

Δυναμική Κβαντικών Λογικών Πυλών Υψηλής Πιστότητας

Ευάγγελος Βαρβέλης

RWTH Aachen

20 Δεκεμβρίου, 2018

Περιεχόμενα

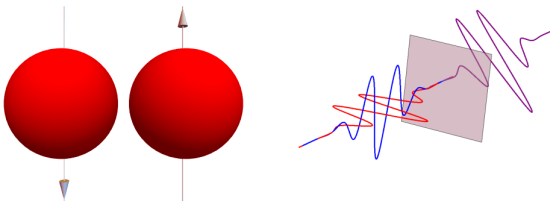
- 1 Εισαγωγή στην Κβαντική Πληροφορία
- 2 Ενεργός Χαμιλτονιανή Magnus-Taylor
- 3 Πύλη Singlet-Triplet Qubit

Εισαγωγή στην Κβαντική Πληροφορία

Qubit

Το Qubit είναι η βασική μονάδα πληροφορίας και μπορεί να είναι ένα οποιοδήποτε φυσικό σύστημα με 2 πιθανές ιδιοκαταστάσεις

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$



Η Σφαίρα του Bloch

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = r_\alpha e^{i\phi_\alpha}|0\rangle + r_\beta e^{i\phi_\beta}|1\rangle \Rightarrow 4 \text{ παραμέτρους}$$

- Κανονικοποίηση $r_\alpha^2 + r_\beta^2 = 1$
- Αναλλοίωτη από global φάσεις $|\psi\rangle \equiv e^{-i\phi_\alpha}|\psi\rangle$

Η Σφαίρα του Bloch

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = r_\alpha e^{i\phi_\alpha}|0\rangle + r_\beta e^{i\phi_\beta}|1\rangle \Rightarrow 4 \text{ παραμέτρους}$$

- Κανονικοποίηση $r_\alpha^2 + r_\beta^2 = 1$
- Αναλλοίωτη από global φάσεις $|\psi\rangle \equiv e^{-i\phi_\alpha}|\psi\rangle$

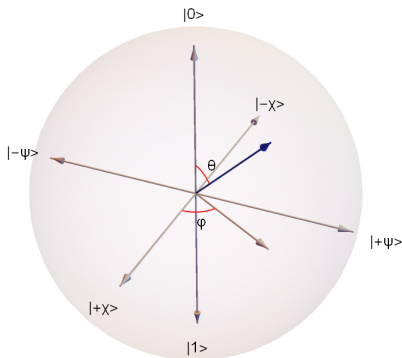
↓

$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|0\rangle + e^{i\phi}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|1\rangle \Rightarrow 2 \text{ παραμέτρους}$$

Η Σφαίρα του Bloch

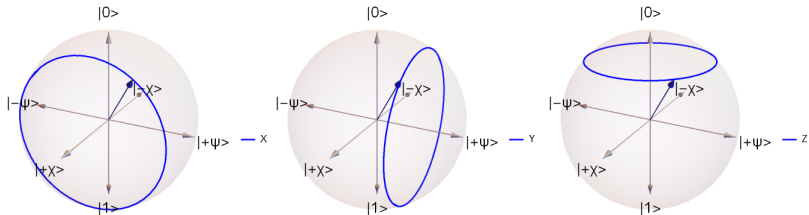
$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle + e^{i\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |1\rangle$$

$\theta \equiv$ γωνία με τον άξονα z $\phi \equiv$ γωνία με τον άξονα x στο επίπεδο xy



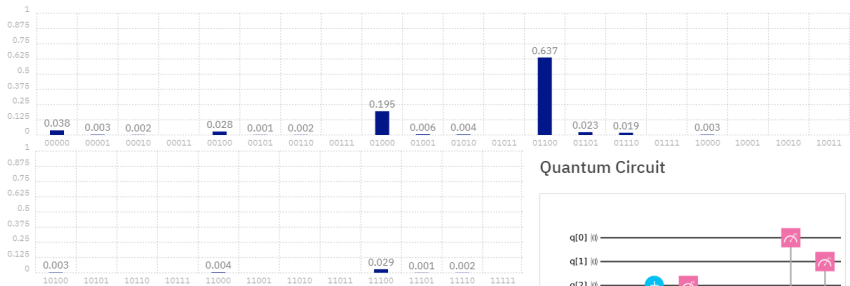
Λογικές Πύλες

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_{\hat{n}}(\gamma) &= \exp \left[-i \frac{\gamma}{2} (n_x \sigma_x + n_y \sigma_y + n_z \sigma_z) \right] \\ &= e^{-i \frac{\gamma}{2} (\hat{n} \cdot \vec{\sigma})} = \cos \left(\frac{\gamma}{2} \right) I - i \sin \left(\frac{\gamma}{2} \right) (\hat{n} \cdot \vec{\sigma}) \end{aligned}$$

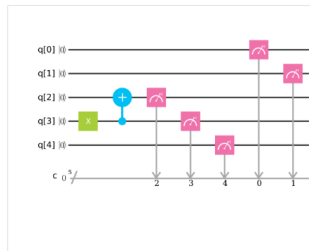


Λογικές Πύλες

Quantum State: Computation Basis



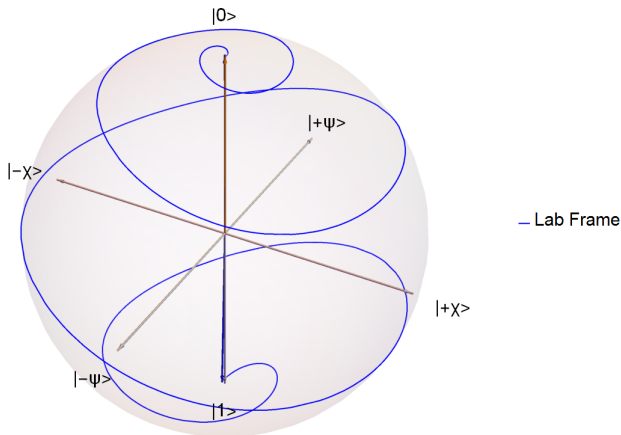
Quantum Circuit



Ενεργός Χαμιλτονιανή Magnus-Taylor

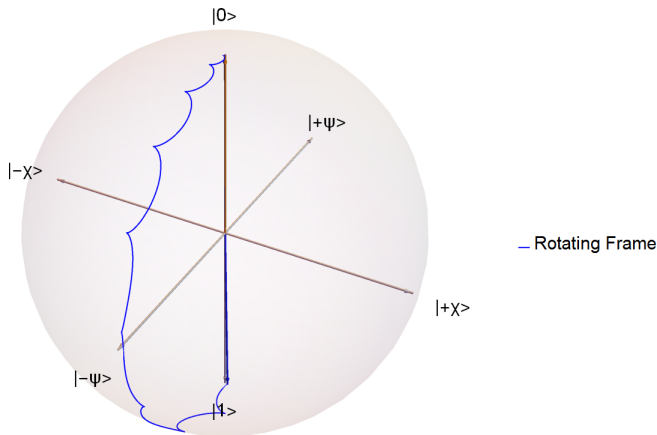
Στροβοσκοπική Συμφωνία

$$\mathcal{H}_{\text{TM}}(t) = \frac{\omega}{2}\sigma_z + \frac{\mathcal{A}_1(t)}{2}\cos(\omega t)\sigma_x$$



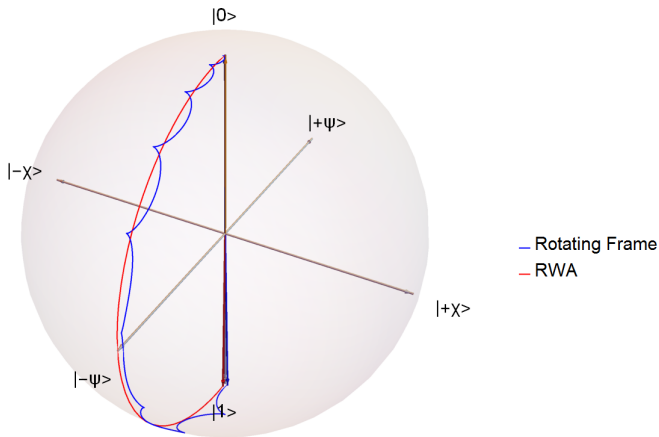
Στροβοσκοπική Συμφωνία

$$\mathcal{H}_{\text{rot}}(t) = \frac{A_1(t)}{4} [\sigma_x + \cos(2\omega t)\sigma_x - \sin(2\omega t)\sigma_y]$$



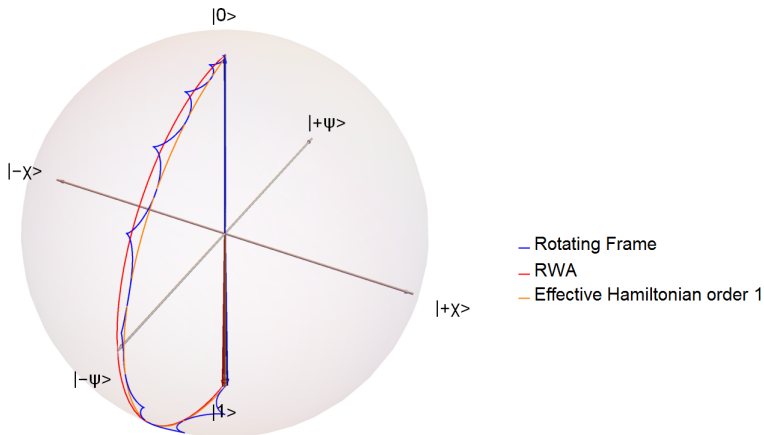
Στροβοσκοπική Συμφωνία

$$\mathcal{H}_{\text{RWA}}(t) = \frac{\mathcal{A}_1(t)}{4} \sigma_x \quad \left(\frac{\mathcal{A}_1(t)}{\omega} \ll 1 \right)$$



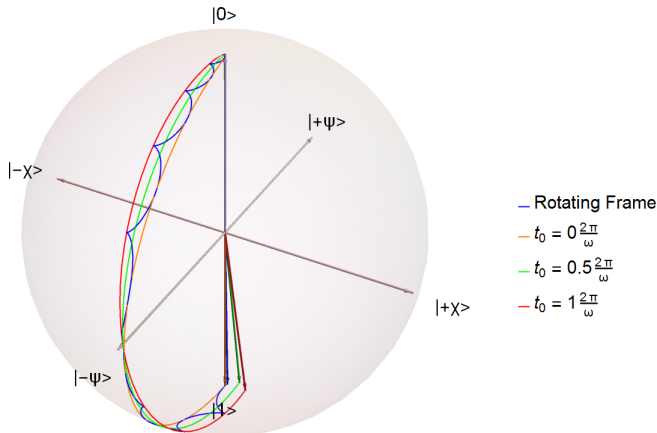
Στροβοσκοπική Συμφωνία

$$U(t_0 + nt_c, t_0) = U_{\text{eff}}(t_0 + nt_c, t_0), \forall n \in \mathbb{Z}$$



Παράμετρος Βαθμίδα

$$\mathcal{H}_{\text{eff}}(t) = \frac{\mathcal{A}_1(t)}{4} \sigma_x + \frac{\mathcal{A}_1^2(t)}{32\omega} (1 - 2 \cos(2\omega t_0)) \sigma_z - \frac{\partial_t \mathcal{A}_1(t)}{2\omega} (\sin(2\omega t_0) \sigma_x - \cos(2\omega t_0) \sigma_y)^1$$

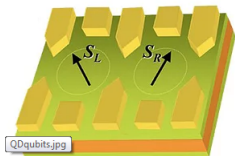


¹Zeuch, Daniel, et al. arXiv preprint **1807.02858** (2018)

Πύλη Singlet-Triplet Qubit

Το Σύστημα

(A)

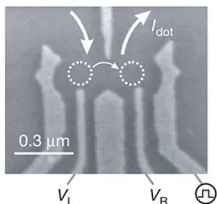


Δύο συζευγμένες κβαντικές κουκίδες
 εντος εξωτερικού μαγνητικού πεδίου

$$|0\rangle_L = |S\rangle = \frac{|01\rangle - |10\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$|1\rangle_L = |T_0\rangle = \frac{|01\rangle + |10\rangle}{\sqrt{2}}$$

(B)



- Αριθμητικοί παλμοί επιδιόρθωσης συστηματικών σφαλμάτων $^2\epsilon(t)$
- π και $\frac{\pi}{2}$ πύλες ενός qubit πιστότητας $> 99.9\%$

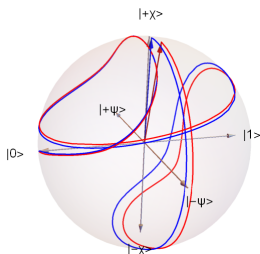
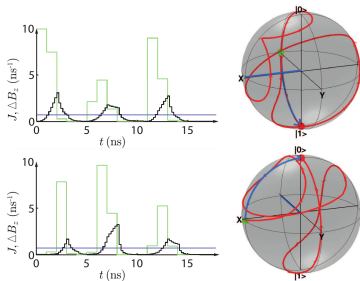
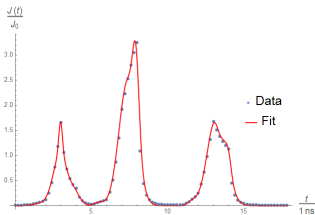
$$\mathcal{H}(t) = \frac{\Delta B_z}{2} \sigma_z + \frac{J(\epsilon(t))}{2} \sigma_x$$

²Cerfontaine, Pascal, et al. Physical review letters **113**.15 (2014)

Συχνοτική Ανάλυση

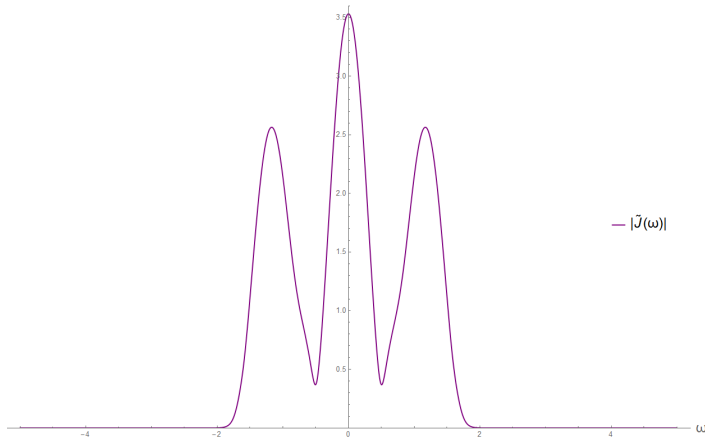
- Οι αριθμητικοί παλμοί για πύλη $(\frac{\pi}{2})_y$
- Μοντέλο προσαρμογής

$$J(t) = \sum_{n=0}^{10} \alpha_n \exp\left(-\frac{(t - t_n)^2}{\sigma_n}\right)$$



Συχνοτική Ανάλυση

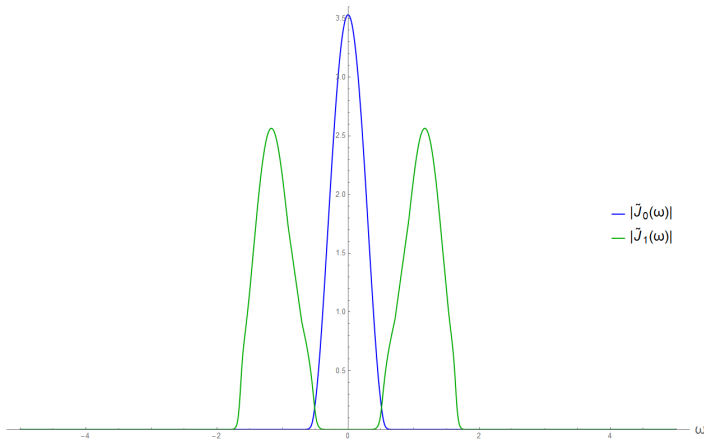
Ιδανικά



$$\sim \frac{\mathcal{A}_1(t)}{2} \cos(\omega t) \sigma_x$$

Συχνοτική Ανάλυση

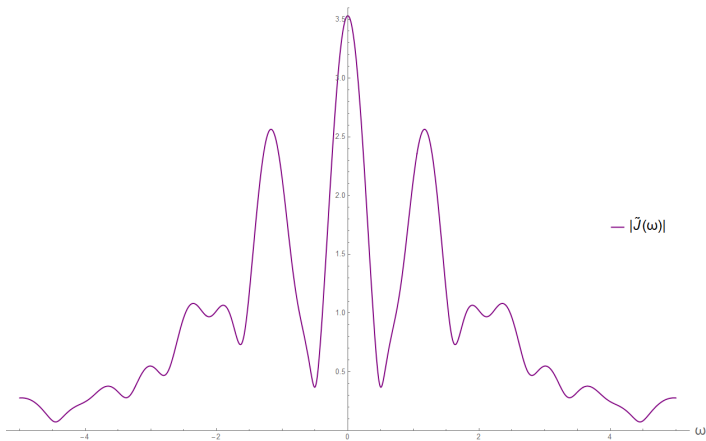
Ιδανικά $J(t) = J_0(t) + J_{1c}(t) \cos(\omega_d t + \phi_c) + J_{1s}(t) \sin(\omega_d t + \phi_s)$



$$\sim \frac{\mathcal{A}_1(t)}{2} \cos(\omega t) \sigma_x$$

Συχνοτική Ανάλυση

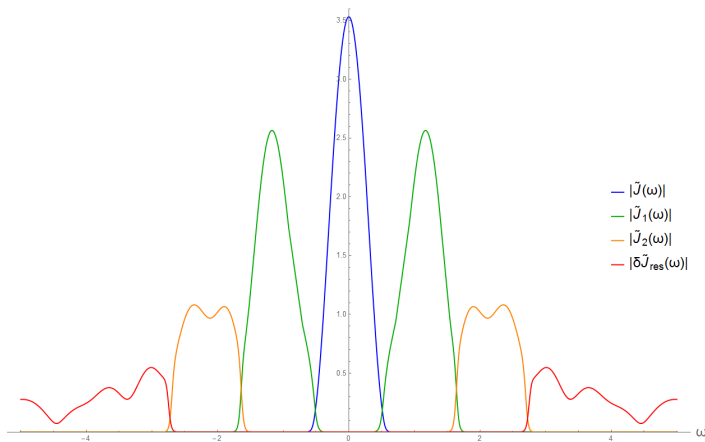
Πραγματικότητα



Συχνοτική Ανάλυση

Πραγματικότητα

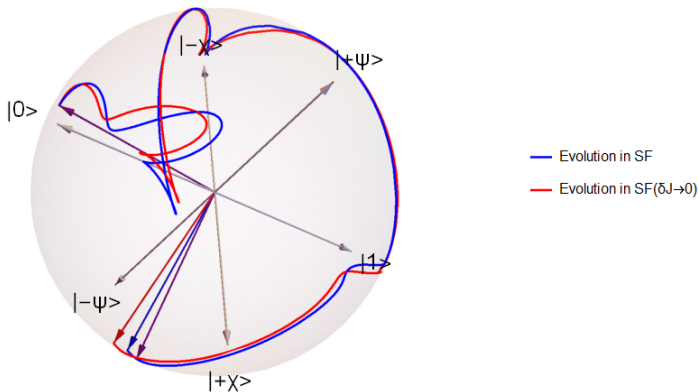
$$J(t) = J_0(t) + J_{1c}(t) \cos(\omega_d t + \phi_{1c}) + J_{1s}(t) \sin(\omega_d t + \phi_{1s}) + J_{2c}(t) \cos(2\omega_d t + \phi_{2c}) + J_{2s}(t) \sin(2\omega_d t + \phi_{2s}) + \delta J_{res}(t)$$



Σύστημα Αναφοράς

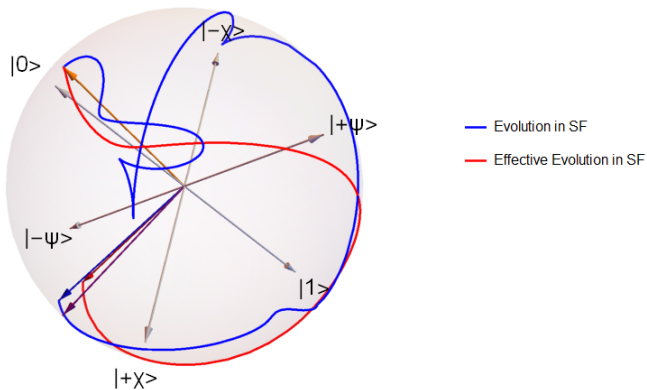
Μετασχηματισμός

$$U = U_z U_y = \exp\left(-\frac{i}{2}\omega t \sigma_z\right) \exp\left(-\frac{i}{2} \tan^{-1}\left(\frac{J_0(t)}{\Delta B_z}\right) \sigma_y\right)$$



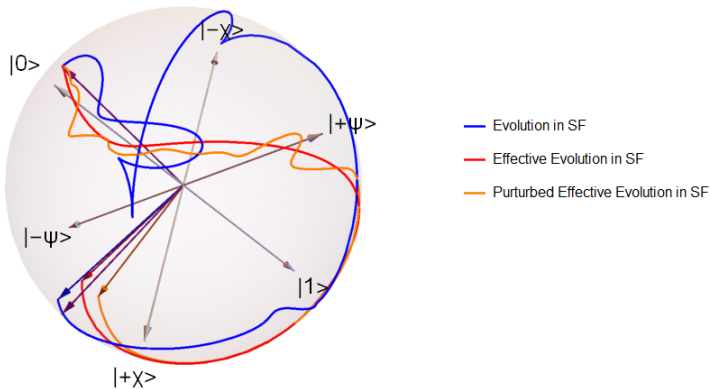
Ενεργός Χαμιλτονιανή

$$\mathcal{H}_{\text{SF}}(t) = \mathcal{H}_{\text{harmonic}}(t) + \mathcal{H}_{\text{noise}}(t), \quad \text{όπου} \quad \mathcal{H}_{\text{noise}}(t) \propto \delta J_{\text{res}}(t)$$



Ενεργός Χαμιλτονιανή

$$\mathcal{H}_{\text{SF}}(t) = \mathcal{H}_{\text{eff}}(t) + \mathcal{H}_{\text{noise}}(t)$$



Σας ευχαριστώ για τον χρόνο σας!