

宇宙総合学研究ユニット

NEWS 2022年9月号



宇宙倫理学教育プログラム・前期の活動が終了しました！

宇宙倫理学教育プログラム（SEEP）が始まって最初の学期が終了しました。受講者たちは、ゼミに所属して自らの研究を進めながら、複数の必修科目と選択科目を受講して知識を広げています。以下、宇宙倫理学の入門講義とゼミについて、前期の様子を報告します。

まず、文学部の講義として SEEP 受講者以外も受けられるかたちで開講した「宇宙倫理学入門」ですが、予想以上に多くの履修希望があったため、教室を当初予定していたものより大きな部屋に変更して実施することとなりました。文学部の学部生を中心としつつも、理学部等の他学部生や大学院生を含む多様な参加者が席を並べる学際的な場となっていたのも印象的です。この講義では、最初に準備として倫理学理論と宇宙開発史の基礎知識について解説し、その後、宇宙倫理学のトピックを毎回 1 つずつ扱っていきました。最終的に提出された期末レポートは 43 件で、高水準な力作が多く、受講者たちの関心とレベルの高さがうかがわれました。

SEEP のために宇宙ユニットが独自に設置した「宇宙倫理学ゼミ」では、プログラム受講者 13 名が毎週集まり、それぞれの専門と関心に基づいた研究の進捗発表を行いました。今年度の受講者は、学内から学部生と大学院生が 5 名ずつ、学外から 3 名という構成ですが、まったく異なる知的背景を持つメンバーが集まったことで、毎回多様性に富んだ議論が交わされています。宇宙倫理学という新しい分野に挑戦する場であるため、ゼミ開始時にはいずれの受講者も初学者として手探りの段階から研究を始めることとなりましたが、それぞれの分野で豊富な経験と知識を持つ社会人受講者や大学院生のリードによって、さっそく興味深い発表とディスカッションが行われています。学部生も積極的に知識を広げながら、獲得しつつある各自の専門性を活かした研究を進めています。

後期（2022年10月～）は、「宇宙倫理学入門」に代わり「宇宙倫理学演習」が開講され、専門的な英語文献の読解と批判的ディスカッションの技法を学びます。「宇宙倫理学ゼミ」は通年開講で後期も継続します。前期で得た知識と経験をもとに、どのような発表や議論が行われるのか、今からとても楽しみです。

今後の宇宙学セミナー・関連イベントなど

日時	内容	開催方法
9月20日 午後3時～ ※スケジュール変更の可能性があるので、Webでご確認ください。	第6回宇宙学セミナー 講師：寺園淳也氏（ムーン・アンド・プラネット） 題名：（仮題） 「世界と日本の月探査・最新情報」	Zoomによるオンライン開催です。準備ができ次第、HPに掲載いたします。

※宇宙学セミナーの詳細は随時 Web ページ (<http://www.usss.kyoto-u.ac.jp/seminar/>) で公開いたします。

巨大天体衝突で天王星の衛星を作る！

佐々木 貴教

京都大学 宇宙物理学教室

天王星は太陽系の8惑星の中では一見マイナーな存在ですが、他の惑星と比べて非常に特異な姿をしており、研究者にとっては挑戦しがいのある魅力的な天体です。この天王星、およびその周りの衛星系の形成メカニズムについて、ここ数年で大きな研究の進展がありましたので、本稿ではその概要について紆余曲折の議論の過程も含めて簡単に紹介します。

「起」：太陽の周りを横倒して回る天王星系

天王星の最大の特徴は、衛星も含めた天王星系全体が公転軌道面に対し98度傾いた状態（つまりほぼ「横倒し」）で太陽の周りを回っていることです。巨大惑星が形成される過程では、自転軸は0度（つまり「直立」）に近い状態で成長することが期待されるため、天王星の自転軸を傾けるためには何か大きなイベントが必要となります。そこで先行研究で提案されてきたのが、天王星への巨大天体衝突（ジャイアントインパクト）です。

巨大天体衝突といえば地球の月の形成仮説として有名ですが、天王星が形成された環境においても天体同士の衝突が起こっていた可能性は高いと考えられています。90年代はじめ頃には天王星への巨大天体衝突の数値シミュレーションが行われ、地球サイズの天体が斜めに衝突することで実際に天王星の自転軸の傾きが説明できることが示されてきました。

「承」：巨大天体衝突で天王星の衛星は作れるか？

天王星への巨大天体衝突が起こると、天王星が横倒しになると同時に、赤道面付近に衝突によって生じた破片が円盤状にばらまかれることが予想されます。2010年代後半になると数値シミュレーションの解像度が大幅に上がり、この衝突破片の分布や量が計算によって求められるようになりました。その結果、

この衝突破片が重力で集まって大きくなることで、現在の天王星衛星系が形成される可能性があることがわかってきました（図1）。

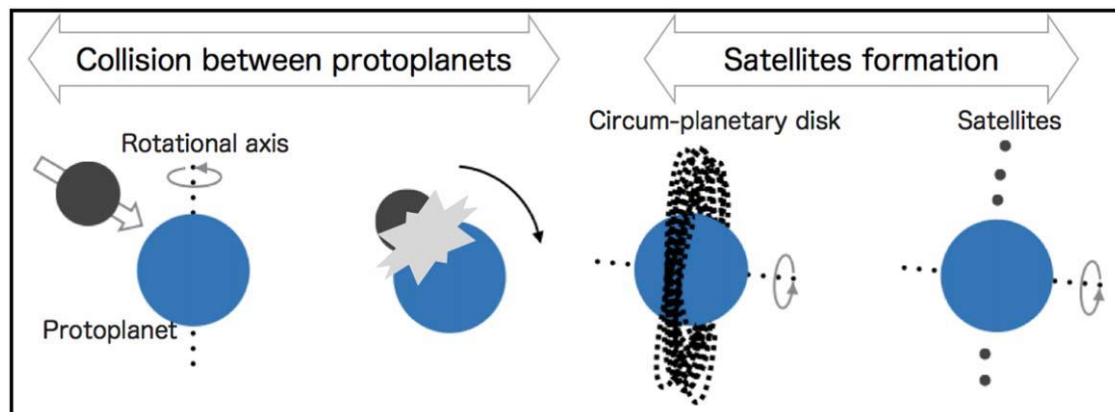


図1. 巨大天体衝突による天王星衛星形成の概念図。(Ishizawa et al., 2019)

原始惑星(protoplanet)同士の衝突により自転軸(rotation axis)が傾き、傾いた自転軸の周りに周惑星円盤(circum-planetary disk)がつかられ、その中で惑星が形成される。

そこで我々は、大量の天体同士の重力相互作用の計算を行う「N体計算」を用いて、衝突破片の集積による衛星形成過程に関する数値シミュレーションを行いました。しかし、残念ながら現在の天王星衛星系の特徴である「天王星から離れるほど衛星のサイズが大きくなる」という特徴を再現することはできませんでした。巨大天体衝突直後の破片分布をもとにN体計算の初期条件を作成したところ、天王星の近くほど破片の量が多く、より大きな衛星が形成されることになってしまったのです（Ishizawa et al., 2019）。

「転」：天王星周囲に形成された円盤は進化する！

これにて巨大天体衝突による天王星衛星形成の夢はついでたかに見えましたが、ここで我々はある重要な点を見落としていたことに気づきます。巨大天体衝突で天王星の周囲にばらまかれる「破片」は、もともと氷成分が主であるため、衝突直後にはほぼ全てが蒸発しているという点です。つまり、初期に天王星周囲に形成される円盤は氷破片からなる固体の円盤ではなく、水蒸気からなるガスの円盤なのです。円盤の温度が下がれば、いずれ水蒸気は凝縮して氷に戻りますが、その前にガス円盤が進化する可能性があります。

そこで、ガス円盤の拡散・冷却・凝縮過程を詳しく調べてみたところ、以下のような進化過程をたどることがわかりました（図2）。

- ① 巨大天体衝突直後に形成されるガス円盤は、非常に高温で質量も大きく、天王星から遠ざかるに従って密度が下がる分布をしている。
- ② ガス円盤は速やかに拡散し、内側で天王星に降着して質量を減らす一方、外側への拡散によって円盤の半径が広がっていく。外側の円盤ガスが薄い領域から先に温度が下がり、外側から氷が凝縮し始める。
- ③ 円盤ガスは引き続き拡散・降着により質量を減らしながら、外側から順に氷が凝縮していく。これにより、後から凝縮する領域ほど円盤の密度が小さくなった状態で氷円盤に変わることになる。

- ④ 最終的に形成される氷の固体円盤は、初期のガス円盤とは逆に、天王星から遠ざかるに従って密度が上がる分布となる。

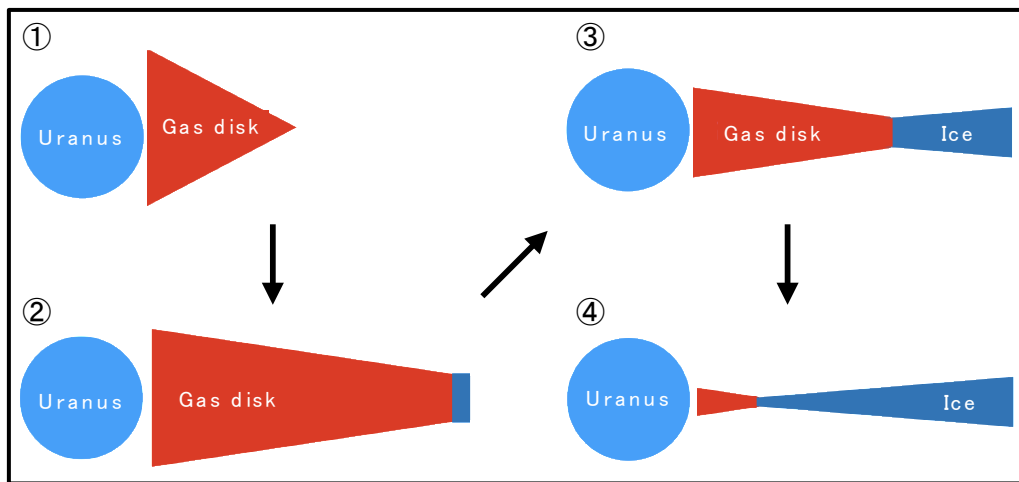


図 2. 巨大天体衝突後の円盤進化の概念図。

以上のとおり、巨大天体衝突によって天王星周囲に形成されたガス円盤は、熱力学的な過程を経て、全く逆の密度分布を持った氷円盤へと進化することがわかったのです (Ida et al., 2020)。

「結」(?) : 新しい天王星衛星形成シナリオ

さて、それでは天王星衛星の形成に再チャレンジです。円盤進化過程も考慮した初期条件のもとで、再び N 体計算によって衛星形成過程のシミュレーションを行いました。その結果、天王星衛星系の特徴である「天王星から離れるほど衛星のサイズが大きくなる」点を見事に再現することに成功しました (図 3)。

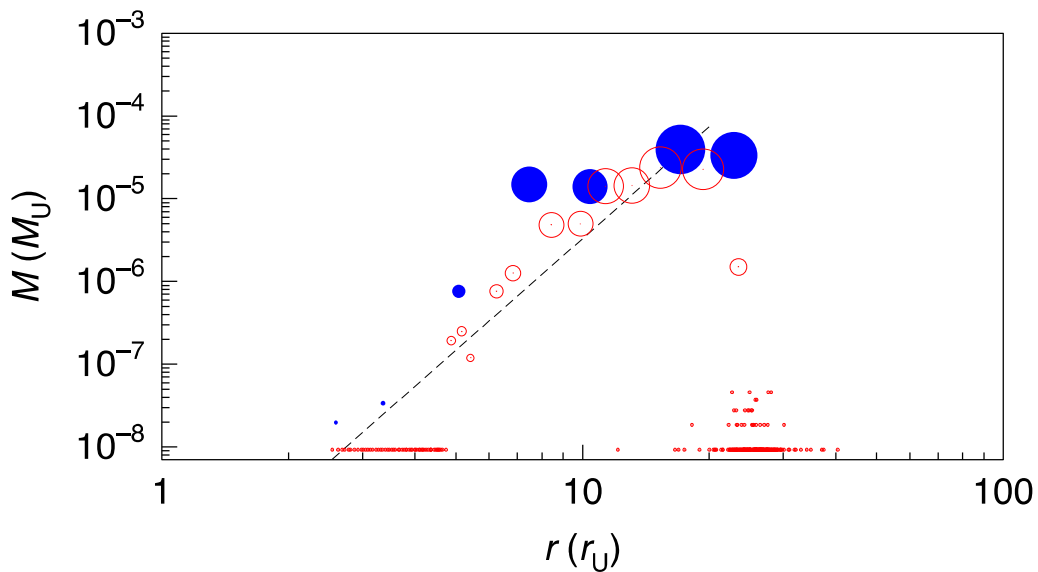


図 3. シミュレーション結果 (赤丸) と実際の天王星衛星 (青丸) の分布図。横軸は天王星からの距離、縦軸は衛星の質量。それぞれ天王星の半径・質量で規格化して示してある。(Ida et al., 2020)

ただし、この論文の中では N 体計算は 1 例のみしか行わなかったため、本シナリオの信頼度をより高めるためには、複数回の N 体計算を行って統計的な結果を示す必要がありました。そこで最後の詰めとして、想定される巨大天体衝突の物理条件の範囲内で、大量の N 体計算を行ってその結果を解析しました。これにより、新しい天王星衛星形成シナリオが完成する・・・はずでした。

しかし、宇宙はやはりそんなに甘くはありませんね。計算結果を解析したところ、天王星衛星系の大まかな特徴は再現できることが確認されたものの、その一方で新たな問題点がいくつも浮かび上がってきたのです。ここでは詳細は割愛しますが、これらの問題点の指摘とその解決案の提示について、論文としてまとめたものを現在投稿中です (Kihara et al., submitted)。

以上、天王星系の研究に関するここ数年間の一喜一憂をご紹介させていただきました。天王星とその衛星の起源解明への挑戦は、これからもまだまだ続きます。今後のさらなる研究の進展に、どうぞご期待ください。

参考論文：

- ・Yuya Ishizawa, Takanori Sasaki & Natsuki Hosono, Can the Uranian Satellites Form from a Debris Disk Generated by a Giant Impact?, *Astrophysical Journal* **885**, 132(10pp) (2019)
- ・Shigeru Ida, Shoji Ueta, Takanori Sasaki & Yuya Ishizawa, Uranian satellite formation by evolution of a water vapour disk generated by a giant impact, *Nature Astronomy* **4**, 880-885 (2020)
- ・Yodai Kihara, Takanori Sasaki & Shigeru Ida, N-body simulations of the formation process of Uranian satellites (submitted)

ホームページ：

Sasaki Takanori Online (<http://sasakitakanori.com>)

宇宙ユニットの活動やイベントについては、下記サイトをご覧ください。また、宇宙ユニットや本 NEWS に関する皆様のご意見等も気軽に下記メールアドレスまでお送りください。

京都大学 宇宙総合学研究ユニット

<https://www.usss.kyoto-u.ac.jp/>

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 507 号室

編集人：今井 慶悟 (宇宙ユニット RA)

Tel&Fax: 075-753-9665 Email: usss@kwasan.kyoto-u.ac.jp