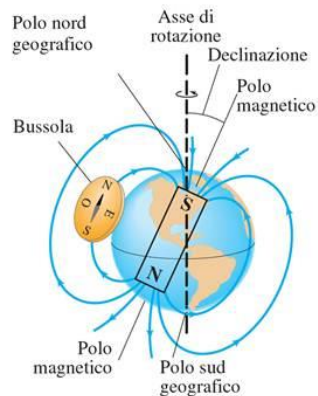


## MISURA DEL CAMPO MAGNETICO LOCALE

(Michele Setti, Ottavia Celli, Antonio Fabiano)

Il campo magnetico terrestre è confrontabile con quello generato da un dipolo magnetico, i cui poli magnetici non coincidono con quelli geografici. Infatti, l'asse dei poli magnetici è inclinata di  $11,5^\circ$  rispetto all'asse di rotazione della Terra.



Considerando quindi il pianeta Terra come un magnete con due poli e osservando le linee di forza del campo magnetico da esso generato, si deduce che il campo è entrante nell'emisfero Nord ed uscente dall'emisfero Sud. Quindi, il polo Nord magnetico della Terra è orientato come il polo Sud geografico e il polo Sud magnetico è orientato come il polo Nord geografico, per convenzione però si considera come polo Nord magnetico quello indicato dall'ago di una bussola, ovvero il Nord geografico.

Quando si effettua la misura del campo magnetico terrestre in un determinato punto della superficie terrestre, si ottiene un valore che è il risultato della sovrapposizione di contributi di origine diversa. Ciascuno di essi corrisponde ad un diverso campo:

1. Campo principale, generato nel nucleo fluido tramite il meccanismo di geodinamo;
2. Campo crostale, generato dalle rocce magnetizzate della crosta terrestre;
3. Campo esterno, generato da correnti elettriche che fluiscono nella ionosfera e nella magnetosfera come conseguenza dell'interazione tra il vento solare e il campo geomagnetico;
4. Campo di induzione elettromagnetica, generato da correnti indotte nella crosta e nel mantello dal campo esterno variabile nel tempo.

Considerando tutti e quattro i contributi sopra citati, l'intensità del campo magnetico rilevato sulla superficie terrestre, vale circa  $40 \mu T$ . Questo valore fa riferimento alla misura eseguita dall'Osservatorio Magnetico di castello Tesino (TN).

[http://roma2.rm.ingv.it/it/risorse/osservatori\\_geomagnetici/13/osservatorio\\_magnetico\\_di\\_castello\\_tesino](http://roma2.rm.ingv.it/it/risorse/osservatori_geomagnetici/13/osservatorio_magnetico_di_castello_tesino)

Durante lo svolgimento dell'esperienza è importante tener conto della presenza del campo magnetico terrestre e di quello dovuto ai dispositivi elettronici situati nelle vicinanze del magnetometro, con cui si effettua la misura. La somma di questi due contributi, costanti nel tempo, è indicata con il nome "campo magnetico di fondo". Siccome il contributo al campo magnetico di fondo dovuto agli apparecchi elettronici è trascurabile, rispetto a quello del campo magnetico terrestre, nell'esperienza, si considererà solo la presenza di quest'ultimo; anche perché ci si pone in una situazione in cui l'influenza di dispositivi diversi dal magnete sia minima. Per svolgere l'analisi d'interesse, sarà conveniente scegliere una particolare configurazione sperimentale per cui la misura non risentirà dell'influenza del campo magnetico terrestre.

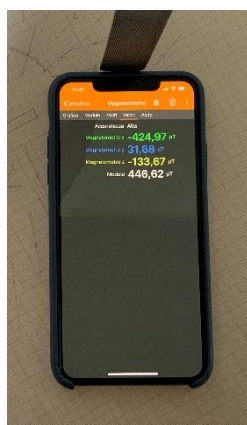
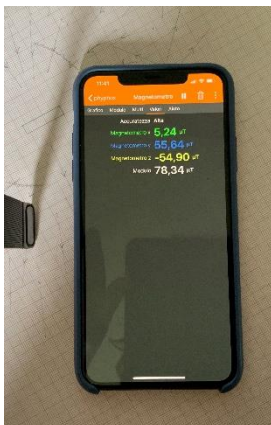
L'esperienza consiste nell'indagare la relazione presente tra l'intensità del campo magnetico generato da una calamita\* e la distanza tra il punto in cui viene misurata e la posizione del magnete che appunto genera il campo. In particolare, quindi, si studia come varia l'intensità del campo in funzione della distanza. Inoltre, si ricercherà se la relazione osservata è analoga ad una legge fisica nota, ad esempio quella che descrive l'andamento dell'intensità del campo magnetico di un dipolo in funzione della distanza, lungo una particolare direzione.

*\*La calamita utilizzata è l'estremità magnetica del cinturino di un orologio.*

## PROCEDIMENTO

### Impostazione dell'esperienza

Prima di effettuare la misura, mediante l'applicazione *Phyphox* (<https://phyphox.org/>), è necessario individuare la posizione del sensore magnetico all'interno del telefono (o generale dispositivo con cui si effettua la misura): per farlo si deve avviare l'applicazione e osservare su quale lato viene indotta una variazione di campo maggiore nello spostare il magnete sui quattro lati.

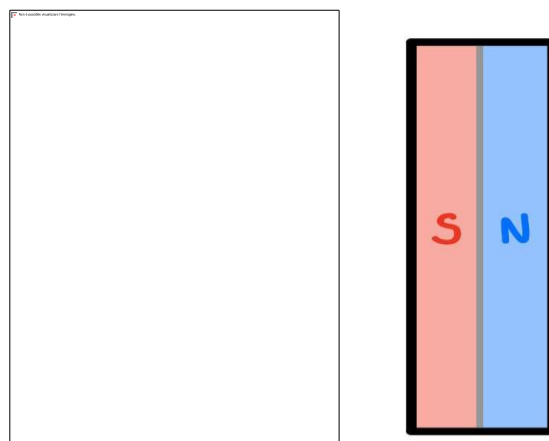


Attenzione, nel fare ciò è necessario mantenere a contatto col dispositivo sempre lo stesso lato del magnete, in quanto si è osservato che anche l'orientamento di questo provoca una variazione del valore misurato. Infatti, ruotando i due poli del magnete, si ruota la configurazione del campo generato da questo, che andrà a sovrapporsi (e quindi sommarsi vettorialmente) al campo magnetico di fondo.

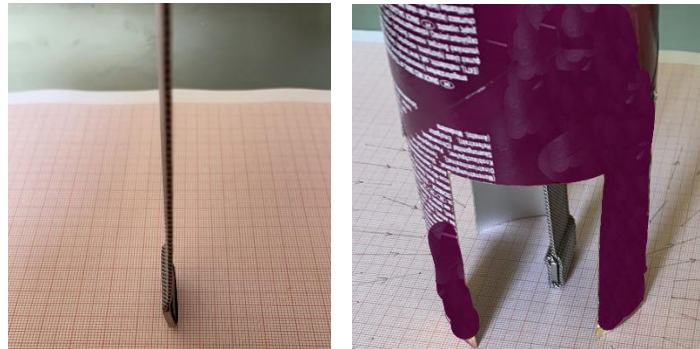
In particolare, effettuando tale procedimento, si è concluso che il sensore magnetico si trovasse nella parte superiore del telefono utilizzato come magnetometro, probabilmente nella zona sinistra, in quanto in quella destra è situata la telecamera. Nonostante tale supposizione, il metodo utilizzato non permette di conoscerne l'esatta posizione, né lungo il lato corto del telefono, muovendoci da sinistra a destra per così dire, né a che altezza lungo il lato lungo del telefono. La precisa posizione del sensore, verrà ricavata in seguito. Inoltre, si verifica che il cinturino dell'orologio non sia magnetico o che comunque non disturbi il campo del magnete.



Siccome la misura verifica quanto detto, si procede studiando il campo generato dal magnete, sondandolo con il seguente metodo. Posizionando una bussola analogica in prossimità del magnete, si è osservata la direzione verso cui si orientava l'aghetto magnetico, notando che, avvicinandola ad un lato il Nord della bussola veniva attratto da esso, mentre avvicinandola al lato opposto veniva respinto, quindi si è ipotizzato che il polo Nord e Sud del magnete fossero posizionati come in figura, con una geometria analoga a quella di un dipolo.



Di conseguenza, per poter disegnare le linee di forza del campo generato dal magnete, lo si è dovuto posizionare come illustrato nella foto sottostante; per mantenere tale posizione si è costruito un supporto con un tubo di cartone. Si è poi fissato sul tavolo un foglio di carta millimetrata, necessaria per eseguire le misure richieste.

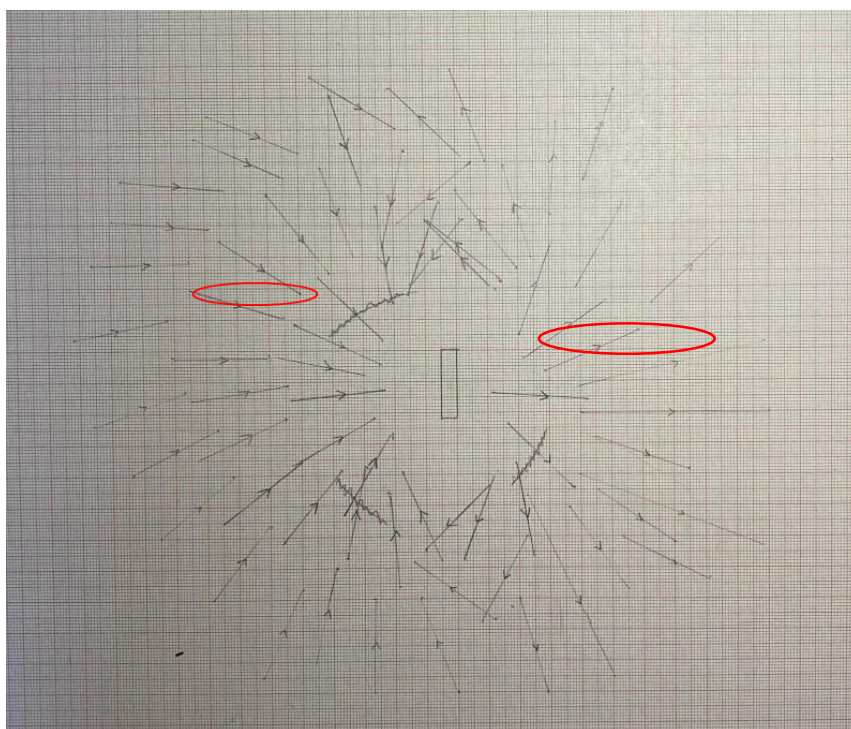


A questo punto si può procedere posizionando la bussola alla minima distanza possibile dal magnete, ovvero quella pari al raggio del tubo di 3 cm, osservare come si orienta l'ago e tracciarne il prolungamento sul foglio di carta millimetrata sottostante.

Dopodiché, si toglie la bussola e si completa il prolungamento, prestando attenzione a indicare anche il verso dell'ago rosso (Nord) lungo tale segmento, con una freccia.

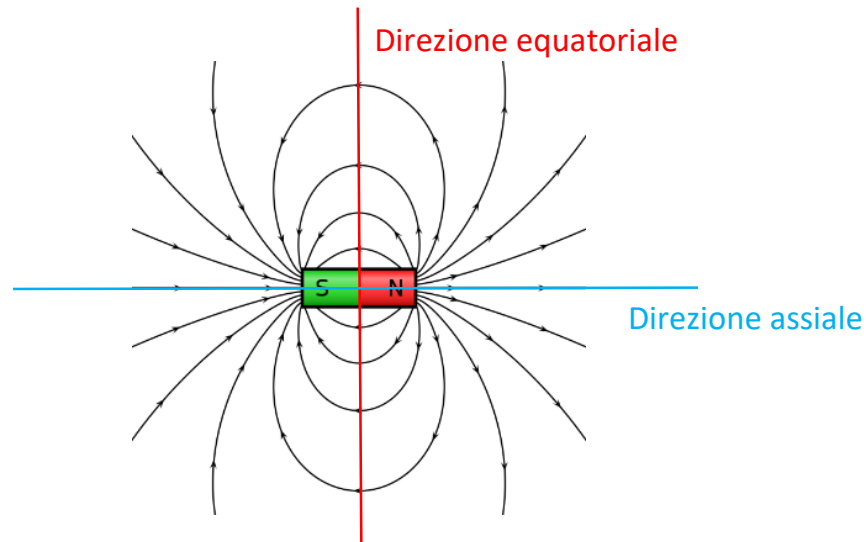
Il verso è importante per capire se in un determinato punto del piano considerato, il vettore campo magnetico è uscente o entrante rispetto al magnete. Iterando il processo e spostando la bussola lungo una circonferenza centrata nel punto in cui si trova il magnete, si disegnano le linee di forza del campo ad una certa distanza da esso, poi si può variare la distanza, quindi aumentare il raggio della circonferenza lungo cui ci si muove e ripetere il processo, per avere più informazioni.

Il campo sondato è risultato avere la seguente configurazione.

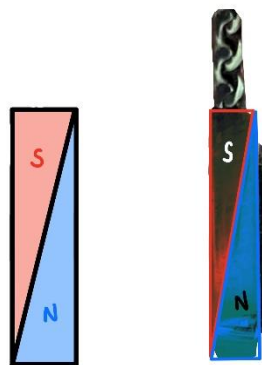


*Le linee a "zig zag" indicano tratti del perimetro del tubo*

Osservando le linee di forza tracciate sul foglio si è notata una somiglianza evidente con le linee di forza del campo generato da un dipolo magnetico, si veda l'immagine sottostante. Il Nord del dipolo è a destra, le linee sono uscenti, mentre il Sud è a sinistra, le linee sono entranti. L'ipotesi iniziale, riguardante la geometria del magnete, risulta quindi verificata.



Però, dal disegno ottenuto, si nota che le due linee di forza orizzontali (cerchiate in rosso), una entrante ed una uscente, non sono alla stessa altezza, il che può far pensare che il magnete sia montato come in figura.

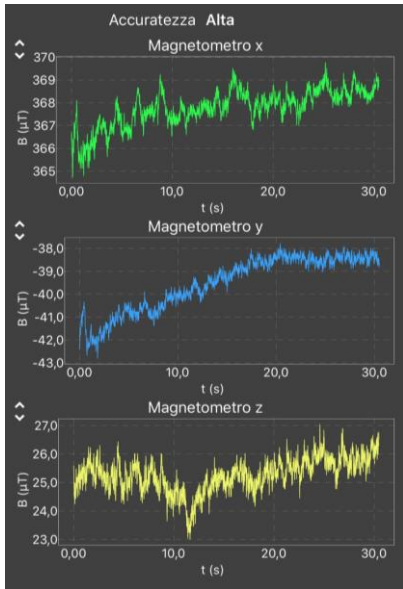


Per verificare che il campo mappato sia, effettivamente, solo quello del magnete e che sia confrontabile con quello di un dipolo, si ruota il magnete di 90° rispetto alla linea di forza orizzontale di destra\* (che si assume essere l'asse dell'ipotetico dipolo) e si rilevano le componenti x, y e z del campo magnetico ad una precisa distanza dal magnete, ad esempio 3 cm, prima e dopo la rotazione.

Se la componente x rimane simile e le componenti y e z si invertono, allora significa che il campo ruota con il magnete e che questo è effettivamente assimilabile ad un dipolo nello spazio e non solo sulla superficie utilizzata per la mappatura. Sperimentalmente si ottengono i seguenti risultati:

- Misura prima della rotazione:  $B_x = 387 \mu T$ ;  $B_y = 21,7 \mu T$ ;  $B_z = -22,7 \mu T$
- Misura dopo la rotazione:  $B_x = 367 \mu T$ ;  $B_y = -41 \mu T$ ;  $B_z = 25 \mu T$



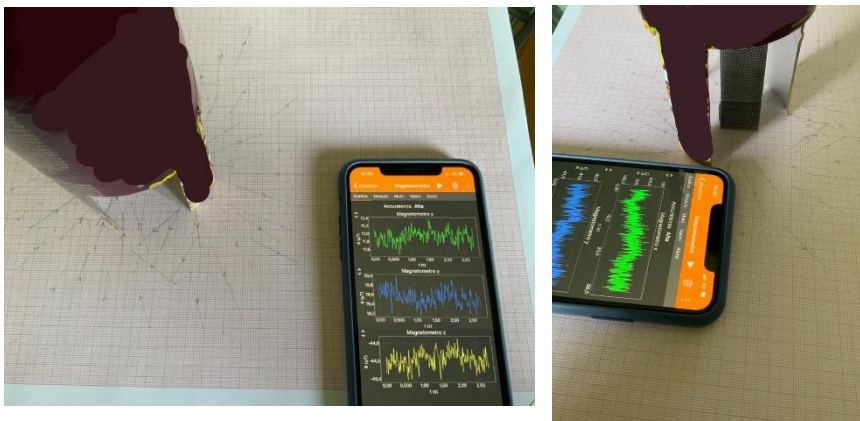


Per come viene effettuata la misura, la linea di forza rilevata dal sensore è sempre la stessa, in entrambe le configurazioni. siccome non si conosce l'esatta posizione del sensore nel telefono, si è sollevato quest'ultimo di un'altezza tale che la linea di forza assiale lo attraversi a metà spessore, dov'è più probabile che si trovi il sensore, per ridurre gli errori comunque presenti. Le misure relative alla componente x nelle due configurazioni sono confrontabili e le componenti y e z si invertono come previsto, perciò il magnete si comporta come un dipolo anche nello spazio tridimensionale e non solo nella configurazione studiata.

*\*si veda l'immagine delle linee di forza*

### Esecuzione della misura

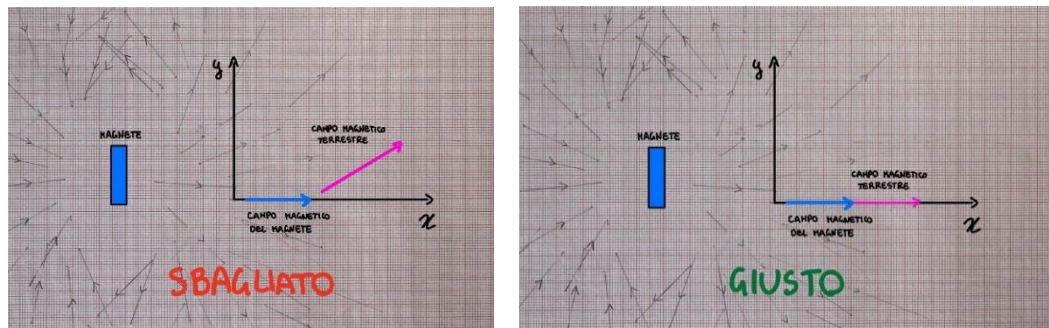
Si procede ora con la rilevazione, partendo dalla configurazione sperimentale illustrata in foto.



La misura dell'intensità del campo magnetico del magnete viene fatta lungo la linea di forza orizzontale uscente dal magnete, ovvero in direzione assiale e a tal proposito, è importante verificare che, anche allontanandosi ulteriormente dal magnete questa mantenga tale direzione. Il fatto che la direzione non vari, significherebbe che il campo del magnete e il campo di fondo siano perfettamente allineati, perché se così non fosse, allontanandosi,

l'influenza del magnete calerebbe e l'ago si orienterebbe seguendo il campo di fondo. Se questo non avviene, significa che i due campi sono perfettamente allineati\*. Inoltre, siccome localmente il campo terrestre ha un andamento rettilineo, non solo, il campo del magnete si mantiene rettilineo in direzione assiale, ma qualsiasi deviazione dell'ago sarà dovuta all'influenza del solo magnete.

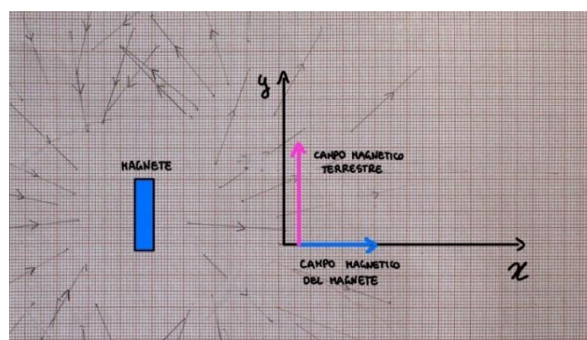
*\*Per verificare ciò è possibile togliere il magnete e osservare la direzione del campo magnetico terrestre con la bussola.*



In pratica, per verificare che la linea di forza lungo cui si eseguiranno le misure, mantenga invariata la sua direzione, ci si pone in modo tale che essa risulti parallela e di verso concorde al vettore campo magnetico terrestre, determinato in assenza del magnete. Si posiziona quindi la bussola vicino alla linea di forza, l'ago rosso si orienterà nella sua stessa direzione e verso, risultando parallelo al vettore campo magnetico terrestre; si sposta la bussola lungo la linea, prestando attenzione che l'ago mantenga il suo orientamento iniziale. Se non varia, significa che ci si trova nella situazione d'interesse precedentemente esplicita e illustrata nella foto sovrastante.



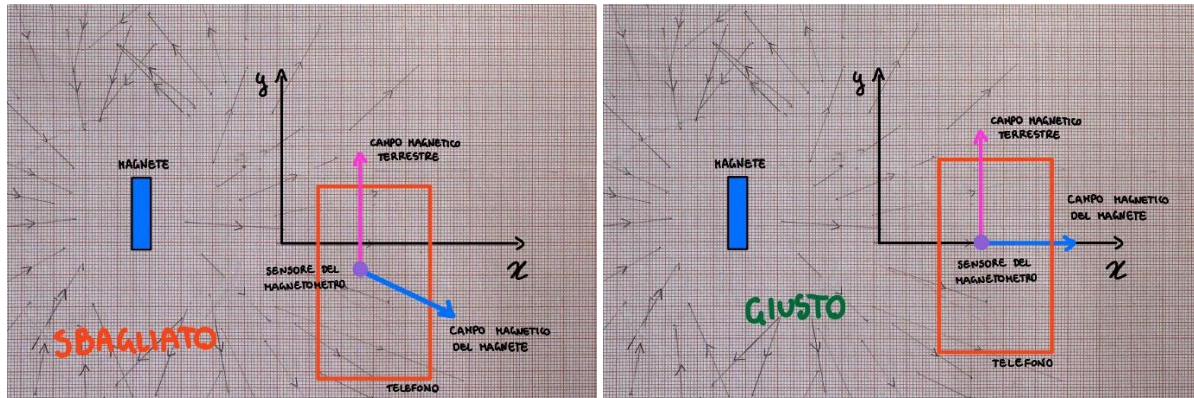
Effettuata tale verifica, ci si pone nella configurazione illustrata nella foto sottostante, dove la linea di forza orizzontale, determinante l'asse x, risulta perpendicolare alla direzione del vettore campo magnetico terrestre, appartenente al piano yz. Nella figura, il vettore in rosa, rappresenta la proiezione del vettore campo magnetico terrestre sul piano xy.





Il telefono, che assume la funzione di magnetometro, viene intuitivamente posizionato in modo tale che la linea di forza considerata attraversi il sensore magnetico\*, di fatto, la linea di forza disegnata sul foglio di carta millimetrata è solo la proiezione sulla superficie del tavolo, della reale linea di forza attraversante il sensore.

Siccome lo spessore del telefono è piccolo e l'altezza dell'ago della bussola è confrontabile con lo spessore del telefono, tale proiezione ben rappresenta l'effettiva linea di forza che attraversa il sensore.



*\*Per sapere a che altezza, lungo y, si trova il sensore del telefono, si cerca il punto in cui la componente y misurata dal magnetometro, sia la stessa del campo magnetico terrestre in assenza del magnete (circa  $21,7 \mu T$ ). La distanza del sensore del telefono, dal bordo superiore del telefono, è risultata essere 1,8 cm.*

In questa configurazione quindi, la componente y del campo, rilevato dal magnetometro, è dovuta solamente al campo magnetico terrestre ( $21,7 \mu T$ ) che rimane costante, ovviamente entro il range di errore ( $21,7 \pm 0,5$ )  $\mu T$ , durante l'esperimento.

Così si ha la certezza che i valori rilevati lungo l'asse x siano, unicamente, quelli assunti dal campo magnetico del magnete, siccome lungo tale linea la componente del campo terrestre è sempre nulla.

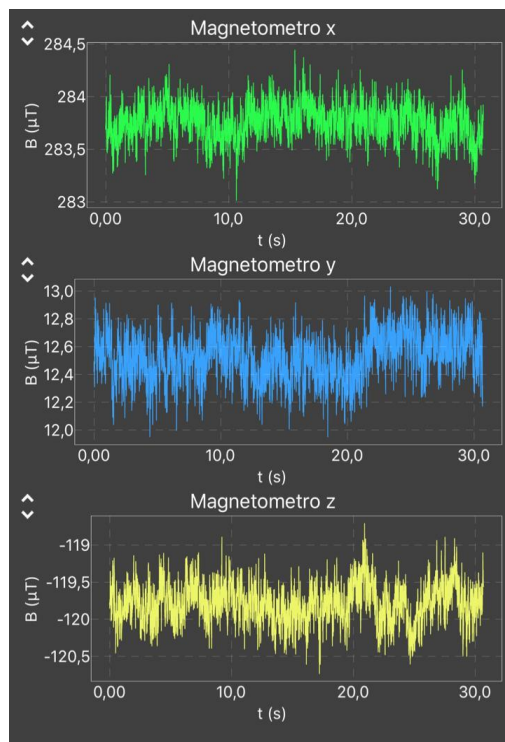
Il sistema di riferimento considerato ha quindi l'asse x con la stessa direzione e verso della linea di forza scelta, l'asse y con la stessa direzione e verso della componente del campo magnetico terrestre, perpendicolare alla linea di forza orizzontale e l'asse z con verso uscente dal piano xy. Durante la rilevazione si nota poi che, i valori misurati lungo x, y e z sono positivi, quindi gli assi del sistema di riferimento sono effettivamente concordi alle componenti del campo osservate.



Inoltre, gli assi del sistema sono centrati sul magnete, ma come anticipato, la posizione iniziale considerata è a 3 cm dall'origine. Quindi, il sistema di riferimento visibile nelle immagini riportate sopra, non coincide con quello realmente utilizzato, ma l'origine degli assi cartesiani è traslata, a destra, lungo x.

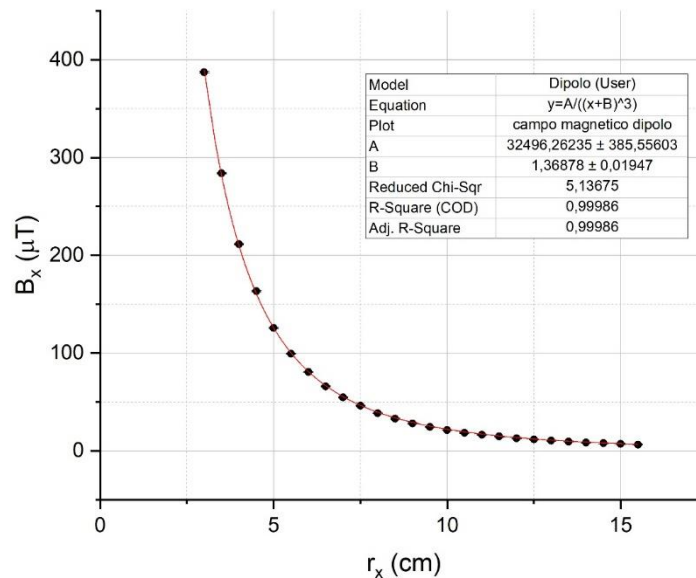
Si procede alla rilevazione dei dati, misurando l'intensità del campo magnetico generato dal magnete lungo l'asse x, allontanando quindi il telefono lungo tale direzione e avviando il magnetometro ogni 0,5 cm.

Per limitare gli errori, durante la singola rilevazione, il magnete e il telefono non sono stati spostati e per ottenere valori più precisi, è stato creato un grafico riportante in funzione del tempo il valore in  $\mu\text{T}$  del campo magnetico, attraverso una misurazione di circa 30 secondi, per le tre componenti x, y e z. Esportando in un file Excel i dati utilizzati da *Phyphox* per la creazione del grafico (all'incirca 3050 punti) ed eseguendo una media è stato ottenuto il valore definitivo.



*Misura dell'intensità del campo magnetico della calamita, lungo i tre assi, posta ad una distanza di 3 cm dal magnetometro. Si nota come sia ragionevole assumere  $\pm 0,5 \mu\text{T}$  come range di errore su ogni valore rilevato.*

Iterando questo procedimento è stato creato il seguente grafico, riportante l'andamento del campo magnetico del magnete in direzione assiale (cioè la componente lungo x), al variare della distanza tra il magnetometro ed il magnete stesso.



Notare come il primo dato è relativo alla minima distanza possibile dal magnete, pari a 3 cm.

L'equazione utilizzata per il fitting dei dati sperimentali è:

$$y = f(x) = \frac{A}{(x + B)^3}$$

Dove:

- $x$  è la variabile indipendente e rappresenta la distanza dello spigolo sinistro del telefono dal magnete;
- $B$  è un parametro che, in valore assoluto, rappresenta la posizione del sensore magnetico rispetto allo spigolo sinistro del telefono, in direzione  $x$ .

A questo punto, sono note le coordinate  $x$  ( $1,1369 \pm 0,019 \text{ cm}$ ) e  $y$  ( $2,9 \pm 0,1 \text{ cm}$ ) del punto in cui si trova il sensore magnetico del telefono e se ne può individuare l'effettiva posizione.



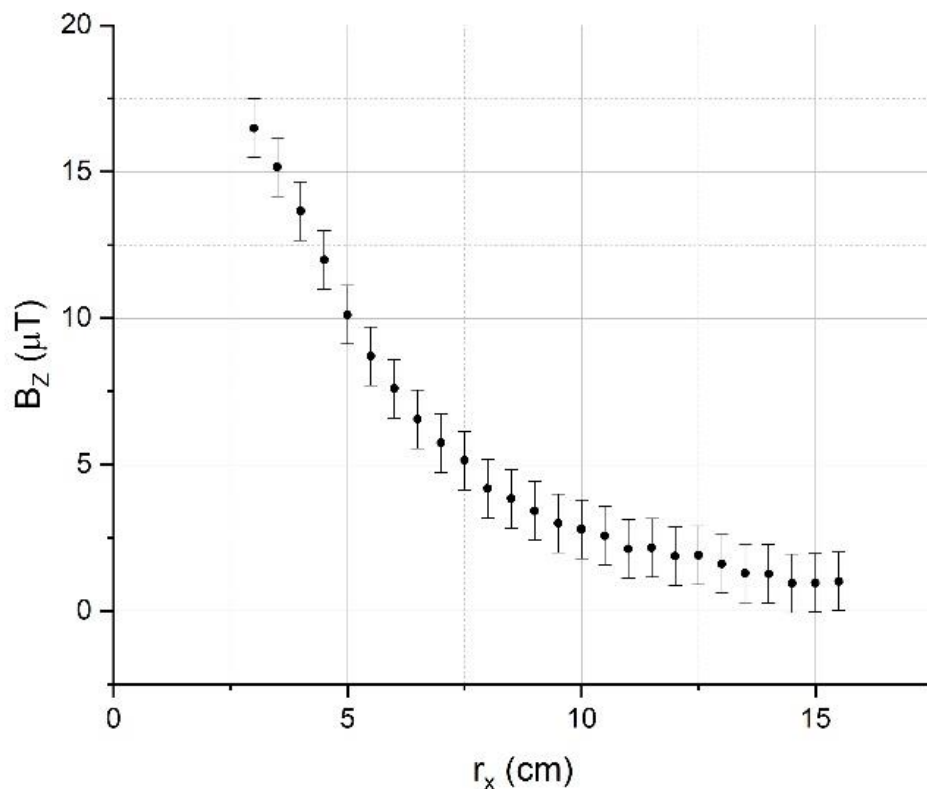
L'equazione del campo magnetico di un dipolo è:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{3x(m \cdot x)}{x^5} - \frac{m}{x^3} \right)$$

In direzione assiale, il prodotto scalare ( $m \cdot x$ ) va a zero e si ottiene un andamento come  $\frac{1}{x^3}$ , che ben approssima l'andamento dei dati sperimentali. Quindi l'ipotesi che, in direzione assiale, il magnete utilizzato si comporti come un dipolo è ulteriormente verificata.

### Osservazione

Nell'eseguire l'esperimento si sono registrati anche i valori rilevati lungo l'asse z del magnetometro. Togliendo il valore del campo magnetico terrestre lungo tale asse ( $-39 \pm 0,5 \mu T$ ) ai dati ottenuti, è possibile costruire un grafico rappresentante la variazione dell'intensità della componente z del campo generato dal magnete, in direzione assiale.



*Si nota come, allontanandosi dal magnete lungo l'asse x, la componente z tenda a zero.*

## Riassumendo

Svolgendo l'esperimento si è dedotto il seguente metodo sperimentale:

- 1) Per scegliere l'ambiente in cui effettuare la misura si deve verificare che i valori rilevati lungo le direzioni x y e z del magnetometro del cellulare corrispondano alle componenti orizzontale e verticale del campo terrestre. Quindi, trovare una posizione del cellulare in cui una componente orizzontale vada a 0 e le altre due corrispondano alle componenti orizzontale e verticale del campo magnetico terrestre;
- 2) Traslare il cellulare su un piano orizzontale (senza ruotarlo): le tre componenti non devono mai cambiare. In questo modo si può assumere trascurabile il contributo ambientale di sorgenti spurie di campo magnetico;
- 3) Verificare con il magnetometro che il campo generato dalla calamita sia almeno un ordine di grandezza superiore al campo magnetico terrestre.
- 4) Considerare l'asse di simmetria del magnete e nel piano contenete tale asse mappare le linee di forza del campo magnetico della calamita usando la bussola (o limatura di ferro);
- 5) Se le linee di forza ricordano quelle di un dipolo magnetico, ripetere la stessa operazione ruotando il magnete di 90 gradi attorno all'asse di simmetria del magnete;
- 6) Se in entrambe le orientazioni del magnete si individua una linea di forza rettilinea, orientare tale asse lungo la direzione del campo magnetico terrestre e proseguire nella verifica di andamento rettilineo fino a distanze dal magnete confrontabili con la componente orizzontale del campo magnetico terrestre;
- 7) Orientare poi il magnete in modo che la linea di forza rettilinea del campo magnetico della calamita sia perpendicolare alla componente orizzontale del campo magnetico terrestre, mentre in verticale si legge un valore di campo magnetico confrontabile con la componente verticale del campo magnetico terrestre;
- 8) Traslare il cellulare sul suo lato lungo (y) perpendicolarmente alla linea di forza rettilinea della calamita (senza ruotarlo): individuare la posizione in cui la componente x è massima e la componente y è uguale alla componente orizzontale del campo magnetico terrestre;
- 9) In corrispondenza di quella posizione traslare il cellulare in direzione x senza ruotarlo (lungo la linea di forza) e acquisire il valore della componente x letta dal magnetometro (il valore z dovrebbe discostarsi poco dal valore della componente verticale del campo magnetico terrestre) annotare questo dato in funzione della coordinata x che dà la distanza del cellulare dalla calamita (il suo lato più vicino al magnete);
- 10) Mettere in grafico e analizzare con una legge tipo  $f(x) = \frac{A}{(x+B)^3}$  considerando il campo di un dipolo. Il valore  $|B|$  indica la posizione del magnetometro rispetto al lato del cellulare più vicino al magnete.