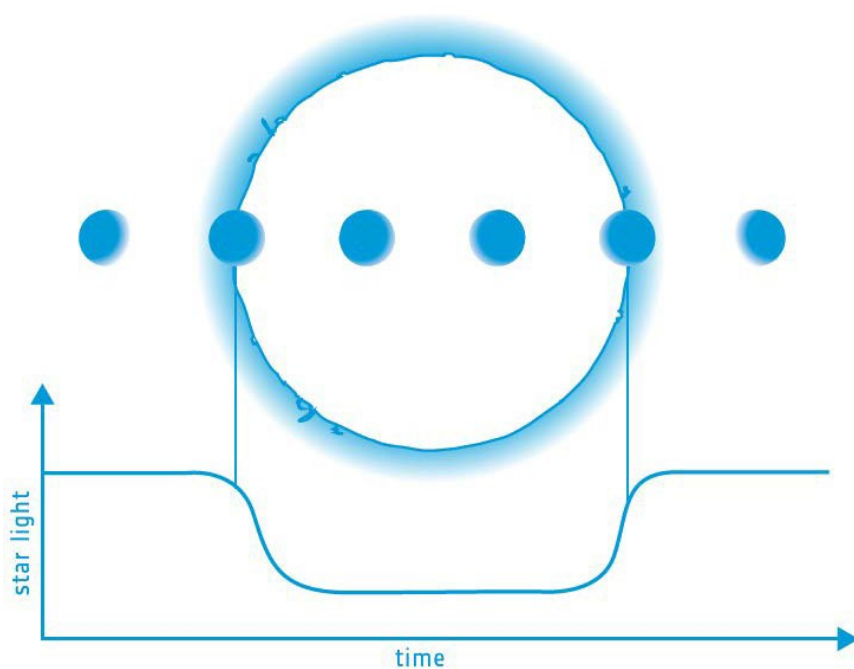
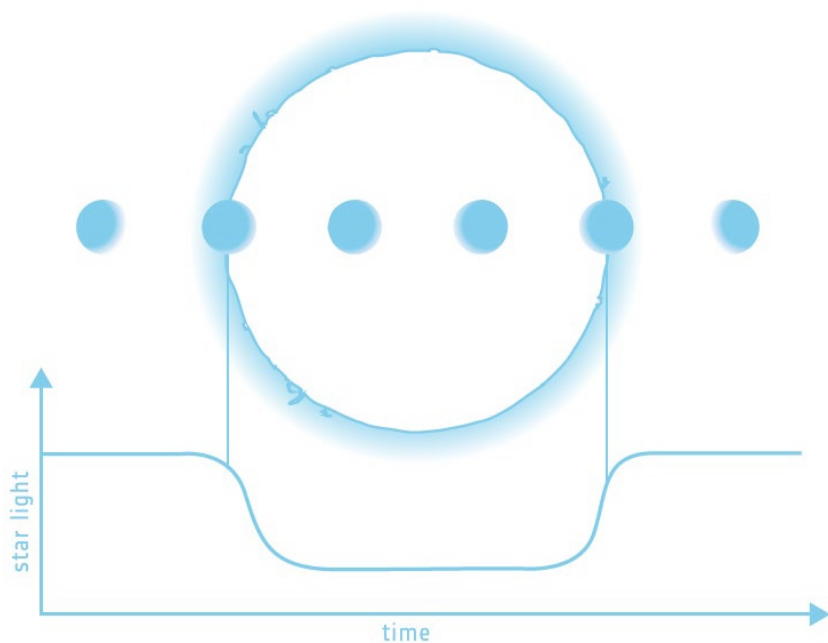


učte s vesmírem

→ DETEKTIV EXOPLANET

Popis exoplanet pomocí družicových dat





Příručka pro učitele

Rychlá fakta	strana
Shrnutí činností	3
Úvod	strana
Aktivita 1: Porozumění světelným křivkám	strana 6
Aktivita 2: Být detektivem exoplanet	strana
Pracovní list pro studenty	9
	strana

učte s vesmírem – detektiv exoplanet | P31
www.esa.int/education

Vzdělávací kancelář ESA vítá zpětnou vazbu a připomínky
teachers@esa.int

Produkce ESA Education
Copyright 2022 © Evropská kosmická agentura

→ DETEKTIV EXOPLANET

Popis exoplanet pomocí družicových dat

RYCHLÁ FAKTA

Předmět: Matematika, fyzika, astronomie

Věkové rozmezí: 13-18 let

Typ: Studentská aktivita, praktické modelování

Složitost: střední

Potřebná doba výuky: 45 minut

Cena: nízká (0-10 eur)

Umístění: učebna

Klíčová slova: Fyzika, matematika, astronomie, exoplanety, světelné křivky, tranzity, oběžné dráhy, měřítko, grafy, perioda

Stručný popis

V této sadě aktivit se žáci dozvědí, jak vědci zkoumají exoplanety pomocí dalekohledů a tranzitní metody. Dále budou charakterizovat exoplanety pomocí modelových a skutečných dat světelných křivek družice ESA Cheops (CHaracterising ExOPlanet Satellite).

Studenti si procvičí vykreslování a interpretaci dat a škálování/práci s měřítky grafů v kontextu charakterizace exoplanet.

Tato aktivita je součástí série, která zahrnuje "Exoplanety v pohybu", kde si studenti postaví vlastní model tranzitu, a "Exoplanety v krabici", kde studenti postaví model tranzitu v krabici od bot a vypočítají velikost exoplanety.

Cíle učení

- Pochopení toho, co jsou exoplanety a jak je zkoumají družice.
- Porozumění tomu, jak se tranzitní metoda používá pro charakterizaci exoplanet.
- Zlepšení experimentálních dovedností pozorováním a interpretací naměřených světelných křivek.
- Matematické myšlení a převod abstraktního modelu na reálný model.
- Interpretace experimentálních dat pomocí matematických modelů a grafů.
- Vyvozování závěrů z porovnání modelu se skutečnou soustavou exoplanety.
- Sdělování vědeckých a matematických poznatků spolužákům.

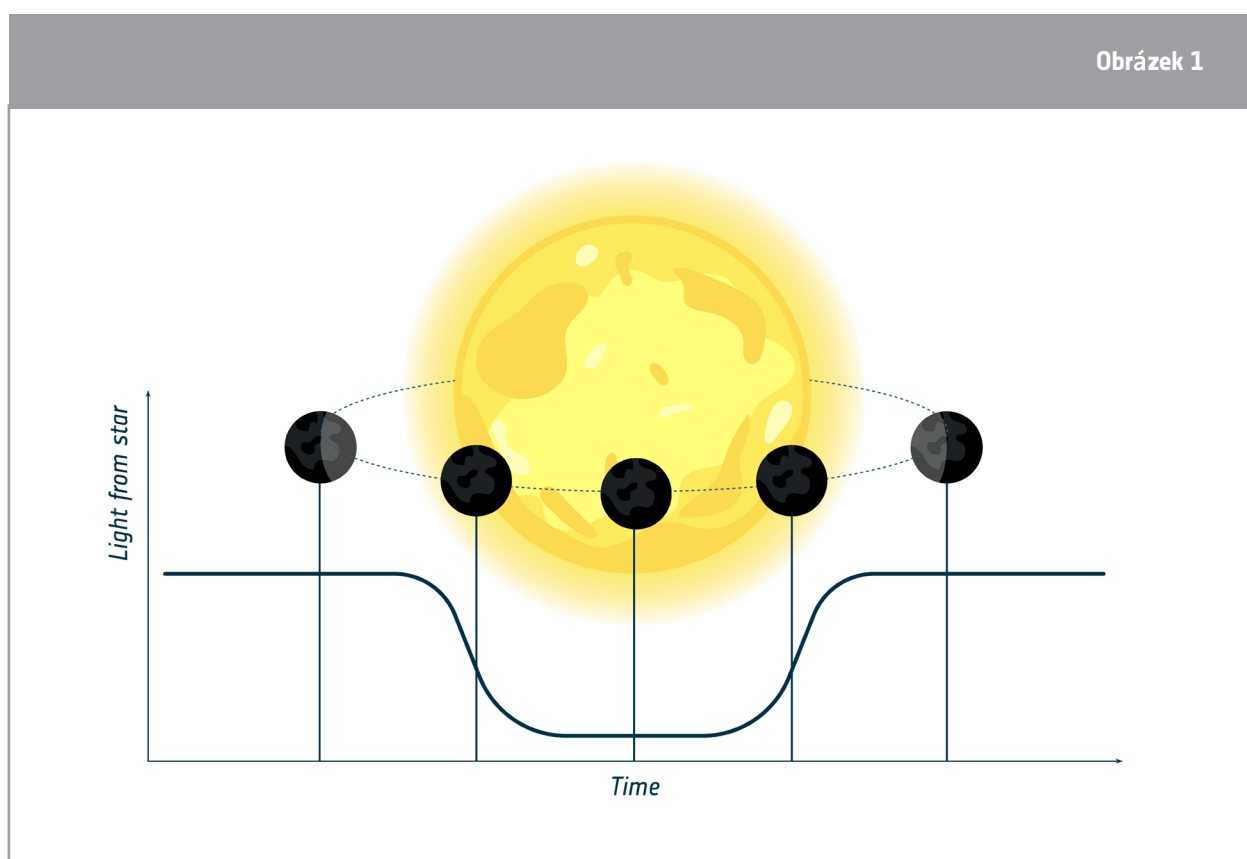
→ Shrnutí činností

Shrnutí činností					
	Název	Popis	Výsledek	Požadavky	Čas
1	Porozumění světelným křivkám	Analyzujte syntetické i skutečné světelné křivky a určete, jaké informace obsahují o modelových nebo skutečných exoplanetárních soustavách.	Porozumět tomu, jak a proč zvolit měřítko grafů. Rozvíjet dovednosti interpretace grafů a používat je k vyvozování závěrů o skutečných exoplanetárních soustavách.	Žádné	30 minut
2	Být detektivem exoplanet	Cílem této aktivity je shrnout poznatky získané v předchozích aktivitách a popsat, co se vědci mohou dozvědět ze světelných křivek měřených družicemi.	Vztahovat poznatky z modelu k reálné situaci pomocí analogií.	Žádné	10 minut

→ Úvod

V tomto souboru aktivit se zaměříme na analýzu světelných křivek získaných pomocí tranzitní metody. Tato metoda byla použita k detekci a charakterizaci mnoha dosud známých exoplanet. Během ní dalekohledy velmi přesně měří množství světla vyzařovaného jednotlivými hvězdami po dobu hodin až měsíců. Toto měření světla z objektu v závislosti na čase se nazývá světelná křivka (viz obrázek 1). Analýzou tvaru světelné křivky a jejích rysů se můžeme dozvědět informace jak o hvězdě, tak o případných exoplanetách, které kolem ní obíhají.

Když exoplaneta přechází před hvězdou, kolem které obíhá, zablokuje malou část světla hvězdy – tento jev se nazývá tranzit. Pokud teleskop během tohoto tranzitu pozoruje světlo dané hvězdy, naměří malý pokles světelné křivky.



↑ Zobrazení poklesu světelné křivky hvězdy při tranzitu exoplanety.

Hloubka poklesu přímo závisí na tom, kolik procent světla z hvězdy je blokováno prolétající exoplanetou, což závisí na poměru velikosti exoplanety vzhledem k hvězdě. Čím větší je planeta vzhledem ke hvězdě, tím větší část světla blokuje. Pokud známe velikost hvězdy, můžeme určit velikost planety.

→ Aktivita 1: Porozumění světelným křivkám

Toto cvičení se bude zabývat měřítky a interpretací grafů simulovaných i skutečných družicových dat.

Jako úvod do problematiky exoplanet se doporučuje absolvovat aktivitu *Exoplanety v pohybu*.

K seznámení studentů s tématem exoplanet můžete využít také videomateriál dostupný na níže uvedených odkazech nebo použít jako doplňující zdroj základní informace.

Níže jsou uvedeny některé návrhy videomateriálů ESA:

- Seriál Seznamte se s odborníky – Jiné světy:
https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2020/07/Meet_the_Experts_Other_worlds
- Seznamte se s družicí Cheops, the Characterising Exoplanet Satellite:
http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2019/12/Meet_Cheops_the_Characterising_Exoplanet_Satellite
- Paxi zkoumá exoplanety! https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2019/12/Paxi_explores_exoplanets

Jakmile se studenti seznámí s exoplanetami, tranzitní metodou a družicí Cheops, mohou v pracovním listu pro studenty vypracovat úkol 1.

Cvičení 1 - Měřítka grafů

Porozumění měřítkům grafů je důležitou dovedností v matematice i přírodních vědách. V tomto cvičení studenti uvidí příklad skutečných dat pořízených družicí Cheops a na jejich základě zjistí, jak se grafy škálují, aby z dat v nich bylo možné získat co nejvíce informací.

V těchto grafech je pozorované množství světla z hvězdy na ose y zobrazeno jako procento průměrné hodnoty naměřené z této hvězdy během pozorovacího období. V obou grafech v tomto cvičení jsou vynesena naprosto stejná data, ale v každém z nich je použito jiné měřítko.

Poznámka: Protože graf zobrazuje množství světla z hvězdy jako procento průměrné hodnoty jasnosti, pokládáme tuto průměrnou jasnost rovnu 100 % na ose y. Pokud během pozorování dochází k událostem, které zvyšují množství měřeného světla, například hvězdné erupce, pak jsou naměřeny hodnoty jasnosti nad průměrnou hodnotou a v grafu jsou znázorněny jako hodnoty vyšší než 100 %.

Diskuse

Níže jsou uvedeny odpovědi pro cvičení 1. Proberte se studenty odpovědi a princip škálování.

1.1. Studenti by si měli uvědomit, že na obrázku 3 je tranzit mnohem snadněji identifikovatelný než na obrázku 2, a to díky jinému měřítku osy y.

1.2. Na obrázku 2 vypadá světelná křivka téměř konstantně, zatímco na obrázku 3 je na křivce mezi 6,5 h a 10,75 h patrný pokles množství přicházejícího světla z hvězdy.

Čas (v hodinách) zobrazený na ose x je pro oba grafy stejný.

Hodnoty množství světla z hvězdy (%) uvedené na ose y se liší. V prvním grafu se hodnoty pohybují od 0 % do 110 %, zatímco ve zmenšeném grafu, kde je vidět propad, se hodnoty pohybují od 99,3 % do 100,1 %.

Cvičení 2 - Interpretace světelných křivek

V tomto cvičení studenti dostanou příklady simulovaných světelných křivek tranzitů a pokyny, jak číst a interpretovat jejich grafy. Toto cvičení lze absolvovat ve dvojicích nebo samostatně.

Další informace: množství hvězdného světla blokováného planetou přímo souvisí s velikostí plochy planety, která se před hvězdu promítá.

Světlo, které planeta blokuje, je úměrné hodnotě $\frac{R_p^2}{R_s^2}$, kde R_p je poloměr planety a R_s poloměr hvězdy.

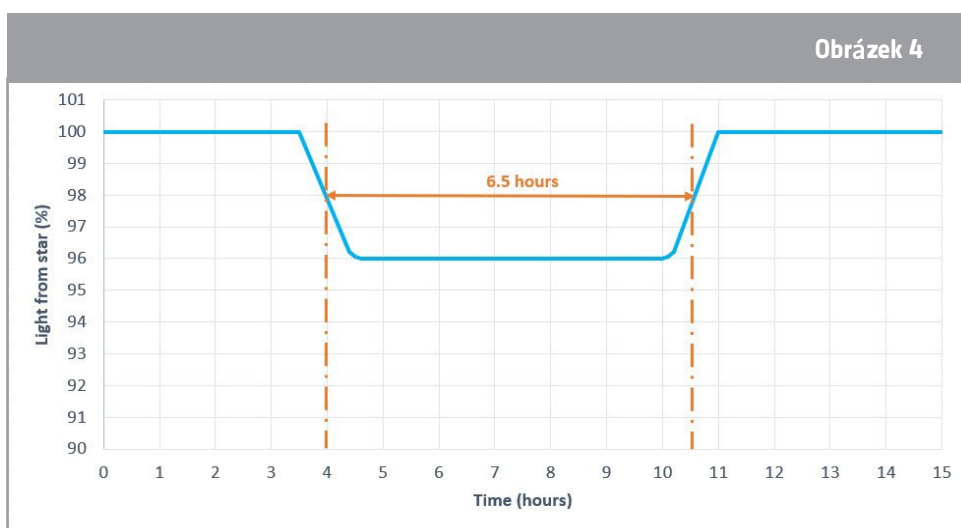
Pokud planeta blokuje dvakrát více světla, neznamená to, že je dvakrát větší: aby planeta blokovala dvakrát více světla, musí být $\sqrt{2}$ (= asi 1,41) krát větší.

Diskuse

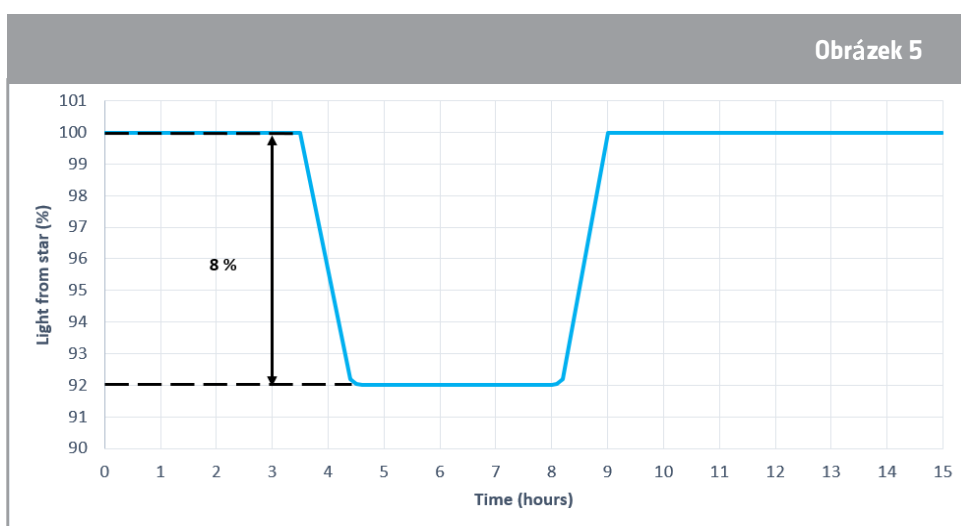
Najděte odpovědi pro níže uvedené cvičení 2:

2.1. Pozorovaná exoplaneta, která vytvořila tuto světelnou křivku, procházela před hvězdou 4,5 hodiny a zablokovala 4 % světla hvězdy.

2.2.



2.3



Poté, co žáci sami nebo ve dvojicích dokončí toto cvičení, prodiskutujte výsledky ve třídě, abyste je připravili na interpretaci skutečných údajů z družice Cheops.

Cvičení 3 - Interpretace skutečných satelitních dat

V tomto cvičení studenti využijí pojmy osvojené v předchozích cvičeních k interpretaci světelné křivky tranzitu hvězdy WASP 189b pozorované družicí ESA Cheops.

Diskuse

Najděte správné odpovědi uvedené níže.

- 3.1. 4,5 hodiny
- 3.2. 0,55 %

Další informace:

Při analýze skutečných dat si studenti mohou všimnout některých rozdílů mezi simulovanými a skutečnými daty. Studenti mohou mít otázky týkající se fitování nebo mezer ve světelné křivce.

Fitování je proces konstrukce křivky založené na nalezení matematické funkce, která nejlépe odpovídá řadě datových bodů.

Během oběhu družice Cheops dochází ke dvěma typům událostí, které způsobují, že někdy nemůžeme měřit světlo z hvězdy nepřetržitě. Tyto události vytvářejí ve světelné křivce mezery. První z nich nastává, když je hvězda zastíněna Zemí, což je známé jako zákryt Zemí. Druhá nastává, když Cheops prochází nad oblastí v jižním Atlantiku, kde dochází k velkému rušení velmi citlivých přístrojů na palubě družice. Rušení má tak velký vliv, že se vědci ani nepokoušejí měřit světlo hvězdy, když družice prochází touto oblastí.

Cvičení 4 - Oběžná doba

Toto cvičení se zaměřuje na to, jak lze ze světelné křivky určit oběžnou dobu.

Poznámka: oběžná doba planety je doba, za kterou planeta dokončí jeden celý oběh kolem své hvězdy. Lze ji změřit tak, že najdeme střed dvou po sobě jdoucích tranzitů téže exoplanety a změříme časový interval mezi nimi.

Diskuse

Najděte správné odpovědi uvedené níže.

- 4.1. 3 dny
- 4.2. V této odpovědi by studenti měli být schopni vlastními slovy popsat, že v této exoplanetární soustavě existují dvě exoplanety, které můžeme objevit na oběžné dráze kolem stejné hvězdy. Dále by odpověď měla obsahovat, že hlubší poklesy křivky ukazují na větší planetu, která má oběžnou dobu 3 pozemské dny a blokuje 2 % světla hvězdy, a že mělké poklesy křivky ukazují na menší planetu, která má oběžnou dobu 2,5 pozemského dne a blokuje 1 % světla. Pokud jste zavedli koncept, že světlo, které exoplaneta blokuje, je úměrné $\frac{R_P^2}{R_S^2}$, pak by studenti měli být schopni určit, že větší planeta je tedy 1,4krát větší než menší planeta.

→ Aktivita 2 - Být detektivem exoplanet

V této aktivitě studenti využijí poznatky z analýzy předchozích světelných křivek a interpretují pozorování exoplanetárního systému, které provedl Cheops, jako skuteční/é vědci/vědkyně.

Cvičení 1: Popis pozorování exoplanet

Věty by měly být doplněny následujícím způsobem:

Když exoplaneta projde mezi družicí a hvězdou, zablokuje malou část světla z hvězdy a způsobí tak pokles ve světelné křivce. Tento jev se nazývá přechod/tranzit.

Pokud je pozorováno více oběhů téže exoplanety, pak časový interval mezi zjištěnými poklesy světelné křivky je přímým změřením oběžné doby planety.

Větší exoplaneta vytváří hlubší propad v měřené světelné křivce a menší exoplaneta vytváří mělký pokles. Jednotlivé exoplanety lze od sebe odlišit podle hloubky poklesů, které vytvářejí ve světelné křivce, a podle jejich oběžných dob.

Pokud chcete žákům ve třídě zadat pokročilejší úkol, můžete je nechat, aby svůj závěr formulovali vlastními slovy. Při diskusi o závěrech, které studenti sami formulovali, dbejte na to, aby se pozorování a závěry nezaměňovaly a aby jejich závěry vyplývaly z pozorování.

Cvičení 2: Pozorování exoplanet

Ve druhém cvičení mají studenti za úkol interpretovat skutečná data z družice Cheops stejně jako profesionální vědci/vědkyně. Pokud někteří studenti potřebují pomoc, můžete je podpořit otázkami zobrazenými níže, které jim pomohou strukturovat interpretaci světelné křivky.

1. Kolik exoplanet má pozorovaný systém?
2. Jaká je oběžná doba každé exoplanety?
3. Kolik světla (v %) je blokováno každou exoplanetou?
4. Můžete říci něco o velikosti exoplanet?
5. Vidíte ještě něco nápadného? Pokuste se to popsat vlastními slovy a pokud možno interpretovat.

Další informace: Soustava TOI-178 se nachází pouhých 205 světelných let od Země. Exoplanetární mise ESA Cheops odhalila, že se jedná o unikátní planetární systém sestávající ze šesti exoplanet, z nichž pět obíhá kolem své centrální hvězdy ve výjimečném rytmickém tanci. Všimněte si, že v tomto souboru dat jsou identifikovatelné pouze 4 planety (b, c, d a e).

Tento jev se nazývá orbitální rezonance a znamená, že se při oběhu planet kolem hvězdy opakují určité vzorce, přičemž některé planety se dostávají do stejného postavení každých několik oběhů. Tento jev si můžete představit v této animaci: <https://youtu.be/-WewvRGgysY>.

Dvě vnitřní planety (b a c) mají hustotu podobnou hustotě Země, a čtyři vnější planety (d, e, f a g) jsou plynné, s hustotou jako Neptun a Jupiter.

Zatímco planety v systému TOI-178 obíhají kolem své hvězdy velmi uspořádaně, porovnání jejich hustot neukazuje na žádnou zvláštní závislost. Jedna z exoplanet, hustá planeta podobná Zemi, se nachází hned vedle podobně velké, ale velmi řídké planety – jakéhosi mini-Jupiteru, a vedle ní je planeta velmi podobná Neptunu.

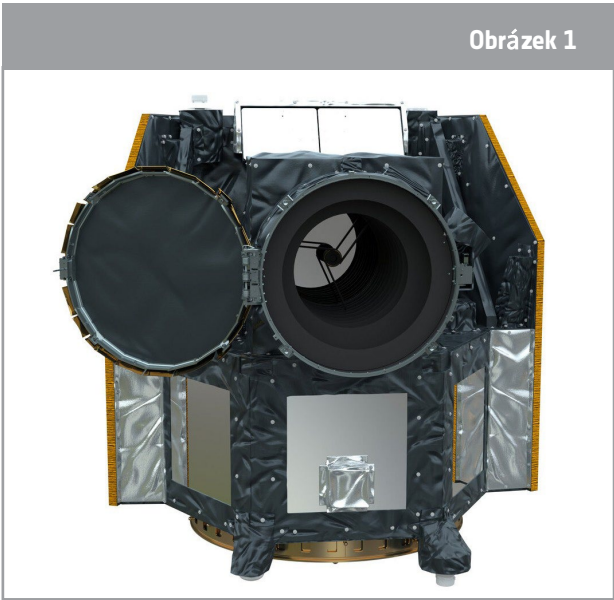
Popis exoplanet pomocí družicových dat

→ Úvod

Studiem velkého počtu různých exoplanet jsou vědci schopni pochopit, jak se exoplanetární soustavy formují a vyvíjejí. To je důležitý krok na cestě k pochopení naší vlastní sluneční soustavy a našeho místa ve vesmíru.

V tomto souboru aktivit využijete skutečná data shromážděná družicí ESA Cheops (CHaracterising ExOPlanet Satellite).

Díky přesnému měření světelných křivek blízkých hvězd, o nichž je známo, že hostí tranzitující exoplanety, je Cheops schopen určit velikost těchto exoplanet. Kombinací těchto informací s dalšími měřeními budou vědci schopni určit hustotu exoplanet. U některých konkrétních exoplanet můžeme dokonce určit, zda mají mraky.



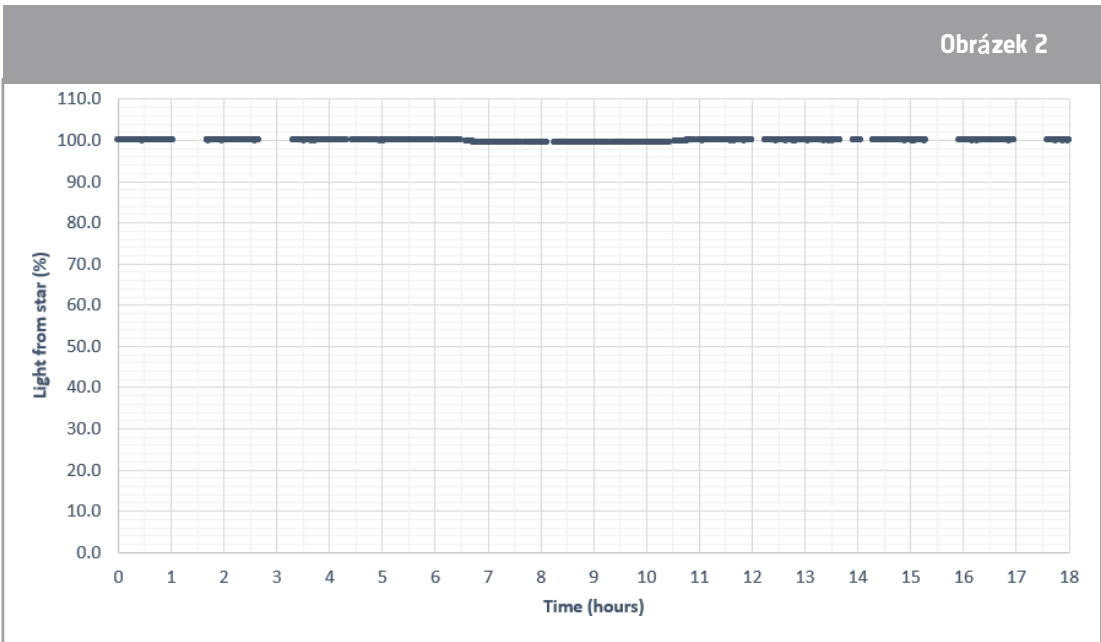
↑ družice Cheops

→ Aktivita 1: Porozumění světelným křivkám

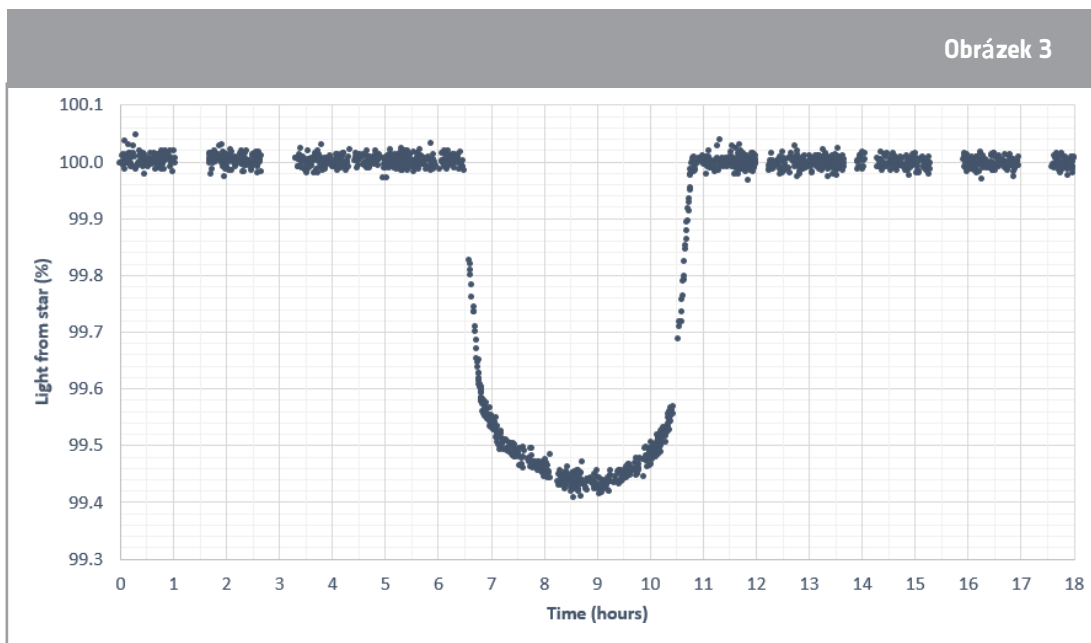
Když družice pozoruje tranzit exoplanety, hloubka, tvar a poloha poklesu světelné křivky nám může poskytnout informace o exoplanetární soustavě. V této aktivitě budete tuto myšlenku dále zkoumat s využitím skutečných dat z družice Cheops.

Cvičení 1 - Měřítka grafů

Exoplanety dosahují obvykle jen malého zlomku velikosti hvězdy, kolem které obíhají, například Země má 1/100 velikosti Slunce a Jupiter má 1/100 průměru Slunce. Množství blokování světla je proto často menší než jedno procento celkového světla hvězdy.



↑ světelná křivka tranzitu WASP 189b získaná pomocí družice Cheops.



↑ Stejná světelná křivka tranzitu WASP 189b získaná pomocí družice Cheops, s jiným měřítkem na ose y.

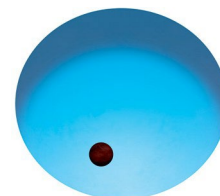
Vezměme si světelnou křivku tranzitu WASP 189b, pořízenou pomocí družice Cheops, zobrazenou na obrázcích 2 a 3:

1.1. Dokážete identifikovat tranzit exoplanety na obrázku 2 a 3?

1.2. Porovnejte oba grafy a popište rozdíly:

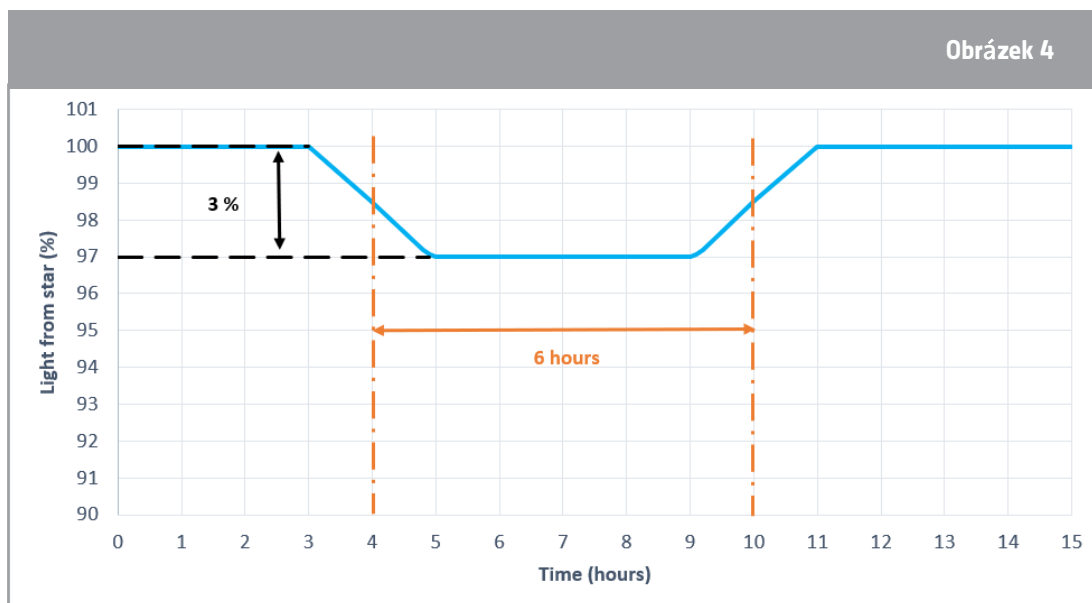
Věděli jste?

WASP 189 b je velká plynná exoplaneta, která je asi o 50 % větší než Jupiter. Tato obří exoplaneta obíhá jednou za 2,7 pozemského dne kolem hvězdy, která je o více než 2000 °C teplejší než naše Slunce a je téměř 2,5krát větší.



Cvičení 2 - Interpretace světelných křivek

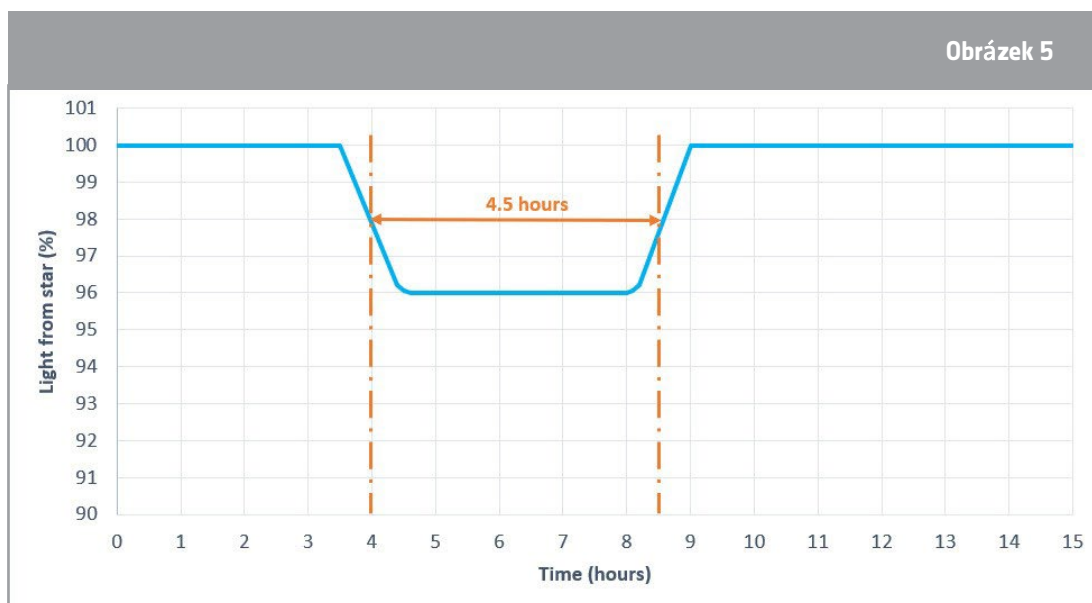
Níže vidíte zjednodušené znázornění světelné křivky hvězdy měřené v době přechodu exoplanety. Přerušované čáry znázorňují, jak lze z grafu určit některé základní informace o exoplanetární soustavě:



↑ Příklad simulované světelné křivky.

Ze světelné křivky můžeme určit, že pozorované exoplanetě trvalo 6 hodin, než prošla před hvězdou a zablokovala 3 % jejího světla.

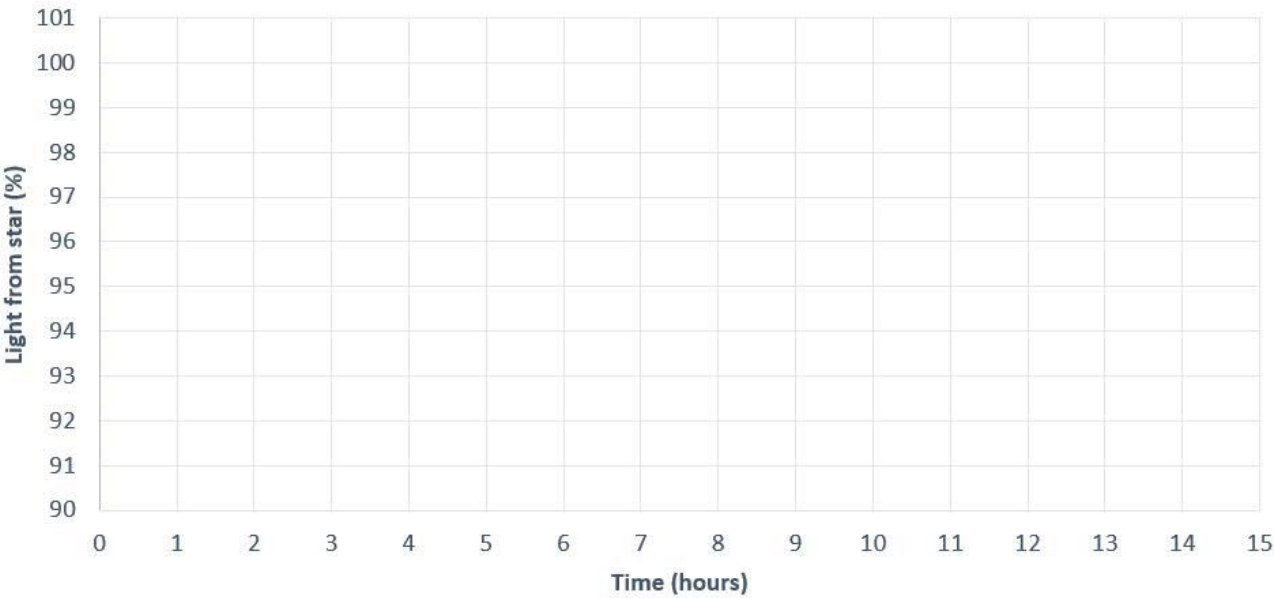
2.1. Prozkoumejte světelnou křivku na obrázku 5 a doplňte chybějící informace.



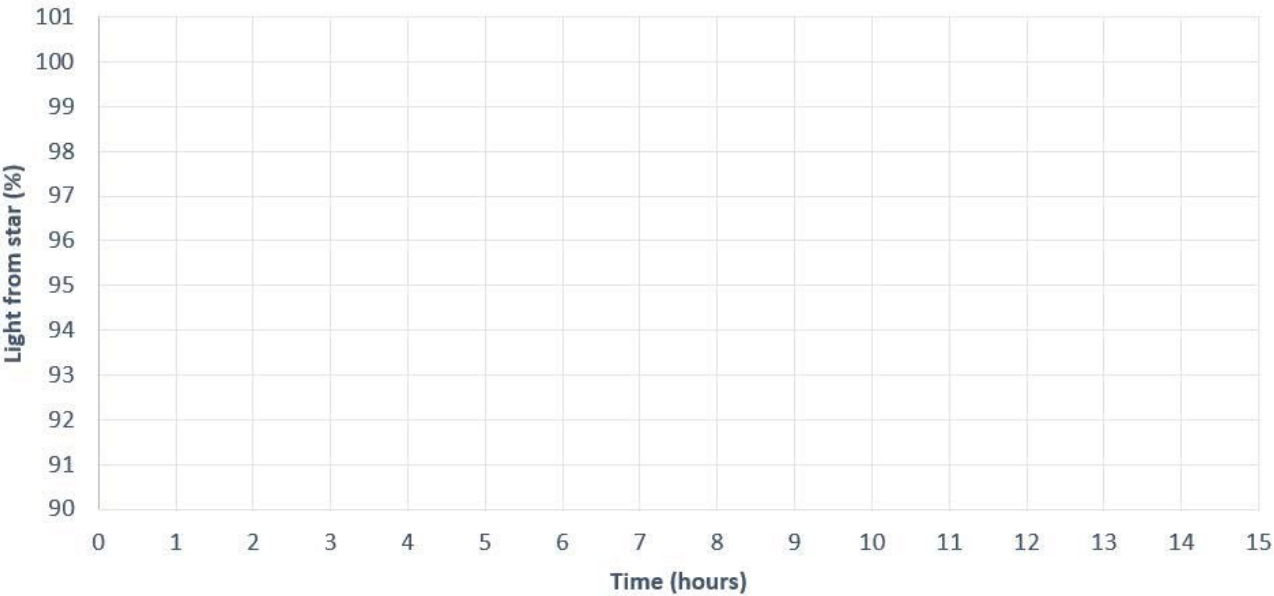
↑ Simulovaná světelná křivka.

Pozorované exoplanetě, která vytvořila tuto světelnou křivku, trvalo _____ hodin, než prošla před hvězdou, a zablokovala _____ % světla hvězdy.

2.2. Nakreslete očekávanou světelnou křivku pro exoplanetu, která má stejnou velikost jako exoplaneta na obrázku 5, ale její přechod trvá o dvě hodiny déle:

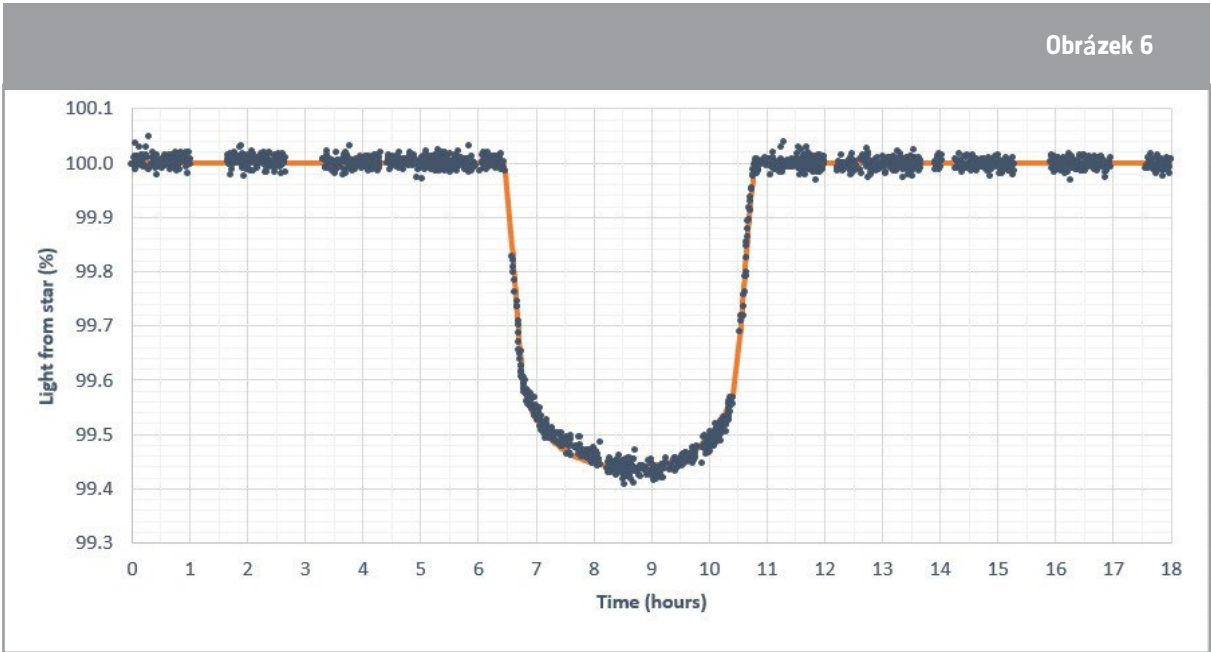


2.3. Nakreslete světelnou křivku jiné exoplanety obíhající kolem stejné hvězdy jako na obrázku 5. Tato exoplaneta je větší než předchozí exoplaneta a blokuje dvakrát více světla. Předpokládejte, že exoplaneta projde před hvězdou za stejnou dobu jako na obrázku 5:



Cvičení 3 - Interpretace skutečných satelitních dat

Na základě dosavadních poznatků můžete nyní analyzovat světelnou křivku tranzitu WASP 189 b, kterou jste viděli dříve během aktivity (obrázek 3).



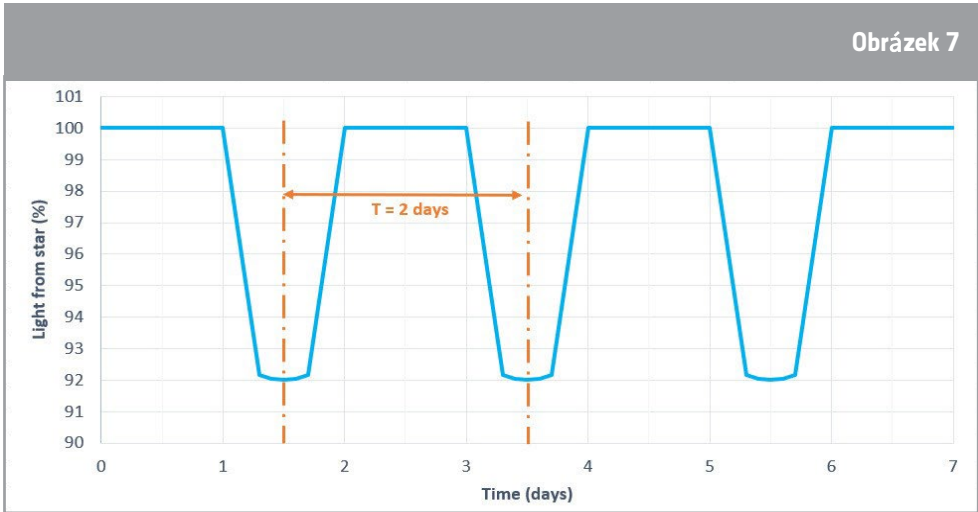
↑ světelná křivka tranzitu WASP 189 b, včetně nejlépe odpovídajícího fitu (modelu).

- 3.1. Jak dlouho přibližně trvá tranzit hvězdy WASP 189 b před její mateřskou hvězdou? _____
- 3.2. Jaké procento světla hvězdy WASP 189 b přibližně blokuje? _____

Cvičení 4 - Oběžná doba

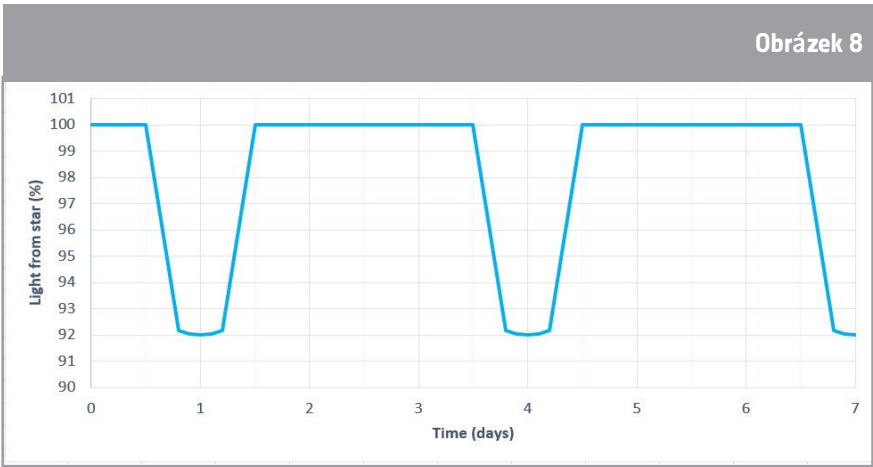
Při každém přechodu exoplanety před mateřskou hvězdou dojde k poklesu světelné křivky. Pokud je hvězda pozorována dostatečně dlouho na to, aby exoplaneta dokončila více než jeden oběh, objeví se na světelné křivce více poklesů jasnosti. Časový interval mezi počátečním a dalším poklesem je oběžná doba (T) exoplanety.

Na obrázku 7 je simulovaná světelná křivka dlouhá 1 týden. Během této doby simulovaná planeta třikrát prošla před diskem hvězdy. Měřením vzdálenosti mezi poklesy světelné křivky zjistíme, že oběžná doba planety je 2 dny.



↑ Simulovaná světelná křivka včetně vícenásobných tranzitů.

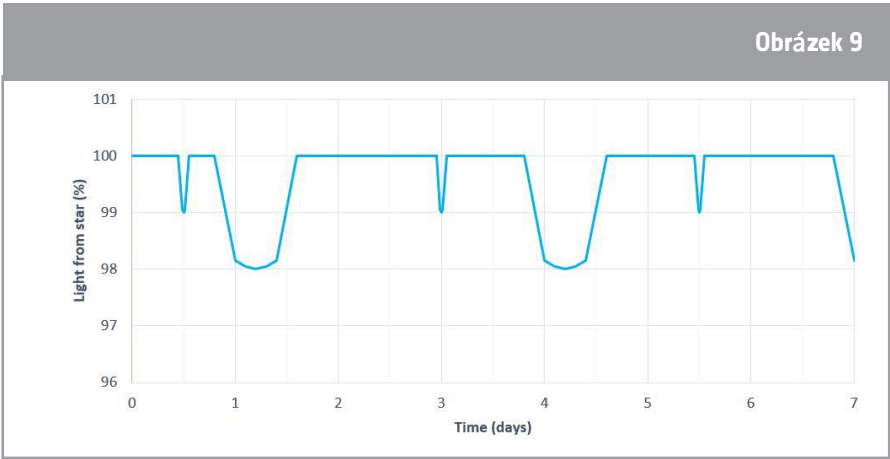
4.1. Podívejte se na obrázek 8 níže:



↑ Zjednodušený náčrt světelné křivky.

Jaká je oběžná doba exoplanet, jejichž tranzity jsou vidět na světelné křivce na obrázku 8?

4.2. Co můžete s využitím dosud získaných dovedností říci o pozorované soustavě exoplanet, jejíž světelná křivka je znázorněna na obrázku 9:



↑ Zjednodušený náčrt světelné křivky s více tranzity.

→ Aktivita 2 - Být detektivem exoplanet

Nyní jste připraveni analyzovat skutečná pozorování jako skuteční vědci zabývající se exoplanetami a shrnout, co jste se naučili. Porovnáte svá pozorování z vlastní modelové exoplanetární soustavy s pozorováními skutečných exoplanetárních soustav pořízenými pomocí družice Cheops.

Cvičení 1: Popis pozorování exoplanet

Doplňte mezery pomocí slov z nabídky a připomeňte si tak, co jste se naučili. Každé slovo bude použito právě jednou.

družicí	větší	mělicí	hvězdy	přechod/tranzit
dob	oběhů	hloubky	pokles	menší
				časový interval

Když exoplaneta projde mezi _____ a hvězdou, zablokuje malou část světla z _____ a způsobí tak _____ ve světelné křivce. Tento jev se nazývá ____.

Pokud je pozorováno více _____ téže exoplanety, pak _____ mezi zjištěnými poklesy světelné křivky je přímým měřítkem oběžné doby planety.

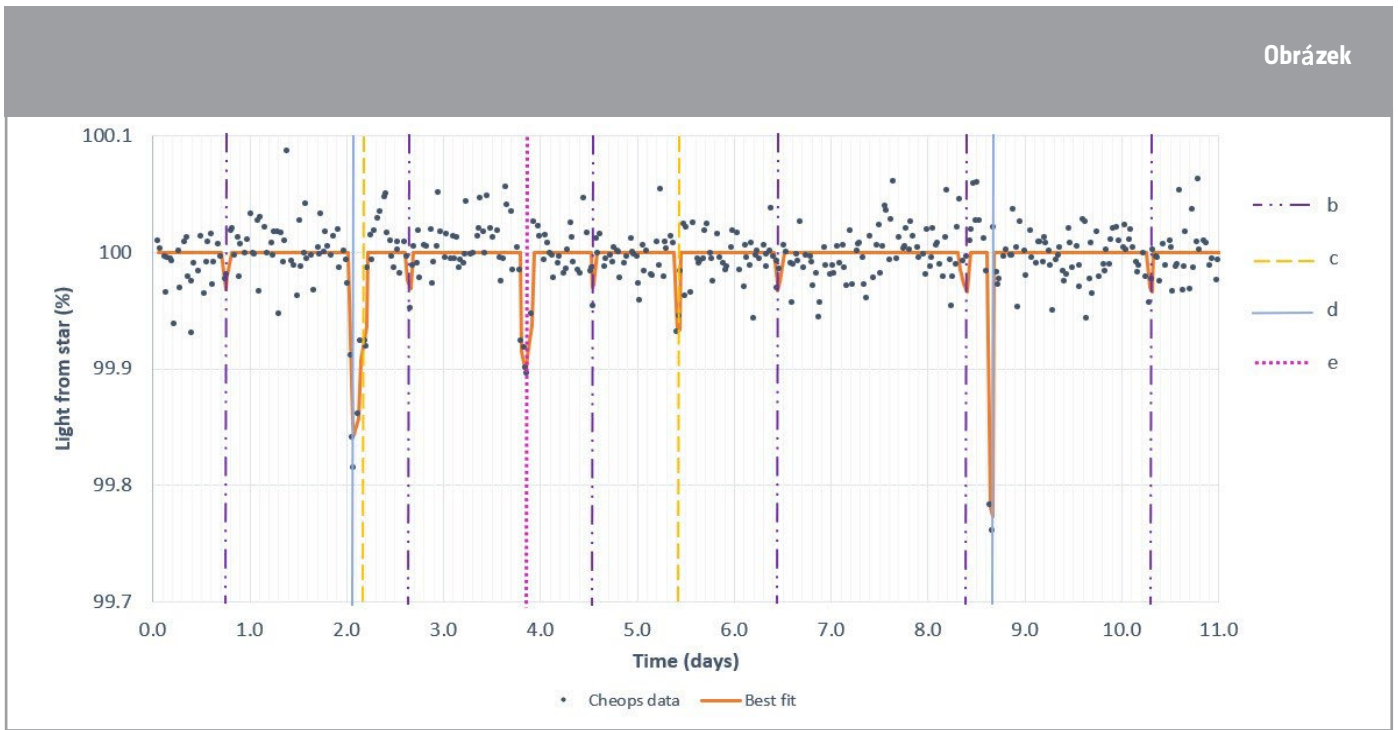
_____ exoplaneta vytváří hlubší pokles v měřené světelné křivce a _____ exoplaneta vytváří _____ pokles.

Jednotlivé exoplanety lze od sebe odlišit podle _____ poklesů, které vytvářejí ve světelné křivce a jejich oběžných. _____.

Cvičení 2: Pozorování exoplanet

Nyní jste připraveni interpretovat tuto světelnou křivku systému TOI-178, kterou Cheops pozoroval v průběhu 11 dnů.

Analyzujte světelnou křivku na obrázku 10 a popište, jaké informace můžete z tohoto souboru dat získat.



↑ Světelná křivka ze systému/soustavy TOI-178 pozorovaná družicí Cheops

→ Odkazy

Zdroje ESA

Zdroje ESA pro výuku esa.int/Education/Classroom_resources

Učte s exoplanetami
esa.int/Education/Teach_with_Exoplanets

Seznamte se s družicí Cheops: the Characterising Exoplanet Satellite
esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2019/12/Meet_Cheops_the_Characterising_Exoplanet_Satellite

Seriál Seznamte se s odborníky – Jiné světy
esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2020/07/Meet_the_Experts_Other_worlds

Paxi zkoumá exoplanety!
esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2019/12/Paxi_explores_exoplanets

Hackni exoplanetu
hackanexoplanet.esa.int

Vesmírné projekty ESA

Časový plán exoplanetárních misí ESA
<http://sci.esa.int/exoplanets/60649-exoplanet-mission-timeline>

Cheops – Characterising ExOPlanet Satellite
esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Cheops

Webb – Vesmírný teleskop Jamese Webba
esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Webb

Detekce exoplanet družicí Gaia
<https://sci.esa.int/s/WEmoOnW>

PLATO – PLAnetary Transits and Oscillations of stars
sci.esa.int/plato

ARIEL – Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey
sci.esa.int/ariel

Další informace

Umělecká animace oběžných drah a rezonancí systému TOI-178 <https://youtu.be/-WewvRG9ysY>