

論文内容の要旨

論文題目：広帯域パラメトリック光子対の発生とその
微弱分光等への応用実験

Generation of broadband photon pairs and its application to absorption
spectroscopy and quantum key distribution

氏名 藪下 篤史

光の量子的な特徴を用いた非常に興味深い実験が近年盛んに行われるようになってい
る。それらはいずれも古典光学では実現不可能である物理的に興味深い実験である。また実
用的応用として、量子通信、量子計算などの分野に応用できる可能性があり、非線型結晶に
よる自発的パラメトリック下方変換(SPDC : Spontaneous Parametric
Down-Conversion)の過程で発生する光子対を用いた実験は特によく知られている。本論
文の研究でもこのSPDC光子対を用いる。SPDCの過程で生じる光子対はさまざまな
パラメータで絡み合う可能性があり、個々のパラメータを用いた多様な実験が可能である。

本論文では第一のテーマとして光子対の周波数の絡み合いを用いた実験を行う。周波数の
絡み合いをよくするため励起光源としてスペクトル幅の狭い連続波(Continuous
Wave :CW)レーザーを用いている。その周波数の絡み合った光子対を用いて吸収分光を行
うことを目的としているのだが、十分に広いスペクトル領域での測定を行うためには光子
対のスペクトルが広いスペクトル幅を持っていることが要求される。但し、逆にスペクト
ル領域を広げることで各波長当たりの光子数が減り測定に支障を及ぼす可能性もある。し
たがって、狭いスペクトル幅、広いスペクトル幅それぞれの周波数絡み合い光子対を発生
させ、分光測定を行った(図1)。

発生したSPDC光子対とともにSPDC光子対に変換されなかった励起光も同軸に進

むため、SPDC光子対のみの測定を行うためには励起光を除去せねばならない。発生する光子対が広いスペクトル幅を持つことを考慮しつつ励起光を確実に除去できるよう設計した光学系を図2に示す。

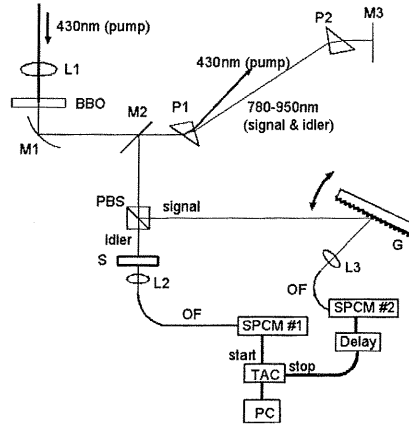


図1 実験に用いた自作相関分光系の概念図。L1はレンズ(焦点距離 100mm ないし 8mm)。BBOは type-II の BBO 結晶。M1は焦点距離 12.7mm の放物面鏡。P1、P2はプリズム。M2、M3は平面鏡。PBSは偏光ビームスプリッター。Gは溝本数 1400 本/mm の回折格子。L2、L3はレンズ(焦点距離 11mm)。OFは光ファイバー。SPCM#1、#2は単一光子計数装置。TACは時間電圧変換装置。Delayは遅延回路。PCはコンピュータ。Sは試料。

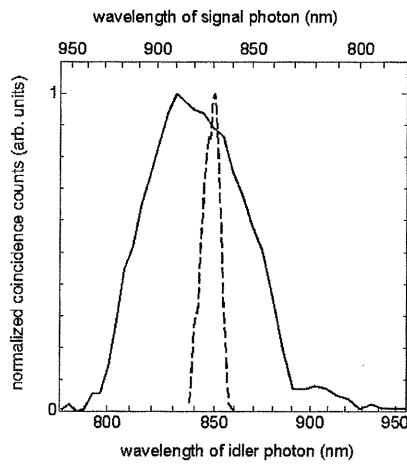


図2 回折格子の角度を回転させながら各点において 120 秒間の同時計数を測定して得られた同時計数スペクトル。励起光集光用レンズ L1として焦点距離 100~mm のレンズを使用した場合(点線)と焦点距離 8~mm の対物レンズを使用した場合(実線)。

実際にこの狭いスペクトルの周波数絡み合い光子対、広いスペクトルの周波数絡み合い光子対のそれぞれを用いて、Nd³⁺ドープガラスの吸収分光測定を行った。どちらを用いた測定においても、古典的分光法により測定された試料の吸収スペクトルと定性的にも定量的

にも合う結果が得られ、周波数絡み合い光子対を用いた分光測定法により正しい測定結果が得られていることが検証された。広いスペクトルの光子対により測定された吸収スペクトル(図3)においては特に試料の吸収ピークの形を反映した吸収スペクトルが測定されている。本実験は絡み合い光子対を用いた分光測定に成功した世界で初めての例である。

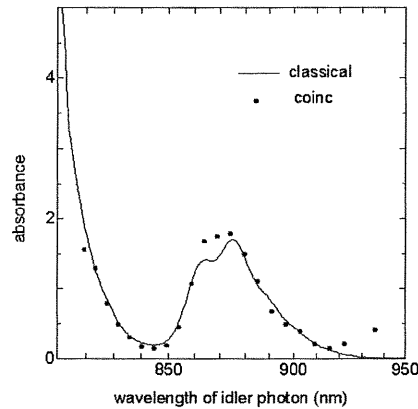


図3 広いスペクトル幅の周波数絡み合い光子対を用いて測定した試料の吸収スペクトル(黒点)と、古典的分光法により測定された試料の吸収スペクトル(実線)

周波数絡み合い光子対を用いた分光を応用できる場合として以下のようなことが考えられる。この方法論を用いた分光測定は、試料を透過した光子を分光することなくその試料の分光を行うことができるというところに大きな特徴がある。古典光源を用いた分光実験は、今までに無数になされているが、古典的手法が適用困難な下記のような状況においては、周波数絡み合い光子対を用いた手法は有効な手段となる。そのような例としては試料透過光の分光が困難である極限的環境下、例えば超高温超低温などといった環境下などにおいては、周波数絡み合い光子対を用いた分光が有利になることがあると考えられる。また赤外波長領域において光に対して脆い試料の分光を行うような場合には、古典的分光でも熱雑音の多い赤外波長領域の光検出器を使う必要があるが、周波数絡み合い光子対を用いた分光を行えば、光子対のうち片方の光子は他方の光子を検出する際の時間的なゲートとして働くためにその測定における信号雑音比は飛躍的に向上すると期待される。

周波数絡み合い光子対を発生させる際に非線形結晶としては **type-II** のものを用いていたが、これにより偏光の直交した光子対が発生していた。但し、周波数絡み合いを用いた実験では、直交した偏光を持つ光子対を効率的に1つずつの光子に分けるために、ビームスプリッタとして偏光ビームスプリッタを用いていたが、これは偏光の絡み合いを壊すため、偏光の絡み合いも用いる実験を行うためにはこれを無偏光ビームスプリッタに置き換える必要がある。さらに励起光と同軸に発生する光子対のみを取り出すアイリスを非線形結晶の後ろに配置した上で、信号光を波長分解した状態において信号光とアイドラー光の光子

が偏光において絡み合っているかどうかの検証実験を行った。その実験系を図4に示す。

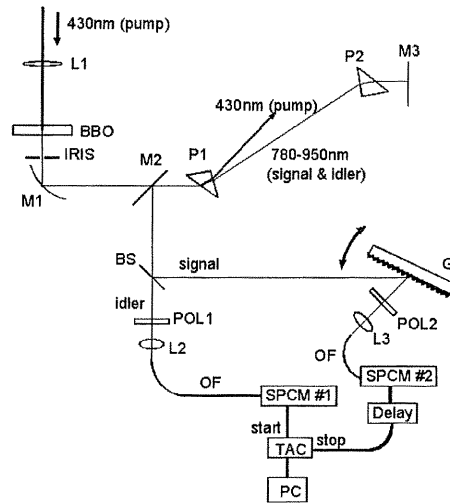


図4 波長分解した光子対の偏光絡み合いの測定系。POL1、2は偏光板。BSは無偏光ハーフビームスプリッタ。IRISはアイリス光学絞リ。その他の記号については図1に同じ。

その結果、偏光板POL1の角度を0度にして同時計数を測定した際に同時計数が最大になるPOL2偏光板の角度は、POL1の角度を45度にして測定した際に同時計数が最大になるPOL2偏光板の角度と差異を持つ結果が得られた(図5)。これは光子対が偏光において絡み合っていることを示している。この実験結果により、光子対を波長分解したあとにおいても光子対が偏光の絡み合いを持っていることが示された。これはBBM92プロトコルを用いた量子暗号鍵配送を周波数(波長)多重で行う際の光源として応用できると考えられる。

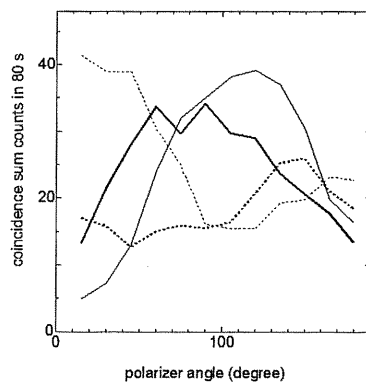


図5 信号光側の偏光板POL2が0度(細線)、45度(太線)、90度(細い点線)、135度(太い点線)であるときの偏光の相関を同時計数により測定したデータ。横軸はアイドラー光側の偏光板POL1の角度。