

Peter Lukan

Filozofska fakulteta Univerze v Ljubljani

Temeljni pojmi Boškovičevega atomizma v perspektivi vznikanja moderne znanosti

Namen članka je podati oris atomske teorije Ruderja Boškovića, nakazati vpliv in tehtnost nekaterih njegovih najbolj prodornih teoretičnih znanstvenih dosežkov ter jih umestiti v odnosu do razvoja moderne znanstvene misli in metode. V uvodu na kratko predstavim Boškovićevo življenje in delo, nato orišem njegovo pojmovanje atomov, ki ga vzporejam z manj dodelanimi pojmovanji Newtona in Leibniza, po čigar teorijah se je deloma zgledoval. V nadaljevanju predstavim njegov zakon univerzalne sile, po čemer je najboljše poznan, ter njegov odnos do naravnih zakonov nasploh. Posebno pozornost namenjam Boškovićevo izvirni predelavi aristotelskih pojmov potencialnega in aktualnega, ki ju aplicira na pojma zveznega in diskretnega v povezavi s pojmovanjem prostora in časa ter sta implicitni temeljni sestavini njegovega atomizma. Na koncu omenjam še Boškovičev prispevek k znanstveni metodi in navajam nekatere dolgoročne vplive njegovega dela.

Ključne besede: Bošković, atomizem, naravni zakoni, prostor, potencialnost, znanstvena metoda

Uvod

Ruder Josip Bošković¹ (1711–1787), dubrovniški fizik, astronom, matematik, geodet, filozof, inženir, hidrograf, diplomat, pesnik in jezuit je razmeroma dobro poznana zgodovinska figura na območju Balkana – po njem se na primer imenuje tudi osrednji hrvaški znanstveni inštitut v Zagrebu. Kljub temu je v svetovnem merilu relativno slabo poznana figura glede na njegov prispevek k znanstveni misli in metodi, čeprav za časa njegovega življenja ni bilo tako. Po mladosti, ki jo

¹ Njegovo italijansko poimenovanje se glasi Ruggero Giuseppe Boscovich, angleško pa Roger Joseph Boscovich. Ker je živel v času pred vznikom nacionalnih držav, se ni posebej izrekal za državljanstvo v današnjem smislu, čeprav je sebe vsekakor štel za Dubrovničana, saj je Dubrovnik bil samostojna republika. Danes si ga lasti več držav: Hrvaška, Srbija in Italija.

je preživel v Dubrovniku, se je 14-leten odpravil v Rim na študij pri jezuitih. Večino svojega življenja je deloval na območju Italije in Francije, veliko je tudi potoval po Evropi z namenom raziskovanja. Med svojim daljšim obiskom v Londonu je postal tudi član angleške Kraljeve družbe.

V slovenskem prostoru se je o Boškoviću pisalo relativno malo, izjemi sta Stanislav Južnič in Sandi Sitar,² ki sta o njem napisala več člankov, tako da je Boškovićevo življenje in delo vsaj v osnovi že bilo predstavljeno. Južnič se v svojih strokovnih člankih osredotoča predvsem na njegove dosežke na področjih astronomije, kemije in tehnike ter na njegov vpliv na ožjem prostoru Ljubljane ter širše v slovenskem prostoru, tudi z njegovo fizikalno teorijo. Kot jezuit je Bošković namreč večkrat tudi predaval v Ljubljani ter s tem deloma pustil svoj pečat tudi pri nas, ki pa je majhen v primerjavi z njegovim mednarodnim vplivom, o čemer bom pisal kasneje. O Boškoviću je na balkanskem prostoru najbolj poglobljeno pisal že pokojni znani hrvaški jedrski fiziki in humanist Ivan Supek, na čigar monografijo o Boškoviću se tudi opiram (Supek, 1989). Sam se osredotočam na Boškovićevo teorijo iz problemsko-konceptualnega vidika, ki je pomemben za sočasni razvoj znanosti.

Boškovićeve atomi

Bošković je dandanes med zgodovinarji znanosti najbolj poznan po svojem pojmovanju atomov in z njim povezano t.i. krivuljo sil, o kateri več nekoliko kasneje. Tako kot velja za druge pojme pri njem, se tudi glede razumevanja samih atomov zgleduje tako po Leibnizu kot po Newtonu, ki sta sicer bila zagrizena nasprotnika na več področjih, zato bom najprej na kratko predstavil ti dve pojmovanji.

Newtonovo razumevanje atomov, ki ga je podal na precej skop način, je mogoče povzeti predvsem iz nekaterih odlomkov iz njegove *Optike* (1952). Tam med drugim zapiše, da je verjetno Bog ustvaril

/.../ snov kot trdne, masivne, trde, nepredirne, gibljive delce takšnih velikosti in oblik in s takšnimi drugimi lastnostmi ter prostorskimi razmerji, da so najprimernejši za namen, zaradi katerega jih je ustvaril; in da so ti prvotni delci, ki so trdni, neprimerno trši od kateregakoli poroznega telesa, ki je iz njih sestavljeno, celo tako trdi, da se nikoli ne obrabijo in razlomijo na koščke. (Newton, 1952: 375-376)

Johnson in Wilsonova na podlagi tega odlomka iz tretje knjige *Optike* trdita, da Newton na tem mestu pravzaprav parafrazira Lukrecija in njegovo delo *O naravi sveta*, ki je imelo vpliv že na Pierra Gassendija, enega prvih evropskih mislecev

² Pri Sitarju gre za dva krajša članka bolj opisne narave, ki se ne ukvarjata z Boškovićevo naravoslovno teorijo iz problemsko-konceptualnega vidika.

atomizma, ter da njegov atomizem lahko v grobem razumemo kot lukrecijevski tip atomizma, čeprav mu je dodal tudi teološke elemente kreacionizma in voluntarizma (Johnson in Wilson, 2007: 141–142). Če nekoliko povzamem, Newtonovi delci imajo razsežnost, maso, inercijo, ki je pasivna lastnost, sila med njimi pa je neživa (t.i. *vis mortua*), kar se je tedaj razlikovalo od tako imenovane žive sile (*vis viva*), in po Newtonu ne deluje na razdaljo.

Leibniz po drugi strani pristaja na *monade*, ki zanj pomenijo neminljive, nespremenljive in nedeljive enostavne umske substance (Leibniz, 2004a: 133). Monade so »resnični Atomi Nature in, z eno besedo, Elementi stvari« (ibid.). Njihova pomembna značilnost je dušni princip, ki ga povzemata lastnosti percepcije in apetitive. Percepcija ni nič drugega kot »menljivo stanje, ki zaobjema in predstavlja neko množstvo v celoti ali v enostavni substanci« (Leibniz, 2004a: 135), torej stanje, ki odraža mnogoteri vpliv zunanosti v monadi sami. To moramo razlikovati od zavesti oziroma apersepcije.³ Apetitive je »dejavnost notranjega principa, po kateri se dogaja spreminjanje ali prehajanje od percepcije k percepciji« (ibid.), pri čemer apetit teži k percepciji in je ne more povsem doseči. Z nekoliko ustvarjalnega razumevanja bi v sodobnem fizikalnem smislu apetitive morda lahko vzporejali z variacijskim načelom minimalne akcije, ki opisuje prehod v ravnovesno stanje, percepcijo pa kot to ravnovesno oziroma stacionarno stanje. Pri vsem omenjenem ni odveč poudariti, da Leibniz ločuje med dušo in monado:

Če rečemo Duša vsemu, kar ima *percepcije* in *apetitive* /.../, potem bi lahko vse enostavne substance ali ustvarjene Monade imenovali Duše; toda ker je čutenje nekaj več kot enostavna percepcija, sem sam za to, da naj zadostuje obče ime Monada ali Entelehija za enostavne substance, ki imajo samo le-to, medtem ko imenujemo *Duše* samo tiste, katerih percipiranje je bolj določno in ga spremlja pomnljivost. (Leibniz, 2004a: 135)

Bolj korektno je torej reči, da pojem monade vključuje princip duše in da gre za umsko substancu v tem smislu besede.

Monade so lahko aktivne ali pasivne, mera njihove aktivnosti pa je odvisna od mere (ne)jasnosti njihove percepcije: »Tako pripisujemo Monadi Aktivnost, kolikor so njene percepcije razločne, trpnost pa, kolikor so zmedene« (Leibniz, 2004a: 141). V tem smislu inercija monade ni njena pasivna lastnost, njena pritliklina, temveč je rezultat dogajanja v smislu zmedenih predstav. Monade tako tudi nimajo mase, masa je šele rezultat enostavnih substanc. Monade nimajo razsežnosti, med sabo ne interagirajo na razdaljo, sila med njimi pa je živa (*vis viva*). Morda ni odveč omeniti, da se je Leibniz glede atomizma zelo verjetno navdahnul tudi pri piscu arabske srednjeveške šolske filozofije Kalāma Maimonidesu (Jammer,

³ Leibniz je npr. mnenja, da so kartezijanci zgrešili prav v tej točki, »ko so za nič šteli percepcije, katerih se ne zavemo« (Leibniz, 2004a: 133).

1954: 64).⁴ Do svojega pojmovanja atomizma je torej prišel po nekoliko drugačni poti kot Newton.

Bošković svoje razumevanje atomov poda predvsem v *Theoria philosophiae naturalis* (1758), ki predstavlja njegov *opus magnum*. Supek (1989) in Child (1922) povzemata nekatere osrednje lastnosti njegovih atomov. Njegove »snovne točke«, kot jih tudi imenuje, so med seboj enake, nedeljive, nepredirljive, telesa, ki so iz njih sestavljena, pa nič od tega. Bošković tako torej ne priznava neskončne deljivosti, temveč samo neskončno sestavljenost. Atomi niso niti togi niti elastični. Sami po sebi nimajo mase, čeprav je ta sorazmerna številu »snovnih točk«, torej množini snovi. Zaradi takšnega pogleda je Bošković bil nekoliko v konfliktu s tedaj prevladujočim materializmom, ki se je najbolj učvrstil prav s pojmom mase. Kljub temu so »snovne točke« inertne, kar jih dela sorodne Newtonovim atomom, pri katerih pa je inercija neposredno povezana z maso. V vseh teh lastnostih so Boškovičevi atomi podobni Leibnizevim monadam (Child, 1922: XII). Bistvena razlika med obema je, da so Boškovičevi atomi neživi, ne poznajo apeticije in percepcije, njihova inercija pa je – za razliko od Leibnizevih monad – pasivna lastnost. Kot omenja Supek, je še ena od pomembnih lastnosti, ki jih loči od monad, ta, da so atomi zaznavni samo v medsebojni interakciji, medtem ko za monade to ne velja, saj je percepcija vsebovana v njih samih (Supek, 1989: 110). Tudi Child poudarja, da »posamična točka ne bi dala čutnih podatkov [*sense datum*], če je ločena od druge točke; zato je lahko posamezne točke razumemo kot same na sebi nezaznavne, vendar kot zaznavne skozi odnose do ostalih snovnih točk« (Child, 1922: XIV).

Sam Bošković je trdil, da njegova *Teorija* stoji med Newtonovo in Leibnizevo. Supek piše, da Bošković

od Newtona odstopa, ker zavrača trdne atome, vendar ohranja dominantnost sile, Leibnizu se približuje s sliko breztežnih atomov, vendar zavrača njegovo predestinirano harmonijo, ki upravlja vsako monado posebej. Tako Leibniz kot Bošković se držita načela kontinuitete, vendar to Dubrovničan najprej aplicira na gibanje, medtem ko materija sestoji iz diskretnih točk. (Supek, 1989: 110)

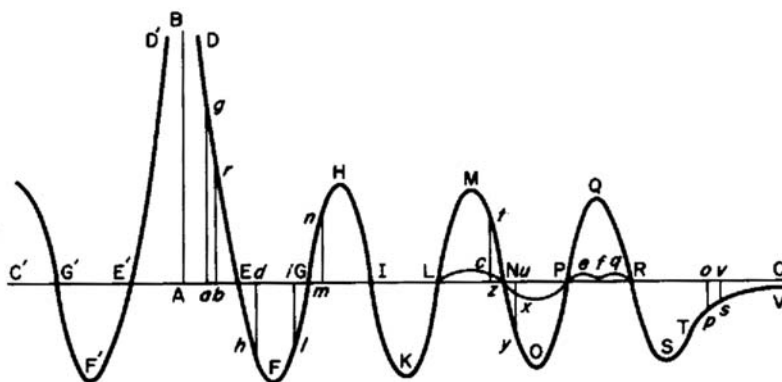
Boškovičeva novost v odnosu do klasičnega atomizma je prav to njegovo priseganje na princip kontinuitete, kljub temu da se to sliši protislovno. Antični atomizem Demokrita in Lukrecija je namreč poleg obstoja atomov postuliral tudi obstoj praznine, to je njegov bistveni sestavni del, medtem ko Bošković zavrača atomistično predpostavko praznega prostora (ibid.: 85). V tem smislu je zanj glavna on-

⁴ Ena od zanimivih posebnosti te šole v odnosu do atomizma je, da je gibanje atomov razumela kot *diskretno*, kar je zanimiva podobnost z nekaterimi interpretacijami kvantne mehanike. Kljub temu da se je ta arabska srednjeveška »sholastika« izdatno zgledovala po Aristotelu, *al failosoufu*, je vseeno prisegala na atomizem, ki ga je on sam zavračal.

tološka danost »sila«, materiji odvzame razsežnost, kar je bila bistvena značilnost materialne substance po Descartesu (ibid.: 80). V naslednjem razdelku zato obravnavam njegovo krivuljo sil.

Boškovičeva »krivulja sil« in razumevanje naravnih zakonov

Na koncu prejšnjega razdelka je bilo nakazano, da Boškovičevo pojmovanje atomov ni zgolj nekakšna kombinacija Newtonovega in Leibnizevega pojmovanja, temveč prinaša tudi pomembne izvirne elemente. Te najboljše povzema njegova »krivulja sil« (slika spodaj), ki predstavlja prvo matematično artikulacijo teorije atomov, ki so vse do tedaj bili razumljeni na nematematični način. S tem se teorija atomov prvič resno sreča z razvijajočo se moderno znanostjo.



Boškovičeva krivulja sil, kot jo najdemo v njegovi *Theoria philosophiae naturalis* (vir: internet). Snovni delec se nahaja v izhodišču v točki A, krivulja sil pa nakazuje, kakšna sila deluje na drug delec, ki se nahaja na določeni oddaljenosti od točke A.

»Krivulja sil« prikazuje, kako se sila na neko snovno točko spreminja z oddaljenostjo v smeri vzdolž premice od snovne točke, ki je postavljena v izhodišče koordinatnega sistema (točka A). V veliki oddaljenosti (od točke S dalje) sila dokončno preide v privlačno gravitacijsko silo, ki se zmanjšuje s kvadratom razdalje in gre proti 0 z večanjem razdalje med snovnima točkama. Iz grafa je razvidno, da je sila na nekaterih odsekih pozitivna, na drugih pa negativna, kar z drugimi besedami pomeni, da atomi na neki razdalji čutijo odbojno, na drugi privlačno silo, na nekaterih območjih pa so prehodi med obema režimoma. To ima za posledico, da obstajajo določene medsebojne ravnovesne lege, v katerih je sila med atomoma enaka nič in v katerih atomi obmirujejo (Bošković, 1996: 167). Gre torej za medsebojna ravnovesna stanja atomov, s kakršnimi se danes opisuje povezavo dveh atomov v molekuli.

Kar se pri tem pojmovanju zdi pomembno, je to, da »krivulja sil« predstavlja neko zvezno entiteto, ki zapolnjuje prostor. Ravno v tem pogledu je Boškovičeva krivulja sil prekurzor kasnejšega pojma električnega polja, ki ga je uvedel Michael Faraday, in kasneje tudi vseh drugih variant fizikalnega pojma polja. Takšno pojmovanje je bilo novost v razmišljanju o atomih in silah nasploh. Sicer je tudi Newton zagovarjal stališče, da sila ne deluje preko praznega prostora, da pri gravitaciji ne gre za neko »strašljivo silo na daljavo« (*spooky action at a distance*). Golo delovanje na daljavo bi zanj pomenilo absurd, kot je zapisal v pismu Bentleyju, čeprav se ne izjasni, ali gre za snovni ali nesnovni medij. Kljub temu Newton ni določene oblike tega medsebojnega delovanja delcev, nikdar ni omenjal možnosti sile, ki bi prehajala iz privlačne v odbojno. Bošković sicer citira mesto iz njegove *Optike*, kjer piše o odbojnih silah za razliko od gravitacije, ki je privlačna sila, na drugem mestu pa omenja silo kohezije, tj. takšno, ki drži telesa skupaj, tako da mu takšni možnosti delovanja sil nista tuji. Bošković je takšne različne variante sil zvedel na eno univerzalno silo, ki jo je razumel kot rezultanto vseh sil.

Za bolj celovito razumevanje Boškovičevega atomizma se zdi pomembno natančneje secirati tudi njegov pojem sile. Kot poudarjajo nekateri proučevalci, Boškovičeva »krivulja sil« pravzaprav ne opisuje sil v Newtonovem smislu. Sicer drži, da je svoj zakon poimenoval *legis virium*, vendar izraz *vis* v njegovem času ni imel enoličnega pomena sile. Kot piše J. M. Child v svojem predgovoru k *Teoriji*, je Boškovičeva teorija *kinematična*, kar pomeni, da uporablja zgolj intuitivne in empirične pojme, kot so pot, hitrost, pospešek, čas. Za razliko od tega je Newtonova teorija *dinamična*, saj uporablja tudi pojem sile in njej pridružen pojem mase, ki sta aksiomatizirana v 2. Newtonovem zakonu. »Zgleda, da je Boškovičeva krivulja graf pospeška-intervala [*acceleration-interval graph*]; napačno je nanašati se na njegov kozmični sistem kot na sistem 'centrov sil'. /.../ Kljub temu je besednjak 'privlačnosti' in 'odbojnosti' toliko bolj priročen kot ta o 'pospešku hitrosti približevanja' in 'pospešku hitrosti oddaljevanja', da bo uporabljen v nadaljevanju – prav tako, kot je bil uporabljen tudi vseskozi prevod razprave« (Child, 1922: XIV).

Max Jammer v svoji monografiji *Concepts of Force – a Study in the Foundations of Dynamics* (1957) prav tako potrjuje takšno razumevanje pojma sile pri Boškoviću:

Prav gotovo ne more iti za Newtonovo definicijo [sile], saj Boškovičeve materialne točke, čeprav so navdane z inercijo, nimajo mase v newtonovskem pomenu besede. /.../ Torej je za Boškovića »sila« določenost, težnja približevanja in oddaljevanja in se meri s proizvedenim pospeškom. Nikjer v svojih spisih Bošković ne poskuša razložiti vzroka za te določenosti; zgolj postulira njihov obstoj. Torej, strogo rečeno, ordinate /.../ na krivulji sil predstavljajo zgolj pospeške. (Jammer, 1957: 177)

Takšno razumevanje pojma sile lahko nadalje podpremo tudi z Boškovičevo izrecno in matematično natančno trditvijo, da »ploščina krivulje [tj. pod krivuljo],

katere abscise predstavljajo razdalje in ordinate sile, predstavlja povečanje ali zmanjšanje kvadrata hitrosti»⁵ (Bošković, 1922: 105). Pojmi, ki jih Bošković uporablja, torej označujejo osnovne opazljive količine, ki opisujejo gibanje. Nikjer izrecno ne omenja mase, kot je že bilo rečeno. Takšen pojem sile torej ni ekvivalenten Newtonovemu pojmu sile, temveč mu je zgolj premo sorazmeren v matematičnem smislu, tako kot pospešek. Child zato argumentira, da to, kar resnično obstaja v Boškovičevi teoriji, ni sila, temveč gibanje, ki ga lahko kvantificiramo kot produkt pospeška in mase v smislu množine snovnih točk. Privlačnost teles, kot tudi Bošković izrecno zapiše, je neka določenost oziroma težnja: »To določenost imenujem 'sila' <vim> /.../; ta izraz ne označuje načina delovanja, temveč izražanje določenosti same [*ipsam determinationem exprimens*], karkoli že je njen izvor, katere magnituda se spreminja s spreminjajočimi razdaljami« (ibid.: 39). Takšno razumevanje pojma sile nakazuje, da njegov pojem univerzalnega zakona implicira nekaj takšnega kot univerzalno težnjo in se ne pretvarja, da lahko pojasni vse z uporabo pojma sile.

Bošković sam je na svoj zakon gledal kot na razširitev Newtonovega univerzalnega zakona gravitacije tudi na mikroskopsko domeno. Podobno kot Newton je tudi sam za cilj imel postavitev naravnega zakona, ki pa mora vključevati tudi dogajanja na atomskem nivoju. V času Boškovičevega pisanja *Teorije*, okrog 1750, je postalo znano Franklinovo delo o elektriki, ki je uvajalo električno silo. Bošković, ki se je zavzemal za univerzalno silo, je zato hotel električno in gravitacijsko silo zvesti na eno skupno silo, ki deluje na osnovne gradnike. Svoje delo je v tem oziru razumel kot »mogočen napredek v filozofiji narave«, saj je dogajanje razlagalo na podlagi maloštevilnih osnovnih principov. V predgovoru k svoji knjigi *Teorija naravne filozofije* piše:

V njej je vsebovana nova zvrst univerzalne filozofije narave, takšna, ki se močno razlikuje od katerekoli, ki je splošno sprejeta ali prakticirana v sedanjem času; kljub temu pa so ključne točke vseh najbolj zaslužnih teorij današnjega časa, prepletene in utrjene na resnično čudovit način, kombinirane v njej; ravno tako to velja za enostavne nerazsežne elemente pristašev Leibniza kot tudi za newtonovske sile, ki proizvajajo medsebojno približevanje na nekaterih razdaljah in medsebojno oddaljevanje na drugih in ki ju običajno imenujemo privlačnost in odbojnost. (Bošković, 1922: 9)

Bošković se torej javlja kot ta, ki spravlja dve različni teoriji o naravi, Newtonovo in Leibnizevo, ki sicer ni bila matematično formulirana, v okviru nove teorije, ki opisuje interakcije med telesi na poljubnih medsebojnih razdaljah. V tem smislu jo lahko imamo za zgodovinski primer teorije poenotenja, ki povezuje več narav-

⁵ Ploščina pod krivuljo (in nad absciso) v grafu namreč ustreza integralu količine, ki je predstavljena na ordinati. Če z integracijo po koordinati x na abscisi dobimo količino »kvadrat hitrosti«, v^2 , potem mora integrirana količina biti pospešek, a , saj velja: $\int a \, dx = \int \frac{dv}{dt} \, dx = \int dv \, \frac{dx}{dt} = \int v \, dv = v^2 + \text{const.}$

nih zakonov. Tovrstna težnja je sorodna današnjim težnjam po poenotenju teorije relativnosti in kvantne teorije. Pri govoru o tej sintezi pa je le potrebno biti nekoliko bolj natančen. Boškovičeva sinteza sestoji iz združitve Newtonovega gravitacijskega zakona in njegovega novega zakona o medatomskih silah. Pri tem je zelo pomembno poudariti, da tukaj ne gre za enakovredno sintezo, saj je v tem času gravitacijski zakon že bil empirično verificiran, medtem ko je bil zakon o medatomskih silah povsem spekulativne narave in eksperimentalno nepreverjen. V današnjem smislu bi lahko govorili prej o matematični spekulativni razširitvi zakona izven eksperimentalno dosegljivega območja.⁶

Poleg omenjenega je potrebno dodati, da Boškovičeva univerzalna sila ni bila matematično enolično artikulirana. To je gotovo tudi posledica njegove želje, da bi se približal bralcu: »Odločil sem se, da je zame najpomembnejše, da čim bolj poskrbim, kolikor je to bilo mogoče, da naj bo vse jasno razloženo in da tukaj zato ni potrebe po višji geometriji ali računanju« (ibid.: 13). Že v uvodu omenja, da v *Dodatku III*, naslovljenem *Analitična rešitev problema določitve narave zakona sil* (ang. *Analytical Solution of the Problem to determine the nature of the Law of Forces*), ponuja tudi analitično formulo za svojo krivuljo (ibid.: 427); gre za polinom n -te stopnje, ki ima n (realnih) ničel. Iz tega dodatka je razvidno, da njegova analitična formulacija zakona sil ni matematično enolična, saj tukaj razpravlja bolj ali manj zgolj o nujnosti, da ima krivulja več izmenjujočih se lokalnih minimumov in maksimumov, vendar ne ve, koliko jih je v resnici. Njegov pristop ostaja v splošnem geometrijski, tako kot Newtonov slabo stoletje pred tem (Supek, 1989: 106). Kljub temu sam poudarja edinstvenost svojega naravnega zakona:

Čeprav, kot sem že poudaril, je mogoče ta zakon sil miselno razdeliti v več zakonov, te pa bi bilo mogoče predstaviti z več ustreznimi krivuljami, je mogoče ta zakon, ki je unikatni, sestaviti iz vseh teh s pomočjo unikatne [*unique*], zvezne [*continuous*] in enolične [*one-fold*] krivulje, ki jo podajam. (ibid.: 23)

Pri Boškoviću lahko torej govorimo kvečjemu o kvalitativni, predvsem pa o konceptualni sintezi naravnih zakonov in ne o znanstveni sintezi teorij v modernem smislu. Tudi Supek piše, da v *Teoriji* Bošković ne podaja nobenega temeljnega fizikalnega zakona ali eksperimenta, temveč poskuša konceptualno spremeniti pogled na naravo v tem smislu, da pojmovanje materije, prostora in časa spremeni s pomočjo univerzalne sile.

Na podlagi Boškovičevega razumevanja vloge matematike pri opisu naravnih zakonov in njegovega razumevanja pojma sile lahko zaključimo, da je naravne zakone razumel kot univerzalne, vendar ne nujno kot univerzalno formulirane. Uni-

⁶ Čeprav je ta oznaka morda slišati slabšalno, je treba dodati, da tudi v moderni znanosti to ni redka praksa – kot takšne lahko označimo različne teorije strun, teorijo kvantne gravitacije, tudi razne modele črnih lukenj, čeprav slednji vseeno temeljijo na empirično trdnih temeljih splošne relativnosti.

verzalnost naravnih zakonov ni pogojena z njihovo matematično enoličnostjo. Njegova formulacija zakona opisuje gibanje snovnih točk, ki bi načeloma lahko bilo matematično izraženo na več načinov. V modernem smislu je njegov pogled na naravne zakone torej neredukcionističen, zakonov ne reducira na to ali ono opredelitev.

Načelo zveznosti in dihotomija potencialni-aktualni prostor

Prehajam k še eni od posebnosti Boškovičeve teorije atomizma in sicer k njegovemu pojmovanju prostora in časa. To je tesno povezano z vlogo zveznosti v njegovi teoriji, ki ima status načela oziroma zakona, o njej je napisal tudi posebno delo, *De continuitatis lege* (1754). Zakon neprekinjenosti je pravzaprav *apriorni* temelj celotne Boškovičeve teorije, kar sam jasno poudari (Bošković, 1996: 159). Prevzel ga je od Leibniza in je posebni pečat njegovega atomizma, kot sem že omenil. Med misleci, ki dopuščajo neprekinjenost v naravi, Bošković med drugim navaja Newtona in škotskega matematika Maclaurina. Ta dva jo dopuščata predvsem v tem smislu, da gre pri trdih telesih za kontinuum, manj pa v smislu razmerja med atomi in prostorom, kar je ravno Boškovičev poudarek. Drugi za vsa telesa trdijo, da so elastična – to v prvi vrsti velja za vse pristaše Leibniza.

Bošković načelo neprekinjenosti v svoji *Teoriji* dokazuje na dva načina, induktivno in metafizično (Bošković, 1922: 55–70). Njegov metafizični argument je ta, da je v prostoru, če ga razdelimo na neskončno majhne intervale, lahko neskončno mej, te pa niso deljive in tudi po Aristotelu povezujejo to, kar delijo – za Aristotela je prostor namreč »prva negibna meja obdajajočega« (Aristotel, 2004: 201). V tem smislu lahko govorimo o neprekinjenosti mej. Še drugače rečeno, če ves prostor razparceliramo na neskončno majhne dele, od njih ostanejo le še meje, te pa dele prostora povezujejo in ne delijo. S tem miselnim limitnim procesom dobimo (potencialno) zvezen prostor, ki je poln povezujočih mej. Aristotel sam naj sicer ne bi imel povsem jasne predstave neprekinjenosti, pripominja Supek, čeprav loči med zaporednim, stičnim in neprekinjenim. Po njegovem mnenju Aristotel zavrača atomistiko zato, ker jo razume v fizikalnem in ne matematičnem smislu, ravno to slednje pa je značilna poteza Boškovičevega atomizma. Lahko bi rekli, da je Boškovičev atomizem matematični atomizem, saj je atom zanj nerazsežna točka, torej matematični objekt, ki povzema lastnost nedeljivosti.

Omenil sem že, da je ena od Boškovičevih novosti znotraj atomizma bila ta, da prostora ni dojemal kot zgolj praznega (Supek, 1989: 85), temveč kot nepraznega in zveznega. Za razliko od Leibniza Bošković ni zavračal diskretnosti, temveč je poiskal drugačen način, na katerega lahko ta sobiva s pojmom zveznosti. Da bi to bolje razumeli, je treba poudariti, da je ta njegov pogled strogo vezan zgolj na gibanje: »V nadaljevanju pokažem, da je zveznost sama v resnici lastnost zgolj gibanj in je v ostalih stvareh bolj ali manj zgrešen privzetek« (Bošković, 1922: 25). To pomeni,

da so zanj vse bivajoče stvari diskretne, le gibanje je zvezno. Supek v svoji prodorni analizi argumentira, da Bošković uspe najti pomiritev med pojmom kontinuuma in diskretne točke v Aristotelovi dihotomiji potencialno-aktualno (Supek, 1989: 85). Ta dihotomija leži pravzaprav v samem srcu njegove atomske teorije. Zanj predstavlja zadostni temelj, da lahko uvede atomizem kljub temu, da je ta tradicionalno nasprotoval pojmu zvezne snovi, saj je predpostavljal prazen prostor.

Ta aristotelska dihotomija je tuja Newtonu, ki razume čas in prostor kot absolutna, ter ju označi za božja atributa – prostor je »božji senzorij«. Pri njem »[a]bsolutni, resnični ali matematični čas teče enakomerno, sam po sebi in iz svoje lastne narave, brez odnosa do česarkoli izven sebe« (Newton, 1995: 6). Dogajanje, ki je vezano na praktično mero časa, pa povzema pojem relativni čas: »/.../ relativni, navidezni ali navadni čas [pa] je neko čutno in zunanje (bodisi natančno bodisi nenatančno) merilo trajanja z gibanjem, ki ga ponavadi uporabljamo namesto resničnega časa: na primer dan, ura, mesec, leto« (Newton, 1995: 6). Ta se relativno dobro ujema z Aristotelovo definicijo časa iz *Fizike* – ta je »število gibanja glede na preje in kasneje« (Aristotel, 2004: 229) in je neločljivo povezan z gibanjem oziroma spreminjanjem. Nekaj podobnega kot za čas velja za Newtonovo razumevanje prostora: »Absolutni prostor ostaja vselej isti in negiben po svoji lastni naravi, brez odnosa do česarkoli izven sebe. Relativni prostor [pa] je neka gibljiva razsežnost ali merilo absolutnih prostorov, ki ga naši čuti določijo s svojim položajem do teles in katerega navadno smatramo za negibnega« (ibid.). Newton torej pozna ontološko temeljni absolutni prostor ter čutni relativni prostor, ki ima ontološko podrejeni status.

Prav tako je omenjena dihotomija tuja Leibnizu, ki je zavračal realnost prostora in časa – njegova znana trditev iz pisemske polemike z Newtonovim zagovornikom Clarkom se glasi: »Kar se mene tiče, sem nič kolikokrat dal vedeti, da mi velja prostor za nekaj povsem relativnega, prav tako kot čas; da mi pomeni neki red koeksistenc, tako kot je čas neki red zaporedij« (Leibniz, 2004b: 165). Relacijska narava prostora in časa pri njem tema dvema pojmom odvzema temeljni ontološki status, kakršnega imata absolutni prostor in čas pri Newtonu.

Bošković razume prostor in čas v okviru aristotelske dihotomije potencialno-aktualno. V dodatku k *Philosophiae Recentioris* (1760) klerika Benedikta Staya piše o dveh vrstah prostora. Prvi je imaginarni zvezni matematični prostor, ki je neskončen in večni, v njem se izvajajo temeljne matematične operacije. Drugi je realni in povezan s časom, o njem lahko razmišljamo kot o množici vseh snovnih točk oziroma atomov, ki v nekem trenutku v času pridejo iz virtualnega prostora, in je v tem smislu diskreten. Gibanje v tem kontekstu pomeni stalno manifestacijo realnega prostora in časa: »Pri Boškoviću je nujno razumeti, da se virtualna prostor in čas neprestano transformirata v realne položaje in čase njegovih točk in to je tisto, kar se kaže kot gibanje« (Supek, 1989: 87).

Kar se pojma prostora tiče, ima Boškovičev potencialni prostor drugačen status od Newtonovega absolutnega in Leibnizevega relativnega, čeprav so vsi trije matematizirani. Boškovičev pojem potencialnega prostora lahko sicer v sebi vključuje pojem privilegiranega univerzalnega koordinatnega izhodišča, kot velja za Newtonov absolutni prostor (ne pa za Leibnizev relativni), vendar ima drugačen ontološki status, kar nakazujeta tudi pridevka »absolutni« in »potencialni«. Boškovičev aktualni prostor je bistveno relacionalen, tako da je blizu temu, kar Newton označuje kot relativni prostor. Boškovičeva dihotomija pojmovanja prostora prinaša v primerjavi z Newtonovo drugačno ontološko postavitev, zanj je novoveški dualizem nekoliko pretesen,⁷ medtem ko za Newtonovo pojmovanje tega ne bi mogli reči. V tem sam vidim največjo Boškovičevo osvežitev v tedanjem mišljenju pojma prostora.

Potencialni čas je ravno tako matematiziran in s tem soroden Newtonovemu absolutnemu času. Aktualni čas je po drugi strani ta, v katerem se dogaja spreminjanje in ki ga lahko merimo oziroma je mera spreminjanja, kar se ujema z Aristotelovo definicijo časa oziroma z Newtonovim relativnim časom. Boškovičeva aristotel-ska dihotomija mimogrede velja tudi za sile – tudi te so bodisi potencialne bodisi aktualne: prve ne povzročajo pospeškov, medtem ko jih druge povzročajo.

Pomembno je poudariti, da je Bošković aristotel-ska pojma potencialnosti in aktualnosti transformiral. Aktualno, za katerega Aristotel uporablja izraza *èntelechéia* oziroma *ènérgεια*, je tisto stanje, ki pomeni dopolnitev, doseganje *télosa*, in ne tisto, ki je prezentno, kot se pojem aktualnost pogosto tolmači danes. V *Metafiziki* izrecno povezuje aktualnost oziroma dejanskost in dovršenost: »delo (*êrgon*) je namreč smoter (*télos*), dejanskost (*ènérgεια*) pa je delovanje, zaradi tega pa se tudi ime dejanskost izreka po delu, in se zaradi tega razteza proti dovršenosti (*èntelécheia*)« (Aristotel, 1999: 1050 a 20-23). V tem smislu je npr. otrok, ki ta hip stoji pred nami, zanj zgolj potencialno človek, aktualno človek pa postane, ko razvije dušo in s tem doseže svoj smoter. Snov, ki je čista potencialnost (*dýnamis*), se razvije v dovršene forme s posredovanjem finalnega vzroka (lat. *causa finalis*).

Bošković je eksplicitno zavračal uporabo finalnih vzrokov pri tolmačenju narave (Supek, 1989: 114), kot je to značilno za vso moderno znanost, in ravno v tej točki je njegov odmik od Aristotela. Poleg tega slednji daje prednost aktualnosti pred potencialnostjo:

Ker pa je bilo že zgoraj opredeljeno, na koliko načinov se izreka »prej«, je očitvidno, da je dejanskost pred možnostjo. Menim pa, da je prej ne zgolj pred že opredeljeno zmožnostjo, ki se izreka kot spremljevalno počelo v

⁷ Na to kaže tudi Boškovičevo mišljenje povezave med dušo in telesom, ki ga predstavlja v enem od dodatkov na koncu *Teorije*. V ta namen uporablja dvojico aktualno-potencialno. Na nekem drugem mestu tudi izrecno zapiše, da njegov sistem ne razlikuje med telesnim in duhovnim, torej ni dualističen (Bošković, 1996: 173).

drugi stvari ali v stvari sami, kolikor je druga, marveč nasploh pred vsakim gibalnim in ustalitvenim počelom. (Aristotel, 1999: 1049 b 4-9)

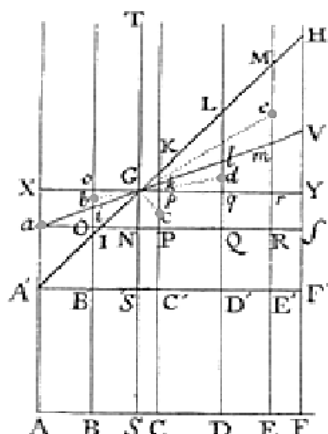
Bošković po drugi strani ne daje prednost nobenemu od obeh vidikov. Da je torej lahko uporabil to dihotomijo, jo je moral transformirati tako, da jo je ločil od pojma finalnega vzroka. Kar se vzročnosti tiče, Bošković namreč prisega na moderno zakonsko (deterministično) kavzalnost, kot jo je kasneje poudarjeno zagovarjal Laplace. Poleg omenjenega je bistven Boškovičev odmik od Aristotelovega pojma potencialnosti v tem, da je svoj pojem potencialnosti bistveno vezal na prostor in čas, medtem ko je pri Aristotelu vezana na snov (*hýle*). Na nek način je s tem aristotelsko potencialno snov »križal« s pojmom prostora, ki je za Aristotela objektivni in ima svojo kozmološko strukturo, vendar je neločljiv od predmetov, saj je njihova nepremična zunanja meja, ki telo vsebuje.

Napetost med diskretnim in zveznim ponovno izrazito oživi v moderni znanosti z vznikom kvantne mehanike, v kateri lahko vidimo moderno znanstveno področje, za katerega se zdi Boškovičeva zastavitev pojmov filozofsko zelo relevantna (Lukan, 2015: 73–74). Njegova »krivulja sil« je tako kot atomski potencial v kvantni fiziki struktura, ki kaže na potencialne interakcije med vsaj dvema delcema, je nekakšna struktura potencialne aktualizacije, bi lahko rekli. V pojmu potenciala oziroma pojmu polja se poudarek z interakcije dveh delcev prenese na samo en delec (za razliko od pojma sile, kjer je ta vedno definirana kot sila med dvema telesoma), polje povzema strukturo potencialnosti interagiriranja enega delca z drugim. Sam sem mnenja, da je Boškovičeva transformirana pojmovna dvojica lahko zelo ploden koncept tudi za interpretacijo pojma verjetnosti, kot ga najdemo v moderni fiziki (tj. tako imenovana mersko-teoretska verjetnost).

Prispevek k znanstveni metodologiji

Če govorimo o Boškovičevem prispevku k razvoju moderne znanosti, se zdi pomembno opozoriti še na en vidik. Ta je za razliko od njegovega atomizma, ki je teoretičnega pomena, bolj metodološkega pomena za znanost. Boškoviću pripisujejo prvo rabo matematične metode za enolično določitev najbolj optimalne krivulje prilagajanja množici merskih točk, čemur se dandanes v žargonu reče »fitanje« (ang. *best fit to data*) (Eisenhart, 1961: 200-212). Gre za to, da množici meritev poiščemo optimalno krivuljo, za katero verjamemo, da najbolje povzema meritve. Metodo je do popolnosti razvil francoski matematik Legendre in je znana pod imenom metoda najmanjših kvadratov (ang. *least square method*) ter se danes uporablja v vseh obdelavah podatkov, v katerih nastopa prilagajanje krivulje. Ta pristop omogoča tudi oceno merske napake in torej bolj rigorozno operiranje z merskimi natančnostmi.

Bošković je ta pristop prvič uporabil na problemu določitve eliptičnosti Zemlje. Na podlagi petih tedaj znanih meritev z različnih koncev Zemlje je prvi izračunal ta parameter in s tem empirično potrdil hipotezo, da Zemlja ni povsem okrogla. Njegov pristop je bil geometrijski, tako kot Newtonov v *Principih*, za razliko od nekoliko kasnejšega Legendrovega, ki je bil analitičen.



Boškovičeva aplikacija metode najmanjših kvadratov na geometrijski način pri problemu določitve eliptičnosti Zemlje na podlagi petih meritev (vir: Stigler, 1986: 48). Pri tej metodi se izračuna »težišče« podatkov – matematika je povsem enaka kot pri računanju fizičnega težišča.

Metoda najmanjših kvadratov je igrala pomembno vlogo v zgodovini razvoja teorije meritev in razvoja statistike. Skupaj z združitvijo uporabe normalne krivulje (oziroma krivulje napak, kot so jo tedaj imenovali) v tako imenovani Gauss-Laplaceovi sintezi je tvorila teoretično hrbtnico znanstvene metode 19. stoletja, ki je v nadaljnjem razvoju privedla tudi do razvoja statistike kot samostojne discipline (Stigler, 1986: 139–158). V okviru t.i. galilejske paradigme, ki naravoslovno znanost razume kot kombinacijo uporabe matematike v teorijah in izvajanja eksperimentov za njihovo podkrepitev, je teorija meritev pravzaprav tisto presečno področje, v katerem sta oba elementa te paradigme najbolj trdno povezana. Za metodo najmanjših kvadratov lahko zagotovo rečemo, da je kot del Gauss-Laplaceove sinteze teorije meritev pomagala postaviti trden temeljni steber galilejske paradigme.

Bošković sam je s svojim pristopom uvažanja rigoroznih matematičnih principov v znanstveno metodologijo implicitno izkazal privrženost galilejski paradigmi, še več, s svojim dosežkom je celo pomembno prispeval k njeni utrditvi. S tem je prispeval tudi k razvoju teorije merskih metod, ki so več kot stoletje kasneje pomagale utrditi moderni atomizem na podlagi več dobro zasnovanih poskusov. Bošković sam za takšne poskuse ni imel nikakršne možnosti, saj pravzaprav vsi

temeljijo na uporabi elektronske merilne tehnike, ki v njegovem času še ni obstajala. Njegov atomizem je zato ostal pri statusu matematične spekulacije. V tem smislu lahko vidimo nekaj ironije v tem, da je njegovi atomistični teoriji – poleg konkretnih poskusov – umanjkal splošni metodološko-eksperimentalni temelj, ki ga je pravzaprav on sam šele pomagal zgraditi ter je kasneje bistveno prispeval h končni uveljavitvi atomizma v fiziki.

Vpliv in pozaba

Boškovićevo delo se je po evropskih univerzah, predvsem znotraj Avstro-Ogrske, predavalo v drugi polovici 18. in prvi polovici 19. stoletja, vendar se kasneje ni obdržalo. Postopna pozaba Boškovičevega doprinosa se je odvijala tudi kasneje v 20. stoletju in je – kot poroča Supek – na primer razvidna tudi skozi zaporedne izdaje *Encyclopedie Britannice*, v katerih se je geslo pod njegovim imenom čedalje bolj krajšalo, dokler ni v izdaji iz leta 1977 povsem izpadlo.

Glavni razlog za to, da se Boškovičev atomistični nauk ni ohranil, Supek vidi v tem, da to ni bilo matematizirano znanje. Na tem mestu je potrebno dodatno pojasnilo, saj sem zgoraj zapisal, da gre pri Boškoviću za prvo matematično artikulacijo atomistične teorije. Kot že omenjeno v razdelku o krivulji sil, pri Boškoviću ne gre za matematično enolično artikulacijo zakona o medatomske silah, ta bi lahko bil tudi drugače oblikovan. Njegova krivulja ni podana kot rešitev matematičnega problema, tj. diferencialne enačbe, temveč kot rešitev konceptualnega problema. V modernem fizikalnem smislu so naravni zakoni običajno pojmovani kot diferencialne enačbe (pogojno morda kot krivulje, ki predstavljajo njihove rešitve), ne pa kot poljubne matematične krivulje. Ustrezni matematični problem, tj. ustrezne in precej zapletene diferencialne enačbe, je rešil šele Friedrich Bessel v prvi polovici 19. stoletja.

Boškovićevo delo je ponovno oživil ameriški eksperimentalni fizik Michael Faraday, ki je znan predvsem po svojih poskusih z električnimi pojavi in po uvedbi pojma električnega polja. Faraday je trdil, da mu je pri uvedbi pojma polja pomagala Boškovičeva teorija atomov, ki razume sile kot prvotno realnost, čeprav, kot sem pokazal zgoraj, ni šlo za newtonovsko pojmovanje sil. Zanj je ena glavnih potez Boškovičeve misli v tem, da je dala univerzalno silo, na katero se dajo zvesti vse ostale znane sile. Faraday se od Boškoviča razlikuje samo po tem, da slednji še vedno ohranja aristotelska pojma aktualnega in potencialnega (Supek, 1989: 172). Pri obeh polje – čeprav Bošković ne uporablja tega izraza – ustvarja maso atoma, sile so bolj temeljne od atoma.

Pojem polja je v moderni fiziki ključnega pomena, saj je sestavni del obeh osrednjih fizikalnih teorij, splošne relativnosti in kvantne teorije polja. Lahko bi rekli, da predstavlja tisto entiteto, ki najbolje povzema predstavo moderne znanosti o odnosu med prostorom in snovjo: polje lahko razumemo tudi kot ime za to, da

prostor nikoli ni povsem prazen, ker je v njem vedno polje, čeprav v njem ni obstojnih delcev, hkrati pa polje interagira z delci. Gledano skozi prizmo antične dileme med atomizmom in t.i. plenizmom, h kateremu štejemo tudi Aristotela, polje funkcionira kot nekakšen mediator med pojmom snovi in prostora, s čimer presega atomistično dihotomijo, po drugi strani pa gre za brezmasno entiteto in torej ne za snov v modernem fizikalnem smislu. Boškovičev pojem univerzalne sile je zgodovinski predhodnik pojma polja tudi v tem, da kot pojem – za razliko od pojma sile – ne potrebuje dveh entitet, med katerima deluje. S tem Boškovičev atomizem že prinaša konceptualna vprašanja, ki so relevantna tudi za razumevanje statusa modernega pojma polja.

Tudi James Clerk Maxwell, ena od največjih fizikalnih eminenc vseh časov in oče elektromagnetizma, ki je sprva zagovarjal atomizmu konkurenčno teorijo etra in vrtnicev, je naposled leta 1877 v reviji *Nature* zapisal, da je najbolje, kar se lahko naredi, to, da se namesto togega jedra uvede Boškovičeve atome (ibid.: 176). Te je priznaval tudi Lord Kelvin, še ena fizikalna eminenca, po kateri se med drugim imenuje enota za absolutno temperaturo. Tako Niels Bohr kot Werner Heisenberg, dva izmed očetov kvantne mehanike, sta Boškoviču priznavala pomembno mesto v razvoju znanosti in atomistike še posebej. John Henry Poynting, angleški fizik, znan po svojem doprinosu k elektromagnetizmu, je zapisal, da je Boškovičevo premoščanje meje med silo in maso pomenilo trajen doprinos k filozofskim idejam (ibid.: 178). Po Supku naj bi Boškovič naredil podoben konceptualni korak kot kasneje Einstein s teorijo relativnosti, v kateri je uvedel svojo znano enačbo za mirovno energijo $E = mc^2$. S tem naj bi se Boškovičev program začel širiti na atom kot masno točko – začela se je pretvorba pojma mase v energijo, medtem ko je Boškovičev pojem mase »pretopil« v pojmu sil oziroma polja (ibid.: 179).

Basic Concepts of Boscovich's Atomism in Light of the Emerging Modern Science

The aim of this article is to give an account of Roger Joseph Boscovich's atomic theory, to show the influence and relevance of some of his most penetrating scientific achievements, and to put them into the context of the development of modern scientific thought and method. In the introduction, I briefly present Boscovich's life and work, then I provide a sketch of his conception of atomism, which I compare with the less elaborated conceptions of Newton and Leibniz whose theories he took as exemplifying achievements. Further, I present Boscovich's law of universal force, for which he is best known, and his attitude towards the laws of nature in general. I pay special attention to his original transformation of the Aristotelian concepts of the actual and the potential, which he applies to the concepts of the continuous and the discrete with regard to his conception of space and time, and which are the implicit cornerstones of his atomism. In the last section, I also discuss Boscovich's contribution to the scientific method, and mention certain long-lasting influences of his work.

Keywords: Roger Boscovich, atomism, laws of nature, space, potentiality, scientific method

Literatura

- Aristotel (2004). *Fizika: knjige 1, 2, 3, 4*. Ljubljana: Slovenska matica.
- Aristotel (1999). *Metafizika*. Ljubljana: Založba ZRC, ZRC SAZU.
- Bošković, R. J. (1996). *O zakonu neprekinutosti*. Zagreb: Školska knjiga. Hrv. prev.
- Talanga, J. (Izvirnik: Boscovich, R. J. (1754), *De continuitatis lege et ejus consecretariis pertinentibus ad prima materiae elementa eorumque vires*. Rim: Facolta di Roma.)
- Bošković, R. J. (1922). *A Theory of Natural Philosophy*. Chicago, London: Open Court Publishing Company. Ang. prev. Child, J. M. (Izvirnik: Boscovich, R. J. (1763), *Theoria philosophiae naturalis redacta ad unicam legem virium in natura existentium*. Venezia.)
- Child, J. M. (1922). »Introduction«. V Bošković, R. J., *A Theory of Natural Philosophy*, Chicago in London: Open Court Publishing Company, str. XI–XVIII.
- Eisenhart, C. (1961). »Boscovich and the Combination of Observations«. V Whyte, L. L. (ur.), *Roger Joseph Boscovich*, London: Allen & Unwin, str. 200–212.
- Leibniz, G. W. (2004a). *Principi filozofije ali monadologija*. V Leibniz, G. W., *Izbrani filozofski spisi*, Ljubljana: Slovenska matica, str. 131–150.
- Leibniz, G. W. (2004b). *Kontroverza med Leibnizom in Clarkom*. V Leibniz, G. W., *Izbrani filozofski spisi*, Ljubljana: Slovenska matica, str. 151–230.
- Jammer, M. (1954). *Concepts of space: the history of theories of space in physics*. Cambridge: Harvard University Press.
- Jammer, M. (1957). *Concepts of force: a study in the foundations of dynamics*. Cambridge: Harvard University Press.
- Johnson, M. in Wilson, C. (2007). »Lucretius and the History of Science«. V Gillespie S. in Hardie P. (ur.), *The Cambridge Companion to Lucretius*, Cambridge: Cambridge University Press, str. 131–148.
- Lukan, P. (2015). »Roger Boscovich and the quantum mechanical combination of dynamic and statistical laws«. *Almagest*, vol. 6(1), str. 65–78.
- Newton, I. (1952). *Opticks: or a treatise of the reflections, refractions, inflections & colours of light*. New York : Dover Publications.
- Newton, I. (1995). *Mathematical Principles of Natural Philosophy and System of the World* (ang. prev. Andrew Motte). Amherst, N.Y.: Prometheus Books.
- Stigler, J. (1986). *History of Statistics: The History of Uncertainty Before 1900*. Cambridge [etc.]: The Belknap Press of Harvard University Press.
- Supek, I. (1989). *Ruđer Bošković, vizionar u prijelomima filozofije, znanosti i društva*. Zagreb: Školska knjiga.