

Brevi note sul metodo scientifico

Paolo Bernardini

Dipartimento di Matematica & Fisica "Ennio De Giorgi" - Università del Salento

I principi basilari del metodo scientifico vengono presentati sinteticamente, prendendo le mosse dal pensiero di Cartesio e Galileo. Una digressione di statistica, riferita al lancio dei dadi, permette anche ai lettori con poche conoscenze matematiche, di comprendere come una previsione teorica possa essere smentita dai dati sperimentali. Vengono quindi presentati diversi esempi di applicazione del metodo scientifico: teorie verificate con successo, risultati smentiti da misure successive, dati sperimentali ancora non compresi.

Le origini del metodo scientifico

Nel linguaggio comune viene spesso usata l'espressione "È scientificamente provato che ...". L'avverbio *scientificamente* fa intendere che l'affermazione che segue non è arbitraria, ma viceversa è fondata su basi certe, perché è il risultato di misure, osservazioni e verifiche eseguite con un metodo rigoroso. Anche se questa espressione viene usata talvolta a sproposito, resta il fatto che si sente il bisogno di una procedura oggettiva che garantisca la correttezza dell'affermazione. La necessità di definire un metodo rigoroso con il quale osservare e comprendere la natura animò il dibattito filosofico, circa quattro secoli fa. Bacon e Cartesio furono tra i principali protagonisti

di questo dibattito. Nel 1628 Cartesio scriveva

"Per metodo ... intendo delle regole certe e facili, osservando le quali esattamente nessuno darà mai per vero ciò che sia falso, e senza consumare inutilmente alcuno sforzo della mente, ma gradatamente aumentando sempre il sapere, perverrà alla vera cognizione di tutte quelle cose di cui sarà capace [1]"

Le regole proposte da Cartesio, si possono sintetizzare così :

- Accettare solo l'evidenza.
- Scomporre le difficoltà.
- Andare dal più semplice al più complesso.
- Fare delle ricognizioni esaustive.

Ma è con Galileo Galilei che il metodo scientifico viene codificato e la matematica assurge a strumento fondamentale per *leggere il libro della natura*. Il metodo proposto da Galileo è riassumibile in quattro passaggi:

- Osservazione e riproduzione *in laboratorio* del fenomeno in esame.
- Descrizione quantitativa del fenomeno ed elaborazione di una teoria.
- Predizione quantitativa di nuovi fenomeni osservabili.

- Verifica sperimentale della predizione.

È opportuno sottolineare il carattere quantitativo che ogni teoria deve assumere. Non basta descrivere qualitativamente un fenomeno, è necessario conoscerlo e prevederlo per mezzo di quantità ben definite e misurabili. I risultati che un ricercatore raggiunge in laboratorio devono poter essere confrontati con quelli ottenuti da altri.

Non è detto che le quattro fasi qui elencate si presentino proprio in quest'ordine. Una teoria può essere il frutto di puro ragionamento, ma non può fare a meno di sottoporsi alla verifica sperimentale. Se il risultato smentisce la teoria, questa viene abbandonata e si torna in laboratorio eseguendo altre misure, alla ricerca di nuove evidenze e di una nuova teoria, che ancora una volta deve sottoporsi alla verifica sperimentale, riprendendo il ciclo. Il termine *laboratorio* va inteso in senso lato: il laboratorio è un qualsiasi luogo dove si fanno misure e si osservano i fenomeni (naturali o artificiali).

Sia negli scritti di Cartesio sul metodo che in quelli di Galileo si afferma che partendo da problemi semplici si riducono le difficoltà e che solo successivamente si possono affrontare problemi più complessi. Galileo scrive:

"Io stimo più il trovare un vero, benchè di cosa leggera, che 'l disputare lungamente delle massime questioni senza conseguire verità nessuna [2]"

Questo approccio viene chiamato *riduzionista*: si cerca di isolare il fenomeno in esame da altri fenomeni che possono nascondere l'essenza. Il *riduzionismo* ha permesso di ottenere tanti successi nella ricerca scientifica, ma indubbiamente può risultare inadeguato nell'affrontare la sfida della complessità. Si pensi alla medicina: è praticamente impossibile separare un singolo organo dall'intero organismo.

Le problematiche connesse al metodo scientifico sono numerose. Ad esempio: quali sono i limiti del riduzionismo? il metodo scientifico è adattabile a tutte le discipline? Questa breva nota non pretende di approfondire queste tematiche, semplicemente si vogliono presentare alcuni

esempi (principalmente nel campo della fisica) di applicazione del metodo scientifico.

L'esperimento del *gran navilio*

Un esempio mirabile si trova leggendo quanto scrive Galileo in difesa della teoria sulla rotazione terrestre. Contro questa teoria si obiettava che la rotazione comporterebbe effetti evidenti che in realtà non vengono osservati. Ad esempio, lanciando un oggetto verso l'alto questo dovrebbe ricadere ad una certa distanza dal punto di lancio perché la Terra si sarebbe spostata mentre l'oggetto è in volo. Contro quest'argomento Galileo propone il seguente esperimento [3]:

"Riserratevi ... sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle ... un gran vaso d'acqua, e ... de' pescetti; sospendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca ... stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animaletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti ... i pesci si vedranno andar notando indifferente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto e voi, gettando all'amico alcuna cosa, non più gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa; e saltando voi ... a piè giunti, eguali spazii passerete verso tutte le parti."

E continua:

"... fate muover la nave con quanta si voglia velocità; chè (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, nè da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina o pure sta ferma: voi saltando passerete nel tavolato i medesimi spazii che prima, ... le goccioline cadranno come prima nel vaso inferiore, senza caderne pur una verso poppa, benchè, mentre la gocciola è per aria, la nave scorra molti palmi..."

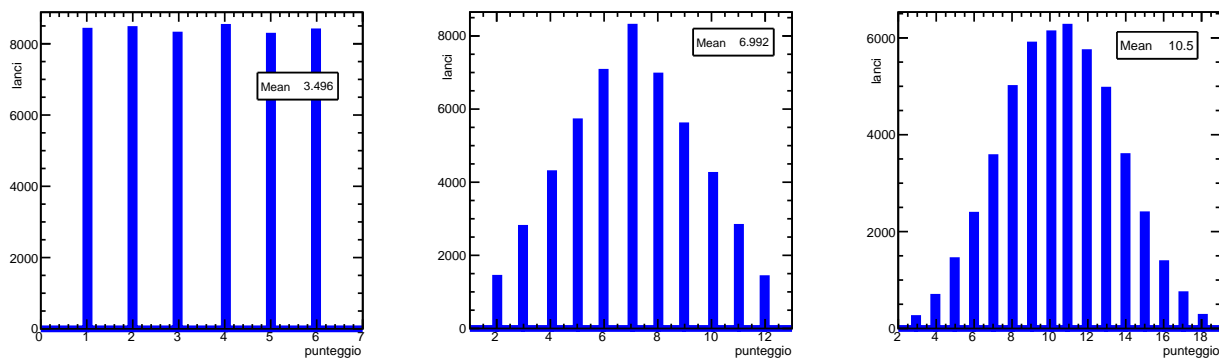


Figura 1: A sinistra: distribuzione dei punteggi per il lancio di un singolo dado (ovviamente il punteggio è compreso tra 1 e 6, la media vale ~ 3.5). Al centro: distribuzione dei punteggi per il lancio di due dadi (punteggio totale tra 2 e 12, media ~ 7). A destra: distribuzione dei punteggi per il lancio di tre dadi (punteggio totale tra 3 e 18, media ~ 10.5).

Il lettore non si faccia ingannare dallo stile letterario (peraltro pregevole) di Galileo, privo di formule matematiche. Il ragionamento che viene qui sviluppato è denso di contenuti scientifici: viene definito il sistema inerziale (la nave in navigazione con velocità costante) e viene formulato il principio della relatività Galileiana (non c'è modo di sapere se la nave è ferma o meno). L'esperimento proposto è riproducibile da chiunque e le osservazioni da fare sono ben definite: l'osservatore deve verificare che la caduta della goccia avvenga proprio sulla verticale in modo da centrare la bocca del recipiente sottostante. Si tratta di un'applicazione rigorosa del metodo scientifico (misure quantitative e riproducibili per demolire le argomentazioni di chi non crede alla rotazione terrestre).

Giocare a dadi (digressione statistica)

Non è facile esporre sinteticamente le tecniche che vengono usate per valutare i risultati di una singola misura oppure di un esperimento complesso. Ma un esempio semplice come il lancio dei dadi permette di introdurre alcuni concetti di statistica e quindi di valutare un certo risultato anomalo.

In figura 1 sono rappresentate le distribuzioni ottenute simulando (metodo di Monte Carlo) per 50 mila volte il lancio di un solo dado, due e tre dadi, rispettivamente. Nel caso di un solo dado

la distribuzione è uniforme, con piccole fluttuazioni, perché ogni valore (da 1 a 6) è ugualmente probabile. Nel caso di due dadi la distribuzione assume una forma triangolare, in altre parole è più probabile che la somma dei due dadi valga 7 perché questo punteggio è il risultato di diverse combinazioni (1+6, 2+5, 3+4 e viceversa 6+1, 5+2, 4+3) mentre i punteggi 2 e 12 sono poco probabili, perché dovuti ognuno ad una sola combinazione (1+1, 6+6, rispettivamente). Nel caso di tre dadi la distribuzione assume una forma a campana, che merita particolare attenzione.

Tale forma a campana si può approssimare con la funzione di probabilità elaborata da Carl Friedrich Gauss:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

nella quale il parametro μ rappresenta il valore centrale ed anche quello più probabile, mentre σ è il parametro associato alla larghezza della distribuzione. Come si vede dalla figura 2 la curva Gaussiana approssima abbastanza bene la distribuzione per il lancio di tre dadi ed anche meglio quella per il lancio di dieci dadi. Esiste un teorema (teorema del limite centrale) in base al quale la somma di molte grandezze si distribuisce secondo la funzione Gaussiana, indipendentemente da quale sia la distribuzione di ogni singola grandezza. Nel caso in esame, sebbene la distribuzione per il punteggio di un singolo dado sia uniforme, quella per il punteggio di dieci dadi è una Gaussiana. Analogamente suc-

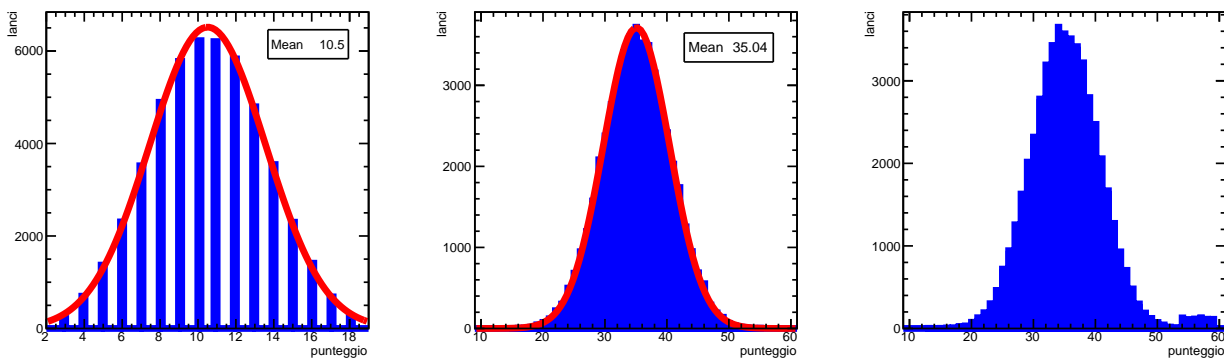


Figura 2: A sinistra: la distribuzione dei punteggi per il lancio di tre dadi è interpolata con una funzione Gaussiana (curva rossa). Al centro: la distribuzione dei punteggi per il lancio di dieci dadi (punteggio totale tra 10 e 60, media ~ 35) è interpolata con una funzione Gaussiana (curva rossa). A destra: la distribuzione relativa al lancio di dieci dadi presenta un'anomalia: i punteggi superiori a 53 presentano una numerosità eccessiva, non compatibile con la distribuzione Gaussiana.

cede che una misura possa essere condizionata da molte cause di incertezza e questo comporta che la misura, ripetuta più volte, si distribuisca secondo la Gaussiana, che viene anche chiamata "distribuzione normale".

presentano un numero di volte eccessivo rispetto all'attesa. In particolare, in base alla distribuzione Gaussiana riferita a 50 mila lanci dei dieci dadi, solo in circa 11 casi si dovrebbero ottenere punteggi superiori a 53. Invece se ne contano più di 700 ed è altamente improbabile (praticamente impossibile) che questo sia dovuto al caso. Si può dunque concludere che qualche dado è truccato.

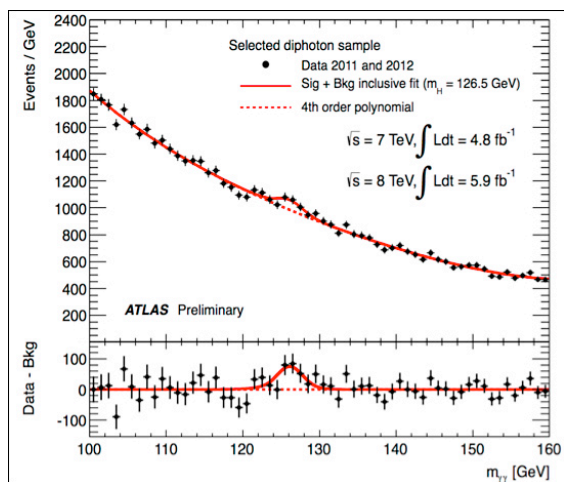


Figura 3: Evidenza del bosone di Higgs nei dati dell'esperimento Atlas [5]. La linea rossa tratteggiata rappresenta il numero di eventi attesi senza ipotizzare il bosone di Higgs. La linea rossa continua rappresenta lo stesso numero ipotizzando che il bosone esista ed abbia una certa massa (126.5 GeV). I risultati sperimentali (punti neri) non sono compatibili con la linea tratteggiata.

Non è opportuno approfondire ulteriormente l'argomento in questa sede, ma la teoria degli errori e la conoscenza di un certo fenomeno permettono di distinguere tra una possibile fluttuazione statistica della misura oppure la scoperta di un'anomalia, incompatibile con le conoscenze generalmente accettate. In questo modo i ricercatori verificano la correttezza di una teoria o viceversa individuano delle incongruenze che portano a nuove scoperte (nel nostro esempio, un po' banale, abbiamo scoperto che i dadi sono truccati). Nel seguito verranno presentati alcuni casi esemplari.

Una volta nota la distribuzione normale (o Gaussiana) per il punteggio totale ottenuto lanciando dieci dadi (al centro in figura 2), è possibile interpretare quantitativamente la distribuzione raffigurata a destra nella figura 2. È evidente la presenza di un'anomalia: i punteggi più alti si

I successi del metodo scientifico

Il bosone di Higgs - La scoperta del bosone di Higgs è un ottimo esempio della potenza del metodo scientifico ed è sufficiente ricordare quanto già detto sui dadi truccati per comprendere come i ricercatori degli esperimenti Atlas e CMS nel 2012 hanno potuto dichiarare al mondo di aver trovato il bosone, la cui esistenza era stata ipotizzata nel 1964. Nella figura 3 sono rappre-

sentate due curve rosse (una tratteggiata e l'altra continua). Esse rappresentano cosa ci si aspetta assumendo che il bosone non esista (curva tratteggiata) e cosa invece nell'ipotesi che esista ed abbia una certa massa (linea continua). In quasi tutto il grafico le due curve sono sovrapposte e quindi indistinguibili, ma c'è un piccolo intervallo in cui le due curve si separano. In quell'intervallo le misure (punti neri) si sovrappongono alla curva continua e sono ben separati da quella tratteggiata. Ai punti sperimentali sono associate delle *crochette* che rappresentano le incertezze delle misure, ma anche tenendone conto i punti sperimentali restano ben separati dalla curva tratteggiata e quindi la curva intera è favorita, per cui si può affermare l'esistenza del bosone con una certa massa.

La falena prevista - In Madagascar esiste un fiore (Orchidea Cometa) dotato di uno sperone nettario estremamente lungo (25-30 cm). Ai tempi di Darwin non si conosceva nessun insetto in grado di impollinare un fiore con queste caratteristiche. Darwin affermò che la selezione naturale avrebbe portato all'estinzione quella specie di orchidea se in parallelo non si fosse evoluto un insetto in grado di impollinarla. Su questa base ipotizzò l'esistenza di una falena con una spirotromba sufficientemente lunga [4]. Mezzo secolo più tardi questa falena fu effettivamente individuata e fu chiamata *Xanthopan morgani praedicta*, proprio per ricordare la predizione di Darwin.

Le onde gravitazionali - Nel 1916 Albert Einstein ipotizzò l'esistenza delle onde gravitazionali: perturbazioni dello spazio-tempo dovute a interazioni gravitazionali. Nel 1974 Hulse e Taylor (Nobel nel 1993) verificarono che il sistema binario PSR 1913-16 perdeva energia proprio nella misura prevista dalla relatività generale, ipotizzando l'emissione di onde gravitazionali. Nel 2015 gli avanzamenti tecnologici permettono la costruzione di interferometri particolarmente sensibili e la collaborazione Ligo-Virgo ne mette un funzione due, posizionati a circa 3000 km di distanza. Poco dopo la loro messa in funzione su entrambi viene osservato lo stesso segnale nello stesso momento, simile a quello teoricamente ipotizzato per le onde gravitazionali (figura 4).

In realtà tra i due segnali c'è un ritardo di 10 ms, proprio il tempo che impiega la luce a percorrere i 3000 km che separano i due interferometri (le onde gravitazionali si pensa che viaggino alla velocità della luce). La probabilità che un disturbo casuale degli strumenti di misura si riproduca uguale su due interferometri così lontani è praticamente nulla e sulla base di questa considerazione gli scienziati di Ligo-Virgo hanno affermato di aver osservato direttamente un'onda gravitazionale.

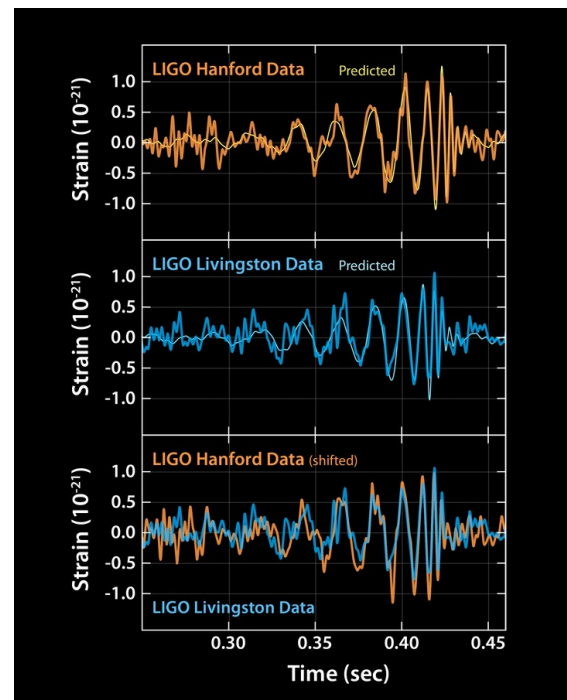


Figura 4: La scoperta delle onde gravitazionali: il segnale rilevato dall'interferometro ad Hanford è sovrapponibile a quello rilevato a Livingston, nonostante i due apparati distino 3000 km [7].

Stelle di periferia e materia oscura

Nelle galassie a spirale la gran parte delle stelle è concentrata nel bulbo (*bulge*). Questo comporta che, in base alla fisica Newtoniana, la velocità (v) delle stelle esterne al *bulge* deve risultare

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (2)$$

dove G è la costante di gravitazione universale, M la massa del *bulge* ed r la distanza della stella dal centro della galassia. In altre parole, in base alla equazione 2, ci si aspetta che la velocità diminuisca all'aumentare della distanza. In realtà le misure (figura 5) mostrano che, per le stelle esterne al *bulge*, la velocità è praticamente costante, quindi indipendente dalla distanza.

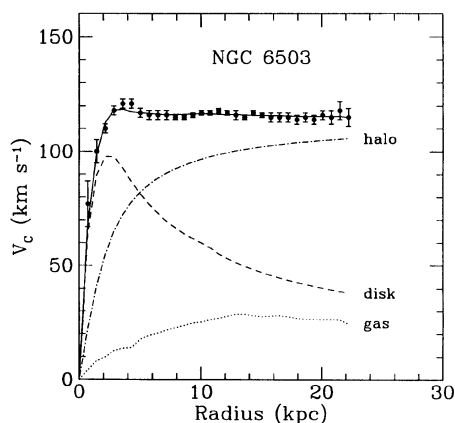


Figura 5: Velocità delle stelle (in km/s) in funzione della distanza (in kpc) dal centro della galassia NGC 6503 [6]. I punti neri rappresentano le misure. Le diverse curve quella che sarebbe la velocità delle stelle ipotizzando che la galassia sia composta solo dalla materia visibile (*disk*) o solo da *gas* oppure che ci sia solo materia oscura distribuita in un alone (*halo*). Come si vede la velocità attesa per effetto della materia visibile non è compatibile con i dati osservati. La curva continua, che ben si adatta ai punti sperimentali, è la somma dei diversi contributi (*disk+gas+halo*).

Questa anomalia, confermata da altre misure simili, potrebbe essere risolta ipotizzando che la materia osservabile (quella luminosa) è solo una parte della materia presente nelle galassie e che esiste un alone di materia invisibile attorno al disco delle galassie che si manifesta solo per effetto gravitazionale. Molti tentativi di osservare questa materia oscura (*dark matter*) finora non hanno dato risultati, il problema resta aperto e c'è chi mette in discussione la meccanica Newtoniana. Questa anomalia non viene vista come una sconfitta da parte della comunità scientifica, ma piuttosto come un'opportunità per nuove entusiasmanti scoperte.

Più veloci della luce?

Per studiare le oscillazioni dei neutrini, un fascio di queste particelle, veniva emesso dal CERN di Ginevra e inviato in direzione dei laboratori sotterranei del Gran Sasso, a circa $730 km$ di distanza, dove l'esperimento Opera era in grado di rivelarli.

Dopo accurate misure sul tempo di volo dei neutrini, nel settembre 2011 venne pubblicato un articolo [8] in cui la collaborazione Opera dichiara di aver misurato che la velocità dei neutrini (v) è maggiore di quella della luce (c). Questo è il dato che compare nell'articolo:

$$\frac{v - c}{c} = (0.00248 \pm 0.00028 \pm 0.00030)\% \quad (3)$$

In altre parole, la differenza è piccola, ma significativa (0.00248%), la misura è affetta da un'incertezza statistica ($\pm 0.00028\%$) e da un'incertezza sistematica ($\pm 0.00030\%$), ma non tali da rendere $v - c$ compatibile con 0 (se $v - c$ valesse 0 si dovrebbe concludere che i neutrini non superano la velocità della luce).

La misura suscitò grande scalpore perché metteva in discussione uno dei pilastri della fisica moderna, cioè l'assunzione che la velocità della luce non possa essere superata. Ma il metodo scientifico richiede che la misura sia ripetibile e infatti altri ricercatori la ripeterono utilizzando altri rivelatori posizionati nei laboratori del Gran Sasso. I risultati di queste nuove misure furono molto diversi: i neutrini non sembravano superare la velocità della luce. Nel frattempo i ricercatori di Opera individuarono una possibile causa di errore (un cavo mal collegato).

A luglio del 2012 l'articolo di Opera venne corretto [9]. Nella nuova versione la differenza tra v e c si riduce di un ordine di grandezza (circa 10 volte). Da 0.00248% si passa a 0.00027% e quindi diventa compatibile con gli errori sperimentali che restano simili a quelli del settembre 2011 [formula 3].

Nell'arco di pochi mesi, l'applicazione del metodo scientifico, in particolare la necessità che la misura sia ripetibile (e sia effettivamente ripetuta),

aveva fatto giustizia di una falsa scoperta.

Conclusioni

In merito al metodo scientifico molto altro ci sarebbe da scrivere, con un ben maggiore livello di approfondimento. In questa breve nota si son voluti comunque fornire alcuni elementi di riflessione e molti esempi, si spera utili per ragionare sul metodo scientifico. La verifica sperimentale è l'elemento che caratterizza la scienza, la falsificazione di una teoria non rappresenta un fallimento, è piuttosto il passaggio necessario per arrivare a nuove scoperte e ad una migliore comprensione della realtà. La conferma oppure la falsificazione di una teoria si può avere in pochi mesi oppure dopo molti anni. Lo sviluppo tecnologico a volte fissa questi tempi: una misura irrealizzabile diventa fattibile anni dopo. Quanto dovremo ancora aspettare per sapere se la materia oscura esiste? E nel caso esista: cos'è?

del Salento. Nei primi anni della sua carriera, all'Università di Urbino, si è interessato di storia della fisica e di elettronica quantistica. Trasferitosi a Lecce nel 1988, si è dedicato alla fisica astroparticellare, nell'ambito delle attività dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Ha collaborato all'esperimento MACRO presso i laboratori sotterranei del Gran Sasso, contribuendo alle analisi sui neutrini atmosferici che portarono alla scoperta del fenomeno delle oscillazioni. Successivamente si è dedicato all'esperimento ARGO-YBJ presso l'osservatorio di alta quota di YangBaJing in Tibet. Attualmente è attivo nell'analisi dei dati sui raggi cosmici provenienti dal satellite DAMPE e collabora alla progettazione dell'esperimento DUNE negli Stati Uniti.

Questa lezione è stata presentata il 19 febbraio 2019 all'ISUFI nell'ambito dei seminari del *Laboratorio didattico ISUFI sul metodo scientifico*.



- [1] R. CARTESIO: *Regole per la guida dell'intelligenza*. Bompiani, Milano (2000).
- [2] G. Galilei, nota a margine in uno scritto indirizzato al padre Campanella.
- [3] G. GALILEI: *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*. Einaudi, Torino (1970).
- [4] C. DARWIN: *I vari espedienti mediante i quali le orchidee vengono impollinate dagli insetti*. ETS, Pisa (2009).
- [5] <https://atlas.cern/node/1116>
- [6] K. FRESSE: "Review of Observational Evidence for Dark Matter in the Universe and in upcoming searches for Dark Stars", *EAS Publ.Ser* 36 (2009) 113-126. arXiv:0812.4005 [astro-ph]
- [7] <https://www.ligo.caltech.edu>
- [8] <https://arxiv.org/abs/1109.4897v1>
- [9] <https://arxiv.org/abs/1109.4897v4>



Paolo Bernardini: professore associato di Fisica Nucleare e Subnucleare presso l'Università

