



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Název projektu: Mezinárodní centrum pro informaci a neurčitost

Registrační číslo: CZ.1.07/2.3.00/20.0060

Zpráva z účasti na stáži

Datum konání stáže:	4.11.2013 – 8.11.2013
Navštívené pracoviště:	Albert Einstein Institute, Leibnitz Universität Hannover, SRN
Zahraniční garant:	prof. Roman Schnabel
Účastník stáže:	doc. Mgr. Jaromír Fiurášek, Ph.D.

Stručný popis navštíveného pracoviště

Max Planck Institut for Gravitational Physics (Albert Einstein Institute) Leibnizovy Univerzity v Hannoveru představuje špičkové vědecké pracoviště hrající zásadní roli při vývoji detektorů gravitačních vln. Hlavním posláním pracoviště je konstrukce, provozování a rozvoj detektoru gravitačních vln GEO600 tvořeného Michelsonovým interferometrem s délkou ramene 600 metrů. Dalším klíčovým dlouhodobým vědeckým projektem je příprava satelitní mise LISA, jež by měla umožnit interferometrickou detekci gravitačních vln pomocí trojice satelitů ve vesmíru. Vzhledem k výše uvedenému zaměření institutu se na tomto pracovišti uskutečňuje výzkum převážně v oblastech laserové fyziky, kvantové optiky, elektroniky a obecné teorie relativity.

Skupina profesora Romana Schnabela působící na Albert Einsteinově Institutu se dlouhodobě zabývá problematikou generace stlačených stavů světla a jejich využití pro zvýšení citlivosti interferometrických detektorů gravitačních vln. S touto problematikou souvisí i výzkum kvantových vlastností optomechanických oscilátorů reprezentovaných vibračními módy zrcadel optických rezonátorů. K dalším výzkumným směrům skupiny profesora Schnabela patří využití stlačených stavů světla pro optickou kvantovou komunikaci a kvantové zpracování informace a využití optických rezonátorů pro manipulaci světla na klasické i kvantové úrovni. Skupina profesora Schnabela čítá okolo 20 členů, převážně doktorandů a post-doků.

Průběh stáže

V průběhu stáže jsme se s profesorem Schnabelem a jeho studenty věnovali třem tématům, která jsou detailně popsána níže:

Generace a charakterizace jednofotonových stavů na vlnové délce 532 nm

Detailně jsme diskutovali a analyzovali výsledky aktuálního experimentu, kde byly podmíněně generované jednotlivé fotony na vlnové 532 nm, tj. ve viditelné oblasti optického spektra. Na tomto experimentu se podíleli zejména studenti Christoph Baune a Axel Schönbeck. V experimentu je použitý nelineární krystal umístěný v optickém rezonátoru a čerpaný kontinuálním laserovým svazkem o vlnové délce 532 nm. Tento systém tvoří nede degenerovaný optický parametrický zesilovač, který generuje dvoumódové stlačené světlo na vlnových délkách 1550 nm a 810 nm. Pro účely přípravy jednofotonových stavů je klíčové, že tento parametrický zesilovač operující pod prahem emituje korelované páry fotonů, jeden na vlnové délce 1550 nm a druhý na vlnové délce 810 nm. Fotony na vlnové délce 810 nm jsou detekované pomocí jednofotonového detektoru (křemíkové lavinové fotodiody). Detekce fotonu na vlnové délce 810 nm indikuje přítomnost fotonu v módu o vlnové délce 1550 nm. Tyto fotony jsou z telekomunikační vlnové délky 1550 nm up-konvertovány na vlnovou délku 532 nm pomocí procesu vzestupné frekvenční konverze v nelineárním krystalu čerpaném laserem o vlnové délce 810 nm.

Díky up-konverzi do viditelné části spektra je možné tyto podmíněně připravené jednofotonové stavy detekovat pomocí křemíkových lavinových fotodiód s poměrně vysokou kvantovou účinností (cca 50%). Během mého pobytu v Hannoveru jsme detailně diskutovali časovou distribuci podmíněně generovaných fotonů vzhledem k okamžiku detekce fotonu na vlnové délce 810 nm. Tato distribuce má přibližně průběh dvojité negativní exponenciální funkce, jejíž šířka je determinovaná primárně šířkou pásma optického parametrického zesilovače. Ta činí cca 10 MHz, čemuž odpovídá časová šířka okolo 100 ns. Bylo analyzováno, jak z naměřených dat korektně a efektivně stanovit pravděpodobnost jednofotonových a vícefotonových příspěvků, což je potřebné k charakterizaci implementovaného podmíněného zdroje jednofotonových stavů. Kolegům z Hannoveru jsem v této souvislosti objasnil metodu detekce a certifikace kvantově negaussovských stavů pomocí měření v Hanbury-Brown Twissově konfiguraci a zodpověděl jsem řadu dotazů týkajících se této metody. Ukazuje se, že tato metoda by měla být aplikovatelná na experimentální data získaná v Hannoveru, a toto bude předmětem dalšího společného výzkumu.

Emulace iterativní destilace kvantové provázanosti pomocí postselekce na experimentálních datech

Během mého pobytu v Hannoveru jsme dále detailně diskutovali plánovanou experimentální implementaci iterativního protokolu pro gaussifikaci dvoumódových kvantově provázaných stavů pomocí postselekce na experimentálních datech. Tomuto experimentu se věnuje doktorandka Daniela Schulze. Hlavní výhodou navrženého přístupu je to, že nevyžaduje kolektivní operace na několika fyzických kopiích kvantového stavu. Místo toho stačí provést měření na jednotlivých kopiích a následně vhodně zpracovat experimentální data. Tento experiment byl koncepčně navržen během mého předchozího pobytu v Hannoveru na podzim roku 2012 a v současné době se tento projekt dostal do finální fáze přípravy. Bylo rozhodnuto, že na obou módech bude provedena heterodynní detekce (tj. projekce na koherentní stav), protože toto měření je tomograficky úplné a umožní tak kompletně

charakterizovat výsledný gaussifikovaný stav. Emulace iterativního gaussifikačního protokolu bude provedena tak, že se vždy použijí data změřená na dvou kopiích kvantového stavu, a vhodnou lineární kombinací dat se bude emulovat interference těchto dvou kopií na vyvážených děličích svazku. Následně se na základě hodnot dat provede postselekce, tj. stanoví se, zda pro daný pár kopií stavu podmíněná gaussifikace uspěla nebo ne. Při úspěšné gaussifikaci se obdrží výsledky měření na jedné gaussifikované kopii stavu, které lze použít v další iteraci protokolu.

Tento protokol se bude testovat na dvoumódových stlačených stavech narušených náhodnými fázovými fluktuacemi. Tyto stavy jsou negaussovské a navržená procedura proto umožňuje destilaci kvantové provázanosti těchto stavů. Skupina profesora Schnabela má s destilací kvantové provázanosti těchto stavů dlouholeté zkušenosti, což umožní srovnání navrženého iterativního protokolu s výsledky předchozích experimentů, kde byla fyzicky implementována destilace ze dvou a tří kopií pomocí interference na děličích svazků a homodynní detekce. Navržená emulace by měla umožnit otestovat několik iterací gaussifikačního protokolu, což je prakticky nemožné uskutečnit přímou fyzickou implementací z důvodu vysokého počtu módů, příliš komplikovaného požadovaného multimódového interferometru a nízké pravděpodobnosti úspěchu. V diskusi jsme se mimo jiné dotkli i problematiky spektra fázového šumu, kdy může docházet k tomu, že šum aplikovaný na dvě časově sousledné kopie stavu je částečně korelovaný. Tyto korelace lze eliminovat tak, že se spárují vždy takové dvojice kopií stavů, které budou od sebe dostatečně časově separované. V této souvislosti jsem rovněž referoval o nedávném experimentu australské skupiny prof. P.K. Lama a jeho kolegů, kteří experimentálně demonstrovali emulaci bezšumného kvantového zesílení světla. Tento experiment vychází z teoretického návrhu, který jsem na konci roku 2012 publikoval spolu s prof. N.J. Cerfem, a který byl východiskem i pro návrh experimentu plánovaného v Hannoveru. Zásadním rozdílem v obou experimentech je to, že plánovaná demonstrace emulace gaussifikačního protokolu bude představovat emulaci kolektivní operace na několika kopiích kvantového stavu, zatímco experiment australské skupiny představuje emulaci kvantové operace na jedné kopii kvantového stavu.

Generace kvantové superpozice koherentních stavů světla na telekomunikační vlnové délce a ve viditelné oblasti optického spektra

Skupině profesora Schnabela se podařilo úspěšně experimentálně demonstrovat vzestupnou frekvenční parametrickou konverzi stlačeného světla, kdy stlačené vakuum generované na telekomunikační vlnové délce 1550 nm je s vysokou účinností konvertováno na vlnovou délku 532 nm. Tento experiment potvrzuje, že frekvenční up-konverze zachovává kvantovou koherenci mezi jednotlivými Fockovými stavy, a současně otevírá cestu k řadě dalších experimentů. Zejména je možné tímto způsobem implementovat podmíněnou subtrakci jednoho fotonu ze stlačeného světla na telekomunikační vlnové délce tak, že část signálu je nejprve frekvenčně up-konvertovaná a následně detekovaná vysoce účinnou křemíkovou lavínovou fotodiodou. Tímto způsobem je možné připravit silně neklasický stav světla s negativní Wignerovou funkcí, který velice dobře aproximuje superpozici dvou koherentních stavů. Další zajímavou možností je generace kvantově provázaného stavu dvou módů na různých vlnových délkách 1550 nm a 532 nm nebo frekvenční konverze silně neklasických stavů světla. V diskusi během mého pobytu jsme navrhli pořadí jednotlivých plánovaných experimentů, které zahrnuje i technologické aspekty jako je navýšení účinnosti frekvenční konverze stlačeného světla a dosažení silného stlačení cca 6 dB po vzestupné frekvenční konverzi.

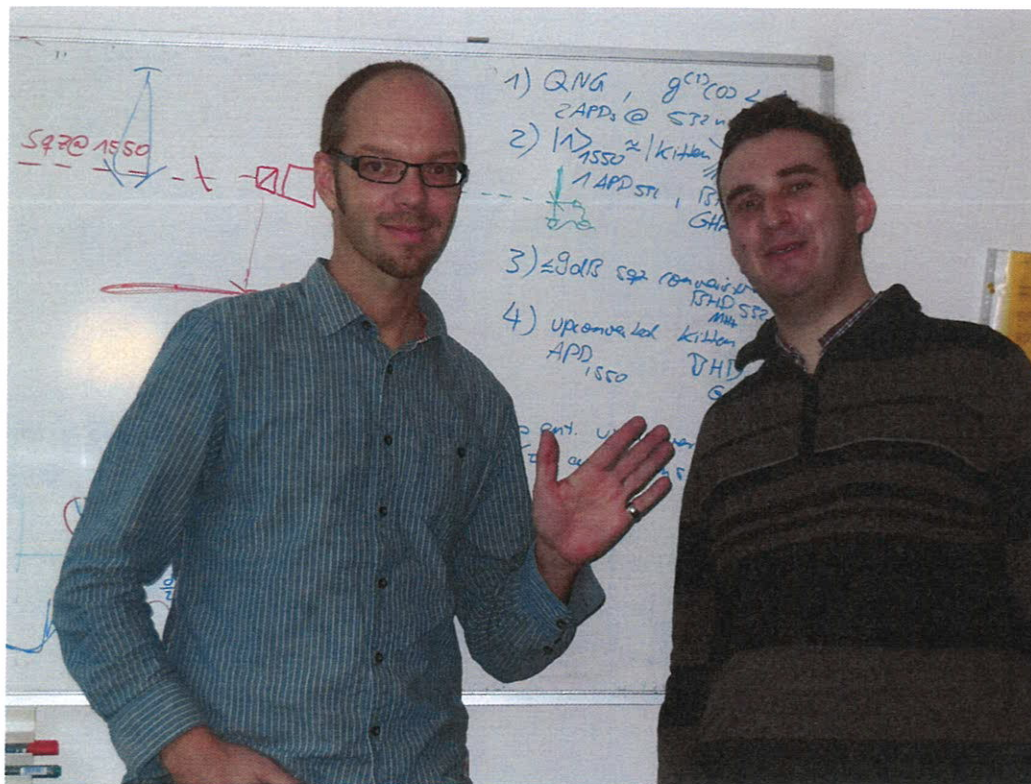
Shrnutí stáže

Stáž úspěšně navázala na mou předchozí stáž na tomto pracovišti, která se uskutečnila na podzim roku 2012 rovněž v rámci projektu MCIN. Bylo detailně analyzováno několik návrhů experimentů, které vznikly v mé spolupráci se skupinou prof. Schnabela a jejichž realizaci se nyní prof. Schnabel a jeho tým věnují. Během stáže jsem také kolegům v Hannoveru prezentoval aktuální vědecké výsledky dosažené na katedře optiky PřF UP týkající se efektivní charakterizace lineárně optické kvantové Toffoliho brány. Má stáž významně přispěla k výměně vědeckých poznatků a k prohloubení vědecké spolupráce se skupinou profesora Schnabela. Během stáže jsem získal řadu nových poznatků zejména v oblasti vzestupné frekvenční konverze stlačených stavů světla a podmíněné generace jednofotonových stavů s úzkým spektrem. Tyto a další poznatky budou dále předány cílové skupině projektu formou odborných seminářů.



Doc. Mgr. Jaromír Fiurášek, Ph.D.

Fotografická dokumentace



Docent Fiurášek a profesor Schnabel při plánování pořadí experimentů s vzestupnou frekvenční parametrickou konverzí a jednofotonovou detekcí.