

学 位 論 文 題 名

Collective Manipulation of Quantum Entangled States

(量子エンタングルメント状態の集成的操作)

学位論文内容の要旨

情報とはいったい何であるか、という問いは科学における基本的な問題の一つです。情報は抽象的な概念であり、数学的な手法のみによって研究されると思われがちです。しかし実際には、情報は実在の物理系の状態として表わされ、情報の処理はその物理系の時間発展として記述されます。その系を支配する物理法則が、情報の性質についてある種の制約を課しているということが考えられます。したがって、情報というものの本質を理解するためには、物理学的な視点から研究することも必要となります。つまり、はじめに述べた問いに答えるためには、情報の物理学というものが必要となるわけです。

従来の情報の概念は、異なる状態を見分けることによって何らかの知識を得ることに関係しています。ここでいう状態とは、実際には古典物理学によって記述される系で表される状態をいいます。(簡単な例としては、コイン投げがあげられます。コイン投げをして、表が出る状態と裏が出る状態を見分けることによって、どちらの結果が出たかの情報が得られます。)したがって、従来の情報の概念は、古典物理によって支配されているといえます。このような情報を、古典情報と呼びます。

しかし、この世界は基本的には量子力学によって記述されるため、量子状態によって表わされた情報というものも考えられます。通常物理学でよく知られているように、量子系は古典系とはまったく異なったふるまいを示すため、量子系によって表わされる情報というものは、古典情報とはまったく違った性質を持つのではないかと期待されます。量子状態によって表される情報を量子情報と呼ぶのですが、近年、量子情報理論の研究が急速に発展しています。量子情報の重要な担い手の一種に量子エンタングルメント状態という特殊な量子状態が存在するのですが、本研究は、量子エンタングルメント状態の新たな性質を明らかにしました。

古典情報の最小単位は、0か1を表わす1ビットですが、量子情報の最小単位というものはこれをさらに拡張したものとなっています。例えば電子のスピンを考えて、スピナップで $|0\rangle$ を、スピンドアウンで $|1\rangle$ を表わすことにします。そうすると、この2つの基底の任意の重ね合わせを考えることにより、 $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ ($|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$) という状態をつくることができます。これが量子情報の最小単位で、キュービットと呼ばれています。キュービットをたくさん用意して、重ね合わせ状態で表わされた量子情報に対して、ユニタリー変換や観測操作などを施すことによって情報処理を行うのが量子情報処理です。

量子テレポーテーションや量子計算などの量子情報処理では、量子エンタングルメント状態をうまく利用することが重要な鍵となります。量子エンタングルメント状態というのは、2つ以上の系からなる合成系の特殊な量子状態で、各部分の状態の積としては表わせないような状態のことです。最も有名なエンタングルメント状態は $\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle_{AB} + |11\rangle_{AB})$ であり、この状態は、EPRのパラドックス以来、量子力学の基礎に関する研究において非常に重要なものでした。Bellの不等式の証明などを通して、エンタングルメント状態に関する多くの研究がなされてきましたが、

量子テレポーテーション等の発見によって、エンタングルメント状態が単に量子力学の奇妙な一面を映し出すだけでなく、情報処理を行うための重要な資源として認識されるようになりました。それ以来、エンタングルメント状態の基礎的な性質に関する研究が数多く成されてきました。

その中でも重要な結果の1つは、エンタングルメント状態を定量的に扱うための理論が作られたことです。エンタングルメント状態にもいろいろな形のものがあり、各エンタングルメント状態がどの程度エンタングルしているのかを定量的に示す、エンタングルメント・メジャーというものが定式化されました。大雑把にいうと、エンタングルメントの量が多い状態の方が、量子情報処理において有用だということです。

エンタングルメント状態を量子テレポーテーションのような量子通信などに利用する場合、エンタングルメントした2つの系は必然的に、離れた場所にいる送信者と受信者によって別々に所有されています。したがって、エンタングルメント状態に何か変換を施そうとする場合には、両方の系にまたがる大局的なユニタリー変換は施せません。それぞれの系に施す局所的なユニタリー変換や観測操作と、その観測結果をお互いに伝え合うための古典的な通信が利用できるだけです。このような局所的な操作と古典通信のみを使えるということが、エンタングルメント状態の基礎的な性質を研究する際に、重要な枠組みとなります。

局所的な操作と古典通信という枠組みのもとで、あるエンタングルメント状態を他のエンタングルメント状態に変換する場合は、エンタングルメントの量が必ず減少してしまう、という事実がエンタングルメントの重要な性質として知られています。

本研究では、ある工夫をすることによって、エンタングルメントの減少分を部分的に回収する方法が存在することを示し、さらにその結果から、エンタングルメントの新たな性質を明らかにしました。

エンタングルメントというのは量子情報処理において非常に重要な資源であり、できるだけ減少するのを抑えたいと考えるのは自然なことです。そこで、あるエンタングルメント状態を変換するとき、それとは別にもう1組のエンタングルメント状態を用意します。そして、その2組に対して集合的な操作をすることによって、本来行いたかった変換を行いながらも、そこで減少してしまったエンタングルメントをもう1組のペアが部分的に回収できることを示しました。受け皿となった、もう1組のエンタングルメント状態が回収したエンタングルメントは保存しておいて、それらをたくさん集めることによって、あとでまた、テレポーテーション等に使うことができます。

このように、エンタングルメントの回収が可能であることがわかったわけですが、このことを別の視点から見ることにより、エンタングルメントの新たな基本的な性質が明らかになりました。一方のペアが失ったエンタングルメントを、もう一方のペアが回収するということは、見方を変えれば、一方のペアから他方のペアにエンタングルメントを転送するというふうに見ることもできます。そのような視点で、上で述べた回収が可能であるための条件を見直すと、エンタングルメントの転送可能性が、実は、どれだけエンタングルメントを送り出されたかではなく、受け手の方のペアがどれだけエンタングルしているかということのみに依存することがわかりました。これは非常に直観に反する現象であり、エンタングルメントという量が、通常の物理量とは大きく異なる性質を持っているということです。また、エンタングルメント・メジャーの概念では説明のつかない新たな性質の存在を示したこともなります。

以上のように、本研究では、局所的な操作と古典通信の枠組みで、エンタングルメントが回収可能であるための条件を求めました。さらにその結果として、エンタングルメントという量が、通常の物理量とは非常に異なる性質を持つことを明らかにしました。

びに量子情報理論に貢献するところ大なるものがある。
よって著者が北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。