

エンタングルメント・エントロピーのダイナミクスの解明

京都大学 基礎物理学研究所 教授

高柳 匡



研究の背景

ミクロな世界の物理法則である量子力学は、マクロな世界にはない不思議な物理現象を予言します。その典型例が「量子エンタングルメント」です。量子的な物質（量子系）の全体の状態は1つに特定できたとしても、その物体の一部を見ると、様々な状態がある確率で現れるという現象です。量子エンタングルメントの強さを測る量が「エンタングルメント・エントロピー」です。私たちは過去の研究で、このエントロピーが実は反ドジッター空間の曲面の面積と等しいことを発見しました。これは、ゲージ重力対応と呼ばれる重力理論とゲージ理論の対応の一例となっています。それが引き金となり、エンタングルメント・エントロピーは、最近、様々な分野で注目を浴びています。

研究の成果

私たちは、これまで理解が乏しかったエンタングルメント・エントロピーのダイナミカルな性質を解明する研究を行いました。まず、量子系に小さなエネルギーを与えた場合に、エントロピーの増加に何か普遍的な法則があるかどうかを調べました。ゲージ重力対応を利用する計算法（図1）を用いることで、エンタングルメント・エントロピーに実は熱力学の第一法則と類似する性質があることを発見しました。

次に、エントロピーがどのように時間発展するかを理解するために、量子系の1点に大きな衝撃を与え、エントロピーがどのように伝播するかを計算しました。まず、

厳密に解ける系（可積分系）に対して計算すると、ある時刻からエントロピーが増大し、その後一定値に近づきました（図2上図）。一方、相互作用が強く、カオス的な振る舞いをする系に対しては、ゲージ重力対応を用いて解析した結果、エントロピーがある時刻から増加するのは同じですが、その後、対数関数的に単調増加することが分かりました（図2下図）。このように量子系の相互作用の性質の違いで、エンタングルメント・エントロピーのダイナミクスが大きく異なることが明らかになりました。

今後の展望

私たちの研究によって、量子エンタングルメントのダイナミクスの基本的な性質が解明されました。その時間発展を調べることで、様々な物質の相互作用の性質を分類することができると期待されます。

量子エンタングルメントの幾何学は、ゲージ重力対応を通して重力理論の幾何と同一視できると期待されています。今後は、量子エンタングルメントの解析から、宇宙のミクロな法則（量子重力理論）の解明にアプローチしたいと思っています。

関連する科研費

- 平成24-26年度 挑戦的萌芽研究「量子エンタングルメントを用いた量子重力理論の定式化」
- 平成25-27年度 基盤研究 (B)「エンタングルメント・エントロピーを用いたAdS/CFT対応の解析」

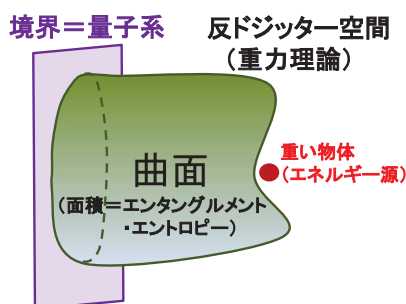


図1 ゲージ重力対応を用いたエンタングルメント・エントロピーの計算

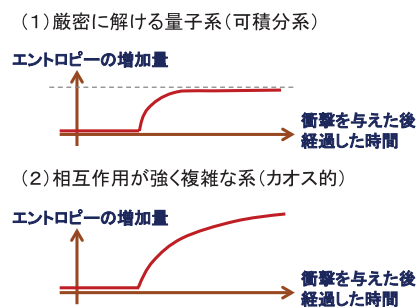


図2 エンタングルメント・エントロピーの時間発展の違い