

# 平衡状態の量子もつれが示す普遍的な法則

東京大学物性研究所 杉浦 祥\*1、中川 裕也\*2、藤田 浩之  
東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 渡邊 正隆  
\*1 現：ハーバード大学 \*2 現：株式会社 QunaSys

## ①研究の背景

量子力学とは原子一つ一つのようなミクロな世界を記述する物理理論です。他方、熱力学とは金属や液体のように原子や分子が集まった物質においてマクロで普遍的な性質に着目する理論的です。物理学の根幹をなすこの2つの理論間の対応関係は、20世紀初頭の量子力学の黎明期から研究されてきました。特に、外界から切り離された環境において、量子純粋状態の性質を熱力学で予言できるかという問いは、理論的な興味はもちろん、冷却原子を使った実験との対応からも、近年重要な課題となっています。

このようなミクロとマクロの対応の研究に重要になるのが、量子もつれです[1]。量子もつれは、量子状態を2つの領域に分割した時に、その2つの間に生じる量子力学的な相関の事です。具体的には、量子力学的な重ね合わせがその2つの領域にまたがって広がっている時に生じます。量子もつれは量子力学に基づく現代物理学の様々な分野を貫く基礎的な概念です。例えば、量子系の効率的なシミュレーションや量子テレポーテーション、ブラックホールの蒸発現象など、様々な現象が量子もつれによって理解できます。

量子純粋状態を用いた熱力学では、量子もつれの量が熱力学的なエントロピーに対応します[2]。従って、熱力学エントロピーの増大によって実現する熱平衡化は、量子力学から説明すると系全体に量子もつれが広がることで起こる現象と言うことができます。

## ②研究の内容

我々のグループは、熱平衡状態を表すような量子純粋状態における量子もつれの空間分布を研究しました。量子純粋状態を空間的に二つに分けた時に、その領域間に存在する量子もつれの量(エンタングルメント・エントロピー)がどのような性質を持つかを調べました(図1)[3][4]。

まず、熱力学系との厳密な対応が確立されている量子純粋状態である canonical thermal pure quantum state (cTPQ)に基づき、エンタングルメント・エントロピーの

空間分布を表す一般的な関数を理論的に導出しました。そして孤立量子系のエネルギー固有状態と定常状態とが持つ量子もつれの空間分布に対して、我々の導出した関数が共通してよく当てはまることを、数値シミュレーションを用いて確認しました。

エネルギー固有状態は、ある意味で熱平衡状態と非常に近い事が知られています。つまり、任意のエネルギー固有状態を用いて局所的な物理量の期待値を計算すると、非可積分系と呼ばれるクラスの系において、その値が熱平衡状態と一致する値を示す事がよく確かめられています(エネルギー固有状態熱平衡化仮説、ETH と呼ばれる[2])。反対に、可積分系の場合には、固有状態を用いた期待値の値は熱平衡状態からずれを持つことも知られています。我々の数値シミュレーションでは、我々の理論が非可積分系のエネルギー固有状態の正しいエンタングルメント・エントロピーの空間分布を与え、可積分系では与えないことを示しました。つまり、ETH がエンタングルメント・エントロピーに対しても成立していることを我々は新たに示しました。

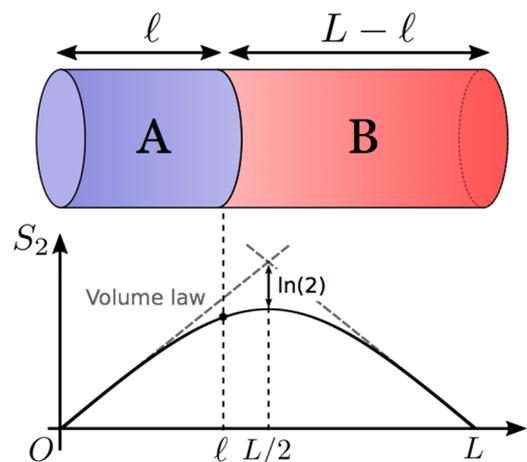


図1 量子もつれの空間分布の概念図。物質をAとBの2つに分けた時に、AとBの間にどのくらいの量子もつれが生じているかを縦軸に、物質Aの長さを横軸にプロットしてある。



能な基本的な成果であり、分野を越えた共同研究は今後さらなる成果を上げていく事が期待されます。

- [1] M. A. Nielsen, and I. L. Chuang, 2000, *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge University Press, Cambridge)
- [2] L. D'Alessio, Y. Kafri, A. Polkovnikov, and M. Rigol, *Adv. Phys.* **65**, 239 (2016).
- [3] Y.O. Nakagawa, M. Watanabe, S. Sugiura and H. Fujita, *Nature Commun.* **9** 1635 (2018).
- [4] H. Fujita, Y.O. Nakagawa, S. Sugiura, and M. Watanabe, *J. Hep.* **18**, 112 (2018).
- [5] A. M. Kaufman, M. E. Tai, A. Lukin, M. Rispoli, R. Schittko, P. M. Preiss, and M. Greiner, *Science* **353**, 794 (2016).
- [6] A. Chandran, C. R Laumann, and V.Oganesyan, *arXiv* , 1509.04285 (2015).

