

12. Bestimmung der elektronischen Struktur anhand der Coulomb-Diamanten

Die elektronische Struktur einer Kohlenstoffnanoröhre (CNT) soll durch die Auswertung der Coulomb-Diamanten bestimmt werden. Die elektronische Struktur der CNT wird beschrieben durch zwei Bänder mit äquidistanten Zuständen, die um eine Energie δ gegeneinander verschoben sind. Der Abstand zwischen den Zuständen eines Bands sei Δ (siehe Abb. a), die Austauschenergie sei J (siehe Abb. c), die Aufladungsenergie $E_C = \frac{e^2}{2C}$. Die Excess-Coulombenergie dU berücksichtigt die zusätzliche Coulombenergie, wenn zwei Elektronen (mit unterschiedlichem Spin) den selben Zustand besetzen. Die Additionsenergie ist definiert als die Änderung des chemischen Potentials μ_N , bei Änderung der Ladung der CNT von N zu $N + 1$.

- Zeigen Sie, dass für die Additionsenergien gilt:

$$\Delta\mu_1 = \Delta\mu_3 = E_C + dU + J$$

$$\Delta\mu_2 = E_C + \delta - dU$$

$$\Delta\mu_4 = E_C + \Delta - \delta - dU$$

Zusätzliche Informationen erhält man durch die Auswertung der zusätzlichen parallelen Linien, die durch Anregung eines Elektrons bei Besetzung durch ein oder zwei Elektronen entstehen:

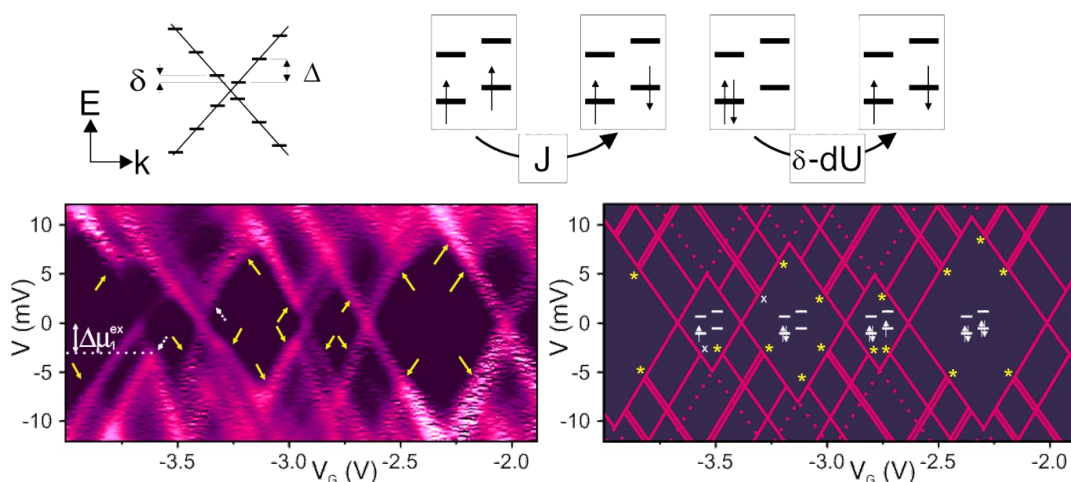
$$\Delta\mu_1^{ex} = \delta$$

$$\Delta\mu_1^{ex} = \delta - J - dU$$

- Bestimmen Sie mithilfe dieser fünf Gleichungen die fünf Parameter für die unten gezeigten Coulombdiamanten mit vier Elektronen. Links ist die differentielle Leitfähigkeit geplottet, rechts die theoretische Simulation. Vergleichen Sie Δ mit dem theoretischen Wert für den Abstand zwischen den quantenmechanisch möglichen Zuständen

$$\Delta_{theo} = h\nu_F/2L^3,$$

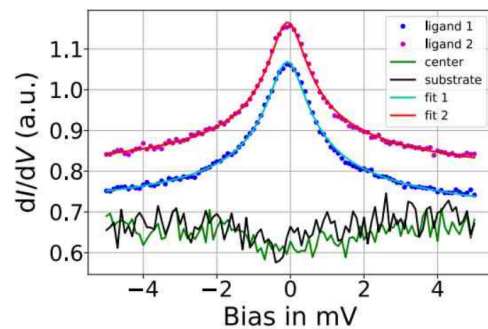
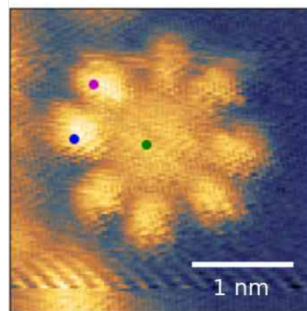
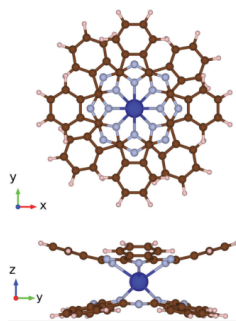
wobei $L = 180 \text{ nm}$ und $\nu_F = 8.1 \times 10^5 \text{ m/s}$.



13. Kondoeffekt im RTM

Auf einem Phthalocyanin-Doppeldecker-Molekül mit zentralem Dysprosium-Atom wird die differentielle Leitfähigkeit in der Nähe der Fermikante gemessen.

- Für welchen Teil des Moleküls würden Sie einen Kondoeffekt erwarten? Was zeigt die Messung?
- Wie könnte man ausschließen, dass die Erhöhung der Zustandsdichte auf eine inelastische Anregung (z. B. Phononen) zurückzuführen ist?
- Was würden Sie erwarten, wenn Sie den Einfluss des Spins des Dysprosium-Atoms berücksichtigen?



14. Inelastische Tunnelspektroskopie

- Ein Quantenoszillator (z.B. ein Molekül) mit der Eigenfrequenz $\omega_0 = 7,5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ befindet sich auf einer metallischen Oberfläche. Ein Tunnelspektrum wird mit der RTM-Spitze direkt über dem Molekül gemessen. Wie sehen der Tunnelstrom und seine erste Ableitung im Bereich -100 mV bis 100 mV aus? Wie sieht das d^2I/dU^2 -Spektrum in diesem Bereich aus? Nehmen Sie an, dass die Zustandsdichten von Spitze und Probe in diesem Bereich konstant sind.
- Wenn der Tunnelwiderstand $2 \text{ M}\Omega$ beträgt, und die Anregungswahrscheinlichkeit durchschnittlich 10 % beträgt, wie groß ist das d^2I/dU^2 -Signal bei Raumtemperatur? Bei welcher Temperatur sollte die Messung gemacht werden, um eine minimale Peakhöhe von $1 \mu\text{A} \cdot \text{V}^{-2}$ zu erreichen? Nehmen Sie an, dass die intrinsische Breite der Anregung unendlich klein ist und eine Modulationsamplitude von 10 mV benutzt wird.
- Die Amplitude des inelastischen Peaks wächst quadratisch mit der Modulationsamplitude. Warum kann man keine beliebig große Modulationsamplitude benutzen? Was ist die maximale sinnvolle Modulationsamplitude bei diesem Experiment? Wie würde das d^2I/dU^2 -Spektrum mit 0,5 eV Modulation aussehen?