

PROBLÉMY FYZIKÁLNYCH A NEFYZIKÁLNYCH MERANÍ

JURAJ BOLF, GUSTAV PROKEŠ, Ústav merania a meracej techniky CFV SAV, Bratislava

Dlhodobý rozvoj vedy ukázal, že bez predbežných predstáv a prvotného formulovania idey o *príčinnej* súvislosti medzi javmi nemôžeme vo vede úspešne experimentovať. Základom experimentálnej prírodovedy, ktorá postupne rozvinula techniku, bola práve myšlienka príčinnej súvislosti medzi prírodnými javmi. Názorný príklad takéhoto tvrdenia siaha do samých počiatkov rozvoja fyziky, kde základom experimentov, z ktorých Newton vyvodil zákony, bola idea *mechanickej* súvislosti medzi javmi.

Newtonova mechanika sa síce opierala o abstraktné kategórie priestoru, času, hmotnosti a sily, no k týmto kategóriám nebolo možné dospieť len intuitívnou cestou. Vývoj klasickej fyziky ukazuje, že spojenosť experimentu a príslušnej fyzikálnej teórie nie je vždy hneď jednoznačná, na čo výrazne ukázal už A. Einstein.

Spätosť fyzikálnych teórií a experimentu nevytvára nevyjasnené zložitosti medzi prírodnými zákonmi a experimentom, ako sa to mnohí domnievajú. Fyzikálny experiment má nesporne vlastné vnútorné zákonitosti, v dôsledku ktorých rozvoj experimentálnych výskumov a ich teórií podnecuje vznik ďalších experimentov.

Úloha experimentu znamená, že skutočné zákonitosti prírodných dejov sveta nie sú redukovateľné na jednoduché základné schémy. Nakoniec zákony mechaniky boli experimentálne dokázané len pre určitú oblasť javov.

Teórie a experiment

Vzájomná väzba a spätosť fyzikálnych teórií s experimentom je veľmi zložitá. Spája ich empiria, intuícia a snaha po neustálom upresňovaní fyzikálnych zákonov a existujúcich hypotéz, výrokov a pojmov. Značnú časť teoretických problémov vo fyzike pomáha riešiť matematika. V experimentálnych oblastiach sú z matematiky využívané hlavne teória pravdepodobnosti a matematická štatistika.

Aj keď je matematická štatistika podnecovaná potrebami experimentu, v *abstraktnej* matematickej sfére sa vyvíja ako deduktívna veda, ktorá rozvinula významnú disciplínu teórie *náhodných* funkcií. Abstraktne formulované princípy týchto teórií sú síce málo využiteľné v experimente, no ich deduktívne konštrukcie vytvárajú celú sústavu užitočných názorov. V poslednej dobe sa objavujú domnienky, že po zavedení počítačov sa matematická štatistika stáva z veľkej časti experimentálnou vedou a to vzhľadom na to, že deduktívne konštrukcie sú vytláčané modelovaním, ktoré viac využíva presvedčivé fakty experimentu.

V modernej fyzike často prechádzame cez experiment od názorných pojmových štruktúr fyziky k abstraktným štruktúram moderných fyzikálnych teórií, ktoré prinášajú do fyzikálneho myslenia nové, všeobecnejšie hľadiská. V súčasnej technike, najmä v oblasti zložitých priemyselných, najmä elektrotechnických a elektronických zariadení a systémov, vystupuje do popredia merací systém, ktorý umožňuje prenášať všeobecné alebo špeciálne zložené úlohy z jedného vedného odboru do iného, napríklad z mechaniky do elektrotechniky alebo z fyziky do rôznych technických odborov a naopak. S prvkami abstrakt-

ného myslenia a „abstraktného“ experimentu sa stretávame stále viac v oblasti nefyzikálnych vied, najmä v biológii a psychológii, ktoré usposobujú svoj spôsob vedeckého myslenia na spôsob *fyzikálnej metódy*. Táto spočíva v dôslednej aplikácii teórie experimentu fyzikálnych meraní a v spracovávaní výsledkov nefyzikálnych meraní podľa netradičných štatistik. Pre takéto vedecké disciplíny sa ukázala matematická štatistika ako veľmi užitočný vedecký nástroj aj pri formulácii prírodných zákonov s nefyzikálnym obsahom.

V dobe Galileiho a Newtona je počiatok formulovania hlavného obsahu prírodných zákonov matematiky a vznikajú aj prvé fyzikálne teórie. Postupne sa ukazuje potreba, aby získané empirické a teoretické poznatky bolo možné kvantifikovať a vyjadrovať ich ako merateľnú vlastnosť v číselnej forme. Kvantifikácia vo fyzike ukázala nové cesty jej rozvoja tým, že zaviedla pojem *merateľných vlastností* objektov s priradením čísel ako nevyhnutných faktov tohto procesu. *Merateľnosť* objektu možno chápať ako priradovanie čísel podľa daného predpisu, resp. pravidla vo forme údajov.

Pojem priradovania čísel fyzikálnym veličinám môže často viesť k značnému formalizmu, čím sa nemusí úplne vyčerpať podstata meraného objektu alebo sledovaného deja. Tá spočíva v matematicko-fyzikálnej štruktúre fyzikálnych veličín a na ich fyzikálnej interpretácii, ktorá je daná už vhodne volenou mierou fyzikálnej jednoty. Všeobecnosť pojmu merania zahŕňa meranie v klasickej fyzike, ďalej v kvantovej mechanike a tiež v oblasti nefyzikálnych meraní.

Merateľnosť ako konvenčná vlastnosť fyzikálnej štruktúry

Podľa predchádzajúcich výsledkov možno z hľadiska účelu a konečného cieľa meranie charakterizovať ako proces vedúci k získaniu kvantitatívnych údajov určitej triedy vlastností vyšetrovaného objektu ako ich nositeľa alebo zdroja. Tento proces predpokladá existenciu, resp. splnenie týchto typických zložítk:

1. Skúmaná veličina X_i patrí do triedy objektov kvantitatívneho charakteru.
2. V tejto triede existuje vzťažná jednotka X_N korešpondujúcej vlastnosti, a to jednotka objektívna a reprodukovateľná (konvenčný normál) — ak ide o meranie v užšom slova zmysle, alebo aspoň jednotka subjektívna (v myslení vhodne transponovaná) — ak ide o kvantitatívny „odhad“.
3. Uskutočnenie porovnávacieho procesu medzi veličinou X_i a jednotkou X_N , ktorého výsledkom je číslo n_i blízke číslu $N_i = X_i/X_N$.

Pozorovanie a meranie je takto podstatným sprostredkujúcim článkom medzi objektami a javmi reálneho sveta. Pôsobí však aj pri exploatacii získaných poznatkov, pri aktívnej činnosti človeka a celkove pri využívaní prírody. Preto je pochopiteľné, že sa tejto sprostredkujúcej zložke venuje vo fyzike zvýšená pozornosť.

V zmysle opisu fyzikálnych meraní, ktoré predkladá tento článok, je ľubovoľná merateľná fyzikálna veličina P_i funkcionálne viazaná s indikáciou meracieho prístroja, t. j. $P_i = f(\alpha, \gamma)$. Určenie hodnôt meranej veličiny P_i podľa tejto relácie je málo možné, a to pre mnohoznačnosť funkcie f . Táto je podmienená takmer neobmedzenou množinou možných interakcií v priestore senzora meracieho prístroja, vyvolaných presne známymi účinkami, ale aj podmienkami, ktoré experimentátor nemôže vymedziť. Redukovanie takejto množiny je nevyhnutné pomocou meracieho prístroja, ktorý dáva súbor nezávislých indi-

kácií $\{\alpha^1, \alpha^2, \dots, \alpha^n\}$ a hodnoty meranej veličiny P_j treba určiť ako funkciu nad takouto merateľnou n -ticou.

Gnozeologická koncepcia takéhoto modelu fyzikálnych meraní je taká, že fyzikálne deje a objekty nejakej triedy G sú experimentátorovi známe, ak je možné získať číselné údaje prvkov P_j z n -člennej množiny logicky dedukovaných výpovedí o ich vlastnostiach. Fyzikálnu štruktúru prvkov P_j uvažovanej množiny možno nazvať množinou *konvenčných* vlastností a jej obsah má byť experimentátorovi jasný. Len takto je možné rozumne vybrať prvky množiny $\{P_1, \dots, P_n\}$ vyhovujúce istej triede alebo klasifikačnej štruktúre. Konvencionálna charakteristika ich fyzikálnych vlastností je tak *kvantitatívna*, ako aj *kvalitatívna*.

Táto konvenčná množina, ktorá vyjadruje fyzikálnu štruktúru meracieho procesu, je gnozeologicky neobyčajne dôležitá. Poznanie konvenčných vlastností dovolí opísať dejovú a vecnú stránku fyzikálnych meraní, no vo svojom informačnom obsahu takáto množina je *redundantná* a tým v konečnej výpovedi neefektívna, navyše komplikuje matematickú analýzu poznávacieho procesu a fyzikálny experiment takto znižuje svoju vedeckú hodnotu.

Vzájomné podmieňovanie a prelínanie kvantitatívnej a kvalitatívnej stránky, opísané prvkami množiny $\{P_1, \dots, P_n\}$, je možné odseparovať množinou *nezávislých kvantitatívnych* vlastností $\{p_1, \dots, p_n\}$, ktorej prvky p budú mať charakter čísel. Ich voľba nebude jednoduchá a bude závislá od druhu fyzikálnej veličiny, pričom sa predpokladá, že tieto boli viazané určitou reláciou k prvkom konvenčnej množiny P_j , t. j. $P_j = F_j(p_1, \dots, p_n)$ $j = 1, \dots, n$. Funkcia F_j značí matematickú funkciu analytického typu.

Ak majú prvky konvenčnej množiny P_j *kvalitatívny* charakter, potom sa hľadá prvkom p_i iná forma priradenia, napríklad tabelárna.

Experimentátor obracia pozornosť na charakter prvkov p_i , ktoré sa prezentujú ako fyzikálne konštituenty dejovej alebo materiálnej stránky objektu. Ich aktivita má byť taká, aby boli vhodnými excitátormi interakčných polí, schopnými pôsobiť na senzor meracieho prístroja.

Rozmanité sa prejavujúce vlastnosti fyzikálnych dejov a objektov a mnohostrannosť ich opisu a záznamových možností hovorí, že jedna a tá istá konvenčná vlastnosť, charakterizovaná P_j , môže byť vyjadrená ako korešpondujúce zobrazenie výberovej množiny prvkov p_i , z ktorej možno separovať n -tice najrozmanitejších druhov $\{p_1, \dots, p_j\}$, $\{p'_1, \dots, p'_n\}$ za podmienky platnosti $P_j = F_j(p_1, \dots, p_n) = F'_j(p'_1, \dots, p'_n), \dots = (\text{invariant})_j$ pre $j = 1, \dots, n$.

Vzniknutá nerovnosť $p_i \neq p'_i \neq \dots$ má nielen numerické vyjadrenie, ale aj odpovedajúci fyzikálny obsah a dimenzionálnu veľkosť, ktorá sa vzťahuje na všetky indexy.

Fyzikálna interpretácia prvkov p_i je viazaná na charakter experimentu a je zdrojom hlavných problémov, zložitých vedeckých experimentov. Tieto relácie, ktoré sa vzťahujú na široké možnosti výberovej množiny prvkov p_i , rozširujú doterajšie vzťahy excitáciou a reakciou lokalizácie diskretných bodov na celý komplex excitačných polí rôznej alebo tej istej fyzikálnej podstaty. Tieto relácie platia aj pre špecifické vlastnosti a charakteristiky, ktoré dominujú a fyzikálne zvýrazňujú skúmaný dej alebo objekt. Tento prístup ale predpokladá širšie koncipovanie fyzikálnej stránky experimentu a konečné zvládnutie obsahu poznatkov získaných prostredníctvom merania.

V konkrétnych experimentoch zložitých fyzikálnych alebo iných (biologic-

kých, psychologických a pod.) meraní je možné z obsahovo bohatej výberovej množiny veličín p_i vybrať odpovedajúcu n -ticu, aby spĺňala podmienky $P_j = F_j$ a F'_j = invariant a že správnou voľbou vystihujúcou fyzikálne charakteristiky dejovej alebo materiálnej stránky objektu je možné vytvoriť pri statickej udalosti nad signálom senzora *nezávislé* funkcionály ($\alpha^1, \dots, \alpha^n$), realizované na báze korelačných prvkov. Z fyzikálneho hľadiska ide tu o súbor nezávislých indikácií, opísaných matematickou štruktúrou.

Širšia pôsobnosť pojmu *nezávislé* vlastnosti, vystupujúceho v bohatej výberovej množine veličín, sa môže využiť k zostaveniu systému parciálnych diferenciálnych rovníc ako konečného výsledku teórie určujúcej implicitne reláciu medzi súborom nameraných hodnôt ($\alpha^1, \dots, \alpha^n$) a *nezávislými* vlastnosťami deja alebo objektu.

Merania „nefyzikálne“

Fyzikálna veličina charakterizuje a precízne opisuje dôležité vlastnosti látok, ale aj dôležité javy, ktoré v látkach alebo mimo nich prebiehajú. Základné požiadavky na meranie sú maximálne dosiahnuteľná presnosť, reprodukovateľnosť, spoľahlivosť a častokrát aj rýchlosť, s akou sa meranie vykonáva. Základným znakom všetkých fyzikálnych meraní je, že tieto sa robia na základe dobrých znalostí fyzikálnych zákonov, ako aj podmienok, za ktorých javy a procesy týchto zákonov prebiehajú.

Matematické vzťahy na výpočet meranej veličiny sú nutné relácie, ktoré svojou štruktúrou opisujú fyzikálnu realitu sledovanú v experimente. Napríklad pri meraní termoelektrických veličín vychádzame z diferenciálnej rovnice pre vedenie tepla, v ktorej vystupujú explicitne dve veličiny: tepelná vodivosť a meranie tepla. Vhodným riešením diferenciálnej rovnice sa získavajú relácie na meranie požadovaných veličín. Základným kritériom klasifikácie metód merania termofyzikálnych veličín je nutná dôkladná znalosť fyzikálnych podmienok vzniku a šírenia sa tepla.

Z hľadiska teórie a metódy v problémoch merania sú relevantné predovšetkým problémy konceptualizácie fyzikálnych teórií, resp. teórií vzťahujúcich sa na sám objekt merania. Tu sa rešpektujú tiež empirické a matematické postupy. Bez ohľadu na množstvo existujúcich názorov na štruktúru konceptualizácie teoretickej podstaty, ktorá reprezentuje princípy meracej metódy, možno podľa predchádzajúceho v zásade meranie rozdeliť aj takto: 1. meranie fyzikálne, 2. meranie „nefyzikálne“.

Znovu prízvukujeme, že fyzikálne merania sa opierajú o fyzikálne teórie, vzťahujúce sa na hmotnú podstatu reálneho diania a reálnych objektov. V jednoduchých prípadoch stačí konečný údaj parametrov meranej veličiny. V mnohých vedeckých experimentoch je meranie len prostriedkom na získanie konkrétnych faktov, prípadne nových abstraktných predstáv a ich formulácií. Podľa predchádzajúceho, riešenie teplotných polí vyúsťuje do hľadania teplotných funkcií, čo je v podstate matematická úloha. Z experimentálneho hľadiska, ktoré zastáva v tomto prípade fyzika, budú tieto riešenia v meraní rozhodujúcim prostriedkom na odvodenie vzťahov fyzikálnych veličín potrebných pre koncipovanie najvhodnejšej meracej metódy.

Nefyzikálne merania nie sú merania mimo fyzikálneho diania, ako sa často tejto kategórii merania hovorí. *Konceptuálne a operacionálne sa tieto vzťahujú*

u sledovaného subjektu alebo objektu merania na metódy číslcového symbolizovania podľa subjektívnych schém a rozhodovaní.

Hlavná stránka nefyzikálnych alebo „mimofyzikálnych“ meraní je spätá s klasifikáciou. Operacionálne je procedúra merania viazaná na merací prístroj len sekundárne. Ich stupnica sa obyčajne neviaže na jednotky fyzikálnych veličín, ale na rôzne znaky a symboly. Reprezentantom tohto druhu merania je obyčajne psychológia. Táto oblasť sa intenzívne rozvíja hlavne v súvislosti s otázkami tzv. umelého intelektu. Smerom k aplikáciám súvisí psychológia teoreticky so sociológiou a pedagogikou a prakticky s lekárstvom a technickými vedami. V psychológii má veľkú úlohu vzájomné pôsobenie experimentátora a pokusnej osoby. Toto vzájomné pôsobenie sa dosť často dá do značnej miery eliminovať, niekedy sa však dá ťažko kontrolovať a ťažko dopredu odhadnúť. To sú okolnosti, pre ktoré oveľa častejšie ako vo fyzikálnych meraniach zdanlivo rovnaké experimenty dávajú rôzne výsledky.

V psychológii sa uplatňujú metódy matematickej štatistiky na spracovanie údajov charakterizujúcich náhodné veličiny a ich vzájomnú súvislosť. Medzi rozsiahlejšími ucelenými oblasťami aplikácií matematických metód pre vyhodnocovanie zložitých psychologických experimentov je *faktorová analýza*. Z hľadiska *teórie merania* tu ide vlastne o približné vyjadrenia danej n -dimenzionálnej náhodnej veličiny ako funkcie náhodnej veličiny menšej dimenzie, pričom sa kladú rôzne obmedzujúce podmienky. Najčastejšie sa požaduje linearita, ak sa problém experimentu formuluje takto: K danej n -dimenzionálnej náhodnej veličine y nájsť náhodnú veličinu x čo najvhodnejšej dimenzie a lineárnu transformáciu A tak, aby veličina $y - Ax$ bola v istom zmysle minimalizovaná.

Koncipovanie modelu procesov merania súvisiacich hlavne s matematickými metódami optimalizácie parametrov meraných veličín je dnes samozrejmé. Faktorovaná analýza v mimofyzikálnych psychologických experimentoch a meraniach má podstatnú úlohu. Jasne ukazuje, že je možné aplikovať mnohé štatistické teórie aj v netradičných oblastiach a že štruktúra týchto experimentálnych meraní je v podstate taká istá ako pri klasických fyzikálnych meraniach. Zavádzanie matematických a fyzikálnych metód do nefyzikálnych meraní postupne zatláča do pozadia subjektívne rozhodovanie, aj keď bude ono v experimente a v koncipovaní meracej metódy (testovania) viac rozhodujúce, než je tomu pri fyzikálnych meraniach.

Záver

To, že meranie sa stalo súčasťou fyzikálnych bádání, je prirodzeným dôsledkom historického vývoja empirických vied. Je známe, že vždy, keď objem nahromadených poznatkov a experimentálnych faktov vo fyzike prekročil určitú hranicu, ukázala sa *potreba zmien* v štruktúrálnej organizácii všeobecnej fyziky, aby nahromadený materiál bolo možné účinnejšie spracovať a exploatovať. Pritom zvyčajne prebehli dva protichodné procesy súčasne. Na jednej strane bolo účelné a logicky opodstatnené v danej situácii niektoré odvetvia vedy spájať do spoločného celku (asociačný proces), súčasne však na druhej strane sa ukázalo potrebné rozštiepiť niektorú pôvodne jednotnú disciplínu na viac samostatných celkov (disociačný proces). Aj funkčná *pozícia* merania v empirických vedách sa vyvíjala v rámci takýchto procesov.

Za posledných desať rokov sa aplikačná doména merania, ako aj fyzikál-

na, resp. matematická problematika s ním spojená (ako napr. vývoj adekvátnej fyzikálnej teórie merania, meracích metód, technických prostriedkov a pod.) natoľko rozrástli, že sa zreteľne prejavuje potreba revidovať celý rad „klasických“ pojmov, definícií a rôznych iných špecifických charakteristík budovaných na báze predchádzajúcich teórií a zaviesť prípadne pre konštrukcie niektorých definícií a univerzálnych teórií niektoré nové pojmy, operatívne účinnejšie.

Dnes ešte nie je možné naznačiť postup, resp. jeho varianty, ktoré by viedli k maximálnej exploatácii doteraz nahromadeného komplexu s meraním súvisiacich skúseností a experimentálnych faktov poznávacieho procesu. Podstatné ťažkosti i v tomto smere spočívajú už hneď v tom, že v súčasnosti sú viac rozvinuté matematické teórie vyhodnocovania ako fyzikálne teórie meracích metód. Po formálnej stránke charakterizujeme poznávanie ako proces, v ktorom zisťujeme konkrétne hodnoty prvkov P_i z nejakej množiny P určitých výpovedí o skúmanom objekte. Tieto výpovede, ich zmysel a pojmovo štruktúrálna výstavba sú dobre adaptované v mentálnom systéme subjektu, ktorý v experimente predstavuje pozorovateľ.

LITERATÚRA

1. KUBÁČEK, L. — PÁZMAN, A.: Štatistické metódy v meraní. Bratislava 1979.
2. FEDOROV, V. V.: Teorija optimal'nogo experimenta. Moskva 1971.
3. STARÍČEK, I.: Úvod do metronomiky. Bratislava 1977.
4. PROKEŠ, G.: Vedeckovýskumná správa. Bratislava 1979.
5. BOLF, J.: Metronomics, science of the laws of measurement. In: Acta Metronomica 2, č. 11, ÚTM—SAV
6. WEY, H.: Philosphic der Mathematik und Naturwissenschaft. München. Oldenbourg 1966.
7. SUPPES, P. — ZINNES, S.: Basis Measurement Theory. In: Handlook of Mathematical Psychology. New York 1963.
8. HEMPEL, G.: Fundamentals of Concept Formation in Empirical Science. In: International Encyclopedia of Unified Science. 2, č. 7. Chicago. 1952.
9. BERKA, K.: Škály měření. Praha, Ústav pro filozofii a sociologii ČSAV, 1971.
10. HELMHOLTZ, H.: Zahlen und Messen erkenntnistheoretisch betrachtet. In: Philosophische Aufsätze Eduard Zeller gewidmet. Leipzig 1887.