

## 自発的パラメトリック下方変換による量子もつれ光子対の生成と空間相関測定

宮崎 力 (光制御・ネットワーク研究室)  
(指導教員 小林 弘和 教授)

## 1. 研究背景

近年、量子もつれ状態にある2光子(光子対)を用いた量子イメージング技術の研究が盛んである。自発的パラメトリック下方変換(SPDC)と呼ばれる非線形光学効果によって生じる2光子が常に同時・同位置で生成されるという量子的な時間・空間相関を持つことを利用して、古典的なイメージングによる解像度や視野を超えることができる[1]。本研究では、各ピクセルに到達した光子数を識別できる光子計数カメラ(qCMOSカメラ)を用いて光子対を観測することで、光子対の空間相関を高速に測定する手段を確立し、量子イメージングに応用することを目的としている。本稿では、qCMOSカメラによって観測された光子対の2次元画像データから空間相関分布として光子対の有する波数相関が導出される結果について述べる。

## 2. Type-IIのBBO結晶を用いた2光子対生成

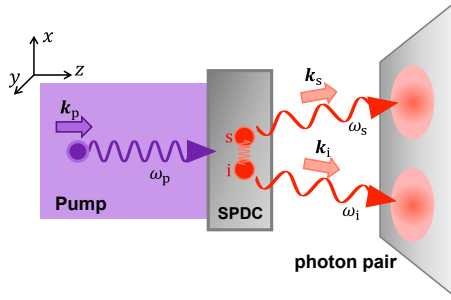


図1: BBO結晶内のSPDCによる光子対の生成過程

本研究では光子対が水平偏光と垂直偏光の2光子対で生成されるType-IIと呼ばれる非線形光学結晶として、ベータホウ酸バリウム(BBO)結晶を用いる。ポンプ光をBBO結晶に入射すると、結晶内部ではエネルギー保存と運動量保存が成り立つように光子対が生成される(図1参照)。ポンプ光と光子対の2光子(シグナル、アイドラーと呼ぶ)それぞれの角周波数を $\omega_p, \omega_s, \omega_i$ 、伝搬方向を示す波数ベクトルを $k_p, k_s, k_i$ とすると、エネルギー保存と運動量保存はそれぞれ

$$\hbar\omega_p = \hbar\omega_s + \hbar\omega_i \quad (1)$$

$$\hbar k_p = \hbar k_s + \hbar k_i \quad (2)$$

と書ける。式(1)から、生成されるシグナルとアイドラーのもつエネルギーの和がポンプ光と等しくなるため、ポンプ光の波長より長い波長の光子対が生成されることが分かる。式(2)から、シグナルとアイドラーの波数ベクトルの和が、ポンプ光の波数ベクトルと等しいことが分かる。 $k_p$ の向きをz軸とすると、波数ベクトルのx, y成分について

$$k_{sx} + k_{ix} = 0 \quad (3)$$

$$k_{sy} + k_{iy} = 0 \quad (4)$$

という2光子対の波数空間上での相関関係が得られる。

## 3. 2光子対の観測画像からの空間相関導出過程

図2に、画像取得から2光子間の空間相関を導出するまでの解析手順を示す。本研究では、2f光学系を用いて波

数空間上での光子分布を観測した。2f光学系とは、焦点距離fのレンズに対し、観測対象と観測場所をレンズの前後にそれぞれ距離fの場所へ設定することで、波数空間上での観測を可能にする手法のことである。取得されたシグナル光子とアイドラー光子の2次元分布画像は、y軸方向に沿って積算することで1次元分布へと変換される。得られた1次元分布同士の積から、各軸方向における空間相関を評価することができる。本研究では10000枚の画像を取得しており、導出した相関分布については平均化処理を施した。

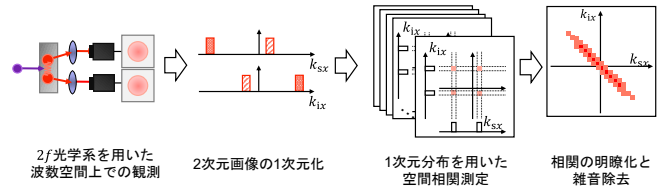
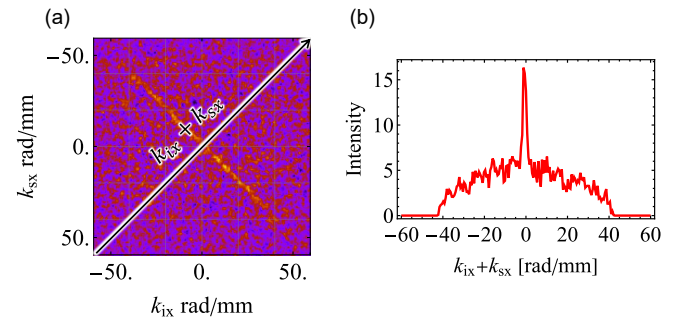


図2: 相関を得られるまでに必要な過程

## 4. 得られた空間相関分布と2光子対の有する波数相関

前節の手法を用いて、シグナル、アイドラー光子それぞれの画像から得られた空間相関を図3(a)に示す。図3(a)より、式(3)の、SPDCにおける運動量保存則から得られる2光子対の有する波数空間上での相関関係が、画像から導かれる平均空間相関から導かれた。この分布の相関方向を評価する方法がラドン変換であり、図3(a)を $k_{ix} + k_{sx}$ 方向へ積算した分布を図3(b)に示す。

図3: 2光子対の全撮影画像から得られた(a)相関分布 (b)(a)を $k_{ix} + k_{sx}$ 方向へ積算した分布

## 5. まとめ

SPDCによって生成される量子もつれ光子の有する波数相関をqCMOSカメラによって観測された画像から得られた空間相関分布として導出することができた。

## 参考文献

- [1] H. Defienne, M. Reichert, and J. W. Fleischer, Phys. Rev. Lett., 120, 2018.