

# Kodanský výklad kvantovej teórie a jeho vybrané filozofické dôsledky

Miroslav Karaba

KARABA, M.: Copenhagen Interpretation of Quantum Theory and its Selected Philosophical Implications. *Studia Aloisiana*, 5, 2014, 2, s. 47 – 63.

The Copenhagen interpretation was the first general attempt to understand the world of atoms as this is represented by quantum mechanics. As the father of this interpretation is regarded mainly Niels Bohr, but also Werner Heisenberg, Max Born and other physicists made important contributions to the overall understanding of the atomic world. Today the Copenhagen interpretation is mostly regarded as synonymous with indeterminism, Bohr's correspondence principle, Born's statistical interpretation of the wave function, and Bohr's complementarity interpretation of certain atomic phenomena. The presented paper is focus on analysis of base and consequences of this kind of interpretation, namely from the ontological as well as epistemological point of view. *Keywords:* quantum theory, Copenhagen interpretation, complementarity, correspondence rule

Objav modernej kvantovej teórie v polovici dvadsiatych rokov minulého storočia priniesol jednu z najzásadnejších zmien v skúmaní povahy fyzikálneho sveta od doby Isaaca Newtona. To, čo bolo predtým pokladané za doménu jasných a determinovaných procesov, sa stalo (minimálne na subatomárnej úrovni) hmlistým a neuchopiteľným. V porovnaní s touto revolučnou zmenou sa aj veľké objavy špeciálnej a všeobecnej teórie relativity javia iba ako zaujímavé variácie klasických tém.<sup>1</sup> Je príznačné, že pre metafyzický vkus Alberta Einsteina, tvorca teórie relativity, bola kvantová teória natoľko vzdialená, že ostal po celý svoj život jej nezmieriteľným odporcom. V priebehu viac ako 80

1 Porov. BOHR, N.: *Essays 1958 – 1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*. New York; London : John Wiley & Sons, 1963, s. 2.

rokov skúmania, ktoré nasledovalo po prvotnej formulácii kvantovej mechaniky, sa táto teória ukázala nesmierne plodnou.

Kodanská interpretácia bola prvým všeobecným pokusom porozumieť svetu atómov a „elementárnych“ častíc tak, ako ho reprezentuje kvantová mechanika. Za jej zakladateľa možno pokladať N. Bohra, ale aj W. Heisenberga, M. Bornu a ďalších fyzikov, ktorí prišli s dôležitými príspevkami ku spôsobu porozumenia sveta atómov, spojenými s menom hlavného mesta Dánska. V skutočnosti sa Bohr a Heisenberg navzájom nikdy úplne nezhodli v porozumení matematického formalizmu a ani jeden z nich nepoužíval termín „kodanská interpretácia“ ako spoločné označenie ich myšlienok.<sup>2</sup> Cieľom tohto príspevku je analýza východísk a konzekvencií kodanskej interpretácie kvantovej teórie, a to najmä z ontologického a epistemologického hľadiska. Vychádzať budeme pritom najmä z myšlienok Nielsa Bohra a Wernera Heisenberga, dvoch významných predstaviteľov kvantovej fyziky, ktorí sa zároveň silne angažovali v premýšľaní o jej filozofických dôsledkoch.

## Cesta ku kodanskej interpretácii

Niektoré časti Bohrovho modelu<sup>3</sup> atómu priniesli isté zvláštnosti v porovnaní s princípmi klasickej fyziky, pretože zavádzali pre klasickú mechaniku cudzí prvok diskontinuity a indeterminizmu:

1. Bolo zrejmé, že nie každý bod v priestore je prijateľný (dostupný) pre elektrón pohybujúci sa okolo vodíkového jadra. Elektrón sa síce pohybuje po klasickej orbite, ale počas prechodu z jednej orbity na inú orbitu nie je na jednoznačne určenom mieste medzi týmito dvoma orbitami. Čiže elektrón sa môže nachádzať iba v základnom stave (orbita s najnižšou prípustnou energiou), alebo v excitovanom stave (ak bol pôsobením inej častice prinútený opustiť základný stav).

- 2 Tento termín je skôr nálepkou, čo vytvorili ľudia, ktorí nesúhlasili s Bohrovou myšlienkou komplementarity, na identifikovanie toho, čo pokladali za spoločné črty Bohrovej – Heisenbergovej interpretácie, tak ako sa objavila v dvadsiatych rokoch 20. storočia. Dnes sa kodanská interpretácia väčšinou pokladá za synonymum indeterminizmu, Bohrovho princípu korešpondencie, Bornovej štatistickej interpretácie vlnovej funkcie a Bohrovej komplementárnej interpretácie určitých atómových javov. Namiesto názvu „kodanská“ sa táto interpretácia niekedy označuje aj ako „ortodoxná“ alebo „štandardná“ interpretácia.
- 3 Niels Bohr aplikoval Planckovu kvantovú hypotézu na Rutherfordov model atómu, spoznajúc nedostatky klasickej elektrodynamiky pri opise správania systémov na úrovni atómových veľkostí. Ak teda môže atóm meniť svoju energiu iba o diskrétné energetické dávky, potom môže existovať iba v diskrétnych stacionárnych stavoch, pričom stav na energiu najchudobnejší je práve „normálnym“ stavom atómu. Preto sa atóm po určitom type pôsobenia nakoniec vždy znovu vracia do tohto normálneho stavu. Bohr predpokladal, že a) klasická mechanika môže byť nápomocná v diskusii o dynamike stacionárnych stavov, ale nevzťahuje sa na prechod z jedného takéhoto stavu do iného; b) prechod elektrónu z energeticky vyššej hladiny  $E_n$  do energeticky nižšej hladiny  $E_m$  je sprevádzaný emisiou monochromatického žiarenie, ktorého frekvencia  $\nu(n, m)$  je vo vzťahu k rozdielu týchto energií ( $E_n - E_m$ ). Porov. BOHR, N.: On the Constitution of Atoms and Molecules. In: *Collected Works*. Amsterdam : North-Holland, 1972. (Pôvodne publikované in: *Philosophical Magazine*, roč. 26, 1913, č. 1.)

2. Nie je možné predpovedať, kedy tento prechod nastane a ako nastane. Okrem toho neexistujú nijaké vonkajšie alebo vnútorné príčiny, ktoré by determinovali preskok späť do základného stavu. Excitovaný elektrón sa v princípe môže dostať do stavu s nižšou energiou, alebo do základného stavu.
3. Rutherford podobne ako Bohr ukázal, že frekvencia žiarenia, ktorú elektrón počas prechodu emituje, závisí od energetického rozdielu medzi iniciačnou a konečnou energetickou hladinou. Elektrón sa prejavuje tak, ako keby musel poznať, k akej konečnej energetickej hladine je nasmerovaný, a aby tak mohol emitovať žiarenie so „správnu“ frekvenciou.
4. Einstein urobil ďalšie zvláštne zistenie, keď sa pýtal, v ktorom smere sa fotón „rozhoduje“ opustiť elektrón.<sup>4</sup>

V rokoch 1913 až 1925 Bohr, Sommerfeld a ďalší zdokonalili používaný model atómu a spolu so zavedením Pauliho vylučovacieho princípu dospeli k rozumnému opisu základných chemických prvkov. Predsa však sa tento model dostával do problémov, keď sa ho pokúšali aplikovať na vysvetlenie spektier zložitejších prvkov. Možno povedať, že medzi vedúcimi osobnosťami vtedajšej fyziky vládlo všeobecné presvedčenie, že Bohrov model bude treba skôr či neskôr nahradiť oveľa radikálnejšou teóriou. V roku 1925 položil Heisenberg základy maticového znázornenia kvantovej mechaniky<sup>5</sup> a v nasledujúcom roku prišiel Schrödinger s diferenciálnou rovnicou pre vlnovú funkciu.<sup>6</sup> Ešte v tom istom roku prišiel Born s návrhom konzistentnej štatistickej interpretácie, v ktorej druhá mocnina absolútnej hodnoty vlnovej funkcie vyjadruje veľkosť pravdepodobnosti výsledkov merania.

Bohr vnímal kvantovú mechaniku ako zovšeobecnenie klasickej fyziky, hoci narúša niektoré základné ontologické princípy, na ktorých je klasická fyzika postavená. Medzi tieto princípy patrí:

- Princíp času a priestoru. – Fyzikálne objekty (systémy) existujú izolovane v čase a priestore takým spôsobom, že sú vždy lokalizovateľné a merateľné; fyzikálne procesy (vývoj systémov) sa vždy uskutočňujú v presne určenom priestore a čase.
- Princíp kauzality. – Každá udalosť má svoju príčinu, resp. rovnaké príčiny vyvolávajú za rovnakých podmienok rovnaké následky.

4 Porov. Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics. In: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/entries/qm-copenhagen/> (23. 11. 2004).

5 Porov. HEISENBERG, W.: Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. In: *Zeitschrift für Physik*, roč. 33, 1925, s. 879–893.

6 Porov. SCHRÖDINGER, E.: Quantisierung als Eigenwertproblem : Erste Mitteilung. In: *Annalen der Physik*, roč. 79, 1926, s. 361–376; SCHRÖDINGER, E.: Quantisierung als Eigenwertproblem : Zweite Mitteilung. In: *Annalen der Physik*, roč. 79, 1926, s. 489–527; SCHRÖDINGER, E.: Quantisierung als Eigenwertproblem : Dritte Mitteilung : Störungstheorie, mit Anwendung auf den Starkeffekt der Barmelinien. In: *Annalen der Physik*, roč. 80, 1926, s. 437–490; SCHRÖDINGER, E.: Quantisierung als Eigenwertproblem : Vierte Mitteilung. In: *Annalen der Physik*, roč. 81, 1926, s. 109–139.

- Princíp determinizmu. – Každý nasledujúci stav systému je jedinečne determinovaný predchádzajúcim stavom systému.
- Princíp continuity. – Všetky procesy preukazujúce rozdiely medzi počiatočným a konečným stavom musia prebiehať cez každý predchádzajúci stav.
- Princíp zachovania energie. – Podľa tohto princípu môže byť energia uzavretého systému transformovaná do rozličných foriem, ale nikdy nemôže byť v rámci tohto systému zväčšená, zmenšená alebo zničená.

Kodanská interpretácia kvantovej teórie začína paradoxom, pretože vychádza z premisy, podľa ktorej môže byť akýkoľvek experiment, či už sa vzťahuje na udalosti bežného ľudského života, alebo na atómovú fyziku, opísaný iba v pojmoch klasickej fyziky. Tieto pojmy utvárajú reč, v ktorej (okrem iného) opisujeme usporiadanie našich experimentov a stanovujeme ich výsledky. Aplikovateľnosť týchto pojmov je však obmedzená (napr. vzťahmi neurčitosti) a my si musíme byť neustále vedomí tohto nedostatku.<sup>7</sup>

V kvantovej teórii nemožno, na rozdiel od klasickej fyziky, interpretovať pokus jednoznačne, takpovediac deterministicky.<sup>8</sup> Ak sa budeme napríklad zaujímať o pohyb elektrónu v hmlovej komore a budeme chcieť určiť jeho počiatočnú polohu a rýchlosť, naše meranie nemôže byť presné. Okrem nepresností zapríčinených náročnosťou experimentu bude totiž obsahovať nepresnosti vyplývajúce z princípu neurčitosti. Druhá z týchto nepresností umožňuje vyjadriť výsledok pozorovania matematickým aparátom kvantovej teórie. Formuluje sa pravdepodobnostná funkcia<sup>9</sup>, znázorňujúca experimentálnu situáciu v čase merania, vrátane jeho možných nepresností. Len čo v kvantovej mechanike pozorovaním určíme pravdepodobnostnú funkciu v počiatočnom čase, môžeme zo zákonov tejto teórie vypočítať pravdepodobnostnú funkciu v ktoromkoľvek inom čase a potom môžeme vopred určiť pravdepodobnosť, s akou meranie poskytne určitú hodnotu meranej veličiny. Tak sa dá napríklad predpovedať pravdepodobnosť, s akou bude nájdený elektrón v určitom bode hmlovej komory. Treba však zdôrazniť, že pravdepodobnostná funkcia neznázorňuje samotný priebeh udalostí v čase. Znamená skôr niečo ako tendenciu k dejom, možnosť dejov alebo našu znalosť týchto dejov. Pravdepodobnostnú funkciu je možné spojiť so skutočnosťou iba vtedy, ak splníme podstatnú podmienku,

7 Porov. HEISENBERG, W.: *Fyzika a filosofie*. Praha : Aurora, 2000, s. 21.

8 V klasickej newtonovskej mechanike môžeme začať napríklad tým, že určíme polohu a rýchlosť nejakej planéty, ktorej pohyb chceme študovať. Výsledky pozorovania sa vyjadria matematicky tak, že z pozorovaní odvodíme hodnoty pre súradnice a hybnosť danej planéty. Potom sa použijú pohybové rovnice, aby sme z týchto číselných hodnôt vypočítali hodnoty súradníc alebo iné vlastnosti systému v budúcnosti. Tak možno napr. presne vypočítať, kedy nastane zatmenie Mesiaca.

9 Možno povedať, že pravdepodobnostná funkcia je zmesou dvoch rôznych prvkov, sčasti skutočnosti a sčasti stupňa nášho poznania tejto skutočnosti. Znamená skutočnosť natoľko, nakoľko východiskovej situácii pripisuje pravdepodobnosť 1, teda úplnú istotu. Aj v klasickej fyzike musíme brať do úvahy chybu merania. Ako výsledok potom dostaneme pravdepodobnostné rozdelenie počiatočných hodnôt súradníc a rýchlostí, teda niečo podobné ako pravdepodobnostnú funkciu v kvantovej mechanike. V klasickej fyzike však chýba zvláštna neistota, ktorá nevyhnutne vyplýva z princípu neurčitosti.

totiž ak vykonáme nové meranie alebo pozorovanie, aby boli zistené určité vlastnosti systému. Iba vtedy umožňuje pravdepodobnostná funkcia vypočítať pravdepodobný výsledok nového merania. Výsledok merania sa pritom opäť udáva v pojmoch klasickej fyziky.<sup>10</sup>

V pozadí Bohrových a neskorších Heisenbergových prác na rozvoji konzistentnej atómovej teórie možno vidieť princíp korešpondencie. Bohr pochopil, že podľa jeho koncepcie vodíkového atómu sú frekvencie žiarenia zodpovedajúce prechodu elektrónu medzi dvoma stacionárnymi stavmi s veľkými kvantovými číslami (napr. stavy extrémne vzdialené od základného stavu) v približnej zhode s výsledkami klasickej elektrodynamiky. Preto sa v hľadaní teoretického výkladu kvantovej mechaniky stalo pre Bohra metodologickou požiadavkou, aby akákoľvek ďalšia atómová teória bola schopná predpovedať hodnoty v oblasti veľkých kvantových čísel tak, aby boli blízкими aproximáciami k hodnotám klasickej fyziky. Princíp korešpondencie bol teda heuristickým princípom určeným na zabezpečenie faktu, že v oblasti, v ktorej možno vplyv Planckovej konštanty zanedbať, budú numerické hodnoty predpovedané takouto teóriou v zhode s hodnotami predpovedanými klasickou teóriou žiarenia.

Po tom, čo Heisenberg v roku 1925 formuloval konzistentnú teóriu kvantovej mechaniky, začal sa spolu s Bohrom zaoberať úsilím nájsť koherentnú interpretáciu príslušného matematického formalizmu. Obaja sa však vydali trochu odlišnými cestami, pretože zatiaľ čo Heisenberg sa spoliehal na formalizmus a jeho známy princíp neurčitosti, Bohr sa vybral cestou analýzy konkrétnych experimentálnych usporiadaní, najmä dvojštrbinového experimentu. Bohr pokladal vzťah neurčitosti iba za vyjadrenie svojej všeobecnej predstavy, že naše porozumenie atómových javov je postavené na komplementárnom opise. V roku 1927 po prvýkrát prezentoval svoje úvahy, podľa ktorých určité rozdielne opisy možno pokladať za komplementárne. Princíp komplementarity a princíp korešpondencie stoja v základoch kodanskej interpretácie kvantovej teórie.<sup>11</sup>

10 Porov. HEISENBERG, W.: *Fyzika a filosofie*, s. 21–22.

11 Porov. Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics. In: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/entries/qm-copenhagen/> (23. 11. 2004). Samotný pojem komplementarity nesie v sebe dve základné asociácie: spojenie vzájomne sa vylučujúcich ideí a úplnosť opisu, pričom obe možno pokladať za integrálne zložky Bohrovho chápania tohto pojmu. Princíp korešpondencie poukazuje na fakt, že aj keď je kvantový opis reality odlišný od klasického opisu, musí s ním plynulo korešpondovať, berúc do úvahy jeho jednotlivé limity a obmedzenia (napr. keď je Planckova konštanta zredukovaná na nulu). Inými slovami, klasický a kvantový opis reality nemôžu byť v protirečení.

## Teoretický výklad experimentu

Teoretický výklad experimentu<sup>12</sup> v kvantovej mechanike si vyžaduje tri základné fázy.<sup>13</sup> V prvej sa východisková experimentálna situácia preloží do pravdepodobnostnej funkcie, v druhej sa táto funkcia matematicky sleduje v priebehu času a v tretej sa vykoná nové meranie systému, ktorého očakávaný výsledok možno vypočítať z pravdepodobnostnej funkcie. (Okrem toho je pri experimente nevyhnutné stanoviť okrajové podmienky.) Pre prvú fázu je platnosť vzťahu neurčitosti nevyhnutným predpokladom. Druhá fáza zase nemôže byť opísaná v pojmoch klasickej fyziky. Nie je však možné povedať, čo sa so systémom deje medzi počiatočným pozorovaním a najbližším meraním. Iba pri tretej fáze sa môže znovu nahradiť možné faktickým. Už pri definovaní samotného experimentu sa v kodanskej interpretácii môžeme stretnúť s nevyhnutnosťou klasických konceptov. V tejto otázke je Bohr veľmi dôrazný, keď tvrdí, že akokoľvek určité javy presahujú rámec klasických fyzikálnych vysvetlení, akýkoľvek pokus o ich opis musí byť vyjadrený v klasických termínoch.<sup>14</sup> Príčina toho je jednoduchá:

„Slovom »experiment« opisujeme situáciu, v ktorej môžeme ostatných oboznámiť s tým, čo sme urobili a čo sme sa dozvedeli (...) a preto opis experimentálneho usporiadania a výsledkov pozorovania musí byť vyjadrený v jednoznačnom jazyku, s primeraným použitím terminológie klasickej fyziky.“<sup>15</sup>

Spomínané tri fázy možno priblížiť použitím jednoduchého myšlienkového experimentu. Vieme, že atóm sa skladá z atómového jadra a elektrónov, ktoré sa okolo jadra pohybujú. Konštatovali sme tiež, že pojem dráhy elektrónu je prinajmenšom problematický. Kedy je teda možná fáza prekladu výsledkov pozorovania do pravdepodobnostnej funkcie? Je možná iba vtedy, ak je po pozorovaní splnená podmienka princípu neurčitosti. Miesto elektrónu môžeme teoreticky určiť s presnosťou, ktorá je daná vlnovou dĺžkou žiarenia  $\gamma$ .<sup>16</sup> Predpokladajme, že elektrón bol pozorovaný prakticky v pokoji. Pri našom pozorovaní muselo mikroskopom prejsť prinajmenšom jedno kvantum žiarenia  $\gamma$  a udelilo

12 Často sa diskutovalo o tzv. „myšlienkových experimentoch“, ktoré boli vymýšľané na osvetlenie nejakej zvlášť problematickej otázky, nezávisle od toho, či experiment možno naozaj uskutočniť, alebo nie. Bolo prirodzene dôležité, aby pokus bol aspoň v zásade uskutočniteľný, experimentálna technika však pritom mohla byť ľubovoľne zložitá. Takéto myšlienkové experimenty sa ukázali ako mimoriadne prospešné, pretože často inšpirovali k utvoreniu jednoduchších a v daných podmienkach realizovateľných experimentov.

13 Porov. HEISENBERG, W.: *Fyzika a filosofie*, s. 22–26.

14 Porov. TORRETI, R.: *The Philosophy of Physics*. Cambridge : Cambridge University Press, 1999, s. 371.

15 BOHR, N.: Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics. In: *Albert Einstein : Philosopher-Scientist*. Ed. P. A. Schilpp. Evanston (IL) : Library of Living Philosophers, 1949, s. 209.

16 Pri myšlienkovom experimente by sme mohli v zásade sledovať dráhu elektrónu mikroskopom s veľmi vysokou rozlišovacou schopnosťou. Takú vysokú rozlišovaciu schopnosť by sme však nedosiahli s použitím tej časti elektromagnetického spektra, ktoré nazývame svetlo, pretože chyba merania nemôže byť v takomto prípade menšia ako vlnová dĺžka svetla. Avšak mikroskop, ktorý by pri svojej práci používal napr. žiarenie  $\gamma$  (jeho vlnová dĺžka je menšia ako veľkosť atómu), by takémuto pozorovaniu vyhovoval.

pozorovanému elektrónu ráz, takže zmenil svoju hybnosť a rýchlosť. Možno ukázať, že neurčitost tejto zmeny je dostatočne veľká, aby zaručovala platnosť vzťahu neurčitosti. Zároveň však treba pripomenúť, že nie je možné pozorovať dráhu elektrónu okolo jadra. Keďže vlnová dĺžka kvanta  $\gamma$  je oveľa menšia ako veľkosť atómu, hybnosť tohto kvanta je podstatne väčšia ako pôvodná hybnosť elektrónu. Už prvé kvantum stačí na to, aby vyrazilo elektrón z atómu, a ten už nemožno pozorovať ako vlnové kĺbko elektrónovej dráhy. Nedostávame sa tak do rozporu so skúsenosťou, keď tvrdíme, že nejestvujú dráhy elektrónu v bežnom zmysle.

Tretia fáza ukáže elektrón na jeho dráhe smerom od atómu, ale vo všeobecnosti je úplne nemožné opísať, čo sa udialo medzi dvoma za sebou nasledujúcimi pozorovaniami. Prirodzene, budeme tvrdiť, že elektrón musel medzi oboma pozorovaniami niekde byť a musel opísať akúsi dráhu (cestu), aj keď by azda nebolo možné túto dráhu zistiť. Takúto argumentáciu možno pokladať za rozumnú v klasickej fyzike, v kvantovej teórii by však išlo o neoprávnené použitie dostupných výrazových prostriedkov.<sup>17</sup>

Problémy pri porozumení tohto výkladu sa začínú vyskytovať vždy, keď sa položí známa otázka: Čo sa v skutočnosti deje pri atómovom procese?<sup>18</sup> Predovšetkým treba zdôrazniť, že merania a výsledky pozorovania musíme stále opisovať v pojmoch klasickej fyziky. Bohr vo všeobecnosti pripisoval veľký význam otázkam jazyka používaného pri opise kvantových javov. Experimentálne zariadenia pripravujúce mikroobjekty v určitých stavoch i zariadenia, pomocou ktorých uskutočňujeme merania, musia byť opísané tak, aby experimenty bolo možné na základe tohto opisu zostaviť znova a aby výsledky boli reprodukovateľné. Tu prišiel Bohr k záveru, že pri opise prístrojov treba používať jazyk klasickej fyziky.<sup>19</sup> Aj tak však, s tým, ako rastie naše poznanie, musíme byť pripravení a otvorení pre zmeny pohľadu na najvhodnejšie usporiadanie našej skúsenosti. A hoci nás rozvoj modernej fyziky núti ku dôkladnej revízii pojmových významov v súvislosti s výsledkami pozorovaní a experimentov, podľa Bohra to znamená, že

„...je nesprávna predstava, že ťažkostiam s atómovou teóriou sa možno vyhnúť konečným nahradením konceptov klasickej fyziky novými konceptuálnymi formami. (...) Uznanie obmedzení spojených s našou formou vnímania a predstáv v nijakom prípade neznamená, že by sme sa mohli obísť bez našich tradičných konceptov a ich priamych slovných

17 V tejto chvíli ešte môžeme ponechať nevyriešenou otázku, či sa toto naše varovanie dotýka výpovede o spôsobe, akým máme o atómových dejoch hovoriť, alebo výpovedí o týchto dejoch samotných. V každom prípade musíme byť nanajvýš opatrní pri formulácii výpovedí dotýkajúcich sa správania objektov na úrovni atómových štruktúr.

18 Tieto špecifické vlastnosti kvantových procesov sa v súčasnom dialógu medzi vedou a teológiou usilujú využiť niektorí filozofi na objasnenie možnosti pôsobenia Boha vo svete. Porov. SPIŠIAKOVÁ, M.: *Zlo v Božom stvorení: Riešenie problému zla v analytickej filozofii náboženstva*. Warszawa : Rhetos, 2012, s. 215–216.

19 Porov. PIŠŮT, J., GOMOLČÁK, L., ČERNÝ, V.: *Úvod do kvantovej mechaniky*. Bratislava : Alfa, 1983, s. 511.

vyjadrení. Nie je pravdepodobné, že by sa fundamentálne koncepty klasických teórií stali niekedy prebytočnými alebo zbytočnými pre opis fyzikálnej skúsenosti."<sup>20</sup>

To, čo z pozorovania vyberáme, je však pravdepodobnostná funkcia, teda matematický výraz, ktorý spája výpovede o možnostiach alebo tendenciách s výpovedami o našej znalosti skutočnosti. Výsledok pozorovania preto nemôžeme plne objektivizovať. Nemôžeme opísať, čo sa deje medzi týmto a najbližším pozorovaním, a vyzerá to tak, akoby sme tým zavádzali do teórie subjektívny prvok.<sup>21</sup>

Prečo sa však pri pokuse opísať deje medzi dvoma za sebou nasledujúcimi pozorovaniami dostávame do takých ťažkostí? Na lepšie priblíženie tohto problému bude vhodné uvážiť nasledujúci myšlienkový pokus.<sup>22</sup> Sčernenie fotografickej dosky možno na kvantovej úrovni opísať ako chemický pochod spôsobený jednotlivými svetelnými kvantami. Monochromatický svetelný zdroj vyžaruje svetelný lúč, ktorý prechádza clonou s dvoma malými otvormi a zachytáva ho fotografická doska. Z korpuskulárneho hľadiska by sme mohli situáciu opísať takto: Jednotlivé svetelné kvantum môže prejsť buď jedným, alebo druhým otvorom. Ak kvantum prejde napr. otvorom číslo 1, potom pravdepodobnosť, že bude neskôr absorbované v určitom bode fotografickej dosky, nezávisí od toho, či je otvor číslo 2 zatvorený, alebo otvorený. Pravdepodobnostné rozdelenie na doske musí byť rovnaké, ako keby bol otvorený iba prvý otvor. Ak opakujeme experiment mnohokrát a zhrnieme všetky prípady, keď svetelné kvantum prešlo prvým otvorom, malo by sčernenie dosky zodpovedať tomuto pravdepodobnostnému rozdeleniu. (Podobne by sa mala situácia zopakovať, ak bude otvorený iba druhý otvor.) Celkové sčernenie by teda malo byť presným súčtom sčernení v oboch prípadoch, inými slovami povedané, nemali by existovať nijaké interferenčné pružky. My však vieme, že to nie je pravda, a v pokuse sa tieto pružky nepochybne ukážu. Z toho je zrejmé, že výpoveď o nutnosti prechodu svetelného kvanta jedným alebo druhým otvorom je problematická a vedie k rozporom s pozorovaním. Pojem pravdepodobnostnej funkcie teda neumožňuje časopriestorový opis toho, čo sa deje medzi dvoma pozorovaniami, a každý pokus o takýto opis by viedol k rozporom. To nás privádza k záveru, že pozorovanie hrá v procese rozhodujúcu úlohu a skutočnosť je rôzna vždy podľa toho, či ju pozorujeme, alebo nepozorujeme.<sup>23</sup>

20 BOHR, N.: *Atomic Theory and the Description of Nature*. Cambridge : Cambridge University Press, 1934, s. 16.

21 Porov. HEISENBERG, W.: *Fyzika a filosofie*, s. 25–26. Ku vzťahu empirického pozorovania a východiskovej teórie porov. BINDER, V.: Empirické pozorovanie vo vede a jeho teoretická podmienenosť. In: NEMEC, R. (ed.): *Filozofické reflexie modálneho myslenia, slobody a teoretickej podmienenosti pozorovania*. Trnava : Dobrá kniha, 2013, s. 24–45.

22 Porov. FEYNMAN, R. P., LEIGHTON, R. B., SANDS, M.: *Feynmanove prednášky z fyziky V*. Bratislava : Alfa, 1990, s. 13–22.

23 Porov. HEISENBERG, W.: *Fyzika a filosofie*, s. 26–27.



Teoretický výklad experimentu teda začíname fázou, v ktorej musíme opísať usporiadanie pokusu, eventuálne spolu s prvým pozorovaním, v pojmoch klasickej fyziky. V ďalšej fáze preložíme tento opis do pravdepodobnostnej funkcie, ktorá vyhovuje zákonom kvantovej teórie a jej zmena v priebehu času sa dá vypočítať z počiatočných podmienok. V pravdepodobnostnej funkcii sa takpovediac spájajú objektívne a subjektívne prvky. Obsahuje totiž výpovede o pravdepodobnostiach (resp. tendenciách k dejom) a tieto výpovede sú úplne objektívne, nezávislé od akéhokoľvek pozorovateľa. Okrem toho však obsahuje aj výpovede o našej znalosti systému, ktoré musia byť prirodzene subjektívne, môžu teda byť pre rôznych pozorovateľov rôzne. V osobitne priaznivých prípadoch môže byť subjektívny prvok v pravdepodobnostnej funkcii vzhľadom na objektívny prvok úplne zanedbateľný a vtedy hovoríme o tzv. „čistých stavoch“.<sup>24</sup>

Teraz, keď pristúpime ku vlastnému pozorovaniu, ktorého výsledky by bolo možné predpovedať z teórie, je dôležité, aby nám bolo jasné, že predmet musel byť pred pozorovaním alebo aspoň v okamihu pozorovania vo vzájomnom pôsobení s ostatnými časťami sveta, napr. s experimentálnym zariadením, meracími prístrojmi a podobne.<sup>25</sup> V každom experimente interaguje sústava, pre ktorú je kvantum prenesenej energie podstatné, s prístrojmi opísanými jazykom klasickej fyziky. Pri klasickej opise prístrojov je však kvantum energie na tejto úrovni nepodstatné a každú časť interagujúcej sústavy opisujeme iným jazykom. V tejto situácii Bohr trval na tom, aby celá sústava, skladajúca sa z mikrosústavy a z prístroja, bola chápaná ako jediný nedeliteľný celok.<sup>26</sup>

Pohybové rovnice pre pravdepodobnostnú funkciu musia počítať s vplyvom, ktorý má na systém vzájomné pôsobenie s týmito vonkajšími faktormi. Tento vplyv prináša nový prvok neurčitosti, pretože meracie zariadenie musí byť opísané v pojmoch klasickej fyziky. Toto zariadenie však okrem toho súvisí aj s ostatným svetom a preto v skutočnosti obsahuje neistoty mikroskopickej štruktúry celého sveta. Heisenberg navrhuje nazývať tieto neistoty „objektívnymi“, ak sú jednoducho dôsledkom toho, že opisujeme pokus v pojmoch klasickej fyziky v jednotlivostiach nezávislých od pozorovateľa. Druhú skupinu možno zase nazývať „subjektívnymi“ neistotami, keďže odrážajú našu neúplnú znalosť sveta.<sup>27</sup>

Pre von Neumanna je vedomie pozorovateľa pri meraní nevyhnutné, aj keď nie je celkom jasné, čo treba zahrnúť do pojmu „pozorovateľ“. Von Neumannova teória nepriamych meraní hovorí, že výsledky nezávisia od toho, kde presne vedieme hranicu medzi mikrosústavou a pozorovateľom. Táto otázka sa vyskytuje aj v Bohrových a v Heisenbergových prácach o interpretácii kvantovej

24 Porov. HEISENBERG, W.: *Fyzika a filosofie*, s. 27–28.

25 Meracie zariadenie plní svoju funkciu iba vtedy ak je akýmsi mostom medzi dvoma svetmi. Musí byť preto v kontakte nielen s meraným predmetom, ale aj v úzkom dotyku s ostatným svetom, musí teda existovať fyzikálne vzájomné pôsobenie medzi ním a pozorovateľom. Keby bolo meracie zariadenie izolované od ostatného sveta, neplnilo by svoj účel a nemohlo by sa opisovať v pojmoch klasickej fyziky.

26 Porov. PIŠŮT, J., GOMOLČÁK, L., ČERNÝ, V.: *Úvod do kvantovej mechaniky*, s. 512.

27 Porov. HEISENBERG, W.: *Fyzika a filosofie*, s. 28.

mechaniky. Pri zložitejších procesoch totiž nie je jasné, ktoré časti aparatúry majú byť opisované kvantovo-mechanicky a ktoré už klasicky. Von Neumannov pozorovateľ je subjektivistickou analógiou Bohrovho klasicky opísaného meracieho prístroja. Ukazuje sa, že hranicu medzi mikrosústavou opísanou kvantovou mechanikou a vonkajším svetom opísaným klasicky môžeme síce takmer ľubovoľne posúvať, ale nemôžeme ju odstrániť.<sup>28</sup> Klasickou ukážkou tohto problému je paradox Schrödingerovej mačky.<sup>29</sup>

Keďže pri meraní nastáva vzájomné pôsobenie medzi mikro- a makroštruktúrami, obsahuje pravdepodobnostná funkcia objektívny prvok možnosti alebo tendencie a subjektívny prvok neúplnej znalosti dokonca aj vtedy, ak ide o tzv. čisté stavy. Práve z tohto dôvodu nie je vo všeobecnosti možné s istotou predpovedať výsledok pozorovania. Predpovedať možno iba pravdepodobnosť určitého výsledku pozorovania a je možné túto výpoveď o pravdepodobnosti overiť, keď pokus veľakrát zopakujeme. Na rozdiel od matematickej schémy newtonovskej mechaniky, pravdepodobnostná funkcia neopisuje určitý dej, ale súhrn možných dejov, aspoň pokiaľ ide o pozorovací proces. Pozorovanie samotné mení pravdepodobnostnú funkciu nespojito, pretože vyberá zo všetkých možných procesov taký, ktorý sa skutočne vyskytol. Pretože pozorovanie zmenilo našu znalosť systému nespojito, zmenilo sa nespojito i jej matematické vyjadrenie a hovoríme o „kvantovom skoku“. Prechod od možného k faktickému sa teda uskutočňuje v priebehu pozorovacieho aktu. Pri opise dejov na úrovni atómových procesov musíme vychádzať z faktu, že výraz „deje sa“ možno vzťahovať iba na pozorovanie, a nie na situáciu medzi dvoma pozorovaniami (ide pritom o fyzikálny, a nie psychologický pojem pozorovania). Dá sa teda povedať, že prechod od možného k faktickému nastáva, len čo príde ku vzájomnému pôsobeniu predmetu s meracím zariadením (t. j. s ostatným svetom). Prechod nesúvisí s registráciou výsledku pozorovania vo vedomí pozorovateľa. Nespojitá zmena pravdepodobnostnej funkcie však nastáva aktom registrácie, pretože tu ide o nespojitú zmenu našej znalosti v okamihu registrácie, ktorú zobrazuje nespojitá zmena pravdepodobnostnej funkcie.<sup>30</sup>

28 Posúvanie hranice medzi mikrosústavou opísanou kvantovo-mechanicky a meracím prístrojom opísaným klasickými pojmami sa niekedy nazýva fyzikálnym paralelizmom a o samotnej hranici sa občas hovorí ako o Heisenbergovom reze.

29 V experimente so Schrödingerovou mačkou použijeme zdroj fotónov a polopriepustné zrkadlo, ktoré kvantový stav dopadajúcich fotónov zmení na superpozíciu dvoch stavov – jeden zodpovedajúci odrazenému fotónu a jeden fotónu prechádzajúcemu zrkadlom. Na dráhe prechádzajúceho fotónu je detekčné zariadenie, ktoré registruje dopad fotónu tým, že aktivuje kohútik pištole, tá vystrelí a zabije mačku. Mačku môžeme v tomto prípade pokladať za konečné registračné zariadenie meracieho procesu. (Ochrancovia zvierat odpustia.) Táto meracia procedúra spojí udalosť z kvantovej úrovne (dopad fotónu) s makroskopickým svetom, kde môže byť mačka v jednom z dvoch stavov (živá, alebo mŕtva). Jadro vecí spočíva v tom, že fotón je v superpozícii stavov zodpovedajúcich jednej i druhej dráhe, ale aj detektor (ak ho pokladáme za kvantovo-mechanický systém) je v superpozícii stavov „pištoľ, ktorá vystrelila“ a „pištoľ, ktorá nevystrelila“ a nakoniec je teda i mačka v superpozícii stavov „živá“ a „mŕtva“. Paradox Schrödingerovej mačky dobre poukazuje na fakt, že priame a nekritické použitie kvantovej mechaniky v súvislosti s makroskopickými telesami vedie ku prekvapujúcim a dokonca paradoxným záverom.

30 Porov. HEISENBERG, W.: *Fyzika a filosofie*, s. 28–29.

## Kľúčové črty kodanskej interpretácie

Do akej miery môžeme dospieť k objektívnemu poznaniu sveta, predovšetkým atómových procesov? Klasická fyzika vychádzala z predpokladu, že môžeme opísať svet, alebo aspoň jeho časti, bez toho, že by sme hovorili o nás samotných, čo je skutočne možné v širokom rozsahu. Vieme napríklad, že Mesiac existuje nezávisle od toho, či sa niekto práve pozerá, alebo nepozerá na nočnú oblohu. Dá sa povedať, že práve klasická fyzika bola idealizáciou sveta, pri ktorej sme hovorili o svete alebo jeho častiach bez toho, že by sme pritom brali do úvahy nás samých. Jej úspech viedol ku všeobecnému ideálu objektívneho opisu sveta a objektivita sa oddávna pokladala za najvyššie kritérium hodnoty vedeckého poznania. Zodpovedá kodanský výklad kvantovej teórie ešte tomuto ideálu? Možno povedať, že kvantová teória neobsahuje nijaké vlastné subjektívne črty, ani nezavádza vedomie fyzika ako časť atómového procesu. Začína však rozdelením sveta na predmet a ostatný svet, pričom tento ostatný svet musíme vždy opisovať klasickými pojmami.<sup>31</sup> Treba povedať, že napríklad Bohr pokladal v mnohých ohľadoch za správnejšie nepovažovať rozdelenie na predmet a ostatný svet za ľubovoľné. Bohrov vyzretý pohľad na interpretáciu kvantovej teórie, t. j. pohľad po uverejnení EPR príspevku,<sup>32</sup> možno zhrnúť v nasledujúcich bodoch:<sup>33</sup>

1. Interpretácia fyzikálnej teórie sa musí spoliehať na experimentálne overenie.
2. Experimentálne overenie predpokladá určitú predvedeckú metódu opisu, ktorá zakladá normu pre experimentálny merací aparát, v dôsledku toho sa pokladá za vedeckú skúsenosť.
3. Predvedecká metóda porozumenia nášho vonkajšieho prostredia je úpravou v zmysle skúsenosti oddelenia, orientácie, identifikácie a reidentifikácie fyzikálnych objektov v čase.
4. Táto predvedecká skúsenosť je uchopená v termínoch bežných kategórií, ako napr. poloha a zmena polohy nejakej veci, doba trvania a zmena tejto

31 Toto rozdelenie je v istom zmysle a do istej miery ľubovoľné a je historicky priamym dôsledkom prírodovedeckej metódy rozvíjanej v minulých storočiach. Možno povedať, že používanie klasických pojmov je dôsledkom všeobecného duchovného vývoja ľudstva. V skutočnosti by sa však nemal prejavovať nijaký rozdiel v konečnom výsledku, ak by sme napr. chceli ku predmetu pripočítať aj časť nášho meracieho zariadenia a na tento omnoho komplikovanejší predmet by sme potom aplikovali zákony kvantovej mechaniky. Dá sa ukázať, že takáto zmena teoretického základu by nezmenila predpovede výsledku daného experimentu. Matematicky z toho vyplýva, že zákony kvantovej teórie sú takmer identické s klasickými zákonmi pre javy, pre ktoré sme si pokladali Planckovu konštantu za veľmi malú (v danom prípade zanedbateľnú) veličinu.

32 V máji roku 1935 publikoval Albert Einstein spolu s dvoma postdoktorandskými spolupracovníkmi na Inštitúte pre pokročilé štúdiá, Borisom Podolským a Nathanom Rosenom, príspevok označovaný ako EPR argument (EPR = Einstein – Podolsky – Rosen), v ktorom sa pokúsili ukázať, že kvantová mechanika neuspela v úsilí poskytnúť úplný opis fyzikálnej reality. Porov. EINSTEIN, A., PODOLSKY, B., ROSEN, N.: Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? In: *Physical Review*, roč. 47, 1935, s. 777–780.

33 Porov. Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics. In: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/entries/qm-copenhagen/> (23. 11. 2004).

doby, vzťah medzi príčinou a následkom, t. j. v termínoch a princípoch, ktoré sú v súčasnosti časťou bežného jazyka.

5. Tieto obvyklé kategórie sú podmienkami pre objektívne poznanie a každý opis prírody, ak má byť objektívny, musí použiť tieto koncepty.<sup>34</sup>
6. Koncepty klasickej fyziky sú iba exaktnými špecifikáciami spomenutých kategórií.
7. Klasické koncepty (a nie klasická fyzika samotná) sú nevyhnutné pre akýkoľvek opis fyzikálnej skúsenosti, s cieľom porozumieť tomu, čo robíme, a pre schopnosť prinášať informácie o získaných výsledkoch ostatným ľuďom, najmä pri opise kvantových javov – tak ako sa prejavujú v experimentoch.
8. Planckovo empirické zistenie kvantovania účinku si vyžaduje revíziu základov pre používanie klasických konceptov, pretože nie sú aplikovateľné súčasne. Ich použitie je dobre vymedzené iba vtedy, ak sa vzťahujú na experimentálne interakcie, v ktorých možno kvantovanie účinku pokladať za zanedbateľné.
9. V experimentálnych prípadoch, v ktorých hrá kvantovanie významnú úlohu, aplikovanie klasických konceptov neprináša opis nezávislých vlastností objektu; tak ako je nejasne vymedzené pripisovanie kinematických alebo dynamických vlastností objektu existujúcemu nezávisle od špecifických experimentálnych interakcií.
10. Kvantovanie účinku si vyžaduje obmedzenie v používaní klasických konceptov tak, že tieto koncepty sú aplikované iba na javy (fenomény), ktoré Bohr chápe ako makroskopické prejavy merania na objekte, t. j. nekontrolovateľná interakcia medzi objektom a meracou aparátúrou.
11. Kvantovo-mechanický opis objektu sa odlišuje od klasického opisu meracej aparátúry a vyžaduje si pri opise oddelenie objektov a meracích zariadení, avšak línia tohto oddelenia makroskopického náradia a mikroskopických objektov nie je jedna. V niektorých prácach<sup>35</sup> bolo detailne vysvetlené Bohrovo upozornenie na to, že časť meracieho zariadenia sa môže niekedy správať ako objekt kvantovo-mechanického opisu.<sup>36</sup>
12. Kvantovo-mechanický formalizmus neposkytuje fyzikom „ilustratívne“ znázornenie, pretože funkcia  $\psi$  nereprezentuje tak, ako dúfal Schrödinger, nový druh reality. Namiesto toho navrhol Born interpretáciu, v ktorej štvorec absolútnej hodnoty funkcie  $\psi$  vyjadruje pravdepodobnosť amplitúdy pre výsledky merania. V dôsledku toho, že si vlnová funkcia vyžaduje imaginárnu veličinu, môže mať táto rovnica iba symbolický charakter, ale jej formalizmus môže byť použitý na predpovedanie výsledkov merania,

34 Na dôležitosť a komplementárny charakter predvedeckého poznania a vedeckého výskumu dobre poukazuje dielo ROJKA, L.: *The Eternity of God*. Trnava : Dobrá kniha, 2005, s. 30–36.

35 Porov. HOWARD, D.: What Makes a Classical Concept Classical? Toward a Reconstruction of Niels Bohr's Philosophy of Physics. In: FAYE, J., FOLSE, H. (ed.): *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*. In: *Boston Studies in the Philosophy of Science*, roč. 158, 1994, s. 201–229.

36 Porov. BOHR, N.: *Essays 1958 – 1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*, s. 4.

čo zakladajú podmienky, v ktorých sa koncepty ako poloha, moment, čas a energia stávajú aplikovateľnými na fenomény.<sup>37</sup>

13. Pripisovanie týchto klasických konceptov skúmaným fenoménom počíta s experimentálnym kontextom javu tak, že celá štruktúra spolu s presne vymedzenými podmienkami pre aplikáciu kinematických a dynamických konceptov zabezpečuje pole pôsobnosti kvantovej fyziky.
14. Takéto javy sú komplementárne v tom zmysle, že prejavy závisia od vzájomne vylučných meraní, ale informácie získané prostredníctvom rôznych experimentov dostatočne vyčerpávajú všetko možné objektívne poznanie objektu.

## Filozofický dosah kodanskej interpretácie

Staršie generácie filozofov často označujú kodanskú interpretáciu ako subjektivistickú, alebo pozitivistickú, práve pre dôraz na celistvosť a nedeliteľnosť javu. Pri dôkladnom štúdiu Bohrových prác však možno s týmto názorom minimálne polemizovať.<sup>38</sup> V pozitivizme je totiž základom elementárny jav, ktorý je vnemom pozorovateľa, Bohrov jav je však objektívnym výsledkom interakcie prístroja a mikrosústavy. Z pozitivistického hľadiska je Bohrov „jav“ niečím veľmi komplikovaným, a vôbec nie elementárnym. Vidno to aj z nevyhnutnosti použiť klasický jazyk pri opise prístroja a z istej nevyhnutnosti pojmovej štruktúry pre Bohrovu koncepciu javu.<sup>39</sup> Ako už mnohí upozornili, v Bohrovej práci možno nájsť typicky realistické i antirealistické prvky a určitú podobnosť s Kantom resp. s neokantovstvom.<sup>40</sup>

Bohr nepokladal atóm za heuristickú alebo logickú konštrukciu, ale za istý druh reality. Neveril však v pravdivosť kvantovo-mechanického forma-

37 Abstraktný character vlnovej funkcie, predovšetkým pri jej aplikácii na začiatok existencie versmíru, má dôležité filozofické implikácie. Porov. ROJKA, L.: *Stvorenie vesmíru z ničoho*. Trnava : Dobrá kniha, 2012, s. 61–65.

38 Podľa Bohrových životopiscov mali na jeho filozofické myslenie dominantný vplyv dvaja filozofi. Prvým z nich bol dánsky filozof Høffding, s ktorým sa Bohr poznal od svojich chlapčenských čias a u ktorého absolvoval základný kurz filozofie. Až do Høffdingovej smrti v roku 1931 si ho Bohr veľmi vážil a jeho články ku problematike komplemetarity pokladal za to najlepšie, čo bolo z filozofického pohľadu na túto tému napísané. Druhým filozofom, ktorý mal na Bohra významný vplyv, bol veľký dánsky filozof Kierkegaard. Bohr ako študent čítal jeho knihu *Štádiá na ceste životom* (1845) a hoci s Kierkegaardom v mnohom nesúhlasil, označil knihu za jednu z najlepších, aké kedy čítal. Zvlášť ho fascinoval Kierkegaardov jazyk a jeho spôsob vyjadrovania. Okrem toho sa Bohr s rešpektom vyjadroval napr. aj na adresu Williama Jamesa. Porov. PAIS, A.: *Niels Bohr's Times : In Physics, Philosophy, and Polity*. Oxford : Clarendon Press, 1993, s. 423–424.

39 Porov. PIŠŮT, J., GOMOLČÁK, L., ČERNÝ, V.: *Úvod do kvantovej mechaniky*, s. 513.

40 Porov. CHEVALLEY, C.: Niels Bohr's Words and the Atlantis of Kantianism. In: FAYE, J., FOLSE, H. (ed.): *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*. In: *Boston Studies in the Philosophy of Science*, roč. 158, 1994, s. 33–55. K základom realizmu a antirealizmu porov. JENÍK, L.: *Východiská a konzekvencie konštruktivizmu Nelsona Goodmana*. In: *Studia Aloisiana*, roč. 2, 2011, č. 4, s. 41–59.

lizmu v tom zmysle, že by nám poskytoval doslovné znázornenie, skôr iba symbolickú predstavu kvantového sveta. Bohra možno jednoducho označiť za realistu odporujúceho realistickej teórii.<sup>41</sup> Je to preto, že komplexné veličiny v kvantovej fyzike (kde komutačné pravidlo pre kánonicky časované premenné  $p$  a  $q$  zavádza do formalizmu Planckovu konštantu prostredníctvom vzťahu  $pq - qp = ih/2\pi$ ) jej nedovoľujú ilustrujúce znázornenie sveta. Podobne podľa Bohra ani teória relativity neprináša úplné znázornenie, pretože rýchlosť svetla je predstavená spolu s faktorom  $\gamma$  v definícii štvrtej súradnice štvordimenzi- onálnej konfigurácie.<sup>42</sup> Tieto teórie môžu byť teda použité iba symbolicky na predpovedanie pozorovaní v dobre definovaných podmienkach. V takomto vý- zname (s ohľadom na teórie) bol Bohr antirealistom alebo inštrumentalistom.

Vo všeobecnosti vnímal Bohr požiadavku komplementarity v kvantovej mechanike na rovnakej úrovni (logicky), ako je požiadavka relativity v teórii relativity.<sup>43</sup> Veril, že obe teórie sú výsledkom nových aspektov pozorovania problémov, vzhľadom na fakt, že pozorovanie vo fyzike je závislé od kontex- tu.<sup>44</sup> Táto situácia je následkom existencie najvyššej možnej rýchlosti šírenia akéhokoľvek účinku (rýchlosť svetla vo vákuu) v oblasti teórie relativity a existencie najmenšieho možného kvanta účinku (Planckova konštanta) v oblasti kvantovej fyziky. Vďaka týmto univerzálnym obmedzeniam v teórii relativity nie je možné urobiť jednoznačné oddelenie času a priestoru bez odkazu na pozorovateľa a v kvantovej mechanike nie je možné urobiť ostré rozdelenie medzi správaním objektu a jeho interakciou s prostriedkami pozorovania.<sup>45</sup>

Kodanský výklad kvantovej teórie začína paradoxom, podľa ktorého musíme naše pokusy opisovať v pojmoch klasickej fyziky aj napriek poznaniu, že tieto pojmy sa nehodia na prírodu úplne presne. Napätie medzi týmito dvoma východiskami je príčinou statického charakteru kvantovej teórie. Navrhovalo sa preto, aby sme sa úplne vzdali klasických pojmov a radikálne ich zmenili pre opis experimentov, čo by mohlo viesť k nestatickému a úplne objektívnemu opisu prírody. Podľa Heisenberga však tento návrh spočíva v nedorozumení, pretože pojmy klasickej fyziky sú iba zjemnením pojmov každodenného živo- ta a tvoria podstatnú časť reči, ktorá je predpokladom celej prírodovedy. Na opis našich experimentov naozaj používame klasické pojmy a používať ich musíme, pretože inak by sme si nemohli rozumieť. Úlohou kvantovej teórie je práve teoretický výklad experimentov na tomto základe. V tomto bode nám musí byť jasné, že – ako to formuloval von Weizsäcker – „príroda bola skôr

41 Porov. FOLSE, H.: Niels Bohr, Complementarity and Realism. In: FINE, A., MACHAMER, P. (ed.): *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*. Vol. I. East Lansing : PSA, 1986, s. 96–104.

42 Porov. BOHR, N.: Causality and Complementarity. In: FAYE, J., FOLSE, H. (ed.): *The Philosophical Writings of Niels Bohr*. Vol. IV. Woodbridge : Ox Bow Press, 1998, s. 86.

43 Treba si uvedomiť, že Bohrove rané pokusy o vytvorenie teórie komplementarity boli špecificky zamerané na vlnovo-časticovú povahu objektov mikrosvetu.

44 Porov. Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics. In: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/entries/qm-copenhagen/> (23. 11. 2004).

45 Porov. BOHR, N.: Causality and Complementarity. In: FAYE, J., FOLSE, H. (ed.): *The Philosophical Writings of Niels Bohr*. Vol. IV, s. 86.

ako človek, ale človek bol skôr ako prírodoveda". Prvá časť výroku dáva za pravdu klasickej fyzike s jej ideálom úplnej objektívnosti, druhá časť nám zas vysvetľuje, prečo nemôžeme uniknúť nevyhnutnosti používať klasické pojmy. Našou snahou je porozumieť určitému javu, teda poznať to, ako vyplýva zo všeobecných prírodných zákonov. Časť hmoty alebo žiarenia, ktorá sa na tomto jave zúčastňuje, je preto prirodzeným predmetom teoretického rozboru a mala by byť v tomto zmysle oddelená od nástrojov, ktoré na štúdium javov používame. Tak opäť vystúpi do popredia subjektívny prvok v opise atómového procesu, pretože používané zariadenie skonštruoval pozorovateľ (prípadne jeho kolegovia). To, čo pozorujeme, nie je teda samotná príroda, ale príroda vystavená nášmu spôsobu kladenia otázok. Vedecká práca vo fyzike spočíva v tom, že kladieme otázky o prírode v reči, ktorá je nám vlastná, a usilujeme sa získať odpoveď pomocou experimentov, ktoré realizujeme dostupnými prostriedkami. Kvantová teória, ako to vyjadril Bohr, nám pripomína, že pri hľadaní harmónie v živote nikdy nesmieme zabudnúť, že v hre života sme súčasne divákmi aj hercami.<sup>46</sup>

Pri zdôrazňovaní nevyhnutnosti klasických konceptov na opis kvantových javov bol Bohr ovplyvnený novokantovstvom, pričom klasické koncepty sú iba vysvetleniami spoločných konceptov, ktoré sú už výsledkami nášho adaptovania sa svetu. Tieto koncepty a podmienky ich aplikácie určujú podmienky pre objektívne poznanie. Objav kvantovania účinku však ukázal, že tieto koncepty nemožno aplikovať na kvantové objekty tak, ako sa to robilo v klasickej fyzike. Takže kinematické alebo dynamické vlastnosti (reprezentované časovými premennými) možno zmysluplne pripisovať objektom iba vo vzťahu ku konkrétnym experimentálnym výsledkom, a nie bez ohľadu na to, či ich skutočne pozorujeme, alebo nie, ako to bolo v klasickej fyzike. Inak povedané, Bohr popieral možnosť, že by klasické koncepty pripisovali fyzikálnemu svetu vlastnosti jestvujúce poza javy, teda na rozdiel od klasickej fyziky nepredpokladal, že fyzikálny svet má tieto vlastnosti sám osebe ako základné vlastnosti, nezávislé od ich aktuálneho pozorovania.<sup>47</sup>

Bohrov pohľad možno v modernom filozofickom žargóne vyjadriť tak, že skutočné podmienky súdov pripisovaných kinematickým alebo dynamickým hodnotám v atómových objektoch sú závislé od zúčastneného zariadenia takým spôsobom, že tieto podmienky musia zahŕňať odkazy na experimentálne usporiadanie a aktuálne výsledky experimentu. Bohr akceptoval Bornovu štatistickú interpretáciu, pretože veril, že funkcia  $\psi$  má iba symbolický charakter a nereprezentuje niečo reálne. V skutočnosti Bohr, Heisenberg a mnohí ďalší fyzici pokladali kodanskú interpretáciu za jedinú racionálnu interpretáciu

<sup>46</sup> Porov. HEISENBERG, W.: *Fyzika a filosofie*, s. 30–32.

<sup>47</sup> Bohr veril v „reálnosť“ atómov, stále však zostáva v súčasnej literatúre (v relevantnej problematike) diskutovaný druh spomínanej reálnosti. Porov. FOLSE, H.: *The Philosophy of Niels Bohr: The Framework of Complementarity*. Amsterdam : North Holland, 1985; FAYE, J.: *Niels Bohr: His Heritage and Legacy: An Anti-Realist View of Quantum Mechanics*. Dordrecht : Kluwert Academic, 1991; FAYE, J., FOLSE, H. (ed.): *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*. In: *Boston Studies in the Philosophy of Science*, roč. 158, 1994.

kvantového sveta. Domnievali sa, že nám dáva porozumenie atómových javov, ktoré je v zhode s akýmkoľvek fyzikálnym opisom a s možným objektívnym poznaním sveta.<sup>48</sup>

Kodanská interpretácia bola prvým komplexným a systematickým pokusom o odpoveď na hlbšie otázky vynárajúce sa z kvantovej teórie. S jej jednotlivými formuláciami možno polemizovať (najmä vtedy, ak sú vytrhnuté z kontextu), ale celkový obraz prírody a jej základných štruktúr, ktorý utvoril Bohr a jeho nasledovníci, je hlboko premyslený.<sup>49</sup>

## Použitá literatúra

- BINDER, V.: Empirické pozorovanie vo vede a jeho teoretická podmienenosť. In: NEMEC, R. (ed.): *Filozofické reflexie modálneho myslenia, slobody a teoretickej podmienenosti pozorovania*. Trnava : Dobrá kniha, 2013, s. 24–45.
- BOHR, N.: *Atomic Theory and the Description of Nature*. Cambridge : Cambridge University Press, 1934.
- BOHR, N.: Causality and Complementarity. In: FOLSE, H., FAYE, J. (ed.): *The Philosophical Writings of Niels Bohr*. Vol. IV. Woodbridge : Ox Bow Press, 1998.
- BOHR, N.: Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics. In: *Albert Einstein : Philosopher-Scientist*. Ed. P. A. Schilpp. Evanston (IL) : Library of Living Philosophers, 1949.
- BOHR, N.: *Essays 1958 – 1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*. New York; London : John Wiley & Sons, 1963.
- BOHR, N.: On the Constitution of Atoms and Molecules. In: *Philosophical Magazine*, roč. 26, 1913, s. 1–25, 476–502, 857–875.
- FEYNMAN, R. P., LEIGHTON, R. B., SANDS, M.: Feynmanove prednášky z fyziky V. Bratislava : Alfa, 1990.
- FOLSE, H.: Niels Bohr, Complementarity and Realism. In: FINE, A., MACHAMER, P. (ed.): *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*. Vol. I. East Lansing : PSA, 1986, s. 96–104.
- HEISENBERG, W.: *Fyzika a filosofie*. Praha : Aurora, 2000.
- HOWARD, D.: What Makes a Classical Concept Classical? Toward a Reconstruction of Niels Bohr's Philosophy of Physics. In: FAYE, J., FOLSE, H. (ed.): *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*. In: *Boston Studies in the Philosophy of Science*, roč. 158, 1994, s. 201–229.
- CHEVALLEY, C.: Niels Bohr's Words and the Atlantis of Kantianism. In: FAYE, J., FOLSE, H. (ed.): *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*. In: *Boston Studies in the Philosophy of Science*, roč. 158, 1994, s. 33–55.

48 Porov. Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics. In: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/entries/qm-copenhagen/> (23. 11. 2004).

49 Porov. PIŠŮT, J., GOMOLČÁK, L., ČERNÝ, V.: *Úvod do kvantovej mechaniky*, s. 511.



- JENÍK, L.: Východiská a konzekvencie konštruktivizmu Nelsona Goodmana. In: *Studia Aloisiana*, roč. 2, 2011, č. 4, s. 41–59.
- PAIS, A.: *Niels Bohr's Times : In Physics, Philosophy, and Polity*. Oxford : Clarendon Press, 1993.
- PIŠŮT, J., GOMOLČÁK, L., ČERNÝ, V.: *Úvod do kvantovej mechaniky*. Bratislava : Alfa, 1983.
- ROJKA, L.: *Stvorenie vesmíru z ničoho*. Trnava : Dobrá kniha, 2012.
- ROJKA, L.: *The Eternity of God*. Trnava : Dobrá kniha, 2005.
- SPIŠIAKOVÁ, M.: *Zlo v Božom stvorení : Riešenie problému zla v analytickej filozofii náboženstva*. Warszawa : Rhetos, 2012.
- TORRETI, R.: *The Philosophy of Physics*. Cambridge : Cambridge University Press, 1999.
- Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics. In: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/entries/qm-copenhagen/> (23. 11. 2004).

doc. PhDr. Miroslav Karaba, PhD.  
Katedra filozofie  
Teologická fakulta Trnavskej univerzity  
Kostolná 1, P. O. Box 173  
814 99 Bratislava  
e-mail: miroslav.karaba@truni.sk