

(続紙 1)

| | | | |
|---|--|----|-------|
| 京都大学 | 博士 (理学) | 氏名 | 梅本 滉嗣 |
| 論文題目 | Multipartite, Quantum, and Classical Correlation in the AdS/CFT correspondence AdS/CFT 対応における多体・量子・古典相関について | | |
| (論文内容の要旨) | | | |
| <p>D+1次元の重力理論が共形場理論と呼ばれる場の理論 (ゲージ理論であることが多い) と物理的に等価になることを意味するゲージ重力対応は実は量子情報理論と深く関わるのが最近の研究から分かってきて、注目を集めている。その最も基本となる対応関係は、共形場理論のエンタングルメント・エントロピーがゲージ重力対応を通じ、反ドジッター空間の極小面積になるというホログラフィック・エンタングルメント・エントロピーである。このエンタングルメント・エントロピーは、純粋状態に関して、量子論に特有の相関である量子エンタングルメントを定量化する量子情報量である。しかし混合状態に対しては、エンタングルメント・エントロピーは、量子情報量として正しい振る舞いを示さず、相関の量を表わさないことが良く知られている。</p> <p>梅本氏の博士論文では、この事実に動機付けられて、混合状態の二体相関や、量子系の三体相関を定量化する量子情報理論的な量が、ゲージ重力対応通じて、どのような幾何学量で表されるのか調べ、多くの重要な結果を得た。まず、ゲージ重力対応において共形場理論の部分系を考えたときに、その部分に対応する量子情報を対応する反ドジッター空間のどの部分が担っているか? という問題には最近回答が与えられており、エンタングルメント・ウェッジと呼ばれる。これは、前述の極小曲面と境界に位置する共形場理論の部分系に囲まれた領域である。このエンタングルメント・ウェッジの断面積は興味深い幾何学量であるが、梅本氏らの4年前の研究 (梅本氏の修士論文) によって、純粋化エンタングルメントと呼ばれる量に対応することが分かった。そこで、梅本氏の博士論文ではまず、この純粋化エンタングルメントと呼ばれる部分系AとBの二体相関を定量化する量子情報量を自由場の理論や横磁場イジング模型と言った基本的な量子多体系で解析した。その結果、ナイーブに期待される部分系AとBの距離に関しての単調減少性が破れる場合があることを見出した。さらに、もともとAとBが対称であっても、純粋化の過程で、その対称性が自発的に破れることがあることを発見した。また別の二体相関を表す量子情報量である相互情報量と比較することで、純粋化エンタングルメントは量子的相関よりも古典的な相関を増幅して定量化しているという特徴も明らかになった。</p> <p>さらに梅本氏の博士論文では、二体相関の次として三体以上の相関を定量化する量子情報量がどのようにゲージ重力対応で計算されるのか解析を行った。その際にまず相互情報量の三体への拡張である新しい量子情報量を導入し、それを純粋化して最小化することで、純粋化エンタングルメントを多体相関に拡張した。ゲージ重力対応を通じ、この量は、反ドジッター空間における複数の曲面の面積の和の最小値として表されることが分かった。実際に、この面積の満たす不等式が、量子情報の解析から期待される不等式を再現することも確かめられた。さらに、Q相関やR相関と呼ばれる最近の量子情報理論の研究で導入された新しい量に関しても、ゲージ重力対応を用いた幾何学的な計算法が解析された。その結果、R相関は、純粋化エンタングルメントと同様にエンタングルメント・ウェッジの断面積と等しくなるが、Q相関は、全く新しい幾何学量 (エンタングルメント・ウェッジの相互情報量と呼ぶ) で計算されることが見出された。</p> | | | |

梅本氏の博士論文の終盤では、量子情報で知られる荒木-リーブの不等式の等号が満たされる例を考察することで、量子エンタングルメントのみを抽出する量（量子相関を定量化する量）が満たすべき性質をゲージ重力対応の文脈で明らかにし、エンタングルメント・ウェッジの断面積やエンタングルメント・ウェッジの相互情報量はそのような量とは一致しないことを示した。逆に、ゲージ重力対応が成り立つ共形場理論に対しては、相互情報量を2で割った量が、Squashedエンタングルメントと呼ばれる量子エンタングルメントを測る量と一致するという結果を得た。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

ゲージ重力対応と量子情報の関係性に関しては、国際的にも大きな話題となっており、これまで多くの研究がなされてきた。特に、純粋状態の量子エンタングルメントを測るエンタングルメント・エントロピーに関して非常に多くの知見が場の理論においても、また重力理論においても得られてきた。しかし、混合状態の量子エンタングルメントは量子情報理論でも難しい問題であることが知られ、対応する量子情報量は多くの提案があるものの、ほとんどのものが、無限次元空間における最小化を必要とするもので具体的な計算は困難であった。しかしゲージ重力対応を用いると幾何学的にずっと簡単に計算できると期待される。その端的な例が、混合状態の二体相関を表す純粋化エンタングルメントである。これについては過去の梅本氏らの研究成果で、エンタングルメント・ウェッジの断面積としてこの量が計算できることが分かっている。そこで梅本氏の博士論文では、この純粋化エンタングルメントを初めて場の理論において数値計算を行った。その結果、単調性の破れや、自発的対称性の破れ、そして古典相関の増幅という興味深い性質が明らかになった。またQ相関やR相関といった最近量子情報で導入された量に関してもいち早くゲージ重力対応で解析し、それぞれの幾何学的公式を見出した。これらの成果は、今後、素粒子論で混合状態の量子情報量を扱う際に、重要な役割を担うと期待される。

上記は二体相関の定量化であるが、梅本氏の博士論文では、さらに続いて、三体以上の多体相関をどのように量子情報量で表すのか？また、ゲージ重力対応と用いるとどのような幾何学量に対応するのか？という重要な疑問に答えている。相互情報量を一般化して、それを純粋化で最小化するというアイデアで、新しい量子情報量を導入し、それが純粋化エンタングルメントの多体化に相当することを見出した。さらに、ゲージ重力対応を用いると比較的簡単な幾何学的公式で計算できることも明らかにした。また量子情報論的解析で予想される不等式に対し、ゲージ重力対応から幾何学の三角不等式などを用いて美しい導出を与えている。この研究以前には、多体相関に関して量子情報やゲージ重力対応の双方で研究成果が挙がっておらず、上記の梅本氏の貢献はとても大きいと言える。

さらに量子エンタングルメントのみを抽出する、真の量子相関を測る量に関しても梅本氏の博士論文では重要な結果が与えられている。このような量が反ドジッター空間のどの曲面の面積に対応するのかは重要な問題である。梅本氏は、量子情報で知られる不等式をうまく使うことで、上記の量の幾何学的候補を大幅に制限することに成功した。これは、今後の研究で重要になると期待されるゲージ重力対応と混合状態のエンタングルメントの関係を理解する際の鍵となるので大いに評価できる。

梅本氏の博士論文は、三本の主論文に基づくが、そのうち一本は単著論文であり、もう一本は、海外の若手研究者との共著論文である。このことから梅本氏が自立した研究者で、これらの論文において中心的な役割を果たしたことが分かる。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、2021年1月15日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 2021 年 3月 31日以降