

Tesina di maturità - Il pendolo inaffidabile

Giovanni Mascellani - V A

mercoledì 25 giugno 2008

1 Introduzione

L'argomento di questa tesina prende le mosse da un esperimento che quest'anno ho avuto occasione di compiere. Nell'ambito del progetto *Scienza?... Al Dini!*, ogni anno proposto dalla mia scuola a tutti gli studenti interessati, durante l'ultima edizione ho partecipato ad un laboratorio sul tema delle *Curve matematiche*. In particolare la mia attenzione si è focalizzata su una di esse, la cicloide, molto interessante per le sue proprietà teoriche, ma anche applicate. Tra queste compare l'introdurre una correzione, introdotta da Christiaan Huygens, al pendolo di Galilei, che in realtà non possiede realmente le proprietà che il grande scienziato gli attribuì.

L'esperimento è stato fatto e presentato con successo al pubblico che entrato nel laboratorio di cui facevo parte. Tuttavia i dati che erano stati raccolti in quell'occasione sono poi per lo più rimasti privi di un'elaborazione accurata: si sa, appena prima della maturità lo studio è tanto! Ho quindi pensato di rispolverarli ed inserirli in questa tesina, evidenziando le differenze tra i pendoli di Galilei ed Huygens, e di cogliere l'occasione per proporre, anche a partire dal pensiero del filosofo viennese Karl Popper, una riflessione su quanto la conoscenza scientifica possa considerarsi "credibile" e "giusta", anche quando lavora con approssimazioni.

2 Galileo Galilei, ovvero la scoperta dell'isocronia del pendolo

2.1 L'isocronia del pendolo galileiano nei *Discorsi e dimostrazioni matematiche*

Nonostante esso sia conosciuto fin dall'antichità, il pendolo è tradizionalmente legato al nome dello scienziato e filosofo pisano Galileo Galilei (1564 - 1642) che per primo enunciò l'importante legge dell'*isocronia* nei suoi *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica e i movimenti locali*, un'opera pubblicata in Olanda nel 1638[1].

Come altri scritti di Galilei, l'opera si svolge sotto forma di un dialogo tra tre uomini effettivamente vissuti. I primi due sono contemporanei dell'autore e da lui personalmente conosciuti: Filippo Salviati, uno scienziato di famiglia fiorentina che sostiene le tesi di Galileo, equilibrato e razionale; e Giovan Francesco Sagredo, un nobile veneziano, interessato ma non esperto degli argomenti di cui si parla, che ha il ruolo di moderare il dibattito in corso ed è figura dei destinatari del libro. Il terzo personaggio è Simplicio, che rappresenta le teorie aristoteliche e scolastiche; il suo nome non solo ricorda un commentatore di Aristotele del VI secolo, ma è anche una

Gli interlocutori dei *Discorsi*

velata ridicolizzazione del personaggio, spesso messo in difficoltà dalle tesi degli altri due.

Nel brano citato Salviati presenta ai suoi due interlocutori tre importanti leggi che riguardano il pendolo. In realtà, come vedremo dopo, sono tutte e tre errate o, meglio, non del tutto corrette!

Salv. [...] Vengo ora a gli altri quesiti, attenenti a i pendoli, materia che a molti parrebbe assai arida, e massime a quei filosofi che stanno continuamente occupati nelle più profonde quistioni delle cose naturali; tuttavia non gli voglio disprezzare, inanimato dall'esempio d'Aristotele medesimo, nel quale io ammiro sopra tutte le cose il non aver egli lasciato, si può dir, materia alcuna, degna in qualche modo di considerazione, che e' non l'abbia toccata. Ed ora, mosso da i quesiti di V. S., penso che potrò dirvi qualche mio pensiero sopra alcuni problemi attenenti alla musica, materia nobilissima, della quale hanno scritto tanti grand'uomini e l'istesso Aristotele, e circa di essa considerer molti problemi curiosi; talché se io ancora da così facili e sensate esperienze trarrò ragioni di accidenti maravigliosi in materia de i suoni, posso sperare che i miei ragionamenti siano per esser graditi da voi.

Sagr. Non solamente graditi, ma da me in particolare sommamente desiderati, come quello che, sendomi dilettrato di tutti gli strumenti musici, ed assai filosofato intorno alle consonanze, son sempre restato incapace e perplesso onde avvenga che più mi piaccia e diletta questa che quella, e che alcuna non solo non mi diletta, ma sommamente m'offenda. Il problema poi trito delle due corde tese all'unisono, che al suono dell'una l'altra si muova e attualmente risuoni, mi resta ancora irresoluto, come anco non ben chiare le forme delle consonanze ed altre particolarità.

Salv. Vedremo se da questi nostri pendoli si possa cavare qualche sodisfazione a tutte queste difficoltà. E quanto al primo dubbio, che è, se veramente e puntualissimamente l'istesso pendolo fa tutte le sue vibrazioni, massime, mediocri e minime, sotto tempi precisamente eguali, io mi rimetto a quello che intesi già dal nostro Accademico; il quale dimostra bene, che 'l mobile che descendesse per le corde sottese a qualsivoglia arco, le passerebbe necessariamente tutte in tempi eguali, tanto la sottesa sotto cent'ottanta gradi (cioè tutto il diametro), quanto le sottese di cento, di sessanta, di dieci, di due, di mezzo e di quattro minuti, intendendo che tutte vadano a terminar nell'infimo punto, toccante il piano orizzontale. Circa poi i descendenti per gli archi delle medesime corde elevati sopra l'orizzonte, e che non siano maggiori d'una quarta, cioè di novanta gradi, mostra parimente l'esperienza, passarsi tutti in tempi eguali, ma però più brevi de i tempi de' passaggi per le corde; effetto che in tanto ha del maraviglioso, in quanto nella prima apprensione par che dovrebbe seguire il contrario: imperò che, sendo comuni i termini del principio e del fine del moto, ed essendo la linea retta la brevissima che tra i medesimi termini si comprende, par ragionevole che il moto fatto per lei s'avesse a spedire nel più breve tempo; il che poi non è, ma il tempo brevissimo, ed in conseguenza il moto velocissimo, è quello che si fa per l'arco del quale essa linea retta è corda. Quanto poi alla proporzione de i tempi delle vibrazioni di mobili pendenti da fila di differente lunghezza, sono essi tempi in pro-

La legge di isocronia del pendolo

La proprietà di brachistocronia dell'arco di cerchio

porzione suddupla delle lunghezze delle fila, o vogliam dire le lunghezze esser in duplicata proporzion de i tempi, cioè son come i quadrati de i tempi: sì che volendo, v. g., che 'l tempo d'una vibrazione d'un pendolo sia doppio del tempo d'una vibrazione d'un altro, bisogna che la lunghezza della corda di quello sia quadrupla della lunghezza della corda di questo; ed allora, nel tempo d'una vibrazione di quello, un altro ne farà tre, quando la corda di quello sarà nove volte più lunga dell'altra: dal che ne séguita che le lunghezze delle corde hanno fra di loro la proporzione che hanno i quadrati de' numeri delle vibrazioni che si fanno nel medesimo tempo.

Sagr. Adunque, se io ho ben inteso, potrò speditamente sapere la lunghezza d'una corda pendente da qualsivoglia grandissima altezza, quando bene il termine sublime dell'attaccatura mi fusse invisibile e solo si vedesse l'altro estremo basso. Imperò che, se io attaccherò qui da basso un assai grave peso a detta corda e farò che si vada vibrando in qua e in là, e che un amico vadia numerando alcune delle sue vibrazioni e che io nell'istesso tempo vadia parimente contando le vibrazioni che farà un altro mobile appeso a un filo di lunghezza precisamente d'un braccio, da i numeri delle vibrazioni di questi pendoli, fatte nell'istesso tempo, troverò la lunghezza della corda: come, per esempio, ponghiamo che nel tempo che l'amico mio abbia contate venti vibrazioni della corda lunga, io ne abbia contate dugenquaranta del mio filo, che è lungo un braccio; fatti i quadrati delli due numeri venti e dugenquaranta, che sono 400 e 57600, dirò, la lunga corda contener 57600 misure di quelle che il mio filo ne contien 400; e perché il filo è un sol braccio, partirò 57600 per 400, che ne viene 144; e 144 braccia dirò esser lunga quella corda.

Salv. Né vi ingannerete d'un palmo, e massime se piglierete moltitudini grandi di vibrazioni.

La legge di dipendenza quadratica tra il periodo e la lunghezza del pendolo

2.2 La modellizzazione matematica del pendolo di Galileo

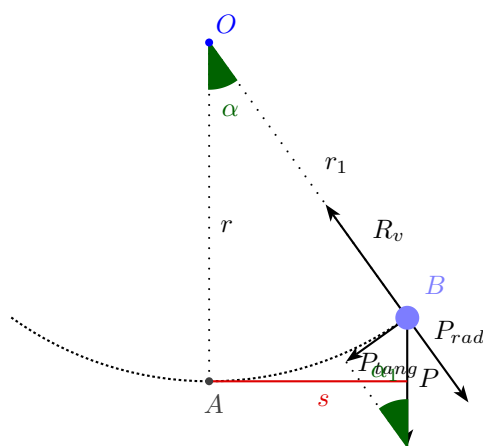


Figura 1: Il pendolo di Galileo

È piuttosto semplice abbozzare una dimostrazione della legge sul periodo del pendolo galileiano, e lo faremo sfruttando strumenti matematici più moderni di quelli che erano a disposizione durante il XVII secolo. Si faccia riferimento alla figura 1: il peso è indicato dalla lettera B ed il suo scostamento orizzontale considerato con segno

dalla posizione di minimo potenziale con s . Su di esso agiscono sia la forza di gravità (indicata con P e scomposta nelle componenti tangenziale e radiale rispetto alla traiettoria del peso) che la tensione del filo (indicata con R_v): supporremo l'angolo α sufficientemente piccolo da poter considerare l'arco AB uguale a s , la componente tangenziale dell'accelerazione di gravità agente nella stessa direzione di s .

Per costruzione si può vedere come l'angolo α_1 sia uguale ad α . Esprimendo tale angolo in radianti e chiamando g e g_{tang} rispettivamente l'accelerazione del peso dovuta alla forza di gravità e la sua componente tangenziale e m la sua massa possiamo anche scrivere:

$$\frac{m \cdot g_{tang}}{m \cdot g} = \frac{P_{tang}}{P} = \sin \alpha \simeq \alpha = \frac{AB}{r} \simeq \frac{s}{r}.$$

Ma secondo le assunzioni precedentemente fatte, l'accelerazione g_{tang} è la derivata seconda di s , perché è l'accelerazione del punto la cui coordinata è s . Possiamo dunque esprimere il problema nella seguente equazione differenziale:

$$\frac{d^2 s}{ds^2} = \frac{g}{r} s, \quad (1)$$

che ammette come soluzione particolare la funzione

$$s(t) = A \sin \sqrt{\frac{g}{r}} t.$$

In tale espressione A è l'ampiezza del moto del pendolo, ossia il valore assoluto della massima coordinata s che il peso può assumere, e che dipende dalle condizioni iniziali del sistema. Le altre soluzioni della 1 differiscono da quella indicata per la fase della sinusoide, anch'essa dipendente dalle condizioni iniziali del sistema.

Il periodo T della funzione $s(t)$ è

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{r}{g}}. \quad (2)$$

Tale risultato effettivamente sembrerebbe confermare due delle leggi di Galileo: il periodo del pendolo non dipende dalla sua ampiezza (che infatti non compare nella formula), ma cresce con la radice quadrata della lunghezza del pendolo stesso. Però attenzione! Per arrivare a questo risultato abbiamo dovuto compiere delle approssimazioni che valgono unicamente per valori piccoli di α . Quando però l'angolo di oscillazione aumenta esse non valgono più: è possibile, anche se richiederebbe strumenti matematici troppo avanzati per questa trattazione, esprimere il T anche in funzione di α in modo esatto (perlomeno relativamente al modello fisico che abbiamo preso in esame). Il risultato, tratto da [3], è questa somma infinita (nella quale si indica con α_0 l'angolo massimo di oscillazione):

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{r}{g}} \cdot \left(1 + \frac{1^2}{2^2} \sin^2 \frac{\alpha_0}{2} + \frac{1^2 \cdot 3^2}{2^2 \cdot 4^2} \sin^4 \frac{\alpha_0}{2} + \dots\right). \quad (3)$$

3 Christiaan Huygens, ovvero la correzione al modello di Galileo

3.1 L'introduzione del pendolo cicloidale

e fisico olandese Christiaan Huygens (1629 - 1695) pubblicò un'opera, *l'Horologium oscillatorium sive de motu pendulorum*[2], nel quale descriveva come migliorare il pendolo semplice per renderlo realmente isocrono. Alla base della nuova invenzione vi era una curva, detta *cicloide*, il cui nome è dovuto al curioso modo in cui può essere costruita: essa è infatti la traiettoria di un punto appartenente ad un cerchio man mano che questo rotola senza strisciare, o, per vederla più "concretamente", la traiettoria della valvola di una ruota di bicicletta mentre questa procede su un asfalto orizzontale.

È piuttosto facile scrivere le equazioni parametriche della cicloide. Esse sono

$$\begin{cases} x(t) = t - \sin t \\ y(t) = 1 + \cos t \end{cases} \quad (4)$$

e sono visualizzate nella figura 2.

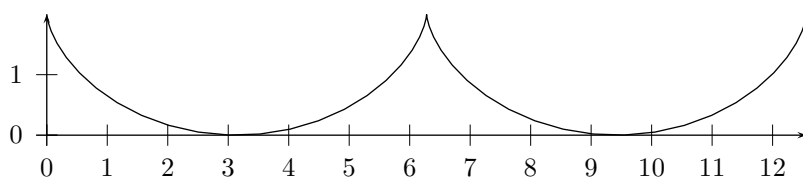


Figura 2: La cicloide

La proprietà della cicloide che ci interessa in questo momento è la cosiddetta *tautocronia* (parola che significa "tempi uguali"), secondo la quale due corpi che cadono sotto l'azione della forza di gravità lungo una traiettoria cicloidale impiegano sempre lo stesso tempo per arrivare nel punto di minimo, indipendentemente dall'altezza alla quale sono stati lasciati andare. Avendo a disposizione una pista a forma di cicloide non è difficile verificare sperimentalmente questa proprietà (si veda la figura 3 nella pagina seguente).

La proprietà di tautocronia della cicloide

La dimostrazione di questa proprietà richiede conoscenze di analisi molto avanzate, e quindi non sarà trattata. E però facile convincersi intuitivamente di come palline lasciate cadere da più in alto abbiamo, è vero, un maggior percorso da compiere, ma possano compensare questo ritardo con una maggiore accelerazione dovuta alla maggiore inclinazione del loro punto di partenza.

Sfruttando la proprietà di tautocronia della cicloide è facile costruire un pendolo isocrono: basta fare in modo che il suo peso si muova su una traiettoria cicloidale invece che circolare. Per ottenere questo risultato è necessario costruire un pendolo ordinario e disporre accanto al filo due "alette", anch'esse con profilo cicloidale, come mostrato in figura 4 nella pagina 7. Oscillando a destra ed a sinistra la cordicella a cui è legato il peso aderirà al profilo cicloidale, obbligando quindi il peso stesso a seguire una traiettoria non circolare, ma (come si può dimostrare), cicloidale a sua volta.

Il pendolo di Huygens

3.2 Elaborazione di dati sperimentali

Come ho già detto nell'introduzione, questa è la parte della tesina che ha dato il via a tutto il resto. Durante la scorsa edizione di *Scienza?... Al Dini!* io mi sono preoccupato, tra le altre cose, di organizzare l'esperimento sul pendolo di Huygens. L'apparato sperimentale, oltre che dal pendolo in quanto tale, era composto da un circuito elettronico con un sensore a raggi infrarossi per la rilevazione del passaggio

L'apparato sperimentale



Figura 3: La proprietà di tautocronia della cicloide

del peso e da un cronometro digitale preciso al millisecondo per la misurazione del periodo. Sono anche stati predisposti un circuito ed un cronometro simili per eseguire misure anche su un tradizionale pendolo galileiano, per poter confrontare i risultati. In figura 5 nella pagina 8 è visibile il pendolo cicloidale, con in basso il sensore ed a metà altezza il cronometro.

Metodologia di raccolta dei dati

Durante la raccolta dei dati sperimentali veniva rilevato il periodo di un'oscillazione completa ogni due. Durante l'oscillazione non misurata l'operatore aveva il tempo di reimpostare il cronometro e registrare il dato appena calcolato. All'inizio il peso veniva scostato dalla verticale quanto più possibile (in genere circa una quarantina di gradi) e poi lasciato andare. Dopo alcune oscillazioni necessario perché il moto si stabilizzasse, si avvicinava il sensore e si iniziava la rilevazione vera e propria, che andava avanti finché l'ampiezza delle oscillazioni non diventasse sufficientemente piccola. Si noti che, a causa dell'attrito con le alette cicloidali, il pendolo di Huygens impiega meno oscillazioni per fermarsi rispetto al pendolo di Galileo.

3.2.1 I dati raccolti

La lunghezza del filo del pendolo di Huygens era di $2,42\text{ cm}$ (per un periodo teorico di $3,121\text{ s}$), mentre il filo del pendolo di Galileo era lungo $1,86\text{ cm}$ (per un periodo teorico in oscillazioni infinitesimali di $2,736\text{ cm}$).

I dati raccolti sono mostrati in figura 6 nella pagina 9, dove in ascissa sono presenti le varie rilevazioni fatte nel corso di una serie e in ordinata la differenza assoluta tra il periodo misurato e quello teorico per il pendolo in questione. Attenzione però! Le serie non sono direttamente confrontabili, in quanto né l'ampiezza di partenza né la perdita di energia ad ogni oscillazione sono necessariamente le stesse per ognuna di esse. Sono riunite sullo stesso grafico unicamente per motivi pratici.

Possiamo osservare come per ciascuna serie il periodo inizialmente sia un po' più



Figura 4: Il perno del pendolo di Huygens

grande di quello teorico con oscillazioni infinitesimale, ma che gli si avvicini man mano che l'oscillazione si smorza e diventa più piccola (come del resto ci aspettavamo). Il dato numerico di maggiore interesse che possiamo ricavare dal grafico è per ogni serie la differenza di periodo tra le prime oscillazioni (quelle con angolo maggiore) ed il periodo teorico. Rapportando questa differenza al periodo teorico del pendolo siamo in grado di valutare quanto il pendolo stesso sia in grado di compensare la variazione di periodo dovuta a grandi angoli di oscillazione.

3.2.2 L'elaborazione

Serie	$T - T_{teorico}$	$T_{teorico}$	$\frac{T - T_{teorico}}{T_{teorico}}$
Galileo 1	0,056 s	2,736 s	0,0205
Galileo 2	0,081 s	2,736 s	0,0296
Galileo 3	0,091 s	2,736 s	0,0333
Huygens 1	0,009 s	3,121 s	0,0030
Huygens 2	0,014 s	3,121 s	0,0046

Tabella 1: Elaborazione dei dati sperimentali

Dalla lettura della tabella 1 è immediato verificare come il pendolo di Huygens abbia un periodo molto più stabile di quello di Galileo. La media degli aumenti relativi di periodo per il pendolo di Galileo è 0,0278, mentre per il pendolo di Huygens è 0,0038, quasi sette volte e mezzo più piccola! Nonostante il grande miglioramento rispetto al pendolo di Galileo, bisogna notare che secondo la teoria il pendolo di Huygens non avrebbe dovuto mostrare alcuna crescita di periodo per ampi angoli di oscillazione. Del resto è anche vero non solo che l'esperimento soffre di limitazioni di costruzione (relative alla qualità delle alette cicloidali e delle sospensioni del filo), ma che lo stesso modello teorico non tiene conto di vari elementi, in particolare del momento di inerzia del peso e dell'attrito sviluppato dal peso contro l'aria e dal filo contro le alette e la sospensione. In ogni caso il risultato è piuttosto netto e conferma come il pendolo di Huygens sia un effettivo miglioramento rispetto al modello galileiano.



Figura 5: L'intero apparato sperimentale

4 Il problema dell'affidabilità della conoscenza scientifica

4.1 L'incertezza e l'approssimazione nella scienza

Durante la discussione dei due modelli di pendolo appena visti siamo giunti ad una situazione che, per alcuni versi, potrebbe sembrare un po' paradossale: abbiamo prima presentato il pendolo di Galileo, attribuendogli determinate proprietà che lo stesso Galileo dava per certe e precise. Tuttavia subito dopo abbiamo introdotto il pendolo di Huygens, di pochi decenni successivo, dicendo che il così preciso pendolo di Galileo non era in realtà sufficientemente preciso e che andava migliorato. Ma lo stesso miglioramento non si è rivelato poi come perfetto, perché l'esperimento ha confermato che lo stesso pendolo di Huygens non è realmente isocrono.

Nella storia della scienza esempio di questo tipo non si contano (tra tutti il più famoso è forse la teoria della relatività galileo-newtoniana, poi ridefinita da Lorentz ed Einstein ed ancora ben lontana dall'essere certa e sicura in tutte le sue conseguenze): viene spontaneo chiedersi quale affidabilità possa vantare un paradigma di scienza che non sa dare altro che risultati mai del tutto corretti. Ed a ben pensarci, si può anche vedere come l'introduzione di un'incertezza non sia un fatto accidentale che capita, in una qualche modo, "per sbaglio", ma è connaturato nel ragionamento scientifico, a tal punto che nessuno scienziato si stupisce mai che per arrivare a delle conclusioni vengano introdotte approssimazioni che permettano di trattare il sistema studiato con gli strumenti matematici che si hanno a disposizione, precisamente come è stato fatto nell'analisi del pendolo galileiano. E se questo accade nella fisica, la più "esatta" tra le scienze, figuriamoci quanto succede nella chimica o nella biologia!

D'altro canto, per quanto dubbi sull'affidabilità della scienza possano sorgere, non possiamo non renderci conto di come, in ultima analisi, la scienza che abbiamo di

L'approssimazione strutturale-mente inserita nel pensiero scientifico

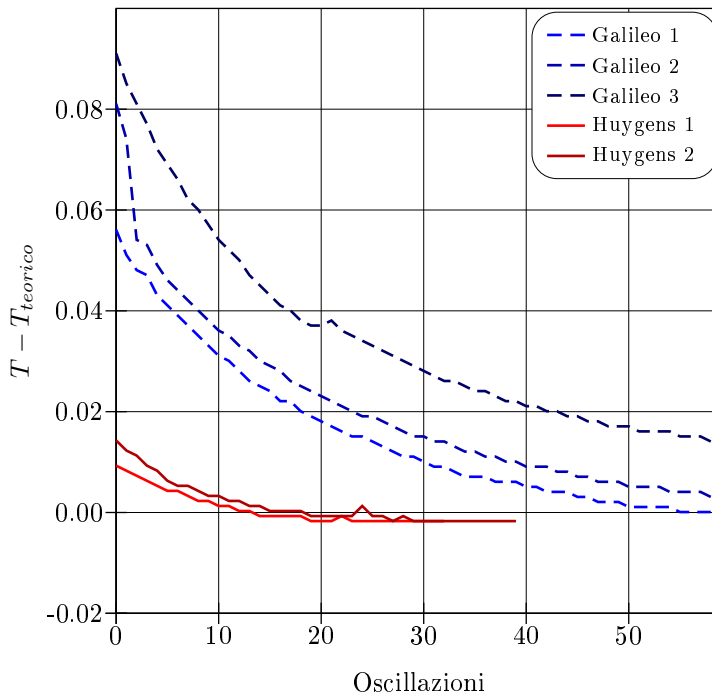


Figura 6: I dati sperimentali dei due pendoli

fronte oggi e la tecnologia che da essa deriva effettivamente “funzionano”, ossia ci permettono la soluzione dei problemi per cui sono state pensate.

4.2 Karl Popper, ovvero il criterio di falsificabilità

È interessante citare al riguardo di quanto è appena stato detto alcuni elementi del pensiero del filosofo della scienza austriaco Karl Popper (1902 - 1994).

Uno dei risultati più famosi al quale è legato il suo nome è il *criterio di falsificabilità* come criterio di demarcazione della conoscenza scientifica. Il suo intervento in proposito si inserisce nella discussione che nei primi anni '30 anima il circolo neopositivista di Vienna: prima di Popper la teoria più gettonata è quella di Wittgenstein, secondo il quale un'asserzione è da considerarsi scientifica se è *verificabile*, ossia se è possibile osservarla empiricamente in una situazione che rappresenti il suo significato. Secondo Popper questo criterio è errato: da una parte, infatti, non rende conto di tutte le moderne teorie scientifiche che si stanno sviluppando, caratterizzate da una sempre maggiore astrazione dalla realtà empirica (si pensi alla meccanica quantistica ed alla relatività einsteiniana) e quindi da una sempre minore verificabilità; dall'altra parte il criterio di verificabilità potrebbe addirittura garantire una validità scientifica a teorie superstiziose, che però si sono sviluppate a partire da eventi realmente osservati.

Al criterio di verificabilità Popper contrappone il suo criterio di falsificabilità: un'affermazione è da considerarsi scientifica se può essere falsificata, ossia se esiste un suo *falsificatore potenziale*, ossia un'altra affermazione che, se fosse effettivamente osservata, ne dimostrerebbe la falsità. Le asserzioni scientifiche sono quindi *proibizioni*, perché non affermano che determinati eventi possano essere osservati, ma che determinati eventi non possano essere osservati: l'eventuale osservazione di un evento proibito determinerebbe la caduta della teoria scientifica che lo proibiva.

Il criterio di falsificabilità non è, tuttavia, da intendersi erratamente come la demarcazione delle affermazioni che hanno senso, ma solo di quelle scientifiche. Esistono

Il criterio di falsificabilità

affermazioni perfettamente dotate di senso ed eventualmente anche vere, che però non devono alla scienza la garanzia della loro correttezza, proprio perché non ammettono falsificatori potenziali. Inoltre Popper precisa anche come la falsificabilità sia un criterio di ordine generale, che deve essere di volta in volta applicato ai casi pratici in modi che dipendono dalla teoria in gioco, dalle modalità di osservazione e dall'accordo esistente tra gli osservatori.

In questa prospettiva il carattere scientifico delle teorie sul pendolo di Huygens e sul pendolo di Galileo è in realtà confermato: del resto, l'esperimento condotto non ha fatto altro che falsificare l'isocronismo del pendolo galileiano, ma anche, seppure in misura minore, quello del pendolo cicloidale.

5 Conclusione divertente per chi non si è ancora annoiato

Chi è arrivato fin qui a leggere è veramente coraggioso! Ad ogni modo, ormai questa tesina è finita. Visto però l'argomento ho pensato di includere un breve racconto[4] dello scrittore Achille Campanile (1899 - 1977), una divertente ironia su come, a volte, il pensiero scientifico si trasmette con difficoltà a chi non è "del mestiere". Spero possa essere una conclusione divertente per tutti!

Quando Galileo, osservando le oscillazioni del pendolo, fece la grande scoperta, per prima cosa andò a dar la notizia al Granduca.

« Eccellenza, » gli disse « ho scoperto che il mondo si muove. »

« Ma davvero? » fece il Granduca, meravigliato e anche un po' allarmato. « E come l'avete scoperto? »

« Col pendolo. »

« Accidenti! Colpendolo con che cosa? »

« Come, con che cosa? Col pendolo, e basta. Non c'era nient'altro, quand' ho fatto la scoperta. »

« Ho capito. Ma colpendolo con che cosa? Con un oggetto contundente? Con un'arma? Con la mano? »

« Col pendolo, soltanto col pendolo. »

« Benedetto uomo, ho capito. Avete scoperto che il mondo si muove colpendolo. Cioè, che si muove quando lo si colpisce. Bisogna vedere con che cosa lo si colpisce. Non potete averlo colpito con niente. E ci vuole un bell'aggeggio per colpire il mondo in modo da farlo muovere. »

Il grande astronomo e matematico si mise a ridere di cuore.

« Eccellenza, » disse « ma voi credete che "col pendolo" vada legato con "si muove". No. Va legato con "ho scoperto". Col pendolo ho scoperto che il mondo si muove. L'ho scoperto col pendolo. »

« Colpendo il mondo. Ho capito. »

« Ma no. Col pendolo. Col pendolo! »

« Ma colpendo chi, allora? E con che? »

« Ma non colpendolo. Col pendolo! »

« Che modo di ragionare! Non colpendolo, ma colpendolo! »

Insomma, dovette scriverglielo su un pezzo di carta¹.

¹E dire che avrebbe chiarito tutto se avesse detto: « Con il pendolo ».

Indice

1	Introduzione	1
2	Galileo Galilei, ovvero la scoperta dell'isocronia del pendolo	1
2.1	L'isocronia del pendolo galileiano nei <i>Discorsi e dimostrazioni matematiche</i>	1
2.2	La modellizzazione matematica del pendolo di Galileo	3
3	Christiaan Huygens, ovvero la correzione al modello di Galileo	4
3.1	L'introduzione del pendolo cicloidale	4
3.2	Elaborazione di dati sperimentali	5
3.2.1	I dati raccolti	6
3.2.2	L'elaborazione	7
4	Il problema dell'affidabilità della conoscenza scientifica	8
4.1	L'incertezza e l'approssimazione nella scienza	8
4.2	Karl Popper, ovvero il criterio di falsificabilità	9
5	Conclusione divertente per chi non si è ancora annoiato	10

Elenco delle figure

1	Il pendolo di Galileo	3
2	La cicloide	5
3	La proprietà di tautocronia della cicloide	6
4	Il perno del pendolo di Huygens	7
5	L'intero apparato sperimentale	8
6	I dati sperimentali dei due pendoli	9

Elenco delle tabelle

1	Elaborazione dei dati sperimentali	7
---	--	---

Riferimenti bibliografici

[1] Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica e i movimenti locali*, Leida (Olanda), 1638

[2] Christiaan Huygens, *Horologium oscillatorium sive de motu pendulorum*, 1673

[3] Paul A. Tipler, *Fisica vol. 1*, Zanichelli, Bologna, 1980

[4] Achille Campanile, *Vite degli uomini illustri*, BUR, Milano, 1979

[5] John Ziman, *Si deve credere alla scienza?*, Laterza, 1984

[6] Massimo Bontempelli e Fabio Bontivoglio, *Il senso dell'essere nelle culture occidentali vol. 3*, Trevisini Editore, Milano