Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Imrich Staríček

Mechanika Newtonových Princípií

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 32 (1987), No. 3, 113--122

Persistent URL: http://dml.cz/dmlcz/139895

Mechanika Newtonových Princípií

Imrich Staríček, Bratislava

1. Úvod

Newtonova mechanika, ktorá vyšla práve pred 300 rokmi v jeho Princípiách, spôsobila prelom vo fyzikálnom myslení. Tento prelom sa pripravoval už dávnejšie a zavŕšili ho až neskoršie generácie. Základné črty Newtonovej mechaniky sa udržujú vo vedomí fyzikov dodnes. Zato malá pozornosť sa venuje pôvodným Newtonovým formuláciám a okolnostiam, za ktorých Princípia vznikali. Cieľom článku je doplniť túto medzeru a priblížiť dnešku štýl Newtonovho vedeckého myslenia.

2. Stručný životopis

Isaac Newton sa narodil 25. decembra 1642 (podľa vtedajšieho juliánskeho kalendára, t. j. 4. januára 1643 podľa dnešného gregoriánskeho kalendára) v malej osade Woolsthorpe v strednom Anglicku. Do svojho dvanásteho roku žil ako obyčajné dedinské dieťa osamelým, hĺbavým životom v opatere starej mamky, pretože otca stratil pred svojím narodením a matka sa čoskoro vydala do súsednej obce [1]. Na strednej škole v Granthame si obľúbil matematiku, logiku, latinčinu a teológiu. Jeho domáci, lekárnik, vzbudil v ňom záujem o chémiu a alchýmiu [2, 3].

V r. 1661 odišiel študovať teológiu do Trinity College v Cambridge, kde si jeho učiteľ Isaac Barrow všimol jeho nadanie a vzbudil v ňom hlbší záujem o mechaniku, optiku [4] a matematiku [5]. V rokoch 1665–1667 Newton prerušil na dva roky svoje štúdiá lebo v Anglicku vypukol mor. Tieto morové prázdniny v rodnom Woolsthorpe boli najplodnejšími rokmi jeho vedeckej činnosti. Vtedy objavil infinitezimálny počet, ktorý sám nazýval metódou fluxií, rozklad bieleho svetla a údajne aj myšlienku gravitácie.

Po návrate z nedobrovoľných prázdnin sa Newton venoval prevážne optike a matematike. Ako zručný experimentátor zhotovil r. 1671 prvý zrkadlový ďalekohľad, za čo ho zvolili za člena Royal Society. Barrow, ktorý prednášal optiku a matematiku, plne pochopil Newtonovo geniálne nadanie, a keď Newton skončil štúdiá, vzdal sa r. 1669 dobrovoľne svojej katedry (t. zv. Lucasovskej) v prospech Newtona. V r. 1696 odchádza Newton z Cambridge do Londýna, kde si ako strážca mincovne, neskôr riaditeľ, získal skvelé spoločenské postavenie, v ktorom sa venoval vedeckej činnosti iba okrajovo. Zomrel 84 ročný 20. marca 1727 v Kensingtone pri Londýne.

Mechanikou sa Newton zaoberal už počas svojich štúdií. Študoval najmä Descartovu fyziku [6] a Galileiho mechaniku. Atomistikou sa zaoberal na základe prác Gassendiho a Boyla. Gravitačným zákonom sa začal vážnejšie zaoberať až po roku 1679 na podnet experimentátora Hooka, sekretára Royal Society. V r. 1687 vyšlo na naliehanie astronóma Halleyho jeho najslávnejšie dielo: *Philosophiae naturalis principia mathematica* (*Matematické základy prírodnej filozófie*) [7], stručne nazývané *Princípia*, o ktorom pojednáme v ďalších kapitolách. Za Newtonovho života vyšli tri vydania *Princípií*, a to v rokoch 1687, 1713 a 1726 [8], ktoré sa obsahovo odlišujú, lebo Newton svoje *Princípiá* upravoval, spresňoval a doplňal.

3. Základné pojmy Princípií

Newtonove *Princípia* majú prísnu logickú štruktúru, aká bola vtedy bežná najmä v geometrických dielach. Podľa tohto vzoru *Princípia* začínajú definíciami základných pojmov a axiómami, ktoré Newton nazýva zákonami. Pokračujú s dôsledne logicky formulovanými argumentáciami a dôkazmi, ktoré vyúsťujú vo vety komentované poznámkami. Základné pojmy fyzikálne zavádza Newton ako kvantity, veličiny, ktorých veľkosť zobrazuje úsečkami, lebo jednotlivé problémy rieši zásadne geometrickou cestou a nie matematickou.

Prvým definovaným pojmom v *Princípiách* je množstvo matérie (quantitas materiae) definované ako miera matérie, ktorá má svoj pôvod v jej hustote aj v objeme ([7], [8] 21). V poznámke k tejto definícii uvádza Newton, že dvakrát hustý vzduch v dvojnásobnom objeme obsahuje štvornásobné množstvo matérie. Množstvo matérie nazýva masou, ale v tejto terminológii nie je dôsledný [9]. Množstvo matérie sa podľa Newtona určuje vážením. Uvedená definícia množstva matérie nezodpovedá plne dnešnej hmotnosti, pretože napr. hmotný bod má nulový objem a teda aj nulové množstvo matérie. Newton nepozná pojem hmotného bodu. Definícia hmotnosti pochádza od Eulera, ktorý ju definuje ako mieru odporu proti pôsobeniu danej sily, ktorú určujeme zrýchlením. Newtonova definícia množstva matérie nie je ani kvantitatívne dôsledná, lebo by mala predpokladať kvantitatívne určenie hustoty. Podľa Boyleho by hustota plynu mala byť úmerná počtu molekúl v danom objeme, lenže to je hypotéza, o ktorú sa Newton nemohol oprieť. Hustotu planét určuje síce podielom množstva matérie stanoveného podľa gravitačného zákona a objemu ([8] 394), ale to neznamená, že by definícia množstva matérie bola kruhová. Ostrú kritiku Newtonovho „množstva matérie" vyslovil aj Mach ([10] 210, 260).

Druhým základným pojmom *Princípií* je množstvo pohybu (quantitas motus), definované ako miera pohybu, ktorá má svoj pôvod v rýchlosti aj v množstve matérie. S výhradou vyššie uvedených pripomienok zodpovedá množstvo pohybu dnešnej hybnosti.

Silu, pohyb, objem a čas pokladá Newton za všeobecne známe pojmy, ktoré nevyžadujú definíciu. Zato definuje dva druhy sily: silu zotrvačnosti (vis insita) a silu vnútenú (vis impressa). Silou zotrvačnosti sa matéria bráni narušeniu svojho stavu pokoja alebo stavu rovnomerného a priamočiareho pohybu. S myšlienkou, že matéria kladie odpor proti pôsobiacej sile prišiel prvý Kepler, ale ten uvažoval iba o odpore proti zmene pokoja.

Vnútenú silu definuje Newton ako pôsobenie na teleso, ktoré mení jeho stav pokoja alebo stav rovnomerného a priamočiareho pohybu. Sila je u Newtona nezávislá od hmotnosti. V dnešnej mechanike sa stretávame s názormi, že druhý pohybový zákon (o ktorom ešte bude reč) treba pokladať za definíciu sily ako súčinu hmotnosti a zrýchlenia. To nezodpovedá Newtonovej koncepcii, lebo zákon udáva vzťah medzi známymi alebo definovanými veličinami.

4. Pohybové zákony

Pomocou uvedených základných pojmov formuluje Newton svoje tri všeobecne známe pohybové zákony: zákon zotrvačnosti, zákon sily a zákon akcie a reakcie (v dnešnej terminológii). V záhlaví kapitoly o zákonoch užíva aj názov axiómy (axiomata). Tým naznačuje, že ide o základné tézy, z ktorých sa (po vzore Euklida) odvodzujú ďalšie tvrdenia. Termín zákon (lex) poukazuje na to, že (po vzore Descarta) ide o experimentálne overené fakty a nie o hypotézy.

Prvý zákon definuje Newton známou formulou: Každé teleso zotrváva v pokoji alebo v rovnomernom priamočiarom pohybe, kým nie je nútené vnútenými silami zmeniť svoj stav (pozri obr. v článku [14], str. 493). Ako príklady uvádza šikmý vrh, otáčanie sa kolesa a obežný a rotačný pohyb planéty, čo znie trochu paradoxne. To vzbudzuje niekedy pochybnosti, či Newton tu myslí doopravdy pohyb priamočiarý alebo len pohyb v určitom smere ([11] 344). Tento zákon predpokladá Galileiho princíp zotrvačnosti vo zmysle fyzikálnej ekvivalencie pokoja a pohybu rovnomerného a priamočiarého a nadväzuje na Huygensov rozklad kruhového pohybu na rovnomerný a priamočiarý pohyb vo smere dotyčnice a na pohyb vo smere dostredivej sily. To poukazuje na to, že Newton v uvedených príkladoch myslí iba na dotyčnicovú zložku pohybu.

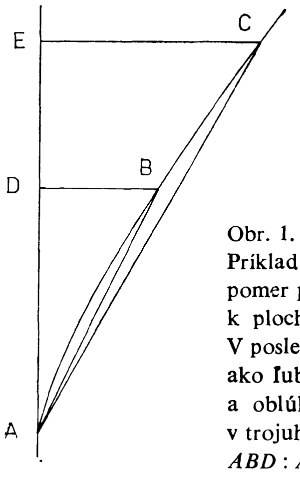
Druhý pohybový zákon formuluje Newton takto: Zmena množstva pohybu je úmerná vnútenej sile a prebieha pozdĺž priamky, v ktorej táto sila pôsobí. Dnes bežná formulácia tohto zákona: Sila je rovná súčinu hmotnosti a zrýchlenia, pochádza od Eulera. Z hľadiska dnešnej „newtonovskej" mechaniky vyžaduje druhý pohybový zákon isté doplnenie, a to v prípade pohybu tuhého telesa momentom sily, čo nebolo predmetom Newtonových úvah. Podobne k formulácii tretieho pohybového zákona: Akcia je rovná reakcii a má opačný smer, treba podotknúť, že neplatí všeobecne [12]. Ide tu však o javy (napr. elektromagnetické pole), ktoré neboli Newtonovi známe. Newton pripisoval všetkým trom pohybovým zákonom všeobecnú platnosť, a to s takým presvedčením, ktoré neznášalo kritiku.

Newton rozlišuje medzi absolútnym a relatívnym pohybom telesa. Absolútny pohyb je pohyb vzhľadom na nehybný absolútny priestor, ktorý nie je nijakým spôsobom ovplyvňovaný pohybom telies. Pohybové zákony platia pre absolútny pohyb. Relatívny pohyb je pohyb vzhľadom na relatívny priestor, ktorý je viazaný na pohybujúce sa telesá a je merateľný. Pojem absolútneho priestoru vypadol z dnešnej fyziky pod vplyvom teórie relativity.

5. Limitný proces

Newton chápe mechaniku ako určovanie sily spôsobujúcej pohyb telesa po danej dráhe, alebo naopak ako určovanie dráhy telesa pri danej sile ([8] 2). Myslí tým problémy racionálnej mechaniky, ktoré dnes riešime spravidla metódami infinitezimálneho počtu postaveného na definícii limity. Newton nazýva v *Princípiách* ekvivalent dnešnej limity posledným pomerom a definuje ho geometricky ([8] 46) v lemme: Veličiny, ako aj pomery veličín, ktoré sa v určitom časovom intervale blížia k rovnosti a pred ukončením tohto intervalu sa môžu k sebe priblížiť viacej ako akýkoľvek daný rozdiel, sú sebe rovné. Na vysvetlenie tejto ťažkopádne formulovanej vety uvažujme oblúk danej krivky medzi dvoma danými bodmi A a B, ako aj ich spojnicu ako sečnicu uvedenej krivky. Keď sa bod B bude blížiť k bodu A po krivke, bude sa meniť aj poloha uvedenej sečnice. Pritom sa pomer dĺžky oblúka a príslušnej tetivy bude neustále blížiť k jednej. Ak sú obe dĺžky kratšie ako hocaká daná úsečka, nazýva Newton uvedený pomer oboch dĺžok posledným pomerom. V poslednom pomere možno dĺžku tetivy položiť rovnú dĺžke príslušného oblúka, uhol medzi sečnicou a krivkou bude nulový a sečnica prejde v dotyčnicu.

Ako ďalší príklad určenia posledného pomeru, ku ktorému pripojíme aj fyzikálnu interpretáciu ([8] 49), uvažujme podľa obr. 1 oblúk krivky A, B, C, ktorý pretína os úsečiek v bode A. Úsečka bodu B (C) nech je AD (AE) a jeho poradnica BD (CE).*)



Obr. 1.
Príklad na výpočet posledného pomeru (limity). Newton počíta pomer plochy obmedzenej oblúkom AB a stranami AD a DB k ploche obmedzenej oblúkom AC a stranami AE a EC. V poslednom pomere, t. j. keď sú všetky uvedené dĺžky kratšie ako ľubovoľná daná dĺžka, oblúk AB splýva s úsečkou AB a oblúk AC s úsečkou AC a porovnávané plochy prejdú v trojuholníky ADB, resp. AEC, pričom pre pomer plôch platí $ABD : ACE = AD^2 . AE^2$.

Tetiva AB vytvára s poradnicou BD a úsečkou AE trojuholník ABD a podobne tetiva AC s poradnicou CE a úsečkou AE trojuholník ACE. Ak sa body B a C budú blížiť k bodu A, dostaneme pre posledný pomer plôch oboch trojuholníkov úmeru

$$ABD . ACE = AD^2 : AE^2 .$$

Tento posledný pomer platí i vtedy, ak miesto pomeru plôch trojuholníkov budeme uvažovať plochy, v ktorých sú tetivy AB a AC nahradené príslušnými oblúkmi uvažovanej krivky.

Nech krivka ABC znázorňuje vo fyzikálnej interpretácii závislosť rýchlosti na čase nejakého daného pohybu. Nech sú na osi úsečiek nanesené príslušné časové intervaly

*) Z technických dôvodov sa v celom článku užíva rovnaký symbol XY pre priamku XY, úsečku XY i jej veľkosť. Pozn. red.

$t_B = AD$ a $t_C = AE$ a na ose poradníc príslušné rýchlosti v_B a v_C. Potom v poslednom pomere môžeme položiť dráhu s_B z bodu A do bodu B úmernú ploche trojuholníka ABD (to vedel už Galilei), a podobne dráhu s_C z bodu A do bodu C úmernú ploche trojuholníka ACE, takže pre pomer dráh bude platiť

$$s_B : s_C = ABD : ACE = AD^2 . AE^2 = t_B^2 : t_C^2 .$$

Táto úmera hovorí, že na začiatku ľubovoľného pohybu sú prejdené dráhy úmerné štvorcom príslušných časov. V poslednom pomere sú jednotlivé dráhy úmerné rýchlostiam ($s_B : s_C = v_B : v_C$), a preto sú podľa druhého pohybového zákona úmerné vnúteným silám, teda štvorcom času. Preto vnútené sily, ktoré tieto pohyby vyvolali (F_B, F_C), sú priamo úmerné príslušným dráham a nepriamo úmerné štvorcom príslušných časov, t. j.

(1)
$$F_B : F_C = \frac{1}{t_B^2} : \frac{1}{t_C^2} .$$

Uvedený dôkaz nájdeme až v treťom vydaní *Princípií.* V prvom vydaní ho Newton podrobnejšie nerozvádza, lebo kladie na čitateľa omnoho vyššie nároky. Ak chceme tento Newtonov výsledok porovnať s dnešnou „newtonovskou“ mechanikou, musíme si uvedomiť, že uvedená úvaha platí iba pre začiatok pohybu, teda v diferenciálnej forme.*)

6. Dôkaz gravitačného zákona**)

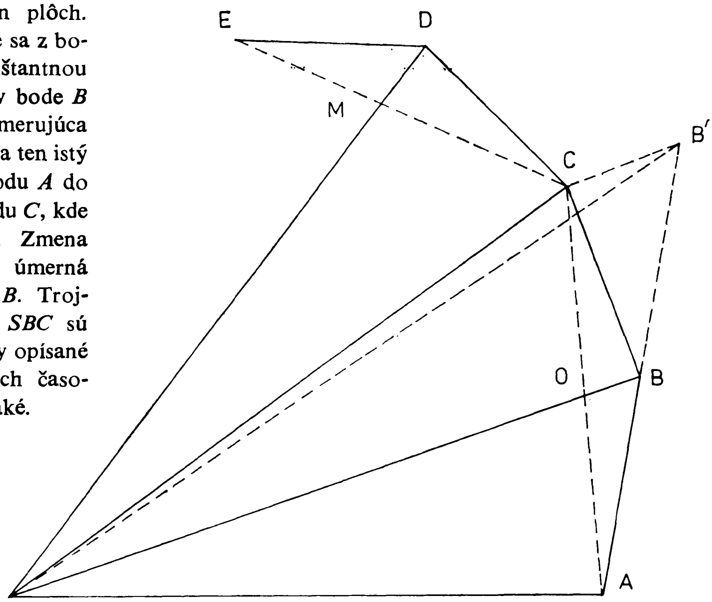
Koncom roka 1679 požiadal generálny sekretár Royal Society Robert Hooke písomne Newtona o spoluprácu pri riešení dráhy planéty, pre ktorú platia dosiaľ nedokázané Keplerove zákony, za predpokladu, že táto dráha je zložená z rovnomerného priamočiareho pohybu vo smere dotyčnice a z dostredivého pohybu vo smere centrálneho telesa. Ďalej uviedol, že dostredivá sila má byť nepriamo úmerná štvorcu vzdialenosti planéty od centrálneho telesa [13]. Tieto údaje získal Hooke z prác Huygensa, Borelliho a Boullialda. Riešením tohto problému je Newtonov gravitačný zákon uverejnený s dôkazom v *Princípiách.*

Pri riešení Newton najprv predpokladá, že dostredivá sila pôsobí z pevného bodu S na pohybujúce sa teleso iba v diskrétnych bodoch jeho dráhy v rovnakých časových intervaloch (obr. 2) ([8] 55). Ak teleso prejde z bodu A do bodu B podľa prvého pohybového zákona rýchlosťou AB a v bode B nepôsobí žiadna sila, teleso by v ďalšom časovom intervale došlo do bodu B', kde $AB = BB'$. Ak však na teleso zapôsobí v bode B okamžitá dostredivá sila, zmení sa v ňom rýchlosť podľa druhého pohybového zákona

*) V Leibnizovej formulácii má druhý pohybový zákon tvar $F\,dt = m\,dv$. Keďže dt je konečné, môžeme ho zvoliť za jednotku času a potom $dv = ds$. Preto $F_B . F_C = ds_B . ds_C$. V texte sme miesto ds položili s a písali $s_B . s_C$. Z obr. 2 vidno, že v poslednom pomere $s = \frac{1}{2}vt$ a $v = kt$, kde k je konštanta, a preto $s = k/2t^2$.

**) Dôkaz je podaný štýlom ktorý Newton použil vo svojich *Princípiách* [8].

o hodnotu $B'C$, kde $B'C$ je rovnobežné s SB. Pritom $B'C$ je úmerné veľkosti pôsobiacej sily. Teleso pritom prejde z bodu B do bodu C. Jednoduchou geometrickou úvahou možno dokázať, že trojuholníky ASB a SBC sú rovnoploché. Táto rovnosť je vyjadrením Keplerovho zákona plôch. Newtonov dôkaz však platí pre každú dostredivú silu.



Obr. 2. Keplerov zákon plôch. Keď na teleso pohybujúce sa z bodu A do bodu B konštantnou rýchlosťou AB zapôsobí v bode B okamžitá dostredivá sila smerujúca do bodu S, prejde teleso za ten istý čas, v ktorom prešlo z bodu A do bodu B, z bodu B do bodu C, kde $BB' = AB$ a $CB' \parallel BS$. Zmena rýchlosti $CB' = \frac{1}{2}OB$ je úmerná dostredivej sile v bode B. Trojuholníky SAB, SBB' a SBC sú rovnoploché. Preto plochy opísané sprievodičom v rovnakých časových intervaloch sú rovnaké.

Spojnica AC pretína sprievodič SB v bode O, pričom $OB = \frac{1}{2}B'C$, a preto úsečku OB môžeme pokladať za úmernú dostredivej sile v bode B. V ďalšom časovom intervale nech teleso prejde z bodu C do bodu D. V tomto bode môžeme úvahu v bode B zopakovať a zostrojiť bod M analogický bodu O. Ak má platiť, že odstredivá sila je nepriamo úmerná štvorcu sprievodiča, musí platiť

$$OB : MD = \frac{1}{SB^2} : \frac{1}{SD^2}\,.$$

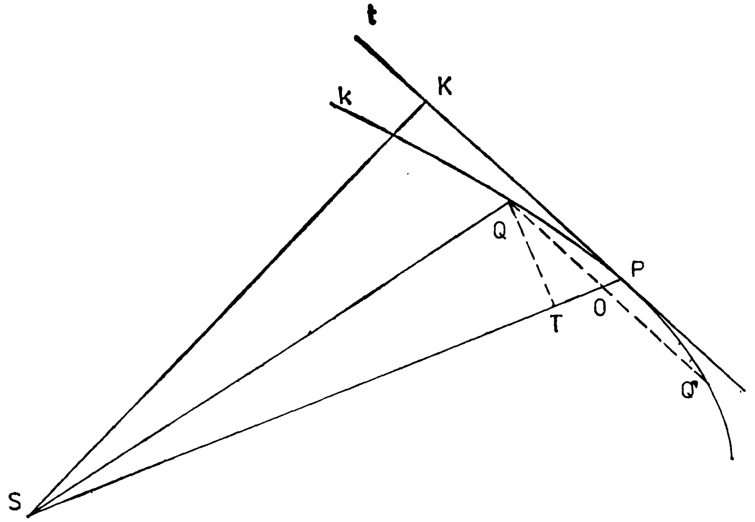
To je Newtonova interpretácia problému, ktorý mu Hooke predložil. Newton pokračoval v riešení tohto problému prejdením k poslednému pomeru, v ktorom sú body A, B, C a D bližšie k sebe ako ľubovoľná daná úsečka, a dokázal, že body A, B, C a D musia ležať na kužeľosečke, a to na základe známych vlastností kužeľosečiek. Tento Newtonov dôkaz je dnes už len dômyselnou historickou kuriozitou. Jeho podrobný rozbor by vyžadoval istú zbehlosť v konštrukcii kužeľosečiek a presahuje rámec tejto štúdie.

Newton vyriešil aj opačný mechanický problém ([8] 62). Nech je pohyb bodu P po danej krivke k (obr. 3) spôsobený dostredivou silou o danom strede S. Treba určiť veľkosť dostredivej sily v bode P. Newton si zvolil na krivke k dva body Q a Q' tak, aby teleso potrebovalo rovnakú dobu k prejdeniu dráhy z P do Q' ako z Q do P. Keď sečnica QQ' pretne sprievodič SP v bode O, potom podľa predchádzajúcej úvahy je úsečka OP v poslednom pomere pre Q a Q' blízke P úmerná dostredivej sile v bode P.

Newton ďalej spustil z bodu Q na sprievodič SP kolmicu QT. V poslednom pomere je plocha trojuholníka SPQ rovná súčinu $\frac{1}{2}SP \,.\, QT$ a je podľa zákona plôch úmerná dobe potrebnej k prejdeniu telesa z bodu Q do bodu P. Keďže dostredivá sila je podľa vzorca (1) nepriamo úmerná čtvorcu času, je v poslednom pomere priamo úmerná súčinu štvorcov $SP^2 \,.\, QT^2$. Podľa úvahy k obr. 2 je dostredivá sila v bode P priamo úmerná aj dĺžke OP, a preto je úmerná výrazu

$$\frac{1}{SP^2} \cdot \frac{OP}{QT^2},$$

kde za $OP : QT^2$ treba dosadiť posledný pomer, ktorý sa určí z tvaru dráhy. Pre kužeľosečky je dostredivá sila nepriamo úmerná štvorcu sprievodiča meraného od ohniska kužeľosečky. Tým je podľa Newtona vyriešený aj problém určenia dostredivej sily, keď je známa dráha pohybu.



Obr. 3. Určenie dostredivej sily. Teleso sa pohybuje pod účinkom dostredivej sily pôsobiacej do bodu S po krivke k zo zvoleného bodu Q do bodu P za rovnaký čas ako z bodu P do bodu Q'. V poslednom pomere pre Q a Q' blízke k P je plocha trojuholníka, ktorá je úmerná dobe potrebnej k prejdeniu z Q do P rovná $SP \,.\, QT$, kde QT je kolmica z bodu Q na sprievodič SP. Podľa (1) je dostredivá sila v poslednom pomere nepriamo úmerná štvorcu doby, a preto aj súčinu $SP^2 \,.\, QT^2$.

Ak t je dotyčnica k dráhe k v bode P a SK kolmé na t, je dĺžka SK nepriamo úmerná rýchlosti telesa v bode P.

Newton ďalej dokazuje, že rýchlosť telesa v danom bode dráhy P (obr. 3) je pri centrálnom pohybe nepriamo úmerná dĺžke kolmice SK spustenej zo stredu síl na dotyčnicu dráhy v bode P ([8] 63). To mu umožňuje riešiť problém dráhy planéty, ak je jedným z určujúcich parametrov rýchlosť v danom bode.

Časový priebeh centrálneho pohybu určuje Newton zo zákona plôch: Doba prechodu medzi dvoma bodmi na dráhe je úmerná ploche opísanej ich sprievodičmi. Pri eliptickom pohybe rieši Newton tento problém dômyselným premietnutím pohybu po elipse do pohybu na kružnici, k čomu používa konštrukciu trochoidy ([8] 122). Dokonca aj zákon dráhy voľného pádu určuje zo zákona plôch, pričom dráhu po priamke premieta na parabolu ([8] 128). Dnes riešime tento problém pomocou veľmi jednoduchej diferenciálnej rovnice. Nemožno sa preto diviť, že priekopnícka práca Newtona spojená s geometrickým výkladom sa v praxi neujala a nenašiel sa nik, kto by v nej pokračoval.

Newton odmieta bodové centrá ako matematické fikcie. Priťahovať sa môžu iba telesá konečných rozmerov. Na výpočet príťažlivej sily je potrebný integrálny počet, ktorý Newton tiež zvládol ([8] 166, 210). Podľa tretieho pohybového zákona je príťažlivosť telies vzájomná. To umožnilo aj dôkaz úmernosti príťažlivej sily hmotnostiam (množstvám matérie) a formulovať gravitačný zákon v dnešnej podobe.

7. Princípiá v dejinách fyziky

Newtonove *Princípiá* tvorili nielen logicky, ale aj obsahovo uzavretý celok. Obsahujú prakticky všetko, o čom sa vtedy v mechanike dalo hovoriť. Základné tézy mechaniky, vrátane gravitačného zákona, a ďalšie aplikácie centrálneho pohybu (ako vrh, kyvadlo, prechod malých častíc rozhraním) sú obsiahnuté v prvej knihe *Princípií.* Druhá kniha *Princípií* pojednáva o pohyboch v odporovom prostredí a rieši problémy hydrostatiky a hydrodynamiky so zvláštnym zreteľom na vírenie kvapalín, kde vyvracia Descartove predstavy planetárneho pohybu. V tretej knihe dokazuje platnosť svojej mechaniky pre pohyb nebeských telies. Newton tvrdí, že aj ostatné prírodné javy ako elektrické, magnetické, optické, chemické i fyziologické sa v zásade dajú vysvetliť pomocou rôznych príťažlivých a odpudivých síl jeho mechaniky, avšak nato niet dostatok experimentálnych poznatkov a teória je málo vyvinutá. Známe Newtonovo tvrdenie „hypotézy nevymýšľam" v závere *Princípií* uzatvára ďalšiu diskusiu k týmto problémom ([8] 511).

Celý koncept *Princípií* dokazuje, že Newton bol sčítaným v celej súčasnej matematike, geometrii, fyzike i astronómii. *Princípiá* sú stavané na výsledkoch prác jeho predchodcov najmä Galileiho, Huygensa, Descarta a Keplera [14], aj keď Newton nevenuje historickému vývinu fyzikálnych ideí žiadnu pozornosť. Dnes v dobe konfrontácií Newtonovej mechaniky s modernými fyzikálnymi teóriami rastie záujem nielen o to, jak došlo k postaveniu Newtonovej mechaniky, ale aj o to ako ďalší vývoj mechaniky pokračoval do dnes ustálenej formy, ktorú nazývame newtonovskou mechanikou, ktorá spolu s Maxwellovou teóriou elektromagnetizmu tvorí klasickú fyziku.

Už pred vydaním *Princípií* boli známe Leibnizove práce o diferenciálnom a integrálnom počte, ktoré sa ukázali byť oveľa vhodnejšie pre ďalší rozvoj Newtonovej mechaniky ako pôvodný Newtonov geometricky orientovaný prístup. Na základe prác Bernoulliovcov a najmä ich žiaka Leonarda Eulera (1707—1783) sa okolo r. 1750 podarilo preformulovať Newtonovu mechaniku na problém riešenia pohybových diferenciálnych rovníc v Leibnizovom dnes bežnom „kalkule"; pritom dochádza k modifikácii Newtonovej mechaniky (napr. spomínaný problém hmotnosti) a k jej doplneniu (mechanika tuhého telesa, kontinua). Pritom však základná štruktúra „Newtonovej“ mechaniky zostáva zachovaná [16].

Sto rokov po vydaní *Princípií* vydáva Lagrange svoju *Analytickú mechaniku* [17], a to v elegantnej matematickej forme, ktorá nevyžaduje žiaden geometrický obrázok. Lagrange (vo svojich rovniciach druhého druhu) necharakterizuje fyzikálny systém pôsobením síl, ale rozdielom kinetickej a potenciálnej energie, a tým zavŕšuje vývoj newtonovskej mechaniky vo forme dnes nazývanej klasickou mechanikou.

8. Záver

Princípiá boli napísané veľmi ťažkopádnym štýlom, ktorý mohol do detailov sledovať iba malý okruh špecialistov. Sláva *Princípií* sa zpočiatku zakladala na gravitačnom zákone, ktorý bol veľmi popularizovaný, lebo spájal nebo a zem. V Anglicku nemal Newton primeraného nasledovníka a vývoj mechaniky po Newtonovi tam stagnoval. Francúzski fyzici, stúpenci Descarta, zpočiatku Newtona ignorovali. Ostatný kontinent Európy bol poznačený trapným sporom Newtona s Leibnizom a Newtona opomínal. Oživenie mechaniky prinieslo vnesenie Leibnizovho kalkulu do Newtonových formulácií. Newtonova geometrická interpretácia mechaniky nenašla nikde nasledovníka.

Niet preto divu, že aj v našich podmienkach sa Newtonovej mechanike začala venovať pozornosť pomerne oneskorene. Jak pražská, tak aj trnavská univerzita boli v rukách jezuitov, ktorí sa k novotám vo fyzike stavali rezignovane, najmä ak šlo o teórie, ktoré potvrdzovali Koperníkov heliocentrický systém. Pritom sa však aj medzi jezuitmi nachádzali závažní stúpenci Newtona, ako bol Dalmatínec Josip Boškovič (1711 – 1787), ktorý r. 1758 predložil novú koncepciu štruktúry sveta a vykladal ju pôsobením newtonovských síl na hmotné bodové centrá [18].

Na Karlovej univerzite v Prahe r. 1748 odmietol jezuita Josef Stepling (1716 – 1778) profesor, neskôr dekan filozofickej fakulty prednášať aristotelovskú filozófiu, aby sa mohol venovať prednáškam z fyziky a matematiky. V týchto prednáškach sa venoval aj Newtonovej mechanike. Už v r. 1759 kritizuje Boškovičovu filozófiu s jeho bodovými centrami, lebo v nej vidí prvky Leibnizovej monadológie. Steplingov žiak Ján Tesánek (1728 – 1788) pripravil vydanie Newtonových *Princípií* s vlastným komentárom. Prvé dve knihy vyšli v r. 1780 a 1785, tretia kniha zostala v rukopise. Tesánkove komentáre poprvé využívajúce metód infinitezimálneho kalkulu na mechaniku dokazujú, že v tej dobe bola Newtonova mechanika na pražskej univerzite na výške doby ([19] 106, [20] 65).

Na trnavskej univerzite sa venovala zvýšená pozornosť Koperníkovej heliocentrickej sústave a astronómii až po r. 1757, keď bol zrušený zákaz jej obhajoby. Tým sa pripravila pôda aj pre Newtonovu mechaniku. Fyzikálne učebnice boli písané ešte v aristotelovskom duchu, ale nachádzame v nich aj prvky Descartovej filozofie. Prvou newtonovsky koncipovanou fyzikou na trnavskej univerzite bola *Physica generalis* (*Všeobecná fyzika*) Jána Horvátha, ktorá vyšla vo Viedni r. 1772. Horváth pokračoval v pestovaní Newtonovej fyziky aj po preložení trnavskej univerzity do Budína r. 1777 ([21] 211).

Dvojsté výročie vydania Newtonových *Princípií* si Karlova univerzita pripomenula vydaním Seydlerovho stručného životopisu Newtona a obsahu jeho *Princípií* [22].

V dnešnej dobe sú Newtonove *Princípiá* iba historicky zaujímavou kuriozitou, ktorá sa veľmi ťažko číta a študuje. Zato klasická fyzika postavená na rozvinutí Newtonových *Princípií* patrí dodnes k základným fyzikálnym teóriam, nakoľko platí pre širokú oblasť makrofyzikálnych javov, pokiaľ v nej neuvažujeme rýchlosti blízke rýchlosti svetla. Teoria relativity a kvantová teória, ktoré túto medzeru fyzikálneho poznania dosiaľ úspešne zavŕšujú, by neboli ani mysliteľné ani formulovateľné bez tej základnej pojmovej štruktúry, ktorú dal Newton fyzike svojimi *Princípiami*.

Literatúra

[1] NOVÝ, L. a SMOLKA, J.: *Isaac Newton.* Praha, Orbis, 1969.
[2] STARÍČEK, I.: *Isaac Newton a jeho Princípia.* Vesmír *64* (1985) 398.
[3] MORE, L.: *Isaac Newton a biography.* New York, Dover, 1962.
[4] VAVILOV, S.: *Izák Newton* (preklad z ruštiny) Bratislava, SAVU, 1952.
[5] WUSSING, H.: *Isaac Newton.* Leipzig, Teubner, 1977, 146.
[6] KOYRÉ, A.: *Newtonian studies.* Cambridge, Harvard univ. press, 1965.
[7] NEWTON ISAAC: *Philosophiae naturalis principia mathematica.* London 1687.
[8] NEWTON ISAAC: *Mathematische Principien der Naturlehre.* (Nemecký preklad tretiho vydania Princípií z r. 1726). Berlín, 1872.
[9] FRIDMAN, V.: *Ob učenii Njutona o masse.* Uspechi fiz. nauk *61* (1957) vyp. 3 s. 451.
[10] MACH, E.: *Die Mechanik in ihrer Entwicklung.* Leipzig, Brockhaus, 1912.
[11] ČERNOHORSKÝ, M.: *Newtonova formulace prvního pohybového zákona.* Pokroky matematiky, fyziky a astronómie *20* (1975) 344.
[12] HORÁK, Z.: *Před 250 lety zemřel Isaac Newton.* Pokroky matematiky, fyziky a astronomie *22* (1977) 263.
[13] COHEN, I:. *Newtons discovery of gravity.* Scientific American *244* (1981) č. 3.
[14] STARÍČEK, I.: *Prednewtonovská mechanika.* Pokroky matematiky, fyziky a astronómie *32* (1987) 57.
[15] NOVÝ, L.: *Newtonovy práce na textu díla Philosophiae naturalis principia mathematica.* Čs. čas. fyz. *A 24* (1974) 490.
[16] TRUESDELL, C.: *Essays in the history of mechanics.* Berlin, Springer, 1968.
[17] GINDIKIN, S.: Joseph Louis Lagrange. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie *31* (1986) 297.
[18] ROGER JOSEPH BOSKOVICH. *Studies on his life and work on the 250 anniversary of his life.* London, Allen, 1961.
[19] *Dějiny exaktních věd v českých zemích do konce 19. století.* Praha, ČSAV, 1961.
[20] KOLOMÝ, R.: *Josef Stepling a bleskosvod v mestě Poličce.* Dějiny věd a techniky *13* (1980) č. 2.
[21] PÖSS, O.: *Fyzika na trnavskej univerzite.* Vesmír *65* (1986) č. 4.
[22] SEYDLER, A.: *Izák Newton a jeho Principia.* Praha, vlastným nákladom, 1887.