



Prosiding Seminar Sains Antariksa

Homepage: <http://www.lapan.go.id>



Pemodelan Non Standar Kurva Cahaya Microlensing: Memperoleh Interpretasi Fisis dari Sistem Pelensa- Sumber OB 130723

(Non Standard Light Curve Modelling To Obtain Physical Interpretation of
Microlensing Event OB 130 723)

Ichsan Ibrahim^{1,3,5}, Hakim L. Malasan¹, Anton Timur Jaelani¹, Mitra Djamal², Chatief
Kunjaya^{1,4} dan Dhimaz Gilang Ramadhan¹

(1) Program Studi Astronomi, Institut Teknologi Bandung

(2) Program Studi Fisika, Institut Teknologi Bandung

(3) Fakultas Syariah, Institut Agama Islam Negeri Ternate, Ternate

(4) Universitas Ma Chung, Malang

(5) Jurusan Teknik Informatika, STMIK-Indonesia Mandiri, Bandung

e-mail: ichsan.ibrahim@s.itb.ac.id; hakim@as.itb.ac.id; antontj@as.itb.ac.id;
mitra@fi.itb.ac.id; kunjaya@as.itb.ac.id; dhimaz.gilang@gmail.com

ABSTRAK

Riwayat Artikel:

Diterima: 19-11-2015

Direvisi: 16-10-2016

Disetujui: 19-10-2016

Diterbitkan: 24-10-2016

Kata kunci:

fotometri, pelensaan
gravitasi mikro,
pemodelan kurva cahaya

Peristiwa pelensaan gravitasi mikro adalah salah satu fenomena dari pengaruh benda masif (pelensa) yang mampu mendefleksi cahaya dari objek terang yang berada di belakang pelensa (sumber). Peristiwa tersebut dapat menghasilkan citra majemuk dan mengalami penguatan intensitas dibandingkan intensitas sumber. Sudut pisah antara citra-citra yang terbentuk dengan sumber sangat kecil (orde 10^{-6} derajat) untuk dapat terpisahkan jika dilihat oleh teleskop landas Bumi. Sehingga, kita hanya dapat mengamati perubahan intensitas cahaya sebagai fungsi dari waktu yang disebut kurva cahaya pelensa gravitasi mikro. Secara umum, kurva cahaya dari peristiwa pelensa gravitasi mikro dapat dimodelkan dengan Model Standar Kurva Cahaya, yang memiliki tiga parameter yaitu epoch, skala waktu, dan parameter dampak. Model juga dikenal sebagai model Point Source Point Lens (PSPL), yang mana, lensa dan sumber dianggap sebagai titik massa. Kecuali, jika ada informasi tambahan seperti model kinematika galaksi dan fungsi massa bintang di Galaksi Bima Sakti, kita akan mengalami kesulitan untuk memperoleh properti fisis dari lensa dan sumber. Hal tersebut membuat sulitnya melakukan interpretasi fisis yang tepat dari sistem pelensa-sumber. Untuk mengatasi masalah ini, sangat direkomendasikan untuk penggunaan dan pengembangan model kurva cahaya non-standard. Kami akan menyajikan studi sebuah model kurva cahaya dan implementasi model-model untuk satu set data fotometri event OB 130723 yang berasal dari pengamatan oleh tim Observational Gravitation Lensing Experiment (OGLE).

Keywords:

Photometry,

ABSTRACT

gravitational microlensing, light curve modelling

Gravitational microlensing event is based on the gravitational lens effect. A massive object (the lens) will bend the light of a bright background object (the source). This can generate multiple magnified and brightened images of the background source. Separation angle of the images are very small to be separated by a ground-based telescopes. Therefore, we can observe changes of the source brightness as a function of time (light curve). In general, the light curve of gravitational microlensing events can be modeled with the Standard Model Light Curve that has three parameters which are time (epoch), timescales, and impact parameter. The model also known as Point Source Point Lens model (PSPL model), in which, the lens and the source is considered as a point. Unless additional information like kinematics galaxy model and stellar mass function in the Galaxy are given, we will encounter difficulties to determine physical properties of the lens and the source and to do exact physical interpretation of the systems. To overcome this problem, it is necessary to use and developed some non-standard light curves models. We will present the study of a model of light curve and the implementation the models to a set of photometry data of OB 130723 event from Observational Gravitation Lensing Experiment (OGLE), University of Warsaw (Poland).

1 Pendahuluan

Pelensaan gravitasi mikro (Paczynski, 1986) terjadi ketika cahaya dari bintang sumber dibelokkan oleh objek kompak bermassa besar yang berada di antara sumber dan pengamat. Penguatan cahaya sumber akibat kejadian tersebut dapat berlangsung dalam beberapa hari hingga beberapa pekan. Perubahan kecerlangan sumber dapat kita amati sebagai kurva cahaya dari kejadian pelensaan gravitasi mikro. Salah satu kelompok riset yang membangun sistem untuk petunjuk awal secara rutin dari kejadian pelensaan gravitasi mikro adalah grup *Optical Gravitational Lensing Experiment* (OGLE) yang berpusat di Universitas Warsawa, Polandia (Udalski *et al.*, 1994).

Secara umum, kurva cahaya dapat dimodelkan dengan Model Kurva Cahaya Standard (Paczynski, 1996), yang memiliki tiga parameter yaitu epoch, rentang waktu, dan parameter dampak. Model itu juga dikenal sebagai model *Point Source Point Lens* (PSPL model), dengan pelensa dan sumber dianggap sebagai sebuah titik massa. Ketika pelensa memiliki lebih dari satu komponen, seperti bintang ganda atau sistem planet yang mengorbit bintang induknya, maka terdapat gangguan pada pola terang sumber yang diamati oleh pengamat. Untuk fenomena tersebut, perlu dikembangkan model kurva cahaya non standar. Pemodelan yang mengakomodasi anomali dari kurva cahaya dapat membawa ke arah pendeteksian efek-efek kecil, yang memungkinkan untuk pengukuran

sifat fisis dari sistem pelensaan gravitasi mikro yang lebih lengkap misal terungkap adanya sumber cahaya ganda (misalnya oleh Schneider dan Weiss 1986), perhitungan efek *limb-darkening* pada sumber (misalnya oleh Cassan *et al.* 2004), dan deteksi ekstra solar planet, seperti yang disarankan pertama kali oleh Mao dan Paczynski (1991) dan pertama dicapai pada tahun 2003 (Bond *et al.*, 2004).

Namun demikian, untuk mendapatkan karakterisasi penuh sistem fisis dari peristiwa anomali tersebut, biasanya membutuhkan analisis yang sangat rinci. Hal ini berlaku khususnya untuk peristiwa pelensaan gravitasi mikro yang menampilkan adanya fitur *caustic-crossing* di kurva cahaya mereka. Peristiwa ini menarik, karena mencapai sekitar 10% dari jumlah keseluruhan kejadian pelensaan gravitasi mikro yang terdeteksi, dan mereka merupakan sumber informasi yang penting tentang sifat fisik dari sistem bintang ganda (Jaroszynski *et al.*, 2006).

Tanpa skema pemodelan yang kuat dan penjelajahan lebih jauh terhadap parameter-parameter sumber ataupun pelensa yang menuntut proses komputasi, maka sangat sulit untuk mendeduksi secara lengkap bentuk alami dari sistem pelensaan gravitasi mikro.

2 Model Kurva Cahaya

2.1 Model PSPL

Untuk menggambarkan peristiwa pelensaan gravitasi mikro dapat digunakan beberapa

kuantitas statistik. Kuantitas statistik yang sering digunakan adalah kedalaman optik dan tingkat kejadian. Seperti kita ketahui, kejadian pelensa gravitasi mikro, umumnya tidak terulang. Selain itu, foton dari panjang gelombang yang berbeda akan mengikuti jalan propagasi (geodesik) yang sama. Hal ini disebabkan bahwa medan gravitasi yang dihasilkan oleh pelensa (bintang), yang mana ukurannya, relatif kecil dibandingkan dengan jarak dari pelensa ke sumber cahaya. Hal ini menyebabkan, kurva cahaya dari pelensa gravitasi mikro tidak tergantung pada warna atau panjang gelombang cahaya. Karakteristik ini digunakan sebagai kriteria pemisahan antara kurva cahaya dari peristiwa pelensa gravitasi mikro terhadap kurva cahaya dari berbagai jenis bintang variabel.

Selama kejadian pelensa gravitasi mikro, berkas cahaya dari sumber akan mencapai pengamat sepanjang jalan yang membengkok akibat pelensa. Dengan keselarasan sempurna dari posisi pengamat, pelensa dan sumber, maka pengamat akan melihat sumber tampak sebagai objek yang berbentuk cincin (disebut cincin Einstein) yang berjarak θ_E dari pelensa.

Pelensa diletakkan di pusat maka sudut defleksi cahaya sumber diberikan oleh

$$\alpha = \frac{D_{LS}}{D_S} \frac{4GM}{c^2 D_L \theta} \quad (2.1)$$

dengan G adalah konstanta gravitasi = $6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$, dan c adalah kecepatan cahaya = $2,99 \times 10^8 \text{ m detik}^{-2}$ serta M menyatakan massa pelensa dalam satuan kilogram dan D_L , D_S , secara berurutan jarak pengamat-pelensa, pengamat-sumber, dan sumber-pelensa (dalam satuan meter)

Jika kita mendefinisikan parameter dampak R yaitu dari jarak berkas cahaya yang membengkok ke arah pelensa bermassa M sebagai

$$R = \frac{D_{LS}}{D_L \theta D_S} \quad (2.2)$$

Dari (2.1) dan (2.2), diperoleh:

$$\alpha = \frac{2S_L}{R} \quad (2.3)$$

dengan S_L adalah jejari Schwarzschild dari pelensa. Jika kejadian pelensa gravitasi mikro didekati sebagai kejadian pelensa oleh lensa sferis,

maka panjang fokus efektif (F) dinyatakan sebagai berikut:

$$F = \frac{R^2}{2S_L} \quad (2.4)$$

dan dengan menggunakan formula lensa untuk optika geometri diperoleh:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{D_L} + \frac{1}{D_S - D_L} = \frac{2S_L}{R^2} \quad (2.5)$$

Dengan mencari solusi untuk R , dapat diperoleh dari cincin Einstein,

$$R_E = \sqrt{2S_L D_S X(1-X)} \quad (2.6)$$

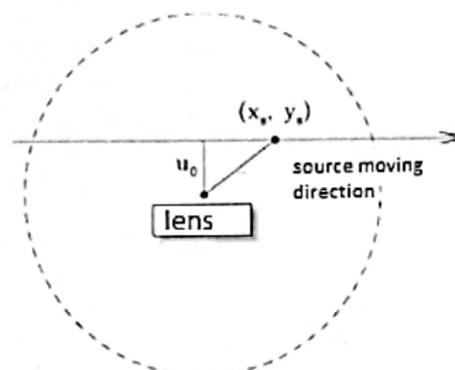
dengan $X \equiv D_L/D_S$ sebagai rasio jarak pelensa terhadap sumber (ambil $0 < X < 1$). Sehingga jejari sudut dari cincin Einstein adalah

$$\theta_E = \frac{R_E}{D_L} = \sqrt{2S_L D_S \frac{(1-X)}{X}} \quad (2.7)$$

Jika keselarasan posisi tidak terjadi, maka berkas-berkas cahaya dari tiap sisi pelensa akan mencapai pengamat. Pada kasus ini, persamaan lensa adalah persamaan kuadratik yang memiliki dua nilai akar yang berbeda

$$u_{\pm} = \frac{(u \pm \sqrt{u^2 + 4})}{2} \quad (2.8)$$

yang memberikan dua posisi dari citra sumber yaitu: > 1 untuk citra utama and < 1 untuk citra minor, dengan .



Gambar 2-1. Cincin Einstein dan lintasan sumber

Gambar 2.1 menunjukkan cincin Einstein dan lintasan sumber lintasan. Pada bidang pelensa yang tegak lurus terhadap garis pandang, didefinisikan koordinat Cartesian x dan y dengan pelensa berada di origin, bintang sumber bergerak dalam sumbu $x+$ arah dan memotong sumbu $y+$ pada jarak terdekat dari pelensa. Dalam satuan θ_E , jarak sumber - pelensa adalah

$$u = \sqrt{u_0^2 + u_x^2} \quad (2.9)$$

dengan u_0 jarak pisah terkecil, dan

$$u_x = \frac{\mu(t-t_0)}{\theta_E} = \frac{(t-t_0)}{t_E} \quad (2.10)$$

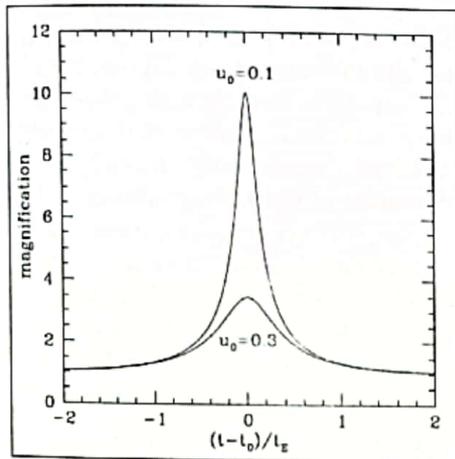
yang mana μ adalah gerak diri relatif pelensa, t_0 adalah waktu saat jarak terdekat dan adalah lama waktu yang dibutuhkan untuk melintasi cincin Einstein) yang dirumuskan oleh

$$t_E = \frac{\theta_E}{\mu} \quad (2.11)$$

Maka total penguatan cahaya sumber akibat kejadian pelensa gravitasi mikro:

$$A = \frac{u^2+2}{u\sqrt{u^2+4}} \quad (2.12)$$

karena u berubah terhadap waktu, maka persamaan (2-12) mendefinisikan karakteristik dari kurva PSPL (lihat Gambar 2-2).



Gambar 2-2. Kurva PSPL (Mao, 2008)

2.2 Ukuran sumber terbatas

Untuk titik sumber dengan penguatan yang tinggi, maka jarak pelensa-sumber mendekati Nol, sehingga penguatan cahaya sumber akan membesar menuju tak hingga. Hal ini menyebabkan terbentuknya cincin Einstein dengan penguatan tak hingga dan ketebalan yang sangat kecil. Pada kondisi ini, pendekatan sumber sebagai benda titik tidak lagi tepat, sehingga ukuran sumber menjadi penentu yang penting.

Penguatan terbatas cahaya dari sumber berukuran terbatas diberikan oleh Bennett dan Rhie (1996) dan Dominik (1998, 2007). Jejeri sudut sumber $\theta_s = R_s/D_s$ akan dapat

diperbandingkan dengan jejeri cincin Einstein θ_E . Perbandingan dapat dituliskan :

$$u_s = \frac{\theta_s}{\theta_E} = \frac{R_s}{\sqrt{2} S_L D_s X(1-X)} \quad (2.13)$$

$$= 0.0013 \left(\frac{R_s}{R_\odot}\right) \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{-0.5} \left(\frac{x}{1-x}\right)^{0.5}$$

dengan θ_s adalah jejeri linier sumber dalam satuan jejeri Matahari, M adalah massa sumber dalam satuan massa Matahari.

Efek ukuran sumber terbatas penting untuk anomali planet ketika radius sudut sumber θ_s melebihi dari cincin Einstein oleh planet yang menjadi pelensa (Bennett dan Rhie 1996). Jika $\theta_p = q^{1/2} \theta_E$, efek ukuran sumber terbatas menjadi penting ketika

$$q \lesssim \left(\frac{\theta_s}{\theta_E}\right)^2 \sim$$

$$2 \times 10^{-6} \left(\frac{R_s}{R_\odot}\right)^2 \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{-1} \left(\frac{x}{1-x}\right) \quad (2.14)$$

Jika diambil massa Bumi $m_\oplus = 3 \times 10^{-6}$ massa Matahari, maka massa planet didekati dengan

$$m_p = qM \lesssim 0.6 m_\oplus \left(\frac{R_s}{R_\odot}\right)^2 \left(\frac{x}{1-x}\right) \quad (2.15)$$

Untuk bintang sumber yang berukuran besar, anomali dari planet kecil hampir tidak tampak pada kurva cahaya sehingga tidak terdeteksi dengan mudah. Atas dasar ini, deteksi ekstra solar planet dengan massa sekitar massa Bumi akan lebih mudah jika ukuran sumber diambil berupa bintang-bintang deret utama.

2.3 Pelensa ganda

Untuk kasus pelensa ganda, dibuat modifikasi pada perumusan untuk sudut defleksi sebagai berikut

$$\alpha(x) = \frac{4G}{c^2} \left(\frac{M_1(x-x_1)}{(x-x_1)^2} + \frac{M_2(x-x_2)}{(x-x_2)^2} \right) \quad (2.16)$$

dengan M_1 = massa pelensa 1, M_2 = massa pelensa 2, x_1 = posisi relatif pelensa 1 and x_2 = posisi relatif pelensa 2.

Persamaan (2-16) menunjukkan besar sudut defleksi yang diberikan oleh dua pelensa. Karena sifat non-linear dari persamaan lensa, efek yang diberikan tidak sepenuhnya sama dengan efek yang dihasilkan oleh penjumlahan sederhana atau superposisi dua kasus pelensa tunggal. Distribusi penguatan dan letak *Caustics* (pemetaan posisi sumber pada bidang pelensa) di dalam bidang sumber akan terlihat berbeda, jika dibandingkan dengan kasus satu titik pelensa. Hal ini juga disebut juga sebagai *Critical Line*

yaitu pemetaan sejumlah lokasi sumber yang mengalami penguatan pada bidang citra.

Dalam kasus pelensa ganda, maka ada tiga parameter baru, yaitu:

1. Rasio massa (q) yaitu rasio massa dari kedua pelensa
2. Proyeksi jarak pisah kedua pelensa (d), dinyatakan dalam satuan Einstein radius
3. Sudut antara lintasan sumber dengan garis yang menghubungkan kedua pelensa (ϕ)

Schneider dan Weiss (1986) memberikan rincian tentang sifat-sifat suatu sistem yang berisi dua pelensa (dengan rasio massa $q = 1$). Dalam analisis, mereka mendapatkan tiga kelompok untuk:

- a) Jarak pisah kedua pelensa lebar ($d > 1 R_E$), maka kedua lensa dianggap sebagai dua pelensa tunggal yang mengalami gangguan kecil. *Caustic* dari pelensa yang terisolasi akan mengalami cacat menjadi berbentuk bintang dengan 4 *cusp* dan *Critical Line* berbentuk lingkaran.
- b) Jarak pisah kedua pelensa adalah sebesar $1/\sqrt{8} R_E$. Ini akan membentuk topologi yang berbeda, dua daerah di *Critical Line* mulai terpisah dan *caustics* akan dibagi menjadi tiga bagian: dua bagian berbentuk segitiga dan sebuah berbentuk bintang dengan empat *cusp* sebagai *main caustics*.
- c) Jarak pisah kedua pelensa kecil ($d < 1/\sqrt{8} R_E$), maka kedua *caustic* segitiga akan menjauh dari *main caustic*.

dalam ketiga kelompok R_E adalah jejari linier cincin Einstein.

Persamaan lensa untuk pelensa tunggal dapat dituliskan ulang menggunakan notasi bilangan kompleks sebagai berikut:

$$z_S = z - \frac{z}{z^2} = z - \frac{1}{z} \tag{2.17}$$

Analog dengan hal sebelumnya, maka persamaan pelensa ganda dituliskan dalam bentuk:

$$z_S = z - \frac{m_1}{z-z_1} - \frac{m_2}{z-z_2} \tag{2.18}$$

Konjugasi dari persamaan (2-18) adalah

$$\bar{z}_S = \bar{z} - \frac{m_1}{\bar{z}-\bar{z}_1} - \frac{m_2}{\bar{z}-\bar{z}_2} \tag{2.19}$$

Jika diperoleh dan disubstitusi ke persamaan sudut defleksi akan menghasilkan persamaan kompleks polinom orde 5. Solusi dari persamaan tersebut dapat digunakan untuk mencari sebanyak 3 sampai 5 lokasi citra hasil pelensa, yang ditentukan oleh apakah sumber

berada di dalam (5 lokasi) atau di luar (3 lokasi) terhadap kurva caustics

Total penguatan oleh pelensa ganda adalah

$$A = J^{-1} \tag{2.20}$$

dengan J is matriks Jacobian yang berasosiasi dengan persamaan (2-18)

$$J = \det \left(\frac{\partial(z_S, \bar{z}_S)}{\partial(z, \bar{z})} \right)^{-1} = \frac{1}{1 - \left| \frac{m_1}{z-z_1} + \frac{m_2}{z-z_2} \right|^2} \tag{2.21}$$

3 Data

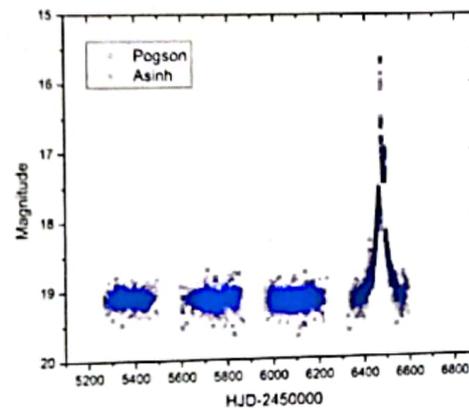
Untuk pekerjaan ini kami memilih sebuah kejadian pelensa gravitasi mikro dengan parameter kurva cahayanya yang berasal dari basis data OGLE ditampilkan pada Tabel 3-1.

Kami merekonstruksi kurva cahaya OB 130723 setelah kami mengubah data fotometri yang awalnya dari magnitudo logaritma (Pogson) ke magnitudo Asinh (lihat Ibrahim, 2015) Kami menyajikan kurva cahaya pada Gambar 3-1

Tabel 3-1

Kejadian Pelensa Gravitasi Mikro OB 130723

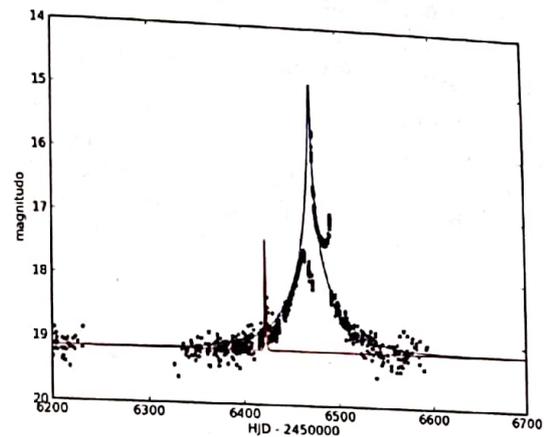
RA (2000.0)	Dekl. (2000.0)	T0 (+2450000	TE (hari)	I_0
17:34:41	-27:26:53.2	6463.37	39.396	19.14



Gambar 3-1. Kurva cahaya kejadian pelensa gravitasi mikro OB 130723 (Ibrahim, 2015)

4 Hasil dan Pembahasan

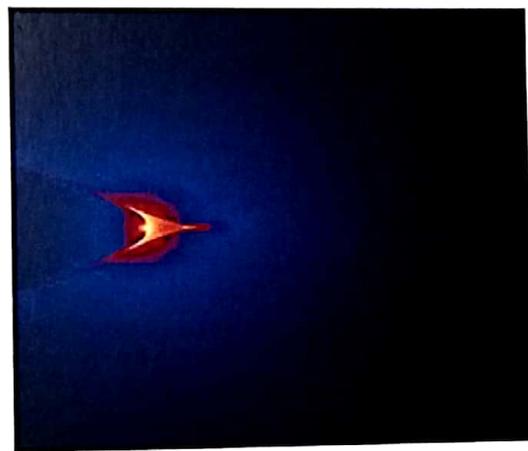
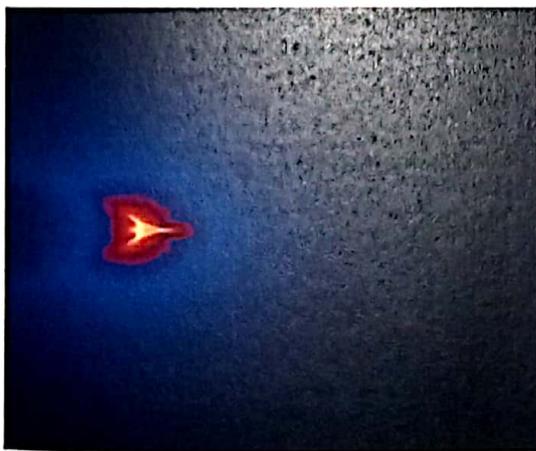
Dari data Diagram Warna-Magnitudo yang diberikan pada situs OGLE untuk event pelensaian gravitasi mikro OB130723 (<http://ogle.astrouw.edu.pl/ogle4/ews/2013/blg-0723.html>), diestimasi bahwa jarak sumber (D_s) sekitar 7 kpc ($1 \text{ pc} = 3,09 \times 10^{16}$ meter). Dengan melakukan pencocokan kurva cahaya dengan model PSPL untuk berbagai nilai parameter dampak, diperoleh sebuah nilai parameter dampak yaitu $R = 0,02$ (kurva biru) untuk puncak utama dan puncak kedua memiliki parameter dampak $R = 0,9$ (kurva merah). Jadi dapat disimpulkan bahwa peristiwa OB 130723 disebabkan oleh dua pelensa (diperlihatkan pada Gambar 4-1). Jarak sistem pelensa diperoleh dengan menggunakan persamaan (2.7) Pada persamaan dapat dihitung harga $X = D_L/D_s$ yaitu sebesar 0,082. Seterusnya dapat ditentukan bahwa jarak sistem pelensa dari pengamat adalah 575 pc. Untuk menentukan komponen pelensa yang kedua digunakan informasi dari kedua puncak. perbandingan puncak tersebut, Selanjutnya besar radius cincin Einstein diperoleh sebesar 1,76 mili detik busur.



Gambar 4-1. Pencocokan dengan model PSPL (pelensa tunggal), puncak utama memiliki $R = 0,02$ (biru) dan puncak kedua memiliki $R = 0,9$ (merah). $\chi^2 \text{ fit} = 6,6 \times 10^5$, $\text{dof} = 3212$

Untuk pencocokan dengan kurva non-standar, dilakukan simulasi peta-peta penguatan untuk pelensa ganda dengan menggunakan kode Lucky Lensing (Marnach, 2014) yang parameter input sebagai berikut:

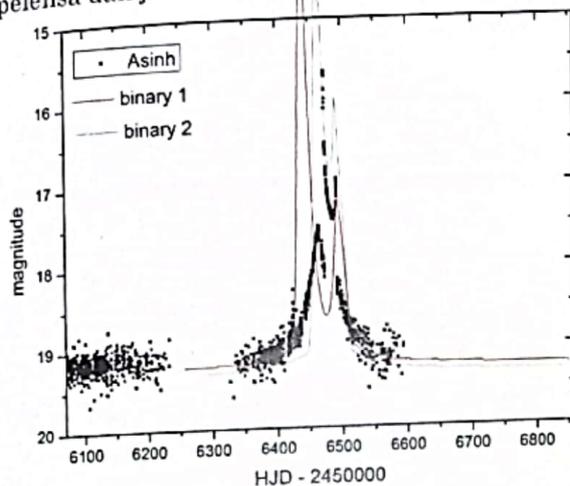
- $1,0 \times 10^{-3} < q$ (rasio massa) $< 1,0$ dengan step perhitungan: dengan $n = [0.6]$
- $0,6 \theta_E < d$ (separasi) $< 1,7 \theta_E$, dengan step perhitungan $0,1 \theta_E$



Gambar 4-2. Peta penguatan dengan parameter (atas) $d = 0,7 \theta_E$, $q = 3,16 \times 10^{-2}$ dan (bawah) $d = 0,8 \theta_E$, $q = 3,16 \times 10^{-2}$

Setelah melakukan inspeksi dan pencocokan kurva cahaya dari peta-peta penguatan yang dibuat dengan parameter input berupa rasio massa yang sama tetapi berbeda nilai separasi yaitu $d = 0,7 \theta_E$ (merah) and $d = 0,8 \theta_E$ (hijau), dipilihlah 2 buah peta yang paling cocok (Lihat Gambar 4-2). Sedangkan pencocokan kurva diberikan pada Gambar 4-3. Catatan, seluruh peta penguatan diberikan pada bagian Lampiran.

Dengan memperhatikan bentuk kurva dari model pelensa ganda dipilihlah nilai separasi yang terbaik dari model adalah $d = 0,7 \theta_E$ untuk rasio massa $q = 3,16 \times 10^{-2}$. Informasi tersebut yang digunakan untuk mendapatkan massa dari tiap pelensa dan jarak antar pelensa



Gambar 4-3. Pencocokan kurva cahaya dengan model non standard (pelensa ganda)

5 Kesimpulan

Dari pencocokan kurva dan proses perhitungan dengan menggunakan parameter dari model kurva cahaya yang digunakan, dapat diperoleh beberapa properti fisis dari sistem pelensa gravitasi mikro untuk kejadian pelensa OB130723 yaitu:

- penguatan total $A = 15,38$
- parameter dampak $R = 0,9$ (puncak kedua)
- radius sudut cincin Einstein $\theta_E = 1,76 \times 10^{-3}''$
- radius cincin Einstein $= 1,01$ AU
- gerak diri relatif $\mu_{\text{relatif}} = 1,36 \times 10^{-3}''/\text{tahun}$
- jarak pisah sudut antara pelensa $d = 0,7 \times 2 \theta_E = 2,46 \times 10^{-3}''$
- jarak pisah antar pelensa $= 1,41$ AU
- rasio massa $q = 3,16 \times 10^{-2}$
- massa pelensa 1 (M_1) $= 0,09$ massa Matahari (1 massa Matahari $= 1,99 \times 10^{30}$ kg)
- massa pelensa 2 (M_2) $= 0,0028$ massa Matahari $= 2,93$ massa Jupiter (M_J). Sebagai

pembandingan digunakan satuan massa planet Jupiter. (Massa planet Jupiter $= 1.898 \times 10^{27}$ kg $\approx 9.55 \times 10^{-4}$ massa Matahari)

Dapat disimpulkan bahwa pelensa gravitasi mikro tersebut disebabkan oleh pelensa ganda dengan pelensa pertama adalah bintang bermasa rendah dan pelensa kedua berupa benda dengan massa sekitar massa Jupiter.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini disupport oleh dana dari "Program Riset dan Inovasi KK" Institut Teknologi Bandung untuk periode Februari-Maret 2014.

Penelitian ini juga merupakan salah satu bagian dari disertasi Ichsan Ibrahim pada program pascasarjana Astronomi ITB. Ichsan Ibrahim berterima kasih kepada Kemenristek DIKTI atas pemberian beasiswa BPPDN untuk periode 2011-2014.

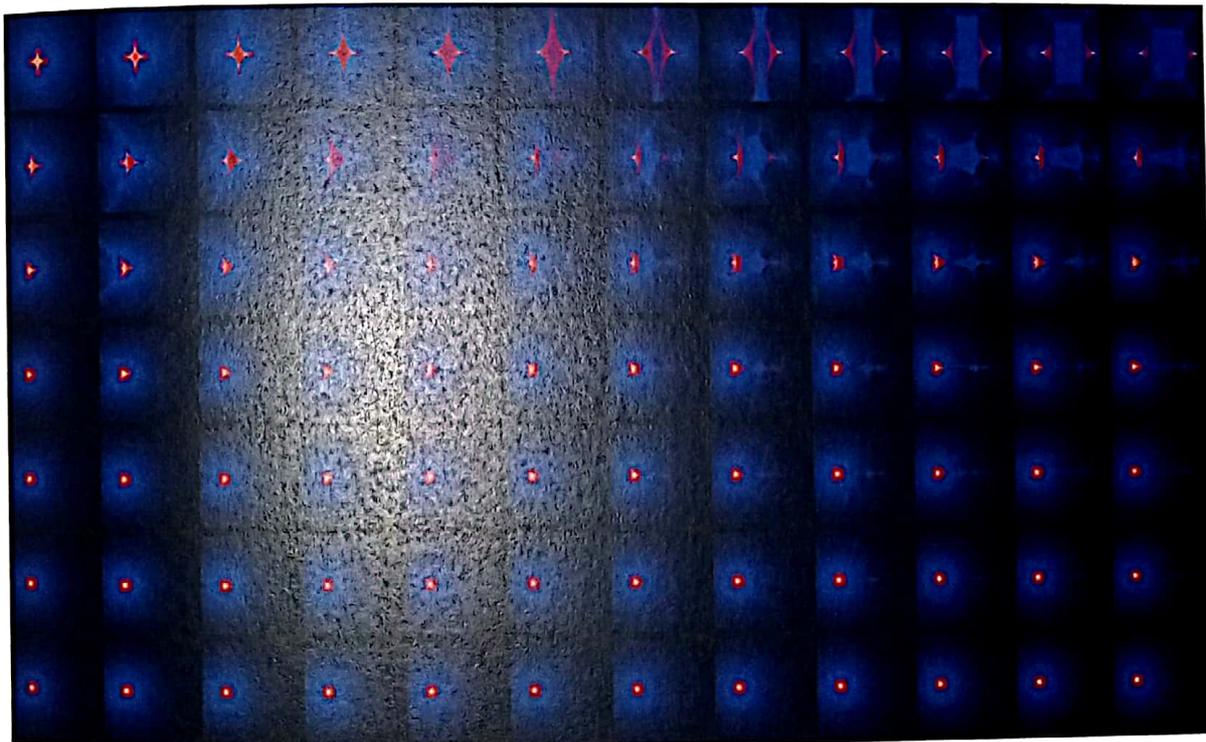
Rujukan

- Bennett, D. P., Rhie, S. H. (1996). Detecting Earth-Mass Planets with Gravitational Microlensing, *Astrophysical Journal*, 472, 660-664.
- Bond, I. A., Udalski, A., Jaroszyński, M., Rattenbury, N. J. et al. (2004). OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53: A Planetary Microlensing Event, *Astrophysical Journal*, 606, L155-L158.
- Cassan, A., Beaulieu, J. P., Brilant, S. (2004). Probing the atmosphere of the bulge G5III star OGLE-2002-BUL-069 by analysis of microlensed Ha line, *Astronomy & Astrophysics*, 419, L1-L4.
- Dominik, M. (1998). A robust and efficient method for calculating the magnification of extended sources caused by gravitational lenses, *Astronomy & Astrophysics*, 333, L79-L82.
- Dominik, M., Rattenbury, N. J., Allan, A. (2007). An anomaly detector with immediate feedback to hunt for planets of Earth mass and below by microlensing, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 380, 792-804.
- Ibrahim, I. Djamal, M., Malasan, H. L. (2015). Detection Level Enhancement of Gravitational Microlensing Events from The Light Curves: The Simulations, *Publication of The Korean Astronomical Society*, 30, 235-236.

- Jaroszynski, M., Skowron, J., Udalski, A. (2006). Binary Lenses in OGLE-III EWS Database. Season 2004, *Acta Astronomica*, 56, 307-332.
- Marnach, S. (2014). A library and a GUI for computations in the context of gravitational microlensing, <http://github.com/smarnach/luckylensing>.
- Mao, S. (2008). Introduction to Gravitational Microlensing in *The Manchester Microlensing Conference*, <https://arxiv.org/abs/0811.0441>.
- Mao, S. and Paczynski, B. (1991). Gravitational microlensing by double stars and planetary systems, *Astrophysical Journal*, 374, L37-L40.
- Paczynski, B. (1986). Gravitational microlensing by the galactic halo, *Astrophysical Journal*, 304, 1-5.
- Paczynski, B. (1996). Gravitational Microlensing in the Local Group, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 34, 419-460.
- Schneider, P., Weiss, A. (1986). The two-point-mass lens - Detailed investigation of a special asymmetric gravitational lens, *Astronomy and Astrophysics*, 164, 237-259.
- Udalski, A., Szymanski, M., Kaluzny, J. (1994). The Optical Gravitational Lensing Experiment. The Early Warning System: Real Time Microlensing, *Acta Astronomica*, 44, 227-234.

Sumber data:

<http://ogle.astrouw.edu.pl/ogle4/ews/2013/blg-0723.htm>



Lampiran 1. Peta Penguatan (seluruh parameter) parameter $1,0 \times 10^{-3} < q$ (rasio massa) $< 1,0$, step: dengan $n = [0..6]$ (kolom) parameter $0,6 \theta_E < d$ (separasi) $< 1,7 \theta_E$ (baris), step: $0,1 \theta_E$ (baris)