

# The one-dimensional Wigner crystal in carbon nanotubes

VIKRAM V. DESHPANDE AND MARC BOCKRATH\*

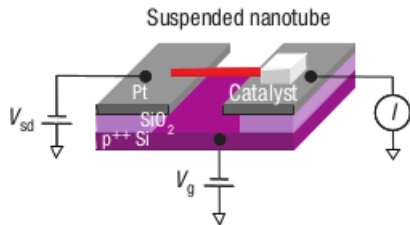
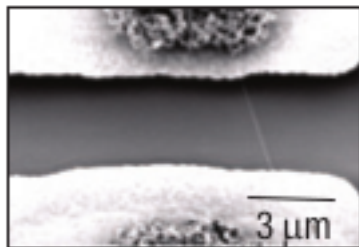
Applied Physics, California Institute of Technology, Mail Stop 128-95, Pasadena, California 91125, USA

\*e-mail: mwb@caltech.edu

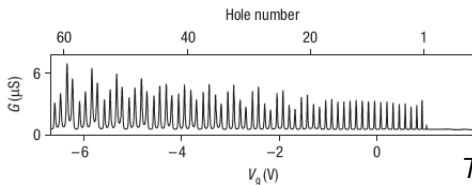
Sárkány Lőrinc  
Nanoseminar Journal Club  
2012. április 19.

# Elrendezés

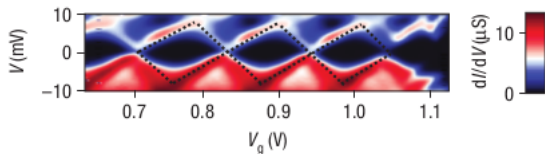
- suspended geometria, kontaktusra növesztve
- félvezető CNT



# Alapmérések



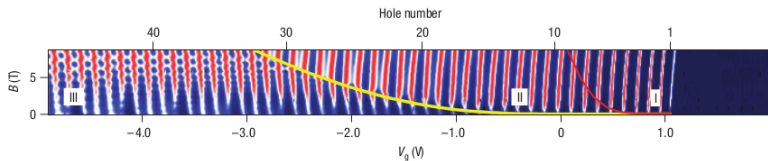
$T = 1,4$  K-en, kvantált vez. kép.,  
szabályos  $\Rightarrow$  egy QD



stabilitási diagram, Coulomb-gyémántok

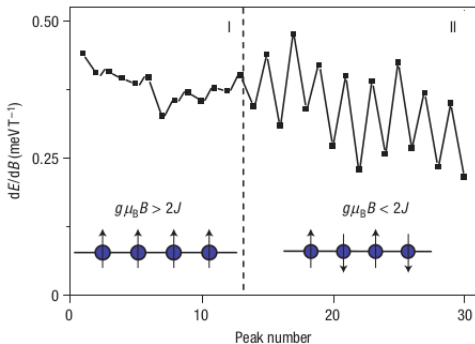
- CNT-ban spin és **izospin** szabadsági fok:  $\mathbf{v}(\mathbf{k}) = \frac{\partial \epsilon(\mathbf{k})}{\partial \mathbf{k}} / \hbar \Rightarrow$  „kiralitás” (izospin) – melyik irányba kering a kerület mentén
- axiális mágneses térben:
  - $E_Z = \pm g \mu_B B / 2 \approx 0,058 B[T] \text{ meV}$
  - $E_{orb} = \pm \mu_{orb} B = \pm r e v_F B / 2$  – tipikusan 5 – 10-szer nagyobb, mint a Zeeman

# Mágneses térben



- I. régió ( $N \sim 12$ -ig): pozitív meredekségű egyenesek
- II. régió: váltakozó poz. meredekség
- III. régió: cikk-cakk ( $B < 3$  T alatt elmosódik)

# I. → II. átmenet



- I: spin és izospin polarizáció
- II: izospin polarizáció, alternáló spinek
- $\rightsquigarrow \mu_{orb} \approx 0,33 \text{ meV T}^{-1}$
- meredekség-váltakozásból  $\rightsquigarrow g \approx 2,4$

I. régió spin polarizációja meglepő: alternálást várnánk  
Magyarázat: **Wigner-kristály**

# Wigner-kristály

- $\epsilon_F \sim n^2/m$ ,  $V_{int} \sim ne^2/\epsilon$
- $\epsilon_F \ll V_{int} \Leftrightarrow na_B \ll 1$  ( $a_B = \epsilon/(e^2m)$ , eff. Bohr-sugár): a részecskék nem tudják legyőzni Coulomb-taszítást, „kristályosodnak”
- (valójában: sűrűség-sűrűség korrelációban  $4k_F$ -es oszcilláció, hatványfgv-nél lassabb lecsengés)
- spinek effektív viselkedése:

$$H_{\text{spin}} = J \sum_i \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_{i+1}$$

első közelítésben:

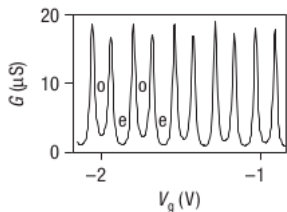
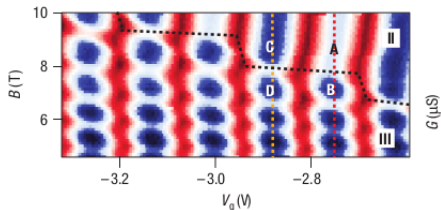
$$J \sim \exp\left(\frac{-\eta}{\sqrt{na_B}}\right) \quad (> 0, \text{antiferromágneses!})$$

# Wigner-kristály

- lyukak Wigner-kristályt alkotnak!
- II:  $n \uparrow \Rightarrow J \uparrow$ ,  $B$  már nem elegendő ahhoz, hogy polarizálja a spineket, de az izospin még igen
- III: nincs (izo)spin polarizáció

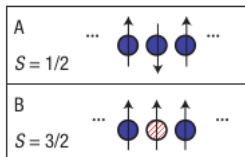


## II. → III.



- Coulomb-völgyek mélysége alternál (ptl. magasabb) – Kondo-effektus! (ez is mutatja az alternáló spineket)
- B-t változtatva (II. → III.)
  - $A \rightarrow B$ :  $\Delta G \approx 1,5 \mu\text{S}$  csökkenés (N ptl.)
  - $C \rightarrow D$ : nincs csökkenés (N ps.)

II.  $\rightarrow$  III.



- izospin-flip mellett spin-flip is van
- nagyobb spin  $\Rightarrow T_K$  csökken  $\Rightarrow G$  is!

Köszönöm a figyelmet!

Felhasznált irodalom:

Vikram V. Desphande, Marc Bocrath: The one-dimensional Wigner crystal in carbon nanotubes (Nature Phys., 2008, doi:10.1038/nphys895)