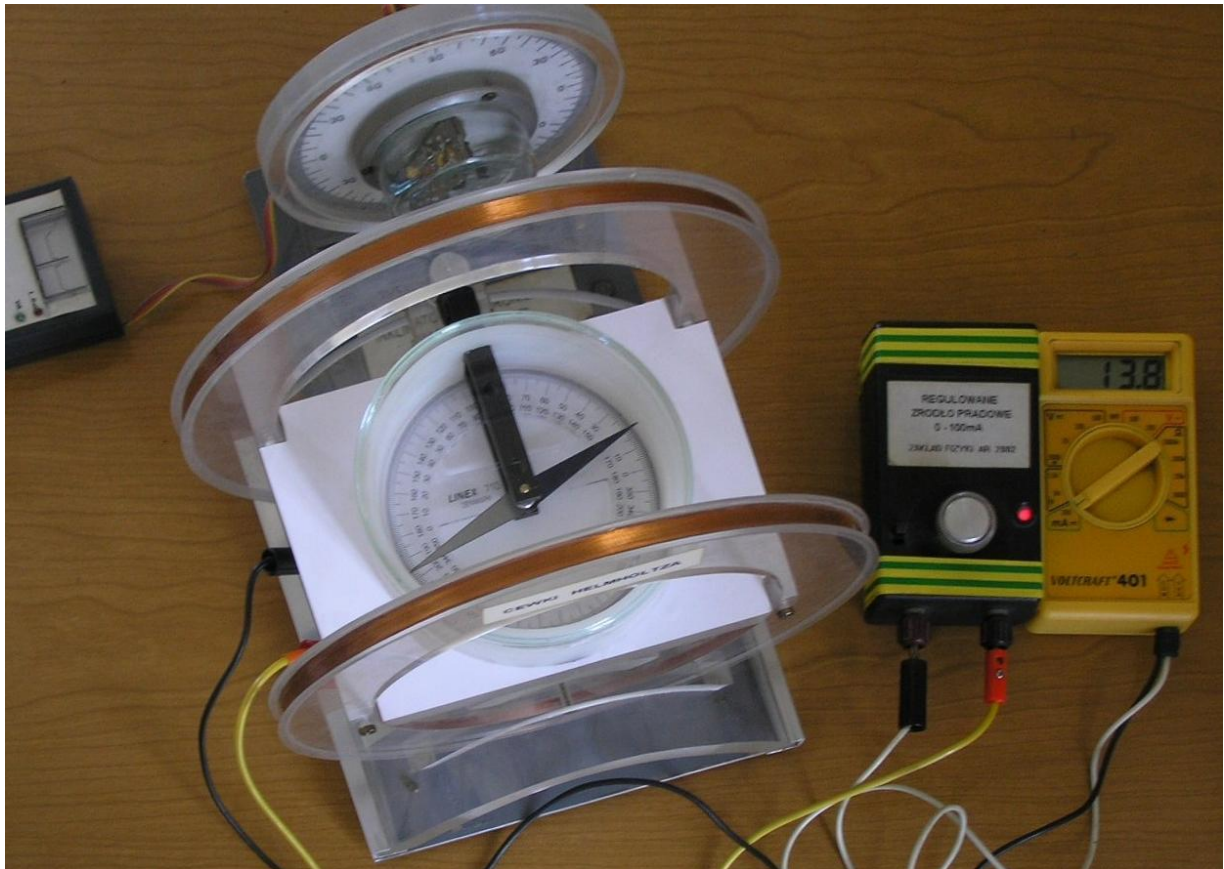


Piotr Janas, Paweł Turkowski  
Zakład Fizyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

# ĆWICZENIE 30

## POMIARY ZIEMSKIEGO POLA MAGNETYCZNEGO

Kraków, 31.05.2021



Modyfikacja ćwiczeń z przedmiotu Fizyka w ramach projektu  
pn. „Innowacyjny program strategicznego rozwoju Uczelni”  
o numerze POWR.03.05.00-00-Z020/18

---

Projekt „Innowacyjny program strategicznego rozwoju Uczelni” jest współfinansowany  
w ramach Unii Europejskiej z Europejskiego Funduszu Społecznego



Rzeczpospolita  
Polska

Unia Europejska  
Europejski Fundusz Społeczny



## SPIS TREŚCI

### CZEŚĆ TEORETYCZNA

Pole magnetyczne i czujniki pola magnetycznego  
Linie pola magnetycznego  
Pole jednorodne i niejednorodne. Bieguny magnetyczne  
Dipol magnetyczny  
Ziemskie pole magnetyczne  
Pole magnetyczne jest wektorem  
Wektor natężenia pola magnetycznego  $H$   
Cewki Helmholtza  
Wektor indukcji magnetycznej  $B$   
Zapis siły Lorentza w postaci wektorowej  
Metoda pomiaru składowej poziomej ziemskiego pola magnetycznego  
Pomiar inklinacji

### LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA INSTRUKCJA DO WYKONANIA ĆWICZENIA

#### ZAKRES WYMAGANYCH WIADOMOŚCI

Wektory, dodawanie wektorów, rozkład wektora na składowe, iloczyn wektorowy.  
Pole magnetyczne, czujniki pola magnetycznego. Linie pola magnetycznego. Pole magnetyczne jednorodne i niejednorodne. Dipol magnetyczny. Ziemskie pole magnetyczne. Inklinacja magnetyczna i deklinacja magnetyczna. Bieguny magnetyczne Ziemi. Biegun północny i południowy. Zmiany ziemskiego pola magnetycznego: w skali dni, lat i setek tysięcy lat. Paleomagnetyzm.  
Wektor indukcji magnetycznej  $B$ , wektor natężenia pola magnetycznego  $H$ , jednostki.  
Natężenie pola magnetycznego wewnątrz pojedynczego zwoju. Cewki Helmholtza.  
Metoda pomiaru składowej poziomej ziemskiego pola magnetycznego za pomocą busoli stycznych.

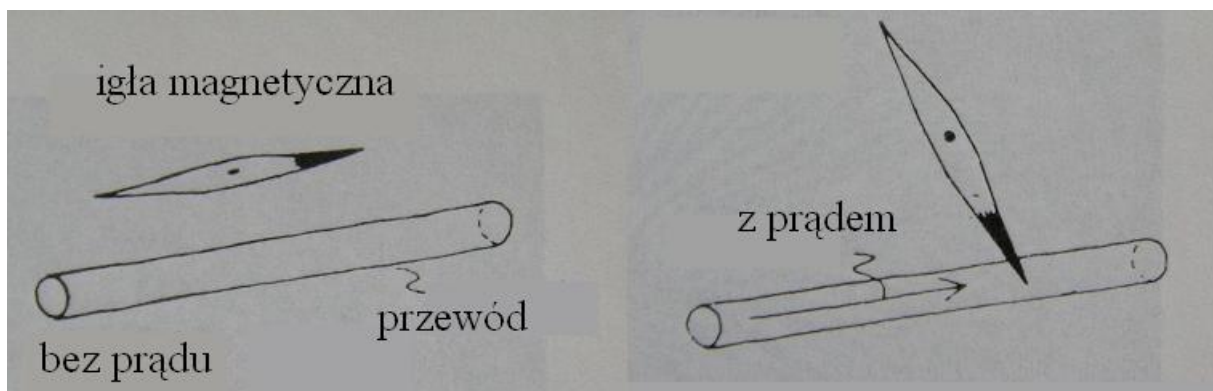
## CZĘŚĆ TEORETYCZNA

### 1. Pole magnetyczne i czujniki pola magnetycznego

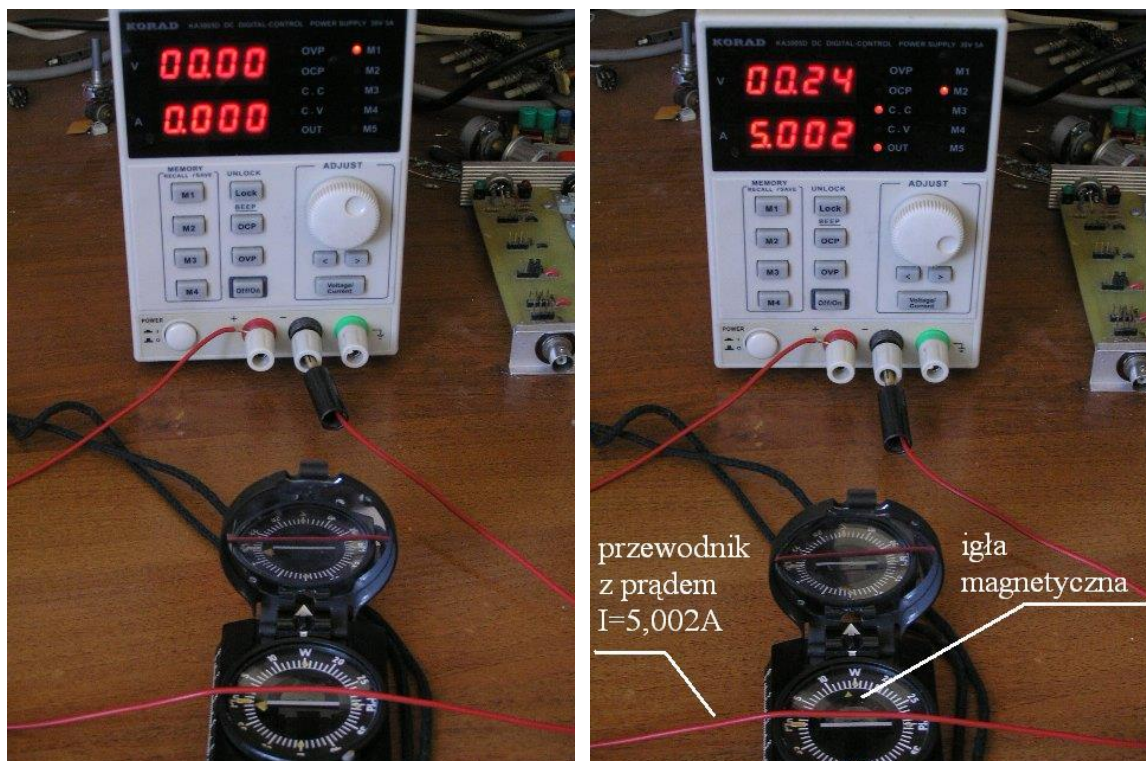
Magnesy trwałe wykonane są z materiałów ferromagnetycznych np. ze związków żelaza, kobaltu, niklu, neodymu i mogą mieć różne kształty: sztabki, podkowy i inne. Igła magnetyczna np kompasu lub busoli jest także niewielkim magnesem, który może obracać się swobodnie wokół osi ustawionej pionowo. Igła umieszczona w pobliżu magnesu ustawia się w określony sposób (Rys.1.). Podobnie zachowuje się igła umieszczona w pobliżu przewodnika, przez który przepływa prąd elektryczny (Rys.2 i Rys.3). Mówimy, że w przestrzeni w pobliżu magnesu i przewodnika z prądem istnieje **pole magnetyczne**, którego obecność wykazuje igła magnetyczna.



Rys.1. Magnes w kształcie podkowy i igła kompasu w pobliżu magnesu. Foto ZF UR



Rys.2. Prostoliniowy przewodnik i igła kompasu w sytuacji płynie prąd o dużym natężeniu

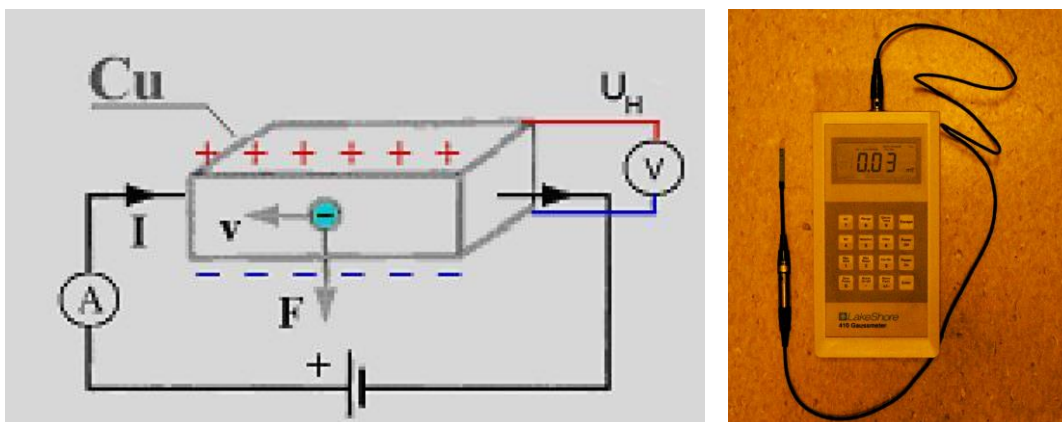


Rys.4. Igła magnetyczna umieszczona pod przewodnikiem, w którym płynie prąd o natężeniu 5A ustawia się prostopadle do przewodnika (fotografia po prawej). Foto ZF UR

Igła magnetyczna jest przykładem **czujnika pola magnetycznego**, czyli urządzenia służącego do wykazywania jego obecności. Spośród wielu innych czujników pola magnetycznego wymienimy często spotykane: czujniki magnetorezystancyjne (MR sensors) zmieniające opór elektryczny pod wpływem pola magnetycznego (Rys.5) i czujniki Halla, tzw. hallotrony.



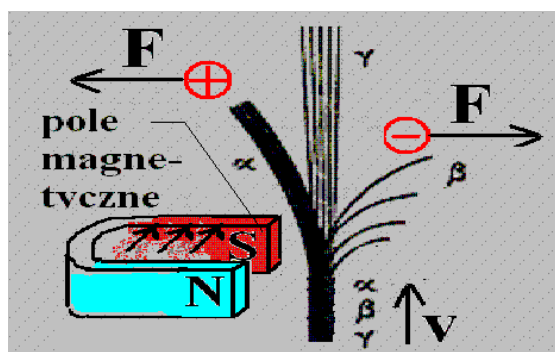
Rys.5. Igła magnetyczna i stosowany w naszym ćwiczeniu czujnik magnetorezystancyjny KMZ10A firmy Philips o wymiarach 4.8x5.2x1.8mm



Rys.6. Zasada działania hallotronu. Po prawej – hallotronowy miernik pola magnetycznego.

Czujnik Halla (czytaj „hola”) jest niewielkim elektronicznym urządzeniem o czterech elektrodach (Rys.6). Pomiedzy dwoma elektrodami czujnika przepływa prąd elektryczny o znanym i stabilizowanym natężeniu ( $I$ ). Prąd elektryczny jest uporządkowanym ruchem ładunków elektrycznych. W obecności pola magnetycznego na każdy z tych ładunków działa siła zwana **siłą Lorentza** odchylająca nieco kierunek ruchu elektronów od kierunku pierwotnego. W efekcie na pozostałych dwu elektrodach hallotronu pojawia się napięcie  $U_H$  zwane napięciem Halla tym większe im silniejsze jest pole magnetyczne.

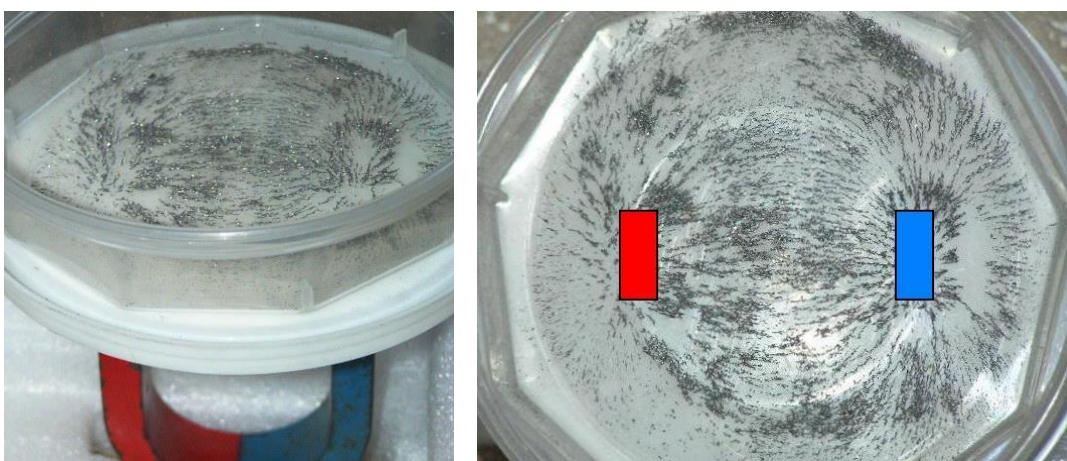
Ponieważ igła magnetyczna nie zawsze jest w stanie zarejestrować obecność pola magnetycznego, np. gdy jest ono zbyt słabe lub podlega szybkim zmianom, możemy przyjąć, że **w przestrzeni istnieje pole magnetyczne gdy na poruszający się w tej przestrzeni ładunek elektryczny działa siła Lorentza** (Rys.7).



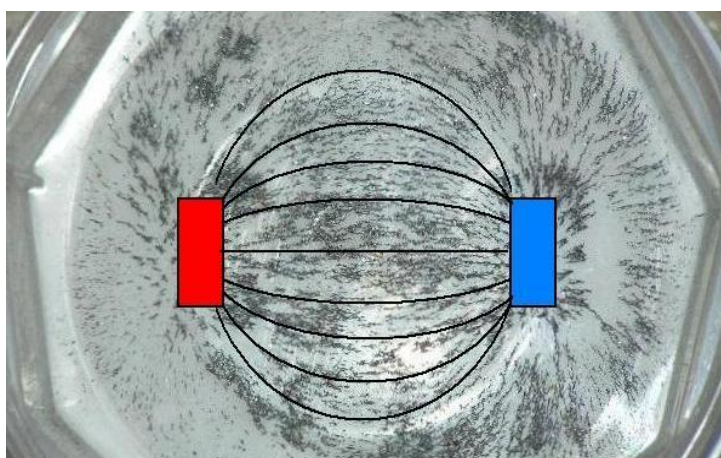
Rys.7. Ilustracja efektu działania siły Lorentza  $F$ . Naładowane elektrycznie cząstki  $\alpha (+)$  oraz  $\beta (-)$  przebiegając przez obszar pola magnetycznego ulegają odchyleniu od pierwotnego kierunku podczas gdy promieniowanie  $\gamma$  biegnie nadal torem prostoliniowym

## Linie pola magnetycznego

Jednym ze sposobów obrazowania pola magnetycznego jest wykreślanie **linii pola magnetycznego**. Rysunek linii pola można uzyskać kładąc na magnes kartkę papieru i posypując ją drobnymi opiłkami stalowymi. Opiłki układają się w łańcuchy wzdłuż linii pola (Rys.8). Innym sposobem określania przebiegu linii pola jest posłużenie się igłą magnetyczną. W obecności pola magnetycznego igła ustawia się **stycznie do linii pola**.



Rys.8. Opiłki żelazne w polu magnetycznym magnesu. Foto ZF UR



Rys.9. Linie pola magnetycznego wykreślone w pobliżu magnesu

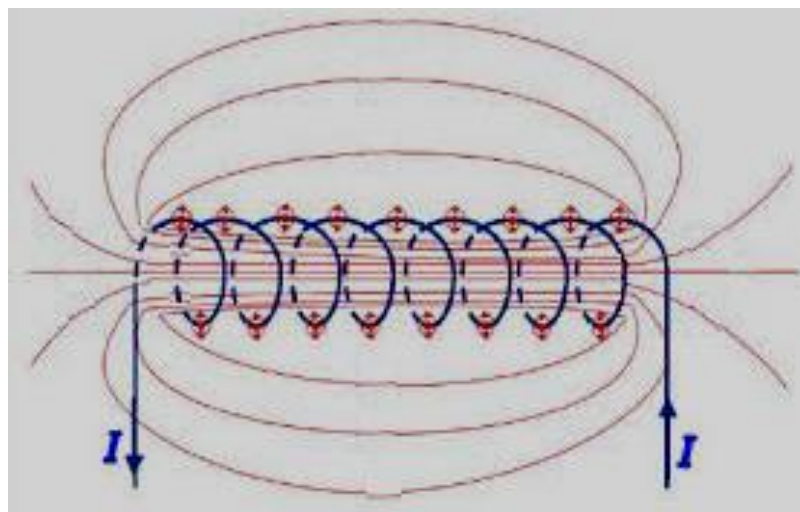


## Pole jednorodne i niejednorodne. Bieguny magnetyczne

Przyjmujemy, że **kierunek pola magnetycznego jest styczny do linii pola magnetycznego**. Oprócz informacji o kierunku linii pola niosą informację o tym gdzie pole jest silne a gdzie jest słabsze. W miejscach gdzie pole jest silniejsze linie **zagęszczają się**. Zagęszczenia takie obserwujemy szczególnie w pobliżu obu końców magnesu sztabkowego lub magnesu w kształcie podkowy. Te dwa miejsca nazywamy **biegunami magnetycznymi**. Jeśli linie są równoległe i równo od siebie oddalone to mówimy, że pole jest **jednorodne**. Otrzymanie pola jednorodnego wymaga specjalnych zabiegów i najczęściej mamy do czynienia z polem mniej lub bardziej **niejednorodnym**, takim jak w pobliżu biegunów magnesu.

Stosunkowo jednorodne pole magnetyczne występuje **wewnątrz długiej zwojnicy** (cewki), przez którą płynie prąd elektryczny (Rys.10). W ćwiczeniu do otrzymania jednorodnego pola magnetycznego nie użyjemy zwojnicy lecz opisanego poniżej układu zwojnic zwanych cewkami Helmholtza. Dwa zagęszczenia linii pola w pobliżu końców cewki to dwa bieguny magnetyczne.

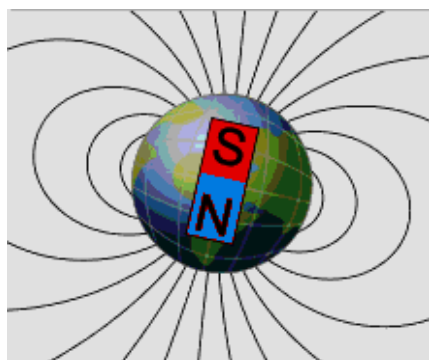
W przyrodzie istnieją przypuszczalnie wyłącznie układy dwu biegunów (**dipole magnetyczne**) lub układy parzystej ich liczby. W konsekwencji braku istnienia pojedynczych biegunów magnetycznych linie pola magnetycznego tworzą zawsze zamknięte pętle (Rys.10).



Rys.10. Linie pola magnetycznego zwojnicy mają charakter dipolowy (dwubiegunowy) tzn występują dwa obszary zagęszczeń linii w pobliżu końców zwojnicy. Wewnątrz zwojnicy pole jest w wysokim stopniu jednorodne – linie są równoległe

## Ziemskie pole magnetyczne

**Ziemskie pole magnetyczne** ma charakter dipolowy tzn. przypomina pole wielkiego magnesu stałego lub pojedynczej cewki, przez którą płynie prąd elektryczny.



Rys.11. Uproszczony obraz linii ziemskiego pola magnetycznego

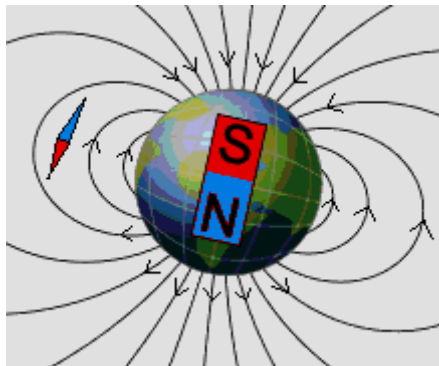
Linie pola magnetycznego w okolicy równika są równoległe do powierzchni Ziemi a im bliżej biegunów geograficznych tym wektory pola magnetycznego przyjmują kierunki bliższe pionowemu. Nachylenie linii w stosunku do kierunku poziomego w danym miejscu nazywa się **inklinacją magnetyczną**. W Krakowie wektor pola magnetycznego jest nachylony wzg. poziomemu o kąt  $65,5^\circ$  (inklinacja  $\varphi=65,5^\circ$ ). Dla nawigacji większe znaczenie ma fakt, że linie ziemskiego pola magnetycznego rzutowane na powierzchnię Ziemi są mniej lub bardziej odchylone od kierunku północ-południe. To odchylenie nazywa się **deklinacją magnetyczną**. W Krakowie pozioma składowa wektora pola magnetycznego skierowana jest  $0,5^\circ$  na zachód w stosunku do kierunku północnego (deklinacja zachodnia  $\delta=0,5^\circ$ ) [Jeżewski s.259].

**Biegunami magnetycznymi Ziemi** nazywa się te miejsca na powierzchni Ziemi, w których inklinacja wynosi  $90$  stopni. Podobnie jak w przypadku magnesów w pobliżu biegunów magnetycznych ziemskie pole jest najsilniejsze. Bieguny magnetyczne nie leżą dokładnie w tych samych miejscach co bieguny geograficzne. Jest to główna przyczyna tego, że deklinacja magnetyczna jest różna od zera. Ponadto ich położenie zmienia się w skali lat i deklinacja magnetyczna także podlega powolnym zmianom. Dokładne mapy podają wartość lokalną deklinacji oraz rok, dla którego zastała ona wyznaczona.

**Magnetyczny biegun północny i południowy.** Biegunem północnym przyjęto nazywać ten koniec igły kompasu lub busoli, który wskazuje na Ziemi kierunek północny. Biegun północny magnesu (**N**) oznaczany jest zwykle kolorem niebieskim a południowy (**S**) czerwonym lecz należy zwrócić uwagę, że stosowane są także inne a nawet odwrotne konwencje oznaczeń barwnych.



Jeśli dysponujemy dwoma magnesami to ich bieguny różnoimienne N i S przyciągają się. Wynika stąd, że w pobliżu północnego bieguna geograficznego Ziemi znajduje się jej południowy biegun magnetyczny. **Zwrot linii pola magnetycznego** zaznaczany strzałkami na graficznym przedstawieniu pola magnetycznego jest to kierunek w przestrzeni wskazywany przez północny biegun igły magnetycznej umieszczonej w tym polu.



Rys.12. Zwrot linii ziemskiego pola magnetycznego

### **Pole magnetyczne jest wektorem**

Pole magnetyczne ma **kierunek, zwrot i wartość** czyli jest **wektorem**. Zwykle wygodniej jest mówić o wektorach pola magnetycznego zamiast o jego liniach. Dla przykładu jeśli w pewnym obszarze przestrzeni kierunek i wartości tego wektora są jednakowe mówimy, że mamy od czynienia z **polem magnetycznym jednorodnym**.

Jak już wiemy położenia ziemskich biegunów magnetycznych, a więc także kierunki i wielkości wektorów ziemskiego pola magnetycznego podlegają systematycznym i **powolnym zmianom** obserwowanym wraz z upływem lat i stuleci. Ponadto ulegają one **szybkim nieprzewidywalnym zmianom** w skali godzin a nawet minut. Zwykle są to zmiany niewielkie w granicach rzędu 1%. Całodobową obserwację tych zmian prowadzi wiele stacji geomagnetycznych rozsiansych po całym świecie.

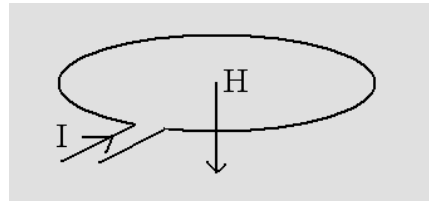
W XX wieku odkryto, że w bardzo odległej przeszłości, średnio raz na kilkaset tysięcy lat dochodziło zaniku ziemskiego pola magnetycznego a następnie do zamiany miejscami bieguna północnego z południowym. Te **bardzo powolne zmiany** ziemskiego pola magnetycznego są przedmiotem badań dziedziny wiedzy zwanej **paleomagnetyzmem**. Wyjaśnienie wszystkich cech ziemskiego magnetyzmu wymaga przyjęcia złożonego modelu zjawisk zachodzących wewnątrz kuli ziemskiej oraz w ziemskiej jonosferze.

## Wektor natężenia pola magnetycznego H

Wektor natężenia pola magnetycznego H jest to wektor styczny w danym punkcie do linii pola o zwrocie takim jak zwrot linii. Jego wartość podawana jest w A/m („ampery na metr”) i może ona zostać zmierzona przyrządami zwanymi **magnetometrami**.

W prostych przypadkach w pobliżu przewodników z prądem natężenie pola może zostać przewidziane na drodze obliczeń. Dla przykładu: w centrum pętli kołowej wektor natężenia pola magnetycznego jest prostopadły do pętli i jego wartość wynosi

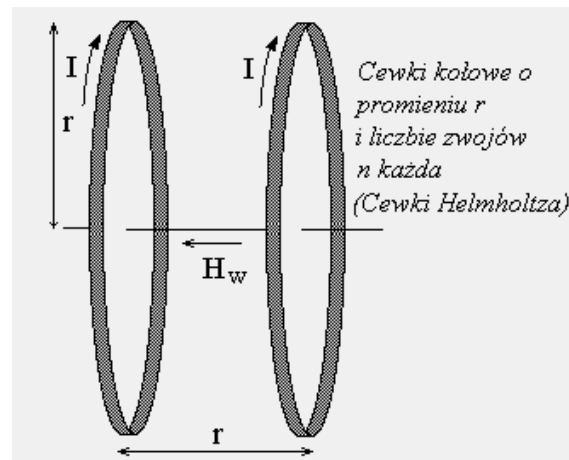
$$H = \frac{0,5I}{r}$$



Gdzie  $I$  oznacza natężenie prądu,  $r$  – promień okręgu. Przy natężeniu prądu  $I=1\text{A}$  i dla  $r=0,1\text{m}$  daje to  $H=5\text{A/m}$ . Dla porównania: zmierzona w Krakowie wartość natężenia naturalnego pola ziemskiego wynosi  $15,6\text{A/m}$  (składowa pozioma).

## Cewki Helmholtza

Cewki Helmholtza to dwa uzwojenia kołowe o jednakowych promieniach  $r$  oraz liczbach zwojów  $n$ . Cewki ustawione są wzajemnie równoległe w odległości  $r$  jedna od drugiej (Rys. 13).



Rys.13. Cewki Helmholtza



Gdy przez uzwojenia cewek Helmholtza płynie prąd elektryczny o jednakowym natężeniu  $I$ , to taki układ uzwojeń daje pomiędzy cewkami **bardzo jednorodne przestrzennie pole magnetyczne**. Wektor  $\mathbf{H}$  leży wówczas na osi symetrii układu skierowany prostopadle do płaszczyzn cewek a natężenie pola  $H_w$  w centrum układu wynosi:

$$H_w = \frac{0,715 nI}{r}$$

### **Wektor indukcji magnetycznej $\mathbf{B}$**

Mierniki wyposażone w czujnik hallotronowy wskazują najczęściej nie wartości natężenia pola ale wartości tzw. indukcji magnetycznej ( $\mathbf{B}$ ) wyrażone w jednostkach zwanych „Tesla” oznaczanych w skrócie „T”. Stąd używana jest niekiedy nazwa „teslometr”.

W próżni i w powietrzu wektor indukcji magnetycznej  $\mathbf{B}$  jest równoległy do wektora natężenia pola  $\mathbf{H}$  a związek pomiędzy nimi jest następujący:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$$

gdzie  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  [T·m/A] – tzw. przenikalność magnetyczna próżni

**Przykład:** Pole ziemskie naturalne o natężeniu  $H=40\text{A/m}$  to pole o indukcji  $B=0,00005\text{T}$ . Jak widać pole o indukcji 1T jest bardzo silne w porównaniu z polem ziemskim. Dlatego do opisu indukcji ziemskiego pola wygodniej stosować milionowe części Tesli – mikrotesle oznaczane „ $\mu\text{T}$ ”. Wtedy nasz wynik zapiszemy jako  $B=50\mu\text{T}$ .

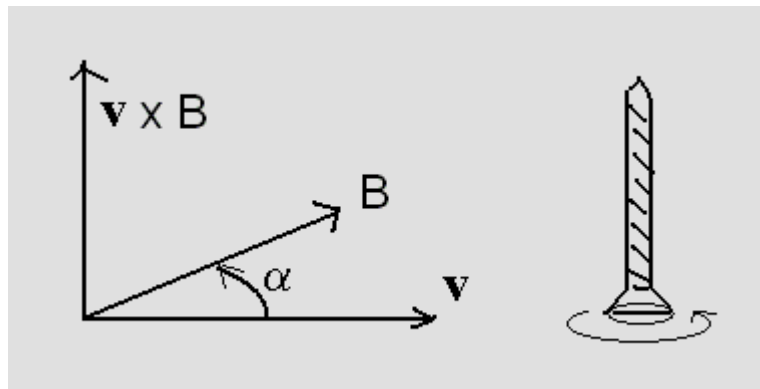


## Zapis siły Lorentza w postaci wektorowej

Siła Lorentza  $\mathbf{F}$  działająca na ładunek  $q$  poruszający się z prędkością  $\mathbf{v}$  jest prostopadła do wektora prędkości oraz do kierunku wektora indukcji  $\mathbf{B}$ . Ponadto jej wartość rośnie proporcjonalnie wraz ze wzrostem  $v$ ,  $B$ , oraz  $q$ . Matematycznie zapisujemy to równaniem:

$$\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

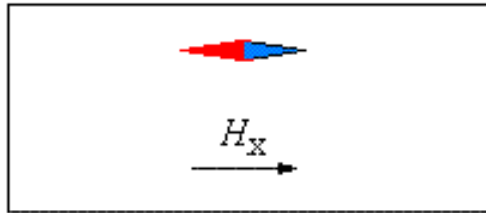
W matematycznej formie zapisu siły Lorentza występuje iloczyn wektorowy  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ . Przypomnijmy, że **iloczyn wektorowy** dwu dowolnych wektorów, np.  $\mathbf{v}$  i  $\mathbf{B}$  oznaczamy symbolem „ $\times$ ” (wyrażenie  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  czytamy „ $v$  krzyż  $B$ ”).  $\mathbf{i}$  jest to wektor prostopadły zarówno do wektora  $\mathbf{v}$  jak i do wektora  $\mathbf{B}$  o wartości  $|\mathbf{v}| |\mathbf{B}| \sin \alpha$ , gdzie  $|\mathbf{v}|$  oraz  $|\mathbf{B}|$  to wartości wektorów  $\mathbf{v}$  oraz  $\mathbf{B}$ ;  $\alpha$  to kąt pomiędzy nimi. Gdy  $\alpha = 90^\circ$ , to  $|\mathbf{v} \times \mathbf{B}| = |\mathbf{v}| |\mathbf{B}|$ . Zwrot wektora  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  wyznacza śruba prawoskrętna obracająca się od  $\mathbf{v}$  do  $\mathbf{B}$ .



Rys.14. Ilustracja iloczynu wektorowego wektorów  $\mathbf{v}$  i  $\mathbf{B}$

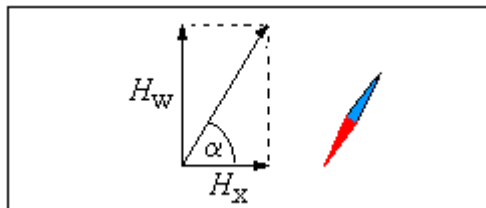
## Metoda pomiaru składowej poziomej ziemskiego pola magnetycznego

Badając ziemskie pole magnetyczne stajemy przed zagadnieniami wyznaczenia jego kierunku i wartości natężenia. Jeśli jako czujnika pola magnetycznego użyjemy kompasu, lub precyzyjniejszego urządzenia zaopatrzonego w skalę i nazywanego busolą stycznych, to możemy ustalić jaki jest kierunek i zwrot składowej poziomej  $H_x$  wektora natężenia pola magnetycznego (Rys.15).



Rys.15. Igła magnetyczna w ziemskim polu magnetycznym

Pomiar wartości wektora  $H_x$  wykonamy następującą metodą. Wytwarzamy dodatkowe pole magnetyczne  $H_w$  o znanej wartości natężenia skierowane także poziomo ale prostopadle do wektora  $H_x$ . Igła busoli ustawi się równoległe do wypadkowej wektorów  $H_x$  i  $H_w$ .



Rys. 16. Igła magnetyczna w ziemskim polu magnetycznym  $H_x$  i w sztucznie wytworzonym polu skierowanym do niego prostopadle

Ponieważ kąt  $\alpha$  może zostać zmierzony szukana długość wektora  $H_x$  można obliczyć ze związku:

$$H_x = \frac{H_w}{\operatorname{tg} \alpha}$$

W szczególności gdy  $\alpha=45$  stopni to  $H_x=H_w$ .



Rys. 17. Busola używana w ćwiczeniu. Po obu stronach busoli widoczne są uzwojenia kół Helmholtza

W naszym ćwiczeniu do wytworzenia wzorcowego jednorodnego pola  $H_w$  służą cewki Helmholtza. Wartość  $H_w$  może zostać obliczona na podstawie równania

$$H_w = \frac{0,715nI}{r}$$

gdzie  $n$  oznacza liczbę zwojów,  $r$  – promień cewek oraz  $I$  - natężenie prądu w cewkach.

W centrum cewek Helmholtza znajduje się igła magnetyczna. Igła umieszczona jest na pionowej osi zaopatrzonej w dwa łożyska i może się obracać w płaszczyźnie poziomej. Pod igłą znajduje się podziałka kątowna. Ponieważ igła ustawia się równolegle do wektora natężenia pola magnetycznego, czyli stycznie do linii pola, stąd stosowana niekiedy nazwa „busola stycznych”.

Jeżeli płaszczyzny cewek Helmholtza ustawimy w kierunku północ-południe tzn. równolegle do wektora  $H_x$ , to kierunek pola magnetycznego  $H_w$  wytworzonego przez prąd płynący w uzwojeniu jest do wektora  $H_x$  prostopadły. Igła busoli ustawia się równolegle do wypadkowego wektora natężenia pola magnetycznego. Pomiar kąta  $\alpha$  o jaki obróciła się igła busoli pozwala obliczyć wartość składowej  $H_x$ :

$$H_x = \frac{H_w}{\operatorname{tg} \alpha}$$

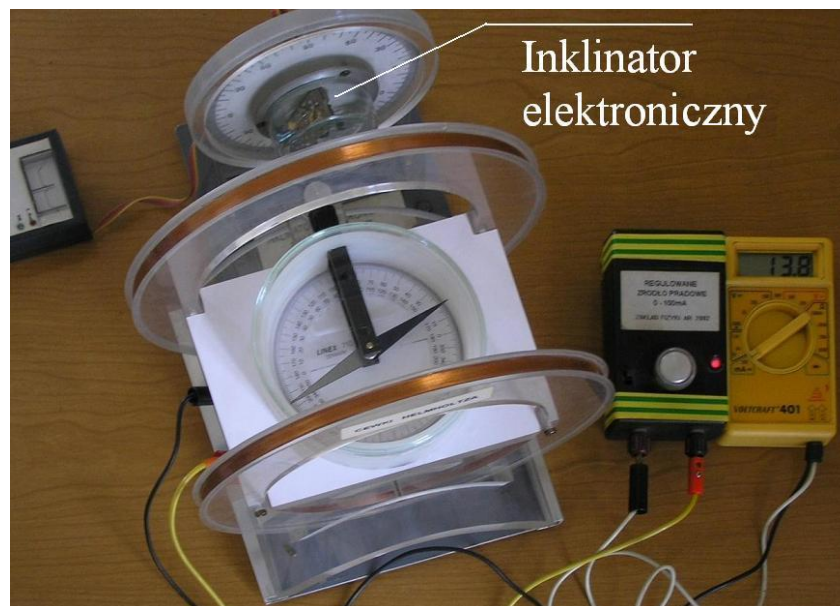
## Pomiar inklinacji

Wektor natężenia ziemskiego pola magnetycznego  $\mathbf{H}$  rozłożyć można na dwa wektory składowe: poziomy  $\mathbf{H}_x$  oraz pionowy  $\mathbf{H}_z$  o długościach  $H_x = H \cos \varphi$ ,  $H_z = H \sin \varphi$  gdzie  $\varphi$  to kąt jaki  $\mathbf{H}$  tworzy z płaszczyzną poziomą (*inklinacja*). Inklinację magnetyczną można zmierzyć za pomocą odpowiednio ustawionej busoli zwanej **inklinatorem** lecz jest to trudniejszy pomiar niż ten, który dotyczy składowej poziomej (Rys.18).



Rys.18. Inklinator

W naszym pomiarze, w drugiej jego części, do pomiaru inklinacji zamiast igły użyjemy elektronicznego magnetorezystancyjnego czujnika pola magnetycznego (Rys.19).



Rys.19. Busola stycznych, cewki Helmholtza wraz zasilaczem oraz układ do pomiaru inklinacji magnetycznej stosowane w ćwiczeniu



## LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

Halliday D., Resnick R., *Fizyka Tom 2*, Wydanie ósme, PWN, Warszawa 1994, s.237-330.

Kądziołko-Hofmokr M., *Magnetyzm ziemski: Encyklopedia Fizyki Współczesnej*, s.845-860, PWN, Warszawa 1983.

Jeżewski M., *Tablice wielkości fizycznych oraz pomocnicze tablice matematyczne*. PWN, Warszawa 1957.

Jeżewski M., *Fizyka ogólna*, Tom 2, PZWS, Warszawa 1973, s.118-121.

Salach J. (red.), *Wybieram fizykę. Zakres rozszerzony z fizyki dla szkół ponadgimnazjalnych 2, Rozdział 12 Pole magnetyczne*. Zamkor Kraków 2008, s.265-306.

Wikipedia: hasło „Ziemskie pole magnetyczne”. Rok 2019.



Modyfikacja ćwiczeń z przedmiotu Fizyka w ramach projektu pn. „Innowacyjny program strategicznego rozwoju Uczelni” o numerze POWR.03.05.00-00-Z020/18

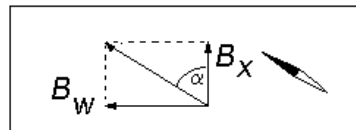
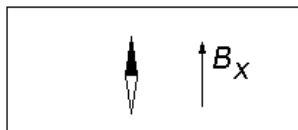
## 30 POMIARY ZIEMSKIEGO POLA MAGNETYCZNEGO

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie wartości składowej poziomej wektora indukcji ziemskiego pola magnetycznego oraz określenie kierunku tego wektora względem płaszczyzny poziomej.

**Aparatura:** busola stycznych, cewki Helmholtza, źródło prądowe, miliamperomierz, inklinator.

### ZASADA POMIARU

Jako czujnika pola magnetycznego użyjemy igły magnetycznej zaopatrzonej w skalę (busola stycznych). Busola ustawia się w kierunku wektora indukcji ziemskiego pola magnetycznego a dokładniej mówiąc w kierunku jego składowej poziomej  $B_x$  (rysunek poniżej po lewej).



Pomiar długości wektora  $B_x$  wykonujemy następującą metodą. Za pomocą cewek Helmholtza wytwarzamy dodatkowe pole magnetyczne  $B_w$  o znanej wartości indukcji skierowane prostopadłe do wektora  $B_x$ . Igła magnetyczna ustawi się równoległe do wypadkowej wektorów  $B_x$  i  $B_w$ . Długość wektora  $B_x$  można obliczyć ze związku  $B_w/B_x = \text{tg}\alpha$  (rysunek powyżej po prawej).

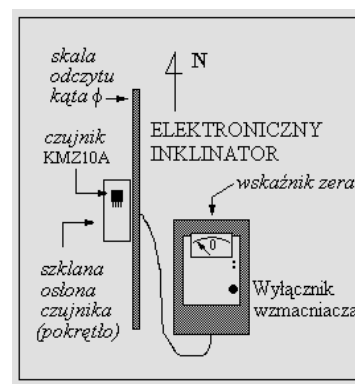
Cewki Helmholtza (Rys.2) to dwa uzwojenia kołowe o jednakowych promieniach  $r$  oraz liczbach zwojów  $n$ . Cewki ustawione są wzajemnie równoległe w odległości  $r$  jedna od drugiej. Indukcja pola magnetycznego  $B_w$  w całym obszarze pomiędzy cewkami Helmholtza (pole jest jednorodne) wynosi:

$$B_w [\text{T}] = \frac{0,715\mu_0 nI}{r} \quad (1)$$

gdzie  $n$  oznacza liczbę zwojów każdej z cewek, tu  $n=38$ ,

$I$  - natężenie prądu płynącego przez każdą z cewek wyrażone w amperach,

$r$  – promień cewek wyrażony w metrach  $r=0,112\text{m}$ . Przyjąć  $\mu_0=0,00000126[\text{T}\cdot\text{m}/\text{A}]$ .



Rys.2. Po lewej: busola stycznych i cewki Helmholtza. W środku – inklinator ustawiony równoległe do kierunku północ-południe i równoległe do cewek Helmholtza. Po prawej – opis inklinatora

## WYKONANIE ĆWICZENIA

1. Cewki *Helmholtza* ustawić na stole tak, by uzwojenia cewek leżały w kierunku północ-południe wskazywanym przez igłę magnetyczną. Wskazówka busoli pokazuje wówczas 0°.
2. Włączyć zasilanie źródła prądowego. Ustawić wartość natężenia prądu  $I$  tak, by wychylenie wskazówki busoli wynosiło około 25°. Odczytać położenie wskazówki ( $\alpha$ ) oraz wartość natężenia prądu  $I$ . Zanotować wyniki w tabeli. Pomiar powtórzyć zmieniając natężenie prądu tak, by otrzymać kąt wychylenia wskazówki ( $\alpha$ ) około 35° oraz 45°. Wyłączyć zasilanie źródła prądowego.

nr pomiaru	$\alpha$ [°]	$I$ [mA]
1		
2		
3		

3. Pomiar inklinacji  $\varphi$ . Ustawić pionową tarczę *inklinatora elektronicznego* równoległe do kierunku północ-południe (Rys. 2), czyli równoległe do cewek Helmholtza. Kierunek ten wskazuje igła magnetyczna busoli stycznych. Czujnik pola magnetycznego KMZ10A znajduje się wewnątrz szklanej osłony w centrum tarczy. Włączyć zasilanie wzmacniacza dołączonego do czujnika.
4. Obrócić szklanym pokrętkiem czujnik tak, by *wskaznik zera inklinatora* pokazywał „0”. W tym położeniu czujnik jest prostopadły do wektora  $\mathbf{B}$  indukcji ziemskiego pola magnetycznego. Na skali inklinatora odczytać wartość inklinacji  $\varphi_1$ . Obrócić szklanym pokrętkiem czujnik o kąt bliski 180°, tak by znowu doprowadzić wskazanie miernika do 0. Odczytać kąt  $\varphi_2$ . Obrócić podstawę inklinatora o 180°, tak by ustawić pionową tarczę jego skali ponownie równoległe do kierunku południe-północ i do cewek Helmholtza. Odczytać jak poprzednio kąty  $\varphi_3$  oraz  $\varphi_4$ .

## OPRACOWANIE WYNIKÓW

1. Dla każdego z trzech pomiarów kąta  $\alpha$  obliczyć wartości  $\operatorname{tg}\alpha$ . Wyniki zapisać w tabeli.
2. Każdą z trzech wartości natężenia prądu  $I$  wyrazić w amperach. Zgodnie z równaniem (1) określić wartość indukcji magnetycznej  $B_w$  w centrum cewek Helmholtza wyrażoną w teslach [T].  
Promień cewek  $r=0.1115\text{m}$ , liczba zwojów  $n=38$ . Wynik obliczenia  $B_w$  otrzymujemy w teslach. Przelicz wartość  $B_w$  z tesli (T) na mikrotesle ( $\mu\text{T}$ ).  $1\text{T}=1\,000\,000\mu\text{T}$ . Oblicz dla każdego z trzech pomiarów wartość składowej poziomej indukcji ziemskiego pola magnetycznego  $B_x = B_w/\operatorname{tg}\alpha$ .

nr pomiaru	$\alpha$	$\operatorname{tg}\alpha$	$I$ [mA]	$I$ [A]	$B_w$ [T]	$B_w$ [ $\mu\text{T}$ ]	$B_x$ [ $\mu\text{T}$ ]
1							
2							
3							

3. Obliczyć wartość inklinacji  $\varphi$  jako średnią arytmetyczną zmierzonych kątów  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  oraz  $\varphi_4$ .
4. Obliczyć całkowitą wartość indukcji ziemskiego pola magnetycznego  $B=B_x/\cos\varphi$ . W obliczeniu przyjąć wartość  $B_x$  wyznaczoną w trzecim pomiarze.
5. Obliczyć niepewności standardowe wielkości  $r$  oraz  $\alpha$ , gdzie  $\Delta r = 0,0005\text{m}$ ,  $\Delta \alpha = 0,0087$  rad (t.j.  $1/2^\circ$ )

$$u(r) = \frac{\Delta r}{\sqrt{3}} = \dots\dots\dots[\text{m}] \quad u(\alpha) = \frac{\Delta \alpha}{\sqrt{3}} = \dots\dots\dots[\text{rad}]$$

6. Niepewność pomiaru pośredniego  $u(B_x)$

$$u(B_x) = B_x \sqrt{\left[\frac{u(I)}{I}\right]^2 + \left[\frac{u(r)}{r}\right]^2 + \left[\frac{u(\alpha)}{\sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)}\right]^2}$$

gdzie  $u(I)/I=0,0087$  (z instrukcji amperomierza). Wartość  $u(\alpha)$  wstawiamy w radianach.

7. Zapisz wynik końcowy:  $B_x = \dots\dots\dots\mu\text{T}$ ,  $u(B_x) = \dots\dots\dots\mu\text{T}$