STRAŠIDELNÉ PŮSOBENÍ NA DÁLKU
(Nobelova cenu za fyziku v roce 2022)

MILOSLAV DUŠEK

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI

KVANTOVÁ TEORIE

- Vzniká na začátku 20. století ve snaze vysvětlit některé jevy, s nimiž si tehdejší fyzika nevěděla rady.
  Např. tvar spektra tepelného záření, chování měrného tepla pevných látek při nízkých teplotách, fotoelektrický jev, příčina čárových spekter atomů.
- V současnosti patří mezi nejlépe experimentálně ověřené teorie.
- Představuje také teoretické jádro mnoha technologií, se kterými se setkáváme v každodenním životě:
  Polovodičové součástky, jaderná energetika, lasery, nukleární magnetická rezonance a jiné diagnostické metody, nové materiály jako grafen apod.
- Přes to všechno jí ale ani po více než sto letech nerozumíme tak dobře, jak bychom chtěli. Kvantová teorie totiž zásadním způsobem mění paradigma ve fyzice.
  Otřásla determinismem, změnila roli pozorovatele a otevřela otázku lokality.

KVANTOVÁ TEORIE

Kvantová teorie se ukázala být velmi efektivní při popisu přírody.
Musíme se ale smířit s tím, že má mnohé podivné a kontraintuitivní vlastnosti:

- Částice se může nacházet ve stavu, který je superpozicí dvou stavů, jež odpovídají dvěma různým polohám. V takovém stavu nemá smysl mluvit o poloze - částice je jakoby na dvou místech zároveň.
- Některé veličiny nelze přesně měřit, při opakovaných měřeních na přesných replikách systému dostáváme různé výsledky. Zdá se, že existuje náhodnost, kterou nelze odstranit, která není dána pouze neznalostí některých parametrů.
- Na rozdíl od klasické fyziky může měření podstatným způsobem změnit stav systému. Pozorovatel už tedy není „nadčlověkem“, jenž může fyzikální systém pozorovat bez jakékoli intervence. Pozorování systém ovlivní.

KVANTOVÁ TEORIE – ENTANGLEMENT

- V kvantové fyzice také existují korelace mezi vzdálenými částicemi, které jsou silnější než korelace známé z klasické fyziky. Výraz „silnější“ má přesný matematický význam – jde o porušení tzv. Bellových nerovností.
  Těm se budeme v této přednášce věnovat podrobněji.
- Porušení Bellových nerovností souvisí s existencí kvantově provázaných (neboli *entanglovaných*) stavů (tvořených kvantovou superpozicí vícečásticových stavů).
- V případě kvantově provázaného systému není nejlepší možná znalost částí totéž co nejlepší možná znalost celku.
- Ascher Peres říkal, že *entanglement je trik, který kvantoví mágové používají k předvádění jevů, jež klasičtí mágové neumějí napodobit*.
- A Albert Einstein mluvil o *strašidelném působení na dálku*.

KVANTOVÁ TEORIE – NOVÉ TECHNOLOGIE

- Hlubší pochopení kvantové mechaniky je důležité pro správnou interpretaci jejích formálních struktur i pro porozumění širších souvislostí v rámci filosofie přírodních věd.
- V posledních několika desetiletích se však ukazuje, že ony těžko uchopitelné vlastnosti kvantové teorie mohou mít i přímé praktické využití. Na rozdíl od dříve zmíněných aplikací tyto nové, tzv. *kvantové technologie* staví přímo na využití kvantových superpozic a entanglementu.
- Jde o *kvantovou kryptografii* a *kvantové počítače (včetně kvantových simulátorů),* ale např. také o *kvantovou metrologii* a *kvantové senzory.*
- Naskytla se tak příležitost propojit základní experimentální výzkum na pomezí fyziky a filosofie s postupným rozvojem technologií založených na úplně nových principech.

EPR PARADOX

- V roce 1935 formuloval Albert Einstein spolu s Borisem Podolskym a Nathanem Rosenem myšlenkový experiment se dvěma částicemi v kvantově provázaném stavu, který měl na základě jednoduchých předpokladů ukázat, že by mělo být možné – v rozporu s kvantovým principem neurčitosti – určit polohu i hybnost částice zároveň.
- Argumentace autorů vychází ze dvou hlavních premis:
  - Z předpokladu *lokality* – to, co se děje s jednou částicí, nemůže okamžitě ovlivnit stav ani výsledky měření na druhé, vzdálené částici.
  - A z předpokladu *reality* – každý, i potenciální výsledek měření je určen tzv. elementem reality, tedy něčím skutečným, co existuje již před měřením.
- Pokud přijmeme tyto předpoklady, tak autoři argumentují, že musejí existovat elementy reality pro polohu i hybnost částice zároveň.

EPR PARADOX A BELLOVY NEROVNOSTI

- Teorie, které výše uvedené předpoklady splňují, se označují jako *lokálně realistické* nebo jako *lokální teorie se skrytými parametry*.
- Co když ale kvantová mechanika některý z předpokladů nesplňuje?
- EPR paradox sám o sobě nedává návod, jak to zjistit.
- V roce 1952 přeformuloval David Bohm EPR myšlenkový experiment tak, že místo polohy a hybnosti použil průměty spinu do dvou různých os, jimž kvantová mechanika rovněž zakazuje, aby měly oba zároveň určitou hodnotu.
- John Bell v roce 1964 odvodil *nerovnosti, které musí splňovat každá lokální teorie se skrytými parametry*, a ukázal, že kvantová mechanika je porušuje.
- Tím jednak dokázal formální nekompatibilitu kvantové teorie s lokálním realismem, ale hlavně poskytl způsob, jak mezi těmito možnostmi rozhodnout experimentálně.

BELLOVY NEROVNOSTI

- My si odvodíme variantu Bellových nerovností nalezenou Johnem Clauserem, Michaelem Hornem, Abnerem Shimonym a Richardem Holtem (CHSH nerovnosti).
- Uvažujme čtveřici náhodných proměnných α , β , α', β', které mohou nabývat hodnot +1 nebo −1, a sestavme z nich následující výraz:

$$\gamma = \alpha\beta + \alpha\beta' + \alpha'\beta - \alpha'\beta'$$

- Funkce γ může nabývat pouze hodnot +2 nebo −2.

α	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
β	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	-1	-1	-1	-1	$+1$	$+1$	$+1$	$+1$	-1	-1	-1	-1
α'	$+1$	$+1$	-1	-1	$+1$	$+1$	-1	-1	$+1$	$+1$	-1	-1	$+1$	$+1$	-1	-1
β'	$+1$	-1	$+1$	-1	$+1$	-1	$+1$	-1	$+1$	-1	$+1$	-1	$+1$	-1	$+1$	-1
γ	$+2$	$+2$	$+2$	-2	-2	-2	$+2$	-2	-2	$+2$	-2	-2	-2	$+2$	$+2$	$+2$

BELLOVY NEROVNOSTI

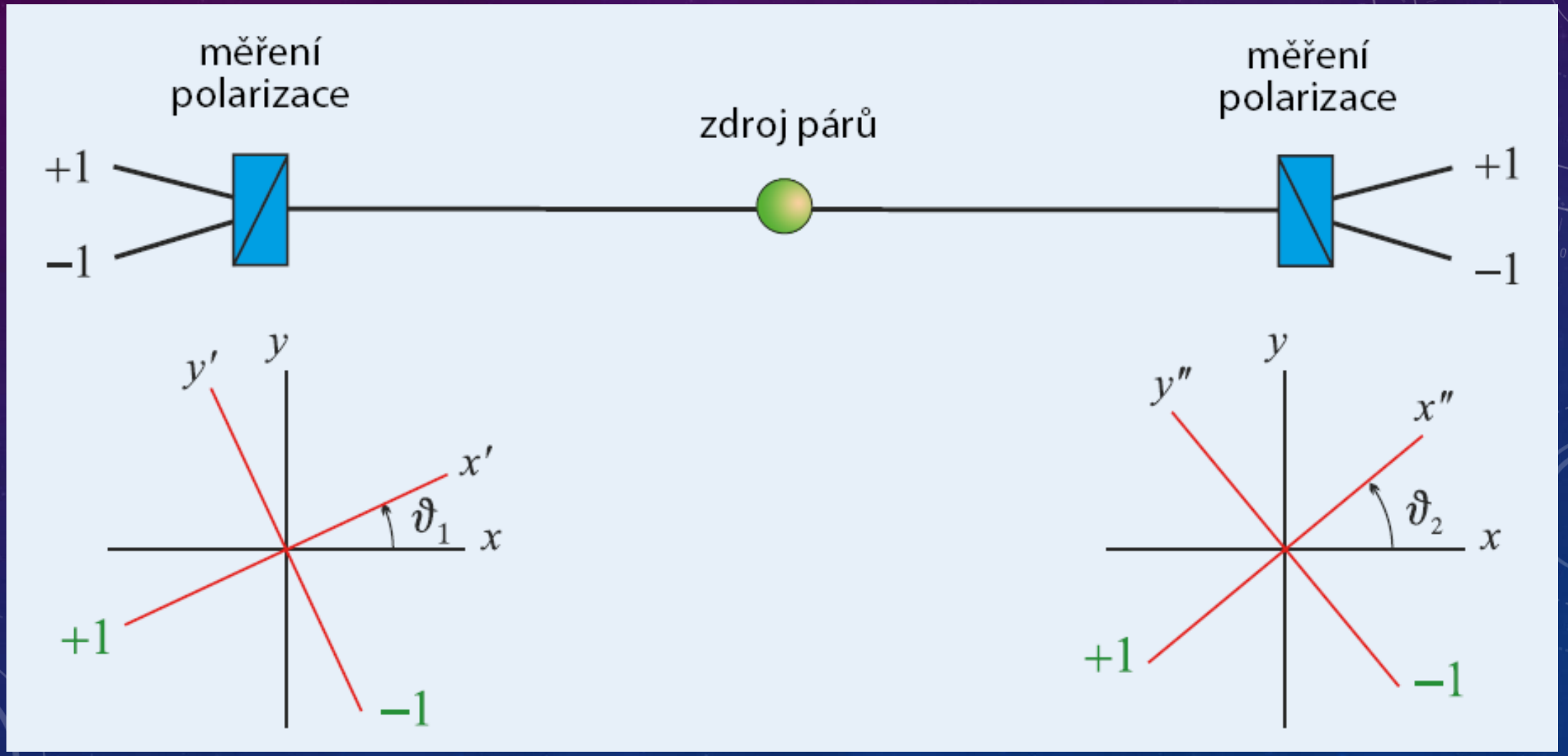
- Máme-li statistický soubor čtveřic $(\alpha\ ,\beta\ ,\alpha',\beta')$, pak zřejmě střední hodnota náhodné proměnné γ musí ležet v intervalu mezi −2 a +2, tedy

$$-2\ \leq \langle\alpha\beta\rangle + \langle\alpha\beta'\rangle + \langle\alpha'\beta\rangle - \langle\alpha'\beta'\rangle \leq +2,$$

  kde úhlové závorky značí střední hodnotu přes statistický soubor.

- Předpokládejme teď experimentální uspořádání, kde ze zdroje vyletí dva fotony pohybující se v opačných směrech.
- Na každém z nich budeme provádět měření lineární polarizace v obecně pootočené polarizační bázi.
- Výsledky měření *A* (vlevo) a *B* (vpravo) nabývají pouze hodnot ±1, podle toho, která polarizace byla nalezena.

BELLOVY NEROVNOSTI



BELLOVY NEROVNOSTI

- Výsledky měření $A(\vartheta_1, \lambda)$ a $B(\vartheta_2, \lambda)$ závisejí na úhlech natočení polarizačních bází ϑ_1 a ϑ_2 a závisejí na také skrytém parametru λ, jehož hodnota je náhodná. Předpokládáme, že ϑ_1, ϑ_2 a λ jsou vzájemně nezávislé.
- Pokud λ neznáme, chovají se $A(\vartheta_1)$ a $B(\vartheta_2)$ jako náhodné proměnné.
- Předpoklad lokality je obsažen ve faktu, že A nezávisí na ϑ_2 a B nezávisí na ϑ_1.
- Zaveďme korelační funkci, tedy střední hodnotu součinu výsledků měření (středuje se pres náhodný parametr λ):

$$C(\vartheta_1, \vartheta_2) = \langle A(\vartheta_1) B(\vartheta_2) \rangle = \int_\Lambda A(\vartheta_1, \lambda)\, B(\vartheta_2, \lambda)\, \mathrm{d}\varrho$$

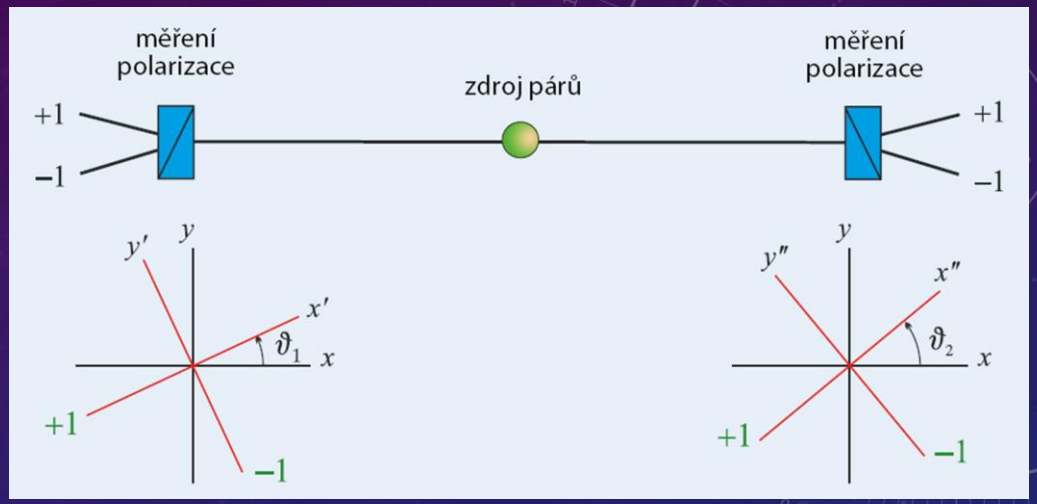
BELLOVY NEROVNOSTI

- Položíme-li $\alpha = A(\vartheta_1),\ \ \beta = B(\vartheta_2),\ \ \alpha' = A(\vartheta_1'),\ \ \beta' = B(\vartheta_2'),$
  kde ϑ_1' a ϑ_2' jsou úhly obecně odlišné od ϑ_1 a ϑ_2
  a dosadíme-li do dříve nalezených nerovností, dostaneme pro naše korelační funkce následující nerovnosti, představující CHSH variantu Bellových nerovností:

$$-2 \ \leq C(\vartheta_1, \vartheta_2) + C(\vartheta_1', \vartheta_2) + C(\vartheta_1, \vartheta_2') - C(\vartheta_1', \vartheta_2') \leq +2.$$

- Tyto nerovnosti musí splňovat každá lokálně realistická teorie bez ohledu na její konkrétní podobu.
- Jednotlivé korelační funkce zde udávají korelace výsledků měření pro různé dvojice úhlů. Lze je odhadnout z experimentálních výsledků.

PŘEDPOVĚĎ KVANTOVÉ TEORIE



- Zkusme popsat uvedený experiment kvantově mechanicky za předpokladu, že pár fotonů je v kvantově provázaném stavu

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle_1|x\rangle_2 + |y\rangle_1|y\rangle_2),$$

kde $|x\rangle$ a $|y\rangle$ představují stavy fotonu s ortogonálními lineárními polarizacemi.

- Tento stav lze vhodnou transformací báze převést na tvar

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\cos\vartheta\,|x'\rangle_1|x''\rangle_2 - \sin\vartheta\,|x'\rangle_1|y''\rangle_2 + \sin\vartheta\,|y'\rangle_1|x''\rangle_2 + \cos\vartheta\,|y'\rangle_1|y''\rangle_2\right),$$

kde jednotlivé stavy odpovídají polarizačním bázím z obrázku a $\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1$.

PŘEDPOVĚĎ KVANTOVÉ TEORIE

- Pravděpodobnosti výsledků měření v těchto bázích pak jsou

$$P^{\psi}(x', x'') = P^{\psi}(y', y'') = \frac{1}{2}\cos^2\vartheta,$$

$$P^{\psi}(x', y'') = P^{\psi}(y', x'') = \frac{1}{2}\sin^2\vartheta,$$

- Naše korelační funkce nabývá tvaru

$$C(\vartheta_1, \vartheta_2) = P^{\psi}(x', x'') + P^{\psi}(y', y'') - P^{\psi}(x', y'') - P^{\psi}(y', x'') =$$

$$= \cos^2\vartheta - \sin^2\vartheta = \cos 2\vartheta.$$

PŘEDPOVĚĎ KVANTOVÉ TEORIE

- Zvolíme-li úhly $\vartheta_1 = 0°,\ \vartheta_1' = 45°,\ \vartheta_2 = 22{,}5°,\ \vartheta_2' = -22{,}5°$ a dosadíme-li do vztahu

$$C(\vartheta_1, \vartheta_2) + C(\vartheta_1', \vartheta_2) + C(\vartheta_1, \vartheta_2') - C(\vartheta_1', \vartheta_2') \leq 2$$

odpovídající hodnoty $C(\vartheta_1, \vartheta_2) = \cos 2(\vartheta_2 - \vartheta_1)$, dostaneme:

$$\cos(45°) + \cos(-45°) + \cos(-45°) - \cos(-135°) = \mathbf{2\sqrt{2} > 2.}$$

- Tento výsledek říká, že existují taková nastavení polarizačních hranolů, pro která předpověď kvantové mechaniky porušuje CHSH nerovnosti.

NĚKOLIK POZNÁMEK

- Výše uvedené argumenty nevylučují nelokální teorie se skrytými parametry, tedy takové, které připouštějí nějaký způsob okamžitého působení na dálku.
- Předpokládáme, že ϑ_1, ϑ_2 a λ jsou nezávislé (částice předem nevědí, co se rozhodneme měřit). V principu ale nelze vyloučit ani možnost, že každé „svobodné“ či „náhodné“ rozhodnutí o natočení polarizátorů je ve skutečnosti determinováno nějakou událostí v minulosti, společně ovlivňující oba pozorovatele i stavy obou fotonů.
  Při vhodné korelaci volby měření a skrytého parametru (kdy ϑ_1, ϑ_2 a λ nebudou nezávislé) se pak může stát, že Bellovy nerovnosti budou porušeny i v případě striktního determinismu.
- Z praktického hlediska jsou však důležitější omezení technického charakteru.

NĚKOLIK POZNÁMEK

- Reálné detektory nemají stoprocentní účinnost. Kdyby účinnost detektorů závisela na skrytém parametru, tak soubor detekovaných případů nemusí být charakteristický pro soubor všech emitovaných párů. Bellovy nerovnosti by pak mohly být porušeny i v případě lokálního realismu.
- David Mermin ukázal, že je-li účinnost detektorů větší než 82,8 %, pak soubor detekovaných případů je již natolik reprezentativní, že porušení Bellových nerovností nelze vysvětlit „nekvantově“.
- Problém účinnosti lze částečně obejít pomocí tzv. „event ready“ experimentů. Každý vyrobený pár je doprovázen signálem, že k emisi došlo. Pak je možné do statistiky započítat i případy, kdy některý z detektorů selhal. Další možností jsou experimenty s více než dvěma částicemi. Požadavky na účinnost detekce v tomto případě klesají.

NĚKOLIK POZNÁMEK

- ϑ_1, ϑ_2 a λ musí být nezávislé. Proto je třeba zajistit, aby volby měřicích bází byly náhodné a aby rozhodnutí o nastavení měřicích bází u obou pozorovatelů jakož i vznik páru částic byly odděleny *prostoru podobnými intervaly*.
  Tedy aby rozhodnutí nemohlo ovlivnit vznik páru (a naopak) a aby informace o natočení jednoho polarizačního hranolu (šířící se maximálně rychlostí světla) mohla ke druhému pozorovateli dorazit nejdříve až po registraci jeho fotonu.
- Důležité je též, aby generátory náhodnosti *neměly paměťový efekt* nebo aby byl zahrnut do předpokladů statistického zpracování.
- Je třeba mít také na paměti, že se vždy pracuje s konečným počtem experimentálních dat. Ve většině experimentů se uvádí pouze, o kolik směrodatných odchylek byly nerovnosti porušeny. Správnější je však provádět řádné testování hypotézy.

KONTEXTUALITA

- Nelokalita je speciálním případem tzv. kontextuality (výsledek měření může závisetí na kontextu měření).
- Klasická fyzika je nekontextuální: pokud lze pozorovatelnou *A* měřit společně s pozorovatelnou *B* nebo s pozorovatelnou *C*, pak výsledek měření pozorovatelné *A* nezávisí na tom, je-li současně měřena *B* nebo *C* nebo je-li *A* měřena sama.
- V kvantové mechanice toto obecně neplatí. I když existují rozdělení pravděpodobnosti $p(a,b)$ a $p(a,c)$ výsledků měření a, b, c pozorovatelných *A*, *B*, *C*, nemusí existovat společné rozdělení pravděpodobnosti $p(a,b,c)$.
- Pro prostor stavů s dimenzí větší nebo rovnou třem neexistuje žádná nekontextuální teorie se skrytými parametry, která by dávala stejné předpovědi jako kvantová teorie. Poprvé to dokázali Simon B. Kochen a Ernst Specker v roce 1967.

EXPERIMENTÁLNÍ TESTY

- První experimentální testy Bellových nerovností (CHSH) byly provedeny Stuartem J. Freedmanem a Johnem F. Clauserem v Berkeley v roce 1972. Využívaly se v nich dvojice fotonů s korelovanými polarizacemi, vyzářené při kaskádních přechodech elektronů mezi energetickými hladinami v atomu vápníku. Měřeny byly koincidenční detekce po průchodu fotonů polarizátory pro různá nastavení polarizátorů.
- Postupně se objevovaly další experimenty – např. práce Edwarda S. Frye a Randalla C. Thompsona v Texasu (1975), Alaina Aspecta, Jeana Dalibarda a Gérarda Rogera v Orsay (1976–1983), Z. Y. Oua a Leonarda Mandela v Rochesteru (1988) a mnoha dalších.
- Již nejranější práce převážně potvrzovaly předpovědi kvantové mechaniky, jejich výsledky nicméně nebyly vždy dostatečně průkazné. Porušení Bellových nerovností bylo prokázáno jen o několik málo směrodatných odchylek, účinnost detektorů byla nízká a nastavení polarizátorů bylo pro velké sady měření fixní. Postupně se ovšem experimenty zdokonalovaly a jejich přesnost zvyšovala.

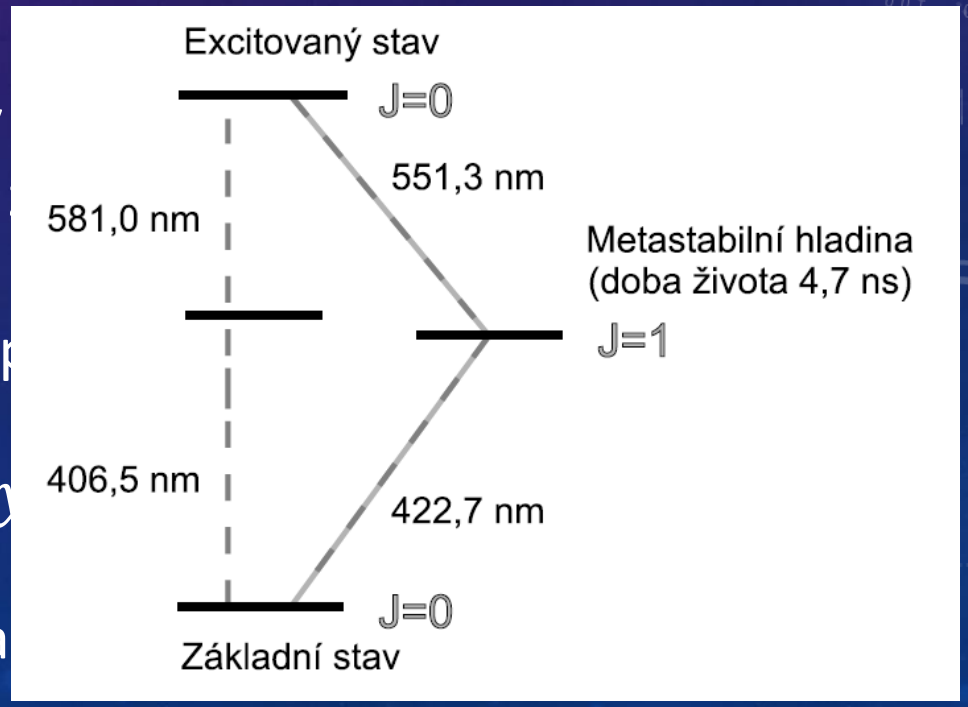
EXPERIMENTÁLNÍ TESTY – ORSAY

Experimenty prováděné skupinou kolem Alaina Aspecta v Orsay ve Francii (1982).

- Jako zdroj fotonových párů sloužil svazek vápníkových atomů, které byly pomocí dvou laserů vybuzeny do stavů s vyšší energií. Atomy pak vyzářením fotonu přecházejí do „mezistavu“ s nižší energií a odtud téměř okamžitě do původního stabilního stavu s nejnižší energií, přičemž vyzáří druhý foton.
- Protože původní i excitovaný stav mají oba nulový
  „mezistav“ má nenulový moment hybnosti, klade
  momentu hybnosti určitá omezení i na polarizace
  Výsledkem je, že polarizace fotonů jsou kvantově

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle_1|x\rangle_2 + |y$$

- Pro zjišťování polarizace fotonů byly využity Wolla



EXPERIMENTÁLNÍ TESTY – ORSAY

Experimenty prováděné skupinou kolem Alaina Aspecta v Orsay ve Francii (1982).

- Jako zdroj fotonových párů sloužil svazek vápníkových atomů, které byly pomocí dvou laserů vybuzeny do stavů s vyšší energií. Atomy pak vyzářením fotonu přecházejí do „mezistavu“ s nižší energií a odtud téměř okamžitě do původního stabilního stavu s nejnižší energií, přičemž vyzáří druhý foton.
- Protože původní i excitovaný stav mají oba nulový moment hybnosti, zatímco „mezistav“ má nenulový moment hybnosti, klade zákon zachování celkového momentu hybnosti určitá omezení i na polarizace obou vyzářených fotonů. Výsledkem je, že polarizace fotonů jsou kvantově provázány:

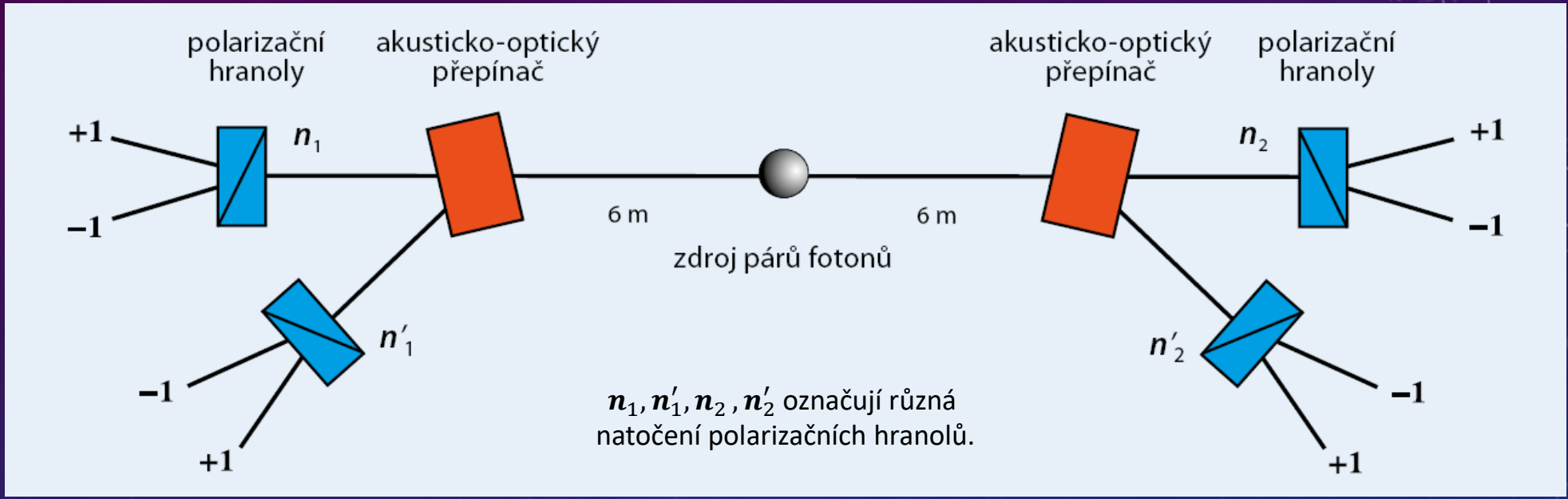
$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle_1|x\rangle_2 + |y\rangle_1|y\rangle_2).$$

- Pro zjišťování polarizace fotonů byly využity Wollastonovy hranoly.

EXPERIMENTÁLNÍ TESTY – ORSAY

- Při odvození Bellových nerovností se předpokládá, že nastavení orientace polarizačního hranolu v jednom rameni neovlivní měření ve druhém rameni ani proces přípravy páru. Aby se tato možnost vyloučila, měnilo se nastavení orientace polarizačních hranolů v reálném čase. Nastavení se tak mohlo změnit až po emisi páru.
- Realizovalo se to pomocí akusticko-optických přepínačů, které umožňovaly rychle měnit směr světelného paprsku. Každý z těchto přepínačů směroval přicházející foton vždy na jeden ze dvou různě nastavených polarizačních hranolů v každém rameni.
- Oba přepínače byly ovládány nezávislými oscilátory s průměrnou periodou přepínání kolem 10 ns. Vzdálenost přepínačů a polarizačních hranolů od zdroje byla zhruba 6 m (doba šíření fotonu cca 20 ns).

EXPERIMENTÁLNÍ TESTY – ORSAY

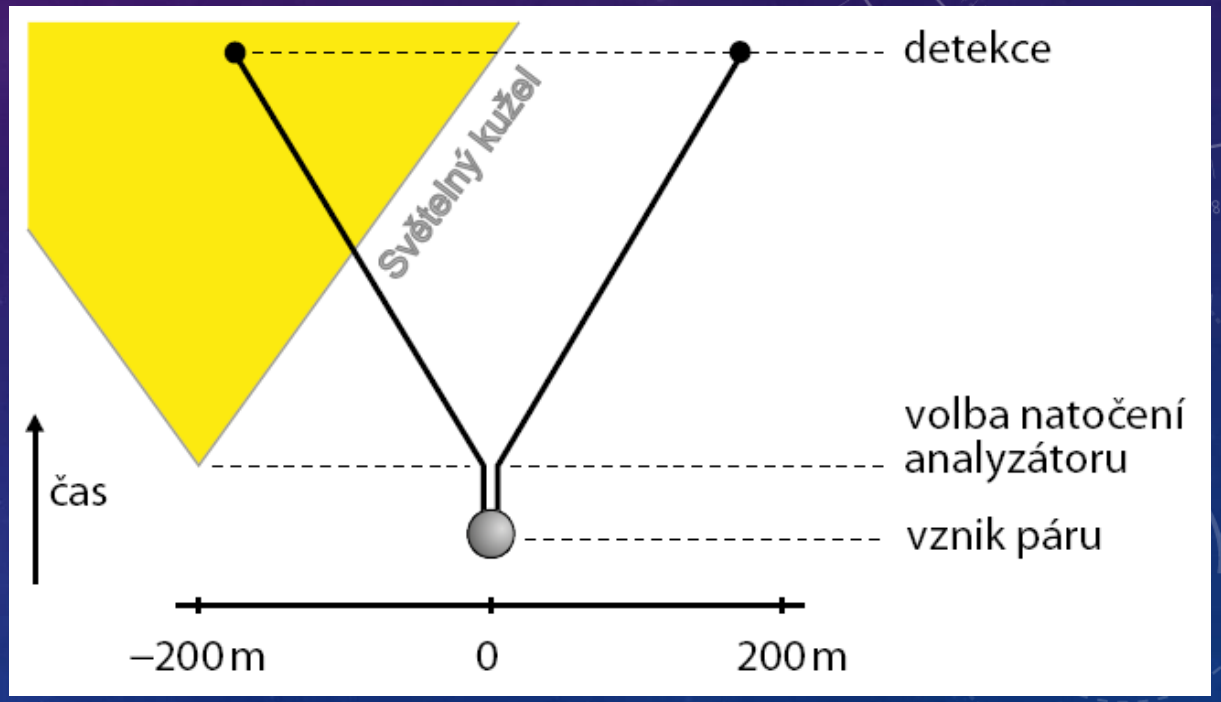


- Porušení Bellových nerovností v tomto náročném experimentu bylo prokázáno s přesností větší než 5 směrodatných odchylek.
- U podobných, ale technicky méně náročných experimentů bez použití akusticko-optických přepínačů, bylo porušení prokázáno s přesností až několika desítek směrodatných odchylek.

EXPERIMENTÁLNÍ TESTY – INNSBRUCK

Test porušení Bellových nerovností uskutečněný skupinou Antona Zeilingera v Innsbrucku v roce 1998.

- V tomto experimentu měření realizovaná oběma pozorovateli představovala dvě události oddělené prostoru podobným intervalem. Informace o volbě polarizační báze mohla ke druhému pozorovateli dorazit až po registraci jeho fotonu.
- Volba typu měření byla u obou pozorovatelů skutečně náhodná a nezávislá.



- Nepřekonaným problémem zůstala stále ještě ne dost vysoká účinnost detekce.

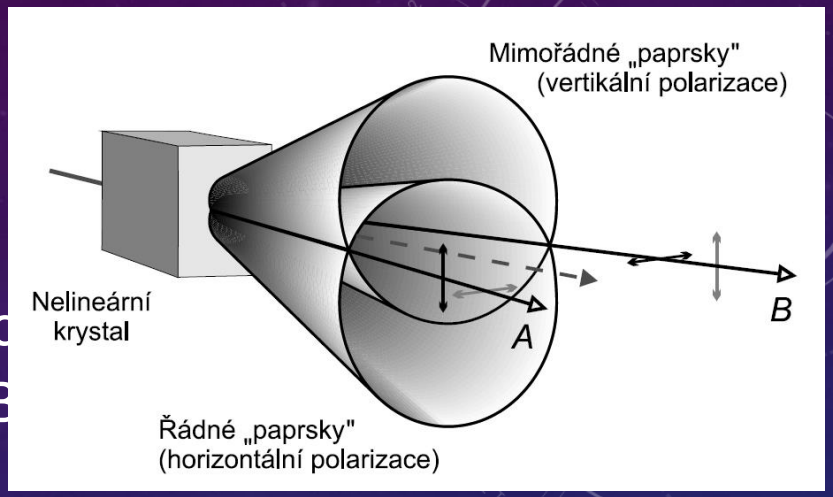
EXPERIMENTÁLNÍ TESTY – INNSBRUCK

- Využívaly se páry fotonů s kvantově provázanými polarizacemi, připravené pomocí spontánní parametrické frekvenční konverze v krystalu β-BaB_2O_4 (BBO):

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle_1|y\rangle_2 - |y\rangle_1|x\rangle_2).$$

- Fotony z argonového laseru o vlnové délce 351 nm se konvertovaly na dvojice fotonů o vlnové délce 702 nm. Sfázování typu II zajišťovalo, že jeden z nich se šířil v krystalu jako řádný paprsek s lineární polarizací ve směru x a druhý jako mimořádný s polarizací v kolmém směru y. Vhodným geometrickým uspořádáním byl získán výše uvedený entanglovaný stav.
- Fotony byly navázány do optických vláken a vedeny ke dvěma měřicím stanicím vzdáleným od zdroje párů 200 m (vlákna byla trochu delší).

EXPERIMENTÁLNÍ TESTY – INNSBRUCK



- Využívaly se páry fotonů s kvantově provázanými polarizac
spontánní parametrické frekvenční konverze v krystalu β-B

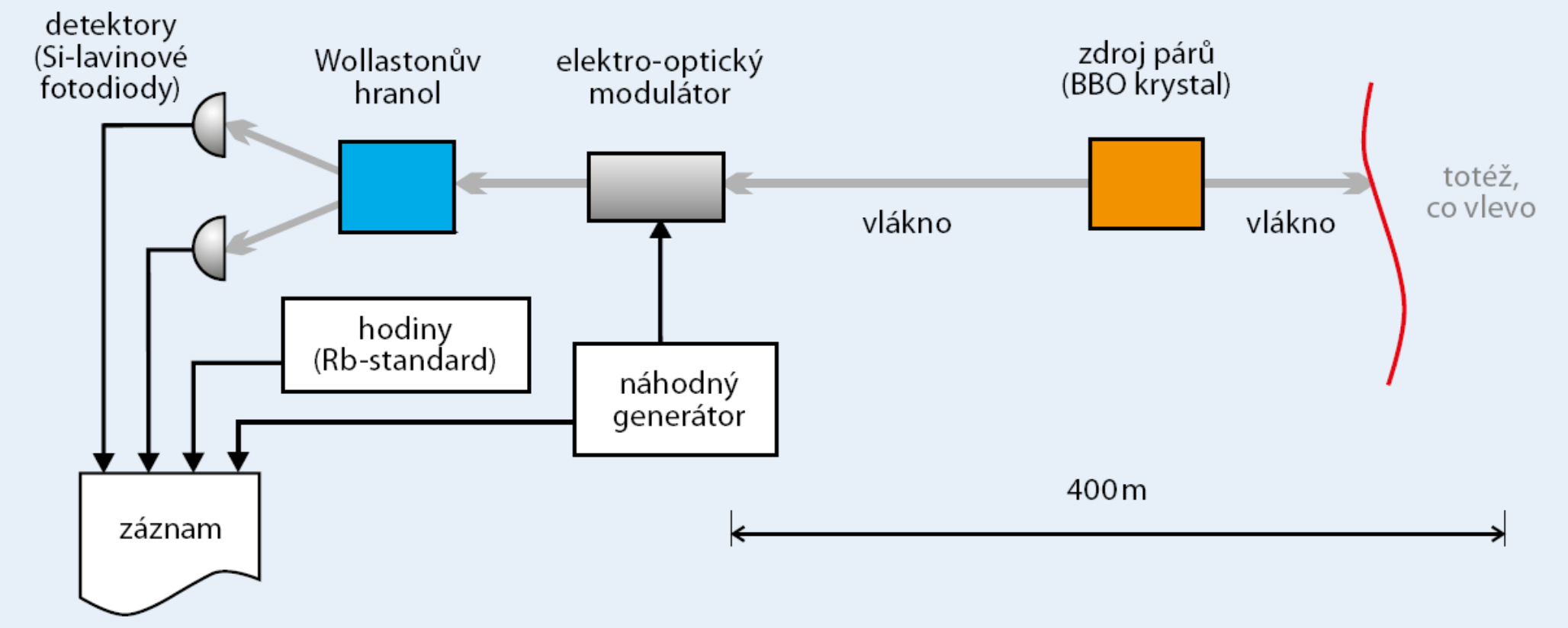
$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle_1|y\rangle_2 - |y\rangle_1|x\rangle_2).$$

- Fotony z argonového laseru o vlnové délce 351 nm se konvertovaly na dvojice fotonů o vlnové délce 702 nm. Sfázování typu II zajišťovalo, že jeden z nich se šířil v krystalu jako řádný paprsek s lineární polarizací ve směru x a druhý jako mimořádný s polarizací v kolmém směru y. Vhodným geometrickým uspořádáním byl získán výše uvedený entanglovaný stav.
- Fotony byly navázány do optických vláken a vedeny ke dvěma měřicím stanicím vzdáleným od zdroje párů 200 m (vlákna byla trochu delší).

EXPERIMENTÁLNÍ TESTY – INNSBRUCK

- Polarizace se zjišťovala pomocí Wollastonova hranolu a dvou detektorů (křemíkových lavinových fotodiod).
- Hranol byl v klidu - pootáčena byla polarizace přicházejícího světla prostřednictvím rychlého elektro-optického modulátoru. Dvě zvolená pootočení se střídala náhodně.
- Hlavním přínosem tohoto experimentu bylo použití fyzikálních náhodných generátorů. Ty fungovaly na základě dělení světla o velmi nízké intenzitě na děliči svazku. Za děličem byly dva detektory, které reagovaly na náhodné dopady fotonů.
- Záznamy výsledků na obou měřicích stanicích byly prováděny zcela nezávisle a jejich srovnání proběhlo až po skončení experimentu.
- Záznamy proto musely být opatřeny velmi přesnými časovými značkami. Ty byly generovány atomovými hodinami na bázi rubidiového standardu.

EXPERIMENTÁLNÍ TESTY – INNSBRUCK



- Testována byla výše popsaná CHSH varianta Bellových nerovností.
- Experimentální hodnota porušení nerovností byla $2{,}73 \pm 0{,}02 > 2$.

EXPERIMENTÁLNÍ TESTY – KANÁRSKÉ OSTROVY

Distribuce entanglovaného stavu mezi 144 km vzdálenými stanicemi na ostrovech La Palma a Tenerife (2006).

- V tomto experimentu bylo testováno porušení CHSH nerovností a zároveň i realizován kvantový přenos kryptografického klíče.
- Provázané páry fotonů byly připravovány v procesu parametrické frekvenční konverze v krystalu BBO čerpaném pulzním laserem.
- Polarizace prvního fotonu byla měřena nedaleko zdroje na La Palma.
- Druhý foton byl poslán volným prostorem na Tenerife. Jako přijímač byl použit teleskop o průměru 1 m.
- Stabilita směrování vysílače a přijímače byla automaticky udržována zpětnovazebním systémem využívajícím pomocný laserový svazek.

EXPERIMENTÁLNÍ TESTY – KANÁRSKÉ OSTROVY

- Celkový útlum jednofotonových signálů se typicky pohyboval kolem 30 dB, z toho 8 až 12 dB bylo způsobeno atmosférickými ztrátami, 10 až 16 dB divergencí svazku, která byla větší než apertura přijímacího teleskopu, útlum 2 dB připadal na optické komponenty a za 6 dB byla odpovědná kvantová účinnost detektorů.
- Experiment demonstroval možnost distribuce entanglementu volným prostorem, což je důležité pro budoucí kvantovou komunikaci mezi satelity a pozemními stanicemi.

- Test Bellových nerovností trval 221 s, během nichž bylo akumulováno 7 058 koincidenčních detekcí.
- Dosažená míra porušení CHSH nerovností byla $2{,}508 \pm 0{,}037 > 2$.

EXPERIMENTÁLNÍ TESTY – VÍDEŇ

Z novějších experimentů stojí za zmínku test realizovaný ve sklepení vídeňského Hofburgu v roce 2015.

- V tomto experimentu *byl překonán problém s nízkou účinností detektorů* a zároveň bylo zajištěno oddělení jednotlivých událostí prostoru podobnými intervaly.
- Jako zdroj párů fotonů posloužila opět parametrická frekvenční konverze, tentokrát v periodicky pólovaném krystalu KTP ($KTiOPO_4$) v Sagnacově uspořádání.
- K detekci byly použity supravodivé TES jednofotonové detektory (transition-edge sensors), které mají vysokou účinnost a nízký šum.
- Nastavení polarizace probíhalo pomocí rychlých elektro-optických modulátorů řízených generátory náhodných čísel.

EXPERIMENTÁLNÍ TESTY – VÍDEŇ

- V tomto experimentu bylo testováno porušení tzv. *Eberhardových* nerovností (1993).
- Tyto nerovnosti započítávají explicitně i nedetekované případy.
- Tolerují nižší účinnost detektorů ($\eta > 2/3$).
- V případě $\eta < 1$ dochází k maximálnímu porušení nerovností pro *nemaximálně* entanglované stavy.

- Byla provedena pečlivá statistická analýza, která ukázala, že pravděpodobnost, že by se získané výsledky mohly objevit v rámci lokálního realismu, je **menší než** $\mathbf{3{,}74 \times 10^{-31}}$.

EXPERIMENTÁLNÍ TESTY – DELFT

Poslední experiment, který chci zmínit, byl proveden v Delftu v Nizozemsku v roce 2015.

- Podařilo se v něm kvantově provázat stavy spinů (magnetických momentů) elektronů ve vzdálených NV (nitrogen-vacancy) centrech v diamantech.
- Spiny elektronů byly kvantově provázány prostřednictvím měření dvojice vyzářených (se spiny provázaných) fotonů.
- K provázání spinů došlo, pokud byla dvojice fotonů měřením vyprojektována do stavu

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle_1|y\rangle_2 - |y\rangle_1|x\rangle_2).$$

EXPERIMENTÁLNÍ TESTY – DELFT

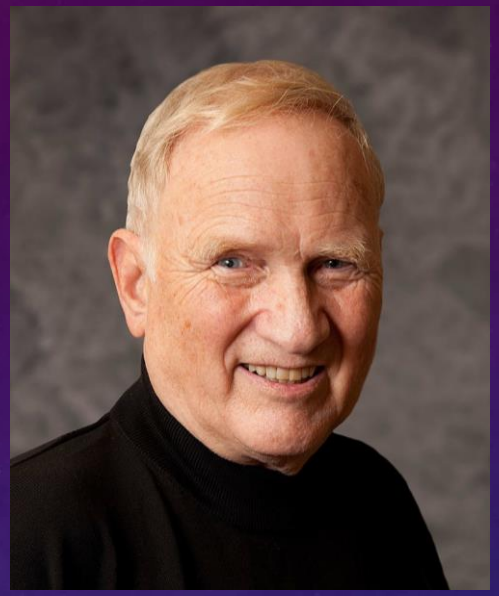
- Detekce oznámila vytvoření entanglovaného stavu spinů, jednalo se tedy o „event ready“ experiment.
- Diamanty s NV centry byly vzdáleny 1 280 m a bylo zajištěno oddělení jednotlivých událostí prostoru podobnými intervaly.
- Čtení průmětu magnetického momentu do osy zvolené náhodným generátorem probíhalo s vysokou účinností. Byl tak překonán problém s nízkou účinností detektorů, známý z optických testů.

- Testovány byly CHSH nerovnosti a zjištěná míra porušení byla $2{,}42 \pm 0{,}20 > 2$.

Alain Aspect

Narozen: 1947, Agen, Francie
Studium: École normale supérieure v Cachanu a Univerzita v Orsay
Doktorát: 1983, Univerzita Paris-Sud

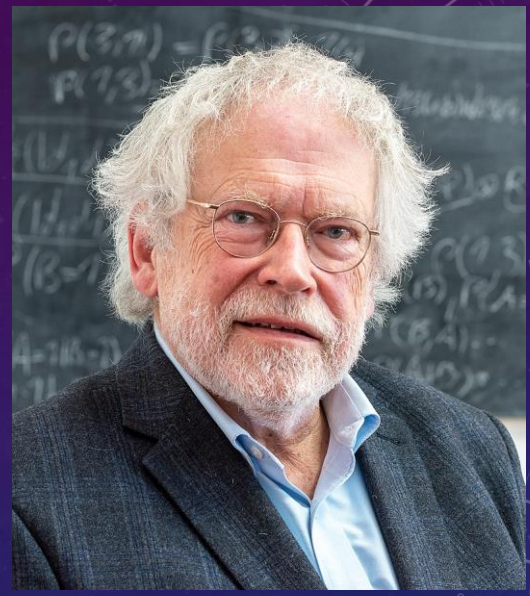
Věnoval se experimentálním testům Bellových nerovností, zkoumal vlnově částicovou dualitu fotonů, zabýval se laserovým chlazením atomů a Bose-Einsteinovými kondenzáty.



John Francis Clauser

Narozen: 1942, Pasadena, Kalifornie
Studium: Kalifornský technologický institut a Kolumbijská univerzita v NY
Doktorát: 1969, Kolumbijská univerzita v NY

Provedl první experimentální test Bellových nerovností (1972), změřil subpoissonovskou fotopulsní statistiku, sestrojil atomový interferometr.



Anton Zeilinger

Narozen: 1945, Ried im Innkreis, Rakousko
Studium: Vídeňská univerzita.
Doktorát: 1971, Vídeňská univerzita

Zabýval se interferencí neutronů, zkoumal vícečásticové provázané stavy, podílel se na testech Bellových nerovností, na kvantové teleportaci a na přenosu kvantového klíčena (144 km), zkoumal interferenci molekul fullerenu.

DĚKUJI ZA POZORNOST

M. Dušek: *Strašidelné působení na dálku aneb Nobelova cenu za fyziku v roce 2022*, Čs. čas. fyz. **72** (2022), č. 6, s. 427.