

# Mořská dmutí a Galileo

Jan Novotný

Katedra fyziky, chemie a odborného vzdělávání,  
Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity v Brně,  
novotny@physics.muni.cz

## Co dokázal Galileo?

Příběh Galilea Galileiho a jeho boje za nehybné Slunce a pohyblivou Zemi zná snad každý, kdo chodil do školy. Veliký vědec dokázal, že Země se točí kolem své osy a obíhá kolem Slunce, to však bylo nepřijatelné pro církevní autority, které ho pod hrozbou mučení a upálení donutily odvolat. Jak to však Galileo dokázal? A byly jeho důkazy opravdu tak přesvědčivé, jak se to vykládá ve škole?

Nejllepší odpověď si může dát sám tazatel, když si přečte stěžejní Galileovo dílo, Dialog o dvou systémech světa. Tato kniha vyšla poprvé 1632 ve Florencii a byla napsána v italštině. Galileo dal svému mateřskému jazyku přednost před latinou, kterou tenkrát obvykle vědci psali, aby mohl oslovit co nejširší okruh čtenářů. Čtenář může sáhnout po slovenském vydání z roku 1962, které mají ve větších odborných knihovnách. Zaujme-li vás následující stručný průvodce Dialogem natolik, že se zatoužíte seznámit s knihou přímo, neobávejte se slovenštiny ani přílišné učenosti. V té době se ještě i špičková věda obešla bez množství symbolů a odborných termínů. Kromě toho Galileo opravdu dovedl psát. Jeho kniha je mistrovským literárním dílem a dává čtenáři možnost nejen sestoupit k pramenům moderní vědy, ale též ponořit se do renesančního atmosféry, plné zvědavosti a nadšení nad nejnovějšími objevy.

Velmi zajímavé jsou už dvě předmluvy. První je nejponíženější a nejuctivější věnování nejjasnějšímu velkovévodovi Toskánskému (neměl spíše on za ně poníženě poděkovat Galileovi?). Domyslíme si, že věda se ani tenkrát neobešla bez sponzorů, jež bylo třeba si naklonit. V druhé předmluvě se Galileo na první pohled velmi opatrně vyrovnává s možnými námitkami ze strany církve, která o pohybu Země zakázala na veřejnosti mluvit. Ujišťuje, že mu vůbec nejde o polemiku s učením o nehybnosti Země, ale jen o porovnání argumentů zastánců Ptolemaiovy geocentrické a Koperníkovy heliocentrické soustavy. Hodlá především ukázat, že argumenty ptolemaiovců proti koperníkovcům jsou zcela nepřesvědčivé a že běžné přírodní jevy neumožňují mezi oběma soustavami rozhodnout. Dále slibuje vyložit důvody pro heliocentrickou soustavu a přidat jeden nový vlastní, a to ne aby zpochybnil učení církve, ale aby ukázal, že italští vědci nezaostávají za světem a drží se geocentrické soustavy jen z úcty k náboženství. Zde i na jiných místech předmluvy současný čtenář sotva přehlédne jedovatou ironii Galileových slov a nediví se, že ji nepřehlédli ani církevní hodnostáři.

Pro svůj výklad zvolil Galileo formu rozhovoru mezi třemi vzdělanci. Salviati obhajuje Koperníkův a Simplicio Ptolemaioův názor, zvědavý Sagredo má úlohu pozorného posluchače a tazatele a zároveň jakéhosi rozhodčího. Čtenář ovšem brzy pochopí, že nejde o střetnutí rovnocenných soupeřů. Galileo se ani příliš nesnaží předstírat neutralitu. Zatímco Salviati je informován o nejnovějších vědeckých objevech (občas se odvolává na výzkumy Akademie, kterým je míněn sám Galileo), Simplicio je muž sice učený, ale otrocký závislý na autoritách, z nichž rád dlouze cituje. Rozhovor se odehrává v Sagredově paláci v Benátkách a je rozvržen do čtyř dnů. Každý den má rozhovor své hlavní téma, často však odbočuje a rozbíhá se do širě. Pokusíme se postihnout jeho

OSNOVU.

## První den

Hlavním námětem prvního dne debaty je, zda pozemské jevy se zásadně liší od nebeských, jak to předpokládala aristotelovská fyzika. O tento názor se opírali odpůrci Koperníka, kteří tvrdili, že kruhový pohyb může být vlastní pouze nebeským tělesům, mezi něž Země nepatří. Rozmluva začíná od věci zdánlivě velmi odtažitě – z čeho plyne, že prostor je třírozměrný? Podle Simplicia to Aristotelés zdůvodňuje tím, že číslo tři je dokonalé, protože každá věc má začátek, střed a konec. Podle Salviatiho taková argumentace nic nedokazuje – podstatné je, že poloha každého bodu může být zadána třemi souřadnicemi. V kostce se tak ukazuje rozdíl mezi různými způsoby uvažování, první se opírá o klasické texty a povrchní analogie, druhý o pozorování, měření a počítání.

Debata se postupně soustředí na otázku, zda jsou nebeská tělesa vsutku naprosto neproměnná a dokonale hladká, jak to ze svých knih vyčetl Simplicio. Proti neproměnnosti nebes může Salviati uvést pádné doklady z nové doby – sledování pohybu komet z různých míst prokázalo, že jsou vzdálenější než Měsíc, a nové hvězdy (dnes bychom řekli supernovy) roku 1572 a 1604 dosvědčily, že stálá není ani hvězdná sféra. Z toho, jak vidíme povrch Měsíce, je zcela jasné, že je neméně drsný než povrch Země. Účastníci debaty se o tom prakticky přesvědčují, když sledují odraz slunečních paprsků na rovinném a sférickém hladkém zrcadle – ponechávám na čtenáři, aby usoudil či zjistil, co je v tom případě vidět a jak to souvisí s důkazem drsnosti měsíčního povrchu. Je podrobně rozebrána otázka, jak to na Měsíci vypadá a proč tam nemůže být život podobný našemu – dokážete sami přijít na argumenty, které byly v sedmnáctém století použitelné?

Rozhovor prvního dne má výrazné filosofické pozadí – Galileo tu dává najevo své okouzlení proměnami přírody, které se neomezují jen na Zemi, ale jsou vlastní celému vesmíru. Jak říká Sagredo:

Můžeme si představit větší hloupost, než nazývat stříbro a zlato hodnotami a zemi a hlinu marnostmi? Jak to, že ty lidi nenapadne, že kdyby země byla tak vzácná, jako klenoty a nejdražší kovy, nenašel by se člověk, který by nevěnoval měšec diamantů a rubínů či třeba čtyři vozy zlata, aby měl aspoň hrstku země postačující na zasazení jasmínu v malém květináči anebo jádérka čínského pomeranče, aby se díval, jak klíčí, roste, pokrývá se krásným listím, voňavými květy a lahodným ovocem? ... Ti, kdož se tak ohánějí nezničitelností, neměnností atd., dospívají podle mne k podobným názorům jen proto, že z obavy před smrtí chtějí vydržet co nejdéle. Nemyslí přitom na to, že kdyby lidé byli nesmrtelní, nedostal by se na ně podíl na pobytu na světě. Takoví lidé by si zasloužili potkat se s hlavou Medúzy, která by je proměnila v sochy z jaspisu nebo diamantu, aby se tak stali dokonalejšími, než jsou.

Závěrečná Sagredova promluva je oslavou lidského rozumu a tvořivosti. Jejich nejvyšší projev vidí ve vynálezu písma, které nám umožňuje přenášet naše myšlenky v prostoru a v čase. Zbytek dne stráví přátelé projížďkou na lodičce.

Dnešního čtenáře překvapí, nakolik je sám Galileo poplatný tradici, proti níž bojuje. Pokládá za samozřejmé, že nebeská tělesa (mezi něž řadí i Zemi) se pohybují rovnoměrným kruhovým pohybem, který si nevyžaduje žádné další vysvětlení. Uvažuje dokonce o tom, že tato tělesa původně Bůh zhotovil na stejném místě a pak je nechal na

své dráhy „skutálet“ rovnoměrně zrychleným pohybem, čímž by se vysvětlilo, proč planety bližší Slunci se pohybují rychleji. Některé problémy Galileo jen zformuloval, ale nevyřešil – odkud se např. bere světlo, které vidíme na Měsíci za jeho úplného zatmění? Víte to?

## Druhý den

Tento den je věnován otáčení Země kolem své osy a důkazům, že taková možnost neodporuje běžné lidské zkušenosti. Debata opět začíná kritikou filosofů, kteří se slepě drží Aristotela. Sagredo připomíná, jak jeden z nich, když byl přítomen pitvě a viděl na vlastní oči, že nervy vycházejí z mozku a ne ze srdce, prohlásil, že by tomu skoro uvěřil, kdyby Aristotelés netvrdil opak. I tam, kde se ctitelé Aristotela dovolávají zkušenosti, mluví často o pokusech, které ve skutečnosti vůbec nedělali. Salviati pak nejprve poukazuje na to, jak absurdní je předpokládat, že kolem Země se spořádaně otáčí celý obrovský vesmír, a jak přirozené je naopak vysvětlení pohybů na nebi rotací Země. Potom se zabývá námitkami odvolávajícími se na pozemské jevy: kdyby se Země točila, kameny puštěné z výše by nepadaly svisle, ale šikmo, při míření by bylo třeba brát ohled na směr střelby, vál by neustále prudký vítr, stavby by se zřítily a neupevněná tělesa by byla vymrštěna do prostoru. Salviatiho argumentace vrcholí vyličením experimentů na stojící a plující lodi:

Vejděte s přítelem do velké místnosti nacházející se pod palubou lodě, a zásobte se mouchami, motýly a podobným hmyzem. Vezměte si i velkou nádobu s vodou, do které dáte rybičky. Zavěste dále nahoru malé vědro, z něhož bude kapat voda do další nádoby z úzkým hrdlem, stojící na podlaze.

Salviati podrobně popisuje, že živočichové se rozptýlí rovnoměrně do všech směrů, voda bude kapat do hrdla a také řada dalších pokusů dopadne stejně bez ohledu na to, zda loď stojí nebo se pohybuje rovnoměrným pohybem. Je to snad nejslavnější a nejčastěji připomínané místo Dialogu, které se mnohdy pokládá za první vyjádření principu relativity.

Současný fyzik by k němu mohl vznést dvě zajímavé připomínky. Zprvce situace stojící a pohybující se lodi není úplně stejná. Loď se pohybuje vůči zdroji gravitace, kterým je Země, a proto by experimenty, jejichž výsledek je závislý na gravitaci, mohly dopadnout jinak než na stojící lodi, aniž by se tím zpochybnil princip relativity. Podle Newtonova gravitačního zákona ovšem gravitační síla působící na tělesa nezávisí na jejich rychlosti a relativistické odchylky od tohoto závěru jsou při malých rychlostech zcela zanedbatelné a nepozorovatelné. Můžeme proto souhlasit s tím, že vodorovný pohyb v gravitačním poli Země je nezjistitelný. Navíc je v Salviatiho argumentaci stojící a pohybující se loď analogií stojící a pohybující se Země, a v tom případě už tu není žádné další těleso, pohybem vůči němuž by se obě situace lišily.

Další námitka by spočívala v tom, že princip relativity se vztahuje k inerciálním soustavám, které se vzájemně pohybují rovnoměrně a přímočaře. Stojící loď se však spolu s povrchem Země pohybuje vůči inerciální soustavě po kružnici a plující loď, nejede-li podél rovnoběžky, vykonává pohyb ještě složitější. Nejde tedy o inerciální soustavy. Mohli bychom Galilea obhajovat tím, že vliv neinerciálnosti považoval při popisu pokusů za zanedbatelný a měl přesně vzato na mysli vzájemný pohyb inerciálních soustav.

To bychom však jeho stanovisko příliš přikrašlovali. Jak je vidět z více míst rozhovoru, Galileo se nezřekl představy, že kruhový pohyb těles spočívajících na povrchu Země je pohybem přirozeným, který nemusí být udržován silou. Jeho „princip relativity“, jak bychom to dnes nazvali, je proto možno vztahovat na kruhové pohyby kolem středu Země. Takový princip ovšem neplatí a pokusy na stojící a plující lodi dají proto jen přibližně stejný výsledek, přičemž při větší rychlosti lodí budou rozdíly nápadnější.

Pro cíl, který si Galileo klade – dokázat, že rotace Země je možná, je to sice dostačující, zbavuje se tím však příležitosti dokázat, že Země skutečně rotuje. Padající kámen či vodní kapka se ve skutečnosti odchyluje od svislice a střely vypálené v různých směrech se vzhledem k Zemi pohybují různě, i když jev je mnohem méně nápadný, než by měl být podle názoru Simplicia. Pozornému čtenáři neujde, jak Salviati ve svých výkladech tápe na rozhraní mezi starými a moderními představami. Když má vysvětlit pohyb kamene puštěného z věže, skládá jeho „přirozený“ kruhový pohyb s vlivem gravitace, naopak pro vodorovně vržené těleso neuvažuje o podílu tohoto přirozeného pohybu a pokouší se složit s vlivem gravitace rovnoměrný a přímočarý pohyb, jehož těleso nabývá vrhem. Zde je už blízko principu setrvačnosti a zákonu síly, jak je stanovil Newton, a v jeho uvažování se projevují prvky diferenciálního počtu. Nedovede jej ovšem správně použít a tak dospívá k závěru, že ani při sebevětší rychlosti otáčení by nemohly kameny, sloni, věže a města vyletět do povětří. V tom se mýlí právě tak jako Simplicio, který si naopak myslí, že by k tomu muselo dojít i při sebepomalejší rotaci.

Během druhého dne je uveden jeden z největších Galileových objevů – matematické vyjádření závislosti dráhy volného pádu na čase a zjištění, že při zanedbání odporu vzduchu zrychlení volného pádu nezávisí na váze a složení tělesa. Salviati naivně užívá tohoto objevu k výpočtu, za jak dlouho by dopadl na zem kámen spuštěný „ze sféry Měsíce“. Zde je pěkně vidět, jak je Galileo dosud v zajetí tradičních názorů – pohyb kamene k Zemi, k níž náleží, je „přirozený pohyb“ a zdá se tedy logické, že jeho zrychlení se nemění. Pak ovšem následuje jedno z nejpozoruhodnějších míst Dialogu – Salviati zapochybuje o tom, zda má vůbec smysl rozlišovat přirozené a násilné pohyby, když o jejich příčinách nic nevíme. Prohlašuje, že kdyby mu někdo vysvětlil, co způsobuje pád kamene k Zemi, dovedl by už zdůvodnit, proč Měsíc obíhá kolem Země a planety kolem Slunce. Simplicio dokonce připomene, že příčina pádu kamene je všeobecně známa a každý ví, že je to gravitace. Salviati ovšem odpoví, že se neptá, jak se tato příčina nazývá, ale jaká je její podstata.

Jako by tu Galileo bezděčně narazil na stopu vedoucí ke gravitačnímu zákonu, ale nebyl schopen ji dále sledovat.

### **Třetí den**

Další den se Simplicio, který dojížděl do paláce na gondole, dostaví se zpožděním, protože loď při odlivu uvázla na mělčině. Autor Dialogu si tak připravuje půdu pro závěrečný den. Debata třetího dne je jinak věnována převážně obíhání Země kolem Slunce. Její značnou část ale zabírají Salviatim komentované výpočty, které potvrzují, že „nová hvězda“ z roku 1572 byla opravdu hvězdou, protože byla mnohem dále než planety (viz obr. 1). Galilea zřejmě právě v době psaní velmi upoutaly nové informace o určování její vzdálenosti různými autory, mezi nimiž byl i český učenec Tadeáš Hájek z Hájku. Spis tak po nějakou dobu připomíná čistě odbornou práci, která příliš nebere ohled na čtenáře. Nakonec se ale rozhovor vrací k problematice Koperníkovy soustavy. Na rozdíl od prvního dne, věnovaného převážně pozemským jevům, si všímá argumen-

tů, jež vyplývají z astronomických pozorování. Ta většinou podnikl sám Galileo svým dalekohledem a získal tak údaje, které ještě Koperník nemohl mít k dispozici. Srpkovitý tvar Venuše, jež při obíhání okolo Slunce jeví fáze podobné měsíčním, a proměnná velikost kotoučků Venuše a Marsu v závislosti na jejich měnicích se vzdálenostech od Země odpovídají Koperníkově soustavě a přesvědčivě vyvracejí Ptolemaiovu představu o rozložení a pohybech planet ve Sluneční soustavě. (Poznamenejme ovšem, že ani všechna tato pozorování nevyvracejí kompromisní variantu geocentrické soustavy, kterou vymyslel Tycho Brahe. Podle ní sice Slunce obíhá kolem Země, ale ostatní planety obíhají kolem Slunce. Vzájemné rozložení těles Sluneční soustavy je tedy v každém okamžiku stejné jako podle Koperníka.)

Galileo mimo jiné ukazuje, jak přirozeně vysvětluje Koperníkova soustava období „zpětného“ pohybu vnějších planet vzhledem k hvězdné obloze (viz obr. 2) či střídání ročních dob. Užívá příležitosti k připomenutí vlastních objevů (čtyři Jupiterovy a dva Saturnovy měsíce – ve druhém případě ovšem Galileo ve skutečnosti pozoroval okraje prstence – a otáčení Slunce kolem osy, jež objevil sledováním pohybu slunečních skvrn). I tyto objevy svědčí aspoň nepřímou ve prospěch Koperníkovy soustavy. Zbavují totiž Zemi jejích zvláštností: není jedinou planetou, která má vlastní oběžnici, ani jediným tělesem, které rotuje kolem své osy.

Potom se Dialog obrací k hvězdnému vesmíru a čelí argumentu proti Koperníkovi, jenž se zdál být zvláště silný. Obíhá-li Země kolem Slunce, proč se to nejeví ve změnách úhlů, pod nimiž během roku pozorujeme hvězdy? Galileo to vysvětluje jejich nesmírnou vzdáleností a předvídá, že jednou bude vzdálenost hvězd právě díky obíhání Země kolem Slunce změřena.

Dovídáme se též, jaké jsou Galileovy názory na hvězdný vesmír. Mluví sice ještě tradičně o hvězdné sféře, ale nepředstavuje si, že by hvězdy byly nějak upevněny ve stejné vzdálenosti od středu vesmíru. Jsou podle něho rozesety v obrovském mezikouli a mají pravděpodobně své vlastní pohyby. Nikde se však v Dialogu neuvažuje, že by mohly být podobné Slunci a mít i vlastní planety. Je možné, že Galileo o tom nepsal z opatrnosti, poněvadž měl na paměti osud upáleného Giordana Bruna, který takové myšlenky hlásal.

V závěru Sagredo a Salviati mluví s velkým zájmem a nadšením o nových objevech v oblasti magnetismu, které jsou obsaženy v nedávno vydané knize britského učenice Williama Gilberta a jež obohatili vlastními pozorováními. Tato pozorování ve skutečnosti zřejmě konal sám Galileo. Všimají si i magnetického pole Země a uvažují o tom, že stálý směr zemské osy v prostoru může souviset s jejím magnetismem.

Z hlediska dnešní fyziky a astronomie nemůžeme výsledkům třetího dne debaty vytknout nic podstatného. Překvapivé je pouze to, jak se Galileo drží představy o přesně kruhových drahách planet, ačkoliv již od Koperníka mohl vědět, že taková představa je neslučitelná s přesnými měřeními, a sám Koperník proto musel vykládat pohyby planet skládáním kruhových pohybů podobně, jako to činil Ptolemaios. Od této komplikace osvobodily průkopníky heliocentrismu až Keplerovy zákony, které Galileo rovněž mohl v době napsání Dialogu znát. Z dosti záhadných důvodů, o nichž historikové vědy často diskutují, je však zcela ignoruje.

Bylo by škoda neocitovat z třetího dne rozhovoru alespoň jednu pasáž vloženou do úst Sagredovi: 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 dru-

žice jsou na nebi až od chvíle, kdy se staly přístupnými lidskému zraku? A podobně, což neexistovaly další nesčetné stálice, 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!

### Čtvrtý den

Korunou Dialogu má být čtvrtý den, od něhož se očekává definitivní rozhodnutí sporu. Sagredo je tak napjat, že poslední hodinu před příchodem spolubesedníků je nedočkavě vyhlíží z okna svého paláce. Salviati shrnuje, že dosavadní debata pouze ukázala, jak běžné lidské zkušenosti a pozorování nemohou heliocentrický názor vyvrátit, nevyvracejí však ani názor opačný. Tuto možnost ale dává úvaha o mořských přílivích a odlivech, které by na nehybné Zemi nemohly vzniknout. Tyto jevy může ovšem vyvolat pouze nerovnoměrný pohyb Země a vzniká otázka, jak může takovýto pohyb vzniknout složením rovnoměrných kruhových pohybů – otáčení Země kolem své osy a jejího oběhu kolem Slunce. Salviati nejprve podrobně popisuje jevy mořských dmutí a odmítá jejich vysvětlování tím, že Měsíc k sobě vody přitahuje nebo že je pod sebou ředí, takže zaujmají větší objem. Tyto teorie jsou zřejmě neudržitelné, protože nevysvětlují, proč k přílivu nedochází pouze na přivrácené straně k Měsíci, ale i na straně odvrácené, a proč pod Měsícem nestoupá voda i v rybníce nebo ve sklenici.

Na cestu, kterou považoval za správnou, ho uvedlo pozorování chování pitné vody v cisternách, které byly převáženy po moři. Houpání lodi – čili její nerovnoměrný pohyb – vyvolalo kmitání vody v nádržích. Podobným jevem jsou podle Salviatiho – a tedy Galílea – i mořská dmutí. Salviati pak vykládá, že skládáním obou pohybů Země vzniká nerovnoměrný pohyb, který je schopen mořská dmutí vyvolat.

Zajímavá je ještě vložka o pohybu vzduchu. Salviati konstatuje, že vzduch podobně jako voda není nucen přesně sledovat pohyb Země, a tedy pohyb Země by se měl projevit pohybem vzduchu vůči Zemi. Odvoláním na zkušenosti mořeplavců a lodní deníky dokládá, že k tomu opravdu dochází – plavby plachetnic z východu na západ po Středomoří jsou v průměru o čtvrtinu rychlejší než plavby opačné.

Konečně se Salviati pokouší vysvětlit, proč jev mořských dmutí přece jen závisí na poloze Měsíce, ačkoliv Měsíc na vody nepůsobí. Vysvětluje si to tím, že pohyby Měsíce a Země se navzájem ovlivňují nějak podobně jako posunutí závaží u hodin ovlivňuje pohyby kyvadla. Země proto v závislosti na poloze Měsíce obíhá kolem Slunce s proměnnou rychlostí a prostřednictvím této nerovnoměrnosti pohybu Měsíc přece jen mořská dmutí ovlivňuje. Opět se tu patrně projevuje jakési tušení gravitačního zákona a navíc zákonů zachování, bohužel blíže nerozvedené.

Na debatě posledního dne se Simplicio téměř nepodílí a v závěru přiznává, že jí příliš nerozuměl. Uznává sice, že argumenty ve prospěch Koperníkovy soustavy byly působivé, ale drží se mínění jisté učené a slavné osoby, z něhož plyne, že

Bůh mohl svou nekonečnou mocí a moudrostí dát vodě pohyb, který v ní pozorujeme, i jinak než pohybem 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.

Podobné prohlášení by se dalo chápat jako zdvořilý ústupek vyžadovaný církví, kdyby je Galileo nevrátil do úst právě Simpliciovi, který se po celou debatu jevil jako její nejméně důvtipný účastník. Papež Urban VIII. patrně ve zmíněné „učené a slavné osobě“ poznal sám sebe, na Galileia definitivně zanevřel a přispěl k jeho odsouzení.

Nemůžeme se nyní vyhnout otázce, nakolik Galileo poslední den uspěl v očích pozdějších fyziků. Není pochyby, že vysvětlení správné není. Galileo se pustil do problému, který značně přesahoval jeho možnosti. Někdy je mu vytýkáno, že výsledek své teorie nesrovnal se skutečností. On však neměl ucelenou teorii o vlivu pohybu Země na pohyb vod ani matematický aparát, který by z takové teorie vyvodil jednoznačný důsledek. Podvědomě proto upravoval své vývody tak, že aspoň v něčem odpovídaly realitě.

Abychom vůbec mohli o Galileově teorii diskutovat, pokusme se ji přizpůsobit pozdější fyzice. Myšlenka, že mořská dmutí jsou způsobena pohybem Země, stojí jistě za uvážení. Je však třeba přesněji vymezit různé druhy pohybů vztažných soustav. Ve shodě s newtonovskou fyzikou rozlišujeme inerciální soustavy, jejichž setrvačný pohyb není ovlivňován silami. Tyto soustavy se vzájemně pohybují rovnoměrně a přímočaře. Ostatní soustavy jsou neinerciální. Nejsou-li hmoty v neinerciálních soustavách pevně drženy, začnou se vůči nim díky své setrvačnosti pohybovat, což se však z hlediska neinerciální soustavy jeví jako výsledek působení sil. Lze tedy říci, že v neinerciálních soustavách působí setrvačné síly. Podle toho, zda tyto síly nezávisí na čase anebo se s časem mění, můžeme ještě neinerciální soustavy rozdělit na stacionární a nestacionární.

Stejných termínů uijíme pro pohyb soustav. Inerciální – tedy rovnoměrný a přímočarý pohyb soustavy – žádným pozorováním či experimentem prokázat nemůžeme. Neinerciální pohyb, jako je otáčení Země kolem své osy, však prokázat lze. Příkladem je tu vliv na směr větrů, kterého si Galileo povšiml. Není ovšem pravda, že by musely nutně převládat větry vanoucí proti směru zemské rotace, jak to naivně předpokládal. Ve skutečnosti lze pouze říci, že se větry (a podobně mořské proudy) stáčíjí na severní polokouli doprava a na jižní doleva. K určení jejich převládajícího směru v daném místě a ročním období je třeba podrobnějšího rozboru meteorologických podmínek.

Galileův názor, že mořská dmutí by bylo možno vysvětlit pouze nerovnoměrným pohybem Země, zůstane správný, jestliže ztotožníme nerovnoměrný pohyb s pohybem nestacionárním. Zatímco rotace tělesa kolem osy je sama o sobě stacionární, kruhový oběh je nestacionární (za předpokladu, že těleso nepřivrací ke středu stále stejnou stranu). Vidíme tedy, že Galileovy myšlenky byly velmi pronikavé, i když si vyžadovaly upřesnění.

Po tomto upřesnění vede ovšem Galileova teorie k výsledku, který je v naprostém rozporu se skutečností. Můžeme jej snadno předpovědět, vezmeme-li si nádobu naplněnou vodou na kolotoč, kde jí případně ještě můžeme otáčet kolem její vlastní osy. Voda se bude zvedat na straně nádoby odvrácené od osy otáčení kolotoče.

Podle upravené Galileovy teorie by tedy existovala jediná přílivová vlna následující Slunce s půldenním zpožděním – příliv by tedy vrcholil po půlnoci a odliv po poledni. Čtenáři je jasné, co Galileo opomenul, protože o tom nevěděl – gravitační působení nebeských těles na Zemi. Geocentrická teorie připisující mořská dmutí gravitaci těles obíhajících kolem Země by zřejmě vedla k opačnému výsledku – příliv po poledni a odliv po půlnoci. Vliv polohy Měsíce by byl v obou případech oproti vlivu Slunce podružný a dmutí by byla nesrovnatelně větší než ve skutečnosti. Správný výsledek dostaneme, jestliže obě teorie spojíme. Vliv pohybu Země a gravitace Slunce a Měsíce se pak téměř zruší a projeví se jen malé rozdíly gravitačních sil od Měsíce a Slunce na její při-

vrácené a odvrácené straně. Protože nerozhoduje samotná síla, ale její změny, je vliv Měsíce na mořská dmutí výrazně větší než vliv Slunce a jeho pohyb kolem Země neustále sledují dvě přílivové vlny. Vyvolává je rozdíl mezi zrychlením, které Měsíc udílí mořským vodám, a zrychlením, které udílí pevné části Země – intenzita pole slapových sil (viz obr. 3), které je na přivrácené i odvrácené straně Země od Měsíce orientováno odstředivě, na kolmici ke spojnici Země s Měsícem, procházející středem Země, dostředivě, a v jiných místech má nenulový průmět do vodorovného směru, čímž působí, že vody se neustále vzdouvají pod Měsícem a na opačné straně zeměkoule.

Tímto způsobem správně vyložil mořská dmutí až Newton, který se narodil v roce, v němž Galileo zemřel. Je otázka, zda si Galileo neuspokojivost svého výkladu časem neuvědomil. Protože byl pod dohledem inkvizice, nemohl již o problémech astronomické povahy otevřeně mluvit. Krátce před smrtí, kdy – patrně v důsledku neopatrného pozorování slunečních skvrn – oslepl, napsal svému příteli o tom, že o mořských dmutích stále přemýšlí.

### A závěr?

Bylo by naprostým nepochopením, kdyby se po přečtení předchozích řádků čtenářovo mínění o Galileovi zhoršilo. Hodnotu vědcova díla nesmíme posuzovat podle toho, co víme dnes, ale podle toho, čím dřívější lidské vědění rozšířil. A takové rozšiřování se neobejde bez tápání a omylů. I když Galileo ještě geocentrický názor s definitivní platností nevyvrátil a použil proti němu i argumentů, které nebyly dobré, znamenal jeho Dialog velký krok správným směrem. Jiným takovým krokem bylo objevení Keplerových zákonů a za opravdu definitivní vítězství nové fyziky a astronomie můžeme považovat vydání Newtonových Matematických základů přírodní filosofie roku 1687. Toto dílo podalo ucelenou teorii jednotně vysvětlující pohyby ve sluneční soustavě na základě principů, které platí pro celý vesmír v libovolném měřítku. Proti tomu nemohli odpůrci pohybu Země postavit nic alespoň trochu srovnatelného.

Povšimneme si vědeckých objevů, které by mohly Galileovi pomoci, kdyby k nim došlo už v jeho době. Roku 1725 britský astronom James Bradley zjistil, že světlo hvězd dopadá na Zemi během roku pod proměnným úhlem. Hvězdy se zdánlivě pohybují na nebi po kružnicích (v okolí pólu zemské dráhy kolem Slunce) či elipsách, přičemž odchylka od středu činí asi 21 úhlových vteřin, což je v obloukové míře podíl rychlosti Země kolem Slunce a rychlosti světla – rozumíte proč? Tento jev, nazvaný aberace světla, nám přiblíží přirovnání – kdybychom v dešti obíhali stadion s úzkou válcovou odměrkou a přáli si, aby kapky dopadaly až na dno a neuvázly na stěnách, museli bychom měnit sklon trubice. Podobně je třeba vzhledem k pohybu Země měnit sklon dalekohledu, kterým se díváme na hvězdu.

Aberace není působena změnou polohy Země, ale změnou směru jejího pohybu. Zjistit, že i přemístění Země má vliv na úhel, pod nímž vidíme hvězdy, bylo mnohem obtížnější. Poprvé to dokázal roku 1839 německý astronom a matematik Friedrich Wilhelm Bessel. Vybral si nenápadnou hvězdičku 61 Cygni v souhvězdí Labutě, protože věděl, že ze všech tehdy známých hvězd se po nebi nejrychleji pohybuje a patří tedy patrně k nejbližším. Změna úhlu během roku (neboli úhel, pod nímž by bylo z hvězdy vidět poloměr zemské dráhy, zvaný paralaxa) činila 0,3 vteřiny. Krátce nato uspěli další vědci, kteří si vybrali mimořádně jasné hvězdy  $\alpha$  Centauri a Vegu. V té době již ovšem o Koperníkově teorii nikdo rozumný nepochyboval a hlavním přínosem měření bylo zjištění vzdáleností nejbližších hvězd.



O názorné důkazy pohybu Země nevyžadující pohled na oblohu se zasloužil francouzský učenec Gustave Gaspard Coriolis, který roku 1835 prozkoumal, jak působí setrvačná síla vznikající rotací Země na hmoty, které se vůči Zemi pohybují. Vliv Coriolisovy síly můžete pozorovat v televizních zprávách o počasí – povšimněte si rozdílů mezi pohybem oblaků kolem tlakové výše a kolem tlakové níže. Nejpůsobivější demonstraci zemské rotace podal 1851 v pařížském Panteonu Leon Foucault, když v něm nechal houpat se obří kyvadlo, rovina jehož kyvů se plynule stáčela. U nás bylo – a snad ještě je – Foucaultovo kyvadlo k vidění v pavilonu v Květné zahradě v Kroměříži. Je zajímavé, že na popsání jevu by mohl přijít a předvést jej již sám Galileo, kdyby se jeho myšlenky ubíraly tímto směrem.

Nevyhýbejme se na závěr ošemetné otázky: není ale podle teorie relativity nakonec jedno, co stojí a co se pohybuje, a nevede tak moderní fyzika k závěru, že se vlastně nebylo o co přít? Připomeňme nejprve, že už od Newtonových dob přestalo mít smysl spojovat Koperníkovu soustavu s absolutní nehybností Slunce (či lépe řečeno jeho středu, protože už Galileo zjistil, že Slunce se otáčí). Nehybný může být pouze střed hmotnosti Sluneční soustavy a Slunce pak musí vlastním pohybem jeho nehybnost udržovat, aby vyvážilo pohyby planet. Avšak i střed hmotnosti dovoluje newtonovská mechanika, aby se pohyboval rovnoměrně a přímočaře. Můžeme tedy pouze říci, že existuje inerciální vztažná soustava, v níž je tento střed hmotnosti v klidu (pomineme-li působení vzdálených kosmických hmot, která jsou krátkodobě zanedbatelná).

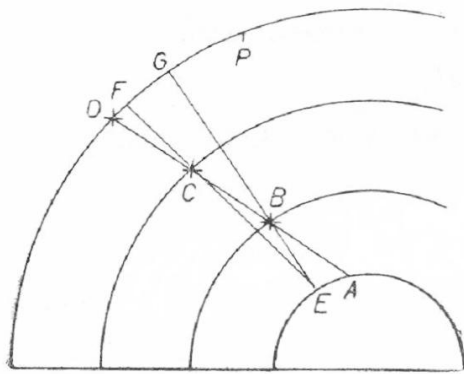
Podle Einsteinovy speciální teorie relativity z roku 1905 nemá žádný smysl jít dál a hledat mezi inerciálními soustavami tu „nejinerciálnější“, absolutně klidnou. Smysl Galileovy práce bychom tedy mohli vidět v důkazech, že soustava spojená se Zemí má do inerciálnosti velmi daleko, a pro rozumný popis a pochopení pohybů Sluneční soustavy je třeba užívat inerciální soustavy, v níž planety obíhají kolem středu hmotnosti, v jehož blízkosti se nachází Slunce.

Je však ještě obecná teorie relativity z roku 1915, podle níž mají zákony přírody stejný tvar ve všech vztažných soustavách. Nebudeme se zde pokoušet tuto teorii vysvětlit, řekneme jen, že i ona zachovává rozdíl mezi inerciálními a neinerciálními soustavami. Inerciální soustavy lze však podle ní zavést jen místně a jsou to soustavy, jejichž pohyb je určován pouze všudypřítomnou gravitací. Tím se pohled na celou problematiku opět poněkud mění. Otáčení Země je možné jen díky negravitačním silám. Působí proto řadu jevů, které jsou pozorováním na Zemi zjizitelné. Naopak oběžný pohyb Země kolem Slunce působí jen sluneční gravitace a vztažná soustava, která se bez otáčení pohybuje spolu se středem Země, je místní inerciální soustavou. Oběžný pohyb Země kolem Slunce tedy nelze na Zemi samotné prokázat. Měli tedy z hlediska dnešní fyziky církevní otcové Galileovi uznat, že Země se točí (kolem své osy), ale trvat na tom, že její střed můžeme právě tak dobře považovat za nehybný jako střed Slunce?

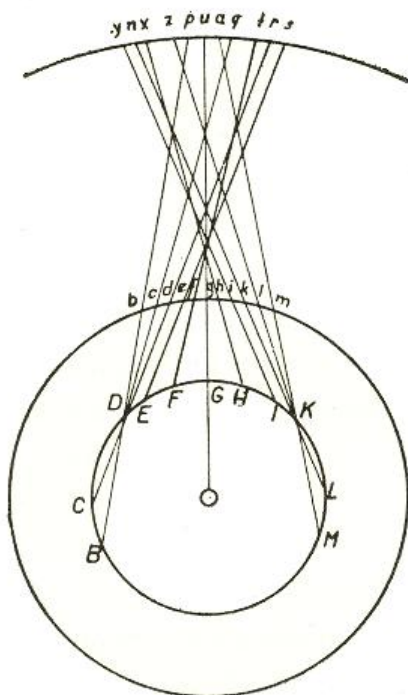
Zde by Galileovi přišla na pomoc aberace a paralaxa. Ty svědčí o tom, že Země mění směr svého pohybu a přemísťuje se vůči rozsáhlejší inerciální soustavě, na jejímž pozadí je soubor těles Sluneční soustavy jen nepatrnou poruchou, zatímco Sluneční soustava, reprezentovaná svým středem hmotnosti, je vůči ní v klidu nebo se pohybuje rovnoměrně a přímočaře.

Nejnovější příspěvek ke sporu však patří relativistické kosmologii. Podle ní je vesmír ve velkém měřítku homogenní a izotropní, čili všude a ve všech směrech stejný. Spojíme-li vztažnou soustavu se samotným vesmírem, tj. zavedeme ji tak, aby vzhledem k ní byla střední rychlost kosmické hmoty nulová, můžeme přece jen dát slovům

„klid“ a „pohyb“ jednoznačný smysl. Je ovšem možno se ptát, zda lze takovou soustavu definovat i v dostatečně malém měřítku, v jakém Galileo uvažoval o Slunci a o planetách. Od roku 1963, kdy britští fyzikové Arno Penzias a Roger Wilson objevili reliktní záření, však víme, že to možné je. Jedná se o elektromagnetické záření, vyplňující vesmír, které je pozůstatkem jeho raných vývojových fází a projevuje se radiovým šumem, jež zmínění fyzikové nechtěně zaznamenali. Samotným vesmírem privilegovaná vztažná soustava je velmi přesně definována tím, že je v ní frekvence reliktního záření ve všech směrech stejná. Vhodným místem pro její zaznamenávání je kosmický prostor. Družice COBE vypuštěná roku 1989 byla schopna z anizotropie zachycovaného reliktního záření zjistit nejen pohyb Sluneční soustavy „vůči vesmíru“, který se děje rychlostí asi 400 km/s, ale z jejích změn během roku potvrdit i obíhání Země kolem Slunce rychlostí 30 km/s. A to je snad poslední slovo vědy ve prospěch Mikuláše Koperníka a Galilea Galileiho.

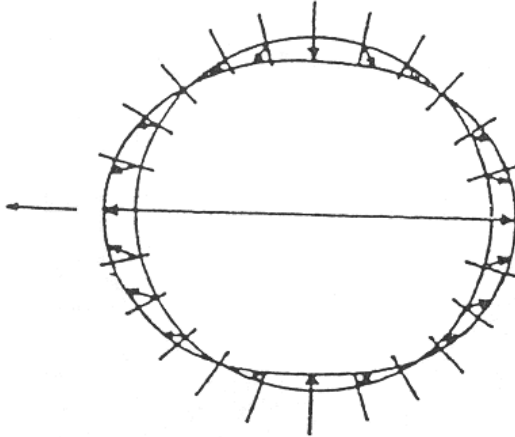


Obr. 1. Vysvětlení z Dialogu, jak je možno rozpoznat vzdálenost svítícího objektu. Z různých míst zemského povrchu se objekt promítá do různých míst nebeské klenby. Pouze velmi vzdálené objekty je vidět ze všech míst na Zemi v téměř téže hvězdné oblohy a tak bylo možno potvrdit, že „nová hvězda“ z roku 1572 si vskutku zaslouží tento název, protože nepatří nejen do zemské atmosféry, ale ani do Sluneční soustavy.



Obr. 2. Vysvětlení kličky planety Jupiter převzaté z Dialogu.

Ačkoliv planeta obíhá stále stejným směrem, díky pohybu Země se pro pozemského pozorovatele její pohyb po nějakou dobu promítá na nebeskou klenbu tak, že planeta se na své cestě zvířetníkovými souhvězdími „vrací“. Výsledkem takovýchto kliček může být vícenásobné míjení planet během kratšího časového období.



Obr. 3. Pole slapových sil vzniká (podle newtonovské mechaniky) vektorovým sečtením gravitačního pole Měsíce (Slunce) a pole setrvačných sil daných translačním obíháním Země okolo těžiště soustavy Země-Měsíc (Slunce). Zatímco první pole ubývá s kvadrátem vzdálenosti, druhé je homogenní.

Slapové působení je proto určeno nehomogenitou gravitačního pole Měsíce (Slunce). Dynamický efekt má průmět slapových sil do tečné roviny k povrchu Země, pod jehož vlivem se mořské vody stále snaží vytvořit ekvipotenciální hladinu v poli všech gravitačních a setrvačných sil. Vzhledem k setrvačnosti pohybu vod a mnoha faktorům (geografickým, meteorologickým, termodynamickým), které tento pohyb ovlivňují, je výsledný jev velmi složitý. Maximum dmutí nastává proto v různých místech Země v dobách různě zpóźděných za kulminacemi Měsíce.

## Literatura a další zdroje

- [1] GALILEO G.: Dialóg o dvoch systémoch světa. SAV, Bratislava 1962.
- [2] NOVOTNÝ J.: Co dokázal Galileo, Sborník XII. semináře o fil.otázkách matematiky a fyziky, Velké Meziříčí 2006