

## Testování Bellových nerovností – aktuální výsledky pokusu z října 2015 na Delftské technické univerzitě

Petr Jedlička

*Tato stat' shrnuje závěry pokusů Hensena a kol., které byly publikovány v říjnu 2015<sup>1</sup>. Hensen experiment prováděl měřením spinů v propletených elektronech umístěných v krystalech diamantu, v dosud největší vzdálenosti 1,3 km, a provedl tak první pokus, který eliminuje všechny tzv. mezery (loopholes) v dosavadních pokusech o testování Bellových nerovností.*

Einstein, B. Podolsky a N. Rosen (EPR) ve známém článku *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete* z roku 1935<sup>2</sup> upozornili na nedostatky Kodaňské interpretace kvantové teorie, kterou považovali za fyzikálně neuspokojivou. Operacionalistický přístup této interpretace (dodnes sdílený většinou fyzikální komunity), podle kterého je podstatná predikční schopnost teorie a její shoda experimenty a nikoliv zachování předpokladů doposud platných v přírodních vědách (jako kauzalita a determinismus), se jim jevil neuspokojivý. Einstein a jeho kolegové zastávali názor, že fyzikální teorie by měla být deterministická a lokální, tzn. že její predikce by měly mít kauzální charakter a měly by vylučovat okamžité působení na dálku („spooky action at distance“, „spukhafte Fernwirkungen“) – tedy situaci, kdy částice „získá“ nebo „projevívá“ své vlastnosti, až vlivem pozorování provedeném na vzdáleném místě. Kvantová mechanika ve své tehdejší i současné podobě neposkytuje možnost deterministického výkladu a nabízí jen statistický popis. Tento statistický charakter by ovšem mohl být výsledkem dosud neznámých „skrytých parametrů“, které by byly součástí dosud neznámé teorie (tento model dále rozpracoval David Bohm a k této interpretaci se hlásil i Louis de Broglie se svou teorií pilotní vlny atd.)

Novým impulsem v této debatě, odehrávající se v prvních desetiletích po vzniku kvantové teorie formou myšlenkových experimentů, se stala teoretická práce D. Bella (který byl inspirován právě D. Bohmem)<sup>3</sup>, jenž v roce 1964 v článku *On the Einstein Podolsky Rosen paradox*<sup>4</sup> ukázal, že žádná teorie, která je lokální a realistická nemůže reprodukovat všechny

---

<sup>1</sup> B. Hensen (Delft Tech. U.) et al.: Experimental loophole-free violation of a Bell inequality using entangled electron spins separated by 1.3 km. Aug 24, 2015. *Nature* (2015). (internet <http://arxiv.org/abs/1508.05949> )

<sup>2</sup> EPR: Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen *Phys. Rev.* 47, 777 – Published 15 May 1935

<sup>3</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Bell%27s\\_theorem](https://en.wikipedia.org/wiki/Bell%27s_theorem)

<sup>4</sup> Bell, J. S. (1964): On the Einstein–Podolsky–Rosen paradox, *Physics* 1 195

predikce kvantové teorie – v každé takové teorii by korelace mezi vzdálenými měřeními musely splňovat jím postulované nerovnosti – a kvantová teorie tyto nerovnosti porušuje. Jeho práce navíc umožňovaly experimentální ověření těchto závěrů. První, kdo se odhodlal zdvihnout hozenou rukavici se stal Alain Aspect v Paříži, který provedl první praktický experiment považovaný empirickou odpověď na myšlenkový experiment EPR, jež ukázal, že skutečně platí predikce kvantové teorie, tedy že došlo k porušení Bellových nerovností. Během následujících let byla vyvinuta řada dalších testů Bellových nerovností, které však (včetně testu Aspectova) vykazovaly nutnost zavedení dodatečných předpokladů – měly tedy jisté nedostatky či mezery v provedení (loopholes).

Bellova nerovnost se týká měření prováděných pozorovateli na páru korelovaných částic – při platnosti lokálního realismu by musela platit daná nerovnost pro korelace mezi následnými měřeními částic při různých nastaveních měřicího přístroje (tedy v různých kontextech).

Bellova nerovnost, původně formulovaná v tomto tvaru

$$\rho(a, c) - \rho(b, a) - \rho(b, c) \leq 1,$$

Kde  $\rho$  je korelace mezi měřeními spinů propletených částic a proměnné  $a, b, c$  odpovídají náhodným nastavením měřicího přístroje, byla později Johnem Clauserem, Michaellem Hornem, Abnerem Shimonym a R. A. Holtem přeformulována (zobecněna) do podoby tzv. CHSH nerovnosti, která ustanovuje klasická omezení, aniž by vyžadovala perfektní korelace (nebo záporné korelace), kterých je obtížné v experimentálních podmínkách dosáhnout.

$$(1) \quad \rho(a, b) + \rho(a, b') + \rho(a', b) - \rho(a', b') \leq 2,$$

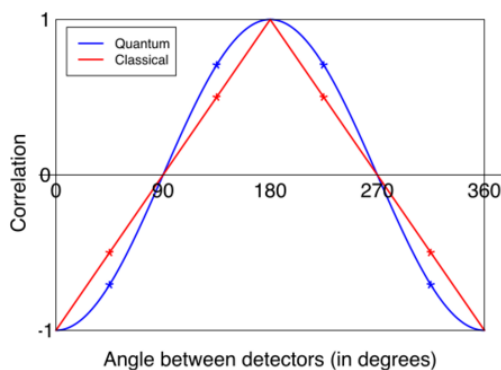
Někdy bývá tato nerovnost dohromady označována jako Bellova-CHSH nerovnost.

Bell ukázal, že každá lokální realistická teorie by musela splňovat jeho nerovnosti, ale experimenty ukázaly, že kvantová teorie správně predikuje výsledky pokusů, a potvrzuje tak porušení Bellových nerovností. Experimentální omezení však způsobily, že dosavadní experimenty trpěly řadou nedostatků, již zmíněných loopholes, které nechávaly volný prostor pro zachování lokálně realistické interpretace. <sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Cejnar P., Dušek M.: Bellovy nerovnosti a jejich experimentální testy Kvantové hlavolamy. : Vesmír 77, 393, 1998/7

## Obr: Rozdíl mezi očekávanými hodnotami kvantového a klasického systému



Nejlepší možná lokálně realistická (červeně) imitace kvantových korelací dvou provázaných spinů (modře) – ukazuje perfektní antikorelaci při 0 stupních a perfektní korelaci při 180 stupních. Hodnoty pro 45, 135, 225, 315 stupňů jsou označeny hvězdičkami a byly naměřeny při standardních experimentech typu Bell-CHSH: kvantová mechanika predikuje  $\pm \frac{1}{\sqrt{2}} = \pm 0.7071\dots$ , kdežto lokální realismus  $\pm 0,5$  či méně.<sup>6</sup>

Aktuálním pokusem, který uzavírá všechny díry (nedostatky, loopholes) je právě experiment provedený Hensenem a kol. v říjnu letošního roku, jehož výsledky byly publikované v říjnu 2015 v časopisu Nature pod titulkem *Experimental loophole-free violation of a Bell inequality using entangled electron spins separated by 1.3 km*. Hensenův pokus výše uvedené loopholes odstraňuje, a tím vylučuje celou třídu lokálně realistických interpretací kvantové mechaniky. Podstatou experimentu je vytvoření provázaných spinů mezi vzdálenými elektrony, při kterém dojde k obejití tzv. **detection loophole** (nedostatku v detekci). Během pokusu bylo provedeno celkem 245 měření ve vzdálenosti 1,3 km – měření CHSH-Bell nerovnosti. Pravděpodobnost nulové hypotézy, která by vysvětlovala tento experimentální výsledek (takto velké narušení bell nerovností) pomocí lokálně realistické teorie je pouze,  $p=0,039$ .

V pokusu se testovala Bellova nerovnost ve formě CHSH. Bell předpokládal, že každá teorie, která je jak lokální (fyzikální vlivy se nešíří rychleji než světlo) a realistická (fyzikální vlastnosti jsou definovány před samotným pozorováním a jsou na něm nezávislé) produkuje odlišné (omezenější) korelace od těch předpokládaných kvantovou teorií. Dalším

<sup>6</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Bell%27s\\_theorem](https://en.wikipedia.org/wiki/Bell%27s_theorem)

předpokladem správného provedení je náhodnost při volbě kontextu pokusu (podmínka „free will“ – „svobodné vůle“) a dostatečná vzdálenost mezi měřicími přístroji při pokusu, tak aby nemohlo mezi nimi dojít ke komunikaci výsledků. Experiment odstraňuje právě ty loopholes, které dosud omezovaly předešle experimenty.

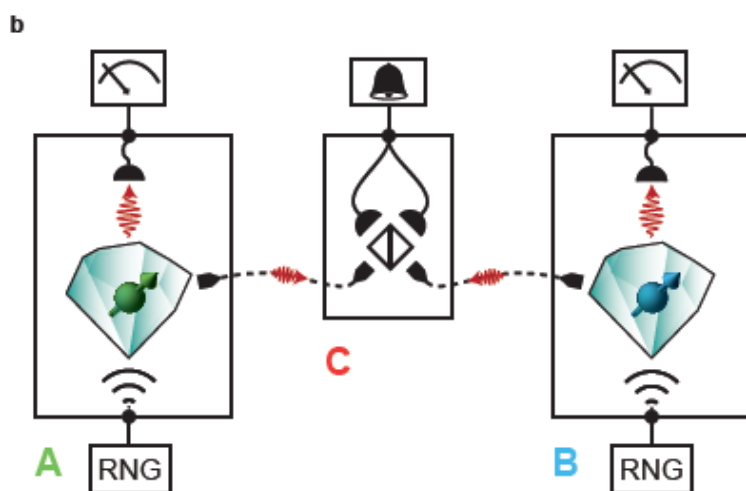
- 1) **Locality loophole** – tedy odstranění jakékoliv možnosti komunikace mezi měřicími přístroji
- 2) **Detection loophole** – zajištění efektivního měření

V prvním případě by mohlo teoreticky dojít k nějaké formě komunikace mezi měřicími přístroji, která by byla rychlejší než světlo, takže by „znalost“ výsledku mohla být použita pro korelování výsledků (nastavení měřících přístrojů), a tím by nebyly splněny podmínky experimentu. V druhém případě, pokud je efektivita jednotlivých pokusů malá (příprava propletených stavů), mohlo by to vést k tomu, že by mohly být nějakým způsobem selektovány jen některé pokusy, přičemž by byla narušena statistická náhodnost výběru a daná vybraná podmnožina měření by mohla vykazovat porušení Bellových nerovností, i když započítání všech měření by takové narušení nevykazovalo.

Dosavadní pokusy zatím nebyly schopny eliminovat tyto dva nedostatky najednou. Problém lokality (locality loophole) byl kupříkladu vyřešen dostatečnou fyzickou vzdáleností v kombinaci s rychlým generátorem náhodných čísel, podle něhož byla nastavovány výchozí podmínky měření. Ale zůstávala zase otevřená detection loophole kvůli neefektivním detektorům a nevyhnutelné ztrátě fotonů během jejich cesty na delší vzdálenosti.

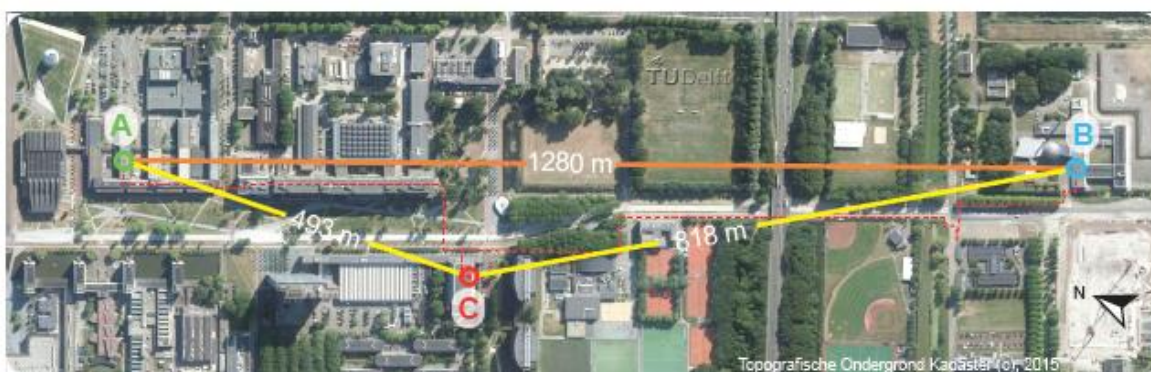
Teprve pokus Hensena a kol. všechny tyto nedostatky eliminuje.

Jednu z podmínek vylepšení experimentu, které by vedly k dokonalému provedení experimentu (tzn. loophole free), navrhnul už sám Bell, který doporučoval, aby se zaznamenával také signál indikující, zda byl úspěšně sdílen požadovaný propletený stav mezi místy měření (A a B), tzn., zda může být provedeno pokusné měření. Nepovedené propletení (kdy došlo např. ke ztrátě fotonu) by byla z měření předem vyloučena a tím by se právě zvýšila efektivita pokusu. Této myšlenky využila také Hensenova skupina, která byla schopna zajistit přenos informace o úspěšné přípravě propleteného stavu.



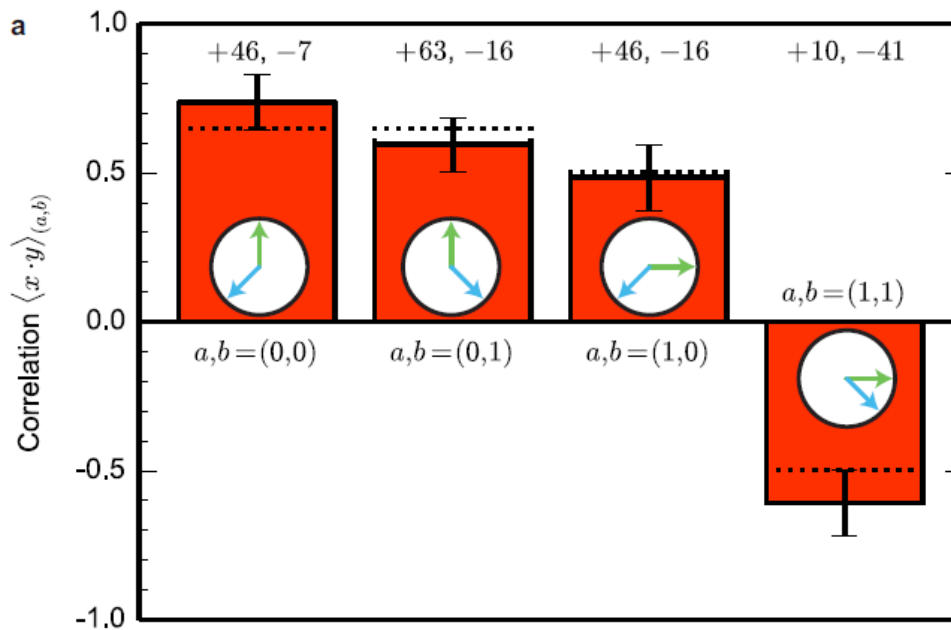
**Obr.: Schéma pokusu**

Současně vzdušná vzdálenost 1280 m mezi lokalitami A a B (a vzdálenost 1700 m optického kabelu), kde je prováděno měření, vytváří dostatečně dlouhé časové okno v délce 4,27 mikrosekund, kdy jsou události v daných místech separovány v čase i prostoru. Během tohoto časového okna je nutné provést nastavení podmínek měření – za tím účelem použila Hensenova skupina rychlé detektory náhodných čísel, které během 160 nanosekund vygenerují náhodný výběr pro nastavení (celkově i s nastavením detektorů operace trvá 480 nanosekund).



Tato fyzická vzdálenost je cca o dva řády vyšší než u všech dosavadních experimentů. Velká vzdálenost sebou nesla i velké ztráty měřených částic. Celkem proběhlo 245 úspěšných měření během celkové délky experimentu 220 hodin. Na základě měření bylo zjištěno narušení CHSH-Bellovy nerovnosti ( $S \leq 2$ ) o hodnotě  $S=2,42$  (se standardní odchylkou 0,20)

Tento experiment jako první na světě současně vylučuje jak detekční tak locality loophole, a umožňuje tak testování Bellovy nerovnosti bez dalších dotatečných předpokladů – podle autorů tak vylučuje všechny lokálně realistické teorie, které akceptují podmínku, že generátory čísel produkují náhodné údaje a že výsledky jsou finální, jakmile jsou elektronicky zaznamenány. Zatím je tedy experimentem s nejpřísněji kontrolovanými podmínkami, který byl kdy proveden.



Obr: Výsledky testu: celkem bylo provedeno 245 pokusných měření. Nastavení detektorům odpovídající vstupním hodnotám (úhlům nastavení) jsou naznačeny modrými a zelenými šipkami. Přerušovaná čára indikuje očekávanou korelaci při měření spinu. Čísla nad sloupci reprezentují počet korelovaných a antikorelovaných výsledků.

Současně však autoři upozorňují na to, že – striktně řečeno – žádný Bellův experiment nemůže vyloučit všechny představitelné lokálně realistické teorie, protože je nemožné dokázat, kdy a jak vznikají údaje v generátorech náhodných čísel. Současně není ani možné vyloučit další (více či méně nekonvenční) teorie – například teorie, které předpokládají, že vstupní údaje jsou už determinovány předem (teorie totálního determinismu apod.)