Jedrska magnetna resonanca
Fizikalni Praktikum V

Matevž Demšar

17. 11. 2025

1 Uvod

Pri vaji smo merili odziv snovi na moƴno zunanje magnetno polje. Epruveto vode smo postavili v magnetno polje, ki smo ga ustvarjali z elektromagnetom. Napetost na elektromagnetu je oscilirala s frekvenco $\nu = 9\,\mathrm{MHz}$. Tako elektromagnet ustvarja visokofrekvenčne kratkotrajne motnje. Ko na delec snovi deluje taka motnja, se magnetni moment magnetnega polja spremeni za neki kot θ glede na zunanje magnetno polje B_0. Nato se sčasoma spet vrne v termodinamsko ravnovesno lego, kar se v povprečju zgodi v času T_1. Projekcija magnetizacije snovi (definirane kot povprečje magnetnih momentov po volumnu) na smer magnetnega polja se namreč po motnji spreminja kot

$$M_{z'} = M_{z'0}\left(1 - e^{-t/T_1}\right) \tag{1}$$

Spinki odmev. Delci snovi se ne odzivajo samo na spremembe zunanjega polja, temveč tudi na magnetna polja ostalih delcev snovi. Če s ϕ_i označimo kot projekcije nekega magnetnega dipolnega momenta μ_i na $x'y'$ ravnino (ki je pravokotna na zunanje magnetno polje B_0), ta odziv vpliva predvsem na manjšanje projekcije μ (in, posledično, M) na to ravnino. Velja:

$$M_{x'y'} = M_{x'y'0}\, e^{-t/T_2} \tag{2}$$

Konstansta T_2 predstavlja tako imenovani spinsko-spinski relaksacijski čas. V praksi zaradi nehomogenosti magnetnega polja (homogeno magnetno polje je namreč praktično nemogoče ustvariti) ne bomo izmerili konstante T_2, temveč bo velikost projekcije padala z neko drugo konstanto T_2^*. Iz meritve T_2^* pa ne bomo mogli zanesljivo izraziti pravega relaksijskega časa T_2' T_2 pa lahko izmerimo drugače: če v času τ magnetni moment nekega atoma zasukamo za kot π, se bo po času 2τ zasukal nazaj v prvotno lego. Na osciloskopu bomo to videli kot dodaten signal, ki mu rečemo spinski odmev. Ko spreminjamo čas τ, amplituda tega odmeva pada, in sicer velja:

$$U = U_0\, e^{-2\tau/T_2} \tag{3}$$

Tako lahko izmerimo pravo vrednost T_2, vendar moramo pri izpeljavi formule zahtevati, da je $T_2 \gg T_2^*$, kar pa ni nujno res. Pri vaji bomo obravnavali dve snovi: vodovodno vodo in vodo z dodanimi paramagnetnimi ioni. V vodovodni vodi konstante T_2^* ne bomo merili, v vodi z dodanimi paramagnetnimi ioni pa bomo to lahko storili.

Opomba. V posnetku vaje je rečeno, da elektromagnet ustvarja polje okoli $B_0 \approx 0.2\,T$, kar je močno magnetno polje. Zanimivo je tudi, da je razmerje

$$\frac{\nu}{B_0} \approx \frac{\gamma}{2\pi},$$

kjer je γ giromagnetno razmerje: $\gamma/2\pi \approx 42.6\,\mathrm{MHz/T}$. Verjetno pri premajhnih ali prevelikih frekvencah ν učinek ni tako dobro viden.
Pri vaji želimo sledeče:

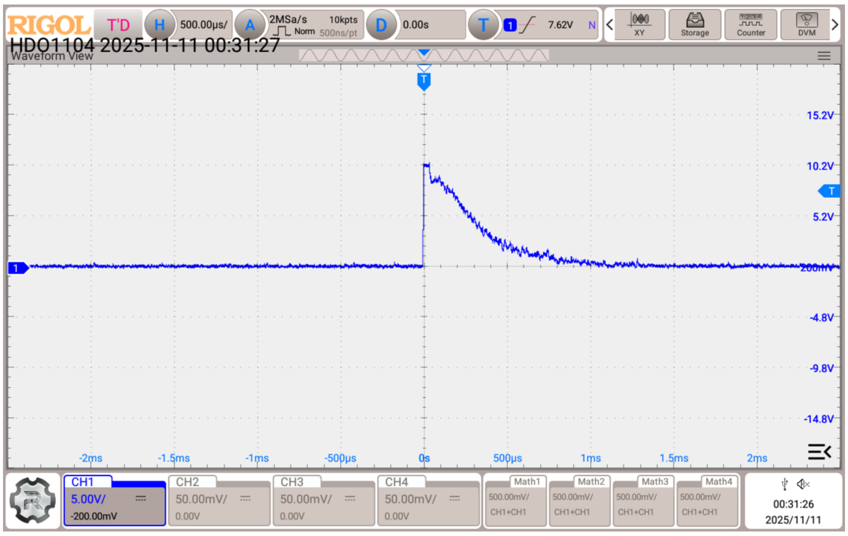
1. Poiskati signal proste precesije po sunku. Na podlagi oblike signala bomo izračunali T_2^*. Izberemo takšne sunke, da se kot θ spremeni ravno za $\pi/2$ ali π.

2. Z opazovanjem amplitude signala proste precesije določiti konstantno T_1.
3. Za vodo z dodanimi paramagnetnimi ioni izmeriti spinsko-spinski relaksacijski čas T_2.

2 Meritve

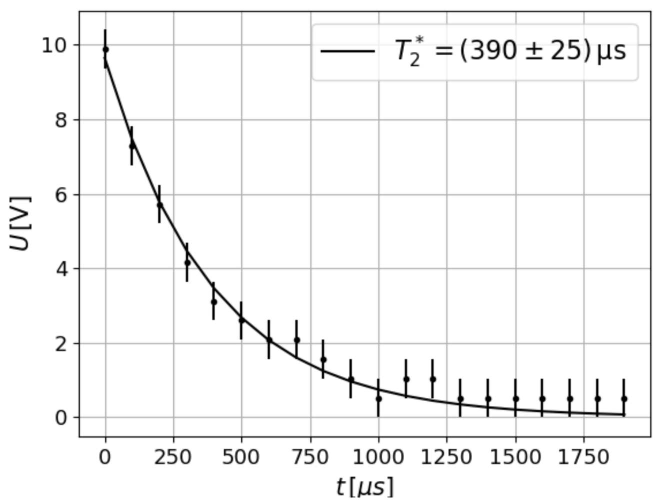
2.1 Voda z dodanimi paramagnetnimi ioni

Meritev T_2^*. Najprej poiščemo nastavitve oscilatorja, pri katerih dobimo signal proste precesije. V faznem načinu merjenja ta izgleda približno takole:



Slika 1: Signal proste precesije na ekranu osciloskopa. Nenadni skok napetosti ne osciloskopu je posledica vzbujanja z elektromagnetom, padanje napetosti pa opisuje enačba 2. Iz te meritve bomo poskusili določiti parameter T_2^*.

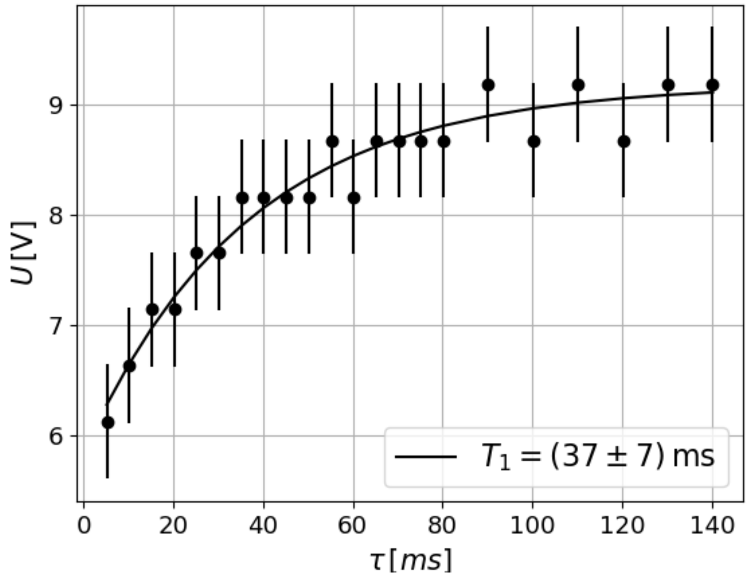
Na grafu izberemo nekaj meritvenih točk in s `pyhon`ovo funkcijo `scipy.optimize.curve_fit` poiščemo fit. Za večjo numerično stabilnost uporabimo le točke, ko je $U = 0.52\,\mathrm{V}$ (saj je toliko naša natančnost pri iskanju meritvenih točk), in lineariziramo krivuljo. Tako lahko za fit uporabimo linearno funkcijo, kar nam da večjo numerično stabilnost.



Slika 2: Na signal proste precesije fitamo krivuljo, opisano v enačbi 2. Dobimo karakteristični čas T_2^*.

Iz grafa na sliki 2 določimo $T_2^* = (390 \pm 25)\,\mu$s.

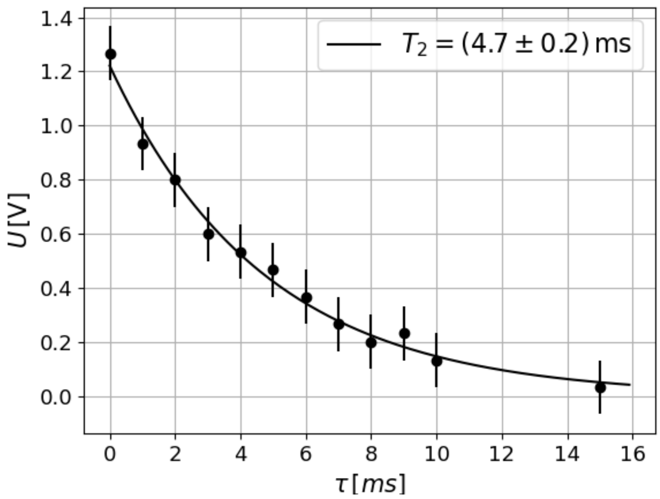
Meritev T_1. Na elektromagnetu ustvarjamo dva sunka, ki sta med seboj zamaknjena za čas τ. Ko se čas τ povečuje, se amplituda signala proste precesije zmanjšuje. Narišimo si graf $U_0(\tau)$:



Slika 3: Izmerimo amplitudo signala proste precesije. Na graf fitamo eksponentno krivuljo $U(\tau) = U_0 \exp((\tau - \tau_0)/T_1)$. Parameter τ_0 dodamo, ker τ ni umerjen.

Na podlagi fita dobimo $T_1 = (37 \pm 7)\,$ms.

Meritev T_2. Izmerimo amplitudo spinskega odmeva pri različnih vrednostih τ. Narišemo graf 4.



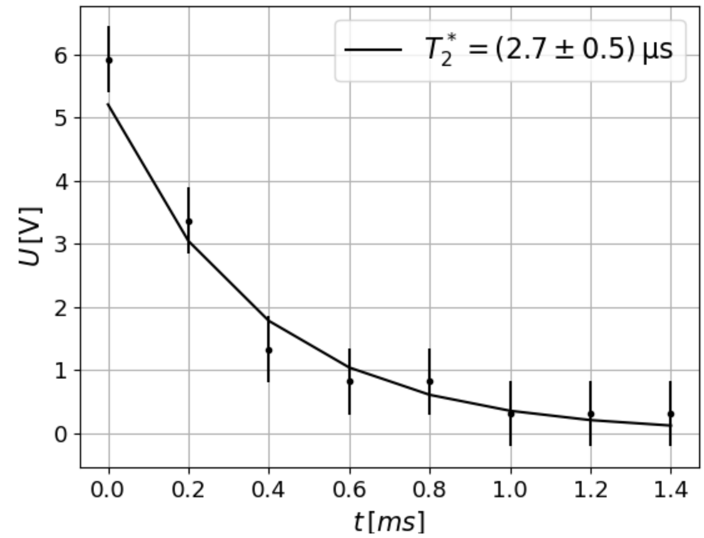
Slika 4: S funkcijo `scipy.optimize.curve_fit` na podatke fitamo krivuljo oblike $U(\tau) = U_0 \exp\left((\tau - \tau_0)/T_2\right)$. Parametra U_0 in τ_0 sta močno korelirana, vendar se zdi še zmeraj smiselno vključiti oba. Tako ali tako nas zanima samo parameter T_2.

Dobili smo $T_1 = (4.2 \pm 0.2)\,$ms.

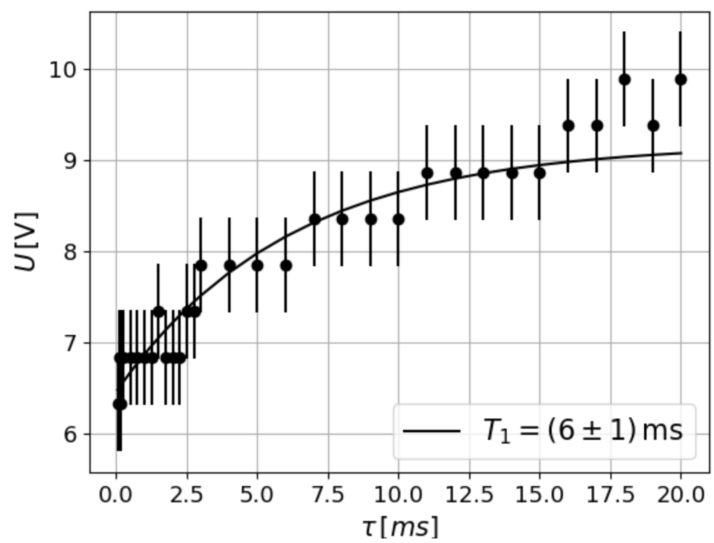
2.2 Vodovodna voda

Pri vodovodni vodi ne moremo meriti spinsko-spinskega relaksacijskega časa T_2, ostale meritve pa so zelo podobne.

Meritev T_2^*. Na grafu $U(t)$ na osciloskopu izberemo nekaj merskih točk in nanje fitamo eksponentno krivuljo. Postopek je popolnoma enak kot pri vodi z dodanimi paramagnetnimi ioni.



Slika 5: Ker je T_2^* za vodovodno tako velik, se prispevek zaradi sunka proste precesije zelo hitro zmanjša do te mere, da ga ne moremo ločiti od šuma. Zato nimamo zelo veliko merilnih točk, kar nam ne omogoča dobrega fita. Na izmerjeni T_2^* se torej ne smemo preveč zanašati. Videti pa je, da se kar dobro ujema z meritvami.



Slika 6: Na podatke fitamo krivuljo $U(\tau) = U_0 \exp((\tau - \tau_0)/T_1)$.