

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Imrich Staríček

Prednewtonovská mechanika

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 32 (1987), No. 2, 57--66

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138723>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1987

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Prednewtonovská mechanika

Imrich Stariček, Bratislava

I. ČASŤ: POZEMSKÁ MECHANIKA

1. Úvod

Newtonova mechanika, ktorej tristo výročie [1] je pred dvermi, je aj dnes základom nášho fyzikálneho obrazu sveta, s ktorým sa už ako žiaci základných škôl dôverne oboznamujeme. Časť fyziky, postavená na princípoch Newtonovej mechaniky, dodnes uspokojivo objasňuje a opisuje celý rad prírodných javov a zákonitostí, s ktorými sa stretávame v každodennom živote i v technickej praxi. Námiety proti klasickej fyzike kladené najmä z radov fyzikov-teoretikov zaoberajúcich sa teóriou relativity a kvantovou teóriou ochotne prehladame v každodennom živote, akoby pochádzali z celkom iného sveta ako je svet bežných skúseností a názorných predstáv. Intuitívne vedomie vlastnej vnútornej jednoty fyzikálneho diania nás však nutí zamýšľať sa nad kritikou klasickej fyziky a obracia našu pozornosť na fyzikálne pozadie v dobe zrodu klasickej fyziky a na teoretickú stránku jej základných pojmov a princípov.

Základné pojmy klasickej fyziky, ako čas, priestor, hmotnosť, hybnosť, sila, sú v nás vžitá tak, že sú samozrejme aj v bežnej hovorovej reči. Ak sa však ako fyzici chceme nad nimi zamýšľať kriticky, nemôžeme obísť otázku: Ako vôbec došlo k ustáleniu pojmovej a teoretickej štruktúry klasickej mechaniky a ako to vyzeralo vlastne s fyzikou pred Newtonom? Z akých premis Newton vychádzal a čím spôsobil zlom v predchádzajúcom vývoji fyziky? Táto dnes ožívajúca problematika bola však donedávna zanedbávaná, lebo kým sa fyzikom darilo riešiť všetky problémy v rámci klasickej fyziky, nik si nekládol otázku, prečo je tomu tak a či by tomu nemohlo byť aj ináč. V článku sa podáva stručný obraz najdôležitejších etáp vývoja fyzikálneho myslenia od prvých historicky doložených začiatkov až po generáciu, v ktorej vyrastal Newton. Okrem toho sa v článku objasňujú podnety Newtona k vybudovaniu jeho mechaniky.

2. Aristotelovská mechanika

Celá prednewtonovská koncepcia fyziky sa vyvíjala v tieni Aristotelovej filozofie a fyziky, ktoré tvorili nepostradateľnú časť učiva na všetkých univerzitách v Európe ešte v dobách Galileiho a Newtona. Mechanika Aristotela bola len malou časťou jeho fyziky [2]. Aristoteles chápal fyziku ako náuku o hmotnom súcne a jeho zmenách. Zmeny uvádzané vo fyzike zatriedil do štyroch skupín: 1. Substanciálne (látkové); 2. Kvalitatívne (zhruba zmeny vnímaných vlastností); 3. Kvantitatívne (zmeny veľkosti a množstva určované číselne) a 4. Zmeny miesta nazývané i miestnym pohybom. Táto zmena zodpovedá dnešnému chápaniu pohybu vo fyzike. Aristoteles všetky štyri zmeny nazýval pohybom. Ku kvalitatívnym zmenám počítal aj všetky prejavy života.

Aristoteles rozlišoval dva druhy miestnych pohybov, pohyby prirodzené, ktoré prebiehajú bez akéhokolvek vonkajšieho podnetu spontánne, a pohyby vynútené, na ktorých vznik a udržiavanie je potrebný stály vonkajší podnet. Aristoteles podľa svojich predchodcov, najmä filozofa Platóna [3] prísne rozlišoval pozemskú a nadzemskú (nebeskú) oblasť prírodných javov a pohybov [4]. Všetky pozemské telesá sa podľa neho skladajú zo štyroch živlov: zeme, vody, vzduchu a ohňa. Tieto živly nezodpovedajú našim látkovým predstavám, ale každý živel bol nositeľom dvoch vlastností, a to: chladna a sucha (zem), chladna a vlhka (voda), tepla a sucha (oheň) a tepla a vlhka (vzduch). Pre potreby mechaniky, t. j. Aristotelovho miestneho pohybu, stačí uviesť, že uvedené živly dodávali jednotlivým telesám ťažkosť, ktorá spôsobovala ich pád, alebo ľahkosť, ktorá spôsobovala ich stúpanie nahor. Pád i stúpanie považoval Aristoteles za jediné prirodzené pozemské pohyby. Všetky ostatné pohyby na zemi, ako pohyb vrhutej strely alebo roztočeného kolesa považoval za vynútené. Aristoteles nepoznal zotrvačnosť a preto aj rovnomerný priamočarý pohyb pokladal za vynútený. Udržiavanie telesa vo vzduchu pri vrhu alebo zrýchlenie padajúceho telesa vysvetľoval Aristoteles pôsobením okolného prostredia, ako je tlačenie vzduchu zo zadu. Pohyb bez priameho podnetu prostredia je nemožný, a preto vákuum nemôže existovať. Každé prostredie však kladie proti pohybu odpor, a preto vynútené pohyby nemôžu byť večné. Ťažké telesá padajú podľa Aristotela rýchlejšie ako ľahšie. Aristotelova fyzika nepoznala experiment a opierala sa iba o pozorovania, ktoré boli často veľmi povrchné.

Už v tomto náčrte Aristotelovej mechaniky vidíme jej mnohé chyby a protirečenia, ktoré bolo potrebné postupne odstraňovať: To však bol veľmi ťažký problém, pretože stredoveká mohamedánska i kresťanská teológia (scholastika) nadväzovali na Aristotelovu filozófiu, aj keď mnohé z jej téz neprevzali, prípadne deformovali. Aristotelovu autoritu v prevzatých tézach chránila cirkevná vrchnosť podporovaná štátnou autoritou, a to aj súdnymi sankciami (inkvizícia).

Stálice, Slnko, Mesiac i planéty boli podľa Aristotela upevnené na guľových nebeských sférach a tie sa otáčali pravidelným pohybom okolo Zeme, ktorá ležala v strede všetkých sfér. Pohyby nebeských sfér boli tiež prirodzené. Prebiehali rovnomerne po kružniciach, spontánne a nerušené žiadnymi pozemskými vplyvmi. Boli výrazom dokonalosti nebeských sfér a boli večné. Že hviezdy ani nepadali ani nestúpali sa vysvetľovalo tým, že sa skladajú zo zvláštneho piateho živlu nazývaného éter a ten bol nevážiteľnou substanciou. Isté nezrovnalosti v kruhových pohyboch planét, ako bol ich spätný (retrográdny) pohyb, sa vysvetľovali pohybom po zvláštnych kruhových dráhach: epicykloch (kružniciach, ktorých stredu sa pohybujú rovnomerne po iných kružniciach), excentroch (excentricky uložených kružníc) a ekvantov (kružníc, do ktorých sa nerovnomerný pohyb planét premieta ako rovnomerný). Astronóm Ptolemaios zosúladiť po Aristotelovi všetky tieto kruhové dráhy (ktorých bolo vyše dvesto) s presnými meraniami svojho predchodcu Hipparcha. Vybudoval takto sústavu kruhových dráh nebeských telies, ktorej stredom bola Zem a ktorú dodnes nazývame Ptolemaiovou sústavou [5, 6]. Tá sa v stredoveku pokladala za súčasť aristotelovskej filozofie a požívala plnú ochranu u vrchnosti.

Po úpadku Athén prežívala aristotelovská fyzika veľký rozmach v starovekej Alexandrii, ktorá bola do ôsmeho storočia stredom svetovej vzdelanosti. Odtiaľ sa dostala

prostredníctvom Arabov do španielskej Cordóby a Sevilly, kam chodili aj európski učitelia študovať už pred založením európskych univerzít [7]. Preklady Aristotela a ostatných gréckych filozofov z arabštiny do latinčiny pripravovali od XII. storočia pôdu pre šírenie sa Aristotelovej filozofie a mechaniky na európskych univerzitách.

3. Začiatky mechaniky v Európe

Prvým aristotelovským mechanikom v Európe, ktorého spisy sa dodnes zachovali, je Jordanus Nemorarius [8]. Znáмым sa stal najmä tým, že zaviedol do mechaniky pojem ťažkosti podľa polohy. Všimol si, že keď dvíhame bremeno uložené na jednom konci ramena otáčaním ramena okolo jeho druhého konca potrebujeme vynaložiť menšiu námahu, keď je rameno v šikmej polohe, ako keď je v polohe vodorovnej. Ako aristotelik nepoznal ešte pojem tiaže ako sily, ani moment sily, a preto tvrdil, že ťažkosť telesa závisí od sklonu podložky, na ktorej je teleso uložené. Jeho ťažkosť podľa polohy je prvým európskym pojmom v mechanike, ktorý poznáme. Jordanus správne vypočítal podmienku rovnováhy na naklonenej rovine [8, 9]. Jeho dôkaz zodpovedá princípu virtuálnej práce.

Aristotelovu predstavu, že vrhnutá guľa je udržiavaná vo svojom pohybe prúdením okolného vzduchu, ostro napadol Ján Buridan (Bürden), rektor parížskej Sorbonny. Buridan tvrdil, že vrhnutá strela dostáva pri vymrštení akýsi popud, ktorý nazval impetus, a ten udržiava strelu ďalej v šikmom priamočarom pohybe. Proti impetusu však pôsobí aristotelovský odpor prostredia, ktorý rastie, postupne premáha impetus a keď ho premôže, strela prestane stúpať a padne prirodzeným pohybom na zem. Dráha strely je podľa Buridana sledom dvoch priamočarých pohybov: šikmého a zvislého.

Mechanika aristotelikov v Európe mala do štrnásteho storočia, vrátane Jordanusa a Buridana, špekulatívny charakter. Nešlo jej o riešenie konkrétnych úloh z mechaniky, ale o komentovanie, prípadne dopĺňanie Aristotela. Jej hypotézy, či už intuitívne alebo dedukované z filozofických úvah (napríklad, že dokonalosť kruhovej dráhy na oblohe nevyžaduje vonkajší podnet na jej udržanie), neboli overované experimentami.

V pätnástom storočí sa našli a publikovali Archimedove spisy o mechanike. Ich vplyv na európskych učencov znamená rozmach mechaniky v Európe, v ktorom sa venuje omnoho viacej pozornosti skutočnému priebehu mechanických pohybov. Archimedes zo Syrakúz, zakladateľ starogréckej statiky a hydrostatiky (Archimedov zákon), riešil celý rad konkrétnych problémov pri stavbe budov, opevnení, lodí i vrhačov striel, spojených s premáhaním ťažkých bremien. Od Archimeda poznáme podmienky rovnováhy na páke, kladke, naklonenej rovine, hriadeli a ostatných jednoduchých strojoch. Archimedes pracuje s presne vymedzenými fyzikálnymi pojmami: meria, váži, počíta.

Európskych mechanikov šesťnásteho storočia, ktorí popri svojom aristotelovskoscholastickom vzdelaní poznali aj Archimedove práce z mechaniky, môžeme pokladať za predchodcov Galilea Galileiho. K najznámejším predchodcom Galileiho patria Tartaglia, Cardano a Benedetti [8, 10]. Tartaglia upresnil Buridanovu teóriu šikmého vrhu, ktorý je podľa neho po celej dráhe krivočiary. Cardano zaviedol do mechaniky pojem momentu sily. Benedetti odmietol Aristotelovu ľahkosť a nahradil ju vznášaním

podľa Archimedovho zákona. Odmietol Jordanovu ťažkosť podľa polohy. Prvý uvádza, že kameň v roztočenom praku má tendenciu odletieť vo smere dotýčnice. Rovnováhu na roztočenom vlčíku, s ktorou si aristotelici nevedeli rady (ako sa tu má uplatniť vplyv prostredia na udržanie rotačného pohybu?) vysvetľoval práve tendenciou častíc odletieť vo smeru dotýčnice. Benedetti robil aj pokusy s voľným pádom z veže, ktoré sa neskôr nepodložene pripisovali Galileimu. Benedetti bol najvážnejším predchodcom Galileiho. Galileo Galilei jeho mechaniku veľmi pečlivo študoval. Galileiho učiteľom fyziky v Pise bol Guido Ubaldo, ktorý odmietal Jordanovu predstavu ťažkosti podľa polohy a tvrdil, že teleso má vždy tú istú ťažkosť, ale reakcia podložky ju môže v rôznych polohách meniť. Spomínaní predchodcovia Galileiho boli odchovancami Aristotelovej fyziky a okrem správnych nových ideí stretávame v ich mechanikách celý rad nesprávnych úvah, ktoré vyžadovali ďalšie vysvetlenia.

4. Mechanika Galileiho a Huygensa

Galileo Galilei sa narodil v Pise a tam aj začal študovať medicínu. Pre svoj mimoriadny záujem o mechaniku nedošťudoval medicínu, ale stal sa učiteľom matematiky v Pise a neskôr v Padove. Verejnosť upozornil na seba svojím prvým hviezdárskym ďalekohľadom, keď objavil mesiace Jupitera, fázy Venuše a hory na Mesiaci. Povzbudený touto pozornosťou odvážil sa hlásať Koperníkov heliocentrický systém vo svojom spise *Dialogo* ... [11]. Bol za to inkvizíciou internovaný v domácom väzení s nepatrnými kontaktami s vonkajším svetom [12, 13]. V ňom dopísal svoje hlavné dielo z mechaniky: *Discorsi* ... [14, 15]. Dielo sa mu podarilo prepašovať a vyšlo v Holandsku r. 1638. Z dnešného hľadiska môžeme povedať, že mechanikou tu Galilei rozumel statiku a miestnym pohybom kinematiku. Toto životné dielo Galileiho shrňuje všetky jeho predchádzajúce práce o mechanike.

Už ako študent sa Galilei staval proti Aristotelovej téze, že ťažšie telesá padajú rýchlejšie ako ľahšie. Za tým účelom robil veľmi prísne experimenty s kotúľaním sa gule po naklonenej rovine, ktoré pokladal za spomalený priebeh voľného pádu [10] a experimenty s kyvadlom, ktoré pokladal za sled po sebe naklonených rovín. Príčinou pádu bola podľa Galileiho aristotelovská ťažkosť telesa. O gravitačnej príťažlivosti nemal ani tušenie. Ťažším problémom pre neho bolo, prečo teleso pod vplyvom rovnakej ťažkosti zvyšuje svoju rýchlosť. Tu si pomáhal Buridanovou predstavou impetusu. Ťažkosť telesa dodá telesu istý impetus a ten mu dá istú rýchlosť. To sa rýchlo za sebou opakuje a nový prírastok rýchlosti sa pridáva ku starému, a preto výsledná rýchlosť neustále rastie. Galilei uvažoval pritom diskkrétne impulzy idúce rýchle za sebou. Integráciu ešte nepoznal. Preto jeho výklad má iba kvalitatívny charakter. Galileiho nezaujímal dynamická stránka pohybu, t. j. vzťah impetusu a prírastku rýchlosti, lebo k tomu nemal experiment. Jeho zaujímal iba kinematická stránka, t. j. časový priebeh pohybu [16]. Na vysvetlenie tejto stránky sa Galilei po istom váhaní rozhodol predpokladať, že rýchlosť pri voľnom páde rastie úmerne s časom. Spočítaním jednotlivých prírastkov rýchlosti za veľmi krátke (jednotkové) intervaly zistil Galilei, že dráha voľného pádu musí byť úmerná štvorcovej dobe voľného pádu. A tento vzťah sa dal experimentálne overiť pomocou naklonenej

roviny. Galilei pri výpočte dráhy použil akúsi náhražku integrálneho počtu, lebo vypočítal dráhu z jej derivácie – rýchlosti, ale postupoval pritom iba intuitívne, z názoru, bez akéhokoľvek matematického zdôvodnenia. Galileiho postup v tomto špeciálnom prípade sa stal predvojom kvantitatívnej metódy vo fyzike, ktorá spočíva v zisťovaní súhlasu medzi hodnotami teoreticky vypočítanými a experimentálne zistenými. Pri spúšťaní gule z naklonenej roviny na vodorovnú stolnú dosku si Galilei všimol, že guľa sa pohybuje rovnomerne priamočiaro bez akéhokoľvek vonkajšieho popudu, čo je proti Aristotelovmu tvrdeniu, ale sám z toho nevyvodil zovšeobecňujúci uzáver. Významný je aj Galileiho prínos ku skladaniu pohybov – rovnomerného priamočarého s voľným pádom; pričom dokázal, že výsledná dráha musí byť parabola. Tým zaviedol do fyziky problém výpočtu geometrického tvaru dráhy, ako aj časového priebehu pohybu po tejto dráhe, a tým položil základy kinematiky.

V astronómii zaujímal Galileiho najviacej problém fyzikálneho dôkazu pohybu Zeme okolo vlastnej osi. Poukázal pritom na to, že v podpalubí lode tiež nemôžeme nijakým spôsobom zistiť, či je loď v pohybe alebo či sa pohybuje rovnomerne priamočiaro. To je vyjadrenie Galileiho princípu relativity.

Uvedené Galileiho mechanické predstavy a jeho kvantitatívnu metódu najdôkladnejšie rozpracoval a ďalej rozviedol Huygens [10, 17], ktorý prvý vypracoval na základe Galileiho štúdií o kyvadle teóriu kyvadlových hodín a tieto hodiny aj zhotovil. Pri štúdiu kruhového pohybu prvý odvodil vzorec pre veľkosť odstredivej sily, ktorý mal neskôr pre Newtona zásadnú dôležitosť. Huygens sa zaoberal aj problémom zrazu telies, ktorý viedol nakoniec k pojmu hybnosti, jedného zo základných pojmov Newtonovej mechaniky.

Od kvantitatívnych formulácií jednotlivých pohybov, ako to robili Galilei a Huygens, viedla k univerzálnym princípom mechaniky, tak ako ich formuloval Newton, ešte dlhá cesta. Tá sa však podstatne skrátila, keď sa nahliadlo, že večné a dokonalé kruhové pohyby nebeských telies treba skúmať obdobným spôsobom ako skúmame pohyby pozemských telies. K tomu prospelo štúdium kozmologických problémov, ktoré ukázalo, že zákony platné pre pohyby pozemských telies majú platiť aj v slnečnej sústave. Tým padla aj nepreklenuteľná priepasť, ktorú aristotelovská filozofia kladla medzi pozemské a nebeské javy.

II. ČASŤ: NEBESKÁ MECHANIKA

5. Kopernikova a Keplerova heliocentrická sústava

Ptolemaiova geocentrická slnečná sústava sa veľmi dobre osvedčovala pri astronomických výpočtoch polôh planét, zatmení a údajov potrebných na zostavovanie kalendárov po celý stredovek, ba aj v dobe astronóma Koperníka. Vyhovovala aj potrebám astrologov, ktorí slúžili na panovníckych dvoroch.

Už v staroveku sa však stretávame aj s inými modelmi vesmíru. Tak podľa pytagorejcov v strede vesmírnej gule nie je Zem, ale večný oheň, Slnko. Za predchodcu Koperníkovej heliocentrickej sústavy v starom Grécku pokladáme heliocentrickú sústavu Eratosthéna [6]. Starogrécki filozofi uvažovali aj model vesmíru, v strede ktorého leží

Zem, okolo ktorej sa otáča Slnko, ale planéty sa otáčajú okolo pohybujúceho sa Slnka. Tento model používal po Koperníkovi Tycho Brahe, lebo bol inkvizíciou prijateľný. Zem bola podľa neho v pokoji a to zodpovedalo doslovnému výkladu biblických textov.

Koperníkova heliocentrická sústava publikovaná v r. 1543 [18] znamenala síce veľký svetonázorový obrat v európskom myslení, ale pre samotnú fyziku neprinášala podstatne nič nového. Aj v Koperníkovej sústave je vesmír uzavretý do sféry stálic. Nič sa nezmenilo v éterickom zložení Slnka, hviezd a planéty sa aj v tejto sústave pohybovali vo sférach podobných Ptolemaiovým sféram. Neodstranili sa ani excentry, epicykly a ekvanty, iba ich ubudlo a výpočty dráh sa zjednodušili. Koperník si nekládol ani otázku, prečo nepozorujeme na Zemi jej vlastný pohyb, hoci jej rýchlosť okolo Slnka je obrovská.

Koperníkov model vesmírnej sústavy bol predložený verejnosti iba ako matematická hypotéza, a nie ako skutočnosť, a preto z počiatku ani zo strany inkvizície neboli proti nemu vznesené námietky až do doby Galileiho (r. 1616) [12], ktorý trval tvrdojšie na tom, že Zem sa v skutočnosti pohybuje a vo svojom *Dialogu* sa to pokúšal aj fyzikálne zdôvodniť pomocou prílivu a odlivu. Toto zdôvodnenie je však fyzikálne nesprávne. Správne vysvetlenie prílivu a odlivu podal až Newton pomocou gravitačného zákona [1]. Galilei zotrval na predstave guľového vesmíru a nevyšiel si ani dynamiku jeho pohybov. Z dôvodov dokonalosti kruhových dráh trval na kruhových dráhach nebeských telies. Preto zásadne odmietal Keplerove eliptické dráhy planét.

Podstatne nový fyzikálny obraz o slnečnej sústave nám poskytol Kepler troma zákonami, z ktorých prvé dva vyšli v jeho *Astronomia nova (Nová astronómia)* v Prahe r. 1609 a tretí v diele *Harmonices mundi (Harmónie sveta)* r. 1619. Kepler pôvodne vysvetľoval planetárnu sústavu v aristotelovských pojmoch a predstavách, ale už v Koperníkovej heliocentrickej sústave. Napríklad zákon plôch odvodil pomocou ekvantu a nie pre eliptickú dráhu a aj to len pre dva body dráhy planéty: perihélium a afélium. Dnešná formulácia jeho zákona plôch sa však vzťahuje na eliptické dráhy planét vypočítané z Newtonovho gravitačného zákona, teda pre každý bod dráhy [8].

Zákon eliptických dráh planét (t. j. prvý zákon Keplerov) Kepler nedokázal teoreticky, ale len zistil, že Tychonom Brahe namerané polohy Marsu neležia na kružnici, ale na elipse. To však bolo pre Keplera neprijemným prekvapením. Bol to koniec dokonalosti kruhových dráh nebeských telies! Aj tretí zákon Keplerov určujúci vzťah medzi obežnými dobami a polomermi dráh planét vypočítal Kepler iba z nameraných hodnôt za predpokladu kruhových dráh a nenašiel preň nijaké teoretické zdôvodnenie. Všetky tri Keplerove zákony výborne súhlasili s experimentami, ale ich teoretické zdôvodnenie bolo treba hľadať [20,21].

V duchu aristotelovskej filozofie Kepler už nemohol hovoriť o dokonalých kruhových dráhach zodpovedajúcich božej dokonalosti, ako tomu dosiaľ veril. Pohyb planét nemôže byť prirodzený, ako to tvrdil Aristoteles. Keďže tu ide o vynútený pohyb, je potrebné hľadať nejakú vonkajšiu príčinu, pre ktorú sa planéty udržujú vo svojom pohybe. Kepler sám sa pokúšal túto príčinu nájsť. Ovplyvnený filozofiou Mikuláša Kuzánskeho pripisoval najprv Slnku dušu, ktorá udržuje planéty na ich dráhach. Keď sa však dostal ku Gilbertovej knihe o magnetizme, ktorá vyšla r. 1600, začal analogicky uvažovať, že Slnko musí planéty priťahovať akousi magnetickou silou. Predstavoval si ju

tak, že Slnko vyžaruje okrem svetelných lúčov aj akési magnetické lúče, ktoré poháňajú planéty po ich dráhach. Z rovinného priebehu dráh planét usudzoval, že magnetické lúče sa šíria iba v jednej rovine a nie do celého priestoru, a preto magnetická sila musí klesať nepriamo úmerne so vzdialenosťou, čo však bola nesprávna úvaha, ktorá viedla k chybným výsledkom. Z obehu Mesiaca okolo Zeme usúdil, že aj Zem musí mať akýsi magnetizmus, z čoho viedol iba krôčik k prisudzovaniu magnetizmu všetkým planétam. Myšlienku všeobecnej príťažlivosti nájdeme teda zakotvenú už u Keplera [8, 20]. To však neznamená, že by Kepler objavil zákon všeobecnej príťažlivosti, lebo nevysvetlil, prečo magnetická sila spôsobuje, že dráhy planét sú eliptické a prečo sú obežné doby planét rôzne. Experimentálne však nebolo pochybnosti, že Keplerove zákony správne opisujú skutočnosť.

Kepler postavil celý fyzikálny svet pred nový fyzikálny problém: vysvetliť dráhy planét pozemsky prijateľnými zákonmi a nájsť fyzikálnu silu, ktorá riadi mechanizmus slnečnej sústavy. Francúzsky astronóm Boulliaud čoskoro dokázal, že tretí zákon Keplerov vyžaduje, aby príťažlivá sila Slnka klesala so štvorcom vzdialenosti, čo je správny výsledok [20]. Ale ani on nevedel dokázať, prečo dráha planéty musí byť eliptická. Púšťal sa do pochybných hypotéz, ktoré zmätky okolo slnečnej sústavy iba zvyšovali. Borelli [20] prirovnával kruhové pohyby uvažované Huygensom k planetárnym dráham a došiel k záveru, že sila pôsobiaca na planétu nemá smer dotyčnice ku dráhe, ale smeruje do stredu dráhy. Táto sila musí vyvažovať odstredivú silu pôsobiacu na planétu, ktorá je prejavom tendencie planéty pohybovať sa zotrvačnosťou vo smere dotyčnice k dráhe. Túto tendenciu pozoroval už pred Huygensom Benedetti. Ale ani z tejto bilancie príťažlivej a odstredivej sily pôsobiacej na planétu nevyvodil Borelli pohybový zákon, nevypočítal tvar dráhy planéty.

6. Descartovský prelom

Najvýznačnejší fyzici prednewtonovskej éry fyziky, ako Benedetti, Galilei a Huygens, sú pokračovateľmi aj archimedovskej tradície mechaniky, ktorá začína rozborom názorných pojmov statiky a neskôr aj kinematiky, najmä dĺžky, tiaže a času. Poznávajú ťah, tlak a zraz ako príčiny pohybu. Nimi objavené fyzikálne zákony majú bezprostredný vzťah ku konkrétnym poznatkom. Postupujú od vnímaných faktov v konkrétnych prípadoch, ale získané poznatky nezovšeobecňujú nad medze overiteľné experimentami. Pohyby nebeských telies zostávajú aj u nich v aristotelovskej sfére nevažiteľného éteru, v spleti ptolemaiovských či koperníkovských kruhových pohybov, ktoré si nevyžadujú žiadne dynamické vysvetlenie.

Tento archimedovsky podložený prúd fyzikálneho myslenia je stále ešte premiešavaný s aristotelovskými predstavami, s ktorými boli jednotlivci oboznámení už za svojich štúdií. Kritika aristotelovskej i scholastickej filozofie ich vedie stále viac do opozície voči Aristotelovi. Táto opozícia rástla aj u filozofov. K najväznejším oponentom aristotelovsko-scholastickej koncepcie sveta, ktorý sa vo svojich úvahách opieral aj o fyzikálne poznatky, patrí filozof Descartes [22]. Prvý si kladie problém novej vedeckej metódy nezaťaženej scholastikou. Východiskom jeho úvah však nie je experiment, ale

deduktívne rozumové (racionálne) uvažovanie. Vo svojom diele *Principia philosophiae* (*Princípy filozófie*), r. 1644 [22] hľadá na celý vesmír, vrátane pozemských skutočností, ako na jednotný fyzikálny systém, v ktorom platia tie isté zákony pre pozemské i nebeské telesá. Všetky telesá, i pozemské, sa skladajú z éteru, ktorého častice sa líšia veľkosťou, prípadne tvarom. Deliteľnosť častíc je neobmedzená, malé častice vyplňajú priestor medzi ostatnými tak, že vákuum neexistuje a pohyb častíc môžeme chápať ako vírenie v kvapaline [23]. Základnou vlastnosťou telies je ich rozpriestranenosť. Descartes neuznáva ani zvláštny hmotný substrát, ktorý by vytváral telesá. Všetky prírodné deje možno vysvetliť pomocou pohybov a zmien tvaru, teda geometricky. Jeho vesmír nemá hraníc, je nekonečný. V zajatí špekulatívneho myslenia však často vyslovuje nesprávne úsudky, podáva chybné vysvetlenia a dochádza k nesprávnym záverom. Jeho filozofia uvádzaná v titule jeho knihy je vlastne fyzikou v dnešnom slova zmysle. Našla mnoho stúpcov najmä vo Francii, ale bola dobre známa aj v Anglicku. Newton pozorne študoval Descarta, sám sa však ostro staval proti nemu najmä pri úvahách o vzniku a vývoji vesmíru pomocou vírivých pohybov éteru [1].

Descartes si – ako filozof – uvedomoval nielen jednotnú koncepciu fyzikálneho sveta, ale aj formuláciu univerzálne platných zákonov pre všetky fyzikálne deje; tu z nich uvedieme niektoré, ktoré mali priamy vplyv na Newtona. Prvý zákon prírody, uvádzaný Descartom v jeho *Princípoch filozófie* [22, 23], znie: Každá vec zostáva v svojom stave dotiaľ, kým ho niečo nezmení. Druhý zákon: Každé teleso má tendenciu zotrvať v priamočarom pohybe. Tretí zákon: Teleso, ktoré sa zrazí so silnejším telesom, nestráca svoj pohyb, a to, ktoré sa srazí so slabším, stráca toľko pohybu, koľko odovzdá. S myšlienkou prvého zákona sa stretávame už u Galileiho, druhý zákon bol povedomý už Benedettimu. S oboma zákonmi sa stretávame u prvého zákona Newtonovho [1]; oba zákony platia aj v dnešnej fyzike. Tretí zákon je výsledkom Descartových experimentov so srážkami guľí a je zrejme nesprávny. Descartes neinterpretoval svoje experimenty na základe presných meraní, ako to robil Galilei a neskôr i Newton, ale iba na základe hrubých pozorovaní a fixných predstáv. V prvej časti tretieho zákona Descartes myslí na pružný odraz tvrdej gule od steny, pri ktorom teleso nezmení veľkosť rýchlosti (u Descarta pohyb), ale len jej smer, čoho si Descartes nevšima. V druhej časti tohto zákona je už nábeh na zákon zachovania hybnosti (u Descarta tiež pohyb), ale len pre uvedený špeciálny prípad. Descartes neuvažuje pôsobiace sily ale len zmeny miesta a rýchlosti.

Descartov vzťah k používaniu matematiky vo fyzike vyjadruje veta: „Vo fyzike neuznávam princípy, ktoré by neboli princípmi matematickými, aby som mohol dôkazom preveriť všetko, čo som na tomto základe odvodil“. Táto veta je napísaná už priamo pod vplyvom Galileiho mechaniky. Galilei doporučuje: „Merať všetko, čo je merateľné, a čo nie je merateľné merateľným urobiť [12]“. Meraním dostávame čísla, pomocou ktorých môžeme počítat matematické vzťahy v prírodných zákonoch. Vedecká reč je podľa Galileiho reč matematická. Matematika podľa neho odhaľuje súvislosť javov, ich príčinnú podmienenosť, umožňuje chápať ich nevyhnutnosť a vyšší stupeň istoty nejestvuje.

Galilei urobil prelom vo fyzikálnom myslení matematickým spracovaním niekoľkých jednoduchých pohybov (voľný pád, šikmý vrh, kyvadlo). Descartes tvrdí už, že pomocou matematických princípov možno vysvetliť všetky javy prírody. Lenže vo svojich dôka-

zoch a vysvetleniach nie je dôsledný a mnohé jeho tvrdenia majú charakter hypotéz, ktoré nie sú experimentálne podložené. Až Newtonovi sa podarilo preklenúť priepasť medzi Galileiho precíznosťou jednotlivých experimentov a Descartovou univerzálnosťou princípov.

7. Záver

Newtonovo dielo *Philosophiae naturalis principia mathematica* (*Matematické základy prírodnej filozofie*, [1], ktoré vyšlo r. 1687 v Londýne, znamená začiatok novej epochy fyziky, epochy klasickej fyziky. Táto fyzika vyriešila všetky vecné fyzikálne problémy, s ktorými sme sa dosiaľ stretli. Fyziku pred Newtonom môžeme charakterizovať ako kvalitatívnu fyziku. Stretávame sa v nej s opismi pozorovaných javov a dejov vyjadrovanými v termínoch hovorovej reči, do ktorej sú tu a tam vkladané termíny, ktorých význam je známy iba školeným filozofom (ťažkosť podľa polohy, impetus).

S matematikou sa stretávame už u Archimeda v jeho statických výpočtoch, ale až u Galileiho je „matematická reč“ predmetom fyzikálneho opisu a fyzikálnej argumentácie. U Huygensa sa poprvý raz stretávame s matematickým vyjadrením inej prírodnej sily ako tiažovej, a to sily odstredivej ako funkcie polomeru a obvodovej rýchlosti. Descartes prehlasuje matematiku za nutný nástroj fyzikálnej metódy. Ale až Newtonovi sa podarilo vytvoriť kvantitatívnu teóriu na deduktívnom princípe, ktorej východzie tézy sú – podľa Newtona – potvrdené experimentami. Matematická formulácia téz má charakter základných princípov, z ktorých deduktívnou cestou odvodzujeme jednotlivé fyzikálne zákony.

Newton, ktorý mal úplné teologické vzdelanie na univerzite v Cambridge, nebol deduktívnym typom mysliaceho filozofa, akým bol Descartes. Jeho prvoradým záujmom nebolo formulovanie univerzálnych princípov mechaniky, ale dôkaz gravitačného zákona, ústredného problému vtedajších „prírodných filozofov“, t. j. fyzikov, ktorý by spájal pohyby nebeské a pozemské.

Newtonovou geniálnou myšlienkou bolo postaviť tento dôkaz na univerzálnych, všeobecne prijateľných princípoch mechaniky, ktoré však bolo potrebné ešte len vysloviť. Génus Newtona nespočíva iba v koncepcii takéhoto odvodenia, ale aj v jeho realizácii, k čomu bolo potrebné vytvoriť diferenciálny a integrálny počet, a aj ten si Newton sám vytvoril.

Literatúra

- [1] NEWTON, I.: *Philosophiae naturalis principia mathematica*. London, 1687.
- [2] ARISTOTELES: *Fyzika*. In: *Od Aristotela po Plotina. Antológia z diel filozofov*. Bratislava, Pravda, 1972.
- [3] PLATÓN: *Timaios*. In: *Pseudosokratici a Platón. Antológia z diel filozofov*. Bratislava, Pravda, 1970.
- [4] ARISTOTELES: *O nebi. O vzniku a zániku*. Bratislava, Pravda, 1985.
- [5] PROLEMAEUS CLAUDIUS: *Matematiké syntaxis (Almagest)*. Nemecký preklad: PROLEMAEUS: *Handbuch der Astronomie Bd. I, Bd. II*. Leipzig, Teubner, 1963.

- [6] GRYGAR, J., HORSKÝ, Z., MAYER, P.: *Vesmír*. Praha, Mladá fronta, 1979.
- [7] POGGENDORF, J.: *Geschichte der Physik*. Nové vydanie. Leipzig, Zentralantiquariat DDR, 1964.
- [8] DUGAS, R.: *A history of mechanics*. Neuchâtel, Ed. Du Griffon, 1955.
- [9] STARÍČEK, I.: *Dejiny mechaniky do polovice XIX storočia*. In: Zborník II. Letná škola dejín fyziky. Liptovský Mikuláš VVTS-ČSSP, 1985.
- [10] MACH, E.: *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*. Leipzig, Brockhaus, 1912.
- [11] GALILEI, G.: *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo tolomaico e copernicano*. Florencia 1632. (Dialóg o dvoch veľkých sústavách svetových ptolemaiovskej a kopernikovskej). Slovenský preklad: GALILEI, G.: *Dialóg o dvoch systémoch sveta*. Bratislava, SAV, 1962.
- [12] SCHMUTZER, E., SCHÜTZ, W.: *Galileo Galilei*. Leipzig, Teubner, 1977.
- [13] KUZNECOV, B.: *Ot Galileja do Ejnštejna*. Slovenský preklad: KUZNECOV, B.: *Od Galileiho po Einsteina*. Bratislava, Pravda, 1975.
- [14] GALILEI, G.: *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica ed i movimenti locali*. Leida, 1638. (Rozhovory a matematické dôkazy o dvoch nových vedách týkajúce sa mechaniky a miestneho pohybu). Ruský preklad pozri [15].
- [15] GALILEI GALILEO: *Izbrannye trudy v 2. tomach*. Tom 2. Moskva, Nauka, 1964.
- [16] ZAJAC, R., CHRAPAN J.: *Dejiny fyziky*. Vysokoškolské skriptá. Bratislava, MFF-UK, 1982.
- [17] KOYRÉ, A.: *Études d'histoire de la pensée scientifique*. Paris, Gallimard, 1973.
- [18] KOPERNÍK, M.: *De revolutionibus orbium coelestium (O pohyboch nebeských sfér) libri VI*. Nürnberg, 1543.
- [19] HORSKÝ, Z.: *Kepler v Praze*. Praha, Mladá fronta, 1980.
- [20] KOYRÉ, A.: *The astronomical revolution*. Londýn, Methuen, 1973.
- [21] SCHIMANK, H.: *Epochen der Naturforschung*. Berlin, Wegweiser Verlag, 1930.
- [22] DESCARTES, R.: *Princípy filozófie*. In: *Novoveká racionalistická filozófia. Antológia z diel filozofov*. Bratislava, Pravda, 1970.
- [23] GAHÉR, F.: *Descartova fyzika*. In: *Referáty z dejín fyziky*. Bratislava, JSMF, 1984.

Urychlovače a collidery

Jiří Formánek, Praha

V r. 1928⁷ J. D. Cockroft napísal memorandum E. Rutherfordovi, v němž požádal o 1000 £ od University of Cambridge na stavbu urychlovače v Cavendishově laboratoři. Požadavku bylo vyhověno. Asi 3 roky pak pracoval s E. T. S. Waltonem na vývoji různých typů statických urychlovačů a již v r. 1932 pozoroval první jadernou transmutaci vyvolanou laboratorně urychlenými částicemi (protony 0,5 MeV). Tím byla zahájena éra urychlovačů a jejich využití ve fyzice. Dnešek a blízké perspektivy této oblasti charakterizují údaje Tab. I. *)

*) Nejsou v ní zahrnuty

- i) urychlovače těžkých iontů,
- ii) tzv. pionové a kaonové továrny,
- iii) tzv. fotonové továrny (= specializované zdroje synchrotronového záření).

Tyto velice důležité urychlovací komplexy si zaslouhují samostatné pojednání, neboť jejich motivace a problematika jsou podstatně odlišné.