

STARIČEK, I.: On the Methodology of Newton's Physics
Filozofia, 46, 1991, No. 5, p. 414—423

The article deals with the preconditions for Newton's elaboration of the fundamental concepts of his mechanics and for his formulation of its laws from the methodological point of view. The author clarifies physical and philosophical influences of his predecessors, especially those of Descartes, Galilei, Kepler and Huygens. He also gives a critical analysis of the influence of Aristotelian and Cartesian philosophy in distinguishing between philosophical and physical concept of mass which Euler made more accurate. The influence of Newton's mechanics on the development of the classic mechanics with regard to modern physical theories is examined as well.

Úvod

Už je tomu tristo rokov odvtedy, čo r. 1687 vyšli slávne Newtonove *Základy (Philosophiae naturalis principia mathematica, Matematické základy prírodnej filozofie)*. Priniesli prelom do fyzikálneho myslenia, ktorý neovplyvnil podstatne iba rozvoj fyziky, ale mal hlboký dosah aj na filozofické myslenie a na metodológiu empirických vied. Ešte koncom minulého storočia bola klasická mechanika, ktorej základy položil Newton vo svojich *Základoch*, vrcholom fyzikálneho myslenia. Newtonove *Základy* priniesli Newtonovi už za jeho života takú slávu a prestíž, že sa nik neodvážil kritizovať ani jeho osobu, ani jeho dielo, o ktorom sa hovorilo iba v najvyšších superlatívoch. Niet preto divu, že keď sa na prelome storočia objavili nové fyzikálne teórie, ako teória relativity a kvantová teória, boli spory medzi poprednými zástancami nových a starých fyzikálnych koncepcií veľmi ostré. Ani dnes nie sú tieto spory utišené a to vedie dnešných metodológov fyziky k odvážnej kritike nielen základných myšlienkových kategórií Newtona v jeho *Základoch*, ale aj k hlbšiemu skúmaniu tých historických podkladov, na ktorých Newton svoje *Základy* budoval.

Základné predpoklady

Vyučovanie fyziky aj na dnešných základných školách, nehovoriac o školách stredných a vysokých, vychádza z troch všeobecne známych princípov mechaniky, ktoré Newton formuluje vo svojej práci ako zákony: zákon zotrvačnosti, zákon sily a zákon akcie a reakcie. K nim patrí aj Newtonov gravitačný zákon. Uvedené zákony sú pritom formulované prakticky podľa doslovného textu *Základov*, akoby Newtonova mechanika bola originálnym dielom bez vzťahu k minulosti. Skôr

opak je pravda: Newtonova fyzika predstavuje obrovskú syntézu fyzikálneho a matematického myslenia viacerých jeho predchodcov, z ktorých môžeme prednostne vyzdvihnúť Galilea Galileiho, Jána Keplera, René Descarta, Christiana Huygensa a Newtonovho učiteľa Isaaca Barrowa. Originálne bolo vynájdenie infinitezimálneho počtu (podľa Newtona počtu fluxiónového) a jeho včlenenie do matematického aparátu mechaniky.

Mechanika predstavovala u Newtona iba časť jeho vedeckých záujmov, ku ktorým patrila aj matematika, optika, astronómia, chémia, ba aj história, alchýmia a teológia. Fyzika, ktorú nazýva prírodnou filozofiou, tvorila organickú časť jeho svetonáhľadu. Aj Newtonova spoločenská aktivita v rokoch po vydaní *Základov*, najmä v službách mincovníctva, poukazuje na to, že v tomto diele realizoval Newton iba časť svojich osobných zámerov.

I pri mnohostrannosti svojich vedeckých záujmov Newton presne vymedzuje nielen obsah svojich *Základov*, ale aj metódu získavania a formulovania nových poznatkov, opierajúc sa o striktné matematicky podloženú argumentáciu, vychádzajúc z pozorovaní a experimentov. Pôvodne koncipoval iba dve prvé knihy *Základov* ako náuku o pohybe (*De motu*), ktorú vymedzuje ako určovanie dráhy telesa, keď naň pôsobia dané sily, a naopak, určovanie sily, ktorá vyvoláva pohyb po danej dráhe. To je podľa Newtona problematika racionálnej mechaniky, ktorá pracuje metódou presných dôkazov, na rozdiel od praktickej mechaniky, ktorú zaraďuje medzi mechanické zručnosti. Vo svojej racionálnej mechanike sa Newton opiera predovšetkým o názorný geometrický model skutočnosti. Geometriu pokladá za časť mechaniky, ktorá dokazuje možnosť a použiteľnosť merania, a tým umožňuje zavádzanie kvantít do mechaniky. Vedecká Newtonova argumentácia sa opiera o geometrické vety a poučky, proti ktorým nemožno klásť žiadne protiargumenty. Newton používa v *Základoch* konštrukcie Euklidovej geometrie vrátane Apolloniovej teórie kuželosečiek. Táto geometrická metóda je však pri riešení jednotlivých problémov veľmi ťažkopádna a pre zložitejšie dráhy, ako sú kuželosečky, prakticky nepoužiteľná. Táto Newtonova metóda nemala žiadnych nasledovníkov. Mechanika sa po Newtonovi rozvíjala síce na ním daných základoch, ale na algebrickej báze a na Leibnizovom formalizme infinitezimálneho počtu. Ale práve dôvtip a veľkorysosť, ktoré Newton používal vo svojich geometrických argumentoch, prezrádajú veľkosť Newtonovho génia.

Nakoľko geometria bola podľa Newtona súčasťou mechaniky, mal každý geometrický argument váhu fyzikálneho argumentu. Tento prístup pokladali scholastickí filozofi 13. a 14. storočia za bežný. Rozdiel bol však v tom, že scholastici nevychádzali vo svojich úvahách z pozorovaní a experimentov, ako to robili Galilei a Newton, ale špekulatívne nadväzovali na texty Aristotela a jeho komentátorov. Dnešnej fyzike nezáleží na tom, či matematické formalizmy používané vo fyzikálnych teóriách ma-

jú bezprostredný a názorný vzťah ku skutočnosti, ale stačí jej, keď výsledky fyzikálnych výpočtov sa potvrdzujú v experimentoch spojených s meraním. Dnešné fyzikálne teórie, vrátane klasickej fyziky, stavíme na hypotetických predpokladoch, ktoré pokladáme za pravdivé, ak sú ich dôsledky potvrdzované experimentálne (princíp verifikácie). Akejkolvek hypotéze prisudzujeme fyzikálny význam (to ešte neznamená pravdivosť) vtedy, keď možno navrhnúť fyzikálny experiment alebo pozorovanie, ktoré by umožnili rozhodnúť, či je uvedená hypotéza pravdivá alebo nie (princíp falzifikácie). Newton podľa vlastného názoru stavia svoju mechaniku na experimentálne podložených zákonoch a na indukcii vychádzajúcej z týchto zákonov. Výroky, ktoré nie sú podložené touto fyzikálnou metódou, pokladá za hypotézy a zásadne ich odmieta (hypotheses non fingo). To však neznamená, že by Newton sám tento metodický princíp vždy striktnie dodržiaval.

Historické pozadie

Uvedenú Newtonovu koncepciu racionálnej mechaniky ako určovania vzájomného vzťahu dráhy a sily pri pohybe môžeme spätne sledovať nanajvýš do doby Galileia Galileiho (1564—1642), ktorý prvý určil matematický vzťah medzi dráhou a časom pri tiažou vyvolanom voľnom páde (*Discorsi*, 1638). Tento Galileiho kvantitatívny horizont mechaniky rozšíril Christian Huygens (1629—1695, *Horologium oscillatorium* 1673) o štúdium kyvadlových pohybov, zrážok telies a o odstredivú silu, ktorej veľkosť určil ako funkciu polomeru kruhovej dráhy otáčajúceho sa telesa a jeho obvodovej rýchlosti. Newton bol dobre oboznámený aj s Descartovou (1596—1650) mechanikou (*Principia philosophiae* 1644), z ktorej prevzal aj princíp zotrvačnosti. Descartes však nesprávne vykladá zákony zrážok telies a pohyb planét pomocou vírov éteru, čím sa Newton zaoberá v druhej knihe *Základov*. Newton však plne uplatnil Galileiho skladanie pohybov, pomocou ktorého skúmal šikmý vrh ako zloženie priamočiareho rovnomerného pohybu a voľného pádu. Newton pri odvodzovaní gravitačného zákona skladá pohyb vyvolaný dostredivou silou a rovnomerný priamočiary pohyb v smere dotýčnice ku dráhe udržiavaný zotrvačnosťou.

Z dochovaných písomných materiálov, vrátane korešpondencie, vidno, že prvoradým Newtonovým cieľom v *Základoch* nebolo napísať mechaniku, ale dokázať gravitačný zákon, ktorý by vysvetlil vtedajšiu záhadu Keplerových eliptických dráh planét a ďalšie dva Keplerove zákony (zákony plošnej rýchlosti a obežnej doby) na základe princípov mechaniky, ktoré v Newtonovej dobe neboli uspokojivo sformulované. O riešenie problému Keplerových dráh ho požiadala Kráľovská spoločnosť (Royal Society) prostredníctvom generálneho sekretára Roberta Hooka (1635—1703) v r. 1679. Nezachovali sa žiadne záznamy o tom,

že by sa Newton pred týmto rokom zaoberal vážnejšie gravitačným zákonom, hoci sa s problémami mechaniky oboznamoval postupne od začiatku svojich štúdií v Cambridge v r. 1661. Na základe ústnej tradície sa hovorí, že Newton objavil gravitačný zákon už cez prázdny v r. 1666, keď so svojej záhrade začal uvažovať o páde jablka. Túto historiku však dnes nepovažujeme za vedecky hodnovernú. Otázku, prečo nepadne Mesiac, keď padajú jablká, ešte nemožno pokladať za intuíciu všeobecnej gravitácie.

Ak Newton chcel po Hookovej výzve gravitačný zákon nezvratne dokázať, musel výjsť z nejakých všeobecne prijateľných zákonov mechaniky, a preto *Základy* začínajú definíciami základných fyzikálnych pojmov a troch vyššie spomenutých základných zákonov. Pritom nevádza, že prvý zákon, zákon zotrvačnosti, prevzal od Descarta a že s jeho špeciálnymi prípadmi sa stretol už v prácach Galileiho a Huygensa. Druhý zákon, zákon sily, môžeme pokladať za indukzívne zovšeobecnenie Galileiho opisu voľného pádu a Huygensových štúdií o zrážke pružných guľí. Obe tieto štúdie sa opierali o starostlivo robené experimenty. Tento zákon má už kvantitatívny charakter. Tretí zákon, zákon o akcii a reakcii, pokladajú niektorí autori za najvlastnejší Newtonov zákon, hoci sa s ním stretávame už v stredovekej literatúre. Je bežnou skúsenosťou, že ak tlačím ruku do kameňa, tlačí kameň na ruku. Newton uplatňuje tento zákon pri odvodzovaní gravitačného zákona, pri zdôvodňovaní, že Slnko a planéty sa vzájomne priťahujú, čo už pred ním tvrdil Ján Kepler. Kepler (1571–1630) predpokladal, že Slnko, planéty a ich mesiace sa priťahujú akousi magnetickou silou, ktorá spôsobuje aj pád telies (*Nova astronomia*, Praha 1609). Nesprávne však tvrdil, že táto sila klesá iba nepriamo úmerne so vzdialenosťou priťahujúcich sa telies.

Myšlienku dôsledne používať v mechanike kvantitatívnu metódu prevzal Newton od Galileiho, ktorý tvrdil, že príroda k nám hovorí rečou matematiky, a preto treba jej zákony vyjadrovať „matematickou rečou“, ak ju chceme pochopiť.

Kritika

Po tomto historickom úvode môžeme prikročiť k posúdeniu Newtonovho prínosu do metodológie vedeckého myslenia v jeho dobe, ako aj zhodnotiť tento prínos z hľadiska dnešnej metodológie vied. Z metodologického hľadiska je najdôležitejšie objasniť si obsah druhého zákona, ktorý Newton formuluje takto: „Zmena hybnosti (*quantitas motus*) je úmerná pôsobeniu vnútej sily a prebieha v smere tej priamky, pozdĺ ktorej táto sila pôsobí“ (preklad autora). Hybnosť definuje ako súčin hmotnosti (*quantitas materiae*) a rýchlosti. V definícii však nepoužíva explicitne termín „súčin“, nakoľko mu ako geometrovi záleží iba na tom, že hybnosť je úmerná hmotnosti aj rýchlosti. Dnes bežná formulá-

cia zákona sily (sila sa rovná súčinu hmotnosti a zrýchlenia) má ten istý fyzikálny obsah ako Newtonov druhý zákon, ak prihladneme ku konštantnosti hmotnosti pohybujúceho sa telesa, o čom Newton nemal žiadnu pochybnosť.

Čo prináša Newtonov druhý zákon do fyziky nového, keď už Galilei vedel, že tiažová sila spôsobuje prírastok rýchlosti, teda zrýchlenie? Táto otázka vedie k vážnemu fyzikálnemu problému. Aj Galilei, aj Newton boli na svojich štúdiách dobre oboznámení s Aristotelovou fyzikou, ktorá chápala látku telesa, jeho matériu (hmotu) ako zmes štyroch živlov: zeme, vody, vzduchu a ohňa. Táto zmes (matéria) sa prejavovala niekedy ako ťažkosť spôsobujúca pád telies na Zem, inokedy ako ľahkosť spôsobujúca stúpanie dymu alebo ohňa. Matéria a ťažkosť (dnešná tiaž) sa chápali ako dva nezávislé pojmy. Matéria mala charakter substancie, ťažkosť bola chápaná ako prípadok (akcidens) substancie. Váženie sa aj v dobe Galileiho chápalo ako určovanie ťažkosti ako vlastnosti a nie ako určovanie hmotnosti. Prvý, kto začal pripisovať hmote (aristotelovsky chápanej) odpor proti pôsoiacej sile, bol Kepler. To však nebol dôsledok priameho pozorovania ani experimentu, ale dôsledok aristotelovskej úvahy: Keby planéty neprejavovali žiadny odpor proti pôsoiacej sile — Kepler myslel na „magnetickú“ príťažlivosť —, museli by sa pohybovať nekonečne rýchlo. V tomto tvrdení môžeme vidieť prvé náznaky rodiaceho sa pojmu zotrvačnej hmotnosti vo forme vzťahu hmoty a sily; Newton ho neskôr zovšeobecnil vo svojom druhom zákone sily), pravda, už s prihladnutím k prvému zákonu (zotrvačnosti), ktorý Kepler nepoznal. Ani u Galileiho, ani u Keplera a ostatných predchodcov Newtona sa nestretávame s kvantitatívnym pojmom matérie, ktorý vyžaduje číselné určenie miery matérie.

Všetky tieto úvahy, Newtonove i naše, sa nezaoberajú filozofickým pojmom hmoty, ale iba jej konkrétnym fyzikálnym prejavom. A tento prejav bolo potrebné podľa Newtona vyjadriť novým, kvantitatívnym pojmom, ktorý Newton zaviedol pod názvom *quantitas materiae* (množstvo matérie), ktorý zodpovedá dnešnému fyzikálnemu pojmu hmotnosť. Newton začína svoje *Základy* definíciou množstva matérie: „Množstvo matérie je jej miera vyjadrená spoločne jej objemom a hustotou“ (preklad autora). Definícia tohto kvantitatívneho pojmu predpokladá kvantitatívne určenie objemu aj hustoty. Termín „spoločne“ treba v tejto súvislosti chápať dnes ako „úmerne s“. Objem telesa je jeho geometrickou charakteristikou, ktorej mieru (veľkosť) určujeme geometricky. S kvantitatívnym určením hustoty nezávisle od objemu to nebolo také jednoduché. Ale v atomárnej predstave štruktúry telesa, ktorú Newton prevzal od Pierra Gassendiho (1592—1655, *Syntagma philosophicum*, 1658) a Roberta Boyla (1627—1691, *Spring of the air* [*Zhustovanie vzduchu*] 1661) môžeme použiť hustotu telesa úmernú počtu jeho molekúl (atómov) v jeho objeme. V zásade by teda za istých špeciálnych okolností bolo možné určovať pomer hustôt vzduchu za rôznych pod-

mienok číselne. Atómová hypotéza nebola v Newtonových časoch všeobecne prijatá, pretože stúpenci Aristotelovej filozofie sa zásadne stavali proti Demokritovým atómom. Ani Newton sa k nej v *Základoch* otvorene nepriznáva. Robí to až neskôr vo svojej *Optike* (1704). Preto jeho definícia množstva matérie, ktorej nemožno z metodologického hľadiska nič zásadne vytýkať, bola fyzikálne nerealizovateľná. Z tejto slepej uličky si Newton pomohol tak, že prehlásil, že množstvo matérie telesa sa určuje jeho vážením, pričom sa odvoláva na svoje experimenty s kyvadlom, ktoré dokazujú úmernosť množstva matérie a tiaže ako sily. Tento nedôsledný Newtonov postoj narazil neskôršie na ostrú kritiku fyzikov.

Otázkou je, prečo Newton začína *Základy* s takýmto fyzikálne nedôsledne definovaným pojmom. Otázka má filozofické pozadie. V Newtonovej dobe bola najrozšírenejšou prírodnou filozofiou (zhruba povedané dnešnou fyzikou) Descartova filozofia (*Principia philosophiae* 1644), v ktorej Descartes uznáva iba jedinú substanciu v prírode, ktorá charakterizuje telesá, a tou je ich objem. Teleso je určené svojím objemom a má celý rad ďalších vlastností, ku ktorým patrí aj jeho tiaž. Proti takejto unitárnej koncepcii telesa sa ostro postavil spomínaný Gassendi tvrdením, že keby teleso bolo určené iba objemom, nebolo by možné vysvetliť zriedkovanie a zhusťovanie vzduchu. Spory Gassendiho s Descartom presahujú rámec nášho výkladu, ale tu stačí uviesť iba toľko, že Newton sa už v prvej definícii *Základov* postavil vlastne za Gassendiho proti Descartovi. Pritom ponecháva množstvu matérie jeho substanciálny charakter, ktorý sa ukázal v ďalšom vývoji fyziky neudržateľný, lebo hmotný bod, ktorý patrí dnes k základným pojmom mechaniky, by musel mať nulové množstvo matérie (nulovú hmotnosť). Tento rozpor odstránil až Leonard Euler (1707–1783, *Teoria motus corporum solidorum seu rigidorum* 1760). V uvedenej mechanike určuje Euler množstvo matérie zrýchlením, ktoré daná sila vyvoláva. Takto definovaný pojem množstva matérie plne zodpovedá dnešnému pojmu hmotnosť, ktorý však je dynamickým pojmom a nie substanciou, ako ho chápal Newton v tóni dozvukov aristotelovskej filozofie. Prechod od substanciálneho chápania k dynamickému platí aj pre hybnosť definovanú úmernosťou k hmotnosti a rýchlosti (dnes hovoríme o ich súčine). Uvedená zmena interpretácie pojmov hmotnosti a hybnosti však nemení vzťah medzi silou a dráhou, ktorý bol východným podnetom pri stavbe jeho mechaniky. Ten zostáva v platnosti aj v dnešnej klasickej fyzike a Newtonovi tu prináleží prvenstvo.

Priestor a čas

Z metodologického hľadiska je významné zmieniť sa o dvoch pojmoch priestoru a času, ktoré Newton v *Základoch* zavádza. Hovorí v nich

o relatívnom a absolútnom priestore a podobne o relatívnom a absolútnom čase. Absolútny priestor zodpovedá chápaniu priestoru ako „nádobu“, v ktorej sú uložené jednotlivé telesá. Absolútny priestor je nehybný a nie je ovplyvňovaný žiadnymi fyzikálnymi procesmi. Pohybové rovnice platia pre sily a rýchlosti určované vzhľadom na absolútny priestor, o ktorom Newton predpokladá, že je stále v pokoji. Relatívny priestor (napríklad zemská atmosféra) je merateľný a môže byť pohyblivý. Skutočné fyzikálne vzťahy medzi telesami určujeme v relatívnom priestore, ktorý má charakter „relačného“ priestoru a ktorý zodpovedá dnešnému Euklidovmu priestoru v klasickej matematike. Ernst Mach (1838—1916) ukázal, že pojem absolútneho priestoru je fyzikálne nadbytočný a ako nefyzikálny má byť z fyziky odstránený. Podobne aj absolútny čas.

Otázkou je, či Newton nemal aj nejaké nefyzikálne dôvody k zavedeniu absolútneho priestoru. V *Základoch*, ktoré sú stavané na prísnej fyzikálno-matematickej báze, o tom niet zmienky. Zato však porovnávaním textov sa zistilo, že pojmy absolútneho priestoru a času nájdeme už pred Newtonom u Gassendiho, ktorý si pritom — ako teológ — pomáha vysvetlením vzťahu sveta a Boha. Gassendi pokladá absolútny priestor za „sensorium Dei“, t.j. za orgán, prostredníctvom ktorého Boh vníma svet. Newton ako fyzik o tomto Gassendiho argumente mlčí, ale ako teologicky vzdelaný ho prijíma, čo dosvedčuje skoro doslovná zhoda textov Newtona a Gassendiho o absolútnom priestore a čase.

Fyzika ako celok

S podobným mlčaním sa stretávame u Newtona pri vysvetľovaní gravitácie. Newton sa ostro postavil proti Descartovmu vysvetľovaniu pohybu planét na spôsob pohybu zrníek piesku v roztočenom sude naplnenom vodou. Podľa Descarta by sa planéty mali pohybovať pôsobením vírov éterických častíc. Ešte pred napísaním *Základov* sa Newton pokúšal vysvetliť gravitáciu pôsobením častíc éteru rôznych veľkostí v póroch telies. Lenže tieto hypotetické pokusy nevedli k cieľu. Neúspech s mechanickým vysvetľovaním pôvodu gravitácie ho viedol k zásadnému odmietaniu akéhokoľvek pokusu o vysvetlenie gravitácie. Preto prehlasuje, že stačí vedieť, že gravitácia existuje, a poznať zákony jej pôsobenia. Každému necháva na ľubovôľu posúdiť, či gravitácia je prejav materiálneho sveta alebo je spôsobená nejakým nemateriálnym zásahom. Tým opäť ponecháva voľné miesto pre nezáväznú teologickú úvahu o gravitácii. S týmto stanoviskom sa stretávame v jeho korešpondencii s teológom Bentlym.

Pri všetkých týchto súvislostiach prírodnej filozofie, matematiky, geometrie i teológie Newton rozvíja svoju fyziku ako prejavy matérie podrobenej silám podľa troch základných zákonov mechaniky. V *Zá-*

kladoch prehlasuje, že aj ostatné fyzikálne javy, napríklad elektrické, magnetické a chemické, možno takto skúmať, ale zatiaľ nemáme k tomu ani dostatočne vyvinutú teóriu, ani dostatok experimentálnych prostriedkov. Newton v *Základoch* nebudoval iba nebeskú mechaniku, ktorej oprávnenosť potvrdzuje v tretej knihe svojho diela porovnávaním pozorovaných dráh nebeských telies s jeho výpočtami podľa gravitačného zákona, ale celú fyziku. Pritom si bol vedomý toho, že v *Základoch* zhrnul všetko, čo sa v jeho dobe dalo o fyzike povedať.

Záver

Newtonove *Základy* vyrástli z jeho gravitačného zákona. Newton bol sebavedomý a hrdý pri svojej práci a záležalo mu na tom, aby nik nepochyboval o pravdivosti jeho dôkazov. *Základom* dal prísnu logickú štruktúru pripomínajúcu štruktúru Euklidových *Základov*. Východiskom jeho fyzikálnej koncepcie boli najmä práce Galileiho a Huygensa. Proti Descartovi, ktorý bol v tých časoch salónnym prírodným filozofom, mal oprávnené výhrady, s ktorými sa neskrýval. Ako teológ písal v súlade so svojím teologickým presvedčením, ale teológii nerobí propagandu. Radšej o nej mlčí. Nikde sa neutieka k teologickým argumentom, ako to miestami robí Descartes. Ide mu o vedeckú pravdu založenú na pozorovaniach a experimentoch. V tomto smere sa opieral o filozofov Francisa Bacona (1561—1621) a Johna Locka (1623—1704), hoci v *Základoch* ich nespomína.

Newton si bol vedomý toho, že jeho prírodná filozofia, zhrnutá v *Základoch*, predstavuje vrcholné vedecké dielo vtedajšej doby, ktoré nemožno kritizovať, ku ktorému nik nemá čo pridať, lebo zhrnul celú prírodnú filozofiu v jediný uzavretý celok. Z metodologického hľadiska nie je dôležitý osobný profil a charakter Newtona (1643—1727), ale na udržanie osobnej prestíže a slávy volil často nevyberané prostriedky. To viedlo nakoniec k veľkým sporom stúpencom Newtona s descartovcami a s Leibnizom, v ktorých rozhodujúcim faktorom boli otázky vedeckej prestíže. Ale ani v samom Anglicku nezapustili *Základy* hlbšie korene. Newton ich zámerne písal ťažkopádny štýlom, aby mu mohlo porozumieť iba zopár vybraných jedincov, ktorí by neoponovali maličernými námietkami. V *Základoch* používa diferenciálny a integrálny počet, ktorý sám vybudoval ešte pred Gottfriedom Leibnizom (1646—1716). Používa ho však v ťažkopádnej geometrickej formulácii, ktorú po ňom nik neprevzal. Newtonova mechanika, postavená na *Základoch*, začala zapúšťať svoje korene na európskom kontinente a neskôr aj v Anglicku až po zavedení Leibnizovho matematického formalizmu infinitezimálneho počtu do mechaniky. Definitívnu, dnes všeobecne prijatú formálnu i pojmovú úpravu dal Newton mechanike už Euler v r. 1760. Sto rokov po Newtonových *Základoch* rozpracoval Joseph Louis Lagrange

{1736—1813} Newtonovu mechaniku do uzavretého matematicky sformalizovaného deduktívneho systému, zahrňujúceho všetky časti mechaniky vrátane teórie kontinua [*Mécanique analytique* (*Analytická mechanika*), 1788]. Tým doviedol vývoj Newtonovej mechaniky do obsahovej i formálnej zjednotenej formy deduktívneho systému klasickej mechaniky.

Úvodná kapitola *Základov* so základnými zákonmi, ako aj celá tretia kniha opisujúca nebeské telesá, boli napísané štýlom dostupným aj neodborníkom. Tieto state vzbudili pozornosť aj u filozofov, akým bol napríklad François Marie Arouet Voltaire (1694—1778). Títo v nich videli prejav úžasnej schopnosti ľudského rozumu a vedeckého myslenia nezaťaženého scholastikou ani Aristotelovou metafyzikou. Newtonove *Základy* sa stali filozofickým argumentom v boji osvietenstva proti scholastike, ale aj proti descartovcom. Takto nepriamo prispeli aj k rozvoju materialistických filozofií, hoci, čo sa zdá byť paradoxné, v Newtonovej dobe sa používali *Základy* ako argument teológov v kázniach proti ateizmu. Napríklad v korešpondencii s Bentleyom Newton uvádza, že je nadchnutý majestátnosťou Božou prejavenu v jeho stvoriteľskom diele. Fyzika sa stala vzorom a ideálom pre mnoho ďalších vedných odborov, ako sú dnes vedy biologické a ostatné empirické vedy. O prenikaní kvantitatívnej metódy do nášho spoločenského života najlepšie svedčí výpočtová technika, ktorá je dnes samozrejmosťou nielen v prírodných, ale aj v spoločenských vedách.

Moderné fyzikálne teórie kritizujú dnes Newtonovu mechaniku ako nesprávnu: teória relativity pre veľké rýchlosti, pri ktorých hmotnosť je funkciou rýchlosti, a kvantová teória pre mikrofyzikálne javy, v ktorých niektoré pojmy Newtonovej mechaniky, ako napríklad dráha častice, strácajú fyzikálny zmysel a deterministický opis mikrofyzikálnych javov sa nahrádza štatistickým. V kvantovej teórii sa uvažuje iba pravdepodobnosť prechodu mikročastice z jednej polohy do inej, ale neuvažuje sa dráha tohto prechodu. Tieto teórie hovoria, že Newtonova mechanika je len približnou fyzikálnou teóriou platnou pre malé rýchlosti a makrofyzikálne objekty.

Pritom obe tieto moderné teórie vychádzajú z pôvodných Newtonových predstáv a ich výsledky sa overujú pomocou fyzikálnych experimentov, ako to robil Newton, a nemôžu sa zaobísť bez dynamických pohybových rovníc formálne analogických Newtonovmu zákonu sily. Newton takýto vývoj predvídal, keď v *Základoch* tvrdil, že aj ďalšie fyzikálne javy sa dajú riešiť metódou rozvedenou v jeho *Základoch* za predpokladu rozšírenia experimentálnych možností a potrebného matematického aparátu.

1. NEWTON, I.: *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Londýn 1686.
2. NEWTON, I.: *Mathematische Principien der Naturlehre*.
(Nemecký preklad tretieho vydania Základov z r. 1726, doplnený poznámkami a vysvetlivkami prekladateľa J. Wolfersa). Berlín 1872.
3. MORE, L.: *Isaac Newton. A biography*. New York, Dover 1962.
4. KOYRÉ, A.: *Newtonian Studies*. Cambridge, Harvard univ. press 1965.
5. DUGAS, R.: *A History of Mechanics*. Neuchatel, vyd. Du Griffon 1955.
6. MACH, E.: *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*. Lipsko, Brockhaus 1912.
7. KOYRÉ, A.: *Études d'histoire de la pensée scientifique*. Paris, Galimard 1973.
8. NOVÝ, L. — SMOLKA, J.: *Isaac Newton*. Praha, Orbis 1969.
9. FRIDMAN, V.: Ob učení Njutona o masse. In: *Uspechi fizičeskich nauk* 61, 1957, č. 3, s. 451.
10. STARÍČEK, I.: *Přednewtonovská mechanika*. In: *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* 32, 1987, 57.
11. STARÍČEK, I.: *Mechanika Newtonových Principií*. In: *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* 32, 1987, 113.
12. STARÍČEK, I.: *Model a skutečnost u Newtona*. In: *Československý časopis fyziky A* 37, 1987, 614.
13. STARÍČEK, I.: *Matematika vo fyzikálnom myslení na stredovekých univerzitách*. In: *Pokroky matematiky fyziky a astronomie* 35, 1990, s. 67.