

〔特別講演〕

## 登場！新惑星仮説

\*神戸大学 理学研究科 向井 正†

神戸大学 理学研究科 パトリック ソフィア リカフィカ

本稿は、2008年9月6日に神戸大学で行なわれた「2008年度流体力学学会年会」での特別講演「新惑星仮説の誕生」に一部修正を加えた解説である。

## Debut! The New Planet Hypothesis

Tadashi Mukai, Graduate School of Science, Kobe University

Patryk Sofia Lykawka, Graduate School of Science, Kobe University.

This is a modified version of the presentation of "Debut of New Planet Hypothesis" given at the annual meeting of fluid dynamics 2008 held in Kobe University on September 6, 2008.

1 はじめに一氷天体研究の歴史<sup>(1)</sup>

ほうき星（彗星）は古代の文献にも見られる天体で、その長い尾を持つ異形は、当時の人々から不吉の前兆として、恐れられていた。彗星が科学の対象として取り上げられるようになったのは17世紀以降のことである。アイザック・ニュートンの仕事の良き理解者であったエドモンド・ハレーが、ニュートン力学に基づいて、彗星の回帰を予言し、彼の死後、その彗星が予想通りに戻って来てハレー彗星と呼ばれるようになったのは良く知られている。彗星は遠くの空間からやって来るらしいという漠然とした予測が、彗星の起源を探るといふ科学の対象となった歴史は、1950年に出された、オランダの天文学者ヤン・オールトの仮説に始まる。

オールトは当時その軌道が知られていた19個の新彗星（過去に出現記録が残っていない新登場の彗星）を使って、彗星の巣の位置を類推した。楕円軌道を描く天体の軌道エネルギー（位置エネルギーと運動エネルギーの和）は、楕円軌道の長半径  $a$  の逆数に比例する。オールトは、彗星の個数の  $1/a$  分布

\*〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1

† E-mail:mukai@kobe-u.ac.jp



図 1. オールト雲から来た彗星 (comet McNaught (C/2006 P1)) (Press Photo 05i/07(19 January 2007), ESO)

を描いた。すると、ほとんどの彗星が大変小さい正の  $1/a$  の値を持つことが判った。このことは、彗星が、太陽系の縁からやってくることを示唆する。そこで彼は、彗星は1万~10万AU地点に巣を作っていると考えた(ここでAUは、天文単位(Astronomical Unitの略)で、1AUは太陽-地球間の距離1億5千万kmを示す)。

また、新彗星がやって来る方向が、太陽の周りを公転する地球の軌道面（黄道面と呼ぶ）に対して、ランダムに分布することから、この彗星の巣は、太陽系を取り囲む球殻状の構造をしていると予想した。これをオールト雲という。その後の観測による新彗星のサンプル数の増加によって、 $1/a$  の小さい部分に彗星が集まっているという傾向は確認された。しかし、現在までの観測では、オールト雲の存在は実証されていない。その意味では、オールト雲はまだ仮説である（図1に最近現れた新彗星を示す）。

彗星は、軌道周期が200年以上の長周期彗星と、200年以下の短周期彗星に分類される。新彗星を含む長周期彗星の軌道面が、黄道面に対してランダムに分布しているのに対して、短周期彗星の軌道面分布は黄道面に沿っている。当初、長周期彗星が、惑星系に入って来て、木星等の惑星の重力効果で軌道面が変わり、黄道面に沿った短周期彗星へと軌道進化すると予測された。しかし、彗星軌道の時間進化をシミュレーションする数値計算が可能になるにつれ、このシナリオで長周期彗星を短周期彗星に進化させることが難しいことが判ってきた。というのは、彗星の軌道面を黄道面に近づけるための時間がかかりすぎるのである。

そこで、短周期彗星の巣が、オールト雲とは別のところ、すなわち、黄道面に沿って、かつオールト雲より太陽に近いところに在るのではないかと思われた。こうして、1950年前後に、アイルランドのアマチュア天文家ケニス・エッジワース(1943年と1949年に発表)と、アメリカの天文学者ジェラード・カイパー(1951年に発表)が、それぞれ独立して提案した海王星軌道以遠に彗星の巣があるという仮説が注目されるようになった。この巣は、エッジワース・カイパーベルトと呼ばれた。

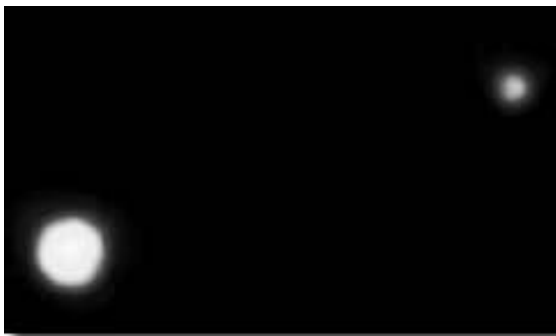


図2. ハッブル宇宙望遠鏡で撮られた冥王星（左）と、その衛星カロン（右）（Credit: Dr. R. Albrecht, ESA/ESO Space Telescope European Coordinating Facility; NASA）

一方で、1930年に発見された冥王星の不思議さが目立ってきた。冥王星の軌道が海王星軌道の内側に入り込むことや、黄道面に対して軌道面が $17^\circ$ も傾いているという軌道の不思議さは発見当初から知られていた。これに加えて、1978年に冥王星の側に大きな衛星カロンが見つかり、これまでの冥王星の大きさを推定していた明るさの一部がカロンによることが判った（図2参照）。カロンの明るさを差し引いた結果、冥王星の大きさは地球の月よりも小さくなった。このため、不思議な軌道上の小さな惑星・冥王星は、ほんとうに惑星なのかと疑われるようになった。

未知の天体を探すというハンターは、いつの時代にも活躍している。冥王星以遠の第10惑星探しと、エッジワースとカイパーが予言する領域に彗星の卵（氷天体）を探すという試みが続けられた。1980年代後半に入って、電荷結合素子(CCD)の測定器への本格的応用によって、暗い天体の探査に強力な道具が備わった。4年間にわたる探査の後、ハワイ大学のデビット・ジェウイトとジェーン・ルーが、最初の氷天体(1992QB1)をみつけたのは1992年の夏の終わりであった。

IAU（国際天文連盟）の新天体の命名法は、発見された西暦年、カレンダーの各月を2つに分割してA, B, C...とアルファベットで示し（ただしIとZは外して24）、その期間内に発見された順位をA, B, C, ..., で表わす（Iは外す）。26番からはA1, B1, ..., となる。1992QB1は、1992年の8月の後半に発見された27番目の天体ということになる。他の26個は新小惑星であった。

1992QB1の発見が始まりとなって、氷天体が続々とみつき、現在では1200個を超す数が報告されている。その過程で、2006年に、「第10惑星」問題が起こった。当時、惑星についての明確な定義がなかったので、「冥王星より大きな天体」がみつければ、新しい惑星となるはずだ、という考えがあった。2005年、ハッブル宇宙望遠鏡の直接撮像で、冥王星より大きいことが確認された氷天体(2003UB313)が見つかり、発見者達はこの天体を第10惑星として認めて欲しいとIAUに申請した。

2006年夏、IAU総会では議論の末に、惑星の定義が提案された。太陽の周りを公転し、自分の重力によってその形状（球形）が決定され、かつ、軌道に沿って存在していた天体を、捕獲するか跳ね飛ばすことによって、軌道がクリーンになっている天体を惑星とすることになった。この結果、冥王星は軌道がクリー

ンになっていないということで惑星とは認められなくなった。

また、今後発見される氷天体も含めて、エッジワース・カイパーベルトの天体は、その軌道周辺に現在でも氷天体が存在するので惑星とは認められないことになった。海王星以遠の氷天体（エッジワース・カイパーベルト天体）は、和名では「太陽系外縁天体」と呼ばれ、冥王星もその仲間となった。これらの議論のきっかけを与えた、冥王星より大きい氷天体 2003UB313 が、その後発見者らによってエリス（ギリシャ神話の不和と争いの神）と名付けられたのは皮肉である。

## 2 太陽系外縁天体の軌道分布<sup>(2)</sup>

1200 個を超す太陽系外縁天体（TNOs (Trans-Neptune Objects の和訳)) がみつき、その軌道についての情報が集まるに連れて、太陽系外縁天体の軌道要素による分類が可能となった。

太陽の周りをケプラー運動している太陽系外縁天体の軌道は、太陽を焦点のひとつに置いた楕円軌道をしている。このため、太陽系外縁天体の軌道分布を表示するために、楕円軌道の軌道長半径  $a$ 、軌道離心率  $e$ 、軌道傾斜角  $i$  が用いられる。加えて、太陽に最も近づく距離（近日点距離） $q$  を使うことがある。 $q$  は  $q=a(1-e)$  で表わされる。

図 3 は、軌道の信頼性が高い 622 個の太陽系外縁天体の軌道をもとに、 $(a, e)$  (図 3 左) と  $(a, i)$  (図 3 右) で表わしたものである。海王星の軌道要素は  $a=30\text{AU}$ ,  $e=0.009$ ,  $i=1.8^\circ$  である。図 3 に見られる垂直な点線は、海王星との共鳴の位置を表わす。ケプラーの第三法則、すなわち、「軌道周期  $T$  の 2 乗は、軌道長半径  $a$  の 3 乗に比例する」から、

$$rT_N = sT_0 \quad \text{とすると、}$$

$$a_0 = a_N (r/s)^{2/3}$$

となる。ここで、 $T_N$ ,  $a_N$  は海王星の軌道周期と軌道長半径で、 $T_0$ ,  $a_0$  は、外縁天体の軌道周期と軌道

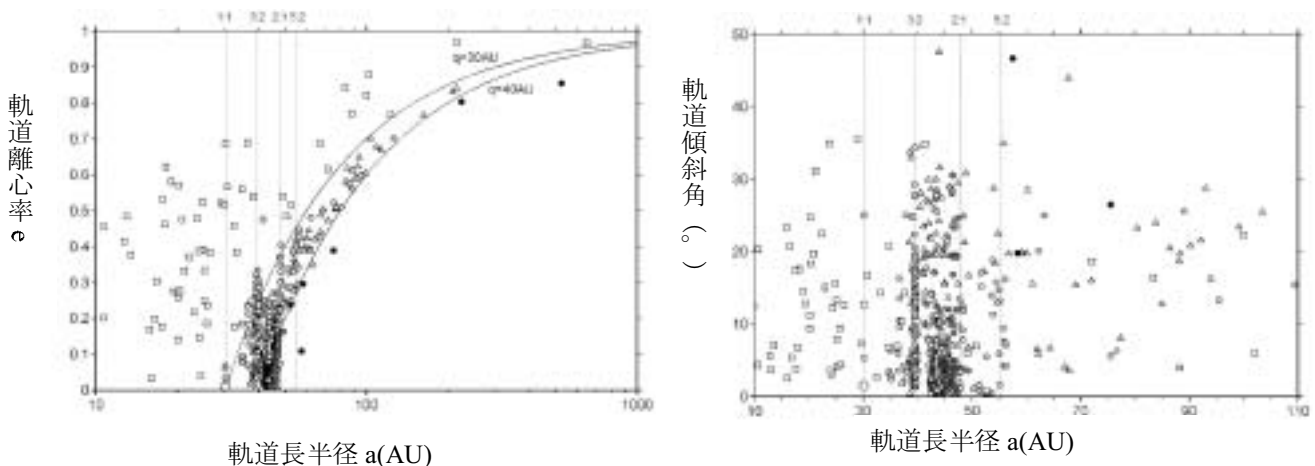


図 3. 太陽系外縁天体の軌道分布. 共鳴群 (淡い灰色丸), 散乱群 (三角形), 分離群 (黒丸), 古典群 (濃い灰色丸) の定義は本文参照. ケンタウルス族(正方形)は木星軌道と海王星軌道の間に軌道を持つ氷天体群. 垂直点線は海王星 (大きな白丸) との共鳴帯 (3:2 は海王星が 3 公転する間に 2 公転). 冥王星は 3:2 の共鳴帯にある. 両図の横軸のスケールが異なることに注意.

長半径である。 $r, s$  は整数で、海王星が太陽の周りを  $r$  回公転する間に、外縁天体が  $s$  回公転する関係 (これを共鳴と呼ぶ) がある。共鳴位置は  $r:s$  と整数比で表示する。海王星との共鳴の位置にある外縁天体を **共鳴群** という。

図 3 の 3:2 の共鳴位置に冥王星があり、同じ共鳴の位置にすでに 100 個以上の太陽系外縁天体が見つかっている。これらをプルーティーン (冥王星族) と呼ぶことがある。2006 年の IAU での議論で、冥王星を太陽系外縁天体の仲間として分類する方が自然であるという意見の根拠は、この 3:2 共鳴位置に

多くの仲間が存在していたことである。

図 3 左には  $q=30\text{AU}$  と  $40\text{AU}$  の位置が曲線で示されている。 $q=a(1-e)$  の関係があるので、 $q=30\text{AU}$  の曲線上の太陽系外縁天体は、軌道の歪みが増すに連れて、近日点距離を海王星軌道の位置に保ったままで、軌道長半径が大きくなっていく。この天体は、海王星軌道の外側に広がる円軌道上の外縁天体群を横切るように公転していることになる。この 2 本の曲線に囲まれた領域にみつかると外縁天体は、近日点付近で海王星に散乱されて、大きく歪んだ軌道になったと思われるので、**散乱群** と呼ばれる。

$q > 40\text{AU}$  では、海王星の影響は小さい。この領域で見つかる太陽系外縁天体は、散乱群と良く似た軌道要素を持っているが、海王星に散乱されたとは考え難いものがある。そこで、これらを区別して**分離群**と呼ぶことにする。

海王星軌道の外側で、海王星の影響をほとんど受けない黄道面付近の円軌道にある天体は、そこで生まれて、そのまま現在まで生き延びたと想像される。これらの太陽系外縁天体を**古典群**と分類する。これらをまとめると、

○共鳴群 海王星の軌道周期と整数比になる位置にある太陽系外縁天体。

○散乱群 (a, e)図 (図 3a)で、 $30\text{AU} < q \leq 40\text{AU}$  にある共鳴群以外の太陽系外縁天体。

○分離群  $q > 40\text{AU}$  の太陽系外縁天体。

○古典群  $42\text{AU} < a < 48\text{AU}$ ,  $e \sim 0$  にある太陽系外縁天体。

### 3 軌道分布の特異さ

星間雲の中に原始太陽が生まれた頃、取り残された星間雲は、この中心星を取り囲む円盤構造（原始惑星系円盤）を作った。これは生まれたての星の周りでみつける普遍的な構造である。星間雲が持っていた自転運動のため、この円盤は中心星に対して公転しており、その遠心力と中心星の重力の合力を受けて、円盤内部の固体微粒子（塵）は、円盤の赤道面に集積する。空間密度の上昇が塵同士の衝突・付着を加速し、赤道面に沿って、数キロメートル程度の微惑星が無数に誕生する。これらが、衝突・破壊・再集合・付着等の過程を経て寡占的に成長していくと、いくつかの原始惑星サイズの天体が生まれる。

円盤を構成する物質中には、氷成分が含まれる。最も多量に存在する水の氷は、昇華温度が氷の中で最も高い（惑星間空間で  $100 \sim 150\text{K}$ ）。太陽の周りの原始惑星系円盤内の温度は、小惑星帯付近ではほぼこの温度になっている。このため、小惑星帯より太陽に近い領域で生まれた4つの地球型惑星を作る材料として、氷成分は存在できなかった。一方、小惑星帯以遠の空間では微惑星は氷天体であった。

小惑星軌道以遠の空間に誕生した氷微惑星は、円盤の赤道面（ほぼ現在の黄道面）に沿って分布し、その軌道離心率も円に近いと想定される（静かな軌道）。このことから、海王星軌道以遠に発見される太陽系外縁天体も静かな軌道に分布しているという予測があった。図3を見て欲しい。発見される太陽系外縁天体の軌道分布は、予想された静かな軌道から

大きく外れている。この軌道分布の特異さを整理しておく。

(1) 一様な静かな軌道という予測から外れて、共鳴群、散乱群、分離群、古典群という多彩な軌道分布がみられること。

(2) 古典群が静かな軌道に近いが、それでも軌道離心率分布の平均値が0ではなくて0.07になっていること。

(3) 50AU以遠に円軌道を描くものが見つからず、古典群に外縁が存在すること。

### 4 特異さの原因

太陽系外縁天体の軌道分布に見られる特異さは、木星型惑星（木星、土星、天王星、海王星）による重力摂動の結果だと考えるのが自然である。散乱群の出現は、海王星に散乱された太陽系外縁天体が、近日点距離を海王星軌道付近に保ちつつ、徐々に歪んだ軌道に移っていったとして理解される。この軌道進化の過程で、軌道の長半径が海王星との共鳴状態に入るものがある。そうすると、それらは、その位置で捕捉され、共鳴群ができたと思われる。古典群は、海王星以遠の静かな軌道に生まれたものの生き残りであろう。

こうした考察で、太陽系外縁天体の軌道分布に見られた特異さのいくつかは説明できる。しかしながら、説明できずに残った特異さが存在する。特異さ(1)の分離群の出現は、単純な海王星による散乱だけでは説明がつかない。また、(2)の古典群の軌道を励起する重力源として、木星型惑星は遠すぎる。更に、(3)の外縁の存在は、全く説明できない。これらを説明するためのシナリオとして提起されたのが、「新惑星仮説」である。

### 5 木星型惑星形成の標準シナリオ

木星型惑星の形成と進化の標準シナリオ<sup>(3)</sup>によると、木星型惑星が生まれた領域は、現在の4惑星の空間的広がりよりもずっと狭い領域であった。すなわち、現在の4惑星の太陽からの距離（日心距離）は、木星5.2AU、土星9.6AU、天王星19AU、海王星30AUで、木星と海王星の間にはほぼ25AUの広がりがある。ここで挙げた日心距離は、惑星の軌道長半径の値であるが、軌道離心率が小さい（最大の土星でも $e=0.056$ ）ので、日心距離とみなせる。

さて、これに対して、標準シナリオでは、4惑星は太陽からの距離にして、5.5AUから14AUの間で生まれ

たという。この場合の広がりには 8AU 程度と狭い。惑星が誕生した位置については、いくつかの別案があるが、木星が誕生後太陽方向に移動（惑星移動（マイグレーション）と呼ぶ）したのに対して、他の 3 つの惑星は太陽から遠ざかる方向に移動した点は共通している。

惑星移動の原因は、原始惑星の周りに残っていた氷微惑星との衝突によると考えられている。原始木星は、公転軌道の外側にあった氷微惑星との衝突によって公転角運動量を失い、太陽方向に移動したという。これに反して、他の 3 惑星は、氷微惑星との衝突を通して、原始木星が失った公転角運動量を得るために、外向きに移動した。一般に、太陽に近い円盤内は、物質密度が濃いために原始惑星が短時間で生まれる。このため、この標準シナリオは、天王星や海王星を短時間で作る上で都合が良い。さらに、このシナリオでは、原始円盤は 34AU 付近で途切れている。この外縁が、海王星の移動に連れて外側に移動し、50AU 付近に至ったのが現状だと説明する。

惑星移動の前後で、原始惑星は周りの氷微惑星を捕獲・吸収する。同時に、一方では、重力散乱によって氷微惑星を跳ね飛ばす。太陽方向に跳ね飛ばされた氷微惑星は群れとなって地球軌道を横切る。これが、地球及び月のクレーター解析から予想される「重爆撃」の原因だという。一方、反対方向に飛ばされた氷微惑星は、太陽系外縁天体の散乱群となり、より遠くに至ってオールト雲を作った。

4 つの木星型惑星は惑星移動とともに、お互いの共鳴帯での捕獲によって、軌道離心率が変化する。例えば、海王星は、天王星との相互作用を受けてその軌道は、離心率 0.4 程度まで歪む。このため、海王星軌道が、現在の太陽系外縁天体の古典群を揺するほどに近づくと考える。こうして、標準シナリオでは、4 章で説明できなかった太陽系外縁天体の軌道分布の特異さが説明できるとされている。分離群について説明していないという指摘については、分離群の観測数が少ないことから、取り上げるほど重要な特異さでは無いと考えているようである。

われわれは標準シナリオを認めつつ、それだけでは太陽系外縁天体の軌道分布に見られる特異さの説明はできないと考えている。例えば、初期の円盤が 34AU で途切れていたとする理由が不明である。また、分離群はその後の観測で発見数が増えつつあり、その存在を無視することはできない。さらに、古典群の静かな軌道を、観測されているような軌道に励起するためには、海王星の離心率の変遷だけでは不十分

だという指摘があることにも注目している。

## 6 「新惑星仮説」の登場

「新惑星仮説」<sup>(4)</sup>の概略を図 4 に沿って紹介する。新惑星は、天王星と海王星が生まれた領域で誕生した。この領域では、原始惑星サイズの天体が複数個（10 個程度）生まれたと思われる。その中の大きな 2 つが天王星と海王星になった。他の惑星サイズの天体は、先に成長した原始天王星や原始海王星による重力散乱によって、領域の外側に飛ばされた。われわれの新惑星は、近日点距離はこの領域に留まりつつ、軌道の長半径と離心率が大きくなるように散乱され、原始海王星と  $r:1$  共鳴を成す位置に移動した（図 4 の左上図）。これが、われわれの数値計算の出発点となる（図中の時刻 0 表示）。

この歪んだ軌道を公転する新惑星は、原始海王星軌道の外側に広がる太陽系外縁天体の静かな軌道群（図 4 において  $e=0$  となる  $x$  軸に沿って分布しているもの）を横切る。この際、新惑星の重力摂動を受けた太陽系外縁天体は軌道離心率が上昇する（軌道が励起される）。これによって、古典群の平均軌道離心率が、初期位置 ( $e=0$ ) から、上昇する。この効果は、軌道エネルギー（位置エネルギーと運動エネルギーの和）の小さい遠方の太陽系外縁天体により大きな変化を与える（図 4 の右上図）。この結果、50AU 以遠の遠方の黄道面内円軌道に、初期分布として存在していた太陽系外縁天体が無くなる（初期状態から、5 千万年～1 億年が経過）。

このころに（初期状態から、～1 億年が経過）、惑星移動が始まる。原始海王星の外向きに連れて、新惑星も外向きに移動する。図 4 の例では、原始海王星は 20AU から 30AU へと移動して行く。原始海王星が現在の位置 ( $a=30AU$ ) に達したころには、新惑星は  $a=100AU$  にまで達している。この原始海王星移動の際に、黄道面内に残っていた太陽系外縁天体の一部が共鳴帯に捉えられて、外側に移動して行く。これが、共鳴帯天体の起源となる。共鳴帯に捉えられている新惑星は、軌道離心率と軌道傾斜角が逆相関を保ちつつ（古在効果と呼ばれる）、軌道進化する。すなわち、軌道が丸くなりつつ、軌道傾斜角が大きくなる。この過程で、新惑星は遠方の太陽系外縁天体を跳ね飛ばして、分離群を作る（図 4 の左下図）。

図 4 の右下図が現在の状態を表す。新惑星の軌道進化につれて、古典群の励起が生じ、遠方では、円軌道を描く太陽系外縁天体が無くなる。加えて、遠

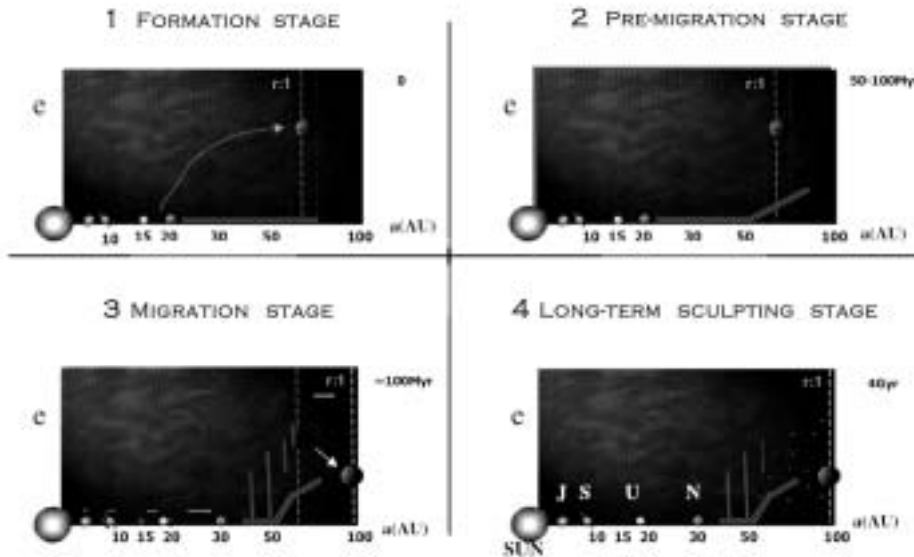


図4. 太陽系外縁天体と仮想新惑星 (r:1 共鳴帯内で歪んだ軌道上)の軌道進化モデル. 詳細は本文6章参照.

方での太陽系外縁天体の重力摂動の源として新惑星が作用し、その結果分離群天体が生まれてくる。

上記のシナリオに沿って数値シミュレーションを実行した. 図4の左上図の初期条件(軌道離心率及び軌道傾斜角を0とした状態)に、数千個のテスト粒子を分布させる(軌道長半径  $a$  は 20-240AU). 新惑星の質量はパラメータとし、惑星移動は  $a$  方向だけを扱い、 $a$  の変化は時間関数形で導入する. この簡略化を行なった理由は、4つの木星型惑星の軌道進化を同時に扱うためには、われわれが使用できる計算機のリソースが不足しているためである。

ほぼ4億年に渡る数値シミュレーションで得られたテスト粒子の軌道分布と、観測されている太陽系外縁天体の軌道分布を比較検討して、新惑星質量等のシミュレーションで仮定した変数値の中から、最適値を導いた. その結果、新惑星の予想質量は、地球質量の 0.3-0.7 倍で、現在の軌道は  $a=100-175$  AU,  $q>80$  AU,  $i=20-40^\circ$  となっている。

## 7 新惑星を見つけるために

新惑星の密度を冥王星程度 ( $2 \text{ g/cm}^3$ ) とすると、その大きさは地球サイズとなる. 冥王星は大気を持つためにその表面の光反射能(アルベド)は 0.5 程度と大きい. ここでは、大気を持たない氷天体の表面として、冥王星より低いアルベド 0.1-0.3 を仮定した. その結果、新惑星の予想される明るさは、近日点付近で 14.8-17.3 等(冥王星は 13.6 等)となった。

われわれのシミュレーションでは、新惑星の軌道要素  $a, e, i$  から軌道の姿は決まるのだが、軌道の方向

が決められない. また、軌道上のある時刻における新惑星の位置も判らない. このため、新惑星を探すために、広い空間領域のサーベイ観測が必要となる。

大きな口径の望遠鏡は遠くまで見られる代わりに視野が狭くなる. 新惑星は、冥王星より暗い天体で、かつ、広い視野のサーベイ観測を必要とする. われわれが期待するのは、ハワイのハレヤカラ山頂で、この秋からサーベイ観測を開始するパンスターズ計画<sup>(5)</sup>である

(Pan-STARRS: Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System). 口径 1.8m の望遠鏡(PS1)に、撮像器として 14 億ピクセル、視野 7 平方度の CCD カメラが装備されている. 30 秒積分で限界等級 22.8 等、一晚(8 時間)のサーベイ領域 6000 平方度が予定されている. 幸運にも、新惑星が近日点付近に位置していた場合、ひと月程度のサーベイ観測で発見が期待できる. PS1 望遠鏡の本格的な稼働が待たれる。

## 参考文献

- (1) 太陽系小天体についてはたくさんの解説書が出版されている. 最近では、日本評論社、シリーズ現代の天文学 I 「人類の住む宇宙」第4章「太陽系と系外惑星系」がある.
- (2) 太陽系外縁天体についても解説書は多い. たとえば、向井, リカフィカ, "冥王星型氷天体の姿とその起源", 科学, 77 (2007), 171-176.
- (3) Levison, H.F. et al., "Origin of the structure of the Kuiper belt during a dynamical instability in the orbits of Uranus and Neptune", Icarus 196 (2008), 258-273.
- (4) Lykawka, P.S. and Mukai, T., "An outer planet beyond Pluto and the origin of the trans-Neptunian belt architecture", Astronom. J. 135 (2008), 1161-1200.
- (5) Gray, T. et al., "The Pan-STARRS synthetic solar system model: A tool for testing and efficiency determination of the moving object processing system, Icarus (submitted) (2008).