OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	数値シミュレーションによる量子重力の研究
Author(s)	花田, 政範
Citation	サイバーメディアHPCジャーナル. 2014, 4, p. 41-43
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/70483
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

数値シミュレーションによる量子重力の研究

花田 政範
京都大学 基礎物理学研究所白眉センター

1. はじめに

本研究では「量子重力」を考える。なぜ量子重力を考えるかというモチベーションを理解するために、有名な例として、ホーキングの情報喪失問題から話を始めたい。

真空とは文字通り空っぽで何も無い状態だと思われがちであるが、実は量子力学的な効果で粒子と反粒子が対生成･対消滅を繰り返している非常にダイナミックな状態である。ただ、対生成された粒子は我々の眼に見える前にすぐに対消滅してしまうので、普通は真空から粒子が放出される様子を見る事は出来ない。ホーキングは、普通でない状況 – ブラックホールの表面 – では何が起きるかを考察した[1]。ブラックホールはあらゆるものを飲み込み、「光すら逃げ出せない」と言われる。ブラックホールの表面で対生成された粒子も、ブラックホールに飲み込まれるはずである。ホーキングはこのプロセスを詳細に分析し、「負のエネルギー」を持った粒子がブラックホールに吸い込まれ、通常の「正のエネルギー」の粒子はブラックホールに吸い込まれずに飛び出してくる事を発見した。「負のエネルギー」の粒子を吸い込む事で、ブラックホールはどんどん軽くなり、やがて蒸発してしまう。この様子を我々がブラックホールの外から観察すると、「光すらも逃げ出せない」はずのブラックホールから徐々に粒子が放出され、その分だけブラックホールが軽くなり、やがて蒸発するように見える。

この発見はそれ自体すでに驚きであったが、ホーキングは更に衝撃的な予言をした。ブラックホールが蒸発するプロセスは、古典力学でも量子力学でも決して破れた事のない基本原理 -- 「情報の保存」 -- と相容れず、量子力学の理論体系の根本的な変更を迫るというのである。

「情報の保存」の意味を理解するために、例として天気予報を考える。明日の天気を知りたければ、今日の各地の気温や気圧をもとにシミュレーションをする。もちろん無限の精度でシミュレーションをする事は不可能なので、大気を上下と水平方向に格子に分割し、時間も離散的に区切って近似計算をする。予報の精度を上げたければ、メッシュをどんどん細かくしていけば良い。原理的には、空気や海中の水分子１つ１つの位置と運動量や太陽から受け取る熱量などのあらゆる情報を無限の精度で知っていて、無限に細かい格子でシミュレーションが出来れば、無限の精度で天気予報を的中させる事が出来る。逆に、今日の天気からさかのぼって、100 年前の天気を再現する事も出来る。すなわち、100 年前の天気の情報は失われず、今日の天気の情報の中にこっそりと隠れている。このような「情報の保存」は量子力学でも成り立ち、基本原理の一つであると認識されている。

今日の天気が 100 年前の天気を知っているように、ブラックホールも、何を吸い込んだかを記憶していると思うのが自然である。そして、ブラックホールが蒸発するときには、ブラックホールから飛び出してくる粒子の振る舞いを無限の精度で観測できれば、何が吸い込まれたかを原理的には判定できると期待したくなる。しかし、ホーキングは、ブラックホールから放出される粒子の振る舞いは何が吸い込まれたかによらずに完全に同じであり、情報は失われてしまうと結論づけた。これをホーキングの情報喪失問題と呼ぶ。

2. マルダセナ予想

ホーキングの予言が正しければ、量子力学という根本的な物理法則を書き変えなければならない。一方で、この予言が間違っていたとしても、ロジックの誤りを見つけ出す過程で物理法則の理解が深まると期待される。そのため、数多くの物理学者が情報

喪失問題の解決に取り組んで来た。20 年以上に渡る論争の末、ホーキングが計算で考慮してなかった重力の量子論的な効果を正しく取り入れれば情報は失われない事が示せるのではないかと言う考え方が大勢を占めるようになった。そして、1990 年代後半の超弦理論の爆発的な進展の中で、ブラックホールの蒸発が、量子重力の効果も含めて、行列を変数とするある種の量子力学系を用いて記述できてしまうという驚くべき予想が提唱されるに至った[2]。この予想は、提唱者の名前を取ってマルダセナ予想と呼ばれる。ブラックホールを記述すると期待される量子力学系は重力とは一見何の関係もない文字通り普通の量子力学系で、量子力学の基本原理である「情報の保存」を満たす。従って、マルダセナ予想が正しければ、情報は失われず、量子力学を書き変える必要はなくなる。

3. マルダセナ予想の量子重力レベルでの検証

マルダセナ予想は提唱直後から多くの研究者の注目を集め、その正しさをサポートする状況証拠が多数見つかっていた。しかし、量子力学の側で解析的な計算が可能なのは対称性による物理量への制限が大きい特別な状況で、かつ量子重力の効果が消えるような極限（行列のサイズ N が無限に大きい「ラージ N 極限」）がほとんどであり、蒸発するブラックホールの量子重力的性質が記述できるかどうかは定かではなかった。そこで我々はこの量子力学系のエネルギーと温度の関係をモンテカルロ法で数値シミュレーションし、重力側の計算と比較した。行列サイズ N が大きい場合については既に 2008 年にシミュレーションを行い、マルダセナ予想を支持する結果が得られていた。素朴には N が小さい方が計算が楽なのではないかと思われるかも知れない。しかし、N が大きい時には比較的高温でマルダセナ予想が検証できたが、量子重力の効果を見るには N を小さくするだけでなくより低温を調べる必要があり計算量が大きい事に変わりはない。更に、N を小さくすると、量子重力の効果に起因するブラックホールの不安定性を反映して、シミュレーションが不安定になってしまう。この不安定性は物理的に重要な意味があるが、シミュレーションをする上では障害となるので、不安定性とうまく付き合う方法を探して、五年近くに渡って様々な試行錯誤を重ねた。詳細は割愛するが、2013 年の初めに、ようやくシミュレーション手法が確立できた。その手法を用いて高エネルギー加速器研究機構(KEK)のクラスターシステム KEKCC でシミュレーションを開始した。行列のサイズ N は 3,4,5 の三通り、温度 T を最終的にシミュレーションを断念したものも含め約 10 通り、連続極限を取るために各(N,T)毎に 5 通りのシミュレーションを行った。これだけでパラメーターが既に 150 通りであるが、当初の予想よりも多くの統計が必要になった事から各パラメーター毎に 5〜40 通りの別乱数でのシミュレーションを行った。このように計算量が大きくなった事から、KEKCC に加え、HPCI を通じて提供された阪大サイバーメディアセンターのクラスターシステムも使用する事にした。シミュレーション結果は重力側で計算された量子重力の効果を綺麗に再現し、マルダセナ予想の量子重力レベルでの成立を示唆するものとなった。この結果は Science で発表された。

4. おわりに

今回の研究結果は、マルダセナ予想が量子重力のレベルで正しく、ブラックホールの蒸発に伴って情報が失われる事は無いことを強く示唆するものである。今後更に詳細なシミュレーションを行い、理論的な考察と比較して行く事で、ブラックホールから情報が帰ってくる仕組みを詳細に理解することが出来ると考えられる。また、マルダセナ予想の応用は情報喪失問題に限らず、超弦理論の立場から宇宙論を展開したり、強結合の量子力学系を理解したりすることも可能にすると期待されており、そのような観点からも今回行ったようなシミュレーションが重要になると考えている。このような基礎的な研究は直ちに金銭的な利益にはつながらないので、公的機関の支援が不可欠である。HPCI と阪大サイバーメディアセンターの支援には深く感謝している。

参考文献

(1) S. W. Hawking, Nature 248, 30 (1974)

(2) J. M. Maldacena, Adv. Theor. Math. Phys. 2,

231(1998).

(3) M. Hanada, Y. Hyakutake, J. Nishimuta and S. Takeuchi, Phys. Rev Lett. 102, 191602 (2009).

(4) M. Hanada, Y. Hyakutake, G. Ishiki and J. Nishimura, Science (2014) [4 月 17 日オンライン版]