



## Výfučení: Fotometrie

### Úvod

Jistě jste si všimli, že některé hvězdy na obloze jsou mnohem jasnější než jiné. Jedna z nejdůležitějších oblastí astronomie je fotometrie, jejímž obecným cílem je měřit množství světla. Otázky, které si fotometrie klade, jsou například, jak je pozorovaný objekt na obloze jasný nebo o kolik se zjasnil oproti jinému objektu. Když se mluví o fotometrii, myslí se tím většinou měření viditelného světla, případně také v infračervené nebo ultrafialové části spektra.

V tomto Výfučení nejprve krátce vysvětlíme, na jakém principu fotometrie funguje, následně se zaměříme na nejrůznější astronomické objekty (planety, hvězdy atp.), u kterých vysvětlíme, co pomocí fotometrie můžeme naměřit. Jelikož různých typů objektů je hodně, bude se jednat o poněkud dlouhý text, nicméně věříme, že ne moc komplikovaný.

### Fotometrie v rámci astronomie

Nejstarším odvětvím astronomie je *astrometrie*: sledování změny polohy objektů na obloze. Lidé si už velmi dávno všimli, že se planety vůči hvězdné obloze pohybují. Protože se hvězdy vůči sobě na obloze zdánlivě nepohybují, někdy se hvězdám říká stálice. Historicky tento poznatek vedl k představě, že „sféra stálic“ je něčím dokonalým a neměnným.

Díky fotometrii si ale ukážeme, že mnohé ze stálic vykazují nejrůznější změny jasnosti, od pravidelných poklesů, přes zvláštní pulzace až k nepředvídatelným vzplanutím. Těmto zajímavým objektům se říká proměnné hvězdy.

Fotometrie se zabývá i jinými objekty, než jsou hvězdy, například množstvím odraženého světla od asteroidů nebo i světlem ze vzdálených galaxií.

### Praktické měření

Základním poznatkem praktické fotometrie je fakt, že všechna měření je třeba provádět relativně. Tedy na otázku „jak je hvězda jasná“ odpovíme s tisíckrát menší přesností než na otázku „o kolik je pozorovaná hvězda jasnější než srovnávací hvězda“. Takto tomu je v experimentální fyzice velmi často. Proč? Představte si, že chcete s kamarádem zjistit, kdo z vás je vyšší, ale máte pouze pravítko s ryskami po deseti centimetrech. Bude mnohem přesnější, když si k sobě stoupnete zády a přímo srovnáte, kdo je vyšší, než když se zvlášť změříte pravítkem a srovnáte naměřené výšky. Podobně tomu je ve fotometrii.

Historicky se fotometrická měření prováděla tak, že pozorovatel měl v okuláru vybrané tři hvězdy: hvězdu, o které se domníval, že je proměnná, a dvě hvězdy, které byly velmi podobně jasné, a o kterých s jistotou věděl, že proměnné nejsou. V průběhu noci pak zapisoval, jaké pozoruje změny jasnosti proměnné hvězdy oproti srovnávacím.

Dnes měření probíhá tak, že je na dalekohledu umístěna kamera, která pořizuje snímky. Na rozdíl od snímků, které pořizujete například telefonem, jež mají expoziční dobu v řádu zlomků sekundy, jsou astronomické snímky pořizovány s expoziční dobou v řádu desítek sekund.<sup>1</sup> Tyto

<sup>1</sup> Expoziční doba je čas, po který světlo může dopadat na snímač. Pokud ji prodloužíme, můžeme zaznamenat temnější objekty za cenu toho, že se v záběru nesmí tolik pohybovat, a také se na snímač dostane více šumu.

kamery bývají chlazené, což snižuje množství šumu na snímku. To proto, že se tím dramaticky sníží počet nahodilých infračervených fotonů, které detektory zachycují stejně jako světlo.

Digitální snímky jsou jenom zobrazení tabulky čísel: tam, kde je na snímku světlá oblast, mají pixely vysoké hodnoty, kde je úplná tma, mají pixely hodnotu nula.

### Světelné křivky

Světelná křivka je graf závislosti množství pozorovaného světla na čase. To znamená, že množství světla vynásíme na vvislou osu a čas na vodorovnou osu. Jsou-li pozorované změny jasnosti objektu pravidelné, můžeme určit periodu této změny. Často se pak setkáváme s pojmem „fáze“, která má v podstatě stejný význam jako fáze Měsíce. S každým primárním (nejhlubším) minimem počítáme, že současná fáze končí a začíná další. V případě, že určíme periodu změn jasnosti objektu, můžeme pro zvýšení přesnosti změn sloučit několik pozorování do jedné světelné křivky, přičemž na vodorovnou osu nevynásíme čas, ale fázi.

### Dvojhvězdy

Velmi často pozorujeme dvojhvězdy, což jsou dvě hvězdy, které obíhají kolem společného těžiště. Odhaduje se, že více než polovina hvězd ve vesmíru je součástí nějakého vícenásobného systému. V naprosté většině případů se ale dvojhvězdy jeví pozorovatelům ze Země jako jeden bod. To proto, že vzhledem k tomu, jak jsou od nás daleko, jsou u sebe velmi blízko.

Jak tedy víme, že se jedná o dvě hvězdy, které obíhají kolem společného těžiště? Víme to díky tomu, že některé tyto dvojhvězdy jsou natočené tak, že se při vzájemném oběhu při pohledu ze Země zakrývají. Dvojhvězdy mohou být velmi rozmanitě a představují jeden ze základních nástrojů k určování hmotností vesmírných těles.

Jednotlivým hvězdám ve dvojhvězdě se říká její složky. V průběhu jednoho vzájemného oběhu dochází ke dvěma zákrytům. Je trochu neintuitivní, že při obou zákrytech je z našeho pohledu zakryta stejná plocha. Přesto se stává, že jeden zákryt je hlubší než ten druhý. Je to díky tomu, že hvězdy nemusí mít stejnou povrchovou teplotu. Ze stejně velké plochy vyzáří teplejší hvězda mnohem více energie než hvězda chladnější. energii, kterou vyzáří jeden metr čtvereční povrchu hvězdy za sekundu, můžeme popsat hustotou zářivého toku  $I$  (měřenou ve watttech na metr čtvereční,  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), pro kterou platí:

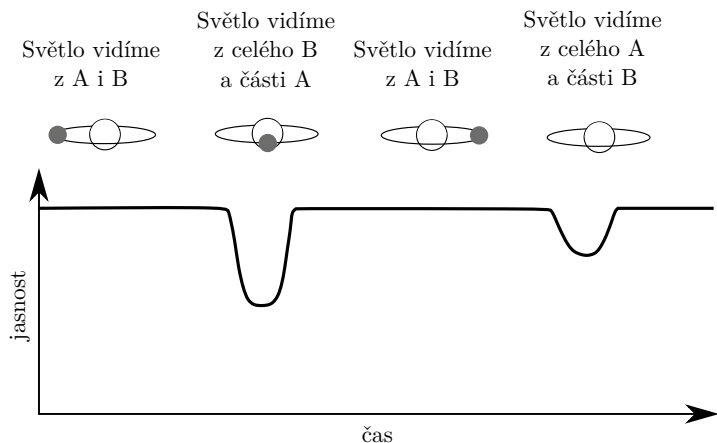
$$I = \sigma T^4,$$

kde  $T$  je povrchová teplota hvězdy a  $\sigma$  Stefan-Boltzmannova konstanta.<sup>2</sup> Tento vztah pak označujeme jako Stefan-Boltzmannův zákon.

Hlubšímu zákrytu říkáme primární a mělčímu sekundární. Podobně hvězdě, která je zakryta v primárním zákrytu, říkáme primární složka a hvězdě zakryté v sekundárním zákrytu sekundární složka.

Typickým příkladem zákrytových dvojhvězd jsou tzv. Algolidy (obr. 1), pojmenované podle hvězdy Algol, která však, jak se později ukázalo, Algolidou není. Jak již bylo řečeno, při zakrytí primární složky A vzniká hlubší primární minimum, při zakrytí sekundární složky B vzniká sekundární minimum. Mimo minima je u Algolid světelná křivka rovná, jelikož se hvězdy nijak nezakrývají. Zakulacený tvar minim vzniká kvůli pomalému a postupnému zákrytu složek. O tom, zda je minimum uprostřed ploché, či ne, rozhoduje sklon roviny oběhu složek vůči směru k Zemi a také relativní velikost obou složek.

<sup>2</sup>Hodnota Stefan-Boltzmannovy konstanty je přibližně  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ .



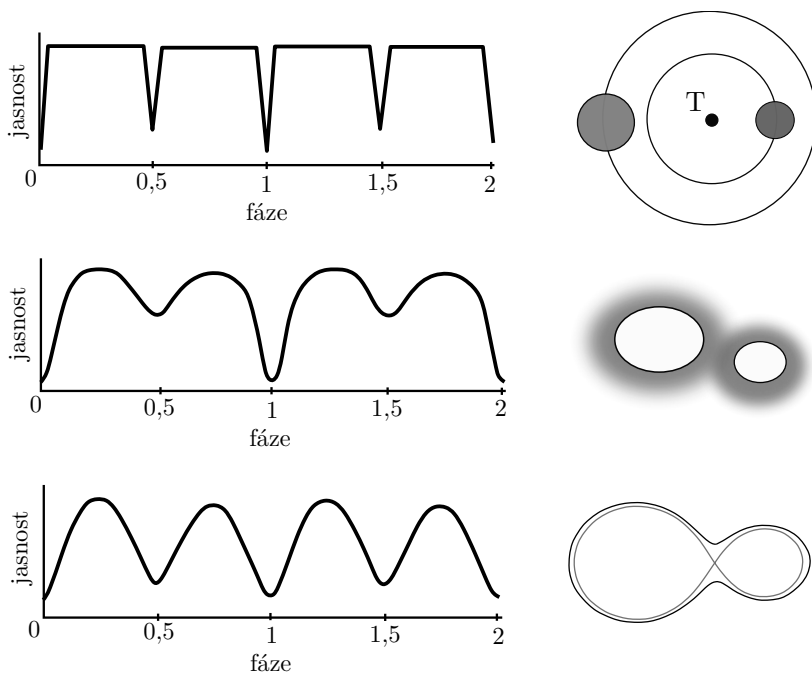
Obr. 1: Světelná křivka zákrytové dvojhvězdy typu Algol

Rozlišujeme celkem tři typy zákrytových dvojhvězd. V horní části obrázku 2 je opět světelná křivka dvojhvězdy typu Algol, která je charakteristická tím, že se jasnost mimo minima téměř nemění, protože jsou složky od sebe dostatečně daleko. Nedochází tedy k silnějším deformacím či přetoku hmoty mezi složkami. Uprostřed je světelná křivka dvojhvězdy typu beta Lyrae, jejíž složky jsou již tak blízko u sebe, že se jasnost mění neustále. Navíc dochází k přetoku hmoty z větší složky na menší po tzv. akrečním disku a obě složky jsou znatelně deformované. Dole je světelná křivka dvojhvězdy typu W Ursae Maioris, která se od typu beta Lyrae liší především téměř shodnými hloubkami primárního a sekundárního minima a také významně kratší periodou. Složky jsou velmi deformované, téměř se dotýkají, mají společnou atmosféru a kvůli intenzivnímu přetoku hmoty mezi složkami také proměnnou periodou.

### Fyzické proměnné hvězdy

Proměnnost hvězdy nemusí být způsobena pouze zákrytem. Změny jasnosti pozorujeme i z úplně jiných důvodů, jakými mohou být pulzace hvězdy, erupce nebo skvrny na jejím povrchu či její zhroucení a exploze. Obecně tedy kvůli změnám fyzických vlastností hvězdy. Na rozdíl od zákrytových dvojhvězd nemají světelné křivky fyzických proměnných hvězd pevně určené primární a sekundární minimum, ale naopak mohou být i zcela nepravidelné. Díky tomu můžeme tyto skupiny od sebe rozeznat.

Nejznámější podtřídou fyzických proměnných hvězd jsou tzv. *cefeidy*. Jedná se o pravidelně pulzující hvězdy, světelné křivky tedy mají v jedné fázi jedno minimum a jedno maximum (obr. 4). Pulzace hvězdy je způsobena rozpínáním a smršťováním jejích podpovrchových vrstev, za což může vyvažování tlaku záření (fotony, které hvězda vyzařuje, vytvářejí tlak, jenž hvězdu zvětšuje) a gravitace působící na vrstvy. V minimu je tedy hvězda nejmenší a tlak záření je tak silný, že překonává gravitaci, proto se hvězda rozpíná. Vrstvy se tedy vzdalují od jádra a gravitace, která tento tlak vyrovnává, je čím dál slabší, proto probíhá rozpínání velmi rychle. Současně se ale zmenšuje tlak záření, a to rychleji než gravitace, takže v maximum je překonán gravitací. Ta začne hvězdu vracet opět do minima, avšak brání jí v tom rostoucí tlak záření,



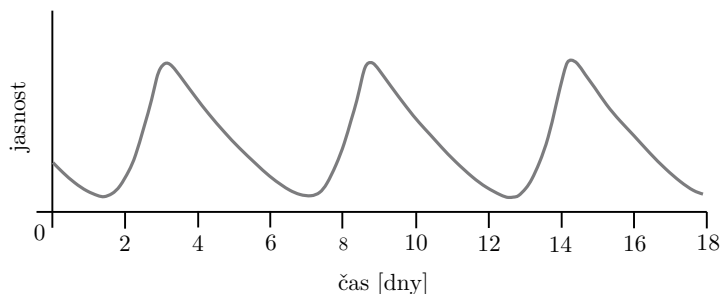
Obr. 2: Světelné křivky tří typů zákrytových dvojhvězd

proto probíhá smršťování pomaleji než rozpínání. Výsledkem je tedy křivka „zkosená směrem doleva“. Jelikož výkon záření cefeidy závisí hlavně na její periodě, můžeme ze znalosti periody a jasnosti cefeidy vypočítat její vzdálenost od Země (kde opět používáme nějakých srovnávacích hvězd – dalších cefeid, jejichž vzdálenost jsme mohli ověřit jinou metodou měření, a tak onu závislost výkonu na periodě objevit). Proto jsou cefeidy velmi důležité při měření vzdáleností ve vesmíru.<sup>3</sup>

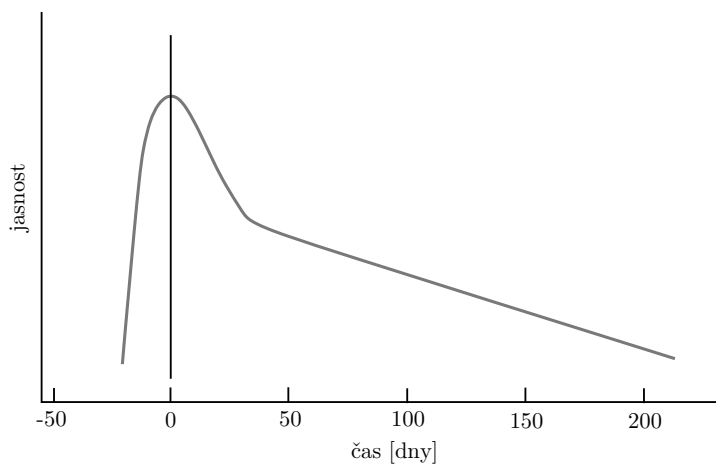
Na obrázku 4 je světelná křivka úkazu, kterému se říká supernova. Supernova vzniká, pokud hvězda dosáhne určité mezní hmotnosti, tlak záření již nemůže vyrovnávat gravitaci a hvězda se zhroutí sama do sebe. Rozlišujeme několik typů supernov, protože k nim dochází různým způsobem. K supernovám typu I dochází v důsledku přetoku hmoty z jedné hvězdy na bílého trpaslíka, což je vyhořelé jádro menší hvězdy. Supernovy typu II jsou závěrem života velmi hmotných samostatně existujících hvězd. V případě na obrázku 4 (tedy typ Ia) vznikla supernova kvůli přetoku hmoty z rudého obra na bílého trpaslíka, který tak zvyšoval svou hmotnost až po Chandrasekharovu mez, což je 1,44násobek hmotnosti Slunce, kdy se zhroutil a explodoval.

Zvláštní a celkem nedávný případ byl výrazný pokles jasnosti hvězdy Betelgeuse ze souhvězdí Orionu. Lze vidět, že minimum nastalo na začátku února roku 2020. Jedná se o červeného

<sup>3</sup>Například Edwin Hubble pomocí cefeid určil vzdálenosti cizích galaxií, z čehož potom mohl přibližně vypočítat rychlost rozpínání vesmíru, kterou dnes označujeme jako Hubbleovu konstantu. Vyšel mu však zhruba desetinásobek dnešní hodnoty, jelikož typ cefeid, které pozoroval, nebyl shodný s tím, se kterým počítal.



Obr. 3: Světelná křivka cefeidy

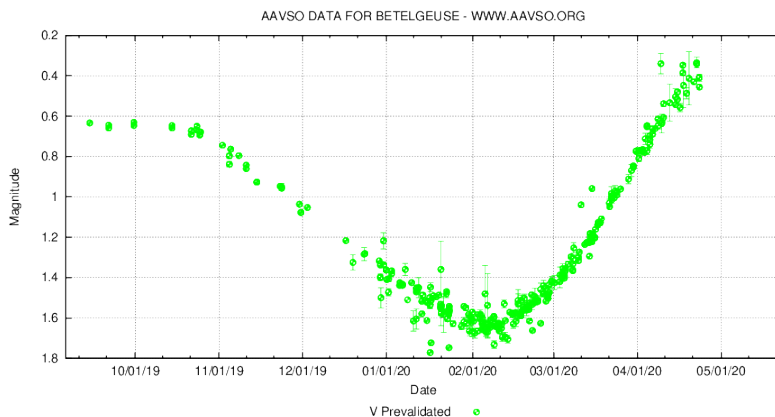


Obr. 4: Světelná křivka supernovy typu Ia

veleobra, gigantickou hvězdu na konci svého života s poloměrem asi tisíckrát větším, než je poloměr Slunce, která by měla v astronomickém měřítku za velmi krátkou dobu explodovat v supernovu. Mnozí astronomové se tehdy domnívali, že právě tento pokles jasnosti představuje gravitační zhroucení hvězdy. Nejpravděpodobnějším vysvětlením je však zastínění Betelgeuse prachovým oblakem, nikoli gravitační kolaps.

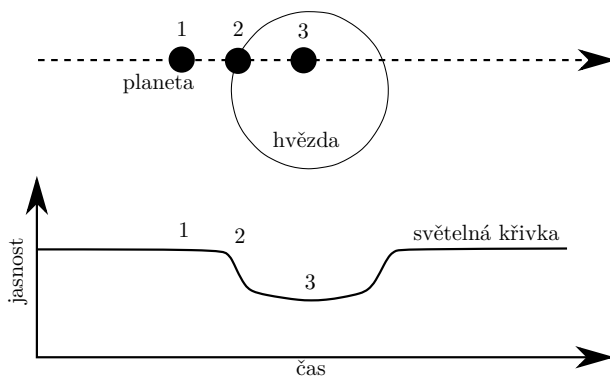
### Exoplanety

Jak nejspíš víte, Slunce rozhodně není jediná hvězda, okolo níž obíhají planety. Planetám mimo Sluneční soustavu říkáme *exoplanety*. Pokud je rovina oběhu exoplanety ve správném úhlu vůči směru k Zemi, můžeme pozorovat mírné poklesy jasnosti hvězdy v důsledku překrytí exoplanetou. Z těchto poklesů pak umíme vypočítat poloměr, periodu i vzdálenost exoplanety od hvězdy. Z měření spektra soustavy pak ještě můžeme určit hmotnost planety a složení její atmosféry. Z těchto údajů posuzujeme například to, zda by se na exoplanetě mohl nacházet život. V drtivé



Obr. 5: Světelná křivka hvězdy Betelgeuse na přelomu let 2019 a 2020 (převzato z <https://www.aavso.org/lcg>)

většine případů se však jedná o plynné obry obíhající velmi blízko mateřské hvězdě, tzv. „horké Jupitery“.

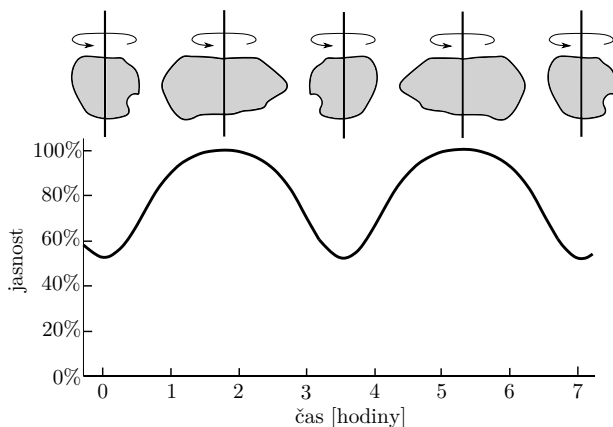


Obr. 6: Světelná křivka tranzitu exoplanety

Čím blíž je exoplaneta ke hvězdě z pohledu Země, tím je minimum širší a placatější. Pokud bychom sledovali křivku po celou fázi exoplanety, našli bychom ještě sekundární minimum, avšak o mnoho méně výraznější. Mezi primárním a sekundárním minimum jasnost systému mírně narůstá, mezi sekundárním a primárním naopak klesá. Exoplaneta totiž odráží světlo hvězdy, a tím, jak okolo ní obíhá, se část osvětleného povrchu viditelná ze Země mění (stejně jako Měsíc střídá fáze od novu přes první čtvrt po úplněk a zase zpět přes poslední čtvrt). Pokud je však exoplaneta „v úplněku“, je zakryta hvězdou, a proto nastává sekundární minimum.

## Planetky

Dalšími objekty, k jejichž výzkumu fotometrie výrazně přispívá, jsou planetky. Největší koncentrace planetek ve Sluneční soustavě je na oběžné dráze mezi Marsem a Jupiterem. Tomuto uskupení říkáme „hlavní pás planetek“. Pravděpodobně vznikl rozpadem planety při formování Sluneční soustavy. Jelikož jsou i relativně blízko Země, pozorujeme je ve srovnání například s transneptunickými tělesy snadno.



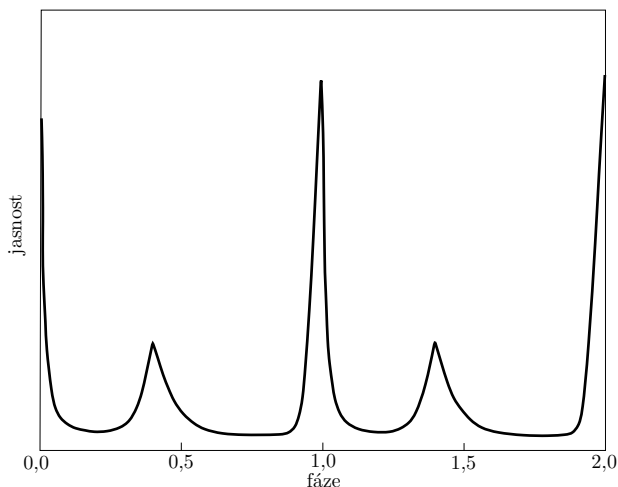
Obr. 7: Světelná křivka planety

Jelikož planetky mají na rozdíl od planet nebo hvězd velmi nepravidelný tvar a k tomu relativně rychle rotují, plocha osvětlená Sluncem se s časem mění. Tyto změny se potom odráží i na jasnosti planety, a získáváme tak většinou mírně nepravidelnou světelnou křivku (minim může být i více než dvě). Z těchto změn pak můžeme určit tvar a periodu rotace planety.

## Pulsary

Pulsary jsou velmi rychle rotující neutronové hvězdy o velikosti pouhé desítky kilometrů, vysílající elektromagnetické záření ze dvou pólů, nikoli pólů rotace, ale z magnetických pólů. Kvůli rotaci se tedy Země může na chvíli dostat do sloupce záření, což má za následek zvětšení jasnosti (většinou jsou měřeny v jiných částech spektra než v tom viditelném). Jelikož pulsary rotují opravdu velmi rychle, měli astronomové při detekování prvního pulsaru za to, že se jedná o signál vyslaný mimozemšťany, a pojmenovali jej LGM-1 jako zkratka „little green men“. Mimořádně první planetární systém mimo Sluneční soustavu byl objeven nikoli u klasické hvězdy, ale právě u pulsaru. Byl objeven pomocí malých odchylek v periodě rotace pulsaru v důsledku gravitačního působení exoplanet.

Na obrázku 8 lze vidět účinek záření vycházejícího z obou pólů. Za vyšší primární maximum může světlo z pólu blíže směrem k Zemi, za nižší sekundární maximum může druhý pól. Celá perioda rotace pulsaru, tedy od jednoho primárního maxima do druhého, se u známých pulsarů pohybuje od 0,001 4 s do 8,51 s.



Obr. 8: Světelná křivka pravidelného pulsaru

## Závěr

Doufáme, že jste se v tomto Výfučení dozvěděli nové poznatky o astronomických objektech a jedné z důležitých metod dnešních astronomů. Fotometrie je totiž zásadní částí astronomického pozorování. Kdyby si starší z vás chtěli opravdová fotometrická pozorování vyzkoušet, můžete se zúčastnit letní Astronomické expedice.<sup>4</sup> S jakýmkoli dotazy k Výfučení se neváhejte zeptat autorů.

**Tomáš Patsch**  
patscht@vyfuk.mff.cuni.cz

**Marco Souza de Joode**  
joode@vyfuk.mff.cuni.cz

---

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported. Pro zobrazení kopie této licence navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.

---

<sup>4</sup><https://astronomickaexpedice.cz/>