

「超伝導量子コンピュータの物理」の誤り訂正

神楽坂基礎研究所 Squary[†]

2018 年 10 月 13 日

本書内に誤りがございました。下記の通りお詫びして訂正致します。

1 初版

次ページ以降に記載の補足と合わせてご確認ください。

1.1 正誤表

表 1 正誤表（初版）

該当箇所		誤	正
4 ページ	15–16 行	高いしきい値や多くの量子ビット	しきい値や必要な量子ビット数
5 ページ	12–13 行	一般化座標 p_i と一般化運動量 q_i	一般化座標 q_i と一般化運動量 p_i
12 ページ	脚注 3	(脚注の式を利用していないため削除)	
24 ページ	式 3.36	$e^{i\phi} = \sum_n n\rangle\langle n+1 ,$ $e^{-i\phi} = \sum_n n+1\rangle\langle n $	$e^{i\phi} = \sum_n n+1\rangle\langle n ,$ $e^{-i\phi} = \sum_n n\rangle\langle n+1 $
27 ページ	式 3.43	$\sigma_y = \cdots = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	$\sigma_y = \cdots = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$
29 ページ	式 3.55	$\hat{\phi} = -\left(\frac{2E_c}{E_J}\right)^{1/4} \sigma_y$	$\hat{\phi} = \left(\frac{2E_c}{E_J}\right)^{1/4} \sigma_y$
30 ページ	式 3.56	$-4E_c n_g \left(\frac{E_J}{2E_c}\right) \sigma_x$	$-4E_c n_g \left(\frac{E_J}{2E_c}\right)^{1/4} \sigma_x$
33 ページ	脚注 14	$\sigma_{\pm} = (\sigma_x \pm \sigma_y)/2$	$\sigma_{\pm} = (\sigma_x \pm i\sigma_y)/2$
35 ページ	式 3.86	(以下の公式を脚注として追加)	
		$[AB, CD] = A[B, C]D + AC[B, D] + [A, C]DB + C[A, D]B$	
37 ページ	式 3.98	$-\frac{E_c}{2}(b^\dagger b)^4$	$-\frac{E_c}{2}(b^\dagger b)^2$
40 ページ	式 4.6	$R_y(\theta) = e^{-i\theta\sigma_z/2}$	$R_y(\theta) = e^{-i\theta\sigma_y/2}$
45 ページ	式 4.31	($i \neq j$ であることを追記)	
45 ページ	式 4.33	$\mathcal{H}_0 + \frac{1}{2}\hbar g_1 g_2 \cdots$	$\mathcal{H}'_0 + \frac{1}{2}\hbar g_1 g_2 \cdots$
		(補足 1 参照)	

(次ページに続く)

[†] <https://squarylium.github.io/>

該当箇所		誤	正
46 ページ	1 行	量子ビットを直接した	量子ビットを結合した
46 ページ	式 4.41	$e^{-i\omega t\sigma_z/2}\sigma_{\pm}e^{i\omega t\sigma_z/2}$ $= \dots = e^{\mp i\omega t}\sigma_{\pm}$	$e^{i\omega t\sigma_z/2}\sigma_{\pm}e^{-i\omega t\sigma_z/2}$ $= \dots = e^{\pm i\omega t}\sigma_{\pm}$
			(補足 2 参照)
46 ページ	式 4.42	$e^{-i(\omega_{q1}-\omega_{q2})t}\sigma_{+1}\sigma_{-2}$ $+e^{i(\omega_{q1}-\omega_{q2})t}\sigma_{-1}\sigma_{+2}$	$e^{i(\omega_{q1}-\omega_{q2})t}\sigma_{+1}\sigma_{-2}$ $+e^{-i(\omega_{q1}-\omega_{q2})t}\sigma_{-1}\sigma_{+2}$
47 ページ	式 4.45		(補足 3 参照)
47 ページ	式 4.47	$\sigma_+ = 1\rangle\langle 0 , \sigma_- = 0\rangle\langle 1 $	$\sigma_+ = 0\rangle\langle 1 , \sigma_- = 1\rangle\langle 0 $
			(補足 4 参照)
50 ページ	式 4.62	$\frac{1}{2}\omega_1\sigma_{z1} + \frac{1}{2}\omega_2\sigma_{z2}$	$\frac{1}{2}\hbar\omega_1\sigma_{z1} + \frac{1}{2}\hbar\omega_2\sigma_{z2}$
50 ページ	式 4.66	$\sigma_{+1}[\sigma_{z2}, \sigma_{+2}]$	$\sigma_{-1}[\sigma_{z2}, \sigma_{+2}]$
51 ページ	式 4.68		(補足 5 参照)
52 ページ	式 4.74	$\sigma_{z1}\sigma_+$	$\sigma_{z1}\sigma_{+2}$
52 ページ	式 4.76	$-\sin((\tilde{\omega}_1 - \tilde{\omega}_2)t)$	$+\sin((\tilde{\omega}_1 - \tilde{\omega}_2)t)$
53 ページ	7 行	iSWAP ゲートや CNOT ゲート	交換相互作用の iSWAP ゲートや CZ ゲート
68 ページ	6 行	第 1 項と第 2 項は調和振動子	第 1 項と第 3 項は調和振動子
68 ページ	式 A.33	$-\frac{E_c}{2}(b^\dagger b)^4$	$-\frac{E_c}{2}(b^\dagger b)^2$

1.2 補足 1 (45 ページ 式 4.33)

正誤表に記載の \mathcal{H}'_0 は共振器との結合により少し変化した Hamiltonian であり具体的な表式は、

$$\begin{aligned}
 \mathcal{H}'_0 = & \hbar \left(\omega_r + \frac{g_1^2}{\omega_{q1} - \omega_r} \sigma_{z1} + \frac{g_2^2}{\omega_{q2} - \omega_r} \sigma_{z2} \right) a^\dagger a \\
 & + \frac{1}{2} \hbar \left(\omega_{q1} + \frac{g_1^2}{\omega_{q1} - \omega_r} \right) \sigma_{z1} + \frac{1}{2} \hbar \left(\omega_{q2} + \frac{g_2^2}{\omega_{q2} - \omega_r} \right) \sigma_{z2},
 \end{aligned} \tag{1}$$

となります。

なお上式から明らかですが、共振器の周波数 ω_r は σ_{z1}, σ_{z2} の両方に依存して (実効的に) 変化します。この共振器で分散読み出しを行うことで、複数の量子ビットを一つの共振器で読み出すことが可能です。

1.3 補足 2 (46 ページ 式 4.41)

式 4.41 は式 3.70 (33 ページ) と同様になります。

1.4 補足 3 (47 ページ 式 4.45)

交換相互作用、

$$A = \sigma_{+1}\sigma_{-2} + \sigma_{-1}\sigma_{+2}, \quad (2)$$

は正則ではありません。このため当然 $A^2 \neq I$ であり、行列指数関数の計算に付録 A.9 の手法を直接利用することはできません。

一方でこの演算子は、

$$A^3 = A, \quad (3)$$

という（冪等のような）性質を持つため、

$$\begin{aligned} e^{-igtA} &= \sum_k \frac{1}{k!} (-igtA)^k \\ &= I + \sum_k \frac{1}{(k+1)!} (-igtA)^{k+1} \\ &= I + A \sum_k \frac{1}{(k+1)!} (-igt)^{k+1} A^k \\ &= I + A \sum_k \left[\frac{1}{(2k+1)!} (-igt)^{2k+1} A^{2k} + \frac{1}{(2k+2)!} (-igt)^{2k+2} A^{2k+1} \right] \\ &= I + A \sum_k \left[-i \frac{(-1)^k}{(2k+1)!} (gt)^{2k+1} I + \frac{(-1)^{k+1}}{(2k+2)!} (gt)^{2k+2} A \right] \\ &= I - i \sin(gt) A + (\cos(gt) - 1) A^2, \end{aligned} \quad (4)$$

として行列指数関数を展開できます。

1.5 補足 4 (47 ページ 式 4.47)

該当箇所においては抽象化した Hamiltonian を扱っており、量子ビットの周波数 ω_q は正の値を想定しています。このとき量子ビットの Hamiltonian の固有状態と固有値（エネルギー）は、

$$\langle 0 | \frac{1}{2} \hbar \omega_q \sigma_z | 0 \rangle = \frac{1}{2} \hbar \omega_q, \quad \langle 1 | \frac{1}{2} \hbar \omega_q \sigma_z | 1 \rangle = -\frac{1}{2} \hbar \omega_q, \quad (5)$$

となり $|1\rangle$ 状態が基底状態となります。このため昇降演算子は、

$$\sigma_+ = |0\rangle\langle 1|, \quad \sigma_- = |1\rangle\langle 0|, \quad (6)$$

となります。この表記は量子ビットの状態ベクトル、

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

及び 33 ページ脚注 14（前記の正誤表も参照下さい）の昇降演算子の定義、

$$\sigma_{\pm} = \frac{1}{2}(\sigma_x \pm i\sigma_y), \quad (8)$$

と整合します。なお第 4.4 節において昇降演算子は $\sigma_{+1}\sigma_{-2} + \sigma_{-1}\sigma_{+2}$ のように対称的に現れるため、この訂正は本書の議論には影響しません。

1.6 補足 5（51 ページ 式 4.68）

一部で係数が誤っていました。正しい計算は以下の通りです。

$$\begin{aligned} [\mathcal{H}_i, S] &= -\frac{\hbar g^2}{\delta} [\sigma_{+1}\sigma_{-2} + \sigma_{-1}\sigma_{+2}, \sigma_{+1}\sigma_{-2} - \sigma_{-1}\sigma_{+2}] \\ &= -\frac{\hbar g^2}{\delta} (-[\sigma_{+1}\sigma_{-2}, \sigma_{-1}\sigma_{+2}] + [\sigma_{-1}\sigma_{+2}, \sigma_{+1}\sigma_{-2}]) \\ &= \frac{2\hbar g^2}{\delta} [\sigma_{+1}\sigma_{-2}, \sigma_{-1}\sigma_{+2}] \\ &= \frac{2\hbar g^2}{\delta} (\sigma_{+1}\sigma_{-1}[\sigma_{-2}, \sigma_{+2}] + [\sigma_{+1}, \sigma_{-1}]\sigma_{+2}\sigma_{-2}) \\ &= \frac{2\hbar g^2}{\delta} \left[-\frac{1}{2}(\sigma_{z1} + 1)\sigma_{z2} + \frac{1}{2}\sigma_{z1}(\sigma_{z2} + 1) \right] \\ &= \frac{\hbar g^2}{\delta} (\sigma_{z1} - \sigma_{z2}), \end{aligned} \quad (9)$$

なお式 4.69 の訂正の必要はありません。

1.7 詳細な正誤表

誤植や表記統一等に関わる詳細な正誤表を以下に掲載致します。

表 2 詳細な正誤表（初版）

該当箇所		誤	正
5 ページ	4 行	Langrangian	Lagrangian
6 ページ	6 行	正準変数 p_i, q_i	正準変数 q_i, p_i
6 ページ	11 行	交換可能ではない ($AB \neq BA$) であること	交換可能ではない ($AB \neq BA$) こと
7 ページ	脚注 1	物理では	物理学では
8 ページ	8 行	2 量子ビットを考えると、これらは 4 つの状態	2 量子ビットのときには 4 つの状態
9 ページ	12 行	通常テンソル積の記号	テンソル積の記号
10 ページ	8 行	状態が a_i	状態が $ a_i\rangle$
12 ページ	式 2.41	$\hbar\omega\left(\hat{n} + \frac{1}{2}\right)$	$\hbar\omega\hat{n}$
13 ページ	25 行	\hat{n} 状態	$ n\rangle$ 状態
13 ページ	式 2.51	$ \hat{n}\rangle, \langle\hat{n} $	$ n\rangle, \langle n $
20 ページ	脚注 3	校正	構成
21 ページ	13 行	二つ	2 つ
22 ページ	2 行	transmon	トランズモン
24 ページ	4 行	正準変数 q, ϕ	正準変数 ϕ, q
26 ページ	7 行	Hailtonian	Hamiltonian
31 ページ	7 行	Lgendre	Legendre
31 ページ	式 3.63	$\sqrt{\frac{\hbar}{2}\omega_r C_r}(a + a^\dagger)$	$\sqrt{\frac{\hbar}{2}\omega_r C_r}(\hat{a} + \hat{a}^\dagger)$
33 ページ	23–24 行	Jayens-Cummings モデル	Jaynes-Cummings モデル
34 ページ	式 3.80	$\frac{\hbar\omega_q}{2}\sigma_z$	$\frac{1}{2}\hbar\omega_q\sigma_z$
34 ページ	式 3.81	(追加)	$\gamma = \frac{g}{\omega_q - \omega_r}$
35 ページ	式 3.84	$\gamma\frac{\hbar\omega_q}{2}$	$\frac{1}{2}\gamma\hbar\omega_q$
35 ページ	式 3.85	$\frac{\hbar\omega_q}{2}\sigma_z, \frac{\gamma\hbar g}{2}$	$\frac{1}{2}\hbar\omega_q\sigma_z, \frac{1}{2}\gamma\hbar g$
36 ページ	式 3.87	$\frac{\hbar\omega_q}{2}\sigma_z, \frac{\gamma\hbar g}{2}, \frac{\hbar}{2}$	$\frac{1}{2}\hbar\omega_q\sigma_z, \frac{1}{2}\gamma\hbar g, \frac{1}{2}\hbar$
36 ページ	式 3.87	(定数項を除いたことを明記)	
36 ページ	脚注 17	読み出しとか	読み出しや
36 ページ	式 3.89	$\frac{\hbar}{2}$	$\frac{1}{2}\hbar$
37 ページ	式 3.93	(不要なため削除)	
37 ページ	式 3.95	$\hat{n}, \hat{\phi}$	n, ϕ
38 ページ	式 3.104	$a\sigma_+ + a^\dagger\sigma_-$	$a^\dagger\sigma_- + a\sigma_+$
41 ページ	式 4.11	$U^\dagger\mathcal{H}U$	\mathcal{H}_{rot}
41 ページ	式 4.12	$U^\dagger\mathcal{H}U$	\mathcal{H}_{rot}
41 ページ	式 4.13	$U^\dagger\mathcal{H}U$	\mathcal{H}_{rot}

(次ページに続く)

該当箇所		誤	正
44 ページ	式 4.26	ω_q^i	ω_{qi}
44 ページ	式 4.26	(γ_i に関する式を別行の数式として分離)	
44 ページ	11 行	及び	及び、
45 ページ	式 4.29	$\hbar\gamma_1, \hbar\gamma_2$	$\gamma_1\hbar, \gamma_2\hbar$
45 ページ	式 4.32	$\hbar\cdots\gamma_1, \hbar\cdots\gamma_2$	$\gamma_1\hbar\cdots, \gamma_2\hbar\cdots$
45 ページ	脚注 4	(論文*1を追加)	
47 ページ	式 4.44	$-i\frac{\mathcal{H}'}{\hbar}t$	$-\frac{i}{\hbar}\mathcal{H}'t$
50 ページ	式 4.64	($\delta = \omega_2 - \omega_1$ と定義し直す)	
51 ページ	19 行	この系のドライブ項と呼ばれる	(削除)
55 ページ	1 行	界の様々な	世界の様々な
55 ページ	3 行	IMB	IBM
66 ページ	式 A.16	$\sum_i i+1\rangle\langle i $	$\sum_m m+1\rangle\langle m $
66 ページ	式 A.17	(4 行目の式が 3 行目と同様のため削除)	
65–67 ページ	A.3–4	(順序の変更)	
66–67 ページ		(全ての E_C を E_c に書き換え)	
67 ページ	12–13 行	(式番号の追加)	
70 ページ	式 A.49	$\left(e^{tA}[A, B]e^{-tA}\right),$	$\left(e^{tA}[A, B]e^{-tA}\right)$
73 ページ	7 行	508 , 500 (2014).	Nature 508 , 500 (2014).

*1 J. Majer *et al.*, “Coupling superconducting qubits via a cavity bus,” Nature **449**, 443 (2007).
DOI:10.1038/nature06184.