

外部磁場項を実装したコヒーレントイジングマシン

Implementation of external magnetic field terms to coherent Ising machine

¹NTT 物性研、²NTT 先デ研

- 武居弘樹¹、稲葉謙介¹、稲垣卓弘¹、生田拓也¹、山田康博¹、本庄利守¹、
風間拓志²、圓佛晃次²、梅木毅伺²、笠原亮一²

¹NTT Basic Research Labs., ²NTT Device Technology Labs.

- H. Takesue¹, K. Inaba¹, T. Inagaki¹, T. Ikuta¹, Y. Yamada¹, T. Honjo¹,
T. Kazama², K. Enbutsu², T. Umeki², and R. Kasahara²

E-mail: takesue.hiroki@lab.ntt.co.jp

概要: 我々は相互に結合した縮退光パラメトリック発振器 (DOPO) パルスをスピンとして見立て、イジングモデルの基底状態探索を行うコヒーレントイジングマシン (CIM) の研究開発を行っている [1]。既に 2000 の DOPO パルスからなる CIM を実現し、これを用いて 2000 ノードの完全グラフの最大カット問題を高速に解くことに成功しているが、各スピンへの外部磁場に相当する項は実装されておらず、またスピン間の結合項は $\{-1, 0, 1\}$ の 3 値に制限されていた。一方、様々な組合せ最適化問題をイジングモデルに変換するには、多くの場合外部磁場項と多値の結合項が必要であることが知られている [2]。今回、外部磁場項と多値結合項を実装した CIM を開発し、それを用いて外部磁場中の 1 次元 (1D) および 2 次元 (2D) イジングモデルを模擬する実験を行った。

装置構成: 1 km の位相安定化された光ファイバ共振器中に周期分極反転ニオブ酸リチウム導波路からなる位相感応増幅器 (PSA) を挿入し、これを 1 GHz 繰り返しのポンプ光パルスで励起することで、約 5000 個の DOPO パルス群を発生する。そのうちの 512 個の DOPO パルスをイジングモデルの解探索に使用する。DOPO パルス群が共振器を周回する毎に、共振器中に配置された光ファイバカプラによりエネルギーの一部を取り出し、平衡ホモダイン検出器によりその振幅を測定する。得られた 512 パルスの振幅測定結果 c_i (i : i 番目のスピンを示す添え字) は field programmable gate array (FPGA) に入力される。FPGA には、目的の問題に対応するスピン間結合 (J_{ij} : 512 行、512 列の行列) と、外部磁場項 (h_i : 512 要素のベクトル) がそれぞれ 8 bit、16 bit の分解能であらかじめ格納されている。FPGA は、 $\sum_j J_{ij}c_j + h_i|c_i|$ で与えられる行列計算により、目的の問題に対応するスピン間結合及び外部磁場を i 番目の DOPO パルスへ与えるための帰還信号を計算する。本帰還信号を DOPO と同じ波長をもつ光パルスに重畳し、各 DOPO に同期して注入することで、各 DOPO 強度に応じたバイアス項の印加と他 DOPO との結合を同時に実装する。本動作を DOPO の発振過程で繰り返し行う。このとき、DOPO パルス群が全系の損失が最小となる位相の組合せにおいて高い確率で発振することを利用して、イジングモデルの基底状態を高確率で得ることができる。

実験: 外部磁場中の 1D/2D イジングモデル: 反強磁性結合かつ周期境界条件を満たす 400 スピンの 1D 及び 2D ネットワークを、上記 CIM の 400 個の DOPO パルスを用いて模擬し、スピン群に印加する一様磁場 h を変化させた場合の磁化の変化を測定した。その結果、 $h \sim 2dJ$ (J : 結合係数、 d : 次元) において反強磁性の秩序状態と強磁性の秩序状態の転移が生じ、平均場近似により得られる理論検討の結果と一致した。また、イジングモデルにおいて厳密解と平均場近似の結果が顕著に異なる 1D のスタガード磁化について、CIM は厳密解に近い結果を与えることを確認した。詳細は当日報告する。

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) により、科学技術振興機構を通して委託されたものです。

参考文献

- [1] T. Inagaki et al., Science **354**, 603 (2016).
- [2] A. Lucas, Frontiers in Phys. **2**, Article 5 (2014).