

# wildcatで量子アニーリングのmaxcut実装

湊 雄一郎(MDR)

# MDR

所在地 : 東京都千代田区丸の内(東京都文京区本郷へ)

設立 : 2008年

主要取引先 : 国立研究所、国立研究開発法人、国内大手企業

## 最優秀はヘテロDB米エヌビディアがAIイベント

日本経済新聞 2017年12月12日 18:37

MDR(東京・千代田、湊雄一郎社長)は量子コンピューターを開発するスタートアップだ。2008年に起業し、組み合わせ最適化問題を高速で解く量子アニーリング方式と幅広い種類の計算を高速化する量子ゲート方式の両面から研究開発を進める。湊社長は「参考になる同業が少ないため、実装を組み合わせで全部自社で手掛ける必要がある。今後は量子コンピューター向けの深層学習理論を考えたい」と話した。

# 量子コンピュータ

「量子力学」の原理を応用して計算

## 量子ゲート方式

量子ビットに量子ゲートを適用して計算

IBM

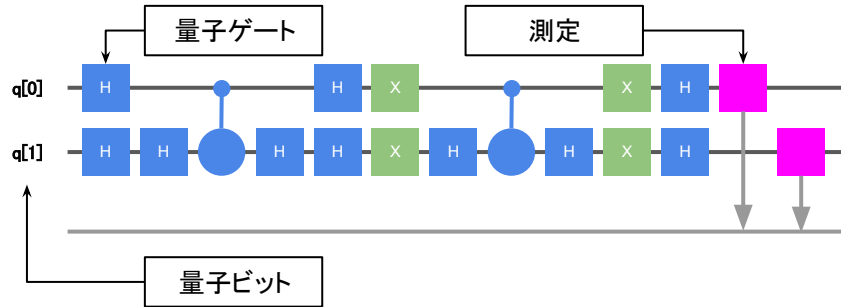
Microsoft

Rigetti

Google

IonQ

QCI



横軸が時間(コヒーレンスタイム)

## 量子イジングマシン方式

磁性体スピングラスを模したイジングモデルに問題をマッピング

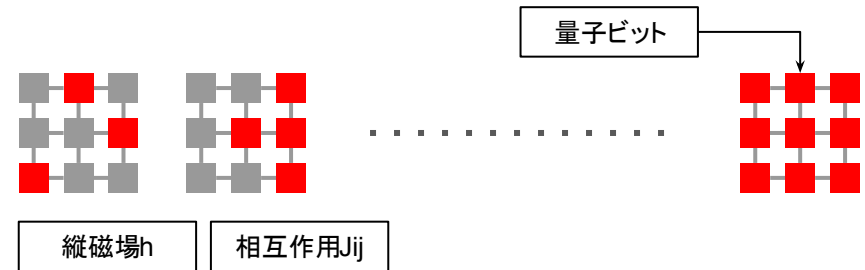
レーザーネットワーク

量子アニーリング

NTT

D-wave

富士通



アニーリング時間を経て変化(横磁場を弱める)

# ビル・ゲイツ氏が告白「量子コンピューターは理解できない」

「量子コンピューターはマイクロソフトがスライドで発表したことだが、私は本当に理解できない。私は物理や数学について、かなりの知識を持っている。だが、スライドの内容はまるで象形文字。それが量子コンピューターだ」とゲイツ氏は語った。

BUSINESS INSIDER  
JAPAN

ENTERPRISE

f t @ Edition ▼ Q

## ビル・ゲイツ氏が告白「量子コンピューターは理解できない」

Matt Weinberger  
© Sep. 26, 2017, 11:30 AM 9,452

FACEBOOK TWITTER LINKEDIN HATENA LINE

マイクロソフトは、最先端のコンピューターシステムの開発に多大なリソースを投入している。

量子コンピューターだ。

今、我々が手にしている、どんなコンピューターシステムよりもはるかにパワフルな新しいコンピューターシステム。

9月25日（現地時間）、マイクロソフト・イグナイト（Microsoft Ignite conference）において同社CEOサティア・ナデラ氏は、量子コンピューターに関する同社のビジョンを発表した。量子コンピュ



ビル・ゲイツ氏にも理解できない。  
Microsoft

### おすすめ記事



スーパーストック創業者に聞く「人生100年時代の最大リスク」の乗り越え方



ソニーの対話ロボ「Xperia Hello!」に疑問、なぜ“独自技術”の挑戦を続けるのか？



リクルートの仕組みが海外でも圧倒的成長を果たす理由——教育格差解消を目指すQuipper広げたのは地道な足腰

Sponsored



Facebook日本オフィスを突撃！永遠の「未完成」は本当だった



米D2Cブランド「テイラー・スティッチ」が組んだ日本のIT企業とは——アマゾンとは違う新世代ECの形

Sponsored

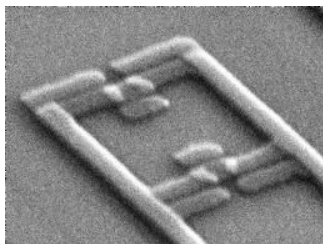
<https://www.businessinsider.jp/post-105234>

# D-waveについて

動作温度: 0.015K

消費電力: 25Kw

アニーリングタイム: 20 $\mu$ s



ジョセフソン結合  
1つのリング  
rf-SQUID(radio  
frequency  
SQUID)

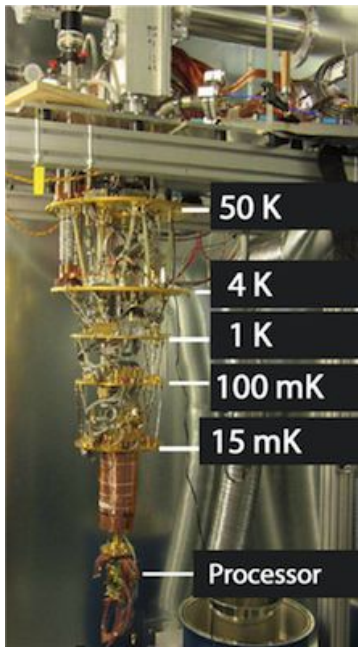
引用元  
: [https://en.wikipedia.org/wiki/Flux\\_qubit](https://en.wikipedia.org/wiki/Flux_qubit)

Nb 4レイヤー

Nb/AIOx/Nb レイヤー

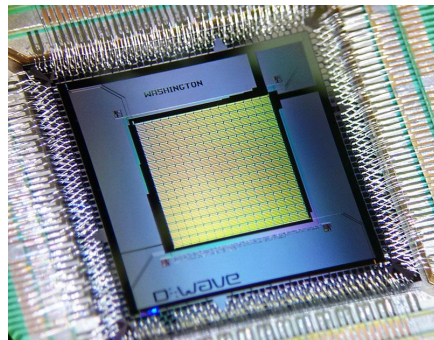
TiPt レジスタレイヤー

プラズマCVDで平坦化された SiO<sub>2</sub> 誘電レイヤー

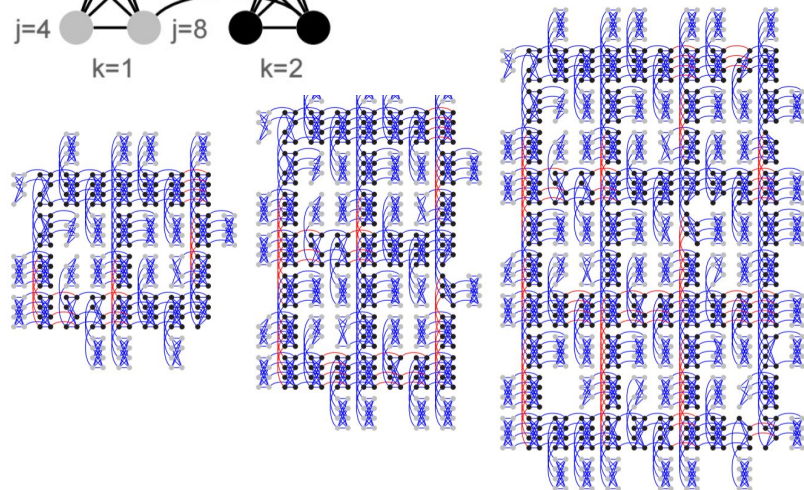
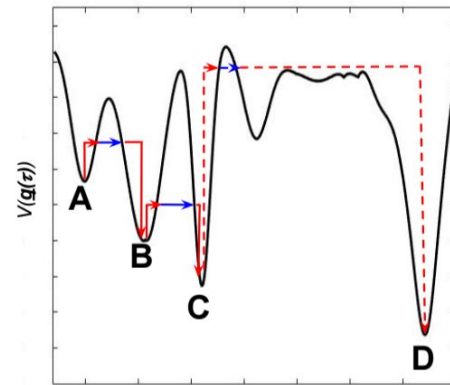
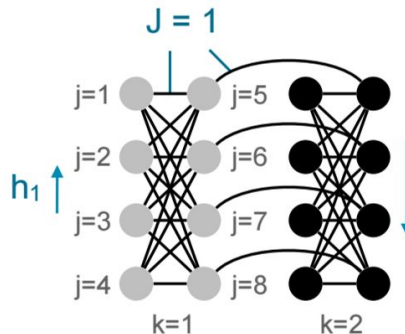
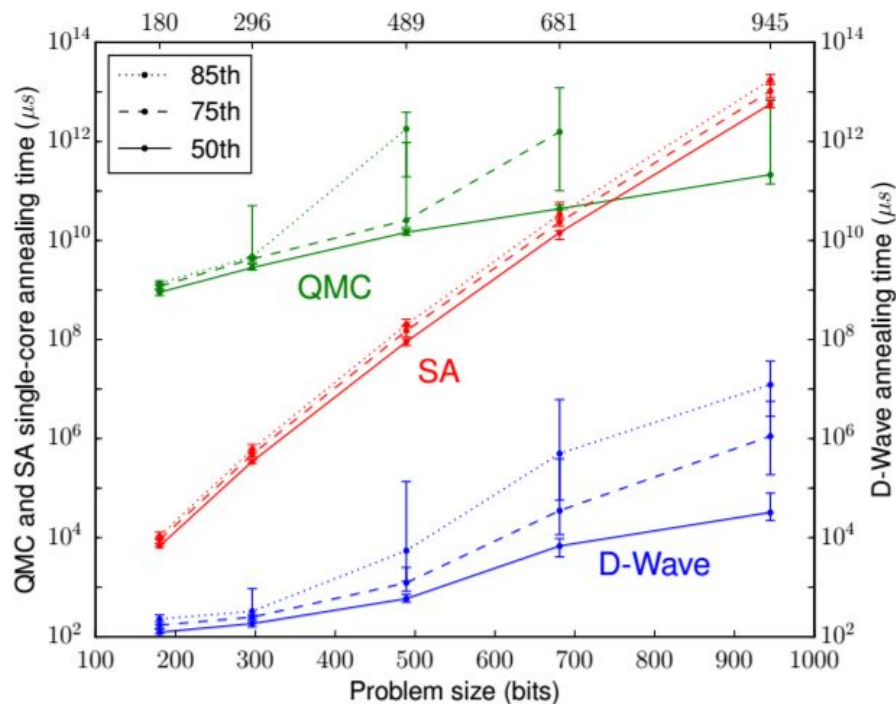


無冷媒希釈冷凍機

Oxford Instruments Triton 400  
Cryofree DR



# D-Waveの量子コンピュータは「1億倍高速」、 NASAやGoogleが会見



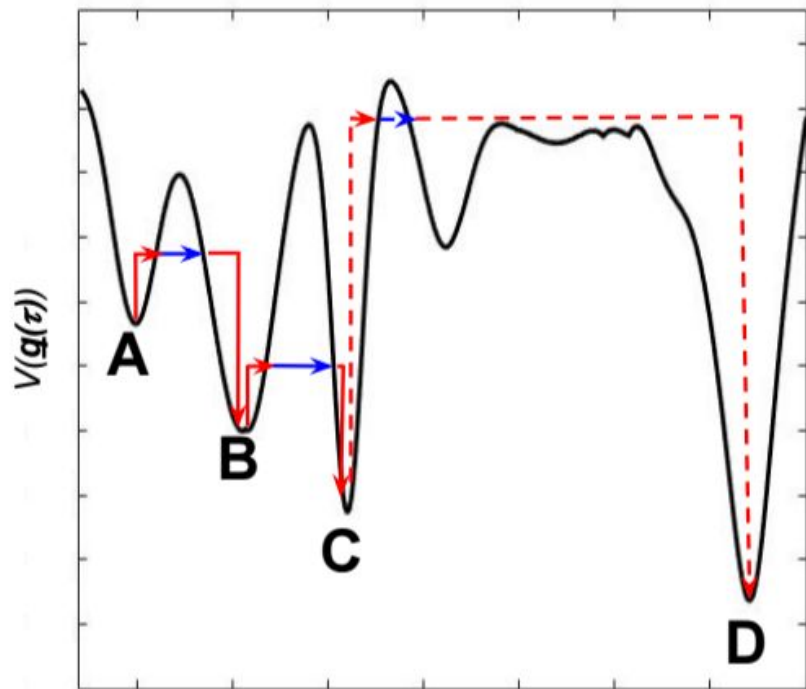
arXiv:1512.02206v4 [quant-ph] 22 Jan 2016

What is the Computational Value of Finite Range Tunneling?

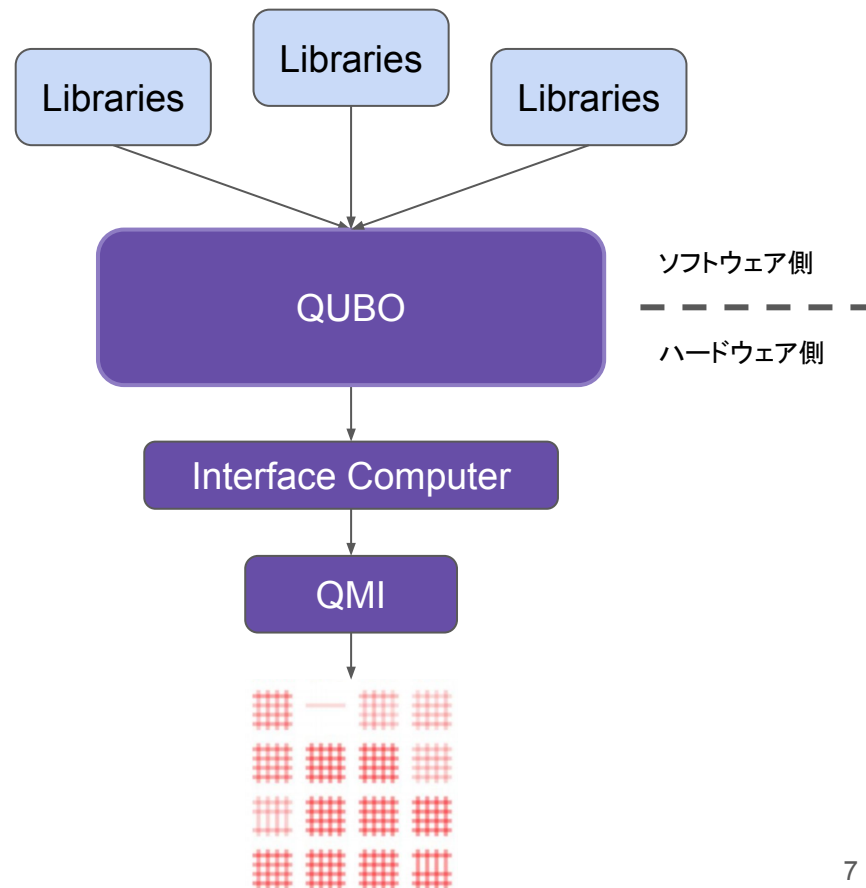
アニーリング

# 量子イジング・アニーリング方式

イジングモデルで最小値問題を解く。



arXiv:1512.02206v4 [quant-ph] 22 Jan 2016  
What is the Computational Value of Finite Range Tunneling?





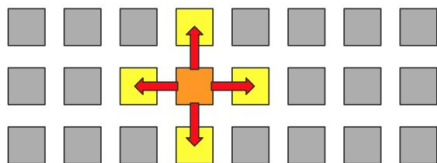
# イジングモデル

隣接格子との相互作用をもつ磁性体スピンを想定した物理モデルに問題を設定

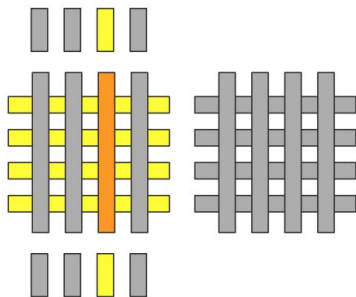
1次元古典系イジングモデル



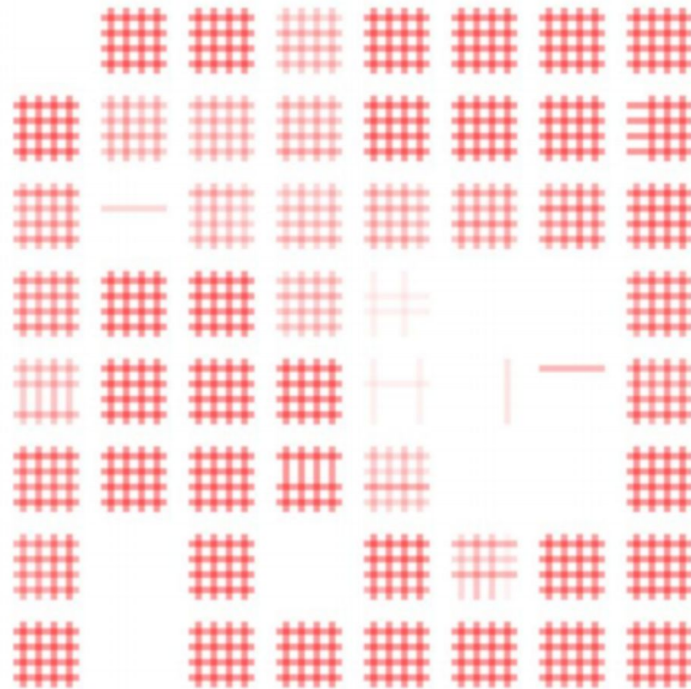
2次元古典系イジングモデル



D-waveキメラグラフ型イジングモデル



G=9.684910757595267





# 横磁場イジングモデル

Quantum annealing in the transverse Ising model Tadashi Kadowaki and Hidetoshi Nishimori Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, Oh-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8551, Japan ~Received 30 April 1998

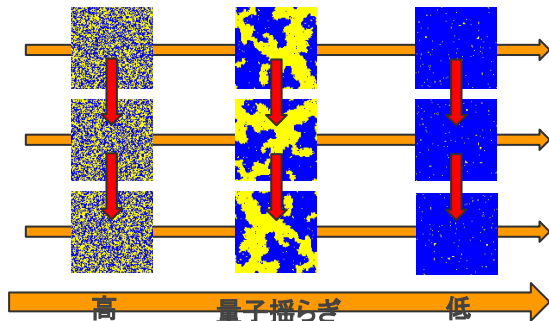
## II. TRANSVERSE ISING MODEL

Let us consider the following Ising model with longitudinal and transverse fields:

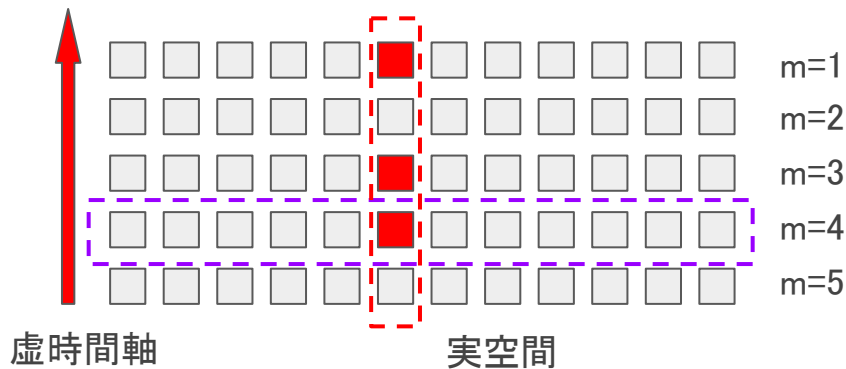
$$\mathcal{H}(t) = - \sum_{ij} J_{ij} \sigma_i^z \sigma_j^z - h \sum_i \sigma_i^z - \Gamma(t) \sum_i \sigma_i^x \quad (1)$$

$$\equiv \mathcal{H}_0 - \Gamma(t) \sum_i \sigma_i^x, \quad (2)$$

<http://www.stat.phys.titech.ac.jp/~nishimori/papers/98PRE5355.pdf>



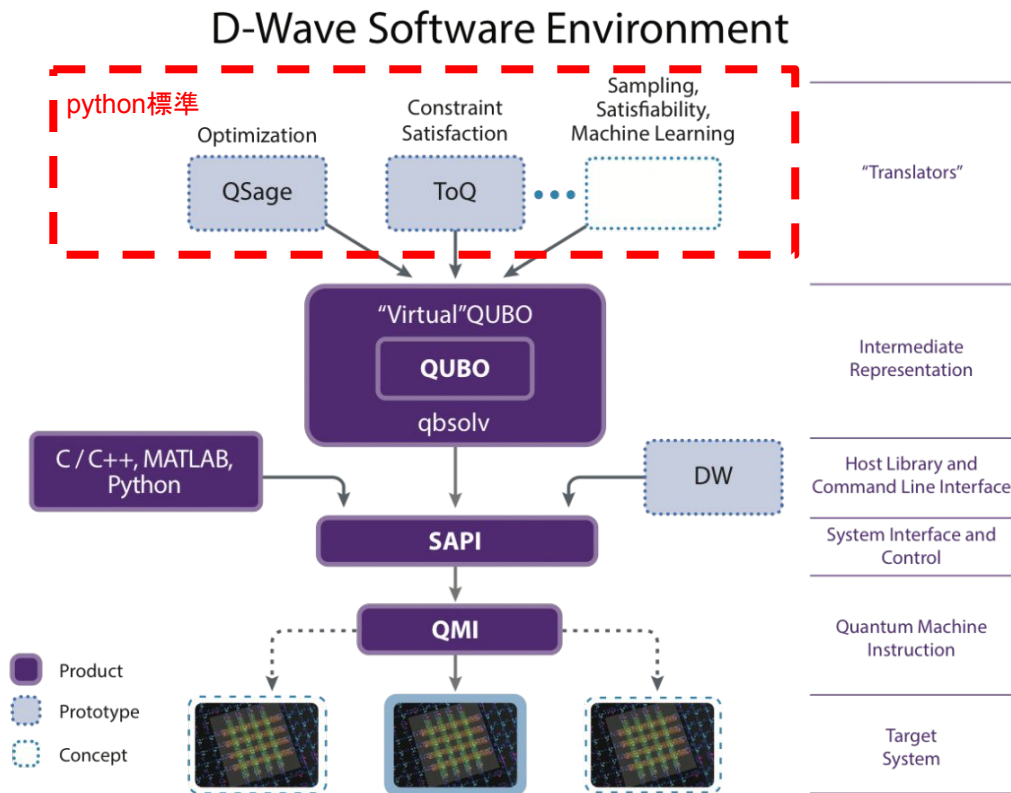
量子揺らぎを導入したイジングモデルを離散近似し経路積分表示。モンテカルロ法を適用。



シミュレーテッド量子アニーリング (SQA)  
量子計算を古典計算機でシミュレート

$$E = - \sum_{i,j} \sum_{k=1}^m \frac{J_{ij}}{m} q_{i,k} q_{j,k} - \sum_i \sum_{k=1}^m \frac{h_i}{m} q_{i,k} - \frac{T}{2} \sum_{i,j} \sum_{k=1}^m \ln \coth \left( \frac{\Gamma}{mT} \right) q_{i,k} q_{i,k+1}$$

# 通常のイジングの開発方法



Specifically when the following constraint is satisfied:

$$\max \sum_i v_i x_i \text{ with } \sum_i w_i x_i \leq W$$

The `PolyKnapsackAgent` solves this problem using the following QUBO formulation when the capacity is even:

$$\min_{x,y} - \sum_i v_i x_i + A \left[ \left( \sum_{i=2}^N w_i x_i \right) \left( \sum_{i=1}^N w_i x_i - 1 \right) + 4 \sum_{j=2, j \in \text{even}}^W y_j \left( j - \frac{1}{2} - \sum_{i=1}^N w_i x_i \right) \right]$$

and the following when it is odd:

$$\min_{x,y} - \sum_i v_i x_i + A \left[ \left( \sum_{i=2}^N w_i x_i \right) \left( \sum_{i=1}^N w_i x_i + 1 \right) + 4 \sum_{j=1, j \in \text{odd}}^W y_j \left( j - \frac{1}{2} - \sum_{i=1}^N w_i x_i \right) \right]$$

問題に合わせたハミルトニアン・QUBOの作成

## II. TRANSVERSE ISING MODEL

Let us consider the following Ising model with longitudinal and transverse fields:

$$\mathcal{H}(t) = - \sum_{ij} J_{ij} \sigma_i^z \sigma_j^z - h \sum_i \sigma_i^z - \Gamma(t) \sum_i \sigma_i^x \quad (1)$$

$$\equiv \mathcal{H}_0 - \Gamma(t) \sum_i \sigma_i^x, \quad (2)$$

# ハミルトニアン

基本となるエネルギー関数。この関数を最小にするように計算する。

Specifically when the following constraint is satisfied:

$$\max \sum_i v_i x_i \text{ with } \sum_i w_i x_i \leq W$$

制約条件やコスト関数

The `PolyKnapsackAgent` solves this problem using the following QUBO formulation when the capacity is even:

$$\min_{x,y} - \sum_i v_i x_i - A \left[ (\sum_{i=2}^N w_i x_i) (\sum_{i=1}^N w_i x_i - 1) + 4 \sum_{j=2, j \in \text{even}}^W y_j \left( j - \frac{1}{2} - \sum_{i=1}^N w_i x_i \right) \right]$$

and the following when it is odd:

$$\min_{x,y} - \sum_i v_i x_i - A \left[ (\sum_{i=2}^N w_i x_i) (\sum_{i=1}^N w_i x_i + 1) + 4 \sum_{j=1, j \in \text{odd}}^W y_j \left( j - \frac{1}{2} - \sum_{i=1}^N w_i x_i \right) \right]$$

むずかしい、、、

そこで、

`pip install wildcat`

もしくは

<https://github.com/mdrft/wildcat> からダウンロードボタン

# 何ができるか、

QUBOと呼ばれるものをつくることで、量子アニーリングが計算できます。

将来的にサンプルがたくさん増えます。(ついでに近い将来量子ゲートの計算もできるようになります。)

**>> 世界唯一の量子アニーリング学習フレームワーク！**

# どうつかうか

wildcatがインストールできたら、フォルダに入って、コードを書くだけ。

テキストエディタかviで

```
from wildcat.util.matrix import random_symmetric_matrix
from wildcat.solver.ising_hamiltonian_solver import IsingHamiltonianSolver
```

```
Jij = random_symmetric_matrix()
solver = IsingHamiltonianSolver(ising_interactions=Jij)
```

```
def callback(arrangement):
    print(arrangement)
```

```
solver.solve(callback)
```

そうすると、、、

#python example.py

```
[ 1  1  1  1  1  1  1  1  1 -1 -1  1 -1  1  1 -1  1 -1 -1 -1  1 -1  1 -1 -1
  1 -1  1 -1 -1 -1  1  1 -1  1  1 -1 -1 -1  1  1  1 -1  1 -1 -1 -1 -1 -1 -1
  1 -1  1  1  1 -1  1  1  1 -1  1 -1  1 -1 -1  1 -1 -1 -1  1  1 -1 -1 -1  1
 -1  1  1 -1  1  1 -1 -1 -1 -1 -1  1  1 -1  1  1  1  1  1 -1 -1 -1 -1  1  1]
```

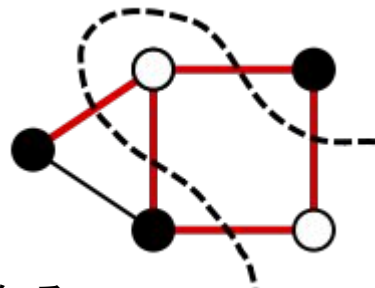
がでます。ランダムなので、、、



では、maxcut

一筆書きで辺をカットできる最大の数。

右上図だと黒と白の頂点が異なる間の辺がカットされるようになる。



ハミルトニアンは、、、

$$H = \sum_{i,j} J_{ij} q_i q_j$$

ただし、 $J_{ij}$ は-1もしくは1

# QUBO

行列を作ります。プログラミングでは配列で表現します。maxcutは対角項を0、非対角項を-1もしくは1にすると実現できます。

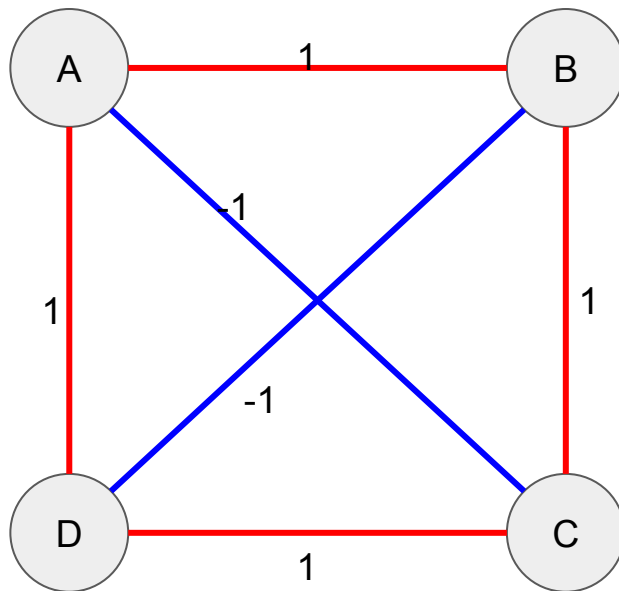
$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 1 \\ & 0 & 1 & -1 \\ & & 0 & 1 \\ & & & 0 \end{bmatrix}$$

実際は行列の上三角形の部分しか使わないのですが、実装上は他のところは適当にうめてしまってもいいです。左は4量子ビットの完全結合のmaxcutです。

# QUBOその2

これを図示すると、

	A	B	C	D
A	0	1	-1	1
B		0	1	-1
C			0	1
D				0



# 実行する

```
from wildcat.util.matrix import random_symmetric_matrix
from wildcat.solver.ising_hamiltonian_solver import IsingHamiltonianSolver
import numpy as np
```

```
Jij = np.array([[0, 1, -1, 1], [0, 0, 1, -1], [0, 0, 0, 1], [0, 0, 0, 0]])
```

```
solver = IsingHamiltonianSolver(ising_interactions=Jij)
```

```
def callback(arrangement):
    print(arrangement)
```

```
solver.solve(callback)
```

# 参考

katoくんがといてくれました。

wildcatで数独

<https://qiita.com/gyu-don/items/0c59423b12256821c38c>