

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Niels Bohr

Kvantová fyzika a filosofie (kausalita a komplementarita)

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 5 (1960), No. 3, 332--337

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/136996>

## 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

KVANTOVÁ FYSIKA A FILOSOFIE <sup>1)</sup>  
(KAUSALITA A KOMPLEMENTARITA)

NIELS BOHR

Bohrův článek „Kvantová fyzika a filosofie“ je velmi zajímavý, zejména proto, že autor se v něm značně přibližuje materialistickým interpretacím základních pouček kvantové fyziky. Bohr především zdůrazňuje objektivnost kvantové mechanického popisu a jeho nezávislost na poznávajícím subjektu. Bohr ukazuje dále, že přístroje a jejich záznamy jsou jen prostředkem zkoumání objektivních vlastností atomárních objektů, čímž zároveň říká, že tyto objekty jsou stejně reálné jako přístroje a záznamy přístrojů. Bohr tu poprvé rozlišuje pojmy „kausalita“ (příčinnost) a „determinismus“ (ve smyslu laplaceovském) a ukazuje, že kausalita jako vztah mezi příčinou a následkem se plně zachovává také v kvantové fyzice, která potřebuje jen zřítci se „klasického ideálu determinismu“. Bohr se zcela obešel bez špatně definovaného pojmu „nekontrolovatelná interakce“, který měl tak významnou úlohu v dřívějších jeho pracích. Bohr místo toho podtrhuje, že odlišnost v interpretaci zkoumaného objektu a přístroje je logického řádu.

Ve zlepšených formulacích N. Bohra nelze nevidět ohlas našich besed z února a března 1957, a částečně i jeho odpověď na záznamy z těchto besed, jež mu byly předkládány. Mnohé these z těchto záznamů jsou vyloženy v našem článku „Poznámky k článku N. Bohra o jeho diskusích s Einsteinem“<sup>2)</sup>. Článek, který v dalším uveřejňujeme, je nepřímou odpovědí i na tyto „Poznámky“.

V. A. Fok

Význam fyzikálních věd pro filosofii není jen v tom, že fyzikální vědy stále doplňují naše znalosti o neživé hmotě, ale především v tom, že umožňují prověřovat základy, na nichž spočívají naše nejprvotnější pojmy, a ukazovat oblast jejich použitelnosti. Narůstání experimentálních dat a rozvoj teoretických pojmů vedou nepochybně k zdokonalování terminologie. Nicméně každý popis fyzikálních výsledků je nakonec založen na běžném jazyku, uzpůsobeném tomu, abychom se vyznali v tom, co nás obklopuje, a abychom mohli zkoumat souvislosti mezi příčinami a následky. Galileiho program, podle něhož se popis fyzikálních jevů musí opírat o veličiny, jež mají kvantitativní míru, položil pevné základy pro uspořádání pokusných faktů ve stále širší oblasti.

<sup>1)</sup> Нильс Бор, Квантовая физика и философия (Причинность и дополнителъность), Успехи физических наук, LXVII, 1 (1959). Podle autorova rukopisu *Quantum Physics and Philosophy (Causality and Complementarity)* přeložil do ruštiny V. A. Fok.

<sup>2)</sup> В. А. Фок, Замечания к статье Бора о его дискуссиях с Эйнштейном, UFN, LXVI, č. 4 (1958); česky V. A. Fok, Poznámka k článku N. Bohra „Diskuse s Einsteinem ognoseologických problémech v atomové fyzice“, v tomto časopise, V (1960), č. 1. Pozn. překl.

V newtonovské mechanice se určuje stav systému hmotných těles jejich okamžitou polohou a rychlostí. Je-li znám stav systému v daný okamžik a jsou-li známy působící síly, je v newtonovské mechanice možné určit na podkladě jednoduchých zákonů jednoznačně také stav systému v libovolném jiném okamžiku. Popis takového druhu představuje zřejmě ideální formu kauzální souvislosti, odpovídající pojmu determinismus<sup>3</sup>). Ukázalo se, že takový popis je možný i mimo mechaniku. Na příklad u elektromagnetických jevů, kde máme co činit s šířením sil konečnými rychlostmi, se ukázalo možným zachovat deterministické popisování, zahrne-li se do pojmu stavu kromě polohy a rychlosti nabitých částic také elektrické a magnetické síly, dané v každém bodě prostoru co do velikosti i směru v uvažovaném okamžiku.

V tomto směru neznamená podstatnou změnu ani okolnost, že popis fyzikálních jevů závisí do jisté míry na vztažné soustavě, zvolené pozorovatelem. Kodifikace této okolnosti tvoří obsah pojmu relativnosti. Jde o mimořádně plodný vědecký směr, který umožňuje formulovat fyzikální zákony obecně pro všechny pozorovatele, a spojit jevy, které se dříve jevily nezávislými. I když se v těchto formulacích používá matematických abstrakcí (na příklad pojmu čtyřrozměrné z neeuklidovské metriky), fyzikální výklad je pro každého pozorovatele založen na obyčejném rozdělení na prostor a čas, přičemž se zachovává deterministický charakter popisu<sup>4</sup>). Kromě toho je, jak ukázal Einstein, koordinace událostí v prostoru a v čase, příslušná tomu kterému pozorovateli, taková, že nikdy nemění daný kauzální sled událostí ve sled obrácený. Teorie relativity proto nejen rozšířila oblast platnosti, ale dokonce upevnila základy deterministického popisování, charakteristického pro velkou stavbu, zvanou klasická fyzika.

Planckovým objevem elementárního účinkového kvanta začala ve fyzikálních vědách nová epocha. Tento objev ukazuje v atomárních dějích celistvost, která sahá daleko za hranice staré ideje o ohraničené dělitelnosti hmoty. Ukázalo se, že názorný popis, charakteristický pro klasickou fyziku, je idealisací, jíž jsou schopny jen jevy; v nichž všechny rozměrové hodnoty působení, s nimiž se v rozboru setkáváme, jsou tak velké, že účinkové kvantum lze vedle nich zanedbat. V jevech běžného měřítka je tato podmínka v rozsáhlé míře splněna. Avšak v experimentálních údajích, vztahujících se k atomárním částicím, se setkáváme se zákonitostmi nového typu, se zákonitostmi, jež nelze podrobit deterministické analýze. Tyto — kvantové — zákonitosti činí atomární systémy pozoruhodně stabilními, a určují jejich reakce. Na nich pak nakonec spočívají i ty vlastnosti hmoty, na nichž jsou závislé naše způsoby pozorování.

Fyzikům vyvstala úloha racionálně zobecnit klasickou fyziku tak, aby se do ní harmonicky vřadilo účinkové kvantum. Po předběžných studiích experimentálních faktů, provedených hrubšími metodami, byla tato obtížná úloha na konec vyřešena zavedením vhodných matematických abstrakcí. V aparátě kvantové mechaniky vystupují místo veličin, jež charakterisují v klasické mechanice stav fyzikálního systému, symbolické operátory, obsahující Planckovu

<sup>3</sup>) V soulase s tím rozumí Bohr zde i dále pod pojmem determinismus laplaceovský determinismus. V. A. F.

<sup>4</sup>) O této otázce viz pozoruhodnou stať Член-корр. А. Н. СССР А. Д. Александров (Ленинград), *Философское содержание и значение теории относительности*, *Вопросы философии*, 1 (1959); česky Člen kor. AV SSSR A. D. Alexandrov (Leningrad), *Filosofický obsah a význam teorie relativity*, v tomto časopise, V (1960), č. 2. Pozn. překl.

konstantu, pro něž neplatí záměnnost násobení (nekomutativnost). To vylučuje fixování takových veličin s přesností, potřebnou pro klasický deterministický popis, umožňuje však najít spektrální rozložení těchto veličin v souhlase s údaji o atomárních dějích. Matematický aparát kvantové mechaniky se v souhlase se svým nemodelovým charakterem fyzikálně interpretuje zákony v podstatě statistickými (pravděpodobnostními), jež se vztahují k výsledkům pozorování, získaným v daných experimentálních podmínkách.

Přesto, že kvantová mechanika je mocným nástrojem pro uspořádání nesmírného experimentálního materiálu, vztahujícího se k atomárním objektům, skutečnost, že se tak silně odchyluje od požadavku navyklého kausálního výkladu dějů, vedla přirozeně k otázce, popisuje-li skutečně úplně vše, co dává experiment. Odpověď na tuto otázku zřejmě vyžaduje pečlivý rozbor podmínek, nutných pro jednoznačné užití pojmů klasické fyziky v analýze atomárních jevů. K tomu je třeba — a to je rozhodující — popisovat experimentální zařízení i experimentální výsledky jasnou řečí, náležitě zdokonalenou použitím obvyklé fyzikální terminologie. Je to prostý logický požadavek, neboť slovem experiment můžeme rozumět jen proceduru, o níž můžeme sdělit jiným, co jsme udělali a co jsme poznali.

Ve skutečných experimentálních zařízeních se tento požadavek splňuje tak, že se jako měřicích přístrojů používá tuhých těles, dostatečně těžkých, aby bylo možno je charakterisovat co do polohy a rychlosti čistě klasicky. Při tom je podstatné — to je třeba si uvědomit — že každá jednoznačná informace o atomárních objektech se vyvozuje z polohy nemizících záznamů na tělesech, z nichž sestává experimentální zařízení, na příklad ze skvrny, která vznikne dopadem elektronu na fotografickou desku. Ireversibilní zesilovací efekty, na nichž je založena registrace atomárních objektů, nečiní zde žádných obtíží, pouze připomínají, že sám pojem pozorování je spjat s podstatnou ireversibilitou. Popis atomárních jevů má v tomto ohledu zcela objektivní charakter, v tom smyslu, že tu není třeba žádného odkazu na nějakého individuálního pozorovatele. Není proto předání informace špato s žádnou nejednoznačností, šetří-li se pouze požadavků teorie relativity.

Z těchto hledisek se problém pozorování v kvantové fyzice nijak neliší od klasického pojetí. Podstatně novým rysem v analýze kvantových jevů je však okolnost, že se zavádí fundamentální rozdíl mezi měřicím přístrojem a zkoumaným objektem. Je to přímý důsledek nutnosti popisovat práci měřicích přístrojů řečí klasické fyziky, aniž se explicitě zavádí účinkové kvantum<sup>5)</sup>.

Z druhé strany jsou kvantové rysy jevu v informaci, získané z pozorování atomárních objektů. V klasické fyzice lze vzájemné působení mezi objektem a přístrojem zanedbat, nebo, je-li toho třeba, je možno je kompenzovat; v kvantové fyzice je tato interakce neoddelitelnou částí jevu. Musí proto jednoznačný popis vlastního kvantového jevu zahrnovat v principu popis všech podstatných částí experimentálního zařízení.

Opakování pokusu, který lze podle výše řečeného charakterisovat, dá obecně jiný výsledek, pokud jde o pokusný objekt. To vede přímo k závěru, že obecná formulace experimentálních výsledků v této oblasti musí mít formu statistických (pravděpodobnostních) zákonů. Sotva je nutno zdůrazňovat, že tu nejde o žádnou analogii obyčejné aplikace statistiky na popis fyzikálních sou-

<sup>5)</sup> Pokud platí Heisenbergova relace neurčitosti i pro přístroje, přihlíží se i při popisování jejich práce nepřímo k účinkovému kvantu. *V. A. F.*

stav, příliš složitých, než aby bylo možno určit prakticky úplně jejich stav tak, aby soustavu bylo možno deterministicky popsat. Takový popis předpokládá možnost neomezeného detailování událostí, což je u kvantových jevů zásadně vyloučeno vzhledem k požadavku, že je třeba konkrétně formulovat podmínky experimentu. Rys celistvosti, typický pro kvantové jevy, je totiž logicky vyjádřen v tom, že každý pokus určitým způsobem rozložit daný jev, by vyžadoval změnu v experimentálním zařízení, změnu, která není slučitelná s vymezením daného jevu.

V klasické fyzice je možno vyšetřit všechny stránky a vlastnosti daného objektu v principu jedním experimentálním zařízením, i když je v praxi výhodné používat pro různá vyšetřování různých zařízení. Získané údaje je totiž možno prostě skládat a kombinovat do jednoho souvislého obrazu chování zkoumaného objektu. V kvantové fyzice naproti tomu jsou údaje, získané různými experimentálními zařízeními ve specifickém vzájemném komplementárním vztahu. I když takové údaje se zdají, chceme-li je složit do jednoho obrazu, vzájemně si odporujícími, nutno uznat, že ve skutečnosti vyčerpávají vše, co o objektu můžeme zjistit. Pojem komplementarity neznamená omezení v tom, klást přírodě otázky ve formě pokusu; prostě charakterizuje možné odpovědi na tyto otázky v případě, kdy interakce mezi měřicím přístrojem a zkoumaným objektem se stává neoddělitelnou součástí jevu.

Klasický popis experimentálního zařízení a ireversibilita údajů, vztahujících se k atomárnímu objektu, zabezpečují samozřejmě sled příčiny a následku, v soulase s elementárním požadavkem kauzality. Zároveň však dostává ve vztazích komplementarity, představuje-li podmínky pro jednoznačné užití základních pojmů, jiný výraz definitivní odklon od klasického ideálu determinismu. Nepodmíněná a neomezená aplikabilita základních pojmů představuje základnu klasického popisu. Pro lokalisaci atomární částice v ohraničené oblasti prostoru a času je však třeba experimentálního ústrojí, které je spjato s přenosem impulsu a energie na tělesa, podobná nehybným měřítkům a synchronně jdoucím hodinám. Tento přenos však nelze zařadit do popisu práce těchto přístrojů, aniž se vzdáme jejich použitelnosti pro fixování vztažné soustavy. Obráceně zase každé důsledné použití zákonů zachování impulsu a energie na atomární děje předpokládá v principu resignaci na podrobnou lokalisaci částice v prostoru a v čase.

Kvantitativního výrazu doznává tato okolnost v Heisenbergových relacích neurčitosti. Tyto relace popisují v kvantové mechanice vztah (nepřímá úměrnost) mezi neurčitostmi ve fixování těch kinematických a dynamických proměnných, kterými se v klasické fyzice určují stavy fyzikálních systémů. Nekomutativnost matematických symbolů, jimiž se v kvantové mechanice tyto proměnné reprezentují, odpovídá totiž neslučitelnosti experimentálních zařízení, nutných k jednoznačnému určení hodnot těchto proměnných. Poznamenejme zde, že nejde o omezenost přesnosti měření, nýbrž o omezenost aplikability prostorčasových pojmů a dynamických zákonů zachování. Tato omezená aplikabilita je spjata s nutností rozlišovat mezi měřicím přístrojem a atomárním objektem.

Pro konkrétní výpočty v úlohách atomové fyziky je nejuvhodnější Schrödingerova stavová funkce. Z ní je možno jistými matematickými operacemi odvodit statistické zákony pro výsledky pozorování za jistých podmínek. Je však třeba říci, že tu jde o čistě symbolickou aplikaci, jejíž jednoznačná fyzikální interpretace vyžaduje na konec odkaz na určité experimentální zařízení.

Přehlížení tohoto faktu vedlo někdy k nedorozuměním. Zejména výroky druhu „pozorování excituje jev“, „měření vytváří fyzikální atributy objektu“ ap. jsou sotva slučitelné s obecně uznaným významem použitých termínů a s obvyklým slovním vyjadřováním.

V souvislosti s tím se vynořila otázka, nebylo-li by účelné v zájmu přesnější představy o vzniklé situaci přejít k vícehodnotové logice. Předcházející úvahy však ukazují, že ať je tomu jakkoli, odklon od obecně uznané řeči a od obvyklé logiky se úplně odstraní, použije-li se slova „jev“ jen ve smyslu něčeho, o čem lze jednoznačně informovat. Slova „měření“ je přitom nutno použít v přímém jeho významu kvantitativního srovnání (srovnání s etalonem). Tato opatrnost ve volbě terminologie je zvláště důležitá při zkoumáních v nové oblasti, kde informaci nelze zahrnout do obvyklého schématu, které došlo takového velkého užití v klasické fyzice.

Jen přihlédneme-li k tomu všemu, můžeme se přesvědčit o tom, že kvantová mechanika splňuje, se zřetelem ke své bezespornosti a úplnosti, všechny požadavky, jež možno klást na racionální výklad<sup>6)</sup>. Pro bezespornou interpretaci aparátu kvantové mechaniky je podstatné vycházet z údajů přístrojů za zcela určitě stanovených podmínek pokusu. Důraz, který klademe na takové odečítání z měřicích aparatur, nahrazuje základní předpoklad klasického fyzikálního popisu, podle kterého každý článek v kausálním řetězu událostí připouští v principu přímé ověření. Úplnosti popisu — podobné úplnosti, k níž špěla klasická fyzika — se dosahuje principiální možností přihlédnout ke všem myslitelným experimentálním zařízením.

Je samozřejmé, že takové úvahy nijak neznamenají, že atomová fyzika nepřináší ničeho nového pokud jde o experimentální objevy a matematické prostředky pro jejich popisování a chápání. Je zcela možné, že pro výklad nových zákonitostí, jež nacházíme při zkoumání atomárních dějů s velmi velkými energiemi, bude třeba nových matematických abstrakcí. Rozhodujícím však je okolnost, že tu nemůže být ani řeči o návratu k takovým způsobům popisování, jež by nějak podstatněji vycházely vstříc obvyklým požadavkům názorného modelování vztahů mezi příčinou a následkem.

Skutečnost, že kvantové zákonitosti nelze proanalyzovat v klasickém duchu, podmiňuje — jak jsme viděli — nutnost zavést při popisování toho, co poznáváme z pokusu, logický rozdíl mezi měřicím přístrojem a atomárním objektem — rozdíl, který principiálně vylučuje možnost deterministického popisu beze zbytku. Vcelku lze říci, že širší rámec komplementarity neznámá svévolný ústup od ideálu kausalit. Pojem komplementarity vyjadřuje přímo naši situaci v otázce odrazu fundamentálních vlastností hmoty, o které se mělo za to, že podléhá klasickému fyzikálnímu popisu, o které se však ukázalo, že je za hranicemi aplikability takového popisu.

Přes všechny rozdíly v situacích, charakteristických pro použití pojmů relativnost a komplementarita, tyto situace z gnoseologického hlediska mají mnoho společného. V obou těchto situacích jde totiž o studium zákonitostí, jež nelze

<sup>6)</sup> Jedna z fundamentálních otázek, v níž se Bohr rozcházel s Einsteinem. Viz o tom Нильс Бор, *Дискуссии с Эйнштейном о проблемах теории познания в атомной физике*, Успехи физический 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. Český Niels Bohr, *Diskuse s Einsteinem o gnoseologických problémech v atomové fyzice*, tento časopis, V (1960), č. 1. *Pozn. překl.*

postihnout názornými představami, vhodnými pro zobrazení fyzikálních faktů v užší oblasti. Rozhodující je však okolnost, že ani v jedné z těchto situací nepředpokládá rozšíření rámce našich pojmů jakýkoli odkaz na pozorující subjekt (takový odkaz by byl překážkou pro předávání experimentálních zkušeností).

V teorii relativity je taková objektivnost zaručena tím, že se přihlíží k závislosti jevů na vztažné soustavě pozorovatele, v komplementárním popisu je jakákoli subjektivnost vyloučena uvážením okolností, jež činí jednoznačnými aplikace našich prvotních pojmů.

Z obecného filosofického hlediska je pozoruhodné, že i v jiných oblastech se setkáváme, pokud jde o analýsu a syntésu, se situací, připomínající situaci v kvantové fyzice. Tak na příklad živé organismy a charakteristiky myslících lidí, i celé lidské kultury vykazují rysy celistvosti, jejichž zobrazení vyžaduje typicky komplementárního způsobu popisování<sup>7)</sup>.

Předávání experimentálních faktů v těchto velkých oblastech vědění vyžaduje bohatého slovníku, a poněvadž se slovům někdy přikládá různý smysl, a především proto, že se ve filosofické literatuře vyskytují rozdílné interpretace pojmu příčinnosti, docházelo často k obrácenému chápání věcí. Postupný vývoj terminologie, vhodné pro popisování v jednodušší situaci ve fyzice, však ukazuje, že tu jde nikoli o více nebo méně nejasné analogie, nýbrž o zřetelné příklady logických souvislostí, s nimiž se v různých kontextech setkáváme v širších oblastech vědění.

*Přeložil dr. Josef Veselka*

---

<sup>7)</sup> Viz N. Bohr, *Atomic Physics and Human Knowledge*, John Wiley and Sons Ltd, New York 1958.

## K TERMINOLOGII ZÁKLADNÍCH POJMŮ VE FYSICE

Prof. RNDr. ZDENĚK HORÁK

1. Základy fyziky a jí blízkých technických věd jsou dnes samozřejmou součástí všeobecného vzdělání a proto by fyzikální názvosloví mělo být ve shodě nejen s názvoslovím technických věd, ale i s všeobecně užívaným významem nejdůležitějších pojmů, jakými jsou zejména hmota a také látka.

2. Na druhé straně musí být jednoznačnost a přesně definovaný význam fyzikálních názvů prvořadým požadavkem, který je třeba plnit co nejdokonaleji a to zvláště při výuce fyziky na školách všech stupňů.

3. Konečně je třeba fyzikální terminologii co nejlépe přizpůsobit dnešnímu stavu fyzikálního bádání.

Všechny tři uvedené požadavky si přímo vynucují úpravu dnešní fyzikální terminologie některých základních pojmů, která je nejednotná a nedává možnost přesného třídění základních fyzikálních objektů.

Největší nesnáze a častá nedorozumění vznikají neustáleným a nevhodným užíváním slova hmota. Kromě nejširšího významu, který se mu přikládá ve filosofii, kde znamená filosofickou kategorii označující objektivní realitu, užívá