

## Efek Relativitas Umum pada Evolusi Orbit Asteroid 1566 Icarus

E. Soegiartini<sup>1\*</sup>, I. Radiman<sup>1</sup>, dan S. Siregar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Astronomi, FMIPA – ITB, Bandung, Indonesia

\*Email: endang@as.itb.ac.id

### ABSTRAK

Efek Relativitas Umum pada proses integrasi numerik (Relativistik) untuk telaah evolusi orbit asteroid 1566 Icarus tidak bisa diabaikan, karena jarak perihelion asteroid 1566 Icarus lebih kecil dibanding jarak perihelion planet Merkurius, serta terdapat presesi perihelion akibat efek ini sebesar  $\lambda \approx 10''.073/\text{abad}$ . Dari hasil integrasi numerik terhadap evolusi orbit asteroid 1566 Icarus, tidak ada indikasi bahwa asteroid 1566 Icarus akan masuk dan menumbuk Matahari atau planet dalam, tetapi juga tidak ada indikasi untuk lepas dari sistem Tata Surya kita. Untuk rentang integrasi sebesar 100.000 tahun ke depan dan ke belakang dari epoch 2455200.5 (4 Januari 2010), efek relativitas umum memberi pengaruh terhadap jumlah kejadian papasan dekat asteroid 1566 Icarus dengan empat buah planet-dalam (yaitu Merkurius, Venus, Bumi, dan Mars), serta menunda waktu kejadian papasan dekat untuk pertama kalinya (sekitar 3.471336 menit dan 54.331668 menit). Secara kualitatif, tidak ada perbedaan trend antara evolusi orbit asteroid 1566 Icarus untuk model Relativistik dan model Newtonian, tetapi secara kuantitatif, perbedaan trend tersebut ada.

**Kata Kunci:** Asteroid 1566 Icarus – Evolusi orbit – Efek Relativitas Umum

### 1 PENDAHULUAN

Asteroid 1566 Icarus merupakan salah satu NEA (Near Earth Asteroid) atau asteroid dekat Bumi dari kelompok Apollo, yaitu kelompok asteroid dengan orbit memotong orbit Bumi. Dengan eksentrisitas orbit yang tinggi,  $e \approx 0.827$  dan setengah sumbu panjang orbit  $a \approx 1.078$  AU, maka 1566 Icarus memiliki perihelion  $q = 0.186$  atau lebih kecil dari  $q_{\text{Merkurius}}$  (0.3075 AU), sedangkan aphelionnya  $Q = 1.969$  AU, yang lebih besar dari  $Q_{\text{Mars}}$  (1.6659 AU). Konsekuensinya adalah asteroid 1566 Icarus merupakan asteroid pelintas orbit Merkurius, Venus, Bumi, dan Mars.

Dengan jarak perihelion yang kecil dan periode orbit terhadap Matahari yang pendek ( $P \approx 1.119$  tahun), membawa konsekuensi bahwa asteroid 1566 Icarus merupakan objek spesial setelah Merkurius yang memiliki efek relativitas, di mana efek ini tidak boleh diabaikan dalam analisis evolusi orbitnya, terutama untuk rentang waktu integrasi panjang (lebih dari 100 ribu tahun)

### 2 EFEK RELATIVITAS UMUM

Asteroid 1566 Icarus merupakan benda langit kedua setelah planet Merkurius yang diketahui dari data pengamatan bahwa perihelionnya mencerminkan efek Relativitas Umum (Sitarski, 1982). Lieske dan Null (1969), dan Shapiro et al. (1971) mendapati efek Relativitas Umum pada gerak asteroid 1566 Icarus dari perhitungan secara numerik. Perhitungan terhadap gerak asteroid 1566 Icarus menunjukkan bahwa persamaan gerak N-benda yang memperhitungkan efek Relativitas Umum, akan menggambarkan gerak planet yang

lebih baik dibandingkan dengan persamaan Newton. Oleh karena itu, persyaratan relativistik pada persamaan gerak N-benda pada penyelidikan gerak planet minor (asteroid) harus diikutsertakan. Dari persamaan yang dikemukakan oleh Zhang, et al. (1989), di mana presesi perihelion akibat efek relativitas umum mengikuti:

$$\lambda = \frac{3.841}{(1-e^2)aP}, \quad (1)$$

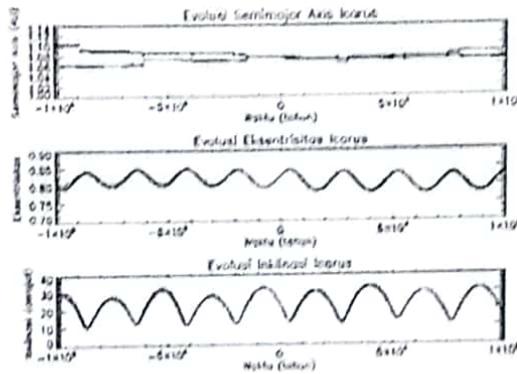
dengan  $\lambda$  dinyatakan dalam detik-busur/abad,  $e$  adalah eksentrisitas orbit,  $a$  merupakan setengah sumbu panjang orbit (dalam AU), dan  $P$  adalah periode orbit planet (dalam tahun), maka  $\lambda = 10''.073/\text{abad}$ .

Integrasi numerik dilakukan dengan menggunakan integrator Mercury\_6 (Chambers, 1999) dengan algoritma Bulirsch-Stoer. Sebagai benda pusat adalah Matahari, dengan 8 buah planet pengganggu yaitu Merkurius hingga Neptunus, serta asteroid 1566 Icarus sebagai benda yang diintegrasikan. Integrasi numerik dilakukan untuk rentang waktu integrasi sejauh 100 ribu tahun, dengan integrasi maju dan mundur dari epoch 2455200.5 (4 Januari 2010), atau JDT -34803576.5 hingga 38246423.5. Step size integrasi adalah 0.5 hari, dengan parameter akurasi  $10^{-12}$ , serta hanya memperhitungkan efek papasan dekat. Papasan dekat didefinisikan bila jarak antara asteroid 1566 Icarus dengan sebuah planet tidak melebihi 3 Radius Hill (Cuntz dan Yeager, 2009).

### 3 EVOLUSI ORBIT 1566 ICARUS

Evolusi orbit asteroid 1566 Icarus untuk rentang waktu 100 ribu tahun, dengan integrasi

maju dan mundur dari epoch 2455200.5 (4 Januari 2010) dikerjakan untuk 2 kasus berbeda, yaitu kasus Newtonian dan kasus Relativistik yang mengikutsertakan efek Relativitas Umum. Dari evolusi orbit 1566 Icarus, terlihat adanya perbedaan jejak evolusi asteroid 1566 Icarus antara kedua kasus tersebut, ditunjukkan oleh Gambar 1.



Gambar 1. Perbandingan evolusi elemen orbit asteroid 1566 Icarus untuk kasus klasik (garis hitam) dan untuk kasus relativistik (garis ungu).

Garis yang berwarna hitam menunjukkan jejak evolusi orbit asteroid 1566 Icarus untuk kasus Newtonian, sedangkan garis berwarna ungu menunjukkan jejak evolusi untuk kasus Relativistik. Terlihat perbedaan jejak evolusi semimajor axis, eksentrisitas, serta inklinasi, tetapi baik pada kasus Newtonian maupun Relativistik, terdapat lompatan nilai pada elemen-elemen orbit 1566 Icarus tersebut yang disebabkan oleh adanya peristiwa papasan dekat antara asteroid tersebut dengan 4 buah planet-dalam.

Dinamika benda-benda di kawasan dekat Bumi (NEO) sangat dipengaruhi oleh peristiwa papasan dekat (*close-encounter*) dengan planet-planet, dan setiap papasan dekat yang terjadi memberikan kecepatan dorong untuk lintasan benda (memperlambat atau mempercepat), yang menyebabkan harga semimajor axis 'melompat'.

Perubahan semimajor axis berkorelasi dengan perubahan eksentrisitas dan inklinasi yang dapat dinyatakan dengan parameter Tisserand, relatif terhadap planet Jupiter yang berpapasan dengannya (Opik, 1976).

Untuk orbit benda dengan semimajor axis  $a$ , eksentrisitas  $e$  dan inklinasi  $i$ , yang relatif mengorbit benda bermassa besar, tunduk pada mekanisme Kozai  $H_{Kozai}$  berikut :

$$H_{Kozai} = \sqrt{a(1-e^2)} \cos i \tag{2}$$

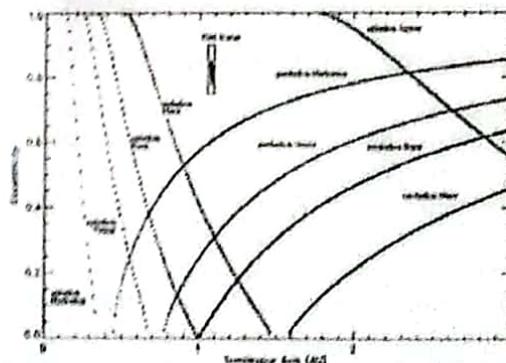
yang dikenal sebagai mekanisme Kozai (Kozai, 1962), yang merupakan gangguan sekuler planet pada asteroid. Efek Kozai pada dasarnya diperlukan untuk mempertahankan momentum sudut selama asteroid mengorbit. Momentum sudut dapat memanifestasikan dirinya sebagai eksentrisitas orbit atau inklinasi orbit, di mana berkurangnya eksentrisitas akan diimbangi dengan bertambahnya inklinasi, begitu pula sebaliknya. Nilai  $H_{Kozai}$  cenderung konstan. Mekanisme Kozai menyebabkan pertukaran periodik antara sudut inklinasi dan eksentrisitas, sehingga dapat menyebabkan terjadinya librasi (osilasi di sekitar nilai konstan) pada argumen perihelion  $\omega$ .

Bentuk lain dari mekanisme Kozai adalah parameter Tisserand. Parameter Tisserand adalah sebuah besaran dinamik yang dipertahankan selama proses pertemuan antara planet dan benda antarplanet (asteroid), dan merupakan sebuah cara untuk menghubungkan sifat dinamik pasca-pertemuan dengan pra-pertemuan, dan dari parameter Tisserand, dapat diprediksi kecepatan relatif asteroid ketika melintas orbit planet. Parameter Tisserand dinyatakan dengan persamaan:

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2\sqrt{\frac{a(1-e^2)}{a_J}} \cos i, \tag{3}$$

di mana  $a_J$  adalah semimajor axis planet Jupiter. Chamberlin (2007) menyatakan bahwa  $T_J = 3$  berlaku untuk objek dengan  $a = a_J, e = 0, i = 0$ . Benda-benda yang terikat oleh Jupiter (sebagian besar adalah asteroid), biasanya memiliki tipe  $T_J > 3$ , yaitu benda-benda yang berada di dalam orbit Jupiter, dan mereka bukan merupakan benda-benda pelintas orbit Jupiter (Weissman et al. 2002).

Gambar 2 menunjukkan posisi 1566 Icarus terhadap batas daerah pelintas planet. Terlihat bahwa 1566 Icarus bukanlah pelintas orbit Jupiter,



Gambar 2. Kurva batas daerah pelintas orbit planet. Asteroid 1566 Icarus menempati suatu daerah relatif terhadap semimajor axis planet dalam.

tetapi pelintas orbit Merkurius, Venus, Bumi, dan Mars. Dengan demikian, diyakini bahwa 1566 Icarus berasal dari sabuk asteroid, dan bukan merupakan asteroid *comet-like* atau pun hasil migrasi dari objek luar.

4 PERISTIWA PAPASAN DEKAT

Terdapat perbedaan jumlah dan waktu peristiwa papasan dekat antara kasus Newtonian dan Relativistik, yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Jumlah peristiwa papasan dekat asteroid 1566 Icarus dengan 4 planet dalam, antara kasus klasik dan relativistik.

Planet	Newtonian	Relativistik
Merkurius	14	9
Venus	65	87
Bumi	171	154
Mars	53	48
Total	303	298

Peristiwa papasan dekat yang terjadi untuk pertama kalinya baik pada kasus Newtonian maupun kasus Relativistik adalah dengan planet Bumi untuk integrasi maju, dan dengan planet Mars untuk integrasi mundur.

Untuk integrasi maju, peristiwa papasan dekat yang pertama kali terjadi adalah dengan planet Bumi, dan pada kasus Relativistik terjadi pada 97.1819248 tahun setelah epoch 2455200.5 (4 Januari 2010) dengan jarak 0.02989142 AU atau sekitar 4,471,692.784 km, sedangkan untuk kasus Newtonian, terjadi pada 97.1819182 tahun setelah epoch 2455200.5 (4 Januari 2010) dengan jarak 0.02989368 AU atau 4,472.030.875 km. Dengan demikian peristiwa papasan dekat untuk kasus Newtonian lebih cepat sekitar 0.0000066 tahun atau sekitar 3.4713360 menit dibanding untuk kasus Relativistik, dengan selisih jarak sekitar  $2.2 \times 10^{-6}$  AU atau sekitar 339 km. Sedangkan untuk integrasi mundur, peristiwa papasan dekat yang pertama kali terjadi adalah dengan planet Mars: untuk kasus Relativistik terjadi pada 880.3568258 tahun sebelum epoch 2455200.5 (4 Januari 2010) dengan jarak 0.01433958 AU atau 2,145,170.635 km, dan untuk kasus Newtonian terjadi pada 880.3567225 tahun sebelum epoch 2455200.5 (4 Januari 2010) dengan jarak 0.01377893 AU atau 2,061,298.588 km. Dibandingkan dengan kasus Newtonian, peristiwa papasan dekat untuk kasus Relativistik dengan integrasi mundur, tertunda sekitar 0.0001033 tahun atau 54.331668 menit, dengan selisih jarak sekitar  $5.6 \times 10^{-4}$  AU atau 84,000 km.

Pola peristiwa papasan dekat antara asteroid 1566 Icarus dengan planet-dalam, baik untuk kasus Newtonian maupun Relativistik sulit dibedakan, terutama secara kuantitatif, karena itu, penyelidikan dilakukan dengan memanfaatkan teknik DFT (*Discrete Fourier Transform*), yaitu transformasi Fourier yang memetakan deret waktu ke dalam deret frekuensi (amplitudo dan fase), yang dinyatakan sebagai:

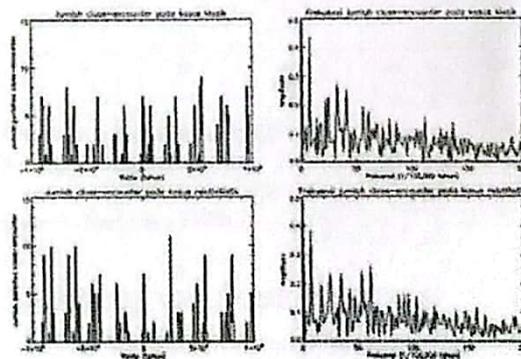
$$F(n) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) e^{-2\pi i n k / N} \tag{4}$$

Dengan membuat selang waktu kejadian papasan dekat sebesar 500 tahun untuk rentang waktu integrasi 100 ribu tahun dengan integrasi maju dan mundur dari epoch 2455200.5 (4 Januari 2010), dan menerapkan *Kolmogorov-Smirnov test statistic* (Chakravarti et al. 1967) yang didefinisikan dengan persamaan 5 berikut:

$$D = \max \left( F(Y_i) - \frac{i-1}{N}, \frac{i}{N} - F(Y_i) \right), \tag{5}$$

di mana  $F$  adalah distribusi kumulatif secara teori dan distribusi sampel yang akan diuji,  $Y_i$  adalah variabel yang merupakan frekuensi kejadian,  $i$  adalah kejadian ke- $i$  yang terjadi, dan  $D$  merupakan simpangan antara model teoritik dengan pengamatan. Diperoleh histogram dan frekuensi peristiwa papasan dekat antara asteroid 1566 Icarus dengan 4 buah planet-dalam, baik untuk kasus Newtonian maupun kasus Relativistik pada Gambar 3.

Nilai  $D$  untuk tes *Kolmogorov-Smirnov* bagi sistem ini, adalah  $D = 0.0268204$ , dengan *probability Kolmogorov-Smirnov test* = 0.999037, sementara nilai kritis untuk tes *Kolmogorov-Smirnov*  $D_{kritis} = 0.061$ . Dengan demikian, nilai  $D$



Gambar 3. Histogram dan frekuensi peristiwa papasan dekat antara asteroid 1566 Icarus dengan 4 buah planet-dalam, baik untuk kasus klasik maupun kasus relativistik.

di atas diterima, dan ini berarti bahwa peristiwa papasan dekat antara asteroid 1566 Icarus dengan 4 planet-dalam, baik kasus Newtonian maupun Relativistik adalah sama.

## 5 PENUTUP

Secara global, evolusi elemen orbit asteroid 1566 Icarus stabil untuk rentang waktu sejak 100,000 tahun, sebelum dan sesudah waktu 0 (epoch 2455200.5 JD atau 4 Januari 2010).

Asteroid 1566 Icarus merupakan Mercury, Venus, Earth, and Mars crossing object, tetapi bukan merupakan asteroid Jupiter - crossing object.

Tidak ada perbedaan evolusi elemen orbit 1566 secara kualitatif antara kasus Newtonian dan Relativistik.

## 6 PUSTAKA

- Chakravarti, I. M., Laha, R. G., & Roy, J. 1967, *Handbook of Methods of Applied Statistics, Vol. 1: Techniques of Computation, Descriptive Methods, and Statistical Inference*, John Wiley & Sons, Inc., New York
- Chamberlin, A. B. 2007, Comet and Asteroid Orbital Element Distribution, NASA JPL Solar System Dynamics <[http://ssd.jpl.nasa.gov/?dist\\_ae\\_sb](http://ssd.jpl.nasa.gov/?dist_ae_sb)>, diunduh pada 26 Juni 2010
- Chambers, J. E. 1999, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 304, 793-799
- Cuntz, M. & Yeager, K. E. 2009, *Astrophys. J.*, 697, L86-L90
- Kozai, Y., 1962, *Astron. J.*, 67, 591-598.
- Lieske, J. H. & Null, G. W. 1969, *Astron. J.*, 74 (2), 297-307
- Opik, E. J., 1976, *Science*, 194 (4265), 609-610
- Shapiro, I. I., Smith, W. B., Ash, M. E., & Herrick, S., 1971, *Astron. J.*, 76 (7), 588-606.
- Sitarski, G., 1992, *Astron. J.*, 104 (3), 1226-1229
- Weissman, P. R., Bottke, W. F. Jr, & Levison, H. F., 2002, Evolution of Comets into Asteroids, in *Asteroids III*, (eds. W. F. Bottke Jr. et al.), Univ. of Arizona Press, Tucson, 669-686
- Zhang, J. X., Yang, J. X., & Wu, Y. Z., 1989, *Ch. A. & A.*, 13, 69-72