Jak Kepler dospěl k prvním dvěma zákonům v *Astronomia nova*

Vladimír Štefl
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, Přírodovědecká fakulta MU, Kotlářská 2, 611 37 Brno; stefl@physics.muni.cz

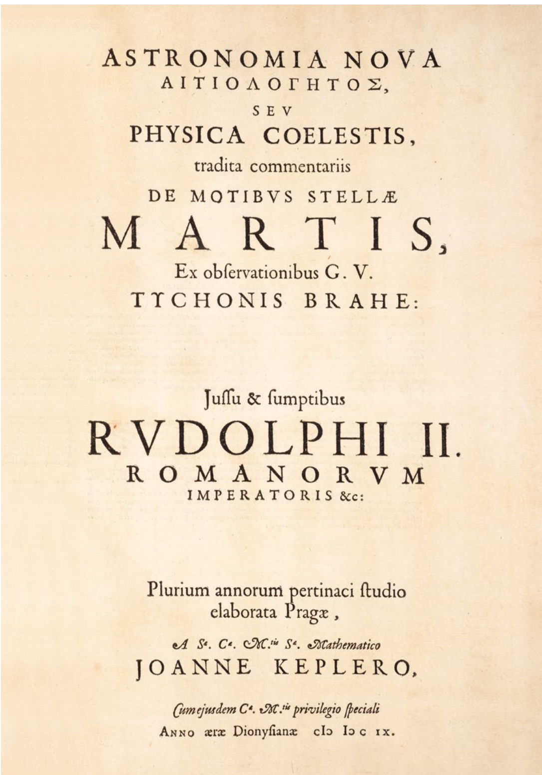
Keplerův spis Astronomia nova představuje jedno z nevýznamnějších astronomických děl všech dob. Obsahuje odvození vztahů, jimž dnes říkáme první a druhý Keplerův zákon pohybu planet. Kepler zde uplatnil nový přístup k astronomii, fyzice a vesmíru vůbec, když vyšetřoval eliptickou dráhu, po níž se Mars pohybuje kolem Slunce. Vysvětlení pohybu Marsu pojal nejen geometricky, ale využil i fyzikální magnetickou hypotézu.

Po vyřešení finančních a tiskařských náležitostí vyšel v Heidelbergu r. 1609 Keplerův spis Astronomia nova, česky Nová astronomie [1], s úplným názvem *Astronomia nova seu Physica cœlestis, tradita commentariis De motibus stellæ Martis, ex observationibus G. V. Tychonis Brahe, Jussu&sumptibus Rudolphi II. Romanorum Imperatoris…*, česky *Nová astronomie, založená na studiu příčin, čili nebeská fyzika, podávaná v komentářích o pohybu hvězdy* [planety] *Marsu, kterou na základě pozorování urozeného pana Tychona Brahe, z rozkazu a na náklad Rudolfa II., císaře římského…* viz obr. 1. Spis byl tedy věnován mecenáši – imperátoru Rudolfu II.

Již na titulní straně oznámil Johann Kepler (1571–1630, obr. 2) netradiční přístup ke zkoumání pohybu Marsu, vycházející z fyzikálních souvislostí. S jejich pomocí autor hledal potvrzení svého matematického modelu, který by objasňoval polohu, reálnou dráhu planety v prostoru a její pohyb. Jednalo se tak skutečně o zcela novou astronomii, odlišnou od dosud existující.

Úvod

Původní text [1], který obsahoval historicky autentickou formulaci prvních dvou zákonů, byl zvláštní a hodně rozvleklý. Přesněji vytříbená pregnantní znění zákonů ve spisu nenalezneme, jednotlivé textové úryvky jsou vnořeny do útržků různých vět a kapitol v [1], na něž se vztahují odkazy v článku. Samostatné speciální formulace zákonů neexistují, pro pravidla, která Kepler zavedl, pojmy „zákony" neužíval. Že jde o zvlášť důležitá vyjádření, lze poznat podle uvedení veršů jím oblíbeného Vergilia. Příkladně zmínce o eliptickém tvaru dráhy předcházejí na počátku 58. kap. verše z 3. eklogy zmiňovaného básníka. Samotný první Keplerův zákon byl vysloven převážně pouze verbálně, například v podobě vyjádření „*dráha planety je elipsa*", v průběžném textu především kap. 59 byl podpořen geometrickými úvahami a odvozeními. Skutečnost,


ASTRONOMIA NOVA
ΑΙΤΙΟΛΟΓΗΤΟΣ,
SEV
PHYSICA COELESTIS,
tradita commentariis
DE MOTIBVS STELLÆ
MARTIS,
Ex obſervationibus G. V.
TYCHONIS BRAHE:

Juſſu & ſumptibus
RVDOLPHI II.
ROMANORVM
IMPERATORIS &c:

Plurium annorum pertinaci ſtudio
elaborata Pragæ,
A S. C. M. S. Mathematico
JOANNE KEPLERO,
Cum ejusdem C. M. privilegio ſpeciali
ANNO æræ Dionyſianæ cIↄ Iↄ c ix.

Obr. 1 Titulní list Astronomia nova 1609

že Slunce leží v jednom z ohnisek elipsy, není explicitně zmiňována v [1] vůbec, autor psal pouze o místě pro něj *punctum eccentricum* – excentrickém bodě. Až pozdější spis Epitome astronomiae Copernicanae, česky Souhrn koperníkovské astronomie, z let 1618–1621 [2] uvedl eliptickou křivku se dvěma ohnisky. Samotný pojem ohnisko zavedl Kepler v Evropě již ve spisu *Ad Vitellionem paralipomena, quibus Astronomiae pars optica traditur appellari* [3], česky Poznámky k Vitelovi, jimiž se vykládá optická část astronomie, v r. 1604.

Vraťme se k obsahu spisu [1], který byl rozdělen do sedmdesáti kapitol, původně čítajících tři sta třicet sedm stran, rozčleněných do pěti částí:

I. O antických hypotézách
II. O první nerovnosti Marsu
III. O druhé nerovnosti a příčinách pohybů
IV. O objemu správné dráhy
V. O délce

Důvody vzniku [1] nejlépe pochopíme z historického kontextu. Astronomové již od antiky zkoumali složité pohyby planet po obloze a hledali jejich objasnění. Postupně pochopili, že pozorované pohyby vznikají skládáním dvou jednoduchých. Prvním bylo otáčení celé oblohy včetně hvězd za 24 hodin. Druhým byl pohyb jednotlivých planet od západu k východu probíhající v delších časových intervalech. V posledně zmiňovaném vymezili dvě nerovnosti. První popisovala to, že planety urazily stejné oblouky v různém čase. Jednalo se o důsledek proměnné úhlové rychlosti při jejich vlastním pohybu kolem Slunce. Nestálost směru, zastavování a zpětné pohyby planet zachycovala druhá nerovnost, odrážející oběh Země kolem Slunce. Právě správná interpretace obou nerovností byla pro Keplera klíčem k objevu prvních dvou zákonů v [1]. Výklad druhé nerovnosti provedl již Mikuláš Koperník (1473–1543) ve spisu *De revolutionibus orbium coelestium*, česky O obězích nebeských sfér [4], v r. 1543. Pozorovaný pohyb planet vyložil jako výsledek skládání dvou reálných pohybů, Země kolem Slunce a vlastního pohybu planety, tudíž prostřednictvím kinematického principu relativity. Objasnění první nerovnosti a zákonitostí pohybů planet však nepodal.

Detailní studium [1], včetně zdůvodnění všech kroků vedoucích k objevu prvních dvou Keplerových zákonů, nebylo dříve příliš v centru pozornosti historiků astronomie, s výjimkou spisů R. Smalla z r. 1804 [5] a J. B. J. Delambra [6] z r. 1821. V obou však spíše převládal výklad matematických a empirických aspektů

Obr. 2 Johann Kepler 1571–1630.

spisu [1], úloha fyzikálních úvah spojovaných s pohybem Marsu vedoucí k objevu zákonů nebyla dostatečně vyložena. S tím souvisí okolnost velmi rozšířeného zjednodušujícího a nesprávného názoru, že k eliptické dráze dospěl Kepler pouze pouhým fitováním pozorovacích údajů poloh Marsu. To odmítá sám autor slovy v kap. 58: „*Quod toto hoc opere spectavi, ut Physicam invenirem hypothesin, quae non tantum distantias efficeret observatis consentaneas sed etiam aequationes itidem probas…*“, česky „Celým tímto dílem jsem zamýšlel ověřit fyzikální hypotézu, jejímž výsledkem by byly vzdálenosti shodné s pozorováním, ale zároveň také platné rovnice…“

Teprve od minulého století, v jeho první polovině, nastal především zásluhou M. Caspara posun v objasňování zmiňovaných fyzikálních přístupů v [1]. Ve druhé polovině zmiňovaného století A. Koyré, C. Wilson, O. Gingerich, J. B. Voelkel, A. E. L. Davis a další je začali detailně analyzovat.

Předchůdci Keplera Klaudios Ptolemaios (90–165) i Tycho Brahe (1546–1601) k popisu pohybů planet používali matematické modely opírající se o principy rovnoměrných kruhových pohybů po deferentu, epicyklu, excentru a jejich modifikací ekvantem. Ten ze svých úvah odstranil Koperník a ironií osudu ho znovu zavedl Kepler ve *vicarious hypothesis* – tzv. *náhradní hypotéze*, v kap. 19.

Kepler se pokusil o vyložení pozorovaného nerovnoměrného pohybu planety, hledal příčinu změn rychlosti. Vycházel z přesvědčení, že je poznatelná. Kladl si otázku, proč se mění rychlost planety? Zjistil její změnu v závislosti na vzdálenosti od Slunce, tudíž logicky v kap. 33 dovodil, že hybná síla uvádějící do pohybu Mars musí vycházet z něj. Doplnil heliocentrickou teorii, která tak již nebyla jenom matematickou hypotézou k *zachránění jevů*, ale k jejich *fyzikálnímu vysvětlení*.

Matematický popis pohybu planety Kepler rozšířil o fyzikální objasnění. Inspiraci převzal od W. Gilberta (1544–1603) ze spisu [7] *De magnete magneticisque corporibus et de magno magnete Tellure physiologia nova*, česky O magnetu, magnetických tělesech a velkém magnetu – Zemi, nová fyziologie. Autor vycházel ze silového působení, jež mělo vyvolávat „postrkování“ planety po její dráze prostřednictvím *effluvium magneticum* – magnetických paprsků. V pozdějších spisech svoji koncepci dále propracovával. Pro něj uspokojivé řešení magnetické hypotézy nalezl v [2]. Sluneční paprsky tlačí planetu, nikoliv však podél dráhy, ale kolmo k rádiusu Slunce–Mars tak, že v každém infinitezimálním čase se pohybovala podél kruhového oblouku. Současně s tím probíhalo magnetické přitahování a odpuzování, které vyvolávalo vibrace planety podél rádiusu. Výsledkem kombinování obou procesů měl být pohyb planety po eliptické dráze v souladu se zákonem ploch.

Nezbytnou pro odhalení zákonitostí pohybu planet a určitým naplněním kontrolní funkce správnosti Keplerovy teorie byla znalost absolutních hodnot jejich vzdáleností. Jeho úvahy se potýkaly s nejistotami, v té době používané metody nedávaly spolehlivé výsledky. Začal proto přemýšlet o nepřímých metodách. Vycházel z předpokladu, že pokud se vzdálenosti planet od Slunce podřizují nějaké zákonitosti, nemohou být doby oběhů náhodné. Jinak řečeno, hledal vztah mezi vzdálenostmi planet a dobami jejich oběhů, což do té doby nikdo nezkoumal. Výsledkem byl třetí Keplerův zákon, tzv. harmonický ve spisu *Harmonice mundi*, česky Harmonie světa [8].

Souběžně se sepisováním [1] pracoval autor na spisu [3]. V něm, vedle ústřední problematiky optiky – rozboru podstaty světla a jeho vlastností, oka jako optického přístroje, dírkové komory, vzniku stínu Země, Měsíce, astronomické refrakce a jejího vlivu na astronomická pozorování – rovněž formuloval axiomy pohybu planet:

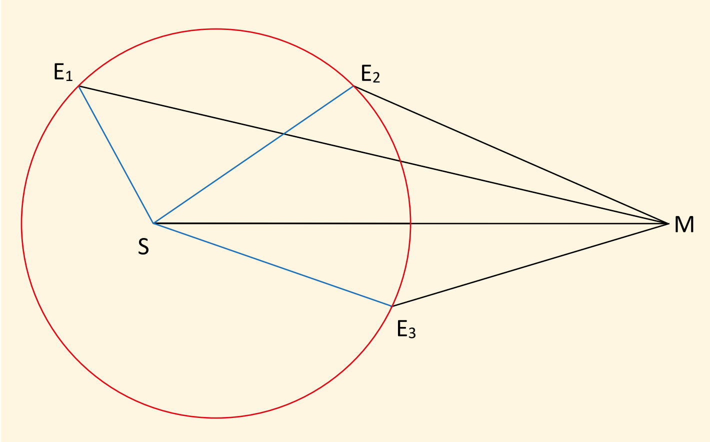
1. Planeta svou podstatou má snahu nacházet se ve stavu klidu v poloze, kterou lze pokládat za izolovanou od jiných těles.
2. Síly vycházející ze Slunce přemísťují planetu z jedné polohy na ekliptice do druhé.
3. Pokud vzdálenost planety od Slunce zůstává neměnná, pak se pohybuje po kružnici.
4. Jestliže by nějaká planeta uskutečnila dva úplné oběhy jeden za druhým v různých vzdálenostech od Slunce, potom by oběžné doby byly v poměru kvadrátů vzdáleností nebo délek obvodů kružnic.
5. Síly obsažené v samotné planetě jsou nedostatečné proto, aby se mohla přemísťovat z místa na místo, neboť nemá ani nohy, křídla či ploutve, kterými by se mohla opírat o éter.
6. Změna vzdálenosti planety od Slunce je podmíněna silou příslušející samotné planetě.

Zpracování pozorování

Vedle výše uvedených teoretických úvah disponoval Kepler rozsáhlým pozorovacím materiálem planet, který dokázal efektivním způsobem zpracovat. Zvolil jako výchozí 12 pozorovacích údajů opozic Marsu z období let 1580–1604, drtivou většinou získaných Tychonem Brahem. Volba planety nebyla dána pouze velkou početností jejího pozorování, ale především větší výstředností její dráhy 0,093, pro srovnání Země 0,017, jak zdůvodnil Wilson v [9]: „*Vzhledem k velikosti nevyhnutelných chyb při pozorování poloh u planet, jejichž dráhy se blíží kruhovým, mohly být odchylky od nich detekovatelné pouze u Merkuru a Marsu, u kterých výstřednosti drah byly dostatečně velké.*“ Při zpracování pozorování, shrnutých vesměs v kap. 26–28, se autor setkal se dvěma problémy:

1. Astronomové dosud neuměli správně propočítávat sklon dráhy Marsu k rovině ekliptiky. Předpokládali, že vibruje v čase.
2. Tycho Brahe svá pozorování a výpočty vztahoval ke střednímu Slunci, data skutečných opozic a poloh Marsu bylo nezbytné nalézt interpolací jeho údajů.

V [1] Kepler projevil předvídavou intuici, zamítl tehdy rozšířenou myšlenku vibrace dráhové roviny planety a začal hledat nové postupy k jejímu stanovení v prostoru. K tomuto účelu vymyslel několik metod popsaných v kap. 13. Z nich můžeme příkladně uvést jednu, která vycházela z pozorování Marsu v okamžiku kvadratury se Sluncem, jež se nacházelo se Zemí na uzlové přímce. Ve stejném čase byla úhlová vzdálenost Marsu od ekliptiky – jeho šířka – rovna úhlu mezi dráhovou rovinou planety a ekliptikou, tedy sklonu dráhy. Autor nalezl čtyři pozorování vyhovující popsaným podmínkám, viz [10], jsou zachycena v kap. 13. Zjistil neměnnost sklonu dráhy vzhledem k ekliptice, dosahoval hodnoty $1^{\circ}\,50'$, viz kap. 62, což umožnilo přepočítávat heliocentrické délky k dráhové rovině planety. Shrnuto za pomoci určitých privilegovaných pozorování, Kepler výrazně zjednodušil řešení problému pohybu Marsu dokázáním neměnnosti sklonu jeho dráhy.



Obr. 3 Keplerovo stanovení dráhy Země

Výše popsaný poznatek autor později rozšířil na všechny planety. Gingerich v [11] pro něj zavedl příhodný název **nultý Keplerův zákon**, který lze v zobecněném znění formulovat takto:

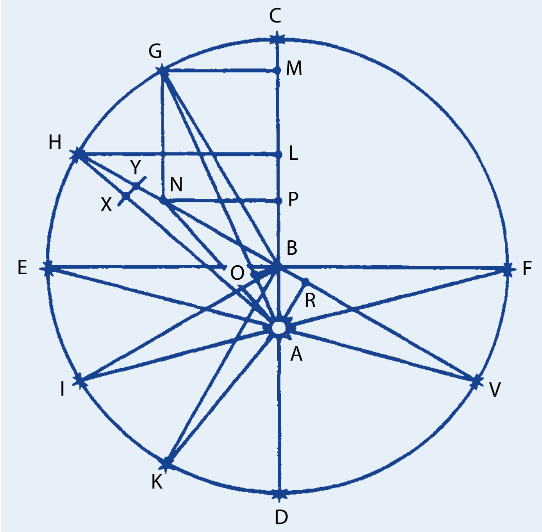
1. Roviny planetárních drah se vyznačují stálým sklonem vzhledem ke vztažné soustavě spojené s hvězdami.
2. Všechny roviny planetárních drah procházejí Sluncem, a ne středem „*orbis magnus*“ (velkého kruhu), jak předpokládal Koperník.

Polský astronom výpočty pohybů planet vztahoval ke středu velkého kruhu – dráhy Země. Jeho uspořádání sluneční soustavy bylo heliostatické, nikoliv důsledně heliocentrické, což charakterizoval výstižně Gingerich v [11]: „*Koperník dal světu revoluční heliostatický systém, Kepler ho přepracoval na heliocentrický.*“

Na základě zjištění, že dráhové uzly Marsu byly ve vzájemné opozici vzhledem ke skutečnému fyzickému Slunci, Kepler v kap. 10–15 převedl pozorovací údaje planety na něj. Uvedené zvolení počátku souřadnicové soustavy vedlo podle Barboura [12] ke zdokonalení pohledu na sluneční soustavu. Věcně však podle Wilsona [13] „*tato inovace zvýšila přesnost výpočtů, ale koncepčně důležitá nebyla*“.

Jak jsme již konstatovali, Kepler pro své výpočty potřeboval znát vzdálenosti ve sluneční soustavě. S tím souvisela otázka přesnosti jejich stanovení. Především vzdálenost Slunce–Mars byla klíčem k odhalování tvaru dráhy planety. Keplerovy úvahy však byly mnohem obecnější. I při omezení se pouze na matematickou stránku záležitosti zahrnovaly nejen určení zmiňované vzdálenosti, ale také výpočet rovnic pro výstřednost na základě zákona ploch. Následný jejich rozbor vedl ke korekci parametrů elipsy. Rozsáhlé výpočty vzdáleností prováděné v kap. 51–53 vedly autora k závěru o eliptickém tvaru dráhy učiněném v dalším textu.

Wilson v [13] analyzoval odpověď na otázku: „*Co může ukázat samotné určování vzdáleností?*“ Základní úvahy Keplera se opíraly o stanovení vzdálenosti Slunce–Mars při řešení Δ SEM, viz obr. 3. Heliocentrickou délku Země – E – použil autor z nové upřesněné teorie dráhy Země, heliocentrickou délku Marsu – M – převzal z *vicarious hypothesis*. Směr EM – geocentrické délky – určil z pozorovacích údajů Tychona Braheho, byly tak známy všechny úhly Δ SEM. Platí vztah $SM = SE\frac{\sin \sphericalangle SEM}{\sin \sphericalangle SME}$. Proveďme odhad řádové velikosti chy-



Obr. 4 Znázornění optické středové rovnice

by δ (SM), která roste s chybou strany SE a úhlů, což lze zapsat δ (SM) = δ (SE) + SE δ (∢SEM) + SE δ (∢ SME). V měřítku užitém autorem činilo SE přibližně 100 000 ± 1,8 % dílů. Hodnoty SE při výpočtech převzal z tabulky, za předpokladu výstřednosti dráhy Země 1 800, viz kap. 30, 51–53. Maximální rozdíl mezi vzdálenostmi oválu a kružnice činil 32 dílů, Kepler uváděl možnou chybu 16 dílů s tím, že je nevýznamná. Nechť průměrný rozdíl mezi oválem a elipsou byl δ (SE) = 8 dílů. V případě úhlů předpokládejme, že chyba mohla dosahovat 1′ obloukové míry. Položíme δ(∢ SEM) = δ (∢ SME) = 1′ = 0,0029 rad, odtud obdržíme SE δ (∢ SEM) = SE δ (∢ SME) = 29 dílů. Shrnuto za uvedených předpokladů, byla řádově chyba určování Slunce–Mars velikosti 8 + 29 + 29 = 66 dílů. Kepler v kap. 51 porovnal vzdálenosti SM ve stejných úhlech z obou stran afélia a konstatoval, že je šťastný, jestliže rozdíl je menší než 100 dílů. Jak jsme již sdělili, úloha určování vzdáleností i přes její závažnost měla spíše kontrolní podtext, poskytovala číselné údaje pro ověřování pracovních hypotéz a jejich přesnosti. Příkladně ukázala, že výstřednost dráhy Marsu ve *vicarious hypothesis* byla nesprávná.

Matematické hypotézy, pojmy

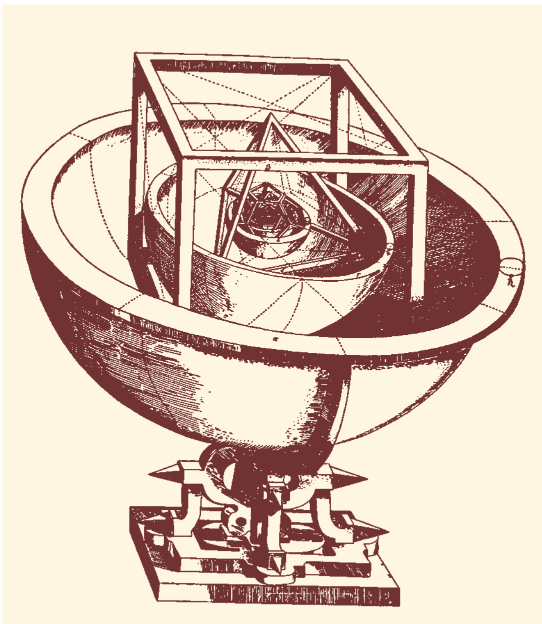
Přejděme k matematickým hypotézám, kterých do [1] autor zařadil několik. Přesněji vyjádřeno, jednalo se o pracovní hypotézy o tvaru dráhy Marsu uplatňované při zpracování pozorovacích údajů (vzhledem k šíři problematiky se jimi zabývat nebudeme). Vesměs byly chybné, tvůrce [1] otevřeně poskytl i jejich vyvrácení. Jak vtipně poznamenal v širší souvislosti Voelkel v [14], hypotéza tvaru dráhy „*via buccosa* (odulá tvář) *byla poslední Keplerovou chybou v jeho dlouhodobém boji s Marsem*“. Jako by na svých omylech chtěl Kepler demonstrovat své nezměrné úsilí a houževnatost při překonávání překážek spojených se zpracováním pozorovacích dat a matematickými výpočty. Své deduktivní hypotézy o tvaru dráhy Marsu ověřoval geometrickými metodami, vycházejícími jak z antických autorů Archimeda [15] a Apollonia [16], tak z vlastních nově vyvinutých postupů, které lze v některých částech, příkladně v kap. 40 a 50, považovat za úvod k infinitezimálnímu počtu (podrobněji je popíšeme v dalším textu). Na konci spisu [1] v kap. 60 autor zavedl jednu z prvních transcendentních rovnic evropských matematiků. Pokusil se ji řešit složitým iteračním geometrickým způsobem, jak rozebral Sverdlow v [17], když porovnal řešení podle [1] a [2].

Kepler si zřetelně uvědomoval obtížnost používané matematiky pro běžného čtenáře, což vyjádřil v úvodu [1] slovy: „*Durissima est hodie conditio scribendi libros Mathematicos, praecipue Astronomicos*“, česky „Podmínky pro psaní matematických, zvláště pak astronomických knih jsou dnes velmi těžké.“

Poloha Marsu byla zachycena geometrickým způsobem, dnes bychom řekli v algebraické podobě dvojice souřadnic. První z nich byla vzdálenost Slunce–Mars, druhá pomocí pojmu *mora*, viz dále, reprezentovala ubíhající čas při oběhu planety kolem Slunce. Vztah plochy a času formuloval Kepler slovy z [2]: „… *area pro mensura temporis constituitur…*“, česky „… *plocha je poměřována časem…*“

V [1] tvůrce vycházel z celé řady originálních nápadů, z nichž je zřejmé, že byl vynikajícím matematickým astronomem. Ve vytvořených postupech se musel nezbytně opírat o zavedení nových pojmů, například spojených s hledáním dráhy Marsu či matematickými metodami využívajícími vlastnosti elipsy, příkladně *lunule* (termín pro obsah plochy mezi kružnicí a oválem, respektive elipsou). Dalším zmiňovaným nestandardním termínem je *anomalia coaequata* – vyrovnaná anomálie. Zachycovala úhel mezi planetou a přímkou apsid vzhledem ke Slunci. Ve výsledku vyrovnaná anomálie odpovídala pravé anomálii. V současnosti netradičním pojmem je *aequatio Optica media*, optická středová rovnice, popisující skutečnost, že vzdálenost mezi planetou a excentrickým středem její dráhy se mění. Pozorovaný úhlový pohyb byl pomalejší ve větší vzdálenosti a rychlejší v menší vzdálenosti. V restringované podobě pojem vyjadřoval úhel střed dráhy–planeta–Slunce, konkrétně ∢ BGA, obr. 4, v kap. 40. *Optická středová rovnice* hrála důležitou roli v Keplerových úvahách při hledání eliptické dráhy. Změnu rychlosti reálného planetárního pohybu stanovovala *aequatio Physicae* – fyzikální rovnice vyjádřená velikostí obsahu plochy BGA.

K vyložení pohybu Marsu podstatný kinematický pojem „okamžitá rychlost planety“ byl pro autora

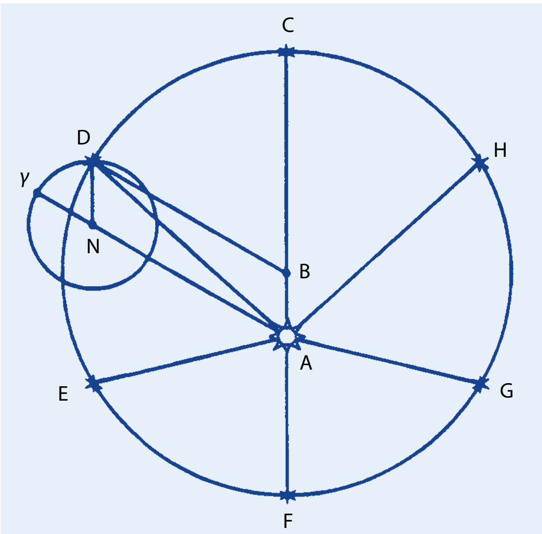


Keplerova představa o uspořádání sluneční soustavy *Mysterium cosmographicum* (Tajemství vesmíru), 1596.

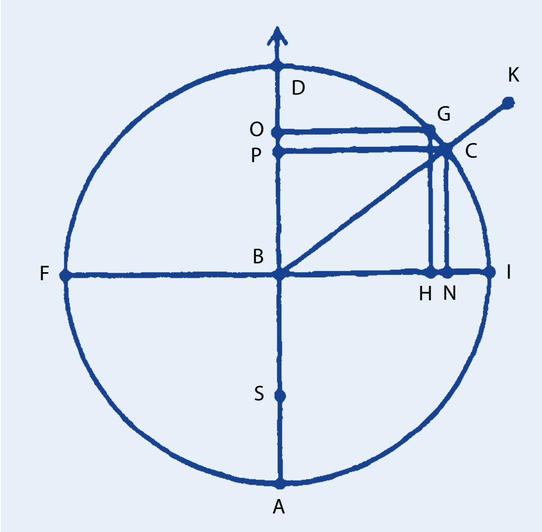
anachronismem – v jeho době neexistoval. Určoval ji nepřímo prostřednictvím pojmu *mora* zachycujícího velikost času, kterou planeta potřebovala k přechodu daného malého úhlu své dráhy. Podle Stephensona [18] byla důvodem používání tohoto pojmu možnost geometrické interpretace, zatímco u rychlosti to možné nebylo. Ze zpracování pozorovacích údajů vyplynulo pravidlo: čím menší rychlost, tím větší *mora*.

Zásadní význam mělo chápání latinských pojmů *orbes* a *orbita,* které se postupně u Keplera měnilo, v jeho spisech lze vysledovat posun významu, přeměnu *orbes* na *orbita,* viz podrobný rozbor Goldsteina a Hona v [19]. Připomínáme, že předchůdci až po současníka Galilea Galileiho (1564–1642) používali ještě pojem *orbes* ve smyslu sfér, na kterých byly planety přichyceny. Galileo předpokládal, že šlo o nejmenší a největší vzdálenosti planet od Slunce. Tohoto výkladu se v podstatě přidržoval i Kepler ve spisu *Mysterium cosmographicum*, česky Tajemství vesmíru [20], z r. 1596, kde užíval termín *orbes* pro planetární sférické vrstvy. Objasňoval je jako materiální, jakož i geometrické objekty. Později svůj názor poopravil, podle [19] byla *orbita* již vnímána jako astronomická entita, která nebyla pouze geometrické, ale také fyzikální povahy, dávaná do souvislosti s příčinou. Zavedení nového pojmu bylo věcně spojováno s jejím převodem z dvojrozměrného pohybu na světové sféře do trojrozměrného prostoru, s novými požadavky na teorii, zejména na vysvětlení dráhy pod působením fyzikálních sil při oběhu kolem Slunce. Další rozvíjení pojmu *orbita* a jeho definitivní dořešení bylo provedeno až ve spisu [2], kde je již zřetelně eliptickou křivkou se dvěma ohnisky. Shrnuto: význam sledovaného pojmu se u Keplera v průběhu jeho života vyvíjel, od sfér – materiálních objektů – přes sféry chápané geometricky až po myšlenou křivku (geometrický pojem), dávanou do kontextu s fyzikálním pozadím, jak lze sledovat v časové posloupnosti vydání spisů Tajemství vesmíru [20] → Nová astronomie [1] → Souhrn koperníkovské astronomie [2].

Své matematické postupy Kepler pečlivě formuloval a komentoval, snažil se čtenáře zapojit do studia pohybů planet ve sluneční soustavě. Pro něj jako pro autora bylo typické, že vedle prezentace dosažených výsledků kladl důraz na podrobný popis metod, jimiž k nim dospěl. Pokládal je za stejně tak podivuhodné jako nebeské jevy samotné.



Obr. 5 Schéma librace



Obr. 6 Magnetická interakce Slunce–Země

Fyzikální hypotézy

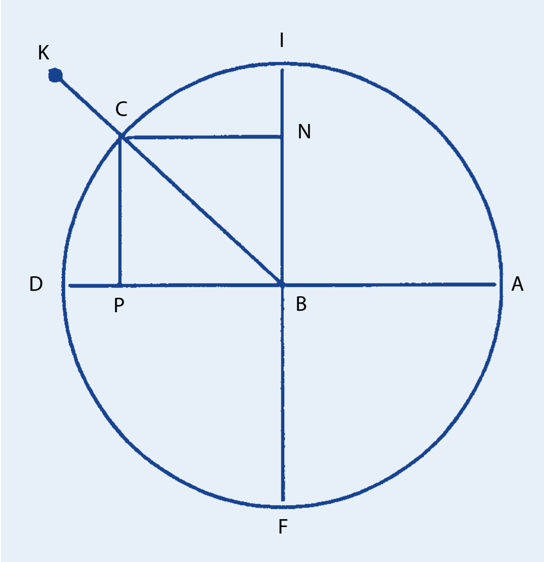
Vedle matematických byly nepostradatelnou součástí autorova studia dráhy Marsu. Příkladně při přechodu od kruhových k jiným typům drah v kap. 57 vyzdvihl nezbytnost jejich ověření další analýzou. V ní rozvíjel fyzikální hypotézy, spekuloval o podstatě nebeských jevů prostřednictvím rozboru analogií s běžnými pozemskými příčinami, v návaznosti na kap. 39.

Proto na Wilsonův dotaz v [13] „*Hrály fyzikální hypotézy nějakou zásadní úlohu při objevování Keplerových zákonů?*“ lze odpovědět kladně právě textem v kap. 57. Tønnessen v [21] dosvědčuje: „*Přesvědčivá fyzikální hypotéza byla nezbytnou součástí Keplerova nalezení správné dráhy Marsu.*“ Příkladně o hypotézu magnetické rovnováhy se její autor opíral při zdůvodnění librace u radiálního pohybu Marsu.

Variace vzdálenosti reprezentující libraci Země byla naznačována v kap. 37. Obecněji pojaté přibližování planet k Slunci a vzdalování od něj, ve svých důsledcích realizující eliptickou dráhu, bylo diskutováno v kap. 56, 58, 59. Kepler pro něj zavedl latinský termín *libratio* vyjadřující librační pohyb spojený s oscilací vzdálenosti v radiálním směru. Libraci v [1] vystihl matematicky v modelu deferentu s epicyklem (ekvivalentní excentru), kde zachytil změnu vzdálenosti librací (oscilací) bodu γ na průměru epicyklu v kap. 57, obr. 5. Autor stanovil vztah pro závislost librace na ∢ CBD excentrické anomálie, měřenou obloukem IG, viz obr. 6.

Pojem librace si vypůjčil Kepler z mechaniky, kde byl používán u vyvažování – *libro* páky. V souladu s Galileem a dalšími vědci té doby předpokládal, že přirozené příčiny lze zachytit jako předměty na páce, které se řídí zákonem rovnováhy na ní. Planetární libraci autor vysvětloval jako produkt působení magnetických sil, což se pokusil vyjádřit matematickým výpočtem opírajícím se o hypotézu magnetické rovnováhy. Ve zdlouhavém postupu ukázal na obecné možnosti porovnání magnetických vlastností a planetárního pohybu, viz rozbor Millera v [22]. K objasnění vlastností systému a provedení jeho analýzy použil mechanickou metodu prostřednictvím geometrie, popsanou v [3]. Následně budeme vycházet z analýzy, kterou provedla Martens v [23]. Nechť těleso planety bylo na obr. 6 z kap. 57 znázorněno kruhem DFAI, její magnetická osa byla DA, D pól přitahovaný k Slunci, A odpuzovaný. Slunce leželo

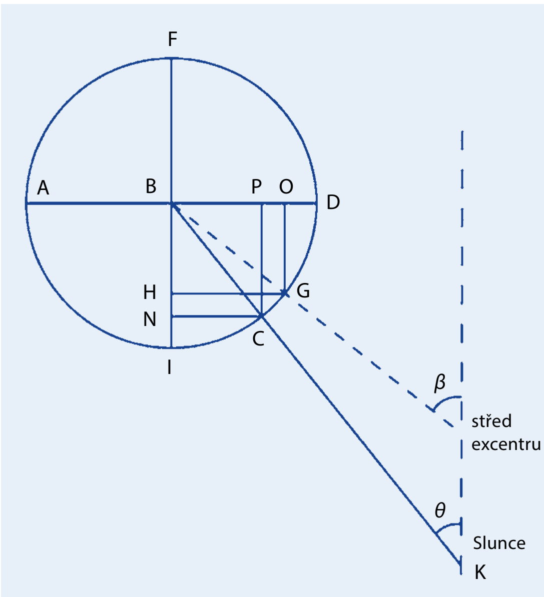
» Původní text, který obsahoval historicky autentickou formulaci prvních dvou zákonů, byl zvláštní a hodně rozvleklý. Přesněji vytříbená pregnantní znění zákonů ve spisu nenalezneme, jednotlivé textové úryvky jsou vnořeny do útržků různých vět a kapitol. «



Obr. 7 Schéma magnetické rovnováhy

v bodě K na úsečce BK. Vyrovnanou anomálii popisoval ∢ CBI, odpovídal ∢ CAD na obr. 5. Pootočením obr. 6 o 90° získáme názornější obr. 7, demonstrující rovnováhu na páce s rameny DP a AP, zavěšenými z CP. Systém byl v rovnováze, jestliže poměr velikostí ∢ DBK : ∢ ABK byl úměrný poměru hmotností D : A, tudíž nepřímo úměrný délkám úseček DP : AP. Tento předpoklad Kepler neobjasnil, pouze informoval, že velikost úhlů je přirozená, z čehož vyplývá stejný poměr jako v rovnováze. Poněvadž délka úsečky DP vyjadřovala velikost odpudivé síly a úsečky AP přitažlivé síly, výsledná síla byla jejich rozdílem rovným délce úsečky SP. Ta byla dvojnásobkem délky úsečky PB = CN, viz obr. 6. Podle autorovy úvahy ∢ DBK a ∢ ABK určovaly polohy přitažlivého a odpudivého pólu k Slunci, velikosti těchto úhlů poměřovaly velikosti přitažlivé a odpudivé síly.

Popsaný model magnetické hypotézy umožnil Keplerovi provést geometrické změny vyúsťující v optimální parametry elipsy, tak aby dávala vyhovující jak vzdálenosti Marsu od Slunce, tak i rovnice. Magnetické působení podle Tønnessena [21] je demonstrováno



Obr. 8 Magnetická interakce Slunce–Země podle Tonnessena

na obr. 8, poloha Slunce je reprezentována bodem ***K***. Úhel ***KBI*** představuje vyrovnanou anomálii zachycující úhlový pohyb planety v aféliu při pozorování ze Slunce.

V [1] autor sdělil: „... *hoc est sinus CN anomaliae coaequalae CBI, metitur vim accessus nudam, hoc situ Planetae ad Solem*“, česky „... CN je sinus vyrovnané anomálie CBI, poměřuje velikosti působení planety na Slunce“. Vysvětleno: velikost *úsečky* CN, sin vyrovnané anomálie, reprezentuje velikost magnetického působení planety.

Aplikace magnetické hypotézy na pohyb planet se v kap. 57 opírala o dva předpoklady:

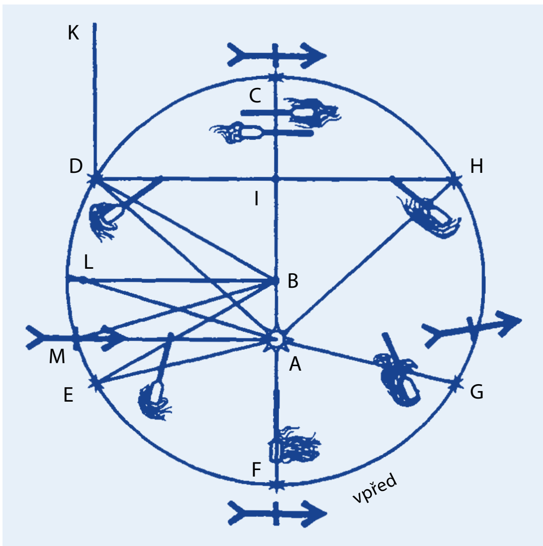
1. Planety po kruhové dráze postrkují kolmo k rádiusu tzv. *species immateriata*.
2. Přitahování a odpuzování planety vedoucí k přibližování a vzdalování, tzv. librace, bylo určováno magnetickou interakcí Slunce a planety.

Pohyb planet autor vysvětlil jako součet dvou pohybů: rovnoměrného po kruhové dráze kolem Slunce a libračního podél rádiusu, což se pokusil vyložit hypotetickou analogií k člunu na kruhové řece. Loďka odpovídala planetě, Slunce v ***A*** vytvářelo cirkulující řeku v kruhu ***CDEFGH*** tekoucí proti směru pohybu ručiček na hodinách, viz obr. 9. Na ní se pohybovala loďka s veslařem, který otáčel veslem jedenkrát ve dvojnásobku oběžné doby planety stále stejným způsobem. Bod C zachycovalo afélium, F perihélieum. V C osa loďky svírala pravý úhel s přímkou k Slunci, v F osa byla shodná s přímkou ke Slunci. Záď a příď se měnily střídavě při pohybu vpřed, v ostatních pozicích měly prostřední odchylku.

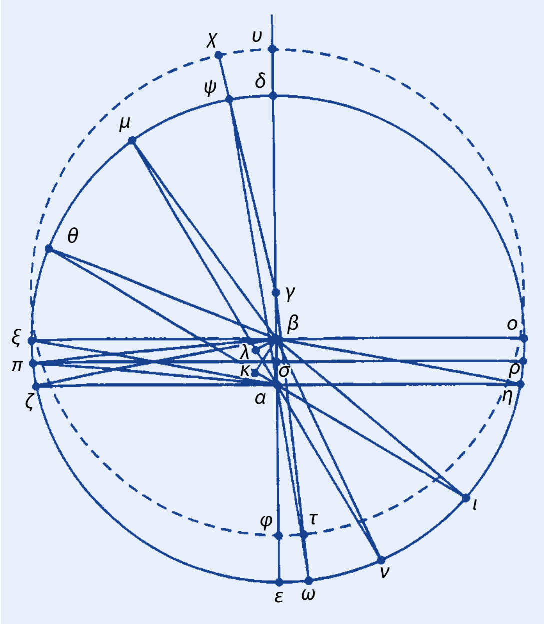
Druhý Keplerův zákon

Připomínáme, že Kepler nejprve objevil v r. 1601 zákon ploch a až později r. 1605 nalezl eliptický tvar dráhy Marsu. Obdobně postupoval při sepisování [1], začneme proto prvně uvedeným zákonem. Existují jeho dvě různá znění:

1. Rychlost planety je nepřímo úměrná vzdálenosti od Slunce.
2. Rychlost planety se mění tak, že přímka spojující planetu se Sluncem opisuje (vymetá) stejné plochy za stejné časy.



Obr. 9 Hypotetická kruhová řeka



Obr. 10 Kruhová dráha

První z nich označujeme jako **tzv. zákon vzdáleností,** byl chápán jako fyzikální zákon. Druhé se svým vyjádřením blíží současné formulaci zákona ploch, na úrovni podávané Keplerem bylo spíše matematickým prostředkem.

U interpretace prvního znění podle magnetické hypotézy autor předpokládal, že planeta je poháněna podél své dráhy nehmotnými paprsky vysílanými Sluncem a rotujícími obdobně jako paprsky kola. Sluneční síla f se měla rozvíjet v rovině, slábnout s rostoucí vzdáleností r od zdroje, platilo $f \sim 1/r$. Podle Aristotelovy teorie pohybu $f \sim v$, proto $v \sim 1/r$, $t \sim r$, kde v byla rychlost v čase t vzatém při malém oblouku dráhy. Tudíž čas nezbytný k přechodu oblouku dráhy planetou byl úměrný vzdálenosti od Slunce.

Konkrétně v kap. 32, obr. 10, autor vyslovil tvrzení, že síla pohybující planetami na kružnici klesá se vzdáleností od zdroje. Tedy ještě nikoliv pro elipsu. V jejím případě to platilo pouze v blízkosti perihélia a afélia dráhy, nebo pro elipsu s malou výstředností, což byl případ dráhy Země, kterou Kepler studoval v kap. 40, v níž dále konstatoval: „*Cumque scirem infinita esse puncta eccentrici, et distantias earum infinitas; subiit, in plano eccentrici has distantias omnes inesse. Nam memineram, sic olim et ARCHIMEDEM, cum circumferentiae proportionem ad diametrum quaereret, circulum in infinita triangula dissecuisse*“, česky „Protože jsem poznal, že existuje nekonečný počet bodů excentru [dráhy] a nekonečný jejich počet vzdáleností [od Slunce], napadlo mne, že všechny tyto vzdálenosti jsou obsaženy v ploše dráhy. Vzpomněl jsem si, že takovým způsobem kdysi také Archimedes rozdělil obsah kruhu na nekonečný počet trojúhelníků, když hledal poměr obvodu kruhu k průměru“.

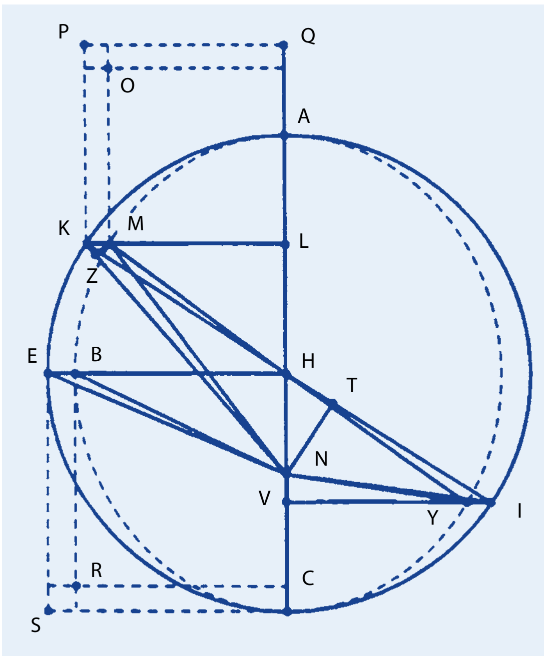
Podrobněji rozvedeno, Kepler rozčlenil obvod kruhové dráhy na 360 stejných oblouků, v každém z nich stanovil vzdálenost od středu (poloha Slunce). Výpočet obsahu kruhu provedl složením nekonečného počtu rovnoramenných trojúhelníků se základnami na jeho obvodu a vrcholy ve středu. V kruhu si dále představil nekonečný počet radiálně vedených přímek zachycujících vzdálenosti od středu k obvodu. Čím byl větší počet spojených trojúhelníků, tím obsahovaly více takových přímek. Autor navrhl provést součet velikostí jednotlivých přímek – vzdáleností planety pro malé úseky dráhy –, nahradit je plochou, v níž by se jednotlivé vzdálenosti „srovnávaly“, matematicky však oba vztahy ekvivalentní nebyly.

Na základě předchozího postupu, zachyceného v [1] zhruba do kap. 50, dospěl Kepler ke zobecnění, že doba, za kterou planeta oběhne oblouk dráhy, je úměrná vzdálenosti, libovolný časový interval tak lze poměřovat součtem všech vzdáleností obsažených v sektoru odpovídajícího oblouku. Takový výpočet obsahoval dvě nepřesnosti – obsah ploch výsečí excentrického kruhu představoval pouze přibližně velikost součtu vzdáleností a tvar dráhy planety nebyl přesně kruhový. Při zavedení eliptické dráhy v kap. 59 autor k tomu dodal, že tyto chyby se jakoby kouzlem vyruší. Smysl poznámky lze chápat tak, že nešlo o vzájemnou kompenzaci chyb. Volbou eliptické dráhy a velikosti součtu vzdáleností se zákon zavedený původně v kap. 40 jako přibližný stal v kap. 59 přesným. Kepler konkrétní výpočet součtu vzdáleností radiálních přímek neprovedl – vyzval k tomu matematiky, ohlas však nenalezl.

Pro větší srozumitelnost budeme v dalším textu používat moderní matematickou českou symboliku a terminologii. V posledně jmenované se používá termín obsah rovinných útvarů a křivek. Kepler psal v [1] o ploše, měl na mysli obsah plochy, jak jsme dosud uváděli.

Souvislost zákonů ploch a vzdáleností prokázal autor v kap. 59 tím, že obsah kruhu stanovil pomocí součtu vzdáleností od polohy Slunce v $\boldsymbol{N}$ při eliptické dráze. Určil poměr mezi obsahy sektoru elipsy obr. 11 [1] opsané ze Slunce – $\boldsymbol{ANM}$ – a celé elipsy $\boldsymbol{ABC}$, který byl úměrný poměru obsahů kruhové výseče opsané ze Slunce – $\boldsymbol{ANK}$ – a celého kruhu, tedy $\boldsymbol{ANM} : \boldsymbol{ABC} \sim \boldsymbol{ANK} : \boldsymbol{AEC}$.

Nejprve v úvodu kap. 59 shrnul poučky o elipse, které při jejich aplikaci umožňují nalézt odpovídající vztahy mezi elipsou a kružnicí v patřičném poměru. Geometrické postupy se opíraly o spisy Apollónia [16]



Obr. 11 Eliptická dráha

» Své matematické postupy Kepler pečlivě formuloval a komentoval, snažil se čtenáře zapojit do studia pohybů planet ve sluneční soustavě. Pro něj jako pro autora bylo typické, že vedle prezentace dosažených výsledků kladl důraz na podrobný popis metod, jimiž k nim dospěl. Pokládal je za stejně tak podivuhodné jako nebeské jevy samotné. «

» Podle magnetické hypotézy autor předpokládal, že planeta je poháněna podél své dráhy nehmotnými paprsky vysílanými Sluncem a rotujícími obdobně jako paprsky kola. Sluneční síla se měla rozvíjet v rovině, slábnout s rostoucí vzdáleností od zdroje. «

a Archimeda [15]. Uvedeme stručný výběr některých autorových úvah, podala je například Davis v [24].

Elipsu na obr. 11 [1] Kepler stanovil prostřednictvím kružnice redukcí všech souřadnic, v poměru poloos ***b* : *a***. Vepsal ji do pomocné kružnice, z jejíhož obvodu spustil kolmice ***KML***, ***EBH*** na přímku apsid ***AC*** procházejících elipsou. Poměr jejich velikostí byl podle původního textu [1] ***BH* : *HE* ~ *ML* : *KL*.** Dále odvodil poměr velikostí obsahů elipsy ***ABC*** a kruhu ***AEC***, který byl úměrný poměru velikostí kolmic z elipsy a z kružnice, tedy poměru malé a velké poloosy, podle Archimedovy věty 5 z [15]. Platilo ***ABC* : *AEC* ~ *BH* : *EH*,** autor tak mohl zaměnit obsahy výsečí kruhu a sektorů elipsy. Výsledkem byl poměr velikostí obsahů ***ANM* : *ANK* ~ *ML* : *KL***, odpovídající poměru velikostí kolmic z kružnice a elipsy, tedy ***ML* : *KL* = *BH* : *EH* = *b* : *a***.

Z Euklidových elementů knihy VI [25] autor aplikoval větu 1. – poučku o dvou trojúhelnících se stejnou výškou, z níž vyplynul poměr velikostí obsahů trojúhelníků ***MNL* : *KNL* = *b* : *a***. Odtud kombinováním výše uvedených vztahů získal

obsah eliptického sektoru MNA = b/a obsah kruhového sektoru KNA.

Vypočítal obsah eliptického sektoru definovaného polohou bodu M (reprezentujícího Mars) pomocí k němu přidruženého obsahu kruhového sektoru, takže platilo

obsah kruhového sektoru MNA = obsah kruhové výseče KHA + obsah Δ KNH.

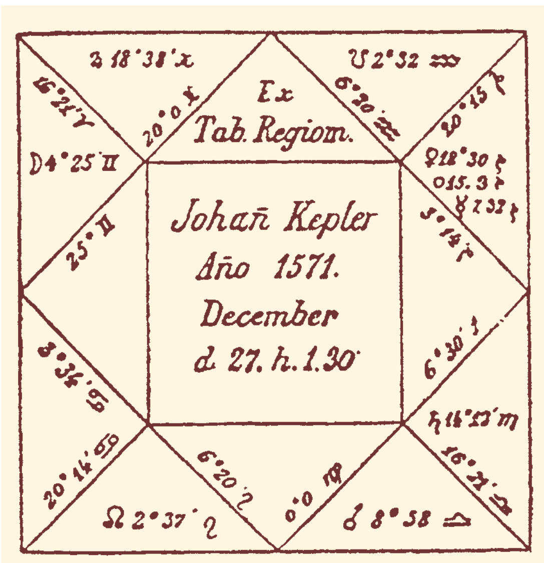
Dále při zavedení označení ***HN* = *ae***, ***∢ AHK* = *β*** (**excentrická anomálie**) vyjádřil obsah kruhové výseče = ½ β a^2 a obsah Δ = z.v/2 = ½ ae.asin β = ½ a^2 *e sin* β. Obsah eliptického sektoru byl poměřován časem udávaným excentrickou anomálií,

obsah eliptického sektoru MNA = b/a (½ a² e sin β + ½ a² β) = ½ ab (β + e sin β).

Dosazením obdržel autor vztahy pro souvislost času a obsahu ploch

čas ~ obsahu kruhového sektoru *ANK* = ½ $a^2 \beta$ + ½ *aea sin* β = ½ a^2 (β + *e sin* β),

čas ~ obsahu eliptického sektoru *ANM* = ½ *ab*β + ½ *aeb sin* β = ½ *ab* (β + *e sin* β).



Keplerův vlastní horoskop.

Původní historický Keplerův vztah pro změnu času ***t*** měřenou prostřednictvím úhlu ***β*** měl tvar ***t* ~ *β* + *e sin β*.** Čas *t* bylo možné zachytit pomocí střední anomálie, což po pozdějších úpravách vedlo k vyjádření souvislosti excentrické anomálie se střední, nyní známou jako Keplerova rovnice. Výsledky propočtů anomálií a poloh Marsu založené na výše uvedených úvahách se ukázaly být v souladu s přesnými pozorováními planet získanými Tychonem Brahem. Autor tak v kap. 59 provedl důkaz platnosti zákona ploch. Jeho aplikační vhodnost při výpočtech pohybu planety významně přispěla k jeho uznání.

V kap. 59 Kepler vyslovil důležité vyjádření vztahující se k obr. 11: „*Arcum ellipseos, cujus moras metitur area* AKN, *debere terminari in* LK, *ut sit* AM“, česky „Oblouk elipsy AM, jehož čas je měřen plochou AKN, nechť je ukončen LK“. Autor konstatoval, že čas, který Mars potřebuje k přemístění podél oblouku eliptické dráhy AM, je měřitelný velikostí obsahu plochy kruhové výseče AKN.

Za nejvhodnější vyjádření zákona ploch pokládá Davis [26] text v kap. 60: „*Anomali media est tempus artificiose denominatum ejusque mensura area* AKN“, česky „Střední anomálie je čas, promyšleně pojmenovaný a jeho velikostí je plocha AKN“.

Jak jsme na ukázkách demonstrovali, Kepler dospěl k závěru, že doby, za které planeta urazí stejné malé úseky dráhy, jsou přímo úměrné její vzdálenosti od Slunce, v jeho interpretaci k zákonu ploch. Přestože v té době měl geometrický charakter, snažil se k němu přistupovat prostřednictvím hypotéz fyzikálně.

První Keplerův zákon

K jeho vyslovení dospěl autor v kap. 58, v níž provedl analýzu tabulky propočítaných vzdáleností z kap. 53 – zjistil nesoulad výsledků výpočtů a pozorovacích údajů. Proto provedl úpravu librační metody a dospěl k velmi blízkým hodnotám vzdáleností odpovídajícím pohybu po eliptické dráze, což ho vedlo ke konkrétním závěrům v kap. 58, kde Kepler psal, že dráha z kap. 43 je příliš velká a z kap. 45 příliš malá. Tudíž pouze elipsa ležící uprostřed obou je správným vystižením dráhy. V předposledním odstavci kap. 58 uvedl: „*Quod si iter Planetae esset ellipsis*“, česky „Kdyby byla dráha planet elipsou…“, a v posledním odstavci „*… nullam Planetae relinqui figuram Orbitae praeterquam perfecte ellipticam…*“, česky „… žádný tvar planetárních drah není ponechán, kromě dokonalé elipsy…“.

Jaké úvahy přivedly Keplera k eliptickému tvaru dráhy? Situováno do historie, začátkem r. 1605 dostal inspirující nápad. Všiml si, že v kvadratuře Marsu při zvolené hypotéze *via buccosa* (odulá tvář) byla vzdálenost Marsu od Slunce přesně polovinou vzdálenosti mezi aféliem a perihéliem. Modifikoval citovaný model dráhy, zvolil elipsu.

Za matematické odvození prvního Keplerova zákona lze v [1] považovat stanovení vztahu pro rádius, vzdálenost Slunce–Mars, což odvodíme podle Davis [27], která použila již známé zavedení ∢ *AHK* = β, obr. 11. Označme ohniskovou vzdálenost *NH* = *ae*, *NB* = *a*, *HB* = *b*. V Δ NBH platí $b^2 = a^2 - a^2e^2$. Jak jsme již uvedli, platí *ML* : *KL* = *b* : *a*, v Δ HKL vyjádříme *KL* = *a sin* β, *ML* = *b sin* β. Zavedeme pravou anomálii ∢ *ANM* = Ω, v Δ MNL je *ML* = *r sin* Ω = *b sin* β, *NL* = *r cos* Ω = *a* (*cos* β + *e*). Dosazením do vztahu $r^2 = NM^2 = ML^2 + NL^2$ obdržíme $r^2 = b^2 \sin^2 \beta + a^2(\cos \beta + e)^2$, po úpravách r^2 =

$a^2 (1 + 2e \cos\beta + e^2\cos^2\beta)$, $\boldsymbol{r = a\,(1 + e \cos\beta)}$, tedy vyjádření pro ***rádius r*** pomocí ***excentrické anomálie β***. Jde o rovnici eliptické dráhy s počátkem v jednom ohnisku, která reprodukovala téměř přesně planetární vzdálenosti. Výpočty tak potvrdily, že prostřednictvím excentrické anomálie β byla rovnice stanovena správně.

Nalezením vztahu pro změnu vzdálenosti Marsu od Slunce v závislosti na jeho poloze Kepler odhalil tajemství jeho dráhy. Pravděpodobně nejprve ani plně nechápal, co přesně znamená, neboť neznal analytickou geometrii. Až když magnetická hypotéza, konkrétně propočet librace, dávala stejné vzdálenosti jako z geometrických úvah, autor definitivně křivku identifikoval jako elipsu.

Ve svém postupu autor prokázal podle Voelkela [14] dovednosti matematického využití vlastností elipsy, vzájemného přepočítávání střední, excentrické a pravé (vyrovnané) anomálie či výpočtech nezbytných rovnic. Přitom byl plně přesvědčen o přirozených příčinách výběru eliptické dráhy.

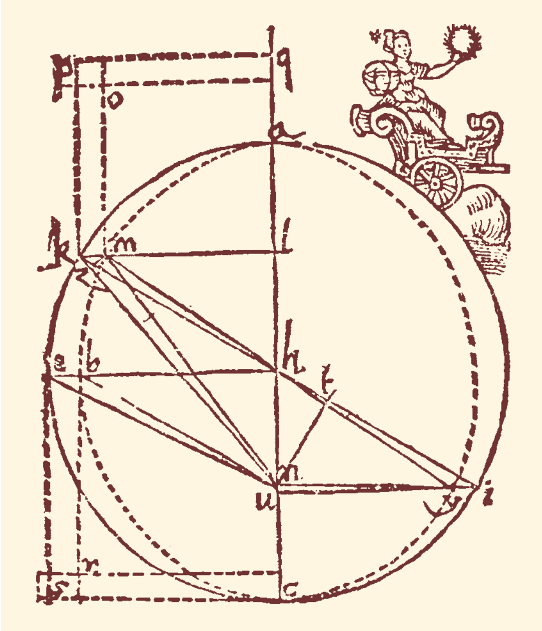
Chronologie myšlenek

Spis [1] nebyl bezezbytku psán chronologicky, posloupnost kapitol neodpovídala vždy časovým okamžikům sepsání. Vývoj Keplerových myšlenek tak můžeme lépe sledovat v jeho korespondenci, která datována je. Více než k jiným astronomům byl otevřený v četných dopisech k Davidu Fabriciovi (1564–1617), proto je jeho písemný styk s tímto fríským astronomem významným zdrojem informací pro analýzu vzniku a rozvoje klíčových myšlenek. Ty byly předmětem rozsáhlé korespondence, čítala devatenáct vzájemně vyměněných dopisů, z období let 1602–1609. Fabricius byl ke Keplerovým názorům místy nedůvěřivý a dostatečně kritický. Voelkel to v [14] vystihl slovy: „*Existuje určitá souvislost Keplerových výkladů a Fabriciových námitek, tedy projevů vzájemného ovlivňování.*“

Z obsahu korespondence je zřejmé, že nebyla formální, nýbrž věcná, což lze doložit tím, že autor v [1] Fabricia zmínil, například v kap. 55 připomněl jeho zásluhy při ověřování hypotézy z kap. 45. V této souvislosti v dopise z 4. července 1603 [28] zdůraznil: „*Verum est ubi hypothesis observationibus extructa et confirmata est*“, česky „Hypotéza se stává pravdivou, jakmile je vystavěna na pozorováních a je jimi potvrzena“. Reakce Fabricia byla v dopise z 27. října 1604 [28], v němž srovnal vlastní pozorování Marsu s výsledky Keplerovy oválové hypotézy. Konstatoval, že rádius se ukázal příliš malým ve středních vzdálenostech.

Interpretace eliptické dráhy Marsu byla rozvedena v rozsáhlém dopise Fabriciovi z 11. října 1605 [29], obsahovala podrobný popis a zdůvodnění Keplerových úvah, včetně připomenutí významu excentrických rovnic u dráhy Marsu. Autor rovněž vysvětlil prostřednictvím matematického modelu magnetickou interakci Slunce a Marsu. V dopise je mimo jiné text: „*Viam planetae verissimam esse Ellipsin … quam Durerus itidem oualem dixit, aut certe insensibili aliquo ab Ellipsi differentem*“, česky „Nejpravděpodobnější dráhou planet je elipsa … o které i rovněž Dűrer tvrdil, že je oválná nebo je nepostřehnutelně odlišná od elipsy“.

Fabricius v dopise z 20. ledna 1607 [28] vyjádřil pochvalu nové hypotéze pohybu Marsu (myšleno po eliptické dráze), ale samotnou metodu výpočtů hodnotil jako složitou a obtížnou.



Astronomia nova, Heidelberg 1609. Postava na voze je Urania, bohyně astronomie. Drží v ruce připravený vavřínový věnec pro objevitele eliptické dráhy Marsu. Eliptická dráha planety je vyznačena čárkovaně.

Závěr

Mimořádně otevřený Kepler [1] podrobně popsal své úsilí při objasňování pohybu Marsu, hledání skutečného tvaru jeho dráhy a celkově tak dovršení heliocentrické teorie. Zdokonalení pohledu na sluneční soustavu spočívalo v položení počátku souřadnicového systému do skutečného fyzického Slunce, v pokusech o podávání fyzikálních důkazů pravdivosti heliocentrismu.

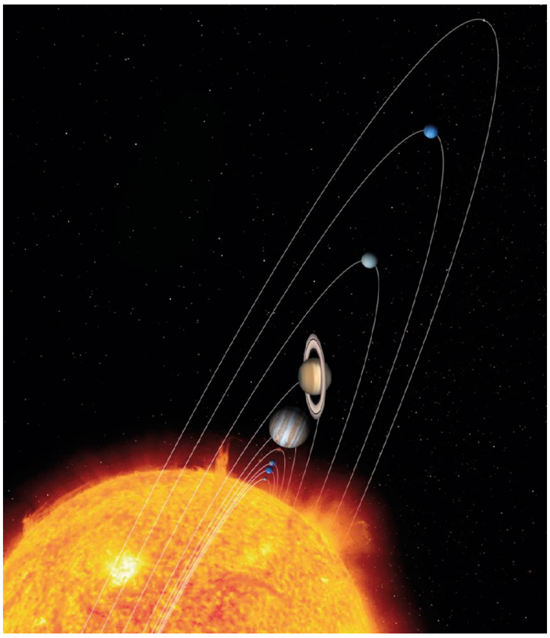
Pouhé pozorovací údaje Marsu Tychona Braheho se ukázaly nedostatečné ke správnému výběru mezi konkurenčními teoriemi tvaru jeho dráhy, proto Kepler musel přikročit k modelům podloženým fyzikálními hypotézami. Jejich prostřednictvím se pokusil podat objasnění sledovaného pohybu planety, v němž by zachytil změnu její vzdálenosti od Slunce. Současně vysvětlit pomalejší pohyb ve větší a rychlejší v menší vzdálenosti. Při hledání důvodů změn rychlosti Marsu předpokládal, že síla na něj působící vychází ze Slunce.

Důkazy prvních dvou Keplerových zákonů byly převážně matematické, vycházely z údajů patřících do astronomie. Důsledně uplatňovaný příčinný přístup přivedl autora k začátkům fyzikálních úvah, k aplikaci pozemských jevů na nebeské. Teorie pohybu Marsu tak již nebyla pouhým matematickým modelem jako u jeho předchůdců.

Model pohybu planet obsažený v prvních dvou Keplerových zákonech optimálním způsobem nahradil složitá schémata založená na kombinaci rovnoměrných kruhových pohybů po deferentech, epicyklech, excentrech doplněných ekvantem. Autor tak úspěšně vytvořil přehledný kinematický obraz při heliocentrickém uspořádání a eliptických oběžných drahách. Vyložil obě nerovnosti v pozorovaném pohybu planet, především první, vznikající v důsledku nerovnoměrného pohybu planet po eliptické dráze.

Právě elipsa byla zásadní, stala se erbovním znakem nové astronomie. Navíc Kepler byl prvním astronomem v historii, který chápal dráhu planety jako pomyslnou jednoduchou křivku.

» Jaké úvahy přivedly Keplera k eliptickému tvaru dráhy? Situováno do historie, začátkem r. 1605 dostal inspirující nápad. Všiml si, že v kvadratuře Marsu při zvolené hypotéze via buccosa (odulá tvář) byla vzdálenost Marsu od Slunce přesně polovinou vzdálenosti mezi aféliem a perihéliem. Modifikoval citovaný model dráhy, zvolil elipsu. «



Spis [1] se týkal převážně pouze Marsu – zobecnění úvah a následně obou zákonů pro ostatní tehdy známé planety provedl autor až v letech 1618–1621 v [2]. Desetiletý časový odstup mu umožnil vytvořit mnohem propracovanější a systematičtější výklad. V něm provedl řadu doplnění – umístěním Slunce do ohniska elipsy, rozšířením platnosti prvních dvou Keplerových zákonů na všechny známé planety, matematicky vhodnějším řešením Keplerovy rovnice atd. Obsah byl účelnějším způsobem didakticky upraven, veden i dnes moderní formou otázek a odpovědí. Šlo o první ucelenou učebnici nové astronomie vycházející z heliocentrické teorie.

Upřesnění fyzikální interpretace obsahu Keplerových zákonů provedl ve spisu *Astronomia Philolaica*, česky Astronomie podle Filolaa [30], Ismael Boulliau (1605–1694), který přijal eliptické dráhy planet. Nesouhlasil však s Keplerovým zákonem vzdáleností předpokládajícím závislost silového působení Slunce na planety v nepřímé úměrnosti se vzdáleností. Navrhl, aby působící síla závisela nepřímo úměrně na čtverci vzdálenosti obou těles. Tato myšlenka byla později potvrzena v zákonu všeobecné gravitace.

Keplerova *Astronomia nova* [1] právem patří do světové pokladnice novověké astronomie, časově i obsahově ji řadíme mezi spisy O obězích nebeských sfér Koperníka [4] a Matematické základy přírodní filozofie Newtona [31].

Článek vznikl díky podpoře projektu „Prameny novověké vědy“ MUNI/G/0835/2016 MU Brno.

Literatura

[1] J. Kepler: *Astronomia Nova AITIOΛOΓHTOΣ seu physica coelestis, tradita commentariis de motibus stellae Martis ex observationibus G.V. Tychonis Brahe.* Heidelberg 1609.

[2] J. Kepler: *Epitome astronomiae Copernicanae.* Lentijs ad Danubium, excudebat Johannes Plancus 1618–1621.

[3] J. Kepler: *Ad Vitellionem paralipomena, quibus Astronomiae pars optica traditur appellari.* Apud Claudium Marnium & Hæredes Ioannis Aubrii, Francofvrti 1604.

[4] M. Koperník: *De Revolutionibus orbium coelestium libri sex.* Apud Ioh. Petreium, Norimbergae 1543.

[5] R. Small: *An Account of the Astronomical Discoveries of Kepler.* London 1804.

[6] J. B. J. Delambre: *Historie de l´Astronomie Moderne.* M V Courcier, imprimeur – libraire pour les Sciences, 1821.

[7] W. Gilbert: *De magnete magneticisque corporibus et de magno magnete Tellure physiologia nova.* Kniha 2, kap. 7. Petrus Short, Londini 1600.

[8] J. Kepler: *Harmonice mundi. Libri V.* Sumptibus Godofredi Tampachii Bibl. Francof. Excudebar Ioannes Plancus, Lincii Auſtriæ 1619.

[9] R. Taton, C. Wilson: *Planetary astronomy from the Renaissance to the rise of Astrophysics Part A: Tycho Brahe to Newton.* Cambridge University Press, Cambridge, New York 1989, část 10, s. 161. C. Wilson: *Predictive astronomy in the century after Kepler.*

[10] J. L. E. Dreyer: *History of the Planetary Systems from Thales to Kepler.* Cambridge 1906, přetisk New York 1953.

[11] O. Gingerich: „Kepler´s place in astronomy“, Vistas in Astronomy **18**, 261 (1975).

[12] J. B. Barbour: *The Discovery of Dynamics.* Oxford University Press, Oxford, New York 2001.

[13] C. Wilson: „Kepler´s derivation of the elliptical orbit“, ISIS **59**, 4 (1968).

[14] J. B. Voelkel: *The Composition of Kepler´s Astronomia Nova.* Princeton University Press, Princeton, Oxford 2001.

[15] Archimedes: *The Works of Archimedes: On Conoids and Spheroids.* Proposition 4. Red. T. L. Health. Cambridge University Press, Cambridge 1897, s. 113.

[16] Apollonius of Perga: *Treatis on Conic Sections.* Kniha III. Red. T. L. Health, Cambridge University Press, Cambridge 1897.

[17] N. M. Swerdlow: „Kepler´s iterative solution to Kepler´s equation“, Journal for History of Astronomy **31**, 339 (2000).

[18] B. Stephenson: *Kepler´s Physical Astronomy.* Princeton University Press, Princeton 1994.

[19] B. R. Goldstein, G. Hon: „*Kepler´s move from Orbs to Orbits*“, Perspectives on Science **13**, 74 (2005).

[20] J. Kepler: *Mysterium cosmographicum.* Georgius Gruppenbachius, Tübingen 1596.

[21] S. Tønnessen: „Kepler´s analysis of the dynamics of planetary motion“. V: *Kepler´s Heritage in the Space Age.* Ed. A. Hadravová, T. J. Mahoney, P. Hadrava, Národní technické museum, Praha 2010, s. 24.

[22] D. M. Miller: „O male factum: rectilinearity and Kepler´s discovery of the elipse“, Journal for History of Astronomy **39**, 43 (2008).

[23] R. Martens: *Kepler´s Philosophy and the New Astronomy.* Princeton University Press, Princeton 2000.

[24] A. E. L. Davis: „Kepler´s Astronomia nova: a geometrical success story“, V: *Kepler´s Heritage in the Space Age.* Ed. A. Hadravová, T. J. Mahoney, P. Hadrava, Národní technické museum, Praha 2010, s. 17.

[25] Eukleides: *Elements.* Kniha VI, věta 1.

[26] A. E. L. Davis: „The mathematics of the area law: Kepler´s successful proof in Epitome Astronomiae Copernicanae (1621)“, Archiv History of Exact Sciences **57**, 355 (2003).

[27] A. E. L. Davis: „The geometrical root of the area-measure of time (From Kepler´s *Astronomia Nova*)“, Journal for the History of Astronomy **46**, 297 (2015).

[28] J. Kepler: *Gesammelte Werke.* Band XIV Briefe 1599–1603. C. H. Beck´sche Verlagsbuchhandlung München MCMLI.

[29] J. Kepler: *Gesammelte Werke.* Band XV Briefe 1604–1607. C. H. Beck´sche Verlagsbuchhandlung München MCMLI.

[30] I. Boulliau: *Astronomia philolaica.* Simeonis Piget, Paris 1645.

[31] I. Newton: *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica.* Londini 1687.