

キーワード:素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理、素粒子(理論)、相対論・重力(理論)

～ミクロの世界から宇宙まで、その成り立ちを理解する根源理論の成果～ 3次元時空の量子重力理論の厳密計算に成功

❖ 研究成果のポイント

- 宇宙の成り立ちを理解するための鍵となる理論:3次元量子重力理論の厳密計算に世界で初めて成功
- 従来の近似手法では厳密な計算は困難があったが、近似を一切用いずに、新たな手法での厳密計算を完了
- 宇宙のはじまり、ブラックホールの解明に必要な量子重力理論の理解を切り開く一つのステップとなる成果

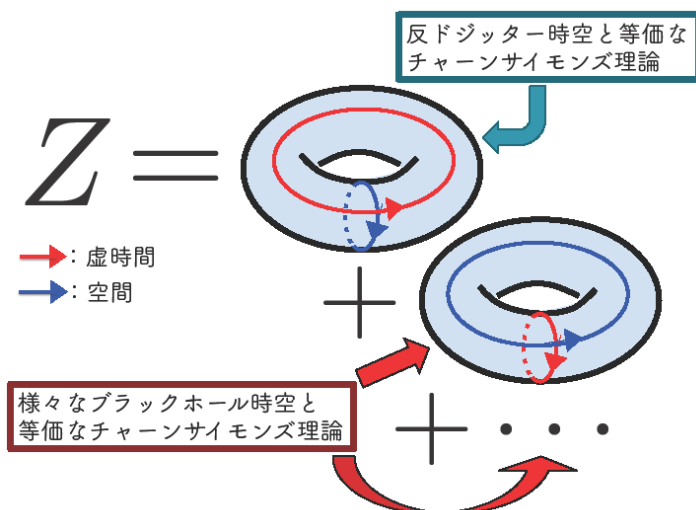
❖ 概要

飯塚 則裕(大阪大学大学院理学研究科助教)は、田中 章詞(研究開始時大阪大学大学院生、現在は理化学研究所基礎特別研究員)、寺嶋 靖治(京都大学基礎物理学研究所助教)との共同研究により、宇宙定数が負の場合、3次元(空間2、時間1次元)の量子重力理論(現代物理学の2大柱:量子力学とアインシュタインの一般相対性理論^{注1}を統一した理論)の厳密な計算をある等価性の下で行うことに世界で初めて成功しました。

量子力学は、電子のような小さな粒子が運動する経路を計算する方法です。量子力学の基本原則である「経路積分」は、従来の方法では厳密計算が難しく、多くの場合近似手法に頼るしかありませんでした。一方、3次元重力理論は、チャーン・サイモンズ理論^{注2}と古典的には等価であることが知られています。本研究では、3次元(2+1次元)重力理論に対応すると考えられるチャーン・サイモンズ理論において、量子論の根底となる「経路積分」を、「局所化^{注3}」という近年発展した新たな手法を用いて、厳密に計算することに成功しました。これは、3次元量子重力理論を厳密に計算したことに相当します。

宇宙がどのようにビッグバン以前に始まったのか?ブラックホールの中心で一体何が起きているのか?これらを理解するためには、現代物理学の枠組み(標準理論)を超えて量子重力理論が必要です。量子重力理論は我々の宇宙の成り立ちを理解するための鍵となる理論です。本研究成果は、未だ発展途上にある量子重力理論の理解を切り開く一つのステップといえます。また、本研究を契機にして、量子重力理論、場の量子論、ゲージ重力対応^{注4}のより深い理解への発展が期待されます。

本研究結果は、2015年10月16日に「Physical Review Letters」のオンライン版にて発表されました。



【図】

3次元量子重力の分配関数 Z を計算するためには時空の経路積分を行う必要がある。本研究では、局所化の手法を適応することにより、この時空の経路「積分」が、様々な時空上のチャーンサイモンズ理論の厳密解の「和」に帰着するとして3次元量子重力の分配関数の厳密計算を行うことに成功した。

❖ 研究の背景

宇宙がどのようにビッグバン以前に始まったのか？ブラックホールの中心で一体何が起きているのか？

これらを理解するためには、現代物理学の枠組み(標準理論)を超えて量子重力理論が必要です。しかし、我々の住む4次元(空間3、時間1次元)でこの理論を理解することは非常に難しく、理論がどのように定義されるべきかということすらわかっていません。以前の研究から、簡単なモデルとして時空を3次元(空間2、時間1次元)とすると、ある近似計算(摂動計算)なら説明が可能になることが知られていました。ただその場合も、**近似に頼らない厳密な経路積分の計算をどのように行えばよいかは、依然として謎でした。**

量子力学では「経路積分」という基本原理があり、そこでは古典力学では許されないすべての「経路」について「積分」することで、量子論的に正しく自然現象を記述することができますが、実際にはこの積分を行うことは非常に難しく、しばしば、「摂動⁵⁾」という近似手法をもちいて計算を行います。本研究では**2+1次元重力理論で、量子論の根底となるこの「経路積分」を、「摂動」という近似手法に頼らずに、「局所化」という近年発展した新たな非摂動的手法を用いて、厳密に計算することに成功しました。**飯塚助教らはこの手法を用い、チャー・サイモンズ形式による量子重力理論の記述が可能であるという仮定のもとで、3次元の量子重力理論の「分配関数⁶⁾」を計算し、エドワード・ウィッテン(アメリカ・プリンストン高等研究所)らによって予想されていたモンスター群の対称性をもつ共形場理論の分配関数(J関数⁷⁾)と一致することを確かめました。

❖ 本研究成果が社会に与える影響(本研究成果の意義)

欧州原子核研究機構 CERN での大型ハドロン衝突型加速器によってヒッグス粒子が発見された今、現代物理学は標準理論を超えたより大きな枠組みで自然現象を理解しようと、世界中で研究が盛んに行なわれています。本研究は**その中でも難問中の難問であり、未だ発展途上にある量子重力理論を理解するための一つのステップです。**量子重力理論は我々の宇宙の成り立ちを理解するための鍵となる理論であり、その進展は人類の英知を深めるという意味で非常に重要です。さらに本研究では3次元量子重力理論に双対な場の理論を**ホログラフィック⁸⁾**に検証しており、**本研究を契機にして、量子重力理論、場の量子論、ゲージ重力対応のより深い理解への発展**が期待されます。

❖ 特記事項

本研究成果は、2015年10月16日に「Physical Review Letters」で発表されました。

論文番号:Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 161304

タイトル:“Exact Path Integral for 3D Quantum Gravity”

筆者名:Norihito Iizuka, Akinori Tanaka, and Seiji Terashima

❖ 用語の説明

注1)一般相対性理論…重力を時間と空間の幾何学で表す理論。アインシュタインが創始した、重力を記述する基礎理論のこと。

注2)チャー・サイモンズ理論…3次元時空における位相的場の理論の一種。

注3)局所化…積分を行う際に、被積分関数の特殊な性質のおかげで、全ての領域を積分せずとも、ある特定の部分の積分を評価するだけで全体の結果が出る手法のこと。

注4)ゲージ重力対応…ホログラフィックな対応の一つ。超弦理論では、重力を含む理論と含まない理論がホログラフィックに等価になることが知られており、これをゲージ重力対応と呼ぶ。

注5)摂動…ある量をパラメータの関数として知りたいとき、パラメータの一般の値では計算できない場合、そのパラメータが小さいとして、べき展開を行って計算する近似方法。

注6)分配関数…場の量子論・統計力学の基礎的な概念で、物理系が与えられた時に、その量子情報を与える基礎となる関数のこと。

注7)J関数…別名J不変量とも呼ばれ、近年、量子重力理論との関わり合いが示唆されていた、特殊な関数。

注8)ホログラフィック…空間次元の異なる物理系が等価である、という関係のこと。

❖ 本件に関する問い合わせ

大阪大学大学院理学研究科 物理学専攻
助教 飯塚則裕(いづか のりひろ)
Tel:06-6850-5730 Fax:06-6850-5732
E-mail: iizuka@phys.sci.osaka-u.ac.jp