

///// studie / article //////////////////////////////////////

**WERNER HEISENBERG,  
NIELS BOHR A PŘÍBĚH  
KODAŇSKÉ INTERPRETACE**

**Abstrakt:** Příspěvek se zaměřuje na zavádějící příběh o tzv. kodaňské interpretaci kvantové mechaniky, již jako údajně nerozpornou či jednotnou vytvořili a sdíleli na základě tzv. kodaňského ducha kvantové teorie její tvůrci v roce 1927. Článek bude vycházet z role, kterou v tomto příběhu sehráli především dva významní fyzikové N. Bohr a W. Heisenberg. První část příspěvku seznamuje s variacemi toho, co se v literatuře považuje za kodaňskou interpretaci. Druhá část odhaluje, že zatímco kvantová mechanika vznikla ve dvacátých letech 20. století, kodaňská interpretace je veskrze problematickým a především Heisenbergovým produktem z let padesátých. Jednou z hlavních motivací, kvůli níž vystoupil s tzv. kodaňskou interpretací, byla obrana vůči množícím se kritikám obhájců kvantové teorie. Jelikož mezi členy tzv. kodaňské školy nepanovala žádná jednotná či nerozporná interpretace kvantové mechaniky, zaměřuje se poslední část příspěvku na několik vybraných rozdílů hlavně mezi Bohrovým a Heisenbergovým výkladem kvantové teorie.

**Klíčová slova:** Kodaňská interpretace; kvantová teorie; komplementarita; Heisenberg; Bohr

**Werner Heisenberg, Niels Bohr  
and the Story of Copenhagen  
Interpretation**

**Abstract:** The article focuses on the misleading story of the so-called Copenhagen interpretation of quantum mechanics. The interpretation was allegedly created as unitary or consistent and shared by its founders in 1927 by virtue of the so-called Copenhagen spirit of quantum theory. The paper is based on the role which two leading figures, Niels Bohr and Werner Heisenberg, played in this story. The first part of the article introduces variations of what is considered to be Copenhagen interpretation. The second part reveals that while quantum mechanics had originated in the 1920s, the Copenhagen interpretation was mainly a problematic Heisenberg's product of the 1950s. One of his main motivations for the introduction of Copenhagen interpretation was to set up a defence against increasing criticism of the supporters of quantum theory. Since there was no unitary or consistent interpretation of quantum mechanics among members of the so-called Copenhagen school, the last part of the paper focuses on several differences primarily between Bohr and Heisenberg's interpretation.

**Keywords:** Copenhagen Interpretation; Quantum Theory; Complementarity; Heisenberg; Bohr

**FILIP GRYGAR**

Katedra filosofie, Univerzita Pardubice  
Stavařov 97, 532 10 Pardubice  
email / filio@centrum.cz

## 1. Několik úvodních poznámek k tématu

Do tzv. kodaňské interpretace kvantové mechaniky<sup>1</sup> se obvykle započítávají příspěvky tvůrců kvantové teorie, tj. idea komplementarity N. Bohra, relace neurčitosti W. Heisenberga z roku 1927 nebo pravděpodobnostní interpretace M. Borna z roku 1926 a některé příspěvky z let 1928 až 1933 (viz níže).<sup>2</sup> Termín „kodaňská interpretace“ (dále jen KI, vyjma citací) se natolik zabydlel v odborné literatuře, učebnicích, dokumentárních pořadech a v hlavách studentů, vědců, přívrženců i odpůrců, že se již nikdo nezdráhá tuto interpretaci uvádět bez úvodní zkratky „tzv.“. Avšak například s J. Cramerem lze prohlásit, že „navzdory rozsáhlé literatuře, která kriticky zhodnocuje kodaňskou interpretaci kvantové mechaniky či jakkoli na ní odkazuje, nikde se neobjevuje žádné výstižné stanovisko, jež by plně definovalo kodaňskou interpretaci,<sup>3</sup> a to ani v textech samotných zakladatelů kvantové teorie. A právě zde tkví tři zásadní problémy, které je třeba v následujícím textu rozebrat: 1. Navzdory tomu, že je tzv. KI u zainteresovaných laiků něco povědomého a pro fyziky něco samozřejmého, nikdo přesně neví, co je jejím skutečným obsahem. 2. Ačkoliv se o KI neustále píše v odborné i po-

<sup>1</sup> Nebo též kodaňská představa či kodaňská doktrína; obvyklý, ortodoxní nebo standardní výklad či představa kvantové mechaniky, respektive kvantové teorie, což je obecnější název pro kvantovou mechaniku.

<sup>2</sup> Bohrova idea či argument komplementarity je epistemologickým rámcem myšlení, jenž umožňuje, oproti aristotelovské nebo karteziánské logice, pojmut neslučitelné a vzájemně neodvoditelné deskripce zkoumaného jevu (více viz níže). Slavný Heisenbergův článek z roku 1927 k relaci či relacím (od roku 1930 principu) neurčitosti (původně nepřesnosti) stanovuje, že „kanonicky sdružené veličiny [například poloha a hybnost; úhel a moment hybnosti – pozn. autora] můžeme současně určit pouze s charakteristickou nepřesností“, jinak řečeno oproti klasické fyzice platí, že „čím přesněji je určena poloha, o to nepřesněji je zjištěna hybnost a naopak“, což Heisenberg vyjádřil matematickou rovnicí (Werner Heisenberg, „Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik“, *Zeitschrift für Physik* 43 (1927): 172, 175). M. Born v roce 1926 představil tzv. statistickou či pravděpodobnostní interpretaci Schrödingerovy rovnice. E. Schrödinger, který věřil na reálné vlnové pojetí přírody, přišel v roce 1926 s vlnovou mechanikou, do níž zavedl vlnovou funkci  $\Psi$  a vlnový balík. Domníval se, že těmito prostředky, opatřenými vhodnými rovnicemi, zajistí vyčerpávající realistický popis atomárního dění. Nezajistil. Proto Born Schrödingerovu rovnici uvažoval čistě jako formalismus týkající se vlny pravděpodobnostní, ta pak určovala jen hustotu pravděpodobnosti výskytu částic v nějaké oblasti a umožňovala pravděpodobnostní výpočty individuálních procesů změn či přechodů; netýkala se tedy něčeho přímo pozorovatelného nebo hmotného vlnění – výpočtu hustoty pravděpodobnosti bylo dosaženo až druhou mocninou absolutní hodnoty  $\Psi$  (podrobně v jeho druhém významném článku z roku 1926 viz Max Born, „Quantenmechanik der Stoßvorgänge“, *Zeitschrift für Physik* 38 (1926): 803–27).

<sup>3</sup> John G. Cramer, „The Transactional Interpretation of Quantum“, *Reviews of Modern Physics* 58, č. 3 (1986): 649.

pulární literatuře, málokdo se ptá po původu tohoto až mytického sousloví tradovaného jako tichá pošta po desítky let napříč vědeckou komunitou i intelektuální elitou. 3. KI měla postihovat v zásadě to, že od počátku existuje jednotná interpretace kvantové mechaniky; avšak jak si kromě jiného ukážeme, v žádném případě to takto neplatí.

Zatímco teorie kvantové mechaniky vznikla ve dvacátých letech 20. století, KI je konstruktem, který byl zaveden až v letech padesátých a není se tedy čemu divit, že z toho povstalo mnoho zmatků, nejasností i dezinterpretací. Proto je mým záměrem představit interdisciplinární (nikoli vyčerpávající) shrnutí diskuse kolem role, již stěžejní architekti kvantové teorie Bohr a Heisenberg sehráli ve vztahu ke KI. Nejprve se pokusím zmapovat, co se obecně považuje za KI kvantové mechaniky (2.), která od počátku u svých zakladatelů vyvolávala řadu filosofických otázek ve vztahu jak k ontologickým, tak k epistemologickým důsledkům kvantové mechaniky. Následně se vrátíme k původu termínu „kodaňská interpretace“ (3.), o který se pravděpodobně zasloužil Heisenberg. Další zásadní problém pak spočívá v tom, že titul a obsah KI se zároveň staly zejména pro Bohra čímisi, co bychom mohli po právu označit danajským darem. Z uvedeného důvodu bude třeba stručně sledovat (4.) odlišnost Bohrovy filosofie vědy, plynoucí z porozumění kvantové mechaniky, od KI, respektive Heisenbergových představ. Svůj náhled Bohr nazýval *epistemologická* či *filosofická* lekce.<sup>4</sup>

Stejně tak jako je nutné se zabývat například dějinami vlastního národa, je rovněž žádoucí se zabývat uvedenými otázkami nejen z hlediska čistě fyzikálního nebo historiografického, nýbrž také z hledisek filosofických, sociologických a psychologických, poněvadž ve vzniku vědeckých teorií, jejich prosazování a tradování hrají – jak je dnes všeobecně známé – důležitou roli mimo jiné temperament vědců, různá sociální, kulturní, jazyková nebo ideologická pozadí a současně nesmírný vliv vědeckých autorit. To dohromady vytváří východisko pro rozmanité motivace a metafyzická před-porozumění, jež formují výchovu budoucích vědců, jejich způsoby myšlení, přístupy k řešení problémů a postoje k jiným teoriím, interpretacím nebo ideovým odpůrcům.

Než se dostaneme k některým z těchto aspektů v rámci jednotlivých podkapitol, naznačíme ještě několik souvislostí a poznámek k bouřlivému

<sup>4</sup> Veškeré další přehledové charakteristiky dějin kvantové teorie nebo různé zobecňující závěry k jejím aktérům, které nebudou v článku vykazovány na základě použité literatury, čerpají z knihy o Nielsi Bohrovi: Filip Grygar, *Komplementární myšlení Nielse Bohra v kontextu fyziky, filosofie a biologie* (Červený Kostelec: Pavel Mervart, 2014).

dění, které se víceméně oprávněně rozpoutalo kolem problematické KI především ze strany jejích oponentů. To, co se skrývá pod jejím názvem, už bylo od svého počátku podrobováno různorodým kritikám, jež chtěly mimo jiné ukázat, že neexistuje jedna správná a nerozporná interpretace kvantové mechaniky. Již na přelomu dvacátých a třicátých let byla tzv. KI posuzována z hlediska toho, zda byl výklad tehdy zformované kvantové mechaniky a její popis kompletní, a tedy uspokojující, ve srovnání s tradičními deterministickými ideály novověké přírodovědy týkající se jakéhokoliv elementárního dění, tj. například i kauzálního chování jediného elektronu nebo fotonu (A. Einstein, M. Planck, E. Schrödinger aj.). Jako typický příklad takového kritického postoje uvedme citaci z Einsteinova dopisu Schrödingerovi z roku 1928. V něm popisuje tehdejší stav ve výkladu kvantové mechaniky takto:

Heisenberg-Bohrova konejšivá filosofie – nebo náboženství? – je tak chytrě zosnována, že prozatím svým věřícím nabízí příjemné spočinutí na vavřínech, z něhož nejsou s to se vymámit, dovolme jim tedy odpočívat. Avšak na mě má tohle náboženství tak zatraceně malý vliv [...].<sup>5</sup>

Ze strany filosofů a historiků vědy bylo toto *chytré zosnování* posléze podrobováno rozmanitým hodnocením, jednou z pozice, jakou zastává (nebo její tvůrci) ve vztahu k realismu, antirealismu, pozitivismu, idealismu, subjektivismu, operacionalismu nebo instrumentalismu (H. Margenau, K. Popper, P. Feyerabend aj.), jindy z pohledu ideologie dialektického materialismu (D. I. Blochincev, A. D. Alexandrov, D. Bohm aj.) nebo z hlediska různých alternativních přístupů ke kvantové mechanice (jejíž funkčnost ale protivníci KI většinou nepopírali; například Bohm, L. de Broglie, L. Janossy a nejnověji H. Everett, W. Zurek). Na postupně se rojící hojně kritiky, jež se mnohdy začaly rozmanitě obsahově proplétat, veřejně reagoval W. Pauli v roce 1953 a W. Heisenberg v roce 1955.<sup>6</sup> Heisenberg se pokusil shrnout jedno společné východisko četných nespokojenců s KI následovně:

Všichni odpůrci kvantové teorie jsou však v jednom bodě zajedno. Podle jejich názoru by bylo žádoucí vrátit se k představě reality, jak ji známe z klasické fyziky, nebo, řečeno obecněji, k ontologii materialismu, tedy k představě ob-

<sup>5</sup> Einstein Schrödingerovi 31. 5. 1928, in *Letters on Wave Mechanics. Albert Einstein, Correspondence with H. A. Lorentz, Max Planck, and Erwin Schrödinger*, ed. Karl Przibram (New York: Philosophical Library/Open Road, 2011), dopis č. 14.

<sup>6</sup> Erhard Scheibe, *The Logical Analysis of Quantum Mechanics* (Oxford: Pergamon Press, 1973), 2.

jektivního, reálného světa, jehož nejmenší částice existují stejně objektivně jako kameny a stromy, lhostejno, zda je pozorujeme či nikoli.<sup>7</sup>

Zřejmě neexistují kritici KI, kteří by se zároveň nevymezovali vůči Bohrovi, poněvadž jej – stejně jako obhájcí KI – považují za hlavního, anebo alespoň jednoho z vůdčích tvůrců a propagátorů KI. Filosof a historik vědy D. Howard píše, že tito odpůrci, shledávající v KI „beznadějný zmatek“ a přičítající její nedostatky Bohrově „obskurnosti a dogmatismu“, se ovšem již neptají, zda je „KI ve skutečnosti Bohrovou představou.“<sup>8</sup> Jak silně byla KI po řadu desetiletí úzce provázána s Bohrovým jménem a myšlením, dokládá například nositel Nobelovy ceny za fyziku M. Gell-Mann. V roce 1979 prohlásil, že „Bohr vymyl mozek celé generaci fyziků tím, že [díky KI – pozn. autora] uvěřili, že byl daný problém už před padesáti lety vyřešen.“<sup>9</sup> Pokud by však valná hromada protivníků, včetně Bohrových kolegů, studovala jeho dílo, nutně by musela dospět k závěru, že Bohr nebyl žádným propagátorem KI a nikdy tento termín nepoužíval. Navíc je nutné zdůraznit, že Bohrovu *filosofickou* či *epistemologickou* lekci nelze ztotožňovat nejen s KI, nýbrž také s jinými výklady z pera jeho kolegů. Patrně kvůli své přehnané zdvořilosti se však Bohr veřejně vůči četným zkreslením či naprostým nepochopením své filosofie vědy nevyjadřoval.

Filosofka vědy C. Chevalleyová uvádí, že „nikdo Bohrovy spisy *nečetl*.“ Fyzici se totiž podle ní řídí stále vsudypřítomným a známým mottem, které hlásá „nikdy nečíst Bohra, jelikož je příliš temný.“ Totiž „Bohrovi čtenáři obvykle *nenacházejí* v jeho textech to, co očekávali [navyklé fyzikální vysvětlení kvantové mechaniky či KI – pozn. autora], nýbrž *nacházejí* řadu věcí, jež *neočekávali* [svébytnou filosofii vědy – pozn. autora].“<sup>10</sup> To je mnohdy způsobené jejich předchozím před-porozuměním, založeným nikoli na studiu původních děl tvůrců kvantové teorie, nýbrž ikonických učebnic plných

<sup>7</sup> Werner Heisenberg, *Fyzika a filosofie* (Praha: Aurora, 2000), 91. Srv. Werner Heisenberg, „The Development of the Interpretation of Quantum Theory,“ in *Niels Bohr and the Development of Physics. Essays Dedicated to Niels Bohr on the Occasion of His Seventieth Birthday*, ed. Wolfgang Pauli, Léon Rosenfeld a Victor F. Weisskopf (London: Pergamon Press Ltd., 1955), 17.

<sup>8</sup> Don Howard, „Who Invented the ‚Copenhagen Interpretation‘? A Study in Mythology,“ *Philosophy of Science* 71, č. 5 (2004): 669.

<sup>9</sup> Murray Gell-Mann in Henry Stapp, „Quantum Theory and the Place of Mind in Nature,“ in *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, ed. Jan Faye a Henry J. Folse (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994), 349.

<sup>10</sup> Catherine Chevalley, „Why Do We Find Bohr Obscure?“ in *Epistemological and Experimental Perspectives on Quantum Physics*, ed. Daniel Greenberger, Wolfgang L. Reiter a Anton Zeilinger (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999), 64.

matematického formalismu, ustálené terminologie a definic. Pro svůj shrnující a zestručňující charakter jsou pochopitelně zbaveny výkladu spleťitého fyzikálně-filosofického a sociálně-psychologického vývoje jednotlivých fyzikálních představ, pojmů nebo rovnic, a také odtržené od metafyzických rozhodnutí jednotlivých fyziků vydat se při řešení rozmanitých problémů tím či oním směrem. A když se stane, že si nějaký hloubavý student začne u skript uvědomovat to, co Heisenberg, totiž že různé paradoxy kvantové teorie mizí v matematickém schématu,<sup>11</sup> může na něj, jak vtipně dokresluje nobelista S. Weinberg, dolehnout „legendární rada“: „Zmlkni a počítej! (Shut up and calculate!).“<sup>12</sup> Docela opačně se to má s Bohrovými spisy plnými variačně se opakujících kvalitativních či filosofických výkladů. Tento náročný styl myšlení o implikacích kvantové mechaniky byl inspirován i jeho interdisciplinární výchovou, pěstovanou s obezřetností vůči jakýmkoliv předpokladům, nechutí k učebním textům a v neposlední řadě fascinací běžným jazykem. Musíme dát za pravdu filosofovi vědy E. Scheibemu, když napsal, že „Bohr tvoří oddělenou jednotku, která může být dnes pochopena výhradně prostřednictvím studia všech relevantních publikací samotného Bohra.“<sup>13</sup> Teprve s odstupem desítek let se nám začíná rádně uspořádat interdisciplinárně pojatá mozaika ke vzniku kvantové mechaniky a jejím jednotlivým interpretacím prostřednictvím jak studia originálních děl předních aktérů kvantové teorie, tak jejich různých motivací, rozhodnutí, střetů, omylů a osudových setkání.<sup>14</sup>

## 2. Co je kodaňská interpretace?

Většina zakladatelů kvantové teorie, ale ani kvantových fyziků nebo filosofů a historiků vědy dalších generací, by se na tom, co KI přesně znamená, patrně nedokázala shodnout. Nadto se ze všech dostupných publikací ukazuje, že ve specifikacích KI dochází k jejímu neuvědomělému zaměňování s tím, čeho je filosofickým či kvalitativním výkladem, tj. s čistě kvantifikovatelnými základními postuláty či matematickým aparátem kvantové mecha-

<sup>11</sup> Heisenberg, *Fyzika a filosofie*, 17.

<sup>12</sup> Steven Weinberg, „The Trouble with Quantum Mechanics,“ in *The New York Review of Books*, navštíveno 30. 8. 2017, <http://www.nybooks.com/articles/2017/01/19/trouble-with-quantum-mechanics/>.

<sup>13</sup> Scheibe, *The Logical Analysis of Quantum Mechanics*, 9.

<sup>14</sup> Lze dohledat nespočet rozmanitě zaměřených publikací ke kvantové mechanice, potažmo KI. Vzhledem k omezenému prostoru jsem, kromě doplňující či dokreslující literatury, z mnohých zásadních a pozoruhodných publikací k tématu vybral jen některé.

niky a naopak, což celkové vyjasnění KI ještě více ztěžuje.<sup>15</sup> Již průkopník v historii vývoje a filosofie kvantové teorie M. Jammer, zabývající se ve své známé publikaci z roku 1974 tímto tématem, představil KI tak, že to „není jednotná, nesporná a jasně definovatelná soustava idejí, nýbrž spíše společný jmenovatel pro rozmanitost spřízněných hledisek. Ani není nutně spojena se specifickou filosofickou nebo ideologickou pozicí.“<sup>16</sup> KI totiž není žádnou standardní interpretací, „jakási taková ortodoxie je iluzorní.“<sup>17</sup> Dokonce lze tvrdit, že „kontradikce a nekonzistence nejsou ve spisech zakladatelů kvantové revoluce nějakou anomálií, ale naopak jsou každodenní záležitostí.“<sup>18</sup> Jammer k tomu v knize z roku 1966 doplňuje paradoxní postřeh, totiž že „kodaňská interpretace dokázala přežít vážné krize“ právě „kvůli své vágnosti a průvodní konceptuální flexibilitě.“<sup>19</sup>

Navzdory tomu, že KI je obsahově veskrze problematická, je zarážející, že jen málo autorů se ptá po samotném jejím původu. Proto v následujícím shrnutí budeme nejprve sledovat, jak se definování obsahu tzv. KI postupně proměňovalo a doplňovalo, a též kdo je tvůrcem tohoto dnes již samozřejmého názvu. Pak se zaměříme na to, zda se zakladatelé kvantové mechaniky na *definicích* vůbec shodovali a především, co z citovaného obsahu tzv. KI je, anebo není, v souladu s Bohrovou filosofií vědy.

Nejstručnější vyjádření toho, co KI je, uvádí kvantový teoretik a fenomenolog P. Heelan ve své druhé knize o Heisenbergovi z roku 2016. Píše, že navzdory námitkám ze strany Einsteina a dalších se „komplementarita či kodaňská interpretace, jak to bylo také nazváno,“<sup>20</sup> v roce 1927 rychle zabydlela ve vědecké komunitě. Podobně se vyjadřuje Jammer v knize z roku 1966. V kapitole o KI líčí, že to bylo zajisté Bohrovo první veřejné uvedení pojmu „komplementarity“ v září roku 1927 na konferenci v Lago di Como, které „obsahovalo esenci toho, co později vešlo ve známost jako ‚kodaňská

<sup>15</sup> K těmto postulátům viz například *Základní postuláty kvantové mechaniky*, navštíveno 30. 8. 2017, <http://fyzika.jreichl.com/main/article/view/743-zakladni-postulaty-quantove-mechaniky/>.

<sup>16</sup> Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretations of QM in Historical Perspective* (New York: John Wiley and Sons, 1974), 87.

<sup>17</sup> John Hendry, *The Creation of Quantum Mechanics and the Bohr-Pauli Dialogue* (Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1984), 1.

<sup>18</sup> Mara Beller, *Quantum Dialogue. The Making of a Revolution* (Chicago: The University of Chicago Press, 1999), 172.

<sup>19</sup> Max Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* (New York: McGraw-Hill Book Company, 1966), 356.

<sup>20</sup> Patrick A. Heelan, *The Observable: Heisenberg's Philosophy of Quantum Mechanics* (New York: Peter Lang Inc., 2015), 61.

interpretace kvantové mechaniky.<sup>21</sup> Současný historik vědy J. Heilbron se obdobně vyjádřil, že revoluční představa komplementarity, s níž Bohr vystoupil ve své přednášce v Como, a která je „známá jako kodaňská interpretace, se rychle rozšířila mezi fyziky, z nichž ji většina akceptovala, aniž by si dělala starosti s jejím porozuměním, a rovněž mezi filosofy, kteří byli přitahováni tímto tématem“ či diskusemi mezi Einsteinem a Bohrem.<sup>22</sup> K posunu u Jammera došlo v jeho knize z roku 1974, kde hovoří již o *komplementární interpretaci* a ve stejnojmenné kapitole píše, že se nárok komplementarity vyslovené v Como stal základem pro to, „co později vešlo ve známost jako ‚komplementární interpretace‘ či ‚kodaňská interpretace‘ kvantové mechaniky.“<sup>23</sup> Dále zdůrazňuje, že i Einstein musel v říjnu 1927 na páté *Solvayské (Solvayově) konferenci* v Bruselu

připustit, že z logického hlediska teorie a její komplementární interpretace tvoří konzistentní systém myšlení. Pro dalších dvacet pět let byla kodaňská interpretace jedinou akceptovanou interpretací kvantové mechaniky – a pro většinu fyziků je tomu tak i dnes.<sup>24</sup>

Fyzik a historik kvantové teorie J. Mehra ve svých sebraných textech z roku 2001 zopakoval téměř doslovně výše uvedenou Jammerovu tezi o tom, že „se Bohrovo stanovisko o komplementaritě z Como stalo esencí toho, co se později nazvalo ‚kodaňská interpretace‘ kvantové mechaniky.“<sup>25</sup> Avšak na jiném místě o komplementaritě jako základu KI přidává už výslovně Heisenbergovy relace neurčitosti: „[...] snahy kodaňských fyziků o fyzikální interpretaci kvantové mechaniky vedly především k Heisenbergovým relacím neurčitosti a Bohrově komplementární představě – ty se staly centrálními

<sup>21</sup> Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, 351. Bohr v tzv. Como přednášce uvažuje o „prostorovo-časovém popisu“ a „kauzálním popisu“ jakožto deskriptivních výlučných. Píše: „Právě povaha kvantové teorie nás nutí zvažovat prostorovo-časovou souřadnici a požadavek kauzality [zde poznání hybnosti či energie – pozn. autora], spojení příznačné pro klasické teorie, za komplementární, avšak vzájemně se vylučující rysy deskripce, symbolizující idealizaci observace a definice“ (Niels Bohr, *Collected Works. Volume 1–13* (Amsterdam: Elsevier, 1972–2008), zde CW 6, 115).

<sup>22</sup> John L. Heilbron, „The Earliest Missionaries of the Copenhagen Spirit,“ *Revue d'histoire des sciences* 38 (1985): 196.

<sup>23</sup> Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, 87.

<sup>24</sup> *Ibid.*, 361.

<sup>25</sup> Jagdish Mehra, *The Golden Age of Theoretical Physics, Volume 2* (Singapore: World Scientific, 2001), 904.



částími tzv. kodaňské interpretace kvantové mechaniky.<sup>26</sup> Toto prohlášení upřesňuje jinde tvrzením, že „Bohr rozvinul svůj jednotlicí koncept komplementarity na základě Heisenbergových příkladů“, které použil ve svém slavném článku o relacích neurčitosti z roku 1927<sup>27</sup> a český fyzik I. Štoll již tvrdí, že „v návaznosti na Heisenbergovu relaci neurčitosti zformuloval Bohr tzv. princip komplementarity.“<sup>28</sup> Současný historik vědy D. Cassidy ve vyčerpávající publikaci o Heisenbergovi z roku 2009 představuje další rozšiřující náhled na KI: Heisenbergův princip neurčitosti, následný Bohrův princip komplementarity a Bornova statistická (pravděpodobnostní) interpretace Schrödingerovy vlnové funkce vytvořily v roce 1927 KI, tj. „explikaci používání a omezení matematického aparátu nyní již jednotné kvantové mechaniky.“ Zdůrazňuje, že KI byla základem pro „porozumění dualit vln a částic, vlnových funkcí a matic, atomů a laboratoří, kontinuity a diskontinuity, kauzálních a nekauzálních popisů, výzkumníků a jejich experimentů.“<sup>29</sup>

Ačkoliv se podle historičky vědy M. Bellerové ani sami tvůrci kvantové mechaniky nikdy neshodovali na její interpretaci, vycházeli ze dvou nesporných pilířů, jimiž jsou „indeterminismus a revize klasické představy reality.“<sup>30</sup> S tímto přehodnocením tradičního rámce fyziky ještě úzce souvisí následující dva důležité rysy KI. Na jeden upozorňuje většina zainteresovaných interpretů Bohra a Heisenberga: nutnost zachování klasických fyzikálních pojmů navzdory jejich limitaci v kvantových popisech. Na druhý rys upozorňuje poslední Bohrův asistent A. Petersen: komplementaritu, již Bohr uvažoval jako obecný filosofický rámec pro „zacházení s epistemolo-

<sup>26</sup> Mehra, *The Golden Age of Theoretical Physics*, 855 nebo 895. Jinde říká, že „z práce Heisenberga a Bohra vzešla tzv. kodaňská interpretace, která se stala základem pro dominantní ortodoxní filosofickou představu kvantové mechaniky“ (Ibid., 1320).

<sup>27</sup> Ibid., 1320.

<sup>28</sup> Ivan Štoll, *Dějiny fyziky* (Praha: Prometheus, 2009), 471.

<sup>29</sup> David C. Cassidy, *Beyond Uncertainty. Heisenberg, Quantum Physics, and the Bomb* (New York: Bellevue Literary Press, 2009), 152, 159 a 170.

<sup>30</sup> Beller, *Quantum Dialogue. The Making of a Revolution*, 171. Na Solvayské konferenci v roce 1927 spolu vystoupili Born s Heisenbergem a v prezentovaném příspěvku kromě jiného prohlásili, že kvantová mechanika je názorná, v mikrosvětě indeterministická, kompletní a uzavřená teorie. Tyto závěry vychází hlavně z Heisenbergova původního draftu. Jejich výklad se také (v té době) snažil vyhnout tzv. redukcí vlnové funkce (viz níže), již (tehdy) považovali čistě za statistický fenomén. Více viz Guido Bacciagaluppi, „The Statistical Interpretation according to Born and Heisenberg,“ in *HQ-1: Conference on the History of Quantum Physics*, MPIWG, ed. Christian Joas, Christoph Lehner, Jürgen Renn, 269–88 (vol. II), 2008, MPIWG preprint series (vol. 350), závěr; navštíveno 27. 9. 2017, <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00999722/file/E4.pdf>.

gickými problémy vznikajícími ze subjekt-objektového rozdělení<sup>31</sup> napříč vědními disciplínami, nebylo jednoduché konkrétně fyzikálně vyjádřit, jako například princip neurčitosti, a využívat pro řešení kvantových problémů. Z uvedeného důvodu to byla především Bohrova idea korespondence (předchůdkyně komplementarity vznikající postupně od představení Bohrova modelu atomu a molekul), jež vytvořila metodologický vztah mezi klasickou fyzikou a rodící se kvantovou mechanikou. Idea korespondence tedy sehrála „klíčovou roli při rozvoji maticové verze kvantového formalismu“ a posléze se právě ona stala „epistemologickým jádrem kodaňské interpretace.“<sup>32</sup>

Ucelenější výčet – toho, co *očekává* už každý fyzikálně vzdělaný čtenář – poskytuje Mehra. Zatímco Bohr se podle něj prostřednictvím „principu komplementarity“ pokoušel „porozumět přírodním fenoménům v plné všeobecnosti“, byl to následně J. von Neumann, který se zase snažil matematicky formulovat do té doby vysoce diskutovanou roli měřících přístrojů při fyzikálních pozorováních. Ačkoliv Mehra stejně jako Jammer zdůrazňuje, že KI není kompletním souborem axiomů, poněvadž je „v mnoha ohledech *představou* nebo *školou*“, pokusil se shrnout několik stanovisek, na nichž se podle něj „přívrženci ortodoxní kodaňské interpretace“ kvantové mechaniky, tj. Bohr, Heisenberg, Born, Pauli, P. Jordan i další přední fyzici, už dokázali víceméně shodnout (jak záhy zjistíme, jde o zavádějící tvrzení). Od roku 1930 byla podle Mehry následující stanoviska KI ještě postupně fyzikálně a matematicky formálně dopracována, zpřesněna či zjemněna:

- (1) *Vlnová funkce*: Stav fyzikálního systému je popsán vlnovou funkcí  $\Psi$ , již představuje vektor v Hilbertově prostoru.
- (2) *Superpozice*: Jestliže  $\Psi_1$  a  $\Psi_2$  reprezentují dva stavy nějakého systému, potom jejich lineární kombinace také reprezentuje určitý stav daného systému.
- (3) *Pohybová rovnice*: Vlnová funkce daného systému se řídí pohybovou rovnicí – Schrödingerova rovnice.

<sup>31</sup> Aage Petersen, *Quantum Physics and the Philosophical Tradition* (New York: MIT Press, 1968), 29.

<sup>32</sup> *Ibid.*, 34. Bohrovův princip, argument či idea korespondence vyjadřuje nárok kvantové mechaniky stát se racionální generalizací klasické teorie. Pak platí, že při přechodu od makroskopických systémů k atomárním přestávají platit zákonitosti klasické mechaniky ve prospěch předpokladů kvantové mechaniky a naopak. Rozhodující ukazatel pro tento přechod je Planckova konstanta (kvantum akce), kardinální pro kvantové jevy, která je podle Bohra z hlediska klasických teorií iracionální. Více viz Bohr CW 3 a v souvislosti s ideou komplementarity viz Grygar, *Komplementární myšlení Nielse Bohra*, 3. kap.

(4) *Měření*: Proces měření je popsán působením odpovídajícího hermitovského operátoru na určitý stav. Toto působení produkuje vlastní funkci (hermitovského operátoru) a související vlastní hodnotu. Současné měření dvou kanonicky sdružených (komplementárních) proměnných podléhá omezením neurčitostí. Obecně vzato, proces observace způsobuje diskontinuitní změnu  $\Psi$ , tento stav systému, jelikož se nutně nejedná o vlastní stav pozorovatelného, implikuje „redukci vlnového balíku“ [k této Heisenbergově či J. von Neumannově redukci, kterou Bohr vůbec nepotřeboval, viz níže – pozn. autora].<sup>33</sup>

### 3. O původu kodažské interpretace

Ani jeden z autorů mnoha studií nebo knih (včetně Heisenberga, erudovaného v latině, řečtině a filosofii) si alespoň orientačně nevyjasnil základní otázku po významu samotného slova „výklad“ (*herméneia, interpretatio*), čímž by se zabránilo klamným očekáváním kladených na KI, a rovněž by odpůrci i obháji interpretace kvantové mechaniky museli začít rozlišovat mezi interpretací Bohrovou, Bornovou, Heisenbergovou, Pauliho, Jordana ad. Je škoda, že se o to nepokusil Bohr, mohl by zapojit svůj obvyklý přístup k řešení problémů a patrně by začal právě touto otázkou. Byl známý tím, že si vždy při řešení nějakého fyzikálního problému nejprve pečlivě vyjasňoval základní teoretické pojmy a předpoklady, s nimiž se doposud k řešenému problému přistupovalo, a teprve pak se zaměřil na to, jak navrhnout nové předpoklady a ten či onen matematický aparát. V nejobecnější rovině se rovněž dotazoval po tom, co vůbec obnáší pojem „vysvětlení“ nebo „porozumění.“<sup>34</sup> Nikdy však v různých variacích neopomněl zdůraznit, že musíme „připustit, že ve veškerém používání jazyka je praktická aplikace jakéhokoliv slova komplementární [neslučitelná – pozn. autora] s pokusy o jeho přesnou definici.“<sup>35</sup>

<sup>33</sup> Mehra, *The Golden Age of Theoretical Physics*, 1321.

<sup>34</sup> Více viz Grygar, *Komplementární myšlení Nielse Bohra*.

<sup>35</sup> Bohr, *CW 10*, 71. Bohrovo originální pojetí komplementarity z hlediska doplňování neslučitelných popisů nějakého fenoménu, nekompatibilních idejí, pojmů, experimentálních uspořádání atd. nelze zaměňovat za běžné používání komplementarity z hlediska pouhého doplňování vzájemně závislých členů, například u dvojice život a smrt, duše a tělo, žák a učitel, bázi DNA atd. (nepřilíš šťastné je proto využití symbolů *jin* a *jang* pro vyjádření Bohrovy původní ideje komplementarity na jeho erbu). Bohr o komplementaritě hovoří například v tom smyslu, že „slova jako ‚myšlenka‘ a ‚cítění‘ odkazují ke vzájemně vylučným zkušenostem [...]“ (Bohr, *CW 10*, 168). Podobně pro Bohra není momentální zakoušení hudby zaměnitelné

Pojem „interpretace“ je v dějinách evropské myšlenkové tradice diskutabilní nejen v tom, co znamená, ale také v tom, že nabývá odlišných úrovní a nároků na to, co od výkladu očekáváme. Navyklé pojetí interpretace známe už ze školních lavic, kdy jsme měli vyložit nějakou básničku, abychom jí následně porozuměli. Avšak Heidegger, který si vysoce cenil Bohrova a Heisenbergova filosofického myšlení (nikoli tak kalkuluující kvantové mechaniky), tvrdí, že k porozumění nedochází až prostřednictvím výkladu (vysvětlení nebo matematiky). Než přistoupíme k básničce (experimentu, měření elektronu atd.), už víme, co je básnička (experiment atd.), rozumíme vždy již nějak jednotlivým slovům, životním situacím a dalším kontextům. Výklad je totiž nejpůvodněji založen na bytostném (ne-subjekt-objektovém či ještě nereflektovaném) rozumění tomu, že jsme, že jest nám trvale být v nekonečných možnostech toho jak být, a z tohoto existenciálního rozumění bytí neustále vzhází a rozvíjí se nesčetné výklady našeho života, dějinného porozumění bytí, přírody či kvantové mechaniky atd. Jakékoliv pojmy nebo aktivity, vytváření nových teorií nebo matematických formalismů, je vždy již nějak založeno na rozmanitých před-porozuměních a metafyzických rozhodnutích sahajících opětovně k tomu, že nekonečně rozvrhujeme „své bytí jako možnosti“, a tím se ocitáme v hermeneutickém kruhu, z něhož nelze vystoupit.<sup>36</sup>

Zatímco u Heideggera jsme vrženi do bytostné dimenze *bytí-ve-světě* (základní struktura našeho *bytí-tu* či *Pobytu*) u Bohra jsme zapuštěni do bytostné dimenze toho, co lze označit jako *diváko-herectví-v-existenci*. Tato Bohrova pozice, podobně jako u Heideggera, souvisí s kritikou dosavadních novověkých ideálů moderní vědy či karteziánské tradice, která považovala subjekt-objektové rozštěpení za něco samozřejmého. Bohr zdůrazňoval, že se v každodenním životě nebo při teoretické a experimentální práci sice ocitáme neustále v situaci, kdy se rozhodujeme udělat někde řez mezi subjektem (pozorovatelem, myšlením, naší teorií přírody, měřicím přístrojem atd.) a objektem (tím pozorovaným, myšleným, měřeným, přírodou atd.), ale tento řez není nijak samozřejmý, nýbrž je rozmanitě oborově interpretační, nevíme, co přesně patří na tu či onu stranu subjekt-objektového vztahu (a to ani v klasické fyzice). Například při popisu kvantových experimentů a výkladu měřených systémů dochází k nemožnosti „separování určitého

a převoditelné na popis uvědomění si tohoto prožitku hudby, a pokládá je za komplementární. Podrobně k této problematice viz Grygar, *Komplementární myšlení Nielse Bohra*, 3. kap.

<sup>36</sup> Více viz Martin Heidegger, *Bytí a čas* (Praha: Oikoymenh, 2002), § 32 a Grygar, *Komplementární myšlení Nielse Bohra*.

chování objektů od jejich interakce s měřicími přístroji<sup>37</sup>, a navíc je už samotný pojem „objekt“ v kvantové teorii nejednoznačný.<sup>37</sup> Podobně „i slova jako ‚být‘ a ‚vědet‘ ztrácejí svůj jednoznačný význam,<sup>38</sup> neboť už musíme být, abychom mohli explicitně vysvětlit to, co toto původní bytí znamená, a tudíž jakýkoli následný výklad nutně jen zpředměťňuje (objektivizuje) to, do čeho jsme neustále bytostně (implicitně či ne-subjekt-objektově) zapuštěni. Stejně tak to dle Bohra platí pro neuchopitelnou dimenzi jazyka, z níž vzhází naše každodenní pojmosloví nebo pojmy klasické fyziky. Nehledě na „propracovanost terminologie díky hromadění experimentálních důkazů a rozvoji teoretických konceptů, veškeré vysvětlení fyzikální zkušenosti je samozřejmě nakonec založeno na běžném jazyce [...]“<sup>39</sup> Bohr si velmi dobře uvědomoval na straně jedné, že se při jakémkoli výkladu a používání pojmů potýkáme v každé specializaci s nutným, nicméně obrovským redukcionismem, jenž „implikuje nebezpečí předsudků,<sup>40</sup> a na straně druhé si byl vědom toho, že pro porozumění problematickým jevům nebo terminologii v rodící se kvantové teorii bylo nutné se obrátit i k jiným disciplínám, jako jsou filosofie nebo psychologie, a rovněž k otázkám epistemologie, „s nimiž už byli konfrontováni myslitelé jako Buddha nebo Lao-c‘, když se pokoušeli harmonizovat naši pozici jakožto diváků a herců ve velkém dramatu existence.“<sup>41</sup>

Je pak pochopitelné, že například oproti už vědomě a axiomaticky vystavěné eukleidovské geometrii nebo kanonizovaným čtrnácti zastavením symbolizujícím křížovou cestu, nemůže být KI, pakliže má zůstat interpretací, standardizovaným manuálem s daným výčtem definic nebo axiomů, na němž by se dokázali shodnout nejen samotní tvůrci kvantové teorie (zatížení různými kulturními tradicemi a filosoficko-vědeckými před-porozuměními), nýbrž také další generace fyziků. Jedním z dokladů mohou být například rozhovory špičkových kvantových fyziků v osmdesátých letech 20. století pro pořady BBC. Všichni si odporují, přesto každý z nich zastává názor, že existuje jen jedna správná interpretace, o níž hovoří.<sup>42</sup> Proto ani

<sup>37</sup> Bohr, CW 7, 335. Snad všechny interpretace kvantové mechaniky se dodnes pokouší vypořádat s problémem měření či otázkou, jaký je vztah mezi klasickými přístroji a zkoumaným kvantovým systémem, zda se má i měřící přístroj považovat za kvantový systém apod.

<sup>38</sup> Bohr, CW 6, 297.

<sup>39</sup> Bohr, CW 10, 127.

<sup>40</sup> Bohr, CW 10, 64.

<sup>41</sup> Bohr, CW 10, 60.

<sup>42</sup> Více viz Paul Davies a Julian R. Brown, ed., *The Ghost in the Atom* (Cambridge: Cambridge University Press, 1986).

„není důvod hledat *onu* kodaňskou interpretaci jako unifikovanou a konzistentně logickou strukturu.“<sup>43</sup> Avšak od navržených základních postulátů a matematického aparátu kvantové mechaniky samozřejmě vyžadujeme jednotnost, objektivnost, kvantifikaci, aplikovatelnost, funkčnost, ověřitelnost výsledků, předvídatelnost, a přesnost atd. S takto vybudovanou mechanikou se již naučilo pracovat několik generací studentů, vědců či kvantových mechaniků, a proto se nemuseli a nemusí trápit nekonečnými kvalitativními filosoficko-fyzikálními diskusemi kolem KI. Úkolem fyzikálních postulátů nebo užití matematiky totiž není starost o existenciální základy našeho dějinného rozumění *bytí-ve-světě* či *diváko-herectví-v-existenci*. Nicméně z nich matematika vzešla motivačně tak, že si je mohla v dějinném vývoji dovolit pro své intuitivní nebo praktické účely, postupně radikálně zúžit a v takto již zajištěné oblasti kalkulujících předem-známostí – tzn. toho, co lze naučit (*to mathéma, ta mathémata*), a současně prostřednictvím učení (*mathésis*) beze změny předávat z generace na generaci – exaktně pracovat.

Obrátíme-li se dále k tomu, jaká tradovaná pojmenování jsou zaměnitelná za KI, můžeme zajisté hovořit také o tzv. ortodoxním výkladu, o němž psal v roce 1958 Heisenberg jako o „ortodoxním“ v uvozovkách.<sup>44</sup> Nebo jinde zase píše o kritikách, kteří rozporovali „ortodoxní“ interpretaci, „ortodoxní“ teorii nebo dokonce „ortodoxní“ kvantovou teorii.<sup>45</sup> Na straně druhé by neměla být KI zaměňována:

1. Za to, čeho je KI výkladem, tj. za samu kvantovou mechaniku, ačkoliv je někdy obtížné, jak se ukazuje nejen v Heisenbergových textech, takový řez striktně učinit. (Jsou například matematicky vyjádřené relace neurčitosti *jen* postulátem či principem kvantové mechaniky, jenž je dodnes podrobován rozmanitým interpretacím, nebo jsou relace neurčitosti *jen* interpretací kvantové mechaniky? Schrödingerovy rovnice (časová a bezčasová) jsou jasné, jsou stále stejné, avšak Schrödinger je interpretoval jinak než Born, Bohr anebo Heisenberg.)

2. Za Heisenbergovo označení „kodaňský duch [Geist – pozn. autora] kvantové teorie“ v chicagských přednáškách proslavených na jaře 1929 na univerzitě v Chicagu a publikovaných v roce 1930 jako proslavená učeb-

<sup>43</sup> Scheibe, *The Logical Analysis of Quantum Mechanics*, 9. Od osmdesátých let se samozřejmě rozvoj jak v četné různorodosti teoretického porozumění, tak v rozmanitých aplikacích kvantové teorie, posunul opět na další a mnohem vyšší úroveň, o níž fyzici z osmdesátých let pouze diskutovali, nebo o ní ani netušili.

<sup>44</sup> Heisenberg, *Fyzika a filosofie*, 100.

<sup>45</sup> Heisenberg, „The Development of the Interpretation of Quantum Theory,“ 16 a 17.

nice.<sup>46</sup> Tím při zakládání kvantové mechaniky odkazoval na památnou filosofickou, intelektuální a rodinnou atmosféru vládnoucí díky Bohrově osobnosti (Bohr ztělesňoval tohoto ducha) v *Univerzitním ústavu pro teoretickou fyziku* v Kodani (založený v roce 1920; od roku 1965 přejmenovaný na Ústav Nielse Bohra).

3. Za „kodaňskou školu“, jež zahrnovala *a*) fyziky, kteří, bez ohledu na to, zda pracovali v Berlíně, Mnichově, Göttingen, Paříži, Cambridge nebo Kodani, po Bohrových vystoupeních na konferencích v Como a v Bruselu na podzim roku 1927 doslova uvěřili v novou kvantovou teorii, a ačkoli na její výklad neměli jednoznačné názory, připojili se ke „kodaňským“ či „komunitě věřících.“<sup>47</sup> Nebo zahrnovala *b*) rozmanité vědce (fyziky, biologie, radiochemiky nebo konstruktéry urychlovačů apod.), kteří byli místně spríznění s „kodaňskou školou“, resp. „kodaňskou školou fyziky“; tzn. že navštěvovali, studovali nebo pracovali v Bohrově fyzikálním ústavu a po válce si tyto účastníci během různých konferencí a příležitostných setkání připomínali onu památnou atmosféru.<sup>48</sup>

Několik autorů (například Howard nebo Chevalleyová), kteří si dali tu práci pátrat po samotném původu KI, se shodují na tom, že spojení slov „kodaňská“ a „interpretace“ zavedl zjevně Heisenberg, a to až ve svých textech z padesátých let 20. století (v publikovaných jazycích *Die Kopenhagener Deutung; Copenhagen Interpretation*); v nich píše jak o KI, tak i tzv. KI anebo

<sup>46</sup> Werner Heisenberg, *The Physical Principles of the Quantum Theory* (New York: Dover Publications, 1949), úvod.

<sup>47</sup> Pauliho pracovní název „kodaňští“ a „komunita věřících“ z roku 1925 byl původně vymezením se vůči „mnichovské škole“, naproti tomu pojmenování „kodaňská škola“ jakožto společný jmenovatel pro fyziky, kteří se sešikovali proti těm, co se nesmířili s dosavadním vývojem v kvantové teorii, se ujal asi až na podzim roku 1927. Více viz Grygar, *Komplementární myšlení Nielse Bohra*, 3. kap. Nicméně v roce 1929 Heisenberg používal spojení „kodaňský kroužek“, jehož byl „Bohr vůdcem“ a v roce 1958 tomuto kroužku také říkal „kodaňská skupina“, která se podle něj vymezovala vůči „göttingenské skupině“ nebo Schrödingerovi; v těchto Heisenbergových případech šlo o místní označení pro kolegy pracující tehdy v Kodani. Více viz: Werner Heisenberg, „Die Entwicklung der Quantentheorie 1918–1928,“ *Die Naturwissenschaften* 17, č. 26 (1929): 492; Heisenberg, *Fyzika a filosofie*, 18 nebo viz Werner Heisenberg, „Quantum Theory and Its Interpretation,“ in *Niels Bohr – His Life and Work as Seen by his Friends and Colleagues*, ed. Stefan Rozenal (Amsterdam: North-Holland Publishing Co., 1967), 101.

<sup>48</sup> Například viz Peter J. Kennedy, „A Short Biography,“ in *Niels Bohr. A Centenary Volume*, 9 nebo Otto R. Frisch, *What Little I Remember* (Cambridge: Cambridge University Press, 1979), 21.

o „KI“ v uvozovkách.<sup>49</sup> Nicméně dvě vzpomínky říkají něco jiného: A. Pais zmiňuje v detailní vědecké biografii o Bohrovi jednu název „kodaňská interpretace“, a to pouze v souvislosti se vzpomínkou anglického fyzika N. Motta, v níž líčí, že když „pracoval v Kodani v roce 1928, už se to jmenovalo ‚kodaňská interpretace‘.“<sup>50</sup> Dále v roce 1963 Heisenberg vzpomíná v rozhovoru s T. Kuhnem na fyzika P. Ehrenfesta, který na *páté Solvayské konferenci* prý prohlásil, že „nyní je kodaňská interpretace tou správnou interpretací.“<sup>51</sup> Bylo by pak pochopitelné, že Heisenberg operoval v padesátých letech s termínem KI s naprostou samozřejmostí, neboť tak navazoval na hektické dění v kvantové teorii vrcholící v roce 1927. Heisenberg, zřejmě po celou dobu přesvědčený o interpretační jednotě kodaňské školy či jejích přívrženců, prohlašuje v pozdních spisech například toto: „Tak se konečně na jaře 1927 došlo k nerozpornému výkladu, který se často nazývá kodaňský výklad.“<sup>52</sup> A jinde zase uvádí, že

od Solvayské konference v roce 1927, byla ‚kodaňská interpretace‘ celkem obecně přijata a vytvořila základ pro všechny aplikace kvantové teorie [...] To, co bylo zroženo v Kodani v roce 1927, nebyl pouze jednoznačný předpis pro interpretaci experimentů, ale také jazyk, v němž člověk hovořil o přírodě na atomární úrovni, a do té míry část filosofie.<sup>53</sup>

Přesvědčení o souladné interpretaci by odpovídalo i vyznění dopisu, který napsal rodičům už bezprostředně po *Solvayské konferenci*: „Jsem v každém ohledu s tímto vědeckým výsledkem spokojený. Bohrovi a moje

<sup>49</sup> V roce 1955: Heisenberg, „The Development of the Interpretation of Quantum Theory,“ postupně stránky 12, 14, 16 atd. Na s. 17 také používá čistě jen termín kodaňská teorie; v roce 1958 Heisenberg, *Fyzika a filosofie*, kap. III (původně jde o přednášky pronesené v letech 1955–56 na skotské univerzitě v St. Andrews) a v roce 1967 Heisenberg, „Quantum Theory and Its Interpretation,“ 107 a 108. Zajímavé je, že ve své druhé knize *Část a celek* (porovnáno s originálem v němčině z roku 1969) nenarazíme na pojem KI, pouze na spojení „fyzikální interpretace“ kvantové mechaniky, „kodaňský kroužek [Kreis]“ nebo že s Bohrem a Paulim hovořili v roce 1952 „na staré téma, zda kvantová teorie byla plně pochopena a zda se výklad, který jsme vypracovali před pětadvaceti lety, stal mezitím všeobecně uznávaným myšlenkovým majetkem fyziky“ (Werner Heisenberg, *Část a celek. Rozhovory o atomové fyzice* (Olomouc: Votobia, 1996), 231).

<sup>50</sup> Nevill F. Mott in Abraham Pais, *Niels Bohr's Times, in Physics, Philosophy and Polity* (Oxford: Clarendon Press, 1993), 289. O KI píše Pais pouze na této stránce.

<sup>51</sup> Werner Heisenberg, *Oral History Transcript – Werner Heisenberg, Session IX*, navštíveno 30. 8. 2017, <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4661-9>.

<sup>52</sup> Heisenberg, *Fyzika a filosofie*, 19.

<sup>53</sup> Heisenberg, „The Development of the Interpretation of Quantum Theory,“ 16.



názory byly obecně přijaty; alespoň nebyly už více učiněny vážné námitky, dokonce ani ze strany Einsteina a Schrödingera.<sup>54</sup>

Ovšem z dostupných archivních materiálů vyplývá, že se na vzpomínky Motta a Heisenberga nemůžeme spoléhat, poněvadž jsou pravděpodobně zpětnou projekcí. Prozatím se tedy ukazuje, že termín KI a obsahově její údajná jednota či správnost je Heisenbergův dodatečný vklad až z padesátých let a v době ustavení kvantové teorie se nepoužíval, neboť by se během desítek let v literatuře, korespondenci nebo ve vzpomínkách mnoha dalších aktérů kvantové mechaniky již nepochybně vícekrát objevilo, že toto sousloví bylo už tehdy používané a že Heisenberg jen termín KI převzal. Podíváme-li se například na vysoce oceňované chicagské přednášky nebo na vzorovou nobelovskou přednášku o vývoji kvantové teorie z prosince roku 1933, o KI v těchto publikovaných textech nenajdeme ani zmínku. Když Heisenberg ve slavnostním projevu použije slovo „interpretace“, tak v tom smyslu, že je potřeba například diskutovat o důkladné „fyzikální interpretaci kvantové mechaniky“ ve vztahu ke klasické fyzice.<sup>55</sup> Historička vědy C. Carsonová, která se zaměřuje ve své rozsáhlé knize o Heisenbergovi z roku 2010 zejména na poválečné období, přichází ještě s jednou alternativou k původu názvu KI. Připouští, že je opravdu možné, že Heisenberg byl první, kdo název KI zveřejnil ve svých textech, nicméně v nich píše i o tzv. KI anebo název dává do uvozovek. Z toho Carsonová dovozuje, že nemuselo toto pojmenování pocházet přímo od Heisenberga, a dokladem toho má být korespondence mezi L. Rosenfeldem a Heisenbergem z roku 1958. Heisenberg prý vzal na vědomí Rosenfeldovu námitku, v níž jej upozornil, že název KI byl zaveden „Bohmiány“ (tj. přívrženci Bohma a jeho teorie skrytých proměnných pokoušející se mimo jiné uchránit materialistické představy), „aby se jejich žvásty [Quatsch] jevily na stejné úrovni jako správný způsob, jak se na věci dívat.“<sup>56</sup> I Chevalleyová či Camilleri naznačují, že Heisenberg mohl reagovat například na článek Blochinceva z roku 1952, který v názvu nese termín „tzv. kodaňská škola“ a který se na pozadí studené války důrazně vymezuje vůči názorům této školy či její

<sup>54</sup> Heisenberg, dopis z 29. 10. 1927 in *Werner Heisenberg: Liebe Eltern! Briefe aus kritischer Zeit 1918 bis 1945*, ed. Anna M. Hirsch-Heisenberg (München: Langen Müller, 2003), 126.

<sup>55</sup> Werner Heisenberg, *Nobel Lecture: The Development of Quantum Mechanics*, navštíveno 30. 8. 2017, [https://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1932/heisenberg-lecture.html](https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1932/heisenberg-lecture.html).

<sup>56</sup> K tomu více viz Cathryn Carson, *Heisenberg in the Atomic Age. Science and the Public Sphere* (Cambridge: Cambridge University Press, 2010), 92.

interpretaci kvantové mechaniky; současně je článek ukázkou ideologické kampaně proti tzv. Bohrovu imaterialismu.<sup>57</sup>

Není nezajímavé se rovněž zaměřit na Heisenbergovy motivace vedoucí k vytvoření mýtického příběhu o KI. Víme, že se na vzniku kvantové teorie většinovým počtem podíleli němečtí fyzici, jichž si Heisenberg až na výjimky vysoce cenil (Planck, Einstein, M. von Laue, A. Landé aj.), s některými z nich během svých studií také spolupracoval (A. Sommerfeld, J. Franck, M. Born). Navzdory tomu Heisenberg hovoří o interpretaci kodaňské. Jeho osobní motivace jsou však v tomto ohledu zcela pochopitelné:

1. Třebaže nelze pominout filosoficko-epistemologický vliv například Kanta nebo Einsteina na Heisenbergovo myšlení, je to výhradně Bohr, který byl pro (o patnáct let mladšího) Heisenberga od roku 1924 privilegovaným mentorem a posléze celoživotním přítelem, jehož Heisenberg a řada jiných až do konce svého života doslova uctívali.<sup>58</sup> Bohr s Heisenbergem byli nepochybně nejdůležitějšími architekty kvantové teorie a Heisenberg se domníval, že mezi jeho a Bohrovými myšlenkami o kvantové teorii, které široce přejímal (ovšem často jinak vykládal) zejména od roku 1927, nebyly žádné zásadní filosoficko-fyzikální rozdíly. Jak silně Heisenberg lpěl na tomto obraze, lze pochopit například z diskuse o článku P. Heelana z roku 1975, který pojednával o rozdílných představách mezi Heisenbergem a Bohrem. Vzhledem k tomu, že Heelan s Heisenbergem spolupracoval již při psaní své první knihy o Heisenbergovi (1965), poslal mu článek ještě před jeho vydáním. Heisenberg posléze Heelana požádal, aby uvedené odlišnosti zmírnil, Heelan mu však podal nové argumenty.<sup>59</sup>

2. Bohr pocházel z Kodaně, v níž založil meku kvantové mechaniky, kam se sjížděli vědci z celého světa pracovat, studovat a především filosofovat, tzn. naučit se filosoficko-fyzikálně interpretovat nejprve nastalé problémy, a posléze pro ně konstruovat ten či onen matematický formalismus, který nikdy pro Bohra nebyl, byť sebeelegantnější a sebešikovnější, sám o sobě spásnosný. Heisenberg toto zásadní metodologické hledisko, s nímž měl

<sup>57</sup> Chevalley, „Why Do We Find Bohr Obscure?“ 62 a 63; Kristian Camilleri, „Constructing the Myth of the Copenhagen Interpretation,“ *Perspectives on Science* 17, č. 1 (2009): 37.

<sup>58</sup> Na dokreslení ocitují protivníka KI Schrödingera, který poté, co se v říjnu 1926 vrátil po krušných diskusích s Bohrem z Kodaně domů, napsal o svém zážitku ihned dopis fyzikovi W. Wienovi: „Sotva bude kdy existovat člověk, který by dosáhl takového nesmírného vnějšího a vnitřního úspěchu, člověk, jenž by byl v oblasti své práce celým světem uctíván téměř jako polobůh [...]“ (In Grygar, *Komplementární myšlení Nielse Bohra*, 118 a 119).

<sup>59</sup> Jak Heelanův článek „Heisenberg and Radical theoretic Change“, tak i dopis Heisenberga jako postscript s názvem „Comments to Heelan's Thesis“, vyšly v *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie*, č. 6 (1975): 113–38, postscript.

zpočátku (nejen on) veliký problém, shrnuje takto: „Matematická jasnost sama o sobě neměla pro Bohra žádnou přednost. Obával se, že by formální matematická struktura zatemnila fyzikální jádro problému [...] byl přesvědčen, že kompletní fyzikální vysvětlení by měla jednoznačně předcházet matematické formulaci.“ Dále píše, že byla od roku 1926 „interpretace kvantové mechaniky nejdůležitějším předmětem našich diskusí.“<sup>60</sup> Heisenberg potom poukazoval na to, „že způsob, pomocí něhož Bohr uvažoval o atomových jevech od roku 1912, byl vždy něčím zprostředkujícím mezi fyzikou a filosofií. [...] Formuloval novou interpretaci kvantové teorie ve filosofickém jazyce [...]“<sup>61</sup>

3. Heisenberg nevytvořil (s následným přispěním Borna a Jordana) maticovou mechaniku přímo během svého stipendijního pobytu v Kodani (září 1924 až květen 1925), nicméně bezprostředně poté, co po četných rozhovorech s Bohrem a jeho asistentem H. Kramersem odjel zpět do Göttingen. Vzápětí v červnu odcestoval pracovat (kvůli těžké senné rýmě) na několik dnů do pronajatého bytu na pustý ostrov Helgoland. Heisenberg to shrnuje následovně: „Napsal jsem první draft kvantové mechaniky, jenž pro mne představoval v jistém smyslu podstatu naší diskuse v Kodani – matematické vyjádření Bohrova korespondenčního principu [tehdy si ještě neuvědomoval, že do kvantové teorie zavedl maticový zápis – pozn. autora].“<sup>62</sup> Heisenberg však v Kodani vytvořil relace neurčitosti, opět po náročných diskusích s Bohrem na přelomu roku 1926 a 1927 (Heisenberg tehdy v protikladu k Bohrovi odmítal vlnovou interpretaci elektronů a lpěl na matematickém formalismu, který předchází fyzikální interpretaci) – právě v době, kdy byl Bohr od poloviny února do poloviny března na zimní dovolené v Norsku. Když se vrátil do Kodaně s epistemologickým rámcem komplementarity, Heisenberg mu představil slavný článek o relacích neurčitosti.<sup>63</sup>

4. Podle Camilleriho a Chevalleyové se Heisenbergova motivace k zavedení KI s tvrzeními, že má být nerozporná, konzistentní či jednotná, objevila v padesátých letech v důsledku kritik ze strany sovětských marxistů či Bohmovy představy skrytých proměnných.<sup>64</sup> Heisenberg nepochybně v dobré víře cítil, že je povolán obhajovat interpretaci kvantové mechaniky za všechny její pravověrné zakladatele či kodaňskou školu, a zejména za Bo-

<sup>60</sup> Heisenberg, „Quantum Theory and Its Interpretation,“ 98 a 101.

<sup>61</sup> Heisenberg, „Development of the Interpretation of Quantum Theory,“ 16.

<sup>62</sup> Heisenberg, „Quantum Theory and Its Interpretation,“ 100.

<sup>63</sup> Více viz Grygar, *Komplementární myšlení Nielse Bohra*, 3. kap.

<sup>64</sup> Chevalley, „Why Do We Find Bohr Obscure?“ 62; Camilleri, „Constructing the Myth,“ 29, 40. Dále viz například Heisenberg, *Fyzika a filosofie*.

hra. Zřejmě se také domníval, že jeho podání je tou správnou interpretací, která se podle něj údajně ustavila již v roce 1927. Chevalleyová přesně vystihuje dobovou situaci, když píše o tom, že pojem KI byl tehdy „ztotožňován s názory Bohrovy skupiny v rámci politického a intelektuálního kontextu,“ tj. střetu s materialismem a teoriemi skrytých proměnných, kontextu „velmi odlišného od toho z dvacátých let.“<sup>65</sup> Vedle Heisenberga nebo Pauliho to byl ještě Rosenfeld, další oddaný Bohrův zastánce a ve třicátých letech jeho asistent, pro nějž nabývala obhajoba kvantové teorie, její interpretace a Bohra vůči marxistům i osobního rozměru. Sám byl pravověrný marxista a zároveň byl skálopevně přesvědčený o jednotné a nerozporné KI. Rosenfelda výstižně charakterizoval vždy ironický vtípálek Pauli, který jej v přátelském dopise oslovil „Milý  $\sqrt{\text{Trockij} \times \text{Bohr}} = \text{Rosenfeld}$ .“<sup>66</sup> Mehrovi Rosenfeld v soukromém rozhovoru potvrdil, že KI „není jen jedna mezi mnoha interpretacemi, nýbrž je pouze jedna.“<sup>67</sup>

5. Na základě knih Cassidyho, Carsonnové a nejnovější literatury týkající se jednak míry Heisenbergovy kolaborace s nacistickým režimem a jednak jeho neblaze proslulé návštěvy okupované Kodaně v roce 1941, jsem nakloněn tomu, že jednou z dalších pohnutek, proč Heisenberg v padesátých letech veřejně vystupoval se sjednocujícím reprezentativním termínem „kodaňská interpretace“ (bez ohledu na to, zda je on přímým tvůrcem) a proč ji začal tak tvrdošíjně hájit jako nerozpornou, je důsledkem jeho poválečného a doživotního traumatu. Nejspíše se cítil být vyděděncem kodaňské školy a svou zjevnou aktivitou chtěl (aniž by si to nutně uvědomoval) připomenout staré dobré časy, kodaňského ducha vládnoucího při vzniku kodaňské teorie, a prokázat loajalitu Bohrovi.

S Camillerim můžeme tuto podkapitolu uzavřít zjištěním, jež vyplývá z výše uvedeného: „Zatímco *teorie kvantové mechaniky* je produktem dvacátých let, *kodaňská interpretace*, v protikladu k zavedené představě, je konstruktem let padesátých a šedesátých.“<sup>68</sup> Toto tvrzení nepopírá rozmanité interdisciplinární výklady, které se začaly objevovat v souvislosti s vývojem kvantové teorie anebo po jejím ustavení. Pouze je nutné vzít v potaz, že to vše bylo během několika desetiletí „usazeno do měnících se teoretických a sociopolitických okolností.“<sup>69</sup>

<sup>65</sup> Chevalley, „Why Do We Find Bohr Obscure?“ 63.

<sup>66</sup> Více Anja S. Jacobsen, „Léon Rosenfeld’s Marxist Defense of Complementarity,“ *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 37, supplement (2007): 4.

<sup>67</sup> Mehra, *Golden Age of Theoretical Physics*, 1321.

<sup>68</sup> Camilleri, „Constructing the Myth,“ 29.

<sup>69</sup> Beller, *Quantum Dialogue*, 198.

Heisenbergovy zmínky o nerozporném výkladu z jara 1927 se ukazují o to nepravděpodobnější, když k ustálení principů a matematického aparátu kvantové mechaniky došlo až po roce 1927, a mimoto ne všichni fyzici byli úzce spjati s kodaňskou školou. Lze proto souhlasit s E. Scheibem, že místo používání názvu KI je přesnější hovořit o ortodoxní interpretaci (ačkoliv je i její ortodoxie pochybná). Tento termín je jak neutrálnější, tak komplexnější, poněvadž zahrnuje představy vytvořené v letech 1927 až 1933. Nejprve se to týkalo výše uvedené sady příspěvků Heisenberga, Bohra a Borna, dále k tomu Heisenberg zavedl v chicagských přednáškách jako standardní nástroj kvantové mechaniky redukci vlnové funkce (viz níže). Následně došlo k publikování dalších příspěvků ke kvantové teorii v rámci řady ikonických textů o principech či základech kvantové mechaniky od Sommerfelda (1929), Borna a Jordana (1930), Jordana (1930), Diraca (1930), A. Marche (1931), P. Wignera (1931), von Neumanna (1932), E. Fermiho (1932) nebo Pauliho (1933).<sup>70</sup> Takto vznikla shrnující paradigmatická literatura, z níž vzešla (bájná jednotná) KI nebo to, čemu se ještě jinak říká „standardní představa kvantové mechaniky, která byla přijata téměř univerzálně [...]“.<sup>71</sup> Nutno opětovně zdůraznit, že interpretace kvantové mechaniky jsou opravdu rozmanité.

#### 4. Bohr a kodaňská interpretace

K tomu, abychom řádně odlišili Bohrovu filosofii vědy od KI nebo různých výkladů Bohra, by bylo nutné následující shrnutí doplnit podrobnými doprovodnými studii, přesto lze vytyčit alespoň několik rozdílů. Předně je důležité upozornit na to, že prohlašovanou nerozpornost a jednotu KI zaměnil Heisenberg (či Rosenfeld) za obhajobu skupiny fyziků, kteří považovali kvantovou mechaniku za správnou a kompletní teorii. Ovšem nikoli všichni, co participovali na kodaňském duchu, se shodovali nebo věřili na její ucelenou interpretaci a paradoxně to byli právě Bohr s Heisenbergem, kteří se po celá desetiletí v řadě věcí neshodovali. To, že se potom, jak píše Howard, „Heisenbergovi podařilo nás přesvědčit o opaku, je nešťastné. Nastal čas tento mýtus rozehnat.“<sup>72</sup>

<sup>70</sup> Scheibe, *Logical Analysis of Quantum Mechanics*, 2. Kupříkladu Jordanových publikací o kvantové mechanice (a s tím i zavádějících výkladů Bohra) si cenili například Popper a Heidegger.

<sup>71</sup> James T. Cushing, *Quantum Mechanics: Historical Contingency and Copenhagen Hegemony* (Chicago: University Chicago Press, 1994), 24.

<sup>72</sup> Howard, „Who Invented the ‚Copenhagen Interpretation?‘“ 680.

Obecně vzato Bohrova interpretace korpuskulárně-vlnového dualismu, procesu měření, kauzality, teoretické kompletnosti, aplikace pojmů nebo řezu mezi objektem a pozorovatelem či měřicím přístrojem není v žádném případě stejná jako v KI nebo ve výkladech jeho nejbližších kolegů. Už v případě stěžejního pojmu komplementarity platí, že zatímco Heisenberg, Born, Jordan, Rosenfeld a Pauli ve svých publikacích s Bohrovou komplementaritou – dle vlastního porozumění – pracovali, Sommerfeld, Dirac, Wigner, Fermi a další ji ignorovali. Komplementarita je totiž nekvantifikovatelná a pro praktikující vědce těžko uchopitelná. V dalších desetiletích nesčetný počet publikací o KI nebo kvantové teorii vycházející primárně z jejich raných vzorových textů, buď komplementaritu vůbec nezmiňuje, nebo dezinterpretuje či kritizuje.<sup>73</sup>

Dále je nutné upozornit na to, že například Heisenberg, Pauli a Born ideu komplementarity chápali hlavně jako interpretaci observační situace v kvantové mechanice a takto posléze docházelo i k jejímu ztotožňování s KI. Bohrův argument komplementarity však není zaměnitelný za tu či onu interpretaci a není jednoduše zaměnitelný ani za trpěný dualismus vlny a částice, jenž byl z klasických předpokladů absurdní či iracionální právě tak jako kvantum akce (Planckova konstanta), komplementarita není ani „charakteristická vlastnost kvantové mechaniky.“<sup>74</sup> Kromě toho Bohr nikdy nechápal a nepsal o komplementaritě jako principu, což se rozšířilo – i zásluhou Bohrových kolegů – do učebnic a odborných publikací, a zároveň ji neodvodil (jak se často uvádí) z Heisenbergova principu neurčitosti. Ve svém komplementárním náhledu – rozvíjejícím se též z jeho předchozího argumentu korespondence – spatřoval filosofický či epistemologický rámec myšlení. Z uvedeného důvodu

epistemologická lekce, již jsme získali z nového vývoje ve fyzikální vědě, kde problémy umožňují poměrně stručnou formulaci principů, může také sloužit k navržení způsobů přístupu v jiných oblastech poznání, ve kterých se střetáváme s okolnostmi, jež jsou ve své podstatě méně přístupné.<sup>75</sup>

<sup>73</sup> Cassidy, *Beyond Uncertainty*, 185 až 189; dále viz Camilleri, *Heisenberg and the Interpretation of Quantum Mechanics*, 2, Camilleri, „Constructing the Myth,“ 28.

<sup>74</sup> Ivo Kraus, *Století fyzikálních objevů – Objevy, které změnily fyzikální obraz světa* (Praha: Academia, 2014), 27.

<sup>75</sup> Bohr, *CW 7*, 335–36. Například fenomén živého nebo vědomí či mysli v biologických, neurovědních a psychologických oborech nelze podle Bohra uchopit jen z hlediska kvantifikovatelných chemicko-fyzikálních či molekulárních zákonitostí. K aplikaci komplementarity na biologii viz Grygar, *Komplementární myšlení Nielse Bohra*, 4. kap.

Bohr se takto pokoušel představit napříč vědními obory netradiční rámec myšlení vytvářející možnosti a podmínky pro porozumění fundamentálních, nicméně rozporuplných až neslučitelných deskriptiv problematičtých přírodních, společenských nebo psychických jevů. Například v kvantové teorii, kde nelze eliminovat jak dimenzi *diváko-herectví-v-existenci*, tak neslučitelný vlnový a korpuskulární obraz přírody, komplementární způsob myšlení ospravedlňuje neklasický objektivní výklad přírody a současně poskytuje smysluplný rámec pro porozumění paradoxních experimentálních výsledků, interpretací, dualit nebo kvanta akce. Z tohoto hlediska je i princip neurčitosti jen speciálním případem obecného argumentu komplementarity. Bohužel se Bohrova filosofická lekce z kvantové teorie záhy vytratila, anebo se jen rozplynula v identifikování komplementarity s tím či oním nebo s KI, která je zase směřována se základními postuláty kvantové mechaniky.<sup>76</sup>

V již zmíněném Mehrově výčtu KI (nebo učebnicích) se píše o „dvou kanonicky sdružených (komplementárních) proměnných.“ Tyto proměnné však pro Bohra z hlediska jeho pojetí komplementarity na základě nároku vylučnosti či neslučitelnosti nejsou komplementární. Samotné proměnné veličiny jako například poloha a hybnost (či rychlost) tedy nepovažuje Bohr za komplementární, poněvadž jsou kanonicky sdružené, tj. bytostně k sobě od počátku patří (jedno nenabývá smyslu bez druhého podobně jako dvojice žák a učitel, život a smrt). Komplementární jsou pro něj vylučná (kauzálně nepropojitelná) experimentální uspořádání, která nám umožňují měřit s nejvyšší přesností buď polohu elektronu, anebo s nejvyšší přesností jeho hybnost. Dvojice pojmů „vlna“ a „částice“ (nebo „váza“ a „profily lidské hlavy“ na známém Rubinově obrázku) naopak pro Bohra komplementární jsou, neboť mezi nimi nebyl původně žádný vztah, který by je jakkoli sdružoval, ten vznikl teprve až v nové situaci, tj. v kvantové teorii (nebo na Rubinově obrázku). Začalo se ukazovat, že pro komplexní popis záření i hmoty (či pro celkový popis Rubinova obrázku) jsou oba neslučitelné a ze sebe neodvoditelné pojmy jeden pro druhého nepostradatelné, tj. doplňují se vylučným způsobem. Taktéž pro zkoumání vlnového anebo korpuskulárního chování kvantových systémů používáme neslučitelná experimentální uspořádání (podobně tak jsou nekompatibilní akt vnímání vázy a akt vnímání profilů lidské hlavy).<sup>77</sup>

<sup>76</sup> Více viz Grygar, *Komplementární myšlení Nielse Bohra*, 3. kap.

<sup>77</sup> *Ibid.*

Pokud jde o intelektuální vztah mezi Bohrem a Heisenbergem, vystihuje jej snad nejlépe Camilleri, když říká, že „byl charakterizován skrytým nesouladem a neporozuměním. Nejnápadněji se to projevuje v jejich osobitých názorech na korpuskulárně-vlnový dualismus a komplementaritu.“<sup>78</sup> Ačkoliv Heisenberg usilovně lpěl na příběhu o názorové jednotě, Bellerová správně upozorňuje, že již „Bohrova představa komplementarity v Como přednášce nebyla slučitelná s Heisenbergovou částicovou ontologií.“<sup>79</sup> Když se vrátíme do jara 1927, Heisenberg sice v ústním rozhovoru s Kuhnem v roce 1963 přiznává, že tehdejší diskuse s Bohrem kolem jeho článku s relacemi neurčitosti byly náročné natolik, že se rozplakal,<sup>80</sup> přesto ve svých textech vážné interpretační rozpory doslova zametal pod koberec. Například v roce 1969 píše, že „Bohr měl zpočátku některé námitky [...], ale brzy jsme poznali [...], že neexistuje vážný rozdíl mezi oběma výklady [...]“<sup>81</sup> Nicméně podle Bohra byl článek uspěchaný, místy založený na špatných dedukcích, a kromě toho relace neurčitosti byly příliš úzké pro požadovanou komplexnost a interpretaci kvantové teorie, což Heisenberg nesl velmi těžce a nerad se smířoval s tím, že jeho relace (původně je proto nenazýval principem) jsou pouze speciálním případem komplementarity.<sup>82</sup> Heisenbergovy tehdejší představy byly stejně jako maticová mechanika založené na diskontuitním pojetí přírody, nikoli též na vlnové interpretaci jak požadoval Bohr, který současně Heisenbergovi ukázal, že jeho neurčitosti mohou být odvozeny i z vlnového modelu elektronu. Heisenberg samozřejmě využíval formalismy vlnové mechaniky, ale nikdy se plně s vlnovou představou přírody nesmířil. (Stejně tak Schrödinger zavrhoval korpuskulární pojetí.)<sup>83</sup>

MacKinnon zase rozebírá Bohrovy a Heisenbergovy odlišné názory na to, jak fyzikální pojmy nabývají svého významu. Heisenberg požadoval,

<sup>78</sup> Camilleri, *Heisenberg and the Interpretation of Quantum Mechanics*, X; podrobně viz Kristian Camilleri, „Bohr, Heisenberg and the Divergent Views of Complementarity,“ *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 38, č. 3 (2007): 514–28 a dále „Heisenberg and the Wave-Particle Duality,“ *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 37, č. 2 (2006): 298–315.

<sup>79</sup> Beller, *Quantum Dialogue*, 171. Současně upozorňuje, že takováto neslučitelnost panovala i mezi korpuskulárně-vlnovou komplementaritou a Bornovou pravděpodobnostní interpretací.

<sup>80</sup> Werner Heisenberg, *Oral History Transcript – Werner Heisenberg, Session VIII*, navštíveno 30. 8. 2017, <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4661-8>.

<sup>81</sup> Heisenberg, *Část a celek*, 95.

<sup>82</sup> Dále viz Cassidy, *Beyond Uncertainty*, 119 nebo viz Grygar, *Komplementární myšlení Nielse Bohra*, kap. 3.5.

<sup>83</sup> Více viz Grygar, *Komplementární myšlení Nielse Bohra*, 3. kap.



aby u zásadních termínů jako je poloha (časový interval) a hybnost (energie) byl význam ustaven či určen pomocí „operací, skrze něž jsou tyto veličiny měřeny,“ naproti tom Bohr tvrdil, že svůj význam už přece mají „v jejich používání v klasické fyzice.“ Tudíž pro Bohra bylo zásadní, aby v kvantové teorii došlo k „rozšíření pojmů, jejichž významy jsou ustaveny v jednom konceptuálním rámci, do nového konceptuálního rámce [...]“.“ Problém se tedy nevyřeší ustavováním nových významů, „nýbrž rozšířením korespondenčního principu z rovnic na pojmy.“<sup>84</sup>

V Mehrově specifikacích KI se dále vyskytuje velmi kontroverzní redukce vlnové funkce (balíku). Bohr však nikde nepracuje s touto redukcí a současně s „dalšími hloupostmi z toho plynoucími, jako je privilegovaná role pro osobní vědomí pozorovatele.“<sup>85</sup> Heisenberg redukci vlnové funkce zavedl jako standardní věc do kvantové mechaniky v chicagských přednáškách a v roce 1955 o tom píše toto tvrzení: „Je známé, že redukce vlnových balíčků se vždy objevovala v kodaňské interpretaci [...]“.“<sup>86</sup> O této redukcí se nejprve zcela stručně a nejasně zmínil už ve slavném příspěvku o relacích neurčitosti,<sup>87</sup> což Pauli v dopise Bohrovi okomentoval tím, že to je poněkud mystická záležitost, které se lze vyhnout, když zahrneme do popisu daného systému všechny měřicí přístroje.<sup>88</sup> Teprve v chicagských přednáškách hovoří Heisenberg o „určitém druhu akce“, přičemž pojem redukce vlnového balíku dal do závorky. Ujala se terminologie redukce (kolaps) vlnové funkce (balíku) a tato představa, již posléze zmatematizoval von Neumann (tzv. projekční postulát), se zabydlela v učebnicích kvantové mechaniky. Závažný problém rovněž spočívá v tom, že v chicagských přednáškách v úvodu Heisenberg čtenářům sdělí, že účelem knihy je odhalit sílu kodaňského ducha, a vše, co tam vysvětluje, vychází z předchozích publikací a „hlavně z Bohrova zkoumání.“<sup>89</sup> Sebe v knize Heisenberg téměř eliminoval a následující generace fyziků (nestudující Bohra) pak vycházely z tohoto celkového vyznění příběhu o Bohrovi či tzv. KI.

<sup>84</sup> Edward MacKinnon „Bohr on the Foundations of Quantum Theory,“ in *Niels Bohr. A Centenary Volume*, ed. Anthony P. French a Peter J. Kennedy (London: Harward University Press, 1985), 108 a 109.

<sup>85</sup> Howard, „Who Invented the ‚Copenhagen Interpretation‘?“ 680.

<sup>86</sup> Heisenberg, „Development of the Interpretation of Quantum Theory,“ 23.

<sup>87</sup> Heisenberg zde píše, že „při každé lokalizaci či měření místa se takto vlnový balíček zredukuje opět na svoji původní velikost  $\lambda$ “ (Viz Heisenberg, „Über den anschaulichen Inhalt,“ 186).

<sup>88</sup> Více viz Grygar, *Komplementární myšlení Nielse Bohra*, kap. 3.1 a 3.6

<sup>89</sup> Heisenberg, *Physical Principles of the Quantum Theory*, úvod.

Kolaps vlnové funkce, způsobený měřením nebo pozorovatelem (vědomím) jako zavedený nástroj v kvantové mechanice, odmítali už Einstein, Schrödinger a později Popper, Bohm aj. (kritizující zároveň – jak jinak – Bohra). Heisenberg věřil, že jde o skutečný fyzikální jev, který váže vlnovou funkci ke stavu individuálního systému. Schematicky řečeno (viz též pozn. č. 2), oproti klasickému měření, dejme tomu tenisového míčku nebo automobilu, v kvantovém měření nejsme schopni získat všechny požadované informace o nějaké mikročástici. Musíme se spokojit s její *lokalizací* v nějakém prostorovém intervalu, který dokáže zachytit vlnová funkce, jejíž časový a prostorový vývoj popisuje Schrödingerova pohybová rovnice. V důsledku interakce měřicího přístroje s měřeným mikroskopickým systémem dojde k okamžitému a nevratnému přechodu možného stavu mikroskopického systému do zúženého faktického stavu; interakcí jsou tak všechny ostatní možnosti systému vymazány nebo zrušeny. Jinak řečeno měřením dojde k nespojitému kolapsu vlnové funkce, která před aktem měření určovala lineární rozložení pravděpodobností možných hodnot stavu či časového vývoje kvantového systému, do jedné možnosti, jíž odpovídá jediný výsledek měření, jedna naměřená hodnota. K tomu Heisenberg dodává, že k uskutečnění redukce vlnové funkce dochází v okamžiku, „když pozorovatel bere na vědomí výsledek měření,“ což v případě samotného Heisenberga (na rozdíl od E. Wignera, von Neumanna aj.) ještě nutně neznamená, že zavádíme „ducha nebo vědomí fyzika jako část atomového procesu.“<sup>90</sup>

Již několik těchto momentů s sebou nese řadu dalších fyzikálních, epistemologických a filosofických otázek, podotázek a problémů. Například náhlý přechod kvantového systému z možného (superpozice stavů) do faktického (vlastního stavu) nevyplývá z matematického popisu stavu systému, respektive tento kolaps nelze odvodit z vlnové funkce (kvantový skok změnil nespojitě jak naši znalost systému, tak matematické znázornění). Výstižně to shrnují J. Klíma s B. Velickým: „Dá se říci, že tento postulát a pokusy o jeho podložení nebo naopak vhodnou náhradu jsou dodnes jedním z centrálních témat diskusí o interpretaci kvantové mechaniky [...]“<sup>91</sup>

Z hlediska Bohrova komplementárního způsobu myšlení není nutné zavádět tento sporný mechanismus, který mimo jiné v makrosvětě vede napří-

<sup>90</sup> Heisenberg, *Fyzika a filosofie*,“ 100 a 29. Heisenbergův celkový výklad je ještě problematičtější, jakmile začne rozlišovat mezi aktem pozorování a aktem registrace (k tomu více viz s. 29 a 97). Podle Howarda směřuje Heisenberg ve svém výkladu k subjektivismu (Howard, „Who Invented the ‚Copenhagen Interpretation?‘“ 676), k tomu dále viz Camilleriho texty.

<sup>91</sup> Jan Klíma a Bedřich Velický, *Kvantová mechanika I.* (Praha: Karolinum, 2016), 40.

klad k paradoxu tzv. Schrödingerovy kočky.<sup>92</sup> V Bohrově komplementárním pojetí se fyzici nejprve rozhodnou, jaké veličiny nebo chování kvantových systémů chtějí zkoumat a v laboratoři si k tomu uspořádají příslušný experiment, jenž je celkově determinovatelný a jazykem jednoznačně popsatelný. To jsou podmínky, v rámci nichž vystávají zkoumané fenomény; jestliže však kterýmkoliv způsobem zasáhneme do probíhajícího experimentu, vznikne celkově nový fenomén, jenž není slučitelný s fenoménem předchozím. Bohr pracuje pouze s tím, co lze vidět a vykázat v laboratoři, respektive s tím, co povstává z navrženého experimentu. Oproti KI nevztahuje vlnovou funkci ke stavu konkrétní částice, nýbrž ke společnému stavu toho měřeného a experimentálního uspořádání (či měřících přístrojů). Tato kvantová provázanost nebo interakce, která tvoří součást jedinečného fenoménu, teprve „ustavuje systém, na který má být aplikován kvantově mechanický formalismus.“<sup>93</sup> Jinými slovy musíme vzít do úvahy kontext celého experimentálního uspořádání a dále rozlišovat

mezi bytostně odlišnými experimentálními uspořádáními a postupy, jež jsou vhodné buď pro jednoznačné použití představy prostorové polohy [v jiném uspořádání vlnového chování – pozn. autora], anebo pro zákonité použití teoretického zachování hybnosti [korpuskulárního chování – pozn. autora]. Jakékoliv zbývající zdání svévolnosti se týká pouze naší volnosti při zacházení s měřicími přístroji [...].<sup>94</sup>

Naproti tomu Heisenberg provádí interpretaci kauzálního popisu z hlediska vlnové funkce v uspořádaném prostoru; superpozice individuálního kvantového systému je podle KI reálná a duální (či pro KI komplementární) k jejímu zredukovanému faktickému stavu.<sup>95</sup>

Dále nesmíme zapomínat, že řez, učiněný mezi měřícím přístrojem a tím měřeným, je záležitost hermeneutická. To rovněž znamená, že se Bohrova koncepce nezabývá přírodou na nás nezávislou (objektivní realitou) a jejími údajnými vlastnostmi (stavy, skrytými proměnnými), poněvadž nám naše

<sup>92</sup> Podrobněji viz Paul Teller, „Projection postulate and Bohr’s Interpretation of Quantum Mechanics,“ in *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, Vol. 1980, Volume Two: Symposia and Invited Papers* (Chicago: University of Chicago Press, 1980), 201–23.

<sup>93</sup> Bohr, CW 7, 362. Srv. CW 7, 388–94.

<sup>94</sup> Bohr, CW 7, 295.

<sup>95</sup> Více viz Ravi Gomatam, „Niels Bohr’s Interpretation and the Copenhagen Interpretation – Are the Two Incompatible?“ *Philosophy of Science* 74, č. 5 (2007): 736–48 nebo Camilleri, „Bohr, Heisenberg and the Divergent Views of Complementarity“.

biologicky uzpůsobené smyslové vnímání, intelektuální schopnosti a jazyk umožňují pouze to, abychom v dimenzi *diváko-herectví-v-existenci* dokázali „rozvítet metody pro uspořádání a prozkoumání lidské zkušenosti“, což nevylučuje objektivní popis. „Naším úkolem musí být vysvětlit tuto zkušenost způsobem nezávislým na jednotlivém subjektivním úsudku, a tudíž objektivním ve smyslu jednoznačné sdělitelnosti v běžném lidském jazyce.“<sup>96</sup>  
Z hlediska navržených experimentů

objektivní deskripce může být dosaženo pouze tak, že do popisu fenoménů zahrneme výslovný odkaz k experimentálním podmínkám. Zdůrazňujeme tím nový způsob neoddělitelnosti poznání a našich možností zkoumání. Střetáváme se zde s obecnou epistemologickou lekcí, která osvětluje naši pozici i v mnoha jiných oborech lidské činnosti.<sup>97</sup>

S matematickým aparátem kvantové mechaniky Bohr pracuje tak, že pro něj „fyzikální interpretace symbolického kvantově-mechanického formalismu obnáší pouze predikce vymezeného a statistického charakteru, týkající se jednotlivých fenoménů, které povstávají za podmínek definovaných pojmy klasické fyziky.“<sup>98</sup> Ty umožňují komunikaci mezi fyziky, popis jednotlivých přístrojů, procedur atd. Bohr v tomto smyslu také upozorňuje na časté omyly a nedorozumění, jež se vyskytují ve fyzikální literatuře, například tvrzení o „narušování fenoménů prostřednictvím observace“ nebo „vytváření fyzikálních vlastností objektů prostřednictvím měření.“<sup>99</sup> To je podle něj „těžko slučitelné s běžným jazykem a praktickou definicí.“<sup>99</sup> Stejně tak to platí pro kolaps vlnové funkce způsobený aktem měření (pozorovatelem), neboť v každém vybraném experimentálním uspořádání je každý celkový fenomén již epistemologicky neredukovatelný.

## Závěr

Tvůrci kvantové teorie se shodovali na komplexnosti a správnosti kvantové mechaniky, nikdy se však neshodovali na jejím jednotném a nerozporném výkladu, na tzv. KI. Toto nepřiliš srozumitelné pojmenování pochází s největší pravděpodobností až z padesátých let 20. století a jeho původcem i propagátorem se pro veřejnost stal Heisenberg, který kromě jiného reagoval na

<sup>96</sup> Bohr, *CW 10*, 157 a 158. Srv. *CW 7*, 394.

<sup>97</sup> Bohr, *CW 10*, 159.

<sup>98</sup> Bohr, *CW 7*, 378.

<sup>99</sup> Bohr, *CW 7*, 393.

množící se kritiky obhájců kvantové mechaniky – hlavně ze strany marxistických vědců nebo filosofů. Studie představila problematiku KI v pojetí dvou hlavních architektů kvantové teorie, Bohra a Heisenberga. Prokazuje, že jejich přístupy a interpretace kvantové mechaniky nejsou shodné. Hlavní důraz byl pak kladen na to, že Bohrova filosofie vědy, navzdory jejímu nesnadnému porozumění, nemůže být zaměňována za kodaňskou interpretaci.

### **Bibliografie:**

Bacciagaluppi, Guido. „The Statistical Interpretation According to Born and Heisenberg.“ *HQ-1: Conference on the History of Quantum Physics*, MPIWG, ed. Christian Joas, Christoph Lehner, Jürgen Renn, 269–88 (vol. II), 2008, MPIWG preprint series (vol. 350). Navštíveno 27. září 2017. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00999722/file/E4.pdf>.

Beller, Mara. *Quantum Dialogue. The Making of a Revolution*. Chicago: The University of Chicago Press, 1999.

Bohr, Niels. *Collected Works. Volume 1–13*. Amsterdam: Elsevier, 1972–2008.

Born, Max. „Quantenmechanik der Stoßvorgänge.“ *Zeitschrift für Physik* 38 (1926): 803–27.

Camilleri, Kristian. „Heisenberg and the Wave-Particle Duality.“ *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 37, č. 2 (2006): 298–315.

Camilleri, Kristian. „Bohr, Heisenberg and the Divergent Views of Complementarity.“ *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 38, č. 3 (2007): 514–28.

Camilleri, Kristian. *Heisenberg and the Interpretation of Quantum Mechanics. The Physicist as Philosopher*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

Camilleri, Kristian. „Constructing the Myth of the Copenhagen Interpretation.“ *Perspectives on Science* 17, č. 1 (2009): 26–57.

Carson, Cathryn. *Heisenberg in the Atomic Age. Science and the Public Sphere*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

Cassidy, David C. *Beyond Uncertainty. Heisenberg, Quantum Physics, and the Bomb*. New York: Bellevue Literary Press, 2009.

Cramer, John G. „The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics.“ *Reviews of Modern Physics* 58, č. 3 (1986): 647–88.

Cushing, James T. *Quantum Mechanics: Historical Contingency and Copenhagen Hegemony*. Chicago: University Chicago Press, 1994.

Davies Paul a Julian R. Brown, ed. *The Ghost in the Atom*. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.

Frisch, Otto R. *What Little I Rememeber*. Cambridge: Cambridge University Press, 1979.

Gomatam, Ravi. „Niels Bohr’s Interpretation and the Copenhagen Interpretation – Are the Two Incompatible?“ *Philosophy of Science* 74, č. 5 (2007): 736–48.

Grygar, Filip. *Komplementární myšlení Nielse Bohra v kontextu fyziky, filosofie a biologie*. Červený Kostelec: Pavel Mervart, 2014.

Heelan, Patrick A. *The Observable: Heisenberg’s Philosophy of Quantum Mechanics*. New York: Peter Lang Inc., 2015.

Heelan, Patrick A. „Heisenberg and Radical Theoretic Change.“ *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie*, č. 6 (1975): 113–38.

Heidegger, Martin. *Bytí a čas*. Praha: Oikoymenh, 2002

Heilbron, John L. „The Earliest Missionaries of the Copenhagen Spirit.“ *Revue d’histoire des sciences* 38 (1985): 195–230.

Heisenberg, Werner. „Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik.“ *Zeitschrift für Physik* 43 (1927): 172–98.

Heisenberg, Werner. „Die Entwicklung der Quantentheorie 1918–1928.“ *Die Naturwissenschaften* 17, č. 26 (1929): 490–6.

Heisenberg, Werner. *The Physical Principles of the Quantum Theory*. New York: Dover Publications, 1949.

Heisenberg, Werner. „The Development of the Interpretation of Quantum Theory.“ In *Niels Bohr and the Development of Physics. Essays Dedicated to Niels Bohr on the Occasion of His Seventieth Birthday*, ed. Wolfgang Pauli, Léon Rosenfeld a Victor F. Weisskopf, 12–29. London: Pergamon Press Ltd., 1955.

Heisenberg, Werner. „Quantum Theory and Its Interpretation.“ In *Niels Bohr – His Life and Work as Seen by his Friends and Colleagues*, ed. Stefan Rozentel, 94–107. Amsterdam: North-Holland Publishing Co., 1967.

Heisenberg, Werner. „Comments to Heelan’s Thesis.“ *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie*, č. 6 (1975), postscript.

Heisenberg, Werner. *Část a celek. Rozhovory o atomové fyzice*. Olomouc: Votobia, 1996.

Heisenberg, Werner. *Fyzika a filosofie*. Praha: Aurora, 2000.

Heisenberg, Werner. *Oral History Transcript – Werner Heisenberg, Session VIII*. Navštíveno 30. 8. 2017. <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4661-8>.

Heisenberg, Werner. *Oral History Transcript – Werner Heisenberg, Session IX*. Navštíveno 30. 8. 2017. <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4661-9>.

Heisenberg, Werner. *Nobel Lecture: The Development of Quantum Mechanics*. Navštíveno 30. 8. 2017. [https://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1932/heisenberg-lecture.html](https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1932/heisenberg-lecture.html).

Hendry, John. *The Creation of Quantum Mechanics and the Bohr-Pauli Dialogue*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1984.

Howard, Don. „Who Invented the „Copenhagen Interpretation“? A Study in Mythology.“ *Philosophy of Science* 71, č. 5 (2004): 669–82.

Hirsch-Heisenberg, Anna M., ed., *Werner Heisenberg: Liebe Eltern! Briefe aus kritischer Zeit 1918 bis 1945*. München: Langen Müller, 2003.

Chevalley, Catherine. „Why Do We Find Bohr Obscure?“ In *Epistemological and Experimental Perspectives on Quantum Physics*, ed. Daniel Greenberger, Wolfgang L. Reiter a Anton Zeilinger, 59–73. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999.

Jacobsen, Anja S. „Léon Rosenfeld’s Marxist Defense of Complementarity.“ *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, č. 37, supplement (2007): 3–34.

Jammer, M. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1966.

Jammer, Max. *The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretations of QM in Historical Perspective*. New York: John Wiley and Sons, 1974.

Kennedy, Peter J. „A Short Biography.“ In *Niels Bohr. A Centenary Volume*, ed. Anthony P. French a Peter J. Kennedy, 3–16. London, Mass.: Harvard University Press, 1985.

Klíma, Jan a Bedřich Veliký. *Kvantová mechanika I*. Praha: Karolinum, 2016.

Kraus, Ivo. *Století fyzikálních objevů – Objevy, které změnily fyzikální obraz světa*. Praha: Academia, 2014.

MacKinnon, Edward. „Bohr on the Foundations of Quantum Theory.“ In *Niels Bohr. A Centenary Volume*, ed. Anthony P. French a Peter J. Kennedy, 101–21. London: Harvard University Press, 1985.

Mehra, Jagdish. *The Golden Age of Theoretical Physics, Volume 2*. Singapore: World Scientific, 2001.

Pais, Abraham. *Niels Bohr's Times, in Physics, Philosophy and Polity*. Oxford: Clarendon Press, 1993.

Petersen, Aage. *Quantum Physics and the Philosophical Tradition*. New York: MIT Press, 1968.

Przibram, Karl (ed.). *Letters on Wave Mechanics. Albert Einstein, Correspondence with H. A. Lorentz, Max Planck, and Erwin Schrödinger*. New York: Philosophical Library/Open Road, 2011.

Scheibe, Erhard. *The Logical Analysis of Quantum Mechanics*. Oxford: Pergamon Press, 1973.

Stapp, Henry. „Quantum Theory and the Place of Mind in Nature.“ In *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, ed. Jan Faye a Henry J. Folse, 345–52. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994.

Štoll, Ivan. *Dějiny fyziky*. Praha: Prometheus, 2009.

Teller, Paul. „Projection Postulate and Bohr's Interpretation of Quantum Mechanics.“ In *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, Vol. 1980, Volume Two: Symposia and Invited Papers*, 201–23. Chicago: University of Chicago Press, 1980.

Weinberg, Steven. „The Trouble with Quantum Mechanics.“ *The New York Review of Books*, January 19, 2017. Navštíveno 30. 8. 2017. <http://www.nybooks.com/articles/2017/01/19/trouble-with-quantum-mechanics/>.