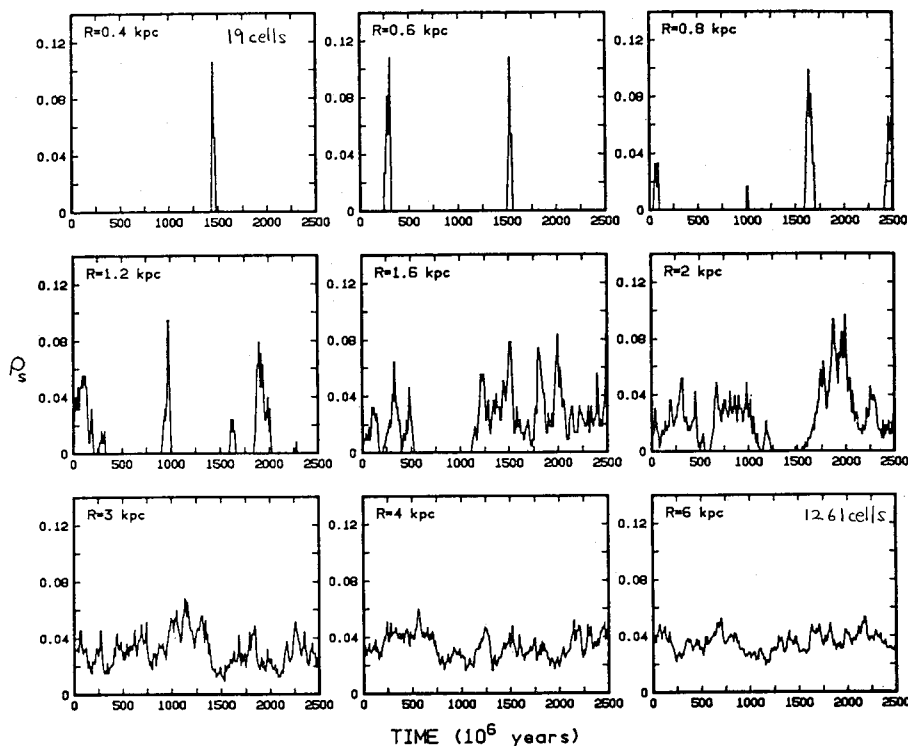


図6 SSPSF (モデル III) における銀河のサイズ効果 1 cell ≈ 200 pc 正方形. 左上から右下へシミュレーション銀河の半径, 従って cell 数が増している. 横軸は時間, 縦軸は星形成を起こしている cell の割合. (Gerola & Seiden ApJ '80 242 517)

散係数, r は空間座標, i は各成分 (相) の形で書けると仮定する. これは物質の流束が $F_i = -D_i \partial X_i(r, t) / \partial r$ であることを示し, 多い所から少ない所へ移動する, という効果を表している. 従って, 伝搬過程が通常分子論的な拡散そのものである必要はなく, 何らかの物理過程の結果, 最終的に星間物質の各成分 i の質量流束が $F_i = -D_i \partial X_i(r, t) / \partial r$ という形になればよいわけである. 例えば, HI 雲のランダム・モーションによる寄与はまさに拡散のイメージである ($D_0 \sim (\text{平均速度})^2 \times \text{平均自由時間}$). 又, HI 雲が SN shell によって押されて散らばってゆくような効果もこの形に書けるであろう. このような伝搬項を入れると, 式 (1) は次の系となる.

$$\begin{aligned} \partial X_c / \partial t &= A X_w - B X_c X_h^2 + D_c \nabla^2 X_c \\ &\text{但し, } X_c = X_c(r, t), \text{ etc.} \\ \partial X_h / \partial t &= B X_c X_h^2 - X_h X_w + D_h \nabla^2 X_h \\ \partial X_w / \partial t &= X_h X_w - A X_w + D_w \nabla^2 X_w \end{aligned} \quad (2)$$

式 (2) のような

$$\partial X(r, t) / \partial t = \text{非線型項} + \text{拡散項}$$

という方程式系から得られる空間的な構造 (密度分布) を「散逸構造」という.

我々は結局, 式 (2) のような方程式系から, 銀河における大域的構造をつくり出そうというのである. しかし

一体, こんな簡単な方程式系で成功するであろうか.

4. 時間構造——4 種類の振舞い

空間的伝搬項を入れない非線型反応方程式系は, どのような時間的振舞いを示すのであろうか. 具体例の式 (1) に沿って話を進めよう. 式 (1) は保存系なので, $X_c + X_h + X_w = 1$ と規格化しておく. $\dot{X}_c = \dot{X}_h = \dot{X}_w = 0$ を満たす定常状態は (X_c, X_h) で書くと, $A > 1$ の時, ① (1, 0) と ② (0, 1) であり, $A < 1$ の時, さらに ③ $((1-A)/(1+BA), A)$ が付け加わる. X_c, X_h の時間的振舞いを $X_c - X_h$ 面 (相図) 上で示したのが図5であり, パラメーター A, B の値により, 4 種類の解が存在する.

$A > 1$ の時, (a) の様に, 単調に定常点 ② へ近づく. つまり星間ガスが全て熱くなってしまふ場合で, ECPC E に於て, 非常に大きな SN rate とした場合, 又は非常に小さなガスの総量にした場合に得られた解である. これは E 型銀河の銀河風モデルに対応したものと考えられる. $A < 1$ で $B > B_0 = (1-2A)/A^2$ の時, 定常点 ③ は安定な焦点となり, 軌道は (b) の様に ③ のまわりをまわりながら近づく. これは, 我々の銀河に対する定常的 2 相モデル, 3 相モデルに対応している. $A < 1$ で $B < B_0$

の時には、(c) の様に、いかなる点から出発してもある極限周期軌道 (Limit Cycle) へ収束していく。このような振舞いを非線型振動論では、定常点 ③ が不安定化し新たにリミット・サイクル解が分岐したという。これも、ECPCE に於て、SN rate がある程度高い時に Hot Phase と Cold Phase 間を周期的に遷移する解に対応する。(d) は (c) の極端な場合で、数学的にはリミット・サイクル解であるが、数値計算では (1,0) 付近から実際上出られなくなった場合である。Cold Phase (1,0) 付近に非常に永く滞在し、そこを抜けると大きなサイクルを描いて Hot Phase (0,1) 付近でしばらく滞在した後、再び (0,1) 付近へ戻る。物理的には、Sweeping の係数 A が小さいためなかなか星間物質が Cold Clouds にたまらない。しかし、いったんほとんどのガスが Clouds になると、周囲のガス密度が小さくなるため SN R が広がりやすく、急速に Hot Gas になってしまうのである。この様に、1 周期の大部分の時間を準定常的な状態 (0,1) (1,0) 付近で過ごし、その間は素早く遷移するような振動は、Relaxation Oscillation と呼ばれる。又、Cold Phase (1,0) に注目すると、放っておけばいつまでもこの状態に在るが、ある閾値以上の摂動が与えられると大きなサイクルを描いて戻ってくるので、化学反応でいう「興奮系」の性質を持っていることになる。 $A > 1$ の時の軌道 (a), $A < 1$ の時の軌道 (b), (c) は上述した様に ECPCE の解を再現しており、モデル方程式 (1) は「星間物質の循環的相変化過程」の良い近似で

あると言える。

さて、(b)→(c)→(d) のような解の変化は、定常状態→周期的変動→Relaxation Oscillation 的変動と表現できるが、これはモデル (III) のシミュレーションに於て、銀河の cell の数を少なくしてゆくと星の形成を起こしている cell 数の割合の時間的変動がやはり、定常的→周期的→バースト的と変化していくのとおちょうど対応している。彼らはこれを、Normal spiral galaxy での穏やかな星形成 (cell 数が多い) から Dwarf galaxy (cell 数が少ない) での時たま起る爆発的星形成までとに対応させ、その原因を銀河の大きさに帰せしめた (図 6) のであるが、我々の立場から言えば、それらは局所的物理過程に含まれるパラメーターの違い (SN rate の大小、ガスの総量の大小) によると考えられる。

このように、式 (1) の様な単純な方程式系からでも、4 種類の定性的に全く異なる解が得られるわけであるが、(c), (d) のリミット・サイクル解というのは非線型の方程式でのみ現れる現象であることを強調したい (例えば、調和振動子では初期の位置、速度で振幅が決まるが、リミット・サイクルの振幅は初期値ではなく方程式自身で決まる)。又、数値計算をせずに、線型解析により定常点の安定性がわかり、判定条件を用いてリミット・サイクルの存在が調べられることも付け加えておく。これらの予想ができることはモデル方程式という方法の利点である。

雑 報

新衛星の名前

木星や土星に新衛星がいくつも発見されたことはご存じの方も多いと思う。衛星は発見されると仮の名前がつけられるが、1980 年に土星に見つかったはじめての衛星は 1980 S1, 3 番目のものは 1980 S3, 木星については 1980 J1 といったのが仮の名前である。

軌道が確定したものは各惑星ごとに一連番号と名前がつけられる。この過程については今までは誰がこの作業をやるかということで多少混乱があったが、昨年のギリシャの IAU の総会でその相談がまとまり、IAU Information Bulletin No. 49, pp. 20-21 に説明されている。

今回、確定番号と名前が決まり IAU で承認されたのは、次表の通りである。

確定番号	仮符号	名前
J XIV	1979 J2	Thebe
S X	1980 S1	Janus
S XI	1980 S3	Epimetheus
S XII	1980 S6	("Dione B")

S XIII	1980 S13	Telesto
S XIV	1980 S25	Calypso

“Dione B” は、Dione という衛星と土星とを結ぶ線を底辺とした正三角形の頂点にあるもので、正式の名前もまもなくきまることと思う。Janus という名前は前からあったが、この軌道を決める際に、2つの衛星がほぼ同じ軌道上を動いていることに気付かなかったので、この Janus の存在まで疑問視されたことがある。今回、これが Janus と Epimetheus という2つの衛星があるとして軌道が確定した。Telesto と Calypso は、Tethys と土星とを結ぶ線を底辺とした正三角形の2つの頂点のあたりを動く衛星である。なお、1980 S28 という、Mimas のほぼ 2/3 倍の周期をもつ衛星に Atlas という名前の提案があったが、軌道がよく分っていないとして採択されていない。

木星についても、1979 J1 を Adrastea, 1979 J3 を Metis という提案があったが、この2つの衛星の軌道半径が $1.79 R_J$, $1.89 R_J$ と近いところから、もう少し検討をすることにした。Thebe は軌道半径が $3.105 R_J$ である。なお、 R_J は木星の赤道半径である。

(古在由秀)