



研究ノート

光子統計とその応用

鈴木 範 人*

1. はじめに

古来、光はあるときは波動として、あるときは粒子として扱われて来たが、そこでの粒子のイメージは素朴な粒というイメージであった。レーザーの発明に前後して素朴な粒子というイメージでは説明できない現象が見付けられ、光の粒子の再検討がはじめられた。その現象というのは光を二つの光路に分割し、二個の検出器で分割された光の光子を検出し、光子の相関の観測を行った場合、ふくらみが見られるという現象である。光の粒子、光子は分割に際し二つに割れるということは決してなく、どちらかの光路を取る。どちらかの光路を取った別々の光子の間に偶然相関以外の相関、すなわちふくらみがあるということは、光子は塊になってやって来る傾向があると解釈する以外解釈のしようがなく、光子の本質的な性質としてその統計性の研究が始められた。この傾向は光子バンテングと呼ばれている。

光子バンテングすなわち光子の統計性は光の様子、たとえばスペクトルの形状を強く反映しており、光子の統計的なふるまいを観測することにより、入射光のスペクトルの形状等を知ることができる。つまり、光学的な分光器を用いなくて分光測定を行うことができる。

ここで光波の振巾という量と光子数という量の関係について考える。

振巾が大きい光は強い光であり光子数が多いことを意味するが、それだけでは光波の振巾と光子数の関係がわかったことにはならない。そこで、振巾が一定の光の、いわゆるコヒーレント光の光子数を考える。振巾が一定の光の一定時間内の光子数をくり返して測定したとき、測

定値は決して一定値にならず、測定の度ごとに異なる。観測時間 T 内の計数値が n 個であるという光子計数確率分布を $P(n, T)$ とすると、振巾が一定の光の場合には $P(n, T)$ は T に無関係にポアソン分布となる。

次にいわゆるインコヒーレント光の光子数について考える。この光の振巾は一定ではなく、ある振巾を持つ確立分布はガウス形になるのが普通である。インコヒーレント光の場合、光子計数確立分布は観測時間によって変化し、観測時間が非常に小さい場合には分布はボーズ分布となり逆に観測時間が非常に長い場合にはポアソン分布となる。観測時間が長いとか短いとかいうのは、光のコヒーレンス時間すなわちスペクトル巾の逆数に比較しての話である。従って観測時間を変化させて光子計数確率分布を求め、それがポアソン分布からボーズ分布に変化して行く様子を知れば光のスペクトルを知ることができることになる。さらに分布の形そのものの代りに分布の形を表わす量、例えば分布の高次のモーメントといった量を用いると便利である。特に便利なのはファクトリアルモーメントと呼ばれている量であり、2次のファクトリアルモーメントはポアソン分布では1であるが、ボーズ分布では2となるので、観測時間を適当な値に設定し、光子計数確率分布を測定し、そのモーメントを求め、モーメントの値が2と1の間でどのような値になるかを知ればスペクトル巾が求められる。複雑なスペクトルに対しては、観測時間を変化させ、モーメントと観測時間の関係曲線を作れば、そこからスペクトルの形状を読みとることができる。

以上のやり方の他に、光子相関々数を測定することによってスペクトルを求める方法がある。光を受光し、光子に対応した光電流パルスをもつ二つの路にわけ、一方の路のパルスを遅延さ

*鈴木範人 (Norihito SUZUKI), 阪大工, 応用物理教室, 助教授, 工博, 光学, 分光学

せ、遅延させた後、他の路のパルスと掛け合すことにより光子相関々数が測定されるが、得られた相関々数はスペクトルをフーリエ変換したものになっている。前述の二個の検知で光子相関を求めた際のふくらみは、実はスペクトルをフーリエ変換したものに相当しているわけである。光子相関々数を測定する方法では、測定結果とスペクトルが直接フーリエ変換で結ばれており、光子計数確率分布から求める方法と比較すると結果がはるかに直観的であるという特長を有するが、高速の処理は困難であるという欠点を有している。

光子統計を用いてスペクトルの形状を求める分光法は光学的な分光器で測れないような微細な構造の測定に適している。例えばレーザー散乱スペクトルのうち、レーザ散乱スペクトルと呼ばれているスペクトルは、散乱体の大きさの測定に用いることができるが、そのスペクトルの中は微細で光子統計を用いた分光法の格好の対象となっている。また、スペクトルの測定以外にも光子統計的な考え方が活用されるであろう分野は狭くない。以下筆者の行っている応用に関する研究を応用例として挙げる。

○ 白内障の早期発見への応用

眼水晶体内には蛋白質があり、これの凝集が進むと白内障がおこるとされているが、元来、この蛋白質粒子は光の波長に比して非常に小さく、また、白濁が見られるためには散乱体の大きさが光の波長程度でなければならないことから、相当数の蛋白質粒子が集まり凝集が進んで初めて発見されるという事情にあった。それに対し、散乱光のスペクトル巾を指標とし散乱体の大きさを知ることになると、散乱体の大きさが光の波長に比して準常に小さくても、その大きさを知ることができるので、白濁化の見られるはるか以前における少数の蛋白質粒子の凝集の様子を知ることが可能である。光子相関によってスペクトル巾を観測することにより、凝集のおこり始めた時点を把握する事ができる事が実験的にも確かめられている。

○ 極紫外スペクトルの超微細構造の測定

波長200 nm以下の光を極紫外光と呼ぶが、波長の短い光の分光は凹面回折格子による外はなく、凹面回折格子の分解能は高くないことから、スペクトルの微細構造の測定は極めて困難であり、その測定法の開発がのぞまれていた。そこで光子統計を用いる方法の活用がのぞまれるが、極紫外スペクトルのコヒーレンス時間は極めて短いので、そこでは極めて高速の光子統計処理装置が必要となる。一方、近年ピコ秒に近い高速で測光を行い得る装置が開発され、極めて短い観測時間内の光子数を計数し、光子計数確率分布を求め、極紫外スペクトルの形状を知ることが不可能ではなくなって来た。しかし、ここでは、必要とされる高速性から、光子相関を用いることは許されないのである。

○ 光通信と光子統計

光は本質的に粒子であり、光通信においても信号を担うものが粒子の集団であることから、通信の誤り率の検討を光子統計の見地から行う必要がある。通信用の光源としては、半導体レーザーやLEDがあるが、半導体レーザー光のスペクトル巾や光子統計的な性質の把握は現在十分には行われていない。例えばスペクトル巾については数 MHz という説、数十 KHz という説があるが、光子相関を利用した測定では数 Hz という結果を得ている。光通信の媒質である空間や光ファイバーに関しては、空間の屈折率のゆらぎや光ファイバーの光の分散現象が光子の統計的性質にどのような影響を与えるかという問題も今後検討を要する問題である。光通信における光子の統計性がどのようなものであり、それが誤り率にどのような影響を与えるかといった事は GHz 近くの出来事であると考えられることから、統計量の測定には前述の極紫外分光のための装置のような高速の測定装置が必要となる。

以上光子統計の一端、応用の一部について述べたが、観測技術の進歩に応じ、応用分野は、合成、生体高分子の分野、反応の動的解析の分野、光通信の分野等に亘り広いものになるであろうと考えている。