

輻射輸送現象のための 高速量子アルゴリズムの開発

SATテクノロジー・ショーケース2024

■ 概要

輻射輸送計算は、工学分野での輻射伝熱解析だけでなく、医療分野における拡散光トモグラフィ、宇宙物理学における輻射流体力学など、多岐にわたる分野で基礎となる。本研究では、将来、実用化される量子コンピュータ上で輻射輸送計算を行うための量子アルゴリズムを作成する。

この量子アルゴリズムは、輻射輸送の主要な物理過程である吸収、散乱、および放射を含む方程式系に、格子ボルツマン法を用いる。計算は、3つの量子回路で構成される。第1部では吸収(減少分)と散乱、第2部では吸収(増加分)と放射を計算する。第3部では伝播過程を求める。

エンコーディングと測定を除き、この量子アルゴリズムは、古典アルゴリズムと比較して、対数スケールで計算量を減少させる。さらに、テスト問題のシミュレーション結果と解析解の一致から、アルゴリズムの妥当性を実証する。

■ アルゴリズム

1. 格子ボルツマン法の適用

1次元輻射輸送方程式の一般的な形式を示す。

$$\frac{\partial I_\nu(x, \vec{\Omega}, t)}{\partial t} + \vec{\Omega} \cdot \nabla I_\nu(x, \vec{\Omega}, t) = -\kappa_\nu(x, \vec{\Omega}, t) I_\nu(x, \vec{\Omega}, t) +$$

$$S_\nu(x, \vec{\Omega}, t) \int I_\nu(x, \vec{\Omega}', t) d\vec{\Omega}' + S_\nu(x, \vec{\Omega}, t)$$

格子ボルツマン法によって離散化する。

$$I_\pm(x \pm \Delta x, t + \Delta t) - I_\pm(x, t) = -\kappa I_\pm(x, t) \Delta t +$$

$$\frac{\sigma}{2} \{I_+(x, t) + I_-(x, t)\} \Delta t + \frac{1}{2} S_\pm(x, t) \Delta t$$

2. 量子回路の構成

輻射強度 I_\pm を振幅としてエンコーディングする。

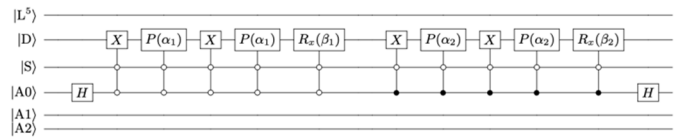
$$|\phi\rangle = |000\rangle_a \sum_i \left(\frac{I_+^i}{\|\phi\|} |00\rangle|i\rangle + \frac{I_-^i}{\|\phi\|} |01\rangle|i\rangle + \frac{1}{2} \frac{S_+^i \Delta t}{\|\phi\|} |10\rangle|i\rangle + \frac{1}{2} \frac{S_-^i \Delta t}{\|\phi\|} |11\rangle|i\rangle \right)$$

量子状態 ϕ に3つの量子回路を作用させて、輻射輸送計算を行う。その後、状態測定によって輻射強度を推定する。

① 吸収(減少分)・散乱過程

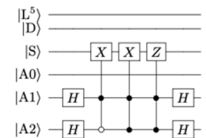
$$I_+^{AS}(x, t) = \left(1 - \kappa \Delta t + \frac{\sigma}{2} \Delta t\right) I_+(x, t) + \frac{\sigma}{2} \Delta t I_-(x, t)$$

$$I_-^{AS}(x, t) = \frac{\sigma}{2} \Delta t I_+(x, t) + \left(1 - \kappa \Delta t + \frac{\sigma}{2} \Delta t\right) I_-(x, t)$$



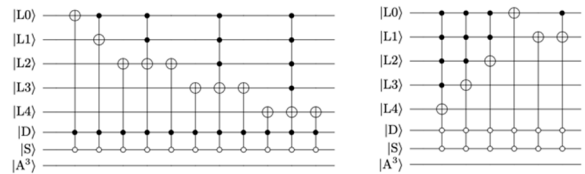
② 吸収(増加分)・放射過程

$$I_\pm^{ASE}(x, t) = I_\pm^{AS}(x, t) + \frac{1}{2} S_\pm(x) \Delta t$$



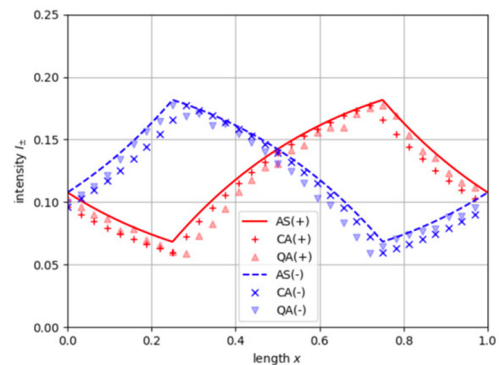
③ 伝播過程

$$I_\pm(x \pm \Delta x, t + \Delta t) = I_\pm^{ASE}(x, t)$$



3. テスト計算

Qiskit Aer simulator を用いた計算結果を示す。量子アルゴリズムの結果($\Delta \nabla$)は、古典アルゴリズムの結果($+ \times$)と同様に、解析解(実線・破線)をよく再現する。



代表発表者 **五十嵐 朱夏(いがらし あすか)**
 所属 **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 **〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1
 TEL: 029-861-6140
 産業技術総合研究所 中央事業所2群
 asuka.igarashi@aist.go.jp**

■キーワード: (1) 輻射輸送
 (2) 量子コンピュータ
 (3) 量子アルゴリズム
 ■共同研究者: 川畑史郎(産総研)、門脇正史(産総研)