

ブラックホールの情報損失問題とそれに纏わる発展



飯塚 則 裕

國立清華大學物理學系/京都大学基礎物理学研究所
iizuka@phys.nthu.edu.tw

ブラックホールは極めて高密度な天体である。そのあまりにも強過ぎる重力のために、一度ブラックホールの**ホライズン**と呼ばれる境界より中に入ってしまうと、少なくとも古典力学の範囲では光でさえ脱出することが不可能になる。このブラックホール時空の特性は、高密度の物質があればどのようにその周辺の時空が曲がるかを表すアインシュタイン方程式によって完全に決定される。

この強力に曲がった時空に現代物理学の根本である量子力学を適用すると非常に奇妙なことが起こる。古典力学の範囲では、何でも吸い込むだけだったブラックホールは、量子論を適用すると実は温度やエントロピーを持つ熱力学的対象物であることがわかる。ブラックホールのホライズンの存在により、真空が持つ**量子もつれ**の片割れが見えなくなるため、ブラックホールはある温度で黒体輻射をするように外側にいる観測者には見えるのである。輻射により質量がどんどん減少すると、やがてブラックホールは完全に消えてなくなる。この現象はブラックホールの蒸発と呼ばれる。

この現象を発見したホーキングは次のポイントに注目した：1. この黒体輻射がブラックホールのホライズン近傍で起こっている。2. ブラックホールのホライズン近傍の時空には（その強力な重力のゆえに）何の情報も存在しない。3. ブラックホールを構成する素粒子の情報は全て特異点と呼ばれるブラックホールのホライズンよりずっと内側の中心点にある。という3点である。ここから、ホーキングは、「ホライズンで生じているブラックホールの蒸発は、ブラックホールの情報とは全く無関係な現象であ

り、ゆえにブラックホール内部の情報はブラックホールの蒸発として出てこれられない」と予言した。これは**ブラックホール情報損失のパラドックス**と呼ばれる。

もしこれが正しいとすると、とんでもないことが起こる。ブラックホールの蒸発は量子論の根本原理であるユニタリー性と矛盾してしまうのである。もちろん、ブラックホールは時空の曲がり方が極限状態になった所である。現代物理学の量子力学は平坦な時空で確立された学問体系なので、ブラックホールのような極限時空でユニタリー性が成り立つ保証はどこにもない。誰もそんなところで実験していないからである。しかしそれでも、量子力学は極めて精巧に作られた理論体系で、それを変更するのは至難であることも我々は知っている。ブラックホールの蒸発は本当に量子論に矛盾するのだろうか？

1970年代にホーキングによってこの問題が提起されて以来、多くの議論を引き起こしたが、未だ万人を納得させる完全な結論は得られていない。しかし人々がこの問題を理解しようとする過程で、多くの新しいアイデアが誕生した。特に素粒子論の分野では、**ゲージ重力対応**、すなわちラージ N ゲージ理論と弦理論の等価予想や、情報理論と創発する時空との関係性、などが現れ、多くの最先端の革新的なアイデアと密接に繋がっており、今もこれらは活発に議論され研究されているテーマである。そしてこれらの最先端のアイデアが暗に示すことは、ブラックホールの蒸発は量子論と矛盾しないと考える方がさまざまな整合性がつく上に、ブラックホールは非常に豊かな物理現象を示すということである。

用語解説

ホライズン：

ホライズン（事象の地平面）とは、古典一般相対論において、内側から外部無限遠へ信号を送れない因果的境界である。もっとも、量子効果により「絶対的な遮断面」という描像は修正され得る。

量子もつれ：

量子もつれとは、空間的に離れた粒子どうしが古典では説明できない強い相関を持つ非可分な量子状態のことで、各粒子の測定結果は個別には不確定だが、一方を観測するとその測定結果に応じてもう一方の測定結果の統計がただちに強く制限される特徴を持つ。

ブラックホール情報損失のパラドックス：

量子もつれがあるならば蒸発により内部の情報が得られるはずであるが、ホーキングは得られないと予言しており、この二つの相違点がパラドックスになっている。

ゲージ重力対応：

素粒子の標準模型の根幹となるのは場の量子論である。特に、Maxwellの電磁気学で学んだようなゲージ対称性を持つ場の量子論をゲージ理論と呼ぶ。自然界には電弱統一理論に現れる $SU(2)$ ゲージ理論や、クォークを結びつけるカラー（色）電荷の $SU(3)$ 量子色力学が存在する。ラージ N ゲージ理論とは $SU(N)$ ゲージ理論で $N \rightarrow \infty$ の極限の理論のことである。ゲージ重力対応はそのようなゲージ理論が漸近的反ドジッター時空の量子重力理論としての弦理論と等価であるという主張である。