

(D01) Ötegezegenlerin 30 Yılı

[90 puan]

Bu soru, ötegezegen keşfetmenin iki temel yönteminin bazı yönlerini incelemektedir: dikine hız ve geçiş yöntemi. Bu soruda, bir Güneş-türlü yıldız (S) etrafında a yarıçaplı çembersel yörüngedeki tek bir gezegen (P) sistemini ele alacağız. Bu sistemi "SP sistemi" olarak adlandıracğız.

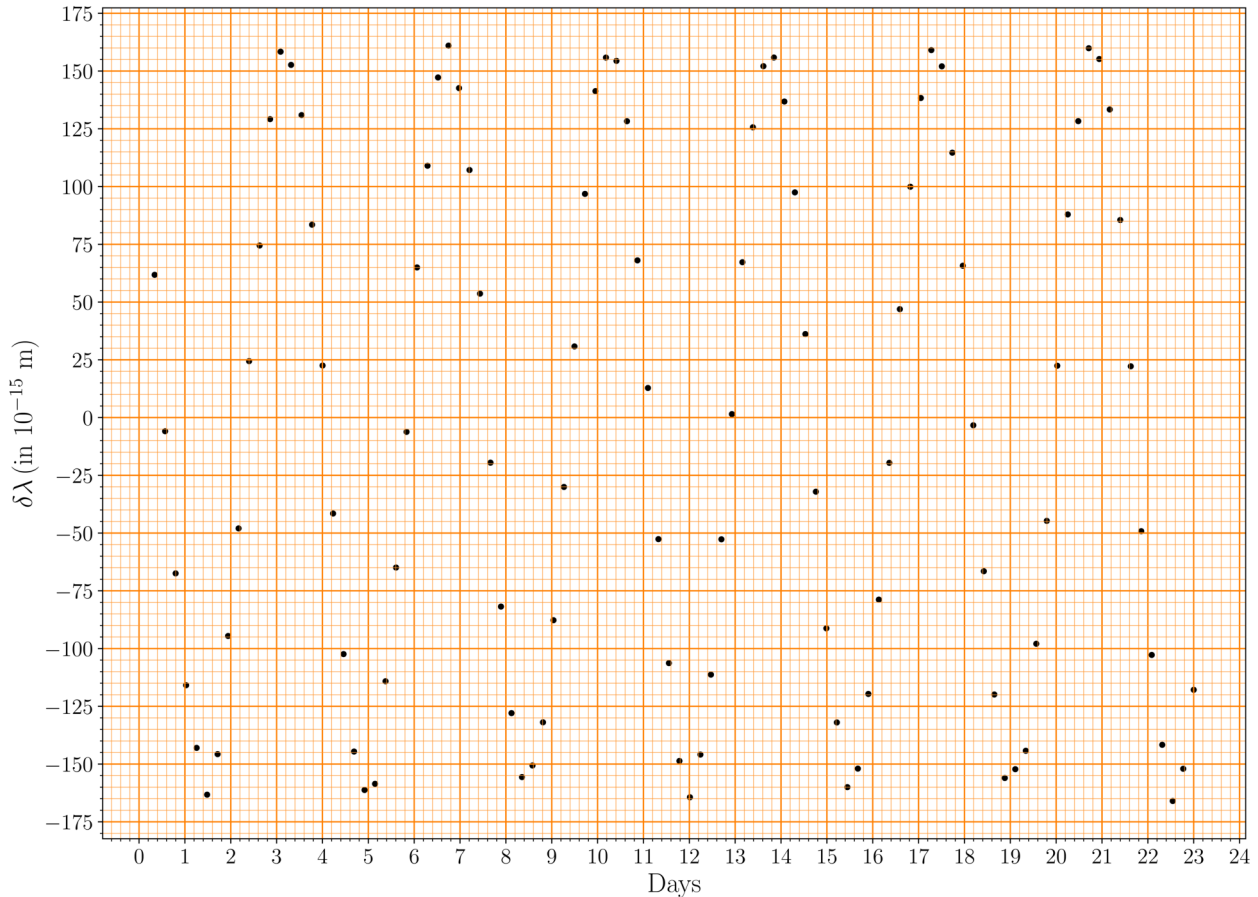
- (D01.1) S yıldızının V-bandı görünür parlaklığı 7.65 ± 0.03 kadir, paralaksı 20.67 ± 0.05 mili-yaysaniyesi ve bolometrik düzeltme (BC) -0.0650 kadirdir. Yani yıldız, V-bandı ışıınımgücünden daha yüksek bir bolometrik ışıınımgücüne sahiptir.

Kütle-ışıınımgücü ($M-L$) ilişkisinin $L \propto M^4$ şeklinde olduğunu varsayarak yıldızın kütlesini $[8]$ (M_s) $M_\odot$ cinsinden bulun. Ayrıca M_s 'deki belirsizliği bulun. $d \ln x / dx = 1/x$ bağıntısını kullanmanız gerekebilir.

Dikine Hız yöntemi

Dikine hız yöntemi bir ötegezegeni tespit etmek ve özelliklerini belirlemek için gözlenen dalgaboyu λ_{obs} ile bilinen bir tayf çizgisinin durağan dalgaboyu λ_0 arasındaki Doppler kaymasını $\delta\lambda \equiv \lambda_{\text{obs}} - \lambda_0$ kullanır.

Aşağıdaki şekil, SP sistemi için gözlenen FeI çizgisinin ($\lambda_0 = 543.45 \times 10^{-9}$ m) zamana göre $\delta\lambda$ 'sını göstermektedir.



Dikine hız yarı-genliği $K \equiv (v_{r, \text{max}} - v_{r, \text{min}})/2$ olarak tanımlanır. Burada, $v_{r, \text{max}}$ ve $v_{r, \text{min}}$ sırasıyla maksimum ve minimum dikine hızlardır. Çembersel bir gezegen yörüngesi için yarı-genlik (K) şu şekilde yazılabilir:

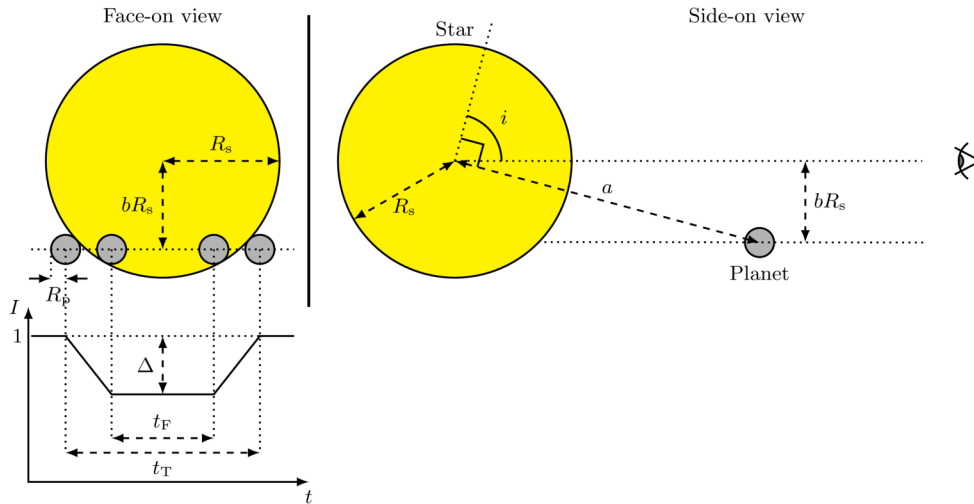
$$K = \left(\frac{2\pi G}{T} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_p + M_s)^{2/3}}$$

Burada, T yörünge dönemi, i gezegen yörüngesinin eğimi (gezegenin yörünge düzlemine dik normal ile gözlemcinin görüş hattı arasındaki açı), M_p ve M_s sırasıyla gezegenin ve yıldızın kütleleridir.

- (D01.2) Aşağıdakileri yanıtlamak için Özet Cevap Kağıdında yukarıda verilen grafiğin 90° döndürülmüş halini kullanın.
- (D01.2a) Grafikte verilen, gözlenen verilerle ilişkili düzgün bir eğri geçirin. [2]
- (D01.2b) Çizdiğiniz eğri üzerinde uygun noktaları seçin ve uygun yöntemleri kullanarak T ile K 'yı ve ilgili belirsizliklerini hesaplayın. T ve K hesaplamasında kullanılan tüm veri noktaları Özet Cevap Kağıdındaki tabloda gösterilmelidir. Gerekirse ara hesaplamalarınızı göstermek için Tablonun geri kalanını, uygun başlıklarla, kullanabilirsiniz. [11]
- (D01.2c) $M_p \ll M_s$ olduğunu varsayarak, gezegenin minimum kütesini ($M_{p, \min}$) $M_\odot$ cinsinden ve buna karşılık gelen belirsizliği bulun. [5]
- (D01.2d) (D01.2c) bölümünde bulunan $M_{p, \min}$ değerini kullanarak gezegenin yörüngesinin yarı-büyük ekseninin minimum değerini ($a_{\min}$) ve belirsizliğini AB cinsinden hesaplayın. [4]

Geçiş yöntemi (kenar kararması olmadan)

Bir gezegen geçişinin şematik diyagramı (ölçeksiz çizilmiştir) aşağıda verilmektedir. Başlangıçta, yıldız diskinin yıldızın kendisinden kaynaklanan bir miktar gürültü ile birlikte düzgün bir ortalama şiddete sahip olduğunu varsayacağız.



Yukarıda şematik diyagramı verilen geçiş olayının ışık eğrisinde, normalize edilmiş şiddetin (I) zamana (t) göre değişimi gösterilmiştir. Geçişin dışında ortalama yıldız şiddeti 1 olarak alınmıştır. Şiddetteki maksimum azalma, normalize edilmiş ışık eğrisinde Δ ile verilir. Uniform parlaklığa sahip bir yıldız disk için gezegenin yarıçapı (R_p), Δ ile şu şekilde ilişkilidir:

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

Burada R_s yıldızın yarıçapıdır.

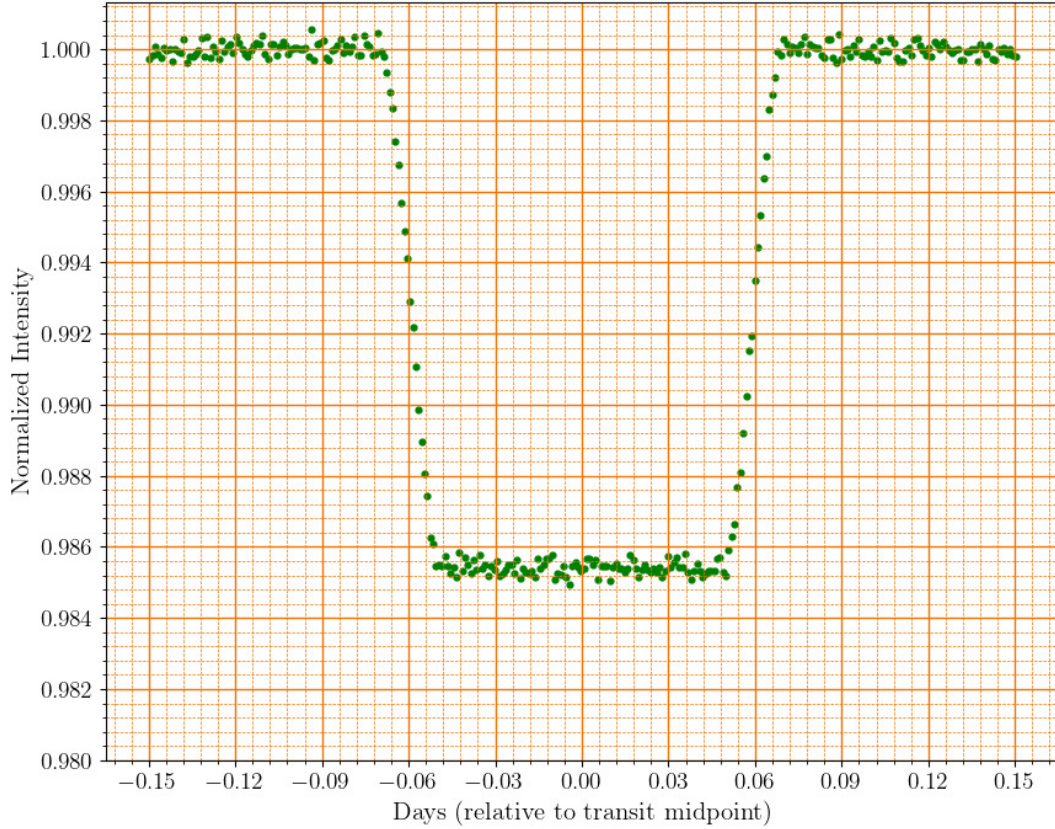
Geçişin toplam süresi (gezegenin yıldız diskini kısmen veya tamamen kapladığı zaman) t_T ile verilirken, t_F gezegenin tamamen yıldız diskinin önünde olduğu süreyi verir. “Etki parametresi” b , geçişin orta noktasında gezegen ile yıldız disk merkezinin arasındaki izdüşüm mesafesidir ve yıldız yarıçapı (R_s) birimindedir.

Neredeyse tamamen yandan görülen bir yıldız-gezegen yörüngesi için etki parametresi şu denklemle verilir:

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

- (D01.3) SP sistemi için yıldız yarıçapının $R_s = 1.20 R_\odot$ olduğu biliniyor ve gezegenin geçişi gerçekten de gözlenebilir. D01.2d kısmında bulunan minimum yörünge yarıçapını ($a_{\min}$) kullanarak eğim açısının minimum değerini ($i_{\min}$) bulun. [3]

Yıldız diskinin düzgün parlaklıkta olduğu varsayılırsa geçiş ışık eğrisi aşağıda gösterildiği gibi görünecektir.



- (D01.4) Verilen ışık eğrisini kullanarak aşağıdaki soruları cevaplayın. Yukarıdaki ışık eğrisi ayrıca Özet Cevap Kağıdında da verilmiştir.

(D01.4a) Grafikte uygun noktaları işaretleyerek t_T ve t_F değerlerini gün cinsinden belirleyin. [3]

(D01.4b) Grafikte uygun noktaları işaretleyerek Δ 'nın ortalama değerini belirleyin ve böylece R_p değerini $R_\odot$ cinsinden bulun. [2]

(D01.4c) Yörünge yarıçapının $a_{\min}$ olduğunu varsayarak i değerini derece cinsinden belirleyin. [2]

Kenar kararmasının dahil edilmesi

Şimdiye kadar yıldız diskinin düzgün parlaklıkta olduğunu varsaydık. Gerçekte, gözlenen yıldız diskinin parlaklığı, “kenar kararması” nedeniyle düzgün değildir — bu, yıldız diskinin merkezinin “kenarından” daha parlak görüldüğü optik bir etkidir.

Kenar kararması etkisi göreceli şiddet $J(\theta) \equiv \frac{I(\theta)}{I(0)}$ ile ölçülebilir. Burada θ bir noktadaki yıldız yüzeyinin normali ile gözlemciyi o noktaya birleştiren çizgi arasındaki açı; $I(\theta)$ o noktada yıldız diskinin gözlenen şiddetidir. $I(0)$ ise yıldız diskinin merkezindeki şiddettir. Uzak bir gözlemci için θ , $\theta = 0$ (diskin merkezi) ile $\theta \approx 90^\circ$ (diskin sınırı) arasında değişir.

(D01.5) Aşağıdaki tablo, Güneş için belirli bir dalgaboyunda ölçülen $J(\theta)$ değerlerini verir. Aynı kenar kararması profilinin S yıldızı için de geçerli olduğunu varsayacağız.

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

Kenar kararması profili bir kuadratik formülle modellenebilir:

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

Burada a_1 ve a_2 iki sabittir.

Verileri kullanarak uygun değişkenlerle bir grafik çizerek bilinmeyen katsayıları a_1 ve a_2 'yi bulacağız.

(D01.5a) x ve y eksenleri boyunca çizmek istediğiniz θ ve J 'nin uygun fonksiyonları olan $[2]$
(x_1, y_1) değişken çiftini seçin ve a_1 ve a_2 'yi belirleyin. x_1 ve y_1 'in ifadelerini yazın.

Ek grafikler için ek değişkenler tanımlamanız gerekiyorsa, onları (x_2, y_2) gibi tanımlayın.

(D01.5b) Grafikleriniz için gereken değerleri tabloya dökün. [4]

(D01.5c) Yeni tanımlanan değişkenleri verilen grafik kağıdına çizin (grafiğinizi "D01.5c" olarak [7]
işaretleyin).

(D01.5d) Grafikten a_1 ve a_2 'yi elde edin. Değerlerdeki belirsizlikler gerekli değildir. [7]

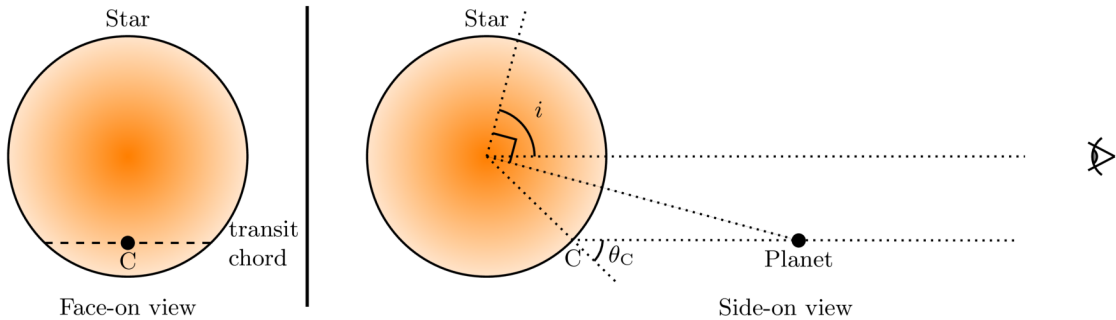
Kenar kararması varlığında geçiş

Şimdi, kenar kararması olan bir yıldız diski üzerinde gezegen geçişlerini ele alıyoruz. Kenar kararması varlığında daha önce verilen $J(\theta)$ denklemi ile modelleyeceğimiz (herhangi bir geçiş olmadan) tüm yıldız diskinden gözlemlenen ortalama şiddet, $\langle I \rangle$, şu şekilde verilir:

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

Dahası, geçiş yapan gezegenin neden olduğu ışık kaybı artık sadece gezegenin ve yıldızın göreceli boyutuna $\left(\frac{R_p}{R_s}\right)$ değil, aynı zamanda geçiş hattı boyunca yıldız diskinin şiddet profiline de bağlıdır ki bu da i eğim açısına bağlıdır.

Aşağıdaki şematik diyagram (ölçekli çizilmemiştir) bu durumu göstermektedir. Yıldızın daha parlak kısmı daha koyu bir tonda gösterilirken gezegen siyah bir nokta olarak gösterilmiştir.



$\left(\frac{R_p}{R_s}\right)$ ve ışık eğrisinden ölçülen Δ arasındaki ilişki şu şekildedir:

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

Burada $I(\theta_C)$ geçiş hattının ortasında (yukarıdaki şekilde C noktası) yıldız diskindeki şiddettir; θ_C ise o noktada bakış doğrultusu ile yüzey normali arasındaki açıdır. Yukarıdakilerden görülebileceği gibi verilen bir yıldız için aynı Δ değerinin birçok farklı gezegen boyutu (R_p) ve eğim açısı (i) kombinasyonu ile elde edilebileceği açıktır.

- (D01.6) İki farklı dalgaboyundaki (örneğin, λ_B , mavi ve λ_R , kırmızı) geçiş ışık eğrisi verilerini kullanarak hem R_p hem de i değerlerini benzersiz bir şekilde belirlemek mümkündür. Bu iki dalgaboyu için kenar kararım katsayıları aşağıda verilmiştir:

Dalgaboyu	a_1	a_2
λ_B	0.82	0.05
λ_R	0.24	0.20

- (D01.6a) λ_B için geçişin maksimum derinliği (Δ) ve yörüngenin eğim açısı (i) arasındaki ilişkiyi aşağıdakilerden hangisinin doğru tanımladığını seçin ve Özet Cevap Kağıdında ✓ ile işaretleyin. [2]

- A. i azaldığında Δ artar.
 B. i azaldığında Δ azalır.
 C. Δ , i 'den bağımsızdır.

- (D01.6b) "SP sistemi" için maksimum geçiş derinliği (Δ), λ_B için 0.0182 ve λ_R için 0.0159 olarak ölçülmüştür. [4]

Verilen ızgara üzerinde hem λ_B hem de λ_R için şematik geçiş ışık eğrilerini çizin ve eğrileri sırasıyla "B" ve "R" olarak işaretleyin. Toplam geçiş süresinin her iki dalgaboyu için de aynı olduğunu varsayın. Eğriler ölçekli olmak zorunda değildir. Ancak ışık eğrilerinin biçimlerini doğru bir şekilde temsil etmelidir.

- (D01.7) SP sistemi için λ_B ve λ_R 'deki Δ ölçümlerini kullanarak R_p ve i değerlerini bulmak için bir grafik yöntem kullanacağız.

- (D01.7a) İlgili değişkenleri birbiriyle ilişkilendiren uygun bir ifade yazın. (İpucu: İlgili değişkenler arasında i veya b ve R_p düşünebilirsiniz.) [6]

- (D01.7b) Grafiğe dökülecek uygun büyüklükleri tablo haline getirin. [5]

- (D01.7c) Uygun bir grafik çizin ve "D01.7c" olarak işaretleyin. [7]

- (D01.7d) Grafikten R_p ($R_\odot$ biriminde) ve i (derece cinsinden) değerlerini belirleyin. [4]

- (D01.8) Bu problemde elde edilen sonuçlara dayanarak P gezegeninin "KAYALIK" mı yoksa "GAZ" mı olduğunu Özet Cevap Kağıdındaki uygun kutuyu ✓ ile işaretleyerek belirtin. [2]

(D02) Koronal kütle atımlarının Dünya'ya varış zamanlarını belirleme
[60 puan]

Güneş, zaman zaman yüzeyinden başlayarak dışa doğru yayılan manyetize plazma, yani koronal kütle atımları (CME'ler) salar. CME'lerin Dünya'ya varış zamanlarının doğru bir şekilde tahmin edilmesi, Dünya yörüngesindeki uydular üzerindeki potansiyel etkilerini anlamak ve azaltmak için çok önemlidir. Bu problemde, 10 CME'nin verilerini kullanarak ampirik bir model geliştirerek CME'lerin varış zamanlarını tahmin etmeyi amaçlıyoruz. Bu problem boyunca, Güneş yüzeyi ile Dünya arasındaki mesafe $214 R_{\odot}$ olarak alınmaktadır.

Ayrıca, Güneş'in dönmediğini varsayın. Elektromanyetik, yerçekimi ve sürüklenme kuvvetleri nedeniyle, CME'ler yayılmaları boyunca değişken bir ivme yaşarlar. Bu problemin ilk iki bölümünde, Güneş ile Dünya arasındaki bölgenin vakum olduğunu varsayıyoruz.

Vakumda CME'ler.

(D02.1) Aşağıdaki tabloda 10 CME için, Güneş yüzeyindeki ($= 1R_{\odot}$) başlangıç hızı, u , Dünya'ya ulaştığında son hızı, v , ve Güneş yüzeyinden ayrıldıktan sonra Dünya'ya varış süresi (saat olarak), τ , verilmiştir.

CME	u	v	τ
Adı	(km s^{-1})	(km s^{-1})	(s)
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) Her CME için ortalama ivmeyi, a , m s^{-2} cinsinden hesaplayın. **[3]**

(D02.1b) Bir CME'nin ivmesi için, a_{model} , başlangıç hızı u 'ya bağlı olan ampirik bir model varsayıyoruz: $a_{\text{model}} = m \left(\frac{u}{u_0} \right) + \alpha$; burada, a_{model} m s^{-2} cinsinden ifade edilir, u km s^{-1} cinsinden ifade edilir ve $u_0 = 1.00 \times 10^3 \text{ km s}^{-1}$.

m ve α sabitlerini ve bunların ilgili belirsizliklerini uygun bir grafik kullanarak **[15]** belirleyin (grafiginizi "D02.1b" olarak işaretleyin).

(D02.1c) Her CME için a_{model} 'i m s^{-2} cinsinden tabloya yerleştirin. Böylece, hesaplanan ivme a ile model değerleri a_{model} arasındaki ortalama-karekök (rms) sapmasını, δa_{rms} , hesaplayın. **[4]**

(D02.2) Başlangıç hızları sırasıyla, $u = 1044 \text{ km s}^{-1}$ ve 273 km s^{-1} olan iki başka CME'yi, CME-1 ve CME-2, ele alıyoruz.

(D02.2a) (D02.1b)'de elde edilen ampirik modeli kullanarak, CME-1 ve CME-2 için sırasıyla **[4]** tahmini Dünya'ya varış sürelerini, $\tau_{1, \text{m}}$ ve $\tau_{2, \text{m}}$ (saat cinsinden, h) hesaplayın.

- (D02.2b) CME-1 ve CME-2'nin gözlenen Dünya'ya varış süreleri sırasıyla 46.0 saat ve 74.5 saattir. [2]
Tahmin edilen varış süresi gözlenen varış süresinin %20'si içinde ise belirli bir CME için ampirik model GEÇERLİ kabul edilir; aksi takdirde GEÇERLİ DEĞİLDİR. Her bir CME için modelin geçerliliğini Özet Cevap Kağıdında uygun kutuyu ✓ ile işaretleyerek belirtin.

Güneş rüzgarının varlığı durumunda CME'ler

Gerçekte, Güneş ile Dünya arasındaki uzay, CME'ler üzerinde sürüklenme kuvveti uygulayan Güneş rüzgarı ile doludur. Bu sürüklenme kuvveti, CME'nin Güneş rüzgarına göre göreceli hızına bağlı olarak CME'yi yavaşlatabilir veya hızlandırabilir. Güneş rüzgarının etkisini hesaba katmak için $R_{\text{obs}}(t) \geq R_0$ olduğu mesafelerde "yalnızca sürüklenme" modeli kullanacağız. Burada R_0 sürüklenme kuvvetinin CME'nin hareketini etkileyen baskın kuvvet haline geldiği mesafeyi belirtmektedir.

"Yalnızca sürüklenme" modelinden belirlenen Güneş yüzeyinden olan mesafe, $R_D(t)$, ve bu modeldeki bir CME'nin hızı, $V_D(t)$, şu şekilde verilir:

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

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

Burada, $\gamma = 2 \times 10^{-8} \text{ km}^{-1}$, V_s Güneş rüzgarının sabit hızıdır, R_0 ve V_0 sırasıyla zaman t_0 anındaki mesafe ve hızdır ve S işaret faktörüdür. Eğer $V_0 > V_s$ ise $S = 1$, $V_0 \leq V_s$ ise $S = -1$ 'dir.

- (D02.3) Aşağıdaki tablolar, iki CME için (CME-3 ve CME-4) Güneş yüzeyinden gözlenen radyal mesafeyi, $R_{\text{obs}}(t)$ (ölçüm birimi $R_\odot$), zamanın (t , saat cinsinden) bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Her tablodaki son veri noktası (sırasıyla D5 ve P8), ilgili CME'nin Dünya'ya varış zamanına karşılık gelir. Bu bölüm için, $V_s = 330 \text{ km s}^{-1}$ olduğunu varsayın.

CME-3		
Veri noktası	t (saat cinsinden)	$R_{\text{obs}}(t)$ ($R_\odot$ cinsinden)
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		
Veri noktası	t (saat cinsinden)	$R_{\text{obs}}(t)$ ($R_\odot$ cinsinden)
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

Bu CME'lerin varış zamanlarını "yalnızca sürüklenme" modelinin başarılı bir şekilde tahmin edip etmediğini değerlendireceğiz. Bu modeli kullanmak için uygun bir t_0 ve buna karşılık gelen R_0 ve V_0 seçimi yapılmalıdır.

- (D02.3a) CME-3 için, aşağıdaki iki durumu ele alın: [6]
 (C1) t_0 D1 – D2 aralığının orta noktası olarak alınır.
 (C2) t_0 D3 – D4 aralığının orta noktası olarak alınır.
 Hızın her bir belirli aralık boyunca, D1–D2 ve D3–D4, sabit kaldığını ancak iki aralık arasında farklı olabileceğini varsayın.
- t_0 , R_0 ve V_0 kullanarak, her iki durum için gözlenen ve tahmin edilen radyal mesafe arasındaki farkları ($\delta R_D \equiv R_{\text{obs}}(t) - R_D(t)$), $R_\odot$ birimlerinde $t = 58.05$ saat için hesaplayın.
- (D02.3b) (D02.3a) ile benzer bir yöntem benimseyerek aşağıdaki iki durumda Güneş ve Dünya arasındaki P5, P6, P7 ve P8 noktalarında CME-4 için $R_D(t)$ 'yi bulun: [4]
- (C3) t_0 P1 – P2 aralığının orta noktası olarak alınır.
 (C4) t_0 P3 – P4 aralığının orta noktası olarak alınır.
- (D02.3c) CME-4 için P5, P6, P7 ve P8 noktalarında her iki durum (C3 ve C4) için $R_D(t)$ 'yi ($R_\odot$ biriminde) t (saat cinsinden) karşısında çizin (grafığınızı “D02.3c” olarak işaretleyin). Aynı grafikte, yukarıda belirtilen iki durum için $R_D(t)$ 'nin düzgün eğrilerini çizin. Bu bölüm için x ekseninin aralığını 0'dan 180 saate kadar alın. [10]
- (D02.3d) Grafiği kullanarak, CME-4'ün Dünya'ya gerçek varış zamanı ile “yalnızca sürüklenme” modeli tarafından tahmin edilen varış zamanı arasındaki mutlak farkı, $|\delta\tau|$ her bir C3 ve C4 durumu için belirleyin. [4]
- (D02.3e) Aşağıdaki ifadenin DOĞRU veya YANLIŞ olduğunu, Özet Cevap Kağıdında uygun kutuyu ✓ ile işaretleyerek belirtin (yazılı gerekçe gerekmez): [1]
 “Güneş rüzgarının CME'lere uyguladığı sürüklenme kuvvetleri, CME-3 için CME-4'e kıyasla daha erken bir zamanda baskın hale gelir”.
- (D02.4) D02.1 bölümündeki 10 CME üzerinde etkili olan baskın kuvvetin sürüklenme olduğunu düşünün. “Yalnızca sürüklenme” modelinin, Güneş yüzeyinden ($R_0 = 1 R_\odot$) itibaren ve ötesinde, tüm CME'ler için geçerli olduğunu varsayın. [7]
 Her bir CME için Güneş rüzgarı hızını V_s km s⁻¹ cinsinden tahmin edin ve tabloya dökün. Ayrıca, tüm 10 CME için ortalama Güneş rüzgarı hızını $V_{s, \text{avg}}$ olarak tahmin edin.