

## **Dekoherentismus: 4. (a poslední) revoluce ve fyzice ve XX. století**

**Ján Pavlík**

Tato studie vznikla v rámci projektu Grantové agentury České republiky  
GA 402/02/1544: Metodologie ekonomických věd a její filosofické základy.

- 1. Úvod**
- 2. Elementární prolegomena k teorii dekoherence**
- 3. Teorie dekoherence**
- 4. Kvantová teorie nevratných procesů**
- 5. Kvantová logika a klasická logika**
- 6. Korespondence mezi kvantovou a klasickou fyzikou**
- 7. Měření a fakticita**
- 8. Neseparovatelnost**
- 9. Závěr**

**Ján Pavlík**

### **Decoherentism: the Fourth (and the Last) Scientific Revolution in the 20<sup>th</sup> Century Summary**

Decoherentism, as being developed by many outstanding contemporary physicists, and elaborated in a systematic form by French physicist Roland Omnès, eliminates eventually the long-lasting quantum-classical dualism in physics. It proves that in consequence of decoherence effect, the laws of quantum mechanics (with their probabilistic character) turn into the deterministic laws of classical physics; it describes therewith a real process through which the phenomenal world as given immediately to our sensory perception arises from quantum fundamentals; accordingly, classical determinism is a direct and controlled consequence of quantum mechanics.

At the same time, decoherentism elaborated quantum logic (which is based on Griffiths' notion of consistent histories and corresponds to quantum mechanics) and proves that when decoherence acts, classical logic becomes a special kind of quantum logic. Since classical logic is essentially a learned version of common sense, the decoherentistic approach shows that the validity of common sense has its foundation in the rules of quantum mechanics. Thus, decoherentism eliminates the conflicts between quantum theory and common sense (in doing so, it proves that the famous paradoxes of Schrödinger's cat and the wave function reduction as well as the EPR paradox came from the mistake of having no account of decoherence effect).

Nevertheless, decoherentism admits that the logic of common sense and as well as determinism itself have some probability of error which can be estimated in principle. These probabilities are most often extremely small and the corresponding errors have no practical consequence.

Contrary to both classical and pre-decoherentistic quantum dynamics, decoherentism implies that the logical structure of quantum mechanics must select a definite direction of time, which necessarily coincides with the one occurring in thermodynamics; this means that the 2. law of thermodynamics (together with the irreversibility of time finds its basis in the decoherentistic interpretation of quantum mechanics.

Hence it follows that decoherentism is truly a scientific revolution because the former principles (such as the principle of quantum-classical correspondence) turns in its frame into ordinary laws which are derived from more fundamental principles.

Considering the fact that classical determinism is a necessary presupposition for all scientific experiments, decoherentism's ability to derive determinism from newly interpreted quantum mechanics enables us to characterise it with the metaphor of "serpent gnawing his own tail." This means that quantum mechanics (in its decoherentistic interpretation) is able to explain even its own basic presuppositions; or, in other words, the results of the development of physical science turns back in order to explain its starting point. This important advancement makes physics structurally analogous to Adam Smith's economics (and to its metaphysical transcriptions in Hegel's *Logic*), to evolutionary biology and other sciences dealing with spontaneous order and self-organisation.

## 1. Úvod

Připusťme, že použít nyní při hodnocení významu jakéhokoliv vědeckého přínosu označení „revoluce“ je obecně velice problematické, už jen z toho důvodu, že tento termín je od vydání Kuhnova spisu *Struktura vědeckých revolucí* zatížen bludnými skepticko-relativistickými konotacemi. Speciálně v případě dekoherentismu, který se zdánlivě jeví pouze jako jeden z celé řady dalších směrů ve vývoji kvantové fyziky, tato problematičnost ještě narůstá, srovnáme-li jej s předchozími třemi revolucemi, představovanými Einsteinovou teorií relativity, kvantovou mechanikou a prigoginovskou nerovnovážnou termodynamikou, která eliminovala dlouhý rozpor mezi fyzikou a evoluční biologii a umožnila exaktní uchopení procesů samoorganizace a zrodu nových kvalit.

Teorie relativity, jak známo, vyvrátila absolutno newtonovského prostoru (prostor označuje Newton explicitně jako *sensorium Dei*) a nahradila je jiným absolutním fundamentem, nalezeným v oblasti elektromagnetismu – konstantní rychlostí šíření elektromagnetického vlnění ve vakuu; toto nově zavedené absolutno, vyznačující se vůči předchozímu konkrétnějším charakterem (rychlost je poměr mezi prostorem a časem), nutně implikuje relativitu a podmíněnost prostoru a času, jež jsou jeho podřízenými, abstraktními momenty. Tvůrce teorie relativity zároveň prokázal, že mezi newtonovskou a relativistickou fyzikou platí vztah korespondence, tj. že relativistická fyzika přechází za určitých podmínek (když jsou rychlosti pohybujících se těles velmi malé ve vztahu k výše zmíněné absolutní konstantě) ve fyziku newtonovskou, která se tím získává status zvláštního, resp. limitního případu obecnějšího relativistického pojetí.

Na rozdíl od teorie relativity se u kvantové mechaniky nepodařilo jejím zakladatelům prokázat, že to, vůči čemu se jejich teorie vymezila jako revoluce, tedy klasická fyzika (zahrnující i teorii relativity), je jejím zvláštním případem. Důvod tohoto neúspěchu spočíval v tom, že hlavní zákony a principy kvantové mechaniky byly v mnoha ohledech v polárním protikladu nejen vůči tvrzením klasické fyziky, nýbrž i vůči principům klasické logiky, jež se uplatňuje v našem předvědeckém rozumění světa, ve kterém žijeme. Charakter tohoto protikladu výstižně vyjádřil Niels Bohr, když jednomu ze svých spolupracovníků řekl známá slova: „Vaše teorie je šílená. Není však dostatečně šílená na to, aby mohla být pravdivá.“ Velmi populární je v tomto ohledu i paradox Schrödingerovy kočky, který je modelovou podobou významného problému makroskopických projevů interference vlnové funkce; paradox tkví v tom, že v souladu se zákony kvantové mechaniky (přesněji v důsledku jejich projekce na makroskopickou úroveň) je kočka nacházející se v experimentálním zařízení určitého typu zároveň živá i mrtvá.

Kvantová mechanika byla tudíž antitezí klasické fyziky i klasické logiky; z toho rezultující nesmířený dualismus klasických a kvantových zákonů trval v podstatě od přelomového Planckova objevu kvantové povahy energie (1900) až do devadesátých let, tedy prakticky po dobu celého XX. století.

Dekoherentismus, rozvíjený mnoha významnými současnými fyziky a vypracovaný do podoby integrální teorie francouzským fyzikem Rolandem Omnèsem, ruší konečně tento dualismus: nejenže podává důkaz, že zákony klasické fyziky (včetně klasického determinismu) jsou zvláštním případem zákonů kvantových, nýbrž zároveň odhaluje reálný proces, jímž z kvantových fundamentů nutně povstává fenomenální svět, v němž žijeme a orientujeme se na základě klasické logiky a v němž se kvantové efekty vykytují pouze okrajově a/nebo s krajní nepravděpodobností. Omnèsem zavedenou korespondenci mezi kvantovou a klasickou fyzikou si předběžně nejlépe objasníme tak, že probabilismus, vlastní kvantové fyzice, jež popisuje dění na mikroskopické úrovni, přechází za určitých podmínek v determinismus klasické (newtonovské) fyziky, která odpovídá dění v makroskopickém světě.

Bereme-li ovšem jako měřítko „revolučnosti“ teorii relativity, může se zdát, že dekoherentismus se svým důkazem kvantově-klasické korespondence je pouze dovršením revoluce, kterou představuje ustavení kvantové mechaniky a že tudíž nemá nárok na to, aby byl sám nazýván revolucí. Nedomníváme se, že je tomu tak, a to z následujících důvodů:

1) Dekoherentismus v Omnèsově podání nezahrnuje pouze fyzikální teorii efektu dekoherence (který tvoří onen doposud chybějící reálně zprostředkující mezičlánek v mnohdy antitetické relaci mezi kvantovou a klasickou fyzikou), nýbrž i teorii kvantové logiky a jejího korespondenčního vztahu k logice klasické;<sup>1</sup> z toho rezultující restituce platnosti předvědeckého

<sup>1</sup> Korespondence mezi kvantovou a klasickou logikou, odhalená v rámci dekoherentismu, je mj. definitivním vyvrácením Kuhnova pojetí vědecké revoluce jakožto skokovitého nastolení nového paradigmatu, jež ruší paradigma předcházející. Když se totiž Kuhnovi namítalo, že

myšlení, které nepoužívá matematicko-fyzikální metody idealizace a abstrakce, vede navíc k tomu, že fyzika se stává otevřenou vůči metafyzice – součástí Omnèsova dekoherentismu je i kvantová filosofie.<sup>2</sup>

2) Dekoherentismus poskytuje kvantově-mechanické založení makroskopické nevratnosti termodynamického času, čímž dává prigoginovské nerovnovázné termodynamice neotřesitelný fundament, který její iniciátor tak dlouho bez úspěchu hledal; dekoherentismus tím syntetizuje výsledky dvou předchozích revolucí ve fyzice.

Již v tomto úvodním nástinu je patrné, že dekoherentistický přístup není ve vztahu k problému makroskopické nevratnosti času pouhým pokusem *ad hoc*, jak tomu bylo v případě Prigoginově; tím, že Omnès nachází v kvantové fyzice obohacené o teorii dekoherence fundaci nejen pro onu nevratnost, nýbrž i pro celou řadu podstatných charakteristik fenomenálního světa, jež jsou s ní neoddělitelně spojené, poskytuje jeho přístup doposud nejucelenější a nejkompaktnější fundaci pro teorii samoorganizace.

3) Dlouhá desetiletí trvající nemožnost najít reálné zprostředkování protikladu mezi kvantovými a klasickými zákony (což byl nesrovnatelně těžší úkol než v případě teorie relativity, kde vztah mezi póly korespondence nebyl antitetický) vedla ke vzniku mnoha stále šílenějších teorií (jako je von Neumannův subjektivismus, Everettova teorie paralelních vesmírů či Wheelerova teorie účastnického vesmíru, v němž nynější akty pozorování konstituují minulost kosmu jako celku), které na jedné straně nesmírně prohloubily ztrátu respektu laické veřejnosti k fyzikálním vědám a na straně druhé ještě více otřáslы důvěrou lidí ve správnost toho, co Omnès označuje termínem „zdravý rozum“ (*common sense*). Dekoherentismus znamená radikální ukončení tohoto myšlenkového chaosu a fyzikálně prokazatelnou (a dokonce ve svých mezích kvantifikovatelnou) restituci platnosti logiky, kterou lidé každodenně používají; je vědeckou revolucí právě tím, že provádí negaci mezitím již dobře etablované a v určitých vědeckých kruzích již jako samozřejmou akceptované antitetičnosti kvantové fyziky a „zdravého rozumu“.<sup>3</sup>

---

korespondence mezi relativistickou a newtonovskou fyzikou kumulativně uchovává výsledky předchozího poznání, obhajoval se tvrzením, že Newton používal jiné pojmy než Einstein. V případě kvantově-klasické korespondence je tato jeho obsahově zcela absurdní obhajoba vyvrácena i formálně. Podle samotného Omnèse se vědecká revoluce vyznačuje tím, že dochází k objevu nových principů a k ustavení obecnější teorie; principy, na nichž stála dosavadní teorie, jsou zahrnuty v nové teorii jakožto důsledky nových principů, a získávají tedy status zákonů. [Srv. Roland Omnès, *Quantum Philosophy, Understanding and Interpreting Contemporary Science*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1999 (dále *QPh*), str. 288.] Jak vidět, vztah korespondence je inherentní součástí Omnèsova pojetí vědecké revoluce.

<sup>2</sup> Podle samotného Omnèse se vědecká revoluce vyznačuje tím, že dochází k objevu nových principů a k ustavení obecnější teorie; principy, na nichž stála dosavadní teorie, jsou zahrnuty v nové teorii jakožto důsledky nových principů, a získávají tedy status zákonů. (Srv. *QPh*, str. 288.)

Omnèsův program je v tomto ohledu zcela jednoznačný: „Objasnit, proč to, co je bezprostředně zřejmé (zdravý rozum), je ve shodě s tím, co je univerzální (kvantová mechanika).“ Realizace tohoto programu spočívá v tom, že prostředky samotné kvantové teorie, jejíž tvrzení se doposud zdála být v radikálním protikladu vůči předvědeckému rozumění světu, založenému na smyslové zkušenosti, se dochází k restituci platnosti jak tohoto rozumění, tak i klasické fyziky, která je jeho exaktním vyjádřením.

Je samozřejmé, že restituce tohoto druhu ukládá tomu, co je restituováno, určité meze – ty jsou však natolik široké, že na kvantové efekty, jež jsou z hlediska „zdravého rozumu“ paradoxní, již nemusíme nahlížet jako na temnou propast, která se neúprosně rozevívá „pod“ veškerým naším fenomenálním světem a degraduje na pouhé zdání jak bezprostřední jistoty našeho vnějšího i vnitřního vnímání, tak i logiku našeho předvědeckého jazyka resp. logiku „zdravého rozumu“.

Jak prokazuje teorie dekoherence, kvantové efekty se uplatňují pouze v jisté omezené (a dobře definovatelné) oblasti, která zahrnuje řádově nemnoho systémů, sestávajících obvykle z malého počtu elementů a izolovaných od interakcí s velkými systémy tvořícími makrosvět. Pravděpodobnost kvantového, tj. z hlediska „zdravého rozumu“ paradoxního chování makroskopických objektů je tak mizivá, že ji lze, jak uvidíme, na základě exaktně-matematického zdůvodnění zcela zanedbat, a to nikoliv pouze v praktických ohledech, nýbrž i v rámci teoretického poznání.

Ve svém konkrétnějším vymezení má Omnèsův program zřetelně kantovské rysy: Omnès chce dedukovat „zdravý rozum“ z kvantových premis spolu s jeho omezeními – chce tudíž prokázat, za jakých podmínek je tento způsob racionálního přístupu ke skutečnosti platný a jaké jsou hranice, za nimiž se dopouští chyb. Z toho plyne, že bližší určení, resp. selekce těch charakteristik fenomenálního světa, které lze odvodit z kvantové fyziky jako její zvláštní či limitní případy, závisí samozřejmě na tom, jak se v této souvislosti vymezí „zdravý rozum“. Omnès pod tímto termínem rozumí globální nazírání (*vision*) světa a specifický druh logiky. Ono nazírání má přitom „klasický“ charakter (ve smyslu klasické fyziky), ale Omnès správně podotýká, že je v našich myslích zakořeněno mnohem hlouběji než samotná Newtonova dynamika; „zdravý rozum“ je v souladu s tím integrálním celkem, jenž má svůj původ v nazírání (tj. hlavně ve vizuální reprezentaci), v předvědeckém jazyku (s jeho primární

---

<sup>3</sup> Pokud bychom hledali analogii dekoherentistické revoluce v politických termínech, museli bychom zdůraznit, že nemá svůj protějšek v kontrarevoluci či restauraci nějakého *ancien régime*, nýbrž v revolučním aktu, jímž umírnění revolucionáři (tj. ti stoupenci revoluce, kteří chápou že revoluční negace starého řádu má své meze a mají za cíl v obnovit vše, co bylo ve starém řádu, kompletně negovaném první fází revoluce, funkční a přiměřené) vítězí nad revolučními extrémisty, kteří chtějí nadále pokračovat v destrukci starého řádu a vykořenit jeho poslední zbytky. Jinak řečeno, dekoherentistická revoluce připomíná revoluční vystoupení zastánců dějinné syntézy starého a nového proti těm, kdo se etablovali v rámci programu co nejdůslednější negace starého.

logikou) a v pojetí či představě pravdy (jež se odvozuje z faktů). Realita jakožto kategorie myšlení je podle Omnèse tím, co je „zdravému rozumu“ nejbližší.

Omnès dodává, že logika „zdravého rozumu“ proniká lidskou mysl jako výsledek osobní životní zkušenosti v rámci příslušných kulturních komunit a skrze strukturu jazyka samotného. Složitou problematiku vztahu „zdravého rozumu“ k různým pojetím přirozeného světa, vypracovaným fenomenologicky orientovanými filosofiemi, si ovšem pro svůj záměr radikálně zjednodušuje tím, že se distancuje od „magických nebo mystických vizí světa“ a soustřeďuje se jen na „obyčejnou“ (*ordinary*) verzi „zdravého rozumu“, jež zahrnuje víru v kauzalitu. To ovšem znamená, že v jeho úvahách nejde o způsob danosti světa v ryze předvědecké a předfilosofické zkušenosti (jejíž apriorní strukturu se snažil popsat např. Heidegger), nýbrž o „zdravý rozum“ euroamerické civilizace, značně ovlivněný zpětným působením dvouapůltisíciletého vývoje západní filosofie a vědy.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Srv. Roland Omnès, *Understanding Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1999 (dále *UQM*), str. 83, 189. Ačkoli se Omnès v této souvislosti výslovně odvolává na Husserla (*ibid.*, str. 194) a tvrdí, že při původním přechodu od „zdravého rozumu“ ke kvantové fyzice a logice je nutno „zdravý rozum“ zazávorkovat, přesto se jeho pojetí i při některých podobnostech značně liší od Husserlovy koncepce přirozeného světa. U Husserla je totiž účelem zazávorkování suspenze platnosti generální teze světa, tj. naivního přesvědčení, že svět existuje nezávisle na intencionálních aktech našeho vnímání a myšlení; zazávorkováním se otvírá pole pro široké transcendentální zkoumání konstituce předmětnosti v intencionálních aktech, které nakonec vede k závěru, že existence světa se redukuje na pouhý korelát (tj. výtvar) smyslodajných aktů transcendentální intersubjektivit. Místo v husserlovské transcendentální intersubjektivitě je u Omnèse jeho „zdravý rozum“ založen v kvantové fyzice (obohacené o teorii dekoherence). To je ovšem z Husserlova hlediska zcela nepřijatelné, protože u něj jsou entity popisované matematickou přírodovědou (atomy, elementární částice atd.) zbaveny reálné existence a vystupují pouze jako užitečné fikce, které v souladu s principem ekonomie myšlení sumarizují zkušenost mnoha pozorování a experimentů a slouží tím jako užitečný nástroj předvídání událostí v přirozeném světě (jenž je charakterizovaný tím, že v jeho bezprostřední danosti absentují veškeré matematické ideality, jako jsou body, okamžiky atd.); z toho plyne, že u Husserla je přirozený svět naprosto primární, na žádnou hlubší („atomární“, „mikroskopickou“ atd.) vrstvu skutečnosti neredukovatelnou půdou, z níž se odvíjí rozumění všem konceptům matematické přírodovědy. V tomto smyslu je velmi instruktivní Husserlův výrok „Die Ur-Arche Erde bewegt sich nicht“ („pra-archa Země se nepohybuje“), v němž má být vyjádřeno nejpůvodnější přirozenosvětské (*lebensweltliche*) rozumění kosmu, které stojí v polárním protikladu dokonce i ke Kopernikově heliocentrické teorii; Husserl má na mysli, že i tato teorie je z hlediska nejpůvodnějšího rozumění světu pouhým abstraktním myšlenkovým modelem sloužícím k předvídání poloh nebeských těles. Určitou paralelu mezi Husserlovým a Omnèsovým přístupem by bylo možno nalézt tehdy, kdybychom za jádro kvantové teorie považovali nerozlišenou jednotu subjektu a objektu poznání (vyvozovanou z toho, že v měření mikroskopických veličin nelze odlišit, co je v měřeném dění „o sobě“ a co do něj „vkládáme“ my prostřednictvím účinku našich měřících přístrojů). Tehdy bychom kategorii objektivní reality přirozenosvětského rozumění (či „zdravého rozumu“) museli suspendovat v její platnosti (tj. zazávorkovat) proto, abychom pak mohli sestoupit ke zmíněné jednotě subjektu a objektu na kvantové úrovni; z tohoto prázákladu bychom zase zpětným pohybem – za pomoci teorie dekoherence – restituovali původní kategorii objektivní reality, ovšem v patřičných

V souladu s takovýmto vymezením „zdravého rozumu“ i jeho intencionálních korelátů je zřejmé, proč Omnès klade z metodického hlediska primární důraz nikoliv na korespondenci mezi kvantovou a klasickou fyzikou (zahrnující korespondenci mezi kvantovým probabilismem a klasickým determinismem), nýbrž na to, aby dovedl, že vztah korespondence platí i ve sféře logiky. Na základě definování logických funkcí v termínech pravděpodobnosti (jež má zase své zdůvodnění v koncepci konzistentních historií) ukazuje, že klasická logika, odpovídající „zdravému rozumu“ a vyznačující se absencí bohrovské komplementárnosti, je limitním případem (jím zavedeného) kvantově-logického myšlení, které naopak komplementárnost připouští (tj. připouští, aby jeden a tentýž děj byl vyjádřen celou řadou sice vnitřně konzistentních, ale přesto se navzájem vylučujících logik). Efekt dekoherence zde vystupuje jako reálná příčina toho, že na makroskopické úrovni vzniká v našich myslích klasická logika; podobnou roli sehrává i při založení „klasického“ vidění, jehož korelátem je svět v trojrozměrném prostoru.

Další charakteristiky fenomenálního světa, které se ustavují působením dekoherenčního efektu, souvisejí se zmíněnou kategorií reality. Jde především o status fakticity, kde působení dekoherence vede k jedinečnosti a nezrušitelnosti faktů (v souladu s původním významem *factum est*); tuto problematiku (spolu s otázkami objektivit a pravdivosti poznatků kvantové fyziky) rozvíjí Omnès v rámci dekoherentistické reinterpretace teorie měření, která má pro kvantovou fyziku konstitutivní význam, jakož i v souvislosti s termodynamickou nevratností a založením stejného směru plynutí času v termodynamice a logice.

V našem stručném výkladu Omnèsova přístupu uvedeme nejdříve základy jeho teorie dekoherence a kvantové teorie nevratných procesů; poté bude prezentováno Omnèsovo pojetí kvantové logiky spolu s objasněním role dekoherence při ustavení vztahu korespondence mezi kvantovou a klasickou logikou. V další části bude vyložena otázka korespondence mezi kvantovou a klasickou fyzikou se zřetelem na restituci determinismu a posléze problematika související s dekoherentistickou restitucí kategorie reality.

Ovšem dříve než se budeme moci věnovat samotnému dekoherenčnímu efektu a prezentovat jeho teoretické vysvětlení, bude nezbytné podat alespoň elementární výklad hlavních pojmů a přístupů kvantové mechaniky, bez jejichž pochopení by byla teorie dekoherence opravdu jen stěží srozumitelná.

---

omezeních. Nezávislost objektu na subjektu, tak jak je dána na („naivní“) úrovni přirozeného světa, by tudíž byla „výtvorem“ jejich nerozlišené jednoty na hlubší kvantové úrovni. Ještě zbývá dodat, že omnèsovská „cesta tam a zase nazpět“ má rysy Hegelovy negace negace – zejména při cestě „nazpět“ od kvantové fyziky ke světu „zdravého rozumu“, kdy dialektická negace kvantové fyziky i logiky efektem dekoherence vede k tomu, že v restituovaném světě „zdravého rozumu“ jsou „překonány i uchovány“ (aufgehoben) charakteristiky kvantové úrovně, a sice v podobě mezí platnosti „zdravého rozumu“.

## 2. Elementární prolegomena k teorii dekoherence

Objev Maxe Plancka, že energie elektromagnetického pole je distribuována v kvantech určených rovnicí  $E = h\nu = \hbar\omega$  (kde  $\nu$  je frekvence elektromagnetického vlnění,  $\omega$  jeho kruhová frekvence,  $h$  je Planckova konstanta a  $\hbar$  je určeno vztahem  $\hbar = h/2\pi$ ), jakož i Einsteinův objev korpuskulárních vlastností elektromagnetických vln porušily jistou symetrii přírody – látka složená z korpuskulí měla mít jen korpuskulární vlastnosti, zatímco elektromagnetickému poli, jehož „způsobem bytí“ je vlnění, se přiznávaly jak vlnové vlastnosti (tj. vlastnosti pole), tak korpuskulární vlastnosti charakteristické pro látku. Této anomálie si jako první povšiml Louis de Broglie a obnovil symetrii ve fyzice tím, že přiřadil korpuskulím (částicím) vlnové vlastnosti. Jeho přístup byl zpočátku pouze spekulativní a vycházel z představy, že jen vlnové vlastnosti elektronu mohou zdůvodnit Bohrovu postulát, podle něž může elektron obíhat kolem atomového jádra jen po takových drahách, pro které platí  $mvr = n\hbar$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$  (kde  $r$  je poloměr kruhové dráhy,  $v$  a  $m$  znamenají rychlost a hmotnost elektronu); jestliže je elektronu přiřazeno vlnění, pak je mu v souladu s Bohrovým postulátem povolena jen taková kruhová dráha, na niž připadá celočíselný počet vln, zatímco ostatní dráhy jsou vyloučeny. De Broglieova myšlenka našla svůj matematický výraz v tom, že každé částici s celkovou energií  $E$  a hybností  $p = mv$  odpovídá vlna o frekvenci  $\nu = E/h$  a vlnové délce  $\lambda = h/mv$ .

Zpřesněním i konkretizací těchto pouze rámcově platných vztahů<sup>5</sup> je Schrödingerova rovnice, která se stala fundamentální rovnicí kvantové mechaniky. Definuje vlnovou funkci  $\psi(q)$  a ve své dynamické variantě, tj. pokud popisuje časový vývoj této funkce, má tvar

$$i\hbar [\partial\psi(q)/\partial t] = H(q, \hbar/i, \partial/\partial t) \psi(t).^6$$

<sup>5</sup> De Broglieovu rovinnou „vlnu látky“ lze vyjádřit ve tvaru  $\psi = \psi_0 \exp [(-2\pi i/h)(Et - px)]$ . tato funkce ovšem nemůže popsat chování reálné částice, neboť má nenulové hodnoty od  $-\infty$  do  $+\infty$ , zatímco částice se vždy nachází v konečném objemu.

<sup>6</sup> Hamiltonova funkce  $H(p, q)$  vyjadřuje v klasické fyzice součet kinetické a potenciální energie atomu prostřednictvím souřadnic polohy a hybnosti; ve Schrödingerově rovnici je hybnostní proměnná  $q$  nahrazena diferenciálním operátorem  $(\hbar/i)(\partial/\partial t)$ . (Pod termínem „operátor“ můžeme zatím rozumět matematickou operaci, která z dané funkce generuje jinou funkci.) Pokud se Schrödingerova rovnice vztahuje na časový vývoj vlnové funkce atomu ve stacionárním stavu s energií  $E_n$ , je určena vztahem  $\psi(q, t) = \exp(-iE_n t/\hbar) \psi_n(q)$ . Jestliže se přitom vlnová funkce týká chování atomu zahrnujícího mnoho elektronů, pak není definována v obyčejném trojrozměrném prostoru (jak se domníval de Broglie), nýbrž v mnohorozměrném fázovém prostoru odpovídajícím souřadnicím všech elektronů, a její hodnoty jsou komplexní. Zejména v tomto svém rysu se vlnová rovnice natolik liší od jednoduché elektromagnetické vlny, že k ní musela být nalezena zvláštní (Bornova) interpretace. (Postup odvození Schrödingerovy rovnice lze najít u J. Krempaského, *Fyzika*, ALFA, Bratislava 1982, str. 351-361.)

V této podobě Schrödingerova rovnice transformuje vlnovou funkci  $\psi(t_0)$  jakožto danou v počátečním čase  $t_0$  ve vlnovou funkci  $\psi(t)$  danou v čase  $t$  (podobně jako trajektorie v klasické mechanice vedou od jednoho bodu fázového prostoru k jinému).<sup>7</sup>

V souladu se známým Bornovým pojetím se vlnová funkce  $\psi$  interpretuje tak, že její druhá mocnina  $|\psi(x)|^2$  určuje hustotu pravděpodobnosti výskytu částice. Vlny látky se v Bornově interpretaci tudíž mění ve vlny pravděpodobnosti.<sup>8</sup> Vzhledem ke komplexní povaze funkce  $\psi$  (jež, přesně řečeno, vyjadřuje amplitudu pravděpodobnosti) se hustota pravděpodobnosti rovná součinu  $\psi(x)$  a komplexně sdružené veličiny  $\psi^*(x)$ .<sup>9</sup>

Pravděpodobnost vyjádřena tímto způsobem je v plném souladu s existencí kvantových interferencí. Z toho, že Schrödingerova rovnice je lineární, vyplývá, že pokud jsou mezi jejími řešeními dvě funkce,  $\psi_1(x)$  a  $\psi_2(x)$ , pak jejich součet  $\psi_1(x) + \psi_2(x)$  je dalším řešením. Příslušná pravděpodobnost je úměrná výrazu  $|\psi_1(x) + \psi_2(x)|^2$  a může odpovídat interferenčním efektům, neboť tento výraz je co do formy stejný jako popis intenzity interferujícího elektromagnetického vlnění pomocí komplexních veličin.

Podobně jako Newtonovy nebo Einsteinovy pohybové rovnice, je i Schrödingerova vlnová rovnice deterministickou rovnicí. Když známe hodnotu vlnové funkce v čase  $t_0$ , můžeme přesně předpovědět, jaké hodnoty nabude vlnová funkce v budoucnosti, nebo jakou hodnotu měla v minulosti. To znamená, že tato rovnice umožňuje předpovědět všechny možné případy vývoje chování částice, pokud ji v budoucnosti budeme sledovat, a dovoluje také zpětně určit všechny možné historie chování elektronu, které by při jeho pozorování v minulosti nastaly. Schrödingerova rovnice tedy popisuje chování,

<sup>7</sup> Fázový prostor je imaginární  $6N$ -rozměrný prostor, jehož osy tvoří  $3N$  souřadnic polohy a  $3N$  impulsů (používá se k popisu systému o počtu částic  $N$ ). Dynamický stav částice, který je určen trojsložkovým vektorem polohy a trojsložkovým vektorem hybnosti, lze znázornit dvěma body, z nichž každý se nachází v trojrozměrném prostoru, nebo, což je výhodnější, jedním bodem v šestirozměrném fázovém prostoru. Stav systému o  $N$  prvcích, k jehož popisu potřebujeme  $6N$  číselných hodnot, pak můžeme také popsat jedním bodem, a sice v  $6N$ -rozměrném fázovém prostoru; vývoj systému v čase bude popsán trajektorií („dráhou“), kterou zmíněný 1 bod opisuje ve fázovém prostoru.

<sup>8</sup> Born vyjádřil vlastnosti vlnové funkce v termínech popisujících rozptyl elektronů při jejich srážce s překážkami, a sice na základě analogie s difrakcí Roentgenových paprsků. Význam vlnové funkce, k němuž tímto způsobem dospěl, se dá formulovat následovně: elektron se může nacházet na kterémkoliv místě, v němž se vlnová funkce liší od nuly; není přitom možné říci, kde přesně je, neboť jeho výskyt je náhodnou událostí.

<sup>9</sup> Výraz  $dP = |\psi(x)\psi^*(x)|dV$ , kde  $dV$  je element objemu, určuje pravděpodobnost výskytu částice v prostorovém objemu  $dV$  v blízkosti bodu  $x$ . Z toho plyne, že vlnová funkce splňuje normovací podmínku  $\int |\psi(x)\psi^*(x)|dV = 1$ , když integrujeme přes celý prostor. (Tato podmínka vyjadřuje, že částice je vůbec někde v prostoru.) V konkrétních podmínkách ovšem pravděpodobnost výskytu částice mimo jistou malou oblast velmi rychle klesá. Bornovo pravděpodobnostní pravidlo lze snadno zobecnit tak, že poskytuje pravděpodobnost nalézání se libovolného fyzikálního systému v nějaké malé oblasti jeho konfiguračního prostoru.

které je vůči času zcela vratné a vnáší tak do kvantové mechaniky dokonalou časovou symetrii.<sup>10</sup>

Je třeba dále mít na paměti, že vlnová povaha pravděpodobnosti, která je mírou možnosti vývoje chování částice, spočívá (v nejjednodušším případě) jednak v tom, že existuje určitá pravděpodobnost, že se částice v určitém čase nachází v bodě  $A$  a zároveň stejná nebo jiná pravděpodobnost, že se v témž čase nachází v bodě  $B$ ,  $C$ ,  $D$  atd., jakož i v tom, že tyto jednotlivé pravděpodobnosti mezi sebou interferují a vytvářejí tak difrakční vzorce, které se projevují v prostorovém rozmístění pozorovaných částic. Pro kvantovou mechaniku je příznačné, že k interferencím mezi jednotlivými pravděpodobnostmi dochází i v případě pohybu jedné částice – odpovídající vlna pravděpodobnosti tehdy interferuje sama se sebou.<sup>11</sup>

Od vlnové funkce, která obsahuje všechny možnosti vývoje systému, je ovšem nutno přejít k aktualizacím těchto možností, které lze získat měřením. Měření probíhá tím způsobem, že se zaregistruje dopad částice do jednoho určitého bodu detektoru (stínítka); naměření určité prostorové polohy částice znamená, že z obrovského množství různě pravděpodobných možností dalšího vývoje chování částice, jež v sobě zahrnuje vlnová funkce, se aktualizovala pouze jedna z nich. Aktualizace této jedné možnosti z mnoha odpovídá i transformace vlnové funkce – z formy, kdy zahrnovala velké množství různých, navzájem interferujících pravděpodobností, přechází okamžitě a nespojitě ve formu, která odpovídá poloze částice zjištěné měřením a přiřazuje jí pravděpodobnost rovnou jedné. Tato transformace se jmenuje „redukce“ nebo „kolaps“ vlnové funkce a lze si ji představit i prostorově: vlna pravděpodobnosti, rozprostírající se v prostoru teoreticky do nekonečna, se náhle kontrahuje do jednoho bodu.<sup>12</sup> Náhlá redukce obrovského množství možností na jednu skutečnou událost při kolapsu vlnové funkce narušuje symetrii mezi stavy v minulosti (mnoho možností) a v současnosti (jedna skutečnost). Narušení časové symetrie zde nasvědčuje i to, že pokusíme-li se z naměřených výsledků rekonstruovat minulou historii systému, obdržíme nekorektní výsledky. Redukce vlnové funkce (způsobená měřením) je tudíž

---

<sup>10</sup> Jelikož podle Arthura Eddingtona může být  $\psi^*$  interpretována jako funkce  $\psi$  rozvíjející se nikoliv do budoucnosti, nýbrž do minulosti, definice hustoty pravděpodobnosti  $\psi\psi^*$  implikuje setkání dvou časů, jednoho, který vychází z minulosti, a druhého, který přichází z budoucnosti; pravděpodobnosti jsou tudíž symetrické v čase.

<sup>11</sup> Srv. John Gribbin, *Pátrání po Schrödingerově kočce*, Columbus, Praha 1998, str. 169-171 a od téhož autora *Schrödingerova kořata*, Columbus, Praha 2001, str. 24.

<sup>12</sup> Na tomto místě se pouze zmíníme o problémech, které vznikají při pokusu zodpovědět otázku, jak je možné, že vlnová funkce, rozložená ve velké (až nekonečné) prostorové oblasti se při svém kolapsu okamžitě „stáhne“ do jednoho bodu. Hlavní otázka, jež má úzkou souvislost s tzv. EPR paradoxem (podrobněji bude vysvětlen níže), zde tkví v tom, že kdybychom chápali vlnovou funkci realisticky, musela by být rychlost její kontrakce nekonečná: šlo by o okamžité působení na dálku (*actio in distans*), což je v rozporu s teorií relativity. Jedním z důsledků Omněsovy reformulace kvantové mechaniky (i Prigoginova pokusu v tomto směru) je též eliminace tohoto problému.

nevratný proces. Zároveň však zůstává v platnosti, že než dojde k měření (tj. „když se nedíváme“), chová se vlnová funkce při svém vývoji deterministicky a představuje popis vratného procesu.<sup>13</sup>

Prigogine v této souvislosti upozorňuje na to, že kvantová mechanika má dualistickou strukturu, neboť kromě Schrödingerovy rovnice vyžaduje další dynamický zákon popisující kolaps vlnové funkce. Je tomu opravdu tak, jelikož zejména Niels Bohr nepovažoval redukční pravidlo za pouhý empirický předpis, nýbrž za jeden z nejfundamentálnějších zákonů kvantové mechaniky, za autentický přírodní zákon. Domníval se navíc, že je jiný než ostatní zákony, protože jedině on umožňuje aplikaci, a posléze i verifikaci kvantové teorie; jako takový pak nemůže podléhat empirické verifikaci, protože je předpokladem pro jakoukoliv predikci. V souladu s tím se nachází na fundamentálnější úrovni než Schrödingerova dynamika, poněvadž ta přestává platit, když dochází k měření.

Poté, co jsme se seznámili se základními myšlenkami Schrödingerovy vlnové mechaniky (formulované pomocí diferenciálních rovnic a skrze tuto svou podobnost s klasickou fyzikou obvyklejší), musíme obrátit pozornost k předpokladům i vyústěním druhého hlavního kvantově-mechanického přístupu, který byl ve stavu svého zrodu reprezentován Heisenbergovou maticovou mechanikou.<sup>14</sup>

Heisenbergovou vůdčí ideou bylo, že ve fyzice je nutné pracovat pouze s pozorovatelnými veličinami. To vedlo k tomu důsledku, že se stalo nepřípustným používat představu klasických oběžných drah elektronů kolem jader nebo se jen dokonce i zmínit o nich, neboť žádný myslitelný experiment nemůže prokázat jejich reálnou existenci. Jak známo, v souladu s 2. Bohrovým postulátem dochází k vyzařování energie v podobě emise fotonů při přeskoku

---

<sup>13</sup> Abychom si učinili přesnější představu o povaze redukce vlnové funkce, uvedeme příklad (rovněž zjednodušující), který podává Prigogine a který se týká nikoliv polohy, nýbrž energie částice: Předpokládejme, že energie částic může nabýt 2 hodnot  $E_1$  a  $E_2$ ; těmito energiím odpovídající vlnové funkce jsou  $u_1$  a  $u_2$ . Funkci  $\psi$  popisující všechny možnosti energetického chování částic vyjádříme ve tvaru lineární superpozice  $\psi = c_1 u_1 + c_2 u_2$ , kde  $c_1$  a  $c_2$  jsou amplitudy pravděpodobností. Funkce  $\psi$  se v souladu s tím „podílí“ na obou energetických hladinách; jinak řečeno, systém se nenachází ani na energetické hladině  $E_1$ , ani na  $E_2$ , nýbrž v jistém druhu intermediárního stavu, jež je způsoben interferencí vlnových funkcí  $u_1$  a  $u_2$ . (Tento intermediární stav odpovídá situaci, v níž je Schrödingerova kočka v superpozici stavů „živá“ a „mrtvá“.) Velikost interferenčního členu plyne z rovnice  $\psi^2 = c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2 + 2c_1 c_2 u_1 u_2$  (pro zjednodušení předpokládáme, že  $\psi$  je reálné číslo). Provedení měření nám však ukáže buď energii  $E_1$ , anebo  $E_2$  s pravděpodobnostmi danými druhými mocninami amplitud pravděpodobnosti  $|c_1|^2$  a  $|c_2|^2$ ; interferenční člen  $2c_1 c_2 u_1 u_2$  se tedy (na rozdíl od měření polohy) v naměřených hodnotách energie neuplatní. Na začátku (v tzv. čistém stavu) jsme tedy měli jedinou vlnovou funkci  $\psi$  zahrnující dvě možnosti energetického vývoje systému; po kolapsu máme směs dvou vlnových funkcí  $u_1$  a  $u_2$ . To však teoreticky není možné, neboť Schrödingerova rovnice transformuje vlnovou funkci v jinou vlnovou funkci, a nikoliv do podoby směsi či souboru několika či mnoha vlnových funkcí. (Srv. Ilya Prigogine, *The End of Certainty*, The Free Press, New York 1997, str. 47-52).

<sup>14</sup> Nedlouho po vzniku obou těchto odlišných přístupů bylo prokázáno, že jsou navzájem ekvivalentní.

elektronu z povolené dráhy, která má větší energii, na jinou povolenou dráhu s menší energií; Heisenberg si uvědomil, že polohu elektronů (jejich vzdálenost od jádra) lze měřit jenom prostřednictvím oné emise. Postuloval proto, že přeskakuje-li atom z energetické úrovně  $n$  na jinou úroveň  $m$ , pak poloha elektronu je úplně charakterizována číslem  $x_{nm}$ , jež reprezentuje způsob, jakým se pozice elektronu projevuje prostřednictvím přeskočků. Zavedl též podobné veličiny  $v_{nm}$  a  $\gamma_{nm}$  pro rychlost a zrychlení elektronu. Když se pokoušel najít vztahy mezi veličinami  $x_{nm}$ ,  $v_{nm}$ ,  $\gamma_{nm}$  a veličinou  $E_n$ , musel nalézt novou formulaci zákonů dynamiky, a sice takovou, v níž by se vyskytovaly pouze tyto veličiny. Spolehl se přitom na princip korespondence, formulovaný prvně Bohrem, který stanovil, že zákony kvantové fyziky se přibližují zákonům klasické fyziky, je-li hodnota Planckovy konstanty relativně malá (tj. lze ji v poměru ke hodnotám zkoumaných proměnných zanedbat); vztahy mezi diskrétními veličinami, které zavedl, měly v takovémto případě reprodukovat klasickou mechaniku i klasickou teorii záření.

Tato myšlenka přivedla Heisenberga k tomu, že postuloval některé jednoduché dynamické relace mezi těmito objekty a probádal hlouběji jejich algebraický charakter. Dospěl tak k docela nečekaným a subtilním pravidlům kalkulace s těmito veličinami; především objevil, že jejich násobení není komutativní. Max Born, Pascual Jordan a Paul Dirac si poté brzy uvědomili, že použití nekomutativních veličin k nahrazení polohy a hybnosti je podstatným rysem Heisenbergovy teorie, a zjistili, že Heisenbergem objevená algebra odpovídá pravidlům maticového počtu. Born a Jordan zanedlouho dospěli k již úplné formulaci této nové mechaniky, přičemž k reprezentaci základních fyzikálních veličin použili nekonečné matice.

Potřeba spojit Heisenbergovskou maticovou formulaci kvantové mechaniky se Schrödingerovým vlnově mechanickým formalismem našla svůj výraz v tom, že veličiny kvantové mechaniky mají povahu operátorů; operátor  $\hat{A}$  se obecně definuje jako předpis (operace, pravidlo), jehož působení na nějakou funkci  $f$  vytváří jinou funkci  $g$  ( $\hat{A}f = g$ ).<sup>15</sup> Pokud je např. operátorem první derivace  $d/dx$  a působil na funkci  $y = e^{3x}$ , výsledkem je původní funkce vynásobená jen nějakým číslem (v našem případě je derivace rovna  $3e^{3x}$ , takže oním číslem je 3). Funkce, které jsou po působení daného operátoru znovu „obnoveny“, se nazývají „vlastní“ („charakteristické“) funkce tohoto operátoru, a čísla, kterými je vlastní funkce po působení operátoru násobena, jsou „vlastní“ („charakteristické“) hodnoty nebo čísla operátoru.

Význam zavedení operátorů pro kvantovou mechaniku si nejlépe přiblížíme, když ukážeme jejich uplatnění při řešení Schrödingerovy rovnice. Pokud popisujeme pohyb částice v uzavřené lineární oblasti  $0 \leq x \leq a$ , má

<sup>15</sup> Označování operátorů stříškou nad příslušným symbolem se je sice známé, avšak řada autorů dává přednost jejich zapisování tzv. stojatým gílem (např. J. Kvasnica), jiní zase (včetně Omněse) je nijak specificky nevyznačují. Označování operátorů pomocí stříšky zde uplatníme, jen pokud je budeme obecně charakterizovat, a to za účelem usnadnění čtenářovy elementární orientace v této problematice.

Schrödingerova rovnice tvar  $-(\hbar^2/2\mu) d^2\psi/dx^2 = E\psi$  ( $\mu$  je hmotnost a  $E$  energie částice). Obecně platí, že řešením diferenciální rovnice  $-d^2u/dx^2 = K^2u$ ,  $K^2 > 0$  je funkce  $u(x) = A \cos(Kx) + B \sin(Kx)$ , kde  $A, B$  jsou libovolné konstanty. Když v případě Schrödingerovy rovnice zavedeme  $K = 1/\hbar^2 \cdot \sqrt{2\mu E}$ , dostaneme obecné řešení  $\psi(x) = A \cos(Kx) + B \sin(Kx)$ . Předpokladu, že částice se má vyskytovat pouze v oblasti  $0 \leq x \leq a$ , odpovídá, že vně této oblasti je  $\psi = 0$ . Spojitost řešení vyžaduje, aby také na hranicích bylo  $\psi = 0$ . Z podmínky  $\psi(0) = 0$  plyne  $A = 0$ , takže musí být  $\psi(x) = B \sin(Kx)$ . Druhá hraniční podmínka  $\psi(a) = 0$  vede k tomu, že musí být  $Ka = n\pi$ , tj.  $K_n = n\pi/a$ . Tomu odpovídá kvantová energie  $E_n = \hbar^2 K_n^2 / 2\mu$ , tj.  $E_n = n^2 E_1$ , kde  $E_1 \equiv \pi^2 \hbar^2 / 2\mu a^2$ . Příslušná řešení jsou  $\psi_n(x) = B \sin(n\pi x/a)$ ,  $0 \leq x \leq a$ , a  $\psi_n(x) = 0$  pro  $x < 0, x > a$ .

Jak jsme právě měli možnost vidět, byla zde dána jistá matematická operace  $\hat{A} (= -d^2/dx^2)$ , výsledkem jejíhož působení na nějakou funkci  $u(x)$  je násobek této funkce ( $\hat{A}u = \text{konst.}u$ ). Z obecného řešení vybereme pouze taková řešení, která jsou (na celém intervalu) jednoznačná, spojitá, ohraničená a kvadraticky integrabilní. Poslední termín označuje existenci integrálu

$$\int_0^a u^2(x) dx$$

pro každé řešení vyhovující uvedeným podmínkám. (Důvod zavedení kritéria kvadratické integrability se nám ujasní, připomeneme-li si Bornovu normovací podmínku pro vlnovou funkci.)

Obecně když máme netriviální (tj. identicky nerovná nule) řešení rovnice  $\hat{A}f = Af$ , jež splňují výše uvedená 4 kritéria, označujeme je jako vlastní (charakteristická) řešení. Ty hodnoty  $A$ , při nichž tato vlastní řešení existují, jsou vlastní čísla (resp. vlastní či charakteristické hodnoty) operátoru  $\hat{A}$ . Množinu vlastních čísel nazýváme spektrem operátoru. Spektrum operátoru může být buď spojitě, anebo diskrétně, případně část spektra může být diskrétní a zbytek spojitý. V případě výše uvedeného řešení Schrödingerovy rovnice je operátor  $\hat{A} = -d^2/dx^2$ , vlastní řešení  $\hat{A}f_n = A_n f_n$  a vlastní čísla jsou  $A_n = K_n^2$ ,  $K_n = n\pi/a$ ; pro vlastní řešení tudíž platí  $f_n(x) = B \sin(n\pi x/a)$ . Spektrum  $A_n = (n\pi/a)^2$  je tedy diskrétní. S rostoucím  $a$  se intervaly  $A_{n+1} - A_n = (2n+1)\pi^2/a^2$  mezi sousedními vlastními hodnotami zmenšují k nule, což značí přechod ke spojitému spektru.<sup>16</sup>

Při sledování vlastních řešení a vlastních čísel operátorů je vhodné zavést pojmy normy, omezenosti a hermitovskosti operátoru.

Normou  $\|f\|$  funkce  $f$  (vlastního řešení nazýváme veličinu

$$\|f\| \equiv \left( \int_a^b |f|^2 dx \right)^{1/2}.$$

Operátor  $\hat{A}$  nazýváme omezený nebo ohraničený právě tehdy, když existuje  $\mu > 0$  takové, že

<sup>16</sup> Jozef Kvasnica, *Matematický aparát fyziky*, Academia, Praha 1997, str. 199-201.

$$\left( \int_a^b |\hat{A}f|^2 dx \right)^{1/2} \equiv \left[ \int_a^b (\hat{A}f)^*(\hat{A}f) dx \right]^{1/2} \leq \mu \|f\|,$$

kde symbol  $*$  vyjadřuje matematický objekt, který je komplexně dané sdružený vzhledem k danému objektu.

Hermitovský, resp. samosdružený operátor  $\hat{A}$ , který pro každé  $f_1, f_2$  vyhovuje podmínce

$$\int_a^b f_1^* \hat{A} f_2 dx = \int_a^b f_2 (\hat{A} f_1)^* dx.$$

mezi hermitovské operátory patří např. nám již známý operátor  $-i d/dx$ .<sup>17</sup>

Nyní přejdeme k charakteristice vlastních řešení (vlastních funkcí) a vlastních hodnot lineárního operátoru  $\hat{L} u_n = L_n u_n$ .<sup>18</sup> Zde platí důležitá věta, že ačkoliv vlastní funkce mohou být komplexní veličiny, přesto všechna vlastní čísla lineárního hermitovského operátoru (LHO) jsou reálná čísla.<sup>19</sup> Když máme dvě vlastní funkce LHO  $\hat{L} u_n = L_n u_n$  a  $\hat{L} u_m = L_m u_m$ , vztahuje se na ně důležitá relace ortonormality

$$\int u_n^* u_m dx = \delta_{mn},$$

kde  $\delta$  označuje Kroneckerovo číslo, což je tenzor 2. řádu, pro který obecně platí  $\delta_{ij} = 1$  pro  $i = j$ ,  $\delta_{ij} = 0$  pro  $i \neq j$ .<sup>20</sup>

Další vlastnost LHO, která je důležitá tím, že bezprostředně souvisí s problematikou kvantové fyziky, si ujasníme krátkou zmínkou o pravidlech operací s více operátory; tato pravidla se uplatňují v situaci, kdy na nějakou funkci působí několik operátorů. Pro nás je relevantní tzv. součin operátorů, který označuje dvě postupné (po sobě následující) operace  $\hat{A}, \hat{B}$ , přičemž obecně závisí na tom, v jakém pořadí operátory působí. O dvou operátorech, které pro libovolné  $f$  splňují relaci  $(\hat{A} \hat{B} - \hat{B} \hat{A}) f \neq 0$ , říkáme, že jsou nekomutativní.

Jestliže operátory  $\hat{x} = x$  a  $\hat{p}_x = -i\hbar d/dx$  jsou operátory, pomocí nichž můžeme z vlnové funkce určit polohu částice  $x$ , resp. složku hybnosti  $p_x$ , pak

<sup>17</sup> V matematické literatuře se obecně zavádí operátor symetrický, samosdružený a hermitovský. Pro omezené operátory jsou všechny tyto pojmy totožné, proto se zde mezi nimi nerozlišuje.

<sup>18</sup> Zde mohou nastat dva případy: 1) Každému vlastnímu číslu  $L_n$  přísluší právě jedno vlastní řešení  $u_n$ . Takové spektrum budeme nazývat prosté; 2) alespoň některým vlastním číslům  $L_m$  přísluší několik lineárně nezávislých vlastních řešení  $u_{m\mu}$ , tj.  $\hat{L} u_{m\mu} = L_m u_{m\mu}$ ,  $\mu = 1, 2, \dots, g_m$ . Takové spektrum budeme nazývat degenerované a počet lineárně nezávislých vlastních řešení  $g_m$ -násobností degenerace.

<sup>19</sup> Důkaz tohoto tvrzení uvádí J. Kvasnica, *ibid.*, str. 203.

<sup>20</sup> Ortonormalita zahrnuje jak normovanost vlastních funkcí  $\int |u_n|^2 dx = 1$ , tak i to, že pro ně platí relace ortogonalit  $\int u_n^* u_m dx = 0$ , když jsou různá vlastní čísla  $L_m \neq L_n$ . Co se týče integrálů, jedná se o určité integrály na definiční oblasti vlastních funkcí. Poněvadž specifikace této oblasti není pro další úvahy nutná, není třeba nadále integrační meze vyznačovat.

nekomutativnost těchto operátorů je vyjádřena rovnicí  $\hat{x} \hat{p}_x - \hat{p}_x \hat{x} = i\hbar$ , která má v zásadě tentýž význam jako známé Heisenbergovy relace neurčitosti.<sup>21</sup>

Na druhé straně nutnou a postačující podmínkou pro to, aby dva LHO měly společné vlastní řešení (vlastní funkci) je komutativnost těchto operátorů. (Z toho plyne, že operátory polohy a hybnosti v kvantové fyzice vlastní řešení nemají.)

Nyní se budem zabývat rozvojem dané funkce  $f(x)$  v řadu podle vlastních funkcí  $u_n$  nějakého zadaného lineárního hermitovského operátoru s úplnou množinou<sup>22</sup> vlastních funkcí  $u_n$ , tj.

$$f(x) = \sum_n a_n u_n(x).$$

Při zadaných  $f(x)$  a  $u_n(x)$  má takový rozvoj cenu pouze tehdy, známe-li všechny koeficienty  $a_n$ . Tyto koeficienty najdeme za předpokladu, že výše uvedená řada je stejnoměrně konvergentní. Pomocí relace ortonormality lze snadno dokázat, že pro koeficienty  $a_n$  platí rovnost  $a_n = \int u_n^*(x) f(x) dx$ . Další postup pak vede k Parsevalově rovnici  $\|f\|^2 \equiv \int |f(x)|^2 dx = \sum_n |a_n|^2$ , která je kritériem úplnosti ortonormálních vlastních řešení.

Rozvojem  $f(x) = \sum a_n u_n(x)$ , podle úplné soustavy řešení  $u_n$  LHO lze dát obecnou geometrickou interpretaci, a to tím, že výrazům  $a_n u_n(x)$  přiřadíme význam vektorů v komplexním vektorovém prostoru, jehož vlastnosti se obvykle charakterizují definicí skalárního součinu vektorů.<sup>23</sup>

V komplexním konečně rozměrném eukleidovském vektorovém prostoru lze vždy nalézt  $n$  nezávislých ortonormálních vektorů  $e_1, e_2, \dots, e_n$ , které konstituují bázi ve vektorovém prostoru. Každý daný vektor  $A$  je pak možné zapsat jako lineární kombinaci vektorů báze, tj. ve tvaru  $A = A_1 e_1, A_2 e_2, \dots, A_n e_n$ , kde koeficienty  $A_1, A_2, \dots, A_n$  se nazývají složkami (komponentami) vektoru  $A$ . Skalární součin vektorů  $A, B$ , pokud ho vyjádříme pomocí komponent, pak má podobu

$$(A, B) = \sum_{j=0}^n A_j^* B_j.$$

<sup>21</sup> Srv. J. Krempaský, *Fyzika*, str. 358, 733.

<sup>22</sup> O množině vlastních funkcí  $u_n(x)$  říkáme, že je úplnou právě tehdy, když jedinou funkcí  $F(x)$  ortogonální ke všem  $u_n$  je nulová funkce  $F(x) \equiv 0$ .

<sup>23</sup> Skalárním součinem  $(A, B)$  dvou vektorů v komplexním eukleidovském prostoru nazýváme takovou operaci, jejíž prostřednictvím každé dvojici vektorů  $A, B$  přiřadíme komplexní číslo  $(A, B)$ , přičemž jsou splněny následující čtyři axiomy: 1) Hermitovskost  $(A, B) = (B, A)^*$ , kde  $(B, A)^*$  označuje číslo komplexně sdružené s  $(B, A)$ . Tento axiom vyjadřuje, že skalární součin vektoru se sebou samým je nutně reálným číslem. 2) Při násobení vektoru libovolným komplexním číslem  $\lambda$  se skalární součin násobí tímto číslem  $(A, \lambda B) = \lambda(A, B)$ . 3) Distributivnost operace, tj.  $(A, B + C) = (A, B) + (A, C)$ . 4) Norma vektoru, tj. skalární součin vektoru sama s sebou  $\|A\| \equiv (A, A)^{1/2}$  je reálné nezáporné číslo, které je rovno nule pouze tehdy, když  $A = 0$ .

Je pak snadné prokázat, že integrály typu  $\int f^*(x)g(x) dx$  ze součinu funkcí  $f^*(x)$ ,  $g(x)$  přes jejich společnou oblast  $G$  splňují všechny čtyři axiomy skalárního součinu.<sup>24</sup>

Z toho pak plyne, že rozvoj  $f(x) = \sum a_n u_n(x)$  lze interpretovat jako rozvoj funkce  $f$  v abstraktním nekonečně rozměrném komplexním prostoru s úplnou ortonormální vektorovou bází a definovaným skalárním součinem; takový prostor se nazývá Hilbertův prostor.

Podmínkou možnosti této abstraktně geometrické interpretace je mj. to, že relaci ortonormality, jakož i výraz pro koeficienty  $a_n$  [ $a_n = \int u_n^*(x)f(x)dx$ ] lze vyjádřit jako skalární součiny ve tvaru  $(u_n, u_m) = \delta_{mn}$ , resp.  $a_n = (u_n, f)$ . Také obecně platí, že složky  $A_n$  vektoru  $A$  se dají vyjádřit skalárními součiny  $A_n = (e_n, A)$ , a sice vzhledem k ortonormalitě báze vektorů, vymezenou vztahem  $(e_m, e_n) = \delta_{mn}$ . To vše implikuje, že funkci  $f(x)$ , pokud má tvar rozvoje  $f(x) = \sum a_n u_n(x)$ , lze přiřadit geometrickou interpretaci v Hilbertově prostoru tím způsobem, že koeficienty  $a_n$  v tomto rozvoji interpretujeme jako složky (komponenty) vektoru  $f$  v Hilbertově prostoru, zatímco vlastní funkce  $u_n$  hrají v tomto prostoru roli báze vektorů. V případě, kdy je v Hilbertově prostoru geometricky interpretován operátor, se báze vektorů, sestávající z jeho vlastních funkcí, označují obvykle jako vlastní vektory operátoru, zatímco koeficienty  $a_n$  představují jeho (reálná) vlastní čísla.

V rámci geometrické interpretace v Hilbertově prostoru mohou být podobné struktury definovány i u některých množin sestávajících z funkcí. Relevantní je zde případ množiny všech kvadraticky integrovatelných funkcí, kterou označujeme  $L^2$  a kterou lze chápat jako vektorový prostor, což umožňuje, aby byly kvadraticky integrovatelné funkce traktovány jako vektory v abstraktním prostoru  $L^2$ .<sup>25</sup> Pokud se tato geometrická interpretace aplikuje na vlnovou funkci, odpovídá koncepčně inverzi postupu, jímž se maticová mechanika převáděla do termínů vlnové mechaniky, protože se nyní vlnová funkce chápe jako vektor, na nějž, jak brzy uvidíme, působí matice. Popsaná struktura vektorového prostoru je navíc vhodná k vyjádření interferenčních efektů, které mají svůj protějšek v součtu dvou funkcí; ve vektorovém prostoru tomu odpovídá součet dvou vektorů. Pokud se ovšem pracuje s Hilbertovým prostorem o nekonečném počtu rozměrů, musíme mít na zřeteli, že k definování funkce  $A(x)$  je třeba zavést nekonečné množství parametrů, např. její hodnoty ve všech bodech  $x$ .

<sup>24</sup> Podrobněji k těmto důkazům viz J. Kvasnica, *ibid.*, str. 213-214.

<sup>25</sup> V kontextu Hilbertova prostoru je funkce kvadraticky integrovatelná tehdy, když integrál  $\int |A(x)|^2 dx$  má při integraci od  $+\infty$  do  $-\infty$  konečnou hodnotu. [ $A(x)$  je komplexní funkce reálné proměnné  $x$ ]. O tomto integrálu se předpokládá, že je Lebesguovým integrálem (tomu odpovídá i označení množiny kvadraticky integrovatelných funkcí symbolem  $L$ ). Definice skalárního součinu v prostoru  $L^2$  je analogická jeho výše uvedené definici, pouze s tím rozdílem, že místo součtu zde vystupuje integrace od  $+\infty$  do  $-\infty$ ; totéž platí o normě funkce  $A(x)$ , přičemž lze podotknout, že norma  $\|A(x)\|^2$  je analogií délky vektoru.

Jak již bylo naznačeno, v Hilbertově prostoru je možné zobrazit operátory pomocí matic. Mějme nějaký lineární hermitovský operátor  $\hat{A}$  s vlastními čísly  $A_m$  a s úplnou ortonormální bází  $v_m$ , tj.  $\hat{A} v_m = A_m v_m$ . Pomocí úplné ortonormální báze  $u_n$  (lineárního hermitovského operátoru  $\hat{L}$ ), určenou vztahem  $\hat{L} u_n = L_n u_n$  vytvoříme výrazy typu  $A_{mn} \equiv \int u_m^* \hat{A} u_n dx \equiv (u_m, \hat{A} u_n)$ . tyto výrazy nazýváme maticové elementy operátoru  $\hat{A}$  vypočtené pomocí operátoru  $\hat{L}$ , zkráceně L-reprezentací operátoru  $\hat{A}$ . (To má své oprávnění v tom, že pro  $A_{mn}$  platí všechny axiomy maticového počtu.)

Výsledkem operace  $\hat{A} u_n$  je opět nějaká funkce (prvek Hilbertova prostoru), takže se opět dá rozvinout pomocí báze  $u_n$ , tj.  $\hat{A} u_n = \sum_k b_k u_k$ . Aplikací relace ortonormality a po příslušných úpravách (z nichž vzejde  $b_m = A_{mn}$ , resp.  $b_k = A_{kn}$ )<sup>26</sup> dostáváme důležitou rovnici

$$\hat{A} u_n = \sum_k A_{kn} u_k. \quad ^{27}$$

V maticovém zobrazení se stává názorným význam podmínky hermitovskosti operátoru, neboť pro maticové elementy operátoru, který této podmínce odpovídá, platí vztah  $A_{mn} = (A_{nm})^*$ , tj. že maticové elementy  $A_{mn}$  jsou rovny komplexně sdruženým elementům transponované matice  $A_{nm}$ . V souvislosti s tím je třeba zavést pojem hermitovsky sdruženého operátoru, jenž je definován vztahem  $(\hat{A}^+)_{mn} = (A_{nm})^*$ . Je to operátor, jehož maticové elementy jsou transponované<sup>28</sup> a komplexně sdružené k původní matici  $A_{mn}$ .

K určení vlastních čísel operátoru  $\hat{A}$  prostřednictvím jeho maticového vyjádření dospíváme následovně: Je-li  $\hat{A} = \hat{L}$ , případně pokud platí  $\hat{A} \hat{L} - \hat{L} \hat{A} \equiv 0$ , pak oba operátory mají společnou bázi  $u_n$ . V rovnici  $A_{mn} = (u_m, \hat{A} u_n)$  užijeme  $\hat{A} u_n = A_n u_n$ , což s ohledem na ortonormalitu dává  $A_{mn} = A_n \delta_{mn}$ . Maticová reprezentace operátoru  $\hat{A}$  je pak diagonální a na hlavní diagonále se nacházejí jeho vlastní čísla  $A_n$ .

Pokud však operátory  $\hat{A}$ ,  $\hat{L}$  spolu nekomutují, pak netriviální řešení existuje právě tehdy, když je determinant soustavy nulový, tj. když platí tzv. sekulární rovnice  $\det(A_{mn} - A \delta_{mn}) = 0$ . Maticové elementy  $A_{mn}$  jsou určeny pomocí známé báze, takže jsou to známá čísla. Vlastní čísla  $A_1, A_2, \dots$  operátoru  $\hat{A}$  jsou pak řešením sekulární rovnice.<sup>29</sup>

<sup>26</sup> Podrobné odvození viz J. Kvasnica, *ibid.*, str. 215-216.

<sup>27</sup> Pro součin operátorů  $\hat{A}$ ,  $\hat{B}$  dostáváme maticové vyjádření analogickým způsobem:  $(\hat{A} \hat{B})_{mn} = \sum_k A_{mk} B_{kn}$ , což je známé pravidlo maticového násobení.

<sup>28</sup> Transponovaná matice k dané matici z ní vznikne výměnou řádků a sloupců.

<sup>29</sup> V obecném případě je výpočet velmi pracný, poněvadž se jedná o rovnici nekonečného stupně. Situace však přesto není tak beznadějná, jak to na první pohled vypadá. Úspěch metody záleží v tom, abychom matici  $A_{mn}$  převedli na blokový tvar kolem hlavní diagonály, na níž se budou nacházet konečně rozměrné matice, zatímco nediagonální členy budou vesměs nulové matice. Tyto a podobné metody patří do speciálních oddílů numerické matematiky. (J. Kvasnica, *ibid.*, str. 219.) V maticovém počtu se dospívá k sekulární rovnici při řešení soustavy rovnic  $\sum a_{ij} x_j = \lambda x_i$  (sumace probíhá od  $j = 1$  po  $j = n$ ;  $i = 1, 2, \dots, n$ ). Čísla  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ ,

Vzhledem k významu diagonálních matic při určování vlastních čísel operátorů je vhodné seznámit se s dalším matematickým nástrojem používaným v kvantové mechanice. Je to stopa matice, která se obecně definuje jako součet diagonálních jejích diagonálních členů a označuje symbolem  $\text{Tr}$  (z anglického *trace*). V případě konečně rozměrné matice  $T$  (o  $n$  rozměrech) je vyjádření její stopy jednoduché:

$$\text{Tr}(T) = \sum_{j=1}^n T_{jj}$$

Pro operátor  $\hat{T}$  působící na nekonečně rozměrný Hilbertův prostor je definice stopy prakticky stejná: vybere se ortonormální báze  $\{\gamma_j\}$  a stopa pak odpovídá výrazu

$$\text{Tr} \hat{T} = \sum_{j=1}^{\infty} (\gamma_j, T\gamma_j)$$

Aby byla stopa dobře definovaná, musí uvedená řada absolutně konvergovat na nějaké bázi; je to zároveň dostatečná podmínka. Pokud je splněna, řada vyjadřující stopu konverguje na každé bázi a o operátoru  $\hat{T}$  říkáme, že patří do stopové třídy. Pro stopu platí, že je invariantem, tzn. že nezávisí na tom, kterou bázi zvolíme. Ještě je záhodno připomenout, že stopa konečné samosdružené matice je součtem jejích vlastních čísel.<sup>30</sup>

Je třeba říci, že od počátku vývoje kvantové mechaniky existovala silná tendence ztotožnit fyzikální pojem pozorovatelné (angl. *observable*) veličiny a matematický pojem samosdruženého operátoru. Von Neumann a Dirac, kteří byli hlavními reprezentanty této tendence, dokonce razili termín *observable* (které má v angličtině i substantivní význam) pro označení obou pojmů. (Do češtiny lze tento termín přeložit jako „pozorovatelná hodnota“ nebo také „pozorovatelná proměnná“.)<sup>31</sup> Pokud uvažujeme energii, hybnost, elektrický proud atd., pak korespondence mezi fyzikálními veličinami a samosdruženými operátory samozřejmě platí, třebaže se ukázalo, že v některých jiných případech tato korespondence podléhá jistým omezením. Pro naše účely ji však lze akceptovat jako platnou obecně.<sup>32</sup>

Dřív než přistoupíme k přesnější charakteristice pojmu pozorovatelné proměnné či pozorovatelné hodnoty, musíme se seznámit s důležitým pojmem projekčních operátorů neboli projektorů, které hrají zásadní roli v interpretaci kvantové mechaniky.

---

pro která existuje netriviální řešení zmíněné soustavy (a která jsou kořeny sekulární rovnice), jsou označována jako vlastní čísla matice  $a_{ij}$ .

<sup>30</sup> Více o vlastnostech stop lze najít v *IQM*, str. 21-22.

<sup>31</sup> V dalším výkladu budeme kvůli optimálnímu zařazení do příslušného kontextu používat jak jeden, tak druhý z těchto významově ne zcela adekvátních převedení.

<sup>32</sup> Ona korespondence zároveň znamená, že představa fyzikální veličiny (vyjádřené operátorem) je v kvantové mechanice odlišná od představy její číselné hodnoty (vyjádřené jeho vlastními hodnotami nebo čísly). Např. energii představuje obvykle Hamiltonův operátor, a energetické hladiny, tedy pozorovatelné hodnoty energie, budou ztotožněny s vlastními hodnotami tohoto operátoru.

Projektor je samosdružený operátor s diskretním spektrem; jeho působení na vektor  $\beta$  v  $N$ -rozměrném Hilbertově prostoru  $\mathbf{H}$  spočívá v tom, že redukuje tento vektor na ty jeho složky, které náleží do  $n$ -rozměrného podprostoru  $\mathbf{M}$ ; vektor  $\beta_1$  tvořený těmito složkami se nazývá projekcí vektoru  $\beta$  do  $\mathbf{M}$ . Projektor je představován diagonální maticí, v níž prvních  $n$  diagonálních prvků se rovná 1 a posledních  $N - n$  prvků je rovno 0; jde o samosdruženou matici s vlastními hodnotami 1 a 0. Pro takovou matici (označme ji např.  $E$ ) platí  $E^2 = E$ . Na druhé straně lze říci, že každý samosdružený operátor  $\hat{O}$ , pro který platí  $\hat{O}^2 = \hat{O}$ , může být asociován s uzavřeným podprostorem Hilbertova prostoru jakožto jeho projektor. Projektory lze aplikovat nejen na diskretní hodnoty, nýbrž i na spojitě spektrum vlastních hodnot  $J = [a, b]$ ; jistý speciální projektor může v takovém případě působit „prokrustovsky“, tj. k dané funkci  $\alpha(x)$  vytvořit funkci  $\beta(x)$ , jež je v intervalu  $J$  totožná s  $\alpha(x)$ , avšak rovná se nule všude mimo tohoto intervalu.

Pozorovatelná proměnná se v kvantové fyzice získá vynásobením každého vlastního čísla (tj. každé možné hodnoty veličiny) odpovídajícím projektorem a následným sečtením výsledků. Pozorovatelná proměnná obsahuje tedy informaci o možných hodnotách veličiny a odpovídajících tvrzeních vyjádřených projektory.<sup>33</sup>

Vlastní hodnoty matice představující projektor, tj. hodnoty (1,0) lze chápat i jako logické symboly vyjadřující pravdivost či nepravdivost určitých tvrzení; z toho plyne, že kvantová fyzikální veličina má jak kvantitativní aspekt, tak i logický obsah (jestliže je z matematického hlediska souborem „čísel, projektorů“, pak z logického hlediska je souborem „čísel, tvrzení“).<sup>34</sup>

Zkonkretizujme si nyní tyto Omnèsovy myšlenky. Pozorovatelná proměnná  $A$ , pokud je traktovaná jako projektor, má obecně jak diskretní spektrum  $\{a_n\}$ , tak i spektrum spojitě. V rámci obvyklého kvantově-mechanického přístupu se předpokládá, že výsledek měření pozorovatelné proměnné musí nutně být číslem patřícím do spektra. Předpokládá se též, že stav systému je charakterizován danou vlnovou funkcí nebo normalizovaným vektorem  $\psi$ . Pravděpodobnost  $p_n$ , že  $A$  bude mít diskretní hodnotu  $a_n$ , se pak definuje následovně: Když zavedeme projektor  $E_n$ , spojený s vlastním číslem  $a_n$ , klademe jakožto postulát platnost vztahu  $p_n = \|E_n\psi\|^2$ . Pravděpodobnost, že  $A$  bude mít hodnotu, která patří do konečného intervalu  $J$ , jenž patří do kontinuálního spektra, se definuje stejným způsobem: použije se projektor  $E_J$  asociovaný s tímto intervalem a klade se  $p_J = \|E_J\psi\|^2$ .

<sup>33</sup> Srv. *QPh*, str. 174, *IQM*, str. 23-24.

<sup>34</sup> Podle Omnèse je z tohoto hlediska zvláště instruktivní von Neumannovo pojetí základních propozic fyziky, které jsou v rámci tohoto pojetí označovány jako elementární predikáty. Predikát je tvrzení vztahující se k pozorovatelné proměnné  $A$ , tj. k nějakému samosdruženému operátoru a k množině reálných čísel  $\Delta$  patřících do jeho spektra. Predikát je vyjádřen větou „hodnota  $A$  se nachází v  $\Delta$ “; von Neumannovou ideou bylo asociovat s predikátem přesně vymezený matematický objekt. Později došlo k její další precizaci v tom smyslu, že s predikátem se asociuje přesně vymezený projektor. (Srv. *UQM*, str. 57.)

Poznatky, které jsme získali, nám teď umožní podat nejobvyklejší (a nejjednodušší) vyvození velmi důležitého pojmu kvantové teorie, jehož ujasnění je nezbytným předpokladem pochopení teorie dekoherence. Jde o pojem stavového operátoru  $\rho$  (též operátoru hustoty), který se v případě konečně rozměrného Hilbertova prostoru označuje také jako matice hustoty.<sup>35</sup> (Jedná se o hustotu distribuce pravděpodobnosti.) Stavový operátor zavedli nezávisle na sobě Lev Landau, Felix Bloch a John von Neumann, když při předpokladu existence vlnové funkce byli nuceni připustit, že možnosti jejího poznání jsou velmi omezené. Uvažovali sice totiž o možnosti ideálního experimentálního přípravného procesu, který by mohl vést k přesně definované vlnové funkci  $\psi_j$ , museli však rovněž vzít v úvahu, že ve skutečnosti by přípravné zařízení nefungovalo dokonale v důsledku náhodných (klasických) fluktuací. V jejich pojetí naše neschopnost kontrolovat tyto fluktuace implikuje náhodnost vlnové funkce samotné, a to v souladu s klasickým chápáním pravděpodobnosti jakožto výrazu naší neznalosti. Výsledkem těchto úvah byl popis stavu pomocí operátoru. Chceme-li si přesněji přiblížit postup jejich uvažování, musíme vyjít od předpokladu, že existuje celá množina vlnových funkcí  $\psi_j$ , přičemž pro každou z nich platí, že pravděpodobnost jejího výskytu v přípravném zařízení je rovna  $p_j$  (předpokládáme o nich, že nejsou ortogonální). Pravděpodobnost, že vlnová funkce  $\psi_j$  vykáže vlastnost  $a$  s projektorem  $E$ , je dána Bornovou formulí  $\|E\psi_j\|^2$ , kterou jsem výše uvedli jako postulát.<sup>36</sup> Když bereme zřetel na pravděpodobnost  $p_j$ , která přísluší vytvoření vlnové funkce  $\psi_j$ , tak

<sup>35</sup> V souvislosti s tímto úkolem (avšak hlavně kvůli pochopení některých pasáží v dalších výkladech) bude nezbytné uvést několik základních pravidel speciální závorkové symboliky, kterou pro popis vektorů v Hilbertově prostoru zavedl do kvantové teorie Paul Adrien Maurice Dirac. V rámci této symboliky se vektor o složkách  $a_n$  značí symbolem  $|a\rangle$  a vektor k němu sdružený  $(|a\rangle)^+$  symbolem  $\langle a|$ . Pro  $|a\rangle$  byl zaveden název ket-vektor, pro  $\langle a|$  název bra-vektor. Tyto názvy mají původ v tom, že oba symboly jsou součástí závorky  $\langle \rangle$ , pro niž je v angličtině termín *bracket*. Skalární součin dvou vektorů  $\langle a|$  a  $|b\rangle$  se značí  $\langle a|b\rangle$ , čemuž v dřívější symbolice odpovídá  $(a, b)$ . Operátor, jeho vlastní čísla a vlastní vektory se označují stejným písmenem, avšak vlastní čísla a vlastní vektory se odlišují indexem, čárkou atp. Místo  $\hat{L}u_n = L_n u_n$  se píše  $\hat{L}|L_n\rangle = L_n|L_n\rangle$  atd. Hermitovské operátory působí na ket-vektory zleva, např.  $|b\rangle = F|a\rangle$ , na bra-vektory zase zprava  $\langle b| = \langle a|F$ . Maticový element operátoru můžeme vyjádřit jako součin bra-vektoru  $\langle m|$  a ket-vektoru  $|n\rangle$ , čemuž odpovídají rovnice  $A_{mn} \equiv \langle m|A|n\rangle \equiv \langle L_m|A|L_n\rangle$ . Poslední zápis je velmi výstižný, neboť lze z něj přímo vidět bázi, v níž je operátor  $\hat{A}$  zobrazen. Diracova symbolika umožňuje také vhodně zobrazit projektory: projektor podél normalizovaného vektoru se zapisuje v podobě  $|a\rangle\langle a|$ . Vlnová funkce  $\psi(x)$  v diracovském zápisu má tvar  $\langle x|\psi\rangle$ .

<sup>36</sup> Způsob, jakým lze dospět k této formulí, ukáže následující příklad, týkající se spojitého spektra: uvažujeme tu vlastnost částice v jednorozměrném prostoru, že hodnota pozorovatelné proměnné  $X$  určující její polohu je v čase  $t = 0$  v oblasti  $\Delta$ . Odpovídající projektor je  $E = \int_{\Delta} |x\rangle\langle x|dx$ ; jelikož v diracovské symbolice platí, že  $\psi(x) = \langle x|\psi\rangle$ , dostáváme následující vztahy:  $\int_{\Delta} |\psi(x)|^2 dx = \int_{\Delta} \langle \psi|x\rangle\langle x|\psi\rangle dx = \langle \psi|E\psi\rangle$ . Vzhledem k tomu, že pro každý projektor platí rovnost  $E^2 = E$ , platí též  $\langle \psi|E\psi\rangle = \langle \psi|E^2\psi\rangle = \langle E\psi|E\psi\rangle = \|E\psi\|^2$ . (Srv. *UQM*, str. 146.)

pravděpodobnost vlastnosti  $a$  je v souladu s pravidlem skládání pravděpodobností dána ve tvaru

$$p(a) = \sum_j p_j \|E\psi_j\|^2.$$

Takto určenou pravděpodobnost  $p(a)$  pak můžeme vyjádřit ve formě  $p(a) = \text{Tr } \rho E$ , z čehož pro stavový operátor vychází výraz  $\rho = \sum_j p_j |\psi_j\rangle\langle\psi_j|$ ; (funkce  $\psi_j$  tedy vystupuje v tomto výrazu jako projektor). Jednoduše řečeno, stavový operátor resp. matice hustoty určuje, jaká je pravděpodobnost, že se systém nachází v tom, či onom kvantovém stavu, z nichž každý je popsán rozdílnou vlnovou funkcí.<sup>37</sup>

Stavový operátor má následující důležité vlastnosti: Je samosdružený ( $\rho = \rho^+$ ); je kladný (všechny jeho vlastní hodnoty jsou kladné nebo rovné nule); má jednotkovou stopu ( $\text{Tr } \rho = 1$ ); tato normalizační podmínka vyplývá v našem vyvození z rovnosti  $\sum_j p_j = 1$ .

Stav, který je popsán stavovým vektorem  $|a\rangle$ , se označuje jako čistý stav. Odpovídající operátor hustoty je daný vztahem  $\rho = |a\rangle\langle a|$  a má pouze jednu nenulovou vlastní hodnotu, rovnou 1 u vlastního vektoru  $|a\rangle$ . Pokud tato jednoduchá forma  $\rho$  neplatí, říkáme o stavu, že je smíšený.<sup>38</sup>

Stavový operátor umožňuje dále stanovit pravděpodobnost vlastnosti s časově závislým projektorem  $E(t)$ , a sice podle vztahu  $p = \text{Tr}[\rho E(t)]$ .

Pro teorii dekoherence má pak význam následující věta: Pokud nějaký systém  $O$  je součástí většího systému  $S$ , v němž je (momentálně) izolovaný, jeho stavový operátor je daný rovnicí  $\rho_O = \text{Tr}_S \rho_S$ , kde stopa je brána přes všechny stupně volnosti  $S$ , které nepatří do  $O$ .<sup>39</sup>

Ještě dodejme, že dynamika, tak jak ji vyjadřuje Schrödingerova rovnice, se též snadno zobecňuje v rámci Hilbertových prostorů. Předpokládejme, že izolovaný systém je v čase  $t$  popsán stavovým vektorem  $\alpha(t)$  a že existuje samosdružený hamiltonovský operátor  $\hat{H}$ , který je pozorovatelnou hodnotou energie. Časový vývoj stavového vektoru se pak řídí rovnicí  $i\hbar \cdot d\alpha(t)/dt = \hat{H}\alpha(t)$ , která se nadále nazývá Schrödingerovou rovnicí. Je často vhodné řešit Schrödingerovu rovnici formálně. K tomu definujeme vývojový operátor  $U(t)$ , a to vztahem  $U(t) = \exp(-i\hat{H}t/\hbar)$ , jestliže stavový vektor v čase  $t = 0$  je  $\alpha(0)$ , dá se snadno ověřit, že pro jeho hodnotu v čase  $t$  platí  $\alpha(t) = U(t)\alpha(0)$ . Vývojový operátor je unitární čili platí  $U(t)U(t)^+ = U(t)^+U(t) = I$  ( $U^+$  je operátor sdružený vůči  $U$ ;  $I$  je jednotková matice), což znamená, že zachovává skalární součin ( $U(t)\beta, U(t)\alpha) = (\beta, \alpha)$ ; z toho pak plyne, že i jeho norma  $\|\alpha(t)\|^2$  je konstantní. V

<sup>37</sup> Srv. Peter Coveney, Roger Highfield, *Šíp času*, OLDAG, Ostrava 1995, str. 207.

<sup>38</sup> Pokud se místo funkce  $\psi$  používá k popisu chování kvantového systému funkce  $\rho$ , Hamiltonův operátor se nahrazuje operátorem Liouvillovým. Obecně platí, že časový vývoj funkce  $\rho$  [pokud závisí na čase, nabývá tvaru  $\rho(q, p, t)$ ] popíšeme tím, že na ni působíme Liouvillovým operátorem  $L$  v souladu s rovnicí  $i\hbar \partial \rho / \partial t = L\rho$ .

<sup>39</sup> Srv. *UQM*, str. 149.

této formulaci dynamiky, vycházející ze Schrödingera, se stavový vektor vyvíjí v čase, zatímco pozorovatelné hodnoty jsou fixními operátory. (Tzv. Heisenbergovou reprezentací, v souladu s níž dochází k časové změně samotných pozorovatelných proměnných, se zde již nemůžeme zabývat.)<sup>40</sup>

### 3. Teorie dekoherence

Nyní již máme dostatek předběžných poznatků, abychom mohli přistoupit k výkladu Omněsovy teorie dekoherence. Můžeme začít povzbuzujícím konstatováním, že efekt dekoherence je z fyzikálního hlediska poměrně jednoduchý. Odvozuje se ze skutečnosti, že jev interference nastává jen u koherentních vln, tj. u takových, jejichž kruhová frekvence  $\omega$  je stejná (konstantní nebo stejně se měnící), takže jejich fázový rozdíl je konstantní.<sup>41</sup> Jestliže tedy máme systém elementárních částic resp. fotonů, jejichž chování v situaci, kdy jsou izolovány od okolí, je popsáno pomocí superpozice vlnových funkcí, pak nezbytnou podmínkou toho, aby matematické vyjádření této superpozice zahrnovalo také nenulový interferenční člen (odpovídající za „podivné“ kvantové efekty) je koherence superponovaných vlnových funkcí. U systémů, sestávajících z malého počtu částic, se tato podmínka opravdu naplňuje. Jenže jakmile nastane interakce zmíněného doposud izolovaného systému s okolím (sestavajícím ze systémů, u nichž počet částic dosahuje termodynamické limity),<sup>42</sup> dochází nesmírně rychle k dekoherenci, tj. k zániku doposud koherentního charakteru superponovaných vlnových funkcí, v důsledku čehož právě tak rychle a beze stop vymizí i interference. Kvantové efekty, jež způsobuje právě interference, se tedy nemohou přenést na makroskopickou úroveň, do níž náleží systémy tvořící okolí.

To, že efekt dekoherence unikal tak dlouho pozornosti fyziků, je dáno samou podstatou experimentálního přístupu. Experiment jakéhokoliv druhu je uzpůsoben tak, aby ukázal sledovaný proces v jeho čisté a autonomní podobě, tj. tak jak probíhá „o sobě“ při pokud možná dokonalém vyloučení vlivů a intervencí ze strany všech ostatních procesů. To samozřejmě předpokládá i izolaci zkoumaného procesu od okolí a navíc i soustředění experimentátorů na takové procesy, u nichž je tato izolace možná a snadno dosažitelná. Efekt dekoherence, který se odehrává právě v rámci interakce pozorovaného systému s okolím (přičemž je navíc tak extrémně rychlý, že vyžaduje velmi pokročilé

<sup>40</sup> Více viz *IQM*, str. 41-42.

<sup>41</sup> J. Krempaský, *Fyzika*, str. 267-268.

<sup>42</sup> Termodynamická limita je zjednodušující modelová představa používaná ve statistické termodynamice; spočívá v tom, že konečný, byť nesmírně veliký (v řádu  $10^{27}$ ) počet částic obsažených v makroobjektech se nahrazuje jejich nekonečným počtem  $N$  zaujímajícím nekonečný objem  $V$ , přičemž se však uvažuje, že hustota či koncentrace částic ( $N/V$ ) zůstávají konečné. (Srv. Coveney-Highfield, *Šíp času*, str. 352.)

experimentální techniky), musel být proto nejdříve vydedukován při řešení paradoxů, k nimž vedla představa makroskopické působnosti interference.<sup>43</sup>

K tomu, aby plně vynikl převratný význam dekoherentistického přístupu, bude nyní nezbytné rozvést jeho výše podanou předběžnou charakteristiku poněkud podrobněji. Je ovšem velmi těžké, ba přímo nemožné podat přesný výklad bez použití komplikovaného matematického aparátu nebo na základě sugestivních analogií, protože interference v makroskopickém měřítku, tj. pojmové východisko k teorii dekoherence, se právě v důsledku fungování dekoherenčního efektu nikdy neobjevuje v naší zkušenosti a nelze si ji proto ani nijak představit. Nejlepším uvedením do problému bude proto podání stručné charakteristiky interferenčního efektu na mikroskopické úrovni následované popisem Schrödingerem navrženého ideálního experimentu, v němž je mikroskopická interference dána do vztahu s otázkou života a smrti kočky, makroskopického tvora všeobecně známého a oblíbeného v rámci předvědecké zkušenosti a posléze i mezi kvantovými fyziky.

Elementární představu o podivnostech mikroskopické interference získáme, když si připomeneme výsledky známého pokusu, při němž elektrony pronikají k detekčnímu zařízení (stínítku) dvěma otvory v překážce, která dělí východisko jejich pohybu od stínítka. Když zakryjeme první otvor, elektrony pronikají druhým a nejvíc jich dopadne do kruhu kolem bodu, jenž se nachází na stínítku přímo za druhým otvorem; analogický výsledek dostaneme, když zakryjeme druhý otvor. Když umožníme elektronům průchod oběma otvory, neobjeví se na stínítku vzorec, který by byl součtem vzorců získaných při předchozích pokusech (jak by tomu bylo na makroskopické úrovni při vystřelování kulek z revolveru), nýbrž vzorec vlnové interference.<sup>44</sup> Stejný výsledek však získáme i tehdy, když se kadence elektronového děla sníží natolik, že pokusným zařízením projde za časovou jednotku pouze jediný elektron – když projde takto jeden po druhém dostatečný počet elektronů, stopy jejich postupných dopadů vytvoří opět vzorec vlnové interference. Jednotlivý elektron

<sup>43</sup> Tušení o tom, že vliv okolí může hrát roli v problému makroskopické interference, se prvně objevilo již v některých raných úvahách Wernera Heisenberga, avšak správnou odpověď formuloval Nicolaas van Kampen (1954) a po něm ji znovu objevil Hans Dieter Zeh (1970). Zehova domněnka byla testována na jednoduchých modelech a dále rozvíjena v sedmdesátých a osmdesátých letech, přičemž nejdůležitější roli přitom sehráli K. Hepp, E. H. Lieb, W. Zurek, A. O. Caldeira, A. J. Leggett, E. Joos i samotný Zeh. Obecnou teorii dekoherence, nezávislou na speciálních modelech vytvořil až v devadesátých letech Roland Omnès. Experimentální ověření efektu dekoherence provedla v roce 1996 v Paříži skupina vedená J. M. Raimondem a S. Harochem.

<sup>44</sup> Nejvíce elektronů dopadne kolem bodu, jenž se nachází za středem spojnice obou otvorů, pak ve všech směrech od tohoto bodu hustota dopadů rychle poklesne k nule, aby se zase zvýšila, ale na hodnotu poněkud menší, a toto střídání sedel a stále klesajících vrcholů v rozložení hustoty se děje dále všemi směry; vizuálně tomu odpovídá množina soustředných kruhů, jejíž průměr ovšem daleko přesáhne velikost vzdálenosti mezi otvory. Takovéto rozdělení pravděpodobnosti dopadů elektronů má svůj matematický protějšek ve výrazu  $|\psi_1(x) + \psi_2(x)|^2$ , zatímco při popisu dopadů elektronů při střídavém zakrývání otvorů se uplatňuje tvar  $|\psi_1(x)|^2 + |\psi_2(x)|^2$ , který se od předešlého liší právě o interferenční člen.

se tedy při přechodu otvorem chová jinak, když je druhý otvor uzavřen, a jinak, když je druhý otvor otevřen – metaforicky řečeno, „ví“ o tom, zda je druhý otvor uzavřen či nikoli.<sup>45</sup> Přesněji řečeno, superpozice 2 vlnových funkcí zahrnující interferenční člen, jež v tomto případě popisuje pohyb elektronů, odpovídá nikoliv elektronu *in abstracto*, nýbrž – protože jde o vlny pravděpodobnosti – popisuje jeho pohyb jakožto odpovídající situaci s oběma otevřenými otvory, tj. s dvěma stejně pravděpodobnými možnostmi přechodu; když tím nebo oním otvorem proniká vždy jen jedna částice, vlnová funkce vzniklá superpozicí dvou možností přechodu interferuje sama se sebou a interferenční vzorec je vytvářen jejími opakovanými kolapsy.

Schrödingerův ideální experiment převádí mikroskopickou interferenci na makroskopickou úroveň velmi jednoduchým způsobem. Experimentální aparatura pro tento sestává z krabice, v níž je umístěna radioaktivní látka, dále pak detektor radioaktivních částic (Geigerův počítač), skleněná láhev obsahující jedovatý plyn a konečně živá kočka. Detektor bude zapnut tak dlouho, aby byla padesátiprocentní pravděpodobnost, že se jeden z atomů radioaktivní látky rozpadne a detektor zaznamená částici. Zaznamená-li detektor takový jev, pak prostřednictvím vhodně připraveného převodového zařízení (např. revolveru) se láhev s plynem rozbije a kočka zemře; pokud rozpadový jev nebude zaznamenán, kočka zůstane naživu.

Dle tradiční interpretace situace navržené Schrödingerem je chování všech tří důležitých prvků experimentu – radioaktivního materiálu, detektoru i kočky – popsáno jednou a toutéž vlnovou funkcí  $\psi$ , která má vzhledem k existenci dvou možností dění v experimentálním zařízení tvar lineární superpozice  $\psi = c_1\varphi_1(x) + c_2\varphi_2(x)$ , kde  $c_1$  a  $c_2$  jsou amplitudy pravděpodobností. [Funkce  $\varphi_2(x)$  se vztahuje zároveň k uvolnění částice z radioaktivní látky, k reakci detektoru na tuto částici i ke smrti kočky, funkce  $\varphi_1$  zase k tomu, že rozpad nenastane, detektor nic nezaznamená a kočka zůstává naživu.] Jak víme, funkce  $\psi^2$ , vyjadřující hustotu pravděpodobnosti, zahrnuje interferenční člen  $2c_1c_2\varphi_1(x)\varphi_2(x)$  (pokud pro zjednodušení předpokládáme, že  $\psi$  je reálné číslo). Vzhledem k tomu, že oba výsledky experimentu mají stejnou pravděpodobnost, platí  $|c_1|^2 = |c_2|^2 = 1/2$ ; z toho plyne pro funkci  $\psi$  tvar  $\psi = (1/\sqrt{2}) [\varphi_1(x) + \varphi_2(x)]$ . Funkce  $\psi$  se v souladu s tím „podílí“ na obou možných výsledcích experimentu; experimentální zařízení se tudíž nenachází ani ve stavu  $\varphi_1(x)$ , ani ve stavu  $\varphi_2(x)$ , nýbrž v mezistavu, jenž je způsoben interferencí těchto funkcí; z toho plyne, že kočka není ani živá, ani mrtvá, nýbrž nachází se v superpozici stavů života a smrti (je částečně živá i mrtvá). Když experimentátor otevře krabici, dojde k náhlému kolapsu vlnové funkce, a pouze tehdy (alespoň dle von Neumanna), se kočka stane skutečně živou nebo mrtvou. Z von Neumannovy teorie měření navíc plyne, že kočka, kterou nahlédnutí do krabice určilo jako mrtvou, může

---

<sup>45</sup> John Gribbin, *Pátrání po Schrödingerově kočce*, Columbus, Praha 1998, str. 169.

být při pozdějším pozorování shledána opět živou;<sup>46</sup> lze tudíž snadno dospět k závěru, že v čisté kvantové mechanice nemá pojem faktu vůbec žádný smysl.<sup>47</sup>

Při výkladu dekoherentistického přístupu, který popírá přenos interference z mikroskopické úrovně na makroskopickou, se musíme soustředit na ten prvek Schrödingerovy experimentální situace, kde k tomuto přenosu údajně dochází, tj. na detektor radioaktivního záření. Za tímto účelem přepíšeme vlnovou funkci do tvaru  $\psi_d = (1/\sqrt{2}) [\phi_0(x) + \phi_r(x)]$ , kde  $\phi_r(x)$  bude odpovídat situaci, kdy pod vlivem interakce radioaktivní částice s detektorem vzniklo v detektoru napětí  $V$ , které vychýlilo jeho ručičku o makroskopicky pozorovatelnou délku  $x_r$ , zatímco  $\phi_0(x)$  bude odpovídat stavu, kdy v důsledku absence radioaktivní částice je v detektoru nulové napětí a jeho ručička setrvává v poloze  $x = 0$ .<sup>48</sup>

A právě zde dochází k rozchodu s tradiční interpretací: Omnès (v návaznosti na Heisenberga a Zeha) konstatuje, že detektor jakožto reálný

---

<sup>46</sup> Von Neumann, který se v tomto ohledu ukázal spíše jako matematik než jako fyzik, měl za to, že každá pozorovatelná proměnná může být měřena a každý hamiltonián (obecné vyjádření součtu kinetické a potenciální energie) se může uskutečnit. Pokud platí tento druhý předpoklad, je vždy možné sestavit hamiltonián, který o něco později přivede systém do stavu s vlastností „kočka je naživu“. Situaci dobře znázorňuje potenciálová křivka s dvěma potenciálovými jámami oddělenými sedlem. Pokud se částice nachází dejme tomu v levé jámě, představuje živou kočku, když se nachází v pravé jámě, odpovídá to mrtvé kočce. Částice ovšem může proniknout potenciálovou bariérou (reprezentovanou sedlem) prostřednictvím tunelového efektu (spočívajícím v tom, že částice, jejíž pravděpodobnost výskytu se řídí Schrödingerovou rovnicí, se může octnout i za potenciálovou bariérou, k jejímuž překonání podle klasických představ nemá dostatek energie) a přejít takto z pravé jámy do levé; na makroskopické úrovni by to znamenalo, že po příslušné době je z mrtvé kočky zase živá kočka – pokud by ovšem nepůsobil efekt dekoherence, který takovéto non-faktuální chování („protunelování“ kočky ze smrti do života) znemožňuje. (Srv. *UQM*, str. 240.)

<sup>47</sup> Omnès v této souvislosti uvádí analogický, ještě instruktivnější příklad: Představme si, si, že muž jménem Pepin žil v době Karla Velikého. V jedné ze stěn jeho domu byla velmi nebezpečná radioaktivní látka, přičemž mohly nastat pro zjednodušení jen dvě možnosti: 1) během Pepinova dětství došlo k radioaktivnímu rozpadu látky, což mělo za následek, že brzy zemřel a nezanechal potomstvo; 2) k rozpadu během Pepinova života nedošlo, což mu umožnilo, aby zplodil a vychoval děti; ke vzdálenějšímu Pepinovu potomstvu patří v rámci této alternativy Napoleon Bonaparte a profesor Babillard, kvantový fyzik. Když tento fyzik nyní studuje pozůstatky oné radioaktivní látky, popíše odpovídající procesy vlnovou funkcí, jež zahrnuje interference. Interference však poukazují na to, že se z oněch dávných dob zachovala i ta komponenta vlnové funkce, jež odpovídá Pepinově smrti v raném dětství. Profesor Babillard tudíž dospívá k závěru, že jelikož existuje nenulová pravděpodobnost, že Pepin zemřel bezdětný, existuje i nenulová pravděpodobnost, že nikdy neexistoval Napoleon, a rovněž nenulová pravděpodobnost, že on sám, Babillard také neexistuje. Omnès k tomu dodává, že pokud by Babillardova teorie byla správná, vylučovala by existenci faktů jako takových, tj. toho, co tvoří základ každé teorie včetně kvantové fyziky. (Srv. *QPh*, str. 197-198.)

<sup>48</sup> Srv. Roland Omnès, *The Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Series, Princeton, New Jersey 1994 (dále *IQM*), str. 222. Omnès v této souvislosti upozorňuje, že popsaná situace odpovídá nikoliv reálnému, nýbrž ideálnímu měření.

makroskopický objekt nelze popsat pouze jednou proměnnou  $x$ . Skládá se totiž z obrovského počtu částic v řádu  $10^{27}$  (což je miliarda ve 3. mocnině),<sup>49</sup> které musí být zahrnuty do popisu chování ručičky měřicího přístroje. Vlnové funkce je tudíž nutno korigovat do podoby  $\varphi_0(x, y)$ , resp.  $\varphi_v(x, y)$ , kde  $y$  reprezentuje vliv množství (neustále interagujících) částic, jež dosahuje termodynamické limity. V rámci konvence lze vliv vyjádřený zde proměnnou  $y$  označit jako vliv okolí, přičemž se má na mysli nejen obvyklé vnější okolí detektoru, nýbrž hlavně „vnitřní okolí“ tvořené mikroskopickými částicemi, z nichž se makroskopický objekt skládá.<sup>50</sup>

Jak konkrétně působí ono „vnitřní okolí“ v reálném detektoru, jímž je Geigerův počítač? Když elektricky nabitě částice vniknou do dielektrického média, jež je součástí počítače, ionizují atomy, které se nacházejí v dráze jejich pohybu, čímž vznikají volné elektrony. Tyto jsou urychlovány elektrickým polem, takže získávají dost energie, aby mohly ionizovat další atomy. V důsledku tohoto kumulativního procesu se vytváří tak velké množství elektronů, že v kondenzátoru (jenž je též součástí přístroje), může přeskočit jiskra; proudové impulsy jsou pak zaznamenávány počítačem. Kromě toho při rotaci ručičky kolem osy nutně působí síla tření, která v malém světě atomů vyvolává takové změny, jež dají srovnat se změnami vyvolávanými zemětřesením, pokud bychom chtěli použít naše makroskopické měřítko. Obecně je pak možné říci, že vliv „vnitřního okolí“ se převážně realizuje formou chaotického tepelného pohybu molekul, jenž se na makroskopické úrovni projevuje jako třecí síla tlumící mechanický pohyb. Z toho plyne, že vliv „vnitřního“ i vnějšího okolí na makroskopický objekt má povahu disipace.<sup>51</sup>

Disipativní efekty, jejichž prostřednictvím dochází k výměně energie mezi pohybem ručičky detektoru jako celku a neviditelným tepelným pohybem atomů, z nichž se ručička skládá, mají za následek, že vlnové funkce, jako jsou  $\varphi_0(x, y)$ , resp.  $\varphi_v(x, y)$ , jsou extrémně citlivé vůči pozici ručičky, tj. vůči hodnotě  $x$ ; z toho plyne, že se musí od sebe velice lišit. Znaménka u každé z nich se mění

<sup>49</sup> Omnès používá pro toto číslo zkratku BBB (z angl. billion x billion x billion).

<sup>50</sup> Podle Omnèse lze makroskopický objekt formálně traktovat jako skládající se ze dvou subsystémů. První z nich se popisuje tzv. kolektivními proměnnými  $Q$  (resp. kolektivními pozorovatelnými proměnnými), jež, zjednodušeně řečeno, charakterizují objekt jako celek (v našem případě jsou to souřadnice polohy ručičky detektoru). Druhý subsystém, konvenčně zvaný „okolí“, se popisuje mikroskopickými souřadnicemi  $q$  a zahrnuje jak vnitřní součásti systému (atomová jádra a elektrony), tak jeho vnější okolí (molekuly vzduchu kolem objektu nebo fotony okolního světla). Celková vlnová funkce pak má tvar  $\psi(Q, q)$ ; v námi rozebíraném případě se kvůli jednoduchosti přidržujeme obvyklého značení  $\psi(x, y)$ , které má ovšem stejný význam.

<sup>51</sup> Celkový hamiltonián makroskopického objektu je vyjádřen rovnicí  $H = H_c + H_e + H_1$ , kde  $H_c$  je součet kinetické a potenciální energie pro „kolektivní“ pohyb objektu jako celku, pozorovatelný v makroskopickém měřítku,  $H_e$  představuje vnitřní pohyb objektu (převážně tepelný) a  $H_1$  je spojující člen odpovídající výměně energie mezi předchozími dvěma druhy pohybu formou disipace. (Disipativní procesy můžeme jednoduše definovat s Prigoginem jako děje, při nichž dochází ke ztrátě energie.)

na mnoha místech i v případě, že jen jedna z pomezi  $10^{27}$  proměnných vyjadřující vliv okolí se nepatrně změní; pokud se mění víc proměnných v okolí, změna znamének nastává na daleko větším počtu míst. Fáze každé z nich se pod plným vlivem všech okolních proměnných stává prakticky úplně náhodnou. Představíme-li si, že každá z oněch funkcí se v interakcích s okolím musela vyvíjet jinou cestou, pak za daných okolností neexistuje žádná naděje, že by jejich znaménka a jejich fáze měly (při téže hodnotě  $y$ ) cokoliv společného. A jelikož již víme, že podmínkou koherence dvou vln je konstantní fázový rozdíl, můžeme vliv disipativních efektů označit jako dekoherenci.<sup>52</sup> A jestliže dále platí, že nutnou podmínkou pro to, aby se interference týkající se hodnot  $x$  mohla projevit makroskopicky, je koherence závislosti obou vlnových funkcí na hodnotě  $y$ , pak z toho plyne, že bludné nesourodé chování vlnových funkcí při jejich popisu okolí znemožňuje jakékoliv projevení kvantových interferencí na makroskopické úrovni.

Aplikace těchto závěrů na náš případ znamená, že po nesmírně krátké chvilce, kdy ručička detektoru začne chvát, jakoby váhala, zda se má z interferenčního mezistavu popsaného rovnicí  $\psi_d = (1/\sqrt{2}) [\varphi_0(x) + \varphi_v(x)]$  pohnout buď směrem k nulové hodnotě napětí (což uchová kočku při životě) nebo směrem k dílku odpovídajícímu napětí o hodnotě  $V$  (což povede ke smrti kočky) se obě vlnové funkce vzájemně natolik odliší, že již nikdy nebude možné, aby obnovily svoji původní sladěnost plynoucí ze součtu  $\varphi_0(x) + \varphi_v(x)$ .<sup>53</sup> Omnès v této souvislosti říká, že sčítat vlnové funkce již zbavené koherence je totéž, co sčítat mořské vlny s bubláním velryby – tyto děje neinterferují, vzájemně se ignorují, probíhají každý zvlášť. Jinými slovy, jestliže je kočka mrtvá, její vlnová funkce nikdy znovu nezíská jemné fázové ladění vlnové funkce živé kočky. Z toho plyne, že vyjma zmíněného nesmírně krátkého okamžiku, v němž proběhne dekoherence, je Schrödingerova kočka vždy buď živá nebo mrtvá; toto tvrzení (jež představuje maximum toho, co může říci zásadně probabilistická teorie) je v dokonalé shodě s naším předvědeckým rozuměním. Neexistuje zde žádná záhada – dekoherence navždy skoncovala s legendou Schrödingerovy mytické kočky.

K postižení dalších důležitých aspektů dekoherence je potřebné, abychom si uvědomili, že disipativní efekty, které jsou jejím zdrojem, obecně způsobují zpomalení nebo tlumení pohybu (například u kyvadla), jež je charakterizováno útlumovým koeficientem, resp. útlumovým časem. Dekoherence má také svůj útlumový koeficient, ten je však daleko větší než útlumový koeficient stanovený obecnou teorií tlumeného kmitavého pohybu: poměr velikostí je  $\hbar^{-2}$ , což znamená, že útlumový koeficient dekoherence je  $10^{54}$ -krát větší; její útlumový čas je pak  $10^{54}$ -krát menší než útlumový čas nezbytný k tomu, aby síla tření zastavila pohyb kyvadla. Použijeme-li k popisu účinků dekoherence na výše zmiňovaný detektor radioaktivních částic hustotu pravděpodobnosti  $\rho =$

<sup>52</sup> Srv. *QPh*, str. 201.

<sup>53</sup> Srv. *ibid.*, str. 201-202.

$|\psi|^2$ , dostaneme pro *zjednodušené* vyjádření časového vývoje této veličiny rovnici  $\rho(t + \Delta t) = 1/2 (\varphi_0^2 + \varphi_V^2) + \varphi_0\varphi_V \exp(-RkTC^2V^2\Delta t/\hbar^2)$ ,<sup>54</sup> z níž je patrné, že po velmi krátkém čase se exponenciální výraz, jímž se násobí interferenční člen  $\varphi_0\varphi_V$ , natolik přibližuje nule, že interferenci na makroskopické úrovni můžeme zcela zanedbat. To jednoznačně implikuje, že dekoherence je opravdu strašlivě účinný a rychlý efekt – začíná okamžitě „rozežírat“ kvantové interference, aniž jim dá vůbec čas k tomu, aby se rozvinuly.

Jak již bylo dříve naznačeno, hustota pravděpodobnosti (resp. stavový operátor)  $\rho$  se vyznačuje tím, že zahrnuje každý myslitelný bit informace o systému, o detailních fázových variacích vlnových funkcí atd.; popisuje jak kolektivní systém, tak i vnitřní a vnější okolí a označuje se proto také termínem „plný operátor hustoty“. Jelikož však máme přístup pouze ke kolektivním pozorovatelným proměnným, všechny dostupné informace jsou obsaženy v kolektivním (neboli redukovaném) stavovém operátoru  $\rho_c$ , v němž je okolí ignorováno. Redukovaný stavový operátor je dán vztahem  $\rho_c = \text{Tr}_e \rho$  jakožto částečná (parciální) stopa plného stavového operátoru přes všechny stupně volnosti, jež náležejí okolí. (Účelem provádění stopové operace přes okolí je soustředit se pouze na kolektivní, resp. klasické vlastnosti při současné eliminaci detailní paměti okolí.)<sup>55</sup> „Ignorování“ okolí, o němž mluví Omnès, tudíž znamená pouze tolik, že dekoherenční vlivy okolí se vyjádří kolektivně pozorovatelnými veličinami (jako jsou výše zmíněné veličiny,  $C$ ,  $V$ ,  $R$ ,  $T$  nebo tlak v případě plynného okolí apod.), resp. změřenými mikroskopickými veličinami; v souladu s tím operátory  $\rho_c$  a  $\rho$  dávají stejnou pravděpodobnost pro kteroukoliv kolektivní pozorovatelnou veličinou.

Obecně platí, že redukovaný stavový operátor  $\rho_c$  má v maticovém vyjádření diagonální část  $\rho_{cd} = |a|^2 |\varphi_1\rangle\langle\varphi_1| + |b|^2 |\varphi_2\rangle\langle\varphi_2|$  a část nediagonální  $\rho_{cnd} = a^*b |\varphi_1\rangle\langle\varphi_2| + ab^* |\varphi_2\rangle\langle\varphi_1|$ ; uvažujeme pro jednoduchost superpozici pouze 2 vlnových funkcí. Pod vlivem útlumového koeficientu dekoherence, jehož obecný tvar je  $\mu = \gamma MkT/\hbar^2$  (kde  $M$  je koeficient setrvačnosti a  $\gamma$  disipační koeficient, nacházející uplatnění v tlumení pohybu na základě tření) dochází k tomu, že nediagonální elementy redukovaného operátoru hustoty opravdu „strašlivě“ rychle vymizí.<sup>56</sup> Na základě toho je možné říci, že hlavním projevem dekoherence je (skoro úplná) spontánní diagonalizace redukovaného operátoru hustoty (na určité bázi proměnných), přičemž tato diagonalizace je vedlejším produktem disipace.<sup>57</sup>

<sup>54</sup> Přesný tvar této rovnice je  $\rho_c(t + \Delta t) = 1/2 (|0\rangle\langle 0| + |V\rangle\langle V|) + 1/2 (|0\rangle\langle V| + |V\rangle\langle 0|) \exp(-RkTC^2V^2\Delta t/\hbar^2)$ , kde  $R$ ,  $C$  a  $V$  značí elektrický odpor, kapacitu a napětí,  $k$  Boltzmannovu konstantu a  $T$  formální teplotu odpovídající hodnotě vnitřní energie.

<sup>55</sup> Srv. *UQM*, str. 184, 198.

<sup>56</sup> Výraz  $RkTC^2V^2/\hbar^2$  pro dekoherenční efekty v detektoru je zvláštním případem útlumového koeficientu  $\mu$ ; snadno shledáme, že také vede ke diagonalizaci stavového operátoru detektoru.

<sup>57</sup> Srv. *IQM*, str. 276-7.

Pokud se tedy v daném systému neuplatňuje disipace, nepůsobí tam ani dekoherence.<sup>58</sup> Takovéto systémy existují. Jedná se například o supravodivá kvantově interferenční zařízení (známá pod anglickou zkratkou SQUID), jež jsou sice makroskopickými objekty (velikosti vlásenky), avšak vykazují typicky kvantové chování (tunelový efekt). Nicméně tento typ zařízení je laboratorní kuriozitou, a tudíž existuje jen velmi malá šance, že by se vyskytlo v přírodě. Také obyčejné světlo (jež v případě, že zahrnuje velké množství fotonů) je makroskopickým systémem svého druhu. Fotony však interagují v tak malé míře, že prakticky mezi nimi nedochází k žádným interakcím. Proto také se u nich nevyskytuje disipace, a tedy ani dekoherence. Jejich makroskopickou interferenci (v podobě interferenčních proužků) lze pozorovat volným okem, pokud si mezi ukazováčkem a prostředníkem vytvoříme malou šterbinu a podíváme se přes ni ke zdroji světla.

Mohlo by se ovšem zdát, že dekoherenční efekt je relevantní pouze z praktického hlediska, „pro všechny praktické účely“, zatímco z principiálního hlediska se poukazováním na něj nic neřeší; právě v tomto duchu formuloval svoji kritiku teorie dekoherence John Bell. Jeho argument spočívá v tom, že pokud se začíná s čistým stavem, tento čistý stav se zachová, dokud se rozvíjí podle Schrödingerovy rovnice. Z toho plyne, že i když dojde k diagonalizaci redukovaného operátoru hustoty popisujícího kolektivní pozorovatelné hodnoty, není to podstatné: plný operátor hustoty stále reprezentuje nějaký čistý stav, a proto zahrnuje možnost projevení interference. Podle Bella je sice pravda, že při měření kolektivních pozorovatelných veličin nemůžeme zaregistrovat interferenci, ale přesto vždy existují subtilnější veličiny, u nichž by to bylo možné. Měřením těchto veličin, o němž se předpokládá, že je vždy v principu možné, budeme pak podle něj s to prokázat existenci přetrvávající kvantové superpozice v makroskopicky odlišených stavech.<sup>59</sup>

V souvislosti s touto námitkou Omnès přiznává, že dekoherenční efekt je v mnoha případech tak rychlý, že není možné jej zachytit přímo v jeho působení a lze vidět pouze jeho výsledek, jímž je diagonální redukovaný operátor hustoty; takový operátor hustoty je smíšeným stavem, v němž všechny pozůstatky kvantových interferenčních efektů (mezi makroskopicky odlišnými stavy) vymizely.<sup>60</sup> Teorie dekoherence tedy implikuje, že žádné z měření, která

<sup>58</sup> Tvrzení „bez disipace není dekoherence“ platí navzdory tomu, že „úskočné“ trvání dekoherenčního efektu je mnohem kratší než doba, která je nezbytná pro disipativní tlumení. (*UQM*, str. 77.)

<sup>59</sup> V aplikaci na příklad profesora Babillarda by to znamenalo, že hypotetická mimozemská civilizace používající velmi dokonalá měřící přístroje by byla s to změřit vlnovou funkci celé sluneční soustavy a vždy v ní najít nějakou doposud přetrvávající komponentu odpovědnou za to že jeho a Napoleonův předek v době Karla Martella zahynul bezdětný; důsledky již známe – Babillard by byl zároveň živý a mrtvý, historické publikace by byly zároveň správné i nesprávné, což se rovná tvrzení, že fakty nejsou fakty a že pravda je prázdná představa.

<sup>60</sup> Je to právě ten druh operátoru hustoty, který umožňuje, aby kolektivní vlastnosti byly popsány počtem pravděpodobnosti právě tak jako mnohé distinktní události. (*IQM*, str. 485.)

můžeme provést, nikdy neukáže kvantovou interferenci; takováto pozice, v níž žádný experiment nemůže falzifikovat teorii, je ovšem dost nepohodlná.<sup>61</sup>

Zároveň však Omnès poukazuje na to, že Bellova námitka se zakládá na von Neumanově pojetí „čisté“ kvantové mechaniky, jež je poněkud formálním rámcem, podstatně odtrženým od zbytku fyziky; dle tohoto pojetí jsou všechny druhy hamiltoniánů a měření možné, alespoň „v principu“. K odlišným výsledkům ovšem dospějeme, když vezmeme v úvahu ostatní fyzikální zákony včetně faktu, že hmota se skládá z omezeného počtu typů částic a že jejich hamiltonián se vždy odvozuje pouze ze čtyř základních typů interakcí (gravitační, elektromagnetická, silná a slabá), jakož i platnost speciální a obecné teorie relativity. Tehdy se ukáže, že reálné měření přetrvávající makroskopické kvantové interference odpovídající Bellovým požadavkům je z fyzikálního hlediska nemožné.

Pokud bychom totiž chtěli potvrdit, že v měřicím přístroji  $M$  (např. ve výše zmíněném Geigerově počítací) přetrvává interference i poté, co došlo k diagonalizaci jeho redukovaného operátoru hustoty, museli bychom provést měření nějaké non-kolektivní pozorovatelné proměnné  $A$  náležející  $M$ , a na jeho základě zjistit, že plný operátor hustoty pro  $M$  nadále vyjadřuje superpozici; měření veličiny  $A$  by se muselo uskutečnit pomocí jiného měřicího přístroje  $M'$ , a sice v mnohonásobném opakování za přesně stejných podmínek. Měření prostřednictvím  $M'$  by ovšem bylo užitečné jen tehdy, když pravděpodobnost  $p$  získání signifikantního výsledku měření veličiny  $A$  bude větší než pravděpodobnost  $\epsilon$ , že nějaká velká kvantová fluktuace v  $M'$  bude produkovat stejný finální jev, jaký lze získat pozitivním měřením. To je však možné jen když celkové počty (mikroskopických a spojitých) stupňů volnosti  $N$  a  $N'$  přístrojů  $M$  a  $M'$  budou vyhovovat podmínce  $N' > \exp(N^{2/3})$ , z níž při velikosti  $N$  řádově rovné  $10^{27}$  (což je typická kočka...) pro  $N'$  plyne, že by se řádově mělo rovnat číslu 10 umocněnému na  $10^{18}$ . Jestliže si uvědomíme, že celkový počet protonů v pozorovaném vesmíru nepřesahuje počet  $10^{81}$ , snadno dospějeme k závěru, že takovéto měření je nemožné. Kromě toho by existence tak strašlivě mohutného měřicího zařízení byla neslučitelná s obecnou teorií relativity – okamžitě by totiž gravitačně zkolabovalo do černé díry.<sup>62</sup>

<sup>61</sup> *IQM*, str. 305. Přesto však velmi dobré experimentální potvrzení teorie dekoherence existuje – je například prokázáno, že okamžiková disipace drasticky redukuje tunelový efekt u těch makroskopických objektů, kde je jinak běžný atd. (Podrobněji viz *IQM*, str. 433-466.)

<sup>62</sup> Zajímavý pohled na tuto problematiku lze získat použitím pojetí algoritmické komplexnosti; algoritmická komplexnost  $I(q)$  binárního řetězce  $q$  je délka (v bitech) nejkratšího programu, jenž po vložení do univerzálního počítače způsobí, že počítač vypočte  $q$  a pak zastaví svoji činnost. Předpokládejme, že bychom chtěli vypočítat vlnovou funkci  $\psi$  čtecího zařízení napojeného na Stern-Gerlachův detektor v určitém čase  $t$  po měření; prostorovou vlnovou funkci vstupujícího atomu označme jako  $\phi$ . Dále se předpokládá, že příslušný hamiltonián je známý a že při použití vhodného zjednodušujícího modelu část programu, která obsahuje nezbytné informace o hamiltoniánu, je poměrně krátká. Jestliže počáteční vlnová funkce  $\psi(0)$  má malou algoritmickou komplexnost, pak se lze domnívat, že i požadovaná  $\psi(t)$  bude mít malou algoritmickou komplexnost. Omnès však uvádí poznatek

Omnèsovy závěry jsou jednoznačné: Dekoherenci nelze nijak obejít či obelstít, pokud se odehrává v dostatečně velkém objektu.<sup>63</sup> Nemožnost obelstít dekoherenci není pouze praktickou záležitostí – principy, které to zakazují, nepatří ovšem do kvantové mechaniky, nýbrž do teorie relativity, pokud se nezmiňujeme o konečnosti vesmíru; to implikuje, že některé pozorovatelné proměnné nelze měřit, a to dokonce principiálně. Teorie dekoherence je tedy fundamentální, a nikoliv pouze praktickou odpovědí na otázku existence makroskopických interferencí.<sup>64</sup>

#### 4. Kvantová teorie nevratných procesů

Na základě těchto závěrů můžeme nyní přistoupit k zásadnímu řešení problému kvantově-mechanické fundace nevratnosti času, o jehož vyřešení se tak dlouhou dobu neúspěšně pokoušel Ilya Prigogine.

Problém zde tkví v tom, že když se při vysvětlování makroskopických nevratných dějů (řídících se II. větou termodynamickou) aplikuje redukcionistický přístup, v souladu s nímž se má každý jev vysvětlit na fundamentální úrovni pohybu mikroskopických objektů (elementárních částic, atomů, molekul), dospěje se k rozporným výsledkům, jež se týkají směru plynutí času. Zatímco II. věta termodynamická není, jak víme, invariantní vůči inverzi času ( $t \rightarrow -t$ ), rovnice popisující pohyb mikročástic naopak onu invarianci vůči inverzi směru plynutí času vykazují, ať již jde o popis v rámci Newtonovy, relativistické či kvantové mechaniky. Jedním z důsledků neexistence nevratnosti na mikroskopické úrovni (či spíše její absence v dosavadních teoriích, jež ji popisují) je i to, že na mikroskopické úrovni neexistuje rovnovážný stav: fyzikální zákony, které jsou vůči směru plynutí času symetrické, nepředpovídají nějaký speciální stav (ukončení vývoje), kdy je

Carltona Cavese, že vzhledem k malým rozdílům mezi vlastními energiemi je počítání extrémně citlivé na jakkoli malou chybu ve výchozích datech; to znamená, že počítání je v zásadě deterministicky-chaotický proces. Počáteční data musí proto být kontrolována použitím většího množství informace (v řádu  $J$ ), pokud má být výstup spolehlivý. To implikuje, že informace, obsažená v poznání vlnové funkce  $\phi$  atomu z našeho příkladu musí být také v řádu  $J$ . Dále platí věta, v souladu s níž průměrná algoritmická komplexnost řetězce získaného náhodným procesem se rovná informaci, získané jeho poznáním, až po nějakou aditivní konečnou konstantu. Z aplikace této věty na náš příklad vyplývá, že počáteční vlnová funkce  $\phi$  musí být generována přípravným zařízením, které má algoritmickou komplexnost alespoň v řádu  $J$ . Problém, který jsme měli s dostatečně přesným vypočtením  $\psi(t)$ , se tím přenáší zpět na problém analogických, avšak řádově komplikovanějších výpočtů týkajících se přípravného zařízení. Nic se vlastně nezískalo. (Srv. *IQM*, str. 314-315.)

<sup>63</sup> *IQM*, str. 487. Omnèsův postup při odvozování výše uvedené nerovnosti zde nebudeme sledovat; na ukázkou stačí uvést rovnici pro pravděpodobnost  $p$ , že veličina  $A$  bude ve stavu superpozice [ $p = K \exp(-CN^r)$ ,  $K$ ,  $C$ ,  $r$  jsou konst.] a pro pravděpodobnost fluktuace  $\varepsilon$  [ $\varepsilon = CN'^{-sq}$ ,  $s$ ,  $q$  jsou konstanty]. (Srv. *IQM*, str. 306-309.)

<sup>64</sup> Srv. *IQM*, str. 309.

veškerý potenciál pro změny vyčerpán – všechny okamžiky vývoje systému jsou totiž rovnocenné. Existuje tedy rozpor mezi vratností pohybu na mikroskopické úrovni a nevratností termodynamických dějů probíhajících na úrovni makroskopické (fenomenální); jde o rozpor mezi fundamentálními a fenomenologickými zákony, který se často označuje jako paradox nevratnosti.

Reakce na rozpor tohoto druhu je ve fyzice obvykle jednoznačná – pokud se dává přednost tomu, co je v redukcionistickém duchu považováno za popis fundamentální úrovně (a tedy za „pravdu“), pak je nutné prohlásit fenomenologický zákon (v tomto případě II. větu termodynamickou)<sup>65</sup> za pouhé „zdání“ způsobené nedokonalostí lidských smyslů; jinými slovy, entropie se připisuje vlastnostem poznávacího subjektu čili dochází k její subjektivizaci. Právě tento postup vyjádřil Max Born výrokem, v němž traktuje nevratnost jako „důsledek zavedení neznalosti do základních zákonů fyziky“. Jak ničivý dopad má tento doposud poměrně rozšířený postoj na prigoginovskou nerovnovážní termodynamiku, která ve své lineární verzi (jež je s to vysvětlit převážnou většinu procesů v živém organismu) má za základ právě pojem entropie, je nasnadě – redukuje se na pouhé zdání, a s ní i veškerá teorie disipativních procesů a samoorganizace. Řešením tohoto nesmírně závažného problému je nalézt propojení kvantové mechaniky s druhým zákonem termodynamiky *ab initio*.

Omněs přistupuje k problému tím způsobem, že tematizuje nejdřív nevratnost času v termodynamice – směr času se v ní dá definovat přechodem od stavu, který lze připravit, ke stavu, který připravit nelze (jde o formulaci podobnou tradičnímu pojetí, v souladu s nímž je směr času dán přechodem od uspořádanějšího stavu ke stavu méně uspořádanému). Uspořádané stavy je totiž možné snadno vytvářet (například tím, že pístem přesuneme molekuly rozptýlené v celé nádobě do jedné její části), vyskytují se ve skutečnosti a můžeme je bez obtíží teoreticky uchopit. Neuspořádané stavy jsou naopak ztraceny mezi velkým množstvím stavů sobě podobných, není možné je precizně analyzovat a navíc neexistuje metoda, jak je vytvořit – kromě spontánního vývoje uspořádaného stavu, což je ovšem případ, kdy není k dispozici žádný způsob, jak ony stavy přesně reprodukovat.<sup>66</sup> Traktování pojmů

---

<sup>65</sup> Ve své obecné podobě II. věta termodynamická stanovuje, že všechny samovolné (spontánní) děje jsou spojeny se vzrůstem entropie (tj. míry neuspořádanosti) celku složeného ze soustavy a jejího okolí.

<sup>66</sup> Ve statistické termodynamice existují dva argumenty proti vratnosti času. První z nich, empirický, konstatuje nemožnost připravit v praxi stav, v němž by byly polohy a rychlosti všech molekul plynu přesně nastaveny tak, aby se tyto molekuly skrze triliony vzájemných interakcí dostaly všechny do jedné části nádoby. Druhý, více teoretický argument, se odvíjí z tvrzení, že není možné nastavit rychlosti a polohy molekul s nekonečnou přesností, nýbrž jen v mezích nějaké chyby. Je proto nutné uvažovat jen nějakou celou rodinu počátečních stavů, a nikoliv pouze jeden jediný. Tuto situaci lze popsat pouze v rámci počtu pravděpodobnosti, s jehož pomocí můžeme predikovat toliko průměrné hodnoty. Obrácení směru času realizované v čase  $t$  povede k obnovení uspořádaného stavu v čase 0 jen pro naprosto zanedbatelnou množinu poloh a hybností, což znamená, že toto obnovení má nulovou pravděpodobnost. Jde

„uspořádanost“ a „neuspořádanost“ z hlediska připravenosti resp. nepřipravenosti odpovídajících stavů umožňuje definovat jejich význam v rámci kvantové mechaniky.

Tento přístup lze nejlépe uplatnit při zkoumání zániku kvantové superpozice, kde dekoherenční efekt ukazuje mnohem jasněji, co se děje, než samotný efekt disipace. Můžeme začít od plného operátoru hustoty  $\rho(0)$ ; ve skutečnosti se přesně neví, co to přesně je – až na to, že jeho stopa přes mikroskopické stupně volnosti je daný redukovaný operátor hustoty  $\rho_r(0)$ . Může se stát, že známe ještě několik věcí, např. průměrnou energii vnitřního okolí. Tato neznalost nevadí, protože jakýkoliv počáteční stav  $\rho(0)$  bude skrze dynamický vývoj generovat jiný stav  $\rho(t)$ , a to takový, že při jakémkoli  $\rho(0)$  bude mít redukovaný operátor hustoty  $\rho_r(t)$  tutéž hodnotu. Pokud naproti tomu budeme aplikovat operaci obrácení času na  $\rho_r(t)$  a nazveme ji  $\rho'_r(0)$ , pak mezi všemi operátory, které mají  $\rho'_r(0)$  jakožto svoji částečnou stopu, bude existovat pouze jeden jediný operátor  $\rho'(0)$ , který by v dynamickém vývoji měl vygenerovat časově obrácený operátor redukovaného počátečního stavu  $\rho_r(0)$ . V tom právě tkví kvantově-mechanický význam tvrzení, že neuspořádané stavy jsou „ztraceny“ mezi velkým množstvím sobě podobných.

Kdybychom se stav  $\rho(t)$ , jehož vývojem bychom se zpětně dostali do počátečního stavu  $\rho(0)$ , pokusili připravit uměle (šlo by o přípravu takové mrtvé kočky, v níž by byly rychlosti atomů nastaveny obráceně, tj. tak, aby kočka spontánně obživila), mohlo by se nám podařit jenom tehdy, kdyby „kočka“ sestávala ze dvou nebo tří atomů; tehdy by směr času nehrál žádnou roli. Jinak tomu bude u reálné kočky, resp. u systému, sestávajícího z počtu částic řádově rovnému  $N$ . Když pro jednoduchost uvažujeme, že na počátku máme čistý stav, což znamená, že čistým stavem se vyznačuje také  $\rho(t)$ , pak z teorie dekoherence plyne, že vlnová funkce je v tomto čase velmi subtilní a precizní – fáze jejích amplitud pravděpodobnosti na bázi vlastních stavů energie pro okolí jsou extrémně citlivé i na tu nejmenší modifikaci. Přesné nastavení vlnové funkce je úkolem, který řádově o mnoho stupňů přesahuje obtížnost sestavení měřícího přístroje registrujícího přetrvávající interference. Onen olbřímí měřící přístroj sestávající z 10 umocněno na  $10^{18}$  částic byl pouze něčím jako prachovým zrníčkem ve srovnání s nepředstavitelně velkým zařízením, které bychom potřebovali, abychom dosáhli zrušení nevratnosti v případě makroskopických objektů, jež nás obklopují v běžném životě. Umělá konstrukce takového hyperzařízení, jakož i jeho velice nepravděpodobný spontánní vznik jsou – stejně jako v případě předtím uvažovaného měřícího zařízení – principiálně zakázány zákony teorie relativity.

Jinými slovy, v souvislosti se „ztraceností“ neuspořádaných stavů mezi sobě podobnými se ve prospěch nevratnosti vyslovuje probabilistický argument: dosáhnout počátečního stavu tím, že by v čase  $t$  došlo k obrácení rychlostí, je nanejvýš nepravděpodobné, neboť mezi všemi možnými

tady o aplikaci přístupu tzv. hrubozrného dělení, v souladu s nímž se fyzika zabývá pouze konečnými oblastmi fázového prostoru, a nikoliv jednotlivými body. (Srv. *IQM*, str. 315-316.)

distribucemi rychlostí mají ty distribuce, které navrací systém do počátečního stavu, zcela zanedbatelnou váhu. To lze vyjádřit i tak, že máme-li kontrolu pouze nad některými kolektivními parametry, pravděpodobnost vytvoření žádoucího časově či rychlostně obráceného stavu je zanedbatelná. Co se týče charakteru velmi malých nebo zanedbatelných pravděpodobností, akceptuje Omnès stanovisko matematika Émila Borela, jednoho ze zakladatelů moderní teorie pravděpodobnosti (podle Omnèse je totiž čistá teorie pravděpodobnosti fundamentálnější ve vztahu ke kvantové fyzice, která počet pravděpodobností aplikuje). Borelovo stanovisko, vyslovené v podobě axiomu, hlásá, že události s příliš malou pravděpodobností se nikdy nevyskytují, přičemž jeho argumentační báze je následující: 1) takovéto události jsou nereprodukovatelné, 2) nemají žádný statistický smysl a 3) nemohou patřit do experimentální vědy.<sup>67</sup> V návaznosti na toto třetí Borelovo zdůvodňující tvrzení Omnès formuluje semiempirickou definici „příliš malé“ pravděpodobnosti pro kvantovou vlastnost: vyznačuje se tím, že není měřitelná žádným měřicím zařízením, jehož hmotnost je menší než je hmotnost současného vesmíru.<sup>68</sup> V makroskopických objektech se tudíž procesy, které by byly v rozporu s druhou větou termodynamickou, jednoduše nikdy nevyskytují.

Kromě tohoto jednoduchého konceptuálního vysvětlení spojitosti mezi dekoherencí, disipací a nevratností času podává Omnès i exaktní kvantovou teorii nevratných procesů. Jde o rozvinutou podobu tzv. projektorové metody, jejíž základy položili v souvislosti s problémy viskozity, difuze a tepelné vodivosti plynů Nakajima (1958), Zwanzig (1960, 1964) a Haake (1973) a její aplikaci na dekoherenční efekt. Nebudeme zde ovšem reprodukovat celý Omnèsův postup, nýbrž nastíníme pouze hlavní ideje a předpoklady této teorie.

U uvažovaného makroskopického systému, jenž se řídí Schrödingerovou-von Neumanovou rovnicí  $dp/dt = (1/i\hbar)[H, \rho]$ , kde  $\rho$  představuje plný stavový operátor a  $H$  hamiltonián, se provede výběr relevantních pozorovatelných proměnných  $A^i$ , u nichž se zkoumá časový vývoj; jejich průměrné hodnoty jsou vyjádřeny vztahem  $a^i(t) = \text{Tr}(A^i(t) \rho)$ . Relevantním veličinám odpovídá „relevantní“ stavový operátor  $\rho_0 = \exp(-\sum \lambda_i A^i)$ , v němž časově závislé Lagrangeovy parametry  $\lambda_i$  jsou vybrány tak, aby relevantní stav poskytoval tytéž průměrné hodnoty jako opravdový stav. Výraz pro  $\rho_0$  vyhovuje požadavku, aby jeho informační obsah [určený vztahem  $\text{Tr}(\rho_0 \ln \rho_0)$ ] byl minimální; to odpovídá skutečnosti, že známe pouze průměrné relevantní hodnoty. Je zaveden také operátor identity  $I$ , jehož prostřednictvím je vyjádřena normalizační podmínka  $\langle I \rangle = \text{Tr} \rho_0 = 1$ . Dále se zavádí Liouvillův operátor (u Omnèse charakterizovaný jako superoperátor), s jehož použitím přechází Schrödingerova-von Neumanova rovnice do tvaru  $d\rho/dt = L\rho$ .

Vlastní projekční metoda spočívá v tom, že se zavádějí „pomocné“ hustoty  $s_i$ , definované vztahy  $s_i = \partial \rho_0 / \partial a^i$ ; v této souvislosti se zavádí

<sup>67</sup> UQM, str. 236.

<sup>68</sup> UQM, str. 242.

superoperátor  $P$ , který působí na operátor stopové třídy (např. na  $\rho$ ) tak, že dává  $P\rho = \text{Tr}(A^i\rho)s_i$ . Jelikož platí, že  $P^2u = Pu$ , je operátor  $P$  projektorem. Jestliže uvažujeme vztah  $Q = I - P$  (kde  $I$  je operátor identity), pak také pro  $Q$  platí, že je projektorem.<sup>69</sup> V rámci této symboliky dále platí vztah  $\rho = \rho_0 + \rho_1$ , přičemž  $\rho_0 = P\rho$  a  $\rho_1 = Q\rho$ .

Když dosadíme tyto vztahy do Schrödingerovy-von Neumanovy rovnice, dostaneme soustavu dvou vývojových rovnic, v nichž jsou derivace stavových operátorů  $d\rho_0/dt$ , resp.  $d\rho_1/dt$  vyjádřeny pomocí superoperátorů  $P$ ,  $L$ ,  $Q$  a  $dP/dt$  působících na  $\rho_0$  a  $\rho_1$ . Řešením druhé z těchto rovnic dostáváme vyjádření  $\rho_1$  prostřednictvím  $\rho_0$ ; za předpokladu, že v čase  $t$  rovném nule platí  $\rho_1 = 0$ , má toto řešení podobu

$$\rho_1(t) = \int_0^t dt' W(t, t') \sigma(t'),$$

kde  $\sigma = -dP/dt \rho_0 + QLP\rho_0$  a  $W(t, t') = \exp[QLQ(t - t')]$ ;  $W(t, t')$  představuje tzv. „paměťový kořen“. Rovnice pro  $\rho_1(t)$  zavádí určitý směr času, což však ještě neznamená porušení časové symetrie kvantové dynamiky při časové inverzi – tutéž rovnici dostaneme totiž i při opačném směru času. Jak říká Omnès, existence privilegovaného termodynamického směru času se objevuje až v dalším stadiu, jímž je stadium interpretace.<sup>70</sup> Dovršení formální výstavby projektorové metody pak spočívá v tom, že formuli pro  $\rho_1(t)$  dosadíme do první z vývojových rovnic; tím dostáváme „hlavní rovnici“ (*master equation*) pro evoluci  $\rho_0$ , v níž se už výraz  $\rho_1$  neobjevuje a časová derivace  $d\rho_0(t)/dt$  je popsána pomocí působení superoperátorů  $P$ ,  $L$ ,  $Q$  na operátor  $\rho_0$ .

Tato ryze formální rovnice se pak aplikuje na dekoherenční efekt, přičemž jako východisko slouží nám již známý vztah  $H = H_c + H_e + H_1$ , který má

<sup>69</sup> Projektor  $Q = I - P$  vytváří projekci v subprostoru, který je ortogonální vůči subprostoru sdruženému s operátorem  $P$ .

<sup>70</sup> *UQM*, str. 212. Jak uvádí Omnès, interpretovat (z latinského *interpretare*) znamená „učinit jasným, co je v textu nesrozumitelné či skryté (*obscure*)“, a doznává, principy kvantové mechaniky mají ve své matematické formulaci některé rysy nesrozumitelného textu. Proto v Omnèsově pojetí sestává struktura kvantové mechaniky ze dvou částí, které jsou v úzké souvztažnosti, leč přesto hluboce odlišné: první se týká dynamiky, druhá souvisí s logikou. Tato logická struktura, třebaže veskrze pod kontrolou striktně matematických metod, se může uplatnit při precizaci výstavby jazyka fyziky jako celku včetně všech tvrzení vyjadřujících její praktizování a její koncepce. Omnès si bere za vzor Descarta a zdůrazňuje, že při precizaci jazyka fyziky je nutno vyjít od jednoho základního pravidla a postupovat dále ryze deduktivním způsobem. (Srv. *IQM*, str. 506; jelikož k podrobnějšímu podání těchto Omnèsových myšlenek je nezbytné seznámit se se základy jeho kvantové logiky, budeme se jimi zabývat níže.) Kromě interpretace kvantové mechaniky je podle Omnèse navíc nutné, abychom jí porozuměli; „rozumět“ (z latinského *comprehendere*) zde plně odpovídá své etymologii – znamená to „chápat něco dohromady jako celek“. Roumějící přístup v tomto smyslu je nezbytný z toho důvodu, že kvantová mechanika zahrnuje disjunktivní součásti (determinismus versus probabilismus atd.), které je nutno uchopit v jejich jednotě.

v nezjednodušené podobě tvar  $H = H_c \otimes I_e + I_c \otimes H_e + H_1$ .<sup>71</sup> Dalším důležitým krokem v této aplikaci je určení stavového operátoru rovností  $\rho_0 = \rho_c \otimes \rho_e$ , tj. jakožto tenzorového součinu redukovaného operátoru hustoty pro kolektivní subsystém (jak víme,  $\rho_c = \text{Tr } \rho$ ) a normalizovaného operátoru pro okolí, jež je traktované, jakoby se nacházelo ve stavu tepelné rovnováhy; operátor okolí je za této podmínky určen výrazem  $\rho_e = \exp(-\alpha - \beta H_e)$ . Omnès přitom zdůrazňuje, že okolí nemusí být ve skutečnosti v tepelné rovnováze a že tedy uvedený výraz pro  $\rho_e$  znamená pouze tolik, že k získání kolektivních veličin potřebujeme jen průměrnou energii okolí  $E$  (již obdržíme vhodnou volbou parametrů  $\alpha$ ,  $\beta$ ). Vztahy pro  $\rho_c$  a  $\rho_e$  pak umožní nalézt konkrétní tvary pro „pomocné“ hustoty  $s_i$ , a konkretizovat tudíž i operátor  $P$  (tj. vyjádřit jej pomocí  $E$ ,  $H_e$  a  $\rho_e$ ).

Pak přichází „důležitý trik“ spočívající v zavedení kolektivního operátoru  $\Delta H_c = \text{Tr}_e(H_1 \cdot I_c \otimes \rho_e)$ , jenž popisuje kolektivní účinek okolí (např. účinek tlaku v případě plynného okolí). Zbývající část sdružujícího operátoru  $H_1$  (určená vztahem  $H_1' = H_1 - \Delta H_c \otimes I_e$ ) bude odpovídat malým fluktuacím, jež je možné vyjádřit jako perturbace hamiltoniánu  $H_0 = (H_c + \Delta H_c) \otimes I_e + I_c \otimes H_e$ .<sup>72</sup>

<sup>71</sup> Úplný Hilbertův prostor  $H$  odpovídající v tomto případě Schrödingerově rovnici je představován tenzorovým součinem  $H = H_c \otimes H_e$ , kde  $H_c$  je Hilbertův prostor, v němž působí kolektivní proměnné a  $H_e$  je Hilbertův prostor pro okolí. (Aplikace tenzorového součinu zde znamená, že úplná vlnová funkce závisí jak na kolektivních proměnných, tak na proměnných okolí.) K tomu, abychom v úplném Hilbertově prostoru vyjádřili interakci kolektivního subsystému se subsystémem okolí, je nutné zavést tenzorové součiny hamiltoniánů  $H_c$  a  $H_e$  s operátory identity  $I_e$ , resp.  $I_c$ .

<sup>72</sup> Pojem perturbace si nejlépe přiblížíme tak, že si představíme staromódní mechanické hodiny; z hlediska atomů, z nichž se hodiny skládají, je perturbací pohyb hodinových ručiček a dalších součástí stroje. Z teorie dekoherence plyne, že mezi pohybem koleček a kvantovým stavem jejich atomů musí nastat spárování (*coupling*); dochází mezi nimi tudíž k výměně energie, což rezultuje v tření a disipaci. U atomů bude jejich celková vlnová funkce v důsledku vysoké hustoty vlastních stavů energie extrémně citlivá vůči jakkoli malé změně pohybu hodinového stroje. Podle teorie perturbace změna vlnové funkce vlivem perturbace závisí na rozdílu neperturovaných energií nacházejícím se ve jmenovateli. Účinek nějaké značné perturbace se proto nesmírně zvětšuje. V důsledku toho dvě málo odlišné perturbace dávají vzniknout velmi odlišným perturbovaným vlnovým funkcím, které obvykle budou ortogonální vzhledem k velkému počtu svých proměnných. To je to, co se reálně děje během dekoherence, kde perturbace z okolí nutno přičíst jeho spárování s různými hodnotami kolektivních proměnných (*IQM*, str. 271). Použití perturbačního kalkulu je výhodné z toho důvodu, že některé členy druhé evoluční rovnice lze jakožto perturbace druhého řádu považovat za zanedbatelné. (Srv. Roland Omnès, „Decoherence, Irreversibility and the Selection by Decoherence of Quantum States with Definite Probabilities“, [http://arxiv.org/PS\\_cache/quant-ph/pdf/0106/0106006.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/quant-ph/pdf/0106/0106006.pdf), str. 44-45.) Příklad, který Omnès v této souvislosti uvádí, se týká spárování subsystémů, z nichž jeden je píst a druhý plyn působící na píst. Jestliže se nám povede vyextrahovat z  $H_1$  účinek tlaku na píst (tj. přímý makroskopický efekt), zbývající interakce budou sestávat pouze z fluktuací čili z nepatrných změn hybnosti pístu v důsledku kolizí s jednotlivými molekulami, což je velice slabé nahodilé působení. (Srv. *UQM*, str. 214-215.)

Poté, co pak provedeme příslušné substituce, získáme hlavní rovnici v konkrétním tvaru

$$d\rho_c/dt = -i[H_c + \Delta H_c, \rho_c] - \int_0^t dt' \text{Tr}\{[H_1', U[H_1', \rho_0(t')]U^{-1}]\},$$

kde  $U = \exp(-iH_0(t - t'))$  a  $\text{Tr}$  označuje částečnou stopu.<sup>73</sup> První člen na pravé straně této rovnice představuje kvantový vývoj redukovaného operátoru hustoty pod vlivem kolektivního hamiltoniánu  $H_c$  a kolektivního účinku okolí  $\Delta H_c$ , druhý reprezentuje dekoherenci.<sup>74</sup>

Z této rovnice lze dovodit, že při (neúplné) diagonalizaci operátoru hustoty  $\rho_c$  bude veličina popsaná výrazem  $-\text{Tr}(\rho_c \ln \rho_c)$  narůstat. To má zároveň za následek i růst entropie, jež se pomocí operátoru hustoty definuje vztahem  $S = -k \text{Tr}(\rho \ln \rho)$ , kde  $k$  je Boltzmannova konstanta.<sup>75</sup> Teorie dekoherence tudíž poskytuje II. větě termodynamické fundaci na mikroskopické úrovni.<sup>76</sup>

## 5. Kvantová logika a klasická logika

Abychom si učinili představu, jakým způsobem Omnès traktuje logiku v souvislosti s fyzikou, uvedeme nejdříve jeho argumentaci ve prospěch tvrzení, které má bezprostřední souvislost s předchozími závěry, a sice že dekoherence zakládá i privilegovaný směr času v logice. Podle Omnèse je logická predikce věrohodná, jen když se uskutečňuje v takovém nasměrování času, jež umožňuje vzít v úvahu disipaci, tj. jen tehdy, když predikce jde ve směru od počátečního uspořádaného stavu ke konečnému méně uspořádanému stavu. Lze například logicky predikovat pohyb kyvadla, které na začátku vykonává kmitavý pohyb, až nakonec zůstane nehybně viset, avšak nelze to činit opačně. Kdyby se o to někdo pokoušel, musel by znát přesný stav nehybného kyvadla včetně jeho

<sup>73</sup> Srv. Roland Omnès, „Decoherence: An Irreversible Process“, [http://arxiv.org/PS\\_cache/quant-ph/pdf/0106/0106006.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/quant-ph/pdf/0106/0106006.pdf), str. 5.

<sup>74</sup> Z hlavní rovnice lze odvodit i nám již známý dekoherenční koeficient  $\mu_{ij} = (M\gamma)_{ij}kT/\hbar^2$ . (Viz blíže *UQM*, str. 200-201, *IQM*, str. 218-219.)

<sup>75</sup> Odpovídající vzorec pro kvantově-mechanické vyjádření informace prostřednictvím operátoru hustoty je  $I = \text{Tr}(\rho \ln \rho)$ . Omnès ukazuje jeho využití při stanovení minimálního množství informace potřebné k tomu, abychom dosáhli rozumné aproximace ke skutečnému operátoru hustoty, jehož plné explicitní vyjádření zahrnuje objektivní stav „celého vesmíru“ a předpokládá tedy dokonalou znalost všech relevantních faktů. (Viz podrobněji *IQM*, str. 375-377.)

<sup>76</sup> Relativní komplikovanost právě uvedeného Omnèsova postupu je dána tím, že pokud časový vývoj operátoru hustoty  $\rho$  ve vzorci  $S = -k \text{Tr}(\rho \ln \rho)$  odpovídá Schrödingerově rovnici ve tvaru  $\rho(t) = U(t)\rho U^\dagger(t)$ , pak z toho v důsledku unitárnosti vývojového operátoru  $U(t)$  plyne, že entropie je konstantní. Tato implikace je matoucí, neboť konstantní entropie zde vypadá na první pohled jako univerzální vlastnost, a to navzdory tomu, že kvantová mechanika je samo o sobě probabilistická teorie. Jak uvádí Omnès, teoretikové se pokoušejí překonat tento problém tím, že opět použijí metodu hrubozrného dělení; Omnès se v této souvislosti ztotožňuje s obvyklou kritikou takového přístupu, tj. s tvrzením, že výběr stupně „hrubozrného dělení“ je arbitrární, že nerezultuje z objektivní nutnosti a že tedy v důsledku toho by existence entropie závisela na naší arbitrární volbě. (Srv. *IQM*, str. 316.)

okolí se všemi nepatrnými fázovými detaily. Kdyby šlo o čistý stav, mohl by být vyjádřen v úplnosti za použití kvantového projektoru, tj. byl by popsán kvantovou vlastností. Avšak jelikož žádné přípravné zařízení nedokáže tento stav reprodukovat, neexistuje žádný způsob, jak spojit tuto kvantovou vlastnost s klasicky smysluplným fenoménem, tj. asociovat jej s nějakým experimentálním faktem. Z toho plyne, že logické implikace, které se mají vyvodit mezi klasickými vlastnostmi v rámci logiky, pokud se aplikuje na reálné fyzikální situace, jsou omezovány dekoherencí, a sice takovým způsobem, že směr času v logice musí být tentýž jako směr času v termodynamice.<sup>77</sup>

Tvrzení, že dekoherence je základem identity privilegovaného směru času v termodynamice i v logice, jakož i samotná idea založit logiku v kvantové fyzice a chápat klasickou logiku zdravého rozumu v rámci principu korespondence jako speciální případ kvantové logiky, má samozřejmě i své exaktní zdůvodnění; na rozdíl od pokusů odvodit konzistentní logiky přímo z efektu dekoherence (o nichž bude podrobnější zmínka níže) dospívá Omnès k daleko systematičtější podobě tohoto zdůvodnění tím, že se ve své teorii důsledně opírá o koncepci konzistentních historií fyzikálního systému, kterou podal v roce 1984 americký fyzik Robert Griffiths.<sup>78</sup>

Historie se v Griffithsově přístupu definuje jako sekvence různých vlastností, které se vyskytují v různých časových okamžicích. Jestliže vlastnost vyskytující se v určitém čase lze srovnat s fotografickou momentkou, pak analogem historie je sukcese těchto momentek čili film. Zavedení historií představuje výrazný pokrok ve srovnání s von Neumannovým pojetím, kde v roli jazyka kvantové teorie vystupují projektory, jimiž sice lze popsat jakoukoli jednotlivou kvantovou vlastnost na úrovni atomů a částic, ale nikoliv to, co se děje v průběhu experimentu jako celku; naproti tomu historie umožňují vyjádřit dění, a sice nejen dění na úrovni atomů a částic, nýbrž i fungování různých druhů aparatur, jež se účastní na experimentu, jakož i data, která z měření rezultují. To znamená, že v rámci historií lze prostřednictvím sukcesí kvantových projektorů popsat i vlastnosti experimentálních aparatur, jež jsou významné z klasického hlediska, tj. jevy, které vidíme, a činnosti, které provádíme; tento způsob „překladu“ dění na klasické úrovni do jazyka kvantových projektorů implikuje, že historie představují univerzální jazyk, který nám umožňuje mluvit o všech fyzikálních událostech bez výjimky, ať již se dějí na mikroskopické (kvantové) nebo makroskopické (klasické) úrovni. Jako příklad historie můžeme uvést následující sekvenci událostí: neutron vychází z jaderného reaktoru otvorem v pancéřové stěně; prochází silikonovým krystalem; vychází z něj (po difrakci) s rychlostí, jež závisí na jeho směru; při přechodu uranovým blokem narazí na jádro tohoto prvku; výsledkem je rozpad uranového jádra na několik částí atd.

<sup>77</sup> *IQM*, str. 318.

<sup>78</sup> Logické pozadí Griffithsových historií ukázal v roce 1988 Omnès; o dva roky později, Murray Gell-Mann a James Hartle odvodili historie z konceptu dekoherence.

V matematickém tvaru lze historie zavést následujícím způsobem: Jestliže máme pozorovatelné proměnné  $A_1, A_2, \dots, A_n$  (pro okamžiky  $t_1, t_2, \dots, t_n$ ) a intervaly  $D_1, D_2, \dots, D_n$  pro hodnoty těchto proměnných, pak  $A_k$  a  $D_k$  můžeme v Hilbertově prostoru asociovat s časově závislým projektorem  $E_k(t_k)$ ; v důsledku toho máme vlastnost „hodnota  $A_k$  je v čase  $t_k$  v intervalu  $D_k$ “ pro  $k = 1, 2, \dots, n$ . Historie zahrnuje pouze konečný počet elementárních predikátů, takže jakožto matematický objekt je tvořena jen souborem časově závislých projektorů  $\{E_1(t_1), \dots, E_k(t_k), \dots, E_n(t_n)\}$ . Pokud nastane situace, že projektor pro nějakou vlastnost  $E_k(t_k)$  koinciduje s bezprostředně následujícím projektorem  $E_{k+1}(t_{k+1})$ , příslušná historie pouze opakuje v okamžiku  $t_{k+1}$  to, co již známe z okamžiku  $t_k$ ; nic nového tedy nenastává, třebaže bereme v úvahu časový vývoj podle Schrödingerovy rovnice. Tato situace, jež se vyznačuje redundancí, protože konstatujeme dvakrát tutéž vlastnost, se označuje jako tautologie. Když naopak dojde k tomu, že dva bezprostředně následující projektory  $E_k(t_k)$  a  $E_{k+1}(t_{k+1})$  se vzájemně vylučují, jelikož je mezi nimi vztah kontradikce, má tato situace označení „nesmysl“.<sup>79</sup>

Každé historii  $h$  se v kvantové fyzice přiřazuje určitá pravděpodobnost  $p(h)$ . Uvažujeme-li totiž předchozí příklad, pak se mohlo stát, že neutron zůstal v reaktoru nebo se mu nepovedlo proniknout do uranového bloku, nebo jeho srážka s uranovým jádrem nezapříčinila jeho rozštěpení atd. Vzhledem k velmi omezené míře našich znalostí (a též k tomu, že reálné historie předcházející výsledku určitého pokusu stanovujeme značně spekulativním způsobem) se ovšem nelze domnívat, že bychom pravděpodobnosti sdružené s danými historiemi mohli znát explicitně; uvažované pravděpodobnosti proto zůstanou v rovině ryze teoretických představ.<sup>80</sup>

Z počtu pravděpodobnosti plynou pro pravděpodobnosti historií tři základní podmínky: pozitivita, aditivnost a normovanost. Pozitivita znamená, že pravděpodobnost  $p(h)$  je kladná nebo rovna nule, podmínka aditivnost stanovuje, že pravděpodobnosti lze sčítat, pokud se odpovídající události

<sup>79</sup> Další důležité vlastnosti historií se dají nejlépe pochopit z jejich geometrického znázornění. Pokud daná historie  $h$  zahrnuje pouze 2 okamžiky  $t_1$  a  $t_2$ , lze ji zobrazit čtyřúhelníkem, který vznikne nad příslušnými intervaly  $D_1$  a  $D_2$  zobrazenými v souřadnicové soustavě, v níž horizontální osa odpovídá hodnotám  $A_1$ , zatímco vertikální osa hodnotám  $A_2$  (historie je tedy zobrazena jako obdélník o stranách  $D_1 D_2 D_1 D_2$ ). V případě dvou uvažovaných historií  $h'$  a  $h''$ , z nichž každá zahrnuje pouze 2 okamžiky  $t_1$  a  $t_2$ , může nastat případ, že odpovídající obdélníky  $D'_1 D'_2 D'_1 D'_2$  a  $D''_1 D''_2 D''_1 D''_2$  mají prázdný průnik – tehdy mluvíme o disjunktních historiích; když obdélníky odpovídající disjunktním historiím mají společnou hranici, jde o sjednocení či sdružení (*union*) těchto historií (je ovšem třeba odlišit takové sdružení, kdy obdélníky stojí na sobě, od sdružení, kdy stojí vedle sebe). Ve složitějším případě, kdy počet časových okamžiků v historii je rovný  $n$ , je zobrazením historie  $n$ -rozměrná pravoúhlá „krabice“ (*box*).

<sup>80</sup> Ještě je nutno zmínit další důležitý charakter vztahující se k historiím, jímž je jedinečnost. Jedinečnost pravděpodobnosti nějaké historie spočívá v tom, že tato pravděpodobnost závisí pouze na vlastnostech, které zahrnuje, a na ničem jiném, tedy pouze na projektorech. Důkaz jedinečnosti pravděpodobnosti historie podává Omnès v *IQM*, str.140-143.

vzájemně vylučují, a normovanost určuje, že celkový součet pravděpodobností je 1.<sup>81</sup> Nejdůležitější je podmínka aditivnosti, která platí tehdy, když sdružení dvou disjunktních historií s pravděpodobnostmi  $h'$  a  $h''$  je též historií (označenou prostřednictvím pravděpodobnosti jako  $h$ ), a sice ve tvaru  $p(h') + p(h'') = p(h)$ . Tyto tři podmínky jsou vším, co je matematického hlediska nutné k definování míry pro historie. Z pravděpodobností plynou navíc další logické podmínky, z nichž zde zmiňujeme pouze tu, jež stanovuje, že když bezprostředně následující vlastnosti vedou k nesmyslu, pravděpodobnost má být rovna nule.<sup>82</sup>

Rovnice vyjadřující pravděpodobnost určité historie na základě odpovídajících projektorů

$$p = \text{Tr}\{E_n(t_n) \dots E_k(t_k) \dots E_1(t_1) \rho E_1(t_1) \dots E_k(t_k) \dots E_n(t_n)\}$$

nesplňuje v úplnosti podmínky aditivnosti. K tomu je zapotřebí dodat ještě nutné a dostatečné podmínky konzistence; jsou velmi důležité, protože omezují druhy propozic, které se mohou stát součástí kvantové mechaniky, pokud mají být zachována podstatná pravidla logiky.

V jednoduchém případě 2 historií zahrnujících pouze 2 časové okamžiky se podmínky konzistence vyvodí z rovnic pro jejich pravděpodobnosti a z podmínky aditivnosti  $p(h) - p(h') - p(h'') = 0$ :

$$\text{Tr}\{E_2(t_2)E'_1(t_1)\rho E''_1(t_1)\} + \text{Tr}\{E_2(t_2)E''_1(t_1)\rho E'_1(t_1)\} = 0.<sup>83</sup>$$

Význam těchto podmínek vyvstane, uvědomíme-li si, že pro popis fyzikálních událostí je možno navrhnout mnoho historií, avšak mnohé z nich jsou nesmyslné. To je třeba případ, když si vybereme okamžik, kdy se vlnová funkce, odvozená ze Schrödingerovy rovnice, skládá ze dvou částí, přičemž každá z nich je lokalizována v jiném rameně interferometru; když nyní obohatíme předešlé historie specifikací, že foton se v příslušném čase nachází

<sup>81</sup> Přesněji řečeno, podmínce normovanosti odpovídá triviální historie, v jejímž rámci má proměnná  $A_k$  v čase  $t_k$  svou hodnotu uvnitř intervalu  $D_k$ . Odpovídající projektory se redukují na operátory identity a jejich sekvence je  $(I, I, \dots, I)$ . Normovací podmínka tak nabývá podoby  $p(I, I, \dots, I) = 1$ .

<sup>82</sup> Více v *IQM*, str. 128-129.

<sup>83</sup> Jde o případ dvou historií, jejichž obdélníková zobrazení mají společnou hranici a jsou umístěna vedle sebe, takže první z nich odpovídá rodina projektorů  $\{E'_1(t_1), E_2(t_2)\}$ , druhé zase  $\{E''_1(t_1), E_2(t_2)\}$ . Jejich sdružení  $h$  odpovídá historii  $\{E_1(t_1), E_2(t_2)\}$ , kde  $E_1 = E'_1 + E''_1$ . Vzhledem k tomu, že obecný vzorec pro pravděpodobnost historie lze zjednodušit odebráním posledního projektoru  $E_n(t_n)$  – na základě toho, že pro něj platí  $E^2 = E$ , jakož i cyklické invariance stopy (*IQM*, str. 130) –, jsou pravděpodobnosti historií vyjádřeny vztahy  $p(h') = \text{Tr}\{E_2(t_2)E'_1(t_1)\rho E'_1(t_1)\}$ ,  $p(h'') = \text{Tr}\{E_2(t_2)E''_1(t_1)\rho E''_1(t_1)\}$  a  $p(h) = \text{Tr}\{E_2(t_2)E_1(t_1)\rho E_1(t_1)\}$ . Když v  $p(h)$  nahradíme  $E_1(t_1)$  výrazem  $E'_1(t_1) + E''_1(t_1)$ , nabyde rozdíl  $p(h) - p(h') - p(h'')$  tvaru odpovídajícímu levé straně podmínek konzistence. Obecnou formu podmínek konzistence viz *IQM*, str. 137.

bud' v jednom, anebo druhém rameně interferometru, pak se ukáže význam Griffithsových podmínek konzistence, neboť při této specifikaci je nemožné jim vyhovět. Když není splněna podmínka aditivnosti pravděpodobností v rámci „obohacené“ historie, neexistuje ani pravděpodobnost pro to, že foton prochází spíše jedním než druhým ramenem i interferometru; navzdory tomu, že to odporuje návykům našeho myšlení, je představa takovéto události nesmyslem. Před zavedením Griffithsových podmínek konzistence obvyklou odpovědí na tento problém bylo, že takováto historie je nesmyslná, neboť neexistuje měřicí zařízení, jež by umožnilo určit, kterou cestou se foton ubírá. Naproti tomu podmínky konzistence poskytují jiný a hlubší důvod k odmítnutí takové historie – je jím nemožnost přiřadit jí pravděpodobnost. Podmínky konzistence tedy fungují jako kritérium selekce umožňující odlišit smysluplné (konzistentní) historie od nesmyslných.

Může se ovšem stát, že událost zahrnutá v určité historii popisující daný jev se vylučuje s událostí patřící do jiné historie vztažené k témuž jevu; to platí především pro tzv. rodiny historií.<sup>84</sup> Nicméně tyto skupiny či rodiny historií jsou smysluplné, pokud dokonale platná pravděpodobnost (odpovídající podmínkám konzistence) existuje pro každou jednotlivou historii do nich náležející.

Jak prokázal Omnès, nejdůležitější vlastnost Griffithsových historií spočívá v tom, že poskytují kvantové fyzice vlastní logickou strukturu. Pokud se totiž na chování nějakého kvantového systému mechaniky aplikuje způsob uvažování, charakteristický pro „zdravý rozum“, ukazuje se až příliš často neopodstatněnost tohoto přístupu; proto je nutné vybudovat principy kvantové logiky odpovídající podivnému světu kvantové mechaniky.

Na druhé straně se však nelze vzdát ani logiky zdravého rozumu, která je podle Omnèse úzce spjata s naší vizuální reprezentací světa; používáme ji ke komunikaci o tom, co jsme viděli, co se událo, co je zde a teď. Touto logikou se řídí jazyk popisující fakta a činnosti, jenž je jediným jazykem, který umožňuje říci, že takový a takový měřicí přístroj ukázal takové a takové hodnoty, jak byl onen přístroj zkonstruován a jakým způsobem ho lze používat. „Zdravý rozum“ je tedy nezbytný jakožto rámec jazyka, který je jako zcela podmínka možnosti empirické vědy ničím jiným nezastupitelný.

Primárním úkolem, který si v této souvislosti Omnès klade, je tudíž zkoumání souvislostí mezi kvantovou mechanikou a logikou s cílem najít jasné a pevné základy pro kvantovou logiku, jakož i prokázat platnost logiky zdravého rozumu uvnitř hranic určité jasně vymezené domény.

<sup>84</sup> Rodina historií vzniká tím, že celé spektrum  $\sigma_k$  hodnot  $A_k$  se rozdělí na množinu  $\{D'_k\}$  disjunktních domén (intervalů). Ve výše probíraném případě 2 různých historií pak dochází k tomu, že celý dvourozměrný prostor  $\Xi = \sigma_1 \times \sigma_2$  se rozdělí v rodinu sousedících obdélníků. (V zobecnění pro  $n$ -rozměrný prostor dostáváme  $n$ -rozměrné sousedící „krabice“.) Všechny historie v dané rodině jsou tedy asociovány se stejnými počátečními podmínkami, stejnými časovými sekvencemi a se stejnými pozorovatelnými proměnnými, jediný rozdíl spočívá v oblastech hodnot těchto proměnných.

To, že právě pravděpodobnostně určené historie se mohou stát východiskem pro řešení tohoto dvojčediného úkolu, plyne ze skutečnosti, že v jejich rámci lze definovat logickou operaci implikace („jestliže..., pak), která je základem veškeré logiky, a následně pak operace ekvivalence, logického součinu, součtu atd. Lze to realizovat poměrně jednoduchým způsobem, a sice zavedením pojmu podmíněné pravděpodobnosti, jenž patří do klasické teorie pravděpodobnosti; jde o pravděpodobnost, že nastane událost  $b$  za předpokladu, že jiná událost  $a$  již nastala. V symbolickém vyjádření se podmíněná pravděpodobnost  $p(b|a)$  definuje v podobě poměru  $p(a \& b)/p(a)$ . Implikaci „jestliže  $a$ , pak  $b$ “ ( $a \rightarrow b$ ) vyjadřuje podmíněná pravděpodobnost tehdy, když výroky  $a, b$  patří do takového souboru tvrzení kvantové mechaniky, jenž splňuje podmínky konzistence, a když zároveň platí  $p(b|a) = p(a \& b)/p(a) = 1$ . (Logická ekvivalence se pak definuje analogicky jako oboustranná implikace.) Tímto způsobem, jak Omnès opakovaně zdůrazňuje, je zavedením pravděpodobností umožněna inference, a tudíž racionální uvažování.

Logiku, kterou takto vystavíme na pravděpodobnostech, můžeme nazvat aristotelskou nebo booleovskou, avšak ať již jí dáme jakékoli jméno, liší se každopádně velmi výrazně od exotických druhů logiky, navržených Birkhoffem a von Neumannem. Je to standardní druh logiky, který byl testován výstavbou matematiky a „zdravým“ uvažováním na poli přírodních věd. (Jde sice pouze o formální logiku, to však odpovídá tomu, že kvantová mechanika je také formální teorie.)

Běžná (*ordinary*) logika, tj. logika „zdravého rozumu“ tedy platí v rodině konzistentních historií. V případě kvantové fyziky to znamená, že při jejím výkladu nemusíme zůstat na úrovni teorie vyjádřené formalizovaným jazykem matematiky, nýbrž můžeme používat slova běžného jazyka, a že její racionální traktování může být rigorózní a přirozené (podle Omnèse rigorózní myšlení vyžaduje logiku, která je „kompletní a zdravá“ a zahrnuje použití logických operací, jako jsou „ne“, „a“, „nebo“, „jestliže..., pak“). Metoda historií tedy umožňuje, aby se interpretace kvantové fyziky stala běžnou diskursivní teorií, kterou každý může kontrolovat;<sup>85</sup> v souladu s tím lze říci, že podmínky konzistence, sestávající z několika algebraických rovnic, fungují jako selektor, který určuje, který druh diskursu má smysl a který nikoliv. Metoda historií též prokazuje, že sporná mříž, kterou Bohr přísně ohradil kvantovou fyziku proti

<sup>85</sup> Právě korespondence mezi klasickou a kvantovou logikou implikuje tzv. univerzální pravidlo interpretace, které podle Omnèse činí z interpretace deduktivní teorii a je formulováno následovně: „Každá deskripce nějakého fyzikálního systému má být vyjádřena v termínech vlastností náležejících do obvyklé (*common*) logiky. Platné racionální traktování vztahů mezi těmito vlastnostmi má sestávat z implikací platných v této logice.“ (*IQM*, str. 476.) Z univerzálního pravidla interpretace na druhé straně plyne, že každá klasická vlastnost je speciálním případem kvantové vlastnosti, a jako taková musí být popsitelná v jazyku kvantové mechaniky (tj. v jazyku matematiky Hilbertových prostorů). Funkce univerzálního pravidla interpretace spočívá v tom, že v množině všech myslitelných výroků popisujících fyzikální situaci provádí odlišení výroků smysluplných od smysluprostých; odlišuje též věrohodné uvažování od úvah nesprávných. (Srv. *IQM*, str. 506-507.)

hlupákům (tj. jeho drastické oddělení klasické a kvantové fyziky) není nezbytná a její odstranění naopak ohromně otevírá naše obzory.

O Griffithsových podmínkách konzistence lze tvrdit, že jsou nutné a dostatečné pro platnost logiky. Avšak jak ukázalo praktizování jazyka historií, mohou být tyto podmínky vhodně nahrazeny jiným kritériem, prezentovaným v přístupu Gell-Manna a Hartla, a vyznačujícím se tím, že podmínky konzistence se odvozují přímo z konceptu dekoherence. Tyto Gell-Mannovy a Hartlovy podmínky konzistence (GMH) se v jednoduchém případě historie zahrnující pouze 2 hodnoty redukují na jedinou podmínku, totiž

$$\text{Tr} [E_1(t_1)\rho\bar{E}_1(t_1)E_2(t_2)] = 0.^{86}$$

GMH podmínka je silnější ve srovnání s podmínkami Griffithsovými, jelikož v ní vymizí nejen reálná část stopy, nýbrž i část imaginární. GMH podmínka ve skutečnosti implikuje podmínky Griffithsovy. Existuje proto jistota, že pokud platí GMH-podmínka, je příslušná logika platná.

Ačkoliv Omnès uvádí jisté výhody GMH-podmínek oproti Griffithsovým (GMH-podmínky platí téměř automaticky, když historie vzcházejí z klasické fyziky nebo jsou založeny na dekoherenci; dekoherence navíc implikuje konzistenci s extrémně malými chybami v mnoha případech velmi důležitých pro fyziku), přece jen dává přednost podmínkám Griffithsovým. Považuje je totiž za univerzální záležitost logiky, zatímco GMH-podmínkám vytýká směšování logiky s efektem dekoherence, který je dynamickým efektem omezeným na makroskopické systémy, a tudíž ne zcela univerzálním. Dalším důvodem je, že když v GMH-podmínkách se mizení reálné části stopy rozšiřuje na mizení stopy celé, může to vést k nepovšimnutí některých případů, kdy by nějaký jednoduchý systém mohl být popsán konzistentně. Mohlo by tudíž dojít k mylnému prohlášení, že nějaká historie je nesmyslná, aniž by se prozkoumali všechny možnosti konzistence.

---

<sup>86</sup> Jelikož teorie dekoherence, jak vyložená výše, je založena na časových změnách redukovaného operátoru hustoty, zatímco historie spočívají na časové změně pozorovatelných proměnných, objasnění závislosti konzistence historií na dekoherenci vyžaduje ukázat způsob přechodu od schrödingerovského přístupu k přístupu heisenbergovskému. Omnès tento přechod demonstruje na jednoduchém případě, jehož matematické vyjádření zde nebudeme uvádět: Máme měřicí přístroj  $M$ , který je popsán realisticky, jelikož je vzata v úvahu dekoherence; uvažujeme působení dekoherence mezi okamžiky  $t_1$  a  $t_1'$ ; možná data, jež  $M$  poskytuje, jsou v důsledku dekoherence fixována pouze v čase  $t_1'$ ; právě tato data jsou jakožto vlastnosti zavedena do historií. K popisu tohoto případu zavádí Omnès operátor v Hilbertově prostoru vztahující se na systém (atom +  $M$  +  $M'$ ); tento operátor pak vystupuje jako součinitel na pravé straně rovnice pro podmínku konzistence, jejíž levá strana se rovná nule. Jelikož se hodnota operátoru vlivem dekoherence extrémně rychle snižuje, zajišťuje se tím platnost zmíněné rovnice. Omnès ještě dodává, že chování onoho operátoru (jakož i splnění podmínky konzistence, které ukazuje, že popis dvou po sobě následujících měření má smysl) hraje podstatnou roli při vyvrácení tradičního pojetí redukce vlnové funkce. (Srv. *UQM*, str. 231-232.)

Avšak ať již použijeme Griffithsovy nebo Gell-Mannovy a Hartlovy podmínky konzistence, můžeme z kvantové fyziky vyvodit vzájemně se lišící logiky; tato diferenciacce probíhá například tak, že danou logiku rozšíříme použitím menších intervalů pro hodnoty pozorovatelné proměnné nebo že mezi dané časové hodnoty vložíme další, takže historie se stává přesnější atd. Danou logiku lze naopak zjednodušit, když aplikujeme hrubozrnnější dělení pro hodnoty pozorovatelné proměnné atp. Tyto procedury jsou ovšem platné jen tehdy, když změny jimi generované splňují nutné podmínky konzistence.<sup>87</sup>

To, že mnoho vzájemně odlišných konzistentních logik (resp. mnoho různých rodin konzistentních historií) lze použít k popisu jednoho a téhož fyzikálního systému, je podstatou komplementárnosti.<sup>88</sup> (Principiální podmínkou možnosti komplementárnosti je ovšem nekomutativnost operátorů v Heisenbergově maticové reprezentaci kvantové mechaniky.) Přesněji řečeno, když máme 2 různé konzistentní logiky  $L$  a  $L'$ , pak jsou možné 2 případy: 1) Může existovat širší konzistentní logika  $L''$ , která je obě zahrnuje; v tomto případě jsou obě logiky vzájemně konzistentní. 2) Neexistuje žádná taková širší logika; tehdy lze logiky  $L$  a  $L'$  prohlásit za komplementární čili vzájemně cizí, třebaže každá z nich (spolu s odpovídající rodinou historií) je vnitřně konzistentní.

Ať již existuje jakkoliv mnoho komplementárních logik, platí pro ně teorém ne-spornosti, jehož znění pro případ dvou odlišných logik je následující: Nechť  $L'$  a  $L''$  jsou dvě komplementární logiky, jež obě obsahují ve svých oblastech dvojici propozic  $(a,b)$ . Jestliže implikace  $a \rightarrow b$  platí v  $L'$ , pak platí také v  $L''$ .<sup>89</sup> Tento výsledek ukazuje, že kvantová fyzika je dokonale konzistentní a že paradoxy, jimiž proslula, jsou pouze zdánlivé.

Na rozdíl od kvantové logiky je klasická logika (konzistentní ve své aplikaci na makroskopické objekty) imunní vůči komplementárnosti, protože se omezuje na klasicky smysluplné vlastnosti. Přesněji řečeno, klasická logika

<sup>87</sup> Kromě těchto procedur lze dvě logiky, popisující neinteragující systémy, spojit do jedné logiky, která popisuje systém jako celek. Podmínkou zde je, aby logické směry času byly stejné pro oba systémy.

<sup>88</sup> P. Jordan ve *Fyzice 20. století* (1946) vykládá komplementárnost (pro specifický případ chování světla) následovně: „Vlastnosti světla spojené s jeho vlnovou povahou na jedné straně a vlastnosti spojené s jeho korpuskulární povahou na straně druhé se navzájem doplňují v tom smyslu, že se nikde nemohou projevit v jednom a též experimentu, v jednom a též okamžiku a tak se dostat do aktivního přímého rozporu... Vlivem tohoto podivuhodného mechanismu doplňování (komplementárnosti) spojuje příroda v jednom a též fyzikálním objektu vlastnosti a zákonitosti, které si navzájem odporují, a to tak, že nikdy nemohou existovat bezprostředně v jednom a též okamžiku.“ (Cit. in Ivan Úlehla, *Od fyziky k filosofii*, Orbis, Praha 1963, str. 80.)

<sup>89</sup> Tento výsledek znamená, že pokud vyjdeme z určitého daného předpokladu  $a$  vždy dospějeme k též závěru  $b$ , nehledě na mnohost logik. Mohou samozřejmě existovat jiné logiky, které obsahují  $a$ , nikoliv však  $b$ ; to však není vnitřní rozpor, nýbrž pouhá komplementárnost, s níž se musíme naučit žít. Omněs dále poukazuje na to, že komplementárnost není překážkou existence pravdy, tj. souhlasu s realitou.

může ignorovat komplementárnost, protože vlastnosti, jimiž se zabývá, jsou vždy vzájemně kompatibilní, tj. odpovídající kvantové projektory komutují ve vysokém stupni aproximace. Z noetického hlediska to lze formulovat tak, že všechno, o čem uvažujeme na klasické úrovni, je přístupné poznání a každý aspekt, který tam nacházíme, může být spojen s jinými; tato formulace vyjadřuje hlavní charakteristiky obvyklé každodenní reality (tj. reality jakožto kategorie): to, že realita je jedna (nevztahuje se k ní žádná komplementárnost) a úplná (všechno se jeví jako poznatelné).

Pokud nás na druhé straně nekomutativnost operátorů v kvantové fyzice (která je vyjádřením přírodního zákona) nutí přijmout komplementárnost, pak lze připustit, že atom je reálný, existuje a není představou naší mysli; nicméně nemůžeme poznat zde a teď všechno, co je na něm předmětem našeho představování nebo mínění. V kvantové logice tedy nemůžeme legitimně konceptuálně uchopit mnohé z toho, co si lze představovat v souladu s logikou zdravého rozumu; v případě atomu nelze myslet dohromady všechny jeho jednotlivé charakteristiky, o kterých si činíme klasické představy.

Tato skutečnost snižuje naši domnělou intelektuální univerzalitu a jako urážlivé a nesnesitelné se pocituje zejména to, že omezení našich obvyklých rozumových schémat pochází od nejmenších věcí ve světě. Avšak komplementárnosti se v žádném případě nelze vyhnout – představuje přerýv mezi jazykem historií a obvyklou kategorií reality, která implikuje její jedinečnost. Musíme prostě přivyknout této zastřené realitě (jak říká d'Espagnat); nelze už nikdy očekávat návrat k plné realitě dávných dob, kdy lidská mysl nebyla s to překonat horizont rozlišitelnosti malého (neboť neznala mikroskopii) a kdy vše mohlo být poznáváno v souladu s tím, jak to vidí lidské oči.<sup>90</sup> Lze to formulovat i tím způsobem, že když uvažujeme stále menší fyzikální systémy, pravděpodobnost chyby v logice „zdravého rozumu“ je stále větší, až se neomezeně blíží k 1, takže *common sense* se mění v *nonsense* („zdravý rozum“ přechází v nerozum); tato mez nastává na atomární úrovni.

Nicméně komplementárnost nyní ztratila svůj dosavadní status principu, neboť se stala pouhým vedlejším produktem kvantové logiky. Jako taková není již vázána na určité specifické experimentální okolí, jak tomu bylo u Bohra; komplementárnost se tak stává v mnohem větší míře vnitrosystémovým určením kvantové fyziky.<sup>91</sup>

---

<sup>90</sup> Srv. *UQM*, str. 82.

<sup>91</sup> Vyvození komplementárnosti z kvantové logiky resp. z historií je zároveň radikálním koncem vágních pokusů o zobecnění tohoto „principu“, tak jak je nastínil Niels Bohr v článku uveřejněném v časopise *Dialectica* (No 7-8, 1948, str. 317): „Teoretickonoetická lekce, kterou jsme dostali novým vývojem fyzikální vědy, kde problémy připouštějí poměrně sevřenou formulaci principů, může nám napovědět směr postupu v jiných oblastech vědění, kde situace má podstatně méně dostupný charakter. Příkladem je biologie, ve které se mechanických a vitalistických argumentů užívá způsobem typickým pro ideje komplementárnosti. Rovněž v sociologii může být taková dialektika často užitečná (...) Přiznat princip komplementárnosti je stejně potřebné i v psychologii, v níž podmínky pro analýzu a syntézu pokusu ukazují překvapivou analogii se situací v atomové fyzice. Používání obou slov »myšlenka« a »cit« je

Vztah mezi kvantovou a klasickou logikou se řídí „principem“ korespondence: logika „zdravého rozumu“ (která se zabývá klasicky smysluplnými vlastnostmi makroskopických objektů a není tudíž zatížena komplementárností) je nejjednodušším případem kvantové logiky, která platí v univerzálním jazyce interpretace. To, že Omnès umísťuje termín „princip“ do uvozovek nejen v souvislosti s komplementárností, nýbrž i s korespondencí, je plně oprávněné, neboť výsledky teorie dekoherence umožňují úplné odvození klasického chování non-chaotických a makroskopických objektů, ať již se vyskytují v obvyklých podmínkách nebo jsou využity pro provádění kvantových měření, což znamená, že korespondence mezi výše zmíněnými logikami plyne inherentně z tímto způsobem univerzalizované kvantové mechaniky a přestává být pouhým vnějškovým metodickým postulátem. Jinak řečeno, korespondence přestává být pouhým principem proto, že (ne zcela úplné) zanikání komplementárnosti, jímž se realizuje přechod od kvantové logiky k logice klasické, má svůj reálný fyzikální základ („příčinu“) v exaktně kvantifikovatelném efektu dekoherence, jehož teoretický popis je jako takový součástí kvantové mechaniky.

Vzhledem k tomu, že restituce klasické logiky skrze dekoherenční efekt není úplná, neboť se děje pouze v určitých stanovených mezích, je často velmi výhodné používat přibližnou logiku, kde podmínky konzistence jsou splněny až po nějakou relativní chybu a podmínky implikace jsou tedy také pouze přibližné. Jestliže je například  $\varepsilon$  velmi malé číslo, lze říci, že výrok  $a$  implikuje výrok  $b$  s pravděpodobností chyby  $\varepsilon$ , pokud platí, že  $p(b|a) \geq 1 - \varepsilon$ . Pojem přibližnosti je v logice podstatný, protože poskytuje nezbytnou míru svobody uvést v soulad kvantovou a klasickou logiku (resp. obecněji klasickou a kvantovou fyziku), a to navzdory značným rozdílům mezi oběma těmito teoriemi.<sup>92</sup>

V závěru této kapitoly je třeba zmínit, že pojetí konzistentních historií umožňuje formulovat i další verzi univerzálního pravidla interpretace: „Každá deskripce fyzikálního procesu může být vyjádřena prostřednictvím jedinečné (*unique*) kompletní rodiny konzistentních historií. Racionální traktování fyziky systému může vždy být prováděno inferencemi, jež mohou být dokázány v rámci této rodiny.“<sup>93</sup>

---

stejně nutné k ilustraci různorodosti pokusu, který má vztah k navzájem se vylučujícím situacím, charakterizovaným různým vedením dělicí čáry mezi subjektem a objektem. Zejména situace, ve kterých my pocítujeme svobodu vůle, jsou nesrovnatelné s psychologickými situacemi, ve kterých důsledně provádíme kauzální analýzu.“ (Cit. in Ivan Ulehla, *Od fyziky k filosofii*, str. 80-81.) Zánik „principiálního“ statusu komplementárnosti znamená i zánik těch povrchních výkladů, které v něm spatřovaly rozšíření jistého typu filosofického relativismu či skepticismu do oblasti samotných přírodních zákonů.

<sup>92</sup> Je ovšem nutné poznamenat, že z logicko-genetického i historického hlediska je přibližná logika operující se spojeným spektrem pravděpodobnostních hodnot sekundární vůči klasické dvouhodnotové logice, uplatňující se v rámci „zdravého rozumu“ – právě tak jako je pojem pravděpodobnosti derivátem původnějšího pojmu pravdy.

<sup>93</sup> *UQM*, str. 167.

Z tohoto pravidla lze vydedukovat shrnující formulaci řešení problému privilegovaného směru času v termodynamice:

Jakákoliv explanace či diskuse musí probíhat v jazyku vybaveném logikou. Jediná spolehlivá logika, kterou známe, je vystavěná na kvantových historiích. Vlastností v rámci určité historie náleží určitý řád – je to časové pořadí jejich výskytu. Není možné logicky kombinovat dvě rodiny historií s opačnými směry času. Jeden směr musí tudíž být zvolen jednou a provždy.

Nicméně existují dva možné směry času, aniž by byly jakkoliv zjevně odlišeny s výjimkou toho, že jsou nekompatibilní. Klasická fyzika (dynamika), pokud nezahrnuje efekt disipace, uchovává ekvivalenci mezi oběma protichůdnými směry času. Pro dekoherenci musí být vybrán pouze jeden z nich, a to ten, který platí v termodynamice. Dekoherece implikuje logickou konzistenci historií (je nejefektivnějším mechanismem zajišťování platnosti Griffithsových podmínek konzistence),<sup>94</sup> a tudíž i kvantové logiky a klasické logiky „zdravého rozumu“, která je zvláštním případem kvantové logiky a uplatňuje se i ve vnímání. Dekoherece tak působí ovšem jen za té podmínky, že tentýž směr času platí jak pro logiku, tak pro dekoherenci. Z toho plyne, že pro logiku platí stejný čas jako pro termodynamiku a že ekvivalence obou směrů času v klasické dynamice a v předdekoherenční kvantové mechanice vznikla tím, že první z nich abstrahovala od disipace a druhá od dekoherence.<sup>95</sup>

## 6. Korespondence mezi kvantovou a klasickou fyzikou

Jestliže akceptujeme Omnèsovo tvrzení, že každé konstatování a popis v rámci „zdravého rozumu“ lze redukovat na sekvenci relevantních klasických vlastností, pak z toho plyne, že restituce fenomenálního světa na bázi kvantové fyziky nezbytně vyžaduje, aby mezi kvantovou a klasickou fyzikou existoval vztah korespondence.

Nutno ovšem podotknout, že idea kvantově-klasické korespondence (jejíž první důkaz lze zpětně stopovat až k Ehrenfestovu teorému) vznikla mnohem dříve, než byla formulována teorie dekoherence; v tomto svém tradičním chápání má podobu tvrzení, že klasické dynamické chování se jeví jako aproximace kvantové fyziky za podmínky, že hodnota Planckovy konstanty je relativně malá (tj. zanedbatelná v poměru k hodnotám proměnných, jež vystupují v daném procesu).<sup>96</sup> V souladu s tím lze při zanedbání tření poměrně snadno

<sup>94</sup> Srv. *QPh*, str. 208.

<sup>95</sup> Gell-Mann a Hartle také naznačili možnost spojit směr času v logice s kosmologickým směrem času.

<sup>96</sup> Vzhledem k tomu, že existuje analogie mezi přechodem od kvantové ke klasické fyzice a přechodem od vlnové teorie světla ke geometrické optice, se toto tvrzení zdá být dost samozřejmé, avšak jeho precizace a převedení do explicitní podoby je podle Omnèse mnohem obtížnější. Stačí uvést srovnání s teorií relativity, kde limitní případ  $c \rightarrow \infty$  lze vypracovat

prokázat, že Schrödingerova rovnice implikuje klasickou dynamiku. Jako důsledek kvantové dynamiky se pak odvodí Lagrange-Hamiltonova pravidla pro klasickou dynamiku, přinejmenším pro kolektivní proměnné.<sup>97</sup>

Skutečnost, že z ryze formálního hlediska je toto odvození na dekoherenci nezávislé, však zároveň znamená, že klasická dynamika jakožto aproximace kvantové dynamiky plyne v onom tradičním pojetí z kvantové teorie za určitých omezujících podmínek, které jsou vůči samotné této teorii vnějškové a arbitrární; jinými slovy, tradiční, tj. předdekoherenční verze kvantové teorie není s to inherentně zdůvodnit nutnost podmínek, jejichž působením přechází kvantový popis v klasický. Právě tímto svým nedostatkem poukazuje na dekoherenční efekt, který je reálným – a hlavně kvantovou teorií popsatelem – dějem, jenž zpomezi různých možných arbitrárních aproximací vybírá právě jednu (klasickou) jakožto nutnou. Ještě jinak vyjádřeno, teorie dekoherence vysvětluje **ozvláštnění** univerzálna (vyjádřeného kvantovou

---

velice snadno – když naproti tomu uvažujeme v kvantové mechanice analogický limitní případ  $\hbar \rightarrow 0$ , upadáme do rozpaků, když máme vyjádřit, jak se nějaký operátor blíží číslu a jak se na makroskopické úrovni eliminuje vlnová funkce. Kvantově-klasická korespondence je mnohem složitější než pouhý limitní případ; je jedním z nejhlubších problémů kvantové fyziky. (Srv. *UQM*, str. 45.)

<sup>97</sup> Nutno však dodat, že Schrödingerovu formulaci kvantové mechaniky lze odvodit i z ryze klasických představ, což lze ukázat použitím následujícího příkladu: Po rovinném nakloněném svahu hustě pokrytém kameny přibližně stejné velikosti padají dva kulovité objekty – jeden o rozměrech daleko převyšujících rozměry těchto kamenů a druhý, který je svými rozměry (a tedy i s hmotností) s nimi srovnatelný. Ze zákonů klasické fyziky plyne, že v prvním případě bude dráhu představovat přímá spojitá čára, zatímco ve druhém případě půjde o pohyb nepravidelný (cikcakovitý); v prvním případě lze mluvit o přesných hodnotách veličin určujících dráhu a hybnost objektu, nicméně v druhém je možné obě tyto charakteristiky stanovit jen s určitou pravděpodobností. Kvantová fyzika je analogií druhého případu: Mikrosvět je naplněný „kamínky“, které jsou zdroji rozptylu při pohybu – jde o různé fluktuace související s neustálým pohybem mikroobjektů jakož i fluktuace polí. Pokud energie pohybujících se těles daleko převyšuje energii těchto fluktuací, nemá jejich přítomnost vliv na kvalitu pohybu; to je případ klasické fyziky. Když je však energie pohybující se částice stejného řádu, ztrácí pojem dráhy a hybnosti svůj klasický smysl a její pohyb se musí popisovat se zřetelem na charakter rozptylu na mikrofyzikálních „překážkách“. Ukázalo se, že vhodným „slovníkem“ může být v tomto případě terminologie používaná v nauce o vlnění. Z tohoto hlediska termín „vlnové vlastnosti částic“ nevyjadřuje nic jiného, než že k popisu mikročástice je vhodný vlnový formalismus. Tedy i hlavní problém kvantové fyziky – zda je částice korpuskulí nebo vlnou – se stává formálním. Částice je vždy korpuskulí, avšak když se pohybuje v prostředí vyplněném stejně silnými fluktuacemi, je nutné její pohyb popisovat pomocí pojmů užívaných v nauce o vlnění. (Srv. J. Krempaský, *Fyzika*, str. 360.) V souvislosti s touto variantou kvantově-klasické korespondence lze učinit několik poznámek z metodologického hlediska. Jestliže jsou „vlnové vlastnosti“ částic záležitostí pouhého způsobu volby vhodného formalismu, jedná se o nominalistický přístup; tvrzení o korpuskulární realitě mikroobjektů je naopak tvrzením realistickým. Je přípustné kombinovat oba tyto protichůdné metodologické přístupy? A když už je kombinujeme, jaké jsou fundamentální důvody pro to, aby právě vlnový popis byl pouhým jménem, a ne naopak popis korpuskulární? Dále se můžeme ptát, proč se k popisu korpuskulí hodí vlnový popis, a ne nějaký jiný?

fyzikou) do podoby dění popisovaného klasickou fyzikou, a to jako konkrétní, kvantitativně určený proces, jehož základem či „příčinou“ je právě dekoherenční efekt; začlenění teorie dekoherence do kvantové fyziky znamená, že kvantová fyzika se již neomezuje na stanovování pouhých univerzálních principů a stává se z ní teorie nutně se ozvlášťujícího univerzálna.<sup>98</sup>

V souladu s tím Omnès ukazuje, že tradiční pojetí kvantově-klasické korespondence nedostačuje k tomu, aby na bázi kvantové teorie došlo k restituci tak důležitého rysu jeho „zdravého rozumu“, jakým je nazírání fenomenálního světa v trojrozměrném prostoru; ke teoretickému popisu procesu vzniku podmínek možnosti tohoto nazírání je nezbytné, aby se do něj explicitně začlenil efekt dekoherence. Omnèsův přístup si přiblížíme tak, že nejdřív podáme zjednodušené vyvození velmi důležitého modu kvantově-klasické korespondence, jímž je korespondence mezi kvantovým probabilmem a klasickým determinismem; toto vyvození se opírá o korespondenci mezi kvantovou a klasickou logikou, která sice implicitně předpokládá působení dekoherence, formálně však na něm závislé není. Poté bude následovat podobně zestručněný výklad vlivu dekoherence na ustavení fenomenální danosti světa v trojrozměrném prostoru.

Omnès ve své interpretaci přistupuje k problému korespondence tím způsobem, že klasické vlastnosti makroskopických objektů traktuje jako zvláštní kvantové vlastnosti, což implikuje, že tyto vlastnosti musí být v duchu univerzálního pravidla interpretace spojeny s nějakými kvantovými projekty; v opačném případě nemají žádný smysl. Podobně platí, že myšlení „zdravého rozumu“, které je ve shodě s klasickou fyzikou, je z kvantového hlediska platné tehdy, když je příslušná rodina historií konzistentní.

Co se týče determinismu, odpovídá tomuto obecnému přístupu zásadní myšlenka, že klasický determinismus má také své (jednoduché) probabilistické vyjádření. Spíše než by byl chápán jako absolutní pravidlo v laplaceovském duchu, lze jej popsat jako vztah mezi dvěma událostmi, přičemž ovšem v tomto popisu existuje určitá pravděpodobnost chyby. Rozdíl mezi krajnostmi – nebeskou mechanikou a atomy – spočívá v různých pravděpodobnostech chyb v deterministickém popisu; tyto chyby se pohybují v intervalu, jehož hranicí je na jedné straně prakticky nulová velikost a na straně druhé zase hodnota blízká se k 1. V návaznosti na vztah korespondence mezi logickou deskripcí kvantové a klasické fyziky Omnès dále konstatuje, že klasický determinismus může být z hlediska logiky charakterizován jako logická ekvivalence mezi dvěma klasicky smysluplnými vlastnostmi vyskytujícími se v různých časech.<sup>99</sup>

<sup>98</sup> Omnèsovým řešením problematiky vztahu obecného a zvláštního k jednotlivinám či faktům, jímž se Omnès od Hegelova pojetí zásadně liší, se budeme zabývat níže v souvislosti s dekoherentistickou teorií měření.

<sup>99</sup> V exaktnější formulaci lze tuto myšlenku vyjádřit následovně: V klasické (Newtonově) dynamice platí výrok  $a$ , podle něž se souřadnice  $x$ ,  $v$ , jež vyjadřují rychlost a polohu nějakého bodu, nacházejí v čase  $t$  v regionu  $D$ . Každý bod, určený souřadnicemi  $x$ ,  $v$  se pohybem odehrávajícím se mezi okamžiky  $t$  a  $t'$  transformuje v jiný bod určený souřadnicemi  $x'$ ,  $v'$ .

K tomu, abychom našli probabilistický ekvivalent klasického determinismu, musíme jej popsat v termínech fázového prostoru. V tomto druhu formalizace je determinismus popsán pomocí buňky  $C$  ve fázovém prostoru, která se vyvozuje z buňky  $C_0$  na základě klasického pohybu během intervalu  $t - t_0$ . (Jak známo, v klasické fyzice se dvě vlastnosti vyjádřené symboly  $C_0$  v čase  $t_0$  a  $C$  v čase  $t$  navzájem implikují čili jsou logicky ekvivalentní.) V kvantově mechanickém čili pravděpodobnostním popisu musíme determinismus vyjádřit tak, že o vlastnostech  $(C_0, t_0)$  a  $(C, t)$  předpokládáme, že se vyskytují s pravděpodobností  $p(C_0, t_0)$ , resp.  $p(C, t)$ . S použitím podmíněné pravděpodobnosti nabývá pak výraz pro klasický determinismus tvaru

$$p((C_0, t_0)|(C, t)) = p((C, t)|(C_0, t_0)) = 1$$

Význam rovnice je zřejmý: když platí jedna vlastnost, druhá rovněž platí s pravděpodobností 1. K důkaz platnosti vztahu  $(C_0, t_0) \rightarrow (C, t)$  je nutné použít úplnou rodinu historií týkající se relevantních vlastností, zkontrolovat podmínky konzistence a také to, zda onen vztah spočívá na podmíněné pravděpodobnosti rovné 1.<sup>100</sup>

Klasický determinismus se aplikuje na kvantový systém při splnění dvou podmínek:

- 1) když platí Jegorovova korespondence mezi kvantovou a klasickou dynamikou;
- 2) a když počáteční stav systému lze popsat klasicky.

Klasická vlastnost tvrdí, že klasické kolektivní proměnné  $(x, p)$  reprezentují bod náležející do dané buňky  $C$  ve fázovém prostoru. Nejjednodušší z nich udávají souřadnice polohy a hybnosti uvnitř jistých hranic chybného stanovení; v tomto případě je buňka  $C$  jednoduše prostorovým pravoúhelníkem („krabici“). Klasická vlastnost, která dovoluje korespondenci s nějakou kvantovou vlastností, musí splňovat následující podmínky: buňka  $C$  musí být dost velká (její objem je velký, pokud jej měříme v jednotkách řádu Planckovy konstanty) a její hranice musí být dostatečně hladká.

Podmínka hladkosti, jakož i odhad chyb zahrnutých v korespondenci spočívají na jednoduchých geometrických představách. Pro měření souřadnic polohy a hybností lze využít určité referenční škály  $(L, P)$  reprezentující rozměry buňky, alespoň pokud je její tvar dostatečně jednoduchý.<sup>101</sup> Na jejich základě se pro buňku definuje parametr klasičnosti  $\varepsilon$ , a sice vztahem  $\varepsilon = (\hbar/LP)$

Když jako výrok  $b$  označíme větu, že souřadnice  $x'$ ,  $v'$  vyjadřující rychlost a polohu bodu nacházejí v čase  $t'$  v regionu  $D'$ , pak je zřejmé, že výroky  $a$ ,  $b$  jsou logicky ekvivalentní. Klasický determinismus je tedy ryze logická ekvivalence mezi dvěma výroky newtonovské dynamiky se zřetelem ke dvěma časovým okamžikům. Ačkoliv se to zdá triviální, přesto adekvátně vyjadřuje hlavní ideu determinismu, podle níž minulost úplně determinuje přítomnost (a naopak, že přítomnost determinuje minulost, pokud ovšem zanedbáme tření). Taková byla Laplaceova koncepce determinismu. (Srv. *QPh*, str. 169.)

<sup>100</sup> Podrobněji viz *UQM*, str. 185-186.

<sup>101</sup> Obecnou definici těchto škál podává Omnès v *IQM*, kapitola 6.

<sup>1/2</sup>, jakož i efektivní parametr klasičnosti  $\eta$ , jenž je součinem  $\varepsilon$  a poměru mezi plochou hranice buňky vůči jejímu objemu. Čím je buňka objemnější, tím menší je tento parametr (může být v řádu 1 nebo i větší, když je hranice velmi zakřivená).

Pravidelná buňka  $C$  se definuje jako doména sestávající z jednoho kusu bez jakýchkoli děr, dostatečně velká a objemná na to, aby  $\varepsilon$  a  $\eta$  byly malé.<sup>102</sup> Je třeba navíc předpokládat, že intermediární buňky  $C_{t'}$  ( $0 \leq t' \leq t$ ), skrze které pohyb probíhá mezi časem 0 a  $t$ , jsou rovněž pravidelné. Pravidelnost buněk  $C_0$ ,  $C_{t'}$  a  $C$  je nutnou podmínkou, aby bylo možné s každou z nich asociovat projektor (resp. množinu ekvivalentních projektorů). Pro další postup budeme projektory, které jsou při splnění těchto podmínek asociovány s buňkami  $C_0$  a  $C$ , označovat  $E_0$  a  $E$ ; postup spočívá v hrubém odhadu, co by bylo možno očekávat, pokud by kvantově-klasická korespondence byla dokonalá: projektor  $E$  by tehdy vyjadřoval, jaký má v čase  $t$  důsledek vlastnost s projektorem  $E_0$  v čase  $t_0$ . Existoval by tedy i projektor  $D$  vyvíjející se v čase, pro který by platilo  $D(t) \equiv U^{-1}(t)DU(t) = E$  a  $D(t_0) \equiv U^{-1}(t_0)DU(t_0) = E_0$ , což dále po patřičné úpravě implikuje, že  $E = U(t - t_0)E_0U^{-1}(t - t_0)$ . [Připomeňme si, že  $U(t) = \exp(-iHt/\hbar)$  je Schrödingerův vývojový operátor.] Otázkou je, zda posledně uvedená rovnost platí a nakolik je přesná.

Odpověď lze najít v rámci tzv. mikrolokální analýzy,<sup>103</sup> kde je známá jako Jegorovův teorém a má následující znění: Rovnost  $E = U(t - t_0)E_0U^{-1}(t - t_0)$  platí s chybou, která se v zásadě rovná největšímu ze všech parametrů klasicity příslušejících intermediárním buňkám  $C_{t'}$ , skrze něž  $C_0$  prochází během svého klasického pohybu mezi časy  $t_0$  a  $t$ , dříve než se transformuje v  $C$ .<sup>104</sup>

Podmínky platnosti determinismu jsou tytéž jako podmínky platnosti Jegorovova teorému;<sup>105</sup> důkaz tohoto teorému (původně ryze matematického) byl ovšem podán jen za určitých restriktivních podmínek. Nicméně jsou dobré důvody k domněnce, že podmínky platnosti Jegorovova teorému jsou širší než za jakých byl explicitně dokázán; některé z restriktivních podmínek lze totiž

<sup>102</sup> Srv. *IQM*, str. 480.

<sup>103</sup> Mikrolokální analýza neboli pseudodiferenciální počet je nový druh matematické analýzy rozvíjený od konce 60. let 20. století; umožňuje zprostředkování mezi kvantovou fyzikou (kde fyzikálními veličinami jsou operátory a dynamika se řídí Schrödingerovou rovnicí) a fyzikou klasickou (kde dynamika je newtonovská a veličiny jako rychlost a poloha jsou vyjádřeny základními čísly). V rámci mikrolokální analýzy lze např. asociovat operátor působící na vlnovou funkci kyvadla s funkcí rychlosti a polohy; takováto funkce se označuje jako symbol operátoru. Tímto způsobem lze sestavit analogii slovníku, jež poskytuje překlad velmi mnoha termínů kvantové fyziky do klasických termínů.

<sup>104</sup> Explicitnější verze tohoto teorému má tvar  $N^{-1}\text{Tr}|E - U(t - t_0)E_0U^{-1}(t - t_0)| = O(\zeta)$ , kde  $N$  je počet kvantových stavů a  $\zeta$  dynamický parametr klasičnosti, který lze aproximativně vyjádřit jako horní mez různých parametrů klasičnosti  $\varepsilon(t')$  či efektivních parametrů klasičnosti  $\eta(t')$ .

<sup>105</sup> Jegorovův teorém ukazuje, že mnohé z klasických událostí, pokud plynou z determinismu, jsou v konzistenční stopě tautologiemi, jakoby příslušné projektory byly operátory identity. (Srv. *UQM*, str. 164.)

odstranit nebo v určitých případech nahradit slabšími, což je situace obvyklá v mnoha oblastech fyziky a nemusí tudíž působit zvláštní problémy.

Z toho plyne, že klasicko-logická ekvivalence ustavující klasický determinismus platí rovněž jako kvantově-logická ekvivalence, jinými slovy, klasický determinismus je důsledkem kvantové mechaniky. Klasická logika a determinismus jsou takto přímými výsledky univerzálního pravidla interpretace – jeho univerzální charakter nachází své potvrzení právě v tom, že jeho důsledky překračují probabilistický rámec kvantové mechaniky, aby dosáhli téměř jistoty v klasických situacích (ačkoli pravděpodobnosti si podržují vládu nad možnými chybami).

Co se týče těchto chyb, odpovídají určitým případům, kdy je Jegorovův teorém prostě a jasně neplatný, což ovšem znamená porušení klasického determinismu. Dochází k tomu například u pokusů se supravodivými kvantově-interferenčními zařízeními (známými pod zkratkou SQUID), u chaotických systémů, v nichž chaotičnost dosahuje škály Planckovy konstanty nebo v případech spíše hypotetických velkých kvantových fluktuací.

Omezení platnosti determinismu jsou tedy stejná jako pro dynamiku a logiku „zdravého rozumu“ a chyby jsou také stejné. Chyba v determinismu je pravděpodobnost, že jedna z klasických vlastností je nesprávná, když o druhé, s níž je první ekvivalentní, se předpokládá, že je správná.<sup>106</sup> Determinismus je tedy v platnosti až po určité pravděpodobnosti chyb, které mohou být principiálně stanoveny a jsou za většiny praktických okolností extrémně malé.<sup>107</sup>

Nyní je již možné přejít k problematice restituce platnosti nazírání fenomenálního světa v trojrozměrném prostoru. Východiskovou situaci zde určuje další důležitá vlastnost Jegorova teorému, a sice že tento teorém kromě probabilisticko-deterministické korespondence implikuje též (při zanedbání tření) korespondenci mezi unitárními kvantovými transformacemi a klasickými kanonickými transformacemi.<sup>108</sup> To znamená, že kvantová logika

<sup>106</sup> Chyby jsou dvojího druhu: mohou být výsledkem nepatrného narušení podmínek konzistence nebo jemné odchylky podmíněné pravděpodobnosti, jež zdůvodňuje uvažování, od hodnoty 1. Při jejich exaktním vyjádření se uplatňuje dynamický parametr klasičnosti  $\zeta$ , jenž je mírou logické inkonzistence, která může nastat v klasickém uvažování – jde o pravděpodobnost chyby, když formulujeme pro danou situaci závěr, jenž je v souladu s klasickou fyzikou. (Srv. *IQM*, str. 236-237).

<sup>107</sup> Strašlivým vyvrácením determinismu by například bylo, kdyby se v důsledku velké kvantové fluktuace či tunelového efektu naše Země náhle (kvantovým skokem) opustila Sluneční soustavu a začala rotovat kolem Síría. Naštěstí o takové situaci vůbec nemusíme uvažovat, neboť třebaže determinismus není absolutní, pravděpodobnost jeho narušení je nesmírně malá: pro případ přemístění Země k Síríu tunelovým efektem že by její číselné vyjádření vyžadovalo napsat na pravou stranu desetinné čárky řadu nul v počtu 10 umocněno na  $10^{200}$ . Žádný počítač by toto číslo nebyl s to prezentovat v decimální formě zápisu.

<sup>108</sup> Zjednodušeně řečeno, jde o přechod od kvantové nespojitosti (skokovitosti) ke klasické spojitosti. Unitární transformace, která se definuje v maticovém počtu, má tvar  $x_i'x_i' = a_{ij}a_{ik}x_jx_k = x_jx_k$ , z něhož pro koeficienty  $a_{ij}$ ,  $a_{ik}$  plyne platnost vztahu  $a_{ij}a_{ik} = \delta_{jk}$  ( $\delta$  označuje nám již známé Kroneckerovo číslo); přítomnost Kroneckerova čísla s dostatečnou jasností

může být ve rozšířena i na spojitý čas čili že v jejích termínech lze „korespondenčně“ vyjádřit klasickou dynamiku, která popisuje spojitý (klasický) pohyb grupou takovýchto kanonických transformací.

Komplikovanost úkolu vysvětlit pomocí kvantové mechaniky, proč vidíme svět ve trojrozměrném prostoru, spočívá nejen v tom, že Schrödingerova vlnová funkce platí v abstraktním konfiguračním prostoru, a nikoliv v obyčejném trojrozměrném prostoru, nýbrž hlavně v tom, že Lagrange-Hamiltonova verze klasické fyziky (jakožto invariantní vůči kanonickým transformacím) se týká abstraktního fázového prostoru a neimplikuje, že by Newtonova reprezentace fyziky ve trojrozměrném prostoru měla být něčím privilegovaným.

K restituci kompletní platnosti „zdravého rozumu“ chybí na úrovni Lagrange-Hamiltonovy verze klasické fyziky jak nazírání světa ve trojrozměrném prostoru, tak účinky tření, od nichž se, jak víme, abstrahovalo.

A právě zde nastupuje dekoherence jakožto poslední stupeň dovršení naší obvyklé reprezentace světa. Má totiž tu podivuhodnou vlastnost, že selektuje speciální množinu kolektivních souřadnic: V případě ryze mechanického makroskopického systému zahrnujícího tuhé a tekuté složky, nikoliv však makroskopické elektromagnetické efekty, dekoherence selektuje kolektivní souřadnice ve trojrozměrném prostoru (to plyne z invariantnosti fyzikálních zákonů při změně referenční soustavy).<sup>109</sup> Diagonalizace operátoru hustoty vlivem dekoherence nemůže totiž být invariantní vzhledem k úplné grupě kanonických transformací (zahrnující jak proměnné  $q_i$  popisující polohu, tak proměnné  $p_i$ , popisující hybnost), nýbrž invariantnost si uchová pouze v rámci jisté vybrané skupiny proměnných (odborně vyjádřeno, jde o selekci specifické báze),<sup>110</sup> například pouze v rámci skupiny proměnných  $q_i$ , jež charakterizují trojrozměrný prostor. Jak lapidárně říká Omnès, dekoherence vede přímo k Newtonově koncepci klasické mechaniky<sup>111</sup> (a nikoliv pouze k její abstraktní lagrangeovsko-hamiltonovské verzi).

---

poukazuje na nespojitý charakter unitární transformace. Naproti tomu u kanonických transformací, definovaných tím, že odpovídají podmínkám, jež zaručují invariantnost Hamiltonových rovnic při přechodu od jedné souřadnicové soustavy (zahrnující jak proměnné  $q_i$  popisující polohu, tak proměnné  $p_i$  charakterizující hybnost) k jiné, jsou dotyčné podmínky vyjádřeny parciálními derivacemi, tj. spojitě. (Srv. J. Kvasnica, *Matematický aparát fyziky*, str. 97, J. W. Leech, *Klasická mechanika*, SNTL Praha 1970, str. 66.)

<sup>109</sup> V rámci našeho zjednodušujícího výkladu vynecháváme roli, kterou v této selekci hraje zákon setrvačnosti.

<sup>110</sup> Dekoherence může někdy vést k výběru privilegované báze  $|x\rangle$ , kde redukovaný stavový operátor vykazuje zřejmou tendenci k diagonalizaci. To ovšem protirečí základnímu Diracovu pravidlu, kladoucímu invariantnost kvantové mechaniky vzhledem k unitární transformaci (tj. vzhledem ke změně báze) jakožto kvantový ekvivalent invariantnosti klasické Hamiltonovy dynamiky vzhledem ke kanonické změně proměnných ve fázovém prostoru. Tuto nesrovnalost lze odstranit, připustíme-li, že Dirac se sice nemýlil, avšak jeho pravidlo není univerzální, neboť Hamiltonovy rovnice nezahrnují disipaci; a jak víme, bez disipace není dekoherence. (Srv. *UQM*, str. 215.)

<sup>111</sup> *QPh*, str. 205.

Začlenění pojmu dekoherence do teoretické rekonstrukce fenomenálního světa zároveň znamená, že se do ní začlenilo doposud „chybějící“ třetí a že tedy dosáhla vyššího stupně konkretizace.

Teorie dekoherence tedy vede k závěru, že nazírání světa v trojrozměrném prostoru je skutečně důsledkem kvantové fyziky. Lidské smysly nejsou dostatečně jemné, aby zachytily projevy kvantových efektů, a proto to, co lidé vnímají, musí být vyjádřeno výroky podřizujícími se pouze klasické logice; nicméně matematické vyvození propozic klasické fyziky ze zákonů kvantové fyziky poskytuje věrný obraz způsobu, jak lidé vnímají běžný svět a jak vytvářejí jeho mentální reprezentace, a hlavně prokazuje, že „zdravý rozum“ je v rámci relativně velmi širokých hranic plně oprávněným způsobem uchopení světa. To umožňuje, abychom, jak říká Omnès, byli v našem světě „opět Řeky“ s jasnou myslí.<sup>112</sup> Vizuální reprezentace našeho fenomenálního světa i z ní vyrůstající způsob, jímž světu rozumíme a mluvíme o něm, jsou v plné shodě právě s těmi základními zákony fyziky, které je tak dlouho zdánlivě negovaly; harmonie je opět nastolena.

## 7. Měření a fakticita

Fundamentální důležitost teorie měření pro problematiku kvantově-klasické korespondence a restituce fenomenálního světa na bázi kvantové teorie plyne z toho, že zatímco měření v klasické fyzice (realizované např. přikládáním délkového měřítka, teploměrem, tlakoměrem atp.) neovlivňuje měřený děj nebo stav, resp. ovlivňuje ho v naprosto zanedbatelné míře (což platí i pro naše smyslové vnímání, zejména u distantních smyslů, jako jsou zrak a sluch), kvantová fyzika se naopak vyznačuje tím, že jí používané procedury měření významně zasahují do měřených mikroskopických dějů a událostí a podle známé verze kodaňské interpretace dokonce tyto děje a události konstituují.<sup>113</sup> Teorie měření v kontextu vztahu kvantové a klasické fyziky musí tedy zodpovědět otázku, do jaké míry a zdali vůbec jsou výsledky získané měřením objektivní, čili stanovit, nakolik se do nich promítají vlivy pocházející z aktivit poznávajícího subjektu.

Teorie dekoherence je ovšem s to najít vztah korespondence i mezi zákonitostmi měření mikroskopických charakteristik dějů na jedné straně a zákonitostmi, které se uplatňují u měření klasických vlastností a vnímání na straně druhé; k lapidárnímu vyjádření tohoto vztahu dospívá Omnès, když říká,

---

<sup>112</sup> *QPh*, str. 206.

<sup>113</sup> Kromě toho snad ani není zapotřebí zvlášť zdůrazňovat, že pravděpodobnosti, které v teoretických konstrukcích kvantové fyziky vystupovaly pouze jako logický či lingvistický nástroj, získávají měřením empirickou signifikanci. Zde se teorie může porovnat ze zkušeností a cesta vedoucí od formalismu ke konkrétní realitě je konečně dovršena.

že vnímání je speciálním případem měření<sup>114</sup> (v čemž je zároveň implicitně zahrnuto, že měření klasických vlastností je speciálním případem měření vlastností kvantových).

Co se týče samotného měření kvantových vlastností, hlavním problémem je zde stanovení vztahu mezi datem a výsledkem měření, tj. určení charakteru zprostředkování mezi mikroskopickým a fenomenálním světem. Pod datem totiž rozumíme klasický fenomén či vlastnost, týkající se pouze měřícího přístroje: datum je výrazem faktu, jakým je poloha ručičky nebo číslo, které je registrováno v počítačové paměti. Na druhé straně výsledkem měření bude kvantová vlastnost, která je tím, co chceme poznat prostřednictvím měření. Jako taková patří téměř výhradně do mikroskopického světa (může to být např. hodnota komponentu spinu určitého atomu).<sup>115</sup>

Jestliže na vztah mezi datem a výsledkem měření aplikujeme kvantovou logiku, pak je v návaznosti na dosavadní výklad intuitivně zřejmé, že výsledek měření a datum jsou logicky ekvivalentní tehdy, když platí dva předpoklady:

- 1) Měření je správné (nedokonalosti se mohou vzít v úvahu později).
- 2) Měřicí přístroj je podroben působení dekoherenčního efektu.

Hlavní důsledek dekoherence spočívá v tom, že data získaná kvantovým měřením jsou popsána diagonálním operátorem hustoty, takže nemohou vykazovat žádný efekt kvantové interference.<sup>116</sup>

Toto tvrzení mimo jiné implikuje, že když nějaká historie zahrnuje fenomén, který se vyznačuje dekoherencí, nelze přiznat logickou konzistenci

---

<sup>114</sup> *IQM*, str. 509.

<sup>115</sup> Omněs zároveň provádí i rozlišení mezi fakty a fenomény: Fenomény jsou klasicky smysluplné vlastnosti nějakého systému a jsou teoretické a potenciální (tj. hypotetické – mohou být uvažovány jako součást nějakého předpokladu). Fakty jsou naproti tomu aktuální a liší se od fenoménů tím, že jsou reálné a jedinečné. (Srv. *IQM*, str. 477)

<sup>116</sup> Exaktně vyjádřeno, interakce mezi měřeným objektem  $Q$  a měřícím přístrojem  $M$  se odehrává mezi 2 časovými okamžiky  $t$  a  $t + \Delta t$ , tj. mezi začátkem a koncem měření. Pozorovatelná proměnná  $A$  asociovaná s  $Q$ , která je tím, co měříme, hraje v oné interakci privilegovanou roli. K jejímu popisu uvažujeme rodinu projektorů  $E_n$ , patřících k objektu  $Q$ . Každý z nich vyjadřuje, že hodnota  $A$  na začátku interakce se nachází v určitém reálném intervalu (tyto kvantové vlastnosti jsou výsledky měření). Aby interakce mezi  $Q$  a  $M$  měla charakter měření, musí splňovat specifickou podmínku zahrnující vývojový operátor  $S = U(t, t + \Delta t)$  pro celkový systém  $Q + M$ ; tento operátor se vztahuje na časový interval, v němž oba systémy interagují, než je datum registrováno. Tento „kolizní“ operátor musí být semidiagonální, aby byl s to vyjádřit silnou korelaci mezi počátečními vlastnostmi  $Q$ , které se mají měřit, a daty. Označme indexem 0 počáteční neutrální stav  $M$ , indexem  $n$  různá data a symboly  $F_0$  a  $F_n$  odpovídající kvazi-projektory (vyjadřují klasické vlastnosti 0,  $n$  v podobě kvantových vlastností; klasická vlastnost totiž nemůže být asociována s jediným vektorem v Hilbertově prostoru, nýbrž pouze s třídou operátorů sdílejících mnohé vlastnosti s projektory; podrobněji viz *IQM*, str. 480-481); Přístroj  $M$  bude pak dokonalým měřícím zařízením, když bude platit  $S E_n(t) F_0(0) = F_n(t') S E_n(t) F_0(0)$ . Tato rovnice znamená, že je-li přístroj na počátku v neutrálním stavu a interaguje se stavem  $Q$ , jenž se vyznačuje kvantovou vlastností  $n$ , pak odpovídající datum  $n$  bude přístrojem nakonec ukázáno. Pokud samotné měření nemá měnit hodnotu  $A$ , musí interakce mezi  $Q$  a  $M$  vyhovovat rovnici  $S E_n(t) F_0(0) = F_n(t') E_n(t') S E_n(t) F_0(0)$ .

nějaké pozdější vlastnosti, která by protiřečila tomuto fenoménu nebo jeho důsledkům. To umožňuje, aby vznikl nezničitelný záznam (*record*) či otisk, jehož následky se uchovávají i tehdy, když je sám o sobě přemazán nebo podlehne disipaci. Zůstává přítomen ve vnitřních detailech vlnových funkcí, neboť právě dekoherence znemožňuje, aby jeho negace byla konzistentní. Jakákoliv historie, která by vedla k jeho popření (nebo popření jeho dalších důsledků), tedy nutně porušuje podmínky konzistence, a tudíž i pravidla logiky.

Z toho plyne, že poté, co bylo měřením získáno určité datum, musí toto datum zůstat v platnosti jednou provždy, takže může být považováno za fakt (to se vztahuje na každý makroskopický fenomén, ať již vzchází z kvantového dění či nikoliv).

Tento závěr je ovšem v rozporu s von Neumannovým modelem, v němž Schrödingerova kočka, kterou jsme shledali mrtvou, může být velmi dobře shledána naživu později, když se na systému, k němuž náleží, provádí nějaké další měření. Všeobecná akceptace von Neumannova modelu neznamenal tudíž nic jiného, než že před objevením dekoherenčního efektu neměl pojem faktu v kvantové fyzice žádný význam.

Na tomto místě je nezbytné, abychom si připomněli výše zmiňovaný ireverzibilní charakter dekoherence čili skutečnost, že efekt dekoherence vybírá specifický směr času pro události, v nichž působí, a že v důsledku blízkého vztahu mezi dekoherencí a disipací je tento vybraný směr času tentýž jako v termodynamice. Z toho plyne, že data, která byla separována na základě dekoherenčního efektu (což znamená, že v nich již neexistují žádné dvojznačnosti, mající původ v kvantové interferenci), jsou separována provždy, ovšem s výjimkou velmi malých systémů. Slova „dřív“ a „později“ mají proto v teorii i praxi měření zcela určitý význam; jak dodává Omnès, z tohoto hlediska není na procesu měření celkem nic obzvláště mimořádného – je to právě typický příklad nevratného procesu, který se řídí druhým zákonem termodynamiky.

Fundamentální souvislosti mezi termodynamikou, disipací a efektem dekoherence spolu s výše nastíněnou restitucí klasického determinismu zakládají možnost, aby se v záznamu či otisku události uchovala „vzpomínka“ na minulé fakta. V souladu s tím je Schrödingerova kočka v kterémkoliv čase buď objektivně živá, anebo mrtvá. Když otevřeme krabici a zjistíme, že kočka je mrtvá, naše znalost disipativních efektů nám umožní provést pitvu a říci, kdy a proč zemřela.

K podobným závěrům dospějeme, když vyjádříme příběh profesora Babillarda, který objevil, že by mohl neexistovat kvůli zákonům kvantové mechaniky, v termínech Griffithsových historií; ukáže se, že – na základě působení dekoherence – je jeho historie nekonzistentní. Jeho příběh neprotiřečí pouze zdravému rozumu (klasické logice), ale také kvantové logice. Babillardův příběh nám poukazuje na cosi mnohem významnějšího: jakákoliv vlastnost, kterou lze stanovit jako důsledek dekoherence, zůstane poté platnou navždy; nemůže být zneplatněna dalšími událostmi. Má tudíž charakter faktu – a z toho plyne, že pojem faktu si v kvantové mechanice zachovává dokonalou validitu.

Jestliže se použije Bohrova definice fenoménu jakožto myslitelného faktu, pak všechny fenomény lze pokládat za klasické vlastnosti rezultující z dekoherence.

Fenomény, které rezultují z dekoherence, jsou téměř úplně nezrušitelné, kromě neuvěřitelně malých pravděpodobností chyby – právě tak, jako je tomu u klasické fyziky a determinismu. Kvantová teorie nemůže z principiálního hlediska úplně odstranit chyby nebo výjimky; fantazie nám může vždy poskytovat představy o gigantické kvantové fluktuaci, např. že některá vytištěná písmena v knize, kterou právě čtete, by se vznesla do vzduchu a zformovala v nápis „bud’ zdrav, vážený čtenáři“. Tento druh událostí, právě tak jako Schrödingerova kočka, která se vrátí do života v důsledku subtilních procedur měření, nepatří ovšem do empirické fyziky.<sup>117</sup>

Oproti Bellovi a d’Espagnatovi, kteří se domnívají, že teorie dekoherence se dá uplatnit jen pro praktické účely, je Omnès přesvědčen, že tato teorie poskytuje fundamentální explanaci podmínek možnosti faktů jakožto nezrušitelných událostí či nesmazatelných záznamů, do nichž rezultuje dění na kvantové úrovni; pro ustavení takového statusu faktů používá termín „objektifikace“. Explanace se odvíjí od kvalitativního významu tvrzení opírajících se o pravděpodobnosti velmi blízké 1, která kromě objektifikace poskytují oprávnění i „zdravému rozumu“ (tj. klasické fyzice). Tím ovšem není řečeno, že by kvantová fyzika, byť obohacená o teorii dekoherence, měla a mohla podat vysvětlení, proč vůbec existují právě ty, a ne jiné jedinečné fakty. Těmito i dalšími aspekty dekoherentistického pojetí fakticity se budeme zabývat v souvislosti s řešením problematiky redukce neboli kolapsu vlnové funkce.

Jak již víme, v pojetí Nielse Bohra bylo pravidlo redukce vlnové funkce odlišeno od všech ostatních fyzikálních zákonů; bylo pro něj podmínkou možnosti srovnání teorie se zkušeností, a proto unikalo jakékoliv empirické verifikaci. Pro Bohra mělo toto pravidlo dva odlišné významy:

1) Bylo praktickým pravidlem aplikujícím se na výsledky dvou po sobě následujících měření a umožňujícím stanovit pravděpodobnost výsledku druhého měření, pokud výsledky prvního měření jsou známy.

2) Vztahovalo se zároveň k výskytu jedinečné aktuální události mezi všemi možnými výsledky měření, resp. přechodu nekonečného množství možností v jednu jedinou skutečnost; v tomto svém druhém, daleko známějším významu se pravidlo redukce opravdu odlišuje od všech ostatních zákonů.

Co se týče prvního významu, pravidlo redukce konstatuje, že pravděpodobnosti výsledků druhého měření lze vypočítat, „jakoby“ výsledek prvního měření determinoval vlnovou funkci při výstupu z měřícího přístroje. Otázkou je, zda ono „jakoby“ v sobě tají pouhý praktický návod, anebo fyzikální realitu.

---

<sup>117</sup> Jak jsme již výše uvedli, hlavní argument ve prospěch tohoto tvrzení pochází od matematika Borela, který dokazuje, že události s tak malou pravděpodobností nejsou reprodukovatelné, a proto by měly být z vědy vykázány. Matematická teorie se sice nemůže vyhnout tomu, aby se zabývala takovými událostmi, avšak to co o nich vypovídá, nemůže být považováno za spolehlivé a ani za rozumné.

Odpověď, kterou na tuto otázku dává Omnèsův přístup, je jednoznačná: redukce vlnové funkce nevystupuje jako skutečný fyzikální efekt a není nutné ji dokonce ani jen zmiňovat při rozvíjení úplné teorie měření. Když se totiž na problém sukcesivních měření aplikuje koncept Griffithsových historií a vezmou se přitom v úvahu úplné historie jak měřících přístrojů, tak měřených objektů, nenalezne se nikde nic, co by se podobalo redukci vlnové funkce; vše zůstává v plném souladu se Schrödingerovou rovnicí.<sup>118</sup> Neexistuje žádný redukční efekt, který by působil na měřený systém – jediným efektem, který musí nevyhnutelně účinkovat, je dekoherence, jež působí v měřících přístrojích.

Pouze když pozorujeme matematický výsledek aplikace konceptu konzistentních historií, dospějeme ke zjištění, že pravděpodobnost historie, jež zahrnuje dvě po sobě následující měření, může být za určitých podmínek napsána ve formě, která se podobá pravidlu redukce a která zobecňuje toto pravidlo, když není dobře definované. Přesněji řečeno, pravidlo redukce vlnové funkce se popsáním způsobem objevuje tehdy, když nebereme v potaz detailní historii prvního měřícího zařízení a pak sledujeme historii měřeného atomu, tak jak vstupuje do druhého měřícího přístroje; obdržíme tím výsledek předvídaný redukčním pravidlem.

Pokud chceme nastínit exaktně matematickou podobu tohoto postupu, můžeme vyjít z pravidla pravděpodobnosti (prvně formulovaného Maxem Bornem), které je kromě tvrzení o logické ekvivalenci dat a výsledků měření dalším důležitým teorémem teorie; pravidlo pravděpodobnosti stanovuje, že distribuce pravděpodobností pro data závisí pouze na vlastnostech měřeného systému a na jeho počátečním stavu, nikoliv však na detailním fungování měřícího přístroje. Tato závislost (která je v Omnèsově interpretaci nikoliv postulátem, nýbrž predikcí plynoucí z teorie) je dána rovnicí  $p_n = \text{Tr}\{\rho_Q E_n(t)\}$ , kterou lze použít i pro případ dvou po sobě následujících měření, tj. pro případ, kdy poté, co měření vlastnosti  $A$  proběhlo a systém  $Q$  je uvolněn z příslušné interakce s  $M$ , aby byl mohl být měřen znovu, chceme vypočítat pravděpodobnosti různých možných výsledků tohoto dalšího měření, týkajícího se jiné vlastnosti. Když předpokládáme, že první měření dalo výsledek  $n$ , pak pro operátor hustoty  $\rho$  v čase  $t' = t + \Delta t$ , vyznačující pro systém  $Q$  konec prvního měření, bude platit vztah

$$\rho(t') = \{\text{Tr}_M [F_n(t') \rho_Q \otimes \rho_M F_n(t')]\} \cdot \{\text{Tr}_Q [E_n(t') \rho_Q E_n(t')]\}^{-1}.$$

Tato rovnice, která sama o sobě je jen výhodným návodem pro jednoduchou kalkulaci pravděpodobností pro druhé měření, vyjadřuje pravidlo redukce vlnové funkce. Lze vidět, že toto pravidlo nezahrnuje žádné jiné fyzikální efekty, než jaké byly doposud probírány. Hlavní je mezi nimi dekoherence probíhající v přístroji  $M$  po interakci. Neděje se nic jiného, co by mohlo přímo působit na měřený systém  $Q$ . U pravidla redukce jde pouze o

---

<sup>118</sup> *QPh*, str. 210-211.

přímočarý důsledek logických úvah o historiích: když někdo chce uvažovat nějaké další měření, pravidlo redukce umožňuje vyhnout se nutnosti získat informace o historii měřícího přístroje  $M$  při jeho interakci s  $Q$  a po ní.<sup>119</sup>

Redukce vlnové funkce je tedy pouze vhodným, avšak nikoliv podstatným návodem, postradatelnou formulí, která umožňuje přemostit logickou kalkulaci. Jakožto jednoduchá logická konvence nemá ovšem charakter fundamentálního zákona, nýbrž pouhého teorému. Existuje ostatně překvapivě zarážející podobnost mezi tímto výsledkem a jinými, známějšími formami logické simplifikace. V logice je například dovoleno zapomenout jednotlivé kroky v důkazu teorému a připomenout si pouze závěr tohoto důkazu – tomuto postupu se říká *modus ponens*. Redukci vlnové funkce v tomto smyslu lze považovat za *modus ponens* jistého druhu, za logickou zkratku, v níž se vynechávají historie měřících přístrojů. Jediným opravdu fyzikálním efektem, který podmiňuje výsledek, je efekt dekoherence, který ve skutečnosti působí v měřícím přístroji; není tedy tomu tak, že by byl tento výsledek determinován nějakými zvláštními fyzikálními procesy odehrávajícími se v měřeném objektu, jak se tomu dlouhou dobu věřilo.<sup>120</sup>

Podle Omnèse byla Bohrova koncepce redukce vlnové funkce piruetou génia, jíž se mělo uniknout rozporům, které vzcházely ze simultánní akceptace dvou různých druhů fyzikálních zákonů, kvantových a klasických; jako taková se řadí k takovým myšlenkovým přemetům, jako Zenónův důkaz, že Achilleus nedohoní želvu nebo Anselmův důkaz boží existence. Vztahuje se k měření, k datům vyjádřeným klasickou fyzikou, a přitom konstatuje závěr o vlnové funkci, tj. o kvantové představě. Důvod jejího vzniku spočíval tom, že dokud se nedospělo k teorii dekoherence, zůstával přechod mezi kvantovou a klasickou fyzikou neobjasněný; metaforicky řečeno, vyjadřuje situaci, kdy se muselo kráčet současně po obou březích téže řeky, přes kterou ještě nebyl vybudován žádný most.<sup>121</sup>

Z nemožnosti rozvinout analýzu redukce vlnové funkce ryze formálním způsobem vyplynuly pokusy traktovat ji jako reálný fyzikální proces, jako nějaké dění, které reálně probíhá, když měřený objekt a měřený přístroj interagují. Ačkoliv takový efekt nebyl nikdy prokázán, podkladová idea reálného fyzikálního procesu hrála podstatnou roli v popularizaci koncepce (spojované zejména s druhým významem pravidla redukce), podle níž redukce má konkrétní charakter, probíhá náhle v určitém časovém okamžiku a tímto způsobem může simultánně působit v celém prostoru; tato koncepce se, jak známo, dostala do rozporu s teorií relativity.

Byly to právě tyto zjevně nepřekonatelné těžkosti, které hrály dominantní roli při předložení protichůdného přístupu, jenž našel svůj výraz v brilantních a zlomyslných myšlenkách Johna von Neumanna, rozvinutých později Londonem a Bauerem. V souladu s tímto přístupem nemá redukce nic do činění s reálným

<sup>119</sup> Srv. *IQM*, str. 490-492.

<sup>120</sup> Srv. *QPh*, str. 211.

<sup>121</sup> *IQM*, str. 509.

fyzikálním procesem. Uplatňuje se jen v rámci mentální reprezentace světa, jež existuje pouze ve vědomí pozorovatele. To ovšem předpokládá, že vlnová funkce je spíše než součástí reality také pouze prvkem tohoto vědomí: vlnová funkce je reprezentace reality, kterou může pozorovatel koncipovat se zřetelem k informacím, jež má k dispozici.<sup>122</sup> Avšak pojem vlnové funkce, resp. operátoru hustoty je nezbytný pro celkovou stavbu kvantové mechaniky, která je zase základem pro celou fyziku a chemii, a tím i pro ostatní vědy. Z toho plyne, že v tomto přístupu je věda jako celek redukována na to, co se děje ve vědomí jednoho nebo několika pozorovatelů; nezbyvá v ní již žádná objektivita, v nejlepším případě je suplována shodou mezi vzdělanými lidmi. Tuto koncepci považuje Omnès za solipsistickou regresi, tj. za reprezentaci, kde myšlení zůstává uzavřeno uvnitř vlastního prostoru, aniž by se mohlo někdy ujistit o existenci reality; jak známo, přesto všechno začala figurovat jako „standardní interpretace“ a hrála nezanedbatelnou roli při otřesení důvěry, kterou seriózní lidé chovali k vědě.<sup>123</sup>

Omnès v této souvislosti poznamenává, že samotný Bohr sice zdůrazňoval objektivní charakter své interpretace,<sup>124</sup> avšak jeho subtilní

---

<sup>122</sup> Tuto pozici popisuje Gribbin následovně: „...ona prazvláštní věc, jež způsobuje kolaps vlnových funkcí, se odehrává v mozku inteligentních pozorovatelů“, načež uvádí příznačný citát z R. Peierlse: „Okamžik, ve kterém můžete zavrhnout jednu možnost a podržet pouze tu druhou, nastává tehdy, když si konečně uvědomíte fakt, že experiment poskytl jeden výsledek.“ Konstatuje dále, že právě tato linie úvah přivedla J. Wheelera k úsudku, že vesmír existuje jenom proto, že se na něj díváme. (John Gribbin, *Schrödingerova kořata*, Columbus, Praha 2001, str. 194.)

<sup>123</sup> *IQM*, str. 510.

<sup>124</sup> To je ovšem značně zjednodušený výklad Bohrovy pozice, neboť se zde nebere v úvahu, že Bohrovy názory se vyvíjely. Pro první etapu tohoto myšlenkového vývoje je charakteristický následující Bohrův výrok: „Podle kvantového postulátu je jakékoli pozorování atomových jevů spjato s jejich vzájemným působením s pozorovacími přístroji, kterému se nelze vyhnout, a proto není možno přikládat samostatnou fyzikální realitu v běžném smyslu ani jevu ani pozorovacímu přístroji... Na rozdíl od běžné mechaniky nemá nová mechanika co dělat s popisováním pohybu atomových částic v prostoru a času.“ [N. Bohr: *UFN XIII* (1928), 307, cit. in: Ivan Úlehla, *Od fyziky k filosofii*, str. 79.] Podobný přístup lze najít později i u W. Heisenberga (*Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft*, 1945): „To, co se odehrává v atomu, si nelze vždycky představit jako objektivní proces v prostoru a času. ... představa reálnosti, která je základem Newtonovy mechaniky, byla příliš úzká a je ji nutno nahradit něčím obecnějším. ...představa světa existujícího v prostoru a čase je jen idealizovaná skutečnost“. Z filosofického stanoviska se zde Bohr i Heisenberg přibližují k Schellingově identitní filosofii, která oproti rozlišení subjektu a objektu na jevové úrovni klade jejich nerozlišenost v rovině podstaty (schellingovské absolutno je identitou subjektu a objektu v modu ani-ani: není ani subjektem ani objektem); je skoro zbytečné dodávat, že roli schellingovského absolutna přebírá u zmíněných fyziků samotný akt měření mikroskopických dějů. To objasňuje i pozadí Heisenbergova tvrzení v tom smyslu, že představa objektivního světa nezávisle existujícího na subjektu měření (který sestává z pozorovatele „prodlužujícího“ své smysly měřicím přístrojem) je idealizovanou aproximací prapůvodní nerozlišené jednoty subjektu a objektu. Též ve svém pojetí komplementárnosti se Bohr více přibližuje Schellingovi než Hegelovi (jak se domnívá Omnès, který Bohrovi vytýká, že zde dal přednost

argumenty (které zdaleka nebyly samozřejmé a přesvědčivě konzistentní) nemohly převážit nad prostoduchými subjektivistickými představami, které se šířily i mimo fyziku trivializovanými verzemi standardního modelu; nedůsledný objektivismus Bohra mohl být jen stěží akceptován, neboť svou snahou zkombinovat dva různé druhy přírodních zákonů, zákony klasické a kvantové, se pohyboval na okraji propasti. Omnès je přesvědčen, že jeho interpretace končí s touto nebezpečnou hrou, která u Bohra a jeho přívrženců vedla k jistému esoterismu.

Dekoherentistická interpretace dovoluje teorii stát na jediném druhu zákonů a je zároveň je ve shodě s Bohrovým tvrzením, že měřicí zařízení, obyčejný makroobjekt, se chová v souladu s klasickou fyzikou. Nyní ovšem toto tvrzení není pouze postulováno, nýbrž vyvozeno z prvních principů; pokud jeho platnost selhává, jde o chyby, které jsou předvídatelné a obecně velice malé. (Bohrova původní pojetí, které s chybami nepočítá, je nutné korigovat např. při pokusech s objekty typu SQUID; třebaže výsledky těchto pokusů byly předtím chápány jako kritika kodaňské interpretace, jsou v plné shodě s obecnější dekoherentistickou interpretací.)<sup>125</sup>

Dekoherentismus vylučuje na druhé i extrémní objektivismus známé Everettovy koncepce plurality paralelních světů, která je založena na myšlence, že realita má mnoho větví či alternativ, přičemž nová alternativa se otevře vždy, když se vyskytne nová událost podobná kvantovému měření. Z toho plyne, že

---

Hegelově dialektice před logikou Russella a Whiteheada); vzájemně se vylučující (antitetická) tvrzení týkající se téhož dospívají totiž u Hegela k pojmové syntéze, zatímco u Schellinga je tomu tak, že absolutní identity subjektu a objektu lze dosáhnout pouze v aktu intuice; vzájemně se vylučující přístupy k uchopení této identity, formulované diskursivním rozumem v rámci přírodní filosofie a transcendentální filosofie, zůstávají u Schellinga v mezích diskursivního rozumu ve své protikladnosti nezprostředkovatelné. Bohrovou pozici v první etapě jeho myšlenkového vývoje není tudíž ani subjektivismus, ani objektivismus, nýbrž subjekt-objektové pojetí, v němž kvazischellingovská představa bazální nerozlišenosti subjektu a objektu měření je způsobem filosofické interpretace Heisenbergových relací neurčitosti. K výraznému posunu ve svých názorech dospěl Bohr v r. 1959 v práci o kvantové fyzice a filosofii, v níž mj. tvrdí, že přírodu je nutno brát takovou, jaká je, a že vlastnosti, které poznáváme u atomárních objektů, jsou jejich skutečnými vlastnostmi. [N. Bohr, *UFN* LXVII, (1959), 37; cit. *ibid.*, str. 80.] To ovšem neznamená, že by se Bohr vrátil k newtonovskému pojetí objektivitu; jak upozorňuje Omnès (*IQM*, str. 500), šlo mu spíš o to, aby se měřicí přístroje traktovaly v rámci striktně klasické fyziky jako plně reálné bez jakékoliv reference ke kvantovému pozadí. Bohr používá klasickou fyziku jako jediný referenční systém, jako jedinou doménu, v níž lze aplikovat logiku a o níž lze legitimně vypovídat. Tento Bohra přístup, jímž chtěl najít zakotvení pro nezpochybnitelnou pravdu ve faktech a v jejich klasických charakteristikách, však na druhé straně vedl k zákazu popisovat atomární svět (kromě případu, kdy se tento popis realizuje matematickými prostředky); Bohr se tím povážlivě přiblížil pozitivisticko-fikcionalistické koncepci pregnantně vyjádřené výrokem Ph. Franka, v souladu s nímž je elektron „soubor fyzikálních veličin, zaváděných námi ke stanovení systému principů, z kterých můžeme logicky vyvodit údaje ručičky měřicího přístroje“. (*Foundations of Physics*, 1946, str. 54, cit. in Ivan Úlehla, *Od fyziky k filosofii*, str. 79.)

<sup>125</sup> *IQM*, str. 500.

všechno, co univerzální vlnová funkce obsahuje od počátku, není hřbitovem dávných možností, které se nikdy nerealizovaly a jejichž jediným pozůstalým je svět, který vidíme nyní. Protějškem vlnové funkce je naopak tolik paralelních skutečností, kolik je ve funkci zahrnuto možností, přičemž každá z nich se ubírá svou vlastní, od ostatních oddělenou cestou.

Podle Everetta je tedy reálné všechno, co tvrdí teorie; nutno ovšem dodat, že teorie, která se takto stává zákonem reality, je probabilistická teorie zahrnující nekonečně mnoho možností. Omněs se domnívá, že v Everettově pojetí se setkáváme s podivnou odrůdou platonismu, jež přiznává pravděpodobnostem status reality, resp. s odrůdou absolutního idealismu. Srovnání s platonismem ovšem není zcela přesné, protože Platónovy ideje, třebaže mají charakter paradigm, nejsou samy o sobě demiurgy empirické reality. Vhodnější by byla analogie s Hegelovou absolutní ideou, která produkuje jí odpovídající materiální svět; v Everettově koncepci hrají odpovídající roli demiurga skutečnosti pravděpodobnosti (tj. kvantitativně odstupňované možnosti) různých událostí. Ve srovnání s Hegelem však u něj schází eminentně důležitý koncept negativity, která je fundamentální charakteristikou Hegelovy dialektiky. Již samotné vytvoření materiálního světa (sestavajícího z jednotlivin) se u Hegela děje sebenegací ideje vztahující se na její imateriální a obecný charakter; v souladu se známou anaximandrovsko-spinozovskou tezí *omnis determinatio est negatio* zahrnuje pak každá skutečnost negaci nerealizovaných možností.

U Everetta je naproti tomu vztah možnosti a skutečnosti naprosto zbaven momentu negativity: každá možnost (pravděpodobnost) se stává skutečností; nekonečná pluralita možností dává vzniknout nekonečné pluralitě světů – „pravá“ realita tedy není jedinečná, tak jak ji vidíme, nýbrž mnohočetná. (Když třeba v případě Schrödingerovy kočky zjistíme, že kočka žije, zakládá toto měření rozvětvení mezi naším světem a světem paralelním, v němž se tímž aktem měření realizovala teorií stanovená padesátiprocentní pravděpodobnost, že kočka je mrtvá.) Jak patrně, teorie paralelních světů není právě vhodná pro znovuzavedení zdravého rozumu do kvantové fyziky.

Z teorie dekoherence jasně plyne, že entita nebo jsoucno v jedné větvi této mnohočetné reality nemůže nikdy proniknout do druhé větve; žádný experiment nemůže proto stanovit, zda existují jiné větve nebo existuje pouze jediná. Paralelní vesmíry se ve své nespočitatelné mnohosti navzájem úplně ignorují. Věda ovšem studuje ověřitelná fakta a teorie paralelních světů jí nemůže být ověřena, ani vyvrácena – a to dokonce ani v principu. Nemáme zde tudíž nic do činění s vědou, nýbrž s ryzí a nefalšovanou, leč značně primitivní metafyzikou.<sup>126</sup>

Dekoherentistický přístup přinesl tudíž ukončení (alespoň jedné etapy) dlouhých debat o tom, jaká je proporce subjektivního a objektivního faktoru v kvantově-fyzikálním poznání; jak již bylo naznačeno, některé názory, pronesené

---

<sup>126</sup> Srv. *QPh*, str. 212.

v těchto debatách, byly vytrhovány z kontextu a popularizovány mezi laickou veřejností (zahrnující i fyzikálně málo erudované filosofy), což vedlo falešnému dojmu, že závěry fyziky jsou přímo v „šíleném“ rozporu se „zdravým rozumem“, a k ještě falešnějším pokusům relativizovat na základě tohoto zdánlivého rozporu jak platnost fyzikálního poznání, tak i platnost předvědecké racionality. Lze říci, že tyto zmatky, způsobené dlouhodobou absencí onoho *missing link*, jímž je teorie dekoherence, se tak stala jedním z impulsů pro vznik druhdy módního postmodernistického relativismu.

Odstanění zmatků kolem subjektivity a objektivit v kvantové fyzice je prosté. Podle Omnèse je kvantová fyzika objektivní z toho důvodu, že když se v jejím rámci tvrdí, že existuje určitá vlastnost, nebo se dospívá k určitému závěru, odvozují se tato tvrzení pouze z dobře stanovené faktů, tj. takových, které v důsledku dekoherence již nemohou být učiněny neplatnými. Z tohoto hlediska nemá kvantová fyzika větší problémy s objektivitou než klasická fyzika, třebaže její pozadí není tak zřejmé.<sup>127</sup>

Otázka objektivního charakteru poznání je ovšem neoddelitelně spjata s otázkou pravdy, která je v kvantové fyzice velmi komplikovaná, a sice ze dvou hlavních důvodů: 1) Není možné prověřovat každou její propozici tím, že ji srovnáme s odpovídajícím faktem, neboť fakt je pouze aktualizovaným fenoménem, tj. klasicky smysluplnou vlastností makroskopického objektu. Jestliže bychom pozitivistické krédo, podle něž pouze o faktech lze prokázat, že jsou pravdivé, nemohli bychom říci nic rozumného o částicích nebo atomech (tento náhled prosazoval N. Bohr.) Proto Omnès doporučuje pro kvantovou fyziku jiné kritérium pravdy: propozice tvrdící možnost nějakého fenoménu je pravdivá tehdy, když tento fenomén je faktem. 2) Komplementárnost se svou mnohostí konzistentních logik má za následek, že musíme být velmi opatrní pokud logicky odvozujeme určité pravdivé tvrzení z jiného pravdivého tvrzení.<sup>128</sup>

Omnès připouští, že co se týče nejvlastnějších kvantových propozic, pouze velmi málo z nich lze považovat za pravdivé. S výjimkou několika málo případů nepatří mezi ně dokonce ani výsledek měření jakožto reálná vlastnost měřeného systému náležející mu v čase, kdy byla měřena. Pravda se většinou redukuje na určitou vlastnost měřeného systému rezultující z procesu měření bezprostředně poté, co v měřicím přístroji došlo ke kompletní dekoherenci. A dokonce i to musí být kvalifikováno: měření musí být „ideální“, tj. takové, které nenarušuje tzv. vlastní stav měřené pozorovatelné proměnné. Jinými slovy, ideální měření dává tentýž výsledek dvakrát, pokud je prováděno v bezprostřední následnosti. Zdá se, že je to velmi skrovný výsledek, nevezmeme-li ovšem v potaz, že zahrnuje i případy, kdy se doposud po celou dobu používalo pravidlo redukce vlnové funkce (tj. podstatný moment kodaňské interpretace měření.) Z toho plyne, že toho není mnoho v kvantovém světě jednotlivých událostí, o čem lze říci, že je to pravdivé. Realita zůstává zastřena.

<sup>127</sup> Srv. *IQM*, str. 511.

<sup>128</sup> Srv. *IQM*, str. 495.

Ovšem to málo, co je pravdivé či reálné, postačuje pro to, aby se provozovala fyzika.<sup>129</sup>

Přistupme nyní k druhému významu pravidla redukce vlnové funkce, ve kterém se přes zásadní řešení, poskytnuté teorií dekoherence,<sup>130</sup> nadále skrývá stále přítomný problém spočívající v tom, že každý experiment, v němž se uplatňuje měření a dochází při něm k interakci mezi mikroskopickým objektem a makroskopickým měřicím zařízením, rezultuje v jednotlivé datum, ve hmatatelný, neoddisputovatelný fakt. Jinými slovy, jde o nalezení odpovědi na již výše zmíněnou otázku, proč vůbec existují právě ty, a ne jiné jedinečné fakty?<sup>131</sup>

Jak jsme již měli možnost nahlédnout, každá charakteristika reality byla s pomocí modelů vycházejících z teorie dekoherence restituována; schází pouze jedna jediná, a to jedinečnost faktů. Teorie a realita se shodují v každém aspektu kromě tohoto jediného hiatu. Tato neshoda je však absolutní, protože tento konflikt probíhá na nejnižší úrovni a každý z pólů uvažovaného vztahu je v rozporu se samotnou podstatnou pólů druhého.

Teorie, která je ryze matematická, může zahrnout pouze to, co je možné, a její pravděpodobnostní charakter je nevyhnutelný. Realita, na druhé straně, je

---

<sup>129</sup> *QPh*, str. 232. V souvislosti s problematikou pravdy odlišuje Omnès výroky pravdivé od spolehlivých. Spolehlivé výroky se jeví jako logické důsledky nějakého faktu v určitém logickém rámci, avšak nemohou být konstatované v každém logickém rámci, v každé rozumné logice. Jako takové se vyskytují pouze v kvantové fyzice a nemají analogon v žádné jiné oblasti poznání. Jejich formulování zůstává proto věcí arbitrární volby, třebaže nejsou vnitřně protirečivé. Pokud chceme rozdíl mezi pravdivými a spolehlivými výroky vymezit přesněji, musíme si uvědomit, že na rozdíl od běžné reality, kde platí, že když fakt implikuje konstatování, musí být toto konstatování nutně pravdivé, se v kvantovém světě často stává, že existuje více konzistentních rodin historií se stejnými daty, přičemž z těchto dat lze vyvodit výrok jak *a*, který platí pouze v některých rodinách, a zároveň také výrok *b*, platný zase v jiných rodinách. Jestliže zároveň neexistuje žádná konzistentní rodina historií, která by obsahovala výrok „*a* & *b*“, komplementárnost nám zakazuje pokládat *a* za pravdivý výrok. Výrok „*a* & *b*“ tudíž ani nemůže být konstatován, a tím méně může být pravdivý. Pokud se přidržujeme jen té podmnožiny rodin historií, v níž je výrok *a* platný, nevznikne žádné logické protirečení, když se někdo spolehne na výrok *a*, „jakoby“ byl pravdivý. Tím se právě určuje význam určení výroku *a* jakožto spolehlivého nebo věrohodného. (Srv. *QPh*, str. 225.) Příkladem je Einsteinova, Podolského a Rosenova koncepce „elementů reality“, která sestává z arbitrárních a ne-pravdivých, třebaže nikoliv nesprávných výroků, a ke které se vrátíme níže. Jinými slovy, pravdivé vlastnosti jsou ty, které souhlasí s fakty univerzálně, za jakýchkoli podmínek, nezávisle na arbitrárnosti komplementárnosti.

<sup>130</sup> „Jakmile připustíme nevratnost, zhroucení vlnové funkce přestane být velkou záhadou, jakou dosud je. Z tohoto pohledu není na procesu měření celkem nic zvláště mimořádného – je to právě typický příklad nevratného procesu, který se řídí druhým zákonem termodynamiky. (...) Jestliže nalezneme veličinu podobnou entropii, pak můžeme vratnou funkci zahrnout ve prospěch pravděpodobnostního přístupu, právě tak jako Newtonovy rovnice bylo třeba nahradit Liouvillovými rovnicemi.“ (Peter Coveney, Roger Highfield, *Šíp času*, str. 355.)

<sup>131</sup> V kontextu Schrödingerovy kočky otázka zní: jak lze přejít od probabilistického stanoviska, podle něhož je kočka živá nebo mrtvá, k tomu, co se vidí v realitě, kde pouze jedna z těchto možností je skutečně shledána jako empiricky pravdivá?

především jedinečná, protože je tím, co se úplně definuje, když ukážeme prstem a řekneme „toto“. Jak to poněkud poeticky formuluje Omnès, teorie utkaná z pravděpodobností vyjadřujících hru možností neposkytuje mechanismus či příčinu, z níž by mohla rezultovat panenská přítomnost, nezměnitelná a čistá jedinečnost Reality.<sup>132</sup> Neexistuje žádný jazyk vybavený logikou, v níž by měla tato otázka smysl (je to podobné, jako kdybychom se ptali, skrze kterou mezeru prošla částice?). Jde o iluzorní problém, který vzniká tím, že nás zrazuje naše klasické myšlení se svým schématem kauzality; „zdravý rozum“ nám zde dává křivé zrcadlo, které vytváří náhledy, v nichž není ve skutečnosti nic rozumného. Problém objektivizace v tomto silném významu,<sup>133</sup> jenž kromě nezrušitelnosti faktů zahrnuje i otázku, proč došlo k naměření právě tohoto data, a ne jiného (tedy otázku že-zde-a-ted'-výskytovosti jevů), není reálným fyzikálním problémem.<sup>134</sup>

Během více než poloviny století nesčetní fyzikové a filosofové vytýkali kvantové fyzice, že není schopna vysvětlit existenci jedinečné události. Kvantová fyzika opravdu nenabízí v tomto ohledu žádný mechanismus nebo návod. V souladu s názory zmíněných filosofů jde o neoddisputovatelný příznak toho, že teorie má kaz či trhlinu a že lepší teorie v budoucnosti tento kaz odstraní. Podle Omnèse jde o postoj, který má svůj původ v idolatrii teoretických explanací. Ti, kdo jsou touto idolatrií postiženi, se odvažují redukovat herakleitovský tok reality, bez konce se tvořící a měnící, na pouhý appendix Logosu své matematiky, do níž čas nemá přístup a kde vládne věčný klid.<sup>135</sup>

Omnès naproti tomu vyslovuje (vpravdě filosofický) obdiv nad tím, že úsilí lidských bytostí o porozumění reality vytvoří teorii, která jí odpovídá tak přesně, že s ní nesouhlasí jenom v extrémním pomezi. Je to podle něj přímo zázrak, že teorie a realita plně korespondují, třebaže co se týče své podstaty, jsou mezi nimi nejzazší rozdíly. Teorie a realita totiž musejí přece jen nakonec divergovat – jinak by realita ztratila svou vlastní přirozenost a ztotožnila by se s mimočasovými formami říše znaků, zmrzlých ve své vlastní interpretaci. Neschopnost vědeckého přístupu uchopit jedinečnost faktů není podle něj kazem nějaké provizorní teorie, je to naopak zářivé znamení bezprecedentního triumfu. Lidstvo se nikdy předtím nedostalo tak daleko při dobývání principů, sahajících do nitra a podstaty věcí – tyto principy však nejsou věcmi samými. Bohrovo pravidlo redukce vlnové funkce ve svém druhém významu – toto

<sup>132</sup> Srv. *QPh*, str. 211.

<sup>133</sup> V Omnèsových textech se používá termín „objektivizace“ v obou významech.

<sup>134</sup> Srv. *UQM*, str. 256.

<sup>135</sup> Omnès zde dospívá k téměř doslovné parafrázi Hegelových myšlenek z *Logiky* a *Fenomenologie ducha*. Podle *Fenomenologie ducha* platí, že „nadsmyslný svět je takto pokojnou říší zákonů, je sice mimo svět vněmu – neboť ten představuje zákon pouze ustavičnou změnou – ale stejně je ve světě vněmu přítomen a je jeho bezprostředním tichým obrazem“; v *Logice* zase Hegel říká, že „říše zákonů je klidový obsah jevu; jev je však též obsah, jenže představující se v neklidné změně...“, a dodává, že „jev je však bohatší než zákon“.

velmi speciální, podle Omnèse metafyzické pravidlo – vyjadřuje, že teorie se mívá s tím, co je možná podstatou reality; vyjadřuje, že mezi teorií a realitou zeje nepřekonatelná propast (*chasm*).<sup>136</sup>

Zdá se, že vrcholným výsledkem vědeckého přístupu je zde to, čeho dosáhla, jak bylo exaktně prokázáno, právě Omnèsova interpretace kvantové mechaniky: je to dokonalá kompatibilita s jedinečností reality – jedinečnost sice není predikována prvními principy teorie, ale ani s nimi není v rozporu.<sup>137</sup>

Z toho plyne, že existence aktuálních faktů musí být k teorii přidána zvnějšku jako doplňující podmínka získaná empirickým pozorováním. V souladu s tím se ovšem musí modifikovat struktura času. Čas se musí dělit v minulost, přítomnost a budoucnost, které mají velmi odlišné kvality. Přítomnost a minulost jsou definovány jako jedinečné, zatímco budoucnost musí zůstat potenciální a podrobena probabilistickým očekáváním. Tato struktura času, tak samozřejmě z empirického stanoviska, se stává nutnou z hlediska teoretického. Zejména minulost vesmíru je jedinečná.<sup>138</sup> Poslední teze implicitně zahrnuje vyvrácení Wheelerovy teorie účastnického vesmíru, vycházející z nesprávné interpretace tzv. pokusu s odloženou volbou; podle této teorie akty měření (chápané jako akty „pozorovatelského účastnictví“) propůjčují vesmíru hmatatelnou „skutečnost“ nejen pro dobu, kdy se odehrávají, nýbrž mu také určují tu, onu nebo jinou reálnou minulost, a to až k jeho počátku (velkému třesku).<sup>139</sup>

<sup>136</sup> Srv. *QPh*, str. 213. V této souvislosti je třeba dodat, že plné vysvětlení že-zde-a-ten výskytu té nebo oné jednotliviny na bázi všeobecných principů je také mimo dosah metafyziky. Dokonce i u Hegela, který měl v tomto směru největší ambice, můžeme nalézt jen pouhé vysvětlení principu ustavování sféry jedinečných faktů; spočívá v tom, že dialektický proces sebenegace obecně nekončí ustavením sféry zvláštního (tj. ustavením rodů a druhů), nýbrž má ještě další etapu, v níž obecně (tj. ideálně) ustaví svůj protiklad – individualizující látku (hmotu). Jelikož jde o dialektickou negaci, tj. o proces sebenegace čili sebeomezování obecně, nezaniká ozvláštněné obecně ve svém protikladu (sebeodcizení) úplně, nýbrž uchovává se v něm v podobě bezprostředně nezjevného, přesto však poznatelného řádu a zákona. (Jelikož absolutní idea předepisuje absolutnu, aby bylo aktem sebepoznání, je pouhá poznatelnost obecně způsobem jeho odcizenosti.) Hmotné jednotliviny jsou však zároveň sebenegací obecně, což znamená že jejich faktuální výskyt se z obecně nedá apriorně vydedukovat; etapu sebeodcizení obecně, která je nutným krokem k uskutečnění plného sebepoznání absolutna, nelze nedialekticky zrušit – její relikty přetrvávají i tehdy, když překonalo odpor kladený zakrývajícím hmotou a dospělo v Hegelově filosofii k plnému sebeuvědomění. Z toho plyne, že výskyt jednotlivin provždy zůstává ve sféře nahodilosti – Hegel v této souvislosti mluví o kontingenci přírody. Je příznačné, že to byla právě nededukovatelnost faktů z obecně, co přivedlo Schellinga, aby opustil racionalismus a vydal se na cesty iracionalismu (absolutno existuje díky pra-náhodě a jako takové musí mít původně charakter slepého puzení) a své specifické verze pozitivní filosofie.

<sup>137</sup> Srv. *QPh*, str. 215.

<sup>138</sup> Srv. *IQM*, str. 508.

<sup>139</sup> Srv. John Gribbin, *Pátrání po Schrödingerově kočce*, str. 206. Co se týče pokusu s odloženou volbou, experimentální zařízení je při něm sestaveno tak, že proud fotonů může překonat bariéru, v níž jsou dvě štěrby, dvěma odlišnými způsoby: 1) tak, že každý z fotonů projde v souladu se Schrödingerovou rovnicí popisující jeho vlnovou funkci zároveň oběma

Aby nevznikl falešný dojem, že v důsledku aplikace dekoherentistického přístupu „zdravý rozum“ a filosofie z něj vyrůstající definitivně opanovaly bitevní pole a že tudíž všechny záhady kvantového světa kromě komplementárnosti vymizely,<sup>140</sup> je nutno uvést, že právě s ohledem na kvantovou fyziku se musíme zříci univerzální platnosti tří základních filosofických principů. Jde o princip kauzality (každý účinek má svoji bezprostřední příčinu), princip lokalizovatelnosti (každý objekt má své určité místo) a princip separovatelnosti, který obvykle tvrdí, že je možné poznat všechny vlastnosti izolovaného objektu, a ignorovat přitom zbytek vesmíru.<sup>141</sup>

štěrbínami, takže stopy jejich dopadů na stínítku umístěném za bariérou vytvoří typický interferenční obrazec; jedná se o typický makroskopický projev interference vlnové funkce; 2) každý z fotonů projde buď jednou, anebo druhou štěrbínou; fotony se tudíž chovají jako klasické částice. O tom, kterým způsobem budou fotony procházet přes štěrbiny, rozhoduje experimentátor tím, že buď provede, anebo neprovede jistý zásah do experimentálního zařízení. Důležité přitom je, že podmínky pokusu umožňují, aby toto rozhodnutí, zprostředkované zmíněným zásahem, padlo až poté, co fotony již bariéru překonaly. Z toho plyne, že naše rozhodnutí může v určité chvíli determinovat minulost fotonů – buď se bude tato minulost vyznačovat tím, že fotony prošly oběma štěrbínami, nebo naopak tím, že každý z nich prošel jenom jednou z obou štěrbín. Podle Wheelera lze celý vesmír považovat za pokus s odloženou volbou, v němž existence pozorovatelů, kteří v současnosti pozorují vše a jsou popsány způsobem zároveň „účastníky“, determinuje minulost vesmíru od jeho počátku. (Podrobněji viz *ibid.*, str. 204-207.) Omněsově analýze experimentů s odloženou volbou (*IQM*, str. 456-464) se zde nebudeme věnovat v plném rozsahu, uvedeme toliko jeho hlavní závěry. Omněs konstatuje, že experiment s odloženou volbou byl navržen (a poté i proveden) v době, kdy se ještě věřilo, že redukce vlnové funkce musí nutně být reálným fyzikálním procesem a že je zapotřebí zkoumat lokalizaci tohoto procesu. Nyní, když se prokázalo, že redukce není fyzikálním procesem, stává se intuitivní představa, která měla být testována experimenty s odloženou volbou, alogickou mentální reprezentací, kterou univerzální pravidlo interpretace zakazuje. Platí naopak dávná Bohrova myšlenka, kterou vyslovil bez důkazu, že totiž nezáleží na tom, zdali naše plány zasahovat do pokusných zařízení byly fixované již předem, nebo se rozhodnutí odložilo až na dobu, kdy částice přechází z jednoho zařízení do druhého; přínos dekoherentistického přístupu spočívá v tom, že pro tuto myšlenku poskytuje důkaz.

<sup>140</sup> Nebude jistě nevhodné, když na tomto místě podáme stručné shrnutí hlavních výsledků restituce fenomenálního světa na základě teorie dekoherence. Fenomény (klasicky smysluplné vlastnosti makroskopických objektů) vyhovují následujícím podmínkám: jako vlastnosti jsou současně smysluplné jak v kvantové mechanice, tak ve v klasické fyzice. Jsou ve shodě s klasickou logikou, tj. se „zdravým rozumem“. Zejména se řídí klasickým determinismem. Důležitým aspektem determinismu je možnost vysvětlit existenci záznamů („paměti“) v rámci kvantové fyziky. Odlišné vlastnosti jsou jasně separovanými událostmi, tj. neexistují žádné dvojznačnosti, mající původ v kvantové interferenci. „Zdravý rozum“ a determinismus jsou zachovávané pouze až po jistou pravděpodobnost omylu, která může být principiálně stanovena pro každý specifický případ. Pro dostatečně velký systém nemohou být klasické rysy vykázané jako klamné žádným experimentem, ať již by byl jakkoliv subtilní a nákladný (*IQM*, str. 488.)

<sup>141</sup> V této souvislosti je třeba zmínit, že podle Bernarda d’Espagnata náš každodenní pohled na skutečnost zahrnuje 3 hlavní předpoklady: 1) jsou zde reálné věci, které existují neohledě na to, zdali je pozorujeme nebo nikoliv; 2) je naprosto legitimní činit obecné závěry z

Co se týče principu kauzality, je potvrzeno – a to jak teorií, která ve své analýze používá pojem konzistentních historií, tak experimenty –, že existuje nekauzalita v podobě kvantových skoků. (Podle představy kvantových skoků zavedené Bohrem může atom náhle přeskóčit ze stavu 2 do stavu 1, přičemž emituje foton; žádný spojitý přechod mezi oběma stavy se nedá pozorovat.) Nelokálnost je přímo potvrzována experimenty s interferencí. Experimentálně byla rovněž potvrzena neseparovatelnost, tj. nemožnost nebrat za určitých podmínek v úvahu, jak určitý objekt vznikl a jaká trvající korelace se aktem jeho vzniku vytvořila mezi ním a jiným objektem, který může být nyní velice vzdálený.<sup>142</sup>

Kolem problému neseparovatelnosti se v posledních dvaceti letech rozvinuly široké diskuse, a jak to v takových případech bývá obvyklé, došlo ke vzniku celé řady ukvapených generalizací a šílených teorií, které si činily nárok na pravdivost; byl také učiněn pokus vysvětlit na základě neseparovatelnosti i lidské vědomí a svobodnou vůli. Proto je nezbytné věnovat mu zvláštní pozornost.

## 8. Neseparovatelnost

Při traktování problému neseparovatelnosti je zapotřebí začít myšlenkovým experimentem, který navrhli Einstein, Podolsky a Rosen,<sup>143</sup> aby prokázali neudržitelnost principů kvantové mechaniky (je známý pod zkratkou EPR). V tomto experimentu jsou uvažovány dvě částice, které spolu po určitou dobu interagují a poté se od sebe začnou vzdalovat, aniž by během tohoto pohybu (který je v zásadě může přivést až na opačné strany vesmíru) s něčím interagovaly. Principy kvantové mechaniky dovolují, aby v době, kdy se částice nacházejí těsně vedle sebe, byla přesně změřena jejich úhrnná hybnost; totéž platí i o jejich vzájemné vzdálenosti. Pokud později – v době, kdy částice již budou třeba velice od sebe vzdálené – změříme hybnost jedné z nich, budeme na základě získaného data zároveň přesně vědět, jaká je hybnost druhé částice, neboť součet hybností zůstává během výše předpokládaného pohybu konstantní; analogicky můžeme na základě změření polohy první částice přesně určit, jakou má polohu druhá. Nyní ovšem musíme vzít v úvahu Heisenbergovy

konzistentních pozorování či pokusů; 3) předpoklad lokálnosti zahrnující přesvědčení, že žádný vliv se nemůže šířit rychleji než rychlostí světla. Ve svém souhrnu vytvářejí tyto předpoklady základ pro „lokálně realistický“ světonáhled. (Srv. J. Gribbin, *Pátrání po Schrödingerově kočce*, str. 215.) Podle d’Espagnata je teorie separovatelná tehdy, pokud tvrdí, že když nějaký systém zůstává po nějakou dobu mechanicky (ale také elektromagneticky atp.) izolován od všech ostatních systémů, tak vývoj jeho vlastností v této době nemůže být ovlivněn operacemi na jiných systémech. (Srv. *IQM*, str. 399.)

<sup>142</sup> Srv. *UQM*, str. 194.

<sup>143</sup> A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, „Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?“, *Physical Review*, 47 (1935), str. 777-780.

relace neurčitosti, z nichž plyne, že hybnost a poloha jsou komplementární vlastnosti, tj. že přesné změření hybnosti částice znemožňuje přesně určit její polohu a naopak, přesné změření její polohy způsobí, že hybnost částice zůstane neurčitá. O tom, která z těchto vlastností bude změřena přesně a která bude nutně ponechána v neurčitosti, však rozhoduje experimentátor; v rámci EPR platí, že pokud se rozhodnutí experimentátora pro jednu z těchto dvou alternativ uplatní u jedné částice, bude se podle něj chovat i druhá, podle předpokladu velice vzdálená částice. Hlavní problém EPR spočívá v tom, že druhá částice získá „informaci“ o rozhodnutí experimentátora (tj. o tom, zda má mít přesně určenou hybnost, anebo přesně určenou polohu) doslova v témž okamžiku, kdy je znám výsledek měření u první částice; to by znamenalo, že k přenosu oné „informace“ dochází nekonečnou rychlostí a že by tedy k jeho popisu musel být použit překonaný pojem okamžitého „působení na dálku“ (*actio in distans*). Akceptovat působení na dálku, které má povahu akauzality (a které Einstein charakterizoval jako „strašidelné“), resp. připustit, že oddělené částice jsou v jistých aspektech neseparovatelné, je ovšem ve flagrantním rozporu se zásadními tvrzeními teorie relativity, v souladu s nimiž je rychlost světla ve vakuu konečná a konstantní a že žádný objekt nebo signál nemůže být zrychlen z pohybu pomalejšího, než je pohyb světla, na pohyb, který svou rychlostí rychlost světla převyšuje. Odhalení tohoto rozporu mělo podle autorů experimentu EPR prokázat, že principy kvantové mechaniky je nutno revidovat.

Omnès věnuje pozornost také jinému aspektu Einsteinova přístupu, který si lze nejlépe ujasnit pomocí Bohmovy formulace EPR: Částice  $Q$  s celkovým spinem 0 se rozpadá na dvě částice  $P$  a  $P'$ , z nichž každá má spin  $1/2$ . Spinová komponenta částice  $P$  ve směru  $n$  (dejme tomu podél osy  $x$ ) je měřena v čase  $t$ , zatímco spinová komponenta částice  $P'$  ve stejném směru je měřena v pozdějším čase  $t'$ . Podobně jako u původní verze EPR lze v kterémkoliv okamžiku  $t^*$  z časového intervalu  $(t, t')$ , tj. v době, kdy spin u první částice byl změřen a druhá částice ještě nevstoupila do měřicího zařízení, přesně určit, že spinová komponenta částice  $P'$  je vůči změřené spinové komponentě částice  $P$  orientovaná opačně (jen tak se totiž zachovává původní celková hodnota spinu rovná 0).

Einstein a jeho spolupracovníci se domnívali, že výrok o orientaci spinové komponenty u částice  $P'$  je pravdivý, neboť se k němu dospělo, aniž by byla částice  $P'$  jakkoliv ovlivněna naším zásahem, a vyjadřuje tudíž „element reality“ čili jakýsi záblesk pravé objektivní skutečnosti prosvítající skrze subjekt-objektovou povahu kvantových fenoménů. Omnès však konstatuje, že onen výrok (v dalším postupu označený symbolem  $a$ ) není pravdivý, nýbrž pouze spolehlivý. Jestliže totiž uvažujeme výrok  $b$ , v souladu s nímž je v době  $t^*$  již známá hodnota spinové komponenty částice  $P'$  ve směru  $n'$  (např. podél osy  $y$ ), která bude naměřena v čase  $t'$ , pak všechno, co můžeme uvést ve prospěch platnosti výroku  $a$ , se vztahuje i na výrok  $b$ . (Z fyzikálního hlediska je to zdůvodněno tím, že jednotlivé komponenty trojrozměrného spinového vektoru jsou komplementární veličiny, což znamená, že změřením jedné komponenty

dochází ke změně u ostatních.)<sup>144</sup> Podle Omnèse se výrok  $b$  včleňuje do konzistentního logického rámce, v němž logicky vyplývá z data, které získáme v čase  $t'$ . Výrok  $b$  je proto stejně spolehlivý jako výrok  $a$ . To znamená, že v důsledku komplementárnosti neexistuje žádný logický rámec, žádná konzistentní rodina historií, která by zahrnovala oba výroky; výrok „ $a$  &  $b$ “ proto nemá žádný význam. Vzhledem k tomu, že oba výroky jsou v rovnocenném postavení, ani jeden z nich nemůže být pravdivý. Z toho plyne, že Einsteinovu „elementu reality“ nelze přiznat více objektivní skutečnosti, než je tomu u ostatních výroků kvantové mechaniky.<sup>145</sup>

John Bell dospěl v roce 1964 k formulaci svých známých nerovností, umožňujících experimentální potvrzení či vyvrácení neseparovatelnosti, právě při hledání východiska z problémů souvisejících se statusem reality v kvantové mechanice: šlo mu v prvním plánu o možnost prověření platnosti teorie skrytých proměnných.

Tato teorie vyjadřuje kritický postoj ke kvantové mechanice a hlavně k její kodaňské interpretaci, reprezentovaný Einsteinem, Schrödingerem, de Brogliem, Bohmem a jinými fyziky, kteří odmítali myšlenku, že realita má sama o sobě probabilistickou povahu, resp. nepřipouštěli, že by ve fyzice existovala absolutní či objektivní nahodilost. (V tomto ohledu je příznačný známý Einsteinův výrok: „Bůh nehraje v kostky.“) Místo toho se snažili prosadit pojetí, dle něhož se nahodilost uplatňuje pouze v rámci subjekt-objektového vztahu. Teorie skrytých proměnných respektuje tudíž výsledky experimentů ukazujících nahodilý charakter mikroskopických systémů, nicméně tvrdí, že tato nahodilost pochází pouze z naší neznalosti určitých klasických příčin nebo vlastností, které jsou nám (zatím, ale třeba také principiálně) nedostupné, přesto však reálně existují.<sup>146</sup>

Jako u všeho ostatního ve fyzice, i u oněch skrytých příčin či vlastností musí být k jejich deskripci použita čísla – tzv. skryté parametry. V důsledku toho, že kvantová měření poskytují náhodné výsledky, musí mít skryté parametry asociované s měřenými částicemi rovněž náhodnou povahu, avšak protože podle předpokladu vyjadřují skryté parametry reálné vlastnosti, musí se řídit klasickým počtem pravděpodobnosti, jako je tomu v všeho reálného, co není přesně poznané.

<sup>144</sup> Podrobněji k této speciální problematice viz J. Gribbin, *Pátrání po Schrödingerově kočce*, str. 210-216.

<sup>145</sup> Srv. *QPh*, str. 225-226.

<sup>146</sup> V rámci teorie skrytých proměnných je částice skutečně částicí a jako taková má dobře definovanou polohu i hybnost, třebaže v praxi je nemůžeme současně určit. Co lze určit, je pouze jejich statistické rozdělení, které lze adekvátně popsat kvantovou mechanikou. Připouští se tedy, že kvantová mechanika je v zásadě správná teorie, pokud slouží jako formální nástroj pro kalkulace; není však teorií úplnou, protože neposkytuje model skryté reality. Skryté parametry mohou navíc z principiálního hlediska převzít roli působících příčin, jichž je zapotřebí ke zjištění, proč nakonec naměříme právě ten, a nikoliv nějaký jiný specifický výsledek. Skryté parametry tudíž nabízejí klasický substrát, na němž má být vystavěna kvantová mechanika jakožto fenomenologická teorie. (Srv. *IQM*, str. 400-401.)

Bell vyšel ze svrchu uvedené Bohmovy formulace EPR experimentu:  $A$  (resp.  $B$ ) jsou měřicí zařízení, která měří vektorové složky spinu částice  $P$  (resp.  $P'$ ) podél směru  $n$  (resp.  $n'$ ); jelikož Bellovým cílem nebylo prokázat existenci „elementů reality“, položil rovnost  $t = t'$  (měření probíhají ve stejném čase u dvou částic značně od sebe vzdálených). Bell dále učinil předpoklad, že měřicí zařízení jsou separovatelná – že totiž výsledek měření  $P$  prostřednictvím  $A$  deterministicky závisí pouze na směru  $n$  a na skrytých parametrech spojených s  $P$  i  $P'$ , avšak na ničem jiném; analogický předpoklad se vztahuje i na měření prováděné zařízením  $B$ . Explicitně se tedy předpokládá, že výsledek měření pomocí zařízení  $A$  nezávisí na směru  $n'$ , že tudíž se měřicí zařízení vzájemně ignorují, i kdyby byly částice  $P$  a  $P'$  klasicky korelované.<sup>147</sup>

Na bázi těchto předpokladů, tj. v rámci lokálně realistického modelu zahrnujícího lokalizovatelnost a separovatelnost a za použití klasické teorie pravděpodobnosti (konkrétně pravidel pro vázanou pravděpodobnost měření, která se provedou v různých místech zaujímaných zařízeními  $A$  a  $B$ ) dospěl Bell k matematicky formulovaným nerovnostem vztahujícím se ke kombinaci výsledků obou měření. Krása tohoto výsledku, jak říká Omnès, spočívá v tom, že Bellovy nerovnosti nejsou vždy v souladu s predikcemi kvantové mechaniky. Jinak řečeno, v případě, že dojde k jejich porušení, poukazuje to na to, že v příslušném dění se uplatňuje nelokalizovatelnost a neseparovatelnost.<sup>148</sup> Stojí za

<sup>147</sup> Srv. *QPh*, str. 228-229.

<sup>148</sup> Ve své exaktní podobě jsou Bellovy nerovnosti velmi jednoduché, jak lze nahlédnout, uvedeme-li jednu z nich:  $|P(a,b) - P(a,c)| \leq 1 + P(b,c)$ , kde  $P(a,b)$ ,  $P(a,c)$ ,  $P(b,c)$  značí pravděpodobnosti kombinace výsledků měření složek spinového vektoru ve směrech  $\mathbf{a}$  a  $\mathbf{b}$  (resp.  $\mathbf{a}$  a  $\mathbf{c}$ ,  $\mathbf{b}$  a  $\mathbf{c}$ , kde  $\mathbf{c}$  je jednotkový vektor). Další aspekt krásy Bellových nerovností tkví v tom, že v rovnicích, které byly použity jako východisko k jejich odvození, vystupují skryté parametry označené jako  $\lambda$ , jakož i jejich klasická hustota pravděpodobnosti  $\rho(\lambda)$ ; v pozdějším postupu se však tyto (jinak blíže neurčené) veličiny eliminují, takže ve výsledku se již explicitně neobjevují, třebaže jsou jeho implicitními předpoklady. (Podrobné podání odvození Bellových nerovností, které zde neuvádíme, lze najít u Omnèse, *IQM*, str. 403-406.) To kromě jiného znamená, že zjištěný nesoulad s Bellovými nerovnostmi vyvrací teorii skrytých proměnných – pokud do ní ovšem nevčleníme neseparovatelnost; to by ovšem bylo v rozporu s její proklamovaným postavením klasického fundamentu pro fenomenologickou kvantovou mechaniku. Bellovy nerovnosti lze zjednodušeně vysvětlit tak, že počet měření, v jejichž rámci měřicí zařízení  $A$  registrovalo u částice  $P$  složku spinového vektoru ve směru  $\mathbf{a}$  jako kladnou a měřicí zařízení  $B$  použité na částici  $P'$  dává ve směru  $\mathbf{b}$  též kladnou složku (kterýžto výsledek se dá vyjádřit zkráceně jako  $\mathbf{a}^+\mathbf{b}^+$ ) je menší než součet počtu měření, jejichž výsledek se dá analogicky vyjádřit jako  $\mathbf{a}^+\mathbf{c}^+$ , a počtu měření, která dospívají k výsledku  $\mathbf{b}^+\mathbf{c}^+$ . Tento výsledek plyne ze zřejmého faktu, že pokud měření u nějaké konkrétní částice prokáže např. spin  $\mathbf{a}^+\mathbf{b}^-$ , pak celkový stav jejího spinu musí být  $\mathbf{a}^+\mathbf{b}^-\mathbf{c}^+$  nebo  $\mathbf{a}^+\mathbf{b}^-\mathbf{c}^-$ . (Srv. J. Gribbin, *Pátrání po Schrödingerově kočce*, str. 216-217.) Zdánlivá samozřejmost Bellových nerovností vyjádřených touto formou tkví v tom, že jsou správné, když jimi popisujeme náhodné klasické události. (Ještě víc popularizující převod Bellovy nerovnosti do barevných vlastností fotonů lze najít u téhož Gribbina v jeho *Schrödingerových koťatech*, str. 42-45.) Jsou rozvíjeny také úvahy o „časové Bellově nerovnosti“ – pokud by byla porušena, pak by pro sukcesivní kvantové události probíhající na téměř místě platilo, že by se chovaly, jako by mezi nimi nebyl žádný čas. (*Ibid.*, str. 218-220.)

zmínku, že pokud jsou Bellovy nerovnosti porušeny, separovatelnost musí být zavržena i v případě, že kvantová mechanika je úplně nesprávná.<sup>149</sup>

Radou experimentů a mezi nimi na prvním místě slavným pokusem Alaina Aspecta z r. 1982 bylo prokázáno, že v případě zkoumaných jevů jsou Bellovy nerovnosti porušovány, a že tudíž místo implikací vycházejících z představy skryté separovatelné reality platí predikce „tvrdé“ kvantové mechaniky. Aspect měřil polarizační stavy párů fotonů vyslaných ze společného zdroje v opačných směrech, přičemž rozhodnutí, ve kterém směru se bude měřit polarizace fotonů, nepadlo dříve, než oba fotony byly na cestě od zdroje k detektorům *A* a *B*; ideově tedy jeho pokus přesně odpovídal Bohmově formulaci EPR.<sup>150</sup> Výsledkem Aspectova experimentu je potvrzení, že neseparovatelnost se v kvantovém světě opravdu uplatňuje; k popisu této vlastnosti lze použít i termín „kvantová provázanost“, což je podle Jiřího Langer, překladatele citovaného spisu R. Penrosa, doposud neustálený překlad anglického termínu *quantum entanglement*.<sup>151</sup> Stav neseparovatelnosti či provázanosti lze negativně vymezit tím, že v něm se uplatňující korelace nelze adekvátně popsat klasickým počtem pravděpodobnosti.

Omnès suše konstatuje, že kolem neseparovatelnosti se nadělalo mnoho povyku. Stojí za to uvést v této souvislosti delší citát z Gribbina, který uvádí, že „Aspectův pokus a všichni jeho předchůdci vsutku směřují k pohledu na svět, který se velmi liší od pohledu založeného na našem každodenním zdravém rozumu. Ze všech těchto pokusů totiž vyplývá, že částice, jež spolu interagovaly, v nějakém smyslu zůstávají součástmi jediného systému, který společně reaguje na další interakce. Prakticky všechno, co vidíme, čeho se dotýkáme a co vnímáme, se skládá ze souborů částic, které vstupovaly do interakcí s jinými částicemi po všechen čas zpátky až k velkému třesku, ve kterém vznikl vesmír, jak jej známe. Částice, z nichž se skládají atomy mého těla, se kdysi dávno srážely v kosmické ohnivé kouli s částicemi, které jsou nyní součástí vzdálené hvězdy, a s částicemi, které utvářejí tělo nějakého živého tvora na nějaké vzdálené, dosud neobjevené planetě. Částice mého těla se

<sup>149</sup> John Gribbin, *Schrödingerova kořata*, str. 205.

<sup>150</sup> V popularizační literatuře vydané doposud v českém jazyce byl Aspectův experiment dostatečně podrobně vyložen, takže není zde zapotřebí věnovat se mu šířeji. (Srv. J. Gribbin, *Pátrání po Schrödingerově kočce*, str. 217-219, *Schrödingerova kořata*, str. 42-45, 154, Roger Penrose, *Makrosvět, mikrosvět a lidská mysl*, Mladá fronta, Praha 1999, str. 61-62.) Je vhodné dodat jen to, že Aspectem a jeho kolegy byl efekt neseparovatelnosti prokázán do vzdálenosti 12 metrů a že paprsek světla byl v jejich pokusu zvláštním přepínačem usměrňován buď k jednomu, nebo druhému z dvojice polarizujících filtrů, z nichž každý měřil odlišný směr polarizace; tyto změny probíhaly v intervalu 10 nanosekund, zatímco foton dospěl ze svého východiska k detektoru toliko za 20 nanosekund; rozhodnutí, který směr polarizace se bude měřit, tedy opravdu zastihlo fotony, když byly na cestě detektorům.

<sup>151</sup> Někdy dochází i k významovému ztotožňování termínů „provázanost“ a „nelokálnost“ či „nelokalizovatelnost“ (R. Penrose, *ibid.*, str. 60); jak jsme viděli, Omnès význam obou termínů rozlišuje, přičemž terminologicky dává přednost „neseparovatelnosti“ před „provázaností“.

vskutku kdysi strkaly v jednom chumlu a interagovaly s částicemi, které nyní tvoří vaše tělo. Jsem součástími jednoho systému, úplně stejně jako dva fotony, které se rozlétají ze zdroje ve středu Aspectovy pokusné aparatury. Zřejmě budeme muset přijmout, že doslova všechno souvisí se vším ostatním, jak nás upozorňují d’Espagnat a David Bohm. Takové složité jevy, jako je lidské vědomí, se nám patrně podaří vysvětlit pouze tehdy, když přistoupíme k vesmíru holistickým způsobem.<sup>152</sup>

To, v co zde Gribbin vkládá tak velké naděje, tj. holistický charakter kvantové mechaniky, jakoby plynoucí z potvrzení kvantové neseparovatelnosti, znamená podle Omnèse, že kvantová mechanika může vypovídat pouze o celém vesmíru, nikoliv však o jeho oddělených částech; nesmí tak činit dokonce ani tehdy, když některá z částí není v žádné interakci se zbytkem světa. Jde vlastně o popření základního principu vědy, stanovujícího možnost zkoumání nějaké izolované části světa, tak jak je sama sebou (tento princip je vlastně nejjemnější formou redukcionismu). Kdyby tito lidé měli pravdu, říká Omnès, jednalo by se o přímo zničující kritiku vědy vůbec. Bylo by možné dokonce tvrdit, že nějaká částice se chová svobodně, aniž by bylo na ni působeno zvnějšku, jelikož její vlastnosti by se mohly měnit pod vlivem něčeho, co se přihodilo jiné, velice vzdálené částici. (To bylo ostatně v jistém smyslu podstatnou částí argumentace EPR experimentu.)

Než přejdeme k interpretaci neseparovatelnosti z pozice Omnèsova dekoherentismu, připomeňme si pseudodialektický „princip“ hlásající, že „všechno souvisí se vším“, který u nás i jinde zlidověl v dobách, kdy vládla ideologie sovietsmarxismu. Pokud však nedovedeme stanovit ontologickou (a třeba i transcendentální) hierarchii souvislostí, tj. nedovedeme rozlišit souvislosti podstatné od souvislosti akcidentálních či nahodilých, a pokud v rámci takové hierarchie přesně nedefinujeme nesouvislost jakožto absenci podstatných souvislostí (tedy pokud nezavedeme soustavu „vertikálních“ souvislostí do univerzální „horizontální“ souvislosti všeho se vším), nevypovídá výrok „vše souvisí se vším“ prakticky nic – nebo právě tolik jako výrok „nic nesouvisí s ničím“.

Omnès uvádí pěkný příklad neseparovatelnosti v rámci „zdravého rozumu“: muž se okamžitě stává otcem, třebaže porodnice, v níž jeho žena porodila dítě, by se nacházela v mlhovině Andromedy; tomu odpovídá v kvantovém světě situace, když spinový stav částice  $P'$  se stává poznatelným prvkem skutečnosti v tom okamžiku, kdy byla změřena složka spinového vektoru částice  $P$ . Podle jiného triviálního příkladu muž, který je manželem, se nemůže znovu oženit v důsledku minulé události, kdy se dostal do silné korelace se svojí manželkou; analogicky platí, že nelze uvažovat částici nezávisle na druhé, protože vzhledem k nějaké minulé události, na níž měly obě účast, je uvedla do silné korelace. Pokud zde aplikujeme pojetí konzistentních historií, pak za předpokladu, že obě částice či měřené systémy jsou uvažovány

---

<sup>152</sup> J. Gribbin, *Pátrání po Schrödingerově kočce*, str. 220-221.

spolu s příslušnými měřicími zařízeními, podmínky konzistence vyžadují, aby mezi získanými daty existovala příslušná korelace, tj. neseparovatelnost. Je požadavkem kvantové logiky, aby konstatování týkající se výsledku měření částice  $P$  nebylo arbitrární, pokud nějaké konstatování týkající se částice  $P'$  již bylo zvoleno (přinejmenším tehdy, když směry  $n$  a  $n'$  jsou rovnoběžné).

Jak plyne i z uvedených jednoduchých analogií, je dokonale možné dobře popsat a používat systém, který je dostatečně oddělený od zbytku světa. Takový systém může zahrnovat tolik měřících zařízení, kolik je zapotřebí. Neseparovatelnost pouze implikuje, že dva takové systémy, které nejsou v přímé vzájemné interakci, mohou v jistých speciálních vykazovat korelace výsledků měření, prováděných na každém z nich. Tyto případy mohou být vždy stanoveny pečlivým promyšlením zařízení, které neseparovatelné objekty produkuje. Hlavní je, že za žádných okolností nemůže dojít k tomu, aby kterýkoliv fakt pozorovaný v jednom systému byl změněn v důsledku existence druhého systému: to, že jsou korelována měření, neznamena, že jde o přímý vliv.

Z matematického hlediska se neseparovatelnost odvozuje od skutečnosti, že vlnová funkce pro několik částic není obecně součinem individuálních vlnových funkcí spojených s každou z těchto částic. To se zvláště týká identických částic, elektronů nebo fotonů, pro něž jejich globální vlnová funkce musí být symetrická nebo nesymetrická v souladu s Pauliho principem.<sup>153</sup> Můžeme dodat, že z tohoto hlediska je nesprávné, když se neseparovatelnost popisuje tím způsobem, že „pokud jedna vlnová funkce zkolabuje, totéž učiní i druhá“.<sup>154</sup> Jde tu o kolaps či redukci globální vlnové funkce; ježto zároveň víme, že redukce vlnové funkce není reálný fyzikální proces, je nám jasné, proč a jak se neseparovatelnost liší od „působení na dálku“ a proč žádný fakt nemůže být změněn v důsledku existence druhého systému.<sup>155</sup>

Neseparovatelnost tedy patří mezi nejhlubší principy kvantové teorie a prospěch, který z ní plyne, daleko převažuje nad lehkou filosofickou nevolností, kterou může provokovat. Abychom si uvědomili, že neseparovatelnost není v diametrálním protikladu vůči skutečnostem našeho fenomenálního světa, stačí uvést, že neseparovatelností elektronů (čili Pauliho principem v jeho aplikaci na elektrony) lze vysvětlit tvrdost dřeva nebo oceli i proč se vůbec atomy spojují v

<sup>153</sup> Srv. *QPh*, str. 229-230.

<sup>154</sup> J. Gribbin, *Schrödingerova kořata*, str. 41.

<sup>155</sup> To potvrzuje jednoznačně i R. Penrose: „Výsledky měření jsou sice navzájem provázány, ale této skutečnosti nelze žádným způsobem využít k předání signálu z  $A$  do  $B$  či obráceně. (Jakmile pozorovatel v  $A$  zjistí, že jeho částice má spin nahoru, ví, že  $B$  naměřil spin své částice směrem dolů. Dozvěděl se tedy okamžitě na dálku výsledek měření v  $B$ ; pozorovatel v  $B$  však nemohl volně rozhodnout o výsledku svého měření, proto nemůže použít tohoto jevu k zakódování nějaké zprávy, která by se pak nekonečně rychle dostala k  $A$ .) To je velmi důležité pro soulad kvantové mechaniky s teorií relativity, která zakazuje poslat signál rychlostí větší, než je rychlost světla. Kvantová provázanost je velmi zvláštní jev. Objekty nejsou ani zcela nezávislé, ani vzájemně spojené – tak něco mezi tím.“ (R. Penrose, *ibid.*, str. 62.)

molekuly a též příčinu toho, že hmota je stabilní a nezhroutí se do nicoty. Neseparovatelnost fotonů (když se Pauliho princip aplikuje na kvanta elektromagnetického pole) je zase nezbytná k tomu, aby mohl fungovat laser atd.

Shrnutí dekoherentistického postoje k separovatelnosti podává Omnès následovně: Kvantová mechanika je pravdivě separovatelná, pokud se fyzikální systém definuje jako pravdivě separovatelný (lokalizovatelný) tehdy, když žádná pravdivá vlastnost nějakého subsystému nemůže být modifikována nějakou akcí ovlivňující jiný subsystém, který neinteraguje s prvním systémem. Separovatelnost (lokalizovatelnost) ovšem neplatí, když dochází k pokusům arbitrárně ji rozšířit z pravdivých vlastností na vlastnosti pouze spolehlivé.

Je užitečné nyní nastínit zajímavá, ale i slabá místa koncepce (či spíše množiny pozoruhodných nápadů) Rogera Penrosa, v níž se pokouší stanovit základní východiska pro kvantově-mechanický výklad fungování lidského vědomí, přičemž základní roli zde hraje pojem neseparovatelnosti, který Penrose používá synonymně s pojmem koherence.

Kromě řady referencí na panpsychismus A. N. Whiteheada vystupují u Penrosa jako podmínka možnosti takového výkladu dvě zásadní analogie mezi charakterem vědomí a povahou kvantové mechaniky.

V souvislosti s řešením Elitzurova-Vaidmanova problému testování bomby,<sup>156</sup> které lze provést výlučně na bázi kvantové mechaniky, Penrose zdůrazňuje, že k jejím podivuhodným rysům patří to, že nám umožňuje testovat, co by se mohlo stát, aniž se to opravdu stane – kvantová mechanika tudíž testuje to, o čem filosofové hovoří jako o potencialitě. Na druhé straně lidské vědomí funguje tak, že předestírá řadu alternativních možností našeho jednání. Podle Penrose lze tuto funkci vědomí vysvětlit tak, že systém neuronů je kvantový systém zahrnující – podobně jako je tomu u Schrödingerovy kočky – superpozici mnoha odlišných stavů. K mnohosti alternativních možností dospívá mozek tak, že v každé větvi superpozice probíhá výpočet nezávisle na těch, které probíhají v ostatních větvích. Jednota vědomí ovšem vyžaduje, aby ve stavu provázanosti či neseparovatelnosti byla jak jistá podmnožina částic v rámci jednoho neuronu, tak i velký počet neuronů; Penrose proto postuluje provázanost ve velkých měřítkách – v jeho terminologii se ve značné části mozku jako celku uplatňuje efekt kvantové koherence. Vzhledem k tomu, s jak enormní rychlostí ruší omnèsovský dekoherenční efekt kvantovou interferenci (superpozici) na makroskopické úrovni, musel Penrose postulovat, že koherentní kvantové procesy v mozku jsou velmi účinně odděleny od dekoherenčního působení okolí. Domnívá se, že funkce „zadržování“ dekoherence se může realizovat ve zvláštních trubicovitých strukturách nervových buněk – v mikrotubulech.

Naše vědomí si ovšem z řady možností vybírá právě jednu, kterou pak svým jednáním uskutečňujeme. Tomu v kvantovém světě odpovídá redukce

---

<sup>156</sup> K detailnímu popisu tohoto vskutku důležitého pokusu viz R. Penrose, *ibid.*, str. 60-65.

vlnové funkce, která má, jak víme, charakter proměny mnohočetné potenciality v jedinečný fakt; (v souladu s Omnèsem však také víme, že redukce není fyzikálním procesem). Kromě toho v rámci Penrosovy koncepce existuje zřejmý nesoulad mezi „rozmazanou“ povahou kvantových procesů a nepochybnou skutečností zcela určitých a přesných myšlenek i pocitů (řídících se např. formálně-logickým zákonem identity a obecně klasickou logikou), kterou známe z naší bezprostřední zkušenosti. Paralelně probíhající procesy v jednotlivých větvích musí proto vyúšťovat ve zcela určitý výsledek. K tomu je ovšem také potřebná redukce vlnové funkce. Patrně v reakci na subjektivistické výklady redukce (na nichž se účastní myšlení) postuluje Penrose tzv. „objektivní redukci“ (OR), která je naopak předpokladem přesného myšlení. Tato postulovaná objektivní redukce, resp. teorie, ze které OR vyplývá a která propojuje kvantovou a klasickou úroveň, je podle Penrose nevypočitatelná (algoritmicky nerozhodnutelná), avšak nikoli z důvodů, které jsme viděli u Omnèse (že totiž není možné z obecné či ozvlášťující se teorie dedukovat jednotlivá fakta).

Nevypočitatelné je podle Penrosa také lidské vědomí, což zdůvodňuje odvoláváním se na Gödelův teorém, a sice v tom znění, že žádný systém početních pravidel nemůže plně charakterizovat všechny vlastnosti přirozených čísel.<sup>157</sup> To, co je v lidském vědomí nevypočitatelné či nealgoritmizovatelné, je do něj vnášeno procesem objektivní redukce. Tento proces musí rovněž probíhat v izolaci od okolí, protože dekoherenční vlivy okolí by vedly k nahodilým výsledkům; výsledky nevypočitatelných procesů ovšem nejsou nahodilé či chaotické, neboť takové není ani rozumění, které z nich rezultuje.

Kromě trefné poznámky A. Shimonyho, že totiž Penrose balancuje na napjatém laně, protože na jedné straně potřebuje udržet koherenci, aby vysvětlil globálnost mysli, na straně druhé však potřebuje narušení koherence pro vysvětlení určitosti událostí vědomí,<sup>158</sup> se lze i plně ztotožnit s kritikou, kterou Penrosovi adresoval Stephen Hawking (a která implicitně plyne i z dekoherentismu).

Hawking říká, že Penrosova objektivní redukce vlnové funkce má charakter dekoherence a že dekoherence může nastat v důsledku interakce s okolím nebo fluktuací v topologii prostoročasu. Penrosovi nicméně nestačí žádný z těchto mechanismů, předpokládá, že zdrojem OR jsou drobná zakřivení prostoročasu způsobené hmotou malých objektů. Taková zakřivení však podle Hawkinga nebrání hamiltonovskému vývoji, při kterém dekoherence či objektivní redukce nenastává. Podle Hawkinga je dále penrosovska OR tak slabým efektem, že ji není možné odlišit od dekoherence způsobované okolím.

---

<sup>157</sup> Penrose postřehuje, že ač takováto pravidla neexistují, přesto každé dítě rozumí, co přirozená čísla jsou. Pochopit, co jsou přirozená čísla, je podle něj příkladem kontaktu, který jsme s to navázat s platónským či popperovským světem objektivních idealit. Základem lidského vědomí je obecná schopnost rozumět, která je vypočitatelná tím méně, čím více se komplexní obecné rozumění liší od abstraktního rozumění v matematice.

<sup>158</sup> *Ibid.*, str. 129.

Hawking se dále nedomnívá, že by mozek obsahoval systémy, které by byly tak izolované, že by umožnily odlišit OR od dekoherence způsobované okolím. (Pokud by totiž byly natolik izolovány, nemohly by interagovat tak rychle, aby se podílely na duševních procesech.) Hawkingovi také chybí objasnění, jak může být OR odpovědná za vědomí.

To, s čím jsme se v souvislosti s problematikou neseparovatelnosti seznámili u Omnèse, potvrzuje Hawkingovy výtky a umožňuje připojit další závažné námitky.<sup>159</sup> Hlavní z nich se odvíjí od tvrzení, že neseparovatelnost vyjadřuje pouze korelaci mezi měřeními, nikoliv „působení na dálku“ projevující se faktickými změnami jednoho systému způsobenými existencí jiného systému. Je zcela zřejmé, že k vysvětlení fungování mozku (stěží však povahy vědomí) daleko spíše přispěje omnèsovská korespondence mezi kvantovou a klasickou logikou a mezi kvantovým probabilismem a klasickým determinismem.

Samotný Omnès podrobuje Penrosovu koncepci objektivní redukce velmi serióznímu kritickému rozboru, který vyústí v konstatování, že předpokládaný OR proces by musel probíhat v rámci tak závažných omezení, že jeho existence se jeví jako nemožná; z řady jeho kritických argumentů podepírajících toto tvrzení uvedeme jen několik.

Omnès zejména prokazuje, že trvání OR musí být téhož řádu jako trvání dekoherenčního efektu. V opačném případě by nastala následující situace: Dekoherence by působila jako první a potlačila by každý experimentálně registrovatelný účinek kvantové superpozice až na jejich malé zbytky popsané exponenciálně klesajícími nediagonálními členy kolektivního stavu. Pak, o něco později, by nastal OP proces a nahradil by účinek dekoherence („platný pro všechny praktické účely“) účinkem dokonalým, tedy platným pro všechny filosofické účely (nelze si zde nevšimnout jeho ironického šlehu proti kritikům teorie dekoherence). To by ovšem bylo v rozporu s principem ekonomie neboli Occamovy břitvy, protože by existovaly dva odlišné procesy způsobující tentýž výsledek.

Dále Omnès považuje za nutné, aby dekoherence fungovala jako spouštěč procesu OR, nicméně ukazuje, že pokud by se tato myšlenka měla matematicky vyjádřit v teorii OR, narazilo by to na vážné algebraické problémy. OR proces jakožto domněle fundamentální by totiž stěží mohl provádět rozlišení mezi relevantní makroskopickou polohou a okolím, z čehož plyne, že ve jmenovateli výrazů pro spouštěcí děje OR by se musely vyskytnout mizící veličiny popsané nikoliv redukovaným, nýbrž plným operátorem hustoty. Podle teorie dekoherence však neexistuje žádná známá veličina zahrnující plný operátor hustoty, která by zanikala skrze dekoherenci a mohla sloužit jako spouštěč OR procesu. V závěru Omnès vymezuje vědecký status teorie dekoherence oproti Penrosovi, Everettovi i dalším stoupencům víry v reálný charakter vlnové

---

159

funkce: u dekoherentismu se jedná o empirické stanovisko, které nevyžaduje nic jiného než shodu s pozorovanými fakty a logickou konzistencí.<sup>160</sup>

## 8. Závěr

Ve své *Kvantové filosofii* Omnès prohlašuje, že věda (a sice tak, jak je vymezena v předchozí větě) je dnes natolik zralá, že dovoluje znovuzrození metafyziky. Pojmu „metafyzika“ rozumí v souladu s jeho etymologií tak, že jde o úvahy vyvolané určitým poznáním přírody, FYSIS, které se ovšem rozvíjejí v jazyku, jenž vůči jazyku používanému fyzikou zaujímá pozici metajazyka. Jinak řečeno, jedná se o způsob, jak uchopit tytéž věci, jimiž se zabývá věda, ale v takových aspektech, které věda skrze omezení svého jazyka nemůže vyslovit.<sup>161</sup>

V našem výkladu jsme se snažili ukázat, že nejnovější vývoj fyziky (na němž má sám Omnès lví podíl) vyžaduje, aby se jeho metajazyková či metodologická reflexe prováděla v termínech zcela určité, a sice Hegelovy metafyziky. Je přitom třeba mít na mysli, že v Hegelově metafyzice se v oblasti obecných ontologických určení uplatňuje tatáž logická struktura, jakou odhalil ve své analýze ekonomických fenoménů A. Smith v *Bohatství národů*.

Měli jsme možnost nahlédnout, že Omnèsova interpretace kvantové fyziky propůjčuje jejím obecným zákonům charakter Hegelova pojmu (*Begriff*), který jakožto obecně dialekticky nutným procesem ze sebe ustavuje zvláštní (Hegel tím překonává vnějškovost a nahodilost pouhé subsumpce zvláštního

---

<sup>160</sup> Srv. *UQM*, 250-256. V této souvislosti je třeba zmínit Penrosův postoj k Omnèsovi, tak jak byl formulován v roce 1997. Penrose řadí Omnèse (spolu s Gell-Mannem, Hartlem, Griffithsem aj.) mezi ty fyziky, kteří „berou vážně“ jak kvantovou úroveň, tak přechod od ní ke klasické úrovni – míní tím, že nejsou subjektivisty kodaňského typu, pro něž stavový vektor  $\langle \psi |$  existuje v jistém ohledu pouze v lidské mysli, a ani extrémní objektivisté, jaké lze najít mezi zastánci teorie mnoha světů. Podle Penrose však zmínění dekoherentisté nepředpokládají, že by se objevily nějaké nové jevy, které standardní kvantová teorie nepředpovídá; sám ovšem věří, že struktura kvantové mechaniky se musí v něčem podstatně změnit, přičemž má na mysli konstituci kvantové teorie gravitace. Bylo již dost napsáno o tom, že předvídat zásadně nové objevy je nemožné (ve známých Mendělejevových předpovědích objevu „ekasilicia“ atd. se předvídal výskyt fenoménů na bázi objevu fundamentálních struktur); Hawking v této souvislosti trefně konstatuje, že Penrose argumentuje tím způsobem, že vědomí je záhada a kvantová gravitace (*quantized gravity*) zase jiná záhada, takže obě záhady musí spolu nějak souviset. (Srv. R. Penrose, *ibid.*, str. 67-68, 138.)

<sup>161</sup> Srv. *QPh*, str. 240. Omnès zde také konstatuje, že Humova proskripce uvalená na metafyziku v období, kdy se věda vyvíjela v protikladu vůči ní, a vyjádřená tvrzením, že metafyzika je absolutně neschopná proniknout do zdroje vnitřního řádu, je neudržitelná, neboť uvedené tvrzení samotné je metafyzické. Metafyzická koncepce, k níž se Omnès explicitně přiklání, je jistým druhem logického platonismu kombinovaného se spinozismem: fyzická realita, reprezentovaná vědami (Omnès má na mysli tzv. materiální vědy na rozdíl od formálních) a objektivní, na lidské mysli nezávislý logos (reprezentovaný jazykem, logikou a matematikou) jsou dvěma navzájem nepřevoditelnými mody jedné a téže substance, kterou Omnès nazývá Bytí – po vzoru nepříliš hluboce pochopeného Heideggera. (Srv. *IQM*, str. 526-527.)

pod obecnou pouze staticky chápané).<sup>162</sup> Příbuznost Omnèsova přístupu s Hegelovým pojetím vysvitne ještě zřetelněji, uvědomíme-li si, že univerzální kvantové zákony jsou v řadě momentů protikladné vůči zákonům klasické fyziky, a že tedy ozvláštnění univerzálna se realizuje cestou negace („zvrácení v protiklad“). Doposud vládlo mínění, že oprávněným polem aplikace hegelovské koncepce ozvlášťňování univerzálna je (po odstranění ryze spekulativních relikťů) pouze proces biologické a kulturní evoluce resp. teorie spontánních řádů, jejichž geneze probíhá formou diferenciace; skutečnost, že se tato koncepce v Omnèsově interpretaci rozšířila i na oblast vztahu kvantové a klasické fyziky, je pozoruhodným dokladem fundamentální jednoty světa i metod jeho vědeckého vysvětlení (a také slouží jako zdůvodnění toho, že je teorii dekoherence věnováno v rámci teorie spontánního řádu tolik pozornosti.)

Ozvlášťňování univerzálna, jež se děje po způsobu kvantově-klasické korespondence, má ovšem některé specifické rysy. Negace kvantových zákonů při přechodu na klasickou úroveň není úplná, a proto existuje jistý rozdíl mezi oběma druhy dynamiky a dochází k jistým chybám, když se všeobecně aplikuje dynamika klasická. Tato omezení korespondence jsou však, jak jsme viděli, zahrnuty v teorii jako očekávané výjimky z několika základních teorémů nebo spíše jako zvláštní případy, kdy odhadované chyby rezultující z těchto teorémů jsou velmi velké.

Hegelova onto-logika, jakož i logicko-ontologická struktura pohybu spontánního řádu tržního hospodářství, jak ji podává A. Smith, se vyznačují kruhovým charakterem. To znamená, že východisko reálného pohybu i logické předpoklady jeho myšlenkové rekonstrukce jsou pouze zdánlivě čímsi bezprostředním a prostě daným ve své existenci či platnosti; jak proces poznávání pokračuje, ukáže se, že jedno i druhé je vlastně výsledkem téhož reálného či myšlenkového pohybu, jemuž byly počátkem.<sup>163</sup> Onen počátek má zároveň povahu části nebo abstraktní charakteristiky celku; pohyb, který se z tohoto počátku odvíjí, je pohyb ustavování celku neboli pohyb totalizace. Dovršení tohoto pohybu i dovršením procesu, jímž se diferenciací celku vytváří ona část, z níž celek vzešel. Metaforickým obrazem pro tuto kruhovou proměnu výsledku ve východisko, resp. části v celek a celku v část (která je zvlášť příznačná zejména pro spontánní řád života<sup>164</sup> a tržní ekonomie – u dalších typů

<sup>162</sup> Samotný Omnès vyjadřuje vztah mezi teoretickým vyjádřením obecného a zvláštního pomocí termínu „emergence“: Věda *B* emerguje z jiné vědy *A*, když základní pojmy a zákony vystupující v *B* lze uvažovat jako mající svůj zdroj v pojmech a zákonech *A* (a to buď explicitně nebo pouze na základě úvah o kompatibilitě). Ačkoliv pojmy a zákony vědy *B* zůstávají zřetelně odlišné od vědy *A*, vděčí za svou účinnost právě této diferencii. (Srv. *UQM*, str. 191.)

<sup>163</sup> Pravda je „...vznik sebe sama, kruh, předpokládající svůj konec jako účel, který je mu počátkem, kruh, který jen svým provedením a koncem jest skutečný“. (G. W. F. Hegel, *Fenomenologie ducha*, NČSAV, Praha 1960, str. 61.)

<sup>164</sup> Růst živého organismu probíhá jako diferenciace jedné jediné buňky (homozygoty, vzniklé spojením samčí a samičí pohlavní buňky); je dovršen tehdy, když se v rámci takto vzniklého celku vydělí zvláštní podmnožina pohlavních buněk schopných zajistit akt reprodukce.

spontánního řádu, jako jsou spontánní řád mravnosti a jazyka, se uplatňuje prostřednictvím střídání generací) je had zakouslý do vlastního ocasu. V Omnèsově reflexi nad vývojem fyziky je kruhová proměna výsledku ve východisko vyjádřena následovně: věda začíná od neznámého a z této temnoty se dobírá k pozici, z níž se počátek, akceptovaný dříve bez dotazování a pochybování, stává úplně jasným; Omnès používá v této souvislosti i termín „převrácení předpokladů“.<sup>165</sup>

Exemplifikaci tohoto tvrzení nalezneme snadno, uvědomíme-li si, že klasický determinismus je předpokladem pro to, abychom vůbec rozuměli jakémukoliv fyzikálnímu experimentu (je také předpokladem pro existenci záznamů a paměti).<sup>166</sup> Když ovšem výsledky experimentů v kvantové fyzice odhalily takové chování částic, které bylo v rozporu s konceptem klasického determinismu, a zároveň došlo k tomu že principy řídící toto chování byly prohlášeny za fundamentální, stal se předpoklad, na němž celé toto poznání spočívalo, čímsi nevysvětlitelným. Nyní již víme, že to byl znak neúplnosti a abstraktnosti dosaženého poznání. Zavedení teorie dekoherence do kvantové fyziky totiž umožnilo restituci klasického determinismu, tj. fundaci a zprostředkování doposud nezaloženého a nezprostředkovaného logického východiska kvantové fyziky. Období, kdy byl klasický determinismus (a „zdravý rozum“ jako takový) kvantovou fyzikou nevysvětlitelným předpokladem kvantové fyziky, lze, jak to činí Omnès, charakterizovat pomocí husserlovského konceptu zazávorkování, tj. dočasného suspendování platnosti. Tato charakteristika je ovšem oprávněná jen ve zpětné reflexi, protože předtím než byla kvantová fyzika obohacena o teorii dekoherence, se fyzika nikdy uvědoměle neřídila husserlovskou metodologií (že by se totiž snažila „zdravý rozum“ zazávorkovat a pak ho obdržet jako dar vzcházející z fundamentální teorie)<sup>167</sup> a setrvala u dualismu klasických a kvantových zákonů, resp. u subjektivismu, fikcionalismu atd.

V kruhové proměně výsledku ve východisko, tak jak se realizovala v Omnèsově pojetí, lze najít i další moment, který ji sbližuje s metodologickými přístupy Hegela a Adama Smitha. Zavedení teorie dekoherence do kvantové fyziky totiž znamená, že kvantová fyzika (reprezentovaná Omnèsem aj.) si touto formou uvědomila fundamentální rysy své metody i její meze, a učinila tuto implicitní metodologickou reflexi součástí sebe sama. Jinak řečeno, cesta od „zdravého rozumu“ k „šíleným“ kvantovým principům, jako je

<sup>165</sup> Srv. *QPh*, str. 239-240, *UQM*, str. 193. Hegel v téže souvislosti říká: „Co je vůbec známé, je právě proto, že je známé, nepoznáno. Je nejobvyklejším sebeklamem i klamáním druhých, předpokládáme-li při poznání něco jako známé a strpíme-li, aby se to předpokládalo...“ (*Fenomenologie ducha*, str. 68.)

<sup>166</sup> Srv. *IQM*, str. 501. Jinde Omnès říká, že dobré experimentální zařízení musí být deterministické: musí fungovat v souladu s návodem na použití, tak jak se to očekává od automobilu a od pračky. Je to obyčejný determinismus, jenž se děje v obvyklém směru plynutí času. Pokud zmáčkne určitý knoflík, měřicí zařízení začne fungovat přesně tak, jak jsme očekávali. (Srv. *UQM*, str. 44.)

<sup>167</sup> Srv. *UQM*, str. 194.

komplementárnost, tunelový efekt apod., se konala tak, že při zkoumání chování jednotlivých částic se tyto částice uměle izolovaly od působení okolí, od tření atp. Hlavní problém byl v tom, že z „fundamentálních“ poznatků o tomto chování (jež probíhalo v oné umělé izolovanosti zkoumaného objektu od okolí, v izolovanosti, která se v realitě nezávislé na nás vyskytuje zcela sporadicky a okrajově) se principiálně nemohla vyvodit teorie chování makroobjektů, neboť toto chování v sobě zahrnovalo to, od čeho byly objekty, u nichž se objevilo kvantové chování, uměle izolovány.<sup>168</sup> Kvantová fyzika stála před tímto problémem bezradně, protože její představitelé si neuvědomovali, jakou cestou se dobrali poznání kvantových principů, resp. na její charakter zapomněli. Teorie dekoherence, která ukazuje nesmírně rychlé vymizení kvantových efektů při interakci částice s okolím (sestávajícím z makroobjektu o počtu částic v řádu  $10^{27}$  čili BBB), popisuje děj, který je přímo protichůdný postupům, jimiž byla dosažena umělá izolace částic zkoumaných kvantovou fyzikou. Její začlenění do kvantové teorie znamená ve skutečnosti připomnění si metody, již kvantová fyzika předtím používala, aniž ji reflektovala; znamená zpětné zrušení principiálních omezení, které z této metody plynou. Tím umožňuje zahrnout do teorie ty aspekty reality, od níž byly objekty zkoumání kvantové fyziky předtím izolovány, a restituovat platnost klasické fyziky a „zdravého rozumu“. Teorie dekoherence ovšem zároveň zachovává platnost poznatků, které předdekoherenční kvantová fyzika získala zkoumáním izolovaných objektů; nesnaží se však tyto poznatky generalizovat, a přiděluje jim v rámci celkové stavby fyzikálního poznání přiměřené místo, čímž současně stanovuje i meze platnosti „zdravého rozumu“.

Uvedený výklad teorie dekoherence jakožto implicitního připomnění si metody kvantové fyziky a zároveň negace jejích omezení podáme nyní v smithovsko-hegelovských termínech abstrakce a konkretizace; umožní nám to najít odpověď na otázku, proč předdekoherenční kvantová fyzikové zapomněli na povahu svého metodického postupu.

V rámci smithovsko-hegelovského (a též marxovského) pojetí postupuje proces poznání tak, že se z bezprostředně daného konkrétní definovaného jako („srostitá“) jednota mnoha rozmanitých určení v nejširším slova smyslu, analytickým myšlenkovým postupem vydělují, odlučují, izolují či osamostatňují jednotlivá určení, která tím nabývají charakter abstraktních momentů, existujících pouze v myšlení. Tato analýza je zároveň zrušením té formy známosti, kterou se konkrétní, ať již je dáno smyslově nebo v představě, původně vyznačuje. Podle Hegela je toto odlučování, jímž se konkrétní rozkládá na neskutečné abstrakce, něčím, co je pro poznávání přímo bytostné; jeho výroky jsou v tomto ohledu zcela jednoznačné: „Činnost rozlučovací je síla a práce *schopnosti rozvažování*, oné nejpodivuhodnější a největší, dokonce

<sup>168</sup> Nejvýrazněji se tento problém projevil v paradoxu Schrödingerovy kočky, kdy poznatky o chování izolovaného elektronu či fotonu byly v umně sestaveném myšlenkovém experimentu přímo aplikovány na chování makroobjektu (život, resp. smrt kočky odpovídá chování jednoho izolovaného elektronu).

absolutní moci.“ Myšlenkový výkon abstrahování, který způsobí, „...že to, co je vázáno a je skutečné pouze ve své souvislosti s odlišným, nabývá vlastního jsoucna a oddělené svobody, toť nesmírná moc záporná; je to energie myšlení, čistého já. Smrt – chceme-li tak nazvat onu neskutečnost – jest to nejstrašlivější, a udržeti to, co je mrtvé, vyžaduje největší síly.“ Život ducha tkví právě v tom, že je to život, který umí vydržet smrt a v ní se udržet; je mocí pouze pod podmínkou, že pohlíží zápornu do tváře, že u něho prodlévá. A právě toto prodlévání je „kouzelná moc, která zápornu převrací v bytí“.<sup>169</sup> Smrt je zde metaforickým vyjádřením pro destrukci souvztažností mezi jednotlivými určeními konkrétna, kteréžto souvztažnosti zakládají původní jednotu konkrétna jakožto živého, pohybujícího se celku; tato destrukce probíhá tak, že jednotlivá určení se v našem myšlení z celku abs-trahují čili vytrhují a jsou myšlením v této odloučenosti fixovány.

Druhá, právě tak nezbytná etapa poznávacího procesu zahrnuje syntetický postup, v němž se jednotlivé abstraktní momenty opět uvádějí do týchž souvztažností, které byly v předchozí etapě destruovány. Výsledkem této etapy (kterou lze popsat i jako pohyb konkretizace nebo totalizace) je restituce konkrétna, v níž už konkrétno nevystupuje ve své původní bezprostřední danosti, nýbrž v podobě myšlenkového, teoreticky reprodukováného konkrétna.

Postup myšlenkového odlučování toho, co je v bezprostřední danosti spojené, následovaný rovněž myšlenkovým spojováním výsledků tohoto odlučování není nějakou specifickou metodou poznání, nýbrž jeho všeobecnou a nutnou charakteristikou. Specifické metody se odlišují tím, která určení se v první etapě odloučí a která naopak zůstanou neodloučena. Lze je rozdělit na tři základní typy.

První z nich je reprezentován aristotelským substancialismem, v němž se odlučuje obecná substance (forma) od individualizující látky, jež substanci dodává časová a prostorová určení; *propria* (nutná určení) a akcidenty dané substance se však od sebe neodlučují natolik, aby se traktovaly jako rovnocenné ve své osamostatněnosti;<sup>170</sup> prostým myšlenkovým spojením formy a (představy) látky se pak restituuje konkrétno v teoretické rovině.

Druhý typ je nejvýrazněji zastoupen Descartovou analytickou metodou, navazující na pythagorejsko-platónskou tradici, v jejímž rámci myšlení odlučuje od sebe právě to, co zůstávalo v aristotelismu neodloučeno, tedy *propria* a akcidenty (hmotné) substance – např. tlak, teplota, objem –, jakož i časové a prostorové charakteristiky zkoumaných procesů; v karteziánském pojetí přírodních zákonů se popření aristotelského substancialismu rozvíjí do podoby matematicko-funkcionalistického relationalismu.

Třetí základní typ představuje Hegelova onto-logika (vycházející ze smithovské inspirace),<sup>171</sup> v níž dochází k syntéze obou předchozích metod.<sup>172</sup>

<sup>169</sup> G. W. F. Hegel, *Fenomenologie ducha*, str. 68-69.

<sup>170</sup> Kategorie kvality, kvantity atd. jsou v rámci aristotelismu chápány jako nesamostatná určení substance (formy).

Postup od smyslového k myšlenkovému konkrétnu mohl být plně reflektován a explicitně popsán Hegelem až poté, co Adam Smith podal modelové vysvětlení (tj. vysvětlení principu) fungování tržního hospodářství v podobě postupné myšlenkové konkretizace či totalizace abstraktního (resp. parciálního) východiska, jímž je pojmové uchopení fenoménu dělby práce. Je ovšem třeba mít na mysli, že jak u Smitha, tak u Hegela a později i u Marxe je první, analytická etapa tohoto postupu zamlčena, takže se v rámci samotného teoretického vysvětlení netematizuje; to ovšem (na rozdíl od matematické přírodovědy) zcela postačuje k teoretické reprodukci konkrétna, ať již se jedná o mravní nebo tržní řád u Smitha nebo o strukturu sebeuvědomování a sebeuskutečňování absolutna u Hegela. Z toho plyne, že u výše zmíněných myslitelů je nezbytné rozlišovat mezi aplikovanou metodou jako takovou a způsobem výkladu výsledků její aplikace.<sup>173</sup>

Je také třeba dodat, že k Hegelově reflexi postupu od bezprostředního k myšlenkovému konkrétnu v jeho kruhové či spirální struktuře (bezprostřední konkrétno-abstrakce-myšlenková reprodukce konkrétna)<sup>174</sup> přispělo velkou měrou i to, že Smith aplikoval tento postup na vysvětlení kruhového (resp. v případě hospodářského růstu spirálního) pohybu tržní ekonomiky, v němž výsledek zpětně ustavuje východisko. Hegel z této inspirace vyvozuje také svůj princip jednoty předmětu a metody.

Jak již bylo výše naznačeno, v přírodních vědách (zejména v prvních stoletích vývoje matematické přírodovědy) byl na rozdíl od Smithovy pozdější teorie spontánních řádů a Hegelovy metafyziky kladen akcent na první, analytickou etapu postupu poznávacího procesu.

Jedním z důvodů pro to byla skutečnost, že, jak říká Hayek, ve svém vztahu k přírodní skutečnosti člověk primárně vnímá poměrně komplexní jevy,

---

<sup>171</sup> Smithova teoreticko-historická metoda, aplikovaná v *Teorii mravních citů* a *Bohatství národů* představuje specifickou syntézu substancialismu a relationalismu.

<sup>172</sup> Zcela zvláštní přístup můžeme najít u Spinozy, kde se restituce konkrétna děje *more geometrico*, tj. v podobě tautologického rozvíjení axiomů a definic..

<sup>173</sup> Totéž platí *mutatis mutandis* i pro Marxovu „metodu politické ekonomie“, aplikovanou při výstavbě jeho *Kapitálu*; když ovšem Marx ve svých metodologických úvahách kritizuje Hegela z materialistické pozice za to, že konkretizace myšlenkového abstraktna u něj konstituuje nejen myšlenkové, nýbrž v dalším kroku i bezprostředně dané smyslové (hmotné) konkrétno, vyslovuje v zásadě stejnou myšlenku jako Omnès, když tvrdí, že z teorie nelze vyvodit existenci faktů.

<sup>174</sup> U Hegela má ovšem tento proces složitější strukturu, odpovídající jeho idealistickému pojetí; lze ji zkráceně popsat v následujících krocích: 1) bezprostřední, smyslové konkrétno; 2) mrtvé, nehybné abstrakce; 3) přechod od těchto nehybných abstrakcí k pojmu (*Begriff*), který skrze sobě inherentní negativitu je s to dospívat ke svému protikladu; 4) naplňování této potence pojmu v procesu konkretizace a totalizace; 5) pochopení, že myšlenkové konkrétno je tím, co původně (přes ozvláštnění) ustavilo smyslové, z nynějšího hlediska již jen domněle bezprostřední konkrétno. Je pozoruhodné, že přes svůj idealismus je tato strukturace pohybu našeho poznání v lepším souladu s kruhovou/spirální strukturou pohybu spontánních řádů, než její svrchu uvedená redukováná podoba, v níž je idealistický moment potlačen.

z čehož plyne, že pro přírodní (fyzikální) vědy jsou tyto vágně (předvědecky) známé komplexní jevy východiskovým materiálem pro uplatnění analytických postupů, jejichž cílem je exaktní určení původně **neznámých prvků**, z nichž se jevy skládají.

Ve vztahu ke společenské skutečnosti jsou naproti tomu primární danosti či východiskovými „daty“ subjektivní postoje, přesvědčení, názory, pojmy a hodnotící akty jednotlivců, které ve vztahu ke komplexním společenským strukturám, jako je např. cenový systém nebo kapitalismus jako celek, vystupují v roli prvků. Tyto prvky jsou ovšem pro společenskovědního badatele **známými** prvky, neboť jejich charakter i podstatnou strukturu zná na základě metodicky řízené vědecké sebereflexe, která navazuje na sebereflexi předvědeckou. Z toho plyne, že ve společenských vědách přirozeně převládá orientace k totalizaci parciálního, resp. ke konkretizaci abstraktního, zatímco v přírodních vědách dominuje tendence analytická.

Druhým, a jak se zdá, mnohem závažnějším důvodem prevalence analytické metody v přírodních vědách je skutečnost, že se v nich zároveň s myšlenkovou (teoretickou) abstrakcí uplatňuje i postup materializované resp. praktické abstrakce. K materializaci postupu abstrahování dochází v rámci vědeckého experimentu. Snahou experimentátorů je totiž zbavit sledovaný děj vlivu všech ostatních dějů a sil. Příkladem je zde třeba Newtonova trubice, v níž se ve vzduchoprázdnu zkoumá rychlost a zrychlení volného pádu těles o různé hmotnosti. (Trubici je sestavena tak, že od síly tření vzduchu se abstrahuje nejen myšlenkově, ale také v realitě – skrze specifické uzpůsobení trubice.) Jde tudíž o takové uzpůsobení experimentálního zařízení, které nechá vyvstat materializovanou abstrakci jakožto reálný děj odpovídající v co největší míře naší předběžné (apriorní) myšlenkové abstrakci, a sice tak, že potlačí všechny ostatní síly, jež se uplatňují v konkrétní realitě; to znamená, že experiment jakožto materializovaný postup abstrahování nutně zahrnuje umělou izolaci měřené vlastnosti či síly od působení okolí. Až poté, jakožto materializovaná abstrakce, se onen děj stává objektem operací měření.

Přesněji řečeno, materializovaný postup abstrahování rozkládá na dále nedělitelné prvky nikoli konkrétní věcnou entitu, nýbrž konkrétní proces, (třebaže věcně zprostředkovaný), který je jednotou mnoha dílčích procesuálních určení. Cílem experimentu je na základě měření toho nebo onoho děje, který je předveden jako materializovaná abstrakce, stanovit matematickou funkcí vyjádřené kvantitativní vztahy mezi jednotlivými neoddělitelnými charakteristikami zkoumaného děje. (V našem příkladě se vzduchoprázdnu Newtonovou trubicí by šlo o stanovení funkčního vztahu mezi dráhou jakožto prostorovou charakteristikou dění volného pádu a jeho trváním jakožto charakteristikou časovou.) Námi prováděné vědomé experimentální aranžování podmínek při stanovování korelace určité nezávisle proměnné vůči závislé proměnné u zkoumaného děje má za účel eliminovat všechny další faktory ovlivňující hodnotu závisle proměnné; to se uskutečňuje tím způsobem, že se těmito faktorům příslušející nezávisle proměnné uměle udržují během zkoumání

na konstantní úrovni. Realizuje se tak snaha praktickým způsobem oddělit zkoumanou funkční korelaci od jiných korelací uplatňujících se v témž procesu, neboli snaha o to, aby se ona korelace zjevila – a změřila – v čisté podobě jakožto jedno-jednoznačný, dále již nedělitelný, tj. v pravém slova smyslu atomární vztah.

Pojem atomárního vztahu, tj. matematickou funkcí vyjádřeného kvantitativního vztahu mezi neoddělitelnými, inherentními charakteristikami děje, předvedeného jakožto materializovaná abstrakce, odpovídá původnímu newtonovskému pojetí přírodního zákona jakožto nutné, neměnné relace, jež se uplatňuje vždy, když nastanou stejné podmínky, jako byly ty, co vznikly v důsledku materializace postupu abstrahování v rámci experimentu; nedílnou součástí tohoto pojetí je přesvědčení, že funkcionální vztahy mezi proměnnými nemohou být (s výjimkou dokonalejšího změření konstant) pozdějšími experimenty nijak korigovány nebo zpřesňovány. Tím, že má přírodní zákon povahu atomárního vztahu, platného pouze za určitých podmínek, je *eo ipso* abstraktním zákonem.

Druhá etapa poznávacího procesu, konkretizace abstraktních určení, má zde podobu syntézy (resp. jakési superpozice) abstraktních zákonů, stanovených měřeními souvztažností inherentních charakteristik jednotlivých materializovaných abstrakcí vzniklých v předchozí analytické etapě postupu. Tím dospíváme k myšlenkové reprodukci původního konkrétna. V případě volného pádu by se to dělo tak, že bychom nejdříve stanovili abstraktní zákon pro volný pád ve vzduchoprázdnu a posléze bychom se zaměřili na stanovení rovněž abstraktního zákona vyjadřujícího rovněž atomární vztah mezi hmotností tělesa a silou odporu vzduchu (šlo by vskutku o atomární vztah, neboť bychom museli měřit tuto zákonitou závislost na tělesech stejného tvaru; v tomto případě by byla materializací postupu abstrahování produkce experimentálních objektů různé hmotnosti majících stejný tvar, například koule); pak by následovalo stanovení závislosti odporu vzduchu na měnícím se

tvaru padajícího tělesa atd.<sup>175</sup> Syntéza těchto (relativně)<sup>176</sup> jednoduchých abstraktních zákonů do podoby složitějšího funkčního vztahu bude pak dávat zákon konkrétní čili myšlenkovou reprodukci konkrétní.

V souvislosti s problematikou materializovaného postupu abstrahování je třeba v první řadě mít na zřeteli, že nyní již na rozdíl od Bacona a Newtona víme, jako silově-technologicky prováděné odlučování či izolování má prakticko-historickou povahu. To implikuje, že původní představa abstraktních přírodních zákonů jakožto absolutně atomárních vztahů se stala neudržitelnou a musela být nahrazena pojetím, v souladu s nímž je atomárnost vztahu pouze relativní, a to vzhledem ke stupni vývoje měřících zařízení a dosavadní úrovni poznání. S tím, jak známo, souvisí zavedení principu korespondence (jak jsme viděli, u Omnèse přechází tento princip v pouhý vztah), dále koncepce objektivní, a nikoliv absolutní pravdy atd.<sup>177</sup>

Dále je nutno upozornit na jistou matoucí dvojznačnost, která je spojená s materializací postupu abstrahování. Ukážeme si ji opět na příkladu Newtonovy trubice: Pokud chceme zde na zemském povrchu, kde jsme všude obklopeni

---

<sup>175</sup> Způsob, jímž dospíváme k atomárním vztahům, lze charakterizovat i jako uplatnění postupu *ceteris paribus* (za jinak nezměněných podmínek), ovšem z s důrazem na to, že se uplatňuje uvnitř fyziky. Rádoby antiredukcionistickou myšlenku Nancy Cartwrightové, horující proti „imperialismu“ fyziky ve prospěch postmodernistického pluralismu, že totiž postup *ceteris paribus* uplatňuje fyzika tak, že abstrahuje od něčeho, co leží mimo rámec fyziky (třeba od biologických, psychických nebo sociálních interakcí) je třeba co nejrozhodněji odmítnout. „Jakýsi pluralistický názor“ N. Cartwrightové, jenž z toho rezultuje a v souladu s nímž „jsou všechny vědní disciplíny v základě rovnocenné a navzájem se ovlivňují různými typy interakcí mezi činiteli, kteří vystupují v různých oblastech“, vede přímo k mysticismu a šarlatánství: když naznačuje, že narušení fyzikálních dějů může být způsobeno činiteli, které nelze popsat v jazyce fyziky a nepodrobují se jejím zákonům, připouští tím například, že fyzikální zákony platí, jen když (pomocí materializovaného abstrahování) izolujeme zkoumané děje od působení teleonomní *vis vitalis*, psychických „energií“ a vlastně čehokoliv jiného. (Srv. N. Cartwrightová, „Proč fyzika?“, in: R. Penrose, *Makrosvět, mikrosvět a lidská mysl*, str. 131-136.)

<sup>176</sup> V této exemplifikaci jde opravdu o zákony, které jsou jednoduché jen relativně, neboť při pokračování postupu konkretizace bychom se dostali velice brzy k souvislostem popsatelným pouze v termínech statistické fyziky a deterministického chaosu (kdybychom např. uvažovali i vlivy proudění vzduchu způsobené klimatickými fenomény). Fyzikální konkrétno je nevyčerpatelné; jeho úplná reprodukce v myšlenkovém konkrétnu je dána jako kantovská idea, tj. jako úkol, jehož řešení je v nekonečnu.

<sup>177</sup> Např. Galileiho transformace (právě tak jako Newtonův gravitační zákon) byla původně pokládána za absolutně atomární vztah, protože tehdejší měřící přístroje nebyly s to registrovat relativistické, tj. původem elektromagnetické efekty (které jsou ve fenomenálním světě jen ve velice nepatrné míře přimíseny k působení gravitace či setrvačnosti), a neexistovala ani teorie elektromagnetického pole, jejíž promýšlení přivedlo mladého Einsteina k odhalení rozporu mezi ní a newtonovskou mechanikou; Galileiho transformace byla poté nahrazena Lorentzovými transformacemi, v nichž hraje hlavní roli rychlost světla ve vakuu. Právě tato veličina umožňuje konkretizující syntézu mezi mechanikou (k níž se dospělo při – neúmyslné – abstrakci od elektromagnetismu) a teorií elektromagnetického pole (k níž se ovšem také dospělo při abstrakci od mechaniky).

vzduchem, jenž klade odpor, zjistit, jak působí na těleso přitažlivost Země bez příměsí jiných silových působení, musíme materializovat náš abstrahující postup do podoby předvedení volného pádu těles v Newtonově trubici; abychom odloučili „abstraktní“ volný pád od „konkretizujícího“ okolí, musíme silově intervenovat do reality. Zároveň nyní víme, že v kosmickém vzduchoprázdnu se pohybují pod vlivem zemské gravitace různá tělesa, aniž došlo k silové intervenci z naší strany. Tentýž „nesmíchaný“ děj je tudíž jednou dán s naším přičiněním, jindy zase bez našeho zásahu. Co si počít s touto dvojznačností? Lze pohyb kosmických těles, jejich volný pád k Zemi, prohlásit rovněž za abstrakci samu o sobě, kterou na rozdíl od nás předvádí příroda? To by přírodovědci XX. století, nikdy neučinili, neboť v nichž dřímaly reminiscence na pohrdlivé odsudky německé „romantické“ naturfilosofie,<sup>178</sup> předhazované jejím představitelům pozitivistickými a novopozitivistickými metodology. Zmíněná dvojznačnost je mnohem spíše vedla k tomu, že zapomněli, resp. si neuvědomili, že poznatky o „šíleném“ chování izolovaných fotonů či elektronů získali na základě materializace postupu abstrahování, která velice efektivně odloučila předměty jejich zkoumání od vlivů okolí. Jinými slovy zapomněli, že např. volné elektrony vykazují zde v pozemském prostředí efekty kvantové interference v téměř naprosté většině případů jenom při našem masivním a sofistikovaně zacíleném silovém zásahu do reality (elektronové dělo), a začali věřit, že i bez tohoto zásahu se na mikroskopické úrovni všechny částice chovají stejně jako elektrony, jež k nám prázdnotě kosmu letí ze Slunce a nemají možnost interagovat s makroobjekty o počtu částic v řádu BBB. Právě z tohoto zapomenutí povstaly výše zmiňované zmatky, jako dualita kvantových a klasických zákonů, von Neumannův subjektivismus atd. Stejně tak se v kvantové fyzice, ale také v klasické dynamice zapomnělo, že časovou vratnost je možné nalézt jen u objektů a procesů, u kterých byly postupem materializovaného abstrahování uměle (a i to pouze v aproximaci) potlačeny disipativní efekty, resp. u objektů a procesů, u nichž bylo lze tyto efekty zanedbat na základě relativní nepatrnosti jejich působení i praktické nemožnosti jejich měření dobovými měřícími přístroji – to je případ klasické dynamiky, která uvažovala nejen volný pád ve vakuu, nýbrž i pohyb nebeských těles ve vzduchoprázdnu.

---

<sup>178</sup> Schelling a Hegel mechanický pohyb v prostoru tímto opravdu způsobem traktovali. Abstrakce má u nich objektivní význam, jako taková nezávisí na individuálním lidském myšlení. To je ovšem možné jen tehdy, když celek přírody se chápe jako sebeuvědomování absolutna nebo „světové duše“, které je v návaznosti na Aristotelův koncept boha současně sebeuskutečňováním, tedy jen na bázi objektivisticky chápané identity bytí a myšlení. Engels, který se pokusil materialisticky interpretovat toto učení, mluví o tom, že mechanický pohyb je abstraktnější než pohyb biologický, protože biologický pohyb je vyšším konkrétem, syntetickou jednotou mechanická a chemická. Toto tvrzení ve svém jádru sice není nesprávné, avšak to, se zde vyjadřuje termíny „abstraktní“, „konkrétní“, které zde mají pouze relativní charakter (abstraktní je abstraktní jen vzhledem k nějakému konkrétnějšímu), nutno vyjádřit v termínech různých stupňů komplexity; termín „abstraktní“, pokud nepoukazuje k lidským aktivitám, je metafyzickým reliktem objektivního idealismu.

Teorie dekoherence, která naopak tvrdí, že kvantové efekty platí pro izolovaný elektron či foton zanikají v jejich interakci s okolím v čase, který se řádově rovná sekundě vydělené číslem  $10^{54}$ , zahrnuje implicitně uvědomění si metodického postupu materializovaného abstrahování, jímž byly získány poznatky o chování částice izolované od okolí; v jejích teorémech je implicitně, ale i explicitně přítomen postup, který je negací postupu abstrahování, tj. postup konkretizace, jenž vede k myšlenkové reprodukci konkrétna. Jinak řečeno, teorie dekoherence kompenzuje omezení nutně spojená s materializací abstrakce a začleňuje tuto kompenzaci do teorie samotné. Postup konkretizace mezi jiným znamená i teoretickou restituci nevratnosti času v důsledku zpětného začlenění dekoherenčních a disipativních efektů (od nichž se předtím prakticky i teoreticky abstrahovalo) do fyzikální teorie.

Zcela na závěr této kapitoly nebude nevhod připomenout, že v návaznosti na Aristotela lze peníze definovat jako materializovanou, fyzicky od člověka oddělitelnou možnost uspokojit v určité kvantitativní míře (podle jejich množství) jakoukoli kvalitativně odlišenou potřebu; tato možnost přechází ve skutečnost tím, že si jedinec odpovídající předmět prostě koupí. Peníze jsou tedy materializovanou a společensky uznanou možností saturovat ne tu nebo onou potřebu, nýbrž abstraktní potřebnost jako takovou (Aristoteles říká, že peníze se staly měnou potřeby); to znamená, že jsou materializací abstraktního užitku, který každý jejich vlastník konkretizuje individuálně v souladu se svojí hodnotovou hierarchií. Peníze jsou tedy vedle materializované abstrakce, tak jak se uplatňuje v experimentálním poznání, další podobou tohoto zvláštního fenoménu. A navíc, peníze jako materializace abstraktního užitku vznikly spontánně, tj. tak, že ti, kdo je zavedli, neměli žádný explicitní pojem abstraktního užitku. Tento společný rys peněz jakožto míry hodnoty, resp. míry abstraktního užitku, a experimentálních postupů, které umožňují, aby na základě fyzikálního měření byly stanoveny abstraktní přírodní zákony, poukazuje na to, že vztahy člověka k přírodě i ke společnosti vyrůstají ze společných fundamentů.