

## Frekuensi Tumbukan Populasi Asteroid dekat-Bumi Berukuran Kecil terhadap Planet-Planet Kebumian

Wahyudin\*, Judhistira Aria Utama, Dadi Rusdiana

Departemen Pendidikan Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia

\*e-mail : wahyudinbonaparte@upi.edu

### ABSTRAK

Orbit asteroid dekat-Bumi (ADB) mudah berubah karena peristiwa papasan dekat dengan planet-planet kebumian yang sering dialaminya. Salah satu konsekuensi dari perubahan orbit asteroid adalah terjadinya peristiwa tumbukan antara asteroid dengan planet-planet kebumian. Penelitian ini memanfaatkan 2404 sampel ADB nyata berukuran kecil ( $D < 1$  km, dalam rentang  $18 < H < 29$ ) dengan orbit yang telah dikenal sangat baik. Perhitungan orbit selama  $5 \times 10^6$  tahun ke masa depan dilakukan dengan menggunakan paket integrator orbit *Swift\_RMVS4* yang telah dimodifikasi untuk dapat memperhitungkan pula gaya termal Yarkovsky. Langkah waktu perhitungan orbit dibuat sebesar 1/1000 tahun. Pada akhir komputasi orbit diperoleh fluks masuk sampel ADB ke zona pembuangan (menumbuk Matahari/planet dan terlempar ke luar Tata Surya dengan  $a > 100$  sa) sebesar 25 asteroid per tahun. Untuk memperoleh nilai probabilitas tumbukan intrinsik terhadap ADB berukuran kecil dengan planet-planet kebumian dalam penelitian ini digunakan nilai MOID (*Minimum Orbit Intersection Distance*) yang diperoleh melalui pendekatan geometri. Nilai rata-rata probabilitas tumbukan intrinsik yang diperoleh adalah  $5,12\text{E-}18$ ,  $2,31\text{E-}19$ ,  $9,89\text{E-}20$ ,  $6,64\text{E-}17$ , dan  $1,97\text{E-}19$   $\text{km}^{-2}$   $\text{tahun}^{-1}$ , masing-masing secara berturut-turut untuk planet Merkurius, Venus, Bumi, Bulan, dan Mars. Nilai-nilai ini bersesuaian dengan selang waktu antartumbukan dengan masing-masing planet tersebut (rata-rata) sebesar satu tumbukan setiap 164 tahun, 337 tahun, 655 tahun, 28 tahun, dan 2081 tahun. Selang waktu yang diperoleh ini jauh lebih singkat dari pada nilai yang dimiliki asteroid dekat-Bumi berukuran besar, sekaligus menunjukkan kesesuaiannya dengan hasil penelitian lain sebelumnya.

**Kata kunci** : Asteroid Dekat-Bumi, Frekuensi Tumbukan, MOID, Probabilitas Tumbukan Intrinsik

### ABSTRACT

The orbits of Near-Earth Asteroids (NEAs) are easy to change due to close encounters they suffer from terrestrial planets. One consequence of the orbit change is the collision between asteroids and terrestrial planets. This research utilized 2,404 real samples of small ( $D < 1$  km, in the range of  $18 < H < 29$ ) NEAs with well-known orbits. The integrator package of *Swift\_RMVS4* was employed for orbit computation into the next  $5 \times 10^6$  years, which has been modified to account for Yarkovsky thermal force. We used a computation time step of 1/1000 years for our purpose. We found that the entrance flux of small NEAs into the sinks (collided with the Sun/planets or being ejected to outer solar system with  $a > 100$  au) was  $\sim 25$  asteroids  $\text{year}^{-1}$ . To obtain the intrinsic collision probability of terrestrial planets with small NEAs, we used MOID (Minimum Orbit Intersection Distance) value from a geometrical approach. Our mean intrinsic collision probability results are  $5.12\text{E-}18$ ,  $2.31\text{E-}19$ ,  $9.89\text{E-}20$ ,  $6.64\text{E-}17$ , and  $1.97\text{E-}19$   $\text{km}^{-2}$   $\text{year}^{-1}$  for planet Mercury, Venus, Earth, Moon, and Mars, respectively. These values correspond with (average) one collision every 164 years, 337 years, 655 years, 28 years, and 2081 years for every respective body. These intervals between collisions of small NEAs with terrestrial planets are much higher than the ones of large NEAs and in agreement with previous results.

**Keywords** : Near-Earth Asteroids, Impact Frequency, MOID, Intrinsic Collision Probability

## PENDAHULUAN

Asteroid merupakan objek langit berukuran lebih kecil dari pada planet, namun lebih besar dari meteoroid dan tersebar di beberapa bagian Tata Surya. Asteroid-asteroid dengan jarak perihelion  $q < 1,3$  sa (sa = satuan astronomi, setara dengan 149.600.000 km yang menyatakan jarak rata-rata Bumi–Matahari) dan jarak aphelion  $Q > 0,983$  sa dikategorikan sebagai kelompok asteroid dekat–Bumi (ADB). Menurut definisi, ADB dibagi ke dalam 4 kelas, yaitu Apollo (setengah sumbu panjang  $a \geq 1,0$  sa dan  $q \leq 1,0167$  sa), Aten ( $a < 1,0$  sa dan  $Q \geq 0,983$  sa), Amor ( $a > 1$  sa dan  $1,0167 < q \leq 1,3$  sa), dan Atira ( $a < 1$  sa dan  $Q < 0,983$  sa) (Morbidelli & Michel, 2014). Bahkan pada awal Februari 2020 lalu sudah ditemukan asteroid pertama anggota kelas baru, yaitu Vatira (de la Fuente Marcos & de la Fuente Marcos, 2020), yang seluruh orbitnya berada di sebelah dalam orbit planet Venus ( $0,307$  sa  $< Q < 0,718$  sa) dan keberadaannya telah lama diprediksikan dari komputasi orbit.

Populasi ADB memiliki orbit yang mudah sekali berubah, salah satunya akibat papasan dekat yang dialaminya dengan objek-objek masif seperti planet-planet kebumihan dan Bulan. Tumbukan antara populasi ini dengan planet-planet kebumihan dapat berakibat fatal bagi kehidupan, seperti kepunahan masal K/T 65 juta tahun lalu (Bottke dkk., 2007), peristiwa Tunguska (Napier & Asher, 2009), maupun peristiwa Chelyabinsk (Brown dkk., 2013). Becermin dari peristiwa-peristiwa tumbukan yang terekam dalam sejarah Bumi, pengetahuan tentang frekuensi kejadian tumbukan menjadi relevan untuk diketahui. Johnson dkk. (2016), misalnya, mendapatkan  $\sim 7$  kejadian tumbukan ADB dengan Bumi setiap  $10^9$  tahun, sedangkan Nesvorný & Roig (2018) memperoleh fluks tumbukan sebesar  $\sim 1,1 \pm 0,5$  dalam rentang waktu yang sama untuk ADB berukuran besar ( $D > 10$  km). Menurut Nesvorný & Roig (2018), tingginya perolehan nilai fluks tumbukan ADB dengan Bumi yang diperoleh peneliti lain sebagai akibat bercampurnya sampel populasi ADB berukuran kecil dan besar. Padahal, ADB berukuran besar meskipun awalnya berasal dari kawasan sabuk utama asteroid seperti halnya ADB berukuran lebih kecil, diketahui menempuh jalur berbeda dalam evolusi orbitnya menuju kawasan dekat–Bumi, memiliki distribusi orbit yang juga berbeda, dan probabilitas tumbukan yang lebih rendah.

Studi atas populasi ADB berukuran kecil dengan diameter hingga  $\sim 20$  m ( $H \sim 27$ ) yang dilakukan Emel'yanenko & Naroenkov (2015) mendapati bahwa populasi ini bertumbukan dengan Bumi rata-rata 1x dalam 130–240 tahun. Hasil ini diperoleh dari analisis terhadap jarak papasan dekat yang terjadi antara populasi ADB dengan Bumi dari hasil komputasi orbit selama 600 tahun.

Salah satu cara alternatif dalam memperoleh frekuensi tumbukan antara dua objek dalam dua orbit heliosentrik adalah menggunakan nilai MOID (*Minimum Orbit Intersection Distance*), sebagaimana dapat dijumpai dalam sejumlah literatur (lihat misalnya, JeongAhn & Malhotra (2015, 2017); Rickman dkk. (2014, 2017); Fauziah dkk. (2019)). Melalui penggunaan nilai MOID, alih-alih membatasi diri hanya terhadap geometri orbit yang berpotongan, perhitungan frekuensi tumbukan dapat menyertakan pula konfigurasi orbit yang tidak berpotongan, yaitu selama nilai MOID kurang dari jarak minimum tertentu yang ditetapkan.

Berangkat dari uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk memperoleh frekuensi tumbukan antara populasi ADB berukuran kecil ( $D < 1$  km) dengan planet-planet kebumihan dan Bulan melalui simulasi numerik berdurasi panjang, dengan menerapkan metode baru dalam menghitung jarak minimum orbit untuk sepasang orbit heliosentrik (Wiśniowski & Rickman, 2013).

## METODE

Penelitian ini menggunakan metode simulasi numerik masalah N-benda (*N-body problem*). Data populasi sampel asteroid diperoleh dari laman <http://ssd.ipi.nasa.gov/sbdb-query.cgi>. Komputasi orbit dilakukan dengan memanfaatkan paket integrator Swift\_RMVS4 (Levison & Duncan, 1994) yang merupakan perbaikan dari *Mixed-Variable Symplectic* (MVS) yang dikembangkan oleh Wisdom & Holman (1991) dan telah dimodifikasi untuk dapat mengakomodasi pula gaya termal Yarkovsky (Dermawan dkk., 2013). Versi ke-4 dari *Regularized Mixed-Variable Symplectic* ini dapat menghitung peristiwa papasan dekat yang terjadi antara asteroid dengan objek-objek masif dengan lebih teliti dibandingkan versi sebelumnya.

Proses komputasi dijalankan menggunakan PC (*Processor Intel(R) Core(TM) i3-3240T CPU @2,90 GHz, RAM 4,00 GB, 64 bit*

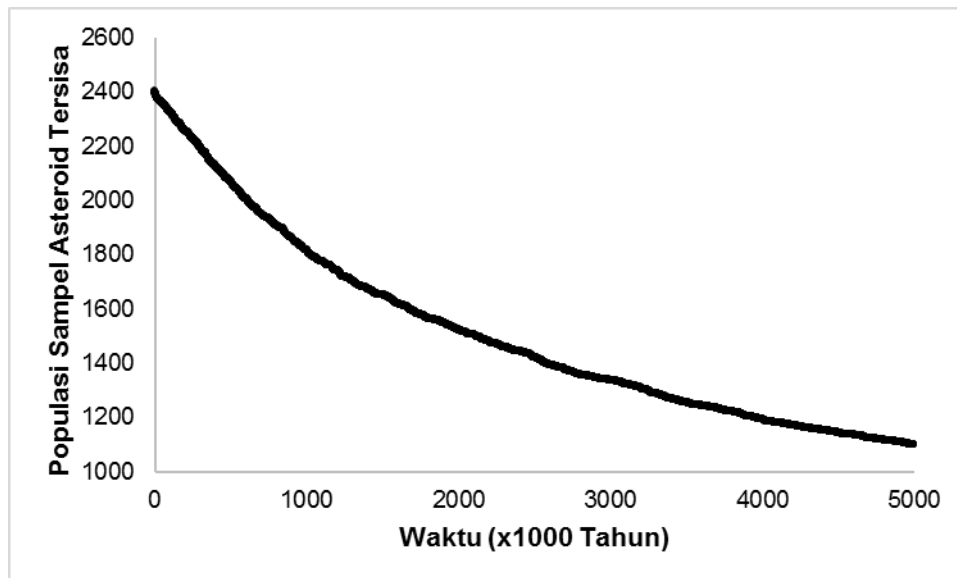
*operating system*) di Laboratorium Komputasi Departemen Pendidikan Fisika FPMIPA– Universitas Pendidikan Indonesia untuk 2404 sampel ADB nyata berdiameter  $D < 1$  km (bersesuaian dengan rentang  $18 < H < 29$ ), Matahari, kedelapan planet (Merkurius hingga Neptunus), dan Bulan selama  $5 \times 10^6$  tahun ke depan. Komputasi berjalan dengan langkah waktu 1/1000 tahun (~9 jam) dan hasilnya dicuplik tiap 1000 tahun. Dengan paket integrator yang digunakan, interaksi gravitasi hanya terjadi antarbenda masif dan antara benda masif dengan seluruh asteroid, sementara tidak terjadi interaksi antarasteroid.

Penyertaan gaya termal Yarkovsky selain gaya gravitasi berimplikasi pada diperlukannya informasi fisis, seperti radius, periode rotasi,

kepadatan *bulk*, kepadatan permukaan, konduktivitas termal, kapasitas termal, emisivitas, dan orientasi sumbu rotasi seluruh sampel asteroid. Ulasan lengkap tentang pentingnya pengaruh gaya termal Yarkovsky dalam komputasi orbit berdurasi panjang dapat dijumpai dalam Bottke dkk., (2006).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada akhir komputasi, diperoleh sebanyak 54% dari sampel awal ADB yang berakhir di zona pembuangan (menumbuk Matahari/planet atau terlempar keluar Tata Surya dengan  $a > 100$  sa). Grafik peluruhan populasi sampel ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Grafik peluruhan sampel ADB sepanjang durasi komputasi  $5 \times 10^6$  tahun.

Peluruhan sampel ADB yang terjadi dapat dihipotesiskan oleh fungsi eksponensial dalam Persamaan (1) berikut.

$$y = 2,1291e^{-1,5 \times 10^{-4}t} \quad (1)$$

Dari Persamaan (1) dan mengikuti pekerjaan Bottke dkk. (2002) diperoleh nilai rata-rata laju peluruhan fraksional dari Kawasan dekat-Bumi menuju zona pembuangan sebesar 0,1465 per juta tahun. Dengan memanfaatkan hasil pekerjaan Tricarico (2017), telah diestimasi jumlah ADB dengan  $D < 1$  km yang ada dalam rentang  $29 < H < 18$  sebanyak  $(1,69 \pm 0,02) \times 10^6$

asteroid, sehingga dapat ditentukan fluks–masuk ADB menuju zona pembuangan sebesar  $24,77 \pm 0,31$  asteroid.

Salah satu cara untuk mendapatkan nilai probabilitas tumbukan antara dua orbit heliosentrik adalah dengan memperkirakan laju tumbukan yang diamati secara langsung dalam simulasi numerik. Namun untuk menghindari permasalahan *small number statistics* dalam penelitian ini peristiwa tumbukan diidentifikasi dengan kriteria  $MOID < \text{Radius Hill}$  masing–masing planet (Galiazzo dkk., 2013).

**Tabel 1.** Nilai radius Hill yang digunakan untuk mengidentifikasi peristiwa papasan dekat.

Objek Target	Radius Hill (sa)
Merkurius	$1,47 \times 10^{-3}$
Venus	$6,74 \times 10^{-3}$
Bumi	$1,00 \times 10^{-2}$
Bulan	$4,10 \times 10^{-4}$
Mars	$7,23 \times 10^{-3}$

Mengacu kepada Galad (2005), frekuensi tumbukan di objek target oleh objek proyektil dinyatakan sebagai

$$f = N(<H)P_i R_C^2 \quad (2)$$

dengan  $R_C$  merupakan radius tangkapan gravitasi planet yang dihitung melalui persamaan

$$R_C = R \sqrt{1 + \frac{V^2}{v_\infty^2}} \quad (3)$$

Di dalam Persamaan (3)  $R$  menyatakan radius efektif planet,  $V$  kelajuan lepas dari permukaan planet, dan  $v_\infty$  kelajuan asteroid dalam orbit hiperbolik.

Sementara itu, distribusi jumlah kumulatif MOID untuk suatu jarak yang kurang dari  $d$  adalah sebanding dengan  $d^2$  (Díaz, 2008) dan dinyatakan sebagai

$$N(<d) = P_1 \times d^2 \quad (4)$$

Nilai  $P_1$  diperoleh dari hasil pencocokan kurva dengan fungsi kuadrat sederhana. Untuk  $n$  pasang objek target dan proyektil selama waktu integrasi  $T$ , dapat dihitung rata-rata probabilitas tumbukan intrinsik  $\langle P_i \rangle$  sebagai

$$\langle P_i \rangle = \frac{P_1}{nT} \quad (5)$$

Menggunakan Persamaan (2) dan (5), hasil yang diperoleh disajikan dalam Tabel 2.

**Tabel 2.** Nilai probabilitas tumbukan intrinsik dan frekuensi tumbukan.

Objek	$P_i$ (per km <sup>2</sup> per tahun)	$f$ (tumbukan per tahun)
Merkurius	$5,12 \times 10^{-18}$	$6,08 \times 10^{-3}$
Venus	$2,31 \times 10^{-19}$	$2,97 \times 10^{-3}$
Bumi	$9,89 \times 10^{-20}$	$1,53 \times 10^{-3}$
Bulan	$6,64 \times 10^{-17}$	$3,58 \times 10^{-2}$
Mars	$1,97 \times 10^{-19}$	$4,80 \times 10^{-4}$

Kebalikan dari nilai  $f$  tidak lain merupakan *collisional lifetime* (CLT), yaitu skala waktu yang dibutuhkan suatu proyektil untuk bertumbukan

dengan target tertentu. Nilai *collisional lifetime* asteroid untuk setiap planet kebumihan dan Bulan disajikan dalam Tabel 3.

Objek Target	CLT (tahun)
Merkurius	164,37
Venus	337,13
Bumi	654,68
Bulan	27,95
Mars	2081,30

**Tabel 3.** *Collisional lifetime* asteroid dengan setiap planet dan Bulan.

penelitian ini untuk ADB berukuran kecil ( $D < 1$  km) dan hasil yang diperoleh Nesvorný & Roig (2018) untuk ADB berukuran besar ( $D > 10$  km). Keduanya menunjukkan nilai frekuensi

Terlihat bahwa ADB berukuran kecil paling sering bertumbukan dengan Bulan dan paling jarang menumbuk planet Mars. Tabel 4 merangkum hasil yang didapat dari

tumbukan yang sangat berbeda. Hasil penelitian ini menguatkan keyakinan bahwa frekuensi tumbukan ADB berukuran kecil dengan planet-planet kebumihan jauh lebih sering daripada yang terjadi untuk ADB berukuran besar.

**Tabel 4.** Perbandingan jumlah tumbukan tiap  $10^9$  tahun.

Objek Target	Estimasi Tumbukan tiap $10^9$ tahun	
	Penelitian ini	Nesvorný & Roig
Merkurius	$6,08 \times 10^6$	-
Venus	$2,97 \times 10^6$	0,84
Bumi	$1,53 \times 10^6$	0,82
Bulan	$3,58 \times 10^7$	0,044
Mars	$4,80 \times 10^5$	0,42

Penelitian yang dilakukan oleh Fauziah dkk. (2019) mendapatkan 1 kejadian tumbukan untuk setiap  $10^7$  tahun antara asteroid berdiameter  $> 1$  km dengan Bumi. Dibandingkan dengan hasil yang diperoleh Emel'yanenko & Naroenkov (2015), nilai CLT untuk Bumi yang didapatkan dalam penelitian ini sekitar 3–5 kali lebih panjang, meskipun sampel ADB yang digunakan di dalam penelitian ini mencapai hingga  $H \sim 29$ . Analisis terhadap perbedaan yang muncul ini akan dilakukan dalam penelitian berikutnya yang akan menyertakan pembagian sampel ADB berukuran kecil dalam rentang diameter tertentu.

## PENUTUP

Peluruhan 2404 sampel ADB berukuran kecil ( $D < 1$  km) menghasilkan fluks–masuk dari kawasan dekat–Bumi ke zona pembuangan sebanyak  $24,77 \pm 0,31$  asteroid per tahun. Dari jumlah tersebut, diperkirakan terjadi rata-rata 1 tumbukan setiap  $\sim 164$  tahun,  $\sim 337$  tahun,  $\sim 655$  tahun,  $\sim 28$  tahun, dan  $\sim 2081$  tahun masing-masing secara berturut-turut dengan planet Merkurius, Venus, Bumi, Bulan, dan planet Mars. Penelitian ini menguatkan keyakinan bahwa tumbukan yang dialami planet kebumihan dengan ADB berukuran kecil terjadi lebih sering dibandingkan dengan ADB berukuran besar, sehingga estimasi frekuensi tumbukan populasi ADB dengan planet-planet harus dilakukan dengan memisahkan sampel berdasarkan ukurannya.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia dengan kontrak bernomor 429/UN40.D/PT/2020.

## DAFTAR PUSTAKA

Bottke, W. F., Morbidelli, A., Jedicke, R., Petit, J. M., Levison, H. F., Michel, P., & Metcalfe,

T. S. (2002). Debiased orbital and absolute magnitude distribution of the near-Earth objects. *Icarus*, 156(2), 399–433.

Bottke, W. F., Vokrouhlický, D., & Nesvorný, D. (2007). An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor. *Nature*, 449(7158), 48–53.

Bottke, W. F., Vokrouhlický, D., Rubincam, D. P., & Nesvorný, D. (2006). The Yarkovsky and YORP effects: Implications for asteroid dynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34, 157–191.

Brown, P. G., Assink, J. D., Astiz, L., Blaauw, R., Boslough, M. B., Borovička, J., Brachet, N., Brown, D., Campbell-Brown, M., Ceranna, L., Cooke, W., De Groot-Hedlin, C., Drob, D. P., Edwards, W., Evers, L. G., Garces, M., Gill, J., Hedlin, M., Kingery, A., ... Krzeminski, Z. (2013). A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature*, 503(7475), 238–241.

De La Fuente Marcos, C., & De La Fuente Marcos, R. (2020). On the orbital evolution of 2020 AV2, the first asteroid ever observed to go around the Sun inside the orbit of Venus. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 494(1), L6–L10.

Dermawan, B., Hidayat, T., & Utama, J. A. (2013). Pengembangan integrator swift\_rmvs4 dengan melibatkan efek termal. *Prosiding Seminar Himpunan Astronomi Indonesia*.

Díaz, C. G. (2008). *Collisional activation of asteroids in cometary orbits*. 367, 363–367.

Emel'yanenko, V. V., & Naroenkov, S. A. (2015). Dynamical Features of Hazardous Near-Earth Objects. *Astrophysical Bulletin*, 70(3), 342–348.

Fauziah, A. N., Utama, J. A., & Simatupang, F. M. (n.d.). *Jarak Minimum Orbit dan*

*Tumbukan Populasi Asteroid dekat-Bumi dengan Planet Bumi.*

- Galad, A. (2005). Probability of Subkilometer Asteroids with the Earth. *Contrib. Astron. Obs. Skalnat'e Pleso*, 35, 65–75.
- Galiazzo, M. A., Bazzó, Á., & Dvorak, R. (2013). Fugitives from the Hungaria region: Close encounters and impacts with terrestrial planets. *Planetary and Space Science*, 84, 5–13.
- JeongAhn, Y., & Malhotra, R. (2015). The current impact flux on Mars and its seasonal variation. *Icarus*, 262, 140–153.
- JeongAhn, Y., & Malhotra, R. (2017). Simplified Derivation of the Collision Probability of Two Objects in Independent Keplerian Orbits. *The Astronomical Journal*, 153(5), 235.
- Johnson, B. C., Collins, G. S., Minton, D. A., Bowling, T. J., Simonson, B. M., & Zuber, M. T. (2016). Spherule layers, crater scaling laws, and the population of ancient terrestrial impactors. *Icarus*, 271, 350–359.
- Levison, H. F., & Duncan, M. J. (1994). The Long-Term Dynamical Behavior of Short-Period Comets. In *Icarus* (Vol. 108, Issue 1, pp. 18–36).
- Morbidelli, A., & Michel, P. (2014). *Origin and Evolution of Near-Earth Objects Origin and Evolution of Near-Earth Objects*. July, 409–422.
- Napier, B., & Asher, D. (2009). The tunguska impact event and beyond. *Astronomy and Geophysics*, 50(1), 1.18-1.26.
- Nesvorný, D., & Roig, F. (2018). *Dynamical Origin and Terrestrial Impact Flux of Large Near-Earth Asteroids*. 42.
- Rickman, H., Winiowski, T., Wajer, P., Gabryszewski, R., & Valsecchi, G. B. (2014). Monte Carlo methods to calculate impact probabilities. *Astronomy and Astrophysics*, 569, 1–15.
- Rickman, H., Wisniowski, T., Gabryszewski, R., Wajer, P., Wójcikowski, K., Szutowicz, S., Valsecchi, G. B., & Morbidelli, A. (2017). Cometary impact rates on the Moon and planets during the late heavy bombardment. *Astronomy and Astrophysics*, 598, 1–15.
- Tricarico, P. (2017). The near-Earth asteroid population from two decades of observations. *Icarus*, 284, 416–423.
- Wisdom, J., & Holman, M. (1991). Symplectic Maps for the N-Body Problem. *The Astronomical Journal*, 102.
- Wiśniowski, T., & Rickman, H. (2013). Fast geometric method for calculating accurate Minimum Orbit Intersection Distances. *Acta Astronomica*, 63(2), 293–307.