

## OD ČASTÍČ K POLIAM: ONTOLOGICKÉ OTÁZKY FYZIKY

RÓBERT MACO, Filozofická fakulta Univerzity Komenského v Bratislave, Katedra filozofie a dejín filozofie, Bratislava, SR

MACO, R.: From Particles to Fields: Ontological Issues of Physics  
FILOZOFIA, 75, 2020, No 6, pp. 431 – 445

The question of the ultimate constituents of the physical universe was one of the first questions at the dawn of the Western tradition of philosophy. At present, the most successful answers to this question are offered by the fundamental theories of elementary particle physics, which are formulated within the broader conceptual and mathematical apparatus of quantum field theory. The aim of this paper is to explain in an accessible manner the fundamental changes brought about by the transition from particle to field understanding of the universe in contemporary physics. The brief account of Newton's ontological view of the world serves both as an introduction and as a background to what follows. The paper also intends to address and encourage philosophers interested in ontological problems to study the latest physical theories despite their mathematical complexity and apparent inaccessibility.

**Keywords:** Particle – Force – Field – Physics – Ontology – Quantum field theory – Standard model – Newton

*The streets are fields that never die.*

J. Morrison

Základnou a z nášho pohľadu najzaujímavejšou filozofickou otázkou súčasnej fyziky je otázka vzťahu medzi vysoko abstraktným a sofistikovaným matematickým formalizmom, ktorý je nevyhnutnou súčasťou našich fundamentálnych teórií a reálnym svetom, ktorý sa tieto teórie usilujú opisovať a vysvetľovať. Túto základnú otázku možno rozdeliť na viacero čiastkových otázok:

- Aký obraz sveta nám vlastne predkladajú naše najúspešnejšie fundamentálne fyzikálne teórie?
- Máme vôbec od fundamentálnej fyziky v súčasnosti očakávať niečo také ako obraz sveta?

- Ktoré entity sa z pohľadu súčasnej fyziky ukazujú ako najlepšie kandidáti na základné stavebné kamene univerza?
- Koľko „ontologickej dôvery“ máme vkladať do matematického aparátu fyzikálnych teórií, ktoré zaznamenávajú najväčšie úspechy z hľadiska experimentálne potvrdených predikcií a technologického využitia?

V týchto otázkach sú obsiahnuté dve metaforické slovné spojenia: „obraz sveta“ a „základné stavebné kamene“. Pre účely tohto textu nie je našim zámerom poskytnúť pre tieto termíny explicitnú definíciu. Namiesto toho chceme ponúknuť osvetlenie prostredníctvom exemplifikácie. Ukážeme si, aký obraz sveta a aké stavebné kamene univerza postuloval Newton, vychádzajúc zo svojich *matematických princípov prírodnej filozofie*, zo svojich rozsiahlych pozorovaní a experimentov, a taktiež zo svojich teologických presvedčení.

Tento postup so sebou prináša okrem väčšej názornosti aj tú výhodu, že si tým zároveň vypracujeme kontrastné pozadie k súčasnej fyzike, ktorá zvykne byť najčastejšie porovnávaná s tým, čo sa označuje ako „mechanistický obraz sveta“, ktorý sa automaticky prepája s newtonovskou mechanikou. Zatiaľ čo mechanistický obraz sveta sa vníma – alebo aspoň prezentuje – ako relatívne jednoduchý, priehľadný, názorný (intuitívny) a *commonsensical*, nová (moderná) fyzika má povest' niečoho mimoriadne zložitého, abstraktného a idúceho proti „zdravému rozumu“. Citáty o jej záhadnosti a nepochopiteľnosti sú dobre známe a na tomto mieste ich netreba opakovať.

Cieľom tohto článku však nie je tematizovať všetky jednotlivé prvky súčasnej fyziky, ktoré dali podnet k spomenutým výrokom. Ako už bolo povedané v úvode, svoju pozornosť obmedzíme na to, čo by sme mohli stručne nazvať „ontológiou súčasnej fundamentálnej fyziky“. Interpretčné problémy, ktoré sú najčastejšie spájané s kvantovou mechanikou a ktoré sa s ňou ako predmet ustavičných kontroverzií ťahajú už od prvých dekád dvadsiateho storočia, sú síce takisto úzko prepojené s ontologickými otázkami, no v súvislosti so zvolenou výkladovou stratégiou a v neposlednom rade aj z priestorových dôvodov sa chceme zamerať výlučne na spomenutý užší problém.

### **Newtonova koncepcia**

Keby sme pri výklade Newtonovho fyzikálneho obrazu sveta chceli učiniť zadosť všetkým historickým a konceptuálnym detailom jeho myslenia, bol by to skôr námet na samostatnú knihu. Je prirodzené, že niektoré jeho názory sa postupne vyvíjali a menili, v niektorých obdobiach si „hypotézy vymýšľal“ častejšie, inokedy menej, alebo bol aspoň opatrnejší pri ich formulovaní. Koniec koncov, významní znalci dejín vedy a Newtona ako A. R. Hall, M. B. Hall, I. B. Cohen či A. Koyré sa rozchádzajú dokonca

aj v niektorých základných bodoch Newtonovej koncepcie (pozri napr. Hall, Hall 1962, 192 – 193). Keďže našim primárnym zámerom nie je diskutovať o rôznych interpretačných kontroverziách, ale skôr získať istý ucelený, a pokiaľ možno názorný a zrozumiteľný obraz, zvolíme si tú podobu Newtonovej koncepcie, ktorú predstavil vo svojej poslednej veľkej prírodovednej práci *Optika*.<sup>1</sup>

Aký je teda najpravdepodobnejší obraz sveta podľa zrelého Newtona? Vyjadrené s maximálnou stručnosťou: Centrom všetkého je najvyššia inteligentná bytosť (Boh), ktorá je sama nehmotná, no je tvorcom hmotného sveta, ktorý stvorila v podobe pohyblivých častíc, ktoré svojimi rozmanitými pohybmi a vzájomným spájaním generujú celú rozmanitosť sveta, prístupnú našim zmyslom (a prípadne aj tú, ktorá je mimo dosahu našich zmyslov<sup>2</sup>). Keďže nám ide o povahu fyzikálneho sveta, dovolíme si v ďalšom ponechať bokom povahu nemateriálneho stvoriteľa a konkrétny spôsob jeho interakcie so svetom. Keď už je však reč o interakciách, nesmieme zabudnúť, že okrem teologickej otázky možnej interakcie nehmotnej inteligencie s hmotným svetom je tu aj problém interakcie jednotlivých častí hmotného sveta, čiže sveta spomínaných častíc. Na opis a vysvetlenie tejto dynamickej (interakčnej) stránky sveta Newton prináša do hry ešte jeden kľúčový prvok, ktorý označuje ako „silu“ (*force, power, virtue*). Fyzikálny svet teda nie je len hromada korpuskúl, ale je to skôr súbor korpuskúl spolu s ich vzájomnými silovými pôsobeniami.

Skôr ako si povieme viac o presnejšej povahe spomínaných častíc a spomínaného silového pôsobenia, bude dobré pripomenúť si, aké základné výzvy stáli pred Newtonom ako prírodovedcom na začiatku osemnásteho storočia. V *Optike* Newton okrem hlavnej témy, teda svetla, najčastejšie spomína také javy, ako sú (statická) elektrina, magnetizmus, fermentačné procesy, šírenie tepla a kohéziu telies. Išlo o zdanlivo jednoduché otázky, na ktoré bolo prekvapivo ťažké odpovedať (dokonca aj z pohľadu fyziky začiatku dvadsiateho storočia): Ako je možné, že nejaký malý nerast má schopnosť zdvihnúť malé kúsky železa a prekonať tak gravitačné pôsobenie celej zemegule? Ako je možné, že niektoré iné predmety získavajú podobnú schopnosť priťahovať čisto v dôsledku predchádzajúceho trenia? Ako je vôbec možné, že zložené telesá držia pohromade?

Newton v *Optike* v závere svojej vedeckej kariéry priznáva, že na tieto otázky zatiaľ nenašiel adekvátne odpovede. Záver *Optiky* preto koncipoval vo forme sugestívnych (alebo rétorických) otázok (*Queries*), ktoré v ďalších edíciách dopĺňal o nové

---

<sup>1</sup> Prvé vydanie Newtonovej *Optiky* pochádza z roku 1704, no v ďalšom texte budeme vychádzať z rozšíreného tretieho vydania z roku 1721.

<sup>2</sup> Newton v *Optike* zvažuje a pokladá za mysliteľnú aj takú možnosť, že Boh stvoril na viacerých odľahlých miestach nekonečného priestoru častice s odlišnými charakteristikami, čo by mohlo mať za následok existenciu odlišných prírodných zákonov v rôznych častiach univerza (Newton 1721, 379 – 380).

a rozširoval ich až do podoby akýchsi samostatných úvah o fundamentálnych prvkoch svojho fyzikálneho, filozofického a teologického obrazu sveta. Práve tu možno nájsť najpodrobnejšie informácie o Newtonových predstavách o povahe hmoty a jej ultimatívnych konštituentoch.

Akými vlastnosťami sa vyznačujú newtonovské najmenšie častice (atómy) hmoty? Sú pevné, hmotné (*massy*), tvrdé, nepreniknuteľné, pohyblivé, majú rôzne tvary a veľkosti a možno disponujú aj ďalšími vlastnosťami. Pevnosť znamená schopnosť držať svoj tvar, tvrdosť znamená schopnosť odolávať akejkoľvek fragmentácii alebo „ošúchaniu“, nepreniknuteľnosť znamená schopnosť zabrániť akémukoľvek inému hmotnému telesu obsadiť miesto, ktoré zaberá daná častica, a nakoniec pohyblivosť znamená pre časticu schopnosť meniť miesto. Okrem spomenutých vlastností Newton pripisuje časticiam takzvanú *vis inertiae*, ktorej doslovný preklad by síce bol „sila zotrvačnosti“ (prípadne „zotrvačná sila“). Jej povahu nám oveľa lepšie ako tento preklad ozrejmi porovnanie s pasážou o pohybových zákonoch a s príslušnou definíciou z *Princíпов* (Newton 1687, 2; 12). *Vis inertiae* alebo *materiae vis insita* (ako ju Newton nazýva v *Princíпов*) je schopnosť telesa (častice) vzdorovať zmene svojho pohybového stavu. Implicitne je teda prítomná v prvom pohybovom zákone (zákone zotrvačnosti). I. B. Cohen vystopoval používanie termínu *vis insita* v Newtonovom kratšom traktáte *De motu (O pohybe)*, ktorý o niekoľko rokov predchádzal *Principia mathematica*.

Z Cohenovho výkladu vyzdvihnem len dva body, ktoré sú dôležité v tomto našom kontexte (pozri Cohen 1971, 66 – 68). Po prvé, newtonovskú *vis insita*, respektíve *inertiae* treba (napriek mäúcim pomenovaniám) chápať ako schopnosť (vlastnosť) častice, ktorá je pre ňu inherentná (esenciálna), nie je do nej len zvonku vložená (*insita*). A po druhé, táto *vis* vlastne nie je silou, pokiaľ pod silou máme na mysli (ako je to bežné dnes v rámci klasickej mechaniky) to, čo spôsobuje zmenu pohybového stavu, teda zrýchlenie. Silu v tomto zmysle Newton tiež označuje latinským výrazom *vis*, ibaže s iným adjektívom – hovorí o nej ako o *vis impressa* (čiže doslova „vtlačená sila“).

Pripomenúť tieto jemné detaily Newtonovej terminológie je dôležité preto, lebo našim cieľom je dospieť k Newtonovmu fyzikálnemu obrazu sveta, v ktorom evidentne figurujú nielen atomárne častice, ale aj sily pôsobiace medzi časticami. Je možné vytvoriť si o týchto silách podobne názornú predstavu, ako to bolo pri elementárnych časticách? Akým druhom entity sú vlastne tieto newtonovské interakčné sily? Sú v nejakom zmysle „hmotné“ a existujúce nejakým spôsobom popri hmotných časticách? Alebo by sme ich mali skôr chápať ako nejaké osobité atribúty (potencie) samých častíc, čiže mali by sme ich z hľadiska klasickeho rozlíšenia substancia-akcident chápať ako nesamostatné momenty častíc? Alebo ide o čisto pojmové nástroje,

ku ktorým by sme nemali vôbec hľadať nijaký *predmetný* korelát v realite? Je snaha začleniť sily do „ontologického inventára univerza“ len nešťastným pokusom o reifikáciu istého dobre fungujúceho matematického formalizmu?

Úplne jasnú a jednoznačnú odpoveď na takto položené otázky u Newtona zrejme nenájdeme. Z Newtonových *Queries* na konci *Optiky* však môžeme aspoň extrahovať isté náznaky o tom, ako o týchto veciach uvažoval. Explicitne napríklad hovorí o tom, že častice (atómy hmoty) sú pohybované určitými „aktívnymi princípmi“ a ako konkrétne príklady uvádza gravitáciu, ale aj „to, čo zapríčiňuje fermentáciu a kohéziu telies“ (Newton 1721, 376). Samozrejme, slovné spojenie ako „aktívne princípy“ je dráždivo neurčité vo vzťahu k vyššie nastoleným otázkam. Treba si však uvedomiť, že neurčitosť Newtonovej formulácie mohla byť sčasti zámerná, pretože Newton si bol dobre vedomý horúcej pôdy, po ktorej jeho teória síl kráčala. Od publikovania *Princípov* bol terčom kritiky, či už zo strany stúpenčov karteziánu, alebo zo strany takých významných mysliteľov ako Leibniz či Huygens. Všetkým týmto bol nanajvýš podozrivý spôsob, akým sa podľa nich Newton usiloval vysvetliť pohyby nebeských telies postulovaním „gravitačnej sily“ pôsobiacej na diaľku, ktorá týmto zástancom striktného mechanistického prístupu vo fyzike evokovala zdiskreditované *qualitates occultae* starej aristotelovsko-scholastickej metafyziky. V treťom vydaní *Optiky* Newton práve v súvislosti so spomínanými „aktívnymi princípmi“ doplnil priamu reakciu na tento typ kritiky: „Tieto princípy nepokladám za skryté [*occult*] kvality, ktoré majú plynúť zo špecifických foriem vecí, ale za všeobecné zákony prírody, ktorými sú veci samy utvárané. Ich pravdivosť sa nám ukazuje prostredníctvom fenoménov, hoci ich príčiny ešte nie sú objavené“ (Newton 1721, 376 – 377).

Newtonova stratégia voči spomínaným kritikom sa dá zhrnúť týmto spôsobom: príťažlivé a odpudivé sily, chápané ako aktívne princípy pôsobiace v prírode, navrhujú chápať nie ako skryté príčiny, ktoré generujú pozorovateľné účinky, ale naopak, vychádzajúc z pozorovateľných tendencií vecí k vzájomnému približovaniu a oddaľovaniu sa postuluje isté aktívne princípy, chápané ako matematicky vyjadriteľné zákonitosti, ktorých príčiny zatiaľ nepozná, a preto si ich nechce špekulatívne domýšľať. Z tohto hľadiska teda môžu newtonovské sily figurovať v ontologickom inventári sveta iba vo forme matematizovateľných „tendencií“ vecí. Tento záver je v dobrom súlade s Newtonovým skorším vyhlásením „Hypotheses non fingo“ v rámci *Princípov*. Do tej istej kategórie sa dá zaradiť aj slávna pasáž z Newtonovej korešpondencie (list Bentleymu z 1692), ktorý sa vyslovuje týka nemechanistického silového pôsobenia na diaľku, ale aj – čo je nemenej dôležité – otázky, či je gravitačná sila inherentnou súčasťou hmoty:

„Je nemysliteľné, aby neživá hrubá hmota (bez sprostredkovania niečoho iného, čo nie je hmotné) ovplyvňovala inú hmotu a pôsobila na ňu bez vzájomného kontaktu,

ako by to muselo byť, keby bola gravitácia v zmysle Epikura niečím inherentným a esenciálnym v hmote. (...) Príčinou gravitácie musí byť nejaký agens, konštantne pôsobiaci podľa istých zákonov, no či je tento agens hmotný alebo nehmotný, to je otázka, ktorú som ponechal na zváženie svojim čitateľom“ (Janiak 2004, 102 – 103).

Ako teda vyzerá Newtonov ontologický obraz sveta? Ako vidno z predchádzajúcich riadkov, ani v rámci „klasickej fyziky“ nie je takýto obraz úplne jednoduchý a priamočiary. V predchádzajúcom výklade sme sa sústredili najmä na problémy, ktoré vyvstávajú pri Newtonovom chápaní síl, a na ich problematický ontologický status. Pritom sme si však ešte vždy mohli myslieť, že častice ako druhý typ fundamentálnych entít predstavujú niečo viac-menej jasné, zrozumiteľné a v určitom zmysle aj názorné. Ako však ukázal už vývoj fyzikálneho myslenia v osemnástom storočí, koncepcia tvrdých, nepreniknuteľných atď. častíc v sebe skrýva napriek svojej názornosti množstvo dodatočných nevyriešených otázok. Niektoré predchádzajúce problémy sa takpovediac iba presúvajú na hlbšiu úroveň: Ak je odpoveď na otázku, čo drží pohromade napríklad zrnko piesku to, že sú to nejaké príťažlivé sily pôsobiace na krátke vzdialenosti medzi elementárnymi časticami, nemožno sa vyhnúť otázke, čo drží pohromade samotné častice ako rozpriestranené a prakticky neporušiteľné kúsky hmoty. V snahe riešiť tieto a ďalšie otázky predložil napríklad v polovici osemnásteho storočia chorvátsky prírodovedec Rudjer J. Boškovič novú koncepciu fundamentálnych prvkov prírody, v ktorej originálnym spôsobom skombinoval leibnizovskú monadológiu a newtonovskú atomistiku: svet podľa jeho videnia je na fundamentálnej fyzikálnej úrovni tvorený bodovými (bezrozmernými) silovými centrami, ktorých jedinými esenciálnymi vlastnosťami je zotrvačnosť a schopnosť vzájomne na seba silovo pôsobiť v závislosti od vzdialenosti. Tento dynamický obraz sveta upútal na začiatku devätnásteho storočia na istý čas aj pozornosť M. Faradaya, ktorý v dôsledku svojich prelomových experimentálnych výskumov v oblasti magnetizmu a elektriny neskôr zaviedol do jazyka fyziky kľúčový pojem poľa, chápaného ako fundamentálna zložka fyzikálnej ontológie. A práve pojem poľa figuruje na prvom mieste v obraze sveta súčasnej fyziky, ktorej sa chceme venovať v nasledujúcej časti.

### **Obraz sveta súčasnej fyziky**

Ako je známe, fundamentálna teória súčasnej fyziky nesie stručný názov *štandardný model* (ŠM), alebo v rozvinutejšom tvare *štandardný model fyziky elementárnych častíc a fundamentálnych interakcií*. Vychádzajúc čisto z názvu by sme si mohli myslieť, že od Newtonových čias sa v *princípe* nič nezmenilo. Samozrejme, súčasná fyzikálna teória a experimentálna aparátúra dnešnej fyziky sú neporovnateľne zložitejšie a sofistikovanejšie. Keby sme však chceli pozerieť na všetky historické peripetie fyziky z veľkého nadhľadu, mohli by sme predsa len vnímať ako upokojujúci fakt to, že

stále ide v princípe o to isté, teda identifikovať fundamentálne častice a príslušné fundamentálne sily, ktoré zabezpečujú interakcie medzi nimi. Obraz sveta, ktorý pred nami kreslí súčasná fyzika, je opäť javiskom, na ktorom sú hlavné roly stále rozdané medzi dva typy fundamentálnych entít, častice a sily, a to, ako konkrétne dané entity „vyzerajú“, je už záležitosťou jednotlivých čoraz lepších – obsiahlejších a exaktnějších – fyzikálnych teórií, do ktorých ako filozofi nemáme čo hovoriť, pretože tie už patria do rúk profesionálnych fyzikov, teoretických a experimentálnych.

Hlavným zámerom tejto druhej časti textu je ukázať, že takéto uvažovanie je prinajmenšom v jednom zásadnom bode chybné. Je chybou myslieť si, že na utvorenie adekvátneho obrazu o ontológii súčasnej fyziky nám bude stačiť schéma časticovo-silového chápania sveta, nech už akokoľvek uvoľnená a zovšeobecnená. Presnejšie povedané, chceme tvrdiť, že ak budeme vychádzať z matematicky najprecíznejšie vypracovanej podoby súčasných fundamentálnych fyzikálnych teórií, mali by sme buď radikálnym spôsobom zreformovať svoje predstavy o ontologickom inventári sveta, alebo by sme si prinajmenšom mali začať uvedomovať, že vyššie spomenutý upokojujúci pohľad na vec je hrubo zjednodušujúci. Mali by sme začať byť filozoficky znepokojení a udivení.

Aby bolo jasné, k akým zmenám v našom pohľade na svet vyzývame, pozrime sa bližšie na jednotlivé komponenty *štandardného modelu*, a to najprv tak, ako sa najčastejšie prezentujú pre širšie laické publikum: ŠM je teóriou viacerých typov elementárnych častíc a troch druhov fundamentálnych interakcií (síl). Máme šesť typov kvarkov (ktoré tvoria okrem iného protóny a neutróny), šesť typov takzvaných leptónov (medzi nimi elektrón a neutrína) a dvanásť typov bozónov (medzi nimi osem rôznych gluónov, jeden Z-bozón, dva W-bozóny a jeden Higgsov bozón). Tri fundamentálne sily sú: elektromagnetická, slabá a silná interakcia. Na „vysvetlenie“ toho, ako častice spolu interagujú, sa zvyčajne používa záhadne znejúca formulácia, že sa tak deje tým, že častice si medzi sebou navzájom „vymieňajú“ nejaké iné častice – napríklad dva elektróny, ktoré sa pri strete od seba „odrazia“ rôznymi smermi, si vymenili (virtuálne) fotóny.

Ak sa čitateľovi, ktorý nie je práve profesionálnym teoretickým fyzikom, javí takýto spôsob vyjadrovania málo zrozumiteľný, ba dokonca trochu bizarný, nemožno mu to zazlievať. Pre získanie prijateľnejšieho obrazu o fyzike ŠM však neexistuje nijaká *via regia*, iba cesta podrobného štúdia základných matematických a experimentálnych aspektov tejto teórie.<sup>3</sup> A práve štúdium týchto aspektov môže mať za následok, že v našom myslení vzniknú zásadné zmeny, o ktorých sme hovorili o dva odseky vyššie.

---

<sup>3</sup> Našťastie, v posledných rokoch sa objavilo viacero čitateľsky ústretových učebníc, napríklad Klauber (2013); Lancaster, Blundell (2014); Edelhäuser, Knochel (2016); Schwichtenberg (2020).

Adekvátny výklad konceptuálnych a matematických základov teórie *standardného modelu* určite nemôže byť realistickou ambíciou tohto článku, môžeme sa však napriek tomu pokúsiť aspoň o letný pohľad „pod kapotu“, ktorý by nám umožnil priblížiť si filozofickú zaujímavosť súčasnej fundamentálnej fyziky s ohľadom na jej ontologickú problematiku.

Teórie, ktoré tvoria ŠM, patria do širšej skupiny kvantových teórií poľa (QFT). Presnejšie ide o takzvanú neabelovskú (lokálne) kalibračnú (kvantovú) teóriu poľa. Táto teória vznikla dômyselným spojením troch koncepcií: *klasickej teórie poľa*, *špeciálnej teórie relativity* a *kvantovej mechaniky*.

Kvantová teória poľa ako konceptuálny rámec a matematický formalizmus *standardného modelu* je založená na myšlienke, že fyzikálny opis sveta možno urobiť prostredníctvom kvantových polí, pričom všetko ostatné sa dá interpretovať ako stavy a charakteristiky týchto fundamentálnych entít, respektíve ako výsledky interakcií niekoľkých základných typov kvantových polí. Častice, na ktoré sa ako na miniaturizované verzie každodenných predmetov rada upína naša predstavivosť, sa v rámci QFT stávajú špecifickými („časticovými“) stavmi kvantového poľa. Ide o takzvané vzbudené (excitované) stavy poľa, teda o tie stavy, ktoré sa nachádzajú na vyššej energetickej úrovni, ako je základná úroveň. Existencia diskretných energetických úrovní, teda fakt, že k zvyšovaniu energie polí nedochádza kontinuálne, ale v skokoch, po „kvantách energie“, vysvetľuje pomenovanie *kvantové* (alebo *kvantované*) polia. Zároveň je to, samozrejme, most, ktorý kvantovú teóriu poľa prepája s kvantovou mechanikou z dvadsiatych rokov dvadsiateho storočia.

Mnohí fyzici minulého storočia vnímali prechod ku kvantovej teórii poľa ako fundamentálnemu aparátu fyziky ako najvýznamnejší úspech svojej disciplíny v druhej polovici dvadsiateho storočia. Tieto vysoké hodnotenia, prirodzene, vychádzajú najmä z riešení konkrétnych teoretických problémov, ktoré QFT priniesla (napríklad definitívne zosúladenie kvantovej teórie so špeciálnou relativitou), a z radosti nad ohromujúco presnými a úspešnými predikciami, ktoré poskytuje dlhé desaťročia. V neposlednom rade však mnohých teoretických fyzikov teší tiež unifikujúci charakter QFT. Namiesto rôznych typov fyzikálnych entít, ako sú častice a sily, častice a vlny, častice a polia, QFT ponúka jednotný opis a jednotné vysvetlenie prostredníctvom ústredného pojmu kvantového poľa. Zračí sa to aj v nasledujúcich výrokoch fyzikov, ako sú Weinberg, Schwinger, Mills, Wilczek, ktorí patria k hlavným spoluvytvorcom ŠM:<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> J. Schwinger je spoluvytvorcom kvantovej elektrodynamiky (QED), R. Mills spolu s Ch.-N. Yangom zovšeobecnil matematický aparát QED na neabelovské kalibračné teórie, S. Weinberg sa podieľal na tvorbe takzvanej elektroslabej teórie (zjednotenie teórie elektromagnetických a slabých interakcií),



„Dve úplne nesúvisiace klasické koncepcie diskretných častíc a spojitých polí sú teraz zjednotené v tejto novej koncepcii kvantovaného poľa – ba viac než zjednotené, – prekročené, pretože táto nová koncepcia obidve presahuje. (...) Kvantované pole bolo, z hľadiska jeho historického vzniku, iba výhodným spôsobom ako sumarizovať matematické vlastnosti nerozlíšiteľných častíc, no čoskoro sa vďaka čoraz väčšiemu rozvoju experimentálnej vedy stalo to, čo bolo chápané jednoducho ako matematická idealizácia, realitou (Schwinger 2001, 21 – 22).

„Jediný spôsob, akým môžeme mať konzistentnú relativistickú teóriu, je chápať všetky častice prírody ako kvantá polí, ako v prípade fotónov“ (Mills 1994, 386).

„Rovnice teórie poľa, akou je *standardný model*, nie sú o časticách, ale o poliach; častice sa javia ako manifestácie týchto polí“ (Weinberg 1992, 25).

„V kvantovej teórii poľa nie sú primárnymi prvkami reality individuálne častice, ale polia. Tak napr. všetky elektróny sú len excitáciami určitého poľa, nazývaného elektrónové pole, ktoré vyplňa všetok priestor a čas“ (Wilczek 1999, 11).

Polia sa na prvý pohľad nejavia ako najvhodnejší kandidát na rolu fundamentálnych entít fyzikálneho univerza. Tým zaujímavejšia a naliehavjšia je z filozofického hľadiska otázka, ako polia nadobudli – Schwingerovými slovami – tento nový status reality.

Z matematického hľadiska sa pod „poľom“ funkcia, ktorá priradzuje každému bodu priestoru v danom čase určitú hodnotu: skalárnu, vektorovú či tenzorovú. Jednoduchým príkladom skalárneho poľa je *teplotné pole*, čiže funkcia, ktorá v každom čase priradzuje každému bodu (napríklad miestnosti) hodnotu teploty. Trochu zložitejšie je vektorové pole, ktoré v každom čase priradzuje danému bodu nielen číselnú hodnotu (skalár), ale zároveň aj *smer* danej veličiny. Ako jednoduchý a názorný príklad môžeme v tomto prípade uviesť *rýchlostné pole*, charakterizujúce tečenie vody v koryte rieky: každý bod pohybujúcej sa masy vody si môžeme predstaviť ako zaopatrený šípku, ktorej smer ukazuje, kadiaľ sa pohybuje infinitezimálny element vody v danom okamihu, a ktorej dĺžka predstavuje veľkosť jeho okamžitej rýchlosti. Ako je zrejmé, poliam tohto druhu nie je potrebné ani rozumné pripisovať samostatnú fyzikálnu realitu. Polia, ako je pole teplôt či pole rýchlostí, je najlepšie chápať ako určitú formu matematickej reprezentácie daného fyzikálneho systému (masa vzduchu v miestnosti, pohybujúca sa masa vody v koryte rieky). To, čo existuje, sú molekuly vzduchu, respektíve molekuly vody, ktoré vykonávajú rôzne pohyby. Pole nie je dodatočná entita popri nich, ale je to len výhodná forma reprezentácie istých aspektov daných systémov.

---

F. Wilczek významne prispel k vzniku kvantovej chromodynamiky (QCD), teda teórie kvarkov a silných interakcií. Steven Weinberg je, mimochodom, aj autorom názvu *standardný model*.

Podobne možno v rámci klasickej fyziky chápať aj reč o *gravitačnom poli* a gravitačnom potenciáli. No gravitačné pole by sme mohli interpretovať aj ako novú fyzikálnu entitu (nielen čisto matematickú), ktorá vyplní priestor v okolí hmotného telesa, alebo je určitou vlastnosťou (modifikáciou) tohto priestoru. Analogicky by sme mohli v prvom momente uvažovať aj o elektrickom a magnetickom poli v rámci klasickej teórie elektromagnetizmu, no tendencia pripísať elektromagnetickému poľu samostatnú realitu sa stala fyzikálne oveľa relevantnejšou po objave elektromagnetických vln koncom 19. storočia. Napriek pokusom predrelativistických fyzikov (v konečnom dôsledku neúspešnom) interpretovať toto vlnenie v rámci mechanistického modelu za pomoci určitého svetlonosného média (éter), vlny EM poľa nesúce energiu a hybnosť priestorom nakoniec zostali niečím nenázorným, no zároveň z fyzikálneho hľadiska veľmi reálnym.

Klasický (nekvantový) elektromagnetizmus bol zároveň prvou verziou takzvanej kalibračnej teórie: namiesto elektrických a magnetických polí, ktoré vystupujú v Maxwellových rovniciach, túto teóriu možno matematicky preformulovať v potenciálovej podobe prostredníctvom takzvaného skalárneho a vektorového potenciálu (z matematického hľadiska opäť polia), ktoré pripúšťajú rozmanité spôsoby matematického „nastavovania“ (kalibrácie) v závislosti od teoretických alebo prakticko-výpočtových potrieb (napríklad Coulombova kalibrácia, Lorenzova kalibrácia).

Tento princíp kalibrácie sa potom s oveľa väčšou silou a oveľa vážnejšími dôsledkami vracia v kvantovej teórii poľa. Kvantová teória poľa, na ktorej je postavený ŠM, je takisto kalibračnou teóriou, no okrem toho, že tento nový typ kalibrácie je z matematického hľadiska výrazne komplikovanejšia, má oproti teórii klasickej elektrodynamiky aj prekvapivé ontologické dôsledky. Ako sa ukazuje, nové polia, ktoré sú v tomto prípade matematicky generované uplatnením požiadavky (fyzikálnej) invariančnosti danej teórie vo vzťahu k istým typom matematických transformácií,<sup>5</sup> možno chápať ako úplne legitímnych členov rodiny polí, ktoré opisujú svet, pretože práve tieto kalibračné (bozónové) polia umožňujú nové vysvetlenie toho, čo sa označuje ako *fundamentálne sily*, respektíve *fundamentálne interakcie*.

Samozrejme, treba dodať, že každý súčasný fyzik pôsobiaci v tejto oblasti nie je pripravený vyvodzovať z naznačených matematických konštrukcií závery o ontologickom inventári nášho univerza. Nakoniec, kvantová teória polí má aj v súčasnej podobe svoje problémy, ktoré sa doposiaľ nepodarilo odstrániť k všeobecnej spokojnosti. Nehovoriac už o tom, že aj po desiatkach rokov usilovného snaženia stále chýba

---

<sup>5</sup> Tieto transformácie sa dajú chápať ako prvky určitých algebraických štruktúr nazývaných grupy, z ktorých niektoré majú a niektoré nemajú vlastnosť komutatívnosti. A keďže komutatívne, respektíve nekomutatívne grupy sa synonymne označujú aj ako abelovské, respektíve neabelovské grupy, vo fyzike sa zvykne hovoriť o abelovských a neabelovských kalibračných teóriách.

úspešná verzia kvantovej teórie gravitácie, teda taká verzia Einsteinovej všeobecnej teórie relativity, ktorá by bola plne vybudovaná v konceptuálnom rámci kvantovej teórie poľa. No odhliadnuc od všetkých nedostatkov tohto typu, ešte vždy zostáva otvorená jedna otázka, ktorá je filozoficky mimoriadne zaujímavá a ktorú sme postavili vo všeobecnej podobe na začiatku tohto článku: V akom zmysle a do akej miery možno interpretovať abstraktné matematické objekty (napríklad spomínané kalibračné polia) nielen ako šikovné formálne nástroje na budovanie teórií a predikovanie výsledkov experimentov, ale aj ako náznakov toho, že sa nám podarilo odhaliť nejakú hlbšiu vrstvu reality, nové fundamentálnejšie prvky fyzikálneho univerza?

Na takto položenú otázku dnes neexistuje nekontroverzná odpoveď. No pokiaľ sa nepodarí niekomu presvedčivým spôsobom preukázať, že sama formulácia takejto otázky nespĺňa nároky sémantickej zmysluplnosti (k čomu podľa nášho presvedčenia zatiaľ nedošlo), otázka zostáva živá a predstavuje jeden z bodov prieniku medzi filozofickým a prírodovedeckým úsilím o porozumenie svetu.

Ako dôkaz toho, že problém realistickej, respektíve antirealistickej interpretácie matematického aparátu QFT je citlivým miestom aj v rámci fyzikálnej komunity, môže poslúžiť polemika odštartovaná článkom (Hobson 2013). Hobson je jednoznačným (a zrejme najhlasnejším) zástancam poľovej ontológie súčasnej fyziky. Väčšina fyzikov by síce súhlasila, že jeho argumenty proti časticovému chápaniu sú definitívne, mnohí však jedným dychom dodávajú, že kvantové polia reprezentované matematickými operátorovými poľami majú podobné problémy s prevzatím úlohy základných stavebných kameňov, ako sa to ukázalo pri časticách.<sup>6</sup> Spomedzi filozofov fyziky najvplyvnejšiu kritiku poľovej interpretácie QFT predložil David Baker, pričom jeho argumentačná stratégia takisto tkvie v poukázaní na to, ako ťažkosti časticovej interpretácie sprostredkované dopadajú aj na tú poľovú (Baker, 2008). Baker však zároveň patrí do tej skupiny súčasných filozofov fyziky (T. Maudlin, M. Lange, S. French a i.), ktorí trvajú na tom, že *nejaký* ontologický obraz súčasnej fyziky je potrebný. Plne sa s nimi stotožňujeme v názore, že úhybný manéver do niektorej z radikálnejších verzií antirealizmu, respektíve instrumentalizmu je neuspokojivý, pretože ten zväčša – okrem toho, že rezignuje na vysvetlenie – plodí iný typ problémov a konceptuálnych konfúzií.

Určitú minimalistickú verziu realizmu predstavujú varianty štrukturálneho realizmu, napríklad ontický štrukturálny realizmus S. Frencha. Túto cestu možno chápať aj v duchu známeho Hertzovho výroku „Maxwellova teória je Maxwellova sústava rovníc“, ak pod tým rozumieme, že ontológiou je spoločný štrukturálny menovateľ, ktorý môže byť reprezentovaný v rôznych reifikovaných podobách (vrátane časticovej a poľovej). Za hlavný deficit tohto návrhu považujeme to, že jadro ontologickej

---

<sup>6</sup> Ku konkrétnym protiargumentom pozri septembrové číslo *American Journal of Physics* (2013).

záhadnosti sa tu presúva na nie veľmi presvedčivé rozlíšenie medzi matematickými a fyzikálnymi štruktúrami.

Je celkom možné, že primeraná odpoveď na tieto otázky bude musieť zísť hlbšie. V tomto smere je na zváženie napríklad Healeyho (opatrná) poznámka o tom, že sama „dekompozičná stratégia“ (ako označuje úsilie hľadať stavebné kamene prírody) možno pomaly dohráva svoju úlohu (Healey 2013, 56; 61). Samozrejme, kým sa dostatočne presne nepovie, čo je alternatíva, môže to vyznieť ako iba ďalší rétorický trik.<sup>7</sup> V každom prípade je to prinajmenšom výzva pre filozofov, ktorí sa radi pohybujú v širšom mori konceptuálnych možností.

### **Záver: retrospektíva a perspektíva**

Tradičné dejiny západnej filozofie začínajú pozoruhodnými pokusmi niekoľkých starogréckych mysliteľov pochopiť svet ako *kosmos*, ktorého *archai kai aitiai* je možné odhaliť ľudským rozumom poučeným každodennou skúsenosťou. Východiskom tohto textu je presvedčenie, že otázky, ktoré sa týkajú povahy sveta ako celku, jeho fundamentálnych elementov a zákonitostí, stále sú a mali by aj zostať súčasťou filozofie ako akademickej disciplíny. Tento postoj so sebou, samozrejme, nevyhnutne nesie otázku, aká je úloha filozofie v procese poznávania fundamentálnych štruktúr a prvkov univerza, a táto otázka je naliehavejšia o to väčšmi, že v rámci súčasných prírodných vied – špeciálne vo fyzike vysokých energií a v kozmológii – si tieto otázky, ako sa zdá, našli svoj prirodzený domov.

Ak tento typ pýtania sa prijme ako legitímnu súčasť filozofie, máme v zásade tri možné spôsoby ako postupovať: *metafyzický*, *fenomenologický* a *naturalistický*. *Metafyzická* cesta predstavuje pokus rozvíjať autonómnu filozofiu prírody, nezávisle od postupov a výdobytkov empirických vied, pričom ambíciou je objaviť ešte hlbšiu jednotu a ešte fundamentálnejšie prvky prírody, než je toho schopná prírodná veda. Pod *fenomenologickým* prístupom tu rozumieme taktiež istý druh autonómneho hľadania základných elementov, no v tomto prípade nejde o tromfnutie vedy v jej úsilí, ale o prevrátenie optiky: základné elementy prezentované vo vedeckých teóriách sú interpretované ako abstraktné konštrukty, ktoré slúžia istým obmedzeným cieľom, a za skutočné základné entity sa vyhlasuje to, čo je bezprostredne evidentné a vnímateľné, veci nášho prirodzeného sveta (*Lebenswelt*). *Naturalistický* prístup prichádza – oproti obom predchádzajúcim – s výrazným obmedzením autonómie filozofie vo veci hľadania adekvátnej ontológie prírody. Jeho ústredným mottom je aj na tomto poli hlboká quineovská nedôvera k „prvej filozofii“. Úlohou filozofa je podieľať sa svojím

---

<sup>7</sup> Dodajme, že toto nie je kritika Healeyho, ale skôr priznanie, že v rámci tohto textu už nemôžeme podať podrobnejší výklad. Richard Healey je autorom jednej z filozoficky najlepších a matematicky najerudovanejších prác, venovaných práve interpretácii súčasných kalibračných teórií (Healey, 2007).

kúskom na celkovom procese poznávania a prispievať bez toho, že by si nárokoval kompetencie teoretických a experimentálnych prírodných vied. Jeho part však nemusí byť bezvýznamný, pokiaľ ho dokáže hrať so znalosťou problematiky, historickou akribiou a s pojmovou precíznosťou.

Za optimálnu stratégiu vo filozofii vedy vo všeobecnosti pokladáme práve takto chápaný naturalistický postoj. Toto prihlásenie k naturalizmu si však žiada niekoľko dodatočných poznámok. Naturalizmus (v našom ponímaní) nemôže byť – takpovediac zo svojej podstaty – dogmatický v tom zmysle slova, že si osvojuje a za každú cenu presadzuje jednu verziu (fundamentálnej) vedeckej teórie. Naturalistický prístup chápeme ako filozofický postoj k spôsobom skúmania sveta, nie ako propagáciu alebo apológiu momentálne dominujúcej fundamentálnej teórie. Filozofia (fyziky) má byť ponorená v prostredí vedeckého skúmania, ale nemá sa v ňom (nechať) utopiť. Naturalistický filozof v ňom musí vedieť plávať, aj keď štýlom odlišným od (nefilozofujúceho) vedca.

Napriek tomu, že vymedzili naturalizmus v kontraste k metafyzickému a fenomenologickému prístupu, pokladáme za dôležité primerane zohľadňovať niektoré ich aspekty. Po prvé, naturalistická filozofia fyziky by pre silnú naviazanosť na aktuálne najúspešnejšie fyzikálne teórie nemala strácať z dohľadu fenomenologický problém prepojenia medzi „zjavným“ a vedeckým obrazom sveta (v Sellarsovom zmysle). A to aj preto, že sémantika aj tých najabstraktnejších teoretických koncepcií na začiatku vzišla a v konečnom dôsledku je prístupná práve z našej (relatívnej a podmienenej) skúsenosti s javmi, ktoré sa nás doslova dotýkajú. Zveličenie alebo dokonca absolutizovanie tejto podmienenosti môže viesť k subjektivismu – ale iba tejto hypertrofii by sa mal naturalista vystríhať. A po druhé, metafyzický impulz v zmysle revizionistickej metafyziky môže byť tiež čiastočne užitočne kooptovaný do naturalistického spôsobu práce, pretože schopnosť pozrieť sa radikálne inak aj na zabehané a osvedčené metódy a schémy myslenia je kľúčová pre samo vedecké skúmanie.

Čo to znamená konkrétne vo vzťahu k fundamentálnej fyzike súčasnosti vo forme kvantovej teórie poľa a jej novej sugestívnej a unifikujúcej ontológii? Znamená to, z nášho pohľadu, pracovať v rámci naturalistickej perspektívy (okrem už spomenutého) na troch typoch úloh: 1. poskytovať širšie intelektuálne historické pozadie pre súčasné fundamentálne fyzikálne teórie,<sup>8</sup> 2. podieľať sa na pojmovom rozpletaní a vyjasňovaní rozdielov medzi metaforickými (analogickými) a doslovnými spôsobmi hovorenia v súvislosti s prezentáciami fyzikálneho obrazu sveta, ale aj v súvislosti s každodennou prácou fyzikov, v ktorej môže byť toto prelínanie heuristicky mimoriadne

---

<sup>8</sup> Jedným zo vzorových príkladov takýchto filozoficky motivovaných a filozoficky prínosných historických diel sú práce Mary Hesse – v súvislosti s témou tohto článku je osobitne zaujímavá jej kniha (Hesse 1962).

užitočné, 3. kritickou pojmovou analýzou strážiť a ošetrovať tie miesta fyzikálneho slovníka, kde často dochádza k (na pohľad možno nevinným) nejasnostiam a ambivalenciám, no so sklonom k nebezpečným kategoriálnym omylom.<sup>9</sup>

A na úplný záver: Ako stručne odpovedáme na štyri otázky, ktorými sme tento článok začali?

- Súčasnú fundamentálnu fyzikálnu teóriu skôr vylučujú mnohé obľúbené obrazy sveta, než by nám nejaký presvedčivý poskytovali / sugerovali (odhliadnúc od *ad hoc* heuristických výhod toho-ktorého modelu).
- Očakávať obraz v zmysle niečoho názorného alebo vizualizovateľného by bolo naivné, no pýtať sa na ontológiu fyziky je stále opodstatnené.
- Ak na chvíľu zavrieme oči pred „drobnými“ technickými problémami, potom je v súčasnosti najlepšou voľbou chápať ako základné entity kvantové polia.
- Miera dôvery závisí od konkrétnej zvolenej interpretácie matematického aparátu, ale vo všeobecnosti máme dôvody byť skôr opatrní ako triumfalistickí.<sup>10</sup>

## Literatúra

- BAKER, D. J. (2009): Against Field Interpretations of Quantum Field Theory. *British Journal for the Philosophy of Science* 60, 585 – 609. DOI: <https://doi.org/10.1093/bjps/axp027>
- COHEN, I. B. (1971): *Introduction to Newton's „Principia“*. Cambridge: University Press.
- EDELHÄUSER, L, KNOCHEL, A. (2016): *Tutorium Quantenfeldtheorie*. Berlin: Springer.
- FRENCH, S. (2014): *The Structure of the World*. Oxford: Oxford University Press.
- HALL, A. R., HALL, M. B. (1962): *Unpublished Scientific Papers of Isaac Newton*. London: Cambridge University Press.
- HEALEY, R. (2007): *Gauging What's Real*. Oxford: Oxford University Press.
- HEALEY, R. (2013): Physical Composition. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 44, 48 – 62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2011.05.001>
- HESSE, M. B. (1962): *Forces and Fields. The Concept of Action at a Distance in the History of Physics*. New York: Dover Publications, Inc.
- HOBSON, A. (2013): There are no particles, there are only fields. *American Journal of Physics*, 81 (3), 211 – 223. DOI: <https://doi.org/10.1119/1.4789885>
- JANIAK, A. (ed.) (2004): *Isaac Newton: Philosophical Writings*. Cambridge: Cambridge University Press.
- KLAUBER, R. D. (2013): *Student Friendly Quantum Field Theory*. Fairfield: Sandtrove Press.
- LANCASTER, T., BLUNDELL, S. J. (2014): *Quantum Field Theory for the Gifted Amateur*. Oxford: Oxford University Press.
- MILLS, R. (1994): *Space, Time and Quanta*. New York: W. H. Freeman and Company.

<sup>9</sup> V kontexte tohto článku máme na mysli napríklad konfúzne nerozlišené používanie termínu *pole* jednak v matematickom zmysle, a jednak vo fyzikálnom zmysle, čo síce v niektorých prípadoch môže predstavovať len pragmatickú skratku v prúde hovorenia (či písania), no v iných prípadoch môže viesť prinajmenšom k zbytočným zavádzaniam, v horších prípadoch k bizarným ontologickým koncepciám napríklad takého typu, ako je práca M. Tegmarka *Our Mathematical Universe* (2014).

<sup>10</sup> Za dobre ciele pripomienky ďakujem anonymnému recenzentovi. Štruktúra a rozsah článku, bohužiaľ, neumožnili ich plné zohľadnenie a zapracovanie.

- NEWTON, I. (1687): *Philosophiae naturalis principia mathematica*. London: Royal Society.
- NEWTON, I. (1721): *Opticks, or a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*. London. The Third Edition.
- SCHWICHTENBERG, J. (2020): *No-Nonsense Quantum Field Theory*. Karlsruhe: No-Nonsense Books.
- SCHWINGER, J. (2001): *Quantum mechanics: Symbolism of Atomic Measurements*. Berlin: Springer.
- WEINBERG, S. (1992): *Dreams of a Final Theory*. New York: Random House, Inc.
- WILCZEK, F. (1999): Mass without Mass I. Most of Matter. *Physics Today*, 52, 11, 11 – 13. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.882879>

---

Článok vznikol ako súčasť riešenia grantového projektu VEGA, *Realizmus a antirealizmus v súčasnej filozofii vedy*, č. 1/0258/2019.

---

Róbert Maco  
Univerzita Komenského v Bratislave  
Filozofická fakulta  
Katedra filozofie a dejín filozofie  
Gondova 2  
811 02 Bratislava 1  
Slovenská republika  
e-mail: [robert.maco@uniba.sk](mailto:robert.maco@uniba.sk)  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5061-9344>