



Evolusi Dinamik Sun's Birth Cluster dan Pencarian Solar Siblings di Bimasakti

Rendy Darma 1 *, Mochamad Ikbal Arifyanto 2

*1 Program Studi Pascasarjana Astronomi, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha 10 Bandung 40132, Indonesia*

*2 Kelompok Keahlian Astronomi dan Observatorium Bosscha, Institut Teknologi
Bandung, Jl. Ganesha 10 Bandung 40132, Indonesia*

* Penulis Penanggungjawab. E-mail: darmarendy@gmail.com

hp: +62-858-41943283

ABSTRAK

Sebagian besar bintang-bintang di galaksi terbentuk di dalam gugus bintang, baik gugus terbuka maupun gugus bola. Begitu juga dengan Matahari, yang diperkirakan terbentuk pada 4,6 milyar tahun lalu di dalam sebuah gugus terbuka (sun's birth cluster). Bintang-bintang yang terbentuk bersamaan dengan Matahari di dalam sun's birth cluster, disebut sebagai solar siblings. Argumen ini didukung oleh penemuan radioisotop berumur pendek dan objek-objek Edgeworth-Kuiper yang memiliki inklinasi dan eksentrisitas tinggi di Tata Surya. Pekerjaan ini bertujuan untuk mempelajari evolusi dinamik sun's birth cluster selama 4,6 milyar tahun dan mencari keberadaan solar siblings di Bimasakti dalam radius 1 kpc dari Matahari. Simulasi N-benda dilakukan untuk memahami evolusi dinamik sun's birth cluster dan sebaran solar siblings saat ini dalam pengaruh potensial gravitasi Bimasakti. Sebanyak 2 juta bintang dari katalog GAIA DR2 digunakan untuk mencari solar siblings dalam radius 1 kpc dari Matahari. Hasil dari pekerjaan ini menunjukkan bahwa sun's birth cluster mengalami kehancuran pada usia kurang dari 1 milyar tahun setelah pembentukannya, akibat adanya gangguan pasang surut Bimasakti yang menyebabkan solar siblings terlepas dari sun's birth cluster dan menyebar di sekitar orbit Matahari saat ini. Semakin besar jumlah bintang sun's birth cluster yang dimodelkan, semakin banyak solar siblings yang dapat ditemukan di sekitar Matahari. Analisis kinematika dan fotometri solar siblings menunjukkan setidaknya terdapat 14 hingga 19 kandidat solar siblings pada katalog GAIA DR2 dalam radius 1 kpc dari Matahari.

Kata Kunci : Bimasakti; Sun's Birth Cluster; Solar Siblings

ABSTRACT

Most of stars in our Galaxy are born in star clusters, both in open cluster or globular cluster. Our Sun as well, was born in an open cluster (sun's birth cluster) at 4.6 billion years ago. Stars those were born with our Sun in the sun's birth cluster are called as solar siblings. This argument was supported from the discovery of short-lived radioisotopes and Edgeworth-Kuiper belt objects which have high inclination and eccentricity in our Solar System. In this work, we would like to investigate the dynamical evolution of sun's birth cluster and searching for solar siblings in the Milky Way at radius less than 1 kpc from our Sun. We used N-body simulation to learn the dynamical evolution and present distribution of solar siblings under Milky Way tidal field. We used almost 2 billion stars of GAIA DR2 catalog that located around the Sun. We found that the dissolution of sun's birth cluster occurred at age less than 1 billion years after its formation. It can be seen from the escaping stars from the cluster which now spreading around the orbit of our Sun. The larger number of stars in a cluster, the higher number of solar siblings found around the Sun. Constraints of kinematics and photometry of solar siblings showed there are 14 -19 candidate of solar siblings on GAIA DR2 catalog at radius less than 1 kpc from our Sun.

Keywords: Milky Way; Sun's Birth Cluster; Solar Sibling

1. Pendahuluan

Sebagian besar bintang-bintang di Bimasakti terbentuk di dalam sebuah kelompok bintang yang terikat secara gravitasi, disebut sebagai gugus bintang [1]. Secara umum, terdapat dua jenis gugus bintang, yaitu gugus terbuka dan gugus bola. Selama mengorbit pusat Galaksi, gugus bintang akan mengalami gangguan baik dari dalam (internal) maupun luar (eksternal) gugus tersebut, lihat [2-7]. Gangguan ini menyebabkan bintang-bintang di dalam gugus terlepas

dan menyebar di Bimasakti.

Penemuan radioisotop berumur pendek (terutama ^{60}Fe) pada meteorit-meteorit purba dan objek-objek sabuk Edgeworth-Kuiper yang memiliki eksentrisitas dan inklinasi tinggi [8], menunjukkan pada 4,6 milyar tahun lalu Matahari diperkirakan terbentuk di dalam sebuah gugus bintang, lihat [8-11]. Gugus bintang yang dimaksud adalah gugus terbuka.

Gugus bintang tempat Matahari terbentuk disebut sebagai sun's birth cluster. Jika Matahari memang benar terbentuk di dalam sun's birth cluster, maka seharusnya terdapat bintang-bintang yang terbentuk bersamaan dengan Matahari di dalam gugus yang sama, disebut sebagai solar siblings. Jika kita dapat mengonfirmasi keberadaan solar siblings di Bimasakti, maka kita dapat memahami lebih baik evolusi dinamik gugus bintang dan model Bimasakti yang digunakan saat ini.

Beberapa penelitian sebelumnya, seperti [8, 12, 9, 10], melakukan simulasi N-benda evolusi dinamik sun's birth cluster dan sebaran solar siblings di Bimasakti. Beberapa dari mereka menggunakan katalog Hipparcos yang mengandung sekitar 800.000 bintang untuk mencari keberadaan solar siblings. Dalam pekerjaan ini, kami melakukan simulasi N-benda untuk mempelajari sebaran solar siblings di Bimasakti dan mengonfirmasi keberadaan solar siblings pada katalog GAIA DR2 yang berisi sekitar 2,5 milyar bintang dengan data kinematika yang lebih akurat. Sehingga peluang mencari solar siblings akan lebih besar.

2. Metode Penelitian

2.1. Model Sun's Birth Cluster

Sun's birth cluster dimodelkan berdasarkan analisa dinamika internal gugus, berupa kemungkinan waktu

relaksasi dan jarak papasan dekat antarbintang di dalam gugus, lihat [8-10]. Parameter fisis sun's birth cluster dapat dilihat pada Tabel 1. Initial Mass Function (IMF) pada Tabel 1 berfungsi untuk memodelkan distribusi massa bintang-bintang di dalam gugus.

Dalam pekerjaan ini, dibuat dua kasus sun's birth cluster berdasarkan parameter fisis pada Tabel 1, yaitu:

(i). Sun's birth cluster dengan radius gugus dan jumlah bintang sebesar 3 pc dan 5000 bintang. Jumlah bintang ini bersesuaian dengan massa gugus sekitar $3000 M_{\odot}$.

(ii). Sun's birth cluster dengan radius gugus dan jumlah bintang sebesar 1 pc dan 850 bintang. Jumlah bintang tersebut bersesuaian dengan massa gugus sekitar $500 M_{\odot}$.

IMF yang digunakan pada kedua kasus tersebut sesuai dengan Tabel 1. Sedangkan dispersi kecepatan bintang di dalam gugus ditetapkan sebesar 2,15 km/s.

Tabel 1. Parameter Fisis Sun's Birth Cluster

Parameter Fisis	Nilai
Massa gugus	$500 - 3000 M_{\odot}$
Radius gugus	0,5 - 3 pc
Jumlah bintang	$10^2 - 10^3$
IMF	0,08 - $100 M_{\odot}$ [13]
Dispersi kecepatan	1,4 - 2,9 km/s

2.2. Model Potensial Bimasakti

Untuk memahami evolusi dinamik gugus bintang di Bimasakti, gangguan pasang surut Bimasakti juga perlu dimodelkan dalam pekerjaan ini. Secara umum, struktur Bimasakti terdiri dari bulge, piringan, dan halo dark matter. Masing-masing struktur Bimasakti tersebut dimodelkan dalam persamaan potensial gravitasi.

$$\Phi_B = -\frac{GM_B}{\sqrt{r^2 + b_1^2}} \quad (1)$$

$$\Phi_D = -\frac{GM_D}{\sqrt{R^2 + \left(a_2 + \sqrt{z^2 + b_2^2}\right)^2}} \quad (2)$$

$$\Phi_H = -\frac{GM(r)}{r} - \frac{GM_h}{1,02a_3} \left[-\frac{1,02}{1 + K^{1,02}} + \ln(1 + K^{1,02}) \right]_r^{100} \quad (3)$$

dengan: $M(r) = \frac{M_h K^{2,02}}{1 + K^{1,02}}$ dan $K = \frac{r}{a_3}$.

Model struktur bulge mengikuti [14], seperti Persamaan (1). Model potensial [15] digunakan untuk piringan Bimasakti, seperti Persamaan (2). Sedangkan halo dark matter dimodelkan menggunakan potensial logaritmik. Dengan demikian, potensial Bimasakti dapat ditulis sebagai

$$\Phi_{MW} = \Phi_B + \Phi_D + \Phi_H$$

Potensial Bimasakti kemudian diturunkan dalam bentuk persamaan gerak

$$\left(\ddot{r} = -\frac{\partial \Phi}{\partial R} \dot{R} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} \dot{z} \right)$$

untuk menghitung orbit bintang-bintang di Bimasakti. Kombinasi ketiga model ini dikenal dengan model potensial Allen & Santillan [16]. Nilai parameter untuk masing-masing persamaan potensial tersebut dapat dilihat pada Tabel 2. Nilai ini diadopsi dari [8].

Tabel 2. Nilai untuk parameter potensial Bimasakti yang digunakan.

2.3. Simulasi N-benda Menggunakan

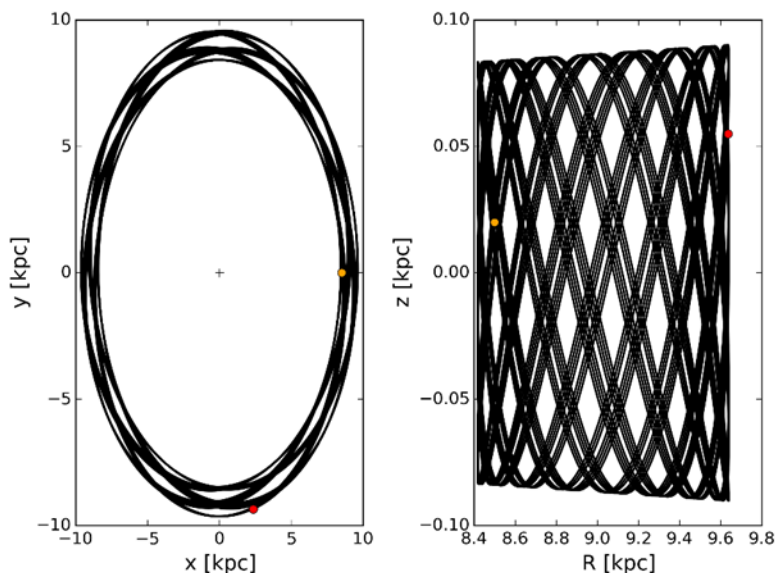
Parameter	Nilai	Struktur Bimasakti
M_B	$1,41 \times 10^{10} M_\odot$	Bulge
b_1	0,38 kpc	
M_D	$8,56 \times 10^{10} M_\odot$	Piringan
a_2	5,31 kpc	
b_2	0,25 kpc	
M_H	$1,07 \times 10^{11} M_\odot$	Halo dark matter
a_3	12 kpc	

AMUSE Framework

Simulasi N-benda dilakukan menggunakan AMUSE Framework, lihat [17, 18]. Penulisan script pada AMUSE Framework menggunakan bahasa python. Interaksi gravitasi antarbintang di dalam gugus dihitung menggunakan integrator BHTree [19].

Softening length pada integrator ini dihitung menggunakan persamaan $N^{-0,33}$ (pc), dimana adalah jumlah bintang dalam gugus. Softening length adalah jarak minimum antarbintang yang dapat digunakan untuk menghitung interaksi gravitasi antarbintang. Perhitungan interaksi gravitasi ini dilakukan secara parallel dengan perhitungan interaksi gravitasi antara gugus bintang dan potensial Bimasakti menggunakan integrator Bridge [20]. Kami juga menambah faktor evolusi bintang pada simulasi N-benda yang dibuat. Perhitungan faktor evolusi bintang menggunakan SSE code [21], dengan metalisitas (Z) sebesar 0,02 (sesuai metalisitas Matahari).

Simulasi N-benda dilakukan dari posisi dan kecepatan sun's birth cluster pada 4,6 milyar tahun lalu. Oleh karena itu, untuk mendapatkan posisi dan kecepatan tersebut, perlu dilakukan perhitungan mundur orbit Matahari hingga 4,6 milyar tahun ke belakang dengan menggunakan posisi dan kecepatan Matahari saat ini. Untuk melakukan ini, arah kecepatan Matahari harus diubah menjadi searah jarum jam. Posisi Matahari saat ini mengikuti [8], yaitu $(x_{\odot}, y_{\odot}, z_{\odot}) = (8,5; 0,0; 0,02)$ kpc dan nilai kecepatan mengikuti [22], yaitu $(u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot}) = (11,1; 12,4 + V_{LSR}; 7,25)$ km/s. Nilai $V_{LSR} = 220$ km/s, bersesuaian dengan model potensial Bimasakti yang digunakan.



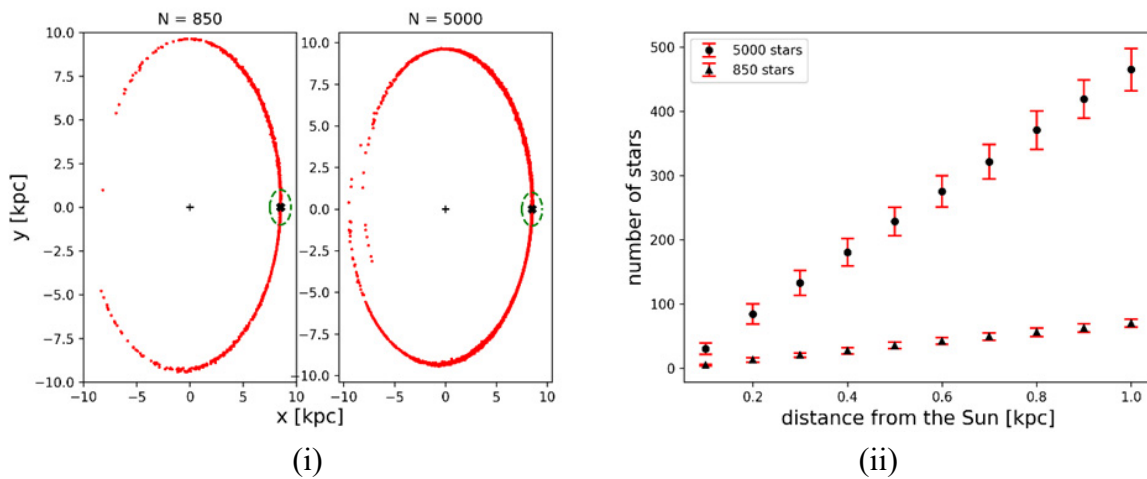
Gambar 1. Orbit Matahari selama 4,6 milyar tahun ke belakang (garis hitam) dalam arah face on (kiri) dan edge on (kanan). Titik jingga dan merah masing-masing adalah posisi Matahari saat ini dan pada 4,6 milyar tahun lalu,

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil perhitungan mundur orbit Matahari hingga 4,6 milyar tahun ke belakang memberikan posisi dan kecepatan sun's birth cluster, yaitu $(x_{\odot}, y_{\odot}, z_{\odot}) = (2,342; -9,347; 0,055)$ kpc dan $(u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot}) = (-198,378; -51,736; 5,502)$ km/s (lihat Gambar 1). Hasil ini mirip dengan perkiraan [8, 10]. Posisi Matahari pada 4,6 milyar tahun lalu ternyata lebih jauh dari pusat Bimasakti jika dibandingkan dengan posisi Matahari saat ini. Arah kecepatan ini akan diubah menjadi berlawanan arah jarum jam untuk melakukan perhitungan orbit sun's birth cluster selama 4,6 milyar tahun depan.

Gambar 2 bagian kiri menunjukkan hasil simulasi N-benda selama 4,6 milyar tahun

saat ini. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sun's birth cluster mengalami kehancuran pada usia kurang dari 1 milyar tahun setelah pembentukannya. Kehancuran ini menghasilkan sebaran solar siblings yang tampak berada di sekitar orbit Matahari saat ini. Dalam pekerjaan ini, pencarian solar siblings dilakukan dalam radius 1 kpc dari posisi Matahari saat ini. Kami mendapatkan bahwa sekitar 465 solar siblings untuk kasus (i) dan sekitar 70 solar siblings untuk kasus (ii) (lihat Gambar 2 bagian kanan). Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah bintang pada sun's birth cluster, semakin besar kemungkinan untuk menemukan solar siblings dalam radius 1 kpc dari Matahari.



Gambar 2. Gambar bagian kiri adalah sebaran solar siblings saat ini (titik-titik merah) untuk kasus (i) (kiri) dan kasus (ii) (kanan). Garis putus-putus hijau adalah radius 1 kpc pencarian solar siblings di sekitar Matahari (titik hitam). Tanda + adalah pusat Bimasakti. Gambar bagian kanan adalah jumlah solar siblings yang dapat ditemukan dalam radius 1 kpc dari Matahari. Titik bulat dan segitiga hitam masing-masing adalah jumlah solar siblings untuk kasus (i) dan (ii).

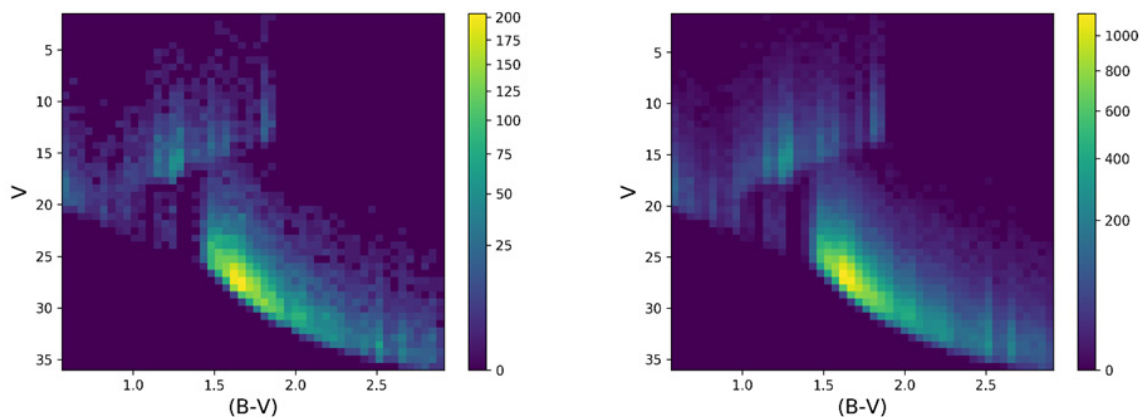
Data posisi dan kecepatan solar siblings dalam radius 1 kpc dari Matahari kemudian ditransformasi menjadi data kinematik dengan menggunakan galpy package [23] pada program python. Data kinematik tersebut berupa proper motion ($\mu_\alpha \cos \delta$, μ_δ) dan kecepatan radial (V_r), yang kemudian dijadikan kriteria dalam mencari solar siblings pada katalog GAIA DR2 (lihat Tabel 3). Sebanyak 2.261.008 bintang pada katalog GAIA DR2 berada dalam radius 1 kpc dari Matahari.

Dari kriteria kinematik pada Tabel 3, kami mendapatkan 50 dan 39 bintang pada

katalog GAIA DR2 yang diduga sebagai kandidat solar siblings, masing-masing pada kasus (i) dan (ii). Kami kemudian mengonfirmasi hasil ini melalui diagram HR sun's birth cluster (lihat Gambar 3). Data isochrones sun's birth cluster diadopsi dari [24]. Magnitudo dan indeks warna untuk solar siblings dan kandidat solar siblings didapatkan dari proses interpolasi pada data isochrones. Proses transformasi magnitudo ke UBV Johnson [25] pada kandidat solar siblings perlu dilakukan sebelum proses interpolasi pada data isochrones.

Tabel 3. Kriteria kinematik solar siblings dalam radius 1 kpc dari Matahari.

Kasus (i)	Kasus (ii)
$3,474 \text{ km/s} \leq V_r \leq 18,927 \text{ km/s}$	$3,023 \text{ km/s} \leq V_r \leq 18,815 \text{ km/s}$
$2,643 \text{ mas/yr} \leq \mu_\alpha \cos \delta \leq 3,402 \text{ mas/yr}$	$2,580 \text{ mas/yr} \leq \mu_\alpha \cos \delta \leq 3,447 \text{ mas/yr}$
$4,676 \text{ mas/yr} \leq \mu_\delta \leq 5,157 \text{ mas/yr}$	$4,673 \text{ mas/yr} \leq \mu_\delta \leq 5,168 \text{ mas/yr}$



Gambar 3. Histogram 2D diagram HR sun's birth cluster untuk kasus (i) (atas) dan (ii) (bawah). Gradasi warna menunjukkan jumlah solar siblings yang berbeda untuk tiap binning.

Interpolasi pada data isochrones menunjukkan bahwa solar siblings memiliki kriteria fotometri $(B-V) \geq 0,5$ dan $V \geq 5$. Akhirnya, pemeriksaan pada diagram HR sun's birth cluster menunjukkan bahwa terdapat 19 dan 14 kandidat solar siblings yang memenuhi

kriteria fotometri dan kinematik dengan error relatif kurang dari 5%, masing-masing untuk kasus (i) dan (ii). Data kinematik dan fotometri kandidat solar siblings tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Kandidat solar siblings pada katalog GAIA DR2 dalam radius 1 kpc dari Matahari yang memenuhi kriteria kinematik dengan error relatif $\leq 5\%$ dan kriteria fotometri. Angka (i) dan (ii) pada kolom 1 menunjukkan kandidat solar siblings yang ditemukan pada kasus (i) dan (ii). Posisi dan paralaks bintang masing-masing dinyatakan dalam koordinat ekuatorial (α, δ) dan p . $(B - V)$ dan V kandidat solar siblings diperoleh dari transformasi fotometri yang telah dilakukan.

Stars	α (deg)	δ (deg)	p (mas)	$\mu_{\alpha} \cos \delta$ (mas/yr)	μ_{δ} (mas/yr)	V_r (km/s)	$(B - V)$	V
(ii)	71.27225	-80.3934	1.139151	3.300421	5.167537	15.059	0.782767	10.5045
(ii)	351.429	41.84916	1.842526	3.415021	4.985669	9.202378	0.826865	11.51332
(i), (ii)	114.6043	-35.0969	1.043767	2.736378	4.722385	5.545083	0.777223	11.25637
(i), (ii)	78.44865	-75.7702	1.096444	2.827255	4.744886	15.64825	0.83341	11.50665
(i), (ii)	292.59	-36.7292	1.823854	2.985293	4.736285	16.35537	0.623592	10.8721
(ii)	289.2285	-15.0749	2.053269	2.643293	4.693374	13.43457	0.623609	12.84063
(i), (ii)	124.8262	11.53139	1.196514	2.837543	4.766587	5.33491	0.987792	9.380571
(ii)	72.56115	-56.9526	5.036692	2.588829	4.857314	14.33422	0.816807	12.38279
(i), (ii)	252.4873	-39.3161	4.985931	2.981027	5.00787	10.44037	0.605714	11.40224
(ii)	321.7433	78.98415	1.232547	2.932711	5.163028	15.54959	1.08539	11.2333
(i), (ii)	303.5347	-47.7409	1.224597	2.975684	5.143356	15.46626	0.792916	11.6632
(i), (ii)	193.5051	-45.9025	1.00695	3.022082	5.058527	13.62636	0.885273	11.84983
(i), (ii)	101.0131	-3.33843	1.337076	2.813763	4.719544	18.14985	0.938147	11.629
(i), (ii)	261.0851	-59.976	1.349453	2.718707	5.108023	7.218619	0.850891	10.25896
(i), (ii)	305.359	-7.54596	1.470985	2.79037	4.818759	11.05073	0.836457	10.43531
(i), (ii)	275.2452	-83.1282	1.046986	3.258074	5.050882	7.983201	1.058358	10.17165
(i), (ii)	190.6806	44.62027	1.408563	2.993155	4.9912	16.88458	0.674961	9.590522
(i), (ii)	265.6925	40.91514	1.21302	3.088836	4.864238	8.106062	0.833282	10.4724
(i), (ii)	276.5286	-40.0528	3.430838	3.256739	4.852644	14.18728	0.726525	8.566255

4. Simpulan

Hasil simulasi N-benda evolusi dinamik sun's birth cluster selama 4,6 milyar tahun menunjukkan adanya sebaran solar siblings di sekitar orbit Matahari. Pencarian solar siblings pada katalog GAIA DR2 dengan menggunakan kriteria kinematik dan fotometri, serta error relatif kinematik kurang dari 5%, menunjukkan sebanyak 19 dan 14 solar siblings untuk kasus (i) dan (ii). Hasil ini berhubungan dengan jumlah bintang dalam sun's birth cluster yang dimodelkan. Semakin besar jumlah bintang, semakin besar pula peluang menemukan solar sibling dalam radius 1 kpc dari Matahari.

Dalam pekerjaan ini, gangguan pasang surut dari lengan spiral dan bar Bimasakti belum dilibatkan. Gangguan dari lengan spiral dan bar akan memberikan pengaruh evolusi dinamik yang lebih besar pada gugus bintang. Sebaran solar siblings yang dihasilkan akan lebih luas dan jumlah kandidat solar siblings yang dapat ditemukan akan lebih sedikit. Evolusi dinamik gugus bintang dalam pengaruh lengan spiral dan bar Bimasakti menarik untuk dikerjakan pada pekerjaan selanjutnya. Beberapa penelitian sebelumnya berusaha mensimulasikan evolusi dinamik sun's birth cluster dalam pengaruh lengan spiral dan bar Bimasakti [8, 12]. Namun, parameter potensial untuk lengan spiral

dan bar masih dalam rentang nilai yang besar, sehingga hasil yang diberikan masih dalam ketidakpastian yang besar. Dengan demikian, studi terkait lengan spiral dan bar Bimasakti perlu dipahami terlebih dahulu untuk mendapatkan parameter potensial kedua struktur dengan akurasi yang baik.

5. Ucapan Terima Kasih

Kami mengucapkan terima kasih kepada Dr.rer.nat. Hesti Tri Retno Wulandari, Dr. Budi Dermawan, dan Dr. Muhamad Irfan Hakim dari program studi Astronomi Institut Teknologi Bandung, atas diskusi dan masukannya selama pengerjaan penelitian ini. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada Simon Portegies-Zwart dari Leiden University, Netherlands, atas diskusi dan sarannya mengenai simulasi N-benda menggunakan AMUSE Framework.

6. Referensi

1. Lada, C. J., & Lada, E. A. (2003). Embedded clusters in molecular clouds. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 41(1), 57-115.
2. Madrid, J. P., Hurley, J. R., & Sippel, A. C. (2012). The Size Scale of Star Clusters. *The Astrophysical Journal*, 756(2), 167.
3. Gieles, M., Heggie, D. C., & Zhao, H. (2011). The life cycle of star clusters in a tidal field. *Monthly*



- Notices of the Royal Astronomical Society*, 413(4), 2509-2524.
4. Gieles, M., Athanassoula, E., & Portegies Zwart, S. F. (2007). The effect of spiral arm passages on the evolution of stellar clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 376(2), 809-819.
 5. Gieles, M., Zwart, S. P., Baumgardt, H., Athanassoula, E., Lamers, H. J. G. L. M., Sipior, M., & Leenaarts, J. (2006). Star cluster disruption by giant molecular clouds. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 371(2), 793-804.
 6. Baumgardt, H., & Makino, J. (2003). Dynamical evolution of star clusters in tidal fields. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 340(1), 227-246.
 7. Takahashi, K., & Zwart, S. F. P. (2000). The evolution of globular clusters in the galaxy. *The Astrophysical Journal*, 535(2), 759.
 8. Martínez-Barbosa, C. A., Brown, A. A., Boekholt, T., Portegies Zwart, S., Antiche, E., & Antoja, T. (2016). The evolution of the Sun's birth cluster and the search for the solar siblings with Gaia. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 457(1), 1062-1075.
 9. Brown, A. G., Zwart, S. F. P., & Bean, J. (2010). The quest for the Sun's siblings: an exploratory search in the Hipparcos Catalogue. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 407(1), 458-464.
 10. Zwart, S. F. P. (2009). The lost siblings of the Sun. *The Astrophysical Journal Letters*, 696(1), L13.
 11. Looney, L. W., Tobin, J. J., & Fields, B. D. (2006). Radioactive probes of the supernova-contaminated solar nebula: evidence that the Sun was born in a cluster. *The Astrophysical Journal*, 652(2), 1755.
 12. Mishurov, Y. N., & Acharova, I. A. (2011). Is it possible to reveal the lost siblings of the Sun?. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 412(3), 1771-1777.
 13. Kroupa, P. (2001). On the variation of the initial mass function. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 322(2), 231-246.
 14. Plummer, H. C. (1911). On the problem of distribution in globular star clusters. *Monthly notices of the royal astronomical society*, 71, 460-470.
 15. Miyamoto, M., & Nagai, R. (1975). Three-dimensional models for the distribution of mass in galaxies. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 27, 533-543.
 16. Allen, C., & Santillan, A. (1991). An improved model of the galactic mass



- distribution for orbit computations. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*, 22, 255-263.
17. Pelupessy, F. I., Jänes, J., & Zwart, S. P. (2012). N-body integrators with individual time steps from Hierarchical splitting. *New Astronomy*, 17(8), 711-719.
18. Zwart, S. F. P., McMillan, S. L., van Elteren, A., Pelupessy, F. I., & de Vries, N. (2013). Multi-physics simulations using a hierarchical interchangeable software interface. *Computer Physics Communications*, 184(3), 456-468.
19. Barnes, J., & Hut, P. (1986). A hierarchical O (N log N) force-calculation algorithm. *nature*, 324 (6096), 446.
20. Fujii, M., Iwasawa, M., Funato, Y., & Makino, J. (2007). BRIDGE: A Direct-Tree Hybrid-Body Algorithm for Fully Self-Consistent Simulations of Star Clusters and Their Parent Galaxies. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 59(6), 1095-1106.
21. Hurley, J. R., Pols, O. R., & Tout, C. A. (2000). Comprehensive analytic formulae for stellar evolution as a function of mass and metallicity. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 315(3), 543-569.
22. Schönrich, R., Binney, J., & Dehnen, W. (2010). Local kinematics and the local kinematics and the local standard of rest. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 403(4), 1829-1833.
23. Bovy, J. (2014). galpy: Galactic dynamics package. *Astrophysics Source Code Library*.
24. Girardi, L., Bressan, A., Bertelli, G., & Chiosi, C. (2000). VizieR Online Data Catalog: Low-mass stars evolutionary tracks & isochrones (Girardi+, 2000). *VizieR Online Data Catalog*, 414.
25. Jordi, C., Gebran, M., Carrasco, J. M., de Bruijne, J., Voss, H., Fabricius, C., ... & Mora, A. (2010). Gaia broad band photometry. *Astronomy & Astrophysics*, 523, A48.