

ブラックホールと量子エネルギーテレポーテーション

東北大学大学院理学研究科 堀田昌寛 (Masahiro Hotta)
Graduate School of Science, Tohoku University

この発表は論文 [1] に基づいている。ブラックホールは熱輻射を放出し、エントロピーを定義できる熱力学的対象であることが知られている。しかし、超弦理論における進展もありながら、エントロピーに寄与するマイクロ状態が事象の地平面の内部にあるのか外部にあるのか、それとも地平面直上にあるのかさえわかっていない現状にある。例えば、球対称重力崩壊によって事象の地平面が現れて外部が物質のない真空になる場合、時空はブラックホールの質量 M だけで特徴づけされるシュワルツシルト計量で記述される。従って、重力崩壊した物質の詳細情報は古典的には全エネルギー量以外失われたとみなせる。またブラックホールは同じ M で決まるエントロピー $S = 4\pi GM^2$ を持つ (G は重力定数)。このエントロピーに統計力学的理解を与えることがブラックホールエントロピー問題であるが、曲がった時空上のマイクロ状態という観点では未だ解かれていない。本発表では、確立していない量子重力の情報を一切使うことの無い極めて保守的な立場で、ブラックホールエントロピーと量子場の情報の新しい関係性を論じる。重力場は古典論的に扱い、多数 (Large N) の物質場を量子的に扱う。量子情報理論において本発表者が最近提案している量子エネルギーテレポーテーション [2] (quantum energy teleportation 略して QET) の思考実験を事象の地平面外部において行うことで、外部の量子場の零点振動がもつ情報量とブラックホールエントロピーとの間に密接な関係があることがわかる。

QETとは、量子多体系の量子的にもつれた基底状態に対して、局所的量子操作及び古典通信 (local operations and classical communication 略して LOCC) だけを行うことで、エネルギーを有効的に輸送できる量子プロトコルである。量子力学の1つの特徴は、基底状態においても各部分系では量子揺らぎが残り、零点エネルギーが存在する点である。この零点エネルギーは基底状態に対する任意の局所的操作を施しても外部に取り出すことはできない。もし可能だとするとその操作終了後の系のエネルギーは基底状態のエネルギーの値より小さな値を持ってしまい、基底状態が最低エネルギー状態であるという定義自体に反してしまうからである。ところが興味深いことに、離れた他の部分系の量子揺らぎを測定して得られる情報を用いると、その零点エネルギーは局所的に取り出して使用することが可能となる。この場合、最初の測定では系にエネルギーが注入され、その注入値を上限としたある量の零点エネルギーが外部に放出される。最初のある部分系の測定で注入されたエネルギーを入力とみなし、離れた別な部分系から取り出された零点エネルギーを出力とみると、全体としてエネルギー輸送現象の1つとみなせる。もう少し詳しく説明する。一般に基底状態では空間的に離れた部分系の揺らぎの

間にも量子もつれに起因した相関が存在している。Aの局所的測定によって系に入ったエネルギーはその直後にはA近傍に局在しているが、そのエネルギーを再びAでの局所的量子操作で取り除こうとしても、完全には基底状態に戻らないこともわかる。もとの基底状態に戻すにはAの測定で壊された量子もつれを復活させる必要があるが、この量子もつれはAの局所的操作だけでは復元できない。例えば測定によって壊されたAの揺らぎと別な部分系Bの量子揺らぎとの間の量子もつれは、AとBの両方の領域を跨ぐ大域的操作を用いてはじめて復活することができる。従って領域Aに溜まっている先ほどのエネルギーにはAの任意の局所的操作でも取り出せない残留エネルギーが必ず含まれていることになる。それはAの局所的操作で系は最低エネルギーをもつ基底状態には戻れず、なんらかの励起状態に留まるためである。しかし興味深いことに、この残留エネルギーの一部はAの測定で量子もつれを壊された領域Bから実効的に取り出すことができ、様々な量子操作に利用することができる。つまりAから通信された測定結果を用いて領域Bの量子揺らぎに測定結果に依存した操作を行なうと、Bの零点振動から一部エネルギーが取り出されるのである。ポイントは、基底状態における領域Aの量子揺らぎに対して局所的測定を行うと、得られた測定結果には量子もつれを通じて領域Bの量子揺らぎの情報までが部分的に含まれていることにある。その測定結果を古典通信で領域Bに伝達する。領域Bでは、測定結果をもとにして適当なスクイーミング量子操作を選択して領域Bの零点振動に作用させると、領域B近傍において基底状態に比べてもっと量子揺らぎが抑制された状態が実現する。そして基底状態の量子揺らぎがもっていた領域Bのエネルギーと量子揺らぎが抑制された後の領域Bのエネルギーの差分がこのQETの量子操作で外部に取り出される。QETを零点エネルギー抽出という観点で説明すると以下ようになる。もともとの基底状態における領域Bの量子揺らぎは様々な成分が状態重ね合わせとして存在していた。このままでそれらの揺らぎに局所的量子操作を行っても、ある成分の揺らぎは小さくなるが他の成分の揺らぎが大きくなってしまい、平均として領域Bの揺らぎは小さくならない。しかしQETではAの測定から領域Bの揺らぎの情報を得るため、実際には特定の成分の揺らぎのみが領域Bに実現していることがわかり、その特定の量子揺らぎを小さくする量子操作を選択することで平均の揺らぎも小さくすることができるわけである。なお基底状態のエネルギー密度（の期待値）が至るところで零であると定義することによって、基底状態の時よりも小さな零点振動をもつ領域は負のエネルギー密度の値で特徴づけすることができる。

このQETは量子場の基底状態（真空状態） $|0\rangle$ に対しても有効である。エネルギーの運動項が量子もつれを真空状態の量子揺らぎに発生させているためである。また非常に大きな質量をもつブラックホールの地平面近傍は、曲率が極めて小さくミンコフスキー空間で記述される。ブラックホール上の量

子場の熱平衡状態を記述するハートル・ホーキング状態は、この地平面近傍の外部領域では通常のミンコフスキー真空状態 $|0\rangle$ に移行する。この真空の局所的量子揺らぎを測定すると、揺らぎの情報を得るとともに、エネルギーが測定器から場に注入されて正エネルギーの波束が生成する。この波束は地平面内部に吸収されて、ブラックホールの質量を増す。それとともにブラックホールエントロピーも増加する。測定過程に球対称性を課すと物質吸収直後に外部の時空構造はより大きな質量のシュワルツシルト時空になって静的になる。もし測定で得た情報を使用しないならば、話もこれで終わりである。しかし測定結果に依存したある量子操作を地平面外部の場の量子揺らぎに施すと、今度は負エネルギー密度を持った波束ができてブラックホールに吸収されることが示される。そのためエントロピーは減少することがわかる。ここで、もし測定結果の情報を失ってしまっていたら、このブラックホールのエントロピー減少は決して起こせないことに注目すべきである。測定結果に依存しない量子操作を量子揺らぎに施しても、正エネルギーの波束を再度生成するだけで、負エネルギーの波束を発生させることはできないし、ブラックホールのエントロピーを減少させることもできない。このことから Q E T によるブラックホールエントロピーの減少分は量子揺らぎの測定で得た情報量と密接に関係があると言える。この詳細な解析は論文 [1] を参照されたい。この解析から、物質を吸収したブラックホールでは古典的に地平面外部が静的に落ち着いた後でも、実は地平外部には量子的に残っている崩落物質の情報が量子的な形態で存在していることを示される。ただこの情報はブラックホールの毛（エントロピーに寄与する安定なマイクロ状態）とはみなせないとも考えられる。この量子的情報は時間とともに減少し、減らせるブラックホールエントロピーも時間とともに小さくなるためである。このことから、この Q E T 思考実験がプローブしているのはブラックホールの量子力学的熱的緩和過程であると予想されている。

参考文献

- [1] M. Hotta, Phys. Rev. **D81**, 044025 (2010).
- [2] M. Hotta, Phys. Lett. **A372**, 5671 (2008); M. Hotta, J. Phys. Soc. Jap. **78**, 034001 (2009); M. Hotta, Phys. Rev. **A80**, 042323 (2009); M. Hotta, Phys. Rev. **D78**, 045006 (2008); M. Hotta, J. Phys. A: Math. Theor. **43**, 105305 (2010).