

# Spin-polarized excitation spectroscopy

{ Piszter Gábor @ Nanophysics seminar, 2011. 11. 10.

- & Bevezető
- & Mérési elrendezés
- & Egy atomos spin polarizált tűk
- & Spin-polarizált gerjesztési spektrum
- & Magasabb gerjesztések
- & Relaxációs idő

# Tartalom

2

- ⌘ Az elektronok kétféleképpen alagutazhatnak:
  - ⌘ Elasztikus és inelasztikus módon.
- ⌘ Inelasztikus alagutazásnál az elektron kölcsönhat a környezetével, megváltozik az energiája és a saját mágneses momentuma.
- ⌘ Ebben a cikkben a egyedi atomok spin-gerjesztési spektrumának vizsgálták spin-polarizált STM tűvel.

# Bevezető

- ⌘ Scanning tunneling microscope (STM)
- ⌘ UHV körülmények
- ⌘ 600 mK  $^3\text{He}$  -  $^4\text{He}$  hűtéssel
- ⌘ 7 T mágneses tér síkban vagy merőlegesen
- ⌘ Hordozó: Cu(100) kristály
  - ⌘  $\text{Cu}_2\text{N}$  (decoupling) réteget növesztenek rá
    - ⌘ Sík, szigetel a réz hordozótól
    - ⌘  $\text{N}_2$  sputtering és utólagos hőkezelés 800 K-en

# Mérési elrendezés

⌘ Erre kerülnek a vizsgált atomok: Mn, Fe, Cu

⌘ A 10 K-es mintára adszorbeálódnak.

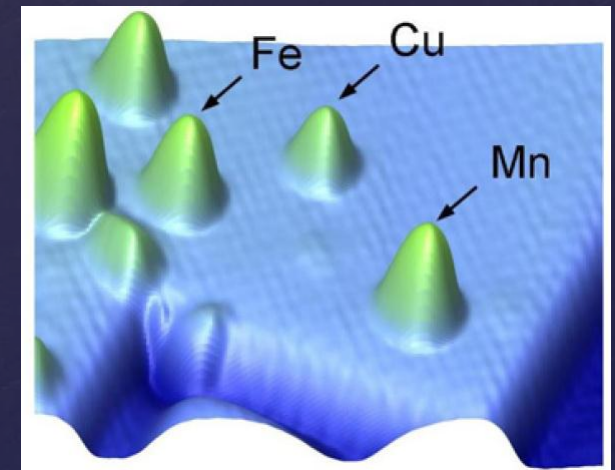
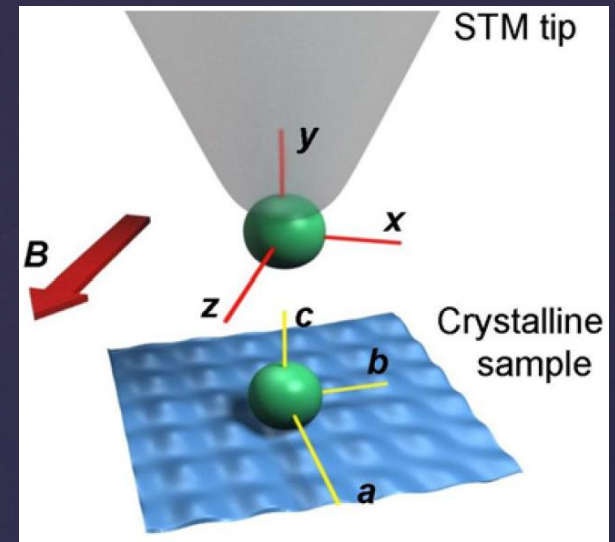
⌘ **Lokalizált mágneses momentum.**

⌘ A tű wolfram vagy irídium.

⌘ Csúcsára Cu sapka kerül.

⌘ Belenyomják a tömbi rézbe.

⌘ Az utolsó atomot leszedik.



# Mérési elrendezés

⌘ Erre kerülnek a vizsgált atomok: Mn, Fe, Cu

⌘ A 10 K-es mintára adszorbeálnak.

⌘ **Lokalizált mágneses momentum.**

⌘ A tű wolfram vagy irídium.

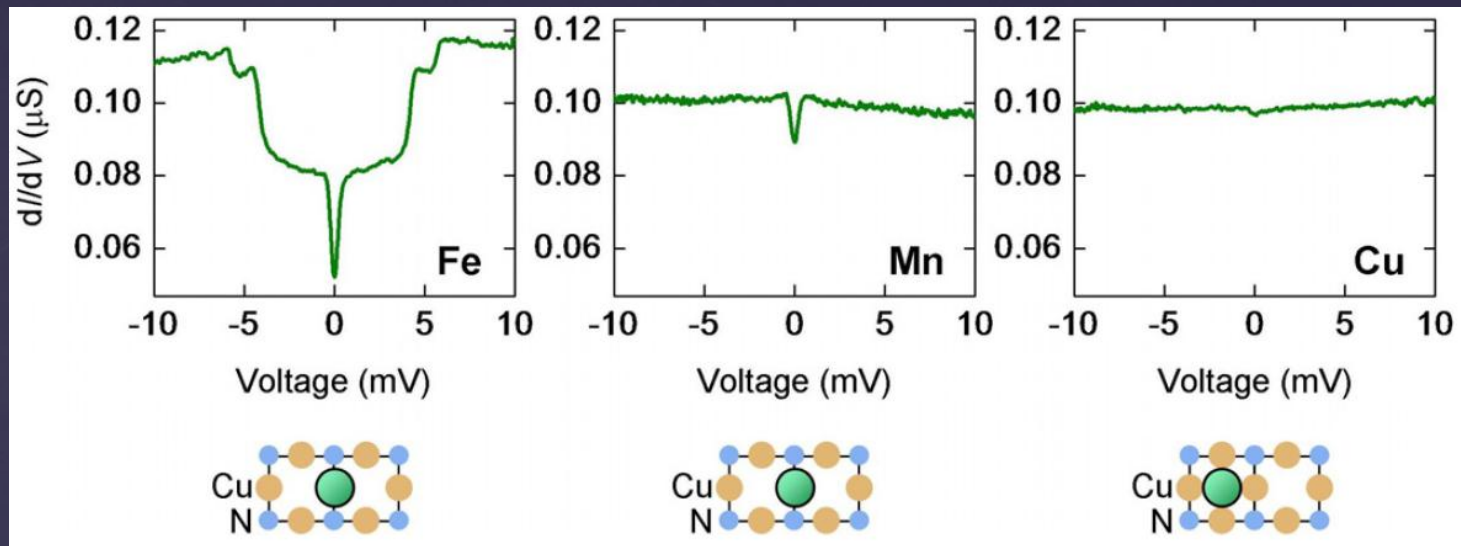
⌘ Csúcsára Cu sapka kerül.

⌘ Belenyomják a tömbi rézbe.

⌘ Az utolsó atomot leszedik.

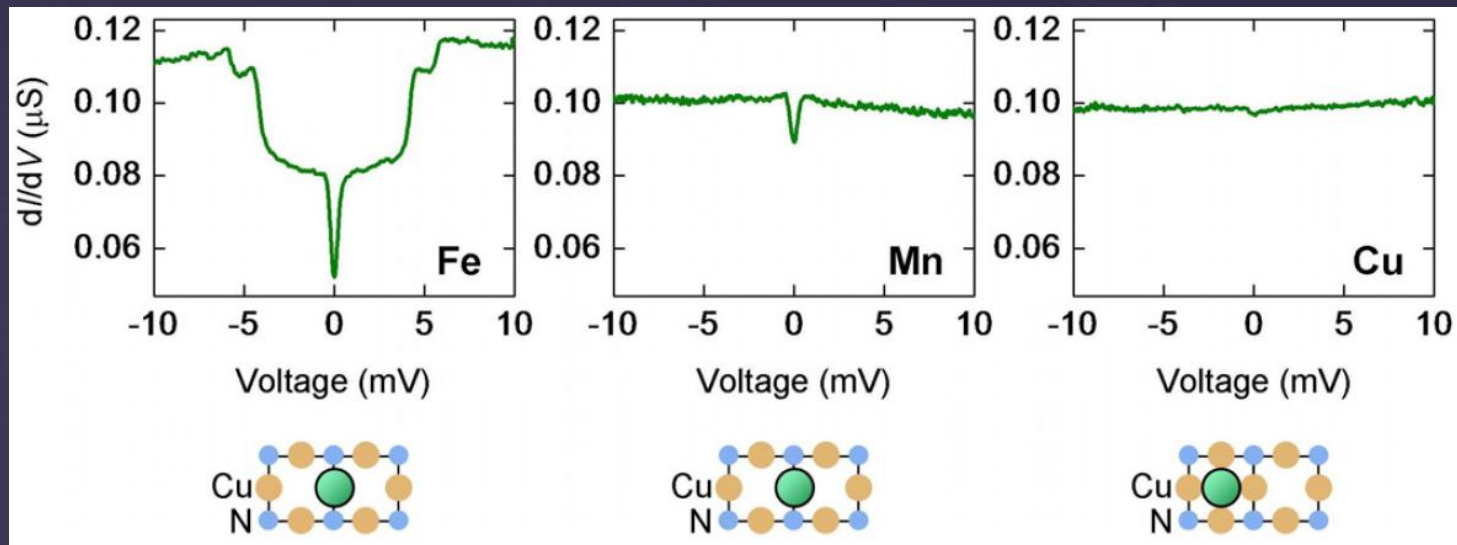


# Mérési elrendezés



- ⌘ Az atomokat a spin-polarizált STM tűvel azonosították.
  - ⊘ Térképezés és SES 3T tér mellett.
- ⌘ Az így kapott spin gerjesztési spektrumok függenek a spin nagyságától és a mágneses anizotrópiától.

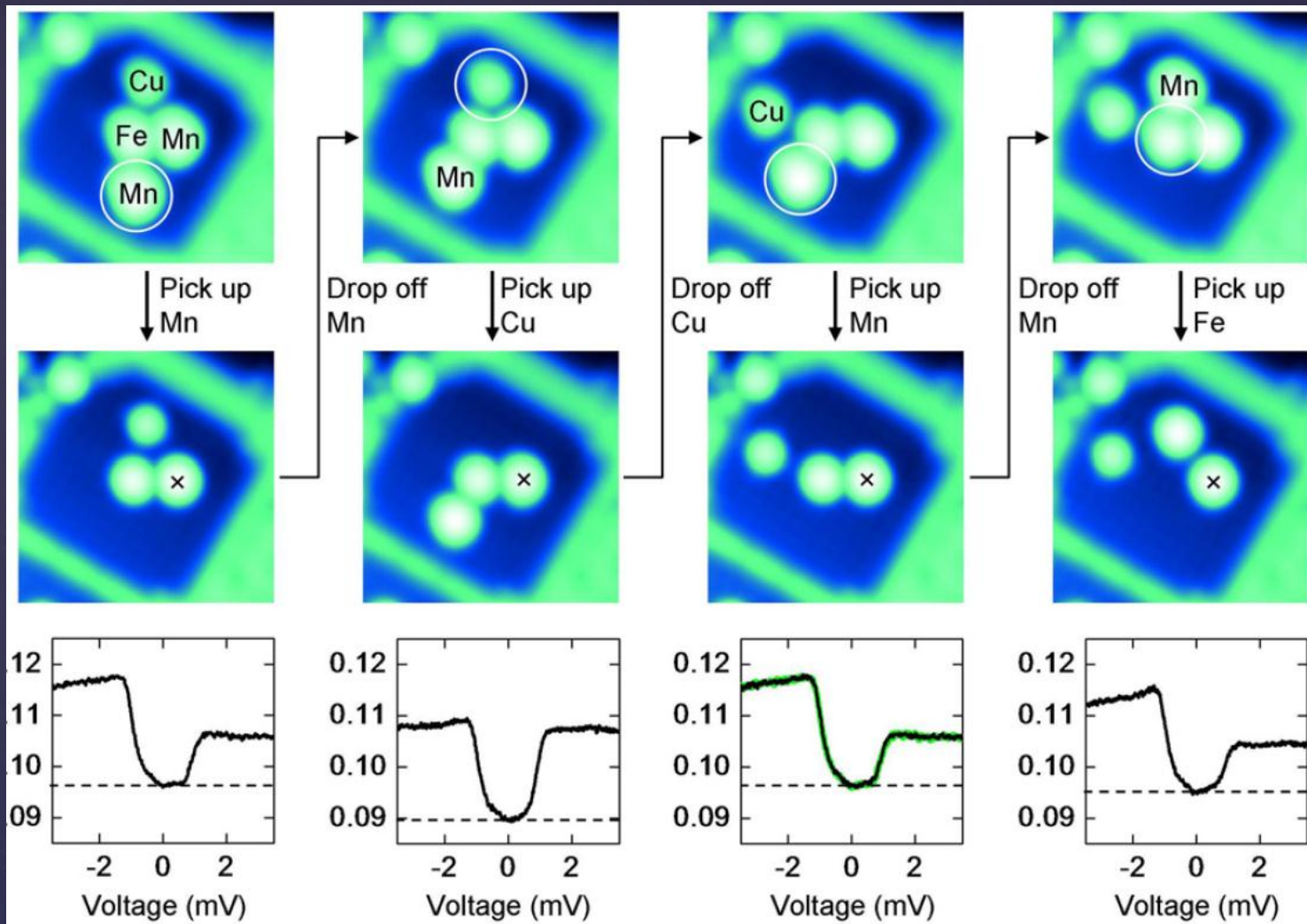
# Atomok azonosítása w/ SES



- ⊗ Fe:  $S=2$ , nagy anizotrópia  $\rightarrow$  3 spin gerjesztés.
- ⊗ Mn:  $S=5/2$ , kis anizotrópia  $\rightarrow$  1 spin gerjesztés.
- ⊗ Cu: Máshova kötődik, mint az előző kettő.
  - ⊗ Nincs gerjesztés, nincs jel.
  - ⊗ De a tomográfia elárulja ( $\sim 2 \text{ \AA}$  magasság).

# Atomok azonosítása w/ SES



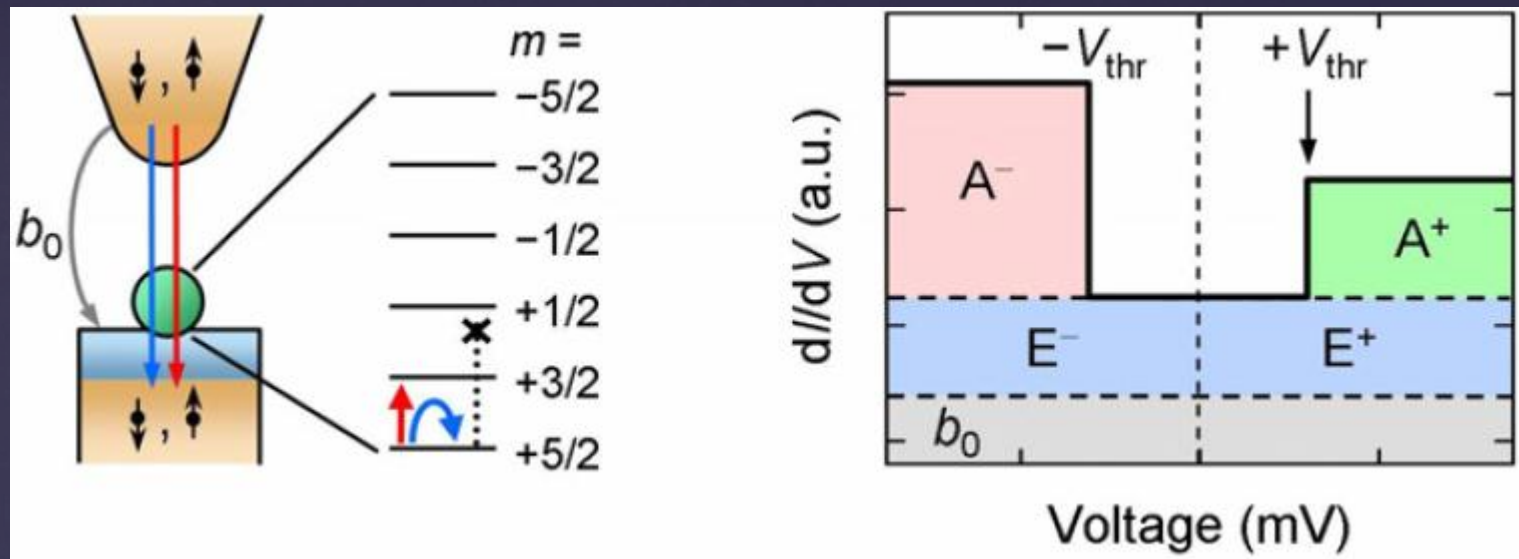


# Mérések kivitelezése

Elméleti megfontolásokból következik:

- ⌘ Az inelasztikus spin szórás spin-polarizált.
- ⌘ Ha elhanyagolható a transzverzális mágneses anizotrópia, akkor teljesen spin polarizált.
- ⌘ A mérésekből látható, hogy a spin polarizáció határozott aszimmetriát okoz a gerjesztési spektrumokban.
- ⌘ Szükséges: az aszimmetria kvalitatív jellemzése.

# Spin-polarizált spektrumok



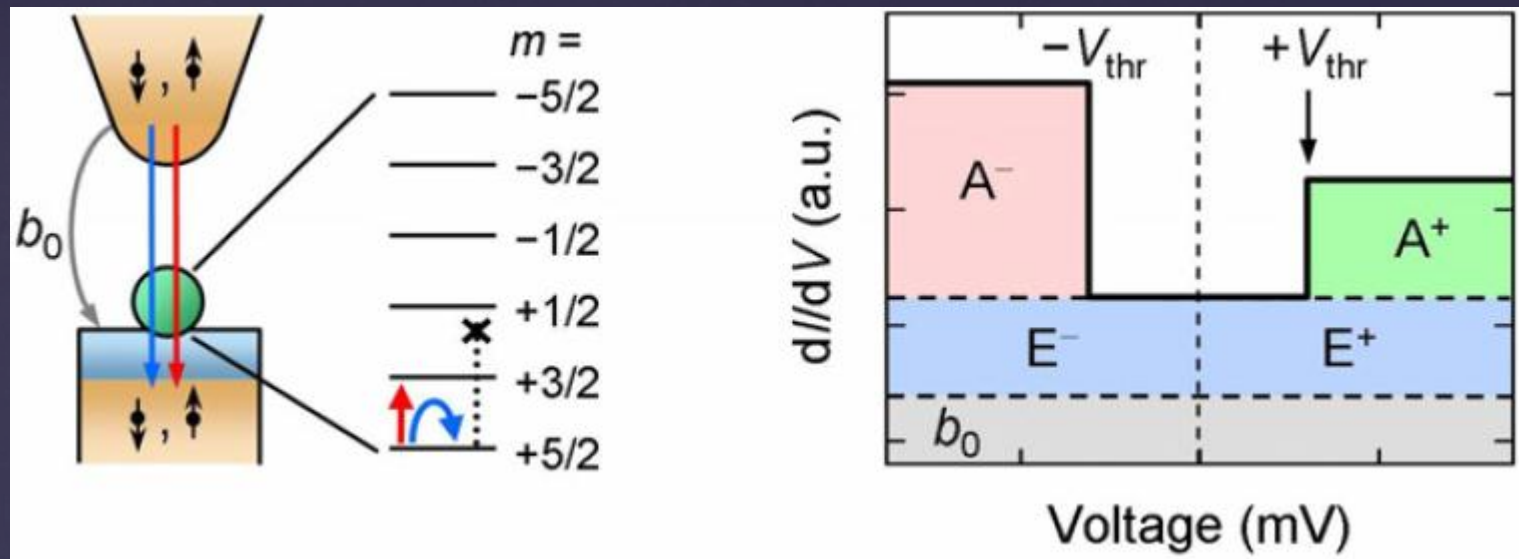
⊗ Mn ( $S = +5/2$  alapállapot) atom esetében felbontjuk a gerjesztési spektrumot:

⊗ Inelasztikus alagutazás  $+5/2$ -ről  $+3/2$ -re.

⊗ Elasztikus spin függő alagutazás (Mn –  $e^-$  kcsh.)

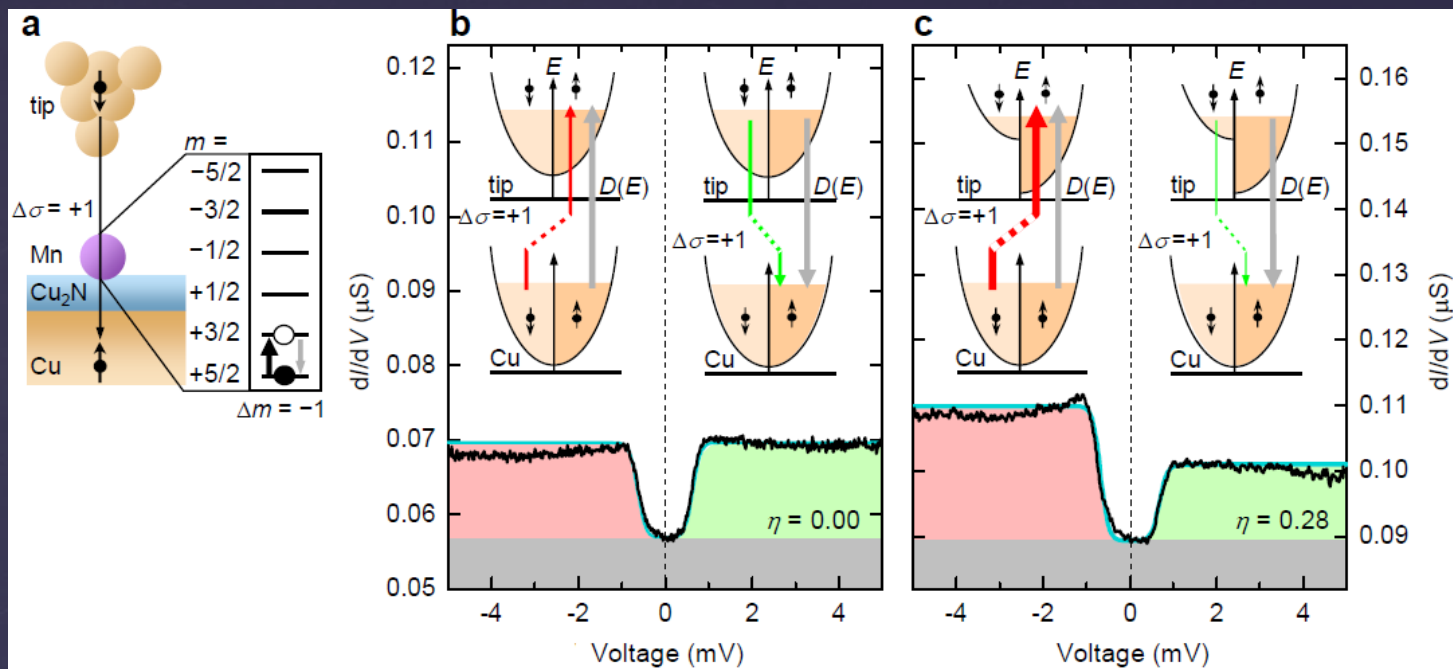
⊗ Bg. vezetőképesség, ahol nincs Mn spin –  $e^-$  kcsh.

# Spin-polarizált spektrumok

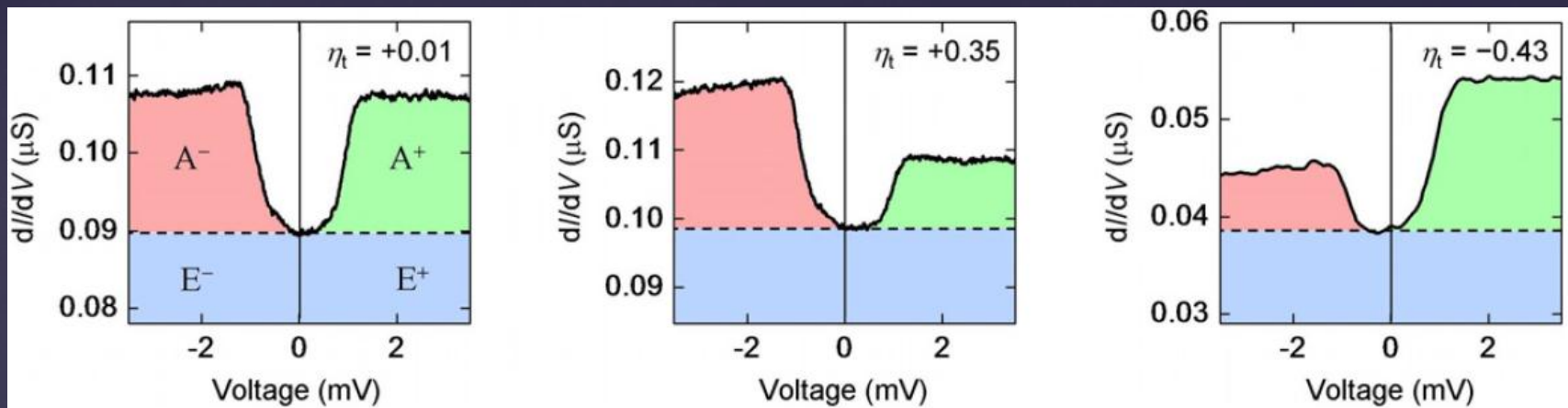


- ⊗ A két elasztikus alagutazási mód feszültségfüggetlen vezetőképesség járulékokot ad:  $b_0, E^\pm$ .
- ⊗ Az inelasztikus alagútáram járuléka:  $A^\pm$ .

# Spin-polarizált spektrumok



**Supplementary Figure S1 | The effect of spin-polarization on differential conductance spectra ( $dI/dV$ ) of a Mn atom.** Magnetic field of 7 T applied in the plane of the sample. **a**, Schematic for the inelastic tunneling process when tunneling from tip to sample. The excitation from the Mn ground state ( $m = +5/2$ ) to its first excited state ( $m = +3/2$ ) requires a change in spin angular momentum of  $\Delta m = -1$  and can only be induced by tunneling electrons that change by  $\Delta\sigma = +1$ . It is therefore limited to electrons starting in a down state and ending in an up state [7] and the tunneling direction determines which tip states are required for this process. **b**, Spectrum of a Mn atom measured with a normal metal (spin-averaging) STM tip. Steps at  $V_{ex} = 0.7$  mV and  $-V_{ex}$  are due to excitation of the Mn from its ground to first excited spin state. Black line: measured spectrum, blue line: fit using inelastic tunneling step functions [3]. The steps are of equal height because tip and sample have equal amounts of up-electron and down-electron states. Inset depicts the components of the spin-dependent tunneling processes resolved by the spin-dependent densities of states  $D(E)$ : inelastic tunneling into up tip states (red), inelastic tunneling out of down tip states (green), and elastic tunneling for all tip states (gray). **c**, Spectrum of the same Mn atom measured with a spin-polarized tip plotted similar to **b**. The asymmetry in the measured spectrum is a result of an asymmetry of up-electron and down-electron density of states at the Fermi energy of the tip. Fitting the inelastic tunneling step functions to the spectrum and evaluating the relative height of the step at negative voltage compared to the one at positive voltage yields a quantitative measure of the spin polarization (see Methods). For the tip used here,  $\eta = 0.28 \pm 0.03$ .

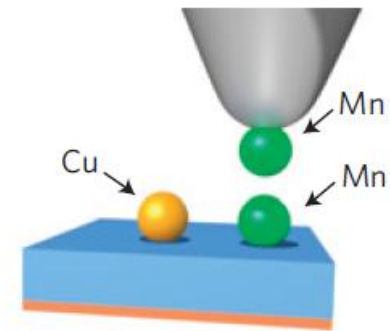
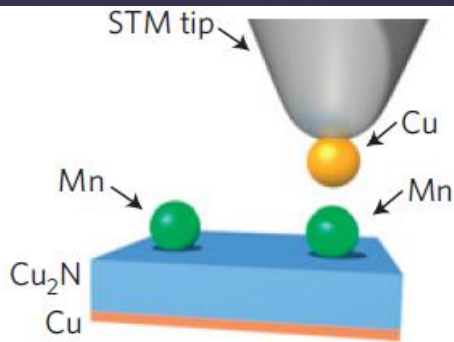


- ⊗ Gerjesztési spektrumok különböző tű polarizációkra 7T-nál.
- ⊗ A funkcionálatlan tűnek nincs nettó spin-polarizációja, a spektrum szimmetrikus.
- ⊗ Mn atommal pozitív polarizációt kaptak.
- ⊗ Viszont több Mn atom alkalmazásakor negatív lett a polarizáció → az Mn antiferromágneses.

# Alacsony anizotrópia: Mn

- ⌘ Mindegyik inelasztikus alagutazási esemény velejáróan gerjeszti a spin-rendszerünket.
- ⌘ Ennek eredményeként a mérés betekintést ad a jellemző relaxációs időskálákra is: mérhető, hogy a gerjesztett spin mikor kerül vissza alapállapotba.
- ⌘ Alacsony áramok esetén sokkal kevesebb gerjesztés van, ezért van idő relaxálni.
- ⌘ Magas alagútáramok esetén megnő a valószínűsége annak az eseménynek, hogy az alagutazó elektron egy, már gerjesztett spinnel ütközik → magasabb gerjesztést létrehozva.

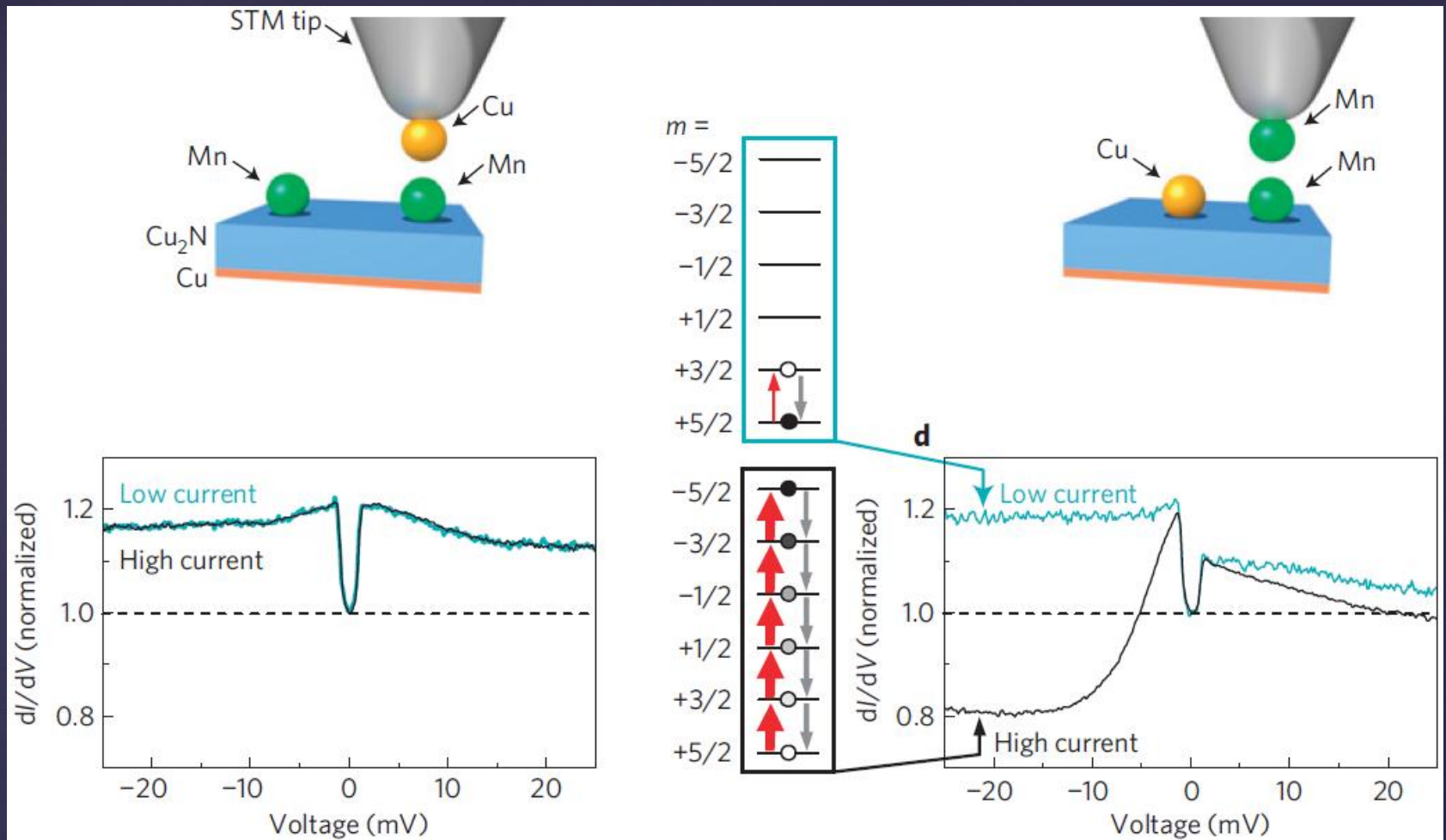
# Többszörös gerjesztések



- ⊗ Az STM áramát úgy növelték, hogy a  $V$  feszültség ne változzon  $\rightarrow$  tű közelítése.
- ⊗ Ekkor a spin-átlagoló (Cu hegyű) tűvel mérve nem tapasztaltak változást.
- ⊗ Míg a spin-polarizált tű által mért spektrum reprodukálhatóan megváltozott.
- ⊗ Magyarázat: a betöltések idő-átlaga eltolódik az alapállapotból egy gerjesztett állapotba.

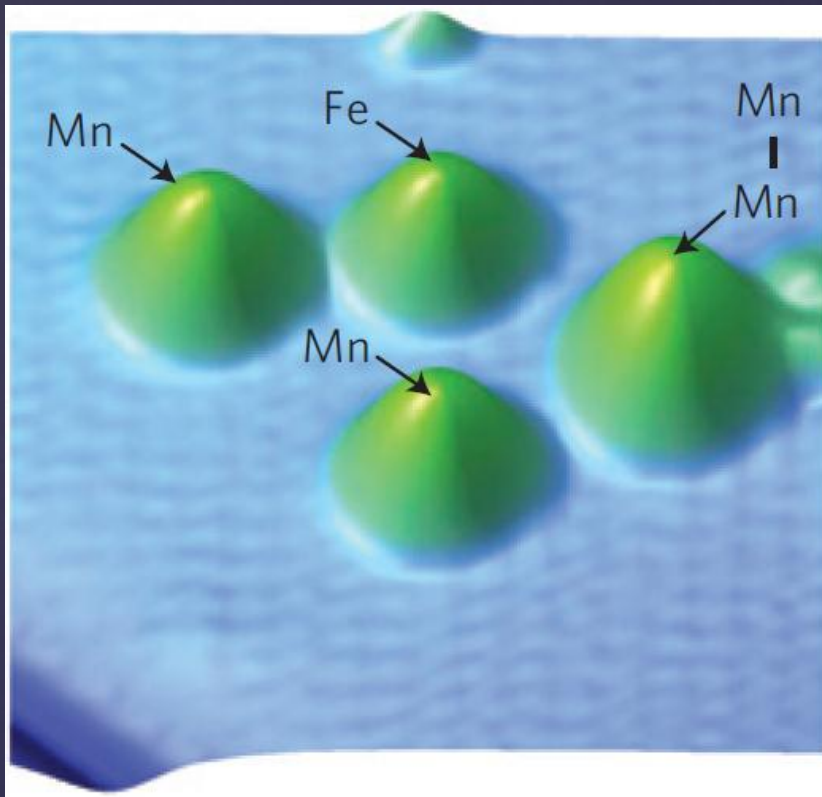
# Megnövelt alagútáram





# Megnövelt alagútáram

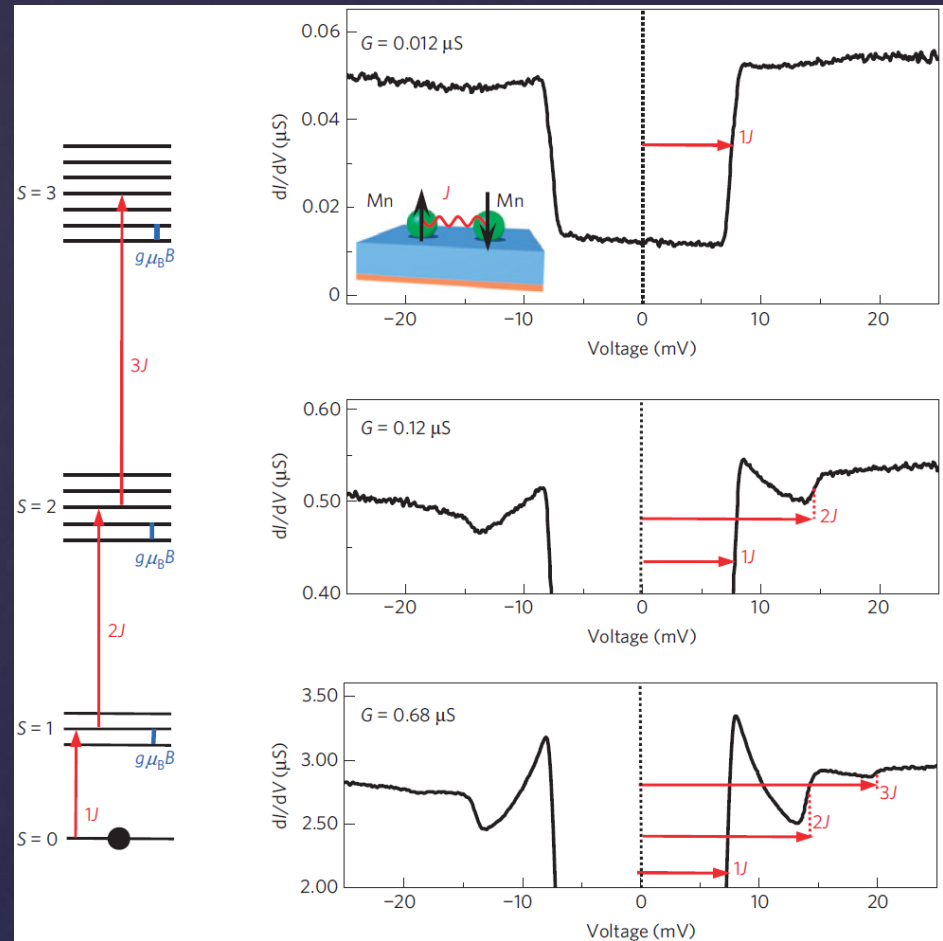
17



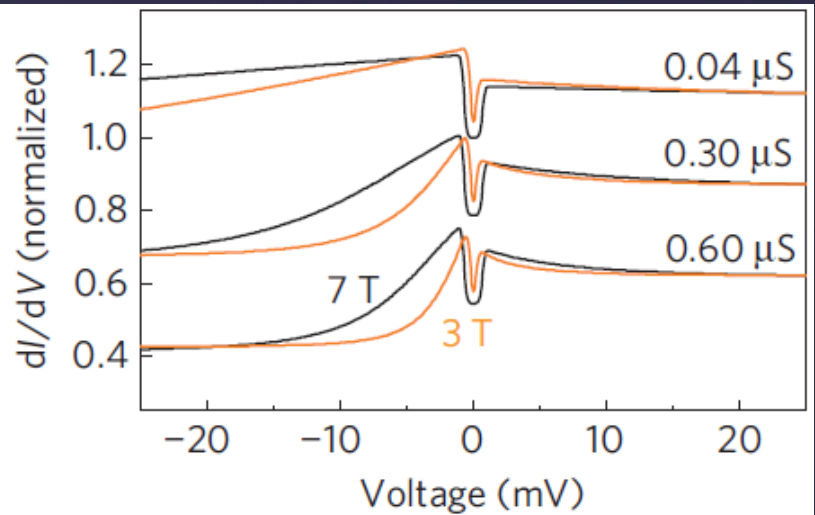
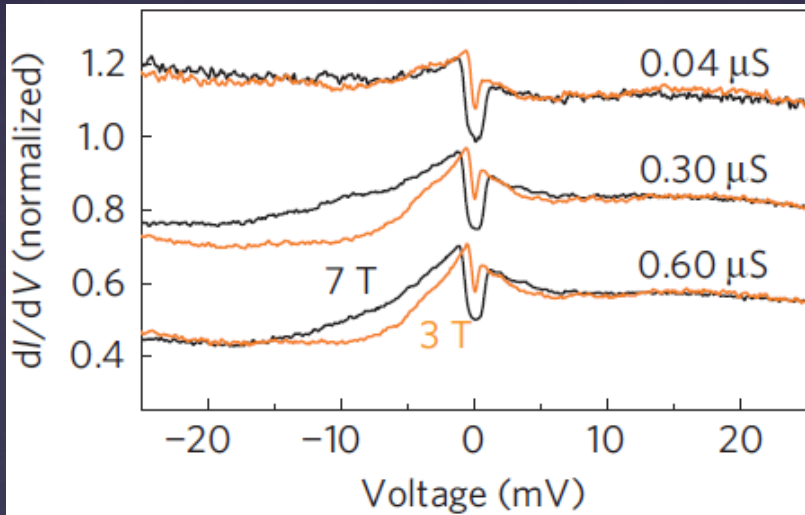
- ⌘ Meg kell vizsgálni a magasabb gerjesztéseket.
- ⌘ Ehhez el kell különíteni az alapállapotból induló eseményektől.
- ⌘ Mn – Mn dimer rendszert használtak, mert
  - ⌘ antiferromágneses, ezért nincs spin alapállapotban,
  - ⌘ és az egymás utáni gerjesztések skálája fokozatosan növekszik az energia növelésével.

# Többszörös gerjesztések

- ⌘ A spinállapot diagram mutatja a Mn-dimer spinállapotok energiáit.
- ⌘ Átlagoló tűvel spin-pumping látható.
- ⌘ 3T mágneses tér.
- ⌘ Lépcsők 1J, 2J, 3J energiáknál, ami az egymás utáni gerjesztésekhez tartozik.
- ⌘ Szinglett-triplett ámenet  $\pm 7,4$  mV-nál.

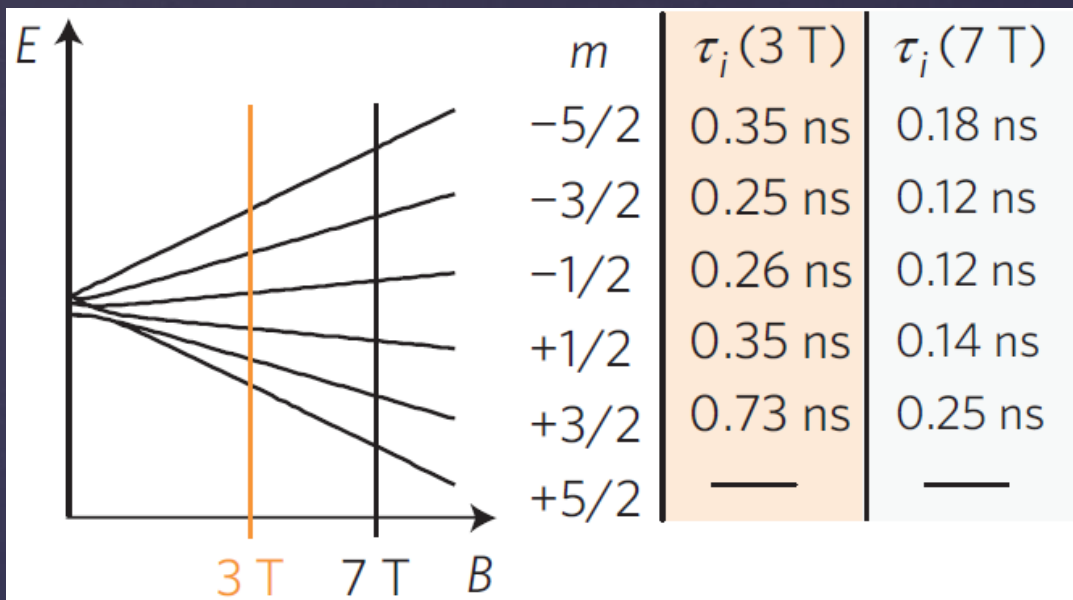


# Mn-dimer gerjesztései



- ⊗ Különböző spin-polarizált tú – Mn atom távolságok mellett rögzítették a vezetőképesség görbéket.
- ⊗ Ezeket összevetve az elméleti modellel: jól fittel.
- ⊗ Az elméleti modell: a folytonos relaxációt spin-szóródások egymásutánjaként írják le. Az energiát és a spint a szubsztrát elektronjai viszik el, ezért az egyetlen jellemző:  $G_s$  szubsztrát vezetőképessége.

# Mn spin B-tér függése



Az mérési adatok illesztésével kiszámolhatók a Mn atomra jellemző relaxációs idők is, különböző (3T, 7T) mágneses terek esetén.

Ezek az idők még nem alkalmasak spintronikai alkalmazásokra, de a szigetelő réteg javításával a relaxációs idő könnyedén növelhető.

# Relaxációs idők

- ⌘ Loth, S., Lutz, C. P., & Heinrich, A. J. (2010). Spin-polarized spin excitation spectroscopy. *New Journal of Physics*, 12(12), 125021. doi:10.1088/1367-2630/12/12/125021
- ⌘ Loth, S., von Bergmann, K., Ternes, M., Otte, A. F., Lutz, C. P., & Heinrich, A. J. (2010). Controlling the state of quantum spins with electric currents. *Nature Physics*, 6(5), 340-344. Nature Publishing Group. doi:10.1038/nphys1616
- ⌘ Loth, S., Etzkorn, M., Lutz, C. P., Eigler, D. M., & Heinrich, A. J. (2010). Measurement of fast electron spin relaxation times with atomic resolution. *Science (New York, N.Y.)*, 329(5999), 1628-30. doi:10.1126/science.1191688
- ⌘ Heinrich, A., & Loth, S. (2011). Physics. A logical use for atoms. *Science (New York, N.Y.)*, 332(6033), 1039-40. doi:10.1126/science.1206086

# Hivatkozások

{ Köszönöm a figyelmet!