

A single-atom electron spin qubit in silicon

Jarryd J. Pla¹, Kuan Y. Tan^{1†}, Juan P. Dehollain¹, Wee H. Lim¹, John J. L. Morton^{2†}, David N. Jamieson³, Andrew S. Dzurak¹ & Andrea Morello¹

A single atom is the prototypical quantum system, and a natural candidate for a quantum bit, or qubit—the elementary unit of a quantum computer. Atoms have been successfully used to store and process quantum information in electromagnetic traps¹, as well as in diamond through the use of the nitrogen–vacancy-centre point defect². Solid-state electrical devices possess great potential to scale up such demonstrations from few-qubit control to larger-scale quantum processors. Coherent control of spin qubits has been achieved in lithographically defined double quantum dots in both GaAs (refs 3–5) and Si (ref. 6). However, it is a formidable challenge to combine the electrical measurement capabilities of

servicing as both a sensitive charge detector and an electron reservoir for the donor. Using gates PL and TG (Fig. 1a) to tune the electrochemical potentials of the donor electron spin states (μ_{\downarrow} and μ_{\uparrow} for states $|\downarrow\rangle$ and $|\uparrow\rangle$) and the Fermi level in the SET island (μ_{SET}), we can discriminate between a $|\downarrow\rangle$ or $|\uparrow\rangle$ electron as well as perform electrical initialization of the qubit, following the procedure introduced in ref. 8.

Our experiments use a two-step cyclical sequence of the donor potential, alternating between a spin read-out/initialization phase and a coherent control phase (see Supplementary Video). The qubit is first initialized in the $|\downarrow\rangle$ state through spin-dependent loading by satisfying the condition $\mu_{\downarrow} < \mu_{\text{SET}} < \mu_{\uparrow}$ (Fig. 1b). After this, the system

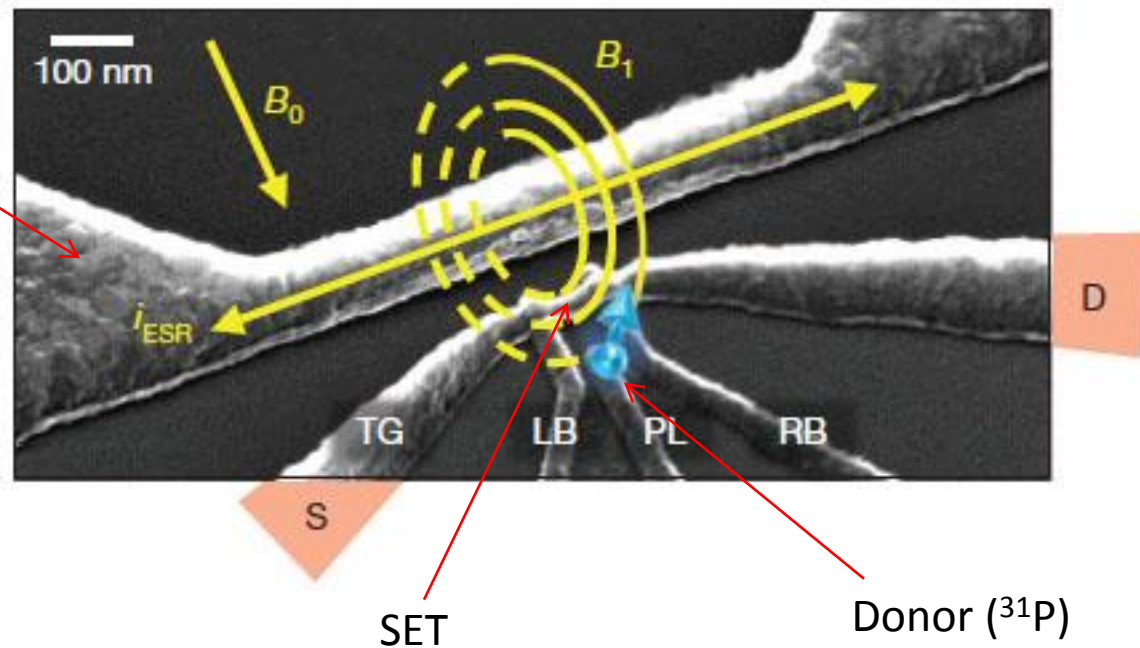


M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Magyarkuti András
Nanofizika szeminárium JC
2012. Szeptember 27.

Kísérleti elrendezés

Szélessávú
hullámvezető



- Koherens spinmanipuláció: mikrohullám
- Kiolvasás: spin-töltés konverzió
- Kompatibilis a modern CMOS technológiákkal

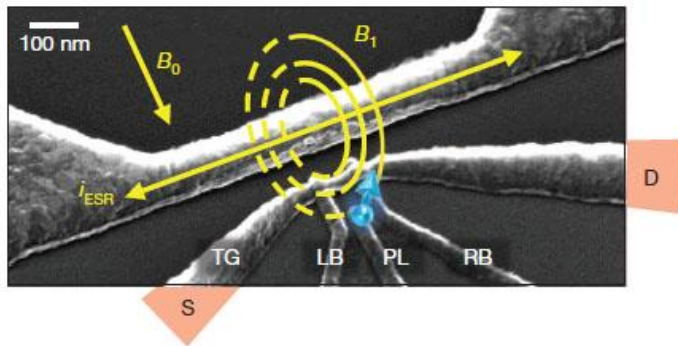
Paraméterek:

$$B_0 \approx 1 \text{ T}$$

$$B_1 \approx 0.1 \text{ mT}$$

$$T_{electron} \approx 300 \text{ mK}$$

Spin manipuláció és mérés



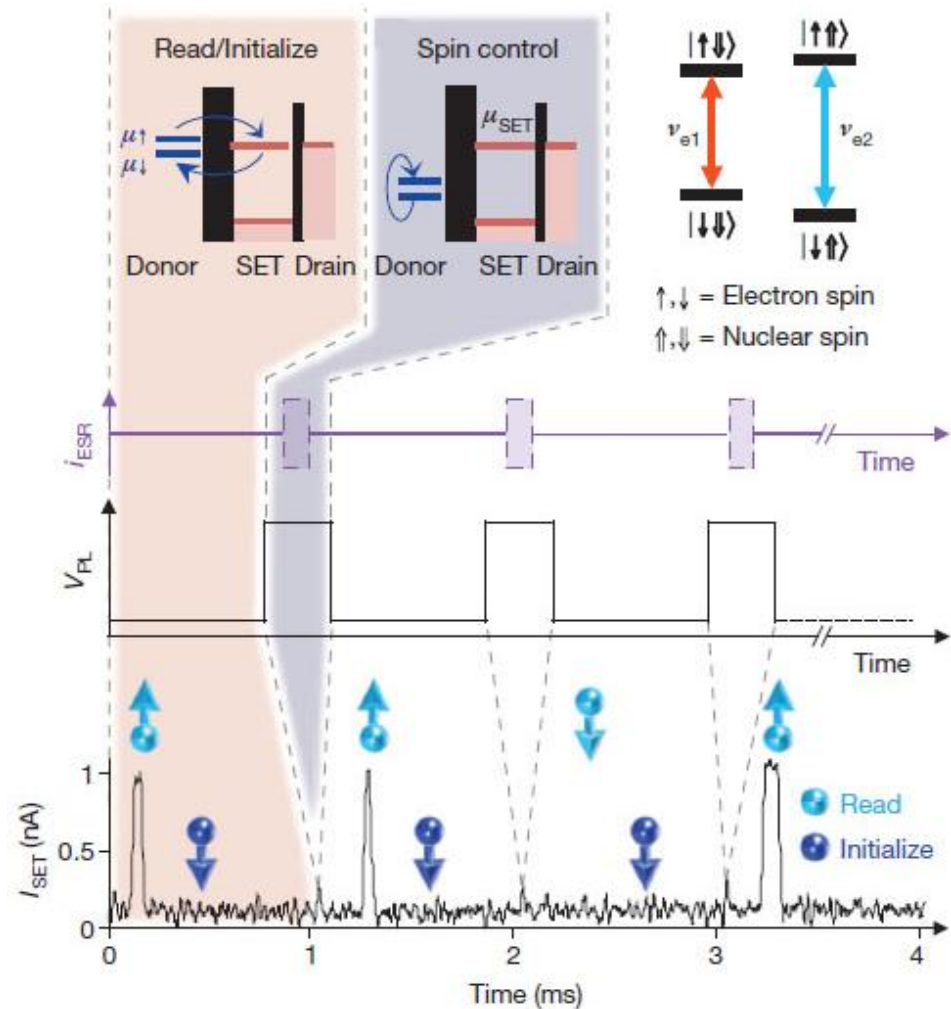
- Inicializálás: $|\downarrow\rangle$ állapotban
- Manipuláció:

$$H = \gamma_e B_0 S_z - \gamma_n B_0 I_z + AS \cdot I$$

$$\nu_{e1} \approx \gamma_e B_0 - A/2 = 29.886 \text{ GHz}$$

$$\nu_{e2} \approx \gamma_e B_0 + A/2 = 30.000 \text{ GHz}$$

- Kiolvasás: csúcs detektálása az áramban



Rabi oszcilláció

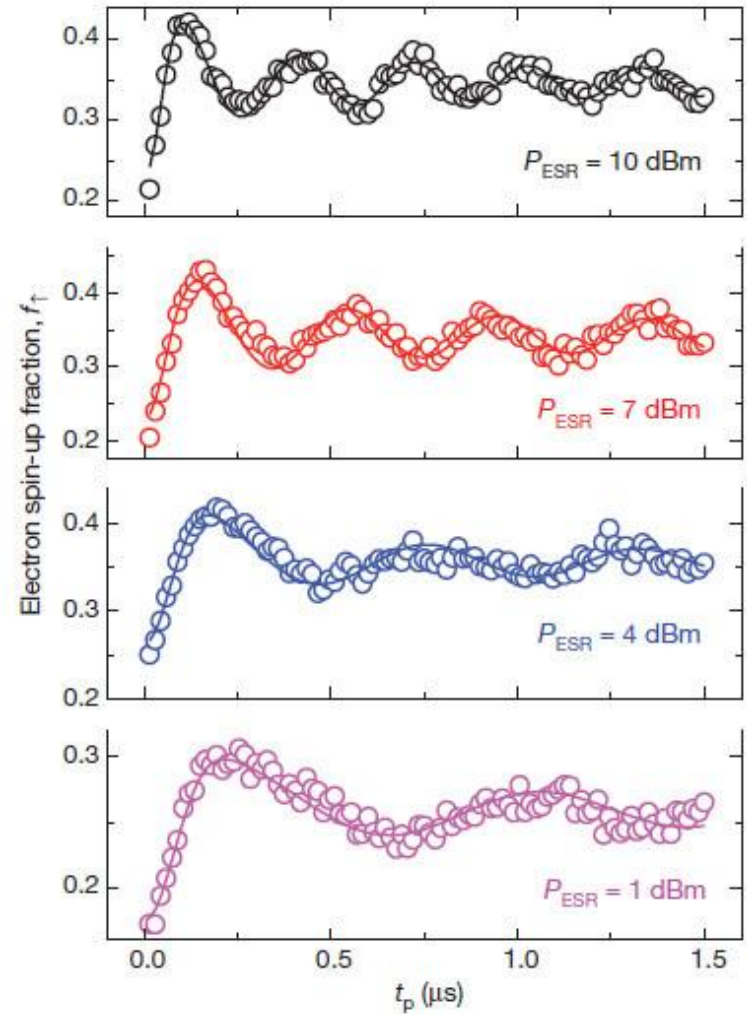
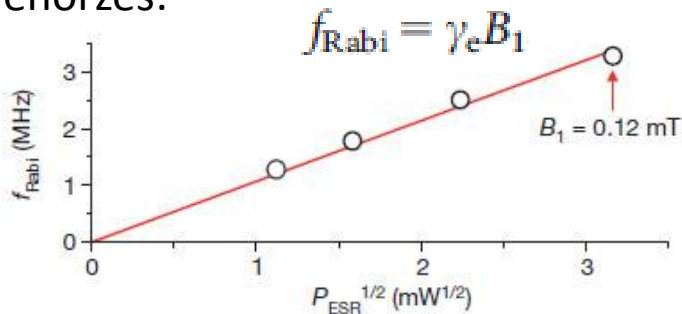
$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} \beta \\ -\alpha \end{pmatrix} \xrightarrow{\hat{U}(t)}$$

$$\alpha \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} e^{-iE_+t/\hbar} + \beta \begin{pmatrix} \beta \\ -\alpha \end{pmatrix} e^{-iE_-t/\hbar} = e^{-iE_+t/\hbar} \begin{pmatrix} \alpha^2 + \beta^2 e^{-i\mathcal{R}t/\hbar} \\ \alpha\beta(1 - e^{-i\mathcal{R}t/\hbar}) \end{pmatrix}$$

$$P_{\uparrow}(t) = |\alpha^2 + \beta^2 e^{-i\mathcal{R}t/\hbar}|^2 = (\alpha^2 - \beta^2)^2 + 4\alpha^2\beta^2 \cos^2(\mathcal{R}t/2)$$

- B_0 állandó mágneses tér és B_1 erre merőleges, ω frekvenciával forgó mágneses tér.
- Ha $\omega = \omega_L = \gamma B_0$, akkor az elektron spin-je $\Omega = \gamma B_1$ frekvenciával fog forogni.
- B_1 teret meghatározott időre bekapcsolva a spin tetszőleges irányban elforgatható.

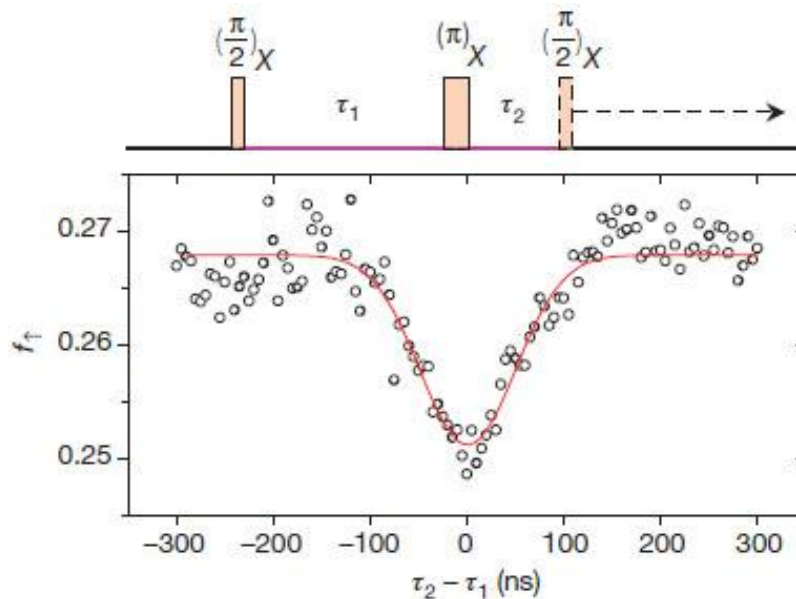
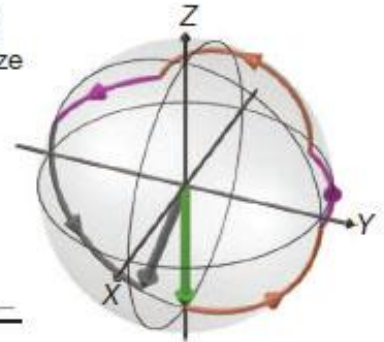
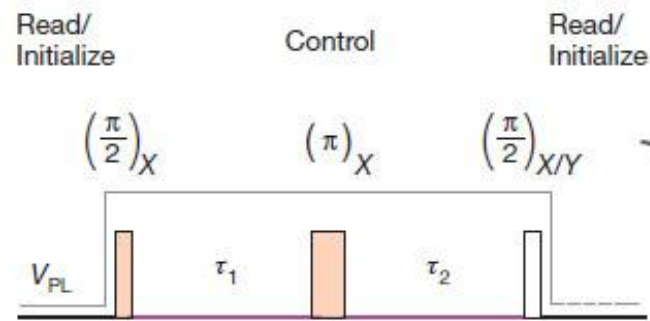
- Ellenőrzés:



Spin manipuláció

- Koherencia élettartam > manipulációhoz szükséges idő (≈ 100 ns)
- Dekoherencia okai:
 - Si hordozó magspinjei
 - külső mágneses tér zaja
 - mágneses szennyezések
- Kompenzálás: spin echo

Hahn echo



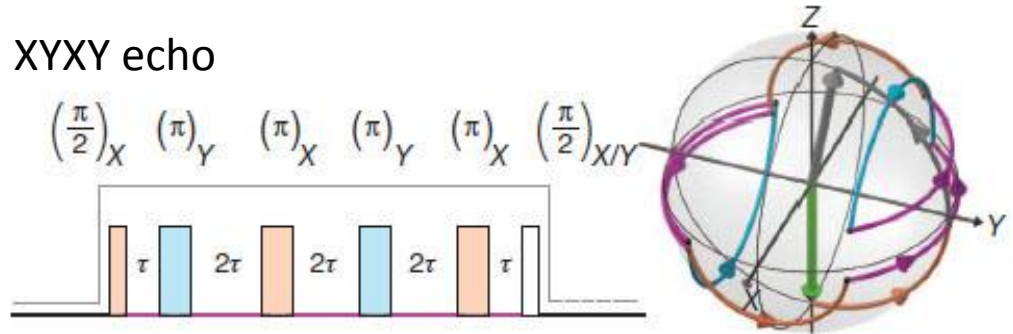
- $\tau_1 = \tau_2$ esetén visszatér a kiindulási állapotba: $|\downarrow\rangle$
- $\tau_1 \neq \tau_2$ esetén nem tökéletes az újrafókuszálás, megnő a $|\uparrow\rangle$ állapot valószínűsége.
- Illesztett Gauss görbe félértékszélességéből a koherencia élettartam: $T_2^* = 55 \pm 5$ ns

Spin manipuláció

Koherencia idő növelése: XYXY echo

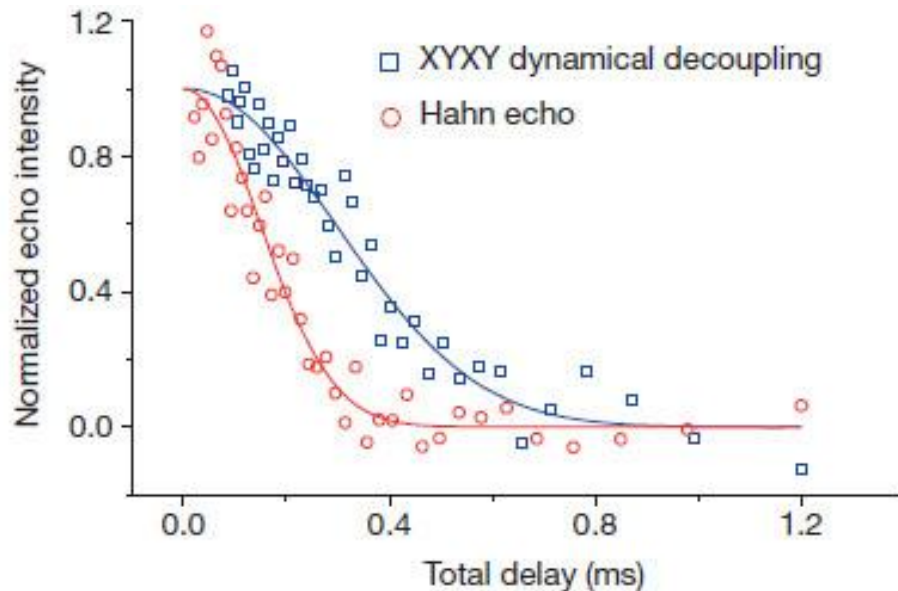
- Egy π -vel való forgatás helyett négy π forgatás egymás után, felváltva az X és Y tengelyek körül.

XYXY echo



- Koherencia élettartam mérése:

$\tau = \tau_1 = \tau_2$, újrafókuszálás után mérik a $|\uparrow\rangle$ állapot valószínűségét τ függvényében:



- Illesztett Gauss görbe:

$$y = \exp(-(2\tau/T_2)^b)$$

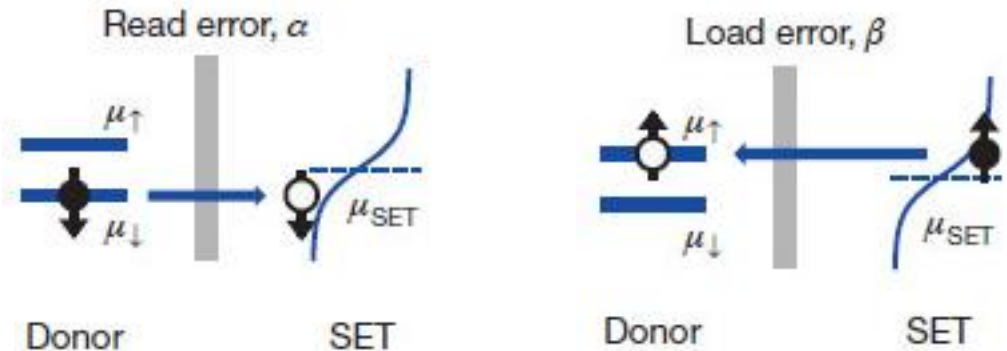
- Koherencia élettartam:

$$T_2 = 206 \pm 12 \mu\text{s}$$

Megbízhatóság vizsgálata

Hibaforrások:

- Termikus kiszélesedés
- véges sávszélesség
- véges Jel/Zaj arány

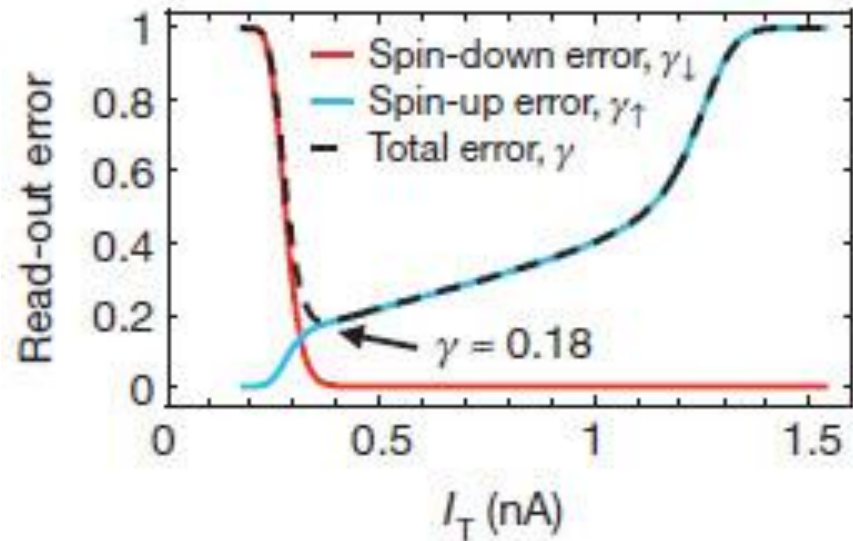


Spin mérés hibája a küszöb áram értékének függvényében:

- Optimum: $I_T = 370 \text{ pA}$

↓
 $\gamma = \gamma_{\downarrow} + \gamma_{\uparrow} = 18\%$

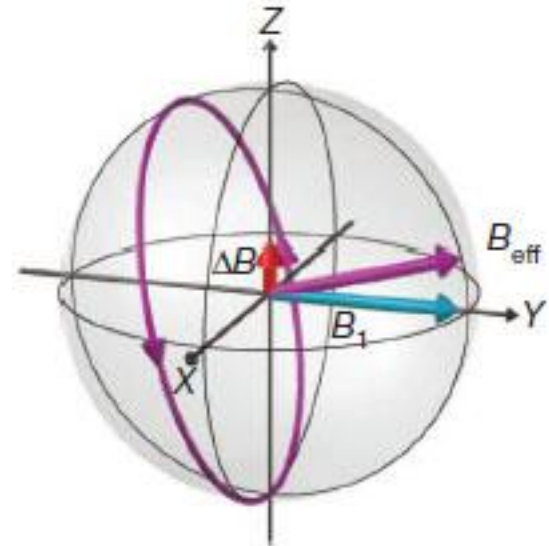
- Szimulációk eredménye:
 - Mérés megbízhatósága:
 $F_M = 77 \pm 2\%$
 - Inicializálás megbízhatósága:
 $F_I > 90\%$



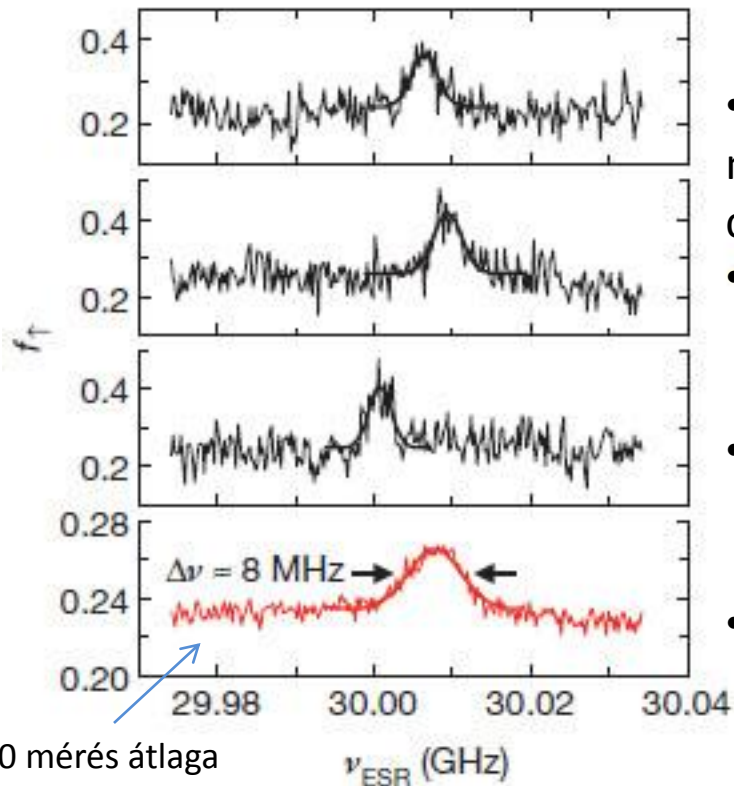
Megbízhatóság vizsgálata

Spin manipuláció megbízhatósága:

- Mágneses tér véletlen fluktuációja: Si hordozó atomjainak váltakozó magspin konfigurációi okozzák.
- A forgatás nem a kívánt tengely körül történik:



A mikrohullám frekvenciájának separtetése ν_{e2} körül:



100 mérés átlaga

- A $|\uparrow\rangle$ állapot valószínűségének maximuma minden mérésben más frekvenciához tartozik: néhány erősen csatolt Si atommag lassú fluktuációja.
- Csúcsok szélessége: egymástól messze levő, gyengén csatolt Si magspinek fluktuációja.

- 100 mérés átlagának félértékszélessége:

$$\bar{\Delta\nu} = 7.5 \pm 0.5 \text{ MHz}$$

- Szimulációk eredménye: $F_C = 57 \pm 2\%$

Köszönöm a figyelmet!