



Pedagogická  
fakulta  
Faculty  
of Education

Jihočeská univerzita  
v Českých Budějovicích  
University of South Bohemia  
in České Budějovice

---

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta

Katedra aplikované fyziky a techniky

Diplomová práce

# **Metody měření ve vesmíru**

Vypracoval: Bc. Jan Kučera

Vedoucí práce: Doc. RNDr. Josef Blažek, CSc.

České Budějovice

2017

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury. Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě - v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Pedagogickou fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 28. dubna 2017

.....

Jméno a příjmení

**Název:** Metody měření ve vesmíru  
**Autor:** Bc. Jan Kučera  
**Katedra:** Katedra aplikované fyziky a techniky  
**Vedoucí diplomové práce:** Doc. RNDr. Josef Blažek, CSc.

**Anotace:** Práce se zabývá metodami měření vzdáleností ve vesmíru. První část pojednává o vývoji představ o uspořádání a rozměrech vesmíru od starověku po 20. století. Mimo jiné je detailně popsán Aristarchův heliocentrický model sluneční soustavy, včetně jeho kvantitativních odhadů vzdáleností a rozměrů Měsíce a Slunce. Podrobně jsou popsány i geometrické modely Hipparcha a Ptolemaia. Též značná pozornost je věnována vzniku heliocentrické teorie Mikuláše Koperníka. Současnými metodami měření vesmírných vzdáleností se zabývá druhá část. Postupuje se systematicky v pořadí od vzdáleností ve sluneční soustavě přes vzdálenosti hvězd až po největší vzdálenosti galaxií a kvasarů. V nutné míře jsou probírány i příslušné fyzikální principy, na nichž je měření vzdálenosti založeno. Součástí práce je rozsáhlá obrazová příloha s doprovodným textovým komentářem.

**Klíčová slova:** dějiny astronomie, geocentrická soustava, heliocentrická soustava, deferent, epicykl, astronomické jednotky vzdálenosti, paralaxa, žebřík vzdáleností v astronomii

**Title:** Methods of measuring in the Universe  
**Author:** Bc. Jan Kučera  
**Department:** Department of Applied Physics and Technics  
**Supervisor:** Doc. RNDr. Josef Blažek, CSc.

**Abstract:** The work deals with distance measuring in space. The first part is about evolution of space arrangement and dimension imaginations from ancient times until the 20th century. Also Aristarchos' heliocentric model of the solar system is described in detail, including his quantitative estimates of the Moon and Sun distances and dimensions. Hipparchos' and Ptolemaios' geometric models are described in detail too. Great attention is given to a genesis of heliocentric theory of Nicolaus Copernicus. The second part deals with contemporary methods of distance measuring. The work proceeds systematically from distances in the solar system to distances between stars as far as to distances between galaxies and quasars. It was necessary to write also about physical principles because distance measuring is based on them. The part of the work is a large pictorial supplement with text comments.

**Key words:** history of astronomy, geocentric model, heliocentric model, deferent, epicycle, astronomical units of length, parallax, cosmic distance ladder

## **Poděkování**

Na tomto místě bych především rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. RNDr. Josefu Blažkovi, CSc. za jeho cenné rady a odbornou pomoc při zpracování této práce.

# OBSAH

ÚVOD .....	8
<b>ČÁST PRVNÍ: HISTORICKÝ VÝVOJ POZNÁVÁNÍ VESMÍRU .....</b>	<b>11</b>
Předmluva k první části diplomové práce .....	12
<b>1 PŘEDSTAVY O VESMÍRU V PŘEDANTICKÉM OBDOBÍ .....</b>	<b>13</b>
1.1 Astronomie ve starověku .....	13
<b>2 ASTRONOMIE V ANTICKÉM ŘECKU .....</b>	<b>18</b>
2.1 Astronomie od Thaléta po Aristotela .....	18
2.1.1 Thalés z Milétu .....	18
2.1.2 Pythagoras ze Samu .....	19
2.1.3 Filolaos z Krotónu .....	19
2.1.4 Herakleidés z Pontu .....	20
2.1.5 Platon z Atén a jeho žák Eudoxos z Knidu .....	21
2.1.6 Aristoteles ze Stageiry .....	22
2.2 Astronomie od Aristarcha po Klaudia Ptolemaia .....	23
2.2.1 Aristarchos ze Samu .....	23
2.2.2 Archimédes ze Syrakus .....	31
2.2.3 Eratosthenés z Kyrény .....	33
2.2.4 Hipparchos z Nikaie .....	36
2.2.5 Klaudios Ptolemaios .....	43
<b>3 ASTRONOMIE VE STŘEDOVĚKU A RENESANCI .....</b>	<b>56</b>
3.1 Georg von Peurbach a Johannes Müller-Regiomontanus .....	57
3.2 Mikuláš Koperník .....	59
3.3 Tycho Brahe a Johannes Kepler .....	74
3.4 Galileo Galilei .....	85
3.5 Astronomie na konci renesančního období .....	91
<b>4 ASTRONOMIE 18. AŽ 20. STOLETÍ .....</b>	<b>92</b>
4.1 Významné okamžiky v astronomii 18. a 19. století .....	93
4.2 Významné okamžiky v astronomii na počátku 20. století .....	94

<b>ČÁST DRUHÁ: METODY MĚŘENÍ VZDÁLENOSTÍ VE VESMÍRU</b>	
<b>A JEJICH FYZIKÁLNÍ PODSTATA</b> .....	97
Předmluva k druhé části diplomové práce .....	98
<b>5 CHARAKTERISTICKÉ VZDÁLENOSTI VE VESMÍRU A JEJICH JEDNOTKY</b> .....	100
5.1 Astronomická jednotka .....	100
5.2 Světelný rok .....	102
5.3 Parsek .....	103
5.4 Paralaxa .....	105
5.4.1 Denní paralaxa .....	107
5.4.2 Rovníková paralaxa .....	108
5.4.3 Roční paralaxa .....	109
5.4.4 Fotometrická paralaxa .....	110
<b>6 METODY MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI VE SLUNEČNÍ SOUSTAVĚ</b> .....	112
6.1 Vzdálenost Země – Měsíc .....	112
6.1.1 Počátky radarové astronomie .....	112
6.1.2 Koutové odražeče na Měsíci .....	114
6.2 Vzdálenost Země – Slunce .....	119
6.2.1 Zpřesňování astronomické jednotky .....	119
6.3 Planety sluneční soustavy a jejich vzdálenosti .....	127
<b>7 SPEKTROSKOPICKÉ CHARAKTERISTIKY HVĚZD</b> .....	130
7.1 Zářivý výkon a jasnost hvězd .....	130
7.2 Hvězdná velikost .....	133
7.2.1 Pozorovaná (zdánlivá) hvězdná velikost .....	133
7.2.2 Absolutní (skutečná) hvězdná velikost .....	135
7.3 Hertzsprungův – Russellův diagram .....	137
<b>8 HVĚZDY A JEJICH VZDÁLENOSTI</b> .....	142
8.1 Měření vzdálenosti hvězd pomocí trigonometrické paralaxy .....	142
8.2 Měření vzdálenosti hvězd pomocí HR diagramu .....	147
8.2.1 Metoda spektrální paralaxy .....	149

<b>9 GALAXIE A JEJICH VZDÁLENOSTI</b> .....	150
9.1 Měření vzdálenosti blízkých galaxií pomocí cefeid .....	151
9.1.1 Fyzikální podstata cefeid a jejich základní dělení .....	151
9.1.2 Historie poznávání cefeid a metody určování vzdálenosti .....	152
9.1.3 Galaxie M100 a její názorné určení vzdálenosti .....	156
9.2 Měření vzdálenosti galaxií pomocí supernov typu Ia .....	159
9.3 Měření vzdálenosti galaxií pomocí rudého posuvu spektrálních čar .....	162
9.3.1 Kvasary .....	164
9.3.2 První známý kvasar a jeho přibližné určení vzdálenosti .....	165
<b>10 KOSMOLOGICKÝ ŽEBŘÍK</b> .....	166
<b>ZÁVĚR</b> .....	168
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	170
<b>PŘÍLOHA</b>	
<b>Astronomie v obrazech</b> .....	174

## ÚVOD

Vesmír neboli kosmos je ze současného vědeckého pohledu souhrnné označení pro veškerou hmotu, energii a časoprostor. Z představ široké veřejnosti vesmír představuje především objekty, nacházející se ve sluneční soustavě a mimo ni. Konkrétně máme na mysli planety se svými měsíci, planetky, komety, meteoroidy, meziplanetární prach a částice slunečního větru, dále pak hvězdy, galaxie, mezigalaktický prostor a další. Avšak podle některých vědeckých teorií či hypotéz je tento „náš“ pozorovatelný vesmír součástí systému většího počtu vesmírů, zvaného multivesmír (mnohovesmír). Přitom v těchto dalších vesmírech mohou platit zcela odlišné fyzikální zákony než ty, které platí pro ten náš.

Jedním z hlavních zájmů vědecké činnosti je právě intenzivní studium a hledání poznatků o skutečném vzniku a vývoji vesmíru. V současnosti mezi vědecké obory, zabývající se zkoumáním vesmíru jako celku, hlavně patří astronomie, astrofyzika, kosmologie. Ty však ve svých metodách měření využívají znalosti z fyzikálních oborů, jako jsou například klasická a relativistická mechanika, elektromagnetismus, optika, termodynamika a statistická fyzika, kvantová mechanika nebo jaderná fyzika či fyzika elementárních částic. V neposlední řadě k získávání poznatků o vesmírném prostoru přispívají i obory jako je například chemie, geologie či astrobiologie. O úspěšných výsledcích a významných objevech z oblasti výzkumu vesmíru nás pak prostřednictvím médií včas informují přední světové vědecké organizace a agentury (např. NASA, ESA, CERN), zabývající se výzkumem vesmíru. Abychom však lépe porozuměli těmto informacím, je třeba mít alespoň základní znalosti o astronomii, astrofyzice či kosmologii.

Se všeobecnými poznatky o vesmíru se žáci setkávají v různé míře již na základních i středních školách, a to převážně v rámci výuky fyziky. Jako učitel fyziky mohu ze své zkušenosti potvrdit, že o učivo, týkající se astronomie, astrofyziky či kosmologie, je mezi žáky velký zájem. Aktuálně fyziku vyučuji společně s dalšími odbornými předměty na VOŠ, SPŠ automobilní a technické v Českých Budějovicích. I když tematika astronomie je do předmětu fyzika v rámci ŠVP zařazena jen okrajově a s malou hodinovou dotací, je o ní mezi žáky značný zájem. Několik žáků se astronomii věnuje i rámci mimoškolních aktivit, např. navštěvováním astronomického kroužku. Bylo příjemné, že při společných diskuzích, týkajících se vědeckých hypotéz o vzniku sluneční soustavy i celého vesmíru, žáci k této tematice uváděli vlastní



poznatky, které se převážně dozvěděli z populárně naučných pořadů, kde vystupují známý popularizátoři vědy jako je například americký astrofyzik Neil deGrasse Tyson, americký teoretický fyzik Michio Kaku nebo český astronom a astrofyzik Jiří Grygar. Příznivé bylo i to, že většina studentů měla také zájem o získání poznatků a zodpovězení otázek, týkajících se historického vývoje poznávání vesmíru a metod, jakými se dnes zjišťují vzdálenosti kosmických objektů ve vesmíru.

Pozitivní přístup k astronomii ze strany žáků se pro mě stal motivačním impulzem pro vytvoření práce, která by byla zaměřena právě na problematiku určování vzdáleností ve vesmíru.

Hlavním cílem předložené diplomové práce je vytvoření podpůrného studijního textu k předmětu Astronomie, vyučovaném pro studenty pedagogických fakult se zaměřením na fyziku. Jelikož však poznatky k jednotlivým tématům jsou v práci uváděny srozumitelnou, nenáročnou a čtivou formou, bez větších nároků kladených na znalost složité matematiky či fyziky, může být použita i ve fyzikálním semináři na středních školách jako doplňkový text k získávání a rozšíření informací k danému tématu. Rovněž tak práce jistě poslouží jako zdroj informací pro čtenáře s hlubším zájmem o astronomii.

Po obsahové stránce je text práce rozdělen na dvě tematické části, které na sebe svým pojetím navazují. První část popisuje, jak se v proměnách staletí rozvíjely poznatky o struktuře a rozměrech vesmíru. S ohledem na téma diplomové práce je zde především kladen důraz na podrobnější popis geometrických modelů sluneční soustavy u řady významných osobností antické, středověké či novověké astronomie. Čtenář po přečtení této první části získá poznatky i o tom, jaké důmyslné metody, týkající se měření a určování rozměrů kosmických objektů včetně jejich vzdáleností, astronomové používali.

Současnými metodami měření vesmírných vzdáleností se zabývá druhá část. Postupuje se systematicky v pořadí od vzdáleností ve sluneční soustavě přes vzdálenosti hvězd až po největší vzdálenosti galaxií a kvasarů. Čtenář je zde v nutné míře seznámen i příslušnými fyzikálními principy, na nichž je měření vzdálenosti založeno.

Z hlediska názornosti je text v celé práci v dostatečné míře vhodně doplňován různými grafickými schémata, obrazovými prvky a tabulkami. Též pro názornou představu jsou uvedeny řešené fyzikální úlohy, týkající se především jednotlivých metod měření vzdálenosti ve vesmíru. Součástí práce je též rozsáhlá obrazová příloha

s doprovodným textovým komentářem. Na tu je čtenář v průběhu celé práce průběžně odkazován formou číslování obrázků, začínajících velkým písmenem P (např. obr. P01).

Hlavním zdrojem informací se pro tuto práci stala celá řada odborných článků, zaměřených jak na problematiku měření vzdáleností ve vesmíru, tak i na poznatky z dějin astronomie. Ty jsou v elektronické podobě dostupné na internetových stránkách zahraničních i tuzemských institucí zaměřených na vzdělávání a vědeckou činnost. V nemalé míře byly informace také čerpány z populárně naučných encyklopedií, učebnic fyziky a z knih obsahově zaměřených na poznatky o vesmíru. V neposlední řadě byly při psaní práce použity i některé zajímavé informace z televizních a rozhlasových pořadů o vesmíru, kde vystupují známí popularizátoři vědy (obr. P74).



## Předmluva k první části diplomové práce

Už jen pouhým okem letmý pohled na jasnou noční oblohu plnou více či méně zářících hvězd v každém z nás jistě vzbuzuje výrazný obdiv, který se například za pomoci již dnes cenově dostupného hvězdářského dalekohledu pro začínající astronomy jen znásobí. Vždyť v jeho okuláru máme možnost pozorovat impozantní vesmírné objekty, jako jsou například krátery na povrchu Měsíce, různá hvězdná seskupení nebo planetu Mars, když je v opozici se Sluncem atd. Již tyto nejsnáze pozorované objekty nás do jisté míry podněcují k zamyšlení, k fantazii, k představám o nekonečné velikosti, věčnosti a stálosti vesmíru. Ti z nás, co našli v astronomii zálibu, si u svých pozorování ověřují třeba i ty nejjednodušší informace o vesmíru: Obloha se otáčí, některé hvězdy opisují větší kružnice, jiné menší, a jedna z nich (tj. Polárka) se nepohybuje vůbec. Část hvězd zapadá, jiné vycházejí a některé jsou pozorovány celou noc ve všech ročních obdobích.

Avšak z vědeckého hlediska vesmír není tak jednoduchý, jak se nám na první pohled zdá. V rozlehlém kosmickém prostoru je kromě hvězd celá řada dalších objektů a nestálých chemickofyzikálních dějů. Probíhají v něm např. bouřlivé procesy změn, které provázejí zrození, vývoj a zánik hvězd. Současná astronomie má o vesmíru díky technickému pokroku nespočet cenných informací z pozorování a průzkumu jak kosmického prostoru ve sluneční soustavě, v naší galaxii, tak i kosmického prostoru, nacházejícího se v obrovských vesmírných vzdálenostech. Nelze však opomenout, že nemalá část těchto informací byla získána zásluhou celé generace významných astronomů, kteří vytvářeli pevné příčky poznání.

Právě první část diplomové práce je věnována poznatkům o tom, jak se s proudem času vyvíjely představy o struktuře a rozměrech vesmíru v dějinách lidské kultury. Přitom značná pozornost zde náleží především těm osobnostem, které svými činy výrazně ovlivnily dnešní znalosti, a to nejen na poli současné astronomie.

## 1 PŘEDSTAVY O VESMÍRU V PŘEDANTICKÉM OBDOBÍ

Astronomie jako vědecká disciplína má své kořeny v antickém Řecku, kde se v hlavách tehdejších myslitelů rodily první myšlenky o podobě vesmíru. Pro čtenáře bude jistě přínosné uvést některé pozoruhodné okamžiky z dějin předantické astronomie. Jednotlivé fragmenty, které se z této doby dochovaly, jsou i dnes pro nás do jisté míry velkou záhadou.

### 1.1 Astronomie ve starověku

Faktem je, že lidská touha po poznávání vesmíru formou pozorování hvězdné oblohy započala již na úsvitu lidstva. Neboť pravidelné každodenní střídání světla a tmy, právě tak jako stále se opakující roční doby, upoutávaly pozornost člověka již na samém počátku vývoje lidské civilizace. Důkazem toho jsou první ryté kameny, na nichž nacházíme náznaky hvězdných skupin, rovněž i skalní malby ze střední doby kamenné, připomínající obrysy některých souhvězdí (obr. P01) [1].

S dalším vývojem lidstva, kdy se z lovce stával spíše zemědělec, došlo k tomu, že zájem o astronomii se soustředil hlavně na oblast určování času. Nebyla to tedy astronomie v dnešním slova smyslu, nýbrž spíše pozorování Měsíce, Slunce a hvězd. Jako nejjednodušší způsob určování času se nabízí sledování Měsíce a střídání jeho fází, tedy doby od úplňku k úplňku. Tento cyklus trvá 29,5 dne, je však zaokrouhlován na 30 dní [2].

Jak bylo v minulém odstavci předesláno, zájem o časovou jednotku souvisí hlavně se zemědělstvím. Z hlediska zemědělství je důležitější roční cyklus než cyklus měsíční. A jelikož se zemědělství, tenkrát extenzivní, objevovalo v údolích velkých řek, musíme hledat počátky astronomie právě tam. Tedy okolo řek Nil, Eufrat a Tigris, v údolích řeky Gangy a Žluté řeky. V údolích řek Eufrat a Tigris se zrodila civilizace sumerská, po ní následovaly civilizace akkadská, asyrská a chaldejská. Z této doby známe jejich pozorovací věže a chrámy zvané *zikkuraty* (obr. P02) [2]. Největší rozkvět nastal v 7. – 6. století před Kristem. Chaldejští astronomové sledovali hlavně Měsíc, Slunce a hvězdy, později planety. Jejich měsíční rok, odvozený z pohybu Měsíce, trval 354 dnů, stejně jako v Číně. Délku tropického roku stanovili na 365 dnů. Rozdíly v počtu dnů měsíčního a slunečního roku řešili přidáním přestupných měsíců. Výsledky

jejich pozorování dodnes nacházíme zaznamenané klínovým písmem na hliněných tabulkách (obr. P03) [2; 3].

Počátky egyptské astronomie sahají již do 3. tisíciletí před Kristem. I ony jsou spojeny s rozvojem zemědělství, se zvláštním důrazem na cyklicky se opakující záplavy. Egyptská astronomie se prolíná s egyptskou astrologií a chronologií. Podle orientace staveb, hlavně pyramid, víme, že Egypťané znali světové strany, a to velmi přesně. Příchod životodárných záplav byl určován podle jejich posvátné hvězdy Síríus. Jejich rok měl 12 měsíců po 30 dnech. Na konci roku byl jejich běžný rok o 360 dnech doplněn 5 dny na 365 dnů. V Egyptě má původ metoda úhlového měření průměru Slunce. Na přelomu letopočtu splýnula egyptská kultura s řeckou, což se následně projevilo na řecké astronomii [2].

Izolovaně se vyvíjela astronomie čínská. Její počátky nalézáme též ve 3. tisíciletí před Kristem. Čínští astronomové se převážně věnovali pozorování komet, Slunce a jeho zatměním. Za zmínku stojí dochované záznamy přesného astronomického pozorování Slunce, které provedl kolem roku 1100 před Kristem čínský astronom Ču Kong [4]. Konkrétně pomocí *gnómonu* změřil sklon ekliptiky k rovníku. Gnómon coby jednoduchá astronomická pomůcka představoval tyč upevněnou v zemi ve svislé poloze. Z délky jejího stínu bylo možné určovat výšku Slunce nad obzorem (obr. 1-1). Pro následný výpočet výšky Slunce byl využíván jednoduchý vztah, jehož zápis pomocí dnešní matematické symboliky je

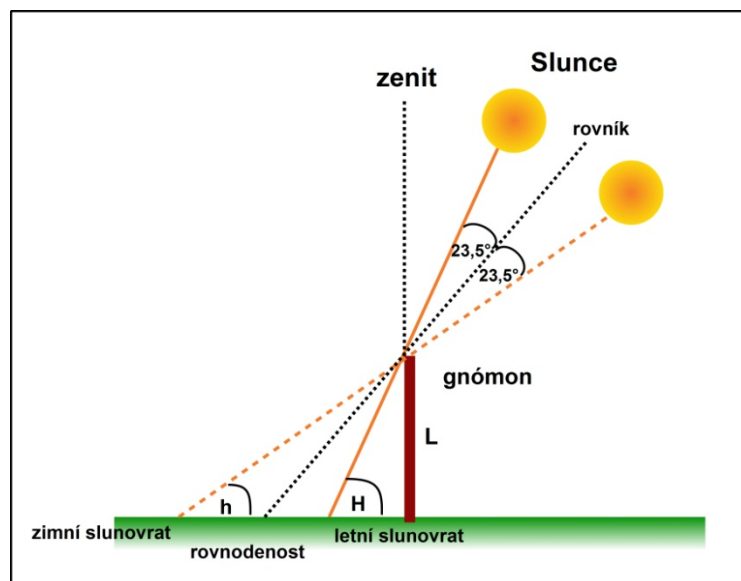
$$\operatorname{tg} h = \frac{L}{l}, \quad (1.1)$$

kde  $h$  je úhlová výška slunce nad horizontem,  $L$  výška gnómonu a  $l$  délka jeho stínu. Pomocí 2,43 m vysokého gnómonu byla takto stanovena délka stínu za letního a zimního slunovratu a určen sklon ekliptiky k rovníku údajně na hodnotu  $\varepsilon = 23,5^\circ$  s využitím vztahu

$$\varepsilon = \frac{H - h}{2}, \quad (1.2)$$

kde  $H$  je výška Slunce v poledne při letním slunovratu a  $h$  výška Slunce v poledne při zimním slunovratu (obr. 1-1) [2]. Čínští astronomové rovněž s pomocí gnómonu dokázali stanovit zeměpisnou šířku  $\varphi$  místa pozorování s využitím vztahu

$$90^\circ - \varphi = \frac{H + h}{2}. \quad (1.3)$$



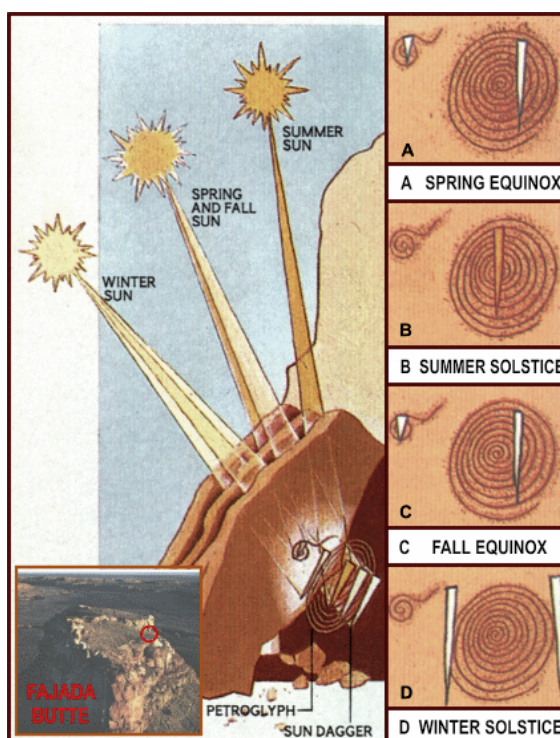
Obr. 1-1: Měření sklonu ekliptiky k rovníku pomocí gnómonu.

Díky skutečnosti, že pozorování vesmíru čínskými astronomy byla především záležitost státní, zachovala se nám prostřednictvím státních letopisů a kronik celá řada dalších pozoruhodných a přesných záznamů z astronomických pozorování. Z roku 1054 n. l. stojí za pozornost záznam výbuchu supernovy SN1054 v souhvězdí Býka, jejímž pozůstatkem je Krabí mlhovina (obr. P04) [2; 5].

Nástup astronomie v Evropě počal s táním ledovců, které umožnilo rozvoj zemědělství. V tomto příhodném období (okolo 2. tisíciletí před Kristem) se budovaly mohutné kamenné pozorovatelné, a to údajně kvůli potřebě sledování pohybu Měsíce a Slunce. Centrem budování pozorovatelů se stala území budoucích států Francie, Německa, a hlavně Anglie. Na území Anglie se nachází pravděpodobně nejznámější památka na starověkou astronomii, která se nazývá *Stonehenge* (obr. P05). Jedná se o komplex menhirů a kamenných kruhů, nacházející se na Salisburské pláni asi 13 km severně od městečka Salisbury v jižní Anglii. Podle archeohistorických výzkumů bylo zjištěno, že tato megalitická stavba představuje jakousi observatoř, ve které jsou pomocí kvádrů zachyceny směry západů a východů Slunce a Měsíce. Dále jsou zde zachyceny i jejich mezní hodnoty. U Slunce se jedná o slunovratové východy a západy, u Měsíce o nejsevernější a nejjižnější východy a západy. Takto byly nalezeny body obratu ročního cyklu. Na základě těchto zjištění se můžeme domnívat, že Stonehenge

umožňovala získávat údaje, z nichž byl uspořádán kalendář pro zemědělské potřeby. Observatoř Stonehenge začala být budována údajně již začátkem 4. tisíciletí před Kristem a v dalším období byla postupně zdokonalována [2; 5].

Počátky astronomie jsou známy i na americkém kontinentu. Pozorování objektů na obloze bylo předmětem zájmů tehdejších pozoruhodných civilizací. Za zmínku jistě stojí zaniklý národ Anasaziů z kañonu Chaco, který leží na jihozápadě USA ve státě Nové Mexiko. Zde na hoře Fajada Butte neboli Sluneční dýka Anasaziové zkonstruovali zařízení, jehož součástí jsou vytesané obrazce ve tvaru spirály. Když štěrbinou ve skále projdou paprsky Slunce při jeho východu ve dnech slunovratu či rovnodennosti, dopadnou jako dýka na střed jedné ze dvou spirál, vytesaných do kamene. Paprsek pak putuje po obraze a označuje tak jednotlivé dny po slunovratu (obr. 1-2). Prostřednictvím tohoto dokonalého zařízení lze dokonce přesně předpovídat nejen pohyb Slunce, ale také Měsíce [5; 6].



**Obr. 1-2:** Astronomické zařízení na hoře Fajda Butte v Novém Mexiku.

(Zdroj: <http://www.spirasolaris.ca/sbb4g1.html>)

Co se týká území střední Ameriky, asi každý slyšel o poměrně vyspělé kultuře Mayů, kteří žili na Yucatánském poloostrově. Její největší rozmach nastal ve 2. – 9. století. Prostřednictvím svých rozsáhlých observatoří (obr. P06) vytvářeli přesné roční kalendáře, které se skládaly ze dvou oddělených cyklů o délce 260 a 365 dní.



Mayové též dokázali vypočítat zatmění Slunce, což vyžadovalo jisté pokročilé znalosti [2].

Na území Jižní Ameriky byla rovněž na vyspělé úrovni civilizace Inků, pocházející z peruánských And. V jejich středisku na Machu Picchu se nacházel gnómon (obr. P07), přičemž podle polohy a délky jeho stínu byl určován denní čas i roční období [5].

## 2 ASTRONOMIE V ANTICKÉM ŘECKU

S rozvojem matematiky a geometrie nastává nová epocha astronomie, kterou můžeme nazvat vědeckou. Její počátky můžeme spojit s novými myšlenkami, které se objevily v 6. století před Kristem v Řecku. V této souvislosti je nutno poznamenat, že většina významných řeckých vědců žila mimo vlastní území Řecka. Hlavně žili v egyptské Alexandrii (obr. P08), kde jejich poznání v oblasti astronomie dosáhlo vrcholu. Zajímavý je i fakt, že poznání v oblasti astronomie se spojovalo s filozofií. Učenci se nesnažili astronomické jevy jen pozorovat, nýbrž je i vyložit v rámci určitého pojetí světa.

Vlastní a hlavně ucelené názory starověkých vědců a filozofů se nezachovaly, známe jen jejich útržky, které byly shrnuty do celků, sepsaných jejich pozdějšími následovníky.

### 2.1 Astronomie od Thaléta po Aristotela

Je známo, že kořeny řecké astronomie sahají do západního středomořského pobřeží Malé Asie, přesněji do starověkého města Milétu. Toto přístavní město bylo založeno helénským kmenem Ionů ve 2. tisíciletí před Kristem. Nacházelo se u ústí řeky Menderes, přibližně 60 km jihozápadně od města Aydin a 5 km severně od Akkoy v dnešním Turecku. Zajímavostí je, že usazeniny řeky jej od počátku našeho letopočtu od moře postupně vzdalovaly. Proto se v současné době jeho zříceniny nacházejí přibližně 10 km od pobřeží. Právě z Milétu pocházel významný matematik a astronom Thalés z Milétu (asi 625 – 543 př. n. l.) [7].

#### 2.1.1 Thalés z Milétu

Thalés z Milétu (obr. P09) je považován za vědce, který vnesl do základů astronomie prvky matematiky a fyziky [8]. Můžeme ho tedy považovat za zakladatele moderní astronomie. Z jeho astronomických znalostí se dochovaly pouze zlomky a různá vyprávění, sepsaná v dílech pozdějších filozofů. V první řadě za zmínku stojí jeho správná předpověď úplného zatmění Slunce na 28. května 585 před Kristem, které údajně přerušilo bitvu na řece Halys. K určení předpovědi využil babylonské znalosti periody saros, po které se poloha Měsíce vzhledem ke Slunci a Zemi opakuje. Za zmínku také stojí i jeho dělení roku na 365 dní nebo stanovení úhlového průměru

Slunce na  $1/720$  kruhu, tj. asi na  $30'$ , či schopnost sestrojít sluneční hodiny. Zajímavá je i jeho úvaha týkající se tvaru Země. Podle něj je Země plochou deskou ležící na hladině světového oceánu, v důsledku jehož vlnobití vzniká zemětřesení. Thalés také věřil, že Slunce a hvězdy jsou ohnivé a dokonce podle některých pramenů soudil, že Měsíc svítí jen odraženým světlem. Zajímavá je i válcová představa tvaru Země, kterou zastával Thalétův přítel filozof Anaximénes z Milétu (588 – 528 před Kristem) [2; 8].

### 2.1.2 Pythagoras ze Samu

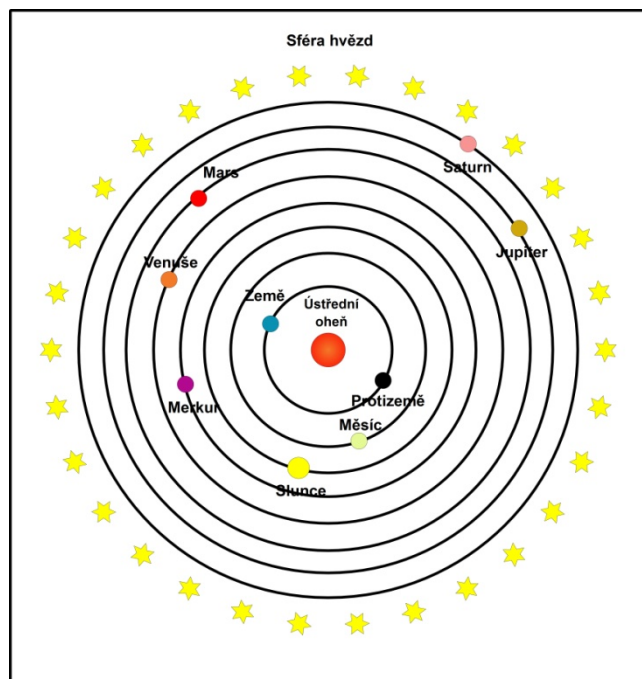
Pravděpodobně známější byl Thaletův následovník Pythagoras (kolem 580 – 497 před Kristem), pocházející z ostrova Samos, ležícím ve východní části Egejského moře poblíž pobřeží Malé Asie (obr. P09). Byl zakladatelem školy, která nesla jeho jméno, tedy školy pythagorejské [2]. Stěžejní myšlenkou této školy byla představa, že vše se dá vysvětlit na základě přírodních zákonů. Pythagorejci za nejdokonalejší považovali kruh, kruhový pohyb, případně kouli. Pod vlivem této myšlenky usuzovali i na to, že Země musí být kulatá, jelikož je dokonalá. Toto svoje tvrzení dokládali tím, že Země vrhá stín tohoto tvaru na Měsíc při jeho zatmění [2]. Pythagorejci jsou mimo jiné známí také tím, že jako první ve svých úvahách o celkovém pohledu na svět užívali slovo *kosmos*, značící ve svém původním významu něco uspořádaného a krásného (odtud i původ slova kosmetika) [7].

### 2.1.3 Filolaos z Krotónu

V 5. století před Kristem se rozvíjela první kosmologická představa, týkající se uspořádání vesmíru. Jejím autorem byl údajně pythagorejec Filolaos z Krotónu (470 – 399 před Kristem), (obr. P09). Ve svém díle O přírodě pojednává o koncepci vesmíru, založené na pevných soustředných křišťálových koulích (sférách), v jejichž centru stojí ústřední oheň, nikoliv Slunce (obr. 2-1) [7]. Tyto sféry jsou přiřazeny pěti v té době známým planetám, dvě Slunci a Měsíci a jedna i hvězdné obloze. Pohyb planet a hvězd je v modelu tvořen otáčením jednotlivých nehmotných sfér kolem ústředního ohně. Skutečnost, že ústřední oheň je pro obyvatele Země nepozorovatelný, vysvětluje Filolaos myšlenkou, že Země je obydlena jen z jedné půli, trvale odvrácené od centrálního ohně. Uvádí, že pozorovatelné je pouze jeho světlo, které se odráží od Slunce a Měsíce. U této koncepce stojí jistě za pozornost zmínka o pořadí planet od nějakého centra, nebo že Země není středem vesmíru, což se objevuje vůbec poprvé v celé historii astronomie. Za pozornost také stojí zmínka o tzv. Protizemi (antichthonu) nacházející se na druhé straně od centrálního ohně. Proto nebyla možnost ji pozorovat.

Důvodem zavedení Protizemě do systému nebeských těles bylo, aby se jejich počet rovnal číslu deset. Desítku pythagorejci považovali za dokonalé a posvátné číslo [7].

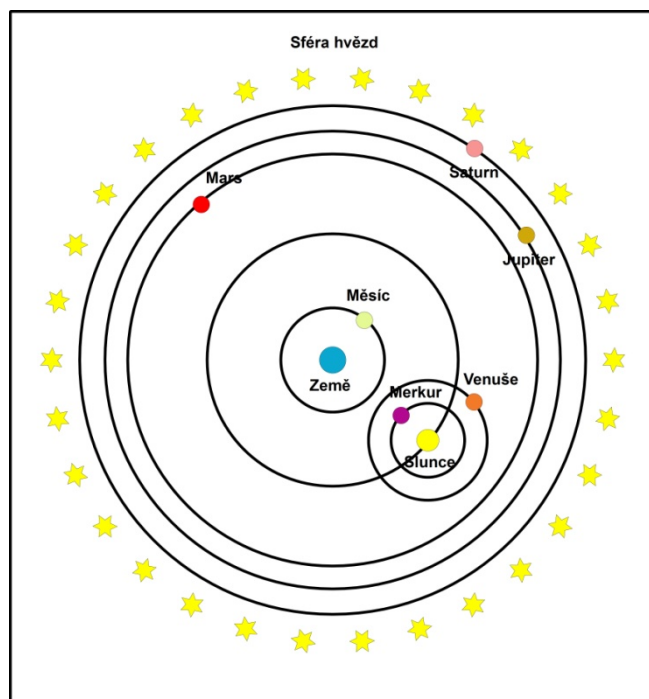
Prostřednictvím matematiky Pythagorejci také prosazovali myšlenku, že planety ve vesmíru jsou umístěny ve vzdálenostech, jejichž poměr je vyjádřen co nejmenšími přirozenými čísly [2].



Obr. 2-1: Systém světa jak si ho představoval Filolaos z Krotónu.

#### 2.1.4 Herakleidés z Pontu

Mezi historické mezníky antické astronomie patří v neposlední řadě i domněnka Herakleida z Pontu (388 – 315 před Kristem), který na základě svých pozorování jako první usoudil, že Merkur a Venuše se pohybují kolem Slunce a ne kolem Země (obr. 2-2). Údajně si všiml, že obě planety se na obloze od Slunce příliš úhlově nevzdalují. S trochou nadsázky můžeme říci, že se jednalo o první krok k heliocentrické soustavě. Obdivuhodné je i to, že si jako první uvědomil relativnost pohybu. Zastával totiž názor, že stejný pohled na oblohu by nastal, kdyby se neotáčela nebeská klenba, nýbrž Země kolem své osy, jak předpokládal [7].



Obr. 2-2: Systém světa jak si ho představoval Herakleidés z Pontu.

### 2.1.5 Platon z Atén a jeho žák Eudoxos z Knidu

První dochované ucelené vědecké poznatky starořecké astronomie nacházíme u Platóna (427 – 347 před Kristem) viz obr. P09 [2]. Jeho kosmologické a kosmogonické úvahy a názory jsou uvedeny ve spisech *Tímaios*, *Kritias* a částečně se objevují i v *Ústavě* či *Zákonech*. V díle *Timaios* se Platon formou dialogu zabývá celkovým pohledem na vznik a uspořádání vesmíru. Například zde uvádí, že hvězdy se otáčejí rovnoměrně okolo svých os. Stejně tak i Země, kterou již považuje za kulatou a nacházející se ve středu vesmíru. Kosmická tělesa kolem Země seřadil v pořadí: Měsíc, Slunce, Venuše, Merkur, Mars, Jupiter a Saturn [7].

Platon studoval i pohyby planet, a to v díle *Zákony*. Zde předpokládal pohyb všech sedmi kosmických těles v jedné rovině proti dennímu otáčení oblohy. V *Ústavě*, která je pokládána za jeho vrcholné dílo, pojednával i o rychlostech jednotlivých planet [7]. Z uvedených tvrzení zde jednoduše vyplývá, že čím je planeta vzdálenější od středu planetární soustavy, tím je její rychlost pohybu menší a tím je i její denní posuv vůči pozadí hvězd menší. S dalším vývojem dějin astronomie se tato teze stala správná pro všechny kosmologické modely.

Platon je mimo jiné významný také tím, že roku 387 před Kristem založil v Athénách Akademii, kde údajně studoval i jeho žák Eudoxos z Knidu (asi 408 – 355

před Kristem). Tento řecký astronom a matematik je považován za prvního antického vědce, který se pokusil vysvětlit pohyby planet vědeckou úvahou [7]. Jeho princip mechanismu uspořádání a pohybů kosmických těles byl následující: Země se též nacházela uprostřed vesmíru a kolem ní, uvažoval stejně jako Filolaos, soustředné nehmotné křišťálové kulové sféry, které nesly jednotlivé planety, Měsíc a Slunce. Jejich osa otáčení byla společná. K jednotlivým tělesům důmyslně přiřadil potřebný počet dalších nehmotných otáčejících se sfér, kdy každá nižší přejímala pohyb vyšší. Touto formou probíhalo skládání pohybů, které vedlo k tehdejšímu dostačujícímu vysvětlení zdánlivě zmatených a nepravidelných pohybů nebeských těles [9]. Eudoxova teorie však měla jisté nedostatky. Například nedokázala objasnit změny jasností planet, které naznačovaly, že jsou způsobovány změnou jejich vzdálenosti od Země. Tato hypotéza byla potvrzena i pozdějším samotným pozorováním, kdy bylo zjištěno, že zdánlivý průměr Měsíce na obloze se periodicky mění.

### 2.1.6 Aristoteles ze Stageiry

O shrnutí veškerých vědeckých poznatků z oblasti astronomie se pokusil Aristoteles (384 – 322 před Kristem) ve spisech *Fyzika*, *O nebi*, *O vzniku a zániku*, *Výklad hvězdářský* a v dalších jeho dílech (obr. P09) [2]. Tento všestranný vědec pocházel z osady Stageira, která se nachází na poloostrově Chalkidiki v dnešní řecké Makedonii, přibližně 80 km východně od Soluně [10]. Aristoteles stejně jako Eudoxos byl významným žákem Platona. Z jeho života stojí za pozornost, že na žádost makedonského krále Filipa II. působil jako vychovatel jeho syna, mladého Alexandra, budoucího krále Alexandra Velikého. Jeho názory ve vztahu ke kosmu byly oportunistické vůči škole pythagorejské, neuznával jejich geometrické pojetí, vytvořil si vlastní astronomickou soustavu. Při její tvorbě v podstatě přijal Eudoxovu koncepci pohybu kosmických těles. Též bezpochyby zastával myšlenku o existenci tzv. hlavních a pomocných sfér, které se pohybují kolem Země a na nichž jsou pevně rozloženy planety [9]. Sféry považoval za hmotné, čiré, krystalické či skleněné nosné kulové konstrukce. Důvodem bylo jeho tvrzení, že ani hvězdy ani planety, které byly uchyceny na jednotlivých sférách, se nemohou pohybovat prostorem volně („valením a vířením“), neboť při takovém pohybu by zcela nepochybně byla porušena celková harmonie. [7] Podle Aristotela je příčinou pohybu jednotlivých sfér tzv. prvotní hybatel. Jednalo se o zvláštní rotující sféru, která se nacházela za sférou nehybných hvězd a která svou denní rotací uváděla do pohybu všechny ostatní vnitřní sféry.

Uspořádání sfér a tím i kosmických těles kolem Země bylo v Aristotelově soustavě následující: Měsíc, Slunce, Venuše, Merkur, Mars, Jupiter a Saturn. Veškerý pohyb v této poměrně složité soustavě je popisován pomocí 59 tuhých křišťálových sfér, zatímco Eudoxos si ve své soustavě vystačil pouze s 27 nehmotnými abstraktními sférami [7]. Z hlediska popisu poloh kosmických těles v soustavě Aristoteles vycházel z představy, že planety se nacházejí ve větší vzdálenosti od Země než Měsíc a Slunce. Vzdálenost sféry hvězd údajně považoval až devětkrát větší než vzdálenost Země od Slunce. Zcela zásadní byla myšlenka, že Země v jeho geocentrické soustavě je v klidu a nerotuje.

## 2.2 Astronomie od Aristarcha po Klaudia Ptolemaia

V období 3. a 2. století před Kristem se astronomická bádání přesunula z Řecka do již zmíněné egyptské Alexandrie, nacházející se na břehu Středozemního moře. Důvodem přesunu mohly být příznivější podmínky pro pozorování hvězd, nebo získání jiných poloh již známých hvězd, které v Alexandrii měly svou polohu výše nad obzorem než v Řecku. Byla zde i možnost pozorovat nová jižnější souhvězdí. Rovněž přínosem pro astronomii zde bylo kvalitnější vědecké zázemí, neboť v Alexandrii byl kolem roku 300 př. n. l. založen Múseion [11]. Jednalo se o významnou vědeckou instituci, ve které působily obecně známé osobnosti řecké vědy, jako například matematici Eukleides a Apollónios z Pergy, mechanik Herón z Alexandrie, geograf Eratosthénés z Kyrény a mnozí další. Alexandrie byla také domovem významných řeckých astronomů jako byl Aristarchos ze Samu, Hipparchos z Níkaie a Klaudios Ptolemaios [7]. Z uvedeného výčtu osobností plyne, že město představovalo intelektuální centrum řecké vzdělanosti. Je známo, že řečtí vědci zde ve svých oborech učinili obrovský pokrok. To dokazují i některé dochované výsledky jejich práce, vystihující starořeckou vzdělanost mnohem více než práce z kteréhokoli jiného období.

### 2.2.1 Aristarchos ze Samu

První z uvedených řeckých astronomů, působících alespoň část svého života v Alexandrii, byl Aristarchos (310 – 230 před Kristem) viz obr. P10. Stejně jako Pythagoras pocházel z řeckého ostrova Samos. Vycházel z tradic babylonské astronomie a zastával názor, že uprostřed soustavy planet nestojí Země, nýbrž Slunce. V dnešní době je za toto své tvrzení s úctou nazýván Koperníkem starověku. Hypotéza

o heliocentrickém systému neměla však v té době uznání, převládala náklonnost k Aristotelovu geocentrickému modelu. Aristarchos svou pozoruhodnou myšlenku o rotující Zemi, která obíhá společně s ostatními planetami kolem nehybného Slunce, údajně uvedl v díle *Hypotheses*. Kniha se bohužel nedochovala. Svědectví o heliocentrismu nacházíme pouze jako jednotlivé fragmenty v Archimedově spisu *Počítání písku (Psammités)* [2].

Aristarchův hlavní přínos na poli astronomie byla jeho průkopnická činnost v měření vesmíru, ve které má své prvenství. Svědčí o tom již dochovaný spis *O velikostech a vzdálenostech Slunce a Měsíce (Perimagethón kai apostématón héliú kai selénes)* viz obr. P11. Ze spisu je patrné, že tento důmyslný vědec pojal astronomické bádání formou přímého pozorování oblohy, které se snažil kvantitativně vyjádřit. Tím se značně lišil od jiných v té době známých astronomů, neboť jejich poznávání vesmíru spočívalo převážně ve tvorbě teorií logickou konstrukcí. Ze spisu též vyplývá, že Aristarchos pro své určování prostorových vzdáleností kosmických těles stanovil tyto následující předpoklady [12]:

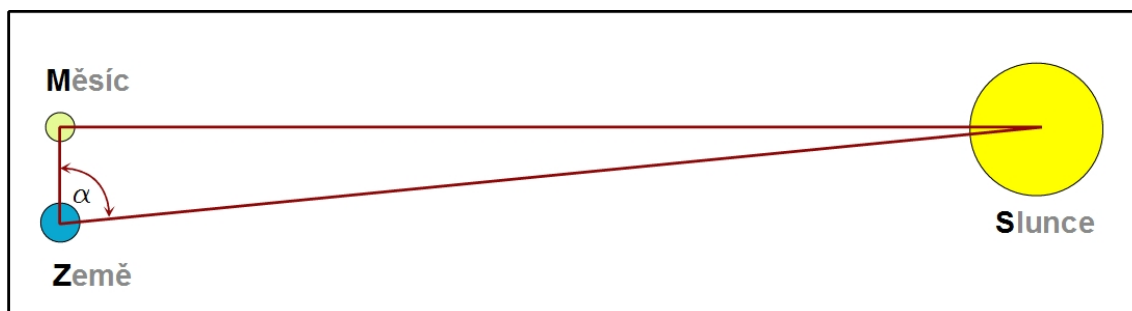
- *Měsíc získává své světlo od Slunce.*
- *Země ve vztahu k sféře, po které se pohybuje Měsíc, je bodem a středem.*
- *Když se Měsíc jeví rozpůlený, pak velký kruh dělicí temnou a světlou část je ve směru našeho pohledu.*
- *Když se Měsíc jeví rozpůlený, jeho úhlová vzdálenost od Slunce je menší než jedna čtvrtina kruhu zmenšená o jednu třicetinu této části.*
- *Šířka stínu Země je rovna šířce dvou Měsíců.*
- *Slunce zaujímá patnáctou část jednoho znamení zodiaku (zvířetníku).*

Vzhledem k náplni této diplomové práce stojí za hlubší pozornost Aristarchovo měření vzdálenosti od Země ke Slunci nebo určení poloměrů Měsíce, Země a Slunce.

Na základě uvedených předpokladů můžeme usoudit, že Aristarchos si plně uvědomoval, že Měsíc září díky odraženému slunečnímu světlu a že pravidelně se opakující vzájemná poloha Měsíce, Země a Slunce je příčinou jeho fází. Této skutečnosti využil k vytvoření metody určení poměru vzdáleností Slunce od Země a Měsíce od Země, založené na měření úhlu, který svírají spojnice Země – Měsíc (ZM) a Země – Slunce (ZS) v okamžiku, kdy je Sluncem osvětlena přesně polovina Měsíce. V té chvíli se naskýtá možnost ze Země vidět Měsíc v první nebo v poslední čtvrti. Za



použití jednoduché geometrie si uvědomil, že v této fázi tvoří Slunce, Země a Měsíc vrcholy pravouhlého trojúhelníku  $ZMS$  s pravým úhlem při vrcholu  $M$  (obr. 2-3).



**Obr. 2-3:** Poloha Slunce, Země a Měsíce v okamžiku kdy bylo možné určit poměr vesmírných vzdáleností. Aristarchos takto určil, že poměr vzdáleností Země k Měsíci a ke Slunci je 1:19.

Pro následné určení hledaného poměru vzdáleností změřil úhel  $\alpha$ , který svírají spojnice  $ZM$  a  $ZS$ . Jeho naměřená hodnota měla velikost  $87^\circ$ . Tomu odpovídá poměr spojnic [12]:

$$\frac{|ZM|}{|ZS|} = \cos(87^\circ) \approx \frac{1}{19}. \quad (2.1)$$

Z výsledku tedy plyne, že Země je od Slunce 19krát dále než Měsíc. I když je tento obdivuhodný postup měření vzdálenosti metodicky správný, výsledek je chybný. Podle současných měření je úhel  $\alpha$  totiž roven hodnotě  $89^\circ 51'$ . Za použití goniometrické funkce kosinus dostáváme skutečný poměr vzdálenosti k Měsíci a ke Slunci [12]:

$$\cos \alpha = \frac{1}{382}. \quad (2.2)$$

Slunce se ve skutečnosti nachází od Země přibližně 400krát dále než Měsíc. Uvažovaný pravouhlý trojúhelník  $ZMS$  je mnohem protáhlejší, než si sám Aristarchos dokázal představit.

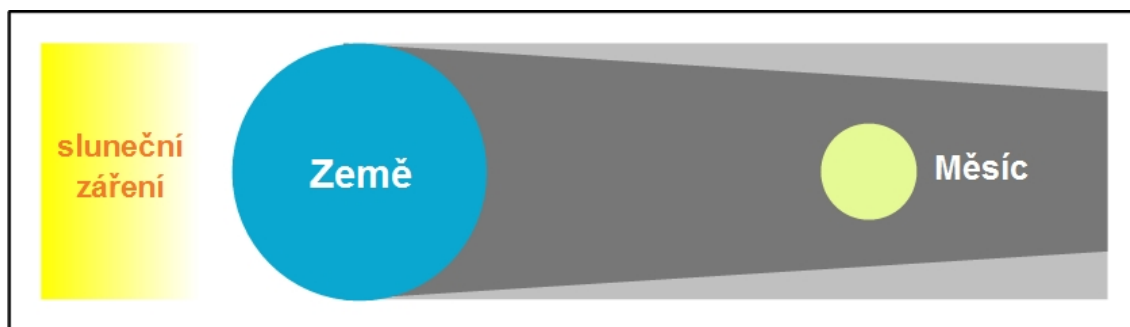
Důvodem značné nepřesnosti Aristarchova výsledku byly problémy spojené již se samotnou metodou měření. Například bylo dost obtížné v té době přesně určit čas první čtvrti (resp. poslední čtvrti) Měsíce, nebo provést přesné měření uvažovaného úhlu  $\alpha$ , neboť Země, Měsíc ani Slunce nejsou bodové objekty. Nutno poznamenat, že důležitost přesnosti měření úhlu  $\alpha$  je opravdu podstatná, neboť již při jeho dvoustupňové odchylce bylo dosaženo dvacetinásobného podcenění vzdálenosti Země – Slunce, jak plyne z výše uvedených výsledků. K nepřesnému určení vzdálenosti

také do jisté míry přispěla v té době neznalost goniometrických funkcí, které se dnes k řešení pravouhlého trojúhelníku běžně používají. Vzdálenost jako funkce úhlu byla vyjadřována pouze přibližně. Uvádí se, že i Aristarchos svojí výslednou hodnotu měření vzdálenosti nakonec přibližně uvedl v intervalu poměrů od 1/18 do 1/20, což s pomocí současné matematické symboliky můžeme zapsat následovně [7]:

$$\frac{1}{18} > \cos 87^\circ > \frac{1}{20}. \quad (2.3)$$

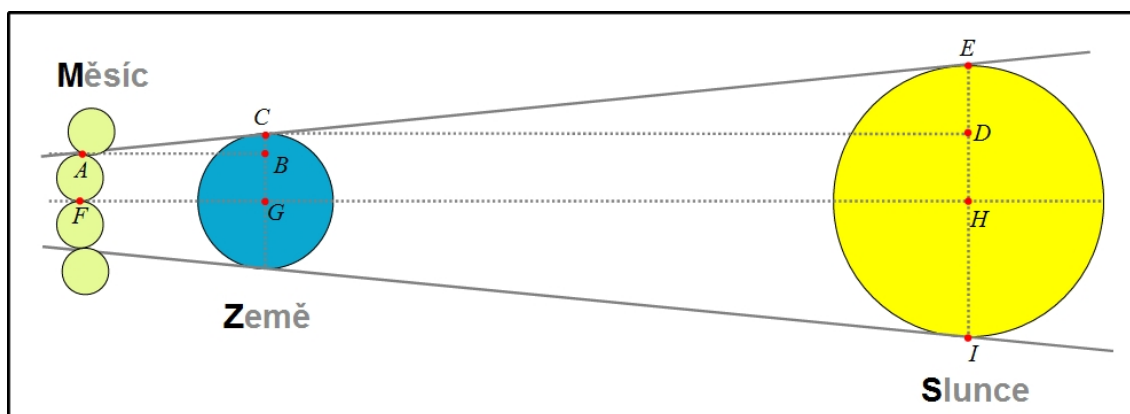
Aristarchův přínos z výše popsaného měření vzdálenosti pro astronomii spočívá především v tom, že kvantitativně poskytl první velikostní obraz o okolí Země, byť nebyl správný.

Dalším jeho již zmíněným významným a písemně dochovaným astronomickým měřením bylo určování poměrů velikostí Země, Měsíce a Slunce prostřednictvím pozorování úplného zatmění Měsíce [7]. Je známo, že k tomuto astronomickému úkazu dochází v okamžiku, kdy celý Měsíc vstoupí do kuželu zemského stínu (obr 2-4).



**Obr. 2-4:** Poloha Slunce, Země a Měsíce v okamžiku úplného zatmění Měsíce.

Aristarchos zjistil, že doba, po kterou se Měsíc zasouvá do zemského stínu, je přibližně rovna době, po kterou je v tomto stínu zcela zakryt. Následně opět pomocí jednoduché geometrie a s využitím předchozích výsledků stanovil poměry průměrů uvedených kosmických těles. Jeho počínání je naznačeno v níže uvedeném nákresu (obr 2-5).



**Obr. 2-5:** Geometrický náčrtek k určení poměrů velikostí Země, Měsíce a Slunce prostřednictvím pozorování úplného zatmění Měsíce.

Zobrazené trojúhelníky  $ABC$  a  $CDE$  jsou podobné. Pro poloměry Země  $R_Z$ , Měsíce  $R_M$  a Slunce  $R_S$  platí [12]:

$$|BC| = R_Z - 2R_M; |DE| = R_S - R_Z \quad (2.4)$$

S využitím vztahu (2.1) dostáváme:

$$\frac{|FG|}{|GH|} = \frac{|AB|}{|CD|} = \frac{1}{19}; \quad (2.5)$$

$$\frac{|FA|}{|IE|} = \frac{2R_M}{2R_S} = \frac{1}{19}. \quad (2.6)$$

Ze vztahu (2.6) jednoduchou úpravou dostáváme vztah mezi poloměrem Slunce  $R_S$  a poloměrem Měsíce  $R_M$  ve tvaru:

$$R_S = 19R_M. \quad (2.7)$$

Opět vyjdeme z podobnosti trojúhelníků  $ABC$  a  $CDE$ , z které vyplývá:

$$\frac{|AB|}{|CD|} = \frac{|BC|}{|DE|}. \quad (2.8)$$

Po následném dosazení vztahů (2.4) a (2.5) dostáváme vztah:

$$\frac{1}{19} = \frac{R_Z - 2R_M}{R_S - R_Z}, \quad (2.9.)$$

jehož tvar můžeme po dosažení vztahu (2.7) zapsat ve tvaru:

$$\frac{1}{19} = \frac{R_Z - 2R_M}{19R_M - R_Z}. \quad (2.10)$$

Postupnými jednoduchými, matematickými úpravami rovnice (2.10) dostáváme vztah mezi poloměrem Země  $R_Z$  a poloměrem Měsíce  $R_M$ :

$$R_M = \frac{20}{57} R_Z, \text{ tj. } R_M \approx 0,35 R_Z. \quad (2.11)$$

Nakonec po dosažení rovnice (2.11) do vztahu (2.7) získáme i vztah mezi poloměrem Země  $R_Z$  a poloměrem Slunce  $R_S$ :

$$R_S = \frac{19 \cdot 20}{57} R_Z = \frac{20}{3} R_Z, \text{ tj. } R_S \approx 6,67 R_Z. \quad (2.12)$$

Aristarchovo úsilí dát do vzájemné souvislosti výše odvozené velikosti Země, Měsíce a Slunce a jejich vzájemné vzdálenosti je velmi pozoruhodné. Východiskem mu byl jeho šestý předpoklad, ve kterém uvádí, že Slunce zaujímá patnáctou část jednoho znamení zodiaku. Podle historických pramenů se však místo patnácté části správně uvádí šedesátá část. Předpokládá se, že chybná hodnota (tj. 1/15) údajně vznikla až při pozdějším přepisu Aristarchova díla. Svědčí o tom i dochovaný záznam v pracích od Archiméda, který správnou hodnotu plně využíval ke svému měření [12].

Zodiak neboli zvěrokruh, jehož původ pochází údajně ze starobylé babylonské říše, představuje myšlený pás na nebeské sféře, táhnoucí se symetricky podél ekliptiky. Pro potřeby astrologie byl tento pás rozdělen na dvanáct stejných dílů, nazvaných, podle zvířetníkových znamení (resp. podle dvanácti zvířetníkových souhvězdí). Řeční astronomové na něj pohlíželi jako na největší kružnici ve vesmíru, po které se pohybuje Slunce. Aristarchos tak předpokládal, že Slunce lze podél celého tohoto pásu (tj. obvodu zvěrokruhu) umístit celkem  $12 \cdot 60 = 720$  krát [12].

Za použití předchozího vztahu (2.12) a v duchu Aristarchových předpokladů, lze kvantitativně určit délku zvěrokruhu  $o$ , po které se pohybuje Slunce, ve tvaru:

$$o = 720 \cdot 2R_S = 720 \cdot 2 \cdot 6,67 R_Z, \quad (2.13)$$

kde  $R_S$  je poloměr Slunce a  $R_Z$  poloměr Země. Následně pomocí vztahu (2.13) tak nalézáme Aristarchův vztah pro vyjádření poloměru kruhové trajektorie Slunce  $R_{ZS}$  ve tvaru:

$$R_{ZS} = \frac{o}{2\pi} = \frac{720 \cdot 2 \cdot 6,67 R_Z}{2\pi} \approx 720 \cdot 2 R_Z. \quad (2.14)$$

Z tohoto vztahu tedy plyne, že vzdálenost Země od Slunce je přibližně rovna 720 průměrům Země. Následně pomocí výše uvedených výsledků Aristarchova měření můžeme snadno uvést i jeho vyjádření vzdálenosti Měsíce od Země  $R_{MZ}$  ve tvaru:

$$R_{MZ} = \frac{R_{ZS}}{19} = \frac{720 \cdot 2 R_Z}{19} \approx 38 \cdot 2 R_Z. \quad (2.15)$$

Aristarchos tedy předpokládal, že vzdálenost Měsíce od Země je přibližně rovna 38 průměrům Země.

Dalším obdivuhodným Aristarchovým úsilím byla snaha vyjádřit rozměry poněkud rozsáhlejšího prostoru vesmíru, než je okolí Země. Přesně řečeno, jeho snaha spočívala v určení velikosti průměru tzv. sféry hvězd. Jednalo se o sféru, jejíž střed byl totožný se středem Země, a na jejímž povrchu se podle řeckých astronomů nacházely hvězdy. K názornému určení tohoto průměru nám poslouží jeho další předpoklad, který zní: *Poměr průměru Země k průměru vesmíru je roven poměru průměru vesmíru k průměru sféry stálic* [12]. Průměrem vesmíru byl řeckými astronomy myšlen průměr kružnice, po které se pohybuje Slunce. Pomocí již zavedené symboliky můžeme Aristarchův předpoklad zapsat ve formě:

$$\frac{2R_Z}{2R_{ZS}} = \frac{2R_{ZS}}{2R_{SH}}, \quad (2.16)$$

kde  $R_Z$  je poloměr Země,  $R_{SH}$  je poloměr sféry hvězd a  $R_{ZS}$  je vzdálenost Země od Slunce, představující též poloměr vesmíru. Po jednoduché úpravě a následném dosazení vztahu (2.14) do rovnice (2.16) dostáváme Aristarchovo vyjádření velikosti poloměru sféry hvězd ve tvaru:

$$R_{SH} = \frac{R_{ZS}^2}{R_Z} = \frac{(720 \cdot 2 R_Z)^2}{R_Z} = 1036800 \cdot 2 R_Z. \quad (2.17)$$

Porovnáme-li výše uvedené výsledky Aristarchova důmyslného měření se současnými přesněji určenými hodnotami poměrů vzdáleností Měsíce od Země a Slunce od Země a hodnotami jejich vzájemných poměrů poloměrů, zjistíme, že většina hodnot je značně podhodnocená. Například pokud bychom ve vztahu (2.14) za  $R_Z$  dosadili pro názornost správně určenou číselnou hodnotu 6 378 km, představující rovníkový poloměr Země, dostali bychom výsledek, že Země se od Slunce nachází ve vzdálenosti přibližně 9 184 320 km. To je však přibližně 16,3 krát méně než se ve skutečnosti uvádí. Poloměr sféry hvězd z dnešního pohledu zcela jistě představuje vzdálenost od Slunce k nejbližší hvězdě, kterou je Proxima ze souhvězdí Kentaura. Podle Aristarcha by tato vzdálenost po dosazení rovníkového poloměru Země do vztahu (2.17) odpovídala přibližně číselné hodnotě  $1,3 \cdot 10^{10}$  km. Podle současných měření se však uvádí hodnota 4,22 světelných let (tj. přibližně  $3,83 \cdot 10^{13}$  km). I když Aristarchos tedy správně předpokládal, že hvězdy jsou od nás mnohem dál než Slunce a tím již tehdy objasnil důvod, proč nejsou během roku pozorovány změny polohy hvězd na obloze, tak jeho výsledek o velikosti sféry hvězd byl oproti současnému správnému údaji 2,9 krát menší. Vše přehledně vystihuje tabulka č. 1.

Předmět měření	Aristarchos - výsledky měření		Současná astronomie - výsledky měření	
	Poměrové vyjádření	Konkrétní číselná hodnota	Poměrové vyjádření	Konkrétní číselná hodnota
Poloměr Země	$R_Z$	6 378 km	$R_Z$	6 378 km
Poloměr Slunce	$6,67R_Z$	42 541,26 km	$109R_Z$	695 202 km
Poloměr Měsíce	$0,35R_Z$	2 232,30 km	$0,27R_Z$	1 722 km
Vzdálenost Země - Slunce	$720 \cdot 2R_Z$	9 184 320 km	$11726 \cdot 2R_Z$	149 576 856 km
Vzdálenost Země - Měsíc	$38 \cdot 2R_Z$	484 728 km	$30,2 \cdot 2R_Z$	385 231,20 km
Vzdálenost Slunce - hvězdy	$1036800 \cdot 2R_Z$	$1,32 \cdot 10^{10}$ km	$3 \cdot 10^9 \cdot 2R_Z$	$3,83 \cdot 10^{13}$ km

Tabulka č. 1: Porovnání Aristarchových výsledků s výsledky současnými.

Jak je vidět z výše uvedených Aristarchových výpočtů, dávní astronomové byli hlavně geometři, kteří využívali svých vtipných a originálních myšlenek k řešení daných astronomických úloh. Důraz kladli hlavně na vlastní řešení problémů, přesnost nebyla moc důležitá. I přesto Aristarchovi náleží velké uznání, neboť – jak již bylo zmíněno – byl první, kdo měl kvalitativně správnou představu o vesmíru. Tato představa však byla rychle zapomenuta a znovu se objevila až v 18. století [13].

### 2.2.2 Archimédes ze Syrakus

Je známo, že Aristarchovo počínání, týkající se tehdejších astronomických měření, do jisté míry ovlivnilo dalšího významného řeckého vědce, Archiméda ze Syrakus (287 – 216 před Kristem) viz obr. P10. Archimédes jako mechanik či fyzik, který položil základy poznání o jednoduchých strojích (páka, kladkostroj, atd.) a o kapalinách a zrcadlech, se částečně zabýval i astronomií. Důkazem je jeho již zmíněné dílo *Počítání písku* (*Psammités*). Zde se kromě aritmetických úvah, zaměřených na matematické vyjádření a zápis libovolně velkého čísla, věnoval i astronomickým otázkám, týkajících se např. velikosti samotného vesmíru, rozměrů kosmických těles či množství látky v něm [14]. Z díla především plyne, že velmi dobře chápal Aristarchovy úvahy a stejně jako on se snažil vesmír pochopit kvantitativně.

Z hlediska uspořádání vesmíru není známo, zdali Archimédes zastával heliocentrický názor stejně jako Aristarchos. Jeho představa vesmíru byla v podobě koule, která je ohraničená sférou hvězd, jejíž poloměr je bilionkrát větší než poloměr sféry, nesoucí Zemi. Kosmická tělesa jsou podle něj tvořena slepenci zrněk, představujících základní částice, jejichž velikost je řádově  $10^{-4}$  rozměru zrnka máku [14].

Z Archimédova díla se dozvídáme i některé další údaje o rozměrech a vzdálenostech kosmických těles. Například délku obvodu Země určil jako 300 000 egyptských stádií, tj. přibližně 47 000 km. Jeho odhad vzdálenosti Země od Slunce je 5 miliard stádií, tj. přibližně 790 milionů km [5]. V díle jsou též důkladně popsána jeho důvtipná měření úhlového průměru Slunce. K tomuto měření využívá řadu svých originálních speciálních měřidel ve tvaru válečků a tyčinek. Byl si vědom, že měření je třeba realizovat v době, kdy je Slunce nízko nad obzorem, neboť v této poloze není jas příliš velký a nebrání tím v získání přesnějších výsledků. Takto získanou hodnotu

úhlového průměru Slunce stanovil v mezích od  $1/800$  do  $1/656$  kruhu. Z pohledu dnešní symboliky tomu odpovídá interval zorných úhlů  $0^{\circ}27'00''$  -  $0^{\circ}32'56''$ . V porovnání se současnou hodnotou měření (s ohledem k ročnímu období v mezích  $0^{\circ}31'05''$  -  $0^{\circ}32'05''$ ), je Archimédův výsledek poměrně přesný. Archimédes ve svém díle dále uvádí, že poloměr Slunce je 30krát větší než poloměr Země [14]. S ohledem na vztah (2.12) to je přesnější poměr, než určil Aristarchos.

V Archimédově díle jistě stojí za pozornost i jeho pokus určit množství látky ve vesmíru. Archimédes pomocí svých aritmetických úvah, týkajících se velkých čísel, a důmyslných představ o zaplňování daného prostoru písečnými zrny došel k závěru, že do sféry hvězd se vejde nejvýše  $10^{63}$  zrněk písku. Tento výsledek je jistě zajímavý v porovnání s dnešním údajem, podle něhož se v pozorované části vesmíru nachází řádově  $10^{80}$  těžkých částic (tzv. baryonů) [14].

O tom, že Archimédes byl velmi činný v měření vesmíru, se dozvídáme i v písemnostech takových velikánů jako byl například Klaudios Ptolemaios [5].

Ve své době se Archimédes též zasloužil o celou řadu obdivuhodných konstrukčních vynálezů, které lidem ze Syrakus jistě pozitivně sloužili, ať už k obraně proti nepříteli (např. katapulty či údajně zrcadla určená k zapalování římských lodí), nebo k ulehčení práce (např. Archimédův šroub určený k efektivnímu čerpání vody) [14]. Z hlediska antické astronomie sehrála významnou úlohu jeho konstrukce planetária neboli sféry, které po dobytí města Syrakusy během druhé punské války padlo do rukou významného římského vojevůdce Marca Claudiuse Marcella (268 – 208 před Kristem) jako válečná kořist [15]. Jednalo se o soustrojí soustředných skleněných koulí, které byly poháněny vodou. Tento konstrukční výtvar údajně napodoboval nezávislý pohyb Slunce, Měsíce a planet na pozadí sféry hvězd. Archimédes ho pravděpodobně důkladně popsal ve svém astronomickém díle *O konstrukci sféry (Peri sfairopoias)*, které se bohužel již nedochovalo [14]. Zmínku o něm, ale nacházíme v písemnostech u celé řady významných římských osobností. Příkladem může být římský politik, filozof a spisovatel Marcus Tullius Cicero (106 – 43 před Kristem) nebo římský básník Claudius Claudianus (369 – asi 408) [15]. Díky současné historicko-vědecké studii vznikla jedna z možných rekonstrukcí tohoto planetária, která se nachází v jednom z kapitolských muzeí v Římě (obr. P12) [16]. Za zmínku jistě stojí, že některé další historicko-vědecké studie prostřednictvím celé řady hypotéz dávají planetárium do spojitosti s mechanismem z Antikythéry (obr. P13) [5]. Zkrátka Archimédovo

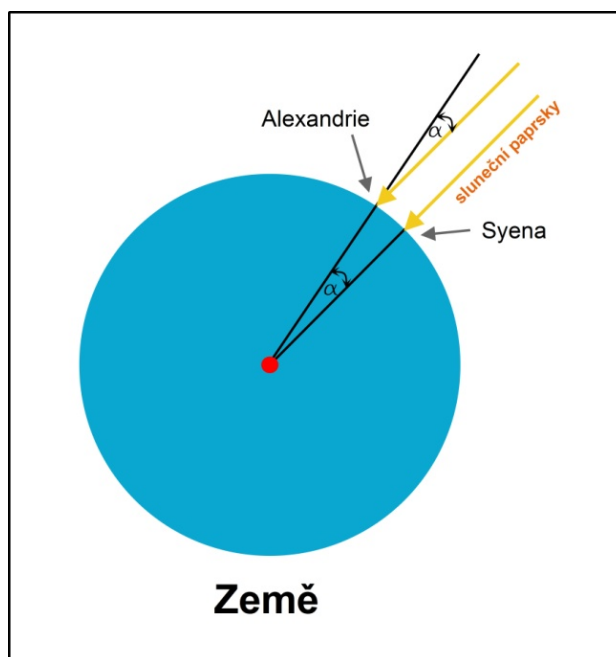


planetárium představovalo model vesmíru, který odrážel celou řadu antických vědomostí.

### 2.2.3 Eratostenés z Kyrény

Další významnou antickou osobností alexandrijské školy, která svou činností výrazně obohatila dějiny astronomie, byl Eratosthenes z Kyrény (275 – 194 před Kristem) viz obr. P10. Tento matematik, astronom a zřejmě i největší geograf antického Řecka, se zasloužil o relativně přesné určení prvního známého rozměru velkého měřítka – obvodu Země [2]. Část svého života působil jako správce alexandrijské knihovny. O jeho vytříbené matematické vzdělání se postarali učenci, jako byl Lysanias z Kyrény, Aristones z Chiu nebo Kallimachos z Kyrény [7].

Způsob, jakým na tehdejší dobu velmi přesně určil obvod Země, spočíval v jednoduché geometrické metodě, která využívala vržené stíny svislých tyčí (gnómonů) ve stejný okamžik na dvou různých místech poledníku [17]. Eratosthenes si byl dobře vědom, že sklon slunečních paprsků na dvou různých místech v době rovnodennosti není stejný. Údajně se od tehdejších cestovatelů dozvěděl, že v městě zvané Syena (dnešní Asuán) v den letního slunovratu (tj. 21 června) je v pravé poledne i v těch nejhlubších studnách možno zahlédnout odraz Slunce [7]. Z toho plyne, že sluneční paprsky zde musejí dopadat kolmo na zemský povrch a svislá tyč tak nemůže vrhat žádný stín. Naopak v severnější Alexandrii, která leží na přibližně stejném poledníku, byla situace odlišná. Jelikož toto město neleží na stejném obratníku (tj. obratníku Raka) jako město Syena, paprsky zde dopadají na zemský povrch pod určitým úhlem  $\alpha$ . U svislé tyče tak bylo možno pozorovat krátký stín (obr P14). Na základě této skutečnosti a s přesvědčením o kulatosti Země dospěl k obdivuhodné myšlence, jak určit její obvod. Pokud změříme délku poledníkového oblouku, představujícího vzdálenost mezi uvedenými městy, a je-li znám k němu příslušný středový úhel  $\alpha$ , lze daný obvod Země dopočítat. Podle Eratosthena úhel  $\alpha$  má hodnotu  $7^{\circ} 12'$  [7]. Znázornění tohoto úhlu, který určuje sklon dopadajících slunečních paprsků a tedy i středový úhel, je patrné z níže uvedené jednoduché geometrické konstrukce (obr. 2-6). Úhel  $7^{\circ} 12'$  náhodou představuje jednu padesátinu kruhu.



**Obr. 2-6:** Geometrický nákres k určení obvodu Země podle Eratosthena.

Eratosthenes vzdálenost mezi městy přímo neměřil. Jelikož ale zastával práci knihovníka v Alexandrijské knihovně, měl možnost získat potřebné informace, z nichž zjistil, že jí odpovídá hodnota 5 000 stadií. Tuto hodnotu údajně změřili i vojáci, putující z Alexandrie do Syeny. Velikost zemského obvodu následně (tj. obvod poledníkové kružnice) určil ze vztahu [16]:

$$\frac{D}{o} = \frac{7^{\circ}12'}{360^{\circ}} = \frac{1}{50}, \quad (2.18)$$

kde  $D$  je vzdálenost mezi městy a  $o$  obvod Země. Délka poledníkové kružnice mu vyšla 250 000 stadií. Vzhledem k tomu, že pravděpodobně používal egyptská stadia o délce 157,7 m, určil velikost obvodu Země 39 425 km.

Eratosthenova úvaha byla zcela správná, menší nepřesnosti vstupních měření neměly příliš velký vliv na získanou hodnotu délky poledníkové kružnice. Z hlediska současných znalostí a exaktního vědeckého postupu se dopustil Eratosthenes několika drobných chyb [17]:

- Nevzal (resp. nemohl vzít) v úvahu zploštění Země.
- Syena a Alexandrie ve skutečnosti neleží na jednom poledníku. Syena je asi  $3^{\circ}$  východněji.
- Syena neleží přesně na obratníku Raka, ale ve skutečnosti je o  $24'$  severněji.

- Vzdálenost obou uvažovaných měst není přesně 5000 stadií.
- Hodnota úhlu není přesnou padesátinou kruhu, ale je asi o 5' menší.

Uvedené nedostatky se však navzájem kompenzovaly, a proto je Eratostenův výsledek opravdu na tehdejší dobu velmi dobrý.

Ke svým měřením použil fascinující přístroj vlastní konstrukce, tzv. *skafé* (obr. P15) [17]. Jednalo se o dutou polokouli s vyznačenou stupnicí na vnitřní straně a svislým hrotem uprostřed, jehož velikost se rovnala poloměru koule. Stín vržený hrotem na polokouli mu umožňoval měřit sklon slunečních paprsků v daném místě.

V Eratostenově době byl již dobře znám vztah pro výpočet obvodu kruhu (tj. výraz  $\pi d$ ) a hodnota  $\pi \approx 3,14$  byla též známa. Odhadl ji jeho současník i přítel, zmíněný Archimédes. Mohl tak již být určen i konkrétní průměr Země. Podle Eratosthena je tedy průměr Země přibližně 12 556 km [18].

Pokud vyjdeme z poměrů poloměrů Měsíce a Slunce vzhledem k poloměru Země, jak je určil Aristarchos (tabulka č. 1), a za poloměr Země dosadíme hodnotu, jak ji stanovil Eratoshenés, obdržíme hodnoty uvedené v tabulce č. 2. Pro srovnání jsou zde opět uvedeny i jejich současné hodnoty.

	Antická astronomie	Současná astronomie
Poloměr Země	6 278 km	6 378 km
Poloměr Slunce	41 874,26 km	695 202 km
Poloměr Měsíce	2 197,30 km	1 722 km

Tabulka č. 2: Porovnání poloměrů kosmických těles, odpovídajících Eratostenově době, s jejich současnými hodnotami.

Kromě zemského obvodu se Eratostenés též pokoušel určit vzdálenosti ke Slunci a k Měsíci. Pomocí úhlového měření při úplných zatměních údajně určil, že Slunce se od Země nachází ve vzdálenosti 804 000 000 stadií (tj. 126 680 000 000 km) a Měsíc ve vzdálenosti 780 000 stadií (tj. 123 000 000 km) [7]. I když jsou tyto výsledky značně přehnané, a to nejméně o tři řády, mohly alespoň v té době podávat informaci o obrovských vzdálenostech k těmto tělesům. Je vhodné poznamenat, že

Eratostenés naopak velmi přesně určil velikost sklonu zemské osy. Stanovil jej na  $11/83$  ze  $180^\circ$ , tj.  $23^\circ 51' 15''$  [7].

O určení poloměru Země pomocí úhlových měření se pokoušela celá řada dalších autorů, jejichž předmětem zájmu byla také astronomie. Výsledky některých z nich jsou uvedeny v tabulce č. 3 [7].

Poloměry Země		
Rok určení	Autor	Poloměr
100 př. n. l.	Poseidonios z Apameie	5 300 km
827 n. l.	Arabové	6 370 km
1525 n. l.	Jean Francois Fernel	6 374 km
1622 n. l.	Willebrord Snellius	6 377 km (rov.)
		6 356 km (pol.)

Tabulka č. 3: Další měření poloměrů Země.

#### 2.2.4 Hipparchos z Nikaie

Za nejvýznamnějšího antického astronoma je jistě právem považován Hipparchos (190 – 120 před Kristem), jehož rodným domovem bylo město Nikaie v maloasijské Bithýnii (obr. P10) [19]. Město, ležící na severu Turecka, je dnes známo pod jménem Iznik. Většinu svého života však Hipparchos prožil v Alexandrii a na ostrově Rhodos ve Středozezemním moři, který byl v jeho době dalším významným centrem vzdělanosti [9]. Hipparchos zde založil svou vlastní astronomickou observatoř. Zajímal se nejen o astronomii, nýbrž i o filozofii a matematiku. Hipparchos byl výtečný v pozorování nebeských těles a důkladně znal i výsledky pozorování starých Babyloňanů, které mu mohly posloužit k porovnání s jeho vlastními astronomickými údaji [2]. Kombinace numerických údajů z pozorování s jeho důmyslnými geometrickými konstrukcemi pohybů těles vedla k lepším výsledkům při jeho astronomickém bádání. Můžeme ho tak pokládat za zakladatele vědecké astronomie.

Mezi Hipparchovy zájmy z oblasti astronomie patří např. tvorba ročního kalendáře, sestavení katalogu hvězd, studium zemské precese a kvantitativní popis pohybu Slunce, Měsíce a planet.

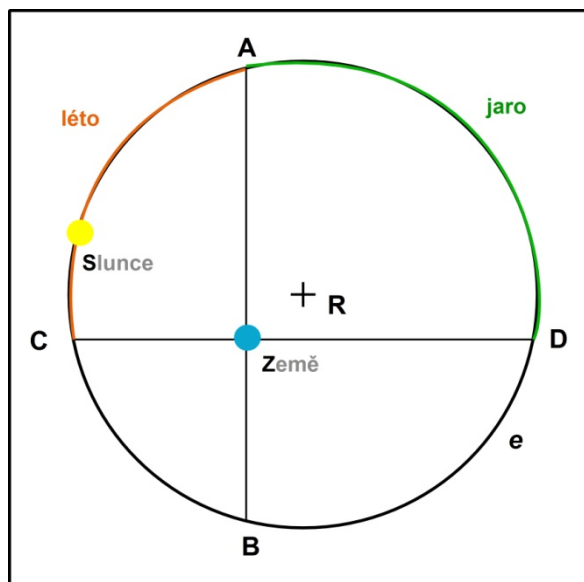
Z jeho astronomických děl se dochoval pouze spis *Komentář Arata a Eudoxa* (*Toon Aratou kai Eudoxou Fainomenoon exegesis*). V podstatě se jednalo o objasňující výklad k Arátově básni *Zjevy nebeské*. Arátos ze Soloi v Kilíkii (315 – 239 před Kristem) v této básni kolem roku 275 před Kristem popsal 48 souhvězdí na severní a jižní obloze [9]. Na tomto základě Hipparchos zkoumal polohu více než 300 hvězd. Z historicko-astronomického hlediska je zde zajímavé to, že Arátův text má mnohem starší původ a popisuje vzhled oblohy, pozorovaný na zeměpisné šířce Babylónu, z časového období 2 500 let před Kristem. Hipparchův spis vznikl ještě před sestavením jeho hvězdného katalogu.

Mezi další Hipparchova díla, která se již nedochovala, patří tři spisy – *Přestupné měsíce a dny*, *O délce roku*, *O pohybu bodů slunovratu a rovnodennosti*. O jejich existenci se dozvídáme z velmi cenného díla *Almagest*, jehož autorem je věhlasný alexandrijský astronom Klaudios Ptolemaios (85 – 165 n. l.) [9].

Hipparchos byl zastáncem geocentrického uspořádání kosmických těles ve vesmíru. Za zmínku stojí jeho obdivuhodné řešení pohybu Slunce kolem Země. Již babylonští i antičtí astronomové zjistili, že Slunce se po hvězdné obloze pohybuje různou rychlostí. Tyto informace byly známy dávno před Hipparchem. Například starořecký matematik a astronom Metón Athénský, který žil v 5. století před Kristem v Athénách, zjistil, že jednotlivá čtvrtletí roku netrávají stejně dlouho [7]. Konkrétně zjistil, že jarní období bylo přibližně o dva dny delší než období letní. Této skutečnosti si byl Hipparchos vědom a proto při svém popisu pohybu Slunce (po kruhové ekliptice) kolem Země vytvořil dva různé geometrické modely, které zjištěné informace zohledňují.

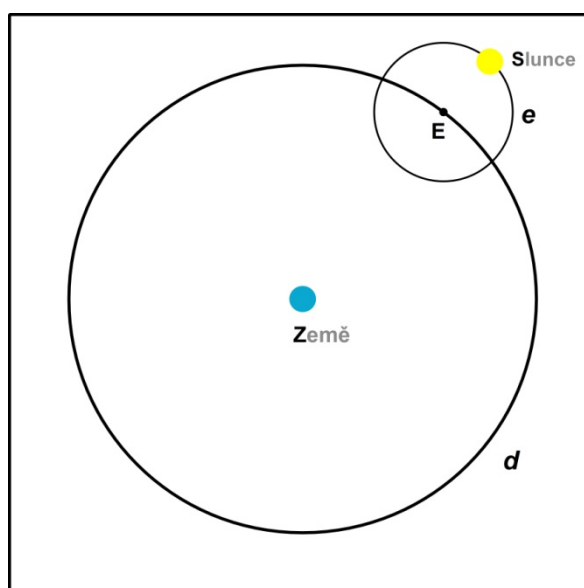
První jeho geometrická konstrukce modelu (obr. 2-7) spočívala v následující představě [7]. Rovnoměrný pohyb Slunce kolem Země je uskutečněn po kruhové trajektorii (tzv. kruhové ekliptice  $e$ ), jejíž střed  $R$  však není totožný s vyznačenou polohou  $Z$  Země. Pro pozemského pozorovatele v bodě  $Z$  se tak pohyb Slunce jeví jako nerovnoměrný, což bylo požadováno. Slunce během roku na obloze prochází všemi body ekliptiky  $e$  a opíše celý kruh. Hipparchos tuto dráhu rozdělil do čtyř kvadrantů podle ročních období se středem v bodě  $Z$ . Z obrázku je patrné, že vyznačený oblouk  $DA$  představuje část dráhy, po které se Slunce pohybuje v období jara. Následně

přechází do oblouku  $AC$ , kde se pohybuje během léta. Při porovnání délek obou oblouků vzhledem k bodu  $R$  zjistíme, že nejsou stejně dlouhé a doba trvání jarního období je o něco delší než léto. Podle Hipparcha se pozorovateli v bodě  $Z$  jeví pohyb Slunce nerovnoměrný, jakoby se Slunce pohybovalo po své dráze různou rychlostí.



**Obr. 2-7:** Geometrický nákres k vysvětlení nerovnoměrného pohybu Slunce podle Hipparcha.

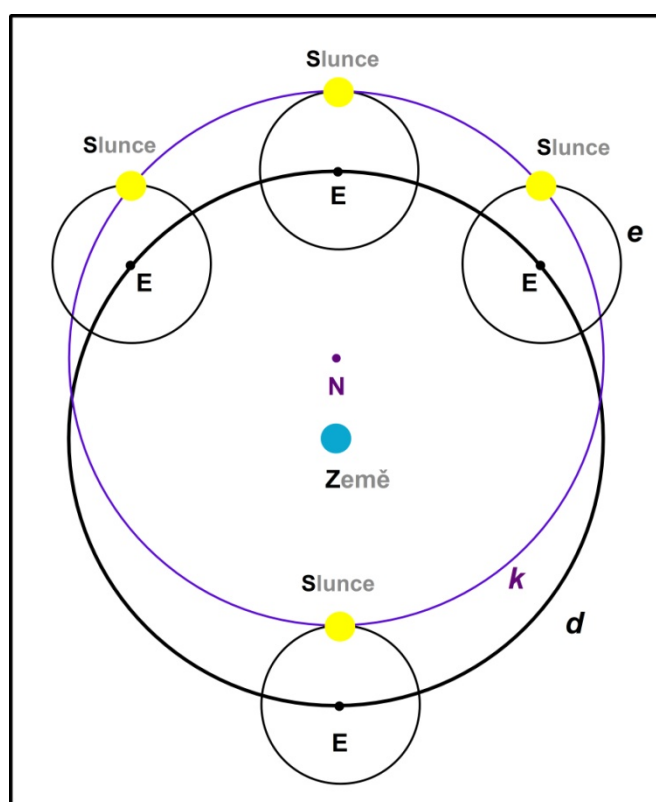
Druhý jeho geometrický model, popisující způsob pohybu Slunce, využívá dva charakteristické geometrické prvky, jejichž autorem byl údajně on sám. Jednalo se o dvě kružnice různého poloměru (obr. 2-8) [7].



**Obr. 2-8:** Deferent a epicykl – charakteristické kružnice pro popis nerovnoměrného pohybu Slunce.

Kružnice  $d$  s větším poloměrem se nazývala *deferent* a kružnice  $e$  s menším poloměrem *epicykl*. Uvažované kosmické těleso  $S$  (Slunce) se pohybovalo po epicyklu, jehož střed  $E$  opisoval deferent. Země se nacházela ve středu  $Z$  deferentu.

Hipparchos uvažoval, že pohyb Slunce po epicyklu probíhá opačným směrem než pohyb celého epicyklu po deferentu. Dále uvažoval, že oběžná doba Slunce po epicyklu je rovna době oběhu středu  $E$  epicyklu po deferentu. Tím bylo možné jednotlivými polohami Slunce proložit kružnici  $k$  se středem v bodě  $N$  (obr. 2-9) [7]. Výsledný pohyb složený ze dvou kruhových rovnoměrných pohybů by se pozemskému pozorovateli opět jevil jako nerovnoměrný.



**Obr. 2-9:** Geometrické schéma popisující pohyb Slunce podle Hipparcha.

Při pozornějším prostudování obou schémat zjistíme, že pokud vzdálenost  $ZN$  (obr. 2-9) je rovna vzdálenosti  $RZ$  (obr. 2-8), pak oba modely popisují stejný pohyb Slunce. Hipparchos se zabýval i určením výstřednosti polohy Země vůči středu sluneční dráhy a stanovil ji na  $1/24$  poloměru sluneční dráhy.

Jak již bylo předesláno, Hipparchos je především znám tím, že byl velmi pečlivý a přesný pozorovatel. Jako první začal rozlišovat siderický (hvězdný) rok jako časový interval, kdy projde Slunce v blízkosti určité hvězdy a tropický rok, tedy interval mezi

dvěma průchody bodem rovnodennosti. Jeho usilovná práce při určení co nejpřesnější délky tropického roku spočívala v pečlivém porovnávání svých výsledků měření s výsledky měření svých předchůdců z minulých staletí. Údajně při svém vlastním pozorování v době rovnodennosti a slunovratů a s využitím údajů Aristarchových z roku 280 před Kristem vypočítal délku tropického roku o hodnotu  $1/300$  dne menší než  $365 \frac{1}{4}$  dne [2]. V dnešních časových jednotkách tomu odpovídá 365 dnů 5 hodin 55 minut a 12 sekund. Pokud tento výsledek porovnáme se současnou hodnotou 365 dnů, 5 hodin, 48 minut a 46 sekund zjistíme, že získal délku tropického roku s přesností několika minut.

Hipparchos si při svých měřeních délky tropického roku povšiml, že jarní bod se nepatrně posouvá. Je známo, že tento posun je způsoben tzv. precesí zemské osy, která míří ke světovému severnímu pólu a opisuje kuželovou plochu s vrcholovým úhlem přibližně  $47^\circ$  [20]. Dále osa této kuželové plochy míří k pólu ekliptiky. Vlivem tohoto pohybu se při pozorování ze Země pohybuje geografický severní pól vůči hvězdám s periodou rovnou tzv. *Platónskému roku*. Po uplynutí této doby bude zemská osa opět mířit k původní hvězdě, k níž mířila na začátku Platónského roku. Hipparchos si byl precesního pohybu zemské osy vědom a stanovil délku Platónského roku na 36 000 let. S porovnáním se současnou hodnotou (tj. 25 725 let) a s možnostmi, které Hipparchos ve své době měl, je i tak jeho určená hodnota poměrně solidní. Nepřesnost jeho výsledku pochopitelně spočívá v tom, že svá pozorování mohl provádět pouze několik desítek let. Což je vzhledem k délce Platónského roku velmi krátká doba. V podstatě byl především odkázán na výsledky měření svých předchůdců, které měl k dispozici a i ty v sobě zahrnovaly jisté nepřesnosti.

Co se týče pohybů Měsíce, již Hipparchovi předchůdci z Babylonie věděli, že Měsíc se nepohybuje v rovině ekliptiky, neboť zatmění Slunce se neobjevuje cyklicky. Hipparchos tak upřesnil sklon dráhy Měsíce k ekliptice na  $5^\circ$  [20].

Hipparchos navázal i na další zjištění babylonských astronomů, na fakt, že pokud je Měsíc v menší vzdálenosti od Země, pohybuje se rychleji [7]. Jak je vidět, v podstatě zde nalézáme základy druhého Keplerova zákona. Hipparchos na základě tohoto zjištění a svých měření či výpočtů správně usoudil, že Měsíc se pohybuje po dráze ve tvaru elipsy. Na této elipse určil i body, kde je pohyb Měsíce nejrychlejší a kde nejpomalejší. Nejbližší bod nazval *perigeum*, nejvzdálenější nazval *apogeum* [7]. Takto je nazýváme dodnes.



Hipparchos upřesnil i synodickou oběžnou dobu, tedy dobu mezi dvěma úplňky Měsíce. A to na hodnotu 29 dnů, 12 hodin, 44 minut a 2,8 sekundy, tedy 29,530592 dne [7]. Stejně tak znal oběžnou dobu siderickou, tedy dobu oběhu Měsíce okolo Země vzhledem ke hvězdám. V současnosti je určena její délka na 27 dnů, 7 hodin, 43 minut a 11,5 sekundy [7]. Hipparchos znal i třetí oběžnou dobu Měsíce okolo Země, dobu, která je daná průchodem Měsíce jeho perigeem, která se nazývá animalistický měsíc. Dle dnešních měřítek trvá 29 dnů, 13 hodin, 18 minut a 33,7 sekundy. Čtvrtou a poslední oběžnou dobou Měsíce byl drakonický měsíc, interval mezi dvěma následujícími průchody Měsíce výstupným uzlem dráhy. Tuto periodu zavedl do astronomie právě Hipparchos. Samotný pojem drakonický měsíc se objevuje až ve středověku, na základě legendy o tom, že během zatmění Měsíce či Slunce obě tato nebeská tělesa požívá drak [2]. V současné době je velikost této časové periody 27 dnů, 5 hodin, 5 minut a 35,8 sekundy.

Hipparchos se též věnoval i měření vzdáleností ve vesmíru, tedy tématu aktuálnímu, ve vztahu k mé diplomové práci. Například pro určení poloměru Měsíce a vzdálenosti Země – Měsíc nebo Země - Slunce vycházel z geometrických metod, které již byly známé ve 2. století před Kristem. Věděl, že úhlový poloměr Měsíce je 15' a poloměr zemského stínu ve vzdálenosti Měsíce je 40'. Pro názorné porovnání obou poloměrů uvedeme jejich poměr:

$$\frac{R_{Zst}}{R_M} = \frac{8}{3} \Rightarrow R_{Zst} = \frac{8}{3} R_M, \quad (2.19)$$

kde  $R_{Zst}$  je poloměr zemského stínu a  $R_M$  poloměr Měsíce. Ze vztahu (2.19) tedy plyne, že poloměr zemského stínu ve vzdálenosti Měsíce je roven 8/3 poloměrům Měsíce. Na základě geometrických úvah Hipparchos dále určil, že poloměr Měsíce je přibližně roven rozdílu poloměru Země  $R_Z$  a zemského stínu ve vzdálenosti Měsíce, tj.:

$$R_M \approx R_Z - R_{Zst}. \quad (2.20)$$

Pokud do rovnice (2.20) dosadíme vztah (2.19), po následné jednoduché matematické úpravě získáme vyjádření poloměru Měsíce ve tvaru:

$$R_M \approx \frac{3}{11} R_Z. \quad (2.21)$$

Podle Hipparcha je tedy poloměr Měsíce přibližně roven  $3/11$  poloměru Země. V porovnání se současnou hodnotou poměrového vyjádření poloměru Měsíce (tj.  $0,27R_Z$ ) to je obdivuhodně přesný výsledek.

Hipparchos použil k určení vzdálenosti Země – Měsíc Aristarchovu metodu, která se od té doby používala v astronomii velmi často [2]. Jestliže do vztahu (2.11) dosadíme poloměr Měsíce, který je podle Aristarcha vyjádřen vztahem (2.15), získáme po úpravě jeho přibližné vyjádření vzdálenosti Měsíce od Země  $R_{MZ}$  ve tvaru:

$$R_{MZ} \approx 217R_M. \quad (2.22)$$

Dosadíme-li do vztahu (2.22) vyjádření poloměru Měsíce (2.21), získáme pro vzdálenost Země – Měsíc takový vztah, jak ho kdysi v dávných antických dobách určil sám Hipparchos, tj.

$$R_{MZ} \approx 59R_Z. \quad (2.23)$$

Podle Hipparcha se Měsíc nachází od Země ve vzdálenosti, která přibližně odpovídá 59 poloměrům Země. Opět se jedná o poměrně přesnou hodnotu.

Obdobným postupem můžeme uvést i určení vzdálenosti Země – Slunce  $R_{ZS}$ . Hipparchos i zde vycházel z výsledků získaných Aristarchem. Jedná se konkrétně o vztahy (2.14) a (2.15). Z nich po jednoduché úpravě a dosazením vztahu (2.21) můžeme uvést jeho přibližné vyjádření zmíněné vzdálenosti  $R_{ZS}$  ve tvaru:

$$R_{ZS} \approx 4114R_M \approx 1122R_Z. \quad (2.24)$$

Hipparchos zde tedy předpokládal, že Země se nachází od Slunce ve vzdálenosti odpovídající 1 122 poloměrům Země. Po dosazení současné číselné hodnoty poloměru Země do vztahu (2.24) získáme vzdálenost Země od Slunce o hodnotě 7 156 116 km. To je přibližně 20 krát méně než uvádějí současná astronomická měření.

Při výkladu pohybu planet údajně používal Hipparchos opět model epicyklů a excentrických deferentů. Zda je i zde jejich autorem či je převzal, to nevíme.

Za největší Hipparchův přínos astronomii můžeme považovat katalog, ve kterém popsal přibližně 850 hvězd [2]. Určil také jejich souřadnice na obloze pomocí ekliptikální soustavy souřadnic vztažených k roku asi 129 př. n. l.

Velmi zásadní je jeho rozdělení hvězd do šesti tříd, na základě pozorování jejich světla pouhým okem [2]. Nejjasnější hvězdě přiřadil hvězdnou velikost rovnou hodnotě

jedna, nejslabší hodnotě šest. Vlastní intuicí tak vystihl logaritmický vztah mezi podnětem a vlastním vjemem.

Hipparchos byl svým způsobem i vizionář. Uvědomil si, že délka lidského života je vzhledem ke stáří vesmíru nicotná, přesněji zcela zanedbatelná. Tato myšlenka a výbuch supernovy v roce 134 před Kristem v souhvězdí Štíra ho vedla k sestavení onoho katalogu hvězd. Přesněji řečeno, domníváme se, že tomu tak bylo.

S trochou nadsázky bychom mohli říci, že Hipparchos sehrál podobnou roli jako Tycho Brahe na prahu moderní astronomie. Díky pečlivému pozorování získali jeho následovníci dostatečné množství kvalitních dat, které pak zpracovávali.

### 2.2.5 Klaudios Ptolemaios

Za nejznámějšího představitele a současně za dovršitele řecké astronomie je považován alexandrijský geograf, matematik, astrolog a především astronom Klaudios Ptolemaios (asi 85 – asi 165 let po Kristu). Tato významná osobnost se stala symbolem geocentrického pohledu na vesmír, který vyhovoval řadě teologů až do 19. Století [7]. Jeho velmi cenný přínos pro astronomii spočíval hlavně v tom, že shromáždil, utřídil a zasadil do logického celku veškeré tehdejší astronomické poznatky. Výsledkem jeho usilovné práce byl první ucelený geocentrický model vesmíru popisující strukturu sluneční soustavy a pohyby jejích kosmických těles. Tento model též dokázal do jisté míry vysvětlit všechny tehdy pozorované jevy na obloze [9].

Jako místo jeho narození se podle některých historických pramenů uvádí Horní Egypt, přesněji tehdejší osada Hermiou. Podle původu jeho jména se též uvádí, že údajně pocházel ze smíšené římsko-egyptské rodiny [7]. O jeho vytříbené astronomické a matematické vzdělání se zasloužil řecký filozof, matematik a astronom Theón ze Smyrny (70 – 135 po Kristu) [7].

Jak již bylo zmíněno, Ptolemaios svá astronomická měření prováděl v Alexandrii a v tamější známé alexandrijské knihovně údajně vzniklo i jeho stěžejní veledílo *Velká skladba astronomie* (*Megalé syntaxis tés astronomás*) viz obr. P16. Toto dílo bylo později uváděno pod názvem *Almagest*. Kniha byla totiž v 10. století přeložena do arabštiny pod názvem *Tabrir al maghesti* a odtud se pak dostala v latinském překladu do Evropy pod již zkomoleným názvem *Almagest* [9]. Ptolemaios dále napsal předběžný výklad svých názorů a teorií uváděný pod názvem *Kanopská*

poznámka (*Canobic Inscription*). Po dokončení *Almagestu* přistoupil k sepsání astrologického spisu *Tetrabiblos*, česky *Čtyři knihy*. Později Ptolemaios také napsal encyklopedii týkající se geografie a optiky [2].

Jako u některých jeho předchůdců i následovníků sehrála významnou roli v jeho bádání astrologie. Věřil, jako mnozí i dnes, že osudy na planetě Zemi určuje postavení vesmírných objektů [2]. Údaje o postavení těchto objektů získával z astronomie. Jsme zde opět svědky, že z dnešního hlediska scestná „věda“ astrologie přispěla k vývoji astronomie, stejně jako alchymie k rozvoji přispěla chemie.

Co se týká *Almagestu*, jedná se o unikátní astronomické dílo, ve kterém jsou shrnuty veškeré tehdejší poznatky o vesmíru. Ptolemaios v něm uvádí kosmologické myšlenky a výsledky měření od celé řady tehdejších významných řeckých a babylonských astronomů [7]. Obdivuhodné je, že tento „klenot“, představující vědecký odkaz antiky, odolával celých 1400 let, než byla jeho základní teze zcela vyvrácena. Jako základní výchozí princip celého díla máme na mysli Ptolemaiovův geocentrismus. Jinak řečeno, jeho kosmologie byla opřena o výsadní postavení Země uprostřed vesmíru. Z hlediska rozsáhlosti je celé dílo tvořeno třinácti knihami, které se četly velmi obtížně. Proto bylo toto dílo na středověkých universitách nahrazováno příručkami, které podávaly jeho výklad zjednodušeně [21]. Obsahová stránka celého díla je stručně uvedena v následujících odstavcích.

První a druhá kniha je věnována teoretické astronomii a matematickým metodám výpočtů. Poprvé se zde objevuje i zmínka o astronomické refrakci, která je vysvětlována různou vlhkostí vzduchu [21]. V první knize je též velmi pečlivě vybudována sférická geometrie, a to včetně velmi precizních důkazů předkládaných tvrzení. Nedílnou součástí této knihy jsou také tabulky polovičních délek tětív, které spolu s ostatním matematickým aparátem slouží k astronomickým výpočtům [7]. První dvě knihy nám dále představují i Ptolemaiovu koncepci vesmíru.

Třetí a čtvrtá kniha popisuje pohyb Slunce a Měsíce, přičemž sklon roviny ekliptiky k rovině světového rovníku Ptolemaios určil na  $23^{\circ}51'$  [21]. Dále zde zavedl střední hodnoty denního pohybu Slunce a ročního pohybu Slunce po obloze a našel vztahy mezi tzv. pravým slunečním časem a středním slunečním časem.

Pátá kniha se skládá ze dvou částí. V první části Ptolemaios popisuje pozorovací přístroj, který dnes nazýváme armilární sféra (obr. P17) [7]. V *Almagestu* jsou rovněž podrobně popsány i další poměrně jednoduchá zařízení, které astronomové používali při svých měřeních vesmíru. Příkladem může být astroláb, kvadrant či triquetrum –

paralaktické pravítko. Ve druhé části jsou vyloženy metody k určování vzdálenosti Slunce a Měsíce. Objasňuje zde měsíční a sluneční paralaxu, která slouží k výpočtům vzdáleností vlastně i dnes. Tabulky na toto téma jsou opět součástí knihy a jsou nejsložitější ze všech, které Ptolemaios uvádí v *Almagestu* [7].

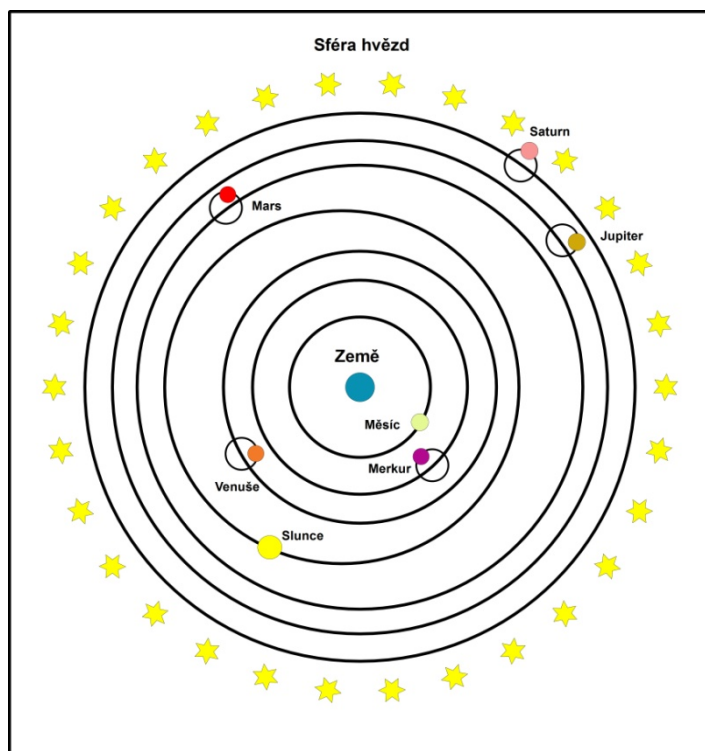
Šestá kniha obsahuje výpočty doby zatmění Slunce a zatmění Měsíce. Tyto předpovědi souhlasily se skutečností po celá staletí. Je známo, že například Babyloňané očekávali zatmění Slunce pouze na základě vypočítané periody *saros* (6585,35 dne  $\approx$  18 roků a 10 dnů). Tuto hodnotu v knize zmiňuje i Ptolemaios, který ji převzal od Hipparcha a ten zas právě od Babyloňanů [2]. V knize se údajně též nachází zmínka o tom, jak Řekové zvládli datum jednotlivých zatmění vypočítat na základě kinematického modelu pohybu nebeských těles.

Sedmá a osmá kniha obsahují katalog hvězd, jejichž počet překračuje tisíc. Jsou rozděleny do čtyřiceti osmi souhvězdí. Vzhledem k tehdejším možnostem pozorovatele je nutno omluvit jisté nepřesnosti. Třeba to, že některé hvězdy Ptolemaios uvádí dvakrát, případně je zaměňuje za hvězdokupy či mlhoviny [2].

Devátá až třináctá kniha je kosmologického rázu, neboť je věnována pohybům planet. Je zde vyložena již zmíněná Hipparchův systém epicyklů a deferentů, který Ptolemaios doplňuje tak, aby vysvětlil skutečně všechny pozorované pohyby a přitom zajistil rovnoměrný pohyb nebeských těles, čímž musel údajně zavést až 40 epicyklů [21]. Konkrétně devátá kniha podává výklad o celkovém pohledu na vesmír v podobě pověstného sférického modelu planetární soustavy a systému soustředných kružnic se Zemí uprostřed. Dále například ve dvanácté knize se Ptolemaios výhradně zabývá objasněním zdánlivě zpětného pohybu planet [21].

Z obsahové stránky *Almagestu* tedy vyplývá Ptolemaiovo velké úsilí postihnout vesmír jako celek, a to se všemi tehdy známými astronomickými jevy.

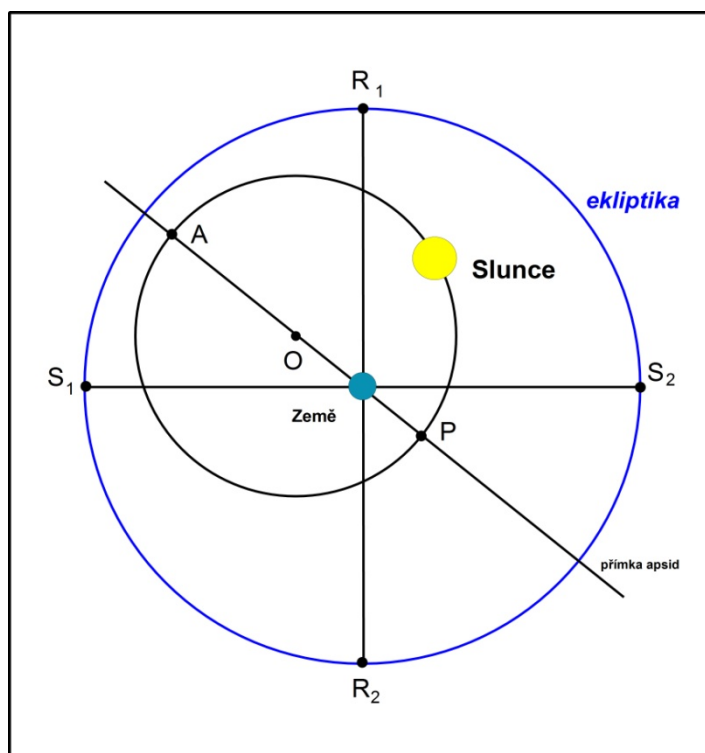
S ohledem na téma diplomové práce se již dále podrobněji věnujme jen některým částem tohoto díla. Za hlubší pozornost především stojí geocentrická planetární soustava. Při jejím budování v podobě geometrického modelu Ptolemaios vycházel ze základního předpokladu týkajícího se polohy Země. Plně přijal postulát o Zemi, nacházející se ve středu vesmíru, jak již ve své době prosazoval sám Aristoteles [7]. V následujícím obrázku 2-10 je zakresleno jeho schéma celkového uspořádání vesmíru.



**Obr. 2-10:** Celkové uspořádání vesmíru jak si ho představoval Klaudios Ptolemaios.

Tvoří jí nehybná, neotáčející se Země, kolem které obíhají výhradně po kruhových trajektoriích ostatní vesmírná tělesa. Při podrobnějším studiu tohoto schématu zjistíme, že Ptolemaios zde opravdu z velké části vycházel z Hipparcha, neboť stejně jako on používal při popisu pohybů planet ideální geometrické tvary, tj. malé kružnice (epicykly) a velké kružnice (deferenty). Jak již víme, jedná se o charakteristické kružnice, které Ptolemaios považoval za zdánlivé objekty, nezbytné pro shodu představ a skutečných pohybů planet, jak je pozorujeme ze Země na pozadí hvězdné oblohy. Kosmická tělesa se rovnoměrně pohybují po epicyklech, jejichž středy se rovněž rovnoměrně pohybují po deferentech. Tímto způsobem se mu podařilo celkově vysvětlit nerovnoměrný pohyb kosmických těles, pozorovaný ze Země. Z obrázku je též patrná jistá odlišnost v umístění kruhové trajektorie obíhajícího Slunce kolem Země. Není totiž středově symetrická jako ostatní deferenty, ale je výstředná vzhledem k Zemi. Jak již bylo výše uvedeno, důvodem zavedení této anomálie v poloze trajektorie Slunce, byla snaha v modelu objasnit nestejnou délku čtvrtletí [7].

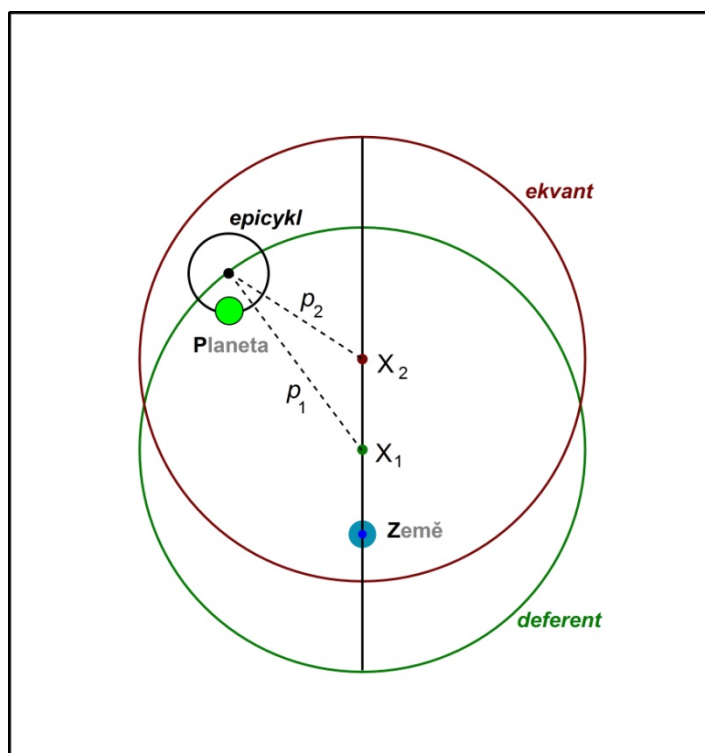
Ptolemaios podrobněji popisuje pohyb Slunce prostřednictvím geometrického modelu, jehož schéma je zachyceno v obrázku 2-11 [7].



**Obr. 2-11:** Ptolemaiovo geometrické schéma pohybu Slunce kolem Země.

Zde stojí za povšimnutí charakteristická kružnice (ekliptika), na kterou se při pohledu ze Země promítá pohyb Slunce. Nerovnoměrný pohyb Slunce je zde vyřešen kružnicí se středem v bodě  $O$ , tj. mimo střed Země. Body  $S_1$  a  $S_2$  spojené úsečkou představují místa slunovratu. Druhá úsečka zase spojuje body  $R_1$  a  $R_2$ , ve kterých jsou uvažována místa rovnodennosti. Na kružnici, představující trajektorii Slunce, jsou vyznačeny body  $A$  (Apogeeum) a  $P$  (Perigeum), znázorňující místa, kde se Slunce pohybuje nejrychleji a nejpomaleji. Ve schématu nechybí ani přímka apsid (tj. spojnice bodů  $AP$ ), kterou Ptolemaios vzhledem k bodům slunovratu celkem správně odklonil.

Jak již bylo předesláno, Ptolemaios se usilovně zabýval vytvořením takového geometrického modelu pohybu planet, který by co nejdělněji popisoval skutečné, pozorované pohyby, změny rychlosti pohybu planet a zároveň neztracoval jejich kruhové rovnoměrné pohyby. Proto při sestavování daného modelu používal kromě epicyklů a deferentů další jím zavedený typ kružnice zvaný *ekvant* [7]. Uplatnění této kružnice je obecně objasněno ve schématu 2-12, týkajícího se jeho modelu, zaměřeného právě na pohyb planet.



**Obr. 2-12:** Ptolemaiovo geometrické schéma pro popis pohybu dané planety kolem Země.

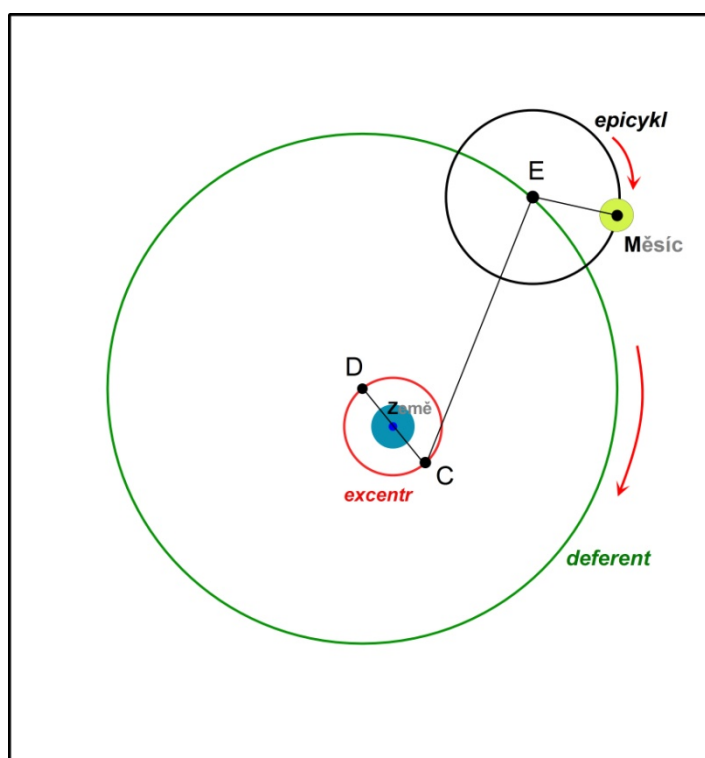
Ze schématu je patrné, že Země, nacházející se v bodě  $Z$ , je od středu deferentu  $X_1$  ve stejné vzdálenosti, jako je vzdálenost středu ekvantu  $X_2$  od středu deferentu  $X_1$ . Ptolemaios zde dále předpokládal, že daný epicykl, nesoucí uvažovanou planetu  $P$ , se s jeho středem pohyboval po deferentu tak, že průvodič  $p_2$ , vedený ze středu ekvantu, se stáčel rovnoměrně, zatím co průvodič  $p_1$ , vedený ze středu deferentu, se stáčel nerovnoměrně. To znamená, že pohyb kosmického tělesa po deferentu se sice jevil jako rovnoměrný, ale pokud byl pozorován ne ze středu deferentu, nýbrž ze středu ekvantu, jakého si vyrovnávacího bodu. Zavedením ekvantu tak Ptolemaios ve svých modelech zajistil vždy určitou přítomnost rovnoměrných pohybů kosmických těles a především více zpřesnil shodu v modelování jejich pohybů s pozorováním.

Co se týče popisu pohybu Měsíce jakožto nejbližšího tělesa k Zemi, i zde byl Ptolemaios velmi důsledný. Při modelování jeho pohybu totiž bral v úvahu celou řadu pozorovaných jevů, ovlivňujících skutečný pohyb Měsíce kolem Země, a to bez znalosti jejich příčiny. Příkladem může být kolísání úhlové rychlosti v jednotlivých fázích Měsíce v intervalu od  $10^{\circ}2'$  do  $16^{\circ}18'$  [7]. Toto kolísání, jak je Ptolemaios nazývá, je více znatelné ve čtvrtích než v úplňku. Dalším znatelným jevem je porucha pohybu



Měsíce asi o  $1^\circ$  [2]. Podstatu tohoto jevu poprvé vysvětlil až Isaac Newton. Vše spočívá ve změně polohy Měsíce vzhledem ke Slunci. V novu je Měsíc blíže ke Slunci než Země. Slunce má tendenci, jak známe z Newtonova gravitačního zákona, „přitáhnout“ Měsíc k sobě a „vzdálit“ ho od Země, následkem čehož je dráha Měsíce protažena směrem ke Slunci. Poruchové působení Slunce dosahuje maxima v perihéliu a minima v aféliu zemské dráhy. V dnešní době tuto poruchu známe pod označením *evokce*, které zavedl již v roce 1634 francouzský astronom Ismaël Boulliau (1605 – 1694), významný pozorovatel proměnných hvězd [2].

Ptolemaios tak při vytváření co nejpřesnějšího modelu pohybu Měsíce vycházel ze skládání tří rovnoměrných kruhových pohybů [7]. Tento složený pohyb vystihuje schéma v níže uvedeném obrázku 2-13.



**Obr. 2-13:** Ptolemaiovo geometrické schéma pro popis pohybu Měsíce kolem Země.

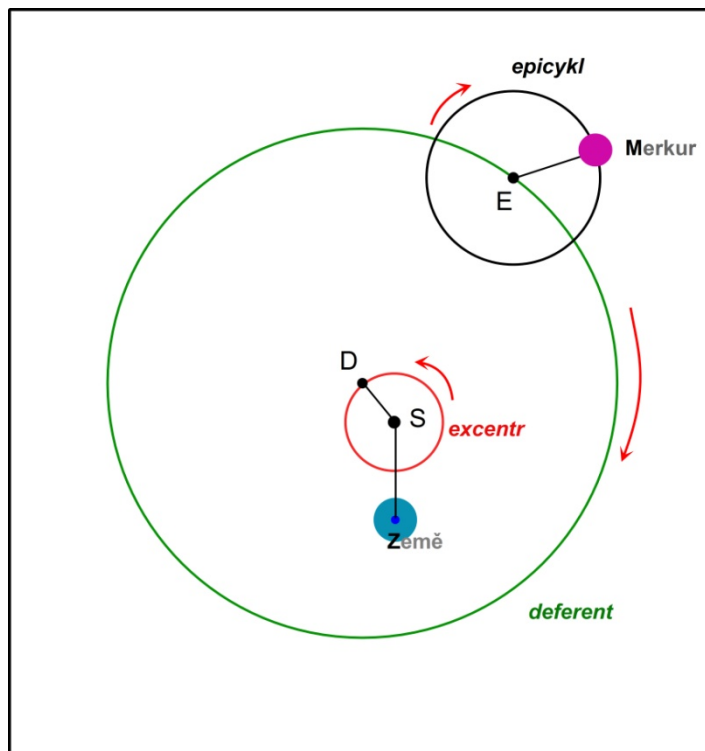
Měsíc se zde rovnoměrně pohybuje po epicyklu, jehož střed *E* zároveň rovnoměrně opisuje deferent. Střed deferentu *D* není ovšem totožný se středem Země, nýbrž rovnoměrně opisuje kolem ní kružnici zvanou *excentr* [7]. Ptolemaios zde dále předpokládal, že střed epicyklu *E* se pohybuje dvakrát větší rychlostí, než střed deferentu *D*. Přímka *CE*, zobrazená ve schématu, se pak stáčí rovnoměrně od západu k východu. Toto modelové uspořádání pohybů objasněné prostřednictvím schématu,

uspokojivě vyhovovalo i skutečnosti, že při něm nedocházelo ke zdatelné změně zdánlivé velikosti Měsíce.

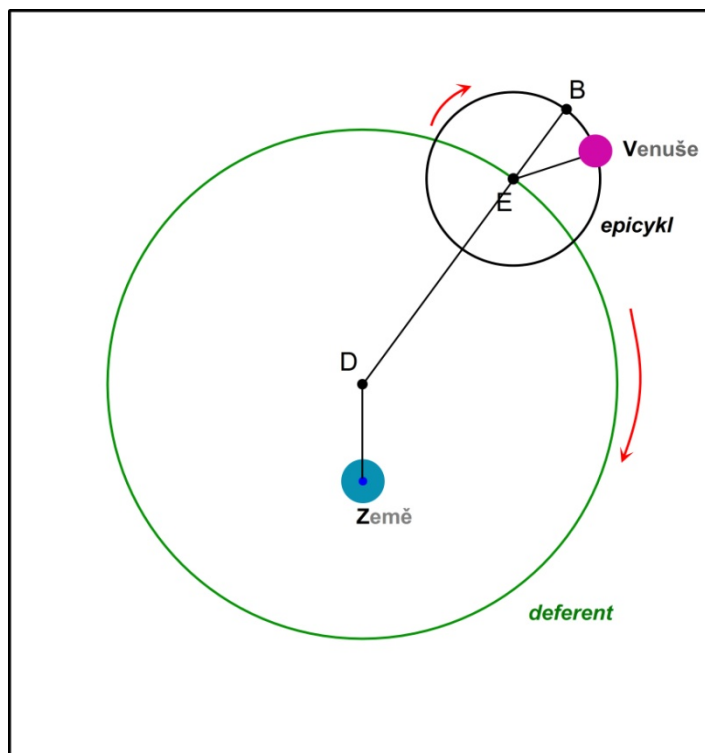
Jestliže bychom měli možnost nahlédnout a provést hlubší rozbor Ptolemaiova *Almagestu*, tak bychom jistě s obdivem zjistili, že Ptolemaios v deváté až třinácté knize systematicky analyzoval kinematiku pěti tehdy známých planet nezávisle jedné na druhé. Nejprve zde postupně uvádí popis pohybu vnitřních planet (Merkur a Venuše) a dále následuje popis pohybu vnějších planet (Mars, Jupiter, Saturn). Při tom opět využíval nejméně jeden epicykl a jeden deferent [7]. Zdali se jedná o vnitřní nebo vnější planetu Ptolemaios ve své době samozřejmě přímo nevěděl. Usuzoval tak na základě svého pozorování. Všiml si, že Merkur s Venuší se od Slunce příliš nevzdalují, zatím co Mars, Jupiter a Saturn se dostávají do velkých opozic [7].

Například jeho počínání při sestavování kinematického modelu planety Merkur bylo následující. Jako výchozí bod mu posloužily výsledky měření největší úhlové vzdálenosti planety od Slunce (tj. asi  $19^\circ$ ), které údajně prováděl v ranních či večerních hodinách. Celkem se jednalo o tři pozorování – dvě vlastní z let 137 a 138 po Kristu a jedno převzaté od Theóna Alexandrijského z roku 129 po Kristu [7]. Především pomocí těchto pozorování vytvářel zmiňovaný kinematický model, jehož schéma je zachyceno v obrázku 2-14. Ze schématu je patrný pohyb středu  $D$  deferentu planety po excentru. Poloměr excentru je rovný polovině vzdálenosti  $ZS$ .

Naprosto analogicky postupoval i při sestavování kinematického modelu planety Venuše. Opět použil vlastní i převzaté výsledky měření největší úhlové vzdálenosti této planety od Slunce. Z dochovaných záznamů plyne, že Ptolemaios údajně v roce 136 po Kristu naměřil úhlovou vzdálenost  $47,25^\circ$  [7]. Tato hodnota se rovněž shodovala i s dvěma výsledky pozorování z let 119 a 132 po Kristu, které opět ve svých pracích uváděl Theón Alexandrijský. Z obrázku 2-15 je patrné, že výsledné schéma popisující pohyb Venuše je podstatně jednodušší než u Merkuru. Obsahovalo pouze jeden výstředný deferent  $d$  a jeden epicykl  $e$ . Vyznačená spojnice mezi body  $D$ ,  $E$  a  $B$  se otáčela kolem středu  $D$  deferentu planety s konstantní úhlovou rychlostí, vůči pozorovateli ze Země  $Z$  však nerovnoměrně. Co se týče modelování pohybu vnějších planet, Ptolemaios vycházel ze stejného principu jako u Venuše. Proto se jejich bližšímu popisu již nadále nebudeme věnovat.



**Obr. 2-14:** Ptolemaiovo geometrické schéma pro popis pohybu Merkuru kolem Země.



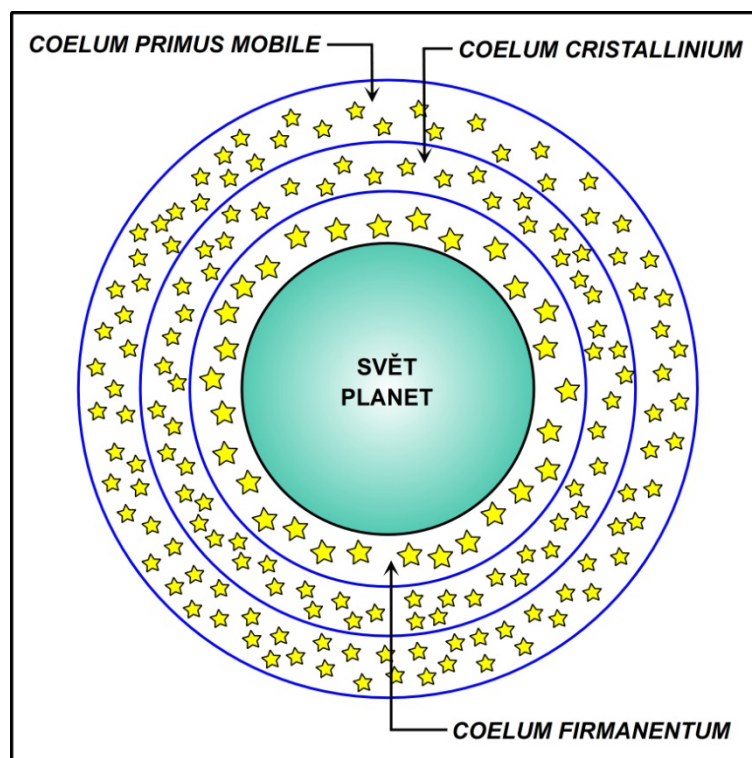
**Obr. 2-15:** Ptolemaiovo geometrické schéma pro popis pohybu Merkuru kolem Země.

Všechny jeho kinematické modely planetárních pohybů zahrnovaly vlastnosti, které byly dostatečně ve shodě s tehdejšími výsledky pozorování. Pro zajímavost zde uvedme souhrnný výčet těchto vlastností [9]:

- *Země a středy epicyklů Merkuru, Venuše a Slunce leží vždy na jedné přímce. Tím je oběžná doba středů epicyklů Merkuru a Venuše kolem Země přesně rovna jednomu roku.*
- *Oběžná doba vnitřních planet po jejich epicyklech je různá. U Merkuru odpovídá 88 dnům a u Venuše o 137 dní více, tedy 225 dnům.*
- *Středy epicyklů vnějších planet obíhají po jejich deferentech též za různé časové intervaly. Například u Marsu za 687 dnů a téměř 30 roků u Saturnu.*
- *Mars, Jupiter a Saturn obíhají po epicyklech za jeden rok.*
- *Roviny deferentů Merkuru a Venuše jsou shodné s rovinou ekliptiky. Roviny epicyklů Marsu, Jupitera a Saturnu jsou rovnoběžné s rovinou ekliptiky.*
- *Roviny epicyklů Merkuru a Venuše, či roviny deferentů Marsu, Jupitera a Saturna jsou skloněny k rovině ekliptiky o malé úhly.*
- *U planet Mars, Jupiter a Saturn jsou spojnice středů epicyklů s planetou vždy rovnoběžné se směrem Země - Slunce.*

Ptolemaios rovněž dokázal vhodnou kombinací určitých epicyklů a deferentů u jednotlivých modelů modelovat i pozorované charakteristické pohyby, jako jsou například přechodné, zdánlivě zpětné pohyby planet [9].

Nutno říci, že jeho touha po astronomickém poznávání, týkající se představy uspořádání vesmírných těles kolem Země, sahala mnohem dále, než byl prostor poslední sféry planety Saturn. Stejně jako jeho předchůdci i on se věnoval popisu uspořádání hvězdného vesmíru. Ptolemaios odhalil jistou změnu polohy hvězd, a to díky svému důkladnému studiu několik set let starých údajů o polohách hvězd. Nápomocné mu jistě zde bylo i jeho pečlivé pozorování hvězdné oblohy. Tento pohyb hvězd si vyložil jako tzv. kolébání sféry hvězd (*Coelum firmanentum*) kolem dvou bodů, které se nacházely již na další sféře (*Coelum cristallinum*) [7]. Ptolemaios nad tuto sféru nakonec umístil ještě třetí hvězdnou sféru, kterou nazval sféra prvního hybatele (*Coelum primus mobile*) [7]. Dále již uvažoval jakési empyrové nebe obklopující všechny tři hvězdné sféry (obr. 2-16). Z dnešního pohledu tak jistě můžeme říci, že stejně jako jeho předchůdce Hipparchos i on při tomto počínu do jisté míry popisoval precesní pohyb zemské osy.



Obr. 2-16: Ptolemaiova představa hvězdného vesmíru.

Ptolemaios se svým způsobem hypoteticky rovněž zabýval i určováním vzdáleností jednotlivých vesmírných těles. V jeho pozdějším dvousvazkovém spise, který je uváděn pod názvem *Planetární hypotézy*, se pokusil řešit problematiku týkající se absolutních vzdáleností planet [9]. Výchozím bodem se mu zde stal předpoklad, že maximální vzdálenost vnější planety od středu Země je rovna minimální vzdálenosti následující vnitřní planety (tabulka č. 5). V tomto spise dále uvádí poměry velikostí poloměrů epicyklů a deferentů všech pěti planet (tabulka č. 4). Tyto poměry údajně určil pomocí kombinace údajů z pozorování s výpočty metodou postupných aproximací.

Vnitřní planety		Vnější planety		
Merkur	Venuše	Mars	Jupiter	Saturn
0,376	0,720	0,658	0,129	0,103

Tabulka č. 4: Poměry velikostí poloměrů epicyklů a deferentů jednotlivých planet.

Nutno poznamenat, že Ptolemaios byl přístupný i k jiným modelům planetární soustavy. Právě v astronomickém díle *Planetární hypotézy* provedl podrobný rozbor Aristotelova modelu planetární soustavy [9]. Jak již bylo výše zmíněno, základními prvky tohoto modelu byly homocentrické křišťálové sféry. Každá sféra svou rotací přitom unášela jednu planetu. Podle Ptolemaia, měla příslušná sféra konečnou tloušťku, která byla dána minimální a maximální vzdáleností dané planety od středu Země. V následující tabulce č. 5 jsou tak pro názornost uvedeny vnitřní a vnější poloměry sfér kosmických těles, které Ptolemaios vyjádřil jako násobek poloměru Země  $R_Z$ .

Kosmické těleso	Měsíc	Merkur	Venuše	Slunce	Mars	Jupiter	Saturn
Vnitřní poloměr	33	64	166	1160	1260	8820	14187
Vnější poloměr	64	166	1079	1260	8820	14187	19865

Tabulka č. 5: Vnitřní a vnější poloměry sfér kosmických těles vyjádřené v poloměrech Země  $R_Z$ .

Ptolemaiovo počínání na poli astronomie, můžeme považovat opravdu za velkolepé. Neboť již jeho základní přínos spočívá v ucelení tehdejších astronomických znalostí do jediného díla a tím i jejich zachování pro další generace. Zároveň popisoval, jak a čím prováděl svoje pozorování. Též zavedl terminologii, částečně převzatou, částečně nově vytvořenou. Rovněž rozvádí dosavadní teorie a dále je rozšiřuje svými myšlenkami.

Jak již bylo předesláno, Ptolemaios jako první vytvořil ucelený astronomický obraz sluneční soustavy i celého vesmíru. Jeho model však měl pouze kinematicko-geometrický charakter, nezpracovával rozložení kosmických těles v prostoru. Nejasnou problematikou, například zda je rotace světových sfér, epicyklů a deferentů reálná, se autor nezabýval. Pro zachycení rozložení a pohybu kosmických těles po obloze zvolil geocentrickou soustavu, která je složitější než heliocentrická. Na druhou stranu model, který vypracoval, zcela zabezpečoval dostatečnou přesnost pro převážnou většinu vědeckých potřeb tehdejší doby. Ptolemaiovy spisy se staly vzorem v přístupu k řešení astronomických problémů prakticky až do doby Mikuláše Koperníka.

Ve vědecko-astronomických kruzích se Ptolemaiovi někdy vyčítá chybné zvolení geocentrické soustavy [2]. Kritikům nevhodnosti jejího používání lze jen

připomenout, že astronomické ročenky současnosti uvádějí efemeridy kosmických těles právě v geocentrické soustavě, tedy obdobně jako v dobách Ptolemaia.

### 3 ASTRONOMIE VE STŘEDOVĚKU A RENESANCI

Podle dochovaných historických písemností a jiných artefaktů je známo, že středověká astronomie nebyla, co se týče přemýšlení tehdejších astronomů o struktuře a velikosti vesmíru, zpočátku nějak převratná. Jejich touha po objevování nových astronomických poznatků byla zastíněna převažující spokojeností se stavem vědění, jehož základy tvořila antická astronomie. Prakticky až do počátku 16. století převažoval v tehdejších názorech na uspořádání vesmíru ucelený poznatkový systém řecké a římské kultury [7]. Máme především na mysli již zmíněné dílo Klaudia Ptolemaia *Almagest*, které vzdělání Arabové pečlivě ochránili před jeho ztracením [5]. A tím vlastně ulehčili práci jeho pokračovatelům. Na arabské učence tedy můžeme pohlížet jako na jaké si dědice antické astronomie.

Arabští učenci byli také významní tím, že vynikali ve zdokonalování pozorovací techniky. Například přidáním hvězdné mapy zdokonalili astroláb, jeden z nejstarších řeckých astronomických přístrojů, který v první řadě sloužil k měření výšky Slunce nebo hvězd nad obzorem (obr. P18) [5]. Upravený arabský závěsný astroláb z konce 8. století umožňoval určovat kromě zeměpisné šířky i dobu východu a západu Slunce a hvězd.

Za významného představitele arabské astronomie můžeme považovat syrského matematika a astronoma al-Battáního, zvaného *Albategnius* (850 – 929 po Kristu) viz obr. P19 [5]. Jeho práce na poli astronomie spočívala například ve zdokonalování Ptolemaiovy geocentrické soustavy uspořádání planet tím, že ji rozšířil o další pomocné kruhy (tj. epicykly a deferenty), obr. P20.

Charakteristickým prvkem středověké astronomie byla pozorovací činnost, spojená se sepisováním poloh planet (tj. efemerid) v podobě tabulek. Východiskem při sestavování takových tabulek byl zmíněný ptolemaiovský geocentrický systém, který umožňoval provést výpočet tak, že čísla v tabulkách vyjadřovala dostatečně přesně polohy planet v určitém čase. Svoje výsledky z pozorování tabelárně zpracovával i Al-Battání na observatoři v Racce v letech 877 – 919 po Kristu [7]. Na základě těchto astronomických tabulek vznikly tzv. *Toledské tabulky*, jejichž autorem je arabský astronom al-Zarkálí zvaný *Arzachel* (1029 – 1087 po Kristu) [7]. Následně Toledské astronomické tabulky přispěly ke vzniku slavných Alfonsíných tabulek ze 13. století. Tyto tabulky vznikly na žádost kastilského krále Alfonse X. (1211 – 1284) zvaného *Moudrý* v roce 1252. Údajně na nich pracovalo přes padesát křesťanských, arabských a židovských učenců [22]. Je známo, že tyto tabulky obsahovaly kromě poloh



nebeských těles i výklad trigonometrie a chronologie a také astrologie. Tehdejší astronomům byly velmi užitečné po celý středověk.

### 3.1 Georg von Peurbach a Johannes Müller-Regiomontanus

O následný rozvoj astronomie v 15. století se zasloužili dva významní astronomové, kteří jsou považováni za představitele tzv. vídeňské astronomické školy. První z nich byl rakouský astronom a matematik Georg von Peurbach (1423 – 1462), který se též zabýval praktickými výpočty a astronomickým pozorováním (obr. P21) [7]. Kromě toho, že od roku 1458 působil na vídeňské univerzitě, kde vedl přednášky z matematiky, vydal i astronomické tabulky popisující zatmění Slunce a Měsíce. Peurbach je především známý tím, že se pokusil sjednotit Eudoxova a Aristotelova učení o planetárních sférách s Ptolemaiovou soustavou epicyklů a deferentů, se kterou se seznámil prostřednictvím studia *Almagestu* během svého pobytu v Itálii [23]. Například pozoruhodná je jeho představa uspořádání pohybujících se kosmických těles kolem Země. Stejně jako Ptolemaios i on předpokládal, že každá planetární sféra je tvořena dvěma kulovými plochami, které vymezují největší a nejmenší vzdálenost planety od Slunce, a planeta se pohybuje mezi nimi. Touto představou se snažil vysvětlit proměnnou jasnost planet.

Druhým výrazným astronomem středověku byl Peurbachův žák německý astronom, matematik, astrolog a překladatel Johannes Müller zvaný *Regiomontanus* (1436 – 1476) viz obr. P21 [23]. Je známo, že Regiomontanus byl na poli astronomie velmi činný. Jeho znalost řeckého jazyka byla na velmi vysoké úrovni, což mu umožnilo lépe pochopit a pečlivěji prostudovat Ptolemaiovu *Almagest*. Na základě toho provedl korekci dosavadního překladu. Následně v roce 1496 díky nedávno vynalezenému knihtisku vychází jeho vlastní latinský překlad *Almagestu*, který je uváděn pod názvem *Epistome in Almagestum Ptolemai*. Dále například v roce 1467 dokončil v Ofenu *Tabulky prvního pohybu (Tabulae primi mobilis)*, které obsahovaly vlastní hodnoty sinů vybraných úhlů [7]. Nebo ve vlastní tiskárně v Norimberku pomocí ním zdokonaleného knihtisku vydal knihu svého učitele Peurbacha *Nová teorie planet* a následně i své *Efemeridy (Ephemerides astronomicae)*, které sestavil na základě nových, vlastních pozorování. Jednalo se o hvězdářskou ročenku s údaji pro léta 1475 - 1506 s intervalem jednoho dne, tedy pro období, ve kterém vrcholily námořní plavby.

Regiomontanovy astronomické tabulky tak údajně používali významní mořeplavci, jako byl Kryštof Kolumbus, Vasco de Gama nebo Amerigo Vespucci (obr. P22) [24].

Regiomontanus se také zabýval představou o vzdálenostech mezi kosmickými tělesy. Můžeme tak usuzovat z dochovaných záznamů o jeho měření paralaxy komety z roku 1472, které prováděl pomocí Jakobovy hole (obr. P23) [7]. Její paralaxu stanovil na hodnotu  $6^\circ$ , což znamenalo, že se kometa nachází blíže k Zemi než Měsíc. Tímto měřením tak nepřímo potvrdil Aristotelovo učení o tom, že komety jsou proměnlivým astronomickým jevem a mají se nacházet v tzv. „podměsíční sféře“ [7]. Faktem je, že poměrně velká chyba způsobená nepřesností Jakobovy hole, byla ve vývoji poznávání vesmíru krokem zpět, ale i takové věci se během vývoje vědy stávají.

Souhrnně řečeno, oba výše uvedení představitelé středověké astronomie svými názory a pozorováním dali podnět k dalšímu studiu astronomie. I když některé jimi nastolené astronomické otázky a problémy přesáhly jejich možnosti, staly se impulsem pro astronomy v budoucnu. Konkrétně jejich tzv. astronomický program údajně zahrnoval úkoly jako například zrevidování poloh hvězd, které byly stanoveny Ptolemaiem, nebo určení základních parametrů komet.

### 3.2 Mikuláš Koperník

Zásadní zvrát ve vývoji představ a názorů na uspořádání vesmíru nastává na přelomu 15. a 16. století, a to příchodem vědce, jenž položil základy moderní astronomie. Byl jím slavný polský kněz, lékař a především astronom Mikuláš Koperník, který se narodil 19. 2. 1473 v Toruni, ležící na severu Polska (obr. P24) [25]. Jeho otec, uznávaný zámožný kupec a městský radní, náhle zemřel během morové epidemie v roce 1483. O desetiletého budoucího astronoma a jeho sourozence Ondřeje, Barboru a Kateřinu, se proto postaral matčin bratr, církevní hodnostář Lukáš Watzenrode (1447 – 1512). Poměrně tvrdý a rázný strýc, v té době zastávající úřad warmijského biskupa, brzy pochopil touhu svých synovců po vzdělání a podporoval je [26].

Koperníkův revoluční pohled na vesmír je zachycen v jeho dochovaném slavném díle *O oběžích nebeských sfér knih šest (De revolutionibus orbium coelestium libri VI)*. Šestisvazkové dílo vyšlo v roce 1543 v Norimberku [26]. Jeho obsahem byla především věcně a důkladně rozepsána představa o heliocentrismu, která byla po dlouhou dobu terčem ostré kritiky. Dílo kritizovala nejenom církve, ale i někteří pozdější velikáni světové astronomie.

Aby Koperník mohl své velkolepé dílo vytvořit, musel mít patřičné znalosti a přehled o veškerých poznatcích, které byly doposud v té době z astronomie známé. Proto je vhodné zmínit se o některých okamžicích spojených s jeho astronomickým životem. Zřejmě jeho první kroky k vědeckému poznávání vesmíru vedou na Jagellonskou univerzitu v Krakově, kde se společně s bratrem Ondřejem ke studiu zapsali v roce 1491 (obr. P25) [25]. Zde se mladý Mikuláš seznámil s teorií planet již zmíněného astronoma vídeňské školy Peurbacha. Zajímal se také o Alfonsínské astronomické tabulky, které byly spolu s Ptolemaiovým *Almagestem* základem přednášek z astronomie. Při výuce astronomie se též používaly spisy od Regiomontana. Matematika se přednášela podle Eukleidových *Základů* a studenti byli seznamováni i s dílem Aristotela. Koperníka zde údajně nejvíce ovlivnily přednášky astronoma Vojtěcha z Brudzewa (1445 – 1495), který mimo jiné velice poutavě vykládal Ptolemaiovův geocentrický model a nebál se upozornit i na jeho některé nepřesnosti a nedostatky [25]. Na jeho přednáškách se též hojně probíraly aktuální problémy astronomie 15. století. Příkladem může být pohyb planet, o kterém Vojtěch z Brudzewa často vedl se studenty diskuze. Z těchto diskuzí mohla vyplynout důležitá otázka, jak se bude jevit pohyb, jestliže změníme místo pozorovatele (tj. změníme vztažnou soustavu).

Po ní mohly též následovat úvahy o tom, že pohyb Slunce nemusí odpovídat skutečnému pohybu. A tudíž by mohlo jít o zdánlivý pohyb Slunce, který je pouze důsledkem pohybu Země kolem Slunce. Je docela pravděpodobné, že pozdější úvahy Mikuláše Koperníka o heliocentrickém systému se začaly rodit právě při těchto diskusích v Krakově. Faktem je, že pod vedením Vojtěcha z Brudzewa a vlivem historických děl, si Koperník začal uvědomovat problémy, které antická astronomie nevyřešila. Sám začal provádět vlastní astronomická měření, na základě kterých v něm začaly narůstat první pochyby o Ptolemaiově geocentrickém modelu vesmíru [26].

Další důležitou osobou, která ovlivnila Koperníkův astronomický život, byl vzdělaný italský učitel a astronom Domenico Maria Novara (1454 – 1504) z Ferrary [25]. Jejich přátelství vzniklo během studijního pobytu v hlavním městě renesance italské Bologni, kde se Koperník díky naléhání svého strýce zapsal 6. února 1497 na tamější univerzitě ke studiu práv. Jejich společná práce především spočívala v pozorování noční oblohy a v přemýšlení nad Ptolemaiovým geocentrickým modelem. Když dne 9. 3. 1497 společně pozorovali zákryt jasně hvězdy Aldebaran Měsícem, bylo jim jasné, že tento úkaz bude dalším krokem ke hledání jiného modelu sluneční soustavy [25]. Při jejich následujících nočních pozorováních objevili celou řadu nesrovnalostí mezi vlastním pozorováním a teoretickými předpověďmi vyplývajícími z Ptolemaiova modelu. Příkladem může být skutečnost, že Měsíc neměnil svůj úhlový průměr, jak by podle Ptolemaia měl.

V Itálii se též Koperník naučil dokonale ovládat řečtinu, znovu si přečetl Eukleidovy *Základy*, ale již v originální verzi [26]. Pečlivě prostudoval celou řadu astronomických děl, aby v širším záběru porozuměl co nejvíce soudobé astronomii i astronomii, popsané Ptolemaiem v jeho *Almagestu*. Velmi detailně se proto věnoval dílům od astronomů Puerbacha a Regiomontana [7].

Koperníkovo studium práv v Boloni sice nedopadlo úspěšně, ale zato si v Itálii za čtyři roky osvojil řadu poznatků a praktických metod, používaných v astronomii [7]. I jeho touha po předělání nevyhovujícího Ptolemaiova modelu zde silně vzrostla.

Koperník si byl také velice dobře vědom, že o heliocentrickém uspořádání vesmírných těles uvažovali již někteří staří Řekové v antice. Sám se s touto informací setkal během úspěšného studia lékařství v Padově v roce 1501 [26]. Zde totiž měl možnost si přečíst Plutarchův spis *O názorech filozofů*, kde se objevuje první náznak heliocentrického modelu v odkazech na díla Pythagorejců.

Další významné období v Koperníkově životě je z dnešního pohledu právem často nazýváno jako „Příprava velkého díla“, neboť v tomto období se nejprve zabýval svojí základní hypotézou o heliocentrické soustavě, kterou později detailněji rozvinul a sepsal ve svém hlavním díle *O obězích nebeských sfér knih šest* [27]. Koperník tedy svou činnost na poli astronomie zahájil tím, že údajně někdy kolem roku 1509 rozeslal zkrácené pojednání o své hypotéze na pouhých 10 stranách s názvem *Malý komentář (Nikolai Copernici de hypothesibus motuum coelestium a se constitutis commentariolus)* v rukopisné podobě pouze svým nejbližším příznivcům v Evropě. Vzhledem k odmítavé reakci z církevních kruhů své heliocentrické názory totiž tajil. Ani přes naléhání jeho přátel nechtěl až do vydání hlavního díla nic veřejně publikovat [27].

V Malém komentáři Koperník uvádí sedm základních myšlenek nové koncepce vesmíru bez matematického vysvětlení, které bylo nutné dále rozpracovat [27]. První z nich pojednává o tom, že nebeská tělesa a jejich trajektorie nemají jediný střed ve vesmíru. Druhá zase, že střed Země je středem trajektorie Měsíce, není ale středem světa. Pojmem střed světa rozuměl střed vesmíru. Je známo, že tehdy nebyl pro astronomy rozdíl mezi sluneční soustavou a celým vesmírem, neboť z vesmírných objektů mimo sluneční soustavu byly známy pouze hvězdy, které měly jakési výsadní postavení. Všechny totiž ležely na tzv. sféře stálic. Třetí myšlenka zastává názor, že všechny planety se pohybují kolem Slunce, které stojí ve středu jejich trajektorií. Co se týká vesmírných vzdáleností, tak ve čtvrté myšlence v podstatě uvádí, že vzdálenost Země od Slunce je nepatrná ve srovnání se vzdáleností hvězd od nás. Jednalo se o velice důležitou myšlenku, neboť až do Koperníkovy doby nikdo nepředpokládal tak velké rozměry vesmíru. Obecně se předpokládalo, že sféra nehybných hvězd ohraničovala vesmír bezprostředně za sférou Saturna. Zbylé tři myšlenky jsou čistě kinematického rázu. Na tehdejší dobu zde Koperník převratně tvrdí, že denní pohyb oblohy je zdánlivý pohyb a je odrazem otáčení Země kolem své osy. Dále tvrdí, že zdánlivý pohyb Slunce kolem Země je odrazem skutečného pohybu Země kolem Slunce. Též zastává myšlenku, že zdánlivé pohyby planet vznikají skládáním pohybu Země a planet. Tím též objasňuje smyčky opisované planetami na obloze v důsledku pohybu Země kolem Slunce.

K úvahám o novém pojetí vesmíru vedly tehdy Koperníka patrně dvě základní myšlenky. Především myšlenka významného německého filozofa, církevního hodnostáře či všestranného učenice Mikuláše Kusánského (1401 – 1464) o relativnosti pohybu, ale také myšlenka týkající se jednoduchosti a řádu. Usiloval totiž o to, aby jím

navržený heliocentrický model byl zároveň jednodušší než Ptolemaiův geocentrický model. Jak již bylo výše předesláno, Ptolemaiův geocentrický model obsahoval při svém zrodu 40 epicyklů. Postupem času, kdy byl model neustále doplňován a zpřesňován tak, aby jeho předpovědi stále souhlasily s pozorováními, vzrostl počet epicyklů na dvojnásobek [26]. Vzhledem ke složitosti modelu si Koperník údajně ani nedokázal přesně představit, jak by mohl fyzicky sestrojený model podle Ptolemaiovy teorie fungovat. Na druhou stranu faktem je, že tento model poskytoval po celou dobu jeho existence (tj. po dobu trvání 14 století) poměrně dobrou předpověď poloh planet na obloze. Toho si byl vědom i sám Koperník. Aby jeho jednodušší model z pohledů kritiků obstál, musel dávat ve srovnání se skutečností přesnější předpovědi než Ptolemaiův model. Navíc bylo nutné, aby nový model odpovídal i pozorováním, která byla učiněna v dřívějších dobách, v době Ptolemaia, Hipparcha, Aristarcha atd.

Koperník tedy při vytváření svého sluncestředného modelu musel přebudovat celou teorii pohybů planet a přitom s nimi zacházet jako s velkým celkem, který bude patrně podléhat nějakému jednotnému popisu. Současně si již uvědomoval, že vesmír v jeho představě bude výrazně větší než vesmír, který popisovali antičtí astronomové (Hipparchos, Aristarchos a další), kde byly vzdálenosti jednotlivých těles sluneční soustavy velmi podhodnocené.

Na svém heliocentrickém modelu začal intenzivně pracovat, když zaujal místo administrátora warmijské kapituly v Olsztýně v severním Polsku (obr. P26) [26]. Zde na tamějším zámku prováděl veškerá potřebná astronomická pozorování a měření. Pro pozorování Slunce ve dne si dokonce upravil jižní stěnu severozápadního zámeckého křídla jako velké stínítko s rozměry asi 140 cm a 750 cm, na které se pomocí odrazné plochy umístěné na parapetu okna promítal pohyb Slunce [27]. K vytvoření odrazné plochy mu údajně posloužilo zrcadlo, hladina rtuti v nádobě nebo hladina vína. Koperník byl první, kdo takový experiment konal. Kromě jiných pozorování zde 7. července roku 1518 pozoroval zatmění Slunce a 12. prosince téhož roku důležitou opozici Marsu. Za zmínku jistě stojí, že dodnes je na zámku tabule s hyperbolami a přímkou rovnodennosti s nápisem *AEKVINOCTIUM (rovnodennost)* [27]. Tento historický artefakt tak připomíná dobu, v níž se rodil heliocentrický model sluneční soustavy.

Nyní již můžeme přistoupit k pojednání o hlavním díle *O obězích nebeských sfér*. Koperník na tomto obzvlášť astronomicky cenném díle údajně pracoval přes třicet let, během kterých provedl velmi kvalitní pozorování, naměřená data propočítával,

rýsoval modely sluneční soustavy a vše důkladně zapisoval [7]. Na základě konkrétních dat byl schopen vyvozovat i obecné zákonitosti. Což je právě prvek, který činí jeho dílo tak převratným a odlišným od děl jeho předchůdců. Jelikož od Ptolemaia převzal rovnoměrný pohyb planet po kružnici, obsahoval i jeho popisovaný model jistý počet epicyklů, deferentů a pomocných kružnic. Důvod použití rovnoměrného pohybu po kružnici byl zřejmý, dal se totiž velmi dobře popsat i matematicky. Pohyb po jiných křivkách nebo pohyb proměnlivou velikostí rychlosti nebylo možné v té době matematikou popsat. Navíc uvažovat o pohybu jednoho tělesa kolem druhého po jiné trajektorii, než je kružnice, bylo myšlenkově nemožné. Vliv Aristotelova učení byl pořád ještě příliš silný [7].

Po obsahové stránce je spis tvořen šesti knihami. V první knize se Koperník především zabývá popisem jeho heliocentrického modelu, podle kterého Země a ostatní planety obíhají kolem Slunce po kruhových trajektoriích. Faktem je, že toto tvrzení nemohl dokázat pomocí dat získaných z pozorování. Jsou zde v podstatě uvedeny jeho hlavní myšlenky z *Malého komentáře*, které důkladně rozebírá v dalších knihách. Nechybí zde ani matematický aparát, který používá při řešení daného astronomického problému. Tvoří ho matematické věty z rovinné trigonometrie a sférické trigonometrie včetně jejich důkazů. V celém díle je též patrná inspirace Eukleidovými *Základy* [28].

Koperníkův výklad astronomických poznatků je v první knize rozdělen do čtrnácti kapitol [28]. Jak je vidět z názvů jednotlivých kapitol (tabulka č. 5), problematice sférického tvaru světa i Země věnoval první až osmou kapitolu. Například o tom, zda se Země pohybuje kruhovým pohybem nebo jaké místo ve vesmíru zaujímá, se zabývá v páté kapitole.

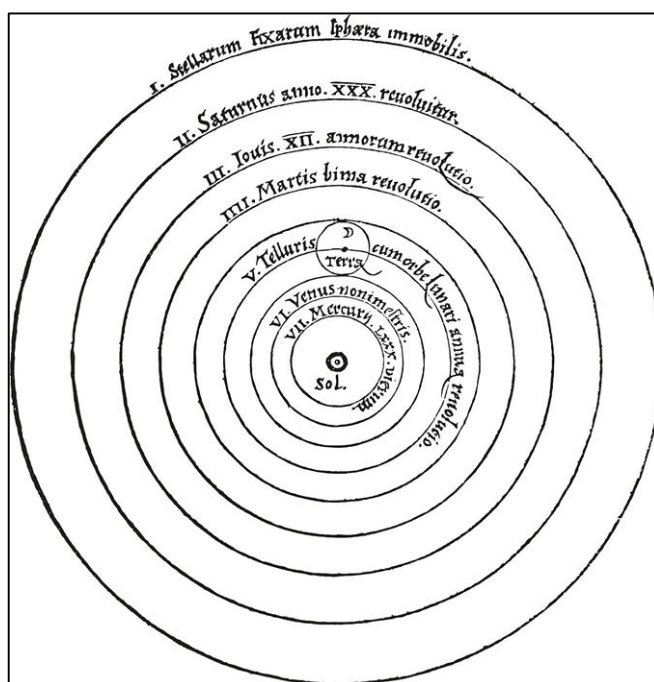
Číslo kapitoly	Název kapitoly
01.	<i>O tom, že svět je kulatý.</i>
02.	<i>O tom, že také Země je kulatá.</i>
03.	<i>O tom, jak Země s vodou tvoří jedinou kouli.</i>
04.	<i>O tom, že pohyb nebeských těles je rovnoměrný, kruhový, nepřetržitý anebo složený z kruhových pohybů.</i>
05.	<i>O tom, zda se Země pohybuje kruhovým pohybem, a o jejím místě.</i>
06.	<i>O nesmírné velikosti nebe vzhledem k velikosti Země.</i>
07.	<i>Proč se staří domnívali, že Země leží nehybně ve středu světa jako jeho centrum.</i>
08.	<i>Řešení předložených důvodů a jejich nedostatečnost.</i>
09.	<i>Zda je možné Zemi přisoudit více pohybů a o středu světa.</i>
10.	<i>O pořadí nebeských sfér.</i>
11.	<i>Důkaz o trojnásobném pohybu Země.</i>
12.	<i>O přímkách, které jsou těživami kruhu.</i>
13.	<i>O stranách a úhlech přímostranných rovinných trojúhelníků.</i>
14.	<i>O sférických trojúhelnících.</i>

Tabulka č. 5: Názvy čtrnácti kapitol první knihy Koperníkova díla *Oběhy nebeských sfér*.

Vzhledem k tématu mé diplomové práce stojí za pozornost desátá kapitola *O pořadí nebeských sfér*, v níž je mimo jiné umístěna známá kresba heliocentrické planetární soustavy (obr. 3-1) [2]. Koperník zde popisuje nový heliocentrický model světa. Polohu Slunce ve středu trajektorií planet bere jako výchozí předpoklad bez odůvodnění. Je třeba podotknout, že toto schéma je velmi zjednodušené a velmi často citované jako ukázka Koperníkova modelu světa. Ve skutečnosti totiž jeho model obsahoval 48 kružnic, kterými tak popisoval svůj model sluneční soustavy [28]. Také musel při dalších preciznějších výpočtech umístit Slunce mimo střed sféry Země. Jinak by nebyl schopen dopočítat nerovnoměrnosti pohybu Země a dalších planet při jejich obězích kolem Slunce. V desáté kapitole věnoval pozornost i absolutním vzdálenostem ve sluneční soustavě. Jeho představy o absolutních vzdálenostech byly však dosti chybné. Například vzdálenost Země od Slunce stanovil přibližně na  $1200 R_Z$ , což je



zhruba 7,5 milionů kilometrů. Tím tuto vzdálenost přibližně 20krát podcenil [2]. Nejvzdálenější v té době známá planeta Saturn se podle něj nacházela ve vzdálenosti jen 60 milionů kilometrů. Zde stojí rovněž za zmínku, že Koperník se zabýval i příčinou nenalezení paralaktických posuvů hvězd, které vzhledem k pohybující se Zemi musejí nastat. Tento astronomický problém komentuje slovy [2]: „*Přestože poloměr zemské dráhy je velký, přesto je nicotně malý ve srovnání se vzdáleností nehybných hvězd.*“ Zkrátka si uvědomoval, že příčinou, proč nelze pozorovat pohyb hvězd, je jejich velká vzdálenost od Země, respektive malá paralaxa. Faktem je, že tehdejší přesnost pozorování lidským okem a s primitivními prostředky (např. Jakobova hůl) ani nedovolovala stanovení malých paralax. Proto svůj model upravil tak, že sféru hvězd posunul až za sféru Saturna mnohem dále než jeho předchůdci [26].

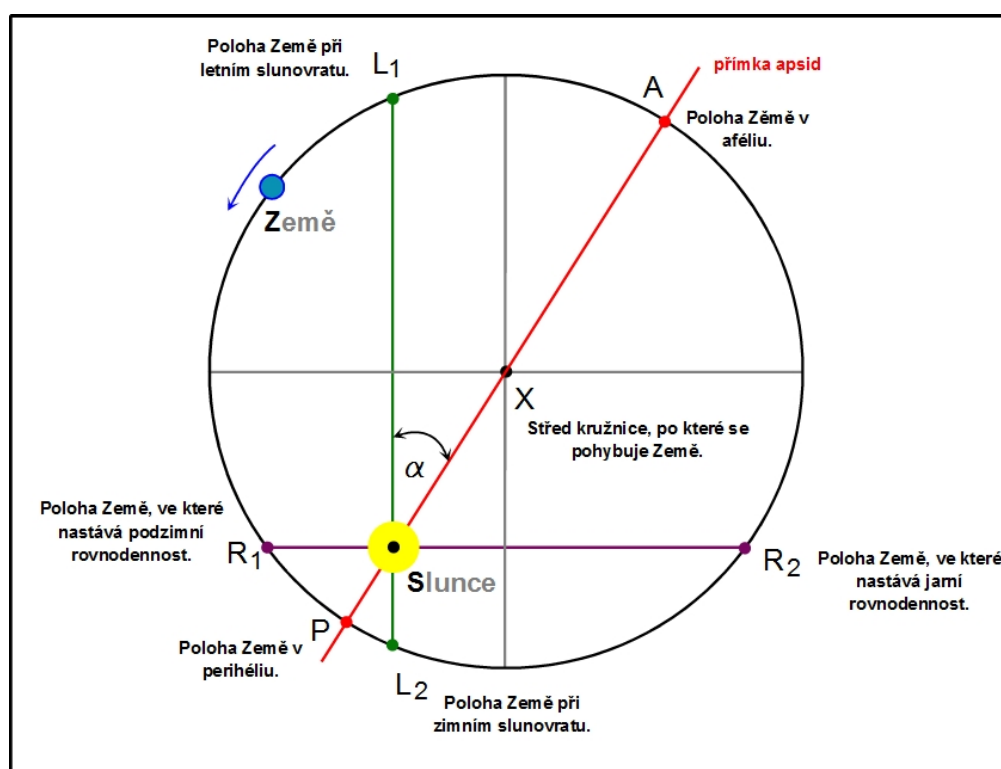


**Obr. 3-1:** Koperníkův heliocentrický model světa.

(upraveno z: <http://pfyziolifup.upol.cz/castwiki/?p=4347>)

V jedenácté kapitole se Koperník důsledně zabývá kinematikou Země. Podle něj Země vykonává celkem tři pohyby. Prvním pohybem míní rotační pohyb Země kolem své osy probíhající s periodou 24 hodin [26]. Jedná se vlastně o denní pohyb, který se projevuje střídáním dne a noci. Druhý pohyb je tzv. roční pohyb, tj. oběžný pohyb, který vykonává sféra Měsíce (střed sféry Měsíce a střed Země splývají). Tento pohyb probíhá s periodou jeden rok. Třetím pohybem míní pohyb sklonu zemské osy, tj. pohyb

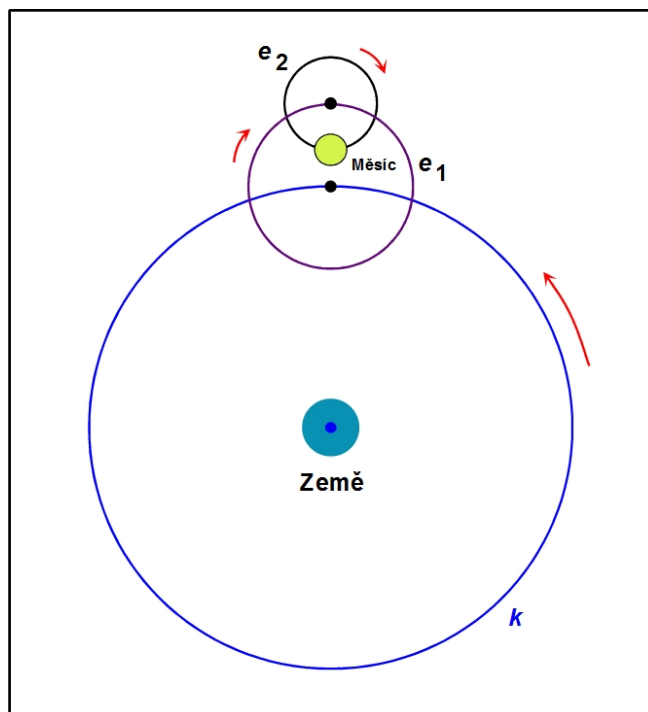
precesní, který byl znám již od antického astronoma Hipparcha. Koperník zde zastával názor, že důsledkem složeného pohybu Země kolem Slunce a právě pohybu sklonu zemské osy je fakt, že zemská osa zachovává během svého pohybu stálý směr vzhledem ke hvězdám [28]. Těmito pohyby, které přisuzoval Zemi, se na rozdíl od jeho předchůdců výrazně přiblížil ke skutečnosti. Ti ji museli komplikovaně vysvětlovat jako pohyby celého vesmíru. Na druhou stranu je třeba podotknout, že Koperník popisoval precesní pohyb nesprávně. Zavedl ho z logické nutnosti jako kompenzační pohyb, aby mohl objasnit neměnnost polohy světového pólu v průběhu roku [28]. Správné vysvětlení precesního pohybu nebylo známo, neboť otázky o příčinách jevů si v té době vědci včetně Koperníka ještě nekladli. Díky pečlivému zkoumání precesního pohybu Země se mu ale podařilo objevit stáčení přímky apsid. Jedná se o přímku, která prochází perihéliem a aféliem zemské trajektorie (obr. 3-2) [28].



**Obr. 3-2:** Přímka apsid a její poloha vzhledem k bodům slunovratů a rovnodennosti.

Co se týká studia konkrétní kinematiky vesmírných těles, tak stejně jako jeho předchůdci i Koperník se detailně zabýval popisem pohybu Měsíce kolem Země. Opravil nedostatky Ptolemaiova modelu, podle kterých by se výrazně měnil úhlový průměr Měsíce při pozorování ze Země. Např. ve čtvrté knize *Oběhů nebeských sfér* je

uvedena jeho vlastní teorie pohybu Měsíce, která vycházela ze tří kruhových pohybů [7]. Celý průběh měsíčního pohybu je znázorněn v následujícím schématu 3-3.



**Obr. 3-3:** Geometrické schéma pro popis pohybu Měsíce.

Zde prvním kruhem myslí sféru deferentu  $k$ , jejíž střed je souhlasný se středem Země. Po něm současně obíhá proti směru hodinových ručiček střed druhé kružnice, tj. velkého epicyklu  $e_1$ . Střed třetí kružnice, tj. malého epicyklu  $e_2$ , obíhá po kružnici prvního epicyklu ve směru hodinových ručiček s dvakrát větší úhlovou rychlostí. Takže Měsíc projde malým epicyklem  $e_2$  dvakrát za svoji oběžnou dobu kolem Země. Co se týče velikostí jednotlivých kružnic, tak Koperník stanovil průměry malého epicyklu  $e_2$ , velkého epicyklu  $e_1$  a deferentu  $k$  přibližně v postupném poměru 1 : 5 : 50. Koperníkem zde vypočtené vzdálenosti Měsíce od Země v různých měsíčních fázích nejsou sice zcela přesné, ale za to jsou výrazně přesnější než hodnoty plynoucí z Ptolemaiova modelu. Jeho konkrétní hodnoty vzdáleností, které jsou určeny jako násobky zemského poloměru, uvádí pro názornost následující tabulka č. 6 [7].

Vzdálenost Měsíce od Země	Poměrové vyjádření vzdálenosti
nejmenší vzdálenost ve čtvrti	$52\frac{17}{60}R_Z$
největší vzdálenost ve čtvrti	$68\frac{1}{3}R_Z$
vzdálenost při novu	$55\frac{8}{60}R_Z$
vzdálenost při úplňku	$65\frac{1}{2}R_Z$

Tabulka č. 6: Koperníkovo poměrové vyjádření vzdálenosti Měsíce od Země při jednotlivých měsíčních fázích.

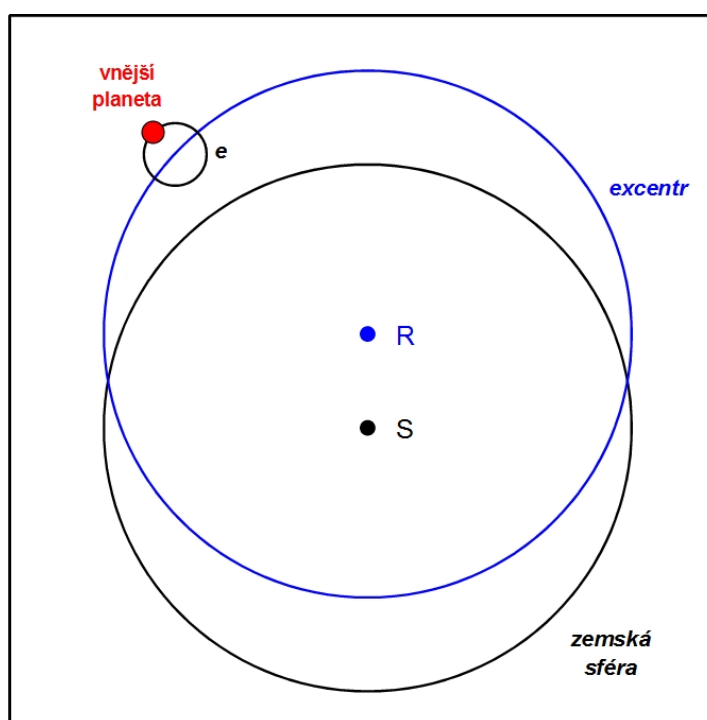
Pokud bychom za poloměr Země  $R_Z$  dosadili současnou číselnou hodnotu 6 378 km, dostaneme například největší vzdálenost Měsíce 435 828 km a nejmenší 333 463 km.

Koperník se během vytváření modelu svého rozsáhlého vesmíru rovněž zabýval otázkou, jak velká jsou tělesa sluneční soustavy. Velikosti se pokusil odhadnout jako poměr jejich objemů. Například z jeho výpočtů plyne, že objem Slunce je 163 krát větší než objem Země [7]. Ve skutečnosti je však objem Slunce  $1,3 \cdot 10^6$  krát větší než objem Země. Objem Měsíce je zas 43krát menší než objem Země [7]. Zde byl mnohem přesnější, neboť ze skutečného poměru objemů plyne, že Měsíc je 52krát menší než Země. Za použití jednoduché matematické úpravy můžeme z poměru objemů určit i poměry lineárních rozměrů daných těles. Například v následující tabulce č. 7 je uveden poloměr Slunce a Měsíce v poměru s poloměrem Země včetně srovnání se skutečnými údaji.

Poloměr tělesa	Koperník	Současná astronomie
Slunce	$R_S = 5,5R_Z$	$R_S = 109R_Z$
Měsíc	$R_M = \frac{R_Z}{3,5}$	$R_M = \frac{R_Z}{3,67}$

Tabulka č. 7: Porovnání poloměrů Slunce a Měsíce podle Koperníka s výsledky současné astronomie.

Pátá kniha zachycuje, jak tento velký astronom chápal kinematiku pěti tehdy známých planet. Zde je ve 36 kapitolách podrobně vyložena Koperníkova teorie pohybů vnějších a vnitřních planet. Z této teorie vyplývá, jak již bylo i výše řečeno, že Koperník neměl pro popis všech planet jednotné schéma. Téměř každá planeta měla svůj vlastní systém kružnic, po kterých se pohybovala. Navíc konkrétní systém kružnic kupodivu zaručoval velice dobrou shodu modelu s pozorováním. Například pro popis pohybů Marsu, Jupitera a Saturnu použil jednotné schéma, jehož geometrická konstrukce zahrnovala kružnice, jako jsou excentr a epicykl. Jejich vzájemné uspořádání znázorňuje následující schéma 3-4 [7].



**Obr. 3-4:** Geometrické schéma pro popis pohybu vnějších planet (Mars, Jupiter, Saturn).

Zde Koperník předpokládal, že poloměr epicyklu  $e$ , po kterém se pohybuje uvažovaná vnější planeta, je roven jedné třetině vzdálenosti středu  $S$  zemské sféry a středu  $R$  excentru planety. Tento předpoklad byl shodný pro všechny tři vnější planety. Jednotlivá schémata se lišila pouze volbou velikosti úsečky  $RS$  a dobou oběhu planet po epicyklech. Konkrétně Mars opsal svůj epicykl za 779 dní, Jupiter za 398 dní a Saturn za 379 dní [7].

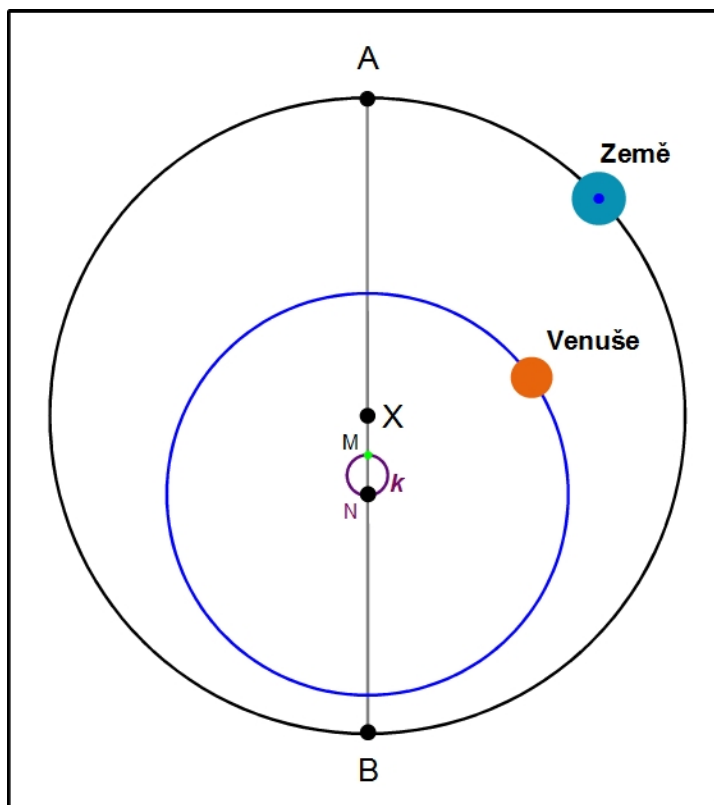
Vzhledem k výsledkům dnešní astronomie je však především obdivuhodné jeho poměrně přesné určení oběžných dob vnějších planet kolem Slunce, jak vystihuje tabulka č. 8 [7].

Oběžné doby vnějších planet		
planeta	Koperník	Současná astronomie
Mars	1,88 roku	1,88 roku
Jupiter	11,80 let	11,86 let
Saturn	29,50 let	29,45 let

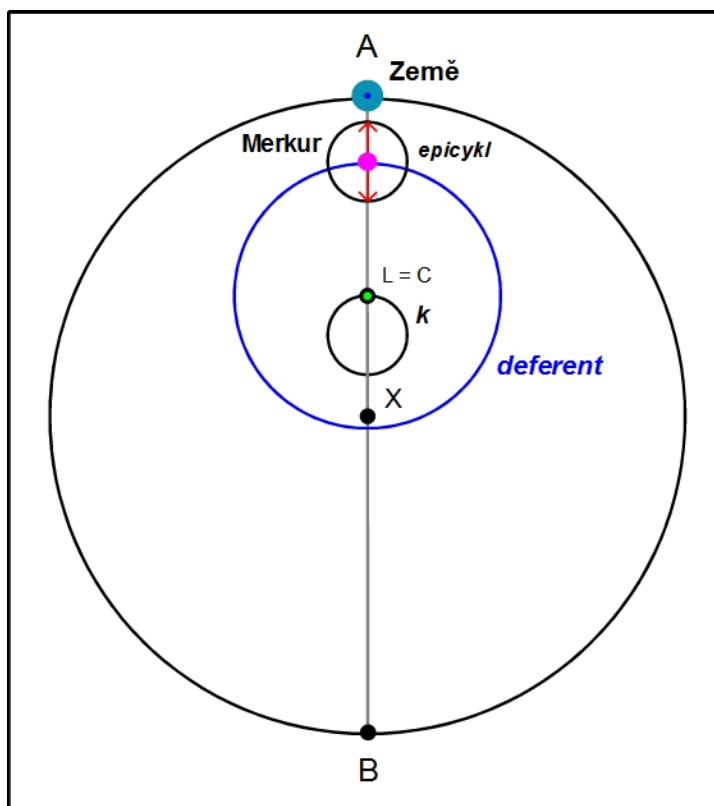
Tabulka č. 8: Porovnání oběžných dob vnějších planet kolem Slunce podle Koperníka s výsledky současné astronomie.

Zde stojí obzvlášť za pozornost stanovení oběžné doby Saturnu, neboť odpovídá přibližně době, po kterou Koperník na svém modelu pracoval.

Co se týče kinematiky vnitřních planet, bylo podle Koperníka potřeba pro zachycení co nejvěrnější shody výsledků s pozorováním použít geometrický model, který se již lišil od předchozího modelu, popisujícího pohyb vnějších planet. Tento model nebyl dokonce ani pro obě vnitřní planety koncepčně jednotný. Na následujících obrázcích 3-5 a 3-6 je vidět, jak si Koperník konkrétně představoval pohyby Venuše a Merkuru [7]. Ve schématu pro popis pohybu Venuše označil bod  $X$  jako střed kružnice, po které se pohybuje Země (obr. 3-5). Zatímco střed  $N$  kruhové dráhy Venuše ležel na kružnici  $k$ , po které se zároveň pohyboval. Synchronizace rychlostí pohybů zde byla taková, že v okamžicích, kdy Země procházela body  $A$  a  $B$ , střed  $N$  kruhové dráhy Venuše se nacházel v bodě  $M$ . Nakonec jeho „modelování“ pohybu Merkuru je uvedeno ve druhém schématu na obr. 3-6. Zde předpokládal, že uvnitř kruhové dráhy Země se středem v bodě  $X$  je umístěn deferent Merkuru, jehož střed  $L$  se pohybuje po kružnici  $k$ . Samotná planeta se však, podle Koperníka, nepohybuje po obvodu epicyklu, nýbrž pouze v jeho průměru. Dále zde formuloval předpoklad, že kdykoliv Země vstoupí do poloh určených body  $A$ ,  $B$ , musí se střed kruhové dráhy Merkuru nacházet v bodě  $C$ .



Obr. 3-5: Geometrické schéma pro popis pohybu Venuše.



Obr. 3-6: Geometrické schéma pro popis pohybu Merkuru.

Nutno připomenout, že Koperník pro svůj co nejpřesnější výše uvedený popis pohybů planet hojně využíval výsledky i měření svých předchůdců. Pomocí nich umožňoval jeho heliocentrický systém jak určení oběžných dob planet, tak i určení jejich relativní vzdáleností, a to jako násobek vzdálenosti Země – Slunce ZS. Výsledky těchto vzdáleností včetně porovnání s výsledky současné astronomie zachycuje tabulka č. 9 [26].

Relativní vzdálenosti planet (vyjádřeny v jednotce vzdálenosti Země – Slunce [ZS])		
planeta	Koperník	Současná astronomie
Merkur	0,395	0,387
Venuše	0,719	0,723
Země	1,000	1,000
Mars	1,520	1,524
Jupiter	5,219	5,203
Saturn	9,321	9,539

Tabulka č. 9: Porovnání relativních vzdáleností vnitřních a vnějších planet podle Koperníka s výsledky současné astronomie.

Ze srovnávaných hodnot uvedených v tabulce č. 9 vyplývá dostatečně vysoká přesnost Koperníkových údajů, týkajících se jak astronomických pozorování poloh planet, tak i teoretického zpracování měření. Vždyť relativní vzdálenosti planet od Slunce byly stanoveny s chybou menší než 1%, pouze u Saturnu byla chyba 3,8%.

K ucelenému a snad i přehlednému výkladu o jednotlivých pohybech planet z pohledu Koperníka je třeba už jen upřesnit, že všechny výše uvedené pohyby planet jsou tzv. pohyby v délce. Jedná se vlastně o pohyby pozorované na obloze jako zdánlivé posuvy planet přibližně ve směru východ – západ, tj. o pohyby podle ekliptiky. Koperník si byl samozřejmě vědom, že roviny oběžných drah planet jsou o několik stupňů skloněny k rovině ekliptiky, a to každá z nich jinak. Koperník tedy musel do svého heliocentrického systému zavést kromě rovinného pohybu kolem Slunce i pohyb vzhledem k rovině ekliptiky. Bohužel se mu však nepodařilo oba tyto pohyby sloučit.



Proto jeho úsilí zde nakonec směřovalo k vytvoření dalšího planetárního modelu popisujícího pohyb planet v šířce, tj. ve směru poledníku. Tomuto prostorovému pohybu planet se věnoval v šesté knize, kde k popisu opět využíval systém kružnic [7].

Mikuláš Koperník tak ve své době vytvořil opravdu velkolepé dílo zahrnující kosmologickou koncepci, která v novověku zcela jistě výrazně změnila pohled na vesmír. Z pohledu církve však dílo bylo v roce 1616 zařazeno na církevní index škodlivých, nebezpečných, a tedy i zakázaných knih. V seznamu setrvalo dlouhých 212 let, než z něho bylo v roce 1828 vyškrtnuto [26].

### 3.3 Tycho Brahe a Johannes Kepler

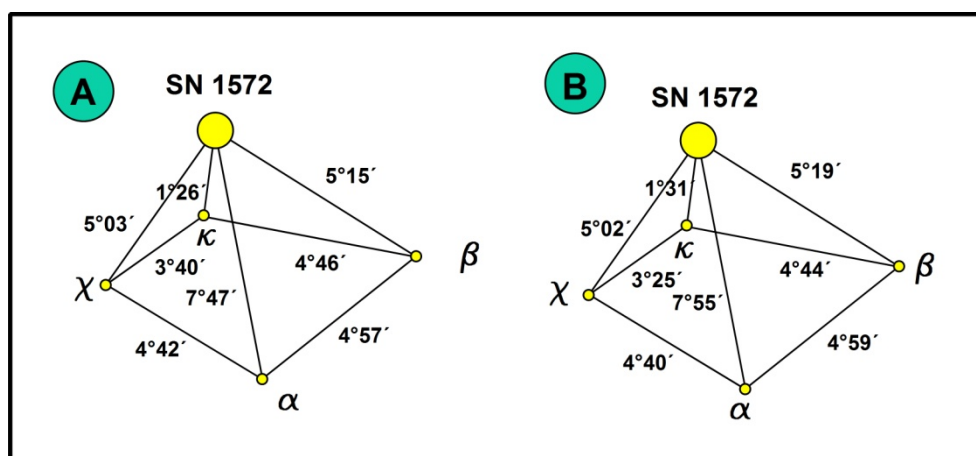
Při dalším sestavování přehledu dějin poznávání vesmíru nesmí být opomenuto uvést velmi významné období, které je právem nazýváno zlatým věkem astronomie. Jedná se o druhou polovinu 16. století a počátek století sedmnáctého, kdy na svět přichází celá řada převratných objevů a teorií, dávajících skutečný obraz sluneční soustavy. Velkou zásluhu na tom mají dva velikáni dějin astronomie – Tycho Brahe a Johannes Kepler (obr. P27).

#### *Tycho Brahe*

Dánský astronom Tycho Brahe, který se narodil 14. prosince roku 1546, tedy jen tři roky po smrti Mikuláše Koperníka, je v dnešní době považován za nejlepšího pozorovatele oblohy lidským zrakem [2]. Prvotní zájem o astronomii projevil již v útlém věku, když například 21. srpna roku 1560 v Kodani pozoroval částečné zatmění Slunce. Tehdy si prý pořídil i Ptolemaiovu *Almagest*, aby získal astronomické poznatky o světě. Následně v roce 1563 při pozorování konjunkce Jupitera a Saturna zjistil, že úkaz nastal v časovém posuvu oproti údajům uváděných v Alfonsinských tabulkách. To ho přivedlo k závěru, že je třeba sestavit nové astronomické tabulky na základě přesných, dlouhodobých astronomických pozorování [2].

Mezi výrazné astronomické okamžiky v životě dánského astronoma patřilo pozorování nové hvězdy v souhvězdí Kassiopeií ze dne 11. listopadu roku 1572 (obr. P28) [2]. Dnes víme, že se jednalo o supernovu. Velmi jasně zářící hvězda, která byla dobře pozorovatelná i za bílého dne, se tehdy stala předmětem zájmu pozorování i u dalších astronomů, například známého českého astronoma Tadeáše Hajka z Hájků (1526 – 1600) [7]. To, že se pozorovaný zářící objekt na obloze nepohyboval a choval se tedy staticky, přivedlo astronomy k zamyšlení nad tím, v jaké vzdálenosti se od Země objekt nachází. Několik astronomů, včetně Braheho a Hájka správně usoudilo, že poloha supernovy se nachází v mnohem větší vzdálenosti od Země než Měsíc, tj. ve sféře nehybných hvězd. Dochované záznamy o jejich na sobě nezávislém proměřování poloh supernovy vzhledem k ostatním hvězdám souhvězdí Kassiopeií zachycuje obrázek 3-7 [7]. Veškeré údaje z pozorování tohoto astronomického úkazu včetně popisu použitého pozorovacího přístroje (tj. polosextantu), jsou uvedeny v dochovaném Braheově spisku *O nové hvězdě (De Stella Nova)*. V tomto díle též stojí za pozornost jedno zásadní tvrzení. Brahe z měření vzdálenosti supernovy usoudil, že pokud může docházet ke změnám ve sféře hvězd, pak taková sféra nemůže být pevná. Z jeho tvrzení

tak dnes můžeme zpozorovat jisté zpochybnění Aristotelova členění kosmu na dvě kvalitativně odlišné oblasti oddělené sférou Měsíce [2].



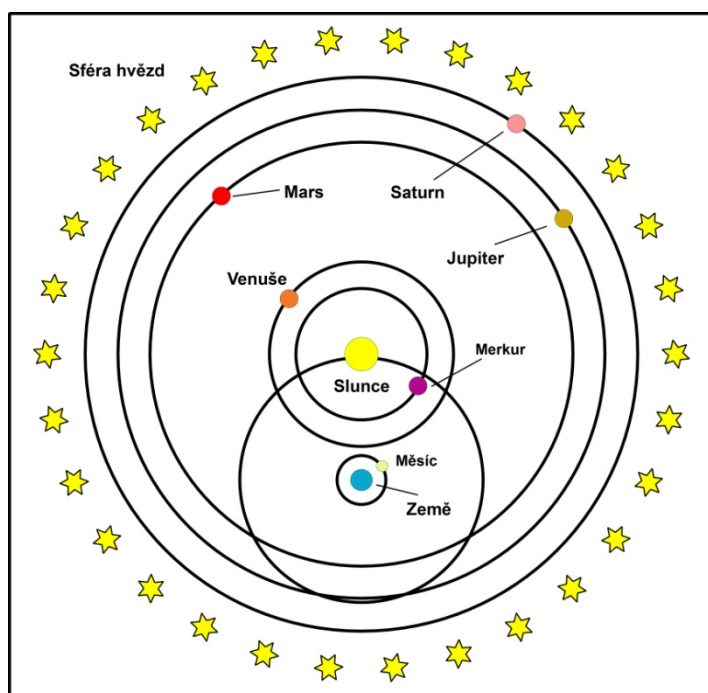
Obr. 3-7: Proměrování polohy supernovy 1572 vzhledem k některým hvězdám souhvězdí Kassiopie: A) Hájek, B) Tycho Brahe.

Je známo, že Tycho Brahe se též s velkou oblibou věnoval i pozorování komet, které prováděl na svých observatořích Uraniborgu (Nebeského zámku) a Sterneborgu (Hvězdného zámku), nacházejících se na malém švédském ostrově Hven, ležícím v úžině mezi Dánskem a dnešním Švédskem (obr. P29) [5; 7]. Zde například roku 1577 pozoroval a proměřoval polohu velmi jasné komety. Na základě změřených denních paralax usoudil, že se musí nacházet v šestkrát větší vzdálenosti od Země než Měsíc. Polohu komety tak kladl do prostoru, kde se nacházejí planety. Tycho zde údajně zpochybnil existenci sfér, neboť zastával názor, že sféry by byly překážkou pozorovaného pohybu komet za drahou Měsíce. Přesná pozorování a matematické výpočty, týkající se vzdálenosti zmíněné komety, jsou uvedeny v jeho díle *Druhá kniha o nedávných jevech v nebeské sféře (De mundi aeteri recentioribus phaenomenis liber secundus)* z roku 1588 [2]. Jeho observatoře na Hvenu se v 16. století řadily mezi ty nejlepší, neboť byly v té době vybaveny dokonalými pozorovacími přístroji, kterými bylo možno provádět velmi přesná astronomická měření. Popis včetně konstrukce těchto přístrojů se dochoval v jeho díle *Přístroje obnovené astronomie (Astronomie instauratae mechanica)* z roku 1598 (obr. P30) [2].

Tycho Brahe stejně jako předchozí velcí astronomové se zabýval i představou o struktuře uspořádání celého vesmíru. Je známo, že vlastnil basilejské vydání cenného Koperníkova díla *O obězích nebeských sfér*, které velmi podrobně znal. Koperníkovu

heliocentrickou soustavu však nepřijal. Sice plně chápal jednoduchost heliocentrické soustavy při řešení složitých pozorovaných planetárních pohybů, ale nepodařilo se mu nalézt paralaktický posuv poloh hvězd vznikajících jako důsledek pohybu Země kolem Slunce [7]. Zřejmě pro něj bylo nepřestavitelné připustit si skutečnost, že vesmír může být tak nesmírně veliký, aby paralaxa hvězd způsobená ročním oběhem Země kolem Slunce byla pod hranicí citlivosti tehdejších úhломěrných přístrojů. Námitky proti heliocentrické soustavě jsou zachyceny v jeho spisu *Astronomický list* z roku 1596 [2].

Přibližně mezi lety 1582 až 1587 tak vznikla Tychonova verze uspořádání planet ve sluneční soustavě. Jednalo se o kompromisní model mezi geocentrickou a heliocentrickou soustavou. Tycho svůj kosmologický model publikoval v díle *O nedávných jevech v éterickém světě (De mundi asteri recentioribus phaenomenis)* z roku 1588 [7]. Na následujícím obrázku 3-8 můžeme vidět schéma tohoto kompromisního modelu. Z modelu je patrné, že všechny planety kromě Země se pohybovaly kolem Slunce a se Sluncem kolem Země.



**Obr. 3-8:** Sluneční soustava jak si ji představoval Tycho Brahe.

Tato soustava byla údajně v lepším souladu s astronomickým pozorováním než soustava Koperníková. V jeho modelu je zahrnuta ještě jedna zásadní odlišnost od ostatních modelů sluneční soustavy. Planety nejsou pevně vázány na žádné křišťálové sféry, tudíž mohou volně obíhat prostorem kolem daného centrálního tělesa [7].

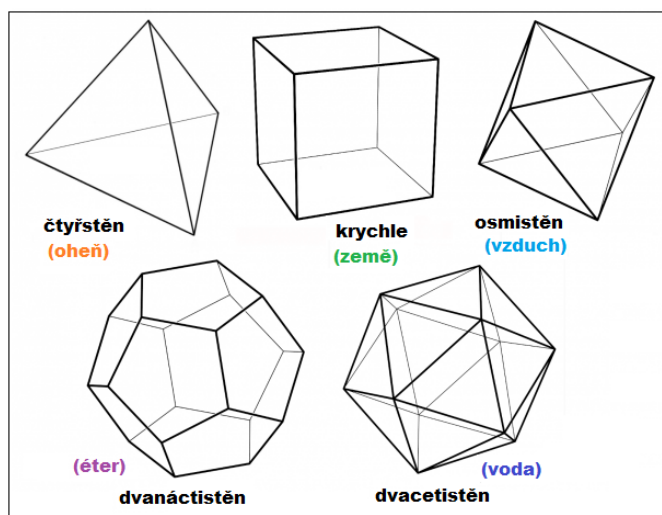
Z dnešního pohledu tak můžeme říci, že tato změna jistě přispěla k pochopení skutečného chodu celé soustavy.

Faktem je, že nejvýznamnější Tychonovo astronomické období spadá do roku 1599, kdy na pozvání císaře Rudolfa II., které zprostředkoval Tadeáš Hájek z Hájku, přijel do Prahy [29]. V Čechách Tycho Brahe prováděl proměřování poloh planet. Této činnosti se celkem věnoval 21 let. Za tu dobu se mu podařilo zaznamenat do svých pozorovacích deníků v podobě tabulek velké množství údajů. Sám však nedokázal zhodnotit své výsledky z pozorování a najít v nich nějakou obecnou zákonitost. Proto se nakonec rozhodl vložit tato data do rukou císařského matematika Johannese Keplera (1571 – 1630), se kterým na dvoře Rudolfa II. úzce spolupracoval [29].

### ***Johannes Kepler***

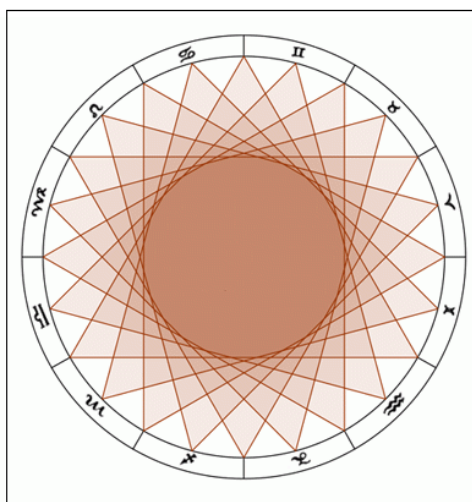
Druhou velmi významnou osobností 17. století je německý matematik a astronom Johannes Kepler, který se narodil 15. května roku 1571 ve Weilu ve Württemberku. K jeho zájmu o astronomii údajně přispěl i jeden výrazný astronomický zážitek z dětství, který se stal v roce 1577. Tehdy jako šestiletý chlapec společně se svou matkou pozorovali na obloze jasně zářící kometu. Shodou okolností se jednalo o tu samou kometu, kterou pozoroval i Tycho Brahe a řada dalších astronomů [7].

V jeho raném věku, kdy působil jako profesor matematiky na gymnáziu ve Štýrském Hradci, se již s velkým nadšením věnoval astronomii [29]. Svoji pout' za poznáním vesmíru začal studiem antické astronomie. Zvlášť velkou oblibu shledával u pythagorejců. Jejich číselná a geometrická mystika ho tak zaujala, že věřil v její spojení s chodem vesmíru. Údajně nejvíce ho zaujal Platón a jeho geometrická koncepce světa [29]. Platónův model světa byl tvořen pěti pravidelnými mnohostěny, přičemž každý z nich symbolizoval jednu z tzv. pralátek světa (obr. 3-9).



**Obr. 3-9:** Platonská tělesa: Platon považoval těchto pět těles za představitele tzv. pralátek světa. Johannes Kepler je, použil ve svém Kosmografickém mystériu.

Kepler v Platonově koncepci viděl pevný řád vesmíru, ve který vždy věřil. Vypovídá o tom i jeho pozoruhodné dílo *Tajemství vesmíru* neboli *Kosmografické mystérium* (*Mystérium cosmographium*) z roku 1596 [7]. Obsahem tohoto díla je geometrická představa o koncepci vesmíru, jejímuž vzniku předcházela zajímavá myšlenka, která se v Keplerově hlavě zrodila na jedné z jeho vyučovacích hodin na gymnáziu. Když svým studentům přednášel o konjunkcích nejvzdálenějších planet, Saturnu a Jupiteru, jak přeskakují ve znameních zvěrokruhu, nakreslil na tabuli kruh a rozdělil ho na dvanáct znamení zvěrokruhu. Dále vyznačil místa konjunkcí, tak jak po sobě následují, a pospojoval je úsečkami. S údivem si všiml, že uprostřed obrazce zůstává prázdný kruh (obr. 3-10) [30].



**Obr. 3-10:** Místa konjunkcí Saturnu a Jupiteru. (zdroj: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/vedec/1205/kepler>)

Poloměr nově vzniklého kruhu byl k poloměru kruhu konjunkcí překvapivě ve stejném poměru jako poměr sféry Saturnu k poloměru sféry Jupitera. Kepler na základě tohoto objevu usoudil, že by mohl mezi jednotlivé kruhové dráhy planet vkládat pravidelné mnohoúhelníky, které by tak byly pro jednu dráhu vepsány a pro následující naopak opsány. Tato myšlenka rovinného charakteru však brzy ztroskotala, neboť vložené mnohoúhelníky, jak se ukázalo, by značně deformovaly kruhové dráhy planet, jejichž poloměry určil již Koperník a nepřipadalo k úvaze je měnit [30].

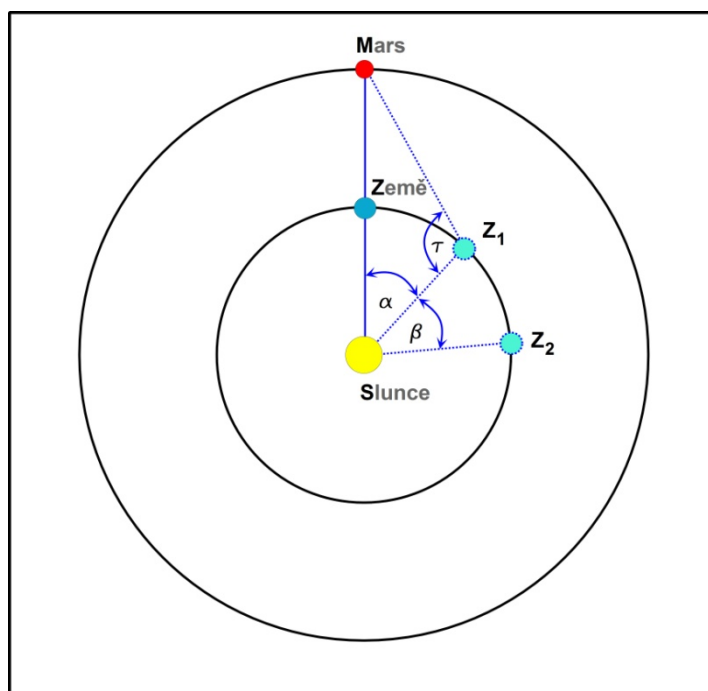
I když myšlenka byla neúspěšná, dala Keplerovi podnět k hlubšímu zamyšlení, které se zdánlivě vyplatilo. Kepler totiž harmonickou dokonalost již nehledal v rovině, ale v prostoru. Konkrétně přišel s nápadem, že pokud jsou sféry planet kulové, tak se jim dá opsat nebo vepsat pravidelná tělesa [7]. Použil zmíněná platónská tělesa, jejichž stěny jsou tvořeny shodnými pravidelnými mnohoúhelníky. Jejich rozmístění, tvořící geometrickou skladbu planetárního systému, bylo následující: mezi sféru Saturnu a Jupitera vložil krychli, mezi sféru Jupitera a Marsu čtyřstěn, mezi sféru Marsu a Země dvanáctistěn, mezi sféru Země a Venuše dvacetistěn a mezi sféru Venuše a Merkuru osmistěn (obr. P31). Kepler tak svým způsobem zdárně vytvořil pozoruhodný planetární systém, který se stal známý právě pod stejným názvem jako jeho dílo, tedy *Kosmografické mystérium* [29].

Hlavní Keplerův přínos k objasnění skutečného chodu vesmíru však spadá do období jeho pobytu v Praze. Sem ho ke společné práci pozval Tycho Brahe [7]. V Praze roku 1600 tak Kepler začal pilně pracovat na zpřesnění teorie planet z hlediska jejich pohybu ve sluneční soustavě. Nápomocen mu byl Braheho rozsáhlý soubor údajů o polohách planet, především přesná pozorování Marsu. Jeho cesta za objevením prvních dvou zákonů pohybů planet tedy započala zkoumáním a vyhodnocováním údajů o pohybu Marsu. Zde si cíleně stanovil, že je třeba určit dráhu Marsu a vyjádřit hledanou křivku matematicky [7].

Vycházel z Koperníkova předpokladu, že dráhy planet mají kruhový tvar. Jako výchozí bod zvolil údaje o dvanácti opozicích Marsu, které se nacházely v záznamech od Tychona. Pro své úvahy použil čtyř z nich. Jako zkušený matematik si byl vědom, že každými třemi body neležícími v přímce lze proložit vždy jedinou kružnicí. Při konstrukci schématu kruhové dráhy procházející polohami Marsu při třech opozicích však zjistil, že pro polohu planety při čtvrté opozici nastává jisté odchýlení od kruhové dráhy. Toto zjištění přispělo k zamítnutí předpokladu kruhové dráhy Marsu a nakonec

i ostatních planet a zavedení nového předpokladu. Předpokládal, že dráhy planet jsou uzavřené křivky vykazující určitou periodicitu.

Jak Kepler dále postupoval, je zachyceno ve schématu 3-11 [7].

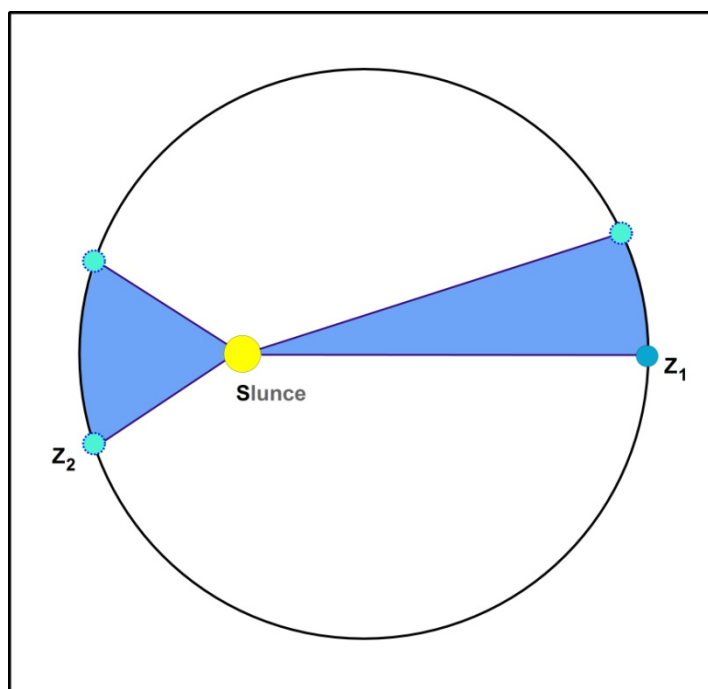


**Obr. 3-11:** Keplerovo geometrické schéma vzájemných poloh Slunce, Marsu a Země.

Zde se zabýval vytvářením konstrukcí trojúhelníků, v jejichž rozích se nacházely aktuální polohy Země, Slunce a Marsu. Přesněji řečeno, danou konstrukci trojúhelníku vždy provedl po úplném oběhu Marsu kolem Slunce, tj. pro interval 687 dní. Jako výchozí stav použil údaj o opozici Marsu, kdy polohy Slunce, Země a Marsu byly v jedné přímce SZM. Jakmile Mars vykonal jeden oběh kolem Slunce, Země na své dráze vykonala dva oběhy, přičemž druhý oběh již nebyl úplný, ale skončil v poloze  $Z_1$ . Keplerovi vycházelo, že do úplného oběhu chybělo přibližně 43 dní [7]. Podle schématu tomu odpovídá úhel  $43^\circ$ . Kepler pomocí údajů od Tychona modeloval další dva oběhy Marsu a opět Zemi chybělo  $43^\circ$  do vzájemné polohy se Sluncem a Marsem v jedné přímce. Dohromady tedy přibližně  $86^\circ$ . Současně při konstrukcích určoval úhel  $\tau$ , který svírají průvodci ze Země ke Slunci  $Z_1S$  a k Marsu  $Z_1M$ . Tímto počínáním tedy získával zdánlivé polohy Marsu na obloze. Zajímavostí je, že pomocí těchto úvah se mu sice zatím nepodařilo nalézt eliptickou dráhu Marsu, ale našel cestu k jeho druhému zákonu, tj. zákonu o stálé plošné rychlosti.

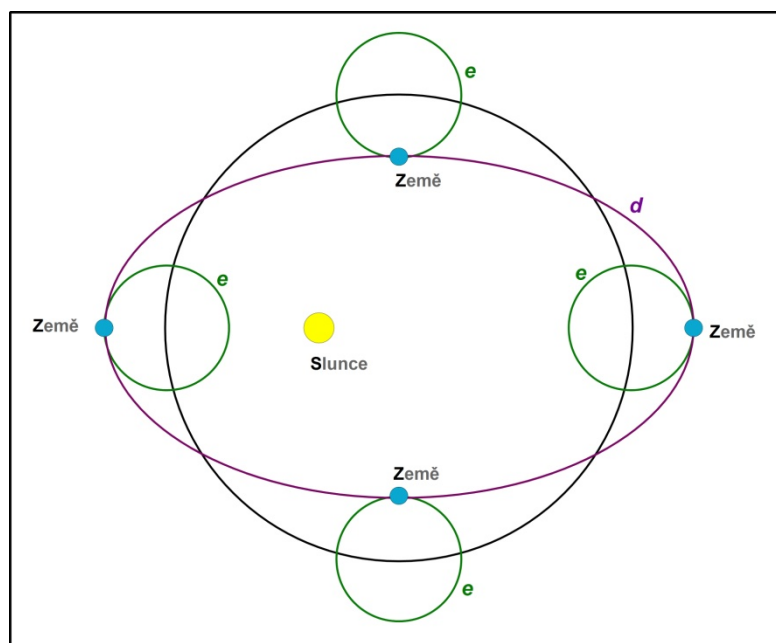


Kepler se zaměřil na výseče ohraničené dráhou Země za stejný čas, který odpovídal době oběhu Marsu. Zde zjistil, že středové úhly  $\alpha$  a  $\beta$  nejsou stejně velké. V dalším schématu (obr. 3-12), kde v duchu Koperníkovy teorie již Slunce stavěl, mimo střed kruhové dráhy Země, vyplynula i délková neregularita průvodičů  $SZ_1$  a  $SZ_2$ . Když spočítal obsahy všech vyznačených výsečí, zjistil, že jsou stejně velké. Tím došel k velmi důležitému závěru. Rychlost planety se mění v její dráze tak, že úsečka spojující Slunce s planetou opisuje za stejný čas stejné plochy [7].



**Obr. 3-12:** Prvotní verze Keplerova zákona o plošné rychlosti pro Zemi. Kepler zde stále ještě usilovně řešil otázku týkající se skutečné polohy Slunce a tvaru dráhy Země.

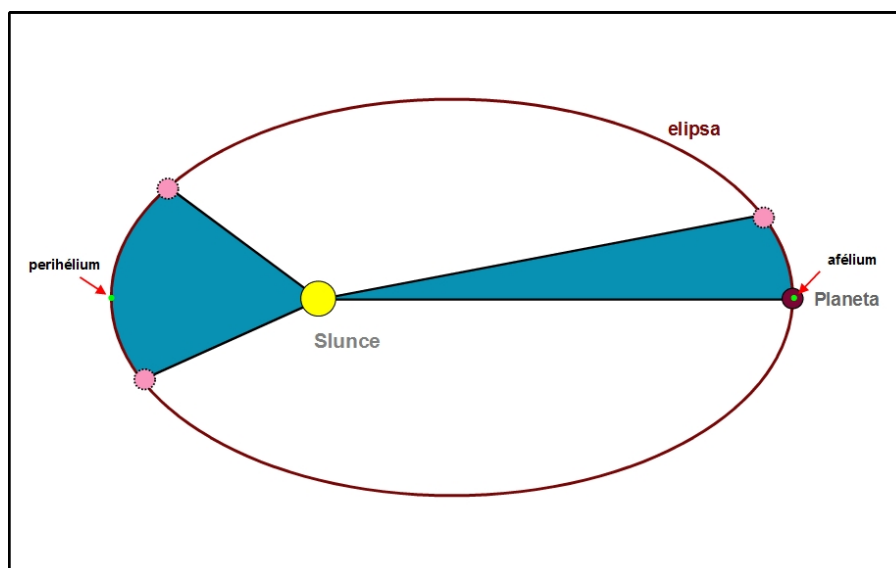
Objevit první zákon týkající se skutečného tvaru trajektorie, po které se nerovnoměrně pohybují planety, nebylo pro Keplera vůbec jednoduché. Je známo, že mu věnoval značné úsilí po dobu pěti let. Zajímavostí je, že první kroky k zákonu o tvaru drah Kepler modeloval pomocí deferentu  $d$  a epicyklu  $e$ . Doba oběhu planety po epicyklu byla shodná s oběhem jeho středu po deferentu. Výsledkem tohoto modelování bylo dosažení viditelně protáhlé dráhy planety. Jako by se měla pohybovat po oválu (obr. 3-13) [7]. I když toto další prvotní schéma důležitý astronomický problém ještě zcela nevyřešilo, navodilo již Keplera na správnou cestu k planetární elipse.



**Obr. 3-13:** Keplerovo geometrické schéma týkající se modelování nekruhové dráhy pomocí deferentu a epicyklu.

Přibližně v dubnu roku 1605 se Keplerovy hypotézy, týkající se tvaru dráhy či význačné polohy Slunce, staly skutečností. Kepler pohyb Marsu a i ostatních tehdy známých planet po elipse již plně považoval za správný. Jeho první a druhý zákon týkající se pohybu planet jsou vyloženy v díle *Nová astronomie (Astronomia nova)*, které vyšlo v roce 1609. Jejich znění je z dnešního pohledu následující [7]:

- *První Keplerův zákon: Dráhy planet jsou málo výstředné elipsy, v jejichž společném ohnisku stojí Slunce.*
- *Druhý Keplerův zákon: Obsahy ploch, opsaných průvodiči planet za stejný čas, jsou stejné (obr. 3-14).*



**Obr. 3-14:** Keplerovo geometrické schéma vyjadřující jeho druhý zákon. Je známo, že planeta se v aféliu pohybuje nejpomaleji a v perihéliu nejrychleji. Pohyb planety je tedy nerovnoměrný.

Význam Keplerových zákonů je opravdu velkolepý, neboť též elegantně sjednotil pohyb planet v délce (podle ekliptiky) a v šířce. Tyto pohyby byly totiž doposud modelovány každý zvlášť. Sjednocení spočívá v tom, že je třeba předpokládat, že roviny oběžných drah jednotlivých planet jsou k ekliptice různě skloněné. Dnes víme, že tyto roviny se vejdou do jakéhosi pomyslného vějíře s rozevřením  $7^\circ$  [7].

Kepler se problematikou pohybu planet zabýval i v dalších letech. Prostřednictvím výpočtů zjistil, že s rostoucí vzdáleností od Slunce se oběžné doby planet zvětšují rychleji než poloměry drah a tedy se zmenšuje rychlost jejich pohybu.

V roce 1618 tak objevil tzv. harmonický, dnes nazývaný třetí Keplerův zákon, vyjadřující závislost mezi velikostmi velkých poloos a oběžnými dobami planet. Dnes se jeho znění uvádí takto [7]:

- *Třetí Keplerův zákon: Poměr druhých mocnin oběžných dob dvou planet se rovná poměru třetích mocnin hlavních poloos jejich oběžných drah.*

Kepler svůj třetí kinematický zákon podrobně vyložil v díle *Harmonie světa* (*Harmonices mundi*), které vyšlo roku 1619 v Linci [2].

Z předchozích poznatků je zřejmé, že Keplerova teorie pohybu planet především jednoduchým způsobem nahradila složitá schémata, založená na kombinaci rovnoměrných kruhových pohybů po deferentech, epicyklech, a vytvořila jasný

kinematický obraz pohybu planet. Též objasnila příčinu, která přispívá k nerovnoměrnosti v pozorovaném pohybu planet.

### 3.4 Galileo Galilei

Za jednu z nejnápadnějších osobností první třetiny 17. století, která též zásadně ovlivnila vývoj astronomie, lze jednoznačně považovat i Keplerova současníka, italského matematika, fyzika a astronoma Galilea Galileio (1564 – 1642) viz obr. P32 [31]. Jeho rodištěm bylo přímořské toskánské město Pisa, které je dnes u široké veřejnosti mimo jiné známé především díky své atraktivní historické památce – pisánské šikmé věži. Galileo byl již v raném věku velkým příznivcem poznávání a řešení fyzikálních zákonitostí, kterých si kolem sebe všiml víc než dost. Dokazuje to například údajné vyprávění o tom, jak devatenáctiletý Galileo sledoval v pisánském domě rozhoupanou lampu věčného světla na dlouhém závěsu [31]. Zde si všiml, že rozkvyv lampy se postupně zmenšoval, ale doba kyvu, kterou měřil pomocí pulzů vlastního srdečního tepu, se přitom neměnila. Tento jev byl později pojmenován jako izochronismus kyvadla [31].

Období vzdělávání Galileo zahájil studiem medicíny na pisánské univerzitě v roce 1581. Měl však také velkou zálibu v matematice. V té ho podporoval i blízký rodinný přítel matematik Ostilio Ricci (1540 – 1603) viz obr. P32 [32]. Znalost a studium matematiky, fyziky a v neposlední řadě i astronomie byl pro Galilea ten správný životní směr než studium medicíny, jak si přál jeho otec. Proto studium medicíny na univerzitě v Pise zanechal. Zde v letech 1589 až 1591 získal možnost vyučovat matematiku. Následně v roce 1592 přijal místo profesora matematiky na univerzitě v Padově, kde zůstal 18 let [32].

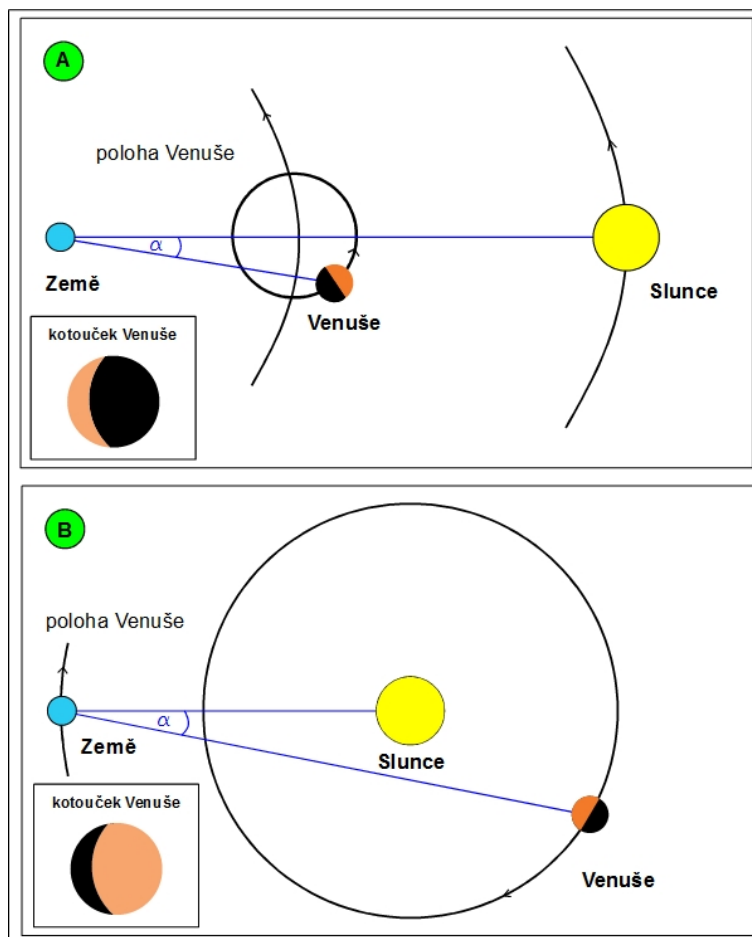
Z vědeckého hlediska zaujímá Galileo Galilei vysoké postavení především pro své průkopnické užívání kvantitativních experimentů, jejichž výsledky matematicky analyzoval. Právě díky své experimentální činnosti je často považován za „otce moderní vědy“. Mezi jeho významné zásluhy na poli fyziky lze uvést formulování zákonů mechaniky, volného pádu, šikmého vrhu, objev závislosti periody kyvadla na délce jeho závěsu nebo určení postupu skládání rychlostí [32].

Za význačné období, kdy se Galileo začal mnohem více věnovat astronomii, je zpravidla v historické literatuře uváděno období mezi lety 1604 až 1609. Tehdy na základě informací z Holandska sestrojil dalekohled (refraktor), složený z objektivu spojky a okuláru rozptylky, jenž umožňoval jen trojnásobné zvětšení. Ten postupně přidáváním dalších upravených čoček zdokonaloval, až dosáhl zvětšení přibližně 35 krát [31]. I když byl první dalekohled vynalezen v Holandsku, Galileo ho po úpravě jako

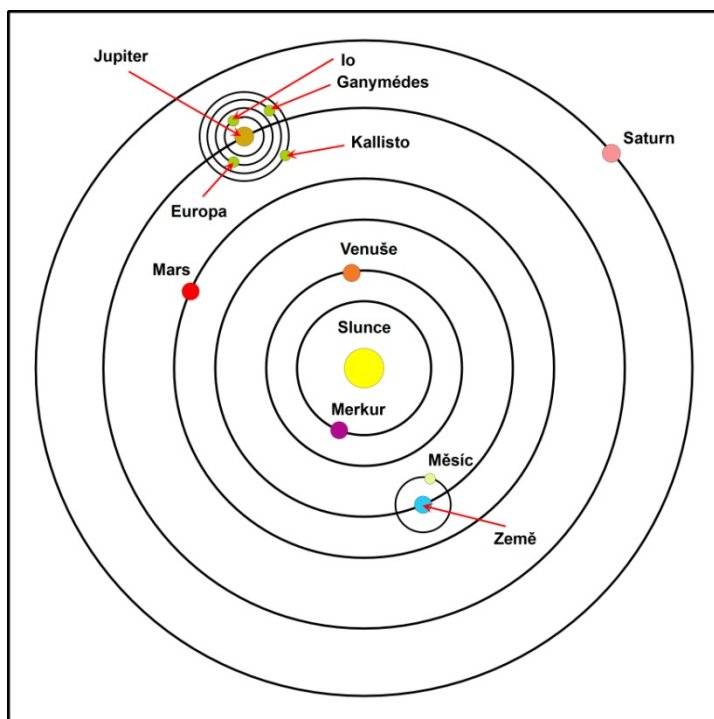
první použil pro astronomické účely. Od té doby se dalekohled stal nepostradatelným pozorovacím přístrojem každého astronoma.

Galileo svou observační činnost systematicky prováděl od roku 1609. Nejprve dalekohled nasměroval na nejbližší kosmické těleso, tj. Měsíc. Zde objevil jeho hornatý charakter a z délky stínů již dokázal určit přibližnou délku vyvýšených hornatých útvarů [2]. Jeho velmi detailní nákresy povrchu Měsíce, které během pozorování kreslil, jsou uvedeny v jeho díle *Hvězdný posel (Sidereus Nuncius)* vydané v roce 1610 (obr. P33). Galileo tak jako první vyvrátil do té doby prosazovanou představu, že Měsíc má tvar dokonalé hladké koule [7].

Z jeho pozorovacích výsledků z roku 1610 má pro astronomii zásadní význam objev čtyř Jupiterových měsíců. V roce 1614 byly Jupiterovy měsíce nazvány *Io*, *Europa*, *Ganymédes* a *Kallisto* [2]. Na obrázku P34 v příloze vidíme ukázkou záznamů z jeho pozorování [2]. Galileo na soustavu Jupiterových měsíců ve svých představách pohlížel jako na zmenšenou planetární soustavu [13]. Rok 1610 byl pro Galilea velmi úspěšný, neboť v tomto roce provedl další významný astronomický objev. Pozoroval fáze Venuše, které jasně vyvracely Ptolemaiovu geocentrickou teorii [13]. Tato teorie sice správně předpokládala, v jaké úhlové vzdálenosti  $\alpha$  je Venuše od Slunce, ale nesprávně předpokládala, jak jsou ze Země vidět fáze Venuše (obr. 3-14A). Podle geocentrické teorie celá dráha Venuše leží mezi Zemí a dráhou Slunce okolo Země. Což by znamenalo, že z Venuše by byl vidět jen úzký srpek. Galileo ale dalekohledem pozoroval, že fáze Venuše se někdy blíží k úplňku (obr. 3-14B). Na základě těchto pozorování se stal rozhodným zastáncem Koperníkovy heliocentrické teorie [13]. Obrázek 3-15 vystihuje geometrické schéma sluneční soustavy, tak jak si ji představoval. Z obrázku je patrné, že od Koperníkova modelu se liší pouze soustavou drah čtyř měsíců kolem Jupitera.



Obr. 3-14: Fáze Venuše – (A) podle geocentrické teorie, (B) podle heliocentrické teorie.



Obr. 3-15: Sluneční soustava jak si ji představoval Galileo Galilei.

Mezi další Galileovy zajímavé observační objevy z roku 1610 je vhodné zmínit jeho pozorování v té době nejvzdálenější známé planety Saturn. Při pohledu do svého dalekohledu ji viděl jakoby trojitou, skládající se ze tří objektů, z vlastní planety a předpokládaných dvou měsíců [2]. Tento podivuhodně protáhlý tvar planety objasnil až v roce 1659 holandský fyzik a astronom Christian Huygens (1629 – 1695). Prostřednictvím dalekohledu, umožňujícím zvětšení až 92krát, Huygens objevil, že Saturn má prstenec [2]. Ve skutečnosti se jedná o soustavu planetárních prstenců, kterou jako první společně se čtyřmi Saturnovými měsíci objevil italsko-francouzský astronom Giovanni Domenico Cassini (1625 – 1712) [7].

Galileo věnoval pozornost i skvrnám na Slunci (obr. P34). Studoval jejich měnící se tvar, vznik, vývoj a zánik [2]. Na rozdíl od ostatních pozorovatelů zastával názor, že skvrny se nacházejí v blízkosti povrchu Slunce. Například německý jezuita, astronom Christopher Scheiner (1575 – 1650) naopak předpokládal, že pozorované skvrny jsou kosmická tělesa nacházející se mezi Zemí a Sluncem [2].

V neposlední řadě mu pozorování dalekohledem umožnila rozložit některé oblasti Mléčné dráhy na jednotlivé hvězdy. Zde dospěl k závěru, že Mléčná dráha je tvořena velkým počtem hvězd. Například v otevřené hvězdokupě v Plejádách pozoroval 36 hvězd [2]. Vzhledem k jeho výše uvedeným obdivuhodným, observačním výsledkům lze jen konstatovat, že Galileo je v dnešní době právem nazýván i „otcem observační astronomie“.

Pro doplnění celkového pohledu na Galileovo počínání v dějinách astronomie bude jistě přínosné se na závěr alespoň částečně zmínit o dalším významném období v jeho životě. Máme na mysli rok 1632, kdy bylo vydáno jeho základní dílo *Dialog o dvou hlavních světových soustavách, Ptolemaiově a Koperníkově* (*Dialogo sopra i due massimi sister del mondo Tolemaioco e Copernicano*) – obr. P35 v příloze [2]. Toto významné dílo představuje souhrn Galileových myšlenek a pohledů na otázky astronomie. Kniha je psána italsky v té době tradiční formou dialogu probíhajícího mezi třemi osobami po dobu čtyř dnů [7]. První postava je nazývána *Salviati* a v knize zastává heliocentrické uspořádání vesmíru. Z textu je patrné, že s touto postavou se ztotožňoval i sám Galileo. Druhá postava je nazývána *Simplicio* a v knize zastává aristotelovské a ptolemaiovské názory týkající se především geocentrické teorie. Třetí vystupující postavou je *Sagredo*, který v díle fakticky představuje laika snažícího se podle vlastního úsudku rozhodnout o pravdivosti názorů obou filosofů.

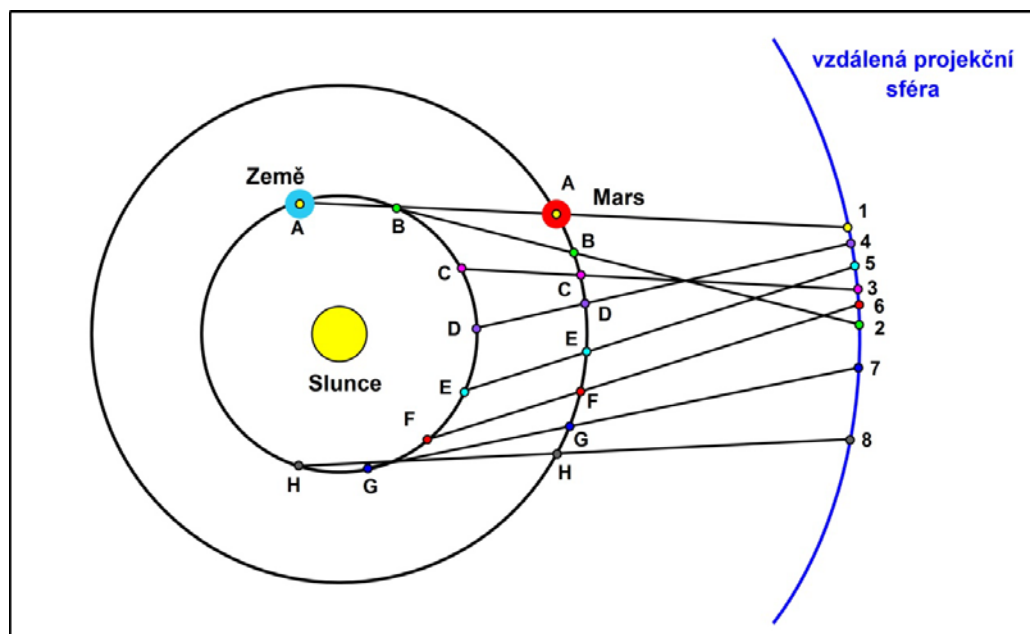


Po obsahové stránce je kniha členěna do čtyř kapitol, přičemž každé kapitole přísluší jeden den, ve kterém je diskutováno vždy konkrétní téma. Nosným tématem první kapitoly je spor o to, zda se pozemské jevy liší od kosmických [2]. Tedy zda dokonalý kruhový pohyb je vlastní pouze kosmickým tělesům. Jádrem sporu vzniklo i okolo téze, zda vesmírná tělesa jsou neměnná a dokonale hladká. Galileo se zde konkrétně věnoval i Měsíci. Ne však jeho pohybu, ale vlastnostem. Na studiu odrazivosti slunečních paprsků dospěl k závěru, že Měsíc není dutá polokoule obrácená dutinou k Zemi, jak se dosud také tradovalo. Zároveň pochopil, že Měsíc má dobu oběhu shodnou s periodou vlastní rotace, proto je k Zemi obrácená stále stejnou stranou.

Ve druhé kapitole se Galileo zabýval rotací Země [2]. Správně usoudil, že rotací Země se dá vysvětlit pohyb nebeské sféry lépe než otáčením celého vesmíru okolo Země. V souvislosti s tímto poznatkem vyslovil myšlenku o relativnosti pohybu. Zkráceně řečeno: Jelikož jsme součástí pohybu Země, tento pohyb si neuvědomujeme.

Ve třetí kapitole je diskuze zaměřená na stavbu vesmíru, pohyb Země okolo Slunce a rozbor vzdáleností jak ve vztahu Země – Měsíc, Země – Slunce, tak vzdálenostmi mezi hvězdami [2]. Správně posoudil i existenci paralaxy jako důsledek pohybu Země okolo Slunce. Správně odvodil i to, že vzhledem k ohromné vzdálenosti hvězd není možné zjistit změny úhlů při jejich pozorování. Zajímavou se jeví skutečnost, že nepolemizuje s Koperníkem ohledně otázky kruhových drah pohybu planet, byť věděl, že přesná měření napovídají, že pohyb planet probíhá po drahách eliptických. V této části knihy také stojí například za pozornost zmínka o tom, jak pomocí Koperníkovy teorie Galileo objasňuje smyčky v pohybu planet (např. planety Mars) k hvězdnému poli v pozadí (obr. 3-16) [7].

V poslední čtvrté kapitole se Galileo především věnuje podstatě přílivu a odlivu [2]. Dlužno dodat, že v této oblasti se Galileovy úvahy ukázaly jako scestné. Jak již dnes víme, zásadní problém byl v tom, že neuvažoval o gravitačních silách mezi Sluncem, Zemí a Měsícem. Chybně předpokládal, že výše zmíněné jevy jsou výsledkem skládání rotace a ročního oběhu Země okolo Slunce. I když v první třetině 17. století například Johannes Kepler již správně předpokládal, že příliv a odliv jsou vyvolány jakousi přitažlivostí Měsíce a Slunce, Galileo údajně tuto hypotézu pokládal za lehkomyšlnou [2].



**Obr. 3-16:** Schéma, kterým Galileo objasnil zdánlivý smyčkový pohyb planety Mars. Pro zjednodušení jsou uvažovány kruhové dráhy planet. Z nákresu je patrné, že planeta při promítání na oblohu (pole hvězdného pozadí či zdánlivou projekční sféru) se v úseku 234 pohybuje opačně než v úsecích 12 a 45678.

Jak je známo, heliocentrická soustava popsaná Galileem se stala nepohodlnou pro církev, která ji oficiálně zakázala. Jádrem sváru se stalo hlavně tvrzení o tom, že: „*Slunce je středem světa a co do místa zcela nepohyblivé.*“ [2] Druhý problém, který nastal s dogmatem církve, souvisí s jeho výrokem: „*Země není středem světa a také ne nepohyblivá, ale pohybuje se jako celek a krom toho i denním pohybem.*“ [2] Tím že podporoval heliocentrický systém a za výše uvedená tvrzení, byl v roce 1633 církví odsouzen k doživotnímu domácímu vězení (obr. P35) [32]. Od smrti ho zachránilo jen to, že své učení před inkvizičním soudem odvolal.

### 3.5 Astronomie na konci renesančního období

Koncem první třetiny 17. století tak byla objasněna kinematika pohybu planet, dynamické příčiny však nalezeny nebyly. Ty jako první objasnil geniální anglický fyzik, matematik, astronom Isaac Newton (1643 – 1728), a to v rámci svojí všeobecné teorie gravitace (obr. P36). Konkrétně se jedná o období druhé poloviny 17. století. Od roku 1665 Isaac Newton udělal řadu významných objevů, které měly revoluční dopad na matematiku, fyziku i astronomii [13]. Například máme na mysli jeho zavedení diferenciálního a integrálního počtu jako matematického aparátu potřebného k výpočtům pohybu planet. Kromě toho objevil zásadní skutečnost, že zemská gravitace působí nejen na tělesa na Zemi, ale i na Měsíc a že stejnou silou působí i Slunce na planety. Dále zobecnil zákony mechanického pohybu. Výsledkem bylo jeho formulování tří pohybových zákonů. A nakonec Newton pomocí třetího Keplerova zákona odvodil, že gravitační síla klesá s druhou mocninou vzdálenosti. Tím formuloval výše zmíněný zákon všeobecné gravitace, který uvádí ve svém velkolepém díle *Matematické základy přírodní filozofie (Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica)*, vydaném roku 1687 [2].

Za velmi významný počín ve vývoji astronomie s ohledem na téma diplomové práce lze na tomto místě uvést i léta 1672 a 1676. V prvním uvedeném roce byla poprvé změřena denní paralaxa planety a z ní odvozené skutečné vzdálenosti těles ve sluneční soustavě. Připomeňme, že do té doby byly známy jen poměry těchto vzdáleností. V druhé části této práce se dozvíme, že největší zásluhu na tom měl astronom Giovanni Domenico Cassini (obr. P37) [13].

Skutečnost, že znalost správné hodnoty rychlosti světla je pro další pokrok v astronomii velmi důležitý parametr si začali uvědomovat někteří tehdejší fyzikové a astronomové. V roce 1676 si dánský matematik a astronom Olaf Römer (1644 – 1710) všiml, že Jupiterovy měsíce zdánlivě obíhají rychleji, když se k nám Jupiter přibližuje, a pomaleji, když se vzdaluje (obr. P37) [13]. Tento jev správně vysvětlil tím, že rychlost světla má konečnou hodnotu. Tato hodnota byla také z jeho pozorovacích údajů přibližně určena na  $215\,000\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  [2]. I když v porovnání s dnešní uznávanou hodnotou přibližně  $300\,000\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  byla tato rychlost dosti podceněna, přesto astronomové měli v rukou konkrétní kvantitativní představu o její velikosti.

## 4 ASTRONOMIE 18. AŽ 20. STOLETÍ

Jestliže se ohlédneme za historickým vývojem názorů a představ o struktuře uspořádání či rozměrech pozorovaného vesmíru, a to od antiky až po vrcholné období renesance zjistíme, že předmětem podrobného, usilovného zkoumání byla především kosmická tělesa, jako je Slunce, Země a ostatní známé planety. Z předchozích textů je též zřejmé, že uspořádání těchto kosmických těles ve vesmíru podle Koperníkovy teorie, společně s Keplerovými zákony, popisujícími pohyb těchto těles, či Newtonovu teorii gravitace, popisující síly mezi nimi, představoval doposud vrchol poznání v dějinách astronomie. Nebeská mechanika planetárního systému měla již celkem pevné základy. Co se ale týče hvězd, ty stále zůstávaly až na výjimky mimo zájem tehdejších astronomů. Ze schémat modelů vesmíru je patrné, že hvězdy v představách astronomů hrály vždy roli pevně umístěných těles na takzvané hvězdné sféře uzavírající planetární soustavu. Snad za výjimku můžeme do jisté míry považovat Giordana Bruna, který jako jeden z mála zastával názor, že Slunce není středem světa, ale pouze středem jedné malé části vesmíru, který je nekonečný [33]. V jeho kosmologickém modelu žádná hvězdná sféra neexistuje (obr. P38). Hvězdy jsou podle něj rozprostřeny v různých vzdálenostech v celém nekonečném prostoru vesmíru. Tyto názory byly samozřejmě čistě spekulativní bez konkrétního důkazu. Důvod, proč nebylo vynaloženo značné úsilí v pozorování hvězdných těles, je prostý. Hvězdy jsou příliš daleko na to, aby jejich případné proměny či změny poloh mohly být v té době pozorovány pouhým lidským okem nebo prvními dalekohledy.

#### 4.1 Významné okamžiky v astronomii 18. a 19. století

Zlom ve vývoji astronomie nastává až v 18. století a to díky vynikajícímu anglickému astronomovi Fredericku Williamu Herschelovi (1738 – 1822), zakladateli stelární astronomie a současně objeviteli Uranu (v r. 1781) – sedmé planety sluneční soustavy. Za jeho zásluhy v astronomii je i dnes právem považován za jednoho z nejúspěšnějších astronomů všech dob, který byl zároveň i nejlepším konstruktérem zrcadlových dalekohledů své doby (obr. P39) [7].

Dalším významným astronomickým mezníkem v první polovině 19. století je rok 1814. V tomto roce známý německý fyzik a astronom Joseph von Fraunhofer (1787 – 1826) objevil ve spektru Slunce a hvězd spektrální čáry [13]. Tím de facto do astronomického výzkumu zavedl spektroskopii, která je dnes nejdůležitější astronomickou metodou v astrofyzice (obr. P40).

O 24 let později, tedy roku 1838, sklízí astronomie další významný úspěch. Německý matematik a astronom Friedrich Wilhelm Bessel (1784 – 1846) jako první člověk změřil paralaxu hvězdy a tím získal první spolehlivý údaj o vzdálenostech hvězd [13]. O jeho počínání bude pojednáno v druhé části diplomové práce. V roce 1846, tedy v roce kdy zemřel Bessel, byla objevena planeta Neptun. Na objevu Neptunu měl velkou zásluhu francouzský matematik Urbain Le Verrier (1811 – 1877), který na základě svých výpočtů předpověděl pozici planety (obr. P41) [13].

Souhrnně řečeno, astronomie v 18. až 19. století především zahrnovala práci matematiků (např. Pierre Simon Laplace, Joseph Louis Lagrange, William Rowan Hamilton nebo Carl Friedrich Gauss), kteří vypracovali důmyslné matematické metody, umožňující přesné výpočty drah planet podle Newtonových zákonů (obr. P42) [13]. Astronomové zase proměřovali polohy tisíců hvězd. Souběžně probíhalo i neustálé zdokonalování pozorovacích přístrojů (refraktometrů) a metod. Samozřejmě probíhalo i zpřesňování měření vzdálenosti ve sluneční soustavě. Díky usilovné práci mnoha dalších astronomů a osobností z různých oborů tehdejší vědy bylo dosaženo prvních velkých úspěchů z oblasti hvězdného vesmíru. Bylo shromážděno velké množství informací o hvězdách, jejich jasnostech a jejich pohybu v kosmickém prostoru.

## 4.2 Významné okamžiky v astronomii na počátku 20. století

Co se týče astronomie počátku 20. století, první a zásadní otázkou se stala problematika struktury a rotace naší galaxie. Na skutečnost, že naše galaxie rotuje, upozornil švédský astronom Johann August Gylden (1841 – 1896). K tomuto poznatku dospěl na základě svého pozorování pohybů hvězd [34].

Jelikož astronomové nedokázali vypočítat počet hvězd v naší Galaxii, tedy nedokázali určit strukturu Galaxie, začali na počátku 20. století používat metodu statistickou, odvislou od vzorků hvězd. Touto metodou pracovali zejména německý astronom Hugo von Seeliger (1849 – 1924) a holandský astronom Jacobus C. Kapteyn (1851 – 1922). Na základě svých poznatků, založených na zkoumání hvězd do určité velikosti a určených směrů, vyslovili předpoklad, že naše galaxie má tvar zploštělého disku [34].

Další významnou osobností astronomie 20. století je americký astronom Harlow Shapley (1885 – 1972), který ukázal, že Slunce se nachází ve vzdálenosti necelých 40 000 světelných let od středu Galaxie (průměr celé Galaxie je odhadován na 100 000 světelných let) [35]. Z tohoto faktu odvodil, že Slunce, tedy i celá sluneční soustava, se nachází na okraji naší Galaxie. Nutno podotknout, že ještě v roce 1920 se vědci přeli o to, zda naše Galaxie je ve vesmíru jediná, či ne. Například velmi uznávaný americký astronom Heber Doust Curtis (1872 – 1942) byl zastáncem teorie, že galaxií existuje více. Jeho největší odpůrce, právě zmíněný H. Shapley zastával názor, že mlhoviny existují za hranicemi Galaxie, ale nemají charakter hvězdné soustavy. Faktem je, že myšlenka o existenci více galaxií ve vesmíru vznikla již v 19. století. Podporovali ji zejména německý astrofyzik J. Scheiner (1858 – 1913) a anglický astronom W. Maunder (1851 – 1928) [35]. Tento spor definitivně vyřešil až Edwin P. Hubble (1889 - 1953), jemuž se podařilo prokázat hvězdný charakter některých mlhovin. Hubbleho objev hvězdné struktury mlhovin se tak stal prvním krokem mimogalaktické astronomie. O jeho práci na poli extragalaktické astronomie bude též blíže pojednáno v druhé části této diplomové práce.

V roce 1927 švédský astronom Bertil Lindblad (1895 – 1965) a holandský astronom Jan H. Oort (1900 – 1992) potvrdili rotaci naší Galaxie, a to na základě pozorování pohybů a radiální rychlosti hvězd [34]. Následně díky zjištění, že rychlost Slunce je  $250 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  a oběhne střed galaxie za 230 milionu let, bylo vypočteno, že hmotnost galaxie je zhruba 150 miliard hmotnosti Slunce.

Nový pohled astrofyziky na vývoj hvězd přinesl Hertzsprungův-Russelův diagram, který sestavil v roce 1913 americký astronom Henry Norris Russell (1887 – 1957) na základě poznatků získaných dánským astronomem Ejnarem Hertzsprungem (1873 – 1967) [34]. O jeho zásadním významu v oblasti určování hvězdných vzdáleností bude opět pojednáno v druhé části diplomové práce.

Další oblastí astronomie, kde byl zaznamenán velký pokrok, je oblast spektrografie umožňující získat spektrogramy hvězd (fotografie spekter). Nutno dodat, že první snímky hvězdných spekter pořídil již anglický astronom sir William Huggins (1824 – 1910) v roce 1875. Na základě teorie absolutně černého tělesa, kterou vypracoval Max Planck (1858 – 1947) v roce 1900, se astrofyzikům dařilo získat rozdělení intenzity záření ve spektru pozorované hvězdy. Následně z pozorovaného spektra mohlo být odvozeno celkové množství vyzářené energie a teplota dané hvězdy. V roce 1930 americký astronom Christian Thomas Elvey (1899 – 1970) a ruský astrofyzik Grigorij Abramovič Šajn (1892 – 1956) potvrdili rotaci hvězd, a to základě zkoumání profilů jejich spektrálních čar [34].

Na přelomu 19. a 20. století se tehdejší astronomové začali zajímat také o vnitřní strukturu hvězd. Za přelom v této oblasti můžeme pokládat práci švýcarského astrofyzika Roberta Jacoba Emdena (1862 – 1940) z roku 1907 s názvem *Gaskugeln* (*Plynové koule*). Jak už sám název práce ukazuje, považoval Emden hvězdy za tělesa vytvořená z ideálního plynu. Podle jeho předpokladů měla ve středech hvězd panovat teplota několika miliónů stupňů. V roce 1913 navázal na předchozí teorii polský fyzik Czeslaw Bialobrzeski (1878 – 1953), který dokázal, že uvnitř hvězd působí kromě tlaku plynu také tlak záření. K teorii vnitřního uspořádání hvězd pak přispěl v roce 1921 anglický astrofyzik Arthur Stanley Eddington (1882 – 1944), který vypočítal první model hvězdy [34].

Za jeden z největších objevů 20. století, můžeme považovat objev astronoma Edwina Hubbleho o tom, že vesmír se rozpíná [7]. O existenci expanze vesmíru uvažoval již v roce 1924 ruský matematik a kosmolog Alexandr Alexandrovič Friedmann (1888 – 1925), který na základě všeobecné teorie relativity Alberta Einsteina (1879 - 1955) vytvořil nestacionární model vesmíru [34].

První třetina 20. století též patřila i významným objevům ve sluneční soustavě. Jako příklad může být uveden objev planety Pluto v roce 1930. Autorem objevu planety byl americký astronom Clyde W. Tombaugh (1906 – 1997) [2]. V současné době je planeta Pluto společně s dalšími planetkami (např. Ceres, Haumea, Makemake, Eris)

zařazena do kategorie trpasličích planet. Ze souboru planet byla Mezinárodní astronomická unie vyřazena v roce 2006 [34].

Přehled významných okamžiků v dějinách astronomie v první polovině dvacátého století uzavřeme vznikem nového vědního oboru – radioastronomie. Portréty výše uvedených osobností této podkapitoly jsou součástí obrazové přílohy diplomové práce (obr. P43).

Počátky oboru radioastronomie sahají do roku 1931. Tehdy americký inženýr českého původu Karl Guthe Jansky (1905 – 1950) v Bellových laboratořích poprvé zachytil rádiové záření přicházející z vesmíru, když při práci na řešení úkolu dálkového telefonního spojení přes Atlantský oceán zachytil rádiový šum oblohy (obr. P44) [36]. O svém objevu poprvé referoval v následujícím roce. Některé prameny tak uvádějí rok 1932 jako rok zrodu radioastronomie. Pozdější měření ukázala, že toto záření přichází ze středu naší Galaxie [34].

První radioteleskop s pohyblivou anténou pak byl postaven už roku 1936 a zasloužil se o to americký inženýr a amatérský astronom Grote Reber (1911 – 2002). Jeho radioteleskop měl anténu o průměru 950 cm a pracoval na vlnové délce 60 cm (obr. P44) [34]. Jak uvidíme ve druhé části diplomové práce, radioastronomie se začala bouřlivě rozvíjet až po skončení druhé světové války.





## Předmluva k druhé části diplomové práce

V předchozí části této diplomové práce bylo pojednáno o vývoji názorů a představ o struktuře a rozměrech vesmíru. Poznali jsme řadu významných astronomů, kteří svou neúnavnou prací, zahrnující především observační pozorování, shromažďování naměřených údajů a výpočtů a sestavování různých hypotetických koncepcí podoby vesmíru, přispěli k objasnění skutečného fyzikálního obrazu naší sluneční soustavy. Rovněž tak jsme získali představu o tom, jak se astronomie vyvíjela v dějinách lidské kultury. Velká pozornost byla věnována ohromující zvědavosti a vynalézavosti významných osobností astronomie dané doby. Především díky příchodu dokonalejší pozorovací techniky, včetně prvních dalekohledů, se vývoj astronomie nezastavil jen u studia Slunce, planet a jejich měsíců, komet a dalších těles sluneční soustavy, ale posunul se v kosmickém měřítku mnohem dál. Uvedený historický vývoj poznávání hvězdného vesmíru, včetně zkoumání vzdálených galaxií, je toho důkazem.

Nemalá část pozornosti byla průběžně věnována tomu, jak určovat vzdálenosti a rozměry jednotlivých kosmických objektů ve sluneční soustavě i mimo ni. Počátky problematiky, jak určit v astronomii jednu z nezákladnějších fyzikálních veličin, kterou je vzdálenost, sahají až do antického Řecka. Samozřejmě stanovení co nejpřesnější vzdálenosti a tím vlastně i polohy pozorovaných objektů noční oblohy je trvalým předmětem zájmu astronomů až dodnes.

V dnešní době astronomové dokážou určovat vzdálenosti ve vesmíru s relativně vysokou přesností na různých prostorových škálách, a to díky impozantnímu technologickému vývoji pozorovací, výpočetní a jiné potřebné techniky. Samozřejmě nesmíme opomenout fakt, že přitom astronomové musejí dokonale ovládat nejen fyziku a matematické metody, ale i výpočetní techniku a další moderní technologie. Musejí se stále učit a přizpůsobovat se novým poznatkům.

*Jak daleko jsou od nás ty svítící objekty na obloze? Jak je to tedy s těmi vesmírnými vzdálenostmi? Kde se nacházejí hranice vesmíru? Snad každý, kdo někdy sledoval jasnou noční oblohu pomocí dalekohledu nebo jen prostým okem a nechal se unášet tajemnou krásou hvězd tvořících různá seskupení, či obdivoval povrch Měsíce v okuláru optických pozorovacích přístrojů, se otázkami tohoto typu zabýval. Následně pak hledal odpovědi, ať už prostřednictvím internetu, v odborné literatuře, či u zkušeného astronoma. Například ve večerních zprávách jsme mohli zaslechnout informaci o tom, že byla objevena nová hvězda, vzdálená od nás dvacet miliónů*

světelných let. Nebo o pár měsíců později pro změnu informaci o tom, že byla nalezena jakási galaxie ve vzdálenosti tří miliard světelných let. Pro většinu lidí zřejmě nezajímavé informace, pokud si nepoloží otázku: *Jak víme, že je to zrovna dvacet miliónů světelných let? Proč by to nemohlo být třeba několik tisíc?* Vždyť i nejbzdálenější lidský výtvar, vesmírná sonda Voyager 1, vypuštěná v roce 1977, teprve opouští naši sluneční soustavu a nenachází se tak od nás více než 19 miliard kilometrů (obr. P45) [18].

V této části práce se budeme plně věnovat některým současným metodám měření vzdáleností ve vesmíru.

## 5 CHARAKTERISTICKÉ VZDÁLENOSTI VE VESMÍRU A JEJICH JEDNOTKY

Než přejdeme k výkladu o tom, jak se měří vzdálenosti ve sluneční soustavě, v prostoru nejbližších hvězd, galaxií či ve vesmíru v průběhu kosmické expanze, je třeba se seznámit s fyzikálními jednotkami, používanými v astronomii.

Víme, že základní jednotkou délky podle Mezinárodní soustavy jednotek SI (Système International d'Unités) je *metr*. V současné době je metr stanoven prostřednictvím měření času. Na základě přesně definované rychlosti světla  $c$  ve vakuu, tj. [37]

$$c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (5.1)$$

je metr definován jako délka dráhy, kterou světlo urazí ve vakuu za  $\frac{1}{299\,792\,458}$  s.

V běžném životě měříme vzdálenosti mezi jednotlivými pozorovanými objekty na metry, případně na kilometry. Tyto jednotky se v astronomii hodí jen pro nejbližší okolí Země. Můžeme například říci, že Měsíc obíhá přibližně 400 000 km od Země nebo stacionární družice je obíhá Zemi ve výšce 35 000 km. Použitím jednotky kilometr pro měření větších vzdáleností by vycházela těžko přestavitelná gigantická čísla. V astronomii se proto používají jednotky mnohem větší, které již nejsou pouhými dekadickými násobky základní jednotky metr.

### 5.1 Astronomická jednotka

K měření vzdáleností ve sluneční soustavě se obvykle používá tzv. *astronomická jednotka*, pro kterou byla zavedena zkratka **au** (*astronomical unit*). Tato jednotka vzdálenosti se definuje jako střední vzdálenost Země od Slunce, tedy [37]

$$1 \text{ au} = 149\,597\,870\,700 \text{ m} \approx 1,50 \cdot 10^{11} \text{ m}. \quad (5.2)$$

Jedné astronomické jednotce tak přibližně odpovídá 150 milionů km.

Díky této jednotce můžeme například říci, že planeta Jupiter je od Slunce 5,2 au (tj. 777 908 928 km) daleko, nebo planeta Neptun je od Slunce ve vzdálenosti 30 au (tj. 4 487 936 121 km). Dalším zajímavým příkladem může být informace o tom, že

vesmírná sonda Voyager 1 byla v říjnu 2012 od Slunce vzdálená 123 au (tj. 18 400 538 096 km) [38].

Následující tabulka č. 10 pro zajímavost uvádí další příklady vzdáleností a rozměrů známých vesmírných objektů, jež se často uvádějí právě v astronomických jednotkách [38].

Objekt měření	Velikost vzdálenosti
Vzdálenost Měsíce od Země	$0,0026 \pm 0,0001$ au
Vzdálenost Marsu od Slunce	$1,52 \pm 0,14$ au
Vzdálenost Jupiteru od Slunce	$5,20 \pm 0,05$ au
Vzdálenost Pluta od Slunce	$39,5 \pm 9,8$ au
Průměr sluneční soustavy bez Oortova oblaku	přibližně 105 au
Průměr sluneční soustavy s Oortovým oblakem (hrubý odhad)	50 000 až 100 000 au
Vzdálenost nejbližší hvězdy (po Slunci) Proximy Centauri od Slunce	přibližně 267 000 au
Průměr hvězdy Betelgeuze	2,57 au
Vzdálenost Slunce od středu Galaxie	$1,7 \cdot 10^9$ au
Velikost viditelného vesmíru	$1,9 \cdot 10^{15}$ au

Tabulka č. 10: Příklady vzdáleností a rozměrů známých vesmírných objektů, vyjádřených v astronomických jednotkách.

Za zmínku stojí připomenout historickou, řídce používanou astronomickou jednotku, zvanou *siriometr* (též nazývanou *astron*, *makron* či *metron*). Jedná se o milióntý násobek astronomické jednotky, tedy

$$1 \text{ siriometr} = 1 \text{ astron} = 1 \text{ makron} = 1 \text{ metron} = 1 \cdot 10^6 \text{ au} . \quad (5.3)$$

Tuto jednotku navrhl v roce 1911 švédský astronom Carl Vilhem Ludwig Charlier (1862 – 1934). Odpovídá jí zhruba vzdálenost, rovnající se dvojnásobku vzdálenosti mezi Zemí a nejjasnější hvězdou na obloze Sirem, nacházející se v souhvězdí Velkého psa (obr. P46) [38].

## 5.2 Světelný rok

Z předcházející tabulky č. 10 je patrné, že astronomická jednotka v rámci sluneční soustavy sice plně postačuje, ale pro určování vzdáleností hvězd, galaxií a dalších astronomických uskupení těles již vhodná není. Proto byla zavedena větší a pro veřejnost mnohem názornější vesmírná jednotka, tzv. *světelný rok*. Tato jednotka má zkratku **ly** (light year) a je definována jako vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za jeden juliánský rok (tj. za přesně 365,25 dne, tedy 31 557 600 s) [39].

Ze známé rychlosti světla  $c$  (viz vztah (5.1)) lze následně spočítat délku světelného roku v metrech:

$$\begin{aligned} 1 \text{ ly} &= 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1} \cdot 31\,557\,600 \text{ s} = \\ &= 9\,460\,730\,472\,580\,800 \text{ m} \approx 9,467 \cdot 10^{15} \text{ m} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Jednomu světelnému roku tak přibližně odpovídá 10 bilionů km [40]. Pokud tuto hodnotu vydělíme astronomickou jednotkou vyjádřenou v metrech, dostaneme převodní vztah mezi oběma jednotkami:

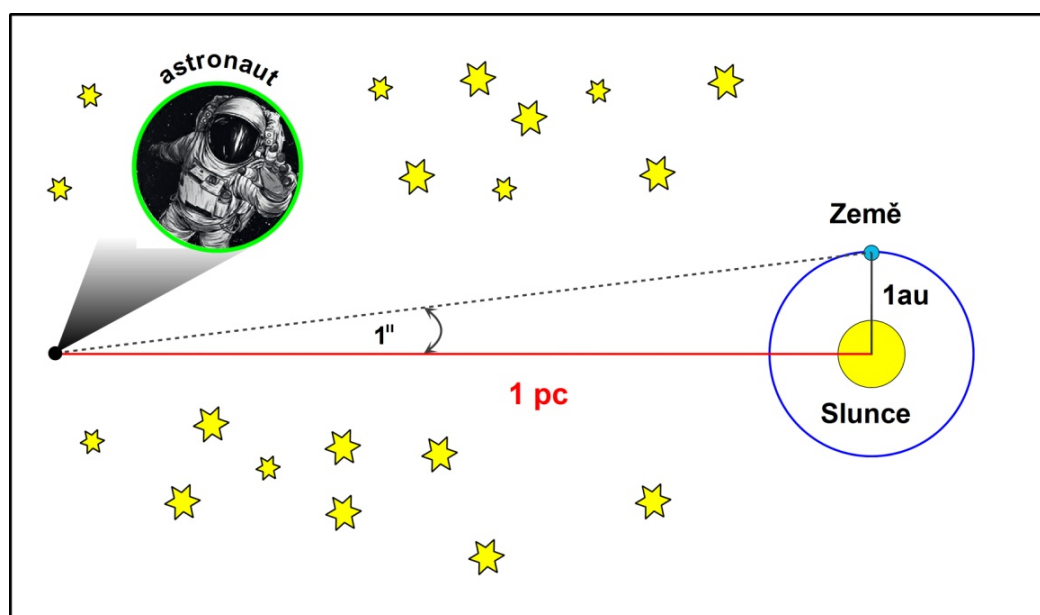
$$1 \text{ ly} = \frac{9\,460\,730\,472\,580\,800}{149\,597\,870\,700} \text{ au} = 63\,241 \text{ au} . \quad (5.5)$$

Světelný rok se používá při určování vzdáleností hvězd, galaxií, rozměrů galaxií apod. Jako příklad můžeme uvést vzdálenost nejbližší hvězdy Proximy Centauri od Slunce, která je 4,22 ly, tedy 39 924 282 594 291 km (obr. P47) [40]. Již z tohoto posledního zápisu je patrné, že pokud se budeme bavit o vzdálenostech mezi hvězdami nebo galaxiemi, jejichž vzdálenosti se počítají na tisíce světelných let, pak převody na kilometry ztrácejí názorný význam.

Na závěr je třeba zdůraznit, že světelný rok je jednotkou vzdálenosti, nikoliv času!

### 5.3 Parsek

Kromě předchozích dvou vesmírných jednotek astronomové používají ještě větší jednotku vzdálenosti nazývanou *parsek* (*parallax second*), zkráceně značenou **pc**. Názorně si ji lze představit z následující úvahy. Již víme, že Země je od Slunce vzdálená jednu astronomickou jednotku. Nyní si představme astronauta v kosmické lodi, který odletí ze sluneční soustavy tak daleko, že Země a Slunce budou od sebe úhlově vzdálené pouhou jednou obloukovou vteřinou, tedy  $(1/3600)^\circ$ . Uvažovaný astronaut pak bude od Slunce ve vzdálenosti právě jednoho parseku (obr. 5-1).



Obr. 5-1: Názorná představa velikosti jednotky parsek.

Z této úvahy a pomocí jednoduché geometrie můžeme napsat převodní vztah pro vyjádření parseku v astronomických jednotkách, tj[39].

$$1 \text{ pc} = \frac{1 \text{ au}}{\text{tg } 1''} \approx 206\,265 \text{ au} . \quad (5.6)$$

Vydělením poslední hodnoty hodnotou ze vztahu (5.5) dostaneme převodní vztah mezi parsekem a světelným rokem[39]:

$$1 \text{ pc} = \frac{206\,265}{63\,241} \approx 3,262 \text{ ly} . \quad (5.7)$$

Jen pro úplnost uvedeme ještě hodnotu parseku v metrech:

$$1 \text{ pc} \approx 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m.} \quad (5.8)$$

V praxi se pro vyjadřování větších vzdáleností běžně používají násobky této jednotky (tabulka č. 11). Například 1 Mpc je nejběžnější délkovou jednotkou, používanou v extragalaktické astronomii [41].

Odvozená jednotka	Značka	Velikost
kiloparsek	kpc	$1 \text{ kpc} = 1 \cdot 10^3 \text{ pc}$
megaparsek	Mpc	$1 \text{ Mpc} = 1 \cdot 10^6 \text{ pc}$
gigaparsek	Gpc	$1 \text{ Gpc} = 1 \cdot 10^9 \text{ pc}$

Tabulka č. 11: Jednotky odvozené z parseku a používané v praxi.

Pro zajímavost uvádí následující tabulka č. 12 některé přibližné vzdálenosti známých objektů vesmíru vyjádřené v megaparsecích [41].

Objekt měření	Velikost vzdálenosti
Vzdálenost sluneční soustavy od středu Mléčné dráhy	0,008 Mpc
Průměr Mléčné dráhy	0,028 Mpc
Vzdálenost Země od galaxie v Andromedě (M31)	0,779 Mpc

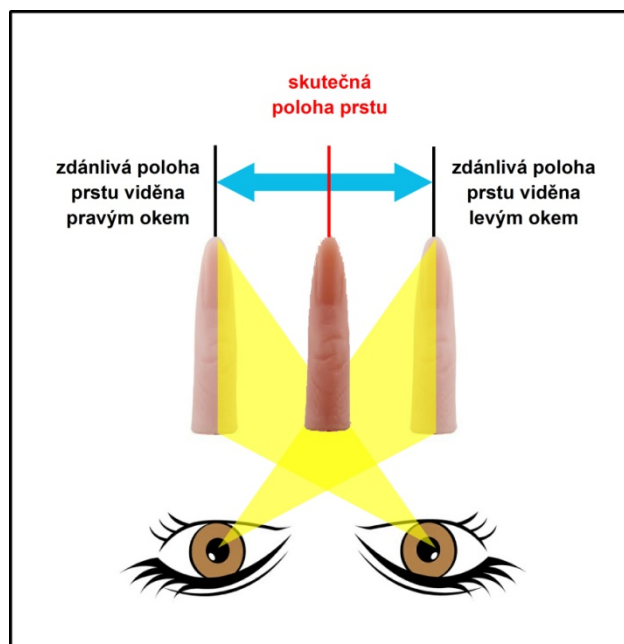
Tabulka č. 12: Příklady vzdáleností a rozměrů známých vesmírných objektů vyjádřené pomocí délkové jednotky megaparsek.



## 5.4 Paralaxa

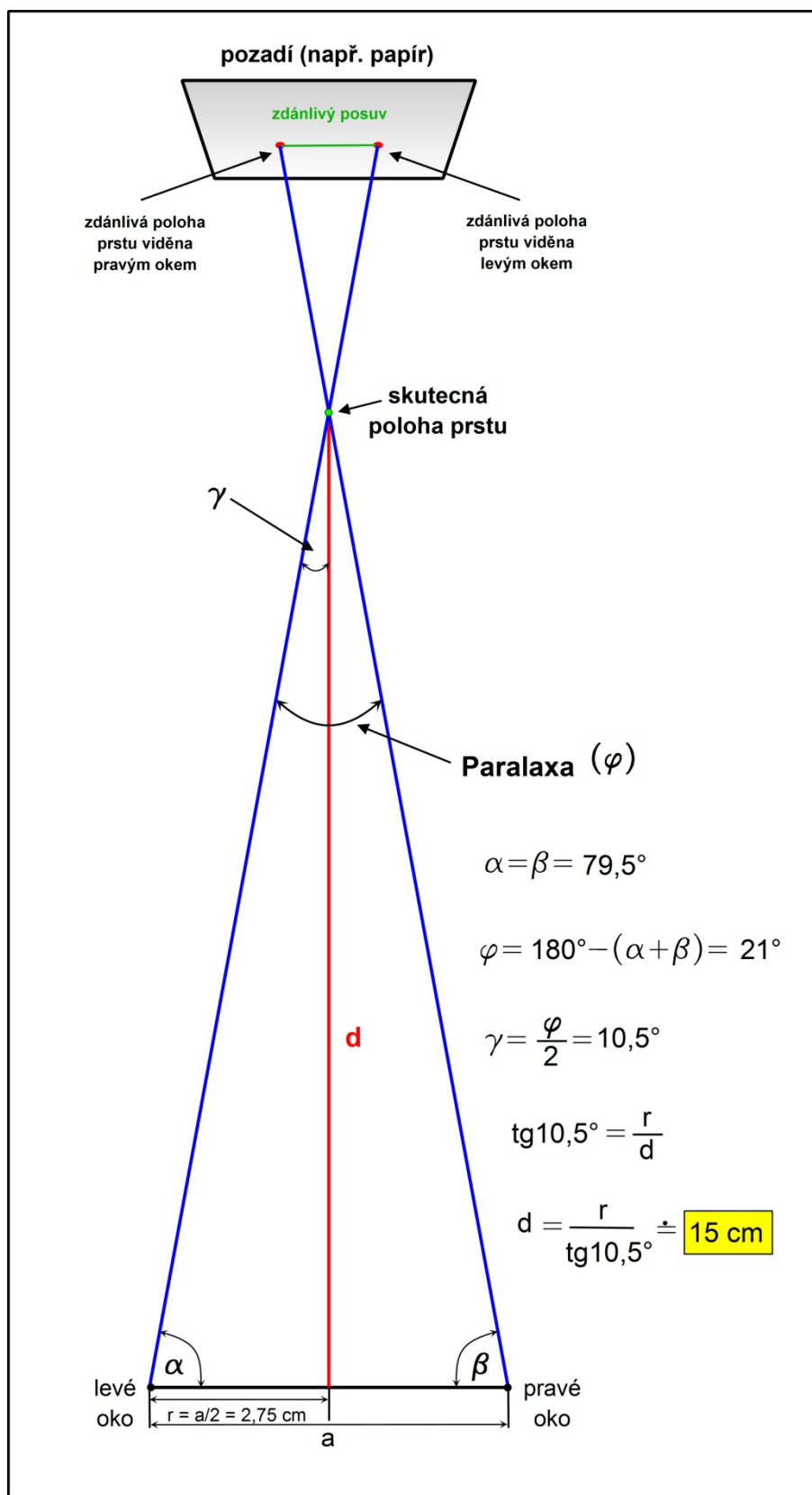
Dalším důležitým pojmem, který se vyskytuje nejenom v astronomii, je tzv. *paralaxa* (z řeckého *parallaxis* – změna) [42].

Obecně vzato jde o úhel, který mezi sebou svírají přímky, vedené ze dvou různých míst v prostoru k pozorovanému bodu. Pro pochopení způsobu měření vzdálenosti pomocí paralaxy lze využít jednoduchý pokus s prstem (obr. 5-2) [42].



Obr. 5-2: Paralaxa pomocí prstu.

Nejprve si dáme prst přibližně 15 cm před nos a zavřeme třeba levé oko. Následně provedeme záznam (např. tečku) pozice našeho prstu na pozadí předmětu (např. papír na zdi). Nyní zavřeme levé oko a otevřeme pravé. Vidíme, že náš prst se promítl do jiné pozice, kterou si opět zaznamenáme. Je zřejmé, že k tomuto „skoku“ musí docházet, protože oči jsou od sebe vzdálené několik centimetrů a každé oko tedy vidí prst pod trochu jiným úhlem. Nyní můžeme provést konstrukci trojúhelníka, jak jej zachycuje schéma na obrázku č. 5-3. Ze změřených úhlů  $\alpha$ ,  $\beta$  a vzdálenosti očí  $a$  již dopočítáme hledanou vzdálenost  $d$  prstu od nosu (obr. 5-3). Stejnou techniku bychom mohli použít k měření vzdálenějších objektů než je náš prst, například při měření vzdálenosti pohoří.



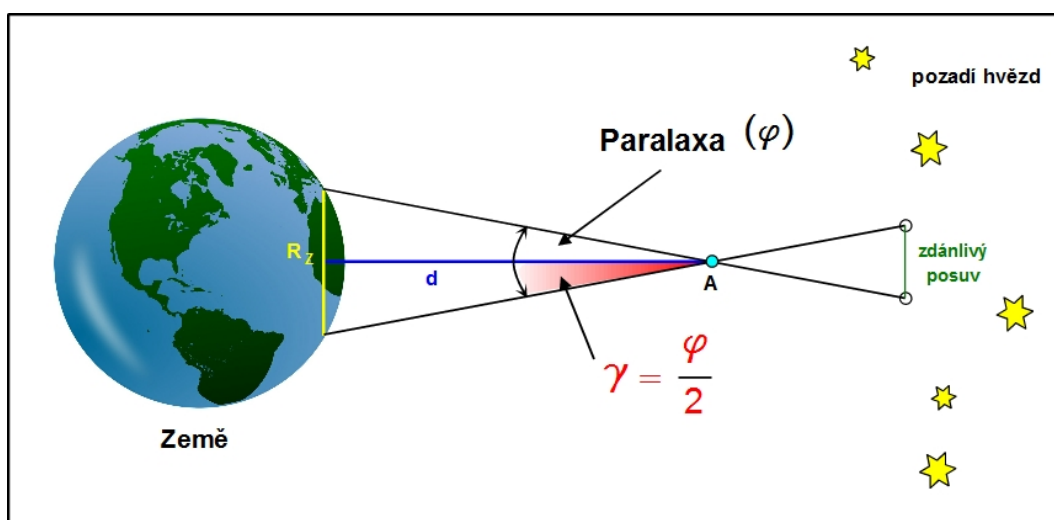
Obr. 5-3: Určení vzdálenosti prstu pomocí trigonometrické paralaxy.

Obdobně se též postupuje i v astronomii. O úspěšnosti metody zde rozhoduje vzdálenost pozorovacích míst  $a$ . Jelikož jsou vesmírné objekty značně vzdálené, jsou měřené úhly  $\alpha$ ,  $\beta$  velmi malé. Aby i přesto astronomové naměřili hledané údaje s uspokojivou přesností, je nutné volit základnu  $a$  co největší.

Paralaxa určená výše popsaným způsobem se nazývá trigonometrická, neboť je stanovena na základě výpočtů v trojúhelníku [42]. V astronomii je paralaxa  $\varphi$  daného vesmírného objektu definována jako úhel, o který se poloha tohoto vesmírného objektu na obloze posune při přesunu pozorovatele o určitou, přesně definovanou vzdálenost. Podle vzdálenosti, o kterou se pozorovatel přesune, pak rozlišujeme paralaxu denní, rovníkovou a roční.

#### 5.4.1 Denní paralaxa

Při určování denní paralaxy se vychází z určování změny polohy objektu během jednoho dne. Za základnu, vůči níž se měření provádí, se v tomto případě volí poloměr Země  $R_Z$ . Posune-li se pozorovatel na Zemi o vzdálenost  $R_Z$ , posune se na obloze objekt A vzhledem k pozadí hvězd o úhel  $\varphi$  (obr. 5-4) [43].



Obr. 5-4: Určení vzdálenosti objektu A pomocí denní trigonometrické paralaxy.

Po změření tohoto úhlu je možné hledanou vzdálenost  $d$  vesmírného objektu od Země určit pomocí vztahu

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \frac{R_Z}{2d}, \quad (5.9)$$

kde úhel  $\frac{\varphi}{2}$  vyjadřuje polovinu denní paralaxy  $\varphi$ .

Vzhledem k tomu, že měřené úhly paralaxy  $\varphi$  jsou velmi malé, můžeme využít vlastnosti funkce sinus (resp. funkce tangens, kterou lze použít také): pro malé úhly  $\varphi$ , vyjádřené v radiánech, platí

$$\operatorname{tg} \varphi \approx \sin \varphi \approx \varphi. \quad (5.10)$$

Na základě popsaného zjednodušení je možné psát:

$$\frac{\varphi}{2} = \frac{R_Z}{2d}, \text{ tedy } \varphi = \frac{R_Z}{d}. \quad (5.11)$$

Po jednoduché matematické úpravě předchozí rovnice můžeme pro hledanou vzdálenost  $d$  psát

$$d = \frac{R_Z}{\varphi}. \quad (5.12)$$

Denní paralaxa se používá k určování vzdáleností planet a objektů ve sluneční soustavě.

#### 5.4.2 Rovníková paralaxa

Rovníková paralaxa se měří analogicky jako denní paralaxa, ale s tím rozdílem, že za základnu měřeného trojúhelníka se volí průměr Země  $D_Z$ . Posune-li se pozorovatel na Zemi o vzdálenost  $D_Z$ , posune se na obloze objekt A vzhledem k pozadí hvězd o úhel  $\varphi$  (obr. 5-5) [43]. Po změření tohoto úhlu je možné hledanou vzdálenost  $d$  vesmírného objektu od Země určit pomocí vztahu

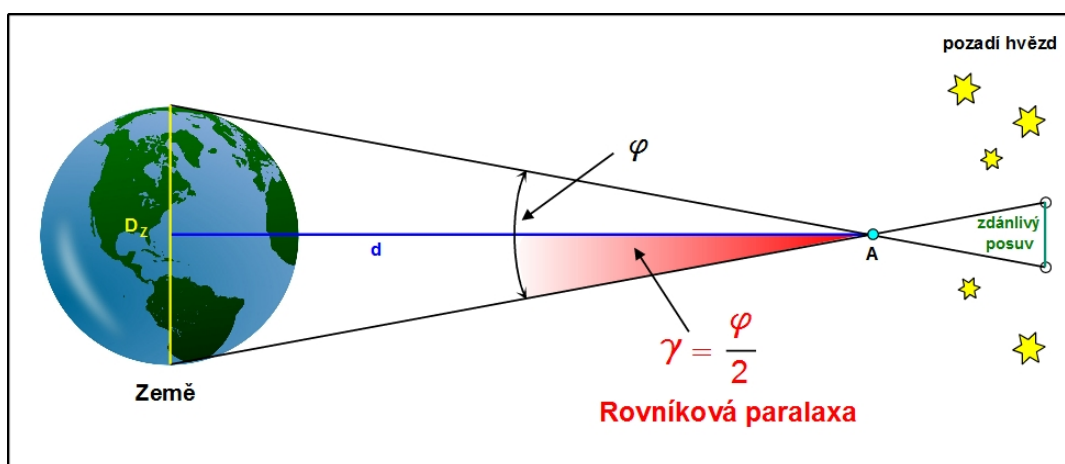
$$\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{D_Z}{2d}, \quad (5.13)$$

kde úhel  $\frac{\varphi}{2}$  vyjadřuje rovníkovou paralaxu  $\gamma$ . Vzhledem k tomu, že platí stejné podmínky (vztah (5.10)) jako v předchozím případě, lze k výpočtu rovníkové paralaxy použít vztah

$$\frac{\varphi}{2} = \frac{D_Z}{2d}, \text{ tedy } \varphi = \frac{D_Z}{d}. \quad (5.14)$$

Opět po jednoduché matematické úpravě předchozí rovnice (5.14) můžeme pro hledanou vzdálenost  $d$  psát:

$$d = \frac{D_Z}{\varphi}. \quad (5.15)$$

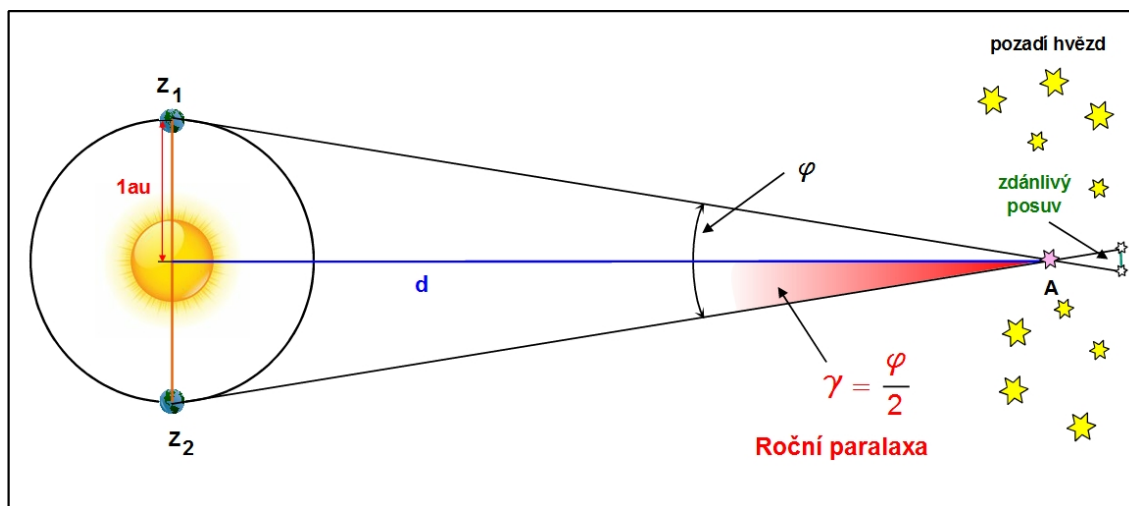


Obr. 5-5: Určení vzdálenosti objektu A pomocí rovníkové trigonometrické paralaxy.

### 5.4.3 Roční paralaxa

Roční paralaxa se používá k určování vzdálenosti hvězd, neboť s využitím denní paralaxy by byly úhly velice malé a měření značně nepřesné. Poloha vzdálené hvězdy se totiž vůči pozorovateli na Zemi za půl dne změní jen nepatrně.

Při měření roční paralaxy se vychází z trojúhelníku, jehož základnu tvoří úsečka s délkou rovnou střední vzdálenosti Země od Slunce, čili 1 au (obr. 5-6). Roční paralaxa dané hvězdy představuje tedy úhel, pod kterým by byla z této hvězdy vidět úsečka délky 1 au, kolmá ke směru pohledu [43]. Na obrázku č. 5-6 je znázorněna poloha Země na její oběžné dráze kolem Slunce S v časových intervalech půl roku (tj. v bodech  $Z_1$  a  $Z_2$ ).



Obr. 5-6: Určení vzdálenosti hvězdy A pomocí roční trigonometrické paralaxy.

Při určování vzdálenosti pomocí roční paralaxy se postupuje stejně jako u předchozích paralax. Tedy

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1 \text{ au}}{d}. \quad (5.16)$$

V přiblížení malých úhlů je hledaná vzdálenost

$$d = \frac{1 \text{ au}}{\varphi}. \quad (5.17)$$

Připomeňme, že roční paralaxa o velikosti  $1''$  odpovídá vzdálenosti 1 pc. Mezi hvězdami je k nám nejbližší a má tedy největší paralaxu Proxima Centauri. Její hodnota  $\varphi = 0,772''$  odpovídá vzdálenosti asi 1,3 pc.

#### 5.4.4 Fotometrická paralaxa

Kromě trigonometrických paralax, jejichž základem je měření v trojúhelníku, se v astronomii též používají i jiné metody, jak určit vzdálenost hvězdy. Jistou fotometrickou metodu nazýváme poněkud zavádějícím způsobem fotometrická paralaxa. Vzdálenost je v tomto případě určena ze zdánlivé hvězdné velikosti  $m$  a absolutní hvězdné velikosti  $M$ . Z jejich rozdílu lze určit vzdálenost hvězdy  $d$  v parsecích podle vztahu [45]

$$d = 10^{\left(\frac{m-M}{5}+1\right)}. \quad (5.18)$$

Fotometrické paralaxy jsou sice jednotlivě nepřesné, umožňují ale statistický výzkum většího počtu hvězd, např. hvězdokup nebo galaxií [44].

## 6 METODY MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI VE SLUNEČNÍ SOUSTAVĚ

Z pohledu historie bylo určování vzdáleností jednotlivých těles sluneční soustavy průběžně probíráno v první kapitole. Hlubší pozornost byla věnována počátkům této astronomické činnosti v období antického Řecka. Již v této době dokázali někteří antičtí myslitelé díky své vynalézavosti navrhnout měřicí metody, založené převážně na jednoduché geometrii, a s pomocí mnohdy vlastnoručně zhotovených důmyslných nástrojů (úhломěrů) odhadovat rozměry a vzdálenosti nejběžněji pozorovaných objektů na obloze (tj. Měsíce a Slunce). V dnešní moderní době jim za jejich experimentální přístup k vesmíru zaslouženě náleží stálý obdiv.

Předmětem zájmu v této kapitole budou některé současné či v nedávné minulosti používané metody měření vzdáleností ve sluneční soustavě. Konkrétní výklad bude vždy doplněn o historickou zajímavost, bezprostředně související s danou metodou měření.

### 6.1 Vzdálenost Země – Měsíc

Jak určit, v jaké vzdálenosti se nachází od Země její přirozená družice Měsíc? Připomeňme si, že touto otázkou se podle dochovaných záznamů již zabýval slavný antický astronom Aristarchos ze Samu. Pomocí zatmění Měsíce se tehdy pokusil odhadnout poměrové velikosti Země, Měsíce a Slunce. Následně prostřednictvím jednoduché geometrie (viz oddíl 2.2.1) stanovil, že Měsíc se nachází ve vzdálenosti, rovnající se 38 zemských průměrům. Současná přesná hodnota této vzdálenosti je 30,2 průměrů Země. Ještě přesnější byl též zmíněný Hipparchos z Níkaie. Ten, jak víme, použil stejnou metodu jako Aristarchos. Jeho odhad této vzdálenosti odpovídal asi 29,5 průměrům Země.

#### 6.1.1 Počátky radarové astronomie

Získání přesnější hodnoty vzdálenosti Země – Měsíc bylo docíleno až ve 30. letech 20. století, a to prostřednictvím odrazů rádiových signálů od povrchu Měsíce. Konkrétně již v roce 1935 přišel americký elektroinženýr Dr. Albert. Hoyt Taylor



(1879 – 1961) z washingtonské Naval Research Laboratory s myšlenkou, použít krátkovlnné signály k měření vzdálenosti Měsíce (obr. P48) [46].

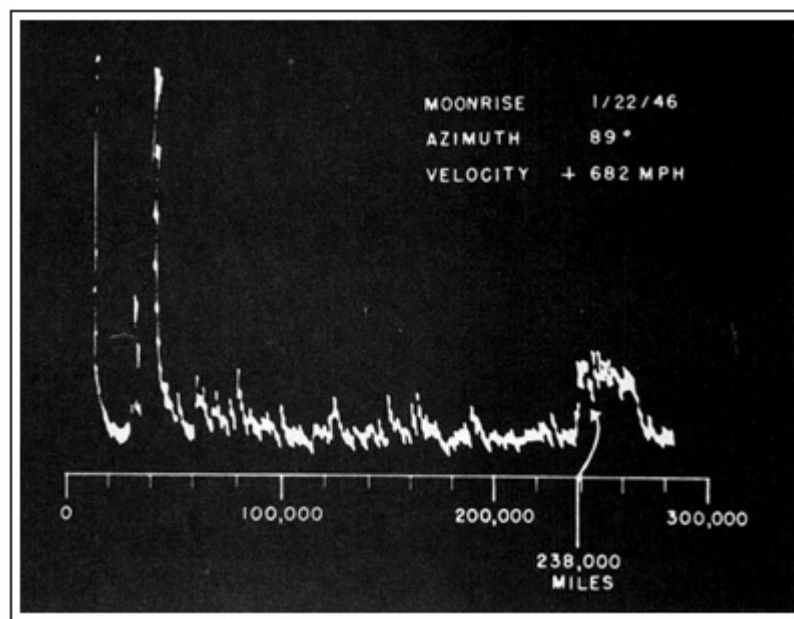
Navrhl pokusy, založené na vyslání soustředěného úzkého kužele rozhlasových vln, které by po odrazu byly zachyceny citlivým rádiovým přijímačem. Bohužel pokusy s krátkovlnným vysíláním nebyly úspěšné. Příčinou neúspěchu byla vrstva ionosféry, která obklopuje Zemi ve výškách v rozpětí asi od 60 do 500 km. Jak je známo, krátkovlnné signály ionosférou téměř neprocházejí a většina se jich odráží zpět. Taylorovy pokusy tak nemohly být úspěšné.

Taylorova neúspěšná myšlenka však neskončila bez užitku, neboť se o ni začal v roce 1940 zajímat americký průkopník v rozhlasovém vysílání a radarové astronomii John Hibbett DeWitt (1906 – 1999) – obr. P49 v příloze. Tehdy jako šéfkonstruktér rádiové stanice WSM v Nashville si do svých poznámek zapsal [46]: *“Pokud vím, zatím se nikomu nepodařilo odeslat přes celou atmosféru rádiový signál a zachytit jeho návrat zpět. Kvůli vlivu ionosféry se budou asi muset používat vyšší frekvence než dosud. Je pravděpodobné, že s frekvencemi nad 40 megahertzů by to mohlo fungovat. Zdá se mi, že by se dalo využít odraz ultrakrátkých vln od Měsíce. Pokud by se to podařilo, otevřely by se široké možnosti studia horních vrstev atmosféry. Odraz signálů od Měsíce by také mohl umožnit nový způsob komunikace ...”*.

Po druhé světové válce v září roku 1945 v rámci „Projektu Diana“ začal DeWitt se spolupracovníky pracovat na rádiovém „průzkumu“ Měsíce. Výzkumná základna projektu se nacházela na pobřeží Atlantického oceánu ve státě New Jersey [46].

Na základě teoretických výpočtů se ukazovalo, že s využitím dostatečně výkonného radaru by se mohl odraz rádiových vln od povrchu Měsíce podařit. Za předpokladu, že průměrná vzdálenost Měsíce od Země je 380 000 km, měl by se radarový paprsek vrátit za 2,5 s. DeWitt a jeho tým experimentátorů sestavili ze součástek vojenských radarů vysílač, který generoval signál o frekvenci 111,5 MHz. Čtvercová vysílací a přijímací anténa, která byla umístěna na 30ti metrovém stožáru, měla možnost regulace pouze ve vodorovné rovině. Experimenty proto probíhaly pouze v době, kdy byl Měsíc těsně nad obzorem, tedy při jeho východu nebo západu. Po vyslání signálu se anténa připojila na vstup přijímače, který „čekal“ na jeho návrat.

Kladného výsledku experimentování se de Witt a jeho tým dočkal až po týdnech, v lednu 1946 (obr. P50). Konkrétně při východu Měsíce 10. ledna 1946 se poprvé podařilo zachytit a na radarové obrazovce zaznamenat odraz radarového impulzu (obr. 6-1) [46]. Tímto úspěšným pokusem tak začalo radarové zkoumání sluneční soustavy.



**Obr. 6-1:** Projekt Diana – záznam odrazu radarového impulzu od povrchu Měsíce ze dne 22. ledna 1946.

(zdroj: [http://www.army.cz/images/id\\_8001\\_9000/8753/radar/f10.htm](http://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/f10.htm))

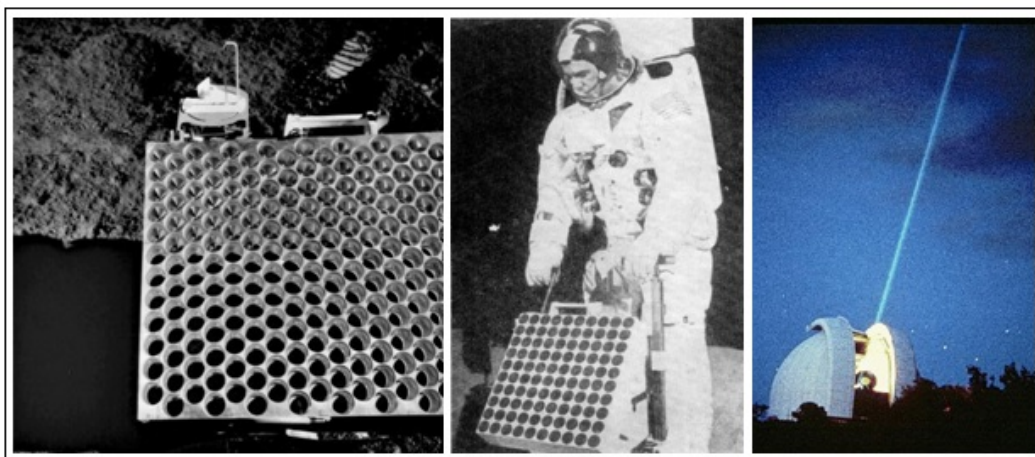
### 6.1.2 Koutové odražeče na Měsíci

Metoda měření vzdálenosti Země – Měsíc pomocí odrazu rádiových signálů od povrchu Měsíce přinesla výrazně přesnější výsledky než kdykoliv předtím. Stále však z vědeckého technologického hlediska nebylo docíleno uspokojivé přesnosti. To se změnilo až s příchodem metody využívající místo rádiového signálu přesnější laserový paprsek. Tato metoda je často označována zkratkou LLR (Lunar Laser Ranging), česky laserové proměření Měsíce.

#### *Historie metody LLR*

Počátky metody LLR sahají do roku 1962, kdy byl poprvé namířen laserový paprsek k Měsíci s cílem určení přesné vzdálenosti díky odrazu od něj [47]. Výsledek však nebyl vůbec uspokojivý a metoda nebyla shledána za dostatečně přesnou, neboť velké nerovnosti na měsíčním povrchu způsobovaly obrovská zkreslení konečných výsledků potřebných k určení dané vzdálenosti. Problém s odrazivostí laserového paprsku byl úspěšně vyřešen až instalací tzv. koutových odražečů (retroreflektorů) přímo na povrchu Měsíce. Metoda LLR se po té stala již velmi účinným prostředkem k určení vzdálenosti Země - Měsíc.

První koutový odražeč byl na Měsíci instalován rámci amerického kosmického letu programu Apollo 11 dne 21. července 1969. Astronaut Neil Armstrong ho umístil v Moři klidu, nacházejícím se ve východní části přivrácené strany Měsíce (obr. P51) [48]. Tento koutový odražeč se skládal ze stovky malých krychliček z vysoce homogenního umělého křemene Suprasil, rozmístěných na hliníkovém panelu o ploše 46 cm<sup>2</sup> (obr. 6-2) [47]. Následně tento odražeč umožnil první měření vzdálenosti, které se uskutečnilo o 11 dní později pomocí optického dalekohledu Lickovy observatoře nacházející se na vrcholku hory Hamilton v pohoří Diablo západně od San José v Kalifornii (obr. 6-2). Díky silnému laserovému paprsku v době měření jeho odrazu od koutového odražeče musela být odkláněna letecká doprava z letišť v San José a San Francisku [47].



**Obr. 6-2:** Koutový odražeč, instalovaný na Měsíci v rámci vesmírného programu Apollo 11. Laserový paprsek vysílaný z Lickovy observatoře.

(zdroj: [http://mek.kosmo.cz/pil\\_lety/usa/apollo/ap-11/lk8.htm](http://mek.kosmo.cz/pil_lety/usa/apollo/ap-11/lk8.htm))

V listopadu roku 1970 byl sovětskou kosmickou misí Luna 17 na Měsíc dopraven druhý odražeč (obr. P52) [49]. Tento koutový odražeč francouzské výroby obsahoval 14 odrazných hranolků a byl umístěn na prvním měsíčním vozítku s označením Lunochod 1, které se pohybovalo v západní oblasti Moře dešťů (Mare Imbrium). Podle některých zdrojů je však tento odražeč již nefunkční, neboť došlo k jeho nadměrnému znečištění měsíčním prachem.

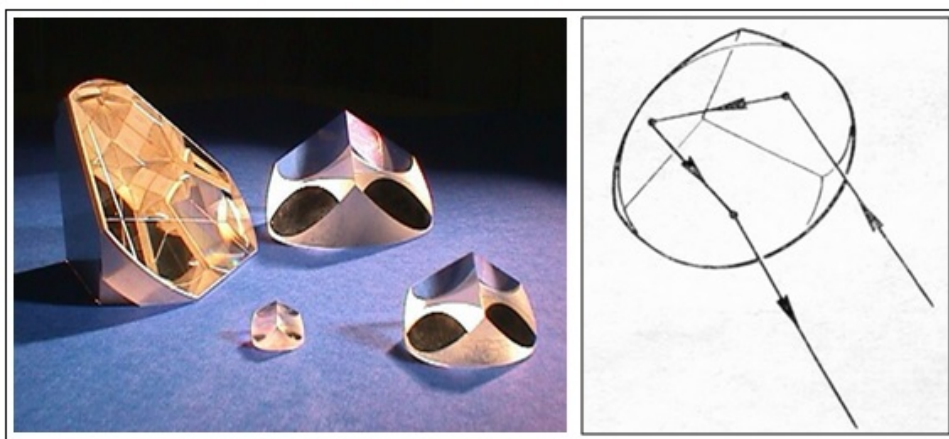
V lednu roku 1971 instalovala posádka kosmického letu programu Apolla 14 třetí odražeč v oblasti měsíční kráterové formace Fra Mauro (obr. P53 v příloze) [49]. Následně v červenci téhož roku pak k němu přibyl další, umístěný na terénním vozidle Apolla 15, který dodnes odpočívá u úpatí měsíčního pohoří Apenin (obr. P54 v příloze).

Oba odražeče jsou stále funkční, i když jejich odrazivost za uplynulá léta klesla asi desetkrát. Za snížení odrazivosti může vrstva meteoritů a lunárního prachu, který se na odrazkách postupně usazuje [49].

V lednu roku 1973 byl posádkou sovětské kosmické mise Luna 21 dopraven v celkovém pořadí pátý odražeč, tvořený postříbřenými povrchy francouzské výroby. Byl součástí měsíčního vozítka Lunochod 2. Podle dostupných zdrojů již tento odražeč není díky erozi mikrometeority funkční [49].

### **Princip činnosti metody LLR**

Odrasové prvky koutového odražeče (obr. 6-3), které mají nejčastěji tvar trojboké pyramidy, jsou zajímavé tím, že světlo, které do nich dopadá, se odráží stejným směrem (obr. 6-3). Proto najdeme tato zařízení třeba v odrazkách a hlavně v armádě, kde zařízení na tomto principu funguje jako klamné cíle pro techniku, která je založena na navádění radarovými paprsky [47].



**Obr. 6-3:** Odrasové prvky koutového odražeče. Znárodnění odrazu laserového paprsku v koutovém odražeči.

(zdroj: <http://fyzmatik.pise.cz/296-zrcatka-koutove-odrazece-na-mesici.html>)

Základní princip metody LLR je zřejmý. Pomocí optického dalekohledu, umístěného na některé z pozemních observačních stanic, se k danému odražeči vyšle laserový paprsek, který se od jeho zrcadélek odráží přesně ve stejném směru, od kterého přišel. Měřením času mezi odeslaným a přijatým signálem a pomocí známé rychlosti světla lze určit vzdálenost velmi přesně. Například v roce 1969 dosahovala přesnost těchto měření 40 cm a v roce 1985 dokonce už 18 cm. Současná měření dovolují určit vzdálenost Měsíce od Země s přesností obdivuhodných 5 mm [47].

I když koutové odražeče nejsou pochopitelně ze Země viditelné, lze optické dalekohledy sloužící k vysílání a přijímání laserových impulsů poměrně přesně nasměrovat. Je totiž známo, že u povrchu Měsíce má laserový paprsek tloušťku od tří do sedmi kilometrů, a tak trefit se s ním do požadované oblasti není příliš velký problém. Laserová "ozvěna" od našeho souseda ovšem není nijak zvlášť silná. I když se k Měsíci vydá přibližně  $10^{19}$  fotonů, cestu zpátky si najde i za velmi dobrých atmosférických podmínek v průběhu sekundy jen několik fotonů, což je zároveň mnohem méně, než dostává lidské oko i za té nejtemnější noci. Naštěstí systém LLR dokáže zachytit i tyto jednotlivé fotony [49].

Do dalekohledu se však dostává množství nežádoucího světla, které nepochází od laserových paprsků odražených z Měsíce. Tento problém se částečně řeší tím, že každý foton, odcházející z pozemní stanice, je tzv. "označkován". Laser totiž produkuje monochromatické světlo o známé vlnové délce, takže k odstranění nežádoucího světla se použije filtru s propustností pouze do vlnové délky o velikosti 0,12 nm [49]. Světlo vcházející do detektoru také musí nejprve projít skrze clonu s průměrem pouze několik obloukových sekund, která zajišťuje odpovídající směr příchozích paprsků.

Detektor odražených signálů je rovněž naprogramován takovým způsobem, aby přijímal laserové pulsy pouze v úzce vymezených "oknech", ve kterých se na základě dřívějších testů předpokládá příchod paprsku. Taková pozorovací okna s dobou trvání jen několik mikrosekund dokáží docela spolehlivě rozlišit, zda dané světlo pochází z odrazu od koutových odražečů na povrchu Měsíce, nebo z jiného zdroje. Úspěšnost zachycení odražených signálů je po těchto procedurách obdivuhodných 99 % [49].

Na závěr nutno poznamenat, že současná metoda LLR neslouží jen k určení vzdálenosti Země – Měsíc, ale rovněž k celé řadě dalších aplikací. Například ke zjištění vzdalování Měsíce od Země (asi 3,8 cm/rok), seismiky Měsíce, relativistických efektů, důkazů o pohybu litosférických desek na Zemi či variacím délky pozemského dne [47].

Na měření vzdálenosti Měsíce od Země pomocí metody LLR se podílela přibližně desítky pozemních observačních stanic z pěti zemí světa. Podle níže uvedené tabulky č. 13 jsou některé z nich i dnes stále v činnosti [49].

Místo	Průměr dalekohledu	Období činnosti
Lick Observatory (USA)	3 m	dočasné měření v srpnu 1969
Simeis (Krymská observatoř)	2,6 m	1969 - ?
Tokio (Japonsko)	2,7 m	1969 - ?
Pic du Midi (Francie)	1,05 m	pouze zkoušky
McDonald (USA)	2,7 m	1969 – 1985
MLRS1 (USA)	2,7 m	1983 – 1988
Haleakala (Hawaii, USA)	0,4 m „Lunastat“	1984 – 1990
Grasse (Francie)	1,05 m	1984 – dodnes
MLRS2 (USA)	2,7 m	1988 – dodnes
Wetzell (Německo)	0,75 m	1991 – dodnes
Matera (Itálie)	1,5 m	provoz zahájen 21. 5. 1999

Tabulka č. 13: Pozemní observační stanice, které se podílely na měření vzdálenosti Měsíce od Země.

## 6.2 Vzdálenost Země – Slunce

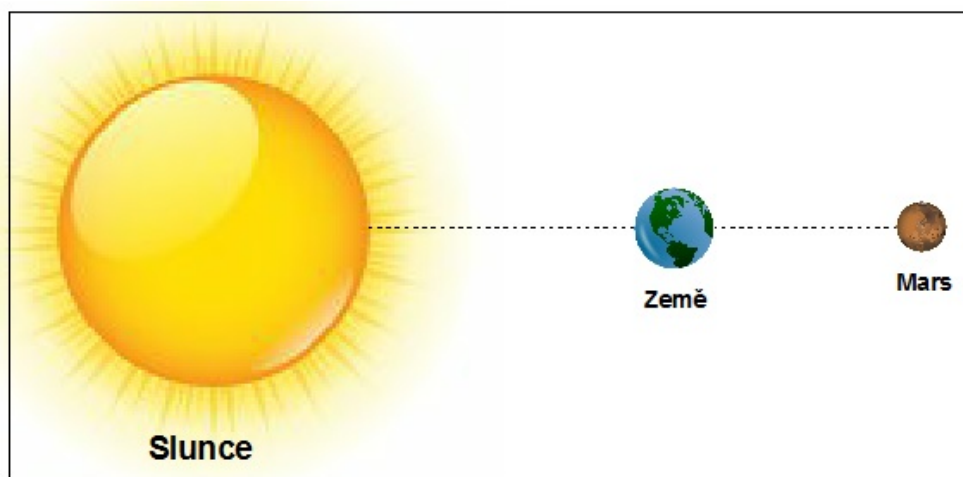
První pokusy o určení, jak daleko od zemského povrchu se ve vesmíru nachází Slunce, nejzářivější těleso denní oblohy, opět sahají až do starověku. Připomeňme si, že počáteční odhady této vzdálenosti též nacházíme u antického astronoma Aristarcha. Ten na základě svojí důmyslné metody (viz oddíl 2.2.1), vycházející z určité konfigurace vzájemných poloh Země, Měsíce a Slunce, odhadoval, že Slunce je od Země 19krát dále než Měsíc. Z dnešního pohledu je pochopitelné, že odhady této vzdálenosti byly velmi silně podceněny, a to nejenom ve starověku, ale i ve středověku. Dokonce ještě počátkem novověku byly přijímány zcela nesprávné představy o vzdálenosti Země – Slunce. Například podle Mikuláše Koperníka je Slunce v dnešních mírách od nás vzdálené jen asi 7 miliónů kilometrů (ve skutečnosti 150 miliónů).

Snad první přiblížení ke správné hodnotě vzdálenosti můžeme shledávat až v roce 1672. V tomto roce se naskytla možnost využít právě probíhající opozici Marsu ke stanovení jeho vzdálenosti od Země a tím i ke stanovení vzdálenosti Země – Slunce, čili astronomické jednotky [50].

### 6.2.1 Zpřesňování astronomické jednotky

Když v roce 1671 známý francouzský matematik a astronom Jean Picard (1620 – 1682) úspěšně proměřil délku zemského poledníku a následně upřesnil zemský poloměr (tj. 6372 km), do jisté míry tím přispěl i k získání přesnější hodnoty vzdálenosti Země – Slunce [2]. Jeho výsledky totiž v roce 1672 použili další dva významní astronomové k určení, v jaké vzdálenosti od Země se nachází planeta Mars. Byli to francouzský matematik a astronom Jean Richer (1630 – 1696) a italsko-francouzský astronom Giovanni Domenico Cassini (1625 – 1712) viz obr. P55 [42]. Oba astronomové tehdy věnovali pozornost opozici Marsu. V době, kdy se Mars nacházel nejbliže k Zemi (obr. 6-4), zahájili astronomickou činnost, jejímž výsledkem bylo určení vzdálenosti Země – Mars. Jejich práce byla následující. Jean Richer odcestoval do města Cayenne, nacházejícím se ve Francouzské Guyaně v Jižní Americe, zatímco Domenico Cassini zůstal v Paříži. Oba současně na svých odlehlých pozorovacích místech zahájili astrometrická měření polohy Marsu na hvězdném pozadí. Když se astronomové znovu sešli, porovnali své záznamy a pomocí nich následně určili denní paralaxu Marsu, tj. úhel, pod kterým by se z Marsu jevil poloměr Země. Údajně

se jednalo o úhel asi  $19''$  [42]. Poté pomocí trigonometrických vztahů již vypočítali vzdálenost Marsu od Země o velikosti přibližně 73 milionů kilometrů. Protože tato vzdálenost, jak vyplývalo z předchozích úhlových měření, je 0,5 au, mohli tím určit i velikost astronomické jednotky, tj. vzdálenost Země – Slunce [42].



Obr. 6-4: Poloha planety Mars v okamžiku, kdy je k Zemi nejbliže.

**Fyzikální úloha 01: určení vzdálenosti Země – Slunce pomocí opozice Marsu a třetího Keplerova zákona [51].**

Vzhledem k didaktickému účelu této diplomové práce bude vhodné se s postupem výpočtu vzdálenosti Země – Slunce podle dvou výše uvedených astronomů seznámit podrobněji.

Richer i Cassini již znali oběžnou dobu Země (tj. 365 dní) a Marsu (tj. 687 dní) kolem Slunce. Byly jim známy i Keplerovy zákony. Především třetí Keplerův zákon jim umožnil uvažovanou vzdálenost vypočítat. Tento zákon nám říká, že poměr druhých mocnin oběžných dob dvou planet se rovná poměru třetích mocnin délek hlavních poloos jejich (eliptických) trajektorií. Za předpokladu, že dráhy obou planet jsou přibližně kruhové (tj. elipsy s malou výstředností), může být tento zákon napsán ve tvaru

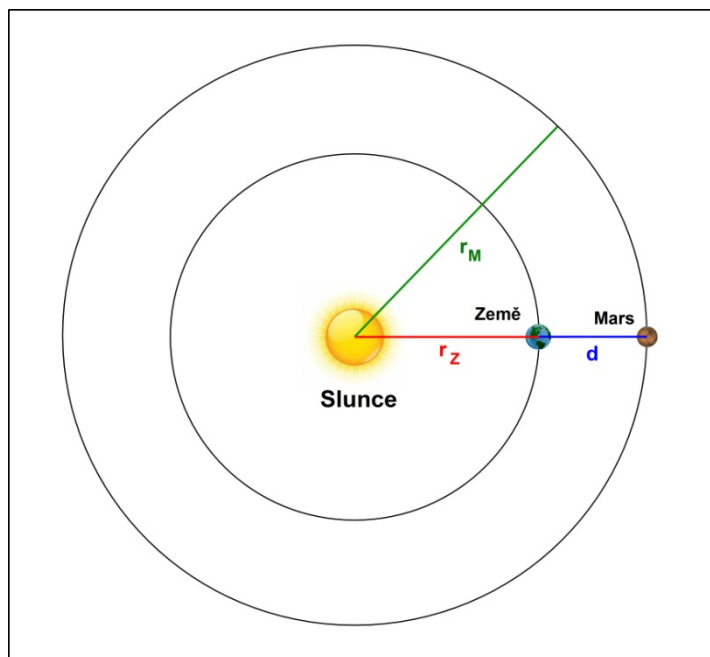
$$\frac{T_Z^2}{T_M^2} = \frac{r_Z^3}{r_M^3}, \quad (6.1)$$



kde  $T_Z$  je oběžná doba Země,  $T_M$  oběžná doba Marsu,  $r_Z$  je poloměr trajektorie Země a  $r_M$  je poloměr trajektorie Marsu. Mezi vzdálenostmi  $r_Z$ ,  $r_M$  dle obrázku 6-5 platí vztah

$$r_M = r_Z + d, \quad (6.2)$$

kde  $d$  je vzdálenost Marsu od Země.



**Obr. 6-5:** Geometrický nákres k výpočtu vzdálenosti Země - Slunce.

Jako výchozí krok pro vyjádření vzdálenosti  $r_Z$  již použijeme třetí Keplerův zákon (6.1). Přitom za  $r_M$  v rov. (6.1) dosadíme vztah (6.2). Pro vzdálenost  $r_Z$  odtud po úpravě dostáváme

$$r_Z = \frac{d}{\sqrt[3]{\frac{T_M^2}{T_Z^2} - 1}}. \quad (6.3)$$

Jestliže nyní do rovnice (6.3) dosadíme výše uvedené hodnoty požadovaných veličin, zjistíme, že podle zmíněných astronomů je Země od Slunce vzdálená přibližně 140 milionů km. Tento výsledek v porovnání s dnešní průměrnou hodnotou vzdálenosti  $149,6 \cdot 10^6$  km můžeme považovat za velmi dobrý.

**Historie pozorování přechodu Venuše před Sluncem**

Další zpřesňování astronomické jednotky přinesla důmyslná metoda, kterou v roce 1716 navrhl slavný anglický astronom a matematik Edmund Halley (1656 – 1742) viz obr. P56 [2]. Tato metoda vychází z astronomického úkazu přechodu Venuše přes sluneční disk. Přechod Venuše před Sluncem patří mezi nejvzácnější předpověditelné astronomické úkazy, neboť podle současných výpočtů a záznamů z dřívějších pozorování plyne, že tyto přechody vykazují zhruba 243letou periodu. Během této periody se vyskytnou dvě dvojice přechodů. Mezi jednotlivými přechody ve dvojici je interval 8 let. A mezi dvojicemi se pak střídají intervaly 121,5 a 105,5 roku [52].

Zajímavostí je, že autorem první předpovědi byl Johannes Kepler [18]. Ten též předpověděl i přechod planety Merkur přes sluneční disk. Co se týká předpovědi přechodu Venuše, byl Keplerem stanoven na 7. prosinec 1631, ten však v Evropě nebyl pozorovatelný. Další přechod nastal o osm let později, 4. prosince 1639. O jeho první vědecké pozorování se již zasloužili angličtí astronomové Jeremiah Horrocks (1618 – 1641) a William Crabtree (1610 – 1644) viz obr. P57 [18].

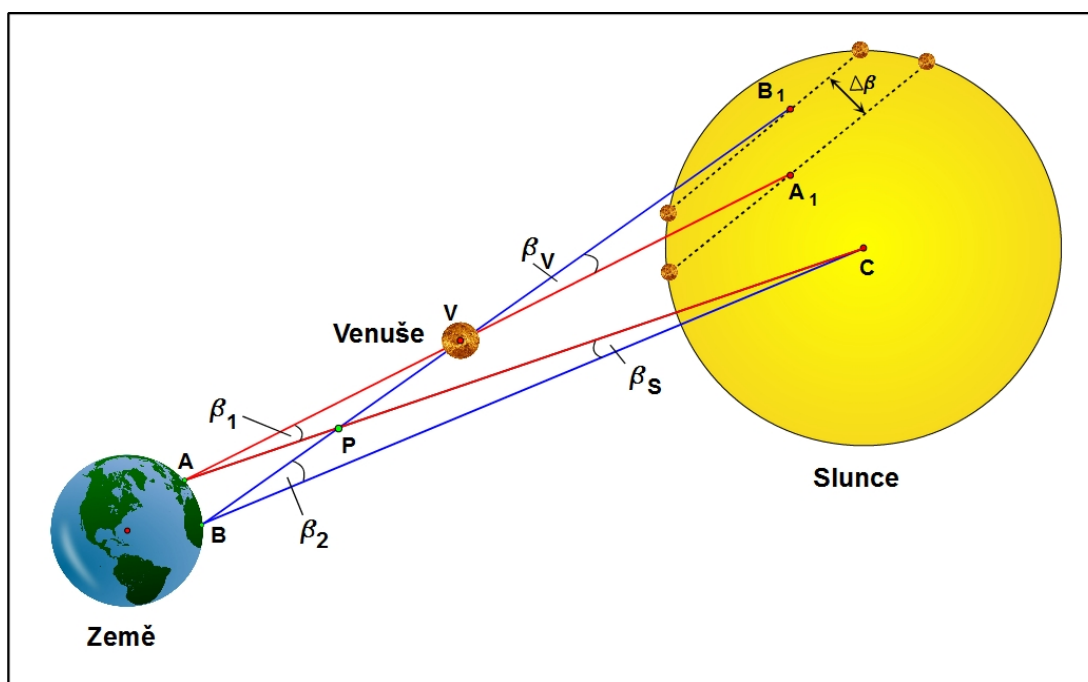
Z dochovaného záznamu je známo, že právě Jeremiah Horrocks se na základě svého pozorování pokusil určit vzdálenost Země od Slunce. Během pozorování astronomického úkazu ze svého stanoviště v Salfordu poblíž Manchesteru změřil úhlovou velikost Venuše [52]. Následně pak odhadl vzdálenost Země od Slunce na 95,6 milionu kilometrů. Jeho odhad sice posunul Zemi od Slunce přibližně 250krát dále, než odhadovali Řekové ve starověku, ale i tak byl dosti podhodnocený. Nesprávný odhad spočíval v jeho mylné teorii, že velikosti planet jsou přímo úměrné jejich vzdálenosti od Slunce tak, aby při pohledu ze Slunce byly jejich úhlové velikosti stejné. Přesto byl tento údaj mnohem přesnější než veškeré předchozí odhady. Horrocksova pozorování byla zveřejněna ve spise *Venuše před Sluncem spatřená (Venus in Sole Visa)* až roku 1662, tedy 21 let po jeho smrti [52].

Následující přechod Venuše v letech 1761 a 1769 byl již pozorován z více jak šedesáti míst po celé zeměkouli. Za jeho vědeckým pozorováním a zdokumentováním se do různých míst světa vydávala celá řada expedic. Na základě jejich výsledků z pozorování a s pomocí zmíněné Halleyovy metody byla již stanovena výrazně přesnější hodnota astronomické jednotky [53].

**Fyzikální úloha 02: určení vzdálenosti Země – Slunce na základě přechodu Venuše přes sluneční disk [53].**

Z hlediska zaměření diplomové práce bude opět jistě přínosné se s principem výpočtu astronomické jednotky z pozorování přechodu Venuše, jak ho navrhl sám Edmund Halley, seznámit blíže.

Pro jednoduchost předpokládejme, že obě uvažované expedice se nacházejí na stejném poledníku. Kromě toho dále předpokládáme, že obě expedice jsou na různých místech Země A a B, která sice mají stejnou zeměpisnou délku, ale značně odlišnou zeměpisnou šířku (obr. 6-6). Venuše se jim tak promítá jako malý disk na sluneční kotouč ve dvou různých místech  $A_1$  a  $B_1$ . To je dáno tím, že pozorovací přímky z bodů A a B směrem k Venuši jsou různé. Kdybychom stejně jako členové expedic pozorovali pohyb Venuše během celého přechodu, mohli bychom zakreslit pozice středu Venuše během pozorování. Při pozorování ze dvou míst A a B tak dostáváme dvě rovnoběžné úsečky, odpovídající vždy jednomu z těchto míst. Pro úhlovou vzdálenost těchto úseček zavedeme značení  $\Delta\beta$ .



**Obr. 6-6:** Geometrický nákres přechodu planety Venuše přes sluneční disk.

Nyní již za pomoci obrázku 6-6 můžeme přejít k názornému odvození vztahu pro výpočet vzdálenosti Země – Slunce. Pro vyznačené trojúhelníky APV a BPC platí, že jejich vnitřní úhly při vrcholu P jsou stejné. Tudíž součty jejich úhlů ve zbylých dvou vrcholech jsou též stejné. Platí tedy vztah

$$\beta_V + \beta_1 = \beta_S + \beta_2 \rightarrow \beta_V - \beta_S = \beta_2 - \beta_1 = \Delta\beta, \quad (6.4)$$

kde  $\Delta\beta$  je úhlová vzdálenost dvou různých stop Venuše na slunečním disku, měřených oběma expedicemi. Jestliže obě strany druhé rovnice (6.4) vynásobíme podílem  $\frac{\beta_S}{\beta_S}$  a následně provedeme dílčí matematické úpravy, dostaneme vztah

$$\Delta\beta = \beta_S \cdot \left( \frac{\beta_V}{\beta_S} - 1 \right). \quad (6.5)$$

Dále zavedeme značení  $r_Z$ , tj. vzdálenost Země – Slunce a  $r_V$ , tj. vzdálenost Venuše – Slunce. Za použití definic paralaxy Venuše  $\beta_V$  a paralaxy Slunce  $\beta_S$ , tj.

$$\beta_V = \frac{AB}{r_Z - r_V}; \quad \beta_S = \frac{AB}{r_Z} \quad (6.6)$$

můžeme podíl  $\frac{\beta_S}{\beta_V}$  v rovnici (6.5) vyjádřit pomocí vzdálenosti Země – Slunce a Venuše – Slunce, tj. po úpravě

$$\frac{\beta_V}{\beta_S} = \frac{r_Z}{r_Z - r_V}. \quad (6.7)$$

Tento vztah (6.7) dosadíme do rovnice (6.5) a dostaneme

$$\Delta\beta = \beta_S \cdot \left( \frac{r_Z}{r_Z - r_V} - 1 \right) = \beta_S \cdot \frac{r_V}{r_Z - r_V}. \quad (6.8)$$

Poté rovnici (6.8) matematicky upravíme do tvaru

$$\beta_S = \Delta\beta \cdot \left( \frac{r_Z}{r_V} - 1 \right), \quad (6.9)$$

kde podíl  $\frac{r_Z}{r_V}$  můžeme vyjádřit pomocí třetího Keplerova zákona, neboť známe oběžnou dobu Venuše ( $T_V = 224,70$  dní) a Země ( $T_Z = 365,25$  dní). Číselně

$$\left(\frac{r_Z}{r_V}\right)^3 = \left(\frac{365,25}{224,70}\right)^2 \rightarrow \frac{r_Z}{r_V} = \sqrt[3]{\left(\frac{365,25}{224,70}\right)^2} = 1,38248. \quad (6.10)$$

Tento výsledek dosadíme do vztahu pro paralaxu Slunce (6.9):

$$\beta_S = \Delta\beta \cdot (1,38248 - 1) = 0,38248 \cdot \Delta\beta. \quad (6.11)$$

Nakonec z definice paralaxy Slunce (6.6) vyjádříme vzdálenost  $r_Z$  a s použitím vztahu (6.11) dostaneme již konečný vztah pro výpočet astronomické jednotky, tj.

$$r_Z = \frac{AB}{\beta_S} = \frac{AB}{0,38248 \cdot \Delta\beta}. \quad (6.12)$$

Z odvozeného vztahu (6.12) tedy vyplývá, že pro zjištění vzdálenosti Země od Slunce stačí znát vzdálenost expedice AB a úhlový posun stop  $\Delta\beta$  jejich pozorování přechodu Venuše před Sluncem.

Konkrétně v roce 1769 pozorovaly přechod Venuše expedice z Vardö a z Tahiti. Jimi určené stopy Venuše na slunečním disku se lišily o úhel  $\Delta\beta = 0,0019$  rad. Ze vzdálenosti obou pozorovacích míst 11 425 km dostáváme hodnotu astronomické jednotky přibližně o velikosti 157 milionů km [53].

Určováním astronomické jednotky výše popsanou metodou se zabýval i známý francouzský astronom Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande (1732 – 1807). Ten v roce 1771 zpracoval získané údaje z obou přechodů Venuše a určil astronomickou jednotku přibližně na hodnotu 153 milionů km [52]. S ohledem na současnou hodnotu to byl velmi solidní výsledek.

Astronomové při následujících pozorováních přechodu Venuše z let 1874 a 1882 již vypočítali z naměřených údajů téměř současnou hodnotu astronomické jednotky, a to i díky technickému pokroku. Astronomové tehdy využili výhod vynálezu fotografie, který jim umožnil mikrometrická měření vzdálenosti Venuše od okraje slunečního disku. Tím již nebyli odkázáni na prchavé okamžiky kontaktů na počátku a konci přechodu. Za zmínku stojí astronomická činnost kanadsko-amerického matematika

a astronoma Simona Newcomba (1835 – 1909). Newcomb zkombinoval data ze čtyř posledních přechodů a odvodil hodnotu astronomické jednotky na téměř přesnou hodnotu 149,6 milionů km [52].

Kdybychom si položili otázku, zdali má vůbec smysl se v dnešní době stále zabývat měřením a upřesňováním hodnoty astronomické jednotky, jistě by nám každý zkušený astronom odpověděl, že rozhodně ano. Důvodem jednoznačné odpovědi je i fakt, že přesnou hodnotu astronomické jednotky potřebujeme znát například k dalšímu kroku měření vzdálenosti objektů ve vesmíru, např. blízkých hvězd.

K měření vzdálenosti Slunce od Země dnes astronomové používají velmi výkonné radary, které jsou schopné získat rádiový odraz od elektricky vodivé sluneční ionosféry. Z naměřených hodnot rádiových signálů se pak dá vypočítat mimořádně přesná hodnota vzdálenosti s odchylkou  $\pm 1$  m [35].

### 6.3 Planety sluneční soustavy a jejich vzdálenosti

Z předchozího výkladu o určování vzdálenosti Země - Slunce vyplynul zásadní poznatek. Jelikož přímé určování vzdáleností je v astronomii obecně problémem, tak kdykoliv to lze, se měření vzdálenosti převádí na určování nějaké jiné, jednodušejší měřitelné veličiny. Například z předchozích poznatků je zřejmé, že výhodným prostředkem k určování vzdáleností objektů ve sluneční soustavě je třetí Keplerův zákon, tj. [14]

$$\frac{T^2}{a^3} = \text{konst.} \quad (6.13)$$

Ten nám v rámci sluneční soustavy umožňuje převést určení hlavní poloosy dráhy  $a$  na daleko jednodušší určení oběžné doby  $T$ . Je-li tedy znám rozměr dráhy aspoň jedné planety od Slunce, popř. nejmenší vzájemná vzdálenost dvou planet, pak je možné určit rozměr dráhy libovolné jiné planety z doby jejího oběhu kolem Slunce [35].


V současné době se již výpočty pomocí sluneční paralaxy k určení hodnoty astronomické jednotky nepoužívají, neboť moderní metody, využívající vesmírných sond či radarových pozorování těles sluneční soustavy, umožnily určit její hodnotu s průměrnou přesností  $\pm 30$  m [35]. Přesnost měření výkonným radarem je obzvláště vysoká u planet terestrického typu (Merkur, Venuše, Mars), a to díky jejich pevnému povrchu, který umožňuje velmi dobrou odrazivost radarových vln. Pozemské speciální radarové stanice mají dnes již velký dosah, takže je možné radarovým odrazem změřit i vzdálenosti Jupiteru a Saturnu. Dokonce se podařilo zachytit radarové odrazy od Saturnových prstenců [35].

V poslední době se k měření vesmírných vzdáleností hojně využívají i kosmické sondy. Když k dané planetě letí kosmická sonda, má na své palubě rádiový vysílač, pomocí kterého udržuje kontakt s pozemskými stanicemi. Na základě rádiových vln z tohoto vysílače získávají astronomové mimo jiné údaje o tom, v jaké aktuální vzdálenosti se kosmická sonda nachází. Například vzdálenosti kosmických sond Voyager 1 a 2, které jsou již daleko za planetárním systémem, se stále určují pomocí rádiového spojení [35].

Z hlediska získání celkové představy o rozměrech naší sluneční soustavy uvádíme v závěru této podkapitoly formou tabulky přehled vzdáleností jednotlivých planet ve sluneční soustavě. Jelikož planety se kolem Slunce pohybují po eliptických dráhách, musí se pochopitelně měnit vzhledem k aktuální poloze i jejich vzdálenosti. V tabulce

č. 14 jsou proto uvedeny jen střední hodnoty těchto vzdáleností v kilometrech a astronomických jednotkách [54].



Planeta	Střední vzdálenost planety od Slunce
 MERKUR	58 000 000 km (0,39 au)
 VENUŠE	108 000 000 km (0,72 au)
 ZEMĚ	150 000 000 km (1,00 au)
 MARS	227 000 000 km (1,51 au)
 JUPITER	778 000 000 km (5,19 au)
 SATURN	1 427 000 000 km (9,51 au)
 URAN	2 869 000 000 km (19,13 au)
 NEPTUN	4 497 000 000 km (29,98 au)

Tabulka č. 14: Planety sluneční soustavy a jejich vzdálenosti.

## 7 SPEKTROSKOPICKÉ CHARAKTERISTIKY HVĚZD

Než pojednáme o metodách měření vzdálenosti objektů, nacházejících se v kosmickém prostoru daleko za hranicemi naší sluneční soustavy, je třeba se nejdříve seznámit s veličinami, které je charakterizují. Těmi objekty máme na mysli hvězdy a jejich vnějšími charakteristikami např. zářivý výkon, resp. absolutní magnitudu, a pozorovanou (tj. zdánlivou) hvězdnou velikost. Právě tyto veličiny nás mohou dovést ke stanovení vzdálenosti dané hvězdy.

### 7.1 Zářivý výkon a jasnost hvězd

V prvním přiblížení lze hvězdy považovat za zdroje elektromagnetického záření, které je do prostoru vyzařováno rovnoměrně do všech směrů (izotropně). Množství elektromagnetického záření, které na Zemi dopadá z hvězd, se většinou vyjadřuje pomocí jeho energie [55].

Celkovou energii, kterou hvězda vyzáří ve všech vlnových délkách elektromagnetického spektra za jednu sekundu, udává fyzikální veličina *zářivý výkon* neboli *zářivost*. Značí se  $L$ , jednotkou je *watt* (W). V astronomii se též hodnota zářivého výkonu hvězd vyjadřuje v jednotkách nominálního zářivého výkonu Slunce. Rozhodnutím Valného shromáždění IAU z roku 1997 je nominální výkon Slunce definován hodnotou  $L_s = 3,83 \cdot 10^{26}$  W [55]. Výkony jiných hvězd pak poměříme touto poměrnou jednotkou. V následující tabulce č. 15 jsou pro názornost uvedeny některé hodnoty zářivého výkonu hvězd, vyjádřené v jednotkách nominálního zářivého výkonu Slunce [56].

Hvězda	Zářivý výkon [L/LS]
Eta Carinae	5 500 000
Deneb	250 000
Betelgeuze	60 000
Spica	14 000
Polaris (Polárka)	2 200
Aldebaran	140
Vega	47
Sirius A	22
Proxima Centauri	0,000 06

Tabulka č. 15: Příklady hvězd, jejichž zářivé výkony jsou vyjádřeny jako násobek zářivého výkonu Slunce.

Dále je třeba se blíže seznámit s pojmem *jasnost* hvězd. Kdybychom na obloze pozorovali dvě hvězdy o stejném zářivém výkonu, ale každá by byla v různé vzdálenosti od Země, přirozeně bychom zjistili, že nejsou stejně jasné. Je to proto, že v případě vzdálenější hvězdy se její záření rozkládá na větší kulovou plochu. Následně tak každou plochou o obsahu  $1 \text{ m}^2$  projde za sekundu méně energie.

Z hlediska kvantitativního vyjádření proto zavádíme veličinu jasnost hvězdy  $j$ , která udává, kolik zářivé energie hvězdy projde za jednu sekundu plochou  $S$  o obsahu  $1 \text{ m}^2$  (obr. 7-1). Její jednotkou je *watt na čtvereční metr* ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) [57]. Platí tedy

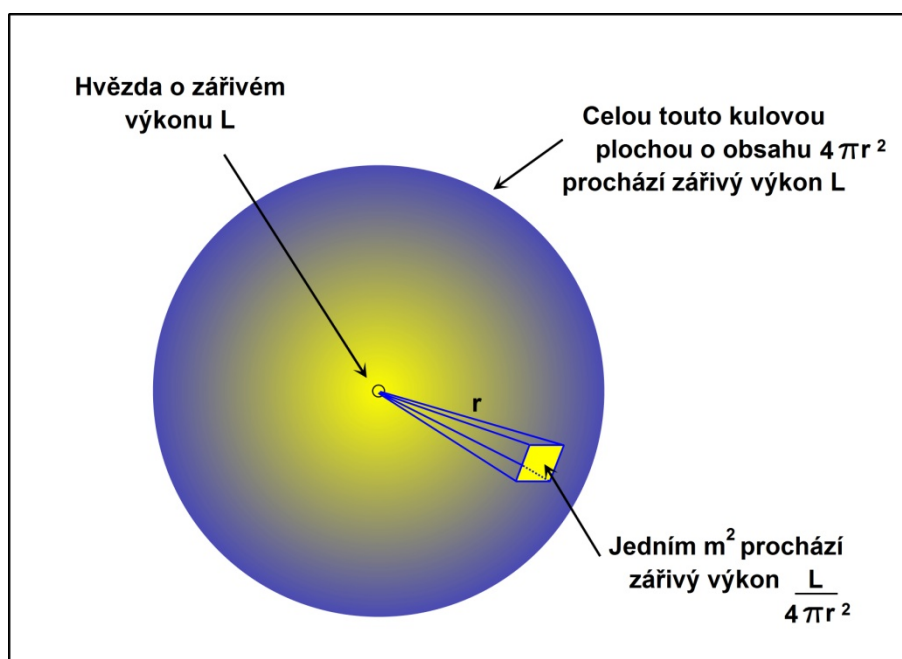
$$j = \frac{L}{S}, \quad (7.1)$$

kde  $L$  je velikost zářivé energie, která projde určitou kulovou plochou  $S$  za jednu sekundu.

Z rovnice (7.1) vyplývá, že jasnost hvězdy je přímo úměrná jejímu celkovému zářivému výkonu a nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti. Pro jasnost hvězdy, která se nachází ve vzdálenosti  $r$  od Země, tedy platí vztah [13]

$$j = \frac{L}{4\pi r^2}. \quad (7.2)$$

Jasnost hvězdy, kterou vyjadřuje rovnice (7.2), se nazývá přesněji *bolometrická jasnost* nebo též *hustota zářivého toku*.



**Obr. 7-1:** Celý zářivý výkon  $L$  hvězdy prochází uvažovanou kulovou plochou o poloměru  $r$  a rovnoměrně se na ní rozkládá. Jasnost hvězdy neboli výkon procházející v této vzdálenosti od hvězdy plochou o obsahu jeden metr čtvereční, je  $L/4\pi r^2$ .

V astronomii se též udává tzv. *vizuální jasnost*, která se, na rozdíl od bolometrické jasnosti, týká jen úzké oblasti spektra elektromagnetického záření, v tomto případě jeho viditelné části [13]. Z optiky víme, že jde o světlo v neostře ohraničené oblasti v rozsahu frekvencí od  $7,7 \cdot 10^{14}$  Hz do  $3,9 \cdot 10^{14}$  Hz. Tomu odpovídá interval vlnových délek od 390 nm (fialová barva světla) do 760 nm (červená barva světla). Připomeňme si ještě vztah mezi vlnovou délkou  $\lambda$  a frekvencí  $f$  záření [37]:

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (7.3)$$

Zde  $c$  je rychlost světla ve vakuu nebo jiném prostředí.

## 7.2 Hvězdná velikost

Důležitou základní charakteristikou hvězd je jejich *hvězdná velikost*. Z historického hlediska jde o vůbec první charakteristiku, která se objevila již v antické astronomii.

Již starověcí astronomové si při pozorování noční oblohy prostým okem povšimli, že pozorované hvězdy nejsou stejně jasné. Připomeňme si, že jejich představa o hvězdách byla taková, že mají stálou neměnnou polohu a jsou stejně daleko od Země. Tudíž rozdílná jasnost hvězd byla podle nich určena jen jejich rozdílnou geometrickou velikostí [13].

Z dochovaného katalogu hvězd, jehož autorem byl antický astronom Ptolemaios, byla nalezena zmínka o tom, jakým způsobem jeho předchůdce Hipparchos přiřazoval hvězdné velikosti ve svém katalogu pozorovaným hvězdám. V jeho původním katalogu, obsahujícím asi 800 hvězd, byly nejjasnější hvězdy označeny jako *hvězdy první velikosti*, a hvězdy nejméně jasné zase jako *hvězdy šesté velikosti* [7].

Hipparchem zavedená hvězdná velikost se v poněkud pozměněné podobě užívá i dnes. Je však přesně definovaná pomocí množství zářivé energie (resp. zářivého toku), která na Zemi od hvězdy přichází. Její hodnota tedy nemá přímou souvislost se skutečnými rozměry hvězdy či jiného nebeského objektu [13].

Rozlišujeme tzv. pozorovanou (zdánlivou) hvězdnou velikost a absolutní (skutečnou) hvězdnou velikost.

### 7.2.1 Pozorovaná (zdánlivá) hvězdná velikost

Pozorovaná (zdánlivá) hvězdná velikost je fotometrická veličina, která udává jasnost pozorovaného světelného zdroje (např. právě hvězdy) na obloze. Její hodnota představuje – ať už subjektivně vnímanou nebo přístrojem detekovanou – jasnost hvězdy. Značí se  $m$ , její jednotkou je *magnituda* (mag).

Tato fotometrická veličina je obvykle definovaná pomocí rozdílu hvězdných velikostí dvou hvězd [13], tj.

$$m_A - m_B = -2,5 \log \frac{j_A}{j_B}, \quad (7.4)$$

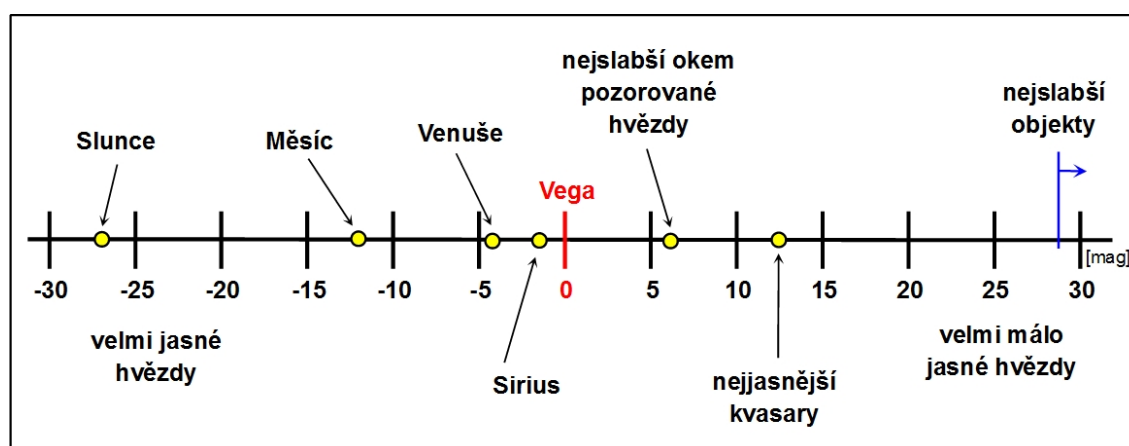
kde  $j_A$  a  $j_B$  jsou jasnosti pozorovaných hvězd. Logaritmus se v rovnici objevuje z toho důvodu, že lidské oko vnímá lineárně se měnící jasnost logaritmicky. Faktor 2,5

odráží empirickou skutečnost, že rozdílu 5 magnitud odpovídá stonásobný rozdíl jasností, tj.

$$m_A - m_B = K \log \frac{j_A}{j_B} \Rightarrow 5 = K \log 100, K = -2,5 \quad (7.5)$$

Znaménko mínus je důsledkem toho, že hvězdám o větší jasnosti je historicky přiřazována menší magnituda. Rovnice (7.5) je známá pod názvem Pogsonova rovnice. V roce 1856 ji zavedl anglický astronom Norman Robert Pogson (1829 – 1891) viz obr. P58 [59].

S postupem času, jak se stále zdokonalovaly pozorovací přístroje, byly objeveny stále slabší a slabší hvězdy, než které mohl vidět pouhým okem Hipparchos. Proto hvězdná velikost může nabývat libovolných reálných hodnot. Obecně platí, že čím má hvězda menší hodnotu hvězdné velikosti, tím je jasnější. Nejslabší hvězdy, viditelné ještě pouhým okem, mají hvězdnou velikost kolem 6 mag, naopak nejslabší hvězdy, viditelné dalekohledem, pak přibližně 25 mag [60]. Nejvzdálenější objekty, které jsou pozorovatelné prostřednictvím Hubbleova vesmírného teleskopu, mají hvězdnou velikost dokonce až 30 mag [60]. Na druhé straně, jak je patrné z níže uvedeného obrázku 7-2, má Slunce hvězdnou velikost  $-26,7$  mag a Měsíc v úplňku  $-12,7$  mag [60].



Obr. 7-2: Pozorované hvězdné velikosti některých kosmických objektů.

### 7.2.2 Absolutní (skutečná) hvězdná velikost

V předchozím textu jsme uvedli, že zdánlivé hvězdné velikosti závisí na vzdálenosti hvězdy od Země. Jinými slovy řečeno, zdánlivá hvězdná velikost udává, jak jasná se hvězda jeví při pozorování ze Země. Aby bylo možné porovnávat skutečné hvězdné velikosti, je nutné zdánlivou hvězdnou velikost opravit o vliv vzdálenosti od Země. K tomuto účelu se zavádí *absolutní hvězdná velikost*.

Absolutní hvězdná velikost ( $M$ ) je definována jako hvězdná velikost hvězdy, která se nachází ve standardní vzdálenosti  $r_0 = 10$  pc (tj. 32,6 ly) od Země [61]. Z této definice pro pozorovatele vyplývá, že si pozorovanou hvězdu jakoby „posune“ do vzdálenosti 10 pc a z této vzdálenosti poté určí její hvězdnou velikost [61].

Odvodíme si nejdříve vztah vyjadřující absolutní hvězdnou velikost  $M$  v závislosti na zdánlivé hvězdné velikosti  $m$  a na vzdálenosti  $r$  hvězdy od Země. Jako výchozí pro nás bude poznatek, že jasnost hvězdy je nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti [61]:

$$j_0 = \frac{L}{4\pi r_0^2} \text{ a } j = \frac{L}{4\pi r^2}, \quad (7.6)$$

kde  $j_0$  je jasnost hvězdy, pozorované ze vzdálenosti  $r_0 = 10$  pc, a  $j$  je jasnost hvězdy, pozorované ze vzdálenosti  $r$ . Z rovnic (7.6) dostaneme

$$\frac{j_0}{j} = \frac{r^2}{r_0^2}. \quad (7.7)$$

Vztah (7.7) dosadíme do rovnice (7.4) a obdržíme

$$M - m = -2,5 \log \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 = -5 (\log r - \log r_0). \quad (7.8)$$

Pro vzdálenosti v parsecích je  $\log r_0 = \log 10 = 1$ . Odtud

$$M = m + 5 - 5 \log r. \quad (7.9)$$

Z této rovnice vyplývá vztah pro výpočet fotometrické paralaxy, rov. (5.18).

**Fyzikální úloha 03: určení absolutní hvězdné velikosti Slunce**

Jako příklad si z odvozeného vztahu (7.9) odvodíme výpočet absolutní hvězdné velikosti Slunce  $M_S$ . Do vztahu nejdříve dosadíme již dříve zmíněné údaje:

- zdánlivá velikost Slunce  $m_s = -26,73 \text{ mag}$ ,
- vzdálenost Země – Slunce  $r = 4,864 \cdot 10^{-6} \text{ pc}$ .

Provedeme výpočet:  $M_S = -26,73 + 5 - 5 \log(4,864 \cdot 10^{-6}) = 4,84 \text{ mag}$ .

Absolutní hvězdná velikost Slunce je 4,84 mag.

---

Obecně hvězdná velikost závisí na spektrální oblasti, z níž záření registrujeme. V současné době astronomové k určování hvězdné velikosti používají velmi citlivé fotoelektrické detektory (CCD), před které lze dát barevné filtry. Tyto filtry propouštějí pouze záření určité vlnové délky a dovolují tak stanovit hvězdnou velikost pro konkrétní spektrální oblast [13].

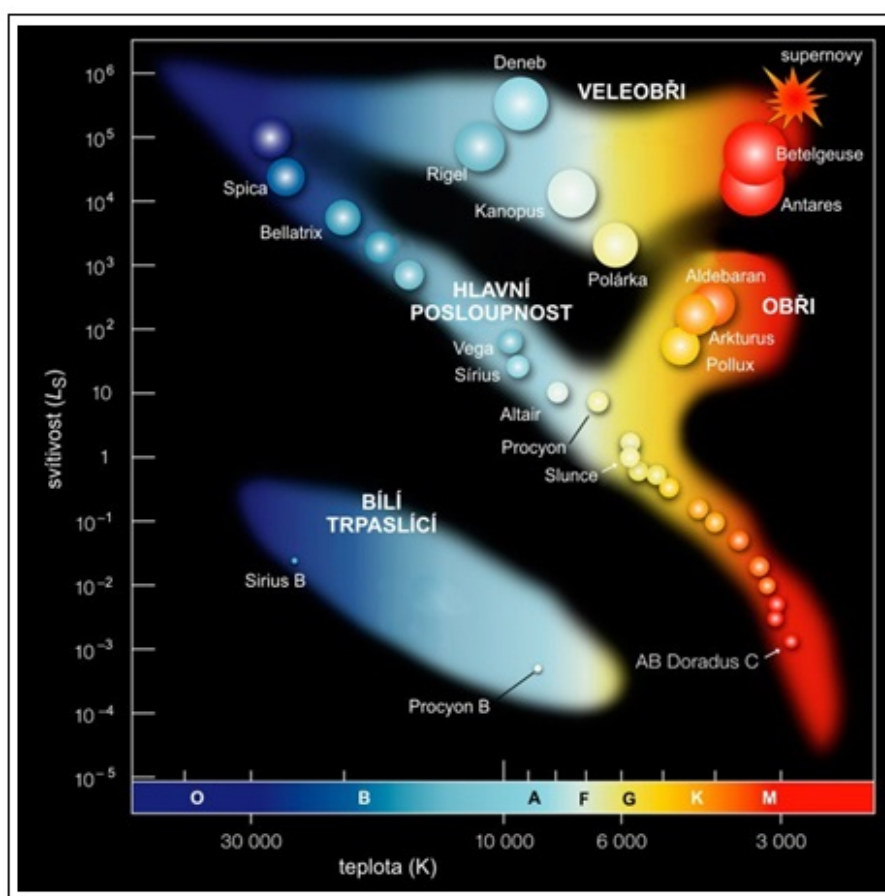
V astronomické praxi se především rozlišuje hvězdná velikost *bolometrická* a *vizuální*. Bolometrickou hvězdnou velikostí rozumíme hvězdnou velikost, která bere v úvahu úhrnné záření hvězdy (tj. včetně infračerveného a ultrafialového záření atd.). Termínem „vizuální“ se zas naopak myslí hvězdná velikost, která bere v úvahu jen úzkou oblast viditelného záření hvězdy [13].



### 7.3 Hertzsprungův – Russellův diagram

V prvním desetiletí dvacátého století, kdy již byly známy absolutní hvězdné velikosti několika stovek hvězd, vznikl pro astronomy velmi užitečný nástroj, tzv. Hertzsprungův-Russellův diagram (zkrácené HR diagram). Jak z názvu plyne, autory diagramu jsou dánský chemik a astronom Ejnar Hertzsprung (1873 – 1967) a americký astronom Henry Norris Russell (1877 – 1957) viz obr. P59. Konkrétně Hertzsprung již v roce 1905 našel určitou závislost mezi absolutní hvězdnou velikostí a spektrální třídou hvězd [62]. Údaje z této závislosti zaznamenal do přehledné tabulky. O grafické zpracování tabulkových údajů do diagramu se v roce 1913 zasloužil druhý jmenovaný astronom Russell [13].

HR diagram zobrazuje hvězdy v závislosti na jejich absolutní hvězdné velikosti  $M$  (a tedy i v závislosti na zářivém výkonu  $L$ ) a na spektrální třídě (a tedy i na jejich efektivní povrchové teplotě  $T$ ).

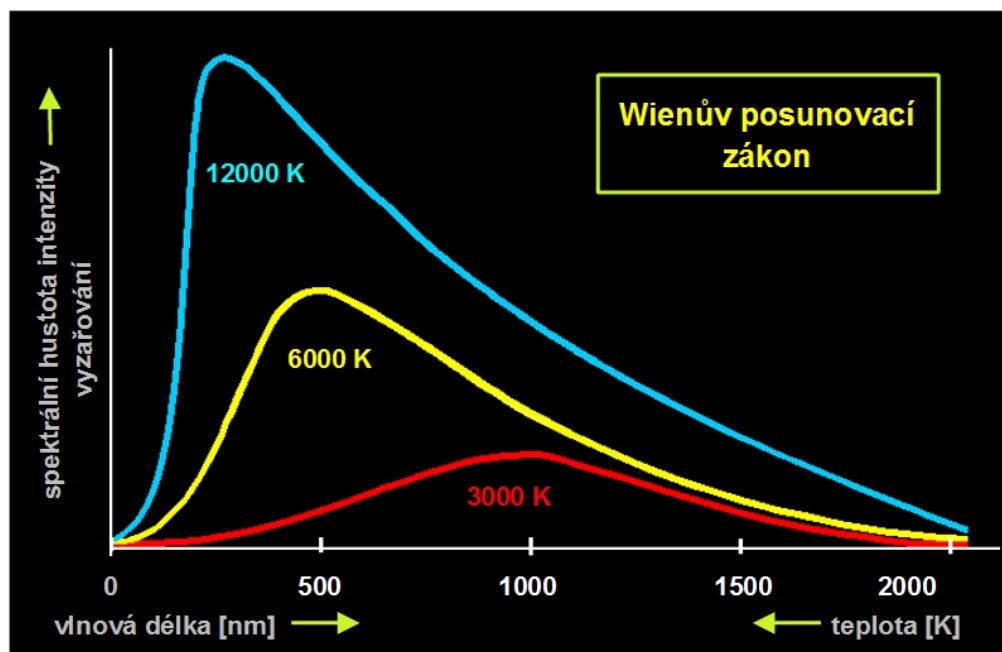


Obr. 7-3: HR diagram.

(zdroj: <http://www.qwertasip.estranky.cz/clanky/jak-se-meri-vzdaleni-ve-vesmiru--cast-2---hvezdy-a-galaxie.html>)

Na obrázku 7-3 je uveden příklad takového HR diagramu. Z historických důvodů v HR diagramu obecně platí, že na vodorovnou osu vynášená hodnota povrchové teploty roste zprava doleva. Na vodorovné ose bývají vyznačeny i spektrální třídy. Na svislou osu je vynášen zářivý výkon hvězdy  $L$ , obvykle jako poměrné číslo v porovnání se zářivým výkonem Slunce  $L_S$ .

V souvislosti s teplotou povrchu hvězd se zde zmiňme o jednom jejím možném určení s pomocí tzv. Wienova posunovacího zákona. Tento zákon, jehož autorem je německý fyzik Wilhelm Wien (1864 – 1928), konstatuje, že v záření absolutně černého tělesa je maximální energie vyzařována na vlnové délce, která je nepřímo úměrná termodynamické teplotě  $T$  (obr. 7-4) [37].



Obr. 7-4: Wienův posunovací zákon.

(upraveno z: <http://www.qwertasip.estranky.cz/clanky/jak-se-meri-vzdalenosti-ve-vesmiru--cast-1---slunecni-soustava.html>)

Tomu odpovídá matematický vztah

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (7.10)$$

kde  $b$  je Wienova konstanta ( $b = 2,898 \text{ mm K}$ ) [37].

Je známo, že záření hvězd, jako je naše Slunce, se poměrně dobře blíží vlastnostem záření absolutně černého tělesa. Slunce vyzařuje maximum energie na vlnové délce přibližně  $\lambda_{\max} = 500 \text{ nm}$  [18]. Tomu odpovídá jeho povrchová teplota

přibližně 5800 K. Dalším příkladem může být hvězda Betelgeuse, druhá nejjasnější hvězda v souhvězdí Orionu, která vyzařuje maximum energie záření na vlnové délce přibližně  $\lambda_{\max} = 830 \text{ nm}$ . Této vlnové délce přibližně odpovídá povrchová teplota 3500 K.

Teplota povrchu hvězdy úzce souvisí s její barvou. Obecně platí, že nejchladnější hvězdy jsou červené a oranžové. O něco teplejší hvězdy, jako například naše Slunce, jsou žluté a žlutobílé. Nejteplejší hvězdy pak září barvami od bílé až po modrou.

Subjektivní „barvu“ hvězdy nahrazujeme spektrální analýzou jejího záření. Tou můžeme určit nejenom povrchovou teplotu hvězdy, ale i chemické složení a rychlost jejího pohybu. Spektrálních tříd je vícero druhů, zde se zabýváme pouze tzv. Harvardskou spektrální klasifikací [63]. Ta dělí hvězdy podle povrchové teploty od nejžhavějších po nejchladnější dle následujícího pořadí: (Q – P – W) – O – B – A – F – G – K – M – (L – C – S). Třídy, odpovídající písmenům v závorkách, se vyskytují jen výjimečně. Občas se k písmenům ještě přidávají čísla z intervalu od 0 do 9, které udávají rozdíl ve spektrech v rámci jedné třídy. Zde pro jednoduchost postačí klasická stupnice OBAFGKM. V následující tabulce č. 16 jsou uvedeny vnější charakteristiky hvězd včetně typických hvězdných zástupců v jednotlivých spektrálních třídách [63].

Spektrální třída	Povrchová teplota (K)	Barva hvězdy	Příklady hvězd	Hmotnost (MS)	Poloměr (RS)	Zářivý výkon (LS)
O	více než 33 000	modrá	$\zeta$ Pup, $\delta$ Pup $\zeta$ Ori	více než 16	více než 6,6	více než 30 000
B	10 000 – 33 000	modro bílá	Regulus, Rigel, Sirius B, Algol A	2,1 – 16	1,8 – 6,6	25 – 30 000
A	7500 – 10 000	bílo modrá	Vega, Altair, Sirius A, Prokyon B, Deneb	1,4 – 2,1	1,4 – 1,8	5 – 25
F	6000 – 7500	žluto bílá	Polárka, Canopus, Procyon	1,04 – 1,4	1,15 – 1,4	1,5 – 5
G	5200 – 6000	žlutá	Slunce, Capella	0,8 – 1,04	0,96 – 1,15	0,6 – 1,5
K	3700 – 5200	oranžová	Aldebaran, Arcturus, Pollux	0,45 – 0,8	0,7 – 0,96	0,08 – 0,6
M	méně než 3700	červená	Betelgeuse, Proxima Centauri	méně než 0,45	méně než 0,7	méně než 0,08

Tabulka č. 16: Vnější charakteristiky hvězd.

Z uvedeného HR diagramu (obr. 7-3) je patrné, že hvězdy ležící nejvýše vlevo jsou žhavé a velmi zářivé, naopak hvězdy v pravém dolním rohu jsou naopak velmi chladné a málo zářivé.

Hvězdy nejsou v HR diagramu rozloženy rovnoměrně, ale soustřeďují se v několika oblastech. Nejvíce hvězd (asi 90 %) leží na tzv. hlavní posloupnosti [62]. Jsou to hvězdy, které ve svém nitru „spalují“ vodík na hélium. Kromě toho se v HR diagramu nacházejí i další tři větve. Nad hlavní posloupností leží obří (resp. červení obří). Červení proto, že jejich povrch má nízkou teplotu a vyzařují tedy světlo z oblastí nízkých frekvencí, a obří proto, že mají velký poloměr a tedy i povrch, a tak i při nízké teplotě mají relativně velký zářivý výkon. Ještě výše jsou nadobří (též veleobří). Naopak pod hlavní posloupností leží bílí trpaslíci, hvězdy o vysoké teplotě, ale malém poloměru [63].

Skutečnost, že hvězdy v HR diagramu leží jen v několika větvích, přitom převážně na hlavní posloupnosti, souvisí s jejich vývojem. Hvězda největší část své existence stráví téměř na jednom místě hlavní posloupnosti.

Jako názorný příklad využití HR diagramu porovnáme dvě konkrétní hvězdy – Sirius A a Deneb. Sirius A je nejjasnější hvězda noční oblohy a leží na hlavní

posloupnosti. Její povrchová teplota (přibližně 10 000 K) je téměř shodná s povrchovou teplotou hvězdy Deneb. Ta však má mnohem větší poloměr a tudíž i zářivost, než by odpovídalo hvězdě na hlavní posloupnosti. Konkrétně Sirius A je 1,7 krát větší než Slunce a má zářivost 25 Sluncí, zatímco Deneb je asi 200 krát větší než Slunce a jeho zářivost dosahuje kolem 200 000 Sluncí.

HR diagram má v astronomii mnohonásobné využití. Kromě vzdáleností, velikostí a vývojových fází hvězd lze pomocí něj odhadnout např. hmotnosti hvězd. Hmotnost hvězdy  $M$  na hlavní posloupnosti je závislá na jejím zářivém výkonu  $L$  podle vztahu [59]

$$\frac{L}{L_S} = \left( \frac{M}{M_S} \right)^a, \quad (7.11)$$

kde  $L_S$  je zářivý výkon Slunce a  $M_S$  jeho hmotnost. Číslo  $a$  je pro hvězdy s hmotností v intervalu  $(2 - 20)M_S$  přibližně 3,5.

## 8 HVĚZDY A JEJICH VZDÁLENOSTI

Určování vzdáleností hvězd a jiných vesmírných objektů, nacházejících se vně sluneční soustavy, je jedním z nejobtížnějších a nejdůležitějších problémů astronomie. Pokud je totiž na noční obloze pozorován velmi slabě zářící bod, může se jednat o blízkou malou hvězdu nebo naopak o nesmírně vzdálený objekt, jehož zářivý výkon je stejný jako zářivý výkon tisíců galaxií. Skutečná povaha některých impozantních vesmírných objektů, například kvazarů, byla pochopena teprve poté, co byla určena jejich vzdálenost.

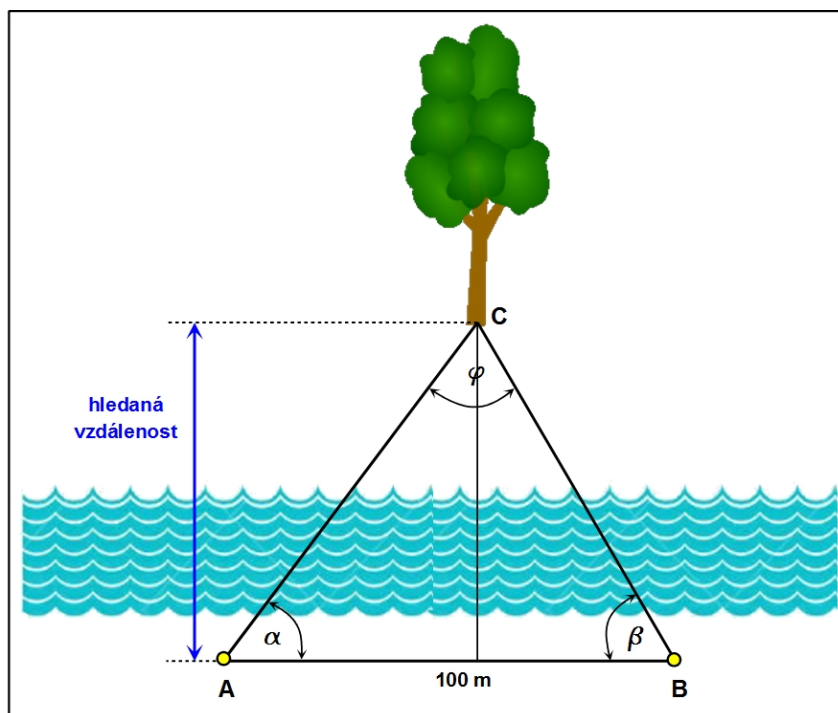
Problematika pozorování a s ním spojená snaha určovat vzdálenosti hvězd byla u astronomů intenzivním středem zájmu v okamžiku, kdy již měli k dispozici dalekohled. Avšak první úspěchy mohli astronomové sklízet až po nástupu mocných refraktometrů (teleskopů), tj. čočkových dalekohledů velkých rozměrů s dostatečnou úhlovou rozlišovací schopností, potřebnou k měření např. paralax blízkých hvězd.

### 8.1 Měření vzdálenosti hvězd pomocí trigonometrické paralaxy

V šesté kapitole bylo pojednáno o tom, že vzdálenosti ve sluneční soustavě mohou být zjišťovány buď měřením denní paralaxy planet, nebo radarem či prostřednictvím radiového spojení s kosmickou sondou. U hvězd nepřipadá pro jejich velkou vzdálenost radar v úvahu. Též využití kosmické sondy není možné. I světlu trvá doba k uražení vzdálenosti od nejbližší hvězdy (tj. Proxima Centauri) k nám cca 4 roky [35]. Tudíž velmi silným prostředkem k nepřímému měření vzdáleností především blízkých hvězd se pro astronomy stala již dříve zmíněná metoda, založená na měření trigonometrické paralaxy (viz oddíl 5.4).

Původ této metody bychom opět našli v antice, kde byla vyvinuta pro měření vzdáleností objektů nepřístupných od místa pozorování [64]. Pro bližší představu této činnosti uvažujme pomocí obrázku 8-1 názornou situaci z běžného života. Představme si, že jsem u nějaké řeky a chceme zjistit, jak daleko je od nás strom, který se nachází na druhé straně řeky. Přes řeku nevede žádný most. Abychom zjistili, jak daleko se od nás nachází pozorovaný strom, budeme postupovat následujícím způsobem. Na přivrácené straně řeky, tedy na břehu, kde stojíme, si vytyčíme nějakou základnu, dlouhou např. 100 m, ohraničenou body A a B. Základnu můžeme změřit pomocí pásma, které máme

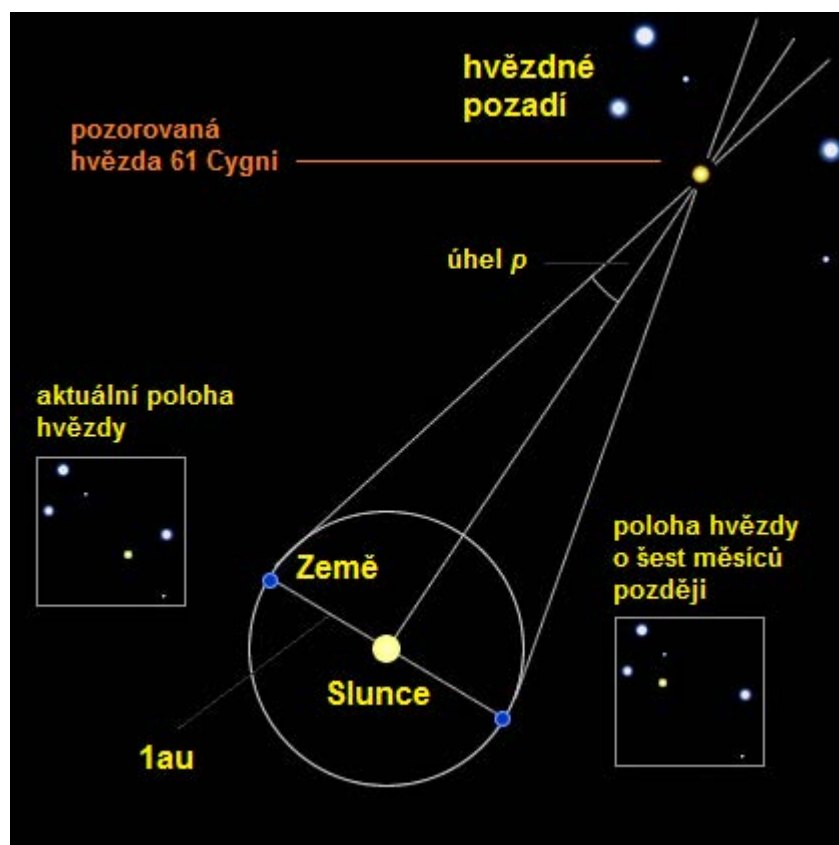
k dispozici. Ze znalosti velikosti úhlů  $\alpha$  ;  $\beta$  a délky strany AB můžeme pomocí trigonometrických vztahů (sinová věta, kosinová věta) dopočítat hledanou vzdálenost stromu (obr 8-1). Tímto způsobem jistě postupovali i starověcí geometři.



**Obr. 8-1:** Geometrický náčrsek pro určení hledané vzdálenosti pomocí trigonometrické metody.

Možnost využít metodu trigonometrické paralaxy na určování vzdáleností vesmírných objektů byla známá již na konci 16. století. S nápadem aplikovat ji na hvězdy přišel v roce 1573 anglický matematik a astronom Thomas Digges (1546 – 1595) [65]. Na konci 17. století již astronomové měli relativně přesnou představu o velikosti astronomické jednotky, přesto nebyli schopni vlivem technického omezení paralaxy hvězd změřit. Navíc astronomové v té době ještě neměli představu o tom, jak kompenzovat kývání zemské osy (nutaci) a aberaci světla, kterou objevil anglický astronom James Bradley (1693 – 1762) v roce 1727 (obr. P60) [65]. Obecně se aberací světla označuje odchýlení světelného paprsku, přicházejícího od pozorovaného tělesa (např. hvězdy) k pozorovateli na Zemi, způsobené pohybem pozorovaného tělesa a pohybem pozorovatele. Objev aberace byl též definitivním důkazem heliocentrické soustavy.

Teprve ve 30. letech 19. století, kdy astronomové již měli k dispozici propracované teorie a technologie dalekohledů, mohli být v měření vzdáleností hvězd konečně úspěšní. První, komu se podařilo změřit hvězdnou paralaxu a určit tak první hvězdnou vzdálenost, byl německý astronom a matematik Friedrich Wilhelm Bessel (1784 – 1846) viz obr. P60. Do dějin astronomie se tato velká astronomická událost zapsala roku 1838 [13]. Tehdy Bessel v rozmezí šesti měsíců změřil paralaxu hvězdy 61 Cygni a prohlásil, že se za tu dobu posunula vůči hvězdnému pozadí o úhel  $0,0001742^\circ$  (tj.  $0,62712''$ ) [63]. Podle obrázku 8-2 je zřejmé, že se jedná o roční paralaxu, jejíž význam byl objasněn v oddíle 5.4. Ostrý úhel  $p$  ve vyznačeném pravoúhlém trojúhelníku v obrázku 8-2 je tedy roven hodnotě  $0,0000871^\circ$ . Pro názornou představu to odpovídá změně úhlu pozorování, jestliže bychom ze vzdálenosti 6,5 km pozorovali malým dalekohledem svíčku, kterou někdo posunul o jeden centimetr.



**Obr. 8-2:** Geometrický nákres pro určení hledané vzdálenosti hvězdy 61 Cygni pomocí metody trigonometrické paralaxy.

(upraveno z: <http://www.qwertasip.estranky.cz/clanky/jak-se-meri-vzdalenosti-ve-vesmiru--cast-2---hvezdy-a-galaxie.htm>)



V jaké vzdálenosti  $d$  se podle Bessela hvězda 61 Cygni nachází, můžeme vypočítat dosazením požadovaných údajů do rovnice (5. 17), tedy

$$d = \frac{149,6 \cdot 10^6}{\sin 0,0000871^\circ} \text{ km} = 98,4 \cdot 10^{12} \text{ km} . \quad (8.1)$$

kde hodnota  $149,6 \cdot 10^6$  km je vzdálenost Země – Slunce. V jednotkách ly se hvězda 61 Cygni nachází přibližně ve vzdálenosti 10,4 ly. Z porovnání se současnou hodnotou 11,4 ly vidíme, že v té době to byl od Bessela opravdu úctyhodný výkon.

I když tento výsledek může být pocíťován jako obrovská vzdálenost, přesto s ohledem na vesmírná měřítka je tato hvězda naším velice blízkým sousedem. Například Polárka, která má paralaxu  $0,00756''$ , se od nás podle rovnice (5.17) nachází přibližně ve vzdálenosti 431 ly. To je 38krát dále než hvězda 61 Cygni. Je zřejmé, že čím je hvězda blíže k Zemi, tím je její paralaxa větší. Zde připomeňme, že největší dosud známou paralaxu má hvězda Proxima Centauri (asi  $0,772''$ ), což odpovídá vzdálenosti asi 4,2 ly.

Vzhledem k tomu, že paralaxy hvězd jsou velmi malé, mohli astronomové pomocí nich zpočátku určovat opravdu jen vzdálenosti těch nejbližších hvězd. Důvodem byla skutečnost, že i ty nejlepší dalekohledy byly omezeny rozhodujícím hendikepem – lidským okem. Téměř neznatelné paralaxy vzdálených hvězd byly prostě příliš malé, než aby je lidské oko mohlo vůbec postřehnout. Začátkem 20. století s rozvojem fotografických desek se obor měření vesmíru významně rozvinul. Astronomové tak již mohli měřit paralaxy o velikosti až  $0,01''$  [42]. Nejzjevnější výhodou fotografie je, že poskytuje trvalý a přesný záznam polohy hvězdy. Pomocí fotografického záznamu tak může být poloha hvězdy změřena s mnohem větší přesností. Dnes jsou fotografické desky plně nahrazeny CCD zařízeními.

Trigonometrická paralaxa je poměrně přesná metoda určování vzdálenosti blízkých hvězd. Při velmi malých paralaxách je však určení vzdáleností zatíženo značnou chybou. Paralaxa menší než  $0,01''$  se ze Země nedá kvůli atmosférickému neklidu měřit vůbec. Měřením paralaxy ze Země lze určovat pouze vzdálenosti hvězd bližších než 100 pc [13].

Na konci 20. století se díky pozorováním z vesmírné družice získalo mnoho paralax s nebývale vysokou přesností. Konkrétně měření vzdálenosti hvězd pomocí jejich paralaxy měla za úkol družice HIPPARCOS (High Precision Parallax Collecting Satellite), která byla vypuštěna Evropskou kosmickou agenturou ESA v roce 1989 (obr.

P61 v příloze). Úkolem této družice bylo měření polohy, vlastního pohybu, jasnosti a barvy více než 100 000 hvězd. Z důvodu technické poruchy se však nepodařilo družici dostat na geostacionární dráhu. Před ztrátou kontaktu v roce 1993 přesto družice v rámci této mise splnila všechny určené cíle. Družice HIPPARCOS změřila paralaxu přibližně u 120 000 hvězd do vzdálenosti až 1600 ly, a to s přesností na 0,001''. Dále pak s menší přesností (asi 0,01'') zmapovala i dalších dva a půl milionu hvězd [59].

V roce 2013 byla agenturou ESA vypuštěna družice GAIA (Global Astrometrics Interferometry for Astrophysics), která má za cíl změřit vzdálenosti asi miliardy hvězd v naší Galaxii a v galaxiích, patřících do místní kupy, s přesností do  $24 \cdot 10^{-6}$  úhlových vteřin. Hlavním cílem mise je vytvořit trojrozměrnou mapu Galaxie pomocí měření polohy, vlastních pohybů a barvy hvězd. Plánovaný konec mise je v roce 2018 [59].

## 8.2 Měření vzdálenosti hvězd pomocí HR diagramu

Naprostá většina hvězd v naší Galaxii je však příliš daleko na to, abychom mohli určit jejich vzdálenosti pomocí trigonometrické paralaxy. K určování vzdáleností hvězd, které jsou od Země mnohem dál, se v rámci naší Galaxie využívá HR diagram, jehož základní podstata byla vyložena v oddíle 7.3.

Na následujícím obrázku 8-3 je uvedena varianta HR diagramu, kterou astronomové využívají v praxi, například právě k určování hvězdných vzdáleností. Vodorovná osa diagramu znázorňuje spektrální třídu hvězd a k nim příslušné efektivní povrchové teploty v kelvinech i jejich barevné indexy (B-V). Barevný index je rozdíl hvězdných velikostí měřených u pozorované hvězdy ve dvou různých spektrálních oborech. Konkrétně ve značení B-V je B je hvězdná velikost v modré barvě ( $\lambda_m = 440 \text{ nm}$ ) a V ve žluté ( $\lambda_z = 550 \text{ nm}$ ) [66]. Svislá osa znázorňuje absolutní hvězdné velikosti  $M$  a k nim příslušné zářivé výkony  $L$  v logaritmické škále a v jednotkách zářivosti Slunce [63].

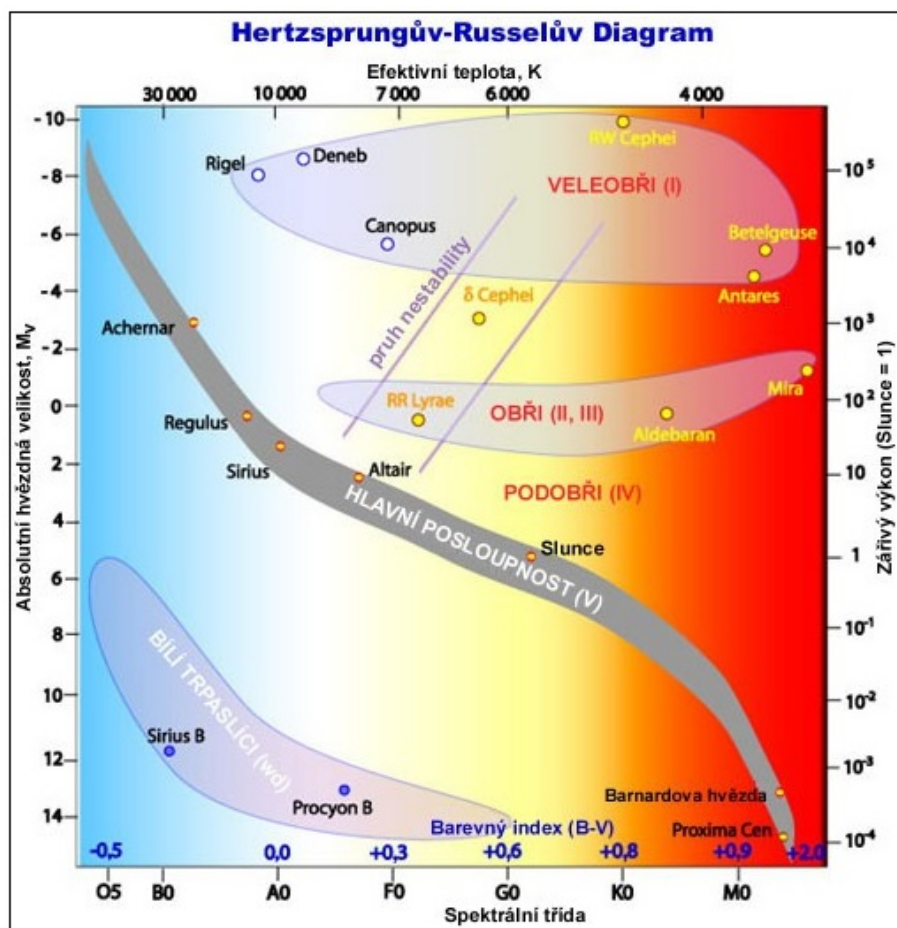
Co se týká zářivého výkonu  $L$  hvězdy, v hrubém přiblížení září podobně jako absolutně černé těleso. Proto můžeme zavést tzv. efektivní teplotu jejího povrchu vztahem [37]

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{ef}}^4. \quad (8.2)$$

kde  $R$  značí poloměr hvězdy a  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}$  Stefanovu-Boltzmannovu konstantu. Jestliže známe zářivý výkon hvězdy a její poloměr, můžeme vypočítat její efektivní povrchovou teplotu  $T_{\text{ef}}$  z upraveného vztahu (8.2) [37],

$$T_{\text{ef}} = \sqrt[4]{\frac{L}{4\pi R^2 \sigma}}. \quad (8.3)$$

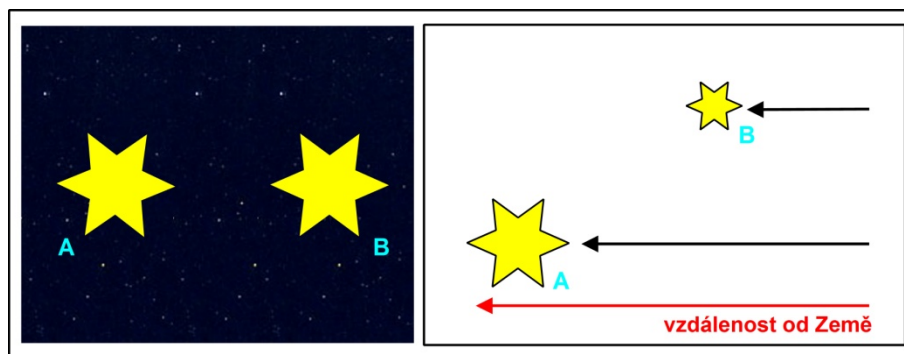
Ve skutečnosti se ze zářivého výkonu a efektivní teploty, určené spektroskopicky, určuje poloměr hvězdy.



Obr. 8-3: Jiná varianta HR diagramu.

(zdroj: <http://www.qwertasip.estranky.cz/clanky/jak-se-meri-vzdalenosti-ve-vesmiru-cast-2---hvezdy-a-galaxie.html>)

Pro zjišťování vzdáleností hvězd pomocí HR diagramu se vychází z toho, že jasnost klesá s druhou mocninou vzdálenosti. Jestliže například dvě pozorované hvězdy se nám jeví stejně jasné, můžeme si myslet, že mají stejný zářivý výkon a nacházejí se od nás ve stejné vzdálenosti. Nebo se jedna z nich nachází dále, ale je více zářivá (obr. 8-4) [63].



Obr. 8-4: Názorná představa k určení vzdálenosti hvězdy.

Intuitivně pocítujeme, že druhá možnost bude mnohem pravděpodobnější. Pokud tedy najdeme na obloze dvě hvězdy o stejné zářivosti, ale jedna z nich bude devětkrát jasnější než druhá, pak se ta druhá musí nacházet ve trojnásobné vzdálenosti:

$$j_1 = 9j_2 \Rightarrow \frac{L}{4\pi r_1^2} = 9 \frac{L}{4\pi r_2^2} \Rightarrow r_2 = 3r_1. \quad (8.4)$$

### 8.2.1 Metoda spektrální paralaxy

Jeden ze způsobů, kterým lze určit vzdálenost hvězd v naší Galaxii z HR diagramu, je metoda tzv. spektrální paralaxy. Tato metoda ve skutečnosti nesouvisí s úhlovou paralaxou, její název byl zvolen jen z důvodu názornosti. Určování vzdálenosti metodou spektrální paralaxy spočívá v proměření spektra hvězdy. Z něj lze vyčíst jak spektrální třídu hvězdy, danou rozložením a intenzitou spektrálních čar, tak i tzv. luminozitní třídu, stanovenou z šířky spektrálních čar [59]. Z umístění hvězdy v HR diagramu stanovíme absolutní hvězdnou velikost  $M$  dané hvězdy. Fotometrickým měřením určíme ještě zdánlivou hvězdnou velikost  $m$  a z již dříve odvozeného vztahu  $m - M = 5 \log r - 5$  vypočítáme vzdálenost hvězdy  $r$ . Při takovémto určení vzdálenosti však vzniká značná chyba, která je dána nejistotou grafického určení absolutní hvězdné velikosti v rozmezí 0,7 až 1,25 mag [59]. Chyba určení vzdálenosti tak může dosáhnout až desítek procent. Tato metoda tedy slouží spíše k řádovému odhadnutí vzdálenosti, nežli k jejímu přesnému určení.

Vzhledem k tomu, že se stále se zvyšující vzdáleností klesá rychle i jasnost hvězd, lze tuto metodu využít jen v rámci naší Galaxie, tj. na vzdálenosti do 100 000 ly [42].

## 9 GALAXIE A JEJICH VZDÁLENOSTI

Jak již název této kapitoly napovídá, pozornost zde bude věnována poznatkům, týkajícím se určování mezigalaktických vzdáleností. Jak již víme, ty se u astronomů staly předmětem zájmu především až počátkem 20. století. V té době již pozorovací technika byla natolik vyspělá, že umožnila rozeznat u některých dříve pozorovaných jasných mlhovitých „obláčků“ jednotlivá seskupení bilionů hvězd, podobná naší Galaxii. Samozřejmě o existenci jiných galaxií se v astronomických kruzích, a nejenom tam, hypoteticky diskutovalo již podstatně dříve. Například v roce 1755, kdy astronomům stále nebyla zřejmá podstata pozorovaných jasných mlhovitých oblaků, přišel známý německý filozof Immanuel Kant (1724 – 1804) s hypotézou, že se kromě oblaků mezihvězdného prachu a plynu, může jednat o stejná seskupení hvězd jako naše Mléčná dráha [13]. Tuto hypotézu potvrdil až v roce 1923 slavný americký astronom Edwin Hubble (1889 – 1953). Tehdy tento výjimečný astronom prováděl intenzivní pozorování na observatoři Mount Wilson v Pasadeně poblíž Los Angeles v Kalifornii (obr. P62) [42]. Zde pomocí stopalcového (2,5metrového) Hookerova reflektoru (tehdy největší dalekohled na světě) v oněch mlhovinách rozlišil jednotlivé hvězdy (obr. P63). Mezi nimi byly i proměnné hvězdy *cefeidy*. Jak bude pojednáno dále, právě cefeidy poprvé umožnily určit vzdálenosti k nejbližším galaxiím.

Při hledání vhodné metody k určení vzdáleností blízkých galaxií si astronomové již tehdy byli vědomi, proč v tomto případě nelze použít např. dříve diskutovanou metodu hlavní posloupnosti, tedy HR diagram. Čím větší vzdálenost musí světlo hvězdy z jiné galaxie překonat, než dorazí k pozorovateli na Zemi, tím více potká cestou překážek v podobě např. mezihvězdného prachu, který světlo pohlcuje a odchyluje. Tudíž světlo, které k pozorovateli nakonec přes všechny tyto překážky dorazí, již nepodává pravdivé údaje o hvězdě, která jej vyslala. Problém spočívá v tom, že světlo je cestou absorbováno a znovu emitováno atomy, přítomnými v prachu. Tím jeho původní spektrum dorazí k Zemi smíchané se spektry všech látek, jimiž prošlo [35].

K definitivnímu kroku pro určování mezigalaktických vzdáleností astronomové potřebovali najít takový kosmický objekt, jehož světlo může pronikat mezigalaktickou a mezihvězdnou látkou a tím posloužit jako jakýsi „mezigalaktický kilometrovník“.

## 9.1 Měření vzdálenosti blízkých galaxií pomocí cefeid

Současná astronomie již zná kosmický objekt, jehož záření dokáže proniknout skrze „kosmický šum“, tvořený prachem a plynem v mezigalaktickém prostoru. Jedná se o již zmíněný druh proměnných hvězd, zvaných cefeidy.

### 9.1.1 Fyzikální podstata cefeid a jejich základní dělení

Z teorie vývoje hvězd je známo, že hvězdy jsou v rovnováze díky dvěma klíčovými silám, gravitaci a tlaku. Gravitace přitahuje veškerou hmotu směrem do středu hvězdy, zatímco teplo termonukleární fúze uvnitř jádra zase vytváří tlak, jenž hvězdu naopak zvětšuje [63]. Právě cefeidy mají tu vlastnost, že tyto dvě síly u nich nejsou v rovnováze. Hvězda se tak střídavě smršťuje a rozpíná, čímž pravidelně mění svou jasnost. Když je gravitace silnější, hvězda se smršťuje a vydává méně světla, jakmile ale uvnitř začne narůstat tlak, hvězda se nafoukne a opět tak zvýší svou zářivost. Tato pulzace se obecně odehrává v řádu několika hodin, dní či měsíců. Cefeidy jsou většinou veleobři spektrálních tříd F, G a K, kteří se v HR diagramu nacházejí v pásu nestability.

Z odborného astronomického hlediska se cefeidy zpravidla dělí do několika skupin [59]:

- *Cefeidy typu I* (klasické cefeidy, cefeidy typu  $\delta$  Cephei) – proměnné hvězdy populace I. Jedná se o jasnější hvězdy, jejichž perioda se pohybuje v rozmezí dnů až měsíců.
- *Cefeidy typu II* – méně hmotné a méně jasné proměnné hvězdy populace II. Tento typ cefeid se podle délky periody dělí dále na hvězdy typu *BL Herculis* s periodou 1 až 4 dny, *W Virginis* s periodou 10 až 20 dní a *RV Tauri* s periodou delší než 20 dní.
- *Cefeidy typu RR Lyrae* – trpasličí krátkoperiodické proměnné hvězdy s periodou pohybující se mezi 0,2 a 1,2 dne (9 - 17 hod.).

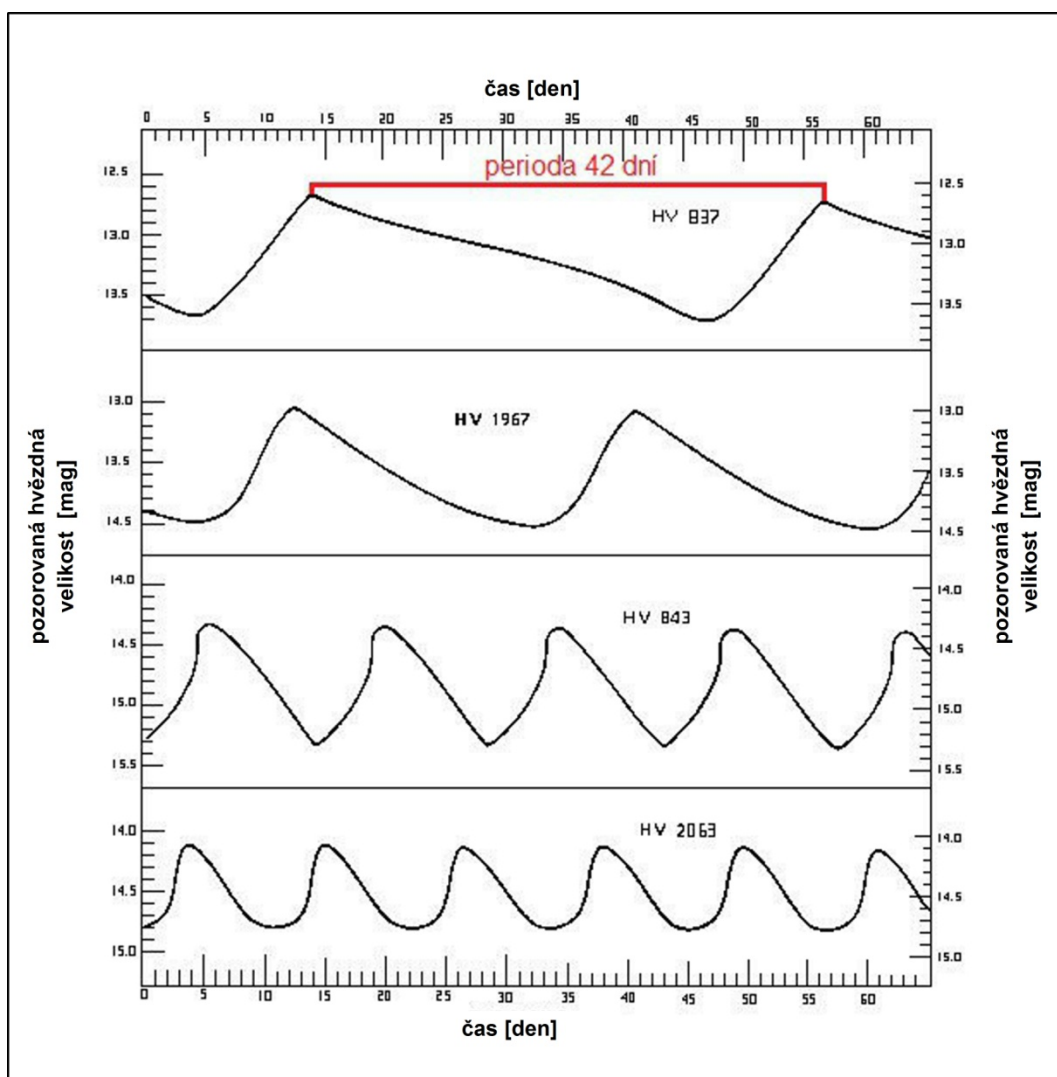
Pro zajímavost: nejznámější a nejbližší cefeidou je Polárka ( $\alpha$  UMi), která je od nás vzdálena asi 130 pc (tj. asi 424 ly). Polárka je pětinasobnou hvězdou, kde nejjasnější složkou je veleobr  $\alpha$  UMi Aa, který je cefeidou s periodou pulsace asi 4 dny [59].

### 9.1.2 Historie poznávání cefeid a metody určování vzdálenosti

Z historického hlediska první objevenou cefeidou byla hvězda  $\delta$  Cephei ze souhvězdí Cefeja, jejíž proměnlivost zaznamenal anglický astronom John Goodricke (1764 – 1786) již v roce 1784 (obr. P64) [59]. Podle ní je též pojmenován tento druh proměnných hvězd. Až v prvních letech 20. století byl na observatoři Harvard College Observatory v Massachusetts objeven potenciál těchto proměnných hvězd stát se kosmickým měřítkem. Na této observatoři působila americká astronomka Henrietta Swan Leavittová (1868 – 1921), jejíž pracovní náplní zde byla katalogizace zářivosti hvězd zaznamenaných na fotografických deskách (obr. P65) [64]. Konkrétně v letech 1893 až 1906 Leavittová zkoumala fotografické desky Malého Magellanova mračna, na kterých objevila přes dva a půl tisíce proměnných hvězd, ze kterých později dvacet označila jako cefeidy, do té doby známé jen z naší Galaxie. Malé Magellanovo mračno je trpasličí galaxie v souhvězdí Tukana, která je s naší Galaxií gravitačně vázaná a nachází se ve vzdálenosti asi 200 000 ly [63]. Leavittová předpokládala, že všechny označené cefeidy jsou prakticky ve stejné vzdálenosti, neboť si byla vědoma toho, že malé rozdíly vzdáleností jednotlivých cefeid od Země v rámci trpasličí galaxie jsou zanedbatelné ve srovnání s mnohem větší vzdáleností této trpasličí galaxie od Země. Z toho vyvodila závěr, že určité cefeidy se nám jeví jasněji nikoli proto, že by byly blíže, ale proto, že mají větší zářivý výkon [42].

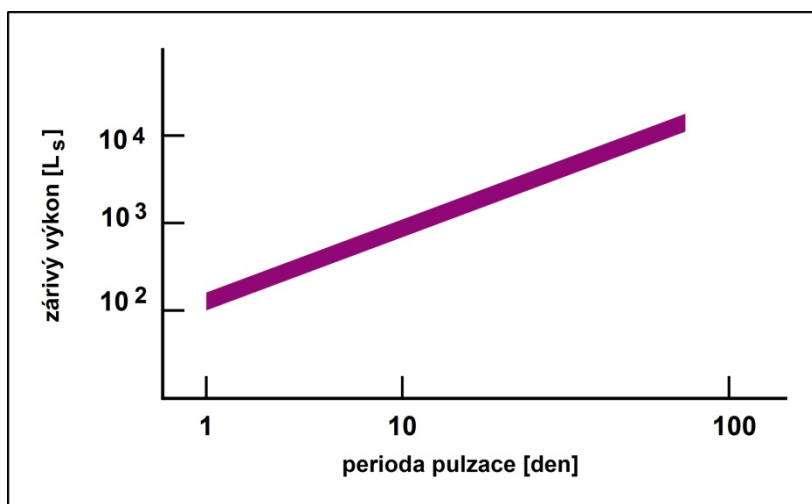
Leavittová si u pozorovaných cefeid především všimla závislosti mezi měnící se zdánlivou hvězdnou velikostí a dobou periody. Pro názornou představu je na následujícím obrázku 9-1 uveden záznam světelných křivek pro čtyři různé cefeidy, nacházející se v Malém Magellanovu mračnu [63]. Leavittová tímto objevem a společně s dalším výzkumem v roce 1912 dospěla důležitému závěru [67]: Perioda zjasňování a pohasínání cefeid jednoznačně závisí na jejich zářivém výkonu (tj. na absolutní hvězdné velikosti). Z následujícího grafu (obr. 9-2) je patrné, že čím větší má proměnná hvězda zářivý výkon, tím delší je její perioda pulzace.





**Obr. 9-1:** Záznam světelných křivek čtyř různých cefeid z Malého Magellanova mračna. U cefeidy HV 837 byla pro názornost vyznačena perioda pulzace, tj. 42 dní.

(zdroj: <http://www.qwertasip.estranky.cz/clanky/jak-se-meri-vzdaleni-ve-vesmiru--cast-2--hvezdy-a-galaxie.html>)



**Obr. 9-2:** Graf zachycující závislost zářivého výkonu na periodě pulzace cefeidy.

Právě výše uvedená závislost se stala klíčovým poznatkem, vedoucím k možnosti využít cefeidy k měření vzdálenosti např. hvězdokup a galaxií, které nejsou dále než asi 100 milionů světelných let. V základním přiblížení můžeme tedy obecný princip určování vzdáleností pomocí cefeid vyložit následovně. Změřením periody pulzace  $P$  zkoumané cefeidy určíme i její absolutní hvězdnou velikost  $M$  a porovnáním s její zdánlivou hvězdnou velikostí  $m$  lze její vzdálenost vypočítat pomocí modulu vzdálenosti (7.9) či přímo z odvozeného vztahu na fotometrickou paralaxu (5.18). Cefeidy se proto používají jako standardní svíčky [67].

K určení absolutní hvězdné velikosti  $M$  dané cefeidy je využíván empirický vztah mezi periodou a jasností cefeid, který byl od doby Leavittové mnohokrát upravován. V současné astronomii je nejpresnějším vyjádřením vztah [67]

$$M = -2,78 \log P - 1,35, \quad (9.1)$$

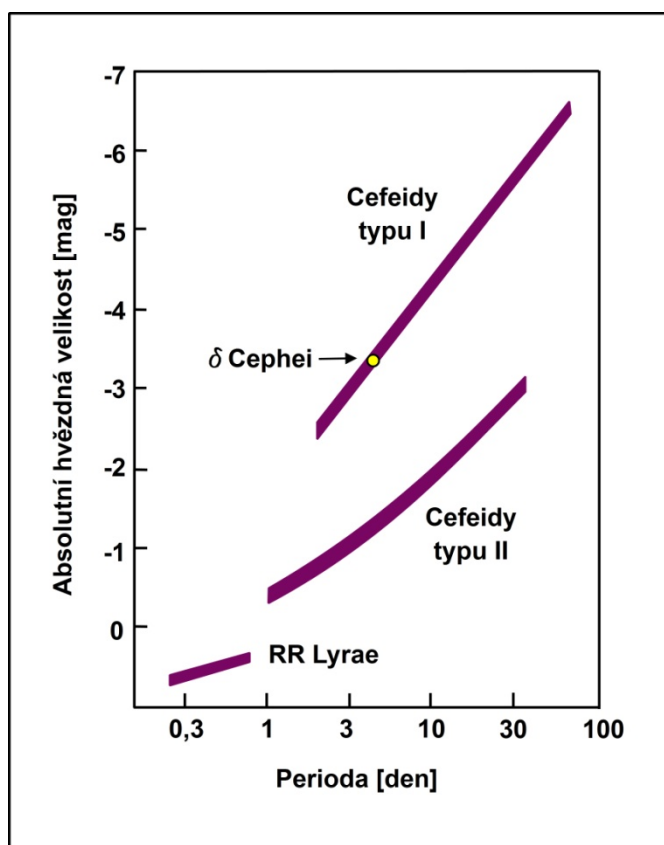
kde  $M$  je absolutní hvězdná velikost cefeidy a  $P$  je její perioda pulzace ve dnech.

První, kdo výrazně využil potenciál cefeid pro určování vzdálenosti blízkých galaxií, byl již zmíněný Edwin Hubble. Svá měření vzdáleností pomocí cefeid použil k důkazu, že některé Messierovy mlhavé vesmírné objekty jsou příliš daleko na to, aby se mohly nacházet uvnitř naší Galaxie. Tudíž musejí být samostatnými galaxiemi. Konkrétně v roce 1923 pomocí cefeid určil, že galaxie M31 v Andromedě je od Země vzdálená přibližně 900 000 ly (obr. P66) [42]. Tento odhad byl na jednu stranu pro astronomii obrovským přínosem, neboť definitivně potvrdil skutečnost, že rozměry vesmíru sahají daleko za hranice naší Galaxie. Na druhou stranu však důsledky bezprostředně vyplývající z této vzdáleností nekořespondovaly s některými vědeckými výsledky týkajícími se například stáří vesmíru. Z výpočtů, které Hubble později provedl, vyplynulo, že vesmír by byl jen dvě miliardy let starý, což bylo příliš málo. Vždyť jenom Země a Měsíc jsou přinejmenším čtyři miliardy let staré. Současná astronomie odhaduje stáří vesmíru na 13,82 miliardy let [42].

O zpřesnění Hubbleova výsledku se zasloužil německý astronom Walter Baade (1893 – 1960), který v roce 1931 emigroval do USA (obr. P67). Ve 40. letech 20. století během druhé světové války se mu pomocí zmíněného stopalcového Hookerova teleskopu podařilo díky mnohem příznivějším pozorovacím podmínkám lépe rozlišit jednotlivé hvězdy v galaxii M31 [64]. Těmi příznivějšími pozorovacími podmínkami bylo především výrazné snížení tzv. světelného smogu. Během druhé světové války

bylo totiž v USA nařízeno, aby kvůli obávaným nepřátelským nočním náletům bylo veškeré osvětlení během noci v Los Angeles vždy zatemněno.

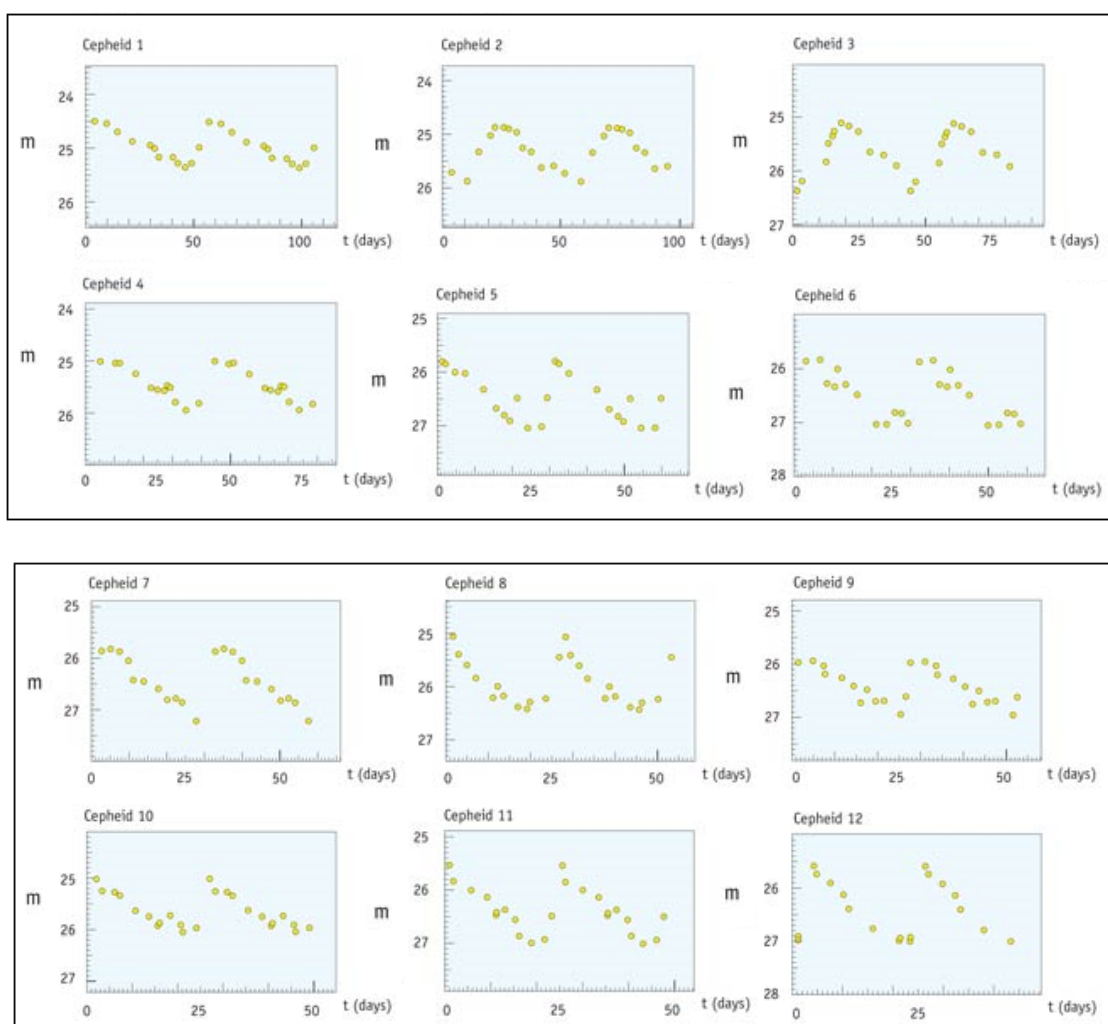
Když Edwin Hubble pozoroval cefeidy v galaxii v Andromedě a porovnával je s cefeidami v naší Galaxii, domníval se, že všechny cefeidy mají stejné vlastnosti a jsou tak stejného typu. Baade však zjistil, že cefeidy v galaxii M31 patří k mladší populaci I, zatímco ty naše jsou staršího typu II [64]. Z níže uvedeného grafu (obr. 9-3) je patrné, že mezi první a druhou populací cefeid je rozdíl v magnitudě. Cefeidy typu I jsou o 1,5 magnitudy jasnější než cefeidy typu II o stejné periodě pulzace. Cefeidy v Andromedě mají tak přibližně čtyřikrát větší zářivý výkon. Proto se galaxie M31 v Andromedě musí nacházet přibližně ve dvojnásobné vzdálenosti, než se doposud myslelo. Baade tak upravil její vzdálenost přibližně na 2,3 milionu světelných let. Podle současných astronomických studií se tato vzdálenost dokonce ještě trochu navýšila. Udává se hodnota kolem 2,5 až 3 milionů světelných let [63].



**Obr. 9-3:** Graf vyjadřující závislost absolutní hvězdné velikosti na periodě pulzace u jednotlivých skupin cefeid.

### 9.1.3 Galaxie M100 a její názorné určení vzdálenosti

Opět jako v předchozích metodách bude jistě i zde přínosné ukázat si názorný příklad výpočtu vzdálenosti konkrétní galaxie. Věnujeme pozornost galaxii M100, což je nádherná spirální galaxie ve velkém shluku galaxií v souhvězdí Panny (obr. P68). Je známo, že tento shluk obsahuje celkem asi 2500 galaxií. Galaxie M100 je rotujícím systémem plynu, prachu a hvězd, který je podobný naší Galaxii (Mléčné dráze) [67]. Galaxie M100 je jednou ze vzdálenějších galaxií, u kterých byla provedena přesná měření cefeid, a to pomocí Hubbleova kosmického dalekohledu. Například na obrázku P69 v příloze je šest snímků, fotografovaných v různý čas pro jednu z cefeid, které zachytila jedna z kamer Hubbleova dalekohledu.



**Obr. 9-4:** Grafy zachycující světelné křivky dvanácti cefeid z galaxie M100, které byly proměřeny pomocí HST.

(upraveno z: <https://sites.google.com/site/gchdpuda/astroweb/1-ulohy/cviceni-2---urceni-vzdaleni-ke-galaxii-m100-pomoci-promennych-hvezd---cefeid>)

Pro náš modelový výpočet mezigalaktické vzdálenosti máme k dispozici dvanáct grafů, zachycujících světelné křivky cefeid (obr. 9-4), které byly proměřeny též Hubbleovým dalekohledem (HST – Hubble Space Telescope) [67].

Údaje z těchto grafů nám postupně poslouží k výpočtu uvažované vzdálenosti galaxie M100. Jelikož máme k dispozici údaje dvanácti cefeid, můžeme pro každou z nich spočítat vzdálenost. Poté spočítáme průměrnou hodnotu vzdáleností všech dvanácti cefeid. Tuto hodnotu již můžeme brát jako přibližný odhad vzdálenosti galaxie M100. Dále budou provedeny v potřebném pořadí jednotlivé kroky výpočtů.

- *Určení absolutní hvězdné velikosti cefeidy 1:*

- Nejprve pomocí vztahu (9.1) vypočítáme absolutní hvězdnou velikost cefeidy 1. K samotnému výpočtu potřebujeme znát její periodu pulzace. Podle grafu světelné křivky cefeidy 1 (obr. 9-4) jí odpovídá hodnota 53,5 dne.

$$\text{Výpočet } M: M = -2,78 \log 53,5 - 1,35 = -6,15 \text{ mag.}$$

Absolutní hvězdná velikost cefeidy 1 je tedy  $M = -6,15 \text{ mag}$ .

- *Určení zdánlivé hvězdné velikosti cefeidy 1:*

- Za zdánlivou hvězdnou velikost u cefeid lze považovat například aritmetický průměr zdánlivé hvězdné velikosti v době minima a maxima. Obě hodnoty opět zjistíme z grafu světelné křivky cefeidy 1:

$$m_{\min} = 25,30 \text{ mag}, m_{\max} = 24,50 \text{ mag}, m = \frac{25,30 + 24,50}{2} = 24,90 \text{ mag.}$$

- Tato hrubá metoda určování zdánlivé hvězdné velikosti byla používána astronomy především na počátku dvacátého století.

- *Určení vzdálenosti cefeidy 1:*

- Nyní výše vypočítané údaje dosadíme do vztahu (5.18) a určíme, v jaké vzdálenosti se cefeida 1 nachází.

$$d = 10^{\left(\frac{24,9+6,15}{5}+1\right)} = 16,22 \cdot 10^6 \text{ pc} = 16,22 \text{ Mpc.}$$

- *Další výpočty:*

- Analogicky provedeme výpočty pro ostatní proměnné hvězdy (tj. cefeidy 2 až 12). Dostaneme výsledky, které shrnuje tabulka č. 17.

cefeida	P [den]	M [mag]	m(max) [mag]	m(min) [mag]	m (průměr) [mag]	d [Mpc]
1	53,5	-6,15	24,50	25,30	24,90	16,22
2	47,5	-6,01	24,90	25,90	25,40	19,14
3	42,5	-5,88	25,10	26,40	25,75	21,18
4	39,0	-5,77	25,00	25,95	25,48	17,78
5	31,0	-5,50	25,80	27,05	26,43	24,32
6	29,0	-5,42	25,80	27,10	26,45	23,66
7	30,5	-5,48	25,80	27,20	26,50	24,89
8	27,0	-5,33	25,05	26,40	25,73	16,29
9	26,0	-5,28	25,90	27,00	26,45	22,18
10	24,5	-5,21	25,00	26,10	25,55	14,19
11	24,0	-5,19	25,55	27,00	26,28	19,68
12	22,0	-5,08	25,60	27,00	26,30	18,89

Tabulka č. 17

Výslednou vzdálenost galaxie M100 pak určíme jako aritmetický průměr vzdáleností všech cefeid. Vzdálenost M100 je tedy přibližně 19,87 Mpc.

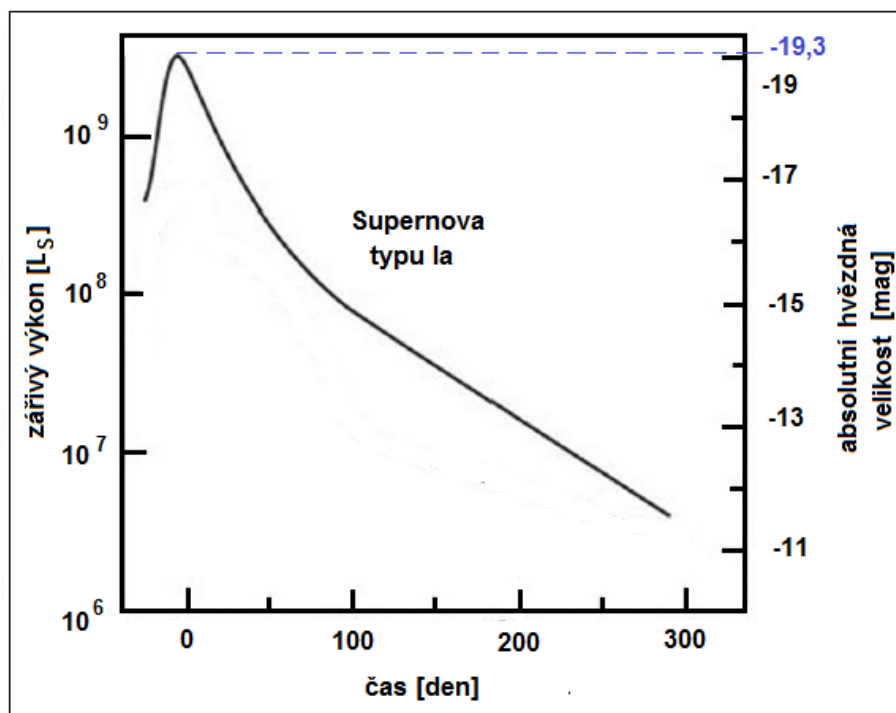
Z hlediska reálné praxe je samozřejmostí, že v dnešní době astronomové využívají přesnější měřicí techniky k určování vzdálenosti galaxií, které při výpočtech zohledňují důležité faktory ovlivňující výsledek. Konkrétně u galaxie M100 byla na základě měření z Hubbleova vesmírného dalekohledu stanovena hodnota na  $17,1 \pm 1,8$  Mpc, přičemž při jejím výpočtu byla provedena korekce na mezihvězdnou hmotu, která se může nacházet mezi Zemí a počítanou galaxií [67]. Námí vypočítaná hodnota 19,87 Mpc je tedy poměrně dobrá.

## 9.2 Měření vzdálenosti galaxií pomocí supernov typu Ia

Stejně jako předchozí metody i proměnné hvězdy mají svůj vzdálenostní limit. Cefeidy lze využít maximálně do vzdálenosti přibližně 100 miliónů světelných let. Pro určení vzdálenosti ke galaxiím, nacházejícím se v kosmickém prostoru za touto hranicí, astronomové od konce 20. století již využívají jiný typ standardní svíčky. Tou je supernova typu Ia (obr. P70) [68].

V základním přiblížení lze na supernovu typu Ia pohlížet jako na původně dvojhvězdnou soustavu, ve které je jednou složkou bílý trpaslík a druhou obvykle červený obr. Z hlediska vývoje hvězd se jedná o závěrečné vývojové stádium těsné dvojhvězdy, ve kterém dochází k přenosu hmoty z průvodce (červeného obra) na bílého trpaslíka, který tak zvyšuje svoji hmotnost [68]. Podle teoretických poznatků může být bílý trpaslík stabilní jen do 1,44 hmotnosti Slunce. Pokud překročí tuto tzv. *Chandrasekharovu mez*, dostane se za hranici stability a exploduje. Dojde k explozivnímu termonukleárnímu hoření uhlíku a kyslíku na nikl v celém objemu trpaslíka a uvolněná energie se projeví jako supernova typu Ia. Pro supernovy typu Ia je charakteristické, že jsou pozorovány ve všech typech galaxií a všechny mají na začátku exploze přibližně stejnou hmotnost. Tudíž se při jejich výbuchu uvolňuje stejné množství energie a mají i stejnou jasnost (jedná se o energii asi 1 až  $2 \cdot 10^{44}$  J) [63]. Jestliže známe absolutní jasnost explodující hvězdy, můžeme porovnáním s její zdánlivou jasností dopočítat její vzdálenost od Země.

Po explozi je většina hmoty vyvržena do okolí ve formě jakési obálky. Ta má rychlost asi  $10\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  a postupem času se neustále zvětšuje, čímž roste i její absolutní jasnost. Z grafu (obr. 9-5), zachycujícím světelnou křivku supernovy typu Ia, je patrné, že během několika prvních dní tato obálka natolik zvětší svoji plochu, že absolutní jasnost dosáhne maxima. Ta je u všech supernov typu Ia stejně velká, asi  $-19,3 \text{ mag}$  [63]. Několik dalších týdnů se pak obálka ochlazuje, až se nakonec zcela ztratí z dohledu.



Obr. 9-5: Graf zachycující průběh světelné křivky supernovy typu Ia.

Supernovy typu Ia jsou asi 300 000krát zářivější než cefeidy. Z toho vyplývá, že ve srovnání s cefeidami je můžeme pozorovat na pětisetnásobnou vzdálenost, tedy asi na vzdálenosti pěti miliard světelných let. Předností je, že supernovu typu Ia lze jednoznačně identifikovat podle tvaru jejího spektra. Konkrétně lze v jejím spektru najít jasné čáry křemíku [59].

Nevýhodou této „standardní svíčky“ pro určování vesmírných vzdáleností by se na první pohled mohlo zdát dlouhé čekání na explozi. V průměrné galaxii k takové události dochází asi dvakrát za 100 let. Pokud by však nezáleželo na jedné konkrétní galaxii, například při měření rozpínání vesmíru, stačí statistický přístup. Například v pěti tisících galaxií můžeme počítat se sto explozemi za rok [69].

Astronomové používají supernovy typu Ia jako „standardní svíčky“ především ke zkoumání geometrie vesmíru. Například měření velmi vzdálených explozí těchto supernov poskytla v roce 1998 důležité informace o existenci temné energie, která urychluje expanzi vesmíru [70].

Astronomové pomocí supernov typu Ia dokážou posunout „vesmírné měřítko vzdáleností“ až do vzdálenosti miliard světelných roků. Ještě větší kosmické vzdálenosti již touto metodou nelze měřit. Hlavním důvodem není nedostačující pozorovací technika, ale skutečnost, že čím vzdálenější vesmír pozorujeme, tím je starší, protože



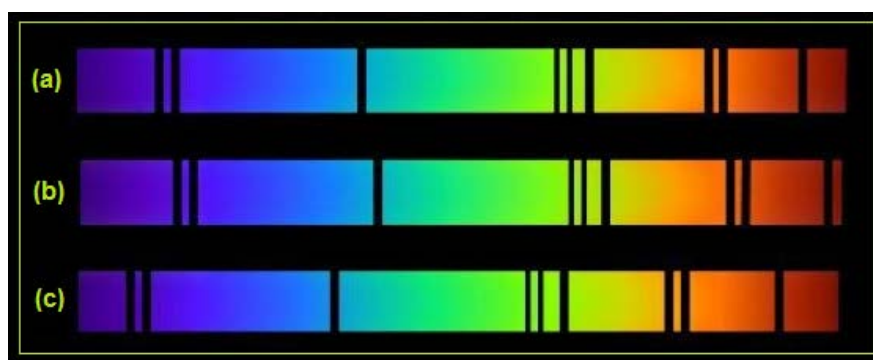
nověji emitované světlo k nám ještě nestačilo doletět. Ve vesmíru starém méně než pět miliard let se ještě supernovy typu Ia nevyskytují [69].

Avšak podle současných vědecko-kosmologických výzkumů je známo, že v tomto velmi hlubokém vesmírném prostoru se vyskytují fascinující objekty, zvané kvazary. V prvním přiblížení lze na kvazary pohlížet jako na nejvzdálenější a nejzářivější objekty v pozorovaném vesmíru. Právě u těchto objektů se astronomům v současné době podařilo zjistit závislost mezi zářivostí a poměrem emisí v ultrafialovém a rentgenovém pásmu, což opět vede k použití metody standardní svíčky [69]. Tuto závislost astronomové tušili již od roku 1970, jenže až v posledních deseti letech bylo možné sestavit dostatečný vzorek, čítající 1138 kvasarů se známým vyzařováním v obou oborech, aby bylo možné tuto závislost určit a ověřit její platnost ve všech epochách vývoje vesmíru [71].

### 9.3 Měření vzdálenosti galaxií pomocí rudého posuvu spektrálních čar

Další metoda, umožňující zjišťování intergalaktických vzdáleností, a zároveň poslední, která bude v této diplomové práci bližší vyložena, se principiálně odlišuje od předchozích metod. Vychází z faktu, že se vesmír rozpíná.

Základy této metody spadají do roku 1929, kdy již zmíněný americký astronom Edwin Powell Hubble měřil pomocí Dopplerova jevu rychlost vzdalování galaxií [64]. Došel k závěru, že čím je galaxie vzdálenější, tím větší je rychlost jejího vzdalování od nás. V jejím spektru se to projeví tím, že všechny spektrální čáry jsou posunuté více směrem k červenému konci spektra – jde o tzv. *červený (rudý) posuv*. Existují ale i galaxie, které se k nám blíží, což se v jejich spektru projeví *modrým posuvem*. Na následujícím obrázku 9-6 jsou vidět tyto posuvy ve spektru dané galaxie.



**Obr. 9-6:** Posuvy spektrálních čar chemických prvků v elektromagnetickém spektru dané galaxie. (a) bez posuvu, (b) rudý posuv, (c) modrý posuv.

(upraveno z: <http://www.qwertasip.estranky.cz/clanky/jak-se-meri-vzdalenosti-ve-vesmiru--cast-2---hvezdy-a-galaxie.html>)

Galaxie, která by vůči nám byla v klidu, by vyzařovala podle horního spektra. Další dvě spektra jsou stejná, ale spektrální čáry chemických prvků jsou posunuty. Vlivem přibližování kosmického objektu se zvyšuje frekvence spektrálních čar a ty se tak posouvají směrem k modré části spektra. U vzdalujících se objektů je posuv opačný.

Hubble zjistil, že velikost rychlosti vzdalování  $v$  je přímo úměrná vzdálenosti galaxie  $d$ , tj.

$$v = H \cdot d, \quad (9.2)$$

kde  $H$  je *Hubbleova konstanta*. Její hodnota se od prvního objevení vztahu (9.2), kterému dnes říkáme *Hubbleův zákon*, již několikrát přeměřovala a opravovala.

V počátku hodnota konstanty kolísala v intervalu od  $50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$  do  $100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ . Až v roce 2003 se pozorováním z družic podařilo získat poměrně přesnou hodnotu  $H = (71 \pm 3,5) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$  [13]. Její co nejpřesnější určení je i v dnešní době pro astronomy stále stěžejní záležitostí. Dle posledních měření z roku 2013 s použitím družice Planck má Hubbleova konstanta hodnotu  $H = (67,2 \pm 1,2) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$  [72]. Z toho plyne, že galaxie vzdálené od nás 1 Mpc se od nás vzdalují střední rychlostí  $67,2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Vzhledem k tomu, že pro známou velikost rychlosti  $v$  vzdalování galaxií není známa přesná odpovídající vzdálenost, používá se často parametr  $z$  (tzv. *rudý posuv*). Nerelativistický rudý posuv je definován vztahem [13]

$$z = \frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \quad (9.3)$$

kde  $\Delta\lambda$  je celkový posun původní vlnové délky  $\lambda$  elektromagnetického záření, vyzařovaného galaxií.

Zde je vhodné zdůraznit, že při vzdalování galaxií od Země nemá Země žádné zvláštní místo ve vesmíru. Při všeobecném rozpínání vesmíru by byl z libovolného místa ve vesmíru pozorován stejný jev a došli bychom ke stejným závěrům.

Jestliže z rovnice (9.3) vyjádříme (nerelativistickou) rychlost (nepříliš) vzdálené galaxie, kterou dosadíme do Hubbleova zákona (9.1), získáme po jednoduché úpravě vztah pro výpočet přibližné vzdálenosti této galaxie:

$$d = \frac{\Delta\lambda \cdot c}{\lambda \cdot H} = \frac{z \cdot c}{H}. \quad (9.4)$$

Z této rovnice je patrné, že vzdálenost galaxie je úměrná jejímu rudému posuvu (obr. P71).

Pro hodně vzdálené galaxie je souvislost mezi jejich vzdáleností a rudým posuvem složitější. Rudý posuv je třeba započítat relativisticky a navíc je třeba brát v úvahu i kosmologické faktory, spojené s expanzí vesmíru po dobu putování paprsku [64].

### 9.3.1 Kvasary

Mezi kosmická tělesa, jejichž charakteristickým znakem je výrazný rudý posuv, jednoznačně patří již zmíněné kvasary.

V šedesátých letech 20. století astronomové pozorovali zvláštní typ namodralých objektů, které byly zdrojem rádiových vln. V jejich neobvyklých viditelných spektrech se ukazovaly jasné emisní čáry, které však neležely na vlnových délkách, odpovídajících známým prvkům. V roce 1962 známý nizozemský astronom Maarten Schmidt identifikoval s použitím slavného dvousetpalcového (pětimetrového) teleskopu na observatoři Palomar v Kalifornii tento konkrétní pozoruhodný zdroj rádiových vln (obr. P72) [65].

Když zkoumal jeho viditelné spektrum, povšiml si, že spektrální čáry odpovídají známým prvkům, včetně charakteristické vodíkové série, ale všechny jsou výrazně posunuty k červenému konci spektra. Velký rudý posuv tedy potvrzuje fakt, že tyto extragalaktické objekty se od nás vzdalují dosud nevídanou rychlostí (asi okolo  $45000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ) [13]. Astronomům bylo jasné, že objekt není normální hvězda, a tak dostal název kvazar, což je zkratka anglického *quasi-stellar source* (hvězdě podobný zdroj).

V současné době mají astronomové dostatek důkazů, které potvrzují skutečnost, že obrovská rychlost kvazarů souvisí s jejich vzdáleností od Země právě podle Hubbleova zákona. Tudíž kvasary opravdu patří mezi nejvzdálenější objekty, které člověk zná. Astronomové jsou si dobře vědomi, že pokud při těchto nesmírně obrovských vzdálenostech vypočítají absolutní hvězdnou velikost a zářivý výkon, získají neuvěřitelně velké hodnoty. Kvazar, který je mnohem menší než galaxie, má totiž zářivý výkon, odpovídající řádově tisícovce galaxií. Nejbližší kvazar je vzdálen 240 Mpc, nejvzdálenější známý 5 500 Mpc. Většina kvazarů leží více než 1 000 Mpc od Země [13].

Co se týká představ o podobě kvazaru, většina astronomů zastává názor, že se jedná o aktivní jádra galaxií. Za zmínku stojí, že při jejich pozorování je mnohdy zachycen obraz, na kterém jsou kvazary zdvojené a zdeformované. Příčinou je například gravitační pole kupy galaxií, které zakřivuje dráhu světla přicházejícího od vzdáleného kvazaru. Tomuto jevu se říká efekt gravitační čočky (obr. P73) [64]. Efekt gravitační čočky předpověděl již v roce 1924 ruský fyzik Orest Chvolson (1852 – 1934) a v roce 1936 též Albert Einstein (1879 – 1955) [64]. První gravitační čočka byla objevena

v roce 1979 [13]. Pomocí ní byl pozorován i první deformovaný obraz kvazaru. V dnešní době jsou jich známy řádově stovky.

Astronomové též intenzivně pracují na objasnění, odkud kvazary berou svou značnou energii. Jedna z aktuálních teorií, pokoušejících se vysvětlit původ jejich obrovských zářivých výkonů, je, že ve středu kvazaru se nachází černá díra o hmotnosti stamilionů až miliard hmotností Sluncí. Do této černé díry padá velké množství hmoty, ale než je zcela pohlceno, stačí vyzářit část energie, která se při pádu uvolňuje [13].

### 9.3.2 První známý kvasar a jeho přibližné určení vzdálenosti

Názorně si ukážeme, jak určit vzdálenost kvazaru pomocí rudého posuvu. K tomu nám poslouží první známý kvasar, označovaný 3C 273 [13]. Při studiu Lymanovy série spektrálních čar v atomu vodíku je známo, že čára  $L_{\alpha}$  má v pozemských laboratorních podmínkách vlnovou délku  $\lambda = 121,6 \text{ nm}$ . Ve spektru kvasaru 3C 273 má však vlnovou délku  $\lambda_k = 140,8 \text{ nm}$ . Pro výpočet přibližné vzdálenosti  $d$  tohoto kvasaru, použijeme vztah (9.4), který byl odvozen z Hubbleova zákona. Než tak učiníme, provedeme postupně výpočet přibližné hodnoty rudého posuvu  $z$  a rychlosti vzdalování  $v$ :

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_k - \lambda}{\lambda} \approx 0,158;$$

$$v = z \cdot c = 0,158 \cdot 3 \cdot 10^5 \approx 47000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1};$$

$$d = \frac{z \cdot c}{H} = \frac{47000}{67} \approx 700 \text{ Mpc},$$

kde  $H$  je Hubbleova konstanta. Její předpokládaná hodnota je zde uvažována  $H = 67 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ .

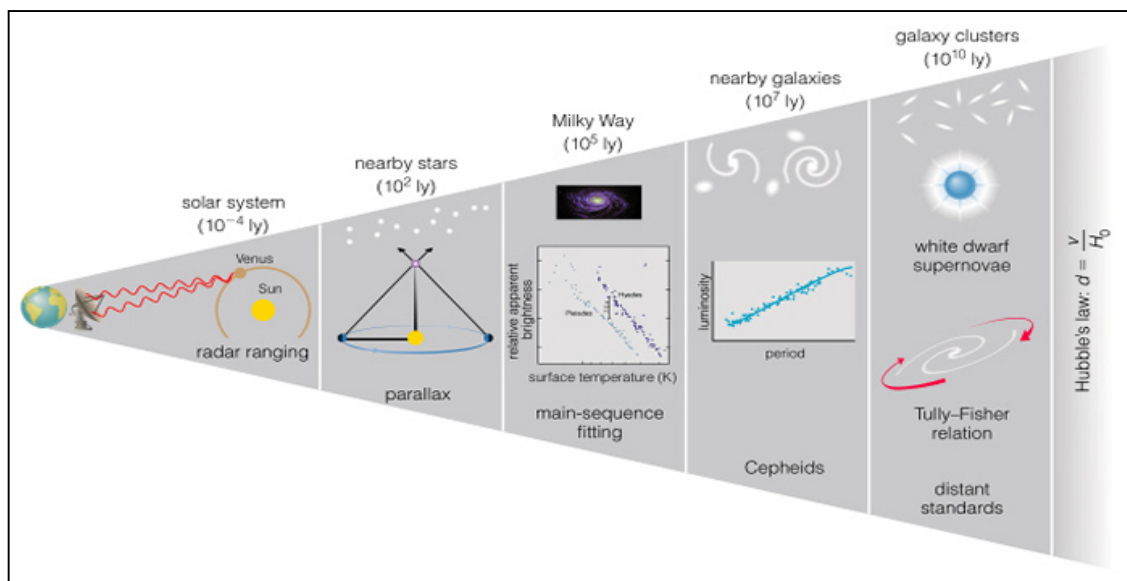
Kvasar 3C 273 je tedy od Země vzdálen přibližně 700 Mpc a jeho rychlost vzdalování je přibližně  $47000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Započítáme-li relativistické efekty, vyjde rychlost o něco menší. Ve srovnání s rychlostí blízké kupy galaxií, která se od Země vzdaluje rychlostí přibližně  $1000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , to je i tak dechberoucí výsledek.

## 10 KOSMOLOGICKÝ ŽEBŘÍK

Určování vzdáleností ve vesmíru je problémem, který se táhne celou historií astronomie. Určení skutečné vzdálenosti kosmických objektů je pro astronomii jeden z nejdůležitějších úkolů vůbec, a to od starověku přes novověk až po budoucí věk. Znalost co nejpřesnější vzdálenosti je zvláště důležitá pro astrofyziky, kteří jí mimo jiné potřebují k určování fyzikálních, případně chemických parametrů pozorovaných kosmických objektů.

Na závěr si přehledně uvedme současné metody určování vzdáleností v kosmickém prostoru. Astronomie má k měření objektů ve sluneční soustavě k dispozici přímá měření z odrazu laserového paprsku nebo z radarových odrazů. Pro určení větších vzdáleností, např. blízkých hvězd, využívá trigonometrickou paralaxu. Její velmi přesná hodnota se získává především pomocí kosmických družic. Dále ve vývoji astronomických měřících metod mají významné postavení fotometrie (tj. porovnávání zdánlivých a absolutních hvězdných velikostí) a spektroskopie. Díky těmto metodám jsme dnes schopni odhadnout vzdálenosti nejen v naší, ale i v nejbližších galaxiích. Přesnost fotometrické i spektroskopické paralaxy se však nemůže vyrovnat trigonometrické paralaxě, proto se současně zavádí i jiné doplňující metody, například metoda, která je založena na předpokladu, že nejjasnější hvězdokupa v některé galaxii má zhruba stejný zářivý výkon jako nejjasnější hvězdokupa v jiné galaxii. Určování velmi velkých vzdáleností je o to obtížnější, že velmi vzdálené hvězdy již nejsou vidět. K tomu se navíc připojují i další limitující faktory, například mezihvězdný plyn a prach. Nakonec pro ty nejvzdálenější objekty současná astronomie využívá např. supernovy nebo měření rudého posuvu kvazarů (Hubbleův zákon), či tzv. Tullyho-Fisherovu metodu. Ta je založena na vztahu mezi absolutní hvězdnou velikostí  $M$  spirálních galaxií a rychlostí jejich rotace. Tuto empirickou závislost obou vlastností společně objevili v roce 1977 kanadský astronom Richard Brent Tully a americký astronom James Richard Fisher [63].

Na obrázku 10-1 jsou přehledně znázorněny hlavní metody měření vzdáleností ve vesmíru, od zlomků světelných let až do vzdáleností přibližně 10 miliard světelných let.



**Obr. 10-1:** Přehled jednotlivých metod měření vzdálenosti ve vesmíru od  $10^{-4}$  ly až do  $10^{10}$  ly.

(zdroj: <http://www.qwertasip.estranky.cz/clanky/jak-se-meri-vzdalenosti-ve-vesmiru--cast-2---hvezdy-a-galaxie.html>)

Čím dále se díváme, tím obtížněji a méně přesně měříme. S každou další pomyslnou příčkou se chyba měření zvětšuje, neboť veškeré kalibrace vycházejí z předchozích zjištěných vzdáleností. Jelikož každý krok je závislý na tom předchozím, bývá tento princip někdy označován jako *kosmologický žebřík* [35]. Zatímco jeho základy jsou poměrně přesné a pevné, horní příčky se nejistě viklají. Astronomům nezbyvá nic jiného, než je postupně zpevňovat, a to pomocí neustále se vyvíjející pozorovací a výpočetní techniky.

## ZÁVĚR

Po přečtení celého pojednání si čtenář může vytvořit představu, jak během historie lidstva vznikaly jednotlivé kosmologické či kosmogonické teorie pro pozorovatelný vesmír. Některé nejdůležitější poznatky z první části práce si stručně připomeneme. Především nejstarší kvantitativní geocentrické modely vznikaly ve starověkém Řecku. Ty předpokládaly, že vesmír je v prostoru konečný, existenčně věčný a obsahující soubor soustředných křišťálových sfér konečných velikostí. Jednotlivé sféry, jež náležely stálicím, Slunci a tehdy známým planetám, se otáčely kolem kulaté, nehybné Země. Poznali jsme, že v průběhu staletí, díky přesnějším měřením vedl vývoj ke kinematickému heliocentrickému modelu sluneční soustavy Mikuláše Koperníka a po té k dynamickému heliocentrickému modelu vesmíru Isaaca Newtona. Následný mohutný vývoj astronomie a jejích příbuzných oborů, přinesl poznání o tom, že naše sluneční soustava je součástí galaxie, složené z miliard hvězd, tj. Mléčné dráhy. Později se ukázalo, že kromě Mléčné dráhy existují v dosahu astronomických pozorovacích přístrojů i jiné galaxie. Pečlivé studium rozložení těchto galaxií a jejich spektrálních čar vedlo ke vzniku moderní kosmologie. Nakonec objev rudého posuvu Edwinem Hubblem ukázal, že vesmír se rozpíná, a tudíž zřejmě měl i svůj počátek.

Prostřednictvím charakteristických metod, zaměřených na určování značných vzdáleností v kosmickém prostoru jsme pak získali představu o rozměrech pozorovaného vesmíru, a to na všech jeho prostorových škálách. Tyto metody včetně jejich fyzikální podstaty byly přehledně shrnuty v poslední kapitole druhé části diplomové práce.

Jak již z úvodu práce plyne, cílem autora byla snaha o vytvoření díla, které by přehlednou, srozumitelnou a čtivou formou předávalo čtenáři – studentovi jak základní, tak i zčásti hlubší poznatky z této oblasti astronomie a bylo mu tak zároveň nápomocno při jejím studiu. Za hlavní didaktický přínos je považován fakt, že v práci je kladen značný důraz na názornost. Tu můžeme shledávat v tvorbě velkého množství grafických schémat a obrazových prvků, které byly z hlediska vytváření celkového vzhledu díla stejně jako jeho textové části časově velmi náročné. S tím souvisí i tvorba obsáhlé obrazové přílohy, jejímž úkolem je postupně vzbudit ve čtenáři větší zájem o studium



dané problematiky. Příloha může posloužit i jako doprovodná prezentace při výuce astronomie.

Autorovým přáním je, aby práce motivovala zájemce o astronomii k jejímu hlubšímu studiu.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] <http://www.seklova.webzdarma.cz/d/pravek/lascaux.html> [cit. 2.12. 2014]
- [2] <http://www.physics.muni.cz/astrohistorie> [cit. 8.12. 2014]
- [3] REES, Martin J., ed. *Vesmír*. Vydání druhé. Přeložil Pavel PŘÍHODA, přeložil Petr KULHÁNEK, přeložil David BŘEŇ, přeložil Ivan HAVLÍČEK, přeložil Martin ŽÁČEK, přeložil Lenka SOUMAROVÁ, přeložil Jan PACÁK. Praha: Knižní klub, 2015. Universum (Knižní klub). ISBN 9788024249520.
- [4] [http://www.aldebaran.cz/ls/LS06/2006\\_14.html](http://www.aldebaran.cz/ls/LS06/2006_14.html) [cit. 10.1. 2015]
- [5] COUPER, Heather a Nigel HENBEST. *Dějiny astronomie*. Praha: Knižní klub, 2009. Universum (Knižní klub). ISBN 978-80-242-2367-4.
- [6] [www.spirasolaris.ca/sbb4g1.html](http://www.spirasolaris.ca/sbb4g1.html) [cit. 15.1. 2015]
- [7] JÁCHIM, František. *Jak viděli vesmír: [po stopách velkých astronomů]*. Olomouc: Rubico, 2003. ISBN 80-85839-48-2.
- [8] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Thal%C3%A9s\\_z\\_Mil%C3%A9tu](https://cs.wikipedia.org/wiki/Thal%C3%A9s_z_Mil%C3%A9tu) [cit. 16. 1. 2015]
- [9] ŠTEFL, Vladimír. *Klaudios Ptolemaios: tvůrce geocentrické soustavy*. Praha: Prometheus, 2005. Velké postavy vědeckého nebe. ISBN 80-7196-317-8.
- [10] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Aristotel%C3%A9s> [cit. 18. 1. 2015]
- [11] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1418-alexandrijska-knihovna> [cit. 18. 1. 2015]
- [12] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1428-aristarchos-ze-samu> [cit. 7. 2. 2015]
- [13] Macháček Martin: *Astrofyzika, Fyzika pro gymnázia*, Prometheus 2004
- [14] BEČVÁŘ, Jindřich a Ivan ŠTOLL. *Archimedes: největší vědec starověku*. Praha: Prometheus, 2005. Velké postavy vědeckého nebe. ISBN 80-7196-273-2.
- [15] <http://exhibits.museogalileo.it/archimedes/object/ArchimedesPlanetarium.html> [cit. 10. 3. 2015]
- [16] <http://www.giovanipastore.it/ARCHIMEDES.htm> [cit. 10. 3. 2015]
- [17] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1440-eratosthenes-z-kyreny> [cit. 12. 3. 2015]
- [18] <http://www.qwertasip.estranky.cz/clanky/jak-se-meri-vzdalenosti-ve-vesmiru--cast-1---slunecni-soustava.html> [cit. 19. 3. 2015]
- [19] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Hipparchos> [cit. 19. 3. 2015]

- [20] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1434-hipparchos-z-nikaie>  
[cit. 19. 3. 2015]
- [21] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1435-kludios-ptolemaios>  
[cit. 8. 4. 2015]
- [22] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1473-arabska-astronomie>  
[cit. 16. 5. 2015]
- [23] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1511-videnska-astronomicka-skola>  
[cit. 19. 5. 2015]
- [24] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1510-popis-situace> [cit. 19. 5. 2015]
- [25] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1515-zivot-mikulase-kopernika>  
[cit. 19. 5. 2015]
- [26] ŠTEFL, Vladimír. *Mikuláš Koperník: tvůrce heliocentrické soustavy*. Praha: Prometheus, 2002. Velké postavy vědeckého nebe. ISBN 80-7196-234-1.
- [27] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1516-priprava-velkeho-dila>  
[cit. 4. 6. 2015]
- [28] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1517-o-obezech-nebeskych-sfer>  
[cit. 4. 6. 2015]
- [29] ŠOLCOVÁ, Alena. *Johannes Kepler: zakladatel nebeské mechaniky*. Praha: Prometheus, 2004. Velké postavy vědeckého nebe. ISBN 80-7196-274-0.
- [30] <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/vedec/1205/kepler> [cit. 12. 9. 2015]
- [31] SMOLKA, Josef. *Galileo Galilei: legenda moderní vědy*. Praha: Prometheus, 2000. Velké postavy vědeckého nebe. ISBN 80-7196-171-X.
- [32] <http://astronomia.zcu.cz/astronomove/galilei/2390-galileo-galilei>  
[cit. 15. 10. 2015]
- [33] <http://astronomia.zcu.cz/astronomove/bruno/2479-giordano-bruno> [cit. 8. 2. 2016]
- [34] <http://jamsedlacek.blog.idnes.cz/blog.aspx?c=211715> [cit. 4. 3. 2016]
- [35] [http://www.rozhlas.cz/leonardo/leonardoplus/\\_zprava/1398078](http://www.rozhlas.cz/leonardo/leonardoplus/_zprava/1398078) [cit. 20. 3. 2016]
- [36] GRYGAR, Jiří, HORSKÝ, Zdeněk, MAYER, Pavel: *Vesmír*, Mladá fronta, Praha 1979
- [37] SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky*. 4., upr. vyd. Praha: Prometheus, 2005. ISBN 80-7196-307-0.
- [38] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Astronomick%C3%A1\\_jednotka](https://cs.wikipedia.org/wiki/Astronomick%C3%A1_jednotka) [cit. 11. 6. 2016]
- [39] VANÝSEK, Vladimír. *Základy astronomie a astrofyziky*. Praha: Academia, 1980.
- [40] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Sv%C4%9Bteln%C3%BD\\_rok](https://cs.wikipedia.org/wiki/Sv%C4%9Bteln%C3%BD_rok) [cit. 11. 6. 2016]

- [41] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Parsek> [cit. 12.6. 2016]
- [42] GILLILAND, Ben. *Jak postavit vesmír: od velkého třesku po konec vesmíru*. Přeložil Ivan BOHÁČEK. Praha: Knižní klub, 2015. ISBN 978-80-242-5014-4.
- [43] <http://fyzika.jreichl.com/index.php/main.article/view/951-paralaxa> [cit. 18. 6. 2016]
- [44] [http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id\\_desc=27494&title=fotometr%C3%BDick%C3%BDe%20paralaxa&s\\_lang=2](http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=27494&title=fotometr%C3%BDick%C3%BDe%20paralaxa&s_lang=2) [cit. 18. 6. 2016]
- [45] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Paralaxa\\_\(astronomie\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Paralaxa_(astronomie)) [cit. 18. 6. 2016]
- [46] [http://www.army.cz/images/id\\_8001\\_9000/8753/radar/f10.htm](http://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/f10.htm) [cit. 24. 6. 2016]
- [47] <http://fyzmatik.pise.cz/296-zrcatka-koutove-odrazece-na-mesici.html> [cit. 28. 6. 2016]
- [48] [http://mek.kosmo.cz/pil\\_lety/usa/apollo/ap-11/lk8.htm](http://mek.kosmo.cz/pil_lety/usa/apollo/ap-11/lk8.htm) [cit. 28. 6. 2016]
- [49] [http://www.ian.cz/detart\\_fr.php?id=383](http://www.ian.cz/detart_fr.php?id=383) [cit. 28. 6. 2016]
- [50] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Giovanni\\_Domenico\\_Cassini](https://cs.wikipedia.org/wiki/Giovanni_Domenico_Cassini) [cit. 15. 7. 2016]
- [51] <http://reseneulohy.cz/1238/mars-v-opozici-se-sluncem> [cit. 15. 7. 2016]
- [52] [https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99echod\\_Venu%C5%A1e](https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99echod_Venu%C5%A1e) [cit. 19. 7. 2016]
- [53] <http://casopis.vesmir.cz/clanek/prechod-venuse-pred-sluncem> [cit. 19. 7. 2016]
- [54] <http://www.aldebaran.cz/astrofyzika/sunsystem/index.html> [cit. 12. 8. 2016]
- [55] <http://hvezdy.astro.cz/charakteristika/6-zarivy-vykon> [cit. 12. 8. 2016]
- [56] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A1%C5%99iv%C3%BD\\_v%C3%BDkon](https://cs.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A1%C5%99iv%C3%BD_v%C3%BDkon) [cit. 19. 8. 2016]
- [57] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1068-zarivy-vykon-a-jasnost-hvezd> [cit. 19.8. 2016]
- [58] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1071-pogsonova-rovnice> [cit. 19. 8. 2016]
- [59] MÁDLOVÁ, Tereza. *Metoda tzv. standardních svíček k určování vzdáleností ve vesmíru: bakalářská práce*. Praha: Astronomický ústav UK, 2014. 78 l. Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Martin Šolc, CSc.
- [60] <http://hvezdy.astro.cz/charakteristika/2-hvezdna-velikost> [cit. 19. 8. 2016]
- [61] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1072-absolutni-hvezdna-velikost> [cit. 23. 8. 2016]
- [62] <http://hvezdy.astro.cz/diagram/17-hr-diagram> [cit. 26. 8. 2016]
- [63] <http://www.qwertasip.estranky.cz/clanky/jak-se-meri-vzdalenosti-ve-vesmiru--cast-2---hvezdy-a-galaxie.html> [cit. 26. 8. 2016]

- [64] WEB, Stephen. Measuring the Universe: The Cosmological Distance Ladder. Springer 1999
- [65] BAKER, Joanne. Vesmír: 50 myšlenek, které musíte znát. Přeložil Jakub ROZEHNAL. Praha: Slovart, 2016. ISBN 978-80-7529-112-7.
- [66] [http://www.wikina.cz/a/Barevn%C3%BD\\_index](http://www.wikina.cz/a/Barevn%C3%BD_index) [cit. 20. 9. 2016]
- [67] <https://sites.google.com/site/gchdpuda/astroweb/1-ulohy/cviceni-2---urceni-vzdalenosti-ke-galaxii-m100-pomoci-promennych-hvezd---cefeid> [cit. 3.10. 2016]
- [68] [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2012\\_04\\_sni.php](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2012_04_sni.php) [cit. 23. 9. 2016]
- [69] <http://sw.gurroa.cz/real/real-04.php> [cit. 12. 11. 2016]
- [70] [http://farnostkyje.cz/att/mereni\\_vesmiru.pdf](http://farnostkyje.cz/att/mereni_vesmiru.pdf) [cit. 18. 11. 2016]
- [71] <http://www.kosmonautix.cz/2015/12/nova-metoda-mereni-vzdalenosti-v-kosmu-rentgenova-astronomie> [cit. 18. 11. 2016]
- [72] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Hubbleova\\_konstanta](https://cs.wikipedia.org/wiki/Hubbleova_konstanta) [cit. 27.12. 2016]



## Představy o vesmíru v předantickém období

01



**Obr. P01:** Začátkem čtyřicátých let 20. století byly objeveny malby zvířat v jeskyni Lascaux, nacházející se v jižní Francii. O významu jednotlivých maleb bylo vysloveno velmi mnoho více či méně odvážných hypotéz. V současné době je mezi vědci předmětem zájmu zajímavá myšlenka, jejíž autorkou je světově uznávaná francouzská etnoastronomka Chantal Jéguez-Wolkiewiezová (vpravo nahoře). Figury jednotlivých zvířat podle ní nejsou rozmístěny nahodile, nýbrž odpovídají souhvězdím zvěrokruhu. Mezi souhvězdí, která se jí podařilo určit, patří Kozoroh, Býk a Štír. **Převzato a upraveno z [1].**



**Obr. P02:** Mezi první znaky mezopotámské civilizace patří monumentální architektura, která se projevila stavbou zikkuratů. Zikkurat byla vysoká stupňovitá věž, většinou na půdorysu čtyřúhelníku, se třemi až sedmi terasami barevně odlišenými a chrámem na vrcholu. Ten sloužil ke kultovním účelům a také k astronomickým pozorováním. Příkladem je zikkurat ve městě Ur postavený za vlády sumerského krále Ur-Nammu. **Převzato a upraveno z [2].**

Zdroje:

[01] <http://www.seklova.webzdarma.cz/d/pravek/lascaux.html>

[02] <https://www.crg.cz/sekce/historie/referaty/starovek/mezopotamie/zikkurat.htm>



**Obr. P03:** Tabulka s klínovým písmem. Pomocí tabulek chaldejští astronomové zaznamenávali své astronomické výsledky z pozorování. **Převzato z [3].**



**Obr. P04:** Krabí mlhovina je emisní mlhovina, která se nachází v souhvězdí Býka. Poprvé ji pozoroval anglický astronom John Bevis v roce 1731. Je pozůstatkem supernovy SN 1054, kterou v roce 1054 pozorovali čínští a arabští astronomové. **Převzato z [4].**

---

Zdroje:

[03] <http://www.physics.muni.cz/astrohistorie>

[04] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Krab%C3%AD\\_mlhovina](https://cs.wikipedia.org/wiki/Krab%C3%AD_mlhovina)





**Obr. P05:** Stonehenge je komplex menhirů a kamenných kruhů, nacházející se na Salisburské pláni asi 13 km severně od městečka Salisbury v Jižní Anglii. Údajně sloužil i k astronomickým účelům. **Převzato z [5].**



**Obr. P06:** „El Caracol“, chrám, který Mayové používali k astronomickým pozorováním. Chrám se nachází v zříceninách mayského města Chichén Itzá na mexickém poloostrově Yucatán. **Převzato z [6].**

---

Zdroje:

[05] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Stonehenge>

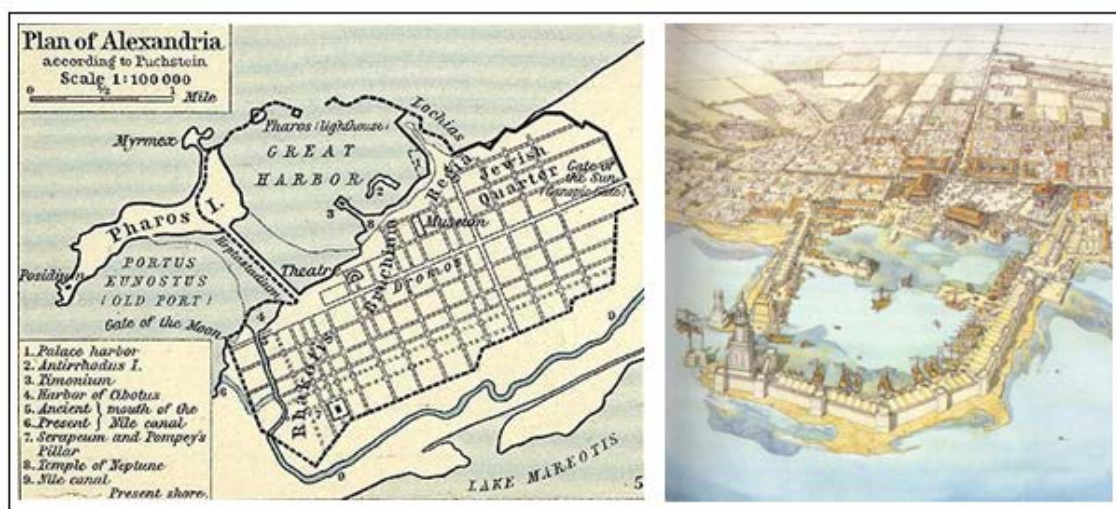
[06] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Observato%C5%99>



**Obr. P07:** Gnómon, nacházející se v ruinách předkolumbovského inckého kultovního města v peruánských Andách. **Převzato z [7].**

## Astronomie v antickém Řecku

02



**Obr. P08:** Plán starověké Alexandrie a její vyobrazená tehdejší podoba. Zde stojí za povšimnutí jeden ze sedmi divů světa alexandrijský maják, který se bohužel nedochoval. Alexandrie byla působiště celé řady významných antických osobností, které svými názory a prací výrazně přispěly k rozvoji a vývoji astronomie. **Převzato a upraveno z [8].**

Zdroje:

[07] <http://www.travelthruhistory.com/html/historic25.html>

[08] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Starov%C4%9Bk%C3%A1\\_Alexandrie](https://cs.wikipedia.org/wiki/Starov%C4%9Bk%C3%A1_Alexandrie)



**Obr. P09:** Přehled některých významných řeckých osobností z antického období: (1) Thales z Milétu, (2) Pythagoras ze Samos, (3) Filolaos z Krotónu, (4) Platon z Atén, (5) Aristoteles ze Stageiry. **Převzato a upraveno z [9].**



**Obr. P10:** Ukázka z Aristarchova díla *O velikosti a vzdálenosti Slunce a Měsíce*. **Převzato z [10].**

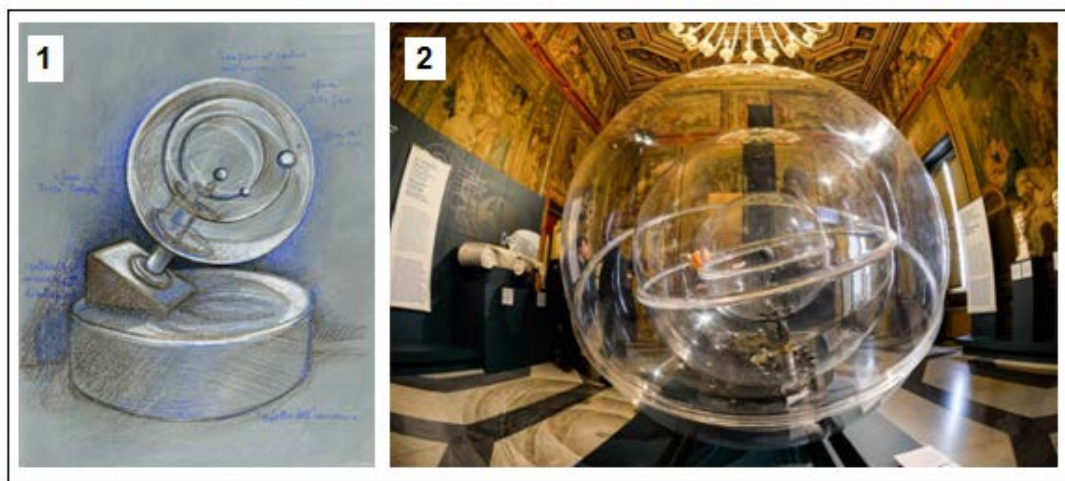
Zdroje:

[09] <https://cs.wikipedia.org/>

[10] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1428-aristarchos-ze-samu>



**Obr. P11:** Přehled dalších významných řeckých osobností z antického období: (1) Aristarchos ze Samu, (2) Archimédes ze Syrakus, (3) Eratosthenés z Kyrény, (4) Hipparchos z Nikaie, (5) Klaudios Ptolemaios. **Převzato a upraveno z [11].**

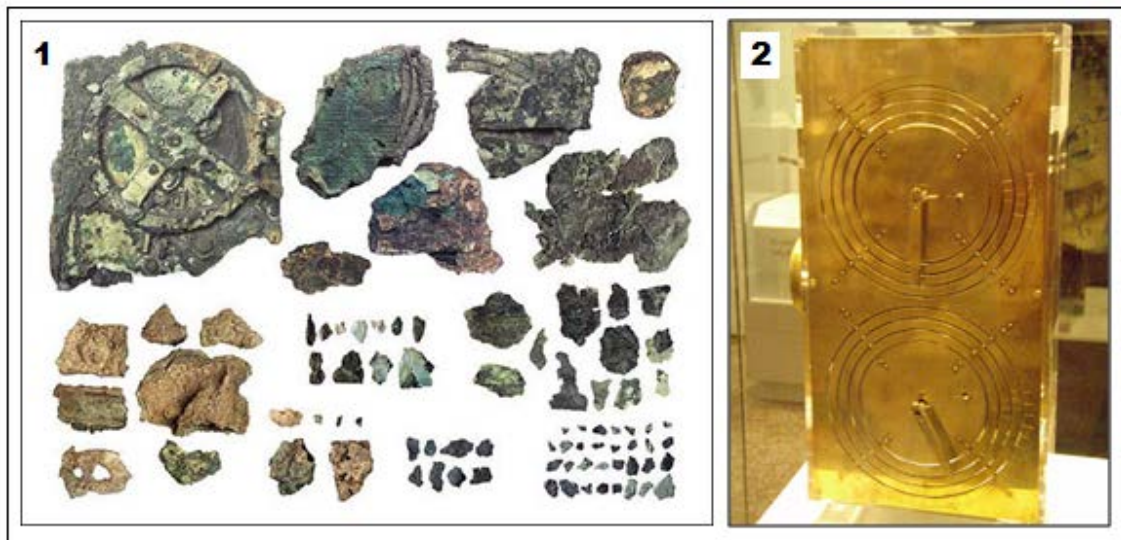


**Obr. P12:** (1) Kresba údajné podoby Archimédova modelu planetária, nacházející se v museu Galileo v italské Florencii, (2) Rekonstrukce Archimédova modelu planetária nacházející se v Kapitolském museu v Římě. **Převzato a upraveno z [12].**

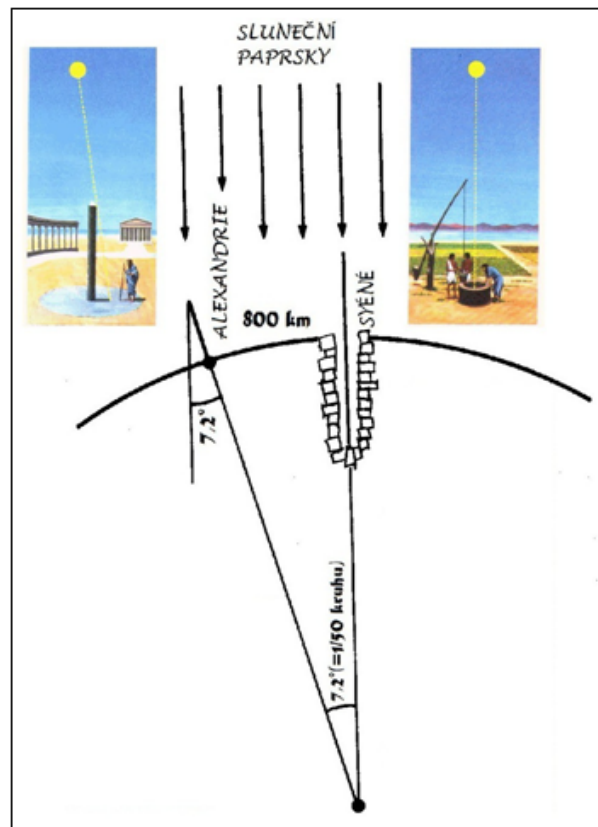
Zdroje:

[11] <https://cs.wikipedia.org/>

[12] <http://exhibits.museogalileo.it/archimedes/object/ArchimedesPlanetarium.html>



**Obr. P13:** Mechanismus z Antikythéry. (1) Jednotlivé fragmenty mechanismu, které byly v roce 1902 nalezeny ve vraku římské lodi potopené u řeckého ostrova Antikythéra. (2) Rekonstrukce vzhledu antikythérského mechanismu. Národní archeologické muzeum, Atény. **Převzato a upraveno z [13].**

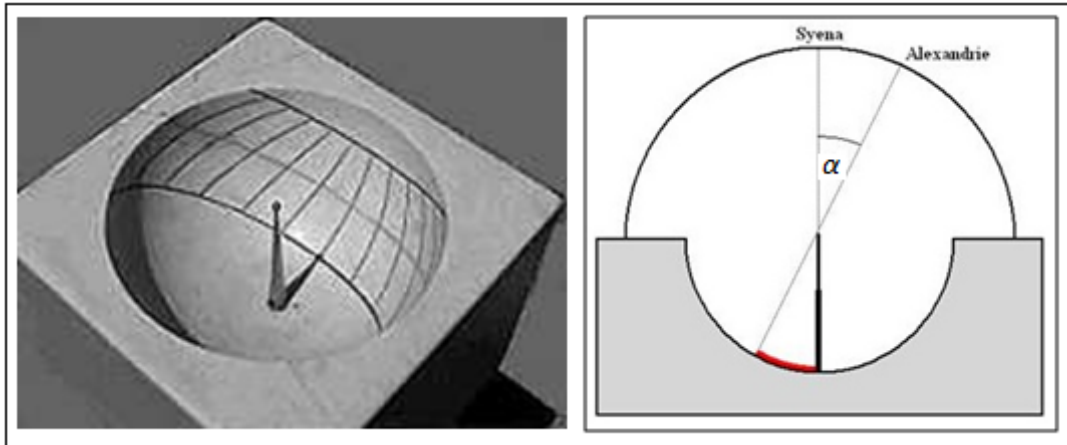


**Obr. P14:** Eratosthenés a jeho způsob určení obvodu Země. **Převzato z [14].**

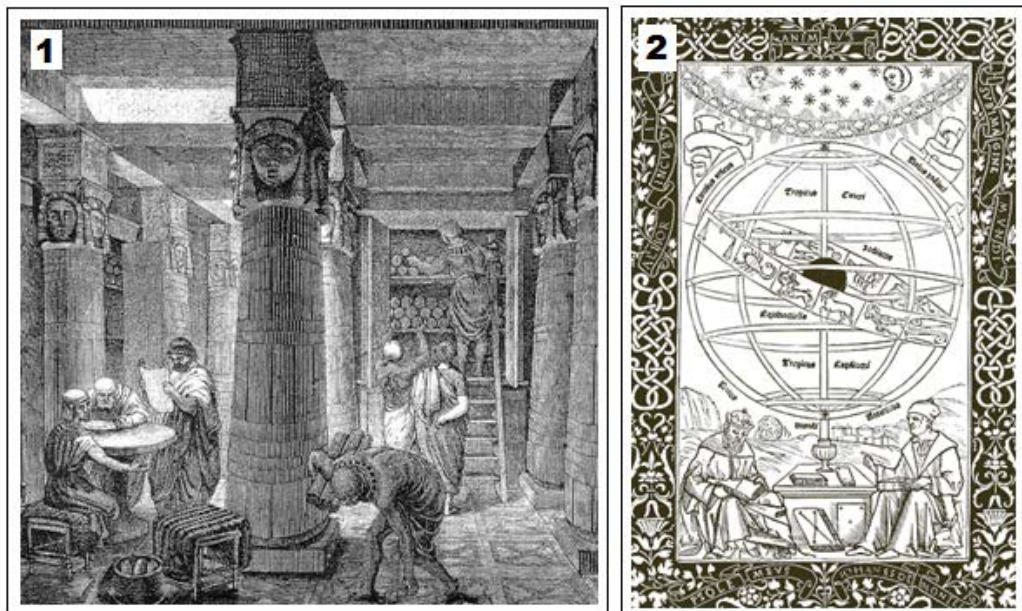
Zdroje:

[13] <https://cs.wikipedia.org/> ; <http://www.antikythera-mechanism.gr/>

[14] <http://www.qwertasip.estranky.cz/clanky/jak-se-meri-vzdalenosti-ve-vesmiru--cast-1---slunecni-soustava.html>



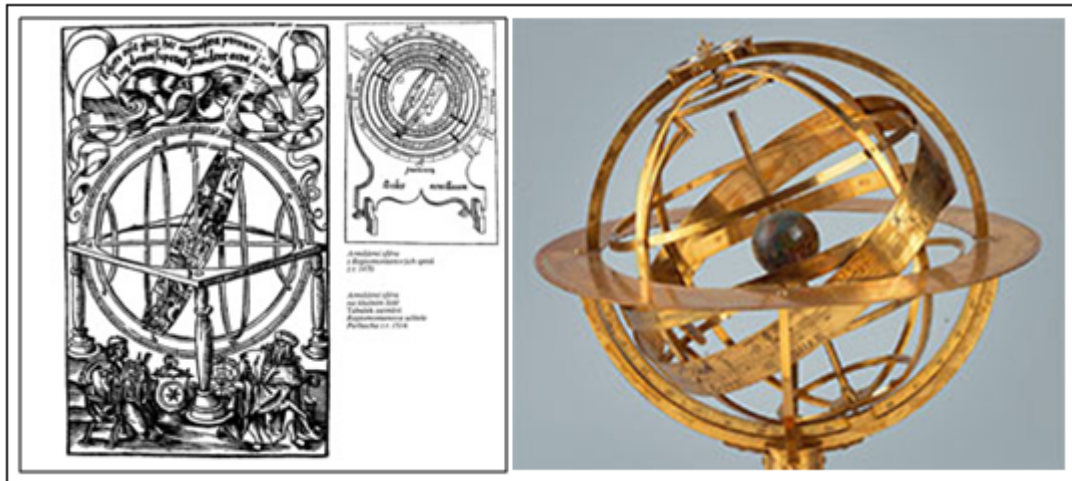
**Obr. P15:** Skafé - přístroj, který Eratosthenés používal ke svému měření. **Převzato a upraveno z [15].**



**Obr. P16:** (1) Alexandrijská knihovna byla největší a nejslavnější knihovna starověku. Byla součástí věhlasného múseia v Alexandrii. Zde údajně vznikl i Ptolemaiov Almagest. (2) Titulní strana Regiomontanova vydání Ptolemaiova Almagestu z roku 1496. **Převzato a upraveno z [16].**

Zdroje:

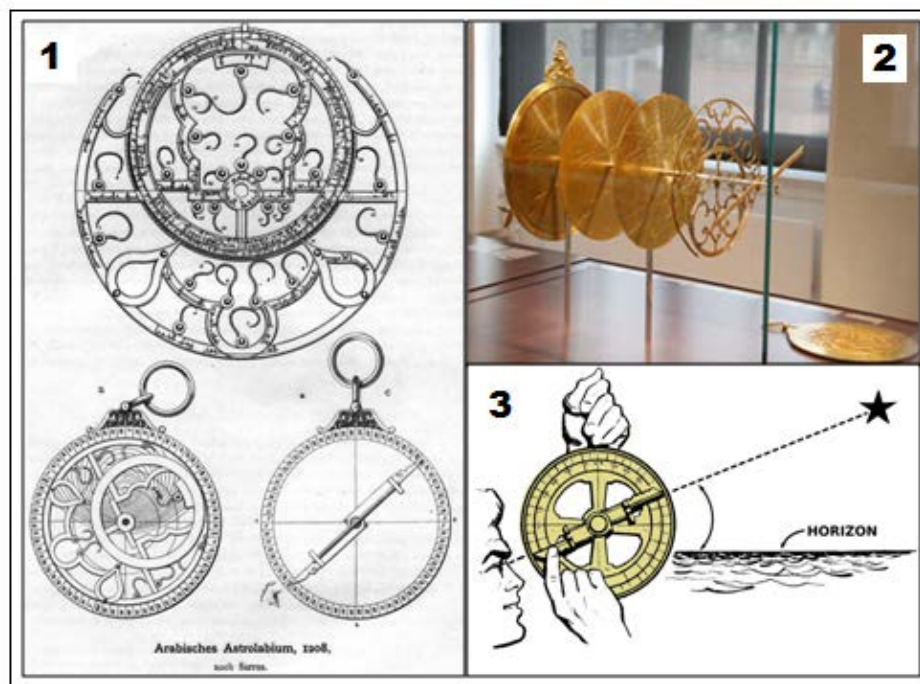
- [15] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/1440-eratosthenes-z-kyreny>  
<http://www.chronomag.cz/clanek/2009-10-10/kratka-historie-lidskeho-mereni-casu.html>
- [16] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Alexandrijsk%C3%A1\\_knihovna](https://cs.wikipedia.org/wiki/Alexandrijsk%C3%A1_knihovna)



**Obr. P17:** Armilární sféra je historický astronomický přístroj, který umožňoval znázorňovat vzájemnou polohu důležitých kružnic (ekliptika, nebeský rovník, obratníky a kolury) na nebeské sféře. Tento přístroj již popisoval Ptolemaios ve svém *Almagestu*. V dobách starověké astronomie byla armilární sféra nejdůležitějším přístrojem. Pomáhala tedy řešit především úkoly sférické astronomie. **Převzato a upraveno z [17].**

### Astronomie ve středověku a renesanci

03



**Obr. P18:** Astroláb je historický astronomický přístroj, který dříve astronomové, astrologové, navigátoři používali na určování a předpovídání poloh hvězd a Slunce, určování místního času podle místní zeměpisné délky a naopak, k zeměměřickým účelům a pro triangulaci. **(1)** Perský astroláb z roku 1208. **Převzato a upraveno z [18].**

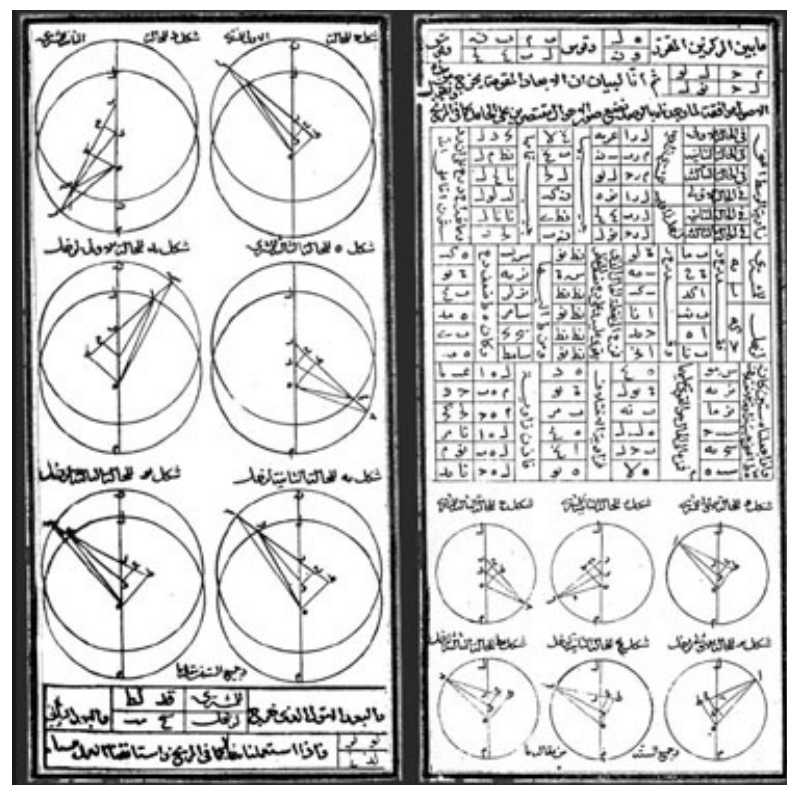
Zdroje:

[17] <https://www.dorotheum.com/en/departments/all-departments/historical-scientific-instruments-and-globes.html>

[18] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Astrol%C3%A1b>



**Obr. P19:** Představitelé arabské astronomie. (1) Syrský matematik a astronom al-Battání zvaný Albategnius. (2) Středověká rytina zachycující al-Battáního při své astronomické činnosti. **Převzato a upraveno z [19].**



**Obr. P20:** Názorná ukázka z díla od al-Battáního, kde jsou zachycena geometrická schémata, jejímž výsledkem bylo zdokonalení Ptolemaiovy geocentrické soustavy uspořádání planet. **Převzato z [20].**

Zdroje:

[19] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Al-Batt%C3%A1n%C3%AD>  
<https://www.dirjournal.com/blogs/great-muslim-scientists/>

[20] [http://www.columbia.edu/~gas1/project/visions/case1/finished/747\\_11\\_1.jpg](http://www.columbia.edu/~gas1/project/visions/case1/finished/747_11_1.jpg)





**Obr. P21:** (1) Středověká rytina zachycující George von Peurbacha při jeho astronomické činnosti. (2) Johannes Müller-Regiomontanus (3) Regiomontanovy astronomické tabulky – ukázka z díla. **Převzato a upraveno z [21].**

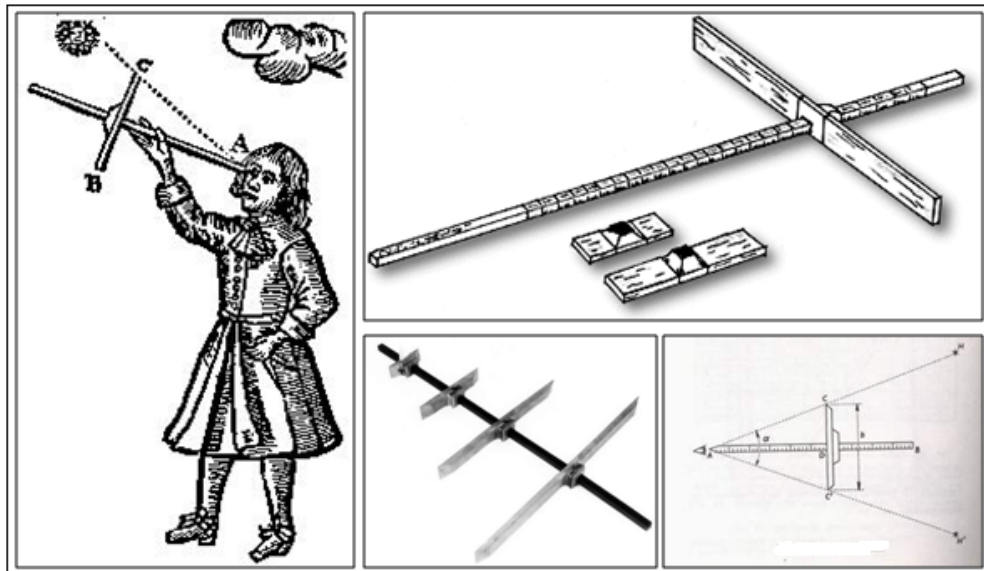


**Obr. P22:** Významní mořeplavci středověku. (1) Kryštof Kolumbus (2) Vasco de Gama (3) Amerigo Vespucci K orientaci na moři údajně využívali Regiomontanovy astronomické tabulky. (4) Santa Maria, Pinta, Niña. Lodě použité Kryštofem Kolumbem při jeho první cestě přes Atlantský oceán v roce 1492. **Převzato a upraveno z [22].**

Zdroje:

[21] <http://www.astronomy.ro/forum/viewtopic.php?p=125569>; <https://cs.wikipedia.org/>

[22] <https://cs.wikipedia.org/>



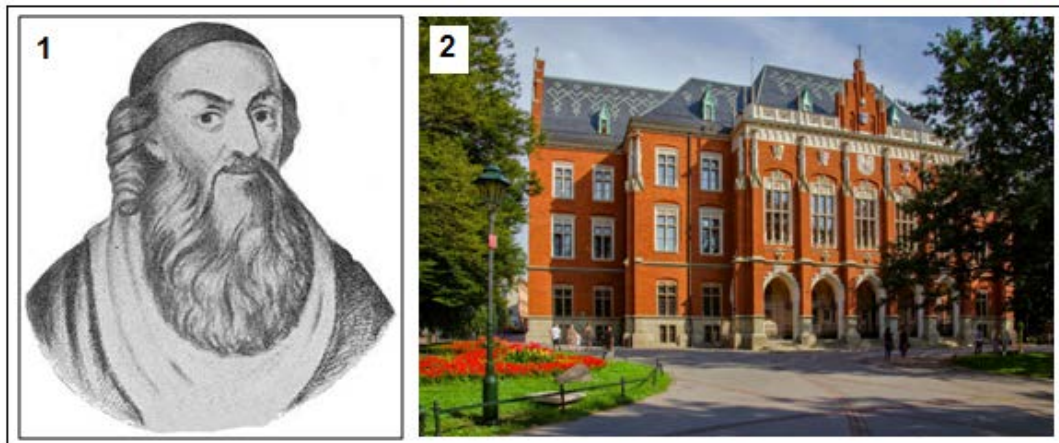
**Obr. P23:** Jakubova hůl je jednoduchý přístroj pro měření úhlů a historická navigační a astronomická pomůcka, která funguje na principu podobnosti trojúhelníků. Přístroj se skládá z tyče se stupnicí a kolným posuvným břevnem. **Převzato a upraveno z [23].**



**Obr. P24:** Mikuláš Koperník – tvůrce heliocentrismu. Názorná ukázka z jeho díla *O obězích nebeských sfér knih šest*. **Převzato a upraveno z [24].**

Zdroje:

- [23] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Jakubova\\_h%C5%AFI](https://cs.wikipedia.org/wiki/Jakubova_h%C5%AFI)  
[http://gis.zcu.cz/Stare\\_mapy/Web/mericke\\_postupy.html](http://gis.zcu.cz/Stare_mapy/Web/mericke_postupy.html)  
<http://geodezie-duchov.blog.cz/galerie/pristroje-16-a-17-stoleti-popis/obrazek/26785240>
- [24] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Mikul%C3%A1%C5%A1\\_Kopern%C3%ADk](https://cs.wikipedia.org/wiki/Mikul%C3%A1%C5%A1_Kopern%C3%ADk)  
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1517-o-obezich-nebeskych-sfer>



**Obr. P25:** (1) Wojtěch z Brudzewa – Koperníkův učitel astronomie (2) Jagellonská univerzita v Krakově. **Převzato a upraveno z [25].**



**Obr. P26:** Malba zachycující Koperníka při práci na svém heliocentrickém modelu. Hrad Warmijské kapituly v Olsztyně v severním Polsku. Zde Koperník prováděl astronomická pozorování, která mu napomáhala ke vzniku heliocentrické teorie. **Převzato a upraveno z [26].**

Zdroje:

- [25] [https://en.wikipedia.org/wiki/Albert\\_Brudzewski](https://en.wikipedia.org/wiki/Albert_Brudzewski)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Jagiellonian\\_University](https://en.wikipedia.org/wiki/Jagiellonian_University)  
 [26] [https://en.wikipedia.org/wiki/Castle\\_of\\_Warmian\\_Bishops\\_in\\_Olsztyn](https://en.wikipedia.org/wiki/Castle_of_Warmian_Bishops_in_Olsztyn)



**Obr. P27:** (1) Tycho Brahe - nejlepší pozorovatel lidským zrakem. (2) Johannes Kepler – zakladatel nebeské mechaniky. Převzato a upraveno z [27].



**Obr. P28:** (1) Kresba zachycující Tychona Brahe při pozorování supernovy SN 1572 v souhvězdí Kassiopeji. (2) Ukázka z jeho díla *O nové hvězdě*. Na obrázku je zakreslen záznam poloh jednotlivých hvězd v souhvězdí Kassiopeii včetně SN 1572. Převzato a upraveno z [9].

Zdroje:

- [25] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Tycho\\_Brahe](https://cs.wikipedia.org/wiki/Tycho_Brahe);  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Johannes\\_Kepler](https://cs.wikipedia.org/wiki/Johannes_Kepler)  
 [26] <https://physics.weber.edu/carroll/honors/tychosn.htm>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/SN\\_1572](https://en.wikipedia.org/wiki/SN_1572)



**Obr. P29:** (1) Uraniborg - Nebeský zámek), (2) Stjerneborg – Hvězdný zámek. Observatoře, ležící na švédském ostrově Hven. **Převzato a upraveno z [29].**



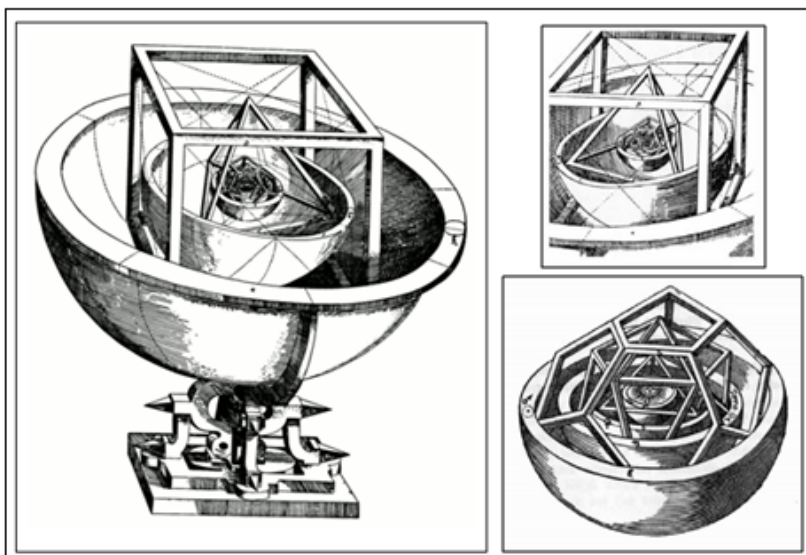
**Obr. P30:** Názorná ukázka z díla *Přístroje obnovené astronomie*. Tycho Brahe v tomto díle popisuje konstrukce a principy tehdejších astronomických pozorovacích přístrojů. Těmi byly vybaveny i jeho observatoře na ostrově Hven. **Převzato a upraveno z [30].**

Zdroje:

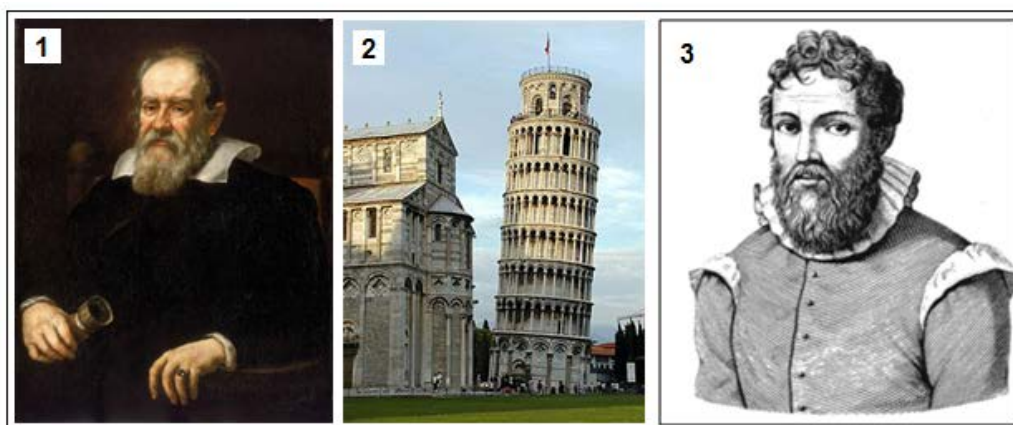
[29] <https://en.wikipedia.org/wiki/Uraniborg>; <https://en.wikipedia.org/wiki/Stjerneborg>

[30] <https://en.wikipedia.org/wiki/Uraniborg>

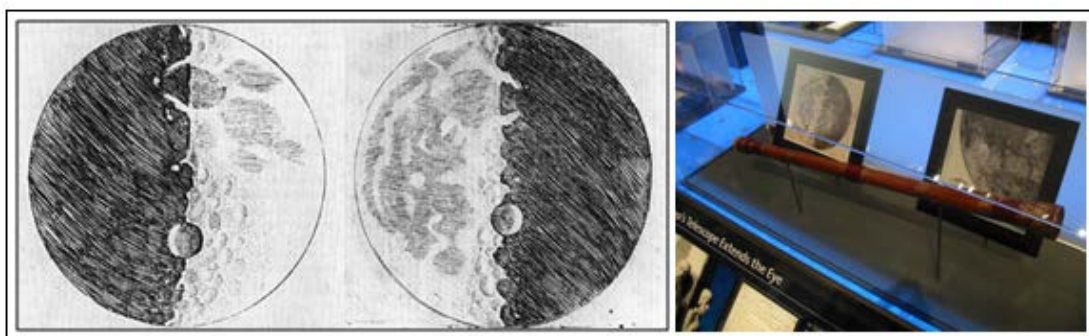
<http://www.pytheasbooks.com/shop/science/tycho-de-brahe-astronomiae-instauratae-mechanica/>



**Obr. P31:** Kosmografické mystérium (Mysterium cosmographicum) – Keplerův model sluneční soustavy. Převzato a upraveno z [31].



**Obr. P32:** (1) Galileo Galilei – legenda moderní vědy. (2) Šikmá věž v toskánském městě Pisa. Zde Galileo prováděl experimenty z mechaniky. (3) Ostilio Ricci – Galileův učitel matematiky. Převzato a upraveno z [32].



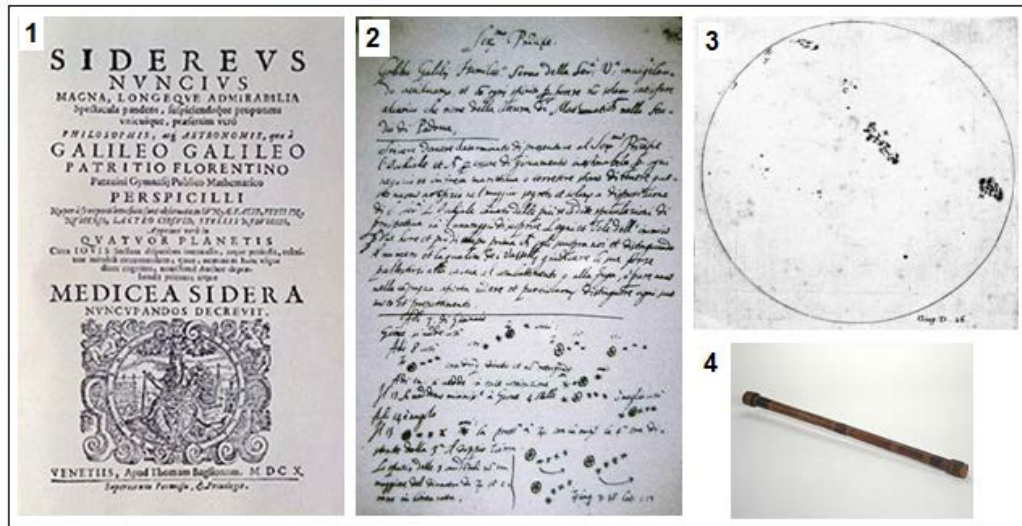
**Obr. P33:** Detailní nákresy povrchu měsíce z díla *Hvězdný posel*. Převzato a upraveno z [33].

Zdroje:

[31] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Johannes\\_Kepler](https://cs.wikipedia.org/wiki/Johannes_Kepler)

[32] [http://www.wikiwand.com/es/Galileo\\_Galilei](http://www.wikiwand.com/es/Galileo_Galilei); <https://cs.wikipedia.org/wiki/Pisa>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Ostilio\\_Ricci](https://en.wikipedia.org/wiki/Ostilio_Ricci)

[33] <http://forum.kosmonautix.cz/forum/viewtopic.php?f=77&t=1089&start=20>



**Obr. P34:** (1) Titulní strana z díla *Hvězdný posel*. (2) Galileův záznam poloh čtyř Jupiterových měsíců v díle *Hvězdný posel*. (3) Galileův záznam slunečních skvrn. (4) Jeden z Galileových dalekohledů. Převzato a upraveno z [34].



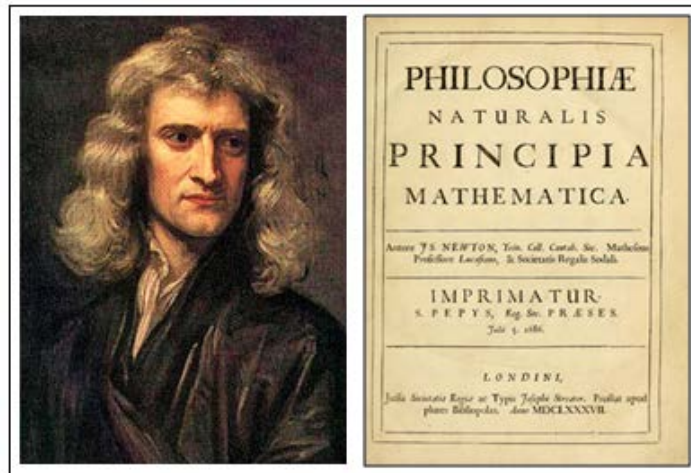
**Obr. P35:** (1) Titulní strana z díla *Dialog o dvou hlavních světových soustavách Ptolemaiově a Kopernikově*. (2) Sluneční soustava v představách Galilea. (3) Malby Joseph-Nicolase Robert-Fleuryho a Cristiana Bantiho. Galileo čelí římské inkvizici. Převzato a upraveno z [35].

Zdroje:

[34] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Galileo\\_Galilei](https://cs.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei)

[32] [https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo\\_Galilei](https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei)

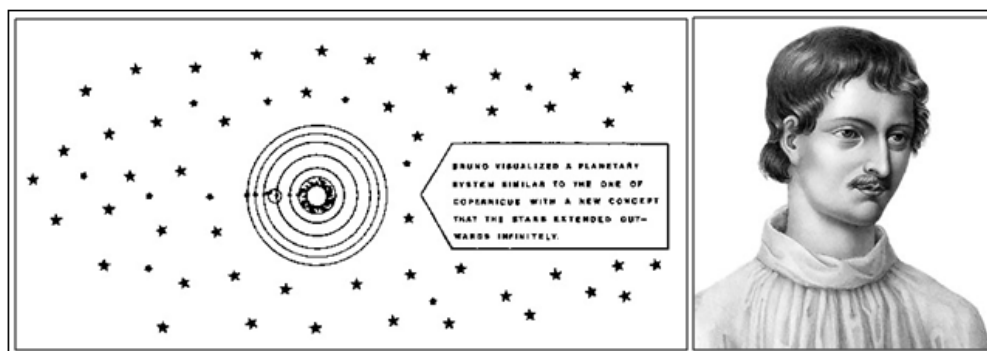
<https://theartstack.com/artist/joseph-nicolas-robot-fleury/galileo-before-holy-off>



**Obr. P36:** Isaac Newton - zakladatel klasické mechaniky. Titulní strana jeho díla *Matematické základy přírodní filozofie*. Převzato a upraveno z [36].



**Obr. P37:** (1) Giovanni Domenico Cassini (2) Ole Christensen Römer  
Převzato a upraveno z [37].



**Obr. P38:** Giordano Bruno a jeho pojetí vesmíru. Převzato a upraveno z [38].

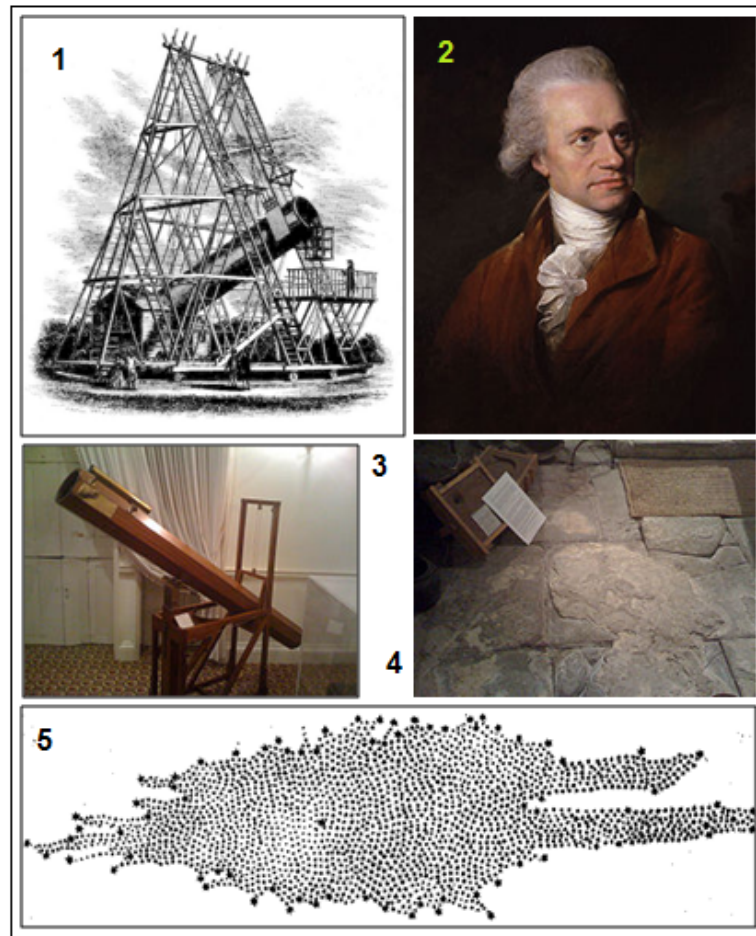
Zdroje:

[36] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Isaac\\_Newton](https://cs.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton)

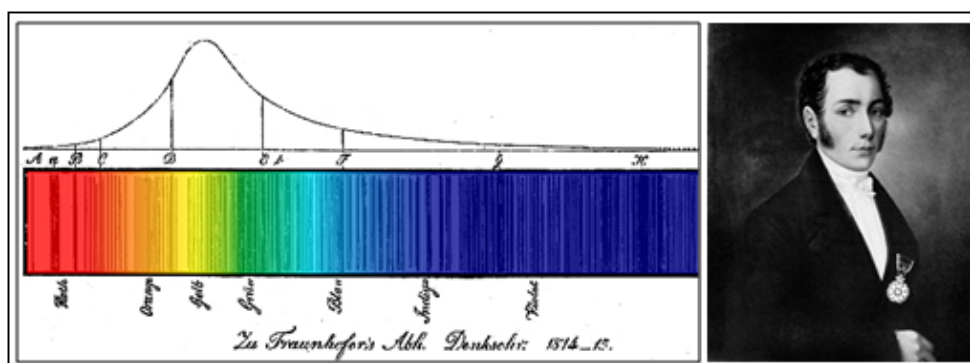
[37] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Giovanni\\_Domenico\\_Cassini](https://cs.wikipedia.org/wiki/Giovanni_Domenico_Cassini)  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Ole\\_R%C3%B8mer](https://cs.wikipedia.org/wiki/Ole_R%C3%B8mer)

[38] <http://astronomia.zcu.cz/astromove/bruno/2479-giordano-bruno>





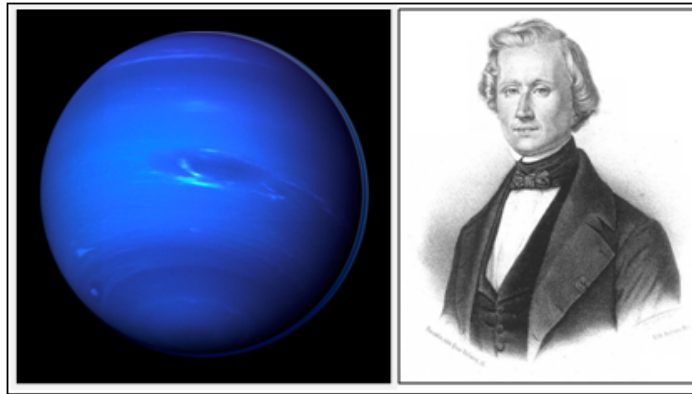
**Obr. P39:** (1) Dalekohled s ohniskovou vzdáleností 12 m, kterým Herschel 28. srpna 1789 objevil Saturnův měsíc Enceladus. (2) Frederick William Herschel (3) Replika teleskopu, se kterým Herschel objevil planetu Uran. (4) Místo v prostorách muzea v Bath, kde se Herschelovi rozlil roztavený kov při výrobě velkého zrcadla. (5) Herschelova představa tvaru naší Galaxie. **Převzato a upraveno z [39].**



**Obr. P40:** Joseph von Fraunhofer objevil ve spektru Slunce a hvězd spektrální čáry. **Převzato a upraveno z [40].**

Zdroje:

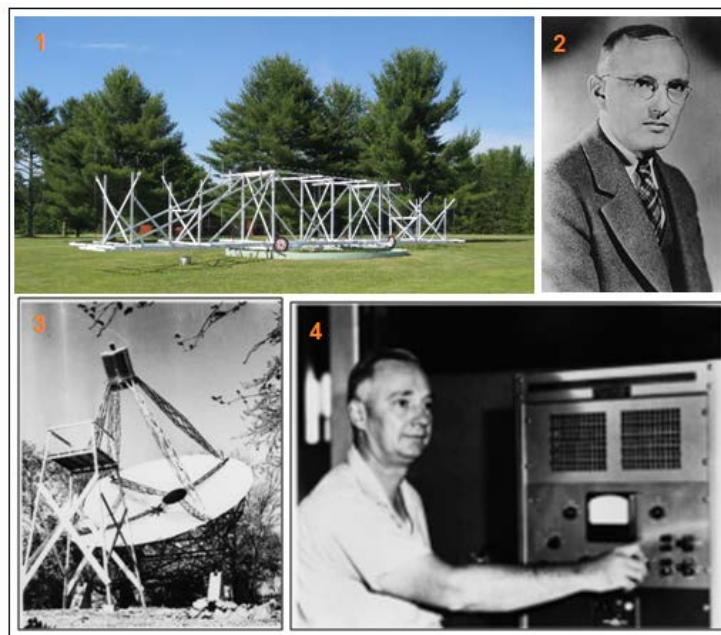
- [39] [https://cs.wikipedia.org/wiki/William\\_Herschel](https://cs.wikipedia.org/wiki/William_Herschel)  
 [40] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Joseph\\_von\\_Fraunhofer](https://cs.wikipedia.org/wiki/Joseph_von_Fraunhofer)  
<http://www.physics.muni.cz/astrohistorie/node35.html>



**Obr. P41:** Urbain Le Verrier předpověděl na základě svých výpočtů pozici planety Neptun. **Převzato a upraveno z [41].**



**Obr. P42:** Významní matematici. (1) Pierre Simon Laplace, (2) Joseph Louis Lagrange, (3) William Rowan Hamilton, (4) Carl Friedrich Gauss. **Převzato a upraveno z [42].**



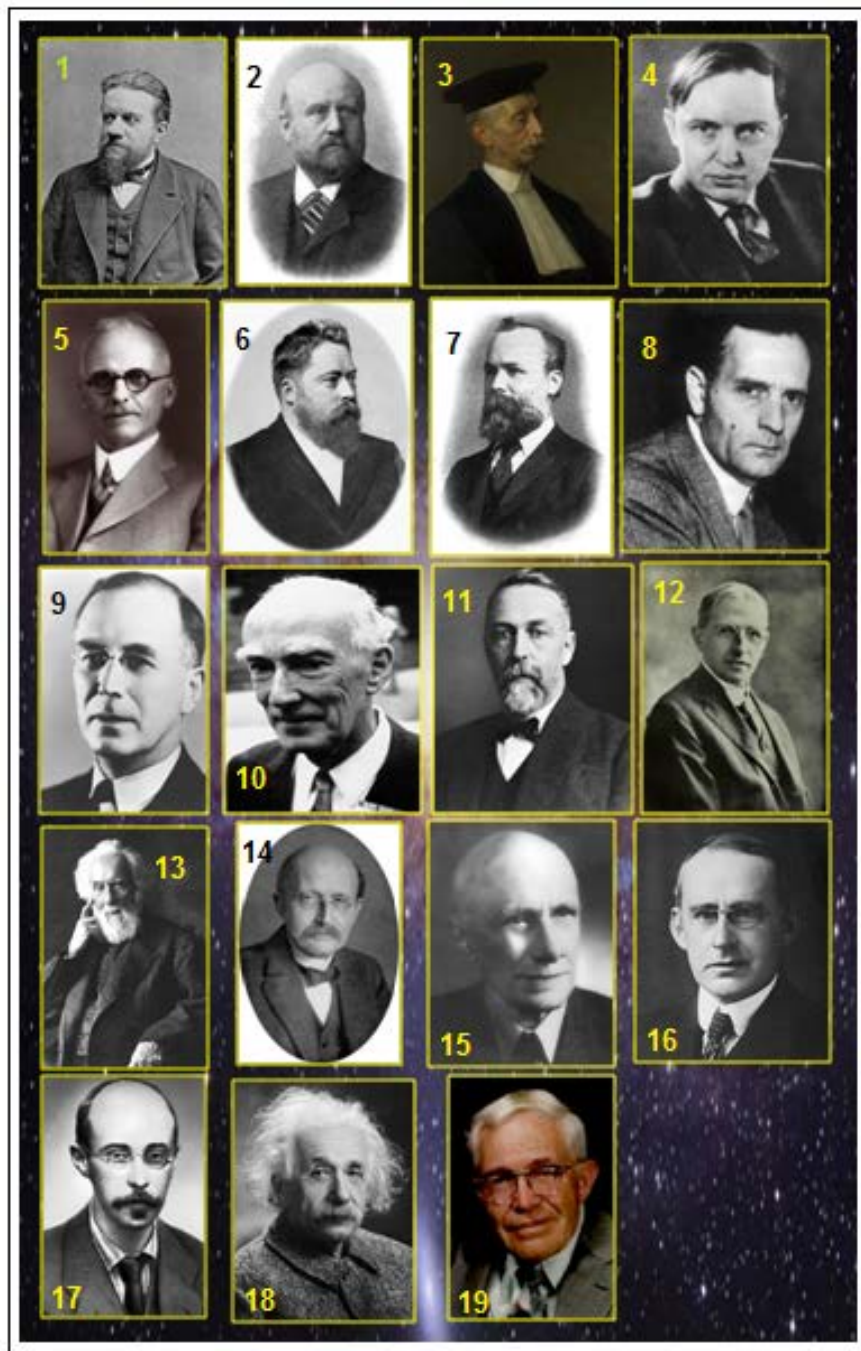
**Obr. P44:** (1) Replika Janského antény. (2) Karl Guthe Jansky – průkopník v oboru radioastronomie. (3,4) Grote Reber a jeho radioteleskop. **Převzato a upraveno z [44].**

Zdroje:

[41] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Urbain\\_Le\\_Verrier](https://cs.wikipedia.org/wiki/Urbain_Le_Verrier)

[42] <https://cs.wikipedia.org/>

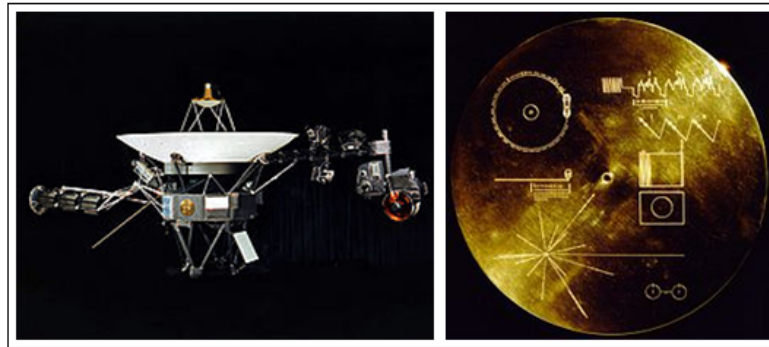
[44] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Grote\\_Reber;](https://cs.wikipedia.org/wiki/Grote_Reber;)  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Karl\\_Guthe\\_Jansky](https://cs.wikipedia.org/wiki/Karl_Guthe_Jansky)



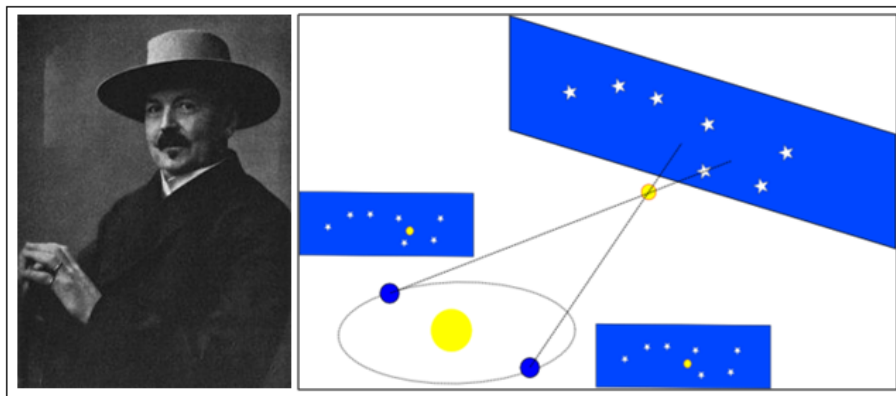
**Obr. P43:** (1) Johann August Gylden, (2) Hugo von Seeliger, (3) Jacobus C. Kapteyn, (4) Harlow Shapley, (5) Heber Doust Curtis, (6) J. Scheiner, (7) W. Maunder, (8) Edwin P. Hubble, (9) Bertil Lindblad, (10) Jan H. Oort, (11) Ejnar Hertzsprung, (12) Henry Norris Russell, (13) sir William Huggins, (14) Max Planck, (15) Czeslaw Bialobrzski, (16) Arthur Stanley Eddington, (17) Alexandr Alexandrovič Friedmann, (18) Albert Einstein, (19) Clyde W. Tombaugh. **Převzato a upraveno z [43].**

Zdroje:

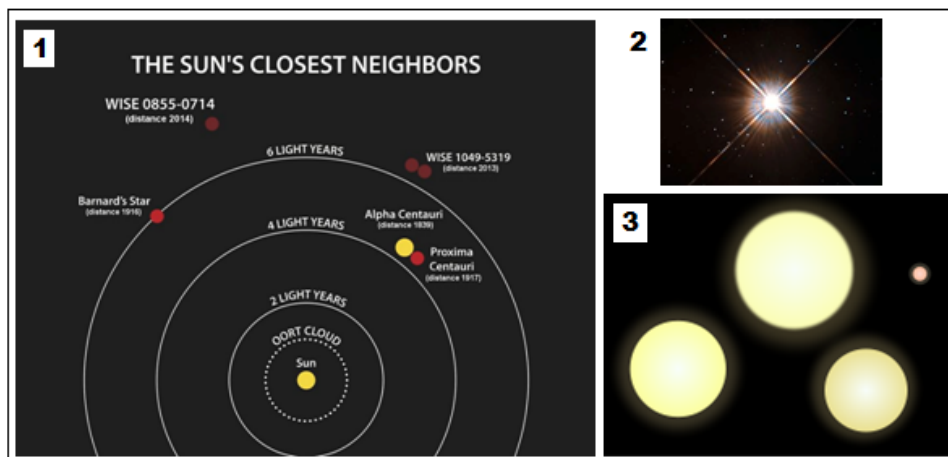
- [43] <https://cs.wikipedia.org/>  
<https://en.wikipedia.org/>  
<http://www.aldebaran.cz/famous/index.php>



**Obr. P45:** Vesmírná sonda Voyager 1, která byla vypuštěna v roce 1977. Zlatá deska s poselstvím případným jiným světům. **Převzato a upraveno z [45].**



**Obr. P46:** Carl Vilhem Ludwig Charlier. Navrhl astronomickou jednotku, zvanou siriometr. **Převzato a upraveno z [46].**



**Obr. P47:** (1) Proxima Centauri a její poloha vzhledem ke Slunci. (2) Proxima Centauri na snímku pořízeném Hubbleovým vesmírným dalekohledem. (3) Srovnání velikostí hvězd zleva – Slunce, Alfa Centauri A, Alfa Centauri B, Proxima Centauri. **Převzato a upraveno z [47].**

Zdroje:

[45] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Voyager\\_1](https://cs.wikipedia.org/wiki/Voyager_1)

[46] [https://en.wikipedia.org/wiki/Carl\\_Charlier](https://en.wikipedia.org/wiki/Carl_Charlier)

[47] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Proxima\\_Centauri](https://cs.wikipedia.org/wiki/Proxima_Centauri)



**Obr. P48:** Počátky radarové astronomie. Dr. Albert. Hoyt Taylor navrhl pokusy založené na vyslání soustředěného úzkého kužele rozhlasových vln, které by po odrazu byly zachyceny citlivým rádiovým přijímačem. **Převzato z [48].**

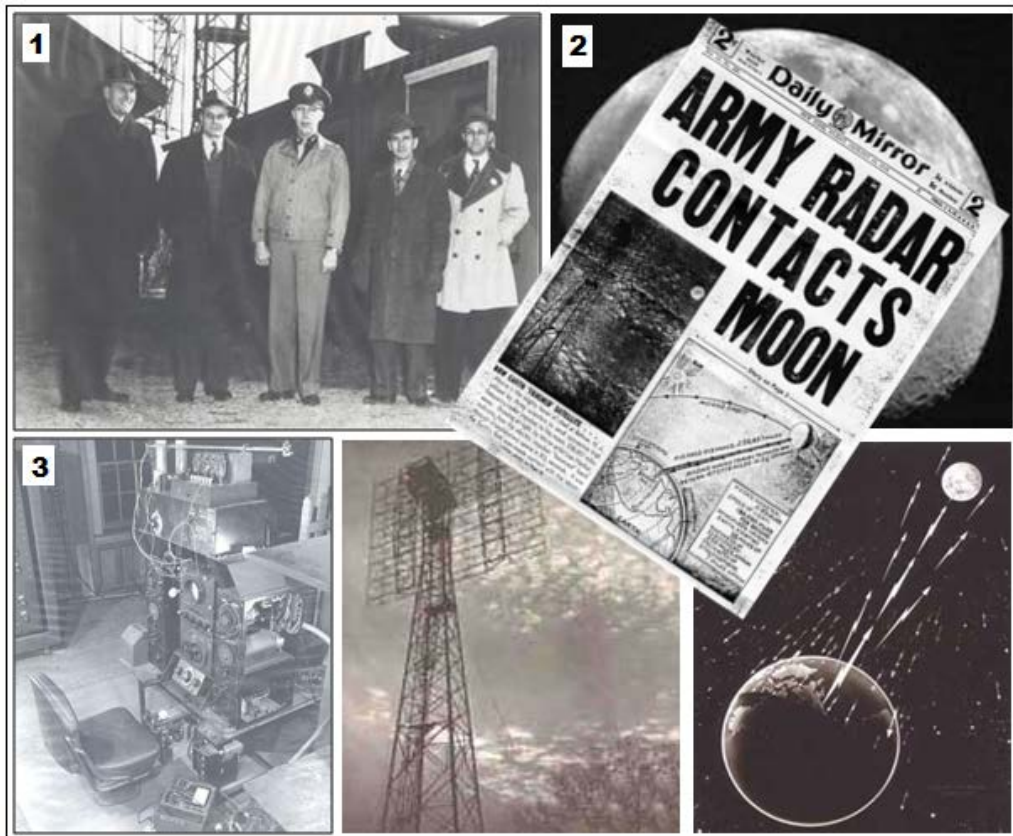


**Obr. P49:** John Hibbett DeWitt – zakladatel projektu Diana. **Převzato a upraveno z [49].**

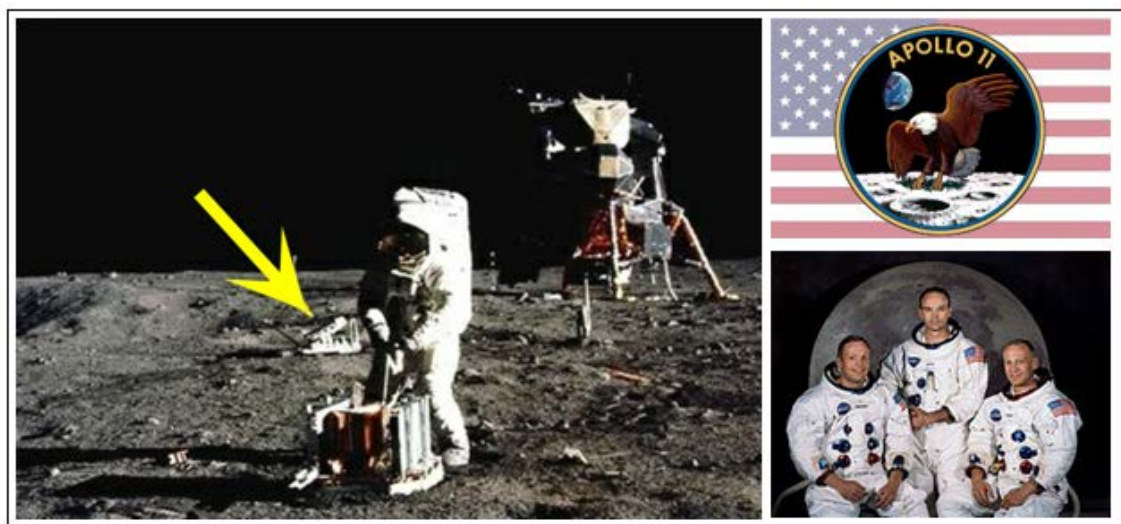
Zdroje:

[48] [http://www.army.cz/images/id\\_8001\\_9000/8753/radar/f10.htm](http://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/f10.htm)

[49] <https://aas.org/obituaries/john-hibbett-dewitt-jr-1906-1999>



**Obr. P50:** (1) John Hibbett DeWitt se spolupracovníky z projektu Diana. (2) První úspěšné výsledky v rádiovém průzkumu Měsíce byly hlavním tématem na titulních stránkách denního tisku. (3) Výkonný radarový vysílač umožňoval generovat signál o frekvenci 111,5 MHz. Čtvercová vysílací a přijímací anténa byla umístěna na 30 metrovém stožáru. **Převzato a upraveno z [50].**



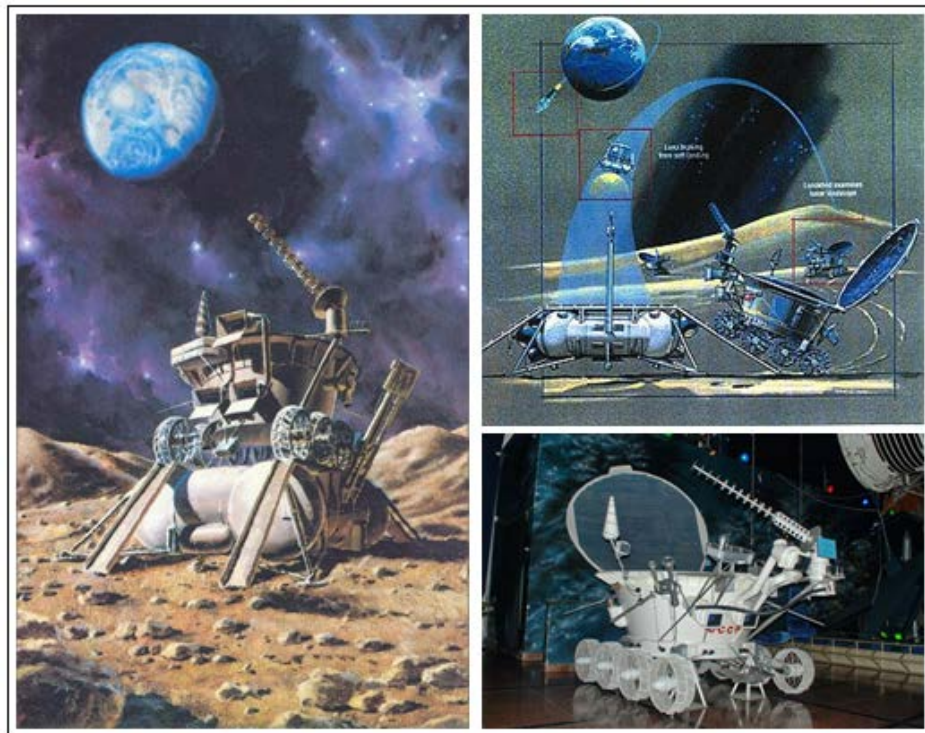
**Obr. P51:** Vesmírný let amerického programu Apollo 11. Astronauti - Neil Armstrong, Michael Collins, Buzz Aldrin. První instalace koutového odražeče na Měsíci. **Převzato a upraveno z [51].**

Zdroje:

[50] [http://ethw.org/Project\\_Diana](http://ethw.org/Project_Diana)

[51] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Apollo\\_11](https://cs.wikipedia.org/wiki/Apollo_11)

<http://fyzmatik.pise.cz/296-zrcatka-koutove-odrazece-na-mesici.html>



**Obr. P52:** Sovětská kosmická mise Luna 17. Legendární měsíční vozítko Lunochod 1. Ve výbavě vozítka byla celá řada technických přístrojů včetně laserového odražeče francouzské výroby. **Převzato a upraveno z [52].**



**Obr. P53:** Vesmírný let amerického programu Apollo 14. Astronauti - Alan Shepard, Stuart Roosa, Edgar Mitchell. Jeden z úkolů této posádky byla instalace koutového laserového odražeče v oblasti měsíční kráterové formace Fra Mauro **Převzato a upraveno z [53].**

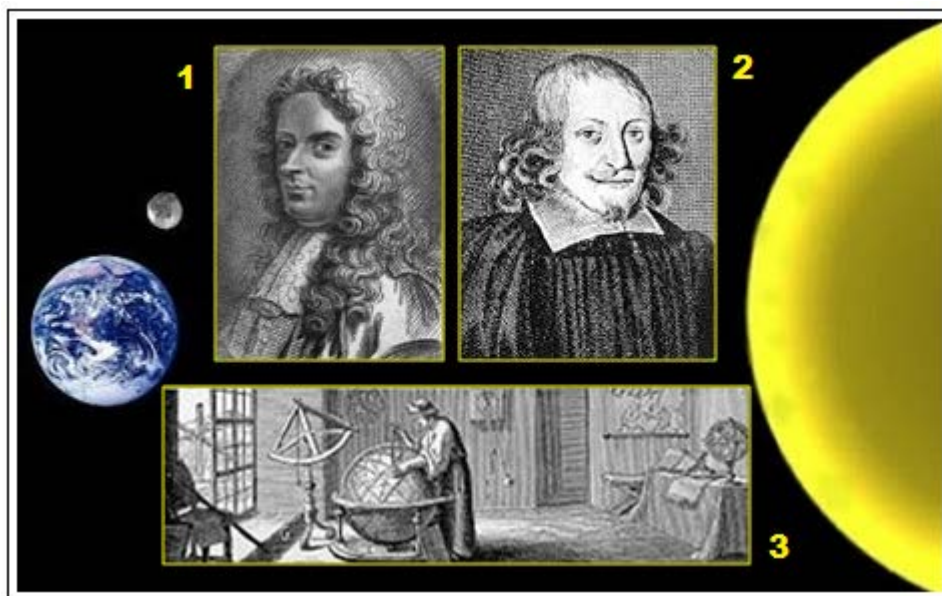
Zdroje:

[52] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Lunochod>

[53] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Apollo\\_14#Pos.C3.A1dka](https://cs.wikipedia.org/wiki/Apollo_14#Pos.C3.A1dka)



**Obr. P54:** Vesmírný let amerického programu Apollo 15. Astronauti - David Scott, Alfred Worden, James Irwin. Hlavním cílem této posádky bylo nalézt nejstarší horninu Měsíce zvanou „bílý kámen“. Během rekordních tří dnů na Měsíci nasbírali na 70 kg hornin, k čemuž jim pomohl poprvé užitý měsíční automobil „Rover“. V jeho technické výbavě byl opět laserový koutový odražeč. Po skončení expedice byl společně s vozidlem umístěn u úpatí měsíčního pohoří Apenin. **Převzato a upraveno z [54].**



**Obr. P55:** Zpřesňování astronomické jednotky. (1) Giovanni Domenico Cassini. (2) Jean Picard (3) Jean Richer při práci týkající se měření polohy planety Mars. **Převzato a upraveno z [55].**

Zdroje:

[54] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Apollo\\_15](https://cs.wikipedia.org/wiki/Apollo_15)

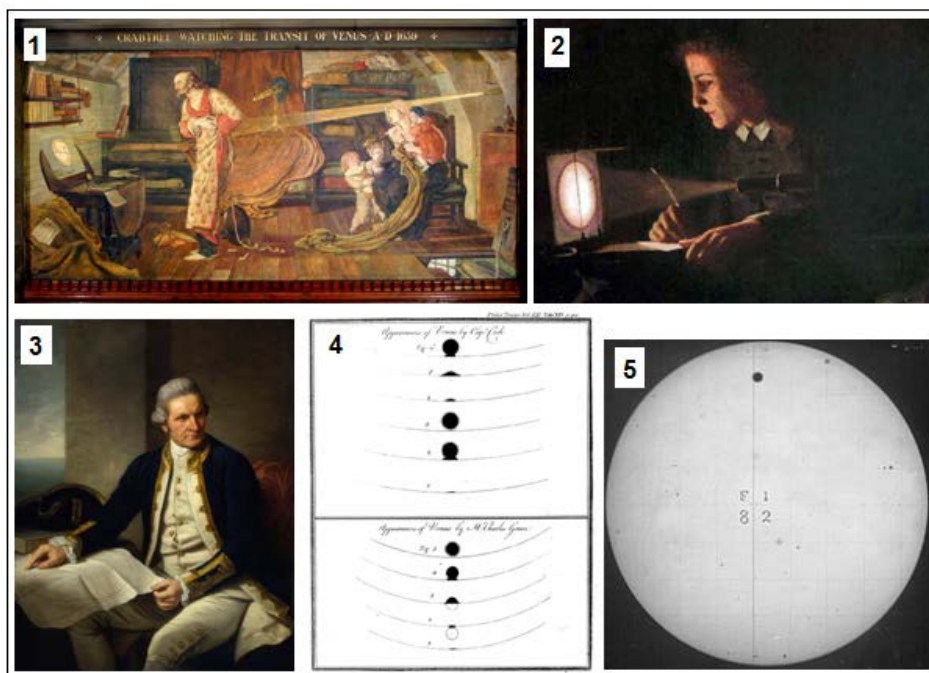
[55] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CD009-Richer\\_Guyane.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CD009-Richer_Guyane.jpg)

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Figure\\_de\\_la\\_Terre\\_et\\_gravitation\\_universelle](https://fr.wikipedia.org/wiki/Figure_de_la_Terre_et_gravitation_universelle)





**Obr. P56:** Edmund Halley a kometa, která je ze Země vidět každých 75-76 let. Je nazvaná po něm, neboť jako první předpověděl její návrat v roce 1758. Edmund Halley je též autorem důmyslné metody k určení astronomické jednotky, založené na přechodu planety Venuše přes sluneční disk. **Převzato a upraveno z [56].**



**Obr. P57:** (1) Freska zachycující jak William Crabtree pozoruje přechod Venuše roku 1639. (2) Jeremiah Horrocks při prvním pozorování přechodu Venuše roku 1639. Obraz Slunce se promítá přes dalekohled na stínítko. (3) James Cook (4) Přechod Venuše přes sluneční disk, jak jej zakreslili James Cook a Charles Green na Tahiti v roce 1769. (5) Přechod Venuše roku 1882. **Převzato a upraveno z [57].**

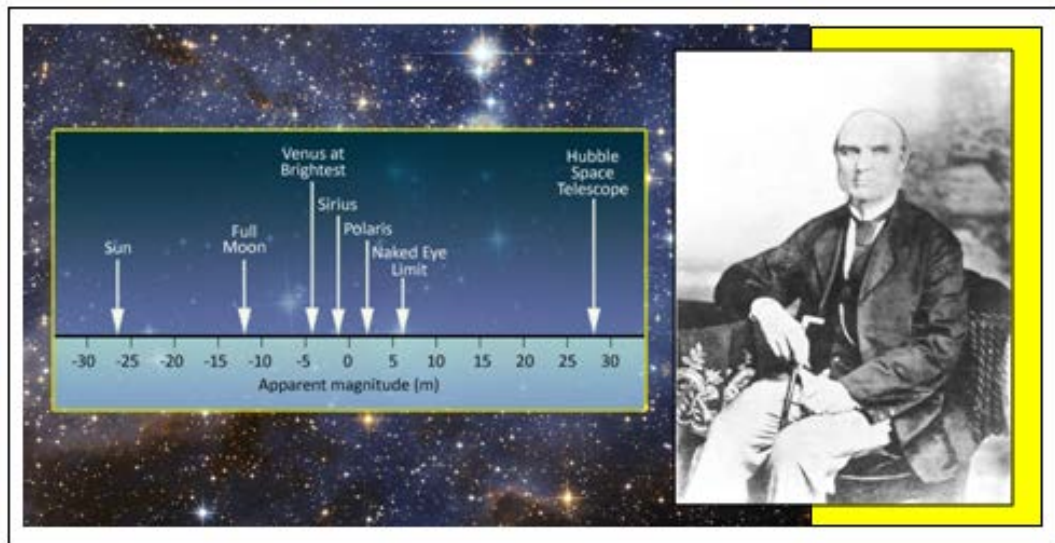
Zdroje:

[56] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Edmund\\_Halley](https://cs.wikipedia.org/wiki/Edmund_Halley)

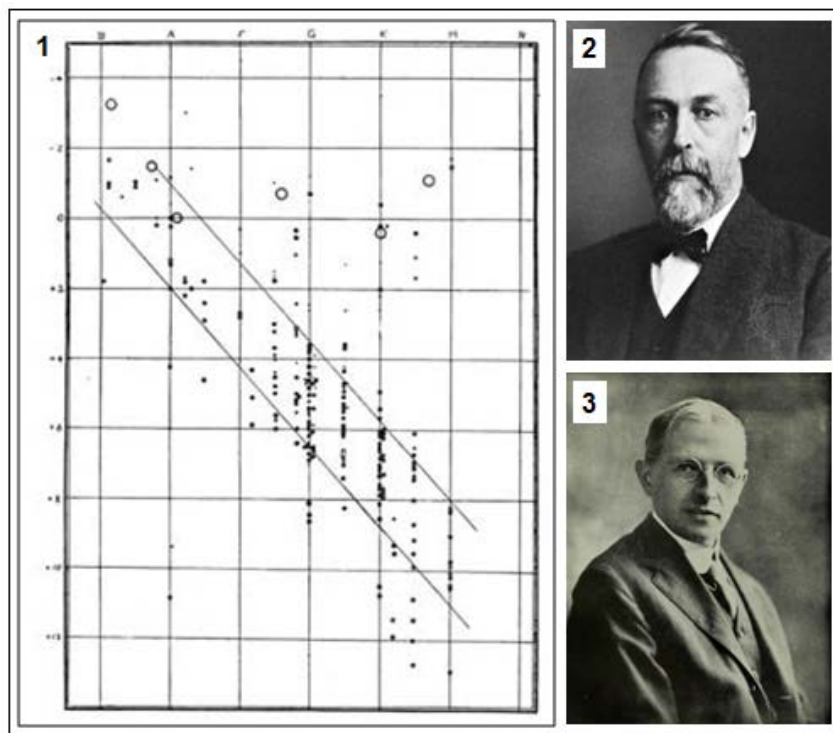
[57] [https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99echod\\_Venu%C5%A1e](https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99echod_Venu%C5%A1e)

## Spektroskopické charakteristiky hvězd

07



**Obr. P58:** Norman Robert Pogson – jeho charakteristická rovnice vyjadřuje vztah mezi pozorovanou hvězdnou velikostí a jasností pozorovaných kosmických objektů. **Převzato a upraveno z [58].**

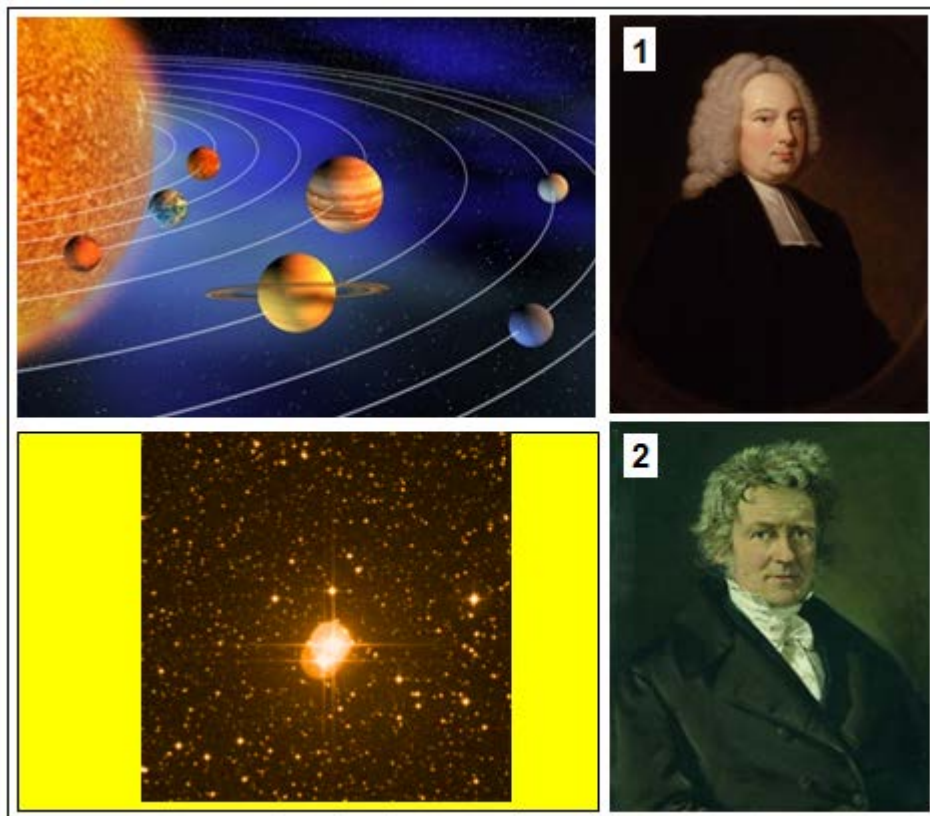


**Obr. P59:** (1) První Hertzsprungův – Russellův diagram z roku 1914. (2) Ejnar Hertzsprung, (3) Henry Norris Russell. **Převzato a upraveno z [59].**

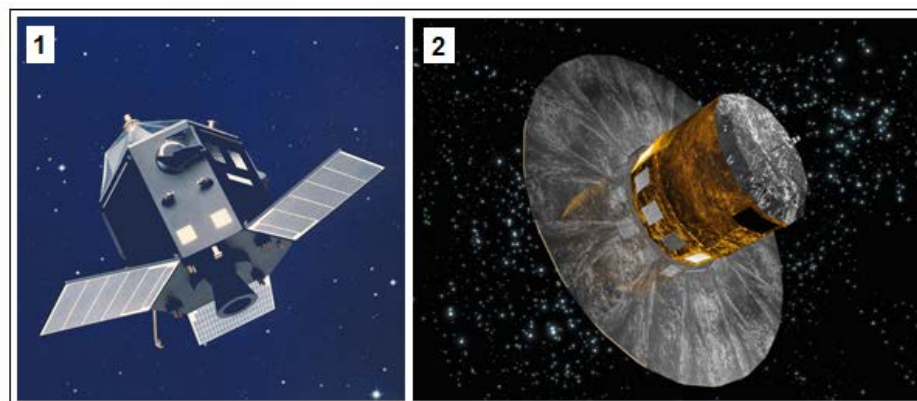
Zdroje:

[58] [https://en.wikipedia.org/wiki/N.\\_R.\\_Pogson](https://en.wikipedia.org/wiki/N._R._Pogson)

[59] <http://hvezdy.astro.cz/diagram/18-prvni-hr-diagram>



**Obr. P60:** (1) James Bradley. Jeho objev aberace byl definitivním důkazem heliocentrické soustavy. (2) Friedrich Wilhelm Bessel. V roce 1838 jako první člověk změřil paralaxu hvězdy (61 Cygni) a i vypočítal její vzdálenost od Země. **Převzato a upraveno z [60].**



**Obr. P61:** (1) Satelit HIPPARCOS (High Precision Parallax Collecting Satellite). Jeho činností bylo měření hvězdných paralax a vlastních pohybů hvězd. (2) Sonda GAIA (Global Astrometry Interferometry for Astrophysics). Jejím cílem je změřit vzdálenosti asi miliardy hvězd v naší Galaxii a v galaxiích patřících do místní kupy. **Převzato a upraveno z [61].**

Zdroje:

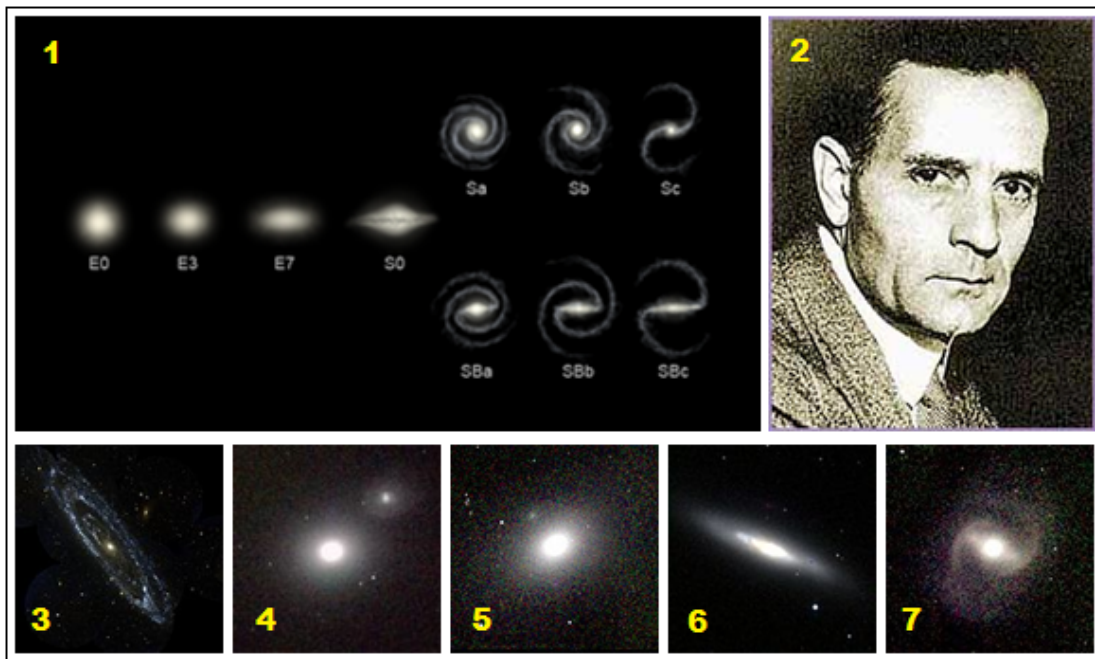
[60] [https://cs.wikipedia.org/wiki/James\\_Bradley](https://cs.wikipedia.org/wiki/James_Bradley)

[https://cs.wikipedia.org/wiki/Friedrich\\_Wilhelm\\_Bessel](https://cs.wikipedia.org/wiki/Friedrich_Wilhelm_Bessel)

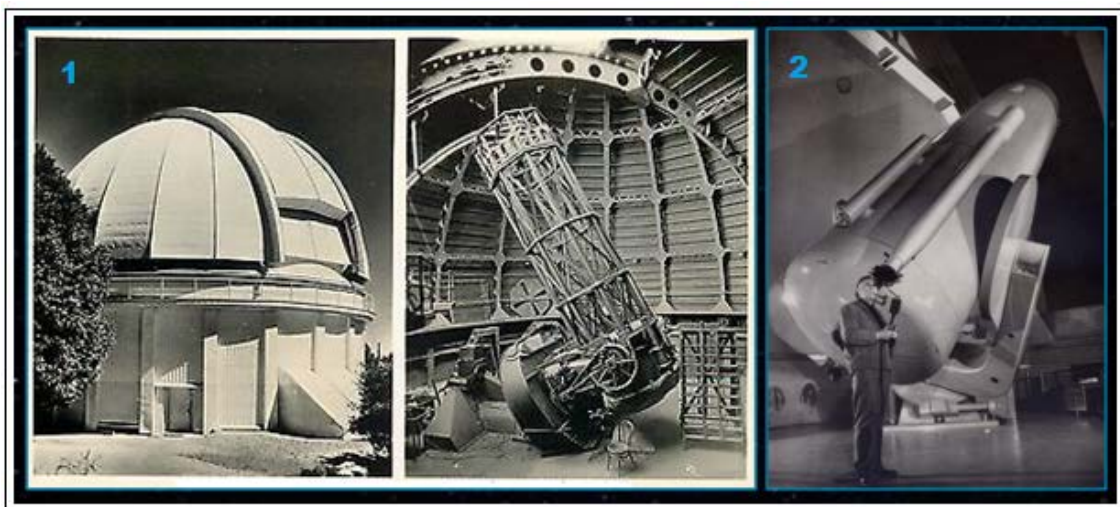
[61] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Hipparcos>; [https://en.wikipedia.org/wiki/Gaia\\_\(spacecraft\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Gaia_(spacecraft))

## Galaxie a jejich vzdálenosti

09



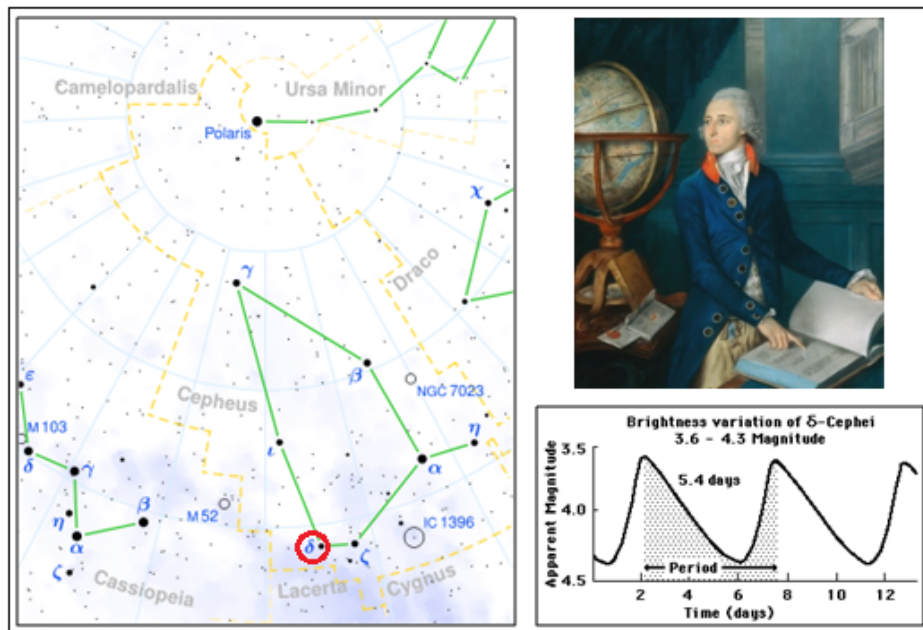
**Obr. P62:** (1;2) Edwin Powell Hubble a jeho klasifikace galaxií. (3) Spirální galaxie M31. (4) Eliptická galaxie M60. (5) Čočková galaxie M86. (6) Nepravidelná galaxie M82. (7) Spirální galaxie s příčkou M91. **Převzato a upraveno z [62].**



**Obr. P63:** (1) Observatoř Mount Wilson v Kalifornii. Stopalcový (2,5metrový) Hookerův teleskop. (2) Slavný dvousetpalcový (pětimetrový) teleskop na observatoři Palomar v Kalifornii. **Převzato a upraveno z [63].**

Zdroje:

- [62] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Edwin\\_Hubble](https://cs.wikipedia.org/wiki/Edwin_Hubble)  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Hubbleova\\_klasifikace\\_galaxi%C3%AD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Hubbleova_klasifikace_galaxi%C3%AD)
- [63] <http://vintagenational.tumblr.com/page/10>  
<https://www.rubylane.com/item/183041-29-0439GG-4/1930s-Los-Angeles-California-Mount-Wilson>



**Obr. P64:** První objevenou cefeidou byla hvězda  $\delta$  Cephei ze souhvězdí Cefeida, jejíž proměnlivost zaznamenal anglický astronom John Goodricke v roce 1784. V současnosti její perioda pulsace byla změřena na 5,4 dne. **Převzato a upraveno z [64].**



**Obr. P65:** (1) Henrietta Swan Leavittová objevila přes dva a půl tisíce proměnných hvězd, ze kterých později šestnáct označila jako cefeidy. První fotografie zachycuje skupinu žen (včetně Leavittové) při práci na katalogizaci zářivosti hvězd zaznamenaných na fotografických deskách. (2) Leavittová při práci u svého stolu v Harvardově observatoři. (3) Malé Magellanovo mračno. **Převzato a upraveno z [65].**

Zdroje:

[64] [https://en.wikipedia.org/wiki/John\\_Goodricke](https://en.wikipedia.org/wiki/John_Goodricke)

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Astro/cepheid.html>

[65] [https://en.wikipedia.org/wiki/Henrietta\\_Swan\\_Leavitt](https://en.wikipedia.org/wiki/Henrietta_Swan_Leavitt)

[https://cs.wikipedia.org/wiki/Mal%C3%BD\\_Magellan%C5%AFv\\_oblak](https://cs.wikipedia.org/wiki/Mal%C3%BD_Magellan%C5%AFv_oblak)



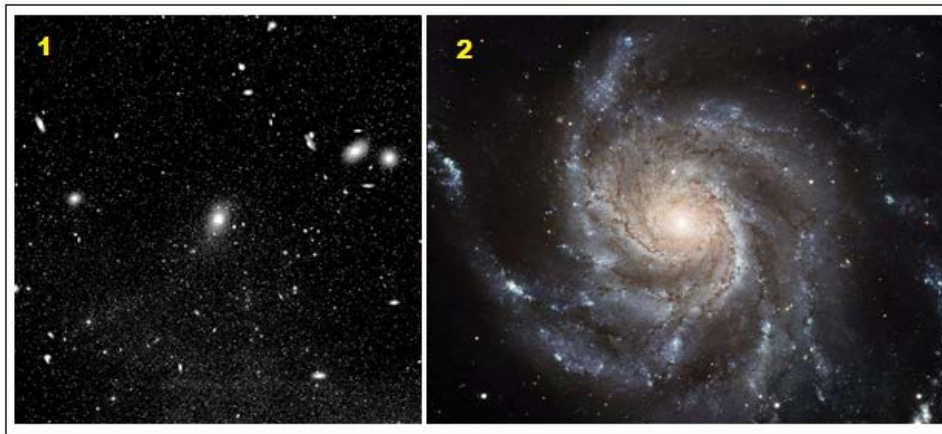
**Obr. P66:** První, kdo výrazně využil potenciál cefeid pro určování vzdálenosti blízkých galaxií, byl Edwin Hubble. V roce 1923 pomocí Hookerova teleskopu zkoumal mlhovinu v Andromedě a ke svému překvapení zjistil, že je složena z mnoha hvězd. Nalezl zde i cefeidy, pomocí kterých odhadl vzdálenost. Nemohlo jít o hvězdokupu z naší Galaxie, ale o objekt daleko za hranicemi Mléčné dráhy. Edwin Hubble tak jako první objevil cizí galaxii (M 31) a uvědomil si, že Mléčná dráha není celým vesmírem. **Převzato a upraveno z [66].**



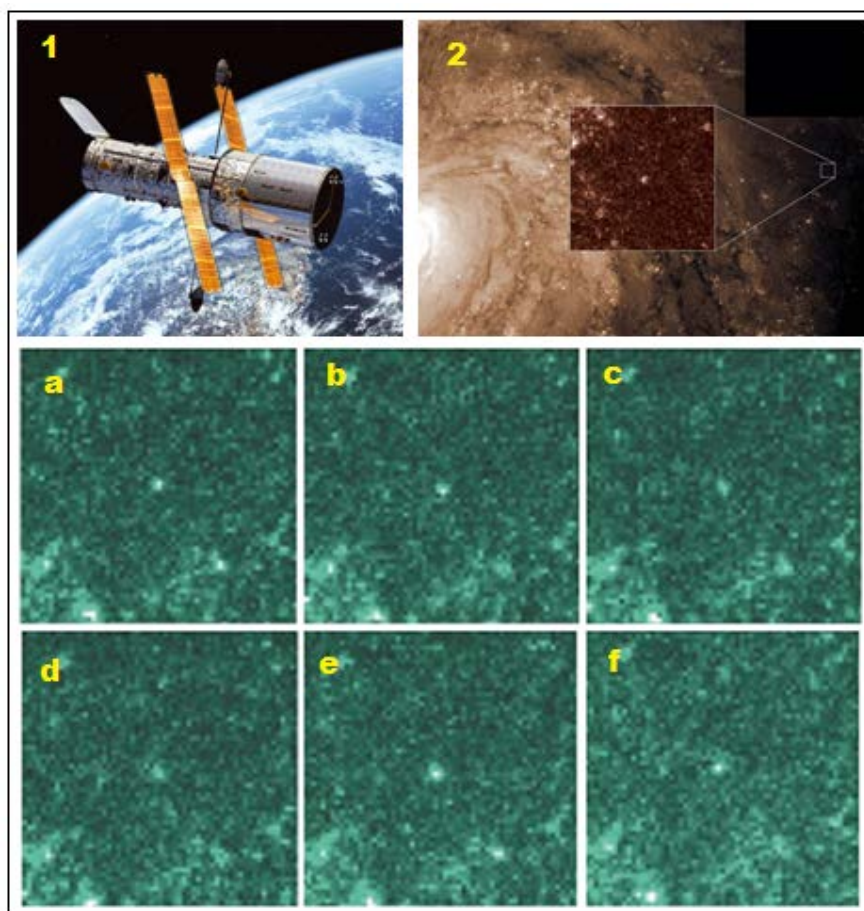
**Obr. P67:** Walter Baade. Jako prvním se podařilo rozlišit jednotlivé hvězdy v centrálních oblastech galaxie M 31 v Andromedě (obr. vpravo). **Převzato a upraveno z [67].**

Zdroje:

- [66] [http://www.aldebaran.cz/famous/people/Hubble\\_Edwin.php](http://www.aldebaran.cz/famous/people/Hubble_Edwin.php)  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Galaxie\\_v\\_Andromed%C4%9B](https://cs.wikipedia.org/wiki/Galaxie_v_Andromed%C4%9B)  
<http://www.u-s-history.com/pages/h1722.html>
- [67] <http://www.gettyimages.co.uk/photos/walter-baade?excludenudity=true&sort=mostpopular&mediatype=photography&phrase=walter%20baade>



**Obr. P68:** (1;2) Spirální galaxie M100 ve velkém shluku galaxií v souhvězdí Panny. Převzato a upraveno z [68].

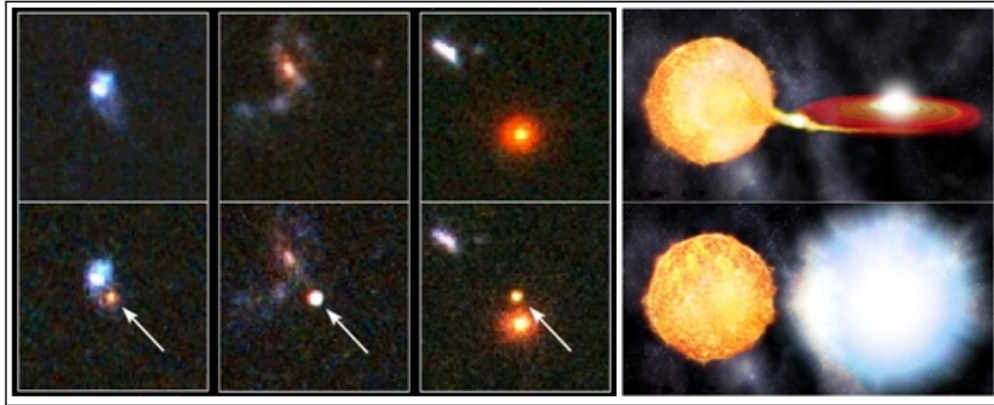


**Obr. P69:** (1) Hubbleův kosmický dalekohled. (2) Jedna z kamer Hubbleova kosmického dalekohledu sleduje cefeidu v galaxii M100. Jednotlivé snímky dané cefeidy v galaxii M100, které pořídila jedna z kamer Hubbleova kosmického dalekohledu. Cefeida se nachází uprostřed každého rámečku. Je vidět, že se jasnost hvězdy v čase mění. Převzato a upraveno z [69].

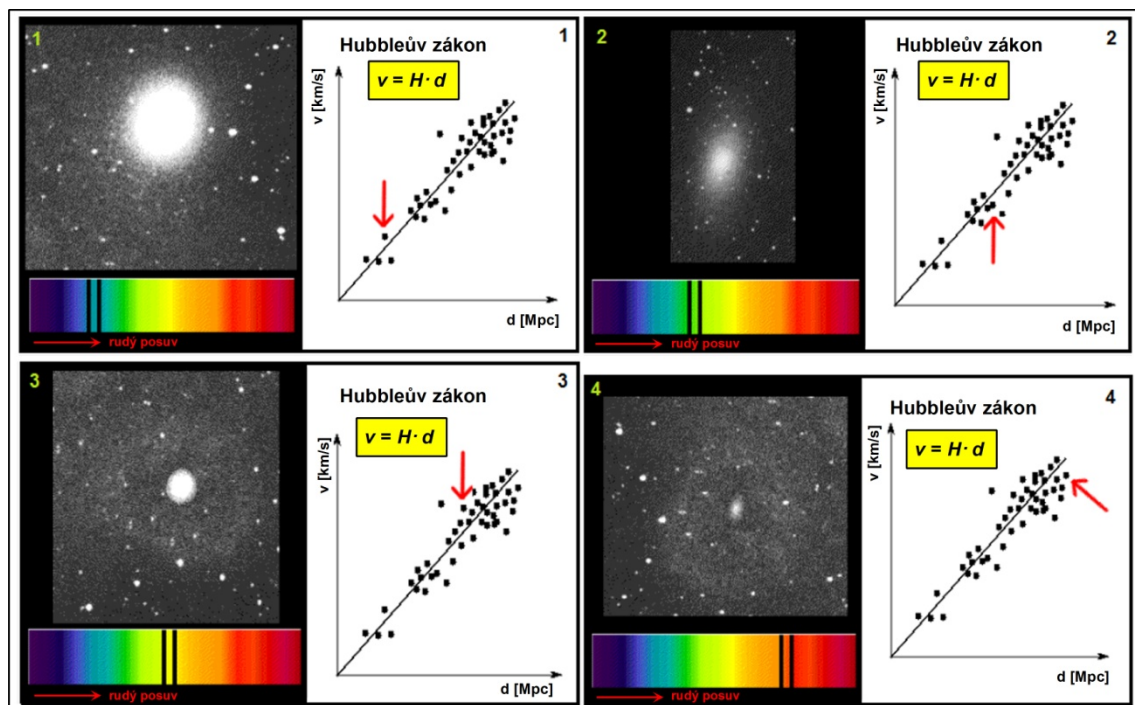
Zdroje:

[68] <http://gimeda.cz/galaxie.html>; <http://www.astroforum.cz/viewtopic.php?t=1517&start=150>

[69] <https://sites.google.com/site/gchdpuda/astroweb/1-ulohy/cviceni-2---urceni-vzdalenosti-ke-galaxii-m100-pomoci-promennych-hvezd---cefeid>



**Obr. P70:** Velmi vzdálené supernovy typu Ia nalezené Hubbleovým kosmickým dalekohledem. V horní části je mateřská galaxie před explozí, v dolní části v průběhu exploze. Z jasnosti supernovy je možné odhadnout vzdálenost mateřské galaxie. **Převzato a upraveno z [70].**

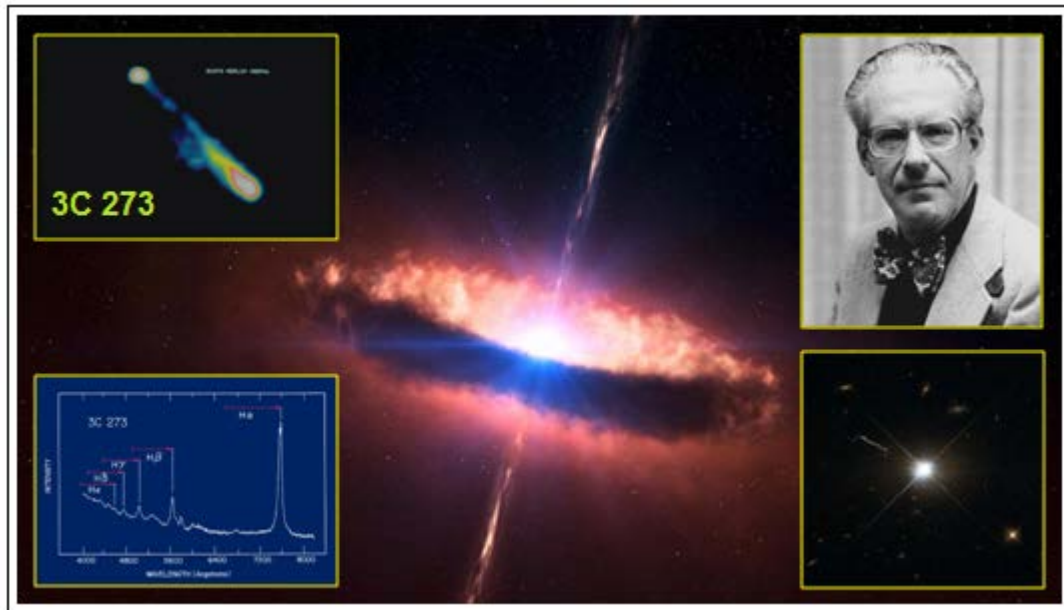


**Obr. P71:** Názorná ukázka rudého posuvu u čtyř galaxií. Z jednotlivých obrázků je patrné, že čím větší rudý posuv naměříme, tím je od nás galaxie vzdálenější. **Převzato a upraveno z [71].**

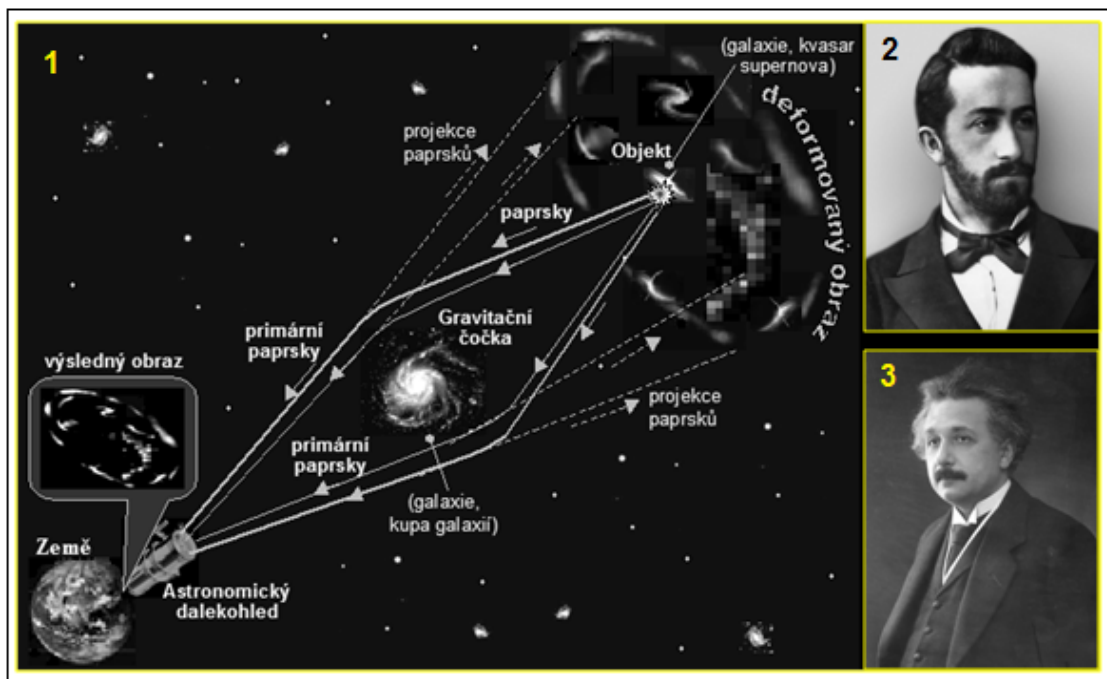
Zdroje:

- [70] [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2012\\_04\\_sni.php](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2012_04_sni.php)  
<http://www.glogster.com/tonithion/type-1a-supernova-poster/g-6lsp5sv07unrmknk443n7a0>
- [71] <http://www.qwertasip.estranky.cz/clanky/jak-se-meri-vzdalenosti-ve-vesmiru--cast-2---hvezdy-a-galaxie.html>





**Obr. P72:** Maarten Schmidt – astronom, který jako první změřil vzdálenost kvasarů. Převzato a upraveno z [72].



**Obr. P73:** Gravitační čočky jako mohutné astronomické dalekohledy. (1) Schématické znázornění hybridního gravitačně-optického astronomického "dalekohledu". Velmi vzdálený zářící objekt (galaxie, kvasar či supernova) je nejprve zobrazen gravitační čočkou, kterou může být mezilehlá galaxie nebo kupa galaxií. Ohnuté světelné paprsky pak vstupují do klasického astronomického dalekohledu (který může být optický nebo radioastronomický - podle toho, zda pozorujeme v optické nebo rádiové oblasti), kde vzniká výsledný obraz. S trochou nadsázky lze říci, že gravitační čočka tvoří "objektiv" a velký astronomický dalekohled slouží jako "okulár" tohoto vesmírného zobrazovacího systému. (2) Orest Chvolson, (3) Albert Einstein. Osobnosti, které předpověděly efekt gravitační čočky. Převzato a upraveno z [73].

Zdroje:

[72] <http://phys-astro.sonoma.edu/brucemedalists/schmidt/>

[73] <http://astronuklfyzika.cz/Gravitace4-3.htm>; <http://www.aldebaran.cz/famous/index.php>

## Popularizátoři vědy



**Obr. P74:** Známy popularizátoři vědy. (1) Neil deGrasse Tyson je americký astrofyzik a známý popularizátor vědy. V dokumentárních pořadech o vesmíru jako např. *Kosmos - časoprostorová odysea*, zaujal diváky po celém světě. (2) Michio Kaku je americký fyzik, profesor teoretické fyziky, spoluzakladatel strunové teorie a též oblíbený popularizátor vědy. V březnu 2008 se jeho celosvětově známá kniha *Fyzika nemožného* dostala na seznam bestsellerů magazínu *The New York Times*. (3) Jiří Grygar je známý český astronom a astrofyzik. Jeho popularizační činnost v oblasti astronomie je například známá díky televiznímu pořadu *Okna vesmíru dokořán*. **Převzato a upraveno z [74].**

---

Zdroje:

- [74] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Neil\\_deGrasse\\_Tyson](https://cs.wikipedia.org/wiki/Neil_deGrasse_Tyson)  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Michio\\_Kaku](https://cs.wikipedia.org/wiki/Michio_Kaku)  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Jiří\\_Grygar](https://cs.wikipedia.org/wiki/Jiří_Grygar)