

振動回転エンタングルメントを利用した量子演算

(東北大院・理¹、JST - CREST²)寺西慶哲^{1,2}、大槻幸義^{1,2}

【序】

量子コンピュータは、既存のコンピュータよりもはるかに効率的な計算が可能であることが期待され注目を集めている。量子計算は、量子状態のユニタリ変換で表されるゲート操作の組み合わせと非ユニタリである観測によって実現される。本研究では、ヨウ素分子の振動回転エンタングルメントを利用した量子演算の可能性について議論し、ショアの因数分解アルゴリズムの実行過程をシミュレートする。

【ditを用いた量子演算】

多くの量子コンピュータは、量子bit と呼ばれる2準位系を基本単位とし、n 個の量子ビットによって張られる 2^n 次元のヒルベルト空間上のベクトルに対するユニタリ変換によって演算を行う。任意のユニタリ変換は、一つの量子bitにのみ作用する1 bit操作と2つの量子ビットに作用する2bit操作の組み合わせで表現することが出来ることが知られている。

分子の振動回転運動は、個々の自由度が多くの固有状態を持つ。この特性を利用するために、本研究では2進数を基本とする量子演算ではなく、d進数(dit)を用いる。ditを用いると少ない自由度の物理系でも比較的大きな計算を実行することが可能である。しかしながら、基本演算である1 dit、2 dit 操作が非常に複雑になるという欠点をもつ。本研究では、ヨウ素分子のB状態上の振動回転それぞれの自由度をditとする2dit系を考える。また、1 dit操作と2 dit 操作を行うレーザーパルスを最適制御法によって設計する。

【ショアの因数分解アルゴリズム】

ショアの因数分解アルゴリズムを簡単に説明する。関数 $f(k) = x^k \text{ MOD } N$ という関数の周期からN の因数を得ることが出来る。ここでは、以下の手順に従ってこの関数の周期を得る(以下では、計算基底 $|a\rangle|b\rangle$ の $|a\rangle$ を入力レジスタ、 $|b\rangle$ を出力レジスタと呼ぶ)。

- (1) 入力レジスタ重ね合わせ状態、 $|k\rangle|0\rangle$ を用意する。
- (2) 入力レジスタの値に応じて関数 f の値を出力レジスタに書き込む。
(演算後の結果： $|k\rangle|x^k \text{ MOD } N\rangle$)
- (3) 入力レジスタをフーリエ変換し、関数の周期を得る。

本研究では、計算基底 $|a\rangle|b\rangle$ を、振動(回転)量子数が v (J)である量子状態 $|v\rangle|J\rangle$ を用いて表す。(対応関係は、 $a=v-27$ ($v=27\sim 34$) $b=(J-1)/2$ ($J=1\sim 6,7$))。

【演算パルス】

上記アルゴリズムをヨウ素分子とレーザーで実装する手順は以下のとおりである。

(I) ヨウ素分子のX状態の振動回転基底状態を初期状態として用意する。

(II) ナノ秒パルスを照射し、 $|k\rangle |x^k \text{ MOD } N\rangle$ に相当する振動回転波束をB状態上に生成する。

(III) 振動状態をフーリエ変換するフェムト秒パルスを照射して振動状態分布を測定する。

手順(II)で用いるナノ秒パルスが振動回転エンタングルメントを生成する2dit操作で、手順(III)で用いるフェムト秒パルスが1dit操作である。

【結果と考察】

$X=10, N=33$ の場合の結果を図1に示す。左が演算が厳密に行われた場合に期待される状態分布で、右が最適制御によって得られたパルスを照射した後の状態分布である。上の2つのグラフは手順(II)の直後の結果で、下の2つは手順(III)直後の結果である。我々のパルスを用いればショアのアルゴリズムが精度良く2原子分子で達成可能であることがわかる。

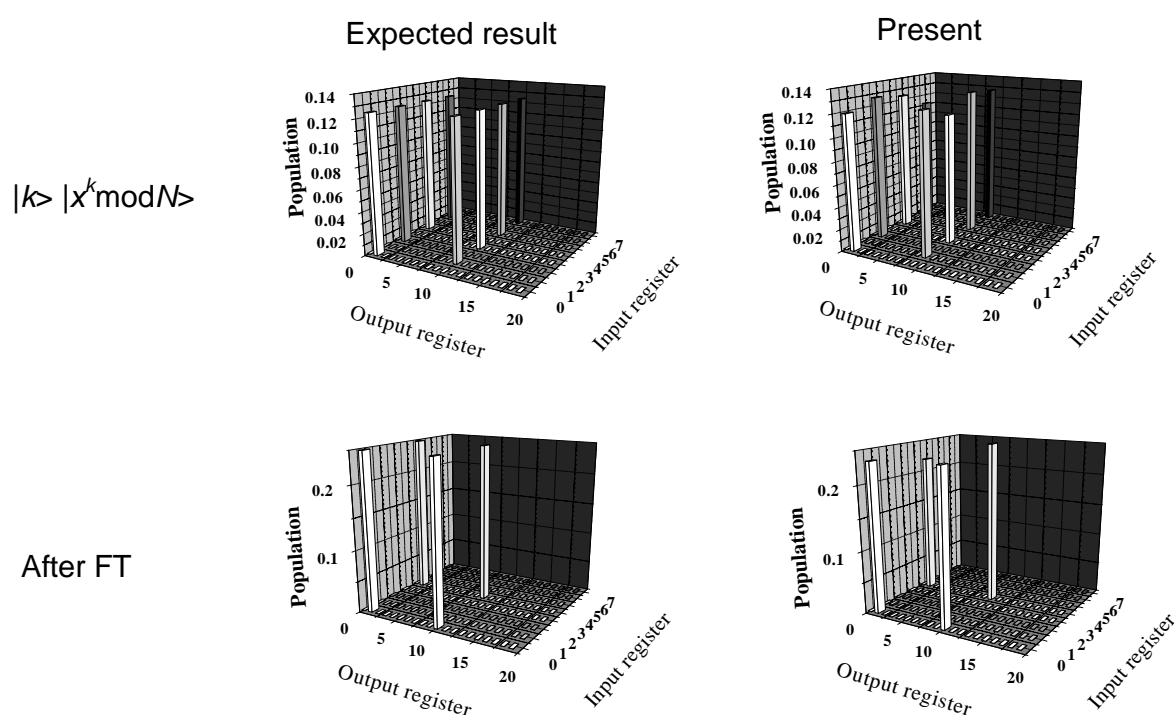


図1. 各手順での状態分布(計算基底)。右が最適制御パルスによって得られる結果で、左が演算が厳密に行われた場合の結果