

## 解説「惑星 X」

向井正（神戸大・大学院理学研究科・地球惑星科学専攻）

パトリック ソフィア リカフィカ（神戸大・大学院理学研究科・地球惑星科学専攻）

### 概要（431字）

海王星以遠領域に多数みつかった太陽系外縁天体(TNOs)は、惑星系形成初期に衝突及び力学進化を受けた惑星系円盤の名残と考えられる。海王星以遠帯の複雑な構造は、初期惑星系円盤の特徴や、惑星形成等のその後の円盤の進化過程を知る上で重要となる。円盤の赤道面への物質の降着・衝突合体に因って TNOs が誕生したとすると、現在観測されているような、大きく歪んだ軌道や大きな軌道傾斜角を持った TNOs の出現が説明できない。この論文は、木星、土星、天王星、海王星という4つの巨大ガス惑星が、形成初期に円盤物質の摂動力によって移動（ミグレーション）したというシナリオに沿っている。海王星近傍で誕生した地球質量の(0.3-0.7)倍の未知の惑星が、ミグレーションに伴って外側に移動し、現在 80AU 以遠に存在すると仮定して、円盤内の TNOs の 40 億年にわたる力学進化を追跡した。その結果、現在観測されている TNOs の軌道の様々な特色（高離心率、高軌道傾斜角の出現等）が説明できた。

### (Abstract in English)

Trans-Neptunian objects (TNOs) are remnants of a collisionally and dynamically evolved planetesimal disk in the outer solar system. This complex structure, known as the trans-Neptunian belt, can reveal important disk properties, planet formation, and other evolutionary processes. In contrast to the predictions of accretion theory, TNOs exhibit surprisingly large eccentricity and inclination, which can be grouped into distinct dynamical classes. Based on extensive simulations of planetesimal disks with the presence of the four giant planets and massive planetesimals, we propose that the orbital history of an outer planet with tenths of Earth's mass can explain the trans-Neptunian belt orbital structure.

## 解説「惑星 X」

理科年表（平成20年版）の、「天文学上のおもな発明発見と業績」を見ると、1846年に海王星がみつかっているが、その発見者として、ルベリュ（フランス）、アダムス（イギリス）、ガルレ（ドイツ）の3名が並んでいる。その経緯は次の様であったと伝わっている。

1781年、ハーシェル（イギリス）によって発見された天王星の軌道が、19世紀に入る頃には、予測値から外れ出し、木星と土星の重力摂動を取り入れても修正できないことが分かった。1845年9月、イギリスで、当時学位を取ったばかりの26歳のアダムスが、天王星軌道の外側に未知の惑星の存在を仮定した摂動計算の結果、未知惑星の軌道、質量等を推測して、グリニッジ天文台長のエアリに提出した。エアリはなぜかこの結果を無視した。同じ頃、フランスではパリ天文台長アラゴが、当時33歳のルベリュに、天王星のふらつきの謎解きを勧めた。ルベリュは解析結果を翌1846年6月のアカデミー報告に発表したところ、これを知ったエアリが、ルベリュの結果と、アダムスの結果が非常に良く一致していることを知り、観測の必要性を講演するようになった。1846年8月31日にルベリュは彼の予測位置を修正した第3論文を、ベルリン天文台のガルレに送り観測を依頼した。9月23日にこれを受け取ったガルレは、その夜探索を開始した。最初は見つからなかったが、届いたばかりの恒星図を用いたところ、ルベリュの予測位置から約50分の所に光度8等級、視直径3"の天体を発見した。これが海王星であった。

未知の海王星の存在を、隣接する天王星の軌道のふらつきから予測することが成功したのは、未知惑星の影響力が、土星の影響力に比べて無視できなかったためである。即ち、土星（質量は地球の95.2倍）、天王星（質量は地球の14.5倍）、海王星（質量は地球の17.2倍）がほぼ10AU（1AUは太陽-地球間の距離で約1億5千万km）の間隔で並ぶために、天王星には土星の1/6の重力摂動が海王星からかかっている。その後、1930年に海王星の外側に冥王星が発見されたが、地球質量の0.2%の質量しか持たない冥王星の発見には、海王星の軌道のふらつきから外側の未知惑星を予測するという手法は使えなかった。

今回 Lykawka & Mukai の新惑星予測の方法は、「天王星の軌道のふらつきから、その外側に未知の惑星を予測した」故事と似ている。「天王星」の替わりを勤めるのが、「太陽系外縁天体」である。「太陽系外縁天体」というのは、1992年に初めて発見された海王星軌道（日心距離30AU）以遠の氷天体で、その後続々と発見され、2007年6月で1100個を越す存在が明らかになっている。また、「軌道のふらつき」に対応するのが、「太陽系外縁天体の軌道分布に見られる特徴」である。それでは、観測で明らかとなってきた「太陽系外縁天体の軌道分布の特徴」をまとめよう。

(1) 惑星系の形成理論では、原始惑星系星雲の赤道面に沈降したダストの衝突成長によって多数の微惑星が赤道面に生まれ、これらの衝突合体が惑星を作る。このことは、現在の8つの惑星がほぼ太陽系の赤道面に沿って、円に近い軌道をとっていることと矛盾しない。ところが、太陽系外縁天体の軌道分布をみると、大きな軌道離心率を持ち、かつ歪んだ軌道上にある天体がたくさん見つっている。

(2) 40AU から 50AU に向けて太陽系外縁天体の数が減少し、観測可能な 50AU 以遠の円軌道周辺に全く見つっていない。即ち、50AU 付近に、円に近い軌道をとる太陽系外縁天体の存在する領域の外縁部があるらしい。

(3) 50AU 以遠に、大きな軌道傾斜角と大きな軌道離心率を持った太陽系外縁天体が見つっている。これらの中には、海王星との共鳴軌道に在るものが見つっている。ここで共鳴軌道というのは、海王星の軌道周期と整数倍になる軌道のことで、例えば、3:2 の共鳴軌道にあるといわれる冥王星は、海王星が太陽の周りを 3 回周回する間に 2 回周回する。50AU 以遠に存在し、大きな軌道離心率と軌道面傾斜角を持つ天体の中で、近日点位置が海王星軌道から大きく離れた特異な天体が存在している。

海王星による重力摂動によって、太陽系外縁天体の軌道分布が大きな影響を受けることは確かである。大きな軌道離心率と大きな軌道面傾斜角を持つ天体で、その近日点距離が海王星に近いものの起源は、海王星軌道付近で生まれた氷天体が、海王星による重力散乱で跳ね飛ばされたためにこのような軌道になったとして説明される。そうすると、近日点距離が海王星軌道から離れ、かつ軌道の長半径が 40-50AU で、軌道面傾斜角及び軌道離心率が共に零でない（励起された太陽系外縁天体）の起源については、海王星の影響は微小であり、励起された軌道分布を作る物理過程については定説が無い。同じように、軌道長半径が大きく (>50AU)、近日点距離が海王星軌道から大きく離れ、歪んで傾いた軌道上の氷天体についても、その力学進化は未知である。

この論文は、木星、土星、天王星、海王星という4つの巨大ガス惑星が、誕生後 1 億年程度経た時期に、およそ 1 千万年のスケールで円盤物質の摂動力によって移動（ミグレーション）したというシナリオに沿っている。当時 20AU 付近にあった海王星近傍から、地球質量の(0.3-0.7)倍の未知の惑星が、海王星の重力散乱によって遠方に飛ばされ、海王星との共鳴軌道に捕獲される。海王星の外向きのミグレーションに伴って、共鳴位置も外側に移動し、海王星が現在の位置(30AU)に達した後、この未知惑星の軌道進化を 40 億年に渡って数値シミュレーションで追跡した。現在 80AU 以遠に存在するこの仮想惑星は、自身が軌道進化する過程で、周りの太陽系外縁天体の軌道を変えていった。円盤内の太陽系外縁

天体群の 40 億年にわたる力学進化を追跡した結果、現在観測されている太陽系外縁天体の軌道の様々な特色（高離心率、高軌道傾斜角の出現等）が説明できた。

遠方の未知惑星を仮定しなくても、現在の観測されている太陽系外縁天体の軌道分布を説明できるという説もある。例えば、惑星系の形成初期に、恒星や分子雲が太陽系の近くを通過して、太陽系の外縁部分に力学的影響を与えたという考えもある。また、80AU よりも近くに未知惑星を仮定する説もある。

この論文では、他の考え方について詳しい検討を加え、その不備な点を指摘しつつ、我々の惑星 X の存在が、これまでの観測事実と矛盾しないことを示した。