

FYZIKA A NATURALISTICKÁ FILOZOFIA: FYZIKÁLNE A FILOZOFICKÉ ASPEKTY KALIBRAČNÉHO PRINCÍPU

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

MACO, R.: Physics and Naturalistic Philosophy: Physical and Philosophical Aspects of the Gauge Principle
FILOZOFIA, 77, 2022, No 9, pp. 694 – 710

In the introductory part of the paper, we outline the position of the philosophy of physics in the context of naturalistic theoretical philosophy. The main message here is an appeal for understanding philosophy as an integral part of the scientific investigation of the world. In the following sections, we identify three central aspects of contemporary fundamental physics, knowledge of which is essential for philosophical reflection on physics. This is followed by an explanation of one of these aspects, which is the gauge principle. Based on classical electrodynamics, we explain with the help of a relatively modest mathematical apparatus the key idea of gauge symmetry, as it appears in the core theories of the standard model of elementary particles. In the final part, we point out the philosophical relevance of the gauge principle, especially within the current debates between substance- and structure-oriented philosophies of physics.

Keywords: Naturalism – Physics – Quantum field theory – Gauge principle – Symmetry – Standard model – Structuralism

1. Úvod

Ak dnes v rámci teoretickej filozofie hovoríme o „naturalistickej filozofii“ a chceme zostať pri minimalistickom vymedzení tohto jej typu, mohli by sme povedať, že ide o taký prístup, ktorý v porovnaní s inými mimoriadnym spôsobom rešpektuje prírodné vedy. To, samozrejme, vyvoláva viacero legitímnych otázok. Napríklad čo všetko sme pripravení zahrnúť pod termín „prírodné vedy“? Mohli by sme sa tiež pýtať, či spomedzi všetkých prírodných vied pokladáme niektorú za dôležitejšiu v tom zmysle, že je fundamentálna.

Pre účely tohto výkladu budeme predpokladať, že tieto otázky máme nateraz primerane zodpovedané a že pod spomínanou fundamentálnou prírodnou vedou budeme rozumieť fyziku, a to konkrétne tú jej časť, ktorá sa (aspoň z hľadiska svojich ambícií) venuje opisu, vysvetľovaniu a predpovedaniu prírodných procesov na

úrovni elementárnych častíc, polí a základných interakcií. Túto časť budeme označovať termínom „fundamentálna fyzika“: Einsteinova gravitačná teória (teda všeobecná teória relativity), teória elektromagnetickej interakcie, teória slabej jadrovej interakcie a teória silnej jadrovej interakcie.

Zostáva zamyslieť sa nad vyššie použitým slovom „rešpektuje“. O aký druh alebo mieru rešpektu tu vlastne ide? A opäť, na obmedzené účely tohto textu si dovoľíme túto otázku zodpovedať minimalisticky: „Rešpektovanie“ je prinajmenšom taká forma filozofického zohľadňovania prírodných vied, ktorá predpokladá oboznámenosť s prírodnými vedami na úrovni umožňujúcej určitú formu netriviálnej filozofickej participácie na prírodovednom poznávaní. Prírodné vedy z pohľadu naturalistickej filozofie (tak, ako ju tu chápeme) nemajú byť len zdrojom ilustratívnych príkladov pri rozvíjaní v zásade autonómnych filozofických teórií alebo „pokladnicou“ poznatkov či metód, ktoré môžeme z času na čas využiť na rozširovanie si svojho epistemického horizontu, ale mali by byť spolu s filozofiou súčasťou *jedného celostného*, no zároveň falibilného kognitívneho procesu, v ktorom v konečnom dôsledku ide všetkým o to isté: o čoraz lepšie porozumenie povahe a fungovaniu sveta.

Lenže prečo by práve prírodné vedy (a osobitne fyzika) mali mať prioritu až do takej miery, že sama filozofia od nich preberá svoju charakteristiku („naturalistická“)? Nuž, hlavne preto, že práve tento typ vedeckého bádania sústavne zaznamenáva najväčšie úspechy. Pod úspechmi tu však na samom prvom mieste nemyslíme ani tak ten fakt, že za posledné storočia sa nahromadila úctyhodná suma poznatkov a ich aplikácií, ale predovšetkým to, že prírodným vedám sa podarilo nájsť určitý produktívny a sebakorigujúci *modus operandi*, ktorý na jednej strane bráni trvalým úletom do čistej špekulácie, a na druhej strane neviazne v čírom akumulovaní empirických dát.

Filozofia má tradične bližšie práve k tým teoretickejším častiam prírodných vied – filozofa to viac tiahne k princípom, abstrakcii, všeobecnosti, systematickej prepojenosti rôznorodých aspektov, otázkam celkového zmyslu a hodnoty atď. A práve v *tomto* zmysle filozofia je (alebo mala by byť) súčasťou spomínaného globálneho poznávacieho procesu. To znamená nebyť len divákom, ktorého občas niečo zaujme a na chvíľu sa pri tom pozastaví, a nebyť ani akousi povznesenou externou inštanciou, ktorá sa nazdáva, že sama najlepšie vie, v čom tkvie „podstata“ vedeckého bádania, aké sú jeho neprekročiteľné (vnútorné a vonkajšie) limity a pod. Obrazne povedané, naturalistická filozofia nie je divákom ani rozhodcom, ale je skôr jedným z hráčov. Byť však platným filozofickým hráčom vyžaduje také sústredenie na hru, ktoré dopĺňa aktivity ostatných hráčov o čosi, čo týmto ostatným hráčom môže uniknúť, či už pre nedostatok času, alebo absenciu istého špecifického

druhu cviku. Aby však filozofický hráč vôbec mohol k takémuto uplatneniu dospieť, vyžaduje si to od neho primeranú znalosť základných pravidiel hry vrátane znalosti kľúčových stratégií danej disciplíny.

2. Polia, kalibrácie a symetrie ako ústredné témy

Keď sa touto optikou pozrieme na požadovanú výbavu filozofického hráča uprostred prírodovedného skúmania, ktorého fundamentom je fyzika, vynára sa otázka, čo presne treba vedieť o základných pravidlách a základných stratégiách hry. Nesporne musí významnú rolu zohrávať znalosť matematiky. V tomto texte sa však chceme orientovať na fyzikálnu stránku veci, hoci vyjadrenú prostredníctvom matematických formalizmov. Naším cieľom je teda najskôr identifikovať a pomenovať tie „časti“ fundamentálnej fyziky, ktoré sú *conditio sine qua non*, no takým spôsobom, že budú zredukované na to najpodstatnejšie.

Zdá sa nám, že filozofický hráč sa musí dôkladne oboznámiť prinajmenšom s tromi kľúčovými aspektmi súčasných fundamentálnych fyzikálnych teórií. Po prvé musí chápať, čo presne znamená, že všetky tieto teórie sú teóriami *poľa*. Po druhé musí rozumieť, čo znamená *kalibračný princíp*, na ktorom sú všetky tieto teórie postavené. A po tretie musí chápať, prečo sa v týchto teóriách takým rozhodujúcim spôsobom využívajú *symetrie*.

O každom z týchto troch mimoriadne dôležitých aspektov by sa dal napísať samostatný text. V tomto texte sa sústredíme na ten druhý, a to z týchto dôvodov:

1) Kalibračný princíp znamená, že príslušné fyzikálne teórie sú určitým špeciálnym druhom *teórií poľa*, takzvanými *kalibračnými* teóriami poľa. Ak teda v súvislosti so súčasnými fundamentálnymi fyzikálnymi teóriami hovoríme (o nich ako) o kalibračných teóriách, je v tom automaticky obsiahnutý aj ich poľový charakter, a teda tento aspekt pri našom rozprávaní nestratíme.

2) Symetrie môžu mať síce rôznu povahu, ale ako ústredné symetrie v súčasnej teoretickej fyzike figurujú práve tie, ktoré sa označujú ako *kalibračné* symetrie. Porozumieť kalibračnému princípu teda znamená porozumieť jednému mimoriadne dôležitému uplatneniu symetrií v súčasnej teoretickej fyzike.

Takto teda kalibračná teória ako základný teoretický rámec pre súčasnú fundamentálnu fyziku v sebe zahŕňa tak pojem poľa, ako aj pojem symetrie. Môžeme teda dúfať, že zoznámením sa s hlavnou myšlienkou kalibračnej teórie získame veľa pre porozumenie ďalším dvom rozhodujúcim aspektom.¹

¹ Priekopnícku prácu vo filozofii fyziky vo vzťahu ku kalibračnému princípu a kalibračným teóriám vykonal Michael Redhead, ktorý v štáti z roku 2002 upozornil na nedostatočnú pozornosť, ktorá sa

Termín „kalibračná teória“ je síce spomedzi spomenutých troch aspektov pre nezainteresovaného čitateľa určite najmenej známy, takže by sa mohlo zdať, že nejde o najlepší začiatok pre vysvetľovanie. V teoretickej fyzike posledných dekád je však princíp kalibrácie natoľko dôležitý,² že sme sa rozhodli začať priamo ním, a to bez ohľadu na didaktické ťažkosti.³

3. Idea kalibrácie v klasickej fyzike (klasický elektromagnetizmus)

Aby sme si situáciu čo najviac uľahčili, v podrobnejšom výklade sa sústredíme len na tú najjednoduchšiu verziu kalibračnej teórie. A, samozrejme, aj v rámci nej sa obmedzíme na vysvetlenie hlavnej idey. Hoci pri tom uvedieme aj niekoľko rovníc, dôraz pri tom nebude kladený na pochopenie jednotlivých matematických pojmov alebo deduktívnych krokov, ale iba na pointu celého postupu. Vychádzame totiž z toho, že predtým, ako sa filozof pustí do technických detailov danej teórie, je preňho užitočné mať aspoň hrubý obraz o jej základnom smerovaní a rozumieť jej fyzikálnej (ale aj filozofickej) relevancii. Po získaní takéhoto prehľadu sa potom možno vrátiť k jednotlivým bodom a doplniť si svoje matematické a fyzikálne vedomosti (a zručnosti).

V predchádzajúcich riadkoch sme pri zmienke o fundamentálnych fyzikálnych teóriách explicitne nerozlišovali medzi kvantovými a klasickými (predkvantovými) teóriami. Štandardný model fyziky elementárnych častíc, prirodzene, patrí do oblasti kvantovej fyziky, zatiaľ čo všeobecná relativita (einsteinovská teória gravitácie) je nekvantovou teóriou. Pozoruhodnou črtou súčasnej fundamentálnej fyziky je to, že kalibračný princíp je jadrom tak kvantových, ako aj nekvantových teórií. Je síce pravda, že v prípade rôznych fundamentálnych teórií ide o rôzne kalibračné symetrie, takže porozumením jedného typu kalibračnej teórie nemáme ani zďaleka vyhrané, no zároveň platí aj to, že porozumenie tomu, ako myšlienka kalibrácie funguje pri jednom type teórie (aj keď len pri tej najjednoduchšej), prináša neoceniiteľný zisk uchopenia určitého základného „triku“, ktorý sa potom opakuje v rôznych

dovtedy tejto téme venovala v rámci filozofických základov fyziky. Záverečné vety jeho state sú veľmi priamym apelom, adresovaným kolegom filozofom: “The gauge principle is generally regarded as the most fundamental cornerstone of modern theoretical physics. In my view its elucidation is the most pressing problem in current philosophy of physics” (Kuhlmann, Lyre, Wayne 2002, 299).

² Čo sa prejavuje aj na jazykovej úrovni frekvenciou výskytov slov „kalibrácia“, resp. „kalibračný“ – v slovných spojeniach ako kalibračná symetria, kalibračná invariancia, kalibračné pole, kalibračná funkcia, kalibračná voľnosť, kalibračná podmienka atď.

³ Dobrý (netechnický) úvod do kalibračných teórií predstavuje napr. článok G. 't Hoofta ('t Hooft 1980), systematický výklad možno nájsť napr. v Aitchison, Hey (2013) a historický výklad v dielach O' Raifeartaigh (1997) a Yang (2014).

modifikáciách a s čoraz vyšším stupňom matematickej sofistikovanosti a náročnosti z hľadiska fyzikálnej interpretácie.

Pozrime sa teda najskôr na elementárny príklad toho, čo nazývame kalibračnou symetriou. Klasická teória elektromagnetizmu, iniciovaná počas šesťdesiatych a sedemdesiatych rokov devätnásteho storočia J. C. Maxwellom, je – stručne povedané – teóriou o tom, ako prítomnosť elektrických a magnetických polí meniacich sa v priestore a čase ovplyvňuje správanie elektricky nabitých častíc alebo telies obsahujúcich elektricky nabitú časticu, a o tom, ako prítomnosť a pohyby elektricky nabitých častíc spôsobujú vo svojom okolí modifikácie priestoru, ktoré nazývame elektrickými a magnetickými poľami.⁴ Z ontologického hľadiska by sme teda mohli na danej úrovni zjednodušenia povedať, že teória nám predstavuje svet ako pozostávajúci z dvoch fundamentálnych typov entít. Jednými sú spojité a donekonečna rozpriestranené entity nazývané polia, druhými sú diskkrétne a bodové entity nazývané častice. Tieto dva druhy entít sú previazané interakciami: prítomnosť poľa v danej oblasti priestoru môže napríklad spomaliť alebo urýchliť pohyb nabitej častice, zatiaľ čo prítomnosť, respektíve pohyb nabitej častice môže generovať pole.⁵

Častice fungujú ako zdroje polí, teda keby neexistovali nabitú časticu, priestor by nebol elektricky a magneticky modifikovaný, čiže by sme buď mohli povedať, že polia (ako špecifické modifikácie priestoru) by vlastne neexistovali, alebo že by mali všade nulovú intenzitu. Na druhej strane, ak už nabitú časticu existujú, môžu niektorými svojimi pohybmi generovať také modifikácie priestoru, ktoré sa môžu stať nezávislými od existencie častíc, ktoré ich generovali. Tak je to v prípade elektromagnetického žiarenia, ktoré podľa teórie elektromagnetizmu nie je ničím iným ako vlnami magnetických a elektrických polí, ktoré za istých podmienok postupujú spolu v tandeme a šíria sa v priestore, aj keď by už častice, ktoré ich pôvodne generovali, medzičasom zanikli. Minimálne v tomto zmysle teda možno povedať, že polia majú svoju vlastnú existenciu, takže vzťah častíc a polí sa nedá opísať modelom (samostatnej) substancie a (nesamostatného) akcidentu. Pri zdôrazňovaní svojbýtnej existencii polí však môžeme ísť aj ďalej tým, že sa zamyslíme nad tým, ako na seba vzájomne pôsobia jednotlivé nabitú častice. Ich vzájomné pôsobenie neprebieha okamžite, ale je sprostredkované práve poľami. Častice na seba nereagujú na diaľku a bezprostredne, ale reagujú vždy len lokálne na príslušnú intenzitu poľa

⁴ Nejde nám tu o historicky verné vystihnutie pôvodného Maxwellovho chápania – ako ho rozoberá napr. Berkson (2014) –, ale skôr o charakterizovanie „maxwellovskej“ elektrodynamickej na prelome devätnásteho a dvadsiateho storočia.

⁵ Pre pochopenie základov klasickej elektrodynamickej si ťažko možno predstaviť vhodnejšiu knihu, ako je učebnica Davida Griffithsa (Griffiths 2013).

v danom mieste (alebo v bezprostrednom okolí) výskytu častice. Ak teda chce napríklad nejaká častica periodicky meniť pohybový stav inej častice, môže to dosiahnuť len tak, že bude periodicky meniť konfiguráciu polí okolo seba a čakať, kým druhá častica začne tieto zmenené podmienky na svojom mieste „cítiť“.

Zákony, ktoré v sebe obsahujú scenáre takýchto rôznych interakcií medzi poľami a časticami, sú známe pod názvom Maxwelllove rovnice:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (4)$$

Na týchto rovniciach bude pre nás dôležité len to, že v nich na ľavej strane vystupujú matematické entity nazývané vektorové polia, $\mathbf{E}(\mathbf{x}, t)$ a $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$, ktoré slúžia na reprezentovanie magnetických a elektrických polí v každom bode priestoru a každom čase, a na pravej strane (dvoch zo štyroch uvedených rovníc) zasa figurujú matematické entity, ktoré reprezentujú rozmiestnenie nabitých častíc v priestore a ich pohyby: hustota elektrického náboja $\rho(\mathbf{x}, t)$ a hustota elektrického prúdu $\mathbf{J}(\mathbf{x}, t)$.

Aby sme vedeli povedať, po akej trajektórii a akou rýchlosťou sa bude pohybovať nabitá častica pri danej konfigurácii polí v jej bezprostrednom okolí, potrebujeme ešte použiť jednu dodatočnú (pohybovú) rovnicu, ktorá prepojí vektorové polia (získané vyriešením Maxwellových rovníc pre dané počiatočné a okrajové podmienky) so silou pôsobiacou na častice, a nakoniec prepojiť silu so zrýchlením, ktoré je touto silou privedené. Spomínanú pohybovú rovnicu získame spojením dvoch ďalších zákonov: *zákona Lorentzovej sily* (\mathbf{F}_L) a *Newtonovho zákona sily* (alias druhého pohybového zákona klasickej mechaniky)

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{F}_L = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \\ \mathbf{F} = m\mathbf{a} = m \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} \end{array} \right\} \rightarrow q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = m \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2}$$

Toto je všeobecná schéma pre riešenie jedného typu problémov, s ktorými sa stretávame v klasickej teórii elektromagnetizmu. Aby sme sa odtiaľto dopracovali k princíp kalibrácie, obrátíme teraz svoju pozornosť k istým matematickým vlastnostiam maxwellovskej teórie.

Pravidlá vektorovej analýzy nám umožňujú preformulovať Maxwellove rovnice tak, že sa v nich namiesto \mathbf{E} a \mathbf{B} budú vyskytovať dve nové funkcie priestoru a času, ktoré sa štandardne označujú \mathbf{A} a ϕ , ktorých celé názvy znejú *magnetický vektorový potenciál* a *elektrický skalárny potenciál*. Preformulovanie Maxwellových rovníc v tomto duchu je pri znalosti vektorovej analýzy veľmi jednoduché. Z homogénnych Maxwellových rovníc (2) a (3) plynie, že musia existovať dve také funkcie priestoru a času $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t)$ a $\phi(\mathbf{x}, t)$, že platí

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (5)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi - \frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} \quad (6)$$

Takže po dosadení nových výrazov za \mathbf{E} a \mathbf{B} do zvyšných dvoch Maxwellových rovníc (1) a (4) dostaneme ich *potenciálovú* reformuláciu

$$\nabla^2\phi + \frac{\partial}{\partial t}(\nabla \cdot \mathbf{A}) = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (7)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}(\nabla\phi) - \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial^2\mathbf{A}}{\partial t^2} = \mu_0\mathbf{J} \quad (8)$$

Keby sa nám pri známych (zadaných) veličinách ρ a \mathbf{J} podarilo vyriešiť tieto dve rovnice, teda zistiť, ako presne vyzerajú funkcie \mathbf{A} a ϕ , ktoré tu vystupujú v úlohe neznámych, mohli by sme sa následne ľahko dopracovať k \mathbf{B} a \mathbf{E} podľa vyššie uvedených vzťahov. A odtiaľ by sme mohli tak ako predtým postúpiť k pohybovej rovnici, vyriešiť túto diferenciálnu rovnicu a tak zistiť hľadané trajektórie nabitej častice (častíc).

Prečo si však takto komplikovať život? Prečo zavádzať namiesto \mathbf{E} a \mathbf{B} nejaké nové matematické entity, keď nakoniec sa predsa len dostaneme k Lorentzovej sile, v ktorej vystupujú \mathbf{E} a \mathbf{B} , a nie \mathbf{A} a ϕ ?

Zdôvodnenie, ktoré sa uvádza v klasickom elektromagnetizme pre túto okľuku cez potenciály, je pragmatické. Hoci na prvý pohľad to môže vyzeráť tak, že sme si cestu predĺžili a možno dokonca aj sťažili zložitejšou verziou diferenciálnych rovníc, v skutočnosti môžu nastať prípady, keď je matematicky jednoduchšie pre daný problém nájsť zo zadaného rozloženia nábojov a prúdov v priestore najprv potenciály a potom relatívne jednoduchými matematickými operáciami (derivovaním) z nich odvodiť \mathbf{E} a \mathbf{B} .

Celá záležitosť teda vyzerá ako šikovný formálny (matematický) trik na riešenie niektorých špecifických elektromagnetických problémov. Súčasťou tohto triku je dôležitá okolnosť, že pri akejkoľvek fyzikálnej situácii, ktorá je jednoznačne daná

hodnotami \mathbf{E} a \mathbf{B} , nezodpovedá tejto dvojici vektorových polí jediná dvojica funkcií \mathbf{A} a ϕ . Naopak, existuje nekonečne veľa možností, ako zvoliť podobu dvojice \mathbf{A} a ϕ .

Ďalšie celkom priamočiare cvičenie vo vektorovej analýze vedie k spresneniu tohto výroku tým, nám ukáže, v akom spektre možností sa môžeme pri voľbe \mathbf{A} a ϕ pohybovať. Dvojicu potenciálov \mathbf{A} a ϕ môžeme vždy nahradiť⁶ dvojicou modifikovaných potenciálov \mathbf{A}' a ϕ' , pokiaľ majú nasledujúcu podobu

$$\phi \rightarrow \phi' = \phi - \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (9)$$

$$\mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A}' = \mathbf{A} + \nabla \lambda \quad (10)$$

pričom $\lambda(\mathbf{x}, t)$ môže byť ľubovoľná skalárna funkcia priestoru a času.⁷ Takto sa po prvýkrát dostávame k možnosti použiť termín „kalibračný“, k vysvetleniu ktorého sme celý čas smerovali.

Rovnice definujúce čiarkované (modifikované) potenciály sa totiž štandardne označujú ako *kalibračné transformácie*, čiže čiarkované potenciály sú *kalibračne transformovanými* potenciálmi. Funkcia λ zasa nesie zaužívaný názov *kalibračná funkcia*. Okolnosť, že maxwellovská teória má tú matematickú vlastnosť, že jej rovnice možno preformulovať do potenciálovej verzie, pričom tieto potenciály nie sú (na rozdiel od polí \mathbf{E} a \mathbf{B}) jednoznačne určené, ale je možné ich vyberať podľa vhodnosti pre danú situáciu, sa označuje ako *kalibračná voľnosť*. Potenciály, ktoré sa dajú takýmto spôsobom (v určitých mantineloch) prispôbovať („kalibrovať“) sa tak odlišujú od polí \mathbf{E} a \mathbf{B} , ktoré sú *kalibračne invariantné*, teda voľba potenciálov v hraniciach stanovených predpisom kalibračných transformácií ich nemení. A nakoniec, o fyzikálnych zákonoch, teda o rovniciach, ktoré ich reprezentujú (napr. pôvodné Maxwellove rovnice) a ktoré sa nemenia v dôsledku kalibračných transformácií, sa hovorí, že vykazujú *kalibračnú symetriu*.⁸

Teraz už je zrejme jasnejšie, prečo sa v tomto kontexte vžil termín „kalibrácia“. Toto slovo prilihavo naznačuje, že ide o určitý druh nastavovania, ktoré máme do istej miery vo svojej moci a ktoré si môžeme voľiť podľa aktuálnych potrieb. Je to teda podobné ako pri kalibrovaní nejakého meracieho prístroja. Na druhej strane pri meraní chceme nakoniec dostávať objektívne výsledky, ktoré nám niečo vypove-

⁶ Či je to výhodné pre konkrétny problém je, pravdaže, druhá vec.

⁷ Samozrejme, úplne ľubovoľná byť nemôže, keďže musí byť diferencovateľná, ale vo fyzikálnych textoch sa zväčša táto podmienka explicitne ani neuvádza – keď sa hovorí „ľubovoľná funkcia“, myslí sa vlastne „ľubovoľná *slušne sa správajúca* (well-behaved) funkcia“.

⁸ Teda ako uvidíme konkrétnejšie aj ďalej, symetria znamená vo fyzike primárne nemennosť rovníc (resp. langrangiánu), resp. schopnosť zachovať si rovnaký tvar napriek uskutočneniu určitých transformácií.

dajú o skutočnosti. Podobne pri teóriách, ktoré sú v uvedenom zmysle kalibrovaťelné, chceme, aby nám nakoniec produkovali poznatky o svete a neboli len odrazom našich vlastných konvencií. Alebo prinajmenšom chceme, aby nám umožnili odvodzovať také hypotézy, ktoré budeme vedieť komparovať s experimentálne zistenými údajmi a vyhodnotiť ako empiricky adekvátne, dostatočne presné alebo naopak.

Keby sa idea kalibrácie vyčerpávala len tým, čo sme o nej doposiaľ povedali, ťažko by sme jej mohli pripisovať status ústrednej myšlienky v rámci súčasných fundamentálnych fyzikálnych teórií. Naším zámerom je však osvetliť práve to, prečo je toto iba zárodkom oveľa impozantnejšej úlohy, ktorú kalibračný princíp zohráva v súčasnej teoretickej fyzike. Aby sme naznačili, o čo pôjde, predstavme si, že smer nášho doterajšieho uvažovania (obrazne povedané) otočíme o stoosemdesiat stupňov.

Čo tým chceme presne povedať? Doteraz sme postupovali tak, že sme sústredili pozornosť na jednu z klasických fyzikálnych teórií a za pomoci využitia určitých matematických znalostí sme v nej boli schopní nájsť určitú (kalibračnú) *volnosť* a zároveň (kalibračnú) *invariantnosť*. Zhrnuli sme to tým, že sme konštatovali, že daná teória vykazuje kalibračnú *symetriu*. Čo by teraz znamenalo otočiť tento postup o stoosemdesiat stupňov?

Čo keby sme myšlienku *kalibračnej symetrie* vzali za svoje východisko? Čo keby sme (z nejakého dôvodu) pri nejakej teórii chceli trvať na tom, že daná teória by mala mať takúto symetriu, aj keď ju v nej zatiaľ nevidíme, lebo sme ju zatiaľ nehládali, alebo dokonca aj v prípade, že sme sa ju síce už snažili danej teórii nejako „vnútiť“, no teória ju „odmietla“? Čo keby sme napriek tomu robili všetko možné, aby sme nejakými šikovnými matematickými trikmi upravili príslušné rovnice tak, že by sme si nakoniec mohli povedať, že daná teória už nami vytúženú symetriu má?

Takto povedané to znie ako mimoriadne pochybný a umelo pôsobiaci projekt. Je azda možné, aby sme sa takto čisto formálnymi manipuláciami a vedení víziou istej symetrie dostali k niečomu, čo nám odkryje nejaké nové aspekty alebo prvky fyzikálnej reality? Stručne povedané, odpoveď súčasnej fyziky je jednoznačne áno.

4. Idea kalibrácie v nerelativistickej kvantovej mechanike

Aby sme si takúto možnosť bližšie demonštrovali, musíme v našom výklade prekročiť hranice deliace fyziku devätnásteho storočia od *modernej fyziky*, pod ktorou budeme v nasledujúcom rozumieť najmä kvantovú teóriu. Aj keď o kalibračných teóriách sa zvyčajne hovorí najčastejšie v súvislosti s jednotlivými *kvantovými teóriami poľa*, ktoré spolu tvoria *štandardný model* súčasnej časticovej fyziky, my sa

pre zjednodušenie sústredíme na hlavnú rovnicu nerelativistickej kvantovej mechaniky, ktorou je Schrödingerova rovnica.⁹

Zacielenie na Schrödingerovu rovnicu (SchR) má okrem spomínanej (matematickej aj fyzikálnej) jednoduchosti ešte aj tú výhodu, že nám takýto výklad dovolí veľmi prirodzeným spôsobom nadviazať na to, čo sme si predtým povedali o kalibrácii v spojitosti s klasickou (maxwellovskou) elektrodynamikou.

SchR v najvšeobecnejšej podobe je rovnicou, ktorá v zásade hovorí o energii daného systému, no na rozdiel od klasického prípadu je energia reprezentovaná nie spojitou funkciou, akou je klasický hamiltonián, ale Hamiltonovým *operátorom* \hat{H} , ktorý pôsobí na (komplexnú) vlnovú funkciu, resp. stavový vektor.

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H}\psi \quad (11)$$

V prípade jednoduchého systému, ktorý pozostáva z jednej častice (napr. z jediného elektrónu) za prítomnosti nejakého silového poľa (napr. elektrického), môžeme kvantový hamiltonián ako operátor celkovej energie systému napísať ako súčet dvoch operátorov, operátora kinetickej a potenciálnej energie. Pokiaľ je naším cieľom opísať správanie elektrónu v úplnom elektromagnetickom poli, môžeme vychádzať z tvaru klasického hamiltoniánu pre časticu s (elektrickým) nábojom q a s hybnosťou \mathbf{p} :

$$H = \frac{1}{2m} (\mathbf{p} - q\mathbf{A})^2 + q\phi \quad (12)$$

Keďže *funkcia* hybnosti sa podobne ako funkcia energie zmení v kvantovom prípade na *operátor* hybnosti nasledujúceho tvaru

$$\mathbf{p} \rightarrow \hat{\mathbf{p}} \equiv -i\hbar\nabla$$

SchR opisujúca časticu v EM poli s potenciálmi \mathbf{A} a ϕ bude vyzeráť takto

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{1}{2m} [(-i\hbar\nabla - q\mathbf{A})^2 + q\phi]\psi \quad (13)$$

Môžeme si teda – podobne ako v klasickom prípade – položiť otázku, či by si táto rovnica zachovala svoj tvar, ak by sme namiesto \mathbf{A} a ϕ použili ich kalibračne

⁹ Rovnicu prvýkrát publikoval Erwin Schrödinger vo svojom článku z roku 1926 *Quantisierung als Eigenwertproblem* v *Annalen der Physik*.

transformované verzie v súlade s klasickým predpisom pre kalibračné transformácie. Ak urobíme príslušné substitúcie, ľahko zistíme, že tvar rovnice sa zmení, čo znamená, že SchR nie je *kalibračne kovariantná*¹⁰ pri klasickej kalibračnej transformácii.

Je však pozoruhodné, že stratená kovariancia sa opäť objaví, keď popri spomenutých transformáciách vykonáme ešte jednu transformáciu, ktorá sa týka vlnovej funkcie. Výpočtom sa dá overiť, že pokiaľ okrem transformácií (9) a (10), do SchR zapracujeme ešte dodatočnú *fázovú* transformáciu

$$\psi \rightarrow \psi' = e^{\frac{iq\lambda}{\hbar}} \psi$$

rovnica si udrží svoj pôvodný tvar, a teda táto zmena nemá vplyv na opis daného fyzikálneho systému. Skúmaný systém teda môžeme opisovať buď pomocou pôvodných potenciálov a pôvodnej vlnovej funkcie, alebo pomocou dvojice nových (transformovaných) potenciálov spolu s novou vlnovou funkciou doplnenou o fázový faktor

$$e^{\frac{iq\lambda}{\hbar}}.$$

Keďže riešením SchR vždy hľadáme ako neznámu funkciu ψ , ktorá z formálneho hľadiska hrá rovnakú úlohu ako polohová funkcia v elementárnej klasickej mechanike, pre nepoučeného by sa mohlo zdať zvlášťne, že dve rovnice, ktoré majú ako svoje riešenie dve zjavne odlišné funkcie, totiž ψ a ψ' , opisujú rovnako dobre presne ten istý fyzikálny systém (napr. spomínaný elektrón v EM poli). Keby sme totiž v klasickej mechanike dostali pri snahe predikovať správanie (trajektóriu) nejakej častice dve odlišné polohové funkcie, boli by sme nútení skonštatovať, že nám vychádzajú dve odlišné predpovede, a teda aspoň jedna z funkcií by musela byť zamietnutá ako nesprávne riešenie.

Tu však vstupuje do hry osobitá povaha kvantovej mechaniky, v ktorej jednak nemáme k dispozícii nič také ako spojité trajektórie pohybu kvantových objektov, a jednak v nej výsledok riešenia SchR, t. j. ψ , funguje len nepriamym spôsobom, a to pri určovaní (stredných) hodnôt jednotlivých fyzikálnych veličín (poloha, hybnosť, energia atď.). Vlnová funkcia ψ „neopisuje“, respektíve nereprezentuje

¹⁰ Keď sa hovorí o *rovniciach*, ktoré si zachovávajú rovnaký tvar aj po určitých transformáciách (v tomto prípade kalibračných, ale môže ísť aj o iné, napr. relativistické lorentzovské transformácie), používa sa zväčša termín *kovariantný*, zatiaľ čo v prípade fyzikálnych *veličín*, ktoré sa nemenia pod vplyvom transformácií sa hovorí o *invariantných* veličinách.

priamo správanie elektrónu, ale dáva nám fyzikálnu informáciu o systéme len vtedy, ak ju podrobíme dodatočnej matematickej operácii zvanej *Bornovo pravidlo*

$$\psi(x, t) \xrightarrow{\text{Bornovo pravidlo}} |\psi|^2 = \psi\psi^*$$

čo v prípade funkcie typu

$$\psi' = e^{\frac{iq\lambda}{\hbar}}\psi$$

znamená, že kvadrát bude rovnaký bez ohľadu na to, či použijeme čiarkované alebo nečiarkované ψ

$$\psi'\psi'^* = e^{\frac{iq\lambda}{\hbar}}\psi e^{-\frac{iq\lambda}{\hbar}}\psi^* = e^{\frac{iq\lambda}{\hbar} - \frac{iq\lambda}{\hbar}}\psi\psi^* = e^0\psi\psi^* = \psi\psi^*$$

Keďže teda pri predpovedaní hodnôt pozorovateľných (merateľných) fyzikálnych veličín zohráva úlohu nie priamo ψ , ale až kvadrát ψ , ľahko vidíme, ako môže vyššie spomínaná kalibračná transformácia (*vrátane* fázovej transformácie funkcie ψ) dávať zmysel práve v kvantovej mechanike.

Toto všetko je možno (matematicky) veľmi pekné, ale zdá sa, že sme sa dostali do podobnej situácie ako predtým pri kalibračných transformáciách potenciálov v rámci klasickej elektrodynamiky. Uvedomili sme si, že existuje (potenciálová) reformulácia danej teórie, ktorá obsahuje určitý typ voľnosti, ktorá nám azda môže prakticky poslúžiť pri riešení konkrétnych úloh a možno nám umožňuje v niektorých prípadoch elegantnejšie matematické vyjadrenie, ale z hľadiska fyzikálneho obsahu sme sa nič nové nedozvedeli. A nakoniec, dáva to aj zmysel. Naozaj sme si mysleli, že takýmito (analytickými) matematickými reformuláciami získame nejaký nový empirický poznatok o študovanom systéme?

Ako sme však naznačovali a sľubovali vyššie, kalibračné teórie, ktoré sú jadrom súčasných najúspešnejších kvantových teórií podľa tvoriacich slávny „štandardný model“, majú ambíciu byť niečím oveľa významnejším, ako len novým dômyselným preformulovaním pôvodných teórií. Znamená to azda, že tým chceme tvrdiť, že tieto sofistikovanejšie kalibračné teórie nám čisto apriórnu cestou umožňujú – povedané kantovskou terminológiou – tvoriť „rozširovacie“ (syntetické) súdy o fyzikálnej realite? Vyjadriť to takto by bolo zavádzajúce alebo azda aj trochu neobozretné, no predbežne môžeme povedať aspoň toto: kalibračné teórie slúžia ako určité pozoruhodné heuristické nástroje na objavovanie nových aspektov fyzikálnej reality, ktoré by sme bez nich možno neobjavili.

Aby sme ukázali, aká hlavná myšlienka sa skrýva za tým celým, musíme postup, ktorý sme sledovali pri SchR, otočiť a pozrieť sa, čo nám táto zmenená perspektíva môže naznačiť. Predtým sme totiž – tak v prípade Maxwella, ako aj Schrödingera – postupovali tak, že vychádzajúc z kľúčových rovníc sme prichádzali na isté invariencie pri istých transformáciách, čo nás podnietilo hovoriť o kalibračnej symetrii tej či onej teórie. Tentokrát však chceme vychádzať z daných fundamentálnych rovníc príslušnej teórie hneď od samého začiatku a trvať na určitej symetrii danej teórie, následne sa zamýšľať, čo by mohlo implikovať nástojenie na takejto teoretickej požiadavke.¹¹

Ak to urobíme, dospejeme k nasledujúcemu prekvapivému výsledku: Ukazuje sa, že SchR, ktorá opisuje „voľnú časticu“ (čiže kvantový objekt, na ktorý nepôsobia žiadne vonkajšie sily), by mohla zostať nezmenená (teda by mohla vykazovať symetriu) aj pri takej zmene (transformácii) vlnovej funkcie ψ , keď by sme namiesto fázového faktora s konštantnou fázou zvolili *fázovú funkciu* s meniacimi sa hodnotami (v závislosti od miesta a času). V záujme zachovania invariencie našej rovnice pri takejto *lokálnej fázovej transformácii* je nevyhnutné zaviesť do rovnice isté nové diferenciálne operátory. Vďaka nim sa však zároveň v našej rovnici „samy od seba“ objavia členy, v ktorých sa dajú rozpoznať (resp. ktoré sa dajú interpretovať ako) už dobre známe elektromagnetické potenciály.

Prekvapivosť tohto výsledku teda môžeme zhrnúť tak, že naliehanie na invarienciu pri lokálnej fázovej transformácii si vynútilo premenu rovnice z *rovnice pre voľnú časticu* na rovnicu obsahujúcu členy reprezentujúce nejaké silové polia, v ktorých sa častica nachádza, ako to konkrétne elektromagnetické polia reprezentované potenciálmi \mathbf{A} a ϕ .

5. Princíp kalibrácie v kvantových teóriách poľa štandardného modelu

Samozrejme, v striktnom ponímaní je to celé tak trochu „podvod“, pretože sme už vopred vedeli, ako vyzerá SchR pre časticu v EM poli, a taktiež sme videli, že sa dá preukázať jej kalibračná symetria pri transformáciách potenciálov a zároveň vlnovej funkcie. Takže keď sme potom vychádzali z voľnej SchR a dumali nad tým, čo treba urobiť, aby sme sa po lokálnej fázovej transformácii vlnovej funkcie opäť matematicky prepracovali k niečomu, čo má tvar SchR, tak sme už, vedeli, že práve zavedenie potenciálov do rovnice bude tá správna voľba. Preto sme diferenciálne operátory modifikovali tak, že sa v nich vyskytli práve potenciálové funkcie.

¹¹ Keďže tu nie je priestor na podrobnejší výklad tohto matematicky trochu náročnejšieho prípadu, odkazujeme čitateľa na mimoriadne zrozumiteľné odvodenie v (Griffiths, Schroeter 2018, 229 – 234). V hlavnom texte sa obmedzíme len na vystihnutie ústrednej myšlienky.

Predstavme si však teraz, že by sme v rámci kvantovej teórie mali nejakú inú rovnicu opisujúcu častice, pri ktorých by sme mali zatiaľ len matné tušenie, že by mohli podliehať istým novým, zatiaľ neznámym silám, alebo – inak povedané – že by mohli vstupovať do interakcií s nejakými novými poľami, ktorých presnejšiu podobu zatiaľ netušíme, takže nevieme matematicky formulovať príslušné potenciály. Povedzme, že by sme – inšpirovaní predchádzajúcim zaujímavým prípadom kalibračnej „spriaznenosti“ elektromagnetického poľa a vlnovej funkcie SchR – aj tu použili rovnaký trik. Zvolili by sme nejakú inú zložitejšiu fázovú transformáciu vlnovej funkcie s tým, že by sme trvali na kalibračnej symetrii danej rovnice. A povedzme, že by sme touto úvahou a následnou matematickou analýzou tohto prípadu dospeli k poznaniu, že kalibračnú symetriu možno nastoliť, no len za cenu toho, že aj v tomto prípade do rovnice nanútime isté dodatočné členy, teda že pozmeníme pôvodné diferenciálne operátory tak, že v nich pribudnú členy, ktoré budú vyzeráť ako nové vektorové polia.¹² Mohli by sme potom experimentálne skúmať, či tieto novonarodené matematické členy zodpovedajú aj niečomu, čo sa dá reálne pozorovať, respektíve namerať. No a presne to sa v kvantových teóriách poľa štandardného modelu opakovane stalo. Najskôr pri teórii takzvanej slabej jadrovej interakcie a potom aj pri teórii silnej interakcie.¹³

6. Filozofická zaujímavosť kalibračného princípu

Kalibračný princíp a kalibračné teórie, ktoré sú na ňom založené, si zasluhujú filozofickú pozornosť už tým, že sú základom „fundamentálnej fyziky“. Ak by mala byť filozofia (fyziky) tým, čo sme sa snažili čitateľovi vsugerovať na začiatku tohto textu, tak je prirodzené, že filozofi by sa mali na túto tému osobitne sústrediť. No okrem toho, že kalibračné teórie sú momentálne našou najlepšou nádejou na poznanie sveta na úrovni fundamentálnych interakcií, existujú aj ďalšie filozoficky ladené dôvody, prečo je táto problematika hodná pozornosti.

¹² Základnú ideu kalibračnej symetrie veľmi koncízne využitím pokročilejšieho matematického aparátu formuluje napr. Lochlainn O' Raifeartaigh (1997, 4 – 5).

¹³ Na tomto mieste si môžeme skompletizovať našu „kalibračnú terminológiu“. Modifikované diferenciálne operátory, ktoré sa v týchto situáciách zavádzajú, sa označujú ako *kalibračne kovariantné derivácie* a nové vektorové polia, ktoré sa v nich objavujú, sa nazývajú *kalibračné polia*. Častice, ktoré v rámci QFT vo všeobecnosti vystupujú ako excitačné kvantá jednotlivých kvantových polí, sa v prípade týchto konkrétnych kalibračných polí nazývajú *kalibračnými bozónmi*. A nakoniec, kalibračné transformácie v každej jednej kvantovej teórii poľa štandardného modelu sa dajú na vyššej (abstraktnejšej) matematickej úrovni uchopiť ako prvky algebraických štruktúr nazývaných grupy (konkrétnejšie Lieove grupy), ktoré sa následne označujú ako *kalibračné grupy symetrií* danej teórie.

Pre tých, ktorých stále zaujímajú ontologické aspekty fyzikálnych teórií, je myšlienkový obsah kalibračných teórií vábivým podnetom na zamyslenie nad vlastnou preferovanou ontologickou pozíciou. Kalibračné teórie nám, samozrejme, nepodávajú priame odpovede na ontologické otázky, no niektoré ontologické prístupy v nej môžu vidieť prirodzeného spojenca.

Zoberme si napríklad rozdiel medzi štrukturalisticky a substancialisticky orientovanými filozofiami fyziky. Čo by mali naše fundamentálne fyzikálne teórie ideálne opisovať ako základné stavebné kamene? Mali by to byť nejaké druhy entít, ktoré disponujú určitými súbormi elementárnych vlastností, alebo by sme tieto „základné kamene“ skôr mali vidieť v nejakom type elementárnych štrukturálnych črt, istých relácií? Obľúbenou ontologickou pozíciou mnohých súčasných štrukturalisticky orientovaných filozofov je *ontický štrukturálny realizmus*, ktorého stúpenci si svet nepredstavujú ako súbor jednotlivín vyznačujúcich sa istými vnútornými vlastnosťami, ale ako relačnú štruktúru, ktorá má byť ontologicky „pôvodnejšia“ ako veci a vlastnosti.

Kalibračné teórie s ich dôrazom na symetrie a celé rodiny symetrií (spolu s ich vysoko abstraktným matematickým opisom v rámci teórie grúp, algebier a reprezentácií) sa ponúkajú v tomto ťažení za vydobytie prednostného postavenia pre relácie a štruktúry ako prinajmenšom ďalší vítaný príklad presvedčivosti a úspešnosti relacionistického (odsubstantivizovaného) uvažovania. Už kvantová teória poľa ako taká nás vedie k tomu, že by sme si konečne mali odvyknúť chápať častice súčasnej „časticovej“ fyziky ako indivíduá na spôsob akýchsi sofistikovanejších následníkov demokritovských atómov alebo newtonovských korpuskulí. Skôr by sme ich mali brať ako excitačné mody kvantových polí. Zdá sa však, že kalibračný aspekt kvantových teórií poľa ešte väčšmi posilňuje desubstantivizáciu nielen „častíc“, ale aj samých polí, keďže kalibračný princíp takpovediac umiestňuje všetku fyzikálnu akciu do symetrií, ktoré akoby generovali príslušné polia. Ako hovoria Ladyman a Ross (s odvolaním na novokantovského protoštrukturalistu Cassirera) v najrazantnejšej obhajobe štrukturálneho ontického realizmu za ostatné dekády – „pole nie je nič než štruktúra“ (Ladyman, Ross 2007, 140). A Holger Lyre vo svojom článku, ktorého predmetom sú práve kalibračné teórie, odpovedá z pozície štrukturálneho realistu na otázku o tom, čo to vlastne je štruktúra (*structure is all there is to the world*) tým, že jednoducho vymenuje jednotlivé kľúčové matematické štruktúry súčasnej teoretickej fyziky vrátane grúp symetrií (Lyre 2004, 662).

Mohlo by sa však zdať, že pokiaľ filozofiu fyziky chceme chápať ako „platného hráča“ na poli poznávania sveta, ktorého kritériom úspešnosti a platnosti je síce nie výlučne, ale predsa v prvom rade miera prispenia k poznaniu a chápaniu reality, potom spory medzi substancialistami a štrukturalistami rôznych odtieňov sú

už trochu vzdialené tomu, čo chápeme ako seriózny vedecký výskum. Síce sme už predtým pripustili, že filozofii je vlastná tendencia k fundamentálnemu a esenciálnemu a že túto črtu nemusí zahadzovať, ani keď bude seba vnímať ako integrálnu súčasť vedeckého poznávacieho procesu (a nie ako príležitostného postranného kibica), ale je pravda, že takémuto typu uvažovania trvalo hrozí riziko, že sa príliš odpúta do sféry abstrakcií a zamotá sa do vlastných interných jazykových hier. To by sme však nemali chápať ako dôvod na vyoperovanie „filozofického čreva“ v nás, ale skôr ako dôvod na bdelú a trvalú obozretnosť v prospech zachovania produktívnej dynamiky. To, či nejaká úvaha individuálneho filozofa alebo nejaká zdĺhavá diskusia v rámci určitej úzkej filozofickej komunity prekročila hranice smerom k neproduktívnemu diskurzu, nemusí byť niekedy celkom zjavné a jednoznačné, keďže vo filozofii sú zakaždým v hre aj konštitutívne pravidlá hry a hodnoty. Ved' napokon, občas to tak nie je ani v tých empiristickejších častiach vedeckého poznávania.

Povedzme však, že by sme aspoň v role advokáta *diaboli* nateraz zaujali skeptickejšie stanovisko voči produktívnosti vyššie pertraktovaných ontologických otázok. Mohli by sme napriek tomu stále hovoriť ešte o nejakom ďalšom, hoci možno umiernenejšom aspekte filozofickej relevancii kalibračného princípu a kalibračných teórií?

Sme presvedčení, že odpoveď je jednoznačne áno a zdôvodnenie vidíme v tom, že kalibračné teórie vzorovým spôsobom vracajú, ba dokonca zosilňujú jednu zo zásadných otázok, ktorá je tak fyzikálna, ako aj filozofická, a ktorá sa tiahne modernou fyzikou od jej počiatkov. Je ňou problém vzťahu medzi jej „matematickou“ a „fyzikálnou“ stránkou. Ide o typ a súbor otázok, ktoré sa dajú (a musia) klásť aj nezávisle od toho, či je alebo nie je v našom pracovnom programe vybudovanie a obhájenie nejakej všeobjímajúcej ontologickej pozície. Problémy tohto druhu sa totiž opätovne vynárajú v rámci fyzikálnej praxe ako takej a ich rozhodnutie v konkrétnych prípadoch tým či oným spôsobom môže významne ovplyvniť priebeh ďalšieho bádania a mieru jeho produktivity.

Literatúra

- AITCHISON, I. J. R., HEY, A. J. G. (2013): *Gauge Theories in Particle Physics. A Practical Introduction. Volume 1*. Boca Raton: CRC Press.
- GRIFFITHS, D. J., SCHROETER, D. F. (2018): *Introduction to Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- GRIFFITHS, D. J. (2013): *Introduction to Elektrodynamics*. Boston: Pearson.
- KUHLMANN, M. – LYRE, H. – WAYNE, A. (eds.) (2002): *Ontological Aspects of Quantum Field Theory*. New Jersey: World Scientific Publishing Company.
- LADYMAN, J., ROSS, D. (2007): *Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized*. Oxford: Oxford University Press.
- FRIEBE, C. et al. (2018): *The Philosophy of Quantum Physics*. Cham: Springer.

- LYRE, H. (2004): Holism and Structuralism in U(1) Gauge Theory. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 35 (4), 643 – 670.
- O' RAIFEARTAIGH, L. (1997): *The Dawning of Gauge Theory*. Princeton: Princeton University Press.
- O' RAIFEARTAIGH, L., STRAUMANN, N. (2000): Gauge Theory: Historical Origins and some Modern Developments. *Reviews of Modern Physics*, 72 (1), 1 – 23.
- 't HOOFT, G. (1980): Gauge Theories of the Forces between Elementary Particles. *Scientific American*, 242 (6), 2 – 19.
- YANG, CH. N. (2014): The Conceptual Origins of Maxwells Equations and Gauge Theory. *Physics Today*, 45, 45 – 51.

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-18-0178.

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