Fixstars Amplifyハッカソン

Fixstars Amplifyの天体観測への応用の試み
ー 中性子星のX線偏光観測 ー

2021年3月31日

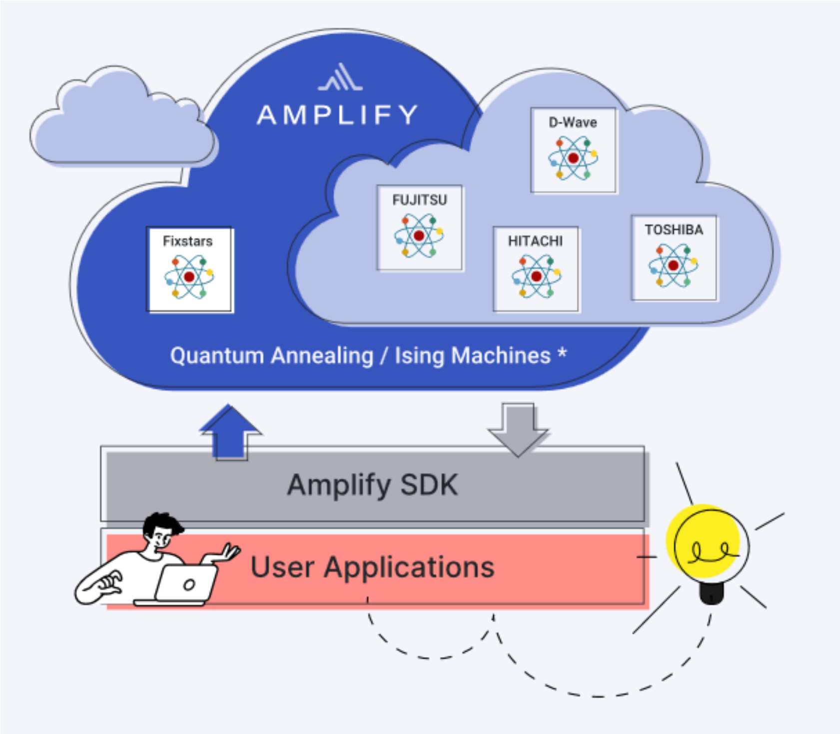
日本電気株式会社
矢田部　彰宏

\Orchestrating a brighter world

未来に向かい、人が生きる、豊かに生きるために欠かせないもの。
それは「安全」「安心」「効率」「公平」という価値が実現された社会です。

NECは、ネットワーク技術とコンピューティング技術をあわせ持つ
類のないインテグレーターとしてリーダーシップを発揮し、
卓越した技術とさまざまな知見やアイデアを融合することで、
世界の国々や地域の人々と協奏しながら、
明るく希望に満ちた暮らしと社会を実現し、未来につなげていきます。

Fixstars Amplifyハッカソン



株式会社フィックスターズ,
Fixstars AmplifyハッカソンWebサイト
https://amplify.fixstars.com/hackathon00　より

- Fixstars Amplifyは株式会社フィックスターズが開発した量子アニーリングマシン・イジングマシンを実行するためのクラウド基盤。
- Fixstars Amplifyを通して組合せ最適化問題を解くことができる。
- ハッカソンでは、Amplifyを使ったアプリを開発する。
  - ジョークプログラムから社会課題に挑む意欲作まで、テーマは自由。
- 本スライドはFixstars Amplifyハッカソンの提出物。

概要：本取り組みで試みたこと

- 近年、アニーリングマシンの応用先が盛んに研究されていて、素粒子物理学実験(*1)のようなアカデミックの分野でもアニーリングマシンの活用がなされている。
- 実験や観測で得られたデータから意味のある結果を取り出すことは天文学の観測においても同様に行われることである。
- 本取り組みではX線偏光の観測に着目して、中性子星と呼ばれる天体からのX線領域の偏光のデータを簡単な理論モデル(*2)によって作成し、Fixstars Amplifyによって姿勢を推定することを試みる。

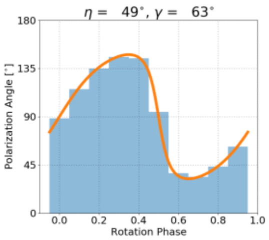
*1 Mott, A., Job, J., Vlimant, JR. *et al.* *Nature* 550, 375–379 (2017).
*2 Yatabe, A. & Yamada, S. *Astrophys. J* 850, 185, (2017). の理論モデルを簡略化した

本取り組みで目指すこと

中性子星の
姿勢パラメータ

η：観測者方向と
自転軸のなす角
γ：自転軸と磁軸
のなす角

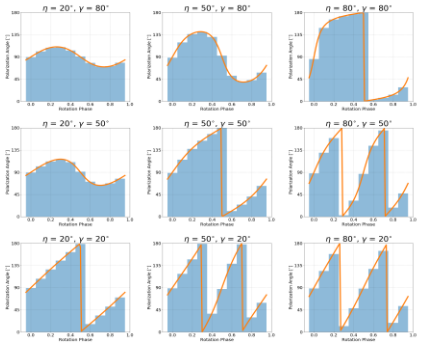
テストデータ
η=49°, γ=63°



※入力データは
青色のヒストグラム

テンプレート内で
一番似ている
データを探す

偏光データのテンプレート
（理論モデル、10°ごと）



角度パラメータ
（η、γ）
はいくつか？

正解

予想した姿勢
η=50°
γ=60°

推定した角度の違いが5°以下であれば正解とする。

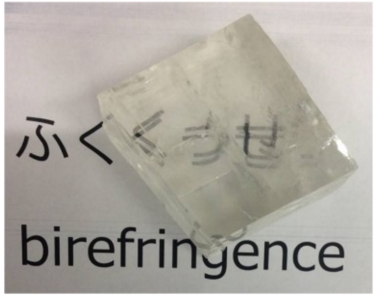
答え
η=49°, γ=63°

目次

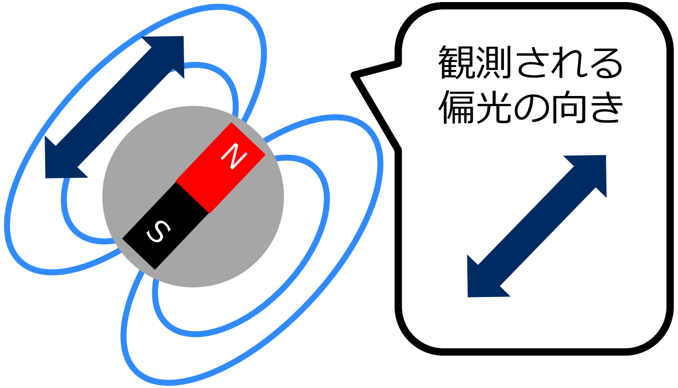
中性子星のX線偏光

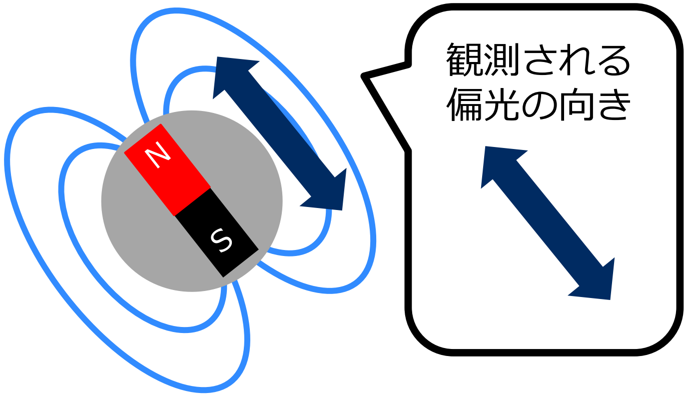
- 中性子星は極めて強い磁石（通常のもので10^8テスラ、これはネオジム磁石の1億倍の強さ）であることが観測から知られている。
- そのような強い磁石の周囲では、何もない状態である真空でさえも状態を変えてしまい、複屈折と呼ばれる、偏光によって屈折率が異なる現象が起きると理論的に予想されている。
- 複屈折やその他の効果により、中性子星表面から出てきたX線の光は中性子星の姿勢（磁石の向き）によって、観測される偏光の向きが異なると予想されている。

中性子星の姿勢と偏光の向きの関係



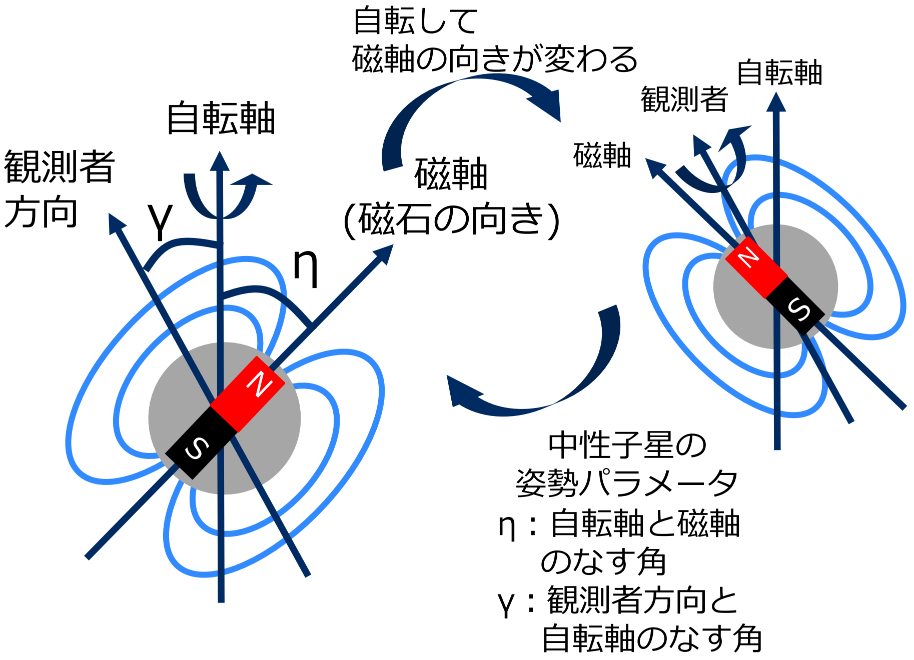
※方解石による複屈折。
文字が二重に見える。

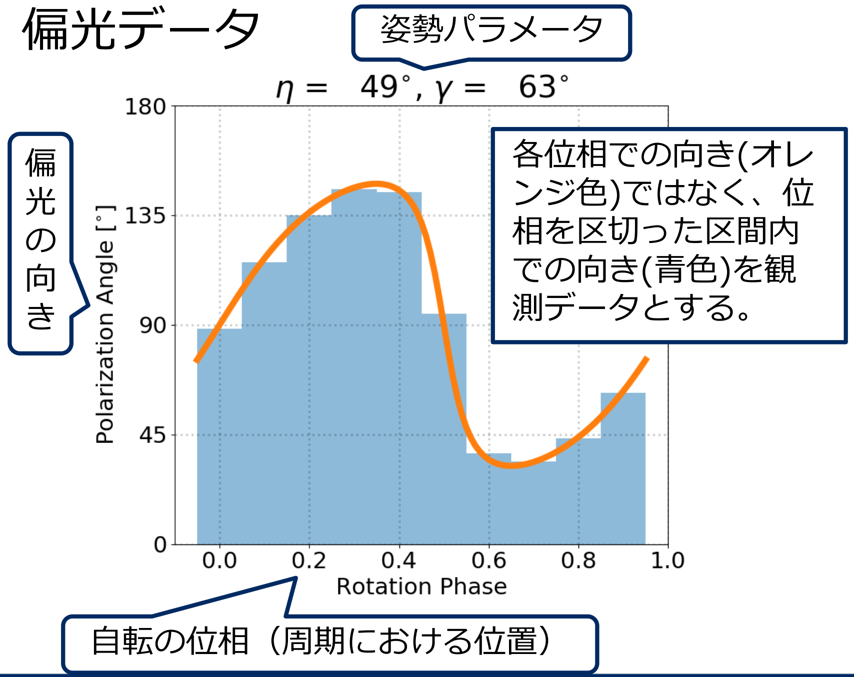




中性子星の姿勢と観測されるX線の偏光

- 中性子星は自転しているので磁石の向きは変化し、それに伴い偏光の向きも変化する。
- 観測される偏光データは時々刻々データが得られるわけではなく、区切られた時間内に得られたデータから偏光データが得られる。そのため、今回の取り組みでは周期を時間的に10等分した偏光データを観測データとして使う。

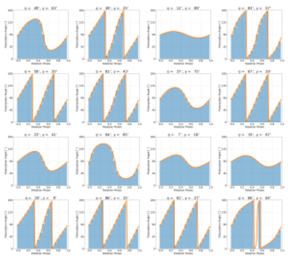




問題設定

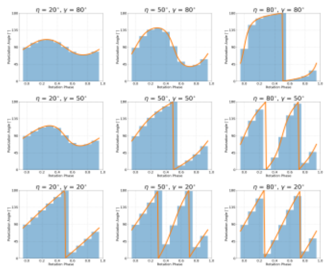
- テストデータを16個用意して、前ページのハミルトニアンを用いてFixstarsのイジングマシンに解かせて、テストデータの姿勢パラメータと比較して最もテストデータのパラメータと近いテンプレートのデータを得ることができるかを試す。

テストデータ



テンプレート内で一番似ているデータを探す

偏光データのテンプレート



テンプレートからテストデータに最も近い解は得られたか？

$$\frac{?}{16}$$

- テストデータの姿勢パラメータ(η, γ)は0°~90°の整数をランダムに選び、偏光のデータは理論モデルから作成する。

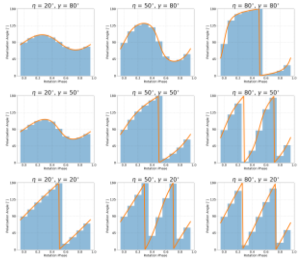
テスト	η	γ	テスト	η	γ	テスト	η	γ	テスト	η	γ
1	49	63	**2**	49	25	**3**	12	89	**4**	83	57
5	58	20	**6**	81	43	**7**	37	75	**8**	67	19
9	23	41	**10**	64	85	**11**	7	18	**12**	19	67
13	20	9	**14**	86	15	**15**	81	27	**16**	66	64

※テストデータは1番から16番まであり、例えば1番のテストデータはη=49°、γ=63°というように読み取る。

テストデータをテンプレートと比較するQUBOモデル：変数

- 与えられた偏光のデータと最も似ているデータを、あらかじめ用意してあるテンプレートのデータから取り出すQUBOモデルを考える。
- 変数はテンプレートのデータごとに用意する。

テンプレートのデータ



γ : 0°~90°の10°ごと

η : 0°~90°の10°ごと

変数のインデックス

q[9]	q[19]	・・・	q[99]
・	・		・
・	・		・
・	・		・
・	・		・
q[2]	q[12]	・・・	q[92]
q[1]	q[11]	・・・	q[91]
q[0]	q[10]	・・・	q[90]

γ : 0°~90°の10°ごと

η : 0°~90°の10°ごと

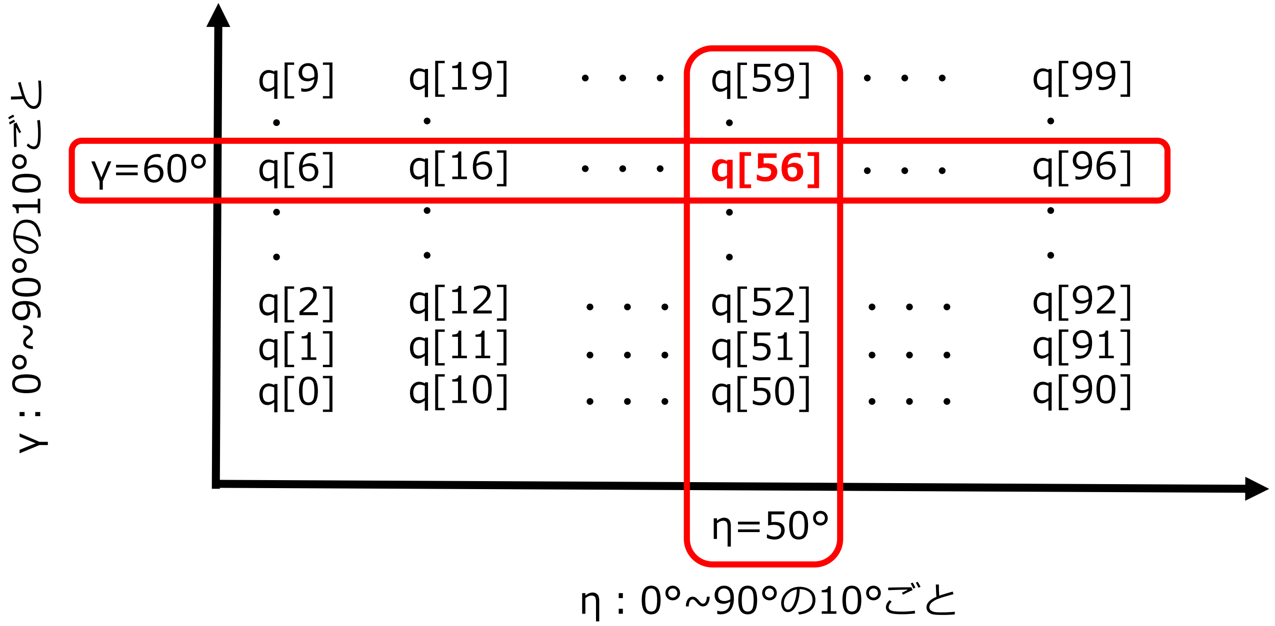
変数の定義：q[i]

q[i] = 1のとき、i番目のテンプレートのデータはテストデータと最も似ている。
q[i] = 0のとき、そうではない。

制約条件：選ばれるテンプレートのデータは1つだけ

- 例えば、テストデータがη=49°, γ=63°であった場合はテンプレートのうちη=50°, γ=60°のデータに対応する変数のみが1で他が0であるべき。

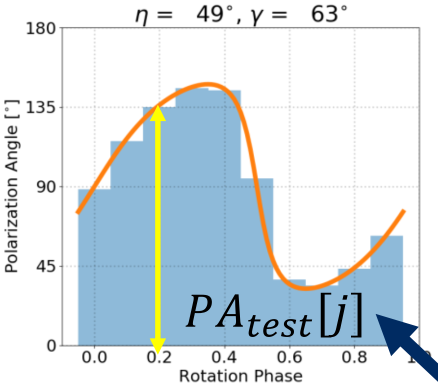
例：η=50°, γ=60°が選ばれる場合はx[56]=1で、その他は0。



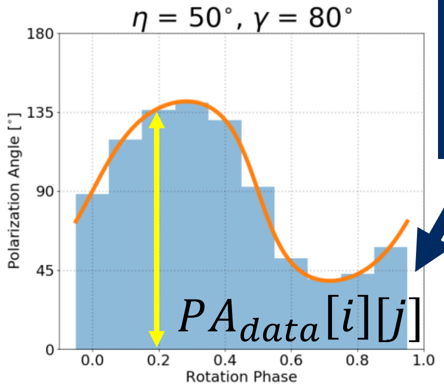
制約条件は以下の式

$$\sum_{i=0}^{99} q[i] = 1$$

QUBOモデル：目的関数（角度の大きさ）



各位相での角度の大きさで比較



$i = 2, j = 58$の場合

同じ位相ごとに偏光の向きを表す角度(Polarization Angle)の大きさPAを比較して、テストのデータと位相の全体で最も似ているPAをもつテンプレートのデータを探す。

- テストデータのPAをPA_{test}、テンプレートのPAをPA_{data}とする。

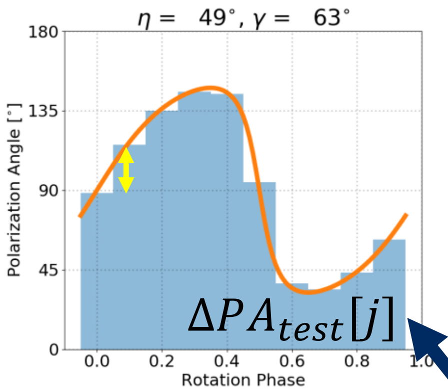
以下の目的関数を加える。

- 定式化は最小二乗法と同じ。

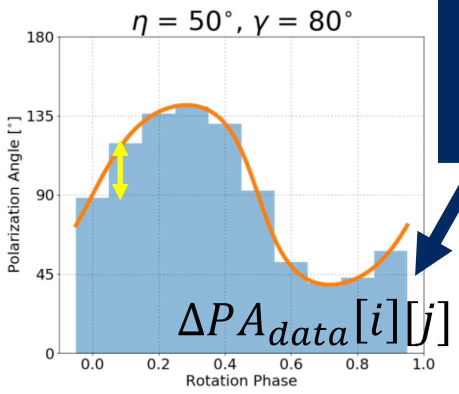
$$\sum_{j=0}^{9}\left(PA_{test}[j] - \sum_{i=0}^{99} PA_{data}[i][j] \times q[i]\right)^2$$

i：テンプレートのインデックス
j：位相に関するインデックス

QUBOモデル：目的関数（角度の差）



各位相での角度の差で比較



$i = 0, j = 58$の場合

隣り合う位相の偏光の向きの差ΔPAを同じ位相ごとに比較して、テストのデータと位相の全体で最も似ているΔPAをもつテンプレートのデータを探す。

- テストデータのΔPAをΔPA_{test}、テンプレートのΔPAをΔPA_{data}とする。
- PAとΔPAのインデックスの関係は
  $\Delta PA[j] = PA[j+1] - PA[j]$である。

以下の目的関数を加える。

- 定式化は最小二乗法と同じ。

$$\sum_{j=0}^{9}\left(\Delta PA_{test}[j] - \sum_{i=0}^{99} \Delta PA_{data}[i][j] \times q[i]\right)^2$$

i：テンプレートのインデックス、j：位相に関するインデックス

ハミルトニアン

ハミルトニアンH

$$H = \underbrace{C_1 \times \left(\sum_{i=0}^{99} q[i] - 1\right)^2}_{\text{制約条件}} + C_2 \times \left(\frac{1}{180}\right)^2 \times \underbrace{\sum_{j=0}^{9}\left(PA_{test}[j] - \sum_{i=0}^{99} PA_{data}[i][j] \times q[i]\right)^2}_{\text{目的関数（角度の大きさ）}}$$

$$+C_3 \times \left(\frac{1}{180}\right)^2 \times \underbrace{\sum_{j=0}^{9}\left(\Delta PA_{test}[j] - \sum_{i=0}^{99} \Delta PA_{data}[i][j] \times q[i]\right)^2}_{\text{目的関数（角度の差）}}$$

C_1, C_2, C_3：アニーリング時に決める係数

コード上でのハミルトニアンの係数の変更

- 該当行の係数を変更することでハミルトニアンが変更できます。

例：C_1, C_2, C_3がすべて1.0の場合

制約条件　目的関数（角度の大きさ）　目的関数（角度の差）

```
H = 1.0 * const_onehot + 1.0 * obj_pa + 1.0 * obj_pa_diff
```

C_1　C_2　C_3

計算のためのコード説明

token設定（各自取得したtokenを設定してください）

```
client.token = "xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx"
```

計算方法

- template_data, test_data, amplify_hackathon.pyを同じディレクトリに用意し、tokenを設定したのちamplify_hackathon.pyを実行すると計算が行われます。

結果の表示

正解の場合

```
estimated eta = 50
estimate gamma = 60
answer eta =    49
answer gamma =    63
Correct!!
```

テストデータとテンプレートのη、γの差が5°以下なので正解

選ばれたテンプレートのη、γ

テストデータのη、γ

不正解の場合

```
estimated eta = 40
estimate gamma = 20
answer eta =    49
answer gamma =    25
Not Correct!!
```

テストデータとテンプレートのη、γの差が6°以上なので不正解

結果

角度の大きさだけを考慮した場合

- $(C_1 = 1.0, C_2 = 1.0,\ C_3 = 0.0)$：正解率7/16

テスト	η	γ	結果	テスト	η	γ	結果	テスト	η	γ	結果	テスト	η	γ	結果
1	49	63	×	**2**	49	25	×	**3**	12	89	×	**4**	83	57	×
	50	70			40	20			10	60			80	50	
5	58	20	○	**6**	81	43	○	**7**	37	75	○	**8**	67	19	○
	60	20			80	40			40	80			70	20	
9	23	41	×	**10**	64	85	○	**11**	7	18	×	**12**	19	67	○
	30	60			60	80			20	60			20	70	
13	20	9	×	**14**	86	15	×	**15**	81	27	○	**16**	66	64	×
	40	20			80	10			80	30			60	70	

表の見方

上段：テストデータ作成で使ったη,γの値。

テスト	η	γ	結果
1	49	63	×
	50	70	

テストデータの番号

正解：○
不正解：×

下段：テンプレートのデータから見積もったη,γの値。

結果

角度の差だけを考慮した場合

- $(C_1 = 1.0, C_2 = 0.0, C_3 = 1.0)$：正解率7/16

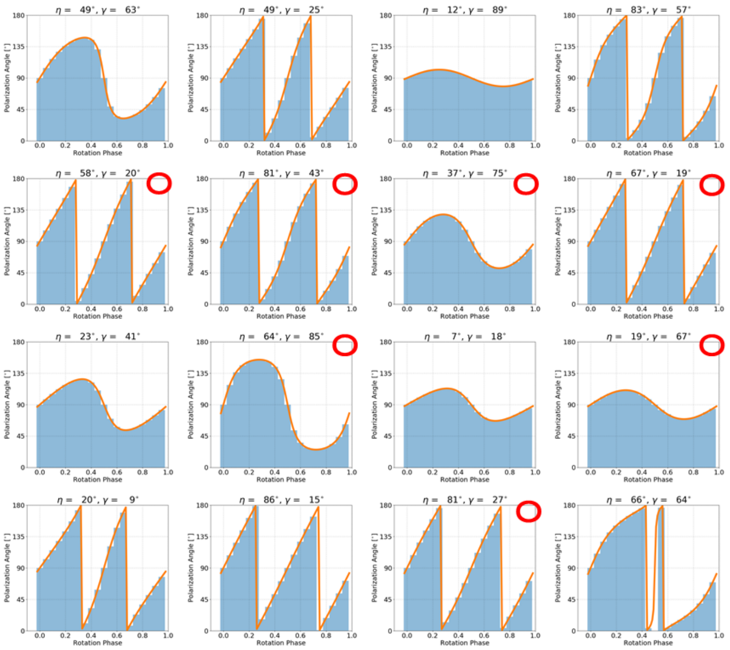
テスト	η	γ	結果	テスト	η	γ	結果	テスト	η	γ	結果	テスト	η	γ	結果
1	49	63	×	**2**	49	25	×	**3**	12	89	×	**4**	83	57	×
	40	50			40	20			10	60			80	50	
5	58	20	○	**6**	81	43	○	**7**	37	75	○	**8**	67	19	○
	60	20			80	40			40	80			70	20	
9	23	41	×	**10**	64	85	○	**11**	7	18	×	**12**	19	67	○
	30	50			60	80			10	30			20	70	
13	20	9	×	**14**	86	15	×	**15**	81	27	○	**16**	66	64	×
	40	20			80	10			80	30			50	60	

両方考慮した場合

- $(C_1 = 1.0, C_2 = 1.0, C_3 = 1.0)$：正解率8/16

テスト	η	γ	結果	テスト	η	γ	結果	テスト	η	γ	結果	テスト	η	γ	結果
1	49	63	○	**2**	49	25	×	**3**	12	89	×	**4**	83	57	×
	50	60			40	20			10	60			80	50	
5	58	20	○	**6**	81	43	○	**7**	37	75	○	**8**	67	19	○
	60	20			80	40			40	80			70	20	
9	23	41	×	**10**	64	85	○	**11**	7	18	×	**12**	19	67	○
	30	60			60	80			20	60			20	70	
13	20	9	×	**14**	86	15	×	**15**	81	27	○	**16**	66	64	×
	40	20			80	10			80	30			60	70	

考察



16個のテストデータの偏光の向きのグラフ。今回試した3つのハミルトニアン全てで正解となったものに赤い丸印をつけた。η>γ, η<γのどちらが正解しやすいといった特徴は見られない。

- 正解するテストデータはどの定式化でも正解するものがほとんどなので、正解するものには特徴がある可能性があるが、偏光の向きのデータを見るだけではわからない。また、どちらの定式化でも各位相での偏光の向きを使っているので同じものが正解するのは当然かもしれない。
- 素粒子実験にアニーリングを応用した事例では機械学習の一部にアニーリングを用いたので、組合せ最適化問題としては解いていない。複数から一つの答えを選ぶ問題を単純な最小二乗法の定式化によって組合せ最適化問題として解くのはあまり向いていないかもしれない。

\Orchestrating a brighter world

NEC