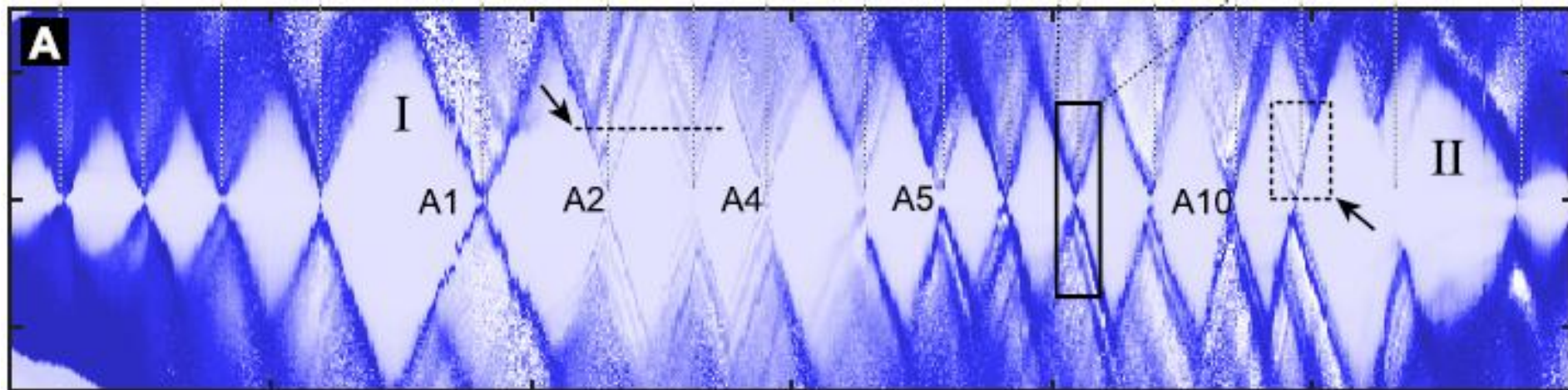


Transport through graphene quantum dots

J Güttinger¹, F Molitor, C Stampfer², S Schnez, A Jacobsen, S Dröscher, T Ihn
and K Ensslin

Solid State Physics Laboratory, ETH Zurich, 8092 Zurich, Switzerland



Nanofizika szeminárium
2013. március 1.

Pósa László

Tunable Graphene Single Electron Transistor

C. Stampfer,* E. Schurtenberger, F. Molitor, J. Güttinger, T. Ihn, and K. Ensslin

Solid State Physics Laboratory, ETH Zurich, 8093 Zurich, Switzerland

**NANO
LETTERS**

**2008
Vol. 8, No. 8
2378-2383**

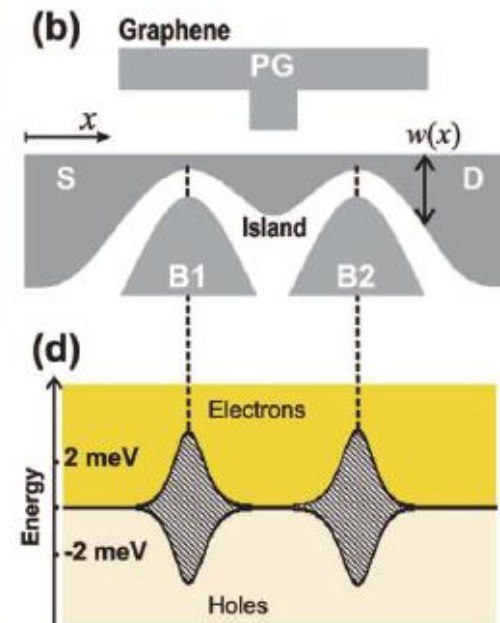
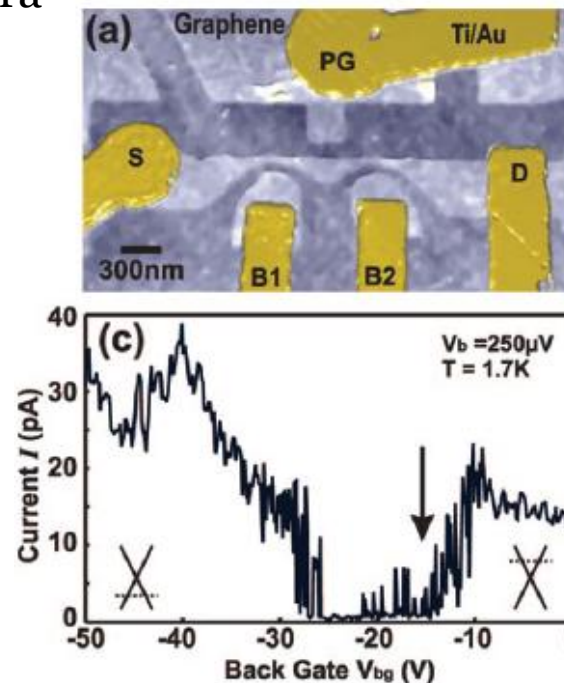
Grafén előnye spin qubit létrehozására GaAs rendszerekkel szemben:
 - Nagyobb spinkoherencia idő
 - Gyenge hiperfinom csatolás: ^{12}C atommagnak nincs spinje
 - Gyenge SOI: kis rendszám

Probléma: Nincs gap \rightarrow gap nyitása grafén szalagokkal: Transzport gap

$$W < 20\text{nm}: E_g(w) = \hbar v_F / w$$

$$W > 20\text{nm}: E_g(w) = (a/w) \cdot \exp(-b/w)$$

$a = 1\text{eV}$
 $b = 0.023 \text{ nm}^{-1}$ (cikk szerint)



Vizsgált qdot paramétere:

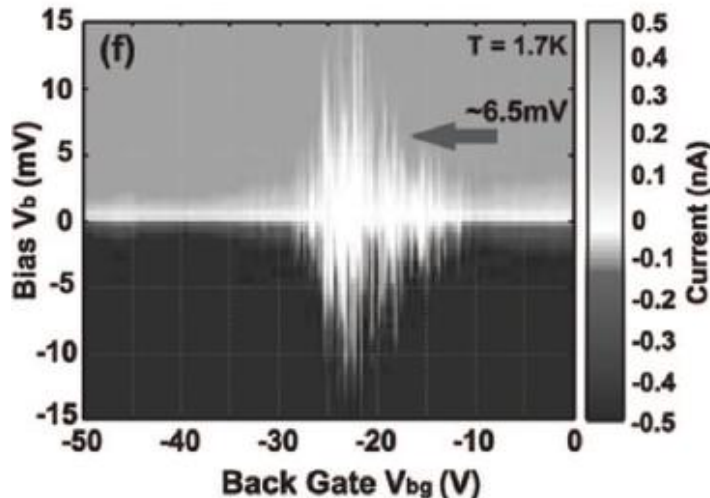
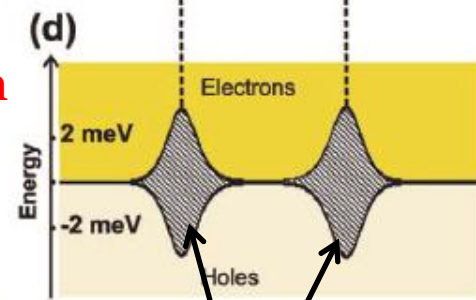
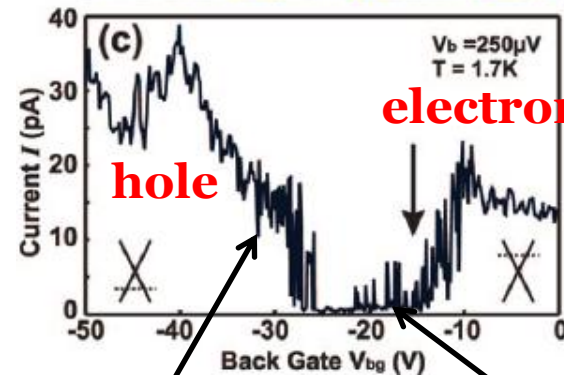
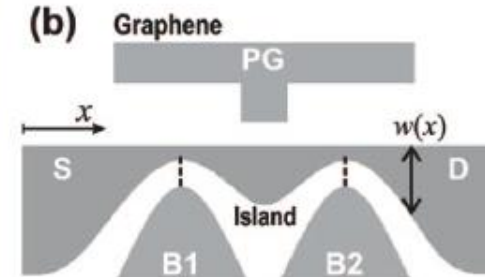
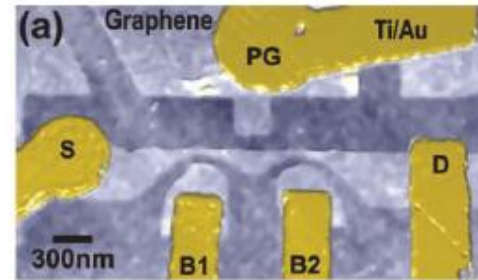
- Összekötő vezeték szélessége: 50nm
- A qdot területe: $A=0.06\mu\text{m}^2$

Gate-k:

- B1, B2: a szalagok hangolására
- PG plunger gate: a qdot hangolása
- Back gate

Mérés paramétere:

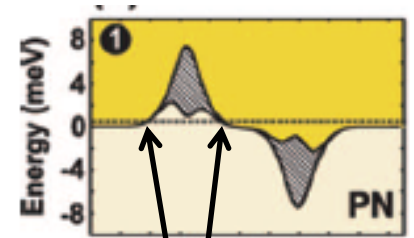
- $T=1.7\text{K}$
- Előtte 12h keresztül $135\text{ }^\circ\text{C}$ -on vákuumban hőkezelték.
- Lock-in technika: $50\mu\text{V}$ moduláció



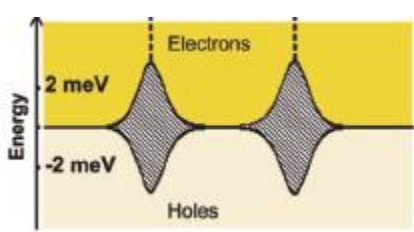
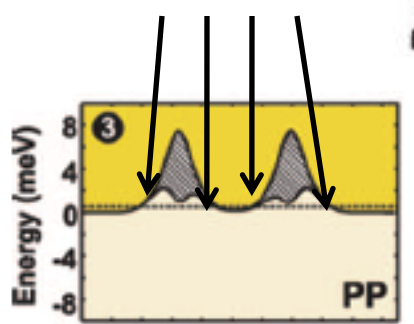
A mért áram gate függése ($V_{\text{bias}}=250\mu\text{V}$)

Gap nyílik az összekötő vezetékekben (traszport gap) $V_{\text{bg}}=-25\text{V}$ -tól -15V -ig

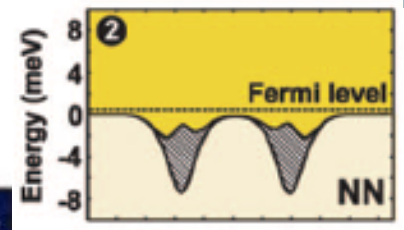
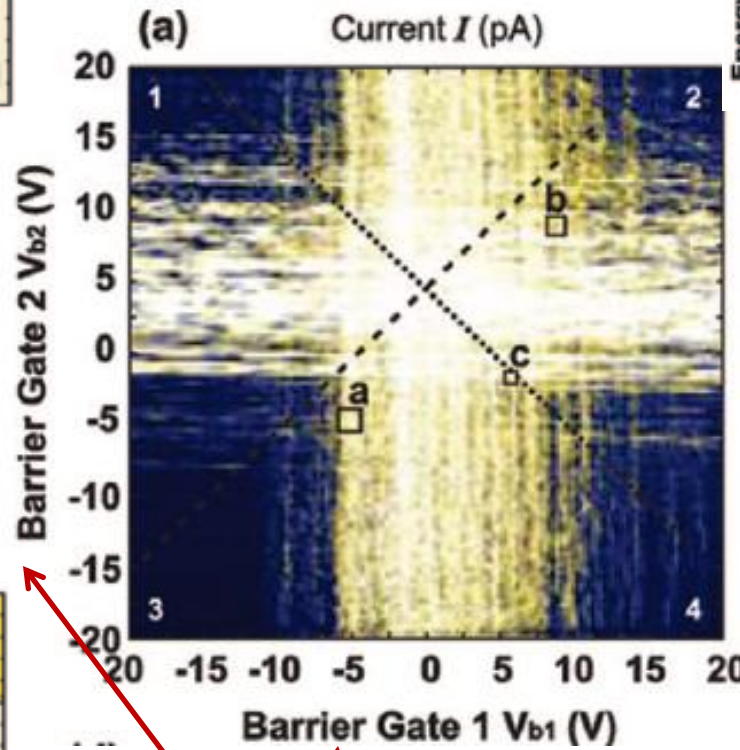
Stab. diagram: A transzport gap nagysága 10meV körül. Erős fluktuáció: lokalizált állapotok.



p-n átmenet szerűség, de semmi erre utaló jel -> Klein-tunneling???

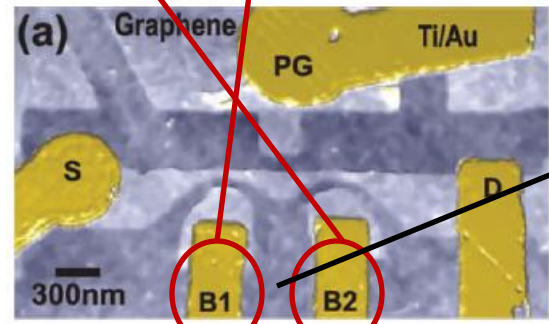
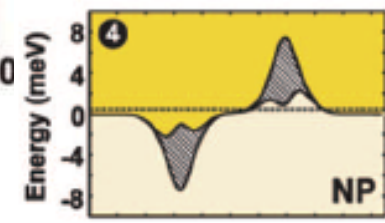


$V_{B1}, V_{B2} = 0V$

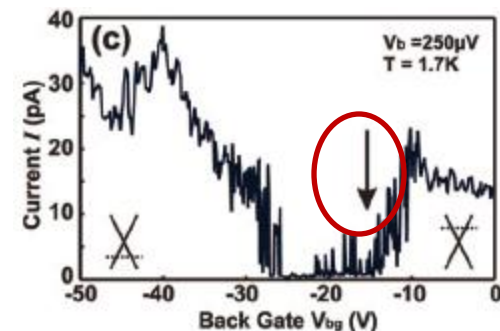


Transzport vizsgálata a B1, B2 gate hangolásával:

- Fix back gate: 15V -> E_F a vezetési sáv alján
- Kereszt alakú mintázat -> Mindkét szalag gappal rendelkezik
- Egymástól ftn-ül hangolhatók.

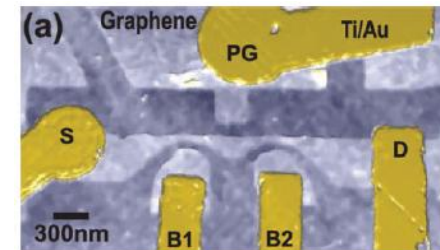
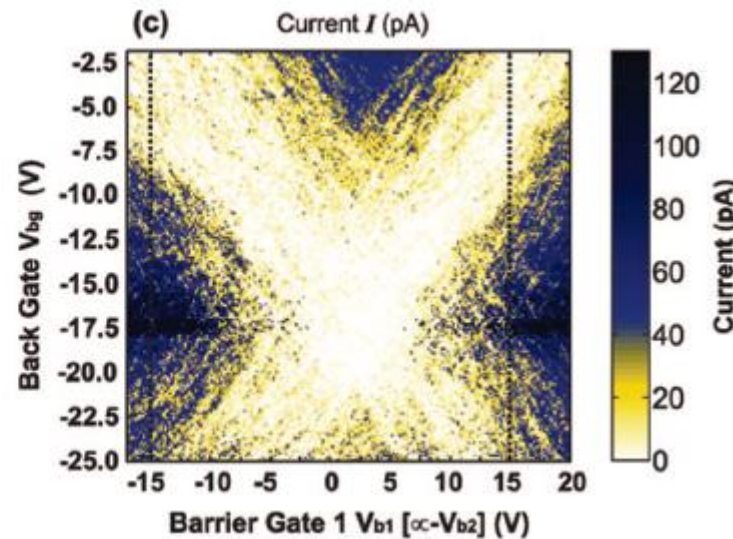
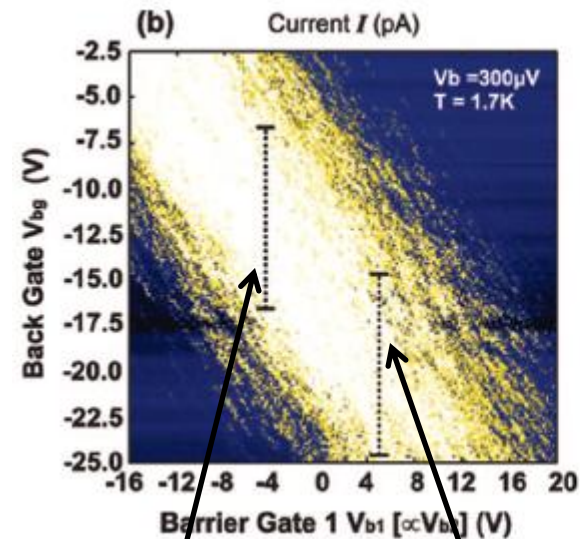


Cross talk: <2%



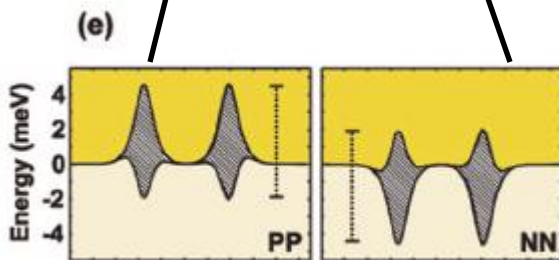
Szimmetrikus hangolás

Aszimmetrikus hangolás



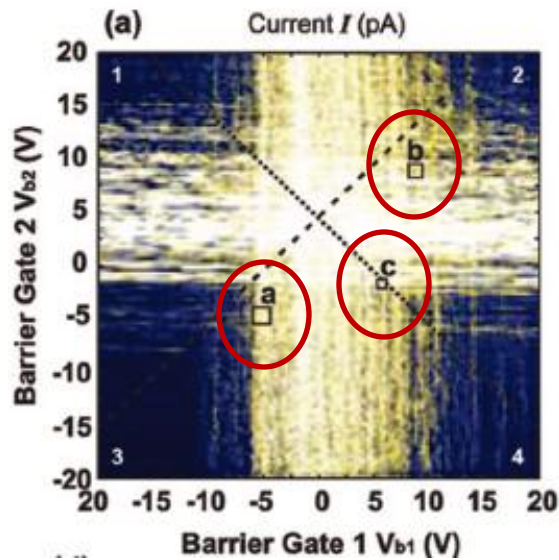
$$V_{B2} = V_{B1} + 5$$

$$V_{B1} + V_{B2} = 5V$$



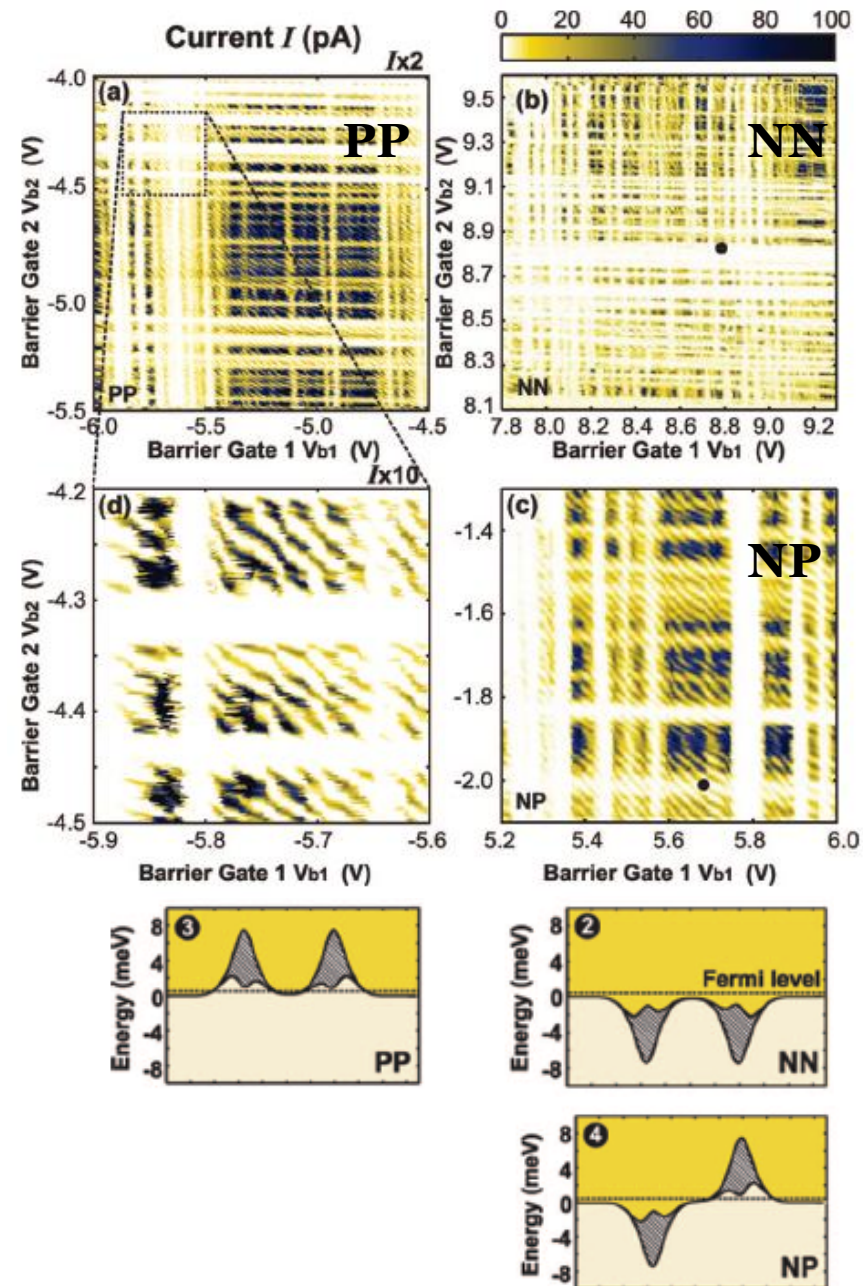
Az előző elmélettel konzekvens mérések.

- A V_{bg} hangolásával a transzport gap helye változik a V_{B1} , V_{B2} skálán (nagysága nem)
- Átváltási arány: $\Delta V_{bg} / \Delta V_{B1, B2} \approx 0.9$



Finomabb struktúrák vizsgálata:

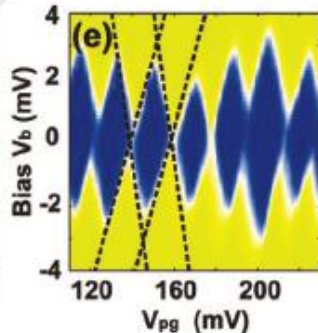
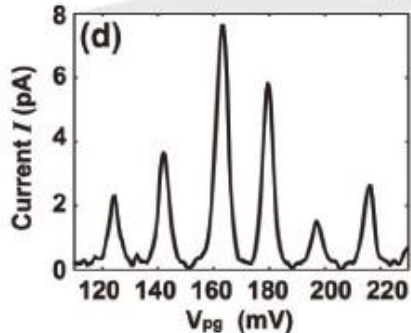
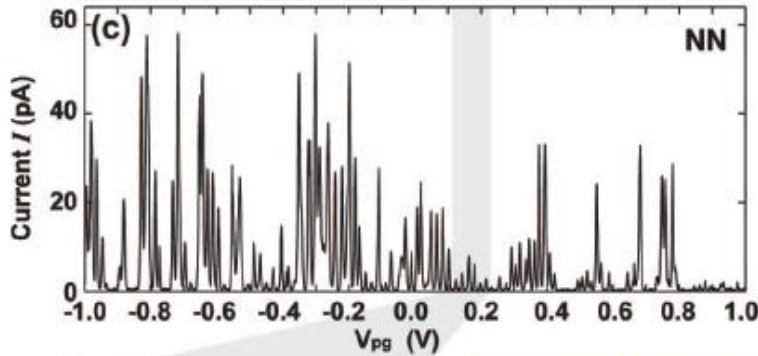
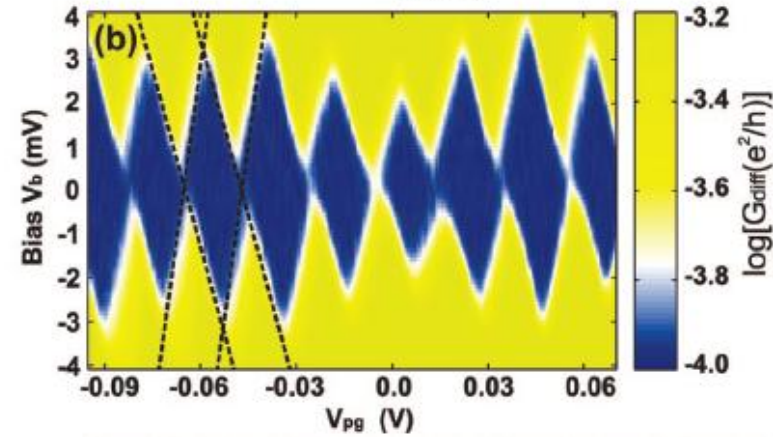
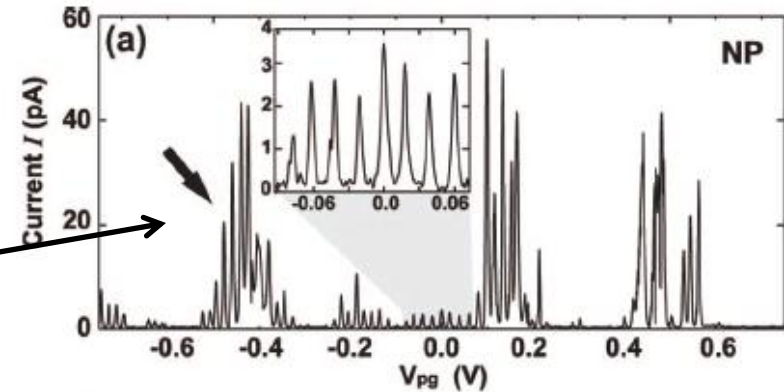
- A 3 különböző transzport tartományban felvett mérések nem különböznek jelentősen.
- Függőleges (constriction 1) és vízszintes (constriction 2) mintázat.
- Ezeket a mintákat a szigeten lokalizált állapotok adhatják.
- Ezek a qdot Coulomb-blokád (később) tartományában vannak.



Grafén sziget vizsgálata:

- V_{B1}, V_{B2} feszültségek rögzítése (NP és NN tartományban is vizsgálták).

A plunger gate függvényében 20mV periódusú oszcillációk vannak. Ezek amplitúdói 200mV periódussal modulálja a kontaktáló szalag transzmissziója



Hasonlóan megvizsgálták NN tartományban, de nincs jelentősebb különbség.

A gyémántok bias irányú kiterjedése alapján a charging energy: $3,4eV \rightarrow C_{\Sigma}=47.3aF$

Az egyes gate-k kapacitív csatolása:

- A legtöbb érték független melyik tartományban lett mérve.
- Ahol különbözik ott az első érték az NP-re, a zárójelben levő pedig az NN-re vonatkozik.
- A source és a drain csatolása függ erősen a tartománytól -> Coulomb gyémántok különböző meredeksége.

| | BG | PG | B1 | B2 | Source (S) | Drain (D) |
|---------------------|------|------|-------------|-----|-------------|-------------|
| capacitance (aF) | 18.0 | 6.9 | 6.0 (5.5) | 5.0 | 1.8 (10.1) | 9.6 (1.8) |
| lever arm | 0.38 | 0.15 | 0.13 (0.12) | 0.1 | 0.04 (0.21) | 0.20 (0.04) |

A szalagokban jelenlevő rezonanciák energiájának becslése:

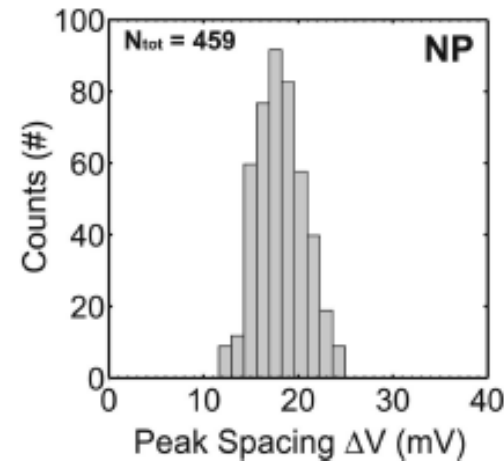
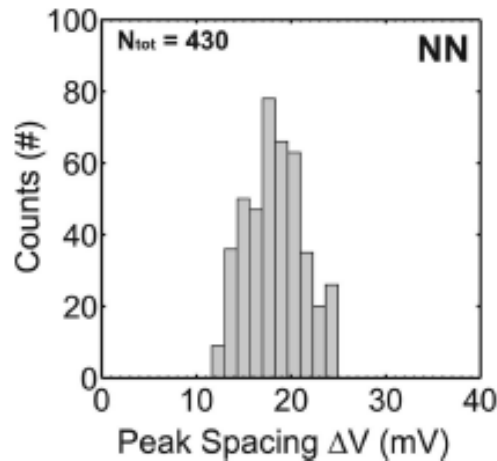
- A plunger gate függvényében 200mV oszcilláció.
- Felteszik, hogy a csatolása a szalagokra 3-szor kisebb, mint a szigetre (geometriai becslés).



Rezonancia energia skálája kb. 10meV

Coulomb csúcsok szinttávolságainak eloszlása:

- NN és NP tartományban vizsgálták, de nem különböznek jelentősen: 17,4eV és 17,9eV
- A csúcsok kiszélesedése lényegesen nagyobb, mint a kettő közötti különbség.
- A source és a drain csatolása függ erősen a tartománytól -> Coulomb gyémántok különböző meredeksége.



Electron-Hole Crossover in Graphene Quantum Dots

J. Güttinger,¹ C. Stampfer,¹ F. Libisch,² T. Frey,¹ J. Burgdörfer,² T. Ihn,¹ and K. Ensslin¹

¹*Solid State Physics Laboratory, ETH Zurich, 8093 Zurich, Switzerland*

²*Institute for Theoretical Physics, Vienna University of Technology, 1040 Vienna, Austria, EU*

(Received 22 April 2009; published 24 July 2009)

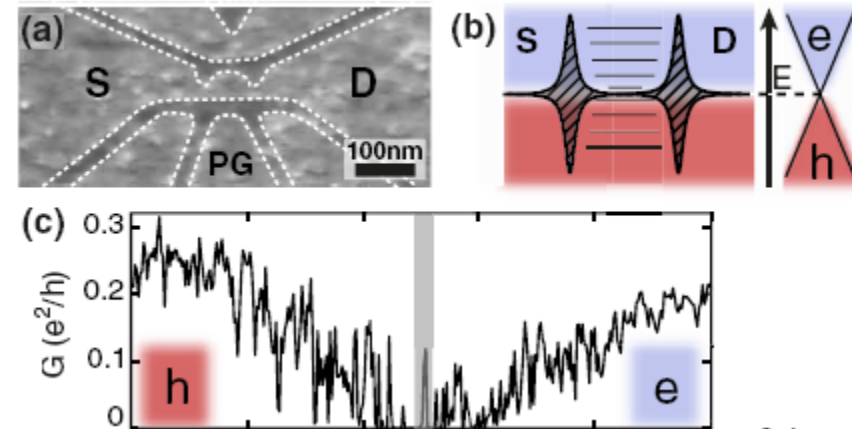
Spoiler: A grafénra a síkjára merőleges mágneses teret fognak bekapcsolni.

Minta kialakítása:

- A qdot mérete: 50x80nm (ez 0.004 μm^2 az előző pedig 0.06 μm^2 volt).
- Kontaktok: 25nm széles és 10nm hosszú (ez is kisebb, mint az előző)
- Gate: csak back gate és plunger gate.

Mérés kivitelezése:

- T=90mK (electron temperature $\approx 200\text{mK}$)
- Lock-in technika



Gate függés vizsgálata:

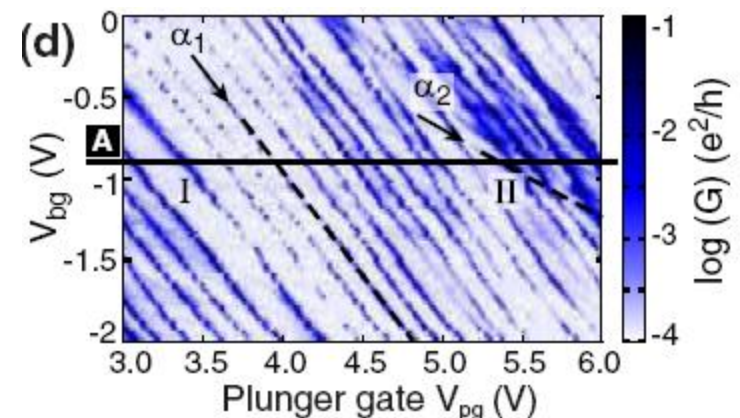
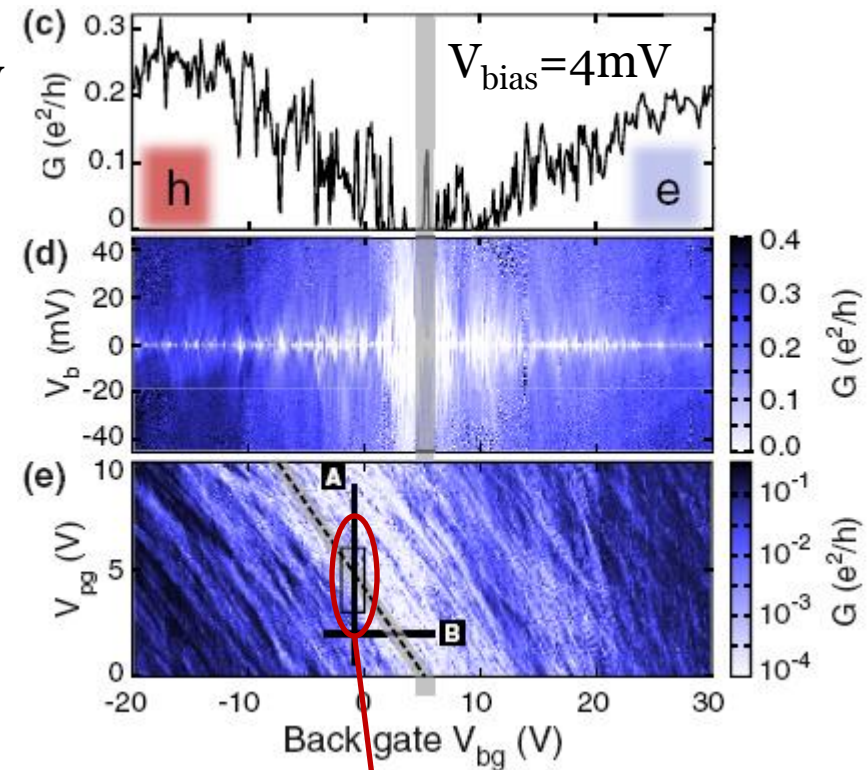
- Itt is egy tartományban ($V_{bg} = 0-10V$) lemegy a vezetőképesség 0-ra: transport gap.

- A bias feszültség alapján a gap nagysága meghaladja a 40mV-ot.

- A plunger gate-tel úgy lehet a qdot energiaszintjeit hangolni, hogy közben a kontaktusokra nem vagyunk hatással.

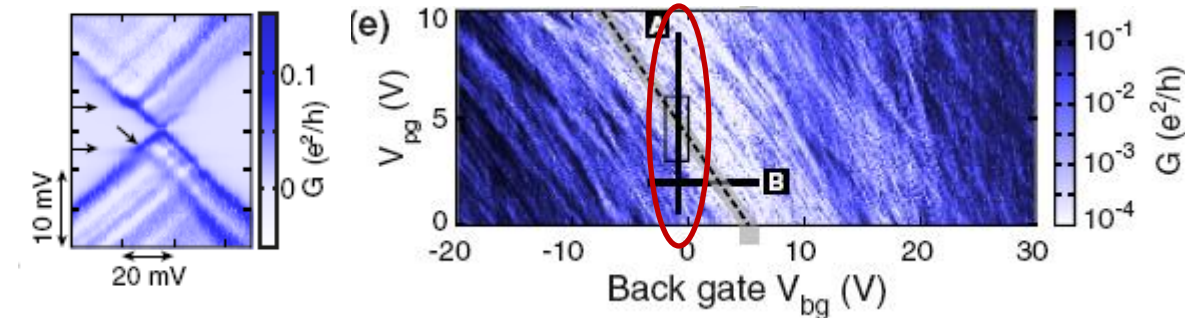
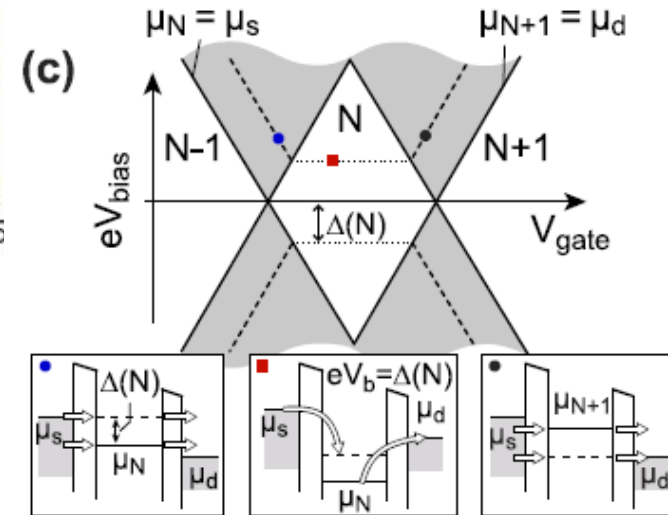
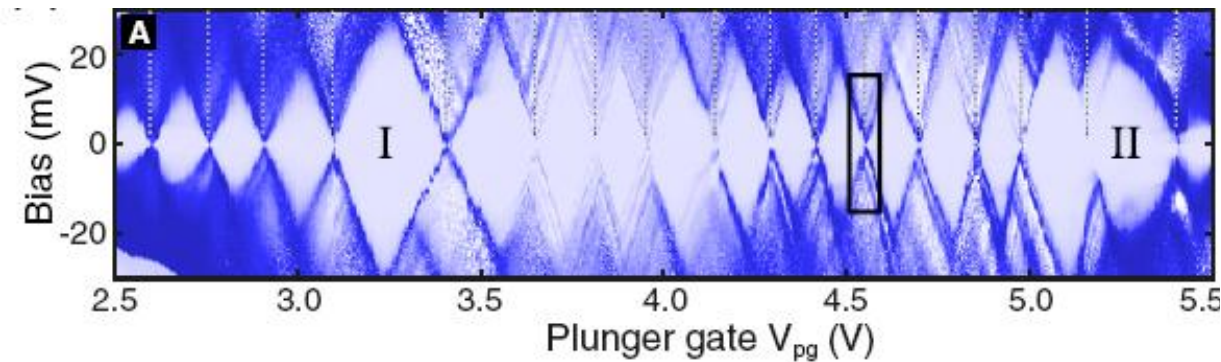
- (e) ábra alapján a back gate.plunger gate átváltási aránya: $\alpha_{pg,bg}^{(gap)} \approx 1.3$

- Az (e) ábrán finomabb struktúrák is megjelennek: A Coulomb-blokádban közel egyenes vonalak. Meredekségük megegyezik.



Gate függés vizsgálata:

- Bias – Plunger gate diagramot is felvették $V_{bg} = -0.9V$ mellett (A vonal).
- Az additional energy erősen szór 13-32meV között.
- Kinagyítva jópár gerjesztett energia látható (cotunneling). A két legkisebb energiájú: 3.1 meV (positive bias) és 2.3meV (negative bias)

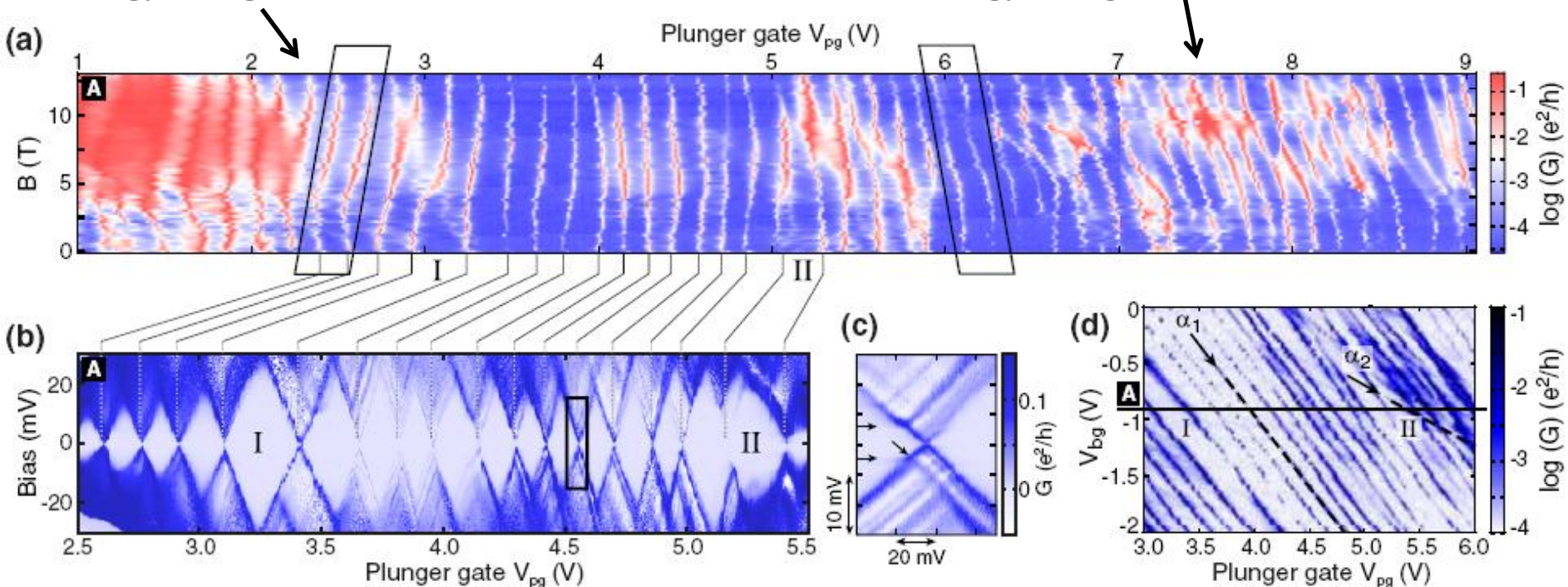


Mágneses tértől való függés vizsgálata:

- A grafén síkjára merőleges mágneses teret kapcsoltak be.
- Közel 50 Coulomb rezonancia mágneses tér függését lehet látni.
- A gate léptetésével átmentek a lyukvezetésből elektron vezetésbe.
- A fő mintázat mellett egyéb feature-k is vannak (level crossing, splitting és amplitúdó modulációk), amik lokalizált állapotoknak, multidot viselkedésnek és a kontaktusok rezonanciáinak tudhatók be.

A rezonanciák a nagyobb energiák (nagyobb gate fesz) felé dőlnek

A rezonanciák a nagyobb energiák (nagyobb gate fesz) felé dőlnek

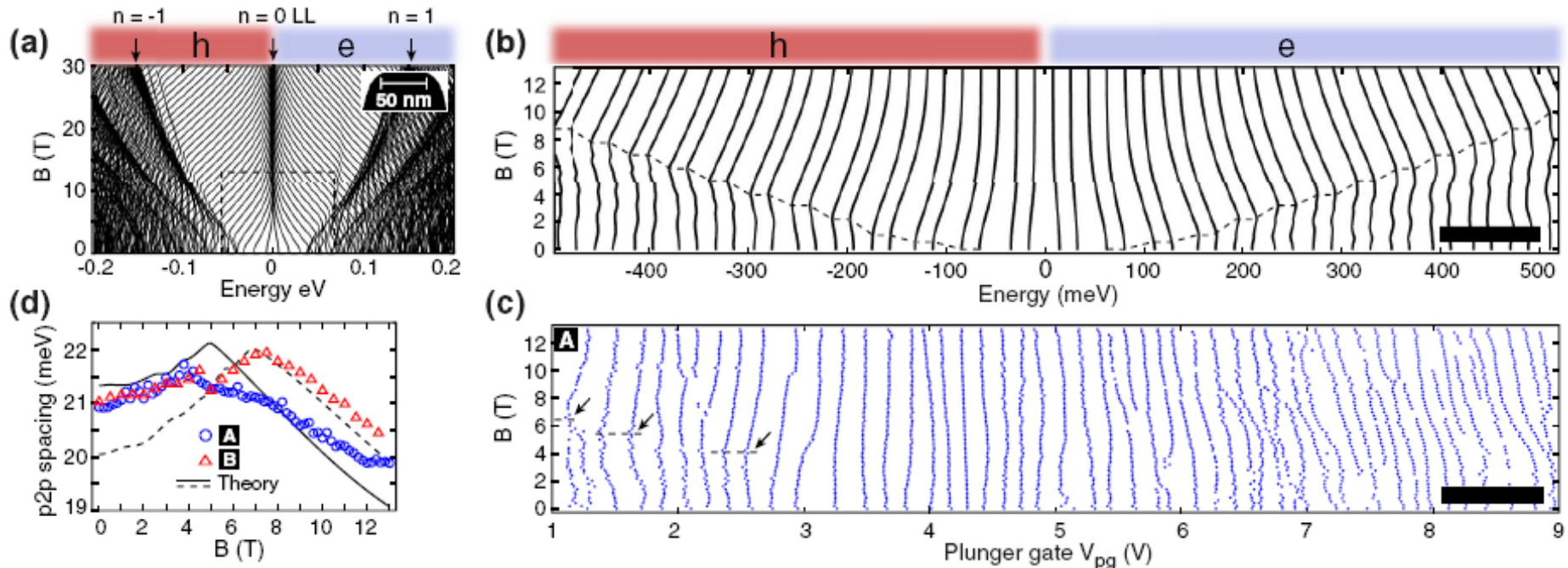


Mágneses tértől való függés vizsgálata

- A rezonanciák csúcsait külön kigyűjtötték és ábrázolták (c) és numerikus számításokat is végeztek rá (a) és (b)
- Nagyobb mágneses tér: Landau nívók kialakulása. A lineáris diszperzió következtében a nívók diszperziós relációja:

$$E_n = \text{sgn}(n) \sqrt{2e\hbar v_F^2 |n| B}$$

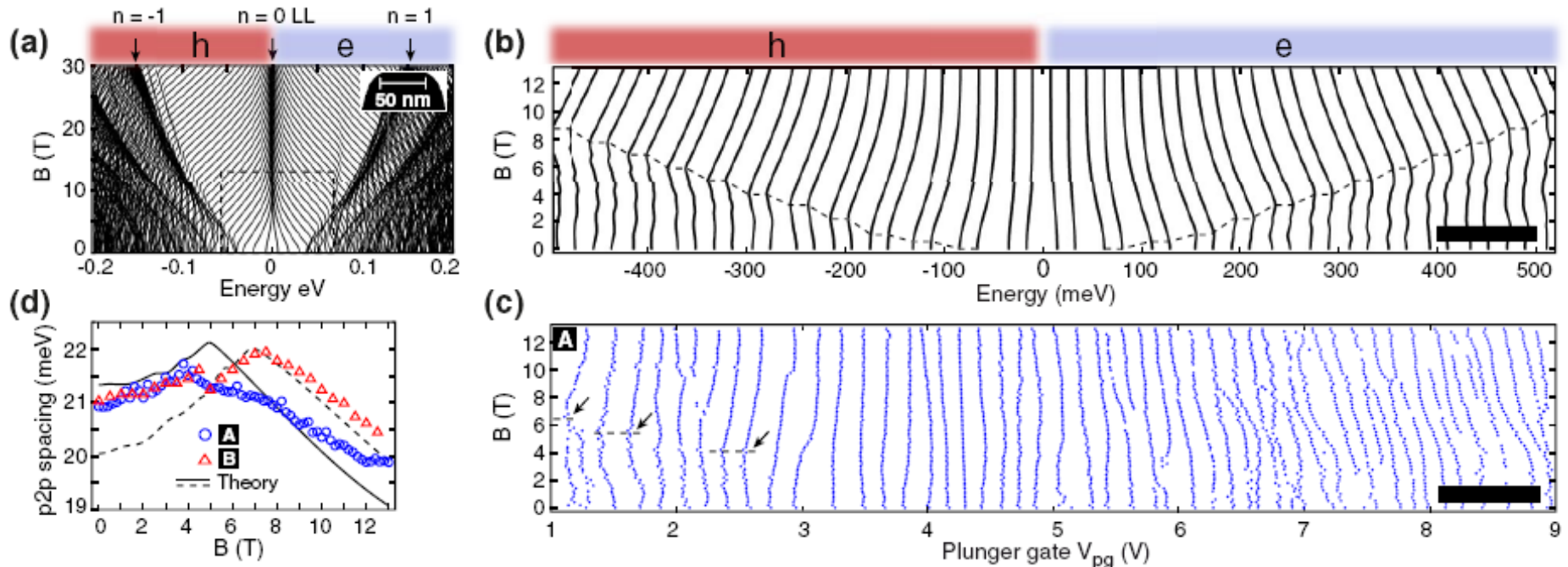
- $E=0$ -nál kialakul egy, a mágneses tértől független nívó, pont az elektron-lyuk átmenetnél -> azonosítása, cél: azonosítani azt az állapotot, mikor kevés elektron/lyuk van a doton.



Mágneses tértől való függés vizsgálata:

- Elektronállapotok konvergenciája az $E=0$ LL-hez: Szinttávolság ábrázolása: (d) ($V_{pg}=2.4-4.9V$)
- Az elmélettel egyező tendenciát kaptak, egy maximum után el kezd csökkenni.
- Ugyanezeket a méréseket megcsinálták a B vonalra is és hasonló eredményeket kaptak.

A mérések alapján az elektron-lyuk átmenet $V_{pg}=4.3-5.5$ között lehet, $V_{bg}=-0.9V$ mellett.



Spin States in Graphene Quantum Dots

J. Güttinger,^{*} T. Frey, C. Stampfer,[†] T. Ihn, and K. Ensslin

Solid State Physics Laboratory, ETH Zurich, 8093 Zurich, Switzerland

(Received 19 February 2010; published 7 September 2010)

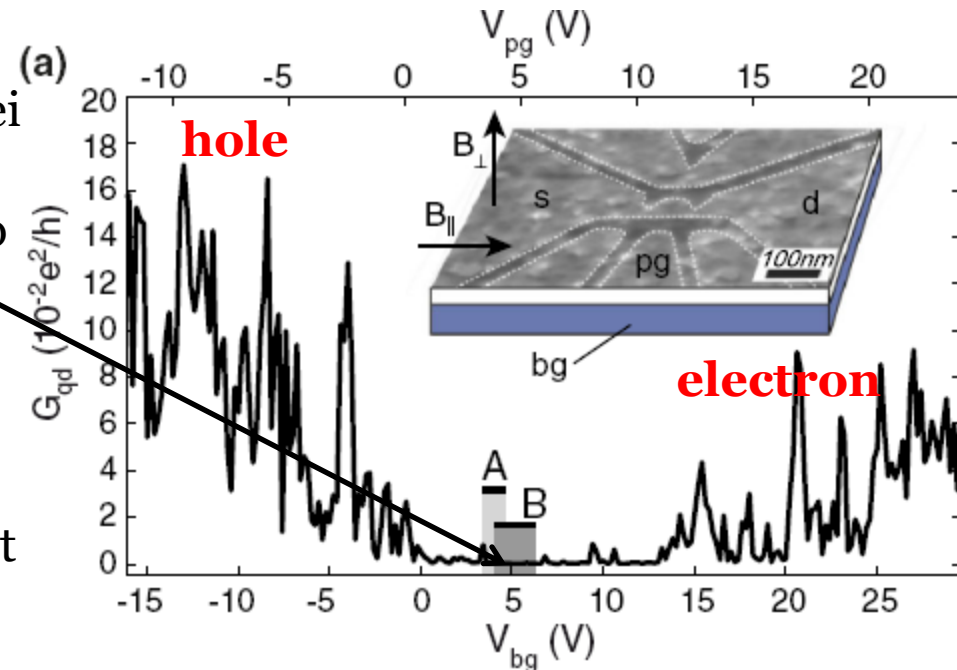
Spoiler: A grafén síkjára merőleges és párhuzamos mágneses teret kapcsolnak be és figyelik a Coulomb-rezonanciák és a gerjesztett állapotok mágneses tértől való függését.

A minta kialakítása és a mérés körülményei megegyeznek az előzőével.

Transzport gap

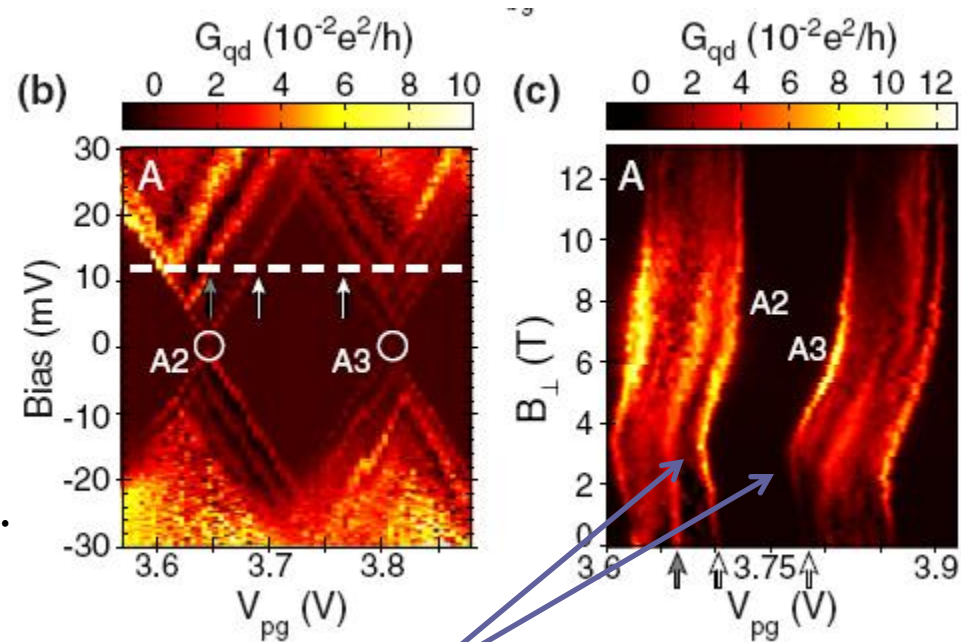
A plunger gate-el (felső tengely) és a back gate-el (alsó tengely) ugyanazt látták.

A grafikonon jelölt A ill. B transzport régiót vizsgálták alaposabban.



Az 'A' transzport tartomány:

- Két Coulomb rezonancia van benne: A2, A3.
- Electron addition energy: 20mV.
- Láthatóak a gerjesztett állapotok is.
- A mágneses tér függést a szaggatott vonalon vették fel, (c) ábra.
- A törés után az állapotok magasabb feszültség fele hajlanak a B növekedésével.



A gyémántok széleinek azonos fejlődése (fehér nyilak) arra enged következtetni, hogy ugyanazon pályán levő két különböző spinű elektronok lehetnek.

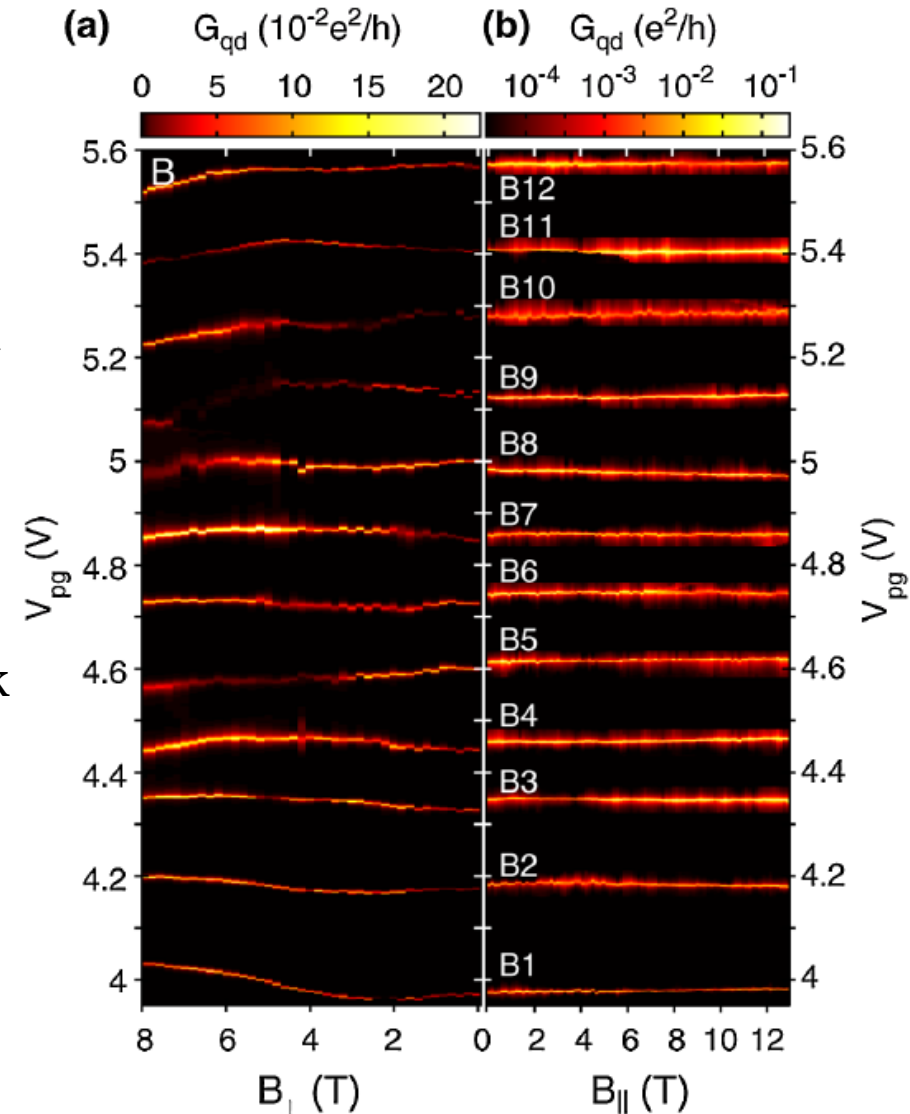
Az egyedi rezonancia görbék vizsgálatával nagyon nehéz megfigyelni a Zeeman felhasadást



Szinttávolság vizsgálata azonos pályán levő spinpárok között.

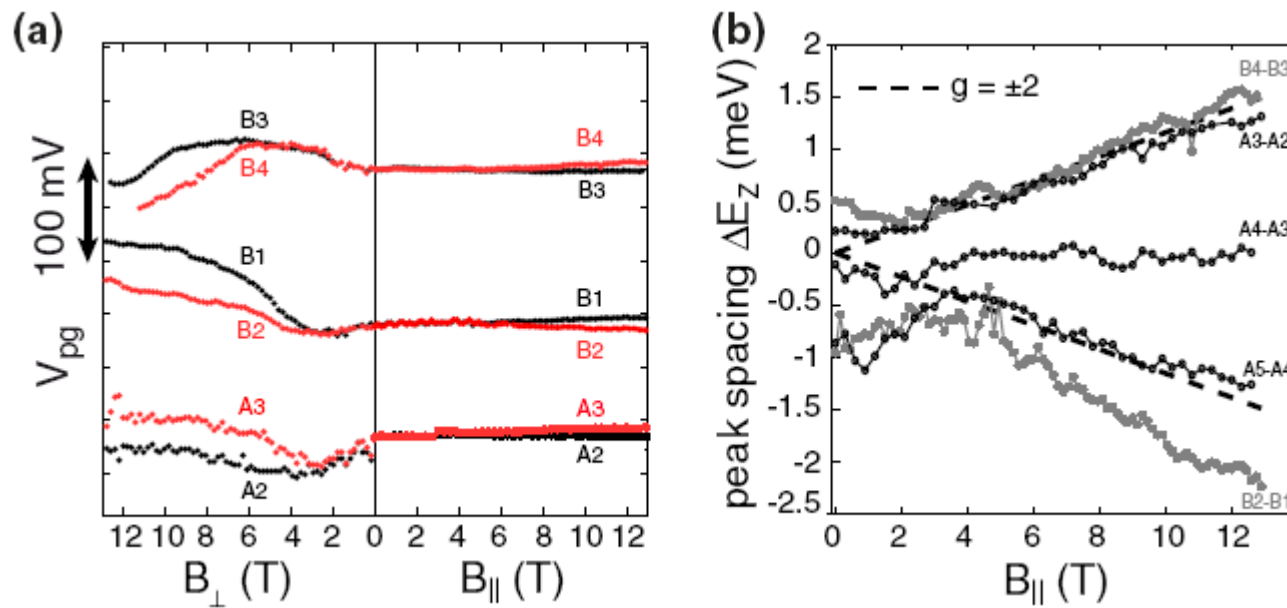
A 'B' transzport tartomány:

- Hasonlóan a B tartományon is megnézték a rezonancia csúcsok mágneses tértől való függését.
- Lehetséges spin párok: (B1, B2) ill. (B3, B4)
- A minta elforgatásával megnézték a csúcsok in-plane mágneses tértől való függését.



Szinttávolságok vizsgálata:

- Ábrázolták az egyes rezonancia párok maximum értékeit úgy, hogy $B=0$ esetén egybe essenek.
- Alacsony mágneses térnél egy darabig mindkét pályának azonos a menete: misallington hamis merőleges B teret adnak, de ez véges nagyságú
- Párhuzamos tér esetén a lineáris függés tisztán látható.
- (b) ábra: A fenti 3 spinpár és 2 további szinttávolságai.



Szinttávolságok vizsgálata:

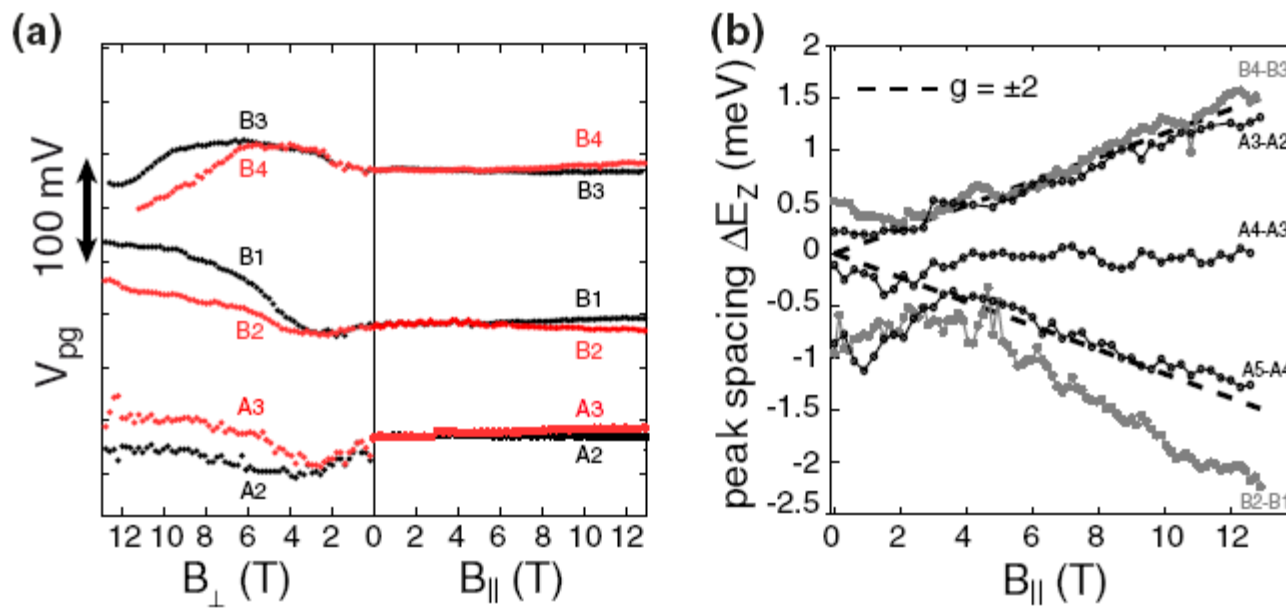
- A Zeeman felhasadás mértéke: $\Delta E_{N+1}^Z = (S_{N+1} - 2S_N + S_{N-1})g\mu_B B_{\parallel} + const$

,ahol S_N : A B_{\parallel} irányával párhuzamos qdot spin kvantumszáma

- Két egymást követő alapállapotok spinjeinek különbsége: $\Delta S_{N+1}^{(1)} = S_{N+1} - S_N$, amely mindig félegész értéket vesz fel.

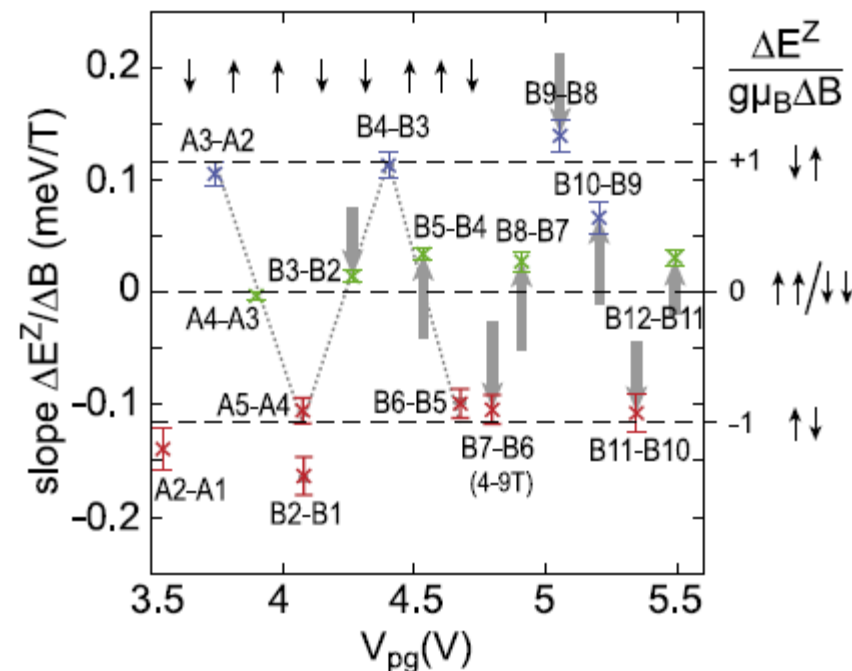
- Három egymást követő alapállapot esetén a spinek különbsége a fenti formula.

- A B2-B1 páros kivételével az összes állapot ΔE_{N+1}^2 szerint hasad fel, $g=2$ érték mellett.



Szinttávolságok vizsgálata:

- Ezek után a spinbetöltődések sorrendjét próbálják megállapítani.
- Az összes rezonancia $B_{||}$ mágneses térben felvett meredekségét ábrázolták a V_{pg} gate feszültség függvényében.
- Az A és a B tartományok átfednek egymással.
- A spinbetöltődés sorrendje A2-B6-ig: $\downarrow\uparrow\uparrow\downarrow\downarrow\uparrow\uparrow\downarrow$



Köszönöm a figyelmet!