

Na čem pracujeme: Odvození tvaru planetky Torifune: k ověření sondou Hayabusa

20.7.2026 - | Astronomický ústav AV ČR

Sluneční soustava kromě osmi planet zahrnuje celou řadu mnohem menších těles. O nich máme v drtivé většině případů pouze informace ze vzdálených pozorování, jen v několika málo případech byla tato tělesa navštívena sondami vyrobenými lidskou rukou. Proto například tvar je odvozován ze světelných křivek nebo radarových měření. Průlety sond umožňují mimo jiné verifikovat tvary odvozené na dálku a testovat tak spolehlivost rekonstrukčních metod. Takovým případem je i model blízkozemní planetky Torifune, kolem níž v červenci 2026 prolétla sonda Hayabusa2 v rámci své rozšířené mise. Autoři představovaného článku nejen zpřesnili její rotační parametry před přiletem sondy, ale především vyvinuli novou metodiku, která umožňuje lépe pracovat s nestejně kvalitními pozorováními a spolehlivěji odhadnout nejistoty výsledného modelu.

Planetky patří mezi nejstarší tělesa Sluneční soustavy a představují jakési fosilie z období jejího vzniku před více než 4,5 miliardy let. Přestože jich známe statisíce, pouze u nepatrného zlomku máme k dispozici detailní snímky z kosmických sond. Většina informací o jejich velikosti, tvaru či rotaci proto pochází z pozemních teleskopů. Astronomové sledují, jak se při rotaci planetky a také s ohledem na pozorovací geometrii mění její jas. Tyto světelné křivky obsahují překvapivě mnoho informací – z jejich průběhu lze matematickými metodami odvodit orientaci rotační osy i přibližný trojrozměrný tvar tělesa. Jde však o nepřímou metodu, jejíž spolehlivost je obtížné ověřit, protože skutečný vzhled planetky obvykle neznáme.

Výjimečnou příležitost představují případy, kdy se k planetce vydá kosmická sonda. Ta může pořídit snímky s rozlišením, které umožní přímo porovnat skutečný tvar tělesa s modelem vytvořeným ze světelných křivek. Takové příležitosti jsou velmi vzácné, a proto mají mimořádný význam nejen pro studium konkrétní planetky, ale také pro ověření samotné metodiky. Pokud se ukáže, že model vytvořený pouze z pozemských dat odpovídá realitě, získají odborníci větší důvěru v tisíce dalších modelů planetek, které nikdy zblízka nevyfotografujeme.

Právě takovým případem je blízkozemní planetka (98943) Torifune, která se stala prvním cílem rozšířené mise japonské sondy Hayabusa2. Šlo o mimořádně rychlý a těsný průlet: sonda minula planetku rychlostí přibližně 5 km/s a plánované největší přiblížení činilo asi 800 metrů od středu tělesa, jehož ekvivalentní poloměr se před průletem odhadoval na přibližně 460 metrů. Ještě před jejím průletem tým astronomů z Oddělení meziplanetární hmoty ASU vytvořil nový model rotace a tvaru planetky.

Studie navazuje na dřívější práce, které již určily základní rotační vlastnosti planetky Torifune, avšak využívá výrazně rozsáhlejší soubor pozorování. Autoři zkombinovali nejkvalitnější měření získaná mezi lety 2002 a 2025. Vedle dříve publikovaných světelných křivek zařadili také nově zveřejněná pozorování z roku 2024, vybraná data z automatické přehlídky oblohy ATLAS a především vlastní měření pořízená na dánském 1,54metrovém dalekohledu na observatoři La Silla v Chile během sedmi nocí na přelomu října a prosince 2025. Díky tomu získali nejen delší časovou základnu, ale zejména pozorování z nových směrů, z nichž byla planetka sledována. Právě rozmanitost pozorovacích geometrií je totiž rozhodující pro to, jak dobře lze rekonstruovat trojrozměrný tvar tělesa, nová pozorování vhodně doplnila starší pozorovací řady.

Samotná rekonstrukce využívá známou metodu inverze světelných křivek. Ta hledá takový tvar

planetky a orientaci její rotační osy, které co nejlépe reprodukuje pozorované změny jasnosti během rotace. Protože se však jednotlivé soubory dat výrazně liší kvalitou, přesností i četností měření, věnovali autoři velkou pozornost tomu, jak jednotlivá pozorování správně zohlednit při výpočtech. Na tom založili hlavní novinku práce, a to systém vážení jednotlivých měření. Místo toho, aby všechna pozorování měla stejnou důležitost nebo aby se slepě spoléhalo na formálně udávané chyby měření, autoři odhadovali váhu každého bodu podle několika kritérií. Ta zohlednila jednak vnitřní kvalitu (rozptyl) měření, tak hustotu pozorovaných bodů v čase a skutečnost, že přesnost fotometrických měření závisí také na okamžité jasnosti planetky. Toto umožnilo spojit pozorování s velmi rozdílnou kvalitou v použitelnou datovou sadu.

Neméně důležitou součástí práce je nový způsob odhadu nejistot výsledného modelu. V astronomii bývá běžné uvádět nejlepší nalezené hodnoty, ale mnohem obtížnější je určit, jak spolehlivé skutečně jsou. Autoři proto použili statistickou metodu zvanou blokový bootstrap. Namísto náhodného vybírání jednotlivých měření opakovaně vybírali celé světelné křivky jako samostatné bloky. Tím zachovali přirozenou strukturu dat i vzájemnou závislost jednotlivých měření během jedné pozorovací noci. Každá bootstrapová realizace navíc musela obsahovat alespoň jedno pozorování z každého období, kdy byla planeta sledována. Tím bylo zajištěno, že žádná simulace neztratí důležitou informaci o různých pozorovacích geometriích. Takto vygenerovali dva tisíce náhodných realizací pozorování, kdy na každém znovu provedli rekonstrukci rotačního stavu i tvaru planetky. Rozdělení odvozených hodnot pak přináší informace o nejistotě určených parametrů.

Výsledky ukazují, že rotační perioda planetky je dnes určena s mimořádnou přesností. Torifune vykoná jednu otočku za 5,0215221 hodiny a nejistota této hodnoty činí pouhé zlomky milisekund. Oproti předchozím studiím se přesnost dále zvýšila díky delšímu časovému intervalu pozorování i lepšímu pokrytí různých pozorovacích směrů. Velmi dobře se podařilo určit také orientaci rotační osy. Planetka rotuje ve stejném smyslu, jakým obíhá kolem Slunce, přičemž její rotační osa míří téměř k severnímu ekliptikálnímu pólu.

Podstatně složitější situace nastává při určování samotného tvaru planetky. Rekonstrukce ukazuje, že Torifune je zřetelně protáhlá. Poměr délek dvou nejdelších os je poměrně dobře určen, což znamená, že délku a šířku tělesa lze z dostupných dat odhadnout spolehlivě. Naproti tomu rozměr ve směru rotační osy zůstává výrazně nejistější. Jednotlivé bootstrapové modely připouštějí poměrně široký rozsah možných hodnot. Autoři podrobně vysvětlují, proč tomu tak je. Důvod neleží v nedostatku samotných dat, ale především v geometrii pozorování. Torifune obíhá po dráze s malým sklonem vůči rovině ekliptiky, a proto ji ze Země téměř nikdy nepozorujeme z výrazně odlišných směrů nad nebo pod jejími póly. Chybí tedy informace, které by umožnily přesně určit její výšku. Ani nová pozorování z roku 2025 tuto nevýhodu zcela neodstranila, přestože situaci významně zlepšila. Autoři navíc připomínají, že použitý model rekonstrukce připouští pouze tzv. konvexní modely, čili tvary bez kráterů nebo jiných prohlubní. Jejich přítomnost (jak ukázaly průletové snímky) situaci velmi komplikuje.

Autoři práci zveřejnili ještě před průletem sondy kolem planetky. Model vytvořený před průletem nesloužil jen jako teoretická předpověď pro pozdější porovnání, ale byl využit i při samotném plánování průletu sondy. Ze znalosti rotační periody, orientace rotační osy a předpokládaného tvaru bylo možné odhadnout, jak bude Torifune natočena v okamžicích před největším přiblížením, a naplánovat snímkování tak, aby sonda zachytila co největší část povrchu. Po zpracování dat bude možné testovat několik konkrétních předpovědí: zda světelná křivka naměřená sondou odpovídá určené orientaci rotační osy, zda je rotační fáze v čase průletu správně předpovězena, zda se shoduje celkové protažení tělesa a jak dobře odpovídá vnější obálka konvexního modelu skutečným obrysům planetky na snímcích. Právě rozdíly mezi modelem a skutečným tvarem pak ukážou, které informace lze ze světelných křivek spolehlivě získat a kde už se projeví omezení nepřímé rekonstrukční metody.

Průletové snímky, které ještě nebyly dokonale zpracovány, ukazují, že planetka je skutečně velmi protáhlá a svým tvarem připomíná spíše burský oříšek. Jedná se o takzvanou kontaktní binární planetku vzniklou pozvolným spojením dvou menších těles. Konvexní model tedy nemůže popsat skutečnost dostatečně dobře, pouze odpovídající vnější obálku tělesa.

Jde ale o důležitý experiment. Představuje jednu z mála příležitostí, kdy lze přímo porovnat model vytvořený výhradně z pozemských fotometrických pozorování s realitou zachycenou kosmickou sondou. Parametry modelu budou v následujících týdnech a měsících testovány proti skutečným pozorováním a pak se ukáže, jaké jsou hranice metody rekonstrukce tvarů a určování rotačního stavu planetek. V tomto směru představuje práce významný metodologický příspěvek, jehož přínos sahá daleko za studium jediné planetky. Kompletní přenos dat ze sondy by měl být dokončen do konce roku, takže podrobné porovnání modelu se skutečnými snímky bude možné až po jejich úplném zpracování.

P. Fatka, P. Pravec, P. Scheirich a kol., *Refined rotational state and shape model of (98943) Torifune ahead of the Hayabusa2# flyby*, Icarus (2026) v tisku, preprint arXiv:2607.03275

<https://www.asu.cas.cz/articles/2593/19/na-cem-pracujeme-odvozeni-tvaru-planetky-torifune-k-overeni-sondou-hayabusa>