

論文審査の結果の要旨

氏名 中 田 芳 史

中田芳史氏は本論文において、量子情報理論の分野で二つの新しい提案をしました。一つは、ヒルベルト空間内の量子状態のアンサンブルとして、位相のみをランダムに分布させる「位相ランダム状態アンサンブル」の提案です。もう一つは、測定ベースの量子計算に用いる状態を準備するために、強相関多体系のハミルトニアンを用いる提案です。いずれも量子情報理論における非常に基本的な提案であり、それらが果たして有意義な提案であるかどうかは、提案そのものだけでは直ちに明らかではありません。

しかるに、特に二つ目の提案については、その後の研究で著しい有用性が確認されています。また、一つ目の提案についても、カノニカル分布に関する議論や、現在の実験技術による量子情報処理プロトコルの実用化において今後の発展が大いに期待できます。いずれの提案も新しいトピックを作り出す礎となる重要性を持っており、本論文が物理の発展に寄与した重要な成果です。

本論文は4部構成になっています。第1部の第1章では論文全体を概観し、同第2章では量子情報理論の基礎を手際よく概観しています。第2部と第3部が本論文の主要提案を述べている部分です。第4部の第8章と第9章は、それぞれ第2部と第3部のまとめを記述しています。以下で第2部と第3部について、より詳しく述べます。

第2部は「位相ランダム状態アンサンブル」の提案のための第3章・第4章・第5章から成っています。まず第3章では従来のランダム状態アンサンブルを概観し、いよいよ第4章において位相ランダム状態アンサンブルを提案しています。第5章では位相ランダム状態アンサンブルを発生させるための量子回路を議論しています。

従来から考えられていた量子状態のアンサンブルである「ランダム状態アンサンブル」は、ヒルベルト空間内に一様に分布しています。それに対して、中田氏が提案した「位相ランダム状態アンサンブル」は、位相のみが分布している状態群です。これは、ある特定の初期状態に対する時間発展上に現れる状態のアンサ

ンブルと考えることができます。中田氏は、位相ランダム状態のエンタングルメントが初期状態の振幅の分布にどのように依存するかを明らかにしました。そこから、量子多体系の数値計算によく用いられる行列積状態が、実際にはどのような場合に有用であるかを示唆しました。また、従来のランダム状態アンサンブルでは、その中の典型的な状態が部分空間でカノニカル分布を与えることが知られていますが、中田氏は位相ランダム状態アンサンブルにおいて同じことが起こるための十分条件を具体的に導きました。

中田氏はさらに、既存の実験技術を用いて効率的に位相ランダム状態を近似生成できることを証明しました。これを用いて、多くの量子情報処理で使われるランダム状態を容易に生成でき、また量子シミュレーター内で熱平衡状態が実現可能であることも示しました。この方法は現在の実験技術で実装可能であり、量子情報処理の実用化の観点から量子情報理論の進展に大きく貢献しています。

第3部は測定ベースの量子計算において強相関多体系を用いる提案のための第6章・第7章から成っています。第6章で測定ベースの量子計算を概観し、いよいよ第7章で強相関多体系を用いる手法を提案しています。

測定ベースの量子計算では、あるエンタングルした純粋状態に次々にプログラムされた測定を行うことによって答えを得ます。最初に用意する純粋状態をユニバーサル状態と呼びます。従来の多くの研究では、ユニバーサル状態を用意するために、ユニバーサル状態を基底状態とする最も簡単な無相関系のハミルトニアンを用いていました。それに対して中田氏は、ユニバーサル状態を低温で自発的対称性の破れた熱平衡状態とする、強相関系のハミルトニアンを用いることを提案しました。この提案は、相関が強い方が熱雑音に強い量子計算が行えるとの直観に基づいています。中田氏は実際に、ゲート忠実度が強相関系のハミルトニアンを用いた時の低温において大きくなっていることを確認しました。その後の、中田氏と他研究者の共同研究によって、エラー訂正を組み合わせると、強相関系の低温相でゲート忠実度が著しく改善されることが明らかにされており、これによって中田氏の直観が裏付けられました。

本論文の以上の2つの提案は、新トピックを拓く基礎的な成果であり、物理学に対して新しくかつ有用な貢献をしています。本論文は村尾美緒氏、Peter S. Turner氏、藤井啓祐氏との共同研究に基づいていますが、主要な部分は中田芳史氏が主体的に研究を進めて得られた成果です。以上により、論文提出者の中田芳史氏に博士（理学）の学位を授与できると認めます。