

HISTORIE ASTRONOMIE



Vladimír Štefl, Jiří Krtička

Brno 2008

„Jestliže tedy hodnotu věd určuje předmět, kterým se zabývají, nejvznešenější bude věda, kterou jedni nazývají astronomií. Jako vrchol vznešených věd, nejdůstojnější pro svobodného člověka, opírá se takměř o všechna odvětví matematiky.“

Mikuláš Koperník

Předmluva

Předkládaný multimediální učební text vznikl díky podpoře grantu FRVŠ 92/2007/F6.

Je určen studentům učitelských kombinací s fyzikou pro předmět Historie astronomie v závěrečných ročnících studia respektive studentům odborné astronomie pro stejnojmenný výběrový předmět. Ve svém obsahu podává stručný přehled historie astronomie, který ve vysokoškolských učebnicích historie fyziky zpravidla není uceleným způsobem zpracován.

Proč je žádoucí znát historii astronomické vědy? Nesporně je poučná a velmi užitečná. Její studium vyžaduje nejenom pouhou znalost faktického materiálu případně jeho systematický výklad, ale především analýzu za účelem nalezení zákonitostí vývoje astronomické vědy. Jen tak lze odhalit příčiny, které určují směr a tempo vývoje astronomie. Proto v textu nejprve připomínáme podněty, jenž vedly k rozvoji astronomie a následně uvádíme, v kterých oblastech se výsledky výzkumů uplatnily respektive jaké změny vyvolaly.

Studium historie astronomie umožňuje studentům si vytvářet objektivní představy o tom, jak se astronomická věda rozvíjela, jak vznikaly a vyvíjely se nové myšlenky. Obsah je rozčleněn do jednotlivých etap, časových období. V nich se astronomie zabývala odlišnými problémy, což těsně souviselo jak s rozvojem společnosti, tak i matematiky a fyziky. Celkově však můžeme konstatovat, že astronomie jako věda vždy zaujímala významné místo v historii lidstva.

Učební text je při nezbytném ohraničení jeho rozsahu zamýšlen pouze jako úvod k celé problematice. Není v něm prostor na podrobnější pohledy, například na osobní portréty tvůrců nových astronomických myšlenek a teorií.

Vladimír Štefl, Jiří Krtička
Brno, prosinec 2007

Obsah

| | |
|--|------------|
| Předmluva | 3 |
| 1 Význam astronomie | 7 |
| 2 Astronomie ve starověku a antice | 8 |
| 2.1 Astronomické poznatky v předantickém období | 8 |
| 2.2 Antická řecká astronomie | 11 |
| 3 Astronomie ve středověku a renesanci | 40 |
| 3.1 Heliocentrická soustava | 40 |
| 3.2 Přesná pozorování | 52 |
| 3.3 Kinematické zákony pohybu planet | 55 |
| 3.4 Pozorovací potvrzení heliocentrické soustavy | 57 |
| 4 Kosmická mechanika | 64 |
| 4.1 Astronomická jednotka, určení rychlosti světla | 64 |
| 4.2 Astrometrie | 67 |
| 4.3 Zákon všeobecné gravitace a jeho důsledky | 69 |
| 4.4 Teorie pohybu Měsíce | 72 |
| 4.5 Dynamické zákony pohybu planet | 76 |
| 4.6 Objevy dalších planet | 79 |
| 4.7 Objev planety Ceres | 82 |
| 5 Stelární astronomie | 84 |
| 5.1 Základy stelární astronomie | 84 |
| 5.2 Mezihvězdná látka | 87 |
| 5.3 Rotace Galaxie | 88 |
| 5.4 Studium hvězdných soustav | 89 |
| 6 Astrofyzika | 92 |
| 6.1 Použití fotografie, fotometrie a spektroskopie v astrofyzice | 92 |
| 6.2 Výzkum Slunce | 93 |
| 6.3 Rozvoj astrospektroskopie a teorie hvězdných atmosfér | 94 |
| 6.4 Historie H – R diagramu | 99 |
| 6.5 Stavba nitra hvězd | 101 |
| 6.6 Zdroje energie hvězd, vznik prvků | 102 |
| 7 Extragalaktická astronomie a kosmologie | 106 |
| 7.1 Extragalaktická astronomie | 106 |
| 7.2 Kosmologie | 110 |

| | |
|--|------------|
| 8 Historický vývoj astronomie u nás | 112 |
| 8.1 Stručný nástin historie astronomie u nás do poloviny 19. století | 112 |
| 8.2 August Seydler | 112 |
| 8.3 Astronomie u nás na přelomu 19. a 20. století | 118 |
| 8.4 Astronomie v první polovině 20. století | 122 |
| Časová osa historického vývoje astronomie | 131 |
| Literatura | 136 |
| Rejstřík | 140 |

1 Význam astronomie

Vývoj přírodních věd je zajímavý. Zvláště přitažlivá je historie astronomie. Poznávání zákonů vesmíru a jeho stavby lidstvem probíhalo relativně velmi rychle. Od primitivních pokusů o objasňování astronomických jevů až po současné komplexní studium kosmických těles uběhlo pouze několik tisíc roků.

Důležitost astronomických poznatků pro společnost byla vždy velká, určování denního a ročního času a následně tvorby kalendáře, stanovení zeměpisné polohy, především délky v 17. a 18. století až po výzkum aktivity Slunce a její vliv na Zemi v posledních desetiletích 20. století. Astronomie rovněž poskytovala údaje pro astrologii.

Vlastní vývoj astronomie byl nerovnoměrný, závisel především na vzájemném využití poznatků a metod matematiky respektive fyziky. Počínaje důvtipnými metodami starořeckých geometrů, přes aplikaci diferenciálního a integrálního počtu při řešení pohybu kosmických těles, po využití moderních fyzikálních disciplín a současné metody zpracování pozorovacích záznamů z celého rozsahu elektromagnetického spektra. Nejdynamičtější rozvoj astronomie proběhl v minulém století, které je právem nazýváno zlatým věkem astronomie. Připomeňme, že ještě na jeho začátku nebyly známy zdroje energie hvězd, závěrečná stadia vývoje hvězd či vnější galaxie. Moderní astrofyziku charakterizuje právě výzkum uvolňování energie v nitrech hvězd, jádrech galaxií, stavby hmoty či ověřování platnosti nejobecnějších fyzikálních teorií.

2 Astronomie ve starověku a antice

2.1 Astronomické poznatky v předantickém období

Astronomie je jednou z nejstarších věd. Její počátky sahají do období přibližně před šesti tisíci roky. Závislost vzniku a vývoje astronomie na potřebách zemědělských civilizací byla bezesporná, neboť zemědělské práce jakož i další dlouhodobější lidskou činnost bylo třeba plánovat. Proto astronomie jako první praktický problém řešila chronologii – určování času.

V prvním období vývoje astronomie nešlo o vědu v současném slova smyslu, nýbrž o neuspořádané dílčí poznatky získávané pozorováním oblohy, pohybů zdrojů světla na ní. Zpočátku lidé pozorovali Slunce, Měsíc a hvězdy. Postupně si začali uvědomovat, že hvězdy pohybující se od východu k západu každou noc jsou jedny a tytéž. Již tento elementární poznatek byl velkým pokrokem. Později lidé dospěli k poznání, že Měsíc a Slunce mění svoji polohu na obloze mezi hvězdami a souhvězdími. Střídání dne a noci vedlo ke vzniku první časové jednotky. Změny fází Měsíce umožnily zvolit časovou jednotku větší než den, od úplňku k úplňku 29,5 dne – synodický měsíc. Tato časová jednotka byla zaokrouhlována na 29 dnů respektive 30 dnů.

Složitější než sledování pohybu Měsíce bylo pozorování pohybu Slunce podél ekliptiky. Pojem roku jako časové jednotky se upřesňoval postupně, zřejmě v těsné návaznosti na rozvoji zemědělství, které bylo bezprostředně spjata se střídáním ročních období. To byl hlavní důvod, proč lidstvo přešlo od měsíčního k ročnímu kalendáři.

Vhodné podmínky pro zemědělství byly zejména v povodí velkých řek, kde vznikly první tzv. říční kultury v údolích velkých řek, Eufratu a Tigridu, Nilu, Žluté řeky, Jang-č-tiangy, Gangy. Astronomie se po ukončení malé doby ledové začala rozvíjet rovněž v západní Evropě a na americkém kontinentu.

V údolí Eufratu a Tigridu v Mezopotámii vznikla tři tisíce roků před naším letopočtem chaldejská civilizace, která stavěla velká města. V nich se nacházely astronomické observatoře – věže pro pozorování oblohy zvané *zikhuráty*. Ty společně s vhodnými pozorovacími podmínkami umožnily značný rozvoj astronomie. První písemné zmínky jsou z 2. tisíciletí př. n. l., největší rozkvět astronomie nastal v 7. – 6. st. př. n. l. v období tzv. asyrské astronomie.

Chaldejští astronomové pozorovali zejména Měsíc, Slunce a hvězdy, později i planety. Pozorovací údaje sloužily astrologii a chronologii. Orientace na pozorování Měsíce umožnila tvorbu měsíčního kalendáře, doba synodického měsíce se stala základem pro výpočet doby trvání roku, který měl stejně jako např. v Číně 354 dnů. Pomocí heliakických východů hvězd, které se opakují přibližně po 365 dnech, byla stanovena délka tropického roku. Časový rozdíl měsíčního a tropického roku byl řešen vkládáním přestupných měsíců.

Výsledky pozorování poloh kosmických těles byly pomocí klínového písma zachycovány na hliněných tabulkách. Některé se dochovaly do současnosti i s uvedením jména pozorovatele – viz obr. 1. Výpočty z astronomických záznamů dovolovaly předpovídat polohy Měsíce a Slunce. Je pravděpodobné, že Chaldejci znali cyklus zatmění *saros* – 18 roků 11 dní, ve kterém se zatmění opakují. Rovněž jim byl znám cyklus zatmění trvajících

19 roků, který byl později nazván metonický na počest Řeka Metona, jenž ho okolo roku 433 př. n. l. podrobně analyzoval.



Obr. 1: Tabulka s klínovým písmem

V 5. st. př. n. l. již chaldejští astronomové znali dobu oběhu nejjasnějších planet, pozorování pohybů planet tomuto stanovení muselo předcházet. Chaldejci rovněž znali zpětný pohyb a smyčky pohybu planet, explicitně Marsu. Tabulky pozorování Měsíce a planet byly zpracovány pomocí úhlové míry. Poměrně přesně byla chaldejským astronomům známa doba trvání synodického měsíce – 29,53 dne.

Počátky starověké egyptské astronomie sahají do 3. tisíciletí př. n. l. Egyptské zemědělství, využívající záplav Nilu, bylo těsně závislé na stupni vyspělosti astronomie. K pozorování kosmických těles byly budovány stavby, které současně sloužily i církevním účelům. Orientace hlavních os staveb svědčí o tom, že jejich stavitelé znali směry základních světových stran.

Egyptská astronomie rovněž sloužila astrologii a chronologii, z prvního pozorování heliakického východu Siria – Sotise v roce byla určována doba příchodu záplav Nilu. Egyptský rok s 365 dny byl rozdělen na 12 měsíců po 30 dnech, na konci roku byl doplněn na 366 dnů.

Hvězdy na obloze egyptští astronomové rozdělovali do 36 souhvězdí, heliakický východ každého z nich připadal do určité dekády, takže obloha byla velikým ročním kalendářem. Z egyptské starověké astronomie se dochovaly písemné památky v podobě hieroglyfů a nástěnných nápisů vztahujících se k astronomii.

Metoda přibližného určování úhlového průměru Slunce byla vypracována v Egyptě. Vycházela ze srovnání času od prvního objevení se slunečního disku až k jeho úplnému vynoření s celkovou dobou od východu k západu Slunce. Egyptští astronomové našli, že průměr Slunce je 750. díl kruhové dráhy Slunce, což odpovídá přibližně $28^{\circ}50'$.

V období Ptolemaiovců (323 – 30) př. n. l. se Alexandrie stala kulturním a vědeckým střediskem světa, došlo v ní ke splynutí egyptské a řecké astronomie, což podstatně přispělo k rozvoji antické řecké astronomie.

V poměrné izolovanosti od ostatního světa se rozvíjela astronomie v Číně, její počátky klademe do 3. tisíciletí př. n. l. Například nejstarší čínský záznam o slunečním zatmění je z roku 2 697 př. n. l., z roků (2 315 – 2 287) př. n. l. existují záznamy o pozorování komet.

Z 11. století př. n. l. jsou známa přesná čínská astronomická pozorování Slunce, která využívala gnómon (tyč vertikálně zaraženou do země), z jehož stínu bylo možné určovat výšku Slunce nad obzorem. Zapsáno současnou matematickou symbolikou byl využíván vztah $\operatorname{tg} h = \frac{l}{L}$, kde h byla výška Slunce nad horizontem, L výška gnómonu a l délka jeho stínu. Pomocí gnómonu s výškou 2,43 m byla stanovena délka stínu za letního a zimního slunovratu a určen sklon ekliptiky k rovníku na $\varepsilon = 23^{\circ}54'$ s využitím vztahu $\varepsilon = \frac{H-h}{2}$, kde

H je výška Slunce v poledne při letním slunovratu a h výška Slunce v poledne při zimním slunovratu. Rovněž znali stanovení zeměpisné šířky φ místa pozorování při využití vztahu $90^\circ - \varphi = \frac{H+h}{2}$.

Čínští astronomové v 8. st. př. n. l. na základě studia poloh hvězd zjistili, že délka hvězd se mění o 1° za 83 roků, tedy o $45''$ za rok. V současné době stanovená roční *precese*, velikost úhlu, o který se posune jarní bod vstříc pohybu Slunce po ekliptice, činí $50,256''$ za rok.

Základní zaměření čínské astronomie bylo především na pozorování a tvorbu kalendáře. Původně pastevecká civilizace používala měsíční kalendář, 12 měsíců po 29,5 dnech stanovovalo délku roku na 354 dnů. S přechodem k celoročnímu zemědělství závislému na nástupu monzunových dešťů bylo potřebné z pozorování pohybu Slunce na obloze určit délku roku, jenž byla stanovena na 365,25 dne. Hvězdy na obloze čínští astronomové rozdělovali do souhvězdí, která označovali jmény. Z nám známých souhvězdí se na čínských mapách vyskytovaly pouze čtyři. Rovněž znali výpočty předpovědi zatmění Slunce a Měsíce.

Pozorování čínských astronomů byla zaznamenávána do státních letopisů respektive kronik. V nich se dochovala například zpráva o sledování supernovy v roce 1 054 n. l. v souhvězdí Býka, jejímž pozůstatkem je Krabí mlhovina. Píše se v ní: „*V prvním roce éry Č'-che (1054), v pátém měsíci v den tí-čchou (4. července), se (hvězda host) objevila několik palců jihovýchodně od Tchien-kuan (ζ Tauri). Po více než jednom roce poznenáhlu zmizela.*“

Po ukončení malé doby ledové se v západní Evropě začalo rozvíjet zemědělství. Vyvstala potřeba sledování pohybů Měsíce a zejména Slunce, což byl jedním z hlavních stimulů pro výstavbu nákladných kamenných pozorovatelů. Přibližně kolem roku 2 tisíce př. n. l. byl vybudován v západní Evropě větší počet těchto pozorovatelů, například v Anglii, Francii, Německu, Skotsku a Španělsku. Primitivní astronomické pozorovatelný umožňovaly roční orientaci v čase případně vytvoření kalendáře na astronomickém základě.

Zhruba v 2. tisíciletí př. n. l. byla dobudována v jižní Anglii u Salisbury observatoř Stonehenge. Archeohistorický výzkum stavby ukázal, že pomocí kamenných kvádrů jsou v ní zachyceny základní směry východů a západů Slunce i Měsíce včetně nalezení mezních hodnot. U Slunce jde o slunovratové východy a západy, u Měsíce o nejsevernější a nejjižnější východy a západy. Tak byly nalezeny body obratu ročního cyklu. Shrnuto observatoř Stonehenge umožňovala získání údajů, z nichž byl uspořádán kalendář pro zemědělské potřeby. V dalším období byla postupně Stonehenge dále dobudována a zdokonalována.

Rovněž na americkém kontinentu se rozvíjela astronomie u tehdejších civilizací. Pozorování Slunce ve střední Americe pomocí rozsáhlých observatoří umožnilo tvorbu ročního kalendáře. Nejvyspělejším národem byli Mayové, kteří žili na Yucatánském poloostrově, kde jejich civilizace dosáhla vrcholu v období (2. – 9.) st. n. l. Mayové měli propracovanou chronologii, zachycovali průběh času prostřednictvím čísel, cyklů, jak dosvědčují například zachované kresby na žebřících a chodbách. Kalendář Mayů byl podrobně rozpracován, používal dva oddělené cykly po 260 dnech a 365 dnech. Ze záznamů *Dráždánského kodexu*, jedné z knih hieroglyfů vyplývá, že Mayové dokázali předpovídat zatmění Slunce a Měsíce. V kodexu je uvedena tabulka předpovědi zatmění, podle které je možné vypočítat 1 034 zatmění, která následovala po sobě v letech (206 – 647) n. l. S nevelkými změnami lze tabulku používat i pro předpovědi zatmění v současné době.

Na vyspělé úrovni byla rovněž civilizace Inků v peruánských Andách. V jejich středisku na Machu Pichu se nacházel gnómon, podle jehož polohy a délky stínu byly určovány denní čas i roční období.

Při shrnutí komentovaného období lze konstatovat, že v předantické astronomii se rozvíjelo především pozorování Slunce a Měsíce, které umožnilo tvorbu měsíčního a posléze ročního kalendáře. Dále byly pozorovány jasné hvězdy a pohyby planet. Zatímco pohyb hvězd byl vyložen rotací oblohy kolem Země, vysvětlení pohybu planet naráželo na potíže. K pozorování kosmických těles byly sestrojeny jednoduché pozorovací přístroje, s nimiž starověcí astronomové dosahovali poměrně přesných pozorovacích údajů.

2.2 Antická řecká astronomie

Tabulka 1: Historický vývoj antické astronomie

| |
|--|
| Thales z Milétu (624 – 545) ? vznik astronomie jako vědecké disciplíny |
| Pythagoras ze Samu (569 – 490) ? sférický tvar Země |
| Aristoteles (384 – 322) geocentrická soustava |
| Aristarchos ze Samu (310 – 250) ? určování vzdáleností Země – Měsíc – Slunce heliocentrická soustava |
| Eratosthenes (276 – 194) ? stanovení poloměru Země |
| Hipparchos (190 – 120) ? precese, katalog hvězd |
| Klaudios Ptolemaios (90 – 165) ? geocentrická soustava |

Počátky vědecké astronomie lze klást přibližně do 6. st. př. n. l. Působitě většiny vynikajících řeckých astronomů bylo mimo území vlastního Řecka, samotná řecká astronomie vyvrcholila v egyptské Alexandrii. Ke vzniku a vývoji astronomie přispěl jak rozvoj matematiky a geometrie, tak i kladný vliv řecké filozofie, jež se snažila vyložit astronomické jevy prostřednictvím všeobecně platných zákonů. Řečtí astronomové se již nespokojovali pouhým zaznamenáváním astronomických jevů, předpovídáním zatmění a jiných periodicky se opakujících jevů, ale snažili se tyto jevy vyložit. Na rozvoj řecké astronomie mělo příznivé vliv rovněž splývání řecké a východní kultury, na kterou navazovala.

Názory nejstarších řeckých astronomů, matematiků a filozofů se přímo nezachovaly, jsou známy pouze některé útržky z jejich názorů, které byly citovány v textech pozdějších autorů.

Nejstarší zástupce jónské školy byl **Thales z Milétu (624 – 545) ? př. n. l.**, který učinil matematiku a geometrii základem astronomie.

V 6. st. př. n. l. působil Pythagoras ze Samu, zakladatel pythagorejské školy. Její příslušníci věřili v zákonitosti přírodního dění. Podle nich všechny jevy je možné vyložit ze všeobecně platných přírodních zákonů, což bylo důležité pro budování astronomie jako vědy. Za nejdokonalejší považovali rovnoměrný kruhový pohyb, filozofická představa dokonalosti kruhového pohybu se stala výchozím principem řecké astronomie. Na základě filozofických úvah pythagorejci usuzovali, že koule je nejpravidelnější těleso. Země jakožto nejdokonalejší dílo přírody musí mít rovněž sférický tvar. Tuto svoji úvahu dotvrzovali kruhovým stínem Země vrženým na Měsíc při zatmění Měsíce.

Pohyb Slunce pythagorejci rozkládali na pohyb denní od východu k západu po kruhu rovnoběžném se světovým rovníkem a na pohyb roční od západu k východu po dalším kruhu. Výklad pohybu hvězd vycházel z představy, že sférická obloha se otáčí s hvězdami na ní upevněnými kolem osy procházející středem Země.

Ucelené písemné doklady se zachovaly teprve od **Platona (427 – 347) př. n. l.** V dialogu *Timaios* se Platon zabýval kosmologickými otázkami a uváděl, že hvězdy se otáčejí rovnoměrným pohybem kolem svých os a rovněž Země rotuje kolem své osy. Kosmická tělesa kolem Země seřadil Platon takto: Měsíc, Slunce, Venuše, Merkur, Mars, Jupiter a Saturn. Jejich poměrné vzdálenosti od Země jsou 1, 2, 3, 4, 8, 9, 27. V dialogu *Zákony* Platon studoval pohyb planet. Rozlišoval pozorovaný pohyb planet a skutečný, který však blížeji nespecifikoval.

Astronomické a kosmologické poznatky své doby shrnul filozof **Aristoteles (384 – 322) př. n. l.** především ve spisech s českými názvy *Fyzika*, *O nebi*, *O vzniku a zániku*, *Metafyzika*, *Meteorologie*. Odmítal geometrický přístup pythagorejců a vytvořil uspořádanou vlastní astronomickou soustavu. Při její tvorbě vyšel z představ, které rozpracovali **Eudoxos (410 – 350) ? př. n. l.** a **Kallipos (370 - 300) ? př. n. l.** Zahrnovaly myšlenku existence hlavních a pomocných sfér, které se pohybují kolem Země a na nichž jsou rozloženy planety. Podle Aristotela je příčinou pohybu sfér prvotní hybatel, zvláštní rotující sféra, položená za sférou nehybných hvězd. Svou denní rotací uvádí do pohybu všechny ostatní vnitřní sféry, které v Aristotelově soustavě jsou uspořádány kolem Země následujícím způsobem: Měsíc, Slunce, Venuše, Merkur, Mars, Jupiter a Saturn. Veškerý pohyb v této složité soustavě je tak popisován pomocí 56 tuhých křišťálových sfér.

Planety se v Aristotelově soustavě nacházejí ve větší vzdálenosti od Země než Měsíc a Slunce. Vzdálenost sféry hvězd je maximálně 9krát větší než vzdálenost Země od Slunce. Země je v této geocentrické soustavě v klidu a nerotuje.

Z názorů Aristotela na vesmír a místo Země v něm podle spisu *O nebi* uvádíme: „*Nebe má nevyhnutelně tvar koule, neboť tento tvar je nejvhodnější pro jeho podstatu a je od přírody proní.*“

... „*Je tedy zcela zřejmé, že Země musí být uprostřed světa a musí být nehybná, a to z příčin, které jsme vyložili, i také proto, že těžká tělesa vyhozená vzhůru do výšky padají po svislici zpět do téhož bodu, a to i tehdy, jestliže byla velkou silou vržena nesmírně daleko. Po těchto rozborech*

je zřejmé, že Země se nehýbá, ani není položena mimo střed. Vyplývá nám z toho i příčina její nehybnosti.“

Známým astronomem byl **Aristarchos ze Samu (310 – 250) ? př. n. l.**, který se narodil na ostrově Samos. V jeho době však již zdaleka nebyl tak významným kulturním střediskem jako v dobách dřívějších. Ostrov získal autonomii roku 322, později se dostal pod správu egyptského státu Ptolemaiovců. Poslední část svého života prožil Aristarchos v Alexandrii, kde také zemřel.

Vycházel z poznatků babylonské astronomie, které přenesl na řecký ostrov Kos učenec Berossos (3. století př. n. l.) zhruba v roce 280 př. n. l. Po přesídlení na ostrov zde vybudoval astronomickou observatoř a vytvořil astrologickou školu. Napsal třídílnou knihu s výkladem babylonské a chaldejské historie a astronomie.

Přibližně z roku 265 př. n. l. pochází Aristarchův spis s názvem *Peri megethon kai apostematon heliou kai selenes* česky *O velikostech a vzdálenostech Slunce a Měsíce*. Dílo je připomínáno **Archimédem (287 – 212) př. n. l.** ve spisu *ψαμμιτης – Psammites* česky *O počtu písečných zrn*. Význam tohoto Aristarchova spisu spočívá v zabývání se prostorovými vzdálenostmi mezi kosmickými tělesy. Začíná uvedením šesti základních vět:

1. Měsíc přebírá světlo od Slunce.
2. Země ve vztahu k měsíční sféře je bodem a středem.
3. V situaci, kdy se nám jeví Měsíc rozdělený hranicí stínu na dvě stejné části (dichotomie), rovina rozdělující tmavou a světlou část Měsíce prochází naším zrakem.
4. Při dichotomii je úhlová vzdálenost Měsíce od Slunce menší než jedna čtvrtina kruhu bez jedné třicetiny této části.
5. Šířka zemského stínu zahrnuje dva Měsíce.
6. Měsíc zahrnuje patnáctinu části zodiakálního znaku.

V šestém bodě Aristarchos přecenil hodnotu úhlového průměru Měsíce – 2° namísto $1/2^\circ$. Na základě uvedených vět Aristarchos dokazuje následující tři tvrzení:

1. Vzdálenost Země od Slunce je větší než osmnáctinásobek, ale menší než dvacetinásobek vzdálenosti Země – Měsíc.
2. Poměr průměrů Slunce a Měsíce leží mezi osmnácti až dvaceti.
3. Poměr průměrů Slunce a Země je větší než $19/3$ a menší než $43/6$.

Řeční filozofové se zabývali studiem Měsíce, pozorovali jeho pohyb na hvězdném pozadí. Metodu, která poměrně jednoduchým způsobem umožnila stanovit vzdálenosti v soustavě Slunce – Země – Měsíc, však vymyslel až Aristarchos.

Změřil úhlovou vzdálenost Měsíce od Slunce v okamžiku první čtvrti v dichotomii, kdy je Měsíc hranicí stínu rozdělen na dvě poloviny. Úhel Země – Měsíc – Slunce je v tomto okamžiku roven 90° a úhel MZS z pozorování Aristarchos stanovil na 87° ; skutečná hodnota je však $89^\circ 51'$. Příčinou rozdílu byly jak méně přesné pozorovací přístroje a obtížnost přímého sledování Slunce pouhým okem, tak stanovení okamžiku, kdy je osvětlena právě polovina Měsíce. Vzhledem k tomu, že se Měsíc pohybuje před pozadím po hvězdné obloze rychlostí $0,5^\circ$ za hodinu, odpovídá chyba v určení časového okamžiku jedné hodiny

změně velikosti úhlu MZS o $0,5^\circ$. S přihlédnutím k těmto okolnostem nebyla Aristarchem stanovená hodnota úhlu MZS příliš špatná. Svá pozorování pochopitelně prováděl na povrchu Země a předpokládal, že výsledek je stejný, jako by se pozorovatel nacházel ve středu Země. Jinými slovy nezahrnoval do svých úvah paralaxu Měsíce (během rotace Země kolem své osy dochází k pohybu pozorovatelů na jejím povrchu, což způsobuje změny úhlů, pod kterými pozorujeme Měsíce ve srovnání s úhlem od středu Země). Tzv. *denní paralaxa* je úhel, pod kterým bychom z Měsíce pozorovali poloměr Země. Přepočítání výsledků Aristarchových pozorování ke středu Země provedl až Archimédes v již zmíněném spisu *O počtu písečných zrn*.

Z toho, že pozorované úhlové průměry Měsíce a Slunce jsou téměř stejné, Aristarchos s použitím předcházející úvahy o vzdálenostech v soustavě Slunce – Země – Měsíc určil, že Slunce je v 19krát větší vzdálenosti od Země než Měsíc a skutečný průměr Slunce musí tedy být 19krát větší. Jaký je vzájemný poměr průměrů Slunce a Země? Z údajů o zatmění Měsíce Aristarchos odvodil, že jeho průměr je přibližně roven jedné třetině průměru Země. Podle Aristarcha je průměr Země 6,5krát menší než průměr Slunce. Objem Slunce převyšuje objem Země přibližně 300krát. Na základě výpočtů dospěl Aristarchos k údajům o poloměrech a vzdálenostech kosmických těles: $R_S \approx 7R_Z$, $R_M \approx 7/19R_Z$, $r_{ZM} \approx 19R_Z$, $r_{ZS} \approx 19R_S \approx 361R_Z$.

Antičtí astronomové byli v první řadě geometry, kteří si vybrali sluneční soustavu k ilustraci svých důvtipných geometrických myšlenek. Astronomické hodnoty velikostí a vzdáleností kosmických těles byly uváděny jako příklady a takto byly interpretovány. Důraz byl kladen spíše na vynalézavost metod řešení geometrických úloh, přesnost hodnot veličin, jako jsou úhly a délky neměla zásadnější význam.

Aristarchos je znám především jako tvůrce heliocentrického modelu, který vycházel ze dvou základních principů:

1. Všechny planety obíhají kolem centrálního tělesa – Slunce.
2. Jejich oběh je rovnoměrný.

K dalšímu rozpracování heliocentrického modelu a k zachycení nerovnoměrného pohybu kosmických těles však nedošlo.

Proč zastával Aristarchos heliocentrickou hypotézu? Nejpřirozenější odpovědí je, že vycházel z výše uvedeného srovnání velikostí kosmických těles. Měsíc je menší než Země a obíhá kolem ní, tudíž Země – menší než Slunce – by měla rovněž obíhat kolem většího Slunce. Antičtí astronomové a fyzici neměli ještě jasné představy o setrvačnosti, ale chápali, že snadnější je pohybovat malým předmětem než velkým. Tudíž jestliže Slunce má mnohem větší objem než Země, je přirozené předpokládat, že Země obíhá kolem Slunce, a nikoliv naopak.

Aristarchovi patří priorita v nalezení souvislosti pozorovaného – zdánlivého – pohybu planety s teoretickým, získaným pohybujícím se pozorovatelem. Jde o dva pohyby, rotaci Země kolem vlastní osy a oběh Země kolem Slunce.

Novou a významnou Aristarchovou myšlenkou je připuštění velkých vzdáleností hvězd. Do té doby převládal názor **Herakleita z Pontu (388 – 315) ? př. n. l.**, že hvězdy jsou v 2,5krát větší vzdálenosti než Slunce. Můžeme usuzovat, že snad právě přijetí velkých vzdáleností hvězd mohlo vést učence – astronomy k nedůvěře v heliocentrickou Aristarchovu soustavu.

Dalším astronomickým důvodem odmítání Aristarchovy soustavy, při zjednodušeném předpokladu rovnoměrných kruhových pohybů planet, byl rozpor s výsledky tehdejších pozorování.

Také filozofové Aristarchovy doby nepokládali heliocentrickou hypotézu za vhodnou, i když podávala obraz vesmíru geometricky harmoničtější způsobem než předcházející geocentrické soustavy. Příčin jejího odmítnutí bylo více, z obecného pohledu byl heliocentrismus nepřijatelný především vzhledem k již existujícím astrologickým představám, které vycházely z centrálního postavení člověka a Země ve vesmíru.



Obr. 2: Hipparchos

Hipparchos (190 – 120) ? př. n. l. se narodil v Níkaie v Býthýnii (nyní Iznik) v severozápadním v Turecku, proto bývá nazýván Hipparchos z Níkaie. Převážnou většinu života prožil na ostrově Rhodos, který byl tehdy vedle Alexandrie dalším intelektuálním centrem ve východní části dnešního Středomořího moře. Na ostrově vybudoval vlastní astronomickou observatoř. Určitý čas pobýval rovněž v Alexandrii. Přestože byl především astronomem pozorovatelem, zajímal se také o matematiku a filozofii. Je nazýván otcem vědecké astronomie, která právě v jeho osobě udělala velký krok kupředu. Začal kombinovat důmyslné kinematické geometrické konstrukce s numerickými výsledky astronomických pozorování, aby kvantitativně objasnil pohyb Měsíce, Slunce a planet.

Byl všestranným astronomem, chápal základní úlohy stojící před astronomií jeho doby. Proto předmětem astronomického zájmu Hipparcha byla problematika tvorby kalendáře, studium precese, sestavení hvězdného katalogu, pohyb Slunce, Měsíce a planet. K základním spisům Hipparcha patří *Přestupné měsíce a dny*, *O délce roku* dále *Peri tes metabaseios ton tropikon kai isemerinon semeion* česky *O pohybu bodů slunovratu a rovnodennosti*. Z názvů je patrné, že šlo o díla zaměřená k praktickým tématům. Žádné větší astronomické kompendium Hipparchos nezanechal.

Z Hipparchových spisů se dochoval jediný *Toon Aratou kai Eudoxou Fainomenoon exegesis* česky *Komentář k Arátovi a Eudoxovi*. Jde o komentář k Arátově básni *Fainomena*, česky *Zjevy nebeské*.

Arátos ze Soloi v Kilíkii (315 – 239) ? př. n. l. kolem roku 275 př. n. l., v básnické hexametrové podobě pojmenoval a popsal čtyřicet osm souhvězdí na severní a jižní obloze. Historická astronomická analýza údajů z obsahu básně vedla k závěru, že Arátův text má mnohem starší původ a popisuje vzhled oblohy pozorovaný na zeměpisné šířce Babylónu, z časového období starověku 2 500 př. n. l..

Na základě údajů v Arátově textu Hipparchos ve svém *Komentáři k Arátovi a Eudoxovi* zkoumal polohu více než tři set hvězd. Spis vznikl ještě před sestavením Hipparchova hvězdného katalogu.

Ve svém dalším díle *O délce roku* Hipparchos začal rozlišovat *siderický* (hvězdný) rok jako časový interval mezi dvěma následujícími průchody Slunce v blízkosti určité hvězdy a *tropický rok* – časový interval mezi dvěma následujícími průchody Slunce bodem jarní rovnodennosti. Srovnáním letního slunovratu pozorovaného Aristarchem roku 280 př. n. l. se svým pozorováním v roce 135 př. n. l. dospěl Hipparchos k závěru, že délka tropického roku je rovna $365 \frac{1}{4}$ dne – $\frac{1}{300}$ dne, v dnešních časových jednotkách 365 dnů 5 hodin 55 minut 12 sekund. Tropický rok je tedy kratší než siderický. Hipparchos stanovil rozdíl délek roků na přibližně 15 minut, skutečná hodnota je zhruba 20 minut. Porovnejme historický vývoj délky tropického roku určených v antice:

| | | |
|-----------------|---------------|--|
| Thales z Milétu | 600 př. n. l. | 365 dnů |
| Meton | 430 př. n. l. | $365 + \frac{5}{10}$ dne |
| Aristarchos | 3. př. n. l. | $365 + \frac{1}{4} + \frac{1}{1623}$ dne |
| Hipparchos | 2. př. n. l. | $365 + \frac{1}{4} - \frac{1}{300}$ dne |
| Současná doba | 21. st. n. l. | 365 dnů 5 hodin 48 minut 46 sekund |

Časový rozdíl délek siderického a tropického roku je patrný při dostatečně dlouhé době pozorování, za stovky roků. Projevuje se v systematickém posunu dat rovnodenností. Tuto skutečnost objasňujeme již zmiňovanou precesí, tj. posunem bodu jarní rovnodennosti naproti Slunci. O objev precese se zasloužil právě Hipparchos. Rozeberme celý jev podrobněji.

Úhlovou vzdálenost Slunce od bodu jarní rovnodennosti (ekliptikální délku Slunce) určíme za pomoci jeho výšky nad horizontem v okamžiku průchodu poledníkem. Vlastní stanovení posunu jarního bodu Hipparchos popsal následovně. Při zatměních Měsíce byly současně pozorovány jasné hvězdy a byla stanovena jejich úhlová vzdálenost od středu disku Měsíce, což umožnilo určit ekliptikální délky hvězd. Astronomové Aristillos a Timocharis 169 let před Hipparchovými pozorováními takto zaznamenali polohy osmnácti hvězd na obloze. Obdobně Hipparchos při svém pozorování zatmění Měsíce sledoval polohy hvězd. Porovnáním zjistil, že hvězda Spica (α Vir) podle měření Timocharise předcházela jarní bod o 8° , zatímco při jeho vlastních pozorováních již pouze o 6° . Shrnutí – hvězda se posunula naproti Slunci, tj. bod jarní rovnodennosti se za 169 roků přesunul ve směru ke hvězdě Spica o 2° , zhruba o čtyři průměry měsíčního disku. Přestože pozorování nebyla prováděna s velkou přesností, můžeme výpočtem přibližně určit, že za rok činil posun $2^\circ/169 = 43''$. Později Hipparchos údaj upřesnil na hodnotu $46''$. V chápání dnešní astronomie jde o precesi lunisolární, vyvolanou kombinací gravitačního působení Měsíce a Slunce, jejíž hodnota stanovená v současnosti činí $50,37''/\text{rok}$.

V souvislosti s vyjadřováním velikosti úhlů měřených ve stupních připomínáme, že Hipparchos zavedl do antické astronomie původně babylonské dělení kruhu na 360 stupňů se šedesátkovým dělením na úhlové minuty a vteřiny.

Hipparchos ve svém výkladu předpokládal, že precesní pohyb je relativní pohyb bodů rovnodennosti a slunovratu, jak o tom svědčí název jeho spisu *O pohybu bodů slunovratu a rovnodennosti*. Hvězdy v rámci této koncepce jsou pohyblivé, podobně jako planety se vyznačují vlastním pohybem ve směru posloupnosti zvířetníkových souhvězdí, tedy od západu k východu. Tato Hipparchova teorie byla zřejmě spojena s faktem, že antickým astronomům jedinými známými pohybujícími se „hvězdami“ byly planety, které se přemísťovaly podél pásu zvířetníkových souhvězdí. Názory Hipparcha o precesi dobově odpovídají, byly adekvátní jemu dostupným údajům.

Již babylonští a antičtí astronomové na základě pozorování objevili pohyb Slunce na hvězdné obloze od západu k východu – v průběhu roku oběhne celý kruh ekliptiky, rychlost jeho pohybu je však v různých částech roku nestejná. Před Hipparchem např. Kallipos objevil odlišnou délku ročních období a Hipparchos propočty zpřesnil. Zjistil, že jarní období počítané od průchodu Slunce jarním bodem do letního slunovratu trvá 94 1/2 dne. Obdobně letní období trvá 92 1/2 dne, což dává celkovou délku období 187 dnů, zatímco časový interval mezi průchody podzimním a jarním bodem činí 178 1/4 dne. Skutečné v současnosti naměřené hodnoty vyjádřené ve dnech jsou 94,1 – 92,2 – 88,6 – 90,4. Antičtí astronomové si uvědomovali, že na jaře se Slunce pohybuje po obloze pomaleji, zatímco na podzim nejrychleji.

Geocentrické interpretaci jevu odpovídá konstrukce, v níž je Země posunuta do kvadrantu podzimu, mimo střed kruhové dráhy Slunce. Jeho pohyb po ekliptice se tak jeví nerovnoměrný. Tento model zavedl **Apollonius z Pergy (262 - 190) př. n. l.** Hipparchos propočítal a sestavil tabulku, podle které bylo možné určit polohu Slunce na hvězdné obloze pro každý den.

Historie výkladu pohybu Měsíce začíná starověkými babylonskými astronomy, kterým již bylo známo, že rovina dráhy Měsíce neleží v rovině ekliptiky, neboť zatmění Slunce a Měsíce se neopakují pravidelně při každém úplňku respektive novu. Hipparchos upřesnil úhel sklonu roviny dráhy Měsíce k ekliptice na hodnotu 5°.

Starověcí babylonští astronomové již ve 4. st. př. n. l. zjistili, že rychlost pohybu Měsíce kolem Země není konstantní. Při přibližování Měsíce k Zemi rychlost jeho pohybu narůstá, při vzdalování se naopak zmenšuje. Hipparchos tento nerovnoměrný pohyb vzhledem k pozorovateli na Zemi analyzoval a zjistil, že Měsíc zrychluje respektive zpomaluje svůj pohyb vzhledem k propočítanému střednímu pohybu, rozdíl poloh může činit až 6°.

K objasnění jevu Hipparchos přijal předpoklad, že stejně jako Slunce i Měsíc se pohybuje po excentrické kružnici – excentru, jehož rovina je skloněna k ekliptice pod úhlem 5° který ekliptiku protíná ve dvou bodech, výstupném a sestupném uzlu. Na sever od ekliptiky přechází Měsíc ve výstupném a na jižní stranu v sestupném uzlu. Dále na excentru rozeznával existenci nejbližšího bodu – *perigea* – a nejb vzdálenějšího bodu – *apogea*. Řečeno současnou terminologií, úhlová rychlost pohybu Měsíce v perigeu měla největší hodnotu, zatímco v apogeu nejmenší.

Hipparchos přispěl k upřesnění oběžných dob charakterizujících pohyb Měsíce. Přesností dosáhl díky tomu, že měl k dispozici některé údaje ze starověkého Babylonu o pozorování zatmění Slunce a Měsíce až z 5. st. př. n. l. , celkově za časový interval 345 roků.

Především upřesnil *synodickou oběžnou dobu*, čas mezi dvěma úplňky, který je roven podle soudobých údajů 29 dnů, 12 hodin, 44 minut a 2,8 sekundy, tedy 29,530592 dne.

Druhou oběžnou dobou známou Hipparchovi byla perioda oběhu Měsíce kolem Země vztahovaná k hvězdám, tedy *siderická oběžná doba*, jejíž v současnosti určená délka je 27 dnů, 7 hodin, 43 minut a 11,5 sekundy.

Třetí oběžnou dobou vztahující se k pohybu Měsíce je tzv. *anomalistický měsíc*, doba mezi dvěma následujícími průchody Měsíce perigeem jeho dráhy, s trváním 29 dnů, 13 hodin, 18 minut a 33,7 sekundy.

Poslední oběžnou dobou zavedenou v pozdní antice byl *drakonický měsíc*, časový interval mezi dvěma následujícími průchody Měsíce výstupným uzlem dráhy, jak tuto periodu

interpretoval poprvé Hipparchos. Připomínáme, že v jeho době se předpokládala nehybnost Země a rovina ekliptiky byla rovinou dráhy, po které se Slunce pohybuje kolem Země. V současnosti určená délka drakonického měsíce je 27 dnů, 5 hodin, 5 minut a 35,8 sekundy. Samotný termín *drakonický měsíc* byl zaveden až později ve středověku. Vycházel z legendy, podle které Slunce či Měsíc jsou v průběhu zatmění požírány drakem.

Hipparchos také přezkoumal problematiku určování vzdálenosti Země – Měsíc v 2. st. př. n. l. Bylo mu známo, že úhlový poloměr Měsíce je roven $16'$ a poloměr zemského stínu ve vzdálenosti Měsíce je $40'$, tj. $8/3$ krát větší. Z geometrických úvah Hipparchos našel, že poloměr Měsíce R_M je roven rozdílu poloměru Země R_Z a zemského stínu ve vzdálenosti Měsíce tedy $R_M = R_Z - R_{Zst}$. Odtud vyplynulo, že $R_M \approx 3/11 R_Z$, což je prakticky v souladu se skutečným rozměrem Měsíce. Po nalezení lineárního poloměru Měsíce, ze znalosti úhlového poloměru a vzhledem k tomu, že úhlový poloměr Měsíce je roven téměř přesně úhlovému poloměru Slunce, lze vzdálenost Měsíce od Země vyjádřit dnešním způsobem $r_{ZM} \approx 218R_M \approx 59R_Z$.

Pro vzdálenost Země – Měsíc našel Hipparchos poměrně přesnou hodnotu $59R_Z$, která byla převzata do Ptolemaiova *Almagestu*. Pro vzdálenost Země – Slunce byla Hipparchem stanovena hodnota $1120 R_Z$, tj. asi $7 \cdot 10^6$ km, což je přibližně 20krát méně než skutečná vzdálenost.

Při výkladu pohybu planet Hipparchos používal model epicyklů a excentricky umístěných deferentů. Není jasné, zda šlo o převzatý, nebo vlastní původní model.

Největší Hipparchova zásluha však spočívá ve vytvoření katalogu přibližně 850 hvězd, který vznikl kolem roku 129 př. n. l. Byly v něm v definitivní podobě udávány polohy v ekliptikálních délkách a šířkách. Připomínáme, že *ekliptikální délka* je úhel, který svírá rovina procházející póly ekliptiky a objektem s rovinou procházející póly ekliptiky a jarním bodem, *ekliptikální šířka* je úhlová vzdálenost objektu od roviny ekliptiky. Nejprve však Hipparchos vyjadřoval polohy hvězd pomocí úhlové vzdálenosti od světového rovníku (*deklinace*) a vzdálenosti od hlavního poledníku (obdoba *rektascenze*), jímž byl poledník procházející Rhodem. Komentář ke katalogu obsahoval měření poloh a časů východu, kulminací a západů souhvězdí již dříve uvedených ve spise *Komentář k Arátovi a Eudoxovi*. Původní Hipparchův katalog se nedochoval, jeho pravděpodobnou podobu známe jen z přenesení tohoto souboru do katalogu umístěného v sedmé a osmé knize Ptolemaiova *Almagestu*.

S pozoruhodnou intuicí Hipparchos rozdělil hvězdy pozorovaných pouhým okem do šesti tříd, přičemž vycházel z vnímání světla hvězd lidským zrakem. Nejasnější hvězdy měly hvězdnou velikost rovnou jedné, zatímco nejslabší šestou hvězdnou velikost. Intuitivně tak vystihl vlastnosti lidského oka, zachycené ve Weberově-Fechnerově fyziologickém zákonu z 19. století, vyjadřujícím logaritmický vztah mezi podnětem a subjektivním vjemem.

Za konkrétní důvod sestavení hvězdného katalogu je považován objev novy roku 134 př. n. l. v souhvězdí Štíra. Hipparchos si při této příležitosti zřejmě uvědomil důležitost zachycení vzhledu hvězdné oblohy pro příští generace, neboť na ní probíhají pomalé změny i v průběhu lidského života.



Obr. 3: Klaudios Ptolemaios

Almagest. Současně s jeho přípravou napsal předběžný výklad svých názorů a teorií – *Canobic Inscription* česky *Kanopská poznámka*. Po dokončení *Almagestu* přistoupil k sepsání astrologického spisu *Tetrabiblos* česky *Čtyři knihy*. Později Ptolemaios napsal rovněž encyklopedického spisy týkající se geografie a optiky.

Ptolemaios ve čtyřech knihách *Tetrabiblosu* zkoumal astrologii jako doplněk k astronomii, přičemž sledoval souvislost událostí na Zemi a jejich ovlivnění kosmickými tělesy. Údaje o jejich poloze mu poskytovala právě astronomie.

Samotný vliv kosmických těles považoval Ptolemaios za jeden z faktorů určujících události na Zemi; zkoumal dva typy astrologie – světovou čili obecnou a genetickou. Zabýval se především světovou astrologií, tj. metodami předpovídání událostí týkajících se velkých zemských regionů, zemí, národů či sociálních skupin. Mimo jiné zkoumal otázky tzv. astrologické geografie a předpovědi počasí.

V úvodu Ptolemaios píše: „*Dvě metody astronomické předpovědi, ó Syre, jsou nejdůležitější a nejplatnější. První v pořadí i podle účinnosti je ta, s jejíž pomocí chápeme aspekty pohybů Slunce, Měsíce a hvězd ve vztahu vzájemném a ve vztahu k Zemi, jak se čas od času vyskytují; druhá je ta, která pomocí přirozeného charakteru těchto aspektů samotných zkoumá změny, které tyto vyvolávají ve svém okolí. První metoda má vlastní způsob studia a má význam sama o sobě, i když bychom nesledovali cíle, o něž usiluje druhá metoda. Nyní filozoficky popíšeme druhou, méně soběstačnou metodu, aby ten, jehož cílem je pravda, nikdy nemohl srovnávat její představy s jistotou první, neměnné vědy, protože jí připisuje slabost a nepředvídatelnost hmotných kvalit nalézáných v jednotlivých věcech, a aby ani nikdo neupustil od těchto výzkumů, jak je v mezích možností, když je tak zřejmé, že většina událostí obecné povahy má příčiny skryté v nebesích. . .*“ Zde autor přejímá aristotelovský názor na neměnnost kosmických těles a jejich pravidelných pohybů, které lze poznat a předpovědět pomocí astronomie. „*Ale poněvadž všechno, čeho je těžké dosáhnout, může snadno napadnout převážná většina lidí, a v případě dvou zmíněných disciplín by bezdůvodná*

Poslední v řadě významných alexandrijských osobností byl **Klaudios Ptolemaios (90 – 165) ? n. l.** Přesná životopisná data Ptolemaia nejsou známa, připomínaná pozorování v jeho hlavním díle *Almagestu* jsou datována mezi roky 127 n. l. a 141 n. l. Žil tedy v době vlády císařů Hadriána (vládl 117 – 138), Antonia Pia (138 – 161) a s velkou pravděpodobností i počátkem vlády Marka Aurelia (161 – 180). Samotný *Almagest* byl napsán přibližně kolem roku 150 n. l. Z historických pramenů je známo, že roku 165 zasáhla Egypt a postupně Malou Asii, Itálii, a dokonce část střední Evropy epidemie moru. Lze proto hypoteticky předpokládat, že Ptolemaios s velkou pravděpodobností zemřel právě v tomto roce. Z jiných zdrojů víme, že zemřel stár zhruba 75 let, takže datum jeho narození vychází kolem roku 90 n. l. Můžeme nepřímou usuzovat, že začal svá pozorování zhruba ve věku 37 let a prováděl je 14 roků. Následně asi 9 let pracoval na svém stěžejním díle

tvorzení proti první z nich mohl učinit jen slepec, zatímco pro druhou je vhodná půda – poněvadž obtížnost jejich částí způsobila, že si myslí, že je úplně nepochopitelná, nebo obtížnost uniknutí tomu, co je známo, snížila dokonce použitelnost jejího předmětu, prověříme v krátkosti možnost a užitečnost takového předpovídání, ještě než nabídneme podrobné instrukce o tomto předmětu.“

Ptolemaios chápal, že nelze porovnávat astrologii s plnoprávnou vědou astronomií, nicméně se domníval, že však určité, i když diskutabilní výsledky poskytuje a tudíž je vhodné se jí zabývat.

Připomínáme, že v Ptolemaiově době byla astrologie, tedy umění předpovídání osudu podle polohy kosmických těles, všeobecně uznávána a považována za vědu. K předpovědím sloužily polohy pohybujících se kosmických těles – Slunce, Měsíce a pěti tehdy známých planet viditelných pouhým okem. U výpočtů poloh planet k danému datu bylo třeba znát teorie pohybu uvedených těles.

V textu následuje detailní výklad problematiky různých vlivů planet v závislosti na jejich poloze. *„Aktivní síla základní povahy Slunce spočívá ve vyzařování a do určité míry ve vysoušení (Aristotelovy čtyři prvky – teplo, chlad, vlhko a sucho). To je v případě Slunce mnohem zřetelnější než u jiných kosmických těles díky jeho velikosti a zřejmosti ročních změn, protože čím více se blíží k zenitu, tím více na nás takto působí. Většina síly Měsíce spočívá v zavlažování, zřejmě proto, že je blízko Země a díky svým velkým výparům.“* (Ptolemaios připomíná starou myšlenku, že vlhkost ze Země vyživuje kosmická tělesa). *„Působí tedy přesně tak, že z velké části změkčuje a způsobuje hnutí v těle, ale mírně se podílí také na hřejivé síle díky světlu, které získává od Slunce.“*

Saturn, (Ptolemaios zpravidla uvádí „hvězda“ Saturn) především ochlazuje a mírně vysušuje, pravděpodobně proto, že je nejdále (pořadí těles podle narůstající vzdálenosti od Země je podle Ptolemaia Měsíc, Merkur, Venuše, Slunce, Mars, Jupiter, Saturn) jak od slunečního žáru, tak od vlhkých výparů kolem Země. Jeho síly se jako i u ostatních planet řídí různými aspekty se Sluncem a Měsícem. Neboť více či méně, tu tak, tu onak mění jejich aspekty uzpůsobení nebeských vlivů.

Mars hlavně vysušuje a spaluje v souhlasu se svou ohnivou barvou, a protože je blízko Slunce, jehož sféra se nachází přímo pod ním.

Jupiter má mírnou aktivní sílu, protože se pohybuje mezi chladícím vlivem Saturnu a spalující silou Marsu. Zahřívá a zvlhčuje, a protože jeho hřejivá síla je větší díky sférám, které leží pod ním, vyvolává zúrodnující větry.

Venuše má stejné síly a mírnou povahu jako Jupiter, ale působí opačně; mírně hřeje, díky své blízkosti Slunci, ale především zvlhčuje jako Měsíc díky množství vlastního světla a proto, že získává exhalace z vlhké atmosféry obklopující Zemi.

O Merkuru se obvykle tvrdí, že v určité době vysouší a pohlcuje vlhkost, protože se nikdy nedostane do zeměpisných délek daleko od žáru Slunce.“

Poslední zajímavou ukázkou je popis vlivu Měsíce: *Také Měsíc, jako Zemi nejbližší kosmické těleso, poskytuje své záření, nejhojněji přírodním věcem, protože většina z nich, ať jsou živé či neživé, je s ním v souladu a mění se podle něho – řeky zvyšují a snižují svůj stav podle jeho svitu, moře mění příliv s jeho východem a západem a rostliny a zvířata buď celé, nebo jejich části rostou a vadnou spolu s Měsícem. . . “*

Od obecných vyjádření přechází Ptolemaios ke konkrétnějším. Rozebírá různé polohy planet a jejich vliv na přírodu, člověka a osudy lidí. Prohlašuje, že existuje vztah mezi životem člověka a postavením planet v okamžiku jeho narození.

Tetrabiblos měl velkou autoritu u astrologů, sehrál zásadní roli v dalším rozvoji astrologie, jeho autor se stal proslulým ve středověku především zásluhou tohoto spisu.

Přejdeme k hlavnímu astronomickému Ptolemaiovu dílu *Almagestu*. Jeho název nezvolil Ptolemaios, ale pochází z pozdější doby. Autor napsal spis s řeckým názvem *Μεγαλή συνταξις* - *Megalé syntaxis*, který překládáme nejčastěji jako *Velká skladba*. Samotný Ptolemaios v odkazech na svoji knihu ji nazývá *Μαθηματικη συνταξις*, což znamená *Matematická skladba* respektive *kompedium*. Arabští překladatelé zřejmě z úcty k autorovi či prostou záměnou slov v názvu zaměnili megalé *μεγαλη* (velká) a megisté *μεγιστη* (největší). Proto Ptolemaiovu knihu nazývali *Al Magisti*, odtud pochází i latinizovaný název *Almagest*.

Text *Almagestu* je značně obšírný, novodobý anglický a ruský překlad mají přes 500 stran velkého formátu, německý dokonce dva svazky o 400 stranách. *Almagest* byl samotným Ptolemaiem rozdělen na třináct knih, v textu se vyskytují odkazy na jednotlivé knihy. Pozdější prepisovatelé, překladatelé a komentátoři rozčlenili knihy na kapitoly, od pěti do devatenácti kapitol v každé knize, celkem jich je 146. Rozdělení do kapitol nepochází od Ptolemaia, neboť žádné odkazy na čísla kapitol či jejich názvy v textu nejsou. Víme, že v době kdy žil Pappos z Alexandrie (290 – 350) ?, tedy v 4. st. n. l., již rozčlenění na kapitoly existovalo, ale odlišovalo se od současného. Dochovaný řecký text obsahuje také některé interpretace, které byly vneseny až pozdějšími prepisovateli.

Úvod *Almagestu* začíná slovy: „*Skuteční filozofové, Syre, jak se domnívám, měli pravdu, když odlišovali teoretickou část filozofie od její praktické části.*“ Ptolemaios se obrací k osobě – Syrovi, což se objevuje i v dalších jeho dílech, například v *Tetrabiblosu*. Není jasné, o jakou konkrétní osobu jde. Jméno Syrus bylo v Egyptě v době pozdní antiky poměrně rozšířené.

Dělení věd převzal Ptolemaios částečně u Aristotela, o kterého se ve svých úvahách v celém *Almagestu* opírá. Přesněji Ptolemaios rozděloval vědy na praktické a teoretické, k posledně uvedeným patřila fyzika, matematika a teologie. Aristoteles dělil vědy na praktické (etika, politika), poietické (tvůrčí) a teoretické (fyzika, matematika a teologie).

V první knize zkoumá obecné otázky týkající se struktury vesmíru jako celku, jeho nejobecnějšího matematického modelu, z dnešního pohledu bychom mohli tento úvod nazvat antickou kosmologií. Například je dokazován sférický tvar oblohy a Země, centrální poloha a nehybnost Země. Text explicitně připomíná, že světová sféra rotuje jako celek, Země má tvar koule a nachází se ve středu světové sféry, vzhledem ke níž má nepatrné rozměry a je nepohyblivá. Z knihy věnované Zemi uvádíme ukázkou:

„*Kdo pokládá za podivné, že Země, tak nesmírně těžké těleso, se o nic neopírá a nepohybuje, jak se mi zdá, ten uvažuje podle předsudků vzniklých z toho, co se vidí při pozorování malých těles, a nikoliv, co se patří k obecným úvahám o světě, a z toho pak pochází ona chyba. Domnívám se, že takové setrávání v klidu se mu již nebude zdát podivné, jakmile se dopracuje k představě, že Země v celé své mohutnosti není ničím více než bodem ve srovnání s vesmírem, který ji obklopuje. Pak by shledal možným, že Země nesmírně malá je ze všech stran ovládána a pevně na svém místě držena rovnoměrnými tlaky, které na ni ze všech směrů vykonává ji obklopující vesmír, nekonečně větší než ona a složený z podobných částic.*“

Tedy ve svých názorech Ptolemaios vycházel ze základních představ aristotelovské fyziky. Nesprávně odhadoval důsledky případné rotace Země za 24 hodin. Podle něj by vyvolávala řečeno současnou terminologií „velké zrychlení“, pád těles západním směrem. Ptolemaios říká „*Země by se dávno rozpadla a zbořila by samotné nebe, živé tvory a vše nepřipevněné. . .*“ Mylně přeceňoval důsledky existence odstředivé síly, vznikající při rotaci libovolného tělesa. Kladně však lze hodnotit, že na potvrzení geocentrické soustavy uváděl i fyzikální argumenty, nikoliv pouze obecně filozofické úvahy.

Značná část první knihy *Sférická astronomie* je zasvěcena rovněž výkladu hlavních pojmů sférické astronomie – základních rovin na světové sféře, rovníku a ekliptiky. V druhé polovině knihy jsou podávány základy ptolemaiiovské sférické trigonometrie s řadou potřebných tabulek, které nahrazovaly trigonometrické funkce v té době ještě neznámé. Také zde nalezneme popis některých jednoduchých úhломěrných přístrojů.

Ke stanovení zeměpisné šířky φ a sklonu ekliptiky ε (úhlu, který svírá rovina ekliptiky s rovinou světového rovníku) Ptolemaios využil tradiční metodu. Určoval zenitovou vzdálenost Slunce (úhlovou vzdálenost Slunce od zenitu měřenou po vertikální kružnici) v poledne v dobách letního a zimního slunovratu. Z naměřených hodnot stanovil zeměpisnou šířku φ i sklon ekliptiky ε . Ptolemaios dospěl v *Almagestu* k vymezení hodnoty sklonu ekliptiky v intervalu $47 + 2/3^\circ < 2\varepsilon < 47 + 3/4^\circ$ a později upřesnil na $\varepsilon = 23^\circ 51'$, skutečná hodnota v jeho době činila $\varepsilon = 23^\circ 41'$.

Je zajímavé, že v první knize Ptolemaios konstatuje možnost z naměřených údajů stanovit zeměpisnou šířku φ místa pozorování, její hodnotu však zde neuvádí. Přesunul ji až do páté knihy s výsledkem $\varphi = 30^\circ 58'$. Svá známá pozorování prováděl Ptolemaios v Alexandrii.

V první knize Ptolemaios zavádí časový stupeň jako časový interval rovný $1/360$ části dne. Jednotka má však starší, babylonský původ. Ve stupních ze sférických souřadnic Ptolemaios určoval rektascenzi.

Problematika sférické astronomie je vysvětlována v druhé knize. Jsou v ní zkoumány úlohy na určování dob východů a západů kosmických těles a jejich průchodů přes poledník. Dále jsou rozebírány praktické otázky, například délka dne a stínu gnomonu, úhel mezi ekliptikou a základními kružnicemi světové sféry. Úhly mezi ekliptikou a horizontem nejsou v *Almagestu* v tabulkové podobě, mohou však být snadno propočítány. Pro výpočet maximální délky dne využíval Ptolemaios starší astronomické údaje Hipparcha.

Na ukázkou z druhé knihy první kapitoly *O obecné poloze obývaných částí Země* citujeme: „*Co se týká pro rozbor nezbytných podrobností, charakterizujících sklon sféry, pak v uváděném díle by snad bylo nejvhodnější zkoumat charakteristické zvláštnosti každého ze severních kruhů (pásů) rovnoběžných s rovníkem s mezi nimi se nalézajícími obývanými částmi. K těmto zvláštnostem patří vzdálenost pólů prvního pohybu nebeské sféry (vzdálenost pólů světového rovníku od horizontu) nebo vzdálenost kruhů rovnodennosti od bodu, nacházejícího se přímo nad hlavou (v zenitu), proměřované po poledním kruhu.*“

Ptolemaios hovoří o tom, že na každém místě je hodnota zeměpisné šířky rovna výšce pólu světového rovníku nad horizontem.

V druhé knize autor rozebírá další z nejdůležitějších problémů antické a později středověké sférické astronomie, určování dob východů kosmických těles na dané zeměpisné šířce.

Teorie pohybu Slunce, zahrnující výběr kinematického modelu a sestavení tabulek pro výpočet jeho ekliptikálních délek, je vypracována v třetí knize *Almagestu*. Byla pro Ptolemaia nezbytná pro studium pohybu Měsíce a hvězd, neboť jejich polohy určoval pomocí známé délky Slunce.

Jde o jednu z nejjednodušších teorií, neboť Slunce pohybující se po ekliptice neopisuje po obloze smyčky jako planety a ve srovnání s Měsícem je jeho výklad pohybu jednodušší.

Ptolemaios při tvorbě kinematického modelu pohybu Slunce postupně řešil několik úloh. Nejprve určil, který časový interval v průběhu roku je nejvhodnější. Následně si vyjasnil, má-li vybraná roční doba konstantní velikost, a v závěru našel její hodnotu.

Časová jednotka rok, v dnešní terminologii používáme termín *tropický rok*, byla Ptolemaiem definována jako časový interval, v průběhu něhož Slunce uskutečňuje po ekliptice úplný oběh vzhledem k určitému počátečnímu bodu, nejčastěji k bodu jarní rovnodennosti.

Výklad Ptolemaios začíná popisem bodů východů Slunce na horizontu v průběhu roku, což spojuje s ročním pohybem Slunce po ekliptice. Následuje zkoumání délky tropického roku, s využitím pozorování poloh Slunce v průběhu několika staletí. Ptolemaios vybral šest měření okamžiků podzimních rovnodenností, prováděných Hipparchem na Rhodu mezi roky 161 př. n. l. až 142 př. n. l., a čtrnáct okamžiků jarních rovnodenností mezi roky 146 př. n. l. až 127 př. n. l. U těchto pozorovacích řad zaokrouhloval Hipparchos časové okamžiky rovnodenností na nejbližší čtvrtiny dne, zaznamenával, že rovnodennost nastala o půlnoci, ráno, v poledne, respektive večer. Proto stanovil pouze přibližnou délku tropického roku, a to $365 \frac{1}{4}$ dne.

V třetí knize *Almagestu* Ptolemaios rozebírá Hipparchovo upřesnění délky roku na základě údajů z pozorování letního slunovratu 279 př. n. l. provedeného Aristarchem a Hipparchova pozorování letního slunovratu v roce 134 př. n. l. Oba letní slunovraty odděluje 145 roků, zjištěný časový interval mezi nimi byl však o 12 hodin kratší, než by bylo v případě položení délky tropického roku přesně $365 \frac{1}{4}$ dne. Tudíž za 290 roků, které Hipparchos zaokrouhluje na 300 roků, činí rozdíl mezi údaji jeden den. Proto je délka roku rovna $(365 + \frac{1}{4} - \frac{1}{300})$ dne. Žádná upřesnění této hodnoty na základě vlastních pozorování Ptolemaios neprovedl, pouze přejal Hipparchův údaj. Odtud Ptolemaios stanovil hodnotu středního denního pohybu Slunce po ekliptice v délce a našel v šedesátkové soustavě hodnotu 0, 59, 8, 17, 13, 12, 31, tedy číslo $\frac{59}{60} + \frac{8}{60^2} + \frac{17}{60^3} + \frac{13}{60^4} + \frac{12}{60^5} + \frac{31}{60^6}$. V jednotkách používaných v současné době jde o hodnotu $0,98563526^\circ = 0^\circ 59' 8,28700238''$. Ptolemaios rovněž našel střední roční pohyb Slunce, v jeho interpretaci přírůstek délky za jeden egyptský rok, $359,75687661^\circ = 359^\circ 45' 24,75587306''$.

Ptolemaios uvedl podrobné instrukce k výpočtu časové rovnice, rozdílu mezi pravým a středním slunečním časem na každý den v roce. Čtenářům připomínáme dnešní definice: *Pravý sluneční čas* je určen hodinovým úhlem pravého Slunce, *střední sluneční čas* je měřen pomocí tzv. druhého středního Slunce, které se jako myšlený bod pohybuje rovnoměrně po světovém rovníku. Ptolemaios v *Almagestu* zavedl řadu důležitých pojmů, které jsou v astronomii používány dodnes, např. *pojmy střední Slunce, střední denní pohyb Slunce, střední roční pohyb Slunce*.

Důvodem, proč ke studiu pohybu Slunce zvolil osmnáctiletý cyklus, mohla být podobnost se sarosem. Během této periody se cyklicky opakují sluneční a měsíční zatmění; trvá cca 18 roků a 10 dnů, přesně 6 585,32 dne. Listy papyru, na které Ptolemaios psal, měly

standardní šířku. Využití osmnáctiletých časových intervalů v tabulkách je spojeno s nezbytností rozmístění textu na listy papyru standardní velikosti s čtyřiceti pěti řádky. Proto Ptolemaios seskupoval tabulky středních pohybů na třech listech následujícím způsobem: na prvním listu 45 řádků s osmnáctiletými přírůstků, na druhém $18 + 24 = 42$ řádků (tabulky jednotlivých roků a hodin), na třetím $12 + 30 = 42$ řádků (tabulky měsíců a dnů v měsíci). Celkově tabulky středních pohybů Slunce v *Almagestu* tímto způsobem zahrnují $18 \times 45 = 810$ roků, tj. nedosahují epochy samotného Ptolemaia, neboť za počátek tabulek zvolil rok 747 př. n. l. podle éry Nabukadnéšara. Ptolemaios pochopil nevhodnost zvolené formy tabelování, a proto ve svém spise *Πρόχειροι κανόνες* česky *Příruční tabulky* napsaném později přešel k pětadvacetiletému cyklu, za počáteční datum přijal rok 323 př. n. l., kdy začal vládnout makedonský král Filippos II.

V textu *Almagestu* následuje výklad nejjednodušších astronomických poznatků vyplývajících z pozorování: sférický tvar Země, denní pohyb oblohy, nepravidelnosti pohybu Měsíce známé v tehdejší době, pohyb Slunce a planet, doba trvání dne a noci v různých zeměpisných šířkách, doba východu a západu hvězd.

Ve čtvrté knize Ptolemaios vykládá složitou teorii pohybu Měsíce, který je Zemi nejbližším kosmickým tělesem. Ze Země lze proto zjistit i malé nepravidelnosti v jeho pohybu (odchylce jeho polohy o 2 km odpovídá úhel $1''$). Například k časové předpovědi nástupu slunečního zatmění na jednu sekundu je potřebné znát polohu Měsíce s přesností na $0,5''$, v antice však přesnost pozorování neklesala pod několik úhlových minut. Pro lepší pochopení pohybu Slunce a Měsíce budeme nejprve celou problematiku stručně charakterizovat z pohledu současné kosmické mechaniky. Země se pohybuje kolem Slunce v důsledku působení gravitace, vliv planet ve srovnání se Sluncem je při úrovni přesnosti antických pozorování zanedbatelný.

Měsíc je souputníkem Země, přesněji řečeno obě tělesa obíhají kolem společného hmotného středu – barycentra. Uvažovanou hlavní silou ovlivňující pohyb Měsíce je gravitační působení Země. Samotné barycentrum však obíhá kolem Slunce, proto třetím gravitačně působícím tělesem na soustavu Země – Měsíc je Slunce. V kosmické mechanice posuzujeme velikost gravitačního působení prostřednictvím zrychlení, které udílí jedno kosmické těleso druhému. Země udílí Měsíci tzv. zrychlení hlavní, rovné přibližně $3 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, jehož závislost na vzdálenosti je r^{-2} . Tzv. poruchové zrychlení Měsíce, vyvolané rozdílem gravitačního silového působení Slunce na Měsíc a Zemi, je malé, ale zanedbatelné. Připomínáme, že poruchové zrychlení závisí na vzdálenosti úměrně r^{-3} . Dosahuje v situaci, kdy je Měsíc při oběhu kolem Země ve větší nebo naopak menší vzdálenosti než Země, přibližně 1 % hodnoty zrychlení od hlavního tělesa – Země, tedy $3 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Během tří dnů kolem novu anebo úplňku se toto zrychlení mění velmi málo, odchylku polohy Měsíce od bezporuchové dráhy lze odhadnout na 1 000 km. Dynamika zrychlení je závislá na vzájemných vzdálenostech Měsíce, Země a Slunce, mění se v průběhu oběhu Země kolem Slunce i Měsíce kolem Země. Proto je novodobá teorie pohybu Měsíce neobyčejně komplikovaná.

Ptolemaios potřeboval vytvořit kinematickou teorii pohybu Měsíce, aby mohl využít pozorování Měsíce při určování zeměpisných délek na povrchu Země a pro předpovědi zatmění Slunce a Měsíce. K dispozici měl starší údaje o pozorování zatmění Slunce a Měsíce ze starověkého Babylonu, z Rhodu a Alexandrie, jakož i vlastní záznamy, vše v časovém

rozpětí téměř devíti století. Rovněž znal určení délek čtyř základních oběžných dob Měsíce, získaných a vypracovaných Hipparchem.

Z velkého počtu údajů vybral Ptolemaios pozorování zatmění Měsíce, která byla přesnější než ostatní, neboť okamžiky nástupů a konců zatmění nezávisí na poloze pozorovatele na Zemi. V *Almagestu* jsou uváděny údaje o devatenácti zatměních Měsíce, pozorovaných jak před Ptolemaiem, tak jím samým. Ptolemaios připomíná Aristotelův výklad objasňující příčinu měsíčních zatmění tím, že Měsíc leží ve stínu vrženém Zemí. Kruhovým tvarem zemského stínu dokazoval Aristoteles sférický tvar Země.

Následuje Ptolemaiovův výklad pohybu Měsíce v ekliptikální šířce. K časovému upřesnění doby drakonického měsíce, plného oběhu Měsíce vzhledem k *výstupnému uzlu dráhy* (průsečíku dráhy Měsíce s rovinou ekliptiky), se rozhodl vybrat dvě zatmění Měsíce, oddělená co největším časovým odstupem. Zatmění Měsíce musela vyhovovat podmínce výskytu Měsíce ve stejné poloze vzhledem k dráhovému uzlu a situaci, kdy je Měsíc přibližně ve stejné vzdálenosti od Země. Ptolemaios pro vlastní výpočet zvolil následující dvě zatmění Měsíce: 490 př. n. l., 25/26. dubna, (doba trvání 6 hodin, pozorované v Babylonu) a 125 n. l., 5/6. dubna, (doba trvání 4 hodiny, pozorované v Alexandrii).

Časový interval mezi zatměními tvoří přesně 615 roků, 133 dnů, 21 hodin a 50 minut. Za tuto dobu proběhl celý počet drakonických měsíců. Připomínáme, že jako téměř v celém *Almagestu* i zde Ptolemaios používal při výpočtech egyptský rok rovný přesně 365 dnům. Naopak okamžiky slunečních zatmění, zákrytů hvězd Měsícem a jeho polohy mezi hvězdami na poloze pozorovatele závisí. Důvodem je skutečnost, že Měsíc obíhá v blízkosti Země, tudíž je třeba provést paralaktickou opravu změny polohy Měsíce v závislosti na poloze pozorovatele na Zemi. Ptolemaios později určil paralaxu Měsíce a přibližně stanovil i vzdálenost Měsíce.

Rovněž v čtvrté knize je podáván výklad teorie pohybu Měsíce v ekliptikální délce. Je v něm volen obdobný postup jako u pohybu Slunce, Ptolemaios nejprve propočítává střední denní pohyb Měsíce, určuje jeho hodnotu na $13,176^\circ$ za den. Následně popisuje velkou nerovnost, rozdíl mezi pohybem skutečného a středního Měsíce v důsledku nerovnoměrného pohybu Měsíce po eliptické dráze kolem Země. Středním Měsícem rozumíme fiktivní Měsíc, který by se pohyboval rovnoměrně po kruhové dráze kolem Země. Maximální rozdíl mezi skutečným a středním Měsícem je $6^\circ 7,3'$. Do kinematických výpočtů poloh Měsíce v antické astronomii před Ptolemaiem byla zahrnována pouze tato tzv. velká nerovnost.

Ptolemaios se v *Almagestu* také zabývá druhou nerovností v pohybu Měsíce, dnes nazývanou *evekce*. Konstatuje, že v první a třetí čtvrti se Měsíc předbíhá na obloze o více než dva své úhlové průměry od propočítané polohy, jak zaznamenal již dříve Hipparchos. Podrobný kinematický popis jevu je však dílem až Ptolemaia. Dnes víme, že v důsledku evekce se Měsíc může odchýlit od polohy na střední dráze až o $1^\circ 17'$, což odpovídá zmiňovaným dvěma průměrům Měsíce.

Sám jev nerovnoměrnosti pohybu Měsíce vzniká změnami výstřednosti měsíční dráhy (výstřednost je určena poměrem vzdálenosti ohniska od středu elipsy k délce hlavní poloosy). Jev je závislý na postavení Slunce k *přímce apsid* měsíční dráhy – spojnici perigea a apogea. Přímkou apsid se jeho rušivým působením stáčí ve směru pohybu Měsíce a vý-

střednost jeho dráhy se zvětšuje. Evekce periodicky mění výstřednost dráhy Měsíce, její perioda činí přibližně 31,8 dne.

Fyzikální vysvětlení jevu podal až Newton. Příčinou je změna polohy Měsíce vzhledem k Slunci. V novu je Měsíc v menší vzdálenosti ke Slunci než Země, přitažlivá síla Slunce má snahu „vzdálit“ Měsíc od Země. Měsíční dráha je pak protažena ve směru k Slunci. Poruchové působení Slunce dosahuje maxima v periheliu a minima v aféliu zemské dráhy. V *Almagestu* Ptolemaios hovoří o výše popsané nerovnoměrnosti jako o kolísání. Termín *evекce* zavedl až v roce 1634 francouzský astronom Ismaël Boulliau (1605 – 1694), proslulý pozorovatel proměnných hvězd.

Další dvě poruchy v pohybu Měsíce, *roční nerovnost* a *variace*, objevil o jeden a půl tisíce roků později dánský astronom **Tycho Brahe (1546 – 1601)**. Pozdní objev variace vysvětlujeme tím, že je nulová v novu a úplňku, neprojevuje se tedy při zatměních, která byla hlavním zdrojem informací o pohybu Měsíce v antické astronomii.

Následně Ptolemaios zmiňuje periodu saros a užívá pro ni hodnotu přebranou od Hipparcha, jak jsme již uvedli 6 585,32 dne \approx 18 roků 10 dnů. Mylně se Hipparchovi připisuje autorství určení její hodnoty, ten ji pouze převzal z babylonských záznamů.

Ptolemaios k vytvoření metody výpočtu polohy Měsíce na obloze zvolil model soustavy epicykl – deferent. V kinematické teorii Ptolemaia se Měsíc pohybuje po epicyklu ve směru pohybu hodinových ručiček. Střední Měsíc se pohybuje po deferentu proti směru pohybu hodinových ručiček s dobou oběhu rovnou synodickému měsíci. V největší vzdálenosti od Země v apogeu je vzdálenost Měsíce $64 \frac{1}{6} R_Z$. Naopak v perigeu je minimální, $33 \frac{1}{2} R_Z$, což je téměř dvakrát méně. Z pozorování pouhým okem však bylo zřejmé, že pozorovaný úhlový průměr Měsíce se mění ve skutečnosti pouze ve velmi malých mezích, a nikoliv dvakrát, jak vyplývalo z teorie. Ptolemaios k tomu podává zajímavé vysvětlení, podle něhož u Měsíce v malé vzdálenosti od Země nemůže pozorovatel pohledem zachytit celou velikost průměru Měsíce.

Hodnoty největšího a nejmenšího pozorovaného průměru Měsíce určil Ptolemaios ze záznamů pozorování měsíčních zatmění z 16/17. července 540 př. n. l. v Babylonu, kdy se Měsíc nacházel v blízkosti apogea své dráhy a 27/28. ledna 140 př. n. l. na Rhodu, kdy Měsíc byl v blízkosti perigea své dráhy. Pozorované průměry disku Měsíce Ptolemaios použil v prvním případě $31' 20''$, v druhém $35' 20''$, správné hodnoty však byly $29' 22''$ a $33' 30''$. U Slunce pozorovaný průměr disku položil Ptolemaios za konstantní a rovný $31' 20''$, ve skutečnosti se mění v intervalu $31' 28'' - 33' 32''$. Zhodnoceno současným pohledem, Ptolemaiovy pozorovací údaje byly značně nepřesné.

Ptolemaiova teorie pohybu Měsíce dávala možnost určovat jeho polohu na obloze prostřednictvím ekliptikální délky a šířky, nezachycovala však prostorové vzdálenosti Měsíce od Země. Propočet změny vzdálenosti Měsíce by podle ní vedl k rozporům s pozorovacími údaji. Teorie pohybu Měsíce zachycující změny jeho vzdálenosti byla podána až polským astronomem **Mikulášem Koperníkem (1473 – 1543)** ve spisu *O oběžích nebeských sfér*, ve kterém umístil Zemi do středu deferentu a zavedl k přesnějšímu vystižení ještě druhý epicykl.

Pátá kniha *Almagestu* se skládá ze dvou částí. V první je podáván podrobný popis astronomického přístroje dnes zpravidla nazývaného armilární sféra, v druhé části jsou vyloženy metody určování vzdáleností Slunce a Měsíce, je objasňována teorie sluneční

a měsíční paralaxy, nezbytná pro výpočet zatmění obou těles. Paralaktické tabulky jsou nejsložitější ze všech uváděných v *Almagestu*.

Celkově jsou v *Almagestu* shromážděny údaje o devatenácti měsíčních zatměních pozorovaných jak před Ptolemaiem, tak jím samým.

Teorii zatmění Slunce a Měsíce vycházející z Hipparcha Ptolemaios dále rozvíjí v šesté knize, která je doplněna matematickými výpočty a četnými ilustracemi. Autor propočítává údaje o novech a úplních pro časový interval 1 100 roků. Začíná prvním rokem éry Nabukadnésara, tedy 747 př. n. l., a končí rokem 355 n. l. V tabulkách udává data v měsíci, první měsíc roku podle egyptského kalendáře, kdy nastupuje nov či úplněk.

Zatmění Slunce a Měsíce nenastávají při každém úplňku či novu. V syzygiích, což je společný název pro konjunkci (nov) a opozici (úplněk), se musí nacházet Měsíc v blízkosti jednoho z uzlů své dráhy, aby zatmění mohlo nastat.

Jestliže by dráhová rovina Měsíce byla shodná s rovinou ekliptiky, pak by se při každém novu Měsíc nacházel přesně mezi Zemí a Sluncem a pozorovali bychom sluneční zatmění při každém novu. Dráhová rovina Měsíce, jak jsme již uvedli, protíná ekliptiku ve dvou uzlech. Jejich spojnice, uzlová přímka, nezachovává stále stejný směr ke hvězdám, nýbrž vykonává jeden oběh za 18,6 roku.

Ptolemaios provedl výpočty podmínek pro pozorovatele slunečního zatmění v pásu zeměpisných šířek od $16^{\circ} 30'$ (soutok řek Atbaru a Nilu, v dnešním Súdánu) do $48^{\circ} 30'$ (střední tok Borisfenu, dnešní Dněpr). Podmínky pro pozorování zatmění Slunce tak jsou různé v závislosti na tom, zda se Měsíc nachází severněji či jižněji od dráhového uzlu. Při výpočtech Ptolemaios používal jím určenou hodnotu úhlu sklonu měsíční dráhy k ekliptice. Autor zachycuje a objasňuje čtenáři geometrický obraz jevu zatmění Slunce a Měsíce. Pro podmínku nástupu měsíčního zatmění nalézá krajní hodnotu úhlové vzdálenosti Měsíce od uzlu $12^{\circ} 12'$, což je velmi blízké k hodnotě uváděné v současnosti.

Srovnání tabulek zatmění Slunce a Měsíce sestavených Ptolemaiem s údaji propočítanými v současnosti zpětně dává téměř ve všech případech velmi dobrou shodu. Problematika slunečních a měsíčních zatmění je jednou z nejdůmyslnějších aplikací Ptolemaiovy teorie pohybu Měsíce. V době pozdní antiky byla na vysoké úrovni, přestože veškerá pozorování byla prováděna pouhým okem, bez použití optických přístrojů, pouze s jednoduchými úhломěrnými přístroji.

Sedmá a osmá kniha obsahují *katalog* více než jednoho tisíce hvězd. Celkový počet objektů v katalogu je nejčastěji uváděn 1 028, jsou rozděleny do čtyřiceti osmi souhvězdí, dále rozčleněných do dvaceti jedna severních souhvězdí (332 hvězd), dvanácti zvířetníkových souhvězdí (290 hvězd) a patnácti jižních souhvězdí (298 hvězd). V katalogu je rovněž dvacet dva skupin zahrnujících hvězdy neuvedené v žádném souhvězdí (108 hvězd). V třech případech se však hvězdy opakují, jsou zapsány ve dvou souhvězdích. Vedle toho dalších pět objektů nejsou hvězdy, jde například o mlhovinu v Orionu, o dvojitou hvězdokupu $\chi + h$ Persea a hvězdokupu Praesepe. Proto ze soudobého pohledu je v katalogu uvedeno cca 1 020 hvězd (cca 20 hvězd se nepodařilo identifikovat).

Souhvězdí jsou seřazena podle vzdálenosti od severního světového pólu spirálovitým způsobem v pořadí narůstání ekliptikálních délek. Nejprve souhvězdí vpravo od oblasti Mléčné dráhy, následuje oblast Mléčné dráhy, souhvězdí vlevo od ní, zvířetníková souhvězdí a nakonec hvězdy jižní oblohy. Toto netradiční pořadí začíná souhvězdími Malého

medvěda, Velké medvědice a teprve na třetím místě je souhvězdí Draka, kterým by podle logiky měl katalog začínat, neboť je položeno u pólu ekliptiky. V souhvězdích jsou nejprve uváděny ekliptikální souřadnice délek a šířek základních hvězd, následně souřadnice hvězd, které tvoří základní obrys souhvězdí. Ekliptikální délka byla proměřována podél pozorované roční dráhy středu Slunce – ekliptiky od bodu jarní rovnodennosti proti směru denního pohybu světové sféry až po kruh šířky, procházející od pólu ekliptiky přes hvězdu. Druhá souřadnice, ekliptikální šířka, zjednodušeně úhlová vzdálenost hvězdy od ekliptiky, byla měřena od ekliptiky podél kruhu šířky k hvězdě. Přesněji řečeno ekliptika byla rozdělena na dvanáct částí podle zvířetníkových souhvězdí a antičtí astronomové označovali délku pomocí zvířetníkového souhvězdí a délky hvězdy od počátku tohoto souhvězdí.

Ekliptikální souřadnice byly považovány antickými astronomy za neměnné, pouze ekliptikální délky se rovnoměrně zvětšovaly v důsledku precese, šířky se s časem neměnily vůbec. Až později bylo objeveno, že i ekliptikální souřadnice se mění, a tudíž se přestaly používat. Koperník proto ve svém katalogu zahrnutém do spisu *O oběžích nebeských sfér* ekliptikální délky hvězd vztahoval ke hvězdě γ Ari, jejíž délku položil rovnou nule.

V původní podobě *Almagestu* byly souřadnice hvězd uváděny ve zlomcích stupňů, např. $1/6^\circ$, $1/5^\circ$, $1/4^\circ$, $1/3^\circ$ atd. Zlomky s jedničkou v čitateli jsou objevem egyptské aritmetiky, antičtí astronomové je převzali. Dávali zpravidla přednost zápisu $1/2 + 1/4$, nikoliv současným způsobem $3/4$. Dnes víme, že souřadnice jsou v katalogu zachyceny s přesností $1/6^\circ$, tedy $10'$, pouze výjimečně $1/4^\circ$, tudíž $15'$.

Již dobách před Ptolemaiem starověké kultury spojovaly jasné hvězdy v souhvězdí do obrazů lidí, zvířat, předmětů atd. Připomínáme, že v dnešní době rozhodnutím IAU z roku 1930 je obloha rozdělena na osmdesát osm souhvězdí. Ptolemaiem pozorované hvězdy na obloze spadají do padesáti současných souhvězdí. Ten obsahuje 15 hvězd s hvězdnou velikostí první magnitudy, 45 hvězd druhé magnitudy, 208 hvězd třetí magnitudy, 474 hvězd čtvrté magnitudy, 217 hvězd páté magnitudy a 49 hvězd šesté magnitudy. Dvanáct hvězd je ještě slabších, jde o hvězdy, jejichž jasnost autor katalogu špatně odhadl. Původní Ptolemaiovo třídění bylo ve skutečnosti jemnější, mnohé hvězdy v katalogu měly poznámku (řečeno současnou terminologií), že jejich jasnost je větší, respektive menší, než je pro danou hvězdnou velikost obvyklé. Do katalogu autor vybral z méně jasných hvězd pouze takové, které byly součástí obrazů souhvězdí.

Rozdělení hvězd podle jasností do hvězdných velikostí neodpovídá současnému dělení úplně všech případech, například podle Ptolemaia jsou Arktur a Sirius stejně jasné hvězdy.

V sedmé knize *Almagestu* Ptolemaios opakovaně připomíná, že pozorování hvězd prováděl sám a že srovnával svá měření s Hipparchovými a s údaji ještě dalších starších astronomů, Timocharise a Aristilla.

Soudobá astrometrická analýza potvrdila, že nejpřesněji jsou v katalogu stanoveny polohy jasných hvězd Arktur, Preindematrix (současné značení 47ϵ Vir), Spica, Regulus, Aselli (43γ Cam), Sirius, Procyon, Lyra (Vega), Capella, Aquila (α Aql), Canopus a Antares.

V katalogu Ptolemaios zaznamenává načervenalé zbarvení u hvězd Antares, Arktur, Aldebaran, Betelgeuse, Pollux a Sirius. Hvězdu Sirius, fyzickou dvojhvězdu se složkami A a B Ptolemaios klasifikuje jako objekt s hvězdnou velikostí první magnitudy. Zejména zmínka o načervenalém zbarvení Siria vzbudila velkou pozornost astronomů. Hypotéza,

že v Ptolemaiově době mohl být Sirius B zřejmě červeným obrem, je však astrofyzikálně málo pravděpodobná. V pozdější modifikaci Ptolemaiova katalogu od perského astronoma **Al Súfího (903 – 986)** z roku 964, ve kterém jsou upřesněny hvězdné velikosti, se již zmínka o načervenalém zabarvení Siria neobjevila.

V kapitole sedmé knihy věnované precesi píše, že časový interval mezi pozorováními Hipparcha a prvním rokem vlády Antonia Pia – 138 n. l., „*v kterém jsem také pozoroval velkou část nehybných hvězd*“, je roven 265 roků. Srovnání ekliptikálních šířek hvězd s dřívějšími měřeními vedlo Ptolemaia k závěru, že v průběhu staletí se šířky hvězd nezměnily: „*když jsme určili šířku každé hvězdy, našli jsme hodnoty stejné jako v dobách Hipparcha, v krajní míře s nevelkými odchylkami, které mohly být způsobeny pozorovacími chybami.*“

Ekliptikální délky hvězd v důsledku precese s časem narůstaly. Dnes víme, že Ptolemaios se dopustil chyby v určení velikosti precese a použil nepřesnou hodnotu 36"/rok místo 50"/rok. Pravděpodobně plně nedomyslel poznámku Hipparcha, který při srovnání svých pozorování s Timocharisovými a Aristillovými uvedl, že velikost precese je nejméně 36"/rok. Ptolemaios považoval tuto hodnotu za definitivní.

Chyba měla závažné důsledky, v katalogu *Almagestu* jsou délky mnoha hvězd uvedeny menší, než jaké byly v Ptolemaiově době, rozdíl činí 1°. Tuto skutečnost objevila celá řada astronomů, viz text dále, kteří dospěli k závěru, že Ptolemaios u převážné většiny hvězd převzal ekliptikální délky hvězd z Hipparchova katalogu a přidal k nim svoji opravu na precesi za 265 roků. Výpočet je zřejmý: $36'' \times 265 = 9\,540'' = 2^\circ 40'$, zatímco potřebné bylo přidat $50'' \times 265 = 13\,250'' = 3^\circ 40'$, rozdíl obou vypočtených hodnot dává 1°.

Samotnou precesi Ptolemaios objasňuje kinematicky rotací sféry nehybných hvězd kolem pólů ekliptiky ve směru posloupnosti zvířetníkových souhvězdí. Precesní pohyb je podle něj vlastní sféře hvězd, nikoliv pouze bodům rovnodennosti a slunovratu vzhledem ke hvězdám, jak původně předpokládal Hipparchos. V Ptolemaiově koncepci body rovnodennosti a slunovratu byly nehybné v prostoru, proto bod jarní rovnodennosti byl použit jako začátek odpočtu ekliptikální délky.

V *Almagestu* Ptolemaios rozvádí podrobněji svůj postup určení ekliptikálních souřadnic. Nejprve stanovil souřadnice vybraných vztažných hvězd. Dále použil teorii pohybu Slunce vytvořenou v *Almagestu* a vypočítal jeho ekliptikální délku v určitém časovém okamžiku, určil rozdíl délek mezi vztažnou hvězdou a Sluncem. Problém nepozorovatelnosti hvězd ve dne a Slunce v noci Ptolemaios vtípně obešel pomocí Měsíce, který je pozorovatelný v obou případech. Zjištěním úhlové vzdálenosti mezi Sluncem a Měsícem před západem Slunce mohl nastavit kruh ekliptiky na armilární sféře pro Slunce. Následně Ptolemaios stanovil rozdíl ekliptikálních délek mezi Měsícem a hvězdou po západu Slunce. Známým způsobem změřil posuv a paralaxu Měsíce, získal tak ekliptikální délku. Za pomoci druhého kruhu s vizíry určil ekliptikální šířku. V uvedené metodě je obsažen odhad časového intervalu mezi oběma měřeními Měsíce, přibližně asi jedna hodina, větší přesnost však není nezbytná. Popsaný postup předpokládal pouze dvě měření, elongaci Měsíce od Slunce před jeho západem a elongaci hvězdy od Měsíce. Všechny ostatní hodnoty nezbytné pro nalezení ekliptikální délky hvězdy jsou určovány výpočtem.

Takto Ptolemaios stanovil souřadnice hvězdy Regulus roku 139 n. l. Zřejmě příklad podrobně rozebíral k ilustraci své metody. Měření souřadnic Regula je dnes všeobecně uznáváno jako nezpochybnitelné původní Ptolemaiovo pozorování.

Ptolemaios v sedmé knize *Almagestu* připomíná Hipparchem popsaná hvězdná seskupení – souhvězdí a konstatuje, že se zachovala do jeho doby. Učinil odtud správný závěr, že hvězdy vytváří neměnné pozadí. Jsou v Ptolemaiově katalogu označovány popisným způsobem – název souhvězdí a uvedení její polohy v souhvězdí. Například zmiňovaná hvězda, původně Hipparchem objevená nova v souhvězdí Štíra, je uváděna jako „střední hvězda na čele Štíra“. Dále Ptolemaios popisuje a upřesňuje i polohy jednotlivých hvězd, které nejsou součástí základního obrazu souhvězdí, ale nacházejí se v něm. Obdobným způsobem postupovali i dříve v starověku babylonští astronomové, antičtí astronomové včetně Hipparcha a Ptolemaia tento způsob převzali.

Teprve mnohem později roku 1603 německý právník a astronom **Johann Bayer (1572 – 1625)** ve své *Uranometrii*, atlasu oblohy zobrazujícího asi 2000 objektů, zavedl označení hvězd v souhvězdích zpravidla podle jejich jasnosti řeckými písmeny α , β , γ , δ atd. Krátkost tohoto označování byla pro astronomy výhodná a užívá se dodnes.

Z obsahu *Almagestu*, čtvrté kapitoly sedmé knihy nazvané *O způsobu sestavení katalogu nehybných hvězd*, můžeme stanovit obecný princip sestavení celého katalogu, který byl vytvářen ve dvou etapách diferenciálním způsobem.

Nejprve Ptolemaios určil souřadnice vybraných jasných vztažných hvězd, zvolil hvězdy v blízkosti zvířetníku, což je pochopitelné vzhledem ke snadnějšímu určování ekliptikálních souřadnic. V textu však explicitně neuvádí, které hvězdy zvolil, pouze se na ilustrující ukázce zmiňuje o Spici a Regulu. Můžeme usuzovat, že kromě těchto hvězd zřejmě použil i Antares a Aldebaran, které připomíná v souvislosti s určováním poloh planet.

Jak jsme již výše ukázali, Ptolemaios při určování ekliptikální délky hvězd postupoval sice složitě, ale důmyslně, s využitím Slunce a v závěru i Měsíce. V *Almagestu* vysvětluje, že srovnával polohy hvězd s Měsícem, jehož ekliptikální délku propočítal.

V druhé etapě byly stanoveny souřadnice zbývající převážně většiny hvězd relativním způsobem, tedy ke zvoleným jasným vztažným hvězdám.

Do sedmé knihy je zařazen katalog souhvězdí severní oblohy, do osmé knihy katalog souhvězdí jižní oblohy. Kromě pokračování katalogu je v osmé knize rozebírána poloha Mléčné dráhy, konstrukce nebeského globusu a typické konfigurace hvězd. Dále je v knize zkoumána problematika východů a západů hvězd, zvláště *heliakických*, tedy takových, kdy se hvězda objevuje poprvé na ranní obloze před východem Slunce či mizí na večerní obloze při západu Slunce.

V této souvislosti je namísto poznámka z jiných astronomických Ptolemaiových spisů. Velký význam pro zemědělství v Egyptě mělo přesné časové stanovení nástupu záplav Nilu, k čemuž byl využíván první ranní heliakický východ Siria. Pozorování tohoto jevu bylo obtížné, neboť po východu hvězdy se vzápětí rozednívalo. Podrobná historická analýza heliakických východů Siria ukázala, že poprvé se objevoval přibližně při letních slunovratech. Přesněji, v roce 3 000 př. n. l. byl heliakický východ Siria, v Egyptě nazývaného Sotis, souhlasný s datem letního slunovratu. Později východ Siria nastupoval až po letním slunovratu, například v roce 1 000 př. n. l. byl posunut 16 dnů a v době Ptolemaia činil rozdíl již 26 dnů.

Problematika původu a autorství hvězdného katalogu v *Almagestu* byla a dosud je předmětem úporné diskuse. Analýzy Ptolemaiova katalogu hvězd mají po dvou tisících

letech rozhodnout, zda Ptolemaios v něm uvedl výsledky vlastních pozorování, či zda je nepřevzal od Hipparcha, nebo dokonce si některé pozorovací údaje sám nevymyslel.

Znovu připomínáme Ptolemaiova slova v *Almagestu*, že měření ekliptikálních délek a šířek hvězd prováděl pomocí armilární sféry: „Využíváme opět stejný pozorovací přístroj, kruhy kterého se otáčejí kolem pólů ekliptiky. Prozkoumali jsme všechny hvězdy, které jsme mohli okem pozorovat do hvězdné velikosti šesté magnitudy.“ Autor tudíž naznačuje, že prováděl veškerá pozorování sám.

První nesoulad mezi ekliptikální délkou a dobou pozorování – sestavení katalogu zjistil Al-Súfí z Bagdádu. Konstatoval, že v ekliptikálních délkách hvězd obdržíme chybu 1° , jestliže připustíme dobu vzniku katalogu v prvním roce panování Antonia Pia, tedy roku 138 n. l. Později Tycho Brahe, francouzští astronomové Jean Batiste Delambre (1749 – 1822) a Joseph Jerome Lafrançais de Lalande (1732 – 1807) rovněž vyslovili pochybnosti o tom, zda v *Almagestu* uváděný katalog hvězd byl sestaven Ptolemaiem.

Tato problematika byla předmětem analýz astronomů i v pozdějších dobách. V druhé polovině 20. století americký astronom zabývající se kosmickou mechanikou Robert Newton (1919 – 1991) upozornil na anomálně vysokou četnost výskytu hodnot ekliptikálních délek hvězd . . . $40'$ v Ptolemaiově katalogu. Vyslovil hypotézu, že Ptolemaios vytvořil hodnoty ekliptikálních délek přičtením k původním Hipparchovým $2^\circ 40'$, čemuž odpovídá hodnota precese 1° za 100 roků. Hipparchův katalog se bohužel přímo nedochoval, jím stanovené souřadnice můžeme zpětně odvodit z údajů obsažených v jeho spisu *Komentáře k Aratovi a Eudoxovi* pouze u některých hvězd.

K rozřešení, kdo katalog uvedený v *Almagestu* sestavil, vyvinula astrometrie důmyslné metody k určení stáří jeho vzniku. Objasníme si princip dvou z nich. V katalogu jsou zachyceny polohy hvězd v době jeho sestavení. Jak je však z astrometrie známo, hvězdy mění svoji polohu na obloze v důsledku skutečného pohybu v prostoru vzhledem k pozorovateli. Hovoříme o vlastním pohybu μ , vyjadřovaném pomocí tangenciální rychlosti hvězdy v úhlové míře. U hvězd pozorovatelných pouhým okem, tedy s hvězdnou velikostí větší než šesté magnitudy je typická hodnota vlastního pohybu μ přibližně $20''$ za století. Průměrná hvězda se tak za dvacet století od Ptolemaiovy doby přemístila na světové sféře o $400''$, přibližně o $1/10$ stupně, což je již astrometricky měřitelné. Metoda tedy vychází z proměřování změn poloh hvězd s velkým vlastním pohybem vzhledem ke hvězdám pomalejším. K tomuto typu analýzy, poprvé použitému koncem dvacátého století, byly vybrány hvězdy z Ptolemaiova katalogu jasnější než páté magnitudy. Soubor vybraných 832 hvězd byl rozdělen do dvou skupin. První obsahovala 276 hvězd „rychlých“ s vlastním pohybem $\mu > 0,1''/\text{rok}$. Příkladem je jasná hvězda Rigil – α Cen, podle označení Ptolemaia „noha Centaura“, která mění svoji polohu o více než $3''/\text{rok}$, za dvě tisíciletí se změnila její poloha o 2° , tedy o 4 úhlové průměry Měsíce. Zbývajících 556 hvězd ze souboru bylo označeno za hvězdy „pomalé“, vztažné. U všech vybraných hvězd byly zpětně ze současných ekliptikálních souřadnic propočítány jejich změny v čase. Pro výpočty byl zvolen rok sestavení Hipparchova katalogu 127 př. n. l. a Ptolemaiova katalogu 138 n. l.

Metoda analýzy vlastních pohybů hvězd vymezila časový interval vzniku katalogu na druhé století před naším letopočtem, kdy žil Hipparchos. Stejná metoda byla úspěšně použita ke kontrolnímu určení stáří dalších dvou hvězdných katalogů **Ulugh – Bega (1394**

– 1449) Tychona Brahe, u kterých je doba vzniku katalogu historicky doložena. Přesnost metody je odhadována na přibližně ± 40 roků.

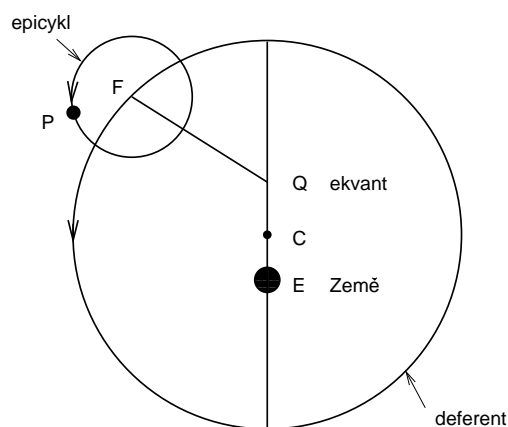
Podstata použité druhé fotometrické metody spočívá v analýze pozorovatelnosti hvězd uvedených v katalogu ze dvou zeměpisných poloh na Zemi. Tedy posouzení, zda katalog byl sestaven Hipparchem na Rhodu, nebo Ptolemaiem v Alexandrii. Dobu a místo pozorování hvězd z katalogu můžeme stanovit z rozboru jasností hvězd na jižní obloze. Soustava hvězdných velikostí uváděných v katalogu odpovídá jejich pozorovatelnosti lidským zrakem v noci, zkrácené zeslabením světla v zemské atmosféře extinkcí. Posledně uvedená závisí kromě jiného na výšce hvězdy nad horizontem. Na libovolné zeměpisné šířce místa pozorování můžeme vyčlenit skupinu nejižnějších hvězd, které jsou pozorovatelné pouze nízko nad obzorem. Lze předpokládat, že jejich hvězdné velikosti byly určovány právě v okamžiku kulminace, v bodě nejvyššího výstupu nad horizont při průchodu poledníkem.

Pozorovatelné v malých výškách pouhým okem jsou pouze velmi jasné hvězdy. Příkladem takové hvězdy je α Car – Canopus, s dnes udávanou hvězdnou velikostí $-0,6$ magnitudy, v antice známá pod názvem „Přízemní hvězda“. V místě pozorování Hipparcha na Rhodu se zeměpisnou šířkou $\varphi = 36^\circ$ tato hvězda kulminuje nad horizontem ve výšce $1,3^\circ$. Při zeslabení jasnosti atmosférou byla pozorovatelná při čisté atmosféře jako hvězda s hvězdnou velikostí čtvrté magnitudy, v běžných atmosférických podmínkách s hvězdnou velikostí páté magnitudy. Proto můžeme z údajů o hvězdných velikostech jižních jasných hvězd v katalogu usuzovat na zeměpisnou šířku jejich pozorovatele.

Podle závěrů analýzy všechny hvězdy v katalogu mohly být pozorovatelné Hipparchem v 2. st. př. n. l. z Rhodu. Zjednodušeně řečeno, v katalogu nebyla nalezena ani jedna hvězda nepozorovatelná v důsledku velké jižní deklinace z Rhodu, která by naopak byla pozorovatelná z jižněji položené Alexandrie. Velmi pravděpodobně tak Ptolemaios pozoroval všechny hvězdy, ale do katalogu uvedl polohy získané Hipparchem, ke kterému měl velkou úctu jako k autoritě.

Lze uzavřít, že polohy velké většiny hvězd z Ptolemaiova katalogu, zhruba osmi set padesáti, byly s velkou pravděpodobností stanoveny Hipparchem, Ptolemaios pouze převedl ekliptikální délky ke své době s nesprávnou hodnotou precese v délce 1° za 100 roků. Za hlavního autora katalogu proto považujeme Hipparcha. Nelze však vyloučit, že přibližně u jedné šestiny hvězd z katalogu určil jejich polohy Ptolemaios sám. Při sestavování katalogu se dopustil chyby ve stanovení ekliptikální délky vztažných hvězd.

I jiné soudobé historické analýzy prokazují, že převládající většina souřadnic hvězd v katalogu *Almagestu* byla určena za života Hipparcha, nikoliv Ptolemaia. Ve prospěch myšlenky převzetí souřadnic z Hipparchova katalogu svědčí například i to, že v Ptolemaiově katalogu chybějí údaje o hvězdách ze souhvězdí Koníčka (Equuleus), které nebyly uvedeny ani v Hipparchově katalogu.



Obr. 4: Ptolemaiův model pohybu planet

přemísťoval po velkém kruhu zvaném *deferent*. Pohyb středu epicyklu po deferentu byl rovnoměrný, s konstantní úhlovou rychlostí. Antičtí astronomové hovořili o otáčení deferentů a epicyklů. Pro lepší soulad teorie s pozorovacími údaji Ptolemaios předpokládal, že pohyb zkoumáme nikoliv ze středu deferentu C nebo středu Země E, ale z určitého vyrovnávacího bodu Q nazývaného *střed ekvantu*. Výsledek tak byl ještě přesnější. Pokud je střed Země, kolem něhož planeta obíhá, umístěn mimo střed deferentu, hovoříme o *excentru*.

Myšlenka, jak popsat matematicky, v případě antických astronomů geometricky, nepravidelný pohyb planet na pozadí hvězdné oblohy jako složení rovnoměrných pohybů po kružnici, intuitivně předjímá novodobou metodu vyjádření nejrůznějších funkcí pomocí rozvoje do řad. Moderní matematická analýza, jejíž základní myšlenky pocházejí z 18. století, postupovala při vyjadřování funkcí řadami podobným způsobem. Průběh nějaké funkce zachytíme složením dobře známých a určitým způsobem pravidelných funkcí, násobených číselnými koeficienty, jejichž hodnoty lze určit z porovnání s vyjadřovanou funkcí.

Pohyb planet v délce a šířce je v *Almagestu* analyzován nezávisle jeden na druhém. Výklad je veden v pořadí vnitřní (dolní) planety Merkur, Venuše a vnější (horní) planety Mars, Jupiter a Saturn. Vlastnosti kinematického modelu planetárních pohybů jsou následující:

1. Země, středy epicyklů Merkuru, Venuše a Slunce leží vždy na jedné přímce. Oběžná doba středů epicyklů Merkuru a Venuše kolem Země je proto přesně rovna jednomu roku.
2. Oběžné doby Merkuru a Venuše po epicyklech jsou různé, menší než rok. Pro Merkur je to 88 dnů a pro Venuši 225 dnů.
3. Středy epicyklů Marsu, Jupitera a Saturna obíhají po svých deferentech za různé časové intervaly, u Marsu za 687 dnů a téměř 30 roků u Saturnu.
4. Mars, Jupiter a Saturn obíhají po epicyklech za jeden rok.

Ptolemaiův model pohybu planet měl zachycovat jejich pozorované pohyby, změny rychlosti pohybu a změny jasností planet. Ve shodě s autorovým postupem v *Almagestu* nejprve stručně shrneme teorii pohybu planet v délce, která je obsahem deváté až dvanácté knihy. Ve svém výkladu Ptolemaios vycházel z Hipparcha, používal při popisu pohybů planet ideální geometrické útvary – kružnice: *deferenty*, *epicykly*, *excentry* a *ekvanty*, které považoval za zdánlivé objekty, nezbytné pro shodu představ a skutečných pohybů planet, jak je pozorujeme ze Země na pozadí hvězdné oblohy. Ptolemaiova metoda výpočtu poloh planet objasňovala nerovnoměrný pohyb planet jako souhrn několika jednoduchých rovnoměrných kruhových pohybů, použijeme-li novodobou terminologii. Každá planeta se pohybovala rovnoměrně po malém kruhu – *epicyklu*, jehož střed se

5. Roviny deferentů Merkura a Venuše jsou shodné s rovinou ekliptiky. Roviny epicyklů Marsu, Jupitera a Saturna jsou rovnoběžné s rovinou ekliptiky.
6. Roviny epicyklů Merkura a Venuše, deferentů Marsu, Jupitera a Saturna jsou skloněny k rovině ekliptiky o malé úhly.
7. U planet Mars, Jupiter a Saturn jsou spojnice středů epicyklů s planetou vždy rovnoběžné se směrem Země – Slunce.

Podmínky pohybu vnitřních a vnějších planet jsou rozdílné, určující roli má Slunce. Oběžné doby planet po deferentech u vnitřních planet nebo po epicyklech u vnějších planet jsou rovny oběžné době Slunce, tj. jednomu roku.

Podrobnější výklad začneme devátou knihou, zabývající se posloupností rozložení Slunce, Měsíce a pěti planet, následují tabulky jejich středních pohybů v délce a základní polohy. V závěru knihy je rozebírána problematika pohybu Merkuru. V první kapitole deváté knihy Ptolemaios píše: „*Především musíme vyložit posloupnost, v jaké jsou rozloženy sféry planet, které jsou rozloženy kolem pólu šikmého kruhu, procházejícího přes střed zvířetníkových znaků. Všichni staří astronomové jsou zajedno ve dvou bodech. Všechny planetární sféry jsou blíže Zemi než sféra stálic, ale ve větší vzdálenosti od Země než sféra Měsíce. Tři sféry planet – Saturna, Jupitera a Marsu, z nichž sféra Saturna je největší, sféra Jupitera, protože je Zemi blíže, je druhá v pořadí, a sféra Marsu leží pod sférou Jupitera, jsou od Země dále než zbývající planetární sféry a sféra Slunce.*

Co se týče sfér Venuše a Merkuru, které starověcí astronomové kladli pod sféru Slunce, někteří jejich následovníci je přesunuli nad tuto sféru, neboť nikdy nepozorovali přechod těchto planet před Sluncem. Nezdá se nám však, že by tento zdánlivě rozhodující důvod byl tak průkazný, protože planety mohou být pod Sluncem, aniž bychom je viděli přecházet před jeho povrchem, totiž aniž by se pohybovaly v rovině procházející Sluncem a naším okem. Mnohem spíše budou v některé jiné rovině a z toho důvodu nenastane žádný pozorovatelný přechod planety před Sluncem. Vždyť i při pohybu Měsíce, který je také pod Sluncem v době konjunkcí, rovněž většinou nedochází k žádným změnám zatmění.

Proto se žádným způsobem nemůžeme zbavit těchto myšlenek, neboť planety nemají měřitelnou paralaxu, tedy úkaz, podle něhož se jedinečně dají určovat vzdálenosti. Tudíž nejvíce je důvěryhodný názor starých astronomů, podle něhož Slunce při své prostřední poloze přirozeně odděluje planety, které dosahují opozice, od těch, které nikdy do této polohy nedospějí a setrávají stále v blízkosti Slunce. Toto uspořádání nemůže však planetám nedosahujícím opozice dovolit, aby se při vzdálení od Slunce přiblížily Zemi natolik, že by vykazovaly měřitelnou paralaxu.“

Pohybu Venuše a Marsu je věnována desátá kniha. Velké obtíže musel zvládat Ptolemaios při vytváření odpovídajícího popisu zpětných pohybů planet, především s objasněním velikosti smyček. Až teprve zdokonalený výklad pohybu Marsu sehrál rozhodující roli při tvorbě Ptolemaiovy kinematické teorie obdobně jako mnohem později při matematickém vyjádření dráhy planety německým matematikem a astronomem **Johannese Keplerem (1571 – 1630)**. Ptolemaios zkoumal pohyb Marsu prostřednictvím analýzy ekliptikální délky Marsu, měřené východním směrem podél zvířetníku. Odtud a s pomocí dalších údajů Ptolemaios propočítal střední pohyb Marsu, který se pohybuje, jak dnes víme, za rok o $191^{\circ} 16' 54''$, průměrně přibližně $1/2^{\circ}$ za den. V průběhu osmi set deseti roků, ze kterých měl k dispozici astronomická pozorování, Mars uskutečnil 730 oběhů a navíc urazil úhel 138° .

Pro upřesnění teorie pohybu Marsu v délce Ptolemaios potřeboval sedm parametrů. Dva z nich, perioda oběhu a poloha na epicyklu, souvisely s teorií pohybu Slunce. K stanovení pěti zbývajících využil následující pozorování Marsu.

| Datum | Pozorování uváděná Ptolemaiem | Skutečná poloha | Rozdíl |
|-------------------------|-------------------------------|-----------------|--------|
| 18. ledna 272 př. n. l. | Scorpio 2° 1/4 212° 15′ | 212° 31′ | 0° 16′ |
| 15. prosince 130 n. l. | Gemini 21° 81° | 81° 25′ | 25′ |
| 21. února 135 n. l. | Leo 28° 5/6 148° 50′ | 150° 15′ | 1° 25′ |
| 27. května 139 n. l. | Sgr 2° 34′ 242° 34′ | 242° 49′ | 15′ |
| 30. května 139 n. l. | Sgr 1° 3/5 241° 36′ | 241° 35′ | 19′ |

Z tabulky je patrné, že ani Ptolemaiova vlastní pozorování nebyla přesná, dokonce pozorování z roku 135 n. l. má chybu větší než 1°

Jedenáctá kniha obsahuje stanovení dráhových parametrů Jupitera a Saturna. Následuje popis geometrické metody stanovení poloh planet vycházející z periodických pohybů. V závěru jsou tabulky pro určování poloh délek planet doplněné konkrétními výpočty.

V dvanácté knize jsou analyzovány pozorované pohyby planet. Při jejich výkladu se Ptolemaios opírá o kinematická schémata Apollonia z Pergy. Postupně probírá pohyb Saturna, Jupitera, Marsu, Venuše a Merkuru. V závěru jsou sestaveny tabulky poloh planet, kromě jiných zachycující maximální elongace Merkuru a Venuše od Slunce.

V třinácté knize se Ptolemaios nejprve zabývá problematikou pozorování planet. Rozebírá např. polohu planety v konjunkci se Sluncem, při které obě kosmická tělesa mají stejnou ekliptikální délku. Planetu je obtížné pozorovat, neboť Slunce je příliš jasné. Při přibližování planety ke Slunci tak existuje poloha, při které je pozorovatelná naposledy. Obdobně při vzdalování planety od Slunce nastupuje okamžik, kde je pozorovatelná poprvé. O studium těchto poloh se velmi zajímali již babylonští astronomové. Proto Ptolemaios tuto situaci analyzoval a propočítal pro každou planetu hodnotu kritické úhlové vzdálenosti od Slunce, při které je planeta ještě pozorovatelná.

Dále se v třinácté knize Ptolemaios zabýval pohybem planet v ekliptikálních šířkách. Z dnešního heliocentrického pohledu je situace jednoduchá, podstatně složitější byl však popis v geocentrické vztahné soustavě. Odchylky od ekliptiky pokládal Ptolemaios za velmi malé, než aby mohly mít vliv na tvorbu modelu pohybu planet, jestliže vycházíme z přesnosti pozorování lidským okem. Podrobný Ptolemaiovův přístup odlišoval různost teorií šířek pro vnitřní a vnější planety.

Pro vnitřní planety deferent představoval skutečnou geocentrickou dráhu Slunce, epicykl odpovídal heliocentrické dráze planety. Proto se deferent nacházel v rovině ekliptiky a úhel mezi deferentem a epicyklem byl konstantní. Rovina, v níž ležel epicykl, měla konstantní polohu v prostoru. U vnějších planet deferent reprezentoval dráhu planety kolem Slunce a epicykl heliocentrickou dráhu Země. Teorie pohybu vnitřních planet v ekliptikálních šířkách byla v antické astronomii poměrně jednoduchá. Ptolemaios zahrnul do výkladu skutečnost, že planety se při svém pohybu odchylojí od roviny ekliptiky.

Obě teorie pohybu v ekliptikálních délkách a šířkách jsou v závěru třinácté knihy propojeny k popisu pozorovaného pohybu planet. Potřebné informace pro současné určení délek a šířek planet získává Ptolemaios z údajů o heliakických východech a západech planet.

Zajímavostí je, že Ptolemaios v *Almagestu* výklad pohybu planet začínal od Merkuru a končil poslední tehdy známou planetou Saturnem, zatímco u Koperníka ve spisu *O oběžích nebeských sfér* je pořadí výkladu opačné, nejprve Saturn a jako poslední Merkur.

Almagest uzavírá Ptolemaios slovy: „Poté, co jsme vše splnili, o Syre, a rozebrali, jak doufám, téměř vše, co musí být prozkoumáno v podobném díle, nakolik uplynulá doba umožnila zvýšení přesnosti našich a upřesnění starších objevů, vytvářeném ne pro vlastní chválu, ale pouze ve prospěch vědy, necht' předkládané dílo zde získá vhodný a přiměřený závěr.“

Do současné doby je *Almagest* zdrojem nejen důležitých poznatků o antické astronomii, ale také o chronologii. Byl používán při analýze antických kalendářů, neboť starověcí i antičtí astronomové svá pozorování pečlivě datovali. Studium chronologie bylo velmi obtížné, protože při uvádění údajů z pozorování prováděných jinými astronomy Ptolemaios využíval různé kalendáře. Například později Koperníkovi trvalo několik desetiletí, než úplně pochopil všechny kalendáře a než si osvojil přepočítávání dat mezi nimi. Vlastními slovy složitost problematiky charakterizuje sám Ptolemaios, když na začátku díla hovoří o svých cílech: „Pokusíme se níže poznamenat vše, co jsme objevili až dosud; uděláme to tak krátce, jak to je možné, a ve stylu, který mohou sledovat ti, kteří již jsou dostatečně zasvěceni v této oblasti. Pouze v zájmu úplnosti vyložíme vše vhodné pro teorii nebe v žádoucím pořádku.“

Kalendářní soustava používaná v *Almagestu* se při stanovení chronologické škály opírala především o tzv. egyptský kalendář, vedle toho však Ptolemaios v *Almagestu* používal další kalendáře; pro čtenáře uvádíme jejich stručný přehled.

1. *Juliánský kalendář*, zavedený nařízením Julia Caesara reformou k 1. ledna 45 př. n. l., měl délku roku 365,25 dne, tedy delší než skutečný rok.

2. *Egyptský kalendář*, jehož základem byl egyptský rok se stálou délkou 365 dnů rozdělených na 12 měsíců po 30 dnech plus 5 doplňkových dnů, přidávaných na konci roku. Používal se ve Starém Egyptě jako základ občanského kalendáře v průběhu celého období.

3. *Kallipův kalendář*, jenž vycházel z cyklu 76 roků, střední délka roku je rovna 365 a 1/4 dne, měsíce mají 29 nebo 30 dnů. Korekce byla určována požadavkem, aby střední počet dnů v měsíci odpovídal periodě synodického měsíce, obsahujícího 29,530 589 dnů. V některých rocích to bylo 12 měsíců, v jiných 13.

4. *Babylonský kalendář* neměl rigorózně stanovená číselná pravidla. Opíral se o pozorování, která prováděly speciálně určené osoby. Babylonský rok měl 354 dnů rozdělených do 12 měsíců, které měly střídavě 29, respektive 30 dnů. Názvy měsíců vycházely z života starověkých Babyloňanů. V kalendáři byly vyznačeny šťastné a nešťastné dny. Měsíc začínal večer v den, kdy se poprvé po západu Slunce objevil srpek nového Měsíce. Rovněž dny začínaly večer. Kolem roku 700 př. n. l. byla sestavena učebnice astronomie obsahující kalendář s údaji o heliakických východech jednotlivých hvězd. V určitém období babylonští astronomové spojovali svůj kalendář s heliakickým východem α Aur – Capelly.

5. *Athénský kalendář* vycházel z měsíčně-slunečního cyklu. Začátek roku, obvykle na přelomu června a července, byl stanoven prvním úplňkem po letním slunovratu. Po roce 86 př. n. l., kdy Řekové ztratili samostatnost, přestali vnášet do kalendáře nezbytné opravy, tudíž se začátek roku stal plovoucím vzhledem k juliánskému kalendáři. V průběhu staletí posun tak narostl, že v 10. století n. l. se počátek roku přesunul na leden.

6. *Dionýsiův kalendář*, ve kterém první rok éry Dionýsia začínal ve dni letního slunovratu 26. června 284 př. n. l. Délka roku byla zvolena na 365 1/4 dne, rok měl 12 měsíců, jejich

názvy vycházely z označení zvířetníkových souhvězdí. Prvních jedenáct měsíců mělo po 30 dnech, poslední 35 nebo 36 dnů, neboť každý čtvrtý rok měl o jeden den více.

7. *Nabukadnésariův kalendář*, nazvaný podle asyrského krále panujícího v letech (747 – 734) př. n. l. Ten zavedl reformu kalendáře s počátkem své vlády, tedy 26. února 747 př. n. l.

Arabsky píšící perský astronom a filozof **Abú ar-Rajhán Al-Birúní (973 – 1048)** v 11. století přeložil *Almagest* z arabštiny do sanskrtu. Roku 1175 vynikající překladatel Gerhard z Cremony (1114 – 1187), jenž pracoval v Toledu ve Španělsku, dokončil latinský překlad, který vycházel z arabské verze. Především tento text se stal později podkladem pro četné další překlady. V souvislosti s *Almagestem* zasluhuje pozornost kniha *Sex primi libri epitomatis Almagesti* česky *Výňatky z Ptolemaiova Almagestu* vydaná tiskem v roce 1496 v Benátkách. Překlad a doplňující výklad provedli rakouský astronom **Georg Peuerbach (1423 – 1461)** a německý astronom **Johann Müller – Regiomontanus (1436 – 1476)**.

Při hodnocení významu *Almagestu* je třeba připomenout, že spis byl encyklopedickým shrnutím poznatků pozdní antické astronomie, formulovaných nejčastěji prostřednictvím geometrie. Přestože se Ptolemaios snažil o srozumitelnost výkladu, byl text svým obsahem a zpracováním velmi obtížně sledovatelný, předpokládal čtenáře vzdělaného.

Na základě rozboru údajů z pozorování se snažil objasnit charakteristické zvláštnosti pohybu kosmických těles a následně provést výběr kinematického modelu, který nejlépe odpovídal pozorovaným jevům. Při stanovení optimálního modelu vycházel Ptolemaios z principu jednoduchosti. Ve třetí knize *Almagestu* o tom píše: „*Pokládáme za vhodné objasňovat jevy za pomoci nejjednodušších předpokladů, pokud pozorování neodporují vytyčené hypotéze.*“

Ptolemaios používal pozorovací data jak vlastní, tak svých předchůdců. Takto získané údaje za velmi dlouhá historická období mu umožňovaly stanovit oběžné doby planet, Měsíce, Slunce, jakož i geometrické parametry (poloměry epicyklu, excentru) kinematického modelu s maximální možnou přesností.

Uvedený přístup uplatnil Ptolemaios nejprve při popisu pohybu Slunce, u kterého vystačil s jednoduchým kinematickým modelem. Při zkoumání složitějšího pohybu Měsíce Ptolemaios vícekrát model měnil, než našel přijatelný soulad s pozorovacími údaji. Ještě komplikovanější bylo, jak jsme již popsali, zachycení popisu pohybu planet v ekliptikální délce a šířce.

Různá zdokonalení Ptolemaiova modelu pohybu planet, např. zavedení excentru, umožnila zvýšit přesnost stanovení poloh planet přibližně třikrát ve srovnání s prostým modelem. Formálně však byl narušen požadavek rovnoměrnosti kruhových pohybů.

Počítačové výpočty prováděné v současnosti stanovily přesnost Ptolemaiova původního modelu, průměrná chyba stanovení polohy činila u Marsu 25', Jupiteru 10' a Saturnu 25'.

Celkově pro výklad všech pozorovaných zvláštností v pohybu v jeho době známých planet zavedl Ptolemaios na čtyřicet epicyklů. Beze zbytku však neobjasnil všechna pozorovaná fakta. Například nevysvětloval, proč Mars, Jupiter a Saturn se nacházejí v nejmenší vzdálenosti k Zemi jedenkrát za rok v opozicích se Sluncem, tedy když vycházejí večer a zapadají ráno. Nebo proč středy epicyklů Merkuru a Venuše leží vždy na jedné přímce, spojující pozorovatele se Sluncem? Z jakého důvodu nevykazují Slunce a Měsíc zpětné pohyby, které pozorujeme u planet?

V závěrečné, třinácté knize *Almagestu* Ptolemaios připomíná, že geocentrický matematický model pohybu planet chápe jako hypotézu, jako jeden ze způsobů popisu planet. Obdobně u rotace Země v první knize připouštěl i jiné možné výklady: „Jsou však lidé, kteří aniž by mohli cokoli namítnout proti tu uvedeným důvodům, tvrdí, že nic například nebrání předpokladu, že nebe je v klidu a Země se otáčí kolem své osy od západu k východu a že se takto otáčí zhruba jednou za den. Anebo že se takto otáčí oboje, Země i nebe, kolem společné osy, ovšem tak, aby zůstaly zachovány odpovídající vztahy.“ . . . „i když mnohem jednodušší by bylo si představit, že se Země otáčí kolem své osy.“

Aristarchovu heliocentrickou soustavu v *Almagestu* nevzpomíná vůbec, pouze se zmiňuje v třetí knize o jeho pozorováních letního slunovratu. Pod vlivem Aristotela, pro vytvoření teorie pohybu planet a praktický soulad s pozorovacími údaji, Ptolemaios staví vše na hypotéze o nehybnosti Země. Z dnešního pohledu se dopustil zásadní chyby při výkladu pohybu tím, že považoval pozorovaný pohyb za skutečný, a nikoliv za relativní.

V současné době je *Almagest* kritizován ve třech základních směrech. Především bývá Ptolemaios obviňován z plagiátorství, neboť s velkou pravděpodobností převzal do svého hvězdného katalogu převážnou většinu údajů od Hipparcha. *Almagest* je však kompilačním spisem, antickou učebnicí astronomie. Autoři i v současné době u takových typů publikací často neuvádějí použité zdroje. Jeví se proto historicky nespravedlivé odsuzovat Ptolemaia podle soudobých norem vědeckého bádání.

Dále je *Almagestu* vyčítána malá přesnost v něm uváděných pozorovacích údajů. Přesné zaměrování poloh pohybujících se kosmických těles je obtížné. Vždyť například kromě denního otáčení hvězdné oblohy o přibližně 15° za hodinu je rychlost Slunce na pozadí hvězdné oblohy 1° za den, Měsíce $0,5^\circ$ za hodinu, u Marsu $0,524^\circ$ za den. Často Ptolemaios rovněž využíval pozorovací údaje o Slunci, Měsíci či planetách, ve kterých jsou uvedeny nejen jejich úhlové polohy, ale i čas jejich stanovení. Ten však byl pouze přibližný, nepřesnosti jeho určování u sumerských či babylonských pozorování činily až několik hodin, což odpovídá chybám v polohách řádově stupňů.

Některé zjištěné větší nepřesnosti pozorovacích údajů až několik stupňů mohly vzniknout v textech při překladech z řečtiny, například záměnou písmen při dalších pozdějších opisech nebo i chybnými zápisy přímo při pozorování, což můžeme předpokládat.

Především se však Ptolemaiovi vyčítá principiální chybnost zvolené geocentrické soustavy. Kritikům nevhodnosti jejího používání lze připomenout, že astronomické ročenky současnosti uvádějí efemeridy kosmických těles právě v geocentrické, a nikoliv heliocentrické soustavě, tedy obdobně jako v dobách Ptolemaia.

Základní a nezpochybnitelný význam Ptolemaia pro astronomii spočívá v shrnutí starověkých i antických pozorování, především v *Almagestu*. Ptolemaios shromáždil a utřídil rozsáhlý soubor astronomických údajů, který by jinak zůstal ztracen. Při jejich zpracování provedl analýzu jejich důvěryhodnosti a přesnosti. Současně s astronomickými údaji ve svých spisech popisoval metodiku pozorování i jím používané přístroje.

Značným přínosem Ptolemaia je vytvoření antické astronomické terminologie, některé pojmy převzal od předchůdců, další zavedl sám. Rovněž v astronomických spisech rozvádí teorie astronomických jevů a zdokonaluje jejich výklad, například u evekce pohybu Měsíce.

Vlastní příspěvek Ptolemaia spočíval především ve vypracování výkladu nerovnoměrných a smyčkovitých pohybů planet prostřednictvím skládání rovnoměrných kruhových

pohybů po epicyklech, jejichž středy se rovnoměrně pohybovaly po deferentech. Stejný model využívala arabská a středověká astronomie i později Koperník.

Ptolemaios jako první vytvořil ucelený astronomický obraz sluneční soustavy, v interpretaci antické astronomie celého vesmíru. Jeho model však měl pouze kinematicko – geometrický charakter, prostorové rozložení kosmických těles nepropracovával. Nejasnou problematikou, například reálností rotace světových sfér, epicyklů a deferentů, se autor nezabýval. Pro zachycení rozložení a pohybu kosmických těles po obloze zvolil geocentrickou soustavu, která je ve své podstatě složitější než heliocentrická. Model jím vypracovaný plně zabezpečoval dostatečnou přesnost pro převážnou většinu jakýchkoliv potřeb tehdejší doby. Ptolemaiovy spisy se staly vzorem v přístupu k řešení astronomických problémů prakticky až do Koperníkovy doby. Měly velký vliv nejen na jeho současníky, ale i na další generace astronomů, po dobu jednoho a půl tisíce roků se staly nenahraditelným zdrojem astronomických poznatků.

Po antickém období převzala vedoucí úlohu arabská věda, která astronomii dále rozvinula. Zpřesnila některé teorie, což se promítlo do upřesnění tabulek pohybu Slunce a Měsíce. Základní principy geocentrického systému však přejala beze změn.

Nekonformní názory se objevovaly pouze v okrajových oblastech arabské moci. Ve střední Asii působil již zmiňovaný perský astronom al Birúni, jeden z nejlepších astronomů arabské vědy. V spise *Památníky dávných pokolení* mimo jiné porovnával kalendáře asijských národů k vzájemnému přepočítávání dat z jednoho kalendáře do druhého. U Birúniho se objevuje myšlenka o pohybu Země a pochybnosti o platnosti geocentrické soustavy.

Další astronomickou osobností z arabského období byl již zmiňovaný Ulugh Beg, který byl přesným pozorovatelem na observatoři v Samarkandu.

Z arabského období se do současné astronomie zachovaly četné názvy hvězd. Zhruba 80 % názvů nejjasnějších hvězd je arabského původu. Například Algol pochází z arabského Ras al Ghul, což znamená ďáblova hlava respektive hlava démona pouště.

3 Astronomie ve středověku a renesanci

3.1 Heliocentrická soustava



Obr. 5: Mikuláš Koperník

Osobností, která vytvořila moderní pohled na sluneční soustavu a astronomii jako vědu byl polský astronom **Mikuláš Koperník (1473 – 1543)**. Po studiích v Krakově a v Boloni, Padově a Ferrare působil celý svůj další život jako warmijský kanovník na území dnešního severovýchodního Polska.

Vedle svých právnických a lékařských studií v Itálii nezapomínal na astronomii. Pečlivě studoval matematiku, prováděl příležitostná astronomická pozorování a naučil se řecky, aby mohl studovat původní práce. Při přemýšlení o astronomii se u Koperníka objevovala řada otázek: Co je důvodem nesouhlasu poloh planet teoreticky propočítaných s pozorovanými? Z jakého důvodu vnější planety opisují smyčky? Proč je chybná ptolemaiovská teorie pohybu Měsíce? Je nutné, aby geocentrická soustava byla tak složitá?

Uvědomoval si značné rozdíly mezi vypočtenými a pozorovanými polohami planet a jevů s nimi spojených. Pro zámořské objevné cesty, pro reformu občanského kalendáře i pro astrologii bylo nutné znát přesnější astronomické údaje. To byly společenské podněty pro změnu geocentrické soustavy, která navíc byla značně složitá.

Koperníkovi bylo čím dál jasnější, že jestliže přijmeme Slunce za střed, kolem kterého obíhají planety včetně Země, pak lze všechny výše položené otázky vyložit jednodušším a přirozenějším způsobem. Postupně se u Koperníka formoval vlastní racionální heliocentrický pohled na uspořádání těles ve sluneční soustavě. Byl si velmi dobře vědom, že své názory bude třeba doložit astronomickými pozorováními a matematickými výpočty.

Zdůvodnění vzniku heliocentrické myšlenky a její další rozpracování charakterizuje Koperník sám ve spisku *Malý komentář*, o kterém bude podrobněji pojednáno níže, takto: „Tyto teorie (geocentrické) se ukázaly neodpovídající pohybům nebeských těles, pokud nebyly zavedeny určité ekvanty, ale potom bylo objeveno, že planeta se nepohybuje s konstantní rychlostí ani na deferentu ani kolem středu epicyklu. Proto podobná soustava je nedostatečně absolutní a vhodná. Ujasnil jsem si tyto nedostatky, často jsem o nich přemýšlel, nelze-li nalézt nějakou racionálnější kombinaci sfér, pomocí které by bylo možné objasnit pozorované nerovnoměrnosti, přičemž tak, aby každý pohyb sám o sobě byl rovnoměrný, jak to vyžaduje princip dokonalého pohybu.“

Přibližně v letech 1507 – 1508 bylo sepsáno a později rozesláno přátelům po Evropě dílo nazvané úplným názvem *Nicolai Copernici de hypothesibus motuum caelestium a se constitutis commentariolus*, česky Mikuláše Koperníka malý komentář o jím vypracovaných hypotézách nebeských pohybů. Častěji se používá již uvedený zkrácený název *Commentariolus - Malý komentář*. Šířil se opisováním po Evropě, do dnešní doby se dochovalo pouze několik

exemplářů (Vídeň, objeven 1877, Stockholm 1881, Aberdeen 1962). Vydán byl tiskem roku 1878 podle vídeňské kopie.

Tato několikastránková rozprava bez matematického výkladu, neboť nebyla určena veřejnosti či k tisku, uváděla sedm stručných principů heliocentrismu. Nejharmoničtější výklad problematiky pohybů planet vidí Koperník v skládání rovnoměrných kruhových pohybů, obdobně jak to činila starověká řecká astronomie.

1. *Není jednoho bodu, který by byl středem všech nebeských drah nebo sfér.*
2. *Střed Země není středem světa, je pouze středem tíže a středem měsíční dráhy.*
3. *Všechny sféry obíhají kolem Slunce jako svého středu, proto je Slunce položeno v blízkosti středu světa.*
4. *Vzdálenost Země od Slunce je nepatrná ve srovnání s velikostí nebeské klenby. Změna polohy pozorovatele, způsobená ročním pohybem Země kolem Slunce působí zdánlivé posouvání hvězd. Je však příliš malá vzhledem k nesmírné vzdálenosti nebeské klenby, aby takový pohyb mohl být pozorován.*
5. *Všechny pohyby, které pozorujeme na hvězdné obloze vznikají z pohybu Země. To totiž ona spolu s nejbližšími živly – vodou a vzduchem – se otáčí denně kolem nehybných pólů. Hvězdná obloha je nepohyblivá.*
6. *Všechno, co se zdá být pohybem Slunce, nepochází z jeho pohybu, ale z pohybu Země a její sféry. Země obíhá kolem Slunce tak jako každá jiná planeta. Země vykonává zároveň několik různých pohybů.*
7. *Přímý i zpětný pohyb planet není jejich vlastním pohybem, ale klamem vznikajícím při pohybu Země. Její pohyb dostačuje k výkladu mnoha jevů na obloze.*

Při formulaci základních principů své teorie Koperník používal pojmy starověké astronomie. Tak například hovoří o pohybu sfér, samotný pohyb planet je objasňován pohybem sfér, každá nese určitou planetu. Třetí a sedmý princip obsahuje nejdůležitější myšlenky heliocentrismu, které postačují k výkladu pozorovaných pohybů planet po obloze. Neobyčejně důležitý je čtvrtý princip, z něhož vyplývá, že vzdálenost Země od Slunce je nepatrná ve srovnání se vzdáleností hvězd od nás. Až do Koperníka nikdo nepředpokládal tak velké rozměry vesmíru, obecně se předpokládalo, že sféra nehybných hvězd ohraničovala vesmír bezprostředně za sférou Saturna. Pátý princip je třeba chápat tak, že sféra nehybných hvězd je nepohyblivá a neúčastní se pohybu planetárních sfér, jak to bylo v geocentrické soustavě. Objevný je šestý princip, který Koperník spojuje s představou, že pozorovaný pohyb kosmických těles není zdaleka vždy skutečným. Tudíž teprve rozdíly zdánlivého a skutečného umožňují analyzovat pravdivost našich smyslů. Poslední sedmý princip objasňuje smyčky opisované planetami na obloze v důsledku pohybu Země kolem Slunce.

Koperník v *Malém komentáři* rozlišoval dva základní pohyby. První byl pohyb Země kolem nepohyblivého Slunce, které se nachází v blízkosti středu kruhové dráhy Země. Druhým pohybem byla rotace kolem vlastní osy, což vyjadřuje takto: „*Druhý pohyb příslušný Zemi je její denní rotace kolem pólů ve směru zodiakálních znaků, t.j. od západu k východu. V důsledku toho se nám zdá, jakoby celý svět se otáčel kolem Země velkou rychlostí. Rozumí se, že*

Země rotuje současně s obtékajícími vodami a přiléhající k ní atmosférou.“ Později v *Oběžích* v I. knize doplnil Koperník ještě třetí pohyb Země – deklinační pohyb osy, precesi.

V závěru spisku Koperník uvádí: „*Takovým způsobem se Merkur pohybuje za pomoci celkem sedmi sfér, Venuše za pomoci pěti sfér, Země tři a Měsíc kolem ní za pomoci čtyř sfér a nakonec Mars, Jupiter a Saturn při pomoci pěti sfér pro každou planetu. Souhrnně třicet čtyři sfér je dostatečných pro objasnění mechanismu stavby celého světa a pohybu planet.*“

Připomínám, že pro výklad pohybů všech v starověku známých planet a Měsíce v Ptolemaiově geocentrickém systému bylo zapotřebí původně přibližně 40 sfér. Později, jak narůstaly rozdíly mezi pozorovanými a propočítanými polohami, byly vkládány další pomocné epicykly. V Koperníkově době počet sfér převyšoval 80.

Při psaní Malého komentáře Koperník již uvažoval o budoucím sepsání úplného systematického výkladu své teorie, opírajícího se o astronomická měření a matematické důkazy. Po uvedení základních principů připomněl, že vzhledem ke stručnosti spisku považoval za nezbytné vypustit matematické důkazy, které jsou předurčeny pro velké knihy (*maiori volumini destinatas*).

Zamýšlenou velkou knihou se stal spis s rozšířeným latinským titulem *Nicolai Copernici Torinensis De Revolutionibus Orbium coelestium Libri sex* česky *Mikuláše Koperníka Toruňského šest knih o oběžích nebeských sfér*. Titulní strana rukopisu se nezachovala, je velmi pravděpodobné, že Koperník ho nazval kratším způsobem, například *De Revolutionibus sphaerarum mundi* respektive pouze *De Revolutionibus*. Kniha vyšla v Norimberku v březnu 1543.

Její název pochází od vydavatele. Zamysleme se, jak asi chápal název Koperník a jak by ho vyložila současná astronomie? Již první pojem *De Revolutionibus*, polsky *O obrotach*, česky *O oběžích* zasluhuje detailnější rozbor. Pojem oběhy, který je snad nejvíce blízký chápání Koperníka, v sobě zahrnuje jak pojem rotačního pohybu tělesa kolem osy tak i postupný kruhový pohyb hmotného bodu kolem určitého středu. V mechanice Koperníkovy doby nebyly tyto pojmy definovány, tím spíše rozlišovány. Teprve až mnohem později švýcarský matematik, fyzik a astronom **Leonhard Euler (1707 – 1783)** tyto pojmy vymezil. Pro upřesnění v současné astronomii hovoříme o rotačním pohybu planety kolem vlastní osy a oběhu planety kolem Slunce. Rovněž i druhý pojem *orbium* vyžaduje zpřesňující výklad. V textu díla samotný Koperník píše *orbis vel sphaera*, tedy *svět* nebo *sféra*, tudíž chápe pojem *orbis* jako *sféra*. Z další ukázky „*orbes, quibus sidera feruntur errantia*“, tedy česky „*sféry, kterými jsou planety nesené*“, je zřejmé, že planeta je sférou v jeho konstrukci unášena.

V souvislosti s významy dalších pojmů lze obecně konstatovat, že Koperník přestože je přebral ze středověké latinské astronomické terminologie, nebyl v jejich užívání důsledný a spis nemá jednoznačně formulovaný odborný jazyk. Většinu pojmů autor nedefinoval, často se vyjadřoval zkratkovitě a používal i více termínů pro jednu skutečnost. Proto je nutné význam pojmů hledat složitou interpretací textu. V některých případech ještě používal starou terminologii, například střední čára zodiaku (ekliptika), kruh rovníkosti (rovník), přímka ze středu (poloměr), kolébání (librace), komutace (paralaxa) atd.

V předmluvě díla Koperník vysvětlil vznik své heliocentrické teorie a předpověděl názorovou revoluci: „*Zajisté s určitostí mohu počítat s tím, Svatý Otče, že někteří jakmile se doslechnou, že jsem v těchto knihách, které jsem napsal o oběžích sfér světa, přisoudil Zemi některé pohyby, ihned strhnou pokřik, že si zasloužím, abych byl pro takovou domněnku rázně umlčen.*“

Nejsem totiž zdaleka natolik zahleděn do svých názorů, abych pečlivě nevážil, co o nich budou soudit jiní...“

Dále Koperník vysvětluje, že badatel má usilovat o poznání pravdy, přičemž výsledky jeho práce mají být zpřístupňovány širokým kruhům: *„A tak když jsem sám rozvažoval, za jak nesmyslnou budou považovat moji řeč ti, kteří názor, že Země nehybně spočívá uprostřed nebe jako jeho střed, uznávají jako názor ověřený úsudky mnohých staletí, také jsem sám pochyboval zda kdybych naproti tomu potvrdil, že Země se pohybuje, mám zveřejnit své úvahy sepsané na dokázání jejího pohybu, anebo zda by nebylo vhodné následovat příkladu pythagorejců a některých jiných, mezi nimiž bylo zvykem, že nesdělovali tajemství filozofie písemně, ale pouze od úst k ústům...“*

Jednu ze základních myšlenek své teorie, řečeno současnou terminologií, kinematický princip relativity, popisuje Koperník následujícím způsobem: *„A tak já při tom uspořádání pohybů, které Zemi dále ve svém díle připisuji, jsem konečně po mnohém a dlouhém pozorování shledal, že jestliže se pohyby ostatních planet přenesou na oběh Země a to se stane základem pro oběh kterékoli planety, nejen že tak vyjdou jejich zdánlivé pohyby, ale i pořadí a velikosti všech planet a sfér a celé nebe se tak dokonale navzájem propojí, že v žádné jeho části není možno cokoli přemístit, aniž by se uvedly v nepořádek všechny ostatní části a celý vesmír.“*

Uspořádání obsahu Oběhů sleduje Almagest, který měl 13 knih, zatímco Oběhy pouze 6. V jednotlivých knihách je u Ptolemaia 5 – 19 kapitol, u Koperníka 9 – 36 kapitol, celkový počet kapitol je v obou spisech zhruba stejný, 146 kapitol u Ptolemaia, u Koperníka 131 kapitol.

Časová posloupnost sepsání jednotlivých knih Oběhů byla rekonstruována z analýzy vodoznaků na papíře Koperníkova rukopisu. Nejprve dopsal I. knihu, počátek jejího sepisování klademe do roku 1515, závěrečnou redakci kolem roku 1520. Následně roku 1523 dokončil II. knihu a kolem roku 1525 začal sepisovat III. knihu a současně i IV. knihu. Téměř zároveň s nimi byla zpracována celá V. kniha a část VI. knihy. Předpokládáme, že uvedené části Oběhů byly vytvořeny kolem roku 1530, neboť jsou v nich využita pozorování z roku 1529, ale nejsou uvedena pozorování při stanovení apogea Venuše z roku 1532. Později Koperník dopsal zbývající část V. knihy a zakončil pro něj obtížnou VI. knihu.

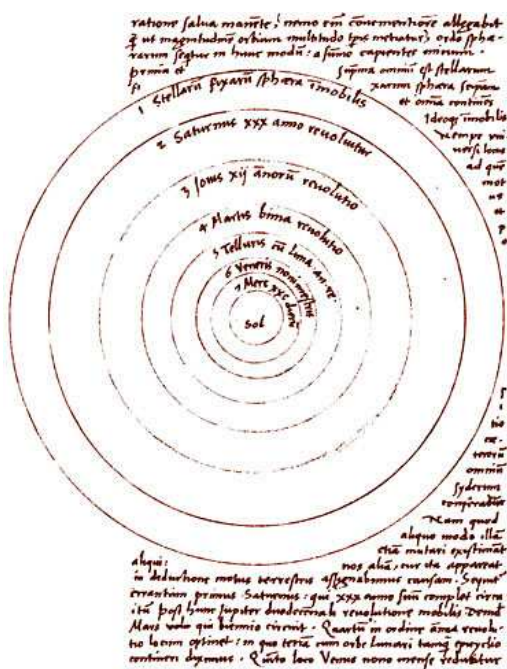
V úvodu I. knihy se Koperník vyjadřuje o významu samotné astronomie takto: *„Jestliže tedy hodnotu věd určuje předmět, kterým se zabývají, nejvznešenější bude věda, kterou jedni nazývají astronomií. Jako vrchol vznešených věd, nejdůstojnější pro svobodného člověka, opírá se takměř o všechna odvětví matematiky.“*

V prvních kapitolách se zabýval sférickým tvarem světa i Země. Odpověď na klíčovou otázku své teorie, zformulovanou v názvu kapitoly páté: *O tom, zda se Země pohybuje kruhovým pohybem a o jejím místě*, podává již zde. Koperník byl dostatečně kritický k pozorovacím vjemům a zkušenostem získaným smysly. Dokázal na rozdíl od Aristotela neztotožňovat jevovou bezprostředně vnímanou skutečnost s realitou. Skutečnost, že Země se jeví běžnému pozorovateli bez pohybu a kosmická tělesa jako Slunce, Měsíc v pohybu, nebyla Koperníkovi dostatečným důkazem její nehybnosti. Matematickým způsobem dokázal prověřovat jevové skutečnosti vnímané lidským zrakem. Využil princip relativnosti pohybu k objasnění pozorovaných pohybů planet z pohybující se Země, což vysvětluje takto: *„Mezi autory panuje většinou shoda o tom, že Země nehybně stojí uprostřed světa, takže by pokládali za hloupé, či dokonce za směšné myslet si něco opačného. Avšak jakmile tuto věc začneme sledovat pozorněji, ukáže se, že tato otázka není dosud rozřešena, a proto že ji vůbec nemáme přehlížet. Všechna změna*

místa totiž, která se jeví, se děje buď proto, že se pohybuje pozorovaná věc, nebo pozorovatel, nebo že se různým směrem pohybují oba.“

V kapitole deváté Zda je možno Zemi přisoudit více pohybů a o středu světa Koperník říká: „Jestliže tedy Země vykonává jiné pohyby než ten kolem středu, nezbytně to budou takové, které se podobně budou zrcadlit v mnohých věcech vně Země, podle nichž shledáváme roční oběh. Neboť jestliže se roční oběh zamění místo slunečního za zemský, když se přitom současně připustí nehybnost Slunce, východ a západ znamená stálic, z nichž se stávají buď hvězdy ranní, nebo večerní, se budou jevit tímtež způsobem, a rovněž zastávky, zpětné i přímé pohyby planet se ukáží být nikoli pohybem jejich, ale pohybem Země, který si planety pro své zdánlivé pohyby vypůjčují.“

Rovněž v této kapitole formuluje svůj názor na přitažlivost, v Koperníkově interpretaci na tíhu: „Myslím, že tíha není nic jiného, než jakési přirozené úsilí částí se shlukovat, které jim dala božská prozřetelnost tvůrce světa, aby se seskupováním do tvaru koule spojovaly do své jednoty a úplnosti. Můžeme věřit, že tuto vlastnost mají jak Slunce, Měsíc a ostatní planety, takže jejím působením zůstávají ve sférickém tvaru a uskutečňují přitom různé kruhové pohyby.“ U Koperníka je tíha určitá snaha přírody, přičemž ji chápe nejenom na Zemi, ale také na Slunci, Měsíci i planetách. K zobecňující myšlence, že všechna tělesa se vzájemně přitahují však nedospěl.



Obr. 6: Kresba heliocentrické soustavy

Nejdůležitější je kapitola desátá O pořadí nebeských sfér, v níž je mimo jiné umístěna známá kresba heliocentrické planetární soustavy, viz obr. 6. V kapitole Koperník konstatuje: „Proto se nezdráháme tvrdit, že všechno to, co Měsíc uzavírá ve svou sféru, jakož i střed Země, obíhá stejně jako ostatní planety v oné velké sféře kolem Slunce jedenkrát za rok a že při Slunci je střed světa, v němž také nehybné Slunce spočívá. Cokoli se zdá být pohybem Slunce, se mnohem lépe dá pravdivě vysvětlit pohybem Země. Velikost světa je však taková, že i když ona vzdálenost Země od Slunce má vzhledem k libovolným ostatním sféram planet a vzhledem k jejich oběhům sdostatek zřetelnou velikost, vzhledem ke sféře stálic je nezřetelná.“

Významným byl pro Koperníka argument estetický, vyzdvihující harmonii celku i jednotlivých částí: „Avšak uprostřed všech spočívá Slunce. Vždyť kdo by v tomto překrásném chrámu vložil tuto svítilnu do jiného a lepšího místa, než odkud by zároveň všechno mohla osvětlovat? Jistě nikoliv nevhodně někteří nazývají Slunce lucernou světa, jiní jeho myslí, jiní jeho vládcem“.

„Shledáváme tedy v tomto uspořádání podivuhodnou symetrii světa a pravé harmonické spojení pohybu sfér s jejich velikostí, jaké žádným jiným způsobem nemůže být nalezeno.“

O absolutních hodnotách vzdáleností ve sluneční soustavě měl Koperník chybné představy, předpokládal, že vzdálenost Země – Slunce je přibližně 1 200R_Z, zhruba 7,5 milionů kilometrů. Přestože 20krát podcenil vzdálenost Země – Slunce i tak velikost Slunce byla značně větší než Země. Nejevzdálenější planeta Saturn se podle Koperníka nacházela ve vzdálenosti pouze 60 milionů kilometrů.

Jako astronom se Koperník zamýšlel nad nenalezením paralaktických posuvů hvězd, což komentoval slovy: „*Přestože poloměr zemské dráhy je velký, přesto je nicotně malý ve srovnání se vzdáleností nehybných hvězd.*“ Uvědomoval si, že tehdejší přesnost pozorování lidským okem nedovolovala stanovení malých paralax. Dnes víme že přesnost pozorování nebyla lepší než 5', což podle výpočtu dává vzdálenost hvězd neboli v koperníkovské koncepci poloměr nebeské sféry asi 1 000krát větší, než je vzdálenost Země od Slunce nebo přibližně 100krát dále, než tehdy nejvzdálenější planeta od Slunce Saturn. Právě na tuto propastnost rozměrů mezi sluneční soustavou a hvězdami Koperník upozorňoval. Sféru nehybných hvězd tak posunul mnohem dále za sféru Saturna, než jeho předchůdci. V této souvislosti připomínáme, že Koperník sám se nepokoušel odhadnout vzdálenost hvězd od Země.

Často je uváděn za přímý důkaz platnosti heliocentrické teorie paralaktický posuv pouze poloh hvězd. Lze však za něj považovat i mnohem větší paralaktický posuv vnějších planet. Mezi oběma důkazy není principiálního rozdílu, tudíž i v epoše Koperníka existovaly přímé důkazy oprávněnosti heliocentrické soustavy.

Zásadná význam má jedenáctá kapitola *Důkaz o trojnásobném pohybu Země*. V této kapitole Koperník důsledně přenáší na Zemi všechny pohyby, které jeho předchůdci včetně Ptolemaia museli komplikovaně vysvětlovat jako pohyby celého vesmíru. Podle Koperníka Země vykonává rotační pohyb za 24 hodin, oběžný za jeden rok a konečně tzv. pohyb sklonu, tj. pohyb precesní. První dva jsou zřejmé, avšak zaváděný třetí ve skutečnosti neexistuje. Koperník předpokládal, že skloněná osa Země opisuje široký kužel, přičemž zachovává svoji orientaci vzhledem ke středu rotace. Toto pootočení osy kompenzoval Koperník postulováním třetího pohybu. Neznal zákon zachování momentu hybnosti, v důsledku kterého rotační osa Země zachovává setrvačností neměnný směr v prostoru, pokud na ni nepůsobí jiné vnější síly. Působení Slunce a Měsíce vytváří na rovníku Země výdut', což vede ke precesi. Aby Koperník objasnil neměnnost polohy světového pólu v průběhu roku, připsal zemské ose třetí kompenzační pohyb. Podle Koperníka: „*Neboť jestliže by zachovávaly týž sklon a prostě jen následovaly pohyb středu, nenastávala by žádná nestejnost dní a nocí, ale trvale by byl buď slunovrat letní či zimní, nebo rovnodennost, buď léto, nebo zima, nebo stále beze změny některá jiná roční doba Proto tedy třetí pohyb sklonu také následuje roční oběh, ale opačně, to je zpětně proti pohybu středu. A tak, protože oba tyto pohyby jsou navzájem sobě rovné a protichůdné, vychází, že osa Země a spolu s ní rovník, největší z rovnoběžek, směřují do skoro téhož místa světa a tak setrvávají nehybné.*“

Ve svém výkladu astronomické teorie se Koperník opíral o matematické postupy a metody, používal tradiční aritmetiku, algebru, geometrii a trigonometrii, pracoval jak s celými čísly, tak i se zlomky. V úvodu celého díla Koperník připomíná: „*Nepochybují, že schopní a vzdělaní matematici budou se mnou souhlasit...*“

Při výpočtech používal jím propočtené tabulky, ve kterých místo sinu používal složitější starší vyjádření – poloviční tětiva dvojnásobného úhlu vzhledem k zvolenému danému průměru. Tedy neužíval pojem sinus, přestože v západní Evropě v té době již tato trigonometrická funkce byla známa a Koperník o tom věděl.

Druhá kniha *Oběhů* se skládá ze čtrnácti kapitol, které jsou věnovány různým problémům sférické astronomie, jevům spojeným s denním pohybem oblohy. Koperník na začátku popisuje základní pojmy, příkladně o horizontu říká: „*Dále následuje horizont, který latiníci nazývají omezujícím kruhem, ohraničuje nám totiž viditelnou část světa od té, jež je zakryta.*“

Také všechno, co zapadá, se zdá na horizontu, který má střed na povrchu Země a pól v našem nadhlavníku.“

Zavádí astronomické souřadnice, nejprve rovníkové, u kterých za vztažnou považujeme rovinu světového rovníku, která je prodloužením roviny zemského rovníku. Dále pak souřadnice ekliptikální, kde je vztažnou rovina ekliptiky. Koperník popisuje postupy umožňující transformaci mezi výše popsány astronomickými soustavami souřadnic, ukazuje, jak se vyjadřuje deklinace a rektascenze hvězd. Následuje objasnění jevů souvisících s třemi pohyby Země, především je rozebírána denní rotace Země a její oběh kolem Slunce.

Rotaci Země Koperník neměl možnost ve své době dokázat přímo. Teprve později byla objevena rotace planet – Jupitera, Marsu, Saturna a odtud bylo možné analogicky předpokládat i rotaci Země.

Kniha končí katalogem obsahujícím polohy hvězd s přesností $\pm 5'$. U každé hvězdy jsou uvedeny ekliptikální souřadnice – délka, šířka a jasnost dle šestidílné stupnice zavedené již Hipparchem, s uvedením hvězdných velikostí 1 025 hvězd. Koperník používá k jejich označení popisný způsob, tedy například *Albireo* v souhvězdí Labutě je uváděna jako *hvězda na zobáku*, *Polárku* v souhvězdí Malého medvěda označuje jako *hvězdu na konci ocasu*, *Aldebaran* v Býku je popisován jako *v tom oku*.

Rozsáhlá třetí kniha je současně s první nejdůkladnějším systematickým výkladem. Obsahuje dvacet šest kapitol, věnovaných výkladu precese a ročnímu pohybu Země kolem Slunce. Nejprve je podrobně rozebírána precese, dlouhoperiodický pohyb zemské osy po plášti kužele, s periodou stanovenou Koperníkem v Oběžích na 25 816 roků. Správně je dále analyzován pohyb zemské osy jako skutečná příčina precesního jevu. Důsledkem je posouvání jarního a podzimního bodu, průsečíků ekliptiky se světovým rovníkem, na pozadí hvězd o asi 50''rok. Z pohledu dnešní kosmické mechaniky víme, že samotná precese je částečně vyvolána gravitačním působením Měsíce a Slunce, tzv. *lunisolární precese*, menší část gravitačním působením planet, tzv. *planetární precese*.

Po uvedení základních principů, výkladu starověkých kinematicko – geometrických objasnění precesního jevu, Koperník píše: *...„že body rovnodennosti postupují kupředu, se zdá ne proto, že by se snad sféra stálic měla pohybovat, ale proto, že rovník, který je vůči rovině ekliptiky skloněn, se po ní posouvá zpět podle pohybu sklonu zemské osy. Tímto způsobem vidíme ony rovnodennostní průsečíky ekliptiky s rovníkem spolu s celým sklonem ekliptiky postupovat během doby kupředu, zatímco stálice o tolikéž zůstávají vzadu.“*

Na základě analýzy pozorování se Koperník snažil odvodit posouvání bodů rovnodennosti vyvolané precesí. Z pozorování jasných hvězd, především *Spicy* – α souhvězdí Panny, *Regula* – α Lva a *Acraba* – β Štíra dospěl Koperník ke střednímu ročnímu pohybu bodů rovnodennosti 50,23'', což je v dobré shodě s hodnotou 50,25'' pro precesi k epoše roku 1 500 podle zpětně provedeného výpočtu v současnosti.

Délku tropického a hvězdného roku definuje Koperník následujícím způsobem: *„Přirozeným čili obecným rokem nazýváme ten, který nám způsobuje čtyři roční období, hvězdným rokem je zase ten, jehož uplynutí se vztahuje k určité hvězdě. Že délka přirozeného roku, který se také nazývá rokem tropickým, není stálá, potvrzují přesná pozorování starověkých vědců.“*

V knize čtvrté je podrobně rozebírán pohyb Měsíce, přičemž tradičně Koperník podrobuje kritické analýze kinematickou teorii pohybu Měsíce Ptolemaia v *Almagestu*, která vycházela z Hipparcha.

Při tvorbě teorie pohybu Měsíce astronomie v historii nikdy nepochybovala o tom, kolem kterého tělesa Měsíc obíhá – vždy kolem Země, což platilo jak pro geocentrické tak pro heliocentrické uspořádání sluneční soustavy.

Situaci charakterizuje Koperník slovy „...Na počátku začneme s pohybem Měsíce, a to předně proto, že jeho pomocí se dají poznat a určit jak ve dne, tak i v noci polohy každé hvězdy, za druhé proto, že Měsíc jediný ze všech nebeských těles obíhá kolem Země a mění fáze a je ze všech Zemi nejpodobnější...“

Kritická analýza Ptolemaiovy teorie pohybu Měsíce Koperníkem vedla v druhé kapitole k závěru: „Jestliže přijmeme rovnoměrným pohyb středu epicyklu kolem středu Země, pak musíme přijmout, že jeho pohyb po vlastní dráze a zejména excentru musí být nerovnoměrný.“

Koperník odmítl starověká kinematická schémata, přestože souhlas pozorovaných a teoretických poloh Měsíce byl v celku dobrý. Vzdálenost Země – Měsíc však byla Ptolemaiem uváděna velmi nepřesně – nesprávně, měnila se až o jednu třetinu. Konkrétně Ptolemaios uváděl, že střední vzdálenost Měsíce v úplňku nebo ve fázi nového měsíce, je rovna $59R_Z$ s možným kolísáním $(54 - 64)R_Z$, zatímco v první čtvrti je $38,7R_Z$ s kolísáním $(33,6 - 43,8)R_Z$. Úměrně tomu by se musel měnit značně úhlový průměr Měsíce, což však bylo v rozporu s pozorováními jak samotného Koperníka, tak i jiných astronomů. Úhlový průměr Měsíce se mění ve skutečnosti v mezích $29' 20'' - 33' 32''$, tedy zhruba o 13 %, neboť interval vzdáleností Měsíce je $(55,9 - 63,8)R_Z$.

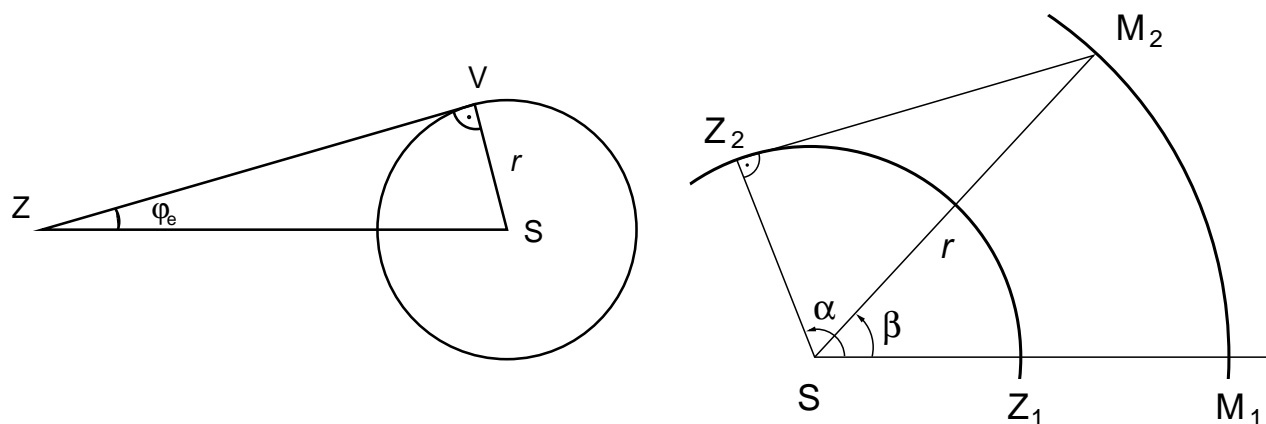
Vlastní Koperníkova teorie pohybu Měsíce vycházela ze soustavy tří kruhových pohybů. Prvním je sféra deferentu, jejíž střed je souhlasný se středem Země. Po deferentu obíhá střed velkého epicyklu, proti směru hodinových ručiček. Jeden oběh vykoná za 29 dnů, 31 prvních, 50 druhých, 8 třetích, 9 čtvrtých a 20 pátých šedesátých částí dne; připomínáme, že Koperník nepoužíval desetinnou soustavu. Střed malého epicyklu obíhá po kružnici prvního epicyklu, ve směru hodinových ručiček s 2krát větší úhlovou rychlostí, takže v průběhu synodické oběžné doby vykoná na něm dva oběhy. Poměr poloměrů velkého a malého epicyklu jsou $1097 : 237$, t.j. $4,63 : 1$. Ve výše propracovaném schématu Koperníka se střední úhlový průměr Měsíce mění od $28,8'$ do $37,6'$, což odpovídalo hodnotám jím získaným při pozorováních.

Konec čtvrté knihy je věnován změně šířek Měsíce, největší vzdálenost od ekliptiky je podle Koperníka 5° . Základem jeho analýzy bylo studium délky drakonického měsíce. Z hodnot uváděných v *Oběžích* lze stanovit jeho délku na 27,2122236 dne, tedy s odlišností od dnes uváděné hodnoty pouze 0,3 sekundy.

Pátá kniha podává v třiceti šesti kapitolách teorii pohybu planet, především jsou diskutovány změny poloh v délce. Výkladem začíná interpretací pohybu Saturna, následují Jupiter, Marsu, Venuše a na závěr Merkur.

Při svých měřeních Koperník určoval ekliptikální délku, respektive šířku, tedy ekliptikální souřadnice. Koperníkovo oddělování pohybu planet v šířce a v délce je stále ještě poplatné Ptolemaiovu *Almagestu*.

Složitě pozorované pohyby planet objasnil Koperník jako výsledek skládání dvou skutečných pohybů, planety a Země po jejich drahách kolem Slunce. Vyložil tak jak přímý



Obr. 7: Určení relativní vzdálenosti Venuše (vlevo) a Marsu (vpravo) od Slunce

pohyb planet v okolí konjunkce planet, tak zpětný retrográdní pohyb v blízkosti opozice vnější planety. Při vypracování heliocentrického systému vycházel Koperník ze základní myšlenky, že planety a Země obíhají kolem Slunce vcelku rovnoměrně po kruhových drahách. Přesněji středem planetárních drah byl střed dráhy Země, nikoliv Slunce, které bylo umístěno excentricky. Původní zavedení pomocných epicyklů pro planety později upravil tím, že větší epicykl nahradil excentricky umístěnou hlavní sférou. Neodhalil skutečnost, že nerovnoměrnosti pozorovaného pohybu planet, různé úhlové rychlosti v rozdílných místech drah, jsou důsledkem jejich eliptičnosti.

V kapitole třetí k pohybu planet uvádí: „Protože jsou tedy dvě příčiny, pro které se rovnoměrný pohyb planety jeví jako nerovnoměrný, a to jednak pohyb Země, jednak vlastní pohyb planety, vysvětlíme každou z nich co nejnázorněji podle jejího původu a zvláště objasníme, jak je od sebe rozlišit.“

Přínosem Koperníka je zavedení pojmu siderické oběžné doby planet a jejich stanovení za pomoci synodických oběžných dob určených z pozorování a ze známé siderické oběžné doby Země.

Dalším významným výsledkem heliocentrického systému bylo stanovení relativních vzdáleností planet od Slunce, vyjádřených v jednotkách vzdálenosti Země – Slunce. U vnitřních planet Koperník stanovil z pozorování maximální elongaci planet, například pro Venuši $\varphi_e = 46^\circ$, poloměry drah pak určil $r = \sin \varphi_e ZS = 0,72 ZS$. Pro vnější planety, příkladně pro Mars zjistil, že nastává kvadratura Z_2M_2 průměrně 106 dní po opozici Z_1M_1 . Při znalosti siderické oběžné doby Země 365 dní a Marsu 687 dní byl znám střední úhlový pohyb planet. Země za 106 dní urazila úhel $\alpha = 104,5^\circ$ a Mars úhel $\beta = 55,5^\circ$. Odtud vyplynulo, podle následujícího obr. 7 že poloměr dráhy Marsu je roven $r = \frac{1}{\cos(\alpha - \beta)} = \frac{1}{\cos 49^\circ} = 1,52 ZS$. Obdobným způsobem určil i poloměry drah Jupitera a Saturna.

V Oběžích není explicitně uváděna souhrnná tabulka s hodnotami relativních poloměrů drah planet vypočtenými Koperníkem, můžeme však ji z údajů ve spisu sestavit.

| Planeta | Koperník | Hodnoty uváděné současnou astronomií |
|---------|----------|--------------------------------------|
| Merkur | 0,3953 | 0,3871 |
| Venuše | 0,7193 | 0,7233 |
| Země | 1,0000 | 1,0000 |
| Mars | 1,5198 | 1,5237 |
| Jupiter | 5,2192 | 5,2028 |
| Saturn | 9,3213 | 9,5389 |

Soulad srovnávaných hodnot ukazuje na dostatečně vysokou přesnost Koperníkových údajů, jak při astronomických pozorováních poloh planet, tak i při teoretickém zpracování měření. Relativní vzdálenosti planet od Slunce byly stanoveny s chybou menší než 1 %, pouze u Saturnu byla chyba 3,8 %.

V šesté knize Koperník v devíti kapitolách rozebírá matematickou teorii pohybu planet v ekliptikální šířce, tedy teorii odklonu pohybu planet od ekliptiky. K tomu uvádí: *„Přístupujeme nyní k pohybu pěti planet, do jejichž pořadí a velikosti jejich sfér vnáší pohyb Země za obdivuhodného souhlasu jistou symetrii, jak jsme to souhrnně vyložili v své knize, když jsme ukázali, že tyto sféry mají mnohem spíše své středy při Slunci než při Zemi. Je nyní naším úkolem zabývat se tím pohybem, kterým se tyto planety posouvají v šířce a ukázat, nakolik i v těchto jevech vykonává pohyblivost Země svůj vliv...“*

Obsahově odpovídá třinácté knize Ptolemaiova *Almagestu*, která zachycuje změnu šířky poloh planet tím, že rovina epicyklů svírá určitý úhel s rovinou excentrického deferentu. Koperník založil svoji teorii pohybu v šířce na myšlence rovnoměrné kmitavé změny sklonu excentricky umístěné hlavní sféry každé planety k rovině ekliptiky. V souladu s jeho teorií roviny drah pěti planet protínají rovinu ekliptiky v jedné a téže přímkce souhlasné s průměrem zemské dráhy. Pro vnější (horní) planety – Saturn, Jupiter a Mars – úhly vytvořené rovinami drah a rovinou ekliptiky se mění kmitavým způsobem kolem průsečnice ukázaných rovin. Pro Venuši a Merkur sestrojil mnohem složitější teorii změny šířek zavedením speciálního pojmu *deviace*. Přesněji deviační kmitání využil Koperníkem k objasnění, proč šířky Venuše a Merkuru nejsou rovny nule v okamžiku, kdy se nachází na průsečnici svých drah s rovinou ekliptiky.

Koperníková teorie pohybu planet v šířce nesouhlasí se současnými představami o změnách poloh planet v šířce. Byla však spolehlivá při výkladu největších a nejmenších šířek planet. Vedle toho je v této knize vyložen názorný trigonometrický způsob určování sklonu drah velkých planet k rovině ekliptiky. Autorem nalezené hodnoty jsou pro Saturn $2^{\circ} 3'$, Jupiter $1^{\circ} 6'$. V současnosti uváděné hodnoty sklonů jsou $2^{\circ} 29'$ u Saturna a $1^{\circ} 18'$ u Jupitera, tedy souhlas je relativně dobrý.

Šestá kniha je nejslabší částí *Oběhů*, nebyla nikdy hlouběji propracována a dokončena. Je vykládána spíše astronomicky, bez hlubšího matematického pohledu a obecnějších závěrů.

Charakterizujme stručně pozorování Koperníka. Hlavní pracovním nástrojem bylo lidské oko a primitivní přístroje, které si sám zhotovil. V knize *Oběhy* nám zanechal popisy těchto přístrojů. Používaly se v podstatě již v antice, nešlo tedy o nejmodernější přístroje dané doby – středověku, která již znala například dokonalejší ploché astrolabium. Prvním a nejjednodušším používaným přístrojem byl *paralaktický instrument* tzv. *trikvetrum*. Skládal se ze tří dlouhých latí, z nichž svíslá zavěšená na stojanovém sloupu byla otáčecí. Lat' – rameno byla dlouhá 1,9 m, centrální sloup měl výšku 2,5 m. Popsaný paralaktický přístroj

sloužil k určování paralaxy Měsíce, tedy vzdálenosti Měsíce od Země a dále k stanovení vzdálenosti hvězd od zenitu. Přesnost měření odhadujeme na nejméně 5. Po Koperníkově smrti se tento přístroj po čtyřiceti letech dostal do rukou Tychona Brahe, který ho popsal ve své knize z roku 1598 *Astronomie instauratae mechanica* česky *Přístroje obnovené astronomie*.

Pro určování úhlové výšky Slunce, zeměpisné šířky a úhlu sklonu ekliptiky používal Koperník *ptolemaiovský kvadrant*. Napříč vodorovnou cihlovou plošinou – pavimentem probíhal kovový poledník pevně do ní zasazený. Na tento pás se upevňoval a zaměřoval v poledníkovém směru tzv. sluneční kvadrant. Skládal se z větší čtvercové desky, nejspíše z mědi či mosazi, na kterou byla vyryta úhlová stupnice od 0 do 90 stupňů, každý stupeň byl dále ještě rozdělen na šest dílků. Do středního bodu této stupnice byl zasazen sloupek, čímž vznikl gnómon, obdoba slunečních hodin. Gnómonový sloupek ukazoval svým stínem výšku Slunce v poledne, což umožňovalo Koperníkovi stanovit zeměpisnou šířku např. Fromborku jakož i sklon ekliptiky vzhledem k rovníku. Pro tento přístroj Koperník nechal upravit pozorovatelnu a po instalaci od roku 1515 jej používal. V Oběžích je zmiňována nejúplnější řada observací právě z uvedených let. Tato pozorování poskytla údaje pro výpočetní podklady ke stanovení délky roku a následně tvorbě spolehlivého kalendáře. Pozorovací přístroj obsluhoval Koperník sám, přípravu na pozorování zřejmě prováděl pomocník.

Konečně třetím a nejsložitějším používaným přístrojem Koperníka byl *astroláb*, který umožňoval pozorování objektů na obloze v libovolné poloze a měření úhlové vzdálenosti dvou objektů. Jednalo se o *armilární sféru* s vizíry pro pozorování, otvory v kovových destičkách zasažených na pohyblivou lištu. Skládal se z šesti soustředných dřevěných kruhů – obručí – opatřených úhlovými měřítky a průzory. Každý z kruhů odpovídal určitému kruhu světové sféry, například jeden z kruhů odpovídal ekliptice, tudíž tak bylo možné určovat ekliptikální délku případně šířku. Přesnost určování souřadnic hvězd tímto přístrojem odhadujeme na zhruba 10'. Vedle chyb daných použitým přístrojem existovaly další vyplývající z toho, že astroláb se velmi obtížně situoval vzhledem k horizontu a základním směrům. Do výsledků měření se dostávaly rovněž tzv. teoretické chyby, např. poloha Slunce byla propočítávána podle tehdejší teorie pohybu Slunce a nezbytně zahrnovala její chyby. Stanovení poloh planet bylo méně přesné než u hvězd, neboť planety mají rychlejší vlastní pohyb.

Velkou pozornost věnoval Koperník přesnému určování času observací, jak vyplývá z dochovaných účtů kapituly za opravy a seřízení věžních hodin vysoké zvonice ve Fromborku, odkud pochází podstatná část pozorování.

Jediným novodobým pozorovacím nástrojem, který sám Koperník vymyslel, byly sluneční hodiny realizované od ledna do dubna 1517 na zámku v Olštýně. Jejich konstrukce využívala odraznou metodu, paprsky Slunce dopadaly v období jarní rovnodennosti jen na malý úsek okenních parapetů ochozu, kde Koperník umístil zrcátko. Na protilehlou zeď ochozu, kde byla nakreslena řada čar s označenými stupni podél dlouhé čáry představující ekliptiku, dopadaly odražené sluneční paprsky. Dlouholetá pozorování Slunce vedla Koperníka roku 1530 ke stanovení sklonu ekliptiky $\varepsilon = 23^\circ 28' 24''$.

Koperník byl pečlivým pozorovatelem, ale jeho pozorovací program spíše doplňoval údaje starších astronomů, než aby představoval systematická a pravidelná pozorování. Na

druhé straně si uvědomoval jejich význam, což v rukopise Oběhů vyjádřil takto: „ *Kdo chce sledovat pomocí číselných výpočtů charakter pohybů a rotací, říkám, nezíská nic.*“

Převážnou většinu observací prováděl Koperník s velkou pravděpodobností na své věži ve Fromborku, v němž astronomické podmínky byly málo příznivé a neporovnatelně horší než v Itálii. Z jistě mnohem většího počtu pozorování se uchovaly záznamy o 63 známých a doložených pozorováních. Jejich celkový počet byl určitě větší, neboť se zřejmě zmiňuje pouze o těch, které jsou stěžejní a podstatné.

V celkovém hodnocení heliocentrické teorie je zřejmé, že její význam v plné míře současníci zdaleka nepochopili. Oběhy byly příliš obtížným spisem, s výjimkou obecněji zaměřené I. knihy. Jen velmi málo exemplářů I. a II. vydání je opatřeno opravami chyb (zpravidla tiskových a numerických údajů) či komentáři od čtenářů. Z nich jsou známé např. poznámky německého matematika a astronoma **Michaela Mästlina (1550 – 1631)** a asistenta Tychona Brahe německého astronoma **Paula Witticha (1546 – 1586)**. Více už bylo těch, kteří heliocentrickou teorii přijali.

Význam astronomických teorií byl posuzován a oceňován podle toho, do jaké míry zjednodušovaly a zpřesňovaly astronomické tabulky poloh kosmických těles, zejména planet. Heliocentrická teorie byla nejprve využívána v Polsku na Krakovské univerzitě k výpočtům poloh planet na rok 1549, později v letech 1578 – 1579. Propočítané polohy sloužily pro astrologické účely.

Na universitách mimo Polsko se první dochovaná zmínka o výuce heliocentrické teorie objevuje v Salamance v Španělsku roku 1561. V Německu byla významná činnost již zmiňovaného profesora matematiky na universitě v Tübingenu Michaela Mästlina, který vedle jiných na základě vlastních pozorování supernovy z roku 1572 dospěl k názoru, že objekt se nachází ve velmi vzdálené sféře stálic. Právě Mästlin mladého Keplera seznámil s novým uspořádáním sluneční soustavy.

Ve Švýcarsku **Christian Wursteizen (1544 – 1588)**, švýcarský historik, matematik a astronom na basilejské univerzitě ve svých přednáškách propagoval poznatky Koperníkovy heliocentrické teorie. Později přesídlil do Itálie, jeho argumenty používal v Galileově Dialogu jeden ze tří diskutujících, Sagredo.

Na podkladě heliocentrické teorie byly německým matematikem a astronomem **Erasmem Reinholdem (1511 – 1553)** roku 1551 vydány *Prutenicae tabulae coelestium motum* česky *Pruské tabulky nebeských pohybů*, obsahující efemeridy kosmických těles. V úvodu Reinhold píše: „*Jsmo zavázáni Koperníkovi za jeho obtížná pozorování a zejména za nalezení skutečného učení o pohybech nebeských těles.*“ V příloze tabulek bylo uvedeno podrobné rozpracování výpočetních metod podle heliocentrické teorie, na jejímž základě byly předpovědi souřadnic kosmických těles určovány. Pruské tabulky ve své době dávaly přesnější předpovědi poloh než všechny předcházející tabulky, což podpořilo myšlenku o správnosti heliocentrického uspořádání kosmických těles ve sluneční soustavě. Gregoriánská reforma kalendáře provedená roku 1582 papežem Řehořem XIII. se opírala právě o údaje z Pruských tabulek. Avšak ani tyto tabulky neodpovídaly přesnosti později dosahované při pozorováních Tychonem Brahe.

Boj za uznání Koperníkovy heliocentrické soustavy, především pro její světonázorový obsah, trval dvě a půl století. K rozhodnému odsouzení heliocentrismu došlo v důsledku široké veřejné činnosti stoupence Koperníkovy filozofie, renesančního italského filozofa

Giordana Bruna (1548 – 1600). Ve svých dialozích *Della causa, principie et uno* česky *O příčině, principu a jednom*, *La cena delle Ceneri* česky *Večeře na Popeleční středu* a *De l'infinito, universo e mondi* česky *O nekonečnu, vesmíru a světech* formuloval Bruno své kosmologické a filozofické představy, které byly v protikladu s názory tehdejších představitelů katolické církve.

V již uvedeném dialogu *O nekonečnu, vesmíru a světech* Bruno vyslovuje mnohem později ověřený poznatek, že ve sluneční soustavě existují planety dosud astronomům v jeho době neznámé: „*Vždyť neodporuje rozumu, že okolo našeho Slunce obíhají i jiné oběžnice, které nevidíme pro jejich větší vzdálenost nebo menší rozměry. . .*“

Ve své filozofii navazoval Bruno na názory řecké filozofie. Vesmír je podle Bruna časově a prostorově nekonečný, bez pevných bodů a privilegovaného středu. Zavrhoval tedy nejen výsadní postavení Země ve vesmíru, ale i ústřední postavení Slunce u Koperníka. Podle Bruna střed nekonečného vesmíru neexistuje, naše sluneční soustava je jedním z nekonečného množství světů neustále vznikajících a zanikajících.

3.2 Přesná pozorování

Jen tři roky po smrti Koperníka přichází na svět nejpřesnější pozorovatel lidským zrakem dánský astronom **Tycho Brahe (1546 – 1601)**. Vztah k astronomii získal již v mládí při sledování astronomických jevů. V roce 1563 při pozorování konjunkce Jupitera a Saturna zjistil, že úkaz nastal v časovém posuvu oproti údajům uváděným v Alfonsinských tabulkách sestavených roku 1272. Dospěl k závěru, že je potřebné sestavit nové tabulky, ke kterým jsou nezbytná přesná a dlouhodobá astronomická pozorování.

V Dánsku 11. listopadu 1572 pozoroval v souhvězdí Kassiopei jasnou novou hvězdu, dnes víme že supernovu. Pomocí polosextantu proměřil úhlové vzdálenosti mezi supernovou a nejjasnějšími hvězdami obrysu souhvězdí. Poloha supernovy se neměnila, tudíž správně usoudil, že se nachází ve sféře nehybných hvězd. Údaje z pozorování, včetně popisu pozorovacího přístroje, jsou uvedeny ve spisku *De Stella Nova* česky *O nové hvězdě*.

Již při budování svých observatoří Uraniborgu – Nebeského zámku a Sterneborgu – Hvězdného zámku na Hvenu v roce 1577 pozoroval a proměřoval polohu jasné komety. Na základě stanovení denních paralax dospěl k závěru, že kometa se nachází vně dráhy Měsíce a je tedy ve stejném prostoru jako planety. Tycho zpochybnil představu existence sfér, kterou mimo jiné zastával ještě i Koperník. Sféry by podle něho byly překážkou pozorovaného pohybu komet za drahou Měsíce.

Přispěl tak společně s dalšími astronomy k vyvrácení obecně přijímané Aristotelovy představy o původu komet ze zemských výparů, podle níž jsou komety zhuštění v horních vrstvách atmosféry Země. Názory o vzdálenosti komety od Země se opíraly o přesná astronomická pozorování a matematické výpočty, nikoliv o filozofické spekulace. Jsou zachyceny v díle z roku 1588 *De mundi aeteri recentioribus phaenomenis liber secundus* česky *Druhá kniha o nedávných jevech v nebeském světě*.

Ve své zprávě *De cometa anni 1577* česky *O kometě roku 1577* Tycho Brahe uvádí: „. . . z mnoha pozorování s náležitými instrumenty jsem zjistil a z poučky o trojúhelníku našel, že tato kometa byla od nás tak daleko, že její největší paralaxa nemohla být větší než 15° . Odtud plyne,

že by mohla být vzdálena přinejmenším 230 zemských poloměrů od Země. Z čehož pak dále vyplývá, že se nacházela mezi drahou Měsíce a Venuše. . . “

Nejlepší observatoře 16. století na světě Tycho vybavil dokonalými pozorovacími přístroji, kterými bylo možné provádět velmi přesná astronomická měření. Přístroje různých typů a velikostí v závislosti na předurčených cílech pozorování podrobně popsal v práci *Astronomie instauratae mechanica* česky *Přístroje obnovené astronomie* z roku 1598.



Obr. 8: Kvadrant Tychona Brahe

K pozorování sloužily kvadranty různých rozměrů – 42 cm, 64 cm, 167 cm a 194 cm. Nejznámější a nejpresnější byl meridiánový zední kvadrant *Quadrans muralis sive Tichonicus* z roku 1582, který byl orientován v poledníkovém směru ve východní stěně, viz obr. 8. Pro zvýšení přesnosti odečítání byla využívána metoda transversál, tj. řady bodů stejně vzdálených od konců oblouku, co umožňovalo dosahovat přesnosti až 5". Při pozorování se zedním kvadrantem byli zapotřebí k jeho obsluze tři pozorovatelé – pomocníci.

K měření úhlových vzdáleností mezi dvěma objekty na obloze Tycho využíval sextanty, dva z nich měly poloměr 155 cm. V knihovně observatoře Uraniborg byl instalován měděný nebeský globus s průměrem 149 cm, na jehož povrchu byly naneseny polohy jednoho tisíce hvězd. Na podkladě dlouhodobých pozorování sestavil Tycho katalog 788 hvězd. Se zvláštní přesností v něm byly určeny polohy dvaceti jedné vztažných hvězd. Srovnání se současnými údaji ukázala, že střední chyby při jejich stanovení nepřevyšovaly 40", u ostatních hvězd dosahovaly

chyby přes 1'.

Koncem 16. století nepřesnosti předpovědí poloh planet narůstaly, vyvstala potřeba jejich korekce. K tomuto účelu shromáždil Tycho velmi přesná pozorování poloh planet za období téměř dvaceti roků. Zejména pozorování Marsu, který vykonal za uvedenou dobu více než 10 oběhů kolem Slunce, byly velmi cenná. Jejich přesnost činila zhruba 2'.

Tycho Brahe nepřijal Koperníkovu heliocentrickou soustavu, k čemuž se vyjádřil takto: „Koperníkovy hypotézy. . . odporují nejen fyzikálním principům, ale i autoritě Písma Svatého, které několikrát potvrzuje nehybnost Země.“ Plně chápal jednoduchost heliocentrické soustavy při řešení složitých pozorovaných planetárních pohybů, jako vynikající pozorovatel však nenašel paralaktický posuv poloh hvězd vznikající jako důsledek pohybu Země kolem Slunce. Vysvětlující Koperníkovu myšlenku skupinových vzdáleností velmi vzdálených hvězd Tycho odmítl. Námitky proti heliocentrické soustavě jsou zachyceny mimo jiné ve spisu *Epistolæ astronomicæ* česky *Astronomický list* z roku 1596. Vytvořil model, představující kompromis mezi geocentrickou a heliocentrickou soustavou, který publikoval v roce 1588 ve spisu *De mundi asteri recentioribus phaenomenis* česky *O nedávných jevech v éterickém světě*. V ní se planety pohybovaly kolem Slunce obíhajícího Zemi s roční oběžnou dobou. Tato

soustava byla v lepším souladu s astronomickými pozorováními než Koperníkova soustava.

Na pozvání císaře Rudolfa II., které zprostředkoval Tadeáš Hájek z Hájku, přijel Tycho Brahe do Prahy v roce 1598. Svoji životní pout' po nuceném opuštění Dánska zde roku 1601 ukončil. Na hrobce v Týnském chrámu je zapsáno jeho životní krédo: „*Non fasces nec opes sola artis sceptrum perrenant*“ česky „*Ne moc a bohatství, ale vědění vládne žezlem času.*“.

V listopadu 1572 pozoroval v Čechách, stejně jako řada astronomů v Evropě, vzplanutí nové hvězdy – supernovy český lékař, filozof a astronom **Tadeáš Hájek z Hájku (1526 – 1601)**. Vlastní pozorování a jejich interpretaci shrnul Hájek do knihy *Dialexis de novae et prius incognitae stellae* česky *Rozprava o nové hvězdě*, vydané ve Frankfurtu nad Mohanem roku 1574.

Vzhledem k své velké jasnosti byla supernova pozorovatelná v listopadu a prosinci téhož roku i na denní obloze. Při deklinaci zhruba $61,5^\circ$ zůstávala jako cirkumpolární objekt nad obzorem.

K určení souřadnic supernovy Hájek využil jak metodu pozorování průchodu objektu – supernovy rovinou místního poledníku tak i metodu používanou v následných stoletích při absolutních měřeních pasážníkem či meridiánovým kruhem. Její autorství se připisuje Hájkovi a německému astronomu **Vilému IV. Hesenskému (1527 – 1607)**. V okamžiku kulminace byla stanovena výška supernovy nad obzorem, která po odečtení výšky rovníku (90 stupňů minus zeměpisná šířka místa pozorovatele) udávala její deklinaci. Hvězdný čas okamžiku kulminace je přímo roven rektascenzi objektu. Stanovení času hodinovými stroji zdaleka nedosahovalo v druhé polovině 16. století potřebné přesnosti. Například Tycho Brahe proto užíval u svého meridiánového zedního kvadrantu na Uraniborgu troje hodiny, přičemž prováděl zprůměrnování získaných hodnot.

V případě supernovy mělo měření její polohy odpovědět především otázku její vzdálenosti od Země. Objevení se supernovy a pozvolný pokles její jasnosti se očekával podle aristotelovské kosmologie pouze v oblasti uvnitř sféry Měsíce. Pak by ovšem musela mít supernova denní paralaxu větší než má Měsíc. Střední horizontální rovníková paralaxa Měsíce, úhel, pod nímž by se jevil rovníkový poloměr Země při pozorování ze středu Měsíce, činí téměř jeden stupeň. Tato hodnota byla známá už v antice, denní paralaxa objektu bližšího než Měsíc by se proto dala prokázat i mnohem jednoduššími přístroji, než měli k dispozici Hájek a jeho současníci.

Hájek proměřil úhly mezi supernovou a hvězdami α , β , γ a κ v souhvězdí Kassiopei, pro kontrolu stanovil i úhlové vzdálenosti mezi těmito hvězdami. Podle historických analýz Hájkovy údaje se vyznačují chybou kolem $5'$, zatímco chyba Tychonových měření polohy byla menší přibližně $3,5'$.

U komety roku 1577 Hájek užil Regiomontanovu metodu pozorování výšky komety nad obzorem několikrát v průběhu noci. V případě objektu bližšího než Měsíc by se musela výrazně projevit odchylka způsobená změnou polohy pozorovatele v důsledku rotace Země. Odchylka by se projevila i při průmětu objektu na hvězdnou oblohu, tedy při opakovaném měření úhlové vzdálenosti objektu od vybraných hvězd několikrát během noci. V prosinci v Praze Hájek provedl pozorování vždy s odstupem asi tří až čtyř hodin. Výsledek měření vedl k závěru, že kometa se nachází v prostoru vně dráhy Měsíce.

3.3 Kinematické zákony pohybu planet

S cílem upřesnit teorii planet přistoupil ke studiu jejich pohybu v roce 1600 v Praze německý matematik a astronom **Johannes Kepler (1571 – 1630)**. Měl k dispozici na zpracování rozsáhlý soubor údajů poloh planet, především přesná pozorování Marsu od Tychona Brahe. Kepler si stanovil za cíl určit dráhu Marsu, vyjádřit hledanou křivku matematicky. Uvědomoval si jako stoupenec heliocentrické teorie, že pohyb Marsu byl pozorován z pohybující se Země. Proto nejdříve upřesnil dráhu Země. V roce 1601 našel, že dráha Země kolem Slunce je téměř shodná s kružnicí, přičemž Slunce je posunuto mimo střed. Samotný výsledek nebyl nový, byl již obsažen v Koperníkově teorii. Velikost posuvu vyjádřená v dílech poloměru dráhy však byla v Keplerově teorii přibližně $1/59$ zatímco v Koperníkově teorii $1/31$, tedy 2krát větší. Skutečná eliptická dráha Země má excentricitu rovnou $0,017$, malá osa se odlišuje od velké přibližně o $1/7000$. Tehdejší přesnost astronomických pozorování nedovolovala Keplerovi odlišit eliptickou dráhu Země od kruhové. Její eliptičnost se však projevovala v posunu polohy Slunce vzhledem ke středu dráhy a v nerovnoměrnosti pohybu. Posledně uvedená nerovnoměrnost je zásadní, neboť podle Koperníkovy teorie založené na epicyklech a deferentech se Země pohybuje po dráze rovnoměrně. Kepler objevil, že pohyb Země je nerovnoměrný, s větší rychlostí v perihéliu než v aféliu.



Obr. 9: Johannes Kepler

Po upřesnění dráhy Země přistoupil Kepler koncem roku 1601 ke studiu dráhy Marsu. Vybral z pozorovacích materiálů údaje o polohách Marsu při opozicích se Zemí v průběhu několika oběžných dob. Vycházel ze znalosti dráhy Země, kterou považoval za téměř kruhovou. Na ní existují polohy Z_1, Z_2, Z_3 odpovídající času $t'_1 = t_1 + kT$, kde kT je celistvý násobek siderické oběžné doby Marsu. Základní poloha Země a Marsu byla Z_1 a M_1 , za dobu jedné siderické oběžné doby pak Z_2 a M_2 . Tak lze zachytit polopřímky s_1 a s'_1 , na kterých pozorujeme Mars z bodů Z_1 a Z'_1 v časech t_1 a t'_1 . Protože polohy Marsu se opakují s periodou T , nachází se Mars v časech t_1 a t'_1 v tomtéž bodě M_1 , který nalezneme jako průsečík polopřímek s_1 a s'_1 . Opakováním popsaného postupu pro další dvojice časů $t_2, t'_2; t_3, t'_3$ atd. můžeme postupně sestavit celou dráhu Marsu.

Kepler naznačeným způsobem vypočítal polohu Marsu v různých časových okamžicích a získal celkovou dráhu. Rozborem výsledků odhalil, že se blíží

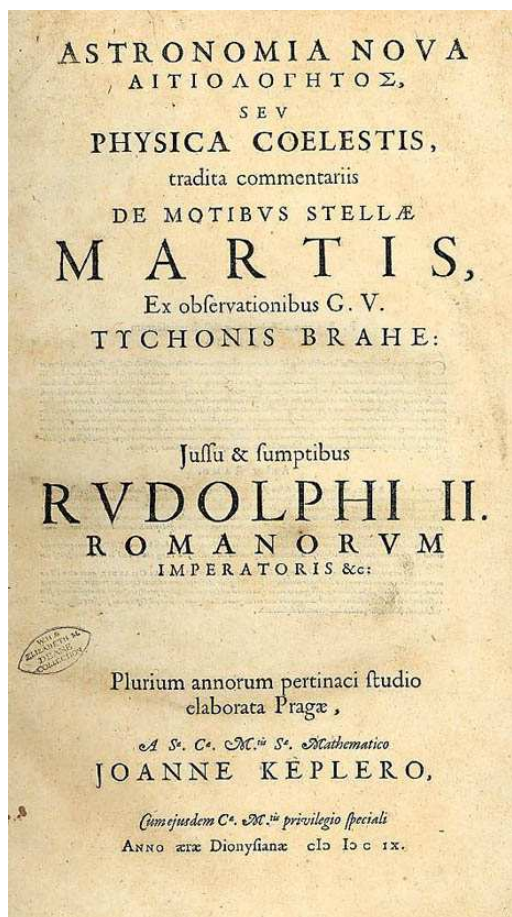
kružnici, je však protažena podél přímky spojující afélium a perihélium. Maximální vzdálenost Marsu od Slunce v aféliu se odlišuje od minimální přibližně pouze o $0,5\%$.

Historicky nejdříve však pomocí údajů o rychlosti pohybu dokázal, že planeta se pohybuje podle zákona ploch jím objeveného, tedy v souladu s II. Keplerovým zákonem, objeveným již v roce 1601.

V dalším období se snažil popsat matematicky nalezenou křivku, podél níž se Mars pohybuje. Z počátku Kepler prověřoval dráhy vejcovitého tvaru, později v roce 1604 ová-

lovité. Až teprve roku 1605 popsal pohyb Marsu rovnicí, která se nyní nazývá Keplerovou. Dospěl k závěru, že dráha Marsu je eliptická a Slunce se nachází v ohnisku elipsy. Kepler porovnával výsledky svých výpočtů s pozorovacími údaji. K prokázání eliptického charakteru drah bylo zapotřebí přesnosti pozorování pod 8'. Správně předpokládal, že Tycho Brahe se při pozorováních dopouštěl chyb menších, dnes víme že přibližně 2'.

První dva Keplerovy zákony byly zveřejněny v díle napsaném během jeho pobytu v Praze, vydaném v Heidelbergu roku 1609 pod názvem *Astronomia nova* česky *Nová astronomie*. Podrobněji titulní list – obr. 10 uvádí *Nová astronomie, založená na studiu příčin, čili nebeská fyzika, odvozená ze studia pohybu planety Marsu, kterou na základě pozorování ušlechtilého pána Tycho Brahe, z příkazu a na náklad Rudolfa II., císaře římského atd. vypracoval za několikaletého vytrvalého studia v Praze Johannes Kepler, matematik svatého císařského veličenstva.*



Obr. 10: Titulní list Keplerova spisu *Astronomia nova*

I v dalších letech se Kepler problematikou pohybu planet nepřestal zabývat. Prostřednictvím výpočtů zjistil, že s rostoucí vzdáleností od Slunce se oběžné doby planet zvětšují rychleji než poloměry drah, tedy se zmenšuje rychlost jejich pohybu. V roce 1618 objevil tzv. *harmonický*, dnes nazývaný III. Keplerův zákon, vyjadřující závislost mezi velikostmi velkých poloos a oběžnými dobami planet. Objev tohoto zákona komentoval Kepler takto:

V Nové astronomii vyslovuje Kepler axiomy týkající se tíže (čili gravitace) následovně:

„Veškerá tělesná substance, nakolik je tělesná, je zrozena tak, že může setrvávat v klidu na kterémkoliv místě, na něž bude vložena jako zcela osamocená, tj. mimo dosah síly příbuzného tělesa.

Gravitace je vzájemné tělesné působení mezi příbuznými tělesy, směřující k sjednocení či ke spojení (takového druhu je také magnetické působení) tak, že Země více přitahuje kámen, než kámen táhne k Zemi.“

V Nové astronomii nalezneme různé formulace zákona konstantních plošných rychlostí – II. Keplerova zákona, dnes používáme tuto: *Rychlost planety se mění tak, že úsečka spojující Slunce a planetu opisuje za stejný čas stejné plochy.*

Přestože Keplerovy zákony jsou kinematického charakteru, snažil se autor odhalit i dynamickou stránku pohybu. V úvodu díla vyjádřil myšlenku, že síla pohybující planetami vychází ze Slunce a má magnetický charakter. Přes chybnost stanovení vlastní podstaty interakce je myšlenka rozhodujícího vlivu Slunce na pohyb planet správná.

Kepler velmi podrobně ve svých dílech rekonstruoval své myšlenkové postupy, včetně i nesprávných myšlenek. Výstižně k tomu konstatoval: *„Metody, kterými lidé pronikají do podstaty nebeských jevů jsou pro mne stejně tak podivuhodné jako jevy samotné.“*

„8. března tohoto roku 1618, přeje-li si někdo přesný údaj času, se tento poměr vynořil v mé mysli. Neměl jsme však štěstí, když jsem jej ověřoval výpočtem, takže jsem jej zavrhl jako chybný. Konečně se však dne 15. května opět vrátil a v novém náporu přemohl temnoty mého ducha. Vyplýnul přitom tak dokonalý souhlas mezi mou sedmnáctiletou prací nad Brahovými pozorováními a mou současnou úvahou, že jsem se zprvu domníval, že jsem snil a že jsem hledaný vztah vložil do výchozích předpokladů. Ale je to věc zcela jasná a zcela přesná – poměr, který je mezi oběžnými dobami kterýchkoliv dvou planet, je přesně půldruhanásobkem poměru středních vzdáleností, tedy samotných drah; ovšem je přitom třeba dbát na to, že aritmetický průměr obou diametrů eliptické dráhy je poněkud menší než diameter...“

Půldruhanásobkem poměru v latinské matematické mluvě 17. století znamená, že první veličiny, tj. oběžné doby, je třeba vzít v druhé mocnině a další veličiny – střední vzdálenosti v mocnině třetí.

III. zákon byl publikován roku 1619 v díle *Harmonices mundi libri V.* česky *Harmonie světa pět knih*, které vyšlo v Linci.

Keplerova teorie pohybu planet jednoduchým způsobem nahradila složitá schémata založená na kombinaci rovnoměrných kruhových pohybů po deferentech, epicyklech a vytvořila jasný kinematický obraz pohybu planet. Při heliocentrickém uspořádání a eliptických oběžných drahách vyložila obě nerovnoměrnosti v pozorovaném pohybu planet podél ekliptiky. Smyčky v pohybu planet vznikající proto, že planety pozorujeme ze Země obíhající kolem Slunce, vyložila již Koperníkova teorie. Druhou nerovnoměrnost, která je důsledkem nerovnoměrného pohybu planet po eliptické dráze, objasnila až Keplerova teorie.

Na základě objevených zákonů Kepler propočítal a sestavil roku 1627 *Tabulæ Rudolphinæ* česky *Rudolfínské tabulky*, podle kterých bylo možné stanovit efemeridy planet. Byly na svoji dobu přesné a používaly se až do konce 17. století. Staly se praktickým důkazem správnosti Keplerových zákonů.

Koncem první třetiny 17. století tak bylo završeno období studia pohybu planet, které lze nazvat popisným geometrickým. Byla objasněna kinematika pohybu planet, dynamické příčiny však nalezeny nebyly.

3.4 Pozorovací potvrzení heliocentrické soustavy

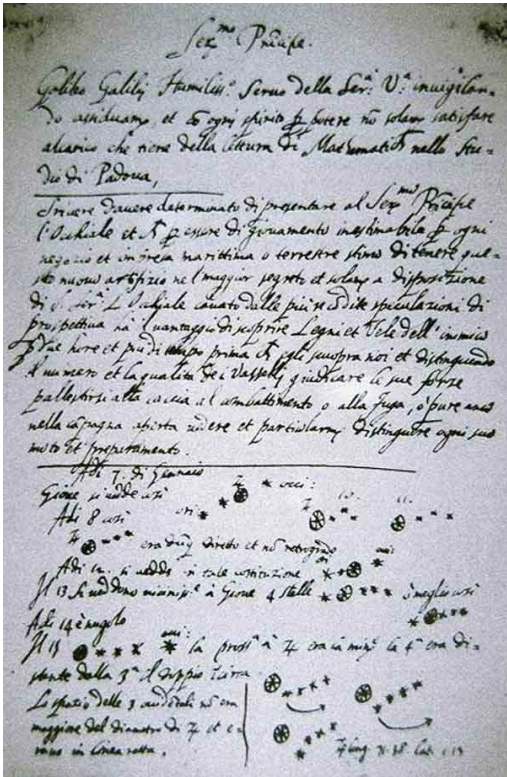
Osobností zásadního významu pro potvrzení Koperníkova heliocentrického systému, zejména po stránce observační, byl italský fyzik a astronom **Galileo Galilei (1564 – 1642)**.

Již roku 1597 psal Keplerovi: „Mnoho let zpět jsem se obrátil k myšlenkám Koperníka a za pomocí jeho teorie se mně podařilo plně objasnit mnohé jevy, které nemohly být obecně objasněny prostřednictvím předchozí geocentrické teorie.“

Na základě informací z Holandska jako fyzik experimentátor Galileo dokázal sestrojít roku 1609 dalekohled – refraktor složený z objektivu spojky a okuláru rozptylky. Postupně zdokonaloval technologii zhotovení čoček dalekohledu až dosáhl zvětšení přibližně 35krát. Dalekohled, tehdy ještě nazývaný „*perspektiva*“, použil k sledování kosmických těles. Termín dalekohled zavedl až v dalších letech filolog Domenisiani (1576 – 1614). Systematická pozorování Galileo vedl od konce roku 1609, kdy začal zkoumat povrch Měsíce. Objevil jeho hornatý charakter, z délky stínu určil přibližnou výšku hor. Pochopil, že Měsíc nemá

atmosféru. O Měsíci Galileo konstatoval: „je nerovný, zvolněný, posetý četnými prohlubněmi a vyvýšeninami tak, jako je povrch samotné Země převýšen řetězy hor a dělen hlubokými údolními.“

V lednu 1610 objevil u Jupitera „medicejské hvězdy“ – měsíce, které byly roku 1614 nazvány Io, Europa, Ganymédes a Kallisto. Ukázka záznamů z těchto pozorování je na obr. 11. V následujícím období se pokusil vyjádřit zákonitosti pohybu měsíců Jupitera, jenž měly sloužit k určování zeměpisné délky na moři. Myšlenku Galileo dále propracovával, její praktické využití se však neuskutečnilo.



Obr. 11: Galileovy záznamy pozorování měsíců Jupitera

Výsledky prvních astronomických pozorování Galileo shrnul v díle *Sidereus Nuncius* česky *Hvězdný posel*, které vyšlo v březnu 1610. V knížce považuje pohyb Země za prokázaný, k čemuž uvádí: „S pomocí vědeckých důvodů a argumentů přejatých z pozorování přírody jsem se 100krát přesvědčil, že Země se pohybuje jako planeta. . .“

V tomtéž roce pozoroval „krajní“ planetu Saturn trojitou, skládající se zdánlivě jakoby ze tří objektů, z vlastní planety a předpokládaných dvou měsíců. Žádný hlubší závěr však z pozorování neučinil, což bylo vzhledem k nevhodnému natočení roviny prstence Saturna pochopitelné. Existence samotného prstence byla potvrzena až roku 1659 holandským fyzikem a astronomem **Christianem Huygensem (1629 - 1695)** prostřednictvím dalekohledu zvětšujícím 92krát.

Vraťme se však k pozorováním Galilea. Koncem roku 1610 objevil fáze Venuše. Jejich studiem, rozbořen velikosti Venuše jakož i změnou její jasnosti související se změnou vzdálenosti Země – Venuše podle heliocentrického modelu potvrdil Koperníkův názor na uspořádání planet ve sluneční soustavě.

Od léta 1610 začal sledovat sluneční skvrny. Studoval změny tvaru skvrn, jejich vznik, vývoj a zánik. Skvrny se pohybovaly nerovnoměrnou rychlostí přes sluneční disk, což Galilea vedlo k závěru, že souvisí s povrchem Slunce, které rotuje kolem své osy. Podle jejich přemísťování od východního okraje k západnímu určil dobu synodické rotace Slunce.

Astronomické poznatky z dopisů byly shrnuty v práci z roku 1613 *Historia e dimostrazioni intorno alle Macchie Solari* česky *Historie a demonstrace slunečních skvrn*. Galileo prokázal, že skvrny se nacházejí v blízkosti jeho povrchu. Vyvrátil tak hypotézu německého jezuita **Christophera Scheinera (1575 – 1650)**, že skvrny jsou kosmická tělesa nacházející se mezi Zemí a Sluncem.

Galileo ke slunečním skvrnám uvádí: „Neustálá pozorování. . . mne přesvědčila, že takové sluneční skvrny na povrchu tělesa slunečního jsou spojitě rozloženy a že tedy se neustále mnoho vytvoří a pak se rozpojují některé v kratším, některé v delším čase. Přesvědčila mně, že se otáčejí ve stejné době jako Slunce. . .“

Nezávisle na Galileovi pozorovali sluneční skvrny i další. Již v prosinci 1610 je pozoroval anglický matematik a astronom Thomas Harriot (1560 – 1621). Jako první je popsal v březnu 1611 holandský astronom **Johann Fabricius (1587 – 1615)**.

Pozorování dalekohledem umožnila Galileimu rozložit některé oblasti Mléčné dráhy na jednotlivé hvězdy. Odtud učinil závěr, že je tvořena velkým počtem hvězd. V otevřené hvězdokupě v Plejádách pozoroval 36 hvězd.

Roku 1632 vychází základní Galileovo dílo *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo Tolemaico e Copernicano* česky *Dialog o dvou hlavních světových soustavách, Ptolemaiově a Koperníkově*. Kniha je psána italsky, v té době tradiční formou dialogu probíhající čtyři po sobě následující dny. Jde o diskusi Salviatiho (představující názora Galilea), Simplicia (stoupence Aristotela, Ptolemaia) a Sagreda, který na základě vlastního úsudku rozhoduje o pravdivosti názorů obou filozofů.

Původní záměr autora byl dokázat pohyb Země prostřednictvím pokusů a potvrdit Koperníkovu teorii. Dále chtěl objasnit pozorované astronomické úkazy na obloze a především podrobně vysvětlit příliv a odliv, který již byl částečně vyložen ve spisku z roku 1616 *Discorso del flusso e reflusso del mare* česky *Rozprava o příčinách přílivu a odlivu moře*. K vytyčenému cíli v předmluvě Dialogu Galileo uvádí:

„Nejprve se vynasnažím ukázat, že všechny zkušenosti, které jsou zde na Zemi, nejsou dostatečné pro důkaz pohyblivosti Země, ale že jich je možné použít bez rozdílu pro důkaz, že Země je v pohybu i v klidu. Doufám, že odhalím mnohé věci, které nebyly známé starověku. Za druhé budeme zkoumat nebeské jevy, podporující takto Koperníkovu domněnku, jak by měla zůstat navždy platnou. . . Za třetí, předestřu svůj originální nápad. Před několika lety jsem vyřkl tvrzení, že nevyřešený problém mořských přílivů a odlivů by se mohl trochu osvětlit, kdybychom připustili zemský pohyb.“

Výklad začíná objasněním základních pojmů z mechaniky, popisem nejjednodušších pohybů těles v pozemských podmínkách, tj. *volným pádem, pohybem po nakloněné rovině* atd. Dále následuje porovnání argumentů zastánců geocentrické a heliocentrické soustavy, včetně doložení důvodů pro přijetí platnosti posledně jmenované.

První den

Tématem prvního dne je podobnost pozemského a kosmického světa, zkoumání, zda se pozemské jevy liší od kosmických, jak předpokládala aristotelovská fyzika. Odpůrci Koperníka tvrdili, že dokonalý kruhový pohyb může být vlastní pouze kosmickým tělesům. Diskuse se soustředila na otázku, zda kosmická tělesa jsou naprosto neměnná a dokonalé hladká, jak tvrdí Simplicio. Salviati proměnnost hvězdné sféry doložil astronomickými pozorovacími důkazy – sledováním komet z druhé poloviny 16. století a nových hvězd, v dnešní terminologii supernov, z let 1572 a 1604.

Následně se Galileo věnoval Měsíci. Astronomové starověku se snažili studovat jeho pohyb, vlastnostmi se nezabývali. Ty právě naopak zajímaly Galilea, který je odhaloval při pozorováních. Nepochyboval o kulatosti jeho tvaru, objasňoval na základě odrazivosti paprsků, že Měsíc není dutá polokoule obrácená dutinou k Zemi. Přitom sledoval odraz slunečních paprsků na rovinném a sférickém zrcadle.

Z pozorování usoudil, že povrch Měsíce je podobný povrchu Země – soustava hor, údolí a moří. Konstatuje: *„Proto Měsíc, který má nerovný povrch a není hladký, odráží sluneční světlo na všechny strany a pozorujícím se ukazuje jako všude stejně osvětlený. Kdyby jeho kulatý povrch byl*

dokonale vyhlazený, zůstal by vůbec neviditelný. . . “ Srovnání povrchu Měsíce a Země vedlo Galilea k závěru, že „měsíční kraje nejsou mrtvé a pusté, přece netvrdím, že by v nich byl pohyb a život, a ještě méně jsem ochotný připustit, že tam rostou rostliny, zvířata a jiné věci podobné našim.“

Na námitku Simplicia, jak bude prokazovat, že Měsíc nezáří vlastním světlem, Salviati odpovídá: *„Když budete důkladně pozorovat, zjistíte smysly, že stejně tak Měsíc v době, kdy má tvar tenkého srpku, osvětluje Zemi slabě a jak se na něm zvětšuje část osvětlená Sluncem, zvětšuje také zář, která se dostává odrazem. Stejně tak Měsíc, když má tvar tenkého srpku. . . má velkou část zemské polokoule osvětlenou – ukazuje se ve velkém světle. Když se však vzdaluje od Slunce a blíží se čtvrti, jeho světlo (popelavé světlo) slábně a za kvadraturou je už velmi slabé, protože stále ztrácí osvětlenou část Země, a přece by to měl být opak, kdyby to bylo jeho vlastní světlo.“*

Galileo plně pochopil, že Měsíc je k Zemi obrácen stále stejnou stranou. Proto jeho doba oběhu je shodná s periodou vlastní rotace.

Druhý den

Především je posuzována problematika rotace Země. Galileo uvádí: *„Když už jsme ve včerejších rozpravách vytáhli Zemi z temnot a umístili ji na otevřené nebe, musíme nyní sledovat a zkoumat, zda je pravděpodobnější považovat ji za stálou a vůbec nepohyblivou. . . nebo je víc pravděpodobnosti v tom, že se Země pohybuje jakýmsi pohybem – a když, tak jakým.“*

Následuje kritika Aristotelových názorů. Salviati poukazuje na to, jak by bylo absurdní předpokládat, že kolem Země se spořádaně otáčí celý vesmír. Naopak rotací Země se podle Galilea dá vyložit pozorované otáčení hvězdné sféry.

Možnost rotace Země neodporuje lidské zkušenosti: *„Necht' je tedy začátkem našeho pozorování úvaha, že jakýkoliv pohyb, který se připisuje Zemi, je pro nás jako její obyvatelé, a proto i pro účastníky tohoto pohybu, vůbec nepozorovatelný, jako by ani neexistoval, neboť my pozorujeme jen věci nacházející se na Zemi. A na druhé straně je zase nevyhnutelné, aby se nám ten jistý pohyb jevil jako společný pohyb všem ostatním tělesům a viditelným předmětům, které, když by byly oddělené od Země, neměly by tento pohyb. . . “*

Podrobně jsou probírány argumenty opačné. Kdyby se Země otáčela, kameny puštěné z výše by nepadaly svisle, ale šikmo, při míření by bylo třeba brát ohled na směr střelby, vál by neustále prudký vítr, neupevněná tělesa by byla vymrštěna do prostoru.

Salviati pochybuje o tom, zda má vůbec smysl rozlišovat přirozené a vynucené pohyby, když o jejich příčinách nic nevíme. Vyslovil důležitou myšlenku, že kdyby mu někdo vysvětlil, co způsobuje pád kamene na Zemi, dovedl by už zdůvodnit, proč Měsíc obíhá kolem Země a planety kolem Slunce.

Zdůraznil, že otáčivý pohyb Země si neuvědomujeme a nevnímáme ho, protože jsme s pohybující se Zemí spojeni. *„Pohyb je pohybem a jeví se jako pohyb jen dotud, pokud se vztahuje na věci, které ho nemají, ale na ty věci, které se ho stejně účastní, vůbec nepůsobí, jako kdyby neexistoval.“* Myšlenka relativnosti pohybu tak umožňuje uvažovat o rotaci Země.

Třetí den

Třetí den je věnován oběhu Země kolem Slunce a stavbě vesmíru. Diskuse začíná podrobným rozbořením vzdálenosti Měsíce od Země, Slunce a hvězd. Galileo srovnává číselně

hodnoty různých autorů s vlastními představami. Následuje kritický rozbor, posouzení možné existence paralaxy nehybných hvězd, vznikající jako důsledek pohybu Země kolem Slunce. Správně Galileo argumentoval, že hvězdy jsou nesmírně vzdálené, než aby bylo možné zjistit změny úhlů při pozorování vzdálených hvězd v souvislosti s oběhem Země kolem Slunce. Na rozdíl od Koperníka Galileo vychází z toho, že hvězdy ve hvězdné sféře nejsou stejně vzdálené. Navrhuje: „Kdyby se pomocí dalekohledu našla nějaká malá hvězda blízko některé velké a přitom první z nich by byla o mnoho vyšší, mohlo by se stát, že v jejich vzájemné poloze se vyskytne nějaká pozorovatelná změna. . . Je možné, že obrovská vzdálenost hvězdné sféry způsobuje, že tyto nepatrné projevy unikají při pozorování.“

Galileo se stále přidržuje kruhových drah planet, přestože ze studia Oběhů Koperníka věděl, že tato představa neodpovídá přesným pozorovacím údajům. Dosud není vyjasněno, proč nezabudoval do své teorie Keplerovy představy eliptických drah planet. Stanovisko k nim v Dialogu chybí.

Sagredova slova dokumentují názory Galilea: „Kdo by se odvážil věřit, že prostor mezi Saturnem a stálicemi, považovaný některými lidmi za příliš velký a nepotřebný, neobsahuje jiná tělesa náležející vesmíru? Snad proto, že je nevidíme? Copak čtyři Medicejské planety a Saturnovy měsíce jsou na nebi až do chvíle, kdy se staly přístupnými lidskému zraku? A podobně, což neexistovaly další nesčetné hvězdy, dokud je lidé neobjevili? Mlhoviny byly pro nás nejdříve světlými skvrnami a až poté jsme pomocí dalekohledu zjistili, že jsou to seskupení mnoha zářivých hvězd. Ach, jak je domýšlivá, a ba co víc, drzá lidská nevědomost!“

Vedle uvedených hlavních témat Salviati komentuje své výpočty potvrzující, že nové hvězdy – supernovy z let 1572 a 1604 jsou mnohem dále než planety. Posléze se rozhovor vrací k problematice Koperníkovy soustavy. Zde se diskutující více zaměřují na astronomické jevy – změny fází Venuše, měsíce Jupitera a pohyb planet.

Galileo mimo jiné ukazuje, jak přirozeně Koperníkova teorie objasňuje smyčky v pohybu planet vzhledem k hvězdnému poli v pozadí. Dále připomíná vlastní objevy, čtyři Jupiterovy měsíce a rotaci Slunce. To vše proto, aby podpořil heliocentrismus. Země je tak zbavována své výjimečnosti, stává se pouhou planetou. Část průběhu diskuse třetího dne můžeme sledovat na ukázce:

Simplicio: „Z čeho usuzujete, že místo uprostřed oběhu planet náleží Slunci, a ne Zemi?“

Salviati: „Dochází k tomu ze zcela očividných, tedy přesvědčivých pozorování. Nejzřetelnějším důvodem pro to, aby Země byla vyňata ze středu a tam dosazeno Slunce je fakt, že všechny planety jsou jednou Zemi blíž, podruhé zase dál a rozdíl těchto vzdáleností jsou značné. Tak například Venuše, je-li nejvzdálenější od nás, je šestkrát dál než při svém nejbližším postavení, a u Marsu může být vzdálenost až osmkrát větší, než je-li nejbližší. Je vám tedy zřejmé, že Aristoteles se poněkud zmýlil, když myslel, že planety jsou od nás stále stejně vzdáleny.“

Simplicio: „Ale čím budete dokládat, že se planety pohybují kolem Slunce?“

Salviati: „Pokud jde o tři svrchní planety, Mars, Jupiter a Saturn, je to zřejmé podle toho, že jsou Zemi nejbližší, když jsou v opozici, a naopak nejdál, když se dostávají do konjunkce se Sluncem. Toto přibližování a vzdalování je tak značné, že když Mars je nám blízko, zdá se 60krát větší, než když je od nás nejdále. Že Merkur a Venuše nesporně obíhají kolem Slunce, poznáme zase z toho, že se od něho nikdy příliš nevzdalují a že je možno je někdy spatřovat před ním, někdy za ním, jak o tom svědčí proměnlivost fází Venuše. Pokud jde o Měsíc, je zřejmé, že jej za žádných okolností nemůžeme odloučit od Země z důvodů, o kterých budeme jednat za chvíli.“

3.4.1 Čtvrtý den

Je věnován diskusi o mořských přílivech a odlivech, což byl jeden z původních motivů vydání Dialogu. Galileo k svému záměru píše: „*My jsme už dávno prozkoumali a dokázali, že všechny pozemské jevy dokazující nepohyblivost Země a pohyblivost Slunce a nebeské klenby se nám musí jevit podobně i při pohyblivosti Země a nepohyblivosti Slunce a nebeské klenby; jedině prvek vody jako prvek nejrozšířenější, který není spojen a spjat se zeměkoulí tak těsně jako jiné její pevné částice, tento prvek díky své tekutosti zůstává částečně sui iuris a volný a jedině on ze všech podměsíčních věcí nám umožňuje zpozorovat nějakou stopu nebo poukaz na to, jak se chová Země vzhledem k pohybu či klidu.*“

Salviati podrobně popisuje jevy mořských dmutí. Poblíž Itálie jsou přílivy ve Středomořském moři různě vysoké. Galileo soudil, že závisí na velikosti moře, tvaru a hloubce mořského dna. Na základě analogie s pohyby nádrží s pitnou vodou dováženou na lodích do Benátek při prudkém zbrzdění lodi předpokládal, že slapové síly jsou obdobným projevem: „*A tak páni moji, co činí člun vzhledem k vodě v ní se nacházející, to samé dělá i nádrž Středomořského moře. . . Pohyb celé zeměkoule a každé její části by byl rovnoměrný a stejný, kdyby se její části pohybovaly jen jedním pohybem, buď jednoduchým ročním, aneb jen denním. Potom je tak jistě nevyhnutelné, aby ze složení těchto dvou pohybů vyplývaly pro části zeměkoule nerovnoměrné pohyby, někde zrychlené a jinde zpomalené, podle toho, či se denní otáčení připočítává k ročnímu pohybu, nebo se od něho odečítá.*“

Příliv a odliv nemohou být způsobeny Měsícem, neboť nejsou pozorovány u malých vodních nádrží, rybníků či jezer. Podle Galileových představ tento jev u malých nádrží nenastává, neboť „kolébání“ vodní hladiny zrychleným či zpomaleným pohybem je tak malé, že je nepozorovatelné.

„*Bůh mohl svou nekonečnou mocí a moudrostí dát vodě pohyb, který v ní pozorujeme, i jinak než pohybováním nádrže. Oba potvrdíte, že to mohl a uměl udělat nesčetnými způsoby, které náš rozum dokonce ani nedokáže postihnout. Je-li tomu tak, docházím k závěru, že by bylo krajně opovážlivé, kdyby někdo chtěl omezit a zmenšit boží moc a moudrost jen čistě lidským rozumem.*“

Takové prohlášení spíše dosvědčuje, že jde o přizpůsobení se církvi, kdyby je Galileo nevložil do úst Simpliciovi, nejméně důvtipnému účastníku diskuse.

Při interpretaci slapových jevů Galileo neuvažoval gravitační síly působící mezi Zemí, Měsícem a Sluncem, tudíž jeho výklad nemohl odhalit podstatu jevu a byl tak nesprávný. Chybně předpokládal, že příliv a odliv nastávají v důsledku skládání dvou pohybů – rotace a ročního oběhu Země. Nerovnoměrný pohyb Země vzniká podle Galilea složením rotačního denního a ročního pohybu, které sami o sobě jsou rovnoměrné. Nerovnoměrnost spatřuje Galileo v rozdílu rychlostí částí Země ke Slunci přivrácené a odvrácené.

V první třetině 17. století již např. Kepler správně předpokládal, že příliv a odliv jsou vyvolány přitažlivostí Měsíce a Slunce, Galileo však tuto hypotézu pokládal za lehkomyšlnou.

Dialog považoval za své nejvýznamnější dílo, což vyjádřil takto: „*Hledat konstrukci světa je jeden z největších a nejvznešenějších problémů, které jsou v přírodě. . .*“ Nejde však o dílo jen astronomické či fyzikální, ale především filozofickou obhajobou heliocentrické Koperníkovy teorie proti geocentrické Ptolemaiově teorii. Pro Galileův výklad je charakteristická jasnost argumentace ve prospěch svých názorů. Ústy Salviatiho podává pro svoji obha-

jobu astronomické a fyzikální důkazy. Fakty vyvrací Aristotelovu představu o neměnnosti kosmických těles (sluneční skvrny, fáze Venuše, objev nových supernov z let 1572, 1604).

V souvislosti s Galileiovou činností se heliocentrická teorie stala nepohodlnou pro katolickou církev. Svaté officium 24. února 1616 zakazuje heliocentrický názor. Názory officia můžeme sledovat v ukázce.

Prvé tvrzení: „*Slunce je středem světa a co do místa zcela nepohyblivé.*“

Rozhodnutí: „*Všichni se vyslovili, že uvedená věta je filozoficky pomatená a absurdní a formálně kacírská, především proto, že výslovně odporuje tvrzením, které na mnoha místech uvádí Písmo Svaté, jak co do smyslu, tak co do jejich běžného výkladu od svatých otců a doktorů theologie.*“

Druhé tvrzení: „*Země není středem světa a také ne nepohyblivá, ale pohybuje se jako celek a krom toho i denním pohybem.*“

Rozhodnutí: „*Všichni se vyslovili, že toto tvrzení filozoficky zaslouží téhož rozhodnutí a pokud se týká theologické pravdy, že je přinejmenším rovno omylu ve víře.*“

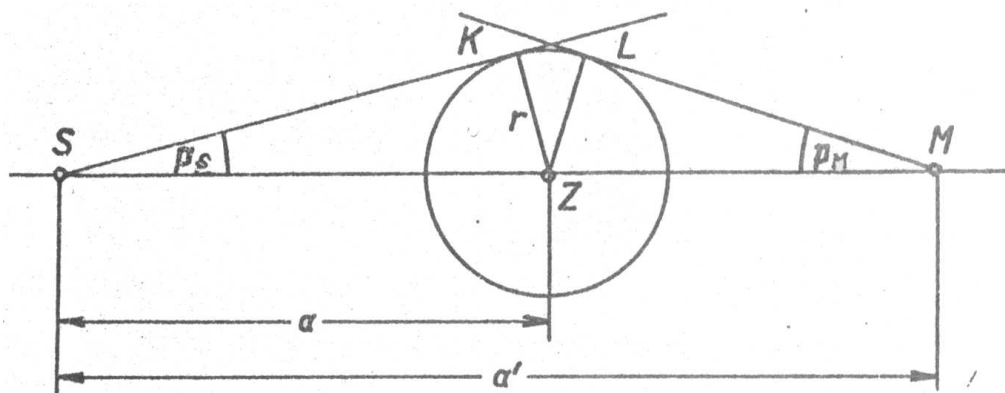
Přesvědčivým obhájcem heliocentrismu byl německý fyzik **Otto von Guericke (1602 – 1686)**, který proslul především svými experimenty s magdeburskými polokoulemi dokazujícími tlak vzduchu. Ve své práci z roku 1672 *Experimenta Nova (ut vocaiatur) Magdeburgica de Vacuo Spatio* česky *Nové magdeburské pokusy s vakuovým prostorem*, podává rovněž výklad světové soustavy, přičemž jako jedinou správnou uvádí Koperníkovu heliocentrickou teorii. V její prospěch uvádí jevy, které ji potvrzují a dospívá k závěru, že pouze Slunce může být středem sluneční soustavy a udržovat planety na jejich drahách.

Argumentace Guerickeho je velmi dobře propracovaná a podložená. Podle ní u každé soustavy je třeba jasně stanovit, co spojuje její jednotlivé části, co vede k pohybu a jakým způsobem se naplňuje. Tento přístup důsledně aplikoval na problematiku hvězd. Podrobně vysvětlil, že nejbližší hvězda Sirius je tak vzdálena od Země, že nás nemůže ovlivňovat. Guericke kladl průměrnou vzájemnou vzdálenost mezi hvězdami shodnou se vzdáleností Síria od Slunce. Jestliže hvězdy jsou velmi vzdálené a ještě v různých vzdálenostech, bylo by podle Guerickeho absurdní předpokládat, že všechny obíhají kolem Země s oběžnou dobou 24 hodin. Jako příklad teoreticky propočítal, že hvězda s paralaxou 1" by musela urazit za 1 sekundu 200 000 německých mil (německá míle = 7,5 km). To odpovídá, jak nyní víme, pětinasobku rychlosti světla ve vakuu. Správně Guericke dedukoval, že vzdálenější hvězdy by se musely pohybovat podle této úvahy ještě mnohem většími rychlostmi. Proto dospěl k závěru, že Země rotuje kolem své osy jednou za 24 hodin a pohyb hvězd je pouze pozorovaným důsledkem. Celou úvahu uzavřel tvrzením o nemožnosti geocentrické koncepce společného pohybu velmi vzdálených hvězd v rozdílných vzdálenostech.

4 Kosmická mechanika

4.1 Astronomická jednotka, určení rychlosti světla

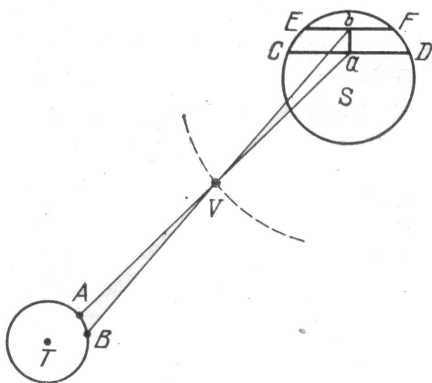
Proměření délky poledníku a následné upřesnění zemského poloměru francouzským astronomem a matematikem **Jeanem Picardem (1620 – 1682)** v roce 1671 umožnilo využít v září 1672 velkou opozici Marsu ke stanovení vzdálenosti Země – Slunce. Ze dvou míst na Zemi, z Cayenne ve Francouzské Guayaně francouzský matematik a astronom **Jean Richer (1630 – 1696)** a z Paříže francouzský astronom italského původu **Giovanni Domenico Cassini (1625 – 1712)** astrometricky proměřili polohu Marsu na hvězdném pozadí. Úhlová odchylka mezi zornými přímkami k Marsu z obou míst činila $19''$ (viz obr. 12).



Obr. 12: Určení hodnoty astronomické jednotky pomocí opozice Marsu

V pravoúhlých trojúhelnících platí vztahy $\sin p_S = \frac{r}{a}$ a $\sin p_M = \frac{r}{a'-a}$. Porovnáním a úpravou obdržíme $\sin p_S = \left(\frac{a'}{a} - 1\right) \sin p_M$. Paralaxy Slunce a Marsu jsou velmi malé, jejich siny můžeme nahradit přímo úhly v radiánech $p_S = \left(\frac{a'}{a} - 1\right) p_M$. Při znalosti relativních hodnot a' a a pomocí III. Keplerova zákona byla z naměřených hodnot propočítaného úhlu p_M stanovena sluneční paralaxa na $9,5''$ a odtud vypočtena hodnota astronomické jednotky na zhruba $1,38 \cdot 10^{11}$ m. Skutečná hodnota astronomické jednotky je $1,496 \cdot 10^{11}$ m.

Možností k určování vzdálenosti Země – Slunce, kterou poskytuje pohyb a prostorové uspořádání těles ve sluneční soustavě, je přechod vnitřních planet přes sluneční disk. Jako první pozoroval přechod Merkuru přes sluneční disk 7. listopadu 1631 Pierre Gassendi (1592 – 1655) v Paříži na základě Keplerovy předpovědi. Ten rovněž propočítal datum přechodu Venuše na 7. 12. 1631, jev však nebyl v Evropě pozorovatelný.



Obr. 13: Určení astronomické jednotky

Další zpřesnění hodnoty astronomické jednotky přinesla až metoda anglického astronoma a matematika **Edmonda Halleyho (1656 – 1742)**, který při svém pobytu na ostrově Sv. Heleny pozoroval přechod Merkuru přes sluneční disk. Uvědomil si, že mnohem výhodnější by byl z geometrických důvodů přechod Venuše. Proto po návratu do Anglie později v roce 1716 napsal článek *A New Method of Determining the Parallax of the Sun, or his Distance from the Earth* česky *Nová metoda určování paralaxy Slunce respektive jeho vzdálenost od Země*. Její princip spočívá v přesném stanovení časové délky průchodu Venuše V přes disk Slunce ze dvou pozorovacích míst A a B na Zemi. Je sledován průchod po dvou chordálách, na nich body a a b středy chordál. Platí, že $\angle aVb = \angle AVB$.

Viz obr. 13. Při známé vzdálenosti obou pozorovacích míst na Zemi A i B a relativní vzdálenosti Země – Slunce d a Venuše – Slunce e můžeme s využitím III. Keplerova zákona zapsat $\frac{AB}{c} = \frac{d-e}{e} = \frac{3}{7}$ a odtud nalézt průměr Slunce. Metoda byla prakticky použita v letech 1761 a 1769. Francouzský astronom **Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande (1732 – 1807)** v roce 1771 zpracoval získané pozorovací údaje z obou přechodů Venuše a odvodil vzdálenost Země – Slunce na 153 milionů km.

Dánský astronom **Christensen Ole Römer (1644 – 1710)** koncem šedesátých roků sedmnáctého století prováděl dlouhodobá pozorování zákrytů v jeho tehdejší terminologii *prvního měsíce Jupitera* Io. Zjistil zpoždění nástupů zatmění měsíce při vzdalování Země od Jupitera. K zpřesnění údajů se v roce 1671 vypravil Römer na Hven, kde osm měsíců studoval zákryty měsíce Io. Během 2/3 roku získal údaje o více než 100 zákrytech. Připomínáme, že oběžná doba měsíce Io je zhruba 42 hodin. Römer objevil, že časový interval mezi jednotlivými zákryty je proměnný, závisící na poloze Země na oběžné dráze kolem Slunce. Byl kratší, jestliže se Země přibližovala k Jupiteru a delší při vzdalování. Na základě analýzy výsledků Römer po návratu do Paříže předpověděl další zákryt měsíce Io na 9. listopadu 1676 v 5 hod 35 minut 45 sekund večer. Pozorovaný jev však proběhl o 10 minut později oproti předpovědi. Výklad zpoždění Römer podal v publikaci *Démonstration touchant le mouvement de la lumière trouvée par M. Römer* česky *Vysvětlení týkající se objevené rychlosti světla podle Römera*.

Text uvádí: *Je to již dávno, co se filozofové odhodlali provést několik pokusů, zda světlo dorazí do určité vzdálenosti okamžitě, či zda k tomu potřebuje čas. Pan Römer z Královské akademie přišel na způsob využití pozorování prvního měsíce Jupitera, jímž dokazuje, že k překonání vzdálenosti asi 3 000 mil, což je asi velikost průměru Země, světlo nepotřebuje více než sekundu.*

A jako Slunce, B jako Jupiter, C jako stín prvního měsíce Jupitera, který vstupuje do jeho stínu, aby ho opustil v bodě D a EFGHKL jako Země v různé vzdálenosti od Jupitera. Tedy předpokládejme, že Země se nachází v bodě L proti druhé kvadratuře Jupitera, pak je vidět měsíc během vynořování ze stínu Jupitera v bodě D.

Po asi 42 a půl hodinách po jednom oběhu tohoto měsíce víme, že Země se nachází v bodě K se stálým výhledem na bod D. To ukazuje, že jestliže světlo potřebuje čas k překonání vzdálenosti

z bodu L do bodu K, měsíc bude pozorován později při návratu v bodě D. Což by se nemohlo stát, kdyby Země zůstala v bodě K a když oběh tohoto měsíce byl opožděn o takovou dobu, kterou světlo potřebuje k přemístění z bodu L do K. Naopak v kvadratuře FG, kde se Země přibližuje k měsíci a jde světlu vstříc, se oběžné dráhy v místě vstupu do stínu zdají o tolik zkrácen, o kolik jsou na dráze výstupu prodloužené. A protože měsíc potřebuje asi 42 a půl hodiny na každý oběh, vzdálenost mezi Zemí a Jupiterem v jedné či druhé kvadratuře kolísá mezi 210 průměry Země.

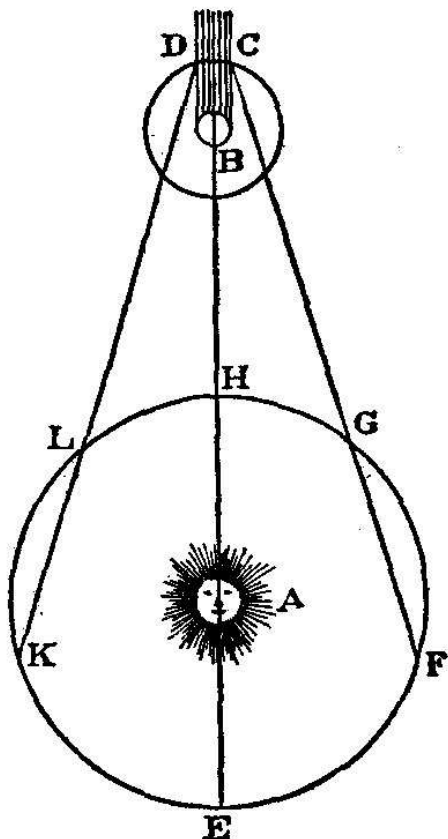


FIG. 70.

Obr. 14: Určení rychlosti světla

měsíce Jupitera byla excentrická a že jeho ostatní oběhy byly zrychleny či zpožděny mírou vzdálenosti Jupitera od Slunce. I když oběhy měsíce byly nerovnoměrné, tyto jmenované příčiny nebrání tomu, aby byla ta první zjevná.

Správný výklad lze podat následovně:

V poloze K při vzdalování Země od Jupitera je doba T' mezi dvěma po sobě následujícími zatměními měsíce Io větší než skutečná oběžná doba T_0 , $T' = T_0 + \Delta t$, kde Δt je doba, kterou potřebuje světlo na uražení dráhy proběhnuté Zemí při jejím oběhu za dobu T_0 . Platí $\Delta t = T_0 \frac{v}{c}$ a tedy $T' = T_0 + \frac{v}{c} T_0$.

V poloze F se Země přibližuje k Jupiteru, doba mezi dvěma zatměními T'' je menší než skutečná doba T_0 , obdržíme $T'' = T_0 - \frac{v}{c} T_0$. Z rovnic pro T' a T'' po úpravě dostaneme $c = \frac{T' + T''}{T' - T''} v$. Při znalosti doby mezi zatměními T' a T'' a z rychlosti pohybu Země kolem Slunce v lze stanovit rychlost světla c .

Z toho plyne, že na každý průměr Země je třeba sekunda času. Světlo potřebuje tři a půl minuty na každou vzdálenost GF a KL, což způsobuje rozdíl asi polovinu 1/4 hodiny mezi dvěma oběhy měsíce, z nichž jeden je sledován z místa FG a druhý z KL, v místě, kde není patrný žádný rozdíl. Z toho vyplývá, že světlo potřebuje čas. Neboť když byl sledován tento jev blíže, bylo zjištěno, že to co nebylo patrné u dvou oběhů, bylo zcela zřetelné u většího počtu. Například 40 pozorovaných oběhů z místa F bylo citelně kratších, než 40 jiných sledování z jiného místa oběžné dráhy Země až k místu konjunkce s Jupiterem. To se týká 22 míst na přímce HE, což je dvojnásobek vzdálenosti Země od Slunce. Nezbytnost této nové rovnice, týkající se opožďování světla, je dána všemi pozorováními, vykonanými Královskou akademií a observatoří během 8 let. Nově byla potvrzena vypořováním měsíce, pozorovaným 9. listopadu v Paříži, naposledy v 5 hod 35 minut 45 sekund večer. O 10 minut později už nemohl být očekáván, vyjdeme-li z toho, co bylo pozorováno v srpnu, když byla Země mnohem dál od Jupitera, což Römer předpokládal v Akademii začátkem září.

Ale kvůli důvodovým pochybám, zda tato nepravidelnost byla způsobena zpožděním světla, dokazuje, že nedochází k žádné další nesrovnalosti nebo jiné příčině než obyčejně. To se týká vysvětlení nepravidelnosti Měsíce a dalších planet. Nicméně postřehl, že dráha prvního

Z časových údajů uváděných Römerem byla později dosažením stanovena hodnota rychlosti světla na $215\,000\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Nepřesnost číselné hodnoty byla způsobena jak nedostatečně známými rozměry ve sluneční soustavě, tudíž chybě určení v , tak chybami určení časových údajů nástupů zákrytů měsíce Io. Stín Jupitera není úplně ostrý, měsíc mizí ve stínu postupně. Chyby stanovení přesného časového okamžiku mohou činit až minuty. Zatímco první nepřesnosti lze v dnešní době minimalizovat, druhá chyba při pozorováních zůstává.

4.2 Astrometrie

Koncem 17. století anglický astronom **John Flamsteed (1646 – 1719)** začal používat pro určování poloh kosmických těles *dalekohled se záměrným křížem v pozorovacím poli*, který se nastavoval pomocí mikrometrických šroubů. Tímto speciálním zařízením získal větší přesnost stanovení polohy, střední chyba dosahovala přibližně $10''$. Výsledky jeho pozorování téměř tři tisíc hvězd byly nejprve publikovány roku 1713 v *Historia Coelestis Britannica* česky *Historie britské oblohy*. Úplné vydání do té doby nejpřesnějšího katalogu hvězd vyšlo až po jeho smrti roku 1725. Flamsteed se stal v letech 1675 – 1719 prvním britským královským astronomem.

Později přesnost ještě zvýšil na $5''$ anglický astronom **James Bradley (1692 – 1762)**. Zpřesnění astrometrických měření umožnilo Halleymu roku 1718 srovnat tehdejší polohy hvězd s polohami určenými Hipparchem v jeho katalogu. Tak byl objeven *vlastní pohyb* některých *hvězd*, například Aldebaranu, Arktura a Siria. Předem však musel odečíst systematický posuv poloh hvězd zapříčiněný precesí (dlouhodobým kuželovým pohybem zemské osy) a sklonem rovníku k ekliptice. Halleyův objev byl později v sedmdesátých letech 18. století potvrzen německým matematikem a astronomem **Johannem Tobiasem Mayerem (1723 – 1762)** a anglickým astronomem **Nevilem Maskelynem (1732 – 1811)**, kteří stanovili vlastní pohyb několika desítek hvězd.

Systematická pozorování s cílem objevit paralaktický posuv poloh hvězd vedla k objevu aberace světla, která nepřímo potvrzovala roční pohyb Země. Roku 1725 Bradley ukázal na existenci *aberace světla* u hvězdy γ Draconis, která byla výsledkem skládání konečné hodnoty rychlosti světla s rychlostí pohybu Země kolem Slunce. V písemné podobě výklad paralaktického posuvu podal Bradley až roku 1728.

Astrometrická měření roku 1727 vedla Bradleyho k zjištění změn poloh hvězd, které nebylo možné objasnit precesí respektive aberací. Po hlubším studiu jevu roku 1732 dospěl k závěru, že příčinou změn poloh hvězd je kolísání zemské osy, vyvolané gravitačním působením Měsíce na rovníkovou oblast Země, tzv. *nutace*. Vzhledem k téměř devatenáctileté periodě stáčení uzlů měsíční dráhy byla teorie ověřena až po pozorování průběhu celé periody, výsledky byly zveřejněny roku 1747. Bradley sestavil tabulky zahrnující precesi, nutaci a aberaci hvězd při přesných měřeních poloh hvězd. S podrobným zahrnutím možných chyb měřících přístrojů dosáhl značné přesnosti při určování poloh hvězd. V letech 1750 – 1762 na Greenwichské observatoři byly pod Bradleyho vedením změřeny s velkou přesností polohy více než šedesáti tisíc hvězd.

Především však v druhé polovině 17. století bylo aktuální podrobné studium pohybu planet, upřesnění tabulek poloh planet a Měsíce. Zejména efemeridy Měsíce byly důležité

pro určování zeměpisné délky na moři. Stanovení poloh planet ve sluneční soustavě nebylo možné před objevem zákona všeobecné gravitace podstatně upřesnit.

V roce 1676 Halley srovnával propočítané polohy planet s pozorovanými a zjistil, že střední rychlosti Jupitera a Saturna při jejich oběhu kolem Slunce se mění. Vyslovil hypotézu, že tento jev nerovnosti v pohybu je způsoben vzájemným gravitačním působením obou planet. Na vysvětlení jevu vypsal Pařížská akademie cenu v letech 1748 a 1752, přesný výklad však přišel až po 100 letech.

Vedle sledování planet se rozvinulo pozorování měsíců dvou největších planet Jupitera a Saturna. V druhé polovině 17. století byly známy čtyři měsíce Jupitera, které objevil Galileo a pět měsíců Saturna objevených v letech v období let 1655 – 1684 holandským astronomem a fyzikem **Christianem Huygensem (1629 – 1695)** a již zmiňovaným Cassinim. Podle tehdejších pozorování astronomové předpokládali pohyb měsíců po kruhových drahách. Ve skutečnosti jsou dráhy eliptické s velmi malou excentricitou. Nízká přesnost tehdejších pozorování nedovolovala z počátku eliptických charakter drah objevit.

Základní Huygensovo dílo astronomické *Cosmotheoros* česky *Teorie kosmu* bylo sepsané roku 1694, ale vyšlo až po smrti autora roku 1698. Shrnovalo autorovy astronomické názory, ve kterých vycházel z heliocentrismu a z platnosti Keplerových zákonů. Popisoval vlastní pozorování planet, např. polárních čepiček Marsu, pruhů v atmosféře Jupitera. Huygensovo astronomické dílo časově i svým obsahem spadá mezi Galilea a Newtona.

Objev měsíce Saturna Titanu publikoval Huygens roku 1656 v díle *De Saturni Luna observatio nova* česky *Pozorování nového Saturnova měsíce*. Huygens zmiňuje v roce 1659 pozorování prstence Saturnu v anagramu, z něhož po jeho vyřešení dostaneme „*Annulo cingitur tenui, plano, nusquam cohaerente ad eclipticam inclinato*“ česky „*Je obklopena tenkým rovinným prstencem, který nikde s ní nesouvisí a je nakloněn k ekliptice.*“ Autor podal správný výklad rozdílnosti vzhledu prstence a jeho občasnou nepozorovatelnost. Dvakrát za oběžnou dobu Saturnu kolem Slunce, tedy zhruba každých patnáct roků, prochází rovina prstence rovinou oběžné dráhy Země kolem Slunce, tudíž se tenký prstenec stává nepozorovatelným.

Dále Huygens učinil první kroky ve stelární astronomii. Vycházel přitom z tehdy přijímaného předpokladu, že všechny hvězdy mají stejné poloměry a zářivé výkony. Na jeho základě a vzhledem k pozorované jasnosti Siria dospěl k závěru, že se od nás nalézá v 27 000krát větší vzdálenosti než Slunce. Vzdálenost byla Huygensem podceněna, ve skutečnosti je ještě 20krát dále, tedy $8,1 \cdot 10^{16}$ m.

Období vývoje astronomie od poloviny 17. století do poloviny 19. století probíhalo pod vlivem kosmické mechaniky. Tato vědní disciplína na základě Newtonových zákonů dynamiky, zákona všeobecné gravitace a Keplerových zákonů propočítávala polohy kosmických těles nejprve ve sluneční soustavě (planety, Měsíc, komety, planetky), později přešla ke studiu pohybu dvojhvězd.

4.3 Zákon všeobecné gravitace a jeho důsledky

PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICÆ

Auctore J.S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos
Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. P E P P Y S, Reg. Soc. P R Æ S E S.
Julii 5. 1686.

L O N D I N I,

Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud
plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Obr. 15: Titulní list Principií

Zakladatelem kosmické mechaniky byl **Isaac Newton (1643 – 1727)**, který ve svém stěžejním díle *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* česky *Matematické základy přírodní filozofie* z roku 1687 podal výklad pohybu kosmických těles pod působením gravitačních sil. Titulní list Principií z prvního vydání je na obr. 15. Dílo se skládá ze tří knih, věnovaných postupně mechanice bodů a tuhého tělesa, hydrodynamice, všeobecné gravitaci a kosmické mechanice. Třetí kniha nesoucí název *O světové soustavě* je rozdělena do kapitol:

1. *O příčinách světové soustavy.*
2. *O velikosti nepravidelností pohybu Měsíce.*
3. *O velikosti mořského přílivu.*
4. *O precesi rovníkennosti.*
5. *O kometách.*

Newton v úvodu formuluje svá čtyři pravidla bádání:

1. *K výkladu přirozených věcí se nemají akceptovat jiné příčiny než ty, které jsou pravdivé a k výkladu jevů postačující.*
2. *Stejným účinkům je třeba přisuzovat stejné příčiny.*
3. *Vlastnosti těles, které nemohou být ani zvětšeny ani zmenšeny a které jsou vlastní všem tělesům, s nimiž lze provádět experimenty, musíme pokládat za vlastnosti všech těles.*
4. *V experimentální fyzice je třeba věty plynoucí ze zkušenosti indukci pokládat za přesně nebo velmi přesně platné, dokud se neobjeví úkazy jiné, jimiž se upřesňují nebo podrobují výjimkám.*

Na základě studia pohybu kosmických těles, např. pohybu měsíců kolem Jupitera a Saturna vyvozuje Newton závěry:

1. Přitažlivost existuje na všech planetách.
2. Přitažlivost směřuje k libovolné planetě, je nepřímo úměrná čtverci vzdálenosti zkoumaných bodů od jejího středu.
3. Všechny planety se vzájemně přitahují.

Newton dospěl k závěru, že přitažlivost existuje všeobecně u všech těles úměrně hmotnostem každého z nich:

„Sluneční gravitace se skládá z gravitací jednotlivých částí Slunce. Při vzdalování od Slunce se zmenšuje přesně se čtvercem vzdálenosti až po dráhu Saturna, jak to zřetelně vyplývá ze stálých poloh afélií planet, a zasahuje až k nejzazším aféliím komet, pokud tato afélie setrvávají v klidu.

Původ těchto vlastností gravitace se mi však nepodařilo vyvodit z pozorovaných jevů, a hypotézy nevymýšlím.“

Zdržení při formulaci zákona všeobecné gravitace Newtonem bylo zapříčiněno několika okolnostmi. Do roku 1672 nebyly přesně známy rozměry Země a především absolutní vzdálenosti kosmických těles ve sluneční soustavě. V letech 1665 – 66 Newton ještě neznal důkaz, že gravitační pole Země je stejné jako gravitační pole částice o hmotnosti rovné hmotnosti Země nacházející se v jejím středu.

Newton v Principiích dokázal, že pokud pohyb kosmického tělesa kolem určitého středu splňuje Keplerův zákon ploch, pak síla odklánějící těleso od pohybu po přímce směřuje vždy přesně k tomuto středu. Pohyb planet kolem Slunce je v souladu s Keplerovým zákonem ploch, proto se planety musí pohybovat kolem Slunce pod vlivem jeho přitažlivosti. Výpočty provedené Newtonem dokázaly, že jestliže dráha po níž se pohybuje těleso je eliptická, v jejímž ohnisku je centrální těleso, pak gravitační síla mající zdroj v tomto centrálním tělese klesá nepřímou úměrně se čtvercem vzdálenosti od něho.

Z I. Keplerova zákona vyplynulo, že pohyb každé planety probíhá po eliptické dráze a Slunce se nachází v jednom z ohnisek elipsy. Proto síla přitažlivosti působící na planetu je nepřímou úměrná čtverci vzdálenosti od Slunce. Tímto způsobem Newton na základě geometrických představ o pohybu planet dokázal, že planety se pohybují pod působením přitažlivosti Slunce. Svoji myšlenku dále rozšířil rovněž na pohyb měsíců kolem planet.

Při studiu pohybu Měsíce kolem Země Newton dokázal, že tíha na povrchu Země a pohyb Měsíce jsou podmíněny stejnou silou. Z Keplerových zákonů dospěl Newton aplikací pohybových zákonů na pohyby planet a Měsíce k zákonu všeobecné gravitace.

Na jeho základě Newton odvodil III. Keplerův zákon v přesném tvaru, odkud bylo možné přímo určovat hmotnosti kosmických těles, např. planet, kolem kterých obíhají měsíce. Ze znalosti parametrů Kallista (velikosti velké poloosy oběžné dráhy a oběžné doby) měsíce Jupitera určil z III. Keplerova zákona v přesném tvaru poměr hmotností Slunce a Jupitera, $M_S = 1\,067 M_J$.

V prvních úlohách o pohybech byla kosmická tělesa zkoumána jak tělesa nacházející se pod působením vzájemné přitažlivosti. Základní nejjednodušší úloha o pohybu dvou těles, které se vzájemně přitahují podle zákona všeobecné gravitace, je tzv. *problém dvou těles*. Byl řešen Newtonem, který zdůvodnil, že jedno těleso se musí pohybovat vzhledem k druhému po dráze kuželosečkového tvaru. Řešení Newtona bylo následně používáno při studiu pohybu komet, měsíců planet a později pohybu fyzických dvojhvězd.

Pohyb kosmického tělesa vyjadřujeme třemi diferenciálními rovnicemi, které odpovídají třem prostorovým souřadnicím. Tyto diferenciální rovnice druhého řádu je třeba 2krát integrovat. Vystupuje v nich přímo zrychlení kosmického tělesa, které je přímo úměrné působící síle podle II. Newtonova pohybového zákona. První integrací obdržíme rychlost, druhou získáme polohu tělesa pro zvolený časový okamžik.

Dráha a poloha tělesa na ní při pohybu kolem Slunce jsou plně popsány šesti nezávislými veličinami, dráhovými elementy. Obvykle volíme velikost velké poloosy, numerickou excentricitu, sklon dráhy, délku výstupného uzlu, argument šířky perihélia a polohu kosmického tělesa v určitém časovém okamžiku. Těchto šest elementů matematicky odpovídá tomu, že úplné řešení systému tří diferenciálních rovnic druhého řádu musí obsahovat šest konstant.

Všechny integrace mají řešení. Vedou k důkazu, že kosmické těleso se pohybuje v rovině (1. – 3. integrace), k důkazu platnosti II. Keplerova zákona (4. integrace), III. Keplerova zákona (5. integrace) a I. Keplerova zákona (6. integrace).

Historicky bylo řešení problému dvou těles použito poprvé při studiu komet, které byly pozorovány již od starověku a o kterých většina astronomů antiky a středověku předpokládala, že vznikají v zemské atmosféře. Teprve Tycho Brahe a jeho další současníci – astronomové na základě stanovení denních parallax prokázali, že jde o kosmická tělesa nacházející se mimo atmosféru Země, za drahou Měsíce. Nedokázali však ve své době vyložit jejich objevení se na obloze a pohyb.

Newton při studiu komet předpokládal, že se musí pohybovat v souladu se zákonem všeobecné gravitace. Jejich pohyb tedy probíhá pod vlivem přitažlivosti Slunce. Řešení problému dvou těles, v tomto případě Slunce a komety, vedlo k třem možným typům drah eliptické, parabolické a hyperbolické. Úloha byla složitá především pro nedostatek pozorovacích údajů. Z několika málo dostupných stanovil Newton nejprve typ dráhy parabolický, neboť výstřednost je v tomto případě rovna jedné. Proto k určení dráhy bylo zapotřebí o jeden parametr méně.

Dále Newton rozpracoval metodu stanovení parametrů dráhy komety na základě tří pozorování. Řešení metodou vedl pomocí grafických konstrukcí, tři pozorování určují směry na kometu ve třech polohách Země v okamžiku pozorování. Newton sestrojil projekci těchto směrů na rovinu ekliptiky, vybral polohu komety ve středním směru a zkoumal v projekci na ekliptiku rádius vektor komety v okamžiku druhého pozorování a tětivu mezi první a třetí polohou komety. Z počátku předpokládal, že rádius vektor dělí tětivu na úseky úměrné intervalům času mezi prvním a druhým respektive mezi druhým a třetím pozorováním. Předpokládal, že bod – průsečík rádius vektoru a tětivy se pohybuje po tětivy konstantní rychlostí, což však neodpovídá úplně skutečnosti.

Později Newton svoji metodu zdokonalil, našel nový bod tětivy, ve kterém je dělení úměrné intervalům času, ale je realizováno přesněji než v prvním přiblížení. Délka tětivy odpovídala dynamické podmínce vyplývající z toho, že kometa se pohybovala po parabolické dráze. Jako praktický příklad Newton uvedl hlavní etapy hledání dráhy komety z roku 1680. Obdržené výsledky dávaly dobrý souhlas s pozorovacími údaji.

Podle Newtonovy metody propočítal a v roce 1705 uveřejnil Halley výpočty drah 24 komet v práci z roku 1705 v anglické verzi *A Synopsis of the Astronomy of Comets* česky *Stručný přehled astronomie komet*. Při porovnání záznamů o pozorování komet a výpočtů jejich drah z let 1531, 1607 a 1682 dospěl k závěru, že dráhy jsou velmi podobné a že nejde o tři různé komety nýbrž o jednu *periodickou kometu* s oběžnou dobou přibližně 75 – 78 roků. K tomu uvedl: „Mnohé důvody mne vedou k tomu závěru, že kometa r. 1531, kterou pozoroval Apian – Petr Apian (1495 – 1552) musí být stejnou, jenž popsal roku 1607 Kepler a Longomontanus - Christen Sørensen Longomontanus (1562 – 1647) a já sám ji pozoroval r. 1682. Všechny elementy souhlasí, pouze rozdílnost oběžných dob svědčí proti tomuto závěru.“

Halley objasnil, že kometa se pohybuje po uzavřené eliptické dráze, která se v blízkosti perihélia téměř neliší od parabolické dráhy. Komety do 17. století bylo možné pozorovat až v blízkosti perihélia, proto odlišení obou typů drah byla pro Newtona velmi obtížné. Následující návrat komety Halley vypočítal na roky 1758 – 1759. Přesnější propočet průchodu komety perihéliem stanovil na polovinu dubna 1759 francouzský astronom, matematik

a fyzik **Alexis Claude Clairaut (1713 – 1765)**. Skutečný průchod komety perihéliem nastal v polovině března roku 1759, což se stalo přesvědčivým důkazem platnosti zákona všeobecné gravitace.

Jako první pozoroval ve Francii návrat Halleyovy komety v lednu roku 1759 **Charles Messier (1730 – 1817)**. Jeho zásluhou byly komety od druhé poloviny 18. století systematicky pozorovány. Messier popisoval a zakresloval rozměry, změny jasností, jádra a hlavy komety. Zachycoval polohu komet na obloze do hvězdných map, odkud další astronomové propočítávali dráhové elementy. Zkušený pozorovatel Messier, nazývaný ve své době lovec komet, v letech 1763 – 1802 pomocí dalekohledu objevil 14 komet.

Pro usnadnění hledání komet Messier roku 1781 vydal první *katalog mlhovin a hvězdokup*, který obsahoval 103 objektů, z nichž více než 60 bylo objeveno samotným Messierem. Z těchto 103 objektů bylo 33 galaxií, především spirálních, 27 kulových a 30 otevřených hvězdokup a 11 plynných mlhovin. Pouze u dvou z těchto objektů Messier chybně považoval za mlhovinu dvě hvězdy – dvojhvězdu s malou jasností – M 40 a neznámý objekt – M 102. Později byl katalog doplněn o 7 dalších objektů. V Messierově katalogu M 1 označuje Krabí mlhovinu, M 31 mlhovinu v Andromedě a M 42 mlhovinu v Orionu.

4.4 Teorie pohybu Měsíce

Zpřesnění teorie pohybu Měsíce nebylo možné bez upřesnění rozměrů Země. Rozvoj fyziky a matematiky umožnily v 18. století tvorbu již fyzikálně zdůvodněných teorií tvaru Země. Prvním úplnou vycházející z hydrostatického řešení podal již zmiňovaný Clairaut v knize z roku 1743 *Théorie de la figure de la Terre* česky *Teorie tvaru Země*. První část knihy popisuje systematický výklad obecných principů hydrostatiky a jejich aplikací na případy působení různých sil na kapaliny. V druhé autor přechází od obecných úvah o rovnovážných tvarech kapalných planet ke konkrétním výpočtům tvaru Země. Pro její zploštění určil hodnotu menší než 1 : 230.

Ve své práci Clairaut navazoval na díla Huygense a Newtona, kteří již problematiku rozpracovali. V *Principiích* Newton řešil otázku tvaru rotující kapalné hmoty. Clairaut vytvořil analytickou hydrostatiku, třebaže základní pojmy např. tlak byly systematicky vyloženy až o 12 let později Eulerem.

Vratíme se však k teorii pohybu Měsíce. Newtonovo a Halleyovo studium drah komet vyplývající z řešení problému dvou těles bylo první aproximací při studiu pohybů kosmických těles. Jejich reálný pohyb se ve velké většině neshodoval s teoretickým řešením problému dvou těles. Ve skutečnosti téměř vždy existuje nejméně jedno další těleso, gravitačně působící na obě uvažovaná. Příkladem je pohyb Měsíce kolem Země, který je gravitačně dále ovlivňován především Sluncem, ale také jinými planetami.

V historii astronomie byla teorie pohybu Měsíce jedním z nejobtížnějších problémů kosmické mechaniky, neboť jeho dráha se podstatněji odlišuje od eliptické. Na Měsíc při jeho oběhu kolem Země působí především poruchové síly Slunce. Ty se ještě mění v průběhu anomalistického měsíce (se změnou vzdálenosti Měsíce od Země) a v průběhu roku (se změnou vzdálenosti Země od Slunce). Proto poruchy v pohybu Měsíce dosahují velkých hodnot. Složitost matematického vyjádření pohybu Měsíce motivovala astronomy a matematiky v 17. a 18. století k jeho řešení.

Teorie pohybu Měsíce sloužila nejen praktickým cílům – výpočtům polohových souřadnic Měsíce, ale v počátcích také k prověření správnosti samotného zákona všeobecné gravitace. Dovolila vyjasnit, zda se Měsíc pohybuje přesně v souladu s tímto zákonem.

Newtonova teorie pohybu Měsíce je zachycena jak v třetí knize Principií, tak i v spisku *Theoria Lunae* česky *Teorie Měsíce* vydaném až posmrtně roku 1772. Autor kvalitativně objasnil pohyb uzlů měsíční dráhy a periodické změny jejího sklonu k ekliptice. Dokázal vyložit hlavní nerovnost v šířce – evekci. Newtonovi se podařilo, jak píše v Principiích, nalézt sílu Slunce vyvolávající poruchy pohybu Měsíce. Jinými slovy zahrnout do svých výpočtů poruchové působení Slunce.

Částečný úspěch řešení Newtonovy teorie poruchového pohybu Měsíce byl podmíněn dvěma okolnostmi. Zkoumáním pohybů blízkých ke kruhovým a zahrnutím do výpočtů poruch pouze členu úměrného kvadrátu poměru vzájemných vzdáleností. Rovnice spojující rychlosti změn dráhových elementů se složkami poruchových sil v Principiích uvedeny nejsou.

Všechny otázky však Newton uspokojivě nevyřešil, např. neobjasnil střední pohyb perigea. V zápisku *Theoria Lunae* Newton konstatoval, že střední pohyb Měsíce a apogea jeho dráhy neobdržel s dostatečnou přesností. Připomínáme, že při každém oběhu Měsíce se *přímka apsid* (spojnice perigea a apogea) přemísťuje ve směru pohybu Měsíce o $3^{\circ} 4' 8''$.

Ve skutečnosti se perigeum měsíční dráhy posouvá, neboť Měsíc se pohybuje po eliptické dráze stáčeující se v prostoru. Výpočet posuvu perigea měsíční dráhy dával hodnotu 2krát menší než pozorovanou. Teorie pohybu Měsíce byla v tomto místě příliš obtížná i pro Newtona. Její úplnější propracování se tak stalo jedním z nejdůležitějších problémů, které astronomie v době po Newtonovi řešila.

Již zmiňovaný Clairaut při analýze problému dospěl k závěru, že předchozí teorie pohybu Měsíce je potřebné upřesnit, propočítat v tzv. druhém přiblížení. V roce 1749 našel příčinu rozdílů Newtonovy teorie pohybu perigea a pozorovacích údajů. Samotná klasická analytická teorie zachycená prostřednictvím vzorců byla správná. Výrazy pro posuv perigea měsíční dráhy, vyjádřené prostřednictvím mocninné řady, však bylo nutné propočítat s větší přesností. Při výpočtech byly používány vztahy pro mocninné řady typu $a_0 + a_1m + a_2m^2 + \dots + a_nm^n + \dots$, kde a_n jsou číselné koeficienty a m je poměr denních posuvů Země a Měsíce po jejich drahách $m \approx \frac{1}{13}$. Hodnota m je malá ve srovnání s jedničkou a každý další člen řady je tak mnohem menší než předcházející. Newton a francouzský fyzik a matematik **Jean Baptiste d'Alambert (1717 – 1783)** při výpočtech hodnot posuvů perigea používali pouze první člen řady, což vedlo k již zmiňovanému rozdílu teoreticky propočítané a pomocí pozorovacích údajů stanovené rychlosti posuvu měsíčního perigea. Započítáním druhého členu mocninné řady dosáhl Clairaut zmenšení rozdílu hodnot teoretických a pozorovacích 3krát. Při zahrnutí většího počtu členů v matematických rozvoích již bylo dosaženo dobrého souladu teoretické a z pozorování získané hodnoty. Teorie a pozorovací údaje dávaly téměř shodu. Clairautova analýza potvrdila, že velká poloosa dráhy Měsíce se podle teorie i pozorovacích údajů stáčí tempem 20° za rok.

Petrohradská akademie věd v roce 1750 vypsala konkurs na objasnění problematiky teorie nerovnoměrností pohybu Měsíce a vytvoření metody výpočtu přesných poloh Měsíce v libovolném čase. Posledně uvedené bylo zásadní, neboť šlo o možnost praktického využití poloh Měsíce k přesnému stanovení poloh pozorovatele na Zemi. K tomu byly po-

třebné tabulky poloh Měsíce s přesností alespoň úhlové vteřiny. Uvedená chyba v určení polohy Měsíce odpovídá stanovení souřadnic pozorovacího místa s přesností 30 km.

Vypracování teorie pohybu Měsíce bylo důležité vzhledem k možnosti určování polohy pozorovatele na Zemi,

1. Změřit úhlovou vzdálenost středu disku Měsíce od vztažné hvězdy.
2. Započítat refrakci a geocentrickou paralaxu.
3. Stanovit místní čas pozorování proměřením výšky Slunce nebo hvězdy a provedením výpočtů za pomoci vztahů sférické astronomie.
4. Určit interpolací tabulkových údajů dobu nultého poledníku v okamžiku pozorování.
5. Najít rozdíl místního času a času nultého poledníku, který bude zeměpisnou délkou místa pozorování v časové míře.

Definitivní řešení přinesl až hodinář John Harrison (1693 – 1776), který roku 1772 podal definitivní návrh konstrukce chronometru. Námořníci tak měli k dispozici se sebou čas nultého greenwichského poledníku. Z pozorování hvězd či Slunce určili místní čas.

Vratme se však k historickému vývoji teorií pohybu Měsíce. V roce 1752 Clairaut získal v Petrohradské akademii věd cenu a vydal v Petrohradě dílo nazvané *Théorie de la Lune déduite du seul principe de l'attraction réciproquement proportionnelle (sic) aux quarrés des distances* česky *Teorie Měsíce, odvozená z jediného počátku přitažlivosti, nepřímo úměrná čtverci vzdálenosti*. Autor dráhu Měsíce modeloval stáčeující se elipsou. Jako první poukázal na skutečnost, že měsíční nerovnosti se projevují nejen v šířce a délce Měsíce, ale i ve vzdálenosti od Země. Ve vztazích Clairautovy teorie jsou délka, šířka a vzdálenost Měsíce vyjadřovány sumou dvaceti členů řady. Na základě výpočtů Clairaut sestavil a publikoval v roce 1754 tabulky *Tables de la lune* česky *Tabulky Měsíce*, ve kterých se propočítané souřadnice Měsíce odlišují od pozorovaných přibližně o 1,5.

Další pokrok při zpřesňování teorie pohybu Měsíce učinil Euler zdokonalením Clairautovy teorie v svém díle *Theoria motus Lunae exhibens omnes eius inaequalitates* česky *Teorie pohybu Měsíce odhalující všechny jeho nerovnosti* z roku 1753. V této tzv. první Eulerově teorii jsou rovnice pohybu Měsíce vyjádřeny v cylindrických souřadnicích, při čemž hledané souřadnice jsou vyjádřeny pomocí rozkladu na mocninné řady. Aplikace Eulerovy teorie umožňovala mimo jiné odvození rovnic pro rychlost změn velké poloosy, excentricity a délky perigea.

Vyvinutá metoda byla vhodnější pro sestavení tabulek pohybu Měsíce, čehož využil již zmiňovaný astronom Mayer. Vydal v *Transactions* v letech 1752 – 1753 nové tabulky poloh Měsíce a Slunce, v kterých se chyba poloh Měsíce snížila na 1'. Pozorovací přístroje tehdejší doby již dovolovaly zjišťovat polohy kosmických těles s přesností 3"–5". Propočítané tabulky umožňovaly určování zeměpisné délky na moři s přesností 0,5°. Metoda stanovení zeměpisné délky pozorovatele na Zemi a vztah pro korekci chyby v délce vyvolané atmosférickou refrakcí byly publikovány až v roce 1770 *Tabulae Motuum Soli set Lunae* česky *Tabulky pohybu Slunce a Měsíce*. Vdova po Mayerovi v tomtéž roce získala 3000 liber od anglického parlamentu a Euler 300 liber za konzultační pomoc.

Eulerova první teorie patřila ke klasickým analytickým metodám, ve kterých byly souřadnice kosmického tělesa respektive dráhové elementy odvozovány řešením pohybových

rovníc, což vyžadovalo velmi náročnou práci. Později jednu z nejobecnějších teorií vytvořil po téměř dvacetiletém úsilí francouzský astronom **Charles Eugene Delaunay (1816 – 1872)**. Zachycovala teorii pohybu nejen Měsíce, ale i libovolného měsíce planet jakož i umělých družic Země.

Vraťme se zpět k Eulerovi, který v letech 1753 – 1771 vypracoval tzv. druhou teorii pohybu Měsíce. Výsledkem zdokonalení je číselný rozvoj metody a vypočítané tabulky poloh Měsíce v publikaci *Theoria Motuum Lunae, nova methodo pertractata una cum Tabulis Astronomicis*, česky *Teorie pohybu Měsíce vyložená novým způsobem a astronomické tabulky* vydané roku 1772 v Petrohradě. Dílo vzniklo za pomoci syna Johana Albrechta Eulera (1734 – 1800), Wolfganga Ludwiga Krafta (1743 – 1814) a Anderse Johana Lexella (1740 – 1784), neboť Euler byl při dokončování díla již slepý. Druhá Eulerova teorie pohybu Měsíce měla velký metodologický význam, byla úplně pochopena až koncem 19. století. Přes velký pokrok při výpočtech teoretických hodnot koeficientů se propočítané tabulky poloh Měsíce vyznačovaly většími chybami, než značně jednodušší poloempirické efemeridy Měsíce Mayera.

Při výkladu Euler použil postup numericko-analytický, ve kterém hodnoty některých veličin přebíral z pozorovacích údajů a dosazoval je do pohybových rovnic při jejich řešení. Jinak řečeno autor vycházel jak z vybraného matematického modelu, tak z interpretace pozorovacích hodnot. Těmi byly například excentricity drah Měsíce, Země, poměr střední vzdálenosti Země – Slunce ku střední vzdálenosti Země – Měsíc. Euler použil i hodnoty úhlů příkladně elongace Měsíce od Slunce a střední anomálie Měsíce. Poměr hmotností Země a Měsíce položil rovný sedmdesáti, zmiňovaný poměr vzdáleností Země – Slunce a Země – Měsíc kladl čtyři sta.

Po fyzikální stránce Euler vyložil řešení problému pohybu Měsíce pod působením přitažlivosti Země a Slunce za podmínky, že všechna uvedená tělesa byla zkoumána jako hmotné body a střed hmotnosti soustavy Země – Měsíc tzv. barycentrum se pohybuje kolem Slunce po eliptické dráze. Tedy řešil zjednodušený problém tří vzájemně se přitahujících těles. Byl si vědom toho, „že úplné řešení je nad možnosti analýzy nehledě na obrovské úsilí geometrů. . .“ Zkoumal pohyb Měsíce v pravoúhlých souřadnicích, získal pro jejich určení tři diferenciální rovnice druhé řádu obdobného typu jako nelineární rovnice kmitavého pohybu.

Právě to považujeme za nejdůležitější příspěvek Eulera zachycený v první knize.

Matematické zpřesnění teorie pohybu Měsíce dosáhl Euler metodou variace konstant. Vycházela z toho, že eliptická dráha Měsíce je určena šesti elementy. V případě „rušené dráhy“ gravitačně působí na Měsíc i Slunce, dráha je opět eliptická, její elementy se však mění. Euler nezkoumal poruchy v poloze tělesa, ale poruchy v elementech např. velké poloosy, excentricity. Ty vyjádřil jednoduššími vztahy, což umožňovalo výpočet efemerid Měsíce s dostatečnou přesností na delší období. Poruchy vybraného elementu analyzoval individuálně, přičemž ostatní elementy ve zvoleném čase považoval za neproměnné.

Shrnuto v každém okamžiku se Měsíc pohybuje po určité eliptické dráze s malou excentricitou. Elementy dráhy popisující velikost, tvar a polohu elipsy v prostoru se s časem mění. V takovém případě říkáme, že těleso se pohybuje po *oskulující eliptické dráze*.

V rozpracování druhé Eulerovy teorie pokračoval až roce 1878 americký astronom **George William Hill (1838 – 1914)** a vytvořil moderní teorii pohybu Měsíce. Získal rychlost

pohybu perigea analyticky. Ještě podrobnější podobu ji dal později Ernest William Browne (1866 – 1938).

První propočítané tabulky poloh Měsíce, jejichž chyby byly srovnatelné s pozorovacími, vznikly až v polovině 19. století. Vycházely z numerické metody, v které se řada dráhových elementů vybírala z pozorování a následně upřesňovala při výpočtech. Zvýšené přesnosti bylo dosaženo započtením členů až osmého řádu, což uplatnil dánský astronom **Peter Andreas Hansen (1795 – 1874)** jak v práci *Fundamenta nova investigationis* česky *Základy nových výzkumů*, tak následně v tabulkách *Table of the Moon* česky *Tabulky Měsíce* vydané v Anglii roku 1857. Jejich chyby ve srovnání s polohami Měsíce, pozorovanými v průběhu 100 roků v letech 1750 – 1850 nepřevyšovaly $1'' - 2''$. Právě taková byla v polovině 19. století přesnost pozorování. Téměř současně tak dosáhla souhlasu úroveň rozvoje pozorovací a teoretické astronomie. Hansenovy tabulky se používaly až do dvacátých let 20. století.



Obr. 16: Pierre Simon Laplace

Dalším řešeným problémem v teorii pohybu Měsíce bylo pozorované zvětšování středního úhlového pohybu, tzv. sekulární akcelerace, kterou objevil již v roce 1693 Halley. Srovnáním s údaji Ptolemaia v *Almagestu* objevil, že střední úhlový pohyb Měsíce se postupně zvětšoval, změna činila asi $10''$ za 100 roků. Problém zůstal nevyřešen až do konce 18. století, kdy v roce 1787 francouzský astronom, matematik a fyzik **Pierre Simon Laplace (1749 - 1827)** vytvořil přesnější teorii pohybu Měsíce. Z ní vyplývalo, že střední délka Měsíce se zrychluje o $10,4''$ za 100 roků. Laplace tak objasnil periodický charakter sekulární akcelerace, jejíž příčinou je kolísání výstřednosti zemské dráhy, což způsobuje střídání zrychlování a zpomalování pohybu Měsíce.

Výsledkem Laplaceovy práce v letech 1772 – 1802 byl mimo jiné závěr, že pohyb Měsíce je ovlivňován i působením dalších planet sluneční soustavy. Rozborem excentricity dráhy Země zjistil, že při jejím zmenšování se střední vzdálenost Země od Slunce nepatrně zvětšuje. Proto se poruchový vliv Slunce na Měsíc stává menším. Teorie pohybu Měsíce rozpracovaná Laplacem umožňovala určovat jeho polohu s přesností do $0,5'$.

4.5 Dynamické zákony pohybu planet

Všechna tělesa sluneční soustavy se vzájemně přitahují. V důsledku toho se planety nepohybují přesně po eliptických drahách, jak by odpovídalo řešení problému dvou těles. U jejich drah se projevují odchylky tzv. poruchy. V předcházejícím historickém období vývoje astronomie, včetně doby Tychona Brahe a Keplera se při určování poloh planet nepoužíval dalekohled. Zmiňované odchylky od bezporuchového pohybu nebylo proto možné stanovit s dostatečnou přesností. Od poloviny 17. století však polohy planet již byly určovány pomocí dalekohledu se záměrným křížem a dalšími měřícími přístroji, čímž se

přesnost pozorování zvýšila na několik obloukových vteřin. Proto bylo možné odchylky od eliptického pohybu zjistit.

Odchytkami – poruchami zpravidla rozumíme rozdíly reálných poloh kosmického tělesa od těch, které by odpovídaly v určitém časovém okamžiku eliptickému pohybu. Vedle toho hovoříme rovněž o poruchách dráhových elementů. Shrnuto jde o poruchy souřadnic respektive jednotlivých dráhových elementů. Jejich analýza a vyjádření bývá často výhodnější, protože tyto poruchy jsou malé, zatímco u souřadnic velké.

Na rozdíl od problému dvou těles je matematické řešení tří těles vzájemně se přitahujících podle zákona všeobecné gravitace matematické řešení značně komplikované. Třetí těleso zapříčiňuje nejen odchylky v pohybech obou zbývajících od eliptických pohybů, ale také obě tělesa gravitačně ovlivňují těleso třetí. Po matematické stránce jde o systém devíti diferenciálních rovnic druhého řádu, k jejichž řešení je třeba osmnácti integrací. Některé z nich však nevedou k žádným známým analytickým funkcím.

Metody určování poruch jakož i další teoretické problémy kosmické mechaniky se rozvíjely současně s vyšší matematikou. Kosmická mechanika byla budována v průběhu 18. století zejména pracemi francouzských matematiků, fyziků a astronomů.

V prvním přiblížení tzv. poruchy I. řádu zachycují rozdíl vzdáleností poloh planet při ideální eliptické a poruchové dráze (teoretické a reálné), který je úměrný hmotnosti rušící planety $\Delta r \sim M$. Postupně astronomové 18. století shromáždili velký počet přesných pozorování poloh planet, jejichž zpracování umožnilo vytvořit teorii pohybu planet, která v prvním přiblížení souhlasila s pozorovacími údaji. Do konce 18. století byly odvozeny základní rovnice pohybu planet, včetně vyjádření poruchových sil. Současně bylo možné zjišťovat při pozorováních odchylky poloh planet několik úhlových vteřin a teoreticky je předpovídat a analyzovat.

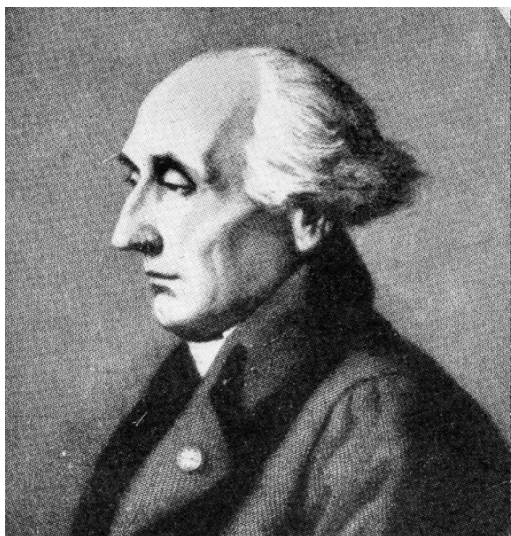
Další rozvoj kosmické mechaniky vytvořil ve svém díle Laplace, jenž vypracoval na tehdejší dobu s velkou přesností teorii pohybu planet a měsíců Jupitera. Podrobně je problematika zpracována v pětidílné knize *Traité de mécanique céleste* česky *Nebeská mechanika*, která vyšla v letech 1799 – 1825.

Mimo jiné je v ní řešena stabilita sluneční soustavy, což byl nevyjasněný problém z dob Newtona, kdy astronomové zjistili v pohybu Jupitera a Saturna poruchy. Docházelo k velmi pomalým změnám střední rychlosti pohybu planet, konkrétně bylo zjištěno zmenšování středního denního pohybu Saturna a naopak jeho zrychlování u Jupitera. Na základě krátkodobých pozorování v 17. století nebylo možné rozhodnout, zda charakter poruch je periodický nebo sekulární.

Její bezprostřední příčinou je skutečnost, že siderické oběžné doby Jupitera a Saturna kolem Slunce jsou zaokrouhleně 12 roků a 30 roků. Doba dvou oběhů Saturna je tak souměřitelná s dobou pěti oběhů Jupitera. Jejich vzájemná gravitační interakce tak má periodický charakter s periodou zhruba 60 roků.

Kosmická mechanika byla postavena před otázkou, zda poruchy velkých poloos a excentricit planetárních drah jsou reálné nebo zda jsou důsledkem nedokonalých matematických metod při jejich vyjadřování. To byla podstata problému stability sluneční soustavy, který byl nastolen v 18. století. V letech 1754 – 1756 d'Alambert publikoval první práce o vzájemných poruchách Jupitera a Saturna. Později v letech 1773 – 1776 francouzský astronom, matematik a fyzik **Joseph Louis Lagrange (1736 – 1813)** a již zmiňovaný Laplace provedli

podrobný rozbor dlouhoperiodických poruch planet ve sluneční soustavě. Matematickým rozbohem dokázali, že velké poloosy drah planet nepodléhají sekulárním změnám, pouze periodicky kolísají kolem určitých středních hodnot. Eliptické dráhy tak nemohou přecházet v parabolické, při kterých by planety opustily sluneční soustavu.



Obř. 17: Joseph Louis Lagrange

Při analýze nejprve rozdělili dráhové elementy do dvou skupin. V první byly délka výstupného uzlu Ω , argument šířky perihélia ω a okamžik průchodu perihéliem T . Změny těchto elementů drah v důsledku poruch nevedou u planet k opuštění sluneční soustavy.

Do druhé skupiny byly zařazeny velká poloosa a , excentricita e a sklon dráhy i . Charakter jejich změn určuje stabilitu sluneční soustavy, proto byly sledovány změny těchto elementů. Lagrange zjistil, že nestačí pouze zkoumat omezenost velké poloosy v libovolném časovém okamžiku, což by řešilo stabilitu planetárních drah ve smyslu „rozbíhání“ planet. Existuje však možnost srážky planety se Sluncem. I při ohraničené hodnotě velké poloosy se bude dráha zplošťovat při zvětšování excentricity. Minimální vzdálenost planety od Slunce je $r = a(1 - e)$, pak při $e \rightarrow 1$ se $r \rightarrow 0$.

Při rozboru stability planetárních drah tak byly studovány změny dráhových elementů a, e, i . Roku 1784 Laplace dokázal platnost dvou vět:

1. $m_1\sqrt{a_1}e_1^2 + m_2\sqrt{a_2}e_2^2 + \dots + m_n\sqrt{a_n}e_n^2 = c_1$, kde c_1 je konstanta, m hmotnost planety, a velká poloosa, e excentricita příslušné dráhy.
2. $m_1\sqrt{a_1}\text{tg}^2i_1 + m_2\sqrt{a_2}\text{tg}^2i_2 + \dots + m_n\sqrt{a_n}\text{tg}^2i_n = c_2$, kde c_2 je konstanta i označuje úhel sklonu příslušné dráhy.

V obou větách součty výrazů pro planety jsou stálé. Věty byly odvozeny za omezujícího předpokladu, že velké poloosy drah se podrobují pouze malým periodickým změnám, tudíž platí pro ohraničené změny e a i . Jak vyplývá z vět, jestliže excentricita jedné dráhy narůstá, excentricita druhé dráhy se zmenšuje. Obdobnou úvahu lze provést i pro sklon drah. Dalším předpokladem bylo, že hmotnosti planet jsou zhruba stejného řádu.

Závěry z obou vět lze shrnout slovně: Jestliže pohyb planet probíhá jedním směrem, jejich hmotnosti jsou stejného řádu, excentricity a sklony drah malé, velké poloosy jsou podrobovány pouze nevelkým změnám vzhledem ke střední hodnotě, pak excentricity a sklony drah budou malé ve zkoumaném časovém intervalu.

Uvedenými větami byla prokázána stabilita sluneční soustavy. Výpočet ukázal, že jde o dlouhoperiodické poruchy, jejichž perioda činí přibližně 930 roků.

Později roku 1839 Leverrier propočítal celou soustavu matematických vztahů charakterizujících stabilitu drah planet, včetně započtení poruch od Uranu. Výsledky v mezích přesnosti vedly k existenci horní hranice změn excentricity a úhlu sklonu dráhy při zachování stability sluneční soustavy.

V současnosti je význam vět pouze historický. Nejsou použitelné pro časové intervaly srovnatelné se stářím sluneční soustavy, neboť započítávají pouze poruchy prvního řádu. V matematických rozvoích byly zanedbávány členy vyšších řádů, v hmotnostech těles sluneční soustavy jsou také podstatné rozdíly. Obecněji problém stability sluneční soustavy zformuloval koncem 19. století ruský matematik **Alexandr Michajlovič Ljapunov (1857 – 1918)**.

4.6 Objevy dalších planet

Uran

Za výsledek zdokonalování pozorovací astronomie a systematickosti výzkumu oblohy lze považovat objev Uranu, i když tato planeta byla již pozorována nevědomě dříve. Anglický astronom německého původu, jehož rodové kořeny sahají až na Moravu (děd Abraham Jelínek – Hirschel) **Frederick William Herschel (1738 – 1822)** započal s pravidelným pozorováním oblohy roku 1773. Postupně sestrojil několik dalekohledů – reflektorů, roku 1789 dokončil reflektor o průměru zrcadla 122 cm. Základní pozorování vzhledem k nezbytné rychlejší manipulovatelnosti však prováděl s reflektorem Newtonova typu o průměru objektivu 30 cm a šestimetrovou ohniskovou vzdáleností. S tímto dalekohledem objevil při systematickém sledování oblohy 13. března 1781 novou planetu později nazvanou Uran.



Obr. 18: Frederick William Herschel

Původní sdělení předložené Královské společnosti o objevu nového kosmického tělesa se jmenuje *Account of Comet* česky *Zpráva o kometě*. Herschel se tedy zprvu domníval, že našel kometu, což potvrzuje text v jeho pozorovacím deníku: „V úterý 13. března 1781 asi mezi desátou a jedenáctou večer, když jsem zkoumal slabé hvězdy v sousedství κ Geminorum, zpozoroval jsem jednu, která se zdála být větší než ostatní. Zaražen jejím nezvyklým vzhledem a velikostí, srovnával jsem ji s κ Geminorum a s malou hvězdou ve čtveřici mezi souhvězdími Auriga a Gemini. Shledav, že obě předčí jasností, domníval jsme se, že je to kometa.

19. května – Pozorovaný pohyb komety je nyní 2,5 vteřiny za hodinu. Pohybuje se ve směru zvířetníku a její dráha je odchýlena od ekliptiky velmi málo.

25. března – Pozorovaný pohyb komety se zrychluje a její průměr se zdá narůstat.

28. března – Její průměr ještě vzrostl, z čehož můžeme

soudit, že kometa se k nám blíží.“

Později Herschel svůj omyl opravil, což vyplývá z textu presidentu Královské společnosti: „Pane, z pozorování nejlepších hvězdářů v Evropě vyplývá, že nová hvězda, na kterou jsem měl čest Vás upozornit v březnu 1781, je velkou planetou naší sluneční soustavy.“

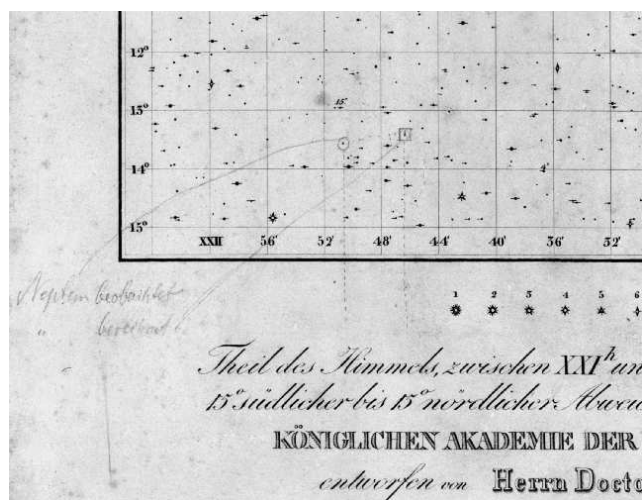
Jak jsme uvedli, Uran již byl mnohokrát pozorován, avšak jeho planetární charakter nebyl odhalen. Pozorovali jej angličtí astronomové John Flamsteed a James Bradley, francouzský astronom Pierre Charles Lemonnier (1715 – 1799) a německý astronom Johann

Tobias Mayer. Jimi získané pozorovací údaje byly později využity k zpřesnění výpočtů dráhových elementů.

V polovině 18. století činila přesnost pozorování poloh na obloze $4'' - 6''$, zásluhou rozvoje astrometrie se koncem 18. a počátkem 19. století již zvýšila do $3''$. Francouzský astronom **Alexis Bouvard (1767 – 1843)** v roce 1820 upřesnil teorii a sestavil tabulky pro pohyb Jupitera, Saturna a Uranu. U posledně jmenované planety využil nejen pozorovací údaje z let 1781 – 1820, ale i zmiňovaná starší nevědomá pozorování planety z roků 1690 – 1771.

Neptun

Po nalezení Uranu se ukázalo, že jeho pohyb neprobíhá pravidelně podle teoreticky propočítané dráhy, přestože výpočty zahrnovaly poruchové působení Jupitera a Saturna. V rychlosti pohybu planety byly zjištěny nepravidelnosti. V letech 1820 – 1826 pozorovací údaje Uranu ukazovaly zrychlení pohybu v délce o $10''$. Od roku 1830 Uran naopak zpomaloval svůj pohyb oproti vypočítanému. V roce 1832 bylo celkové zpoždění planety odhadováno na $30''$, narůstalo přibližně $6'' - 7''$ za rok. Připomínáme, že tehdejší přesnost pozorování dosahovala $3''$. Neexistoval tak souhlas teorie kosmické mechaniky s pozorováními. Proto astronomové vytyčili hypotézy k objasnění nesouladu. Nejvěrohodnější z nich předpokládala, že na pohyb Uranu má vliv další dosud neobjevená planeta.



Obr. 19: Objev planety Neptunu

V létě 1845 ředitel Pařížské hvězdárny francouzský fyzik a astronom **Dominique François Jean Arago (1786 – 1853)** vyzval francouzského astronoma a matematika **Urbaina Jena Josepha Leverriera (1811 – 1877)** k řešení problematiky neznámé planety. Koncem roku Leverrier představil první výsledky práce. Prostřednictvím 115 podmínkových rovnic sestavených z 279 pozorování z let 1690 – 1845 určil dráhu Uranu. Z ní propočítané polohy nesouhlasily s pozorovacími údaji. Následně sestavil Leverrier dalších 103 podmínkových rovnic pouze pro novější pozorování z let 1781 – 1845, z kterých získal opravy dráhových elementů Uranu. Pro srovnání teorie s pozorováními

vybral heliocentrickou délku. Formuloval hypotézu o existenci neznámé planety, stanovil její dráhové elementy a předpokládanou polohu na obloze v druhé publikaci z 31. srpna 1846 s názvem *Sur la planète qui produit les anomalies observées dans le mouvement d'Uranus – Détermination de sa masse, de son orbite et de sa position actuelle* česky *O planetě, která zapříčiňuje anomálie v pohybu Uranu – Určení její hmotnosti, dráhy a současné polohy*. Francouzští astronomové – pozorovatelé však nevěnovali hledání planety patřičnou pozornost. Proto Leverrier zaslal 18. září 1846 dopis s žádostí o pozorování na hvězdárnu do Berlína německému astronomu **Johannu Gottfriedu Gallemu (1812 – 1910)**. V dopise uvedl dráhové

elementy včetně předpokládané heliocentrické délky 326° , s návodem na hledání objektu podle disku, čímž se odlišuje od hvězd. Dopis dorazil Gallemu 23. září a ten získal souhlas ředitele **Johanna Franze Enckeho (1791 – 1865)** k pozorování. V Berlíně měli k dispozici nové akademické hvězdné mapy, jež vytvořil německý matematik a astronom Carl Bremiker (1804 – 1877). Společně s pomocníkem **Henrichem Louisem d'Arrestem (1822 – 1875)** Galle v noci z 23. na 24. září 1846 našli novou planetu o hvězdné velikosti 8 mag v souhvězdí Vodnáře, její skutečná poloha se odlišovala od předpokládané o $52'$ (obr. 19). Popis na obrázku pochází od Enckeho.

Nezávisle na Leverrierovi ve Francii prováděl již od roku 1845 podobné výpočty anglický astronom **John Couch Adams (1819 – 1892)**. Podle Titusova – Bodeho pravidla předpokládal, že hledaná planeta se nachází přibližně v dvojnásobné vzdálenosti od Slunce než Uran. Jeho výpočty však nenalezly kladnou odezvu u recenzenta – anglického fyzika a astronoma **George Biddella Airyho (1801 – 1892)**. Adams předložil další zlepšenou verzi svých výpočtů, u kterých přesnost, jak ukázaly pozdější analýzy, dosahovala necelé 2° . Airy, přestože byl na rozdíl od Adamse seznámen s pracemi Leverriera, se k záležitosti nestavěl nijak kladně. Tak zásluhou rozvoje teoretických metod kosmické mechaniky došlo k objevu Neptuna.

V polovině 19. století Leverrier vypracoval teorii pohybu planet se započtením poruch. V případě terestrických planet zahrnul do teorie poruchy 1. řádu, pro Jupiter a Saturn vzhledem k jejich hmotnostem poruchy 4. řádu. Jeho teorie nebyla plně analytická, spíše numericko – analytická, některé z parametrů pohybu byly zadávány číselně předem. Pro střední pohyby planet využil konkrétní hodnoty získané z dlouhodobých pozorování planet.

Pro terestrické planety teorie plně odpovídala přesnosti pozorování, která již dosáhla $1''$. U velkých planet (Jupitera, Saturna a Uranu) se teorie ukázala méně přesná, rozdíly teoretických a pozorovaných poloh u nich dosahovaly až $9''$.

Později francouzský astronom **Jean Baptiste Aimable Gaillot (1834 – 1921)** zdokonalil teorii pohybu velkých planet, především zásluhou upřesnění jejich hmotností. Dosáhl souhlasu teoretických a pozorovaných poloh u Jupitera $1''$ a Saturna $2''$. Větší rozdíly $5''$ – $6''$ zůstaly u Uranu.

Nově objevený Neptun začali astronomové systematicky pozorovat, v jeho polohách zjistili mírné odchylky $2''$ – $3''$ od vypočtené dráhy, což je vedlo k hypotéze o existenci další planety, která na něj gravitačně působí.

Pluto

Na základě předběžných výpočtů, založených na nepřesných hodnotách hmotností Uranu a zejména Neptuna, i astrometrických chybách určování jejich poloh, objevil v únoru roku 1930 **Clyde William Tombaugh (1906 – 1997)** na snímcích pořízených v lednu na Lowellově observatoři ve Flagstaffu v Arizoně nové kosmické těleso sluneční soustavy poblíž hvězdy δ Gem. Na fotografických deskách pořízených dalekohledem o průměru 33 cm byla původně zachycena hvězdná pole o velikostech $13^\circ \times 13^\circ$. Při expozicích přibližně jedné hodiny byly na deskách zobrazeny objekty s hvězdnou velikostí do 17 mag. Oznámení o nalezení planety provedl **Vesto Melvin Slipher (1875 – 1969)** 13. března 1930, shodou okolností téměř 150 roků po objevu Uranu.

V průběhu několika měsíců bylo kosmické těleso nazvána **Pluto**, akronym jména Percivala Lowella (1855 – 1916), zakladatele a mecenáše hvězdárny ve Flagstaffu. Stalo se devátou planetou naší sluneční soustavy. Po objevu provedený odhad hmotnosti Pluta vedl k hodnotě přibližně $2M_Z$. O případných dalších tělesech Kuiperova pásu nebylo tehdy nic známo. Proto nebyly pochybnosti o zařazení nově objeveného tělesa mezi planety.

V roce 2006 na kongresu IAU byla přijata nová definice planety a Pluto bylo přefazeno do kategorie planetek s číslem 134 340.

4.7 Objev planety Ceres

Další rozvoj kosmické mechaniky byl spojen s určování dráhových elementů kosmických těles – komet a planetek na základě pozorovacích údajů. Definitivně problém stanovení dráhových elementů ze tří pozorování byl vyřešen německým matematikem, fyzikem a astronomem **Karlem Friedrichem Gaussem (1777 – 1855)**. Jeho metoda byla úspěšně použita při znovunalezení planety Ceres, která byla první objevenou planetkou. Objevil ji italský matematik a astronom z Palerma **Giuseppe Piazzi (1746 – 1826)**.

Prvního ledna roku 1801 ve 20h 43min místního času našel objekt, který se během noci posunul o $4'$ k severozápadu. Vzhledem k hvězdnému poli v pozadí se během dalších dnů přemísťoval. Piazzi popsal svůj objev takto: „*Pozoroval jsem 1. ledna poblíž ramena Býka hvězdu s hvězdnou velikostí osmé magnitudy, která se dalšího večera 2. ledna posunula o $3' 30''$ přibližně k severu o $4'$ ke znamení Berana. . .*“

Pozorování prováděl do 11. února 1801, kdy se objekt přiblížil Slunci a přestal být pozorovatelný. Celkově jej Piazzi sledoval 41 nocí, získal údaje o 21 úplných pozorováních, zachytil zhruba 9° jeho dráhy vzhledem k Slunci. Objekt, nejprve označovaný za planetu, později po roce 1850 za planetku, obdržel jméno Ceres Ferdinandea na počest bohyně úrody na Sicílii a sicilského mecenáše krále Ferdinanda, který nechal v Palermu postavit hvězdárnu. Původně objekt astronomové považovali za osmou planetu sluneční soustavy, neboť splňovala vzdáleností $a = 2,8 \text{ AU}$ od Slunce Titiovu–Bodeovu řadu $a = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$, kde $n = -\infty, 0, 1, 2, \dots$

V roce 1766 německý matematik **Johann Daniel Titius (1729 – 1796)** objevil závislost průměrné vzdálenosti planety od Slunce vyjádřené původně v tvaru $a = \frac{n+4}{10}$, kde $n = 0, 3, 6, 12, 24, 48$. Roku 1772 byla závislost uveřejněna německým astronomem **Johannem Elertem Bodem (1747 – 1826)** jako již zmiňovaná Titiova – Bodeova řada.

Z Piazziho údajů vybral Gauss tři pozorování, 2. ledna, 22. ledna a 11. února. Zachycovala retrográdní pohyb od 1. ledna do 11. ledna, kdy objekt přešel opět k přímému pohybu. Do listopadu 1801 Gauss upřesnil dráhové elementy, velká poloosa $a = 2,7673 \text{ AU}$, oběžná doba $T = 1681$ dnů, excentricita $e = 0,0825$ a sklon dráhy $i = 10^\circ 36' 57''$. Dále spočítal předpokládané ekliptikální polohové souřadnice na dny 25. 11. – 31. 12. 1801, v intervalech šesti dnů, s jejichž pomocí astronom **Franz Xaver von Zach (1754 – 1832)** planetku 7. prosince a následně 1. ledna 1802 opět objevil. Polohy se shodovaly s Gaussovým výpočtem na $20'$. Novou planetku sledoval v lednu 1802 také **Heinrich Wilhelm Matthäus Olbers (1758 – 1840)**, který později objevil i další planety Pallas a Vestu. Ještě v témže roce 1802 navrhl Herschel pro nové objekty souhrnný název *asteroidy*. Po roce 1850 byl změněn status Ceresu na planetku.

Obecnou metodu výpočtu dráhy tělesa ve sluneční soustavě ze tří pozorování Gauss uveřejnil v spise sepsaném původně německy, známější je latinské verze *Thoria motus corporum coelestium in sectionibus conicis solem ambientium* česky *Teorie pohybu kosmických těles pohybujících se kolem Slunce po kuželosečkách* z roku 1809.

Detailně vypracoval stanovení šesti elementů eliptické dráhy, dokázal, že minimální počet nutných pozorování jsou právě tři. Metoda Gaussem vyvinutá měla významné postavení v kosmické mechanice při určování poloh planetek a komet. Zdokonalená upravená verze je používána i v současnosti k stanovení drah umělých kosmických těles.

Gauss vycházel z předpokladu, že sledované těleso v daném případě planetka, bylo pozorováno v nevelkém časovém intervalu, tudíž bylo možné zanedbávat působení ostatních kosmických těles. Pohyb planetky kolem Slunce v prvním přiblížení je tedy problémem dvou těles, dráha je určena pomocí šesti konstant.

Vlastní metodu Gauss převedl geometricky k tomu, že ze tří zadaných bodů – poloh Země stanovených vzhledem ke středu Slunce vedl tři směry odpovídající pozorováním. Ty musely protínat rovinu jdoucí Sluncem tak, aby platil II. Keplerův zákon. Kombinace této dynamické a geometrických podmínek vedla po matematické stránce k rovnici 4. stupně pro sinus úhlu mezi Sluncem, planetkou a Zemí, jejíž řešení bylo tabelováno.

V geometrickém zadání Gauss sektory drah nahradil trojúhelníky. Zavedl poměr mezi plochami trojúhelníků a příslušných sektorů eliptické dráhy a jim odpovídajícími časovými intervaly tří pozorování. Hledal vyjádření sektorů, které závisí na elementech dráhy $a, e, i, T, \Omega, \omega$. Iterační postup vyvinutý Gaussem byl upraven pro výpočet pomocí logaritmů.

5 Stelární astronomie

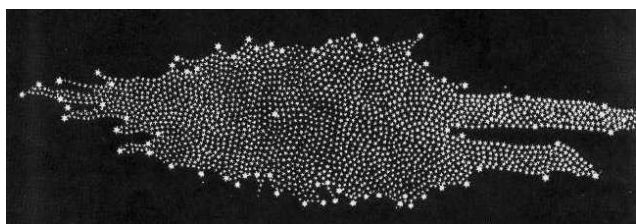
5.1 Základy stelární astronomie

První filozofické názory na rozložení hvězd na obloze a naši hvězdnou soustavu předložil švédský filozof Emanuel Swedenborg (1688 – 1772), následně **Thomas Wright (1711 – 1786)** roku 1750 v díle *An Original Theory or New Hypothesis of the Universe* česky *Originální teorie neboli nová hypotéza vesmíru*. Wright předpokládal, že naše hvězdná soustava se skládá z vrstvy složené z jednotlivých hvězd, přičemž hvězdy jsou v pohybu kolem jejího středu. Rovněž Slunce obíhá kolem středu našeho hvězdného systému.

Skutečným zakladatelem stelární astronomie se stal William Herschel. Od roku 1775 používal při pozorování a výzkumu metodu vybraných oblastí hvězdné oblohy s využitím dalekohledu o průměru 45 cm. Získané pozorovací údaje statisticky vyhodnocoval a snažil se stanovit obecné zákonitosti rozložení hvězd. Vycházel ze dvou základních předpokladů. Všechny hvězdy mají stejné zářivé výkony a jsou rozloženy rovnoměrně v naší hvězdné soustavě. Herschel neznal mezihvězdnou absorpci a mylně se domníval, že může pozorovat okraje Galaxie. Určoval počty hvězd v 3 400 vybraných směrech rozložených po celé obloze. Zjistil nápadné rozdíly v koncentraci hvězd, např. v pásu Mléčné dráhy a ve směru souhvězdí Velké Medvědice. Proto opustil svůj předpoklad konstantní prostorové hustoty hvězd ve všech směrech.

Na základě analýzy dlouhodobého výzkumu Herschel korigoval své názory. Pochopil, že nemůžeme pozorovat hranice hvězdné soustavy, opustil myšlenku stejné vzájemné vzdálenosti všech hvězd, rovné vzdálenosti Slunce – Sirius. Uvědomoval si, že rozdílná jasnost složek fyzických dvojhvězd u stejně vzdálených hvězd musí vést k opuštění předpokladu stejného zářivého výkonu.

Vytvořil model naší hvězdné soustavy, která je výrazně zploštělá v poměru 1 : 5 a skládá se z mnoha milionů hvězd. Z pozorování zjistil rozdvojení soustavy, o kterém dnes víme, že je způsobené mezihvězdnou absorpcí v daném směru. Slunce položil v blízkosti středu hvězdné soustavy, která měla rozměry v dnešních jednotkách vzdálenosti ($3 \times 0,3$) kpc.



Obr. 20: Herschelův model Galaxie

Shrnuto metodou přepočtu hvězd pozorovatelných v různých směrech vytvořil a publikoval v roce 1785 model Galaxie v práci *On the Construction of the Heavens* česky *O stavbě nebes*. Zachycoval její stavbu a přibližné rozměry – viz. obr. 20.

V roce 1783 objevil pohyb Slunce v prostoru směrem ke hvězdě λ Herkula ve směru tzv. apexu. Herschel neznal vzdálenosti hvězd, nemohl stanovit zářivé výkony hvězd a jejich rozložení v prostoru. Proto přešel od studia prostorové stavby Galaxie k morfologickému popisu. Postupně publikoval v letech 1786, 1789 a 1802 katalogy objevených mlhovin a hvězdokup.

Philosophical Transactions of the Royal Society – First catalog of 1000 nebulous objects by William Herschel, Second catalog of 1000 nebulous objects by William Herschel, Third catalog of

500 nebulous objects by William Herschel česky *První katalog 1 000 mlhovin Williama Herschela*, *Druhý katalog 1 000 mlhovin Williama Herschela*, *Třetí katalog 500 mlhovin Williama Herschela*.

V roce 1791 uveřejnil klasifikaci mlhovin, které rozděloval na pravé ze zředěného plynu a nepravé – vzdálené hvězdné soustavy.

Herschel podobně jako řada jeho předchůdců začal kolem roku 1774 hledat paralaktickou elipsu, vznikající jako důsledek pohybu Země kolem Slunce. Při tom sledoval dvojhvězdy. Když se po několika desetiletích vrátil ke svým pozorovacím údajům, zjistil u řady dvojhvězd pootočení spojnice obou složek, u některých až 50 stupňů. Pochopil souvislost obou složek dvojhvězd a potvrdil jejich oběh kolem společného hmotného středu. Objevil tak fyzické dvojhvězdy.

Při hledání paralaxy hvězd zkoumal Herschel dvojhvězdy a vícenásobné hvězdy. Prokázal, že složky dvojhvězdy obíhají kolem společného hmotného středu v souladu se zákonem všeobecné gravitace a Keplerovými zákony. Poprvé tak byly aplikovány tyto zákony na pohyb hvězd.

Roku 1811 publikoval práci *Astronomical Observations relating to the Construction of the Heavens*, česky *Astronomická pozorování týkající se stavby nebes*, ve které rozpracoval problematiku vzájemného vztahu hvězd a mlhovin. Pokusil se o klasifikaci mlhovin podle stupně koncentrace ke středu. Začal zkoumat jejich rozložení ve vesmíru.

Svému bratrovi Williamovi pomáhala v astronomických výzkumech **Lucretia Karolin Herschel (1750 – 1848)**. Vedla technické práce na hvězdárně, zpracovávala a doplňovala pozorování, sama objevila několik komet.

V zaměření astronomického výzkumu svého otce pokračoval jeho syn **John Frederick William Herschel (1792 – 1871)**. Zkonstruoval dalekohled – reflektor o průměru 45 cm, který používal k sledování oblohy. V roce 1834 zbudoval na mysu Dobré Naděje v Jižní Africe astronomickou observatoř a do roku 1838 zmapoval jižní oblohou. Tu mu umožnilo podstatně rozšířit katalog mlhovin a hvězdokup, vytvořený jeho otcem. Dbal pokynů své tety Karolíny, která psala: „*Drahý synovče, jakmile bude tvůj dalekohled postaven, přejí si, aby ses podíval zda není možné najít něco nápadného v jižní části Štíra. Pamatuji si totiž, že se tvůj otec několik nocí a let vracel k oblasti v této části oblohy a nemohl si vysvětlit její neobyčejný vzhled. Bylo to něco více, doufám, než jen úplná absence hvězd.*“

Shrnuté výsledky uveřejnil roku 1847 v díle *Results of Astronomical Observations* česky *Výsledky astronomických pozorování*.

V roce 1864 publikoval *General Catalogue of Nebulae and Clusters* česky *Obecný katalog mlhovin a hvězdokup* obsahující více než 5 000 objektů. Rozšířil systematická pozorování dvojhvězd, v 11 katalozích publikoval údaje o 3 300 dvojhvězdách. Vypracoval teorii *určování drah dvojhvězd*. Zavedl do praxe využívání fotografické metody při astronomických pozorováních.

Celkově John Herschel objevil zhruba 5000 mlhovin. Později v roce 1888 irský astronom dánského původu **John Louis Emil Dreyer (1852 – 1926)** vydal *New General Catalogue* česky *Nový generální katalog*, v němž je na 8 000 mlhovin označeno NGC. Následné doplněné vydání tohoto katalogu v roce 1908 zahrnovalo asi 13 000 mlhovin.

Spirální struktury mlhovin pozoroval v roce 1845 **William Parsons** – lord Rosse (1800 – 1876). Dalekohledem o průměru 1,8 m zkoumal např. galaxii M 51 v souhvězdí Honících psů. Její výrazná spirální struktura ho vedla k myšlence, že je výsledkem rotace.



Obr. 21: Friedrich Wilhelm Bessel

Pro rozvoj stelární astronomie mělo zásadní význam určování prostorových vzdáleností hvězd v naší Galaxii, nejprve paralaktickým způsobem. K němu výrazně přispěl zakladatel astrometrie německý astronom a matematik **Friedrich Wilhelm Bessel (1784 – 1846)**. Při zpracování astronomických pozorování začal aplikovat různé matematické postupy, zejména výsledky teorie pravděpodobnosti a metodu nejmenších čtverců. Zdokonalil redukce astronomických pozorování, rozpracoval teorii chyb měřících přístrojů. Uvedený přístup použil při zpracování měření poloh hvězd v publikaci z roku 1830 *Tabulae Regiomontanae reductionum observationum* česky zkráceně tzv. *Königsberské tabulky*.

Roku 1838 Bessel určil hodnotu *paralaxy* hvězdy 61 Cygni na $0,314''$. Obdobně ruský astronom německého původu **Wilhelm Friedrich Georg Struve – Vasilij Jakovlevič Struve (1793 – 1864)**, zabývající se určováním přesných poloh hvězd uveřejnil roku 1837 hodnotu paralaxy Vegy $0,125''$. Přibližně ve stejném období jako výše uvedení astronomové rovněž skotský astronom **Thomas Henderson (1798 – 1844)** působící v třicátých letech 19. století v Jižní Africe určil v roce 1842 hodnotu paralaxy při definitivním zpracování výsledků u α Centauri na $0,913''$. Jak je zřejmé, astronomové promyšleně k stanovení paralaxy vybrali hvězdy s velkými vlastními pohyby a jasné.

Původní Herschelovu metodu statistického výzkumu rozložení hvězd zdokonalil holandský astronom **Jacobus Cornelius Kapteyn (1851 – 1922)** na přelomu dvacátého století. V té době již byly známy absolutní hvězdné velikosti některých typů hvězd, což umožňovalo stanovení vzdáleností. Kapteyn tak určil změnu prostorové hustoty hvězd v závislosti na jejich vzdálenosti. Roku 1901 sestrojil *schematický model Galaxie*, který měl tvar *zploštělého elipsoidu*. Později svůj model dále propracovával. Statistické vyhodnocování 206 oblastí oblohy, tzv. Kapteynových vybraných polí, navrhl roku 1906. Výzkum měl zahrnovat i hvězdy s nejmenší jasností. Při tomto výzkumu rozložení hvězd v Galaxii byly sledovány počty hvězd a střední paralaxy. Hledané prostorové rozložení hvězd záviselo na funkci svítivosti – na počtu hvězd v objemové jednotce v intervalech absolutních hvězdných velikostí a na mezihvězdné absorpci světla. Funkce svítivosti bylo pokládáno za konstantní, nezávislá na poloze pozorovatele v Galaxii. Dále Kapteyn předpokládal, že skutečná prostorová hustota hvězd se nemůže zvětšovat se vzdáleností od pozorovatele. Pro horní mez absorpce světla získal malou veličinu, kterou bylo možné zanedbávat. Kapteynův model Galaxie reprezentovalo sféroidické rozložení hvězd, které částečně připomínalo Herchelův model. Slunce se nacházelo poblíž středu Galaxie, která měla rozměry disku – průměr 7 kpc a tloušťku 2 kpc.

5.2 Mezhvězdná látka

Koncem 19. století započal výzkum temných mlhovin. Největší zásluhu v propracování tohoto směru výzkumu měl americký astronom **Edward Emerson Barnard (1857 – 1923)**. První práci o temné mlhovině v souhvězdí Střelce uveřejnil v roce 1884. Od začátku 20. století prováděl výzkum za pomoci fotografických snímků. V letech 1905 – 1916 publikoval sérii článků, v nichž popsal nejznámější temné mlhoviny severní oblohy. Na základě jejich studia objasnil, že jde o stínící prach a plyn ležící mezi pozorovatelem a vzdálenými hvězdami. Až posmrtně v roce 1927 vychází jeho celoživotní dílo *A Photographic Atlas of Selected Regions of the Milky Way* česky *Fotografický atlas vybraných částí Galaxie*.

Problematikou *mezhvězdné absorpce* se zabývali astronomové od poloviny 19. století, kdy např. Struve vyzdvihl myšlenku existence absorpce světla v mezhvězdném prostoru. Jako první našel v roce 1904 německý astrofyzik **Johannes Franz Hartmann (1865 – 1936)** ve spektru dvojhvězdy δ Orionis úzkou spektrální čáru K Ca II o laboratorní vlnové délce $\lambda = 393,4 \text{ nm}$, která se nevyznačovala periodickými posuvy na rozdíl od ostatních proměřovaných vodíkových a heliových čar. Periodické posuvy jsou vyvolány oběhem složek kolem společného hmotného středu. Tuto skutečnost Hartmann objasnil v práci *Investigations on the spectrum and orbit of δ Orionis* česky *Výzkum spektra a dráhy δ Orionis* existencí vápníku v mezhvězdné látce. Následovaly objevy K čáry Ca II u dalších spektroskopických dvojhvězd. V roce 1919 byly objeveny čáry D₂ a D₁ Na I u hvězd raných spektrálních typů, čímž byl v mezhvězdné látce nalezen sodík. Kanadský astrofyzik **John Stanley Plaskett (1865 – 1941)** v dvacátých letech 20. století ukázal, že rychlost odvozená z vápníkových a sodíkových čar je u přibližně 50 hvězd zpravidla menší než odvozená z jiných čar. Tak byla původní Hartmannova myšlenka aplikována na soubor hvězd, což vedlo k definitivnímu potvrzení existence mezhvězdné látky.

K názoru, že prostor mezi hvězdami je zaplněn mezhvězdnou látkou, dospěl na základě studia statistického rozložení hvězd rovněž německý astrofyzik **Franz Joseph Maxmilián Wolf (1863 – 1932)**.

Výzkum objevil absorpční a rozptylové vlastnosti mezhvězdné látky. Absorpce by se podle Eddingtonovy myšlenky z roku 1926 měla více projevovat u vzdálenějších hvězd. Proto americký astrofyzik ruského původu **Otto von Struve (1897 – 1963)** prozkoumal zhruba 2 000 hvězd. Zjistil, že mezhvězdná absorpce je větší poblíž galaktického rovníku.

Existenci mezhvězdné absorpce plně prokázal v roce 1930 americký astrofyzik švýcarského původu **Robert Julius Trümpler (1886 – 1956)**. Vycházel z výzkumu otevřených hvězdokup a analýzy změny jejich jasnosti a úhlových rozměrů se vzdáleností. Podle původní Trümplerovy práce zeslabení světla činilo průměrně zhruba 0,5 mag na 1 kpc.

K zeslabování světla při jeho průchodu mezhvězdnou látkou dochází především v důsledku rozptylu, což se projevuje v celém rozsahu vlnových délek. Jde tudíž o částice větší než atomy a molekuly, které by světlo absorbovaly jen na určitých vlnových délkách. Mezhvězdná látka je tvořena ledovými zrny kondenzovaného vodíku, kyslíku, uhlíku, železa a dalších prvků, jejichž velikost je přibližně 0,1 nm. Při tomto rozměru rozptyl závisí nepřímo úměrně na vlnové délce světla. Proto světlo některých hvězd se jeví více červenější, přesněji je více rozptylována modrá část spektra hvězd.

Holandský astronom **Jan Hendrik Oort (1900 – 1992)** si roku 1932 uvědomil, že existující mezhvězdná látka se musí projevovat gravitací. Na základě pozorování pohybu hvězd

v okolí Slunce a analýzy maximální výšky z nad galaktickou rovinu, kam se hvězdy při svém pohybu přesunou, stanovil velikost působící gravitační síly. Z ní odvodil rozložení hmoty a její hustotu.

V roce 1939 zkoumal dánský astronom **Bengt Georg Daniel Strömgen (1908 – 1987)** ionizaci a excitaci atomů mezihvězdného vodíku. Dospěl k závěru, že kolem horkých hvězd v důsledku působení ultrafialového záření se vytváří *oblasti H II ionizovaného vodíku*. Propočítal poloměr těchto tzv. Strömgenových zón.

5.3 Rotace Galaxie

Z dynamických důvodů bylo zřejmé, že naše Galaxie rotuje. Skupinové pohyby hvězd začaly být zkoumány Kapteynem roku 1904. Rozpracoval teorii, podle níž relativní vzájemné pohyby hvězd jevíly pravidelnosti a představovaly dva vzájemně opačné směry pohybu hvězd tzv. *Kapteynovy proudy*. Byly projevem rotace Galaxie, kterou předpokládala již dříve řada astronomů, mezi nimi např. ruský astronom Marian Albertovič Kovalskij (1821 – 1884).

Z hlediska kinematiky naší hvězdné soustavy Galaxie vyslovil důležitou myšlenku německý astronom Hermann Albert Kobold (1858 – 1942). Vyzdvihl existenci přednostních směrů, kterými se pohybuje větší počet hvězd než směry jinými.

Švédský astronom **Bertil Lindblad (1895 – 1965)** dokázal, že vytvořený obraz hvězdných proudů je přirozeným důsledkem *rotace* naší *Galaxie*, v níž se většina hvězd pohybuje po téměř kruhových drahách kolem jejího středu. Podle zjednodušené teorie rotující Galaxie přímka skutečných vertexů prochází středem Galaxie.

Komplexní objasnění problematiky podal již zmiňovaný Oort, zabývající se studiem stavby a dynamiky Galaxie. V roce 1927 na základě statistického studia radiálních rychlostí a vlastních pohybů hvězd, nacházejících se ve vzdálenostech (300 – 3000) pc od Slunce, v práci *Observational evidence confirming Lindblad's hypothesis of a rotation of the galactic system* česky *Pozorovací důkazy potvrzující Lindbladovu hypotézu o rotaci galaktického systému* potvrdil hypotézu Lindblada o rotaci Galaxie kolem jejího středu. Celá soustava se skládá z několika podsystémů hvězd, každý z nich má svůj tvar a obíhá střed Galaxie s určitou rychlostí. Oort prokázal, že vnitřní část rotuje jako tuhé těleso, s rostoucí vzdáleností od středu se zmenšuje rychlost rotace. Stanovil koeficienty určující *diferenciální rotaci*, tzv. *Oortovy konstanty*. Propočítal rychlost rotace Galaxie v okolí Slunce na $250 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ s oběžnou dobou 220 milionů roků. Položil tak základy ke studiu dynamiky Galaxie.

Pracemi Lindblada a Oorta byl potvrzen model Galaxie Shapleyho a vyvrácen Kapteynův, vycházející z nesprávných předpokladů neexistence mezihvězdné absorpce světla a konstantní hodnoty funkce svítivosti v celé Galaxii, která je ve skutečnosti neměnná pouze v blízkém okolí Slunce.

V důsledku objevu mezihvězdné absorpce byly v roce 1930 poopraveny představy o velikosti Galaxie, odhad jejího průměru byl přibližně 3krát zmenšen na zhruba 30 kpc, jak vyplývalo mimo jiné z výpočtů Oorta. Ten detailně zkoumal úlohu mezihvězdné látky v kinematice a dynamice Galaxie a v roce 1932 určil hustotu mezihvězdné látky pomocí složky rychlosti hvězd kolmé k rovině Galaxie. Roku 1938 Oort ukázal, že velká část absorbující látky v Galaxii je soustředěna ve vrstvě s tloušťkou do 200 pc v galaktické rovině,

prostorová hustota hvězd roste ve směru ke galaktickému středu, Slunce leží v oblasti s nízkou hustotou hvězd.

Německý astronom žijící od roku 1931 v USA **Walter Baade (1893 – 1960)** na základě pozorování nejbližších galaxií, zejména M 31, vypracoval ve čtyřicátých letech a publikoval roku 1944 koncepci různých typů hvězdných populací v galaxiích. Navrhl *rozdělení hvězd do dvou populací*, populace I obsahuje mladé hvězdy rozložené podél galaktického rovníku, které těsně souvisí s mezihvězdnou látkou a zúčastňují se pravidelné rotace galaxií a populace II, kterou tvoří červení obři, hvězdy kulových hvězdokup a některé typy proměnných hvězd. Tyto hvězdy jsou sféricko symetricky koncentrovány ke středu galaxií, tvoří tzv. halo a centrální zhuštění. V dalších letech byla Baadeova klasifikace zdokonalena a rozšířena. Rozlišení hvězd na dva typy populací bylo důležitým krokem k pochopení naší a dalších galaxií, což mělo velký význam jak pro studium struktury galaxie, tak pro teorie vzniku a vývoje hvězd.

Spirální struktura Galaxie byla prokázána v padesátých letech výzkumy v optickém oboru amerických astronomů **Donalda Edwarda Osterbrocka (1924 – 2007)**, **Stewartu Sharplesse (1926)** a **Williamu Wilsonu Morgana (1906 – 1994)**, kteří publikovali mapu zářících oblastí ionizovaného vodíku. Ještě důležitější však bylo v roce 1951 potvrzení existence spektrální čáry na vlnové délce 21,1 cm v rádiovém oboru, zjištěné v Austrálii, Holandsku a USA. Hypotézy o existenci záření vodíku v oblastech H I ve spirálních ramenech Galaxie vyslovili roku 1944 holandský astrofyzik **Hendrik Christoffel van der Hulst (1918 – 2000)** a nezávisle na něm roku 1948 sovětský astrofyzik **Josif Samujlovič Šklovskij (1916 – 1985)**. V roce 1954 Hulst a Oort na základě údajů rádiové astronomie vytvořili obraz rozdělení neutrálního vodíku ve spirálních ramenech. Celkovou mapu rozložení neutrálního vodíku v Galaxii publikovali roku 1958 již zmiňovaný Oort, dále narozený v Anglii, studující a působící v Austrálii a USA astronom **Frank John Kerr (1918 – 2000)** a **Gart Westerhout (1927)** holandský astronom žijící v USA.

5.4 Studium hvězdných soustav

Myšlenku vlastních pohybů hvězd, jak jsme již uvedli, vyzdvihl Halley roku 1718. První katalog vlastních pohybů hvězd z roku 1760 pocházel od Mayera. Rovněž William Herschel roku 1783 připomíná pohyb hvězd k určitému bodu oblohy, tedy pohyb sluneční soustavy v prostoru.

Německý astronom Johann Heinrich Mädler (1794 – 1874) upozornil v roce 1846 na pohyb 15 hvězd Plejád. Obdobně anglický astronom Richard Anthony Proctor (1837 – 1888) roku 1870 popsal vlastní pohyb některých hvězd skupiny Velkého vozu, hvězdy vytvářely hvězdný proud.

Studiem pohybových hvězdokup Hyád se začal zabývat americký astronom Lewis Boss (1846 – 1912). Vzhledem k velkým vlastním pohybům členů této hvězdokupy je lze snadno odlišit od hvězdného pozadí. Prodloužené směry vlastních pohybů se protínají v jednom bodu – vertexu. Boss roku 1908 využil vlastních pohybů ke stanovení vzdálenosti Hyád. Benjamin Boss (1880 – 1970) vydal v 20. století katalog k ekvinokciu 1950.0 s vlastními pohyby 33 342 hvězd.

Detailní výzkum Hyád uveřejnil v roce 1952 holandský astronom H. G. van Bueren, se soupisem 350 hvězd, vesměs spektrálních tříd G a K, s určenou vzdáleností od Slunce. Dospěl k závěru, že Hyády tvoří zploštělou soustavu, jejíž velká osa je rozložena podél galaktického rovníku.

Jak jsme již uvedli Trümpler v roce 1930 publikoval svůj výzkum 100 otevřených hvězdokup. Z pozorování stanovil hvězdné velikosti a spektrální třídy jednotlivých členů hvězdokup. Srovnáním s H – R diagramem normálních hvězd odhadl absolutní hvězdné velikosti jednotlivých hvězd a tím i vzdálenosti, které musely být pro všechny hvězdy stejné.

Při stanovení vzdálenosti Trümpler již započítával vliv mezihvězdné absorpce v nízkých galaktických šířkách podél galaktického rovníku, průměrně 0,7 mag na kpc. Ze známé vzdálenosti a znalosti úhlových velikostí hvězdokup Trümpler určil jejich skutečné velikosti, které v průměru dosahují (1 – 15) pc. Pozdějšími výzkumy Trümpler stanovil polohy více než 300 otevřených hvězdokup v prostoru. V padesátých letech minulého století výsledky jeho práce upřesnila ruská astronomka Klavdija Aleksandrovna Barchatova (1917).

Americký astrofyzik **Nikolas Ulrich Mayall (1906 – 1993)** určil v čtyřicátých letech integrální spektrální třídy řady kulových hvězdokup, většina z nich ležela v rozmezí F8 – G5. Toto poznání umožnilo spolehlivé stanovení zčervenání světla a tudíž přesné stanovení vzdálenosti.

Koncem padesátých let američtí astrofyzici Lawrence Helfer, George Wallerstein a **Jesse Greenstein (1909 – 2002)** určili chemické složení obrů v kulových hvězdokupách a jeho odlišnost od hvězd populace I.



Obr. 22: S. Chandrasekhar

*Gravitační stabilitou hvězdných soustav, zejména hvězdokup, se zabývali ve čtyřicátých letech arménský astrofyzik **Viktor Amazaspovič Ambarcumjan (1908 – 1996)**, americký astronom holandského původu **Bart Jan Bok (1906 – 1983)**, americký astrofyzik indického původu **Subrahmanyan Chandrasekhar (1910 – 1995)** a americký astrofyzik **Lyman Spitzer (1914 – 1997)**. Zkoumali gravitační pole hvězdokupy jako celku, vliv gravitačního pole Galaxie na hvězdokupu a její jednotlivé členy jakož i vzájemnou interakci jednotlivých členů.*

Nejdůležitějším faktorem stability hvězdokup je jejich hustota. Proto jsou kulové hvězdokupy útvaru stabilní zatímco některé otevřené hvězdokupy (např. Velký vůz) jsou již ve stádiu rozpadu. Při úniku hvězd z hvězdokupy (vypařování hvězdokup) je porušeno původní Maxwelllovo rozdělení rychlostí hvězd, dochází ke smršťování hvězdokupy. Na jeho obnovení je zapotřebí určitého tzv. relaxačního času, který u otevřených hvězdokup činí desítky milionů roků, u kulových hvězdokup miliardy let.

Jak jsem již uvedli, v druhé polovině čtyřicátých let rozpracoval teorii stability hvězdokup Ambarcumjan. Určil dobu jejich rozpadu. V roce 1947 objasnil rozptýlené dynamicky nestálé hvězdné soustavy – *asociace*, které se pozvolna rozpínají a jejichž stáří nepřevyšuje několik milionů roků. Jejich studium potvrdilo teorii skupinového vzniku hvězd i v současné době. Pro skupiny hvězd typu T Tauri zavedl Ambarcumjan roku 1949 termín T asociace.

6 Astrofyzika

6.1 Použití fotografie, fotometrie a spektroskopie v astrofyzice

V druhé polovině 19. století se začaly úspěšně v astrofyzice používat chemické a fyzikální metody – *fotografie, fotometrie* a posléze *spektroskopie*.

Metodu získávání fotografických snímků na kovové desky objevil Francouz **Louis Jacques Mandé Daguerre (1789 – 1851)**, kdy obraz zachycoval na stříbrnou desku. Dagerotypie začala být používána při astronomických pozorováních. První kvalitní fotografii Slunce získali francouzští fyzici **Arnaud Hippolite Louis Fizeau (1819 – 1896)** a **Jean Bernard Léon Foucault (1819 – 1868)**.

První fotografické snímky hvězd obdrželi William Cranch Bond (1789 – 1859) a **John Adams Whipple (1822 – 1891)**, kteří v roce 1850 fotografovali Venu. Georgie Philips Bond (1825 – 1865) získal snímek první dvojhvězdy – Mizaru. Fotografie mlhoviny v Orionu roku 1880 byla dílem amerického astronoma **Henryho Drapera (1837 – 1882)**.

Kombinace použití velkých dalekohledů a metody mokré fotografické desky umožnila další zkvalitnění metody. Anglický astronom Warren de la Rue (1815 – 1889) od roku 1858 pravidelně denně fotografoval povrch Slunce. V letech 1876 – 1882 anglický astrofyzik **William Huggins (1824 – 1910)** začal používat citlivější suché fotografické desky na získávání snímků komet, hvězd, mlhovin.

Při rozvoji moderní fotografické astrometrie a určování hvězdných paralax z měření poloh hvězd na fotografické desce byly důležité práce amerického astronoma Franka Schlesingera (1871 – 1943) z konce 19. století. Rovněž prostřednictvím fotografických desek již zmiňovaný Kapteyn stanovil roku 1900 vzdálenosti 250 hvězd.

V padesátých letech 19. století německý astronom **Johann Karl Friedrich Zöllner (1834 – 1882)** vyvinul a použil první *astronomický fotometr*. Měřenou pozorovanou hvězdu srovnával s umělou, vytvořenou odrazem světla svítilny. Osvětlení způsobené umělou hvězdou měřitelně měnil polarizačním hranolem. Zöllner zavedl *termín astrofyzika*.

Pro fotometrickou škálu jasností mělo zásadní význam matematické zpřesnění původní Hipparchovy intuitivní stupnice jasností. Podal je roku 1856 anglický astronom **Robert Norman Pogson (1829 – 1891)** v publikaci *Magnitudes of Thirty-six of the Minor Planets for the First Day of each Month of the Year 1857* česky *Hvězdné velikosti třiceti šesti planetek pro první den každého měsíce roku 1857*. Americký astrofyzik **Joel Stebbins (1878 – 1966)** začal počátkem 20. století experimenty se selénovým fotočlánkem a publikoval první fotometrické světelné křivky jasnosti Měsíce se změnou fáze (Stebbins, Brown 1907). O tři roky později Stebbins publikoval přesnější fotometrická pozorování světelné křivky zákrytové dvojhvězdy Algola.

Podstatným zlepšením bylo použití fotonásobiče po roce 1945 při fotometrických měřeních. Široké použití získal *fotometrický systém UBV* autorů **Herolda Lestera Johnsona (1921 – 1980)** a již zmiňovaného W. W. Morgana *Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the revised system of the Yerkes spectral atlas* česky *Základní hvězdná fotometrie standardů spektrálních tříd podle revidovaného systému Yerkeského spektrálního atlasu* z roku 1953.

6.2 Výzkum Slunce

V roce 1800 objevil William Herschel *infračervené záření Slunce*. Pro stanovení zářivého výkonu Slunce bylo důležité určení solární konstanty, které nezávisle na sobě uskutečnili anglický astronom John Herschel v roce 1835 a francouzský fyzik **Claudie Servis Mathias Pouillet (1790 – 1868)** v letech 1837 – 1838. Z nepřesně naměřené hodnoty solární konstanty a při neznalosti Stefanova-Boltzmannova zákona provedli odhad povrchové teploty Slunce s hodnotou 30 000 K.

V první třetině 19. století vymyslel a zkonstruoval již zmiňovaný Arago přístroj na výzkum polarizace světla – *polarimetr*. Použil ho k astronomickým výzkumům, v roce 1811 sledoval polarizaci světla Měsíce. Později zkoumal okraj slunečního disku a přesvědčil se, že světlo zůstalo bílé nepolarizované. Učinil závěr, že světlý povrch Slunce se skládá z plynu. Pochopil, že fotosféra Slunce a analogicky i hvězd je tvořena zahřátým plynem. Spektrální analýza následně za několik desetiletí tyto závěry plně potvrdila. Při pozorování slunečních zatmění Slunce v čtyřicátých letech 19. století objevil Arago nad fotosférou chromosféru.

Německý astronom **Heinrich Samuel Schwabe (1789 – 1875)** studoval maxima a minima sluneční činnosti, stanovil periodicitu na přibližně 10 roků. Švýcarský astronom **Rudolf Wolf (1816 – 1893)** v roce 1852 upřesnil *periodu sluneční aktivity*, zavedl Wolfova čísla $W = k(10g + f)$, kde k je určitý koeficient, g počet skupin slunečních skvrn a f celkový počet všech skvrn.

První pokusy o upřesnění rotace Slunce jsou spojeny s pozorováním slunečních skvrn v roce 1611, uskutečnili je již zmiňovaní Johann Fabricius a Christopher Scheiner, v dalších letech Galileo Galilei.

Anglický astronom **Richard Christopher Carrington (1826 – 1875)** v roce 1863 objevil, že perioda rotace Slunce narůstá pro větší heliocentrické šířky. V polovině 19. století zavedl motýlový diagram, podle něhož se skvrny v průběhu slunečního cyklu posouvají z vyšších heliografických šířek směrem k slunečnímu rovníku. Carrington také v roce 1859 pozoroval erupce na Slunci. Rovněž odvodil vztah pro denní úhlovou rotaci Slunce a závislost rotace na heliocentrické šířce, který později zpřesnil francouzský astronom Hervé Faye (1814 – 1902).

Četností výskytu slunečních skvrn se změnou cyklu se zabýval německý astronom **Gustav Spörer (1822 – 1895)**. Americký astrofyzik **Charles August Young (1834 – 1908)** roku 1869 dokázal, že koróna Slunce je částí atmosféry. Zavedl pojem „převracející vrstva“ mezi fotosférou a chromosférou, ve které vznikají absorpční čáry.

První tabulky vlnových délek čar ve slunečním spektru sestavil švédský fyzik **Anders Jonas Ångström (1814 – 1874)** roku 1868. Na ně navázal americký fyzik **Henry Augustus Rolland (1848 – 1901)**, který publikoval v roce 1897 identifikaci stovek absorpčních čar slunečního spektra.

Americký astronom **George Ellery Hale (1868 – 1938)** a nezávisle na něm francouzský astronom **Henri Alexandre Deslandres (1853 – 1948)** vynalezli téměř současně přístroj pro pozorování protuberancí na Slunci – *spektrohelioskop*. Vedle popisných záležitostí se rovněž rozvíjela teorie o magnetických příčinách vzniku slunečních skvrn.

Americký astronom **Herold Delos Babcock (1882 – 1968)**, zabývající se sluneční astrofyzikou, provedl první *měření magnetických polí na Slunci*.

Francouzský astronom **Pierre Jules César Janssen (1824 – 1907)** pozoroval ve chromosféře při zatmění Slunce roku 1868 spektrální čáry *nového prvku – helia*. Obdobně čáry helia sledoval anglický astronom **Joseph Norman Lockyer (1836 – 1920)**. Teprve následně, roku 1895 skotský fyzik a chemik **William Ramsay (1852 – 1916)** prokázal helium v horninách na Zemi.

Migraci slunečních skvrn v šířce v průběhu slunečních cyklů sledoval a diagramem zachytil roku 1904 anglický astronom **Edward Walter Maunder (1851 – 1928)**. Nalezl v historii minimum sluneční činnosti v letech 1645 – 1715 nazvané na jeho počest Maunderovým minimem.

Méně známým faktem je, že v letech 1900 – 1902 si **Albert Einstein (1879 – 1953)** přivydělával pozorováním slunečních skvrn a jejich statistickým zpracováním pro astronomickou observatoř ve Švýcarsku.

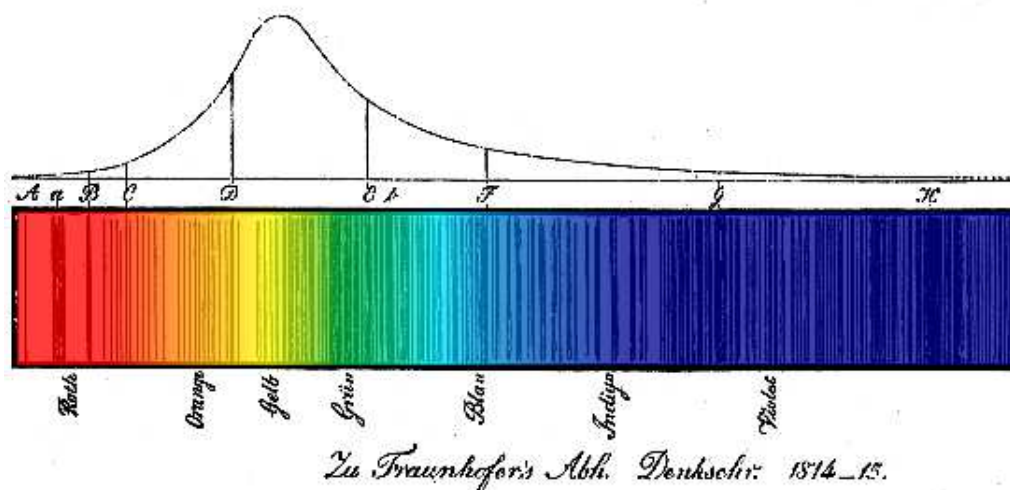
6.3 Rozvoj astrospektroskopie a teorie hvězdných atmosfér

V přímé závislosti na vývoji fyziky se od druhé poloviny 19. století začala rozvíjet astrofyzika, zabývající se fyzikálním a chemickým složením kosmických těles. Rozvoj fyziky a chemie v průběhu první poloviny 19. století vedl k rozpracování nových pozorovacích metod, jejichž aplikace umožnila studium fyzikálních a chemických vlastností kosmických těles. Byl to především rozvoj spektroskopie, objev spektrální analýzy a zákonů záření černých těles, které daly možnost získávat hlubší informace o zkoumaných kosmických tělesech.

Počátky rozpracování *metody spektrální analýzy* spadají do 17. století, rozklad paprsků světla hranolem kromě jiných popsal roku 1666 i I. Newton. Roku 1802 **William Hyde Wollaston (1766 – 1828)** zjistil ve slunečním spektru temné čáry. Jejich pozorování a zakreslení provedl **Joseph Fraunhofer (1787 – 1826)** v roce 1814. Pomocí spektroskopu připojeného k dalekohledu roku 1817 pozoroval spektra některých jasnějších hvězd, přičemž objevil jejich rozdílný vzhled. Tento závěr publikoval roku 1823.

Studiem spekter různých chemických prvků se kolem poloviny 19. století zabývali fyzikové a dospěli k zjištění, že každému prvku přísluší určité spektrum. Hlavní zásluha na vytvoření základů metody spektrální analýzy náleží **Gustavu Kirchhoffovi (1824 – 1887)** a **Robertu Wilhelmu Bunsenovi (1811 – 1889)**, kteří v *Kirchhoffových zákonech* formulovali zákony spektrální analýzy v publikaci z roku 1860 *Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen* česky *Chemická analýza z pozorování spektra*. Vložili příčinu vzniku temných absorpčních čar ve slunečním spektru. V něm objevili spektrální čáry, jejichž vlnové délky odpovídaly laboratorním vlnovým délkám pozorovaným v pozemských laboratořích. To umožnilo v druhé polovině 19. století v atmosféře Slunce identifikovat řadu chemických prvků.

Metoda spektrální analýzy se začala široce používat pro studium kosmických těles všech typů. Pro pochopení podstaty spekter měly velký význam práce již zmiňovaného Hugginse, který roku 1860 sestrojil zdokonalený spektroskop spojený s dalekohledem a pozoroval spektra kosmických těles. Při jejich studiu objevil řadu čar pozorovaných rovněž ve spektru Slunce, identifikoval nejnápadnější čáry ve spektrech Siria a Vegy s některými čarami ve spektru atomu vodíku. Roku 1864 Huggins zjistil, že spektra galaxií jsou složená



Obr. 23: Fraunhoferovy čáry ve spektru Slunce

především z absorpčních čárových spekter a liší se od spekter plyných mlhovin, jež jsou tvořena emisními čárovými spektry. Dnes víme, že spektra galaxií jsou vytvářena především spektry hvězd. Na základě Dopplerova principu formulovaného roku 1842 vypracoval a v roce 1866 poprvé použil pro hvězdu Sirius metodu určování radiálních rychlostí z posuvu spektrálních čar.

Dopplerův princip byl objeven rakouským fyzikem **Christianem Dopplerem (1803 – 1853)** za jeho působení v Praze roku 1842. Výklad jevu byl podán v publikaci *Ueber das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels* česky *O barevném světle dvojhvězd a některých dalších nebeských těles*. V ní autor podává správný výklad změny frekvence světla při pohybu zdroje. Při aplikaci jevu na dvojhvězdy se však dopustil nesprávností, přecenil velikosti radiálních rychlostí hvězd, nevzal v úvahu intenzitu ultrafialové a infračervené oblasti spojitého spektra a hvězdám připsal libovolnou barvu.

Časově pozdější aplikace interpretace posuvu spektrálních čar prostřednictvím Dopplerova jevu na jiná kosmická tělesa vedla k určování rychlostí slunečních erupcí, oběžných rychlostí dvojhvězd a Saturnových prstenců, rychlostí pohybu galaxií atd. Roku 1890 uskutečnil přesná měření radiálních rychlostí mlhoviny v Orionu a 13 planetárních mlhovin americký astronom J. E. Kiler (1857 – 1900).

Rozvoj spektroskopie umožnil v druhé polovině 19. století systematizaci spekter hvězd podle charakteristických rysů. První návrh rozdělení spekter jasných hvězd na tři typy podal roku 1862 americký astronom **Lewis Morris Rutherford (1816 – 1892)**. Podrobnější klasifikaci na základě studia tří set spekter hvězd vypracoval italský astronom **Angelo Secchi (1818 – 1878)** v letech 1863 – 1868. Rozlišoval čtyři základní typy spekter. První patřil hvězdám, v jejichž spektru se nacházely výrazné intenzivní absorpční čáry, podle barvy to byly bílé hvězdy, příkladem byla Vega. Početnými úzkými čarami kovů se vyznačoval druhý typ, byly to žluté hvězdy, příkladem bylo Slunce. Třetí typ zahrnoval červené hvězdy s pásy ve spektrech, například Antares. Pokud existovaly u hvězd široké pásy ve spektru, podmíněné absorpcí sloučenin uhlíku, byly zařazeny jako tzv. čtvrtý typ.

Výše uvedené klasifikace byly prvními pokusy o systematizaci hvězdných spekter. Byly založeny na shodnosti spekter podle vnějšího vzhledu, podle určitých charakteristických znaků, například přítomnosti čar a širokých pásů v určité oblasti spektra.

Další rozpracování spektrální klasifikace hvězd již na teplotním základě provedl německý astronom **Hermann Carl Vogel (1841 – 1907)**, který rozdělil hvězdy podle vzhledu spekter do tří tříd:

1. Pro hvězdy s vysokou teplotou mohou čáry kovů obsažených v atmosférách vyvolat pouze slabou absorpci, tudíž jsou nevýrazné respektive je nemůžeme pozorovat vůbec. K této třídě patří bílé hvězdy.
2. Ve druhé třídě byly žluté hvězdy, v jejichž atmosférách obsažené kovy způsobovaly výrazné absorpční čáry, jako v případě Slunce.
3. Třetí třídu tvořily červené hvězdy, jejichž teplota byla nízká, takže v atmosférách mohly existovat sloučeniny. Spektra byla charakterizována větším či menším počtem širokých absorpčních pásů.

Vogel společně s německým astronomem G. Millerem (1851 – 1925) uveřejnil roku 1883 první spektroskopický katalog hvězd pod názvem *Spektroskopische Beobachtungen der Sterne bis einschliesslich 7,5* česky *Spektroskopická pozorování hvězd do hvězdné velikosti 7,5 mag.* Autoři vizuálně prostudovali přes 4 000 spekter hvězd. Od roku 1888 začal Vogel systematicky určovat radiální rychlosti hvězd za pomoci fotografování hvězdných spekter, sestavil katalog radiálních rychlostí padesáti dvou hvězd.

Vedle spektroskopie a v kombinaci s ní se v druhé polovině 19. století začaly používat další fyzikální a chemické metody, fotometrie a fotografie. Průkopníkem využívání fotografických postupů v astronomii byl již zmiňovaný americký astronom Henry Draper, který roku 1872 získal první *fotografie spekter hvězd*, na nichž byly zachyceny absorpční čáry. Pomocí suché fotografické emulze získával spektra jasných hvězd od roku 1879. Základní práce ve spektroskopii a fotometrii při sestavování fotometrických a spektroskopických katalogů Harvardské observatoře vedl americký astronom **Edward Charles Pickering (1846 – 1919)**.

Zdokonalil metodiku vizuální fotometrie, zavedl standardy – vhodné hvězdy pro stanovení škály hvězdných velikostí. V osmdesátých letech 19. století přistoupil Pickering k hromadnému používání fotografie, pro získávání spektrogramů hvězd používal objektivní hranol. Roku 1884 byl zveřejněn katalog Harvardské fotometrie, původně obsahoval údaje o čtyřech tisících hvězdách, později byl doplňován, roku 1913 soubor katalogů již obsahoval údaje o více než dvou miliónech hvězd pozorovaných na celé obloze. V letech 1886 – 1889 byl sestaven a roku 1890 vydán tzv. *HD katalog* hvězdných spekter na paměť **Henryho Drapera**, jenž obsahoval spektra 10 351 hvězd ze severní oblohy. Pro jejich rozlišování byla v katalogu používána Secchiho klasifikace, která byla dále rozvedena. Původní čtyři základní typy spekter byly dále rozčleněny na celkem 19 tříd. Počátkem století v roce 1901 došlo k omezení počtu tříd, některé byly vzájemně spojeny. Byla zavedena *spektrální klasifikace* (W) – O – B – A – F – G – K – M a relativně méně se vyskytující třídy R, N, S.

Společně s americkou astrofyzičkou **Annie Jump Cannon (1863 – 1941)** připravil Pickering fundamentální *Harvardský katalog hvězdných spekter*, který byl vydán v letech 1918

– 1924 a obsahoval spektra téměř dvě stě třiceti tisíc hvězd ze severní a jižní oblohy. Při studiu spekter objevil Pickering roku 1889 existenci spektroskopických dvojhvězd.

Pro spektroskopii byl důležitý objev série čar vodíku učiněný **Johannem Jacobem Balmerem (1825 – 1898)** roku 1885 v práci *Notiz über die Spectrallinien des Wasserstoffes* česky *Poznámky k spektrálním čarám vodíku*. Vodíkové čáry Balmerovy série sehrály důležitou roli při tvorbě spektrální klasifikace, neboť je můžeme pozorovat v optické oblasti spektra.

Současně se spektroskopií se rozvíjela metoda fotografické fotometrie. V letech 1910 – 1912 byl zveřejněn první katalog hvězdných velikostí **Karlem Schwarzschildem (1873 – 1916)** – *Aktinometrie der Sterne* česky *Měření zářivé energie hvězd*, u nás známé rovněž pod názvem *Göttingenská fotometrie*. Počátky fotoelektrické fotometrie spadají do období 1906 – 1907.

Stanovení povrchové teploty hvězd umožnila znalost zákonů záření černých těles, zejména Stefanova – Boltzmannova zákona, experimentálně objeveného **Josefem Stefanem (1835 – 1893)** roku 1879 a teoreticky odvozeného **Ludvigem Eduardem Boltzmannem (1844 – 1906)** roku 1884. Zákon vyjadřuje důležitou závislost mezi celkovou vyzářenou energií a efektivní teplotou černého tělesa.

Záření hvězd bylo nejprve studováno u Slunce, neboť jde o jedinou hvězdu, jejíž povrch může být detailně zkoumán. První teorie stavby atmosféry a spekter hvězd vznikly právě na základě výzkumu Slunce. S menšími změnami byly následně aplikovány pro další hvězdy. Anglický astrofyzik Ralph Allen Sampson (1866 – 1939) v roce 1893 uveřejnil myšlenku, že přenos energie zářením může převyšovat přenos energie konvekcí. Tento závěr převzal později německý astrofyzik působící v Anglii **Arthur Schuster (1851 – 1934)**. V publikacích z let 1902 – 1905 ideu dále rozpracoval. Předpokládal, že ve vnějších vrstvách hvězd záření přicházející z nitra je jednak pohlcováno atomy a jednak částečně izotropně vyzářováno na stejné vlnové délce procesem rozptylu. Také je částečně vyzářováno na všech vlnových délkách v souladu s Plackovým zákonem – procesem pravé absorpce. Zásadní význam má Schusterova práce z roku 1905 *Radiation through a foggy atmosphere* česky *Záření procházející přes mlžnou atmosféru*.

Schuster společně s Schwarzschildem vypracovali počátkem 20. století teorii stavby atmosféry a původu spektra hvězd. Mimo jiné vyložili *vznik Fraunhoferových čar ve spektru Slunce*. Roku 1906 zavedl Schwarzschild koncepci *zářivé rovnováhy v atmosférách hvězd*, podle níž se přenos energie v atmosférách uskutečňuje především zářením, přenos energie konvekcí je zanedbatelný.

První kvantitativní měření teplot hvězd uskutečnili němečtí astronomové Johannes Wilsing (1856 – 1943) a Julius Scheiner (1858 – 1914) a francouzský astronom Charles Nordmann (1881 – 1940) v roce 1909. Porovnávali závislosti mezi vyzářováním hvězd na různých vlnových délkách s teoretickými křivkami propočítanými z Planckova zákona záření černých těles.

Další rozvoj teorie hvězdných atmosfér byl umožněn vývojem atomové fyziky, Boltzmannovou teorií excitace a Bohrovým modelem stavby atomu z roku 1913. Schwarzschild v roce 1914 rozpracoval fyzikální rozlišení mezi rozptylovými a absorpčními procesy, našel elegantní řešení integrální rovnice přenosu záření. Norský fyzik Johan Peter Holtsmark (1894 – 1975) publikoval první studie *rozšíření vodíkových čar tlakem*, který je podstatný pro hvězdné atmosféry hvězd hlavní posloupnosti.

V letech 1920 – 1921 indický fyzik a astrofyzik **Megnad Saha (1893 – 1956)** objasnil *závislost stupně ionizace na teplotě a tlaku*. Nejprve zkoumal sluneční fotosféru a chromosféru, nalezl stupeň ionizace vápníku, který se vyznačuje intenzivními čarami. Následně v dalším roce aplikoval teorii ionizace na harvardskou posloupnost spektrálních tříd v práci z roku 1921 *On a physical theory of stellar spectra* česky *O fyzikální teorii hvězdných spekter*. Vypracovanou teorii ionizace aplikoval na studium hvězdných atmosfér, stupeň ionizace v atmosférách je podle Sahovy rovnice funkcí teploty a tlaku.

Sahova teorie umožňovala kvantitativní propočít intenzity spektrálních čar, která je určována fyzikálními podmínkami ve hvězdných atmosférách. Vyložila intuitivně dříve sestavenou spektrální posloupnost předchozích astronomů pozorovatelů. Podrobnější výsledky při určování intenzity spektrálních čar ve hvězdách Sahovou metodou dosáhli angličtí astrofyzici **Ralph Howard Fowler (1889 – 1944)** a **Edward Arthur Milne (1896 – 1950)**. Posledně uvedený v letech 1921 – 1928 zkoumal zářivou rovnováhu v hvězdných atmosférách a odvodil mnoho důležitých výsledků týkajících se rozdělení teploty a vznikajícího spektra pro idealizovaný případ šedé atmosféry za předpokladu *lokální termodynamické rovnováhy*. Jeho závěry matematicky zpřesnil a detailně propočítal německý matematik Heinz Hopf (1894 – 1971). Pro studium přenosu záření zavedl *střední hodnotu opacity* norský fyzik **Stein Rosseland (1894 – 1985)**, dnes hovoříme o *Rosselandově střední opacitě*, zavedené v práci z roku 1924 *Note on the absorption of radiation within a star* česky *Poznámka k absorpci záření z hvězdy*.

Pro analýzu profilů spektrálních čar měla zásadní význam Milneho publikace z roku 1928 *The theoretical contours of absorption lines in stellar atmospheres* česky *Teoretické profily absorpčních čar v hvězdných atmosférách*.

V letech 1930 – 32 pokračoval Hopf v hledání exaktního řešení zářivé rovnováhy v šedé atmosféře. Roku 1931 irský matematik a astronom **William Hunter McCrea (1904 – 1999)** vytvořil první model hvězdných atmosfér přímou numerickou integrací příslušných diferenciálních rovnic. Chandrasekhar v letech 1935 – 1937 rozpracoval problém *pokryvkového jevu* spektrálních čar.

Německý astrofyzik **Albrecht Unsöld (1905 – 1995)** roku 1928 potvrdil na základě *analýzy profilů spektrálních čar vodíku*, že se jedná o nejrozšířenější prvek ve Slunci. Později počátkem čtyřicátých let začal studovat stavbu atmosfér prostřednictvím modelů atmosfér vycházejících z předpokladu platnosti lokální termodynamické rovnováhy, za pomoci srovnání teoretických čárových profilů s profily získanými proměřováním vysoce disperzních spekter. Chandrasekhar a další vytvořili metodu diskretních souřadnic k řešení rovnice přenosu.

V třicátých letech belgický astronom žijící v Holandsku **Marcel Gilles Josef Minnaert (1893 – 1970)** použil ke kvantitativnímu stanovení chemického složení hvězd *křivky růstu*. Užitím Chandrasekharových teoretických výsledků americký astrofyzik Marshall Wru-bel (1924 – 1968) propočítal exaktní křivky růstu pro absorpční čáry v působící v Anglii zjednodušeném *Milneově -Eddingtonově modelu* vzniku spektrálních čar.

Další teoretické práce o hvězdných atmosférách následovaly v třicátých letech 20. století, jejich autory byli již zmiňovaní Milne, Unsöld a dále anglický astrofyzik **Alfred Fowler (1868 – 1940)** respektive americký astrofyzik **Henry Norris Russell (1877 – 1957)**.

Studiem hvězdných spekter bylo v dvacátých létech zjištěno, že změna v čárových spektrech hvězd podél spektrální posloupnosti je podmíněna především teplotou a tlakem v atmosférických vrstvách, kde charakteristické čáry vznikají. Relativní intenzita spektrálních čar různých prvků závisí rovněž na obsahu prvků v atmosférách. Vznikl nový směr astrofyzikálního výzkumu, kvantitativní studium chemického složení atmosfér hvězd.

První určení obsahu chemických prvků na Slunci provedl roku 1929 Russell v práci *On the composition of the Sun's atmosphere* česky *O složení atmosféry Slunce*. Stanovil množství vodíku a helia mnohem vyšší než ostatních prvků, což se nepředpokládalo. V roce 1933 Russell provedl podrobnou teoretickou analýzu Fraunhoferových čar se započtením změn koeficientu absorpce s vlnovou délkou.

Prostřednictvím aplikace teorie excitace a ionizace atomů studovala fyzikální podmínky v hvězdných atmosférách americká astrofyzička původem z Anglie **Cecilie Helene Payen-Gaposchkin (1900 – 1979)**. Při srovnání obsahu chemických prvků u velkého počtu hvězd a Slunce dospěla k závěru, že relativní obsah prvků je zhruba konstantní a příliš se neodlišuje od chemického složení zjištěného u Slunce. Základní význam pro teorii hvězdných atmosfér měly její práce *Stellar Atmospheres* česky *Hvězdné atmosféry* z roku 1925 a *Stars of High Luminosity* česky *Hvězdy vysoké svítivosti* publikované v roce 1930.

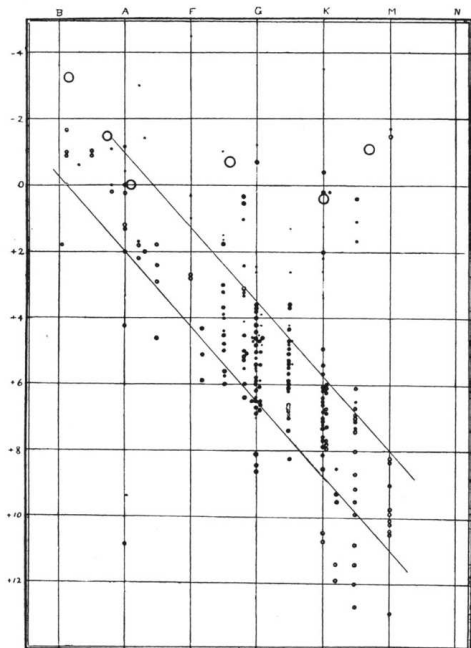
Identifikace čar ve spektrech kosmických těles se podstatně zlepšila zásluhou teoretického studia a laboratorního výzkumu stavby atomů a energetických hladin. Úspěchem bylo objasnění intenzivních zelených emisních čar pozorovaných ve spektrech plynných mlhovin a rovněž intenzivních emisních čar sledovaných ve spektru sluneční koróny. Byly připisovány neznámým chemickým prvkům – nebuliu v plynných mlhovinách a koróniu v koróně Slunce. Po přepočtu vlnových délek patřících zakázaným spektrálním čarům v extrémně zředěném prostředí zjistil americký astrofyzik Ira Sprague Bowen (1898 – 1973), že v případě „nebulia“ jde o čáry především O II, O III, N II a dalších ionizovaných atomů. Obdobně německý astrofyzik Walter Robert Wilhelm Grotrian (1890 – 1954) roku 1941 propočítal, že čáry připisované neznámému prvku koróniu patří Fe X, Fe XIV a dalším ionizovaným atomům například Ni, Cd.

6.4 Historie H – R diagramu

Shromáždění rozsáhlého souboru spekter hvězd a jejich systematizace podle spektrálních tříd umožnily na počátku 20. století zkoumat statistické závislosti mezi spektrálními třídami a dalšími charakteristikami hvězd získávanými z fotometrických pozorování (např. pozorovanou hvězdnou velikostí, absolutní hvězdnou velikostí a zářivým výkonem).

Na skutečnost, že hvězdy s povrchovou teplotou obdobnou Slunci případně nižší se dělí na dvě skupiny hvězd výrazně se odlišující zářivými výkony první upozornil dánským astronom **Ejnar Hertzsprung (1873 – 1967)**. Ve své publikaci *Zur Strahlung der Sterne* česky *Záření hvězd* v roce 1905 uvádí v tabulkové podobě *rozdělení hvězd na posloupnost trpaslíků a obrů*. I další Hertzsprungova práce z roku 1907 se týkala rozdělení hvězd na dvě skupiny (hlavní posloupnost, obři). Pokus o rozčlenění poloh hvězd na plochu diagramu, nikoliv však v současné podobě, ale jako závislost $\lambda_{ef} = f(m_v)$, provedl Hertzsprung roku 1911 a Hans Rosenberg (1879 – 1940). Interpretaci diagramu jako závislosti absolutní hvězdné

velikosti a spektrální třídy přinesl Russell až ve svých přednáškách roku 1913. Uvědomil si, že rozdíly v zářivých výkonech hvězd jsou v korelaci s jejich spektrální třídou. Roku 1913 sestrojil diagram závislosti absolutní hvězdné velikosti na spektrální třídě pro všechny hvězdy s tehdy známými paralaxami – viz obr. 24. Publikace o tomto výsledku *Relations between the spectra and other characteristics of the stars* česky *Vztahy mezi spektry a jinými charakteristikami hvězd* je však až z roku 1914.



Obr. 24: Graf závislosti absolutní hvězdné velikosti na spektrální třídě sestrojený Russellem

V letech 1913 – 14 na základě H – R diagramu zformuloval Russell zdokonalenou teorii vývoje hvězd, podle níž je základním zdrojem energie hvězd jejich gravitační potenciální energie uvolňovaná při smršťování. Celkový vývoj hvězd je pak určován nepřetržitým zvětšováním průměrné hustoty hvězd.

Úplnější H – R diagram, zahrnující všechny hvězdy, pro které byly známy povrchové teploty a absolutní hvězdné velikosti, byl sestrojen později po získání potřebných charakteristik hvězd. Bylo zjištěno podrobnější rozdělení hvězd do posloupností na H – R diagramu: hlavní posloupnost, obři, veleobři, podobní, podtrpaslíci, bílí trpaslíci atd.

V důsledku výběrového efektu byly lépe pozorovatelné hvězdy vysokých zářivých výkonů, proto pro získání představ o relativním počtu hvězd v jednotlivých posloupnostech byly sestrojeny H – R diagramy pro hvězdy do určitých vzdáleností od Slunce. První takové diagramy do vzdálenosti 5 pc sestavil holandský astronom **Peter van de Kamp (1901 – 1955)**.

Od dvacátých let 20. století začal být H – R diagram využíván při studiu hvězdokup. Vycházelo se z předpokladu, že všechny hvězdy hvězdokupy se nachází přibližně ve stejné vzdálenosti od Slunce, proto není nutné určovat jejich absolutní hvězdné velikosti. H – R diagram tak lze sestrojit jako závislost pozorované hvězdné velikosti a povrchové teploty respektive barvy hvězd.

Novější H – R diagramy, zachycující závislost barva – absolutní hvězdná velikost byly sestrojeny **Heroldem Lesterem Johnsonem (1921 – 1980)**, Morganem a dalšími pro různé hvězdokupy. Srovnání takových diagramů bylo použito pro stanovení relativních vzdáleností od Slunce a určení skutečných rozdílů na hlavních posloupnostech různých hvězdokup, což umožnilo ověřovat teorie vývoje hvězd.

Trümpler od roku 1925 studoval H – R diagramy většího počtu otevřených hvězdokup. Do tehdejší doby se předpokládalo, že vývoj hvězd začíná od stadia červených obrů a teprve v dalším vývoji se hvězdy měly přesouvat na H – R diagramu doleva a následně podél hlavní posloupnosti směrem dolů. Při studiu Trümpler odhalil význam počáteční hmotnosti pro vývoj hvězd a dospěl k závěru, že existují rozdíly mezi hmotnostmi hvězd ve hvězdokupách odlišných typů.

Práce Trümplera podstatně změnilы teorie vývojových křivek na H – R diagramu. Astrofyzika postupně dospěla k současné koncepci vývoje od hlavní posloupnosti k oblasti obrů. Takto předpokládaný vývoj hvězd znamená, že mnohé otevřené hvězdokupy jsou relativně mladými hvězdnými soustavami.

Dánský astrofyzik **Bengt Georg Daniel Strömngren (1908 – 1987)** vypracoval *teorie vývoje hvězd* vycházející z předpokladu, že zdrojem energie hvězd jsou termonukleární reakce, přestože přesný sled reakcí mu ještě znám nebyl. Podle Strömngrena se hvězdy při vývoji přemísťují na H – R diagramu v pravo vzhůru, od hlavní posloupnosti k oblasti obrů. Úhel sklonu vývojové křivky od hlavní posloupnosti závisí podle Strömngrena na obsahu vodíku ve hvězdách.

V roce 1937 srovnával americký astrofyzik holandského původu **Gerhard Peter Kuiper (1905 – 1973)** na diagramu spektrum – absolutní hvězdná velikost pro otevřené hvězdokupy teoretické výpočty hvězdného vývoje provedené Strömngrenem s výsledky získanými pozorováním. Takto sestrojené diagramy měly velkou důležitost pro pochopení vývoje hvězd.

Přesné označení posloupnosti a jednoznačné určení polohy, na níž se daná hvězda v H – R diagramu nachází, zavedl roku 1943 ke spektrální třídě Morgan římskou číslicí, charakterizující třídu svítivosti.

Roku 1957 upozornil americký astrofyzik **Allan Rex Sandage (1926)** na další interpretaci H – R diagramu. Při sestrojení souhrnného diagramu pro větší počet hvězdokup lze z bodu odklonu od hlavní posloupnosti a rozložení hvězd na H – R diagramu srovnáním stanovit stáří jednotlivých hvězdokup. Čím je hvězdokupa starší, tím níže leží na hlavní posloupnosti místo odklonu.

6.5 Stavba nitra hvězd

Astrofyzika se od počátku 20. století začala zabývat studiem nitra hvězd. Teoretické podklady připravili v druhé polovině 19. století německý fyzik August Ritter (1826 – 1908) a americký fyzik Jonathan Homer Lane (1819 – 1880) popsáním vlastností plynu prostřednictvím polytropní závislosti. Posledně uváděné představy z roku 1870 vycházely z předpokladu přenosu energie v nitru hvězd konvekcí.

První modely hvězd sestrojil švýcarský fyzik a astrofyzik **Robert Emden (1862 – 1940)**. Aplikoval závěry termodynamiky na plynné koule – hvězdy, doplnil *teorii polytropní rovnováhy* vytvářené působením gravitace a tlaku plynu. Emdenem zkoumané polytropní koule dávaly řadu hvězdných modelů s postupně se zvětšující koncentrací hvězdné látky ke středu. Teoretické modely a vypočítané tabulky jsou shrnuty v práci *Gaskugeln* česky *Plynné koule* z roku 1907. Laneova – Emdenova funkce umožňuje z tabulkových údajů pro danou relativní vzdálenost od středu plynné koule vypočítat hodnoty funkce pro libovolnou další vzdálenost. To je velmi výhodné pro výpočet rozdělení teploty, hustoty a tlaku ve hvězdách.

Základní výsledky ve výzkumu nitra hvězd podal anglický astrofyzik **Artur Stanley Eddington (1882 – 1944)**. Vypracoval první ucelenou *teorii stavby nitra hvězd*, přestože mu nebyly známy fyzikální procesy vedoucí k uvolňování energie. Při tvorbě teorie vyšel z původní myšlenky, že přenos energie v nitru hvězd se uskutečňuje zářením. Propočítal

fyzikální podmínky v nitru hvězd, chování ideálního plynu při vysokých hustotách a teplotách za úplné ionizace. Studium absorpce záření odhalil význam koeficientu opacity pro stavbu nitra hvězd. Z podmínek *zářivé a mechanické rovnováhy* odvodil roku 1924 *vztah hmotnost – zářivý výkon* v publikaci *On the relation between the masses and luminosities of the stars* česky *O vztahu mezi hmotností a zářivým výkonem hvězd*. Ukázal na neudržitelnost gravitační kontrakce jako hlavního zdroje energie hvězd. Výsledky shrnul v knize *The Internal Constitution of the Stars* česky *Stavba nitra hvězd* z roku 1926.



Obr. 25: Artur Stanley Eddington

Následně astrofyzika začala zkoumat lokalizaci energetických zdrojů ve hvězdách. V roce 1934 anglický matematik a astrofyzik Thomas George Cowling (1906 – 1990) propočítal první modely s konvektivními jádry, které zachycovaly stavbu hvězd horní části hlavní posloupnosti.

Teorii Eddingtona zobecnil Chandrasekhar, který studoval vlastnosti plyných koulí jako důsledek obecných fyzikálních zákonů, zejména se zabýval vlastnostmi hvězdné látky při vysokých teplotách a tlacích v nitru hvězd. Eddingtonovi se nepodařilo v rámci jeho teorie vyložit stavbu bílého trpaslíka – hvězdy 40 Eridanus B. Chandrasekhar v letech 1930 – 1932 vytvořil teorii bílých trpaslíků, objasnil rovnováhu v jejich nitru na základě stavové rovnice pro elektronově degenerovaný plyn. Při tom navazoval na výzkum Ralpha Howarda Fowlera, který roku

1926 dokázal, že plyn při vysokých hustotách existujících v nitru hvězd je degenerován a na fyzikální stav elektronů má zásadní vliv Pauliho princip. Roku 1931 publikoval Chandrasekhar v práci *The maximum mass of ideal white dwarfs* česky *Maximální hmotnost ideálních bílých trpaslíků* výpočty *maximální hmotnosti bílého trpaslíka*, nyní nazývané Chandrasekharova mez. Výsledky výzkumů stavby nitra hvězd vycházející z termonukleárních reakcí vyložil Chandrasekhar v učebnici *An Introduction to the Study of Stellar Structure* česky *Úvod do studia stavby hvězd* v roce 1939.

Při přenosu energie v nitru hvězd hraje důležitou roli opacita. Holandský fyzik Hendrik Kramers (1894 – 1952) v roce 1924 odvodil vztah pro *závislost opacity na hustotě a teplotě*. Německý astrofyzik Heinrich Vogt (1890 – 1968) v roce 1926 a nezávisle na něm Russell roku 1927 objasnili *význam hmotnosti a chemického složení pro řešení rovnic stavby hvězd*.

Podmínku *vzniku konvektivní nestability* v hvězdné látce odvozenou Schwarzschildem roku 1906 doplnil v roce 1947 belgický astrofyzik Paul Ledoux (1914 – 1988) *závislostí na chemickém složení*. Přispěl rovněž k teorii radiálních a neradiálních pulsací hvězd.

6.6 Zdroje energie hvězd, vznik prvků

Základním problémem výzkumů stavby nitra hvězd ve dvacátých a třicátých létech 20. století bylo určení zdrojů energie hvězd. Správně bylo předpokládáno, že energie je uvolňována při termonukleárních reakcích, ale přesný průběh reakcí znám nebyl. Po zamítnutí

nesprávných hypotéz předpokládajících, že hvězdy při vývoji výrazně ztrácejí hmotnost byla navržena za základní zdroj energie přeměna prvků.

Koncem dvacátých roků bylo dokázáno, že v centrálních oblastech Slunce jsou teploty dostatečně vysoké, aby zde mohly probíhat termonukleární reakce. Německý fyzik Fritz Georg Houtermans (1903 – 1966) a anglický fyzik působící v Göttingenu Robert d'Escourt Atkinson (1898 – 1982) *aplikovali teorii tunelového jevu* na termonukleární reakce, provedli výpočet reakcí mezi rozdílnými prvky za fyzikálních podmínek existujících v nitru hvězd. V publikaci *Zur Frage der Aufbaumöglichkeit der Elemente in Sternem* česky *K otázce možného vzniku prvků ve hvězdách* dokázali, že při teplotách řádově 20 mil. stupňů mohou probíhat termonukleární reakce, protony pronikat do jader lehkých prvků (lithia, dusíku). Propočítali mimo jiné i výšku potenciálové bariéry a pravděpodobnost průchodu protonů.

V letech 1937 – 1940 ruský fyzik žijící od roku 1934 v USA **Georgij Antonovič Gamov – George Gamow (1904 – 1968)** rozpracoval ucelenou *teorii vývoje hvězd* založenou na termonukleárních reakcích. Kvantitativní teorie termonukleárních zdrojů hvězdné energie, především CNO cyklu, byla publikována roku 1937 německými fyziky **Carlem Friedrichem Freiherrm von Weizsäckerem (1912 – 2007)** a **Hansem Albrechtem Bethem (1906 – 2005)** žijícím v USA.

Původní myšlenka uskutečnění protonových reakcí pochází z roku 1938 a jejím autorem byl americký fyzik Charles Louis Critchfield (1910 – 1994). Konkrétní průběh reakcí p-p řetězce byl objeven až počátkem padesátých let americkým astrofyzikem estonského původu **Isadore Epsteinem (1919 – 1995)** a americkým astrofyzikem **Johnem Beverly Okem (1928 – 2004)**.

Roku 1952 původem rakouský fyzik později žijící v USA **Edwin Ernest Salpeter (1924)** vyložil reakci 3α , která probíhá v nitrech hvězd ve stadiích vývoje po opuštění hlavní posloupnosti.

V Severním Irsku působící původem estonský astronom Ernst Julius Öpik (1893 – 1985) v roce 1938 objasnil pomocí nárůstu centrální teploty přechod hvězd z hlavní posloupnosti do oblasti červených obrů.

Další výklad vývoje hvězd je spojen se jménem amerického astrofyzika německého původu **Martina Schwarzschilda (1912 – 1997)**. V padesátých létech za spolupráce astrofyzika estonského původu Richarda Härra (1906 – 1996) propočítal *modely červených obrů*, hvězd s nestejnorodým chemickým složením, charakteristickým pro pozdní vývojová stadia. Společně se Sandagem vyložil odchod hvězd z hlavní posloupnosti do oblasti obrů prostřednictvím modelu *vodíkového slupkového zdroje a izotermického jádra*, které se smršťuje. Svoji teorii vývoje hvězd Schwarzschild shrnul roku 1958 v knize *Structure and Evolution of the Stars*, česky *Stavba a vývoj hvězd*. V průběhu šedesátých let byly výpočty upřesněny při použití tabulek opacit propočítaných americkým astrofyzikem Arthurem Nelsonem Coxem (1927) pro podmínky v nitru hvězd.

Roku 1959 uveřejnil americký astrofyzik **Louis George Henyey (1910 – 1970)** výpočetní metodu pro řešení rovnic stavby hvězd, nyní nazývanou na jeho počest Henyeyho metoda, která je vhodná pro počítače a aplikovatelná pro široký rozsah fyzikálních podmínek v nitru hvězd v průběhu jejich vývoje.

Japonský astrofyzik **Chushiro Hayashi (1920)** publikoval v roce 1961 výpočty vývoje hvězd při příchodu na hlavní posloupnost, za předpokladu uplatnění konvekce v jejich nitru.

Na Gamovovu teorii vzniku chemických prvků z konce čtyřicátých roku navázali americký astrofyzik **William Alfred Fowler (1911 – 1995)** a angličtí astrofyzici **Fred Hoyle (1915 – 2001)**, Eleanor Margaret Peachey Burbidge (1919) a Geoffrey Donald Burbidge (1925), kteří vytvořili ucelenou teorii o původu chemických prvků ve vesmíru. Shrnutím je práce *Synthesis of the Elements in Stars* česky *Syntéza prvků ve hvězdách* v roce 1957. V ní vyložili *vznik prvků až po železo při termionukleárních reakcích* a dokázali, že vznik těžších prvků než železo probíhá při reakcích neutronů s jádru skupiny železa.

V těsné návaznosti na poznatky moderní atomové fyziky se rozvíjel výzkum supernov. V roce 1919 švédský astrofyzik Knut Lundmark (1889 – 1958) vyslovil myšlenku o možných explozích supernov v Galaxii, k čemuž dospěl studiem záznamů historických supernov. Švýcarský astronom **Fritz Zwicky (1898 – 1974)** a Walter Baade, oba žijící v USA, navrhli ideu o *vzniku neutronových hvězd* při explozích supernov.

Schéma vzniku a vývoje astrofyziky

J. Fraunhofer (1787 – 1826)
čárové spektrum Slunce

W. Huggins (1824 – 1910)
čárová spektra kosmických
těles, určování radiálních
rychlostí

A. Secchi (1818 – 1910)
klasifikace spekter hvězd
podle vnějšího vzhledu

H. C. Vogel (1841 – 1907)
klasifikace spekter hvězd
na teplotním základě

H. Draper (1837 – 1882)
fotografická spektroskopie

E. Ch. Pickering (1846 – 1919)
A. J. Cannon (1863 – 1941)
spektrální klasifikace hvězd
Harvardský katalog spekter

A. S. Eddington (1882 – 1944)
stavba nitra hvězd
vztah hmotnost – zářivý výkon

S. Chandrasekhar (1910 – 1995)
stavba bílých trpaslíků

H. Bethe (1906 – 2005)
C. Weizsäcker (1912 – 2007)
kvantitativní teorie termonukleárních
zdrojů energie hvězd

W. A. Fowler (1911 – 1995)
F. Hoyle (1915 – 2001)
E. M. Burbidgeová (1919)
G. R. Burbidge (1925)
vznik chemických prvků

Ch. Doppler (1803 – 1853)
Dopplerův jev

G. Kirchhoff (1824 – 1887)
R. W. Bunsen (1811 – 1889)
zákony spektrální analýzy

A. Einstein (1879 – 1955)
speciální teorie relativity

7 Extragalaktická astronomie a kosmologie

7.1 Extragalaktická astronomie

Myšlenka, že Galaxie je jednou ze spirálních mlhovin, byla vyzdvižena již v polovině 19. století. Astronomická fakta však pro její prokázání chyběla, neboť nebyly přesně známy metody určování vzdáleností hvězdokup a mlhovin.

Jako jedna z prvních se jimi zabývala americká astrofyzička původem ze Skotska **Williamina Paton Fleming (1857 – 1911)**, která pochopila význam proměnných hvězd – cefeid pro stanovení vzdáleností. Od roku 1901 prováděla jejich výzkum fotografickou metodou, v roce 1907 uveřejnila v práci *A Photographic Study of Variable Stars* česky *Fotografická studie proměnných hvězd* měření proměnnosti 222 cefeid.



Obr. 26: Henrietta Swan Leavitt

Na její výsledky navázala roku 1908 americká astrofyzička **Henrietta Swan Leavitt (1868 – 1921)**, která studovala cefeidy v Magellanových mračnech. Výsledky shrnula v práci *1777 variables in the Magellanic Clouds* česky *1777 proměnných hvězd v Magellanových oblacích*. Roku 1912 stanovila společně s Pickeringem závislost perioda – zářivý výkon pro cefeidy v publikaci *Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud* česky *Perioda 25 proměnných hvězd v Malém Magellanově oblaku*. Za předpokladu, že absolutní hvězdná velikost obdobných typů cefeid, tedy i těch v Malém Magellanově oblaku je stejná, byla Hertzsprungem v roce 1913 stanovena vzdálenost této galaxie.

Od roku 1912 již zmiňovaný americký astrofyzik Slipher systematicky určoval ze spekter radiální rychlosti v tehdejší terminologii extragalaktických mlhovin (galaxií). Zjistil rychlosti stovky až tisíce kilometrů ze sekundu, při čemž téměř všechny objekty se od nás vzdalovaly. To vyvolalo pozornost dalších astrofyziků, jmenujme americké astrofyziky **Miliona Humasona (1891 – 1972)** a již zmiňovaného Mayalla.

Pro definitivní pochopení podstaty vnějších mlhovin měla zásadní význam tzv. Velká debata v dubnu 1920 ve Washingtonu. Hlavními jejími protagonisty byli **Heber Doust Curtis (1872 – 1942)** a **Harlow Shapley (1885 – 1972)**.

Posledně jmenovaný výzkumem hvězd RR Lyra, krátkoperiodických cefeid s periodou pulsace (0,2 – 1,2) dne, stanovil vzdálenosti více než devadesáti kulových hvězdokup, ve kterých se nacházely. Interval určených vzdáleností dosahoval (6 – 50) kpc, jejich prostorové rozložení vytvářelo sféricky symetrickou soustavu. Střed této soustavy ležící ve směru souhvězdí Střelce, byl podle Shapleyho totožný se středem celé naší Galaxie, Slunce leželo vzdáleno od jejího středu 15 kpc. K přecenění rozměrů Galaxie Shapleym došlo v důsledku chybného předpokladu přibližně 4krát větší jasnosti krátkoperiodických cefeid, než mají ve skutečnosti. Rovněž nesprávná byla jeho myšlenka, že spirální mlhoviny se neskládají z hvězd, nýbrž mají plynnou povahu, představují pouze okrajové objekty.

Naopak Curtis zpochybňoval stanovení vzdáleností kulových hvězdokup, neboť pozorované žluté a červené hvězdy v nich považoval za trpaslíky hlavní posloupnosti, nikoliv krátkoperiodické cefeidy. Curtis se spíše přikláněl ke Kapteynově modelu Galaxie, ve kterém Slunce leželo v blízkosti středu Galaxie. Představy Curtise o podstatě spirálních mlhovin a jejich analogii s naší hvězdnou soustavou však byly velmi blízké reálné skutečnosti.

Na základě tehdy dostupných astronomických informací nebylo možné jednoznačně rozhodnout o správnosti řady přednesených tvrzení.



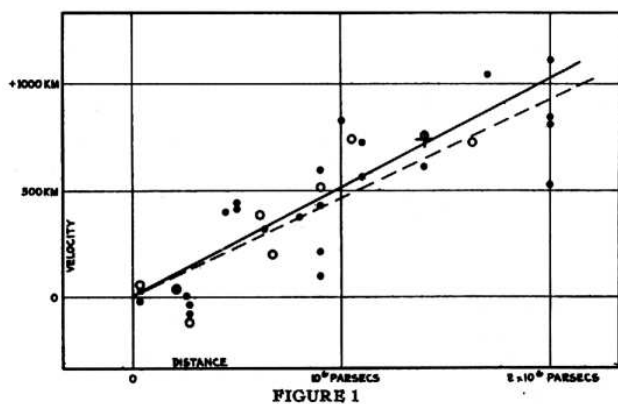
Obr. 27: Edwin Powell Hubble

– viz obr. Pozorované amplitudy změn zářivého výkonu odpovídaly známému vztahu pro klasické cefeidy v Galaxii a v Magellanových oblacích. Ze získaných údajů Hubble určil vzdálenost galaxie M 31 na 300 kpc a dokázal, že jde o spirální mlhovinu – hvězdnou soustavu nacházející se mimo Galaxii.

Hubble se zaměřil na studium galaxií, jejich složení a obecnou strukturu, rozložení v prostoru a pohyby, stal se zakladatelem extragalaktické astronomie. Roku 1925 navrhl klasifikaci galaxií podle jejich tvaru a strukturních prvků. Jeho morfologická klasifikace se stala základem pro další klasifikace.

V nejbližších galaxiích Hubble našel a studoval novy, cefeidy, kulové hvězdokupy, modré a červené obry, plynné mlhoviny. S jejich pomocí určil vzdálenosti vnějších galaxií, vytvořil první škálu extragalaktických vzdáleností. Vypracoval řadu kritérií pro určování vzdáleností galaxií. Roku 1929 srovnával hodnoty radiálních rychlostí galaxií získaná astrofyziky Humasonem a Slipherem s jejich vzdáleností a našel mezi nimi lineární závislost, tzv. Hubbleův zákon „*A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae*“ česky *Vztah mezi vzdáleností a radiální rychlostí extragalaktických mlhovin*. Celkem použil hodnoty radiálních rychlostí čtyřicet čtyř galaxií s rychlostmi nepřesahujícími $1\,200\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ při vzdálenostech do 2 Mpc.

Podstata spirálních mlhovin byla definitivně odhalena americkým astrofyzikem **Edwinem Powell-em Hubblem (1889 – 1953)** v polovině dvacátých let našeho století. Hubble se zabýval extragalaktickými mlhovinami, jeho disertace *Photographia Investigation of Faint Nebulae* česky *Fotografický výzkum slabých mlhovin* byla publikována roku 1920. V říjnu roku 1923 s dalekohledem o průměru 2,5 m na Mount Wilsonu našel klasickou cefeidu na fotografických deskách galaxie M 31. Stanovil její světelnou křivku a odtud i periodu. V dopise z února 1924 Shapleymu uvádí: „*Bude pro Vás zajímavé slyšet, že jsem objevil cefeidu v mlhovině Andromedy (M31). V této sezóně jsem pozoroval mlhovinu tak často, jak to dovoľovalo počasí a za posledních pět měsíců jsem objevil devět nov a dvě proměnné hvězdy. . .*“ K citovanému dopisu přiložil kopii světelné křivky cefeidy, s periodou 31,415 dne, čemuž odpovídá absolutní hvězdná velikost $M = -5\text{ mag}$



Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Obr. 28: Původní verze Hubbleova diagramu

a *The Observational Approach to Cosmology* česky *Pozorovací přístup ke kosmologii* z roku 1936. Hubbleův přínos k extragalaktické astronomii v letech 1922 – 1936 lze shrnout – návrh klasifikace galaxií, definitivní potvrzení jejich hvězdné povahy, důkaz homogenního rozmístění galaxií ve vesmíru a objev, že rychlost vzdalování galaxií je přímo úměrná jejich vzdálenosti.

Astrofyzici postupně objevovali galaxie s většími hodnotami rudého posuvu z , např. kupy galaxií ve Velké medvědici či ve Vlasech Bereniky.

Škálu mezigalaktických vzdáleností poopravil, prakticky zdvojnásobil, Baade roku 1952. Na optických snímcích dalekohledu o průměru pět metrů na Mount Palomar studoval hvězdy v galaxii M 31. Nalezl pouze nejjasnější klasické cefeidy ve spirálních ramenech – hvězdy populace I, zatímco krátkoperiodické cefeidy RR Lyrae v kulových hvězdokupách – hvězdy populace II, pozorovatelné nebyly. Baade objevil existenci hvězd dvou populací.

Podle původní závislosti perioda – zářivý výkon měly dosahovat krátkoperiodické cefeidy s periodou 0,5 dne RR Lyrae pozorovanou hvězdou velikost $m = 22,5$ mag při absolutní hvězdné velikosti $M = 0$ mag. Přestože použitý dalekohled se vyznačoval limitní hvězdnou velikostí 23 mag, žádné hvězdy RR Lyrae na snímcích zjištěny nebyly. Jejich hvězdná velikost dosahuje ve skutečnosti pouze 24 mag, jak bylo zjištěno po následném provedení korekce nulového bodu závislosti perioda – zářivý výkon.

Baade tak k určení vzdálenosti M 31 použil pozorovatelné červené obry typu Mira Ceti – dlouhoperiodické cefeidy s periodou pulsace blízkou k dvěma stům dnům, jejichž absolutní hvězdná velikost dosahuje $M = -1,5$ mag. Prokázal, že modul vzdálenosti určený podle absolutní hvězdné velikosti nejjasnějších červených obrů je o 1,5 mag větší než modul vzdálenosti stanovený dříve pomocí cefeid.

Hubbleovu klasifikaci galaxií doplnil počátkem šedesátých roků minulého století Sandage. V roce 1957 američtí astronomové Morgan a Mayall navrhli na základě studia spekter galaxií jejich třetí klasifikaci, která vycházela ze stupně koncentrace jasnosti ke středu.

Dále astrofyzika řešila otázku vzniku a rotace spirálních ramen galaxií. Proměňování změn poloh detailů v galaxiích, podle kterých lze stanovit směr rotace, nebylo možné využít, neboť rotace jsou velmi pomalé. Můžeme využít Dopplerova jevu, natočit šterbinu spektrografu podél velké osy galaxie, čímž získáme sklon spektrálních čar. Okraj galaxie,

Ve výše uvedené publikaci Hubble vyjádřil nalezený zákon: „Výsledek stanovuje přibližně lineární vztah mezi rychlostmi a vzdálenostmi mlhovin, pro které byly dříve publikovány radiální rychlosti. . . Za účelem zkoumání problému pro mnohem větší vzdálenostní škály, Humason na Mount Wilsonu inicioval program stanovení rychlostí nejvzdálenějších mlhovin dostupných pro pozorování.“

Hubbleův objev se stal pozorovacím základem koncepce expandujícího vesmíru. Nové poznatky o vnějších galaxiích jsou shrnuty v jeho monografiích *The Realm of the Nebulae* česky *Svět mlhovin* z roku 1935

jenž se k nám přibližuje, bude mít modrý posuv, zatímco vzdalující se červený. Tuto metodu lze použít například u galaxie M 31. Nevíme však, který z okrajů je k nám bližší.

Neméně obtížnou bylo tvorba teorie objasňující vznik spirálních ramen. Weizsäcker v letech 1947 – 1951 objasňoval tvar spirálních ramen jako výsledek turbulentních vírů různých měřítek v mezihvězdném plynu. Hypotéza vyložila tvar spirálních ramen, nikoliv však další pozorovaná fakta, příkladně proč pozorované galaxie mají pouze dvě spirální ramena atd.

V letech 1948 – 1958 Lindblad podrobně rozpracoval fyzikální *teorii vzniku spirálních ramen* založenou na zákonitostech hvězdné dynamiky. Dokázal, že v galaxiích majících tvar rotačního elipsoidu může vzniknout zóna, oblast mechanické nestability, v jejímž důsledku proběhne výron skupin hvězd vzhůru. Stimulem k takovému pohybu může být přílivové gravitační působení další blízké galaxie, zvláště v případech těsných přiblížení galaxií.

Lindbladova teorie nedostatečně vysvětlovala zjištěná hvězdná složení spirálních ramen. V nich se nacházejí mladé hvězdy, obří a veleobří s vysokými teplotami. Takové hvězdy nemohly být vyvrženy z jader galaxií, kde převládá populace II. Obecný předpoklad „rozvíjení se“ spirálních ramen nebyl pozorováními potvrzen. Práce Lindblada znamenaly přínos k dynamice hvězdných soustav, byly aplikovatelné při řešení částečných úloh.

Nejobtížnější částí teorie spirálních ramen je objasnění jejich stálosti při diferenciální rotaci. Lindblad navrhl myšlenku, že spirální ramena mají vlnový původ. Američtí astrofyzici čínského původu Lin Chia Chiao (1916) a Shu Frank Hsia (1943) rozvinuli Lindbladovu myšlenku roku 1964 v práci *On Spiral Structure of Disk Galaxies* česky *O spirální struktuře disku galaxií*. Podle jejich teorie spirální ramena jsou místa zvýšené hustoty, která nejsou tvořena stejnými hvězdami, ale představují *hustotní vlny*. Hvězdy obíhají středy galaxií větší úhlovou rychlostí než spirální ramena. Prostorem mezi rameny procházejí hvězdy rychleji, zatímco v nich se zdrží delší dobu.

V roce 1943 americký astrofyzik **Carl Keenan Seyfert (1911 – 1960)** publikoval soupis 12 galaxií, které se vyznačovaly velmi jasnými jádry, jejichž jasnost byl proměnná. Později byly v jejich spektrech zjištěny široké emisní čáry, což ukazovalo na vysoký stupeň excitace vyzařujících atomů. Anomálně velká šířka vodíkových čar dosvědčovala přítomnost plynu pohybujícího se rychlostmi až několik tisíc kilometrů za sekundu. Vyvrhování plynných oblaků o hmotnostech ($10^2 - 10^3$) M_{\odot} svědčí o tom, že doba trvání této aktivity nepřevyšuje 10^8 let. Seyfertovy galaxie tvoří novou třídu *galaxií s aktivními jádry* – AGN, které se projevují ve všech spektrálních oborech, zejména vyzařují rtg. a gama záření.

Počátkem šedesátých let byla zkoumána aktivní galaxie M 82 nacházející se ve vzdálenosti 3,6 Mpc. Jde o nepravidelnou galaxii, z jejíhož jádra probíhá expanze vodíku. V roce 1961 americký astrofyzik C. R. Lynds ztotožnil neznámý rádiový zdroj s touto galaxií, roku 1962 Sandage pořídil snímek galaxie ve světle čáry H_{α} a Lynds pořídil spektrum. Zjistil široké emisní čáry vodíku, kyslíku, dusíku a síry. Určená rychlost rozpínání vláknité struktury plynu byla $1\,000\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Odhad uvolněné energie dosahoval 10^{50} J.

Dalšími objekty zájmu astrofyziků se v padesátých létech minulého století staly rádiové zdroje na obloze. Pomocí dalekohledu na Mount Palomar Baade a **Rudolph Leo Bernhard**

Minkowski (1895 – 1976) identifikovali jednotlivé galaxie vyzařující v rádiovém oboru – *radiogalaxie*: M 87, NGC 5128, NGC 4486.

7.2 Kosmologie

Objevem Newtonových pohybových zákonů a zákona všeobecné gravitace byl koncem 17. století položen základ prvnímu kosmologickému modelu vesmíru podloženému fyzikálními zákony. Newtonovská kosmologie vycházela z představy vesmíru jako *trojrozměrného euklidovského nekonečného absolutního prostoru*, který je nehybný vzhledem k pohybujícím se v něm kosmickým tělesům. Vesmír jako celek se podle Newtona nevyvíjí, pouze se v něm střídají generace kosmických těles stejného typu.



Obr. 29: Albert Einstein

V rámci Newtonova stacionárního modelu vesmíru nebylo možné vyložit tzv. *kosmologické paradoxy* – *gravitační, fotometrický*. Teprve *obecná teorie relativity* německého fyzika **Alberta Einsteina (1879 – 1955)**, jejíž počátky spojujeme s publikací z roku 1916 *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie* česky *Základy obecné teorie relativity*, umožnila výklad kosmologických paradoxů.

Dva roky po vzniku obecné teorie relativity vytvořil Einstein první kosmologický model vesmíru v publikaci *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie* česky *Kosmologické úvahy k obecné teorii relativity*. Z matematických rovnic obecné teorie relativity a na základě platnosti kosmologických principů izotropie a homogenosti ve velkých měřítcích, vypracoval Einstein roku 1917 model vesmíru,

kteřý představoval uzavřený trojrozměrný prostor, jehož objem byl konečný a neměnil se s časem, *model vesmíru byl stacionární a homogenní*. Diskusi volby hraničních podmínek a interpretaci kosmologické konstanty podává práce holandského matematika a astronoma **Willena de Sittera (1872 – 1934)** z roku 1917 *On Einstein's theory of gravitation, and its astronomical consequences* česky *O Einsteinově teorii gravitace a jejích matematických důsledcích*.

V letech 1922 – 1924 ruský matematik **Alexandr Alexandrovič Friedman (1888 – 1925)** v publikacích *Über die Krümmung des Raumes* česky *O křivosti prostoru* z roku 1922 a *Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes* česky *O možnosti světa s konstantní zápornou křivostí* roku 1924 položil základy teorie *nestacionárních modelů vesmíru*. Astronomická pozorování potvrdila vývojový charakter vesmíru, v roce 1929 bylo Hubblem objeveno, jak jsme již uvedli, rozpínání vesmíru. Nestacionární modely vesmíru rozpracoval nezávisle na Friedmanovi koncem dvacátých let belgický fyzik a astronom **George-Henri Lemaître (1894 – 1966)**, připomínáme jeho práci *Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, redant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques* česky *Homogenní vesmír o konstantní hmotnosti a rostoucím poloměru se započítáním radiálních rychlostí extragalaktických mlhovin*.

Později v roce 1965 američtí radiofyzikové **Arno Allan Penzias (1933)** a **Robert Woodrow Wilson (1938)** detekovali teplotní záření, odpovídající záření černého tělesa o jimi zjištěné teplotě (3,51) K, první sdělení bylo v práci *A measurement of excess antenna temperature at 4080 MHz* česky *Měření přebytku anténní teploty na frekvenci 4080 MHz*. Upřesněná měření opravily hodnotu na 2,7 K. Objevené *reliktní záření* se stalo observačním důkazem správnosti teorie horkého modelu vesmíru.

Úvahy o existenci teploty vesmírného prostoru probíhaly již mnohem dříve. Francouzsko – švýcarský fyzik **Charles Édouard Guillaume (1861 – 1941)** v roce 1896 na základě rozboru záření hvězd propočtl teplotu ve vesmíru na (5 – 6) K. Obdobný výpočet Eddingtona v roce 1926 vedl k odhadu teploty na 3,2 K. Z dalších osobností zabývajících se tématem vyberme výsledky německého chemika **Walthera Hermanna Nernsta (1864 – 1941)** z roku 1938 zkoumajícího kosmologický rudý posuv a absorpci záření s odhadem teploty 0,75 K. Na základě spektroskopické analýzy molekul CN v mezihvězdném prostoru roku 1941 německý fyzik žijící od roku 1935 v Kanadě **Gerhard Herzberg (1904 – 1999)** určil teplotu 2,3 K. Fyzikálně – kosmologické příčiny existence teploty záření ve vesmíru nejpřesněji zdůvodnil již zmiňovaný Gamov v roce 1948, vypočetl teplotu záření na 5 K.

Počátkem šedesátých roků astronomové objevili na obloze objekty zcela nového typu, které vyzařovaly mnohem více energie než jiné objekty. Jejich projevy aktivity byly zjištěny především mimo optický obor, proto nebyly dříve zaznamenávány. Až teprve přechod k vševlnovému pozorování umožnil jejich sledování. Rozvoj rádiové astronomie, zvýšení přesnosti určení souřadnic a úhlových velikostí umožnil výzkum nových objektů. Rozlišovací schopnost rádiových teleskopů pracujících interferometricky na základnách zhruba deset tisíc kilometrů převýšil rozlišovací schopnosti optických dalekohledů. V letech 1962 – 1963 byla upřesněna podstata nově pozorovaných objektů – kvasarů. Zákryt s Měsícem umožnil stanovit polohu objektu 3C 273, což popsali Cyril Hazard a John Bolton v práci *Investigation of the Radio Source 3C 273 by the Method of Lunar Occultations* česky *Výzkum rádiového zdroje 3C 273 metodou zákrytu Měsícem*. Ukázalo se, že zdroj rádiového záření je dvojitý, se vzdálenostmi mezi složkami 19" při průměru každého zdroje menším než 10". Následně získal na dalekohledu na Mount Palomar spektrum objektu **Maarten Schmidt (1929)**, původem holandský astronom žijící od roku 1959 v USA. Při identifikaci širokých emisních čar je ztotožnil s Balmerovými čarami H_{β} až H_{ϵ} , dále v čárovém spektru objektu identifikoval posunuté čáry Mg II a O III. Stanovil hodnotu $z = 0,158$ a nalezením vzdálenosti potvrdil mimogalaktický původ objektu. Výsledky shrnul v práci 3C 273: *A Star-like Object with Large Red-shift* česky *3C 273: hvězdě podobný objekt s velkým rudým posuvem*. Spektra objektů – kvasarů se ukázala podobná spektrům seyfertových galaxií.

Při zákrytu objektu 3C 273 Měsícem roku 1963 C. Hazard, M. B. Mackey, A. J. Shimmins velmi přesně stanovili jeho souřadnice v publikaci *Investigation of the Radio Source 3C 273 By The Method of Lunar Occultations* česky *Výzkum rádiového zdroje 3C 273 metodou zákrytu Měsícem*.

8 Historický vývoj astronomie u nás

8.1 Stručný nástin historie astronomie u nás do poloviny 19. století

Obdobně jako v západní Evropě i na našem území byly stavěny kamenné observatoře sloužící k orientaci v čase jak ve dne tak i v průběhu roku. Z období přibližně 3 500 př. n. l. pochází stavba v Makotřasech u Kladna, jsou v ní zachyceny slunovratové linie.

Meteorologické a astronomické jevy byly zachycovány v středověkých kronikách.

Impulsem k rozvoji astronomie bylo založení Karlovy univerzity v Praze roku 1348. Na ní působila řada osobností, jmenujme nejprve Křišťána z Prachatic (1360 – 1439) ?, děkana filozofické fakulty a rektora univerzity, lékaře a astronoma. Jeho neznámější dílo nese název *De compositione astrolabii* česky o *Stavbě astrolábu*.

Druhou významnou osobností byl Jan Šindel (1375 – 1456) ?, rektor univerzity, matematik, astronom a lékař Václava IV. Proslul přesnými astronomickými pozorováními, například výšky Slunce, které později vysoce oceňoval Tycho Brahe. Jeho nejdůležitější dílo je *Canones pro eclipsibus Soli et Lune per instrumentum ad hoc factum inveniedis Magistri Iohannis Schindel* česky *Pravidla pro výpočet zatmění Slunce a Měsíce podle přístroje, který k tomu vymyslel Jan Šindel*. Pod vedením Šindela hodinářský mistr Mikuláš z Kadaně sestavil v roce 1410 staroměstský orloj v Praze.

Jak jsme již zmínili, je Praha v období vlády Rudolfa II. centrem evropské vzdělanosti, což platí pro astronomii zejména. Působí zde vedle domácích astronomů Martina Bacháčka z Nouměřic (1539 – 1612) a Tadeáše Hájka z Hájku také Tycho Brahe, Johannes Kepler a další.

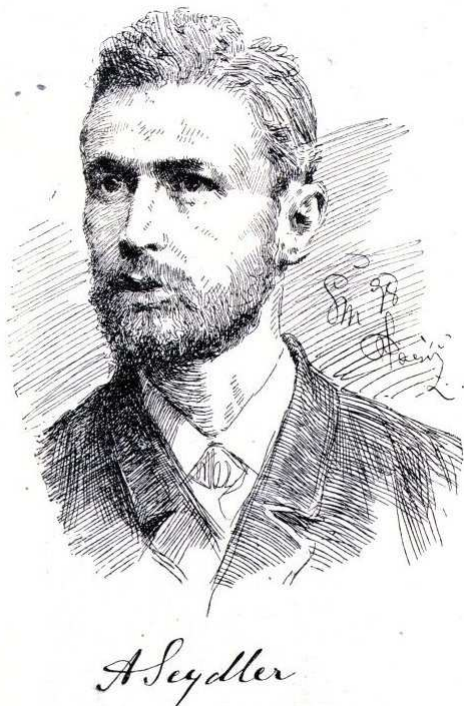
V Klementinské koleji založené roku 1556 jezuitský řád rozvíjel vzdělání, včetně astronomie. Byla zde v roce 1722 postavena astronomická věž – pozorovatelná. Zasluhou prvního ředitele Klementinské hvězdárny Josefa Steplinga je v roce 1750 podstatně lépe vybavena přístroji. Vedle meteorologických pozorování, měření teploty, tlaku, jsou prováděna i astronomická pozorování. Na Klementinské hvězdárně působila řada osobností, například František Josef Gerstner (1756 – 1832).

8.2 August Seydler

Velký rozvoj astronomie ve světě v 19. století byl sledován v Čechách jen z povzdálí. Příčin bylo několik, jak překážky a špatné finanční zajištění ze strany rakouské vlády, tak i lhostejnost a nezájem naší společnosti. Státy s tehdy vyspělou astronomií, např. Anglie, Německo, Rusko tuto vědu podporovaly, přestože výzkum vzdálených hvězd nemohl v daném okamžiku přinést konkrétní použitelné výsledky. Samotná česká společnost nebyla schopna žádoucí materiální podmínky zajistit.

Určité možnosti se české astronomii otevřely v osmdesátých létech 19. století v souvislosti s rozvojem vysokého školství. Přestože nebylo reálné, aby vedle klementinské hvězdárny vznikla ještě jedna vědecká státní instituce, mohly být na vysokých školách zakládány vlastní astronomické ústavy. Jejich úkolem byla výuka astronomie případně geodézie v kombinaci s vědeckou prací. Důležitým momentem se stalo rozdělení pražské Karlovy-Ferdinandovy university v roce 1882, kdy rakouská vláda přistoupila na požada-

vek Němců a rozdělila universitu na českou a německou. Čechům se jen podařilo zachovat právní kontinuitu s universitou dřívější. Majetek měl být rozdělen rovným dílem, ale podstatnou část kabinetů, sbírek a všechny odborné ústavy získali Němci. Česká universita začínala prakticky z ničeho, od počátku se potýkala se slabým finančním zajištěním. S přechodem českých profesorů na novou školu potíže nebyly. Nezalekli se obtížných materiálních podmínek a snažili se přispět k rozvoji naší národní university. Byl mezi nimi i **August Jan Bedřich Seydler (1849 – 1891)**, který za deset let zde vybudoval astronomický ústav.



Obr. 30: August Jan Bedřich Seydler

Seydler se narodil v roce 1849 v Žamberku. Ale již další rok se odstěhoval za svým otcem do Prahy. Studia zahajuje v letech 1860 – 1867 na gymnáziu u piaristů na Novém Městě Pražském, kde také maturuje. Po celých osm let gymnaziálních studií se u něho projevuje zvláštní záliba v matematice a hlavně v astronomii. Proto pokračuje ve studiích na filosofické fakultě Karlovy-Ferdinandovy university. Na ni přišel s nejlepší přípravou, dokonale ovládal učivo střední školy a navíc měl i poměrně široký obzor, získaný soukromým studiem. Přednášky na universitě měly poměrně dobrou úroveň, přednášelo se německy.

O Seydlerově studijním úsilí svědčí i četná kolokvia z matematiky, fyziky a astronomie, která absolvoval vesměs s výborným prospěchem. Dosaženými výsledky upoutal brzo pozornost profesorů. Využil nabídky **Ernsta Macha (1838 – 1916)** a již ve školním roce 1868/69 mohl pracovat v laboratoři fyzikálního ústavu. Obdržel na dobu dvou let stipendium 100 zlatých. Větší význam pro profesionální orientaci měla nabídka **Karla Hornsteina (1824 – 84)**, profesora astronomie na pražské universitě a zároveň ředitele pražské hvězdárny. August Seydler přijal nabídku na místo asistenta na klementinské hvězdárně a od školního roku 1869/70 zde začal pracovat. Podmínky pro astronomickou práci však nebyly valné. Třebaže se Hornstein snažil oživit na hvězdárně astronomická pozorování, některá z nich uveřejnil v magnetických a meteorologických publikacích, úroveň vědecké práce se opožďovala za ostatním světem.

Činnost Seydlera na klementinské hvězdárně byla bohatá. Např. v letech 1874 – 75 určoval pozice asteroidů, pracoval na stanovení průměru kruhového mikrometru, zabýval se intenzivně teoretickou činností. Období Seydlerova působení na pražské hvězdárně má zásadní význam. Zde se vycvičil na výborného pozorovatele, pronikl do astronomické problematiky a jak uvidíme dále, vznikla zde podstatná část prací z kosmické mechaniky.

Na začátku sedmdesátých let talentovaný a k vědecké práci připravený Seydler ukončil studia na filosofické fakultě. Otevřela se před ním poměrně bezpečná kariéra středoškolského profesora. Seydler se však rozhodl jinak, zůstal na vysoké škole a chtěl nadále

vědecky pracovat. K tomu musel projít sítím různých zkoušek a přesvědčit profesorský sbor o svých kvalitách.

Seydlerovým prvním krokem na této cestě bylo složení filosofického rigoróza v roce 1871, kdy mu byl udělen titul doktora filosofie. Následně vypracoval habilitační práci z fyziky, která měla dvě části. První *O některých větvích mechanické teorie tepla* a druhou část astronomickou, za kterou mu posloužila již v roce 1870 opublikovaná práce *Nový způsob, jak lze vypočítat dráhy oběžnic* a dále *Několik pojednání astronomických*. Astronomickou část habilitační práce hodnotil Hornstein. Seydler se podrobil předepsanému kolokviu, stal se soukromým docentem pro teoretickou fyziku na Karlově-Ferdinandově universitě v Praze. O Seydlerových mimořádných schopnostech svědčí, že po celou dobu studií se nezajímal pouze o svůj obor, ale byl schopen si najít dostatek volného času pro filosofii a jazyky, konkrétně pro angličtinu, francouzštinu a italštinu (znalost němčiny byla samozřejmostí). V témže roce, kdy se podrobil náročným zkouškám před habilitační komisí, složil ještě na technice zvláštní zkoušky z uvedených jazyků. Široké jazykové znalosti mu později umožnily číst v originále všechna základní díla velikánů historie fyziky, např. Huygense, Newtona a dalších.

Seydlerovi bylo přesně 23 let, kdy získal možnost přednášet na universitě. Brzy měl stálý okruh posluchačů, kterým byl blízký českými přednáškami a oni naopak považovali za svou povinnost je navštěvovat. Byly vedle přednášek profesora Studničky jediné české na universitě.

Vyvrcholením procesu konstituování české vědy se stává rozdělení pražské university na českou a německou v roce 1882. Tímto aktem byly pro českou vědu získány možnosti rozvoje prakticky ve všech oborech. Česká fyzika, chemie, ostatní přírodní vědy a matematika tak dostaly vysokoškolské katedry. Mezi těmito obory byly na české universitě od počátku přednášeny astronomie a meteorologie.

Vedle jiných profesorů přechází i August Seydler, od roku 1881 již mimořádný profesor matematické respektive teoretické fyziky. Česká universita byla nedostatečně finančně a materiálně zabezpečena. Správně si Seydler uvědomil, že nová škola nemůže zůstat bez odborných ústavů, jinak podlehne v konkurenci ostatních rakouských universit. Postoj české veřejnosti k otázce rozdělení university považoval za netečný – v novinách se objevilo jen několik úvodníků, o celou problematiku byl naprostý nezájem. Je zajímavé Seydlerovy myšlenky citovat, neboť dobře charakterizují vědce v osmdesátých létech 19. století. Ohrazuje se proti tvrzení, že není dobrý Čech ten vědec, který nepíše česky a říká, že kdyby psal německy, tak by ho četly tisíce, v opačném případě jen desítky „... *nejde o osobní ctižádost, o hmotné prospěchy: zde jde o vlastní obsah života, zde jde o jeho plnou cenu* ...“

Přes všechny problémy nezajištěného provozu Seydler přešel na filosofickou fakultu české university a snažil se o rozvoj astronomie na svém novém působišti. V jeho úsilí ho podporuje i profesorský sbor, hlavně **Čeněk Strouhal (1850 - 1922)**. Prvním krokem v tomto směru se stala žádost o řádnou profesuru teoretické fyziky a astronomie pro Seydlera. V případě kladného vyřízení by to prakticky znamenalo, řečeno současnou terminologií, založení katedry astronomie na filosofické fakultě. Chybou ovšem bylo, že v té době se Seydler ještě nedokázal zcela vzdát fyziky a požadoval řádnou profesuru obou těchto disciplín.

V roce 1885 byl Seydler jmenován řádným profesorem teoretické astronomie a teoretické fyziky na filosofické fakultě české Karlovy-Ferdinandovy university. Jak už bylo uvedeno, spojení astronomie a fyziky v jedné profesuře bylo chybou. Seydler si brzy uvědomil náročnost vedení dvou disciplín. Už také proto, že se chtěl napříště věnovat výlučně astronomii. Avšak k tomuto oddělení došlo až po jeho smrti, kdy na universitu byl povolán profesor fyziky **František Koláček (1851 – 1913)** z Brna.

V polovině osmdesátých let byly možnosti praktické výuky astronomie na fakultě velmi omezené. Profesor **Ladislav Weinek (1848 – 1913)** přednášející od roku 1883 na německé universitě astronomii měl k dispozici klementinskou hvězdárnu, zatímco nyní již profesor Seydler po svém jmenování neměl ani dotaci na učební pomůcky, takže některé musel kupovat z vlastních prostředků. Za těchto okolností mohl pracovat s žáky jen čistě teoreticky – zaměstnával je konkrétními výpočty. To bylo sice užitečné, ale ne dostatečné. Seydler si to uvědomoval, o čemž svědčí jeho výrok: „*Jediný večer u dalekohledu více znamená pro oživení zájmu o astronomii než všechny teoretické přednášky.*“ Proto bylo bezpodmínečně nutné založit universitní hvězdárnu. To znamenalo značné náklady a Seydler si nedělal iluze, že by mu je vláda poskytla v dostatečné míře. Bylo nutné také začít ze zařizováním knihovny, která by umožnila aspoň teoretickou práci a s nákupem nejn nutnějších pomůcek.

Rozhodl se najmout v Praze vilu a zřídit tam provizorní pozorovatelnu. Seydler věřil, že nastane příznivější doba a astronomický ústav vybuduje observatoř ve výhodnějších podmínkách. Vybavení pro celý ústav Seydler získal již na počátku roku 1890, kdy zakoupil astronomické přístroje a součástky v pozůstalosti po jednom německém astronomovi se značnou slevou. Protože však cena požadovaná za přístroje převyšovala dotaci určenou pro tento rok, dal Seydler v záruku své vlastní státní papíry, aby druhý rok mohl být dluh vyrovnán. Zbytek dotace chtěl věnovat na odbornou literaturu a na některé menší přístroje. Ve své době bylo vybavení ústavu dostačující, Seydler byl spokojen. Instalace přístrojů se však již nedočkal, zemřel v roce 1891 v Praze.

Vykonal velký kus vědecké práce hlavně na poli teoretické astronomie. Můžeme tak soudit na základě spisů, jež se nám dochovaly i na základě rukopisných záznamů. Všechny astronomicky významnější práce se dají rozdělit do tří skupin. Do první patří práce, jež pojednávají o určování drah planet respektive komet, v druhé jsou astronomické práce zabývající se problémem tří i více těles. K poslední skupině patří příležitostné články týkající se aktuálních astronomických problémů.

Ve své první práci, kterou Seydler zveřejnil ještě jako posluchač astronomie, se zabýval problémem určování dráhy planet. Vyšla roku 1870 v Praze s názvem *Nový způsob, kterým lze vypočítat dráhu oběžnic*. Vytyčený cíl byl následující: „*vypočítat dráhu oběžnice z míst pozorovaných bez jakékoliv omezující hypotézy.*“ Seydler se úspěšně pokusil vyjádřit pomocí lineárních vztahů vzdálenost planety od Země, závislou na velikosti poměru plochy trojúhelníka k ploše eliptické výseče. S pomocí analytické geometrie odvodil, že všechny tři polohy planety musí ležet v rovině procházející středem Slunce. Uvedl praktický návod, jak by se dal vypočítat poměr plochy trojúhelníka ku ploše eliptické výseče. Metoda je srozumitelná a matematicky správná, výrazy však jsou počtářsky velmi složité. V současnosti by se daly řešit spíše pomocí osobních počítačů než logaritmy, jak bylo v Seydlerově době obvyklé. Shrnutí již jako vysokoškolský student dovedl Seydler pojednat o klasickém problému určení dráhy planety.

Zajímavá Seydlerova práce se týkala určení dráhy Dione, která byla jako planeta objevena roku 1868. Pro výpočet její dráhy měl Seydler k dispozici 23 pozorovacích dat, ze kterých získal tzv. normální místa. Z těchto šesti míst vypočítal přesné dráhové elementy a dvě efemeridy na dobu od 1. 1. 1871 – 30. 6. 1871. Nespokojil se jen s tímto výsledkem a roku 1872 uveřejnil důkladnější pojednání. Na základě dalšího pozorovacího materiálu vypočetl poruchové působení Jupitera, které dosud zanedbával. I přes toto upřesnění se výsledky lišily od skutečnosti. Proto poruchy Jupitera propočítal metodou autorů Bonde-Encke a celou práci Seydler ukončil efemeridou planety na rok 1872. K zvolenému problému se vrátil ještě v roce 1876, kdy vzal v úvahu i poruchový vliv Saturna, čímž dosáhl souhlasu vypočítaných a pozorovaných údajů.

Ve všech třech publikacích, pojednávajících o dráze Dione Seydler prokázal znalost metod určování dráhy planety. Metody jím používané mají uplatnění i dnes a nelze je označit za zastaralé. Jsou jen zdokonaleny a urychleny, ale v zásadě se používají tak jako v době Seydlerově. Z rozboru prací můžeme usoudit, že Seydler byl vynikající počtář i teoretik, zvládající složité numerické výpočty. Ke konci svého života se k výpočtům drah planetek ještě vrátil, společně s Nušlem a Láskou propočítali dráhy planetek Lucretie a Asporiny.

Seydler se rovněž zabýval výpočtem drah komet. Metody pro výpočet dráhy komety nebo planety jsou sice v podstatě stejné, liší se však ve svém detailním, zejména numerickém provedení. Praktický výpočet drah komet se usnadňuje tím, že předpokládáme jejich parabolickou dráhu, ale na druhou stranu jsou pozorovací údaje komet udávána s většími chybami a také poruchové vlivy vzhledem k mnohem menším hmotnostem komet mohou být větší. O všech problémech Seydler věděl a dovedl je vyřešit. Publikoval celkem tři práce pojednávající o určování drah tří různých komet.

Výpočet dráhy komety II 1869 uveřejnil v roce 1871, při čemž použil elementy jenž získal francouzský astronom Gustave Leveau (1841 – 1911). Měl však k dispozici o 11 pozorovacích míst více než Leveau a došel i k přesnějšímu výsledku. Výpočet parabolické dráhy provedl klasickou Olbersovou metodou. Zlepšení parabolické dráhy provedl tím, že krajními pozorovacími body proložil dvě nové paraboly a z nich vypočetl parabolu nejpravděpodobnější. Seydler uveřejnil jen konečné výsledky, o metodě svých výpočtů nic neuvádí. Podobného postupu používá i v případě komety I 1870.

Koncem svého života publikoval ještě jednu práci o dráze komety I 1890. Její dráha se nedala vypočítat Olbersovou metodou. Seydler získal údaje z 67 pozorovacích míst. Provést příslušné výpočty a srovnat je se všemi pozorovacími místy byl už značný počtářský úkol. Následně Seydler přistoupil ke zpřesnění dráhy, což provedl na základě variace poměru vzdálenosti komety od Země. V této metodě se připisuje prvnímu a poslednímu pozorovacímu místu velká váha. Stane-li se, že jedno nebo obě jsou zatíženy velkou chybou, je nutno tyto chyby odstranit. Pro nové vyrovnání Seydler navrhl metodu použitelnou za předpokladu, že geocentrická dráha komety mezi oběma místy se málo liší od kružnice, nevykazuje inflexní bod ani smyčku a celý oblouk příslušný geocentrické dráze je malý. V tom případě zvolil korekci prvního a posledního místa jak v rektascenzi, tak v deklinaci, následně použil metodu nejmenších čtverců. Dále opravíme údaje pro první i poslední pozorované místo, proložíme novou parabolou a znovu provedeme vyrovnání.

O pracech, pojednávajících o drahách komet můžeme konstatovat, že Seydler postupoval podle metod, které v podstatě používáme ještě dnes, kriticky posuzoval pozorovací údaje, oceňoval i spolehlivost svých výsledků. V své první práci ještě mnoho nenaznačil o svém postupu, v druhé již leccos udává a ve třetí má již celou řadu původních poznatků.

Problém tří těles byl vždy přitažlivým pro každého teoretického astronoma, proto i Seydler se pokusil přispět k jeho řešení. Při určování dráhy komet se zabýval především numerickými výpočty, oproti kterým jsou výpočty, vztahující se k této problematice, zcela obecné. První práce týkající se přímo problému n těles měla název „*Poznámka k rovnicím, které vyjadřují stabilitu sluneční soustavy*“. Seydler navrhl jiný tvar rovnic popisujících stabilitu sluneční soustavy než Laplace. Zavedl pro sekulární změnu tři úhly: α – střední délka planety, β – délka perihélia, γ – délka výstupného uzlu. Uvedené veličiny se mění s časem tak, že průměrná základní hodnota se zvětšuje. Naproti tomu zavádí tři elementy a, b, c , kde a značí délku velké poloosy, $b = ae$, $c = a \operatorname{tg} \phi$, $e = \sin \phi$. Tyto tři veličiny se mění v určitém intervalu v krátkém čase.

Přednášku *O integrování některých rovnic, vyskytujících se v problému tří těles* měl Seydler v roce 1884. Vycházel ze základních rovnic definujících problém tří těles v pravouhlých souřadnicích. Svůj postup zdůvodnil tím, že konečné výsledky lze psát v symetrickém tvaru. Dále Seydler usuzoval, že lze odvodit problém tří těles z řešení problému dvou těles. Když dosadil výsledky plynoucí z problému dvou těles do rovnic vymezujících problém tří těles, musel je upravit, aby byly schopny integrace. Zavedl pomocnou veličinu u závislou na čase. Po řadě úprav obdržel rovnice, které se daly integrovat, výsledek vyjádřil jednoduchými vztahy.

V březnu 1884 referoval Seydler o svých studiích, přehledovou přednášku rozdělil na tři části. V první pojednával o problému dvou těles, ve druhé a třetí o problému tří těles. V úvodu Seydler odvodil novým způsobem problém dvou těles. Obvykle se při řešení problému vycházelo z principů ploch a živé síly. Seydler zavedl nové rovnice obdobné rovnicím pro princip ploch. Šest rovnic zastupovalo pět jejich integrálů; pomocí integrování diferenciálních rovnic lze odvodit rychlost, s níž se mění průvodič a pravá anomálie. Výsledek první části je stejný, jako při obvyklém způsobu řešení. Seydlerovi se však podařilo pomocí soustavy dvanácti rovnic obejít princip ploch. Jako zcela nový výsledek je třeba uvést rovnice vyjadřující vztahy mezi souřadnicemi a rychlostmi změn pomocných veličin. Získané výsledky z první části Seydler použil v dalších krocích při řešení problému tří těles. Závěr celé této práce je obsažen ve třech rovnicích. První vyjadřuje pohyb dráhy rušené planety v rovině otáčející se kolem středu celého systému. Dvě další zachycují, že dráha rušené planety se příliš neliší od kuželosečky, jejíž přímka apsid se zvolna otáčí v rovině dráhy. Podstatou Seydlerova postupu je metoda variace plošných konstant. Přitom se snažil vyjádřit všechny veličiny v závislosti na čase. V práci je názorně vidět, jak jsou konstanty ploch proměnné s časem, což je vlastně vhodnou aplikací Lagrangeovy metody variace konstant. Pracemi Seydlera vyvrcholila u nás klasická éra teoretické astronomie, v pozdějším období astronomové tyto postupy již nepoužívali a řešili problém tří těles rozvojem nekonečných řad. Seydlerovi byl prvním v našich zemích, kdo se zabýval problémem tří těles a přispěl k jeho řešení novými myšlenkami.

Rovněž Keplerovou rovnicí se zabývalo v historii mnoho astronomů, kteří se snažili nalézt nejrychlejší a nejpřesnější prostředek k řešení této transcendentní rovnice. Seydler

si v letech 1887 vybral za vzor řešení Keplerovy rovnice Enckeovu metodu, odvození však provedl přesněji než autor. Nespokojil se pouze formálním odvozením vztahů, ale zjišťoval a odhadoval přesnost aproximativních výrazů. Pro snazší aplikaci vydává v roce 1888 vlastním nákladem tabulky pro řešení Keplerovy rovnice. Podává dva způsoby řešení, oba jsou obecné, druhý lze s výhodou použít v případě velkých výstředností. Vyžaduje více kroků a numerických výpočtů, obdržené výsledky však jsou přesnější. Obě metody jsou uzpůsobeny pro logaritmické výpočty. Způsob řešení Seydlera je ve srovnání s metodami německých astronomů Enkeho respektive Friedricha Tietjena (1834 – 1895) vhodnější pro numerické výpočty.

Lze shrnout, že výsledky Seydlerovy práce měly mezinárodní význam, našly v zahraničí řadu ocenění. Například v publikacích Lickovy hvězdárny vyšel spis *Research surveys of the minor planets* česky *Přehled výzkumu planetek*. V tomto seznamu objevených planetek je zachyceno, kdo se zabýval výpočtem, případně zpřesněním dráhy, s citací publikace a přesnosti výsledků. Zde jsou uvedeny všechny příslušné Seydlerovy práce i 45 let po jeho smrti.

Vedle významu světového měl Seydler význam i národní. Byl prvním profesorem astronomie na české universitě a vytvořil pro teoretickou astronomii českou terminologii. Čtete-li dnes pozorně jeho česky psané práce, udivuje nás, že až na zcela nepatrné výjimky se jeho odborné výrazy udržely až do dnešní doby.

8.3 Astronomie u nás na přelomu 19. a 20. století

Do posledního desetiletí předminulého století vstoupil astronomický ústav se slibnou perspektivou, měl nové přístrojové vybavení, bohatou vědeckou knihovnu i zkušený personál. Vedle profesora Seydlera jako ředitele zde od roku 1890 pracuje i asistent **Václav Láška (1864 – 1942)**, který již měl bohaté zkušenosti z práce na klementinské hvězdárně u ředitele Weineka. Do práce Seydler zapojoval i studenty, např. K. Petra, F. Nušla, O. Šulce, A. Pařízka, kteří se zabývali ještě před uvedením celého ústavu do provozu výpočty drah malých planetek. Narůstala pedagogická činnost, zvyšovala se kvalita přednášek, výuka astronomie se vyrovnávala s německou universitou. Postupně byla uvedena do provozu praktická cvičení, studenti se v nich seznamovali se základními přístroji ústavu. Vědecká činnost nemohla sledovat světový vývoj v celé jeho šíři, podařilo se však v průběhu tohoto období získat cenná pozorování, vznikly i hodnotné práce teoretické.

V době nemoci Seydlera a po jeho smrti je práce ústavu utlumena, například v zimním semestru 1891 – 92 odpadly všechny přednášky z astronomie. Prozatímním ředitelem je jmenován Strouhal, ale pro jeho velkou zaneprázdněnost jinými organizačními záležitostmi tento stav nemůže trvat dlouho. Proto vedení filosofické fakulty hledá definitivního Seydlerova nástupce. Je uvažováno o Gustavu Grussovi adjunktovi klementinské hvězdárny a Vojtěchu Šafaříkovi. Oba dva mají k výkonu funkce dobré předpoklady, proto jsou jmenováni profesory astronomie na české universitě, kde také přednášejí. Ovšem vzhledem k velkému množství práce související s dobudováním ústavu a vzhledem k věku profesora Šafaříka je v roce 1892 jmenován ředitelem Gustav Gruss.

Na vysokých školách je obvyklé, že nástupcem vysokoškolského profesora je některý z jeho vynikajících žáků a předpokládá se, že bude pokračovat v linii svého předchůdce.

Gruss však byl případ netradiční, nepatřil k Seydlerově škole ani na ni nenavazoval. V době jeho jmenování mu bylo třicet osm let a měl za sebou vlastní vědeckou činnost.

Po příchodu na českou universitu vyvstalo před Grusem několik základních úkolů. Jednalo se především o uvedení do provozu Seydlerem zakoupených přístrojů. Další problém spočíval v hledání vhodného místa pro ústav s pozorovatelnou. Situace se v Praze začala rychle měnit, bylo třeba uvažovat o jeho přemístění. K přestěhování na Vinohrady došlo roku 1900, definitivní přestěhování ústavu proběhlo v roce 1901 na Smíchov do Švédské ulice. Řešení vyžadovala rovněž situace asistentů. Ve velké většině to byli schopní pracovníci, neboť profesori si je vybírali z nejlepších žáků. Ale žádný z nich se na ústavě dlouho nezdržel. Sotva se zacvičili v zacházení s přístroji, odcházeli na výhodnější místa. Jednak kvůli tomu, že asistentská léta nebyla započítávána do státní služby (suplentům na gymnáziích ano) a jednak pro špatné finanční podmínky. Museli si přivydělávat kondicemi, popřípadě vyučovali na středních školách.

Přejdeme k osobě **Gustava Grusse (1854 – 1922)**, který se narodil v Jičíně. Studoval zde gymnázium, kde roku 1873 maturoval. Absolvoval triennium na Filosofické fakultě Karlovy-Ferdinandovy university v Praze. Zabýval se hlavně matematikou, fyzikou, astronomií, v letech 1876-78 pracoval na pražské hvězdárně jako asistent. V roce 1877 se podrobil rigorózu s výtečným výsledkem a na základě obhájené rigorózní práce byl prohlášen doktorem filosofie. Svá vysokoškolská studia zakončil státní zkouškou pro učitelství matematika-fyzika na českých gymnáziích a byl prohlášen „s vyznamenáním za způsobilého“ roku 1878. Ve školním roce 1878-79 přijal místo asistenta geodézie a sférické astronomie na vídeňské technice. Zde zůstal až do roku 1880, kdy nevyužil prodloužení asistentury, protože byl jmenován suplentem slovanského státního gymnázia v Brně. V roce 1881 odchází na klementinskou hvězdárnu. Po odchodu Seydlera zde získává místo adjunkta. Následně po smrti ředitele Hornsteina 1882 až do jmenování Weineka 1883 zastává místo prozatímního správce.

Do roku 1892 měl Gruss za sebou již bohatou vědeckou činnost. V odborném tisku uveřejnil tři pojednání z matematiky, dvě z fyziky, převážnou většinu však tvořily odborné práce z astronomie. Matematikou a fyzikou se Gruss zabýval hlavně v počátečních obdobích své vědecké dráhy, kdy spolupracoval např. s Machem a Weltrubským při optických výzkumech jiskrových vln v roce 1878.

V osmdesátých letech se již Gruss plně věnoval astronomii. Roku 1879 publikoval pojednání *Beiträge zur physischen Beschaffenheit der Sonne* česky *Příspěvek k fyzikálním vlastnostem Slunce*. Gruss chtěl řešit v té době stále otevřenou otázku, zda tepelné a světelné vyzařování je ve všech částech slunečního povrchu stejné. K tomuto účelu zkoumal dlouhé pozorovací řady teploty vzduchu a hledal periodu kolísání teploty.

Weinek, který přišel na Hornsteinovo místo ředitele hvězdárny, byl především pozorovatelem. I přes skromné instrumentální vybavení se snažil rozvíjet činnost hvězdárny především tímto směrem. K jeho nejvýznamnějším spolupracovníkům v té době patřil i Gruss. Spolu pozorovali celou řadu úkazů: zákryty hvězd, zákryty Jupiterových měsíců, zatmění Měsíce, planety, komety a mlhoviny. Šlo však o pozorování spíše příležitostná, většího významu mělo jen pozorování horního okraje Měsíce při průchodu meridiánem.

V roce 1892 přechází Gruss na českou universitu. Stává se zde mimořádným a o pět let později i řádným profesorem teoretické astronomie. Zároveň je pověřen správou astro-

nomického ústavu. Zde se setkává s mladým asistentem **Václavem Láskou (1864 – 1942)**. Právě spolupráce těchto dvou vědců přinesla výsledky, které zařadily universitní ústav mezi přední observatoře, zabývající se studiem proměnných hvězd.

Studium proměnných hvězd bylo dlouhou dobu zanedbáváno, oživeno bylo až činností německého astronoma **Friedricha Wilhelma Augusta Argelander (1799 – 1875)**, ředitele hvězdárny v Bonnu. Argelander vypracoval přesnou metodu vizuálního odhadu pozorované hvězdné velikosti proměnné hvězdy porovnáním s dvěma hvězdami, jasnější respektive méně jasnou hvězdou, než byla zkoumaná. Sledování proměnných hvězd bylo přístupné i amatérům. U nás se jím zabýval profesor chemie Filozofické fakulty **Vojtěch Šafařík (1829 – 1902)**, který vykonal do konce devadesátých let 19. století zhruba dvacet tisíc pozorování. Šafařík sledoval nejen změny pozorovaných hvězdných velikostí, ale snažil se sledovat i změny v barvě. Ve svých článcích doporučoval, aby pro některé hvězdy bylo použito spektrálního výzkumu, který on sám nemohl podniknout. Tento vyšší stupeň výzkumu proměnných hvězd byl dosažen právě na astronomickém ústavu české university, zakotvil zde již počátkem devadesátých let. První pozorování byla ovšem ještě vykonána v optickém oboru světla. Výsledky práce uveřejnili Gruss a Láska roku 1894. Publikace obsahovala výsledky zkoumání dvaceti proměnných hvězd, většinou slabších než šest magnitud. Pozorování probíhalo Argelanderovou metodou za použití osmipalcového universitního dalekohledu. Soustředilo se převážně na studium hvězd méně známých, zatímco známé proměnné hvězdy byly využívány pouze k ověření přesnosti svého postupu. O snaze rozvinout studium hvězd do hloubky svědčí, že pracovníci ústavu velmi rychle přešli od pozorování v optickém oboru ke spektroskopickému výzkumu. Již v roce 1884 oba autoři publikovali práci *Pozorování jasných čar ve spektrech některých hvězd*. Při pozorování osmipalcovým dalekohledem bylo použito okulárových spektroskopů. Celkem bylo zkoumáno třináct proměnných hvězd, u pěti z nich se podařilo sledovat jasné emisní čáry vodíku. Řadou dalších pozorování se podařilo dosažené výsledky ověřit a rozšířit, jak o tom svědčí práce publikovaná v následujícím roce 1885. Většinu výzkumu proměnných hvězd provedl Láska, po jeho odchodu roku 1896 další činnost v tomto směru ochabuje. Uvedená pozorování, i když nejsou příliš početná, mají velký význam neboť jimi u nás začíná skutečný astrofyzikální výzkum. Teoretickým východiskem práce byl tehdy ve světové astronomii prosazovaný názor, že pro poznání podstaty proměnných hvězd je důležité sledovat nejenom změny jasnosti, ale především změny spektra. Bylo zjištěno, že ve spektru proměnných hvězd můžeme pozorovat některé jasné emisní čáry příslušející vodíku a heliu. Proto se autoři Gruss a Láska přímo zaměřili na hledání výskytu emisních čar, zejména na spektrální čáru H_{α} .

Personál ústavu v čele s Grussem se nezabýval jenom tehdy moderní astrofyzikální disciplínou – spektrální analýzou. Značnou část času věnovali také obvyklé činnosti sledování komet, meteorů, zatmění Měsíce aj. Tato pozorování nesloužila jen účelům čistě vědeckým, nýbrž i pedagogickým. Adepti astronomie se při nich učili technice astronomických pozorování a zacházení s přístroji. Získané výsledky vyhodnocovali a srovnávali s teoretickými výpočty. Mezi studenty, kteří jsou v dobových publikacích uváděni jako pozorovatelé, najdeme i budoucí významné představitele české vědy např. F. Nušla, K. Petra, V. Nechvíleho. K dalším pedagogickým povinnostem Grusse patřily universitní přednášky jím vedené téměř 25 let. Podařilo se mu udržet jejich vysokou úroveň i po Seydlerově smrti.

Gruss napsal roku 1896 původní a rozsáhlou knihu *Z říše hvězd*. Ještě v třicátých létech 20. století platila za nejlepší českou populární publikaci o astronomii. Podle této knihy byl později pojmenován i odborný časopis Československé astronomické společnosti – *Říše hvězd*.



Obr. 31: František Nušl

ronomem. V roce 1889 skládá doktorát a o rok později 1890 je jmenován asistentem při astronomickém ústavu české university. Již za ředitele Seydlera se Láška osvědčil nejenom jako nadaný pozorovatel, ale i jako zdatný teoretik. V době svých studií získal velký přehled nejen o astronomii, ale i o matematice, geodézii, meteorologii, filosofii, byl velmi sečtělý, nazývali ho „malou encyklopedií matematických věd“.

Jeho působení na universitní observatoři bylo významné tím, že jako asistent prosazoval moderní astrofyzikální výzkum. Studium spekter proměnných hvězd v devadesátých letech zakotvilo v práci ústavu hlavně jeho zásluhou. K tomu účelu zakoupil i první fotografický přístroj a dal ho namontovat na dalekohled. V teoretické činnosti se Láška zabýval hlavně výpočty drah planet a komet. Pod Seydlerovým vedením spočítal dráhy planetek Asporiny a Sapienie.

Po založení ústavu bylo potřebné zjistit přesné souřadnice observatoře, jejichž znalost je nezbytná pro astronomickou práci. Láška jako „geodet“ se tohoto úkolu zhostil na výbornou. Při proměřování lomeným pasážíkem dosáhl přesných výsledků postupoval metodou, kterou vyvinuli dánský astronom Christian Pedersen Horrebow (1718 – 1776) a americký astronom a matematik Andrew Talcott (1797 – 1883), dospěl k hodnotě zeměpisné šířky: $50^{\circ} 6' 11,7'' \pm 0,1''$. Při této příležitosti Láška určil geografické souřadnice observatoře také geodeticky navázáním na triangulační body v Praze a provedl kritický rozbor analýzy stanovení souřadnic těchto bodů. Výsledky publikoval roku 1899.

Ačkoliv Láška byl schopný odborník, nepodařilo se mu na české universitě zakotvit natrvalo. Místo asistenta bylo po existenční stránce značným provizoriem a protože se

neuvolnilo žádné místo profesora, Láška využil v roce 1896 nabídku university ve Lvově a několik let tam přednášel. Jeho další vědecká dráha se tak odklání od astronomie, prosazuje se jako geodet.

Na ústavě se asistentem a později adjunktem na dobu více než dvaceti let, do roku 1923, stává Jiří Kaván. Začátek 20. století znamená výrazný obrat v úrovni práce ústavu. Šlo však o změnu k horšímu, jak po stránce teoretické, tak i v praktické pozorovací činnosti. Pracovníci astronomického ústavu neudrželi pozitivní trendy z devadesátých let, které hlavně ve sledování proměnných hvězd řadily ústav mezi důležitá vědecká pracoviště. Brzy se projevil pokles a stagnace, vrcholící v období první světové války. V období 1889–1899 byl ještě obor vědeckého zájmu ústavu široký, byly studovány nejenom proměnné hvězdy, ale i komety, planetky, rovněž však Měsíc, Saturn, Jupiter a meteory. Charakter práce v letech 1900–1919 je však již zcela jiný. Na pozorovacím programu zůstalo jen pozorování meteorů a pozorování Měsíce; málo početná teoretická pojednání spadají do několika málo prvních let námi sledovaného období.

Příčinou zaostávání universitního ústavu počátkem století bylo především nepočetné personální obsazení. Prakticky po celou dobu existence ústavu v něm pracoval ředitel, v té době Gruss, asistent Kaván a výpomocný sluha. Ve srovnání s klementinskou hvězdárnou to bylo zcela nedostatečné. Převážná část organizační, pedagogické i vědecké práce ležela na Grussovi. Jeho zdraví však v té době bylo již podlomeno. Kolem roku 1907 se příznaky choroby zhoršily natolik, že Gruss nebyl schopen systematicky vědecky pracovat. Tím samozřejmě trpěla i vzdělávací funkce ústavu, počet praktických cvičení zaostával za skutečnými potřebami. Gruss odešel v roce 1914 do penze, umírá v Praze roku 1922.

K rozvoji ústavu nepřispěla kladně volba prozatímního ředitele. V říjnu 1914 se jím stal Čeněk Strouhal. Ani on není schopen ze zdravotních důvodů zvládnout množství úkolů kladených na něj v souvislosti s funkcí ředitele. Proto v roce 1915 Strouhala vyměnil **Bohumil Kučera (1874 – 1921)**. Jako teoretický fyzik však nemůže zajistit hladký provoz celého ústavu po odborné stránce, snaží se alespoň zajistit opravu chátrající budovy. Ovšem ve válečném roce 1917 je to prakticky nemožné. Ústav stěží plní své povinnosti vůči universitě, vědecká práce jde stranou. Lépe zabezpečená klementinská hvězdárna se rovněž nezabývala astronomií, nýbrž meteorologickou službou pro potřeby armády.

8.4 Astronomie v první polovině 20. století

Poměry se konsolidují až v nové republice v roce 1919, kdy se správy ústavu ujímá **Vladimír Václav Heinrich (1884 – 1965)**, který má všechny předpoklady navázat ve své práci na úspěšná období Seydlerova i Grussova.

Osobou zaručující kontinuitu práce byl v té době byl **Jiří Kaván (1877 – 1933)**, který se významněji neprosadil ve světě, nepronikl ani mezi významné české astronomy. Bez jeho trpělivé každodenní obyčejné a špatně placené práce by byl chod celého ústavu nemyslitelný. Zatímco jeho předchůdci odcházeli ani ne po několika letech, Kaván zůstal na ústavu na dobu více než dvaceti let.

Narodil se v Praze 1877, kde vystudoval filosofickou fakultu české university, aprobaci matematika-fyzika. Již za dob studií se účastnil práce na astronomickém ústavu a od roku 1901 zde zakotvil jako asistent natrvalo. Roku 1902 byl promován na doktora filosofie, ale

ani po získání akademického titulu se nezlepšila jeho finanční situace. Jako asistent měl velmi nízký příjem, proto vedle práce v ústavu působil v letech 1902–1909 na střední škole. Na ústavu se zabýval hlavně praktickým pozorováním, k němuž využíval universitního dalekohledu. Pozoroval jevy v soustavě měsíců Jupitera, meteory, Měsíc. Výsledky svých sledování slunečních skvrn zasílal **Alfredu Wolkerovi (1854 – 1931)** do Curychu. Tato pozorování jsou cenná, neboť v té době tomuto odvětví astrofyziky nebyla věnována patřičná pozornost.

Kaván psal do Ottova naučného slovníku jednotlivá hesla, uveřejnil *Úvod do sférické astronomie*. V astronomickém ústavu vypomáhal při cvičeních, spravoval knihovnu a všechny katalogy a obstarával určování času. Prováděl výpočty i pro hvězdárnu v Ondřejově a v závěru svého života sestavil tabulky numerických funkcí a rozkladů čísel 1 - 256000 na prvočinitele. Na astronomickém ústavu sice oficiálně působil až do roku 1923, ale ve skutečnosti již roku 1918 přebral pražskou hvězdárnu pod správu nového státu. V roce 1919 odešel na Slovensko do Staré Ďaly, dnes Hurbanovo, na Maďary opuštěnou hvězdárnu hraběte Konkolyho. Zde pobyl devět let a vrací se do Prahy, kde v březnu 1933 umírá.

Jak jsme již uvedli, ředitelem ústavu se stal Heinrich, který se narodil v září 1884 v Peruci v Čechách. Mládí prožil v Příbrami, kde jeho otec Bedřich Heinrich byl lékařem. Pobyt Heinrichovy rodiny v Příbrami je zajímavý tím, že v jejich domě pobývali často významné osobnosti kulturního života – Jaroslav Vrchlický a Julius Zeyer. Studia Heinrich absolvoval na místním státním reálném a vyšším gymnáziu v Příbrami, kde maturoval v roce 1903.

Další studia pokračovala v Praze na filosofické fakultě české university, kde strávil osm semestrů v letech 1903 – 1907. Zaměřil se na studium matematiky a fyziky. K jeho pedagogům patřili K. Petr na matematiku, J. Sobotka na geometrii, T. G. Masaryk na filosofii, J. Rayman na chemii, Č. Strouhal, B. Kučera, F. Koláček na fyziku, G. Gruss a **František Nušl (1867 – 1951)** na astronomii. Ta ho přitahovala nejvíce a Heinrich se jí rozhodl věnovat natrvalo. V osobě profesora Grusse našel nejlepšího rádce a učitele.

Začínal nejprve s výpočty dráhy planety Patrocl. Dokázal, že se pohybuje v blízkosti Lagrangeova bodu L_5 soustavy Slunce – Jupiter – planeta a že jako několik jiných Trojanů přibližně splňuje jeden ze zvláštních případů přesného řešení problému tří těles. Tento výpočet dráhy byl první svého druhu v Čechách a zároveň předznamenal další směr Heinrichova vědeckého zájmu, kterým se stala kosmická mechanika. Úroveň práce *Vyšetřování o dráze planety 617* byla vysoká, proto byla přijata jako práce disertační a na jejím základě byl Heinrichovi udělen titul doktora filosofie roku 1908. Po skončení universitních studií odchází Heinrich stejně jako řada jeho předchůdců do ciziny. Na významných evropských observatořích se chce zdokonalit v těch metodách astronomické práce, které vzhledem k přístrojovému vybavení nemohou být pěstovány u nás. Pracuje ve Strassburgu (astrometrie), Heidelbergu (fotografie), Göttingenu (fotometrie a teoretická astronomie).

V Čechách Heinrich v roce 1910 získává vysvědčení učitelské způsobilosti na gymnáziích a školách reálných pro matematiku a fyziku a završuje tím svá universitní studia. Protože profesor Gruss omezuje ze zdravotních důvodů počet svých přednášek z astronomie, Heinrich se roku 1913 habilituje pro teoretickou astronomii na základě své práce *Theorie periodických pohybů typu $5/3$ v asteroidickém problému tří těles*. V ní provádí rozbor

zvláštního případu řešení problému za předpokladu, že planetka má malou hmotnost a že její střední úhlová rychlost je k úhlové rychlosti Jupitera v poměru 5:3.

Roku 1916 definitivně přichází jako asistent na astronomický ústav. Za svízelných válečných let provádí měření dvojhvězd dalekohledem. Heinrichova vědecká i organizační práce je v té době oceněna volbou za mimořádného člena Královské české společnosti nauk v roce 1918 a především jmenováním ministrem školství a národní osvěty již nové republiky v roce 1919 mimořádným profesorem astronomie Karlovy University a zároveň definitivním ředitelem astronomického ústavu.

Po jmenování do čela astronomického ústavu vyvstala před Heinrichem celá řada zdánlivě neřešitelných obtíží, které se projevovaly hlavně v otázce materiálního zabezpečení. Nová republika v tomto ohledu nebyla o mnoho štedřejší než monarchie. Muselo se začít téměř od začátku, jestliže přístrojové vybavení v době Seydlerově ještě vyhovovalo, nebylo to možné tvrdit po třiceti letech, kdy rychlý rozvoj astronomie kladl na výzkumné prostředky zvýšené nároky. Vybavení observatoře již bylo zastaralé. Heinrich poznal celou řadu moderních astronomických observatoří v Evropě i Americe a měl představu, jaké přístroje je nutno získat. Se svými oprávněnými požadavky pravidelně vystupoval na přírodovědecké fakultě, ale byly velmi často zamítány. Finanční potíže byly, použijeme-li Heinrichovy formulace, do nemožnosti zveličovány i v době, kdy peněžních zdrojů byl dostatek. Příčinou byla nejenom značná konkurence jiných ústavů - Ďala, Ondřejov, ale také fakt, že na fakultě se dotace nedělily podle potřeb, ale často podle toho, jaký vliv v profesorském sboru a ve veřejném životě měl dotyčný žadatel. Situaci ve sboru v souvislosti s projednáváním dotací profesor Heinrich charakterizuje takto: *„Konkurenční živly popíraly tu jakékoli potřeby, ba jakékoli oprávnění ústavu mojí stolice.“* Dále podotýká, že boj o dotace byl natolik osobní, jakoby peníze chtěl sám pro sebe.

Rozsáhlé úpravy vyžadovala i vlastní budova, v níž byl ústav umístěn. Již v roce 1917 Kučera upozornil na to, že umístění na Smíchově nevyhovuje. Místnosti ústavu jsou malé, průmysl negativně ovlivňuje pozorování a budova je celkově zbědovaná. Nejnutnější opravy se uskutečnily až koncem roku 1921 za vydatného finančního přispění Heinricha.

Na začátku svého působení nemohl Heinrich v astronomickém ústavu pomýšlet na nákup nových přístrojů. Peníze nestačily ani na opravu zchátralého zařízení, kterým ústav již disponoval. Proto zřídil vlastní mechanickou dílnu, kde byl opraven Seydlerův refraktor. V druhé etapě Heinrich uvažoval o nákupu moderní optiky a konečně ve třetí chtěl ve své dílně tuto optiku smontovat. První dvě etapy se podařilo realizovat, poslední již nikoliv.

V mechanické dílně zaměstnával mechanika Brejlu, velmi schopného pracovníka ze závodu na výrobu měřících přístrojů bratří Fričů. Nyní se mohlo přikročit k opravě dalekohledů a k nákupu nové optiky. Heinrich získal vynikající optiku, která zařadila ústav po této stránce k nejlepším v republice. Roku 1924 zakoupil nový Zeissův desetipalcový objektiv, o rok později dvojdílný astrografický objektiv. Mechanická dílna, přestože se zpočátku uvažovalo o jejím zrušení, úspěšně provedla opravu původního Seydlerova refraktoru.

Brzy po svém jmenování ředitelem astronomického ústavu se Heinrich zamýšlel mezi jiným i nad budoucí orientací vědecké práce ústavu. Ze škály oborů si Heinrich vybral z praktické astronomie hlavně vizuální a fotografickou astrometrii, dále fotometrickou astrofyziku a z teoretické astronomie především kosmickou mechaniku.

Heinrich se věnoval po celou dobu svého působení ve funkci ředitele také odborné knihovně. Všechna starost s jejím zřízením, s obstaráváním publikací a doplňováním fondu ležela na něm, protože početní stav personálu ústavu byl malý, jeden asistent a demonstrátor. Gruss bezplatně vyměňoval publikace jen s hvězdárnami v Německu a ve Vatikánu, Heinrich tuto výměnu rozšířil na sto padesát nejvýznamnějších observatoří celého světa. Tak se na jedné straně podařilo ušetřit asi sto tisíc korun na nákladech, a na druhé straně o práci astronomického ústavu byli informováni astronomové ve Francii, Holandsku, Švédsku, Dánsku, Itálii, Anglii, USA, SSSR, Rakousku, v Jižní a Severní Africe, Austrálii a Asii. Ve více než padesáti člancích a publikacích, některé byly přímo ze zahraničí vyžádány, můžeme najít čtyři větší pozorovací práce mladých pracovníků ústavu. Dvě se týkají obtížného měření dvojhvězd (Buchar) a dvě práce pozorování hvězd proměnných (Šternberk).

Heinrich se zaměřoval jiným směrem než jeho spolupracovníci. Byl vychován matematicky a třebaže v zahraničí se zabýval i praktickou pozorovací činností, po příchodu na astronomický ústav se již věnuje jen problémům kosmické mechaniky, která je disciplínou spíše matematickou než astronomickou. Po celou dobu svého života studoval hlavně problémem tří těles. Pracoval velmi podobně jako Seydler, ačkoliv nebyl jeho přímým žákem, ale v mnohém ho předčil. Snažil se nalézt analytické pokračování zjednodušených případů a výsledkem byla obecně platná sekulární řešení problému tří těles, jež mají vystihnout planetární pohyby konvergentními řadami i pro velmi dlouhé doby. Rozvinul metody francouzského fyzika **Julese Henryho Poincarého (1854 – 1912)** a švédského astronoma **Carla Wilhelma Ludwiga Charliera (1862 – 1934)**. V řadě teoretických prací Heinricha zaujímá zvláštní postavení jeho velmi obsáhlá a originální práce z teorie pohybu Měsíce, dalším objektem zájmu se stal problém Hecuby a dalších planetek.

Bohužel Heinrich se zabýval klasickou kosmickou mechanikou v době, kdy tento obor ustupoval pod tlakem nových pozorovacích metod a hromadícího se statistického materiálu do pozadí a na jeho místě se začala uplatňovat fyzika s možností analyzovat chemické složení, fyzikální vlastnosti a vývoj jednotlivých kosmických těles. Většinou mladých astronomů se zdálo, že klasická kosmická mechanika je již vyčerpaným celkem, v němž nelze očekávat nové objevy. To byl jeden z hlavních důvodů, proč Heinrich nenašel mnoho následovníků.

Heinrich, fundovaný a do svého oboru zapálený člověk, preferoval především vědeckou náplň práce svého ústavu, třebaže bylo potřebné plnit své povinnosti vůči přírodovědecké fakultě. Nemohl se zaměřit jen úzkým směrem vlastního vědeckého bádání, ale naopak musel účinně spolupracovat při výuce astronomie pro studenty učitelství na středních školách. Vedle Nušla právě Heinrich, od roku 1926 již řádný profesor astronomie, vedl přednášky nejenom ze sférické a teoretické astronomie, ale i z kosmogonie, astrofyziky a kosmické mechaniky. Některé přednášky konal i zdarma. V praktických cvičeních byli studenti odkázáni jen na astronomický ústav. Zatímco za Grusse se praktika konala jen každý třetí nebo čtvrtý semestr a počet praktikantů byl omezen na šest, rozvoj ústavu ve dvacátých a třicátých letech umožnil rozšířit tento druh výuky na všechny semestry pro čtyřnásobný počet posluchačů. Ústavem prošly celé generace mladých astronomů, kteří zde získali výborné teoretické i praktické vzdělání a byli schopni efektivně pracovat nejenom na domácích vědeckých pracovištích, ale i v zahraničí, jmenujme např. Mohra, Bucharu.

Universitní ústav zásoboval vyškoleným personálem mimo jiné i Ondřejov, Starou Ďalu, Vojenský ústav geografický aj.

V následující seznamu jsou uvedeny názvy přednášek, postupně uskutečňovaných na astronomickém ústavu. Z tabulky vyplývá, že Heinrich i Nušl věnovali velkou pozornost pokrokovým astronomickým směrům.

- O problému tří těles a oskulačních drahách
- O planetárním systému
- O teorii poruch všeobecných i sekulárních
- Teoretická mechanika se zřetelem k problémům astronomie
- O Mléčné dráze a hvězdných proudech
- O Darwinově-Poincareově kosmogonii slapové
- Astronomie a relativita
- Kosmická fyzika
- Kosmogonie
- O principu relativnosti pokud spadá do kosmické fyziky
- Vývoj názorů o kosmu
- Vybrané části astrofyziky
- O vývoji hvězd
- Teorie moderního teleskopu
- Termodynamika stálic
- Einsteinův princip relativity a jeho fyzikální a kosmologické důsledky
- Teorie hvězdokup
- Vybrané partie z astrometrie
- Vybrané partie ze spektrální analýzy
- Teorie aplanačnického refraktoru a reflektoru
- Užití fotometrie v astrofyzice Vybrané partie z astronomické optiky
- Teorie Nušlova-Fričova radiozenitálu a diazenitálu.

Počátkem třicátých let se před astronomickým ústavem otevírá velmi slibná perspektiva. Končí práce na Seydlerově refraktoru, rozbíhá se montáž šedesáticentimetrového parabolického zrcadla, jehož význam pro úroveň pozorování je nepochybný. Vedle Heinricha se objevuje další astronom budoucích světových měřítek – asistent Mohr. V té době rozpracovává a numericky propočítává svoji teorii pohybu hvězdných systémů a snaží se ji ověřit vlastním pozorováním. V Praze tak i přes všechny nedostatky a problémy vyrůstá vědecký ústav, který získává rozhodující postavení mezi observatořemi v Československu.

Všechno úsilí věnované jeho rozvoji je však negativně ovlivňováno osobními spory ředitele Heinricha s částí personálu a profesorským sborem přírodovědecké fakulty. Důsledkem těchto sporů byl nejenom pokles autority ústavu v očích veřejnosti. V květnu 1933 je Heinrich poprvé vyzván profesorským sborem, aby rezignoval na funkci ředitele astronomického ústavu. Nušl po něm žádá vydání přístrojů, hlavně velkého Schmidtova zrcadla a likvidaci ústavu, aby se aféra prý utlumila. To bylo však pro Heinricha nepřijatelné, neboť jako výlučný teoretik by nenašel žádné posluchače.

Heinrich přednáší astronomii až do uzavření vysokých škol v roce 1939. V této činnosti pokračuje i po osvobození, nejdříve na přírodovědecké a později i na matematicko-fyzikální

fakultě. V roce 1956 je mu udělen titul doktora věd a o rok později odchází do důchodu. Umírá v roce 1965.

Další velmi významnou osobností astronomie u nás byl **Josef Mikuláš Mohr (1901 – 1979)**, který se narodil roku 1901 v Praze. Svá studia začal na Telčské státní reálce, kde maturoval 1919 a pokračoval na Vysoké škole technické v Praze v oboru strojní inženýrství. Již po roce přechází na přírodovědeckou fakultu Karlovy University a až do letního semestru 1923 studuje matematiku, fyziku a astronomii. V letech 1923-1925 pokračuje ve studiích na pařížské Sorbonně, kde také začíná vědecky pracovat v oblasti experimentální fyziky, jmenovitě ve spektroskopii. Podklady pro své práce získává na astrofyzikální observatoři v Meudonu pod vedením profesorů **Jeana Baptista Alfreda Pérota (1863 – 1925)** a **Henriho Alexandra Deslandrese (1853 – 1948)**. Mohrova disertační práce je rázu fyzikálního *O pólovém efektu čar barya, neodymu a vápníku viditelného spektra*.

Do vlasti se Mohr vrátil roku 1925 a promoval z experimentální fyziky a astronomie na Karlově universitě. Později přijímá místo nehonoraného asistenta universitního astronomického ústavu. Pro seznámení se s moderními pracovními metodami v astronomii odchází v roce 1927 pracovat jako asistent profesora Gonnésia na observatoři v Alžíru. Zde je přidělen k časové službě, obsluhuje meridiánový kruh a provádí pozorování malých planet. Výsledky svých výzkumů publikuje. Po návratu odchází z Prahy do Bratislavy.

Následují zahraniční pobyty, v Leidenu v roce 1930 a na Kapteynově ústavu v Groningen roku 1931. Výsledkem působení Mohra na těchto observatořích je již vyzrálá práce *The rotational space motions of the stars* česky *Rotační prostorové pohyby hvězd*, na jejímž základě se habilituje na Karlově Universitě pro obor praktická astronomie a astrofyzika. Znovu se jako neplacený asistent vrací na astronomický ústav od 1934. Placeným asistentem se stává až po Sloukově odchodu v roce 1935. Mohr odešel roku 1942 na tehdejší státní hvězdárnu.

Od počátku svého působení na astronomickém ústavu se snaží o moderní charakter instituce. Proto odjíždí roku 1936 na několik měsíců do Anglie. Zde se na předních astronomických pracovištích snaží najít nové náměty pro činnost ústavu. Chce zjistit, jak využít stávajících přístrojů k modernějším výzkumům a jakým směrem orientovat činnost.

Seznamuje se s observatoří v Oxfordu. Zde si zamýšlel opatřit statistický materiál pro studium vlastních pohybů hvězd až do hvězdné velikosti šestnácti magnitud v Kapteynových vybraných polích, kterým by doplnil dříve publikované studie o prostorových a radiálních rychlostech hvězd. Tento materiál bylo možné následně doma numericky zpracovávat. Po organizační stránce studoval Royal Observatory v Greenwichi, jistý čas strávil na Solar Physics Observatory v Cambridge za účelem spektrálního a fotometrického studia hvězd. Fotografoval spektrum novy Lacertae 1936, s čímž souvisí práce s mikrofotometrem metodou tzv. klínového spektra. Seznámil se s obtížnou kapitolou astrofyziky, se zakázanými čarami ve spektrech mlhovin a ve spektru nov, dále např. s Redmannovou metodou mikrofotografického proměřování celkové jasnosti extragalaktických mlhovin.

Mohr poukázal na rýsující se diskontinuitu v prostorových pohybech hvězd různých spektrálních tříd. Určil rychlost Slunce a zároveň polohu apexu pomocí hvězd, u nichž známe nejen radiální rychlost, ale i vlastní pohyby a paralaxy. Této rychlosti přisoudil dvakrát větší hodnotu, než bylo dosud obvyklé a snažil se opravit tímto údajem individuální rychlosti hvězd v prostoru. Opravených hodnot používal k určení Maxwellova elipsoidu rychlostí jednotlivých spektrálních tříd. Nalezl velmi dobrou shodu s pozorováním. Vý-

sledek svědčí ve smyslu diskontinuity v prostorových pohybech hvězd. Následně Mohr zkoumal prostorové rychlosti hvězd spektrální třídy G se souborem celkem 559 hvězd, z toho 360 obrů.

Další zajímavou prací je *Sur le courant d'étoiles Ursa Major* česky *O hvězdném proudu v Ursa Major*, ve které doplňuje členy pohybové hvězdokupy. Již od druhé poloviny devatenáctého století bylo známo, že několik hvězd v souhvězdí Velké Medvědice se pohybuje týmž směrem. Mohr na základě podrobné analýzy svého materiálu zvětšil počet hvězd tohoto proudu z dvaceti osmi na devadesát šest.

Následující publikace *The rotational space motions of the stars* česky *Rotační prostorový pohyb hvězd* se týká Lindbladovy-Oortovy teorie rotace Galaxie. V práci jsou propočítány důsledky uvedené teorie do podrobností. Pohyb hvězd je nezávislý na jejich vzdálenosti od galaktické roviny. Mezi rychlostmi hvězd a jejich hmotnostmi existuje lineární vztah, s klesající hmotností narůstá prostorová rychlost. Je vysvětlován fakt, že hvězdy s menší hmotností se pohybují kolem centra Galaxie rychlostmi většími než hvězdy s hmotností větší. Hvězdy obíhají po elipsách s větší excentricitou v případě trpaslíků, obří po drahách kruhových. Dále je určena vzdálenost středu rotace a určena střední hmotnost hvězd v okolí Slunce.

V práci *On the question of the possible rotation of the local cluster* česky *O otázce možné rotace lokální kupy* pomocí prostorových rychlostí hvězd spektrální třídy B podává Mohr důkaz, že neexistuje subtrotace hvězd, nalézajících se v nejbližším okolí Slunce, jak někteří autoři tvrdili.

V publikaci *Etude preliminaire du terme K* česky *Předběžná studie K členu* Mohr na základě analýzy pohybu 1636 hvězd odvodil, že člen K v radiálních rychlostech hvězd je mnohem menší, než se tenkrát soudilo a kolísá kolem jednoho kilometru za sekundu. Má pravděpodobně dvě složky – gravitační a dynamickou. Později velmi přesnou analýzou dochází dokonce k ještě menším hodnotám a jako vůbec první uvádí domněnku, jež je dnes obecně uznávána, že člen K ve skutečnosti vůbec neexistuje.

Problém stanovení vzdálenosti středu Galaxie je řešen v práci *The distance of the galactic centre* česky *Vzdálenost galaktického středu*. Mohr odvodil systém rovnic pro řešení tohoto problému. Výsledná rovnice pro vzdálenost centra obsahuje ještě čtyři další neznámé, Mohr dosáhl řešení postupnými aproximacemi. Rozsáhlé numerické výpočty stanovily limitu vzdálenosti středu Galaxie.

V pozdějších letech, zvláště po roce 1945, se Mohr věnuje intenzivně organizační práci na vysokých školách v Brně a později v Praze. Vydal ještě článek o pohybech horkých hvězd a nově zpracoval elipsoid rychlostí hvězd spektrální třídy A. Umřel v roce 1979.

Další osobností je **Bohumil Šternberk (1897 – 1983)**, který se narodil v roce 1897 v Chrudimi, kde vystudoval reálné gymnázium. Vysokoškolská studia zahájil osmi semestry na přírodovědecké fakultě UK v Praze a dokončil je čtyřmi semestry v Berlíně. S astronomickým ústavem UK se poprvé setkal v roce 1919, kdy je přijat jako studentská pomocná vědecká síla. Působí zde až do svého odchodu na hvězdárnu v Babelsbergu v roce 1921. Do Prahy se navrácí o dva roky později a stává se zde asistentem. Na novém působišti se zabývá měřeními a propočítáváním proměnných hvězd, analyzuje dosažené výsledky a u některých hvězd propočítává dráhové elementy. V roce 1927 Šternberk odchází na observatoř ve Staré Ďale. Před 2. světovou válkou se vrátil na Fyzikální ústav UK do Prahy a po

uzavření vysokých škol se zabýval časovou službou na pražské hvězdárně, kde vybudoval chronometrickou laboratoř. Ta byla v roce 1954 začleněna do Astronomického ústavu ČSAV, jehož se stal v letech 1954–68 ředitelem. Šternberk se stal zakladatelem moderní časové služby. Rovněž se však zabýval astrofyzikou, fotografickou fotometrií a proměnnými hvězdami, publikoval práce z oboru astronomické optiky a studia komet. Je spoluautorem vysokoškolských učebnic *Astronomie I. – II.* (1948, 1954).



Obr. 32: Antonín Bečvář

Na počest svého bratra Jana Friče (1863 – 1897) vybudoval **Jan Josef Frič (1861 – 1945)**, majitel firmy na optické přístroje, v Ondřejově hvězdárnu. Roku 1928 hvězdárnu věnoval republice.



Obr. 33: Zdeněk Kopal

autor fotografického atlasu *Měsíce*, zakladatel výzkum těsných dvojhvězd. Narodil se v Litomyšli, kde začal navštěvovat obecnou školu. Později přesídlil s rodinou do Prahy, kde studoval na smíchovském gymnáziu a přírodovědecké fakultě Karlovy Univerzity. V roce

V roce 1923 přichází na astronomický ústav jako demonstrátor student přírodovědecké fakulty **Emil Buchar (1901 – 1979)**. Zabývá se hlavně výpočtem drah planet, dvojhvězd a jejich měřením. Sleduje zákryty hvězd Měsícem, zatmění Slunce. V roce 1925 je na studijním pobytu v Alžírě, kde objevil novou planetku. Vedle astronomie se zabýval především geodézií.

Několik let v ústavě strávil i Hubert Slouka (1903 – 1973), v letech 1928–29 demonstrátor, 1929–35 asistent, který je znám spíše jako neúnavný popularizátor astronomie.

Již v textu zmiňovanou významnou osobností byl profesor Karlovy univerzity **František Nušl (1867 – 1951)**. Zabýval se anomální refrakcí, vynalezl přístroj *cirkumzenitál* sloužící k určování polohy na zemském povrchu, zeměpisné délky i šířky. Byl ředitelem Státní hvězdárny v Praze a v Ondřejově.

Významnou osobností byl **Antonín Bečvář (1901 – 1965)**. Narodil se ve Staré Boleslavi, od 16 let žil v Brandýse nad Labem. Studoval klimatologii a astronomii na přírodovědecké fakultě Karlovy Univerzity. Přešel na Slovensko, kde v průběhu 2. světové války byla vybudována hvězdárna na Skalnatém Plese ve Vysokých Tatrách. V letech 1943 – 1950 byl jejím ředitelem. Zde v roce 1948 se svými spolupracovníky dokončil první hvězdný atlas *Atlas Coeli*. V roce 1951 se vrátil zpět do Brandýsa nad Labem, kde vytvořil atlasy *Eclipticalis* roku 1958, *Borealis* roku 1962 a *Australis* roku 1964, které rovněž vyšly v zahraničí. Bečvář byl rovněž průkopníkem meteorologické fotografie, v roce 1953 vydal *Atlas horských mraků*.

Velmi známým fotografem astronomických dějů na obloze byl **Josef Klepešta (1895 – 1976)**.

K nejvýznamnějším českým astronomům dále patřil **Zdeněk Kopal (1914 – 1993)**, profesor astronomie v Manchesteru,

1938 odchází na studijní pobyt do Cambridge v Anglii. V průběhu 2. světové války působil v USA jak v astronomickém – Harvard, tak i vojenském výzkumu – Massachusettský technologický institut. Roku 1951 přešel na katedru astronomie v Manchesteru ve Velké Británii. Pro měsíční mise NASA Apollo vytvořil topografické podklady s výškovými profily měsíčních map, s podrobnostmi (75 – 125) m. Měl vlastenecký vztah ke své vlasti, kam se často a rád vracel. Je pochován na Vyšehradském hřbitově.

Časová osa historického vývoje astronomie

- 4 241 př. n. l. – první kalendář – Egypt
do 4. tisíciletí – obrázky starověkých Mayů
mezi 4. tisíciletím – 2. tisíciletím – megalitické stavby, Anglie, Bretaň, počátek výstavby – Stonehenge
- 3 379 př. n. l. – zatmění Měsíce, zachycené u starověkých Mayů
3. tisíciletí př. n. l. – vynález vodních hodin, Čína
kolem roku 3. tisíce př. n. l. – první astronomické zápisy v Egyptě, Babylónii, Číně
- 2 679 př. n. l. – zápis o slunečním zatmění v Číně
2 315 – 2 287 př. n. l. – záznamy o pozorování komet v Číně
2 000 př. n. l. – výstavba základního kruhu v Stonehenge
1 100 př. n. l. – z pozorování Slunce určen sklon ekliptiky k rovníku, Čína
763 př. n. l. – nejstarší záznam o pozorování úplného zatmění Slunce, Babylon
600 př. n. l. – základem astronomie matematika a geometrie, Thales z Milétu
530 př. n. l. – sférický tvar Země, Pythagoras ze Samu
370 př. n. l. – pohyb planet – skládání kruhových pohybů, Eudoxos z Knidu
360 př. n. l. – O nebi, Aristoteles
290 př. n. l. – počátky systematických pozorování a určování poloh hvězd, Timocharis, Aristill
270 př. n. l. – myšlenka pohybu Země, Měsíce a planet kolem Slunce, pokus o stanovení prostorových vzdáleností Země – Měsíc – Slunce, Aristarchos ze Samu
230 př. n. l. – rozměry Země, Eratosthenes
220 př. n. l. – úhlová velikost Slunce, Archimedes
200 př. n. l. – epicykl, deferent, Apollonius z Pergy
150 př. n. l. – katalog hvězd, precese, tabulky pohybu Slunce, Měsíce, Hipparchos
46 př. n. l. – zaveden juliánský kalendář
150 n. l. – Megalé syntaxi – Almagest, K. Ptolemaios
960 n. l. – katalog hvězd, Al Sufí
1054 – výbuch supernovy v souhvězdí Býka, zachycen v evropských, čínských a japonských kronikách
1252 – Alfonsinské tabulky, polohy planet
1425 – observatoř v Samarkandu, Ulugh Beg
1472 – Nová teorie planet, G. Peurbach
1496 – překlad Almagestu do latinského jazyka
1543 – O oběžích nebeských sfér, M. Koperník

- 1551 – Pruské tabulky, E. Reinhold
- 1572 – supernova v Kassiopeji
- 1582 – zaveden gregoriánský kalendář
- 1596 – proměnnost α Ceti, D. Fabricius
- 1600 – odsouzen G. Bruno
- 1603 – Uranometrie, hvězdný atlas, J. Bayer
- 1604 – výbuch supernovy
- 1609 – Nová astronomie, J. Kepler
- 1609 – refraktor – dalekohled, H. Lipershey
- 1610 – pozorování oblohy, Hvězdný posel, G. Galilei
- 1611 – rotace Slunce, G. Galilei
- 1619 – Harmonie světa, J. Kepler
- 1627 – Rudolfské tabulky, J. Kepler
- 1632 – Dialog o dvou hlavních světových soustavách, G. Galilei
- 1648 – rozklad světla hranolem, Jan Marek Marci
- 1651 – Almagestum novum G. B. Riccioli, mapa Měsíce
- 1655 – 1659 – objev prstenců Saturna, měsíce Titan, rotace Marsu, polární čepičky, Ch. Huygens
- 1665 – rozklad slunečního světla hranolem, I. Newton
- 1668 – 1671 – dalekohled reflektor, I. Newton
- 1672 – stanovení paralaxy Slunce a astronomické jednotky J. Picard, J. Richer, G. D. Cassini
- 1675 – určení konečné hodnoty rychlosti světla ze zákrytů měsíce Io Jupiterem, O. Römer
- 1687 – Matematické základy přírodní filozofie I. Newton
- 1698 – Cosmotheoros Ch. Huygens, první pokus o stanovení hvězdných vzdáleností
- 1705 – potvrzení periodičnosti některých komet, výpočet návratu komety, E. Halley
- 1717 – objev vlastního pohybu Aldebarana, Siria a Arktura, E. Halley
- 1728 – aberace světla hvězd (1725) a její interpretace (1728), J. Bradley
- 1743 – tvar Země, A. Clairaut
- 1749 – teorie precese a nutace, J. d'Alambert
- 1753 – nová teorie pohybu Měsíce, L. Euler
- 1755 – všeobecná historie přírody a teorie nebe, E. Kant
- 1761 – atmosféra Venuše, M. V. Lomonosov
- 1766 – 1772 – zákon Tituse – Bodeho
- 1773 – stabilita sluneční soustavy, P. S. Laplace
- 1781 – objev Uranu, W. Herschel

-
- 1783 – pohyb Slunce ve směru apexu, W. Herschel
1801 – objev planety Ceres, G. Piazzi, K. F. Gauss
1803 – potvrzení existence fyzických dvojhvězd, W. Herschel
1809 – teorie pohybu nebeských těles obíhajících kolem Slunce po kuželosečkách, K. F. Gauss
1814 – 1815 – popis více než 300 čar ve spektru Slunce, určení jejich vlnových délek, J. Fraunhofer
1817 – měsíc a planety mají sluneční spektrum, září odraženým světlem, J. Fraunhofer
1837 – 1839 – měření paralaxy hvězd, V. J. Struve, F. V. Bessel, T. Henderson
1840 – fotografie Měsíce, J. Draper
1842 – Dopplerův princip
1843 – 1844 – stanovení periodičnosti slunečních skvrn, H. S. Schwabe
1846 – objev Neptunu J. F. Gallem po výpočtech U. J. Leveriera
1850 – počátek širokého používání fotografie v astronomii USA, Anglie
1851 – Foucaltovo kyvadlo demonstrující rotaci Země
1857 – 1863 – sestavení čtyřdílného BD katalogu 324 000 hvězd severní oblohy
1857 – matematický vztah pro rozložení jasností hvězd do hvězdných velikostí, N. Pogson
1859 – zákony spektrální analýzy, G. Kirchhoff, R. Bunsen
1860 – počátky hvězdné spektroskopie
1862 – vizuální objev Siria B, A. Clark
1863 – klasifikace hvězdných spekter, A. Secchi
1864 – spektrální pozorování komet, objev emisních čar ve spektrech komet, G. B. Donati
1868 – nezávislé objevení metody pozorování protuberancí a sluneční koróny mimo zatmění, J. N. Lockyer, P. Jansen
1868 – vizuální měření radiálních rychlostí hvězd, W. Huggins
1868 – objev helia ve spektru Slunce při úplném zatmění, J. N. Lockyer
1870 – pozorování spektra erupce Slunce, Ch. Young
1872 – fotografie hvězdného spektra – Vega, určení radiální rychlosti
1874 – klasifikace spekter hvězd, H. C. Vogel
1877 – měsíce Marsu Phobos a Deimos, A. Hall
1879 – sestavení vztahu pro Balmerovu sérii spektrálních čar vodíku
1879 – 1881 – teorie slapů, vývoj soustavy Země – Měsíc, J. Darwin
1882 – katalog spekter 4051 hvězd, H. C. Vogel
1888 – počátek systematického fotografického studia hvězdných spekter
1888 – 1908 – katalog NGC mlhovin a hvězdokup, J. Drayer
1889 – 1891 – spektroheliograf, J. Heyl, A. Deland

- 1890 – 1924 – HD katalog H. Drapera
- 1898 – Nové metody kosmické mechaniky, H. Poincare
- 1901 – rozpracována spektrální klasifikace, A. Cannon, E. Pickering
- 1905 – rozdělení hvězd pozdních spektrálních tříd na trpaslíky a obry, E. Hertzsprung
- 1908 – magnetická pole slunečních skvrn
- 1908 – 1912 – závislost perioda – zářivý výkon u cefeid, H. Leavitt
- 1910 – počátek fotoelektrických pozorování hvězd se selénovými fotočlánky
- 1910 – 1912 – Göttingenská fotometrie, první katalog fotografických hvězdných velikostí, K. Schwarzschild
- 1910 – 1914 – počátky rozpracování teorie hvězdných atmosfér, K. Schwarzschild
- 1911 – 1914 – diagram spektrum – zářivý výkon, E. Hertzsprung, H. N. Russell
- 1912 – určení radiálních rychlostí galaxií, W. Slipher
- 1913 – teorie stavby atomu vodíku, objasňující série čar v hvězdných spektrech, N. Bohr
- 1914 – 1919 – teorie pulsace cefeid, stanovení nulového bodu, H. Shapley
- 1915 – 1916 – odklon světelných paprsků v gravitačním poli Slunce, A. Einstein
- 1915 – Sirius B potvrzen bílým trpaslíkem, W. Adams
- 1916 – počátky teoretického výzkumu stavby nitra hvězd, mechanismus přenosu energie od středu k povrchu, A. Eddington
- 1918 – výzkum rozložení 69 kulových hvězdokup v prostoru, určení stavby a velikosti Galaxie
- 1918 – uveden do provozu dalekohled o průměru 2,5 na observatoři Mount Wilson
- 1919 – observační potvrzení odklonu slunečních paprsků v průběhu slunečního zatmění v roce 1918, A. Eddington
- 1920 – teorie ionizace atomů ve hvězdných atmosférách, M. Saha
- 1920 – rudý posuv čar ve spektrech galaxií, W. Slipher
- 1920 – 1923 – interferometrické měření průměru hvězd, A. Michelson
- 1922 – rozpracování vývojových nestacionárních modelů vesmíru, A. A. Fridmann
- 1923 – objev cefeid v galaxii M 31, E. Hubble
- 1923 – vynález spektroheliografu, J. Heyl
- 1923 – závislost hmotnost – zářivý výkon, A. Eddington
- 1923 – rozpracována metoda křivek růstu pro určení chemického složení hvězd, M. Minnaert
- 1926 – 1927 – diferenciální rotace Galaxie, B. Linblad, J. Oort
- 1929 – zákon rudého posuvu ve spektrech galaxií, E. P. Hubble
- 1929 – stanovení chemického složení Slunce, H. N. Russell
- 1930 – existence mezihvězdné absorpce, její selektivní charakter, R. Trümpler

-
- 1930 – objev Pluta, C. Tombaugh
1932 – rádiové záření Galaxie, K. Jansky
1933 – neutronové hvězdy jsou výsledkem exploze supernov, W. Baade, F. Zwicy
1937 – 1938 – termonukleární reakce ve hvězdách, H. Bethe, C. F. F. von Weizsäcker
1938 – existence oblastí H II kolem horkých hvězd, B. Strömgren
1944 – předpověď existence rádiového záření na vlnové délce 21 cm, Van der Hulst
1946 – radiolokace Měsíce, J. Stuart,
1948 – koncepce horkého modelu vesmíru, G. A. Gamov
1951 – objev předpovězeného rádiového záření vodíku
1952 – přepočet škály mezigalaktických vzdáleností, W. Baade, A. Sandage
1954 – aktivita jader galaxií, V. A. Ambarcumjan
1957 – vypuštění umělé družice Země
1958 – 1960 – radiační pásy kolem Země, J. A. Van Allen
1961 – oblet Země v kosmickém prostoru, J. A. Gagarin
1962 – 1963 – kvasary, J. Bolton, C. Hazard, M. Schmidt
1965 – reliktního záření, A. Penzias, R. Wilson
1968 – pulsary, J. Bell, A. Hewish.
1969 – lidé na Měsíci, N. Armstrong, E. Aldrin

Literatura

- [1] Baade, H.W.: IAU Trans.VIII. Report to Commission 28. Cambridge University Press, Cambridge 1952, p. 397.
- [2] Balmer, J. J.: *Notiz über die Spektrallinien des Wasserstoffs*. Annalen der Physik und Chemie **25**, 80, 1885.
- [3] Becker, F.: *Geschichte der Astronomie*. Hochschultaschenbücher Verlag, Mannheim 1968.
- [4] Berry, A.: *A short history of astronomy*. Dover Publications, New York, 1961.
- [5] Bessel, F. W.: *A letter from Professor Bessel to Sir J. Herschel*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **4**, 152, 1838.
- [6] Brahe Tycho: *De mundi asteri recentioribus phaenomens liber secundus*. Uraniborg, Praha, 1583 – 1603.
- [7] Burbidge E. M., Burbidge G. R., Fowler W. A., Hoyle F.: *Synthesis of the elements in stars*. Rev. Mod. Phys. **29**, 547, 1957.
- [8] Cannon A. J., Pickering E. C.: *The Henry Draper catalogue*, Ann. Harvard Coll. Obs., **91** – **99**, 1918 – 1924.
- [9] Cassini, M.: *Recherche de la parallaxe du Soliel par le moyen de celle de Mars observé a meme temps a Paris and en Caiene*. Ouvrage D-Astronomie, 1672.
- [10] Curtis, H. 1921, Bull. Nat. Res. Coun., 2, 194.
- [11] d'Atkinson, R., Houtermans, F. G.: *Zur Frage der Aufbaumöglichkeit der Elemente in Sternem*. Zeitschrift für Physik 54, (1929) 656.
- [12] Demin, V. G.: *Sud'ba solněčnej systěmy*. Nauka, Moskva 1975.
- [13] Doppler, Ch.: *Ueber das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels*. Prag, 1842.
- [14] Dougherty, L. M., Dollfus, A.: *F. D. Arago's polarimetr and his original observation of extraterrestrial polarization in 1811*. Journal of the British Astronomical Association **99**, no. 4, 183, 1989.
- [15] Dreyer, J. L. E.: *A History of Astronomy from Thales to Kepler*. Dover Publications, New York, 1953.
- [16] Eddington, A. S.: *On the radiative equilibrium of the stars*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **77**, 16, 1917.
- [17] Eddington, A. S.: *The Internal Constitution of the Stars*. Cambridge, Cambridge University Press, New York, Dover 1926.
- [18] Einstein A.: *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*. Annalen der Physik **49**, 769, 1916.
- [19] Emden, R.: *Gaskugeln*. Teuber, Leipzig 1907.
- [20] Euler, L.: *Theoria Motuum Lunae, nova methodo pertractata una cum Tabulis Astronomicis*, 1772
- [21] Friedman, A. A.: *Über die Krümmung des Raumes*. Z. Phys. **10**, 377, 1922.
- [22] Ferrarese, L. et al.: *The Extragalactic Distance Scale Key Project. IV. The Discovery of Cepheids and a New Distance to M100 Using the Hubble Space Telescope*. The Astrophysical Journal **464**, 568, 1996.
- [23] Galileo, G.: *Sidereus Nuncius*. Benátky 1610.

-
- [24] Galileo, G.: *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo Tolemaico e Copernicano*. Florencie 1632.
- [25] Gamow, G.: *The Origin of Elements and the Separation of Galaxies*. *Physical Review* **75**, 1949, p. 505.
- [26] Gauss, K. F. *Theory of the Motion of the Heavenly Bodies Moving About the Sun in Conic Sections*. Dover Publications, Inc. Mineola, New York. 2004.
- [27] Gingerich, O.: *The Eye of Heaven*. Springer Verlag, New York, 1987.
- [28] Grebenikov, E. A., Rjabov, J. A.: *Poiski i otkrytija planět*. Nauka, Moskva 1975.
- [29] Goodricke, J.: *A series of observations on, and a discovery of the period of the variation of the light of the bright star in the head of Medusa, called Algol*. *Philosophical Transactions* **73**, 474, 1783.
- [30] von Guericke, O.: *Experimenta Nova (ut vocaiatur) Magdeburgica de Vacuo Spatio en*. Amftelodami 1672.
- [31] Halley, E.: *A new Method of determining the Parallax of the Sun, or his Distance from the Earth xperiments on the Refrangibility of the Invisible Rays of the Sun*. *Phil. Trans. Roysl Soc. London* vol. XXIX, 1716. p.
- [32] Hadrava, P., Hadravová.: *Přístroje obnovené astronomie*. Koniasch Latin Press, Praha 1996. Překlad z latiny. *Astronomiae instauratae mechanica*.
- [33] Hadrava, P., Hadravová.: *Sen neboli Měsíční astronomie*. Paseka. Národní technické muzeum. Praha 2004.
- [34] Hazard, C., M. B. Mackey, A. J. Shimmins: *Investigation of the Radio Source 3C 273 By The Method of Lunar Occultations*. *Nature* **197**, 1037, 1963.
- [35] Henderson, T.: *On the Parallax of α Centauri*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **4**, 168, 1839.
- [36] Herschel, W.: *Experiments on the Refrangibility of the Invisible Rays of the Sun*. *Phil. Trans. Roysl Soc. London* 284, 1800.
- [37] Herschel, W.: *On the proper motion of the Sun and solar system, with an account of several changes that have happened among the fixed stars since the time of Mr. Flamsteed*. *Phil. Trans. Roysl Soc.* **73**, 247, 1753.
- [38] Herrmann, D. B.: *Geschichte der Astronomie von Herschel bis Hertzsprung*. Veb Deutscher Verlag der Wissenchaften, Berlin 1975.
- [39] Hertzsprung, E.: *Zur Strahlung der Sterne*. *Zeitschrift für Wissenschaftliche Photographie* **3**, 1905.
- [40] Hertzsprung, E.: *Zur Bestimmung der photographischen Sternegrößen*. *Zeitschrift für Wissenschaftliche Photographie* **5**, 1907.
- [41] Hertzsprung, E.: *Über die Verwendung photographischer effektiver Wellenlaengen zur Bestimmung von Farbaequivalenten*. *Publikationen des Astrophysikalischen Observatoriums zu Potsdam* **22**, 63, 1911.
- [42] Horský, Z., Plavec, M.: *Poznávání vesmíru*. Orbis, Praha 1962.
- [43] Hubble, E. P.: *Relation Between Distance and Radial Velocity Among Extra-galactic Nebulae*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **15**, no. 3, 168, 1929.
- [44] Chandrasekhar, S.: *Stellar configurations with degenerate cores*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **95**, 207, 1935.

- [45] Chandrasekhar, S.: *An introduction to the study of stellar structure*. University of Chicago Press, Chicago, 1939.
- [46] Johnson H. L., Morgan W. W.: *Fundamental Stella photometry for standard sof spectral type in the revise systém of the Yerkes spectral atlas*. *Astrophysical Journal*, **117**, 313, 1953.
- [47] Jáchim, F.: *Tycho Brahe*. Prometheus, Praha 1998.
- [48] Jáchim, F.: *Jak viděli vesmír*. Rubico, Olomouc 2003.
- [49] Jeans, J. H.: *On the stability of a spherical nebula*. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, **199**, 1, 1902.
- [50] Kepler, J.: *Astronomia nova*. Heidelberg 1609.
- [51] Kepler, J.: *Harmonices mundi libri V*. Linec 1619.
- [52] Kirchhoff, G., Bunsen, R.: *Die Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen*. *Annalen der Physik und der Chemie* **110**, 161, 1860.
- [53] Klimišin, I. A.: *Otkrytije Vselennoj*. Nauka, Moskva 1987.
- [54] Kolčinskij, I. G., Korsuň, A. A., Rodrigues, M. G.: *Astronomy*. *Naukova dumka*, Kiev 1986.
- [55] Koperník, M.: *Obehý nebeských sfér*. Veda, Bratislava 1974. Překlad z latiny.
- [56] Kovář, L.: *Historie astronomického ústavu v letech 1889 – 1939*. Diplomová práce, MFF UK, Praha.
- [57] Lagrange, J. L.: *Theorie des Variations seculaires des Elements des Planètes*. *Nouveaux Mem. Acad. Roy. Sci et Belles – Lettres*, Anné 1782, p. 169 – 292.
- [58] Lagrange, J. L.: *Sur l'altération des moyens mouvemens des planètes*. *Nouveaux Mem. Acad. Roy. Sci et Belles . . . s.* 199 – 213.
- [59] Lang, K.R., Gingerich, O., eds.: *A Source Book in Astronomy and Astrophysics 1900 – 1975*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1979.
- [60] Ledoux, P., Pekeris C. L. *Radial pulsations of stars*. *Astrophysical Journal* **94**, 124, 1941.
- [61] Leavitt, H. S.: *Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud*. Harvard College Observatory, 1912, Circular 173.
- [62] Mihalas, D.: *A Guide to the Literature on Quantitative Spectroscopy in Astrophysics*. IUA, commission 36. <http://www.galax.obspm.fr/IAU36/docu.html>
- [63] Newton, I.: *The Principia. Mathematical Principles of Natural Philosophy*. University of California Press. Berkely 1999.
- [64] Novotný, J.: *Galileo Galilei a mořská dmutí*. *Čs. čas. fyz.* **44**, 58, 1994.
- [65] Oort J. H.: *Dynamics of the galactic system in the vicinity of the Sun*. *Bull. Astron. Inst. Neth.*, **4**, 159, 1928.
- [66] Pannekoek, A.: *A History of Astronomy*. Dover Publications, New York 1989.
- [67] Penzias, A.A., Wilson, R.W.: *A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s*. *Astrophysical Journal* **142**, 419, 1965.
- [68] Pogson, N. R.: *Magnitudes of Thirty-six of the Minor Planets for the First Day of each Month of the Year 1857*. Dover Publications, New York 1989.
- [69] Planck, M. : *Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum*. *Annalen der Physik* **4**, 553, 1901.
- [70] Ptolemaios, C.: *Ptolemy's Almagest*. Translation G. J. Toomer. 2. vyd., Princeton 1998.
- [71] Rjabov, J. A.: *Dviženija něbesnych těl*. Nauka, Moskva 1977.

-
- [72] Reinhold, E.: *Prutenicae tabulae coelestium motum*. Wittenberg 1551.
- [73] Roberstson, H. P.: *On the Foundations of Relativistic Cosmology*. Proceedings of the National Academy of Science **15**, 822, 1929.
- [74] Römer, O.: *Démonstration touchant le mouvement de la lumière trouvé par M. Römer*. Journal des Sçavans. Du Lundy 7 December, 233, 1676.
- [75] Römer, O.: *A Demonstration Concerning the Motion of Light Communicated from Paris*. Philosophical Transactions **12**, 893, 1677.
- [76] Russell, H. N.: *Relations between the spectra and other characteristics of the stars*. Popular Astronomy **22**, 275, 1914.
- [77] Russell, H. N.: *Relations between the spectra and other characteristics of the stars*. Nature **93**, 252, 1914.
- [78] Russell, H. N.: *On the composition of the Sun's atmosphere*. Astrophysical Journal **70**, 11, 1929.
- [79] Saha M. N.: *On the physical theory of stellar spectra*. Proc. Roy. Soc. London, A **99**, 135, 1921.
- [80] Saha M. N.: *Ionization in the solar chromosphere*. Phil. Mag. **40**, 472, 1920.
- [81] Shapley, H. 1921, Bull. Nat. Res. Coun., **2**, 171
- [82] Schmidt, M.: *3C273: A Star-like Object with Large Red-shift*. Nature **197**, (1963), 1040.
- [83] Schwarzschild, M.: *Strucutre and Evolution of the Stars*. Princeton University Press, Princeton 1958.
- [84] de Sitter, W.: *On Einstein's Theory of Gravitation, and its Astronomical Consequences*. Monthly Notices Royal Astronomical Society **78**, 3, 1917.
- [85] Stebbins J., Whitford A. E.: *Six-color photometry of stars, I, The law of space reddening from the colors of O and B stars*. Astrophysical Journal **98**, 20, 1943.
- [86] Struve, O., Zebergs, V.: *Astronomy of the Twentieth Century*. New York, Macmillan 1962.
- [87] Struve, F. G. W. *Stellarum duplicium et multiplicium mensurae micrometricae*. St. Petersburg. 1837.
- [88] Šolcová, A.: *Johannes Kepler*. Prometheus, Praha 2004.
- [89] Štefl, V.: *Mikuláš Koperník*. Prometheus, Praha 2002.
- [90] Štefl, V.: *Klaudios Ptolemaios*. Prometheus, Praha 2005.
- [91] Tassoul, J. L., Tassoul, M.: *A Concise History of Solar and Stellar Physics*. Princeton and Oxford, Princeton University Press 2004.
- [92] Toomer, G. J.: *Ptolemy's Almagest*. Princeton University Press, Princeton 1998.
- [93] Whitney, Ch. A.: *The Discovery of our Galaxy*. Alfred A. Knopf, New York 1971.

Rejstřík

- Adams, John Couch, 81
Al Súfí, **29**, 31
Al-Birúní, **37**
Ambarcumjan, Viktor Amazaspovič, **90**
Ångström, Anders Jonas, **93**
Apollonius z Pergy, **17**, 35
Arago, Dominique François Jean, **80**, 93
Argelander, Friedrich Wilhelm August, **120**
Aristarchos, 11, **13–15**, 16
Aristoteles, 11, **12**, 25, 60
Atkinson, Robert d'Escourt, 103
- Baade, Walter, **89**, 104
Babcock, Herold Delos, **93**
Bacháček z Nouměřic, Martin, 112
Balmer, Johann, Jacob, **97**
Barnard, Edward Emerson, **87**
Bayer, Johann, **30**
Bečvář, Antonín, **129**
Bessel, Friedrich Wilhelm, **86**
Bethe, Hans Albrecht, **103**, 105
Bode, Johann Elert, **82**
Bok, Bart Jan, **90**
Boltzmann, Ludvig Eduard, **97**
Bond, Georgie Philips, 92
Bond, William Cranch, 92
Boss, Benjamin, 89
Boss, Lewis, 89
Boulliau, Ismaël, 26
Bouvard, Alexis, **80**
Bowen, Ira Sprague, 99
Bradley, James, **67**, 79
Brahe, Tycho, 26, 31, 32, 50, **52–54**, 56, 71, 112
Bremiker, Carl, 81
Browne, Ernest William, 76
Bruno, Giordano, **52**
Buchar, Emil, 125, 126, **129**
Bunsen, Robert Wilhelm, **94**, 105
Burbidge, Eleanor Margaret Peachey, 104, 105
Burbidge, Geoffrey Donald, 104, 105
Cannon, Annie Jump, **96**, 105
Carrington, Richard Christopher, **93**
Cassini, Giovanni Domenico, **64**
Clairaut, Claude Alexis, **72–74**
Cowling, Thomas George, 102
Cox, Arthur Nelson, 103
Critchfield, Charles Louis, 103
Curtis, Heber Doust, **106**
- d'Alambert, Jean Baptiste, **73**, 77
d'Arrest, Henrich Louis, 81
Daguerre, Louis Jacques Mandé, **92**
de la Rue, Warren, 92
de Lalande, Joseph Jerome Lafrançais, 31
de Sitter, Willen, **110**
Delambre, Jean Batiste, 31
Delaunay, Charles Eugene, **75**
Deslandres, Henri Alexandre, **93**
Domenisiani, 57
Doppler, Christian, **95**
Draper, Henry, **92**, 96, 105
Dreyer, John Louis Emil, **85**
- Eddington, Artur Stanley, 87, 98, **101**, 105, 111
Einstein, Albert, 94, 105, **110**
Emden, Robert, **101**
Epstein, Isadore, **103**
Eratosthenes, 11
Euler, Johan Albrecht, 75
Euler, Leonhard, 42, 72, 74, 75
- Fabricius, Johann, 59, 93
Fizeau, Arnaud Hippolite Louis, **92**
Flamsteed, John, **67**, 79
Fleming, Williamina Paton, **106**
Foucault, Jean Bernard Léon, **92**
Fowler, Alfred, **98**
Fowler, Ralph Howard, **98**, 102
Fowler, William Alfred, **104**, 105

Fraunhofer, Joseph, **94**, 105
 Frič, Jan Josef, 129
 Friedman, Alexandr Alexandrovič, **110**

 Gaillot, Jean Baptiste Aimable, 81
 Galileo Galilei, 51, **57–63**, 68, 93
 Galle, Johann Gottfried, 80
 Gamow, George, **103**, 104, 111
 Gassendi, Pierre, 64
 Gauss, Karl Friedrich, **82–83**
 Gerhard z Cremony, 37
 Gerstner, František Josef, 112
 Greenstein, Jesse, **90**
 Grotrian, Walter Robert Wilhelm, 99
 Gruss, Gustav, **118–122**, 123, 125
 Guillaume, Charles Édouard, **111**

 Hájek z Hájku, Tadeáš, **54**, 112
 Hale, George Ellery, **93**
 Halley, Edmond, **65**, 67, 68, 71, 76, 89
 Hansen, Peter Andreas, **76**
 Harlow Shapley, 88
 Härm, Richard, 103
 Harriot, Thomas, 59
 Harrison, John, 74
 Hartmann, Johannes Franz, **87**
 Hayashi, Chushiro, **104**
 Heinrich, Vladimír Václav, **122–127**
 Helfer, Lawrence, 90
 Henderson, Thomas, **86**
 Henyey, Louis George, **103**
 Herakleitos z Pontu, **14**
 Herschel, Frederick William, **79**, 82, 84–86, 89, 93
 Herschel, John Frederick, **85**, 93
 Herschel, Lucretia Karolin, **85**
 Hertzsprung, Ejnar, **99**
 Herzberg, Gerhard, **111**
 Hill, George William, 75
 Hipparchos, 11, **15–18**, 23, 25, 31, 33, 47, 67, 92
 Holtsmark, Johan Peter, 97
 Hopf, Heinz, 98
 Hornsteina, Karel, **113**
 Houtermans, Fritz Georg, 103

 Hoyle, Fred, **104**, 105
 Hubble, Edwin, Powell, **107**, 108
 Huggins, William, **92**, 105
 Humason, Milton, **106**
 Huygens, Christian, **58**, **68**

 Chandrasekhar, Subrahmanyan, **90**, 98, 102, 105

 Janssen, Pierre Jules César, **94**
 Johnson, Herold Lester, **92**, 100

 Kapteyn, Jacobus Cornelius, **86**, 88, 92
 Kaván, Jiří, **122**, 123
 Kepler, Johannes, 34, **55–57**, 70, 112
 Kerr, Frank John, **89**
 Kirchhoff, Gustav, **94**, 105
 Klepešta, Josef, **129**
 Kobold, Hermann Albert, 88
 Koláček, František, **115**
 Kopal, Zdeněk, **129**
 Koperník, Mikuláš, 26, 36, 39, **40–51**, 53, 55, 59, 61, 63
 Kovalskij, Marian Albertovič, 88
 Kraft, Wolfgang Ludwig, 75
 Kramers, Hendrik, 102
 Křišťan z Prachatic, 112
 Kučera, Bohumil, **122**
 Kuiper, Gerhard Peter, **101**

 Lagrange, Joseph Louis, 77
 Lane, Jonathan Homer, 101
 Laplace, Pierre Simon, **76–78**
 Láska, Václav, 116, 118, 120, **121**
 Leavitt, Henrietta Swan, **106**
 Ledoux, Paul, 102
 Lemaître, George-Henri, **110**
 Lemonnier, Pierre Charles, 79
 Leverrier, Urbain Jean Joseph, 80
 Lexell, Anders Johan, 75
 Lin Chia Chiao, 109
 Lindblad, Bertil, **88**, 109
 Ljapunov, Alexandr Michajlovič, **79**
 Lockyer, Joseph Norman, **94**
 Lundmark, Knut, 104

- Mästlin, Michael, **51**
Müller, Johann, **37**
Mädler, Johann Heinrich, **89**
Mach, Ernst, **113**
Maskelyn, Nevil, **67**
Maunder, Edward Walter, **94**
Mayall, Nikolas Ulrich, **90, 106**
Mayer, Johann Tobias, **67, 74, 75, 80, 89**
McCrea, William Hunter, **98**
Messier, Charles, **72**
Meton, **9, 16**
Milne, Edward Arthur, **98**
Minkowski, Rudolph Leo Bernhard, **109**
Minnaert, Marcel Gilles Josef, **98**
Mohr, Josef Mikuláš, **126, 127–128**
Morgan, William Wilson, **89, 92**
- Nernst, Walther Hermann, **111**
Newton, Isaac, **26, 68, 69–71, 72, 73, 77, 94, 110**
Newton, Robert, **31**
Nordmann, Charles, **97**
Nušl, František, **116, 118, 121, 125, 126, 129**
- Oke, John Beverly, **103**
Olbers, Heinrich Wilhelm Matthäus, **82**
Oort, Jan Hendrik, **87–89**
Öpik, Ernst Julius, **103**
Osterbrock, Donald Edward, **89**
- Parsons, William, **85**
Payen-Gaposchkin, Cecilie Helene, **99**
Penzias, Arno Allan, **111**
Peuerbach, Georg, **37**
Piazzi, Giuseppe, **82**
Picard, Jean, **64**
Pickering, Edward Charles, **96, 105, 106**
Plaskett, John Stanley, **87**
Platon, **12**
Pogson, Robert Norman, **92**
Pouillet, Claudie Servis Mathias, **93**
Proctor, Richard Anthon, **89**
Ptolemaios, Klaudios, **11, 19–39, 43, 47, 49, 76**
Pythagoras ze Samu, **11, 12**
- Ramsay, William, **94**
Reinhold, Erasmus, **51**
Richer, Jean, **64**
Ritter, August, **101**
Rolland, Henry Augustus, **93**
Römer, Christensen Ole, **65–67**
Rosenberg, Hans, **99**
Rosseland, Stein, **98**
Russell, Henry Norris, **98, 100, 102**
Rutherford, Lewis Morris, **95**
- Saha, Megnad, **98**
Salpeter, Edwin Ernest, **103**
Sampson, Ralph Allen, **97**
Sandage, Allan Rex, **101**
Secchi, Angelo, **95, 105**
Seydler, August Jan Bedřich, **112–118**
Seyfert, Carl Keenan, **109**
Shapley, Harlow, **106**
Sharpless, Stewart, **89**
Shu Frank Hsia, **109**
Scheiner, Christopher, **58, 93**
Scheiner, Julius, **97**
Schlesinger, Frank, **92**
Schmidt, Maarten, **111**
Schuster, Arthur, **97**
Schwabe, Heinrich Samuel, **93**
Schwarzschild, Karl, **97, 102**
Schwarzschild, Martin, **103**
Slipher, Vesto Melvin, **81, 106**
Slouka, Hubert, **129**
Spitzer, Lyman, **90**
Spörer, Gustav, **93**
Stebbins, Joel, **92**
Stefan, Josef, **97**
Strömgren, Bengt Georg Daniel, **88, 101**
Strouhal, Čeněk, **114, 118, 122, 123**
Struve, Wilhelm Friedrich Georg, **86**
Swedenborg, Emanuel, **84**
- Šindel, Jan, **112**
Šklovskij, Josif Samujlovič, **89**
Šternberk, Bohumil, **125, 128**
- Thales z Milétu, **11, 12, 16**

Titius, Johann Daniel, **82**
Tombaugh, Clyde William, **81**
Trümpler, Robert Julius, **87, 90, 100**

Ulugh Beg, **31, 39**
Unsöld, Albrecht, **98**

van de Kamp, Peter, **100**
van der Hulst, Hendrik Christoffel, **89**
Vilém IV. Hesenský, **54**
Vogel, Hermann Carl, **96, 105**
Vogt, Heinrich, **102**
von Guericke, Otto, **63**
von Struve, Otto, **87**
von Weizsäcker, Carl Friedrich, **103, 105,**
109
von Zach, Franz Xaver, **82**

Wallerstein, George, **90**
Weinek, Ladislaus, **115**
Westerhout, Gart, **89**
Whipple, John Adams, **92**
Wilsing, Johannes, **97**
Wilson, Robert Woodrow, **111**
Wittich, Paul, **51**
Wolf, Franz Joseph Maxmilián, **87**
Wolf, Rudolf, **93**
Wollaston, William Hyde, **94**
Wright, Thomas, **84**
Wrubel, Marshall, **98**
Wursteizen, Christian, **51**

Young, Charles August, **93**

Zöllner, Johann Karl Friedrich, **92**
Zwicky, Fritz, **104**