

**(D01) 30 Tahun Eksoplanet**

**[90 marks]**

Soal ini mengeksplorasi beberapa aspek dari dua metode utama deteksi eksoplanet: kecepatan radial dan transit. Sepanjang soal ini kita akan mengandaikan suatu sistem yang terdiri dari satu planet (P) dalam orbit melingkar dengan radius  $a$  mengelilingi sebuah bintang tipe matahari (S). Kita akan menyebut sistem ini sebagai "sistem SP".

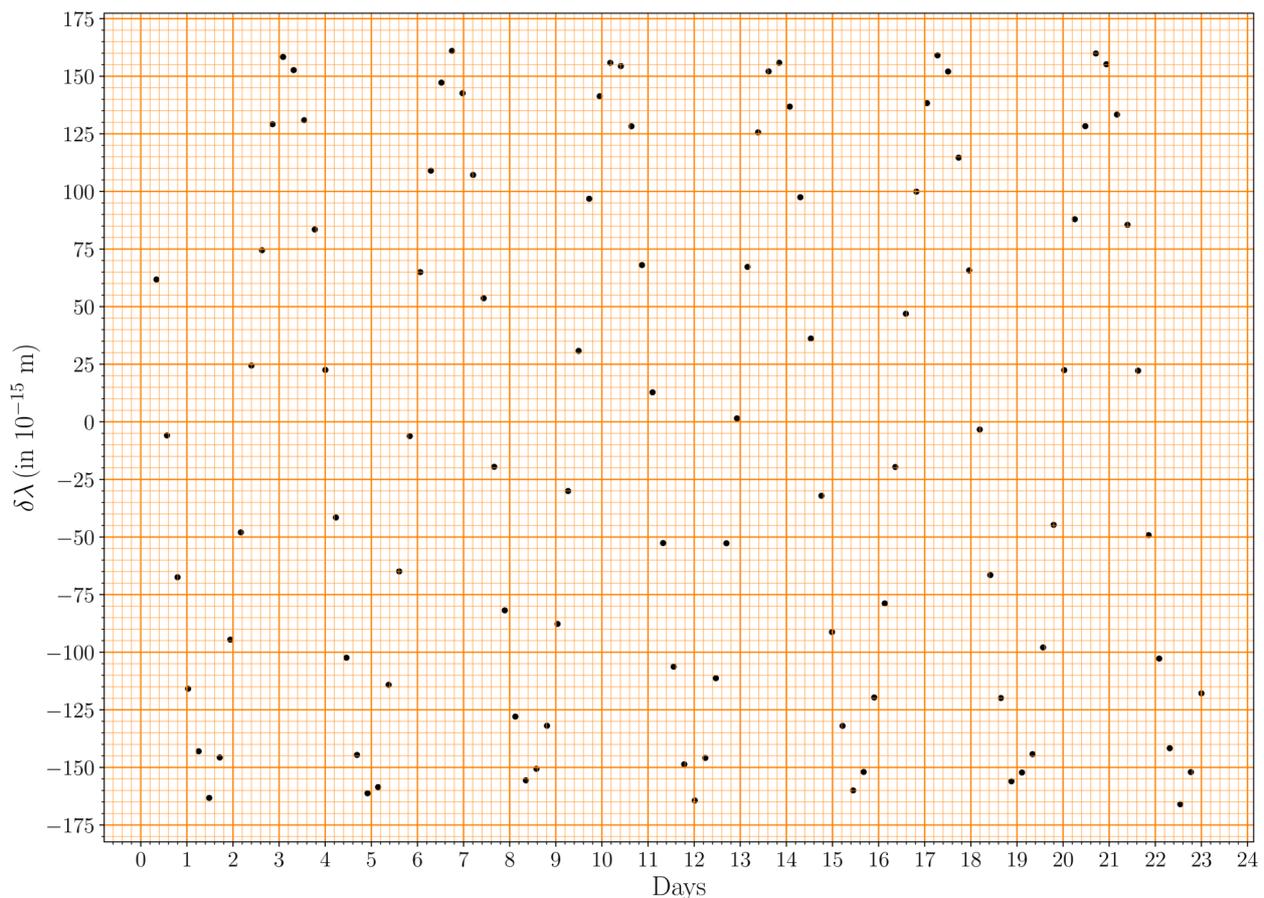
(D01.1) Magnitudo semu pada filter-V dari bintang S adalah  $7,65 \pm 0,03$  mag, paralaks adalah  $20,67 \pm 0,05$  milidetik busur dan koreksi bolometrik (BC) adalah  $-0,065$  mag. Dengan demikian bintang tersebut memiliki magnitudo bolometrik yang lebih terang daripada luminositas pada filter V.

Perkirakan massa bintang,  $M_s$  (dalam satuan  $M_\odot$ ), dengan mengasumsikan hubungan massa - [8] luminositas ( $M-L$ ) dalam bentuk  $L \propto M^4$ . Juga perkirakan ketidakpastian dalam  $M_s$ . Anda mungkin memerlukan  $d \ln x / dx = 1/x$ .

**Metode Kecepatan Radial**

Metode kecepatan radial menggunakan pergeseran Doppler  $\delta\lambda \equiv \lambda_{\text{obs}} - \lambda_0$  antara panjang gelombang yang diamati  $\lambda_{\text{obs}}$  dan panjang gelombang diam  $\lambda_0$  dari garis sebuah spektrum yang diketahui untuk mendeteksi eksoplanet dan menentukan karakteristiknya.

Gambar di bawah ini menunjukkan  $\delta\lambda$  untuk garis Fe I ( $\lambda_0 = 543.45 \times 10^{-9}$  m) sebagai fungsi waktu seperti yang diamati untuk sistem SP.



Semi-amplitudo kecepatan radial  $K$  didefinisikan sebagai  $K \equiv (v_{r, \text{max}} - v_{r, \text{min}})/2$  di mana  $v_{r, \text{max}}$  dan  $v_{r, \text{min}}$  masing-masing adalah kecepatan radial maksimum dan minimum. Untuk orbit planet yang melingkar, semi-amplitudo  $K$  dapat ditulis sebagai:

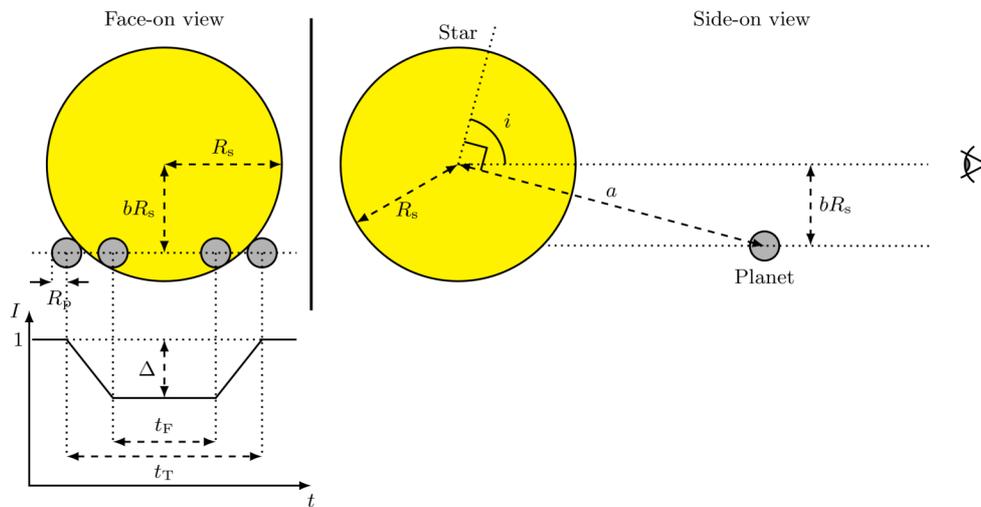
$$K = \left( \frac{2\pi G}{T} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_p + M_s)^{2/3}}$$

di mana  $T$  adalah periode,  $i$  adalah kemiringan orbit planet (sudut antara normal bidang orbit planet dan garis pandang pengamat),  $M_p$  dan  $M_s$  masing-masing adalah massa planet dan bintang.

- (D01.2) Gunakan grafik di atas yang diberikan dalam Lembar Jawaban Ringkasan (yang diputar 90 deg) untuk menjawab pertanyaan berikut.
- (D01.2a) Gambarkan kurva mulus yang terkait dengan data pengamatan yang ditunjukkan [2] dalam grafik.
- (D01.2b) Pilih titik-titik yang sesuai pada kurva yang Anda gambar dan gunakan metode yang tepat untuk menentukan  $T$  dan  $K$  beserta ketidakpastiannya masing-masing. Semua titik data yang digunakan untuk perhitungan  $T$  dan  $K$  harus ditunjukkan dalam tabel di Lembar Jawaban Ringkasan. Gunakan sisa Tabel untuk menunjukkan perhitungan Anda, sesuai kebutuhan, dengan keterangan yang sesuai. [11]
- (D01.2c) Hitung massa minimum planet  $M_{p, \min}$  (dalam  $M_\odot$ ), dan ketidakpastiannya sesuai dengan asumsi  $M_p \ll M_s$ . [5]
- (D01.2d) Dengan menggunakan nilai  $M_{p, \min}$  yang diperkirakan pada bagian (D01.2c), hitunglah nilai minimum sumbu semi-mayor orbit planet,  $a_{\min}$ , dalam satuan astronomi dan ketidakpastiannya. [4]

**Metode transit (tanpa penggelapan tepi)**

Diagram skematik transit planet (tidak digambar sesuai skala) ditunjukkan di bawah ini. Awalnya, kita akan mengasumsikan piringan bintang memiliki intensitas rata-rata yang seragam dengan beberapa noise intrinsik karena bintang itu sendiri.



Kurva cahaya dari intensitas yang dinormalisasi,  $I$ , sebagai fungsi waktu  $t$  ditunjukkan dalam diagram skematik transit di atas. Intensitas bintang rata-rata di luar transit diambil sebagai satu. Penurunan maksimum intensitas diberikan oleh  $\Delta$  pada kurva cahaya yang dinormalisasi. Untuk piringan bintang dengan kecerahan seragam, jari-jari planet,  $R_p$ , berhubungan dengan  $\Delta$  sebagai

$$\left(\frac{R_p}{R_s}\right)^2 = \Delta,$$

di mana  $R_s$  adalah jari-jari bintang.

Durasi total transit (ketika sebagian atau seluruh planet menutupi piringan bintang) diberikan oleh  $t_T$ , sementara  $t_F$  memberikan durasi ketika planet sepenuhnya berada di depan piringan bintang. "Parameter impak"  $b$  adalah jarak yang diproyeksikan antara planet dan pusat piringan bintang pada titik tengah transit, dalam satuan jari-jari bintang,  $R_s$ .

Untuk orbit bintang-planet yang hampir *edge-on*, parameter impak diberikan oleh rumus

$$b = \left[ \frac{(1 - \sqrt{\Delta})^2 - (t_F/t_T)^2(1 + \sqrt{\Delta})^2}{1 - (t_F/t_T)^2} \right]^{1/2}$$

- (D01.3) Untuk sistem SP, jari-jari bintang diketahui sebesar  $R_s = 1.20R_\odot$ , dan transit planet memang terlihat. Dengan menggunakan jari-jari orbit minimum,  $a_{\min}$ , yang diperkirakan pada bagian (D01.2d), temukan nilai minimum,  $i_{\min}$ , dari sudut inklinasi. [3]

Dengan asumsi piringan bintang memiliki kecerahan yang seragam, kurva cahaya transit akan terlihat seperti yang ditunjukkan di bawah ini.



- (D01.4) Dengan menggunakan kurva cahaya yang diberikan, jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut. Untuk referensi Anda, kurva cahaya di atas juga diberikan dalam Lembar Jawaban Ringkasan.

(D01.4a) Perkirakan nilai  $t_T$  dan  $t_F$  dalam satuan hari dengan menandai posisi yang sesuai pada grafik. [3]

(D01.4b) Perkirakan nilai rata-rata  $\Delta$  dengan menandai posisi yang sesuai pada grafik dan kemudian tentukan  $R_p$  dalam satuan  $R_\odot$ . [2]

(D01.4c) Tentukan nilai  $i$  dalam derajat dengan asumsi radius orbit adalah  $a_{\min}$ . [2]

### Memperkenalkan penggelapan tepi

Sejauh ini kita telah mengasumsikan bahwa piringan bintang memiliki kecerlangan yang seragam. Pada kenyataannya, kecerlangan yang teramati pada piringan bintang tidak seragam karena "penggelapan tepi" — efek optik di mana bagian tengah piringan bintang tampak lebih terang daripada tepinya, atau "limb".

Efek penggelapan tepi dapat diukur dengan intensitas relatif  $J(\theta) \equiv \frac{I(\theta)}{I(0)}$ , di mana  $\theta$  adalah sudut antara garis normal pada permukaan bintang di suatu titik dan garis yang menghubungkan pengamat ke titik tersebut,  $I(\theta)$  adalah intensitas teramati dari piringan bintang pada titik tersebut ( $I(0)$  adalah intensitas di pusat piringan bintang). Untuk pengamat yang jauh,  $\theta$  bervariasi dari  $\theta = 0$  (pusat piringan) hingga  $\theta \approx 90^\circ$  (tepi piringan).

(D01.5) Tabel di bawah ini memberikan pengukuran  $J(\theta)$  pada panjang gelombang tertentu untuk Matahari. Kita akan mengasumsikan bahwa profil penggelapan tepi yang sama berlaku untuk bintang S.

$\theta$	$J(\theta)$	$\theta$	$J(\theta)$	$\theta$	$J(\theta)$	$\theta$	$J(\theta)$
$0^\circ$	1.000	$20^\circ$	0.971	$40^\circ$	0.883	$70^\circ$	0.595
$10^\circ$	0.994	$25^\circ$	0.950	$50^\circ$	0.794	$80^\circ$	0.475
$15^\circ$	0.984	$30^\circ$	0.943	$60^\circ$	0.724	$90^\circ$	0.312

Profil penggelapan tepi dapat dimodelkan dengan rumus kuadrat:

$$J(\theta) = 1 - a_1(1 - \cos \theta) - a_2(1 - \cos \theta)^2,$$

di mana  $a_1$  dan  $a_2$  adalah dua konstanta.

Kita akan memperkirakan koefisien yang tidak diketahui  $a_1$  dan  $a_2$  dari data yang diberikan dengan membuat plot dengan variabel yang sesuai.

(D01.5a) Pilih sepasang variabel  $(x_1, y_1)$  yang merupakan fungsi yang sesuai dari  $\theta$  dan  $J$ , yang ingin Anda plot di sepanjang sumbu  $x$  dan  $y$ , masing-masing, untuk menentukan  $a_1$  dan  $a_2$ . Tuliskan ekspresi untuk  $x_1$  dan  $y_1$ . [2]

Jika Anda perlu mendefinisikan variabel tambahan untuk plot tambahan, definisikan sebagai  $(x_2, y_2)$ , dll.

(D01.5b) Masukkan nilai-nilai yang diperlukan untuk plot Anda ke dalam tabel. [4]

(D01.5c) Plot variabel yang baru didefinisikan pada kertas grafik yang diberikan (tandai grafik Anda sebagai "D01.5c"). [7]

(D01.5d) Dapatkan  $a_1$  dan  $a_2$  dari plot tersebut. Ketidakpastian pada nilai-nilai tidak diperlukan. [7]

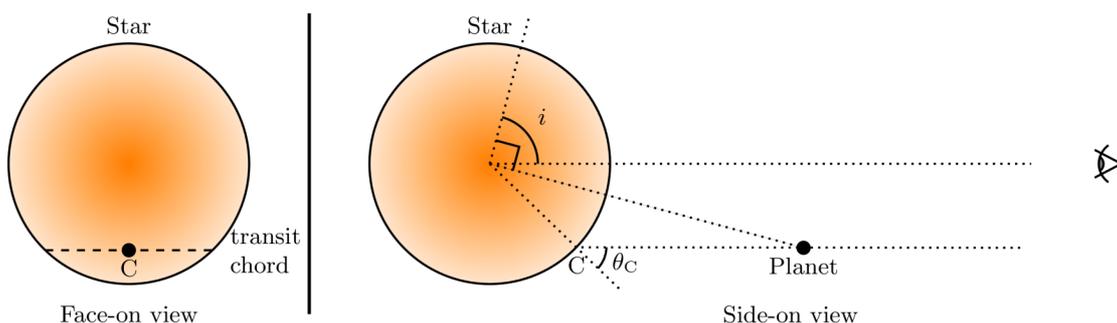
### Transit dengan keberadaan limb darkening

Sekarang, kita mempertimbangkan transit planet melintasi piringan bintang yang mengalami limb darkening. Dengan adanya limb darkening, yang akan kita modelkan dengan rumus kuadratik dari  $J(\theta)$  yang diberikan di atas, intensitas rata-rata yang teramati dari seluruh piringan bintang (tanpa transit),  $\langle I \rangle$ , diberikan oleh:

$$\langle I \rangle = \left(1 - \frac{a_1}{3} - \frac{a_2}{6}\right) I(0)$$

Selanjutnya, penurunan cahaya yang disebabkan oleh planet yang transit, sekarang tidak hanya bergantung pada ukuran relatif planet dan bintang,  $\left(\frac{R_p}{R_s}\right)$ , tetapi juga pada profil intensitas piringan bintang sepanjang lintasan transit, yang pada gilirannya, bergantung pada sudut inklinasi,  $i$ .

Diagram skematik di bawah ini (tidak digambar sesuai skala) menunjukkan konfigurasinya. Perhatikan bahwa bagian bintang yang lebih terang ditunjukkan dengan warna yang lebih gelap, sementara planet ditunjukkan sebagai titik hitam.



Di sini hubungan antara  $\left(\frac{R_p}{R_s}\right)$  dan  $\Delta$  yang diukur dari kurva cahaya adalah

$$\Delta = \frac{I(\theta_C)}{\langle I \rangle} \left(\frac{R_p}{R_s}\right)^2,$$

di mana  $I(\theta_C)$  adalah intensitas piringan bintang pada titik tengah lintasan transit (titik C dalam gambar di atas),  $\theta_C$  adalah sudut antara garis pandang dan normal ke permukaan pada titik tersebut. Dari penjelasan di atas, jelas bahwa untuk bintang tertentu, nilai  $\Delta$  yang sama dapat dihasilkan oleh banyak kombinasi ukuran planet,  $R_p$ , dan sudut inklinasi  $i$ .

(D01.6) Dimungkinkan untuk menghitung secara unik parameter  $R_p$  maupun  $i$  dengan menggunakan data dari kurva cahaya transit pada dua panjang gelombang, misalnya,  $\lambda_B$  (biru) dan  $\lambda_R$  (merah). Koefisien penggelapan tepi untuk kedua panjang gelombang ini diberikan di bawah ini:

Panjang Gelombang	$a_1$	$a_2$
$\lambda_B$	0.82	0.05
$\lambda_R$	0.24	0.20

(D01.6a) Pilih pernyataan yang benar di antara pernyataan berikut ini yang menggambarkan hubungan antara kedalaman maksimum transit  $\Delta$  untuk  $\lambda_B$  dan sudut inklinasi ( $i$ ) dari orbit dan beri tanda centang (✓) pada Lembar Jawaban Ringkasan. [2]

- A.  $\Delta$  meningkat dengan menurunnya  $i$ .
- B.  $\Delta$  menurun dengan menurunnya  $i$ .
- C.  $\Delta$  tidak bergantung pada  $i$ .

(D01.6b) Kedalaman maksimum transit ( $\Delta$ ) untuk "sistem SP" diukur sebesar 0,0182 dan 0,0159 untuk  $\lambda_B$  dan  $\lambda_R$ , masing-masing. [4]

Gambarkan kurva cahaya transit skematik untuk kedua  $\lambda_B$  dan  $\lambda_R$  pada grid yang diberikan dan beri label kurva dengan "B" dan "R", masing-masing. Asumsikan bahwa durasi transit total sama untuk kedua panjang gelombang. Kurva tidak perlu sesuai skala, tetapi harus mewakili bentuk kurva cahaya dengan benar.

(D01.7) Kita akan menggunakan metode grafis untuk menemukan nilai  $R_p$  dan  $i$  untuk sistem SP menggunakan pengukuran  $\Delta$  pada  $\lambda_B$  dan  $\lambda_R$ .

(D01.7a) Tuliskan ekspresi yang sesuai yang menghubungkan variabel-variabel relevan yang akan diplot. (Petunjuk: Anda dapat mempertimbangkan  $i$  atau  $b$ , dan  $R_p$ , di antara variabel-variabel yang relevan.) [6]

(D01.7b) Tuliskan pada tabel kuantitas-kuantitas yang akan diplot. [5]

(D01.7c) Gambarkan grafik yang sesuai dan tandai sebagai "D01.7c". [7]

(D01.7d) Perkirakan nilai  $R_p$  (dalam  $R_\odot$ ) dan  $i$  (dalam derajat) dari grafik tersebut. [4]

(D01.8) Berdasarkan hasil yang diperoleh dalam soal ini, tunjukkan apakah planet P adalah "BERBATU" atau "GAS" dengan memberi tanda (✓) pada kotak yang sesuai di Lembar Jawaban Ringkasan. [2]

**(D02) Memprediksi waktu kedatangan lontaran massa korona di Bumi**

**[60 marks]**

Matahari terkadang melepaskan plasma bermagnet, yang disebut lontaran massa korona (CME), yang berasal dari permukaan Matahari dan menyebar ke luar. Prediksi yang akurat tentang waktu kedatangan mereka di Bumi sangat penting untuk memahami dan mengurangi potensi efeknya pada satelit yang mengorbit Bumi. Dalam masalah ini, kita bertujuan untuk memprediksi waktu kedatangan CME dengan mengembangkan model empiris, menggunakan data dari 10 CME. Sepanjang masalah ini, jarak antara permukaan Matahari dan Bumi dianggap sebesar  $214R_{\odot}$ .

Selanjutnya, asumsikan bahwa Matahari tidak berotasi. Karena gaya elektromagnetik, gravitasi, dan hambatan, CME mengalami percepatan yang bervariasi sepanjang perjalanannya. Dalam dua bagian pertama soal ini, kita mengasumsikan bahwa wilayah antara Matahari dan Bumi adalah vakum

**CME melalui ruang hampa.**

(D02.1) Kecepatan awal,  $u$ , di permukaan matahari ( $= 1R_{\odot}$ ), kecepatan akhir,  $v$ , saat mencapai Bumi, dan waktu untuk saat tiba di Bumi setelah meninggalkan permukaan Matahari (dalam jam),  $\tau$ , diberikan untuk 10 CME dalam tabel berikut.

CME	$u$	$v$	$\tau$
Nama	( $\text{km s}^{-1}$ )	( $\text{km s}^{-1}$ )	(h)
CME-A	804	470	74.5
CME-B	247	360	127.5
CME-C	523	396	103.5
CME-D	830	415	71.0
CME-E	665	400	104.5
CME-F	347	350	101.5
CME-G	446	375	99.5
CME-H	155	360	97.0
CME-I	1016	515	67.0
CME-J	683	410	54.0

(D02.1a) Hitunglah percepatan rata-rata,  $a$ , untuk setiap CME dalam  $\text{m s}^{-2}$ . **[3]**

(D02.1b) Kita mengasumsikan model empiris untuk percepatan,  $a_{\text{model}}$ , dari CME, yang bergantung pada kecepatan awalnya  $u$  sebagai,  $a_{\text{model}} = m \left( \frac{u}{u_0} \right) + \alpha$ ; di mana,  $a_{\text{model}}$  dinyatakan dalam  $\text{m s}^{-2}$ ,  $u$  dinyatakan dalam  $\text{km s}^{-1}$  dan  $u_0 = 1,00 \times 10^3 \text{ km s}^{-1}$ .

Tentukan konstanta  $m$  dan  $\alpha$  beserta ketidakpastiannya menggunakan grafik yang sesuai (tanda grafik Anda sebagai "D02.1b"). **[15]**

(D02.1c) Untuk setiap CME, tabulasikan  $a_{\text{model}}$  dalam  $\text{m s}^{-2}$ . Oleh karena itu hitunglah deviasi akar-rata-rata-kuadrat (rms) dari percepatan,  $\delta a_{\text{rms}}$ , antara percepatan yang dihitung,  $a$ , dan nilai model,  $a_{\text{model}}$ . **[4]**

(D02.2) Kita andaikan dua CME lainnya: CME-1 dan CME-2, dengan kecepatan awal,  $u = 1044 \text{ km s}^{-1}$  dan  $273 \text{ km s}^{-1}$ , masing-masing.

(D02.2a) Dengan menggunakan model empiris yang diperoleh pada (D02.1b), hitunglah prediksi waktu kedatangan kedua CME di Bumi,  $\tau_{1, m}$  dan  $\tau_{2, m}$  (dalam jam), masing-masing untuk CME-1 dan CME-2. **[4]**

(D02.2b) Waktu kedatangan yang diamati di Bumi untuk CME-1 dan CME-2 masing-masing adalah 46,0 jam dan 74,5 jam. Model empiris dianggap VALID untuk CME tertentu jika waktu kedatangan yang diprediksi berada dalam rentang 20% dari waktu kedatangan yang diamati; jika tidak, model tersebut TIDAK VALID. Tunjukkan validitas model untuk setiap CME dengan memberi tanda centang (✓) pada kotak yang sesuai di Lembar Jawaban Ringkasan. [2]

**CME dengan kehadiran angin matahari**

Pada kenyataannya, ruang antara Matahari dan Bumi dipenuhi dengan angin matahari, yang memberikan gaya hambat pada CME. Gaya hambat ini dapat memperlambat atau mempercepat CME, tergantung pada kecepatan CME relatif terhadap kecepatan angin matahari. Untuk memperhitungkan pengaruh angin matahari, kita akan menggunakan model "drag-only" untuk jarak  $R_{obs}(t) \geq R_0$ , di mana  $R_0$  adalah jarak di mana gaya hambat menjadi gaya dominan yang mempengaruhi gerakan CME.

Jarak dari permukaan Matahari yang ditentukan dari model "drag-only",  $R_D(t)$ , dan kecepatan,  $V_D(t)$ , dari CME dalam model ini diberikan oleh

$$R_D(t) = \frac{S}{\gamma} \ln [1 + S\gamma(V_0 - V_s)(t - t_0)] + V_s(t - t_0) + R_0$$

$$V_D(t) = \frac{V_0 - V_s}{1 + S\gamma(V_0 - V_s)(t - t_0)} + V_s$$

di mana,  $\gamma = 2 \times 10^{-8} \text{ km}^{-1}$ ,  $V_s$  adalah kecepatan konstan angin matahari,  $R_0$  dan  $V_0$  adalah jarak dan kecepatan, masing-masing, pada waktu  $t_0$ , dan  $S$  adalah faktor tanda.  $S = 1$  jika  $V_0 > V_s$ ;  $S = -1$  jika  $V_0 \leq V_s$ .

(D02.3) Tabel di bawah ini menunjukkan jarak radial yang diamati dari permukaan Matahari,  $R_{obs}(t)$  (diukur dalam  $R_\odot$ ), sebagai fungsi waktu,  $t$  (dalam jam), untuk dua CME: CME-3 dan CME-4. Titik data terakhir di setiap tabel (masing-masing D5 dan P8) sesuai dengan waktu kedatangan CME masing-masing di Bumi. Untuk bagian ini, asumsikan  $V_s = 330 \text{ km s}^{-1}$ .

CME-3		
Titik data	$t$ (dalam jam)	$R_{obs}(t)$ (dalam $R_\odot$ )
D1	0.200	6.36
D2	0.480	7.99
D3	1.22	11.99
D4	1.49	13.51
D5	58.05	214

CME-4		
Titik data	$t$ (dalam jam)	$R_{obs}(t)$ (dalam $R_\odot$ )
P1	1.00	4.00
P2	3.00	6.00
P3	4.00	9.00
P4	5.00	11.0
P5	21.0	43.0
P6	50.0	100
P7	85.0	170
P8	111	214

Kita akan mengevaluasi apakah model "drag-only" dapat dengan baik memprediksi waktu kedatangan CME ini. Untuk menggunakan model ini, pilih nilai yang tepat dari  $t_0$ , dan  $R_0$  serta  $V_0$ .

- (D02.3a) Untuk CME-3, ambil dua kasus berikut: [6]  
 (C1)  $t_0$  diambil sebagai titik tengah dari interval D1 – D2  
 (C2)  $t_0$  diambil sebagai titik tengah dari interval D3 – D4  
 Asumsikan kecepatan tetap konstan pada setiap interval spesifik D1–D2 dan D3–D4, tetapi mungkin berbeda antara kedua interval tersebut.
- Gunakan  $t_0$ ,  $R_0$ , dan  $V_0$ , hitunglah perbedaan antara jarak radial yang diamati dan yang diprediksi  $\delta R_D \equiv R_{\text{obs}}(t) - R_D(t)$  dalam satuan  $R_\odot$  pada  $t = 58,05$  jam, untuk masing-masing dari kedua kasus tersebut.
- (D02.3b) Hitung  $R_D(t)$  pada titik-titik P5, P6, P7, dan P8 antara Matahari dan Bumi untuk CME-4 untuk dua kasus berikut dengan mengadopsi prosedur yang mirip dengan (D02.3a): [4]  
 (C3)  $t_0$  diambil sebagai titik tengah dari interval P1 – P2  
 (C4)  $t_0$  diambil sebagai titik tengah dari interval P3 – P4.
- (D02.3c) Buatlah plot  $R_D(t)$  (dalam  $R_\odot$ ) vs  $t$  (dalam jam) untuk kedua kasus, C3 dan C4, untuk CME-4 pada titik-titik P5, P6, P7, dan P8 (tandai grafik Anda sebagai "D02.3c"). Pada grafik yang sama, gambarkan kurva halus  $R_D(t)$  untuk kedua kasus yang disebutkan di atas. Untuk bagian ini, ambil rentang sumbu  $x$  dari 0 hingga 180 jam. [10]
- (D02.3d) Dengan menggunakan grafik tersebut, perkirakan perbedaan absolut,  $|\delta\tau|$  antara waktu kedatangan sebenarnya dari CME-4 di Bumi dan waktu kedatangannya yang diprediksi oleh model drag-only, untuk masing-masing kasus C3 dan C4. [4]
- (D02.3e) Tunjukkan apakah pernyataan berikut BENAR atau SALAH dengan mencentang ( $\checkmark$ ) kotak yang sesuai di Lembar Jawaban Ringkasan (tidak perlu justifikasi tertulis):  
 "Gaya hambat yang diberikan oleh angin matahari pada CME menjadi dominan untuk CME-3 pada waktu yang lebih awal dibandingkan dengan CME-4". [1]
- (D02.4) Andaikan gaya hambat sebagai gaya dominan yang bekerja pada 10 CME di bagian D02.1. Asumsikan bahwa model "drag-only" berlaku dari permukaan Matahari ( $R_0 = 1 R_\odot$ ) dan seterusnya, untuk semua CME. [7]  
 Perkirakan dan tabulasikan kecepatan angin matahari  $V_s$  dalam  $\text{km s}^{-1}$  untuk setiap CME. Selanjutnya, perkirakan kecepatan angin matahari rata-rata  $V_{s, \text{avg}}$  untuk semua 10 CME.