


| | | |
|---|---|---|
|  AGH | Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie Wydział FIIS Fizyka techniczna | Zespół nr 3: 1.Kulig Mateusz 2.Ryś Przemysław 3.Jusięga Paweł |
| Laboratorium Podstaw Fizyki Ciała Stałego | | |
| Rok akademicki: 2022/2023 | Semestr V | Grupa laboratoryjna: 1 |
| Temat ćwiczenia: Podatność magnetyczna | | |
| Data wykonania ćwiczenia 15.12.2022 | Data oddania sprawozdania 23.01.2023 | Ocena |

1 Wstęp teoretyczny

1.1 Prawo indukcji Faradaya

Prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya mówi, że w zamkniętym obwodzie elektrycznym znajdującym się w zmiennym polu magnetycznym pojawia się siła elektromotoryczna indukcji ε , której wartość jest równa szybkości zmian strumienia indukcji pola magnetycznego Φ_B przechodzącego przez powierzchnię rozpiętą na tym obwodzie. Oznacza to, że w obwodzie popłynie prąd elektryczny. Matematycznie prawo to zapisać możemy jako

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}, \quad (1)$$

gdzie minus oznacza że powstała siła elektromotoryczna przeciwdziała zmianom strumienia pola magnetycznego zgodnie z regułą Lenza.

1.2 Definicja momentu magnetycznego, namagnesowania i podatności magnetycznej.

Moment magnetyczny to wielkość która opisuje pole magnetyczne wytwarzane przez dane ciało. Dla elektronu moment magnetyczny składa się z części spinowej $\vec{\mu}_s = -g_e \frac{e}{2m} \hbar \cdot \vec{s}$ i orbitalnej $\vec{\mu}_l = \frac{e}{2m} \hbar \cdot \vec{l}$, które pochodzą odpowiednio od spinu elektronu i obrotu jądra przez elektron. Gdy rozważymy cały kryształ możemy zdefiniować wielkość jaką jest namagnesowanie \vec{M} . Jest to suma momentów magnetycznych pochodzących od atomów na jednostkę objętości kryształu. Namagnesowanie kryształu zmienia się, jeśli znajdzie się on w polu magnetycznym o natężeniu H . zależność tą opisuje wzorem $\vec{M} = \chi \vec{H}$, w którym wielkość χ to podatność magnetyczna. Jest ona zależna od materiału z którego zbudowany jest kryształ oraz na przykład temperatury.

1.3 Rodzaje uporządkowania magnetycznego i wynikająca z nich wielkość podatności magnetycznej.

Magnetyki występują w kilku rodzajach uporządkowania które jest tym co określa ich właściwości magnetyczne. Istotny jest znak podatności magnetycznej χ oraz jej zależność od temperatury. Wyróżnia się:

- Ferromagnetyki, w których namagnesowanie ustawia się zgodnie z polem zewnętrznym od którego jest większe, wynika z układania się momentów magnetycznych w materiale w tę samą stronę i oznacza $\chi \gg 1$.
- Antyferromagnetyki; w nich za sprawą oddziaływania wymiany które można policzyć — analogicznie jak dla ferromagnetyków — korzystając z uproszczonego hamiltonianu Heisenberga, korzystniejszym energetycznie układem w obliczu przyłożonego pola magnetycznego jest ustawienie się momentów magnetycznych niejako naprzemiennie w kierunkach zgodnym z zewnętrznym polem i do niego odwrotnym. Skutkiem tego jest zerowa podatność magnetyczna,
- Diamagnetyki. W nich podatność magnetyczna jest nieznacznie ujemna, ale na moduł mniejsza od jedności. Powstaje za sprawą elektronów które mogą ustawiać swoje momenty magnetyczne w kierunku przeciwnym do przyłożonego pola,
- Paramagnetyki o $\chi > 0$, przypominają ferromagnetyki ale ich momenty magnetyczne nie wykazują tak daleko idącej jednomyślności w obieraniu swojego kierunku i zwrotu co skutkuje mniejszym χ . Naturalnie materiał taki musi posiadać atomy lub jony obdarzone momentem magnetycznym.
- Nadprzewodniki. W nich zachodzi idealna zależność $\chi = -1$ co oznacza że indukowane w nich jest dokładnie przeciwne pole niż przyłożone. Jest to diamagnetyk idealny, gdyż jakkolwiek niższa podatność magnetyczna skutkowałaby powstaniem pewnego rodzaju *perpetuum mobile*. Nadprzewodniki wykazują zdolność do lewitacji w polu magnetycznym zwaną efektem Meissnera.

1.4 Zależność temperaturowa podatności magnetycznej dla różnych klas związków (paramagnetyki, ferromagnetyki, antyferromagnetyki, diamagnetyki, nadprzewodniki).

Wymienionym powyżej rodzajom uporządkowania odpowiadają różne własności podatności magnetycznej od temperatury. W diamagnetykach zależności temperaturowe są bardzo słabe. Paramagnetyki dobrze opisywane pod tym względem są przez prawo Curie-Weissa. Ferromagnetyki posiadają niemal stałą podatność magnetyczną poniżej temperatury Curie, zaś powyżej — w obszarze paramagnetycznym — są posłuszne prawu Curie-Weissa. Antyferromagnetyki poniżej temperatury Neéla znajdują się w stanie antyferromagnetycznym i zupełnie nie podlegają prawu Curie-Weissa; ich podatność maleje wraz ze spadkiem temperatury, w stanie paramagnetycznym podobnie jak miało to miejsce w przypadku ferromagnetyków działa prawo Curie-Weissa. Odróżnić paramagnetyk, ferromagnetyk oraz antyferromagnetyk na wykresie $1/\chi(T)$ można szukając punktu przecięcia prostej ekstrapolowanej z obszaru paramagnetycznego z osią temperatury — ferromagnetyk dokona przecięcia w jakiejś dodatniej temperaturze, antyferromagnetyk w temperaturze ujemnej a paramagnetyk w zerze. Nadprzewodniki mogą wykazywać rozmaite zależności podatności od temperatury co wynika choćby z faktu że nadprzewodnictwo z reguły może być utrzymane jedynie w niskich temperaturach.

1.5 Prawo Curie-Weissa.

Prawem Curie-Weissa nazywamy zależność podatności magnetycznej ferromagnetyków w temperaturze powyżej temperatury Curie, kiedy to ferromagnetyk staje się paramagnetykiem. Opisuje ono również zależność ferroelektryków, które analogicznie po przekroczeniu temperatury Curie stają się paraelektrykami. Podatność magnetyczna jest opisana wtedy wzorem 2

$$\chi_m = \frac{C}{T - T_C}, \quad (2)$$

gdzie: C - stała Curie-Weissa, T - temperatura, T_C - temperatura Curie.

Stała Curie niesie informacje o wartości efektywnego momentu magnetycznego μ_{eff} wyrażonego jako wielokrotność magnetonu Bohra $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} \approx 9,2741 \cdot [\text{Am}^2]$.

$$C = \frac{\mu_0 N \mu_B^2 \mu_{eff}^2}{3k_B} \quad (3)$$

gdzie N oznacza liczbę momentów magnetycznych przypadających na jednostkę objętości. Wartość efektywnego momentu magnetycznego μ_{eff} można wyrazić jako:

$$\mu_{eff} = g_L \cdot \sqrt{J(J+1)} \quad (4)$$

W temperatura Curie zawarta jest z kolei informacja o sile oddziaływań wymiennych, co więcej jest ona proporcjonalna do całki wymiany w hamiltonianie Heisenberga. Dla temperatur znacznie większych od krytycznej temperatury Curie, prawo to asymptotycznie przechodzi w zwykłe prawo Curie, wzór 5.

$$\chi_m = \frac{C}{T}, \quad (5)$$

1.6 Magnetyczne przejścia fazowe –temperatury Curie i Neéla.

Analizując Prawo Curie dochodzimy do wniosku, iż niektóre paramagnetyki w miarę zmniejszania temperatury stają się ferromagnetykami, a co za tym idzie następuje porządkowanie magnetyczne materiału. Jeżeli mamy do czynienia z ferromagnetykiem ($T_C > 0$) porządkowanie spinów następuje już dla temperatury Curie, czyli właśnie T_C , jeżeli natomiast do czynienia mamy z antyferromagnetykiem ($T_C < 0$), wówczas porządkowanie następuje w temperaturze Neéla oznaczanej T_N . Jeżeli w układzie nie ma oddziaływań między momentami magnetycznymi, wtedy $T_C = 0$ i mamy zwykłe prawo Curie dla paramagnetyka.

1.7 Zasada pomiaru podatności magnetycznej przy użyciu woltomierza fazoczułego.

Metoda pomiaru podatności magnetycznej bazuje na zjawisku indukcji namagnesowania w próbce umieszczonej w zmiennym polu magnetycznym o możliwie dużej jednorodności przestrzennej. Uzyskujemy takowe przy użyciu cewek Helmholtza. Cewka główna o liczbie zwojów N oplata pozycję próbki. Ponadto, połączona jest ona z dwóch stron do cewek pomocniczych o liczbie zwojów $N/2$, które nawinięte są w kierunku przeciwnym do cewki głównej. Mamy więc N zwojów nawiniętych zgodnie i N zwojów przeciwnie do ruchu wskazówek zegara połączonych szeregowo. W momencie, kiedy w układzie nie ma próbki, natomiast cewki Helmholtza generują zmienne pole magnetyczne, w cewce głównej indukowana jest siła elektromotoryczna, która znosi się z siłą elektromotoryczną indukowaną w cewkach pomocniczych. Jeżeli w układzie pomiarowym zawrzemy teraz próbkę, to mimo zerowania się zewnętrznego pola pozostanie czynnik

związany z namagnesowaniem próbki M i efektywny zbierany sygnał jest do niego proporcjonalny, z czego dalej wynika proporcjonalność do podatności magnetycznej:

$$U^{sk} = C\omega\chi H_0^{sk}V = C\omega\chi_0 H_0^{sk}m, \quad (6)$$

gdzie C – stała związana m.in. z geometrią cewek, V – objętość próbki, m – masa próbki, χ – podatność, χ_0 – podatność właściwa.

Korzystając z tej formuły jesteśmy w stanie wyznaczyć podatność magnetyczną względem materiału wzorcowego o innej podatności.

2 Analiza danych

2.1 Pomiar próbki niklowej

Otrzymano do analizy próbkę zawierającą niklową kulkę o masie $m = 160,3$ g i objętości $V_{kulki} = 18$ mm³. Z racji tego, że nikiel jest w temperaturze pokojowej silnym ferromagnetykiem można z jego pomocą dokonać cechowania aparatury, wykorzystując zależność związaną z tak zwanym czynnikiem demagnetyzacji $\chi_0^{Ni} \cdot m_{Ni} = 3V_{kulki}$ oraz wzór (6). Można wówczas wyliczyć stałe związane z geometrią aparatury oraz dobranymi parametrami prądu wytwarzającego pole magnetyczne; upraszcza to obliczenia i poprawia ich dokładność, zważywszy na niedokładność wykonania aparatury wprowadzającą znaczną niepewność do obliczeń. Celem takiej kalibracji jest oczywiście wykorzystanie jej wyników w jakimś poznawczym celu. Można wyprowadzić wzór pozwalający bezpośrednio wyliczać podatność χ_0^x badanego materiału

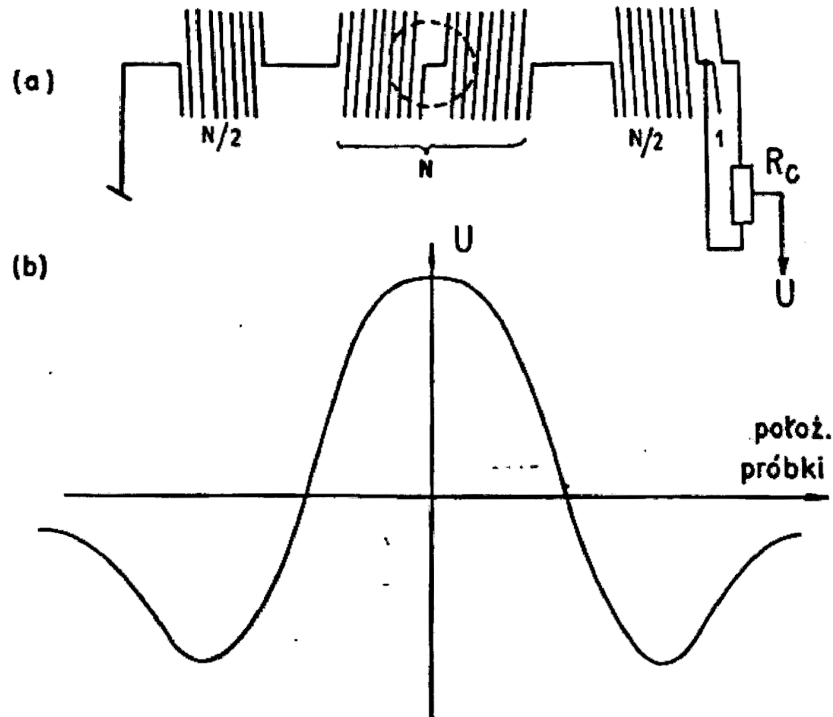
$$\chi_0^x = \frac{U_x^{sk}}{U_{Ni}^{sk}} \frac{3V_{kulki}}{m_x}. \quad (7)$$

W tym wzorze U_{Ni}^{sk} jest napięciem zmierzonym w pomiarze kalibracyjnym, po wsadzeniu do aparatury próbki niklowej i odpowiednim jej ustawieniu w ramach pionowego stopnia swobody oferowanego przez układ pomiarowy.

Zgodnie z teorią elektromagnetyzmu ferromagnetyk umieszczony w cewce zwiększa jej indukcyjność.

$$L = \mu_0\mu_r \frac{N^2 A}{l} \quad (8)$$

Zatem umieszczenie próbki niklu dokładnie w środku cewki pomiarowej spowoduje zwiększenie indukowanego w niej za sprawą zewnętrznego, w przybliżeniu jednorodnego, zmiennego pola napięcia i w konsekwencji powstanie niezerowej siły elektromotorycznej w obwodzie z cewkami; pomiarową oraz pomocniczymi. W przypadku umieszczenia próbki w innym miejscu niż środek cewki pomiarowej indukowane wypadkowe napięcie będzie co do wartości bezwzględnej niższe, w szczególności dla pozycji odpowiadającym środkom cewek pomocniczych będzie miało zarówno niższą na moduł wartość oraz przeciwny znak. Obrazowo przedstawia to poniższy rysunek. [2]

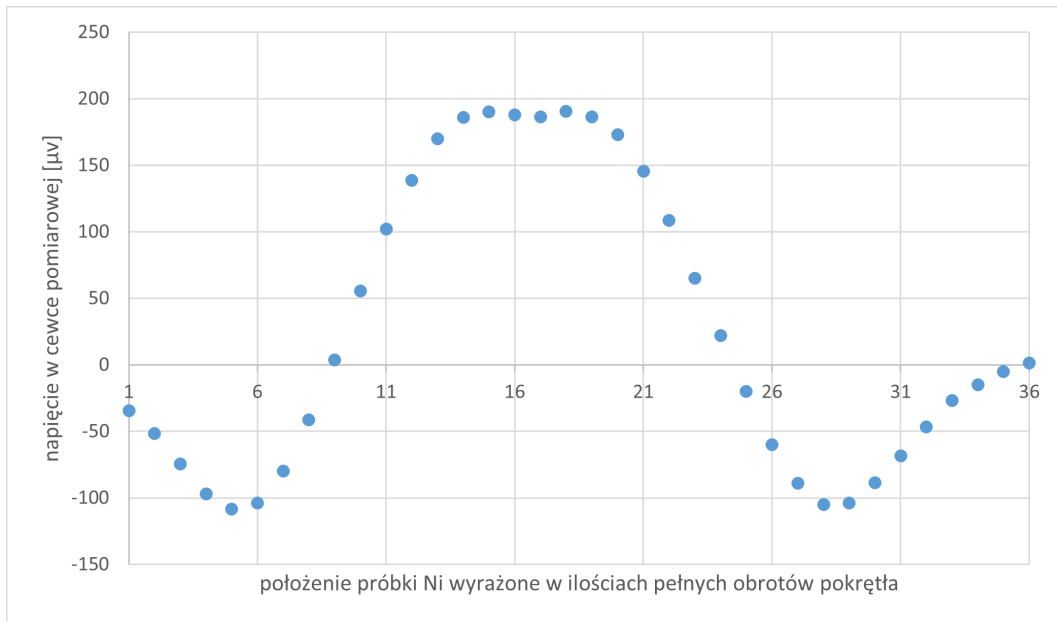


Rys. 1: Spodziewana zależność prądu indukowanego w obwodzie zawierającym cewkę pomiarową. [2] Całość znajduje się w zmiennym polu magnetycznym generowanym przez cewki Helmholtza współosiowe z cewkami na rysunku.

Aby dokonać kalibracji aparatury przy pomocy próbki niklowej należy odszukać jej położenie odpowiadające maksymalnemu napięciu wyindukowanemu w obwodzie z cewką pomiarową. Wyniki tych pomiarów znajdują się w poniższej tabeli:

Tab. 1: Wyniki pomiarów napięcia skutecznego U_{Ni}^{sk} [μV] w obwodzie z cewkami pomiarowymi w zależności od jej pionowego położenia, odmierzanego pełnymi obrotami n pokrętła regulującego wysokość, gdzie $n = 1$ odpowiada jak najwyższemu położeniu.

| n | U_{Ni}^{sk} | n | U_{Ni}^{sk} | n | U_{Ni}^{sk} | n | U_{Ni}^{sk} |
|-----|---------------|-----|---------------|-----|---------------|-----|---------------|
| 1 | -34.5 | 10 | 55.5 | 19 | 186.3 | 28 | -105 |
| 2 | -51.5 | 11 | 102 | 20 | 173 | 29 | -104 |
| 3 | -74.5 | 12 | 138.5 | 21 | 145.5 | 30 | -88.5 |
| 4 | -97 | 13 | 170 | 22 | 108.6 | 31 | -68.5 |
| 5 | -108.4 | 14 | 186 | 23 | 65 | 32 | -46.5 |
| 6 | -103.8 | 15 | 190 | 24 | 22 | 33 | -27 |
| 7 | -80 | 16 | 188 | 25 | -20 | 34 | -15 |
| 8 | -41.5 | 17 | 186.3 | 26 | -60 | 35 | -5 |
| 9 | 3.5 | 18 | 190.5 | 27 | -89 | 36 | 1.3 |



Rys. 2: Punkty pomiarowe otrzymane dla próbki niklowej poruszanej w górę i w dół wzdłuż osi cewek aparatury. Widać że maksimum jest bardzo szerokie, wręcz zbyt szerokie zważywszy na to że w samym centrum lekko opada. Wynika to z geometrii układu pomiarowego. Oprócz tego widać zgodność z teorią.

Oprócz tych pomiarów należy zmierzyć tło aparatury, to jest wskazanie bez obecności wewnątrz niej jakiegokolwiek ferromagnetyka, wynikające z jej niedoskonałego wykonania i odjąć od wszelkich wykonywanych później pomiarów. Otrzymano wartość $19,4 \mu V$. Z czterech najwyższych punktów wyciągnięto wartość średnio-maksymalną z odjęciem tła $\bar{U}_{Ni}^{sk_{max}} = 169,3 \mu V$, ale do następnych obliczeń podatności właściwej zgodnie ze wzorem (7), w wierze że trafione zostanie jedno z maksimów, podstawiono wartość jednego z nich pomniejszoną o pomiar tła, równą $170.6 \mu V$.

2.2 Pomiar podatności magnetycznej gadolinu

Następnie wykonaliśmy pomiary dla gadolinu. Otrzymana próbka miała masę $m_{gadolinu} = 75$ mg. Próbkę ustawiliśmy tak, aby położenie było takie samo jak dla maksymalnego napięcia dla niklu, czyli $U_{niklu} = 190 \mu V$. Następnie ochłodziliśmy próbkę ciekłym azotem i za pomocą grzałki stopniowo zwiększaliśmy temperaturę. Otrzymane wyniki przedstawiliśmy w tabeli 4 w aneksie. Za pomocą odpowiedniej tabeli przeliczyliśmy zmierzone napięcie na temperaturę. Za pomocą wzoru 7 obliczyliśmy właściwą podatność magnetyczną gadolinu, zatem by uzyskać podatność magnetyczną pomnożyliśmy ją przez gęstość gadolinu $\rho = 7901 \frac{kg}{m^3}$.

Na podstawie wyników z tabeli 4 i przygotowanej wielomianowej mapy tabelki zawierającej zależność temperatury T od napięcia T_u :

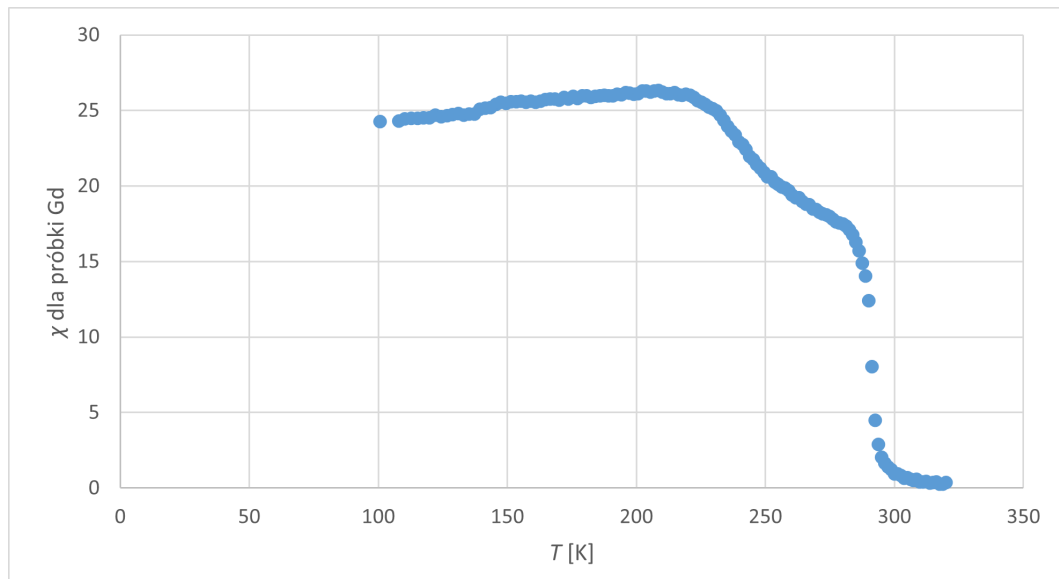
$$T [K] = 0.0005067 \cdot T_u^7 + 0.005552 \cdot T_u^6 + 0.02321 \cdot T_u^5 + 0.0231 \cdot T_u^4 + 0.05125 \cdot T_u^3 - 0.8563 \cdot T_u^2 + 25.99 \cdot T_u + 273$$

dokonano obliczeń zgodnie z opisem powyżej których wyniki znajdują się w poniższej tabeli:

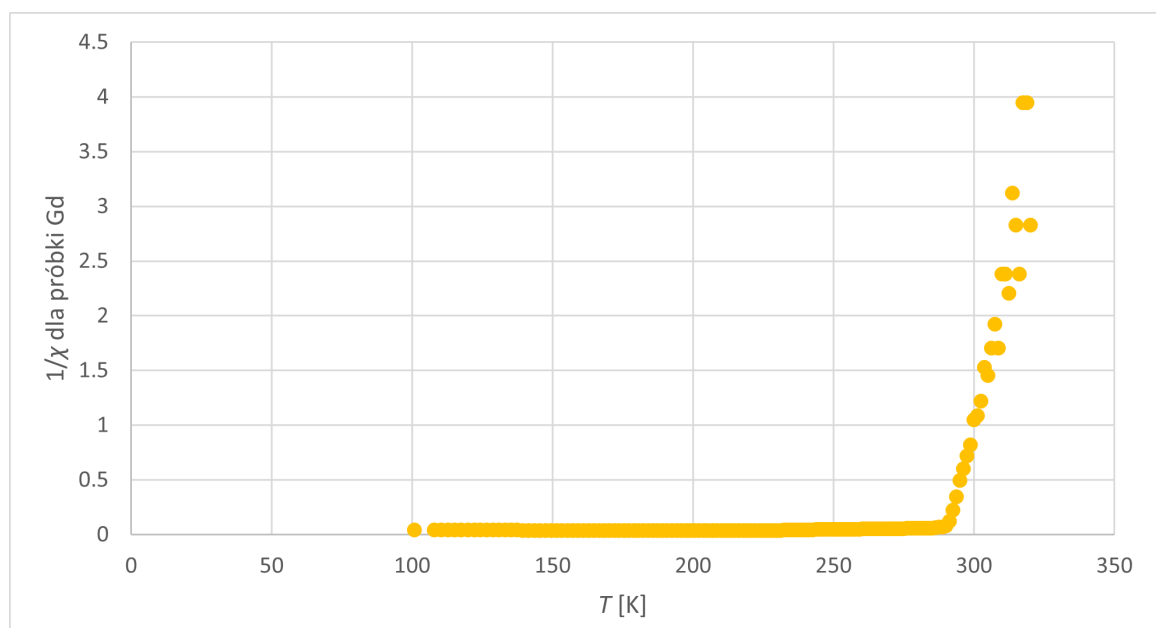
Tab. 2: Wyniki obliczeń podatności od temperatury dla gadolinu.

| T [K] | χ | $1/\chi$ | T [K] | χ | $1/\chi$ | T [K] | χ | $1/\chi$ |
|---------|--------|----------|---------|--------|----------|---------|--------|----------|
| 100.77 | 24.262 | 0.0412 | 195.78 | 26.196 | 0.0382 | 263.02 | 19.227 | 0.052 |
| 107.86 | 24.295 | 0.0412 | 197.4 | 26.163 | 0.0382 | 264.35 | 18.96 | 0.0527 |
| 110.32 | 24.462 | 0.0409 | 199.02 | 26.063 | 0.0384 | 265.68 | 18.793 | 0.0532 |
| 112.74 | 24.496 | 0.0408 | 200.63 | 26.129 | 0.0383 | 267 | 18.76 | 0.0533 |
| 115.13 | 24.496 | 0.0408 | 202.22 | 26.296 | 0.038 | 268.32 | 18.493 | 0.0541 |
| 117.48 | 24.529 | 0.0408 | 203.81 | 26.296 | 0.038 | 269.63 | 18.46 | 0.0542 |
| 119.8 | 24.529 | 0.0408 | 205.39 | 26.229 | 0.0381 | 270.94 | 18.26 | 0.0548 |
| 122.08 | 24.696 | 0.0405 | 206.96 | 26.296 | 0.038 | 272.25 | 18.16 | 0.0551 |
| 124.34 | 24.596 | 0.0407 | 208.53 | 26.33 | 0.038 | 273.55 | 18.093 | 0.0553 |
| 126.57 | 24.662 | 0.0405 | 210.08 | 26.229 | 0.0381 | 274.84 | 17.993 | 0.0556 |
| 128.77 | 24.729 | 0.0404 | 211.63 | 26.129 | 0.0383 | 276.13 | 17.793 | 0.0562 |
| 130.94 | 24.796 | 0.0403 | 213.17 | 26.129 | 0.0383 | 277.42 | 17.626 | 0.0567 |
| 133.09 | 24.696 | 0.0405 | 214.7 | 26.196 | 0.0382 | 278.7 | 17.56 | 0.0569 |
| 135.21 | 24.762 | 0.0404 | 216.22 | 26.029 | 0.0384 | 279.98 | 17.493 | 0.0572 |
| 137.31 | 24.762 | 0.0404 | 217.74 | 25.996 | 0.0385 | 281.26 | 17.326 | 0.0577 |
| 139.39 | 25.096 | 0.0398 | 219.25 | 26.063 | 0.0384 | 282.53 | 17.093 | 0.0585 |
| 141.45 | 25.162 | 0.0397 | 220.75 | 25.996 | 0.0385 | 283.79 | 16.759 | 0.0597 |
| 143.48 | 25.196 | 0.0397 | 222.24 | 25.863 | 0.0387 | 285.06 | 16.293 | 0.0614 |
| 145.5 | 25.396 | 0.0394 | 223.73 | 25.663 | 0.039 | 286.32 | 15.692 | 0.0637 |
| 147.5 | 25.563 | 0.0391 | 225.21 | 25.529 | 0.0392 | 287.57 | 14.892 | 0.0671 |
| 149.47 | 25.463 | 0.0393 | 226.69 | 25.396 | 0.0394 | 288.83 | 14.025 | 0.0713 |
| 151.43 | 25.596 | 0.0391 | 228.15 | 25.229 | 0.0396 | 290.08 | 12.424 | 0.0805 |
| 153.37 | 25.596 | 0.0391 | 229.61 | 25.129 | 0.0398 | 291.32 | 8.0229 | 0.1246 |
| 155.3 | 25.629 | 0.039 | 231.07 | 24.962 | 0.0401 | 292.57 | 4.4883 | 0.2228 |
| 157.21 | 25.563 | 0.0391 | 232.52 | 24.696 | 0.0405 | 293.81 | 2.8877 | 0.3463 |
| 159.1 | 25.629 | 0.039 | 233.96 | 24.329 | 0.0411 | 295.05 | 2.0207 | 0.4949 |
| 160.97 | 25.563 | 0.0391 | 235.4 | 23.962 | 0.0417 | 296.29 | 1.6539 | 0.6046 |
| 162.83 | 25.629 | 0.039 | 236.83 | 23.629 | 0.0423 | 297.52 | 1.3872 | 0.7209 |
| 164.68 | 25.729 | 0.0389 | 238.25 | 23.395 | 0.0427 | 298.76 | 1.2204 | 0.8194 |
| 166.51 | 25.763 | 0.0388 | 239.67 | 22.928 | 0.0436 | 299.99 | 0.9537 | 1.0486 |
| 168.33 | 25.763 | 0.0388 | 241.09 | 22.728 | 0.044 | 301.22 | 0.9203 | 1.0866 |
| 170.14 | 25.696 | 0.0389 | 242.5 | 22.428 | 0.0446 | 302.45 | 0.8203 | 1.2191 |
| 171.93 | 25.863 | 0.0387 | 243.9 | 21.961 | 0.0455 | 303.69 | 0.6536 | 1.5301 |
| 173.71 | 25.763 | 0.0388 | 245.3 | 21.761 | 0.046 | 304.92 | 0.6869 | 1.4558 |
| 175.47 | 25.929 | 0.0386 | 246.69 | 21.428 | 0.0467 | 306.15 | 0.5869 | 1.7039 |
| 177.23 | 25.796 | 0.0388 | 248.08 | 21.161 | 0.0473 | 307.39 | 0.5202 | 1.9224 |
| 178.97 | 25.963 | 0.0385 | 249.46 | 20.894 | 0.0479 | 308.63 | 0.5869 | 1.7039 |
| 180.7 | 25.963 | 0.0385 | 250.84 | 20.627 | 0.0485 | 309.87 | 0.4202 | 2.3801 |
| 182.42 | 25.863 | 0.0387 | 252.21 | 20.594 | 0.0486 | 311.12 | 0.4202 | 2.3801 |
| 184.12 | 25.929 | 0.0386 | 253.58 | 20.261 | 0.0494 | 312.37 | 0.4535 | 2.2051 |
| 185.82 | 25.963 | 0.0385 | 254.94 | 20.127 | 0.0497 | 313.63 | 0.3201 | 3.1239 |
| 187.51 | 25.996 | 0.0385 | 256.3 | 19.927 | 0.0502 | 314.9 | 0.3535 | 2.8292 |
| 189.18 | 25.963 | 0.0385 | 257.66 | 19.861 | 0.0504 | 316.17 | 0.4202 | 2.3801 |
| 190.85 | 25.963 | 0.0385 | 259.01 | 19.694 | 0.0508 | 317.46 | 0.2534 | 3.9459 |
| 192.5 | 26.096 | 0.0383 | 260.35 | 19.394 | 0.0516 | 318.75 | 0.2534 | 3.9459 |
| 194.14 | 26.029 | 0.0384 | 261.69 | 19.227 | 0.052 | 320.06 | 0.3535 | 2.8292 |

Sporządzono rysunki $\chi(T)$ oraz $1/\chi(T)$.



Rys. 3: Wykres podatności od temperatury $\chi(T)$ dla próbki gadolinu. Widoczny jest hiperboliczny kształt w obszarze paramagnetycznym i trudne do określenia kształty w obszarze ferromagnetycznym. Widać również że, zgodnie z definicją ferromagnetyka, jego podatność poniżej temperatury Curie jest znacznie większa niż 1.



Rys. 4: Wykres odwrotności podatności od temperatury $1/\chi(T)$ dla próbki gadolinu. Widać że prawo Curie-Weissa jest spełnione.

Można do powyższego wykresu $1/\chi(T)$ w obszarze paramagnetycznym dopasować prostą o równaniu

$$y = 0.122x - 35.607$$

i obliczyć z tego temperaturę Curie

$$T_C = 292(30) \text{ K},$$

co w pełni zgadza się z wartością teoretyczną. [3]

3 Pomiar podatności magnetycznej nadprzewodnika

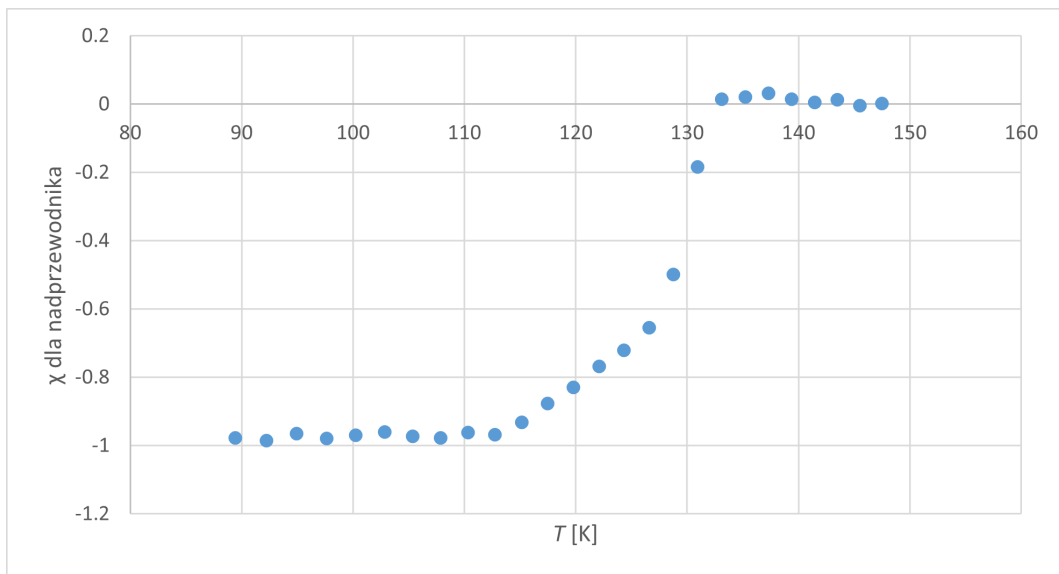
Podobne pomiary jak dla próbki gadolinowej wykonano dla próbki wykonanej z nieznanego nadprzewodnika wytworzonego gdzieś, kiedyś, w murach AGH. W poniższej tabeli znajdują się wyniki pomiarów po obliczeniach. Ze względu

na nieznaną gęstość nadprzewodnika ustalono taką jej wartość (5100 kg/m^3), żeby znormalizować minimalną wartość podatności w okolicach wartości nieco większych niż -1 , z pewnym marginesem gwarantującym nierówność ostrą. Ten margines został przyjęty metodą na oko, ze względu na fakt niezbyt poprawnego przechowywania nadprzewodnika w sali laboratoryjnej degradujący jego właściwości.

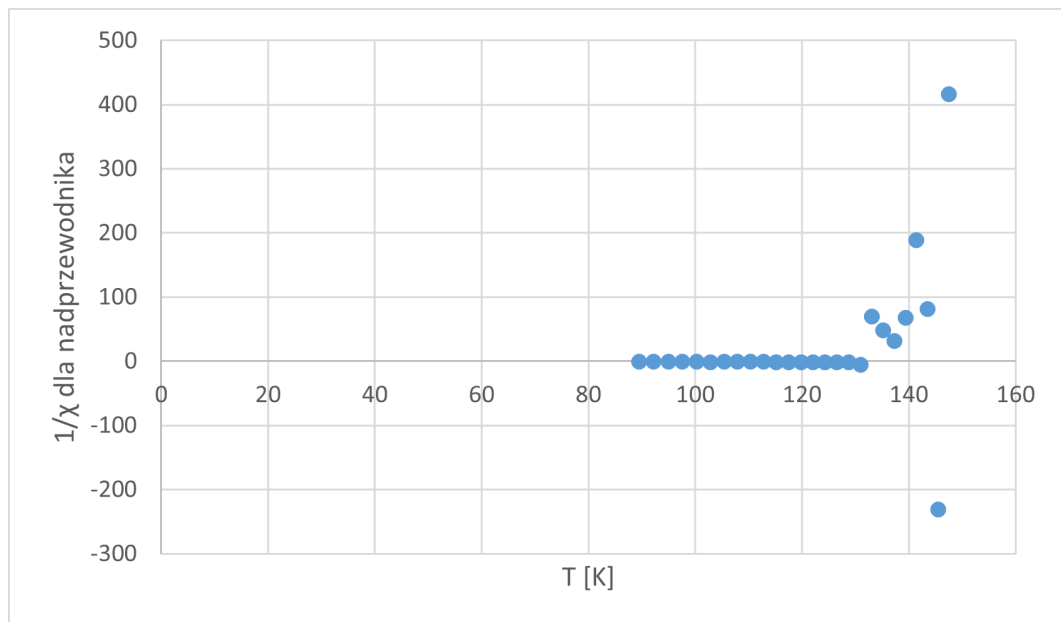
Tab. 3: Wyniki pomiarów i obliczeń przeprowadzonych na próbce nadprzewodnika.

| T [K] | U_{ind} [μV] | χ | $1/\chi$ |
|---------|-----------------------------|---------|-----------|
| 89.45 | -40.70 | -0.9777 | -1.0228 |
| 92.22 | -41.03 | -0.9856 | -1.0146 |
| 94.95 | -40.20 | -0.9657 | -1.0355 |
| 97.62 | -40.77 | -0.9794 | -1.0210 |
| 100.25 | -40.40 | -0.9705 | -1.0304 |
| 102.83 | -40.00 | -0.9609 | -1.0407 |
| 105.37 | -40.51 | -0.9731 | -1.0276 |
| 107.86 | -40.68 | -0.9772 | -1.0233 |
| 110.32 | -40.07 | -0.9626 | -1.0389 |
| 112.74 | -40.31 | -0.9683 | -1.0327 |
| 115.13 | -38.77 | -0.9313 | -1.0737 |
| 117.48 | -36.52 | -0.8773 | -1.1399 |
| 119.80 | -34.52 | -0.8293 | -1.2059 |
| 122.08 | -31.97 | -0.7680 | -1.3021 |
| 124.34 | -30.03 | -0.7214 | -1.3862 |
| 126.57 | -27.27 | -0.6551 | -1.5265 |
| 128.77 | -20.77 | -0.4989 | -2.0042 |
| 130.94 | -7.65 | -0.1838 | -5.4416 |
| 133.09 | 0.60 | 0.0144 | 69.3798 |
| 135.21 | 0.86 | 0.0207 | 48.4045 |
| 137.31 | 1.30 | 0.0312 | 32.0215 |
| 139.39 | 0.61 | 0.0147 | 68.2424 |
| 141.45 | 0.22 | 0.0053 | 189.2177 |
| 143.48 | 0.51 | 0.0123 | 81.6233 |
| 145.50 | -0.18 | -0.0043 | -231.2660 |
| 147.50 | 0.10 | 0.0024 | 416.2789 |

Wykonano wykres $\chi(T)$ znajdujący się poniżej. Wykres $1/\chi(T)$ po nim następujący niestety nie przedstawił żadnej ciekawej zależności.



Rys. 5: Wykres $\chi(T)$ dla próbki nadprzewodnika. Widać że istotnie w niskich temperaturach zachodzi zjawisko nadprzewodnictwa. Temperatura przejścia do stanu nadprzewodzącego wynosi w tym przypadku około 110 K.



Rys. 6: Wykres $\frac{1}{\chi(T)}$ dla próbki nadprzewodnika.

4 Literatura

- 1 Łukasz G., Marcin S., Joanna C. – Laboratorium Fizyki Fazy Skondensowanej
- 2 A. Zięba – Pomiar podatności magnetycznej metodą zmiennoprądową
- 3 https://en.wikipedia.org/wiki/Curie_temperature

Aneks

Tab. 4: Wyniki pomiarów dla próbki gadolinowej. U_{ind} jest odczytem z cewki pomiarowej, natomiast temperatura T_u jest odczytem z woltomierza który można było korzystając z tabelki dostępnej na stanowisku pomiarowym przetłumaczyć na kelwiny.

| T_u [mV] | U_{ind} [μ V] | T_u [mV] | U_{ind} [μ V] | T_u [mV] | U_{ind} [μ V] |
|------------|----------------------|------------|----------------------|------------|----------------------|
| -5.94 | 747 | -3.55 | 805 | -1.25 | 596 |
| -5.8 | 748 | -3.5 | 804 | -1.2 | 588 |
| -5.75 | 753 | -3.45 | 801 | -1.15 | 583 |
| -5.7 | 754 | -3.4 | 803 | -1.1 | 582 |
| -5.65 | 754 | -3.35 | 808 | -1.05 | 574 |
| -5.6 | 755 | -3.3 | 808 | -1 | 573 |
| -5.55 | 755 | -3.25 | 806 | -0.95 | 567 |
| -5.5 | 760 | -3.2 | 808 | -0.9 | 564 |
| -5.45 | 757 | -3.15 | 809 | -0.85 | 562 |
| -5.4 | 759 | -3.1 | 806 | -0.8 | 559 |
| -5.35 | 761 | -3.05 | 803 | -0.75 | 553 |
| -5.3 | 763 | -3 | 803 | -0.7 | 548 |
| -5.25 | 760 | -2.95 | 805 | -0.65 | 546 |
| -5.2 | 762 | -2.9 | 800 | -0.6 | 544 |
| -5.15 | 762 | -2.85 | 799 | -0.55 | 539 |
| -5.1 | 772 | -2.8 | 801 | -0.5 | 532 |
| -5.05 | 774 | -2.75 | 799 | -0.45 | 522 |
| -5 | 775 | -2.7 | 795 | -0.4 | 508 |
| -4.95 | 781 | -2.65 | 789 | -0.35 | 490 |
| -4.9 | 786 | -2.6 | 785 | -0.3 | 466 |
| -4.85 | 783 | -2.55 | 781 | -0.25 | 440 |
| -4.8 | 787 | -2.5 | 776 | -0.2 | 392 |
| -4.75 | 787 | -2.45 | 773 | -0.15 | 260 |
| -4.7 | 788 | -2.4 | 768 | -0.1 | 154 |
| -4.65 | 786 | -2.35 | 760 | -0.05 | 106 |
| -4.6 | 788 | -2.3 | 749 | 0 | 80 |
| -4.55 | 786 | -2.25 | 738 | 0.05 | 69 |
| -4.5 | 788 | -2.2 | 728 | 0.1 | 61 |
| -4.45 | 791 | -2.15 | 721 | 0.15 | 56 |
| -4.4 | 792 | -2.1 | 707 | 0.2 | 48 |
| -4.35 | 792 | -2.05 | 701 | 0.25 | 47 |
| -4.3 | 790 | -2 | 692 | 0.3 | 44 |
| -4.25 | 795 | -1.95 | 678 | 0.35 | 39 |
| -4.2 | 792 | -1.9 | 672 | 0.4 | 40 |
| -4.15 | 797 | -1.85 | 662 | 0.45 | 37 |
| -4.1 | 793 | -1.8 | 654 | 0.5 | 35 |
| -4.05 | 798 | -1.75 | 646 | 0.55 | 37 |
| -4 | 798 | -1.7 | 638 | 0.6 | 32 |
| -3.95 | 795 | -1.65 | 637 | 0.65 | 32 |
| -3.9 | 797 | -1.6 | 627 | 0.7 | 33 |
| -3.85 | 798 | -1.55 | 623 | 0.75 | 29 |
| -3.8 | 799 | -1.5 | 617 | 0.8 | 30 |
| -3.75 | 798 | -1.45 | 615 | 0.85 | 32 |
| -3.7 | 798 | -1.4 | 610 | 0.9 | 27 |
| -3.65 | 802 | -1.35 | 601 | 0.95 | 27 |
| -3.6 | 800 | -1.3 | 596 | 1 | 30 |