

## Esperimenti di levitazione: la trottola magnetica.

### Introduzione

La trottola magnetica è un giocattolo scientifico che unisce diversi principi della fisica, relativi al magnetismo ed al momento angolare, per far fluttuare un magnete a mezz'aria. Incuriosito da questo oggetto spettacolare, in commercio già da parecchi anni, ho cercato di riprodurlo, utilizzando materiali di fortuna ed i magneti del negozio Supermagnete. Il progetto non è una novità sperimentale, ma spulciando in rete non ho trovato nessun'indicazione su un'eventuale processo di realizzazione casalingo e manuale. Qui di seguito, oltre alle istruzioni su come realizzare l'esperimento, cercherò di descrivere i meccanismi del fenomeno mediante concetti di fisica elementare.

### Il principio di funzionamento

E' risaputo che due magneti posti vicini tra loro possono respingersi o attrarsi, in funzione dell'orientamento dei loro poli. La coppia di magneti, come tutti i sistemi naturali, tende a portarsi in equilibrio in base al principio della *minima energia*: le calamite in sostanza, si autoregolano alla ricerca di uno *stato d'equilibrio* caratterizzato dalla minore energia possibile. Supponiamo di avere una coppia di magneti appoggiata su di un piano: se i due magneti sono orientati in modo da respingersi, ad esempio con il nord di un magnete verso il nord dell'altro magnete, e se si riduce in maniera progressiva la loro distanza, ad un certo punto i due si orienteranno automaticamente in modo da attrarsi ed entreranno in contatto. Al di sotto di una certa *distanza minima, o di soglia*, si genera una coppia di forze, quindi un momento, detto *momento magnetico*, che ruota i magneti e spinge il sistema in un nuovo stato, tale per cui l'energia necessaria per mantenere la coppia di calamite attaccate è più bassa di quella necessaria a respingerle. Si può anche affermare che l'equilibrio della coppia di magneti che si respingono, in queste condizioni, è *instabile*, mentre quello delle calamite che si attraggono è *stabile*. Di fatto è impossibile utilizzare *soltanto* questo fenomeno per mantenere in sospensione un magnete sopra un altro, poiché la gravità attira inesorabilmente il magnete superiore fino a fargli raggiungere la *distanza di soglia*.

La trottola è un giocattolo che, da centinaia d'anni, incanta le persone d'ogni età ed anch'esso sfrutta il principio della minima energia ed il concetto dell'equilibrio instabile. La trottola, se è appoggiata con la punta su di un piano orizzontale, se è posta con il proprio asse perpendicolare al piano e se non ruota, appena lasciata libera si trova in una condizione d'equilibrio instabile ed inevitabilmente cade di lato. In tale situazione, il principio della minima energia, legato qui all'energia potenziale del suo baricentro, spinge il sistema alla ricerca di uno stato con energia minore, che equivale a quella della posizione con baricentro più basso: in tali condizioni la trottola cade. Con la rotazione della trottola, invece, si genera una grandezza definita *momento angolare*, che è proporzionale alla massa, alle proprietà geometriche ed alla velocità di rotazione della trottola. Il *momento angolare* è un vettore la cui direzione coincide con quella dell'asse della trottola in rotazione e permette al giocattolo di rimanere in equilibrio verticale, anche a fronte di coppie di forze esterne che tenderebbero a modificarne lo stato. Più sono elevate la massa e la velocità di rotazione della trottola, minori sono gli effetti delle forze esterne sullo stato d'equilibrio raggiunto. Questo fenomeno è sfruttato, ad esempio, nella ruota della bicicletta. Ad alta velocità si raggiunge una maggiore stabilità, proprio perchè il *momento angolare* delle ruote è elevato e mantiene il sistema saldamente in equilibrio.

Vediamo ora com'è composto l'apparato della trottola magnetica e qual è il suo funzionamento, in base ai principi appena descritti. Il sistema è costituito da due parti: una trottola realizzata con un magnete a disco o toroidale ed una base, magnetica anch'essa, di dimensioni e massa superiori, in ogni caso sufficienti a nostri scopi.

Combinando opportunamente i campi magnetici della trottola e della base, si è in grado di vincere la forza di gravità (purché i due magneti siano sufficientemente potenti) e di sospendere a mezz'aria la trottola stessa. Ricordo, però, che questo è un equilibrio instabile ed il *momento magnetico* tende a ribaltare la trottola, richiamata rapidamente dalla base. In realtà, la trottola, quando è messa in rotazione attorno al proprio asse, genera un *momento angolare* che mantiene il sistema in equilibrio, a fronte di disturbi esterni. In questo caso il disturbo è proprio il *momento magnetico*, il cui effetto è ridotto dalla rotazione della trottola che, quindi, non cade di lato e rimane finalmente in sospensione. La spiegazione fisica del fenomeno è un po' più complessa e mette in gioco un altro moto della trottola che è quello di *precessione*.

I problemi da affrontare per la realizzazione di un sistema funzionante sono i seguenti:

- la trottola deve essere leggera ma il magnete che la costituisce altrettanto potente. I normali magneti in ferrite (ad esempio, le calamite che si trovano dentro gli altoparlanti) non permettono di raggiungere entrambi gli obiettivi. Solo da poco tempo sono disponibili in commercio anche per il grande pubblico i magneti in neodimio, che uniscono entrambe le caratteristiche;
- le proporzioni tra le dimensioni della trottola e quelle della base magnetica sono importanti. Dopo svariate prove, infatti, ho riscontrato che il diametro esterno della trottola deve essere pari a circa la metà del diametro interno della base magnetica. Per questo motivo, suggerisco di usare dei materiali simili a quelli riportati in questo documento, così si eviterà di ricorrere a lunghe e noiose sperimentazioni;
- il sistema è ad ogni modo molto delicato e necessita di un'attenta regolazione dei pesi della trottola e della posizione/inclinazione rispetto al piano d'appoggio della base;
- non tutti i punti dello spazio tra i due magneti permettono alla trottola di rimanere sospesa. Esiste un'unica zona, detta *trappola magnetica*, sopra la base, dove la trottola può permanere in sospensione per un periodo più o meno lungo. Tale zona deve essere raggiunta da un *posizione di partenza* più bassa da dove si avvia la rotazione della trottola. La rotazione deve essere lanciata su un piano ausiliario e con l'asse della trottola coincidente con quello della base, in una zona in cui le condizioni magnetiche sono abbastanza particolari e rendono un po' più semplice l'avvio della rotazione;
- infine, va tenuto presente che le condizioni al contorno, tipo il peso della trottola e la posizione/inclinazione della base, vengono influenzate da altri parametri, quali presumibilmente la temperatura e la pressione ambientale. A causa di questi ultimi, le condizioni al contorno non rimangono costanti nel tempo e spingono a regolazioni saltuarie del sistema, nel senso che, se nell'istante presente funziona, dopo un'ora potrebbe essere necessario variare di poco il peso della trottola oppure la posizione della base, per far funzionare di nuovo il tutto.

Personalmente ho dedicato parecchi giorni a capire queste piccole regole ed a mettere a punto gli aggiustamenti necessari per la costruzione di un sistema pienamente funzionante.

### Materiale necessario

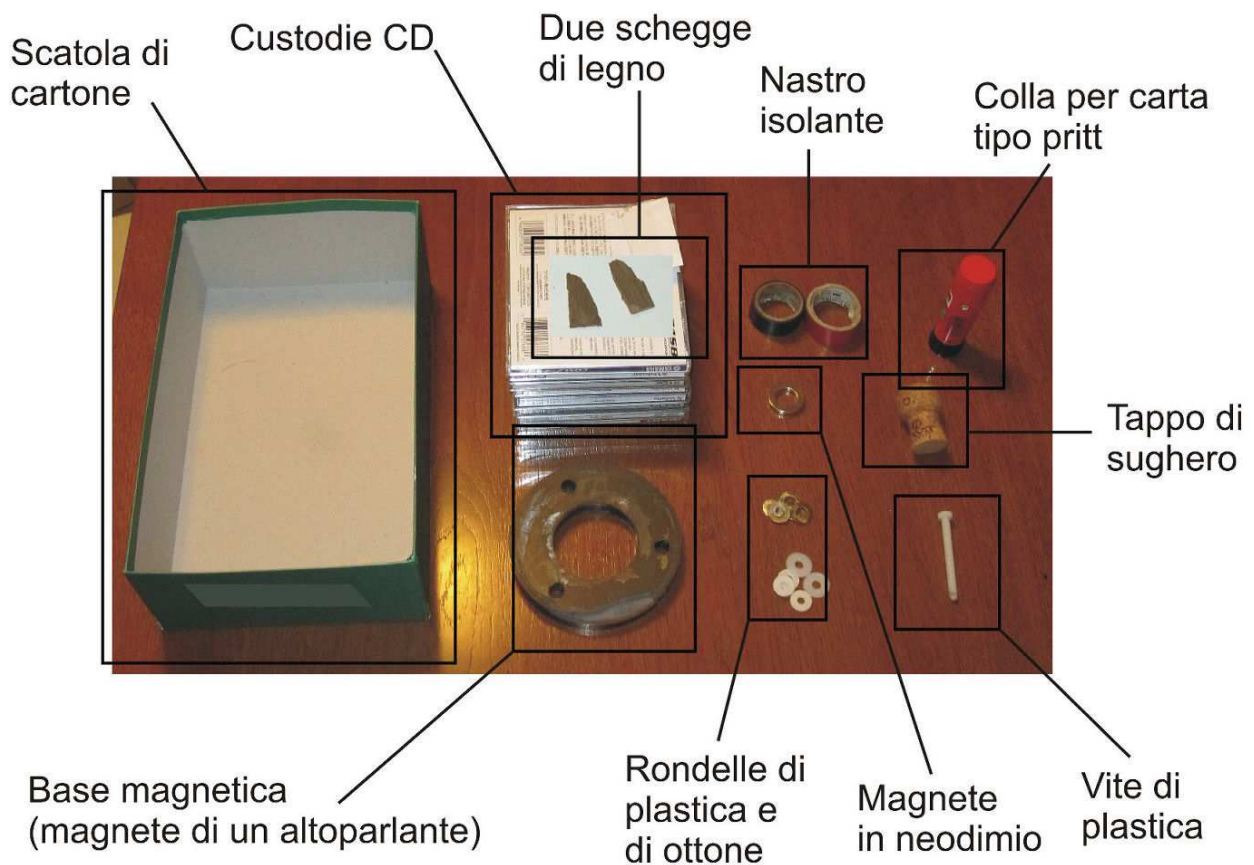
Fatta eccezione per il magnete in neodimio, ho cercato di utilizzare materiale di recupero od oggetti reperibili in ferramenta a basso costo: in questo modo ho contenuto le spese ed il disagio per la ricerca del materiale (vedi anche Fig. 1). Il materiale utilizzato è stato:

- magnete per la trottola magnetica tipo **R-27-16-05-N**,  
**diam. 26,75/16 mm**  
**spessore 5 mm**  
**peso 14 g**  
acquistabile su <http://www.supermagnete.it/>
- magnete per la base, costituito da un magnete in ferrite (di forma toroidale), recuperato da un vecchio altoparlante guasto:  
**diam. 115/57 mm**

**spessore 15 mm**

**peso 600 g;**

- un sughero, recuperato un tappo di bottiglia abbastanza grosso, tipo quello delle bottiglie da spumante;
- una vite di plastica, che non costa molto ma non si trovano in tutte le ferramenta,  
**diametro 6mm**  
**lunghezza 64mm;**
- alcune rondelle in ottone ed in plastica, con diametri variabili ma in ogni caso più piccoli del diametro dell'anello in neodimio. I pesi vanno da **1.7g a 0.5g;**
- colla per carta tipo pritt o equivalente;
- nastro isolante;
- una scatola di scarpe in cartone;
- una decina di custodie di plastica rigida per CD/DVD;
- due schegge di legno;
- carta vetrata.



**Fig. 1: materiale necessario per la costruzione del kit.**

### **Strumenti necessari**

- un cutter (o taglierino);
- una punta di trapano di diametro 5,5mm;
- un seghetto da hobbista;
- una matita o un pennarello punta fine;
- un compasso (utile ma non necessario);
- una micro-bilancia (utile ma non necessaria).

Nel corso del lavoro, ho anche usato un trapanino da hobbista dremel, che in realtà non è necessario ma rende il lavoro più spedito (vedi Fig. 2).

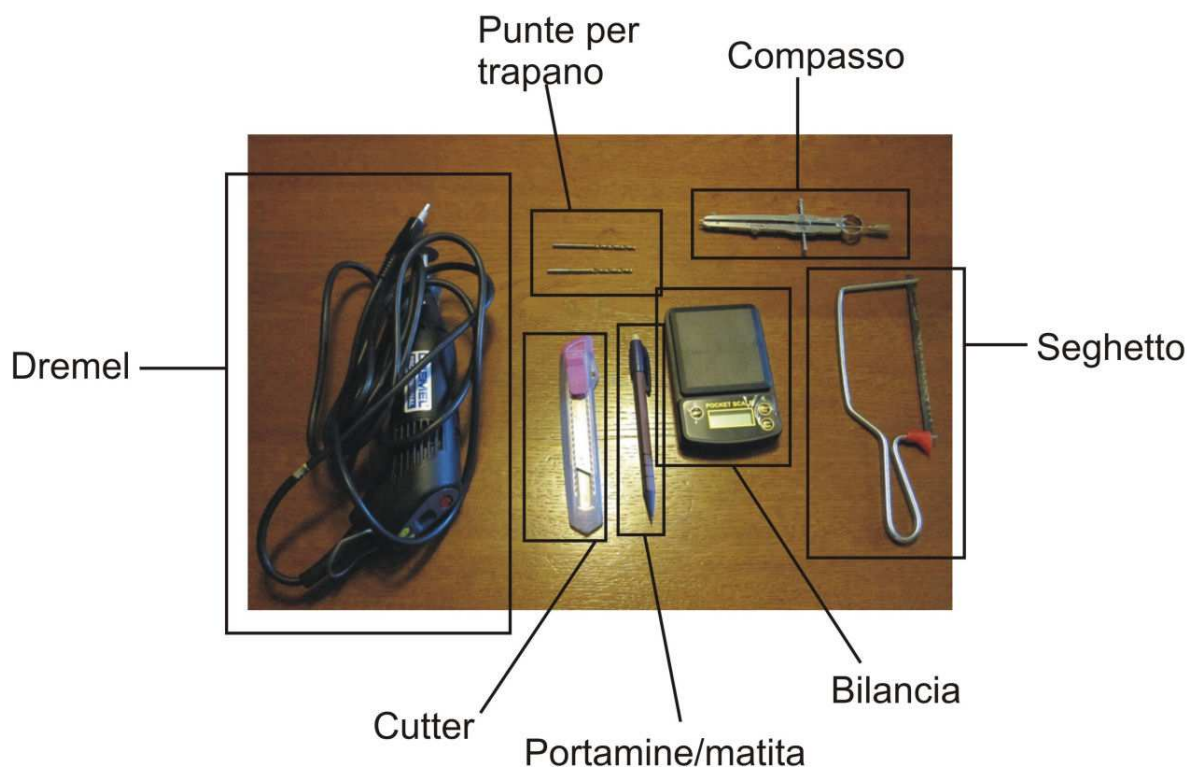


Fig. 2: strumenti necessari per la costruzione del kit.

### Istruzioni per costruire la trottola

Per la realizzazione della trottola si procede secondo le seguenti fasi:

- con il cutter tagliare una fetta di sughero dal tappo (Fig. 3), di spessore pari a quello dell'anello di neodimio (**5mm**);
- appoggiare l'anello in neodimio sulla fetta appena tagliata e con la matita tracciare il diametro interno dell'anello sulla superficie della fetta (Fig. 4). Segnare anche il centro del cerchio appena tracciato (va bene anche ad occhio, altrimenti usare il compasso);
- forare il centro con una punta di trapano di diametro leggermente più piccolo di quello della vite di plastica (**5.5mm**). Si può forare anche usando la punta con la mano poiché il sughero è certamente morbido e semplice da lavorare (Fig. 5);
- con il cutter tagliare la fetta di sughero sulla linea del cerchio (Fig. 6), al fine di ottenere una rondella con un foro in mezzo. Il peso della stessa si dovrebbe aggirare sui **0.4g**;



Fig. 3: taglio del sughero.



Fig. 4: tracciamento del cerchio.



Fig. 5: foratura del sughero.

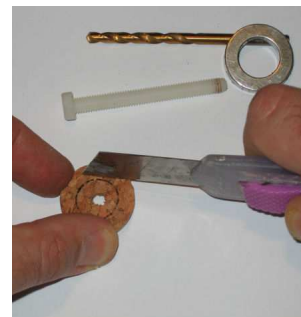


Fig. 6: taglio finale del sughero.

- cospargere un po' di colla sulla superficie laterale della rondella in sughero ed infilarla all'interno del magnete in neodimio, per ottenere il piatto della trottola (Fig. 7);
- accorciare, con il seghetto, la vite di plastica ad una lunghezza di **30mm** circa (Fig. 8), tagliando via anche la testa della vite e realizzare delle intaccature sul gambo (sempre con il

seghetto). Poi, con la carta vetrata, arrotondare uno dei due estremi del gambo appena realizzato, che costituirà la punta della trottola: il peso del gambo dovrebbe essere di circa **0.7g**. Tutte le singole parti della trottola magnetica, a questo punto, sono pronte (Fig. 9);

- avvitare il gambo nel foro della rondella in sughero;
- la trottola appena realizzata dovrebbe avere un peso di circa **15g** ( $14g+0.4g+0.7g$ ). Il peso è in ogni caso inferiore a quello necessario per il funzionamento con la base scelta. Come precedentemente spiegato, il peso della trottola è cruciale: è necessario quindi poterla appesantire od alleggerire alla bisogna. Così, il peso adeguato sarà raggiunto incollando una o più rondelle di plastica/ottone sul corpo stesso della trottola (Fig. 10).

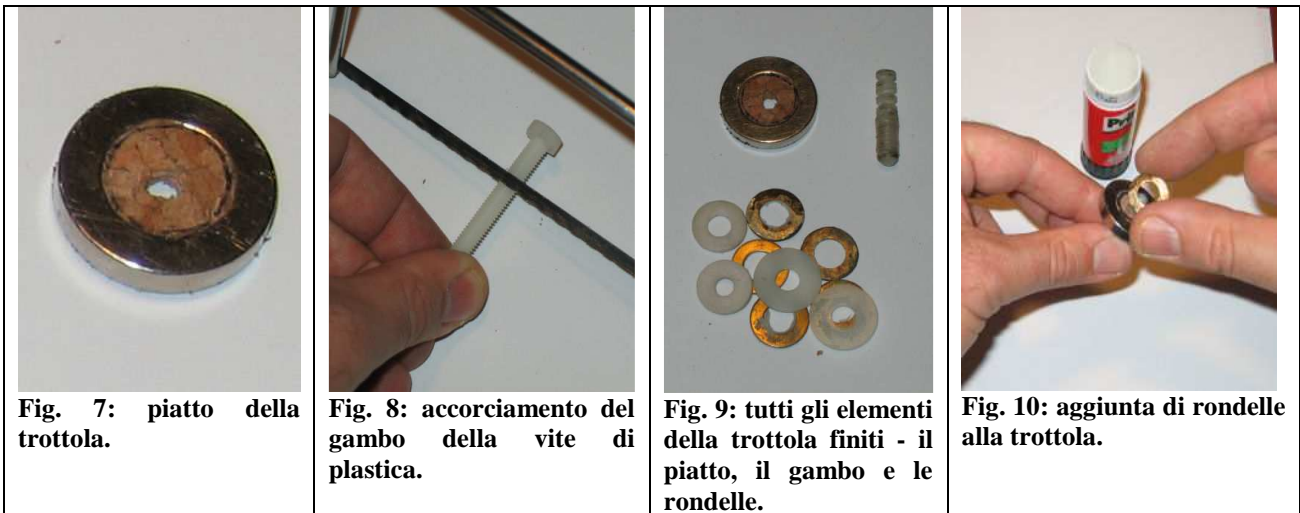


Fig. 7: piatto della trottola.

Fig. 8: accorciamento del gambo della vite di plastica.

Fig. 9: tutti gli elementi della trottola finiti - il piatto, il gambo e le rondelle.

Fig. 10: aggiunta di rondelle alla trottola.

### Istruzioni per costruire la base

Per la base ho utilizzato un magnete in ferrite, ricavato da un vecchio altoparlante guasto. Per poterlo utilizzare, va eliminata la carcassa esterna dell'altoparlante, insieme alle espansioni polari e vanno tolte le viti che generalmente tengono bloccato il tutto. Dato che le espansioni polari, i due dischi in metallo che bloccano le basi del toroide, sono incollate al magnete, il metodo più sicuro (per voi e per il magnete) per staccarle è quello di bloccare il magnete ad una morsa, di riscaldare le espansioni polari con una fiamma (con un becco di bunsen o con un cannello, oppure potete andare anche da un fabbro) e di usare un cacciavite a taglio al fine di fare leva tra il magnete e l'espansione polare. Le espansioni riscaldate si staccheranno senza difficoltà. In Fig. 11 ed in Fig. 12 sono riportate rispettivamente la base e la trottola magnetica finite con le relative misure.

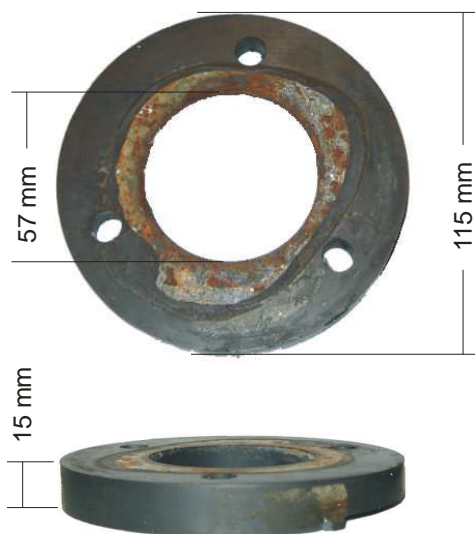


Fig. 11: la base magnetica.

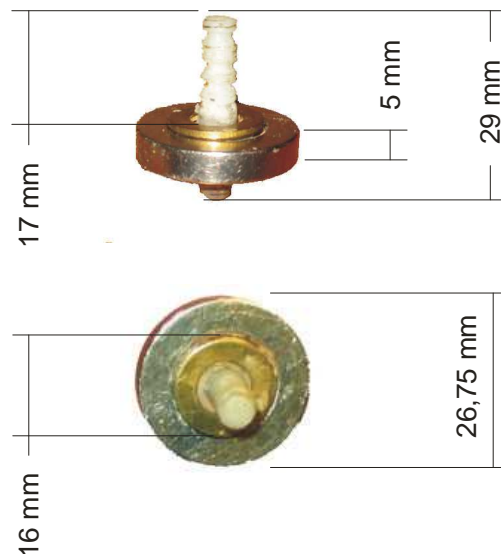


Fig. 12: la trottola magnetica.

## Istruzioni per la levitazione

Prima di tutto bisogna capire come disporre reciprocamente i poli della trottola magnetica e quelli della base. La trottola ha un verso predeterminato, nel senso che, una volta montata, la punta del suo gambo, quella smussata in precedenza, deve stare per forza verso il basso (è il punto d'appoggio su cui si avvia la rotazione). Appoggiare la base (magnete in ferrite) su di un tavolo stabile e possibilmente in bolla. Avvicinare la trottola magnetica, con la punta verso il basso, dall'alto verso la base: i due magneti durante quest'operazione devono essere coassiali. A questo punto, possono accadere due cose:

- la trottola all'inizio è respinta debolmente verso l'alto ma, se si accorciano ancora le distanze tra i due magneti, la trottola è inesorabilmente attratta dalla base, ed acquista subito la configurazione corretta;
- la trottola a qualsiasi distanza, è sempre respinta dalla base. La base va girata dall'altro lato e si deve controllare che il suo comportamento sia quello descritto nel punto precedente.

Ora bisogna trovare la giusta **posizione di partenza**. Vanno prese le custodie dei CD ed impilate su due colonne ai lati della base fino ad un'altezza di circa **40mm**. La scatola di cartone va appoggiata sopra le due colonne, come a formare un ponte sopra la base magnetica (Fig. 13).

Prendere la trottola e avvicinatela dall'alto all'interno della scatola di cartone. Ad un certo punto si dovrebbe sentire l'effetto del campo magnetico combinato di trottola e base magnetica. Poiché la trottola cercherà di sfuggire di lato, si dovrà tenere saldamente tra le dita e cercare il centro della base (Fig. 14), che sarà raggiunto quando l'effetto di scivolamento laterale sarà ridotto al minimo ed anzi si percepirà la trottola attratta leggermente verso il basso. Ecco dunque trovata la **posizione di partenza**.



**Fig. 13:** disposizione della scatola di cartone, della base magnetica e della pila di distanziali (custodie di CD/DVD). I singoli distanziali, in seguito, possono essere tolti o aggiunti per trovare l'altezza idonea.



**Fig. 14:** mantenere saldamente la trottola e cercare la posizione di partenza.

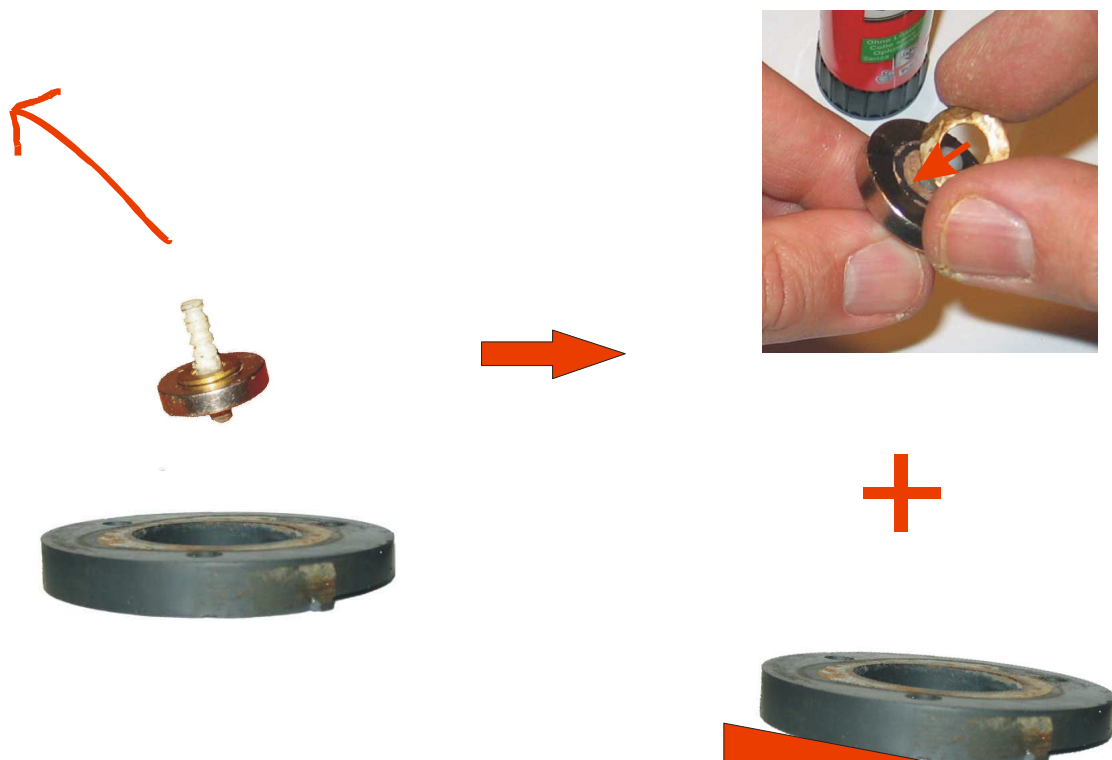
Da qui in poi è necessaria un po' di pazienza e di abilità manuale. La trottola va avviata facendola girare su se stessa, mentre la sua punta è appoggiata sulla base della scatola di cartone. Si possono verificare quattro situazioni:

- la trottola rimane sempre incollata alla base e non è possibile farla fare neanche un giro. Questo accade perché la scatola di cartone è troppo in basso e vicina alla base: sarà da aumentare l'altezza della scatola, agendo sui distanziali;
- la trottola tende a schizzare regolarmente verso l'alto o non si avverte neppure la leggera attrazione verso il basso. In questo caso, sarà da ridurre l'altezza delle pile di custodie;
- il comportamento è misto e, a volte, la trottola scivola di lato. In questo caso, le premesse sono buone e manca soltanto un po' di abilità manuale: si dovrebbe riprovare fino a che...

- la trottola finalmente gira, non sbanda e la sua rotazione è stabile. Una tale condizione dura abbastanza poco, con un po' di fortuna mediamente una decina di secondi, perché l'attrito della punta della trottola sul cartone è aumentato dall'attrazione magnetica tra base e trottola. I passi successivi, quindi, vanno fatti con attenzione ma in fretta.

Ora, mentre la trottola ruota, sollevare la scatola di cartone delicatamente. In questo modo, si allontanerà la trottola dalla base e la si porterà nella *trappola magnetica*. Appena ci si trova nei dintorni di questa zona possono accadere tre cose:

- la trottola continua a girare e si alza leggermente in volo, per poi riappoggiarsi sulla base della scatola. Ciò significa che la trottola è troppo pesante e va alleggerita, togliendo una o più rondelle (oppure si può alleggerirne il gambo aggiungendo, aggiungendo delle tacche a quelle esistenti);
- la trottola appena si trova nelle vicinanze della trappola schizza verso l'alto (Fig. 15), sbandando lateralmente per poi ricadere e fermarsi (a volte anche fuori dalla scatola). In questo caso si devono operare due tipi di modifiche:
  - o aggiungere peso alla trottola magnetica (tramite le rondelle, provando prima con le più leggere). Dal momento che, talvolta, il peso da aggiungere è minore della più piccola delle rondelle, si può provare ad appesantire la trottola aggiungendovi dei piccoli pezzi di nastro isolante (la zona di migliore applicazione è il piatto della trottola magnetica). I pesi in gioco sono dell'ordine di **0.1g**;
  - o inclinare leggermente il piano della base magnetica nella direzione opposta a quella in cui è volata via la trottola. Quest'operazione va eseguita aggiungendo un paio di piccoli spessori, ottenuti con fogli di carta ripiegati o schegge di legno, sotto la base magnetica (in genere gli aggiustamenti sono veramente minimi);



**Fig. 15:** se la trottola schizza verso l'alto bisogna inclinare il magnete della base in senso opposto e aggiungere peso (rondelle o nastro isolante) alla trottola magnetica.

- e dopo due o tre modifiche dovrebbe essere raggiunta la condizione ottimale per la levitazione;
- la trottola è catturata dalla *trappola magnetica* ed è sollevata leggermente verso l'alto. A tal punto, la scatola di cartone va abbassata nella posizione originale, cosicché finalmente la

trottola fluttua a mezz'aria. Si può anche rimuovere la scatola di cartone per rendere più visibile il fenomeno.

Sitografia:

[1]<http://www.arrigoamadori.com/lezioni/TutorialFisica/MomentoAngolare/MomentoAngolare.htm>

[2][http://it.wikipedia.org/wiki/Momento\\_angolare](http://it.wikipedia.org/wiki/Momento_angolare)

[2]<http://www.physics.ucla.edu/marty/levitron/node1.html>

[3]<http://www.levitron.com/physics.html>(magnete d

[4][http://digilander.libero.it/scienza\\_in\\_gioco/trottololevitante.htm](http://digilander.libero.it/scienza_in_gioco/trottololevitante.htm)

[5][http://en.wikipedia.org/wiki/Spin\\_stabilized\\_magnetic\\_levitation](http://en.wikipedia.org/wiki/Spin_stabilized_magnetic_levitation)