

Keplerovy představy o dynamice pohybu planet

Vladimír Štefl

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita, Kotlářská 2, 611 37 Brno; steffl@physics.muni.cz

Úvod

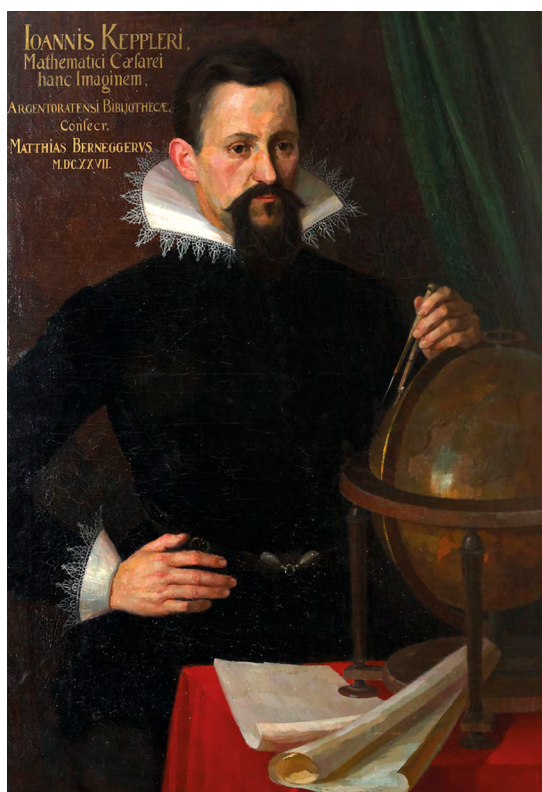
Ve svém studiu pohybu planet nehledal *Johannes Kepler* (1571–1630) pouze geometrickou křivku vyjadřující dráhu, která by vyhovovala pozorovacím údajům. Snažil se také odhalit zákonitosti pohybu, jakož i jejich příčinné zdůvodnění. Zamýšlel se nad tím, co neznámého pohybovalo planetami kolem Slunce, střídavě je k němu přibližovalo a zase od něho vzdalovalo či měnilo jejich oběžnou rychlost. Kladl si otázku, co řídí pohyb planet? Začal tak zkoumat souvislost zmínovaných jevů s působením sil. Keplerovy dynamické úvahy se staly nedílnou součástí koncepce výkladu pohybu planet.

Při jejich komentování a rozboru vycházíme z názorů obsažených především v jeho třech dílech. Jsou to *Nová astronomie* [1], *Souhrn koperníkovské astronomie* [2] a *Sen neboli měsíční astronomie* [3]. Své myšlenky Kepler na počátku 17. století konzultoval rovněž písemně, proto rozebíráme i jeho korespondenci zachycenou v *Dopisech* [4, 5]. Nejprůnosnější a nejcennější byla výměna názorů především s *Davidem Fabriciem* (1564–1617), který sděloval Keplerovi konkrétní zasvěcené poznámky a návrhy k jeho dílčím krokům v postupu řešení různých problémů.

K výkladové interpretaci textů a citování ukázek použijeme v článku překlady z latinského do českého jazyka. Vybrané části *Nové astronomie* [6] přeložila Katarína Petrovičová a *Sen neboli měsíční astronomie* [7] Alena a Petr Hadravovi.

Původní Keplerovy latinské texty byly psány dobovým renesančním stylem s autorovou demonstrací znalosti a bohatosti jazyka, s využitím pro jednu a tutéž věc více pojmů – například pro dynamickou veličinu sílu¹ používal *facultas*, *vis*, *virtus*, *fortitudo*, pro kinematickou veličinu dráhu *via*, *iter*, *circuitus*, *ambitus*, *orbis*, *orbita*. Pouze v některých případech rozlišoval termíny podle věcného obsahu či autora citací, například u Aristotela, Ptolemaia, Koperníka.

Řada Keplerových jednotlivých konkrétních pojmů byla historicky podmíněných, do současného jazyka jsou obtížně převoditelné, ne-li nepřeložitelné. Autor sám neměl jejich význam ustálený, rozdílný byl v optických, v astronomických či astrologických dílech. Například jeden z klíčových pojmů *species* z latinského



Portrét Johanna Keplera z roku 1620. Zdroj: Wikipedie

slova *specere* (vidět, pozorovat) měl mnoho významů. Užil ho poprvé v *Optice* [8] ve významu *jev*, respektive *způsob*. Následně v *Nové astronomii* [1] k popisu mechanismu při unášení planet kolem Slunce použil Kepler upřesňující vlastní termín *species immateriata*, který jsme v [6] přeložili jako *nehmotná forma*. Měl vyjadřovat nehmotné vytékání *species* ze Slunce, která se šířila prostorem stejně jako světlo a pohybovala planetami. Různými autory je tento pojem překládán odlišným způsobem, viz podrobný rozbor Rabinové v [9]. Příkladem Gingerich zvolil v [10] *nehmotné vyzařování*, Stephenson v [11] *nehmotný obraz*, Wallis v [12] *nehmotná forma*. Donahue v [13] použil kombinaci *nehmotná species*. Všem uvedeným je společné, že popisují vlastnosti *species*. Je zřejmé, že adekvátní přesný překladový ekvivalent pro *species* neexistuje, jak konstatovali Donahue [13] pro anglický jazyk a Špelda [6] v případě českého jazyka.

Samotný Kepler si nebyl úplně jistý správnou interpretací termínu *species* – po dopsání *Nové astronomie* [1]

¹ Připomínáme, že chápání pojmů u Keplera bylo jiné než v současnosti. Například pojem síla byl ještě poplatný Aristotelovi, který ji spojoval s rychlostí, nikoliv se zrychlením jako Newton.

r. 1605 ještě své úvahy domýšlel a konkretizoval. V dopise *Matthiasi Hafenrefferovi* (1561–1619) z 16. listopadu 1606 [4] doplnil pohled na *species*, který spojil s vyzářováním a magnetismem – *ut effluxus ex magnete*.

Lze shrnout, že ustálená jednoznačná terminologie v tematice našeho článku nebyla v 17. století v převážné většině vytvořena. Kepler tak musel při výzkumu pohybu planet a řešení problémů s tím spojených nové pojmy zavádět, terminologii vytvářet sám. Bylo to pro něj obtížné tím více, že byl spíše matematikem než fyzikem v dnešním slova smyslu.

Nová astronomie

V *Nové astronomii* [1] Kepler na titulní straně oznámil nový přístup ke zkoumání pohybu Marsu, vycházející ze studia fyzikálních příčin – *nebeskou fyziku*.² Jejím prostřednictvím hledal fyzikální potvrzení své představy pohybu planety, objasňující její polohu a pohyb po dráze v prostoru. Vycházel z existence jediného ústředního tělesa – Slunce, které planetou pohybuje. Oprávněně proto Gingerich v [10] nazval Keplera prvním astrofyzikem v historii.

Směřování k fyzikálním úvahám o příčinách pohybů nebeských těles naznačil Kepler již v rozsáhlém úvodu *Nové astronomie* [6]: „... v tomto díle jsem propojil nebeskou fyziku s astronomií...“ či ve sdělení „mezitím však, když sleduji a zdárně naplňuji tento cíl... zkoumám přirozené příčiny pohybů.“

S výše zmiňovaným souvisela problematika gravitace, která až do Keplera znamenala zjednodušené tíži. Teprve u něj nastal podle Hechta [14] určitý posun v jejím chápání, což lze doložit slovy z úvodu *Nové astronomie* [1], z části Pravdivé učení o tíži [čili gravitaci]: „Tíže je tělesná vlastnost vyvolávající mezi vzájemně příbuznými tělesy sjednocení nebo spojení (při čemž

stejně povahy je také magnetická schopnost)...“ Gravitaci Kepler prezentoval jako fyzikální vlastnost Země, Slunce, ostatních planet a těles. K jejímu výkladu použil analogii s magnetismem.

Výstižnější a obecnější pohled na vzájemné gravitační působení těles v soustavě Země–kámen obsahoval dopis Fabriciovi z 11. října 1605 [4]: „*Předpokládejme, že kámen o velikosti se znatelným poměrem k velikosti Země byl umístěn na pozadí Země. Nechtě obě tělesa nepodléhají jiným pohybům. Pak říkám, že nejen pouze kámen se bude pohybovat k Zemi, ale také Země k němu...*“

Při rozboru gravitační interakce mezi tělesy Kepler prováděl úvahy, předzvěst pozdějších myšlenkových experimentů. V citovaném dopise [4] ztotožnil gravitaci s magnetismem a popsal závislost gravitace na hmotě tělesa textem: „*Gravitace je magnetická síla, jež udržuje pohromadě podobné objekty, které jsou stejné kvantitativně velikosti ve velkém a malém tělese, a je rozdělena podle hmoty těles...*“

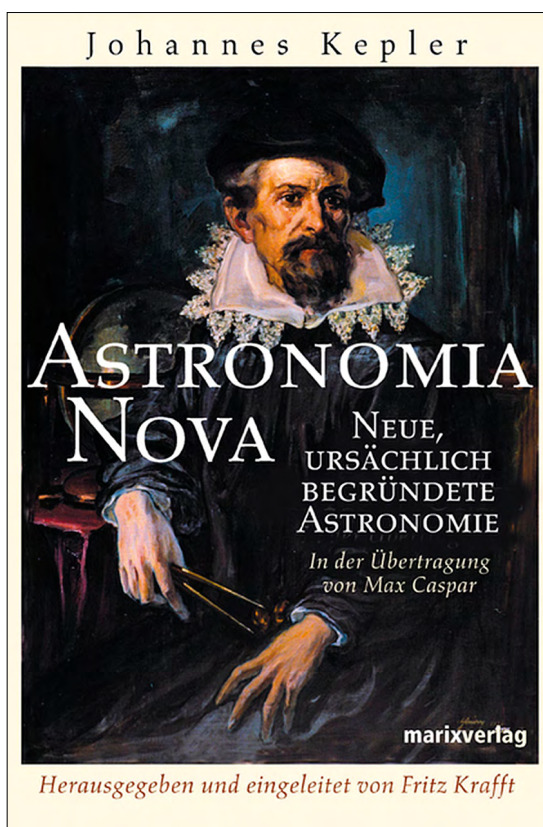
Vraťme se ke komentování *Nové astronomie*, kde v úvodu třetí části výstižně nazvané *Zkoumání druhé nerovnosti, tj. pohybů Slunce nebo Země, neboli klíč do hloubi astronomie*, kde je mnohé o fyzikálních příčinách pohybů, začal Kepler studovat pohyby a šíření působících sil prostřednictvím matematiky, což komentoval v *Nové astronomii* [1] slovy: „*Neboť vidíme, že tyto pohyby jsou prováděny v prostoru a čase a tyto virtue jsou vyzářovány a šířeny skrz prostor světa, které jsou všechny matematickými představami a že tato síla pramení a proudí ze zdroje skrz prostor světa...*“

Základy výpočtů pohybů planet založené na působících silách Kepler systematicky rozebral ve třicáté druhé až třicáté deváté kapitole třetí části *Nové astronomie*. Ve třicáté druhé kapitole se zamýšlel nad koncepcí silového působení na dálku se zdůrazněním fyzikálních příčin pohybů. Výklad pohybu planet se opíral o představu souboje mezi působící silou a jejím přirozeným odporem k pohybu.

Podrobnější zdůvodnění klidu a pohybu planet na příkladu Země rozvedl v dopise *Herwartovi von Hohenburgovi* (1553–1622) z 28. března 1605 [4], kde mimo jiné uvedl myšlenku „*hmotě je vlastní klid*“ (*materiae proprium est quies*) a dodal, že s tímto klidem bojuje síla. V duchu antických názorů o pohybu Kepler předpokládal, že pokud by na Zemi nepůsobily síly, planeta by se zastavila. K jejímu pohybu tak měly být potřebné vnější síly. Rychlost planety v určitém čase byla určována velikostí na ni působící síly. Zde Kepler navazoval na Aristotela, přestože jeho celkové pojetí dynamiky již bylo odlišné.

Ve třicáté třetí kapitole *Nové astronomie* Kepler formuloval své názory na Slunce jako původce pohybu, neboť odhalil, že ovlivňuje rychlost planet. Umístil Slunce do středu světa. Závislost velikosti působení na vzdálenosti od něho charakterizoval v *Nové astronomii* [1] takto: „*Čím je vzdálenější planeta od bodu, který je považován za střed světa, tím slaběji je pohybována.*“ Zdroj pohybu je podle Keplera pouze jeden – Slunce. Hybná síla (*virtus motrix*) z něj vychází, slábne s narůstající vzdáleností. Konkrétní závislost upřesnil slovy v *Nové astronomii* [1]: „*Velikost silového působení je nepřímo úměrná vzdálenosti.*“ Od druhé poloviny třicáté třetí kapitoly při výkladu pohybu planet používal vedle hypotézy planetární mysli také přirozené příčiny, tedy silové ovlivňování.

2 Nebeskými tělesy Kepler rozuměl tělesa Sluneční soustavy, o nichž pojednávala nebeská fyzika.



V klíčové třicáté čtvrté kapitole se Kepler zabýval zdrojem pohybu planet – Sluncem a jeho působením na planety. Nejprve zkoumal, jakého typu těleso je, jeho podobnost a rozdílnost s magnetem. Následně vyložil představu o pohybu planet, na které se měla přenášet rotace magnetických vláken (*filamenta, fibrae*), táhnoucích se podélně kolem magnetického tělesa (*corpus magneticum*) Slunce. Pohyb planet po oběžné dráze vyvolávaly podle Keplera působící hybné síly prostřednictvím nehmotné formy, vznikající přenášením rotačního pohybu tělesa Slunce. Doba pohybu (*mora*) planet při přechodu určitým úsekem dráhy závisela na součtu impulsů působících částic této nehmotné formy. Konkrétním zdrojem hybné síly měly být její výrony z magnetických vláken. Podrobnější rozbor podle Stephenson v [11] provedl v české terminologii Špelda v [6].

Rok před objevem skvrn a jejich pohybu na Slunci Galileem Galileim (1564–1642) Kepler intuitivně věcně správně, ale časově nepřesně předpokládal, že Slunce rotuje s periodou tří dnů, ve stejném směru, v jakém obíhají planety. Keplerova fyzikální představa této skutečnosti byla základem pro objasnění pohybu planet kolem Slunce. Interpretovala tangenciální pohyb jako výsledek působení síly spojené s magnetickými vlákny od rotujícího Slunce. Samotné planety nebyly magneticky přitahovány, nýbrž se na ně měla přenášet rotace magnetických vláken, které takto jimi pohybovaly.

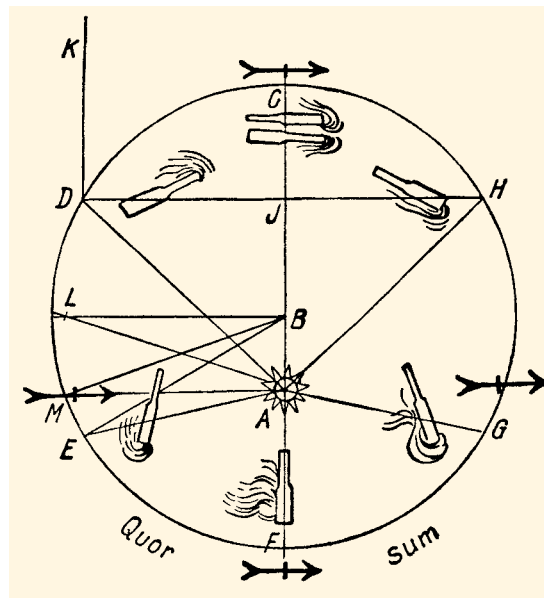
V třicáté šesté kapitole vysvětlil pohyb planet podél ekliptiky na základě uspořádání magnetických vláken ze Slunce.

V úvodu třicáté deváté kapitoly Kepler shrnul své představy o pohybu takto:

1. Těleso planety inklinuje přirozeně ke klidu v každém místě, kde se nachází.
2. Planeta přechází od jedné polohy v délce ke druhé v důsledku síly pocházející od Slunce.
3. Jestliže se vzdálenost planety ke Slunci nemění, je výsledkem pohyb po kruhové dráze.
4. Doby oběhů jsou ve zdvojeném poměru vzdáleností nebo velikostí kružnice.
5. Základní a osamělá síla sídlící v tělese planety není dostatečná pro její přesun z místa na místo, protože chybí nohy, křídla a peří, kterými by mohla stlačovat éterický vzduch.
6. Přiblížení a vzdálení planety ke Slunci a od něj nastává od síly, která je vlastní planetě.

Čtvrtý bod uvádí vztah mezi rychlostmi pohybů a vzdálenostmi planet od Slunce. Keplerův tzv. *zákon vzdáleností* předpokládal, že rychlost pohybu planety se mění nepřímě úměrně se vzdáleností. Byl důsledkem Koperníkova poznatku, že rychlý pohyb v perihéliu a pomalý v aféliu jsou úměrné přímcem nakreslené ze středu světa k planetě (připomínáme, že u Koperníka byl střed světa v blízkosti Slunce, ve středu planetárních drah). Kepler dal změně vzdálenosti od Slunce, respektive v pohybu název *librace*. Vyjadřovala především první skutečnost, ale Kepler ji chápal také jako změnu rychlosti planety podél její dráhy.

Fyzikální přístup při výkladu použil Kepler v třicáté deváté kapitole. Vyložil, že nepravidelnosti planetárního pohybu jsou způsobeny samotnou planetou, jejíž magnetické síly ji usměrňují při odchylkách od kruhové dráhy v rovině ekliptiky. Intuitivně se domníval, že magnet v planetě zapříčiňuje její přibližování a vzdalování od Slunce.



Obr. 1 Keplerovo schéma výkladu pohybu planety po dráze.

K podrobnějšímu výkladu dynamiky pohybu planet se Kepler vrátil v padesáté sedmé kapitole *Nové astronomie*, ve které rozpracoval obě hypotézy řízení pohybu – jak planetární mysl, tak i magnetickou.

Prvně jmenovanou hypotézu planetární mysl používali astronomové pod vlivem filozofie až do počátku 17. století. Domnívali se, že ovlivňuje a řídí pohyb planet. Sama o sobě neměla schopnost cokoliv měnit v tělese planety, stejně jako ji přenášet z jednoho místa na druhé bez pomoci dalšího tělesa, jak bylo požadováno při výkladu pohybu planet. Kepler hypotézu myslí – duchovního hybatele – v padesáté sedmé kapitole *Nové astronomie* zpočátku aplikoval na librační teorii při hledání odpovědi na otázku, proč se vzdálenost planet od Slunce mění.

Později vyslovil kritické pochybnosti, zda planetární mysl může uskutečňovat astronomická pozorování a současně je dokáže matematicky zpracovávat. Ke své činnosti podle Keplera potřebovala reálné vnější indikátory. Například využívat ke stanovení vzdáleností librační model zachycující změny velikosti úhlového průměru Slunce. Úhel excentrické anomálie, nezbytný k určení vlastní polohy planety v prostoru, by³ však mysl vnímat nedokázala, neboť byl měřen od středu dráhy – imaginárního bodu. A při neznalosti planetární vzdálenosti od Slunce by nemohla řídit její pohyb. Nebyla schopna např. zajišťovat stálou polohu zemské osy v případě planety Země. Kepler tak dospěl k názoru, že pozorující a počítající mysl není možná a ani nutná, proto se spokojil s přírodou, nahradil hypotézu myslí fyzikálními silami, což vystihl v *Nové astronomii* [1] slovy: „Pokud neplatí žádné z těchto zdůvodnění, ať mysl, vybavená duševní schopností, která zajišťuje setrvalé směřování zemské osy, dostane úkol také ji v průběhu staletí sklápět. Pokud ovšem neobstojí žádné z těchto zdůvodnění, ani samotná idea myslí v obecnosti, spokojme se s přírodou.“

Vraťme se do padesáté sedmé kapitoly *Nové astronomie*, ve které Kepler objasnil pohyb planety po dráze dvěma způsoby, viz obr. 1. První byl založen na magnetickém působení. Planeta byla na obrázku znázorně-

3 Podmiňovací způsob v textu článku volíme proto, že jde o hypotézu nemající reálný základ, neodpovídající skutečnosti.

» Model magnetické hypotézy umožnil Keplerovi provést geometrické změny směřující k optimálním parametřům elipsy. «

na magnetickou jehlou se stálým směrem. Vysvětlení změny její vzdálenosti od Slunce se opíralo o interpretaci působení přirozených magnetických sil. Planeta s magnetickým polem, v tehdejších představách modelově představená jako velký kulatý magnet, jehož pole mělo z dnešního pohledu dipólový charakter, se při působení síly Slunce pohybovala po dráze, střídavě přitahována a odpuzována podle natočení pólů. Takto bylo možné vyložit změny rychlosti a vzdálenosti od kruhové dráhy. Stálost směřování magnetické osy planety však byla v rozporu s již tehdy známým pohybem rotační osy Země.

Druhé vysvětlení předpokládalo oběh hypotetické řeky kolem Slunce. Její kruhové proudění reprezentovalo nehmotnou formu působící magnetické síly centrálního tělesa. Planeta byla vybavena veslem, které umožňovalo regulovat pohyb do bližší či vzdálenější polohy od Slunce. Zde byl Kepler veden myšlenkou, že příčiny nebeských jevů jsou podobné běžným pozemským.

Při zkoumání librace v padesáté sedmé kapitole Kepler zjistil její nárůst v závislosti na sin úhlu anomálie. Celkovou libraci vyjádřil součtem zmiňovaných sinů pro úhly v intervalu 1° . Neznal ještě obecný vzorec pro součty sin úhlů pomocí aritmetické posloupnosti. Uvědomoval si, že jeho výpočet byl pouze aproximační, vzhledem k nepřesnostem spjatým s nerozlišováním právě a excentrické anomálie nebo s nedostatečně malým intervalem 1° . Definice anomálií a jejich použití byly rozvedeny Šteflem v [15].

Důležitou fyzikální interpretaci příčin přibližování a vzdalování Marsu od centrálního tělesa objasnil Kepler prostřednictvím vzájemného magnetického působení Marsu a Slunce. Domníval se, že Slunce disponuje nehmotnou silou, kterou přitahuje, respektive odpuzuje planetu. Variace její vzdálenosti vedla k excentrické eliptické dráze. V *Nové astronomii* [1] uvedl: „Co když jsou všechna planetární tělesa něco jako obrovské kulaté magnety? O Zemi (tj. podle Koperníka o jedné z planet) to nepochybně platí. Prokázal to William Gilbert.“

Představy o magnetu v tělese planet Kepler upřesnil v dopise z 5. března 1605 Michaelu Mästlinovi (1550–1631) [4]: „... planetární těleso je magnetické nebo kvazimagnetické“. Chápání termínu *est magneticus vel quasi* – kvazimagnetický – „jakoby magnetický“ u vlastnosti planetárního tělesa popsal slovy: „... Ide mi totiž o podobnost, nikoliv přesně o samotnou věc.“ Dále vyzdvihl: „Těleso Slunce je sférický magnet rotující kolem své osy.“

Pohyb planety Kepler vysvětlil skládáním dvou mechanismů. Prvního dynamického, vyvolaného rotací Slunce prostřednictvím působení nehmotné formy, která způsobuje oběžný pohyb kolem centrálního tělesa. Druhým byla magnetická interakce vyvolávající změnu vzdálenosti, ve svých důsledcích určovala pohyb planety po eliptické dráze kolem centrálního tělesa – Slunce nacházejícího se v ohnisku. Ve své koncepci tak Kepler vycházel z jeho myšlené nehybnosti. Až později Isaac Newton (1643–1727) poopravil tento názor, přijal i pohyb Slunce.

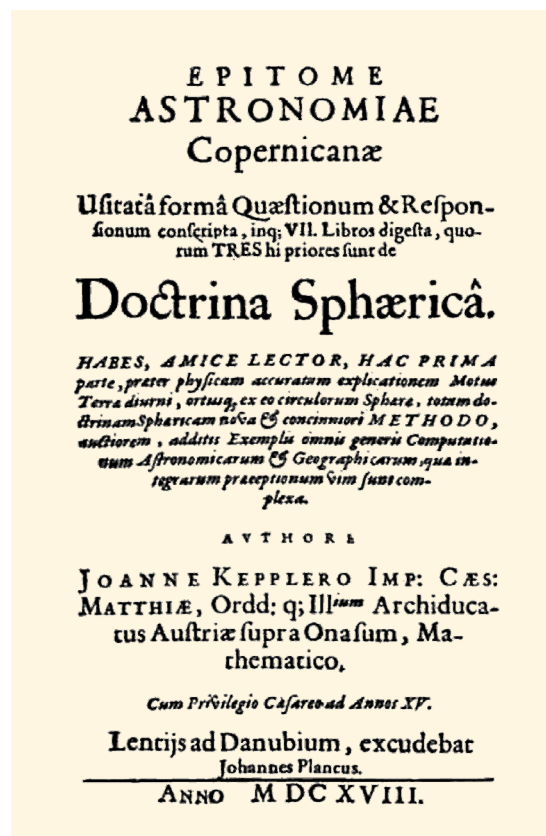
Kepler doplnil v *Nové astronomii* model existence sférického magnetu v nitru planety grafickým zachycením průběhu vláken a odtud odvození jejich působení. Nejprve předpokládal neměnnost jejich polohy, stálou kolmost k přímkce apsid. Později vzhledem k ní změny

postavení připouštěl. Poloha magnetické osy planety ve spojitosti se základním směrem magnetického působení (v dnešní terminologii magnetického toku) měla vést ke změnám vzdáleností Marsu od Slunce v různých částech dráhy.

V apsidách byla magnetická osa Marsu kolmá k průvodiči Slunce–planeta, magnetické přitahování tak nenastávalo. Popíšeme postupný vývoj situace při pohybu planety po dráze. Začneme výchozí polohou v aféliu, ve kterém byl jeden pól jeho vláken bližší ke Slunci, důsledkem bylo přitahování k němu. Skončilo v perihéliu, kde se působení stalo opět neutrální. Jestliže se Mars pohyboval od perihélia, byl druhý pól jeho vláken bližší ke Slunci, výsledkem bylo odpuzování od něho. Při pohybu planety podél přímky apsid nebyl průvodič kolmý k magnetické ose, proto nastávala magnetická interakce se Sluncem. Numerická excentricita elipsy regulovala velikost interakce magnetických vláken Marsu se Sluncem.

Shrnuto, přibližování a vzdalování planety záviselo na stupni vzájemného magnetického působení Marsu a Slunce. Jeho měřítkem byl v *Nové astronomii* sin právě anomálie. Kepler předpokládal pokles působící síly s rostoucí vzdáleností, obdobně jako u magnetu. Odvodil, že u librace je kývavá síla úměrná sin vyrovnané anomálie (úhlová vzdálenost planety od afélia měřená ze Slunce), pokud jsou ostatní vlivy v rovnováze. Tato podmínka však neplatila obecně v různých místech dráhy.

Pojem librace si Kepler vypůjčil z mechaniky, kde se používal u vyvažování (*librare*) páky či vah (*libra*). V souladu s názory v tehdejší době mínil, že přirozené příčiny lze zachytit modelovou analogií prostřednictvím břemen umístěných na páce, které se řídí zákonem rovnováhy. Tu stanovil již Archimedes, na kterého se Kepler ve svých závěrech odvolával. Planetární lib-



Obr. 2 Titulní list Souhrnu koperníkovské astronomie.

raci Kepler vysvětloval jako výsledek působení magnetických sil, což vyjádřil matematickým výpočtem opírajícím se o magnetickou rovnováhu. Ve výkladu ukázal na analogii systému dvou magnetů a soustavy Slunce–planeta. K analýze použil geometrický popis mechanických vlastností.

Uvedený model magnetické hypotézy umožnil Keplerovi provést geometrické změny směřující k optimálním parametrům elipsy s udávanými vyhovujícími vzdálenostmi Marsu od Slunce i vhodnými rovnicemi. Kepler vyložil a zdůvodnil rozdílnou velikost a směr vláken, která byla mírně odkloněna z původního směru.

Souhrn koperníkovské astronomie

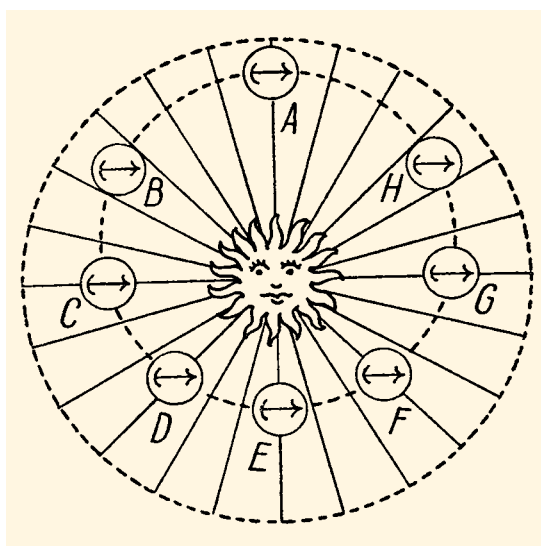
Souhrn koperníkovské astronomie [2] (titulní list viz obr. 2) je nejpropracovanějším Keplerovým dílem, ve kterém prokázal další vyhrávaní svého myšlení, detailnější odůvodňování upřesněných představ o dynamice. Dílo se skládá ze sedmi knih – první až třetí vyšly r. 1618, čtvrtá kniha r. 1620, knihy pátá až sedmá r. 1621. Problematika „nebeské fyziky“ je zachycena ve čtvrté a páté knize. Ve čtvrté knize jí jsou věnovány druhá a třetí část, včetně klíčového výkladu magnetické interakce Slunce–planeta, opírající se o analogii soustavy dvou magnetů. V páté knize při interpretaci librace Kepler použil předpoklad konstantního magnetismu Slunce.

Přejdeme k podrobnější charakterizaci díla. Vychodiska, ze kterých vycházel v *Souhrnu* [2] při tvorbě své astronomické teorie, shrnul Kepler slovy: „Vytvořil jsem svoji celou astronomii na Koperníkově hypotéze ohledně světa, na pozorováních Tychona Braha a konečně na Angličanově Williamově Gilbertově filosofii magnetismu.“

V *Souhrnu* Kepler úspěšně popsal pohyb nejen jednotlivé planety, ale také všech známých planet ve Sluneční soustavě, k čemuž použil eliptický tvar drah. Obtížnější se ukázalo vyložit působení Slunce na planety. Vymyslel proto hypotézu, kterou pečlivě a podrobně na úrovni fyziky tehdejší doby argumentačně podložil. Výklad pohybu planet vycházel z podobné koncepce, o které jsme se již zmiňovali – z působení Slunce prostřednictvím nehmotné formy. Ve čtvrté knize *Souhrnu* [2] uvedl: „Nehmotná forma vytékající ven ze slunečního tělesa k planetám.“ Na planety se měl přenášet její oběžný pohyb, převzatý z magnetických kruhových vláken rotujícího slunečního tělesa. Provedl dynamickou korekci mezi rotací Slunce a oběhem planet. Vzhledem k okamžitému šíření nehmotné formy by měla mít ve všech vzdálenostech od Slunce stejnou úhlovou rychlost. Proč tomu tak z pozorovacích údajů není, musel Kepler vysvětlit. Analýzu jeho úvah provedl Stephenson v [11], z jehož rozboru vyjdeme.

První zdůvodnění nesouladu se opíralo o Keplerovu domněnku, že schopnost nehmotné formy s narůstající vzdáleností poklesává, dochází ke zdržení způsobené setrvačností. Proto se vzdálenější planety pohybují pomaleji než bližší. Planety jako veškerá hmota projevují určitý odpor k pohybu, který Kepler nazýval různými termíny, například použil *inertia*. Hmota má sklon zůstat na svém místě. Ve čtvrté knize *Souhrnu* [2] to formuloval slovy: „... tam je ... přirozená setrvačnost samotných planet při pohybu.“

Druhý důvod spočíval podle Keplera v zeslabování hybné síly se vzdáleností od Slunce. V *Nové astronomii*



Obr. 3 Schéma pohybu planety kolem Slunce při magnetické interakci.

předpokládal pokles síly nepřímo úměrný se vzdáleností od Slunce, což znovu ověřoval v *Souhrnu*. Působící sílu Kepler názorně přirovnal k úchopu rukou, která s planetou pohybuje.

Různou rychlost planet navíc vyložil tak, že pohyb v nich udržuje hmota, a protože planety obsahují její odlišné množství, pohybují se rozdílnou rychlostí. Ty s větší hmotou pomaleji.

Působící magnetická síla je rozptýlována na vzdálenost mezi Sluncem a planetami, jejichž pohyb je ovlivňován setrvačností. Protože magnetické síly a planetární setrvačnosti jsou konstantní, proto k udržování této pravidelnosti není zapotřebí hypotézy myslí. K tomu Kepler ve čtvrté knize *Souhrnu* [2] dodal: „... nebeské pohyby nepracují řízeny myslí, ale přirozenou silou těles...“

Celkový model pohybu planety kolem Slunce popsal Kepler ve čtvrté knize *Souhrnu*, kde nápaditým způsobem v kvalitativní podobě spojil působení magnetických sil s pohybem planety.

Jak jsme již uvedli, podle Keplera se v nitru planety nachází magnet – jeden z pólů označený špičkou šipky vyznačuje směr přitažlivé síly Slunce, viz obr. 3. Planeta se podle obrázku pohybuje po dráze ve směru hodinových ručiček. V aféliu (A) jsou oba póly ve stejné vzdálenosti od Slunce, následně mezi A a B přitahovaný pól planety se začíná natáčet stranou směrem k Slunci. Postupně planeta nakreslená v blízkosti Slunce prochází z B do C a do D. Následně projde perihéliem (E), kde se póly opět nacházejí ve stejné vzdálenosti od Slunce. Od tohoto bodu nastává odpuzování pólu strany od Slunce, takže se nyní planeta pohybuje od Slunce přes body F, G a H až do návratu do afélie v A.

Počátkem 17. století již známé magnetické působení Země použil Kepler k úvaze a aplikační analogii. Předpokládal, že Země pohybuje Měsícem prostřednictvím své emitované *species* a protože i Slunce pohybuje planetami obdobným způsobem, musí být rovněž magnetickým tělesem. Přesněji, v *Souhrnu* bylo Slunce prezentováno jako sférický magnet, s jedním pólem ve středu a druhým položeným na jeho povrchu. Podle textu v *Souhrnu* [2]: „Střed tělesa Slunce odpovídá jedné končetině nebo oblasti magnetu, ale celý povrch druhé oblasti magnetu.“

» Planeta pohybující se po eliptické dráze představuje magnet s pevnou osou. «

Na začátku páté části Kepler potvrdil závěr, že Slunce přitahuje jeden pól magnetu planety, zatímco druhý odpuzuje. Planeta pohybující se po eliptické dráze představuje magnet s pevnou osou. Magnetická interakce fungující tímto způsobem umožňuje řízení planety. Nepůsobí podél dráhy, nýbrž reguluje radiální složku planetárního pohybu.

V *Souhrnu* Kepler použil obdobný výklad magnetismu jako v *Nové astronomii*, navíc předpokládal reálné magnetické síly mezi planetou a Sluncem, která jako hybná forma – *species motrix* – měla být emitována ze Slunce a přitahovat, nebo odpuzovat planetu, podle toho, kterou stranou byla k němu aktuálně natočena, jak jsme již vyložili. Tímto Kepler rozšířil fyzikální přístup, neboť použil povrch planety (Země) jako oblast působení přitažlivých a odpuzivých sil. Celkově v *Souhrnu* vyzdvihl úlohu Slunce, kterému přičítal rozhodující roli při vytváření pohybu.

K nedostatečně vyložené libraci v *Nové astronomii* se Kepler vrátil v páté knize *Souhrnu*, znovu prověřoval její duševní či fyzikální příčinu. Pravidelnost nepravidelností pohybu planet naznačovala, že je třeba zkoumat posledně jmenovanou. Provedený výklad se lišil od kvalitativní librační teorie z *Nové astronomie*, ve které oběžný pohyb vysvětlil společným působením Slunce a planet, matematicky ho vyjádřil obráceným sinem – $\sin^{-1}$ anomálie. V *Souhrnu* přičítal celé působení Slunci, které prostřednictvím pohybu své nehmotné formy řídilo pohyb planet a vzájemnou interakci obou těles pomocí přivracené a odvrácené strany planety, což ukázal na příkladu Země.

Postup výkladu se skládal ze dvou částí. V první Kepler provedl specifikaci podmínek, za kterých lze matematicky určovat fyzikální síly. Následně dokazoval analogii mezi librací a rovnováhou. Druhá část

popisovala výpočet librace a stanovení síly v daný časový okamžik prostřednictvím $\sin$ vyrovnané anomálie. Nastavení librace provedl pomocí obráceného $\sin$ excentrické anomálie a kvalitativního výpočtu opírajícího se o vhodnou orientaci magnetického vlákna.

Zdokonalené Keplerovo vysvětlení librace poskytovalo přesnější výsledky, výklad odchylky magnetických vláken se opíral o matematické odvození fyzikálních příčin. Na obr. 4 označuje PR přímku apsid, A polohu Slunce, B střed kružnice, I, N, E jsou polohy planety.

Odchylku magnetických vláken planety přisuzoval Kepler působení Slunce, které ji, jak jsme popsali, přitahuje jedním pólem a druhým odpuzuje. V aféliu P dráhy planety vlákna svírají pravý úhel s přímkou apsid PR . Při dosažení bodu I planetou se vlákna začínou mírně odchylovat ve směru IH . Kepler předpokládal jejich orientaci ke Slunci ve směru NQ po uběhnutí čtvrtiny celé kruhové dráhy. Zpět do původního směru jako v bodě P se vlákna vrátí v jedné polovině dráhy. Magnetismus takto umožňuje řízení pohybu planety, nikoliv podél dráhy, nýbrž působí jako centrální síla gravitačního typu.

Kepler odvodil matematicky následující vztahy v *Souhrnu* [2], shrnuli je Stephenson [11] a Martensová [15], z jejichž komentáře vycházíme: Podle obr. 4 platilo

$$\frac{\sin HIS}{\sin QNB} = \frac{\sin IAP}{\sin NAP},$$

$\sin$ odchylky $\sin HIS$, $\sin QNB$ vláken byl úměrný $\sin$ vyrovnané anomálie a Kepler ho použil k poměřování fyzikálních sil. Slunce odklání vlákna jejich „táhnutím“, k čemuž Kepler uvedl

$$\frac{BI}{BA} = \frac{\sin BAI}{\sin BIA} \text{ a } \frac{BI}{BA} = \frac{\sin IAP}{\sin BIA}.$$

Při uvažování kruhové dráhy, PNR je částí kružnice, dále obdržel

$$\frac{BI}{BA} = \frac{BN}{BA} = \frac{\sin BAN}{\sin BNA} \text{ a } \frac{BI}{BA} = \frac{\sin NAP}{\sin BNA}.$$

Úpravou výše uvedených získáme poměr

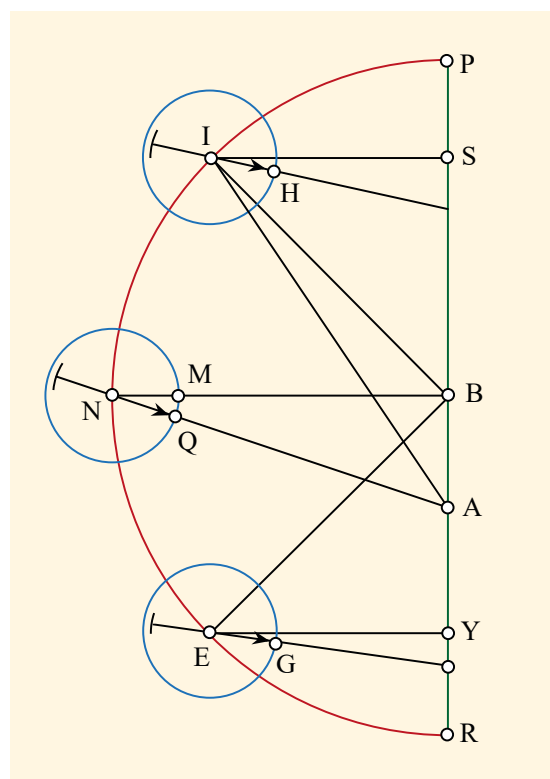
$$\frac{\sin BIA}{\sin BNA} = \frac{\sin IAP}{\sin NAP}.$$

Protože $\propto BIA$ a $\propto BNA$ vyjadřují optické rovnice pro planetu v polohách I a N , sinus optické rovnice⁵ je úměrný $\sin$ vyrovnané anomálie, a tudíž $\sin$ odchylky.

Zdůvodnění matematického postupu popsal Kepler v *Souhrnu* [2]: „Protože efektivní příčiny librace jsou paprsky Slunce a magnetická vlákna planetárního tělesa, dvě fyzikální čáry; je správné hledat měření velikosti librace z úhlu mezi těmito čarami a jeho sinu.“

Matematické odvození librace, opírající se o Keplerovy úvahy o pohybu po dráze, poskytovalo relativně přesné výsledky. Vycházelo ze zjednodušujícího předpokladu kruhové dráhy (nikoliv eliptické), tudíž z kruhových magnetických vláken. Jestliže $\sin$ odchylky byl zjištěn jako úměrný $\sin$ optické rovnice⁵, pak na eliptické dráze vlákna budou pokračovat v odklonu za polohu planety v N . To je fyzikálně neprav-

4 Obrácený sinus, značený versinus, je dnes již nepoužívanou funkcí.



Obr. 4 Schéma výkladu librace – odklonu vláken.

5 Optickou rovnicí nazýval Kepler úhel mezi ohniskem, planetou a středem elipsy.

děpodobné, vyžadovalo by vlákna kroutící se proti působící síle Slunce. Z toho důvodu je Keplerova teorie librace problematická. Podle Stephensona [11] byl *Souhrn* psán spíše jako zjednodušující učebnice. Proto lze tuto nedokonalost fyzikální interpretace librace u Keplera chápat.

Sen neboli měsíční astronomie

Upřesněné názory na gravitaci byly představeny v posmrtně vydaném *Snu neboli měsíční astronomii* [3], titulní list viz obr. 5. V tomto díle, napsaném z větší části v Praze, posunul chápání gravitace do obecnější podoby než v *Nové astronomii*. V poznámce šedesát šest ze *Sna* [7] formuloval svůj názor na gravitaci takto: „Gravitaci definuji jako sílu vzájemné přitažlivosti, podobnou přitažlivosti magnetické. Větší síla této přitažlivosti je mezi těly blízkými než od sebe vzdálenými. Silněji totiž odolávají odtržení jednoho od druhého, když jsou si až dosud navzájem blízká.“ Gravitaci přitažlivost podle Keplera byla obdobná magnetické přitažlivosti, její velikost závisela na vzdálenosti.

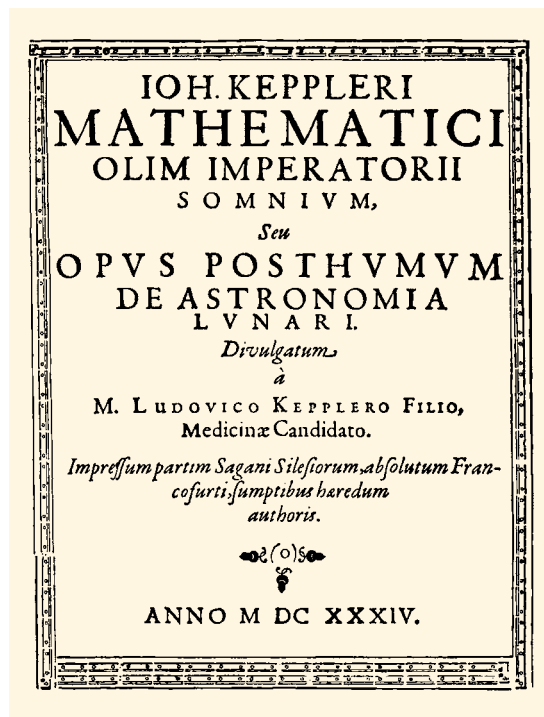
Aplikaci analogie gravitace a magnetismu při popisu rovnováhy sil připomenul v sedmdesáté páté poznámce ze *Sna* [7]: „Když se vyruší magnetické síly Země a Měsíce svým opačným tahem, znamená to právě tolik, jako kdyby tělo nebylo přitahováno nikam...“

Závěr

V článku jsme představili Keplerův přínos k rozvoji dynamiky pohybu planet. Přitom vycházel z vlastností heliocentrického Koperníkova modelu, ve kterém každá následující vzdálenost planety od Slunce narůstala, oběžná rychlost poklesávala a jejich oběžná doba se zvětšovala. Keplerem vytvořený dynamický model Sluneční soustavy předložený v *Souhrnu* umožnil na úrovni tehdejšího fyzikálního poznání uvedené skutečnosti vyložit.

Na cestě k tvorbě modelu Kepler realizoval dva kroky. První a zdařilý byl kinematický. Pomocí důvtipných metod zpracoval velké množství pozorovacích dat a našel správnou eliptickou dráhu. Z její interpretace bylo zcela zřejmé, že studuje reálnou dráhu planety, pohybující se pod působením fyzikálních sil, nikoliv pevné sféry, na kterých měla být upevněna. Výstižně porovnal výchozí principy historického modelu Sluneční soustavy a svého vlastního v dopise Fabriciovi z 1. srpna 1607 [5]: „Rozdíl spočívá pouze v tom, že vy užíváte kružnice [myšleno sféry], já síly těles.“

Druhým krokem Kepler nasměroval astronomii k fyzice, představil planetární pohyb jako fyzikální problém. Přestože jím vytvořená magnetická hypotéza v kombinaci s existencí šířícího se a rotujícího fluida – nehmotné formy nebyla pravdivá, byla pokusem přirozeným způsobem vysvětlit pohyb planet jako důsledek přenosu působení hybné síly Slunce. Ke korektnímu dynamickému objasnění Kepler postrádal fyzikální povědomí o setrvačnosti a gravitaci. Podstatným pokrokem byla myšlenka fyzikálního ovlivňování mezi tělesy na dálku. Pokusil se kvalitativním způsobem vyložit silové působení mezi Sluncem a planetami. V *Nové astronomii* [1] shrnul cíle a výsledky svého bádání slovy: „Celým tímto dílem jsem zamýšlel prověřit fyzikální hypotézu, která by poskytovala nejen vzdálenosti odpovídající pozorováním, ale zároveň také platné rovnice ... planetě nezbyvá žádná jiná podoba dráhy než dokonale eliptická, a to proto, že zdůvodnění



Obr. 5 Titulní list *Snu neboli měsíční astronomie*.

odvozená z fyzikálních zákonitostí se shodují s výsledky pozorování...”

Literatura

- [1] J. Kepler: KGW, Band III. *Astronomia nova*. Herausgegeben von Max Caspar. Zweite Unveränderte Auflage. C. H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München 1990.
- [2] J. Kepler: KGW, Band VII. *Epitome Astronomiae copernicanae*. Herausgegeben von Max Caspar. Zweite Unveränderte Auflage. C. H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München 1991.
- [3] J. Kepler: KGW, Band XI/2. *Somnium*. C. H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München 1993.
- [4] J. Kepler: KGW, Band XV. *Briefe 1604–1607*. C. H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München 1951.
- [5] J. Kepler: KGW, Band XVI. *Briefe 1607–1611*. C. H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München 1954.
- [6] K. Petrovičová, D. Špelda, V. Štefl: *Nová astronomie*. Togga, Praha 2020.
- [7] J. Kepler: *Sen neboli měsíční astronomie*. Překlad A. Hadravová, P. Hadrava. Paseka, Národní technické muzeum, Praha 2004.
- [8] J. Kepler: KGW, Band II. *Astronomiae Pars Optica*. C. H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München 1939.
- [9] S. J. Rabin: Was Kepler's species immateria substantia? *Journal for History of Astronomy* **36**, 49 (2005).
- [10] O. Gingerich: Johannes Kepler and the New Astronomy. *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* **13**, 346 (1972).
- [11] B. Stephenson: *Kepler's Physical Astronomy*. Springer-Verlag, New York 1987.
- [12] Ch. G. Wallis: *Epitome of Copernican astronomy and Harmonies of the world*. Amherst, New York 1995.
- [13] J. Kepler: *Astronomia nova*. Překlad W. H. Donahue. Cambridge University Press, Cambridge 1992.
- [14] E. Hecht: Kepler and the origins of the theory of gravity. *American Journal of Physics* **87**, 176 (2019).
- [15] V. Štefl: Jak Kepler dospěl k prvním dvěma zákonům v *Astronomia nova*. *Čs. čas. fyz.* **68**, 41 (2018).
- [16] R. Martens: *Kepler's Philosophy and the New Astronomy*. Princeton University Press, Princeton and Oxford, 2000.