

MASARYKOVA UNIVERZITA  
Přírodovědecká fakulta  
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

# Fotometrie zatmění Měsíce

Brno, 2011

Tamás Nagy



Děkuji Filipu Hrochovi, vedoucímu práce za velkou pomoc, dále Pavlovi Rapavému a Patricku Chevalleyemu za poskytnutí potřebných dat a další nápady na jejich zpracování.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Brně dne

Tamás Nagy

**Abstrakt:**

Bakalářská práce se zabývá fotometrií měsíčních zatmění. Sluneční paprsky dopadající na povrch Měsíce v době zatmění, prochází zemskou atmosférou. Ze zjištěné hodnoty hustoty stínu nebo světelné křivky můžeme prozkoumat vlastnosti zemské atmosféry. Pomocí vícebarevné fotometrie lze určit i její chemické složení. V prvních dvou kapitolách najdeme poznatky o Měsíci a o měsíčním zatmění. V další kapitole jsou rozebrány metody pro výpočet základních údajů zatmění. Dále jsou popsány základy fotometrie a fotometrická teorie samotného zatmění Měsíce. Praktická část práce obsahuje zpracování získaných snímků a porovnání výsledku s fotometrickým modelem zatmění.

Klíčová slova: fotometrie, zatmění měsíce, hustota stínu

**Abstract:**

This bachelor thesis deals with photometry of lunar eclipses. During the eclipse the incidence of rays of light from the Sun to the Lunar surface, is due to the Earth's atmosphere. Calculating the shadow density or lightcurve, reveals the properties of Earth's atmosphere. We can also determine its chemical compound from multi-color photometry. In the first two chapters we can find the basic information about the Moon and the lunar eclipse. The next chapter explains the methods of calculating basic data of eclipses. Next, description including photometry and photometric theory of lunar eclipse can be found. The practical section features image processing and confrontation results with the photometric model of eclipse.

Keywords: photometry, lunar eclipse, shadow density





# OBSAH

---

---

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Zatmění Měsíce</b>	<b>8</b>
2.1	Co je to zatmění? . . . . .	8
2.2	Zajímavé historky . . . . .	8
2.3	Zatmění Měsíce v historii . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Nebeská mechanika zatmění Měsíce</b>	<b>11</b>
3.1	Podmínky zatmění . . . . .	11
3.2	Zatmění Měsíce v číslech . . . . .	12
3.3	Dráha Měsíce a její změny . . . . .	15
3.4	Saros . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Pozorování zatmění Měsíce</b>	<b>20</b>
4.1	Geometrický průběh zatmění . . . . .	22
4.2	Kdy a odkud pozorovat ...? . . . . .	25
4.3	Zvětšení stínu . . . . .	26
4.3.1	Zemský stín na Měsíci . . . . .	27
4.3.2	Určení velikosti a tvaru stínu . . . . .	29
<b>5</b>	<b>CCD Fotometrie</b>	<b>30</b>
5.1	Základy fotometrie . . . . .	30
5.1.1	Viditelné elektromagnetické záření . . . . .	30
5.1.2	Záření dopadající na detektor . . . . .	31
5.1.3	Hvězdná velikost . . . . .	32

5.1.4	Barevné systémy . . . . .	32
5.2	Snímání CCD kamerou . . . . .	33
5.2.1	CCD zařízení . . . . .	33
5.2.2	Aperturní fotometrie . . . . .	34
5.2.3	Plošná fotometrie . . . . .	35
5.2.4	Korekce CCD snímků . . . . .	35
<b>6</b>	<b>Fotometrie měsíčních zatmění</b>	<b>37</b>
6.1	Základy . . . . .	37
6.2	Vlastnosti a vliv atmosféry . . . . .	38
6.2.1	Stavba atmosféry . . . . .	38
6.2.2	Výpočet vzdušné hmoty . . . . .	39
6.2.3	Změny v atmosféře způsobené refrakcí . . . . .	40
6.2.4	Zeslabení osvětlení důsledkem extinkce . . . . .	41
6.3	Zatmění Slunce? . . . . .	42
6.3.1	Jak to vypadá z Měsíce . . . . .	42
6.3.2	Jas Slunce . . . . .	43
6.4	Fotometrie měsíčních zatmění . . . . .	44
6.4.1	Hustota stínu . . . . .	44
<b>7</b>	<b>Zpracování dat</b>	<b>46</b>
7.1	Příprava k fotometrii zatmění . . . . .	46
7.1.1	Použité přístroje a další informace . . . . .	46
7.1.2	Předzpracování CCD snímků a programové vybavení . . . . .	47
7.1.3	Průběh zatmění Měsíce . . . . .	47
7.2	Fotometrické zpracování . . . . .	48
7.2.1	První sada snímků . . . . .	48
7.2.2	Druhá sada snímků . . . . .	50
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>55</b>
	<b>Literatura</b>	<b>58</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>63</b>



## ÚVOD

---

---

Měsíční zatmění jsou pouhým okem pozorovatelné astronomické jevy, při kterých dochází k změně množství světla dopadajícího na povrch Měsíce. V době zatmění se mění světelný tok odražených slunečních paprsků od měsíčního povrchu. Tato změna není způsobena jenom zacloněním slunečního světla naší planetou, ale hrají tady roli i vlastnosti atmosféry Země, jevy jako propustnost nebo refrakce.

Prozkoumáním problematiky můžeme získat informace o změně osvětlení měsíčního povrchu v době zatmění a vlastnostech zemské atmosféry. Pomocí vícebarevné fotometrie dokážeme získat i informace o chemickém složení atmosféry.

Hlavním cílem práce je fotometricky zpracovávat obrazová data získané v době zatmění Měsíce, tedy získat světelnou křivku průběhu měsíčního zatmění. Dále pak pomocí vícebarevné fotometrie zjistit změnu barevného indexu. Víme, že měsíční kotouč má v čase úplného zatmění červenou barvu tj. dochází k absorpci určité části spektra procházejících paprsků atmosférou.



---

# ZATMĚNÍ MĚSÍCE

---

## 2.1 Co je to zatmění?

Na světě existuje mnoho zázračných věcí. Možná ty nejhezčí ze všeho jsou právě ty, které se nám objevují v přírodě. Takové jsou i zatmění Měsíce a Slunce.

Měsíc je obrovský, velice jasný objekt na nebeské sféře, který odráží světlo od Slunce. I Země, jako každé těleso má vždy vlastní stín ve vesmíru, který ovšem nelze vždy pozorovat. V čase zatmění tento stín dopadá na povrch Měsíce.

Zatmění Měsíce je astronomický jev, který nastává, když souputník Země prochází jejím stínem. Tento jev je silně spojený se způsobem, jakým Měsíc obíhá okolo Země a ta okolo naší nejbližší hvězdy, Slunce. K tomu, aby k zatmění Měsíce vůbec došlo, musí se zmíněná tři tělesa v okamžiku zatmění nacházet na jediné přímce, nebo být blízko k tomuto uspořádání, a to tak, aby Země leželo mezi Sluncem a Měsícem. V tom okamžiku se Měsíc nachází ve fázi takzvaného úplňku. Říkáme, že je v opozici se Sluncem, čili stojí na opačné straně naší planety, než Slunce.

## 2.2 Zajímavé historky

Lidé mnoha zemí a kultur rozvíjeli různé legendy a mýty o zatměních Měsíce. Neznámé a důrazné změny na nebeské sféře v historii, jak to už většinou bývalo, byly považované za příčinou chorob, předpovědí katastrof, smrti nebo pádu vládce. Z toho nebylo výjimkou ani zatmění Měsíce. Zatmění Měsíce

způsobilo vznik pověr a nadpřirozených vysvětlení v různých kulturách. Některé věřili, že Měsíc byl pohlcen neviditelným drakem, nebo nějakým jiným démonem.

Ve starověkém Egyptě se lidé báli zatmění Měsíce. Považovali ho za znamení zla. Texty z dřívějších období popisují spolknutí Měsíce nebem.

V japonštině a čínštině, *gesshoku* a *yueshí* resp., se skládá ze slov Měsíc a jíst. Číňané věřili, že drak požírá Měsíc, aby ho odstrašili, čínské námořnictvo střílelo z kanónu na Měsíc. Zčervenání měsíčního disku v případě některých zatmění mohlo jenom zvyšovat jejich strach.

Severozápadní kmen indiánů vypráví příběh o medvědovi, který se prochází podél Mléčné dráhy. Brzy se setká se Sluncem a začnou se hádat, kdo má být ten, kdo uvolní cestu druhému. Z hádky vypukne bitka, která je prezentována, jako zatmění Slunce. Nakonec medvěd pokračuje svou cestou, ale setká se s Měsícem, se sestrou Slunce. Zase vypukne hádka a bitka. Tehdy nastává zatmění Měsíce. Po zatmění medvěd pokračuje svou cestou podél Mléčné dráhy a cyklus se opakuje. [11]

Ovšem hrozivé pohledy na zatmění nejsou jediné. Např. na Tahiti jsou zatmění popsáné, jako milostná hra Slunce a Měsíce. Ještě i dodneška, Eskymáci a lidé Aljašky, věří, že Měsíc a Slunce dočasně opouštějí své místa a přijdou se podívat, jestli je všechno v pořádku na Zemi [9]. Jak čas plyne a získáváme více informací o tom co se děje okolo nás, většina těchto věcí se zachovává, ale už jenom jako zajímavá tradice.

## 2.3 Zatmění Měsíce v historii

V roce 1433, mezi 2. června – 17. června (15. září – 30. září podle [10]) neboli 28. *Shawwal*<sup>1</sup> – 14. *Dhu al-Qi'dah*<sup>2</sup> (podle islámského kalendáře) nastala, v průběhu 15 dní, 2 zatmění. Nejprve nastalo zatmění Slunce, přičemž přibližně 2/3 kotouče Slunce byly zastíněné. Po 15 dnech došlo k zatmění Měsíce. Tento úkaz je mimořádně vzácný, pozorovat zatmění Měsíce hned po zatmění Slunce v průběhu 15 dní (podle al-Maqrizi, [8]).

22. května 1453 bylo možné pozorovat částečné zatmění Měsíce. Měsíc, symbol města Konstantinopol, hlavního města Byzantské říše, ztmavl. Někteří lidé si mysleli, že je to znamení o dovršení proroctví pádu města. V tom čase probíhalo už skoro dva měsíce trvajícím třetím tureckým obléháním města.

<sup>1</sup>10. měsíc podle islámského lunárního (měsíčního) kalendáře.

<sup>2</sup>11. měsíc podle islámského lunárního (měsíčního) kalendáře.

23. května, druhý den po zatmění, se do města vrátil člun, který byl vyslán na hledání posily. Jeho posádka nesla špatné zprávy, žádná pomoc nepřicházela. 29. května bylo město dobyté. [14] Zatmění nebyla jenom příčinou vzniku pověstí a báje, ale dokázali i změnit historii.

Kolumbus, na své čtvrté cestě do Nového světa se ocitl v úzkých při prozkoumávání pobřeží Střední Ameriky. Kvůli červům, kteří rozežírali jeho loď, byl donucen opustit své dvě lodě ze čtyř, kterými ze Španělska vyrazil 11. května 1502, a přistát na severní části Jamaiky. Poprvé domorodci radostně uvítali trosečníky, poskytli jim jídlo a střechu. Po nějaké době členové posádky začali být nespokojeni s dočasnou situací, vzbouřili se a začali zabíjet Jamajčany, kteří je přestali zásobovat. Kolumbus, aby zachránil situaci, využil své znalosti a pomůcky. Naštěstí měl při sobě almanach astronomických tabulek, které obsahovaly i informace o polohách planet pro období 1475 – 1506. Věděl, že se blíží zatmění Měsíce a tři dny před zatměním oznámil vůdcevi domorodých – jeho Bůh se na ně zlobí, že mu přestali pomáhat; aby Bůh ukázal svůj hněv, za tři dny jim skryje vycházející Měsíc z nebe. Podle vyprávění Kolumbova syna, když to viděli Jamajčani, byli tak vystrašení, že běželi odevšad k lodi a prosili o odpuštění. [12]



# NEBESKÁ MECHANIKA ZATMĚNÍ MĚSÍCE

## 3.1 Podmínky zatmění

Zatmění Měsíce nastává jenom, když Měsíc je ve fázi úplňku. K tomu dochází zhruba každý kalendářní měsíc. Perioda změn fáze pohybu Měsíce vůči Slunci je tzv. synodický měsíc, doba jeho trvání je 29,53 dní. Klidně bychom se mohli ptát, tak proč k zatmění nedochází každý měsíc. Samozřejmě není to tak jednoduché.

Země obíhá okolo naší hvězdy po eliptické dráze v rovině, zvaná rovina ekliptiky<sup>1</sup>. Z pohledu ze Země můžeme říct, že na této rovině, po dráze ekliptiky se pohybuje Slunce kolem nás. Náš souputník, Měsíc má také svou oběžnou dráhu. Jeho rovina dráhy je však skloněná vzhledem k rovině ekliptiky.

Měsíc obíhá okolo nás po eliptické trajektorii. Vzdálenost perigea<sup>2</sup> je 363 300 km a apogea<sup>3</sup> 405 500 km od centra Země. Sklon jeho dráhy vzhledem k ekliptice činí  $5^{\circ}09'$ , pohyb se děje v matematicky kladném směru. [4]

<sup>1</sup>„Ekliptika je průsečnice, v níž rovina dráhy Země kolem Slunce protíná nebeskou sféru. Slovo je odvozeno od latinského *eclipsis* ...zatmění: vychází to ze skutečnosti, že v nejtěsnější blízkosti ekliptiky nastávají zatmění Slunce a Měsíce.”[14]

<sup>2</sup>Nejbližší bod dráhy kosmického tělesa k centrálnímu tělesu se nazývá *periapsida*. V případě Země, jako centrální těleso, *perigeum*.

<sup>3</sup>Nejvzdálenější bod od centrálního tělesa se nazývá *apoapsida*, v případě Země, *apogeum*.

Průsečnice roviny Měsíční dráhy a roviny ekliptiky je tzv. uzlová přímka. Body, které leží na konci uzlové přímky, se nazývají výstupní a sestupní uzel. Výstupní (značí se  $\Omega$ ) neboli severní uzel se nachází tam, kde Měsíc přechází rovinou ekliptiky k její severnímu pólu. Sestupní ( $\vartheta$ ) neboli jižní uzel se nachází na opačné straně uzlové přímky, kde Měsíc přechází k jihu ekliptiky.

Z toho jak vidíme, Měsíc se nenachází stále ve stejné rovině jako Slunce a Země, ale podmínkou zatmění je, aby tato tělesa ležela na jediné přímce. Ke vzniku zatmění vlastně stačí i to, když jsou blízko k této konfiguraci (neboli uspořádání). To nastává, když Měsíc je blízko výstupného nebo sestupného uzlu své dráhy a je v opozici ke Slunci, tj. když Slunce je na opačné straně naší planety, než Měsíc. Tehdy se liší jejich rektascenze o  $12^h$ , neboli  $180^\circ$ .

## 3.2 Zatmění Měsíce v číslech

Teď se podívejme na výpočty přesnějších hodnot, které jsou podmínkou, aby nastalo zatmění Měsíce. Z úhlových poloměrů a paralax Měsíce a Slunce můžeme vypočítat poloměr Zemského stínu  $r$  (postup výpočtu a vysvětlení probereme až v další kapitole). Všechno co teď potřebujeme, jsou hodnoty v tabulce 3.1.

Název	Hodnota
Úhlový průměr Měsíce na obloze:	$31,6'$
Paralaxa Měsíce:	$54' - 61,4'$
Úhlový průměr Slunce na obloze:	$31,45' - 32,53'$
Paralaxa Slunce:	$8,794''$

Tabulka 3.1: Úhlové rozměry Slunce a Měsíce. [13][14]

Poloměr stínu Země dostaneme podle vztahu (3.1).

$$r = \pi_{\odot} + \pi_{\text{M}} - \rho_{\odot}. \quad (3.1)$$

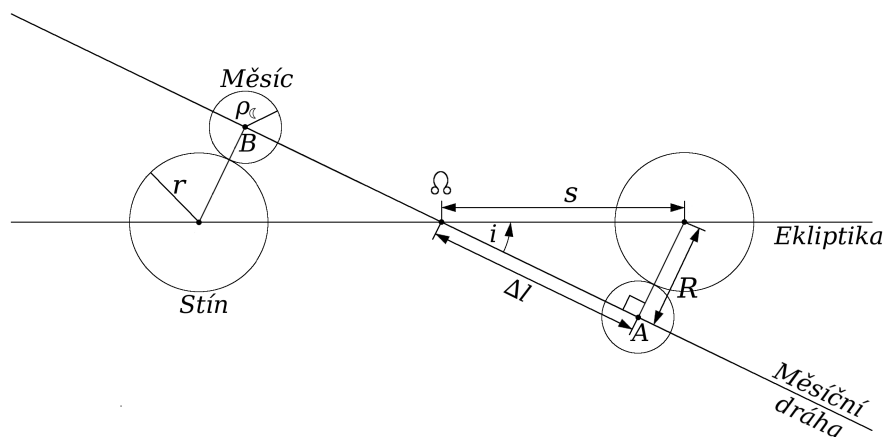
$$r = 61,4' + 9'' - 15,725' = 45,825'.$$

K alespoň částečnému polostínovému zatmění Měsíce dojde, jsou-li středy zemského stínu a Měsíce blíže než:  $45,82' + 15,8' = 61,625'$  (na obr. 3.1



jako  $R$ ). To znamená, že potřebujeme, aby se kotouč Měsíce a zemského stínu protínaly, neboli aby na Měsíc dopadal zemský stín.

Jakužto už víme, chceme, aby se Měsíc nacházel v blízkosti uzlových bodů. Obrázek 3.1 nám to velice dobře znázorňuje, že i když se Měsíc nenachází v „lunárních uzlech“, jenom v jejich blízkosti, zemský stín je dostatečně velký na to aby pokryl část měsíčního povrchu.



Obrázek 3.1: Měsíc a stín Země v blízkosti výstupného uzlu.

Pak z toho využitím poznatků o sférickém trojúhelníku, můžeme určit maximální vzdálenost Měsíce a uzlových bodů. Podle obrázku máme pravoúhlý sférický trojúhelník, jehož jeden neznámý prvek lze vypočítat ze dvou daných prvků podle tzv. Neperova pravidla. Kde  $i = 5^{\circ}9'$  je sklon roviny dráhy Měsíce k rovině ekliptiky a  $\Delta l$  je maximální vzdálenost, co hledáme. Pak platí vztah (3.2).

$$\sin R = \sin \Delta l \sin i. \quad (3.2)$$

Po dosazení dostáváme výslednou hodnotu pro maximální vzdálenost Měsíce od „lunárních uzlů“,  $\Delta l = 11,5189^{\circ}$ . Když jejich vzdálenost je menší

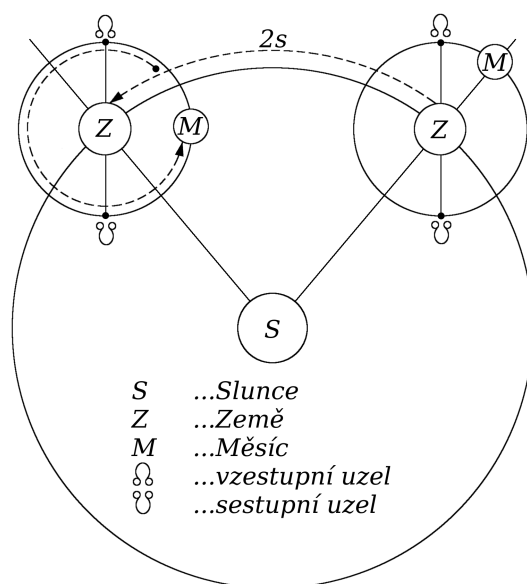
než hodnota  $11,5189^\circ$ , může nastat, i když krátkodobé, částečné zatmění Měsíce.

Zemský stín se po ekliptice pohybuje rychlostí přibližně jeden stupeň za den. Na obrázku 3.1  $2s$  je dráha, kterou Zemský stín musí urazit, než se Měsíc dostane z bodu  $A$  do bodu  $B$ , aby mohlo nastat zatmění přibližně během jednoho měsíce. Vzdálenost  $s$ , vypočítáme užitím dalšího vztahu pro sférický pravoúhlý trojúhelník.

$$\cos \Delta l = \cos R \cos s, \quad (3.3)$$

$$s = 11,4736^\circ.$$

Zemský stín aby urazil vzdálenost  $2s$  potřebuje  $2s \cdot (60/59,137) = 23,282$ d, což je méně než synodická perioda Měsíce. Tuto situaci můžeme vidět na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Změna polohy Země a Měsíce v průběhu  $\sim 23$  dní.

Jak vidíme, Měsíc musí jednou obejít naši planetu plus projít vzdálenost něco navíc. Z toho vyplývá, že Měsíc nedokáže dostihnout stín Země.

„Závěr, pokud v určitém měsíci došlo k zatmění, nenastalo zatmění Měsíce v předcházejícím a následujícím.“ [4]

Během roku nastává žádné až dvě zatmění Měsíce, která jsou vzdálená přibližně o půl roku – třeba i tři, kdyby to 1. nastalo v období krátce po 1. ledna. [4]

Tady ovšem jde o úplném, nebo částečném zatmění, když Měsíc vstupuje do úplného stínu Země. V případě polostínu platí vztah

$$r' = \pi_{\odot} + \pi_{\zeta} + \rho_{\odot}. \quad (3.4)$$

Pak pro polostínové zatmění dostáváme hodnoty:  $r' = 77,815'$  (poloměr polostínu),  $R' = 93,615$  (vzdálenost středu kotouče Měsíce a polostínu),  $\Delta l' = 17,6578^{\circ}$  (maximální vzdálenost Měsíce od uzlových bodů) a  $s' = 17,5909^{\circ}$  (dráha polostínu po ekliptice).

Z toho vychází, že pro polostín, dostat se z bodu  $A'$  do bodu  $B'$  podle obrázku 3.2, trvá 35,6952 dní. To nám říká, že polostín Země se nachází v okolí „lunárních uzlů“ 35,7 dní, což je větší než synodická perioda Měsíce. V tom čase, co polostín stráví v okolí obou uzlových bodu, Měsíc se aspoň jednou v nich vyskytne.

To znamená, že za rok minimálně nastává dvě, maximálně až pět zatmění Měsíce, ale jen když bereme do úvahy i polostínové.

### 3.3 Dráha Měsíce a její změny

Gravitačně neporušena trajektorie Měsíce okolo Země je elipsa s excentricitou (neboli výstředností)  $e = 0,055$  a hlavní poloosou  $a = 384400$  km. Sklon dráhy k ekliptice, jak už to bylo zmíněno je  $5^{\circ}09'$ . Perioda oběhu vůči Slunci je 29,53 dní – synodický měsíc, a vůči hvězdám je 27,32 dní – siderický měsíc.

Ve skutečném pohybu Měsíce však nastávají změny, poruchy způsobené vlivem jiných planet, jejich gravitačním působením. Tyto změny můžeme rozdělit na krátko-periodické a tzv. sekulární neboli dlouho-periodické. Mezi krátko-periodické změny patří sklánění rotační osy. Důsledkem toho je, že sklon dráhy Měsíce vzhledem k ekliptice se mění v rozmezích  $4^{\circ}58'$  až  $5^{\circ}20'$  s periodou půl roku.

Sekulární pohyby postihují i délku výstupného uzlu a délku perigea. Délka výstupného uzlu a perigea jsou velikosti uhlů, měřené od směru jarního bodu (bod na nebeské sféře, ležící na uzlové přímce Země, tj. průnik roviny ekliptiky s rovinou světového rovníku). Znamená to, že dochází ke stáčení

uzlové přímky i přímky apsid. Uzlová přímka se pohybuje proti pohybu Měsíce s periodou 18 let a 7 měsíců a přímka apsid s periodou 9 let. Za těch 18,61 let se pomalu mění i deklinace Měsíce v rozpětí  $23,45^\circ + 5,15^\circ = 28^\circ 36'$  a  $23,45^\circ - 5,15^\circ = 18^\circ 18'$ . Kde  $23,45^\circ$  je sklon ekliptiky k světovému rovníku.

Název	Hodnota
Nejmenší vzdálenost od Země (v perigeu)	356 410 km
Největší vzdálenost od Země (v apogeu)	406 697 km
Excentricita dráhy Měsíce kolem Země	0,0549
Siderický měsíc (vzhledem ke hvězdám) Sidereal month [en]	27,321661 dní
Synodický měsíc (od novu do novu) Synodic month [en]	29,530589 dní
Perioda stáčení uzlové přímky:	18,61 roku
Perioda stáčení perigea:	8,85 roku
Saros (opakování zatmění):	18 let 10/11 dne
Sklon dráhy Měsíce vůči ekliptice:	$5^\circ 8' 43,4''$

Tabulka 3.2: Vlastnosti Měsíční orbity<sup>4</sup>

### 3.4 Saros

Jak už víme, za rok může nastat žádné nebo až tři stínových (eng.: umbral) zatmění Měsíce. Časové intervaly mezi úspěšnými zatmění jsou 1, 5 nebo 6 lunací neboli synodických měsíců – doba za kterou Měsíc vystřídá všechny své fáze. Podle *Five Millenium Canon of Lunar Eclipses* a *Five Millenium Cataloge of Lunar Eclipses* v období 5000 let, od 1999 př. n. l. do 3000 n. l., nastane 12 063 zatmění Měsíce.

Podle tabulky 3.3 můžeme vidět, procentuální rozdělení (toho, jak často nastávají zatmění za příslušný počet lunací) časových period mezi po sobě následujícími zatmění. Vidíme, že 3 zatmění za rok se vyskytují v 12,7% případů. Jsou velice vzácné a různého typu (polostínové, úplné, částečné), a mohou se lišit i orbitální parametry Měsíce (délka perigea, délka výstupného uzlu), proto nejsou vhodné na předpovídání dalších zatmění.

<sup>4</sup>Některé hodnoty Měsíční orbity se liší v různých pracech, proto přidávám další hodnoty v tab. 3.2 podle [10].

Počet lunací	Počet zatmění	Procento
1	1 527	12,7%
5	2 909	24,1%
6	7 627	63,2%

Tabulka 3.3: Základní tři periody mezi zatmění

Můžeme ale najít systém, ve kterém jsou geometrické charaktery zatmění stejné – stejná délka perigea a výstupného uzlu – a stejná fáze Měsíce. Na to ale musí být splněná podmínka, a to, aby tyto tři rozhodující okamžiky nastaly ve stejném čase. My ovšem známe periody opakování zmíněných charakteristik, popsané jsou dole.

Synodický měsíc (od úplňku do úplňku):	29,530589 dní
Anomalistický měsíc (od perigea do perigea):	27,554550 dní
Drakonický měsíc (od výst. uzlu do výst. uzlu):	27,212221 dní

Jejich nejmenší společný násobek nám dá dobu, za kterou je splněna podmínka (tyto veličiny se opakují).

223 synodických měsíců	= 6585,3223 dní	= 6585d 07h 43m
239 anomalistických měsíců	= 6585,5375dní	= 6585d 12h 54m
242 drakonických měsíců	= 6585,3575dní	= 6585d 08h 35m

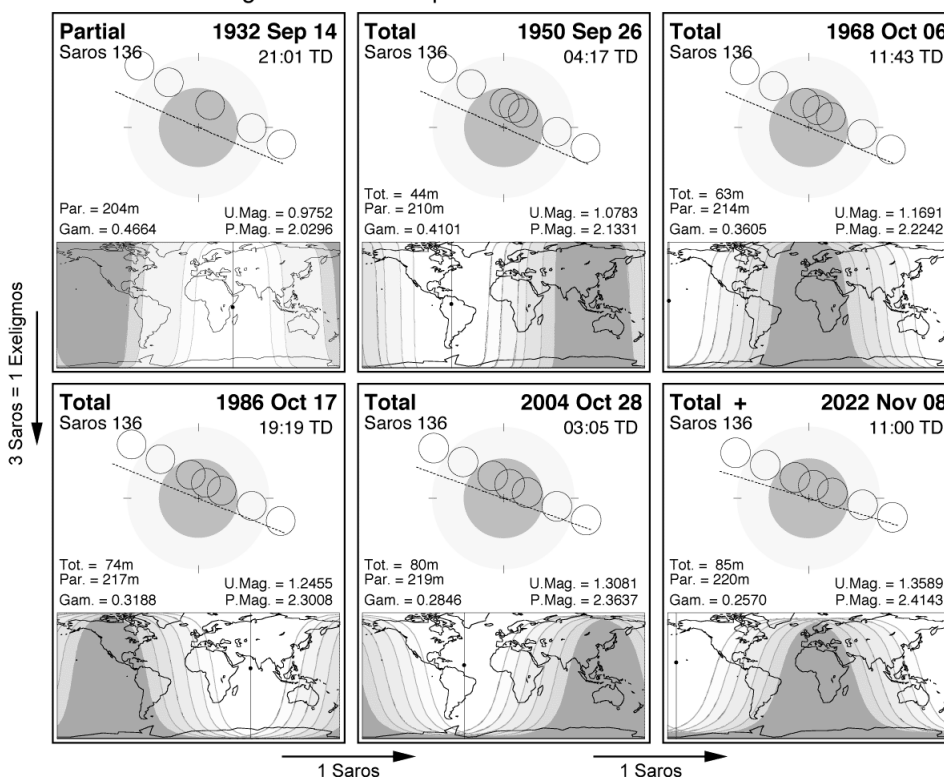
S periodou 6585,32 dní (přibližně 18 let 11 dní 8 hodin) je systém, zvaný Saros, dobře použitelný.

Dvě zatmění, oddělené od sebe periodou Saros, nesou stejné vlastnosti – vyskytují se ve stejném období roku, Měsíc se nachází ve stejném uzlovém bodu, přibližně ve stejné vzdálenosti od Země. Ovšem perioda Saros nejsou celé dny, ale o 8 hodin více, pozorovatelnost zatmění se proto mění. Posouvá se směrem na západ a to o 8 hodin, čili  $120^\circ$ , Země se ještě musí otočit o  $1/3$  dne. Platí, že stejná série Saros se vrací na přibližně stejné geografické místo za tři periody Saros ( $\sim 54$  let a 34 dní). Tři cykly Saros dávají cyklus nazývaný *Exeligmos*.

Obrázek 3.3 nám zobrazuje nahoře popsany posun pozorovacího stanoviště zatmění, je převzatý z internetové stránky <http://eclipse.gsfc.nasa.gov>.

Můžeme si ovšem všimnout, že pozorovatelnost zatmění po 54,093 let není přesně na stejné pozici, jenom v její blízké oblasti. To je způsobeno

Figure 1. Lunar Eclipses from Saros 136: 1932 to 2022

from *Five Millennium Canon of Lunar Eclipses*, Espenak & Meeus (2009)

Obrázek 3.3: Změna pozorovatelnosti zatmění ve stejném Saros.

tím, že synodický, drakonický a anomalistický měsíc nenastanou ve stejném okamžiku, ale je mezi nimi pár hodinový rozdíl (viz nahoře).

Následující případ popisuje průběh, životný cyklus typické série Saros poblíž výstupného uzlu Měsíce. Série začíná v úplňku, ve vzdálenosti Měsíce od výstupného uzlu přibližně  $17^\circ$ .

*Malá část Měsíčního disku prochází severní částí polostínu a nastane polostínové zatmění (en. penumbral eclipse). O každou Saros periodou se Měsíc dostává hlouběji do polostínu a nastává silnější polostínové zatmění. Po  $\sim 10$  polostínových zatmění nastává první částečné zatmění (en. partial eclipse), jak část Měsíce projde stínem Země. Nastane přibližně 20 dalších částečných zatmění, tím se Měsíc dostane celkem do stínu, a nastane úplné zat-*

*mění (en. total eclipse). Během následujících dvou století, každý 18,031 let nastane úplné zatmění, Měsíc blížící se k jižní části stínu. V polovině tohoto období prochází i středem Zemského stínu a vzniká tak, dlouhé úplné zatmění. Aspoň ~6 úplných zatmění nastává jenom v jižní části stínu. Pak následuje období ~20 částečných a ~10 polostínových zatmění Měsíce v jižní části polostínu. Celkově, tato série Saros způsobí 73 zatmění v rozpětí 13 století. [8]*

Z tohoto důvodu je perioda Saros užitečná pro třídění zatmění do rodin sérií. Každá taková série trvá 12 až 15 století a obsahuje 70 nebo více zatmění Měsíce. Jako příklad uvádím údaje o zatmění Měsíce ze Saros 109. Každá se vyskytuje poblíž sestupného uzlu, takže průběh této série probíhá opačně. Trvá 1262,11 let – začíná se 27. června 736 v jižní části penumbry, a trvá až do 8. srpna 1998, kdy Měsíc opustí polostín v jeho severní části.



---

## POZOROVÁNÍ ZATMĚNÍ MĚSÍCE

---

Při pozorování zatmění Měsíce nebo i jiných okultací, nám nestačí znát správnou polohu Měsíce na nebeské sféře. Musíme být i ve správný čas na správném místě.

Díky dlouhotrvajícím pozorování předchozích fyziků, astronomů, už dnes známe pohyby nebeských těles, periodu oběhu neboli tzv. dráhové elementy. Pomocí těchto údajů můžeme předpovědět, kde se budou nacházet, jak se budou chovat v určité době.

Při získávání dat, pořizování snímků o zatmění a dalším zpracování nás může zajímat i zvětšení stínu Země, což může ovlivnit okamžik, kdy jednotlivé fáze zatmění skutečně nastanou. Tato kapitola popisuje metody výpočtů základních parametrů zatmění Měsíce.

Polohy Měsíce, Slunce a pozorovatelnost zatmění byly předem vypočteny až na dalších 1000 let. *Five Millenium Canon of Lunar Eclipses* a *Five Millenium Cataloge of Lunar Eclipses* obsahuje data 12 063 zatmění Měsíce mezi 1999 př. n. l. až 3000 n. l.

Úplný stín Země tvoří sbíhavý kužel s vrcholem nacházející se za Měsícem, ve vzdálenosti od středu Země  $\sim 0,00928$  AU (217 zemských poloměrů). Měsíc se nachází od Země zhruba ve vzdálenosti 0,00256 AU (60 zemských poloměrů). Tedy průměr stínu Země ve vzdálenosti Měsíci je přibližně trojnásobkem průměru Měsíce.

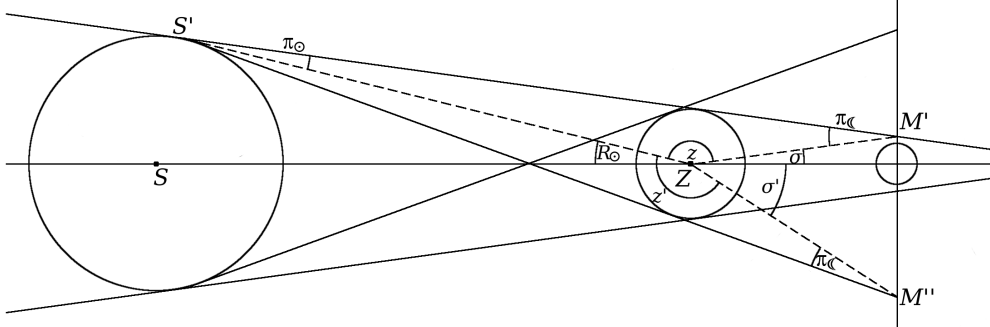
Zemský polostín je rozbíhavý a ve střední vzdálenosti Měsíce je asi dvakrát větší než úplný stín. [1]

Světelné paprsky ovšem prochází zemskou atmosférou, kde se vlivem refrakce ohýbají a tyto jednoduché geometrické vztahy jsou pozměněny. Na obrázku 4.1 můžeme vidět jakým způsobem je možné vypočítat velikosti



#### 4. Pozorování zatmění Měsíce

stínu a polostínu.



Obrázek 4.1: Schéma měsíčního zatmění.

Vyjádříme velikost úhlu  $z$  pomocí známých hodnot paralax a zdánlivých poloměrů objektů. Rozměry zemského stínu vypočítáme z trojúhelníku  $S'ZM'$

$$z = 180^\circ - \pi_{\odot} - \pi_{\lrcorner} \quad (4.1)$$

a dále rozložením přímého úhlu v bodě  $Z$

$$z = 180^\circ - R_{\odot} - \sigma. \quad (4.2)$$

Pomocí těchto rovnic získáme vztah pro velikost poloměru stínu  $\sigma$

$$\sigma = \pi_{\odot} + \pi_{\lrcorner} - R_{\odot}. \quad (4.3)$$

Podobně využitím trojúhelníku  $S'ZM''$  a přímého úhlu v bodě  $Z$  získáme vztahy

$$z' = 180^\circ - \pi_{\odot} - \pi_{\lrcorner}, \quad (4.4)$$

$$z' = 180^\circ - \sigma' + R_{\odot}, \quad (4.5)$$

$$\sigma' = \pi_{\odot} + \pi_{\lrcorner} + R_{\odot}. \quad (4.6)$$

Vzdálenost Měsíce od Země a vzdálenost Země od Slunce se mění. Tyto změny způsobují, že se mění i poloměr stínu a polostínu. Dosazením krajních hodnot paralax a poloměru do získaných rovnic můžeme vypočítat, minimální a maximální hodnoty poloměru stínu a polostínu. Největší poloměr stínu může být  $45'54''$ , nejmenší  $37'48''$ , největší poloměr polostínu může být  $77'54''$ , nejmenší  $69'48''$ . [1]

## 4.1 Geometrický průběh zatmění

Po získání hodnot pro poloměry stínu a polostínu, můžeme stanovit geometrický průběh zatmění, který lze řešit graficky.

Průběh zatmění zobrazujeme graficky v pravoúhlé souřadnicové soustavě, kde osa  $x$  je rovnoběžná s rovníkem a počátek soustavy leží na ose stínu. Potřebné data najdeme ve Hvězdářské ročence obsahující okamžik a souřadnice Slunce a Měsíce v opozici. Data můžeme vygenerovat i pomocí astronomických softwarů, jako *XEphem* [18].

To co potřebujeme, jsou hodnoty rektascenze a deklinace Slunce a Měsíce a hodinové změny těchto hodnot.

Protože střed stínu leží na opačné straně oblohy než Slunce, jeho rovníkové souřadnice jsou:

$$\alpha = \alpha_{\odot} \pm 12^{\text{h}} \quad \delta = -\delta_{\odot}.$$

Nejprve zakreslíme do souřadnicové soustavy stín se středem v počátku souřadnic. V okamžiku opozice mají Měsíc a stín stejné hodnoty rektascenze, proto nakreslíme i Měsíc se souřadnicemi

$$x_0 = 0 \quad y_0 = \delta_{\zeta} - \delta_{\odot}.$$

Následuje zakreslení relativní dráhy Měsíce vůči středu stínu. Hodinové změny Slunce a Měsíce označíme jako  $\Delta\alpha_{\odot}$  a  $\Delta\alpha_{\zeta}$  resp. Pak relativní změna polohy Měsíce vůči středu stínu v rektascenzi bude

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_{\zeta} - \Delta\alpha_{\odot}. \quad (4.7)$$

Tak velká by byla změna v rektascenzi na rovníku, ale ve výšce nad rovníkem o deklinaci  $\delta$ , nutno získanou hodnotu ještě opravit, vzhledem ke konvergenci souřadnicové sítě násobit hodnotou  $\cos\delta_{\zeta}$ , takže nakonec získáme výraz

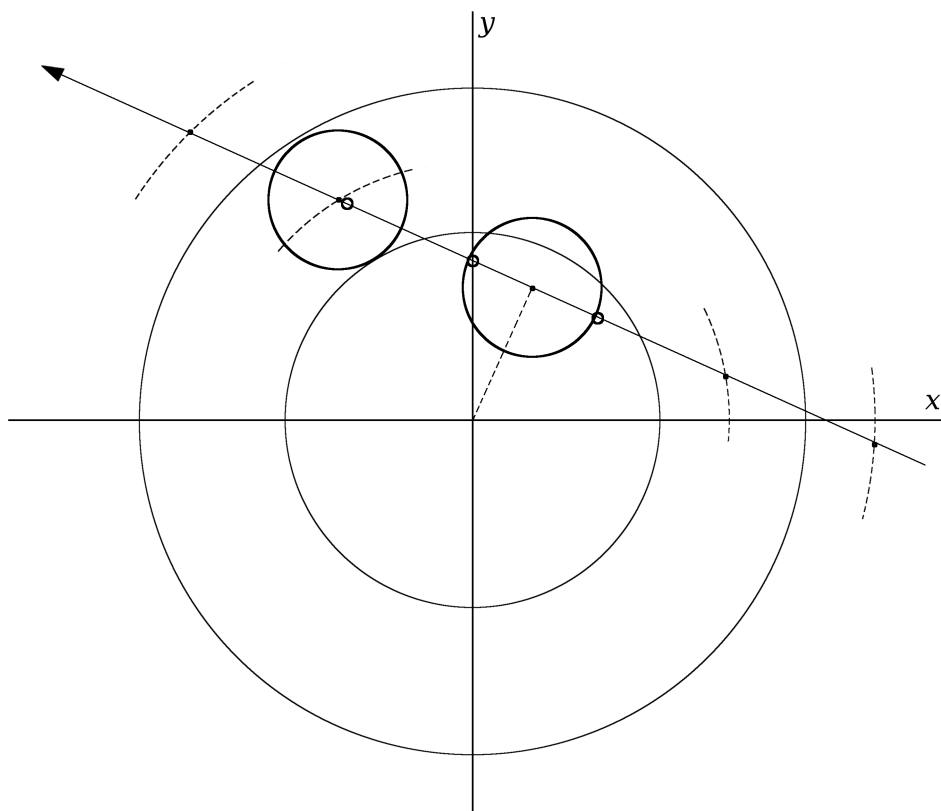
$$\Delta x = \Delta\alpha \cdot \cos\delta_{\zeta}. \quad (4.8)$$

Tento posuv Měsíce ve zvolené pravoúhlé souřadnicové soustavě je jen ve směru  $x$ . Dále hodinové změny Slunce a Měsíce v deklinaci označíme  $\Delta\delta_{\odot}$  a  $\Delta\delta_{\zeta}$ . Z toho pak získáme relativní změnu Měsíce vůči středu stínu ve směru  $y$ , což bude

$$\Delta y = \Delta\delta = \Delta\delta_{\zeta} + \Delta\delta_{\odot}. \quad (4.9)$$

Pomocí hodinových změn můžeme vyznačit na našem grafu několik bodů, polohy nalezení Měsíce v různých hodinách zatmění. Spojíme-li tyto body můžeme zkonstruovat přímku, neboli získáme relativní dráhu Měsíce vůči středu stínu.

Graficky lze jednoduše vyznačit polohy na dráze Měsíce, kde nastávají jednotlivé fáze zatmění, tj. kontakty Měsíce se stínem a polostímem (viz obrázek 4.2).



Obrázek 4.2: Průběh měsíčního zatmění z 16. 08. 2008. Čárkované kružnice odpovídají vstupu do polostínu a stínu.

V době zatmění se mění vzdálenost Měsíce od středu stínu, označíme ji  $L$ . V rovnicích  $\kappa$  je konstanta udávající zvětšení stínu. Pro vzdálenost  $L$  v době vnějšího kontaktu měsíčního kotouče (začátek nebo konec polostínového zat-

mění) platí

$$L_1 = \kappa.(\pi_{\odot} + \pi_{\zeta} + R_{\odot}) + R_{\zeta}, \quad (4.10)$$

v době vnitřního kontaktu s polostínem vzdálenost  $L$  je vyjádřen vztahem

$$L_2 = \kappa.(\pi_{\odot} + \pi_{\zeta} + R_{\odot}) - R_{\zeta}, \quad (4.11)$$

v době vnějšího kontaktu se stínem, tj. začátek nebo konec částečného zatmění, vztahem

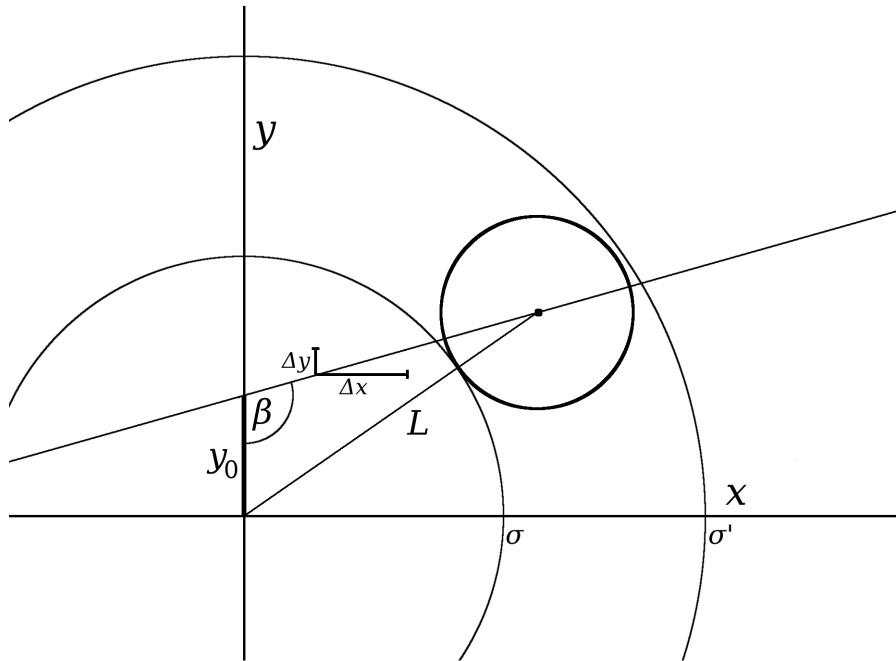
$$L_3 = \kappa.(\pi_{\odot} + \pi_{\zeta} - R_{\odot}) + R_{\zeta}, \quad (4.12)$$

v době vnitřního kontaktu se stínem (začátek nebo konec úplného zatmění) je

$$L_4 = \kappa.(\pi_{\odot} + \pi_{\zeta} - R_{\odot}) - R_{\zeta}. \quad (4.13)$$

Pomocí relací nahoře a využití kosinové věty z trigonometrie, můžeme určit i okamžiky jednotlivých kontaktů. Hodinový pohyb Měsíce je vyjádřen vztahem

$$\Delta s = \sqrt{\Delta x_2 + \Delta y_2}. \quad (4.14)$$



Obrázek 4.3: Schéma pro výpočet kontaktů Měsíce se stínem.

Velikost dráhy Měsíce od základní polohy v libovolném okamžiku zatmění dostaneme

$$s = \Delta s \cdot (T - T_0), \quad (4.15)$$

kde  $T_0$  je čas okamžiku opozice Měsíce a Slunce.

$$T - T_0 = \frac{2y_0 \cdot \cos \beta + D}{2\Delta s}, \quad (4.16)$$

kde

$$D = \pm \sqrt{(2y_0 \cdot \cos \beta)^2 - 4(y_0^2 - r_0^2)}. \quad (4.17)$$

Přičemž platí, že  $D > 0$  pro kontakty před okamžikem opozice,  $D < 0$  pro kontakty, které nastaly po opozici. Když funkce popisující přímkou v pravoúhlé souřadnicové soustavě bude rostoucí v kladné části osy  $x$  pro úhel  $\beta$  platí

$$\beta = \left( \frac{\pi}{2} + \arccos \frac{\Delta y}{\Delta s} \right), \quad (4.18)$$

dále pro záporné hodnoty  $x$  platí

$$\beta = \left( \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{\Delta y}{\Delta s} \right). \quad (4.19)$$

Pro funkci klesající platí vztahy pro úhel  $\beta$  opačně.

Největší fáze zatmění tj. střed zatmění, když Měsíc je nejbližší ke středu stínu, nastane v čase

$$T = \frac{T_Z + T_K}{2}, \quad (4.20)$$

kde  $T_Z$  je čas začátku částečného zatmění a  $T_K$  čas konce částečného zatmění.

## 4.2 Kdy a odkud pozorovat ...?

Teď, když už známe čas, kdy dochází k jednotlivým kontaktům mezi měsíčním diskem a okrajem stínu nebo polostínu, můžeme stanovit i zeměpisné souřadnice míst, kde jsou fáze zatmění pozorovatelné. Zeměpisné souřadnice místa, kde Měsíc se nachází v zenitu v době určité fáze, jsou

$$\lambda = \Theta - \alpha_{\mathcal{C}}, \quad (4.21)$$

$$\varphi \doteq \delta_{\mathcal{C}}, \quad (4.22)$$

kde  $\Theta$  je hvězdný čas dané fáze. Pozorovat zatmění můžeme z neosvětlené části Země. Hranici mezi osvětlenou a neosvětlenou polokoulí Země, udává tzv. terminátor<sup>1</sup>, jehož střed má Slunce v zenitu. Terminátor určuje místa východu nebo západu Slunce v daném čase.

V čase  $T$ , když dochází k určité fázi zatmění, kulminuje Slunce na zeměpisných souřadnicích  $\lambda_{\odot}$  a  $\varphi_{\odot}$ . Dále zeměpisné délky, kde Slunce právě vychází  $\lambda_V$ , nebo zapadá  $\lambda_Z$ , tj. body ležící na terminátoru, jsou dané vztahem

$$\lambda_V = \lambda_{\odot} + \tau, \quad (4.23)$$

$$\lambda_Z = \lambda_{\odot} - \tau, \quad (4.24)$$

kde  $\tau$  je denní polooblouk. Pokud zanedbáme vliv refrakce atmosféry, pak  $\tau$  získáme pomocí vztahu

$$\cos \tau = -\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta_{\odot}. \quad (4.25)$$

Pomocí uvedených rovnic pro okamžik  $T$  určité fáze zatmění určíme polohu terminátoru pro různé zeměpisné šířky.

Mezní hodnoty severní a jižní zeměpisné šířky terminátoru  $\varphi_0$  určíme pomocí rovnice

$$\pm \varphi_0 = 90^\circ + \delta_{\odot}, \quad (4.26)$$

dostaneme-li  $\varphi > 90^\circ$ , je pak  $\varphi_0 = 180^\circ - \varphi$ .

Získané hodnoty vykreslíme do mapy, získáme tak hranici Sluncem osvětlené a neosvětlené polokoule Země. Na neosvětlené části Země je pak pozorovatelná fáze zatmění, pro kterou jsme určili polohu terminátoru.

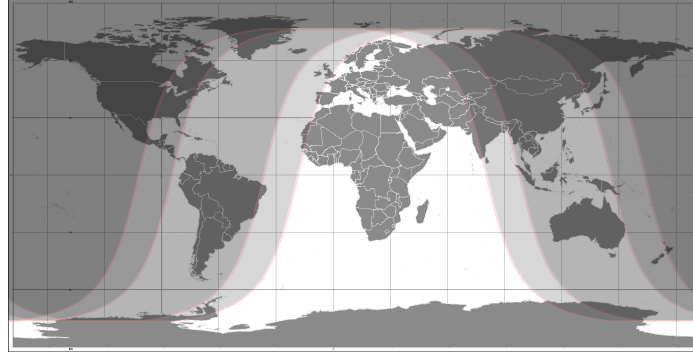
### 4.3 Zvětšení stínu

Existují matematické metody na odhad velikosti stínu Země, které jsou založený na výpočtu geometrické vzdálenosti Slunce-Země a Země-Měsíc. Situace ale není tak jednoduchá.

Tento jev závisí na vlastnostech atmosféry, kterou sluneční paprsky procházejí. Jiné složení atmosféry, tlak, teplota, mohou ovlivnit, jak bude světlo procházet atmosférou.

Přesné hodnoty velikosti stínu můžeme získat jenom v době zatmění, nebo zaznamenáním zatmění a zpracováním získaných dat.

<sup>1</sup>Terminátor je kružnice, rozhraní mezi Sluncem osvětlenou a neosvětlenou částí planety.



Obrázek 4.4: Mapa stínu.

Už pomocí malého dalekohledu s malým zvětšením můžeme pozorovat vstup měsíčních kráterů do stínu. Zkušenosti ukazují, že menší přístroje jsou vhodnější, protože se v nich okraj stínu jeví ostřeji. Takto můžeme získat přesněji okamžiky měsíčních útvarů vstupujících do stínu nebo vystupujících z něho. Hlavním cílem je zjistit okamžik kontaktů měsíčních útvarů se stínem.

Už počátkem 18. století si všimli astronomové, že vypočítané hodnoty začátek a konec jednotlivých fází zatmění se liší od pozorovaných. Rozdíly se pohybují v mezích 1 – 2 minuty. Je to důsledkem toho, že stín je ve skutečnosti od počítané hodnoty podle vztahu (4.3) o něco větší. Pokusy na určení tohoto rozdílu odhalily pro zvětšení stínu hodnoty  $1/41$ ,  $1/50$ , tj. zhruba 2%.

Známe-li časový okamžik kontaktu měsíčního útvaru se stínem, polohu Měsíce na jeho dráze a polohy kráterů na měsíčním disku, tak můžeme zjistit vzdálenost měsíčních útvarů od středu stínu. Tato vzdálenost udává skutečný poloměr stínu. [5]

### 4.3.1 Zemský stín na Měsíci

Vytvořme pravoúhlý souřadnicový systém s počátkem v středu Země. Osa  $X$  bude směřovat k severu, osa  $Y$  k západu a osa  $Z$  k vrcholu stínového kuželu. Pravoúhlé souřadnice středu Měsíce budou

$$\begin{aligned} x_{\mathcal{L}} &= \cos \delta_{\mathcal{L}} \sin (\alpha_{\mathcal{L}} - \alpha) \operatorname{cosec} \pi_{\mathcal{L}} \\ y_{\mathcal{L}} &= \sin (\delta_{\mathcal{L}} - \delta) \operatorname{cosec} \pi_{\mathcal{L}} + k \cdot x_{\mathcal{L}} (\alpha_{\mathcal{L}} - \alpha) \sin \delta \\ z_{\mathcal{L}} &= \cos (\delta_{\mathcal{L}} - \delta) \operatorname{cosec} \pi_{\mathcal{L}} - k \cdot x_{\mathcal{L}} (\alpha_{\mathcal{L}} - \alpha) \cos \delta, \end{aligned} \quad (4.27)$$

kde  $\alpha = \alpha_{\odot} \pm 12^{\text{h}}$ ,  $\delta = -\delta_{\odot}$ ,  $\pi_{\zeta}$  je paralaxa Měsíce a  $k$  je konstanta, jejíž numerická hodnota je  $k = 0,00003636$ . Tyto souřadnice pak vyjádříme v poloměrech zemských.

Pravoúhlé selenografické souřadnice měsíčních objektů jsou

$$\begin{aligned}x_0 &= r_{\zeta} \cos b \sin l \\y_0 &= r_{\zeta} \sin b \\z_0 &= r_{\zeta} \cos b \cos l,\end{aligned}\tag{4.28}$$

kde  $b$  a  $l$  jsou selenografická šířka a selenografická délka a  $r_{\zeta}$  je poloměr Měsíce v jednotkách poloměru zemského ( $r_{\zeta} = 0,27248$ ). [1]

Skutečné hodnoty selenografických souřadnic opravené o vliv librace a sklonu měsíční osy, jsou

$$\begin{aligned}x' &= a_x x_0 + b_x y_0 + c_x z_0 \\y' &= a_y x_0 + b_y y_0 + c_y z_0 \\z' &= a_z x_0 + b_z y_0 + c_z z_0,\end{aligned}\tag{4.29}$$

kde

$$\begin{aligned}a_x &= -\cos \lambda \cos P - \sin \lambda \sin P \sin \beta \\b_x &= +\sin P \cos \beta \\c_x &= +\sin \lambda \cos P - \cos \lambda \sin P \sin \beta \\a_y &= +\cos \lambda \sin P - \sin \lambda \cos P \sin \beta \\b_y &= +\cos P \cos \beta \\c_y &= -\sin \lambda \sin P - \cos \lambda \cos P \sin \beta \\a_z &= -\sin \lambda \cos \beta \\b_z &= -\sin \beta \\c_z &= -\cos \lambda \cos \beta\end{aligned}\tag{4.30}$$

V rovnicích nahoře značí  $\lambda$  a  $\beta$  selenografickou délku a šířku Slunce a  $P$  poziční úhel měsíční osy. Selenografická délka Slunce je dána rovnicí

$$\lambda = 90^\circ - \lambda',\tag{4.31}$$

kde  $\lambda'$  je tzv. colongitudo<sup>2</sup>, jehož hodnotu nalezneme ve hvězdářských ročenkách. Hodnotu pozičního úhlu  $P$  musíme opravit o

$$\Delta P = -0,017^\circ \sin \lambda_{\odot},\tag{4.32}$$

<sup>2</sup>Colongitudo je selenografická délka terminátoru na měsíčním rovníku.



kde  $\Delta P$  je změna pozičního úhlu za 1 hodinu.

Nakonec získáme pravoúhlé souřadnice měsíčních objektů vzhledem ke středu stínu

$$\begin{aligned}x &= x' + x_{\zeta} \\y &= y' + y_{\zeta} \\z &= z' + z_{\zeta} .\end{aligned}\tag{4.33}$$

Z toho pak můžeme určit vzdálenost vybraného objektu od středu stínu pomocí vztahu

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}.\tag{4.34}$$

Poziční úhel tohoto objektu počítané od východu při  $x > 0$ , nebo od západu při  $x < 0$ , je

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{y}{x}.\tag{4.35}$$

### 4.3.2 Určení velikosti a tvaru stínu

Zemský stín nemá tvar kruhu, ale spíše elipsy. Je to dáno zploštěním Země. Paprsky ovšem prochází atmosférou, která má větší zploštění v polárních oblastech, než nad rovníkem. Vlivem atmosféry je pak i zploštění stínu mnohem větší, než bychom očekávali z geometrických poměrů.

Poloměr geometrického stínu v poloměru zemského ve vzdálenosti Měsíce je vyjádřen

$$a = 1 - \frac{1}{\operatorname{tg} \pi_{\zeta}} \operatorname{tg} (R_{\odot} - \pi_{\odot}).\tag{4.36}$$

Rozdíl velké a malé poloosy  $e$  stínu vypočteme jako

$$e = a - b = \omega \left( 1 + \frac{D_{\zeta}}{D_{\odot}} \right) \cos^2 \delta_{\odot},\tag{4.37}$$

kde  $\omega$  je zploštění zemské,  $D_{\zeta}$  je vzdálenost Měsíce a  $D_{\odot}$  vzdálenost Slunce. Potom rovnice<sup>3</sup> elipsy stínu ve vzdálenosti Měsíce v polárních souřadnicích je

$$r = a - e \sin^2 \psi.\tag{4.38}$$

<sup>3</sup>Matematické vztahy (4.27)–(4.38) jsou převzaté z [1].



---

# CCD FOTOMETRIE

---

## 5.1 Základy fotometrie

Pomocí dalekohledu můžeme pozorovat různé vesmírné objekty a pokusit se o jejich klasifikování podle toho, jak se nám jeví, tj. podle morfologických znaků. Pro astronomii to však nemusí vždy stačit. Někdy potřebujeme získat a znát více informací pro další studium. Budeme-li chtít odpovědět otázky typu: Jak daleko jsou pozorované objekty? Kolik energie vyzařují? Jak jsou horké? - využijeme astronomickou fotometrii. [7]

Fotometrie patří mezi základní metody zpracování astronomických dat. Nejzákladnější informace, kterou můžeme změřit je množství energie, přicházející z nebeských objektů. Nazveme ji tokem záření. Fotometrie se vztahuje k měření toku záření přes široký interval vlnových délek. Někdy nám stačí zjistit jednu hodnotu toku záření, někdy zas potřebujeme znát, jak se zářivý tok časem mění.

Více informace můžeme získat o pozorovaných objektech, měřením energie ve více a užších intervalech vlnových délek.

### 5.1.1 Viditelné elektromagnetické záření

Veliké množství astronomických informací získáváme z elektromagnetického (EM) záření. Jsme schopni zachytit a studovat záření ve velikém rozsahu vlnových délek, od rádiových vln až po gama záření.

Naše oko je schopné zaregistrovat z tohoto širokého intervalu jenom malou část, záření o vlnové délce 400 – 750 nm. Tento interval vlnových

délek<sup>1</sup> EM záření se nazývá viditelné záření neboli světlo.

Energie záření nebo EM vlny závisí na vlnové délce  $\lambda$ , nebo na frekvenci  $\nu$ . Energie jednoho fotonu je vyjádřena vztahem

$$E_f = \frac{hc}{\lambda} = h\nu, \quad (5.1)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta,  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Js, a  $c$  je rychlost světla.

Viditelné světlo je pro nás velice důležité, jednak je to rozsah EM vln, které okem vidíme, dále, je to záření kterým svítí nebeské tělesa a které naše atmosféra propouští. Zemská atmosféra zachytí a rozptyluje velikou část záření přicházející z vesmíru. Krátkovlnné a energetické záření atmosférou neprochází, proto vysíláme družice do vesmíru, aby nám detekovali takovéto záření.

Dnes v astronomii pro vědecké výzkumy se lidské oko už nepoužívá jako primární zařízení na detekci světla. Na detekci světla byly vyvinuté metody a zařízení jako - fotografická emulze, fotonásobiče, CCD kamery. [7]

### 5.1.2 Záření dopadající na detektor

Ukázali jsme relaci mezi energií fotonu a jeho vlnovou délkou. Měříme-li záření přicházející od určitého zdroje, určitě nám nedopadne jenom jediný foton na detektor. Celková energie, detekovaná bude vyjádřena vztahem

$$E = E_f N = \frac{Nhc}{\lambda} = Nh\nu, \quad (5.2)$$

kde  $N$  je počet fotonů.

Další veličiny, důležité při fotometrii, jsou intenzita záření a tok záření. Intenzita záření je energie prošlá za jednotku času  $\Delta t$ , jednotkovou plochou  $\Delta S$  z jednotkového prostorového úhlu  $\Delta\Omega$ :

$$I = \frac{\Delta E}{\Delta t \Delta S \Delta \Omega} \quad (5.3)$$

– jednotkou je  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ .

Tok záření bude záření detekované z určitého prostorového úhlu, zachycené určitou plochou (jednotka  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) [2]

$$F = \int I d\Omega \quad (5.4)$$

<sup>1</sup>Vlnové délky jsou nejčastěji vyjádřeny v nanometrech (nm), nebo též v angströmech (Å).  $1 \text{ Å} = 0,1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$ .

### 5.1.3 Hvězdná velikost

Hipparchos, starověký řecký astronom, rozdělil pozorované hvězdy podle jejich jasností do šesti tříd. Každá třída měla určitou hodnotu hvězdné velikosti. Jasnější hvězdy měli menší hvězdnou velikost, než méně jasné hvězdy. Později, když astronomové byly schopné získat měřením jasnosti hvězd, vycházející ze systému hvězdných velikostí, nadefinovali vztah mezi hvězdnou velikostí a jasností hvězd. [7]

Hvězdnou velikost vyjadřujeme v magnitudách a udává nám poměr jasnosti hvězd. Máme-li dvě hvězdy s jasností  $F_1$  a  $F_2$ , rozdíl jejich magnitud dostaneme vztahem

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log_{10} \frac{F_1}{F_2}. \quad (5.5)$$

Chceme-li definovat přesně hvězdnou velikost určité hvězdy, musíme si zvolit nulovou hodnotu systému. Pak hvězdná velikost bude daná tzv. *Pogsonovou rovnicí*

$$m = -2,5 \log_{10} \frac{F}{F_0}, \quad (5.6)$$

kde  $F_0$  je referenční jasnost hvězdy s hvězdnou velikostí  $m = 0$ . [6]

Záření, přicházející ze zdroje, které měříme, má různé vlnové délky. Chceme-li vymežit určitou vlnovou délku pomocí nějakého filtru a určovat hvězdné velikosti v tomto oboru spektra, uděláme tak pomocí vztahu

$$m = -2,5 \log_{10} F + C, \quad (5.7)$$

kde  $C$  je konstanta, příslušná nějakému standardnímu fotometrickému systému, ve kterém chceme získat hvězdnou velikost zdroje. [3]

### 5.1.4 Barevné systémy

Filtry propouštějící světlo, používané v určitých zařízeních, určují příslušné fotometrické systémy optických soustav. Filtry nám vymezují spektrální rozsahy těchto systémů. Různé observatoře mohou využívat jiné fotometrické systémy, to znamená, že stejné objekty budou mít jiné měřené hodnoty v odlišných systémech. Proto bylo potřeba vytvořit tzv. standardní fotometrické systémy. Převodem naměřených hodnot z jiných libovolných systémů na standardní, je možné pak porovnávat získané hodnoty.

Nejnámějším fotometrickým systémem je *Johnsonův systém UB $V$* . Písmena  $UBV$  naznačují barvy využívaných filtrů –  $U$  ultrafialová ( $\sim 360$  nm)<sup>2</sup>,

<sup>2</sup>V závorce jsou vlnové délky s maximem propustnosti pro daný filtr.

$B$  modrá ( $\sim 440$  nm) a  $V$  vizuální ( $\sim 550$  nm). Pásmo propustnosti neboli interval vlnových délek, propuštěných jednotlivými filtry je přibližně 100 nm v širokopásmovém  $UBV$  systému [7][6].

Pomocí hvězdných velikostí v jiných filtrech (např.  $UBV$ ) můžeme definovat i tzv. *barevný index*, jako rozdíl hvězdných velikostí ve vybraných částech spektra, např.:

$$B - V = m_B - m_V. \quad (5.8)$$

Vyjádříme-li barevný index pro systém  $UBV$  pomocí měřených jasností, dostaneme

$$B - V = -2,5 \log_{10} \frac{F_B}{F_V}. \quad (5.9)$$

Bude-li pro toto vyjádření barevný index nulový, neplatí, že toky  $F_B$  a  $F_V$  se rovnají. Nulová hodnota barevného indexu pro tento systém vyplývá z jeho definice. Astronomové zavedli systém  $UBV$  tak, aby pro hvězdy spektrálního typu A0 byly všechny barevné indexy rovné nule  $-(B - V) = (U - B) = 0$ .

Co nám barevné indexy prozrazují?  $(B - V) < 0$  znamená, že hvězda má menší hvězdnou velikost v modrém filtru než ve vizuálním, tj. svítí více v modrém (bude mít namodralou barvu), pro  $(B - V) > 0$  bude svítit více ve vizuálním oboru. [7]

## 5.2 Snímání CCD kamerou

CCD čipy jsou elektronické součástky, používané pro snímání obrazu. Využívají se v různých optických zařízeních i ve vědeckých přístrojích. V astronomii CCD jsou použité k měření množství dopadajícího světla.

CCD čip funguje na principu fyzikálního jevu tzv. fotoefektu. Je tvořen z hodně malých částí, zvaných pixely. Každý pixel dokáže zachytit fotony na něj dopadající. Výstupem je digitální obraz. Z matematického hlediska, získáváme matici čísel z jednotlivých pixelů. Každé číslo přísluší množství světla, připadající na daný pixel. [7]<sup>3</sup>

### 5.2.1 CCD zařízení

Dnes, většinu astronomických detektorů na hvězdárnách i amatérských dalekohledech tvoří CCD kamery. Pomocí CCD můžeme pozorovat a měřit jas-

<sup>3</sup>Pro rozsáhlejší popis principu CCD doporučují knihu [3].

nosti více objektů současně. Jeho další vlastnosti jsou zde krátce popsány.

**Kvantová účinnost (QE)** je vlastnost detektoru, udávající citlivost neboli množství fotonů, které se dají převést na skutečná data. Je to poměr (udávaný v procentech) dopadajících a skutečně zaregistrovaných fotonů. Ideální by byly detektory, které mohou převést 100% informace na užitečná data. Výhodou CCD čipů je však schopnost převést velké množství dopadajících fotonů na fotoelektrony. QE závisí na spektrální citlivosti čipu, tj. na vlnové délce detekovaných fotonů. Dnešní CCD mají QE blízko 90%, dokážou zachytit fotony o vlnové délce 300 – 1100 nm. [3]

CCD kamery mají **lineární odezvu**, což znamená, že zvýší-li se expoziční čas několikanásobně, naměří se signál, stejněkrát větší. CCD však mají lineární rozsah jenom do určité hodnoty. Když překročíme tuto hodnotu, dojde k přetečení signálu, neboli už dál nenarůstá. Při fotometrii musíme znát hranici lineárního rozsahu, abychom předešli možnosti jeho překročení, tehdy bychom ztratili informace.

Největší nevýhodou CCD je tzv. šum. Jedná se o vyčítací šum a temný proud. Teplota snímače může způsobovat, že i bez detekce fotonů, mohou vystupovat elektrony z jednotlivých pixelů a to nehomogenně po celé ploše CCD čipu. Tyto elektrony se přičítají ke skutečné informaci a ovlivňují tak výsledný obraz. Dále v průběhu vyčítání nábojů jsou hodnoty pixelů zesilovány. Když zesilovač není stabilní, některé hodnoty mohou být zesíleny více než ostatní. Moderní CCD už mají zhruba 100krát nižší úroveň šumu, než ty první. [3]

### 5.2.2 Aperturní fotometrie

Aperturní fotometrie je založena na sečtení hodnot pixelů ve vybrané apertuře. Apertura může mít kruhový, čtvercový nebo jiný vhodný tvar. Výsledkem je velikost záření v jednotkách magnitudy. Hodnoty pixelů neobsahují přímo počet spatřených fotonů, jsou převedené AD převodníkem na jiné hodnoty. Mohou přímo vyjadřovat počet vzniklých fotoelektronů, nebo v jednotkách tzv. *ADU* (analog-to-digital unit).

První krok při měření hvězdné velikosti určité hvězdy, je nalézt pixel s největší hodnotou, což by měl být střed hvězdy. Dále si zvolíme aperturu se vhodným poloměrem, aby pokrýval celou hvězdu. Sečteme hodnoty odečtené ze CCD snímku a získáme tak všechny signál  $S$  přicházející od objektu.

Vhodné je určit hodnotu pozadí  $B$  ve vhodné vzdálenosti od měřeného

objektu. Tuto hodnotu odečteme od celkové hodnoty hvězdy pomocí vztahu

$$I = S - N.B, \quad (5.10)$$

kde  $N$  je počet pixelů v apertuře používaného pro sečtení veškerého signálu od objektu. [2]

Při využívání aperturní fotometrie nejdůležitější, na co musíme dbát, je zvolení vhodné velikosti apertury. Zvolíme-li příliš malou aperturu, může se nám ztratit část signálu. Vybereme-li však hodně velkou aperturu, budeme zvyšovat pravděpodobnost, že ve výsledku obdržíme všechny signál od zdroje, ale zvýší se i příspěvek šumu neboli klesá přesnost měření. [3]

### 5.2.3 Plošná fotometrie

V případě hvězd nebo podobných přibližně bodových zdrojů nám stačí výše popsané metody na výpočet hvězdné velikosti. Měsíc je však objekt na nebeské obloze s větší úhlovou velikostí. Na povrchu se nachází krátery a jiné objekty, které mohou mít jinou intenzitu.

Pomocí plošné fotometrie můžeme určit hvězdnou velikost v různých částech měsíčního disku. Plošná hvězdná velikost se vyjadřuje v jednotkách  $\text{mag.arcsec}^{-1}$ , a platí pro ni Pogsonova rovnice ve tvaru

$$m = m_{\text{ref}} - 2,5 \log_{10} \frac{F/(T_{\text{exp}}c^2)}{F_{\text{ref}}}, \quad (5.11)$$

kde  $T_{\text{exp}}$  je expoziční čas,  $c$  je měřítko v jednotkách  $\text{arcsec.px}^{-1}$ ,  $F$  je tok záření z měřené plochy,  $F_{\text{ref}}$  je celkový tok záření od referenční hvězdy a  $m_{\text{ref}}$  její hvězdná velikost.

### 5.2.4 Korekce CCD snímků

Už jsme probrali největší nevýhody CCD zařízení, tj. šum vznikající při snímání. Existují však metody, kterým se dají potlačit tyto vady snímků, pro získání přesnějších dat. Jde o jednoduché odečtení tzv. *DARK*, *BIAS* a *FLAT* snímků od snímku, obsahující zkoumaný objekt. [3]

- BIAS** Tento typ CCD snímku je získaný za nulový (nejkratší pro dané CCD zařízení) expoziční čas, při uzavřené závěrce. Dochází k vyčtení hodnot pixelů bez snímání, získáme tak základní hodnoty jednotlivých pixelů.
- DARK** Jsou podobné *BIAS* snímkům s rozdílem, že se pořizují za nenulový expoziční čas. Většinou jejich expoziční čas odpovídá expozičnímu času snímku o objektu. Pomocí *DARK* snímků je možné změřit temný proud objevující se v CCD čipu. *DARK* snímky obsahují v sobě i hodnoty *BIAS* snímků, proto samostatné *BIAS*y nejsou potřebné.
- FLAT** Jsou vhodné na zjištění variací hodnot různých pixelů a odstranění vad vyplývajících z optické soustavy. Je potřeba vytvořit *FLAT* snímky pro různé barevné filtry, instrumentální sestavu, při kterých byly získané snímky, potřebující korekci.





---

# FOTOMETRIE MĚSÍČNÍCH ZATMĚNÍ

---

## 6.1 Základy

Teorie fotometrií měsíčních zatmění je založena na výpočtu hustoty stínu a polostínu. Hustota stínu je desítkový logaritmus poměru osvětlení  $E$  určitého bodu na měsíčním povrchu mimo stín a osvětlení  $e$  téhož bodu ve stínu Země. Určíme-li hodnoty osvětlení míst v různých vzdálenostech od středu stínu, vykreslením do grafu dostaneme změnu hustoty stínu v závislosti na vzdálenosti.

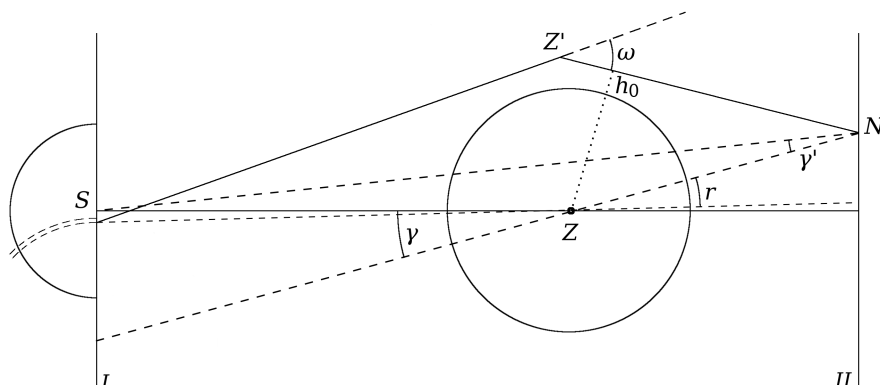
Pomocí hustoty stínu zjistíme poměry intenzit různých míst povrchu Měsíce. Změna intenzity je dána tím, že Měsíc vstupuje do stínu Země. V době zatmění hraje velkou roli i zemská atmosféra, která rozptyluje sluneční paprsky, které se tak dostávají i do stínu vrženého Zemí. Kromě změny směru paprsků, dochází i k jejich zeslabení.

Předpokládáme-li existenci těchto jevů v atmosféře, můžeme vytvořit model hustoty stínu.

Protože nám postačí i aproximativní vztahy, budeme vycházet z teoretických výpočtů, bez použití empirických dat. Pro výsledný výpočet hustoty stínu budeme potřebovat několik rovnic. Neuvádím odvození jednotlivých rovnic, ale jenom důležité výsledné vztahy [5].

Postup bude následující:

1. Vyjdeme z modelu atmosféry pro hustotu. Ze závislosti hustoty na výšce určíme dráhu paprsků v atmosféře. To znamená, že vypočítáme refrakci v různých výškách a z toho i zeslabení světla způsobené refrakcí.



Obrázek 6.1: Fotometrická schéma zatmění Měsíce. Na obrázku je vyznačená rovina Slunce  $I$  a Měsíce  $II$ .

2. Dále určíme množství světla, která dopadá do určitého bodu v rovině Měsíce z povrchu Slunce po průchodu atmosférou, tj. po jejím zeslabení. To uděláme způsobem, že rozdělíme sluneční kotouč na tenké prstence, z kterých prochází světlo zemskou atmosférou v různých výškách, tzn., že bude vycházející světlo z nich různě zeslabené.
3. Nakonec sečteme intenzity od jednotlivých prstenců, dostaneme tak osvětlení v dané vzdálenosti od středu stínu. [5]

## 6.2 Vlastnosti a vliv atmosféry

### 6.2.1 Stavba atmosféry

Pro další práci budeme potřebovat základní informace o stavbě atmosféry naší planety. Atmosféra je tvořena nejenom ze sloučenin různých plynů, ale i z vodní páry a prachových částic. V atmosféře neboli, ve vzduchu, tlak i hustota s výškou klesají a to nerovnoměrně. Závisí totiž na teplotě i na chemickém složení vzduchu. Obecně jsou tyto veličiny vyjádřeny pomocí tzv.

barometrické formule

$$p = p_0 e^{-h\beta} \quad \text{a} \quad \rho = \rho_0 e^{-h\beta}, \quad (6.1)$$

kde  $\beta$  je gradient hustoty vzduchu, vyjádřený

$$\beta = \frac{mg}{k_B T}. \quad (6.2)$$

V rovnici  $k_B = (1,380658 \pm 0,000012) \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$  je Boltzmannova konstanta,  $g$  je gravitační zrychlení,  $T$  absolutní teplota vzduchu a  $m$  hmotnost částice vzduchu.

Z modelu atmosféry víme, že závislost teploty na vzdálenosti od povrchu se mění v různých atmosférických vrstvách. Využijeme-li střední hodnoty teploty a hmotnosti částice vzduchu, pak pro výšku homogenní atmosféry vychází střední hodnota  $\beta = 1,25062 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ . [4]

Tyto hodnoty nám budou ještě důležité pro sledování dráhy paprsku a jejich změn v atmosféře.

Pomocí meteorologických balónů byl určen průběh hustoty atmosféry s výškou, který vykazuje změny od hodnot získaných podle vzorce (6.1). Závislost hustoty na nadmořské výšce získaná podle vztahu (6.1), bude úplně přijatelná pro naši další práci.

### 6.2.2 Výpočet vzdušné hmoty

Sluneční paprsek, který prochází atmosférou, mění svůj směr a ztrácí svou energii důsledkem refrakce a extinkce. Obě veličiny pak závisí na vlastnostech prostředí, kterým světlo prochází. Probereme proto základní vztahy pro výpočet jejich hodnot.

Jak víme, hustota vzduchu s výškou klesá. Rozdělme proto atmosféru na množství vrstviček klesající hustoty  $\rho$  a stejné tloušťky  $\Delta h$ . Pak dráha paprsku v daných vrstvách bude určena

$$\Delta s = \frac{\Delta h}{\cos i}. \quad (6.3)$$

Vynásobením hustotou této vrstvy dostaneme její vzdušnou hmotu

$$\Delta M = \rho \frac{\Delta h}{\cos i}. \quad (6.4)$$

Celkovou vzdušnou hmotu dostaneme, sečteme-li všechny  $\Delta M$  podél dráhy paprsku v blízkém okolí povrchu Země.

K výpočtu potřebujeme znát, jak se mění úhel  $i$  s výškou, kterou odvodíme ze zákona lomu. Tady uvedeme jenom výsledek odvození, vztah převzatý z [5] str. 28.

$$\sin i = \frac{a + h_0}{(1 + c\rho)(a + h)}, \quad (6.5)$$

kde  $a$  je poloměr Země,  $h$  je výška vrstvy atmosféry,  $h_0$  je vzdálenost paprsku procházející vodorovně nad zemským povrchem (viz obr. 6.1) a  $c = 0,000293$  [5].

### 6.2.3 Změny v atmosféře způsobené refrakcí

Lom světla je dobře známý jev, který nastává na rozhraní dvou prostředí. Tento jev je dobře pozorovatelný i v rozsáhlé atmosféře Země. Představíme-li si atmosféru, jako tvořenou z mnoho tenkých vrstev, pak na rozhraní jednotlivých vrstev s jinou hustotou dochází k lomu světla. Důsledkem je, že dráha paprsku se postupně zakřivuje.

Vztah pro refrakci můžeme odvodit taky ze zákona lomu, výsledkem je vztah podle [5] str. 32.

$$\Delta R \doteq c \frac{\rho_{n+1} - \rho_n}{1 + c\rho} \operatorname{tg} i. \quad (6.6)$$

Výpočet pomocí těchto metod je docela zdoluhavý. Někdy nám stačí jenom přibližný odhad hodnoty refrakce a vzdušné hmoty. Využitím vztahu stavby atmosféry pro hustotu rov. (6.1), je možné odvodit přibližný vztah pro refrakci

$$\omega = c\rho\sqrt{2\pi\beta a}, \quad (6.7)$$

pro změnu refrakce

$$\omega' = \beta\omega, \quad (6.8)$$

a pro vzdušnou hmotu

$$M = \frac{\omega}{c\beta} = \rho\sqrt{\frac{2\pi a}{\beta}}. \quad (6.9)$$

V atmosféře důsledkem refrakce dochází i k zeslabení světla. Vlivem refrakce dochází poprvé k zeslabení světla důsledkem rozbíhavosti rovnoběžných paprsků, což vyjadřuje vztah

$$\Phi_1 = \frac{1}{1 + l\omega'}, \quad (6.10)$$

kde  $l$  je vzdálenost Země od Měsíce.

Dále pozorujeme zesílení osvětlení, způsobené paprsky dopadajícími blízko středu stínu

$$\Phi_2 = \frac{a + h}{lr}, \quad (6.11)$$

kde

$$r = (\pi_{\odot} + \pi_{\zeta}) \left(1 + \frac{h_0}{a}\right) - \omega. \quad (6.12)$$

Skutečná změna bude výslednicí obou změn, ovšem když bereme v úvahu, že paprsky vycházející z povrchu Slunce jsou rozbíhavé, dostáváme vztah (podle [5] str. 35)

$$\Phi = \frac{(L + l)(a + h)}{rLl[1 + \omega'Ll/(L + l)]}, \quad (6.13)$$

kde  $L$  je vzdálenost Země od Slunce.

#### 6.2.4 Zeslabení osvětlení důsledkem extinkce

Extinkce je zeslabení záření kosmických objektů v atmosféře vlivem absorpce a rozptylu. Extinkce závisí na velikosti dráze paprsku v atmosféře.

Po té co už máme vypočítání vzdušnou hmotu, můžeme určit zeslabení světla, která vzniká průchodem paprsků atmosférou, ze vztahu

$$I = I_0 e^{-AM}, \quad (6.14)$$

kde  $I_0$  je intenzita světla při vstupu do atmosféry a  $I$  je intenzita při výstupu z ní.  $A$  je extinkční koeficient, který je podle [5] str. 29., vyjádřen rovnicí

$$A = 4,48 \cdot 10^{-12} \frac{(n - 1)^2}{\lambda^4}, \quad (6.15)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka a  $n$  je index lomu.

Extinkční koeficient můžeme určit z pozorování tzv. extinkčních hvězd [4], jsou to hvězdy s dobře určenými hvězdnými velikostmi. Extinkce je v zenitu menší než nad obzorem, je to dáno tím, že dráha paprsků je tam kratší.

## 6.3 Zatmění Slunce?

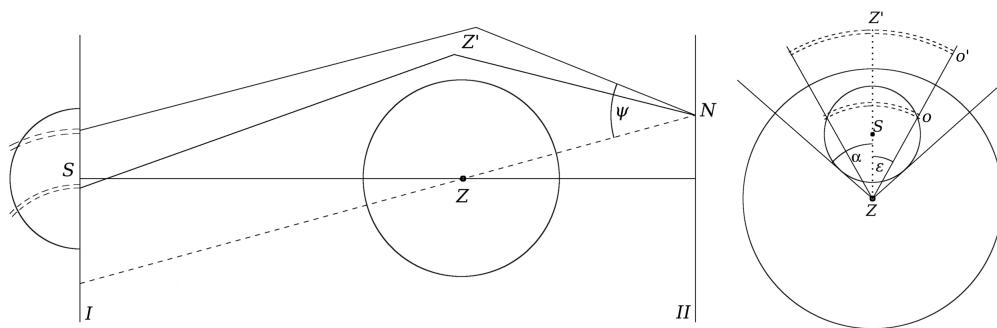
### 6.3.1 Jak to vypadá z Měsíce

Kdybychom se nacházeli na povrchu Měsíce v době měsíčního zatmění, mohli bychom ho pozorovat jako zatmění Slunce. Ve vzdálenosti Měsíce má Země větší úhlový průměr než Slunce.

Z geometrických poměrů plyne, že vstoupí-li Měsíc do stínu, Slunce bude úplně zakryto naší planetou.

Země je však obklopena atmosférou, ve které dochází vlivem refrakce ke změně dráhy slunečních paprsků. Atmosféra se chová, jako čočka, která fokusuje světlo do určitého bodu, vytváří tak obraz Slunce. Tento jev se projeví tím, že je možné pozorovat obraz Slunce, i když je Měsíc v plném stínu.

Nebudeme však vidět obraz celého Slunce, jenom tenký světelný prstenec obklopující tmavou Zemi. Tento jev je zobrazený na obr. 6.2.



Obrázek 6.2: Vlevo vidíme změnu dráhy paprsků dopadajících do stejného bodu  $N$ . Vpravo je pohled na zatmění z Měsíce. Je vyznačena část sluneční kotouče  $o$  a její obraz  $o'$ .

Rozdělíme-li sluneční kotouč na tenké soustředné kružnice, budou paprsky vycházející z těchto kružnic zobrazeny do měsíční roviny jinou vrstvou atmosféry. Úhel, pod kterým paprsek dopadá do určitého bodu na měsíčním povrchu, podle obrázku 6.2 bude daný vztahem

$$\psi = \pi \zeta \left( 1 + \frac{h_0}{a} \right). \quad (6.16)$$

Dále velikost oblouku je dána středovým úhlem  $2\varepsilon$ . Složením jednotlivých oblouků, zobrazených ve stejném bodě Měsíce, dostaneme deformovaný obraz Slunce. Největší hodnotu středového úhlu  $2\alpha$  (úhel vymezený tečnami z bodu  $Z$  ke kotouči Slunce) obrazu dostaneme podle vztahu

$$\sin \alpha = \frac{R_{\odot}}{\gamma}, \quad (6.17)$$

kde

$$\gamma' = \gamma \frac{L}{L+l}, \quad R'_{\odot} = R_{\odot} \frac{L}{L+l}. \quad (6.18)$$

Označíme vzdálenost bodu v měsíční rovině od středu stínu jako  $\gamma$ , úhlový poloměr Země je  $\pi_{\mathcal{L}}$ .

Paprsky zobrazené do měsíční roviny, budou procházet atmosféru v oblasti terminátoru. Celý terminátor se ovšem neúčastní v zobrazení Slunce, jenom jeho část určená středovým úhlem  $2\alpha$ . [5]

### 6.3.2 Jas Slunce

Jak už bylo řečeno na začátku kapitoly budeme rozdělovat slunečný kotouč na tenké kružnice. Uděláme to pro každou vzdálenost od středu stínu. Pro další výpočet budeme potřebovat určit svítivosti těchto prstenců. [5]

Podle obrázku 6.3 vidíme, že se jedná o soustředné kružnice s tloušťkou  $\Delta r$  a poloměrem  $r$ , měřeného od středu Země. Vzdálenost Země – Slunce má velikost  $\gamma$  a Slunce úhlový poloměr  $R_{\odot}$ .

Budeme zanedbávat okrajové ztemnění slunečního kotouče a předpokládáme, že její jas se nemění. Vycházíme-li z této úvahy a položíme celkovou svítivost slunečního kotouče rovnu jedné, bude svítivost určité kružnice daná poměrem její plochy a celkové plochy Slunce

$$\Delta i = \frac{\Delta p}{\pi R_{\odot}^2}. \quad (6.19)$$

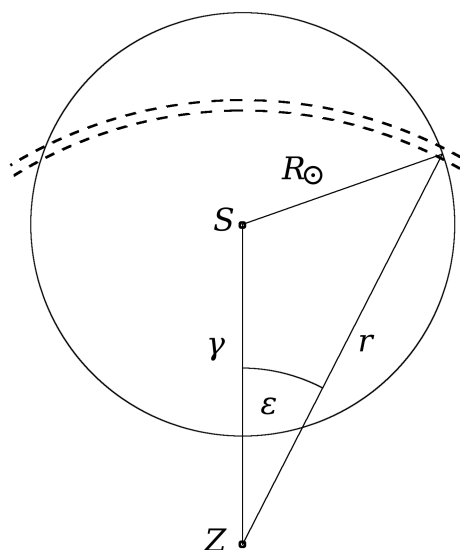
Plochu prstence vyjádříme podle obrázku 6.3 vztahem

$$\Delta p = \pi r \Delta r \frac{\varepsilon}{180^\circ}, \quad (6.20)$$

kde velikost úhlu  $\varepsilon$  spočteme využitím kosinové věty z trigonometrie

$$\cos \varepsilon = \frac{r^2 + \gamma^2 - R_{\odot}^2}{2\gamma r}. \quad (6.21)$$

Teď už máme všechno potřebné pro další krok, což je výpočet osvětlení místa na Měsíci.



Obrázek 6.3: Schéma pro výpočet svítivosti jednotlivých prstenců.

## 6.4 Fotometrie měsíčních zatmění

### 6.4.1 Hustota stínu

Vstup Měsíce do polostínu nemůžeme pouhým okem pozorovat. Jak se přibližuje k okraji plného stínu vidíme ztmavnutí měsíčního povrchu. Do plného stínu dopadá málo světla, takže intenzita směrem k středu stínu klesá. Tento pokles můžeme nejlépe vyjádřit pomocí průběhu hustoty stínu. Hustota stínu je vyjádřena vztahem

$$D = \log_{10} \frac{E}{e}. \quad (6.22)$$

Její hodnotu bychom vypočítali z naměření osvětlení určitého bodu na měsíčním povrchu před zatměním  $E$  a v době zatmění  $e$ .

Paprsky dopadající do plného stínu, jsou ohýbány v atmosféře. To je jediná možnost, aby se sluneční paprsky dostaly do stínu. I tak jsou zeslabené důsledkem různých jevů v atmosféře (část 6.2.3 a 6.2.4).

Předcházející části kapitoly popisují postup metody výpočtu tzv. pomocného stínu. Jde vlastně o model hustoty stínu pro ideální atmosféru.



Už víme jak vypočítat hodnotu refrakce, zeslabení refrakcí, svítivost malých ploch slunečního kotouče.

Světlo vycházející z různých částí povrchu Slunce a dopadající do stejného bodu, bude procházet atmosférou v jiných výškách. Protože hodnoty refrakce a extinkce se výškou mění, znamená to, že bude světlo jinak zeslabené.

Určitý prstenec slunečního kotouče dává osvětlení v bodě měsíční roviny

$$\Delta e = 10^{-d} \Delta i, \quad (6.23)$$

kde  $d$  je zeslabení světla způsobené atmosférou v dané výšce.

Celkové osvětlení ve stejném bodě je vyjádřeno vztahem

$$e = \sum_{\gamma-R_{\odot}}^{\gamma+R_{\odot}} 10^{-d} \Delta i. \quad (6.24)$$

Stejným postupem můžeme určit osvětlení stejného bodu mimo zatmění

$$E = \sum_{\gamma-R_{\odot}}^{\gamma+R_{\odot}} \Delta i, \quad (6.25)$$

přičemž zanedbáme zeslabení paprsků, tzn.  $d = 0$  [5].

Hustotu stínu v určité vzdálenosti od středu stínu určíme vztahem (6.22).



---

## ZPRACOVÁNÍ DAT

---

### 7.1 Příprava k fotometrii zatmění

#### 7.1.1 Použité přístroje a další informace

Bohužel jsem neměl možnost na pozorování vlastních dat. Získal jsem však snímky od dvou lidí:

- RNDr. Pavol Rapavý (ředitel hvězdárně v Rimavské Sobotě, Slovensko)
  - snímky zatmění z 03-03-2007 a 16-08-2008
  - stanice: N  $48^{\circ}22'28''$ , E  $20^{\circ}00'24''$
  - CCD kamera SHT 1.3, 4/300
  - expoziční čas neznámý, ale podle fotografa stejný pro každý snímek a jenom pár ms
- Patrick Chevalley (Švýcarsko, vedle Ženevy)
  - snímky zatmění z 03-03-2007
  - stanice: N  $46,20253^{\circ}$ , E  $6,105178^{\circ}$
  - první série snímků: dalekohled Sky-Watcher 80/400
  - druhá série snímků: Newtonův dalekohled 150/900, ekvatoriální montáž
  - CCD kamera SONY A100
  - snímky: 12bit SONY RAW formát, různý expoziční čas

### 7.1.2 Předzpracování CCD snímků a programové vybavení

Fotky od RNDr. Pavla Rapavého jsou 16bitové TIFF soubory. Existuje několik počítačových programů, které jsou schopné převést TIFF soubory na FITS. Já jsem využil software *ImageTOOLSca* [15].

Na konverzi RAW snímků na FITSy jsem použil program *IRIS* [16]. V tomto softwaru se dá nastavit typ CCD kamery a jeho další parametry, podle čehož se překonvertuje snímek. Barevné RAW snímky jsem rozdělil na jednotlivé RGB barvy pomocí speciální funkce softwaru *IRIS*.

Každý snímek je získán obyčejnou digitální kamerou a nebyly určeny pro fotometrické zpracování. Nebyly tak získané kalibrační snímky, z tohoto důvodu jsem zpracovával surové CCD snímky.

Při dalším zpracování snímků jsem použil počítačový program *IRAF* [17].

### 7.1.3 Průběh zatmění Měsíce

Většina článků o fotometrii zatmění Měsíce využívá měření jasnosti měsíčních objektů. Jak je popsáno v teoretické části, už víme, že při fotometrii zatmění se snažíme zjistit změnu hustoty stínu v závislosti na vzdálenosti od středu stínu. Ne vždy však pozorujeme úplné zatmění Měsíce. Z tohoto důvodu pro nás není nezbytné znát geometrický průběh zatmění, abychom mohli zvolit část měsíčního povrchu, který se ponoří nejvíce do stínu.

Mapa oblastí Země, z kterých můžeme pozorovat zatmění, je pro nás důležitá z více důvodů. Za prvé je dobré předem znát jestli bude zatmění pozorovatelné na místě, kde máme pozorovací techniku. Za druhé, když zkoumáme vlastnosti atmosféry můžeme určit její část, kde prochází sluneční paprsky.

Pomocí popsané metody v kapitole 4. jsem vytvořil jak mapu stínu, tak i grafické zobrazení průběhu zatmění pro zatmění 03-03-2007 a 16-08-2008, najdeme je mezi přílohami. Hodnoty rektascenze, deklinace, jejich hodinové změny apod. jsem získal z programu *XEphem* [18] a taky z on-line systému *HORIZONS* [19]. Podobné mapy jsou dostupné z předcházejících 10 let na internetové stránce <<http://eclipse.gsfc.nasa.gov/lunar.html>>.

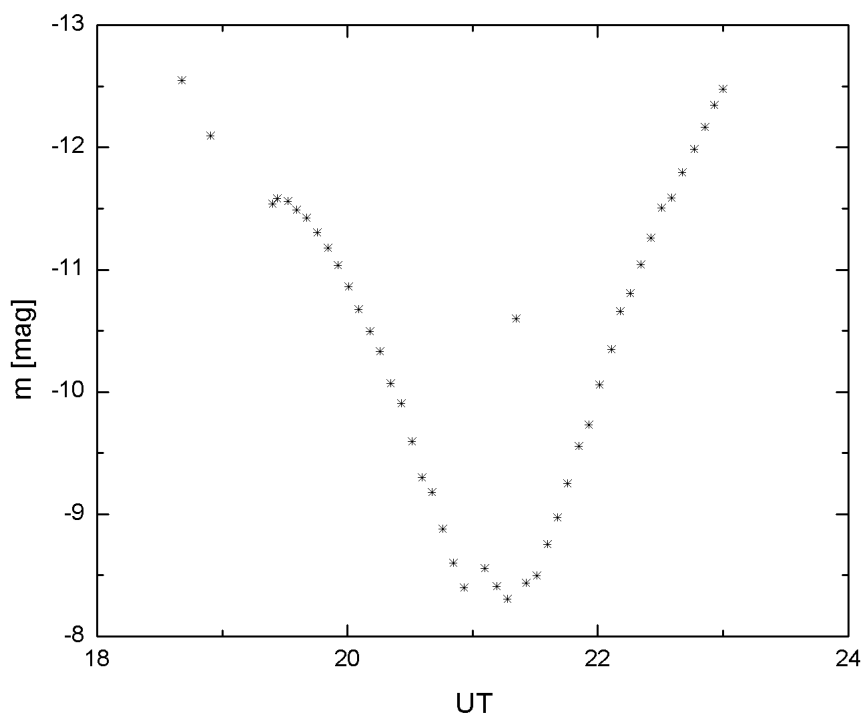
## 7.2 Fotometrické zpracování

### 7.2.1 První sada snímků

Zde je popsáno zpracování snímků obdržných od RNDr. Pavla Rapavého.

Snímky zatmění 03-03-2007 jsou nepoužitelné. V době zatmění byla proměnlivá vysoká oblačnost a Měsíc se ztrácí ze snímku i před začátkem zatmění.

Snímky zatmění 16-08-2008 jsou už v pořádku. Šlo o částečné zatmění ze série Saros 138. Největší problém je velice nízký expoziční čas, který navíc není přesně známý, ale podle pana Rapavého se jedná o milisekundy. Expoziční čas byl zvolený tak, aby bylo vidět celý Měsíc a aby nedošlo k přetečení. Snímky nebyli získané pro fotometrické účely.

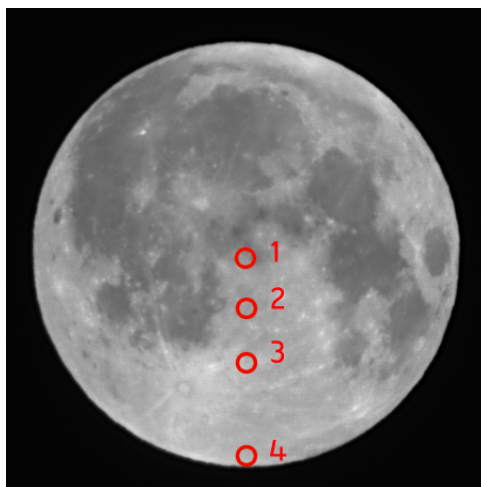


Obrázek 7.1: Světelná křivka zatmění Měsíce 16-08-2008.

Z důvodu nízkého expozičního času není možné určit hustotu stínu, popsané v kapitole 6. Hodnoty měsíčního povrchu ve stínu jsou skoro stejné jako hodnota pozadí. I tak jsem se pokusil získat nějaké informace o změně jasnosti v době zatmění.

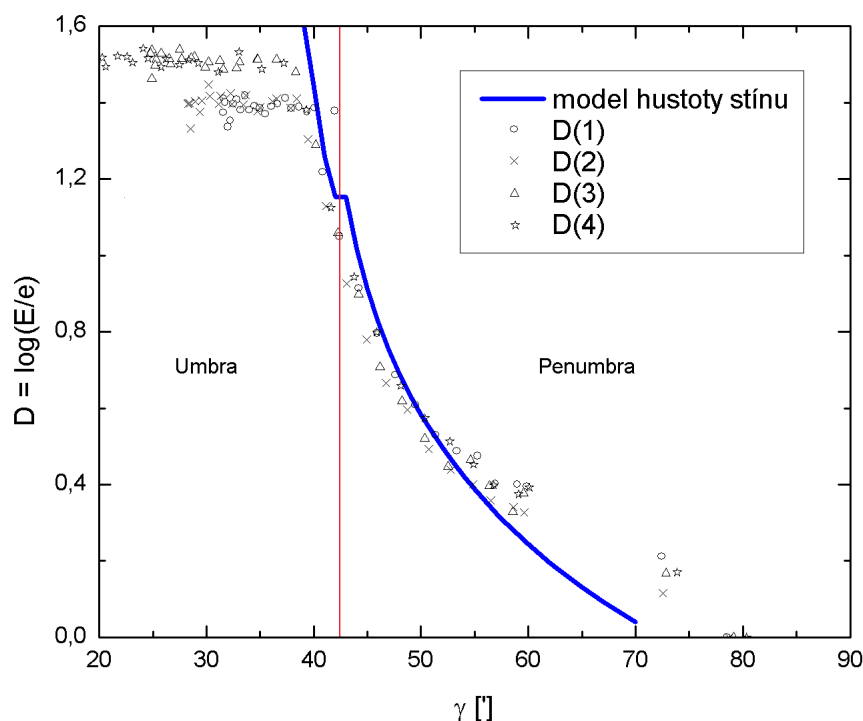
Postupoval jsem tak, že jsem odečetl hodnotu pozadí. Na snímcích není vidět žádný jiný objekt jako např. hvězdy, proto jsem sečetl hodnoty pixelů z celého snímku. Ovšem tak nezískám celkovou jasnost Měsíce, protože při odečtení hodnoty oblohy se odečtou i hodnoty části Měsíce, které jsou ve stínu.

Hodnoty jasnosti Měsíce jsem přepočítal na hvězdné velikosti. Hodnoty hvězdných velikostí jsem nekalibroval tak, aby hodnota Měsíce na začátku zatmění odpovídala hvězdné velikosti Měsíce v úplňku, což je  $-12,55$  mag [10]. Bod v čase 21,34 h má hodnotou  $-10,6$  mag důsledkem přetečení hodnot ve snímku (viz obr. 7.1).



Obrázek 7.2: Části měsíčního povrchu, pro které byla počítaná hustota polostínu.

Jak už jsem psal, hustotu stínu nebylo možné určit důsledkem toho, že hodnoty ve stínu mají všude přibližně stejnou hodnotu. Podařilo se mi ale vypočítat hodnoty hustoty polostínu. Obrázek 7.3 obsahuje křivku modelu hustoty stínu a hodnoty polostínu pro čtyři různá místa na povrchu Měsíce (viz obr. 7.2), v závislosti na vzdálenosti od středu stínu. Jak vidět docela dobře odpovídají hodnotám modelu. Z obrázku 7.3 je vidět i to, že hustota stínu se nemění pro různé vzdálenosti od středu stínu.



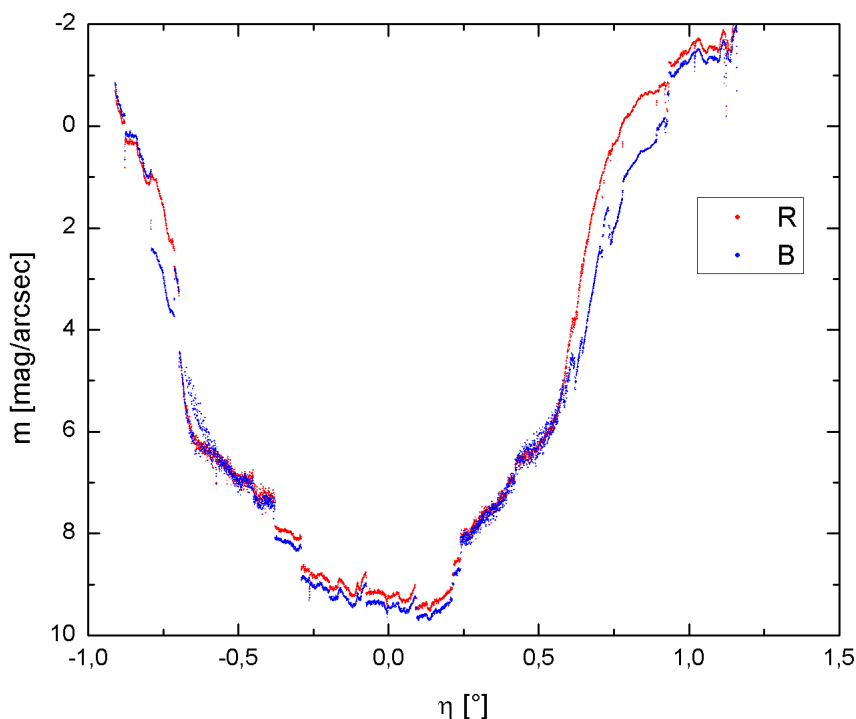
Obrázek 7.3: Hustota polostínu zatmění Měsíce 16-08-2008.

## 7.2.2 Druhá sada snímků

Tato část probírá výsledky zpracovaných snímků od Patricka Chevalleyho. Při zpracování jsem využil jenom snímky focené pomocí Newtonového dalekohledu 150/900. Jsou to snímky úplného zatmění 03-03-2007 ze série Saros 123.

Díky pořízení barevných snímků, jsem byl schopný udělat fotometrii ve třech barvách BVR. Z toho nás nejvíce zajímají hodnoty přes filtry B a R. Víme, že v době zatmění má měsíční disk červenou barvu. Podle toho jsem očekával menší jasnost v modré barvě než v červené, což se mi podařilo dokázat pomocí vícebarevné fotometrie.

Při zpracování těchto snímků a zkonstruování světelné křivky zatmění jsem postupoval trochu jinak, než v předchozím případě. Poděl měsíční



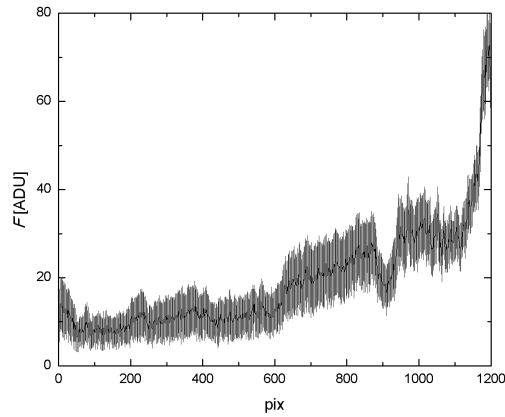
Obrázek 7.4: Světelná křivka zatmění Měsíce 03-03-2007.

dráhy, přes střed Měsíce jsem udělal řez měsíčním diskem. Snímky obsahují velký šum, abych ho co nejvíce eliminoval, udělal jsem řez s tloušťkou 10 pixelů (viz obr. 7.5 a 7.6). Z každých 10 hodnot jsem udělal průměr a získal jsem tak hodnotu jasnosti malých kousků měsíčního disku v různých vzdálenostech. Tento postup jsem využil při zpracování 20 snímků, které jsem pak poskládal. Získal jsem tak světelnou křivku zatmění Měsíce.

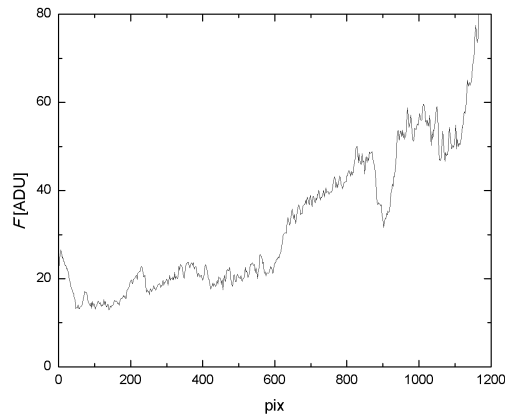
Obrázek 7.4 ukazuje graf závislosti hvězdných velikostí na čtverečnou úhlovou vteřinu ve filtrech R a B na úhlové vzdálenosti od středu zatmění. Nulová vzdálenost je poloha středu Měsíce v opozici. Hodnota  $\eta$  tak značí vzdálenost podél dráhy Měsíce od polohy opozice.

Hodnoty hvězdných velikostí jsem získal pomocí plošné fotometrie. Hodnoty byly kalibrovány pomocí dvou hvězd, které jsou viditelné na některých snímcích. Jedná se o hvězdu  $\epsilon$  Leo a  $\delta$  Leo. Měřítka jsem zjistil ze známého

poloměru kotouče Měsíce, což jsem naměřil i na snímkách v jednotkách pixelů.



Obrázek 7.5: Řez s tloušťkou 1 pixelu.



Obrázek 7.6: Řez s tloušťkou 10 pixelů.

Jak vidíme z grafu, v maximu zatmění, skutečně svítí Měsíc více v červené barvě než v modré. V příloze najdeme i graf barevného indexu  $B - R$ , viz obr. A.5.

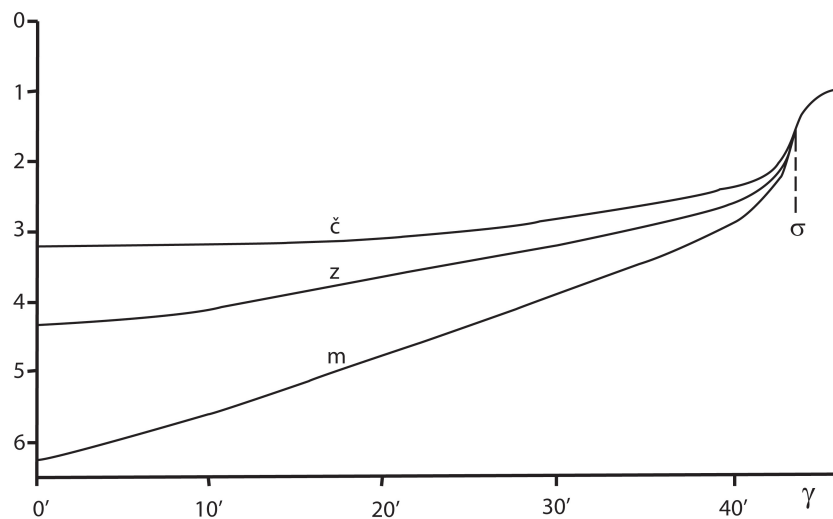
Hlavním úkolem fotometrie měsíčních zatmění je zjistit hustou stínu. V případě těchto snímků to bylo možné udělat. Vybral jsem dva různé objekty na měsíčním povrchu, pro které jsem využil aperturní fotometrii. Jedná



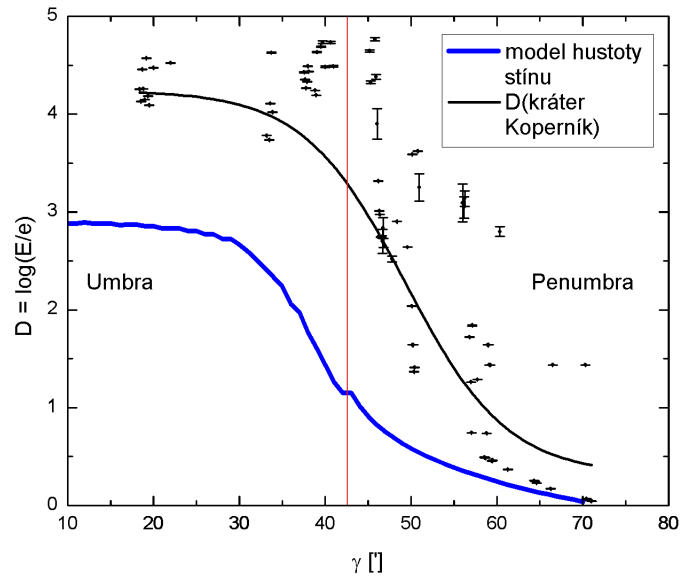
se o kráter Koperník a Moře Nektaru. Vypočítal jsem pro ně změnu hustoty stínu v závislosti na vzdálenosti od středu stínu ve filtru V.

Obrázek 7.8 a 7.9 ukazují i model hustoty stínu. Vypočtené hodnoty se liší od modelu. Hlavním důvodem je, že model byl vytvořený způsobem, že jsem počítal zeslabení světla působené jenom refrakcí. Zeslabení světla extinkcí bylo zanedbané, jako i další vlivy atmosféry, např. ozonová vrstva, a vyšší absorbuující vrstvy.

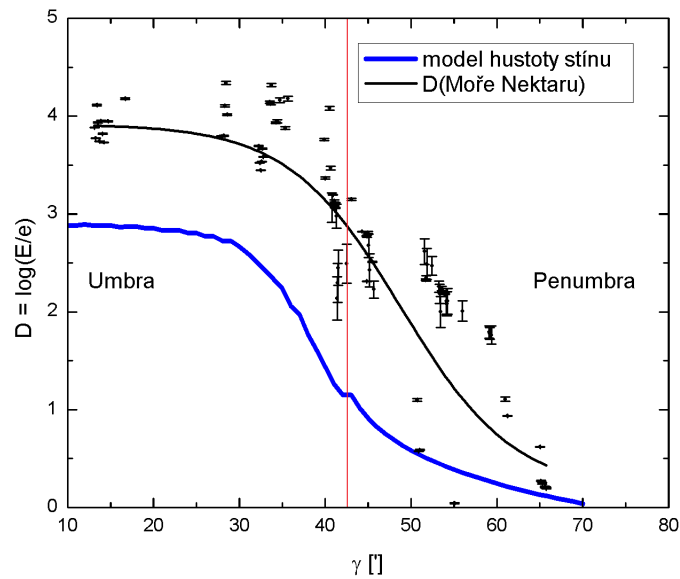
Dále mohly být výsledky ovlivněné i počasím, a to ne jenom na místě pozorování, ale taky v oblasti, kde sluneční paprsky procházely atmosférou. V příloze najdeme obrázek A.6, mapu s vyznačeními částí atmosféry, kterými procházeli sluneční paprsky dopadající na povrch Měsíce v době zatmění. Dále jsou tam přiložené i družicové snímky, světové mapy počasí [20].



Obrázek 7.7: Hustota stínu v závislosti na vzdálenosti od středu stínu v ideální atmosféře,  $\check{c} = 640 \text{ nm}$ ,  $z = 540 \text{ nm}$ ,  $m = 460 \text{ nm}$ . [5]



Obrázek 7.8: Hustota stínu pro kráter Koperník. Zatmění Měsíce 03-03-2007.



Obrázek 7.9: Hustota stínu pro Moře Nektaru. Zatmění Měsíce 03-03-2007.



---

## ZÁVĚR

---

Před existencí vesmírných družic nebo meteorologických balónků, lidé hledali různé metody na zjištění nějakých vlastností zemské atmosféry. Jedna z nich byla i fotometrie zatmění Měsíce. Pomocí této metody byla zjištěna poloha ozónové vrstvy na začátku 30-tých letech 20. století, která později byla ověřena. Dále byla zjištěna existence vysoké absorbující vrstvy ve výškách 100 – 150 km.

Vlastnosti atmosféry mohou ovlivnit výsledky fotometrie zatmění. Moje grafy zobrazují model hustoty stínu, který byl vytvořen tak, že jsem o vlastnostech atmosféry neuvažoval. Jak vidíme v případě obrázku 7.8 a 7.9, měřené hodnoty a vypočtené hodnoty modelu se liší. Odchylka je způsobena pravděpodobně tím, že jsou zanedbané určité vlastnosti atmosféry. Pro lepší hodnoty nebo získání dalších informací bychom potřebovali několik změn. Dobré by bylo popsat další vlastnosti atmosféry a vzít je do úvahy při počítání přesnějšího modelu pro ideální atmosféru.

V případě hustoty stínu jsou důležitější nižší vrstvy atmosféry, protože paprsky dopadající do stínu Země prochází atmosférou blízko zemského povrchu. Tady hraje důležitou roli zeslabení světla způsobené refrakcí a extinkcí. Model je však počítán jenom pro zeslabení refrakcí.

Hodnoty zeslabení refrakcí a extinkcí jsou ve vyšších vrstvách velice malé, takže skoro nijak neovlivňují hodnoty hustoty polostínu. Příčinu odchylky hodnot polostínu musíme hledat jinde, pravděpodobně je to vysoká absorbující vrstva prachových částic.

Důležité jsou i meteorologické vlivy, počasí, množství vodné páry ve vzduchu, a to hlavně podél terminátoru stínu. Tyto odchylky mezi výpočtem a měřením jsou však vhodné na zkoumání různých vlastností atmosféry.

Tato práce popisuje postupy získání jak fotometrických, tak i dalších informací o měsíčním zatmění. Jsou popsány vlastnosti získaných dat i problematika jejich zpracování, což může dát zájemcům představu o tom, jaké data se snažit získat při pozorování a případně jak je zpracovat.





## LITERATURA

---

---

- [1] Bouška, Jiří; Vanýsek, Vladimír. *Zatmění a zákryty nebeských těles*. Nakladatelství Československé Akademie Věd, Praha, 1963.
- [2] Hroch, Filip. *Astronomické Praktikum*. Brno, 2006. Dostupné z www stránky: <<http://www.physics.muni.cz/hroch/apraktik.pdf>>.
- [3] Howell, Steve B. *Handbook of CCD Astronomy*. Second edition. Cambridge University Press, New York, 2006. ISBN 978-0-511-16105-6.
- [4] Janík, Jan; Mikulášek, Zdeněk. *Astronomické pozorování*. Dostupné z www stránky: <[http://astro.physics.muni.cz/documents/lecture\\_notes/](http://astro.physics.muni.cz/documents/lecture_notes/)>.
- [5] Link, František. *Měsíční zatmění a příbuzné úkazy*. Nakladatelství Československé Akademie Věd, Praha, 1961.
- [6] Mikulášek, Zdeněk. *Proměnné hvězdy*. Brno, 2002. Dostupné z www stránky: <[http://astro.physics.muni.cz/documents/lecture\\_notes/](http://astro.physics.muni.cz/documents/lecture_notes/)>.
- [7] Romanishin, W. *An Introduction to Astronomical Photometry Using CCDs*. 2006. Dostupné z www stránky: <<http://observatory.ou.edu>>.
- [8] Espenak, Fred: *Lunar Eclipses of Historical Interest* [online]. [cit. 2010-10-25] <<http://eclipse.gsfc.nasa.gov/LEhistory/LEhistory.html>>.

- [9] Espenak, Fred et al: *Eclipse Myths and Symbolism* [online]. Aktualizováno 14.01.1998 [cit. 2010-10-23].  
<<http://www.earthview.com/ages/myths.htm>>.
- [10] Gabzdyl, Pavel: *Měsíc v číslech* [online]. 27.11.1999/25.10.2010 [cit. 2010-10-26].  
<<http://mesic.astronomie.cz/cisla.htm>>.
- [11] Miles, Kathy: *The Myth and Rituals of Eclipses* [online]. [cit. 2010-10-23].  
<[http://starryskies.com/The\\_sky/events/lunar-2003/eclipse7.html](http://starryskies.com/The_sky/events/lunar-2003/eclipse7.html)>.
- [12] Rao, Joe: *How a Lunar Eclipse Saved Columbus* [online]. 08.02.2008 [cit. 2010-10-23].  
<<http://www.space.com/spacewatch/080208-ns-lunar-eclipse-columbus.html>>.
- [13] Williams, David R.: *Planetary Fact Sheet - Metric* [online]. Aktualizováno 17.11.2010 [cit. 2010-10-26].  
<<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>>.
- [14] <<http://wikipedia.org>>
- [15] <<http://arnholm.org/astro/software/ImageTOOLSca/DOWNLOAD>>
- [16] <<http://www.astrosurf.com/buil/us/iris/iris.htm>>
- [17] <<http://iraf.noao.edu/>>
- [18] <<http://www.clearskyinstitute.com/xephem/>>
- [19] <<http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>>
- [20] <<http://www.ssec.wisc.edu/data/composites.html>>



## SEZNAM TABULEK

---

---

3.1	Úhlové rozměry Slunce a Měsíce. [13][14] . . . . .	12
3.2	Vlastnosti Měsíční orbity . . . . .	16
3.3	Základní tři periody mezi zatmění . . . . .	17





## SEZNAM OBRÁZKŮ

---

---

3.1	Měsíc a stín Země v blízkosti výstupného uzlu. . . . .	13
3.2	Změna polohy Země a Měsíce v průběhu $\sim 23$ dní. . . . .	14
3.3	Změna pozorovatelnosti zatmění ve stejném Saros. . . . .	18
4.1	Schéma měsíčního zatmění. . . . .	21
4.2	Průběh měsíčního zatmění z 16. 08. 2008. Čárkované kružnice odpovídají vstupu do polostínu a stínu. . . . .	23
4.3	Schéma pro výpočet kontaktů Měsíce se stínem. . . . .	24
4.4	Mapa stínu. . . . .	27
6.1	Fotometrická schéma zatmění Měsíce. Na obrázku je vyznačená rovina Slunce $I$ a Měsíce $II$ . . . . .	38
6.2	Vlevo vidíme změnu dráhy paprsků dopadajících do stejného bodu $N$ . Vpravo je pohled na zatmění z Měsíce. Je vyznačená část slunečního kotouče $o$ a její obraz $o'$ . . . . .	42
6.3	Schéma pro výpočet svítivosti jednotlivých prstenců. . . . .	44
7.1	Světelná křivka zatmění Měsíce 16-08-2008. . . . .	48
7.2	Části měsíčního povrchu, pro které byla počítána hustota polostínu. . . . .	49
7.3	Hustota polostínu zatmění Měsíce 16-08-2008. . . . .	50
7.4	Světelná křivka zatmění Měsíce 03-03-2007. . . . .	51
7.5	Řez s tloušťkou 1 pixelu. . . . .	52
7.6	Řez s tloušťkou 10 pixelů. . . . .	52
7.7	Hustota stínu v závislosti na vzdálenosti od středu stínu v ideální atmosféře, $\check{c} = 640$ nm, $z = 540$ nm, $m = 460$ nm. [5] . . . . .	53

7.8	Hustota stínu pro kráter Koperník. Zatmění Měsíce 03-03-2007.	54
7.9	Hustota stínu pro Moře Nektaru. Zatmění Měsíce 03-03-2007.	54
A.1	Zatmění Měsíce 16-08-2008. . . . .	64
A.2	Zatmění Měsíce 03-03-2007. . . . .	65
A.3	Zatmění Měsíce 03-03-2007. . . . .	66
A.4	Zatmění Měsíce 16-08-2008. . . . .	67
A.5	Barevný index $B - R$ . Zatmění Měsíce 03-03-2007. . . . .	68
A.6	Část atmosféry, kterým prochází sluneční paprsky dopadající do stínu Země. Zatmění Měsíce 03-03-2007. . . . .	69
A.7	Mapa počasí: 03-03-2007 18:00 UTC. . . . .	69
A.8	Mapa počasí: 03-03-2007 21:00 UTC. . . . .	70
A.9	Mapa počasí: 04-03-2007 00:00 UTC. . . . .	70
A.10	Mapa počasí: 04-03-2007 03:00 UTC. . . . .	71



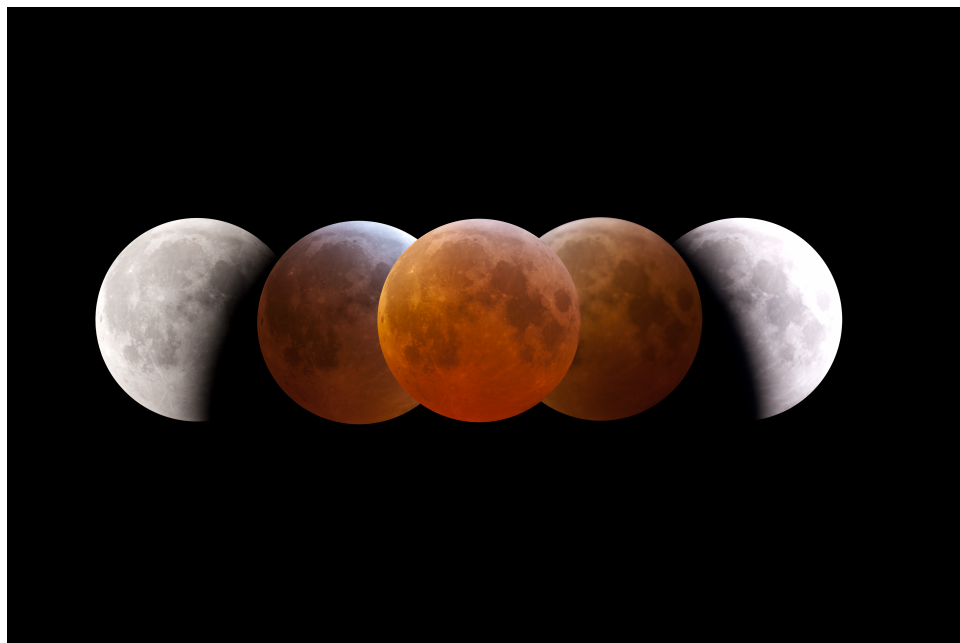
## PŘÍLOHY

---

---



Obrázek A.1: Zatmění Měsíce 16-08-2008.



Obrázek A.2: Zatmění Měsíce 03-03-2007.

## Úplné zatmění Měsíce 2007-03-03

Saros 123

Kontakty se stínem a  
polostímem:

P1: 20:18:11 UT

U1: 21:30:22 UT

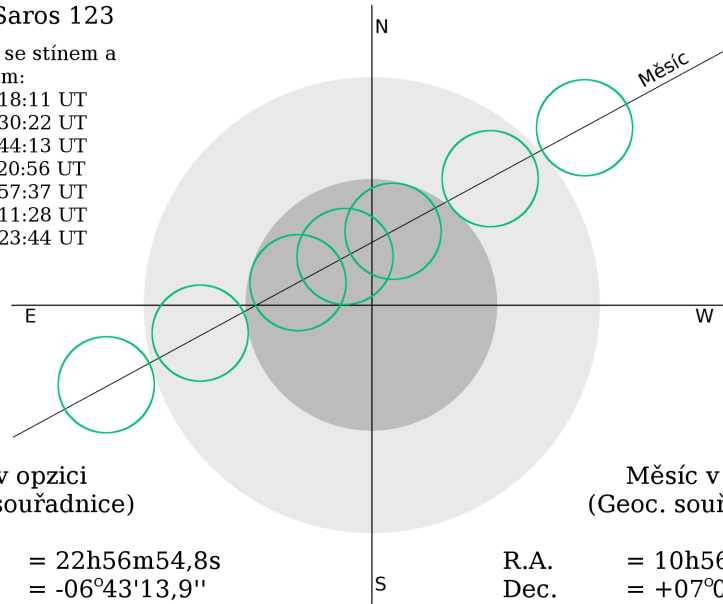
U2: 22:44:13 UT

Max: 23:20:56 UT

U3: 23:57:37 UT

U4: 01:11:28 UT

P2: 02:23:44 UT



Slunce v opzici  
(Geoc. souřadnice)

R.A. = 22h56m54,8s

Dec. = -06°43'13,9"

$\Delta$ (R.A.) = 9,25s

$\Delta$ (Dec.) = 57,57"

$\pi$  = 8,8"

R = 967,98"

Měsíc v opzici  
(Geoc. souřadnice)

R.A. = 10h56m54,8s

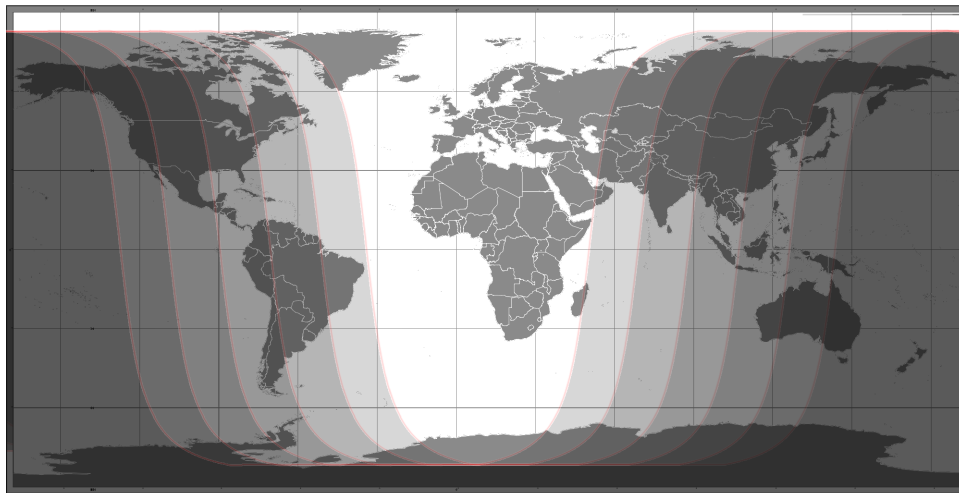
Dec. = +07°02'48"

$\Delta$ (R.A.) = 106,9s

$\Delta$ (Dec.) = -845,87"

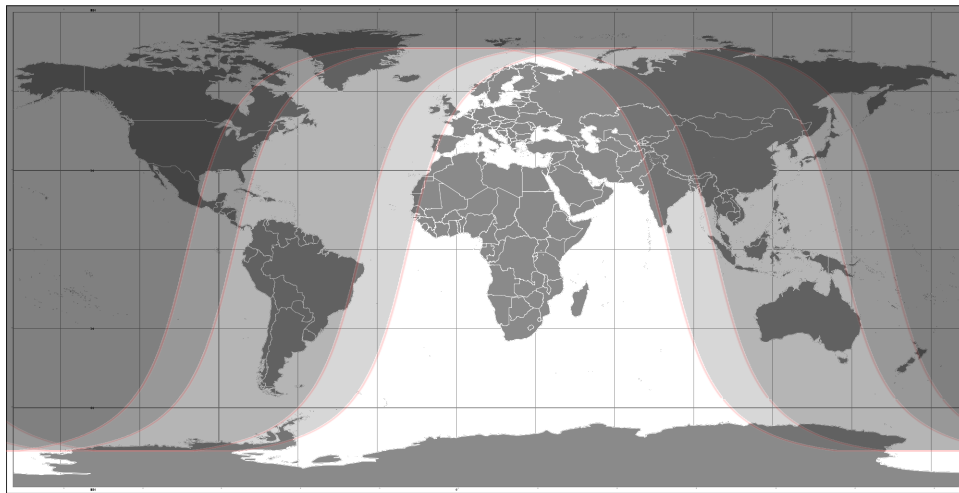
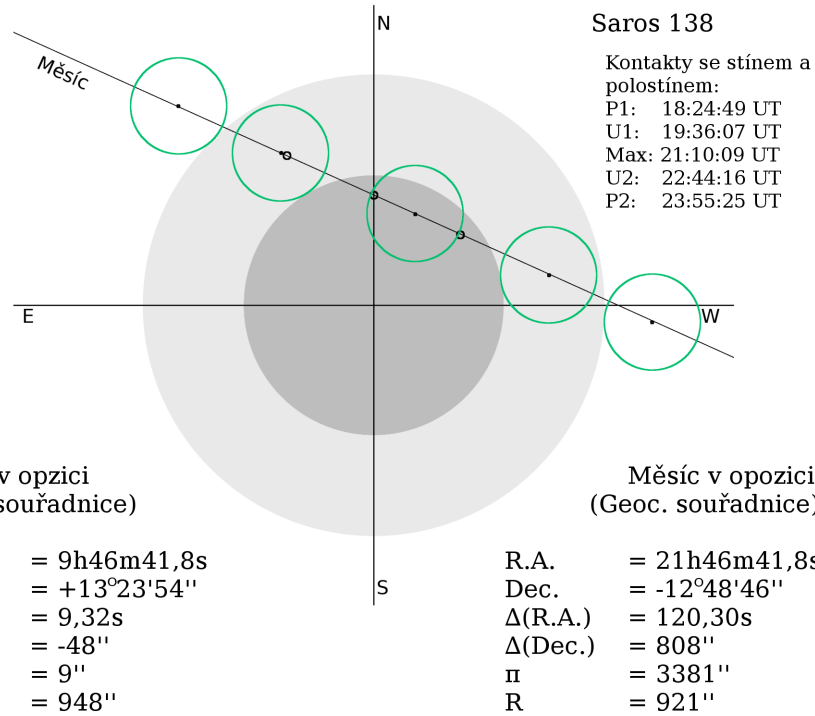
$\pi$  = 3302"

R = 891,06"

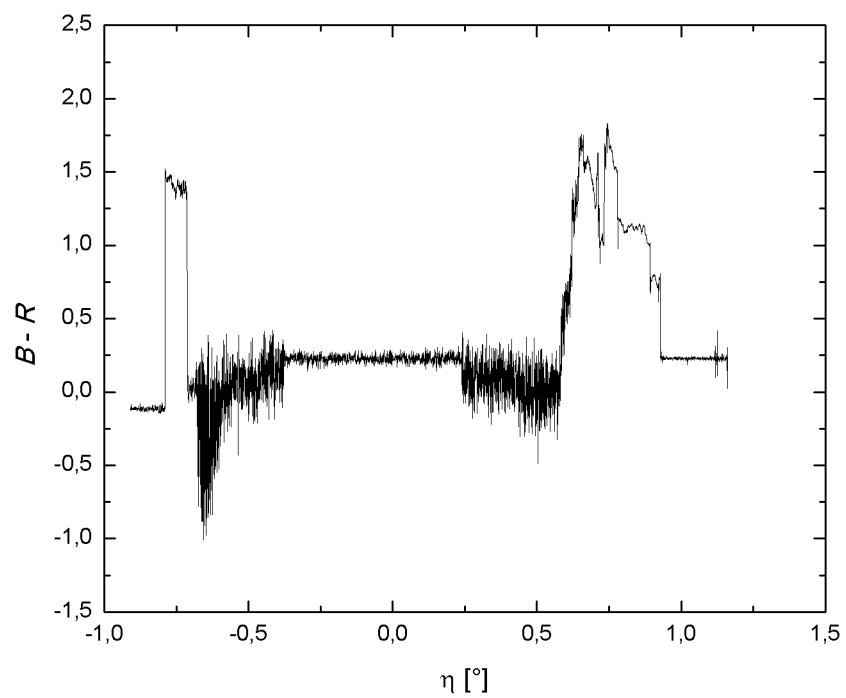


Obrázek A.3: Zatmění Měsíce 03-03-2007.

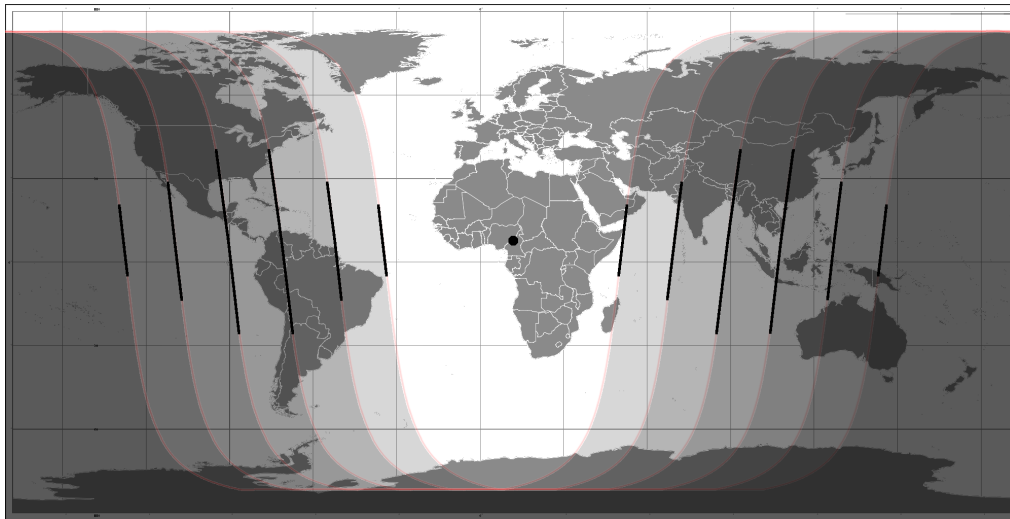
## Částečné zatmění Měsíce 2008-08-16



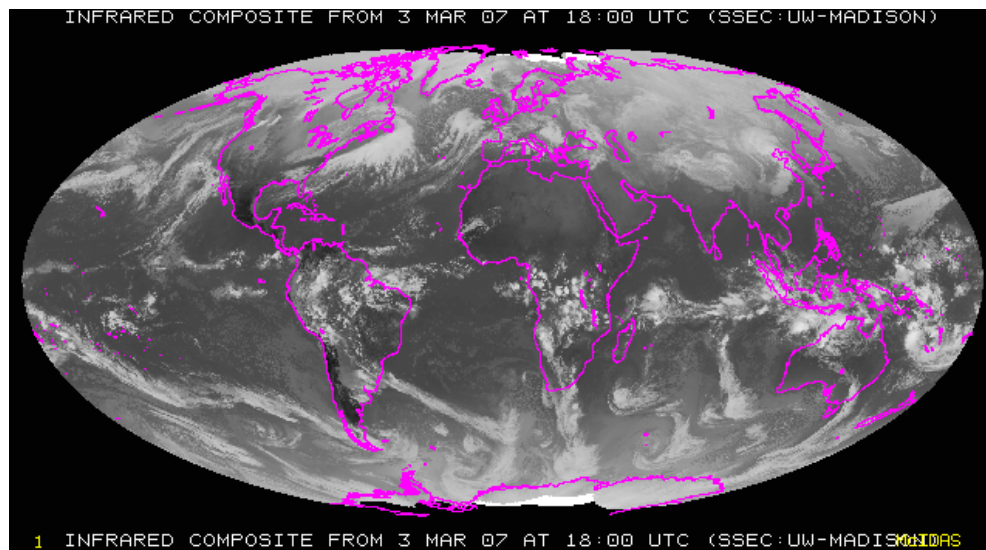
Obrázek A.4: Zatmění Měsíce 16-08-2008.



Obrázek A.5: Barevný index  $B - R$ . Zatmění Měsíce 03-03-2007.

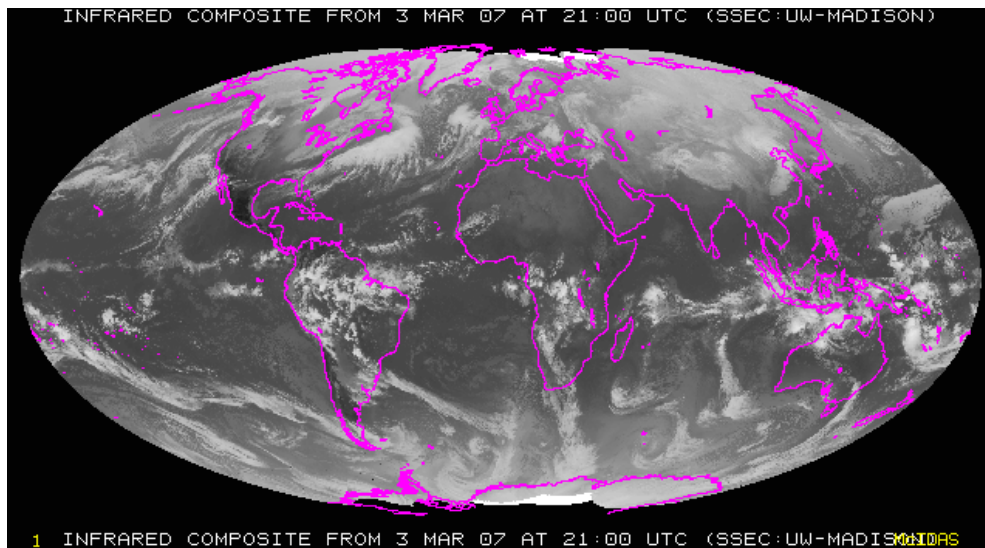


Obrázek A.6: Část atmosféry, kterým prochází sluneční paprsky dopadající do stínu Země. Zatmění Měsíce 03-03-2007.

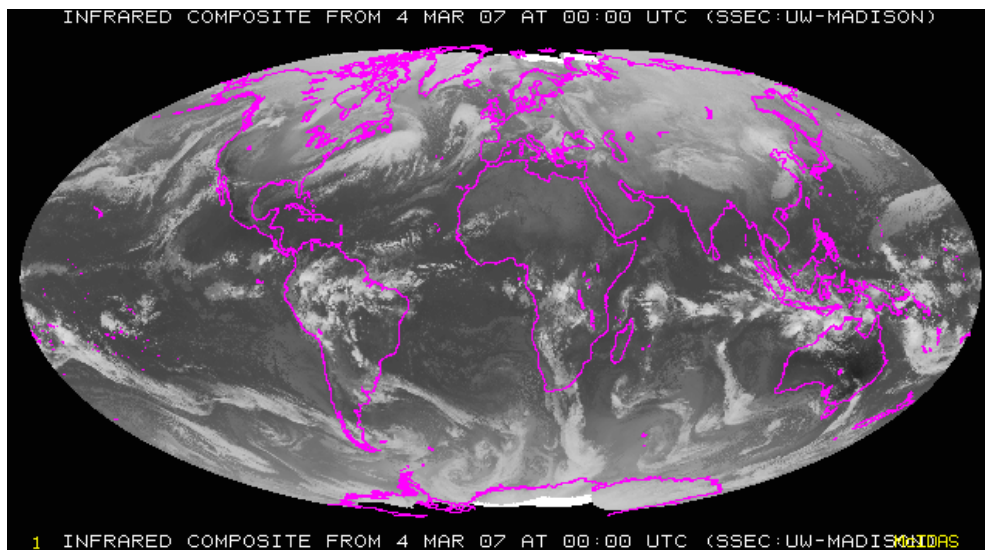


Obrázek A.7: Mapa počasí: 03-03-2007 18:00 UTC.

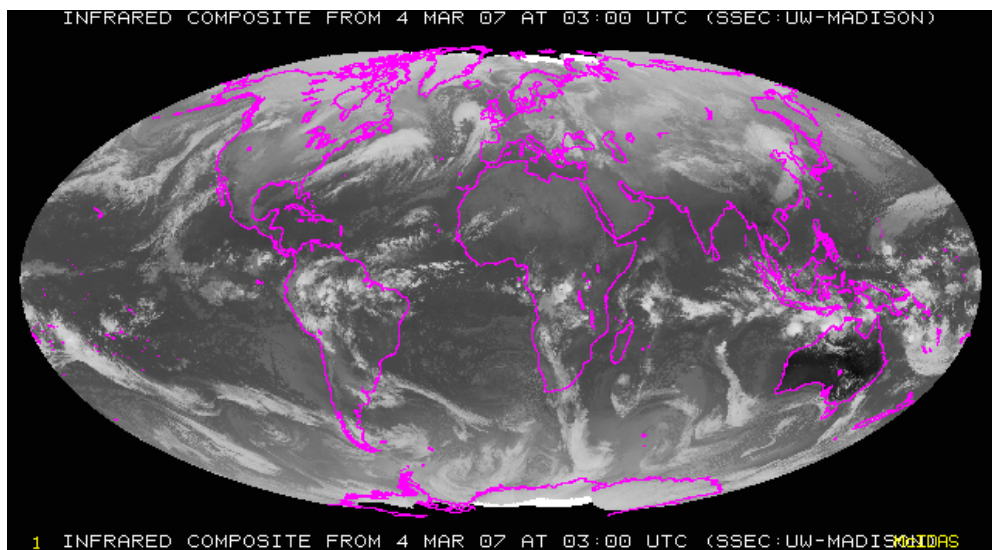




Obrázek A.8: Mapa počasí: 03-03-2007 21:00 UTC.



Obrázek A.9: Mapa počasí: 04-03-2007 00:00 UTC.



Obrázek A.10: Mapa počasí: 04-03-2007 03:00 UTC.