

一般相対論効果を利用した量子系の時間制御

学際・実用領域

SATテクノロジー・ショーケース2025

■ はじめに

近年、量子力学に基づく次世代型のコンピュータである量子コンピュータ開発が注目されている。従来のコンピュータとは異なり、このコンピュータは電子や原子といったミクロな世界に特有の性質を活用しており、計算速度の飛躍的な向上など、多くの利点を持つことから実用化が期待されている。このような期待がある一方で、人工的に構築された量子系は非常に不安定であり、微細な要因によって容易に崩壊してしまう。従って、量子コンピュータの開発に向けて、寿命が長く安定した量子系の実現を目指した理論的および実験的な研究が活発に行われている。

本研究では、「安定した量子系の実現」ではなく、「量子系の寿命を延ばす」ことに焦点を当てる。特に、Einsteinの一般相対性理論によれば、時間の流れ方は一様ではなく、受ける重力の強さによって異なることが知られている。この性質を応用し、観測者に対して時間の進みが遅い量子系を、重力を利用して実現する手法を提案する。

■ 研究内容

1. 早送り法

ある特定の系に対して、寿命が異なる系を理論的に実現する手法の一つである早送り法について説明する。例として、時間 t に依存する座標 $x(t)$ が従う方程式に対して、 $x'(t') := x(t)$ で定義される $x'(t')$ を用い、以下のように時間 t' に置き換える操作を考える。

$$0 = \frac{d^2x(t)}{dt^2} \rightarrow 0 = \frac{dt'}{dt} \frac{d}{dt'} \left(\frac{dt'}{dt} \frac{dx'(t')}{dt'} \right)$$

$$= \left(\frac{d^2t'}{dt^2} \frac{dx'(t')}{dt'} \right) + \left(\frac{dt'}{dt} \right)^2 \frac{d^2x'(t')}{dt'^2}$$

ここで $t' = t/10$ と定義すれば、 $x(t)$ では10秒かかる物理的な操作が、 $x'(t')$ では1秒で実行出来るようになる。

しかし、一般に量子系を記述する方程式は、上述のような単純な微分方程式ではないため、 $x'(t')$ に対する方程式が解けるとは限らず、未知の関数をさらに変換する操作が必要になることがある。

2. 一般座標変換と重力

理論物理学を考える上で非常に重要な概念の一つに対称性が存在する。これはある変換を施しても変わらない

性質のことであり、物理学の理論を構成する際や具体的な解析を行う際など強力な道具となる。例えば、現実の物理現象を記述する際に、西暦で表現しても和暦(令和)で表現しても本質的には変わらない。つまり西暦 y を用いて書き下され数式に対して、以下で定義される和暦 y' への変換を行っても数式は変わらないはずである。

$$y = y' + 2018$$

このような性質を時間並進対称性と呼び、数式の形を制限するだけでなく、解析を行う際には時間の基準点を自由に選ぶことを許し、更にはエネルギー保存則まで導く。

同様の手続きで、物理法則を記述する数式は座標系の選び方に依存しないことを要求する。例えば、2次元二階偏微分演算子は、直交座標 (x, y) で与えられるものと極座標 (r, θ) で与えられるものは等しくない。

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) f \neq \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) f$$

従ってこのような二階微分演算子を使用することは禁止される。一方で、上記の演算子にある適切な行列 $g_{\mu\nu}$ 及びその行列式 g を用いて定義されるLaplace-Beltrami演算子は座標の選び方に依存しない共変な形で与えられる。

$$\frac{1}{\sqrt{|g|}} \partial_i (\sqrt{|g|} f)$$

このような直交座標から極座標への変換を始めとした一般的な座標変換を要求すると自然に行列 $g_{\mu\nu}$ が導入され、物理的にはこの自由度は重力であることが知られている。つまり、重力とは一般座標変換の対称性を要求することで自然に導入される自由度である。

3. 早送り法と重力

早送り法の行う時間 t から t' への変換とは、「時間に関する一般座標変換」と解釈することが可能である。一方、通常の理論と異なる点是对称性を持たない理論を考えており、重力の与える影響を考慮していない。そこで我々は一般座標変換の対称性を持つ重力と結合した理論に焦点を当てて考えた。この理論は対称性を持つため、構成上時間の取り方を変えても数式の形は一切変わらない。一方で、数式には重力が含まれるため、式の形が変わらない代償に、 t と t' の関係に依って重力の強さが変化する。つまり、あらゆる実験設備を変えず、重力の強さを変えるだけで時間の流れ方が異なる系を実現することが出来る。

代表発表者 安藤 雄史(あんど う ゆうじ)
所属 東北大学
数理科学共創社会センター
産業技術総合研究所
量子・AI融合技術ビジネス開発
グローバル研究センター
問合せ先 〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉 468-1
Mail : yuji.ando.b5@tohoku.ac.jp

■キーワード: (1) 量子制御
(2) 一般相対性理論
(3) 重力

■共同研究者: 増田俊平
産業技術総合研究所
量子・AI融合技術ビジネス開発
グローバル研究センター