

## FYZIKA V DĚJINÁCH

Prof. RNDr. Jan Novotný, CSc.

### I. ČÁST: PRVNÍ FYZIKOVÉ (seriál na pokračování)

Kde hledat první fyziky? Pomníme hlubiny vesmíru, kde třeba také žijí a dávno před námi začaly poznávat zákony přírody inteligentní bytosti, a soustředíme se na povrch naší planety. Lidské dějiny se pozvolna vynořují z temnot, o vzezření poznání svědčí archeologické nálezy a písmo (pokud je umíme rozluštit). Velmi mnoho však vymazal – bohužel i za vydatné pomoci samotných lidí – neúprosný běh času. Kromě toho nejdávnejší historie zachovala spíše jména a skutky vládců a bojovníků než učenců a objevitelů. A tak se můžeme jen dohadovat, jak dospěli lidé k poznatkům z mechaniky, které jim dovořily budovat podivuhodné stavby a plavit se po mořích, k znalostem dění na nebeské klenbě, které pomáhaly orientovat se v čase i v prostoru, a k vědomostem, jež jim umožnily vnímat krásu souzvuku tónů. Všechny tři uvedené kořeny poznání – mechaniku, astronomii a hudbu, z nichž se měla vyvinout fyzika, sblížovalo umění počítat a měřit, z něhož měla vyrůst matematika. Z dochovaných egyptských papyrů a babylonských hlíněných tabulek historikové odhalují aspoň zlomky vědění, jež bylo dostupné nejstarším civilizacím, a z těchto ostrůvků nad mořem zapomnění se snaží rekonstruovat zbytek.

Zdá se však, že snahu jednotlivé poznatky spojit a soustavně rozvíjet projevili teprve antičtí Řekové. První fyziky budeme proto hledat mezi nimi. Nebudeme se ovšem pokoušet o systematický výklad. Namísto toho se zastavíme na několika významných místech, u několika velkých osobností, které učinily rozhodné kroky po nových cestách.

#### Slavná předpověď

Bylo odpoledne 28. května roku 585 před Kristem. Někte na území dnešního Turecka vyrazila proti sobě vojska Lýdiů a Médů, aby se pokusila rozhodnout už pět let se táhnoucí válku. Bitva však sotva začala, když se na bojišti začalo stále zřetelněji stmívat. Bojovníci ve strachu z hněvu bohů odložili zbraně a soupeřící králové viděli v slunečním zatmění pokyn nebes, aby zasedli k jednání a uzavřeli mír.

Víme to z díla „otce dějepisu“, řeckého spisovatele Hérodota. Hérodotos také píše, že v té době žil v Milétu na asijském pobřeží Egejského moře muž, který místo i dobu zatmění přesně předpověděl. Jmenoval se Thalés a je znám každému školákovi díky větě o pravých úhlech nad průměrem kružnice. Začíná jím však také skoro každý přehled dějin filosofie, protože byl patrně první, kdo vyslovil velkou zobecňující a pouze o rozum se opírající myšlenku – domníval se, že podstatou a počátkem všeho je voda. Můžeme jen litovat, že se nám z jeho díla nezachovalo víc než několik citovaných výroků v knihách pozdějších autorů, doprovázených zajímavými epizodami z Thalétova života. (Ostatně ani nevíme, zda Thalés své učení zapsal.) I toto málo však svědčí o tom, že si svou moudrostí a vynalézavostí získal nesmrtelnou pověst. Na takovoto výjimečné osobnosti (Thalés byl řazen k legendárním „sedmi mudrcům“) se ovšem snadno nabalují smyšlenky, a nemůžeme proto bez kritického zamýšlení přijmout ani Hérodotovu zprávu, zapsanou o více než sto let později.

Mohl Thalés opravdu přesně předpovědět zatmění Slunce? Abychom posoudili tuto otázku, musíme si nejprve uvědomit, proč se zatmění pravidelně opakují. K zatmění Slunce dochází, když se Měsíc postaví do cesty slunečním paprskům a vrhne stín na Zemi. Kdyby obíhal Zemi ve stejné rovině, v níž Země obíhá okolo Slunce, opakovalo by se zatmění Slunce při každém novu. Protože rovina dráhy, v níž se Měsíc pohybuje, je zřetelně nakloněna vůči rovině, v níž se pohybuje kolem Slunce Země – ekliptice, může k zatmění dojít jen v okamžiku, kdy Měsíc protíná ekliptiku, tj. v bodě na nebeské klenbě, který nazýváme uzlem měsíční dráhy. Aby k němu opravdu došlo, musí ovšem být v blízkosti tohoto bodu i Slunce, tj. měsíc musí být zároveň v novu i v uzlu. Perioda mezi novy, tzv. synodický měsíc, činí průměrně 29,5306 dní a perioda mezi uzly, tzv. drakonický měsíc, je 29,2122 dny. Obě doby jsou dostatečně přesně obsaženy v periodě nazývané saros, která činí 6 585 dní a 8 hodin. Po této době se tedy opakují sluneční – ale z obdobných důvodů i měsíční – zatmění. Protože perioda není přece jen úplně přesná, mění se postupně povaha zatmění. Pro sluneční zatmění trvá celý cyklus asi 13 století a zahrnuje na 70 zatmění, z toho asi 50 úplných. Současně probíhá asi 40 cyklů.

Periodicita měsíčních zatmění neunikla už babylonským astronomům. Sluneční zatmění se však od nich jednou podstatnou věcí liší. Stín Země na Měsíci můžeme vidět z celé noční polokoule, zatímco stín Měsíce na Zemi je patrný jen na poměrně malé části jejího povrchu, který zasáhl. Protože saros přesahuje násobek délky dne o osm hodin, posune se příští zatmění o třetinu zemského obvodu, a když se po třech periodách navrátí k témuž poledníku, je již posunuto asi o 1000 kilometrů v jeho směru. Dávne civilizace patrně neměly možnost shromažďovat údaje o slunečních zatměních z tak rozsáhlého území, aby jejich periodicitu odhalily. Třeba však geniální Thalés pochoopil samotný princip, z něhož vyplývá opakování? I potom by ovšem potřeboval pro svou předpověď data o předchozích slunečních zatměních. Kromě toho se dá očekávat, že by (na rozdíl od egyptských či babylonských kněží, pro něž bylo výhodné posilovat svou autoritu tajemností svou metodu netajil a seznámil by s ní přinejmenším své žáky. Jak však dokazují citáty z jejich děl, ani další milétské filosofové ještě nedovedli podstatu zatmění správně vysvětlit, a nejsou žádné doklady, že by během tří století po Thalétovi někdo z Řeků dokázal sluneční zatmění předpovědět.

Na druhé straně o Thalétově úspěšné předpovědi se zmiňuje řada antických autorů a zdá se tedy málo pravděpodobné, že by šlo o čistou legendu. Řada historiků vědy se proto pokouší vyspekulovat, co mohl Thalés skutečně dokázat. Zájemce, který má k dis-

pozíci vyhledávací program, o tom najdete více dokladů v internetové síti. Snad si Thalés povšiml nahodilě pravidelnosti v dobách zatmění, která mohl sám pozorovat, a učinit na jejich základě předpověď, která náhodou vyšla a jejíž přesnost byla později zveličena? V astronomii jsou takovéto náhody až překvapivě časté.

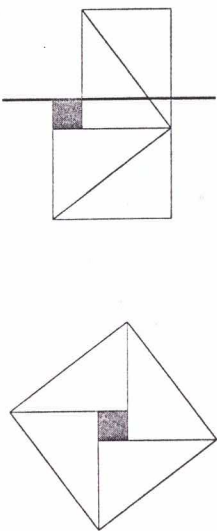
Ať už to bylo jakkoliv, na Thalétově velikosti to nic neubírá. Byl nepochybně jedním z prvních, kdo si uvědomil, že na základě pozorování přírodních dějů a jeho zpracování je možné dělat spolehlivé předpovědi, „vědecky věštit“.

Vrátme se ještě k datu, jímž naše vyprávění začalo. Toto datum je velmi památné ne tak pro samotnou událost, kterou označuje, jako proto, že jde patrně o první přesně zjištěné datum v lidských dějinách. Ve starověku žádný trvalý a obecně přijatý kalendář neexistoval, a je proto velmi obtížné zasadit časové údaje z dávných kronik do našeho kalendáře. Právě zatmění Slunce, které jsme dnes schopni velmi přesně lokalizovat v prostoru i v čase (na internetu jsem našel i mapku jeho průběhu) nám dovolilo dodatečně připsat Hérototovu záznamu přesný čas. Astronomie tak slouží historikům. Ale existuje i služba opačná. Byly to historické záznamy o zatměních, které umožnily astronomům zjistit, že zemská rotace se zpomaluje. I když prodloužení dne, způsobené hlavně třením při přílivěch a odlivech, činí jen tisícinu sekundy za století, v čase se kumuluje. Představme si dva chodce, kteří vyrazí ze stejného místa kroky původně stejné délky, ale jeden z nich své kroky soustavně nepatrně prodlužuje. Můžete se snadno přesvědčit, že rozdíl mezi jejich „došlapy“ bude s časem vzrůstat stále rychleji a stane se nápadným už v době, kdy rozdíl mezi samotnou délkou kroků bude ještě téměř nezatelný. Podobně se zvětšuje rozdíl mezi ideálním rovnoměrným a reálným zpomalovaným otočením Země. Antická zatmění proto nastala v jiných časech a na jiných místech, než jak to vycházelo z astronomií, dokud o zpomalování zemské rotace nevěděli.

### Čísla, hudba a vesmír

Kdo by neznal Pýthagorovu větu? O muži, jemuž je objev snad nejnámější matematické věty připisován, zato víme velmi málo. I z kusých svědectví o Thalétovi vyplývá jasný obraz jeho osobnosti. Pýthagorás se z takových svědectví jeví mnohem rozporněji – někteří v něm viděli člověka téměř nadpřirozených schopností, jiní podivína, jehož hlavní starostí bylo, aby lidé nepožívali boby. Zdá se jisté, že žil v druhé polovině šestého století před Kristem (v mládí prý navštívil zestárlého Thaléta) a pro neshody s vládcem se přestěhoval z rodného ostrova Samu do jižní Itálie, kde založil svou školu. Byl okouzlen světem čísel a jejich tajemnými souvislostmi se světem přístupným smyslům, které se projevují zejména v astronomii a v hudbě. Domníval se proto, že i mezi astronomií a hudbou je souvislost, a mluvil o „hudbě nebeských sfér“. Dělal si prý nárok, že tuto hudbu, na rozdíl od obyčejných smrtelníků, přímo slyší. Pýthagorovi patrně dospěli k významným poznatkům – z pozorování zatmění usoudili, že Země má kulový tvar, a některé zprávy o nich budí dojem, že došli až k heliocentrickému systému (i když to bohužel pro neznalost jejich autentických názorů nemůžeme podrobněji zhodnotit).

Vzhledem k Pýthagorovu nadšení pro čísla je poněkud paradoxní, že jeho jméno je dnes vyslovováno hlavně v souvislosti s geometrií. Je možné, že i k zájmu o pravouhlé trojúhelníky ho dovedla „pýthagorejská čísla“, trojice, kde součtem kvadrátů dvou celých čísel je kvadrát třetího. I když „Pýthagorova věta“ byla patrně známa už před Pýthagorem, není vyloučeno, že objevil a předvedl svým žákům její důkaz, snad právě takový, jaký vidíte na obrázku. Jistě oceníte, že se obejde bez jediného slova.



*Ryze geometrický důkaz Pýthagorovy věty*

Proberne si zde jeden z příběhů, který se o Pýthagorovi dochoval. Uvádí ho ve svém spise o hudbě římský filosof Boëthius. Když Pýthagoras přemýšlel, proč nám některé souzvučky znějí líbě (tvoří akordy) a některé nikoliv, kráče prý – snad řízením božím – okolo kovárny a zaposlouchal se do zvuků, jež vznikaly nárazy kladiv. Povšiml si řady akordů a zachoval se jako pravý fyzik – vstoupil do kovárny a požádal, aby mohl kladiva prozkoumat. Zvážil je a shledal, že čtyři z nich, vydávající akord, mají váhy v poměru celých čísel 12 : 9 : 8 : 6. Páté kladivo s předešlými neladilo zvukem ani vahou a bylo proto vyřazeno. Pýthagoras (ani Boëthius) sice nemohl vědět, že tyto poměry odpovídají poměrům frekvence kmitů, mohl však příslušné poměry přiřadit k základním akordům oktávě (2 : 1), kvintě (3 : 2) a kvartě (4 : 3), které tak objevil. (Poměr 9 : 8, který by také přicházel do úvahy, zní již disonantně.)

Ve filosoficky laděných knihách bývá toto vyprávění často uváděno a komentováno, aniž se posuzuje jeho věrohodnost. Nejde jen o to, že Boëthia dělí od Pýthagora celé tisíciletí, během něhož se mohly tvořit legendy, že je krajně nepravděpodobné, aby čtyři z pěti kladiv byly v náležitých poměrech, a že Pýthagoras by sotva potřeboval chodit okolo kovárny, když měl k dispozici hudební nástroje a jejich struny. Podstatnější je, že kvalita souzvučky ve skutečnosti nijak bezprostředně nezávisí na váze. Naštěstí (jak jsem zjistil na internetu) vyprávění pokračuje: po návratu z kovárny se Pýthagoras vrátil domů a zařídil si laboratoř, v níž studoval souzvučky strun různých délek a tloušťek při různých zatíženích tak, že vždy změnil jedinou veličinu. Tak mohl dospět ke správnému závěru, který bychom dnes vyjádřili slovy, že výška tónu je přímo úměrná odmocnině z napětí struny a nepřímo úměrná její délce a odmocnině z hmotnosti délkové jednotky, přičemž jako líbě vnímáme souzvučky, jejichž frekvence jsou v poměru malých celých čísel.

I přes nevěrohodný začátek tak vyprávění může obsahovat podstatnou část pravdy: Pýthagoras byl asi opravdu otcem hudební teorie a při jejím budování si počínal jako pravý fyzik – experimentátor. Pozoruhodné je, že u kořenů fyziky, považované neznalými za suchou a studenou vědu, stojí nejen měření a čísla, ale i krása akordů, kterou nemůžeme měřit ani počítat, ale pouze vnímat.

### Jak velký je svět

I největším řeckým myslitelům dělalo zprvu potíže odlišit astronomické jevy od jevů meteorologických. Navíc jim chyběla znalost geometrické perspektivy. A tak se např. u Hérakleita setkáváme s neuvěřitelným tvrzením, že Slunce není větší než lidská dlaň. Když o něco později Anaxagoras tvrdil, že Slunce je velké jako Pelloponés, nikdo mu nechtěl věřit. Situace se však rychle změnila k lepšímu a ke třetím století před Kristem, kdy se centrum světové vědy přesunulo do Alexandrie v nílské deltě, se lidé poprvé odvážili

odhadnout velikost světa, který je obklopuje. Základním předpokladem pro to bylo zjištění velikosti Země. To provedl správce alexandrijské knihovny, matematik a geograf, ale i filolog a básník Eratostenés (vzpomenete si na Eratostenovo síto?). Jen všestranné zájmy bránily tomuto muži, aby v některé z oblastí, již se zabýval, dosáhl absolutního prvenství. Jeho současníci mu proto říkali „pan Beta“. Myslím však, že v nastoupení cesty k poznání rozměrů vesmíru byl opravdová jednička. Stačilo mu se dovědět, že v době letního slunovratu je v Syeně (nynějším Assúánu) ležící na jih od Alexandrie vidět Slunce ze dna studny, a změřit, jak vysoko je Slunce na nebi ve stejné době v Alexandrii. Pak stačil jednoduchý trigonometrický výpočet k zjištění, kolikrát je zemský obvod delší než vzdálenost z Alexandrie do Syeny. Ve starověké míře odhadl Eratostenés zemský obvod na 250 tisíc stadií. Historikové se nemožno shodnout, zda stadium bylo 157 či 166 metrů, v každém případě se však Eratostenés přiblížil k správnému výsledku na několik procent.

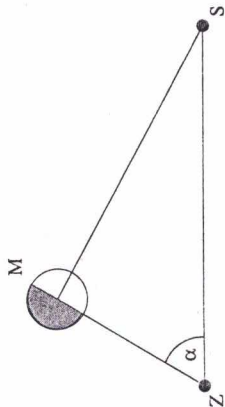
Stojí za zmínku, že o sto let později měřil velikost Země jiný alexandrijský učenec, Poseidonios, který užil podobné metody, ale nahradil Slunce hvězdou Canopus a Syenu ostrovem Rhodos. Určit vzdálenost na moři bylo však asi obtížnější než na souši a tak se stalo, že Poseidonios zemský obvod značně podcenil. Až do začátku novověku ale byla uznávána za správnou jeho hodnota a možná jen díky tomu se Kolumbus odvážil vydat na svou cestu do Indie.

Eratostenés se pokoušel určit také vzdálenost Měsíce a Slunce od Země. V tomto směru ho však překonal Aristarchos, který žil v Alexandrii zhruba ve stejné době. Aristarchos byl též průkopníkem heliocentrického systému a můžeme jen litovat, že jeho spis o sluneční soustavě se nezachoval, a nelze proto posoudit argumenty, o které svůj názor opíral. Své nejvýznamnější následovníky, Hipparcha a Ptolemaia, bohužel nepřesvědčil. Zachovalo se však jeho dílo *O velikosti a vzdálenosti Slunce a Měsíce*.

Pro určení poměru poloměru Země a její vzdálenosti od Měsíce užil Aristarchos měsíčního zatmění. Změřil dobu, během níž Měsíc prošel zemským stínem. Předpokládal, že Slunce je od Země podstatně vzdálenější než Měsíc a že tedy zemský stín ve vzdálenosti Měsíce má zhruba stejný průměr jako Země. Poměr délky kružnice, po níž Měsíc obíhá okolo Země, ku průměru Země musí být tedy stejný jako poměr oběžné doby Měsíce k době jeho průchodu zemským stínem. Popsané metodě by se mohlo vytknout jen to, že nepřehlídí ke zmešování zemského stínu, který se, jak dnes víme, ve vzdálenosti Měsíce zkracuje asi o čtvrtinu. Tento nedostatek metody odstranil později Ptolemaios, když sledováním zatmění přímo určil úhel, který zemský stín ve vzdálenosti Měsíce zabírá. Snad proto bývá v některých knihách za prvního stanovitele vzdálenosti Měsíce od Země označován on. Avšak i Aristarchův výsledek vzdálenosti Měsíce od Země zhruba odpovídal skutečnosti.

Pro určení poměru vzdálenosti Slunce a Měsíce od Země užil Aristarchos pravouhlého trojúhelníka, který tvoří Slunce, Měsíc a Země v okamžiku, kdy je Měsíc v první čtvrti, což znamená, že je právě z poloviny ozářen Sluncem. Jak je vidět z obrázku, stačí změřit úhel mezi spojnicemi Země s Měsícem a Sluncem. Tento úhel se příliš neodlišuje od pravého a je obtížné určit přesný okamžik, kdy má být měřen. Aristarchos jej stanovil jako 87 stupňů, zatímco ve skutečnosti je to 89 stupňů a padesát minut. Proto vzdálenost a tudíž i velikost Slunce značně podcenil. Slunce bylo podle něho jen dvacetkrát dál než Měsíc a pětkrát větší než Země. Někteří historikové vědy se domnívají, že Aristarchovi šlo v jeho knize jen o důkaz, že změření vzdáleností ve vesmíru je možné, a neusiloval v dané chvíli o největší dosažitelnou přesnost. Z některých náznaků se zdá, že později svůj odhad poněkud zlepšil. Všichni jeho antičtí následovníci však užívali výsledku uvedeného v knize a měli tedy

o velikosti sluneční soustavy značně zkreslenou představu. O nápravu se postarali až novověcí astronomové.



*Aristarchovo určení poměru vzdáleností Slunce a Měsíce od Země*

### Jak dlouhý je rok

Že rok má zhruba 365 a čtvrt dne, ví asi každý školák. Jak se však na to přišlo? Co je vůbec rok? Kdybychom na toto téma dělali anketu mezi náhodnými chodci, dostali bychom asi dvě skupiny odpovědí. Podle první se za rok vystřídají roční doby, podle druhé za rok oběhne Země kolem Slunce. Druhá odpověď se zdá být vědeckější, zvláště když změny působené střídáním ročních dob závisí do jisté míry na rozmarech počasí. To si uvědomovali už staří Egypťané, kteří si povšimli, že životadámé jarní mlíské záplavy začínají v době, kdy se těsně před úsvitem objeví na nebi nejjasnější hvězda oblohy Sotis (známá dnes pod jménem Sirius). Z pozemského hlediska to znamená, že Slunce se na své pouti po nebesích navrátilo ke stejné hvězdě, uběhl hvězdný, oběžný rok. Pozorováním ranního východu Síria tak Egypťané upřesnili délku roku, kterou předtím ze střídání ročních období odhadli na 365 dní. Této přesnější délky užíval i kalendář, který zavedl v Římě Julius Caesar a kterého používal také celý křesťanský svět až do roku 1582, kdy papež Řehoř XIII. na doporučení astronomů nařídil vynechat deset dní, aby umožnil opožděnému kalendářnímu roku dohnat rok skutečný, a stanovil složitější pravidlo pro určování přestupných roků, aby podobnému opožďování napříště zabránil.

V té době bylo ovšem už známo, že nejde o rok hvězdný (který může zajímat jen astronomy), ale o rok tropický, neboli rok, během něhož se vystřídají tropy, což řecky znamená právě roční období. Čtenáři tohoto textu doufejme vědí, co netuší ani mnohý vzdělanec, že roční doby nejsou působeny rozdílnou vzdáleností Země od Slunce při jejím eliptickém pohybu, ale proměnlivým úhlem zemské osy se spojnicí Země – Slunce. (Vzpomínám si tu na paní, která dostala od svých příbuzných v Austrálii fotografii z vánočního posezení v zahradě, a divila se, že tam i v zimě kvetou stromy.) Byl to již zmíněný Eratosthenés, kdo patrně jako první změřil sklon zemské osy vzhledem k ekliptice, jemuž za střídání ročních období vděčíme. Kdyby byl ovšem tento sklon stálý, nebylo by mezi délkou hvězdného a tropického roku rozdílu. Již ve druhém století před Kristem však řecký astronom Hipparchos, působící v Alexandrii a na Rhodu, zjistil, že doba, která uplyne mezi jarními rovnodennostmi, se nerovná době, za kterou se Slunce navrátí na obloze k téže hvězdě. Nahlíženo z geocentrického hlediska, jaké zastával i Hipparchos, se jarní bod, v němž je Slunce na hvězdné obloze v okamžiku jarní rovnodennosti, pozvolna pohybuje Slunci vstříc a způsobuje tak, že tropický rok je kratší než rok hvězdný. Otázka po délce roku se nám tak pěkně zkomplikovala, protože už jsme mluvili o čtyřech rocích a lze přidat ještě pátý:

Julianský rok zavedený Caesarem	365,25 dní
Gregoriánský rok zavedený Řehořem XIII.	365,2425 dní
Hvězdný rok oběhu Země kolem Slunce	365,2564 dní
Tropický rok vystřídaní ročních období	365,2422 dní
Anomalistický rok od přísluní k přísluní	365,2596 dní

Zatímco juliánský a gregoriánský rok jsou určeny človkem a jejich zde uvedená délka je přesná, zbývající roky určuje příroda, příslušná čísla jsou zaokrouhlená a s časem se mění, našťáší jen velmi zvolna. Ušetřeme čtenáři práci a poznamenejme, že rozdíl mezi tropickým a oběžným rokem činí asi dvacet minut. Důvod rozdílu mezi oběma roky vysvětlila teprve novověká fyzika. Země je díky své rotaci na rovníku poněkud „nakynutá“. Měsíc a Slunce ji svou gravitací tahají za „tukové polštáře“ a snaží se tak narovnat její osu. Země jako setrvačnick tomuto působení uhýbá a její osa se tak pohybuje (s malými výchyly nahoru a dolů – nutacemi) po pláti kužele. Tomuto pohybu se říká astronomická precese. Precese se projevuje především změnou polohy pólu na hvězdné obloze. Na severní polokouli máme v současné době to štěstí, že směr k severu můžeme snadno určit podle poměrně jasné hvězdy – Polárky. V antických dobách, o kterých tu píšeme, byla Polárka od pólu hvězdné oblohy nezanedbatelně vzdálena. V současné době se vzdálenost Polárky od pólu blíží svému minimu, ale v příštích stoletích naši potomci o ukazatel severu přijdou. K Polárce zemská osa zamíří zase až za asi 26 000 let. I této době se říká rok – a to platónský, i když velký řecký filosof Plátón o jeho existenci ještě nemohl vědět.

Ani tím však přehled různých roků nekončí. Z předchozího by čtenář mohl soudit, že nejpřirozenější definice roku je „doba mezi dvěma jarními rovnodennostmi“. S tím by se dalo souhlasit, ale na internetu jsem nedávno ke svému údivu objevil, že tato doba se nerovná tropickému roku! V současné době platí

Přirozený rok mezi jarními rovnodennostmi 365,2424 dní

Jak je to možné? Představme si Slunce jako běžce, který obíhá kolem dokola po obloze. Pozorovatel, který mu měří čas, však nesedí v hledišti, ale objíždí dráhu proti pohybu běžce na parním válci – jinak řečeno nachází se v jarním bodě. Jak už víme, naměří proto menší čas – tropický rok je kratší než hvězdný. Zatímco však u hvězdného roku je jedno, kterou hvězdu zvolíme pro registraci jeho uplynutí, u tropického roku volba počátku lhotejná není. Nyní totiž vstupuje do hry eliptičnost zemské dráhy a z toho vyplývající rozdílná rychlost Země v jejich různých bodech. Proměnnou vzdálenost Slunce od Země sice nepozorujeme, ale projeví se v proměnné rychlosti jeho pohybu po obloze. (V kalendáři se to odráží v rozdílné délce jara a léta ve srovnání s podzím a zimą – přesvědčte se sami.) Nyní ovšem změřený čas záleží na tom, v jaké fázi svého pohybu se atlet s parním válcem setkává – čas uplynulý mezi jarními rovnodennostmi je jiný než například čas mezi slunovraty. Shora udaná délka tropického roku je délka průmětovaná přes všechny možné pohyblivé mezničky, u nichž se dá měřit. Takový rok má výhodu ve své relativní stálosti – během celých desetiletí se prakticky nemění, zatímco u „přirozeného“ roku, jak jsem si jej dovolil nazvat, doba mezi rovnodennostmi během platónské periody kolísá v rozmezí několika minut. Jak však vyplynulo z předešlého výkladu, je to přece jen rok nejlépe odpovídající astronomické a kulturní tradici.

Vídíme, že odpověď na jednoduchou otázku nebývá vždy právě jednoduchá.

## Největší fyzik starověku

Roku 213 před Kristem oblehla římská vojska pod vedením zkušeného velitele Marcella Syrakúsy, jež v druhé punské válce stály na straně Kartága. I když Kartáginci nebyli schopni poskytnout svému spojenci pomoc, dobývání se protáhlo na celé dva roky. Jak píše Plutarchos v rámci Marcellova životopisu: „Na vojsko, blížící se po pevnině, dopadaly kameny obrovských rozměrů a váhy a neuvěřitelnou rychlostí. ... Balvany ničily s obrovskou silou a praskotem stroje na nepřátelských lodích a lámaly jejich paluby.“ Za účinnou obranu vděčilo město svému rodáku Archimédovi, který se tam vrátil po delším pobytu v Alexandrii. V době války mu asi bylo již 75 let, byl však stále plný nápadů a energie. Jako obvykle zde musíme uvážit, nakolik jsou zprávy o jeho válečných strojích věrohodné. I když pozdější líčení mohou v něčem přehánět (není například pravděpodobné, že by Archimédés dokázal zapalovat na dálku římské lodě pomocí zakřivených zrcadel), Archimédův podíl na obraně Syrakús zaznamenali mnozí autoři. První z nich, slavný a hlavně kritický historik Polybios, psal pouhých třicet let po Archimédově smrti.

Čtenář jistě ví, že boj o Syrakúsy skončil roku 212 jejich dobytím a Archimédovou smrtí, když Marcellus údajně využil nepozornosti svými úspěchy ukořehnaných Syrakúsánů k nočnímu útoku. Snad lze věřit pramenům, že se nemínil Archimédovi musíť a naopak si jej chtěl naklonit, nepodařilo se mu však jej uchránit před drancujícími vojáky. Když se stal římský řečník a spisovatel Cicero správcem Sicílie, vyhledal a nechal obnovit Archimédův náhrobek. Cicero srovnává syrakúského tyrana Dionýsia s Archimédem a píše: „Kdo z mužů na celém světě, jenž má určitý vztah k Múzám, tj. jemuž se dostalo hůmáního a ušlechtilého vzdělání, by nebyl raději tímto matematikem než samovládčím tyranem? Porovnáme-li jejich život a skutky, vidíme, že jeden z nich se oddal hledání a zkoumání číselných poměrů, radostem tvořivých snah, těmto nejkrásnějším slastem duše, kdežto druhý žil uprostřed vražd a vlastních zločinů, dnem i nocí se strachuje o svůj život.“

Co dnes víme o Archimédovi? I když je jen málo známo o jeho životě, přežila podstatná část jeho díla. Přes propasti dějin ji až do doby knižtisku přenesly pouhé dva náhodně uchované rukopisy. Stojí za to uvést názvy zachovaných Archimédových knih: *Dvě knihy o kouli a válci*; *Změření kruhu*; *O konoidech a sféroidech*; *O spirálách*; *Dvě knihy o rovinné rovině*; *O počtu písečných zrn*; *Kvadratura paraboly*; *Jak zacházet s mechanickými věťami*; *Dvě knihy o plovoucích tělesech*. Mezi nedochovanými knihami bylo také dílo o pákách a o odrazu a lomu světelných paprsků. Již z tohoto přehledu je vidět, že Archimédés spojoval schopnosti matematika se schopnostmi inženýra. Jemu připisovaný výrok: „Dejte mi pevný bod a pohnu zeměkouli“ byl možná ohlaselem veřejné demonstrace, při níž pomocí pákového zařízení uvedl sám do pohybu mohutný koráb na mořské hladině.

Všimněme si pouze dvou jeho příspěvků věd. Již svým názvem budí zájem dílo *O počtu písečných zrn*. Archimédés tu naráží na oblíbené úsloví, že zrnka písku na mořském pobřeží nikdo nespočítá. Jeho názor je odlišný. Odvažuje se dokonce spočítat počet písečných zrn, která by zaplnila celý vesmír. Ten si představuje jako ohraničený sférou stálou a odhaduje jeho poloměr na  $10^{16}$  m, což je kupodivu právě vzdálenost k nejbližší hvězdě. Znám bohužel obsah Archimédova díla jen z výkladu jiných autorů a nemohu vám proto říci, jak se mohl tak „trefit“, když v té době neexistovala žádná reálná možnost vzdálenost stálou změřit. To však není jediná závažná shoda. Ve vesmíru by se mohlo umístit podle Archiméda  $10^{63}$  písečných zrn, což, jak dnes víme, odpovídá počtu  $10^{80}$  nukleonů (protonů a neutronů). Zhruba takový je skutečný počet nukleonů v části vesmíru v principu přístupné našemu pozorování.

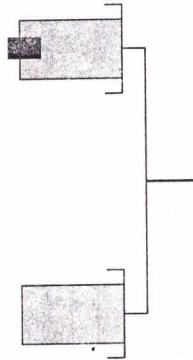


Archimédés sleduje ve své práci o písčných zmech ještě další cíl. Chce upozornit, že věda se neobejde bez velkých čísel a schopnosti s nimi zacházet. Největším číslem, které jeho současníci dovedli zapsat a pojmenovat, byla mriada, čili deset tisíc. Archimédés našel způsob, jak systematicky zapisovat větší čísla, který byl v zásadě podobný tomu, jak dnes využíváme exponentů.

Snad žádně vyprávění o Archimédovi se nevyhne historce, jak po šťastném objevu vyběhl nahý z lázni s voláním: Heureka. Přidružené okolnosti podrobněji líčí římský spisovatel Vitruvius ve svých Deseti knihách o architektuře. Archimédovi prý syrakúský král uložil vyzkoumat, zda zlatník do královské koruny nepřimísil stříbro. Metoda, na kterou údajně přišel ve vaně, však byla pro mne překvapením. Archimédés podle Vitruvia vyvážil korunu zlatem a pak obě hmoty ponořil do stejných nádob vrchovatě nappněných vodou. Podle většího množství vody, které vyteklo z nádoby s korunou, usoudil, že král byl podveden. K tomu ovšem nebylo třeba slavného Archimédova zákona, stačilo vědět, že voda je prakticky nestlačitelná a umožňuje tak měřit objemy těles. To Řekové jistě věděli i bez Archiméda.

Řekl bych, že Vitruvius příběh po fyzikální stránce poněkud pokazil. Daleko elegantnější a hlavně přesnější bylo zvážit obě hmoty znovu ve vodě a konstatovat, že koruna je nyní lehčí. Na takovou metodu mohl opravdu Archimédés přijít po vstupu do vany. Spojil si v hlavě dvě věci – že voda vystupuje výše a že on sám se cítí lehčí. Jak to spolu souvisí? Voda, která předtím podírala vodu nyní vytlačenu jeho tělem, podepírá nyní stejnou silou jeho tělo. A tato vytlačená voda způsobila zvednutí hladiny. (Podívejte se na obrázek, kde je místo Archiméda poleno a vytlačena kapalina přeteka. Která miska je těžší?) Geniální spojení dvou pozorování je podstatou Archimédova objevu.

Smrt Archiméda rukou Římanů je symbolická. I když si Římané získali zásluhy o lidskou civilizaci jako tvůrcové obrovské a relativně dobře spravované říše, věda nebyla jejich silnou stránkou. Ve vědecké tradici ještě nějakou dobu pokračovali Řekové žijící na římském území, jako byl již zmíněvaný Ptolemaios ve druhém století po Kristu. Tvůrce Archimédova formátu se však již mezi nimi nevyskytl a na nové génie vědy bylo třeba čekat jeden a půl tisíciletí.



Archimédův zákon – která miska poklesne?

## FYZIKÁLNÍ SEKCE

Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity v Brně

KORESPONDENČNÍ SEMINÁŘ Z FYZIKY 2002/2003

### FYZIKA V DĚJINÁCH

Prof. RNDr. Jan Novotný, CSc.

#### II. ČÁST: CO DOKÁZAL GALILEI?

(seriál na pokračování)

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 Galilei dokázal? A byly jeho důkazy opravdu tak přesvědčivé, jak se to vykládá ve škole?

Nejlepší odpověď si může dát sám tazatel, když si přečte stěžejní dílo Galileiho, *Dialog o dvou systémech světa*. Tato kniha vyšla poprvé roku 1632 ve Florencii a byla napsána v italském. Galilei dal svému mateřskému jazyku přednost před latinou, kterou tenkrát obvykle vědci psali, aby mohl oslovit co nejširší okruh čtenářů. I když mezi jazyky, do nichž byla později přeložena, čeština schází, může náš čtenář sáhnout po slovenském vydání z roku 1962, které jistě mají ve větších odborných knihovnách. Zaujme-li vás následující stručný průvodce *Dialogem* natolik, že se zatoužíte seznámit s knihou přímo, neobávejte se slovenštiny (malé jazykové rozdíly přestanete po pár stránkách vnímat) ani přílišné učtenosti. V té době se ještě i špičková věda obořila bez množství symbolů a odborných termínů. Kromě toho Galilei opravdu dovedl psát. Jeho kniha je mistrovským literárním dílem a dává čtenáři možnost nejen sestoupit k pramenům moderní vědy, ale též ponořit se do renesanční atmosféry, plné zvědavosti a nadšení nad nejnovějšími objevy.

Velmi zajímavé jsou už dvě předmluvy. První je nejpomínanější a nejuctivější věnování nejjasnějšímu velkovévodovi Toskánskému (neměl spíše on za ně ponížené poděkovat Galileimu?). Domyšlíme si, že věda se ani tenkrát neobešla bez sponzorů, jež bylo třeba si naklonit. V druhé předmluvě se Galilei na první pohled velmi opatrně vyrovnává s možnými námitkami ze strany církve, která o pohybu Země zakázala mluvit. Ujišťuje, že mu

vůbec nejde o polemiku s učním 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 italská věci 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 Galileiho slov a nediví se, že ji nepřehlédli ani církevní hodnostáři.

Pro svůj výklad zvolil Galilei formu rozhovoru mezi třemi vzdělanci. Salviati obhajuje Koperníkův a Simplicio Ptolemaioův názor, zvidavý Sagredo má úlohu pozorného posluchače a tazatele a zároveň jakéhosi rozhodčího. Čtenář ovšem brzy pochopí, že nejde o střetnutí rovnocenných soupeřů. Galilei se ani příliš nesnaží předstírat neutralitu. Záměrem Salviati je informován o nejnovějších vědeckých objevech (občas se odvolává na výzkumy Akademie, kterým je míněn sám Galilei), Simplicio je muž sice učený, ale otrocky 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 šíře. Pokušíme 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 uvážování, 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 vskutku 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 jeho povrch 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 – Galilei 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 nazýváť stříbro a zlato hodnotami a zemi a hlínu marnostmi? Jak to, že ty lidi nenapadne, že kdyby země tak vzácná, jako klenoty*

*a nejdražší kovy, nenašel by se člověk, který by nevěnoval měsíce diamantů a rubínů či třeba čtyři vozy zlata, aby měl aspoň hrstku země poslačující na zasazení jasmínu v malém květináči anebo jaderka čínského pomeranče, aby se díval, jak kličí, roste, pokrývá se krásným listím, voňavými květy a lahodným ovocem? ... Ti, kdož se tak ohánějí neznitelností, 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 projíždkou na lodičce.

Dnešního čtenáře překvapí, nakolik je sám Galilei 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 blíží Slunci se pohybují rychleji. Některé problémy Galilei 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 cititelé 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 vísle, 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 vylíčením experimentů na stojící a plující lodi:

*Vejděte s přítelům 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 dalších nádob s 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 lod 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. Zaprvé 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 žádná 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 Galileiho 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, Galilei 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 formulován pro 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 lodi budou rozdíly nápadnější.

Pro cíl, který si Galilei 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 střelce 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. 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 vylétnout do povětří. V tom se mylí právě tak jako Simplicio, který si naopak myslí, že by k tomu muselo dojít i při sebebomalejší rotaci.

Během druhého dne je uveden jeden z největších objevů Galileiho – 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 Galilei 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 přičina nazývá, ale jaká je její podstata.

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

### Třetí den

Další den se Simplicio, který dojížděl do paláce na gondole, dostává 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 (obrázek 1 v závěru textu). Galileiho 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 argumentů, jež vyplývají z astronomických pozorování. Ta většinou podnikl sám Galilei svým dalekohledem a získal tak údaje, které ještě Koperník nemohl mít k dispozici. Správný tvar Venuše, jež při obíhání okolo Slunce jeví fáze podobné měsíčním, a proměnná velikost kotoučků Venuše a Marsu v závislosti na jejich měnících 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.)

Galilei mimo jiné ukazuje, jak přirozeně vysvětluje Koperníkova soustava období „zpětného“ pohybu vnějších planet vzhledem k hvězdné obloze (obrázek 2) či střídání ročních dob. Užívá příležitosti k připomenutí vlastních objevů (čtyři Jupiterovy a dva Saturnovy měsíce – v druhém případě ovšem Galilei ve skutečnosti pozoroval okraje prstence – a otáčení Slunce kolem osy, jež objevil sledováním pohybu slunečních skvrn). I tyto objevy svědčí aspoň nepřímo ve prospěch Koperníkovy soustavy. Zbavují totiž Zemi její zvláštnosti: 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 neprojevuje ve změnách úhlu, pod nimiž během roku pozorujeme hvězdy? Galilei to vysvětluje jejich nesmírnou vzdáleností a předvídá, že jednou bude vzdálenost hvězd právě díky obíhání Země kolem Slunce změřena.

Dovídáme se též, jaké jsou Galileiho 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 rozestry 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 Galilei 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 učence Williama Gilberta a jež obohatili vlastními pozorováními. Tato pozorování ve skutečnosti zřejmě konal sám Galilei. 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 Galilei drží představy o přesné 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 osvo- bodily průkopníky heliocentristu až Keplerovy zákony, které Galilei 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 Medicéjské planety a Saturnovy družice jsou na nebi až od chvíle, kdy se staly přístupnými lidskému zraku? A podobně, což neexistovaly další nescětné 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 podle Galileiho 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 dmутí 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 správnou cestu ho uvedlo pozorování chování pitné vody v cisternách, které byly převáženy po moři. Houpaní lodí – čili její nerovnoměrný pohyb – vyvolalo kmitání vody v nádržích. Podobným jevem jsou podle Salviatiho – a tedy Galileiho – i mořská dmутí. Salviati pak vykládá, že skládáním obou pohybů Země vzniká nerovnoměrný pohyb, který je schopen mořská dmутí 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 pro- jevit pohybem vzduchu vůči Zemi. Odvoláním na zkušenosti mořeplavců a lodní deníky

dokládá, že k tomu opravdu dochází – plavby plachetnic z východu na západ po Středozemním moři jsou v průměru o čtvrtinu rychlejší než plavby opačné.

Konečně se Salviati pokouší vysvětlit, proč jev mořských dmutí přece jen závisí na poloze Měsíce, ačkoli Měsíc na vody neptusobí. 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 jakási 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 minění 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 pohybováním nádrže. Oba potvrdíte, že to mohl a uměl udělat nesečnými 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 Galilei nevolal 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 Galileiho definitivně zanevřel a přispěl k jeho odsouzení.

Nemůžeme se nyní vyhnut otázce, nakolik Galilei poslední den uspěl v očích pozdějších fyziků. Není pochyby, že vysvětlení správné není. Galilei 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 vývoody tak, že aspoň v něčem odpovídaly realitě.

Abychom vůbec mohli o Galileiho teorii diskutovat, pokusme se jí přizpůsobit pozdější fyzice. Myslénka, že mořská dmutí jsou způsobena pohybem Země, stojí jistě za uvážení. Je však třeba přesněji vymezit různé druhy pohybů vztažených 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 uijme 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 Galilei 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 podobné mořské proudy) stácejí 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.



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

Po tomto upřesnění vede ovšem Galileiho 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 Galileiho teorie by tedy existovala jediná přílivová vlna následující Slunce s půldenním zpožděním – příliv by tedy vrcholil po půlnoci a odliv po polední. Čtenáři je asi jasné, co Galilei opomenul, protože o tom nevěděl – gravitační působení nebeských těles na Zemi. Geocentrická teorie připsující 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 přivrácené a odvrácené straně. Protože nerozhoduje samotná síla, ale její rozdíly vzhledem k různým místům Země, je vliv Měsíce na mořská dmutí výrazně větší než vliv Slunce a jeho pohyb kolem Země neustále sledují dvě přílivové vlny – zatímco zrychlení pevné části Země působené měsíční gravitací je v celém tělese zhruba stejné, vody mají na přivrácené straně zrychlení větší a na odvrácené menší a pohybují se tedy vůči Zemi tak, že se zvedají pod Měsícem a ustupují na opačné straně zeměkoule.

Tímto způsobem správně vyložil mořská dmutí až Newton, který se narodil v roce, v němž Galilei zemřel. Je otázka, zda si Galilei 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 Galileim zhoršilo. Hodnotu vědcova díla nesmíme posuzovat podle toho, co víme dnes, ale podle toho, čím dřívejší lidské vědění rozšířil. A takové rozšiřování se neobejde bez tápání a omylů. I když Galilei 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. V protestantských zemích se mohla nová fyzika rozvíjet vpodstatě bez překážek a katolické církvi po čase nezbylo, než se s ní mlčky smířit, i když vyučování Koperníkově teorii oficiálně povolila až roku 1822. O historických, filosofických

a morálních aspektech Galileiho sporu s církví se diskutuje dodnes a čtenář o tom najde řadu zajímavých textů na Internetu.

Zde si povšimneme jen vědeckých objevů, které by mohly Galileimu 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, který kolísá v rozmezí 20 úhlových vteřin. Tento jev, nazvaný **aberrace světla**, nám přibližuje 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, s nímž by bylo z hvězdy vidět průměr zemské dráhy, zvaný **paralaxa**) činila 0,3 vteřiny. Krátce nato uspěli další vědci, kteří si vybrali mimořádně jasné hvězdy  $\alpha$  Centauri a Vega. 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 Gaspard Gustave 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. Dovedete jev vysvětlit?

Nejpůsobivější demonstraci zemské rotace podal 1851 v pařížském Pantheonu Jean Bernard Léon 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 popsaný jev by mohl přijít a předvést jej již sám Galilei, kdyby se jeho myšlenky ubíraly tímto směrem.

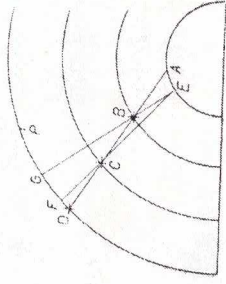
Nevyhýbáme se na závěr ošemetné otázce: není ale podle teorie relativity nakonec jedno, co stojí a co se pohybuje, a nevede tak moderní fyzika k závěru, že se vlastně nebylo o co přít? Připomeňme nejprve, že už od Newtonových dob přestalo mít smysl spojitvat Koperníkovu soustavu s absolutní nehybností Slunce (či lépe řečeno jeho středu, protože už Galilei 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 středu 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 Galileiho 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 pouze 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 negativitacím silám, které udržují Zemi pohromadě. Působí proto řadu jevů, které jsou pozorováním na Zemi zjištěitelné. 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 Galileimu 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?

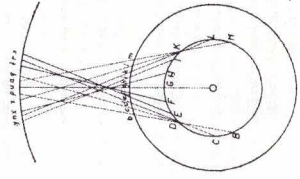
Zde by Galileimu přišla na pomoc aberace a paralaxa. Ty svědčí o tom, že Země mění směr svého pohybu a přemísťuje se vůči rozsáhlejší inerciální soustavě, na jejímž pozadí je soubor těles sluneční soustavy jen nepatrnou poruchou, zatímco sluneční soustava, reprezentovaná svým středem hmotnosti, je vůči 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-li 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 takovouto soustavu definovat i v dostatečně malém měřítku, v jakém Galilei 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 nechtě 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 (Cosmic Background Explorer) 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 Galileia Galileiho.



Obrázek 1

Obrázek 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 též místě 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.



Obrázek 2

Obrázek 2. Vysvětlení klíčky 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 klíčků může být vícenásobné míjení planet během kratšího časového období.

## FYZIKA V DĚJINÁCH

Prof. RNDr. Jan Novotný, CSc.

### III. ČÁST: HLEDÁNÍ NOVÝCH SVĚTŮ

(seriál na pokračování)

Na konci druhého dílu *Feynmanových přednášek z fyziky* (je to jedna z nejkrásnějších knih věnovaných naší vědě) čteme:

„Mnozí budou zklamáni, neobjevíme-li na jiných planetách život. Já ne – meziplanetární výzkum mi bude stále připomínat tu nekonečnou škálu nových jevů, které jsou důsledkem velmi jednoduchých principů, bude mě jimi znovu a znovu těšit a překvapovat. Zkušebním kamenem vědy je její schopnost předpovídat jevy. Kdybyste nikdy nevzkročili na Zemi, dokázali byste předpovídat bouřky, sopky, vlny v oceánu, ranní svítání i barvitý západ Slunce? Užitečným poučením nám bude, dozvíme-li se, že všechno to se děje i na každé z těchto mrtvých planet, na těchto osmi nebo deseti koulích, které se sesbíraly ze stejného oblaku prachu a které splňují stejné fyzikální zákony.“

Historie poznávání planet sahá až do nepaměti. Již naši dávní předkové si povšimli rozdílů mezi hvězdami – stálicemi, které (alespoň v rozmezí lidského života) své místo na nebi viditelně nemění, a planetami – bludicemi, které se na první pohled jakoby z vlastní vůle pohybují v úzkém pásu procházejícím zvířetníkovými souhvězdími. Není divu, že planety byly považovány za bohý, jak to dodnes připomínají jejich jména. Je pravděpodobné, že členění času do sedmidenních úseků bylo zvoleno tak, aby každý den týdně mohl být připsán jednomu z nebeských těles – pěti viditelným planetám, Slunci a Měsíci. Např. ve francouzštině tomu odpovídá i pojmenování dnů týdně – počínaje nedělí jsou připsány Slunci, Měsíci, Marsu, Merkuru, Jupiteru, Venuši a Saturnu (v angličtině jsou připsány latinská jména bohů nahrazena oběhu planet tuto viru zpočátku neodstranilo. Ve spise *Epínomis*, který byl připisován Plátónovi, i když jeho autorem je spíše některý jeho žák, se astronomie prohlašuje za vědu skýtající nejvyšší poznání právě proto, že se zabývá po-

hyby bohů, jejichž neměnná pravdivost je projevem božské podstaty. Křesťanská kultura

přirozeně pohlížela na planety poněkud střízlivěji – byly považovány za světla upevněná na otáčejících se sférách velkolepého vesmírného otloje, která nás upozorňují na dokonalost jeho stvořitele. Proto patrně nikoho nenapadla myšlenka, že by mohly existovat i nevyzbrojeným lidským zrakem neviditelné planety – k čemu by je Bůh potřeboval?

Teprve nová fyzika prosazovaná Galileim zbavila sluneční soustavu nebeských sfér a připsala planetám samostatnou existenci, v níž se řídí obecnými fyzikálními zákony. Dalekohled také Galileimu ukázal, že sluneční soustava se neomezuje na planety a náš Měsíc. 7. ledna 1610 spatřil v dalekohledu v blízkosti Jupitera tři hvězdy. Následujícího večera se přesvědčil, že místo aby je Jupiter minul, unáší je s sebou. Kromě toho našel i čtvrtého Jupiterova průvodce. Sluneční soustavu tak obohatily Jupiterovy měsíce, pro něž se vžila jména navržená Keplerem: Io, Europa, Ganymed, Callisto. Roku 1655 holandský fyzik a astronom Christian Huygens objevil největší Saturnův měsíc Titan. Především ovšem přijetí Koperníkovy soustavy znamenalo vlastně objev šesté planety – Země.

V dalším budeme sledovat, jak se počet planet doplnil na dnešních devět a jakou roli v tom sehrála fyzika.

### Harmonie světa

Heliocentrická soustava se již na první pohled zdá mnohem prostší a vhodnější k odhalení zákonů „stavby světa“ než soustava geocentrická. Pokud však chtěli astronomové přesně vyhovět pozorovacím datům, zjišťovali, že nevystačí s představou kruhových oběhů planet kolem Slunce. Stále bylo nutno komplikovaně skládat kruhové pohyby „nebeských sfér“. Německý učenec Johannes Kepler přijal problém nalezení prostých zákonů stavby a pohybu planetárního systému v rámci heliocentrické soustavy jako životní výzvu. V díle *Mysterium Cosmographicum* (1597) navrhl uspořádání vzdáleností planet od Slunce, které by vysvětlilo, proč je planet zrovna šest. Je to právě takový počet, aby bylo možno mezi jejich „sféry“ vložit pět pravidelných mnohostěnů tak, že vnitřní sféra je jim vepsána a vnější opsána. (Popisem pravidelných těles a důkazem, že je jich právě pět, končí Euclidés své *Základy*.) Kepler vložil mnohostěny v tomto pořadí: osmistěn, dvacetistěn, dvanáctistěn, čtyřstěn, šestistěn (tj. krychle). Porovnání Keplerovy hypotézy s realitou se mi nepodařilo najít – dostatečně plný a v geometrii zručný čtenář si je třeba udělá sám a posoudí, zda Keplerova volba byla nejlepší z možných.

Ohled na výsledky pozorování však patrně vedl Keplera k tomu, že se s uvedeným řešením nespokojil. V díle *Astronomia Nova* (1609) objevil dva skutečně platné zákony pohybu planet – eliptický tvar jejich trajektorie a zachování plošné rychlosti během oběhu. Konečně v knize *Harmonice Mundi* (1619) našel souvislost mezi velkou poloosou obíhané elipsy a oběžnou dobou, čímž doplnil počet zákonů na tři. Jak ještě v téměř století vplývalo z Newtonovy mechaniky a gravitačního zákona, nelze již tento počet zvětšit – pro vzdálenosti planet od Slunce žádná omezení nevyplývají. Keplerovy zákony však nevyžadují ani to, aby planety obíhaly kolem Slunce zhruba ve stejné rovině a ve stejném směru. Vyplyvají z Newtonovy teorie za předpokladu, že vzájemná působení mezi planetami lze zanedbat, který je sice pro přibližný popis přijatelný, ale nedovoluje popsat, jak se na podobě sluneční soustavy odráží způsob, jímž vznikla, a jak ji v dlouhodobém měřítku vládnou interakce mezi planetami. Např. společná rovina oběhu a směr pohybu planet vyplývá z historie vzniku sluneční soustavy, při jejíž kondenzaci se hmota nejdříve uspořádala do podoby rotujícího prstence. Nelze proto vyloučit, že i vzdálenosti planet byly zákonitě určeny. Tomu nasvědčoval objev německého astronoma Johanna Titia (1766);

který o něco později zveřejnil jeho známější kolega Johann Bode. Střední hodnoty vzdálenosti planet od Slunce tvoří tzv. Titiovu-Bodeovu řadu (dnes bychom řekli posloupnost). Volíme-li za jednotku desetinu vzdálenosti Země od Slunce, jsou tyto vzdálenosti dány jako

$$L = 4 + 3 \times 2^n,$$

kde 4 je vzdálenost Merkuru a čísla  $n = 0, 1, 2, 4, 5$  postupně odpovídají Venuši, Zemi, Marsu, Jupiteru a Saturnu – pro  $n = 3$  je v řadě mezer. (Někteří autoři namísto o středních vzdálenostech mluví o velkých poloosách, vzhledem k malé výstřednosti planetárních drah a pouze přibližné přesnosti řady – v řadu procent – to neznamená podstatný rozdíl.) Méně obvyklé, ale asi logičtější, je mluvit o rozdílech vzdálenosti Merkuru a ostatních planet a pokládat za jednotku vzdálenost Merkuru od Venuše, čímž odstraníme ze vzorce „nahodilé“ parametry 4 a 3 a uvedené rozdíly budou dány prostě mocninami čísla 2. (Zkuste zjistit, zda podobná zákonitost neplatí i u měsíců velkých planet – příliš malé měsíce můžete eventuálně vyloučit.) I když pro platnost řady nebylo možno (a neumíme to ani dnes) udat žádný důvod, byla nepochybně působivá a v krátké době se jí mělo dostat vynikajícího potvrzení.

### První objevená planeta

Pozdě večer 13. března 1781 si britský hudebník a v té době ještě amatérský astronom William Herschel při pozorování skupiny hvězd v souhvězdí Blíženců povšiml, že jedna z nich se zřetelně jeví jako kotoouček. (Herschel přišel do Anglie z Německa, kořeny jeho rodiny však údajně sahají do Čech, jeho předkové byli Jelínkovi.) Pozoroval těleso po řadu dalších nocí a brzy zjistil, že se pohybuje vůči hvězdám. Považoval je za kometu, avšak propočty jeho dráhy, do nichž se okamžitě pustilo několik vědců, brzy ukázaly, že se nachází ve velké vzdálenosti, v níž by kometa nemohla být viditelná. Velký francouzský matematik Pierre-Simon Laplace ještě v témže roce přesvědčivě dokázal, že nové těleso je planetou, která se pohybuje za Saturnem po dráze odpovídající Titiově-Bodeově řadě. Herschel chtěl planetu nazvat podle tehdejšího anglického krále Jiřího, prosadil se však moudrý Bodeův návrh, aby byla dodržena tradice a planeta nesla název římského boha – Uran. Dodatečně se ukázalo, že planeta, která je na hranici viditelnosti pouhým okem, byla, již zaznamenaná, poprvé patrně britským astronomem Johnem Flamsteedem roku 1690. Flamsteed ji do roku 1715 pozoroval celkem šestkrát, Bradley v letech 1748-1753 třikrát, Mayer roku 1756 jednou a Herschelův současník Le Monnier v letech 1750-1771 dokonce dvanáctkrát. Nikdo však neuvedl tuto pozorování do souvislosti a tak si všichni mysleli, že pozorují obyčejnou hvězdu.

Nalezení Uranu posílilo důvěru v Titiovu-Bodeovu řadu a vyvolalo velký zájem o za- plnění prázdného místa mezi Marsem a Jupiterem. Koncem 18. století došlo dokonce k mezinárodní poradě astronomů, na níž byl vypracován program systematického hledání další planety. Šťastným objevitelem se však stal 1. ledna 1801 italský astronom Giuseppe Piazzi, který se na dohodě nepodílel. Těleso, jež brzy poté Bode identifikoval jako plá- netu, sice brzy zmizelo za Sluncem, velký matematik Carl Friedrich Gauss však jeho dráhu propočítal a umožnil tak jeho snadné opětné nalezení. Nová planeta, nazvaná Ceres, ale brzy o hodně ze své slávy přišla. Ukázalo se totiž, že je jen jednou z mnoha. Další tě- lesa srovnatelné velikosti mezi Marsem a Jupiterem brzy objevili němečtí astronomové Heinrich Olbers (Pallas 1802, Vesta 1807) a Karl Harding (Juno 1804). Žádné z těchto těles si svými rozměry či hmotností nezaslouží název planety (nejmasivnější Ceres má

desetitisícinu hmotnosti Země) – mluvíme proto o planetkách či asteroidech. Později se s nimi doslova roztrhl pytel. Dnes jich registrujeme asi 6 000 a se znepokojením zjišťujeme, že některé z nich kříží nejen dráhu Marsu, ale i Země a jejich srážky se Zemí mohou pro lidstvo představovat smrtelné nebezpečí. Poloha největších asteroidů dobře odpovídá místu v Titiově–Bodeově řadě a je možno se domnívat, že vytvoření planety zde zabránil vliv mohutného Jupiteru.

### Triumf nebeské mechaniky

Zprvu nevyužitá pozorování Uranu nakonec nebyla bezcenná. Umožnila velmi přesně určit jeho dráhu a dospět tak k závěru, že ne zcela odpovídá tomu, co by se dalo předvídat na základě Newtonova gravitačního zákona. Pro vysvětlení se nabízely tři možnosti – odchylka od platnosti Newtonova zákona na velkých vzdálenostech, síla neznámého původu ovlivňující pohyb Uranu a konečné gravitační působení další, dosud neznámé planety. O určení její polohy na základě vlivu na pohyb Uranu se pokusili dva astronomové a matematikové – Angličan John Couch Adams a Francouz Urbain Jean Joseph Le Verrier. Adams ukončil své výpočty roku 1845. V té době mu bylo 26 let. Seznámil s nimi čelného britského astronoma Georga Airyho, který jim však zprvu nedůvěřoval. Zhruba v téže době se problémem začal zabývat Le Verrier a roku 1846 své výsledky zveřejnil. Teprve poté Airy změnil názor a na jeho výzvu začal John Challis v Cambridge po planetě pátrat. K tomu bylo třeba prozkoumat oblast několikrát větší, než jakou zaujímá na obloze Měsíc, prohledat v ní všechny jen trochu jasnější hvězdy a zjistit, zda se některá z nich nepohybuje.

V létě 1846 proměřil Challis polohy asi 3 000 hvězd. Během jediného dne ho však předběhl berlínský astronom Johann Gottfried Galle, který 23. září 1846 obdržel Le Verrierův dopis s údaji o poloze planety a ještě týž večer ji našel v souhvězdí Vodnáře asi jeden stupeň od místa předvídaného Le Verrierem. Pomožila mu přitom nová podrobná mapa hvězdné oblohy, která umožnila, aby se nezdržoval pozorováním hvězd na ní zakreslených, ale přímo hledal objekt v mapě neobsažený. Ještě téhož roku byl objeven také největší měsíc nové planety. Tělesa byla pojmenována Neptun a Triton.

Dodatečně se ukázalo, že planetu zaznamenal již v létě dvakrát i Challis, nedokázal ji však jako takovou identifikovat. Již roku 1795 zakreslil planetu Francouz Joseph de Lalande a zachytil dokonce změnu její polohy mezi hvězdami, považoval to však za chybu měření. Ani to ale není všechno. Roku 1980 bylo zjištěno, že prvním člověkem, který planetu Neptun viděl a zaznamenal, byl sám Galileo Galilei. Byla totiž v těsné blízkosti Jupitera v době, kdy Galilei horlivě pozoroval pohyby Jupiterových měsíců a zakresloval si i polohy blízkých hvězd. Neptun zachytil dvakrát po sobě v asi měsíčním časovém intervalu, takže by mohl poznat, že nejde o hvězdu, kdyby si povšiml změny polohy.

Le Verrierův výkon (Adams byl zprvu nezasloužené opomenut) měl neobyčejný ohlas na veřejnosti, srovnatelný snad jen s potvrzením Einsteinovy předpovědi ohybu světla hvězd v okolí Slunce při slunečním zatmění 1919. Jeho ohlas se u nás projevuje v díle Jakuba Arbesa *Newtonův mozek*. Šlo skutečně o velikolepý úspěch vědy, který nezměňuje ani fakt, že oběma vědcům přála také náhoda. Ve svých výpočtech se opírali o předpoklad, že hledaná planeta se nachází ve vzdálenosti určené Titiovou–Bodeovou řadou. Neptun je ale první planetou, u níž tento předpoklad zcela selhává. Je Uranu mnohem blíže. Počtáři mu proto přisoudili daleko větší hmotnost – podle Le Verriera byl 1,9krát a podle Adamse 2,7krát hmotnější než ve skutečnosti. V době provedení výpočtu, kdy Uran a Neptun



byly blízko sebe, se našťástí předpovězená a skutečná poloha příliš nelišily (viz obrázek v závěru textu). V dřívějším i pozdějším období by byl rozdíl značný a planetu by se podle vypočtených údajů objevit nepodařilo.

Na sklonku života (zemřel roku 1877, právě v den výročí objevu Neptunu) se Le Verrier pokusil svůj triumf zopakovat. Navázal na své zjištění z pozorování Merkuru, že elipsa, po níž se planeta pohybuje, se pozvolna stáčí způsobem, který nelze úplně vysvětlit vlivem jiných planet. Rozdíl mezi teoretickou a vypočtenou hodnotou stáčení činil asi 40 úhlových sekund za století a mohl by být podle Le Verriera vysvětlen vlivem další planety, které pro její blízkost k Slunci navrhl název boha ohně – Vulkán. Propočítal pohyb Vulkánu a předpověděl, že přejde přes sluneční kotouč 22. března 1877. Tentokrát se však předpověď nesplnila – žádný pozorovatel přechod temného bodu přes sluneční kotouč nezaznamenal. Vulkán byl hledán i později v době úplného zatmění Slunce roku 1878, které by umožnilo uvídnout planetu v jeho blízkém okolí. Byly sice spatřeny dvě údajné planety, později se však dospělo k závěru, že to byly obyčejné hvězdy. Existují také některé starší nevysvětlelé záznamy přechodu temných bodů přes Slunce, podle názoru současných astronomů však nejsou věrohodné – mohlo např. dojít k záměně se slunečními skvrnami. Kromě toho dnes již necítíme potřebu vysvětlovat stáčení Merkurovy elipsy vlivem jiného tělesa, protože si je vykládáme jako důsledek platnosti Einsteinovy obecné teorie relativity.

### Ještě jeden triumf?

Při srovnávání pohybu Uranu a Neptunu s výsledky výpočtů došli astronomové 19. století k závěru, že stále existují malé rozdíly, které by se daly vysvětlit vlivem další planety. Americký astronom Percival Lowell (je znám také „objevem“ kanálů na Marsu, který se později ukázal být zrakovou iluzí) se roku 1915 z těchto údajů pokusil planetu „vypočítat“. V následujícím roce Lowell zemřel a k hledání planety podle jeho dat došlo na observatoři v Arizoně, kterou založil, až v roce 1930. Planetu našel Clyde Tombaugh 21. ledna pouhě 4 stupně od místa, kde ji předpovídal Lowell. Čtenáře už asi nepřekvapí, že i Pluta našli dodatečně v řadě hvězdárn na fotografických deskách (nejstarší byla z r. 1914), což pomohlo upřesnit jeho dráhu a potvrdit většímu Lowellových předpovědí. Učebnice autorů Gutha, Linka, Mohra a Šternberka *Astronomie* z roku 1954 to hodnotí jako „výsledek přímo skvělý a lepší, než jakého dosáhl Le Verrier u Neptunu, uvážíme-li, že ten měl ke stanovení jeho polohy k dispozici odchylky Uranovy dráhy téměř desetkrát větší, než jaké měl Lowell pro stanovení polohy Pluta“.

Jméno vládnice podsvětí dostala planeta podle chladného a temného prostředí, v němž se pohybuje, a možná také proto, že první dvě písmena jejího názvu jsou iniciálami muzeje, který se zasloužil o její objevení. Od roku 1978 ovšem bezpečně víme, že jeho úspěch byl dílem neobyčejné náhody. Trvale zdokonalování pozorovací techniky tehdy umožnilo zjistit, že Pluto je doprovázen měsícem, který dostal jméno Charon. Soustava Pluto – Charon je pozoruhodná tím, že měsíc svou velikostí příliš nezaostává za planetou – jeho průměr je jen asi dvakrát menší, což je ve sluneční soustavě unikát. Z pozorování oběhu Charonu kolem Pluta bylo možno spolehlivě určit hmotnost planety, kterou Lowell odhadoval na šestinásobek hmotnosti Země. Ve skutečnosti má Pluto pouze dvě tisícin její hmotnosti. Takový trpaslík nemohl pohyby obřích planet pozorovatelně ovlivnit a podle současných názorů Lowell ve svých výpočtech vycházel z nespolehlivých podkladů.

Vznikla tak pochybnost, zda si Pluto vůbec zaslouží být řazen mezi planety. Svou velikostí i hmotností zaostává za sedmi měsíci sluneční soustavy (všechny byly v našem textu

uvedeny). Druhá nejmenší planeta, Merkur, je sice o něco menší než Ganymed a Titan, ale předtí je hmotností. Zatím však astronomové Pluta za devátou planetu stále pokládají. Jedním z argumentů pro to může být, že jeho vzdálenost od Slunce dobře odpovídá místu v Titiově-Bodeově řadě, které by měl po právu zaujímat Neptun. Zvláštností Pluta je poměrně velká výstřednost jeho dráhy, která způsobuje, že se v určitých obdobích dostává blíže Slunci než Neptun. Sračky obou těles se však nemusíme obávat – když Pluto oběhne svou dráhu dvakrát, oběhne ji Neptun třikrát a vzájemně pozice planet se tak stále opakují. Jde o příklad rezonančního jevu, který lze vysvětlit podrobnějším rozbořením gravitačního působení mezi tělesy. Není vyloučeno, že Pluto byl v minulosti Neptunovým měsícem a oddělil se od něho v důsledku nějaké mimořádné události, např. zachycení Tritonu.

Plutovo postavení zůstává ovšem ohroženo možnou konkurencí. Dnes již víme, že za Neptunem, v oblasti nazývané Kuiperův pás, se nachází ještě větší počet obíhajících těles než mezi Marsem a Jupiterem. Loni zde bylo objeveno největší těleso sluneční soustavy od chvíle objevení Pluta, které dostalo jméno Quaoar podle indiánského boha. Quaoar je o něco větší než Ceres a velikostí se zhruba vyrovná Charonu. Obíhá zhruba po kruhové dráze, takže se občas dostává do větší blízkosti Slunce než excentrický Pluto. Kdyby se v Kuiperově pásu časem našlo jedno či více těles srovnatelných s Plutem, měl by asi Pluto podobný osud jako Ceres a byl by časem zařazen mezi transneptunické planety či kuiperoidy.

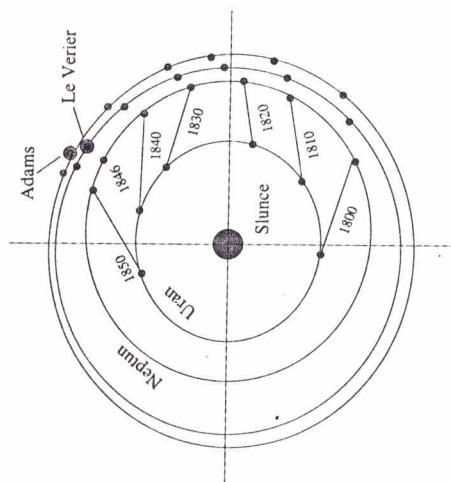
Pro úplnost bychom se měli zmínit i o planetě, která již dávno neexistuje, ale sehrála patrně v dějinách naší Země klíčovou roli. Vznik Měsíce dnes astronomové všeobecně připisují srážce Země s planetou velikosti Marsu, k níž došlo v době, kdy byla Země ještě velmi mladá, tj. asi před čtyřmi miliardami let. Před časem se uvažovalo i o dalším tělesu, které mohlo ovlivňovat osudy Země. Dostalo proto jméno božné pomsty Nemesis. Šlo by o menší vyhaslou hvězdu než o planetu. Nemesis měla být vzdáleným souputníkem našeho Slunce s velmi výstřednou dráhou. V době největšího přiblížení k Slunci by Nemesis narušila oblak komet, který Slunce ve velké vzdálenosti obklopuje, komety by se ve větším počtu přiblížily k Slunci a některé z nich by se srazily se Zemí, což by mohlo vysvětlit vymírání druhů, k němuž podle paleontologů v určitých obdobích docházelo. Dnes se však již hypotéza o existenci Nemesis nepovažuje za pravděpodobnou.

### Planety jiných sluncí

Posluchačky starého učeného žabáka v Nerudových *Písničkách kosmických* nejvíce zajímalo, zda jsou někde ve vesmíru také žaby. Na úrovni tehdejších vědomostí jim žabák nemohl říci ani to, zda je někde mimo sluneční soustavu aspoň jediná planeta. Tato situace trvala ještě přes skoro celé dvacáté století a změnila se teprve v jeho posledním desetiletí, kdy byly ohlášeny a spolehlivě potvrzeny první objevy planet u jiných hvězd. Od té doby se výzkum rychle vyvíjel a dnes už je známo asi sto exoplanet. Někdy jde i o více planet u jediné hvězdy. Jak se na ně přišlo? Odražené světlo planet je příliš slabé, než aby mohlo být z obrovské vzdálenosti zachyceno. Od nejbližší hvězdy Proxima Centauri by se Jupiter jevil jako hvězdička 22 velikosti, navíc zcela přесvícená Sluncem. Přítomnost planety je však možno zjistit z jejího vlivu na mateřskou hvězdu v podstatě třemi způsoby. Za prvé planeta působí pohyb hvězdy kolem společného těžiště. Pokud se tím hvězda střídavě pohybuje od nás a k nám, mění se Dopplerovým jevem frekvence (a tedy poloha spektrálních čar) jí vyslaného světla. Za druhé se nepatrně mění také poloha hvězdy na

obloze. Má-li hvězda vlastní pozorovatelný pohyb, nebude vlivem planety zcela přímočarý. Konečně se též může stát, že planeta nám dočasně zastíní hvězdu a zeslabuje tak periodicky její svět.

Všechny uvedené způsoby zjišťování neviditelných průvodců hvězd se již dlouho s úspěchem používají. Proměnnost svitu hvězdy Algol v souhvězdí Persea, způsobená zákryty, byla známa již ve starověku a snad jí hvězda dokonce vděčí za své jméno, které znamená v arabštině „džebel“. Roku 1844 objevil Friedrich Wilhelm Bessel nepravidelnost pohybu jasných hvězd Sírta ve Velkém psu a Procyonu u Sírta r. 1862 a u Procyonu r. 1896. Donedávna však bylo možno zjistit jen masivní průvodce, kteří jsou sami hvězdami, byť třeba již vyhasínajícími. Jak obtížné je takto objevit planetu, ukazuje příklad, který jsem našel v knize Josefa Šadila *Planety*. Kdybychom chtěli prokázat vliv planety Jupiter ze vzdálenosti 30 světelných roků od Slunce, museli bychom buď zjistit odchylku Slunce od přímočarého pohybu, která činí maximálně pět desetitisícin úhlové sekundy, nebo posun spektra odpovídající změně jeho rychlosti v rozmezí asi 10 metrů za sekundu (obojí v peri-odě oběhu Jupitera kolem Slunce, která činí asi 12 roků), popřípadě pokles jasnosti Slunce v době zákrytu asi o setinu hvězdné velikosti během zhruba jednoho dne. Přesto pokrok pozorovací techniky vedl k tomu, že dnes je možné dostatečně velké planety, „jupitery“, u řady hvězd detekovat. V řadě případů známe již rozložení a pohyb několika velkých těles planetárních systémů a můžeme se pokusit vypočítat, zda by v takovém systému mohla dlouhodobě existovat i planeta o parametrech podobných Zemi, jejíž vliv je zatím pozorování nedostupný. Výsledky výpočtů naznačují, že ve většině případů to možné je. Jak se tedy zdá, obytná místa pro „tvory jako my“ nabízí vesmír v dostatečném počtu.



Dráha a pohyb Uranu a Neptunu ve skutečnosti a podle výpočtů Adamse a Le Verriera.  
Z knihy: Pavel Koubský, *Planety naší sluneční soustavy*, Albatros, Praha 1988.

## FYZIKA V DĚJINÁCH

Prof. RNDr. Jan Novotný, CSc.

## IV. ČÁST: VELKÝ ROK 1905

(seriál na pokračování)

Na konci druhého tisíciletí začalo pro fyziku období výročí. Z hlediska přírody, kterou se fyzika zabývá, se toto konstatování může zdát malicherné – co záleží na tom, že se roční období na nepatrné planetě vystřídala právě stokrát? Lidský obyčej připomínat si okrouhlá výročí je přesto užitečný – dává nám příležitost čas od času si připomenout činy našich předchůdců a jejich důsledky pro dnešek. S „vědeckými“ výročími bývají obvykle spojena mezinárodní setkání odborníků, která mohou vést k výměně informací, navázání spolupráce a přispět tak k novým výsledkům, jež budou jednou také stát za vzpomínku.

Série výročí, do níž jsme vstoupili, nám připomíná, že největší převrat ve fyzice od dob Galileiho a Newtona se uskutečnil během asi třiceti let. V sedmnáctém století fyzika v pravém slova smyslu vznikla, v prvních desetiletích dvacátého století prošla první komplexní přestavbou. Zrodila se speciální a obecná teorie relativity, kvantová teorie a započalo jejich vzájemné sblížení. Současně se rozšířily obzory pro pozorovatele, a to směrem do mikrosvěta i do vesmíru. Přehled velkých okamžiků fyziky bychom mohli začít objevy, kterým přálo štěstí, přestože nebyly založeny na teoretických předpovědích. Roku 1895 Wilhelm Conrad Röntgen objevil záření, nazvané později jeho jménem. I když se časem ukázalo, že jde o elektromagnetické záření s vysokou frekvencí, jeho úloha pro pokrok fyziky mikrosvěta je neocenitelná. O rok později Henri Becquerel náhodně objevil radioaktivitu. Na jeho objev navázali manželé Curieovi, kteří roku 1898 našli dosud neznámé radioaktivní prvky, či Ernest Rutherford, který téhož roku rozlišil radioaktivní záření alfa a beta. Otevřela se tak cesta do světa atomového jádra a jeho přeměn. V roce 1897 Joseph John Thomson ukázal, že katodové záření je proudem částic o přesně daném poměru hmotnosti a elektrického náboje, což znamenalo objev první elementární částice – elektronu. Nejvýznamnějším krokem v oblasti teorie bylo roku 1900 Planckovo vysvětlení spektrálního složení záření černého tělesa na základě předpokladu, že atomy vysílají a pohlcují energii pouze v určitých kvantech, jejichž velikost závisí na frekvenci. Tak se začal tvořit jeden ze dvou pilířů poznávání mikrosvěta – kvantová teorie. Jeho budování výrazněji postoupilo roku 1905, kdy byl v daleko ucelenější podobě vztyčen druhý pilíř – speciální teorie relativity.

Obojí zásluha náleží téměř člověku, tehdy sedmadvacetiletému expertu Švýcarského úřadu pro duševní vlastnictví v Bernu Albertu Einsteinovi.

## Einstein v Bernu

Ve srovnání s jinými velkými fyziky 20. století je začátek Einsteinovy vědecké dráhy poněkud neobvyklý. V té době byla soustava vysokých škol a vědeckých ústavů v Evropě již natolik rozvinutá,

že zpravidla bez komplikací navedla mimořádně nadané lidi na jejich životní dráhu. U Einsteina tomu bylo jinak. Jeho poněkud rebelantská povaha vedla k tomu, že neukončil gymnázium v Mnichově a neucelené vzdělání mu nedovolilo úspěšně vykonat přijímací zkoušky na Polytechniku v Curychu. Maturitu složil teprve jako dvacetiletý. Tri roky nato, v roce 1899, byl již absolventem Polytechniky, nezískal si však přízeň svých učitelů a jeho snaha najít místo spojené s možností vědecké práce byla neúspěšná. Teprve koncem dalšího roku zakotvil v již zmíněné instituci, která byla fakticky patentním úřadem.

Čtenáři mi jistě dovolí osobní vzpomínku. Asi před deseti lety jsem byl na stáži na univerzitě v Bernu a chodil jsem občas odesílat z pošty dopisy domů. Do budovy jsem vždy vstupoval s velkou úctou – právě tam byl kdysi úřad, ve kterém se Einstein věnoval posuzování patentů. Měl i technický talent a sám se několikrát podílel na návrzích přístrojů a experimentů. Jeho posudky byly zřejmě kvalitní a je škoda, že byly později skartovány. Stále intenzivněji se však zabýval fyzikálními problémy. Četl špičkové odborné časopisy i knihy klasiků. V Bernu bylo ovšem těžké najít partnery, kteří by byli schopni jeho myšlenky sledovat. Se dvěma přáteli stejného věku založil „Akademii Olympia“, která se scházela k večeru a k debatám. Schůzkám bývala přítomna též Einsteinova žena Mileva, jež se s ním poprvé setkala jako studentka Polytechniky. Za svého pobytu v Bernu jsem viděl divadelní zpracování schůzek Olympie, které bylo velmi vtipně uděláno – místo aby herci jen mluvili o chování světa, zapalovali svíčky a pobíhali s nimi. Ve skutečnosti ale byly debaty Olympie věnovány hlavně filosofickým problémům. Jak se zdá, jediným člověkem, který Einsteinovy myšlenky pochopil a dovedl pomoci při jejich rozvíjení, byl inženýr Michele Angelo Besso. Pouze s jeho jménem se setkám v poděkování za pomoc v závěru Einsteinovy nejslavnější práce.

Může snadno vzniknout dojem, že Einstein se náhle objevil na vědeckém nebi jako zářivý meteor. Není to však docela pravda. Od roku 1901 publikoval v časopise *Annalen der Physik*, který patřil k nejlepším světovým periodikům. Během čtyř let mu tam otištěli pět prací, jež se zabývaly problémy molekulární fyziky, termodynamiky a statistické fyziky. Některé Einsteinovy výsledky byly hodnotné, získal je však už dříve Američan Joshua Willard Gibbs. Do dějin fyziky se Einstein nesmazatelně zapsal teprve roku 1905, kdy mu v *Annalen* vyšly čtyři práce.

### Vznik a zánik světla

První slavná Einsteinova práce byla přijata do tisku (z hlediska případného uznání priority se toto datum považuje za důležitější než datum uveřejnění) 18. března 1905. Pro rané Einsteinovy články je příznačná důkladnost a zároveň nenápadnost názvu – uvedne jej proto v němčině: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (O jednom heuristickém hledisku vztahujícím se ke vzniku a přeměně světla).

V úvodu Einstein vystihuje současný rozporný stav fyziky a nabízí východisko: *Mezi teoretickými představami fyziků o plynech či jiných vážitelných tělesech a mazwellovskou teorií elektromagnetických procesů v tzv. prázdném prostoru je hluboký formální rozdí. [...] Podle Maxwellovy teorie musí ve všech elektromagnetických a tedy i světelných jevech považovat energii za veličinu, která je spojitě rozložena v prostoru, zatímco energie vážitelného tělesa se podle soudobých fyzikálních představ skládá z energie atomů a elektronů. [...] Já si však myslím, že pokusy týkající se „záření černého tělesa“, fotoluminiscence, vzniku katodových paprsků při ozáření ultrafialovými paprsky i dalších skupin jevů spojených se vznikem a přeměnou světla se nejlépe vysvětlí předpokladem, že energie světla je v prostoru rozložena diskrétně.*

Einstein využívá svých hlubokých znalostí termodynamiky a statistické fyziky, aby ukázal, že Planckovy představy o kvantování energie atomů lze plně rozšířit i na světlo. Jeho práce znamená počátek kvantové teorie záření. Je v ní vysvětlen fotoelektrický jev. Zmíňme se stručně o jeho historii: Heinrich Hertz pozoroval roku 1888, že jiskrový výboj mezi elektrodami zesílí, dopadá-li na ně ultrafialové záření. Již zmíněný J. J. Thomson ukázal, že je to způsobeno vyražením elektronů z látky – tyto elektrony přebírají energii dopadajícího záření. Einstein se ve své práci dovolává soustavných pokusů, které provedl Philipp Lenard. (Týž Lenard se později stal horlivým odpůrcem teorie relativity a spojoval své útoky s prosazováním „německé fyziky“ a kritikou „židovského ducha“, který se údajně v Einsteinově díle projevuje.) Ocitujme alespoň Einsteinův závěr:

Jestliže každé kvantum budícího světla předává svou energii elektronům nezávisle na všech ostatních kvantech, pak rozdělení elektronů podle rychlosti, tj. vlastnost vzniklých katodových paprsků, nemůže záviset na intenzitě budícího světla; na druhé straně množství elektronů opouštějících těleso musí být při jinak stejných podmínkách úměrné intenzitě budícího světla.

Předešlím za tuto práci a některé další příspěvky ke kvantové teorii záření a hmoty dostal Einstein roku 1921 Nobelovu cenu. Nikdy ji nedostal za speciální ani za obecnou teorii relativity (i když později řada fyziků byla za jejich využití v mikrosvětě či v astronomii Nobelovou cenou odměněna). V roce 1921 byla ještě teorie relativity vnímána jako příliš revoluční a nedostatečně ověřená. Potom se však ukázalo, že kvantová revoluce znamená zásadnější krok za hranice klasických představ než revoluce relativistická, a ani sám Einstein nebyl ochoten se s jeho důsledky smířit.

### Všechno je v pohybu

Další Einsteinova závažná práce byla přijata v *Annalen* 11. května 1905. Jmenuje se *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen* (O pohybu částic vzájemně se nepohyblivé kapaliny, který vyplývá z molekulární kinetické teorie tepla).

Práce bývá obvykle stručně charakterizována jako vysvětlení Brownova pohybu. Einstein sám říká: *V této práci bude ukázáno, že podle molekulární kinetické teorie tepla tělesa mikroskopických rozměrů vznášející se v kapalině se musejí pohybovat natolik výrazně, že to lze snadno zjistit pod mikroskopem. Je možné, že diskutované jevy jsou totožné s tzv. brownovským molekulárním pohybem; avšak údaje, které jsou mi o této věci dostupné, nejsou natolik přesné, abych si o tom mohl učinit určitý názor.* O rok později je již Einstein zasluhou kolegů lépe informován a další práci na stejné téma nazývá *K teorii Brownova pohybu*.

Zmíněný jev je pojmenován podle botanika Roberta Browna, který roku 1827 pozoroval a popsal, že pylová zrnka se v kapalině chaoticky pohybují. Postupně bylo zjištěno, že příslušnému pohybu podléhají jakákoliv malá tělíska a že se se zmenšováním jejich rozměrů stává výraznějším. Koncem 19. století byl vícekrát vysloven předpoklad, že se tak děje pod vlivem nárazů molekul kapaliny. Einstein byl však první, kdo podal matematickou teorii jevu a ukázal, že je možno jej využít k určení rozměrů molekul. Na jeho práci navázala řada dalších badatelů, zejména Jean Perrin a „otec kybernetiky“ Norbert Wiener. Řadu pěkných simulací Brownova pohybu může zájemce najít na Internetu.

### Tricet stránek, které otlásky fyzikou

Nejobsáhlejší Einsteinova práce z roku 1905 byla dána do tisku 30. června 1905. Nese zcela ne nápadný název *Zur Elektrodynamik der bewegten Körper* (K elektrodynamice pohybujících se těles). Smysl práce lze nejlépe vystihnout Einsteinovými vlastními slovy:

*Je známo, že Maxwellova elektrodynamika ve své současné podobě vede při aplikaci na pohybující se tělesa k asymetrii, jež patří ne k vlastní samotným jevům. Připomeneme například elektromagnetické působení mezi magnetem a vodičem, kterým protéká proud. Pozorovaný jev zde závisí pouze na relativním pohybu vodiče a magnetu, zatímco podle obvyklých představ představuje případ, kdy se pohybuje jedno či druhé těleso, je nutno přísně rozlišovat. [...] Takovéto příklady, stejně jako neúspěšné pokusy odhalit pohyb Země vůči „světelnosnému prostředí“, vedou k předpokladu, že nejenom v mechanice, ale ani v elektrodynamice žádné vlastnosti jevů neodpovídají pojmu absolutního klidu, a dokonce k předpokladu, že pro všechny souřadnicové soustavy, pro něž platí rovnice mechaniky, platí i stejné elektromagnetické a optické zákony, jak už je to dokázáno pro jevy prvního řádu<sup>1</sup>. Tento předpoklad (jehož obsah bude v dalším nazýván „principem relativity“), jsme odhodlali změnit v postulát a doplnit jej navíc přidáním rychlosti  $c$ , která nezávisí na pohybovém stavu vyzařujícího tělesa.*

Abychom plně pochopili dosah a směrlost Einsteinových slov, musíme si stručně připomenout situaci, v níž byla pronesena. Od roku 1873, kdy James Clerk Maxwell formuloval rovnice elektromagnetického pole, slavila jeho teorie jeden úspěch za druhým. Ve své dané podobě tato teorie předpokládala existenci

<sup>1</sup> Jsou to jevy, v jejichž matematickém popisu se vyskytuje podíl  $\frac{v}{c}$  v první mocnině.

jakéhosi prostředí, nazývaného často éterem, v němž se šíří elektromagnetické vlny (úejichž druhem je i viditelné světlo) ve všech směrech stejnou rychlostí. Zdálo by se tedy, že přesná měření rychlosti světla umožní zjistit, jakou rychlostí se pohybuje Země, na níž je instalováno měřicí zařízení, vůči éteru. I kdyby se snad právě nepohybovala v okamžiku měření, muselo by se to díky jejímu oběhu kolem Slunce v průběhu roku změnit. Experimenty, zejména slavný pokus Michelsona a Morleyho, však tomuto závěru odporovaly. Řada velkých fyziků (Joseph Larmor, Hendrik Antoon Lorentz, George Fitzgerald, Henri Poincaré) se po léta snažila rozpor mezi teorií a experimentem odstranit. Zkoumali důsledky Maxwellovy teorie pro chování hmoty a dospívali k závěru, že rychlý pohyb těles vůči éteru má za následek zkracování jejich rozměrů a prodlužování period fyzikálních procesů, čímž se pohyb vůči éteru „maskuje“ tak, že jej v rámci přesnosti měření nelze zjistit (Poincaré dokonce roku 1905 dospěl k názoru, že jej nelze zjistit vůbec). Krůček po krůčku se tak blížili rozpletení gordického uzlu, který Einstein svými postuláty naráz odstranil.

K tomu ovšem musel odstranit „zdaňlivý rozpor“, o němž se v úvodu svého článku zmiňuje. Představme si, že uprostřed nástupiště rozsvítíme světlo přesně ve chvíli, kdy tudy projíždí střed vagonu. Světlo dospěje současně na oba konce nástupiště, může však současně dospět také na oba konce vagonu, když ten se vůči nástupišti pohybuje, na jednom konci světlo utíká a na druhém mu jede vstříc? Je to možné, ale jen v případě, že události současně z hlediska pozorovatelů vagonu nejsou současně z hlediska pozorovatelů na nástupišti. Einstein tak musel sáhnout na základní vlastnosti času – a v souvislosti s tím i prostoru – které byly do té doby považovány za nezpochybnitelné a vlastně se ani nepředpokládalo, že by o nich fyzika mohla říci něco nového.

Rozpor mezi Maxwellovou teorií a experimenty se tím naráz vyjasnil a odstranil – Maxwellovy rovnice platí ve stejné podobě ve všech inerciálních soustavách (tj. soustavách, v nichž platí první Newtonův zákon a které se navzájem pohybují rovnoměrně a přímočaře), a tedy i rychlost světla je ve všech takových soustavách stejná – je jen třeba přepočítávat hodnoty fyzikálních veličin počínaje souřadnicemi a časem z jedné soustavy do druhé jinak, než se to dělalo dosud. Jako by Maxwell našel správný klíč, ale jeho následovníci se jej marně pokoušeli zasunout do dveří pod nesprávným úhlem.

První Einsteinova práce obsahuje skoro vše, co se dnes dočteme ve stručnějších výkladech (speciální teorie relativity. Za zmínku stojí, že je zde v několika větách popsán i později dlouze rozebíraný paradox hodin – hodiny, které absolvovaly kruhový oběh, ukáží menší čas než hodiny, které zůstaly na místě. Roku 1905 stačil Einstein doplnit svá zkoumání ještě krátkou prací *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?* (Závisí setrvačnost tělesa na jeho energetickém obsahu?), jejíž důležitost je patrná ze závěrečných slov: *Hmotnost tělesa je mírou energie, která je v něm obsažena; změní-li se energie o veličinu  $L$ , změní se hmotnost o odpovídající veličinu  $L/(9 \cdot 10^{20})$ , přičemž energie se zde udává v ercích a hmotnost v gramech. Není vyloučeno, že teorii se podaří prověřit pro látky, jejichž energie se výrazněji mění (například pro solá radia). Odpovídá-li teorie faktům, znamená to, že záření přenáší setrvačnost mezi vyzařujícími a pohlcujícími tělesy.*

I když Einstein v úvodu ke své práci vztahuje princip relativity pouze na mechaniku a elektrodynamiku, bylo mu jasné, že by měl platit pro všechny fyzikální jevy. Názvu „teorie relativity“, který se mezitím vžil, užil až ve své přednášce roku 1911. V té době se však ještě zdálo být pravděpodobné, že pro vysvětlení stavby mikrosvéta postačí elektromagnetické působení. Jedinou další interakcí, jejíž zákony by bylo třeba vtělit do nové teorie, byla gravitace. Odtud vyplynul Einsteinův zájem o gravitaci, datující se od roku 1907, který změnil směr jeho vědecké dráhy. Od světa malých rozměrů, jenž dominoval první fázi jeho tvorby, se postupně obrátil ke planetám, hvězdám a vesmíru. Ukázalo se, že pro to nestačí uvažovat jen o inerciálních vztažných soustavách. V souvislosti s tím začal Einstein rozlišovat speciální (týkající se jen inerciálních soustav) a obecnou teorii relativity. Ukázalo se však, že rozdíl mezi speciální a obecnou relativitou je hlubší – gravitace je projevem zakřivení prostoru a času, o němž se ve speciální teorii relativity ještě neuvažuje. Vylíčení Einsteinovy cesty k obecné teorii relativity by si ovšem žádalo zvláštní článek.

Na závěr bych čtenáře rád upozornil na knihu Albrechta Fölsinga *Albert Einstein*, jejíž český překlad vydalo nakladatelství *Vátoz Globalator* roku 2001 a která mu poskytne podrobnější informace o životě, číle i názorech velkého vědce a myslitele.