Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

V. A. Fok

O interpretaci kvantové mechaniky

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 3 (1958), No. 4, 464--475

Persistent URL: http://dml.cz/dmlcz/137033

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1958

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

DISKUSE

O INTERPRETACI KVANTOVÉ MECHANIKY[1])

V. A. Fok

Charakteristickým rysem současné fysiky je stále hlubší a hlubší pronikání do zákonitostí světa atomů a jiných nejmenších částic hmoty. Studium těchto zákonitostí vyžaduje nejen novou experimentální techniku pro jejich sledování, ale i nové pojmy pro jejich formulaci. Na popis atomových jevů je třeba nových metod, odlišných od těch, jichž se užívá při studiu větších objektů vnějšího světa. Nové postavení problému popisu atomových objektů má velký principiální význam, poněvadž spojené s ním pojmy mohou být použitelné i v jiných oblastech přírodních věd. Na půdě současné fysiky vznikají tak některé otázky filosofického charakteru, na které zde chceme upozornit.

Jak se již nejednou stalo v dějinách fysiky, matematická část teorie, zároveň s některými formálními návody, spojujícími teorii s experimentem, byla vypracována dříve než odpovídající fysikální pojmy. Aparát nerelativistické kvantové mechaniky, který neobsahuje žádné vnitřní rozpory, byl úspěšně používán k řešení konkrétních úloh atomové fysiky, ale jeho fysikální interpretace zůstávala dlouhou dobu nejasnou. Stále ostřeji a ostřeji byla pociťována nutnost a správná fysikální interpretace takového aparátu kvantové mechaniky.

§ 1. Pokusy o klasický výklad vlnové funkce a příčiny jejich neúspěšnosti

Původní hledisko, zdůrazněné de Brogliem a Schrödingerem, spočívalo v představě, že vlnová funkce v kvantové mechanice představuje nějaké pole rozložené v prostoru, podobně jako elektromagnetické nebo jiná dříve známá pole; stacionárním stavům atomů odpovídají podle Schrödingera vlastní kmity tohoto pole. O něco později de Broglie vyzvedl poněkud jiné hledisko, podle kterého v prostoru rozložené pole je nositelem částic a určuje jejich pohyb v klasickém smyslu (vlna — pilot, nebo přesněji vlna — lodivod). Toto hledisko de Broglie vzápětí opustil, avšak v nedávné době, po 25 letech, se k němu opět vrací. S ním souvisí práce Bohma, který se pokoušel zachovat pojem trajektorie a uvést jej do souvislosti se vzorci obyčejné kvantové mechaniky zavedením „kvantového potenciálu", speciálně v každém jednotlivým případě vybraného. Jistou obměnou „vlny-pilota" jsou pokusy použít Einsteinových idejí o částici jako o singulárním bodu pole; tyto snahy nejsou však matematicky dostatečně podepřeny.

V prvních letech rozvoje vlnové mechaniky bylo možno se pokoušet o vysvětlení v klasickém duchu, nelze to však říci o snahách de Broglieho a jeho následovníků v posledních letech. Obecným rysem těchto snah je jejich krajní umělost a nedostatek heuristické hodnoty: ani jedinou novou úlohu se autoři

[1]) B. A. Фок, *Ob interpretacii kvantovoj mechaniki*, Usp. fiz. nauk, sv. LXII (1957), č. 4.

těchto teorií nepokusili vyřešit. Naopak, jejich vývody se podřizovaly (a přitom ne úspěšně) výsledkům již dříve z kvantové mechaniky známým. Kriterium praxe jasně hovoří proti tomuto vědeckému směru.

Které to jsou zvláštnosti kvantové mechaniky, které ji nedovolují interpretovati v klasickém duchu a vidět ve vlnové funkci v prostoru rozložené pole, podobné klasickému? Necháme-li stranou hlubší příčiny gnoseologického charakteru, lze ukázat řadu příčin, odporujících takovému výkladu. Za prvé, v případě složitého systému, složeného z mnoha částic, vlnová funkce závisí ne na třech souřadnicích, ale na třech stupních volnosti systému. Je to funkce bodu v mnoharozměrném konfiguračním prostoru a nikoli v reálném fysikálním prostoru. Za druhé, v kvantové mechanice jsou přípustné kanonické transformace vlnové funkce typu Fourierových transformací, přičemž všechny takto transformované funkce popisují tentýž stav a jsou zcela rovnoprávné s původní vlnovou funkcí, vyjádřenou pomocí souřadnic; fysikální smysl má nejen čtverec modulu původní vlnové funkce, ale i čtverce modulů transformovaných funkcí. Za třetí, úloha mnoha těles (tedy i úloha mnoha stejných částic) má v kvantové mechanice zvláštnosti, nedovolující převést ji na úlohu o jednotlivých částicích, tím méně ji formulovat jako úlohu o poli v obyčejném trojrozměrném prostoru. Má-li tedy složitý systém vlnovou funkci, společnou pro všechny částice, nelze jednotlivým částicím připisovati zvláštní vlnové funkce; kromě toho existuje v případě stejných částic, podléhajících principu Pauliho, mezi částicemi kvantová interakce zvláštního druhu, kterou nelze převést na silové působení v obyčejném prostoru. Dalšího druhu interakce, kterou rovněž nelze převést na klasickou, existuje mezi stejnými částicemi, jestliže jsou popsány symetrickými vlnovými funkcemi. Nakonec nejen v případě mnoha částic, ale ani pro jednotlivé částice neexistuje vlnová funkce vždy, a ne vždy se mění dle Schrödingerovy rovnice; za jistých podmínek se prostě škrtne a nahradí jinou (tzv. redukce vlnového svazku, viz § 11). Je zřejmé, že „okamžitá změna" tohoto druhu nesouhlasí s pojmem pole.

Ukázané zvláštnosti kvantové mechaniky předurčují k neúspěchu všechny pokusy o interpretaci vlnové funkce v klasickém duchu. Spojitost kvantové mechaniky s klasickou je jinde, a to v principu analogie, podle kterého existuje limitní případ, kdy ty vzorce kvantové mechaniky, které bezprostředně srovnáváme s experimentem, přecházejí v klasické. V tomto limitním případě veličiny charakteristické pro daný mechanický systém, mající rozměr účinku, možno považovat za velké ve srovnání s „kvantem účinku"[2]). Princip analogie byl nalezen Bohrem v samém počátku rozvoje kvantové mechaniky a sehrál v jejím rozvoji velkou úlohu.

§ 2. Ideje N. Bohra a jeho terminologie

Pravý smysl vlnové funkce a jiných pojmů kvantové mechaniky se začal vyjasňovat ponenáhlu, počínaje pracemi Maxe Borna o statistické interpretaci kvantové mechaniky. Byl objasněn základní význam pojmu pravděpodobnosti, třebaže nebylo zpočátku jasno, o pravděpodobnost čeho vlastně jde. Pod-

[2]) Pro bod v silovém poli nezávislém na čase lze brát jako takovou charakteristickou veličinu mv^3/w, kde m je hmota částice, v rychlost a w urychlení. Poněvadž potřebujeme řád veličiny, lze místo v a w vzít jejich střední hodnoty (v tomto nebo jiném smyslu). Jestliže rozumíme pod h Planckovu konstantu dělenou 2π, pak kriterium použitelnosti klasické mechaniky k pohybu hmotného bodu píšeme ve tvaru $mv^3 \gg hw$ (viz V. Fok, Uč. zap. LGU, ser. fiz., t. 3, str. 5—6, 1937).

statně přispěly k vyjasnění této otázky a k otázce interpretace kvantové mechaniky Bohrovy ideje, že kvantově mechanický popis vlastností atomového objektu je nutno spojovat s klasickým popisem pozorovacích prostředků (experimentálního zařízení).

Ve svých pracích, věnovaných principiálním problémům kvantové mechaniky, N. Bohr zvlástě podtrhuje nutnost studovat experiment vcelku a dovést výklad experimentu až k měrným hodnotám. Sama o sobě je tato myšlenka správná v tom smyslu, že v principu musí být možno dovést teorii do měrných hodnot. Avšak podtržení úlohy přístrojů vede Bohra k nedocenění nutnosti abstrakce a k opomíjení faktu, že předmětem studia jsou vlastnosti mikroobjektu a nikoli údaje přístrojů. Vlastnosti atomových objektů jako náboj, hmota, spin, forma operátoru energie a zákona interakce částic s vnějším polem, jsou z jedné strany naprosto objektivní a mohou být abstrahovány od prostředků pozorování a z druhé strany tyto vlastnosti potřebují pro svoji formulaci nové, kvantově-mechanické pojmy. To se zvláště vztahuje na formulaci úlohy mnoha těles.

Příčinou nedorozumění je i terminologie používaná Bohrem. Např. hovoří o „nekontrolovatelné interakci", třebaže interakce viděná jako fysikální proces je vždy kontrolovatelná. Bohr hovoří o „nekontrolovatelnosti" pouze proto, aby zakryl nesoulad, vznikající při používání klasických pojmů mimo oblast jejich použitelnosti. Bohr dále staví proti sobě „princip komplementarity" a „princip příčinnosti". Při doslovném chápání těchto termínů takové stavění do opozice je nesprávné. Ovšem pod „principem komplementarity" Bohr chápe nejen Heisenbergovy vztahy, ale i všechny charakteristické rozdíly mezi kvantovou a klasickou mechanikou. Pod „principem příčinnosti" rozumí Bohr příčinnost v úzkém mechanickém smyslu — ve smyslu determinismu podle Laplacea. Má proto ve skutečnosti na zřeteli nemožnost ztotožnit kvantovou mechaniku s determinismem podle Laplacea, nikoli ovšem s principem příčinnosti v obecnějším smyslu. A potom lze s ním souhlasit.

Princip příčinnosti v obecném smyslu je nutno chápat jako tvrzení o existenci přírodních zákonů a tedy i těch, které jsou spojeny s obecnými vlastnostmi prostoru a času (konečná rychlost šíření účinku, nemožnost působit na minulost). Při tomto chápání kvantová mechanika nejen neodporuje principu příčinnosti, ale dává mu nový výraz a rozšiřuje jeho použitelnost na pravděpodobnostní zákony.

Jak jsem měl možnost při osobních rozhovorech s N. Bohrem se přesvědčit, jeho stanovisko ve skutečnosti je bližší materialistickému, než by se dalo soudit z jeho prací o principiálních problémech kvantové mechaniky. Především Bohr předpokládá, že je nutno brát přírodu takovou, jaká je. Rozhodně vyjadřuje svůj nesouhlas s positivistickým hlediskem a zcela uznává objektivnost vlastností atomových objektů. Co se týká terminologie, Bohr je ochoten zavrhnout používání termínu „nekontrolovatelná interakce", který považuje za nezdařilý. Bohr souhlasí též s tím, že obecný princip příčinnosti je nutno rozlišovat od determinismu (podle Laplacea) a že pouze takový determinismus je v rozporu se zákonitostmi atomové fysiky.

§ 3. Odmítání nových idejí jako reakce na jejich positivistický výklad

Novost idejí Bohra a jejich těžko pochopitelný výklad, používající ne vždy zdařilou terminologii, daly vznik mnoha nedorozuměním a nesprávným výkladům v duchu positivismu. (Je nutno říci, že pouze tento positivistický

výklad nových idejí se chápe obvykle pod pojmem „kodaňská škola".) Nejkrajnější positivistickou posici zaujímá P. Jordan; druzí seriosnější fysikové, jako M. Born, W. Heisenberg aj. dali se svého času unášet positivistickými názory, ale nyní se od nich postupně osvobozují. Tak v jedné ze svých posledních prací, vytištěné ve sborníku, věnovaném 70 letům N. Bohra, přiznával W. Heisenberg již objektivnost pojmu kvantového stavu.

Výklad idejí Bohra v duchu positivismu, prováděný některými jeho stoupenci, ve skutečnosti vyvolal reakci, zamítající ve jménu materialismu nové ideje (de Broglie, Born, Vigier aj.). Hlavní pohnutkou jmenovaných učenců k odmítání obyčejného pravděpodobnostního výkladu je klamné tvrzení, že pravděpodobnostní výklad znamená odmítnutí objektivnosti mikrosvěta a jeho zákonů, tj. odmítnutí základních tvrzení materialismu. Dle mínění stoupenců školy de Broglieho pouze determinismus klasického typu lze sloučit s materialismem. Své hledisko proto nazývají deterministickým.

Úzkost a proto i nesprávnost takového chápání materialismu je nepochybná. Vnucovat přírodě pouze deterministickou formu zákonitostí, odmítat navzdory očividnosti existenci obecnější pravděpodobnostní formy — znamená vycházet z jakýchsi dogmat a nikoli z vlastností samé přírody. Takové stanovisko je filosoficky nesprávné. Proto se nelze divit neúspěchu všech pokusů o deterministický výklad kvantové mechaniky — neúspěchu, jehož formální příčiny jsme rozebrali v § 1. Spolu s tím, úporné obnovování snah tohoto druhu a zájem jim věnovaný ze strany nespecialistů, podmíněný tím, že jsou podnikány ve jménu materialismu, — vše to činí nanejvýše nezbytným hlubší rozbor nových idejí kvantové mechaniky z hlediska materialistické filosofie. Takový rozbor musí vést k závěru, že nové ideje značně rozšiřují okruh pojmů, s kterými operuje materialistická filosofie, že však naprosto neodporují jejímu duchu.

§ 4. Vztah k prostředkům pozorování

Pokusíme se ukázat základní zvláštnosti kvantové mechaniky, rozlišující ji od klasické.

Vlastnosti objektů se vždy projevují v jejich interakci s jinými objekty, tedy též s pozorovacími prostředky (přístroji). To je správné jak v klasické tak i v kvantové mechanice. Ovšem v klasické fysice bylo možno se osvobodit od pozorovacích prostředků v mnohem větší míře, než to lze učinit v kvantové mechanice. Je to pochopitelné, jakmile si uvědomíme, že pozorovací prostředky jsou vždy „lidských" rozměrů, zatímco měřítka objektů, s kterými operuje klasická fysika na jedné straně, kvantová fysika na druhé, jsou podstatně rozdílné: klasické objekty nejsou, obecně vzato, menší než prostředky pozorování, kvantové objekty jsou nesrovnatelně menší.

V klasické fysice se předpokládá, že při dostatečné pozornosti nemohou pozorovací prostředky podstatně ovlivnit studovaný objekt, a jestliže přesto ovlivňují, lze s tímto vlivem počítat a opravit ho. Proto tam lze uvažovat tak, jako by pozorovací prostředky neměly žádnou úlohu a hovořit např. o stavu pohybu objektu bez vztahu k pozorovacím prostředkům, tj. chápat pojem „stav pohybu" absolutně. Je pravda, že prvek relativnosti zůstává i zde, poněvadž i v klasické fysice je nutný odkaz na určitou vztažnou soustavu; z hlediska zde rozvíjeného to lze chápat jako zahrnutí pozorovacích prostředků do úvah. Ovšem v kvantové fysice je nutno uvažovat nejen pohyb pozorovacích prostředků, ale v jakési schematisované formě i jejich vnitřní strukturu.

Proto pod klasickým popisem lze rozumět popis bez vztahu k prostředkům pozorování (jestliže nebereme v úvahu jejich pohyby). Přesnost takového popisu je omezena Heisenbergovými vztahy neurčitosti. Taková přesnost je dostatečná pro popis mechanických vlastností větších objektů, pro popis mikrokosmu však nestačí. Nejen přesnost v kvantitativním smyslu, ale i formulace kvalitativně nových vlastností mikroobjektů potřebuje nové metody popisu, a především je nutno zavést do nich nový vztažný element — vztah k pozorovacím prostředkům.

Je naprosto jasné, že tento vztah nenarušuje objektivnost. Již v klasické fysice i takové jednoduché pojmy jako je dráha hmotného bodu, které jsou zcela objektivní, jsou též relativní, neboť mají smysl jen v určité vztažné soustavě. Podobně v kvantové fysice ohled na pozorovací prostředky pouze upřesňuje fysikální pojmy, dovoluje zavést nové a nijak neporušuje objektivnost. Objekty mikrokosmu jsou stejně reálné a jejich vlastnosti stejně objektivní, jako vlastnosti objektů zkoumaných klasickou fysikou.

§ 5. Pojem přístroje

V předešlém paragrafu jsme ukázali na některé obecné závěry z prostého, ale základního faktu, že studium světa atomů je možné jen prostřednictvím větších předmětů, které slouží jako pozorovací prostředky (přístroje). Poněvadž pojem přístroje má velkou úlohu v našich úvahách, je nutno ho upřesnit. Můžeme nazvat přístrojem takové zařízení, které na jedné straně je v interakci s mikroobjektem a reaguje na jeho působení a na druhé straně dovoluje s přesností dostatečnou pro daný cíl klasický popis (a proto již nevyžaduje dalších „pozorovacích prostředků"). Je nutno hned poznamenat, že v této definici přístroje je naprosto nepodstatné, je-li „přístroj" proveden lidskýma rukama, nebo představuje-li přirozený, pro pozorování vhodný souhrn vnějších podmínek, v kterých se mikroobjekt nachází. Je důležité jen to, že tyto podmínky, tak jako i vlastní prostředky pozorování musí být popisovány klasicky.

Chápeme-li termín „přístroj" v tomto smyslu, můžeme formulovat úlohu kvantově-mechanického popisu mikroobjektu takto:

Všechny vlastnosti mikroobjektu, i vlastní kvantové, tj. takové, pro které je popis klasickou mechanikou nedostatečný, můžeme charakterisovat schopností mikroobjektu působit na přístroje, které připouštějí klasický popis.

§ 6. Podstata dualismu vlna — částice

Aby se projevily různé vlastnosti atomárního objektu, musí být splněny různé vnější podmínky. Může se ukázat, že různé typy vnějších podmínek jsou vzájemně neslučitelné. Podívejme se např. na rozptyl elektronů v krystalu. Pravidelné rozložení rozptylujících center je nutné, abychom dostali zřetelný difrakční obrazec a tedy i projev vlnových vlastností elektronů. Táž pravidelnost rozložení je však překážkou přesné prostorové lokalisace elektronu, který je rozptylován. Neporušíme-li pravidelnost rozložení center, nemůžeme určit, kterým centrem byl elektron odchýlen. V literatuře, zvláště v pracích N. Bohra a W. Heisenberga je rozebráno mnoho dalších příkladů, na které se lze dívat jako na ilustraci neslučitelnosti vnějších podmínek, nutných pro projev vlnových a korpuskulárních vlastností elektronů.

Jsou možné i takové podmínky, kdy vlnové i korpuskulární vlastnosti elektronů se projevují současně, potom však tyto vlastnosti nejsou výrazné.

Např. pro elektron vázaný v atomu má vlnová funkce charakter stojaté vlny s amplitudou rychle ubývající se vzdáleností od středu atomu. To však značí, že elektron je přibližně lokalisován (korpuskulární vlastnost), a že se současně částečně projevují vlnové vlastnosti.

Vidíme tedy u atomových objektů, že v jedněch podmínkách vystupují do popředí vlnové vlastnosti, v jiných podmínkách vlastnosti korpuskulární; jsou možné i takové podmínky, kdy ty i ony vlastnosti vystupují, i když ne výrazně, současně. Možno říci, že pro atomový objekt existuje potenciální možnost projevovat se v závislosti na vnějších podmínkách buď jako vlna, nebo jako částice, nebo jako objekt ležící mezi těmito dvěma krajními stavy. Jmenovitě v této potenciální možnosti různých projevů vlastností, charakteristických pro atomový objekt, je dualismus vlna—částice. Každé jiné doslovnější chápání tohoto dualismu ve formě libovolného modelu je nesprávné. Tedy i model částice nesené vlnou, vypracovaný de Brogliem a jeho školou, nebo model částice jako singulárního bodu jsou pole naprosto nevhodné, jak již bylo ukázáno v § 1.

Kromě toho je nutno si uvědomit, že zvláštnosti kvantové mechaniky, (také nerelativistické) nejsou vyčerpány dualismem vlna—částice. Takové vlastnosti elektronů, jako spin a kvantová statistika (princip Pauliho) nelze zredukovat na tento dualismus a přitom mohou být formulovány pomocí aparátu kvantové mechaniky. Základní charakter těchto vlastností je zřejmý již z toho, že jmenovitě ony určují strukturu elektronových slupek atomů a tím jejich optické a chemické vlastnosti.

Aparát kvantové mechaniky, správně zobrazující řadu základních vlastností atomárních objektů, lze racionálně vyložit pouze na základě šířeji položené úlohy popsat mikroobjekt, jmenovitě takové, v které chování mikroobjektu není odtrženo od interakce s prostředky pozorování.

§ 7. Pravděpodobnostní popis interakce mezi objektivem a přístrojem

Hovoříme-li o interakci mezi mikroobjektem a přístrojem, musíme rozlišovat dvě stránky věcí: za prvé interakci jako fysikální proces, za druhé interakci jako kontakt mezi částí systému popisované kvantově mechanicky (mikroobjekt) a částí popisované klasicky.

V prvním případě slovo „interakce" používáme v doslovném smyslu, v druhém případě víceméně v konvenčním smyslu. Zajímá nás zde hlavně druhá stránka věci, poněvadž sám pojem kvantově mechanického popisu musí být založen na rozboru interakce v onom druhém smyslu.

Jaké jsou zvláštnosti interakce atomárního objektu s klasickým přístrojem?

Při odpovědi na tuto otázku musíme uvážit, že vnější podmínky, v kterých se nalézá objekt, i výsledek interakce objektu s přístrojem, musí být popsány jazykem klasické fysiky. Z těchto klasických údajů pak též přísluší činit závěry o kvantových charakteristikách atomárního objektu.

Ani v případě, kdy atomární objekt se nalézá ve fixovaných vnějších podmínkách, není výsledek jeho interakce s přístrojem v obecném případě jednoznačný. Tento výsledek nemůže být předpovězen s jistotou na základě předešlých pozorování, ať tato byla jakkoli přesná. Určitou je pouze pravděpodobnost daného výsledku. Nejúplnější vyjádření výsledků serie měření nebude přesná hodnota měřené veličiny nýbrž její pravděpodobnostní rozložení.

Může se samozřejmě ukázat, že pravděpodobnost jedné hodnoty měřené veličiny (nebo nějakého úzkého intervalu hodnot) natolik převyšuje pravdě-

podobnostní ostatních, že prakticky lze připsat oné veličině pouze danou hodnotu. V tomto případě je možná přesná nebo téměř přesná předpověď výsledku měření. Avšak tento případ je pouhou výjimkou, nebo přesněji, speciálním případem. Charakteristickým znakem pro kvantovou mechaniku je však obecný případ, kdy měření vedou k nějakému rozložení pravděpodobností.

Skutečnost, že v obecném případě zpřesnění předešlých pozorování nevede k jednoznačné předpovědi výsledku pozorování, má velký principiální význam. Tento fakt je nutno brát jako vyjádření nějakého přírodního zákona, spojeného s vlastnostmi atomárních objektů, zejména s příslušným korpuskulárně vlnovým dualismem. Přiznání tohoto faktu znamená odmítnutí klasického determinismu a potřebuje nové formy vyjádření principu příčinnosti.

Samo o sobě vyjádření výsledku serie měření ve formě rozložení pravděpodobností není cizí ani klasické fysice. Tam ovšem pravděpodobnosti byly „vedlejší element", výsledek nezapočítání některých neznámých faktorů a zprůměrování přes neznámé údaje. V klasické fysice byla vždy předpokládána principiální možnost nejprve roztřídit pozorované objekty tak, abychom potom ve výsledcích pozorování dostali pro měřenou veličinu již pouze jednu hodnotu a nikoli rozložení pravděpodobnosti. Naproti tomu v kvantové fysice podobné třídění atomárních objektů není možné, poněvadž — jak to také odpovídá povaze atomárních objektů — měřené veličiny mohou v daných podmínkách nemít určité hodnoty. V kvantové fysice pojem pravděpodobnosti je pojem primární a má tam základní úlohu. Je s ním spojen i kvantově mechanický pojem stavu objektu.

§ 8. Pravděpodobnostní charakteristika stavu objektu

Pro studium vlastností atomových objektů je nejdůležitější takové zadání pokusu, při kterém je možno rozlišit tři stadia: přípravu objektu, chování objektu ve fixovaných vnějších podmínkách a vlastní měření. V souhlase s tím lze v přístroji rozlišovat přípravnou část, pracovní část a registrující část. Např. při pozorování difrakce elektronů na krystalu je přípravnou částí zdroj monochromatického svazku elektronů, clony a jiná zařízení umístěná před krystalem, pracovní částí je sám krystal a registrující částí fotografická deska nebo počítač.

Při takovém zadání experimentu lze měnit závěrečné stadium (měření) a nechávat neměnnými první dvě stadia. Fysikální interpretaci aparátu kvantové mechaniky lze nejlépe prozkoumat jmenovitě při takovémto zadání pokusu.

Měníme-li závěrečné stadium pokusu, můžeme provádět měření různých veličin (např. energie částice nebo její rychlosti nebo polohy v prostoru) a vycházet z téhož počátečního stavu objektu. Každé veličině odpovídá vlastní serie měření, jejíž výsledky jsou vyjadřovány ve formě rozložení pravděpodobností oné veličiny. Všechna ukázaná rozložení pravděpodobností mohou být vyjádřena parametricky touže vlnovou funkcí, která nezávisí na závěrečném stadiu pokusu a která je tedy objektivní charakteristikou stavu objektu bezprostředně před závěrečným stadiem.

Stav objektu, popisovaný vlnovou funkcí, je objektivní v tom smyslu, že představuje objektivní (nezávislou na pozorovateli) charakteristiku potenciálních možností toho či jiného výsledku interakce atomárního objektu s přístrojem. V tomto smyslu se vztahuje právě k danému, jedinému objektu. Ovšem

tento objektivní stav není ještě reálným v tom smyslu, že pro objekt v daném stavu ukázané potenciální možnosti nebyly realisovány. Přechod od potenciálně možného k realisovanému, ke skutečnému, probíhá v závěrečném stadiu experimentu. Pro statistickou charakteristiku tohoto přechodu, tj. pro experimentální nalezení odpovídajícího rozložení pravděpodobností je nutná již serie měření; rozložení pravděpodobností dostaneme statistickým zpracováním této serie měření. Toto experimentální rozložení pravděpodobností může být potom srovnáno s teoretickým, které dostaneme z vlnové funkce. Je nutno poznamenat, že třebaže bezprostřední výsledek závěrečného stadia experimentu je formulován klasicky, lze z něho odvodit na základě teorie také i hodnoty těch veličin, které jsou specificky kvantové, jako spin částice, energetické hladiny atomárního systému atp. Tímto způsobem můžeme ze statistického zpracování serie měření dostat rozložení pravděpodobností nejen pro veličiny analogické klasickým, ale i pro veličiny specificky kvantové.

§ 9. Pojmy potenciálně možného a realisovaného v klasické fysice

V klasické deterministické fysice otázka přechodu od potenciálně možného k realisovanému nevzniká vůbec, poněvadž je tam postulována jednoznačná předurčenost chodu událostí, následkem které vše, co je potenciálně možné se i realisuje, takže není třeba rozlišovat jedno od druhého. Nemožnost předpovědět prakticky všechny události se tu připisuje neúplnosti počátečních podmínek.

Takové deterministické hledisko není ovšem logicky nutné, nýbrž je podmíněno historickými příčinami, především úspěchy nebeské mechaniky v 18. a 19. století. Velká přesnost předpovědí pohybu nebeských těles dala vzniknout mechanickému determinismu (Laplace). Deterministický světový názor se pak rozšířil na celou fysiku (snad kromě termodynamiky) a činil si nárok na to, aby jedině on byl pokládán za vědecký. Úspěchy elektromagnetické teorie světla, která vyzvedla pojem pole jako fysikální reality, třebaže ukázaly omezenost mechanistického hlediska, nedokázaly podlomit víru v determinismus.

Pravda, zkušenost denního života, kde je třeba jasně rozlišovat mezi možností a uskutečněním, hovořila proti; ovšem tato zkušenost byla zavržena jako nevědecká. V oblasti fysiky zůstává „nespolehlivou" ve smyslu determinismu termodynamika, kterou se nepodařilo s ním sladit. Determinismus byl poražen teprve rozvojem kvantové mechaniky, počínaje pracemi A. Einsteina o teorii záření (1916), který prvně zavedl do fysiky apriorní pravděpodobnosti[3]). Správná interpretace kvantově mechanického popisu vlastností atomárního objektu zcela vylučuje deterministické hledisko. Kvantová mechanika znovu uvádí v právo životní zkušeností diktovaný rozdíl mezi potenciálně možným od jeho realisací.

§ 10. Pravděpodobnost a statistika v kvantové mechanice

Pravděpodobnostní charakter kvantové mechaniky nepodléhá pochybnostem a není téměř ani předmětem diskusí. Ovšem otázka, k čemu vlastně se

[3]) Je vedlejší, že Einstein, který mnoho učinil pro kvantovou teorii v počátečním rozvoji a prvý zavedl do fysiky apriorní pravděpodobnosti, se posléze stal protivníkem kvantové mechaniky a přívržencem determinismu; říkával, napůl žertem, napůl vážně, že nemůže uvěřit, že by pánbůh hrál v kostky (*dass der liebe Gott würfelt*).

vztahuje ona pravděpodobnost, v jakém statistickém souboru vlastně platí a představuje-li kvantová mechanika teorii jednotlivých atomárních objektů, nebo je-li pouze teorií souborů těchto částic — tyto problémy se dále diskutují, třebaže v současné době lze na ně zcela jednoznačně odpovědět.

V prvních letech rozvoje kvantové mechaniky, v časných pokusech o její statistickou interpretaci, se fysikové ještě neosvobodili od představy elektronu jako klasického hmotného bodu. O elektronu se hovořilo tak, jako by to byla částice s určitými souřadnicemi a rychlostí, ovšem neznámými. Heisenbergovy vztahy byly interpretovány jako vztahy nepřesností a nikoli vztahy neurčitosti. Čtverec modulu vlnové funkce byl vykládán jako hustota pravděpodobnosti částice mít dané souřadnice (jako by souřadnice byly vždy určité). Analogicky se interpretoval čtverec modulu vlnové funkce v prostoru impulsů, při čemž obě pravděpodobnosti (v prostoru souřadnic a v prostoru impulsů) byly brány současně, jako by hodnoty souřadnic a impulsů byly slučitelné. Faktická nemožnost současně je měřit, vyjadřovaná Heisenbergovými vztahy, byla brána jako jakýsi paradox nebo vrtoch přírody, jehož následkem není vše existující poznatelné. Všechny tyto těžkosti odpadají, jakmile uznáme dvojitý, korpuskulárně-vlnový charakter elektronu, vyjasníme podstatu tohoto dualismu a pochopíme, k čemu se vztahuje v kvantové mechanice studovaná pravděpodobnost. Abychom se zde neopakovali, připomeneme pouze, že pravděpodobnosti, které dostaneme z vlnové funkce pro různé veličiny, se vztahují k různě zadaným experimentům, a že charakterisují ne chování částice „samé o sobě", nýbrž její působení na přístroj určitého typu.

Otázka v jakém statistickém souboru bereme pravděpodobnost, byla také předmětem diskuse. Jeden z prvních vytyčil tento problém akademik K. I. Mandelštam (Sebr. spisy, sv. 5., str. 356), dal však nesprávné řešení. Mandelštam hovoří o „mikromechanickém souboru, ke kterému se vztahuje vlnová funkce", a nazývá ho také „elektronovým souborem", podtrhuje tím, že má na mysli souhrn určitým způsobem připravených mikroobjektů. V těchto Mandelštamových výchozích poučkách jsou nepřesnosti, spojené s ne dost jasnou definicí statistického souboru. Pokusíme se je opravit a podat přesnější definici pojmu soubor.

Představme si neomezenou serii elementů, které mají různé znaky, podle kterých lze je třídit a pozorovat pak četnost výskytu elementu s daným znakem. Jestliže pro výskyt elementu s každým daným znakem existuje určitá pravděpodobnost[4]), potom studovaná serie elementů je statistický soubor.

Jaké statistické soubory je možno studovat v kvantové mechanice? Očividně pouze soubory elementů, popisovaných klasicky, takže pouze těmto elementům lze vždy připsat určité hodnoty parametrů, dle kterých provádíme třídění. Z této příčiny kvantový objekt nemůže být elementem statistického souboru, ani když je v takových podmínkách, že je mu možno přisoudit vlnovou funkci. Nelze proto hovořit o „mikromechanickém" a „elektronovém" souboru v Mandelštamově pojetí.

Elementy statistických souborů studované kvantovou mechanikou, nejsou mikroobjekty samy, nýbrž výsledky pokusů s nimi, při čemž určité zadání

[4]) Existence určité pravděpodobnosti je hypothesa, která je zaváděna buď apriorně (např. ze symetrie) nebo na základě konstantnosti těch vnějších podmínek, při kterých probíhá fysikální realisace studované serie elementů. Hypothesa o existenci pravděpodobnosti je ekvivalentní hypothese o tom, že daná serie elementů je statistický soubor.

experimentu odpovídá jednomu určitému souboru. Poněvadž výsledné rozložení pravděpodobností, vypočtené z vlnové funkce, se pro různé veličiny vztahuje k různě zadaným experimentům, vztahuje se i k různým souborům. Proto se vlnová funkce nemůže vztahovat k žádnému statistickému souboru.

Řečené lze ilustrovat tímto schematem:

	E	p	x	
Ψ_1				
Ψ_2				
Ψ_3				

Každému poli tohoto schematu odpovídá určitý statistický soubor s vlastním rozložením pravděpodobností. V jedné řádce jsou soubory, které odpovídají měřením různých veličin E, p, x, ... vycházejícím z téhož počátečního stavu. V jednom sloupci jsou soubory odpovídající měřením dané veličiny, vycházejícím z různých stavů Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3, ...

Hlubší příčinou toho, že vlnové funkci nelze přiřadit žádný statistický soubor, je fakt, že pojem vlnové funkce se vztahuje k potenciálně možnému (k neprovedeným ještě pokusům), zatím co pojem statistického souboru k výsledkům již provedených experimentů.

Pokusy vztáhnout vlnovou funkci k souhrnům mikroobjektů byly prováděny řadou autorů, při čemž bylo vysloveno mínění, že i celá kvantová mechanika je teorií takových souhrnů mikroobjektů (souborů), zatím co teorie jednotlivých individuálních mikroobjektů ještě neexistuje. Takové mínění je především založeno na nepochopení pojmu pravděpodobnosti. Pravděpodobnost toho či jiného chování objektu v daných vnějších podmínkách je určována vnitřními vlastnostmi daného individuálního objektu a oněmi vnějšími podmínkami; je to číselné ocenění potenciálních možností toho či jiného chování objektu. Proto pravděpodobnost se vztahuje k jednomu objektu a charakterisuje jeho potenciální možnosti. Současně s tím je pro experimentální určení její číselné možnosti nutná statistická realisace těchto možností, tj. mnohonásobné opakování experimentu. Odtud je jasné, že pravděpodobnostní charakter teorie nevylučuje, aby se vztahovala k jednotlivému objektu. To je správné i pro kvantovou mechaniku.

§ 11. Formy vyjádření principu příčinnosti v kvantové mechanice

Kvantově mechanický pojem stavu dovoluje formulovat princip příčinnosti pro atomární jevy. V souhlase s kvantovou mechanikou odpovídá vlnová funkce atomárního systému vlnové rovnici, která ji jednoznačně určuje z počátečních podmínek (Schrödingerova rovnice). Tím je určen i zákon změn pravděpodobností, vyjadřovaných vlnovou funkcí. Vlnová rovnice dovoluje řešit nestacionární úlohy kvantové mechaniky, odpovídající pokusům, jejichž

rozličná stadia jsou rozložena v čase. Typickým příkladem takových úloh je úloha o rozpadu téměř stacionárního stavu atomárního systému, tedy i úloha o ionisaci atomů elektrickým polem; v principu sem spadají i úlohy o radioaktivním rozpadu atomového jádra.

V současné fysice je princip příčinnosti spojován nejen s nemožností účinku na minulost, ale i s existencí limitní rychlosti šíření účinku, rovné rychlosti světla ve volném prostoru. Obě tyto podmínky jsou zahrnuty i v kvantové mechanice. Je pravda, v její nerelativistické formě (v teorii Schrödingerově) existence limitní rychlosti je uvažována jen nepřímo, ve formě doplňující podmínky, aby uvažované rychlosti byly malé ve srovnání s limitní. Ovšem ve všech relativistických zobecněních kvantové mechaniky existence limitní rychlosti je uvažována automaticky. Vztahy, vyplývající z principu příčinnosti, také vztahy pro amplitudu rozptylu, mají velkou úlohu v kvantové teorii pole.

Ve spojitosti s existencí limitní rychlosti šíření účinku je nutno uvažovat problém tzv. „redukce vlnového svazku". Rozumíme tím toto: Jestliže předpokládáme, že závěrečné stadium jednoho pokusu je současně počátečním stadiem jiného, pak vlnová funkce, dávající rozložení pravděpodobností pokusu, musí být zaměněna jinou, odpovídající faktické výslednici pokusu. Taková záměna projde nenadále; změna vlnové funkce neprobíhá dle Schrödingerovy rovnice. Může se ukázat (a tento problém byl skutečně diskutován), že nenadálá změna vlnové funkce je v rozporu s konečnou rychlostí šíření účinku. Je však zřejmé, že zde nemáme co činit s šířením libovolného účinku, nýbrž se změnou postavení problému o pravděpodobnostech. V realisovaném pokusu byl realisován jeden z potenciálně možných případů, předpokládaných vlnovou funkcí. Změna postavení problému o pravděpodobnostech též spočívá v započtení realisovaného výsledku, tj. v započtení nových údajů. A novým údajům odpovídá nová vlnová funkce.

Tyto úvahy ukazují, jak je důležité rozlišovat při interpretaci kvantové mechaniky potenciálně možné a realisované. Ukazují též naprosto jasně, že vlnová funkce není jakési reálné pole, a že náhlá její změna není nějaký fysikální proces podobný změnám pole. S provedením experimentu je skutečně spojen fysikální proces, který se však odráží ve vlnové funkci ne přímo, nýbrž nutností znovu formulovat úlohu o pravděpodobnostech.

Kvantově mechanické chápání příčinnosti se značně liší od klasického, třebaže představuje jeho přirozené zobecnění. Klasický determinismus, o kterém jsme hovořili již v § 9, možno definovat jako hledisko, podle kterého zdokonalení pozorovacích metod současně se zpřesněním formulace přírodních zákonů a jejich matematického zpracování může v principu umožnit jednoznačnou předpověď všech budoucích událostí. Studium světa atomů ukazuje, že klasický determinismus nejen neodpovídá přírodním zákonům, ale ani nedovoluje dostatečně přesně je formulovat. Tento nesouhlas je namístě také v případě prostých elementárních procesů (kvantových přechodů), takže věc je tady ne v složitosti jevu, nýbrž v nevhodnosti starých metod popisu. Podstatné rysy nových metod spočívají, jak jsme viděli, v pravděpodobnostním charakteru popisu, v kterém je nutno rozlišovat mezi potenciálně možným a uskutečněným, a v kterém musíme uvažovat vztah k prostředkům pozorování, a konečně v novém chápání principu příčinnosti, podle kterého tento princip se vztahuje bezprostředně k pravděpodobnostem, tj. potenciálně možnému, a nikoli k skutečně nastalým již jevům.

§ 12. Filosofické problémy předložené kvantovou mechanikou

Rozvoj nových idejí přinesených atomovou fysikou potřebuje propracování řady filosofických otázek, hlavně problémů spojených s analysou procesu poznání. Tyto problémy vznikají ve spojitosti s výše připomenutou nemožností osvobodit se při studiu atomárních objektů od prostředků pozorování a také ve spojitosti s nutností vidět pravděpodobnost jako základní pojem a rozlišovat potenciálně možné od realisovaného, s čímž je v podstatě spojena nová formulace principu příčinnosti. Zde nelze vystačit studiem klasických tradic a výběrem citátů z klasiků, nýbrž je nutno přistoupit k řešení filosofických problémů přírodních věd způsobem tvůrčím. Je nutno tvořivě rozvinovat dialektický materialismus. Přitom je nutno uvážit, že ideje atomové fysiky jsou skutečně radikálně nové a že zamítnout je, pokusit se věc redukovat na ideje, o kterých již máme hotové úsudky klasiků, naprosto nelze.

Nelze se ani odvolávat na to, že pojmy obyčejné kvantové mechaniky nejsou posledním slovem vědy, nebo na to, že uspokojující kvantová teorie pole ještě nebyla vytvořena. Každá teorie a tedy i kvantová mechanika, představuje jen relativní pravdu, což ovšem nedává právo neuznávat její přínos nových idejí a pojmů.

Fysikální pojmy budou rozvíjeny, ale již nyní je jasné, že tento rozvoj půjde cestou dalšího odklonu od klasických představ a nikoli cestou návratu k nim. To znamená, že naděje na návrat klasického determinismu v jakékoli nové formě předpovídané některými fysiky školy de Broglieho nemají pevnou půdu. Ten, kdo se pokouší ve jménu materialismu zavrhovat nové ideje a restaurovat staré, prokazuje materialismu špatné služby.

Filosofické zevšeobecňování nových idejí, vzniklých v lůně atomové fysiky, se může ukázat užitečným i pro rozvoj jiných oblastí vědy, v kterých mohou vzniknout otázky, analogické otázkám již řešeným kvantovou mechanikou.

Řešení rozporu mezi vlnovou a korpuskulární povahou elektronu, dosažené kvantovou mechanikou, mezi pravděpodobností a příčinností, mezi kvantovým popisem atomárního objektu a klasickým popisem přístroje, konečně mezi vlastnostmi individuálního objektu a jeho statistickými projevy, dává řadu jasných příkladů praktické aplikace dialektiky na otázky přírodních věd. Zůstává to faktem nezávisle na tom, byla-li používána dialektická metoda vědomě či nikoli. Úspěchy kvantové mechaniky musí být mocným popudem k rozvoji dialektického materialismu. Zahrnutí nových idejí do pokladnice dialektického materialismu je prvořadým úkolem materialistické filosofie.

Přeložil prom. fys. Zd. Berger