

量子消去系に潜む幾何学的位相

量子力学はしばしば非常識な現象を我々に提示する。粒子と波動の二重性はその最たるものである。この性質は、光子や原子、電子のようなミクロな物体（量子）が、あるときは粒子として振る舞い、あるときは波動として振る舞うというものである。この二重性を示す実験がよく知られたダブルスリット実験である。ここでは量子の例として光子を考える。図 1(a)のように、1 個の光子をダブルスリットに入射し、遠方のスクリーン上で観測すると、1 個の輝点を生じる。個々の輝点はスクリーン上の様々な位置で観測されるが、多数の輝点を集積すると、明確な干渉縞が現われる。これは 1 個の光子が波として振る舞い、二つのスリットを同時に通り抜け、自分自身と干渉した結果である。しかし、このような干渉縞は我々が光子の経路（どちらのスリットを通ったのか）をのぞき見た瞬間に消えてしまう[図 1 (b)]。粒子的な性質である経路情報を得たことにより、波動的な性質である干渉が損なわれてしまうのである。このように干渉と経路情報は互いに相補的な関係にある。では干渉の出現を妨げる経路情報を消してしまえばどうなるだろうか。この場合、量子は波動性を取り戻し、干渉縞が再び現われる[図 1(c)]。このような経路情報の消去というアイディアは Englert と Scully により提案され、「量子消去」と名付けられた。

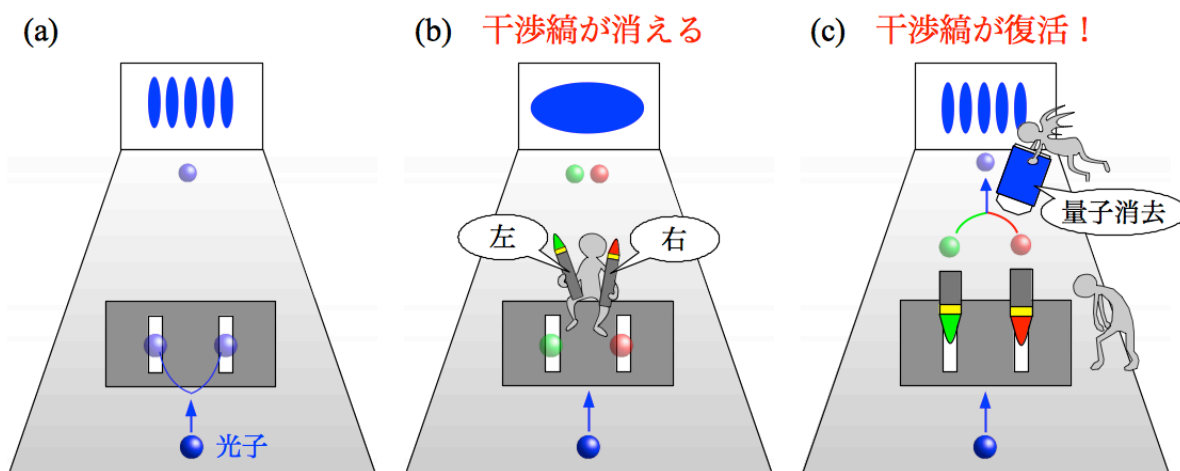


図 1. 量子消去の概念図。(a) ダブルスリット干渉計。(b) 経路の判別による干渉縞の消失。(c) 量子消去による干渉縞の復活。

最近、京都大学工学研究科電子工学専攻のメンバーから成る研究グループは、光の偏光を利用した量子消去の実験を行ない、そこに現れる「幾何学的位相」と呼ばれる位相シフトとの関係を明らかにした。幾何学的位相は量子的な状態変化に伴う付加的な位相シフトで、1984年に Berry により提案された概念である。光学の分野では偏光の状態変化に伴う位相として Pancharatnam による先行研究が行なわれていた。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2011 年 3 月号に掲載された。

図 2 が提案された実験系と CCD で観測された結果である。ダブルスリットの代わりに細線を使用し、その右側を通った光と左側を通った光が干渉する。図 2(a)のように細線の両側に直交する速軸を持った 2 枚の 1/4 波長板を設置し、45° 偏光の光を入射すると、細線の右

側では右回り円偏光、左側では左回り円偏光となる。もし我々に円偏光の極性を区別できる目があれば、細線のどちら側を光子が通過したのかを判別できてしまうため、干渉縞は消失してしまう。偏光の状態が経路情報をもたらしてくれるのである。しかし、図 2(b)のように細線の後ろに 2 枚目の偏光板を設置すると、右回りと左回りの円偏光は同一の直線偏光になってしまうため、もはや光子の経路を判別することはできなくなり、干渉縞が復活する。2 枚目の偏光板が量子消去を行ない、経路情報を消し去ったのである。ここで注目すべき点は、量子消去を行なう偏光板 2 の角度 θ_2 の値に依存して、復活した干渉縞の山の位置がずれていることである。このずれは経路情報を得るための円偏光が量子消去により直線偏光状態に変化したために生じるもので、幾何学的位相と呼ばれる。幾何学的位相の持つ興味深い性質として、非線形な変化が挙げられる。特に偏光板 1 の角度を 45° から非常に小さい角度に設置しなおすと、幾何学的位相は θ_2 の変化に対して非常に敏感になる。これは干渉縞の急激な移動として実際に観測されている。

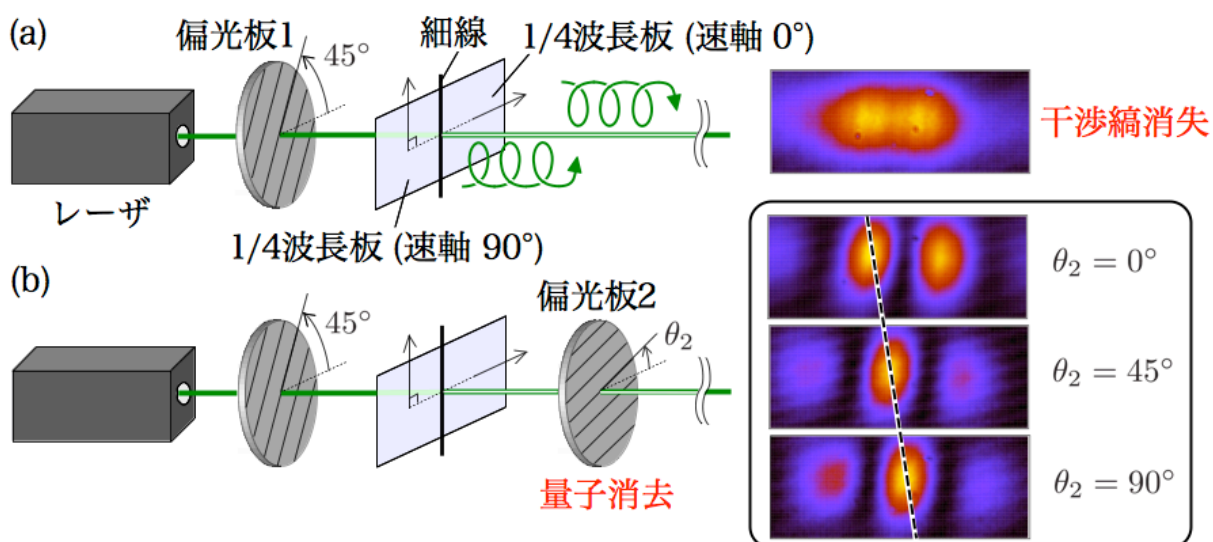


図 2. 光の偏光を用いた量子消去の実験系。(a) 右回りと左回りの円偏光で経路が識別されるため干渉縞は消失する。(b) 偏光板 2 を挿入すると干渉縞が復活する (量子消去)。

提案された実験系はダブルスリット干渉計を用いた非常にシンプルな構成であるが、経路情報による干渉縞の消失、量子消去による干渉縞の回復、幾何学的位相とその非線形性といった量子論の基礎に関する効果や概念を直接確認できるという意味で非常に重要な実験系である。また最近になって幾何学的位相の急激な変化を利用した高感度測定が応用として考えられている。

論文掲載誌 J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) No.3, p.034401

電子版 <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/80/034401> (2月25日公開済)

<情報提供：小林 弘和 (京都大学大学院工学研究科)

北野 正雄 (京都大学大学院工学研究科) >