

Raport științific

privind implementarea proiectului

Modelare accelerată a dispozitivelor cuantice hibride

– Etapele I-II, August - Decembrie 2023 –

Prezentul raport conține rezultatele obținute în cadrul proiectului în corelație cu structura planului de lucru.

Rezumat - Etapa I. În cadrul primei etape de implementare, am dezvoltat și validat o nouă metodologie pentru modelarea teoretică eficientă a dispozitivelor cuantice hibride, care nu fusese prevăzută în propunerea originală de proiect și care a depășit astfel așteptările inițiale. Noua metodologie se bazează pe descrierea terminalelor supraconductoare printr-un model surogat cu un număr redus de nivele efective $\tilde{L} < 10$, având o complexitate computațională cu ordine de mărime redusă în comparație cu modelul Richardson prevăzut original (ce include $L \sim 100$ nivele). Validarea modelelor surogat a constat în compararea rezultatelor privind proprietățile stărilor sub-gap pentru diverse dispozitive hibride cu cele obținute în literatură prin metode numeric exacte, însă mult mai costisitoare din punct de vedere computațional (e.g., Numerical Renormalization Group și Quantum Monte Carlo pentru terminale supraconductoare).

Rezultate principale - Etapa I: Formularea și validarea unui model teoretic pentru a descrie eficient sisteme hibride cu mai multe terminale supraconductoare printr-un singur terminal surogat echivalent. Stabilirea, pe baza acestui model, a prezenței proprietăților topologice nontriviale ale unui sistem hibrid complex (de tipul punct cuantic dublu cuplat la patru terminale supraconductoare) pentru valori realiste ale parametrilor fizici.

Modele surogat pentru dispozitive hibride cu terminale supraconductoare.

Considerăm modelul Anderson pentru un punct cuantic (eng., Quantum Dot, QD) cuplat cu un terminal supraconductor (SC)

$$\begin{aligned}
 H &= H_{\text{QD}} + H_{\text{SC}} + H_{\text{T}}, \\
 H_{\text{QD}} &= \epsilon_d \sum_{\sigma=\uparrow\downarrow} d_{\sigma}^{\dagger} d_{\sigma} + U d_{\uparrow}^{\dagger} d_{\uparrow} d_{\downarrow}^{\dagger} d_{\downarrow}, \\
 H_{\text{SC}} &= \sum_{\mathbf{k}\sigma} \xi_{\mathbf{k}} c_{\mathbf{k}\sigma}^{\dagger} c_{\mathbf{k}\sigma} - \sum_{\mathbf{k}} (\Delta e^{i\varphi} c_{\mathbf{k}\uparrow}^{\dagger} c_{-\mathbf{k}\downarrow}^{\dagger} + \text{h.c.}) \equiv H_{\text{BCS}}, \\
 H_{\text{T}} &= \sum_{\mathbf{k}\sigma} (t c_{\mathbf{k}\sigma}^{\dagger} d_{\sigma} + \text{h.c.}).
 \end{aligned} \tag{1}$$

Aici, $d_{\sigma}^{\dagger}$ creează un electron cu spin σ și energie ϵ_d în QD-ul având o interacție repulsivă Coulomb U . Similar, $c_{\mathbf{k}\sigma}^{\dagger}$ creează un electron cu spin σ , impuls $\mathbf{k}$ și energie $\xi_{\mathbf{k}}$ în terminalul SC cu parametru de ordine $\Delta e^{i\varphi}$, unde Δ și φ sunt cantități reale. Cuplajul SC-QD este descris de H_{T} , pentru care amplitudinile de tunelare, t , sunt presupuse a fi independente de energie. Presupunem o densitate de stări $\nu_F = 1/(2D)$ constantă în SC, într-o bandă de lărgime $2D$ în jurul suprafeței Fermi.

Întrucât corelațiile supraconductoare sunt tratate la nivel de câmp mediu, este posibilă înlocuirea gradelor de libertate electronice din SC cu un termen în acțiunea efectivă a electronilor din QD ce conține funcția de hibridizare

$$\Sigma_d^{\text{T}}(\omega_n) = -\Gamma \begin{pmatrix} i\omega_n & \Delta e^{i\varphi} \\ \Delta e^{-i\varphi} & i\omega_n \end{pmatrix} g(\omega_n), \tag{2}$$

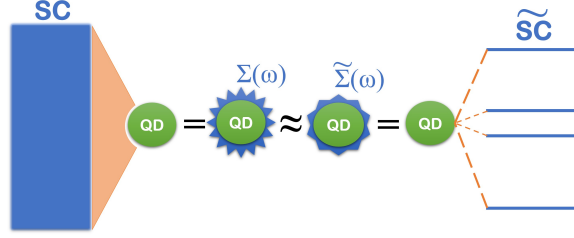


Figure 1: Reprezentare schematică a modelului surogat. Terminalul SC (albastru, stânga) este cuplat la un QD (verde), generând self-energia de tunelare $\Sigma_d^T(\omega)$ (ec. 2,3) pentru QD (țepi albaștri). Aceasta este aproximată conform cu ec. (4), corespunzătoare unui model efectiv BCS ($\widetilde{\text{SC}}$ albastru), reprezentat aici având $\tilde{L} = 4$ nivele.

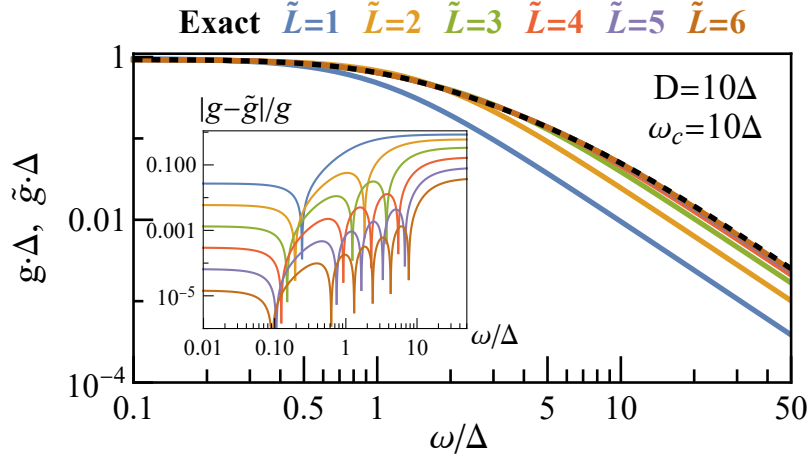


Figure 2: Funcția g exactă (3) și aproximațiile $\tilde{g}(\omega)$ (4) cu $\tilde{L} \leq 6$. Inset: erorile relative pentru aceiași parametri.

unde $\omega_n = (2n + 1)\pi k_B T$ sunt frecvențele Matsubara la temperatura T , rata de tunelare este $\Gamma = \pi \nu_F |t|^2$, iar funcția g este definită ca

$$g(\omega) \equiv \frac{1}{\pi} \int_{-D}^D d\xi \frac{1}{\xi^2 + \Delta^2 + \omega^2} = \frac{2}{\pi} \frac{\arctan\left(\frac{D}{\sqrt{\Delta^2 + \omega^2}}\right)}{\sqrt{\Delta^2 + \omega^2}}, \quad (3)$$

Suntem interesați în a construi cea mai simplă discretizare a terminalului SC care reproduce suficient de precis proprietățile modelului continuu original. Notăm faptul ca fiecare nivel energetic ξ contribuie cu un factor $(\xi^2 + \Delta^2 + \omega^2)^{-1}$ în cadrul funcției g (3). Astfel, căutăm o aproximație în termeni de un număr redus de factori similari

$$\begin{aligned} \tilde{g}_{\text{par}}(\omega) &\equiv 2 \sum_{\ell=1}^K \frac{\gamma_\ell}{\tilde{\xi}_\ell^2 + \Delta^2 + \omega^2}, \quad \tilde{L} = 2K, \\ \tilde{g}_{\text{impar}}(\omega) &\equiv \frac{\gamma_0}{\Delta^2 + \omega^2} + \tilde{g}_{\text{par}}(\omega), \quad \tilde{L} = 2K + 1, \end{aligned} \quad (4)$$

unde K indică numărul de perechi de nivele efective. O funcție $\tilde{g}$ de această formă poate fi obținută prin eliminarea gradelor de libertate electronice asociate unui terminal SC cu același parametru de gap Δ ca și cel original, ale cărui $\tilde{L}$ nivele discrete de energie $\pm|\tilde{\xi}_\ell|$ sunt cuplate la QD prin elementele de matrice de tunelare $\tilde{t}_\ell = \sqrt{\gamma_\ell \Gamma}$.

Pentru fiecare model surogat cu $\tilde{L}$ impar, includem un nivel de energie suplimentar la energie zero, $\tilde{\xi}_0 = 0$. Parametrii $\{\gamma_\ell, \tilde{\xi}_\ell\}$ ai terminalului SC efectiv au fost determinați prin fit-ul funcției g exactă (3) cu forma aproximativă $\tilde{g}(\omega)$ (4), prin minimizarea funcției de eroare pentru o discretizare logaritmică a intervalului $10^{-3}\Delta < \omega < \omega_c$, unde ω_c este ales a fi comparabil cu valoarea celui mai mare parametru relevant.

Ideea de bază a modelelor surogat este prezentată schematic în Fig. (1).

Hamiltonianul modelului surogat pentru un QD în contact cu N terminale supraconductoare se scrie ca

$$\begin{aligned}\tilde{H} &= H_{\text{QD}} + \sum_{\alpha=1}^N \left(H_{\widetilde{\text{SC}},\alpha} + H_{\widetilde{\text{T}},\alpha} \right), \\ H_{\widetilde{\text{SC}},\alpha} &= \sum_{\ell\sigma} \tilde{\xi}_{\ell} c_{\ell\alpha\sigma}^{\dagger} c_{\ell\alpha\sigma} - \sum_{\ell=1}^{\tilde{L}} (\Delta_{\alpha} e^{i\varphi_{\alpha}} c_{\ell\alpha\uparrow}^{\dagger} c_{\ell\alpha\downarrow}^{\dagger} + \text{h.c.}), \\ H_{\widetilde{\text{T}},\alpha} &= \sum_{\ell=1}^{\tilde{L}} \sum_{\sigma=\uparrow\downarrow} \sqrt{\gamma_{\ell}\Gamma_{\alpha}} (c_{\ell\alpha\sigma}^{\dagger} d_{\sigma} + \text{h.c.}),\end{aligned}\tag{5}$$

pentru rezolvarea căruia am folosit fie o procedură de diagonalizare exactă, fie Density Matrix Renormalization Group (DMRG).

Modele surogat cu un singur terminal SC echivalent pentru probleme cu mai multe terminale SC.

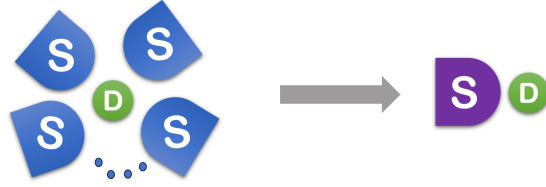


Figure 3: Reprezentare schematică a modelului surogat cu un terminal echivalent.

Întrucât dispozitivele cu mai multe terminale sunt de interes principal în cadrul proiectului, considerăm aici posibilitatea de a descrie o problema cu o impuritate (QD) în contact cu mai multe terminale SC în termeni de un singur terminal SC echivalent. Pentru un QD în prezența a N terminale supraconductoare cu parametri de ordine $\Delta e^{i\varphi_n}$, fiecare cuplat la QD cu o rată de tunelare Γ_n , self-energia de tunelare devine

$$\Sigma_d^{\text{T}}(\omega) = - \sum_{n=1}^N \Gamma_n \begin{pmatrix} i\omega & \Delta e^{i\varphi_n} \\ \Delta e^{-i\varphi_n} & i\omega \end{pmatrix} g(\omega) \equiv -\Gamma \begin{pmatrix} i\omega & \tilde{\Delta} e^{i\varphi} \\ \tilde{\Delta} e^{-i\varphi} & i\omega \end{pmatrix} g(\omega), \tag{6}$$

unde rata de hibridizare totală este definită ca $\Gamma \equiv \sum_{n=1}^N \Gamma_n$, iar gap-ul efectiv este $\tilde{\Delta} e^{i\varphi} \equiv \sum_{n=1}^N \Delta e^{i\varphi_n} \Gamma_n / \Gamma$, cu $0 \leq \tilde{\Delta} \leq \Delta$.

Pentru a formula modelul surogat cu un singur terminal SC, rescriem funcția $\tilde{g}(\omega)$ într-o formă în care gap-ul efectiv $\tilde{\Delta}$ apare explicit, e.g. pentru $\tilde{L}$ par avem

$$\tilde{g}(\omega) = 2 \sum_{\ell=1}^{\tilde{L}/2} \frac{\gamma_{\ell}}{\tilde{\xi}_{\ell}^2 + \Delta^2 + \omega^2} = 2 \sum_{\ell=1}^{\tilde{L}/2} \frac{\gamma_{\ell}}{\tilde{\xi}_{\ell}^2 + \tilde{\Delta}^2 + \omega^2}, \text{ astfel încât } E_{\text{qp},\ell}^2 = \tilde{\xi}_{\ell}^2 + \Delta^2 \equiv \tilde{\xi}_{\ell}^2 + \tilde{\Delta}^2, \tag{7}$$

având nivelele de energie poziționate la $\tilde{\xi}_{\ell} = \pm \sqrt{\tilde{\xi}_{\ell}^2 + \Delta^2 - \tilde{\Delta}^2}$. Hamiltonianul surogat efectiv devine

$$\tilde{H} = H_{\text{QD}} + \sum_{\ell=1}^{\tilde{L}} \sum_{\sigma=\uparrow\downarrow} \tilde{\xi}_{\ell} c_{\ell\sigma}^{\dagger} c_{\ell\sigma} - \sum_{\ell=1}^{\tilde{L}} (\tilde{\Delta} e^{i\varphi} c_{\ell\uparrow}^{\dagger} c_{\ell\downarrow}^{\dagger} + \text{h.c.}) + \sum_{\ell=1}^{\tilde{L}} \sum_{\sigma=\uparrow\downarrow} \sqrt{\gamma_{\ell}\Gamma} (c_{\ell\sigma}^{\dagger} d_{\sigma} + \text{h.c.}), \tag{8}$$

Pentru același număr $\tilde{L}$ de nivele per terminal, modelul surogat cu un singur terminal efectiv este semnificativ mai eficient decât modelul surogat cu N terminale, și operează la același nivel de precizie (a se vedea e.g. Fig. 4 mai jos).

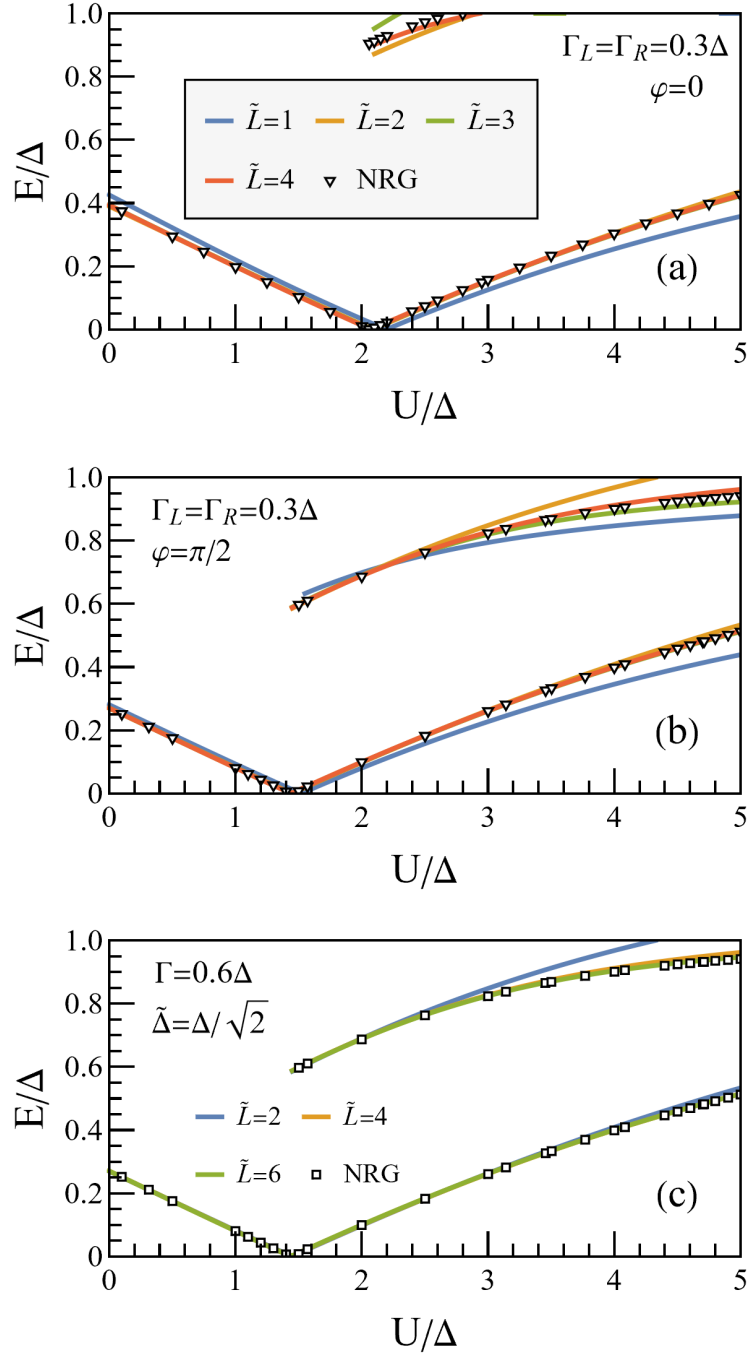


Figure 4: Energiile sub-gap pentru un sistem SC-QD-SC ca functie de taria interactiei Coulomb U , pentru $\Gamma_L = \Gamma_R = 0.3\Delta$, $\varphi = 0$ (a) si $\varphi = \pi/2$ (b), pentru diverse modele surogat cu $\tilde{L} \leq 4$. Rezultatele NRG au fost extrase din Fig. 13 a Ref. [V. Pokorny, M.Zonda, Phys. Rev. B 107, 155111 (2023)]. Chenarul (c) prezinta aceleasi rezultate ca in (b), dar obtinute cu ajutorul modelului surogat cu un singur terminal echivalent avand parametrul de gap $\tilde{\Delta} = \Delta/\sqrt{2}$.

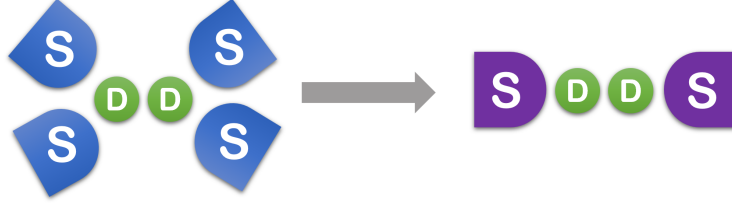


Figure 5: Modelarea unui sistem hibrid cu un punct cuantic dublu cuplat la patru terminale supraconductoare folosind două terminale supraconductoare surogat echivalente.

Pentru sisteme hibride complexe precum cel din figura de mai sus au fost prezise faze topologic nontriviale în cadrul unor modele bazate pe aproximatia nerealistă de gap supraconductor infinit [L. Teshler et al, arXiv:2304.11982]. Cu ajutorul modelelor surogat, a fost posibilă pentru prima oară explorarea comportamentului acestui dispozitiv hibrid în cazul realist al unui gap finit.

Pentru modelarea dispozitivului hibrid am considerat Hamiltonianul modelului Anderson pentru punctul cuantic dublu (eng., Double Quantum Dot, DQD) cuplat la patru terminale supraconductoare (SC)

$$\begin{aligned}
 H &= H_{\text{DQD}} + \sum_{\alpha=1}^4 H_{\text{SC},\alpha} + \sum_{\alpha=1,2} H_{\alpha,1}^{(\text{T})} + \sum_{\alpha=3,4} H_{\alpha,2}^{(\text{T})}, \\
 H_{\text{DQD}} &= \sum_{n=1,2} (\epsilon_n \sum_{\sigma=\uparrow\downarrow} d_{n\sigma}^\dagger d_{n\sigma} + U d_{n\uparrow}^\dagger d_{n\uparrow} d_{n\downarrow}^\dagger d_{n\downarrow}) + r \sum_{\sigma=\uparrow\downarrow} (d_{1,\sigma}^\dagger d_{2,\sigma} + d_{2,\sigma}^\dagger d_{1,\sigma}), \\
 H_{\text{SC},\alpha} &= \sum_{\mathbf{k}\sigma} \xi_{\mathbf{k}} c_{\mathbf{k}\sigma}^\dagger c_{\mathbf{k}\sigma} - \sum_{\mathbf{k}} (\Delta e^{i\varphi_\alpha} c_{\mathbf{k}\uparrow}^\dagger c_{-\mathbf{k}\downarrow}^\dagger + \text{h.c.}), \quad H_{\alpha,n}^{(\text{T})} = \sum_{\mathbf{k}\sigma} t(c_{\alpha\mathbf{k}\sigma}^\dagger d_{\sigma} + c_{\alpha\mathbf{k}\sigma}).
 \end{aligned} \tag{9}$$

Pentru acest Hamiltonian am aplicat metodologia expusă în secțiunile anterioare pentru a construi modelul surogat cu două terminale supraconductoare echivalente reprezentat în figura de mai sus. În cadrul modelului surogat, am calculat indexul topologic Chern în spațiul fazelor $\varphi_1 - \varphi_2$ prin metoda din Ref. [T. Fukui, Y. Hatsugai, and H. Suzuki, J. Phys. Soc. Jpn. 74, 1674 (2005)]. Rezultatul pentru o valoare finită a gap-ului supraconductor $\Delta = \Gamma/3$, unde Γ este rata de tunelare SC-QD este prezentat în Figura de mai jos, confirmând prezența fazelor topologice nontriviale și în acest regim realist de parametri.

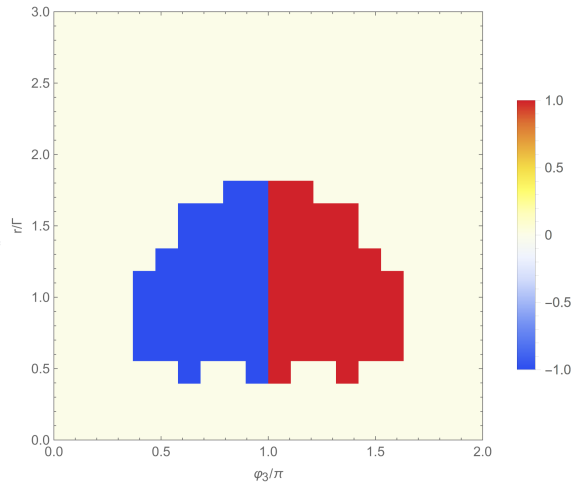


Figure 6: Indexul topologic Chern în spațiul $r - \varphi_3$ pentru sistemul hibrid cu patru terminale supraconductoare la $\Delta = \Gamma/3$.

Rezumat - Etapa II. În cadrul celei de-a doua etape de implementare, am extins aplicabilitatea modelelor surogat la sisteme hibride cu insule supraconductoare, a căror interacție Coulomb nu permite formularea directă a unui model surogat ca în cazul terminalelor supraconductoare standard. Formularea unui model surogat generalizat pentru sisteme hibride cu un număr arbitrar de insule supraconductoare a presupus introducerea unui grad de libertate suplimentar pentru fiecare insulă, care să permită conservarea numărului total de particule (absentă în modelul surogat original) și deci o descriere corectă a interacției Coulomb. Validarea modelelor surogat a constat în compararea rezultatelor privind proprietățile stărilor sub-gap pentru diverse dispozitive hibride cu cele obținute în literatură prin metode mult mai costisitoare din punct de vedere computațional (e.g., modelul Richardson cu $L = 400 - 800$ de nivele).

Rezultate Principale - Etapa II: Formularea și validarea unui model surogat generalizat pentru a descrie eficient sisteme hibride cu insule supraconductoare.

Modele surogat pentru dispozitive hibride cu insule supraconductoare.



Figure 7: Reprezentare schematică a formulării metodologiei surogat pentru un sistem hibrid cu o insulă supraconductoare.

Insulele supraconductoare sunt sisteme mezoscopice care prezintă corelații supraconductoare în prezența unei interacții Coulomb repulsive semnificative. Pentru descrierea corectă a efectelor datorate acestora din urmă este necesară folosirea unui model care conservă numărul de particule (precum modelul Richardson), în care fluctuațiile numărului de particule specifice modelelor BCS de tip câmp mediu sunt absente.

Hamiltonianul tipic pentru sistemul SI-QD din Fig. 7 are forma

$$H = H_{SI,0} + E_c(\hat{N}_{SI} - n_0)^2 + U(\hat{N}_{QD} - \nu)^2 + H_T, \quad (10)$$

unde $H_{SI,0}$ este Hamiltonianul ce descrie corelațiile supraconductoare din SI (e.g., cel corespunzător modelului Richardson), H_T descrie cuplajul SI-QD, iar n_0 și ν sunt sarcinile optime pentru SI și QD.

Folosind conservarea numărului total de particule $N_{tot} = N_{SI} + N_{QD}$, termenul Coulomb al SI poate fi rescris ca o interacție efectivă pentru QD,

$$H = H_{SI,0} + E_c(N_{tot} - n_0 - \hat{N}_{QD})^2 + U(\hat{N}_{QD} - \nu)^2 + H_T. \quad (11)$$

În această formă este posibilă neglijarea dependenței implicite a mărimilor fizice ale QD-ului de numărul de perechi Cooper din supraconductor, e.g. $\langle \psi_N | N_{QD} | \psi_N \rangle \simeq \langle \psi_{N+2} | N_{QD} | \psi_{N+2} \rangle$, fiind justificată acum folosirea aproximației BCS de câmp mediu $H_{SI,0} \rightarrow H_{BCS}$. Acest ultim pas permite tratarea SI ca un terminal supraconductor standard și formularea unui model surogat conform cu metodologia prezentată în secțiunile precedente.

Această metodologie este însă eficientă numai pentru sisteme cu o singură insulă supraconductoare. În cazul unui sistem SI-QD-SI de exemplu, termenul Coulomb pentru una din insule poate fi rescris ca o interacție efectivă pentru QD dar și pentru cealaltă insulă, $E_c(\hat{N}_{SI,1} - n_0)^2 = E_c(N_{tot} - n_0 - \hat{N}_{QD} - \hat{N}_{SI,2})^2$, pentru aceasta din urmă nemaiputând fi deci formulat un model surogat.

Pentru a putea transfera înapoi pe prima insulă termenul său Coulomb (în cadrul modelului surogat însă), avem nevoie mai întâi de a restaura conservarea numărului de particule. Pentru aceasta, introducem un nou grad de libertate ce constă din operatorii conjugați $\hat{N}_p$ și $\hat{\phi}$, unde $[\hat{N}_p, e^{i\hat{\phi}}] = e^{i\hat{\phi}}$,

$\hat{N}_p$ fiind numărul de perechi Cooper din condensatul supraconductor, iar $e^{\pm i\hat{\phi}}$ creează/anihilează o pereche din condensat, $e^{\pm i\hat{\phi}}|N_p\rangle = |N_p \pm 1\rangle$. Hamiltonianul pentru o insulă supraconductoare devine

$$H_{\tilde{\text{SI}}} = \sum_{\ell\sigma} \tilde{\xi}_{\ell} c_{\ell\sigma}^{\dagger} c_{\ell\sigma} - \sum_{\ell=1}^{\tilde{L}} (\Delta c_{\ell\uparrow}^{\dagger} c_{\ell\downarrow}^{\dagger} e^{-i\hat{\phi}} + \text{h.c.}) + E_c (N_{\text{surr}} + 2N_p - n_0)^2, \quad (12)$$

unde am considerat că numărul de particule din SI poate fi scris ca $N_{\text{SI}} = N_{\text{surr}} + 2N_p$, unde $N_{\text{surr}} = \sum_{\ell\sigma} c_{\ell\sigma}^{\dagger} c_{\ell\sigma}$. Generalizarea la sisteme cu mai multe SI este acum imediată,

$$\tilde{H} = H_{\text{QD}} + \sum_{\alpha=1}^N \left(H_{\tilde{\text{SI}},\alpha} + H_{\tilde{\text{T}},\alpha} \right). \quad (13)$$

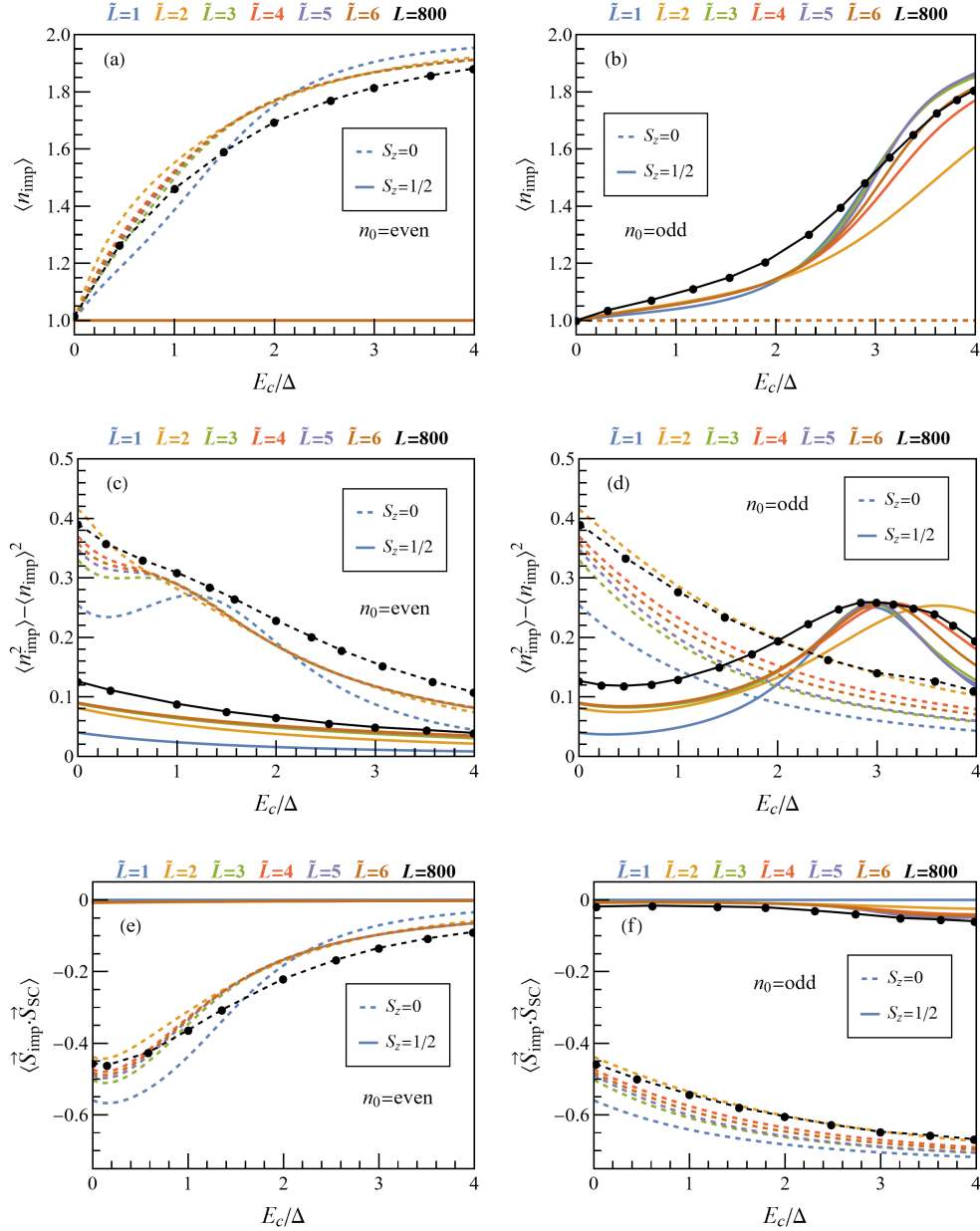


Figure 8: Dependența proprietăților stărilor sub-gap pentru un sistem hibrid SI-QD de tăria E_c a interacției Coulomb a SI obținută în cadrul modelelor surrogat cu $\tilde{L} = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ nivele, în comparație cu rezultatele modelului Richardson cu $L = 800$ nivele, extrase din Fig. 3 a Ref. [L. Pavesic et al, Phys. Rev. B 104, L241409 (2021)].

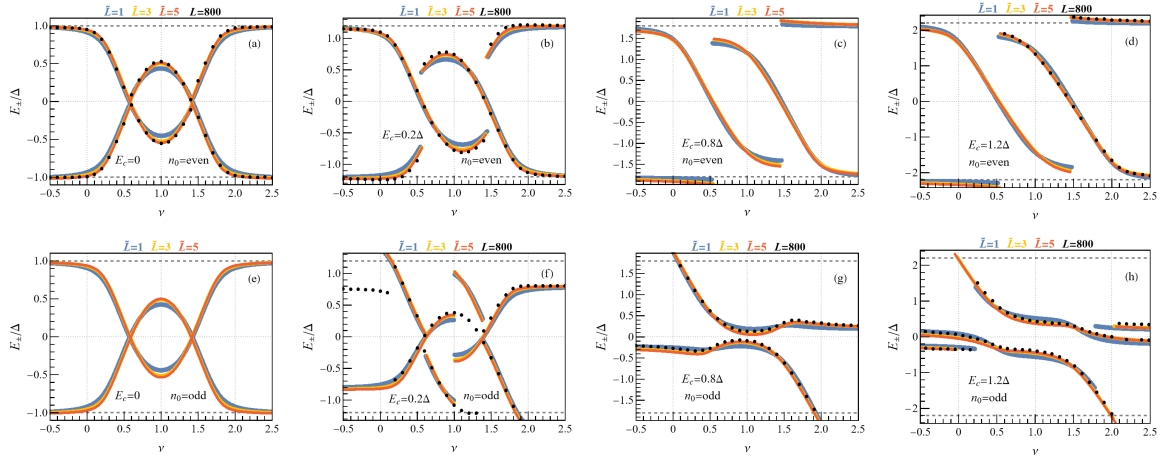


Figure 9: Dependența energiilor stărilor sub-gap pentru un sistem hibrid SI-QD de sarcina optima ν a QD, obținută în cadrul modelelor surogat cu $\tilde{L} = 1, 3, 5$ nivele, în comparație cu rezultatele modelului Richardson cu $L = 800$ nivele, extrase din Fig. 4 a Ref. [L. Pavesic et al, Phys. Rev. B 104, L241409 (2021)].

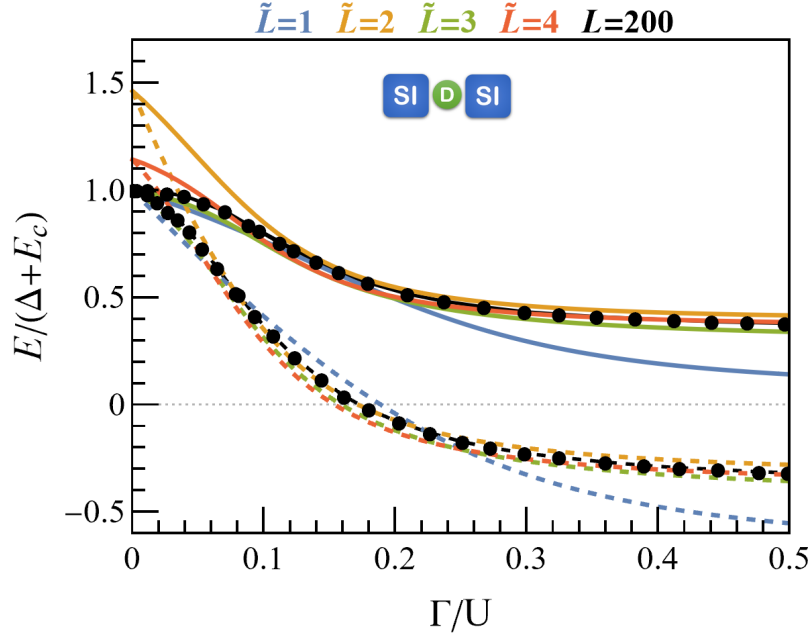


Figure 10: Dependența energiilor stărilor sub-gap pentru un sistem hibrid SI-QD-SI de rata de tunelare Γ , obținută în cadrul modelelor surogat cu $\tilde{L} = 1, 2, 3, 4$ nivele, în comparație cu rezultatele modelului Richardson cu $L = 200$ nivele pentru fiecare SI, extrase din Fig. 3 a Ref. [L. Pavesic, R. Zitko, Phys. Rev. B 105, 075129 (2022)].

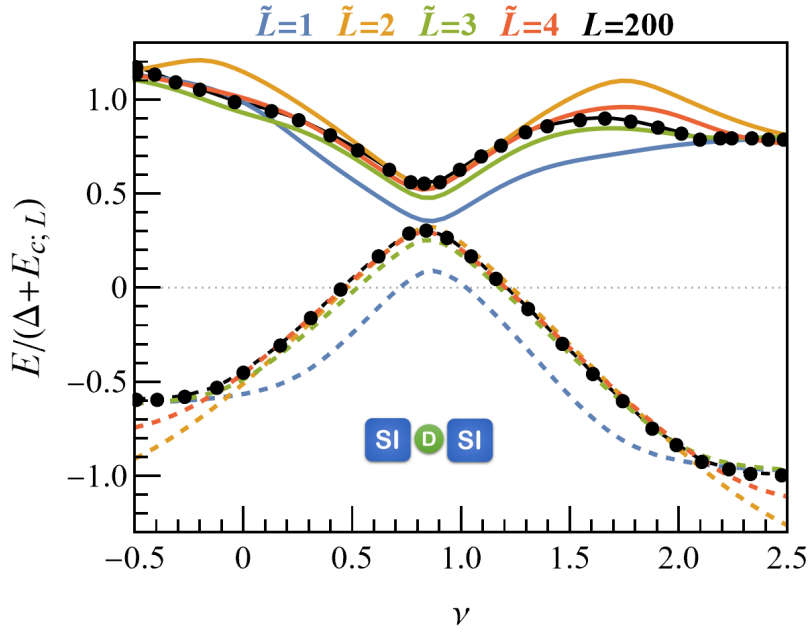


Figure 11: Dependența energiilor stărilor sub-gap pentru un sistem hibrid SI-QD-SI de sarcina optima ν a QD, obținută în cadrul modelelor surogat cu $\tilde{L} = 1, 2, 3, 4$ nivele, în comparație cu rezultatele modelului Richardson cu $L = 200$ nivele pentru fiecare SI, extrase din Fig. 13b a Ref. [L. Pavesic, R. Zitko, Phys. Rev. B 105, 075129 (2022)].

Toate obiectivele propuse în cadrul primelor două etape ale proiectului au fost realizate, iar rezultatele obținute au fost/vor fi diseminate după cum urmează:

- Rezultatele privind modelele surogat pentru sisteme cu terminale supraconductoare au fost incluse în lucrarea “Surrogate model solver for impurity-induced superconducting subgap states”, **acceptată** pentru publicare în secțiunea **Letters** a revistei **Physical Review B** (zona roșie în categoria Physics, Applied, în funcție de AIS, conform ediției JCR 2022 din 28 iunie 2023), cu menționarea suportului financiar parțial al proiectului (în perioada premergătoare începerii implementării proiectului, finanțarea a fost asigurată din fondurile PN-IIIP4-ID-PCE-2020-1142).
- Un manuscris bazat pe rezultatele privind modelele surogat pentru sisteme cu insule supraconductoare este în pregătire.
- Toate rezultatele au fost incluse în prezentarea “Surrogate Superconducting Islands and poor man’s Majoranas” susținută în cadrul seminarului Institutului Niels Bohr (Universitatea din Copenhaga, Danemarca) din data de 30.11.2023, cu participarea membrilor grupului de Fizica Solidului a Universității din Lund, Suedia.
- Codurile numerice corespunzătoare fiecărei activități vor fi făcute liber disponibile pe platforma github.com.

Director proiect, Dr. Virgil V. Baran