

COMPITI E SUDDIVISIONE FONDI TRA LE UNITÀ DI RICERCA
prot. 2005023443

Coordinatore Scientifico	Luigi LUGIATO
Ateneo	Università degli Studi INSUBRIA Varese-Como
Titolo della Ricerca	Fasci gemelli in applicazioni di imaging quantistico e metrologia
Finanziamento assegnato	Euro 132.000
Durata	24 Mesi

Obiettivo della Ricerca

Il fenomeno dell'entanglement quantistico, che in passato veniva guardato come una sorgente di paradossi per la meccanica quantistica, e' ora divenuto l'elemento portante non solo degli studi sui fondamenti della meccanica quantistica stessa, ma specialmente per nuove applicazioni in campi come l'informazione e la comunicazione quantistica, l'imaging quantistico e la metrologia quantistica.

Il processo di conversione parametrica in frequenza (PDC) genera a livello microscopico coppie di fotoni segnale ed idler, che nel regime di elevato guadagno formano fasci gemelli. I fotoni/fasci gemelli esibiscono entanglement quantistico simultaneamente in energia, momento, posizione e, nel caso della PDC di tipo II, anche in polarizzazione. Queste proprieta' hanno fatto si' che i fotoni e i fasci gemelli divenissero uno strumento versatile e diffuso per applicazioni nei campi menzionati sopra.

Scopo di questo progetto e' investigare applicazioni dei campi gemelli nei campi dell'imaging quantistico e della metrologia quantistica.

L'imaging quantistico si propone di sfruttare la natura quantistica della luce e il parallelismo intrinseco dei fasci luminosi per identificare nuove tecniche di imaging ottico e di trattamento dell'informazione in parallelo a livello quantistico. In maniera simile, la metrologia quantistica identifica nuove applicazioni delle proprieta' quantistiche della luce nell'ambito metrologico.

Questo progetto combina il lavoro di due gruppi, di cui il primo (gruppo I) presso l'Universita' dell'Insubria a Como e il secondo (gruppo II) presso l'Universita' di Torino, con associato il laboratorio dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris (IENGF). Nonostante questi gruppi non abbiano ancora collaborato, hanno in comune una solida esperienza nel campo della conversione parametrica in frequenza e in particolare, nell'impiego delle proprieta' quantistiche dei fasci/fotoni gemelli. Questi due gruppi presentano qui un programma di ricerca comune, che include attivita' di tipo sia teorico-numeriche sia sperimentale, e si propone di introdurre progressi significativi nei campi dell'imaging quantistico e della metrologia quantistica attraverso una collaborazione intensa e sistematica.

Il gruppo I e' un leader mondiale nell'area dell'imaging quantistico, e ha giocato un ruolo fondamentale nella creazione del campo stesso, con numerosi studi di tipo pionieristico. Negli anni recenti, e' stato uno dei maggiori partecipanti del progetto FET QUANTIM (Quantum Imaging), ed in particolare ha collaborato a raggiungere la prima dimostrazione sperimentale di una correlazione spaziale a livello quantistico fra i fasci segnale e idler generati da un processo di conversione parametrica. Questo risultato giochera' il ruolo di seme per questo progetto. E' inoltre rilevante menzionare che il gruppo I ha coordinato il progetto PRIN del 2003 "Studio teorico di nuovi dispositivi basati sull'entanglement quantistico", e fa parte, come partner non finanziato, del progetto americano "Quantum Imaging: New Methods and Applications", che e' stato appena approvato dalla iniziativa MURI del DoD.

Il gruppo II ha raggiunto risultati di rilievo nelle prime investigazioni sui fondamenti della meccanica quantistica e nella metrologia e informazione quantistiche. In particolare e' un gruppo leader nello sviluppo delle tecniche di fluorescenza parametrica per la calibrazione di fotorivelatori di tipo analogico (coordinatore del progetto EU MERA). Con l'ausilio finanziario dell'INFN (progetto ENOS), del MIUR (PRIN 2002, FIRB RBAU01L5AZ-002), della Regione Piemonte e della Fondazione San Paolo (per piu' di 700 Keuro negli ultimi tre anni), il gruppo II ha preparato tre laboratori con sorgenti di fotoni gemelli, che sono stati usati per ricerche sui fondamenti della meccanica quantistica e sull'informazione quantistica.

Il progetto PRIN e' articolato in due parti, a cui corrispondono vari obiettivi.

Parte I: Applicazioni dei fasci gemelli all'Imaging Quantistico

Obiettivo 1: Rivelazione di immagini deboli con una sensibilita' oltre il limite quantistico standard.

Teoria e simulazioni numeriche: gruppo I.

Esperimento: gruppo II.

Obiettivo 2: Ghost Imaging con radiazione pseudo termica: rivelazione di un oggetto puramente di fase.

Teoria e esperimento: gruppo I

Obiettivo 3: Esplorazione della geometria dell'entanglement spazio-temporale (e dell'hyper-entanglement) nel processo di conversione parametrica.

Teoria e simulazioni numeriche: gruppo I

Parte II: Applicazioni dei fasci gemelli alla Metrologia Quantistica

Obiettivo 4: Calibrazione di fotorivelatori di tipo analogico usando le proprieta' quantistiche dei fasci gemelli.

*Teoria e simulazioni numeriche: gruppo I e gruppo II.
Esperimento: gruppo II.*

Innovazione rispetto allo stato dell'arte nel campo

Il processo di conversione parametrica in frequenza (PDC) grazie alle sue proprietà di entanglement/correlazione è divenuto nell'ultimo decennio uno degli strumenti più rilevanti nel campo dell'ottica quantistica. Negli ultimi anni l'uso della PDC in regime di alto guadagno, ove vengono generati molti fotoni che producono fasci segnale e idler entangled (fasci gemelli), ha aperto nuove possibilità per le applicazioni nominate sopra, ed, in particolare, per gli studi collegati alla formazione di immagini ed alla metrologia quantistiche.

L'imaging quantistico è un campo di ricerca nato relativamente da poco, che sviluppa idee e tecniche derivanti dai campi dell'ottica quantistica e non-lineare al fine di realizzare processi di formazione di immagini con una sensibilità e una risoluzione che superano quelle disponibili con l'uso di tecniche classiche. Inoltre consente la formazione di immagini "in assenza di interazione" come nel caso del ghost imaging. Le tecniche di imaging quantistico offrono inoltre opportunità significative nell'ambito dell'informazione quantistica in quanto il parallelismo intrinseco dei fasci ottici che trasportano le immagini aumenta la capacità di informazione.

L'obiettivo I di questo progetto esplora la possibilità di impiegare la correlazione spaziale di tipo quantistico che esiste fra i fasci gemelli prodotti nella PDC al fine di migliorare la sensibilità della rivelazione di immagini deboli. Come studi recenti hanno messo in luce, in applicazioni di imaging la differenza fondamentale fra l'uso dei fasci gemelli correlati quantisticamente e quello di fasci correlati classicamente consiste nel migliore rapporto segnale rumore (o visibilità) che può essere ottenuto con i fasci entangled. È quindi chiaro che le misure di alta sensibilità sono l'ambito ove i fasci entangled dovrebbero mostrare prestazioni superiori a quelle ottenute usando fasci correlati classicamente. Correlazioni quantistiche di fasci gemelli a singolo modo prodotti da un oscillatore ottico parametrico sono state utilizzate con successo per rivelare un segnale spettroscopico debole con una sensibilità oltre il limite quantistico standard. In questo progetto studieremo, per la prima volta, come impiegare la correlazione a molti modi fra i fasci gemelli prodotti da conversione parametrica in assenza di cavità per aumentare la sensibilità della misura di un debole assorbimento modulato spazialmente. Ciò può risultare di grande rilievo non solo per le misure di alta sensibilità, ma anche per l'imaging medico o biologico dove vi può essere necessità di illuminare un campione con luce a bassa intensità.

L'obiettivo II si propone la rivelazione di un oggetto puramente di fase tramite la tecnica di ghost imaging con fasci pseudo-termici. Tradizionalmente le tecniche di ghost imaging sono state implementate con coppie di fotoni entangled prodotti dalla PDC. Queste tecniche permettono di ricavare delle informazioni sulla distribuzione spaziale ignota di un oggetto posto nel cammino ottico del fotone segnale misurando la posizione di arrivo del fotone idler che non interagisce mai con l'oggetto. Per spiegare il protocollo è stata invocata la non-località della correlazione spaziale quantistica che esiste tra i fotoni gemelli. Tuttavia, più recentemente, il gruppo I ha mostrato che correlazioni classiche locali sono sufficienti per riprodurre tutte le caratteristiche rilevanti del ghost imaging con fasci entangled, con la sola eccezione del rapporto segnale-rumore. L'analisi teorica ha dimostrato che una radiazione con una statistica di tipo termico divisa da uno specchio semi-riflettente permette di implementare la tecnica di ghost imaging in modo del tutto analogo ai fasci entangled generati per conversione parametrica. In un esperimento recente il gruppo I ha implementato uno schema di ghost imaging dividendo la radiazione proveniente da una sorgente pseudo-termica. In questi esperimenti sono stati impiegati oggetti di ampiezza. Rimane ancora aperta la questione se sia possibile estrarre informazione da un oggetto puramente di fase usando della radiazione classica incoerente in uno schema di ghost diffraction. Mentre la teoria indica che questo dovrebbe essere possibile, un recente articolo (Abouraddy et al.) ha messo in discussione questa possibilità, sostenendo che l'entanglement dello stato quantistico dei fotoni gemelli generati per conversione parametrica sia un pre-requisito necessario per la realizzazione della ghost diffraction di un oggetto di fase. L'obiettivo II si propone di risolvere la questione e di realizzare il primo esperimento di ghost diffraction di un oggetto puramente di fase impiegando radiazione pseudo-termica incoerente.

L'obiettivo III è di natura più esplorativa, e avrà come scopo lo studio della geometria dell'entanglement spazio-temporale nella conversione parametrica in frequenza. Le proprietà di coerenza del campo elettromagnetico sono in genere descritte in termini di un volume di coerenza dato dal prodotto dell'area di coerenza, che governa la coerenza spaziale, e di un tempo di coerenza (moltiplicato per la velocità della luce), che governa la coerenza temporale. Nella conversione parametrica in frequenza, il volume di coerenza "naturale" è intrinsecamente spazio-temporale, a causa della natura delle condizioni di phase-matching nel cristallo non-lineare. La sua geometria nello spazio e nel tempo sarà l'oggetto della nostra analisi teorica, in quanto presiede all'entanglement spazio-temporale in questo sistema. Precedenti studi non avevano dedicato molta attenzione ai gradi di libertà temporali e alla loro connessioni con i gradi di libertà spaziali. Siamo ora convinti che un'attenta caratterizzazione e un controllo della geometria spazio-temporale dei modi entangled possa portare a un miglioramento della correlazione quantistica tra gradi di libertà puramente spaziali. D'altra parte, la presenza simultanea di entanglement nel momento lineare (vettore d'onda), nell'energia (frequenza) e nella polarizzazione dei fotoni è una conseguenza delle condizioni di phase matching nel cristallo e rappresenta una caratteristica distintiva del processo non-lineare di conversione parametrica, a cui spesso ci si riferisce come hyper-entanglement. È nostra intenzione esplorare come l'hyper-entanglement possa essere utilizzato per applicazioni future, come la misura di immagini policromatiche per mezzo di protocolli di ghost imaging, o la rivelazione di immagini di polarizzazione con una sensibilità che superi il limite quantistico standard.

L'obiettivo IV si propone di investigare le applicazioni dei fasci gemelli alla calibrazione di fotorivelatori analogici. Questo obiettivo verrà inizialmente perseguito con studi teorici svolti in collaborazione dal gruppo I e II. In particolare, verificheremo quale è lo schema più adatto per ottenere il risultato, e le caratteristiche richieste dell'allestimento sperimentale. L'esperienza acquisita dal gruppo I nella modellizzazione del processo di conversione parametrica avrà un ruolo importante nel determinare le caratteristiche più appropriate di uno schema di misura sperimentale. I risultati di questi studi guideranno la realizzazione sperimentale di questa parte del progetto. L'idea alla base di questa ricerca è di estendere le tecniche basate sulla correlazione PDC usate per la taratura di foto-rivelatori in

regime di conteggio, al regime di elevato guadagno dei fasci gemelli. Alcuni risultati preliminari suggeriscono infatti che ciò sia possibile. Tale risultato avrebbe grande rilevanza metrologica permettendo per la prima volta una taratura assoluta di rivelatori in regime analogico e consentendo inoltre di connettere il caso di regime di conteggio con quello analogico. Inoltre, questo schema, se realizzato, sarà utile al fine di ottenere una precisa taratura della camera CCD utilizzata nel primo obiettivo del progetto.

Criteri di verificabilità

I criteri di verificabilità sono i seguenti:

- 1) Raggiungimento di una parte sostanziale degli obiettivi I,II,III,IV, come descritto in dettaglio nel programma di ricerca.
- 2) Pubblicazione dei risultati in riviste internazionali ad elevato fattore di impatto.
- 3) Presentazione dei risultati in conferenze e workshops nazionali e internazionali.
- 4) Effettiva collaborazione fra i due gruppi, in particolare attraverso riunioni periodiche e reciproche visite di membri dei gruppi.

Elenco delle Unità di Ricerca

Sede dell'Unità	Università degli Studi INSUBRIA Varese-Como
Responsabile Scientifico	Luigi LUGIATO
Finanziamento assegnato	Euro 69.000

Compito dell'Unità

Parte I: Applicazioni dei fasci gemelli all'Imaging Quantistico.

Obiettivo 1: Rivelazione di immagini deboli con una sensibilità oltre il limite quantistico standard.

Investigazioni teoriche di principio del problema. Investigazioni teoriche e numeriche di uno schema di misura realistico, con modelli che tengono conto delle caratteristiche principali di un processo di conversione parametrica realistico, allo scopo di identificare lo schema di misura sperimentale più adatto.

Modellizzazione numerica dell'esperimento che verrà realizzato nel laboratorio del gruppo II.

Obiettivo 2: Ghost Imaging con radiazione pseudo termica: rivelazione di un oggetto puramente di fase. Teoria e esperimento.

Obiettivo 3: Esplorazione della geometria dell'entanglement spazio-temporale (e dell'hyper-entanglement) nel processo di conversione parametrica.

Studi di tipo teorico e numerico.

Parte II: Applicazioni dei fasci gemelli alla Metrologia Quantistica

Obiettivo 4: Calibrazione di fotorivelatori di tipo analogico usando le proprietà quantistiche dei fasci gemelli.

Investigazioni teoriche in collaborazione con il gruppo II. Supporto teorico e numerico all'attività sperimentale che verrà svolta presso il gruppo II.

Sede dell'Unità	Università degli Studi di TORINO
Responsabile Scientifico	Enrico PREDAZZI
Finanziamento assegnato	Euro 63.000

Compito dell'Unità

Parte I: Applicazioni dei fasci gemelli all'Imaging Quantistico.

Obiettivo 1: Rivelazione di immagini deboli con una sensibilità oltre il limite quantistico standard.

Collaborazione all'attività teorica svolta presso il gruppo I.

Realizzazione di un setup sperimentale di conversione ottica parametrica nel regime di elevato guadagno.

Realizzazione di uno scheme di misura per rivelare immagini deboli con sensibilità migliore del limite quantistico standard utilizzando le correlazioni spaziali dei fasci gemelli.

Parte II: Applicazioni dei fasci gemelli alla Metrologia Quantistica

*Obiettivo 4: Calibrazione di fotorivelatori di tipo analogico usando le proprietà quantistiche dei fasci gemelli.
Studi teorici in collaborazione con il gruppo I.
Attività sperimentale.*
