

Unruh DeWitt detector を用いた「情報」の考察

久木田 真吾 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

ブラックホールの面積が熱力学の第 2 法則に類似の増大則を満たし、その後の Hawking の計算でブラックホールが熱輻射をすることが明らかになって以後、ブラックホールと熱力学、さらには情報理論のようなものを同じ土俵で扱う理論、方法論の類が勃興し、現在では量子情報理論的な観点からの研究が流行している。しかし、これらの研究の多くはただ形式論として他分野で用いられる概念や計算手法を持ち込んだだけで、それらを持ち込むことの正当性について取りざたされることはほとんどない。結果として、そのような方法論で計算した諸量がどのような意味を持つのかということもあいまいになってしまっているきらいがある。そこで、本発表ではこのような諸概念や計算手法をより基本的な立場から見直し、これらの研究の意味を再確認することを目的とし、我々の現実世界ときっても切り離せない「測定」の概念も含めて「情報」の意味を再見し、これについて議論できたらなあ。

1 Introduction

ある種のブラックホール時空のホライズンの面積が、熱力学における「エントロピー」に類似する量になるということがわかって以来、「ブラックホール熱力学」という分野 (Bardeen, & Carter & Hawking (1973)) が精力的に研究されてきた。Hawking はこれがただの類似物であり、ブラックホールは熱放射をしない (= 温度を持たない) ことを証明しようとしたが、その結果ブラックホール時空上での場の量子論を考えることでブラックホールが熱的な輻射をすることが証明されてしまった。この輻射は当然エネルギーをブラックホールから持ち去るために、ブラックホールは最終的に蒸発してしまうだろうと考えられる。これに付随して、「ブラックホールの情報損失問題」というものが取りざたされるようになってきた。すなわち、「いろんなものがすべてブラックホールに落ち込んだはずなのに、ブラックホールは熱輻射というなんら情報を持たない輻射をするのみで燃え尽きてしまった。では、もともとのものが持っていた情報はどこに言ったのか」という問題だ。これは量子論的には「ブラックホール+物質」という全系がユニタリ発展すべしという量子論の大原則と関連付けられ、ラフな計算をすると一見ユニタリ性を破るように見えるという話である。しかし、ひとたびこれを「情報損失」という言葉で十把一絡げに纏

め上げ、情報の問題として取り扱ってしまうと、そも情報とは何ぞや、という重要な問いを見逃してしまう。形式的にはエンタングルメントエントロピーや相互情報量を計算することで何がしかの結論が得られるように考えられるが、それは我々のアクセスできる物理量なのか、またそこから情報の損失について何がいえるのかということは、実は何もわからない。より基本に立ち返ることでこのあたりの話を整備することは出来ないだろうか？

2 Methods : Unruh De Witt detector

最も基本的な思考からはじめよう。すなわち、我々がブラックホール時空とその上の場の量子論から得られる量は何か、という問題である。しばしば、場に対するブラックホール内外のエンタングルメントエントロピーなどが情報として計算されるが、これがオブザーバブルになっているかどうかはまったく自明ではない。そこで、我々が現在実験的に容易にアクセスできる有限自由度の量子系について考える。たとえばスピン $\frac{1}{2}$ の粒子の持つスピン自由度などである。この粒子を二つ用意してそれらの間のエンタングルメントエントロピーなどを計算することは state tomography の観点から実際可能であり、これは広義

の意味での可観測量である。このような粒子二つを空間的に異なる場所に配置し量子場とカップルさせて時間発展させると、量子場のエンタングルメントや相関についての議論を粒子間の「測定可能な」エンタングルメントや相関に移し込むことが出来る。ここで用いたスピン $\frac{1}{2}$ の粒子をしばしば Unruh De Witt detector と呼ぶ。その名のとおり、これは場の量に対する「検出器」として働く。典型的には場を $\phi(x)$ 、スピンに作用する Pauli 行列を $\sigma_i (i = 1 \sim 3)$ とすると、その相互作用ハミルトニアンは

$$H = \lambda\phi(x)\sigma_i \quad (1)$$

とかける（どの Pauli 行列がカップルしていてもいいが、これとスピンのフリーハミルトニアンに出てくる Pauli 行列の関係でダイナミクスが変化する）。このダイナミクスを追うことで、場の量の相関を detector が「検出する」という仕組みになっている。ただ、このダイナミクスは一般には厳密に解けないため何がしかの近似が必要になる。本研究では量子マスター方程式を用いたダイナミクスの計算手法を用いる (Benatti & Floreanini (2004))。

本研究では、この手法でこれまでの漠然とした議論を測定可能量からもっとはっきりとすることが出来ないかということを考えている。

3 Some Quantitiy for Information

もうひとつ重要な点は、情報という概念は情報理論の分野ですら定まった意味を持っていないということである。情報というのはどのような系でどのようなニュアンスで用いられるかによって異なる指標をとるべきものであり、その意味で「情報損失」といってしまうとその言い方自体がこの問題に対する「情報損失」を引き起こしているといってもいいだろう。果たして、「ブラックホールの情報損失問題」にアプローチする際、どのような指標で持って情報を定義すべきなのだろうか？これに対する答えは今もって出ていないように思われる。そこで本研究では、泥臭い方法ではあるが情報理論 (量子情報理論を含む) で情報の指標として扱われているいくつかの

指標を列挙し、これを上述の二つの Unruh De Witt detector 系に応用して計算し、その振る舞いから何か示唆が得られないかを調べる。主として、以下の 4 つについて調べたことを発表する。

- エンタングルメントエントロピー
- ネガティビティ
- 相互情報量
- quantum discord

4 Conclusion

二つの Unruh De Witt detector がブラックホール時空上の量子場と結合している場合の密度演算子の時間発展を追うことはいくつかの近似の元で可能であることがこれまでの研究から明らかになっている。これに対してエンタングルメントなどの計算はしばしばなされるが、相互情報量、quantum discord などについて計算されることはあまりなかった。本発表ではこれらの量について基本的なところをレビューし、二つの qubit 系に適応、計算した。その結果の解釈についてはいまだよくわかっていないので、議論したい。詳しくは発表にて。この発表をとおして、皆さんとともに情報とは何かという議論が出来れば重畳である。

Reference

- Bardeen, J. M. ;Carter, B.;Hawking, S. W. "The four laws of black hole mechanics". Communication in Mathematical Physics 31(2):161-170
- F. Benatti. ; R.Floreanini. "Entanglement generation in uniformly accelerating atoms: Reexamination of the Unruh effect"