

論文の内容の要旨

論文題目 ; Dynamics of black holes and holography
(ブラックホールの動力学とホログラフィー)

氏名 ; 宇賀神知紀

ブラックホールは発見されてからほぼ100年が経過したが、その理論的な理解は依然として不完全である。例えば時空に事象の地平面があると、この時空の上の場の量子論のユニタリー性が一見破れているように見える。このパラドックスは情報喪失問題と呼ばれ、我々のブラックホールについての理解が不完全であることを端的に示している。このような理解の不完全さはブラックホールの事象の地平面の内側が見えないという事実由来していると考えられる。

この博士論文ではゲージ重力対応を用いてブラックホールの事象の地平面とその内側を正確に理解することを目的としている。ゲージ重力対応は $d+1$ 次元 反ドジッター空間上の量子重力理論と、その境界における共形場理論が等価であることを主張する。この共形場理論はバルク (反ドジッター空間) の量子重力理論の非摂動論的な定義とみなすことができるので、バルクの情報が共形場理論の量から引き出せることが期待される。

事象の地平面とその内側を含むような時間スライスを取ると、このバルク時空は非自明に時間発展する。従って事象の地平面とその内側の性質を共形場理論を用いて解析するには、この理論の時間に依存する量を議論しなくてはならない。

二次元共形場理論における興味深い時間に依存する過程として量子クエンチ過程がある。量子クエンチではまずエネルギーギャップを持つハミルトニアンと、その真空があるとす。初期時刻においてハミルトニアンのパラメーターを急激に変化させ、エネルギーギャップを無くしてしまう。この操作により系の状態は著しく励起され、非自明な時間発展をする。量子クエンチ過程には系の励起のさせ方によってさまざまな種類が考えられる。特に系を一様に励起させる場合、この過程は大域的クエンチと呼ばれる。大域的クエンチは熱平衡状態への遷移する過程 (熱化過程) のモデルとみなすことができ、注目を集めている。このほかにもたとえば系の一点だけを励起させる局所クエンチや、加えるエネルギーを場所ごとに変化させる非一様クエンチ等も考えることができる。

これらの過程を記述する物理量として特に興味深いのはエンタングルメントエントロピーである。その理由としてこの量が任意の場の量子論で定義することができ、したがって量子クエンチの理論によらない性質を抜き出せることがあげられる。またこの量は熱力学的なエントロピーの非平衡系への一つの一般化とみなすことができるので、熱化過程を記述するのに有用であることも理由としてあげられる。

大域的クエンチではすべてのエネルギー状態が等しく励起されるため、このような量子クエンチの初期時刻における状態はクエンチのエネルギースケール以下では共形対称性を持つと考えられる。共形場理論の境界状態を用いて記述できると仮定できる。この描像に基づいてエンタングルメントエントロピーの時間発展を厳密に計算することができる。また初期時刻での励起の仕方が空間的に非一様の場合も、対応する境界付きのリーマン面を用いて初期状態を構成でき、エンタングルメントエントロピーの時間発展を正確に追うことができる。量子クエンチでは励起された各点で、互いに量子的にもつれ合った（エンタングルした）準粒子のペアが生成されると考えられる。エンタングルメントエントロピーの時間発展はこの準粒子の運動によって直感的に説明できる。

共形場理論の境界状態は、重力側ではバルクの時空に適切な境界を導入することで実現できることが予想されている。本論文ではまずこの予想をもちいて、量子クエンチに双対な時空をシステマティックに構成する方法を開発した。この方法を用いることで、これまで双対時空が知られていなかったクエンチにも重力による記述があることがわかった。特に局所クエンチがいわゆる **shock wave** 時空に対応していること、空間を二つに分けて加えるエネルギー量に差をつけるクエンチが、2つの温度の異なるブラックストリングの合体して、その平均の温度を持つブラックストリングに遷移する過程として解釈できることを示した。

共形場理論におけるある状態のエンタングルメントエントロピーは、双対な時空上の適当な極小局面（より正確には面積が極値を取るような局面）の面積をニュートン定数の四倍で割ったものと等しいことが知られている。そこで次に我々は構成した量子クエンチに双対な時空における極小局面の時間発展を計算した。特に時空に余分な境界を導入すると、その境界に端を持つような新たな極小局面が存在する（非連結局面）。一般に非連結局面と、通常の連結局面の面積は時間に依存する。従って一般的には、二つの局面の大小がある時刻で逆転し、極小局面が相転移をおこす。この極小局面の相転移が、量子クエンチにおけるエンタングルメントエントロピーの時間発展を正しく再現することが分かった。これらのクエンチにおけるエンタングルメントエントロピーがどのように双対時空の性質をどのように反映しているのかについて、局所クエンチと非一様クエンチを例にとりて詳しく議

論した。また我々の方法は直感的に知られていた大域的クエンチとブラックホールとの対応を自然に再現できることがわかった。この対応によるとエンタングルメントエントロピーは事象の地平面の内側の時間一定面の体積に等しいことがわかる。

次に我々は空間方向が円周の場合の、大域的クエンチにおけるエンタングルメントエントロピーの時間発展を自由ディラックフェルミオン理論の場合に計算した。結果は空間方向が直線の場合とは異なり、エンタングルメントエントロピーが時間的に振動することが分かった。これはクエンチによって励起された準粒子の運動が円周状を周期的に回るからである。エンタングルメントエントロピーは、事象の地平面の内側の時間一定面の体積に等しかったのでこの結果は重力的にはブラックホールの生成とホーキング放射による消滅の繰り返しとして解釈できることがわかる。さらにこの解釈に基づき、この系で情報喪失問題がどのように回避されているのかについて、二点相関関数を例にとりて議論した。

またさらに別の角度から事象の地平面の問題に迫るために、いわゆる **higher spin** 理論におけるブラックホールを考察した。**higher spin** 理論はスピンの2以上の無質量場 (**higher spin** 場)が入っている重力理論である。各々の **higher spin** 場が固有のゲージ対称性を持っているので、一般相対論よりも非常に高い対称性を持っている。このような理論は曲率が非常に大きい時空上の弦の古典論の模型と捉えることができ、大変興味深い。一般に **higher spin** 理論では時空の計量が **higher spin** 場のゲージ変換に対して不変ではない。従って事象の地平面はゲージに依存する概念であり、重要な意味をもたない。

近年3次元 **higher spin** 理論におけるブラックホール解(**higher spin** ブラックホール)が発見され、その共形場理論的な解釈が議論された。しかしこのブラックホールは事象の地平面を持っておらず、従ってこのブラックホールのエントロピーは熱力学第一法則を援用した間接的な方法で解析されて来なかった。一般相対論におけるブラックホールエントロピーは、その表面積に比例するという意味で事象の地平面にもっとも強く結びついた量である。従って事象の地平面がない場合にエントロピーを計算する公式を発見し、その物理的な意味を吟味することはもっとも意義深い問題である。

我々は錐的特異点法と呼ばれるエントロピー公式を導出する方法が、事象の地平面がない場合でも有用であることに着目し、**higher spin** ブラックホールのエントロピーを直接計算する公式を発見した。得られた公式は熱力学第一法則を満たすことがわかった。