

# Jak byla změřena rychlost světla

Michal Švanda

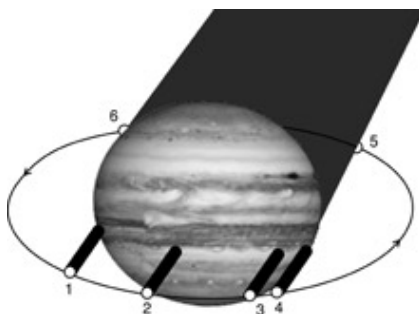
*O podstatě světla již byl napsáno mnoho, fakticky se o tomto tématu vedly sáhodlouhé filozofické debaty. Snad prvním, kdo se světlem jako fyzikálním jevem zabýval, byl v prvním století před naším letopočtem římský básník a filozof Lukrécius (99–55 před n. l.). Ve čtvrté knize svého díla „O povaze věcí“ tvrdil, že objekty kolem sebe vidíme proto, že samy emitují své vlastní repliky. Přirovnával tento jev ke svlékání kůže hadů, jen podotýkal, že probíhá u všech věcí kontinuálně a tyto nové repliky jsou geometricky tenké.*

Isaac Newton (1643–1727) byl přesvědčen, že světlo se chová jako proud částic. Z jeho pokusů vyplývalo, že světlo se pohybuje po křivkách, které bylo možné odvodit z korpuskulární teorie světla. V následujících staletích byla však částicová teorie přebita teorií vlnovou. Vlnové vlastnosti jasně vyplývaly např. z elektromagnetických rovnic postulovaných Jamesem Clerkem Maxwellem (1831–1879). Na přelomu 19. a 20. století však byla experimenty definitivně vyvrácena představa éteru coby prostředí nutného pro šíření světelných vln a pak už šlo vše ráz na ráz. V roce 1905 vysvětlil Albert Einstein (1879–1955) fotoelektrický jev a ukázal, že z jistého pohledu se světlo chová jako proud částic, které mají diskretní energie závislé na své frekvenci. Na počátku 20. století postupně vzniká teorie vlnově-korpuskulárního dualismu, z níž vyplývá, že nejen světlo, ale i jiné částice se chovají současně jako vlny. Pro elektrony tuto vlastnost předpověděl v roce 1920 Louis de Broglie (1892–1987), experimentálně byla prověřena C. J. Davissonem a L. H. Germerem v roce 1927. Bylo tedy jasné, že vlastně všichni měli pravdu – světlo se chová i jako vlna, i jako částice.

Od debaty o podstatě světla není daleko k otázce, jak se to vlastně má s jeho rychlostí. Tímto problémem se zabýval jako první anglický filozof Francis Bacon (1561–1626). Ve své práci *Novum Organum Scientiarum* (vyšla 1620) navrhl, že „blikající hvězdy“ již dávno nemusí existovat, přestože my stále ještě vidíme jejich světlo. Pokusy o exaktní určení rych-

losti světla prováděl na začátku 17. století i slavný Galileo Galilei (1564–1642). Galilei použil dva asistenty s lucernami, které poslal na vzdálené kopce a nechal je světlo lucerny zakrývat. Galileův nápad narazil na fakt, že reakční doba obou jeho asistentů byla podstatně delší než doba, za kterou světlo urazilo vzdálenost mezi oběma vrchy. Aby uspěl, museli by mít jeho asistenti reakční dobu ve zlomkách mikrosekund.

Jak dnes víme, světlo se ve vakuu pohybuje stálou rychlostí  $c = 299\,792$  km/s. Rigorózní měření této konstanty publikoval před Francouzskou akademií věd 22. listopadu 1675 dánský hvězdář Ole Christensen Rømer (1644–1710). Rømer využil pozorovaného faktu, že úkazy jupiterových měsíčků se často zpožďovaly oproti



*Možné úkazy stínohry Jupiterovy rodiny v období od konjunkce k opozici: 1 – vstup stínu měsíce na disk, 2 – vstup měsíce na disk, 3 – výstup měsíce z disku, 4 – výstup stínu měsíce z disku, 5 – vstup měsíce do stínu planety (začátek zatmění), 6 – výstup měsíce zpoza planety. Pro vzdálenější měsíce nemusí nastat úkaz 6, který může být zastoupen výstupem měsíce ze stínu. V období od opozice ke konjunkci je orientace stínů opačná.*



Podobizna dánského hvězdáře Ole Rømera

předpovědi až o 17 minut. Zvláště bylo toto zpoždění patrné poblíž konjunkce Jupiteru se Sluncem. Rømerovi došlo, že v době konjunkce je Jupiter od Země o dvě astronomické jednotky dále než v době opozice. Pokud se tedy světlo šíří konečnou rychlostí, v době konjunkce potřebuje více času k letu mezi Jupiterem a Zemí. Úkazy proto logicky musí být zpožděné oproti předpovědi.

Celkově je Rømerova práce ukázkou výjimečné pozorovatelské pečlivosti. S ohledem na mnoho nepříliš příznivých jevů, které se do celého pozorování promítají, je spíše zázrakem, že mu vyšla smysluplná hodnota. Rømer na již zmíněné přednášce publikoval rychlost světla s hodnotou 227 000 km/s, která se od dnes známé hodnoty liší o méně než 25 %. Podívejme se tedy společně s konkrétními údaji (vztahenými k pozorováním z pozdějších let), jak Rømer postupoval.

Jupiterovo stínové divadlo nabízí velké množství různých úkazů, z nichž je třeba se soustředit na jeden konkrétní. Nejsnáze jsou pozorovatelné vstupy a výstupy měsíců ze stínu vrženého do prostoru Jupiterem, zatímco přechody stínů nebo měsíců přes Jupiterův disk jsou z pozorovatelských důvodů velmi nevhodné, protože jejich časy jsou obtížně měřitelné. Vyberme si tedy třeba vstup měsíce Io do stínu. Pak je jasné, že z geometrických důvodů tento úkaz můžeme pozorovat vždy jen polovinu synodické periody Jupiteru.

**Mgr. Michal Švanda (\*1980)** vystudoval astronomii a astrofyziku na MFF UK, kde nyní pokračuje v doktorském studiu se zaměřením na dynamické dění ve sluneční fotosféře. Pracuje v Astronomickém ústavu AV ČR v Ondřejově a v Astronomickém ústavu UK.

V našem případě od konjunkce k opozici (ale už ne od opozice ke konjunkci; díky blízkosti oběžné roviny jupiterových měsíců k ekliptice tento úkaz zůstává při pohledu ze Země skryt za planetou).

Rozhodujícími budou krajní úkazy, tedy poslední zatmění Io před opozicí a první zatmění Io po konjunkci, neboť je mezi nimi největší dráhový rozdíl. Zatímco okamžik prvního z úkazů je měřitelný poměrně přesně (a jeho pozorování je limitováno pouze počasím), pozorovatelnost druhého je omezena blízkostí Jupiteru Slunci na zemské obloze. Proto si vystačíme s prvním pozorovatelným zatměním Io po konjunkci.

V prvním kroku je třeba určit efektivní (synodickou) periodu tohoto úkazu. Ta se určí ze dvou po sobě následujících posledních zatmění před opozicí. Mezi těmito okamžiky vykoná Io přesně známý počet siderických oběhů planety (perioda byla v Rømerově době známa – 42,48 hodin), počet oběhů však nebude celočíselný. Důvodem je různá orientace stínu v těchto dvou okamžicích (tyto dva konkrétní úkazy nenastávají s periodou totožnou se synodickou periodou oběhu Jupiteru) a s tím související různá pozice Jupiteru na synodické dráze v obou okamžicích. Tedy konkrétně: dvě po sobě jdoucí poslední zatmění Io před opozicí byla pozorována 13. 6. 1960 v 23:23 a 18. 7. 1961 v 23:05. Mezi těmito okamžiky je časový interval 9599 hodin a 42 minut, za který vykonal Io 225,98164 siderických oběhů. Vstupů do stínu nastal celkem určitě celočíselný počet. Z faktu, že maximální zpoždění úkazu oproti předpovězenému je 17 minut, což je výrazně menší hodnota, než je siderická oběžná perioda Io, vyplývá, že obě periody (siderická i efektivní) si musí být velmi blízké. Je tedy jasné, že mezi těmito dvěma posledními zatměními Io před opozicí nastalo 226 vstupů Io do stínu Jupiteru.

Efektivní periodu úkazu získáme prostým podělením časového odstavu mezi těmito dvěma úkazy jejich počtem, tedy v našem případě  $P_{\text{eff}} = 1,769856$  dne. Je to určitě číslo s dobrým smyslem, neboť je „vystředováno“ přes celý synodický oběh Jupiteru.

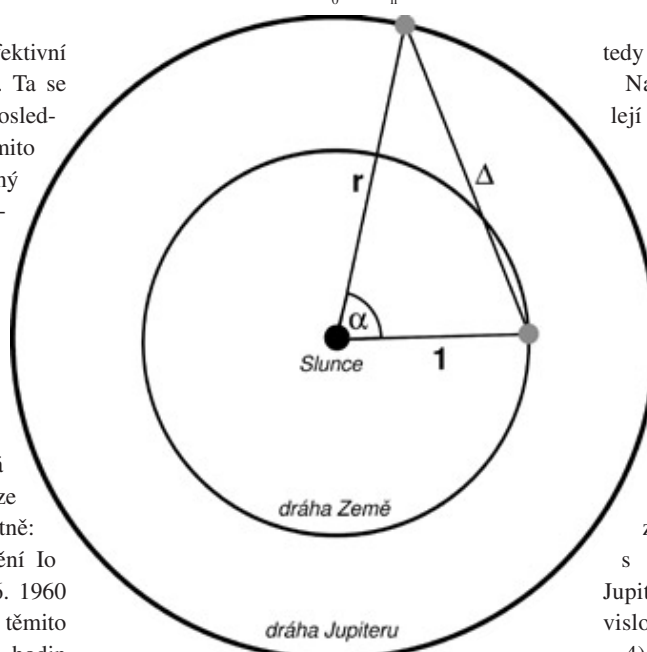
Nyní přijde ke slovu pozorování prvního možného zatmění po konjunkci, které již

máme napozorováno, neboť nastalo mezi oběma použitými posledními zatměními před opozicí. Řekněme, že tento úkaz nastal v  $T_p = 8. 3. 1961$  v 5.31. Je třeba podotknout, že konjunkce nastala téměř o dva měsíce dříve, 5. 1. 1961, ale dříve prostě nebylo možné pozorovat.

Toto konkrétní zatmění předpovíme na základě získané efektivní periody. Použijeme vzoreček

$$T_n = T_0 + nP_{\text{eff}}$$

kde  $T_0$  je okamžik předchozího zatmění před opozicí a  $n$  je celé číslo, které musíme uhodnout. Je totiž jasné, že zatmění mezi okamžikem  $T_0$  a  $T_n$  musel nastat



Geometrické schéma vysvětlující výpočet aktuální vzdálenosti  $\Delta$  mezi Jupiterem a Zemí

celý počet a současně  $T_n$  musí být těsně menší než  $T_p$ , protože jde o zpoždování (předpovězené musí nastat dříve, než pozorované).

Hrátkou s kalkulačkou nalezneme číslo  $n = 151$  a vypočtený okamžik úkazu tedy:  $nP_{\text{eff}} = 267$  dní, 5 hodin 58 minut, tedy  $T_n = 8. 3. 1961$  v 5.21. Zjistili jsme tak zpoždění tohoto konkrétního úkazu,  $\delta t = T_p - T_n = 10$  minut. Zbývá stanovit dráhový rozdíl oproti opozici.

Ten určíme na základě předpokladu, že pohyb Jupiteru po zemské obloze je rovnoměrný. Jednoduše pak odhadneme úhel  $\alpha$  Země–Slunce–Jupiter pro daný čas  $T$ , vztažený vůči opozici. Více snad napoví geometrické schéma na obrázku výše.

$$\alpha = 360^\circ / P_{\text{syn,J}} (T - T_{\text{opp}}),$$

kde  $P_{\text{syn,J}} = 398,87$  dne je synodická perioda oběhu Jupiteru. Z geometrie pak můžeme (pomocí kosinové věty) určit vzdálenost Země–Jupiter ( $\Delta$ ) v daném čase  $T$ :

$$\Delta^2 = r^2 + 1^2 - 2r \cos \alpha,$$

kde  $r$  je střední vzdálenost Jupiteru od Slunce ( $r = 5,2$  AU). Pak můžeme odvodit dráhový rozdíl  $\delta\Delta$  pro okamžiky opozice a  $T$ :

$$\delta\Delta = (\Delta - 4,2) \text{ AU}.$$

Pro náš případ vyjdou hodnoty:  $\alpha = 241,2^\circ$ ,  $\Delta = 5,75$  AU a  $\delta\Delta = 1,549$  AU = 231 569 431 km. Výpočet rychlosti světla je pak velmi přímočarý:

$$c = \delta\Delta/\delta t,$$

tedy v našem případě  $c = 385\,949$  km/s.

Na nepřesnosti určení se v zásadě podílejí čtyři faktory:

- 1) Stín Jupiteru jakožto plynného objektu není zcela ostrý, satelity díky konečné oběžné rychlosti a konečnému rozměru ve stínu mizí postupně a moment „zmizení“ je tak závislý i na pozorovacích podmínkách a kvalitách dalekohledu. Zde se mohou vnášet až minutové chyby.
- 2) Úkaz nemůžeme sledovat po celou dobu oběhu (hlavně v období konjunkce).
- 3) Oběžné dráhy satelitů nejsou zcela přesně v rovině ekliptiky, a tak s ohledem na kuželovitý tvar stínu Jupiteru „stráví“ ve stínu různé doby v závislosti na konkrétní geometrické situaci.
- 4) Dráhy satelitů nejsou přesně keplerovské, projevuje se zde jednak silné slapové ovlivnění Jupiterem, ale také vzájemné rezonance mezi satelity (zvláště mezi Io, Europou a Ganymedem), které se na svých drahách vzájemně různě „postrkují“.

Abychom eliminovali různá další zjednodušení, která byla v této úloze použita, je vhodné výsledky získat pro více opozic a konjunkcí (což v podstatě znamená pro více let) a výsledek vhodně statisticky zpracovat. Pak se i touto metodou dá velmi přiblížit dnes oficiální hodnotě  $c$ .

Předpovědi úkazů Jupiterových satelitů uváděné např. v *Hvězdářské ročence* jsou samozřejmě o rozdíl způsobený konečnou rychlostí světla opraveny. A zvláště s jejich využitím by mělo být určení rychlosti světla starou Rømerovou metodou mnohem jednodušší. Nechcete to zkusit?