

1 研究の進捗状況

研究の進捗は非常に順調である。現在の研究目的は、量子系において情報がどのように蓄えられるかということとを明らかにすることである。これは、ブラックホール物理学、量子カオス、量子通信など幅広い分野に関連する重要なテーマである。量子系においてはエンタングルメントがあることにより非局所相関が重要となり、情報がどこに蓄えられるかという問題が難しくなる。このような非局所相関を調べるツールとして純粋化パートナーが用いられてきた [1]。我々はより一般の状況にパートナーを同定することができる公式を導き出し [2]、ブラックホール蒸発の模型に適用することで非局所相関に蓄えられる情報の重要性を明らかにした [3]。またパートナーを含むようなより一般の概念として「量子情報カプセル」という新たなツールを提案した [4, 5]。まず、[4] と [5] において有限次元系、調和振動子系、量子場においてこのツールが適用できることを示した。それを用いることで、「系がカオス的であるときには実は情報は非常に簡単な構造で蓄えられる」という直観に反するような興味深い現象を見つけることに成功した [6]。以下にこれらの結果をまとめてより詳細な説明を加える：

情報は系のどこに蓄えられるか？この問いは物理学の広い分野に関連した重要なものである。例えばブラックホール物理学の文脈では、ブラックホールを形成した量子場の詳細な情報がどのようにして蓄えられるか（あるいは失われていくか）という問題（いわゆる情報喪失問題 [7]）が数十年にわたって議論されており、量子重力理論を構築するうえでの一つにヒントとなりうると考えられている。また、量子カオスの研究においては時間発展によって情報がどのように拡散されて乱されるかということがしばしば議論される。更に将来的に実現されるであろう量子ネットワークを用いた量子通信を議論する際もこの問いは重要な役割を果たすことが期待される。

古典系においてはこの問いの答えは非常に簡単である。なぜなら、ある系に書き込まれた情報は（少なくともその瞬間には）その書き込んだ場所から取り出すことができるからである。このことは一見当たり前に思えるかもしれないが、量子系においては正しくない。これは、量子系には通常大きな量子もつれがあるからである。量子もつれがあると、系には非局所相関が存在する。局所的な操作によって情報を系に書き込んだとしても、その操作は系の局所的な状態だけでなく系に存在する非局所相関にも影響を与える。その結果として、情報の書き込んだその瞬間においてすらも、情報のすべてを局所的に取り出すことはできなくなってしまう（情報の非局所化）。具体例として、多数の原子が量子もつれを共有している状況を考えよう。ある瞬間に、その中のひとつの原子に磁場をかけたとする。その磁場の強さや向きを書き込んだ情報とみなして、それを系の状態から当てるといふ問題設定を考える。実は、量子もつれが非常に強いときには、磁場を加えた原子を調べるだけでは磁場の情報がまったく得られないことがある。このとき、磁場はその原子の状態を一切変えなかったとしても、他の原子との相関の仕方を変えることができる。したがって、系全体の非局所相関を詳しく調べれば磁場についての情報を得ることができる。これが非局所化された情報である。

非局所相関を調べるための重要なツールとして、（純粋化）パートナーという概念がしばしば用いられる。ある部分系 A のパートナーとは、 A 以外の部分系 B の中で合成系 AB が純粋状態になるものである。ある系が純粋状態にあるということは、他の系と一切相関を持たないことを意味する。したがって、系 A に関係した情報を調べるにはそのパートナー B も含めた二体系について調べておけば十分ということになる。この性質に着目して、ホーキング輻射に含まれる情報を調べる方法としてパートナーを用いる方法が先行研究で提案された [1]。この先行研究では、パートナー自由度を特殊なケースに対して同定している。より一般のケースにパートナーを同定する公式は、我々が文献 [2] において導いた。上述したように、ブラックホール情報喪失問題の文脈では、ブラックホールを形成した場の情報がどのように蓄えられるかが重要となる。パートナー公式をブラックホール蒸発模

型に適用することで、ブラックホール生成の際の物質場の情報がパートナーに共有されるということを最近の研究で明らかにした [3]。場の零点振動が情報のストレージとして重要な役割を果たすことが明らかになった。ここで零点振動と局所的には場の真空と区別がつかない状態のことを指す。ホーキング輻射は局所的には熱的状态と区別できないので、それ自身も複雑な情報は保持できない。しかし我々研究結果により、零点振動とホーキング輻射の間の相関に詳細な情報が保持される可能性が明らかになり、情報喪失問題の解決に向けての理解が深まったと言える。

情報の書き込みおよび読み出しという文脈でも、パートナーは用いることができる。ある情報を部分系 A に書き込んだときにはエンタングルメントによって情報は非局所化されてしまうが、着目すべき系としてパートナー系 B まで含めておけばその外側に情報が洩れることはないということが知られていた。この描像では二体系 AB が書き込んだ情報を共有していることになる。我々の研究で、この描像は冗長であることが明らかになった。うまく部分系を再定義することにより、非極化された情報を完全に保持するような一体系が存在するのである。この一体系が量子情報カプセルである。この概念は我々が文献 [4, 5] で提案し、一般のセットアップでその存在を証明した。この量子情報カプセルがどのように系の時間発展によって変化していくかを調べることで、情報がどのように拡散していくかを調べることもできる。

量子情報カプセルの有用性のひとつの例として、高温の量子系において情報がどのように蓄えられるかの研究もおこなった [6]。高温の量子系では、複雑に系がかき乱される。したがって、直観的には系に複数の情報を書き込んだときにはそれらが互いに混ざり合うことが期待される。しかし、量子情報カプセルを用いた研究により、実は高温系ではそれぞれの情報が独立に蓄えられることがわかった [6]。これは量子系特有の、我々の（古典的）直観に反する現象である。将来の冷却原子系などの実験でも確かめられる可能性もあり、興味深い。

2 今後の GPPU 期間における研究の予定

主にブラックホール情報喪失問題を研究動機として、非局所相関に蓄えられる情報を調べるツール（パートナー公式 [2]、量子情報カプセル [4, 5]）をこれまでの研究で提案、発展させてきた。これらのツールはブラックホールのみではなく、カオス系などの他の対象についても有用である [6]。したがって、ブラックホールのみにこだわることなく、より広い視野を持ってこれらを用いて研究を進めていく。

現在 GPPU 海外研修の一環で滞在中のウォータールー大学では、量子情報カプセルを用いた量子通信についての共同研究をおこなっている。特に相対論的な場を用いた場合、量子情報カプセルを用いると解析が格段に単純化される。また、情報の非局所化によって通常調べるのが難しい、「どこに情報が伝播しているか？」を明確できる点がこの研究の重要な点である。

これと独立した共同研究として、曲がった時空でのエンタングルメントハーベスティングの解析も行っている。エンタングルメントハーベスティングとは、量子場から量子もつれを取り出すプロトコルのことであり、量子場の複雑な量子もつれを解析する手段としてよく用いられている。しかし計算の複雑さゆえに、ほとんどの先行研究での解析ではミンコフスキー時空における解析が主である。我々の研究では、曲がった時空のエンタングルメントハーベスティングの計算を可能にする新たな手法の開発をおこなっている。一般論については議論を十分に深め、現在具体例の数値計算に着手している段階である。これにより、曲がった時空（重力）による量子もつれ構造の変化を解析することができるようになる。

これらの共同研究およびその関連研究をおこなったうえで余裕があれば、もともと研究動機であったブラックホール時空や、宇宙論的なセットアップでの研究もおこないたい。特に曲がった時空における量子場の量子もつれ、その中に情報がどのように蓄えられるかなどについてさらに研究を進めていく予定である。

参考文献

- [1] M. Hotta, R. Schützhold, and W. G. Unruh, “Partner particles for moving mirror radiation and black hole evaporation”, *Phys. Rev. D* **91**, 124060 (2015).
- [2] J. Trevison, K. Yamaguchi and M. Hotta “Pure state entanglement harvesting in quantum field theory”, *Prog. Theor. Exp. Phys* **2018**, 10, 103A03 (2018).
- [3] T. Tomitsuka, K. Yamaguchi and M. Hotta, “Partner formula for an arbitrary moving mirror in 1+1 dimension”, [arXiv:1906.05009 \[gr-qc\]](https://arxiv.org/abs/1906.05009).
- [4] K. Yamaguchi, N. Watamura and M. Hotta, “Quantum information capsule and information delocalization by entanglement in multiple-qubit systems”, *Phys. Lett. A* **383**, 1255 (2019).
- [5] K. Yamaguchi and M. Hotta, “ Quantum Information Capsule in Multiple-Qudit Systems and Continuous-Variable Systems”, [arXiv:1902.05675 \[quant-ph\]](https://arxiv.org/abs/1902.05675).
- [6] M. Hotta and K. Yamaguchi “ Strong Chaos of Fast Scrambling Yields Order: Emergence of Decoupled Quantum Information Capsules”, [arXiv:1906.04990 \[quant-ph\]](https://arxiv.org/abs/1906.04990).
- [7] S. W. Hawking, “Breakdown of predictability in gravitational collapse”, *Phys. Rev. D* **14**, 2460 (1976).