



# SEMINÁRNÍ PRÁCE

Kryštof Pšenička

## Superdeterminismus

Vedoucí seminární práce: Mgr. Ivana Špilínková

2022

Prohlašuji, že jsem tuto seminární práci vypracoval samostatně a výhradně  
s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

V ..... dne .....

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucí seminární práce Mgr. Ivaně Špilínkové za odborné vedení, pomoc, gramatickou kontrolu a rady při zpracování práce.

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Problémy kvantové mechaniky</b>	<b>5</b>
1.1 Problém měření . . . . .	5
1.2 Problém unifikace . . . . .	8
<b>2 Bellova nerovnost</b>	<b>9</b>
2.1 Bellovy testy . . . . .	10
2.1.1 Nepřesnosti v Bellových testech . . . . .	10
<b>3 Definující vlastnosti</b>	<b>13</b>
3.1 Psi-epistemická . . . . .	13
3.2 Deterministická . . . . .	13
3.3 Lokální . . . . .	14
3.4 Porušení Statistické Nezávislosti . . . . .	19
<b>4 Protiargumenty</b>	<b>21</b>
4.1 Bellovy testy . . . . .	21
4.1.1 Kosmické Bellovy testy . . . . .	21
4.1.2 Velký Bellův test . . . . .	22
4.2 Svobodná vůle . . . . .	23
4.2.1 Svobodná vůle iluzí . . . . .	23
4.3 Ohrožení vědecké metody . . . . .	25
<b>5 Výhled</b>	<b>26</b>
5.1 IST . . . . .	26
<b>Závěr</b>	<b>28</b>
<b>Seznam použité literatury</b>	<b>29</b>
Knihy . . . . .	29
Videa . . . . .	29
Články . . . . .	29
Internetové články . . . . .	30

# Úvod

(Zpracováno podle knihy Kumar, 2014)

Na konci 19. století se vědci domnívali, že s výjimkou několika detailů jejich teorie dokázaly odpovědět na všechny otázky fyziky. Podle nich už na obzoru nebyly žádné velké objevy. Maxwellovy rovnice elektromagnetismu a Newtonovy pohybové zákony kreslily deterministický vesmír: částice mají určitou pozici a momentum; síly působící na částici, určují změnu její pozice a rychlosti v čase - vše je předurčeno.

Ale už v roce 1900, při řešení problému absolutně černého tělesa, objevil Max Planck kvanta - nedělitelné balíky světla, jejichž velikost (energie) závisí na frekvenci daného světla. I když si v té době Max Planck i většina ostatních fyziků myslela, že to je pouze matematický trik, který nemá žádné implikace ve fyzickém světě, byl to první krok vedoucí ke kvantové revoluci.

Albert Einstein věřil ve fyzickou existenci Planckových kvant a ve vlnově-korpuskulární dualitu světla, podle níž je světlo částicí a vlnou zároveň a chová se jako jedno nebo druhé podle způsobu našeho pozorování. Ve svém *Annus mirabilis*<sup>1</sup> (1905) kvantově vysvětlil fotoefekt: když elektron získá dostatek energie absorbcí kvanta světla, je uvolněn z obalu atomu a následně může být vyzařován.

Francouzský aristokrat Louis de Broglie vzal myšlenku kvant z Planckovy práce ještě dál a teoretizoval o vlnově-korpuskulární dualitě všech částic, nejen světelných, ale také částic hmotných.

Kvantový model atomu se postupně vyvíjel od modelu Nielse Bohra s jedním kvantovým číslem, vyjadřujícím velikost oběžné dráhy elektronu. Arnold Sommerfeld postupně k tomuto modelu přidal 3 další kvantová čísla: jedno vyjadřující tvar eliptické oběžné dráhy elektronu, druhé (magnetické) vyjadřující orientaci oběžné dráhy v prostoru a poslední vyjadřující spin, vnitřní moment hybnosti částice.

Bylo zřejmé, že je potřeba vytvořit teorii, která by popisovala fenomény kvantového světa: kvantovou mechaniku.

Roku 1925 Werner Heisenberg objevil Maticovou kvantovou mechaniku. Maticová, protože využívá matic a vektorů. Matice jsou tabulky čísel (viz Obrázek 1), jež v této teorii mohou vyjadřovat veličiny jako polohu a hybnost částice. Vektory jsou veličiny, které mají kromě velikosti i směr a dají se vyjádřit maticemi. V Maticové mechanice se používají k vyjádření stavu systému, např. částice. Jelikož rozměry matic se zvyšují exponenciálně s rostoucím počtem částic, je tato teorie nesmírně nepraktická k výpočtu vývoje jakéhokoli systému.

---

<sup>1</sup>Zázračný rok, ve kterém Einstein vydal 4 revoluční vědecké články.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

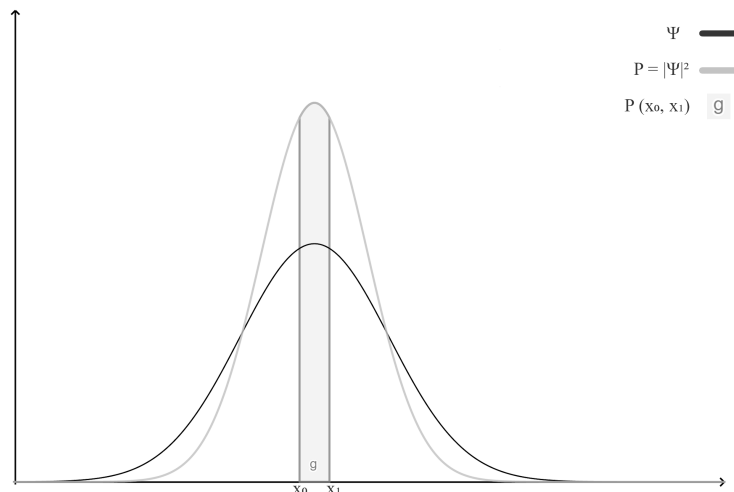
Obrázek 1: Matice o 3 řádcích a 3 sloupcích.

Pouze tři měsíce po vydání Heisenbergova článku o Maticové mechanice zkonstruoval rakouský fyzik Erwin Schrödinger svou proslulou vlnovou rovnici (Rovnice (1)), která popisuje vývoj vlnové funkce. Stala se základem Schrödingerovy Vlnové mechaniky. Výpočty s vlnovou rovnicí jsou daleko jednodušší, a tak se od Maticové mechaniky odstoupilo.

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + V\Psi \quad (1)$$

O rok později Schrödinger dokázal matematickou ekvivalenci Maticové a Vlnové mechaniky: jsou to dvě formy téže teorie - kvantové mechaniky.

Krátce poté Max Born předložil pravděpodobnostní interpretaci vlnové funkce, v níž druhá mocnina vlnové funkce vyjadřuje pravděpodobnostní distribuční funkci výsledku. Pro ilustraci vezměte v úvahu obrázek 2.  $\Psi$  je vlnová funkce, která vyjadřuje stav systému, např. pozici elektronu.  $\mathbf{P}$  je pravděpodobnostní distribuční funkce. Tato funkce vyjadřuje pravděpodobnost pro každý možný výsledek měření (každá možná pozice elektronu).  $\mathbf{P}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_1)$  je pravděpodobnost, že výsledek měření bude mezi  $x_0$  a  $x_1$ . V našem případě je to pravděpodobnost, že elektron bude mít pozici mezi  $x_0$  a  $x_1$  a počítá se integrací pravděpodobnostní funkce mezi hodnotami  $x_0$  a  $x_1$ . Integrací  $(\int_{x_0}^{x_1} |\Psi|^2 dx)$  získáme obsah pod křivkou v daném rozsahu odpovídající hledané pravděpodobnosti.



Obrázek 2: Vlnová funkce, pravděpodobnostní funkce a pravděpodobnost určitého výsledku.

Pravděpodobnostní interpretace se stala důležitou součástí dnešní kvantové mechaniky (Kodaňské interpretace), kterou společně definovali Bohr, Pauli a Heisenberg.

Kvantová mechanika změnila obraz vesmíru z deterministického a předurčeného na indeterministický a pravděpodobnostní. V kvantovém pravděpodobnostním vesmíru můžeme určit pouze pravděpodobnost daného výsledku. Jediný způsob, jak Clerk Maxwell a Ludwig Boltzmann mohli popsat vlastnosti plynu skládajícího se z nespočetného množství částic, bylo použitím pravděpodobnosti. Museli se spokojit se statistickým popisem. Tento nucený ústup ke statistické analýze byl způsoben neuskutečnitelností sledování pozice a rychlosti tolika částic. Pravděpodobnost byla důsledkem lidské nevědomosti. Naopak podle kvantové mechaniky je pravděpodobnostní vyjádření kvantového světa fundamentální vlastností kvantového vesmíru.

Přestože se Albert Einstein na kvantové revoluci podílel, proměnil se v jejího nejhlasilějšího kritika. Uvědomoval si její užitečnost v atomových měřících, ale tvrdil, že „Bůh nehraje v kostky.“ Byl přesvědčený, že kvantová mechanika není konečnou teorií, že za ní musí být fundamentálnější deterministická teorie. Takovým teoriím se říká teorie se „skrytými“ parametry. Podle nich dokážeme určit jen pravděpodobnost výsledků, jelikož neznáme všechny parametry. Kdybychom znali „skryté“ parametry, dokázali bychom určit přesný výsledek měření.

V roce 1962 našel John Stewart Bell způsob, jak matematicky posoudit možnost teorie se skrytými parametry, která by replikovala výsledky kvantové mechaniky. Dnes se jí říká Bellova nerovnost. Tato nerovnost byla experimentálně porušena. Podle všeobecného mínění znamená porušení této nerovnosti nemožnost teorie se skrytými parametry. Porušení ale pouze znamená, že neexistuje teorie se skrytými parametry replikující kvantovou mechaniku, která by splňovala princip lokálního

realismu a podmínku Statistické Nezávislosti.

Zde se budu věnovat teorii se skrytými parametry, která nesplňuje podmínku Statistické Nezávislosti. Takovou teorii nazval Bell Superdeterminismus. Statistická Nezávislost (viz Rovnice (2)) znamená, že pravděpodobnostní distribuce skrytých parametrů ( $\mathbf{P}(\boldsymbol{\lambda})$ ) se nezmění, vezmeme-li v potaz nastavení detektorů,  $(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ . Těto podmínce se často říká podmínka svobodné vůle nebo svobodné volby.

Mým cílem je přehodnotit argumenty proti Superdeterminismu. V rozporu s všeobecným míněním se pokusím vysvětlit, že Superdeterminismus je cestou, která by mohla vyřešit mnoho problémů se současnými teoriemi a kterou bychom neměli ignorovat; je to cesta, kterou jsme se nevydali.

$$P(\lambda|\mathbf{a}, \mathbf{b}) = P(\lambda) \tag{2}$$



# 1 Problémy kvantové mechaniky

## 1.1 Problém měření

(Zpracováno podle videa *The Problem with Quantum Measurement*, Hossenfelder, 2022)

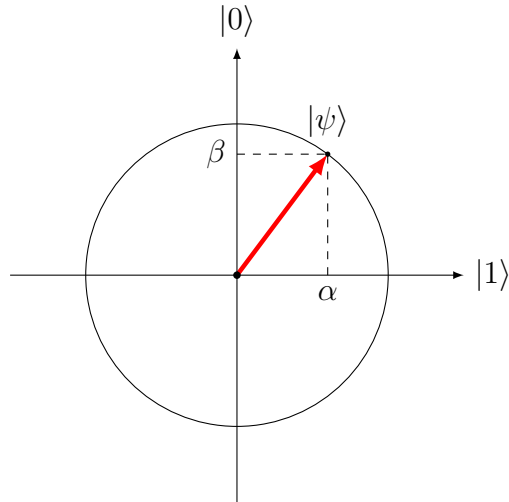
Kodaňská (současná) interpretace kvantové mechaniky se skládá ze tří částí: Schrödingerova vlnová rovnice, postulát o měření a Bornovo pravidlo.

Schrödingerova vlnová rovnice popisuje každou změnu vlnové funkce v čase kromě procesu měření. Tento proces chápeme jako interakci vlnové funkce měřeného systému s jiným (měřícím) systémem, která v měřícím systému zanechá informaci o velikosti určité veličiny měřeného systému. Když dojde k takové interakci, musíme použít postulát o měření, aby stav naší vlnové funkce souhlasil s realitou.

Postulát o měření můžeme jednoduše vysvětlit pomocí jednotkové kružnice. V úvodu jsem představil koncept vlnové funkce používaný k vyjádření stavu kvantového systému. Když sledujeme binární veličinu kvantového systému, např. spin kvantové částice, můžeme využít znázornění používaného v oboru Kvantového počítání k ilustraci stavu kvantového bitu (qubitu). Stav qubitu se znázorňuje vektorem  $|\psi\rangle$  na jednotkové kružnici v soustavě souřadnic, kde osa  $x$  je jeden stav qubitu (např. spin nahoru, označovaný podobně jako u bitů jako  $|1\rangle$ ) a osa  $y$  je stav druhý (např. spin dolů, jako  $|0\rangle$ ) (viz Obrázek 3). Vektor  $|\psi\rangle$  zapisujeme jako součet možných výsledků (viz Rovnice (3)), přičemž druhé mocniny koeficientů  $\alpha$  a  $\beta$  určují pravděpodobnost daného výsledku.

$$|\psi\rangle = \alpha|1\rangle + \beta|0\rangle \quad (3)$$

Součet pravděpodobností je vždy 1, takže pro koeficienty platí vztah  $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ . Stejně se počítá absolutní hodnota vektoru  $|\psi\rangle$ . To znamená, že délka vektoru  $|\psi\rangle$  je vždy 1, a proto používáme jednotkovou kružnici.

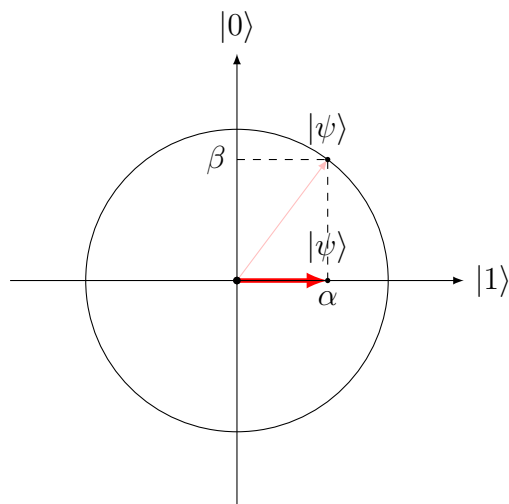


Obrázek 3: Znázornění vlnové funkce pomocí vektoru na jednotkové kružnici.

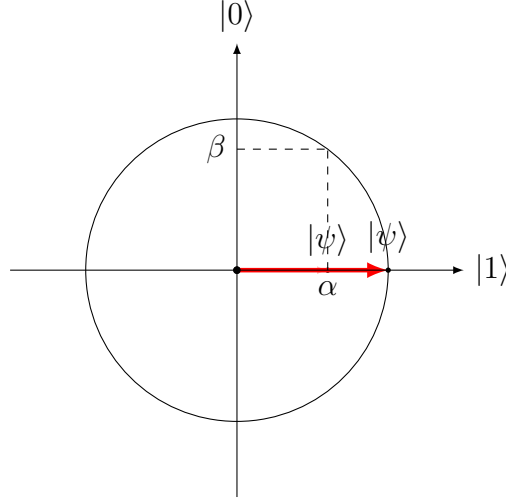
V praxi se používá Blochova sféra (jednotková sféra), jelikož koeficienty  $\alpha$  a  $\beta$  jsou komplexní čísla, která mají navíc imaginární rozměr, což znamená, že  $|\psi\rangle$  je troj-rozměrný vektor. Nám k ilustraci postulátu o měření postačí 2 rozměry.

Podle postulátu o měření máme při měření vektor  $|\psi\rangle$  aktualizovat promítnutím na osu změřeného výsledku a následným prodloužením zpět na délku 1.

Např. když budeme měřit stav qubitu a změříme ho ve stavu  $|1\rangle$ , musíme vektor aktualizovat, aby správně popisoval reálný stav qubitu. V tomto případě musíme vektor promítnout na osu změřeného stavu (osu  $|1\rangle$ ) (viz Obrázek 4). A poté musíme aktualizovat pravděpodobnost prodloužením vektoru zpět na délku 1 (viz Obrázek 5).



Obrázek 4: Promítnutí vektoru na osu změřeného výsledku.



Obrázek 5: Prodloužení vektoru zpět na délku 1.

Schrödingerova rovnice je lineární. To znamená, že pokud za funkci  $\psi$  dosadíme součet dvou jiných vlnových funkcí ( $\gamma$  a  $\epsilon$ ) s libovolnými koeficienty  $\alpha$  a  $\beta$  (viz Rovnice (4)), bude zachována rovnost (viz Rovnice (5)). Součet vlnových funkcí (viz Rovnice (4)) se nazývá superpozice.

$$|\psi\rangle = \alpha|\gamma\rangle + \beta|\epsilon\rangle \quad (4)$$

$$i\hbar \frac{\partial(\alpha|\gamma\rangle + \beta|\epsilon\rangle)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2(\alpha|\gamma\rangle + \beta|\epsilon\rangle)}{\partial x^2} + V(\alpha|\gamma\rangle + \beta|\epsilon\rangle) \quad (5)$$

Problém měření spočívá v nelineárnosti postulátu o měření. Tuto nelineárnost můžeme jednoduše dokázat pomocí superpozice. Pokud budeme měřit částici popsanou vlnovou funkcí  $|\psi\rangle = |1\rangle$ , změříme ji ve stejném stavu ( $|1\rangle$ ). Problém nastává v případě, kdy měříme částici ve stavu superpozice (např.  $|\psi\rangle = \sqrt{\frac{1}{2}}|0\rangle + \sqrt{\frac{1}{2}}|1\rangle$ ), jelikož nezměříme tuto superpozici, ale jen jeden ze stavů superpozice ( $|0\rangle$  nebo  $|1\rangle$ ), každý s pravděpodobností 50%.

Neshodnost Schrödingerovy rovnice a postulátu o měření znamená, že podle moderní kvantové mechaniky se nástroje na měření chovají podle jiných zákonů než elementární částice. Aby toto dávalo smysl, museli bychom opustit předpoklad redukcionismu, podle něhož se dá chování makroskopického objektu derivovat z chování jeho součástí. Museli bychom vytvořit teorii, která by definovala hranici redukcionismu. Touto možností se nebudeme zabírat, jelikož redukcionismus je jedním z nejlépe podložených předpokladů vědy<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>Předpoklad redukcionismu je podporován každým experimentem, který byl kdy proveden. Je těžké najít lépe podložený vědecký fakt.

## 1.2 Problém unifikace

(Zpracováno podle článku Abdeen a Silva, 2013)

Konečným cílem fyziky je teorie všeho popisující všechny jevy ve vesmíru. Doposud jsme všechny známé přírodní zákonitosti zjednodušili do dvou velice odlišných teorií: obecné relativity a kvantové mechaniky. Obecná relativita je teorie velkých rozměrů a energií. Dokáže popsat pohyb nebeských těles s nevídanou přesností.

Podle obecné teorie relativity se v přítomnosti hmoty ohýbá časoprostor, zatímco nepřítomnost hmoty způsobuje plochý časoprostor. Problém vzniká v subatomárních měřítcích. Zde převládají kvantové fluktuace způsobené Heisenbergovým principem neurčitosti<sup>3</sup>, jenž vedou k radikálně zvrásněnému časoprostoru v protikladu k plochému časoprostoru obecné relativity. K dalším nesouladům patří:

- Neschopnost obecné relativity řešit nekonečné zakřivení časoprostoru, způsobené hmotnými body.
- Nereálnost a nelokálnost kvantové mechaniky (vysvětleny v kapitole 2).

---

<sup>3</sup>Podle Heisenbergova principu neurčitosti vznikají i v perfektním vakuu páry virtuálních částic (částice a antičástice), které se anihilují krátce po svém vzniku.

## 2 Bellova nerovnost

Roku 1964 byl zveřejněn převratný vědecký článek (Bell, 1964). Irský vědec John Stewart Bell tímto článkem odpověděl na myšlenkový experiment, jenž byl předložen Albertem Einsteinem společně s Borisem Podolskym a Nathanem Rosenem (1935). Jejich myšlenkový experiment poukázal na paradox v kvantové mechanice. Když se částice se spinem 0 rozpadne na dvě částice, musí podle zákona zachování spinu mít v součtu spin 0. Tomuto jevu se říká kvantové provázání. Pokud změříme spin jedné částice, instantně se dozvíme spin druhé částice, i kdyby tato částice byla vzdálena tisíce světelných let. Informace o spinu se podle kvantové mechaniky šíří mezi provázanými částicemi rychleji než světlo. Nicméně speciální teorie relativity omezuje rychlost každého kauzálního vlivu na rychlost světla. Kvantová mechanika tak porušuje lokální realismus. Lokální realismus obsahuje 2 principy:

1. **Princip lokality:** objekt může být ovlivněn pouze svým bezprostředním prostředím (Kauzální vliv se nemůže šířit rychleji než světlo). (*Principle of locality* 2022)
2. **Princip realismu:** vesmír existuje nezávisle na pozorovateli. (*Philosophical realism* 2022)

Einstein tímto odůvodňoval své přesvědčení, že kvantová mechanika nemůže být správnou reprezentací reality. Podle něj musí každá provázaná částice nést všechny informace o svém fyzikálním stavu už od okamžiku vzniku provázání a to takovým způsobem, že jsou tyto informace nějak skryty před vlnovou funkcí kvantové mechaniky. Einstein byl přesvědčen o existenci „skrytých proměnných“, jež nejsou součástí kvantové mechaniky, a spekoval o možné teorii obsahující tyto skryté vlastnosti reality.

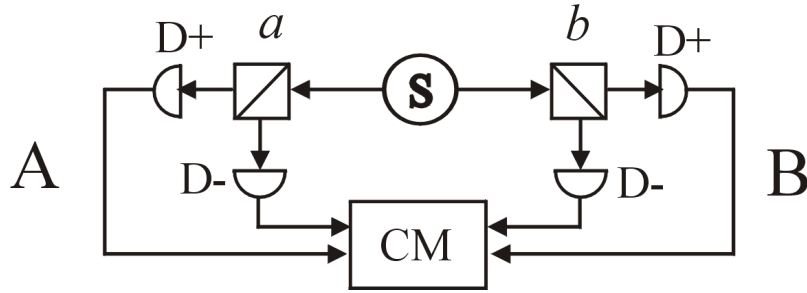
Bell ve zmíněném článku (1964) publikoval Bellovu nerovnost pojednávající o omezení teorie se skrytými proměnnými. Aby mohla existovat teorie splňující předpoklad lokálního realismu (teorie se skrytými proměnnými) a Statistické Nezávislosti, musí být splněna Bellova nerovnost (viz Rovnice 6), podle níž musí být korelace mezi měřeními propletených částic,  $|S|$ , menší, nebo rovna **2**.

$$|S| \leq 2 \tag{6}$$

## 2.1 Bellovy testy

(Zpracováno podle článku *Bell test*, 2022)

U jednoduchého příkladu Bellova testu (viz Obrázek 6) zdroj  $S$  vytváří páry propletených fotonů a každý z nich vyšle v opačném směru. Oba fotony narazí na dvoukanálový polarizační filtr ( $a$ ,  $b$ ), který foton odrazí, nebo propustí, podle polarizace daného fotonu. Následně je každý foton detekován detektorem  $D+$ , nebo  $D-$  a informace o polarizaci fotonu je vyslána do korelačního monitoru  $CM$ .



Obrázek 6: Schéma typického CHSH (dvoukanálového) Bellova testu.

Bell si nemohl dovolit zveřejnit článek v populárním časopise. Otiskl ho tedy v neznámém časopise *Physics Physique Fyzika*, který za příspěvky dokonce platil. Z tohoto důvodu se jeho nerovnost dočkala experimentálního pokusu až o osm let později, kdy Stuart J. Freedman a John F. Clauser změřili korelace mezi lineárními polarizacemi fotonů vyzařovaných z atomů vápníku (1972). Korelace byla větší, než je dovoleno Bellovou nerovností. Tento výsledek byl mnohokrát replikován se stále větší přesností. Alain Aspect, John Clauser a Anton Zeilinger dostali roku 2022 Nobelovu cenu za fyziku za experimenty s propletenými fotony, které prokázaly porušení Bellovy nerovnosti, a za průkopnictví v kvantové informatice.

### 2.1.1 Nepřesnosti v Bellových testech

Nepřesnost experimentů ověřujících Bellovu nerovnost může nastat z více důvodů.

1. **Detekční mezera:** rozdíl mezi počtem emitovaných a detekovaných částic.

Garg a Mermin ukázali, že detekční účinnost ( $\eta$ , podíl vyslaných a změřených částic) potřebná k překonání detekční mezery u experimentu typu CHSH musí být větší než 0.83 (1987). Tato hranice byla překonána roku 2001 experimentem s detekční účinností přes 0.9 (Rowe et al., 2001).

2. **Mezera lokality:** možnost, že volba nastavení měření jedné částice ovlivní měření druhé částice.

Lokalita je jedním z předpokladů potřebných k odvození Bellovy nerovnosti. Původem tohoto předpokladu je teorie relativity, která omezuje rychlost ko-

munikace na rychlost světla. K uplatnění tohoto předpokladu u experimentu musí být doba, která uplyne mezi volbou nastavení měření<sup>4</sup> a měřením samotným, kratší než doba, kterou by světelný signál potřeboval k překonání vzdálenosti mezi místy měření. U našeho příkladu (viz Obrázek 6) by musela být doba mezi volbou úhlu natočení dvoukanálových polarizačních filtrů a měřením kratší, než doba, kterou by světelný signál potřeboval k cestě mezi detektory na straně A a detektory na straně B. Takový experiment navrhoval Bell už ve svém originálním článku (1964). V prvním takovém experimentu (Aspect, Dalibard a Roger, 1982) byla volba nastavení měření na každé straně provedena během letu fotonů ze zdroje.

3. **Mezera spoluvýskytu:** možnost, že zdánlivý pár propletených částic jsou doopravdy dvě částice z odlišných párů vyslaných zdrojem.

U všech Bellových experimentů, zejména u experimentů založených na polarizaci fotonů, se dvojice změřených částic v obou křídlech experimentu identifikují jako patřící do jedné dvojice až po provedení experimentu; tj. posouzením, jestli jsou jejich časy detekce dostatečně blízko sebe. To vytváří možnost pro lokální teorii skrytých proměnných „falšovat“ kvantové korelace: zpozdit čas detekce každé ze dvou částic o větší či menší množství v závislosti na určitém vztahu mezi skrytými proměnnými v částicích a nastavením detektoru, s nímž se setkají.

Předejít mezeře spoluvýskytu lze experimentem s předem pevně danou mřížkou detekčních oken, která jsou dostatečně krátká, aby většina párů částic změřených ve stejném okně skutečně pocházela ze stejné emise, a dostatečně dlouhá, aby skutečný pár částic nebyl oddělen hranicí okna.

4. **Paměťová mezera:** lokální teorie skrytých proměnných by mohla využít paměť předešlých nastavení měření a výsledků měření ke zvýšení porušení Bellovy nerovnosti.

Bylo prokázáno, že při provedení experimentu typu Alaina Aspecta (1982) s randomizací nastavení měření nemá tato mezera dostatečný účinek ke změně výsledku experimentu (Barrett et al., 2002; Gill, 2001; Gill, 2003).

---

<sup>4</sup>Volba nastavení detektorů. V použitém příkladu (viz Obrázek 6) je to volba natočení dvoukanálových polarizačních filtrů  $a$  a  $b$ .

5. **Superdeterminismus:** možnost porušení Statistické Nezávislosti<sup>5</sup>.

Tato možnost byla eliminována v domněnání, že by narušila „svobodnou vůli“ experimentátora a že „svobodná vůle“ je nezbytná pro vědu. V následujících kapitolách zvážíme tuto možnost a ukážeme si, proč bychom ji neměli tak rychle zavrhnout.

---

<sup>5</sup>Možnost korelace skrytých proměnných s nastavením měření.



### 3 Definující vlastnosti

(Zpracováno podle článku Hossenfelder a Palmer, 2020)

Superdeterministické teorie jsou Psi-epistemické, deterministické a lokální teorie skrytých proměnných, které porušují Statistickou Nezávislost a nemusí být nutně realistické.

#### 3.1 Psi-epistemická

Podle Psi-epistemické teorie vlnová funkce Schrödingerovy rovnice ( $\Psi$ ,  $|\psi\rangle$ ) neodpovídá přímo vlastnosti systému v reálném světě. Kodaňská interpretace Kvantové mechaniky je Psi-epistemická, protože považuje vlnovou funkci pouze za reprezentaci znalostí o stavu systému. Opakem je Psi-ontická teorie, která bere vlnovou funkci jako fundamentální část reálného světa.

Superdeterministické teorie jsou Psi-epistemické v tom smyslu, že vlnová funkce je průměrná pravděpodobnostní reprezentace přesných veličin systému popsaných hlubší teorií. Vlnová funkce odvozená ze superdeterministické teorie by se měla řídit dosud ověřenými evolučními zákony kvantové mechaniky. Smyslem hledání takové teorie je tedy vytváření předpovědí nad rámec kvantové mechaniky.

#### 3.2 Deterministická

Roku 1814 formuloval matematik Pierre-Simon de Laplace myšlenku deterministického vesmíru pomocí Laplaceova démona (*Laplace's demon*, 2022). Podle determinismu by bytost (démon) znající pozici a momentum každé částice ve vesmíru s dostatečnou výpočetní silou mohla pomocí základních zákonů přírody vypočítat minulost i budoucnost každé částice. Vše je předurčené; evoluce každé částice je dána přírodními zákony.

Determinismem myslíme, že evoluční zákon teorie jednoznačně mapuje stavy systému v čase  $t$  na stavy v čase  $t'$  pro libovolné  $t$  a  $t'$ .

Jelikož Kvantová mechanika není deterministická, musí deterministická teorie reprodukovat Kvantovou mechaniku obsahovat skryté proměnné. Skryté proměnné, nadále kolektivně označované  $\lambda$ , obsahují všechny informace potřebné k určení výsledku měření kromě „neskrytých“ proměnných, které jsou obsaženy v přípravě stavu systému.

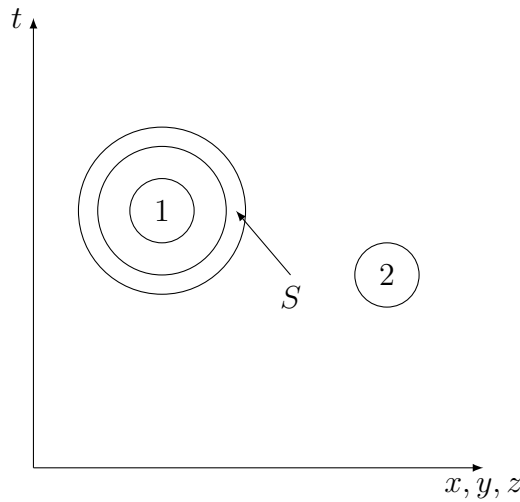
Je důležité poznamenat, že skryté proměnné nemusí být vlastní pro měřený systém, ani v něm nemusí být lokalizované. Představme si chlapce jménem Nikolaj, který má na mysli dvě otázky: „Jaká je moje hmotnost?“ a „Zvládnou úspěšně udělat maturitní

zkoušky?“ V deterministickém vesmíru se odpovědi na obě otázky nacházejí v současném stavu vesmíru, ale jejich dostupnost je velmi odlišná. Informace o hmotnosti Nikolaje se vyskytuje lokálně v něm samotném, zatímco informace o jeho úspěšnosti při maturitní zkoušce je rozložena po většině prostoru současné chvíle.

### 3.3 Lokální

(Zpracováno podle článku Wharton a Argaman, 2020)

Lokalitou v Superdeterminismu myslíme exkluzivně Kontinuitu Působení (dále jen KoP). Zvažme oddělené časoprostorové oblasti **1** a **2** (viz Obrázek 7), přičemž **1** je obklopena „zastiňovací“ oblastí **S**. **S** není pouze prostorovou oblastí, zahrnuje budoucnost i minulost oblasti **1** a zároveň i její prostorový rozsah (v dimenzích  $x, y, z$ ).



Obrázek 7: Kontinuita Působení zobrazená v časoprostorovém diagramu.  $t$  je časová osa a  $x, y, z$  je prostorová osa, znázorňující všechny 3 prostorové dimenze.

Matematický model porušuje KoP, pokud dovoluje „působení na dálku“, tzn. pokud změny ve **2** souvisejí se změnami v **1**, aniž by souvisely se změnami uvnitř **S**. **S** je jakási kontrolovací oblast pro KoP. Jestliže se nějaká informace dostane z **1** do **2**, musí se také nacházet v **S**, aby model dodržoval KoP. Jako příklad můžeme uvést systém kohoutku, trubek a fontány. Aby model s kohoutkem ve **2** a korelovanou fontánou v **1** splňoval KoP, musí obsahovat popis zprostředkujících parametrů (Např. tok vody trubkami mezi kohoutkem a fontánou) v přechodné zastiňovací oblasti **S**. V takovém modelu jsou při znalosti všech parametrů v **S** dodatečné informace z **2** zbytečné k předpovědi budoucího vývoje **1**.

Matematicky můžeme KoP vyjádřit rovnicí (7).  $I_1$  a  $I_2$  představují množiny všech vstupů v oblastech **1** a **2** postupně.  $Q_1$ ,  $Q_2$  a  $Q_S$  označují nevstupní parametry v odpovídající oblasti.

$$P_{I_1, I_2}(Q_1|Q_2, Q_S) = P_{I_1}(Q_1|Q_S) \quad (7)$$

Tato rovnice vyjadřuje nezávislost evolučního zákona  $P_{I_1}(Q_1|Q_S)$  na vstupech  $I_2$  a parametrech  $Q_2$ . Jinými slovy pravděpodobnostní distribuce parametrů  $Q_1$  se vstupy  $I_1$  a  $I_2$  za předpokladu znalosti  $Q_2$  a  $Q_S$  je stejná jako tatáž pravděpodobnostní distribuce bez vstupů  $I_2$  a parametrů  $Q_2$ . Když je tato podmínka splněna, říkáme, že  $S$  zastiňuje  $1$  od  $2$ . U modelů splňujících KoP musí tato rovnost platit pro všechny jednoduše propojené, nepřekrývající se oblasti  $1$ ,  $2$  a  $S$ , pro které platí, že oblast  $S$  zcela odděluje  $1$  od  $2$  a nikde není mizivě tenká.

Bellova Lokalita (dále jen BL), použitá k odvození Bellovy nerovnosti, je silnější kritérium než KoP. BL má oproti KoP ještě 2 omezení:

### 1. Nezávislost na Budoucím Vstupu

Nezávislost na budoucím vstupu (dále jen NBV) zmenšuje zastiňovací oblast na část  $S'$ , která neleží v budoucnosti obou oblastí  $1$  a  $2$  (viz Obrázek 8).

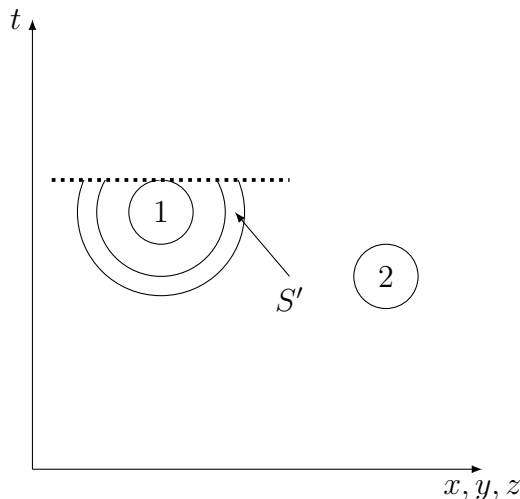
NBV platí pro matematický model  $P_I(Q)$ , jestliže existuje model  $P_{I'}(Q')$  omezený časem  $t'^6$ , který splňuje rovnici 8.  $I'$  je množina všech vstupů v časech po  $t'$  a  $Q'$  je množina všech nevstupových parametrů v časech po  $t'$ .

NBV říká, že  $P_I(Q')$  je nezávislý na budoucích vstupech.

$$P_I(Q') = P_{I'}(Q') \quad (8)$$

---

<sup>6</sup>Horní časová hranice časoprostorových oblastí  $1$  a  $2$ .



Obrázek 8: Nezávislost na budoucím vstupu.  $S'$  je oblast  $S$  omezena na minulost a přítomnost oblastí **1** a **2**.

## 2. Platnost zastiňovací oblasti pro všechny referenční rámce (pozorovatele).

K pochopení tohoto omezení si nejdříve vysvětlíme časoprostorové diagramy, světelné kužely a referenční rámce.

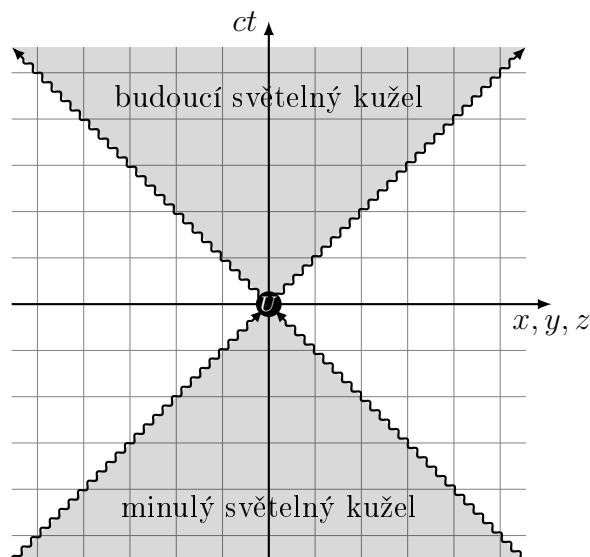
Na obrázku 9 vidíme časoprostorový diagram. Osa  $ct$  je osa času (vynásobení rychlosti světla  $c$ ) a osa  $x, y, z$  je osa prostoru představující všechny 3 prostorové dimenze. V počátku soustavy souřadnic je nějaká událost  $U$ .

Dráha, kterou objekt sleduje v časoprostorovém diagramu, se nazývá světočára. Světočára elektronu je vždy přímka s úhlem  $45^\circ$  od osy  $x, y, z$ , jelikož elektron má rychlost světla. Na této soustavě souřadnic představuje světočáru elektronu rovnice  $ct = (x, y, z)$ , nebo také  $ct = -(x, y, z)$ , která říká, že dráha, kterou elektron následuje časoprostorem, je rovna produktu rychlosti světla a času, který uběhne.

Když do diagramu nakreslíme světočáry elektronu, vzniknou dva světelné kužely<sup>7</sup>. Podle speciální teorie relativity (Einstein, 1905) se nemůže kauzální vliv<sup>8</sup> šířit rychleji než světlo. Budoucí světelný kužel tedy obsahuje všechny události, které může událost  $U$  kauzálně ovlivnit. A minulý světelný kužel obsahuje všechny události, které mohly ovlivnit událost  $U$ .

<sup>7</sup>Kužely, protože ve skutečnosti jsou ve 4 dimenzích.

<sup>8</sup>Jakákoliv informace (vliv, síla).

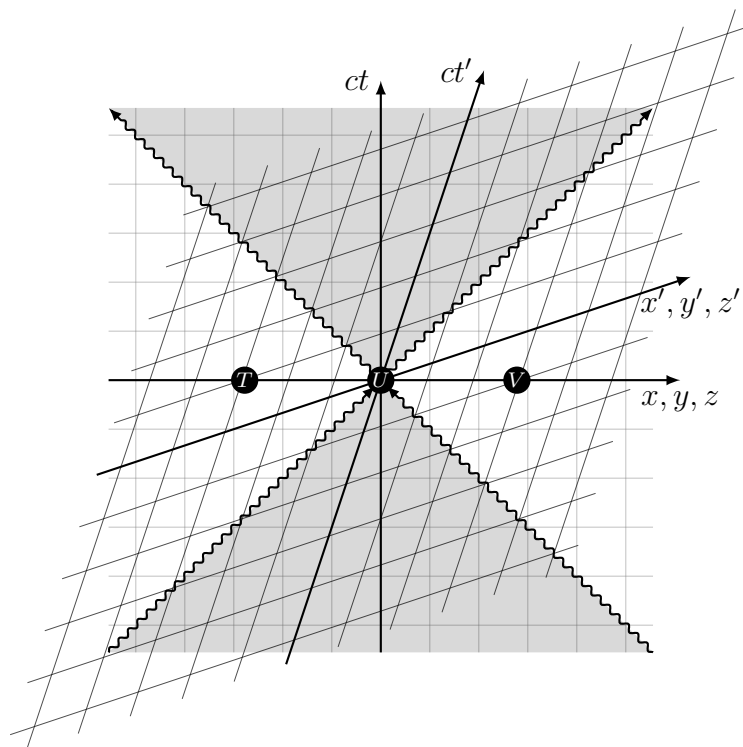


Obrázek 9: Světelné kužely události  $U$  v časoprostorovém diagramu.

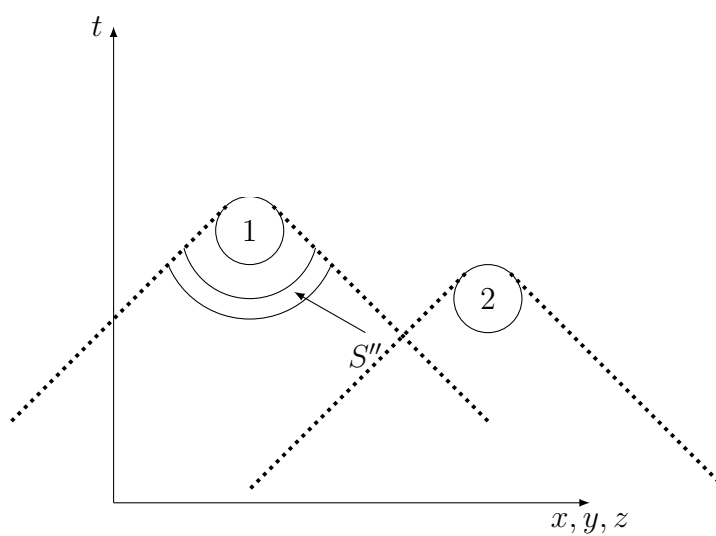
Na obrázku 10 je zobrazena časoprostorová soustava souřadnic pozorovatele  $A$ , který se vzhledem k události  $U$  pohybuje rychlostí 0 a přes ní je zobrazena časoprostorová soustava pozorovatele  $B$ , který se vzhledem k události  $U$  pohybuje rychlostí  $0.3c$  (30% rychlosti světla). Z diagramu můžeme vidět, že události  $T, U, V$  probíhají současně pro pozorovatele  $A$ , ale pro pozorovatele  $B$  probíhají v pořadí  $V, U, T$ . Světelné kužely události  $U$  zůstávají stejné pro všechny pozorovatele, jelikož světočára fotonu se nemění: rovnice  $ct = \pm(x, y, z)$  pro pozorovatele  $A$  a  $ct' = \pm(x', y', z')$  pro pozorovatele  $B$  vykreslují stejné přímky (hranice světelných kuželů události  $U$ ). Omezení kauzálních vlivů světelnými kužely platí pro všechny pozorovatele.

Aby tedy lokální kauzalita platila pro všechny pozorovatele, musíme zastiňovací oblast omezit světelnými kužely oblastí **1** a **2**<sup>9</sup> (viz Obrázek 11).

<sup>9</sup>Zastiňovací oblast nestačí omezit světelnými kužely oblasti **1**. Zastiňovací oblast musí zastiňovat oblast **1** od překryvu světelných kuželů oblastí **1** a **2**.



Obrázek 10: Posloupnost událostí  $T, U, V$  pro 2 různé pozorovatele.



Obrázek 11: Bellova Lokalita. Zastiňovací oblast  $S''$  splňuje podmínky Nezávislosti na Budoucím Vstupu a Platnosti pro všechny referenční rámce.

### 3.4 Porušení Statistické Nezávislosti

Korelace mezi propletenými částicemi v našem vesmíru porušují Bellovu nerovnost. Porušení této nerovnosti poukazuje na chybnost alespoň jednoho z předpokladů potřebných k odvození Bellovy nerovnosti. Většinou je porušení Bellovy nerovnosti interpretováno jako důkaz proti lokálně realistické teorii (Garisto, 2022). Podle této interpretace nás porušení Bellovy nerovnosti nutí k výběru mezi lokalitou a realismem. K derivaci Bellovy nerovnosti je ale zapotřebí ještě předpoklad Statistické Nezávislosti, kterému se často říká předpoklad „svobodné volby“ (Tato terminologie je hluboce zavádějící, o čemž se zmíníme v následující kapitole).

Aby lokální teorie skrytých proměnných souhlasila s pozorovaným porušením Bellovy nerovnosti, musí porušovat Statistickou Nezávislost.

Obecně porušení Statistické Nezávislosti znamená, že stupně svobody<sup>10</sup> dvou prostorově oddělených systémů jsou korelované, a to i v případě, že nemají společnou kauzální příčinu. Jednoduše řečeno, všechno ve vesmíru je spojeno se vším ostatním, i když jen slabě.

V případě Bellovy nerovnosti je při porušení Statistické Nezávislosti výsledek měření závislý na nastavení měření.

Matematický model porušuje Statistickou Nezávislost, pokud pro něj platí výrok (9). Podle výroku (9) je pravděpodobnostní distribuce ( $\mathbf{P}$ ) skrytých proměnných  $\lambda$ , které určují výsledek měření, odlišná za předpokladu nastavení detektorů  $\mathbf{ab}$ . Jinými slovy, pravděpodobnostní distribuce skrytých proměnných je závislá na nastavení detektorů.

$$P(\lambda|\mathbf{ab}) \neq P(\lambda) \quad (9)$$

Jednoduše řečeno jak nastavení detektorů,  $\mathbf{ab}$ , tak skryté proměnné,  $\lambda$ , vstupují do evolučního zákona připraveného stavu<sup>11</sup>. Superdeterminismus znamená, že nastavení měření je součástí toho, co určuje výsledek časového vývoje připraveného stavu.

Je důležité poznamenat, že Superdeterminismus neříká, že  $\lambda$  ovlivňuje  $\mathbf{ab}$ , ale pouze, že  $\lambda$  a  $\mathbf{ab}$  jsou korelované.

Statistická Nezávislost je předpoklad, který dobře popisuje naše pozorování na makroskopické úrovni. Avšak nevíme, jestli je tento předpoklad v zásadě správný. Než se smíříme s tím, že příroda je nepředvídatelná a nepochopitelná (což je stejné jako se vzdát), měli bychom zjistit, co se stane, opustíme-li předpoklad Statistické

---

<sup>10</sup>Nezávislé parametry, které definují konfiguraci nebo stav systému.

<sup>11</sup>Stav měřeného systému (Např. částice) při přípravě.

Nezávislosti, a pokusíme se vytvořit konzistentní<sup>12</sup>, lokální a deterministickou teorii, z níž vychází Kvantová mechanika.

---

<sup>12</sup>Na rozdíl od Kvantové mechaniky.



## 4 Protiargumenty

(Zpracováno podle článku Hossenfelder a Palmer, 2020)

### 4.1 Bellovy testy

Nobelovu cenu za fyziku dostala roku 2022 trojice fyziků Alain Aspect, Anton Zeilinger a John Clauser. Většina médií mylně uvádí, že tato trojice Nobelovu cenu získala za dokázání kvantového provázání částic pomocí mnoha extenzivních testů Bellovy nerovnosti. Ale žádný z těchto experimentů nedokazuje kvantové provázání, ani nemožnost Superdeterminismu.

#### 4.1.1 Kosmické Bellovy testy

V Kosmických Bellových testech (Handsteiner et al., 2017; Rauch et al., 2018) jsou nastavení měření určena přesnou vlnovou délkou světla přicházejícího z kvazarů (velmi vzdálených objektů, které byly kauzálně odděleny v čase emitování fotonů). Tento experiment je velmi pozoruhodný a je hoden Nobelovy ceny, ale nemůže vyloučit Superdeterminismus. Pouze říká, že korelace pozorované v Bellových testech, nemohly být lokálně způsobeny událostmi ve vzdálené minulosti (v případě Kosmických testů jsou těmito událostmi emise fotonů před miliardami let, chvíli po vzniku vesmíru). Porušení Bellovy nerovnosti nám pouze říká, že jeden z předpokladů Bellovy nerovnosti byl porušen. Žádný Bellův test nemůže určit, jaký předpoklad byl porušen.

Domněnka, že takové testy říkají něco o nemožnosti Superdeterminismu, vychází z předpokladu, že stav blízký realizovanému stavu (např. kdyby světlo vyzařované vzdálenými kvazary mělo trochu jinou vlnovou délku) je povolen přírodními zákony a je pravděpodobný. V superdeterministické teorii by ale tato malá změna vytvořila extrémně nepravděpodobný stav. Změna vlnové délky světla z kvazarů by mohla vyžadovat změnu jinde na hyperpovrchu daného momentu, která by vedla experimentátora k rozhodnutí, nepoužít v experimentu světlo z daných kvazarů.

#### 4.1.2 Velký Bellův test

Autoři Velkého Bellova testu si uvědomili úskalí předchozích testů; nelze použít fyzická zařízení k vytvoření náhodnosti v nastavení měření; museli bychom počítat s fyzikální nahodilostí, kterou se snažíme ověřit:

*A Bell test requires spatially distributed entanglement, fast and high-efficiency detection and unpredictable measurement settings. Although technology can satisfy the first two of these requirements the use of physical devices to choose settings in a Bell test involves making assumptions about the physics that one aims to test. Bell himself noted this weakness in using physical setting choices and argued that human ‘free will’ could be used rigorously to ensure unpredictability in Bell tests. Here we report a set of local-realism tests using human choices, which avoids assumptions about predictability in physics.* - The BIG Bell Test Collaboration, 2018

Velký Bellův test proběhl tak, že 100 000 lidských účastníků hrálo online videohru, čímž bylo vygenerováno 97 347 490 binárních voleb, které byly poslány do 12 laboratoří na 5 kontinentech, kde bylo provedeno 13 experimentů testujících Bellovu nerovnost pomocí fotonů, jednotlivých atomů, atomových souborů a supravodivých zařízení. Tímto experimentem byla údajně „uzavřena mezera svobodné volby (možnost, že nastavení měření jsou ovlivněna skrytými proměnnými, a tím korelována s vlastnostmi částic)“. Je jednoduché identifikovat problém v závěru, ke kterému dospěli autoři článku. Experimentátoři předpokládají, že vstup od lidí je na rozdíl od vstupu vytvářeného fyzickými přístroji náhodný, a tím dovozují fundamentální rozdíl mezi lidmi a fyzickými systémy (schopnost svobodné volby). Experiment předpokládá svobodu vůle účastníků při hraní videohry k vytvoření náhodnosti v nastavení měření a k následnému dokázání svobodné vůle. Svobodnou vůli nelze dokázat tím, že ji předpokládáme.

Ve skutečnosti moc nezáleží na detailech těchto experimentů. Musíme vzít na vědomí, že změření porušení Bellovy nerovnosti, ať je experiment jakkoliv komplexní, nemůže určit, které předpoklady nerovnosti byly porušeny.

## 4.2 Svobodná vůle

Předpoklad Statistické Nezávislosti se většinou označuje jako předpoklad svobodné vůle, protože může být interpretován jako svoboda experimentátora vybrat si nastavení měření nezávisle na skrytých proměnných.

Je důležité rozlišovat dvě převládající definice svobodné vůle:

1. **Libertariánská (Li):** možnost jednat jinak.
2. **Kompatibilistická (Ko):** nepřítomnost omezení, která by člověku bránila dělat to, co si přeje.

Statistická Nezávislost se opírá o Li, jelikož obojí vychází z představy kontrafaktuálních světů<sup>13</sup>. Superdeterministické teorie tedy vylučují svobodnou vůli jako možnost jednat jinak. Proto většina vědců tyto teorie odmítá. Odmítat vědeckou teorii jen kvůli tomu, že se vám nelíbí její důsledky, je nevědecké a kontraproduktivní.

Statistická Nezávislost neříká nic o Ko, takže Superdeterminismus tuto možnost nevylučuje.

### 4.2.1 Svobodná vůle iluzí

Z vědeckého pohledu se vše chová podle přírodních zákonů. Podle dosavadních experimentů vše následuje zákonitosti popsané s velmi dobrou přesností fyzikálními teoriemi. To nás vede k vědeckému determinismu, který je neslučitelný se svobodnou vůlí. Podle determinismu jsou všechna naše rozhodnutí předurčena. Nemůžeme zvolit mezi několika možnými variantami budoucnosti, totiž existuje pouze jedna. Pravděpodobnost kvantové mechaniky nám také nedává svobodnou vůli. Podle kvantové mechaniky nemůžeme určit, jak se rozhodneme, můžeme určit jen pravděpodobnost daného rozhodnutí. Ale pokud jsou naše rozhodnutí určena pravděpodobnostmi, také nejsou svobodná. Stejně tak nebudou moje rozhodnutí svobodná, pokud si hodím mincí.

Ve skutečnosti se náš mozek rozhodne pomocí složitých nevědomých kalkulací a až po nějaké době se toto rozhodnutí dostane do našeho vědomí a projeví se jako iluze svobodného rozhodnutí. V roce 2008 byl proveden fascinující experiment (Siong et al., 2008), ve kterém byla použita funkční magnetická resonance k určení časového rozdílu mezi nevědomým a vědomým rozhodnutím. Účastníci experimentu si vybrali mezi dvěma tlačítky a okamžitě zmáčkli to, které si vybrali. Výzkumníci zjistili, že výsledek rozhodnutí je zakódován v mozkové aktivitě už 10 sekund předtím, než se dostane do vědomí. Teoreticky bychom tedy mohli předpovědět, jak se člověk rozhodne, ještě když je v procesu rozhodování.

---

<sup>13</sup>Alternativní svět za jiných okolností.

V případě, že odmítneme determinismus tím, že předpokládáme existenci duše, která se rozhoduje nezávisle na fyzikálních zákonech, měli bychom pozorovat velké odchylky od našich fyzikálních teorií. Není tomu tak. Současné fyzikální teorie jsou podle velmi rozsáhlých testů (Kramer et al., 2021; *Precision tests of QED*, 2022) neuvěřitelně přesné. I kdybychom všechna tato fakta ignorovali, nerozhodujeme o tom, jakou duši dostaneme.

Kompatibilismus (Ko) je filozofie, kterou zastává většina dnešních filozofů (Bourget a Chalmers, 2021). Jde o pokus zachování svobodné vůle při akceptování determinismu. Ko svobodná vůle je sice kompatibilní s determinismem a Superdeterminismem, ale není doopravdy svobodná. Ko pouze svobodné rozhodnutí redefinuje na rozhodnutí, které je určeno tím, co chceme. Pro kompatibilisty je svobodná vůle totéž co vůle; to, co chceme, je naší vůlí. Rozhodnutí určené naší vůlí není svobodné. Nikdo neurčuje, co chce. Např. kdybych se rozhodoval mezi čajem a kávou, rozhodnul bych se pro to, co chci víc. K tomu, abych se rozhodnul pro čaj, musel bych ho chtít víc než kávu. I kdybych se rozhodnul pro kávu s vědomím, že „chci“ čaj, jen abych získal zpět svou svobodnou vůli, stále bych se rozhodoval podle toho, co chci. Rozhodnul bych se pro kávu, jelikož bych chtěl „získat zpět“ svou svobodnou vůli. Abychom změnili chtění na nechtění, museli bychom chtít nechtít a naopak. Je to stále jen o tom, co chceme, jenomže my neurčujeme, co chceme.

Abychom měli svobodnou vůli, museli bychom si být vědomi všeho, co nás ovlivňuje, a mít nad tím kontrolu, což není pravdou a je to samo o sobě paradox. Kdybychom měli tyto schopnosti, podle čeho bychom se rozhodovali? Jestliže mám kontrolu nad tím, co určuje, jak tuto kontrolu využiji, tak jsou moje volby určeny mými volbami, což je velice matoucí a nesmyslné.

Svobodná vůle je vlastně oxymorón. Když se rozhodnu podle své vůle, tak je mé rozhodnutí určeno mou vůlí (tím, co chci), takže nemůže být svobodné, a když by mé rozhodnutí nebylo určené, tak by se nejednalo o vůli.

Fakt, že Superdeterminismus vylučuje svobodnou vůli, není vůbec problematický, jelikož svobodná vůle je pouze iluzí a logicky nesouvislým nesmyslem. Ať je náš vesmír superdeterministický či nikoli, svobodnou vůli nemáme.

### 4.3 Ohrožení vědecké metody

Přesvědčení o nezbytnosti předpokladu Statistické Nezávislosti k objevování přírodních zákonů pomocí experimentů, Shimony, Horne a Clauser už roku 1976 argumentovali proti Superdeterminismu:

*But, we maintain, skepticism of this sort will essentially dismiss all results of scientific experimentation. Unless we proceed under the assumption that hidden conspiracies of this sort do not occur, we have abandoned in advance the whole enterprise of discovering the laws of nature by experimentation.* - Shimony, Horne a Clauser, 1976

Vědci se obávají, že randomizované kontrolované studie<sup>14</sup> by nebyly možné, kdyby výběr kontrolní skupiny mohl záviset na tom, co později změříme. Představme si, že náhodně rozdělíme lidi do dvou skupin, abychom ověřili účinnost nového léku. Pokusná skupina dostane nový lék a kontrolní skupina placebo. V tomto případě je přiřazení do skupiny skrytá proměnná,  $\lambda$ . Když někdo onemocní, provedeme řadu testů (měření), abychom zjistili příčinu jeho nemoci. Myslíte-li si, že onemocnění pacientů závisí na měření, které na nich provedete, nemůžete posoudit účinnost léku.

Tento argument vychází z premisy, že užitečnost předpokladu Statistické Nezávislosti v makroskopickém světě dokazuje platnost tohoto předpokladu ve světě kvantovém. Tato premisa je zřetelně neoprávněná. Původem diskuze o základních teoriích přírody je nedostatečnost klasické fyziky (makroskopického světa) k popisu kvantových systémů. A lidé se nechovají jako částice. Tento argument je ekvivalentní myšlence, že Schrödingerova kočka<sup>15</sup> je doopravdy živá a mrtvá zároveň. V Superdeterminismu dochází k porušení Statistické Nezávislosti pouze, když kvantová mechanika předpovídá kolaps vlnové funkce, neboli při měření. Je důležité poznamenat, že Bellova nerovnost se zabývá pouze tím, co se děje při procesu měření. Ale jakmile změříme kvantový stav, tak tím porušování Statistické Nezávislosti končí. Měli bychom dodat, že měření nevyžaduje měřicí přístroj. Měření je jakákoli dostatečně silná interakce s prostředím. Z tohoto důvodu v našem světě nepozorujeme živomrtvé kočky a superdeterministické korelace v lidech, protože vždy existuje nějaké prostředí (vzduch, světlo, nebo reliktní záření<sup>16</sup>), se kterým makroskopické objekty dostatečně silně interagují.

---

<sup>14</sup>Osoby z experimentálního souboru jsou náhodně rozděleny do 2 stejně velkých souborů: pokusného (dostanou testovaný lék) a kontrolního (dostanou placebo).

<sup>15</sup>Schrödingerova kočka je myšlenkový experiment, ve kterém je po hodině, z důvodu kvantových účinků, kočka v krabici na 50% mrtvá a na 50% živá. A tím je podle kvantové mechaniky živá a mrtvá zároveň.

<sup>16</sup>Elektromagnetické záření, které přichází z vesmíru ze všech směrů a je považováno za pozůstatek konce Velkého třesku.

## 5 Výhled

(Zpracováno podle článku Hossenfelder a Palmer, 2020)

Aby byl superdeterministický přístup úspěšný, musí do budoucna vyřešit 2 problémy. První je experimentální. Platnost Superdeterminismu nelze ověřit pomocí Bellových testů, jelikož Superdeterminismus nesplňuje předpoklady Bellovy nerovnosti, takže ji nemusí dodržovat. Podle Superdeterminismu jsou výsledky měření v kvantové mechanice určené a nenáhodné. Dále teorie, která řeší problém měření, musí být oproti kvantové mechanice nelineární<sup>17</sup>, takže se v chaotickém režimu jeví pravděpodobnostně. Abychom tedy pozorovali superdeterministické odchylky od Bornova pravděpodobnostního pravidla, budeme muset provést experimenty na malých systémech, v nízkých teplotách, v krátkých intervalech a ideálně na jedné a té samé částici.

Druhý problém je na straně teoretické. Aby byl Superdeterminismus úspěšný, je nutné vyvinout obecně platnou teorii, která by vytvářela experimentálně ověřitelné předpovědi. Pokroku v této oblasti brání hlavně nedostatek úsilí. Na formulaci užitečné teorie pracuje jen málo expertů, jelikož Superdeterminismus je odsuzován jako nevědecký. Z těchto důvodů zatím existuje jen pár „hracích“ modelů. Doposud víme, že superdeterministická teorie musí mít podobu matematického formalismu, z něhož vyplyne nelineární evoluční zákon, který bude kontrafaktuálně neúplný, a tím bude lokálně porušovat Statistickou Nezávislost. Tyto skutečnosti nás vedou k fraktální geometrii<sup>18</sup> a p-adickým číslům, používaných v IST<sup>19</sup>.

### 5.1 IST

IST je jedním z nejslibnějších přístupů k Superdeterminismu. Vychází ze skutečnosti, že když přemýšlíme o vzdálenosti dvou možných stavů vesmíru, intuitivně předpokládáme, že může být změřena ve stavovém prostoru<sup>20</sup> pomocí stejné Euklidovské metriky<sup>21</sup>, používané k měření vzdálenosti ve fyzickém prostoru. Podle tohoto přístupu je ze dvou kontrafaktuálních světů blíž k realitě ten, který se „blíže“ podobá realitě. Z tohoto důvodu je nelehké Superdeterminismus akceptovat, jelikož by porušení Statistické Nezávislosti v Kosmických Bellových testech vypadalo velmi konspiračně.

IST ale využívá p-adickou metriku; jedinou další možnou (netriviální) metriku. P-

---

<sup>17</sup>Změna výstupů není úměrná změně vstupů.

<sup>18</sup>Geometrie složitě strukturovaných objektů, které se nemění při daném škálování (zvětšení nebo zmenšení).

<sup>19</sup>Invariant Set Theory: Teorie Invariantní (neměnné) Množiny

<sup>20</sup>Prostor, který obsahuje všechny stavy vesmíru, a jehož dimenze jsou proměnné vesmíru.

<sup>21</sup>Systém měření, ve kterém se vzdálenost měří pomocí absolutní hodnoty.

adická metrika určuje vzdálenosti ve fraktální geometrii, stejně jako Euklidovská metrika určuje vzdálenosti v Euklidovské geometrii<sup>22</sup>. Abych zbytečně nezacházel do podrobností, stačí vědět, že 2 stavy vesmíru, které jsou ve stavovém prostoru podle Euklidovské metriky velice blízké, mohou být podle p-adické metriky velice vzdálené. Např. podle 2-adické metriky je 4 dál od 5, než od 8. Fraktální geometrie má kromě p-adické metriky vlastnost mnoha mezer, čímž silně omezuje kontrafaktuální světy a umožňuje jednoduché porušení Statistické nezávislosti.

IST je založena na předpokladu, že fyzikální zákony vycházejí z geometrie fraktální množiny historií,  $I_U$ , ve stavovém prostoru.  $I_U$  představuje stavy fyzické reality (realizované v našem vesmíru). Ostatní stavy vesmíru, nacházející se v prostoru, ve kterém je množina  $I_U$  vložena, jsou nemožné. Evoluční zákon přetváří vesmír z jednoho bodu v množině  $I_U$  na jiný bod v množině  $I_U$ , z čehož vyplývá, že množina  $I_U$  je neměnná evolučními zákony. V IST je základním prvkem množiny  $I_U$  fraktální helix<sup>23</sup> (v tom smyslu, že každá trajektorie helixu je sama sebou helixem).

---

<sup>22</sup>Geometrie rovin a těles v prostoru s rovnými, nezkřivenými rozměry.

<sup>23</sup>Šroubovice. Můžete si ho představit jako pletený provaz.

## Závěr

V práci jsem předložil a vysvětlil hlavní problémy kvantové mechaniky, které upozorňují na její vnitřní nesrovnalosti, a důvody, proč její doplnění, nebo nahrazení fundamentálnější teorií vyžaduje porušení Statistické Nezávislosti, předpokladu, kterému se často chybně říká Svobodná Vůle. Vyložil jsem původ teorií s touto vlastností, běžně označovaných jako superdeterministické, v Bellově nerovnosti. Extenzivně jsem popsal hlavní rysy těchto teorií a vyvrátil jsem hlavní námitky vznesené proti Superdeterminismu, které jasně vychází z naší intuice, která je založena na makroskopických procesech pozorovaných našimi smysly. Závěrem jsem navrhl, jak bychom měli ve vývoji Superdeterminismu dále postupovat.

Od objevu kvantové mechaniky se věda ubírá cestou unifikace dvou neslučitelných teorií, obecné relativity a kvantové mechaniky (přesněji standardního modelu částicové fyziky), pomocí kvantizace gravitace. Tento přístup, soustředěný na změnu gravitace k tomu, aby mohla být kvantizována, je následován už přibližně 70 let, přesto nevykázal mnoho slibných výsledků. Proto si myslím, že další postup by měl být návratem k přehodnocení kvantizace, k Bellově nerovnosti a k možnosti, že chování kvantových částic závisí na uskutečněném měření; k možnosti, která byla zamítnuta kvůli neoprávněným obavám a špatnému názvosloví.



# Seznam použité literatury

## Knihy

Kumar, M. (2014). *Quantum: Einstein, Bohr, and the Great Debate about the Nature of Reality*. Londýn: Icon Books Ltd.

## Videa

Hossenfelder, S. (2022). *The Problem with Quantum Measurement*. Youtube. Dostupné z [https://www.youtube.com/watch?v=Be3H1A\\_9968](https://www.youtube.com/watch?v=Be3H1A_9968) (cit. 15. 10. 2022).

## Články

Abdeen, M. S., & Silva, L. N. K. de (2013). „Incompatibility of General Relativity with Quantum Mechanics“. *IPSL, Institute of Physics in Sri Lanka* 29, s. 57–63.

Dostupné z <https://ips1.lk/documents/TechSession/2013/ips113-09.pdf>.

Bell, J. S. (1964). „On the Einstein Podolsky Rosen paradox“. *Physics Physique Fyzika* 1, s. 195–200. Dostupné z <https://cds.cern.ch/record/111654>.

Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (1935). „Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?“ *Phys. Rev.* 47 (10), s. 777–780. Dostupné z <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.47.777>.

Freedman, S. J., & Clauser, J. F. (1972). „Experimental Test of Local Hidden Variable Theories“. *Phys. Rev. Lett.* 28 (14), s. 938–841. Dostupné z <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.28.938>.

Garg, A., & Mermin, N. D. (1987). „Detector inefficiencies in the Einstein-Podolsky-Rosen experiment“. *Physical Review D (Particles and Fields)* 35, s. 3831–3835. Dostupné z <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.35.3831>.

Rowe, M. A. et al. (2001). „Experimental violation of a Bell’s inequality with efficient detection“. *Nature* 409 (6822), s. 791–794. Dostupné z <https://doi.org/10.1038/35057215>.

Aspect, A., Dalibard, J., & Roger, G. (1982). „Experimental Test of Bell’s Inequalities Using Time-Varying Analyzers“. *Phys. Rev. Lett.* 49 (25), s. 1804–1807. Dostupné z <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.49.1804>.

Barrett, J. et al. (2002). „Quantum nonlocality, Bell inequalities, and the memory loophole“. *Physical Review A* 66 (4), s. 042111. Dostupné z <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0205016v3>.

Gill, R. D. (2001). „Accardi contra Bell (cum mundi): The Impossible Coupling“. *Mathematical Statistics and Applications: Festschrift for Constance van Eeden* 42, s. 133–154. Dostupné z <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0110137>.

- Gill, R. D. (2003). „Time, Finite Statistics, and Bell’s Fifth Position“. *arXiv e-prints*. Dostupné z <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0301059v2>.
- Hossenfelder, S., & Palmer, T. (2020). „Rethinking Superdeterminism“. *Frontiers in Physics* 8. Dostupné z <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.00139>.
- Wharton, K. B., & Argaman, N. (2020). „Colloquium: Bell’s theorem and locally mediated reformulations of quantum mechanics“. *Rev. Mod. Phys.* 92 (2), s. 021002. Dostupné z <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.92.021002>.
- Einstein, A. (1905). „On the electrodynamics of moving bodies“. *Annalen Phys.* 17, s. 891–921. Dostupné z <https://spaces-cdn.owlstown.com/blobs/rknwr9ocjval2hwwwvnia0ekme1v>.
- Handsteiner, J. et al. (2017). „Cosmic Bell Test: Measurement Settings from Milky Way Stars“. *Phys. Rev. Lett.* 118 (6), s. 060401. Dostupné z <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.118.060401>.
- Rauch, D. et al. (2018). „Cosmic Bell Test Using Random Measurement Settings from High-Redshift Quasars“. *Phys. Rev. Lett.* 121 (8), s. 080403. Dostupné z <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.121.080403>.
- The BIG Bell Test Collaboration, . (2018). „Challenging local realism with human choices“. *Nature* 557 (7704), s. 212–216. Dostupné z <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0085-3>.
- Siong, S. C. et al. (2008). „Unconscious determinants of free decisions in the human brain“. *Nature Neuroscience* 11, s. 543–545.
- Kramer, M. et al. (2021). „Strong-Field Gravity Tests with the Double Pulsar“. *Physical Review X* 11 (4), s. 041050. Dostupné z <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevX.11.041050>.
- Bourget, D., & Chalmers, D. (2021). „Philosophers on Philosophy: The 2020 PhilPapers Survey“. Dostupné z <https://philarchive.org/archive/BOUPOP-3>.
- Shimony, A., Horne, M. A., & Clauser, J. F. (1976). „Comment on "The Theory of Local Beables"“. *EPISTEMOLOGICAL LETTERS* (13), s. 1–8. Dostupné z <https://curate.nd.edu/downloads/cz30pr79d3j>.
- Hossenfelder, S. (2020). „Superdeterminism: A Guide for the Perplexed“. Dostupné z <https://arxiv.org/abs/2010.01324>.

## Internetové články

- Principle of locality* (2022). Wikipedia. Dostupné z [https://en.wikipedia.org/wiki/Principle\\_of\\_locality](https://en.wikipedia.org/wiki/Principle_of_locality) (cit. 15.10.2022).
- Philosophical realism* (2022). Wikipedia. Dostupné z [https://en.wikipedia.org/wiki/Philosophical\\_realism](https://en.wikipedia.org/wiki/Philosophical_realism) (cit. 15.10.2022).

- Bell test* (2022). Wikipedia. Dostupné z [https://en.wikipedia.org/wiki/Bell\\_test](https://en.wikipedia.org/wiki/Bell_test) (cit. 23.10.2022).
- Laplace's demon* (2022). Wikipedia. Dostupné z [https://en.wikipedia.org/wiki/Laplace%27s\\_demon](https://en.wikipedia.org/wiki/Laplace%27s_demon) (cit. 26.10.2022).
- Garisto, D. (2022). *The Universe Is Not Locally Real, and the Physics Nobel Prize Winners Proved It*. Scientific American. Dostupné z <https://www.scientificamerican.com/article/the-universe-is-not-locally-real-and-the-physics-nobel-prize-winners-proved-it/> (cit. 25.10.2022).
- Precision tests of QED* (2022). Wikipedia. Dostupné z [https://en.wikipedia.org/wiki/Precision\\_tests\\_of\\_QED](https://en.wikipedia.org/wiki/Precision_tests_of_QED) (cit. 13.11.2022).