

MAGNETYCZNY REZONANS JĄDROWY W POLU MAGNETYCZNYM ZIEMI

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia laboratoryjnego jest uzyskanie w ziemskim polu magnetycznym sygnału rezonansu magnetycznego pochodzącego od jąder wodoru zawartych w wodzie. Wykorzystując zestaw edukacyjny Terranova MRI firmy Magritek, studenci badają procesy relaksacji (relaksację podłużną i relaksację poprzeczną) w wysoce jednorodnym polu magnetycznym Ziemi. Wykorzystanie techniki tomografii magnetycznego rezonansu (sekwencja echa spinowego) umożliwia studentom otrzymanie dwu wymiarowych obrazów badanych fantomów zawierających wodę.

Zagadnienia

Zjawisko magnetycznego rezonansu jądrowego. Czynniki giromagnetyczny i precesja Larmora. Impulsowe metody badania zjawiska magnetycznego rezonansu jądrowego, impulsy: $\pi/2$ oraz π . Równowaga termodynamiczna opisana statystyką Boltzmanna. Relaksacja podłużna (spinowo – sieciowa) charakteryzowana czasem relaksacji T_1 . Relaksacja poprzeczna (spinowo – spinowa) charakteryzowana czasem relaksacji T_2 . Wpływ niejednorodności pola magnetycznego na czas relaksacji poprzecznej (T_2^*). Echo spinowe. Obrazowanie magnetyczno rezonansowe (zastosowanie gradientów pola magnetycznego do kodowania przestrzennego sygnału, przestrzeń odwrotna i przestrzeń obrazowa, transformata Fouriera, sekwencja echa spinowego). Pole magnetyczne Ziemi. Obwód rezonansowy LC. Klatka Faradaya.

Przygotowujący się do ćwiczenia studenci powinni zapoznać się z wymienionymi powyżej zagadnieniami wykorzystując polecaną literaturę lub inne dostępne źródła.

Literatura

Polecana literatura w języku polskim:

- [1] J. W. Hennel, *Wstęp do teorii magnetycznego rezonansu jądrowego*, wydawnictwo Instytutu Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego, Kraków 1997 (wydanie II).
- [2] A. Hryniewicz, E. Rokita, *Fizyczne metody badań w biologii, medycynie i ochronie środowiska*, PWN, Warszawa 1999.
- [3] B. Ciesielski, W. Kuziemski, *Obrazowanie metodą magnetycznego rezonansu w medycynie*, Oficyna Wydawnicza TUTOR, Gdańsk-Toruń 1994; książka jest dostępna w czytelni Biblioteki Instytutu Fizyki UJ.
- [4] <http://pl.wikipedia.org/wiki/NMR> .

Polecana literatura w języku angielskim:

- [5] Joseph P. Hornak, "The Basics of NMR", <http://www.cis.rit.edu/htbooks/nmr/> ; interaktywna prezentacja podstaw magnetycznego rezonansu jądrowego.
- [6] Joseph P. Hornak, "The Basics of MRI", <http://www.cis.rit.edu/htbooks/mri/> ; interaktywna prezentacja obrazowania magnetyczno rezonansowego.
- [7] Meghan E. Halse, „Terranova-MRI Student Guide”, Magritek Limited, 2006; instrukcja może być wypożyczona studentom przystępującym do wykonywania ćwiczenia (jest dostępna w formie drukowanego podręcznika lub w pliku PDF na płycie CD dostarczonej przez producenta).
- [8] Informacje firmy Magritek: <http://magritek.com/products-terranova-overview> .

Plan pracy

1. Omówienie zagadnień fizycznych związanych z ćwiczeniem.
2. Zapoznanie się z aparaturą doświadczalną (zwłaszcza budową układu cewek) i programem *Prospa* nadzorującym pracę konsoli rezonansu magnetycznego.
3. Ustawienie układu cewek w polu magnetycznym Ziemi.
4. Pomiar poziomu zakłóceń wewnątrz klatki Faradaya.
5. Dostrojenie cewki nadawczo - odbiorczej do częstości rezonansu.
6. *Shimowanie* układu - korekta prądów offsetowych w cewkach gradientowych.
7. Eksperymentalne wyznaczenie czasu trwania impulsów $\pi/2$ oraz π .
8. Pomiar czasu relaksacji (podłużnej i poprzecznej) w fantomach zawierających wodę destylowaną oraz wodę z dodatkiem jonów skracających czasy relaksacji.
9. Obrazowanie wybranych fantomów z wykorzystaniem sekwencji echa spinowego.

Przygotowanie do ćwiczenia

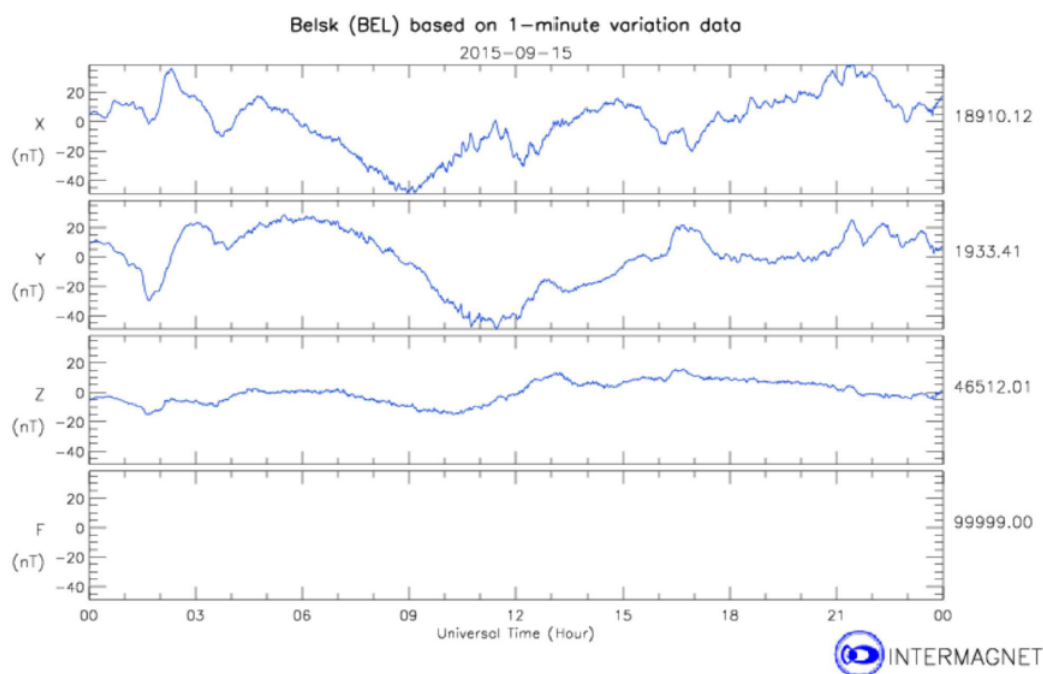
Pomiary odbywają się w polu magnetycznym Ziemi. Przed rozpoczęciem pracy laboratoryjnej studenci proszeni są o połączenie się ze stroną internetową Instytutu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk: <http://www.igf.edu.pl/zespól-observacji-geomagnetycznych.php>. Zespoły Obserwacji Geomagnetycznych wykonują pomiary naturalnego ziemskiego pola magnetycznego. Ciągłe rejestracje zmian pola magnetycznego Ziemi wykonuje między innymi stacja w Belsku ($\varphi=51^{\circ}50.2'$ N, $\lambda=20^{\circ}47.5'$ E). Na stronach internetowych <http://www.intermagnet.org/data-donnee/dataplot-eng.php> (należy wybrać stację pomiarową, np. Belsk z oznaczeniem kodowym BEL) lub <http://rtbel.igf.edu.pl/> prezentowane są bieżące dane geomagnetyczne (zob. rysunek 1 poniżej, dane dobowe z dnia 15 września 2015 r.).



INTERMAGNET

Home > INTERMAGNET Data > Data - Plotting Service - Results

Data - Plotting Service - Results



Rys. 1 Przykładowy wykres dobowych magnetogramów w trzech ortogonalnych kierunkach. Wartość indukcji magnetycznej podana została w nano teslach.

Można także, po wprowadzeniu współrzędnych geograficznych Instytutu Fizyki do kalkulatora dostępnego na stronie internetowej <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/> uzyskać estymowaną wartość deklinacji magnetycznej. Uwaga: elementy konstrukcji budynku (np. pręty zbrojeniowe) mogą wpływać na wypadkowe pole magnetyczne).

Oddziaływanie jąder z polem magnetycznym jest związane z ich precesją wokół osi równoległej do kierunku pola i z częstością ω_0 proporcjonalną do jego indukcji B_0 . Częstość Larmora wyraża wzór

$$\omega_0 = \gamma B_0$$

Czynnik giromagnetyczny γ dla jąder wodoru wynosi $267,513 \cdot 10^6 \text{ rad s}^{-1} \text{ T}^{-1}$.

Proszę wyrazić w Hz częstotliwość rezonansową dla jąder wodoru w wypadkowym polu magnetycznym Ziemi (w dniu wykonywania ćwiczenia i dla położenia geograficznego II Pracowni Fizycznej).

Na podstawie przybliżonego wzoru

$$M = \frac{e^{\frac{2\mu B_0}{k_B T}} - 1}{e^{\frac{2\mu B_0}{k_B T}} + 1} \cong \frac{\mu B_0}{k_B T} = \frac{\gamma \hbar B_0}{2k_B T}$$

(w którym $\hbar$ wyraża zredukowaną stałą Plancka albo stałą Diraca, a k_B to stała Boltzmanna) proszę oszacować magnetyzację jądrową protonów w wodzie o temperaturze pokojowej znajdującą się w ziemskim polu magnetycznym. Używany w ćwiczeniu Z – 50 system Terranova – MRI zwiększa tą magnetyzację za pomocą cewki polaryzującej, przez którą płynie prąd o maksymalnej wartości 6 A wytwarzający pole magnetyczne o indukcji 0,018 T. Proszę oszacować wielkość tak uzyskanej magnetyzacji.

W typowym medycznym tomografie rezonansu magnetycznego pole magnetyczne o indukcji 1,5 T wytwarza prąd płynący w nadprzewodzącym uzwojeniu elektromagnesu. Proszę oszacować wielkość magnetyzacji wody podgrzanej do temperatury ciała człowieka i umieszczonej w takim tomografie.

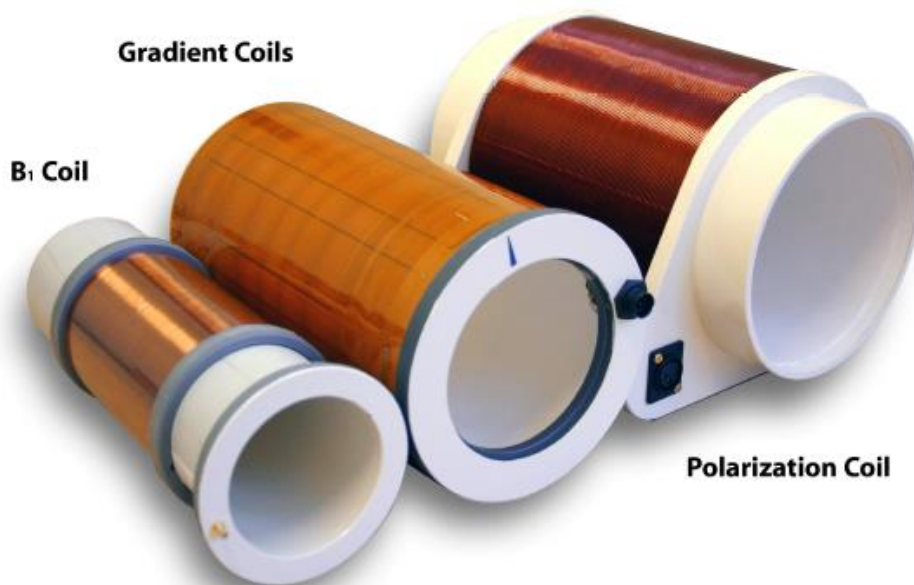
Na terenie II Pracowni Fizycznej uruchamiane są silne elektromagnesy, których pole rozproszone może dodawać się do pola ziemskiego w miejscu wykonywania ćwiczenia. Proszę wyznaczyć, jakie pole magnetyczne (dodane do pola ziemskiego) zwiększy o 5 Hz częstotliwość obserwowanego w ćwiczeniu Z – 50 rezonansu magnetycznego.

Studenci proszeni są o wykonanie powyższych zadań przed przystąpieniem do ćwiczenia oraz do przedstawienia wyników obliczeń asystentowi prowadzącemu ćwiczenie.

Sprawozdanie z ćwiczenia Z – 50 powinno zawierać krótkie wprowadzenie teoretyczne wyjaśniające podstawy magnetycznego rezonansu jądrowego oraz rezultaty rozważań przedstawionych powyżej zagadnień.

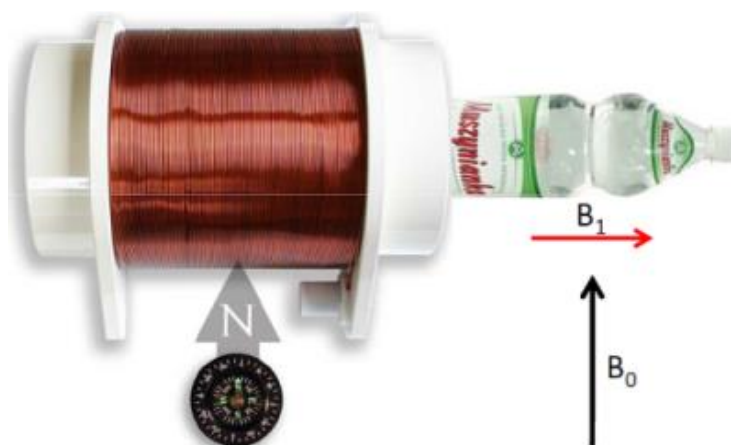
Ustawienie układu cewek i rozpoczęcie pomiarów

System Terranova MRI wyposażony jest w układ cewek przedstawionych na zdjęciu.

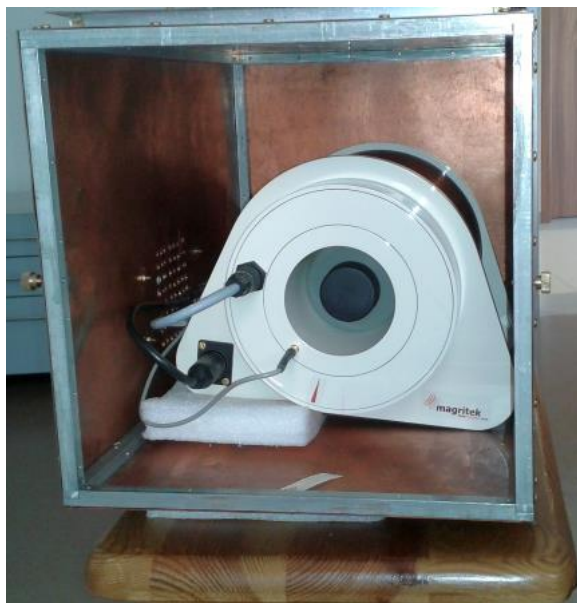


Rys. 2 Współosiowe karkasy: cewki nadawczo – odbiorczej (solenoid), zespołu trzech cewek gradientowych (kierunek inklinacji został oznaczony strzałką), cewki polaryzującej (solenoid).

Wewnątrz tego układu znajduje się cewka nadawczo – odbiorcza (radioczęstości) wytwarzająca ortogonalne (przy ustawieniu zgodnym z rys. 3) do ziemskiego pole B_1 . Współosiowo z nią zamontowany jest cylindryczny karkas z trzema zespołami cewek wytwarzającymi trzy niezależne pola magnetyczne o kierunkach zgodnych z polem ziemskim ale różniące się liniowym gradientem tego pola w trzech wzajemnie ortogonalnych kierunkach. Ważne jest aby kierunek zaznaczony na karkasie strzałką pokrywał się z inklinacją pola ziemskiego (rys. 4). Najbardziej zewnętrzna cewka (solenoid) wytwarza silne pole magnetyczne o maksymalnej indukcji 0,018 T przed każdym eksperymentem. Pole to zwiększa magnetyzację jądrową badanej próbki ale ze względu na współosiową konstrukcję zespołu cewek jest ortogonalne do pola ziemskiego. Układ sterujący konsoli, przed rozpoczęciem każdego pomiaru, włącza i po zadanym czasie wyłącza prąd płynący w tej cewce w kontrolowany sposób, pozwalający spinom jąder na adiabatyczną zmianę ustawienia do kierunku pola ziemskiego. Duża wartość tego prądu rozgrzewa uzwojenie cewki, dlatego układ pomiarowy wymaga chłodzenia powietrzem.

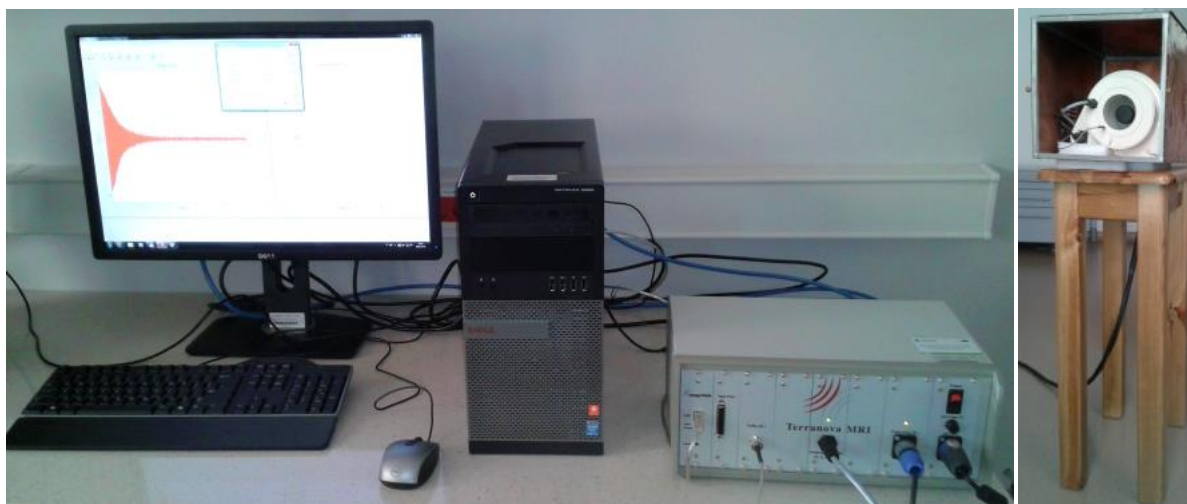


Rys. 3 Ustawienie zespołu cewek ortogonalnie do kierunku północ – południe.



Rys. 4 Ustawienie zespołu cewek wewnątrz małej klatki Faradaya w taki sposób, by kierunek gradientu „z” pokrywał się z inklinacją ziemskiego pola magnetycznego.

Wewnątrz pustego obszaru otoczonego cewką nadawczo – odbiorczą umieszcza się badany obiekt. Należy zwrócić uwagę na rozmiar tej cewki i przedyskutować z prowadzącym ćwiczenie położenie tego przedmiotu wzdłuż osi cewki. W dyskusji przydatna będzie wiedza o rozkładzie pola magnetycznego wewnątrz solenoidu i blisko jego brzegów.

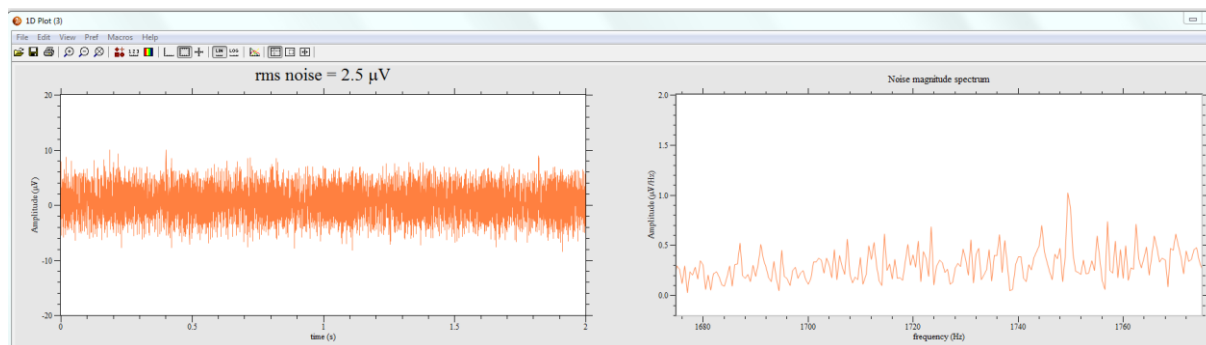


Rys. 5 Zestaw pomiarowy: układ cewek w klatce Faradaya podłączony do konsoli Terranova-MRI sterowanej poprzez USB oprogramowaniem *Prospa*.

Po włączeniu komputera i uruchomieniu systemu Windows należy włączyć konsolę Terranova, a następnie uruchomić oprogramowanie *Prospa* (ikona dostępna z pulpitu, obecnie zainstalowana jest najnowsza wersja V 3.34). Polecenia wybiera się z rozwijanej listy (rys. 6). Przed rozpoczęciem pomiarów należy zmierzyć wartość szumów odbieranych przez cewkę odbiorczą wewnątrz klatki Faradaya w interesującym nas zakresie częstotliwości (rys. 7). Amplituda szumów nie powinna przekraczać wartości $8 \mu V_{RMS}$.

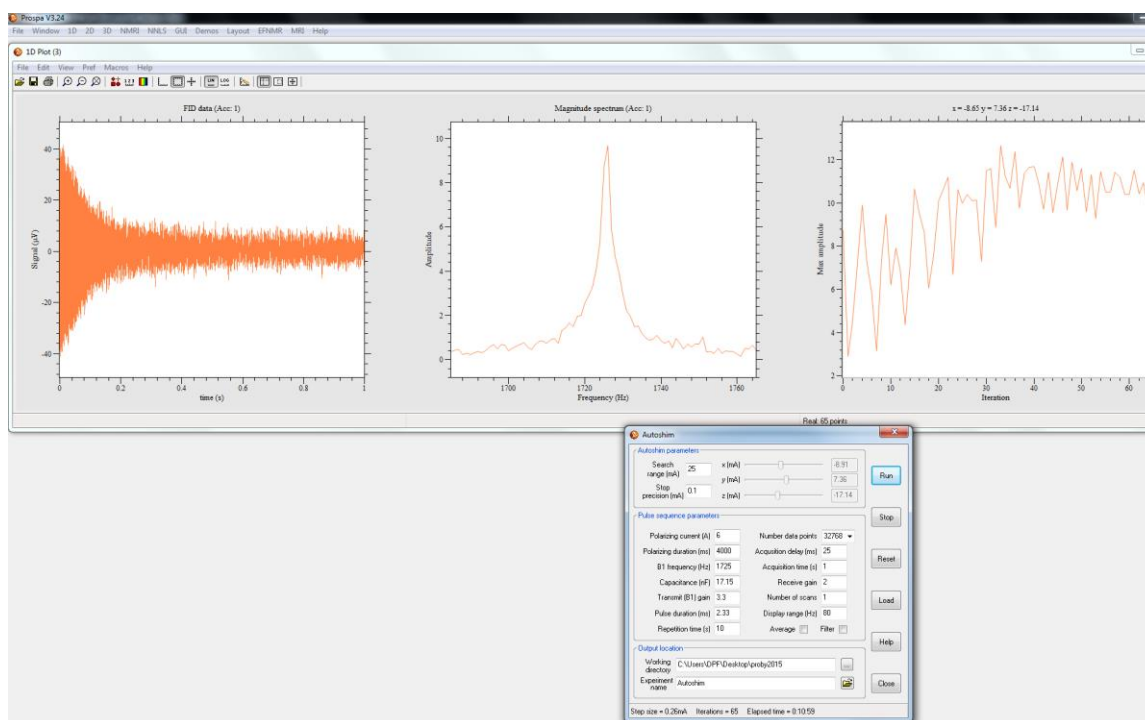


Rys. 6 Oprogramowanie konsoli *Prospa*, zakładka *Earth Field Nuclear Magnetic Resonance (EFNMR)*. Wybór procedury wykonującej pomiar poziomu szumów.



Rys. 7 Pomiar poziomu szumów odbieranych przez cewkę wewnątrz klatki Faradaya w interesującym nas zakresie częstotliwości (prawe okno pokazuje widmo fourierowskie odbieranego przez cewkę sygnału).

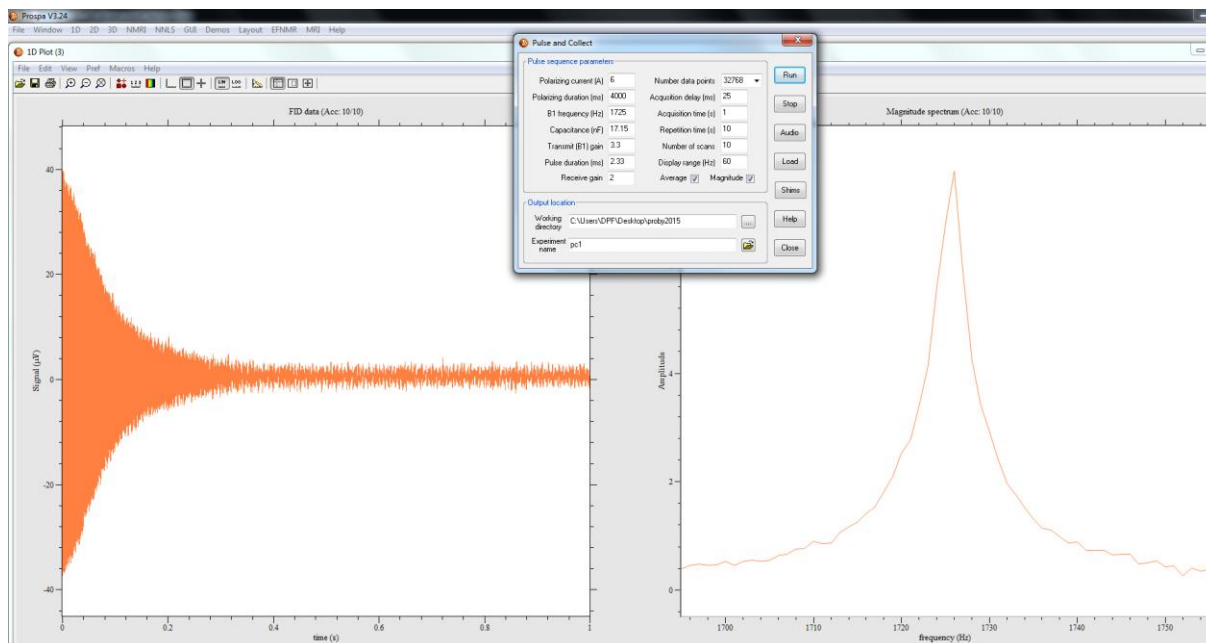
Wspólnie z prowadzącym ćwiczenie należy wywołać procedury służące analizie częstości własnej cewki (*AnalyseCoil*) oraz określeniu długości czasu trwania impulsów (*B1Duration*). Przed rozpoczęciem pomiarów należy wskazać katalog, do którego zapisywane będą wszystkie pomiary, a następnie podać parametry takie jak: prąd płynący przez cewkę polaryzującą i czas trwania polaryzacji, częstotliwość impulsu B_1 oraz czas jego trwania dla impulsu π i impulsu dwukrotnie dłuższego, pojemność dostrajającą cewkę i inne parametry uzgodnione z prowadzącym ćwiczenie. Należy przeprowadzić *shimowanie* cewek gradientowych (rys. 8).



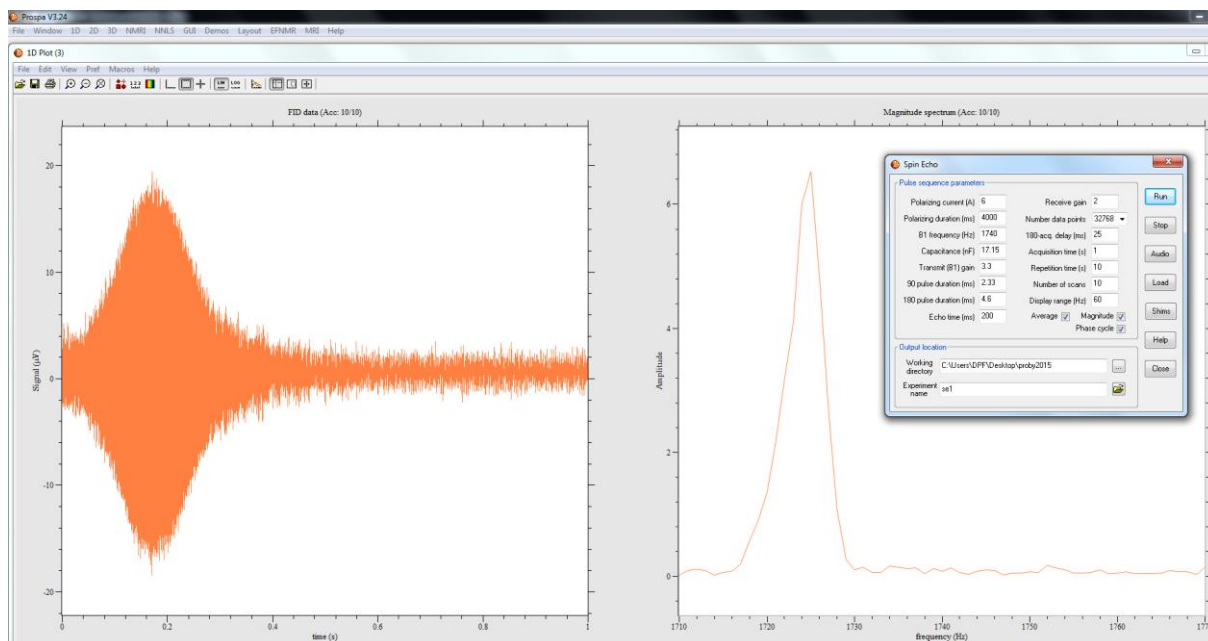
Rys. 8 Rezultat wywołania procedury AutoShim.

Oprogramowanie konsoli automatycznie uwzględni rezultat działania procedury AutoShim w następnych pomiarach

Kolejnymi pomiarami fantomu zawierającego wodę destylowaną są: pomiar sygnału swobodnej precesji (procedura *PulseAndCollect*, rys. 9) oraz sygnału echa spinowego (*SpinEcho*, rys. 10). Z prowadzącym ćwiczenie należy przedyskutować parametry sekwencji ustalające opóźnienie odbioru, czas echa, wzmacnienie odbiornika i rejestrowane pasmo częstotliwości, ewentualne uśrednienie wielokrotnie wykonanego pomiaru.

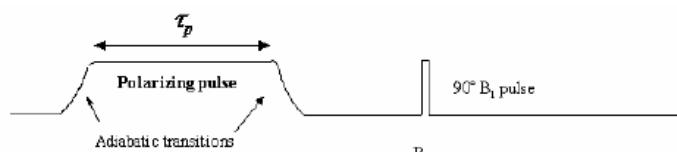
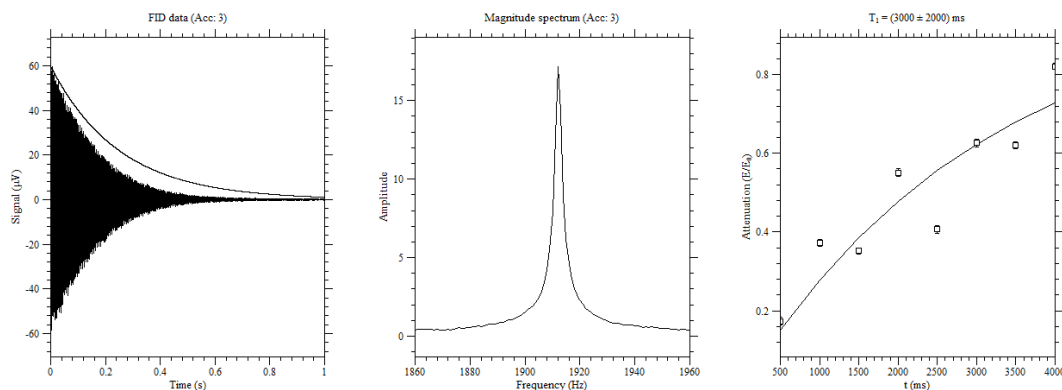


Rys. 9 Sygnał swobodnej precesji (FID) i jego widmo w domenie częstotliwości.

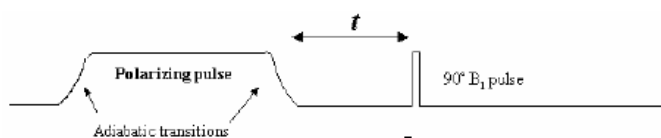


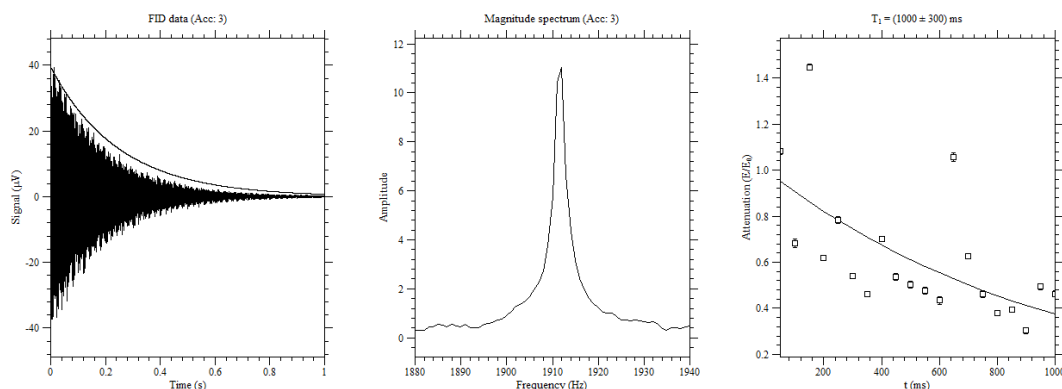
Rys. 10 Sygnał echa spinowego i jego widmo w domenie częstotliwości.

Pomiar czasu relaksacji podłużnej T_1 można zrealizować zmniejszając czas trwania polaryzacji próbki τ_p (sekwencja $T1Bp$, rys. 11) i mierząc wartość (*magnitude*) sygnału swobodnej precesji (konsola wykonuje ten pomiar automatycznie, rys. 12).

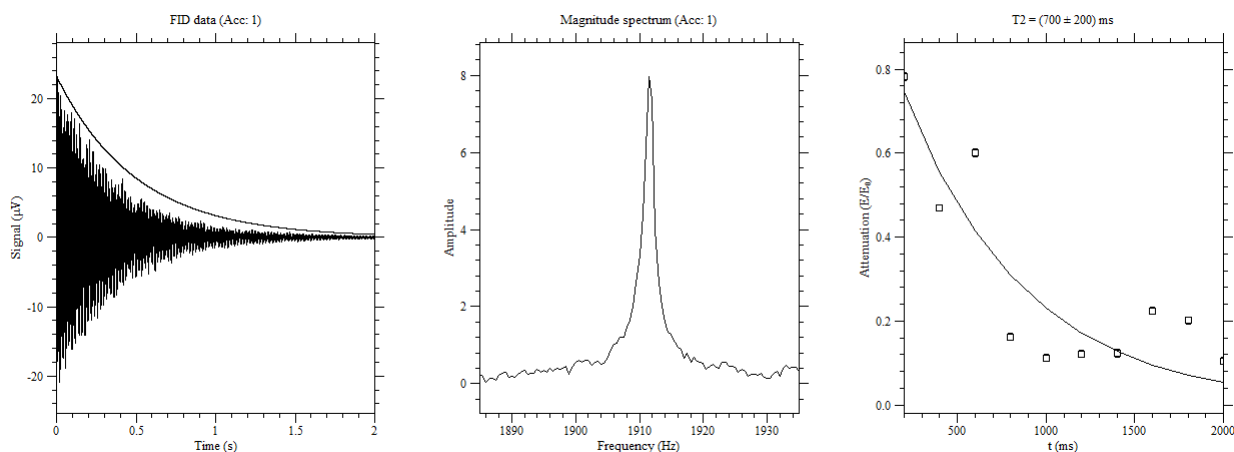
Rys. 11 Sekwencja $T1Bp$.Rys. 12 Pomiar czasu T_1 sekwencją $T1Bp$.

Pomiar czasu relaksacji podłużnej T_1 można także zrealizować zmieniając czas t pomiędzy zakończeniem polaryzowania próbki a podaniem impulsu $\pi/2$ (sekwencja $T1Be$, rys. 13) i mierząc wartość (*magnitude*) sygnału swobodnej precesji (konsola wykonuje ten pomiar automatycznie, rys. 14).

Rys. 13 Sekwencja $T1Be$.

Rys. 14 Pomiar czasu T_1 sekwencją $T1Be$.

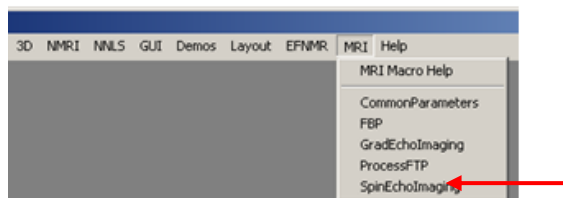
Pomiar czasu relaksacji poprzecznej T_2 można zrealizować zmieniając tak zwany czas echa, czyli czas pomiędzy podaniem impulsu $\pi/2$ i podaniem impulsu π (sekwencja T_2) i mierząc wartość (*magnitude*) sygnału swobodnej precesji (konsola wykonuje ten pomiar automatycznie, rys. 15).

Rys. 15 Pomiar czasu T_2 sekwencją T_2 .

Pomiary czasu relaksacji podłużnej i czasu relaksacji poprzecznej należy wykonać dla różnych próbek: wody destylowanej, wody mineralnej (proszę zwrócić uwagę na jej skład), wodnego roztworu siarczanu miedzi (II) o stężeniu 0,2 %. Jaki na zmianę czasów relaksacji wpływa obecność jonów miedzi w roztworze?

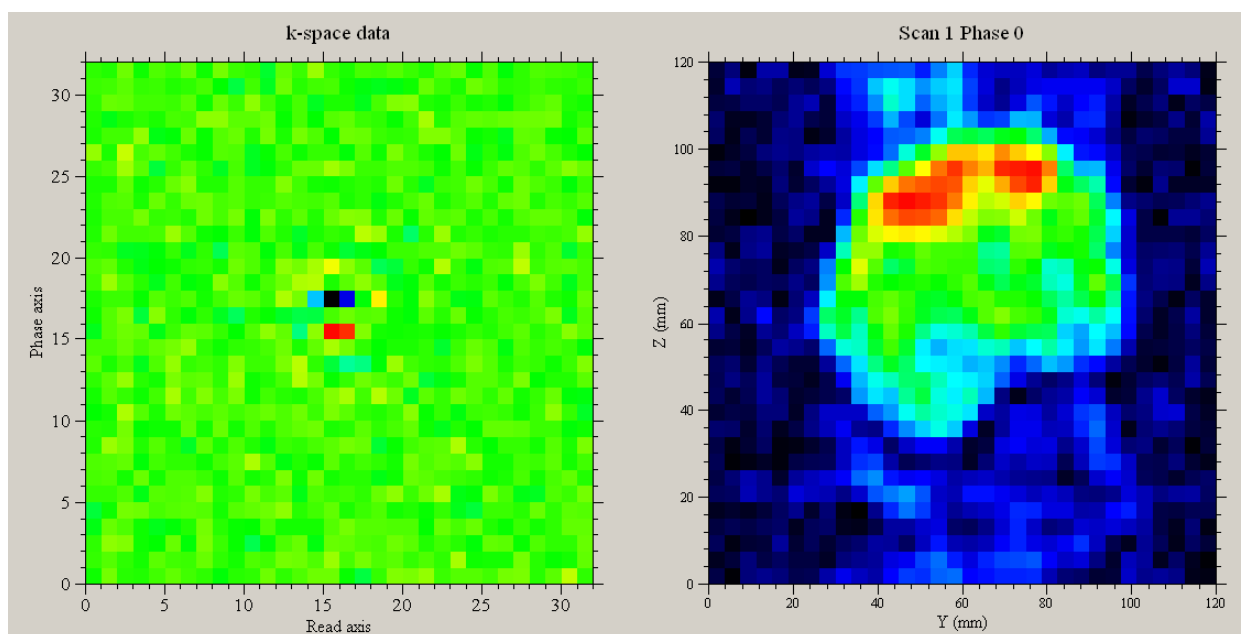
Proszę zwrócić uwagę na wykresy przedstawione na rysunkach: 12, 14 i 15. Pomiary wykonano w poprzednim budynku Instytutu Fizyki UJ (przy ul. Reymonta 4 w Krakowie). Częstotliwość rezonansowa wynosiła wtedy 1910 Hz). Proszę porównać tę wartość z otrzymaną w pomiarach i przedyskutować wynik (z prowadzącym ćwiczenie oraz w sprawozdaniu).

Dwuwymiarowe obrazowanie magnetyczno rezonansowe wykonuje się po wywołaniu procedury *SpinEchoImaging* (procedura echa spinowego) – zobacz rysunek 16. Parametry obrazowania, takie jak obszar (Field of View – FOV), wybór płaszczyzny i grubości warstwy, pasmo odbiornika, czas echa, rozdzielczość, ewentualne iteracje i ich uśrednienie należy przedyskutować z prowadzącym ćwiczenie.



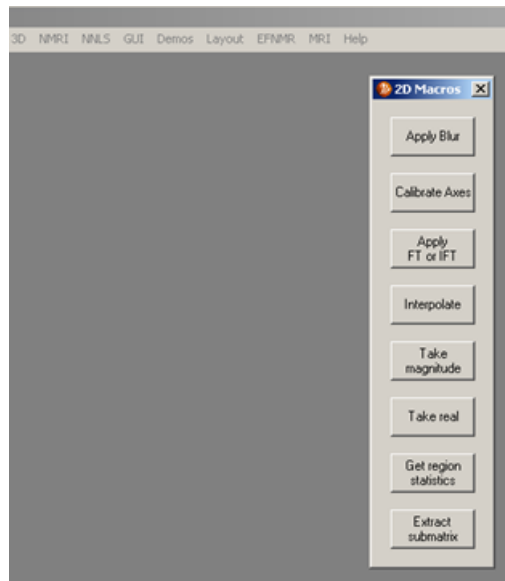
Rys. 16 Panel sekwencji obrazujących.

Proces obrazowania można śledzić w osobnym oknie (rys. 17). Oprogramowanie konsoli uzupełnia macierz danych (przestrzeń k) po każdej zmianie gradientu i na bieżąco rekonstruuje obraz (rys. 17).



Rys. 17 Macierz przestrzeni odwrotnej (k -space) i zrekonstruowany obraz. Proszę wyjaśnić położenie pęcherzyka powietrza w fantomie (którym była butelka z wodą) oraz na zrekonstruowanym obrazie.

Pomiary wykonane w ziemskim polu magnetycznym i przy niewielkiej magnetyzacji próbek charakteryzują się dużymi szumami. Można je badać porównując uśrednione wartości sygnałów zebranych z obszaru wypełnionego cieczą zawierającą jądra wodoru i obszaru gdzie nie było cieczy. Służy do tego zestaw procedur statystycznych (rys. 18).



Rys. 18 Zestaw procedur statystycznych (*Get_region_statistics*) do analizy obrazów 2D.

Na zrekonstruowanym obrazie należy wybrać i zaznaczyć obszar, a następnie poleceniem *Get_region_statistics* uzyskać informację o średniej wartości sygnału (bądź szumu). Proszę przedyskutować z prowadzącym ćwiczenie wpływ wykonania kilku iteracji (i uśrednienia) obrazowania na wartość stosunku sygnału do szumu.