

Badanie magnetycznej relaksacji protonów metodą echa spinowego

Joanna Luc, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UJ
Opiekun naukowy: dr Tadeusz Pałasz

Wstęp
Celem ćwiczenia było zapoznanie się ze zjawiskiem magnetycznego rezonansu jądrowego. Zmierzono czasy relaksacji spin-sieć oraz spin-spin dla roztworu wodnego CuSO₄. Zbadano zależność obu czasów od stężenia CuSO₄ oraz zależność obu czasów od temperatury dla próbki o stężeniu 0,5% CuSO₄.

Relaksacja spin-sieć
Poszczególne atomy badanej substancji mają momenty magnetyczne, które składają się na całkowitą magnetyzację ciała $\vec{M}$. Zderzenia termiczne między cząsteczkami powodują izotropowy rozkład momentów magnetycznych, tak więc dla próbki nie znajdującej się w zewnętrznym polu magnetycznym magnetyzacja jest zerowa. Jeśli umieścimy próbkę w zewnętrznym polu magnetycznym $\vec{B} = B\hat{z}$, to otrzymamy nadwyżkę momentów magnetycznych skierowanych zgodnie z tym polem. Składowa z-owa wektora magnetyzacji rośnie wtedy do pewnej wartości $M_{z\max}$, natomiast pozostałe składowe będą nadal równe zero. Proces ten można opisać następującym równaniem:

$$\frac{dM_z}{dt} = -\frac{M_z(t) - M_{z\max}}{T_1}$$

przy czym T_1 to czas relaksacji spin-sieć (relaksacji podłużnej), która polega na zmianie energii układu spinów w energię kinetyczną tj. na jej przejściu „do sieci”. Rozwiązaniem tego równania jest:

$$M_z(t) = M_{z\max}(1 - e^{-t/T_1})$$

Relaksacja spin-spin
Jeśli po ustaleniu się wartości M_z w pobliżu wartości maksymalnej włączymy w obszarze próbki dodatkowe pole $\vec{B}_1 \perp \vec{B}$ o częstotliwości rezonansowej, to nastąpi zmiana orientacji momentów magnetycznych atomów, a więc także wektora magnetyzacji $\vec{M}$. Załóżmy, że wyłączamy pole $\vec{B}_1$ w momencie, gdy $\vec{M} \perp \vec{B}$. Wówczas składowa M_z będzie równa zero, natomiast składowa poprzeczna osiągnie swoje maksimum, równe wcześniejszemu maksimum składowej podłużnej $M_{\perp z} = M_{z\max}$ (w tym momencie wyłączamy pole $\vec{B}_1$). Na tak uzyskaną magnetyzację poprzeczną mają wpływ wzajemne oddziaływania spinów, ponieważ związane z nimi momenty magnetyczne sprawiają, że efektywne pole magnetyczne jest różne od $\vec{B}$. W związku z tym część momentów magnetycznych z powrotem zmieni orientację, przez co zmaleje $M_{\perp z}$. Proces ten można opisać następującym równaniem:

$$\frac{dM_{\perp z}(t)}{dt} = -\frac{M_{\perp z}(t)}{T_2}$$

przy czym T_2 to czas relaksacji spin-spin (relaksacja poprzecznej), która polega na utracie koherencji ustawień spinów. Rozwiązaniem tego równania jest:

$$M_{\perp z}(t) = M_{z\max} e^{-t/T_2}$$

Eksperyment
Pomiar wartości magnetyzacji jest możliwy tylko dla jej składowej prostopadłej do pola $\vec{B}$, w związku z tym jej zbadanie wymaga odpowiedniego ustawienia wektora $\vec{M}$. Do tego celu używa się impulsów fali elektromagnetycznej o częstotliwości radiowej dostrojonej do częstotliwości Larmora, wyrażającej się wzorem:

$$\nu = \frac{g_I \mu_N B}{h}$$

gdzie g_I jest czynnikiem jądrowym charakterystycznym dla danego typu jądra (dla protonów $g_I = 5,5857$), a μ_N jest magnetonem jądrowym. Gdy powyższy warunek rezonansu jest spełniony, następuje silna absorpcja promieniowania związana z odwróceniem orientacji spinów protonów. W konsekwencji wypadkowy wektor $\vec{M}$ obraca się o odpowiedni kąt. Po zakończeniu podawania impulsu magnetyzacja zaczyna zanikać. W czasie owego zanikania emitowana jest fala elektromagnetyczna o amplitudzie proporcjonalnej do magnetyzacji i to ona podlega pomiarowi. Czas relaksacji spin-spin T_2 badano za pomocą metody echa Hahna (wykorzystującej impulsy $\frac{\pi}{2}, \pi$), zaś czas relaksacji spin-sieć T_1 badano za pomocą metody Carra-Purcella (wykorzystującej impulsy $\pi, \frac{\pi}{2}, \pi$).

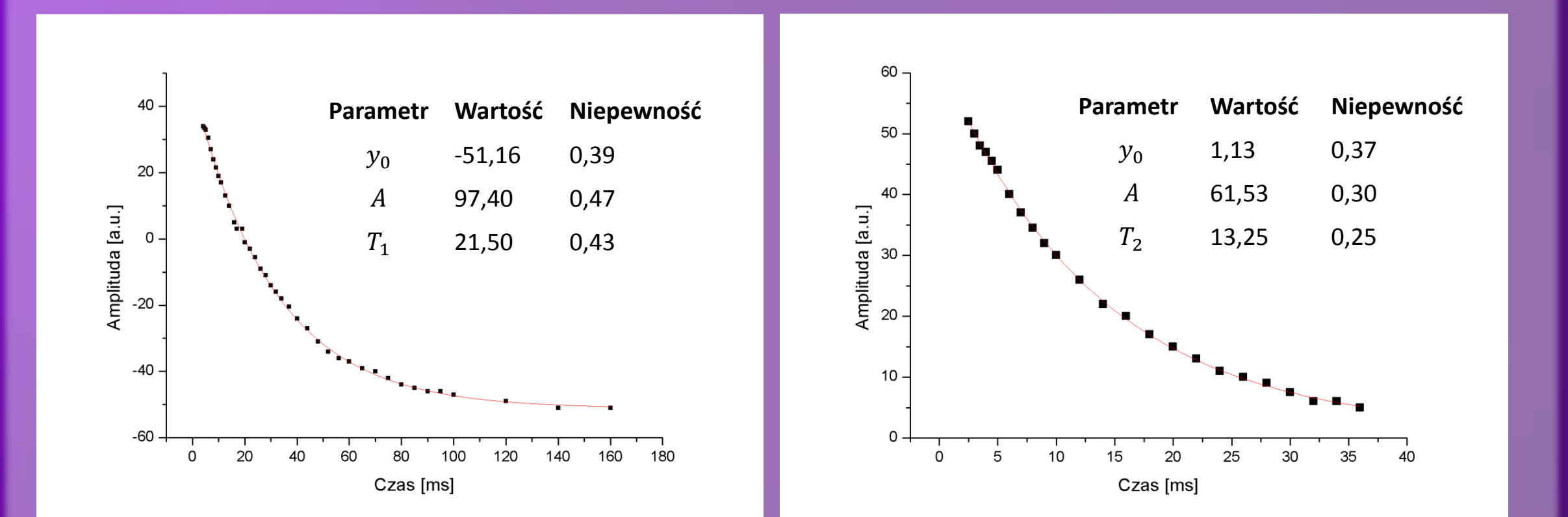
Podsumowanie
Dla próbek o stężeniu 0,25% CuSO₄ i większym uzyskane wyniki potwierdzają eksponencjalne zależności $M_z(t)$ i $M_{\perp z}(t)$. Na ich podstawie wyznaczono wartości T_1 i T_2 (rys. 1). Im większe stężenie CuSO₄, tym krótsze są oba czasy relaksacji. Sprawdzono także, że T_1 i T_2 rosną z temperaturą w sposób eksponencjalny w zakresie od 0°C do 20°C, przy czym czas relaksacji spin-sieć rośnie nieznacznie szybciej (rys. 2).

Bibliografia
Instrukcja do ćwiczenia Z7, dostępna na stronie II Pracowni Fizycznej UJ.
P.W. Atkins, *Podstawy chemii fizycznej*, PWN, Warszawa 2002, rozdz. 11.5.

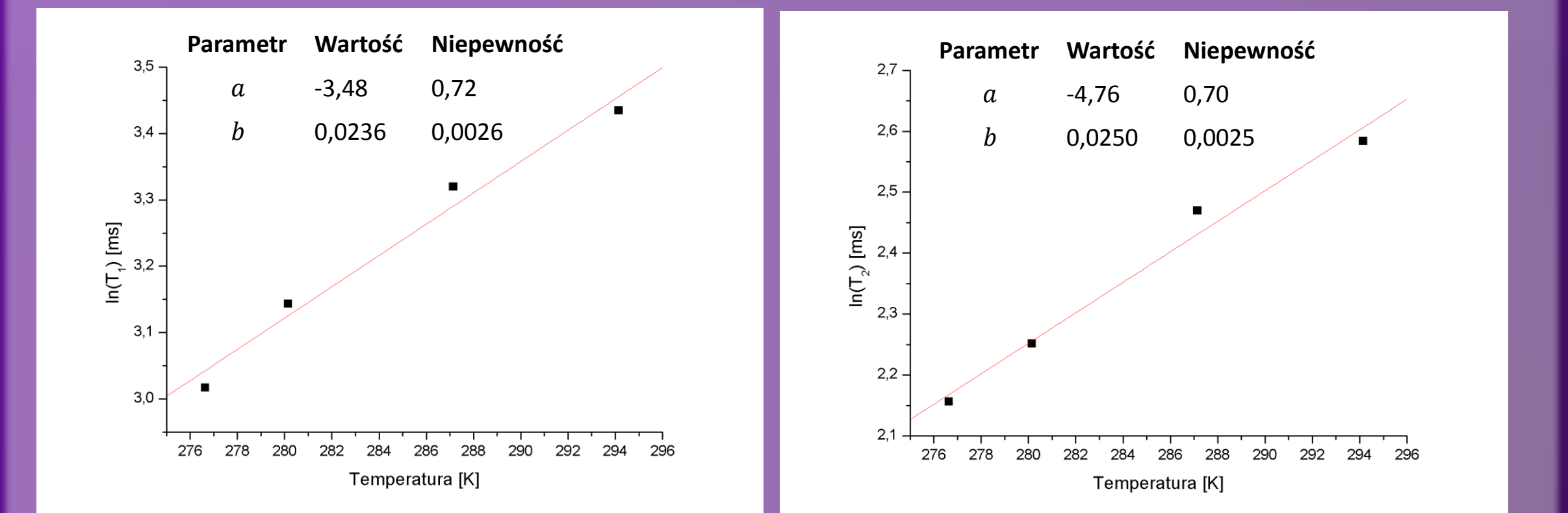
Wyniki

Tabela 1. Czasy relaksacji T_1 i T_2 dla wodnych roztworów o różnych stężeniach CuSO₄.

Stężenie	T_1 [ms]	T_2 [ms]
0,125%	$150,7 \pm 1,5$	$63,5 \pm 7,4$
0,25%	$73,6 \pm 1,1$	$44,7 \pm 1,7$
0,5%	$31,02 \pm 0,43$	$13,25 \pm 0,25$
1%	$16,28 \pm 0,46$	$7,09 \pm 0,24$



Rys. 1. Wyznaczenie czasów T_1 i T_2 dla próbki wody z dodatkiem 0,5% CuSO₄. Dopasowywana funkcja to $y = y_0 + Ae^{-t/T_1}$.



Rys. 2. Zależność czasów T_1 i T_2 od temperatury dla próbki wody z dodatkiem 0,5% CuSO₄. Dopasowywana funkcja to $y = a + bx$.