

量子重力とホログラフィー原理



研究室紹介

西岡辰磨*

Quantum gravity and holographic principle

Key Words: High energy theory, Holographic Principle

はじめに

私の研究室は、阪大物理学専攻の素粒子論研究室を構成する3つのグループのうちの1つです。素粒子論と聞くと、原子核を構成するクォークや電子のような粒子の研究が真っ先に思い浮かぶでしょう。実際、素粒子の「標準模型」とよばれる理論が1970年代に提唱され、自然界を記述する4つの力のうちの3つ——電磁気力、弱い力、強い力——に関する物理現象をよく記述することができます。これらの力は、ミクロなスケールでの素粒子の量子的性質を扱う理論の枠組みによって記述されています。

一方、我々に最も身近な重力については、Einsteinによる一般相対論が大きな成功を収めており、天体などの大規模スケールの物理現象の記述に不可欠です。しかし一般相対論は「古典論」であり、量子力学の効果を取り込んでいません。現在の実験で観測できるスケールでは重力の量子効果は無視できますが、意外なことにブラックホールを考えると、重力と量子論を統合した「量子重力」の理論が必要になります。

私たちのグループでは、この量子重力の研究に取り組んでいます。具体的には、物質の基本構成要素を点粒子ではなく拡がりをもつ「ひも」だとする超弦理論や、重力と1次元低い時空の量子系の等価性を示す「ホログラフィー原理」が量子重力の有力な候補として知られており、これらを主な研究の柱としています。この記事では、ブラックホールという身近な対象からホログラフィー原理の考え方がどのよう

に導かれるかをご紹介します。

ブラックホール

天体の星々は、自らの重力によって中心へ向かって潰れようとする力と、内部の核反応によって外へ向かって膨張しようとする力が釣り合うことでその姿を保っています。しかし、太陽よりもはるかに重い巨大な星が燃え尽きると、自らの重力を支えきれず押しつぶされてしまいます。この「重力崩壊」とよばれるプロセスの果てに誕生するのが、ブラックホールです。

一般相対論によれば、ブラックホールは重力が極限まで強くなり、時空が激しく歪んだ領域として記述されます。その周囲には「事象の地平面(ホライズン)」とよばれる境界が存在し、ひとたびこの内側に入り込むと、宇宙で最も速い光でさえ逃げ出すことができなくなります。重力の強さを川の流れの速さに例えると、ブラックホールに近づくにつれて川の流れが次第に速くなり、あるポイント(ホライズン)を過ぎると流れが速すぎるため引き返せなくなるような状態だと言えます。

古典論に従えば、ブラックホールに吸い込まれたあらゆる物質は外部から完全に遮断され、我々の宇宙から永遠に失われてしまうように思われます。しかし、1970年代にHawkingは、ホライズン近傍における量子力学的な効果を考慮することで、驚くべき事実を明らかにしました。ブラックホールは何もかもを飲み込むだけの完全に真っ黒な穴ではなく、「Hawking 輻射」とよばれる熱輻射を放ち、温度やエントロピーといった熱力学的な性質を備えていることを理論的に示したのです。これは、古典的な重力理論にミクロな量子論を適用しなければ、ブラックホールの真の姿を記述できないことを意味しています。



* Tatsuma NISHIOKA

1983年2月生まれ
京都大学大学院 理学研究科 物理学・
宇宙物理学専攻物理学第二分野 博士後期
課程 (2010年)
現在、大阪大学大学院 理学研究科 物理学
専攻 教授 博士 (理学)
E-mail: nishioka@het.phys.sci.osaka-u.ac.jp

ここで特に重要なのが、エントロピーという概念が現れる点です。エントロピーとは、「ある物体がどれだけ多くの情報を秘めているか」を表す指標です。本やこの記事のような「情報」をもった物質がホライズンの内側に落ち込むとき、その情報は一体どこへ行ってしまうのでしょうか？

直感的には、内部に落ち込んだ物質が蓄積されており、ブラックホールが大きくなるほどより多くの情報を蓄えられる——つまりエントロピーはブラックホールの「体積」に比例するはずだと考えるのが自然でしょう。本棚の収納量はその奥行きや広さ、すなわち体積で決まるのと同じ発想です。しかしこの予想に反して、Bekensteinと Hawking は、ブラックホールのもつエントロピーがその内部の「体積」ではなく、ホライズンの「表面積」に比例することを発見しました。まるで本棚の収納量が高さによらず、棚板の面積だけで決まるようなもので、これは私たちの日常的な直感を根本から裏切る意外な結果です。このことは、ブラックホールの内部自由度が3次元的に分布しているのではなく、ホライズンという2次元面上にのみ存在していることを示唆しています。では、この奇妙な事実は重力理論について何を意味しているのでしょうか。その問いへの答えが、量子重力を理解する上での重要な鍵となっています。

ホログラフィー原理

ブラックホールの内部にあるはずの3次元的な自由度が、2次元のホライズンの表面上にのみ存在しているという直観に反した事実は、それまでの重力理論に対する考えを根本から覆すものでした。そしてこの事実に基づき理論的考察を大幅に推し進め、「重力理論は1次元低い量子系と等価である」という考え方に達したのが「ホログラフィー原理」です。1990年代前半に 't Hooftと Susskindによって提唱されたこの原理の名前の由来は、2次元のスクリーンに記録された情報から3次元の立体的な像を空間に浮かび上がらせる「ホログラム」です。

映画のスクリーンが2次元の平面でありながら奥行きのある3次元の世界を映し出すように、ホログラフィー原理では、3次元領域における重力現象が、その境界となる2次元の「ホログラフィックスクリーン」の上の量子系によって完全に記述されると考

えます。したがって、ホログラフィー原理が正しければ、空間内で起きる重力現象は、スクリーン上に敷き詰められた量子的な自由度という「影」を読み解くことで、過不足なく再構成できることとなります。

さらに情報理論の観点では、ホライズンの表面を「プランク面積」とよばれる極微のピクセルに分割したとき、各ピクセルが「0か1か」という1ビット(情報の最小単位)を担っており、図1のようにホライズン上のピクセルに記録された情報がブラックホールの状態を表していると考えられます。このような考えは、Wheelerによって提唱された「It from bit(万物は情報から生じる)」という概念の具体例となっています。



図1 ホログラフィー原理の概念図。ブラックホールの内部状態はホライズン上に記録された情報で記述される様子を表したものの。

AdS/CFT 対応

ホログラフィー原理が単なる抽象的なアイデアではなく、検証可能な対応関係として、1997年に Maldacena によって提唱されたものが「AdS/CFT 対応」です。これは、負の宇宙項をもつ反ド・ジッター(AdS)時空における重力理論と、その境界上で定義される共形場理論(CFT)とよばれる量子論が、完全に等価であるという予想です。

この対応を直感的に理解する上で鍵となるのが、「粗視化」と「スケール変換」という概念です。粗視化とは、細かい情報をあえて省いて全体の大まかな性質を取り出す操作のことです。地図を例に考えてみましょう。縮尺を小さくした地図(広域地図)では、個々の建物は消えて街や地域の全体像が見えてきます。縮尺を大きくした地図(詳細地図)では、逆に個々

の路地まで見えてきます。このように、「どの縮尺で見るか」を変えることで、同じ場所でも見えてくる情報がまったく異なります。

AdS/CFT 対応では、これと同様のことが起きています。2次元の境界上の量子系に対し、粗視化の程度を変えながら観測するスケールを移していくと、その「粗視化の度合い」が新たな空間座標、すなわち奥行き次元として自然に現れてきます。ちょうど地図の縮尺が一つの軸となって高さという立体的な情報の階層を生み出すように、1次元低い境界の量子論の情報をスケールを変えながら読み取る操作を通じて、重力が存在する高次元空間の「奥行き」そのものを作り出しています。

近年、このホログラフィー原理の探究は、「エンタングルメント(量子もつれ)」と結びつくことで、さらなる展開を見せています。量子もつれとは、二つ以上の粒子が遠く離れていても互いに相関し合う、量子力学に特有の現象です。AdS/CFT 対応において、境界上の量子系がもつ量子もつれの強さは、AdS 時空内の極小曲面の面積として表されることが示されました(笠・高柳公式)。これは、量子的な相関から時空の幾何学(空間の繋がり)そのものが生まれる可能性を示唆しており、古典情報(bit)を量子ビット(qubit)に置き換えた「It from qubit」という新たなパラダイムを提示しています。このように、重力・時空の研究と量子情報の融合は今や世界的な潮流となっており、その展開は現在進行形で続いています。

おわりに

こうした流れの中で、特に注目されているのが2

つの方向性です。一つは、ホログラフィー原理を我々の宇宙に近いド・ジッター(dS)時空へ拡張することです。本文で紹介したAdS/CFT対応は負の宇宙項をもつAdS時空を舞台にしていますが、観測によれば我々の宇宙は正の宇宙項をもつdS時空に近いとされています。この拡張が実現すれば、我々の宇宙における重力の成り立ちそのものの解明につながると期待されています。もう一つは、量子コンピュータを用いてホログラフィー原理を実装し、ブラックホールの内部構造や情報喪失問題を量子計算によって直接探る試みです。

時空と量子をつなぐこの研究分野は、今まさに大きな転換点を迎えています。どれも答えはまだ見えていませんが、それだけに今後の展開がとて楽しみです。私たちの研究室も、この驚きと興奮に満ちた探究の一翼を担いたいという思いで日々研究を進めています。

参考文献

ホログラフィー原理に興味をもたれた方向けに、いくつか文献を難易度順に挙げておきます。

- 1) ホログラフィー原理に関する一般向けの解説書：
大栗 博司「重力とは何か」(幻冬舎新書)
- 2) 上記よりも進んだ内容の解説：
極限宇宙ガイド第2号「ホログラフィー原理とゲージ重力対応」<https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~extremeuniverse/exu-guide-2/>
- 3) ホログラフィー原理と量子情報の関係についてのより専門的な解説：
高柳 匡「量子エンタングルメントから創発する宇宙」(共立出版)

