

京都大学	博士 (理学)	氏名	魏 子夏 WEI ZIXIA
論文題目	Quantum Gravity Beyond the End of the World (世界の終わりを越える量子重力)		
(論文内容の要旨)			
<p>ゲージ重力対応(AdS/CFT対応)は、「$d+1$次元の反ドジッター宇宙(AdS)における重力理論が、d次元の共形場理論(CFT)と等価になる」という対応関係である。これを用いると難解な量子重力理論を、より理解がなされている場の量子論の立場で解明できると期待されることから、世界中で非常に活発に研究されてるテーマである。</p> <p>このAdS/CFT対応では通常、共形場理論は境界のないコンパクトな空間の上で定義される。このAdS/CFT対応を境界がある空間における共形場理論に拡張したものをAdS/BCFT対応と呼び、BCFT(境界のあるCFT)に対応する重力理論は、反ドジッター宇宙に世界の終わりブレーン(End of the world brane)を導入することで得られる。このブレーン上では、ノイマン型の境界条件を課し、数学的に言うと外曲率の値を固定するので、計量自体は変化することができ、ブレーンに局在した重力モードが現れる。</p> <p>魏氏の博士論文は、このAdS/BCFTに関して、主に3つの重要な研究成果： 「(1)動く鏡の模型からのホーキング輻射におけるページ曲線の導出」「(2)ウェッジホログラフィーの発見」「(3)AdS/BCFTにおける因果律」を報告している。それぞれについて以下で上記の順で述べる。</p> <p>動く鏡の模型は、鏡が加速度運動すると輻射を出すことを利用した模型で、古くからブラックホールのホーキング輻射をモデルする際に利用されてきた。ブラックホールはホーキング輻射によって、エネルギーを失い、蒸発すると考えられているが、それと同時にブラックホールの内部に隠れていた情報も消えてしまうと量子力学のユニタリティーに反する。これをブラックホールの情報損失パラドクスと呼ぶ。本博士論文では、動く鏡の模型の二次元共形場理論の記述を用いて表し、さらに、AdS/BCFT対応を用いて等価な重力理論を構成した。この重力理論を用いて、エンタングルメントエントロピーと呼ばれる量子情報量を輻射に対して計算することで、情報損失が起こるか解析した。その結果、ブラックホールの蒸発に対応する動く鏡の模型に対して、エンタングルメントエントロピーはページ曲線と呼ばれる、最初は増加するか、中間点から減少に転じ、最後にゼロになるという振る舞いを解析的に導出することに成功した。この振る舞いから、ブラックホールの蒸発に対応する過程で、情報損失は起こらないという結論を得た。</p> <p>AdS/BCFTは、境界のある共形場理論と重力理論の対応であるが、境界が二つある場合も扱うことができる。時に帯状な領域における共形場理論を考えると、世界の果てブレーンも二枚現れるが、この時に、帯の幅がゼロの極限を取ると、重力理論は、ウェッジ(楔型)領域に閉じ込められる。このAdS/BCFTの極限から、ウェッジ領域と、その縁にある2次元低い共形場理論が等価に対応することが分かる。これをウェッジ・ホログラフィーと呼び、この発見が魏氏の博士論文の成果の一つである。このような対応が本当に成り立つかという検証を自由エネルギー、エンタングルメントエントロピー、そして相関関数を計算することで行っている。例えば、エンタングルメントエントロピーには発散項と有限項があるが、それぞれの長さに対するスケー</p>			

リングが、共形場理論において知られている結果と一致することを確かめた。特に2次元共形場理論の場合には対数発散し、その係数がセントラルチャージに比例する。この値が、自由エネルギーで計算した値と一致することも示された。

AdS/BCFTでは、 d 次元BCFTの境界が、 $d+1$ 次元の反ドジッター宇宙における世界の果てブレンに対応するが、このブレン上に重力モードが局在することが知られていてブレンワールドの模型となる。そこで、 d 次元BCFTとそれと隣接する d 次元の反ドジッター宇宙（世界の果てブレン上の重力理論）という見方もできる。これを中間描像と呼ぶと、(i) d 次元BCFT、(ii) d 次元中間描像、そして、(iii) $d+1$ 次元の重力理論の3つが全て等価であるという関係が得られる。この中間描像では d 次元重力は量子重力理論となっていると期待され、その性質の解明は大変興味深い。魏氏の博士論文では、上記の(i)と(ii)の描像における因果律を(iii)のバルクの重力理論を用いて解析した。その結果、(i)BCFTで期待される因果律は、かなり広い過程の元で成立することが示された。(ii)中間描像では、実は因果律は破れ、共形場理論と重力理論の間に非局所的な相互作用が生じることが、本論文によってはじめて示された。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

魏氏の博士論文では、境界を持つ空間における共形場理論と反ドジッター宇宙の重力理論の等価性であるAdS/BCFT対応に関して、主に3つの重要な研究成果「(1)動く鏡の模型からのホーキング輻射におけるページ曲線の導出」「(2)ウェッジホログラフイーの発見」「(3)AdS/BCFTにおける因果律」を報告している。(1)動く鏡の模型はPhysical Review Letter誌、(2)ウェッジホログラフイーは、Physical Review D誌(Editor's suggestion)、(3)AdS/BCFTにおける因果律は、Journal of High Energy Physics誌に、それぞれ掲載された魏氏の共著論文に基づき、魏氏が大きく貢献した部分を中心に書かれている。(1)と(2)の原著論文は、Inspireデータベースで既に被引用件数が70回に達し、国際的にも広く知られる研究成果と言える。また、(3)は、ともに京都大学の大学院生である魏氏と大宮氏による若手のみの共著論文であることがまず評価されるが、内容も国際的に高いインパクトをもたらしている。例えば超弦理論の著名研究者であるAndreas Karch教授(テキサス大)も、魏氏らの論文に触発されてフォローアップの論文を書いている。

AdS/BCFT対応は、最近ブラックホールの情報損失問題に関する便利な解析手法として最近注目され、多くの研究者によって盛んに研究がなされているが、その中でも魏氏の博士論文にある研究成果は特筆すべきものである。ブラックホールの情報損失が起こらないことを意味するページ曲線をAdS/BCFT対応を持ちいて導出する研究は最近多いが、(1)動く鏡の模型の研究は、このページ曲線を解析的な計算で初めて導出したという、重要な業績と言える。通常AdS/CFT対応は余次元1、つまり重力理論は共形場理論より1次元高い空間で定義されているが、(2)ウェッジホログラフイーでは、余次元が2となる例を発見したことになる。その後、ウェッジホログラフイーは、ブラックホールの情報損失問題に関するアイランド公式を解析する方法や、2次元JT重力理論をブレーン上で実現する方法に活用され、興味深い発展を遂げている。また、ブラックホールの情報損失問題の解析では、AdS/BCFTの中間描像(重力理論と共形場理論が相互作用する系)も良く用いられているが、このときに現れる重力は量子重力理論になると期待されている。にもかかわらず、ここで現れる量子重力理論についての理解は現在でも乏しい。魏氏の博士論文では、(3)AdS/BCFTにおける因果律を解析し、この中間描像では、因果律を破るような非局所的な相互作用が生じることが明らかとなった。

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、令和5年1月18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： 年 月 日以降