

# Misura campo magnetico

Cataldi Martina, Marieni Elisa Iris, Miraglia Martina

Nella prima parte dell'esperimento si misurano i moduli del campo magnetico terrestre totale e delle sue componenti orizzontali e verticali, mentre nella seconda parte, dopo aver realizzato un circuito alimentato con una corrente continua I, si valuta il campo magnetico generato da un filo rettilineo percorso dalla stessa I.

## 1- Introduzione

### 1.1 Misura campo magnetico terrestre locale

Il campo magnetico terrestre locale  $\vec{B}_{tot}$  è il risultato della sovrapposizione di diversi contributi: il campo principale, generato nel nucleo fluido tramite il meccanismo di geodinamo, il campo crostale, il campo esterno, il campo d'induzione elettromagnetica. E' possibile considerare il campo magnetico  $\vec{B}$  prodotto dalla Terra al pari di quello generato da un dipolo situato nel nucleo terrestre.

Il campo magnetico terrestre è caratterizzato da due componenti: una verticale  $\vec{B}_v$ , diretta verso il basso, ed una orizzontale  $\vec{B}_o$ , orientata in direzione del polo nord geografico. Il valore di  $\vec{B}_{tot}$  è variabile a causa di diversi motivi tra cui la latitudine, l'attività solare e la fascia oraria. I valori relativi al campo magnetico terrestre misurati dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, per la latitudine a cui si trova Parma, sono in modulo:

$$B_{tot} = (46,5 \pm 0,5)\mu T$$

$$B_v = (40,5 \pm 0,5)\mu T$$

$$B_o = (22,5 \pm 0,5)\mu T$$

### 1.2 Misura campo magnetico generato da un filo rettilineo percorso da corrente

Un filo rettilineo indefinito, percorso da una corrente stazionaria I, genera nello spazio circostante un campo magnetico  $\vec{B}_f$ , le cui linee di forza sono tangenti a circonferenze di raggio r, centrate attorno al filo e situate in un piano ortogonale rispetto al filo stesso, ed il cui verso è dato dalla regola della vite destrorsa. Il modulo di questo campo dipende dalla distanza r dal filo:

$$B_f(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

dove  $\mu_0$  corrisponde alla permeabilità magnetica del vuoto.

## 2- Strumentazione

- Pacco batterie: 4 pile ricaricabili, ciascuna con  $\varepsilon = (1,35 \pm 0,01)$  V
- Resistenze:  $R = (100 \pm 1)$   $\Omega$
- LED
- Multimetro digitale
- Supporto in legno, cavi elettrici, coccodrilli, filo metallico rettilineo, nastro isolante
- Phyphox (applicazione per misurare il campo magnetico)
- Bussola (sensibilità di 2°)
- Contenitore di plastica, ago, sughero
- Piccoli magneti



Figura 1: pacco batterie, LED, resistenza e coccodrilli

### 3- Descrizione esperimento

#### 3.1 Misura campo magnetico terrestre locale

Per effettuare la misura di  $\vec{B}$ , ci si posiziona in un luogo lontano da qualsiasi dispositivo in grado di produrre un campo magnetico (apparecchiature elettroniche, elettrodomestici).

Si utilizza l'applicazione Phyphox, impostata sulla funzione magnetometro. Al fine di individuare la posizione del rilevatore del campo magnetico presente all'interno del cellulare, è possibile testare il magnetometro avvicinando un piccolo magnete ai diversi lati del telefono: si scopre quindi che il rilevatore è situato sul lato superiore del cellulare.

Grazie a tale applicazione, è possibile misurare il modulo del campo magnetico totale  $B_{tot}$  e i moduli delle componenti di  $B$  dirette lungo gli assi x, y, z. Gli assi del magnetometro sono orientati rispetto al cellulare come in figura 2:

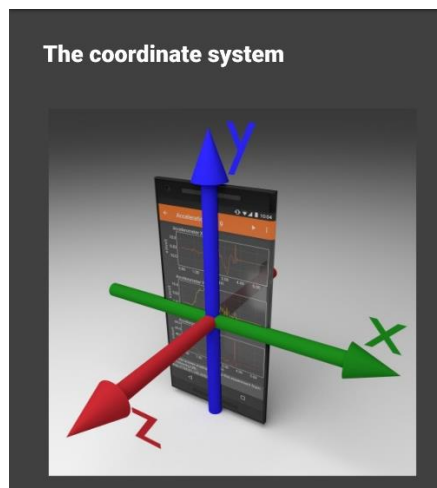


Figura 2: sistema di coordinate del magnetometro

Si procede posizionando il cellulare su una superficie piana orizzontale, in modo che lungo l'asse z si misuri esattamente la componente verticale del campo magnetico  $\vec{B}_v$ , mentre per determinare la componente orizzontale  $\vec{B}_o$  si calcola la radice della somma dei quadrati dei valori del campo misurati lungo l'asse x e lungo l'asse y:

$$B_o = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$$

Si noti, che per misurare direttamente la componente orizzontale, bisogna orientare il cellulare in modo che uno dei due assi tra x e y, ad esempio l'asse y, punti verso il nord: in questo modo lungo l'asse x si misura un valore prossimo a 0  $\mu\text{T}$ , mentre sull'asse y si visualizza direttamente il valore di  $\vec{B}_o$ .

Si registrano quindi diverse misure del campo, effettuate sempre nello stesso luogo e allo stesso orario.

### 3.2 Misura campo magnetico generato da un filo rettilineo percorso da corrente

Innanzitutto bisogna montare un circuito, in modo che sia percorso da una corrente controllata, stazionaria, all'incirca dell'ordine delle decine di mA.

Si utilizza un pacco batterie formato da 4 pile ricaricabili, di cui si misura la fem grazie al multimetro digitale. Quindi, si collega tramite dei cavi elettrici il pacco batterie ad una resistenza,  $R=(100\pm 1)\Omega$ , e ad un filo rettilineo lungo all'incirca 50 cm. Al fine di stabilizzare il più possibile i contatti, si monta il circuito su un supporto in legno e si utilizzano coccodrilli e nastro isolante.



Figura 3: misura della forza elettromotrice di una pila

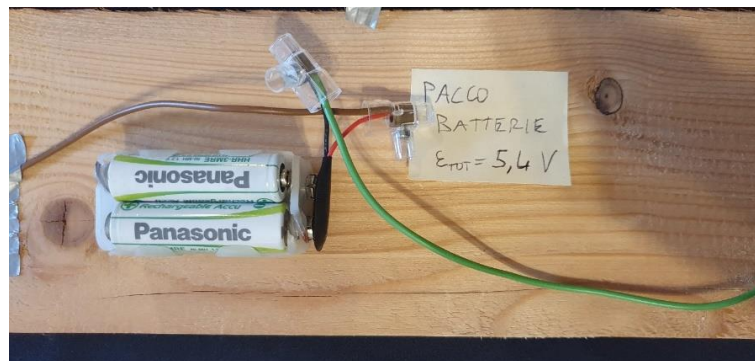


Figura 4: pacco batterie collegato al circuito,  $E_{tot} = (5,40\pm 0,04) V$

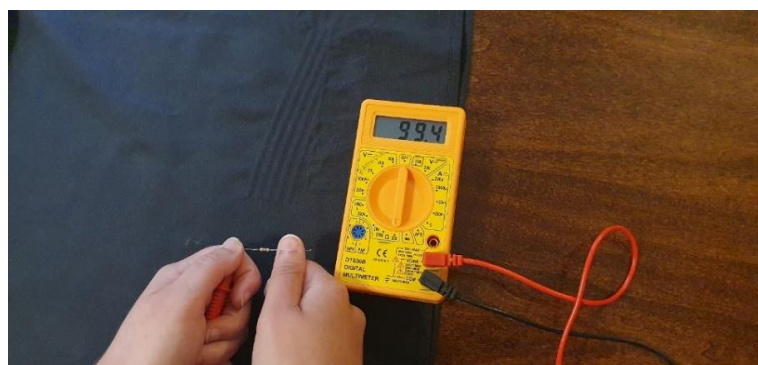


Figura 5: misura della resistenza con il multimetro (NB: misurando in questo modo il tester misura la resistenza dell'elemento passivo in parallelo a quella del corpo umano, cosa non importante se la resistenza che si vuole misurare è piccola. In generale è opportuno appoggiare il resistore su un piano non conduttore e premere sugli estremi con i puntali del tester, toccandola al più con una sola mano)

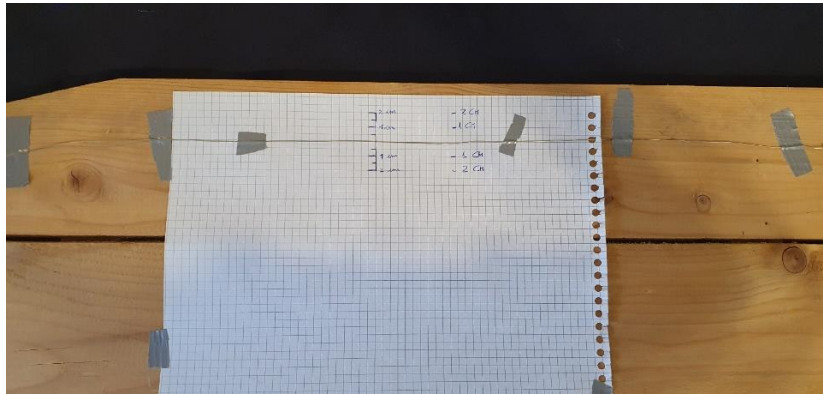


Figura 6: filo metallico rettilineo

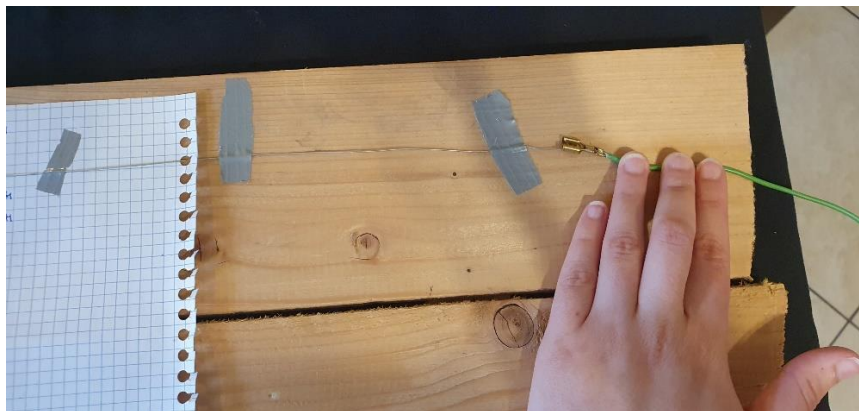


Figura 7: contatto tra il filo e il cavo elettrico del circuito

Prima di procedere con l'esperimento è possibile verificare visivamente il passaggio della corrente, inserendo un LED, di cui si sono individuati anodo e catodo utilizzando il tester nell'opzione prova-diodi: posizionando il LED in modo che l'anodo si trovi ad un potenziale maggiore rispetto al catodo, questo si illumina evidenziando così il passaggio della corrente nel circuito, al contrario se si posiziona il catodo ad un potenziale maggiore rispetto all'anodo il LED non si accende.

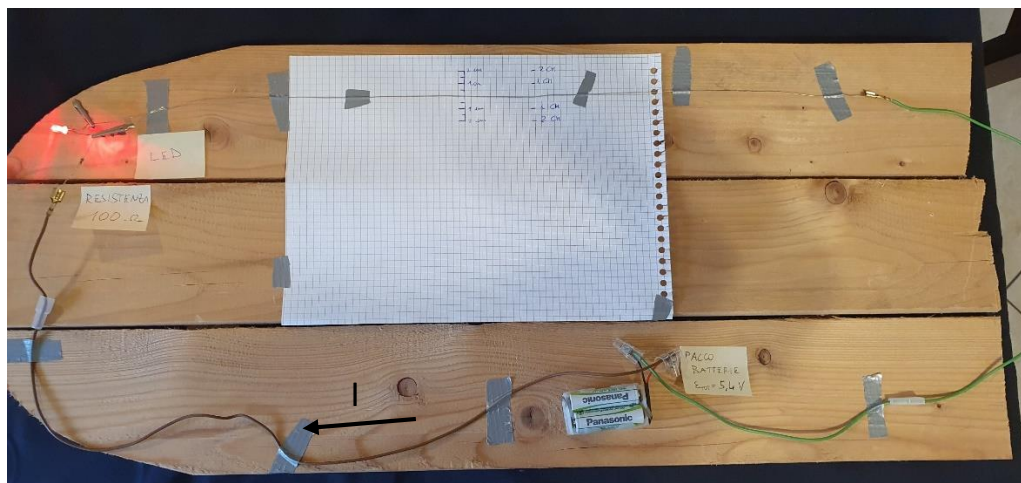


Figura 8: alla chiusura del circuito il LED si illumina, evidenziando il passaggio della corrente



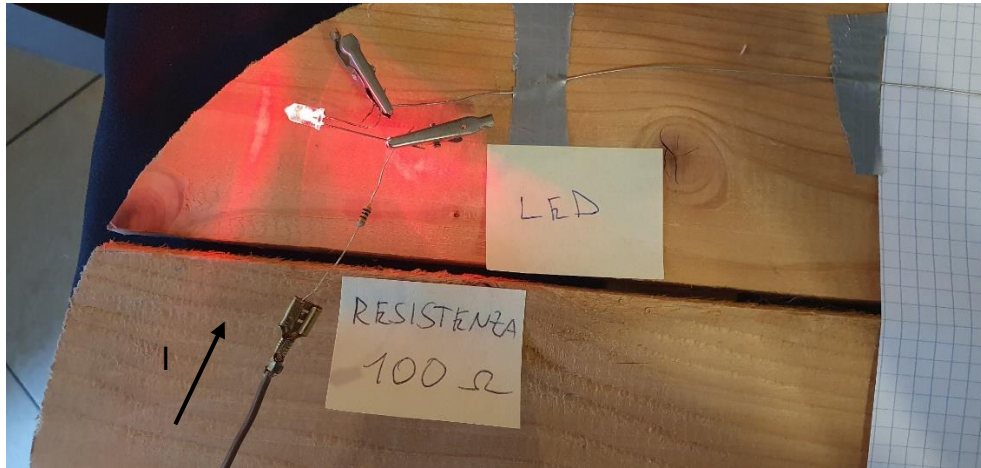


Figura 9: LED e resistenza, il LED è collegato al circuito in modo che l'anodo abbia potenziale maggiore rispetto al catodo



Figura 10: si invertono di posizione catodo e anodo del LED, alla chiusura del circuito il LED non si accende (NB questa operazione va fatta con basse tensioni applicate per non danneggiare il LED)

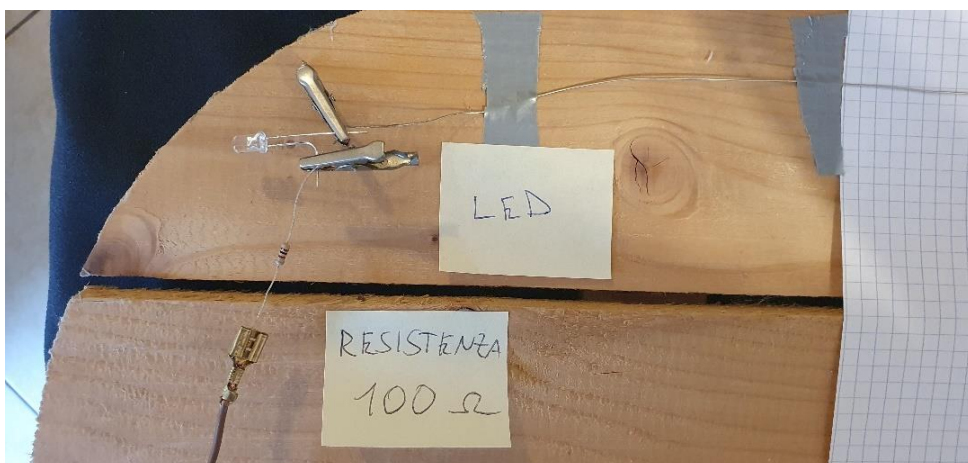


Figura 11: il catodo del LED ha potenziale maggiore rispetto all'anodo e impedisce il fluire della corrente

Dopo aver effettuato questa prova, si scollega il LED. Si chiude il circuito sulla resistenza e si misura la caduta di potenziale ai capi di R con il tester, come mostrato nella figura 12:

$$V = (5,28 \pm 0,05) \text{ V}$$

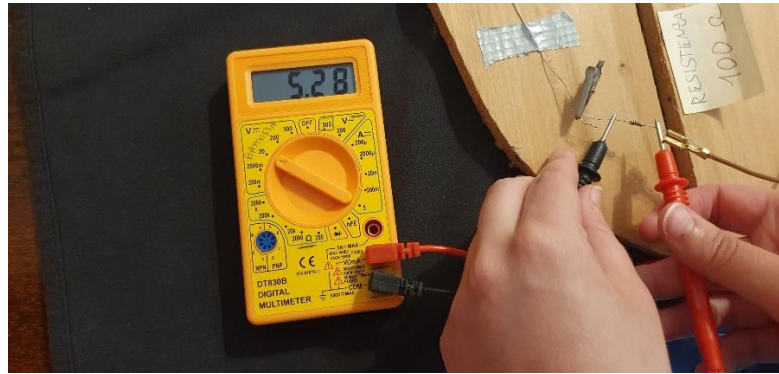


Figura 12: caduta di potenziale ai capi della resistenza R

Allora si ricava attraverso la legge di Ohm la corrente  $I_1$  circolante nel circuito:

$$I_1 = \frac{V}{R} = \frac{5,28 V}{100 \Omega} = 52,8 mA$$

$$\rightarrow I_1 = (53 \pm 1) mA$$

Per effettuare la misura del campo magnetico  $B$  generato dal filo, aiutandosi con una bussola, lo si orienta in modo che questo sia parallelo all'aghetto magnetico, quindi alla direzione nord-sud: così facendo, posizionando il cellulare sopra il filo, in modo che l'asse x del magnetometro sia ortogonale al filo stesso, si misura lungo tale asse solo il campo magnetico prodotto dal filo. In questa configurazione è quindi possibile effettuare direttamente la misura di  $B$ , senza che esso sia sovrapposto alla componente orizzontale del campo magnetico terrestre.

Tuttavia provando a prendere le misure, il magnetometro non rileva alcuna variazione. Considerando che lo spessore del cellulare è pari a  $r_1 = (5 \pm 1) \text{ mm}$ , il campo magnetico teorico generato dal filo percorso dalla corrente  $I_1$  vale:

$$B_{T1} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_1} = \frac{\mu_0 (53 \cdot 10^{-3} A)}{2\pi (5 \cdot 10^{-3} m)} = 2,12 \mu T$$

Tale valore è probabilmente troppo piccolo rispetto alla sensibilità del magnetometro, essendo tra l'altro molto minore della componente orizzontale del campo magnetico terrestre,  $B_o = (22,5 \pm 0,5) \mu T$ , e quindi il magnetometro non riesce a rilevare il campo prodotto dal filo.

Si ripete quindi l'esperimento utilizzando una bussola al posto del magnetometro del cellulare. Si orienta sempre il filo nella direzione nord-sud e si posiziona la bussola sopra di esso, in modo che l'aghetto magnetico sia parallelo al filo, come mostrato nella figura 13: così il campo magnetico generato dal filo percorso dalla corrente è diretto lungo la direzione est-ovest.



Figura 13: filo orientato nella direzione nord-sud

Inizialmente per osservare meglio lo spostamento dell'aghetto della bussola, si scollega la resistenza e si chiude il circuito collegando direttamente le pile al filo rettilineo (figura 14). L'osservazione del fenomeno però deve avvenire in un breve arco di tempo, poiché, non avendo inserito alcuna resistenza, le pile tendono a surriscaldarsi velocemente.

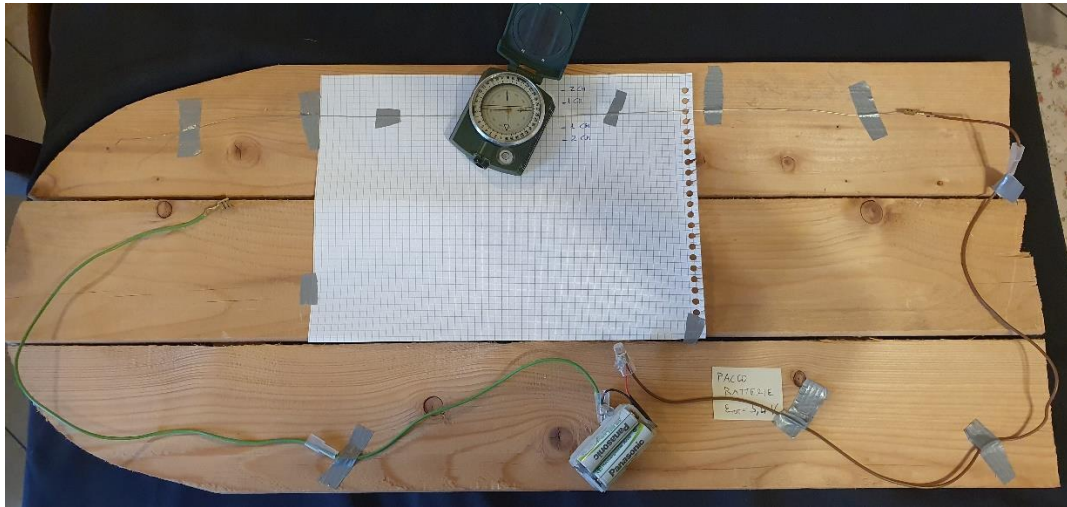


Figura 14: si chiude il circuito direttamente sul filo metallico, senza inserire alcuna resistenza

Quando inizia a circolare la corrente si vede l'aghetto magnetico risentire, oltre che della componente orizzontale del campo magnetico terrestre (orientata verso nord), anche del campo generato dal filo, il quale per la configurazione scelta risulta essere ortogonale rispetto a  $\vec{B}_0$ . Quindi, alla chiusura del circuito, l'aghetto magnetico si sposta dalla direzione nord-sud e si muove verso est od ovest a seconda del verso di circolazione della corrente (regola della vite destrorsa).



Figura 15: circuito aperto, ago della bussola allineato con il filo



Figura 16: circuito chiuso, ago della bussola si sposta verso est

Si inverte il verso di percorrenza della corrente e si osserva lo spostamento dell'aghetto magnetico dalla parte opposta rispetto a prima.





Figura 17: circuito aperto, ago della bussola allineato con il filo



Figura 18: circuito chiuso, ago della bussola si sposta verso ovest

In seguito, si collega al circuito una resistenza da  $100\ \Omega$  e si prova a rilevare lo spostamento angolare dell'ago della bussola: tale spostamento risulta ancora essere molto piccolo, si stima sia all'incirca  $\vartheta_1 = 1^\circ$ , un valore comunque inferiore alla sensibilità della bussola.



Figura 19: circuito aperto, ago della bussola allineato con il filo



Figura 20: circuito chiuso, ago della bussola si sposta di pochissimo verso est



Dalla tangente dell'angolo e conoscendo la componente orizzontale del campo magnetico misurata nella prima parte dell'esperimento, si prova a stimare il campo magnetico  $B_2$  e a confrontarlo con il valore teorico  $B_{T2}$ . Tale valore si calcola considerando la corrente  $I_1$  ed una distanza dal filo pari a  $r_2 = (2,0 \pm 0,1)$  cm, corrispondente all'altezza della bussola.

Al fine di aumentare l'intensità della corrente circolante all'interno del circuito e, di conseguenza, il campo magnetico generato dal filo, si collegano 2 resistenze in parallelo come in figura 23.

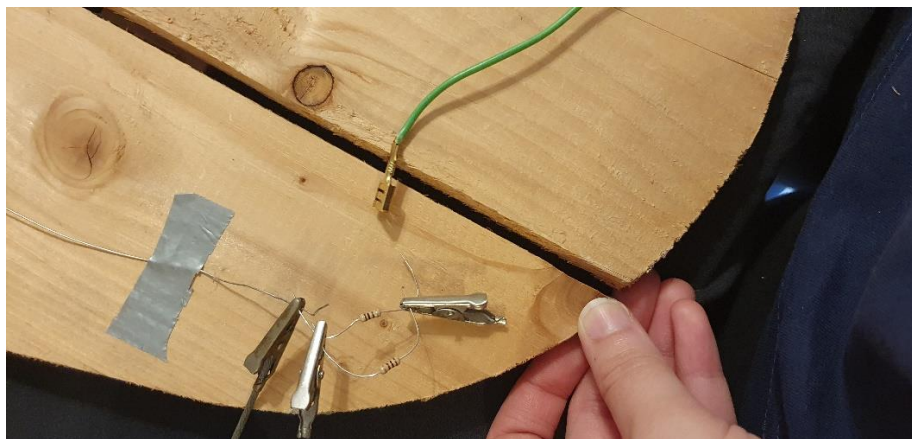


Figura 21: si collegano al circuito 2 resistenze in parallelo, ognuna con  $R=(100 \pm 1) \Omega$

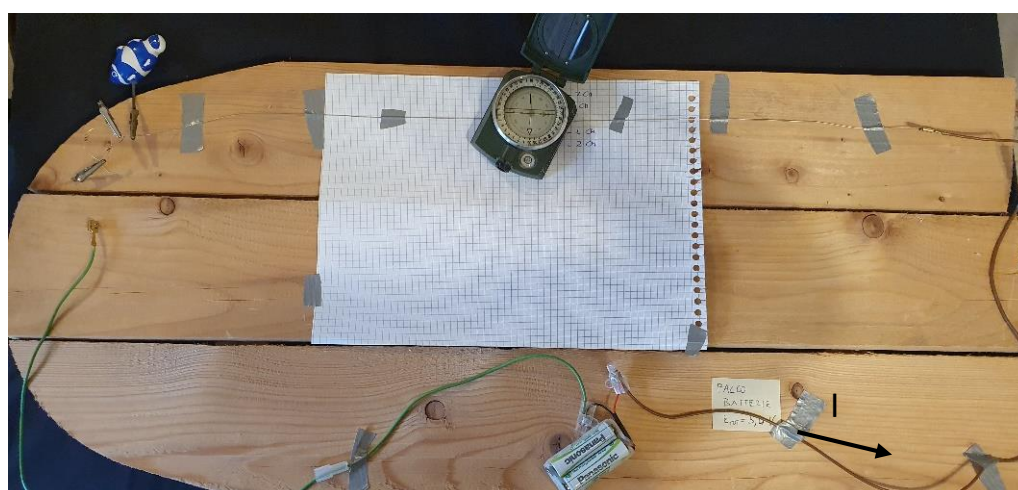


Figura 22: circuito con 2 resistenze in parallelo

Si ottiene quindi una resistenza equivalente inferiore a  $100 \Omega$ :

$$R_{eq} = \frac{R^2}{2R} = \frac{(100\Omega)(100\Omega)}{(100\Omega) + (100\Omega)} = 50\Omega$$

$$\rightarrow R_{eq} = (50 \pm 2)\Omega$$

Si calcola allora l'intensità della corrente  $I_2$  che scorre nel circuito e si determina il valore teorico  $B_{T3}$ . Si procede quindi similmente a quanto fatto precedentemente: si chiude il circuito e si misura uno spostamento angolare della bussola pari a  $\vartheta_2 = 2^\circ$ , corrispondente ad una tacchetta della bussola. Si calcola allora il campo  $B_3$ , da confrontare poi con  $B_{T3}$ .



Figura 23: sistema di misura del campo magnetico generato dal filo con 2 resistenze in parallelo



Figura 24: circuito aperto, ago della bussola allineato con il filo



Figura 25: circuito chiuso, ago della bussola si sposta di all'incirca 2° verso ovest

Infine, è possibile costruire una bussola e ripetere l'esperimento: si utilizzano un contenitore riempito d'acqua, un pezzetto di sughero ed un ago magnetizzato precedentemente con una calamita. Si costruisce quindi una bussola come mostrato nella figura 26 e, collegando direttamente il filo alle pile, si osserva lo spostamento dell'aghetto.



Figura 26: bussola



Figura 27: si allinea il filo all'aghetto magnetizzato

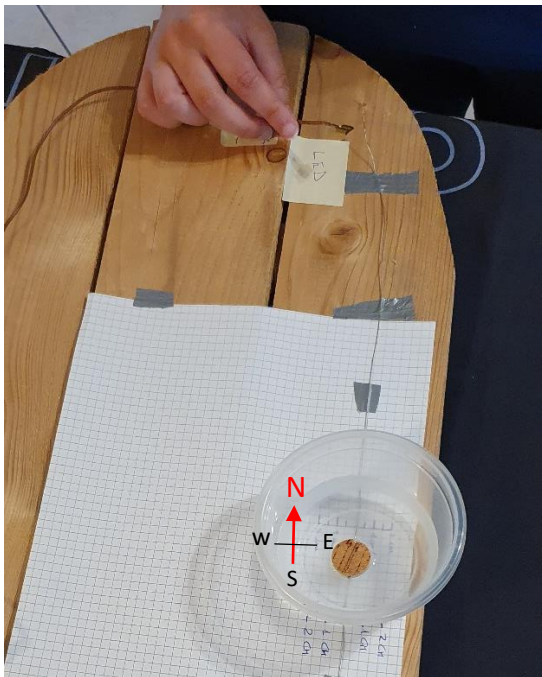


Figura 28: circuito aperto, ago della bussola allineato con il filo

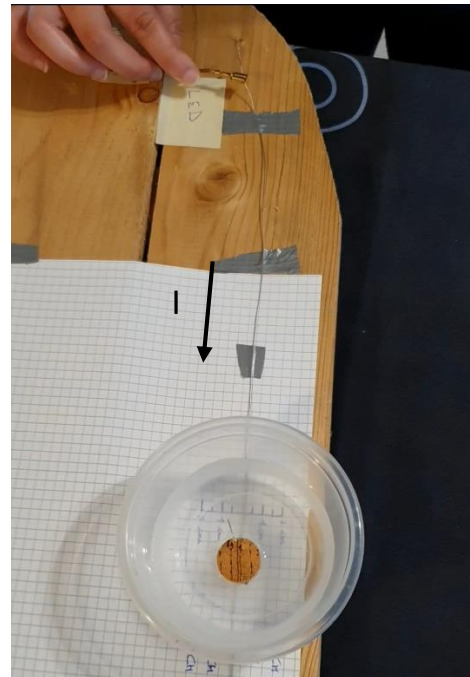


Figura 29: circuito chiuso, ago della bussola si sposta verso ovest



## 4- Elaborazione dati

### 4.1 Misura campo magnetico terrestre locale

$B_x$ ( $\mu T$ )	$B_y$ ( $\mu T$ )	$B_z$ ( $\mu T$ )	$B_{tot}$ ( $\mu T$ )	$B_o$ ( $\mu T$ )
$(4 \pm 1)$	$(-19 \pm 1)$	$(-41 \pm 1)$	$(45 \pm 1)$	$(19 \pm 1)$
$(-1 \pm 1)$	$(-21 \pm 1)$	$(-41 \pm 1)$	$(46 \pm 1)$	$(21 \pm 1)$
$(0 \pm 1)$	$(-21 \pm 1)$	$(-42 \pm 1)$	$(47 \pm 1)$	$(21 \pm 1)$
$(3 \pm 1)$	$(-21 \pm 1)$	$(-41 \pm 1)$	$(47 \pm 1)$	$(22 \pm 1)$
$(4 \pm 1)$	$(-19 \pm 1)$	$(-40 \pm 1)$	$(44 \pm 1)$	$(19 \pm 1)$
$(4 \pm 1)$	$(-19 \pm 1)$	$(-40 \pm 1)$	$(45 \pm 1)$	$(19 \pm 1)$
$(3 \pm 1)$	$(-18 \pm 1)$	$(-41 \pm 1)$	$(45 \pm 1)$	$(18 \pm 1)$
$(5 \pm 1)$	$(-20 \pm 1)$	$(-41 \pm 1)$	$(46 \pm 1)$	$(21 \pm 1)$
$(4 \pm 1)$	$(-19 \pm 1)$	$(-42 \pm 1)$	$(46 \pm 1)$	$(19 \pm 1)$
$(0 \pm 1)$	$(-19 \pm 1)$	$(-42 \pm 1)$	$(46 \pm 1)$	$(19 \pm 1)$
$(5 \pm 1)$	$(-19 \pm 1)$	$(-42 \pm 1)$	$(46 \pm 1)$	$(20 \pm 1)$
$(4 \pm 1)$	$(-22 \pm 1)$	$(-41 \pm 1)$	$(46 \pm 1)$	$(22 \pm 1)$
$(1 \pm 1)$	$(-21 \pm 1)$	$(-40 \pm 1)$	$(45 \pm 1)$	$(21 \pm 1)$
$(1 \pm 1)$	$(19 \pm 1)$	$(-40 \pm 1)$	$(44 \pm 1)$	$(19 \pm 1)$
$(5 \pm 1)$	$(-24 \pm 1)$	$(38 \pm 1)$	$(45 \pm 1)$	$(25 \pm 1)$

Si è calcolata la componente orizzontale per ogni set di dati:

$$B_o = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$$

$$\delta B_o = \left( \frac{\delta x^2 + \delta y^2}{x^2 + y^2} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot B_o$$

dove  $\delta x^2 = \left( 2 \frac{\delta x}{x} \right) \cdot x^2$  e  $\delta y^2 = \left( 2 \frac{\delta y}{y} \right) \cdot y^2$

Si effettua una media per ricavare il valor medio della componente orizzontale del campo magnetico locale:

$$B_o = \frac{\sum B_{oi}}{15} = 20,422 \mu T \quad \delta B_o = \frac{\sigma}{\sqrt{15}} = 0,43 \mu T \rightarrow B_o = (20,4 \pm 0,4) \mu T$$

Si ricava il modulo della componente verticale del campo magnetico terrestre, effettuando una media tra i valori  $B_z$  ottenuti:

$$B_v = \frac{\sum B_{zi}}{15} = -40,80 \mu T \quad \delta B_v = \frac{\sigma}{\sqrt{15}} = 0,28 \mu T \rightarrow B_v = (-40,8 \pm 0,3) \mu T$$

Similmente si ricava il modulo del campo magnetico totale:

$$B_{tot} = \frac{\sum B_{toti}}{15} = 45,60 \mu T \quad \delta B_{tot} = \frac{\sigma}{\sqrt{15}} = 0,24 \mu T \rightarrow B_{tot} = (45,6 \pm 0,2) \mu T$$

### 4.2 Misura campo magnetico generato da filo rettilineo

#### Resistenza da 100 $\Omega$

Campo magnetico teorico prodotto dal filo:

$$B_{T2} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_2} = \frac{\mu_0 (53 \cdot 10^{-3} A)}{2\pi (2 \cdot 10^{-2} m)} = 0,530 \mu T \quad \delta B_{T2} = \left( \frac{\delta I}{I} + \frac{\delta r}{r} \right) B_{T2} = 0,036 \mu T \rightarrow B_{T2} = (0,53 \pm 0,04) \mu T$$

Angolo misurato tra la componente orizzontale del campo magnetico terrestre (direzione nord-sud) e il campo magnetico generato dal filo (direzione est-ovest):

$$\vartheta_1 = (1 \pm 1)^\circ$$

Campo magnetico  $B_2$  :

$$B_2 = B_o \cdot tg\vartheta_1 = (20,4 \mu T)tg(1^\circ) = 0,3648\mu T \quad \delta B_2 = \left( \frac{\delta B_o}{B_o} + \frac{\frac{\delta\vartheta_1}{\cos^2(\vartheta_1)}}{tg\vartheta_1} \right) B_2 = 0,363 \mu T$$

$$\rightarrow B_2 = (0,4 \pm 0,4)\mu T$$

## 2 Resistenze da 100Ω in parallelo

Si calcola la corrente  $I_2$  che circola nel circuito:

$$I_2 = \frac{V}{R_{eq}} = \frac{5,28 V}{50\Omega} = 105,6 mA \quad \delta I_2 = \left( \frac{\delta V}{V} + \frac{\delta R_{eq}}{R_{eq}} \right) I_2 = 5,22 mA \quad \rightarrow I_2 = (106 \pm 5) mA$$

Campo magnetico teorico prodotto dal filo:

$$B_{T3} = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r_2} = \frac{\mu_0 (106 \cdot 10^{-3} A)}{2\pi (2 \cdot 10^{-2} m)} = 1,06 \mu T \quad \delta B_{T3} = \left( \frac{\delta I_2}{I_2} + \frac{\delta r_2}{r_2} \right) B_{T3} = 0,103\mu T \quad \rightarrow B_{T3} = (1,1 \pm 0,1)\mu T$$

Angolo misurato tra la componente orizzontale del campo magnetico terrestre (direzione nord-sud) e il campo magnetico generato dal filo (direzione est-ovest):

$$\vartheta_2 = (2 \pm 1)^\circ$$

Campo magnetico  $B_3$ :

$$B_3 = B_o \cdot tg\vartheta_2 = (20,4 \mu T)tg(2^\circ) = 0,7298\mu T \quad \delta B_3 = \left( \frac{\delta B_o}{B_o} + \frac{\frac{\delta\vartheta_2}{\cos^2(\vartheta_2)}}{tg\vartheta_2} \right) B_3 = 0,370 \mu T$$

$$\rightarrow B_3 = (0,7 \pm 0,4)\mu T$$

## 5- Conclusioni

### 5.1 Misura campo magnetico terrestre

Nella prima parte dell'esperimento, si è misurato il campo magnetico terrestre locale, utilizzando l'applicazione Phyphox. Effettuando diverse misure, si sono ricavati il modulo del campo magnetico totale,  $B_{tot} = (45,6 \pm 0,2)\mu T$ , la sua componente orizzontale,  $B_o = (20,4 \pm 0,4)\mu T$ , e la sua componente verticale,  $B_v = (-40,8 \pm 0,3)\mu T$ . Dal segno negativo di quest'ultima, si deduce che la componente verticale del campo magnetico terrestre punta verso il basso.

I valori così ottenuti risultano confrontabili con i valori teorici:

$$B_{tot}^T = (46,5 \pm 0,5)\mu T$$

$$B_o^T = (22,5 \pm 0,5)\mu T$$

$$B_v^T = (40,5 \pm 0,5)\mu T$$

### 5.2 Misura campo magnetico generato da filo percorso da corrente

Nella seconda parte dell'esperimento, si è costruito un circuito al fine di studiare il campo magnetico generato da un filo rettilineo percorso da una corrente stazionaria.

Inizialmente, si è osservato il fenomeno dal punto di vista qualitativo: collegando direttamente le pile al filo e orientando quest'ultimo lungo la direzione nord-sud, si è notato lo spostamento dell'ago della bussola, posizionata sopra al filo, verso est oppure ovest in base al verso di circolazione della corrente. Si è evidenziato così il campo magnetico generato dal filo percorso dalla corrente.

In seguito, inserendo nel circuito una resistenza da 100Ω, si è provato a rilevare lo spostamento angolare dell'ago della bussola: si è registrata una variazione molto piccola, stimata in all'incirca  $\vartheta_1 = (1 \pm 1)^\circ$ , da cui poi è stato possibile ricavare il campo magnetico generato dal filo,  $B_2 = (0,4 \pm 0,4)\mu T$ . Tale stima risulta comunque ragionevole, se confrontata con il valore teorico del campo  $B_{T2} = (0,53 \pm 0,04)\mu T$ .

Al fine di aumentare il modulo del campo magnetico generato dal filo, si sono inserite nel circuito due resistenze in parallelo, ciascuna da  $100\Omega$ , incrementando così l'intensità della corrente circolante. Si è ripetuto l'esperimento e si è registrato ancora una volta uno spostamento piccolo, anche se più ampio che rispetto al caso precedente. Si è stimato in all'incirca  $\vartheta_2 = (2 \pm 1)^\circ$ . Considerando poi la relazione tra il campo magnetico generato dal filo e la tangente dell'angolo  $\vartheta_2$ , si è stimato un valore pari a  $B_3 = (0,7 \pm 0,4)\mu T$ , il quale, sebbene presenti un elevato errore relativo, risulta confrontabile con quello teorico  $B_{T3} = (1,1 \pm 0,1)\mu T$ .

Quindi, costruendo un circuito con un pacco batterie caratterizzato da  $\varepsilon_{tot} = (5,40 \pm 0,04)$  V e con una resistenza prima da  $100\Omega$  e poi, inserendo due resistenze in parallelo, con una resistenza equivalente da  $50\Omega$ , il campo magnetico prodotto dal filo percorso dalla corrente che scorre nel circuito risulta essere molto piccolo rispetto alla componente orizzontale del campo magnetico terrestre, considerando anche che esso è inversamente proporzionale alla distanza  $r$  dal filo stesso. Risulta quindi difficile da rilevare sia con l'applicazione Phyx che con la bussola, nonostante i risultati ottenuti siano comunque ragionevoli.

Per aumentare il campo magnetico generato dal filo e rilevare una variazione maggiore, e di conseguenza effettuare una misura più precisa, si dovrebbe incrementare la differenza di potenziale ai capi del circuito, quindi utilizzare delle batterie con una f.e.m. più elevata, oppure diminuire la resistenza del circuito, collegando più resistenze in parallelo.