

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Niels Bohr

Diskuse s Einsteinem o gnoseologických problémech v atomové fyzice

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 5 (1960), No. 1, 94--110

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137065>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1960

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

DISKUSE S EINSTEINEM O GNOSEOLOGICKÝCH
PROBLÉMECH V ATOMOVÉ FYSICE 1)

NIELS BOHR

Když jsem byl vyzván vydavatelstvím *Living Philosophers*, abych napsal článek do svazku, věnovaného A. Einsteinovi za jeho obrovský vklad do přírodovědy, a v němž soudobí badatelé mu vyjadřují vděčnost naší generace za to, jak svým geniem prorážel novou cestu, mnoho jsem se rozmýšlel, jak nejlépe vyjádřit, čím jsem Einsteinovi zavázán za jeho inspirující ideje. Vzpomněl jsem si přitom živě na mnoho příležitostí s Einsteinem diskutovat o gnoseologických problémech, jež klade nová atomová fyzika. Došel jsem k tomu, že sotva bych mohl podat něco lepšího, než vyprávění o sporech s Einsteinem, které, i když nekončily vždy oboustrannou shodou, byly pro mne mimořádně cenné a podnětné.

Zároveň věřím, že takové vyprávění může dát širokému kruhu čtenářů představu o tom, jak užitečná je otevřená výměna názorů pro pokrok v oblasti, kde nové výsledky čas od času vyžadovaly revisi našich názorů.

* * *

Hlavním předmětem našich polemik s Einsteinem byla od prvopočátku otázka, jaké stanovisko zaujmout k odchýlkám od běžných principů, podle nichž se popisovala příroda, odchýlkám, které jsou charakteristické pro nejnovější vývoj fyziky. Tímto vývojem rozumíme cestu, kterou fyzika vykročila na počátku 20. století po Planckově objevu účinkového kvanta. Tento objev odhalil v přírodních zákonitostech atomární rys, který zasahoval daleko za hranice dřívější nauky o omezené dělitelnosti hmoty. Planckův objev ukázal totiž, že klasické fyzikální teorie jsou idealisacemi, které připouštějí jednoznačné užití jen v limitních případech, kdy všechna působení jsou velmi velká ve srovnání s velikostí účinkového kvanta. Otázka zněla, máme-li se dívat na ústup od kausálního popisování atomárních dějů — což se ve skutečnosti dělo ve snaze o zvládnutí nové situace — jako na dočasné opuštění idejí, které na konec si svá práva vydobudou zpět, nebo jde-li vývoj nezvratnou cestou ke skutečnému souladu mezi analysou a synthesou fyzikálních jevů. Abych ukázal co nejlépe, na jaké půdě jsme se přeli a jaký byl význam a smysl argumentů ve prospěch toho či onoho hlediska, pokládám za nutné vyloužit s potřebnou podrobností hlavní rysy ve vývoji teorie, k němuž sám Einstein přispěl rozhodujícím podílem.

Boltzmann byl jak známo první, který spojoval zákony termodynamiky se statistickými zákonitostmi, jež se uplatňují v mechanických soustavách s velkým počtem stupňů volnosti. Boltzmannovy ideje vedly Plancka k jeho fundamentálnímu objevu²⁾. Planckovy úvahy byly v podstatě statistické. Planck se velmi pečlivě vyhýbal definitivním závě-

¹⁾ Нильс Бор, Дискуссии с Эйнштейном о проблемах теории познания в атомной физике, *Успехи физических наук*, LXVI, č. 4 (1958). Ruský překlad článku Niels Bohr, *Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics*, Library of Living Philosophers, Albert Einstein: Philosopher - Scientist, (1949). Do ruštiny přeložili V. A. Fok a A. V. Lermontova.

²⁾ Ne hned. M. Planck pracoval zpočátku pod silným vlivem koncepcí E. Macha, a teprve, když se vlastní zkušeností přesvědčil o jejich neplodnosti, obrátil se k myšlenkám Boltzmannovým. Po této zkušenosti se Planck stal nesmířitelným odpůrcem machismu a Ostwaldova energetismu. Podrobněji o tom viz v článku I. V. Kuzněcov, *Max Planck a jeho boj za vědecký světový názor v přírodovědě*, v tomto časopise, III, č. 6, (1958), a také v článku Dr. F. Herneck, *Max Planck (K 10. výročí smrti)*, tamtéž, č. 2. — J. V.

rům, do jaké míry znamená existence účinkového kvanta odklon od základních zákonů mechaniky a elektrodynamiky. Jádrem Einsteinova přínosu do kvantové teorie (1905) byla však právě poučka, že takové fyzikální jevy, jako fotoefekt, mohou přímo záviset na individuálních kvantových efektech [1]. Einstein v téže době, kdy vypracováváním teorie relativity vytvářel novou základnu fyziky, zkoumal svým smělym rozumem nové rysy atomismu, které zasahovaly daleko za rámec klasické fyziky.

Neomylná intuice dovedla Einsteina krok za krokem k závěru, že každé záření je emisí nebo absorpcí individuálních světelných kvant neboli „fotonů“ s energií

$$(1) \quad E = h\nu \quad \text{a impulsem} \quad P = h\sigma,$$

kde h je Planckova konstanta, ν frekvence a σ vlnočet. Představa fotonu vyvolala přes všechnu svou plodnost neočekávané dilema, neboť žádná korpuskulární teorie záření není konsistentní s interferencí, kterou lze popsat v rámci vlnových přestav. Rozpor je o to ostřejší, že interferenční jevy jsou jedinými prostředky, jak určit frekvenci a délku vlny, tj. právě ty veličiny, které vystupují ve vztahu (1).

Za této situace nemohlo být ani řeči o tom, pokoušet se o kauzální analýzu záření. Bylo možno jen kombinováním protikladných obrazů (korpuskulárního a vlnového) zjišťovat pravděpodobnost, s jakou dojde k jednodlívým emisním dějům.

Zde je důležité si dobře uvědomit, že aplikace pravděpodobnostních zákonů sleduje za těchto okolností zcela jiný cíl, než aplikace statistických úvah ve výkladu vlastností mechanických soustav velmi složité struktury. V kvantové fyzice nejde totiž o složitost struktury, nýbrž o nevhodnost klasických představ pro přenášení rysů nedělitelnost nebo „individuálnosti“, které charakterizují elementární děje.

Teorie klasické fyziky se ukazovaly pro výklad mikrokosmických dějů tím nevhodnější, čím více se poznávala stavba atomu. Byl to především Rutherfordův objev atomového jádra (1911), který jedním rázem odhalil nevhodnost představ klasické mechaniky a elektrodynamiky pro výklad stability, pro atom charakteristické. I zde dala kvantová teorie znovu klíč k objasnění. Poskytla zejména možnost vysvětlit jak stabilitu atomů, tak empirické zákonitosti; zjištěné pro spektra prvků. Toto vysvětlení spočívá na předpokladu, že každá atomární reakce, jež vede ke změně jeho energie, zahrnuje úplný přechod atomu z jednoho tzv. stacionárního kvantového stavu k jinému, a že zejména spektra se emitují stupňovitě, při čemž každý přechod je provázen vyzařením monochromatického světelného kvanta, jehož energie je přesně rovna energii einsteinovského fotonu.

Tyto představy, brzy potvrzené Frankovými a Hertzovými pokusy (1914), se spektry, jež jsou vyvolávána srážkami elektronů s atomy, znamenají další odklon od kauzálního popisování. Pro výklad spektrálních zákonů lze totiž předpokládat, že excitovaný atom může — obecně vzato — přejít při současné emisí fotonů v některý z nižších energetických stavů. Sama představa stacionárních stavů pak je již neslučitelná s jakýmkoli předpisem pro volbu mezi takovými přechody, a připouští jen pojem relativní jejich pravděpodobnosti. Odhadnout tyto pravděpodobnosti bylo možno jen na podkladě tzv. principu korespondence, který je výsledkem snahy najít co nejtěsnější vztah mezi statistickým popisem atomárních dějů a důsledky, jež bylo možno očekávat podle klasické teorie. Klasické teorie bylo pak možno použít jen v limitních případech, kdy velikosti všech působení ve všech fázích jevů jsou velmi velké ve srovnání s velikostí universálního účinkového kvanta.

Tehdy ještě nebylo obecně bezesporné kvantové teorie. Tehdejší názory na fyzikální situaci lze však ilustrovat tímto výňatkem z autorovy přednášky z r. 1913 [2]:

„Doufám, že jsem mluvil dostatečně jasně, abyste pochopili, jak silně se uvedené úvahy odchyľují od oné pozoruhodně důsledné soustavy pojmů, kterou právem nazývají klasickou elektromagnetickou teorií. Z druhé strany právě tím, že jsem tak zdůraznil tento protiklad, pokusil jsem se vzbudit ve vás pocit, že časem jistě bude možno nové pojmy uvést v nějaký systém.“

Ve vypracovávání kvantové teorie udělal důležitý krok vpřed sám Einstein ve své znamenité práci z r. 1917 o rovnovážném vyzařování [3]. Ukázal v ní, že Planckův zákon vyzařování připouští jednoduchý závěr na základě předpokladů, které jsou v soulase se základními idejemi kvantové teorie stavby atomů. Einstein zde formuloval obecná statistická pravidla pro emisní přechody mezi stacionárními stavy. Připouštěl při tom, že k emisí a absorpci dochází nejen v atomech z vnějšíka ozařovaných (přičemž pravděpodobnost frekvence těchto přechodů bude úměrná intenzitě dopadajícího světla), ale také v atomech neozařovaných — spontánně, přičemž frekvence těchto dějů bude odpovídat jistě apriorní pravděpodobnosti. V tomto druhém směru Einstein velmi zdůraznil fundamentální charakter statistického popisu tím, že ukázal na analogii mezi předpokladem

existence spontánních emisních přechodů a dobře známými zákony, jimiž se řídí přeměny radioaktivních látek.

V souvislosti s rozбором termodynamických požadavků, vztahujících se k otázkám záření, Einstein dilema ještě zostril. Ukázal totiž, že jsou-li jeho úvahy správné, musí mít každé záření jistý směr. To je nutno chápat tak, že nejen atom, který pohltí světelné kvantum, dostane od fotonu impuls ve směru odpovídajícím šíření fotonu, ale také vyzařující atom dostává impuls v opačném směru, a to přesto, že podle vlnové teorie nemůže být ani řeči o nějakém privilegovaném směru záření. Einsteinovo stanovisko k těmto překvapujícím závěrům najdeme na konci jeho výše zmíněného pojednání z r. 1917 (str. 127):

„Tyto vlastnosti elementárních dějů vedou k tomu pokládat takřka za nezbytné vybudování vlastní kvantové teorie záření. Slabina teorie je v tom, že z jedné strany nás nepřibližuje sjednocení s vlnovou teorií, z druhé strany v tom, že ponechává „náhodě“ dobu a směr elementárních dějů: přesto mám plnou důvěru, že jdeme po dobré cestě.“

Když jsem se poprvé (v Berlíně v r. 1920) setkal s Einsteinem — byla to pro mne velká událost — byly tyto základní otázky předmětem našich rozhovorů. Často jsem se k těmto rozhovorům potom v myšlenkách vracel a k mému nadšení pro Einsteina přistoupil ještě hluboký dojem z jeho nepředpojaté vědecké posice. Jeho záliba v malebných výrociích, jako „strašidelná pole, která vedou fotony“, neznamenal samozřejmě žádný sklon k mysticismu, nýbrž vyjadřovala jeho jiskravý humor, skrytý v jeho pronikavých poznámkách. Přesto jsme se někde rozcházel v názorech a v představách budoucího vývoje. Einstein dovedl mistrně uvádět v soulad fakta, která se zdála protichůdná, aniž se vzdával kontinuity a kauzality, a byl méně než kdokoli jiný nakloněn k tomu tyto ideje odvrhnout, méně než kdokoli, kdo ústup od nich pokládal za jedinou možnost uvést v soulad mnohotvárný materiál v oblasti atomárních jevů, den ode dne se hromadící.

V dalších letech, během nichž počet fyziků zajímajících se o atomové problémy rychle rostl, byly zdánlivé rozpory v kvantové teorii pocitovány stále ostřeji. Velmi příznačná byla diskuse, ke které došlo v r. 1922 v souvislosti s objevem Sternova a Herlachova efektu. Jev z jedné strany bezpečně potvrdzoval správnost představ o stacionárních stavech, zejména pak Sommerfeldovu kvantovou teorii Zeemanova efektu, z druhé strany kladl, jak ukázali přesvědčivě Einstein a Ehrenfest [4] nepřekonatelné obtíže pro jakékoli pokusy o názornou představu chování atomu v magnetickém poli. Podobná paradoxa vznikla z Comptonova objevu (1924) změny vlnové délky při rozptylu Roentgenových paprsků na elektronech.

Comptonův pokus dokázal, jak známo, přímo správnost Einsteinova názoru na přenos energie a impulsu při záření. Zároveň však bylo zřejmé, že žádná jednoduchá představa jevu jako srážky částice jej nemůže beze zbytku popsat. Pod dojmem takových obtíží vznikly dokonce dočasné pochybnosti o platnosti zákona zachování energie a impulsu v individuálních aktech záření [5]. Tyto pochybnosti však brzy zmizely ve světle zpřesněných pokusů, které vysvětlily existenci jednoznačného vztahu mezi rozptylem fotonu a příslušným odraženým elektronem.

Situace se začala vyjasňovat až tehdy, až byla vypracována ucelenější kvantová teorie. První krok v tom směru učinil Louis de Broglie (1925) myšlenkou, že představa vlna — částice se neomezuje na záření, ale že je nutná i při popisování chování hmotných částic. Pokusy s interferenčními jevy svazku elektronů tuto myšlenku potvrdily. Einstein ji s radostí uvítal, neboť stanovil již hlubokou analogii, mezi vlastnostmi tepelného záření a vlastnostmi plynů v tzv. degenerovaném stavu [6]. S nesmírným úspěchem pokračoval v tomto směru Schrödinger (1926), který zejména ukázal, jak lze stacionární stavy atomové soustavy představit pomocí charakteristických řešení vlnové rovnice. Cestu k odvození této rovnice mu ukázala formální analogie mezi mechanickými a optickými problémy, na níž poprvé upozornil Hamilton.

Paradoxní rysy kvantové teorie se tím však nijak nezměkčily; spíše ještě nabyly na ostrosti zdánlivým rozporem mezi požadavky specifického vlnového popisu obecného principu superposice a individuálními rysy v atomárních dějích.

V téže době (1925) položil Heisenberg základy racionální kvantové mechaniky, jež se brzy velmi rozvinula pracemi Borna, Jordana a Diraca. Teorie zavádí formální aparát, v němž kinematické a dynamické proměnné klasické mechaniky se nahrazují abstraktními symboly, pro něž platí nekomutativní algebra. Přesto, že došlo k vzdání se trajektorie částice, zůstaly základní rovnice mechaniky v hamiltonovské kanonické formě zachovány, a Planckova konstanta vystoupila pouze v pozměněném vztahu

$$(2) \quad qp - pq = \sqrt{-1} \frac{h}{2\pi},$$

platném pro každou dvojici hodnot sdružených proměnných q a p . Maticová forma abstraktních symbolů s prvky, vztahujícími se k přechodům mezi stacionárními stavy, umožnila poprvé formulovat princip korespondence kvantitativně.

Připomeňme na tomto místě, že důležitý předběžný krok v tomto směru byl učiněn (zejména Kramérem) vypracováním kvantové teorie disperse. Jejím jádrem jsou obecná einsteinovská pravidla pro pravděpodobnosti absorpce a emise.

Schrödinger ukázal, že maticová forma kvantové mechaniky vede k výsledkům, které souhlasí s výsledky, jichž lze dosáhnout metodami vlnové teorie, přičemž tyto metody jsou často matematicky vhodnější.

V dalších letech byly postupně vypracovány metody pro popisování atomárních dějů, jež v podstatě jsou statistické. Tyto metody sjednotily logicky bezesporné nedělitelnost atomárních dějů s požadavky, které vyplývají z principu superpozice.

Z mnoha úspěchů z této doby vzpomeňme především toho, že aparát kvantové mechaniky umožnil formulovat princip, platný pro stavy systémů s několika elektrony. Tento princip stanovil Pauli ještě před vypracováním kvantové mechaniky. Kvantová mechanika obsáhla teoreticky takové množství empirického materiálu, že nebylo pochybnosti o její plodnosti. Abstraktní charakter jejího aparátu však budil velký pocit nespokojenosti. Objasnit situaci bylo skutečně možno jen hlubokým studiem problému pozorování v atomové fyzice.

Tuto etapu zahájil v r. 1927 jak známo Heisenberg [7] zjištěním, že údaje o stavu atomární soustavy trpí vždy specifickou „neurčitostí“. Tak každé měření polohy elektronu přístrojem, pracujícím s vysokofrekvenčním zářením (např. mikroskopem) je spjato v soulase se vztahy (1) s výměnou impulsu mezi elektronem a měřicím přístrojem, která je tím větší, čím přesněji se snažíme změřit polohu. Heisenberg srovnával tyto úvahy s požadavky, které plynou z formálního aparátu kvantové mechaniky a všiml si toho, že vztah (2) klade přesnosti, s níž lze určit dvě sdružené proměnné p a q hranici, kterou lze vyjádřit závislostí

$$(3) \quad \Delta p \Delta q \approx h,$$

kde Δp a Δq představují neurčitosti v naměřených hodnotách veličin p a q . Tento vztah (Heisenbergova relace neurčitosti) ukazuje těsnou souvislost mezi statistickým způsobem popisování, přijatým v kvantové mechanice, a skutečnými možnostmi měření. Heisenberg ukázal, že tento vztah má velký význam pro výklad paradoxů, k nimž vedou pokusy analyzovat kvantové efekty pomocí obvyklých fyzikálních představ.

Na mezinárodním fyzikálním kongresu v Como (září 1927), věnovaném památce Volty, byly pokroky atomové fyziky předmětem zevrubných diskusí. Ve svém referátě [8] jsem tehdy vložil stanovisko, jež lze stručně charakterisovat slovem „komplementarita“. Toto stanovisko umožňuje jednak postihnout rys nedělitelnosti, charakteristický pro kvantové děje, jednak vysvětlit specifické zvláštnosti úlohy pozorování v této oblasti. Základem tohoto stanoviska je these: Ať jevy vycházejí jakkoli daleko za rámec klasického fyzikálního výkladu, všechny experimentální údaje (*evidence*) nutno popisovat pomocí klasických pojmů.

Toto tvrzení lze zdůvodnit prostým konstatováním, co znamená slovo „pokus“. Slovem „pokus“ označujeme takovou situaci, kdy chceme sdělit jiným, co jsme udělali a poznali sami. Je proto nutno experimentální zařízení a výsledky pozorování popisovat jednoznačně v jazyku klasické fyziky.

Z této základní poučky, která je hlavním thematem diskuse, o níž pojednává tento článek, plyne závěr: Chování atomárních objektů není možno ostře oddělit od jejich interakcí s měřicími přístroji, které fixují podmínky, v nichž dochází k jevu. Nedělitelnost typických kvantových efektů se jeví totiž v tom, že jakýkoli pokus o třídění jevů vyžaduje změnu experimentální situace, což má za následek nové možnosti interakcí mezi objektem a měřicími přístroji, principiálně nekontrolovatelných. Nelze proto údaje, získané v různých experimentálních podmínkách, vměstnat do jednoho jediného obrazu. Na tyto údaje je spíše nutno se dívat jako na komplementární v tom smyslu, že jen soubor různých jevů³⁾ může dát úplnější představu o vlastnostech objektu.

Za těchto okolností je připisování obvyklých fyzikálních atributů atomárním objektům podstatně spjato s nejednoznačností. Přímou je to vidět v dilematu, týkajícího se korpuskulárních a vlnových vlastností elektronů a fotonů, kde se setkáváme se dvěma jakoby vzájemně si odporujícími obrazy, z nichž každý podává podstatnou stránku toho, co uka-

³⁾ Ne však podrobnější popis jednoho jevu. V. F.

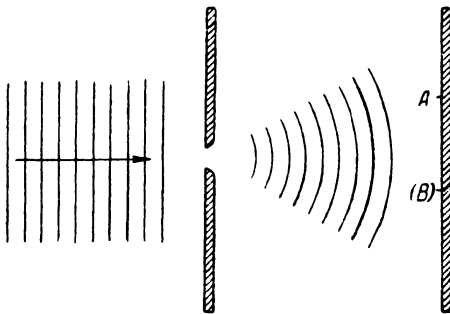
zuje pokus. Všechny zdánlivé paradoxy lze odstranit zkoumáním podmínek (nekonstentních) pokusu, v nichž se pozorují komplementární jevy. Poučný je v tomto směru Comptonův efekt, který bylo zpočátku tak obtížné bez rozporů popsat. Výklad spočívá v tomto případě na faktu, že každé zařízení, vhodné pro studium výměny energie a impulsu mezi elektrony a fotony, musí nevyhnutelně při prostorovém lokalizování připustit neurčitost vlnového čísla a frekvence (vystupující ve vztahu (1)). Také obráceně každý pokus o přesné určení místa srážky fotonu s elektronem by znemožnil přesnější bilancování energie a impulsu, což souvisí s nevyhnutelnou interakcí s pevnými měřítky délky a času, které určují spatiočasovou vztažnou soustavu.

Náležitým prostředkem pro komplementární popisování je právě formální aparát kvantové mechaniky. Je to symbolické schéma, které umožňuje předpovídat výsledky pokusů, konaných za určitých podmínek, jež nutno charakterisovat pomocí klasických pojmů. Toto schéma je spjato s klasickou teorií principem korespondence. Připomeňme, že i vztah (3) je takovým důsledkem formálního aparátu, který nelze nedvojsmyslně vyjádřit slovy, přizpůsobenými pro popis klasického obrazu fyzikálních jevů. Tak vzniká po výroku „současně nemůžeme poznat polohu a impuls atomárního objektu“ ihned otázka, jsou-li vůbec tyto atributy u atomárních objektů reálné. Na tuto otázku můžeme odpovědět jen tak, že zkoumáme podmínky pro jednoznačné použití jednak spatiočasových pojmů, jednak dynamických zákonů zachování. Kausální spojení těchto pojmů je podstatou klasické mechaniky. Zákonitosti, které takovým klasickým popisem nelze postihnout, zapadají do teorie díky tomu, že zkoumání komplementárních jevů vyžaduje vzájemně se vylučujících experimentálních situací.

Nutnost revidovat základy pro sporuprosté aplikování elementárních fyzikálních idejí, která vznikla v atomové fyzice, připomíná poněkud situaci, v níž byl svého času Einstein. Einstein byl nucen provést revisi základů spatiočasových pojmů, a díky důrazu, který byl při této revisi položen na problém pozorování, dostal náš fyzikální obraz světa pozoruhodný vnitřní soulad a jednotnost. Přes všechno nové a nezvyklé, které teorie relativity přinesla, zachovala kausální popis v každé dané vztažné soustavě. V kvantové mechanice se však musíme i toho vzdát pro nekontrolovatelnost interakce mezi objektem měření a měřicím přístrojem. To však v žádném případě neznamená omezenost nebo neúplnost kvantové mechanického popisu, a moje argumentace v Como měla právě ukázat, že stanovisko „komplementarity“ lze pokládat za rozumné zobecnění ideje kausality.

* * *

Einstein nám všem v Como scházel. V říjnu r. 1927 jsem však měl příležitost sejít se s ním v Bruselu na pátém fyzikálním kongresu Solvay. Kongres byl věnován tematiku „elektrony a fotony“. Einstein byl na tomto kongresu jednou z nejpozoruhodnějších postav a mnozí z nás přišli na kongres proto, aby poznali Einsteinův názor na nejnovější etapu rozvoje teorie, etapu, která podle našeho názoru přinesla uspokojivé vysvětlení problémů, položených s takovou naléhavostí samým Einsteinem. Einstein dal však najevo silný neklid z velkého odklonu, ke kterému došlo od kausálního popisu v prostoru a v času.



Obr. 1

Einstein vysvětloval svoje hledisko jednoduchým příkladem částice (elektronu nebo fotonu), procházející štěrbinou ve stínítku, za níž je umístěna fotografická deska (obr. 1). Vlna, která je spjata s pohybem částice (v obraze 1 je vyznačena slabými čarami) se při průchodu štěrbinou ohýbá, nelze proto předpovědět přesně, kam dopadne částice na fotografickou desku. Lze pouze určit pravděpodobnost, s jakou částice dopadne při pokusu do daného místa desky. S takovým popisem jevu je však spojena jedna obtíž, která Einsteina silně zneklidňovala. Byla-li totiž částice při pokusu zaregistrována v bodě A desky, je vyloučena možnost pozorovat jakékoli její působení v jiném bodě B. Avšak zákonitosti obyčejného šíření vln nepřipouštějí žádnou korelaci mezi takovými dvěma jevy.

Věc zavdala podnět k živým debatám v užším kruhu účastníků kongresu. Velmi aktivně se těchto debat zúčastnil také P. Ehrenfest. Chápali jsme samozřejmě všichni, že v uvedeném příkladě nejde o analogii se statistickým chápáním složitých mechanických soustav. Situace spíše připomínala východisko dřívějších Einsteinových závěrů o určitém usměrnění individuálních efektů záření, které byly v příkrém rozporu s jednoduchým vlnovým obrazem. Hlavní otázkou našich debat bylo, vyčerpává-li kvantový popis to, co lze skutečně pozorovat, nebo — jak tvrdil Einstein — lze-li provádět analýsu dále, a nelze-li na konec dojít úplného popisu jevů přihlédnutím k podrobné bilanci energie a impulsu v elementárních dějích.

Abychom vysvětlili, co měl Einstein na mysli, ukážeme některé jednoduché zvláštnosti bilancování impulsů a energie v souvislosti s lokalizací částice v prostoru a času.

Vezmeme jednoduchý případ, kdy částice prochází otvorem ve stínítku stále otevřeným (obr. 2a), popřípadě otvorem ve stínítku, který lze clonou otvírat a zavírat (obr. 2b). Rovnoběžné čáry po levé straně stínítko v obraze 2 představují sled rovinných vln, příslušných pohybu částice, která až do průchodu stínítkem má impuls P , spjatý s vlnovým číslem σ rovnici (1). Po průchodu otvorem je pohyb částice zobrazen (v obraze 2 vpravo od stínítko) sledem kulových vln s určitým úhlem rozptylu θ . V případě, zobrazeném v obraze 2b je tento sled ohraničen také v radikálním směru.

Popis tohoto stavu vykazuje proto neurčitost Δp v impulsové komponentě pohybu částice, rovnoběžné s rovinou stínítko. U stínítko s clonou je také neurčitost ΔE v kinetické energii částice.

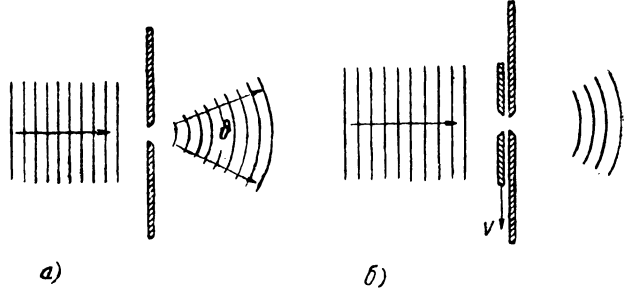
Neurčitost Δq v poloze částice v rovině stínítko se měří poloměrem otvoru a ; dále je $\theta \approx \frac{1}{\sigma a}$. Užitím (1) dostaneme proto $\Delta p \approx \theta P \approx \frac{h}{\Delta q}$ v soulase s (3). Tento výsledek můžeme dostat také přímo, přihlédneme-li k prostorové ohraničenosti vlnového pole v místě otvoru. V důsledku toho je komponenta vlnového čísla, rovnoběžná s rovinou stínítko, určena jen uvnitř intervalu $\Delta \sigma \approx \frac{1}{a} \approx \frac{1}{\Delta q}$. Podobně je šířka rozptylu frekvencí harmonických složek v omezeném sledu vln v případě, znázorněném v obraze 2b, rovna zřejmě $\Delta \nu \approx \frac{1}{\Delta t}$, kde Δt je časový interval, během něhož je otvor ve stínítku otevřený. Δt zároveň představuje neurčitost okamžiku průchodu částice stínítkem. Odtud dostaneme podle (1)

$$(4) \quad \Delta E \Delta t \approx h,$$

zase v soulase s (3) pro obě sdružené proměnné E a t .

Z hlediska zákonů zachování je možno výskyt takových neurčitostí připsat na vrub možnosti výměny impulsu a energie se stínítkem nebo s clonou. V soustavě, znázorněné v obraze 2, lze rychlost stínítko zanedbat. Clona se však pohybuje značnou rychlostí $v \approx \frac{a}{\Delta t}$. S přenosem impulsu Δp bude tedy spjata výměna energie s částicí, rovná $v \Delta p \approx \frac{1}{\Delta t} \Delta q \Delta p \approx \frac{h}{\Delta t}$, tedy veličina téhož řádu jako ΔE ve vztahu (4). Zákonu zachování impulsu bude tedy vyhověno.

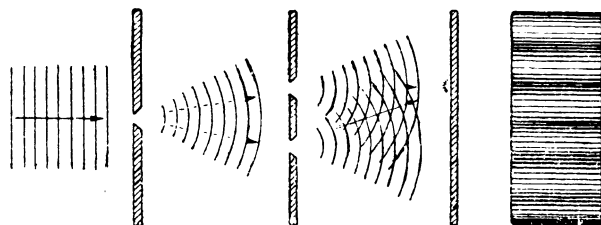
Einstein předložil úlohu ukázat, do jaké míry lze kontroly přenosu impulsu a energie (kontroly spojené s určitou polohou částice) využít pro podrobnější popis stavu částice po jejím průchodu otvorem ve stínítku. Při tom je třeba přihlížet k tomuto: Až dosud se stínítko i clona pokládaly za přesně spjaté s prostorovočasovou vztáží soustavou, takže jejich poloha a pohyb v této soustavě se pokládaly za přesně známé. Tento předpoklad



Obr. 2

znamená podstatnou neurčitost v energii a impulsu těchto objektů, která však nemusí mít patrnější vliv na rychlosti, jsou-li oba objekty dostatečně těžké. Kdybychom však chtěli znát impuls a energii těchto částí měřicí aparatury jen s takovou přesností, která by stačila pro kontrolu výměny impulsů a energie se zkoumanou částicí, věc se změní. Ztrácíme — v soulase s obecnými relacemi neurčitosti — možnost přesně určit polohu stínítka a clony v prostoru a v čase. Mísíme proto vyzkoumat, do jaké míry ovlivňuje tato okolnost předpokládané použití celé aparatury, a právě tím se vyjasní, jak uvidíme, komplementární charakter jevů.

Neřekli jsme ještě přesně, čemu slouží zařízení, znázorněné v obraze 1. Nemožnost přesněji předpovědět místo dopadu částice na fotografické desce logicky plyne z aparátu kvantové mechaniky jen v tom případě, předpokládáme-li, že stínítka a fotografická deska mají přesně určenou polohu v prostoru. Pripustíme-li dostatečnou nepřesnost ve znalosti polohy stínítka, musí být principiálně možno prokontrolovat přenos impulsu na stínítka a tak přesněji předpovědět směr dráhy částice od otvoru k fotografické desce. Z hlediska kvantové mechanického popisování tu máme soustavu dvou objektů, stínítka a částice. S přímou aplikací zákonů zachování na takovou soustavu se setkáváme u Comptonova efektu: např. pozorování odraženého elektronu pomocí Wilsonovy komory umožňuje předpovědět, v jakém směru budeme pozorovat rozptýlený foton.



Obr. 3

ma šterbinami (obr. 3). Dopadali-li rovnoběžný svazek elektronů (nebo fotonů) zleva na prvé stínítka, vznikne za obvyklých podmínek na fotografické desce interferenční obraz (čárkovaný obdélník v obraze vpravo). Při intenzivním ozáření vznikne tento obraz z mnoha jednotlivých dějů, z nichž každý přispěje malou skvrnou na fotografické desce. Rozložení těchto skvrn vyhovuje jednoduchému zákonu, který se odvozuje z vlnové analýsy. Stejně rozložení musíme dostat statisticky z mnoha pokusů s tak slabým ozářením, že při jedné expozici dojde k fotografické desce jen jedna částice, která se projeví v jednom jediném bodě (hvězdička v obraze 3). V tomto případě lze očekávat, že impuls, udělený prvním stínítkem, bude odlišný podle toho, projde-li částice horní nebo dolní šterbinou druhého stínítka (čárkované šipky v obraze 3). Na podkladě této úvahy Einstein ukázal, že kontrola předaného impulsu by umožnila podrobnější rozbor děje, zejména pak že by umožnila rozhodnout, kterou ze dvou šterbin částice projde před dopadem na fotografickou desku.

Podrobnější rozbor těchto úvah však ukázal, že navržená kontrola přenosu impulsu není možná bez nepřesnosti ve znalostech polohy stínítka, nepřesnosti, která vylučuje vznik interferenčních jevů. Je-li totiž ω malý úhel předpokládaných drah částice, procházející horní a dolní šterbinou, je rozdíl v impusech podle (1) roven $\hbar\sigma\omega$, a jakákoli kontrola impulsu stínítka s přesností, postačující k jeho změření, bude mít za následek nepřesnost v měření polohy stínítka řádu nejméně $\frac{1}{\sigma\omega}$. Je-li stínítka se dvěma šterbinami uprostřed mezi prvním stínítkem a fotografickou deskou (obr. 3), připadá, jak je vidět, na jednotku délky právě $\sigma\omega$ pásů. A poněvadž nepřesnost $\frac{1}{\sigma\omega}$ v poloze prvního stínítka má za násle-

dek stejnou nepřesnost v poloze pásů, nemůže dojít k žádné interferenci. Ke stejným výsledkům se dojde, jak se dá snadno ukázat, při jakékoli jiné poloze druhého stínítka a také tehdy, použije-li se pro kontrolu přenosu impulsu druhého stínítka nebo fotografické desky.

Tato stránka věci je z logického hlediska velmi důležitá, neboť jen okolnost, že máme na vybranou buď sledovat trajektorii částice nebo pozorovat interferenci, umožňuje vyhnout se paradoxnímu závěru, že chování částice musí záviset na existenci šterbiny ve stínítku, kterou zcela jistě neprošla. Máme tu typický příklad komplementárních jevů, probíhajících za vzájemně se vylučujících experimentálních podmínek. V analýze kvantových

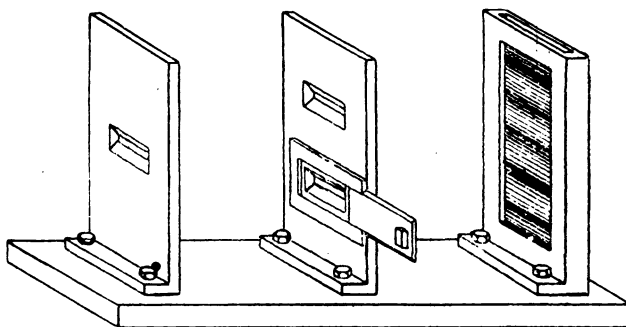
Význam takovýchto úvah se ukázal v diskusích na velmi zajímavém příkladě zařízení, v němž mezi stínítkem se šterbinou a fotografickou deskou bylo další stínítka se dvě-

efektů jsme v situaci, že nemůžeme ostře oddělit chování atomárních objektů o sobě od interakcí s měřicími přístroji, které určují podmínky pro vznik jevů.

Naše rozhovory o této situaci se přirozeně dotkly mnoha filosofických otázek. Přes všechny názorové rozdíly však nepostrádaly humoru. Einstein se nás např. uštěpačně ptal, věříme-li skutečně, že „... pánbíček hraje v kostky...“⁴⁾ Já jsem mu na to odpověděl, že již starověcí myslitelé nabádali k velké opatrnosti v přísuzování běžných stránek života prozřetelnosti. Vzpomínám si také, jak Ehrenfest svým milým způsobem v nejživější diskusi poukázal na zřejmou analogii Einsteinova hlediska s hlediska, jež zaujímají odpůrci teorie relativity. Dodal však, že nebude mít klidu, dokud se nedosáhne souhlasu s Einsteinem.

* * *

Einsteinovy pochybnosti a jeho kritika byly pro nás mimořádně cenným podnětem k revisi názorů na různé stránky situace, s níž se setkáváme při popisování atomárních dějů. Já jsem to s radostí uvítal jako důvod k ještě pečlivějšímu objasnění úlohy měřicích přístrojů. Zkoušel jsem za účelem co nejnázornější ilustrace vzájemně se vylučujících podmínek v pokusech, jež vedou ke komplementárním jevům, navrhnout různá experimentální zařízení. Pro studium jevu, ilustrovaného obrazem 3, je přirozené použít experimentálního zařízení, znázorněného v obraze 4. Jeho pevné části (stínítko a fotografická deska) jsou upevněny na jedné desce. Tak je zajištěna naše znalost jejich vzájemných poloh. V důsledku toho je ovšem zřejmě nemožné kontrolovat přenos impulsu z částice k různým částem přístroje. Jediná možnost přesvědčit se, že částice prošla určitou štěrbinou v druhém stínítku, je zaclonit zbývající štěrbinou (obr. 4).



Obr. 4

Bude-li však jedna štěrbinu zacloněna, nedojde ani k interferenci a na fotografické desce se objeví rozložení, jako v případě, ilustrovaném obrazem 1.

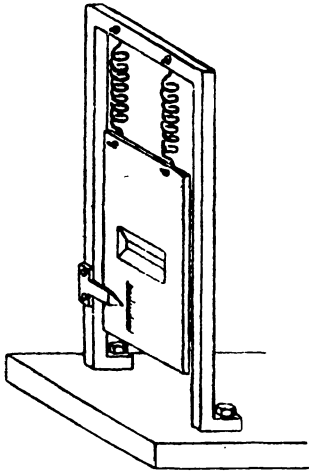
Při studiu jevů, k jejichž popisu je nezbytné znát podrobně bilanci impulsu, je zřejmě nutné připustit, aby některé části pokusného zařízení byly — vzájemně na sobě nezávisle — pohyblivé. V obraze 5 je znázorněn takový přístroj; stínítko je tu zavěšeno v pevném rámu na měkkých pružinách. Rám je upevněn na též podstavci, jako ostatní části přístroje. Pomocí stupnice na stínítku a jazýčku, upevněném na rámu, je možno zkoumat pohyb stínítka v té míře, jak je toho třeba pro odhad impulsu, přenášeného na stínítko. To pak umožňuje posoudit odchylku částice při jejím průchodu štěrbinou. Poněvadž však každé, jakkoli prováděné odečítání na stupnici má za následek nekontrolovatelnou změnu impulsu stínítka, bude, v soulase s principem neurčitosti, vždy existovat inverzní vztah mezi přesností našich znalostí polohy štěrbinu a přesností kontroly impulsu.

Obraz 6 ukazuje podobné (myšlené) zařízení, jímž lze zkoumat jevy, jež vyžadují kromě již řečeného také koordinace v čase. Zařízení sestává z přístroje, v němž clona je pevně spjata s hodinami se silným pérem. Hodiny jsou upevněny na též podstavci jako stínítko. Na též podstavci musí být upevněny i ostatní části aparatury, uváděné v chod buď tímž časovým mechanismem, nebo jinými mechanismy, s ním synchronisovanými. Zdůrazněme, že hodiny jsou stroj, jehož chod lze úplně popsat v rámci obyčejné mechaniky, přičemž ani odečítání na ciferníku, ani interakce mezi atomární částicí a jednotlivými součástmi tohoto stroje nemají na jeho chod žádný vliv. Přístroj tohoto typu může zabezpečit odclození štěrbinu v určitý okamžik, mohl by tedy sloužit např. k přesnému změření doby, kterou potřebuje částice, aby došla od stínítka do jakéhokoli jiného místa.

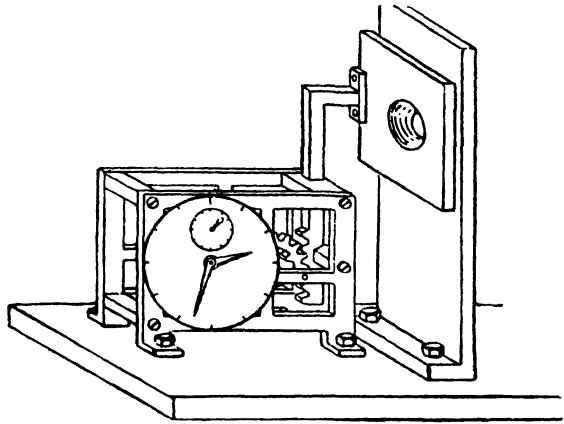
⁴⁾ „... ob der liebe Gott würfelt...“.

Je však zřejmé, že tento přístroj neumožňuje změřit přenos energie na clonu a tedy ani závěr o energii částice, která prochází stínítkem. Kdybychom chtěli činit závěry tohoto druhu, museli bychom použít pokusného zařízení, v němž mechanismus clony nemůže být přesným časoměrem. V takovém zařízení obsahuje určení okamžiku odclonění nepřesnost, sptatou s nepřesností změření energie vztahem (4).

Studium takových více nebo méně realizovatelných aparatur a jejich více nebo méně fiktivního použití bylo velmi poučné, neboť ukazovalo na nejpodstatnější stránky zkou-



Obr. 5



Obr. 6

maných otázek. Hlavní věcí je přitom rozlišovat mezi zkoumanými objekty a měřicími přístroji, které slouží k tomu, aby bylo možno v jazyku klasické fyziky fixovat podmínky, za nichž se jevy pozorují.

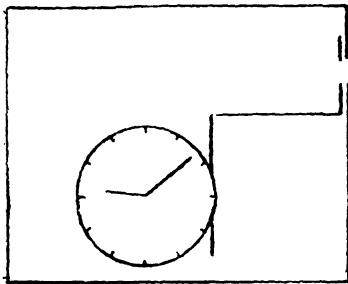
Připomeňme, že pokusy, v nichž se předpokládá možnost měřit přenos impulsu a energie z atomárních částic na těžké objekty typu stínítka a clona, sotva lze prakticky provádět. To však nezmenšuje jejich ilustrující význam. Rozhodující je tu okolnost, že tyto těžké objekty jsou spolu s částicemi částmi soustav, na něž se aplikuje formální aparát kvantové mechaniky. Pokud jde o specifické podmínky pro tuto aplikaci, je důležité, že tyto podmínky musí charakterisovat celé zařízení. Přidá-li se totiž jakákoli další součást, např. zrcadlo, do dráhy částice, vzniknou nové interferenční jevy, které mohou podstatně ovlivnit předpověď možných výsledků, jež se na konec registrují.

Okolnost, že se musíme vzdát názornosti v představách atomárních dějů, je podmíněna tím, že je nemůžeme dělit na dílčí jevy a zkoumat je tak podrobněji. Do jaké míry se musíme vzdát této názornosti, ukazuje znamenitě tento Einsteinův příklad, k němuž se Einstein často vracel: Umístíme do dráhy fotonu poloprůzračné zrcadlo, které mu dává dvě možnosti směru dalšího letu. Foton může být zaregistrován jen na jedné z fotografických desek, jež leží v obou možných drahách fotonu, a vzájemně jsou značně odlehlé. Budou-li na místě fotografických desek zrcadla, můžeme pozorovat jev, který dokazuje, že obě odražené vlny interferují. Každý pokus o názorný výklad naráží tu na obtíž: buď musíme říci, že foton vždy volí jednu ze dvou možných cest, nebo že se chová tak, jakoby prošel oběma cestami.

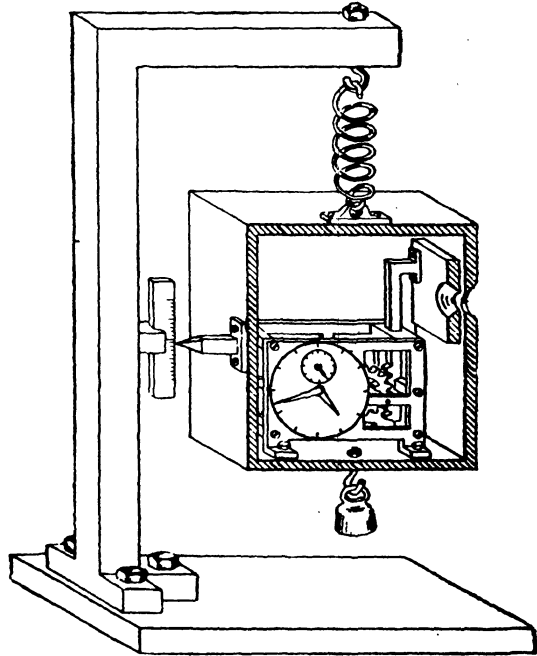
Takovéto argumenty právě ukazují na to, že je nemožné kvantové jevy dělit („rozkousovávat“). Skrývají v sobě také nejednoznačnost, přisuzují-li se atomárním objektům obyčejné fyzikální vlastnosti. Zřejmě je třeba si ujasnit toto: Jestliže se nepřihlíží k prostorovému rozmístění částí aparatury a jejich působení v čase, redukuje se každé jednoznačné užití prostorčasových představ pro popsání atomárních jevů na registraci pozorování na fotografické desce nebo pozorování zesilovacích efektů — prakticky nereversibilních — analogických např. vzniku vodní kapky kolem iontu ve Wilsonově komoře. Je sice pravda,

že vlastnosti materiálů, z nichž jsou zhotovena pokusná zařízení, jsou samy nakonec podmíněny existencí účinkového kvanta, to však není podstatné v problému adekvátnosti a úplnosti kvantové mechanického popisu ve smyslu, jak jsme o tom právě hovořili.

O těchto otázkách se všestranně jednalo na kongresu Solvay [10], na zasedání, na němž mluvil Einstein. Na tomto podkladě vznikl také zajímavý spor o to, jak hovořit o jevech, o nichž je možno činit jen statistické předpovědi. Spor se točil kolem otázky, má-li se při realizaci jednotlivého efektu (z jistého počtu možných) použít terminologie, navrhované Diracem, podle níž jde o volbu ze strany „přírody“, nebo máme-li mluvit podle Heisenberga o volbě ze strany „pozorovatele“, který zhotovil přístroje a zjistil výsledky. Obě terminologie jsou však pochybné. Sotva lze totiž připisovat přírodě svobodnou vůli v běžném slova smyslu, ani pozorovatel však nemůže ovlivnit události, k nimž dochází za podmínek, které vytvořil. Podle mého názoru nemáme jiného východiska, než uznat,



Obr. 7



Obr. 8

že v této oblasti fyziky jde o elementární (nedělitelné) jevy a že vše, co můžeme učinit pomocí různých přístrojů, se redukuje na volbu mezi různými komplementárními typy jevů, jež chceme studovat.

* * *

Při dalším setkání s Einsteinem, ke kterému došlo na konferenci Solvay v r. 1930, dostaly naše diskuse dramatický ráz. Viděli jsme výše, že je-li účelem přístroje určit prostorovo-časový rámec jevů, vylučuje se možnost kontroly impulsu a energie. Einstein proti tomu uváděl, že taková kontrola by snad byla možná, kdyby se přihlédlo k požadavkům teorie relativity. Např. ve speciálním případě umožňuje známá Einsteinova formule

$$(5) \quad E = mc^2,$$

kteřý vyjadřuje vztah mezi hmotou a energií, změřit úhrnnou energii soustavy prostým vážením a v principu takto kontrolovat energii, přenesenou na soustavu za dobu interakce s atomárním objektem.

Einstein navrhl za tím účelem zařízení, schematicky podané v obraze 7. Zařízení sestává ze skřínky s otvorem v jedné stěně. Otvor lze začlenit pomocí časového mechanismu, který je uvnitř skřínky. Předpokládáme nyní, že ve skřínce dochází k vyzařování a že časový mechanismus je nastaven tak, že v určitý okamžik se otvor ve stěně skřínky odclopní na velmi krátkou dobu. Je myslitelné, že můžeme dosáhnout, aby v určitý okamžik, který bude znám s libovolnou přesností, prošel otvorem jediný foton. Kdybychom dále

zvážili skřínku před pokusem a po něm, zdálo by se, že lze změřit energii fotonu s libovolnou přesností — v protikladu k relaci neurčitosti pro energii a čas.

To byla vážná výzva. Otázkou bylo nutno znovu přezkoumat. Výsledkem diskuse, jíž se zúčastnil i Einstein, bylo, že jeho soud je neúplný. Ukázalo se totiž nutným pečlivěji zkoumat důsledky, jež plynou ze ztotožňování setrvačné a tíhové hmoty ve vztahu (5). Zejména bylo nutno přihlídnout k závislosti chodu hodin na jejich poloze v gravitačním poli — závislosti, známé z rudého posuvu ve spektru a vyplývající z Einsteinova principu ekvivalence účinku přitažlivé síly a jevů, pozorovatelných ve zrychleně se pohybujících vztazných soustavách.

Naše diskuse se soustředila na to, lze-li použít přístroje, znázorněného v obraze 8. Skřínka (v obraze v řezu) je zavěšena na pružině. Její polohu lze odečíst na stupnici, upevněné na pevném rámu. Závažím vespuďu skřínky se stanoví nulová poloha. Skřínku lze pak zvážit s libovolnou danou přesností Δm . Avšak každé určení nulové polohy s danou přesností Δq má za následek neurčitost Δp v impulsu skřínky, přičemž Δq a Δp jsou spjatý vztahem (3).

Veličina Δp sama musí být zase menší, než je úhrnný impuls, který může být předán tíhovým polem tělesu s hmotou Δm za dobu T , po kterou se váží, tedy

$$(6) \quad \Delta p \approx \frac{\hbar}{\Delta q} < Tg \Delta m,$$

kde g je tíhové zrychlení. Z druhé strany pak hodiny, přemístěné ve směru tíže o Δq , změňjí podle teorie relativity svůj chod za dobu T o veličinu ΔT , danou vztahem

$$(7) \quad \frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{c^2} g \Delta q.$$

Z (6) a (7) plyne nyní, že po zvážení je naše znalost času⁵⁾ nepřesná o hodnotu

$$\Delta T > \frac{\hbar}{c^2 \Delta m},$$

což vzhledem k (5) vede k nerovnosti

$$\Delta T \Delta E < \hbar$$

v soulase s principem neurčitosti. Použití přístroje pro přesné změření energie fotonu znemožňuje určit přesně okamžik jeho vyzáření.

Tato diskuse, která ukázala průkaznost relativistických argumentů, znovu zdůraznila, že je nutno při studiu atomárních objektů rozlišovat mezi vlastními měřicími přístroji, sloužícími k určení vztazné soustavy, a částmi aparatury, které nutno brát jako objekty výzkumu a u nichž nelze při popisování zanedbávat kvantové efekty⁶⁾. Přes tak přesvěd-

⁵⁾ Zde nejde de facto o naši znalost údajů hodin, nýbrž o nějaký objektivní fakt, zejména pak o přesnost, s jakou lze stanovit korespondenci mezi údajem hodin zavěšených na pružině a údajem laboratorních hodin. Tyto laboratorní hodiny by měly být v obraze 8 naznačeny, a to upevněné na podstavci. *V. F.*

⁶⁾ Zde je třeba vysvětlení. V podstatě jde o požadavek, aby všechny výsledky měření byly vyjádřeny v určité „laboratorní“ vztazné soustavě. Bohřuv výrok, že „vlastní měřicí přístroje slouží k určení vztazné soustavy“ je třeba chápat v tom smyslu, že přístroj buď poskytne přímo údaje v laboratorní vztazné soustavě, nebo lze jeho údaje přepočítat na takovou soustavu, aniž se do nich vnesou nové nepřesnosti. Např. v právě popsaném paradoxu je rozhodujícím momentem přepočet ze soustavy spjaté se skřínkou do soustavy spjaté s podstavcem. Objasnění pak spočívá právě v tom, že i když okamžik výletu kvanta může být přesně registrován hodinami ve skřínce, přepočet na laboratorní údaj (např. na hodiny upevněné na podstavci) vnaší do úvahy neurčitost ΔT .

Pokud jde o Bohrovo rozlišování na vlastní přístroje a na části aparatury, u nichž nelze zanedbávat kvantové efekty, jde pravděpodobně o toto: přístroje nutno popisovat klasicky, avšak s přihlídnutím k Heisenbergovým relacím neurčitosti. To se vztahuje na všechny součásti aparatury. Avšak pro tu část, kterou Bohr nazývá „vlastními přístroji“, lze vzhledem k její masivnosti Heisenbergovy nerovnosti zanedbat. Pro jiné části zařízení jsou Heisenbergovy nerovnosti splněny „na hranici“, je tedy nutno explicitě k nim přihlížet (tak je také třeba rozumět slovům „nelze... zanedbávat kvantové efekty“). *V. F.*

čivě potvrzení logičnosti a šířky kvantově mechanického popisování vyslovil Einstein v rozhovoru, který jsem s ním měl potom, pocit nespokojenosti, pocit, že nemáme fundovaných principů pro popisování přírody, s nimiž by mohli všichni souhlasit. Mohl jsem mu, vycházejí ze svého stanoviska, pouze odpovědět, že klademe-li si za cíl zavést pořádek ve zcela nové oblasti poznání, sotva můžeme spoléhat na jakékoli staré principy, byť sebe obecnější. Jediným nutným požadavkem je logická bezespornost, avšak právě v tomto ohledu splňuje matematický aparát kvantové mechaniky nejnáročnější podmínky.

Kongres Solvay v r. 1930 byl poslední příležitostí, kdy se našich diskusí s Einsteinem zúčastnil Ehrenfest. Nedlouho před svou tragickou smrtí v r. 1933 se mi však svěřil, že Einstein zdaleka není spokojen, a že s pronikavostí ducha jemu vlastní našel nové stránky situace, které ho utvrdily v jeho kritickém postoji. Einstein zkoumal dále možnost použít vážícího zařízení a skutečně přimyslel proceduru, která paradox natolik vyhrotila, že se na první pohled zdálo logicky neřešitelný. Ukázal, že po předcházejícím zvážení skřínky s hodinami a následujícím výletu fotonu vždy ještě zůstává možnost volby: opakovat vážení nebo odclonit otvor ve skřínce a pozorovat časový údaj pomocí laboratorní časové stupnice. Můžeme tak v tomto stadiu pokusu volit, chceme-li učinit závěr o energii fotonu nebo o okamžiku, kdy foton skřínku opustil. Aniž jakkoli ovlivníme foton mezi jeho opustěním skřínky a následující interakcí s příslušnými měřicími přístroji, můžeme činit přesné předpovědi buď o okamžiku dopadu fotonu nebo o energii, uvolněné jeho absorpcí. Podle kvantové mechaniky však nemůže zadání stavu izolované částice obsahovat zároveň úplně určenou korespondenci s časovou stupnicí a přesné stanovení energie. Může se tedy ukázat, že aparát kvantové mechaniky neposkytne prostředky pro náležitě popsání skutečnosti⁷⁾.

I zde našel pronikavý duch Einsteinův specifický aspekt, s jakým se setkáváme v kvantové teorii, aspekt, který ukazuje, jak mnoho jsme se vzdálili od obvyklých způsobů výkladu přírodních jevů. Nicméně nemohl jsem souhlasit s tendencí Einsteinových poznámek, jak je podal Ehrenfest. Máme-li, podle mého názoru, logicky bezesporný matematický aparát fyzikální teorie, můžeme jeho inkonsistenci prokázat jen rozporem teorie s experimentální zkušeností, nebo tím, že předpovědi, na tomto aparátě založené, nevyčerpávají vše, co lze pokusně zjistit. Einsteinova argumentace však nevede ani na jedno ani na druhé. Musíme totiž mít jasně na mysli, že v dané úloze nemáme jednu určitou experimentální situaci, nýbrž dvě, které se vzájemně vylučují. V jedné z nich váhy a jiné přístroje slouží ke zkoumání přenosu energie fotonem, v druhé se měří pomocí clony, řízené laboratorním hodinami, a pomocí jiných ještě přístrojů doba, kterou potřebuje foton k prolétnutí dané dráhy. V obou případech nutno očekávat (jak také činil Einstein), že pozorované efekty budou plně odpovídat předpovědím teorie.

Tato úloha znovu ukazuje, že je nevyhnutelné uvažovat celé experimentální zařízení, jehož přesná specifikace je podstatná pro pokud možno jednoznačné použití aparátu kvantové mechaniky. Můžeme dodat, že paradoxy typu, jaké promyšlel Einstein, vznikají i v tak jednoduchých zařízeních, jaké je znázorněno v obraze 5. Po změření impulsu stínítka můžeme totiž, jakmile částice prošla štěrbinou, vždy ještě volit mezi novým změření impulsu nebo lokalizováním stínítka. Podle této volby pak můžeme činit příslušné předpovědi. Poznamenejme ještě, že pokud jde o efekty pozorovatelné pomocí nějaké dané experimentální aparatury, nezáleží zřejmě na tom, budou-li plány pro sestavení aparatury nebo plány pro manipulaci s ní vypracovány předem, nebo odložíme-li stanovení těchto plánů na pozdější dobu, kdy částice bude již na cestě od jednoho přístroje k druhému.

V kvantově mechanickém popisu lze svobodu konstruovat experimentální zařízení a a manipulovat s ním vyjádřit možností volit klasické parametry, jež lze zavést do úvah při jakémkoli důsledném použití formálního aparátu. V tomto směru totiž ukazuje kvantová mechanika přibuznost se situací v klasické fyzice, a to tak úplně, jak je možno očekávat, uvažujeme-li nedělitelnost kvantových jevů. Einsteinovy úvahy a pochybnosti byly zejména v tomto smyslu obzvláště užitečné.

* * *

⁷⁾ Zde jde v podstatě o relaci neurčitosti pro energii a čas. Tato relace spojuje jak známo neurčitosti ve změně energie v časovém okamžiku, kdy ke změně došlo. V daném případě je změna energie absorbujícího objektu rovna energii světelného kvanta, okamžik, v němž ke změně energie dojde, je okamžik pohlcení kvanta. Myšlenku, vyslovenou v textu Bohrem, bylo by možno volněji vyslovit takto: „Ponevadž podle kvantové mechaniky nemůžeme znát přesně okamžik, kdy došlo ke změně energie částice, současně s velikostí této změny, může se...“ V. F.

Následující kongres Solvay (1933) se zabýval stavbou a vlastnostmi atomového jádra. V nukleární fyzice se právě dosáhlo velkých úspěchů experimentálních i teoretických. V této souvislosti musíme připomenout, že nové výsledky, zejména v bádáních o nukleárních přeměnách, přímo potvrdily základní zákon o ekvivalenci hmoty⁸⁾ a energie, objevený Einsteinem. Tento zákon se postupně stával stále důležitějším prostředkem v nukleárních výzkumech. Připomeňme dále, že také intuitivní Einsteinova domněnka o těsné souvislosti zákona radioaktivních přeměn s pravděpodobnostními pravidly, jimž podléhají individuální efekty vyzařování, byla potvrzena kvantově mechanickým výkladem rozpadu atomového jádra. Zde máme totiž typický příklad statistického popisování, a komplementárnost zachování energie a impulsu z jedné a lokalisace v prostoru a v čase z druhé strany ostře vystupuje ve známém paradoxu o pronikání částice potenciálním valem.

Einstein se kongresu nezúčastnil, neboť byl v té době přímo postižen nástupem německého fašismu. Šešel jsem se s ním však několik měsíců předtím v Princetonu, kde byl tehdy hostem právě založeného vědeckého střediska *Institute for Advanced Study*, jehož se stal brzy stálým členem. Měl jsem při tom příležitost ještě jednou s ním hovořit o otázkách atomové fyziky, vztahujících se k teorii poznání. Rozdílnost v našich stanoviscích i ve způsobu vyjadřování myšlenek však stále ještě bránily vzájemnému pochopení. Až dosud se diskusí, o nichž jsme mluvili, zúčastňovalo poměrně mnoho lidí. Kritické stanovisko Einsteinovo, k němuž se připojila řada dalších fyziků, se však brzy stalo známým širším vědeckým kruhům zásluhou článku, uveřejněného v r. 1935 pod názvem *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?* (Lze pokládat kvantově mechanický popis fyzikální reality za úplný?) [11]⁹⁾.

Argumentace v této práci vychází z kriteria, které autoři formulují takto: „Můžeme-li bez jakékoli excitace soustavy předpovědět hodnověrně (tj. s pravděpodobností rovnou jedné) hodnotu některé fyzikální veličiny, existuje prvek fyzikální reality této fyzikální veličině odpovídající“. Autoři používají představy stavu systému, kterou poskytují

⁸⁾ Tíhové nebo sstrvačné, nikoli hmoty ve smyslu filosofické kategorie. *J. V.*

⁹⁾ Rusky v *Uspechi fizičeskich nauk*, sv. 16, č. 4, (1936).

Napsal jsem k ruskému překladu tohoto článku úvod. Dnes, když jej po dvaceti letech znovu čtu, nemohu neupozornit na nesprávné formulace, které se v něm vyskytují a které by bylo možno chápat pozitivisticky.

V „úvodu“ jsou výroky, v nichž se popírá objektivní charakter pojmu „kvantový stav soustavy“. Takové výroky mohou ovšem zmařit, a neměly se činit. Lze je však částečně objasnit tím, že slova „objektivní“ je zde použito ve smyslu „absolutní“, tj. náležející objektu o sobě. Dáme-li slovu „objektivní“ obvyklý smysl, tj. chápeme-li je jako „nezávislý na lidských počítacích“, je pojem kvantového stavu nepochybně plně objektivní. Nevztahuje se jen k objektu o sobě, nýbrž k potenciálním možnostem objektu reagovat na okolní předměty, zejména na měřící přístroje.

V obvyklém smyslu slova „objektivní“ nejsme proto oprávněni popírat objektivnost pojmu „kvantový stav“. Zavědeme-li však pojmy „potenciálně možné“ a „skutečné“ (tj. realizované), jsme oprávněni popírat, že pojem „kvantový stav“ se vztahuje ke skutečnému, jak myslel Einstein. Jinak řečeno, Einstein neučinil chybu v tom, že pokládal pojem kvantového stavu za objektivní (on skutečně je objektivní), nýbrž v tom, že nerozlišoval mezi potenciálně možným a skutečným a vztahoval tím pojem kvantového stavu ke skutečnému.

Dále se v mém „úvodu“ mluví o tom, že vlnová funkce poskytuje „údaje o stavu, získané jako výsledky maximálně přesného pokusu“. Slova „údaje o stavu“ jsou krajně nevhodná, neboť mají subjektivní charakter. Zde se mělo použít místo slova „údaj“ slova „předpověď“ s ohledem na předpovídání výsledků budoucích pokusů, přičemž tato předpověď odráží objektivně existující potenciální možnosti v daných podmínkách.

Z dnešního našeho hlediska lze Einsteinův paradox vysvětlit jednoduše tím, že každé nové měření (a s ním spojené působení) mění potenciální možnosti a odrážející je předpovědi, přičemž změny předpovědi nejsou fyzikální děje. Subsystemy uvažované Einsteinem nejsou ovšem mechanicky spjaté, potenciální možnosti k nim se vztahující jsou však spjaté logicky a nový fakt (např. změření p_2 nebo q_2), měnící předpověď pro druhý subsystém, automaticky mění předpověď i pro první subsystém. Takovou logickou souvislost potenciálních možností pro dva subsystémy bylo by možno nazvat jejich vzájemnou „nesilovou interakcí“.

Podrobněji o tomto stanovisku viz v článku В. А. Фок, *Од интерпретации квантовой механики*, *Uspechi fizičeskich nauk*, sv. 62, (1957).

Nakonec je třeba říci, že přes mnoho nepřesností, které se vyskytují v mém úvodu k výše citovanému článku z r. 1936, zůstává obecný závěr platný a zejména ve sporu Bohra s Einsteinem má v podstatě pravdu Bohr. *V. F.*

aparát kvantové mechaniky, na soustavu složenou ze dvou částí, které vzájemně na sebe působí po velmi krátkou dobu. Rozborem důsledků, z takového předpokladu plynoucího, dokazují autoři toto: Existují veličiny, jejichž hodnotu nelze současně fixovat v předstávaných jedné ze soustav, tím méně pak je lze předpovědět pomocí měření v druhé soustavě. Na podkladě svého kritéria docházejí pak autoři k závěru, že „kvantová mechanika nedává úplný popis fyzikální reality“, a vyslovují přesvědčení, že musí být možný způsob popisování lépe odpovídající skutečnosti. Svou jasností, a — jak se zdálo — bezvadností argumentace vyvolala práce Einsteina, Podolského a Rosena vzrušení mezi fyziky a měla velkou úlohu v diskusí o obecných filosofických otázkách ve fyzice. Jde nepochybně o velmi subtilní otázky a diskuse byla velmi vhodná k tomu, aby upozornila, jak daleko jsme v kvantové mechanice za hranicemi použitelnosti názoru. Je však možno se přesvědčit, že tu jde o problémy téhož druhu, s nimiž přišel Einstein v dřívějších diskusích. Pokusil jsem se o několik měsíců později [12] ukázat, že z hlediska komplementarity zdánlivé rozporů úplně mizí. Argumentoval jsem v podstatě stejně, jako zde na předcházejících stránkách. Budiž mi však dovoleno ve snaze ilustrovat tehdejší spory, abych z uvedeného své práce citoval.

Po závěrech Einsteina, Podolského a Rosena jsem napsal:

„Takováto argumentace sotva může otfást spolehlivostí kvantové mechanického popisu, založeného na bezvadné matematické teorii, která automaticky zahrnuje všechny případy měření, podobných uvedenému. Zdánlivá spornost ukazuje ve skutečnosti jen zásadní nevhodnost obvyklého hlediska přírodní filosofie pro popisování fyzikálních jevů, s jakými se setkáváme v kvantové mechanice. Interakce mezi objektem a měřicím přístrojem, podmíněná samou existencí účinkového kvanta, má totiž v důsledku nemožnosti kontrolovat obrácené působení objektu na měřicí přístroj (a tak tomu nezbytně bude vždy, pokud přístroj bude sloužit svému účelu) za následek, že je zcela nevyhnutelné vzdát se klasické ideje kauzality a radikálně revidovat naše názory na problémy fyzikální realnosti. Jak uvidíme dále, každé kritérium realnosti, podobné kritériu předloženému autory, bude obsahovat — ať se jeho formulace bude zdát sebe opatrnější — podstatnou nejednoznačnost, budeme-li je chtít aplikovat na skutečné problémy, jež nás zde zajímají.“

Pokud jde o problém, zkoumaný Einsteinem, Podolským a Rosenem, ukázal jsem pak, že použijeme-li aparátu kvantové mechaniky pro představu stavu systému dvou vzájemně interagujících atomárních objektů, dojdeme k závěru, které plně odpovídají jednoduchým argumentům, uvedeným výše v souvislosti s diskusí o experimentálních zařízeních, vhodných pro studium komplementárních jevů. Víme, že každá dvojice q a p kanonicky sdružených proměnných (souřadnic a impulsů) vyhovuje pravidlu (2), takže proměnné lze stanovit až na neurčitosti, dané vztahem (3). Nicméně rozdíl $q_1 - q_2$ souřadnic dvou částí soustavy je komutativní se součtem $p_1 + p_2$ odpovídajících impulsů. To plyne přímo z komutativnosti q_1 s p_2 a q_2 s p_1 . Ve složitě soustavě lze proto fixovat $q_1 - q_2$ i $p_1 + p_2$ a tedy lze pro takový stav systému předpovídat hodnotu q_1 nebo p_1 , byly-li q_2 resp. p_2 určeny přímým měřením. Je-li soustava složena z částice a stínítka (obr. 5), vidíme, že moznosti určit stav částice měřením na stínítku odpovídají přesně situaci, o níž se mluví na str. 99 a dále na str. 100. Ukázali jsme tam, že po průchodu částice stínítkem můžeme principiálně volit mezi změřením polohy nebo impulsu stínítka, a podle toho činit příslušné předpovědi o následujících pozorováních částice. Jak již bylo nejdnou zdůrazněno, nejdůležitější je zde, že pro taková měření je třeba vzájemně se vylučujících experimentálních zařízení.

Článek je shrnut takto:

„Vidíme nyní, že formulace výše uvedeného kritéria fyzikální realnosti, předloženého Einsteinem, Podolským a Rosenem, obsahuje podle našeho názoru dvojsmysl ve výroku, „bez jakékoli excitace soustavy“. Rozumí se, že v případě podobném právě uvažovanému není ani řeči o tom, že by zkoumaná soustava byla po dobu poslední kritické etapy měření podrobena jakémukoli mechanickému působení. Avšak i v této etapě jde v podstatě o excitaci ve smyslu ovlivňování podmínek, určujících možné typy předpovědí budoucího chování soustavy. Poněvadž tyto podmínky jsou podstatným prvkem při popisování každého jevu, na něž lze použít termínu „fyzikální realita“, vidíme, že argumentace autorů je neopravňuje k závěru, že kvantové mechanický popis je podstatně neúplný. Z našich úvah naproti tomu plyne, že tento popis může být charakterisován jako rozumné využití všech možností, jak jednoznačně interpretovat měření v soulase s nepodchytilnou interakcí mezi objektem a měřicími přístroji, charakteristickou pro kvantové jevy. Jen vzájemně vyloučení jakýchkoli dvou experimentálních manipulací, jež by umožnily jednoznačně určit dvě vzájemně komplementární veličiny, uvolňuje totiž místo novým fyzikálním zákonům, jejichž současná platnost by na první

pohled odporovala základním principům vědecké výstavby. A právě tuto zcela novou situaci v popisování fyzikálních jevů jsme se pokusili charakterisovat termínem komplementarita.“

Ču-li dnes tyto řádky, poznávám jejich nedostatečnost a neohrabanost a cítím, že musely v době, kdy jsem je psal, silně ztížit pochopení mých úvah. Chtěl jsem ukázat na nejednoznačnost jakéhokoli pokusu připisovat určité fyzikální stránky objektům v případech, kdy jde o jevy, jež nepřipouštějí ostré rozhranění mezi chováním objektů samých a jejich interakcí s měřicími přístroji. Věřím však, že nynější výklad diskusí s Einsteinem, které tak mnoho přispěly k našemu obeznámení se se situací v atomové fyzice, může dát jasnější představu o tom, jak nutné je — v zájmu logického pořádku v této oblasti — radikálně revidovat základní principy pro výklad fyzikálních jevů.

Einsteinovy tehdejší názory jsou vyloženy v článku „Fysika a realita“, který vyšel v r. 1936 [13]. Einstein začíná s mimořádně jasným výkladem vývoje fundamentálních principů v teoriích klasické fyziky a jejich vztahu k problému fyzikální reality. Einstein zde zastává stanovisko, že aparát kvantové mechaniky nutno brát jen jako prostředek pro popisování průměrného chování velkého počtu atomárních soustav. Svoje stanovisko k přesvědčení, že tento aparát umožňuje vyčerpávající popisování elementárních (individuálních) jevů, vyjadřuje Einstein takto: „Takové přesvědčení je bezpochyby logicky možné a nevede k protikladům. Odporuje však tak silně mému vědeckému citění, že se nemohu vzdát hledání dokonalejší soustavy pojmů.“

I když nebudeme pokládat takové stanovisko za extravagantní, musíme uvážit, že znamená popření veškeré výše uvedené argumentace, jejímž cílem bylo dokázat, že v kvantové mechanice nejde o libovolný ústup od podrobného rozboru atomárních jevů, nýbrž o uznání toho faktu, že takový rozbor je principiálně vyloučený. Nedělitelnost, vlastní kvantovým efektům, nás staví pokud jde o chápání experimentálních výsledků, dosažených za přesně vymezených podmínek, před novou situací, kterou klasická fyzika nepředvíдалa a která je neslučitelná s obvyklými představami, uzpůsobenými k tomu, abychom se orientovali v pokusech obvyklého typu. Zejména v tomto ohledu bylo nutno revidovat v důsledku rozvoje kvantové teorie základy pro použití nejjednodušších pojmů, a tato revize byla dalším krokem v rozvoji, který začal teorií relativity a který je tak charakteristický pro moderní vědu.

* * *

V posledních letech se filosofickými otázkami v atomové fyzice začaly zabývat širší kruhy. Filosofické diskuse proběhly také na druhém mezinárodním kongresu, který se konal v červenci r. 1936 v Kodani. Ve svém referátě [14] na tomto sjezdu jsem se snažil vyzvednout noetické analogie omezení, ukládaných atomové fyzice v kausálním popisování, které nacházíme v jiných oblastech vědeckého poznávání. I jinde vznikají v podstatě tytéž problémy jako v kvantové mechanice. Zároveň jsem se snažil spojit s běžnými pojmy způsob vyjadřování — na první pohled zvláštní — který fyzikové museli vypracovat, aby se vyrovnali se svými obtížemi.

Příklady takových analogií najdeme vedle psychologie, kde komplementarita vystupuje velmi výrazně, také v biologii, zejména při srovnávání mechanistických a vitalistických názorů. Tato otázka a její souvislost s problémem pozorování byla před několika lety předmětem mé přednášky na druhém mezinárodním kongresu o světelné terapii, který se konal v r. 1932 v Kodani [15]. Ukázal jsem zde mezi jiným, že i psychofyzický paralelismus v Leibnitzově a Spinozově formě rozšířil svůj rámec zásluhou vývoje atomové fyziky, který nás nutí v otázce jevů zaujímat stanovisko, připomínající starověkou moudrost: v hledání harmonie v životě nikdy nezapomínejme, že v dramatu bytí jsme současně herci i diváky.

Takovéto výroky mohly ovšem činit dojem sklonu k mysticismu, cizího naší vědě. Snažil jsem se proto na kongresu v r. 1936 odstranit možnost takových nedorozumění a vysvětlit, že jde jen o to pokusit se v každé oblasti o objasnění podmínek pro analýsu a syntésu údajů, jež získáváme ze zkušenosti. I tak se však obávám, že se mi nepodařilo přesvědčit posluchače. Vždyť u nich sama skutečnost, že i mezi fyziky je taková různost mínění, vede přirozeně k pochybnostem o tom, je-li nutno se do takové míry vzdalovat od obvyklých požadavků. kladených na objasňování přírodních jevů. Nutnost být krajně opatrný v terminologii jsem pocítil zejména v r. 1937 v nové diskusi s Einsteinem v Princetonu (která přešla v položertovný spor o tom, na čí stranu by se přidal Spinoza, kdyby se byl dožil dnešního rozvoje fyziky).

O těchto stránkách situace se podrobně jednalo v r. 1938 na sjezdu, uspořádaném ve Varšavě Mezinárodní federací duševních pracovníků. Předcházející leta přinesla velké

úspěchy v kvantové fyzice řadou fundamentálních objevů a značným rozvojem matematického aparátu, zejména v souvislosti s relativistickými požadavky. V tomto směru byla překvapivěm příkladem účinnosti a plodnosti obecného kvantové mechanického popisování geniální Diracova teorie elektronu. Ve vznikání a zanikání dvojic elektron-positron jde totiž o nové fundamentální rysy atomární povahy hmoty, které jsou těsně spjaty s neklasickými stránkami kvantové statistiky (Pauliho princip). Tyto nové rysy vyžadovaly při objasnování ještě většího ústupu od názorných modelů.

Diskuse o gnoseologických problémech v atomové fyzice nabývala v této době nebývalé šíře, a já jsem byl nucen při komentování Einsteinových názorů dotknout se podrobněji terminologických otázek. Zvláště jsem se vyhýbal často používaným fyzikálním obrátům, jako „excitace jevů pozorováním“ nebo „přikládat atomárním objektům fyzikální atributy měřením“. Takové výroky by sice mohly připomínat zdánlivé paradoxy v kvantové teorii, zároveň však mohly vyvolávat zmatek, neboť slov „jevů“, „pozorování“, „atribut“, „měření“ ap. se zde používá ve smyslu, který je sotva slučitelný s běžným jazykem a jejich definicí.

Navrhoval jsem jako účelnější používat slova „jev“ výlučně jen v souvislosti s pozorováním za přesně vymezených podmínek, zahrnujících údaje o pokusu v celku. V takové terminologii přestává být problém pozorování nejednoznačný, neboť při skutečných pokusech se všechna pozorování vyjadřují zcela jednoznačnými výroky, např. registrace bodu dopadu elektronu na fotografické desce. Kromě toho vyzvedává takové vyjadřování velmi dobře okolnost, že správná fyzikální interpretace symbolického aparátu kvantové mechaniky může dát jen předpovědi jednoznačného nebo statistického charakteru, vztahující se k nedělitelným jevům, k nimž dochází v klasicky vymezených fyzikálních podmínkách.

Přes rozdílnost fyzikálních problémů, jež vedly k vypracování teorie relativity a kvantové teorie bije do očí při srovnávání relativistického a komplementárního způsobu popisování z čistě logické stránky shoda, pokud jde o ústup od přikládání absolutního smyslu obvyklým fyzikálním atributům objektů. Také přehlížení atomové struktury měřících přístrojů při popisování skutečných pokusů je stejně charakteristické pro obě teorie. Nepatrnost účinkového kvanta ve srovnání s ději, s nimiž máme co činit v obyčejných pokusech, je stejně důležitá v atomové fyzice, jako je obrovský počet částic ve vesmíru důležitý pro teorii relativity, vyžadující, jak známo, aby rozměry úhломěrných přístrojů byly malé ve srovnání s poloměrem křivosti prostoru.

Ve svém varšavském referátu jsem takto komentoval aplikaci aparátu, zbaveného přímé názornosti, v teorii relativity a v kvantové teorii:

„I matematické aparáty obou teorií, poskytující v příslušném rámci náležitý prostředek pro podechycení veškeré myslitelné zkušenosti, vykazují hlubokou shodu. Překvapivě jednoduchost zobecnění klasických fyzikálních teorií, dosažených v jednom případě vícedimensionální geometrií a v druhém případě nekomutativní algebrou, spočívá v podstatě v obou případech na zavedení symbolu $\sqrt{-1}$. Pro obě teorie je také typický abstraktní charakter formálních aparátů. V tomto smyslu je čistě věcí tradice, chceme-li pokládat první teorii za dovršení klasické fyziky nebo za první rozhodný krok v hluboké revisi soustavy našich pojmů jako prostředku pro srovnávání pozorování, krok, k němuž nás nutí soudobý fyzikální vývoj.“

Je ovšem pravdou, že v atomové fyzice je řada neřešených problémů, zejména problém vztahu mezi elementární jednotkou elektrického náboje a universálním účinkovým kvantem. Tyto problémy nejsou však s otázkami, o nichž zde mluvíme, spjaty těsněji, než zákonitostí relativistického popisování s ještě nerozřešenými úlohami kosmologie. V obou teoriích jde o nové stránky vědecké analýsy a synthesy. V této souvislosti stojí za zmínku, že i v době velké epochy kritické filosofie v minulém století šlo jen o to, do jaké míry lze apriorně zdůvodnit koordinaci naší zkušenosti v prostoru a v čase a kausální vzájemné vztahy, nikdy však nevznikla otázka racionálního zobecnění těchto kategorií lidského myšlení nebo příslušných omezení.

Měl jsem v posledních letech několikrát příležitost hovořit s Einsteinem, ke společnému stanovisku v otázkách teorie poznání jsme se však nedostali. Naše protichůdné názory jsou snad nejlépe vystiženy v jednom z posledních čísel časopisu *Dialectica* [17]. Poněvadž si uvědomuji mnohé překážky, které jsou v cestě k vzájemnému dorozumění v otázkách, v nichž stanovisko každého jedince silně závisí na jeho přístupu k věci i na jiných podmínkách, uvítal jsem nyní další důvod pro podrobné přehlédnutí vývoje, který, jak se mi zdá, vedl k překonání vážné krize ve fyzice. Úkol, který nám z toho vzešel, dovedl nás rozhodně vpřed na cestě nikdy nekončícího zápolení o souhlas mezi obsahem a formou. Tento úkol

nám ještě jednou ukázal, že žádný obsah nelze vystihnout bez příslušné formy, a že každá forma, ať jakkoli vhodná v minulosti, se může ukázat úzkou, má-li postihnout nové výsledky.

V takové situaci, kdy je obtížné dojit souladu nejen mezi filozofy a fysiky, ale dokonce i mezi samými fysiky různých škol, může být kořen obtíží někdy v tom, že se dává přednost určité terminologii, odpovídající tomu nebo onomu přístupu k věci. V Kodaňském institutu, kde se v oněch letech sjíždělo k diskusi mnoho mladých fysiků z různých zemí, měli jsme ve zvyku osvěžovat se v obtížných případech různými žerty, z nichž zvláště oblíbeným bylo staré úsloví o dvou druhích pravdivosti: K jednomu patří taková jednoduchá a jasná tvrzení, že k nim opačná jsou zřejmě nesprávná. Druhý druh, tzv. „hluboké pravdy“, představují naopak taková tvrzení, k nimž opačná obsahují rovněž hlubokou pravdu. Vývoj se děje obvykle v etapách, přičemž chaos postupně přechází v pořádek. Avšak právě v meziobdobí, kdy převládají „hluboké pravdy“, je práce plna napjatého zájmu a povzbuzuje fantasi k hledání pevných opor. V této snaze o dosažení rovnováhy mezi vážným a veselým máme v Einsteinovi skvělý vzor. Vyjadřují své přesvědčení, že zásluhou plodné spolupráce celé generace fysiků se blížíme cíli, kdy logický pořádek nám ve velké míře umožní vyhnout se „hlubokým pravdám“, a doufám, že toto přesvědčení bude přijato v einsteinovském duchu, a zároveň jako omluva za některé kritické výroky z předcházejících stránek.

* * *

Moje debaty s Einsteinem probíhaly v mnohaletém období, v němž fysika dobyla velkých úspěchů. Měly na mne hluboký vliv, a při psaní těchto řádků jako bych s Einsteinem osobně polemisoval. V reprodukci rozhovorů s Einsteinem musím spolehat jen na svou paměť. Nemohu také vyloučit, že mnohé rysy kvantové teorie, v jejímž budování měl Einstein tak významnou úlohu, se mu dnes jeví v jiném světle. Doufám však, že se mi podařilo dát jasnou představu o tom, jak mnoho mi daly rozhovory s Einsteinem, jehož osobnost inspirovala všechny, kteří se s ním setkali.

Zkráceně přeložil dr. Josef Veselka.

Citovaná literatura

- [1] A. Einstein, Ann. Phys., sv. 17, 132 (1905).
- [2] N. Bohr, Fysisk Tidsskrift, sv. 12, 97 (1914), anglicky *Theory of Spectra and Atomic Constitution*, Cambridge, University Press (1922).
- [3] A. Einstein, Phys. Zs., sv. 18, 121 (1917).
- [4] A. Einstein und P. Ehrenfest, Z. f. Phys., sv. 11, 31 (1922).
- [5] N. Bohr, H. A. Kramers and J. C. Slater, Phil. Mag., sv. 47, 785 (1924).
- [6] A. Einstein, Berliner Ber., sv. 261 (1924) a 3 a 18 (1925).
- [7] W. Heisenberg, Zs. f. Phys., sv. 43, 172 (1927).
- [8] Atti del Congresso Internazionale dei Fisici, Como. Settembre 1927. Otištěno také v Nature, sv. 121, 78 a 580 (1928).
- [9] Institut International de Physique Solvay, Rapport et discussions du 5^e Conseil, Paris (1928), 253 a d.
- [10] Tamtéž, 248 a d.
- [11] A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, Phys. Rev. sv. 47, 777 (1935).
- [12] N. Bohr, Phys. Rev., sv. 48, 696 (1935).
- [13] A. Einstein, Journ. Franklin Inst., sv. 221, 349 (1936).
- [14] N. Bohr, Erkenntnis, sv. 6, 293 (1937) a Philosophy of Science, sv. 4, 289 (1937).
- [15] 11^e Congrès international de la Lumière, Copenhague 1932, otištěno v Nature, sv. 131, 421 a 457 (1933).
- [16] New Theories in Physics, Paris (1938), 11.
- [17] N. Bohr, Dialectica, sv. 1, 312 (1948).