

令和 4年 4月 25日

若手研究者海外挑戦プログラム報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

受付番号 202080315

氏名 中出 捷

(氏名は必ず自署すること)

若手研究者海外挑戦プログラムによる派遣を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。
なお、下記記載の内容については相違ありません。

記

- 1 派遣先: 都市名 テキサス州オースティン (国名 アメリカ合衆国)
- 2 研究課題名 (和文) : リウビリアンの複素固有値問題に基づく一次元量子輸送現象の理論
- 3 派遣期間: 令和 3年 10月 1日 ~ 令和 4年 4月 1日 (183日間)
- 4 受入機関名・部局名: Department of Physics, University of Texas at Austin

5 派遣先で従事した研究内容と研究状況 (1/2 ページ程度を目安に記入すること)

本研究の目的は生命現象の素過程において量子効果がどのように役割を果たしているかを明らかにすることであった。その為に、生命の基本構造と考えられるたんぱく質モデル上の量子輸送現象を解析してきた。生体温度という極低温から程遠い状況では、フォノンによる擾乱のため量子コヒーレンスと言う意味での量子効果はすぐ潰れてしまう。しかし、派遣先での研究によって、伝播粒子がフォノンに衝突した際に、前方散乱、後方散乱が起こるという一次元の量子トンネル効果に起因して、伝播粒子の運動量空間が互いに素な部分空間に分離した結果、生体温度でも流体力学音波による安定な輸送モードが出現していることを明らかにした。このことは環境系としてのフォノンを含めた全系のリウビリアンの複素固有値問題を解くことで、環境系による散逸効果を力学に無矛盾に微視的な取り扱ったことで明らかになった。

また派遣先では、この伝播粒子の流体力学的音波による輸送モードの安定性を解析した。この伝播粒子の輸送モードでは、量子力学に従うにも関わらず、確率振幅ではなく確率分布そのものが線形波動方程式に従うという面白さがある。一次元線形波動方程式の解としての確率分布は形が変わらず伝播していくため、この伝播は安定と言える。派遣中の解析によりこの量子系ではフォノンとの相互作用がゼロの場合の散逸を伴わない自由波束の伝播も、確率分布が線形波動方程式に従うことが明らかになった。そこで、自由波束の伝播と流体力学的音波モードによる伝播を詳細に比較し、その違いを明らかにした。フォノンとの相互作用がある場合には、一次元量子トンネル効果に起因して伝播粒子の運動量空間が互いに素な部分空間に分離し、各部分空間毎に緩和現象が起こる。そのため運動量緩和後も初期分布の情報が保存されている。初期分布として運動量方向に細い分布を与えると平衡状態到達後も初期分布の幅が保存され温度で決まるマクスウェル分布の幅と比べ2桁小さい状況を作ることを明らかにした。波束を広げる位相混合の効果は運動量分布の幅で決まるため、同じ温度のマクスウェル分布で幅を与えた自由波束と比べ、波束の広がる速さが圧倒的に抑えられるという意味で伝播が安定となることを明らかにした。

6 研究成果発表等の見通し及び今後の研究計画の方向性 (1/2 ページ程度を目安に記入すること)

派遣先での研究成果は、博士論文にまとめ発表した。今回の解析では伝播粒子とフォノンの結合が弱い状況を考え、二体散乱の効果だけで良い近似となる状況を扱った。その結果、伝播粒子とフォノンの二体散乱における一次元の量子トンネル効果が本質的となって安定な流体力学的音波が出現した。高温領域でフォノンの数が増えても、一つの伝播粒子と一つのフォノンの間の二体散乱における一次元量子トンネル効果は依然として存在するため、生体温度のような高温領域でも、安定な伝播モードは存在したである。今後の研究の方向性としては伝播粒子とフォノンの結合が強い状況を考え、伝播粒子とフォノン複数による多体散乱の効果が効く状況を考える。この状況は、伝播粒子から熱浴としてのフォノンへの影響が、また伝播粒子に返ってきて、それがまたフォノンに返ってと言ったように非線形であり非マルコフ的な効果が効く。非マルコフ効果が量子コヒーレンスという意味での量子効果を顕在化させることを報告した研究もあるので、非マルコフ効果を考慮した量子輸送現象を考える。

また本派遣はコロナウィルスの影響で予定より一年遅く開始しているが、この一年の間に本プログラム応募時には未発見であった結果を得ており、その結果について派遣期間中に新たな成果があつたので今後の計画の方向性と共に示す。派遣までの一年で、この系では伝播粒子の分布の変位の分散の時間微分で定義した現象論的拡散係数が負の値をもち、見かけ上の負の拡散が起こることが明らかにした。それにも関わらずリビリアンの固有値の複素成分として定義される真の拡散係数は常に正の値を持っている。現象論的な拡散係数が負になる理由は、この系では、波束の拡がりに対して常に正の寄与を与える拡散効果に加えて、正負どちらの寄与も与えうる位相混合の効果が存在するからである。派遣前までの成果で、位相混合が負の寄与を与え見かけ上の負の拡散が実現される状況として、二つのガウス波束の重ね合わせを初期分布として与えた状況が発見されていた。この状況では位相混合により二つのガウス波束が互いに近付くため、分布全体の変位の分散が時間とともに減少し現象論的拡散係数は負の値を取る。ただし、其々のガウス波束は拡散効果により拡がるため、各ガウス波束に注目すると、波束は拡がるばかりで負の拡散が起きているように見えない。派遣期間中の成果として、スクイーズドされたガウス波束を初期分布に与えると、一つのガウス波束で見かけ上の負の拡散が起きる状況を実現できることを発見した。この状況では正の拡散効果と負の位相混合の効果が互いに競合しており、位相混合の効果が上回る結果として、単体のガウス波束の幅が減少していく。結果、見かけ上の負の拡散が起きる。ただし、真の拡散係数は正の値を持っている。今後の研究の方向性としては、この見かけ上の負の拡散を示す單一ガウス波束において、負の位相混合の寄与が正の拡散効果を上回る条件を詳細に調べることである。これにより、波束の拡がりが抑えられているという意味で安定な量子輸送伝播を実現できると考える。

7 本プログラムに採用されたことで得られたこと (1/2 ページ程度を目安に記入すること)

第一に受け入れ研究者であるPetrosky博士による指導及び議論を通じて、不可逆性の起源についての専門知識だけでなく、物理学の研究に取り組む際の姿勢や考え方について博士の価値観に影響を受ける機会を得た。特に、印象に残っていることは以下の三点「常に原理に立ち返って考えること」、「ある主張を正しいと信じる根拠を常に把握しておくこと」、「シンボルで説明できたとき初めて理解できたと感じる」である。これらは今後の研究活動において大変役に立つ道標となる。

第二に、テキサス大学オースティン校で出会った博士課程の若き研究者達との繋がりである。特に実験物理の大学院生と仲良くなり、これまで理論ばかりをしてきた私が見たことがない実験装置を見たり触れたりする機会を得た。また、彼らとの英語による科学的コミュニケーションを通じて国際人として活動していく気概が生まれた。

第三に、新しい環境に自ら飛び込むこと、挑戦すること、行動することで人と繋がり、文化的藝術的交流をするという成功体験を得た。例えば派遣先オースティンは芸術・音楽の街として知られるが、私は種々のイベントに参加することで現地の画家、音楽家、陶芸家と言った芸術家と親しくなった。彼らとの交流を通して、分野は違っても創造的活動に共通する点が見つかり、自身の研究活動を鑑みるきっかけになった。また、人生初のフルマラソンを完走したことも成功体験の一つである。今後国際人として活動するにあたって、これらの成功体験は行動の後押しとなり重要な役割を果たすであろう。