



Dinamika Orbit Asteroid Atira untuk Kasus Newtonian dan Post Newtonian

A S Hutasoit, E Soegiartini, dan M Rezky

Program Studi Astronomi, Institut Teknologi Bandung

Abstract. Studi dinamika orbit asteroid masih terus dipelajari. Astroid atau planet minor adalah benda-benda kecil dengan ukuran kurang dari 1000 km yang mengorbit Matahari serta sebagian besar berada diantara orbit Mars dan Jupiter. Tetapi ada kelompok asteroid yang orbitnya membuat dia dekat dengan Bumi, disebut sebagai Asteroid Dekat Bumi (ADB), yaitu jika jarak terdekat dengan Matahari atau jarak perihelionnya $q < 1.3 au$. Terdapat 4 kelompok ADB, yaitu Amor, Apollo, Aten, dan Atira. Amor memiliki setengah sumbu panjang orbit $a > 1.0 au$ dengan $1.017 au < q < 1.3 au$, Apollo memiliki $a > 1.0 au$ dengan $q < 1.017$, Aten memiliki $a < 1.0 au$ dengan jarak terjauh dari Matahari atau jarak aphelion $Q > 0.983$, dan Atira memiliki $a < 1.0 au$ dan $Q < 0.983 au$. Pada penelitian ini, kami hendak mempelajari dinamika orbit asteroid Atira. Analisis terhadap dinamika orbit asteroid Atira kami dasarkan pada Mekanika klasik atau Mekanika Newton, dengan melibatkan Matahari sebagai bintang pusat, 8 buah planet pengganggu yaitu Merkurius, Venus, Bumi, Mars, Jupiter, Saturnus, Uranus, Neptunus, dan 27 asteroid Atira dengan epoch masing masing asteroid yang diunduh pada tanggal 03 Januari 2022. Data masukan diunduh dari basis data “HORIZON System” yang tersedia pada laman https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_query.html untuk dilakukan proses integrasi. Proses integrasi menggunakan integrator IAS15 yang terdapat pada paket pemrograman REBOUND. Integrasi dilakukan untuk 10^7 tahun/ 2π ke depan dengan iterasi perhitungan (*time step*) 0.01 tahun/ 2π . Selain analisis berdasarkan Mekanika Newtonian, analisis dinamika orbitnya juga akan dilakukan jika efek Post Newtonian diikutsertakan dalam proses integrasi, tetap dengan melibatkan Matahari sebagai bintang pusat, 8 buah planet pengganggu yaitu Merkurius, Venus, Bumi, Mars, Jupiter, Saturnus, Uranus, Neptunus, dan 27 asteroid Atira dengan epoch untuk masing masing asteroid, serta diunduh pada tanggal 03 Januari 2022. Pada akhir integrasi, ternyata untuk kasus Newtonian terdapat 7 buah asteroid Atira yang berubah kelompok menjadi Aten, dan 2 buah asteroid Atira menjadi Apollo. Untuk kasus Post-Newtonian terdapat 7 buah asteroid Atira menjadi Aten dan 3 buah asteroid Atira menjadi Apollo. Perubahan kelompok Atira tersebut tidak selalu sama untuk kasus Newtonian dan Post Newtonian.

1. Pendahuluan

Studi tentang Asteroid Dekat Bumi (ADB) terus dilakukan karena benda-benda ini menyimpan petunjuk tentang sejarah dinamika Tata Surya bagian dalam serta evolusi fisik planetesimal (de la Fuente Marcos & de la Fuente Marcos, 2019). ADB adalah asteroid dengan jarak perihelion $q < 1.3 au$ (Ye et al, 2020). Asteroid Atira adalah ADB dengan aphelion $Q < 0,983 au$ (di Carlo et al, 2017) berarti perihelion dan aphelion berada di dalam orbit Bumi.

Terdapat 4 kelompok asteroid dekat Bumi berdasarkan nilai elemen orbit setengah sumbu panjang orbit, a , jarak perihelion, q , dan jarak aphelion, Q , yaitu Amor, Apollo, Aten, dan Atira. Amor memiliki setengah sumbu panjang orbit $a > 1.0 au$ dengan $1.017 au < q < 1.3 au$, Apollo memiliki $a > 1.0 au$

dengan $q < 1.017$, Aten memiliki $a < 1.0$ au dengan jarak terjauh dari Matahari atau jarak aphelion $Q > 0.983$, dan Atira memiliki $a < 1.0$ au dan $Q < 0.983$ au. ADB dengan magnitudo mutlak ($H < 22.0$) dan jarak minimum persimpangan dengan orbit Bumi ($MOID < 0.05$ au) merupakan kelompok Potential Hazardous Asteroids (PHA) atau asteroid-asteroid yang berpotensi membahayakan Bumi. Gambar 1.1 berikut menunjukkan skema orbit ADB.

Tabel 1. Kelompok ADB berdasarkan nilai elemen orbit a, q, Q (Warna merah mewakili skema orbit Bumi, warna hijau mewakili skema orbit ADB, warna hitam mewakili Bumi, dan warna kuning mewakili Matahari).

No	Kategori	Syarat Batas	Ilustrasi
1	Amor	$a > 1.0$ au dan 1.017 au $< q < 1.3$ au	
2	Apollo	$a > 1.0$ au dan $q < 1.017$ au (<i>earth-crossing</i>)	
3	Aten	$a < 1.0$ au dan $Q > 0.983$ au (<i>earth-crossing</i>)	
4	Atira	$a < 1.0$ au dan $Q < 0.983$ au	

1.1. Mekanika Klasik

Persamaan gerak benda langit berdasarkan hukum Newton yang dinyatakan sebagai berikut:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}t \tag{1}$$

dengan \vec{r} adalah vektor posisi benda terhadap titik acuan setelah waktu t , \vec{r}_0 adalah posisi awal benda, dan \vec{v} adalah kecepatan saat t . Gaya yang bekerja pada benda dinyatakan sebagai berikut:

$$\vec{f} = \frac{d\vec{p}}{dt} \tag{2}$$

dengan \vec{f} adalah gaya luar yang diberikan, \vec{p} adalah momentum yang bekerja pada sistem:

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v} \tag{3}$$

dengan m adalah massa benda. Dengan melakukan substitusi persamaan (3) ke persamaan (2), diperoleh persamaan (4):

$$\vec{f} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\ddot{\vec{r}} \tag{4}$$

jika terdapat dua benda titik bermassa m_i dan m_j yang terpisah sejauh \vec{r}_i dan \vec{r}_j , maka benda akan memberikan gaya gravitasi kepada benda yang lainnya. Gaya ini berbanding lurus dengan hasil kali massa kedua benda dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak kedua benda, yang dapat ditulis secara matematis sebagai berikut:

$$\vec{f}_{ij} = Gm_i m_j \frac{\vec{r}_j - \vec{r}_i}{|r_j - r_i|^3} \tag{5}$$

dengan konstanta gravitasi, $G = 6,674184 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$. Untuk sisten N-benda, maka persamaan (5) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$m_i \ddot{\vec{r}}_i = Gm_i \sum_{j \neq i}^n m_j \frac{\vec{r}_j - \vec{r}_i}{|r_j - r_i|^3} \tag{6}$$

$$\ddot{\vec{r}}_i = G \sum_{j \neq 1, j \neq i}^n m_j \frac{\vec{r}_j - \vec{r}_i}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^3} \quad (7)$$

1.2. Post-Newtonian

Selain tinjauan terhadap dinamika orbit asteroid Atira di bawah pengaruh gravitasi Newtonian, akan ditinjau bila efek kelengkungan ruang dan waktu diikutsertakan, yang disebut sebagai kasus Post-Newtonian. Persamaan Post-Newtonian dapat ditulis secara matematis sebagai berikut:

$$\ddot{\vec{r}} + \Delta\dot{\vec{r}} = \frac{GM}{r^3 c^2} \left[\left(\frac{4GM}{r} - \vec{v}^2 \right) \vec{r} + 4(\vec{v} \cdot \vec{r}) \cdot \vec{v} \right] \quad (8)$$

Presesi perihelion planet Merkurius akibat kelengkungan ruang waktu sebesar 43”/abad (Danby, 1993). Dalam perhitungan kami, dengan perhitungan menggunakan integrator IAS15 diperoleh presesi perihelion Merkurius sebesar 43”, 108/abad berdasarkan persamaan (9)

$$\Delta\omega = \frac{2\pi\alpha}{p} / \text{periode} \quad (9)$$

Dengan demikian, kami percaya bahwa perhitungan yang akan dilakukan dapat dipertanggungjawabkan.

2. Metode Penelitian

Simulasi dinamika orbit Atira melibatkan Matahari, 8 planet yaitu Merkurius, Venus, Bumi, Mars, Jupiter, Saturnus, Uranus, Neptunus dan 27 buah Atira yang diunduh dari situ https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_query.html pada tanggal 03 Januari 2022. Data masukan berupa elemen orbit 27 buah asteroid Atira dan 8 buah planet tersebut, serta data fisik yaitu massa Matahari dan planet-planetnya, sedangkan asteroid Atira dianggap sebagai benda tak bermassa. Asteroid Atira yang diunduh adalah yang memiliki seluruh nilai U , yaitu $U = 1 - 9$, dengan U adalah nilai ketidakpastian orbit sebuah asteroid. Semakin besar nilai U maka ketidakpastian orbit dari sebuah asteroid semakin besar.

Proses integrasi dilakukan dengan menggunakan paket perangkat lunak pemrograman REBOUND. REBOUND merupakan kumpulan program komputasi N buah benda (N -benda) untuk melakukan perhitungan masalah gravitasi dan non-gravitasi pada sistem N -benda hingga dinamika tumbukan benda langit. REBOUND merupakan integrator N -body, yaitu paket perangkat lunak yang dapat mengintegrasikan gerakan partikel di bawah pengaruh gravitasi. Rebound disusun oleh Rein dan Liu (2012) menggunakan bahasa pemrograman C yang sesuai dengan standard ISO C99 dan Python. Secara default, simulasi REBOUND menggunakan konstanta gravitasi $G = 1$ agar besaran gravitasi bebas skala. Untuk kasus Bumi-Matahari, maka nilai $G = 1$, $a = 1$, dan massa Matahari $M = 1$, dengan demikian maka periode orbit Bumi mengelilingi Matahari dinyatakan sebagai berikut:

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{GM}} = 2\pi \text{ tahun} \quad (10)$$

Oleh sebab itu, maka satuan waktu yang ditampilkan oleh REBOUND adalah tahun/ 2π . Integrator yang digunakan untuk melakukan simulasi dinamika orbit asteroid Atira adalah IAS15 karena memiliki kelebihan sebagai berikut.

1. Merupakan integrator default dari REBOUND yang membuat runtime optimal dan hasil sangat akurat.
2. Memiliki time-step yang adaptif.
3. Memiliki tingkat akurasi yang lebih baik dibandingkan integrator lain.
4. Menggunakan asumsi bahwa asteroid tidak memberi pengaruh secara gravitasi pada gerak benda langit pengganggu, tetapi di bawah pengaruh gravitasi benda langit pengganggunya.

Simulasi dinamika orbit dilakukan dalam rentang waktu 10^7 tahun/ 2π dengan *time-step* 0,01 tahun/ 2π . Proses simulasi dinamika orbit dilakukan secara terpisah untuk masing-masing asteroid, dengan demikian, setiap proses integrasi terdiri dari 1 buah asteroid, Matahari dan 8 planetnya yaitu Merkurius, Venus, Bumi, Mars, Jupiter, Saturnus, Uranus, dan Neptunus. Karena diasumsikan bahwa asteroid adalah benda tak bermassa, maka tidak ada pengaruh gravitasi oleh asteroid Atira terhadap Matahari dan planet, tetapi asteroid Atira berada dibawah pengaruh gravitasi Matahari dan planet.

Dengan asumsi ini, maka dianggap tidak ada gaya luar yang bekerja pada sistem ini, atau sistem dianggap konservatif.

Massa Matahari beserta 8 planetnya dituliskan pada Tabel (2), sedangkan elemen orbit 8 planet yang terdiri dari setengah sumbu panjang (a), eksentrisitas orbit (e), inklinasi orbit (i), titik nodal naik (Ω), argument perihelion (ω), dan anomali rata-rata (M), dituliskan dalam Tabel (3). Elemen orbit 27 buah asteroid Atira dituliskan dalam Tabel (4)

Tabel 2. Massa Matahari beserta 8 planet dalam Tata Surya.

No	Nama	Massa (kg)	Massa (Massa Bumi)
1	Matahari	1.99×10^{30}	3.33×10^5
2	Merkurius	3.29×10^{23}	5.53×10^{-2}
3	Venus	4.87×10^{24}	8.16×10^{-1}
4	Bumi	5.97×10^{24}	1.00
5	Mars	6.39×10^{23}	1.07×10^{-1}
6	Jupiter	1.89×10^{27}	3.16×10^2
7	Saturnus	5.68×10^{26}	9.54×10^1
8	Uranus	8.68×10^{25}	1.45×10^1
9	Neptunus	1.02×10^{26}	1.71×10^1

Tabel 3. Elemen orbit 8 planet Tata Surya.

No	Nama	a (au)	e	i (°)	Ω (°)	ω (°)	M (°)
1	Merkurius	0.3871	0.20562	7.005	48.307	29.179	174.796
2	Venus	0.7233	0.00678	3.3946	76.62	55.925	50.115
3	Bumi	0.9999	0.01668	7.155	348.7393	114.207	357.517
4	Mars	1.5236	0.0934	1.8480	49.503	286.69	116.557
5	Jupiter	5.2031	0.04845	1.3037	100.492	275.066	18.818
6	Saturnus	9.5424	0.05493	2.4837	113.665	339.92	317.020
7	Uranus	19.1927	0.04722	7.6918	73.989	96.541	142.955
8	Neptunus	30.0758	0.01121	1.7716	131.794	265.646	267.767

Tabel 4. Elemen orbit 27 asteroid Atira.

Nama	e	a (au)	i (°)	Ω (°)	ω (°)	M (°)	U
163693 Atira (2003 CP20)	0.3222	0.741	25.62	103.88	252.92	34	0
413563 (2005 TG45)	0.3722	0.6814	23.33	273.43	230.43	200.69	0
481817 (2008 UL90)	0.3798	0.6951	24.31	81.14	183.65	101.45	0
164294 (2004 XZ130)	0.4546	0.6175	2.95	211.17	5.4	263.35	1
418265 (2008 EA32)	0.305	0.6159	28.26	100.95	181.85	117.94	1
434326 (2004 JG6)	0.5311	0.6353	18.94	37.02	353	190.31	1
(2006 WE4)	0.1829	0.7848	24.77	311.01	318.6	131.12	1
(2012 VE46)	0.3613	0.7131	6.67	8.77	190.5	304.97	1
(2013 JX28)	0.5641	0.6008	10.76	39.94	354.9	53.89	1
(2013 TQ5)	0.1557	0.7737	16.4	286.75	247.21	249.2	1
(2017 XA1)	0.2017	0.8095	17.18	239.64	327.64	99.06	1

Tabel 5. Elemen orbit 27 asteroid Atira.

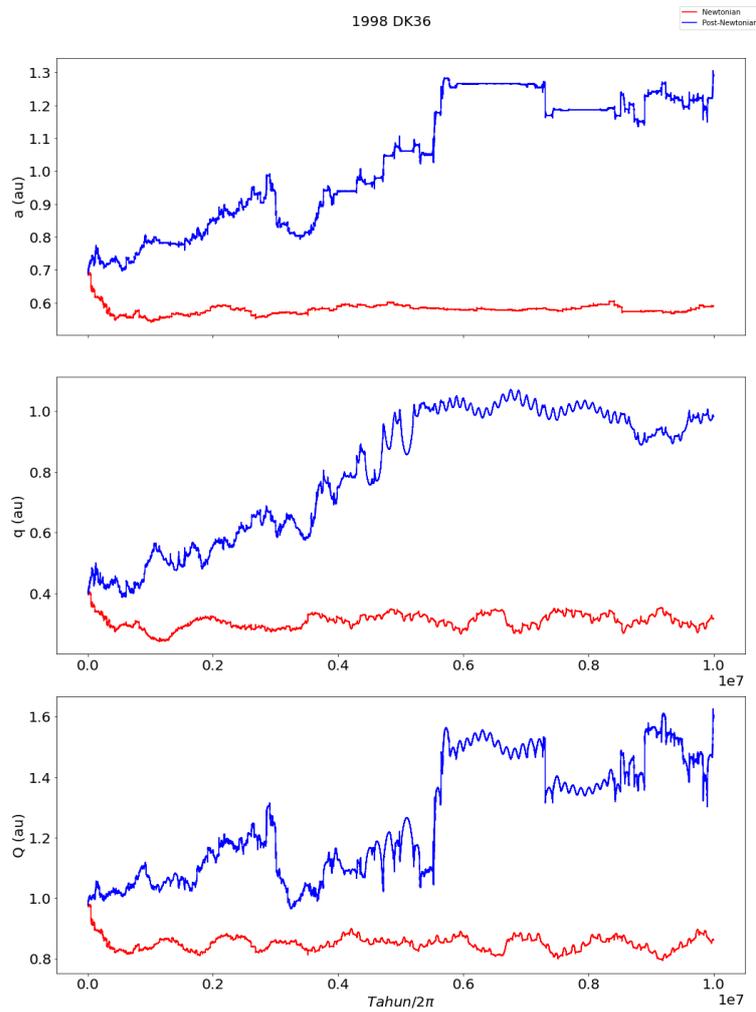
(2019 AQ3)	0.3143	0.5887	47.22	64.48	163.16	140.8	1
(2020 HA10)	0.1552	0.8196	49.65	103.42	26.72	236.08	1
2020 AV2	0.177	0.5554	15.87	6.7	187.33	211.01	2
(2010 XB11)	0.5339	0.618	29.89	96.31	202.49	98.26	2
(2014 FO47)	0.2712	0.7522	19.2	358.65	347.47	194.02	2
(2015 DR215)	0.4716	0.6665	4.08	314.96	42.3	74.46	2
(2017 YH)	0.4825	0.6343	19.85	134.19	147.51	220.54	2
(2018 JB3)	0.2904	0.6832	40.39	106.42	355.25	317.89	2
(2019 LF6)	0.4293	0.5554	29.51	179.03	213.78	336.27	2
(2021 PB2)	0.1501	0.7174	24.83	234.98	278.32	117.13	2
(2020 OV1)	0.2541	0.6376	32.58	296.02	189.78	192.76	3
(2021 BS1)	0.3377	0.5984	31.73	27.68	332.65	186.57	3
(2021 PH27)	0.7117	0.4617	31.93	39.41	8.57	330.35	3
(2021 VR3)	0.4139	0.5339	18.06	129.05	134.4	13.76	3
(1998 DK36)	0.416	0.6923	2.02	151.46	180.04	183.25	9
(2021 LJ4)	0.3834	0.6748	9.83	277.61	56.89	274.75	9

Hasil integrasi numerik asteroid Atira diolah dan divisualisasikan menggunakan bahasa pemrograman Python. Python adalah bahasa *open-source* dan dapat diunduh secara gratis dari situs <https://www.python.org/downloads/>. Olah data dan visualisasi hasil integrasi asteroid Atira pada penelitian ini, menggunakan beberapa modul yang tersedia dalam Python, yaitu:

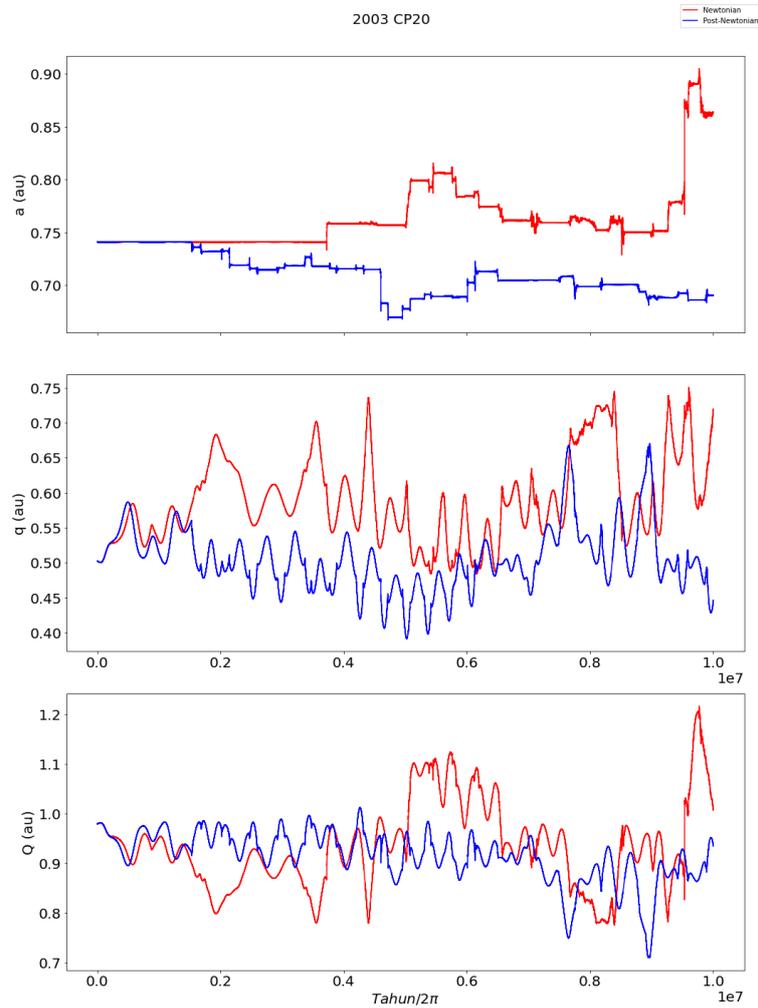
1. NumPy adalah library dasar untuk perhitungan saintifik dengan Python. NumPy dapat digunakan untuk menyertakan berbagai fungsi matematis, pembuatan arrays, serta *indexing*.
2. Pandas adalah library yang digunakan untuk analisis data. Pandas digunakan untuk data tabular, yaitu data yang tersimpan di dalam spreadsheet ataupun database. Pandas sangat berguna untuk mengeksplorasi, membersihkan, dan memproses data.
3. Matplotlib adalah library yang digunakan untuk membuat visualisasi, baik berupa visualisasi statis, animasi, maupun interaktif. Beberapa visualisasi yang dapat dibuat melalui Matplotlib adalah bar chart, line plot, dan scatter plot.

3. Hasil dan Pembahasan

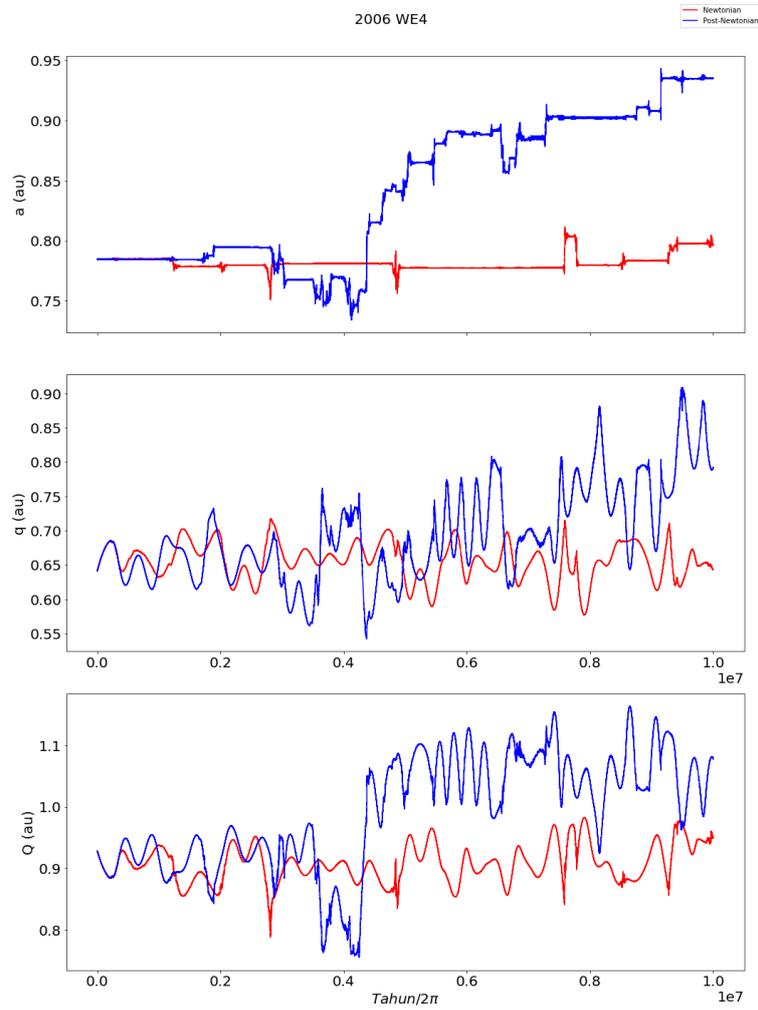
Dari hasil integrasi diperoleh bahwa beberapa asteroid Atira berubah tipe, baik untuk kasus Newtonian maupun Post-newtonian, yang dapat dilihat dari perubahan nilai elemen orbit a , q , dan Q pada akhir integrasi. Gambar berikut adalah contoh dinamika orbit 5 asteroid Atira dari 27 asteroid Atira yang diteliti, dan dapat dilihat pula tipe asteroid Atira pada akhir integrasi.



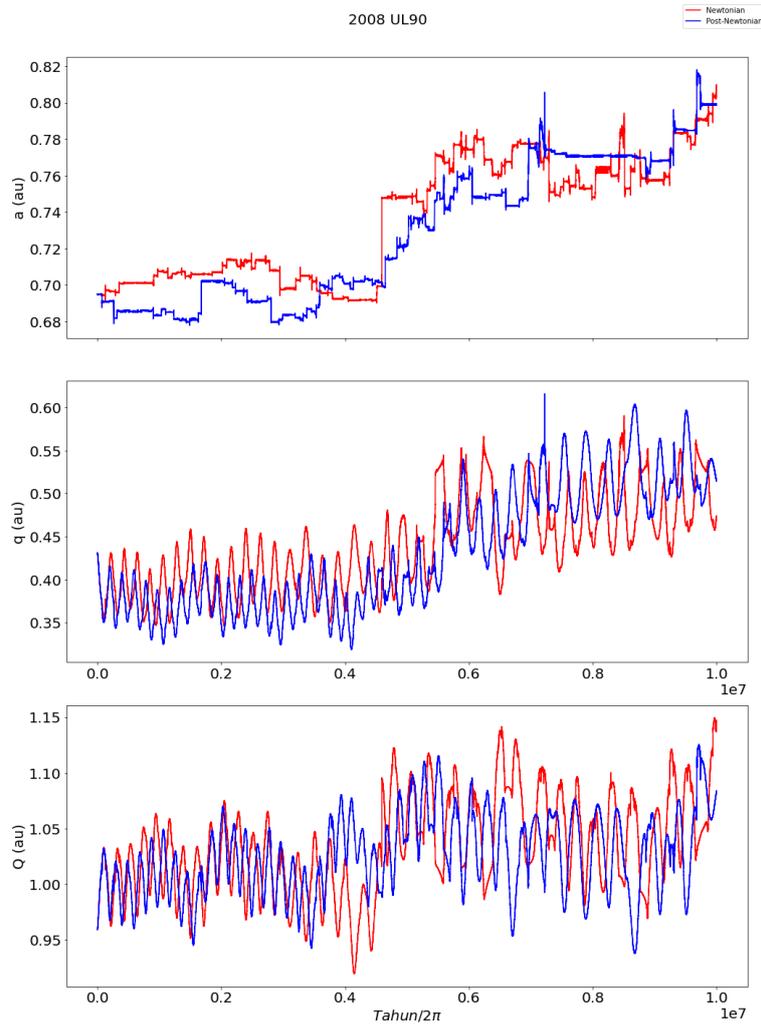
Gambar 1. Dinamika orbit asteroid 1998 DK36. Pada akhir integrasi, untuk kasus Newtonian nilai $Q < 0.983 \text{ au}$ dan $a < 1 \text{ au}$, berarti 1998 DK36 tetap merupakan tipe asteroid Atira, sedangkan untuk kasus Post-newtonian, nilai $q < 1.017 \text{ au}$ dan $a > 1 \text{ au}$, berarti asteroid 1998 DK36 berubah menjadi tipe asteroid Apollo.



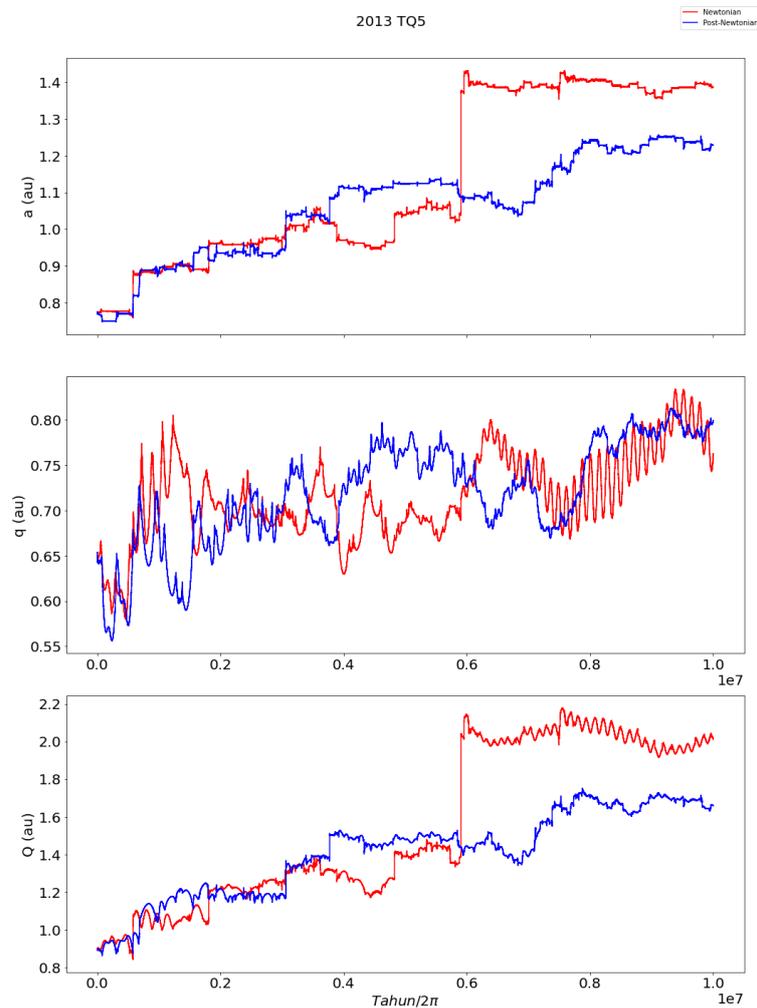
Gambar 2. Dinamika orbit asteroid 2003 CP20. Pada akhir integrasi, untuk kasus Newtonian nilai $Q > 0.983 \text{ au}$ dan $a < 1 \text{ au}$, berarti 2003 CP20 berubah menjadi tipe asteroid Aten, sedangkan untuk kasus Post-newtonian, nilai $Q < 0.983 \text{ au}$ dan $a < 1 \text{ au}$, berarti 2003CP20 tetap merupakan tipe asteroid Atira.



Gambar 3. Dinamika orbit asteroid 2006 WE4. Pada akhir integrasi, untuk kasus Newtonian nilai $Q < 0.983 \text{ au}$ dan $a < 1 \text{ au}$, berarti 2006 WE4 tetap merupakan tipe asteroid Atira, sedangkan untuk kasus Post-newtonian, nilai $Q > 0.983 \text{ au}$ dan $a < 1 \text{ au}$, berarti 2006 WE4 berubah menjadi tipe asteroid Aten.



Gambar 4. Dinamika orbit asteroid 2008 UL90. Pada akhir integrasi, untuk kasus Newtonian dan Post-Newtonian nilai $Q > 0.983 \text{ au}$ dan $a < 1 \text{ au}$, berarti 2008 UL90 berubah menjadi tipe asteroid Aten.



Gambar 5. Dinamika orbit asteroid 2015 TQ5. Pada akhir integrasi, untuk kasus Newtonian dan Post-Newtonian nilai $q > 1.017 au$ dan $a > 1 au$, berarti 2015 TQ5 berubah menjadi tipe asteroid Apollo.

Dari hasil integrasi diperoleh bahwa untuk kasus Newtonian terdapat 7 asteroid Atira yang menjadi Aten, yaitu 2003 CP20, 2005 TG45, 2008 UL90, 2010 XB11, 2012 VE46, 2017 XA1, dan 2020 HA10 dan terdapat 2 asteroid Atira menjadi Apollo yaitu 2013 TQ5, dan 2015 DR215. Sedangkan untuk kasus Post-newtonian terdapat 7 asteroid Atira yang menjadi Aten yaitu 2006 WE4, 2005 TG45, 2008 UL90, 2010 XB11, 2015, DR215, 2017 YH, dan 2020 HA10 dan terdapat 3 asteroid Atira menjadi Apollo yaitu 2013 TQ5, 2017 XA1, dan 2021 PB2.

4. Kesimpulan

Dari hasil integrasi elemen orbit 27 asteroid Atira untuk jangka waktu 10^7 tahun/ 2π dari epoch masing masing asteroid, didapatkan:

- Kasus Newtonian:
 - Tujuh buah asteroid Atira menjadi **Aten**, yaitu 2003 CP20, 2005 TG45, 2008 UL90, 2010 XB11, 2012 VE46, 2017 XA1, dan 2020 HA10
 - Dua buah asteroid Atira menjadi **Apollo** yaitu 2013 TQ5, dan 2015 DR215.
- Kasus Post-newtonian:
 - Tujuh buah asteroid Atira menjadi **Aten** yaitu 2006 WE4, 2005 TG45, 2008 UL90, 2010 XB11, 2015, DR215, 2017 YH, dan 2020 HA10



- Tiga buah asteroid Atira menjadi **Apollo** yaitu 2013 TQ5, 2017 XA1, dan 2021 PB2.

Perubahan tipe Atira pada akhir integrasi tidak selalu ditentukan oleh kondisi Newtonian atau pun Post-newtonian.

5. Diskusi

Jangka waktu yang dipilih untuk integrasi numerik bagi parameter orbit asteroid-asteroid ini adalah 10^7 tahun/ 2π , untuk penelitian selanjutnya, rentang waktu dapat diperpanjang hingga umur Tata Surya untuk mendapatkan dinamika orbit asteroid Atira dengan lebih detil, sehingga lebih banyak informasi yang diperoleh tentang dinamika orbit asteroid Atira. Perlu ditinjau pula peristiwa papasan dekat dengan planet-planet pengganggu yang mempengaruhi dinamika orbitnya. Lebih jauh, dapat dilakukan analisis kondisi ko-orbital dengan planet pengganggu selama perjalanan dinamika orbitnya.

Daftar Pustaka

- [1] Danby J M A 1993 *Fundamentals of Celestial Mechanics* (New York: Macmillan).
- [2] de la Fuente M C and de la Fuente M R 2019 *bimon. not. r. astron. soc.* **487** 2742
- [3] di Carlo M, Martin J M R, Gomez N O, and Vasile M 2017 *adv. n.a. res.* **59** 1724
- [4] Rein H and Liu S F 2012 *astron. astrophys.* **537** 10