

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Juraj Šebesta; Rudolf Zajac

Storočnica Nielsa Bohra. III. Princíp korešpondencie a princíp komplementarity

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 30 (1985), No. 5, 275--287

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139208>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1985

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Usnesení společného zasedání sjezdů JČSMF a JSMF

Společné zasedání sjezdů JČSMF a JSMF konstatuje, že oba sjezdy jednomyslně přijaly programy činnosti pro budoucí období, v nichž vyjádřily plné vědomí odpovědnosti za další rozvoj matematiky a fyziky v ČSSR. JČSMF a JSMF se v plné míře hlásí k iniciativnímu plnění úkolů vyplývajících ze závěrů XVI. sjezdu KSČ.

Obě vědecké společnosti i v příštím období vyvinou maximální úsilí, aby pomohly zajistit další úspěšný rozvoj matematiky a fyziky, vyučování těchto vědních oborů na všech stupních a typech škol, péči o talenty a práci s mládeží.

Chťají tak přispět k urychlení vědeckotechnického rozvoje a tím i k všestrannému rozvoji naší socialistické společnosti.

Storočnica Nielsa Bohra

III. Princíp korešpondencie a princíp komplementarity

Rudolf Zajac a Juraj Šebesta, Bratislava

V tejto časti, venovanej činnosti Nielsa Bohra po roku 1925, sa zameriame na tri základné problémy: interpretáciu kvantovej mechaniky a s tým súvisiace otázky fyzikálnej reality, teóriu jadra a napokon uvedieme niekoľko poznámok o Bohrovi ako organizátorovi vedeckého života a verejnom činiteľovi.

Kvantová mechanika vznikla ako výsledok prác W. Heisenberga, M. Bornu, P. Jordana, E. Schrödingera a P. A. M. Diraca, uverejnených v rozpätí rokov 1925—26. Na rozdiel od predchádzajúcich teórií bol najprv vybudovaný formálno-logický aparát (platí to rovnako o Heisenbergovej a Bornovej maticovej podobe, ako aj o Schrödingrovej vlnovej), pričom nebolo jasné, ako tento aparát fyzikálne interpretovať.

Práve v tomto období hľadania významu kvantovoteoretického aparátu zohral významnú úlohu Niels Bohr. Vyvrcholením jeho niekoľkoročnej práce bola prednáška *Kvantový postulát a najnovší vývoj atómovej teórie* na Medzinárodnom fyzikálnom kongrese, ktorý sa v septembri 1927 konal v talianskom meste Como na počesť A. Voltu. Vzhľadom na závažnosť problému mal Bohr k dispozícii pre svoju prednášku štvornásobný čas a diskusia k nemu trvala po celý zvyšok kongresu. V tejto prednáške Bohr po prvý raz rozvinul koncepciu komplementarity.

Genéza princípu komplementarity

Celé obdobie vzniku kvantovej mechaniky sa nieslo v znamení rozporov medzi klasickými pojmami a možnosťami ich použitia pri opise atomárnych javov. Už u Plancka

sa stretávame so spojením klasického Hertzovho oscilátora (ktorý je v rovnováhe s dutinovým žiarením) a kvantovaných hodnôt jeho energie, ktoré tento oscilátor môže nadobúdať. Rovnako v Bohrovej teórii atómu z roku 1913 sa pojmy a metódy klasickej fyziky kombinovali so zjavne neklasickými prvkami. Okrem toho sa pri budovaní aparátu kvantovej mechaniky používala analógia s klasickou fyzikou, reprezentovaná princípom korešpondencie, o ktorom sme už hovorili v predchádzajúcich častiach.

Z pôvodne čisto technického nástroja, ktorý umožňoval vypočítať energie elektrónu v atóme vodíka, sa princíp korešpondencie stal postupne hlavným metodologickým nástrojom na zavádzanie kvantovomechanických pojmov pomocou pojmov klasickej mechaniky, lebo umožňoval „chápať kvantovú teóriu ako racionálne zovšeobecnenie predstáv, tvoriacich základ bežnej teórie žiarenia“ [1, 311]. Úspechy, ktoré sa začiatkom dvadsiatych rokov dosiahli pomocou aplikácie princípu korešpondencie, utvrdili Bohra v názore, že „každý opis prírody musí byť založený na využití predstáv zavedených a definovaných už v klasickej teórii“ [1, 482].

Ďalší vývoj však ukázal, že s klasickými modelmi a pojmami, hlavne mechanickými a elektromagnetickými, treba narábať veľmi opatrne. Máme na mysli hlavne Heisenbergovu prácu z roku 1925. Napriek tomu, že sa tu silne využíval princíp korešpondencie, úspech sa dosiahol iba vďaka tomu, že sa Heisenberg zriekol klasickej predstavy o pohybe elektrónu v atóme po konkrétnej dráhe a predpokladal iba, že elektrón sa v atóme *nejako* pohybuje. Toto úsilie vyústilo napokon do formulovania princípu neurčitosti a vzťahov neurčitosti pre zložky hybnosti a kánonicky združené súradnice. Ukázala sa teda nutnosť chápať princíp korešpondencie ako vyjadrenie vzťahu medzi klasickou a kvantovou fyzikou, stále abstraktnejšie a všeobecnejšie.

Druhým stimulom, ktorý napokon priviedol Bohra k formulovaniu koncepcie komplementarity, bolo definitívne prijatie dualistickej predstavy nielen o štruktúre látky, ale aj žiarenia. Už sme spomínali, že Bohr dlho nemohol prijať Einsteinovu hypotézu svetelných kvánt. Až po experimentoch Botheho a Geigera priznal, že fotóny treba považovať za fyzikálnu realitu.

Vyvstal tu však problém dualizmu vlna-častica. Ako chápať skutočnosť, že v niektorých pokusoch sa prejavujú vlnové a v iných časticové vlastnosti mikroobjektov? Bohr bol presvedčený, že problém nespočíva v samom objekte, ale v našich spôsoboch opisu, konkrétne v použiteľnosti klasických pojmov a názorných predstáv na opis kvantových javov a objektov. „Zo samej podstaty fyzikálneho pozorovania vyplýva, že všetky výsledky musíme s konečnou platnosťou vyjadrovať pomocou klasických pojmov, bez účinkového kvanta“, napísal Bohr v článku *Kvantum účinku a opis prírody* [2, 57].

Navyše fyzika vždy, keď naráža na nové, nepoznané javy a nepreskúmané objekty, usiluje sa používať známe pojmy, princípy a zákonitosti opisu. Až keď vyjde najavo nevhodnosť a neopodstatnenosť takýchto extrapolácií, hľadajú sa nové prístupy.

Ukázalo sa však, že súvis s klasickou fyzikou je iba jednou stránkou, ktorú bude musieť rodiaca sa teória brať do úvahy. Z analýzy experimentov vyplynulo, že pojmy klasickej fyziky sa nemôžu prenášať na opis mikroobjektov bez zmeny. Prvým výsledkom bolo formulovanie princípu neurčitosti. Zaujímavé je, že táto Heisenbergova

myšlienka sa rovnako ako Bohrov princíp komplementarity zrodila z úporných a dlhotrvajúcich diskusií medzi týmito dvoma veľikánmi svetovej fyziky na začiatku roku 1927.

Vidíme teda, že koncepcia komplementarity bola výsledkom riešenia viacerých problémov, ktoré v podstate môžeme redukovať na otázku miesta a zmyslu klasických pojmov a spôsobov opisu v kvantovej mechanike. Bola tiež vyvrcholením vývoja názorov na možnosti využitia princípu korešpondencie pri zavádzaní pojmov kvantovej mechaniky pomocou klasickeomechanických predstáv a pojmov. Nebudeme podrobne rozvádzať históriu celého tohto prístupu, spomenieme iba jeho základné prvky.

Základná myšlienka komplementárneho prístupu k opisu javov v mikrosвете spočíva v tom, že na opis správania sa mikročastíc treba vždy používať navzájom sa vylučujúce (z hľadiska klasickej mechaniky a jej názorných predstáv!), ale súčasne sa doplňujúce formy. Bohr uvádza tri podoby komplementarity: komplementaritu časopriestorového a energeticko-hybnostného opisu (na niektorých miestach hovorí o komplementarite časopriestorového opisu a zákona zachovania energie), komplementaritu vlnových a časticových vlastností mikroobjektov a napokon (podľa našej mienky viac formálne než obsahovo) komplementaritu Heisenbergovej maticovej a Schrödingerovej vlnovej mechaniky.

Treba konštatovať, že uvedená problematika má viac gnozeologickú a metodologickú než fyzikálnu povahu. Svedčia o tom Bohrove slová: „Komplementárny charakter opisu atómových javov je nevyhnutným dôsledkom protirečenia medzi kvantovým postulátom a oddelením objektu a pozorovacieho prostriedku, ktoré je charakteristické pre samu myšlienku pozorovania.“ [2, 40] Teda ak raz prijmeme existenciu účinkového kvanta, musíme sa zriecť klasickej predstavy o nezávislosti charakteristík objektu od metód, spôsobov a prostriedkov, pomocou ktorých uvedené charakteristiky určujeme. Dôležité, ba až zásadné je, že riešením nie je ani úsilie o odstránenie neurčitosti pri súčasnom určovaní priestorových súradníc a zložiek hybnosti vyšetrovaním množstva energie a hybnosti vymenenej pri meraní, lebo to vedie iba k posúvaniu hranice medzi prístrojom a objektom, nie však k odstráneniu spomínanej závislosti.

Sme tu teda svedkami obmedzenia predpokladanej nezávislosti výsledkov pozorovania od jeho podmienok. „Ak pripustíme určitú interakciu s príslušnými, do sústavy nepatriacimi pozorovacími prostriedkami, aby sa vôbec mohlo realizovať pozorovanie, stáva sa prirodzene nemožným jednoznačné určenie stavu sústavy.“ [2, 31] Podstatné tu je, že energia, ktorú si pri meraní vymieňajú objekt a merací prostriedok je porovnateľná s energiou mikroobjektu, teda proces merania podstatne ovplyvní stav meraného systému. Musíme sa teda zriecť klasickej predstavy, že „skúmaný jav môžeme pozorovať bez toho, aby sme ho nejako ovplyvňovali“ [2, 31]. „Teda v súlade so samou povahou kvantovej teórie musíme pokladať časopriestorový opis a požiadavku príčinnosti, ktorých spojenie bolo charakteristické pre klasické teórie, za komplementárne, ale navzájom sa vylučujúce črty opisu pokusov; tieto črty symbolizujú idealizáciu možnosti pozorovania.“ [2, 31]

V tejto súvislosti Bohr uvádza analógiu s teóriou relativity, ktorá „nás učí, že účelnosť striktného oddelenia priestoru a času spočíva na tom, že bežne sa vyskytujúce rýchlosti

sú malé v porovnaní s rýchlosťou svetla. Z kvantovej teórie sa dozvedáme, že prípustnosť bežného príčinného časopriestorového opisu je plne podmienená malou hodnotou účinkového kvanta v porovnaní s bežnými účinkami, ktoré sa prejavujú v pocitoch.“ [2, 31—32]

Uvedenú analógiu medzi kvantovou mechanikou a teóriou relativity dovidel do dôsledkov až v päťdesiatych rokoch sovietsky teoretik V. A. Fok, ktorý interpretoval princíp komplementarity ako relativnosť výsledkov merania voči meracím prostriedkom (podrobnejšie pozri [3]). V tejto súvislosti môžeme konštatovať, že princíp komplementarity vo Fokovej interpretácii je jedným z prejavov tendencie fyzikálneho poznania k relativizácii (pozri [4, 234—261].)

V ďalšej práci *Kvantum účinku a opis prírody* [2, 56—61] Bohr používa analógiu medzi kvantovou fyzikou a teóriou relativity ako argument na priblíženie a uznanie relativnosti výsledkov merania voči meracím prostriedkom. „Relativite našich poznatkov o pohybe, ktorú si každý z nás osvojil už v detstve na príklade pohybu lode či vozňa, zodpovedajú každodenné pokusy s relativitou údajov, ktoré získavame pri dotyku. ... Uvedme pocity, ktoré prežíva každý pri pokuse orientovať sa v tmavej miestnosti pomocou palice. V prípade, že držíme palicu voľne, pociťujeme ju ako vonkajší predmet, pri pevnom držaní sa pocit cudzieho telesa stráca a dotykový vnem sa lokalizuje bezprostredne v bode, kde sa palica dotýka skúmaného telesa. Asi sotva bude prehnané tvrdenie, že už z psychologických pokusov môžeme urobiť záver, že pojem priestoru a času v podstate nadobúda určitý zmysel iba vďaka tomu, že môžeme zanedbať interakciu pri meraní.“ [2, 60]

Práve zo spomínaných dôvodov sa Bohr pokúsil rozšíriť platnosť princípu komplementarity aj na mimofyzikálne oblasti. Argumentom v prospech takej extrapolácie je konštatovanie, že „na objektívny opis a harmonické zosúladenie experimentálnych faktov treba skoro vo všetkých oblastiach poznania brať do úvahy podmienky a okolnosti, za ktorých sa tieto údaje získali“ [2, 517]. Bohr našiel pole pôsobnosti pre koncepciu komplementarity predovšetkým v psychológii. Vzťahy komplementarity v tejto oblasti „súvisia s jednotnou povahou vedomia a obdivuhodne pripomínajú fyzikálne dôsledky existencie kvanta účinku“ [2, 60]. V roku 1930 v článku *Teória atómu a princípy opisu prírody* [2, 62—71] konštatoval: „Zatiaľ čo teória relativity nám pripomenula subjektívny charakter všetkých fyzikálnych javov, podstatne závislý od stanoviska pozorovateľa, neoddeliteľný súvis atómových javov a ich pozorovania za pomoci našich pozorovacích prostriedkov, ktorý vyplýva z kvantovej teórie, nás núti k rovnakej opatrnosti ako v psychologických problémoch, kde ustavične narážame na ťažkosti pri oddeľovaní objektívneho obsahu od pozorujúceho subjektu.“ [2, 69]

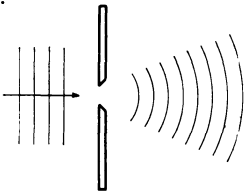
Bohr sa veľakrát vracal k možnosti aplikovať koncepciu komplementarity na iné oblasti. Tieto jeho myšlienky neskôr rozvíjali tak jeho spolupracovníci (Heisenberg hovorí o možnosti komplementarity rôznych kultúrnych tradícií, rovnako ako Born; Rosenfeld sa pokúšal z hľadiska koncepcie komplementarity skúmať vzťah medzi sociálnymi a individuálnymi aspektmi vývoja vedy atď.), ako aj iní vedci. Princíp komplementarity sa aplikoval v biológii, lingvistike, geografii i v teórii literatúry. Zsvätený a zaujímavý rozbor nájde čitateľ v [5, 178—193], prípadne v [8].

Diskusia s Einsteinom

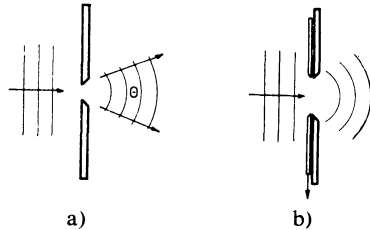
S princípom komplementarity úzko súvisí problém fyzikálnej reality. Vo vývoji Bohrových názorov na tieto problémy zohrala veľkú úlohu jeho diskusia s Albertom Einsteinom. O dlhoročnej polemike podrobne píše Bohr v stati *Diskusia s Einsteinom o epistemologických otázkach v atómovej fyzike* [9], uverejnenom v zborníku k sedemdesiatym narodeninám A. Einsteina. Kongresu v Como, kde Bohr predniesol svoju koncepciu komplementarity, sa Einstein nezúčastnil, ale hneď na 5. Solvayovom kongrese, ktorý sa konal v októbri 1927 v Bruseli, si títo veľkí vedci skrížili meče. Diskusia sa krútila okolo problému či kvantovomechanický opis vyčerpávajúcím spôsobom vystihuje to, čo v skutočnosti pozorujeme a či by sa pri hlbšej analýze nemohol dosiahnuť úplnejší opis tak, že by sa zobrala do úvahy bilancia energie a hybnosti v elementárnych procesoch.

Na vysvetlenie svojho stanoviska Einstein uviedol takýto príklad: Majme časticu, ktorá prechádza cez otvor alebo úzku štrbinu v tienidle, za ktorým je v určitej vzdialenosti fotografická platňa (obr. 1). Keďže sa vlna spojená s pohybom častice v takomto prípade ohýba, nevieme s určitosťou, do ktorého bodu na fotografickej platni elektrón dopadne. Problém je v tom, že keď elektrón zaregistrujeme v bode *A*, je vylúčená akákoľvek možnosť jeho dopadu do iného bodu *B*, hoci zákony bežného šírenia vln nepripúšťajú vôbec nijakú koreláciu medzi takýmito dvoma udalosťami.

Obr. 1.



Obr. 2.



Ako odpoveď na Einsteinovu otázku Bohr rozobral prípad prechodu častice cez otvor, ktorý môže byť buď stále otvorený (obr. 2a), alebo sa môže zatvárať a otvárať pomocou nejakej clony (obr. 2b). Po prechode cez otvor je stav častice zobrazený sústavou sférických vln s rozptylovým uhlom Θ v prvom prípade a v druhom sú sférické vlny obmedzené aj v radiálnom smere. V prvom prípade je zložka hybnosti, rovnobežná s rovinou tienidla, určená s neurčitosťou Δp , v druhom — vzhľadom na zatváranie clony je aj energia určená s nepresnosťou ΔE . Ide o to, že neurčitnosť polohy častice v rovine tienidla je daná priemerom otvoru a uhol rozptylu vln Θ je úmerný $1/\sigma$, kde σ je počet vln na jednotku dĺžky. Teda platí (Δq je neurčitnosť polohy v rovine tienidla určenej súradnicou q):

$$[1] \quad \Delta p \approx \Theta P \approx h/\Delta q,$$

kde sme pre P použili vzťah $P = h\sigma$. Vzťah (1) je plne v súlade so vzťahom neurčitosti

$$[2] \quad \Delta q \Delta p \approx h.$$

V druhom prípade je neurčitosť v určení „počtu kmitov na jednotku času“ [9, 202] $\Delta\nu$ úmerná $1/\Delta t$, pričom Δt označuje časový interval, po ktorý je clona otvorená, čiže Δt je neurčitosť určenia okamihu prechodu častice cez otvor v tienidle. Ak potom použijeme vzťah $E = h\nu$, dostaneme

$$[3] \quad \Delta E \Delta t \approx h,$$

čo je zasa vzťah neurčitosti pre energiu a čas. Z hľadiska zákona zachovania energie treba vysvetlenie existencie takýchto neurčitostí hľadať v skutočnosti, že častica si vymieňa hybnosť, resp. energiu s tienidlom, resp. s clonou. Bohr ďalej dokazuje, že ak vezmeme do úvahy rýchlosť pohybu clony $v = a/\Delta t$, bude s výmenou hybnosti spojená aj výmena energie presne v súlade so vzťahom neurčitosti pre energiu, „takže zákon zachovania hybnosti a energie bude splnený“ [9, 215].

Z týchto úvah Bohr vyvodzuje, že ani detailné zohľadnenie výmeny hybnosti a energie medzi časticou a meracím prístrojom nám neumožní dosiahnuť úplný opis pohybu častice, ako si to predstavoval Einstein. „Keď chceme určiť hybnosť a energiu... častí prístroja s presnosťou dostatočnou na zabezpečenie kontroly nad výmenou hybnosti a energie s meranou časticou, situácia sa zmení. V takom prípade stratíme — v súlade so všeobecne platnými vzťahmi neurčitosti — možnosť presne určiť polohu tienidla a clony v priestore a čase.“ [9, 215]

Ďalej Bohr analyzuje známy dvojštrbinový experiment a dochádza k záveru, že „stojíme pred voľbou: *bud'* sledovať dráhu častice, *alebo* pozorovať interferenciu; iba takto sa vyhneme paradoxnému záveru, že správanie sa elektrónu alebo fotónu by malo závisieť od existencie druhej štrbiny v tienidle, cez ktorú elektrón zjavne neprešiel“ [9, 217—218]. Nasleduje záver, dôležitý z gnozeologického hľadiska: „Pri analýze kvantových efektov sa ocitáme zoči-voči nemožnosti zreteľne oddeliť správanie sa atómových objektov samých o sebe od ich interakcie s meracími prístrojmi, ktoré determinujú samy podmienky vzniku javov.“ [9, 218]

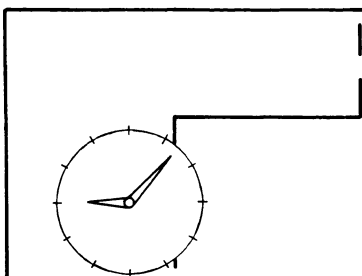
V tejto súvislosti Bohr spomína Einsteinovu ironickú poznámku, či zástancovia kordanskej interpretácie kvantovej mechaniky naozaj veria, že boh hádže kocky. Za zmienku stojí Bohrova odpoveď, že už starí myslitelia poukazovali na nutnosť maximálnej opatrnosti, keď sa prozreteľnosti prisudzujú atribúty vyjadrené v pojmoch každodenného života.

Pod vplyvom spomínanej diskusie na 5. Solvayovom kongrese Bohr ďalej precizoval svoje myšlienky a dospel k záveru, že snahy o zohľadnenie výmeny hybnosti a energie medzi časticou a meracím prístrojom sú vlastne iba posúvaním hranice medzi objektom o sebe a prístrojom, ale neriešia hlavný problém, totiž že vždy treba brať objekt i merací prístroj ako jeden celok, ako si to vyžaduje existencia kvanta účinku.

Na 6. Solvayovom kongrese v r. 1930 A. Einstein na podporu svojho stanoviska uviedol ďalšiu námietku, podľa ktorej je možné kontrolovať výmenu hybnosti a energie medzi časticou a meracím prístrojom, ak vezmeme do úvahy relativistický vzťah $E = mc^2$. Navrhol prístroj (obr. 3) zložený z debničky a hodín. V jednej stene debničky je clona, ktorá sa môže otvárať a zatvárať pomocou spomínaného hodinového mechanizmu. Predstavme si, že debnička obsahuje žiarenie. V istom okamihu, známom s ľubovoľnou presnosťou, cez otvor prejde jediný fotón. Ak okrem toho odvážeme deb-

ničku pred vyžiarením fotónu a po jeho vyžiarení, bude možné zmerať energiu fotónu s hocakou presnosťou, čo by podľa Einsteina bolo v rozpore s kvantovomechanickým vzťahom neurčitosti pre energiu a čas.

Obr. 3.



Bohr aj tentoraz našiel východisko zo zložitej situácie. Ukázal, že treba analyzovať dôsledky stotožnenia zotrvačnej a gravitačnej hmotnosti vo vzťahu medzi energiou a hmotnosťou. Podľa neho treba brať do úvahy závislosť chodu hodín od ich polohy v gravitačnom poli. Po príslušných výpočtoch dochádza k záveru, že presné meranie energie fotónu nedovolí presne stanoviť okamih vyžiarenia fotónu. Zaujímavé je, že aj v tomto prípade N. Bohr majstrovsky využil argumenty Einsteinovej všeobecnej teórie relativity v diskusii s jej tvorcom. Nie je to, mimochodom, prvý raz. Už sme spomínali, že Bohr často poukazoval na analógiu medzi princípom komplementarity a princípom relativity.

Predchádzajúce námietky A. Einsteina proti interpretácii kvantovomechanického opisu správania sa mikroobjektov boli zovšeobecnené v spoločnom článku A. Einsteina, B. Podolského a N. Rosena pod titulkom *Možno pokladať kvantovomechanický opis reality za úplný?* [10] V tejto stati autori predovšetkým definujú, čo rozumejú pod úplným opisom: „Od každej úplnej teórie musíme podľa nášho názoru požadovať toto: každý element fyzikálnej reality sa musí odzrkadľovať v teórii.“ Ďalej formulujú kritérium existencie fyzikálnej reality: „Ak bez akéhokoľvek vplyvu na sústavu môžeme s určitosťou (teda s pravdepodobnosťou rovnou jednej) predpovedať hodnotu nejakej fyzikálnej veličiny, existuje element fyzikálnej reality zodpovedajúci uvedenej fyzikálnej veličine.“ [10, 605]

Ďalej ukazujú, že v stave opísanom vlnovou funkciou, ktorá je vlastnou funkciou operátora hybnosti, má hybnosť určitú hodnotu, ale súradnica nie. Teda v stave opísanom takouto vlnovou funkciou nemôžeme predpovedať hodnotu súradnice, iba ju bezprostredne zmerať. Potom však už systém nebude v stave opísanom pôvodnou vlnovou funkciou. Vo všeobecnosti pre dve veličiny opísané dvoma nekomutujúcimi operátormi platí, že presné určenie jednej vylučuje presné určenie druhej a navyše každý pokus experimentálne určiť druhú veličinu bude meniť stav natoľko, že znehodnotí informácie o prvej veličine. Z toho autori vyvodzujú záver: „... buď 1. kvantovomechanický opis reality pomocou vlnovej funkcie nie je úplný (dvom elementom teórie nezodpovedajú dva prvky fyzikálnej reality — R. Z., J. Š.), alebo 2. keď operátory zodpovedajúce dvom fyzikálnym veličinám nekomutujú, tieto dve veličiny nemôžu

byť odrazu reálne. Lebo ak by boli súčasne reálne, a teda mali určité hodnoty, museli by byť podľa podmienky úplnosti obsiahnuté v úplnom opise.“ [10, 607]

V druhej časti autori uvažujú dve sústavy, ktorých stavy boli známe v čase $t < 0$; potom v čase $t = 0$ sa zapne interakcia a sústavy interagujú až do času $t = T$. Pomocou Schrödingerovej rovnice sme teda schopní určiť stav celkovej sústavy v ľubovoľnom čase, dokonca aj pre $t > T$. Lenže keď chceme pomocou redukcie vlnového balíka určiť stavy týchto podsústav, prichádzame k záveru, že dvoma rôznymi meraniami stavu prvej sústavy získavame o druhej informácie, počľa ktorých táto sústava môže byť v dvoch rôznych stavoch opísaných dvoma rôznymi vlnovými funkciami. „Na druhej strane, keďže počas merania už tieto dve sústavy neinteragovali, nie je možné dosiahnuť nijaké reálne zmeny druhej sústavy nijakými operáciami nad prvou sústavou. ... Teda jednej a tej istej realite (druhá sústava po interakcii s prvou) zodpovedajú dve odlišné funkcie.“ [10, 608].

Ďalší autori ukazujú, že spomínané dve funkcie môžu zodpovedať dvom nekomutujúcim operátorom P a Q . Potom by bolo možné pomocou merania charakteristiky stavu prvej sústavy s určitosťou a bez vplyvu na sústavu určiť raz hodnotu jednej (P) a raz hodnotu druhej veličiny (Q). „Podľa nášho kritéria reálnosti by sme mali v prvom prípade pokladať za element reality veličinu P a v druhom bude elementom reality veličina Q . Videli sme však, že obe vlnové funkcie sa vzťahujú na tú istú realitu.“ [10, 610] Teda predpoklad úplnosti kvantovomechanického opisu pomocou vlnovej funkcie vedie k negácii možnosti, aby dve fyzikálne veličiny, ktorým zodpovedajú nekomutujúce operátory, boli súčasne reálne. „Teda sme nútení konštatovať, že kvantovomechanický opis fyzikálnej reality pomocou vlnových funkcií nie je úplný.“ [10, 610]

Niels Bohr odpovedal na článok Einsteina, Podolského a Rosena staťou s rovnakým názvom. V prvom rade konštatuje, že argumentácia oponentov sotva môže ohroziť spoľahlivosť kvantovomechanického opisu, ktorý je založený na rigoróznejšej matematickej teórii. Zdanlivý rozpor iba potvrdzuje, že bežné hľadiská sa nehodia na opis kvantovomechanických javov. „Konečnosť interakcie medzi objektom a meracím prístrojom, podmienená existenciou kvanta účinku, má za následok — vzhľadom na nemožnosť kontrolovať*) spätný vplyv objektu na merací prístroj — ... nutnosť definitívne sa zriecť klasického ideálu príčinnosti a radikálne zrevidovať naše názory na problém fyzikálnej reality. ... Každé kritérium reálnosti ... obsahuje podstatnú nejednoznačnosť, ak ho aplikujeme na skutočné problémy.“ [2, 181—182]

Kritérium fyzikálnej reality, ktoré navrhujú Einstein, Podolský a Rosen, je neprijateľné, lebo obsahuje nejednoznačnosť v tvrdení „bez akéhokoľvek vplyvu na sústavu“. „Nejde o to, že by počas kritickej etapy procesu merania bola skúmaná sústava vystavená nejakému mechanickému vplyvu (má sa na mysli druhá sústava po oddelení v príklade, ktorý uvádzali Einstein, Podolský a Rosen — R. Z., J. Š.). Ale aj v tejto etape ide v podstate o vplyv v zmysle vplyvu na samy podmienky, určujúce možné typy predpovedí správania sa sústavy v budúcnosti. Keďže tieto podmienky sú podstatným

*) Pod vplyvom kritiky zo strany oponentov Bohr v neskorších formuláciách princípu komplementarity už nehovorí o „nekontrolovateľnom vplyve“.

prvkom opisu každého javu, na ktorý možno aplikovať pojem „fyzikálna realita“, vidíme, že argumentácia autorov ich neopravňuje k záveru, že kvantovomechanický opis je zásadne neúplný.“ [2, 187—188]

Teda vzhľadom na existenciu kvanta účinku, na nutnosť chápať objekt a prostriedky určovania jeho charakteristík ako jeden celok, charakteristiky prostriedkov pozorovania sa nepriamo prejavujú na poznatkoch o objekte. Nepremietajú sa do samých určení objektu, ale prejavujú sa v podobe možnosti ich určovania. V istých pokusoch stanovujeme časopriestorové, v iných zasa energeticko-hybnostné charakteristiky. Tu vidíme, že napriek istej podobnosti a analógii medzi teóriou relativity a kvantovou mechanikou z hľadiska princípu komplementarity, ako sme o tom hovorili vyššie, je tu aj zásadný rozdiel metodologickej povahy. V tomto zmysle možno hovoriť, že teória relativity je zavŕšením klasickej fyziky (čo sa týka prístupu k problému pozorovania a určovania charakteristík objektu), zatiaľ čo kvantová mechanika začína principiálne novú etapu vo vývoji fyzikálneho poznania. A rozhodujúcu úlohu v tomto procese zohral Niels Bohr. Nazdávame sa, že práve v tomto, popri nepochybných konkrétnych úspechoch vo fyzike, treba vidieť príčinu tej obrovskej úcty a vážnosti, ktorej sa Bohr tešil nielen medzi fyzikmi, ale aj príslušníkmi iných vedných odvetví. V tom je aj jeho najväčší prínos do pokladnice ľudského poznania.

Jadrová fyzika

V tridsiatych rokoch sa Niels Bohr venoval jadrovej fyzike a prispel k vyriešeniu viacerých významných problémov. Predovšetkým hodno spomenúť vysvetlenie veľkých účinných prierezov záchytu neutrónov jadrami. Po neúspechoch jednočasticového modelu interakcie neutrónu s jadrom (Bethe, Perrin, Elsasser) prišiel Bohr s koncepciou mnohočasticového stavu, ktorý je výsledkom dopadu častice na jadro. Pri zrážke neutrónu s jadrom nedochádza podľa Bohrovho názoru k zrážke neutrónu s niektorou konkrétnou časticou jadra, následnej zmene dráhy a výletu neutrónu. „Naopak, musíme si jasne uvedomovať, že zvyšok energie dopadajúceho neutrónu sa musí rýchlo rozdeliť medzi všetky častice jadra tak, aby po istý čas ani jediná častica nemala kinetickú energiu dostatočnú na opustenie jadra. Možné nasledujúce uvoľnenie protónu, alfa-častice alebo dokonca neutrónu ... musí svedčiť o komplikovanom procese, v ktorom sa energia opäť môže sústrediť na nejakej častici v blízkosti povrchu jadra.“ [2, 193—194]

V práci *Mechanizmus delenia jadier* z roku 1939 N. Bohr spolu s J. A. Wheelerom vypracovali teóriu javov, prebiehajúcich v ťažkých jadrách pri interakcii s neutrónmi. Základom je tu tzv. kvapkový model jadra. V prvej kapitole, vychádzajúc z Gamowovho vzorca pre rozdiel hmotnosti úlomku a hmotnosti príslušného stabilného jadra s tým istým hmotnostným číslom, odhadujú energetický výťažok pri delení typických jadier na dva odštiepky i celkovú hodnotu dodatkovej energie, ktorá sa uvoľňuje v nasledujúcich beta-rozpadoch. „Jadrá s atómovým číslom menším ako $A \sim 100$ sú energeticky stabilné voči deleniu: nad touto hranicou je energeticky výhodné delenie na dve približne rovnaké časti, pretože zmenšenie elektrostatickej energie v dôsledku oddelenia

nábojov prevyšuje zväčšenie energie krátkodosahových síl, súvisiace so zväčšením povrchu jadier a znížením nasýtenosti.“ [2, 305] Okrem toho sa popri energii, uvoľnenej pri delení, odhaduje aj energia, potrebná na ďalšie uvoľňovanie neutrónov z odštiepkov delenia i energia, ktorú tieto odštiepky uvoľňujú pri beta-rozpade.

V druhej časti Bohr a Wheeler podrobne vyšetrovali stabilitu jadra voči deformácii. Jadro chápali ako tekutú kvapku a usilovali sa určiť energiu, ktorú jednotlivé jadrá potrebujú na dosiahnutie kritickej deformácie, spôsobujúcej delenie. V tretej sa rozoberá proces delenia jadra z hľadiska štatistickej mechaniky a určuje sa pravdepodobnosť delenia. V ďalších častiach sa skúma štatistické rozdelenie odštiepkov delenia jadier podľa ich hmotností, stupeň excitácie odštiepkov a pôvod sekundárnych neutrónov. Autori hodnotia svoje výsledky takto: „Podrobné vysvetlenie, ktoré môžeme dať na báze kvapkového modelu jadra nielen samej možnosti delenia, ale aj závislosti prierezu od energie a zmenám kritickej energie od jadra k jadru, sú zrejme v hlavných rysoch potvrdené porovnaním experimentálnych výsledkov s teoretickými predpoveďami, ktoré sme uviedli vyššie.“ [2, 349]

Veľmi plodnou bola tiež Bohrova koncepcia zloženého jadra, ktorá je myšlienkovou príbuzná predstave o mnohočasticovom stave. V článku *Štiepenie ťažkých jadier* [2, 289—290] z roku 1939 Bohr vyslovil predpoklad, že každá jadrová reakcia, ktorá je dôsledkom nejakej zrážky, je sprevádzaná istým medzistavom — vznikom zloženého jadra, v ktorom sa excitačná energia rozdelí medzi jednotlivé stupne voľnosti podobne ako pri zohrievaní tuhého telesa. Zložené jadro sa potom rozpadá podobne ako kvapka na menšie dve kvapky. Na to je však potrebné, aby sa podstatná časť energie transformovala na typ kmitov, zodpovedajúcich veľkým deformáciám povrchu jadra. Pritom „pribeh procesu je daný fluktuáciami v štatistickom rozdelení energie medzi rozličné stupne voľnosti sústavy a pravdepodobnosť takého rozdelenia podstatne závisí od veľkosti energie, ktorá sa musí koncentrovať na určitý typ pohybu, ako aj od „teploty“ zodpovedajúcej excitácii celého jadra.“ [2, 290]

Ďalší vývoj ukázal, že teória jadra založená na kvapkovom modeli nevystihuje všetky experimentálne fakty. Vznikol zovšeobecnený model jadra, v ktorom sa popri deformácii jadra ako celku berie do úvahy aj pohyb jednotlivých nukleónov.

Bohr — organizátor a verejný činiteľ

Na záver by sme chceli pripojiť niekoľko postrehov o Nielsovi Bohrovi ako človeku, ktorý vzhľadom na svoje kvality, zásluhy, postoje a prístup k ľuďom sa zaradil medzi tých málo osobností, čo po niekoľko desiatok rokov ovplyvňovali vývoj fyziky i životy fyzikov nielen v Európe, ale aj inde na svete.

Symbolom štýlu Bohrovej práce sa stal Ústav teoretickej fyziky v Kodani a hlavne duch, ktorý v ňom vládol. Už v prejave na otvorení ústavu 15. septembra 1920 Bohr vytýčil tri hlavné zásady: po prvé úzky kontakt experimentátorov a teoretikov, po druhé neustále úsilie zapájať do vedeckej práce čo najviac mladých, po tretie voľné diskusie ako hlavná metóda práce. V ústave pracovala relatívne malá skupina stálych „zamestnancov“ — zväčša mladých nadaných fyzikov: Hendrik Kramers, Oskar Klein,

Svein Rosseland, Dirk Coster a György Hevesy, starý Bohrov priateľ z manchesterského obdobia.

Vďaka vrodenej Bohrovej schopnosti vyberať si spolupracovníkov, nadchnúť ich pre prácu i vďaka jeho bezhraničnej žiľivosti panovala v kodanskom ústave výborná atmosféra, do ktorej spravidla zapadli aj „hostia“. A nebolo ich málo. Bohrov ústav udržiaval čulé kontakty s ostatnými európskymi centrami — Cambridgeom (Rutherford), Göttingenom (Born a Franck) i Berlínom (Einstein, Planck, Laue, od r. 1927 aj Schrödinger). Do Kodane prichádzali mnohí mladí fyzici, ktorí sa neskôr zaradili medzi európsku a svetovú fyzikálnu špičku. U Bohra dlhší či kratší čas pracovali Heisenberg, Pauli, Dirac, Landau, Hartree, Mott, Weisskopf a iní. Postupom času sa Kodaň stala „metropolou atómovej fyziky“ a vykryštalizoval sa „kodaňský štýl“.

Bohr veľa cestoval. Okrem krátkodobých prednáškových pobytov v rôznych štátoch absolvoval v r. 1937 veľké turné, keď dostal pozvanie na sériu prednášok v Japonsku a Číne. S manželkou a synom Hansom sa vydali najprv do USA, kde sa zastavili v Princetone, Berkley a na ďalších univerzitách. Potom sa cez Honolulu plavili do Japonska. Tu sa im dostalo veľkolepého prijatia nielen zo strany fyzikov, ale manželia Bohrovci boli pozvaní aj na recepciu v cisárskom paláci a neskôr ich prijal japonský cisár. Rovnako úctivo i srdečne vítali Bohra aj v Číne. Na spiatocnej ceste sa sprievod zastavil v Moskve, Leningrade a v Charkove u Bohrovho obľúbeného žiaka Leva Landaua. Takto sa skončilo polročné Bohrovo putovanie okolo sveta.

Svoje výnimočné postavenie v spoločnosti fyzikov i rozsiahle kontakty Bohr využil koncom tridsiatych rokov, keď sa nad mnohými jeho kolegami v rôznych krajinách začali sťahovať zlovestné mračná. V r. 1938 sa manželia Fermiovcí vydali na slávnostné prevzatie Nobelovej ceny do Stockholmu a potom sa zastavili v Kodani, odkiaľ ich cesta viedla do USA. Iných talianskych emigrantov Bohr prichýľil vo svojom ústave v Kodani. Spolu s priateľmi a spolupracovníkmi pomohol nájsť zamestnanie v Stockholme aj Lise Meitnerovej, ktorá hoci bola rakúskou občiankou, musela po anexii Rakúska odísť z Nemecka.

Bohrova odvaha a vlastenectvo sa prejavili aj za okupácie Dánska fašistickým Nemeckom. N. Bohr patril medzi zakladateľov Dánskej spoločnosti, ktorá pripravila do tlače a vydala knihu o dánskej kultúre, aby pozdvihla národné sebauvedomenie Dánov. Sám Bohr napísal k tejto knihe úvod. Z uvedeného obdobia je známa historka o Heisenbergovej návšteve v Kodani v auguste 1941, ktorá bola podrobne opísaná tak v Heisenbergových spomienkach, ako aj v Jungkovej knihe *Jasnejšie než tisíc slncí* a stala sa i námetom československej televíznej hry. Najpodstatnejším na celej návšteve bol asi Bohrov dojem, že Nemci pracujú na výrobe atómovej bomby. Táto skutočnosť ovplyvnila jeho vzťah k vývoju atómovej zbrane v USA.

28. septembra 1943 jeden známy diplomat navštívil Nielsa Bohra a naznačil mu, že by mal odcestovať z Dánska. Hneď na druhý deň prišla správa, že každú chvíľu má prísť z Berlína príkaz zatknúť Nielsa i Harald Bohrovcov. Nasledoval dramatický útek celej Bohrovskej rodiny najprv na rybárskom člne do Malmö a potom do Stockholmu. Keďže hrozilo reálne nebezpečenstvo atentátu na Bohra vo Švédsku, nasledovala ďalšia dobrodružná cesta do Británie na malom bombardéri, kde jediné miesto pre cestujúceho bolo v zásobníku na bomby. Na dovŕšenie všetkého Bohr nezachytil pokyn

pilotov, aby si vo veľkej výške zapol kyslíkový prístroj, takže stratil vedomie a prebral sa až po pristátí v Škótsku. Potom sa už normálnym civilným lietadlom dostal do Londýna. Po dvoch mesiacoch práce v Anglicku N. Bohr napokon odletel do Spojených štátov, kde pôsobil v Los Alamos. Jeho informácie o tom, že Nemci pracujú na vývoji atómovej bomby urýchlili realizáciu Manhattanského projektu — výrobu atómovej bomby.

Aj v Los Alamos Bohr — alias Nicolas Baker (Američania pri zmene mena ponechávali popredným vedcom aspoň rovnaké iniciály) — zostal verný sám sebe: nevedel sa zmieriť s ochranou, nedodržiaval pravidlá konšpirácie, stal sa „spovedníkom“ a „pastierom“ ľudí, odtrhnutých od vlasti a blízkych. Aj tu mal výnimočné postavenie — ako jeden z mála fyzikov vedel, čo sa robí vo všetkých skupinách zamčaných na riešenie veľmi úzkych, špeciálnych problémov.

Hoci sa Niels Bohr významnou mierou podieľal na vývoji atómovej bomby, ešte pred koncom vojny myslel na budúcnosť. Usiloval sa dosiahnuť, aby sa atómové zbrane nestali nástrojom politiky a aby sa atómová energia využívala na mierové účely. Preto napokon bola Bohrovi zverená dôležitá misia: v apríli 1944 letel do Londýna s úlohou vyložiť Churchillovi svoje i Rooseweltove názory na problematiku využitia atómovej energie po vojne. Žiaľ audiencia u Churchila sa skončila nezdarom.

Po skončení druhej svetovej vojny sa Bohr vrátil do vlasti. Dostalo sa mu najvyšších počt: nielenže sa opäť stal riaditeľom Ústavu teoretickej fyziky, ale naďalej zastával funkciu prezidenta Dánskej kráľovskej vedeckej spoločnosti (až do konca života). Popri vedeckej práci sa venoval aj verejnej činnosti. Usiloval sa o nastolenie kontroly nad atómovými zbraňami. Keď sa nepodarilo dosiahnuť dohodu na pôde Komisie pre atómovú energiu OSN, ktorej predsedal jeho žiak H. Kramers, Bohr poslal v máji 1950 otvorený list OSN. Žiaľ, jeho listu sa nedostalo náležitej pozornosti, lebo krátko nato sa začala vojna v Kórei.

Napriek týmto neúspechom sa Bohr všetkými silami snažil zjednotiť úsilie európskych fyzikov. Na stretnutí bývalých pracovníkov Ústavu teoretickej fyziky v Carlsbergu v r. 1951 sa zrodila myšlienka vybudovať medzinárodné fyzikálne centrum. Takto vznikol dnešný CERN. Nebola to jediná akcia, na ktorej sa Bohr podieľal. V auguste 1955 predniesol v Ženeve úvodný referát na konferencii Atóm pre mier. V období suezskej krízy napísal generálnemu tajomníkovi OSN list, v ktorom navrhoval opatrenia na odvrátenie prípadných konfliktov a nadviazanie medzinárodnej spolupráce.

V tomto období, podobne ako neraz predtým, Niels Bohr veľa cestoval. Medzi posledné jeho cesty patrila návšteva Sovietskeho zväzu v r. 1961, kam ho pozval Lev Landau. V septembri 1961 navštívil Cambridge a v októbri 1961 sa zúčastnil na 12. Solvayovom kongrese v Bruseli. V júni 1962 ho po prvý raz postihla menšia cievná mozgová príhoda. Napriek častočnému zlepšeniu zdravotného stavu 18. novembra náhle zomrel.

Čo povedať na záver? Aký vlastne bol Niels Bohr? Pre spôsob myslenia ho jedni porovnávajú s Faradayom, iní ho pre štýl práce a vzťah k ľuďom prirovnávajú k E. Rutherfordovi. Nazdávame sa, že Bohr bol veľký práve preto, že bol svojský; bol neopakovateľný hlavne v tom, že — ako sa sám charakterizoval — jeho záujem o fyziku nebol ani tak záujmom matematika ako skôr umelca a filozofa.

Literatúra

- [1] BOHR, N.: *Izbrannyye naučnyje trudy. 1. zv.* Moskva, Nauka, 1970.
- [2] BOHR, N.: *Izbrannyye naučnyje trudy. 2. zv.* Moskva, Nauka, 1970.
- [3] FOK, V. A.: *Kvantovaja mechanika i strojenije materii.* Moskva, Znaniye, 1965.
- [4] ŠEBESTA, J.: *Revolúcie v dejinách fyziky.* Kandidátska dizertačná práca. FFUK Bratislava, 1983.
- [5] ALEXEJEV, I. S.: *Koncepcija dopolnitel'nosti. Istoriko-metodologičeskij analiz.* Moskva, Nauka, 1978.
- [6] EINSTEIN, A.: *Sobranije naučnych trudov. 4. zv.* Moskva, Nauka, 1967.
- [7] KLAUS, J. M. - FRANKFURT, U. I. - FRENK, A. M.: *Niŕs Bor.* Moskva, Nauka, 1977.
- [8] POZNER, R. A.: *Metod dopolnitel'nosti: problema soderžanija i sfery dejstvija.* Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, Moskva, 1981.
- [9] BOHR, N.: *Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics.* In: ALBERT EINSTEIN: *Philosopher-Scientist.* Tudor Publishing Company, 2-nd edition, New York, 1951, p. 201—241.
- [10] EINSTEIN A. - PODOLSKY, B. - ROSEN, N.: *Phys. Rev.* 1935, 47, 770.

jubilea & zprávy

ZA RNDR. ŠTEFANOM ŠUJANOM

Dňa 19. 1. 1985 vo veku 38 rokov náhle zomrel RNDr. Štefan Šujan, CSc., samostatný vedecký pracovník Ústavu merania a meracej techniky CEFV SAV. Strácame v ňom erudovaného matematika a skvelého človeka. Jeho vedecké zameranie smerovalo najmä do teórie informácie, ergodickej teórie, biomatematickej a matematickej fyziky.

Prírodovedeckú fakultu UK v Bratislave — odbor pravdepodobnosť a matematická štatistika — ukončil v roku 1970. Po skončení štúdia nastúpil do Oddelenia teoretických metód na vtedajšom Ústave teórie merania SAV (dnes ÚMMT CEFV SAV). V roku 1974 získal titul RNDr; v roku 1977 dosiahol vedeckú hodnosť kandidáta fyzikálno-matematických vied v odbore pravdepodobnosť a matematická štatistika na Ústave teórie informácie a automatizácie ČSAV za prácu *Číselné charakteristiky aditív-*



nych zdrojov informácie. V tom istom roku v súťaži mladých matematikov JSMF získal prvú cenu. Za samostatného vedeckého pracovníka bol priradený v roku 1980.

Na jar 1983 odchádza spolu s manželkou a dvomi deťmi do Spojeného ústavu jadrových