

abrizio I a

IIS "A. Cesaris", Casalpusterlengo (LO)

Giannelli

Didattica

Le strane oscillazioni di un pendolo magnetico

ABSTRACT

This article shows how to make a simple original experiment that presents a behaviour typical of chaotic systems. The experiment involves the use of a physical pendulum with a magnet at the end. The latter interacts with two other rotating magnets, positioned below the rod, which influence the movement of the pendulum, moving it from periodic oscillations to chaotic oscillations.

Introduzione

Nella scuola dove insegno, un liceo scientifico opzione scienze applicate, l'offerta formativa prevede una serie di laboratori scientifici di fisica, chimica, ecc. su vari argomenti, che, generalmente, non vengono affrontati nel normale corso di studi delle diverse discipline. Gli studenti del triennio possono scegliere tra vari laboratori, per il recupero dei tempi scuola, "personalizzando" il percorso di studi.

Io, per qualche anno, ho tenuto un laboratorio sul *caos deterministico* dove introducevo i concetti base ed eseguivo alcuni esperimenti tra cui il *rubinetto gocciolante* descritto nell'articolo [1]. All'interno dello stesso corso proponevo un esperimento, ideato da me, che permette di osservare comportamenti apparentemente caotici. L'esperimento è molto semplice, prevede un pendolo fisico, in pratica un'asta rigida, con un magnete fissato all'estremità libera dell'asta. Quest'ultimo interagisce con due altri magneti in rotazione posti al disotto dell'asta, che influenzano le oscillazioni del pendolo. L'apparato utilizzato era essenziale, costruito con una cannuccia, dei piccoli magneti, un avvitatore e le oscillazioni venivano "visualizzate" con un *sonar*.

Quest'anno, con un gruppo di tre ragazzi di quinta liceo scientifico ed un ragazzo del terzo anno dell'istituto tecnico, abbiamo partecipato, con un progetto sul pendolo fisico, alla XVI edizione di *ScienzAfirenze* [2]. Il nostro lavoro prevedeva un percorso sperimentale articolato. Siamo partiti dagli studi di Galileo, poi abbiamo affrontato le oscillazioni smorzate descritte negli articoli [3] e [4] ed infine abbiamo realizzato uno studio del pendolo magnetico. Il tutto analizzato con un apparato di acquisizione dati RTL autocostruito, dispositivo che ha permesso di apprezzare meglio le dinamiche del pendolo magnetico.

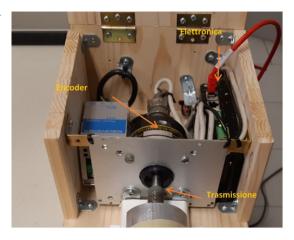
In questo articolo viene fatta una semplice descrizione qualitativa dei risultati ottenuti con il suddetto pendolo.

Descrizione dell'apparato sperimentale

L'apparato sperimentale utilizzato è essenzialmente un pendolo collegato all'asse di un *encoder* incrementale il cui segnale, elaborato da un circuito elettronico, viene inviato ad un *computer*.

Il pendolo e costituito da un'asta in alluminio del diametro di circa 0,8 cm e lunghezza 35 cm. Una delle estremità dell'asta è inserita in una puleggia in plastica (diametro circa 7 cm e spessore circa 2 cm) realizzata con una stampante 3D. Nel centro della puleggia è praticato un foro di diametro leggermente più grande di quello dell'asse dell'encoder in modo tale da inserire quest'ultimo all'interno del foro. L'encoder incrementale utilizzato rileva 5000 posizioni per giro, ossia ha una sensibilità di 0,072°. L'encoder è collegato ad un circuito elettronico che rileva le posizioni del pendolo e le trasmette al computer che, con l'utilizzo di un

Figura 1. Encoder e parte elettronica.



All'altra estremità dell'asta è attaccato, con della colla a caldo e del nastro adesivo, un super-magnete cilindrico al neodimio del diametro di 2 cm e spessore 1 cm. Altri due super-magneti cilindrici (diametro 2 cm e spessore 0,7 cm) sono incollati e fissati con del nastro su una barretta in legno. Quest'ultima è poi fissata sull'asse di rotazione di un motorino Lego, in dotazione al kit di robotica NXT. I due magneti sono collocati in modo tale da presentare verso l'esterno uno il polo nord e l'altro il polo sud. Il motorino è stato fissato su un'asse in legno a sua volta ancorata su due dei tre montanti (lunghezza 60 cm, base 5 cm x 2,5 cm) che sostengono la base in legno che alloggia l'encoder. Il motorino viene disposto esattamente sotto al magnete posto alla base del pendolo in modo tale che tra quest'ultimo e gli altri due magneti ci sia una distanza di qualche centimetro. Quando il motorino viene messo in rotazione i due magneti si affacciano alternativamente sul magnete del pendolo interagendo con quest'ultimo, uno attrae e l'altro respinge il pendolo mettendolo in oscillazione. În figura 2 è riportata una foto dell'intero apparato.

Si può sostituire il sistema di rilevazione dati descritto con un *sonar* o con un sen-

software, permette di registrare e visualizzare l'andamento delle ampiezze in funzione del tempo.

La parte elettronica è costituita dal sistema SW1D2142 che è un azionamento della società 'Ever Elettronica' utilizzato nel settore dell'automazione industriale per il controllo e la gestione di motori passo-passo.

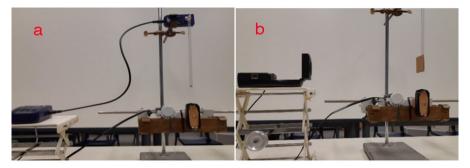
Encoder e circuito sono alloggiati all'interno di un contenitore in legno apribile dalla parte superiore (figura 1).



Figura 2. Apparato sperimentale.

sore di posizione. Inoltre, per mettere in rotazione i magneti si può utilizzare un avvitatore o un qualsiasi motorino purché ruoti in modo regolare anche a basse velocità. In figura 3a è riportato un pendolo realizzato con una cannuccia collegata all'asse di rotazione di un sensore di rotazione (3BNetLab) con apposita interfaccia collegata al computer. In figura 3b è riportato lo stesso pendolo le cui oscillazioni vengono rilevate da un sonar (GoMotion-Vernier). In quest'ultimo

Figura 3. Apparati equivalenti al dispositivo costruito degli studenti. (a) Pendolo con sensore di rotazione. (b) Pendolo con



caso, per meglio rilevare la posizione del pendolo, è opportuno attaccare un piccolo cartoncino sul pendolo stesso. Inoltre, le oscillazioni vanno mantenute in un piccolo intervallo, infatti il segnale di elongazione è affetto da un errore sistematico che resta piccolo solo ad elongazioni piccole, in quanto il *sonar* non misura l'elongazione, ma la proiezione orizzontale del vettore spostamento.

Lo scopo di questo lavoro consiste nell'osservare come variano le oscillazioni del pendolo al variare della velocità di rotazione dei magneti.

Osservazioni delle dinamiche del pendolo

Le interazioni del magnete posto alla base del pendolo con i due magneti in rotazione inducono una serie di oscillazioni le cui dinamiche dipendono dalla velocità di rotazione dei magneti e dalla loro posizione rispetto al pendolo.

Sperimentalmente, una volta fissata la posizione dei magneti in rotazione, abbiamo osservato il tipo di oscillazione che assume il pendolo al variare della velocità di rotazione dei magneti. Abbiamo eseguito un gran numero di misure variando la velocità di rotazione dei magneti per diverse distanze, a riposo, tra magneti e pendolo e quanto emerso si può sintetizzare come segue.

Ci sono alcune condizioni tali per cui l'asta oscilla quasi come se fosse un pendolo ideale, quindi con ampiezza stabile. L'azione complessiva dei magneti è tale da compensare l'attrito che agisce sul sistema e che tenderebbe a far fermare il pendolo. Un esempio di dinamica di questo tipo, detta oscillazione di periodo 1, è rappresentata nel grafico di figura 4a, dove è riportato l'andamento dell'ampiezza al variare del tempo. In figura 4b è riportato il rispettivo diagramma dello spazio delle fasi in cui i valori delle velocità angolari sono ottenuti come rapporto incrementale dell'angolo [5].

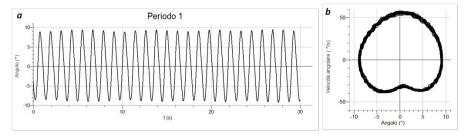


Figura 4. Oscillazione ottenuta con una velocità di rotazione dei magneti di 0,92 giri/s e posti ad una distanza di 9 cm dal pendolo. (a) Grafico dell'ampiezza in funzione del tempo. (b) Velocità angolare in funzione dell'angolo.

Variando gradualmente la frequenza di rotazione dei magneti si hanno delle modifiche riguardanti l'ampiezza di oscillazione del pendolo e transizioni a dinamiche differenti. Da oscillazioni di periodo 1 si passa ad oscillazioni di periodo 2 (figure 5a e 5b) e poi ad oscillazioni, ancora ordinate, di periodo 3 (figure 6a e 6b) o periodo 4 (figure 7a e 7b). Questo può avvenire non necessariamente in modo graduale, al variare della velocità dei magneti, ma anche attraverso un alternarsi di varie oscillazioni periodiche.

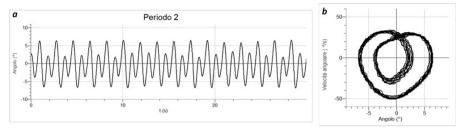


Figura 5. Oscillazione ottenuta con velocità di rotazione dei magneti di 1,16 giri/s e ad una distanza dal pendolo di 9 cm. (a) Grafico dell'ampiezza in funzione del tempo. (b) Velocità angolare in funzione dell'angolo.

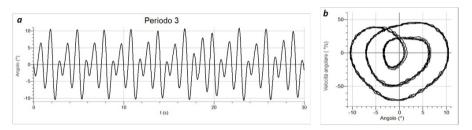


Figura 6. Oscillazione ottenuta con velocità di rotazione dei magneti di 1,07 giri/s e ad una distanza dal pendolo di 9 cm. (a) Grafico dell'ampiezza in funzione del tempo. (b) Velocità angolare in funzione dell'angolo.

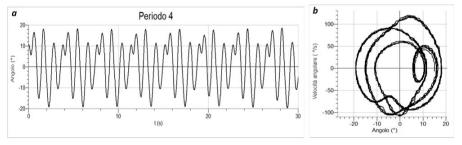


Figura 7. Oscillazione ottenuta con velocità di rotazione dei magneti di 0,61 giri/s e ad una distanza dal pendolo di 5,5 cm. (a) Grafico dell'ampiezza in funzione del tempo. (b) Velocità angolare in funzione dell'angolo.

Come abbiamo visto l'alternarsi dell'azione forzante o smorzante dei magneti in rotazione dà vita a questi delicati equilibri che si traducono in sorprendenti dinamiche periodiche, oscillazioni che sembrano presentare periodi anche superiori al 4.

Molto spesso le oscillazioni non sembrano avere un comportamento ciclico ma caotico, dove oscillazioni forzate si alternano ad oscillazioni smorzate senza una apparente periodicità. Un esempio è riportato in figura 8a-b.

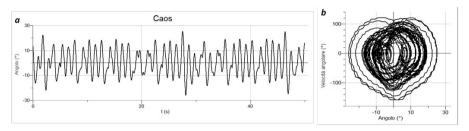


Figura 8. Oscillazione ottenuta con velocità di rotazione dei magneti di 1,1 giri/s e ad una distanza dal pendolo di 5,5 cm. (a) Grafico dell'ampiezza in funzione del tempo. (b) Velocità angolare in funzione dell'angolo.

Continuando ad aumentare la velocità dei due magneti si osserva una situazione nella quale il pendolo risulta praticamente fermo, ossia le sollecitazioni si alternano così velocemente che il pendolo ha solo delle "micro" oscillazioni.

Come detto, è possibile ottenere risultati analoghi a quelli presentati sopra anche con apparati molto più semplici da realizzare. A titolo di esempio, in figura 9a e 9b sono riportati i risultati di una misura ottenuta con l'apparato di figura 3b.



Figura 9. Oscillazione di periodo 3 ottenuta con l'apparato riportato in figura 3b. (a) Grafico della posizione in funzione del tempo. (b) Velocità in funzione della posizione.

Conclusioni

Il fenomeno presentato mostra una sensibile dipendenza dalle condizioni iniziali tipica dei sistemi caotici. Infatti, come abbiamo visto anche dai grafici sopra
riportati, variando di poco la velocità di rotazione dei magneti cambia molto
la dinamica delle oscillazioni del pendolo, passando da oscillazioni periodiche
ad oscillazioni caotiche. Dal punto di vista teorico presenta delle difficoltà non
trattabili con degli studenti di liceo, ma la semplicità dell'apparato sperimentale, almeno nella versione semplificata, dà l'opportunità all'insegnante di trattare
qualitativamente l'argomento. Inoltre, rappresenta anche un'occasione per introdurre lo spazio delle fasi, "strumento" poco o per nulla utilizzato nei licei.

Bibliografia e note

- [1] F. GIANNELLI, G. IUGHETTI, Un esperimento per introdurre il caos deterministico nei licei, *La Fisica nella Scuola*, **XLVI** 3, 119 (2013).
- [2] ScienzAfirenze è un congresso/concorso organizzato da Diesse-Firenze. Il tema della XVI edizione riguardava la rivisitazione di esperimenti storici. Il nostro lavoro ha vinto il primo premio nella sezione triennio.
- [3] E. A. UR, Un pendolo smorzato, con piano di oscillazione variabile, studiato con RTL, *La Fisica nella Scuola*, **XLIII** 4, 186 (2010).
- [4] G. Torzo, P. Peranzoni, Il pendolo fisico: teoria, simulazione esperimento, *La Fisica nella Scuola*, L 4, 149 (2017).
- [5] Tali valori si ottengono con la funzione "Derivative" presente nel programma *Log-gerPro* (www.vernier.com) utilizzato per l'elaborazione dei dati presentati in questo lavoro.

Ravanelli spaziali

L'astronauta Kate Rubins fotografa il suo piccolo orto a bordo della Stazione Spaziale Internazionale. L'esperimento *Plant Habitat-02* studia la crescita dei ravanelli in un ambiente di microgravità. È stato scelto il ravanello perché è una pianta modello: sia nutriente che commestibile, con un breve tempo di coltivazione ed geneticamente simile all'*Arabidopsis*, una pianta frequentemente studiata in condizioni di microgravità.

Crescendo all'interno del *Advanced Plant Habitat* per 27 giorni, le piante richiedono poca manutenzione da parte dell'equipaggio. La camera di crescita contiene luci a LED, un materiale di argilla porosa e un sistema controllato per il rilascio di acqua, sostanze nutritive e ossigeno alle radici della pianta. Le telecamere e più di 180 sensori consentono ai ricercatori del *Kennedy Space Center* della NASA in Florida di monitorare la crescita delle piante e di regolare condizioni come la distribuzione dell'acqua, i livelli di umidità e la temperatura.

L'equipaggio a bordo del laboratorio orbitante raccoglierà i ravanelli per restituirli ai ricercatori sulla Terra che valuteranno la loro crescita. Un primo passo verso un'esplorazione sostenibile di Luna e Marte.



Credits: NASA / Kate Rubins