

K NIEKTORÝM ASPEKTOM MERANIA V KVANTOVEJ MECHANIKE

JANA VRBOVÁ, Ústav filozofie a sociológie SAV, Bratislava

VRBOVÁ, J.: On Some Aspects of Measurement in Quantum Mechanics. *Filozofia* 42, 1987, No. 6, p. 708

The author returns in the paper to problems which stood in the focus of interest of the physicist and philosophers in the first half of the century — to problems of measurement of microobjects in quantum physics. In the initial part of the paper she points out what different position the measuring device occupies in the process of measurement in quantum physics as against with classical physics. The author outlines further the problems which are closely linked with the problem of measurement: the character of physical reality, "relativity to observational means", the relation between the classical and quantum physics.

V tejto práci by sme chceli načrtnúť, v čom spočíva zvláštna, ba priam až výsadná funkcia meracích prístrojov v kvantovej fyzike, pri kontakte s mikrosvetom. Mohli by sme sa pritom oprieť o myšlienku K. Berku v úvode jeho práce *Meranie*, kde tvrdí, že „s výnimkou diskusí o charaktere merania v kvantovej fyzike, predovšetkým o funkcii meracích prístrojov, polemiky o povahe operacionálneho chápania merania..., problematiky relativity vo vzťahu k meraniu a teoretických úvah o rozmerovej (dimenzionálnej) analýze, ktorej praktické uplatňovanie zvlášť v technickej fyzike nespôsobuje žiadne ťažkosti, nie je meranie vo fyzike v podstate zafažené nevyjasnenými či spornými problémami teoretického a metodologického charakteru“ (1, s. 20). Pritom sa nám zdá, že problém funkcie meracích prístrojov je problémom primárnym, pričom napríklad problém relativity vo vzťahu k meraniu (meracím prostriedkom) je skôr jedným z jeho dôsledkov.

Obecne rozumieme pod meraním taký typ poznávacieho procesu, ktorý si kladie za cieľ určenie charakteristík hmotných objektov (ich kvantifikáciu) pomocou príslušných meracích prístrojov.

Meranie zahrnuje objekt merania, merací prístroj a akt merania, čím rozumieme moment vzájomnej interakcie meraného súboru fyzikálnych veličín charakterizujúci určitý objekt s meracím prístrojom, ktorý je schopný ich registrovať a kvantifikovať.

Najprv si všimnime, čo to vlastne prístroj je, na čo nám slúži. I. Úlehlavý vyčleňuje tri typy prístrojov:

1. prístroje, ktorými získavame detailnejšie, presnejšie informácie o charakteristikách objektov;

2. prístroje, ktorými získame tie druhy informácií o charaktere objektov, ktoré nie sú prístupné nášmu bezprostrednému vnímaniu;

3. prístroje, ktoré nám podávajú informácie o charaktere mikroobjektov.

Prečo práve takáto typologizácia prístrojov? V našom bežnom svete, v makrosvete, sa zoznamujeme s okolitou realitou a poznávame ju v procese praktickej činnosti. Tam, kde nestačia naše zmysly, používame prístroje, ktoré nám pomáhajú presnejšie poznávať vlastnosti objektov, ktorými sa zaoberáme. „Naše zmysly sú tak bezprostredne zjemňované. Mikroskopické meracie prístroje a prístroje určené k pozorovaniu, vykonávajú tú istú funkciu ako zmyslové orgány, ale vykonávajú ju v určitom zmysle dokonalejšie. Všetky majú jednu spoločnú vlastnosť, podávajú informáciu o pozorovanom alebo meranom objekte bez toho, aby ho podstatne menili alebo ovplyvňovali“ (2, s. 83).

V tomto makropriblížení sa javí, že meracie prístroje nezanechávajú na objekte stopu, alebo, že aspoň vieme nežiadúce pôsobenie prístroja na objekt kontrolovať, prípadne ho eliminovať. Vzájomné ovplyvňovanie prístroja a pozorovaného objektu pokladáme za zanedbateľné malé, takže získaný údaj môžeme považovať za vernú charakteristiku objektu. Musí však existovať vzájomné pôsobenie medzi objektom a prístrojom, pretože by prístroj nevykazoval žiadne, pre nás zrozumiteľné, zmeny.

Druhým typom prístrojov sú tie, ktoré nám poskytujú údaje o charakteristikách objektov pre nás zmyslovo-názorne nepostihnuteľných (intenzita elektrického a magnetického poľa, rádioaktivita a pod.), ktoré transformujú na také makroskopické prejavy, ktoré sme schopní zmyslami vnímať. Aj pri týchto prístrojoch je, alebo môže byť interakcia s prístrojom zanedbateľne malá. Preto je oprávnený predpoklad, že údaje prístroja sú pravdivými informáciami o stave objektu alebo o zmenách, ktorými prechádza. Človek v tomto prípade vystupuje ako biologický organizmus, ktorého zmysly nie sú natoľko vyvinuté, jemné, aby mu dovoľovali bezprostredný vnem.

Tvrdenie, že „postavenie človeka v prírode ako makroskopického objektu schopného vnímať len obmedzený rozsah a len niektoré druhy impulzov z okolitého sveta“ (2, s. 84) vyvoláva pochybnosti, či tým nie sú obmedzené poznávacie možnosti človeka. Napríklad, poznanie mikrosвета by mohlo byť ohraničené práve biologickými zvláštnosťami ľudského organizmu, jeho príslušnosti k makrosvetu, keďže všetky zmyslové orgány človeka vznikali v procese vývoja živej prírody, s ňou sa rozvíjali alebo boli potláčané. V procese praktickej ľudskej činnosti sa ďalej zdokonaľovali a prispôbovali sa práve tomu prostrediu, v ktorom človek bojoval o svoju existenciu, teda makrosvetu. Preto sa zdá, že „človek je povahou svojich zmyslov akoby makroskopickým prístrojom a patrí do tej skupiny prístrojov, ktoré registrujú makroskopické údaje“ (2, s. 85).

Toto tvrdenie nie je celkom neodôvodnené, pokiaľ ide o prvú časť citovaného výroku. Ten poukazuje na to, že počet a kvalita zmyslových

orgánov človeka je geneticky podmienená jeho príslušnosťou k určitému biologickému druhu. Tým je ohraničená možnosť zmyslových vnemov čo do kvality.

Nezdá sa pravdepodobné, že človek v procese svojho ďalšieho biologického vývoja nadobúda nové zmyslové kvality (niektorí vedci hovoria, že biologicky bude degenerovať). Mení sa však škála, rozsah zmyslového vnímania v rámci daných druhových biologických zmyslových kvalít, čo má zrejme na mysli aj Marx, keď zdôrazňuje, že naše zmysly sú „ľudskými“ zmyslami. Človek ako bio, psycho, sociálna, prakticky činná bytosť sa vyvíja s vývinom spoločnosti. „Vzniká pôvodne z prírodného (biologického) subjektu a mení sa so zmenou materiálnej a duchovnej produkcie. Zredukovať spoločenský subjekt na „prírodný subjekt“ (K. Marx) by znamenalo zredukovať ľudské poznanie na tú elementárnu formu psychiky, ktorá je vlastná vyšším živočíchom geneticky predchádzajúcim človeku“ (3, s. 42).

Úvaha o človeku ako určitom type prístroja, nech máme akékoľvek výhrady voči nej, zároveň poukazuje na dôležitú skutočnosť. Okrem prístrojov umelých, vytvorených človekom existujú priamo v prírode objekty, ktoré spĺňajú požiadavku kladenú na prístroj ako registrátor údajov.

„Ľubovoľné teleso, vlastnosti ktorého by sme poznali aspoň čiastočne, môžeme v princípe používať v kvalite meracej aparatúry ... nie každá aparatúra musí byť skonštruovaná človekom a nachádzať sa v laboratóriu. Tak, napríklad, sa môžeme pozeráť na magnetické pole Zeme ako na časť prirodzeného hmotnostného spektrografa, ktorý rozdeľuje častice kozmických lúčov podľa ich energie a náboja“ (4, s. 668—669).

Používanie prístrojov typu 1. a 2. je charakteristické pre klasickú fyziku. V klasickej mechanike je podstatná tá skutočnosť, že ľubovoľnú fyzikálnu veličinu možno v princípe zmerať presne bez toho, aby sme podstatne ovplyvnili stav sústavy. V kvantovej mechanike pri meraní vo všeobecnosti nastáva zmena stavu sústavy a túto zmenu nemožno urobiť ľubovoľne malou.

Ako navzájom súvisí meracia aparatúra so stavom skúmaného fyzikálneho systému? Vo všeobecnom prípade ide o štatistickú závislosť, ale v tradičných prípadoch (keď $h \rightarrow 0$) môžeme teoreticky dosiahnuť ľubovoľný stupeň presnosti.

„Pri bežnej meracej aparatúre je dosiahnutá súvislosť taká, že každému presne určenému stavu aparatúry zodpovedá oblasť možných stavov skúmaného systému. Túto oblasť môžeme nazvať neurčitosťou alebo chybou meraní... Ale práve pri maximálne presných meraniach chyba môže vzniknúť v dôsledku kvantového charakteru hmoty. V tom prípade nemožno previesť presnejšie meranie bez toho, aby sme fundamentálnym spôsobom nezmenili objekt pozorovania“ (4, s. 669). To vyplýva z Heisenbergovho princípu neurčitosti. N. Bohr ale vzhľadom na tento princíp podčiarkol, že „...tu nemáme do činenia s ohraničením presnosti merania, ale s ohraničenou možnosťou aplikácie priestorovo-časových poj-

mov a dynamických zákonov zachovania, táto ohrozená možnosť aplikácie je spätá s nevyhnutnosťou robiť rozdiely medzi meracími prístrojmi a atomárnymi objektmi“ [5, s. 31].

V rámci kvantovej mechaniky existujú dva rôzne typy zmien stavu:

1. zmeny stavu dané vlastnou dynamikou mikroobjektu a jeho interakciou s inými mikroobjektmi alebo so žiarením;

2. zmeny stavu, ku ktorým dochádza pri meraní, t. j. pri interakcii kvantomechanického objektu s klasickým (makroskopickým) meracím prístrojom. Potom nastáva zmena stavu, t. j. prechod systému „skokom“ do nového stavu, ktorý je vlastným stavom operátora priradeného meranej fyzikálnej veličine.

Pri interakcii mikroobjektu a prístroja môžeme vydeliť dve úrovne interakcie:

1. interakciu ako fyzikálny proces (úroveň mikro—mikro); mikroobjekt interaguje so súborom mikroobjektov, ktorými je tvorený mikroprístroj;

2. interakcia ako kontakt medzi časťou popisovanou kvantovo-teoreticky a časťou popisovanou klasicky (mikro—makro úroveň). Samotný kvantovo-teoretický opis sa musí zakladať na rozbere interakcie na tejto úrovni.

Tým sa dostávame k otázke, či prístrojové údaje sú informáciami: 1. o samotnom mikroobjekte (Einsteinovo stanovisko), alebo 2. o interakcii mikroobjektu s prístrojom (stanovisko Bohra a Kodaňskej školy). Inak povedané, kladieme si otázku, či je kvantovo-mechanický stavový vektor bezprostredným opisom fyzikálnej reality. Odpoveď závisí od jednotlivých autorov, škôl, ich filozofických východísk a prístupov, ktoré môžeme rozdeliť na dva tábory:

1. kvantová mechanika sa zdržiava ľubovoľných definitívnych tvrdení o „fyzikálnej realite“ — nám, pozorovateľom, udáva vo všeobecnosti štatistické vzťahy medzi nasledujúcimi operáciami (postoj charakteristický pre pozitivizmus a subjektívny idealizmus vôbec);

2. stavový vektor (vlnová funkcia) je opisom fyzikálnej reality.

Podľa von Neumanna a Wignera však ani jedna z odpovedí nie je uspokojujúcim riešením. Von Neumannova teória nepriamych meraní (kde určitý merací prístroj opísaný kvantovo-mechanicky je „pozorovaný“ iným rovnako opísaným prístrojom) ukazuje, že výsledky merania nezávisia od toho, kde presne vedieme hranicu medzi mikrosústavou a „pozorovateľom“. Podľa neho je v kvantovej mechanike vždy vhodný opis zodpovedajúcich procesov pomocou Schrödingerovej rovnice. Zmenu stavu pri meraní však táto rovnica neopisuje. Von Neumann predpokladá, že redukcia vlnovej funkcie prebieha pri akte vnímania stavu sústavy prostredníctvom vedomia pozorovateľa, ktoré je pri meraní nevyhnutné. Funkciu pozorovateľa môže spĺňať nielen človek (poznávací subjekt), ale aj prístroj („technicky zovšeobecnený poznávací subjekt“). Odvolá-

vanie sa na vedomie pozorovateľa je teda pri takto vymedzenej hranici medzi pozorovateľom a pozorovaným značne problematické.

Bohr sa obmedzoval na to, že pri opise redukcie vlnového balíka sa odvolával na „klasickosť“ prístroja. Prístroj je u neho opísaný vždy klasicky a meraná sústava kvantovo-mechanicky. Pri zložitejšom procese (alebo prístroji) však prestáva byť jasné, čo sa má ešte opisovať kvantovo-mechanicky a čo už klasicky.

Pauli preto doplnil Bohrovu požiadavku používať terminológiu klasickej fyziky o požiadavku záväzného zavedenia hranice oddeľujúcej mikrosystém od prístroja alebo prístroj od pozorovateľa. Určenie hranice medzi mikrosústavou opísanou kvantovou mechanikou a makrosvetom opísaným klasicky je diktované logickou nevyhnutnosťou, zdá sa však, že jej stanovenie je v „prístupnom rozpätí“ ľubovoľné.

V Bohrovom chápaní výsledku interakcie nemá zmysel hovoriť o mikroobjekte „osebe“, lebo tento v prípade, že nevstúpi do interakcie s meracím prístrojom, „pre nás“ vlastne neexistuje. Ak sa určitým spôsobom prejavuje, potom sa o jeho charakteristikách dozvedáme len v kontexte interakcie.

„Mikroobjekty však tiež, 'existujú sami osebe', pretože majú také vlastnosti, ktoré nie sú závislé ani od poznávajúceho subjektu, ani od procesu pozorovania a merania... A tak ich priestorovo-časové charakteristiky a vlastnosti v korešpondencii s relačnou koncepciou, tak isto ako aj v teórii relativity, nemajú fyzikálny zmysel mimo ich vzájomného pôsobenia v danom prípade s makroprístrojmi, ktoré ich musia 'fixovať' alebo 'pozorovať'“ [6, s. 239].

Keďže každú časť interagujúcich sústav opisujeme iným jazykom, Bohr trval na tom, aby celá sústava, skladajúca sa z mikroobjektu a prístroja, bola chápaná ako jediný, nedeliteľný celok.

„Vzniká teda dojem, že obraz skutočnosti má vo fyzike 20. stor. dve roviny. Na jednej strane do neho patria charakteristiky skúmaného objektu, ktorých poznanie naďalej ostáva cieľom fyziky; reprezentujú rovinu obrazu objektu. Na druhej strane je neurčitosť týchto charakteristík determinovaná podmienkami pozorovania, ktorých charakteristiky predstavujú druhú rovinu fyzikálneho obrazu sveta a tvoria obraz pozorovania. Charakteristiky pozorovania nevyhnutne figurujú pri formulácii akýchkoľvek fyzikálnych úloh a takrečeno sa 'zatavujú' do charakteristík skúmaného objektu“ [7, s. 199].

Schéma poznania fyzikálnej reality na úrovni mikrosвета (mikroobjektov) vyzerá nasledovne: fyzikálny objekt — podmienky pozorovania — pozorovateľ, alebo subjekt — prístroj — objekt. Podľa Molčanova je ešte potrebné „vydeliť v kvalite zvláštného predmetu bádania jednotu všetkých týchto troch členov, t. j. samotný proces poznania ako celok, keďže všetky úvahy a argumenty ohľadom činnosti a aktivity majú zmysel len v kontexte procesu poznania ako celku“ [6, s. 231].

V kvantovej teórii sa nemožno pozeráť na fyzikálny objekt ako na

celok s určitou základnou kvalitou, ktorá sa prejavuje v rozhodujúcom experimente, ako je to napr. v klasickej fyzike, kde „všetky stránky a vlastnosti daného objektu môžu byť v princípe určené pomocou jednej experimentálnej aparatury“ (5, s. 529). Výsledky každého pokusu prebiehajú za podmienok, ktoré vedome stanovil človek. Subjekt teda vedome mení alebo využíva vonkajšie podmienky, v ktorých sa prejavujú jednotlivé stránky objektu, aby tým lepšie mohol poznať jeho charakteristiky. Objektívne zákony je nevyhnutné vyvodzovať zo zmeny chovania objektu v modifikovaných podmienkach, v ktorých sa prejavuje v najčistejšej podobe. Výber žiadúcich a eliminácia nežiadúcich podmienok sú dôsledkom teórie, na základe ktorej je experiment budovaný.

Je zrejmé, že „ovplyvňovanie“ mikroobjektu makroprístrojom nemá len fyzikálny, ale aj teoretický charakter (keďže prístroj je vlastne materializovanou teóriou) ako dôsledok zvýšenej aktivity subjektu. Teda s obohacovaním a rozvíjaním sa subjektu v procese jeho praktickej a zároveň pretvárajúcej činnosti sa rozširujú aj hranice ním reflektovanej objektívnej reality, a teda aj reality fyzikálnej, pričom „fyzikálna realita je taká forma skutočností, ktorá sa prejavuje len makroprístrojom“ (8).

Fok, aby zohľadnil tú okolnosť, že „odlišné experimentálne podmienky prinášajú odlišné obrazy javov, a teda aj odlišné obrazy skúmaného procesu“ (7, s. 176) zaviedol termín „relativita voči pozorovacím prostriedkom“. Interakcia, ktorá prebieha v rôznych pokusoch s tým istým objektom rôzne, je kľúčom k pochopeniu toho, že jeden a ten istý objekt môže odhaliť v rôznych pokusoch rôzne stránky, ktoré sa pri mechanistickom prístupe od seba odtrhávali, stávali sa charakteristikou rôznych objektov. Toto zdanlivé protirečenie sa vysvetľuje rozličnými podmienkami pokusu. Výsledky budú navzájom komplementárne, pričom „chápanie komplementarity jednoducho charakterizuje možné odpovede, ktoré dostávame ako výsledok pozorovania v prípade, keď vzájomné pôsobenie medzi meracím prístrojom a objektom predstavuje neoddeliteľnú časť javu“ (5, s. 526).

Tým, že Bohr poukazoval na to, že informácie o mikroobjekte, ktoré získavame v akte merania, sú komplementárneho charakteru a len vďaka tomu je mikroobjekt úplnejšie popísaný, zdôrazňoval, že sa tu nedostávame do styku s objektívnymi protikladmi, ktoré by boli dané povahou samotného objektu, ale táto protirečivosť je subjektívneho charakteru, ktorý má základ v špecifickosti nášho myslenia.

Dôsledkom nevyhnutného začlenenia prístrojov a meracích aparátov do procesu poznávania mikroobjektov je skutočnosť, že informácie o mikroobjektoch správajúcich sa podľa zákonov kvantovej fyziky dostávame prostredníctvom makroskopických prístrojov, ktoré sa riadia zákonmi klasickej fyziky. Prístroj môžeme totiž „charakterizovať ako také experimentálne zariadenie, ktoré je na jednej strane v interakcii s mikroobjektom a reaguje na jeho pôsobenie a na druhej strane umožňuje opis s dostatočnou presnosťou“ (9, s. 83).

V kvantovej fyzike sa teda stretávame so situáciou, keď empirické potvrdenie jednej teórie, popisujúcej objekty, ktoré nie sú bezprostredne prístupné vnímaniu, je sprostredkované inou teóriou, ktorá popisuje správanie sa zmyslovo pozorovateľných fenoménov. To, že klasická fyzika môže byť sprostredkujúcim článkom medzi teoretickým systémom kvantovej fyziky a experimentálnymi výsledkami popísanými jazykom klasickej fyziky, je dané tým, že klasická teória je limitným prípadom ($h \rightarrow 0$) teórie kvantovej (keď h je Planckova konštanta).

Podstatnú úlohu pri objasňovaní tohto problému a problémov interpretácie kvantovej mechaniky vcelku, zohrala idea Nielsa Bohra, podľa ktorej kvantovo-teoretický opis vlastností mikroobjektu nevyhnutne závisí od klasického popisu pozorovacích prostriedkov, experimentálneho zariadenia. To preto, lebo pod „experimentom môžeme rozumieť len procedúru, o ktorej môžeme povedať ostatným, čo sme urobili a čo sme pri tom dostali“, pričom „opis experimentálnej aparatury a výsledkov pozorovania je možný len na základe zrozumiteľného jazyka, ktorý sa vytvoril cestou aplikácií zvyčajnej fyzikálnej terminológie“ [5, s. 528], t. j. terminológie a pojmového aparátu klasickej fyziky.

Výpovede o určitej triede javov robíme prostredníctvom jazyka či už prirodzeného alebo formalizovaného, čo je nevyhnutnou podmienkou uvedomelého kontaktu s okolitou realitou. Jazyk je teda špecifickým „nástrojom“ uchopenia mikrosвета, koncentrát kultúry, znaková objektivizácia dosiahnutej úrovne poznania, ktorá spĺňa komunikatívnu funkciu. Na úrovni kontaktu človeka a mikrosвета dochádza k viacnásobnému sprostredkovaniu: Subjekt — jazyk — prístroj — mikroobjekt — prístroj — jazyk — subjekt, pričom východisko a výsledok kontaktu musí byť jazykový v zmysle zrozumiteľný.

LITERATÚRA

1. BERKA, K.: Měření. Praha 1977.
2. ÚLEHLA, I.: Od fyziky k filozofii. Praha 1963.
3. ČERNÍK, V. — FARKAŠOVÁ, E. — VICENÍK, J.: Teória poznania. Bratislava 1980.
4. BOHM, D.: Kvantovaja teorija. Moskva 1961.
5. BOHR, N.: Izbrannyje naučnyje trudy. T. II. Moskva 1971.
6. MOLČANOV, Ju. V.: Problema subjekta (nabľudateľa) v sovremennoj fizike. In: Teorija poznaniya i sovremennaja fizika. Moskva 1984.
7. ALEXEJEV, I. S.: Jednota fyzikálneho obrazu sveta ako metodologický princíp. In: Metodologické princípy fyziky. Bratislava 1984.
8. FOK, V. A.: O interpretácii kvantovej mechaniky. In: Filozofické problémy súčasnej fyziky a astronómie. Bratislava 1962.
9. HOLÁ, O.: Filozofické aspekty merania. In: Filozofia 1978, č. 6.

Яна Врбова

Автор в своей статье обращается к проблематике, которая находилась в центре внимания физиков и философов в первой половине этого века, к проблематике измерения микрообъектов в квантовой физике. Во введении статьи она показывает, в чем заключается изменение положения измерительного прибора в процессе измерения в квантовой физике по сравнению с классической физикой. Далее, автор в статье описывает проблемы, связанные с измерением: проблема характера физической реальности, проблема „относительности по отношению к средствам наблюдения“, связь между классической физикой и квантовой физикой.

ZU EINIGEN ASPEKTEN DER MESSUNG IN DER QUANTMECHANIK

Jana Vrbová

Die Vf. kehrt in ihrer Arbeit zur Problematik zurück, die im Mittelpunkt der Aufmerksamkeit von Physikern und Philosophen in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts gestanden ist, zur Problematik der Messung von Mikroobjekten in der Quantenmechanik. Einleitend stellt sie heraus, worin die Änderung des Stellenwerts von Messapparaten im Prozess der Messung in der Quantenphysik gegenüber der klassischen Physik bestand. Die Vf. skizziert weiter Probleme, die mit der Messung eng zusammenhängen: Problem des Charakters der physikalischen Realität, Problem der Relativität gegenüber von Beobachtungsmitteln, Verhältnis zwischen klassischer und Quantenphysik.