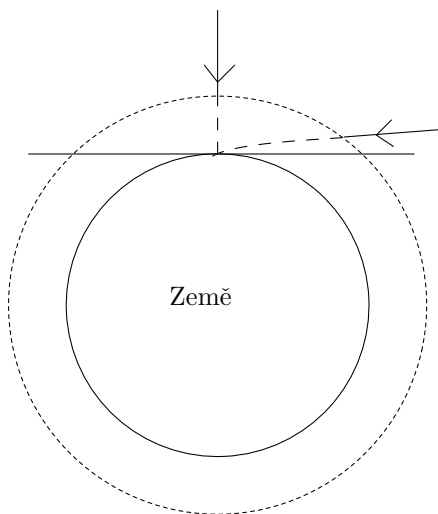


Astronomická refrakce

Co mají společného zamilované páry, které v láskyplném objetí nedočkavě čekají na západ slunce a parta podivně vyhlížejících mladých lidí, kteří s teodolitem pobíhají po parku a hledají místo s dobrým výhledem k západu? Ano, je to ta samá touha dozvědět se něco více o astronomické refrakci.

Pokud budeme z vhodného stanoviště s ideálním obzorem sledovat třeba západ slunce s hodinkami a jednoduchým jízdním řádem, podle kterého by mělo jezdit, zjistíme pozoruhodnou věc – náš životadárce totiž zmizí za obzorem později než by měl. Celou tuhle záhadu vyřeší vzpomínka na základy optiky ze střední školy, kde se většina z nás učila o lomu světla na rozhraní dvou prostředí o různé optické hustotě. Než k nám totiž dospějí hřejivé sluneční paprsky, musí vstoupit z velmi řídkého meziplanetárního prostoru do zemské atmosféry, kde dojde k jejich lomu.

Protože zemská atmosféra není homogenní, budou se paprsky lámat v závislosti na změně indexu lomu prostředí, kterým procházejí. Když dospějí až do našeho oka, bude jejich směr odlišný od původního. Změna směru bude záviset na průběhu indexu lomu prostředí, ale také na dráze, kterou světlo v tomto prostředí urazí. Pomocí jednoduché geometrické úvahy (viz obr.1) dojdeme k závěru, že tento jev, kterému se říká astronomická refrakce, bude tím výraznější čím blíže k obzoru budeme objekt pozorovat.



OBRÁZEK 1 Ilustrace závislosti astronomické refrakce na výšce pozorovaného objektu nad obzorem.

Limitním příkladem bude právě východ nebo západ takového objektu. Těsně nad obzorem dosahuje refrakce hodnoty přibližně $34'$, takže již zmiňované slunce bude při svém západu v okamžik, kdy se dotkne obzoru ve skutečnosti celé pod obzorem (i tohle je nutné brát s rezervou, protože atmosférická refrakce toho má na svědomí více – způsobí totiž také zploštění slunečního disku a tedy zmenšení jeho vertikálního úhlového rozměru). Refrakce je de-

finována jako rozdíl mezi vypočtenou a pozorovanou zenitovou vzdáleností objektu na obloze, tedy:

$$R = z - z'. \quad (1)$$

Postup výpočtu zenitové vzdálenosti pro libovolný objekt a čas je v podstatě problémem převodu rovníkových souřadnic na obzorníkové. Pro stručnost ho zde nebudu uvádět a budu se rovnou věnovat modelům refrakce, které budu poté konfrontovat s naměřenými daty.

Modely refrakce

První model, který ale platí jen v případě, že pozorujeme v zenitových vzdálenostech do 75° , má následující podobu:

$$R = 58,284'' \tan z' - 0,0668'' \tan^3 z'. \quad (2)$$

Mnohem přesěji popisuje refrakci empirický vztah (Bennettova formule):

$$R = \frac{1}{\tan \left(h' + \frac{7,31}{h'+4,4} \right)}, \quad (3)$$

kam dosazujeme namísto zenitové vzdálenosti objektu z' jeho výšku nad obzorem $h' = 90^\circ - z'$ ve stupních (refrakce potom vyjde v minutách). Přesnost tohoto vzorce se dá ještě zvýšit iterací, když k vypočtené hodnotě refrakce přičteme následující člen:

$$-0,06 \sin(14,7R + 13). \quad (4)$$

Kromě těchto dvou modelů byl při zpracování pozorování planety Jupiter zahrnut model uvedený na webových stránkách projektu JPL HORIZONS, který je pravděpodobně založený na výše uvedené Bennettově formuli.

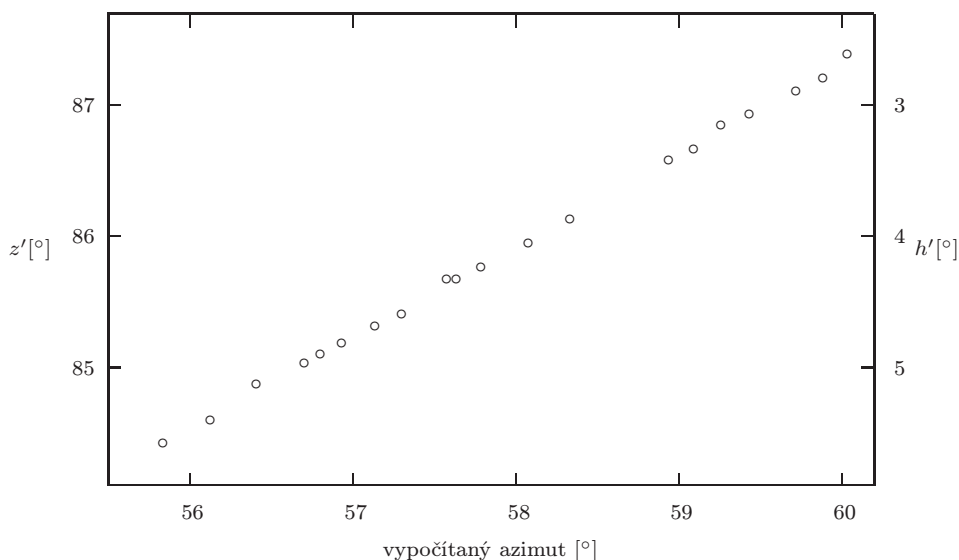
Pozorování

Pozorování spočívalo v zaznamenání přesného času, zenitové vzdálenosti a případně také azimutu objektu pomocí teodolitu. Nejdříve byl pozorován 10. října 2006 západ planety Jupiter a 17. října 2006 k Jupiteru přibyl také Arkturus.

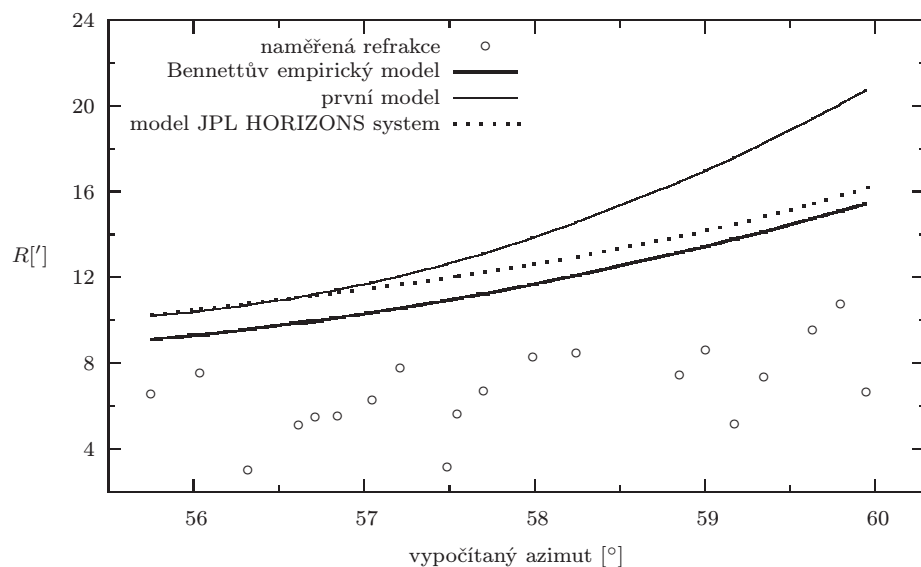
Zpracování dat a výsledky

Coby výsledek této práce poslouží následující grafy – graf závislosti pozorované zenitové vzdálenosti a výšky na azimutu (protože ten pozorovaný není k dispozici, tak na vypočteném) a graf závislosti refrakce na azimutu. Ve druhém grafu budou také zobrazeny jednotlivé modely refrakce, aby se daly snadno porovnat s naměřenými daty.

Nejdříve uvádím grafy vyhodnocující pozorování planety Jupiter 10. října 2006. Výchozí poloha v rovníkových souřadnicích byla $\alpha = 15\text{h } 12\text{m } 45\text{s}$, $\delta = -17^\circ 05' 16''$. Z grafu na obrázku 3 je vidět, že se nejednalo o příliš přesné pozorování.

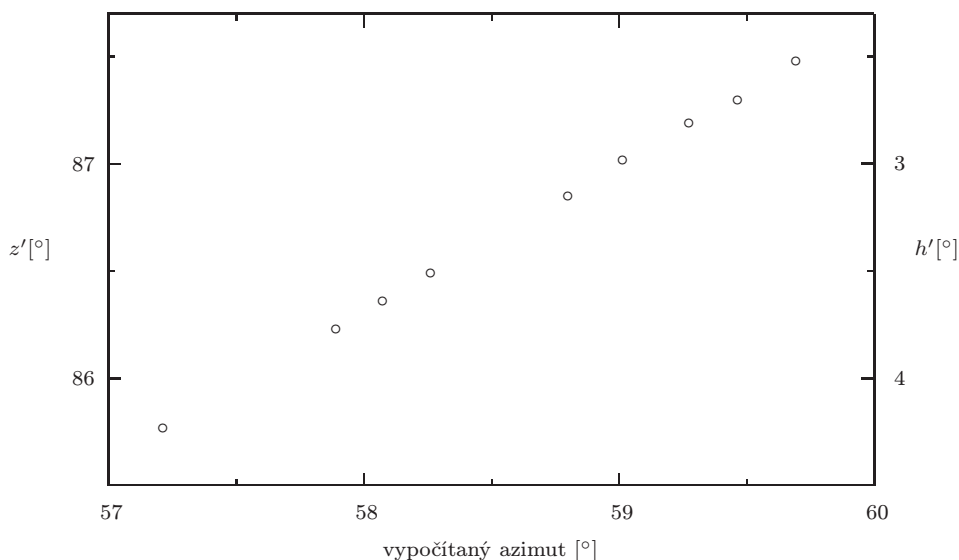


OBRÁZEK 2 Jupiter, 10. října 2006, závislost zenitové vzdálenosti, resp. výšky na vypočteném azimutu

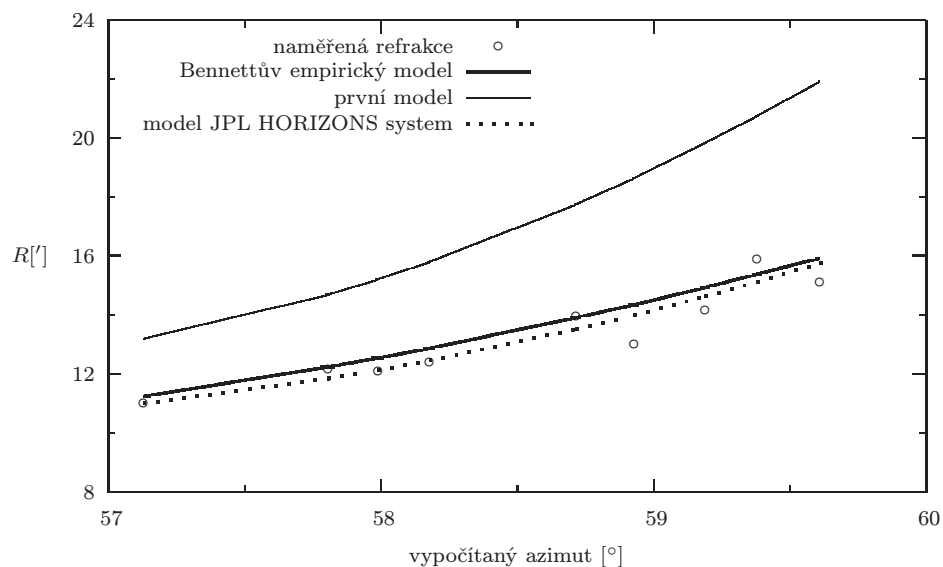


OBRÁZEK 3 Jupiter, 10. října 2006, závislost naměřené refrakce na vypočteném azimutu, srovnání s jednotlivými modely refrakce

Následující grafy shrnují pozorování Jupitera 17. října 2006, $\alpha = 15^{\text{h}}18^{\text{m}}31^{\text{s}}$, $\delta = -17^{\circ} 28' 33''$. To už bylo o něco přesnější než předchozí, ale datových bodů je méně.

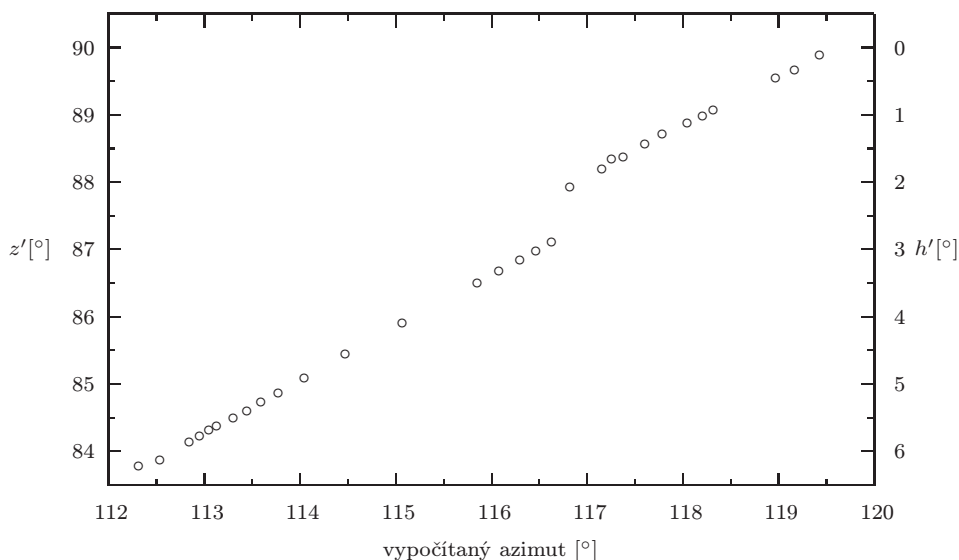


OBRÁZEK 4 Jupiter, 17. října 2006, závislost zenitové vzdálenosti, resp. výšky na vypočteném azimutu

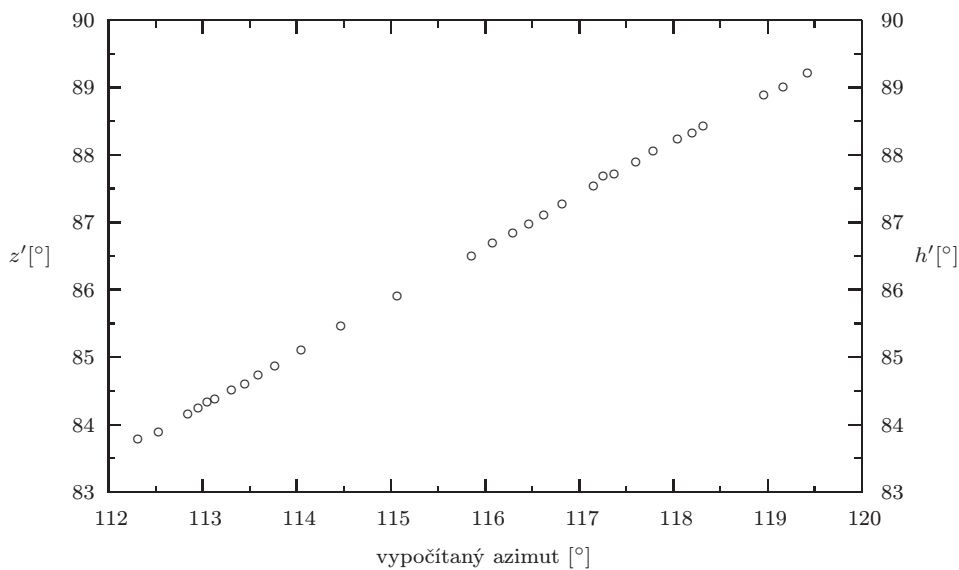


OBRÁZEK 5 Jupiter, 17. října 2006, závislost naměřené refrakce na vypočteném azimutu, srovnání s jednotlivými modely refrakce

Poslední série grafů zachycuje pozorování západu Arktura 17. října 2006, jehož rovníkové souřadnice jsou k datu pozorování $\alpha = 14\text{h } 15\text{m } 57\text{s}$, $\delta = +19^\circ 08' 52''$. Z obrázku 6 je patrné, že během pozorování došlo k jakémusi nečekanému posunu.



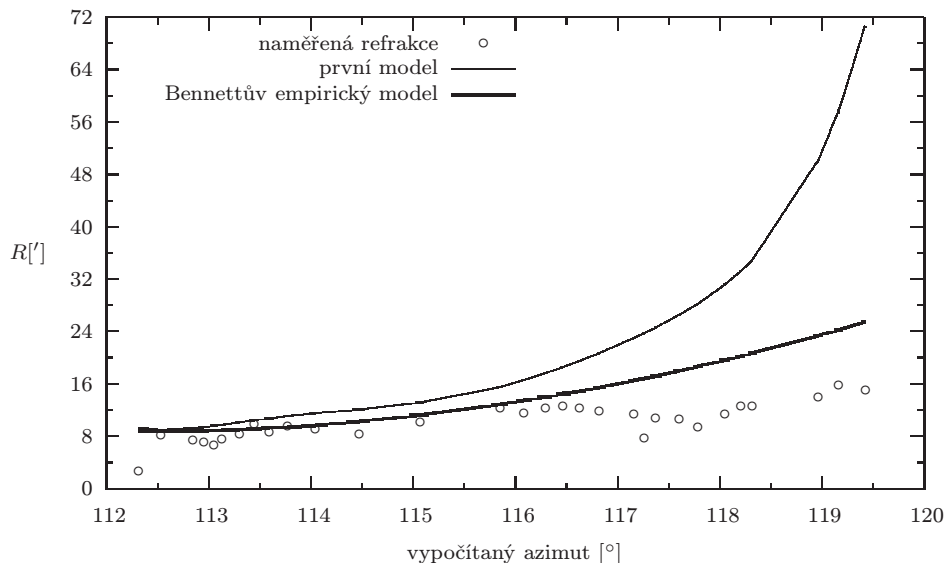
OBRÁZEK 6 Arkturus, 17. října 2006, závislost zenitové vzdálenosti, resp. výšky na vypočteném azimutu, „skok“ v datech je zřejmě způsoben pozorovací chybou



OBRÁZEK 7 Arkturus, 17. října 2006, opravená závislost zenitové vzdálenosti, resp. výšky na vypočteném azimutu

Je málo pravděpodobné, že by se jednalo o projev skutečného skoku Arktura vůči hvězdné obloze, zřejmě došlo k nepovšimnutému posunu teodolitu. S tímto problémem se můžeme vyrovnat například tak, že spočteme o kolik se změnila zenitová vzdálenost v místě skoku a pak pozorovanou zenitovou vzdálenost o tuto hodnotu posuneme. Uvedená metoda ovšem problém zcela neřeší, v grafu na obrázku 8 je vidět nápadná nesrovnalost s empirickým modelem refrakce. První model refrakce nedává pro vyšší hodnoty zenitové

vzdálenost správné výsledky a model JPL HORIZONS nebyl k dispozici.



OBRÁZEK 8 Arkturus, 17. října 2006, závislost naměřené refrakce na vypočteném azimutu, srovnání s modelem refrakce

Závěr

Z uvedených grafů je patrné, že první uvedený model má omezenou platnost a pro námi měřené zenitové vzdálenosti už nedává uspokojivé výsledky. Bennettův model, stejně jako model JPL HORIZONS pro Jupiter, se s naměřenými daty shoduje velmi dobře. U prvního pozorování Jupitera si musíme uvědomit, že jeho přesnost nebyla příliš vysoká (jak je vidět z rozptylu naměřených hodnot).

Průběhy těchto modelů jsou velmi podobné, jen jsou vůči sobě vertikálně posunuté o $2'$ a rozdíl se s rostoucí zenitovou vzdáleností zmenšuje. Tato nesrovnalost je o něco větší než uváděná maximální nepřesnost Bennettovy formule. Možný zdroj chyb je obsažen pravděpodobně už ve výpočtu obzorníkových souřadnic objektu, protože už ty se oproti elektronické ročence JPL HORIZONS lišily i o několik obloukových minut (!).

Drobnou aproximací při výpočtu azimutu a zenitové vzdálenosti bylo, že jsme považovali rektascenzi a deklinaci pozorovaného objektu za neměnné, nicméně to nemá na přesnost výsledku žádný vliv, protože se obě změnili během pozorování maximálně o $4''$.

Porovnání naměřených dat s dostupnými modely refrakce nám dává představu o kvalitativní povaze refrakce i o přesnosti, se kterou jsme schopni tento efekt měřit. Myslím, že by bylo zajímavé nejen provést ještě přesnější měření ve větším rozsahu atmosférických i geografických podmínek, ale také nalézt skutečné příčiny nesrovnalostí obou přesnějších modelů refrakce.