
Scienza e bellezza

Paolo Ciafaloni INFN Lecce & Dipartimento di Matematica e Fisica "Ennio De Giorgi" - Università del Salento

La Scienza non coincide con il metodo scientifico. Quest'ultimo è in buona sostanza un crivello adatto a separare le idee che maggiormente si adattano ad una descrizione della realtà da quelle che se ne discostano. Ma una teoria scientifica è molto più di questo, e la creazione di un nuovo modello va molto al di là dei metodi logico-deduttivi-sperimentali propri del metodo scientifico. Una teoria scientifica è un'opera d'arte, e, per poterla costruire, sono centrali parole-chiave come creatività, semplicità, unificazione e, in ultima analisi, bellezza. Prendo come caso esemplificativo le teorie sulla gravità per mostrare la validità di questa mia tesi.

Prologo

È la terra a girare intorno al sole o piuttosto il sole danza attorno alla terra? La stragrande maggioranza delle persone ad una simile domanda risponderebbe che è il sole il perno centrale attorno a cui ruotano i pianeti del sistema solare, terra inclusa. In realtà non è così. Per un fisico profondamente relativista come me le due affermazioni "il sole gira intorno alla terra" e "la terra gira intorno al sole" sono perfettamente equivalenti: in effetti si tratta solo di diversi punti di vista sullo stesso fenomeno fisico. Anzi, per la descrizione di alcuni fenomeni come l'alternarsi delle stagioni è nettamente più facile e intuitivo, oltre che fondamentalmente più corretto, immaginare che

il sole ruoti intorno all'asse terrestre, con l'orbita su un piano che varia a seconda del periodo dell'anno. Pensare invece che la terra ruoti intorno al sole genera solo confusione e conclusioni sbagliate: provare per credere. Ma allora come mai l'umanità si è convinta che la terra giri intorno al sole? Un motivo c'è, e in questa mia esplorazione storica sul metodo scientifico cerco di tracciare le tappe che hanno portato ad immaginare il sole come centro del sistema solare.

Il Metodo Scientifico

In estrema sintesi, il metodo scientifico consiste in

- avere un'idea, cioè fare un'ipotesi su un dato fenomeno o classe di fenomeni fisici,
- esplorare le conseguenze dell'ipotesi usando logica, deduzione e matematica,
- confrontare le conseguenze dell'ipotesi con i fatti sperimentali.

Se l'ipotesi e le sue conseguenze non sono compatibili con i fatti sperimentali, allora si deduce che l'ipotesi è *falsa* e va scartata. Se invece i fatti sono compatibili con l'ipotesi, quest'ultima è *nonfalsa*. Non esistono ipotesi o teorie *vere*, in quanto una tale affermazione presuppone di poter mettere la teoria al vaglio di qualsiasi esperimento, anche futuro: cosa ovviamente impossibile.

È importante notare che, mentre esiste una chiarezza metodologica sulla transizione ipotesi → verifica sperimentale, non esiste alcun metodo che consenta di indovinare l'ipotesi giusta,



Figura 1: Piano inclinato di Galileo. Le campanelle sono disposte in modo da suonare ad intervalli regolari (vedi testo).

neanche se si è a conoscenza di tutti i fatti sperimentali. È in questo spazio che si concretizza la creatività di uno scienziato.

A titolo di esempio, consideriamo l'ipotesi di Galileo (1564-1642, pisano come me) sulla caduta dei gravi, formulata dopo anni di ricerche¹:

Tolti gli impedimenti, ogni corpo nelle vicinanze della terra si muove con accelerazione costante. Gli spazi percorsi sono cioè circa proporzionali ai quadrati dei tempi.

Per *impedimenti* Galileo intende sostanzialmente l'attrito dell'aria. Una legge fisica, da Galileo in poi, è una relazione matematica fra quantità misurabili, spazio e tempo in questo caso. Si noti il carattere di *universalità* della legge: essa deve valere per tutti i corpi, di qualunque massa e composti di qualunque sostanza. Qualora un esperimento particolare avesse come risultato che la legge non si applica a un determinato corpo, la legge dovrebbe essere considerata falsa. In contrasto con la filosofia Aristotelica imperante all'epoca, la legge è *quantitativa* e si esprime in termini *matematici*. Questo consente un rigoroso confronto con l'esperimento, che ad esempio deve dare lo stesso risultato a Roma oppure a Timbuctù, cioè deve essere *riproducibile*.

Per verificare questa Legge, Galileo considera il moto di oggetti sferici lungo un piano inclinato (vedi Figura 1). Gli oggetti presi in esame rotolano senza strisciare e hanno circa le stesse dimensioni, pur essendo composti di materiali distinti, avendo quindi masse diverse. Il piano inclinato serve per rallentare il moto di caduta

¹il testo è mio, ho fatto una sintesi delle ipotesi di Galileo

consentendo una misura più precisa dei tempi². Le campanelle sono disposte in modo che il corpo, accelerando, le faccia suonare a distanze di tempi circa uguali. Si può quindi verificare la proporzionalità delle distanze spaziali ai quadrati delle distanze temporali e l'indipendenza delle accelerazioni dalle masse dei corpi.

Relatività

È il momento di spiegare perché i due sistemi eliocentrico, o Copernicano (Copernico³ 1473-1543) in cui l'osservatore coincide con il Sole, e quello geocentrico, o Tolemaico (Tolomeo 175 circa) in cui l'osservatore coincide con la Terra, siano *esattamente* equivalenti.

Venere, secondo pianeta del sistema solare, dista dal Sole circa i 3/4 della distanza Sole-Terra; è rappresentato in Figura 2 da un cerchio rosso. In figura la Terra è indicata in blu ed il sole ovviamente in giallo. Un osservatore sulla terra vede il Sole ad una distanza e direzione rappresentati dalla freccia blu e vede Venere con distanza e direzione rappresentati dalla freccia nera. Analogamente un osservatore sul Sole vede Venere con direzione e distanza rappresentati dalla freccia rossa. Il punto di vista della Terra su Venere si può ottenere componendo i punti di vista della Terra sul Sole e quello del Sole su Venere. Formalmente si ha la relazione vettoriale $\overrightarrow{TV} = \overrightarrow{TS} + \overrightarrow{SV}$. L'evoluzione nel tempo dei punti di vista, e quindi la traiettoria di Venere vista dalla Terra, è mostrata nella parte destra della figura stessa. È sufficiente immaginare \overrightarrow{TS} come la lancetta di un orologio grande con centro la Terra, e \overrightarrow{SV} come la lancetta di un orologio piccolo il cui centro (il Sole) è imperniato sull'estremità della lancetta \overrightarrow{TS} . I due orologi hanno frequenze diverse, e in particolare quello piccolo è più veloce di quello grande a causa del fatto che la distanza Sole-Venere è più piccola di quella

²All'epoca di Galileo non esistevano orologi in grado di misurare tempi dell'ordine del secondo. Galileo stesso diede un contributo al miglioramento delle misure osservando l'isocronismo del pendolo, cioè il fatto che la frequenza dell'oscillazione non dipende, in prima approssimazione, dalla sua ampiezza.

³Ho sempre trovato curioso il fatto che Copernico fosse un sacerdote. Alla luce di quello che succederà a Galileo cent'anni dopo per aver difeso le tesi copernicane, mi sembra un interessante paradosso.

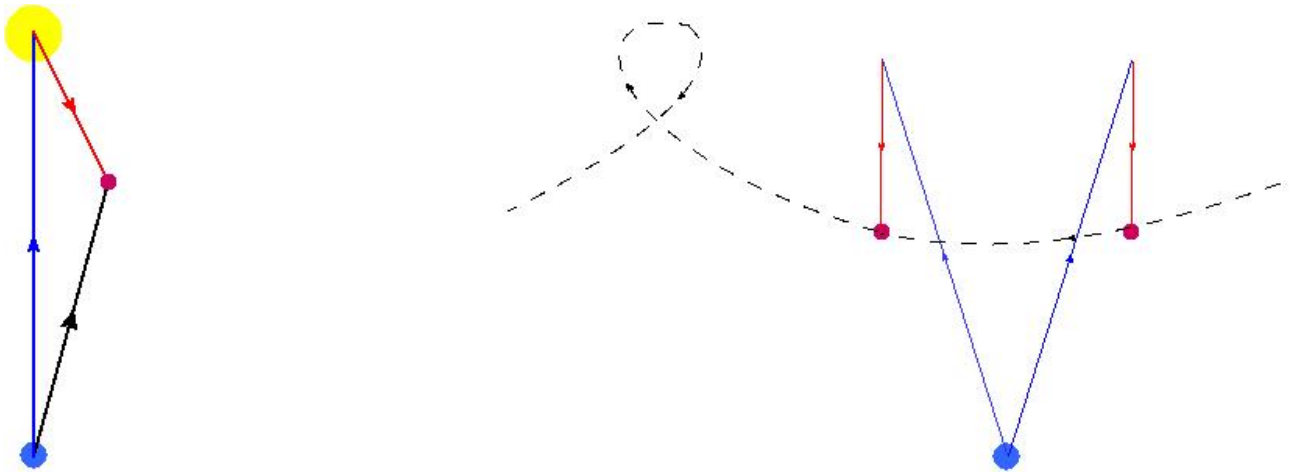


Figura 2: A sinistra, la Terra (in blu), il Sole (giallo) e Venere (rosso). La posizione di Venere rispetto alla Terra è ottenuta come composizione vettoriale delle posizioni Sole-Terra e Venere-Sole. A destra, l'evoluzione temporale: i vettori possono essere pensati come lancette di due orologi, uno più lento (terra-sole) e uno più veloce (sole-venere). Entrambi gli orologi girano in senso antiorario in figura, ma le lancette di venere-sole sono più rapide di quelle terra-sole, essendo Venere più vicina della Terra al Sole. Per la maggior parte del tempo l'orbita di Venere rispetto alla Terra è in senso antiorario, ma in alcune zone è in senso orario (moto retrogrado).

Sole- Terra⁴. Appare chiaro che il punto di vista geocentrico e quello eliocentrico sono esattamente equivalenti dal punto di vista della descrizione del moto e sono anche ugualmente complicati. È possibile rendersene conto osservando le immagini dei planetari **copernicani** e **tolemaici** su internet. Da questo punto di vista, la preferenza di Galileo per il sistema eliocentrico appare più come una questione filosofica che scientifica, ovvero: *come rischiare il rogo per nulla*.

Verso il sistema eliocentrico: Brahe, Keplero e Newton

Tyco Brahe (1546-1601), astronomo danese, è uno dei primi a rendersi conto che la diatriba fra sistema geo- ed elio- centrico si può risolvere solo con i numeri, le misure. Con pazienza, si mette nelle lunghe notti danesi a osservare il cielo e le posizioni dei pianeti e ne misura le posizioni con il variare del tempo, dimostrando con ciò una dedizione alla causa della Scienza sconosciuta di questi tempi. D'altra parte, uno che perde il naso in un duello per stabilire chi abbia maggiori doti per la matematica deve avere per forza qualche qualità fuori dal comune. Il tedesco Keplero (1571-1630), astronomo, matematico, teologo e

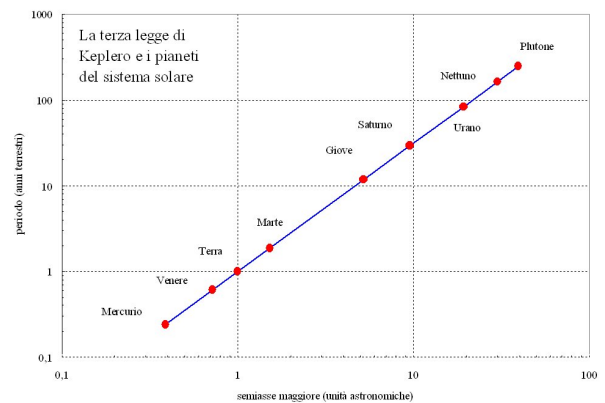


Figura 3: La terza legge di Keplero: i quadrati dei periodi di rivoluzione (ovvero l'inverso dei quadrati delle frequenze) dei pianeti del sistema solare sono proporzionali al cubo delle distanze dal Sole. La figura è in scala logaritmica e si trasforma in una regressione lineare: se T sono i periodi e D le distanze $T^2 = KD^3 \Rightarrow \log T = \frac{1}{2} \log K + \frac{3}{2} \log D$ con K costante universale.

musicista, assistente di Brahe, dimostrò un tipo di dedizione altrettanto ammirevole ma profondamente diversa. Egli cercò infatti di identificare una struttura muovendosi attraverso l'enorme giungla di informazioni che Brahe gli procurava. In termini moderni, questo processo si chiamerebbe *data mining*. Keplero formulò le tre Leggi che portano il suo nome, che riguardano il moto dei pianeti del sistema solare. Il punto cruciale che mi interessa mettere in evidenza è che le leggi di Keplero sono intrinsecamente legate a un

⁴I quadrati delle velocità delle lancette sono inversamente proporzionali alla distanza dal Sole (vedi Figura 3); è questa una delle Leggi di Keplero che discuto più avanti.

sistema eliocentrico: non sarebbe assolutamente possibile trovare leggi quantitative così *semplici* basandosi su un sistema geocentrico. Modernamente, diremmo che il sistema geocentrico è dominato da forze apparenti che rendono estremamente *complicate* le relazioni fra quantità spaziali e quantità temporali. Il sistema geocentrico riceve così un primo, durissimo colpo. Il colpo di grazia lo dà Newton (1642-1727), che era stato convinto da Halley (1656-1742), appassionato di comete, ad uscire temporaneamente dalla vita ascetica che stava conducendo per occuparsi di questioni connesse con la gravità. Il primo passo rivoluzionario di Newton è quello di ipotizzare che la stessa causa, la gravità, che fa cadere una palla di cannone sulla terra possa essere responsabile del moto della Luna intorno alla Terra (vedi Figura 4). Il secondo passo è quello di dimostrare che facendo DUE sole ipotesi, e cioè che le accelerazioni dei pianeti siano dirette verso il sole e che i moduli delle accelerazioni stesse siano inversamente proporzionali ai quadrati delle distanze, si riescono a dimostrare le TRE leggi di Keplero. Questo è un passo fondamentale: la tendenza alla *unificazione* delle leggi della fisica, cioè riuscire a spiegare il maggior numero di fenomeni naturali con il minor numero possibile di ipotesi. Infine, il terzo e forse più importante passo è quello nella direzione della *universalità*. Per quello che sappiamo attualmente, la legge di gravitazione di Newton è valida per un enorme numero di fenomeni naturali in cui è coinvolta la gravità, e su scale di distanza che vanno dal millimetro ai 10^{20} metri della nostra galassia, la Via Lattea.

Dovrebbe essere chiaro a questo punto capire che, anche se i due massimi sistemi sono equivalenti dal punto di vista della descrizione del moto, non lo sono affatto dal punto di vista della dinamica, cioè delle leggi che descrivono le interazioni fra oggetti e permettono di trovare le relazioni fra posizioni occupate dai corpi e gli intervalli di tempo trascorsi. Inoltre la scoperta della gravitazione universale si rivela estremamente *feconda*, apre la via cioè ad un enorme numero di conseguenze fisiche destinate a rimanere inesplorate qualora ci si limiti alla pura descrizione del moto. Una lista molto parziale di tali conseguenze include ad esempio la prima misura della velocità della luce grazie all'osservazione di Io,

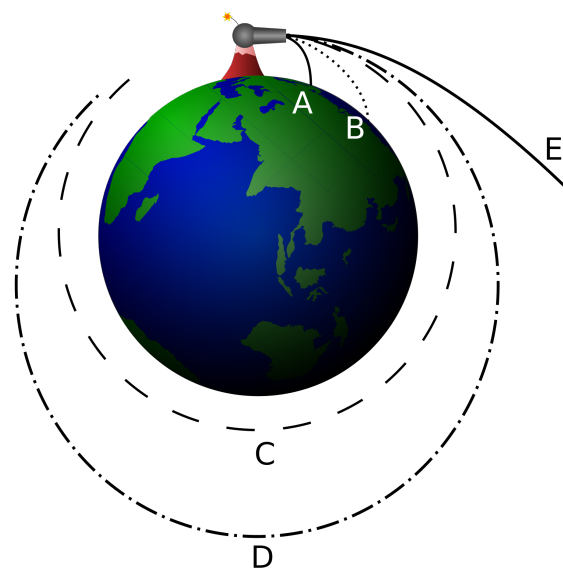


Figura 4: Un rifacimento moderno della figura a pag. 6 di *A Treatise of the System of the World*, il libro scritto da Newton per divulgare in forma semplice i contenuti del suo monumentale *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. Se un cannone posto su di una montagna lancia i suoi proiettili a bassa velocità, essi ricadranno sulla Terra (A,B). Ma se la velocità è sufficientemente alta essi entreranno in orbita (C,D) o, addirittura, si allontaneranno per sempre dal pianeta (E)

la prima delle lune di Giove scoperte da Galileo (Rømer 1672) e la scoperta del pianeta Nettuno grazie a una serie di anomalie riscontrate sul moto di Urano (Le Verrier e Adams, 1846).

Ma una nuova anomalia gravitazionale, cioè il moto del pianeta Mercurio incompatibile con le leggi della gravitazione di Newton (ancora Le Verrier, 1859) stava per aprire la strada alla nuova teoria della gravità, oggi nota come relatività generale, ad opera di uno dei più grandi geni del secolo passato.

Albert, energia e materia oscura.

Essendo un rivoluzionario, Einstein (1879-1955) per scrivere una nuova teoria della gravità non parte dai dati osservazionali come il moto di Mercurio, bensì da un principio generale che oggi chiameremmo di *simmetria*: le leggi della fisica devono essere equivalenti, in gergo, covarianti, per due osservatori in moto relativo qualunque. I due osservatori possono quindi ruotare, trasla-

re, accelerare ecc. uno rispetto all'altra. La cosa può sembrare ovvia, ma non lo è affatto. Questo principio, detto di relatività, era stato introdotto in una forma meno generale già da Galileo, ed è talmente restrittivo da porre limitazioni ben precise sulla forma delle equazioni che descrivono le leggi della fisica. Non entro nei dettagli della teoria della relatività generale nel presente contesto, e mi limito ad osservare che nell' A.D. 2015 i fisici sono di nuovo in un certo modo inguaiati con la gravità. Dal punto di vista teorico infatti, è ben noto che i due pilastri della fisica del ventesimo secolo, cioè la Meccanica Quantistica e la Teoria della Relatività, sono incompatibili fra di loro. Malgrado un elegante tentativo di soluzione di questo problema con la teoria delle stringhe e le sue varianti, la questione è tuttora irrisolta. Dal punto di vista fenomenologico, le osservazioni astrofisiche hanno prodotto negli ultimi anni alcuni risultati sconcertanti. La forza di gravità sembra richiedere infatti una modifica per via della apparente presenza di forze attrattive su scale piccole, cioè dell'ordine delle dimensioni di una galassia, circa 100.000 anni luce, e di forze repulsive su scale grandi, cioè dell'ordine del miliardo di anni luce. Al primo mistero si dà il nome di Materia Oscura, al secondo di Energia Oscura: entrambe sono in attesa di una spiegazione soddisfacente.

Epilogo

Le parole-chiave che ho usato: *universalità, unificazione, semplicità, bellezza, simmetria, creatività* sono estranee alla freddezza e all'austerità del Metodo Scientifico. Eppure, con esso si combinano per produrre quel particolare rapporto fra l'Uomo e la Realtà che è la Scienza. L'Arte e la Scienza sono accomunate da questo: la ricerca della bellezza e dell'unità di tutte le cose.



Paolo Ciafaloni: è un ricercatore in fisica teorica presso l'INFN e l'Università del Salento; vive ad Arnesano in provincia di Lecce. Laureato a Pisa nel 1991, si occupa di fisica delle particelle, cosmologia e teoria della informazione quantistica.

