

accatampato

www.accatagliato.org

La legge è uguale per tutti: anche per i gravi

LA VELOCITA' DEL NEUTRINO

NON SI SORPASSA IN TUNNEL

LE DOMANDE DELLA SCIENZA

NAVIGATORI GPS E RELATIVITA'



$$\begin{aligned}x' &= \gamma(x - vt) \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \gamma(t - vx/c^2)\end{aligned}$$



La rivista è disponibile on-line, è navigabile sia da computer che da cellulare ed è scaricabile nei formati PDF ed ePUB.



<http://www.accastampato.it>

I lettori possono esprimere commenti o fare domande agli autori on-line sulle pagine dedicate ai singoli articoli. I QR Code che corredano alcuni articoli codificano gli URL di pubblicazione on-line e sono generati mediante invx.com

Gli articoli contenuti in questo numero sono protetti con marca digitale grazie a patamu.com



Questo numero della rivista è realizzato con la collaborazione della Commissione Europea e dell'Associazione Frascati Scienza in occasione della Settimana della Scienza 2012 e della Notte Europea dei Ricercatori 2012



Accastampato è realizzato con il patrocinio del Dipartimento di Fisica dell'Università Sapienza di Roma, del CNR Istituto dei Sistemi Complessi (ISC), Unità Sapienza di Roma, dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, del Dipartimento di Fisica dell'Università Roma Tre, dell'Associazione Romana per le Astro-particelle (ARAP).



Indice

num. 9, Settembre 2012

EDITORIALE

Ricercatori... energia pura 5

A un anno circa dal clamoroso annuncio da parte della collaborazione OPERA della possibilità che il neutrino viaggi più veloce della luce ripercorriamo oggi quella vicenda per analizzare come funziona la Scienza

IL RICERCATORE ROMANO

Il neutrino 6

di M. Messina, C. Mancini

Perché questa singolare particella è stata così importante nella recente storia della Fisica e perché lo sarà ancora...

La velocità del neutrino 8

di C. Mancini

Come si fa a misurare qualcosa che va a 300000 km/s su di una distanza di 730 km a una profondità fino a 13 km?

Non si sorpassa in tunnel 12

di N. Loret e A. Maselli

Tutti sanno che la velocità della luce è la massima raggiungibile, ma perché? Cosa vuol dire che il tempo è relativo?

Le domande della scienza 18

di M. Valli

Quando e in quale modo il risultato di un esperimento scientifico può cambiare il nostro modo di vedere le cose?

La legge è uguale per tutti 21

di R. Pujia

Scienza, leggi di natura e teorie definitive...ma esistono davvero verità definitive?

RECENSIONI

La scienza in azione 25

di G. Ghinassi

Nonostante i successi della scienza, l'interpretazione del dato scientifico è una delle questioni cruciali e più spinose dell'ultimo secolo?

IL RESTO DEL NEUTRINO

Navigatori GPS e relatività 26

di G. Organtini

Uno strumento di uso quotidiano per misurare le distanze in modo preciso che senza Einstein sarebbe inservibile

RUBRICHE

Il sistema temperato 28

di M. Pugliese

I principi matematici che sono alla base di un'armoniosa successione di suoni

ESPERIMENTI

Una questione di equilibri 30

di P. Malacari e I. Malacari

Saper gestire la posizione del baricentro per non cadere...



Associazione Culturale Terre Vivaci

presenta

Einstein s'il vous plait

dall'omonimo romanzo di Jean-Claude Carrière

adattamento teatrale di Mario Migliucci e Adriano Saleri

con

Adriano Saleri
Albert Einstein

Mario Migliucci
Visitatore



regia
Giles Smith

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

- Sala Touschek -

Via Enrico Fermi 40 - Frascati

28 settembre 2012

ore 20,00

INGRESSO
GRATUITO

PRENOTAZIONE
OBBLIGATORIA
www.frascatiscienza.it



Ricercatori...energia pura

Il motivo ispiratore di questo numero di Accastampato è una notizia scientifica che di recente ha catturato molta parte dell'interesse nel mondo scientifico e non solo. Stiamo parlando della misura della velocità del neutrino che è stata realizzata esattamente un anno fa con il fascio di neutrini CNRS (CERN Neutrinos to Gran Sasso) che origina dal complesso di acceleratori del CERN di Ginevra ed è diretto verso i rivelatori degli esperimenti in presa dati nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS, L'Aquila).

Nonostante questa misura passi attraverso gli stessi passi concettuali di una qualsiasi misura di velocità (la misura dello spazio percorso da un oggetto e l'intervallo in cui lo percorre), nel caso del neutrino le misure dello spazio percorso e del tempo impiegato possono essere molto complicate. Per la misura del tempo c'è bisogno di un segnale di *start* e di uno di *stop*, dove il primo è dato dal segnale elettrico che le particelle primarie che generano il fascio di neutrini inducono in una spira al loro passaggio, mentre lo *stop* è generato dalla interazione di uno dei neutrini nei rivelatori del LNGS. Troverete tutti i dettagli del caso negli articoli *Il neutrino* e *Misurare la velocità dei neutrini* di Carlo Mancini e Marcello Messina. È importante qui rilevare che la precisione richiesta per entrambe le grandezze in gioco, nanosecondi per la misura temporale e centimetri per la misura spaziale, non sono difficili da ottenere sul piano tecnologico. Ma se consideriamo quelle che in fisica si chiamano *incertezze sistematiche*, ovvero quelle fonti di incertezze non prevedibili, dovute all'impossibilità di avere sotto controllo tutti i parametri che contribuiscono alla misura, che sono centinaia, allora un tale progetto appare subito di grande complessità. In tale misura la cautela, ripetutamente richiesta dall'esperimento OPERA, è necessaria per diversi motivi. Uno di questi è dovuto alle incertezze sistematiche, menzionate sopra, ma un altro dipende dal fatto che in quei dati non c'era la possibilità di vedere una dipendenza del fenomeno da nessun parametro sperimentale, come se i neutrini avessero deciso di accelerare tutti insieme e per la stessa quantità, qualunque fosse la loro energia, almeno secondo le risoluzioni sperimentali in gioco. Per capire un fenomeno è importante capire da quali parametri esso dipende.

È necessaria altresì una riflessione sui titoli sensazionalistici che sono apparsi su molte riviste non specializzate in cui si gridava al fallimento della Relatività Speciale di Einstein (per una breve spiegazione di perché nulla può andare più veloce della luce vi rimando all'articolo *Non si sorpassa in tunnel* di Niccolò Loret e Andrea Maselli). È infatti il caso di rilevare che una teoria così ampiamente verificata, i cui effetti entrano nella nostra vita di tutti i giorni (come nel caso dei *Navigatori GPS e teoria della relatività* di Giovanni Organtini), non può rivelarsi sbagliata, ma tutt'al più si possono scoprire fenomeni non previsti da essa e aprire la via a una teoria più ampia che comprenda la precedente. Ciò è quanto accaduto con la meccanica newtoniana quando è comparsa la meccanica relativistica. Su come possa avvenire il superamento di una teoria da parte di un'altra troverete un'ampia panoramica della riflessione filosofica in *La legge è uguale per tutti* di Roberto Pujia.

Un altro motivo di reticenza dei fisici nell'accettare la violazione della Relatività Speciale è dovuto alla nostra conoscenza a priori di quei campi della fisica in cui un tale risultato avrebbe avuto effetti non osservati. Tutti questi *ingredienti* hanno dato luogo allo scetticismo scientifico nei confronti di una violazione così macroscopica della Relatività Speciale, come potete leggere in *Le domande della Scienza* di Marco Valli.

Per finire vorrei porre l'accento sul fatto che ogni occasione per discutere di scienza deve essere bene accolta. Tuttavia sarebbe opportuno tenere la discussione su di un piano tecnico e competente ed evitare sensazionalismi come se ne sono visti su molte riviste non specializzate.

Buona lettura e buona Notte 2012!

Marcello Messina
Columbia University, New York

REDAZIONE

redazione@accatagliato.org

Alessio Cimorelli

jenkin@accatagliato.org

Carlo Mancini

carlo@accatagliato.org

Silvia Mariani

shyka@accatagliato.org

Leonardo Barcaroli

leov@accatagliato.org

Erica Chiaverini

erica@accatagliato.org

Roberto Garra

roberto@accatagliato.org

Niccolò Loret

niccolo@accatagliato.org

Isabella Malacari

isabella@accatagliato.org

Massimo Margotti

massimo@accatagliato.org

Angela Mecca

lela@accatagliato.org

Kristian A. Gervasi Vidal

krisgerv@accatagliato.org

COMMISSIONE SCIENTIFICA

Giorgio Parisi

Giovanni Battimelli

Fabio Bellini

Lara Benfatto

Stefano Bianchi

Giulia De Bonis

Riccardo Faccini

Francesco Piacentini

Luciano Pietronero

Antonio Polimeni

Antonello Polosa

Maria Antonietta Ricci

HANNO CONTRIBUITO

G. Ghinassi, I. Malacari, P. Malacari,

C. Mancini, M. Messina, C. Mancini,

N. Loret e A. Maselli, G. Organtini,

M. Pugliese, R. Pujia, M. Valli.

CON LA COLLABORAZIONE DI

Commissione Europea

Associazione Frascati Scienza

CON IL PATROCINIO DI

Dipartimento di Fisica dell'Università Sapienza di Roma

Istituto dei Sistemi Complessi CNR-ISC, Sezione Sapienza di Roma

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Dipartimento di Fisica dell'Università Roma Tre

Associazione Romana per le Astro-particelle

SI RINGRAZIANO ANCHE

Donald E. Knuth, Leslie Lamport, il

T_EX Users Group (www.tug.org)

e Gianluca Pignalleri

Il neutrino

Protagonista di storie singolari

Marcello Messina e Carlo Mancini

(Columbia University, Università Roma Tre)

Il neutrino è stato protagonista di storie singolari fin da quando ne fu ipotizzata l'esistenza nel 1930. In quegli anni uno dei fenomeni più studiati per capire la natura degli atomi era il *decadimento beta*, processo in cui un neutrone si trasforma in un protone emettendo un elettrone. Ci si aspettava, infatti, che l'energia dell'elettrone emesso avesse un valore ben preciso, dato dalla differenza di massa fra il nucleo padre e il nucleo figlio¹, secondo la famosa equazione di Einstein $E = \Delta m \cdot c^2$, dove Δm è appunto la differenza di massa fra i due nuclei che si trasforma in energia e c è la velocità della luce.

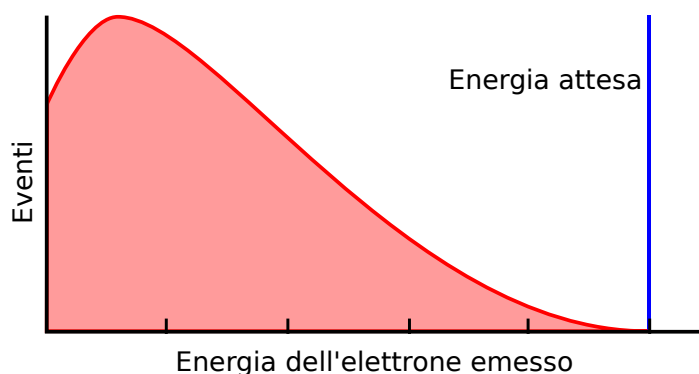


Figura 1 – In rosso lo spettro del decadimento beta (numero di eventi misurati in funzione dell'energia) e in blu l'energia attesa teoricamente.

Sperimentalmente, però, si trovò un fenomeno in completo contrasto con questa aspettativa: gli elettroni non hanno tutti la stessa energia ed essa, comunque, è sempre inferiore rispetto a quella attesa, come schematizzato in Figura 1. Questo è stato un problema enorme per molti anni, tanto che Niels Bohr arrivò addirittura a supporre che ci fosse una violazione del principio di conservazione dell'energia.

Fu Wolfgang Pauli a ipotizzare per primo che nel decadimento beta ci fosse un'altra particella emessa, non visibile perché neutra, che chiamò *neutrone*. In seguito il nome neutrone fu dato alla particella che, insieme al protone, costituisce i nuclei atomici. Enrico Fermi ribattezzò *neutrino* la misteriosa particella del decadimento beta, poiché era chiaro, già allora, che avesse una massa molto piccola, se non addirittura nulla. Ancora oggi tutto il mondo scientifico la chiama esattamente così.

¹ Per una breve dimostrazione: http://it.wikipedia.org/wiki/Decadimento_beta/#La_legge_di_conservazione_dell.27energia

Una disperata via d'uscita

L'esistenza del neutrino risolve il problema dell'energia mancante nel decadimento beta perché il neutrino stesso porta via parte dell'energia disponibile. Questa soluzione era stata presentata dallo stesso Pauli come una "disperata via d'uscita". Lui stesso pare che, una mattina, abbia dichiarato di aver dormito malissimo affermando: "Ho inventato una particella che nessun fisico sperimentale riuscirà mai a trovare!". Nonostante le preoccupazioni di Pauli, Fermi propose una descrizione del decadimento beta così elegante e convincente che è stata presa a modello per tutti i tipi di interazione nucleare oggi conosciuti, e che per questo molti considerano una delle teorie più rivoluzionarie della storia.

L'esistenza del neutrino fu dimostrata nel 1956 da Clyde Cowan e Frederick Reines in un esperimento che valse, a quest'ultimo, il premio Nobel. L'esperimento consisteva nel cercare il processo inverso del decadimento beta in un contenitore di acqua esposto al grande flusso di neutrini prodotto da una centrale nucleare a piccola distanza dal laboratorio. Quando un neutrino interagiva con un protone si produceva un neutrone e un positrone², che annichilendosi con un elettrone produceva fotoni.

Nel 1936 Carl David Anderson, studiando le particelle che vengono dal Sole e dall'atmosfera terrestre, scoprì molte particelle cariche, fra cui il *muone*. Nel 1945 Oreste Piccioni, Ettore Pancini e Marcello Conversi portarono a termine uno storico esperimento che dimostrò che il muone è una particella simile all'elettrone, con la stessa carica elettrica, ma 200 volte più pesante. L'apparato sperimentale è esposto oggi nel museo del Dipartimento di Fisica dell'Università Sapienza di Roma.

Il muone con l'elettrone e il tauone, un'altra particella ancora più pesante, costituiscono insieme ai neutrini il gruppo di particelle chiamate *leptoni*. Schwartz, Lederman e Steinberger ottennero il premio Nobel nel 1962 per aver mostrato sperimentalmente l'esistenza di un neutrino di secondo tipo: quello associato al muone e pertanto chiamato neutrino muonico. Oggi sappiamo che i neutrini, come i leptoni carichi descritti prima, sono di tre tipi e ognuno di essi produce, interagendo, il leptone carico associato. In Figura 2 è riportato lo schema dei leptoni conosciuti con le rispettive masse, cariche elettriche e spin.

² Il positrone è l'antiparticella associata all'elettrone, uguale a esso in tutto tranne che per la carica elettrica. Quando elettrone e positrone interagiscono si distruggono vicendevolmente producendo energia sotto forma di fotoni.

La velocità del neutrino

Come misurare una particella invisibile

Carlo Mancini

(Dipartimento di Fisica dell'Università Roma Tre)

Nel mese di Settembre dello scorso anno l'esperimento OPERA annunciava in una conferenza stampa tenutasi presso i laboratori del CERN di Ginevra clamorosi risultati sulla misura della velocità del neutrino. I ricercatori di OPERA infatti riportavano un risultato assolutamente inaspettato: i neutrini nel loro viaggio dal CERN ai laboratori italiani del Gran Sasso impiegavano un piccolissima frazione di secondo in meno di quanto avrebbe impiegato la luce per percorrere lo stesso tragitto. Un effetto estremamente piccolo ma sufficiente a mettere in discussione la teoria della Relatività Ristretta di Einstein, una delle teorie più solide della fisica moderna. Il neutrino entrava così per la prima volta nelle case dei non addetti ai lavori, e lo scalpore della misura di OPERA generava dibattiti e curiosità un po' ovunque. Ma come si fa a produrre un fascio di neutrini e farlo viaggiare nella crosta terrestre attraversando la materia che la compone? Come si fa a misurarne la velocità in modo così sofisticato?

Fabbriche di neutrini

Il fascio che arriva ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) è prodotto in uno degli acceleratori di particelle del CERN di Ginevra. Per produrli si sfrutta il fatto che nel decadimento beta, come detto nel precedente articolo, viene prodotto



Figura 1 – Una foto del SPS, acceleratore di protoni funzionante al CERN di Ginevra. Dal CERN Document Server (cdsweb.cern.ch).

un neutrino; quindi per avere un fascio di neutrini basta, si fa per dire, produrre un fascio di particelle instabili, che decadono beta, con una certa energia. Per ottenere questo fascio di particelle instabili si estrae una parte dei protoni dal fascio del SPS (Super-Proto-Sincrotrone visibile in Figura 1), stadio di preaccelerazione prima del grande anello LHC, e lo si fa sbattere contro un bersaglio. Nell'interazione con quest'ultimo, i protoni producono delle particelle chiamate *mesoni*, che decadendo producono principalmente muoni e neutrini muonici. I muoni vengono fermati da un muro e dalla roccia, i neutrini attraversano la crosta terrestre per 732 km, con una profondità massima che supera gli 11 km, fino ad arrivare ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso, laboratori sotterranei realizzati accanto alla galleria autostradale Teramo-L'Aquila. In questo modo si ottiene un fascio di neutrini prevalentemente di tipo muonico.

Montagne invisibili e *neutrino*velox

Affrontiamo ora l'ultima domanda che ci siamo posti: com'è possibile che i neutrini viaggino per più di 700 km all'interno della crosta terrestre senza un *tunnel* che gli permetta di fare questo viaggio? La risposta è che i neutrini hanno bassissima probabilità di interagire. È come se lanciassimo una grande quantità di biglie piccoline contro una rete a maglie molto larghe: la probabilità che una biglia venga fermata dalla rete è bassa e quindi la quasi totalità delle biglie passa attraverso la rete. Per dare un'idea di quanto bassa sia la probabilità che i neutrini interagiscano basta pensare che per fermare il 50% di un flusso di neutrini servirebbe un muro di piombo spesso un chilometro!

Veniamo ora al cuore della nostra discussione: come hanno fatto i ricercatori di OPERA a misurare la velocità dei neutrini? Fare una misura di velocità è idealmente semplice: basta misurare il tragitto e dividere per il tempo che ci vuole per percorrerlo. Ma il viaggio dei neutrini attraverso la crosta terrestre dura appena 2,4 millesimi di secondo (0,0024 s) su di una distanza di 730 km! Bisogna dunque avere una grandissima precisione sia nel misurare la distanza che il tempo.

Cominciamo con la misura della distanza. In questa misura gioca un ruolo cruciale il GPS¹: la distanza fra il CERN e i due ingressi del tunnel autostradale della A24 che permette l'accesso ai laboratori è stata misurata con un GPS molto preciso, con l'errore del

¹ Di cui parla diffusamente il professor Giovanni Organitini nell'articolo a pag. 26.

centimetro. Poi, con un sistema di specchi, è stata misurata la distanza di un punto del rivelatore OPERA rispetto a questi due punti. La misura finale della distanza fra il punto in cui parte il fascio di neutrini e il rivelatore, di $730534,61 \pm 0,20$ m, è dominata proprio da quest'ultima misura. La sensazione di quanto precisa sia la misura della distanza, realizzata da un gruppo di ricercatori e professori dell'Area di Geodesia e Geomatica del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università Sapienza di Roma, è data dalla Figura 3, in cui si può vedere la distanza che aumenta con il tempo a causa del movimento delle placche terrestri e l'impressionante gradino dovuto al terribile terremoto che il 6 Aprile 2009 ha colpito L'Aquila. Ovviamente la misura temporale è altrettanto importante e forse più complicata, visto che i ricercatori di OPERA volevano raggiungere la precisione del nanosecondo ($0,000000001$ secondi). Sincronizzare due orologi distanti con questo livello di precisione è molto difficile, considerando che tutti i segnali possono viaggiare al massimo alla velocità della luce. Per risolvere questo problema in entrambi i laboratori sono stati installati due orologi atomici sincronizzati fra loro ogni secondo usando l'ora dei satelliti GPS visibili a entrambi.

La misura

Misurata la distanza e sincronizzati gli orologi, sembrerebbe che il gioco sia fatto, ma non è assolutamente così: come far partire il cronometro? Ovvero, come misurare il momento di partenza dei neutrini? La presenza di un neutrino può essere rilevata solo se esso interagisce, producendo il leptone carico associato. Ma se un neutrino interagisce al CERN lì si ferma, non arriva proprio al Gran Sasso. D'altro canto i neutrini che interagiscono al Gran Sasso di sicuro non hanno interagito al CERN. È quindi impossibile pensare a una misura tradizionale e quello che è stato fatto in realtà è una misura statistica.

Per misurare il momento in cui i neutrini partono da Ginevra si è usato l'istante in cui i protoni da cui sono ricavati i neutrini pas-

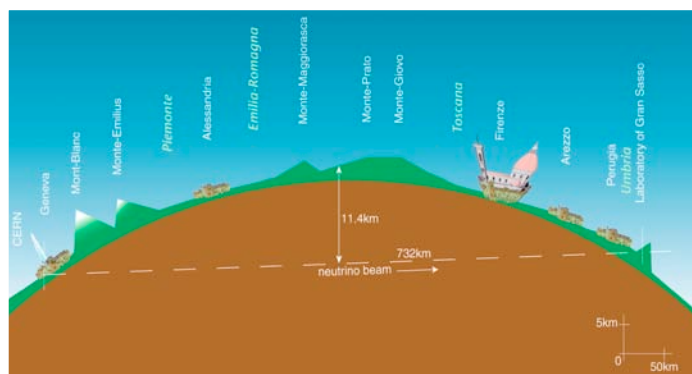


Figura 2 – Schema del tragitto dei neutrini dal CERN ai LNGS. Dal CERN Document Server (cdsweb.cern.ch).

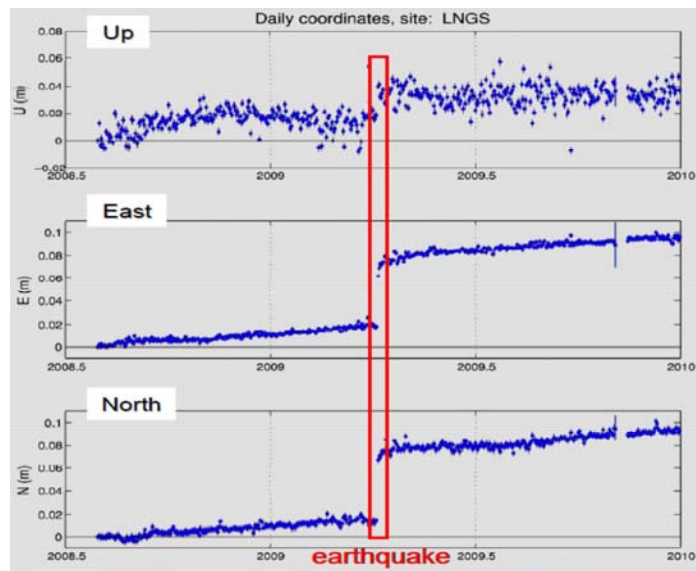


Figura 3 – Misura della distanza CERN-LNGS in funzione del tempo.

sano dentro la parte finale del tunnel, subito prima del bersaglio su cui vengono fatti sbattere per produrre le particelle che decadendo danno origine ai neutrini. Per farlo è stato messo un anello di rame intorno al tubo in cui passano i protoni. Per induzione elettromagnetica² i protoni generano una corrente elettrica nell'anello nel momento in cui gli passano dentro. Dall'intensità della corrente si ricava il numero di protoni che attraversano l'anello di rame in ogni istante, realizzando così un profilo temporale del pacchetto di protoni.

Ogni volta che un neutrino interagisce al Gran Sasso, si misura quanto tempo è passato dal momento dell'interazione rispetto all'inizio del profilo temporale del pacchetto di protoni che l'ha generato: questa è la marcatura temporale dell'evento. I ricercatori di OPERA hanno poi realizzato un profilo temporale anche per tutti gli eventi di neutrini mettendo su di un grafico il numero di eventi in funzione della marca temporale.

Calcolando quanto tempo ci metterebbe la luce a percorrere il tragitto CERN-Gran Sasso si trasporta il profilo temporale ottenuto mediando tutti i profili dei fasci di protoni che hanno generato almeno un evento nel rivelatore al Gran Sasso. La misura del tempo di volo consiste nel trovare il parametro di ritardo δt che fa combaciare i due profili temporali. I grafici sono riportati in Figura 4. Il ritardo che si trova, $\delta t = 1043,4 \pm 7,8$ ns, è la differenza totale, a cui poi vanno sottratti tutti i ritardi noti, dovuti al tempo che ci mettono gli strumenti a reagire all'interazione di un neutrino e a trasportare il segnale fino all'orologio atomico che misura il momento di arrivo. La sottrazione alla fine ha fornito il risultato, ormai famoso, di $57,8 \pm 7,8$ ns.

² Fenomeno noto come legge di Faraday: http://it.wikipedia.org/wiki/Legge_di_Faraday.

Neutrini pulsati

Per essere sicuri che non ci fossero effetti dovuti all'analisi statistica, da Settembre a Dicembre il CERN ha modificato il modo con cui i protoni vengono estratti dall'acceleratore, riducendo le dimensioni temporali di ogni pacchetto di protoni, portandoli da dieci secondi e mezzo a tre nanosecondi. In questo modo il numero di neutrini inviato è decisamente più piccolo ma, per ogni neutrino che interagisce al Gran Sasso, si è sicuri che il momento in cui è partito è in una finestra temporale di tre nanosecondi. Acquisendo dati in questo modo la collaborazione OPERA ha raccolto venti eventi, il cui risultato era in sostanziale accordo con i dati presentati a Settembre. Questa misura ha dimostrato che l'anticipo dei neutrini non era un effetto dovuto a un errore nell'analisi dei dati.

Nell'articolo pubblicato come bozza a Settembre i ricercatori della collaborazione OPERA concludevano che, nonostante il δt da loro trovato fosse distante da zero (neutrini veloci come la luce, almeno entro le possibilità di misura dell'esperimento, come prevede la teoria) più di 6 volte l'errore, avrebbero evitato qualunque tipo di giustificazione teorica e cercato invece il possibile errore.

L'anomalia nella sincronia degli orologi

A Febbraio 2012 gli stessi ricercatori di OPERA hanno reso noto di aver identificato un'anomalia importante nella misura: un cavo a fibra ottica che collegava l'antenna che porta il segnale del GPS all'orologio atomico non trasmetteva il segnale introducendo lo stesso ritardo misurato prima dell'inizio della presa dati. Ecco una possibile causa dell'apparente anticipo dei neutrini.

Usando le misure di distanza e il sistema di temporizzazione realizzati dalla collaborazione OPERA i ricercatori di ICARUS, un altro esperimento sito dentro il Gran Sasso, ha misurato a sua volta la velocità dei neutrini ottenendo un valore compatibile con la velocità della luce.

La parola fine sulla vicenda l'ha messa la pubblicazione di OPERA, il 12 Luglio scorso, dei dati presi fino a quel momento. La differenza fra la velocità della luce e dei neutrini è risultata essere 6.5 ± 15 ns, cioè inferiore all'errore e quindi compatibile con 0 (stessa velocità fra neutrini e fotoni).

Bibliografia

[2] The OPERA Collaboration. *Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam* URL <http://arxiv.org/abs/1109.4897v2>

A.A.V.V., *Faster-than-light neutrino anomaly (OPERA experiment)*: [http://en.wikipedia.org/wiki/Faster-than-light_neutrino_anomaly_\(OPERA_experiment\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Faster-than-light_neutrino_anomaly_(OPERA_experiment))

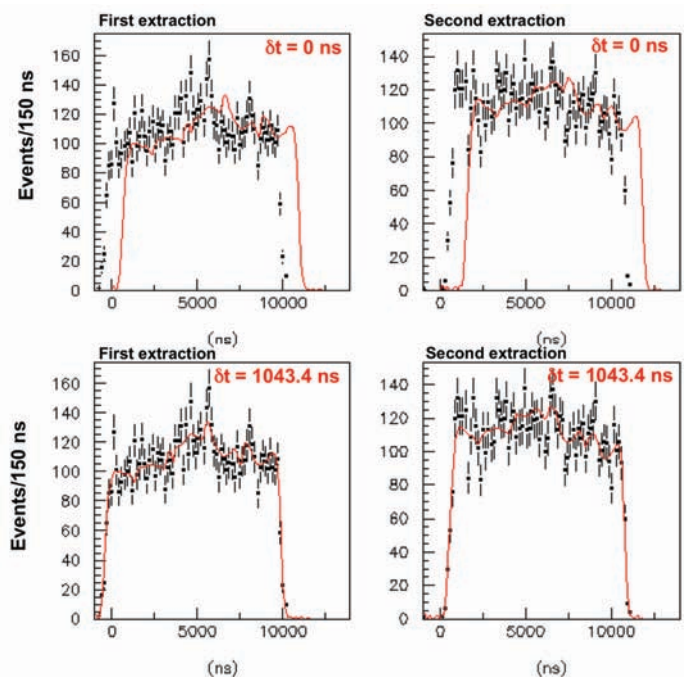


Figura 4 – I profili temporali del fascio di protoni mediato (in rosso) e gli eventi registrati al Gran Sasso (i punti neri). C'è una prima e una seconda estrazione perché il fascio di protoni che genera i neutrini è estratto in due momenti separati a ogni ciclo della macchina (chiamata SPS) che accelera i protoni stessi.

A.A.V.V., *Measurements of neutrino speed*: http://en.wikipedia.org/wiki/Measurements_of_neutrino_speed

Commenti on-line: <http://www.accastampato.it/2012/06/velocita-neutrini/>

Sull'autore

Carlo Mancini Terracciano (carlo@accatagliato.org), laureato in Fisica all'Università Sapienza di Roma con una tesi sperimentale sui neutrini, ha lavorato per un anno a Berna su OPERA e attualmente è dottorando presso Roma Tre. Sta lavorando presso il CERN sul progetto ENTERVISION grazie a una borsa di studio europea Marie Curie. È fra i fondatori dell'associazione ONLUS "Accatagliato" ed è anche direttore scientifico per "Frascati Scienza".



Mappa della città universitaria



- 1- Libreria asSaggi
- 2- Museo di Antropologia
- 3- Museo erbario
- 4- Museo di Storia della Medicina
- 5- Museo di Mineralogia
- 6- Museo di Anatomia Comparata
- 7- Nuovo Edificio di Chimica
- 8- Nuovo Edificio di Fisica
(Museo di Fisica)
- 9- Museo di Arte Classica
- 10- Museo di Chimica

Non si sorpassa in tunnel

Scoprire che la velocità della luce è una costante universale ha cambiato la nostra conoscenza dell'Universo

Niccolò Loret e Andrea Maselli

(Dipartimento di Fisica dell'Università Sapienza di Roma)

Leggendo le notizie sui risultati di OPERA circolati qualche mese fa viene da chiedersi: e se anche fosse? Cosa vieta a una particella come il neutrino di poter superare la velocità della luce? Quali conseguenze potrebbero scaturire da tale fenomeno per le leggi fisiche come le conosciamo oggi?

Newton o Maxwell? Questo è il dilemma

Per comprendere al meglio il problema è necessario tornare alla fine del XIX secolo, quando il sapere scientifico aveva formulato due teorie apparentemente inconciliabili: la meccanica newtoniana e la teoria dell'elettromagnetismo. La prima costituiva da circa 300 anni il punto di riferimento per lo studio della dinamica dei corpi macroscopici; la seconda aveva trovato la sua massima espressione con la sintesi dei fenomeni ondulatori ed elettromagnetici elaborata da James Maxwell. Il conflitto tra queste due teorie ci ha condotti a una riprogrammazione generale del nostro modo di concepire spazio e tempo, portando alla formulazione della Relatività Speciale e Generale da parte di Albert Einstein. Per capire quali siano i punti di attrito e le soluzioni proposte è necessario innanzitutto analizzare alcune proprietà fondamentali delle due teorie. L'universo newtoniano è caratterizzato dall'esistenza di un insieme di sistemi di riferimento privilegiati, detti

inerziali, in cui i corpi non soggetti a forze esterne si muovono di moto rettilineo uniforme. Qualunque nuovo sistema che si sposti con velocità costante rispetto a un sistema inerziale è a sua volta definito tale. Il cuore della fisica newtoniana consiste nella richiesta che le leggi della meccanica siano le stesse per tutti gli osservatori inerziali, ossia in moto con velocità relativa costante. In particolare la seconda legge di Newton, che lega la massa inerziale con l'accelerazione, risulta invariante sotto l'azione delle trasformazioni di Galileo, che legano le coordinate in diversi sistemi di riferimento.

Per comprendere il significato di questo assunto immaginiamo di essere un pirata intento a cannoneggiare un fortino costiero e di voler sapere con quale velocità i difensori vedranno arrivare la palla di cannone che stiamo sparando (cfr. Figura 1). È intuitivo che, se la nave si muove a velocità $\vec{V}_N$ e noi vediamo partire la palla di cannone con velocità $\vec{v}_p$, dal fortino vedranno arrivare il proiettile con velocità $\vec{v}'_p = \vec{v}_p + \vec{V}_N$ come rappresentato in Figura 1. La velocità della palla di cannone è quindi *relativa* al sistema di riferimento di chi la osserva. Anche le coordinate che il secondo osservatore userà per descrivere il fenomeno palla-di-cannone-che-mi-sta-per-sbriciolare saranno differenti: egli infatti osserverà il proiettile muoversi a una velocità maggiore di $\vec{V}_N$, rispetto alla percezione del pirata, per la durata di volo t . Avremo, quindi, che i due misureranno le coordinate spaziali del proiettile nella maniera seguente:

$$\begin{cases} \text{PIRATA} & x = \vec{v}_p t \\ \text{DIFENSORE} & x' = \vec{v}'_p t = \vec{v}_p t + \vec{V}_N t = x + \vec{V}_N t \end{cases}$$

Queste semplici formule di *relatività galileiana* hanno un grande significato filosofico: stiamo dicendo infatti che l'espressione della distanza spaziale di un osservatore è un miscuglio di distanza spaziale e temporale dell'altro. Utilizzando questo miscuglio che abbiamo chiamato x' , i due osservatori possono utilizzare formule fisiche della stessa forma per descrivere la natura: diremo che esse sono *invarianti* sotto trasformazioni del sistema di riferimento.

Notiamo immediatamente che una delle caratteristiche fondamentali della dinamica newtoniana è l'esistenza di un tempo assoluto: i due osservatori concorderanno sempre sulla coordinata temporale, ossia $t' = t$. Nell'Universo di Newton dunque le velocità si compongono sempre in maniera additiva secondo le regole fornite dalla Relatività Galileiana. D'altro canto, la teoria dell'elettromagnetismo, che possiamo descrivere a partire dalle equazioni

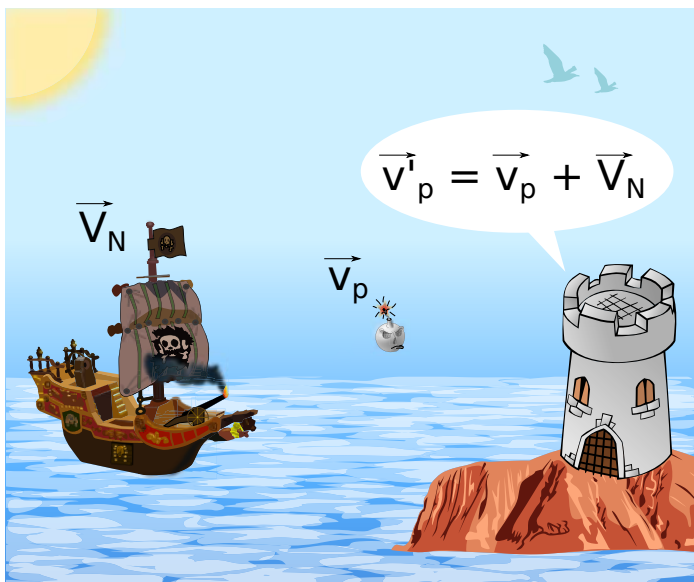


Figura 1 – Una rappresentazione grafica delle trasformazioni galileiane.

di Maxwell, non è invariante sotto trasformazioni di Galileo. Essa inoltre contiene una costante universale, c , identificata con la velocità della luce nel vuoto, che è la stessa per ogni osservatore. In base a queste considerazioni, una nave spaziale in moto con velocità elevatissima $\vec{V}_S$, che si trovi a cannoneggiare con dei raggi laser dritto davanti a sé una base spaziale su un asteroide, vedrà la luce allontanarsi a c (circa 300000 km/s): questa sarà anche l'esatta velocità con la quale il difensore vedrà i fasci laser investirlo. In termini di coordinate spaziali del raggio avremo le seguenti trasformazioni:

$$\begin{cases} \text{PIRATA spaziale} & x = ct \\ \text{DIFENSORE spaziale} & x' = ct' = \gamma(x + \vec{V}_S t) \end{cases}$$

Le formule qui riportate, in cui $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - V_S^2/c^2}}$, sono basate sulle trasformazioni di Lorentz (che approfondiremo meglio più avanti), dal nome di uno dei fisici teorici che hanno lavorato di più sulla compatibilità tra elettromagnetismo e meccanica classica.

Quando Albert Einstein si interessò al problema aveva davanti a sé due strade: rifiutare i risultati della teoria elettromagnetica e accettare la più roduta fisica Newtoniana o ammettere che il principio di Relatività Galileiano, su cui essa si basa, dovesse essere riformulato. Gli straordinari successi ottenuti da Maxwell, Lorentz, Herz e altri scienziati del tempo indussero Einstein a scegliere la seconda opzione provocando quella rivoluzione culturale che ancora oggi porta significative conseguenze.

Una nuova Relatività

Albert Einstein formulò la teoria della Relatività Speciale basandosi su due principi: 1) le leggi della fisica sono le stesse per tutti gli osservatori inerziali, 2) la luce si propaga nel vuoto con velocità costante c , indipendentemente dal moto della sorgente o dell'osservatore. Nonostante gli ingredienti della nuova teoria non sembrino essere così innovativi rispetto al passato, essi producono una serie di risultati assolutamente sorprendenti.

Il colpo di genio di Einstein fu comprendere che per rendere compatibile l'elettromagnetismo con il concetto di relatività è necessario accettare che la velocità della luce sia una costante universale e, dato che *velocità = spazio / tempo*, siano le coordinate spaziali e temporali a contrarsi e dilatarsi nei diversi sistemi, pur di mantenere invariato il valore di c .

Per giungere a queste conclusioni, Einstein sfruttò il lavoro compiuto dai matematici dell'epoca, assumendo che le trasformazioni di coordinate corrette fossero quelle derivate dal matematico olandese Hendrik Lorentz. Se consideriamo ancora una volta i nostri osservatori a velocità relativa $\vec{V}_S$, le coordinate di un evento misurate dai due saranno legate dalle seguenti trasformazioni:

$$t' = \gamma(t - \vec{V}_S x / c^2) \quad x' = \gamma(x - \vec{V}_S t) \quad y' = y \quad z' = z,$$

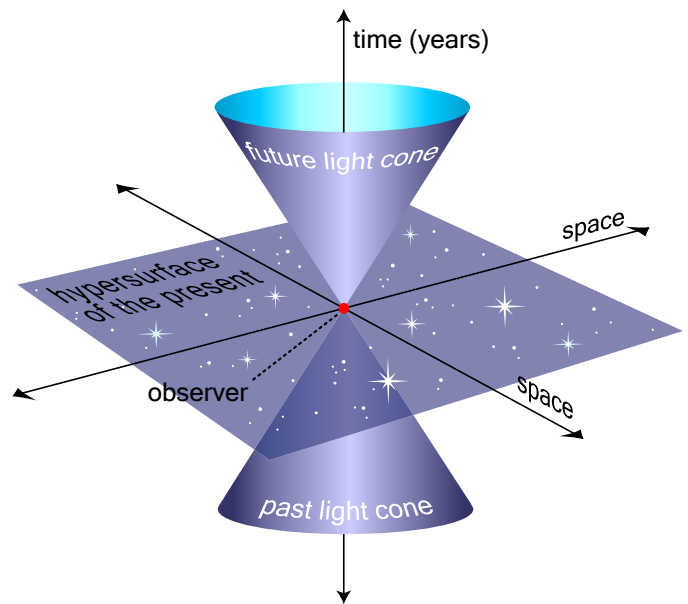


Figura 2 – Rappresentazione di uno spazio tridimensionale (due dimensioni spaziali e una temporale), secondo la teoria della relatività.

in cui il parametro γ , che abbiamo precedentemente introdotto, prende il nome di *fattore di Lorentz*. Notiamo immediatamente che lo scorrere del tempo per i due diversi osservatori non è più lo stesso, ma dipende dalla velocità relativa tra i sistemi di riferimento. Secondo Einstein dunque, diversi osservatori non condividono lo stesso concetto di tempo: esso viene trattato come una coordinata spaziale e si mescola, da un sistema di riferimento all'altro, con le coordinate dell'altro osservatore, proprio come avevamo fatto notare per le coordinate spaziali nel caso Galileiano.

Le trasformazioni di Lorentz lasciano invariate le equazioni di Maxwell e si riducono alle usuali leggi di Galileo per velocità molto minori di quelle della luce ($v \ll c$). Possiamo dunque considerare la meccanica Newtoniana come un limite per basse velocità di una teoria più generale, che è la Relatività Speciale. Quest'ultima ha cambiato in maniera radicale il nostro modo di concepire lo spazio-tempo. Nella fisica classica ad esempio, la distanza tra due eventi risulta una quantità fissata, indipendente dal sistema di riferimento degli osservatori; ciò non è più vero nell'ambito della Relatività Ristretta, nella quale tempo e spazio sono mescolati in maniera non banale dalle trasformazioni di Lorentz. Queste ultime tuttavia, lasciano invariata un'altra quantità, detta *intervallo* s , che può assumere valori positivi, negativi o nulli (non rappresenta dunque l'usuale concetto di distanza), e suddivide lo spazio-tempo in regioni con diverse caratteristiche. Si può pensare a s come alla generalizzazione di distanza in uno spazio a quattro dimensioni, di cui tre spaziali e una temporale.

Se consideriamo per semplicità un sistema tridimensionale descritto da due coordinate spaziali e una temporale, lo spazio-

tempo per un ipotetico osservatore posto nell'origine O del nostro sistema di riferimento sarà rappresentato dalla Figura 2.

Il *cono di luce* rappresenta l'insieme di tutti gli eventi connessi tra di loro in maniera *causale*, ossia legati da un rapporto di causa-effetto, e dunque in grado di influenzarsi. Stiamo dunque ridefinendo i concetti di passato, presente e futuro rispetto alla visione newtoniana di un tempo assoluto, definito alla stessa maniera da tutti gli osservatori: la parte superiore e inferiore del cono costituiscono, quindi, il futuro e il passato di O . In particolare, i punti dello spazio-tempo separati dall'origine da un intervallo $s > 0$ giacciono all'interno del cono e rappresentano tutti gli eventi che possono essere raggiunti dall'osservatore (falda superiore) o lo hanno raggiunto (falda inferiore) con velocità inferiori a c . Eventi separati da un intervallo $s = 0$ si trovano sulla superficie del cono e costituiscono l'insieme degli eventi che possono essere connessi solo da segnali che viaggiano alla velocità della luce. Le stelle o le galassie, che l'osservatore *vede* rilevando la radiazione elettromagnetica emessa, sono situati ad esempio sulla superficie inferiore del cono. La regione esterna a esso infine, è costituita dagli eventi che non hanno alcuna connessione causale con O , separati da un intervallo $s < 0$. Il piano passante per l'origine e perpendicolare all'asse dei tempi rappresenta l'insieme degli eventi simultanei all'osservatore, nel sistema di riferimento in cui esso è in quiete. È fondamentale sottolineare che solo per gli eventi nel cono di luce, legati da un rapporto di causalità, esiste un ordinamento cronologico ben definito che ci permetta di definire, dati due eventi, quale dei due sia accaduto per prima.

È bene sottolineare che quando Einstein presentò alla comunità scientifica i suoi risultati, le possibilità di verificare sperimentalmente l'inesattezza delle leggi di Newton fossero molto basse. Tanto più che le particelle subatomiche caratterizzate da velocità relativistiche sarebbero state scoperte solo qualche anno più tardi.

Vietato il sorpasso

Come abbiamo visto nella sezione precedente, la teoria della Relatività Speciale ha richiesto la modifica delle leggi della dinamica classica, affinché esse fossero compatibili con le trasformazioni di Lorentz. In meccanica relativistica, le componenti spaziali della forza necessaria ad accelerare un corpo di massa m a velocità v , sono date dalle equazioni

$$\mathbf{F} = m \frac{d(\mathbf{v})}{dt} \quad (1)$$

in cui γ è il fattore di Lorentz. Notiamo innanzitutto che nel limite classico ($v \ll c$ o equivalentemente $\gamma \approx 1$) l'equazione si riduce all'usuale seconda legge di Newton, *forza = massa accelerazione* (in cui la variazione della velocità nel tempo $d(\mathbf{v})/dt$ è proprio l'accelerazione). La relazione precedente tuttavia, ci dice anche che la forza richiesta per accelerare il corpo è proporzionale al termine $\gamma^3 = \frac{1}{1 - v^2/c^2}$, e dunque cresce

all'aumentare della velocità, fino ad assumere un valore infinito quando v tende a c , e $\gamma \rightarrow \infty$. Per portare un corpo alla velocità della luce è dunque necessaria un'accelerazione finita per un tempo infinito, o viceversa un'accelerazione infinita per un periodo limitato. In entrambi i casi, sarebbe richiesta una quantità di energia infinita, concetto che in fisica non ha alcun significato. In altri termini, la velocità limite nell'universo einsteiniano è proprio quella della luce.

La violazione di questo limite metterebbe in crisi uno dei concetti fondamentali della fisica, il *principio di causalità*, di cui abbiamo discusso in precedenza e che sancisce l'ordinamento temporale tra due eventi in rapporto di causa-effetto. È possibile dimostrare, infatti, che osservatori in moto relativo sarebbero in disaccordo sull'ordine cronologico di due eventi legati da segnali che si propagano con velocità maggiori di c : in altri termini essi non sarebbero più in grado di affermare in maniera univoca quale dei due eventi sia accaduto prima. Abbiamo visto infatti che per far sì che tutti gli osservatori esprimano le leggi dell'elettromagnetismo (e di tutti gli altri tipi di interazione) allo stesso modo, dobbiamo accettare che la velocità della luce sia la velocità limite oltre la quale

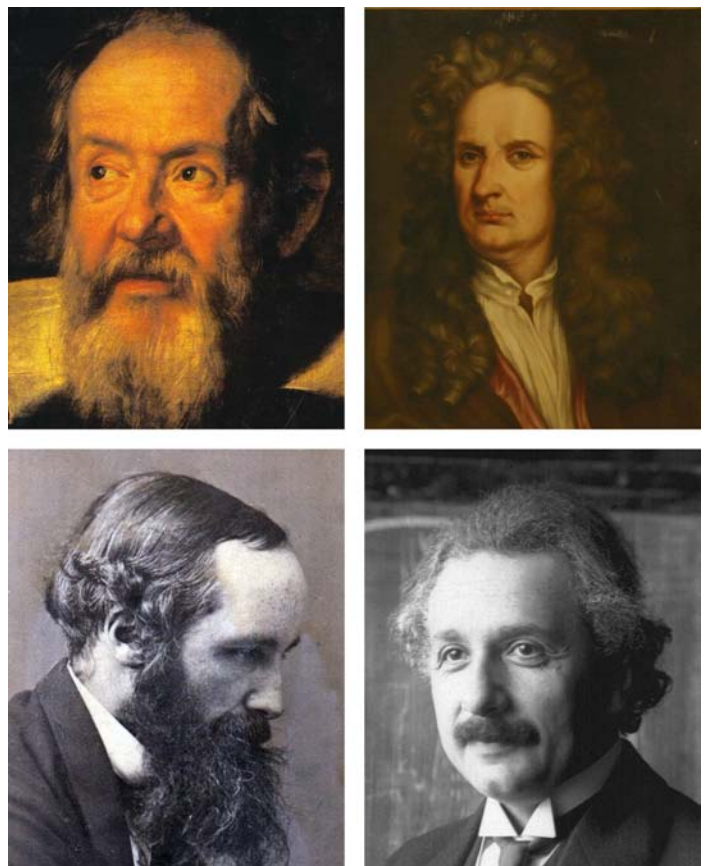


Figura 3 – I quattro scienziati che più hanno contribuito alla teoria della relatività: in senso orario Galileo Galilei (1564–1642), Isaac Newton (1642–1727), James Maxwell (1831–1879), Albert Einstein (1879–1955).

non ci si può spingere. Questo vuol dire che le definizioni di passato, presente e futuro espresse nel cono luce si fondano proprio sul fatto che un evento può avere conseguenze solamente su tutto ciò che può raggiungere con un segnale di tipo luce. Ammettere, quindi, la possibilità di comunicare ad esempio attraverso neutrini superluminali potrebbe voler dire o che diversi osservatori studierebbero differenti leggi della fisica, implicando quindi la non equivalenza tra sistemi inerziali (in pratica un gran casino), oppure che eventi futuri possano influenzare quelli passati, dando vita ai vari paradossi fantascientifici di nipoti che tornano indietro nel tempo per uccidere i propri nonni. Tutto questo, a meno di non ritoccare le leggi della relatività per ricostruire uno scenario coerente, rivoluzionando il concetto stesso di località. Questo è il motivo per il quale la conferma dei risultati ottenuti lo scorso autunno ai laboratori del Gran Sasso avrebbe avuto un enorme impatto sulla comunità scientifica.

Energie relative

Un altro grande problema teorico che ha tenuto banco durante il dibattito scatenatosi a seguito dei risultati annunciati dall'esperimento OPERA è legato all'energia cinetica di una particella superluminale. Anche le particelle stabili (quelle, cioè che non decadono in tempi troppo rapidi rispetto alla scala di tempo dell'esperimento che si sta organizzando), possono, infatti, generare altre particelle se la loro energia è superiore a una certa soglia dipendente dalla massa delle particelle prodotte. L'energia cinetica, però, come la velocità, è relativa al sistema dell'osservatore che la misura. Per ottenere la reazione, quindi, le particelle devono essere mandate a sbattere su un bersaglio rispetto al quale abbiano la giusta energia cinetica. Dato, però, che le trasformazioni di coordinate da un sistema all'altro in relatività speciale sono costruite perché la velocità della luce risulti la stessa per tutti gli osservatori, e che l'energia necessaria ad accelerare una particella aumenta sempre più mano a mano che la sua velocità si avvicina a c , cosa si può dire dell'energia cinetica di una particella superluminale? Ci troviamo di fronte a un assurdo: o le leggi della relatività vanno modificate, o il passaggio di un neutrino in un rivelatore dovrebbe sempre essere accompagnato da una tempesta di altre particelle, cosa che non si è mai osservata.

Niente iperluce

Se i risultati di OPERA fossero stati confermati, la superluminosità del neutrino avrebbe fornito la forte indicazione che a determinate scale di energia le leggi della relatività avrebbero necessitato un'ulteriore evoluzione rispetto alla teoria formulata da Einstein. In quel caso tuttavia sarebbero rimaste insolte domande fondamentali quali: perché proprio il neutrino? Perché queste strane deformazioni si osservano solamente per una particella?

Per un fisico teorico tentare di rispondere a simili domande è molto divertente, come dimostrano le innumerevoli ipotesi che sono state avanzate in quei due mesi in cui le nostre convinzioni hanno tentennato: salti nella quinta dimensione, interazioni tra particelle rispondenti a differenti leggi della relatività, strani effetti tunnel quantistici... Insomma ci siamo divertiti parecchio, peccato che per questa volta l'annuncio si sia rivelato un falso allarme.

Bibliografia

- [3] Galilei G. *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo tolemaico e copernicano*. Wikisource (1632)
- [4] Drake S. *La mela di Newton ed il Dialogo di Galileo*. In *Le Scienze*, vol. 146 (ott. 1980)
- [5] Einstein A. e Davis F. *The Principle of Relativity*. Dover Publications (1952). ISBN 9780486600819
- [6] Feynman R. e Servidei L. *Sei pezzi facili*. Adelphi (2000). ISBN 9788845915512

Commenti on-line: <http://www.accastampato.it/2012/06/non-si-supera-in-tunnel/>

Sull'autore

Niccolò Loret (niccolo.loret@roma1.infn.it) è dottorando all'Università Sapienza di Roma presso il gruppo teorico di Gravità Quantistica, si occupa di problemi teorici relativi alle simmetrie spazio-temporali a piccolissime distanze (sa anche girare una frittata facendola saltare direttamente dalla padella).



Andrea Maselli (andrea.maselli@roma1.infn.it) è dottorando all'Università Sapienza di Roma presso il gruppo teorico di Relatività Generale. Si occupa di problemi teorici relativi all'emissione di onde gravitazionali da sorgenti astrofisiche.



LA NOTTE EUROPEA DEI RICERCATORI 28 SETTEMBRE

La settimana della scienza dal 21 al 29 settembre 2011

PROGRAMMA

Venerdì 21 Settembre

19:30-20:30 Presentazione della Notte della Ricerca 2012
Presso la Libreria asSaggi, in Via degli Etruschi, 4 00185 Roma.
Giovanni Mazzitelli, presidente di Frascati Scienza presenterà
il ricco programma della "Notte della Ricerca" e della settimana
che la precede.

Lunedì 24 Settembre

11:00, 16:00 Visita all'Orto Botanico

10:00, 15:00 Visita al Museo Erbario

10:00, 12:00 Visita al Museo di Storia della Medicina

9:15, 12:30 Visita al Museo di Mineralogia

9:30, 12:30 Visita al Museo di Anatomia Comparata

10:00-11:00 ALLA SCOPERTA DEI MINERALI, LE CELLULE
DEL PIANETA TERRA

PROFESSORE GIOVANNI BATTISTA ANDREOZZI
(DIPARTIMENTO SCIENZE DELLA TERRA)
NUOVO EDIFICIO DI CHIMICA, PIANO IV, AULA III.

11:00-12:00 LA STRUTTURA DELL'UNIVERSO

PROFESSORE ALESSANDRO MELCHIORRI
(DIPARTIMENTO DI FISICA)
NUOVO EDIFICIO DI CHIMICA, PIANO IV, AULA III

12:00-13:00 LE DISCIPLINE SCIENTIFICHE ATTRaverso
LE RACCOLTE LIBRARIE DI PREGIO DELLA
BIBLIOTECA DELLA FACOLTÀ DI SCIENZE MFN

DOTTORRESSA LUCILLA VESPUCCI
(BIBLIOTECA DI MATEMATICA)
DOTTORRESSA MARIA LUISA LIBUTTI
(BIBLIOTECA DI FISICA)
NUOVO EDIFICIO DI FISICA, AULA CABIBBO

Martedì 25 Settembre

11:00, 16:00 Visita all'Orto Botanico

10:00, 15:00 Visita al Museo Erbario

10:00, 12:00 Visita al Museo di Storia della Medicina

10:00, 11:00 Visita al Museo di Arte Classica

9:15, 11:00 Visita al Museo di Mineralogia

9:30, 12:30 Visita al Museo di Anatomia Comparata

10:00-11:00 INFINITE FORME BELLISSIME: GENI, SVILUPPO
ED EVOLUZIONE

PROFESSORESSA LAURA FANTI
(DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA E BIOTECNOLOGIE)
NUOVO EDIFICIO DI CHIMICA, PIANO IV

11:00-12:00 BATTERI, RADIOATTIVITÀ, LEGGI MATEMATICHE

PROFESSORESSA CARLOTTA MAFFEI
(DIPARTIMENTO DI MATEMATICA)
NUOVO EDIFICIO DI CHIMICA, PIANO IV

18:00-19:00 IL TEMPO E L'ENERGIA

PROFESSOR MAURO DORATO
(FACOLTÀ DI FILOSOFIA, ROMA TRE)
PROFESSOR GIOVANNI AMELINO-CAMELIA (DIPARTIMENTI DI FISICA)
AULA CABIBBO, NUOVO EDIFICIO DI FISICA, PIANO TERRA

Mercoledì 26 Settembre

9:30, 11:30 Visita al Museo di Chimica

11:00, 16:00 Visita all'Orto Botanico

10:00, 15:00 Visita al Museo Erbario

10:00, 12:00 Visita al Museo di Storia della Medicina

11:00 Visita al Museo di Arte Classica

9:15, 11:00 Visita al Museo di Mineralogia

9:30, 12:30 Visita al Museo di Anatomia Comparata

10:00-11:00 ARTE, AMBIENTE E SCIENZE: INTRECCI
INTRIGANTI

PROFESSORESSA MARIA PIA SAMMARTINO
(DIPARTIMENTO DI CHIMICA)
NUOVO EDIFICIO DI CHIMICA, PIANO IV

11:00-12:00 SULLE TRACCE DELL'EVOLUZIONE UMANA

PROFESSORE GIORGIO MANZI
(DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA AMBIENTALE)
NUOVO EDIFICIO DI CHIMICA, PIANO IV

8:30-13:30 Ospedale Pediatrico Bambino Gesù
PER LE SCUOLE MEDIE SUPERIORI

10:00 IL GIOCO DELLA SCIENZA

PROFESSORE ENNIO PERES
AUDITORIUM LIBRERIA CAVOUR- PIAZZA DEL GESÙ - FRASCATI

12:00-13:00 INTERNATIONAL COSMIC DAY

LA NOTTE EUROPEA DEI RICERCATORI 28 SETTEMBRE

La settimana della scienza dal 21 al 29 settembre 2011

Giovedì 27 Settembre

- 11:00, 16:00** Visita all'Orto Botanico
10:00, 15:00 Visita al Museo Erbario
10:00, 12:00 Visita al Museo di Storia della Medicina
11:00 Visita al Museo di Arte Classica
9:15, 11:00 Visita al Museo di Mineralogia
9:30, 12:30 Visita al Museo di Anatomia Comparata
- 10:00-11:00** L'ELETTROLISI: ASPETTI TEORICI E SPERIMENTALI
PROFESSORE FRANCO CALASCIBETTA
(DIPARTIMENTO DI CHIMICA)
NUOVO EDIFICIO DI CHIMICA, PIANO IV
- 11:00-12:00** CELLULE VEGETALI COME BIOFABBRICHE DI PRODOTTI FITOTERAPICI, FARMACEUTICI E COSMETICI
PROFESSORE ALESSIO VALLETTA
(DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA AMBIENTALE)
NUOVO EDIFICIO DI CHIMICA, PIANO IV

Venerdì 28 Settembre - Notte Europea dei Ricercatori

FRASCATI

- 14:00-24:00** VISITE AGLI ENTI DI RICERCA
15:00 LEZIONE DI CHIMICA
AUDITORIUM LIBRERIA CAVOUR
PIAZZA DEL GESÙ - FRASCATI
- 17:00-24:00** HANDS ON EXPERIMENTS
PIAZZA SAN PIETRO
- 17:00, 17:45** VIAGGIO NEL COSMO - CROCIERA PLANETARIA
AUDITORIUM LIBRERIA CAVOUR
IL BOSONE DI HIGGS
PRESENTAZIONE DIVULGATIVA
SALA B. TOUSCHEK (LNF, INFN)
- 18:00** DIO E IL BOSONE DI HIGGS A COLLOQUIO
SALA B. TOUSCHEK (LNF, INFN)
- 18:30** L'EREDITARIETÀ
AUDITORIUM LIBRERIA CAVOUR
- 19:00-23:00** TORNEO DI SCACCHI
PIAZZA FULVIO NOBILIORE, 5 - COCCIANO
- 19:30** QUATTRO CHIACCHIERE CON LA SCIENZA
APERITIVO CON I RICERCATORI
BAR DELLA GALLERIA, PIAZZA DEL GESÙ

- 20:00** SPETTACOLO TEATRALE
EINSTEIN S'IL VOUS PLAÎT
SALA B. TOUSCHEK (LNF, INFN)
- 21:00** VIAGGIO NEL COSMO
IL SOLE E L'ALTRE STELLE
AUDITORIUM LIBRERIA CAVOUR
- 21:00, 24:00** STAR PARTY
VILLA TORLONIA
- 22:00** CO2IDEE
SALA B. TOUSCHEK (LNF, INFN)
- 22:00** NON È MAI TROPPO DARWIN
AUDITORIUM LIBRERIA CAVOUR
- 22:30** I DELFINI
AUDITORIUM LIBRERIA CAVOUR
- 22:45** IL PIONIERE DEL WIRELES
AUDITORIUM LIBRERIA CAVOURS

ROMA

- 9:30, 11:30** Visita al Museo di Chimica
- 11:00, 16:00** Visita all'Orto Botanico
- 10:00, 12:00** Visita al Museo di Storia della Medicina
- 9:30, 12:00** Visita al Museo di Antropologia
- 9:15, 11:00** Visita al Museo di Mineralogia
- 8:30-13:30** Ospedale Pediatrico Bambino Gesù
PER LE SCUOLE MEDIE SUPERIORI
- 16:00-24:00** Ospedale Pediatrico Bambino Gesù
APERTO AL PUBBLICO
- 20:30-24:00** OpenLab - Università Roma Tre
- 20:00-24:00** APERTURA DELL'OSSERVATORIO DI GORGA

Sabato 29 Settembre

- 15:00-24:00** Visita all'osservatorio EGO-VIRGO
Via E. Amaldi 56021 - S. Stefano a Macerata
Cascina (PI)

Per ulteriori dettagli e le prenotazioni obbligatorie
visita il sito di Frascati Scienza

[http://www.frascatiscienza.it/pagine/
notte-europea-dei-ricercatori-2012/programma/](http://www.frascatiscienza.it/pagine/notte-europea-dei-ricercatori-2012/programma/)

Le domande della scienza

Bastano i dati sperimentali per verificare la correttezza di una teoria?

Marco Valli

(Dipartimento di Fisica dell'Università Sapienza di Roma)

Nell'autunno dello scorso anno l'ambiente della ricerca scientifica è stato vivacizzato da due annunci di possibili nuove scoperte: i neutrini superluminali di OPERA e il bosone di Higgs negli esperimenti ATLAS e CMS al CERN. Questi due risultati si presentavano con un livello di precisione delle misure molto diverso (superiore nel caso di OPERA), eppure nella comunità scientifica la maggior parte delle persone era molto meno convinta della correttezza dei risultati del primo esperimento, rispetto a quelli del secondo (confermati poi quest'estate).

Come mai? In quale modo il risultato di un esperimento scientifico cambia il nostro modo di vedere le cose? E perché ci sono teorie scientifiche che siamo poco disposti ad abbandonare, anche di fronte a quella che sembra una convincente evidenza?

Che cos'è la Scienza?

Per rispondere a queste domande, dobbiamo fare un passo indietro e domandarci "cos'è la Scienza?". Potremmo rispondere che la Scienza è un tentativo – il migliore possibile, con le informazioni a nostra disposizione – di spiegare come funziona il mondo che ci circonda. Si tratta di costruire delle *teorie scientifiche* che ci aiutino a descrivere i fenomeni naturali. Queste teorie vengono formalizzate in linguaggio matematico e in genere contengono dei *parametri*, i quali rappresentano delle quantità che non conosciamo (quali la massa di una particella elementare o la velocità della luce). La determinazione del valore di questi parametri viene dal confronto con i risultati sperimentali. Per quanto affascinanti possano essere le nostre teorie, infatti, dobbiamo ricordare che la Fisica (come le altre Scienze Naturali) è una scienza sperimentale: solo il confronto con i risultati degli esperimenti ci può dire se abbiamo preso la via giusta.

In che modo avviene il passaggio dalla teoria agli esperimenti (e viceversa)? Come capiamo se le nostre teorie sono corrette? Una buona teoria scientifica deve possedere due caratteristiche: deve essere in grado di spiegare i fenomeni che osserviamo e deve avere un potere predittivo. Deve, cioè, permetterci di prevedere il risultato di esperimenti che ancora non abbiamo fatto: se una successiva verifica sperimentale sarà in accordo con le nostre previsioni, saremo sempre più convinti che la teoria sia valida. Semplice, no? In realtà la strada è molto più lunga e faticosa! I risultati degli esperimenti spesso sono di difficile interpretazione. Ogni esperimento risente sempre degli effetti di tanti altri processi che non possiamo controllare direttamente. Per questo motivo,

le nostre misure presentano una grande variabilità: prove ripetute di uno stesso esperimento non forniranno mai esattamente lo stesso risultato. E questo non per sbadataggine o incapacità dello sperimentatore, ma per la complessità e ricchezza dei fenomeni che stiamo indagando. Le cause di errore che non controlliamo si manifestano in una *distribuzione* delle nostre misure su un certo intervallo di valori.

Scienza, statistica e probabilità

A causa di questa caratteristica *fisiologica* dei risultati delle nostre prove, siamo costretti a raccogliere (quando possibile!) un numero molto grande di misure. Dobbiamo poi utilizzare le tecniche della statistica, che intendiamo come la disciplina che si occupa di *riassumere* le informazioni contenute in una certa mole di dati, per interpretare i risultati ottenuti.

Possiamo *inferire* i valori dei parametri delle nostre teorie a partire dai dati raccolti. Questo passaggio compete alla *statistica inferenziale*, la quale deve ricorrere alla *teoria della probabilità*. L'incertezza che caratterizza le misure si riflette anche sulle teorie: le nostre conclusioni hanno sempre un contenuto probabilistico. Non siamo mai in grado di provare con certezza la validità delle nostre teorie: possiamo solo abbandonare (*falsificare*) quel-

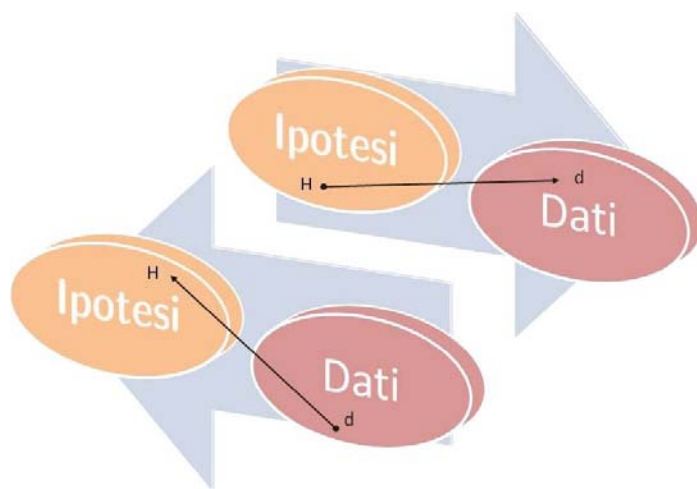


Figura 1 – Il confronto tra i due approcci all'inferenza probabilistica. Nell'approccio frequentista (in alto), si fissa la teoria H (o il valore dei parametri) e si calcola la probabilità dei dati misurati (d). Nell'approccio bayesiano (in basso), a partire dai dati misurati d si valuta la probabilità che la nostra teoria H (o particolari valori dei parametri) sia corretta.

le che non sono in grado di descrivere adeguatamente i fenomeni che osserviamo. Per quanto riguarda le altre teorie (non falsificate), possiamo continuare a raccogliere dati e fare esperimenti diversi, per raggiungere un convincimento sempre maggiore.

Due scuole a confronto

Nel mondo della ricerca non c'è un consenso unanime su questi aspetti: ci sono infatti due *approcci* all'inferenza statistica.

Nell'*approccio frequentista* [7] si può attribuire una probabilità solo a eventi ripetuti. Si può parlare di *probabilità che una teoria produca certi dati*, ma non della *probabilità che una teoria sia corretta*, perché la teoria (e i suoi parametri) non sono avvenimenti che si ripetono: una teoria è vera o falsa. L'inferenza si attua attraverso dei *test di ipotesi*, che, partendo dall'*ipotesi nulla* che una certa teoria sia corretta, calcolano quanto sarebbe probabile ottenere dei dati come quelli misurati. Sulla base di quanto le misure si discostano dalle previsioni della teoria, vengono forniti degli intervalli con un certo *livello di confidenza* (o *C.L.*, *confidence level*), i quali rappresentano la probabilità che una misura successiva vada a cadere in quell'intervallo; non quantificano, quindi, *quanto crediamo nella teoria* (o nei valori dei parametri).

Nell'*approccio bayesiano* [8] la probabilità esprime il *grado di fiducia* (*degree of belief*) che un soggetto ripone nella veridicità di una affermazione. La probabilità è usata per descrivere l'*incertezza*, la quale a sua volta è legata allo *stato di informazione* del soggetto che valuta la probabilità [9]. Per questo la probabilità bayesiana è anche detta *soggettiva*. L'inferenza bayesiana ha come risultato una (distribuzione di) probabilità *a posteriori* (o *posterior*) sulla validità di una teoria, a partire da quella *a priori* (o *prior*) che le si attribuiva prima dell'esperimento: raccogliere nuovi dati ci permette di *aggiornare* le nostre credenze.

I due approcci, pertanto, rispondono a domande differenti. Nel primo, ci si domanda “se fosse vera la mia teoria, quanto sarebbe probabile ottenere questi dati?” e la risposta che si fornisce indica quanto mi aspetto, in esperimenti successivi, che le nuove misure cadano in un certo intervallo. Nell'approccio bayesiano il quesito è “poiché ho misurato questi dati, quanto devo credere che sia corretta la mia teoria?” e il risultato è proprio il nostro grado di certezza nella teoria o nel valore dei suoi parametri.

L'interpretazione dei risultati

L'approccio frequentista è stato quello più in voga durante il secolo passato. Purtroppo, spesso i risultati forniti con impostazione frequentista vengono interpretati, soprattutto nella comunicazione non specialistica (e spesso anche dai ricercatori stessi!) alla maniera bayesiana. Affermazioni come “il valore di questo parametro è in questo intervallo al 95% C.L.” vengono accolte come

“siamo *confidenti* al 95%” (quindi *praticamente certi*) nei risultati! Questo errore interpretativo è alla base di numerosi annunci (*claims*) di presunte scoperte, che poi si sono rivelate molto spesso delle semplici *uttuazioni statistiche* nei dati [10].

Torniamo ora al punto dal quale eravamo partiti: come mai, nonostante l'evidenza in favore dei risultati di OPERA si presentasse molto più *schiacciante* rispetto a quella di ATLAS e CMS, nell'ambiente scientifico quasi tutti erano più propensi ad accettare il secondo risultato piuttosto che il primo? È semplice: la *scoperta* di OPERA, se confermata, avrebbe messo in discussione una teoria che ci ha dato un'infinità di risultati in accordo tra di loro e alla quale *crediamo molto* prima di fare l'esperimento: pertanto, la nostra *prior* tende a favorire fortemente l'ipotesi che la teoria della relatività sia corretta, renda bene conto delle evidenze sperimentali e sia dotata di un potere predittivo a lungo testato. Pesano *tutti gli esperimenti che abbiamo già fatto* e non ne basta uno nuovo per mettere in discussione il nostro grado di fiducia nella teoria. D'altro canto, il possibile risultato sulla ricerca del bosone di Higgs rappresenta qualcosa che *già ci aspettiamo*, perché il Modello Standard delle particelle elementari, che si è già mostra-

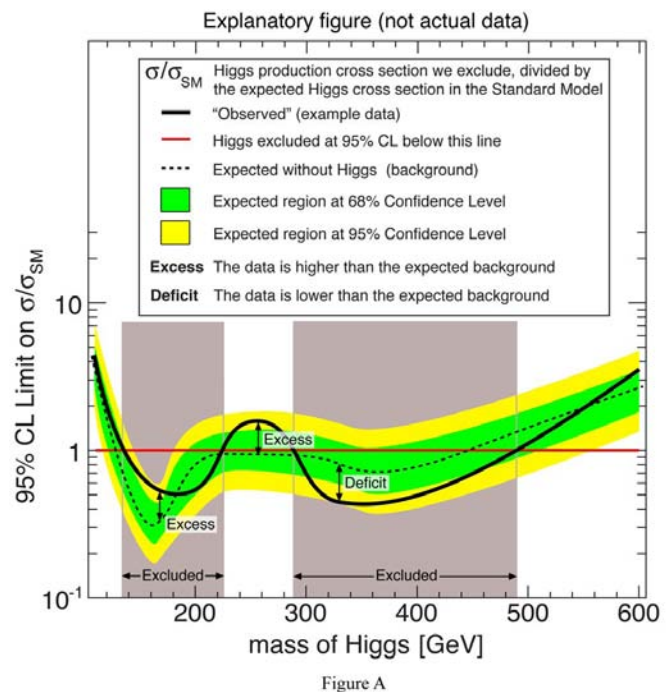


Figura 2 – Figura esemplificativa dalla pagina web dell'Esperimento ATLAS (<http://atlas.ch/news/2011/simplified-plots.html>). Nella spiegazione della figura, purtroppo, si semplifica eccessivamente, parlando di “livello di confidenza del 95%, che in effetti significa la *certezza* che una particella di Higgs con quella massa non esiste” (la traduzione e il corsivo sono miei). Come spiegato nel testo, un intervallo a un certo livello di confidenza non può essere messo direttamente in relazione con la probabilità (grado di certezza) che una teoria (o il valore di un parametro) sia corretta.

to capace di spiegare benissimo una grande quantità di fenomeni diversi, *prevede* l'esistenza di questa particella: non contano solo i dati dei recenti esperimenti, ma di quelli degli ultimi decenni.

Questa linea di ragionamento si sposa benissimo con l'impostazione bayesiana che abbiamo delineato in precedenza, la quale sembra più adatta a rispondere in maniera diretta alle domande della scienza.

Bibliografia

Sito del Prof. G. D'Agostini: <http://www.roma1.infn.it/~dagos/>

Blog *The Endeavour* di J. Cook: <http://www.johndcook.com/blog/>

Blog *Keplero* di A. Balbi: <http://www.keplero.org/>

[7] Nakamura K. *et al.* *The Review of Particle Physics*. In *J. Phys. G*, vol. 37 (2010). URL <http://pdg.lbl.gov>

[8] D'Agostini G. *Bayesian Reasoning in Data Analysis: A Critical Introduction*. World Scientific (2003)

[9] McKay D. *Information Theory, Inference, and Learning Algorithms*. Cambridge University Press (2003)

[10] D'Agostini G. *Probably a discovery: Bad mathematics means rough scientific communication* URL <http://arxiv.org/abs/1112.3620v2>

[11] Ball P. *I'd put a tenner – but not a ton – on the Higgs-Boson existing*. In *The Guardian* (2011). URL <http://www.guardian.co.uk/commentisfree/2011/dec/23/critical-scientist-higgs-boson>

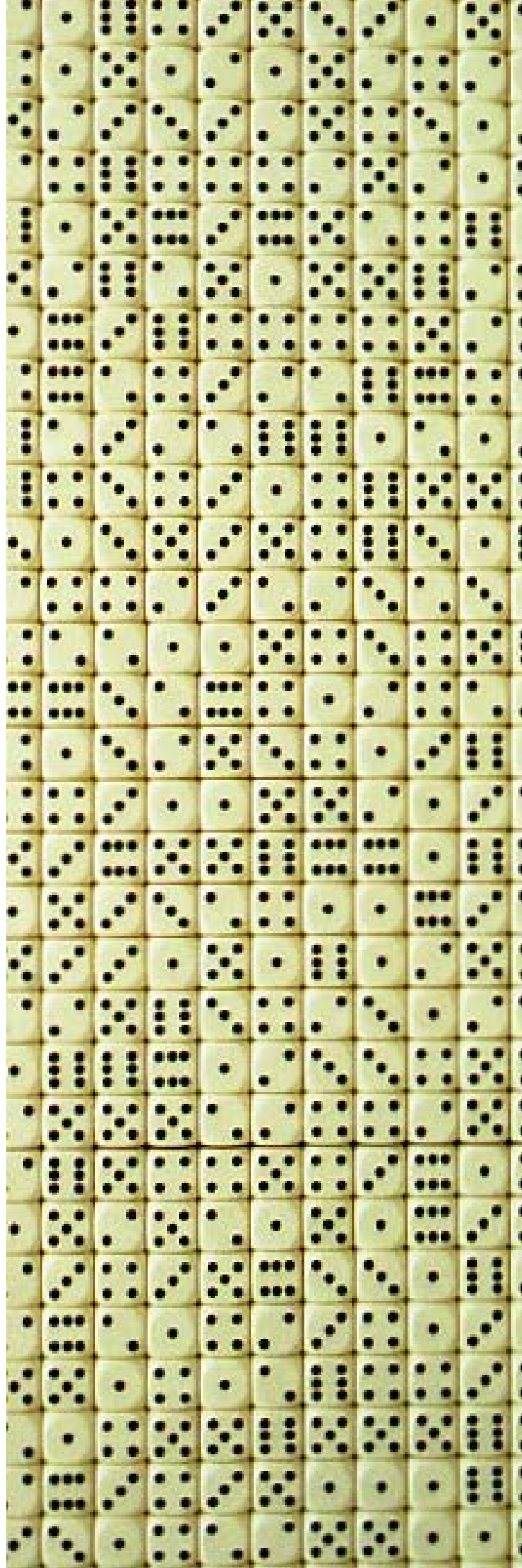
Commenti on-line: <http://www.accastampato.it/2012/06/domande-scienza/>

Sull'autore

Marco Valli (marco.valli@pangeaformazione.it) ha conseguito la Laurea in Fisica e il titolo di Dottore di Ricerca presso l'Università Sapienza di Roma.



Dopo una breve esperienza nel campo della ricerca, si è occupato di divulgazione scientifica e di insegnamento della fisica, sia nella scuola pubblica sia con esercitazioni per corsi universitari. Attualmente si occupa a livello professionale di progettazione di modelli previsionali e simulazioni numeriche basate sull'approccio bayesiano, per applicazioni di tipo gestionale e manageriale.



La legge è uguale per tutti

...anche per i gravi!

Roberto Pujia
(Università Roma Tre)

Come è ampiamente noto già agli albori della razionalità occidentale, i Greci avevano individuato e distinto due forme della conoscenza umana, denominate rispettivamente *doxa* ed *episteme*: la prima legata alla rappresentazione sensoriale e, pertanto, mutevole e per così dire adagiata nel flusso continuo del divenire, e pertanto individuale, particolare e soggettiva; la seconda, invece, che poi noi abbiamo denominato *scienza*, poggiata su fondamenti certi, non mutevoli, oggettiva e universale. Queste due ultime determinazioni, l'*oggettività* e l'*universalità*, sono quelle che, appunto, caratterizzano anche nell'immaginario popolare la differenza tra opinioni individuali e conoscenze scientifiche certe. In altre parole mentre le opinioni sono un po' come i gusti (ciascuno ha i suoi), non altrettanto può dirsi delle scienze. Appare insensato e irrazionale, infatti, dire che ciascuno ha la sua fisica o la sua mineralogia. Abbiamo una sola fisica e una sola mineralogia o, almeno, una per volta, come vedremo in seguito.

La legge di natura

È questo ragionamento, in estrema sintesi, che si trova alla base di quello che possiamo considerare la nozione centrale della conoscenza scientifica: quella di *legge*. Può essere utile richiamare qui che espressioni come *legge di natura*, *legge di gravitazione*, rappresentano, in un certo senso, un approccio metaforico alle nozioni di cui trattiamo, soprattutto per il sapore fortemente normativo e prescrittivo che, nella nostra tradizione, accompagna la nozione di legge. Quando nelle aule di tribunale leggiamo la consueta massima "la legge è uguale per tutti", se ci asteniamo dal sorridere cinicamente e cerchiamo di comprenderne appieno il significato, quello che ne ricaviamo in parole semplici è che tutti i cittadini senza eccezione alcuna sono tenuti a comportarsi in un certo modo, pena la sanzione civile o penale. Se trasferiamo questo concetto nella natura e pensiamo, per esempio, alla legge di gravitazione universale, è evidente che l'elemento prescrittivo ha solo un valore metaforico. È difficile sostenere che i gravi *siano tenuti* ad attrarsi in ragione diretta della massa e inversa del quadrato della distanza. Ciò che vogliamo esprimere è una regolarità empirica che per certi aspetti ha gli stessi effetti che dovrebbe avere un articolo del codice penale. Ciò che caratterizza infatti la legge di natura è dunque l'universalità. È l'universalità che sottrae un qualunque fenomeno naturale alla contingenza del momento e dunque alla percezione individuale, per collocarlo sul piano dell'oggettività. La forma logica di questa universalità, espressa ver-

balmente, è "tutti gli A sono B". Per esempio, la frase "i corpi immersi in un liquido ricevono una spinta dal basso in alto pari al peso del liquido spostato" si riferisce a tutti, ma proprio tutti i corpi, passati presenti e futuri e in ogni luogo. È questo il senso dell'universalità. Ma è proprio qui che cominciano i problemi che hanno assillato i filosofi da sempre.

Universalità problematica

Come si arriva a una conoscenza universale partendo da un contesto inesorabilmente contingente? Noi umani, infatti, siamo limitati, nello spazio e nel tempo. Se siamo in un luogo non possiamo contemporaneamente essere in un altro e la nostra vita, rispetto all'universo, è un battito di ciglia. Questo problema si presenta nella tradizione filosofica come il *problema dell'induzione*. Laddove si abbiano premesse certe il passaggio dalla universalità della legge alla spiegazione di un evento contingente è relativamente semplice. L'evento contingente, l'*explanandum*, viene spiegato (proprio nel senso letterale del termine, *disteso*, *aperto*, eliminando le *pieghe*) seguendo un procedimento deduttivo razionale codificato come effetto della unione delle premesse. Rappresenta cioè una conseguenza (i filosofi preferiscono il termine *inferenza*) dal contenuto delle premesse: se le premesse sono vere e il procedimento deduttivo è corretto anche le conseguenze saranno vere. È questo il senso del sillogismo nei termini nei quali lo ha rappresentato e codificato Aristotele. Se devo spiegare perché il radiatore della mia auto si è spaccato unisco la conoscenza generale e in un certo senso astratta (tutta l'acqua, in ogni luogo e in ogni tempo) che l'acqua sotto gli 0 gradi si solidifica e, solidificandosi, aumenta di volume, con la circostanza fattuale e contingente di aver lasciato l'auto all'addiaccio d'inverno.

Nel corso di tutto il Medio Evo e l'Età Moderna la riflessione sulla scienza e la pratica scientifica, ovvero la ricerca soprattutto nelle scienze naturali, hanno proceduto in simbiosi, tant'è che il nome della ricerca scientifica vera e propria era *filosofia naturale*. Tutti sanno che la scienza come oggi la conosciamo nasce con Galileo, il quale è anche all'origine di quella complessa struttura concettuale capace di dominare con procedimenti formali fenomeni la cui natura è fisica e la cui percezione è e resta empirica e soggettiva, legata cioè ai sensi.

A partire dagli inizi del Novecento assistiamo, tuttavia, a una vera e propria rivoluzione del pensiero epistemologico che ha al suo centro, come elemento metodologico caratterizzante, la riflessione sul linguaggio. I limiti di questo scritto non consentono

un'accurata ricostruzione complessiva degli sviluppi dell'epistemologia analitica contemporanea. Se ne potrà tracciare solo un sintetico profilo e una caratterizzazione attraverso le vicende del Wiener Kreis (Circolo di Vienna): un agguerrito gruppo di scienziati militanti e filosofi straordinariamente sensibili ai problemi filosofici di teoria della conoscenza e attenti agli sviluppi della riflessione sul linguaggio, incentrati soprattutto sul contributo del filosofo austriaco Ludwig Wittgenstein [12].

Verità e ragione

Gli uomini del Circolo di Vienna hanno dato vita a una corrente filosofica denominata *neopositivismo*, o talvolta *neoempirismo* per la contiguità di alcune sue tesi con l'empirismo classico. La premessa teorica fondamentale di questi sviluppi è che una corretta analisi dei processi di costruzione delle teorie non può che partire dalla considerazione che tutte le nostre conoscenze scientifiche sono insiemi di proposizioni, cioè che il linguaggio è l'imprescindibile contenitore delle nostre conoscenze. E come spesso succede il contenitore influisce sulla forma del contenuto. Da ciò deriva, attraverso un processo la cui ricostruzione eccede i limiti di questo scritto, la consapevolezza del fatto che talora noi scambiamo per autentici *problemi di contenuto*, problemi che sono propri del simbolismo entro il quale li rappresentiamo. Le proposizioni non sono tutte uguali: alcune sono sensate altre non lo sono. Per separare le une dalle altre occorre un'analisi filosofica guidata da un principio che diverrà celebre: *il principio di verifica*, talora espresso con la formula "il senso di una proposizione è il metodo della sua verifica". Come dire che non si può rispondere correttamente a una domanda insensata. E l'insensatezza deriva molto spesso dalla imperfezione del nostro simbolismo.

In estrema sintesi la struttura grammaticale e sintattica delle nostre lingue che dovrebbe apparire come una guida che indica cosa vi è nel mondo è spesso in contrasto con la struttura logica profonda. La struttura del linguaggio. Vi è un'importante differenza fra il *linguaggio* e la *lingua*. Si potrebbe dire che le lingue sono il modo in cui il linguaggio è reso visibile. Mentre il linguaggio è uno solo, le lingue sono una pluralità. Per spiegarci con un esempio: "il libro è sul tavolo" e "the book is on the table" esprimono in modo diverso un'identica struttura formale che può essere rappresentata correttamente dalla logica. Come hanno insegnato i contributi di Gottlob Frege [13] e Bertrand Russell, solo una corretta analisi del linguaggio, compreso quello delle scienze, può sanare questi paradossi che inducono a credere nell'esistenza di oggetti inesistenti.

In breve non si può rispondere alla domanda se l'"attuale re di Francia è calvo" attraverso una ricerca storico-politica empirica, ma solo emendando il nostro imperfetto linguaggio che consente di formare espressioni formalmente corrette, ma logicamente insensate. Se traccio, infatti, l'elenco di tutte le cose che sono attuali, sono re e sono calve, non troverò infatti "il re di Francia".



Figura 1 – Fotografia a esposizione multipla dello storico e filosofo Thomas Kuhn. Crediti di Bill Pierce (Time Life Pictures/Getty Images). Dall'Enciclopedia Britannica: www.britannica.com.

Una corretta analisi dei processi attraverso i quali costruiamo la teoria scientifica deve partire e accompagnarsi a una analisi nel linguaggio nel quale le esprimiamo, servendosi degli strumenti offerti dalla logica matematica. L'espressione "il quadrato rotondo non esiste" è solo apparentemente vera e sensata. Il problema è che un simbolismo logicamente corretto non dovrebbe consentire, come ci ha insegnato Bertrand Russell, la costruzione di espressioni linguistiche grammaticalmente corrette il cui soggetto grammaticale suggerisce una presupposizione di esistenza logicamente ed empiricamente insensata [14].

Tutto questo ha ovviamente un effetto anche sulle proposizioni scientifiche di cui i membri del Circolo di Vienna intendevano elucidare la struttura logica profonda. L'animatore del circolo di Vienna è stato Moritz Schlick il quale, influenzato dalle teorie wittgensteiniane, ha elaborato una concezione che tendeva a superare il *gap* sempre esistente tra osservazione individuale e contingente dei risultati della ricerca con l'elaborazione dei cosiddetti *protocolli* [15], giungendo alla proposizione del celeberrimo principio di verifica, strumento logico destinato, nei propositi del suo autore, a separare le proposizioni insensate (quelle della metafisica e della filosofia) da quelle sensate della scienza.

Queste ultime sono sensate non perché sempre verificate, ma perché verificabili almeno in linea di principio. Questo principio separava dunque la nozione di verità da quella di verificabilità. Per esempio la proposizione che esprime il principio di Archimede è scientifica non tanto perché vera, quanto perché indica quale esperienza è in grado di corroborarla: vale a dire l'atto di immergere un corpo in un liquido, mentre la proposizione secondo la quale il dio dei cristiani è uno e trino non lo è, non tanto perché non

potrebbe essere vera, quanto perché non è indicata e non è indicabile, come nel caso del principio di Archimede, un'esperienza empirica che possa verificarla o falsificarla.

Il falsificazionismo

In realtà l'ottimismo col quale i membri del Wiener Kreis speravano di separare, con l'analisi logica, le proposizioni sensate della scienza da quelle insensate (perché inverificabili!) dell'estetica, della filosofia e della religione, era destinato a un rapido declino. In uno studio divenuto celeberrimo [16], Popper mostrava, con argomenti in parte tratti da David Hume, che proprio le espressioni linguistiche che i membri del Circolo intendevano salvare, quelle universali espresse dalle leggi scientifiche, risultavano esse stesse inverificabili. La costruzione delle teorie delle scienze empiriche è basata su un processo induttivo. Nessuna enumerazione di casi empirici di un qualsiasi processo naturale destinata a passare dal particolare all'universale avrebbe resistito all'analisi logica ed epistemologica. Per semplificare: "tutti", che è la forma linguistica dell'universalità delle leggi di natura, diversamente da come potrebbe sembrare non è una somma di parti. Per quanti casi di un determinato fenomeno io verifichi, non ci sarà mai un momento in cui arriverò a esaurire i casi. In secondo luogo se anche, per assurdo, partendo dal processo empirico dell'enumerazione, potessi esaurire tutti i casi di un determinato fenomeno, non potrei mai sapere quando sarà giunto il momento nel quale avrò esaurito il numero, perché "tutti" non è contenuto nell'enumerazione stessa. Può essere visto, per così dire solo dall'esterno, dallo *sguardo di un dio*. In altri termini l'universalità delle leggi scientifiche esprime una correlazione, non afferma l'esistenza: quando dico "tutti gli uomini sono mortali" non sto affermando l'esistenza di uomini, ma sto dicendo che se qualcosa è un uomo allora è mortale.

Da questa critica Popper ricavava la sua teoria del *falsificazionismo*, che individuava la scientificità non nella verificabilità, ma all'opposto nella falsificabilità. Infatti se nessun numero di casi positivi è sufficiente a rendere vera una teoria, un solo caso negativo inficia la possibilità dell'universalità, la possibilità di dire: "tutti gli A sono B". E la falsificabilità è in realtà un aspetto della controllabilità empirica: solo ciò che può, almeno in linea di principio, essere controllato può essere falsificato.

La struttura delle rivoluzioni scientifiche

Gli sviluppi successivi della riflessione epistemologica prenderanno presto altre strade, nelle quali la nitida architettura logica sottesa tanto al verificazionismo che al falsificazionismo lascerà il posto ad altri modelli esplicativi, il più noto dei quali è quello *nomologico deduttivo* (dal greco *νόμος* (*nomos*), *legge*) per il quale la spiegazione di un fenomeno è rappresentata come un ar-

gomento nel quale l'enunciato che descrive il fenomeno da spiegare, appunto l'*explanandum*, è sussunto quale caso particolare da proposizioni che hanno il carattere di leggi generali che esprimono connessioni empiriche uniformi unite ad altre che descrivono fatti particolari contingenti, detti *condizioni iniziali*.

La spiegazione in questo caso inquadra il fenomeno da spiegare in un modello di uniformità [17]. Le spiegazioni strutturate in questo modo debbono soddisfare i due requisiti di *rilevanza esplicativa* e di *controllabilità*. Negli anni Sessanta dello scorso secolo, i modelli falsificazionista e quello nomologico deduttivo saranno confutati, facendo leva sulla indubbia rigidità logica che li caratterizza e che spesso si scontra con le circostanze reali della storia della scienza, che mostra un andamento tutt'altro che lineare. Prevarrà da un lato un approccio che spiega la struttura e la successione delle teorie nei termini rivoluzionari resi noti da Thomas Kuhn [18] e dall'altro la relazione di interdipendenza fra dati e teorie proposta con forza polemica da Paul Feyerabend [19].

Qui il quadro muta radicalmente perché l'epistemologia che si afferma è fortemente debitrice alla storia della scienza, la quale, come affermava Feyerabend, è un serbatoio di "consolazioni per lo specialista", vale a dire offre argomenti per una tesi, ma anche per il suo contrario. In breve: la storia della scienza mostra che il processo di successione delle teorie non è un processo lineare, bensì rivoluzionario. Una teoria è sostituita da un'altra quando la concorrente è in grado di incorporare le anomalie emerse nella teoria dominante e può spiegare più e meglio. Solo che una nuova teoria non è solo una nuova risposta ai problemi, ma è anzi una nuova *configurazione dell'universo*, vale a dire propone non solo nuove risposte, ma soprattutto nuove domande. Un esempio: a dispetto della omofonia non possiamo tradurre una proposizione della fisica newtoniana in una della teoria dei campi quantistici perché termini come *forza* o *massa*, pur essendo presenti in entrambe le teorie, hanno riferimenti diversi. La massa di una particella, infatti, è una proprietà intrinseca della particella stessa in Newton, ma è il risultato dell'interazione della particella con il campo di Higgs nel Modello Standard. In linguaggio filosofico è la teoria che *produce il dato*.

Possiamo arrivare a una verità definitiva?

L'idea che vi sia un piano ateorico rappresentato dall'esperienza vergine, che preceda qualunque teorizzazione e rappresenti per così dire la fase iniziale, aurorale della costruzione della conoscenza scientifica strutturata, ci dice Feyerabend, è un mito. Se Aristotele e Galileo avessero guardato un peso che oscilla sospeso a un filo, il primo avrebbe visto un corpo impedito di raggiungere il suo luogo naturale, mentre il secondo avrebbe visto un pendolo il cui moto è descrivibile in termini di isocronismo.

In anni più vicini a noi, soprattutto grazie al contributo di pensatori come Quine, Davidson e Putnam, la riflessione sulla struttura della conoscenza scientifica ha raggiunto nuovi traguardi e ha

aperto nuove prospettive. Praticando l'esercizio della preterizione si ribadisce qui l'impossibilità di dar conto della complessità di questo dibattito che ha visto la confluenza in programmi complessi di ricerca discipline un tempo chiuse nel proprio apparato categoriale e metodologico come l'*epistemologia*, la *filosofia del linguaggio*, le *neuroscienze*, le *teorie dell'evoluzione* ecc. Valga, per tutti un cenno alla naturalizzazione della conoscenza e al contributo di Willard van Orman Quine al quale dobbiamo una ulteriore svolta, nota come *olismo* (dal greco *o* o , *totalità*). Partendo da considerazioni inerenti alla imperscrutabilità del riferimento giunge alla nozione di *relatività ontologica* [20]. Gli "oggetti sono postulati culturali", dei omerici e sedie dipendono per la loro ontologia dal contesto linguistico. Non possiamo parlare di enti in senso assoluto, ma solo in riferimento al linguaggio. Le singole proposizioni non possono essere confermate o falsificate dall'esperienza. La scienza non si presenta come insieme di proposizioni irrelate, ma come insieme di proposizioni solidali. Gli enunciati empirici non sono opposti per essenza a quelli logico-matematici, vi è solo una differenza di grado. Non ci sono criteri esclusivamente logici di falsificabilità, ma criteri metodologici. Non c'è un confronto diretto fra singole ipotesi ed esperienza. Il linguaggio è un tutto unico. La separazione tra enunciati scientifici ed enunciati comuni non è sostenibile. Ogni linguaggio è una teoria sul mondo, Non si possono separare le componenti linguistiche da quelle dell'esperienza. L'esperienza non ha mai un carattere neutrale rispetto alla teoria. L'ontologia è sempre interteorica (cioè gli *oggetti* di cui ammettiamo l'esistenza discendono dal quadro teorico). I *fatti* sono tali in quanto collocati in un quadro interpretativo. I *fatti* sono carichi di teoria. La teoria è sottodeterminata rispetto ai reperti osservativi. Gli elementi osservativi possono autorizzare innumerevoli enunciati diversi. La *verità* è plurale [21]. La filosofia della scienza è una disciplina psicologica comportamentistica: non ha, né può avere alcuna pretesa fondazionalista, ma le scienze si fondano autonomamente e nel loro progredire additano il cammino alla filosofia. La filosofia tematizza il percorso che dallo stimolo arriva alla complessità delle scienze. Questa complessità è fondamentalmente linguistica. Le teorie scientifiche sono i termini di questa naturalizzazione. L'epistemologia (naturalizzata) è studio della genesi del linguaggio.

Molto, anzi moltissimo, anche di essenziale ai fini di una rappresentazione appena adeguata della riflessione filosofica sulla scienza, rimane fuori da questo breve schizzo il cui unico scopo è quello di stimolare la curiosità e l'interesse di chi voglia approfondirne gli affascinanti rapporti.

Bibliografia

- [12] Wittgenstein L. e Conte A. *Tractatus logico-philosophicus e Quaderni 1914-1916*. Einaudi (1995). ISBN 9788806138172
 [13] Casalegno P. *et al. Filosofia del linguaggio*. Cortina Raffael-

lo (2003). ISBN 9788870788365

- [14] Russel B. *Linguaggio e realtà*. Laterza (1970)
 [15] Trinchero M. *Il neopositivismo logico*. Loescher (1982)
 [16] Popper K. *Logica della scoperta scientifica. Il carattere autocorrettivo della scienza*. Einaudi (2010). ISBN 9788806203924
 [17] Hempel C. *Filosofia delle scienze naturali*. Il Mulino (1968)
 [18] Kuhn T. e Carugo A. *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*. Einaudi (2009). ISBN 9788806199005
 [19] Feyerabend P. e Sosio L. *Contro il metodo. Abbozzo di una teoria anarchica della conoscenza*. Feltrinelli (2002)
 [20] Quine W. e Van Orman Quine W. *Ontological Relativity and Other Essays*. Columbia University Press (1969)
 [21] Quine W. *Parola e oggetto*. Il Saggiatore Tascabili (2008)
 [22] Koyré A. *Dal mondo del pressapoco all'universo della precisione*. Einaudi (2000). ISBN 9788806157913
 [23] Popper K. e Pancaldi G. *Congetture e confutazioni. Lo sviluppo della conoscenza scientifica*. Il Mulino (2009)
 [24] Popper K.R. *Scienza e filosofia*. Einaudi (2000)
 [25] Schlick M. *La svolta della filosofia*. In A. Pasquinelli, curatore, *Il Neoempirismo*. Unione Tipografico-Editrice Torinese (1969). ISBN 9788802026299

Commenti on-line: <http://www.accastampato.it/2012/06/la-legge-e-uguale-per-tutti/>

Sull'autore

Roberto Pujia (roberto.pujia@uniroma3.it) è professore associato di Filosofia e teoria dei linguaggi presso l'Università Roma Tre. Ha compiuto studi e ricerche sulla filosofia dell'Atomismo logico di Bertrand Russell, con particolare riferimento alla teoria referenziale del significato sul monismo di F.H. Bradley, sulla filosofia neopositivista, sull'epistemologia di Karl Popper, sulla filosofia del linguaggio di L. Wittgenstein, di D. Davidson e sugli aspetti filosofici, semiotici e cognitivi della traduzione. Visiting Professor presso l'Università di Helsinki e dell'Universidad Nacional de Córdoba (Argentina). Membro di diverse società scientifiche, è stato presidente della Società Filosofica Romana. Ha collaborato ai programmi culturali della RAI organizzando colloqui e tavole rotonde con figure eminenti del pensiero contemporaneo (K. Popper, I. Prigogine). Presidente del collegio didattico di Scienze della comunicazione dell'Università degli Studi Roma Tre dal 2004 al 2008.



La scienza in azione

Introduzione alla sociologia della scienza

Forse ad alcuni tra voi è capitato di leggere degli articoli scientifici, ma sapevate che quella dell'interpretazione del dato scientifico è una delle questioni cruciali e più spinose della storia della scienza dell'ultimo secolo e dell'epistemologia contemporanea? La stagione post-moderna nella quale viviamo è caratterizzata da narrazioni e interpretazioni quasi infinite di ogni cosa. Ciò a causa della serie di crolli all'interno del pensiero moderno, delle sue certezze, delle sue ambizioni di analisi e di sintesi, di spiegazione, di conclusione, in sostanza della perdita di ogni speranza di conquistare una Razionalità capace di giungere a una descrizione esauritiva della Realtà. Tale processo era già iniziato con Galileo e poi proseguito con Newton, Einstein, Heisenberg... e la lista è ancora molto lunga. L'*ermeneutica*, l'*analitica* e le principali filosofie del Novecento, seppur con diversi approcci, hanno finito per denunciare come vani sia i tentativi di condurre l'analisi della realtà a un punto zero coincidente con la Verità, sia di costruire un sistema capace di contenere la totalità delle descrizioni parziali.

È in questo dibattito che si inserisce questo testo per certi aspetti rivoluzionario, capace come è stato di aprire la riflessione a un nuovo approccio sociologico sul farsi della scienza, distruggendo definitivamente quell'aura di purezza con cui la stessa splendeva sin dal passato. Ma ciò non ha necessariamente una connotazione negativa. Il viaggio all'interno della scienza proposto dall'autore Bruno Latour, celebre sociologo-antropologo-filosofo della scienza francese, inizia "entrando dalla porta di servizio, dalla porta della scienza nel suo farsi, non dall'ingresso grandioso della scienza pronta all'uso", come dirà nel testo. L'esercizio che viene proposto è una riflessione, non solo filosofico-retorica, su ciò che sfugge a chi la scienza la fa, a chi è immerso in quel mondo o sperso nel suo laboratorio tanto da non vedere fino in fondo l'intreccio delle sue leggi logiche con quelle storiche, sociali ed economiche tipiche di ogni epoca. Osservando in maniera minuziosa le pratiche di ricerca scientifica, Latour supera l'idea di una scienza e di una tecnica isolate in torri d'avorio restituendo il lavoro degli scienziati e dei tecnologi alla società. Con questo testo del 1987 viene elaborandosi una visione, sistematizzata in altri lavori (vedi anche "Pandora's Hope" del 1999), di scienza e tecnologia come cardini dei collettivi sociali e dei fatti scientifici come costruzioni sociali. Il testo porta dentro alla scienza e si rivolge al lettore quasi chiamandolo per nome e questo perché l'autore è convinto che "il destino di ciò che diciamo e facciamo è nelle mani degli utilizzatori finali". Di tutti noi insomma!

Il caso della scienza sperimentale e dell'attività di laboratorio è emblematico. Per portare avanti le proprie ricerche la scienza ha bisogno di spazi sempre più attrezzati tecnologicamente, di cui all'inizio, decine di anni fa, non poteva permettersi il costo. I cambiamenti dei sistemi di produzione del passato spingevano però il capitale ad aumentare sempre più gli investimenti nelle tecnologie avanzate. Ecco il primo passo in cui le leggi del mercato entrano nei laboratori prima ancora di noi e degli scienziati stessi, finendo per influire direttamente sulle leggi della fisica. Ma le influenze si estendono all'organizzazione del lavoro e della ricerca applicata, all'assunzione degli scienziati e dei tecnici, alla scelta delle tecnologie da utilizzare e alla volontà extra-scientifica di creare sistemi sempre migliori, ma spesso con lo scopo di accrescere la popolarità e la potenza del gruppo stesso e del proprio profitto. Insomma il farsi della scienza e il fatto scientifico diventano in questo modo il risultato di una precisa epoca storica e di una sovrastruttura storico-culturale.

Questo testo ci fornisce un ottimo esercizio di riflessione filosofica su di una realtà concreta che molti credono di conoscere, ma che presenta diverse zone grigie. Un testo che spiega perché la scienza non sia solo una mera procedura logica, senza soggetti, senza materialità, senza legami con le ideologie e le programmazioni sociali, con gli *stili* e *collettivi* di pensiero, ma sia inserita in una logica in cui s'intrecciano l'astratto e il concreto, la forma e la materia.

Giorgia Ghinassi
(Laureata in Storia della Scienza
presso l'Università di Bologna)

COPERTINA



IN BREVE

Titolo	La scienza in azione
Autore	Bruno Latour
Editore	Edizioni di Comunità – Einaudi
Anno	1998
Pagine	384
Prezzo	19,63 €
ISBN	978-88-24505-51-2

Navigatori GPS e teoria della relatività

Teorie scientifiche di frontiera nelle tasche di tutti

Giovanni Organtini

(Dipartimento di Fisica dell'Università Sapienza di Roma)

Pensate che la fisica della relatività sia qualcosa di assurdamente lontano dalla realtà di tutti i giorni? Credete che fenomeni come la *dilatazione dei tempi* e la *curvatura dello spazio-tempo* si possano verificare solo nei film di fantascienza? Vi sbagliate! La fisica relativistica, ormai, fa davvero parte dell'esperienza quotidiana

Una guida... spaziale

Molti di noi possiedono un navigatore satellitare GPS (*Global Positioning System*). Ogni volta che non sappiamo dove ci troviamo possiamo chiederlo a questo indispensabile oggetto che conosce sempre la propria posizione, purché si trovi all'aperto in un luogo dove può ricevere i segnali radio inviati continuamente da una costellazione di una trentina di satelliti che orbitano a circa 20000 km di quota attorno alla Terra.

Usando un sistema chiamato *trilaterazione*, il navigatore calcola la propria posizione conoscendo la posizione e la distanza di almeno tre satelliti GPS. I satelliti, infatti, trasmettono in continuazione la loro posizione, a loro nota, e l'istante di tempo in cui inizia la trasmissione. Il navigatore misura il tempo di arrivo del segnale attraverso un orologio al quarzo incorporato. Facendo la differenza tra l'istante di arrivo del segnale e l'istante di partenza, ottiene il tempo che ha impiegato il segnale a propagarsi. Multi-



Figura 1 – Raffigurazione artistica di un satellite GPS, cortesia della NASA. Da Wikimedia.

plicando questo tempo per la velocità della luce, che è quella con cui si propagano i segnali radio, trova la distanza tra il navigatore e il satellite che ha emesso il segnale intercettato.

Nota la posizione di tre satelliti e le rispettive distanze, si possono tracciare nello spazio tre sfere, ciascuna centrata in un satellite, di raggio pari alla distanza di ciascuno di essi dal navigatore. Le tre sfere si intersecano, al massimo, in due punti. Di questi solo uno si trova sulla superficie terrestre e perciò è quello in cui si trova il navigatore (vedi Figura 2).

Distanze in secondi

La misura di distanza dunque si riduce a una misura di tempo. Per raggiungere la precisione necessaria i tempi devono essere misurati molto accuratamente, il che non è possibile attraverso un orologio al quarzo da pochi euro, come quello montato sui navigatori. In effetti su ogni satellite si trova un orologio atomico, sincronizzato con tutti gli altri. La differenza tra l'ora segnata dagli orologi dei satelliti e quella del navigatore si può stimare usando i dati di un quarto satellite. Misurandone la distanza e confrontandola con quella calcolabile dalla sua posizione relativa agli altri satelliti, che è nota, si ricava la correzione da apportare alle misure di tempo dell'orologio del navigatore.

Ma cosa c'entra la relatività in tutto questo? Il fatto è che i satelliti GPS si muovono, rispetto a noi, a una velocità $v \simeq 4 \text{ km/s}$, in media. Secondo la teoria della relatività speciale il tempo trascorso a bordo di un satellite appare dilatato di un fattore

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

che nel caso in esame è un numero che differisce da uno per appena due decimi di miliardesimo ($2 \times 10^{-10} \text{ s}$).

Per quanto piccola, la differenza è importante perché l'errore si cumula col tempo. Dopo appena un giorno di volo (corrispondente a 86400 secondi), la differenza tra il tempo segnato da un orologio a terra e uno a bordo di un satellite è pari a $2 \times 10^{-10} \times 86400 \simeq 0,2 \times 10^{-4} \text{ s}$, cioè a circa 2 centomillesimi di secondo. In questo tempo la luce percorre 6 km, quindi le sfere disegnate a partire da ciascun satellite appaiono avere un raggio che differisce di 6 km da quello *reale*. Dunque in prossimità della nostra posizione vedremmo le superfici di due di queste sfere distanti qualche chilometro l'una dall'altra, che corrisponde proprio all'incertezza sulla propria posizione.

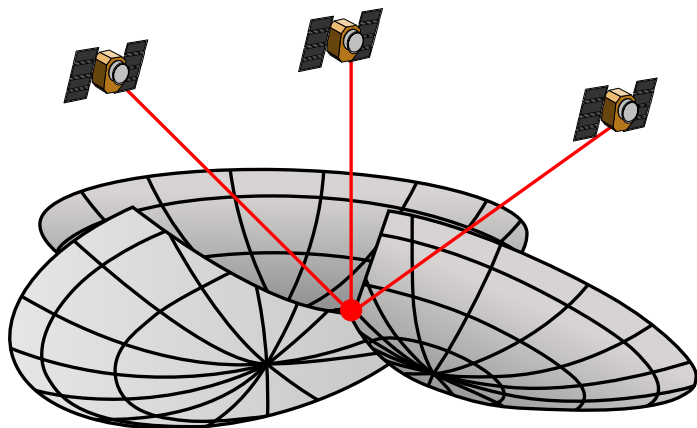


Figura 2 – Schema dell'operazione di trilaterazione per calcolare la posizione del navigatore a partire da tre satelliti in orbita. Da Wikimedia.

Dallo speciale al generale

Questo non è l'unico effetto previsto dalla relatività. Quello appena calcolato è solo l'effetto previsto dalla teoria della relatività speciale, che ha a che fare con i sistemi inerziali, in assenza di forze. Poiché vicino la Terra esiste un campo di forze gravitazionali, dobbiamo invocare la teoria della relatività generale, che prevede che le masse incurvino lo spazio-tempo nelle proprie vicinanze e che quindi sia alterata la misura di distanza fatta dal navigatore.

Per comprendere questo fenomeno basta considerare due punti disegnati sopra un foglio di carta. La loro distanza coincide con la lunghezza del segmento che li unisce quando il foglio è piatto. Se incurviamo il foglio la loro distanza si riduce, ma la lunghezza del segmento che li unisce (che rappresenta il percorso fatto da un raggio di luce che si muove dall'uno all'altro) resta la stessa. La distanza misurata nello spazio curvo è tanto maggiore quanto più è grande la curvatura. Possiamo tradurre questo effetto in termini di misure di tempo. Laddove lo spazio-tempo è più curvo gli orologi marciano più lentamente rispetto a quelli che si trovano in punti dello spazio-tempo meno curvi. Maggiore è la curvatura, maggiore è l'effetto sul tempo, perché la distanza è il prodotto del tempo impiegato dalla luce per andare da un punto all'altro moltiplicato per la velocità di quest'ultima. L'effetto sulla misura dei tempi dovuto alla curvatura spazio-temporale è previsto dalla teoria e provoca un'accelerazione del ritmo degli orologi di bordo di circa sette decimi di miliardesimo di secondo ogni secondo.

L'effetto della relatività generale compensa in parte quello della relatività speciale perché nel primo caso gli orologi di bordo marciano più rapidamente di quelli sulla Terra, mentre nel secondo accade il contrario. L'effetto netto è che gli orologi di bordo si muovono più rapidamente di quelli a terra: ogni secondo che passa a bordo dei satelliti è percepito sulla Terra come appena più breve di $5 \cdot 10^{-10}$ s. Come si vede questo effetto provoca un errore che è più del doppio di quello che avrebbe provocato la sola

relatività ristretta, rendendo l'uso del sistema GPS inutile.

Per tener conto di questi effetti, gli orologi di bordo sono opportunamente *starati* prima della partenza, in modo da farli marciare più lentamente di quanto dovrebbero. Una volta lanciato il satellite, l'orologio che porta a bordo apparirà a un osservatore sulla Terra marciare nel modo *corretto*. Quest'operazione consente di correggere gli effetti relativistici in media. La correzione residua si ottiene attraverso il software di bordo, che altera il valore del tempo misurato a bordo tenendo conto di tutti i parametri, in modo tale da inviare a terra un tempo che corrisponde a quello che avrebbero misurato gli orologi in assenza di effetti relativistici.

La relatività riguarda tutti

D'ora in poi, quando userete un navigatore non potrete più pensare che la teoria della relatività sia qualcosa che non vi riguarda. È utile ricordare che il suo sviluppo non prese le mosse dall'esigenza di produrre una qualche tecnologia, ma solo dalla brama di conoscenza. La scienza di base, come la musica, la letteratura e tutte le altre arti, non si coltiva allo scopo di produrre qualcosa: l'unico obiettivo è il raggiungimento della conoscenza.

Bibliografia

[26] Hofmann-Wellenhof B. e Legat K. *Navigation: Principles of Positioning and Guidance*. Springer (2003). ISBN 9783211008287

[27] Einstein A., Valori R. e Pratelli A. *Come io vedo il mondo - La teoria della relatività*. Newton Compton (2010). ISBN 9788854119550

Commenti on-line: <http://www.accastampato.it/2012/06/gps/>

Sull'autore

Giovanni Organtini (Giovanni.Organtini@roma1.infn.it) è professore associato di Fisica Sperimentale presso il Dipartimento di Fisica dell'Università Sapienza di Roma. Insegna Fisica per il Corso di Laurea in Biotecnologie e Interazioni radiazione-materia per la Scuola di Specializzazione in Fisica Medica. Si occupa di metodi e tecniche per la rivelazione di particelle e di computing ed è membro della collaborazione CMS a LHC.



Il sistema temperato

Il legame indissolubile tra musica e matematica

Martina Pugliese

(Dipartimento di Fisica dell'Università Sapienza di Roma)

Può non essere chiaro a prima vista, ma la musica costituisce una delle attività intellettuali in cui è più evidente la presenza della scienza (e Galileo Galilei fu uno dei primi a capirlo). Qui ci occuperemo principalmente dei principi matematici che sono alla base di un'armoniosa successione di suoni.

Il suono

Guardando la tastiera di un qualunque pianoforte ci si accorge che un'ottava, cioè quell'*intervallo musicale* compreso tra due suoni



Figura 1 – Particolare della tastiera di un pianoforte Steinway & Sons, fabbrica fondata a New York City nel 1853.

dallo stesso nome, contiene dodici tasti. Chi ha stabilito un tale numero? E perché diciamo che le note sono *sette*? Il pianoforte è uno strumento adatto allo studio di questo problema in quanto le note su di esso sono già presenti *a priori*, e non vanno cercate con l'orecchio come accade per esempio con un violino.

Il suono è dato da un *disturbo* che si propaga nell'aria: se un certo oggetto si mette a vibrare, trasmette le sue vibrazioni all'aria come *onde di pressione*, che raggiungendo il nostro orecchio a loro volta mettono in vibrazione il nostro timpano. Il cervello fa il resto. Queste onde si propagano con una certa *frequenza*, che è il numero di oscillazioni che avvengono in un secondo e si misura in Hertz (1 Hz vuole dire che in un secondo c'è un'oscillazione): l'orecchio umano è in grado di percepire (mediamente) frequenze comprese tra 16 Hz e 16000 Hz (sopra e sotto abbiamo rispettivamente *infrasuoni* e *ultrasuoni*). Un intervallo musicale (cioè due note suonate simultaneamente o in successione) può essere *consonante* o *dissonante* a seconda della sensazione uditiva che provoca (gradevole o sgradevole), e fisicamente la distinzione è nel *rapporto* delle frequenze dei due suoni.

Un suono ha quattro caratteristiche fisiche: la *durata*, l'*ampiezza* (che ne dà il volume), l'*altezza* (data dalla frequenza, appunto) e il *timbro* (è dato dallo spettro di frequenze che risuonano assieme alla principale, infatti nessun suono, eccetto quelli degli strumenti elettronici, è puro). Già, ma come si costruisce una scala? Come si stabilisce a quali particolari frequenze dare un nome per farle diventare *note musicali*, da adottare in tutte le opere prodotte?

Stringhe vibranti

Partiamo da un semplice oggetto vibrante, come una stringa (una corda di violino per esempio). Mettiamola in vibrazione così com'è: otterremo un certo suono, con una certa frequenza v (che dipende dalla lunghezza della stringa). Oltre però a tale frequenza di vibrazione (principale), tale stringa vibra anche, con intensità minore, a frequenze via via maggiori secondo una successione ben precisa, quella dei *suoni armonici*, che si trovano a multipli interi nv della frequenza di partenza. Questo è il motivo per cui un suono proveniente da uno strumento naturale non è mai puro, e questo è proprio ciò che lo rende piacevole.

Dopo la nota principale, tra gli armonici troviamo la nota all'ottava immediatamente superiore (che ha frequenza doppia). La consonanza tra due suoni si ottiene se un armonico dell'uno coincide o è sfasato di un'ottava con un'armonico dell'altra (non necessariamente quello corrispondente nell'ordine). La dissonanza si ha

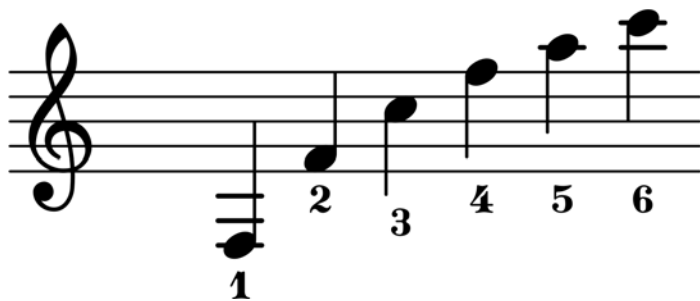


Figura 2 – I primi sei suoni armonici del FA.

quando alcuni o tutti gli armonici sono a coppie sfasati in modo da dare rapporti di frequenze *buffi*. Un intervallo di ottava è così banalmente consonante, e si verifica facilmente che lo è anche uno di quinta giusta (DO-SOL per esempio).

Un primo tentativo di costruzione di una scala, quello più immediato, consiste nel costruire quindi la scala degli armonici. Questa è la nota *scala naturale*, inventata dagli antichi Greci. È chiaro che non è stato facile arrivare a una definizione precisa delle proprietà di consonanza e dissonanza dei suoni, in quanto esse partono da una sensazione uditiva: dar loro una forma quantitativa in termini di frequenze ha richiesto tempo e acquisizione di conoscenze. Ecco perché la matematica viene (sempre) in aiuto.

Sette

Nella storia molti altri tipi di scale sono stati costruiti, ma veniamo adesso al vero nodo cruciale della questione. Abbiamo detto che ogni nota è associata a una frequenza. Come stabiliamo *quali* frequenze sono per noi importanti e quali no? Come si costruisce un pianoforte (che assegna una frequenza prestabilita a ogni tasto, infatti va ogni tanto *accordato*)? Il pianoforte divide l'ottava in dodici tasti e le differenze tra un tasto e il successivo si chiamano *semitoni*. Un'ottava viene così a essere composta da dodici semitoni. La *scala a temperamento equabile* si ottiene dividendo l'ottava in pezzi uguali, per cui ciascuna delle sue note ha una frequenza tale che i rapporti di frequenze tra note adiacenti sono uguali. Il pianoforte, in particolare, si basa su un sistema di temperamento a dodici semitoni. Ma perché proprio dodici? Questo numero fornisce anche una risposta al perché le note (quelle non alterate) sono, tradizionalmente, in numero di sette, e dodici con

quelle alterate. Il punto è che una scala a temperamento equabile a dodici semitoni presenta numerosi vantaggi.

- Contiene più intervalli consonanti che dissonanti di qualunque altra scala,
- Contiene tutti gli intervalli consonanti esistenti,
- Si può suonare un pezzo in qualunque tonalità (scala riferita alla nota scelta come principale) ed esso risulterà semplicemente spostato in frequenza.

Dunque in questo modo otteniamo dodici semitoni esatti all'interno di un'ottava, che risulterà composta così da sette toni, e possiamo nominare dunque le *note*. Questa piccola discussione, naturalmente, non copre l'immenso e profondo rapporto che c'è tra musica e scienza, ma vuole dare uno spunto verso tale direzione.

Bibliografia

[28] Aprea A. *Fondamenti teorici dell'arte musicale moderna*. Ricordi (1959)

[29] Frova A. *Armonia celeste e dodecafonica: musica e scienza attraverso i secoli*. Bureau (2006). ISBN 9788817007634

[30] Lamarque L. *La nuova enciclopedia della musica Garzanti*. Garzanti (1988). ISBN 9788811303046

Commenti on-line: <http://www.accastampato.it/2012/06/musica-e-matematica/>

Sull'autore

Martina Pugliese (m.letitbe@gmail.com), laureata in Fisica presso l'Università Sapienza di Roma, è attualmente dottoranda, ancora in Fisica, presso lo stesso ateneo. Si occupa principalmente di modellizzazione di dinamiche di linguaggio, cioè dei meccanismi alla base del raggiungimento di un accordo entro una popolazione di individui. L'obiettivo è evidenziarne le dinamiche evolutive. Suonando da anni il pianoforte, è molto interessata al profondo rapporto tra musica e scienza.



Una questione di equilibri

Saper gestire la posizione del baricentro per non cadere

di Paola Malacari e Isabella Malacari

Immaginiamo di trovarci all'interno di un grande parco: passeggiamo, ci fermiamo a guardare i fiori di un chiosco, ci sediamo su una panchina e ci chiniamo a giocare con il cane di un passante. Senza che ce ne accorgiamo il nostro corpo sta lavorando spostandosi da una posizione di equilibrio all'altra per permetterci di compiere tutte le azioni che desideriamo. Ma cosa è l'equilibrio e come si raggiunge? Costruiamo un sistema da poter studiare!

Preparazione

Infiliamo ai lati del tappo di sughero le due forchette, l'una opposta all'altra, inclinate verso il basso, come mostrato nelle figure sottostanti. Inseriamo l'ago nella base del tappo. Posizioniamo l'intera struttura sul bordo del collo della bottiglia o sul suo tappo. Facciamo oscillare il sistema e osserviamo... Vedremo che il tutto resterà in equilibrio anche provando a farlo oscillare o roteare!

Cosa succede?

Un corpo poggiato su una superficie orizzontale è in equilibrio stabile quando, sottoposto a una piccola perturbazione, tende a tornare nella propria posizione di equilibrio. Sembra proprio che il sistema tappo-forchette sia, dunque, in equilibrio.



Ma come fa tale struttura a rimanere in equilibrio su un ago? Ogni sistema tende ad assumere la posizione che ne minimizza l'energia, in questo caso potenziale. Questa posizione corrisponde a un equilibrio stabile. Affinché un sistema sia in equilibrio stabile il *baricentro* deve trovarsi nel punto più basso possibile. Nel sistema costruito nell'esperimento il baricentro viene quindi a trovarsi all'interno della bottiglia, più in basso perciò della base d'appoggio costituita dalla punta dell'ago. Quando sottoponiamo il sistema a una piccola perturbazione esterna, si genera un *momento raddrizzante* che tende a farlo tornare nella sua posizione di equilibrio.



Cosa è il baricentro? Ogni oggetto, animale o persona ha un suo baricentro; nel baricentro di un corpo si può immaginare concentrata tutta la sua massa. A seconda del modo in cui questa è distribuita, il baricentro può trovarsi all'interno o al di fuori del corpo stesso. In generale la posizione del baricentro di un corpo omogeneo coincide con il suo centro di simmetria.

Cosa è il momento raddrizzante? In fisica si parla di momento quando si trattano sistemi in moto rotatorio. In questo modo si tiene conto quantitativamente di tutti i fattori che provocano una variazione dello stato di moto rotatorio, ovvero dell'intensità della forza, della distanza tra la retta su cui giace il vettore che la rappresenta e l'asse di rotazione del sistema. Se il momento del sistema non è equilibrato allora si avrà una variazione della velocità di rotazione. Nel nostro sistema la forza da prendere in considerazione è la forza peso che, essendo applicata al baricentro, genera un momento che tende a *raddrizzare* l'intero sistema.

Applicazioni

Vi siete mai chiesti come sia possibile che le barche a vela, nonostante le grandi inclinazioni, riescano a non ribaltarsi? Il segreto sta in quello che abbiamo appena visto. Il baricentro delle barche si trova al di sotto del livello del mare; inoltre è presente una zavorra mobile che fa sì che il centro di gravità si abbassi con l'aumento dell'inclinazione della barca. In questo modo il momento raddrizzante, che si oppone a quello sbandante trasversale dello scafo, incrementa la stabilità dell'imbarcazione!

SCHEMA



MATERIALE

- 1 bottiglia
- 1 tappo di sughero
- 2 forchette di metallo, meglio se identiche
- 1 ago

ARGOMENTI

- Somma vettoriale di forze
- Gravità
- Equilibrio statico

Accastampato non è un periodico, pertanto non è registrato e non ha un direttore responsabile. È un esperimento di comunicazione realizzato dall'associazione Accatagliato degli studenti di fisica dell'Università Sapienza di Roma con il duplice obiettivo di mostrare al pubblico non specialistico e agli studenti delle scuole superiori le ricerche portate avanti nell'area romana e di fornire l'occasione agli studenti universitari e ai giovani ricercatori di raccontare il proprio lavoro quotidiano e di confrontarsi con la comunicazione scientifica non specialistica.

La rivista è prodotta dal motore di composizione tipografica L^AT_EX. I sorgenti sono sviluppati e mantenuti da Alessio Cimorelli e sono disponibili richiedendoli alla Redazione.

Impaginazione: Alessio Cimorelli

Copertina: Simone Cesarini

Quest'opera è rilasciata sotto la licenza Creative Commons Attribuzione-Non commerciale-Condividi allo stesso modo 3.0 Unported. Se non specificato altrimenti, tutti gli articoli in essa contenuti sono rilasciati dai rispettivi autori sotto la medesima licenza. Per leggere una copia della licenza visita il sito web <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/> o spedisce una lettera a Creative Commons, 171 Second Street, Suite 300, San Francisco, California, 94105, USA.





www.frascatiscienza.it

RICERCATORI... ENERGIA PURA.

SETTIMANA EUROPEA DELLA RICERCA 24-28 SETTEMBRE 2012 FRASCATI/ROMA

All'Università Sapienza, musei aperti al pubblico e alle scuole • All'Ospedale Pediatrico Bambino Gesù, laboratori su ricerca clinica, ricerca di laboratorio e robotica dedicati alle scuole.

NOTTE EUROPEA DEI RICERCATORI 28 SETTEMBRE 2012 FRASCATI/ROMA

Laboratori, musei, esperimenti, osservazioni scientifiche, incontri con i ricercatori. Una staffetta di eventi scientifici tra Roma e Frascati. Un'immersione nel mondo più nascosto della Scienza e della Ricerca. Per adulti, ragazzi e bambini. L'ingresso è libero.

Sotto l'Alto Patronato del Presidente della Repubblica

