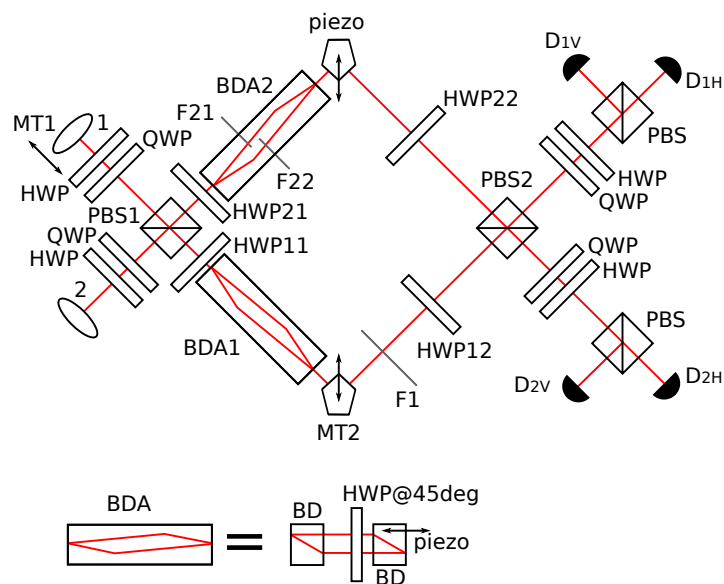


Sbírka experimentálních úloh z kvantové a nelineární optiky



Úloha č. 1: Zdroj fotonových párů

Cíl úlohy:

Tato úloha seznámí posluchače se základními vlastnostmi zdroje kvantově provázaných fotonů založených na procesu spontánní sestupné parametrické frekvenční konverze. Při teoretické přípravě si ujasní princip tohoto nelineárního procesu a zvláště pak konfiguraci umožňující získat kvantově provázané páry fotonů. Praktická část této úlohy následně provede posluchače základními justážními postupy pro sestavení a optimalizaci experimentálního uspořádání pro generaci fotonových párů.

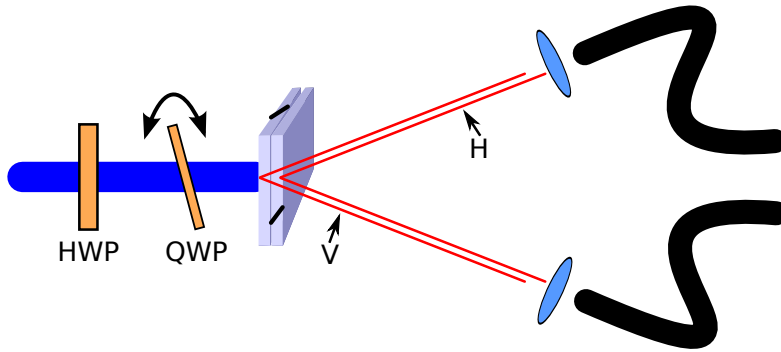
1 Než začneme:

- Seznamte se s nelineárním optickým procesem generace druhé harmonické a sestupné parametrické frekvenční konverze.
- Seznamte se s pojmem kvantová provázanost (entanglement), separabilní a neseperabilní stavy.
- Seznamte se s principem fungování lavinových fotodetektorů.

2 Úvod k úloze:

Pro generaci fotonových párů využíváme proces spontánní sestupné parametrické frekvenční konverze. V tomto procesu dochází za asistence nelineárního prostředí (krystalu) k zániku jednoho fotonu laserového záření a ke vzniku dvou fotonů s poloviční energií. Tyto fotony vykazují velmi zajímavé a užitečné vlastnosti. Vznikají vždy v párech a to ve stejný okamžik. Jejich polarizace je přesně dána vlastnostmi procesu. V našem případě budeme využívat proces typu jedna, kdy mají oba vzniklé fotony shodnou polarizaci, která je kolmá na polarizaci laserového svazku. Tato konfigurace sice umožňuje získat fotonové páry, nezaručuje však jejich kvantovou provázanost (vznikají totiž separabilní stavy).

Návrhů, jak pomocí procesu spontánní sestupné parametrické frekvenční konverze získat kvantově provázané páry, je více. V našem případě použijeme dvojici navzájem kolmo orientovaných krystalů (tzv. Kwiatův zdroj). Schéma experimentálního uspořádání je vyobrazeno na obrázku 2. Čerpací laserový svazek o vlnové délce 355 nm nejprve prochází $\lambda/2$ frakční destičkou, pomocí které je možné nastavit libovolnou lineární polarizaci. Pomocí náklonu $\lambda/4$ frakční destičky následně můžeme nastavit libovolnou fázi mezi horizontální a vertikální složkou polarizace laserového svazku. Následně svazek



Obrázek 1: Schematické vyobrazení Kwiatova zdroje fotonových párů. $\lambda/2$ destička (HWP) umožňuje nastavit libovolnou lineární polarizaci, $\lambda/4$ destička (QWP) kontroluje fázi mezi horizontální a vertikální složkou polarizace. Laserový svazek vhodně polarizovaný prochází oběma krystaly, ve kterých vznikají fotonové páry. Ty jsou zachycovány pomocí navazovacích čoček do vláken.

vstupuje do dvojice krystalů. V prvním z krystalů dochází k procesu, ve kterém jsou horizontálně polarizované fotony čerpacího svazku konvertovány na vertikálně polarizované páry fotonů. Tyto páry fotonů následně vycházejí z krystalu pod úhlem zhruba 4° vzhledem k ose čerpacího svazku. Druhý krystal je kolem osy čerpání otočen kolmo vůči prvnímu krystalu. Díky tomu v něm probíhá konverze vertikálně polarizovaných fotonů laseru na páry horizontálně polarizované. Pomocí navazovacích čoček jsme schopni vycházející fotonové páry navázat do optických vláken a dále s nimi pracovat. Vzhledem k tomu, že navázáním není možné rozlišit fotony vzniklé v prvním a druhém krystalu, dochází ke vzniku koherentní superpozice příspěvků z obou krystalů.

Kvantový stav fotonů získaných z výše uvedeného uspořádání lze zapsat jako

$$|\psi\rangle = \cos(\alpha)|HH\rangle + \sin(\alpha)e^{i\varphi}|VV\rangle, \quad (1)$$

kde H značí horizontálně polarizovaný a V vertikálně polarizovaný foton. Parametr α ovlivníme nastavením $\lambda/2$ destičky a parametr φ nastavením $\lambda/4$ destičky. Zdroj nám tedy umožňuje generovat celé spektrum dvoufotonových stavů: od separabilního ($\alpha = 0$) po maximálně kvantově provázaný ($\alpha = \pi/4$).

Pro detekci fotonových párů použijeme jednofotonové detektory založené na principu lavinových fotodiód. Vláknem z obou navazovačů připojíme do detektorů a pomocí elektroniky čítáme počty detekovaných fotonů v obou výstupech. Dále čítáme počet tzv. koincidencí, tedy případů, kdy oba detektory zaznamenaly současnou detekci.

3 Zadání úlohy:

1. Pomocí clonek ověřte správný průchod čerpacího svazku.
2. Ověřte funkci frakčních destiček (tip. použijte polarizátor).
3. Pod dohledem a po tmě zapněte detektory.
4. Pomocí posuvů, náklonů a ostření optimalizujte navázání fotonů do optických vláken.
5. Stanovte detekovaný počet fotonů z jednotlivých vláken a také počet koincidencí. Ujistěte se, že do vláken sbíráte příspěvky z obou krystalů.

4 Doporučená literatura:

- Bahaa Saleh and Marvin Teich, *Fundamentals of Photonics*, Wiley 1991.
- Robert W. Boyd, *Non-linear optics*, Academic Press 2003.
- Michael A. Nielsen and Isaac L. Chuang, *Quantum computation and quantum information*, Cambridge University Press 2004.
- M. Dušek, *Koncepční otázky kvantové teorie*, Univerzita Palackého, Olomouc 2002.
- Kwiat et al., Phys. Rev. A 60, R773 (1999)

Úloha č. 1: Zdroj fotonových párů (řešení)

Samotné experimentální práci předcházelo seznámení se s doporučenou literaturou a získání základních znalostí na základě teoretické přípravy vytyčené zadáním úlohy.

1 Úkol: Dráha svazku

Pomocí clonek ověřte správný průchod čerpacího svazku.

Svazek z laseru je směřován pomocí dvou zrcátek. Pomocí kontroly průchodu svazku clonkami bylo nastaveno správné naklonění zrcátek, aby svazek procházel správným směrem.

2 Úkol: Vlastnosti frakčních destiček

Ověřte funkci frakčních destiček (tip. použijte polarizátor).

Polarizátor byl umístěn za první frakční destičku ($\lambda/2$). Bylo ověřeno, že destička svou rotací mění lineární polarizaci čerpacího svazku. Vlastnosti $\lambda/4$ destičky nebyly studovány pomocí polarizátoru.

3 Úkol: Detektory

Pod dohledem a po tmě zapněte detektory.

Osvětlení v laboratoři bylo vypnuto. Byly spuštěny jednofotonové detektory a sledován počet temných detekcí. Po ustabilizování detektorů můžeme pokračovat.

4 Úkol: Optimalizace

Pomocí posuvů, náklonů a ostření optimalizujte navázání fotonů do optických vláken.

Postupnou iterativní optimalizací bylo nalezeno maximum navazovaného signálu. Bylo třeba pečlivě vyzkoušet horizontální i vertikální posuvy a optimalizovat pomocí náklonů. Také bylo třeba optimalizovat zaostření navazovací čočky před vláknem.

Krystal č.	1. navazovač	2. navazovač	koincidence
1	251246 ± 501	345978 ± 590	10456 ± 102
2	198732 ± 448	274633 ± 538	6042 ± 78

Tabulka 1: Počty detekovaných fotonů za 1 s pro jednotlivé navazovače a dále počet získaných koincidencí za 1 s (koincidenční okno 1 ns). Uvedená data jsou měřena pro první i druhý krystal.

5 Úkol: Počty fotonů a koincidencí

Stanovte detekovaný počet fotonů z jednotlivých vláken a také počet koincidencí. Ujistěte se, že do vláken sbíráte příspěvky z obou krystalů.

Po optimalizaci (viz předchozí úkol) bylo provedeno měření počtu detekovaných fotonů. Bylo otestováno, že jsou do vláken navazovány fotony z obou krystalů. Generující krystal byl vybrán nastavením vhodné polazizace čerpacího svazku (horizontální pro generaci z prvního krystalu a vertikální pro generaci z druhého krystalu). Následující tabulka shromažďuje naměřené počty. Hodnoty byly stanoveny jako průměrný počet detekovaných fotonů za 1 s při průměrování po dobu 5 s.

Úloha č. 2: Dvoufotonová interference

Cíl úlohy:

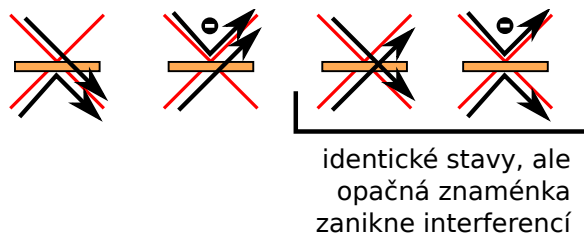
Cílem této úlohy je seznámit posluchače se základními vlastnostmi dvoufotonové interference (tzv. HOM interference). V rámci této úlohy budou posluchači pozorovat HOM dip, určovat jeho vizibilitu jako kritérium nerozlišitelnosti fotonů. Experimentálně bude demonstrován vliv polarizační rozlišitelnosti na ztrátu interference mezi dvěma fotony. Dále pak posluchači mohou zkoumat závislost vizibility interference na dělicím poměru děliče svazku.

1 Než začneme:

- Zopakujte si základy popisu fotonových párů pomocí tzv. Fockova formalizmu.
- Seznamte se s pojmem dvoufotonová (HOM) interference.
- Zopakujte si základní vlastnosti děliče svazku, interference a vliv rozlišitelnosti na ztrátu vizibility.

2 Úvod k úloze:

Dopadne-li foton na dělič svazku, rozdělí se jeho vlnová funkce na dva příspěvky. První se šíří původním směrem, říkáme, že foton děličem prošel. Druhý příspěvek odpovídá možnosti, že se foton na dělič svazku odrazí. Kvantová fyzika předpokládá, že se obě možnosti realizují současně a ke kolapsu vlnové funkce a k volbě právě jedné z nich dojde až v okamžiku detekce. V situaci, kdy dva na sobě nezávislé fotony dopadnou každý na jeden vstupní port děliče svazku, mohou se realizovat celkem čtyři varianty. Oba fotony mohou projít, oba se mohou odrazit, nebo se první odrazí a druhý projde nebo naopak. K zajímavému jevu dojde v situaci, kdy jsou fotony navzájem nerozlišitelné (spektrálně, v polarizaci, ...). V takové situaci vede první možnost (oba projdou) i druhá možnost (oba se odrazí) ke kvalitativně shodnému výsledku: tím je přítomnost právě jednoho fotonu v každém výstupním portu děliče. Ukazuje se, že tyto dvě možnosti spolu mohou interferovat, protože se podle zákonů kvantové mechaniky odehrávají současně. Vzhledem k tomu, že při odrazu se mění fáze fotonů, bude příspěvek o dvou odrazech fázově posunutý a formálně změni znaménko. Výsledkem bude destruktivní interference, která zapovídá možnost, že bychom v každém výstupu našli jeden foton. Namísto toho se fotony tzv. shluknou a oba budou společně cestovat



Obrázek 2: Schematické znázornění čtyř možných výstupů dvoufotonové interference. Příspěvky vedoucí na koincidence se navzájem interferenčně vyruší.

jedním nebo druhým výstupem. Při měření počtu současných detekcí (koincidence) v obou výstupních ramenech bychom tak neměli naměřit žádný signál.

Z výše uvedeného vyplývá, že nezbytnou podmínkou naprostého vymizení koincidence je dokonalá nerozlišitelnost mezi fotony. To zahrnuje celkové sladění jejich polarizací, spektrálních vlastností, ale také shodný čas příchodu na dělič svazku. Dále pak je nezbytné, aby dělicí poměr děliče byl přesně 50:50. V opačném případě by výše uvedené čtyři možnosti mohli nabývat rozdílných amplitud a k maximální možné interferenci by nedošlo.

Při pozorování HOM interference postupujeme tak, že pomocí motorizovaného posuvu měníme dráhově zpoždění jednoho fotonu vůči druhému. Jsme tak schopni zajistit, aby tento na dělič dopadl dříve, ve stejnou chvíli i později oproti druhému. V situaci, kdy se fotony na děliči nesetkají, rozhodují se nahodile a s pravděpodobností 1/2 budeme pozorovat koincidence. V okamžiku, kdy se fotony setkají na děliči pozorujeme významný pokles pravděpodobnosti koincidence. Při měření moha realizací tohoto jevu můžeme získat statistiku, která nám umožní tento pokles vyhodnotit.

3 Zadání úlohy:

1. Nastavte shodné polarizace pro oba fotony a dělič nastavte tak, aby dělil co nejvíce vyváženě. V této konfiguraci pozorujte počty koincidence za jednotku času v závislosti na pozici motorizovaného posuvu. Obdržená data vykreslete, fitujte Gaussovskou funkcí a vyhodnoťte vizibilitu a pološířku obdrženého HOM dipu.
2. Měření podle předchozího bodu opakujte s tím, že fotonům nastavíte navzájem kolmé polarizace. Popište a komentujte pozorovaný výsledek.
3. Pomocí posuvu vysuňte dělič tak, aby se dělicí poměr výrazně znevývážil. Opakujte měření podle prvního bodu. Popište a komentujte pozorovaný výsledek.

TIP: Pro vyhodnocení naměřených koincidenčí jako funkce polohy využijte vyučujícím dodaný software.

4 Doporučená literatura:

- Hong, Ou, Mandel, Phys. Rev. Lett. 59, 2044–2046 (1987)
- http://en.wikipedia.org/wiki/Hong-Ou-Mandel_effect
- Michael A. Nielsen and Isaac L. Chuang, *Quantum computation and quantum information*, Cambridge University Press 2004.
- M. Dušek, *Koncepční otázky kvantové teorie*, Univerzita Palackého, Olomouc 2002.

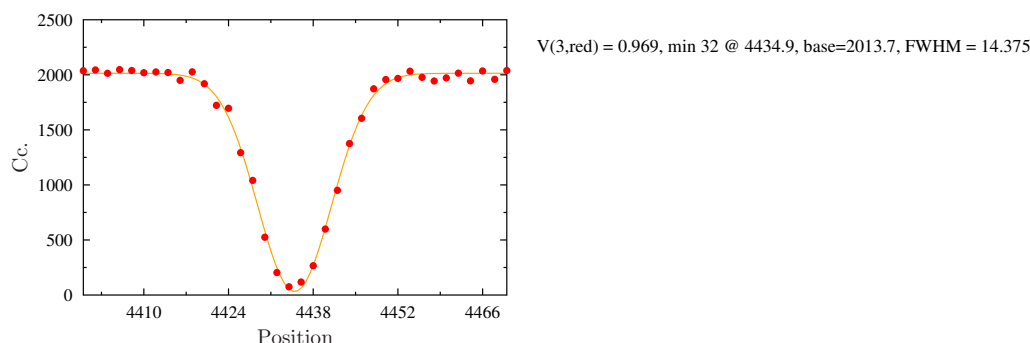
Úloha č. 2: Dvoufotonová interference (řešení)

Samotné experimentální práci předcházelo seznámení se s doporučenou literaturou a získání základních znalostí na základě teoretické přípravy vytyčené zadáním úlohy.

1 Úkol: HOM interference na vyváženém děliči

Nastavte shodné polarizace pro oba fotony a dělič nastavte tak, aby dělil co nejvíce vyváženě. V této konfiguraci pozorujte počty koincidence za jednotku času v závislosti na pozici motorizovaného posuvu. Obdržená data vykreslete, fitujte Gaussovskou funkcí a vyhodnoťte vizibilitu a pološířku obdrženého HOM dipu.

Podle zadání byl seřizen dělič svazku a sjednocena polarizace v obou vstupech děliče. Bylo provedeno měření počtu koincidence v závislosti na poloze motorizovaného posuvu. Výsledky jsou vykreseny v následujícím grafu. Obdržená vizibilita je 96,9%, šířka zářezu v půlce minima je 14,4 μm .



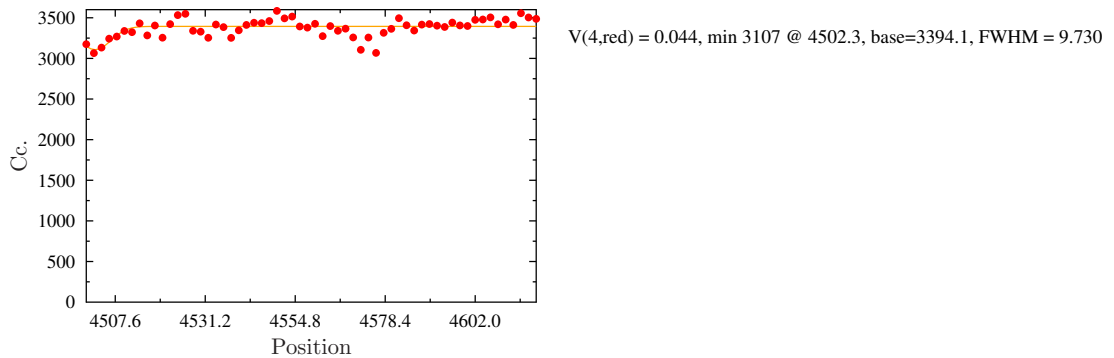
Obrázek 3: HOM dip pozorovaný při nastavení shodných polarizací a maximálně vyváženého děliče. Obrázek je přímým výstupem z dodaného software.

2 Úkol: HOM interference pro kolmé polarizace

Měření podle předchozího bodu opakujte s tím, že fotonům nastavíte navzájem kolmé polarizace. Popište a komentujte pozorovaný výsledek.

Byly nastaveny vzájemně kolmé polarizace pro oba fotony. Proběhlo měření jako v předchozím případě. Naměřené hodnoty nevykazovaly žádný

HOM dip. Vizibilita je tedy 0.



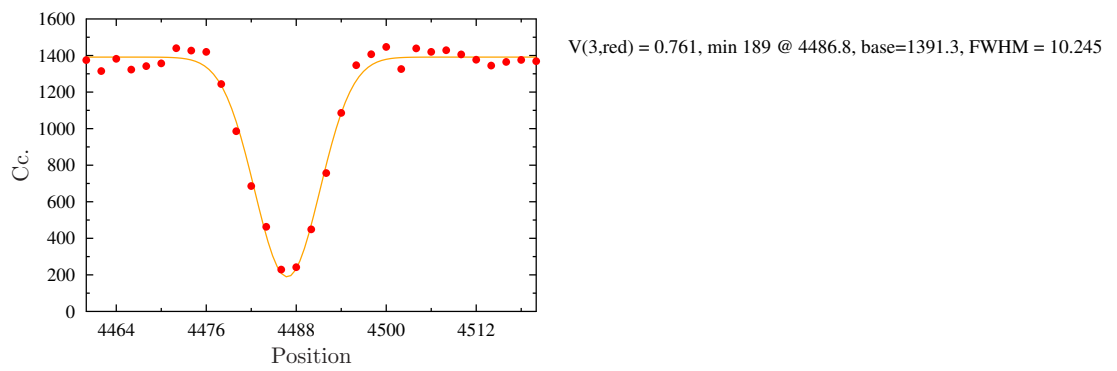
Obrázek 4: HOM dip pozorovaný při nastavení kolmých polarizací a maximálně vyváženého děliče. Obrázek je přímým výstupem z dodaného software.

Důvodem je fakt, že fotony jsou díky rozdílným polarizacím zcela rozlišitelné. Nenastane tedy interference, která by vedla k poklesu počtu koincencí za jednotku času.

3 Úkol: HOM interference na nevyváženém děliči

Pomocí posuvu vysuňte dělič tak, aby se dělicí poměr výrazně znevyvážil. Opakujte měření podle prvního bodu. Popište a komentujte pozorovaný výsledek.

Dělič byl vysunut tak, aby se pouze část odraženého svazku navázala až do detektorů. Bylo tak dosaženo nevyváženého dělicího poměru. Provedením měření podle bodu 1 byl opět získán HOM dip. Vizibilita je nyní 76,2%. Důvodem je fakt, že amplitudy procházející a odražené vlnové funkce jsou rozdílné a nedojde tak ke zcela destruktivní interferenci, ale pouze k částečné.



Obrázek 5: HOM dip pozorovaný při nastavení shodných polarizací a nevyváženého děliče. Obrázek je přímým výstupem z dodaného software.

Úloha č. 3: Tomografie kvantového stavu

Cíl úlohy:

Tato úloha seznamuje posluchače s tomografií dvoufotonového kvantového stavu. Každý foton nese jeden qbit informace kódované do jeho polarizačního stavu. Tomografie umožňuje určení dvoufotonového polarizačního stavu páru fotonů.

1 Než začneme:

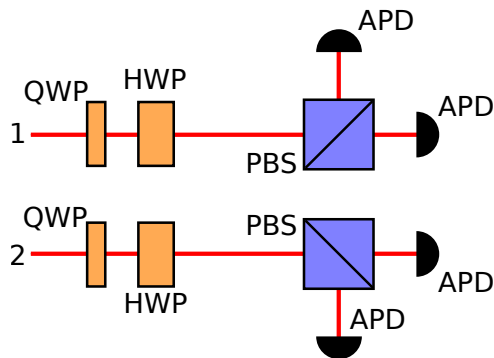
- Zopakujte si základy polarizační optiky a kvantové projekční měření.
- Seznamte se s pojmem tomografie kvantového stavu.
- Seznamte se s pojmem estimace kvantového stavu metodou maximum likelihood.
- Zopakujte si pojmy: polarizační stav, bázeový stav, kvantově provázaný stav.

2 Úvod k úloze:

Abychom byli schopni určit, v jakém stavu se nachází pár fotonů, je třeba provést jeho tomografii a následně pak estimovat kvantový stav. Informaci nese pár fotonů zapsanou do jeho polarizačního stavu. Je tedy třeba provést měření polarizace na obou fotonech. Navíc je třeba provádět měření na obou fotonech naráz, protože v případě, kdy bude kvantový stav páru fotonů provázaný, objeví se korelace mezi polarizacemi jednotlivých fotonů právě při společném měření.

Měření samotné probíhá následujícím způsobem pomocí experimentálního uspořádání vyobrazeném na obrázku 6. Pomocí dvojice čtvrtvlnných a půlvlnných polarizačních destiček umístěných ve dráhách obou fotonů lze transformovat polarizační stavy. Dále je pak zařazen polarizační dělič, který propustí pouze horizontálně polarizované světlo. Kombinace polarizačních destiček a polarizačního děliče umožňuje provádět projekce kvantového stavu obou fotonů do různých tzv. bázeových stavů.

Postupně jsou nastavovány všechny kombinace projekcí do následujících polarizací v obou ramenech: horizontální, vertikální, diagonální, antidiagonální, kruhová pravotočivá a levotočivá. Pro každou kombinaci je po určité době provedeno čítání koincencí a tato data jsou zaznamenána.



Obrázek 6: Schéma experimentálního uspořádání pro provedení polarizační tomografie.

Po provedení měření je použit estimační protokol, který metodou maximum likelihood z naměřených koincidencí určí polarizační stav páru fotonů. Výstupem tohoto software je matice hustoty, která zahrnuje všechny informace o zkoumaném kvantové stavu.

3 Zadání úlohy:

1. Po uvedení experimentálního uspořádání do provozu vám vyučující nastaví zdroj pro generaci kvantového stavu. Proveďte měření tomografie stavu pomocí vyučujícím dodaného software.
2. Předchozí měření opakujte pro další dva kvantové stavy zadané vyučujícím.
3. Pro všechny stavy realizujte estimaci a najděte matice hustoty.
4. Určete následující parametry matic hustoty: čistota, negativita entanglementu.

4 Doporučená literatura:

- Michael A. Nielsen and Isaac L. Chuang, *Quantum computation and quantum information*, Cambridge University Press 2004.
- M. Dušek, *Koncepční otázky kvantové teorie*, Univerzita Palackého, Olomouc 2002.
- J. J. Sakurai, *Modern Quantum Mechanics*, Addison Wesley 2003
- Ježek et al., Phys. Rev. A **68**, 01305 (2003)

Úloha č. 3: Tomografie kvantového stavu (řešení)

Samotné experimentální práci předcházelo seznámení se s doporučenou literaturou a získání základních znalostí na základě teoretické přípravy vytyčené zadáním úlohy.

1 Úkol: Měření kvantového stavu

Po uvedení experimentálního uspořádání do provozu vám vyučující nastaví zdroj pro generaci kvantového stavu. Proveďte měření tomografie stavu pomocí vyučujícím dodaného software.

Bylo provedeno měření podle návodu popsáném v zadání úlohy.

2 Úkol: Opakování měření

Předchozí měření opakujte pro další dva kvantové stavy zadané vyučujícím.

Měření bylo opakováno pro dva další kvantové stavy.

3 Úkol: Estimace matice hustoty

Pro všechny stavy realizujte estimaci a najděte matice hustoty.

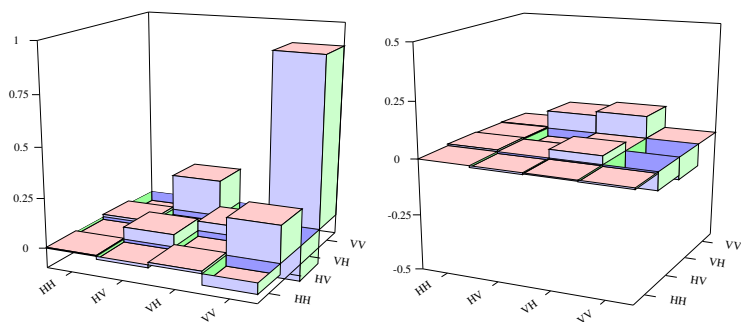
Matice hustoty byla estimována pro všechna tři měření. Grafické znázornění je uvedeno na obrázku 7.

4 Úkol: Určení parametrů kvantového stavu z matice hustoty

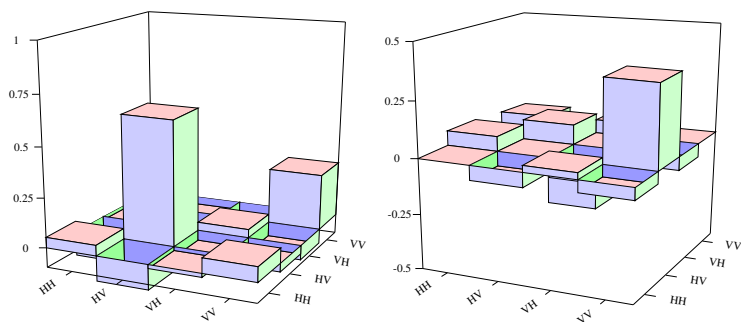
Určete následující parametry matice hustoty: čistota, negativita entanglementu.

Parametry kvantového stavu byly určeny a jsou seskupeny v tabulce 2.

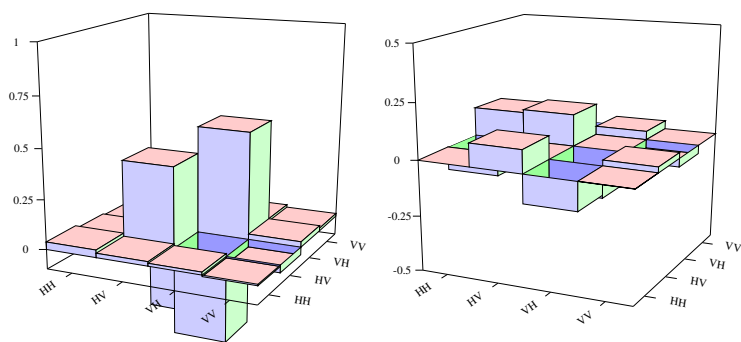
A:



B:



C:



Obrázek 7: Vyobrazení matic hustoty (reálná a následně imaginární část) pro všechna tři měření přímo pomocí software dodaného vyučujícím.

Tomografie	Čistota	Negativita
A	0.97	0.00
B	0.85	0.01
C	0.96	0.46

Tabulka 2: Tabulka shrnuje základní parametry estimovaných kvantových stavů.