

木星で超大型の衝突閃光現象を発見

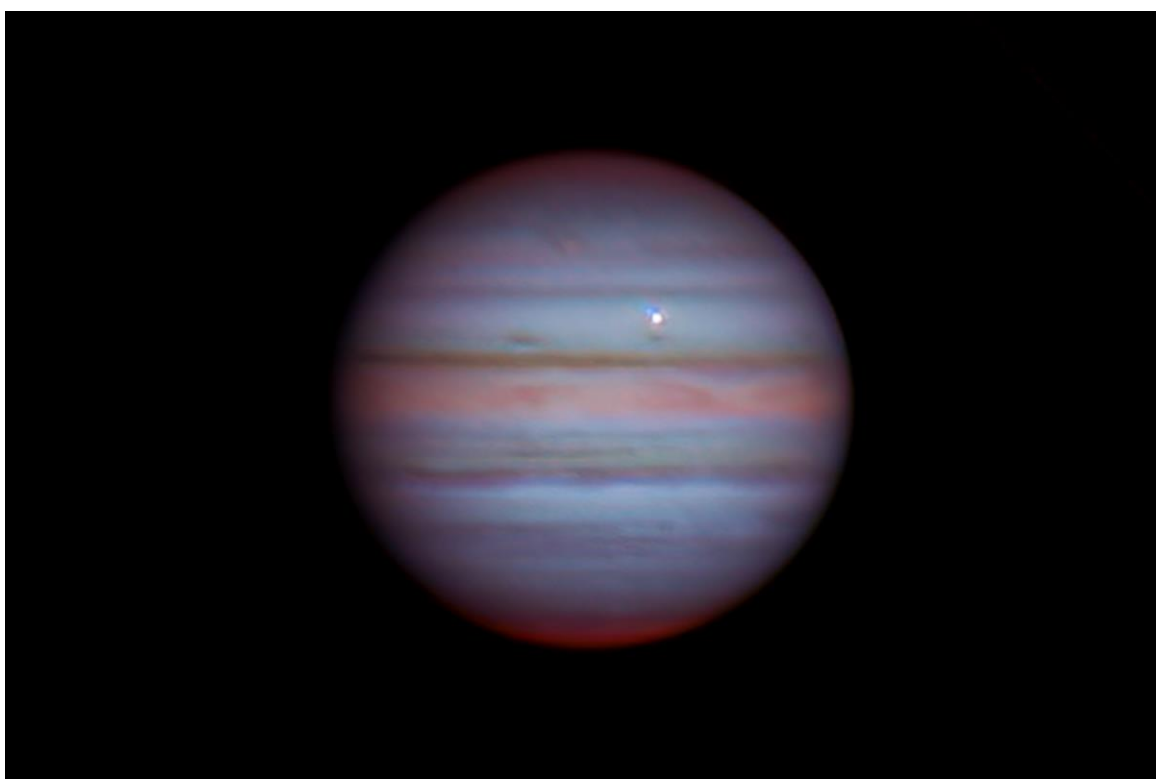
－京大のとある屋上の小さな望遠鏡による大発見－

概要

京都大学白眉センター 有松亘 特定助教を中心とする研究グループは、2021 年 10 月 15 日 22 時 14 分(日本時間)に、木星への小天体の衝突、すなわち木星大気圏突入による巨大閃光現象、『火球』^{※1}を発見しました。こうした衝突閃光はこれまで専用の観測装置による詳細な観測がなされたことがなく、閃光現象を『狙った』観測によって木星での衝突閃光の発見に成功したのは史上初めてです。

今回、京都大学吉田キャンパス施設屋上に設置した小型観測システム『PONCOTS(ポンコツ)』を使用し、史上最も詳細な衝突閃光の動画観測データの取得に成功しました。この動画データから、閃光を司る衝突によって放出されたエネルギーが過去に地上から観測された木星閃光現象と比較しても 10 倍程度大きく、1908 年に地球で発生した、『ツングースカ大爆発』^{※2}とよばれる小天体爆発のエネルギーに匹敵することが判明しました。今回の発見は、木星に衝突していると推定される太陽系外縁部の小天体が豊富に存在することを示唆し、さらに地球のような大気を持った天体への小天体衝突の際のリスクについて新たな知見を与えるものです。

本成果は、2022 年 9 月 13 日から新潟大学で開催される日本天文学会秋季年会で発表されます。また本成果については、2022 年 6 月 28 日にアメリカの国際学術誌「The Astrophysical Journal Letters」にオンライン掲載されました。



画像：京大屋上の望遠鏡 PONCOTS によって撮影された、2021 年 10 月 15 日の木星閃光(中央やや右上の輝点)。 Credit: 有松亘(京都大学)

1. 背景: 木星への天体衝突と『閃光』の謎

太陽系最大の惑星である木星は、その強大な重力によって周囲の小天体を引き寄せ、しばしば衝突を引き起こしています。1994 年にはシューメーカー・レヴィ第9彗星^{※3}が木星に衝突し、世界を驚かせました。さらに2010年以降、木星ではアマチュア天文家によって小天体の衝突に伴う発光現象(衝突閃光)が偶然発見されてきました。こうした衝突閃光を引き起こしているのは、太陽系の外縁部からやってくる、直径にして数 m から数 10m 程度の極めて小さな天体であると考えられています。太陽系形成時の『化石』とも言えるこうした外縁部の小天体群は、小さすぎて直接は観測できません。したがって、衝突閃光の観測は、これらの小天体が木星軌道付近にどの程度存在するのかを知る絶好の機会となります。また、数 10m サイズの小天体の衝突は木星ほどの頻度ではないものの、地球でもしばしば発生しています。地球での小天体衝突にともなう発光現象は『火球』として知られますが、過去にはこうしたサイズの火球にともない人的被害が発生することもありました。こうした火球のリスクを知るためにも、木星への天体衝突の観測は貴重な機会であると考えられています。しかし、衝突閃光は継続時間がせいぜい数秒という超短時間しか継続せず、かつ極めて稀な現象であり、地球上から観測された衝突閃光は全てアマチュア天文家の惑星動画観測^{※4}によって偶然発見されたものに限られていました。したがってこれまで閃光検出に特化した観測装置によって閃光が検出された例はなく、閃光の特性については不明な点が数多く残っていました。

2. 研究手法・成果: “ポンコツ”望遠鏡による木星閃光の発見と詳細観測成功

こうした状況を打破し、閃光観測の真価を見出すため、我々は短時間で発生する時間変動現象を観測することに特化した超小型観測システム、Planetary ObservatioN Camera for Optical Transient Surveys (PONCOTS: ポンコツ、図 2)を開発しました。PONCOTS は口径 0.28 m の市販の望遠鏡に3台の CMOS ビデオカメラを装着し、可視域で最大3波長での同時動画観測を実現する、移動可能な観測装置になります。この PONCOTS は太陽系外縁天体の観測を極めて小さな望遠鏡を用いて実現することを目指している、OASES プロジェクト^{※5}の一環として実施しているものです。なお PONCOTS を開発した2021年夏は新型コロナウイルス(COVID-19)の感染拡大のさなかだったこともあり、観測装置を遠方の観測地に移動させるのも出張するのも困難が多かった時期でした。したがって PONCOTS は完成後、京都大学吉田キャンパス(京都市左京区)の施設屋上に設置し、木星のモニタ観測を開始しました。

2021年10月15日、観測データを観測終了後にチェックしていて、動画内に閃光現象を発見しました。なお観測中にリアルタイムでデータを目視していたわけではなく、また閃光現象は肉眼では確認できるものではないため、閃光現象の瞬間には気が付いていませんでした。発見後、短文投稿 SNS である Twitter(https://twitter.com/OASES_miyako/status/1449028895454367757)で状況提供を募った結果、国内外で合計3人のアマチュア天文家(比嘉保信氏(沖縄県)、“yotsu”氏(愛知県)、および Victor PS Ang 氏(シンガポール))が同じタイミングで同じ閃光を観測していたことが判明しました。

閃光発生当時、PONCOTS はそれぞれ異なる波長の可視光線を検出する3台の CMOS カメラのうち2台が稼働していたため、閃光を2波長で観測することに成功しました。さらに画像に写りこんでいたゴースト像^{※6}を利用することで、これら2波長とは異なる、別の1波長での閃光の動画データを得ることに成功しました。計3波長で閃光の同時観測に成功したのは史上初めてのことです。3波長で取得された動画データを解析することで、木星衝突閃光がどういった『色』を持っており、発光エネルギーがどの程度であったのかについて、初めて詳細に明らかにすることができました。具体的には、今回発生した閃光は温度8000度の物体から放射される光と同じ色で輝き、地球から観測した見かけの明るさは最も明るいときでおよそ4.7等^{※7}であったこと

がわかりました。仮にこの閃光を発生地点直下の木星表面の雲の頂(閃光からの距離およそ 100 km)から観察していた場合、その明るさは地球から眺める太陽の見かけの明るさの 10 倍以上に達していたと推定されます。さらに今回の閃光はおよそ 5.5 秒継続して観測されていましたが、これは過去に観測された閃光(1-2 秒)と比べて大幅に長く、長時間にわたって多くのエネルギーが放出されていたことが示唆されます。これらの観測データからこの衝突によって放出された衝突天体の総運動エネルギーを推定した結果、TNT 火薬 2 メガトン^{※8}に相当することがわかりました。これは過去に地上から観測された衝突閃光と比べても 10 倍以上大きなエネルギーが放出されていたことになります。またこの衝突エネルギーは、2013 年にロシア連邦チェリャビンスク地方に落下した小天体^{※9}の運動エネルギーよりもおよそ 4 倍大きく、1908 年に発生した『ツングースカ大爆発』を引き起こした衝突天体の推定運動エネルギーに匹敵する規模になります。今回、この総運動エネルギーを基に、衝突天体の質量やサイズを推定することに成功しました。

今回の発見・観測から得られたシナリオは次のとおりです：

太陽系外縁部から飛来し、木星軌道付近に存在していた総質量 4000 トン、直径およそ 20-30m ほどの小天体(図 3)が木星の重力にとらわれたのち、2021 年 10 月 15 日に秒速 60 km の相対速度で木星大気圏に突入。周囲の大気を加熱して火球を作り出し、6 秒程度の時間をかけて猛烈な明るさの光を放ちながら分裂・昇華していった…。地球では過去 100 年以上目撃されていなかった規模の衝突の瞬間を、京大施設屋上の小さな望遠鏡は木星の表面に捉えていたのです。地球よりはるかに頻繁に小天体が衝突している木星であっても、これだけ大型の天体が衝突した瞬間が観測されたのは、1994 年にシューメーカー・レヴィ第 9 彗星が衝突して以来初めてになります。

2010 年に地球上から最初の木星閃光現象が発見されて以降、世界中のアマチュア天文家による木星の総観測時間はおおよそ 550 日間に相当すると推定されます。メガトン級の衝突閃光の観測は今回が初めてであることから、今回のような規模の天体衝突が木星表面ではおおよそ年に 1.3 回程度発生していると推定されます(図 4)。地球では同様の規模の天体衝突は 100 年から 1000 年に一回程度と推定されるため、木星では地球と比較して 100 倍から 1000 倍程度の頻度で、メガトン級の天体衝突が発生していることが判明しました。さらに今回得られたメガトン級衝突の発生頻度は、木星の衛星表面のクレーターの密度から推定される衝突頻度と比較しても 10 倍近く大きいものでした。したがって今回の閃光の発見は、太陽系外縁部には直径数 10 m のサイズをもった小天体が大量に存在し、それらが頻繁に木星に衝突していることを示唆しています。

PONCOTS による 3 波長動画観測データによって、今回観測された木星閃光は約 8000 度の物体から放射される光と同じ色で輝き、しかも時間変動を見せなかったという特徴を持っていたことがわかりました。これは地球で観測される火球の典型的な発光傾向とは大きく異なるものの、2013 年にロシア連邦チェリャビンスク地方に隕石が落下した際に観測された巨大な閃光や、1908 年のツングースカ大爆発を再現したシミュレーションなどで示唆される閃光の発光傾向とはよく似ているため、非常に興味深い結果です。すなわち、今回の木星衝突閃光は、大気を持った惑星で共通する、比較的巨大的な衝突時に発生する閃光の一般的な特性を捉えていることが示唆されます。ツングースカ大爆発時には、閃光のエネルギーによって爆心地周辺の木々が発火したとされているほか、一部人的被害も発生していた可能性が近年の研究によって示唆されています。今回の発見によって、地球のような大気を持った天体への小天体衝突の際のリスクを評価する上で今後の基準となりうる、衝突閃光に関する新たな知見を得たといえます。

3. 閃光観測のこれから

現在までのところ、PONCOTS の捉えた衝突閃光はわずか一例ですが、今後も観測を継続することで、さま

ざまな規模の閃光が検出され、木星表面にどの程度の頻度で小天体が衝突しているのかについて、より正確に知ることができると期待されます。また、木星以外の外惑星でも、頻度や規模の違いはあれ、同様に小天体の衝突閃光が発生していると推定されます。現在こうした外惑星への衝突閃光のモニタ観測も検討しており、木星でのモニタ観測の結果と総合することで、外部太陽系に潜む小天体の空間分布を解き明かすことができると期待されます。衝突閃光の観測的研究は、今回の PONCOTS の発見によって全く新しい段階に到達したといえます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究プロジェクトは有松 亘(ありまつ こう) 京都大学白眉センター/理学研究科 附属天文台・特定助教を筆頭著者とし、東京都市大学 津村耕司 准教授、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所 臼井文彦 主任研究開発員、国立天文台 渡部潤一 特任教授との共同研究として実施されました。また、日本学術振興会 科学研究費助成事業 (18K13606, 21H0115) の補助を受けて行われました。

<研究プロジェクト代表者、有松亘 白眉センター特定助教のコメント>

PONCOTS プロジェクトはコロナ禍で気軽に観測遠征ができない時に思いついたものです。高尚で気品のあるプロジェクト名をつけたところで、実際は中学生の時に望遠鏡とデジカメを使って木星を観測していたころと代わり映えがしないことをやっていました。結果として今回の発見につながりました。『バカなアイデアも上手くいけばすばらしいアイデアになる※6』とはよくいったものですが、20 年前からやっていることに進歩のない自分にはうんざりしますね。

<用語解説>

※1 火球：明るい流星(流れ星)のこと。流星は数 mm から数 cm のサイズを持った微小天体(惑星間塵)が大気圏に突入する際に見られる発光現象であるが、より大きなサイズをもった天体が突入する際にはより明るく発光し、火球として観測される。

※2 ツングースカ大爆発：1908 年 6 月 30 日(現地時間)にロシア帝国領(現・ロシア連邦)・シベリア地方を流れるポドカメンナヤツングースカ川付近で発生した、閃光と爆風を伴う爆発現象。のちに直径数 10m、総運動エネルギーにして数―数 10 メガトンに匹敵する天体の大気圏突入時に発生した爆発現象であることが判明した。

※3 シューメーカー・レヴィ第 9 彗星：1993 年にユージン・シューメーカー、キャロライン・シューメーカーおよびデイヴィッド・レヴィによって発見され、その後木星に衝突した彗星。この彗星は発見時には木星を周回する軌道を通っており、潮汐力によって直径 1 km から 50 m 程度のサイズをもつ、少なくとも 21 の破片に分裂していた。これらの破片は 1994 年 7 月 16 日から 22 日にかけて断続的に木星に衝突した。この衝突現象は事前に予報がなされたため、世界中の望遠鏡によって衝突の瞬間の観測がなされた。さらに衝突後には衝突地点付近に巨大な班点が観測され、当時大きな話題となった。

※4 アマチュア天文家の惑星動画観測：木星は、表面の雲が織りなす模様の変化を捉えることなどを目的に、

世界中のアマチュア天文家によって熱心な観測がなされている。多くの天文家は望遠鏡にビデオカメラを接続し、木星を動画で撮像している。これは地球大気による細かい時間スケールでの揺らぎの影響を避けるため、動画観測によって1フレームあたりの露光時間の小さい連続画像を多数取得し、後処理で1枚の画像に合成する手法をとっているためである。こうしたアマチュア天文家による日々の熱心な動画観測により、木星表面に偶然閃光が本発見以前に7例発見されてきたのである。

※5 OASES(オアシズ)プロジェクト：有松が中心となり2015年から実施している、小望遠鏡を用いて太陽系外縁部の解明を目指す観測プロジェクト(Organized Autotelescopes for Serendipitous Event Survey)である。2019年には沖縄県宮古島市に設置した口径0.28 mの小望遠鏡システム(OASES 観測システム)を用いた観測により、超大型望遠鏡でも直接観測不可能な、直径約1.3 kmの太陽系外縁天体を発見した。PONCOTSは、このOASES 観測システムを用いた沖縄離島での観測実施が新型コロナウイルスの感染拡大によって困難になったことにともない、代替の観測プロジェクトとして開始したものである。

・参考 OASES プロジェクトの主要観測成果に関する以前のプレスリリース url:
<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2019-01-29>

※6 ゴースト像：『ゴースト』とは、観測装置に光が入射したさいに、装置内部のレンズなどで設計意図とは異なる経路で光が反射・散乱することにより発生する、偽の像や模様のことを指す。PONCOTSではダイクロイックミラーと呼ばれる特殊なフィルターによって木星の光を波長ごとに分割し、多波長での観測を実現しているが、このダイクロイックミラー内の内部反射によって得られた画像内に木星のゴースト像が発生していた。このゴースト像を詳細に調べた結果、ゴーストはPONCOTSで観測していた2つの波長とは異なる波長の光によって生成されていることが判明した。今回2波長での観測を意図して3波長分の閃光データの取得に成功したのは、PONCOTSの光学系が『ポンコツ』であったがゆえに成し遂げた曲芸といえる。

※7 等級：天体の明るさを表す指標。等級が1小さいと、明るさがおよそ2.51倍明るくなることに相当する。肉眼で感知できる最も暗い天体の明るさはおよそ6等級である。したがって今回PONCOTSによって観測された閃光(約4.7等級)は、肉眼で感知できる明るさに達していたことになる。ただし木星本体が約-2.6等級(閃光の約800倍)の明るさを持っていることを考えると、実際には肉眼で閃光の輝きを認識することは不可能だったであろう。

※8 (TNT 換算)メガトン：爆発で放出されるエネルギーをトリニトロトルエン(TNT)の質量に換算して示している。1メガトンは100万トンであり、およそ 4.2×10^{15} J(ジュール)に相当する。人類史的に広く共有されている爆発事象を例にとると、1945年8月に広島に投下された原子爆弾による爆発で放出されたエネルギーは約0.015メガトンであり、今回発見された木星閃光の衝突エネルギー(2メガトン)はその100倍以上に相当する。なお、文中で『メガトン級』と表記する場合には、1—10メガトンに相当するエネルギーを指す。

※9 チェリャビンスク地方への小天体落下：2013年2月15日(現地時間)にロシア連邦チェリャビンスク地方にて、小天体の大気圏突入と空中爆発にともなって発生した衝撃波が原因となり、1000人以上の負傷者と大規模な物的損害をもたらした天体衝突災害。のちの解析により、大気圏突入前の小天体のサイズはおよそ19 m、総運動エネルギーは約0.45メガトンと推定されている。

※10 『バカなアイデアも上手くいけばすばらしいアイデアになる』: "It's a simple idea, but also stupid. Thing is, when stupid ideas work, they become genius ideas." — Andy Weir, *Project Hail Mary* (Ballantine Books, 2021)

< 本研究に関する学会講演 >

学会名: 日本天文学会 2022 年秋季年会

学会開催地: 新潟大学五十嵐キャンパス(新潟市西区)

講演番号および講演予定日時: P328a (2022 年 9 月 14 日 11:06)

タイトル: PONCOTS による木星での巨大衝突閃光現象の発見および詳細観測

発表者: 有松 亘(京都大学)

< 論文タイトルと著者 >

タイトル: Detection of an extremely large impact flash on Jupiter by high-cadence multiwavelength observations (高時間分解能・多波長観測による木星での超大型衝突閃光の検出)

著 者: Ko Arimatsu, Kohji Tsumura, Fumihiko Usui, Jun-ichi Watanabe

掲 載 誌: The Astrophysical Journal Letters DOI: 10.3847/2041-8213/ac7573

< 参考画像および動画 >

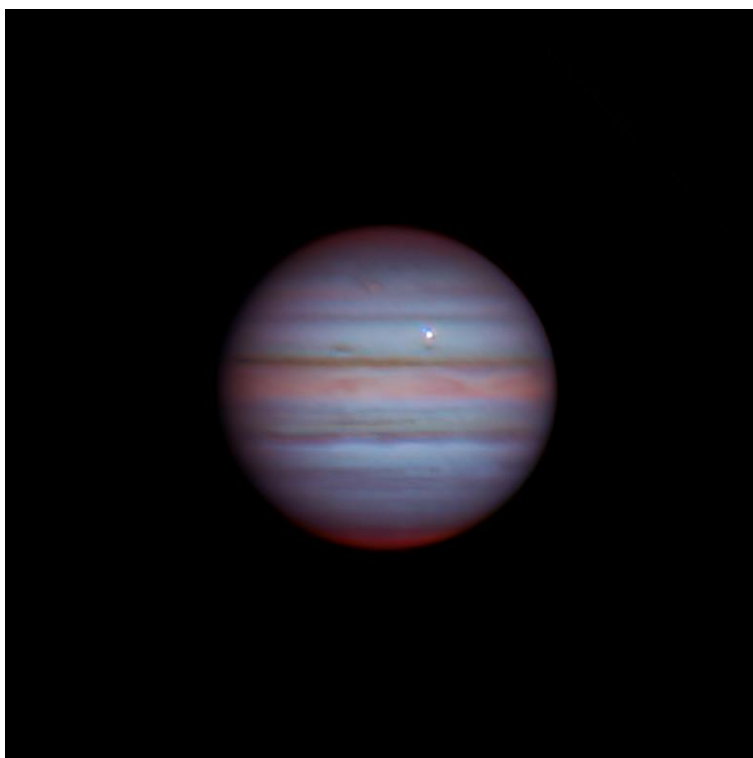


図 1. 京大屋上の望遠鏡 PONCOTS によって撮影された、2021 年 10 月 15 日の木星閃光(中央やや右上の輝点)。

Credit: 有松亘(京都大学)

動画 1. PONCOTS によって撮影された、2021 年 10 月 15 日の木星閃光(下記 YouTube リンク参照)

https://www.youtube.com/watch?v=jl_YQ7cXEJk

Credit: 有松亘(京都大学)



図 2. 京都大学吉田キャンパス某施設屋上に設置された、PONCOTS 観測システム(画像右)を用いて木星のモニタ観測をする様子。

Credit: 有松亘/AONEKOYA



図 3. 木星に衝突した天体の想像図。PONCOTS の観測から推定される、2021 年 10 月 15 日に木星に衝突した天体のおおよその大きさ(16-32 m)と、典型的な小型ジェット旅客機(ボーイング 737-800、全長およそ 40 m)とを比較している。

Credit: 有松亘/AONEKOYA

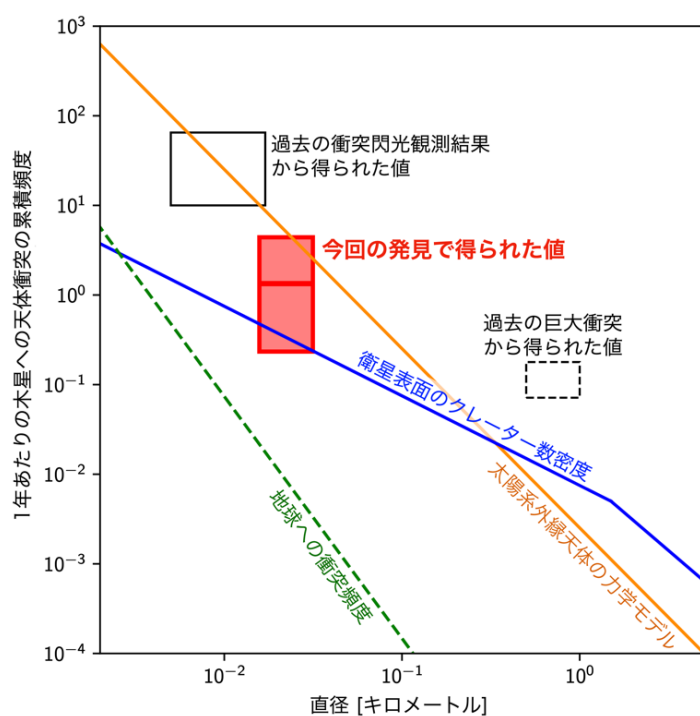


図 4. 今回の発見で明らかになった、木星への天体衝突頻度(赤領域の範囲、領域内の横線は最適値)を示すグラフ。横軸は衝突天体の直径、縦軸はその直径より大きなサイズ为天体が、1 年間で何回衝突しているのかを示す。過去の衝突観測(黒線および黒点線で囲まれた領域)では得られなかったサイズ領域の衝突頻度を史上初めて解明した。緑破線で示しているのは地球への衝突頻度。黄線は木星の衛星表面のクレーターの数密度から推定される木星への天体衝突頻度。青線は力学モデルから予想される太陽系外縁天体の衝突頻度。