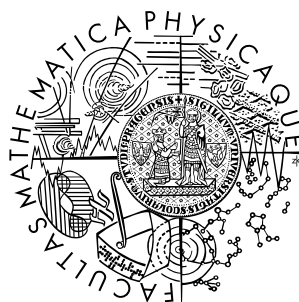


Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Josef Hanuš

Zatmění a zákryty nebeských těles

Astronomický ústav UK

Vedoucí bakalářské práce: Doc. RNDr. Marek Wolf, CSc.
Studijní program: Fyzika

2006

Děkuji svému školiteli za výběr pro mě zajímavého a přitažlivého tématu práce a poskytnutí inspirující literatury.

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

V Praze dne 15.5.2005

Josef Hanuš

Obsah

1	Úvod	5
2	Zatmění Slunce	7
2.1	Teorie	8
2.2	Einsteinova odchylka světla	10
3	Zatmění Měsíce	11
3.1	Teorie	11
4	Přechod planety přes sluneční disk	13
4.1	Venuše	13
4.2	Merkur	15
4.3	Historie	16
4.4	Výpočet vzdálenosti Země-Slunce z pozorování přechodů Venuše přes sluneční disk	16
5	Zákryty hvězd	20
5.1	Zákryty hvězd Měsícem	20
5.2	Zákryty hvězd planetami a planetkami	21
5.3	Zákryt hvězdy Charonem	22
6	Úkazy v soustavách měsíců planet	23
7	Závěr	26
	Literatura	27

Název práce: Zatmění a zákryty nebeských těles
Autor: Josef Hanuš
Katedra: Astronomický ústav UK
Vedoucí bakalářské práce: Doc. RNDr. Marek Wolf, CSc.
e-mail vedoucího: wolf@cesnet.cz

Abstrakt: Práce si klade za cíl sestavit přehled všech známých úkazů ve sluneční soustavě, při kterých dochází k zákrytu nebo zatmění různých nebeských těles a poukázat na možnost odvození některých fyzikálních veličin a vlastností kosmických těles. Každý jev je uveden jednoduchým schématem, ilustrován konkrétním příkladem na výpočet některých parametrů a je vysvětlena jeho periodičnost. Největší důraz je kladen na zatmění Slunce a Měsíce, přechody Merkura a Venuše přes sluneční disk, zákryty hvězd Měsícem, planetami a planetkami a zatmění Jupiterových měsíců.

Klíčová slova: přechody, zákryty, zatmění.

Title: Eclipses and alignments of celestial bodies.
Author: Josef Hanuš
Department: Astronomical Institute of the Charles University
Supervisor: Doc. RNDr. Marek Wolf, CSc.
Supervisor's e-mail address: wolf@cesnet.cz

Abstract: This work wants to set together a survey of all known phenomena in solar system, when we can see alignments and eclipses of different celestial bodies and show the possibility of derivation some physical quantities and characters of space bodies. Each phenomenon is introduced by simple diagram, illustrated by specific example on calculation some parameters and is discussed its periodicity. The work is based on Sun and Moon eclipse, transits of Mercury and Venus over the disk of Sun, alignments of stars by Moon, planets and asteroids and eclipses of Jupiter's moons.

Keywords: transits, alignment, eclipse.

Kapitola 1

Úvod

Astronomické události, při kterých dochází k seřazení tří těles do jedné přímky, z nichž vždy jedno je Země, se dají historicky rozdělit na dva základní typy, a to na zatmění a zákryty. Při zatmění hraje důležitou roli stín vrhaný prostředním tělesem, tedy Zemí při zatmění Měsíce, Měsícem při zatmění Slunce a nebo Jupiterem při zatmění jeho měsíců. Při zákrytu se jedno těleso schovává za disk toho prostředního. Zde se často mluví o zákrytu, když je překryto celé těleso (zákryt hvězd či planetek Měsícem) a o přechodu, jestliže není prostřední těleso dostatečně veliké, aby zakrylo celé krajní těleso (přechody planet přes sluneční disk).

Uvažujme tedy rozdělení na tři typy. Každý z nich se vyskytuje v různém uspořádání rozličných těles. Níže jsem se pokusil o co nejvyčerpávající výčet uvažujíc, že alespoň dvě zúčastněná tělesa se nacházejí ve sluneční soustavě.

- Zatmění
 - Slunce
 - Měsíce
 - v soustavách planeta-měsíce (zatmění měsíců Jupitera, Saturnu, Marsu, ...)
- Přechody
 - planet přes sluneční disk (Merkur, Venuše)
 - v soustavách planeta-měsíce (měsíců přes disk Jupitera, Saturnu, ...)
- Zákryty
 - hvězd Měsícem
 - hvězd planetami (Venuše, Mars, Jupiter, ...)
 - hvězd planetkami (Ceres, Pallas, ...)

- hvězd měsíce ostatních planet (Io, Charon, ...)
- planet Měsícem (Venuše, Mars, Jupiter, ...)
- v soustavách planeta-měsíce (měsíců diskem mateřské planety, např. Jupitera)
- rádiových zdrojů Sluncem, Měsícem, ...

Výčet není jistě úplný. Navíc o některých úkazech se zmíním jen stručně, protože nejsou tak zajímavé a pro astronomii důležité jako jiné, na něž se v textu hlavně zaměřím.

Samozřejmě nesmí chybět zatmění Slunce a Měsíce, které lze pozorovat pouhým okem a je vždy velmi nápadné a laické veřejnosti mediálně předhazované. Další ztěžejší část práce tvoří přechody Merkura a Venuše přes sluneční disk, které v minulosti poprvé posloužily k určení relevantní hodnoty vzdálenosti Země-Slunce v rozumných jednotkách (km). Relativně podrobně se budu věnovat zatměním měsíců Jupitera, jejichž pozorování umožnilo úplně poprvé určit rychlost světla a definitivně vyvrátit teorie, podle nichž měla být jeho rychlost nekonečná. V minulosti sloužilo sledování zákrytů hvězd Měsícem k určování zeměpisných délek observatoří, později ke studiu a upřesňování poloh Měsíce a konečně v první polovině 20. století k zjišťování nerovnoměrného plynutí času UT2 odvozovaného z rotace Země, to jsou důvody, proč se budu významněji věnovat i tomuto jevu. Zákryty hvězd asteroidy se dají využít při masivnějším i amatérském pozorování ke stanovení jejich okamžitého tvaru.

Zatmění Slunce, Měsíce a přechody planet jsou charakteristické svou periodičností. Jednotlivé jevy se dají podle své význačné periody opakování dělit do tzv. sérií a uspořádat do katalogů. Níže se budu zmiňovat o těchto sériích, uvádět jejich počet a délky trvání. Zde využívám numerické předpovědi a katalogy vytvořené F. Espenakem [5].

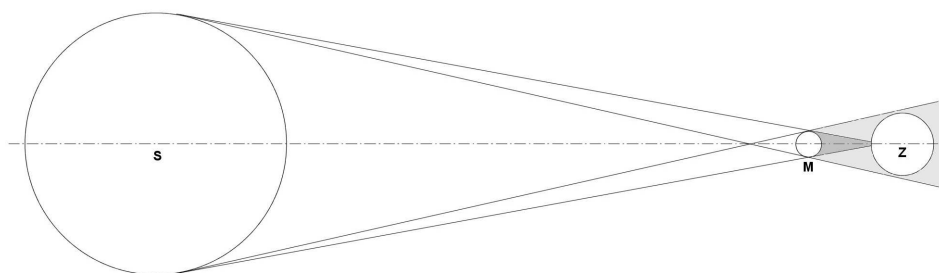
Kapitola 2

Zatmění Slunce

Zatmění Slunce je mimořádně nápadnou astronomickou událostí, vždyť při úplném zatmění se na několik málo minut změni den na noc! Již starověké civilizace si všimly těchto událostí a zaznamenávaly je. První dochovaná zmínka o pozorování úplného zatmění pochází z Číny, a to z 22. října 2137 před našim letopočtem [2]. Už v této době lidé znali periodu saros a předpovídali zatmění dopředu. Zmínky o zatmění Slunce se dochovaly i z Mezopotámie a dalších oblastí. Díky záznamům ze starého Řecka bylo možné upřesnit datování některých významných historických událostí, jež proběhly kolem zatmění.

V novodobé historii posloužilo zatmění Slunce ke zkoumání této nejbližší hvězdy. Obrovský jas Slunce nedovoloval pozorovat jeho atmosféru, bylo to možné pouze v době několikaminutového zatmění. Pouhým okem je pak patrná koróna nepravidelného tvaru, která sahá do vzdálenosti několika slunečních poloměrů od disku, její teplota se pohybuje kolem 1-2 milionů Kelvinů. Pod korónou se nachází tenká vrstva (5000 km) označovaná jako chromosféra o teplotě 100000 K u vnějšího okraje a 6000 K u styku s fotosférou. Tato vrstva o tloušťce 500 km je zdrojem viditelného elektromagnetického záření, v době úplného zatmění je zcela zakryta. Z chromosféry je vyvrhováno do koróny plasma, tyto mohutné erupce sluneční hmoty se nazývají protuberance a při zatměních jsou jasně patrné. Působivé jsou též Bailyho perly. Jedná se o velmi krátkou dobu trvající jev, k němuž dochází těsně před a po úplném zatmění Slunce, kdy poslední paprsky prosvěcující údolí na okraji disku Měsíce a přirovnávají se k perlám.

Dnes slouží zatmění víceméně jen astronomům amatérům, jelikož koronografem můžeme pozorovat korónu i mimo dobu totality. Zatmění se využívalo ke zkoumání koróny - jasnosti, velikosti, tvaru, polarizace, atd.; rozložení jasu na slunečním kotouči, převážně na okraji těsně před nebo po úplném zatmění; chromosféry. Úplné zatmění bylo poprvé použito k měření Einsteinovy odchylky světla. Toto měření vyžaduje pro správné vyhodnocení přítomnost viditelných hvězd v



Obrázek 2.1: Zatmění Slunce: střed Slunce označen S, Měsíce M a Země Z, tmavě je znázorněn stínový kužel vrhaný Měsícem na zemský povrch, světlejší barvou pak polostín

okolí Slunce, a to bylo možné jen v tomto případě.

2.1 Teorie

Sluneční zatmění vznikají tím způsobem, že na Zemi dopadne stín, který vrhá do prostoru Měsíc osvětlený Sluncem. Geometricky je měsíční stín tvořen vnějšími tečnami Slunce a Měsíce, polostín tečnami vnitřními (Obrázek 2.1).

Pokud vrchol stínového kužele leží ve vzdálenosti větší než je okamžitá vzdálenost Měsíce od Země, dochází k úplnému zatmění, a to na území o maximální šířce 270 km (tento extrém odpovídá minimální vzdálenosti Měsíce od Země a maximální vzdálenosti Slunce od Země, tedy je-li v afelu). Naopak leží-li v menší vzdálenosti, mluvíme o prstencovém zatmění. Měsíční stín se po povrchu pohybuje rychlostí přibližně 1 km/s. To výrazně limituje délku trvání zatmění, úplné může trvat nejdéle 7 minut 35 sekund. Pokud se nacházíme v místě polostínu, pozorujeme zatmění částečné, které trvá někdy až 2,5 hodiny.

Z geometrie zatmění je zřejmé, že může nastat jen když je Měsíc v novu. Dráha Měsíce je skloněna k rovině ekliptiky o úhel $5^{\circ}8'43''$ a tak k zatmění Slunce dochází jen v době, kdy je Slunce poblíž výstupného nebo sestupného uzlu měsíční dráhy. Uzly měsíční dráhy se poměrně rychle stácejí, a to směrem opačným než se pohybuje Slunce. Kdyby se uzly nepohybovaly, pak by jimi procházelo Slunce vždy v intervalu půl roku. Ve skutečnosti prochází Slunce jedním a týmž uzlem vždy za 346,62 dní. Doba oběhu Měsíce kolem Země od jednoho průchodu uzlem k následujícímu průchodu týmž uzlem se nazývá drakonický měsíc a trvá 27,21222 dní, doba oběhu Měsíce kolem Země od jedné fáze k téže fázi následující se jme-

nuje měsíc synodický a trvá 29,53059 dní a konečně dobu mezi dvěma průchody Měsíce perigeem označujeme jako anomalistický měsíc s trváním 27,55455 dní. Nalezneme-li společný násobek prvních dvou, získáme interval, v němž se zatmění opakují. Dále vidíme, že i anomalistický měsíc má podobný násobek, což nám jen říká, že bude Měsíc přibližně ve stejné vzdálenosti od Země a bude mít stejný úhlový rozměr.

$$223 \text{ synodických měsíců} = 6585,32157 \text{ dní}$$

$$242 \text{ drakonických měsíců} = 6585,35724 \text{ dní}$$

$$239 \text{ anomalistických měsíců} = 6585,53745 \text{ dní}$$

Sluneční zatmění se budou opakovat tedy přesně po 223 synodických měsících, což odpovídá období 6585 dní 7 hodin 43 minut, v němž je 5 popř. 4 přestupných roků. Přepočteno na roky tedy máme interval 18 roků 10(11) dnů 7 hodin 43 minut, tuto periodu nazýváme saros. Každé dvě zatmění oddělené touto periodou mají podobný geometrický průběh. Měsíc se totiž nachází ve stejném uzlu, v téměř stejné vzdálenosti od Země a je podobný čas v roce (o 10(11) dní více). Saros netrvá celý počet dní, je delší o přibližně 1/3 dne. To způsobuje, že následující zatmění není viditelné na místě o stejné zeměpisné délce, ale o asi 120° západněji, jelikož se o tento úhel Země otočí za přebývající dobu 1/3 dne. Na stejné zeměpisné délce je zatmění pozorovatelné za tři periody saros ($3 \times 120^\circ = 360^\circ$).

Zatmění oddělená sarosem se zahrnují do jedné skupiny, tzv. série. Existuje celá řada sérií probíhajících paralelně. Tyto série netrvají věčně. Je to způsobeno malými rozdíly mezi násobky tří výše zmíněných měsíců. Uvažujeme-li Měsíc v sestupném uzlu, začíná série v oblasti jižního pólu částečným zatměním. Za jeden saros následuje další částečné zatmění, ale je posunutě severněji. Po několika opakováních se objeví první úplné zatmění, které dále postupuje severněji vždy o průměrnou hodnotu 300 km za jeden saros. Úplná zatmění postupně projdou až k oblasti severního pólu a zmizí. Následuje několik zatmění částečných a celá série skončí. Pro výstupný uzel je to analogické, zatmění jen začínají v oblasti severního pólu a směřují na jih. Celá jedna série trvá od 1226 let po maximálně 1550 let. Proměnost trvání je dána eliptickými drahami Země a Měsíce. Během roku nastává dvě až pět slunečních zatmění a v každém okamžiku probíhá přibližně 40 různých sérií, pouze některé však produkují úplná zatmění. Když nějaká série skončí, jiná opět začíná.

Díky neuvěřitelné shodě okolností, a to že poměr rovníkových průměrů Slunce a Měsíce je velmi blízký poměru jejich vzdáleností od Země, se zdánlivé průměry Slunce a Měsíce na obloze jeví přibližně pod stejným úhlem asi 30". Podle toho, který poměr je zrovna větší, nastává úplné nebo prstencové zatmění. Vzdálenost Měsíce od Země se velmi pomalu zvětšuje, proto před mnoha miliony lety docházelo, kromě částečných, jen k úplným zatměním a v daleké budoucnosti nás čekají zatmění jen prstencová.

Při úplném zatmění Slunce je vždy víceméně přesně zakryt celý sluneční ko-

touč. Viditelné jsou pouze vnější části sluneční atmosféry, chromosféra a koróna. Po dlouhou dobu byla úplná zatmění jedinou příležitostí k pozorování chromosféry a protuberací a až do třicátých let 20. století bylo možno pozorovat korónu pouze po několik málo minut totality.

2.2 Einsteinova odchylnka světla

Z obecné teorie relativity vyplývá odchylnka světelného paprsku vlivem gravitačního působení tělesa, v jehož blízkosti paprsek prochází. Einsteinem předpověděná odchylnka světla pro paprsek procházející těsně u povrchu Slunce je $\delta_{teor} = 1,75''$; ve vzdálenosti r od slunečního okraje je její hodnota

$$\delta = 1,75'' \frac{r}{R_{\odot}}, \quad (2.1)$$

kde R_{\odot} je poloměr Slunce. Zatmění Slunce umožnilo poprvé ověřit tento teoretický model, tedy existenci úchylky světla. Při zatmění se vyfotí hvězdy v blízkém okolí Slunce. Stejně místo se pak fotí bez přítomnosti Slunce a oba snímky se porovnají.

Poprvé byla úchylka světla měřena při úplném zatmění 29. května 1919, bližší podrobnosti udává J. Grygar v článku [6]. Už v roce 1917 rozhodl britský Stálý výbor pro sluneční zatmění o uspořádání dvou výprav do pásu totality. Jako stanoviště byla vybrána místa Sobral v Brazílii a Princův ostrov. Toto zatmění bylo pro měření odchylnky mimořádně vhodné, poněvadž se při něm Slunce nacházelo v souhvězdí Býka poblíž hvězdokupy Hyády a bylo tedy obklopeno několika jasnými hvězdami. Pořízené fotografické desky vyhodnotili C. Davidson, Furner a A.S. Eddington. Výsledné hodnoty přepočítali na okraj slunečního disku a získali pro Sobral odchylnku δ_S a Princův ostrov δ_P :

$$\begin{aligned} \delta_S &= (1,98'' \pm 0,12'') \\ \delta_P &= (1,61'' \pm 0,30'') \end{aligned}$$

Výsledky velmi dobře korespondovaly s Einsteinovou obecnou teorií relativity. V nedávné době dokázala družice HIPPARCOS změřit Einsteinovu odchylnku v polohách hvězd, jež byly v době pozorování ve značné vzdálenosti od Slunce.

Kapitola 3

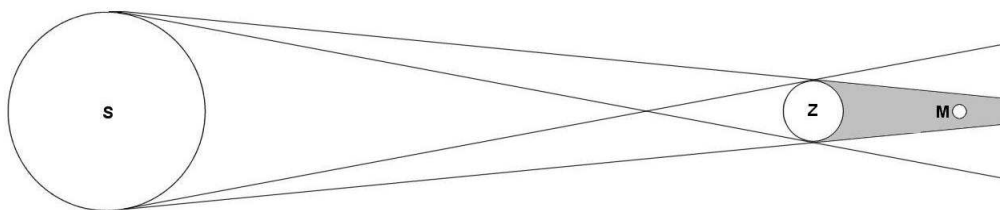
Zatmění Měsíce

Tento jev umožnil již před pátým stoletím našeho letopočtu Řekům zjistit, že má Země kulový tvar a pohybuje se volně v prostoru. Všimli si totiž kruhového tvaru zemského stínu, který se na Měsíc promítá. Ve třetím století před naším letopočtem odhadl Aristarch ze Samu relativně přesně velikost Měsíce a jeho vzdálenost od Země. Do 19. století sloužily zatmění převážně ke studiu pohybu Měsíce, s využitím historických záznamů i daleko do minulosti. Později se začala zkoumala velikost, tvar a hustota zemského stínu. S hustotou stínu úzce souviselo atmosférické znečištění (způsobené například sopečnou a meteorickou činností), které se dalo takto studovat. Této problematice se věnoval také český astronom Link, např [8].

3.1 Teorie

Měsíční zatmění vznikají tím způsobem, že Měsíc vstoupí do stínu, který vrhá do prostoru Země osvětlená Sluncem jak dokumentuje Obrázek 3.1. Podle okolností může nastat zatmění úplné, vstoupí-li Měsíc celým svým kotoučem do stínu, nebo zatmění částečné, prochází-li Měsíc částí úplného stínu. Principiálně dochází ještě k zatmění polostínovému, které je však díky jen nepatrnému zeslabení záře Měsíce vizuálně nepozorovatelné.

Měsíční zatmění může nastat jen za úplňku, tj. je-li Měsíc v opozici se Sluncem. Zatmění Měsíce probíhá na rozdíl od zatmění Slunce pro všechna pozorovací místa na povrchu zemského současně, ale ovšem jen za předpokladu, že se Měsíc nachází nad obzorem, je zatmění viditelné. Proto se zdá, že k zatmění Měsíce dochází častěji než Slunce, místně je to pravda, ale globálně je jich přibližně stejně, počítáme-li i polostínová. Zatmění měsíční se stejně jako zatmění sluneční opakují v periodě saros: 18 roků 10(11) dní 7 hodin 43 minut. Starověké civilizace určily periodu saros z pozorování zatmění Měsíce, jež nastávalo častěji než



Obrázek 3.1: Geometrická situace při zatmění Měsíce M, střed Země je označen Z a Slunce S

sluneční. Saros pak aplikovaly i na zatmění Slunce.

Stejně jako sluneční zatmění, i měsíční se řadí do sérií s diferencí saros. Pokud je Měsíc v sestupném uzlu, postupuje při následujícím zatmění Měsíc vždy poněkud severněji zemským stínem, takže při začátku série nastává řada polostínových zatmění v jižní části stínu, pak následuje řada zatmění částečných a úplných, kdy Měsíc probíhá zhruba středem zemského stínu, následně mizí úplná a objevují se částečná a nakonec polostínová v severní části stínu. Pro Měsíc ve vzestupném uzlu pozorujeme pohyb od severní části stínu k jižní. Celý uvedený cyklus trvá různě dlouho v závislosti na sérii. Současně probíhající nejkratší série je dlouhá 1262,1 roku a obsahuje 71 zatmění, nejdelší trvá 1496,5 let a je možné pozorovat 84 zatmění. Jednotlivé série obsahují kolem deseti úplných zatmění a k roku 2006 jich probíhá 40 paralelně. Různá délka trvání je opět způsobena eliptickými orbitami Země a Měsíce. Za jedno období saros nastane asi čtyřicet zatmění, z nichž je průměrně 15 polostínových, 14 částečných a 11 úplných [5]. V jednom roce můžeme, nepočítaje polostínová, spatřit nejvýše tři měsíční zatmění, v některých letech nenastává zatmění Měsíce vůbec. Přidáme-li zatmění polostínová, pozorujeme jich pak ročně dvě až pět.

Jelikož je dráha Měsíce v prostoru skloněna vzhledem ke dráze Země o úhel $5^{\circ}8'43''$, nenastává měsíční zatmění při každém úplňku, ale pouze v době, kdy je Měsíc v blízkosti výstupného nebo sestupného uzlu. Uzlová přímka měsíční dráhy neleží v prostoru nehybně, nýbrž se dosti rychle stáčí, a to s periodou 18,66 let. Směr otáčení uzlové přímky je opačný než pohyb Slunce v ekliptice. Tím je způsobeno, že měsíční zatmění nemohou nastávat přesně po půl roce, ale za dobu o něco kratší. Proto pozorujeme v některých letech i tři zatmění a během 18,66 let pokrývají zhruba rovnoměrně celý kalendářní rok.

Kapitola 4

Přechod planety přes sluneční disk

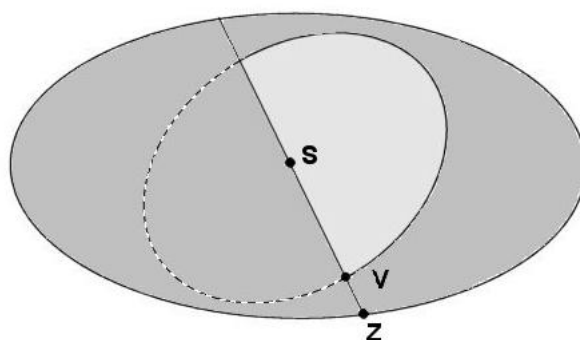
Při přechodu můžeme planetu pozorovat jako malý černý kotouček, který se pomalu pohybuje po slunečním disku. Planeta se musí tedy nacházet uvnitř spojnice Země-Slunce, to lze splnit pouze pro vnitřní planety Venuše a Merkur. Tyto astronomické události jsou relativně řídké, dochází k nim u Venuše průměrně dvakrát za jedno a čtvrt století a u Merkuru třináctkrát za století. Obě planety mají oběžnou dráhu nakloněnou k rovině ekliptiky. V době zákrytu se musí Země nacházet v místě, kde se orbita planety protíná s rovinou ekliptiky, na tzv. uzlové přímce (Obrázek 4.1).

4.1 Venuše

Trajektorie Venuše protíná v současné době ekliptiku každý rok na začátku června a prosince. Pokud se bude Venuše nacházet v této době mezi Sluncem a Zemí, dojde k přechodu. Jestliže dojde k přechodu, druhý obvykle následuje po osmi letech. Je to proto, že doby oběhu Venuše, jež je 224,701 dní, a Země (365,256 dní) mají společný násobek přibližně osm pozemských let, to odpovídá třinácti rokům Venušiným.

Alternativní způsob odhalení osmileté periody spočívá v nalezení doby, za jakou se obě planety na svých oběžných drahách opět setkají. Neznamená to však, že dojde k přechodu, jelikož se Venuše nemusí nacházet v uzlu. Označme tuto dobu T . Pro T platí:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_V} - \frac{1}{T_Z} \quad (4.1)$$



Obrázek 4.1: Rovina ekliptiky a dráha oběhu Venuše se protínají ve dvou místech, tzv. uzlech, aby došlo k přechodu, musí se planeta nacházet v příslušném uzlu.

$$T = \frac{T_V T_Z}{T_Z - T_V} \quad (4.2)$$

Po dosazení příslušných hodnot máme $T = 583,924$ dní. Nyní už jen zbývá najít celistvý násobek oběžných dob T_Z a T . Je snadné se přesvědčit, že odpovídá osmi pozemským rokům a hodnotě $5 \times T$. S touto pětkou také souvisí zdánlivý magický pentagram, který Venuše při své pouti vytváří.

Po osmi letech se tedy obě planety nachází na stejném místě vzhledem ke Slunci. Ve skutečnosti to není zcela přesné, po osmi letech dorazí Venuše na místo setkání o 22 hodin dříve. Ve většině případů dojde k přechodu, ale vyskytují se i případy, kdy Venuše těsně míjí kotouč Slunce (např. v letech 416, 659, 902, 1145, 1388). Při třetím osmiletém cyklu už nedochází k události. Další osmiletý cyklus následuje po 105,5 letech, dále po 121,5 letech a poté opět po 105,5 atd. Je to důsledek společných násobků dob oběhů Venuše a Země. Takže pro celý cyklus máme rekurentní vzorec $8+105,5+8+121,5$ let. Tento cyklus trvající 243 let je vhodný k uspořádání přechodů do sérií podobně jako u slunečních zatmění. Tyto série trvají i více než 5000 let a obsahují kolem dvaceti přechodů. Probíhá jich několik najednou, v roce 2006 máme čtyři. Série začíná přechodem v severní nebo jižní části slunečního disku podle druhu uzlu. Prosincové přechody nastávají v době, kdy se Venuše nachází ve výstupném uzlu a řadíme je do série začínající přechodem v severní části disku Slunce.

Tabulka 4.1 obsahuje jeden cyklus, který nechť začne rokem nula, druhý přechod následuje v roce 8, třetí roku $8+105,5=113,5$ a konečně čtvrtý po osmi letech roku 121,5. Nový cyklus začíná po dalších 121,5 letech v roce 243. Ve třetím sloupci nalezneme datování odpovídající Venuši s jejím rokem o délce 224,701 dní. Ve druhém a čtvrtém je spočteno, kolik pozemských dnů uplyne v době přechodu

Rok na Zemi	Počet dnů	Rok na Venuši	Počet dnů	Rozdíl
0	0	0	0	0
8	2922,048	13	2921,113	0,935
113,5	41456,556	184,5	41457,3345	-0,7785
121,5	44378,604	197,5	44378,4475	0,1565
243	88757,208	395	88756,895	0,313

Tabulka 4.1: Cyklus přechodů planety Venuše

od roku nula pro obě planety a v pátém rozdíl těchto dob.

Pozice uzlu oběžné dráhy Venuše vzhledem k Zemi se pomalu mění v čase. Před pěti tisíci lety docházelo k přechodu kolem 21. května a 19. listopadu, v současnosti je to kolem 7. června a 9. prosince. Celá perioda trvá přibližně osmdesát tisíc let.

4.2 Merkur

Oběžná doba Merkuru je vysoce excentrická, to způsobuje proměnou vzdálenost planety od Slunce v rozmezí 46 a 70 milionů km. Orbitální rychlost Merkuru v perihelu (59,0 km/s) má o více než 50 % větší hodnotu než v afelu (38,9 km/s). Rovina oběžné dráhy Merkuru svírá s ekliptikou úhel 7 stupňů. To vše ovlivňuje charakteristiku a frekvenci přechodů Merkuru přes sluneční disk. Země prochází uzly obou orbit v současnosti na počátku května a listopadu. Při květnovém přechodu je zdánlivý průměr Slunce a Merkuru 1902, respektive 12 úhlových vteřin. Merkur tedy představuje 1/158 rozměru Slunce. Během listopadového přechodu jsou zdánlivé průměry 1937, resp. 10 úhlových vteřin. Velikost Merkuru tedy odpovídá 1/194 velikosti Slunce. Při přechodu v listopadu se Merkur nachází blízko perihelu, v květnu naopak v afelu. Pravděpodobnost přechodu v květnu je téměř dvakrát menší než v listopadu, Merkur se totiž pohybuje pomaleji a snižuje se tak možnost setkání Země-Merkur-Slunce v jedné přímce. Listopadové přechody nastávají v intervalech 7, 13 nebo 33 let, zatímco v květnu v intervalech 13 nebo 33 let. Přechody mezi květnovými a listopadovými termíny zprostředkovávají intervaly 3,5 a 9,5 let. Merkur nemá jednoduchý cyklus přechodů jako Venuše. Kratší periody jsou důsledkem několika vyšších násobků mezi oběžnými dobami Merkuru a Země. Třináctiletá perioda má speciální význam, protože odpovídá téměř 54 oběhům Merkura kolem Slunce (rozdíl činí 2,01 dne). Delší třicetitřiletá perioda, složená z dvou desetiletých a třináctileté, odpovídá 137 oběhům Merkura s rozdílem -1,67 dne. Dáme-li tyto dvě periody dohromady, získáme opakování přechodu po 46 letech, které odpovídá 191 oběhům Merkuru kolem Slunce s odchylkou jen 0,34 dne. Přechody se stejně jako zatmění řadí do sérií, tentokrát s

diferencí 46 let. Série probíhající v květnu jsou kratší než listopadové, trvají 414 let a obsahují 10 přechodů. Listopadové mají 19 přechodů o délce trvání 828 let. Paralelně probíhá šest sérií, z nichž čtyři jsou listopadové. Série se dají rozdělit na dva typy podle druhu uzlu, tedy je-li Merkur ve vzestupném či sestupném uzlu své dráhy. Série pak začíná přechodem v jižní (sestupný) nebo severní (vzestupný) části slunečního disku a končí na opačné straně.

4.3 Historie

Přechod planety přes sluneční disk byl poprvé pozorován roku 1631 francouzským astronomem Gassendim. Jednalo se o planetu Merkur. Přechod Venuše následoval pouhý měsíc poté. Gassendi ho však nemohl pozorovat, jelikož nebyl z Evropy viditelný. V roce 1639 se stali Jerimiah Horrocks a William Crabtree prvními svědky přechodu Venuše. V roce 1716 publikoval Edmond Halley článek, v němž popsal, jak může být pozorování přechodu planety přes sluneční disk, s využitím třetího Keplerova zákona, použito ke stanovení vzdálenosti Země-Slunce (=1AU). Mnoho expedic se vydalo v roce 1761 do celého světa, aby se z jejich naměřených dat určila astronomická jednotka v běžně používaných jednotkách, např. kilometrech. Další expedice následovaly o osm let později. Zpracováním dat z přechodů Venuše získali astronomové první dobrou hodnotu vzdálenosti Slunce od naší planety. V roce 1771 spočetl francouzský astronom Lalande z dat získaných při měření přechodů Venuše z let 1761 a 1769 velikost jedné astronomické jednotky:

$$1AU = (153 \pm 1)10^6 km.$$

Halley očekával přesnost mnohem větší, ta nebyla ale dosažena díky tzv. efektu černé kapky. Nastává při prvním a třetím kontaktu a je způsobený difrakcí. Mezi okrajem slunečního a Venušina disku se vytvoří černá stopa (Obrázek 4.2), která neumožňuje dostatečně přesné určení doby kontaktu.

V roce 1891 použil americký astronom Simon Newcomb stejná data, avšak lepší matematické metody zpracování a dostal přesnější hodnotu:

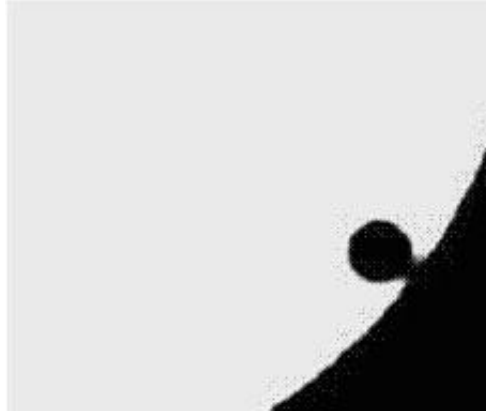
$$1AU = (149,59 \pm 0,31)10^6 km.$$

V druhé polovině 20. století se pomocí radarových měření vzdáleností určila astronomická jednotka mnohem přesněji, současná uznávaná hodnota pro střední vzdálenost středů Slunce a Země je:

$$1AU = (149597870,691 \pm 0,030)km.$$

4.4 Výpočet vzdálenosti Země-Slunce z pozorování přechodů Venuše přes sluneční disk

Jednoduchou, leč ne zcela přesnou, metodou výpočtu vzdálenosti jedné astronomické jednotky je metoda s pozorovateli na stejném poledníku, ale na značně



Obrázek 4.2: Efekt černé kapky [3]

odlišných zeměpisných šířkách. Měření navíc neovlivňuje efekt černé kapky. Pro oba pozorovatele se Venuše promítá na sluneční kotouč ve stejný okamžik na různá místa. Zakreslují-li oba pohyb Venuše během celého přechodu, získají dvě odlišné, navzájem rovnoběžné sečny slunečního disku. Jejich úhlovou vzdálenost označme $\Delta\beta$ (viz Obrázek 4.3).

Nyní vyjdeme z Obrázku 4.4. Máme zde definovanou rovinu středem Země Z, středem Slunce S a Venuší V. Na Zemi jsou pozice pozorovatelů označeny A, B, Venuše se jim na Slunci promítá v místech A', B', r_Z je vzdálenost Země-Slunce a r_V Slunce-Venuše, β_1 , β_2 , β_S a β_V značí úhly.

Jelikož mají trojúhelníky APV a BSP stejné úhly při vrcholu P, máme pro ostatní úhly rovnost

$$\beta_1 + \beta_V = \beta_2 + \beta_S. \quad (4.3)$$

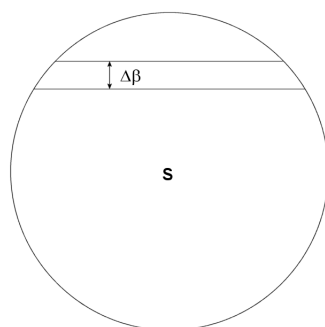
Uvážíme-li, že $\beta_2 - \beta_1 = \Delta\beta$ tedy úhlová vzdálenost míst A', B' pro pozorovatele na Zemi. Dostáváme tedy:

$$\Delta\beta = \beta_V - \beta_S = \beta_S \left(\frac{\beta_V}{\beta_S} - 1 \right). \quad (4.4)$$

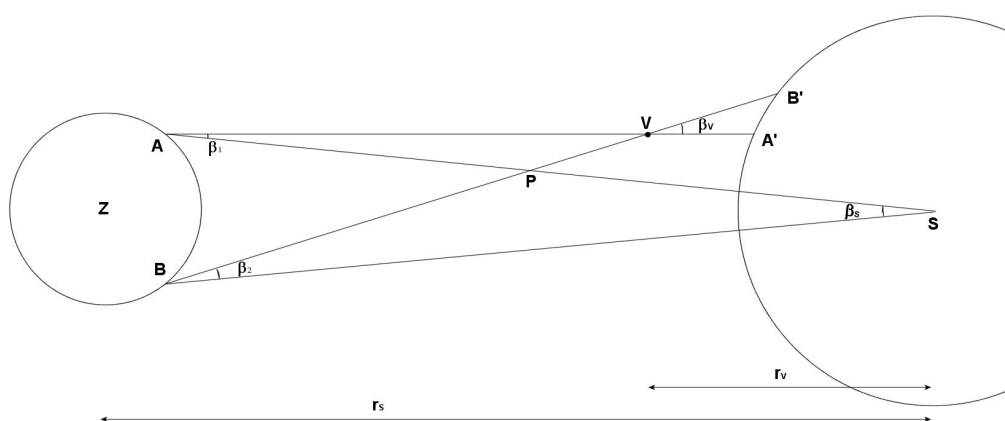
Paralaxu Venuše β_V můžeme vyjádřit jako $\beta_V = \frac{|AB|}{r_Z - r_V}$ a paralaxu Slunce β_S jako $\beta_S = \frac{|AB|}{r_Z}$. Oba tyto výrazy můžeme dosadit do podílu v (4.4):

$$\Delta\beta = \beta_S \left(\frac{r_Z}{r_Z - r_V} - 1 \right). \quad (4.5)$$

Sluneční paralaxa β_S se dá vyjádřit z (4.5):



Obrázek 4.3: Rovnoběžné sečny slunečního disku vzdálené $\Delta\beta$



Obrázek 4.4: Výpočet astronomické jednotky z přechodu Venuše pomocí metody s pozorovateli na stejném poledníku

$$\beta_S = \Delta\beta \left(\frac{r_Z}{r_V} - 1 \right). \quad (4.6)$$

Podíl $\frac{r_Z}{r_V}$ se určí z Keplerova zákona, zde však musíme předpokládat, že Země i Venuše obíhají po kruhové dráze, abychom mohli nahradit hlavní poloosy poloměry r_Z a r_V . Platí tedy:

$$\left(\frac{r_Z}{r_V} \right)^3 = \left(\frac{T_Z}{T_V} \right)^2, \quad (4.7)$$

kde $T_Z = 365,25$ dní a $T_V = 224,7$ dní jsou doby oběhu Země a Venuše kolem Slunce. Dosazením těchto hodnot do (4.7) získáme podíl $\frac{r_Z}{r_V}$ a posléze z (4.6) i β_S :

$$\beta_S = 0,38248\Delta\beta. \quad (4.8)$$

Konečně z definice paralaxy je vzdálenost Země od Slunce r_S rovna:

$$r_S = \frac{|AB|}{\beta_S}. \quad (4.9)$$

Vzdálenost AB se dá určit jednoduše ze znalosti zeměpisných šířek obou pozorovacích míst. Úhlová vzdálenost $\Delta\beta$ se získá z pozorování. Jelikož známe úhlový průměr Slunce viděný ze Země ($30''$), dokážeme již lehce určit přímo úhlovou vzdálenost dvou sečen z pořízených obrázků (jako např. Obrázek 4.3) prostou úměrou. Tato metoda je však díky malým vzdálenostem sečen značně nepřesná. Lepším způsobem určení $\Delta\beta$ je měření délek sečen a následné určení jejich vzdáleností.

Význam těchto úkazů po stránce vědecké v současné době již není tak velký jako byl v 18. a 19. století, kdy měla pozorování těchto úkazů sloužit k stanovení délky astronomické jednotky. Z pozorování přechodů obou planet z různých na Zemi značně vzdálených míst lze teoreticky stanovit relativně přesně geocentrickou paralaxu planety a z toho následně i paralaxu Slunce. Ukázalo se však, že všechna pozorování jsou zatížena značnou chybou, tzv. efektem černé kapky (v angl. black drop effect, Obrázek 4.2), kdy se kotouček planety při prvním a třetím kontaktu se Sluncem protáhne a vytvoří kapku.

Kapitola 5

Zákryty hvězd

Hvězda může být zakryta nejrůznějšími nebeskými tělesy, z historického hlediska byly nejdůležitější zákryty Měsícem. Při zákrytech se dají zjistit některé informace o prostředním tělese, například jeho poloha, tečný rozměr, přítomnost a hustota atmosféry a další. S rostoucí kvalitou přístrojů můžeme pozorovat zákryty i velmi slabých hvězd podobně slabými objekty, jako Pluto, Charon, měsíce Marsu a ostatních planet. V neposlední řadě je možné též pozorovat zákryty rádiových galaktických i extragalaktických zdrojů Měsícem. Jedná se o pulsary a kvazary. Pulsary se ještě v nedávné době používaly k zavedení inerciální soustavy vztahené vůči těmto objektům, jelikož mají narozdíl od hvězd minimální vlastní pohyb. Dnes se k tomu využívají některé kvasary, jež se nacházejí tak daleko, že je jejich vlastní pohyb neměřitelný a velmi se blíží bodovým zdrojům. Podle nich se dá velmi dobře do prostoru usadit pravoúhlá kartézská soustava souřadnic se středem v těžišti sluneční soustavy, která slouží k velmi přesným astrometrickým výpočtům. Tento souřadný systém se nazývá International Celestial Reference System (ICRS).

5.1 Zákryty hvězd Měsícem

Měsíc se na své pouti po noční obloze nepohybuje společně s hvězdami, nýbrž směrem k východu a větší rychlostí. Měsíc se přibližuje k hvězdě rychlostí 0,55 obloukové vteřiny za 1 vteřinu časovou. Tak může během svého pohybu zakrývat hvězdy. Dráha Měsíce je skloněna vůči ekliptice o úhel $5^{\circ}8'43''$, pohybuje se tedy v pásu o přibližné šířce přes 10° .

V tomto případě máme zdroj světla-hvězdu, v nekonečné vzdálenosti. Měsíc pro něj představuje překážku a vrhá do prostoru stín tvaru válce o průměru shodném s průměrem Měsíce, přičemž okraj stínu je závislý na topologii měsíčního okraje. Zákryt nastane, pokud se pozorovatel dostane do tohoto válce. Stín se

po povrchu Země pohybuje průměrnou rychlostí asi 1 km/s, u zenitu pomaleji, naopak blíže obzoru rychleji. Nejlépe patrný je zákryt v době krátce po novu, protože jednak Měsíc nepřesvětluje hvězdy a jednak dohání hvězdy svou dosud neosvětlenou částí. Takovýto zákryt jasnějších hvězd je pozorovatelný i neozbrojeným okem. Velmi řídkou událostí je tečný zákryt hvězdy. Ta se pohybuje těsně u okraje měsíčního disku a v závislosti na jeho topologii je či není zakrývána. Hvězda pak bliká a odhaluje nám nerovnosti (pohoří) na povrchu Měsíce.

Známe-li polohu hvězdy a Měsíce, můžeme ze zákrytu určit zeměpisnou délku pozorovacího místa. Dnes už však na to máme spolehlivější a přesnější metody. Známe-li naopak polohu pozorovatelné hvězdy, můžeme určit přesné souřadnice Měsíce. Tak mohly zákryty sloužit v 19. století ke zkoumání měsíčního pohybu. Se vznikem dostatečně přesné teorie pohybu Měsíce, dostalo pozorování zákrytů v první polovině 20. století nový význam, a to zkoumání nerovnoměrné rotace Země kolem své osy a následně vztah k měření času.

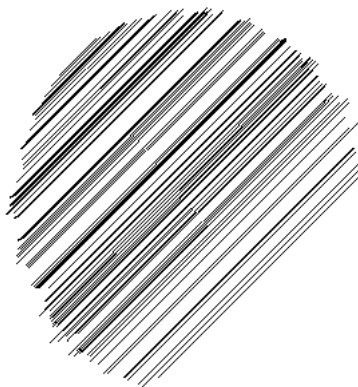
Když se počítaly dopředu polohy Měsíce (=efemeridy) a posléze se určily pozorováním zákrytů hvězd, zjistilo se, že se Měsíc nachází jinde než bylo spočteno. Výpočty byly totiž provedeny pro rovnoměrně plynoucí čas, tzv. efemeridový. Naproti tomu civilní čas se odvozoval od rotace Země, užíval se UT2 plynoucí nerovnoměrně. Oba časy se tedy rozcházely. Zákryty pak sloužily k měření rozdílu mezi nimi. Navíc užitím dřívějších pozorování se dal tento rozdíl dopočítat i do minulosti a dodefinovat tak umělý efemeridový čas. Zmíněná metoda určování poloh Měsíce má omezenou přesnost danou nerovnoměrným okrajem měsíčního disku, je zhruba 50 metrů. Dnes již máme jiné metody sledování času. Významnou organizací je IERS (International Earth Rotation Service).

S rostoucí kvalitou astronomických přístrojů získaly zákryty hvězd nový význam. Fotometricky se dají zkoumat samotné hvězdy. Z naměřených světelných křivek se dalo v určitých případech ukázat na vícečetnost systému, typicky na zdánlivou podvojnost.

5.2 Zákryty hvězd planetami a planetkami

Zákryt hvězdy planetou je poměrně vzácná událost. Aby bylo rozumně viditelné, nesmí být hvězda vůči planetě příliš slabá. Typicky se pozorují zákryty Venuší, Marsem a Jupiterem. S lepší astronomickou technikou rostou i možnosti pozorování u slabších objektů. Zákryt může sloužit ke zkoumání vyšších vrstev atmosfér planet. Při vstupu do atmosféry je hvězda postupně zeslabována refrakcí v důsledku rozdílného indexu lomu v závislosti na výšce a rozptylem na různých molekulách.

Přechod planetky přes hvězdu je též relativně řídký jev. Pro amatérské astronomy má jistou přitažlivost, protože se dá z délky trvání zákrytu určit její



Obrázek 5.1: Určení okamžitého rozměru asteroidu Pallas mnoha pozorovateli měření zákrytu hvězdy 1 Vul, [10]

okamžitý tečný tvar v jednom místě. Pozorovatel na odlišném místě dokáže změřit tvar trochu jinde, a pokud máme dobrou hustotu pokrytí pozorovateli, je možné sestavit profil planetky jako na Obrázku 5.1, který odpovídá skutečnému měření zákrytu hvězdy 1 Vul v roce 1983 asteroidem Pallas.

Současná technika dovoluje již měření zákrytu hvězdy planetkou odhalit například podvojnost těchto těles.

5.3 Zákryt hvězdy Charonem

V noci z 10. na 11. června 2005 došlo k poměrně vzácné astronomické události. Charon, největší měsíc Pluta, zakryl hvězdu. Celý zákryt trval pouze jednu minutu a byl pozorován astronomy z MIT and Williams College. Tato skupina pak následovně určila rozměr Charona s velkou přesností a stanovila horní hodnotu hustoty jeho atmosféry. Pro jeho poloměr udávají hodnotu 606 km s chybou 8 km, jež je závislá na místním reliéfu a možném nesférickém tvaru měsíce. O atmosféře tvrdí, že musí mít více jak milionkrát menší hustotu než zemská [11]. Dále využili měření hmotnosti měsíce pomocí HST a určili jeho hustotu rovnu 1/3 hustoty Země, což odpovídá předchozím předpokladům o směsi kamení a ledu.

Kapitola 6

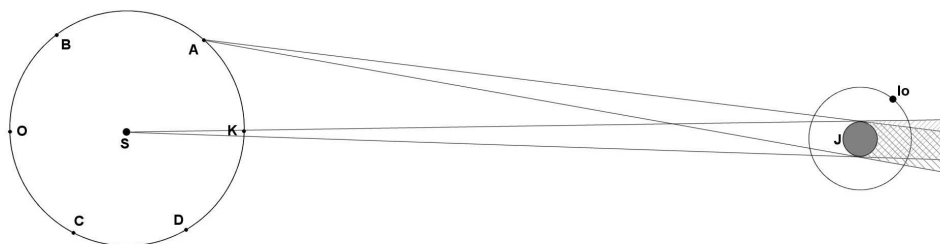
Úkazy v soustavách měsíců planet

Dochází k několika možným jevům:

- Zatmění měsíce, který vstupuje do stínu vrhaného planetou
- Zákryty měsíců kotoučem planety
- Přechody měsíců přes disk planety
- Přechody stínů satelitů po kotouči planety, to odpovídá zatmění Slunce Měsícem

Zmíněné jevy jsou drobnými modifikacemi již dříve uvedených. Z historického hlediska je nejvýznamnějším úkazem zatmění měsíců, zvláště u Jupitera. Dříve se z pozorování zatmění měsíců Jupitera určovala zeměpisná délka, obzvláště na moři. Námořníci si s sebou vozili hodiny se světovým časem nebo se známým rozdílem od něho. Měření zatmění provedli pro tento čas, a jelikož se v ročenkách uváděly časové okamžiky začátků a konců zatmění ve světovém čase pro místa o různých zeměpisných délkách, dala se tato délka jednoduše vyhledat.

Z pozorování zatmění měsíčku Io se podařilo poprvé určit rychlost světla. Olaf Römer si všiml, že se pozorované začátky a konce zatmění měsíčku opožďují proti vypočteným hodnotám, když se Země na své dráze kolem Slunce od Jupitera vzdaluje, a naopak předcházejí, když se k němu blíží. Když je Země nejdále od Jupitera, nastávají zatmění asi o 22 minut později, než když je vzdálenost obou planet nejmenší. Tak bylo již v roce 1676 možné poměrně přesně určit rychlost světla. Sám Römer ve svém článku [9] publikovaném roku 1676 neudal hodnotu pro rychlost světla, neměl totiž spolehlivou velikost astronomické jednotky. Kdyby použil jemu dostupná data, získal by pro rychlost světla c hodnotu: $c = 135000$



Obrázek 6.1: Měsíc Io má konstantní periodu oběhu, zatmění nastávají s touto periodou. Země se ale pohybuje od či k Jupiteru a díky konečné rychlosti světla se pro pozorovatele na Zemi okamžiky zatmění mění. Z obrázku je také patrné, proč pozorujeme v bodě A jen konec zatmění.

km/s. Délku zpoždění zatmění mezi konjunkcí a opozicí Země (22 minut) určil dosti nepřesně, současná uznávaná hodnota délky zpoždění je 16 minut 40 sekund.

Na Obrázku 6.1 je zobrazena oběžná dráha Země, v jejímž ohnisku je Slunce a dále Jupiter se svým měsícem Io. Bod O značí místo, kdy je Země v opozici s Jupiterem a K naopak v konjunkci. Země, stejně jako Io, obíhá proti směru hodinových ručiček. Pokud se Země nachází v místě mezi opozicí a konjunkcí (např. A, B), je možné pozorovat pouze konec zatmění, jelikož začátek je ukryt za diskem Jupitera. Naopak pokud je Země mezi konjunkcí a opozicí (C, D), můžeme pozorovat jen začátky zatmění.

Uvažujme situaci, kdy se pozorovatel nachází v bodě A (viz Obrázek 6.1, označme x vzdálenost Země-Jupiter. V čase t nechť skončí zatmění měsíce Io. Předpokládáme-li konečnou rychlost světla c , zaznamenané konec zatmění v čase t_1 :

$$t_1 = t + \frac{x}{c} \quad (6.1)$$

Nyní se posuneme do bodu B, označme x' vzdálenost Země-Jupiter. Je-li T perioda oběhu měsíce Io ($T=1,769$ dne), dojde ke konci následujícího zatmění v čase $t + T$. Na Zemi ale naměříme čas t_2 :

$$t_2 = t + T + \frac{x'}{c} \quad (6.2)$$

Odečtením rovnice [6.1] od [6.2] dostaneme rozdíl obou naměřených časů:

$$t_2 - t_1 = T + \frac{x' - x}{c} \quad (6.3)$$

Jelikož $x' > x$, bude rozdíl časů konců zatmění větší než T , což odpovídá prodloužení. Tedy pohybujeme-li se z bodu A do bodu B a uvážíme-li konečnou rychlost světla c , musí se konce zatmění prodlužovat, protože se zvětšuje vzdálenost Země-Jupiter, zatímco doba oběhu měsíce Io je konstantní. Pokud je Země ve fázi, kdy se z místa C blíží do D, dochází ke zkracování začátků zatmění. Změříme-li, že v konjunkci nastává zatmění o $\Delta t = 16 \text{ min } 40 \text{ s}$ (současná uznávaná hodnota) později oproti opozici a známe-li vzdálenost d bodů O a K (=2 AU), můžeme určit podle vztahu $c = d/\Delta t$ rychlost světla. Dosazením dostáváme $c = 299200 \text{ km/s}$. Měření v opozici je však nemožné, jelikož se Jupiter ztrácí v záři Slunce, hodnotu však můžeme dobře interpolovat z okolních pozorování.

Zatměním satelitů Jupitera se dá také fotometricky zkoumat jeho nejsvrchnější atmosféra. Při vstupu do stínu je totiž měsíc postupně zeslaben.

Zatmění nelze pozorovat u všech planet s vlastními měsíci, v mnoha případech to jde jen po omezenou dobu v roce. Příčiny lze hledat ve sklonech oběžných drah měsíců a v jejich vzdálenosti od mateřské planety. Navíc jde události u malých měsíců a vzdálených planet pozorovat pouze obřími teleskopy, a proto se musí amatérský pozorovatel s běžným dalekohledem spokojit jen s většími měsíci nejbližších planet, jako Jupiter a Saturn, popřípadě Mars. Po celý rok lze pozorovat zatmění u měsíců Jupitera (Io, Europa, Ganymed). Satelity Marsu, Saturnu, Neptunu a Uranu mají značné sklony k drahám svých planet, a tak můžeme pozorovat zatmění pouze ve dvou obdobích během jednoho oběhu planety kolem Slunce.

Kapitola 7

Závěr

Když si uvědomíme nesmírnou velikost vesmíru vůči rozměrům rozličných objektů od planet přes měsíce až k hvězdám, je až spodivem, že vůbec může dojít k seřazení tří vesmírných těles do jedné přímky. Naštěstí jsou tyto události relativně časté a astronomie za to může být velice vděčná. V textu diskutované jevy sehrály nezapustitelnou úlohu v rozvoji moderní astronomie a astrometrie a některé nacházejí uplatnění i v současné době, jak je vidět například u měření zákrytu hvězdy Charonem. Vyzdvihnul bych především první určení rychlosti světla ze zatmění měsíčku Io Jupiterem, měření astronomické jednotky z přechodu Venuše přes sluneční disk, studování pohybu Měsíce pozorováním zákrytů hvězd a prokázání Einsteinovy odchylky světla při zatměních Slunce. Většina těchto jevů sice již ztratila svůj vědecký význam, ale pro astronomy amatéry mají stále svou přitažlivost. K jejich sledování není většinou potřeba kvalitní a drahá pozorovací technika a tak jsou přístupné defakto každému zájemci o astronomii. Velmi oblíbenou záležitostí je masové cestování za úplnými zatměními Slunce, a to i pro laickou veřejnost, která chce jen zažít okamžik, kdy se ze dne stává na několik málo minut noc. Přitažlivé jsou i zákryty hvězd planetkami, kdy se z mnoha individuálních pozorování určuje okamžitý tvar asteroidu.

Předpovídání jednotlivých událostí se již dnes samozřejmě nedělá přes počítání společných násobků různých dob oběhů, ale výhradně numericky s využitím počítačů. V současnosti existují přesné katalogy, například zatmění Slunce, jež pokrývají dobu několika tisíciletí včetně těch budoucích, jako [5]. Nicméně tyto historické metody jsou velmi názorné a slouží k hlubšímu pochopení celé problematiky.

Literatura

- [1] Astronomy On-Line: *Romer and the Velocity of Light*, [HTTP://WWW.ESO.ORG/OUTREACH/SPEC-PROG/AOL/MARKET/EXPERIMENTS](http://www.eso.org/outreach/specprog/aol/market/experiments)
- [2] Bouška J., Vanýsek V.: *Zatmění a zákryty nebeských těles*, Nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 1963.
- [3] Bueter C.(2004): *The black drop effect*, [HTTP://WWW.TRANSITOFVENUS.ORG/BLACKDROP.HTM](http://www.transitofvenus.org/blackdrop.htm)
- [4] ESO Education & Public Relations Department: [HTTP://WWW.VT-2004.ORG](http://www.vt-2004.org)
- [5] Espenak F.: [HTTP://SUNEARTH.GSFC.NASA.GOV/ECLIPSE/ECLIPSE.HTML](http://sunearth.gsfc.nasa.gov/eclipse/eclipse.html)
- [6] Grygar J.: *Zatmění Slunce v květnu 1919 a relativita*, *Vesmír* 78, 387, 1999/7.
- [7] Halley E.: *A New Method of Determining the Parallax of the Sun, or His Distance from the Earth*, *Philosophical Transactions* Vol. XXIX (1716), Sec. R. S., N0 348, p. 454.
- [8] Link F.: *Eclipse Phenomena in Astronomy*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1969.
- [9] Romer O.: *Démonstration touchant le mouvement de la lumie're trouvé par M. Roemer de l'Académie des sciences*, *Journal des savans*, December 7, 1676.
- [10] Scheirich P.: *Zákryty hvězd planetkami*, *Bílý trpaslík*, č. 105.
- [11] Tholen D.J.: *Reference Planetary science: The ferryman casts his shadow p24*, *Nature*, June 5 2006.