



# Trans-Neptunian Region Architecture: Evidence for a Planet Beyond Pluto

Lykawka, Patryk Sofia

---

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

2007-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲3912

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1003912>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【 2 6 4 】

氏 名・（本 籍）	Patryk Sofia Lykawka ( ブラジル )
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学 位 記 番 号	博い第669号
学位授与の 要 件	学位規則第5条第1項該当
学位授与の 日 付	平成19年3月25日

【 学位論文題目 】

Trans-Neptunian Region Architecture: Evidence for a Planet  
Beyond Pluto  
(トランス-ネプチューン領域の構造；冥王星以遠に存在する  
惑星の証拠)

審 査 委 員

主 査	教 授 向井 正
	教 授 中川 義次
	教 授 乙藤 洋一郎

Trans-neptunian objects (TNOs) represent the relics of planet accretion in the primordial planetesimal disk, and therefore they carry precious information about the origin and evolution of the solar system. These icy bodies are found mainly in two reservoirs, the trans-neptunian belt (30-48AU) and the scattered disk (typically >48AU). In order to understand the origin of the trans-neptunian region (>30AU) architecture, I conducted several theoretical investigations, using mainly statistical tools and numerical simulations. The main results are the following: 1) *Physical properties*. Large TNOs have generally higher inclinations and orbit in the inner trans-neptunian belt (<45AU); Larger TNOs have albedos >0.04 and increasing with size, possibly caused by icy frosts of common species found in the outer solar system: CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, or/and CO. 2) *Long-term evolution*. TNOs are stable at 42AU and beyond, provided perihelion  $q>37$  AU, or if they are trapped in a resonance. This stability is in contrast with the lack of TNOs in the outer trans-neptunian belt (>45AU), and the absence of low-eccentricity objects beyond about 50AU (the so-called trans-neptunian belt outer edge); Resonances play an important evolutionary role in the inner region of the trans-neptunian belt (40-45AU), while only the 2:1 resonance is relevant for the evolution in the outer region (45-50AU). 3) *Dynamical classification*. There are five main classes: centaurs, resonant, scattered ( $q<37$ -40AU), detached ( $q>40$  AU), and classical TNOs (37-48AU;  $q>37$ -38AU); Resonances alone cannot explain the population of detached TNOs, implying the origin of the latter requires a perturbation mechanism other than Neptune's gravity or resonances associated with the giant planet; Stable resonant TNOs currently inhabit between 30 and 108AU, revealing a significant population in the trans-neptunian region. 4) *Origin of scattered disk resonant TNOs*. Long-term resonant TNOs (median ~4Gyr) in the scattered disk must have originated from sweeping resonances over a previously dynamically excited trans-neptunian belt (e.g., with initially moderate-large eccentricities and/or higher inclinations). It is also required a primordial planetesimal disk extending to 45-50AU in size, and an excitation mechanism operating during the early solar system. 5) *A planet beyond Pluto*. After considering several observational constraints and taking the previous results altogether, a model for the origin and evolution of the trans-neptunian region is presented. Just after the formation of the giant planets, the model describes the history of the outer solar system in three main stages: pre-migration excitation of the planetesimal disk (~30-80Myr), planet migration (~100Myr), and long-term sculpting by the planets (~4.4Gyr). In the first stage, the newly formed ice giant planets clean their neighborhood scattering away all planetesimals orbiting nearby. A large Neptune scattered planetesimal (0.3~0.5 Earth masses) is assumed to remain in the outskirts of the ancient trans-neptunian belt, thus exciting the orbits of the outermost planetesimals over a few tens of Myr. During the onset of planet migration, the large planetesimal (the outer planet) is assumed to be captured by a sweeping strong resonance with Neptune of the type  $r:1$  (e.g., 6:1),

which then transports the planet to large distances beyond Pluto (>100AU). Finally, in the last billion of years, the gravitational influence of the planets sculpts the entire trans-neptunian region. In short, the trans-plutonian planet model is able to explain the following: a) Inner depletion of the inner trans-neptunian belt; b) The entire resonant structure in the trans-neptunian region; c) Formation of scattered and detached TNOs; d) The dual nature of the classical region, with physically distinct cold and hot populations; e) The primordial excitation and the current outer edge of the trans-neptunian belt; f) The loss of >99% of the initial total mass of the trans-neptunian belt through dynamical depletion and enhanced collisional grinding. The best observational constraints obtained from the model for this massive outer planet are:  $a_P=100$ -150AU,  $q_P=80$ -90AU,  $i_P=30$ -50°, albedo=0.1-0.3, and apparent magnitude  $m_P=15$ -17mag at perihelion. In summary, based on common and well established mechanisms/assumptions, such as giant planet scattering, existence of large planetesimals in the past, planet migration, and resonance sweeping capture, the model with a planet beyond Pluto can reproduce much of the trans-neptunian region with high level of details in a self-consistent way.

氏名	Patryk Sofia Lykawka		
論文 題目	Trans-Neptunian Region Architecture: Evidence for a Planet Beyond Pluto (トランス・ネプチューン領域の構造：冥王星以遠に存在する惑星の証拠)		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	向井 正
	副 査	教授	中川 義次
	副 査	教授	乙藤 洋一郎
要 旨			
<p>本論文では、太陽系の形成母胎となった原始惑星系円盤に存在していて、現在まで生き残ったと考えられている微惑星である海王星以遠天体 (Trans-Neptunian Objects; TNOs) について、TNOs の力学進化の考察が、著者が独自に開発した数値シミュレーションツールによって得られた軌道進化の結果と、幅広い理論的検討に基づいてまとめられている。</p> <p>1章では、本研究の背景となる歴史的発見や、TNOs 科学の進展についての詳細な紹介が行われている。1950 年代に、エッジワースとカイパーが独立に提案した短周期彗星の巢の構造は、惑星系の外縁部から黄道面に沿った円環状をしていると予想されていた。1992 年ハワイ大学のジェーウィットとルーは、軌道長半径 <math>a</math> が 44AU の地点に新天体を発見した。これがエッジワースとカイパーが予言していた領域の天体であることが確証され、その仲間探しが精力的に行われている。その結果、現在までに 1000 個を超す TNOs が発見され、その分類や、起源・進化の研究は天文学・惑星科学において最も重要な課題となっている。</p> <p>これまでに発見された TNOs は、その軌道要素から 5 つのグループに分類される。即ち、  (1) 古典的 TNOs; 円軌道 (<math>e \sim 0</math>) に近く、軌道長半径 <math>a</math> が 37-48AU、近日点距離 <math>q &gt; 37</math>-38AU となるもの。  (2) 共鳴 TNOs; 海王星軌道と平均永年共鳴地点に在るもので、冥王星の 3:2 が有名 (海王星が 3 公転する間に、2 公転する位置に冥王星がある)。  (3) 散乱 TNOs; <math>q &lt; 37</math>-40AU で、海王星によって重力的に散乱され、大きな <math>a</math> と <math>e</math> を持つもの。  (4) ケントウルス族; <math>q &lt; 30</math>AU で木星軌道との間にある氷天体。  (5) detached TNOs; <math>q &gt; 40</math>AU で、海王星の重力的影響は受けなかったと思われるが、散乱 TNOs に似た軌道をとるもの。</p> <p>2章では、大きな TNOs の物理定数 (特に表面光反射特性：アルベド) についての考察が取り扱われた。一般的に大きな TNOs の大きなアルベド (反射能) は、薄い大気存在を示唆している。大きな古典的 TNOs が大きな軌道面傾斜角 <math>i</math> を持ち、かつ古典的 TNOs の比較的内側領域 (<math>a &lt; 43.5</math>AU) に多く見つかった事実を取り上げて、惑星サイズの TNOs の特徴をまとめている。</p>			

氏名	Patryk Sofia Lykawka
<p>3章では、古典的 TNOs の力学特性をまとめている。ここでは軌道面傾斜角 <math>i = 4.5</math> 度を境として、それより大きな <math>i</math> を持つ hot グループと、小さい <math>i</math> を持つ cold グループが存在することを示した。長期にわたる軌道進化の追跡から、この領域の TNOs の軌道変化が小さいことを明らかにし、その結果、古典的 TNOs は現在の位置で生まれたことを示唆した。</p> <p>4章では、TNOs の力学的側面から眺めたグループの分類で、そのグループの起源とこれまでの軌道の変遷について考察を加えている。ここでは、現在軌道が確定している 687 個の TNOs について、個々の軌道要素の誤差内に 10 個のクーロンを発生させ、合計 6870 個のテスト粒子の軌道を遡ることによって、687 個の TNOs の起源を推定した。その過程で、196 個の TNOs が海王星との共鳴領域に捕獲されていることが明らかになった。さらに、5 つの力学グループへの軌道進化の過程を明らかにすることができた。</p> <p>5章では、散乱 TNOs の軌道進化において、個々の TNO が、いくつかの共鳴領域をはしごすることが明らかになった。この際、共鳴領域の次数が小さい (共鳴点を <math>i:j</math> の整数比で表わすが、<math>i-j</math> が小さい) ほど、共鳴領域に捕獲される強さが強いことが示された。冥王星が捕獲されている 3:2 は、強い (安定した) 共鳴領域であり、すでに 100 個を超えた TNOs の存在が観測によって示されている。</p> <p>6章では、初期の惑星系円盤の広がり が 50AU までであったという推測が行われた。初期の惑星系円盤では、原始惑星が、円盤内の微惑星等との衝突マザツを受けて、半径方向に移動した (migration) と考えられている。このシナリオによると、海王星は、現在の位置より 8AU 程度太陽に近い場所から、現在の 30AU 地点に移動してきた。この海王星の外向き移動に伴って、海王星の共鳴領域も外向きに移動し、その場にあった TNOs を共鳴領域に捕らえつつ外向きに移動したと考えられる。数値シミュレーションはこのシナリオを支持するが、同時に、もしそうであるならば、現在の TNOs の軌道分布からみて、初期の TNOs の空間分布が推測される。その結果、原始惑星系円盤の大きさに上限が与えられた。</p> <p>7章では、現在の TNOs の軌道分布の特徴 (50AU 以上の円軌道に TNOs が存在しないことなど) から、このような軌道分布を発生させるひとつの原因として、未知の惑星の存在を示唆している。これは、2-6 章での力学的進化の検討の総決算として、現在の 5 つのグループの TNOs の軌道分布を説明するための魅力あるシナリオの提案となっている。</p> <p>このように本論文では、TNOs の軌道進化の詳細な検討に基づいて、太陽系形成初期の、太陽系外縁部における微惑星の振る舞いを総括的にとらえることに成功している。各章の内容はすでに学術雑誌に掲載されており、TNOs 研究分野における最近の大きな成果として高く評価され、TNOs の起源と進化について新しい知見を加えたものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者 Patryk Sofia Lykawka は、博士 (学術) の学位を得る資格があると認める。</p>	