

COMPACT PURCELL FILTER DESIGN FOR SUPERCONDUCTING QUBIT READOUT

Simona Zaccaria, Antonio Gnudi

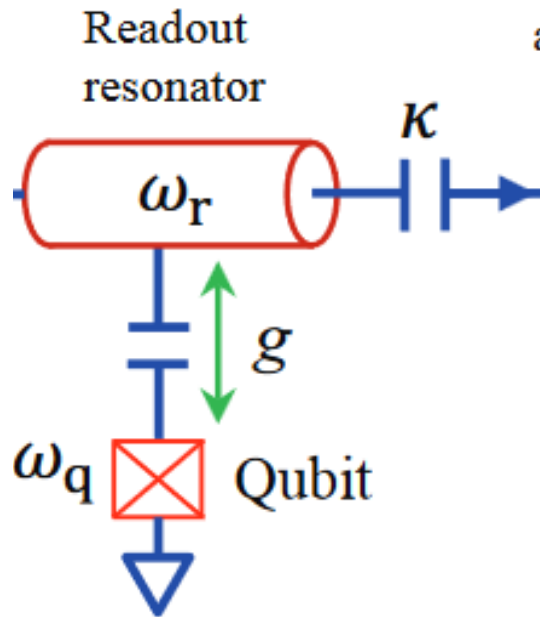
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

DEI, Università di Bologna



Nelle puntate precedenti

THE PROBLEM OF QUBIT MEASUREMENT

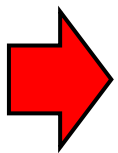


- The state of the qubit is inferred from the measured frequency of the resonator, coupled with the qubit in the dispersive regime

$$\hat{H}_{\text{disp}} \approx \hbar\omega_r \hat{a}^\dagger \hat{a} + \frac{\hbar\omega_q}{2} \hat{\sigma}_z + \hbar\chi \hat{a}^\dagger \hat{a} \hat{\sigma}_z$$

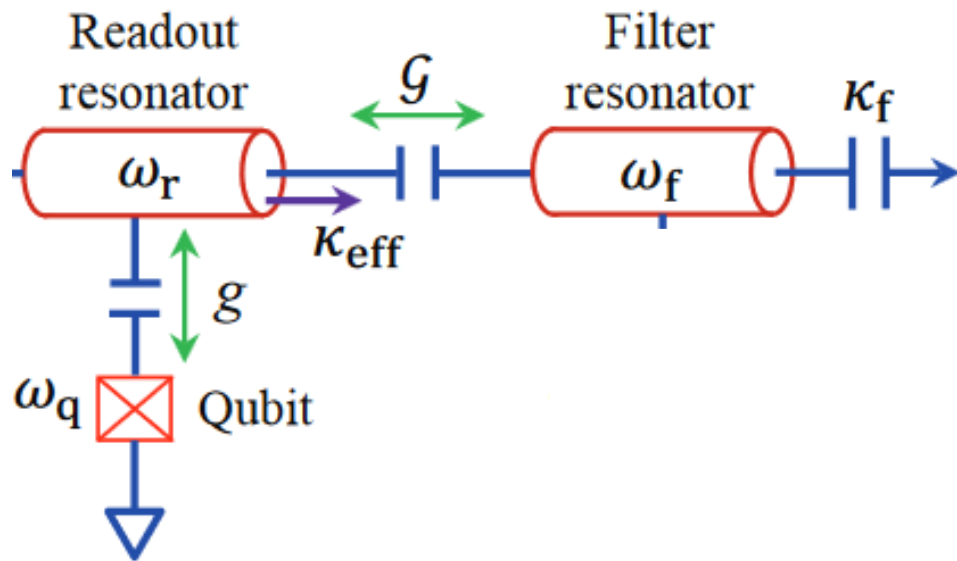
- There is additional leakage of the qubit energy into the transmission line (Purcell effect)

$$\Gamma = \left(\frac{g}{\Delta} \right)^2 \kappa(\omega_q) \quad \Delta = \left| \omega_q - \omega_r \right|$$



Trade-off between qubit decay
and readout measurement time

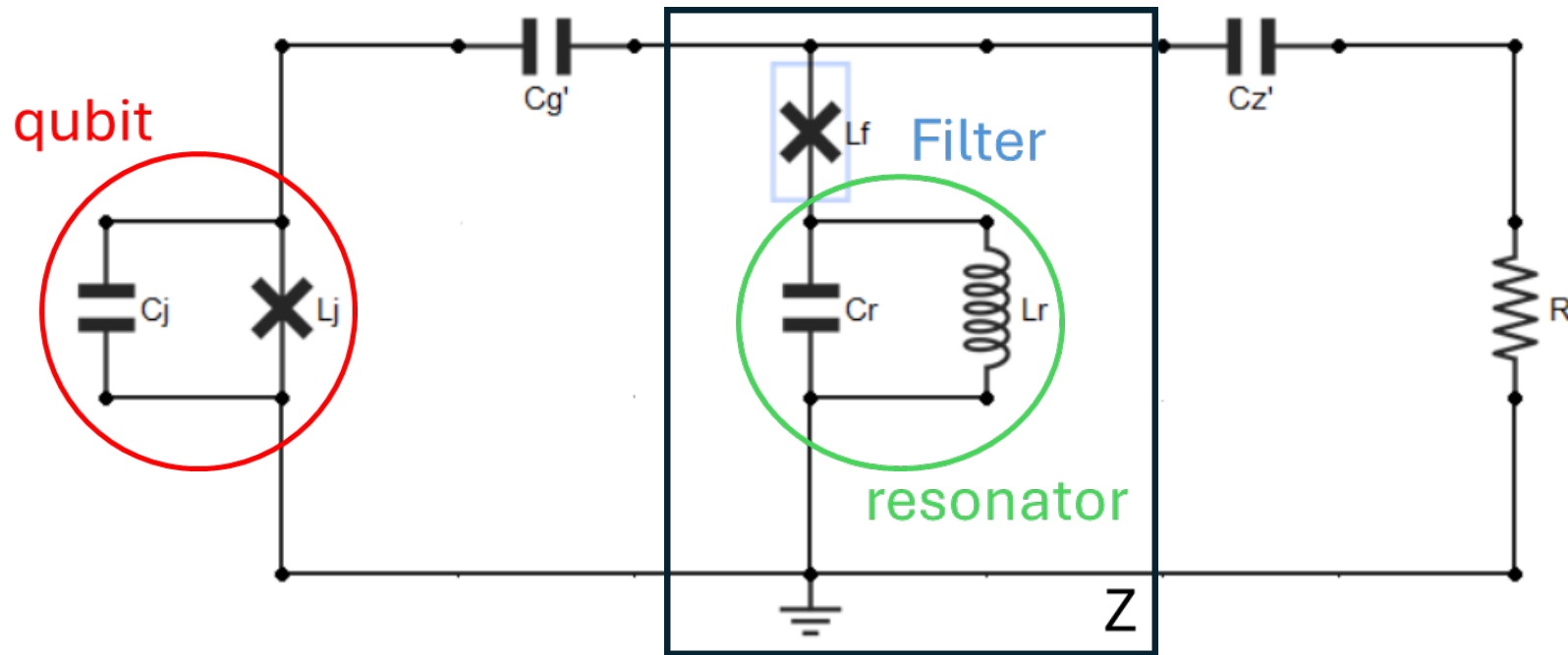
PURCELL FILTER



Solution: Add a filter to reduce the qubit decay at the qubit frequency

$$\Gamma = \left(\frac{g}{\Delta} \right)^2 \kappa_{\text{eff}}(\omega_q)$$

CIRCUIT EXAMPLE: notch Purcell filter with JJs



- L_f implemented with JJ arrays
- Notch band very narrow:
TUNING OF L_f REQUIRED !!

L_f is sized such that $Z(\omega_q)=0$

$$L_f = - \frac{L_r}{1 - \frac{\omega_q^2}{\omega_r^2}} = \frac{1}{\sqrt{L_r \times C_r}}$$

Qubit mode

$$\omega_q > \omega_r$$

Aggiornamenti

CONDIZIONE ANALITICA PER IMPORRE IL REGIME DISPERSIVO

Approssimando il qubit come un **sistema a due livelli** e sotto l'ipotesi di **rotating wave approximation** l'Hamiltoniano risulta

$$H = \underbrace{\omega_q \frac{\sigma_z}{2}}_{\text{Qubit}} + \underbrace{\omega_f a_f^\dagger a_f}_{\text{filtro}} + \underbrace{\omega_r a_r^\dagger a_r}_{\text{resonator}} + \underbrace{g_{qf}(\sigma_+ a_f + \sigma_- a_f^\dagger)}_{\text{Coupling tra qubit e filtro}} + \underbrace{g_{fr}(a_r^\dagger a_f + a_r a_f^\dagger)}_{\text{Coupling filtro resonator}}$$

NON C'E' COUPLING DIRETTO TRA QUBIT E RESONATOR

CONDIZIONE ANALITICA PER IMPORRE IL REGIME DISPERSIVO

Per recuperare il coupling tra qubit e resonator applico la seguente trasformazione unitaria

$$U = \mathbb{I}_q \otimes \exp[\Lambda(a_f^\dagger a_r - a_f a_r^\dagger)]$$

$$\Lambda = \frac{1}{2} \arctan(2g_{fr}/(\omega_r - \omega_f))$$

Ottenendo

$$U^\dagger H U = \omega_q \frac{\sigma_z}{2} + \tilde{\omega}_f a_f^\dagger a_f + \tilde{\omega}_r a_r^\dagger a_r + g_{qf} \cos(\Lambda)(\sigma_+ a_f + \sigma_- a_f^\dagger) + g_{qf} \sin(\Lambda)(\sigma_+ a_r + \sigma_- a_r^\dagger)$$

CONDIZIONE ANALITICA PER IMPORRE IL REGIME DISPERSIVO

$$g_{qf} \cos(\Lambda) \ll \omega_q - \tilde{\omega}_f$$

$$g_{qf} \sin(\Lambda) \ll \omega_q - \tilde{\omega}_r$$

$$\tilde{\omega}_f = \omega_f \cos^2(\Lambda) + \omega_r \sin^2(\Lambda) - g_{fr} \sin(2\Lambda)$$

$$\tilde{\omega}_r = \omega_r \cos^2(\Lambda) + \omega_f \sin^2(\Lambda) + g_{fr} \sin(2\Lambda)$$

NON LINEARITA' INTRODOTTE DALL'INDUTTANZA FILTRANTE L_f

- L'array di giunzioni usato per implementare L_f introduce delle non linearità indesiderate
- Variando il numero N di giunzioni nell'array è possibile ridurre le non linearità

$$\chi_{mn} = \frac{\hbar \bar{\omega}_m \bar{\omega}_n}{4} \left[\frac{p_{m,j} p_{n,j}}{E_j} + \frac{p_{m,f} p_{n,f}}{E_f N^2} \right]$$

$$\Delta_m = \frac{1}{2} \sum_{n \in \{f, q, r\}} \chi_{mn}$$

$$\alpha_m = \frac{\chi_{mm}}{2}$$

Termine introdotto da
 L_f proporzionale a $\frac{1}{N^2}$

NON LINEARITA' INTRODOTTE DALL'INDUTTANZA FILTRANTE L_f

L'obiettivo è determinare N tale che:

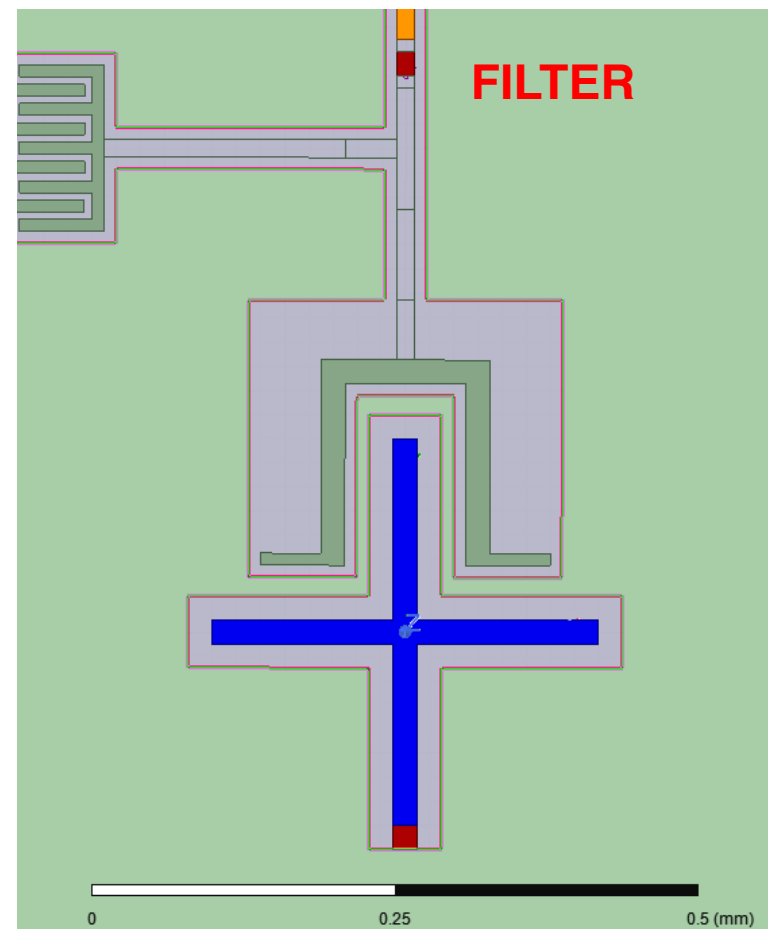
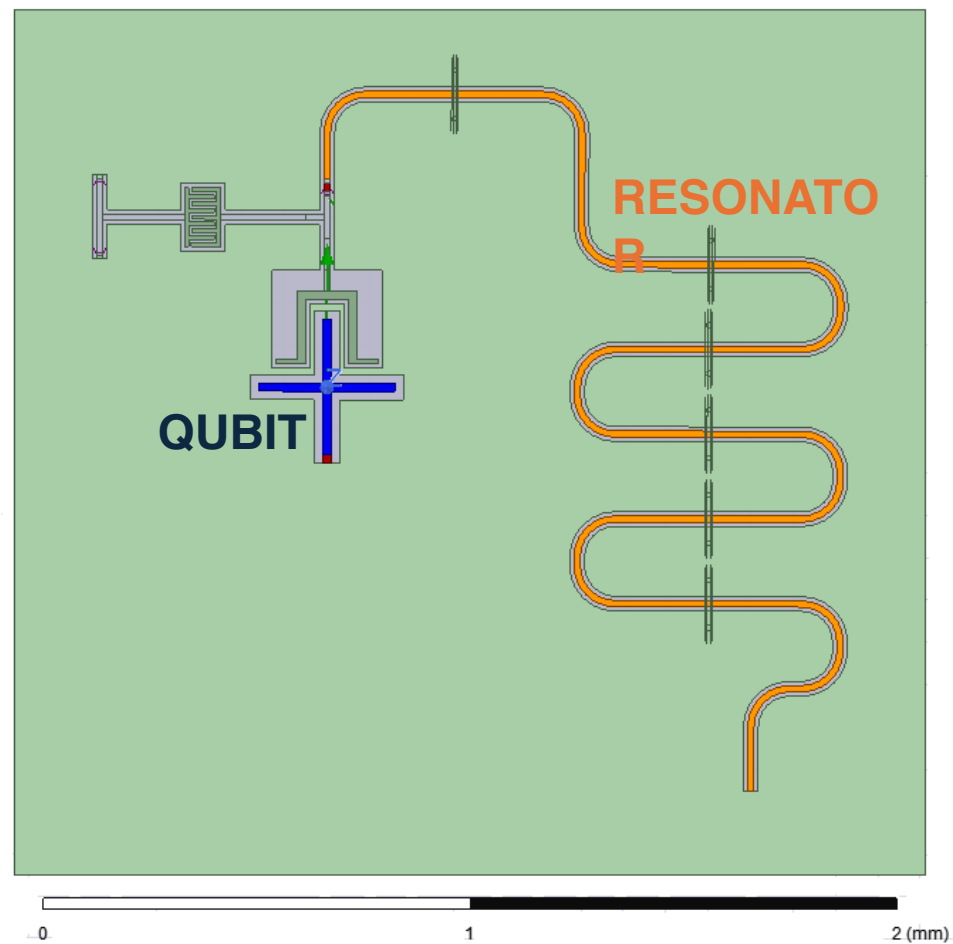
$$\text{Anarmonicit\`a del resonator } \alpha_r \ll \text{Larghezza di banda del resonator } \kappa_r$$

Numero di fotoni nel resonator n_r

$$n_r \ll n_{\text{crit}} = \frac{\Delta^2}{4g^2}$$

Numero critico di fotoni

PROPOSED DESIGN



RISULTATI

Parameter	Value
Qubit mode frequency f_q	6.45 GHz
Resonator mode frequency f_r	6.87 GHz
Filter mode frequency f_f	3.66 GHz
Dispersive shift χ_{qr}	12 MHz
Resonator self-Kerr α_r	0.5 MHz
Linewidth κ_r	10 MHz
Purcell-limited T_1	5 ms
Critical photon number n_{crit}	30

- I risultati sono stati ottenuti modellando il filtro come una catena di **10** giunzioni Josepshon
- Con la tecnologia a disposizione, non sarà probabilmente possibile realizzare l'array di giunzioni

PROSSIMI STEP

- ~~Ricontattare il gruppo di Giachero e mostrare i risultati ottenuti~~
- Rifare uno o più design simili a quello presentato in base ad eventuali specifiche (frequenza qubit, anarmonicità qubit...)
- Stabilire come implementare l'induttanza filtrante (Il gruppo di Giachero propone di usare materiali ad alta induttanza cinetica o giunzioni in alluminio granulare)
- Provare a fabbricare il tutto

Neutrinos oscillations in dense environments

Hamiltoniano da simulare

$$H = \sum_{k=1}^N \vec{b} \cdot \vec{\sigma}_k + \sum_{p < q}^N J_{pq} \vec{\sigma}_p \cdot \vec{\sigma}_q$$

Single qubit gate

Two-qubit
gate

$$\vec{\sigma}_k = (\sigma_k^x, \sigma_k^y, \sigma_k^z)$$

2-qubit gate

Qubit accoppiati capacitivamente

$$H = \frac{\omega_1}{2} \sigma_1^z + \frac{\omega_2}{2} \sigma_2^z - g(\sigma_1^+ - \sigma_1^-)(\sigma_2^+ - \sigma_2^-)$$

Passando all'interaction picture e applicando RWA

$$H_{\text{INT}} = g \left(e^{i\delta\omega_{12}t} \sigma_1^+ \sigma_2^- + e^{-i\delta\omega_{12}t} \sigma_1^- \sigma_2^+ \right)$$

2-qubit gate

Imponendo che i due qubit siano alla stessa frequenza

$$H_{\text{INT}} = \frac{g}{2}(\sigma_1^x \sigma_2^x + \sigma_1^y \sigma_2^y)$$

- Manca il termine di interazione zz
- Alessandro Roggero propone di fare delle simulazioni Analogiche-Digitali in cui si alternano layer in cui si fa evolvere l'Hamiltoniano e layer in cui si applica l'Hadamard gate per ottenere anche

$$[\sigma_1^z \sigma_2^z + \sigma_1^y \sigma_2^y]$$

Questioni aperte

- Qubit tunabili per l'inizializzazione
- Tunable coupler per poter applicare gli Hadamard gate ai singoli qubit ed evitare che nel frattempo i qubit interagiscano tra loro
- Capire come rendere il tutto scalabile