



REGIONE TOSCANA
Consiglio Regionale

PIANETA GALILEO

2010

A cura di Alberto Peruzzi

Si ringraziano:

il Comitato Scientifico di Pianeta Galileo 2010, gli Atenei toscani, le Province di Arezzo, Firenze, Grosseto, Livorno, Lucca, Massa Carrara, Pisa, Pistoia, Prato e Siena, i Comuni di Arezzo, Livorno e Prato, la Fondazione Monte dei Paschi di Siena per il contributo concesso, la Fondazione Toscana Spettacolo, il Gabinetto Scientifico Letterario G.P. Vieusseux, l'Osservatorio Astrofisico di Arcetri - Associazione Astronomica Amici di Arcetri, l'Ufficio Scolastico regionale per la Toscana - MIUR

Pianeta Galileo : 2010 / Regione Toscana, Consiglio regionale ; a cura di Alberto Peruzzi. – Firenze : Consiglio regionale della Toscana, 2011

I. Toscana. Consiglio regionale II. Peruzzi, Alberto

375.6

Scienze – Divulgazione e attività promozionali – Progetti della Regione Toscana – Pianeta Galileo – Atti di congressi

CIP (Catalogazione nella pubblicazione) a cura della Biblioteca del Consiglio regionale

Consiglio regionale della Toscana

Settore Rappresentanza e relazioni esterne

Grafica e impaginazione: Patrizio Suppa, Settore Comunicazione istituzionale, editoria e promozione dell'immagine

Stampato presso il Centro Stampa del Consiglio regionale della Toscana,
via Cavour, 4 - Firenze

Agosto 2011

Realizzato con il contributo della



FONDAZIONE
MONTE DEI PASCHI
DI SIENA

SOMMARIO

Presentazione - <i>Alberto Monaci e Stella Targetti</i>	5
Introduzione - <i>Alberto Peruzzi</i>	7

PROSPEZIONI

MATEMATICA

Matematica nascosta - <i>Riccardo Ricci</i>	15
Probabilità e illusioni - <i>Ennio Peres</i>	25
Walt Disney, i Pitagorici e la matematica - <i>Andrea Sani</i>	39

FISICA

L'attività sperimentale di Enrico Fermi, tra scienza, storia ed etica - <i>Marco Maria Massai</i>	59
Radici quadrate e collisionatori di particelle - <i>Roberto Casalbuoni</i>	71
Masterclass di fisica delle particelle - <i>Sandra Leone, Stefano Venditti</i>	81

SCIENZE UMANE

Gli Yanomami della foresta amazzonica: cultura tradizionale e storia recente nella collezione del Museo di Storia Naturale dell'Università di Firenze - <i>Francesca Bigoni, Giovanni Saffirio</i>	91
Alla ricerca della mente: dalla <i>res cogitans</i> al <i>cogito ergo sum</i> - <i>Francesco Romani</i>	99

STORIA DEL PENSIERO SCIENTIFICO ED EPISTEMOLOGIA

La musica e la genesi del pensiero scientifico moderno - <i>Natacha Fabbri</i>	107
Charles Darwin: viaggio alle origini della varietà dei viventi - <i>Anna Lepre</i>	117
Visione scientifica e senso comune - <i>Michele Marsonet</i>	127
Tra universo del senso comune e universo delle scienze: oltre il conflitto - <i>Carlo Gabbani</i>	137
Imre Toth, sogno di un'ombra - <i>Luigi Maierù</i>	157

ESPERIENZE DIDATTICHE

Avventura sui Vulcani: la Terra raccontata dai ragazzi - <i>Simona Cerrato, Rossella Crescente</i>	171
Insegnare matematica... a teatro - <i>Rosa Santori, Alfia Lucia Fazzino, Antonella Castellini</i>	181
Giochi matematici del Medioevo: pensare-e-agire ludicamente - <i>Antonio Di Pietro, Michela Lorenzi, Giampaolo Mazza, Gianfranco Staccioli, Francesco Tanini</i>	187

CONVEGNI

INFORMATICA NELLA DIDATTICA DELL'INFORMATICA

Premessa - <i>Marco Maria Massai</i>	201
Introduzione - <i>Maria Rita Laganà</i>	203
La danza dei bit: dai fogli a quadretti al palcoscenico - <i>Chiara Bodei</i>	207
I robot: gioco nella scienza - <i>Marco Righi</i>	211
Olimpiadi di Informatica: le gare di programmazione come stimolo per l'autoapprendimento - <i>Roberto Grossi</i>	215
Esperienze sceniche di diffusione della cultura informatica - <i>Romeo Crapiz, Giuseppina Trifiletti</i>	219

IL PROGETTO "EXTREME ENERGY EVENTS" (EEE): UN'ESPERIENZA DI COLLABORAZIONE TRA SCUOLE E TRA SCUOLA E UNIVERSITÀ

Introduzione - <i>Gloria Spandre, Marco Maria Massai</i>	233
L'esperienza delle scuole di Viareggio nell'ambito del Progetto Extreme Energy Events (EEE) - <i>Barbara Natucci</i>	237
Il Progetto Extreme Energy Events (EEE): costruzione dei rivelatori MRCP presso il CERN di Ginevra - <i>Joseph Bensellam, Claudio Bessi, Onofrio Langella, Matteo Panconi, Martina Petrucci</i>	245
Sugli effetti collaterali della ricerca fondamentale: la partecipazione di un'azienda di elettronica locale al Progetto EEE - <i>Carlo Avanzini</i>	249
Applicazioni di tecniche di fisica nucleare in medicina - <i>Maria Giuseppina Bisogni</i>	251
La Relatività Generale di Albert Einstein: una teoria geometrica per la gravitazione - <i>David M. Lucchesi</i>	255

PREMIO GIULIO PRETI

Motivazioni per il conferimento del premio al Prof. Francis William Lawvere	277
La guida alla natura - <i>Francis William Lawvere</i>	281

PRESENTAZIONE

Anche l'edizione 2010 ha confermato la straordinarietà di un progetto come Pianeta Galileo, chiamato a sostenere la più ampia diffusione della cultura scientifica, particolarmente fra le nuove generazioni. Con il cambio di legislatura, infatti, si è deciso di centrare proprio sui giovani il maggior numero delle iniziative che nell'ambito di Pianeta Galileo, in tutta la Toscana, si vanno a realizzare. Una scelta consapevolmente assunta nella certezza che proprio dall'avvicinamento dei giovani allo straordinario mondo scientifico vivo e presente in Toscana potranno realizzarsi importanti prospettive per il futuro della nostra comunità. Una comunità che vuole tornare a crescere e prosperare, in un contesto di diritti e opportunità, solidarietà e rispetto dell'ambiente. L'amore, lo abbiamo detto tante volte, che oggi può nascere in un giovane nei confronti della scienza, del sapere, della tecnologia, della conoscenza continua di nuove cose, proprio grazie ad un'esperienza come Pianeta Galileo, sarà certamente domani un contributo fondante a questo modello di sviluppo che vogliamo tornare ad affermare.

Questo volume raccoglie straordinari contributi legati agli eventi dell'edizione 2010 di Pianeta Galileo, contributi che offrono al lettore un'immagine esauriente della complessità e del fascino di questo progetto in cui Consiglio Regionale e Giunta toscana hanno deciso di continuare a credere. Uno spaccato importante dell'offerta di conoscenza posta, tramite un approccio particolarmente accattivante (ma che niente paga in termini di rigore del percorso di studio e di ricerca che ad essa sta dietro) all'attenzione di moltissimi giovani delle nostre scuole. Giovani ai quali va il nostro ringraziamento per la partecipazione e l'entusiasmo con cui annualmente si rapportano a questa iniziativa, una pagina bella delle nostre Istituzioni che rafforza, crediamo, anche il legame di fiducia che ci deve essere fra queste e i cittadini.

Una pagina che vogliamo, sicuramente, continuare a scrivere, anche grazie al contributo importantissimo di tutte quelle donne e quegli uomini di scienza che hanno scelto di mettere il loro sapere ed il loro lavoro al servizio di questo progetto.

ALBERTO MONACI
Presidente del Consiglio regionale della Toscana

STELLA TARGETTI
Vicepresidente della Regione Toscana

INTRODUZIONE

ALBERTO PERUZZI

Università di Firenze, Coordinatore scientifico di Pianeta Galileo

L'edizione 2010 di Pianeta Galileo, di cui qui si raccolgono gli atti, ha visto un'importante novità sotto il profilo istituzionale. La manifestazione è stata infatti realizzata sulla base di una convenzione tra il Consiglio regionale della Toscana, i tre atenei – Università di Firenze, Università di Pisa e Università di Siena – e l'Ufficio Scolastico Regionale del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca. Tale convenzione ha reso possibile il coinvolgimento diretto di tutti e tre gli atenei toscani fin dalle prime fasi progettuali e un più diretto e fattivo contatto con le scuole di ciascuna provincia grazie all'apporto dell'Ufficio Scolastico Regionale. La nuova modalità di collaborazione ha favorito il conseguimento degli scopi di Pianeta Galileo: promuovere un raccordo tra mondo della scuola e mondo della ricerca, favorire la diffusione della cultura scientifica, fornire ai giovani l'opportunità di partecipare a esperimenti e a progetti di ricerca ma anche aiutarli ad acquisire maggiore consapevolezza del ruolo che la ricerca scientifica ha avuto nella nostra storia, dei suoi legami con lo sviluppo economico e dei suoi rapporti con altri ambiti (dall'arte alla filosofia, dalla medicina alla tutela dell'ambiente).

L'edizione 2010 ha visto crescere il numero degli istituti di istruzione superiore che hanno partecipato e il numero dei centri di ricerca, presenti sul territorio regionale in Toscana, che si sono fatti promotori di iniziative. La distribuzione degli eventi è stata ancor più capillare rispetto alle edizioni precedenti di Pianeta Galileo e la partecipazione delle scuole interessate alle iniziative in programma non si è esaurita in occasioni isolate, suggerendo per il futuro l'opportunità di percorsi formativi che, oltre a proporre tematiche non incluse nei curricula, sviluppino quello spirito esplorativo e collaborativo che fin dalla prima edizione nel 2004 la manifestazione si propone di coltivare.

Le modalità comunicative sono state varie, come attestano i contributi al presente volume, andando da "lezioni-incontro" che offrono una succinta panoramica su particolari aree di ricerca a convegni sulla metodologia didattica, da resoconti sullo stato di avanzamento di un progetto di ricerca a riflessioni storiche e filosofiche sul significato di alcuni concetti fondamentali della matematica, della fisica, della chimica e della biologia, soffermandosi anche su alcune figure eminenti nella storia del pensiero scientifico.

Seppur in nuove forme, le idee di fondo da cui è nata la manifestazione sono rimaste inalterate e i saggi qui raccolti ne sono ulteriore conferma. Pianeta Galileo continua infatti a proporre ai giovani un modo di avvicinarsi al sapere che si contraddistingue

per lo stimolo a un atteggiamento di attiva interrogazione su questioni che riguardano la frontiera di ricerca di una specifica disciplina, così come su questioni di carattere più ampio, concernenti il rapporto tra crescita del sapere e crescita della coscienza civile, nell'idea di mettere sempre più in evidenza il valore che la cultura scientifica ha tanto per l'economia del paese quanto per la formazione dei cittadini. I contributi a questo volume di atti, così come quelli di volumi precedenti, servono anche ad accorgersi che la scienza non è né fredda né noiosa, che il suo avanzamento ha bisogno di sempre nuove domande, e che la passione messa nella ricerca di risposte, unita al rigore del metodo, consente di comprendere la natura sentendola al tempo stesso più vicina e più ... straordinaria (ciò dicasi anche per la *nostra* natura).

Se l'atteggiamento mentale che Pianeta Galileo vuol promuovere raramente trova sostegno nella manualistica, la strategia messa in atto per promuoverlo ne fa qualcosa di molto diverso anche dalle pur numerose iniziative che in Toscana e in altre regioni si prefiggono scopi di divulgazione, oppure sono specificamente finalizzate all'innovazione didattica in ambito scientifico attraverso percorsi di aggiornamento degli insegnanti. Le une e le altre iniziative riescono, rispettivamente, a raggiungere un più ampio pubblico e a realizzare un circolo virtuoso di più estesa durata tra le associazioni degli insegnanti di ciascun settore disciplinare, gli atenei, le società scientifiche nazionali, gli enti di ricerca (pura e applicata) e, per progetti d'interesse peculiare per il territorio, le stesse istituzioni locali. Pianeta Galileo ha un obiettivo più semplice, ma non per questo meno importante, di queste pur meritorie iniziative, cioè, quello di mettere a diretto contatto i giovani con chi fa quotidianamente ricerca e successivamente, partendo da questo contatto, suscitare quella "voglia di capire" che è essenziale non solo per fare ricerca, ma anche per sollevare domande sul significato dell'impresa scientifica e sui diversi impieghi dei suoi risultati.

Un obiettivo simile richiede uno sforzo comunicativo e lo richiede, in particolare, da chiunque si trovi a scrivere un articolo su un argomento di carattere scientifico. Coloro i quali, dopo aver preso parte all'edizione 2010 di Pianeta Galileo, hanno generosamente fornito il testo del loro intervento per inserirlo in questo volume di atti si sono trovati, dunque, di fronte a un compito arduo; lo hanno affrontato cercando sia di esprimersi in modo comprensibile anche da non addetti ai lavori sia di stimolare l'interesse del lettore per l'argomento.

Come nel caso dei volumi precedenti, i materiali qui raccolti vanno oltre la mera documentazione di quanto è stato fatto in Pianeta Galileo 2010, proponendosi come strumenti di una riflessione che non si esaurisce nell'evento e, come i contributi ai volumi precedenti degli atti, anche questi intendono aprire una porta su temi talvolta poco frequentati, prospettano un nuovo modo di avvicinarsi a un argomento, aiutano a capire le radici storiche di un problema, e ci fanno scoprire un patrimonio di umanità in chi, ieri come oggi, dedica la vita alla ricerca.

Come curatore di questo volume, desidero ringraziare tutti gli autori per il loro prezioso contributo e per il costruttivo dialogo che ho avuto con ciascuno di essi nelle

varie fasi editoriali che hanno portato alla realizzazione dell'opera. Un grazie particolare a Marco Massai per l'aiuto nella collazione dei materiali relativi ai convegni qui documentati e a Patrizio Suppa per la precisione del lavoro grafico.

PROSPEZIONI



Matematica

MATEMATICA NASCOSTA¹

RICCARDO RICCI

Dipartimento di Matematica, Università di Firenze

Nell'esperienza quotidiana l'espressione "digitale" è talmente comune che forse si è perduto il senso di questo aggettivo. "Digitale", nel senso che gli si attribuisce parlando di "immagini digitali" o di "musica digitale" è una delle tante parole di origine latina reimportate in italiano tramite l'inglese: in questo caso la parola "digit", che ha lo stesso significato dell'italiana "cifra". Quindi "digitale" è tutto quello che viene affidato per la conservazione e la fruizione alla codifica (e decodifica) tramite una successione di numeri (di 0 e 1). È abbastanza ovvio che in questi processi la matematica debba avere la sua parte accanto all'informatica (anche senza voler pensare a quest'ultima come a una forma moderna della matematica stessa). Ma per quasi tutti gli utenti del "mondo digitale" non è per niente chiaro quale e quanta matematica sia coinvolta nella visione di una fotografia sulla schermo di un computer o nell'ascolto di una brano musicale su Ipod.

Scopo di questa lezione è quello di far emergere una parte della matematica che giace nascosta nella fruizione "digitale" delle immagini.

1. La fotografia digitale

Oggi la fotografia digitale ha quasi completamente soppiantato il vecchio procedimento fotografico basato sulla pellicola fotosensibile, tanto che il 30 dicembre 2010 a Pearson nel Kansas è stato sviluppato l'ultimo rotolino di pellicola Kodachrome, la più usata pellicola per foto a colori.

In una fotografia digitale possiamo individuare tre processi fondamentali. Il primo è quello ottico, del tutto analogo a quello delle vecchie macchine fotografiche, che consente di formare l'immagine su una superficie (la pellicola nella vecchia foto, il "sensore elettronico" per la foto digitale).

Il sensore è una griglia occupata da minuscoli semiconduttori (CCD o CMOS nello stato dell'arte attuale) il cui scopo è trasformare l'intensità della luce in un segnale elettrico. Questo viene a sua volta trasformato in un numero (questo avviene direttamente nel sensore nella tecnologia CMOS). I colori vengono "suddivisi" in tre colori fondamentali: rosso, verde e blu – *red, green, blue*, da cui la sigla RGB, in inglese – catturati da tre differenti sensori adiacenti. Il luogo da essi occupato è comunemente detto pixel. Una fotocamera di oggi (per uso meno che amatoriale) ha una "risoluzione" di almeno 10 megapixel, ovvero di dieci milioni di pixel.

¹ Lezione tenuta a Firenze il 5 novembre 2010 presso il Liceo Classico Michelangiolo, nell'ambito dell'edizione 2010 di Pianeta Galileo.

Il terzo processo è lo stoccaggio di tutti questi numeri in un file. Il file prodotto (nel formato detto RAW) ha una dimensione ragguardevole. Infatti, ogni pixel produce tre numeri (in formato binario, cioè fatti da 0 e 1) che rappresentano l'intensità del rispettivo colore. Questa intensità è suddivisa in una scala che dipende da quanti bit sono dedicati a ogni colore (si usa la sigla bpp, bit per pixel). Una buona fotocamera usa 8 bit per colore (quindi 24 bpp) permettendo così di rappresentare un totale di 2 elevato alla 24, ovvero circa 16,8 milioni di colori. Quindi un file RAW per una foto occupa circa 240 milioni di bit, ovvero circa 30 Megabyte per ogni foto. Nonostante le capacità di memoria sempre più grandi dei dispositivi odierni, questa è una dimensione veramente grande. La grande dimensione di questi file è un difetto molto grave se si vogliono trasferire queste immagini tramite Internet.

Si pone quindi il problema di come ridurre la dimensione dei file (cioè dell'informazione "bruta" legata a ogni foto) senza un'eccessiva perdita di qualità delle immagini. A questo scopo sono nati vari algoritmi di compressione. Alcuni sono basati sulla creazione di "dizionari" che assegnano un "nome" (breve) a una serie di lunghezza fissata di bit: più sequenze uguali ci sono nel file (per esempio, se si ha una foto con molte zone di colore uniforme) più ci saranno serie uguali di bit, tutte condensate da un solo nome. Su questa strategia, che potremmo definire "informatica", si basano i formati GIF e PNG.

Ma il formato di compressione più noto per le fotografie a colori è certamente il formato JPG (o JPEG, acronimo di Joint Photographic Experts Group, la sigla del gruppo di esperti che creò lo standard verso la metà degli anni Ottanta).

Il formato JPEG si basa essenzialmente su una teoria della matematica classica, ovvero la trasformata e le serie di Fourier.

Le serie di Fourier appaiono per la prima volta nel lavoro dedicato dal matematico francese J.B. Joseph Fourier alla teoria della propagazione del calore.² In tale lavoro, Fourier egli sostiene che ogni funzione di una variabile può essere ottenuta come la somma di infiniti termini del tipo seno e coseno della variabile stessa, ciascuno moltiplicato per un'opportuna costante. Queste costanti, dette *coefficienti di Fourier* della funzione, permettono di identificare univocamente la funzione stessa e quindi la loro conoscenza equivale alla conoscenza della funzione di partenza.

Questa scomposizione di una funzione in somma di funzioni trigonometriche può essere fatta anche per funzioni di due variabili (x, y), moltiplicando funzioni trigonometriche della x con funzioni trigonometriche della y . Nella nostre fotografie digitali, il file in formato RAW può essere pensato come la raccolta dei valori che una funzione delle variabili (x, y), rispettivamente l'ascissa e l'ordinata dei punti del sensore, assume nei punti della griglia corrispondenti ai pixel (in realtà le funzioni sono tre, una per ogni colore della terna RGB). Ora possiamo pensare di sviluppare questa funzione usando la tecnica delle serie di Fourier. I dati del nostro file RAW sono quindi trasfor-

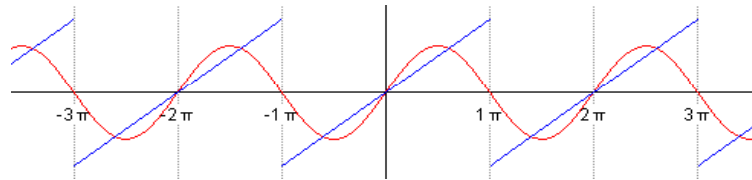
2 J.B.J. Fourier, *Mémoire sur la propagation de la chaleur dans les corps solides*, 1807, e *Théorie analytique de la chaleur*, 1822

mati nei *coefficienti di Fourier* di una opportuna funzione. Non sembra di aver fatto molti progressi, visto che abbiamo appena detto che le somme sono fatte da infiniti termini e quindi abbiamo infiniti coefficienti di Fourier.

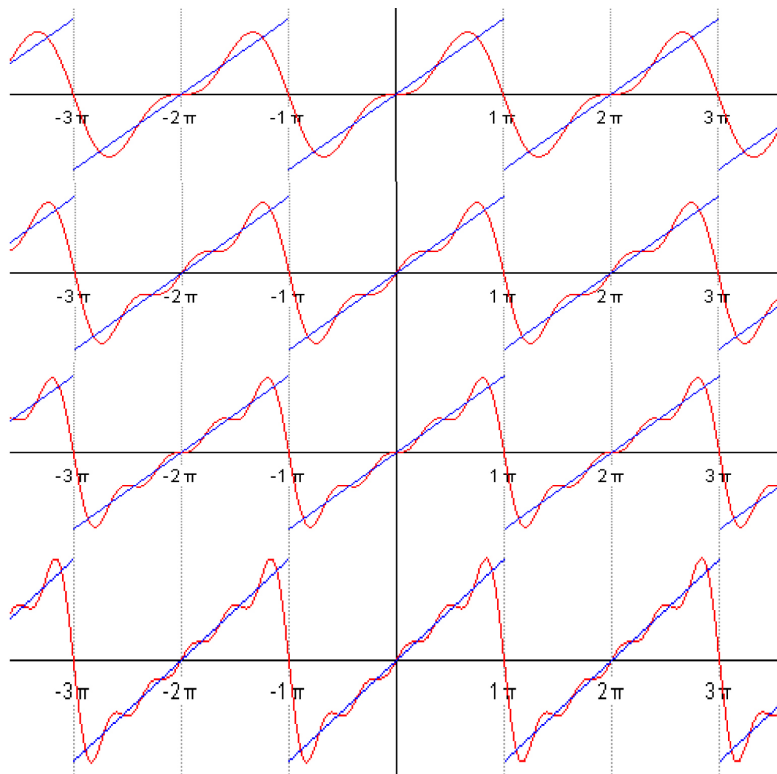
Ma quello che è importante per il nostro problema è che i coefficienti di Fourier decrescono molto rapidamente, ossia solo un numero molto piccolo di essi ha valori sensibilmente diversi da zero, e tutti gli altri (infiniti) termini possono essere trascurati. Perciò, conservando solo pochi termini della somma otteniamo una approssimazione della funzione che ha una forte somiglianza con la soluzione di partenza. Il punto chiave è che, se ci accontentiamo di quest'approssimazione, basta ricordarsi i pochi coefficienti di Fourier che abbiamo selezionato al posto di tutti i valori della funzione contenuti nel file RAW.

Vediamo un esempio (unidimensionale) per capire come funziona l'approssimazione.

Prendiamo la funzione $f(x)=x$ nell'insieme $(-\pi, \pi)$ ed estendiamola periodicamente fuori da questo intervallo, rappresentata in blu nel grafico



Nel grafico abbiamo sovrapposto (curva in rosso) il primo addendo della somma di Fourier. Continuiamo aggiungendo via via i termini successivi fino al quinto addendo.



Nell'ultima figura abbiamo già un buon accordo tra il grafico della funzione originaria e la sua approssimazione di Fourier. Quello che conta ora è che il grafico rosso è ricostruibile ricordando solo i coefficienti di Fourier (che in questo caso sono 2, -1, 2/3, -1/2 e 2/5) tramite la formula

$$\sum_{n=1}^5 (-1)^{n+1} \frac{2}{n} \sin(nx)$$

Al posto delle valutazioni della funzione su tutti i punti della nostra griglia, ora dobbiamo ricordare solo i coefficienti dello sviluppo, con un notevole risparmio di memoria (dimensione del file).

C'è tuttavia una sostanziale differenza tra la curva blu e quella rossa: la prima è discontinua, ovvero mostra salti bruschi tra tratti di grafico in punti di ascissa vicina, la seconda è una curva continua anche se con tratti molto ripidi. Quando questa differenza viene trasformata nella "colorazione" dei differenti pixel, la figura generata dal formato JPEG mostra dei pixel colorati in zone dove non dovrebbero esserlo e viceversa pixel non sufficientemente colorati in zone che magari dovrebbero risultare uniformemente colorate (ciò avviene nelle zone di transizione da un colore all'altro). Questo fenomeno è particolarmente evidente se si salva in formato JPEG un documento che contiene caratteri a stampa o disegni fatti da curve molto nette (come questa pagina), mentre diventa assai poco percettibile nelle fotografie, dove i colori tendono naturalmente a "sfumare" uno nell'altro. Tutto ciò ha una qualche importanza pratica: se dovette digitalizzare un documento scritto, il formato JPEG dà risultati piuttosto deludenti (la scrittura risulta "sbavata") mentre una codifica con il formato PNG dà un risultato di gran lunga migliore per la leggibilità del documento (i grafici e la formula riportate qui sopra sono state digitalizzate in formato PNG). La situazione si ribalta nelle foto: per ottenere risultati paragonabili all'effetto visivo di un file JPEG, la codifica PNG (o GIF) produce file di dimensioni considerevolmente maggiori.

L'analisi di Fourier è alla base anche delle codifiche digitali dei segnali sonori. La più comune codifica attuale (il formato MP3) è ottenuta con l'algoritmo di codifica MPEG che lavora sul cosiddetto dominio delle frequenze, ovvero sulla rappresentazione del segnale sonoro non in funzione del tempo (la rappresentazione "naturale") ma in funzione delle componenti del segnale ottenute tramite una trasformata di Fourier (è una generalizzazione dei coefficienti di Fourier di cui abbiamo parlato). Tuttavia il processo è molto più complesso di quanto sia quello per la digitalizzazione delle immagini e non può essere descritto in questa sede.

2. La *computer graphics*

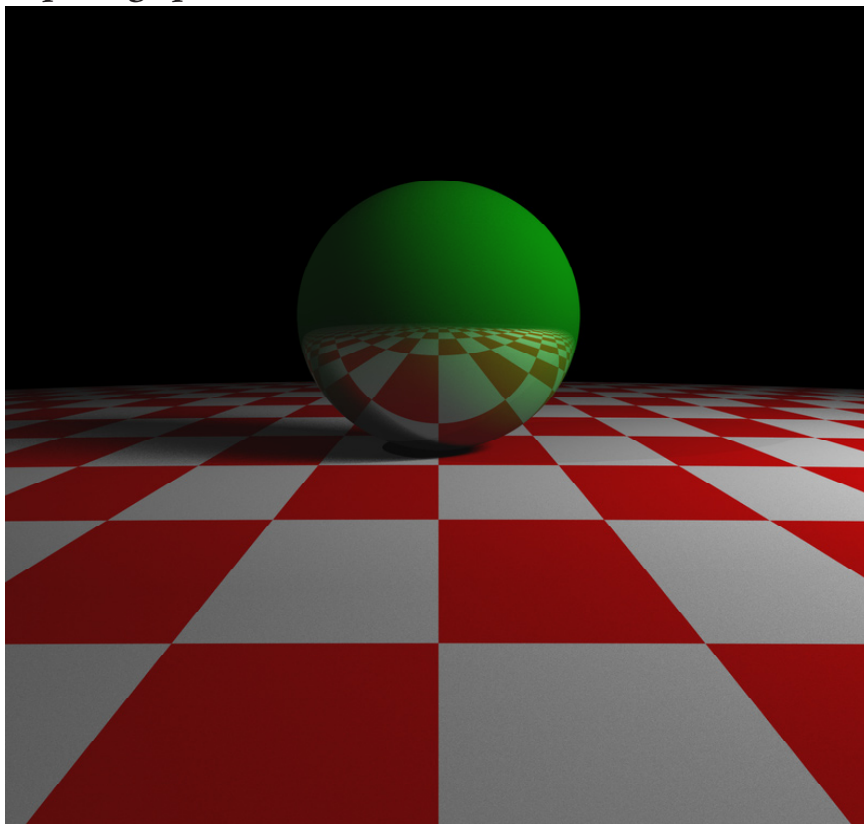


Figura 1. Figura realizzata dagli studenti del corso di *Computer Graphics* tenuto da Alberto Mancini (Dipartimento di Matematica, Università di Firenze).

La *computer graphics* (ormai il nome inglese ha soppiantato ogni tentativo di traduzione italiana) ha per scopo quello di *creare* immagini digitali senza che queste debbano essere ottenute da fotografie o filmati di oggetti reali. L'importanza, in primis commerciale, di quest'attività è stata illustrata anche in una lezione di Pianeta Galileo del 2009,³ cui rimando per molte interessanti osservazioni generali sul “mestiere” di grafico. Questa lezione contiene una descrizione di molta della matematica coinvolta nella *computer graphics*, in particolare la geometria proiettiva e l'interpolazione polinomiale. Il ruolo della prima è essenzialmente quello di gestire la rappresentazione prospettica delle figure nello spazio, necessaria quando si voglia ottenere un effetto realistico come nelle due figure qui riportate. I suoi principi fondamentali datano dai grandi pittori e teorici della pittura del Rinascimento: Brunelleschi, Alberti, Piero della Francesca (autore di un trattato matematico sulla prospettiva).

Come si costruisce un'immagine al computer? Il primo passo è dare una descrizione matematica della forma degli oggetti. Per prima cosa dobbiamo individuare nel piano rappresentativo (che poi verrà visualizzato sullo schermo) gli oggetti presenti nella sce-

³ Marco Franciosi, La matematica dei videogiochi, pp. 81-94 di *Pianeta Galileo* 2009, a cura di A. Peruzzi, Consiglio regionale della Toscana, Firenze 2009.

na. Se ci riferiamo alla Figura 1, abbiamo una sfera e una sorta di “tappeto” quadrettato. La sfera sarà descritta da una griglia di punti che uniremo con dei segmenti ottenendo una cosa del tipo raffigurato nella Figura 2.

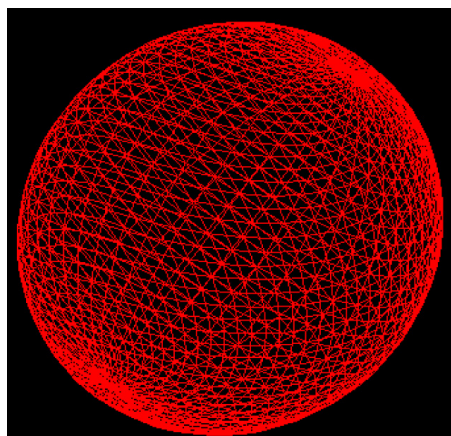


Figura 2.

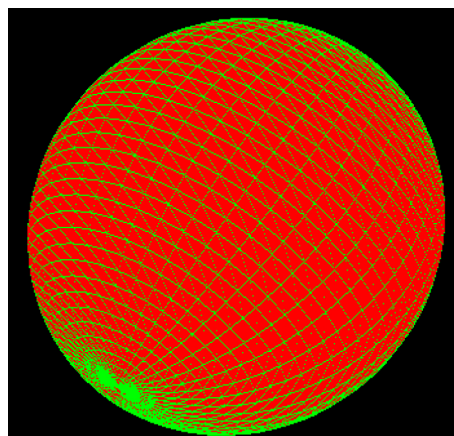


Figura 3.

Ma la sfera è un oggetto solido, quindi possiamo vedere solo i punti che stanno dalla parte dell’osservatore. Dobbiamo quindi rimuovere le “linee nascoste” ovvero quelle linee che delimitano parti della superficie che si trovano “dietro” (oppure che sono nascoste da altri oggetti). Questo è abbastanza facile da fare per un oggetto convesso come una sfera: la superficie è rimossa se la sua *normale esterna*, cioè la direzione perpendicolare alla superficie nel verso uscente dall’oggetto, forma un angolo acuto con la direzione dello sguardo dell’osservatore. Lo si può fare al computer tramite un algoritmo matematico noto come *backface culling*.

Più complicato è eliminare parti nascoste di oggetti non convessi. Per esempio, se rappresentiamo un bicchiere, possiamo vedere alcune parti della superficie interna, ma altre saranno nascoste dal resto del bicchiere anche se la normale esterna guarda verso l’osservatore. Stessa cosa se dobbiamo eliminare parti di un oggetto coperte alla vista da un altro oggetto presente nella scena. In questo caso si usa l’algoritmo detto “del pittore” che consiste nel rappresentare prima gli oggetti (parti di oggetti) più lontani e poi “dipingendoci sopra” quelli più vicini (*Z-sorting*). Si deve quindi decidere “matematicamente” quali sono gli oggetti più lontani, e per far ciò dobbiamo “ricordarci” della coordinata nella direzione della profondità (l’operazione è molto costosa dal punto di vista del calcolo perché si deve lavorare al livello dei singoli pixel e viene spesso implementata in un hardware dedicato, con acceleratori grafici).



Figura 4. Da M. Slater, *The radiance equation*.

Ma per raggiungere un effetto realistico è necessario integrare al disegno gli effetti della luce. Poiché gli oggetti rappresentati sono “nati dal nulla”, cioè ottenuti tramite descrizioni matematiche degli oggetti e del loro posizionamento nello spazio, è necessario che anche l’illuminazione di questi oggetti venga “creata” da un algoritmo matematico.

Per capire la complessità del problema basta guardare con attenzione le due immagini qui presentate: Fig. 1 e Fig. 4. La seconda (che NON è una fotografia digitalizzata, ma un’immagine creata direttamente al computer) è di impressionante realismo, forse un po’ troppo complessa per essere descritta nella sua interezza. Va però notata una sua caratteristica fondamentale: la luce proviene dall’alto a sinistra, per chi guarda, e illumina *direttamente* solo una parte della scena. La parte sinistra del portico si trova in ombra, ma è a sua volta illuminata dalla luce (parzialmente) riflessa dalle zone illuminate. A sua volta, per quanto in misura minore, anche gli oggetti illuminati di riflesso rinvieranno la luce nelle altre parti della scena, e così via.

Una situazione scenograficamente più semplice è presente nella Fig. 1 (risultato di una “esercitazione” di un corso tenuto da A. Mancini presso il Dipartimento di Matematica dell’Università di Firenze). Qui la luce proviene sempre dall’alto, ma dalla destra della scena. Colpisce direttamente una parte del pavimento e una parte della sfera che vi è appoggiata sopra. La sfera s’immagina che debba avere una superficie riflettente (almeno parzialmente) visto che la sua parte inferiore rispecchia il disegno

del pavimento. Anche qui si ha un gioco di riflessione parziale della luce che illumina le parti in ombra.

Dobbiamo ricordarci che le figure qui riprodotte sono la visualizzazione di file numerici a loro volta prodotti “matematicamente”. Se gli effetti che vi si possono osservare sono realistici, ciò è ottenuto grazie alla possibilità di dare un “buon” *modello matematico* della propagazione, riflessione e diffusione della luce. La luce è un fenomeno fisico complesso che presenta aspetti che possono essere descritti talora in termini di onde luminose e talora tramite particelle (fotoni). Nel modello usato si fa uso del concetto di *radianza*, una misura dell’energia luminosa che si assume come propagantesi in raggi luminosi che, quando incontrano un oggetto, vengono in parte assorbiti e in parte riemessi dalla superficie dell’oggetto secondo caratteristiche tipiche della superficie dell’oggetto stesso (trascuriamo qui gli effetti di “attraversamento” di oggetti “trasparenti”).

L’equazione che regola questo comportamento è nota in *computer graphics* con il nome di *rendering equation*, che esprime una particolare forma di conservazione dell’energia. Se indichiamo con L la radianza, abbiamo che a ogni punto della superficie e in ogni direzione, la luce uscente L_o è la somma della luce emessa L_e e della luce riflessa. Questa, a sua volta, è data dalla luce incidente L_i da tutte le direzioni, moltiplicata per una funzione di riflessione dipendente dalle caratteristiche della superficie e per il coseno dell’angolo di incidenza. Tutte queste quantità dipendono dalla lunghezza d’onda della luce stessa (dal “colore”). Il risultato è la seguente equazione di rendering

$$L_o(\mathbf{x}, \omega, \lambda, t) = L_e(\mathbf{x}, \omega, \lambda, t) + \int_{\Omega} f_r(\mathbf{x}, \omega', \omega, \lambda, t) L_i(\mathbf{x}, \omega', \lambda, t) (-\omega' \cdot \mathbf{n}) d\omega'$$

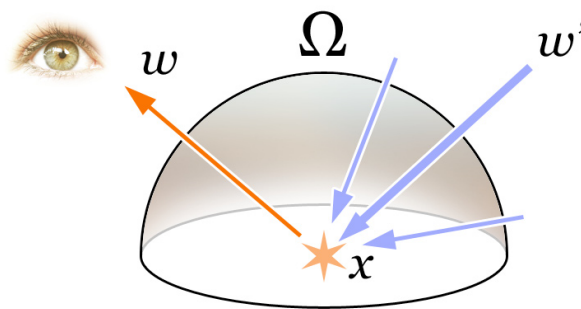


Figura 5. L’equazione di rendering.

L’equazione di rendering è un caso di equazione integrale, un tipo di equazione molto studiato in fisica matematica (un altro celebre esempio è l’equazione di Boltzmann della meccanica statistica).

Per determinare la corretta illuminazione di una scena dobbiamo trovare la soluzione dell’equazione di radianza in funzione della sorgente che illumina la scena (la luce “esterna”) e della forma, posizione e caratteristiche degli oggetti presenti, calcolando la luce che finisce nel punto in cui si trova l’occhio dell’osservatore.

La soluzione tuttavia può essere costruita solo in modo approssimato. Negli anni

sono state sviluppate diverse strategie di soluzione, molte delle quali si basano sul principio del Metodo Montecarlo, che consiste nel generare un numero elevato di prove casuali (in questo caso si tratta di raggi luminosi) e fare una sorta di media dei risultati ottenuti. Questi metodi (*ray tracing*, *path tracing*, *Metropolis light transport*) richiedono un enorme sforzo di calcolo e quindi molto tempo per ottenere un'immagine realistica. Ciò li rende adatti solo per immagini statiche, mentre non possono essere utilizzati per immagini in movimento come quelle dei videogiochi.

PROBABILITÀ E ILLUSIONI

ENNIO PERES

Giornalista, esperto di giochi della mente

1. Concetti di base

In matematica, viene definito *Calcolo delle probabilità* il complesso di regole e di procedimenti con i quali si riesce ad avere informazioni utili, in merito al verificarsi di determinati eventi, il cui esito è legato al caso.

L'evolversi di questa disciplina ha consentito, negli ultimi tre secoli, non solo di affrontare con maggiore consapevolezza molti problemi pratici, ma soprattutto di ampliare in maniera determinante i confini di diversi campi del sapere umano, dalla fisica alla biologia, dalla chimica alla psicologia, dalla geologia alla sociologia.

I primi concetti del *Calcolo delle probabilità* sono stati elaborati, per opera di alcuni sommi scienziati (come Gerolamo Cardano, Galileo Galilei e Blaise Pascal), analizzando delle questioni relative al lancio dei dadi. In generale, infatti, le regole e gli strumenti dei giochi aleatori, essendo sintetici e lineari, si prestano a essere facilmente interpretati, mediante un modello matematico schematico e funzionale. Per tale motivo, nell'esposizione degli elementi principali di tale teoria, si ricorre spesso ad esempi basati sull'utilizzo di materiale da gioco (carte, dadi, palline colorate, ecc.).

Per acquistare confidenza con questa importante branca della matematica, è necessario chiarire i fondamentali concetti di *probabilità* e di *frequenza*, su cui si basa.

Probabilità di un evento: è un valore teorico, potenzialmente ricavabile con diversi procedimenti; corrisponde a una stima, formulata a priori, della possibilità che un determinato evento ha di verificarsi.

Esempio. Prima di lanciare una moneta in aria, possiamo ragionevolmente stimare che la probabilità che cada, ad esempio, dal lato «testa» è uguale a: $1/2 = 0,5$.

Indipendentemente dal metodo usato per ricavarlo, il valore di una probabilità viene espresso mediante un numero decimale, compreso tra 0 e 1. Ovviamente, più è grande questo valore, maggiore è il grado di fiducia che si ripone nel verificarsi dell'evento in questione.

Frequenza di un evento: è un valore pratico, che si ricava al termine di un'apposita sperimentazione; corrisponde al valore che si ottiene effettuando una divisione tra la quantità di volte in cui un determinato evento si è verificato e la quantità totale di prove effettuate.

Esempio. Se dopo aver lanciato una moneta 100 volte, si rileva che la «testa» è uscita 50

volte, si può affermare che la frequenza di uscita di «testa» è uguale a: $50/100 = 1/2 = 0,5$.

Siccome il numero di successi ottenuti non può essere superiore a quello delle prove effettuate, anche il valore di una frequenza corrisponde a un numero decimale compreso tra 0 e 1.

Mentre, in relazione a un determinato evento, il valore della probabilità corrisponde a un numero fisso (ricavato mediante un calcolo matematico), quello della frequenza cambia al variare della quantità di prove effettuate e di quella dei successi ottenuti. In definitiva, quando si calcola la probabilità di un evento, si cerca di valutare a priori la frequenza che si potrebbe ottenere, effettuando un considerevole numero di prove.

Nota. In molte applicazioni pratiche, si usa esprimere i valori di probabilità e frequenza, non mediante numeri decimali, ma sotto forma di frazioni; per cui, ad esempio, si scrive $1/10$, invece di $0,1$. Inoltre, per poter usufruire di un comodo parametro di riferimento, spesso si ricorre a frazioni con denominatore 100; di conseguenza, nel caso precedente, non si scriverebbe $1/10$ (o $0,1$) ma $10/100$ o, più sinteticamente: 10% (10 per cento).

2. Legge dei grandi numeri

L'esistenza di uno stretto legame tra i concetti di probabilità e frequenza è sancita dalla cosiddetta *Legge dei grandi numeri*, enunciata per la prima volta verso i primi del Settecento, da Jakob Bernoulli.

Questo fondamentale teorema matematico afferma sostanzialmente che, tanto più è alta la quantità di prove effettuate (al limite, infinita), tanto più la frequenza di un determinato evento tende alla relativa probabilità.

Un tale presupposto è molto importante, perché consente di assumere direttamente, come valore della probabilità di un evento, quello della frequenza ottenuta dopo aver eseguito un'adeguata quantità di prove in merito.

Se dopo aver lanciato una moneta 100 volte, si rileva che la «testa» è uscita 50 volte, si può affermare che la probabilità di uscita di «testa» è uguale alla frequenza riscontrata, ovvero a $50/100 = 1/2 = 0,5$.

Ovviamente, il ricorso a un metodo del genere risulta particolarmente utile in tutte le situazioni in cui non è facile analizzare a priori le caratteristiche dell'evento che si intende studiare.

Il teorema di Bernoulli, ha favorito la nascita e lo sviluppo della *statistica*, ovvero di quella disciplina che descrive le caratteristiche di un determinato fenomeno, analizzando un insieme di dati raccolti su di esso.

3. Probabilità semplice

Secondo la definizione più antica (detta *classica*), la probabilità di un determinato evento è uguale alla quantità dei casi favorevoli a quell'evento, diviso la quantità di tutti i casi possibili (a condizione che questi siano tutti ugualmente possibili).

Esempio. Se si vuole determinare la probabilità di estrarre un K da un mazzo di 52 carte (effettuando un solo tentativo), bisogna considerare che:

- i casi favorevoli sono: 4 (i K contenuti nel mazzo),
- i casi possibili, tutti ugualmente possibili, sono 52 (le carte dell'intero mazzo).

Il valore della probabilità richiesta, quindi, è uguale a $4/52 = 1/13 = 0,0769$.

Un evento viene detto *certo*, quando tutti i casi possibili sono ad esso favorevoli.

La probabilità relativa a un evento certo è uguale a 1; infatti, se i casi possibili sono N, anche quelli favorevoli devono essere N; quindi, si ha: $N/N = 1$.

Esempio. Se vogliamo calcolare la probabilità di estrarre una carta di cuori da un mazzetto composto da 13 carte di cuori, dobbiamo considerare che:

- i casi favorevoli sono 13 (le carte di cuori contenute nel mazzetto);
- casi possibili sono 13 (le carte dell'intero mazzetto).

Il valore della probabilità richiesta, quindi, è uguale a: $13/13 = 1$ (di conseguenza, un evento del genere è certo).

Un evento viene detto *impossibile*, quando nessuno dei casi possibili è ad esso favorevole. La probabilità che si verifichi un evento impossibile è uguale a 0; infatti, se i casi possibili sono N, quelli favorevoli sono 0; quindi, si ha $0/N = 0$.

Esempio. Se vogliamo calcolare la probabilità di estrarre una carta di picche da un mazzetto composto da 13 carte di cuori, dobbiamo considerare che:

- i casi favorevoli sono 0 (le carte di picche contenute nel mazzetto);
- i casi possibili sono 13 (le carte dell'intero mazzetto).

Il valore della probabilità richiesta, quindi, è uguale a: $0/13 = 0$ (di conseguenza, un evento del genere è impossibile).

Siccome un evento non può mai essere più certo del certo, né più impossibile dell'impossibile, se ne deduce che il valore della probabilità, come abbiamo già visto, è rappresentato da un numero compreso tra 0 e 1.

Un evento viene detto *improbabile*, quando il valore della sua probabilità è vicino a 0, mentre viene detto *probabile*, quando il valore della sua probabilità è vicino a 1.

Esempio. La probabilità di indovinare l'uscita dell'unica sestina vincente al *Superenalotto*, fra tutte le 622.614.630 sestine possibili, è uguale a $1/622.614.630 = 0,0000000016$. Siccome questo valore è molto vicino a 0, si può affermare che il relativo evento è assai improbabile.

Viceversa, la probabilità di non indovinare l'uscita dell'unica sestina vincente al *Superenalotto* è uguale a $622.614.629/622.614.630 = 0,9999999984$. Siccome questo valore è molto vicino a 1, si può affermare che il relativo evento è assai probabile.

Bisogna stare molto attenti a non confondere il concetto di *improbabile* con quello di *impossibile*, né il concetto di *probabile* con quello di *certo*, come comunemente si tende a fare.

Infatti:

- un evento *impossibile* non si verifica mai, mentre un evento anche molto *improbabile*, qualche volta, pur se di rado, può verificarsi (ogni tanto, può capitare che qualcuno riesca a pronosticare l'uscita dell'unica sestina vincente al *Superenalotto* ...);
- un evento *certo* si verifica sempre, mentre un evento anche molto *probabile* qualche volta, pur se di rado, può non verificarsi (ogni tanto, può capitare che qualcuno non sbagli nel pronosticare l'uscita dell'unica sestina vincente al *Superenalotto* ...).

4. Probabilità totale

Due o più eventi vengono detti *incompatibili* quando l'avverarsi di uno qualsiasi di essi esclude l'avverarsi dell'altro (o degli altri).

Esempio. Al gioco del *Lotto*, l'estrazione di un numero pari è incompatibile con quella di un numero dispari, ma non lo è con quella di un numero superiore a 45 (in quanto, ci sono diversi numeri pari, maggiori di 45).

Se un evento è costituito dall'unione di vari eventi incompatibili, la sua probabilità (detta *totale*) è uguale alla somma delle probabilità di tutti gli eventi di cui è composto.

Esempio. Se si vuole calcolare la probabilità che, estraendo una sola carta da un mazzo che ne contiene 52, questa sia una figura o un asso, si può ragionare nel seguente modo:

- i due eventi in questione sono incompatibili tra loro; infatti, l'estrazione di una determinata carta esclude che ne venga estratta una delle altre;
- un mazzo di 52 carte contiene 12 diverse figure; quindi la probabilità che venga estratta una di queste è uguale a

$$P(\text{figura}) = 12/52 = 3/13;$$

- un mazzo di 52 carte contiene 4 diversi assi; quindi, la probabilità che venga estratto uno di questi è uguale a

$$P(\text{asso}) = 4/52 = 1/13.$$

Di conseguenza, la probabilità di estrarre una figura o un asso, è uguale a

$$P(\text{figura o asso}) = 3/13 + 1/13 = 4/13 = 0,3077$$

Nota. Nel semplice caso preso in esame, il risultato ottenuto si può giustificare considerando che in un mazzo di 52 carte ci sono 12 figure e 4 assi; quindi, i casi favorevoli all'evento in questione sono: $4+12 = 16$. Di conseguenza, la probabilità di estrarre una figura o un asso, può essere anche data direttamente da

$$P(\text{figura o asso}) = 16/52 = 4/13 = 0,3077.$$

5. Probabilità composta

Due (o più) eventi non incompatibili vengono detti *indipendenti*, quando l'avverarsi di uno qualsiasi di essi non influenza l'avverarsi dell'altro (o degli altri).

Esempio. Se si effettua una serie di estrazioni di palline da un sacchetto, riponendoci ogni volta le palline estratte, l'esito di ciascuna estrazione non influenza in alcun modo quello delle altre (se invece, le palline non vengono rimesse ogni volta nel sacchetto, ogni estrazione influenza le successive, perché modifica la quantità di palline in esso presenti).

Se un determinato evento risulta dalla concomitanza (simultanea o successiva) di più eventi indipendenti, la sua probabilità (detta *composta*) è uguale al prodotto delle probabilità dei singoli eventi indipendenti.

Esempio. se si vuole determinare la probabilità di estrarre due K di cuori, effettuando due distinte estrazioni da due mazzi di 52 carte, si può ragionare nel seguente modo:

- i due eventi in questione sono indipendenti; infatti, l'estrazione di una carta da uno qualsiasi dei due mazzi non può influire in alcun modo sull'esito delle altre estrazioni;
- un mazzo da cinquantadue carte contiene un solo K di cuori; quindi, la probabilità di estrarre questa carta da uno qualsiasi dei due mazzi è data da

$$P(\text{K di cuori}) = 1/52.$$

- Perciò, la probabilità dell'evento corrispondente alla concomitanza dei due eventi dati, è uguale al prodotto delle probabilità, cioè,

$$P(\text{due K di cuori}) = (1/52)(1/52) = 1/2704 = 0,0004.$$

Nota. Nel semplice caso preso in esame, il risultato ottenuto si può giustificare, considerando che l'insieme di tutte le diverse coppie di carte, componibili con due mazzi da cinquantadue, è uguale a: $52 \times 52 = 2.704$; mentre, tra queste, una sola corrisponde a K di cuori.

Di conseguenza, la probabilità di estrarre due K di cuori da due mazzi di cinquantadue carte, può essere anche data direttamente da

$$P(\text{due K di cuori}) = 1/2.704 = 0,0004.$$

6. Probabilità opposta

Se la probabilità che un evento si verifichi è uguale a P, la probabilità P' che l'evento non si verifichi (detta *probabilità opposta*), è data da

$$P' = 1 - P$$

Esempio. Siccome la probabilità di estrarre un K, da un mazzo di 52 carte, è uguale a:

$$P(\text{K}) = 4/52 = 1/13,$$

la probabilità di *non* estrarre un K è uguale a:

$$P(\text{non K}) = 1 - 1/13 = (13-1)/13 = 12/13.$$

Nota. Nel semplice caso preso in esame, il risultato ottenuto si può giustificare, considerando che in un mazzo di 52 carte ce ne sono 48 diverse da un K e che, quindi, la probabilità di non estrarre un K può essere anche data direttamente da:

$$P(\text{non K}) = 48/52 = 12/13.$$

7. Definizione di probabilità

È singolare constatare che, nel corso degli oltre tre secoli della propria storia, la teoria del *Calcolo delle probabilità* è riuscita a svilupparsi in modo considerevole, nonostante non fosse stata mai trovata una definizione convincente e non ambigua del concetto stesso di probabilità.

Secondo la definizione più antica (detta *classica*), infatti, la probabilità di un evento corrisponde al rapporto tra il numero dei casi favorevoli all'evento e il numero di tutti i casi possibili, sottintendendo che questi debbano essere tutti *ugualmente probabili*.

Come si può notare, una tale enunciazione ha bisogno di appoggiarsi a un concetto di probabilità preesistente. Matematicamente, però, non è accettabile che una definizione si basi sullo stesso concetto che dovrebbe definire ...

In base a una definizione più pragmatica (detta *frequentistica*), la probabilità di un evento corrisponde alla frequenza dei successi che si ottengono in una successione di prove relative a quell'evento, tutte effettuate nelle stesse condizioni. Questa definizione, molto utile in campo statistico, presenta il difetto di non essere operativa nell'analisi di eventi non ancora verificatisi.

All'inizio degli anni Settanta, il matematico italiano Bruno De Finetti ha contribuito a dare al concetto di probabilità un significato più sostanziale e concreto.

Secondo la definizione da lui proposta (detta *soggettiva*) la probabilità di un evento corrisponde al grado di fiducia (variabile da persona da persona) che si pone nel verificarsi dell'evento stesso.

In base a questa rivoluzionaria impostazione, la probabilità non deve essere più vista come una caratteristica insita nei fattori che regolano il verificarsi di un determinato evento, ma solo una personale valutazione delle loro implicazioni.

Questa impostazione, tra l'altro, consente di utilizzare i risultati legati alle altre due definizioni (*classica* e *frequentistica*), adottandoli in base a una scelta soggettiva (senza entrare in contraddizione, quindi, con la definizione assunta).

È bene precisare, comunque, che l'attribuzione soggettiva della probabilità non deve essere confusa con un'assoluta arbitrarietà di scelta; perché possa essere funzionale, infatti, la valutazione personale deve essere espressa nel modo più equo e coerente possibile.

8. Inganni probabilistici

Il *Calcolo delle probabilità* è la branca della matematica in cui è più facile essere tratti in inganno. Utilizzando i suoi strumenti, può capitare non solo di ottenere una soluzione

falsa e ritenerla vera, ma anche di ottenerne una vera e considerarla falsa. Spesso, infatti, i risultati cui porta appaiono paradossali, anche dopo aver esaminato con attenzione una loro rigorosa dimostrazione.

Questa insidiosa caratteristica del *Calcolo delle probabilità* è dovuta alla natura piuttosto capziosa delle problematiche di cui si occupa, ma è aggravata anche dal fatto che, spesso, la rilevazione di un eventuale errore d'impostazione, può scaturire solo da un controllo sperimentale dei risultati teorici ipotizzati. Una verifica del genere, però, non sempre è attuabile e, in ogni caso, per poter essere considerata attendibile, dovrebbe basarsi su un numero assai elevato di prove.

L'inganno in cui si cade più frequentemente riguarda il conteggio dei casi favorevoli a un determinato evento e di tutti quelli possibili. Un'operazione del genere non può essere sempre compiuta in maniera diretta (come è stato possibile fare, nei semplici esempi finora proposti); quando la quantità degli elementi a disposizione diventa troppo elevata, è necessario ricorrere all'uso di apposite formule.

9. Il paradosso dei compleanni

Una divertente conferma di come, a volte, non sia affatto facile valutare la probabilità relativa a un dato evento, riguarda la possibilità che in un determinato gruppo di persone, due di queste siano nate nello stesso giorno e nello stesso mese (anche se in anni diversi). Si stenta a credere, che, ad esempio, in un gruppo di appena 50 persone, una probabilità del genere non è del 15%–20%, come si potrebbe intuitivamente pensare, ma arriva quasi al 100%.

Quindi, se vi trovate a una riunione con 50 o più persone, potete scommettere (con la quasi certezza di vincere) che almeno due dei presenti festeggiano il compleanno nello stesso giorno (pur potendo avere età diverse).

Si può giustificare un tale paradossale risultato, elaborando un ragionamento analogo al seguente.

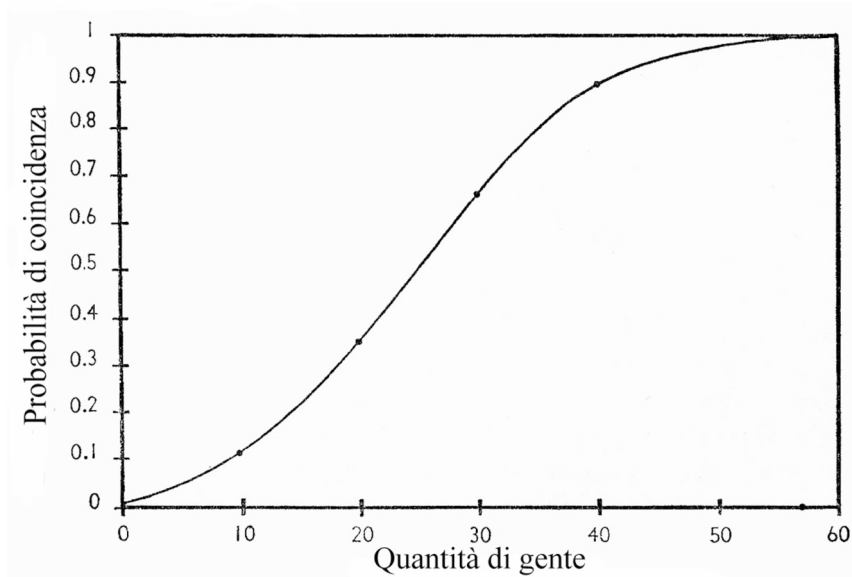
Se si prende in considerazione la probabilità Q che due persone non compiano il compleanno nello stesso giorno (escludendo, per semplicità, gli anni bisestili), si può facilmente ricavare che:

- in un gruppo di 2 persone, $Q = 365 \times 364 / 365^2$;
- in un gruppo di 3 persone, $Q = 365 \times 364 \times 363 / 365^3$;
- in un gruppo di 4 persone, $Q = 365 \times 364 \times 363 \times 362 / 365^4$;
- ...
- in un gruppo di N persone, $Q = 365 \times 364 \times 363 \times \dots \times (365 - N + 1) / 365^N$.

Si può verificare, di conseguenza, che il valore di Q , al crescere di N tende rapidamente a 0; di conseguenza, il valore della probabilità opposta (ovvero che almeno due persone compiano gli anni nello stesso giorno), tende velocemente a 1, essendo dato da

$$P = 1 - Q.$$

Il quadro completo della situazione è riassunto dal seguente diagramma, dove sull'asse delle ordinate sono riportati i valori di P (probabilità di coincidenza) e su l'asse delle ascisse i valori di N (numero di persone).



Per cercare di comprendere meglio l'assunto di questo paradosso, conviene calarsi in una situazione più familiare. Si pensi, ad esempio, a una raccolta di figurine composta da 365 pezzi; qual è la probabilità di non trovare neanche un doppione, tra le prime 50 figurine acquistate? Chi non ha perso memoria dei propri passatempi fanciulleschi, dovrebbe convenire che un'eventualità del genere è estremamente improbabile ...

10. Problemi capziosi

L'inganno in cui si cade più frequentemente, quando si calcola la probabilità relativa al verificarsi di un determinato evento, riguarda il conteggio dei casi favorevoli all'evento e di tutti quelli possibili. Questo genere di errore ha un'origine essenzialmente logica e, quindi, può scaturire anche quando i casi da prendere in considerazione sono molto pochi.

Qui di seguito sono riportati alcuni classici problemi probabilistici, apparentemente semplici, ma estremamente capziosi (nei primi due esempi, per semplicità viene supposto che la probabilità di avere un figlio maschio sia uguale a quella di avere una figlia femmina).

a. In una famiglia ci sono due soli figli, dei quali almeno uno è maschio; qual è la probabilità che l'altro figlio sia femmina?

Soluzione

Intuitivamente, si è portati a ritenere che tale probabilità sia uguale a $1/2$; una risposta del genere, però, è errata. Infatti, ci sono quattro modi possibili di avere due figli, che possono essere così indicati (M = maschio; F = femmina):

MM - MF - FM - FF

Escludendo il caso FF, i modi di avere due figli, almeno uno dei quali maschio, sono tre:

MM - MF - FM.

Come si può facilmente notare, in due casi, l'altro figlio è femmina (MF - FM), mentre in un solo caso è maschio (MM). Di conseguenza, la probabilità che l'altro figlio sia femmina è uguale a $2/3$.

Nota. La risposta $1/2$ sarebbe stata corretta se l'enunciato del problema fosse stato il seguente: «In una famiglia ci sono due soli figli, *il primo dei quali è maschio*; qual è la probabilità che l'altro figlio sia femmina?».

b. In una famiglia ci sono esattamente quattro figli; qual è la probabilità che siano due maschi e due femmine?

Soluzione

Ci sono sedici modi possibili di avere quattro figli e possono essere così indicati:

MMMM - MMMF - MMFM - MFMM - FMMM - MMFF - MFMF - FMMF

FFFF - FFFM - FFMF - FMFF - MFFF - FFMM - FMFM - MFFM.

Solo sei di questi corrispondono a due maschi e due femmine (MMFF - MFMF - FMMF - MFFM - FMFM - FFFM); di conseguenza, la probabilità che, su quattro figli, due siano maschi e due femmine, è uguale a $6/16 = 3/8$ (e non a $1/2$, come si è indotti, erroneamente, a supporre...).

c. Due amici, Andrea e Biagio, giocano a lanciare una moneta. Andrea punta sull'uscita consecutiva di due teste (TT), mentre Biagio punta sull'uscita di una croce seguita da una testa (CT). La moneta verrà lanciata tante volte, finché due risultati consecutivi non coincideranno con una delle due combinazioni scelte. Ad esempio, se l'esito dei primi due lanci dovesse essere: TT, vincerebbe Andrea; mentre, se l'esito dei primi tre lanci fosse: CCT, avrebbe vinto Biagio. Uno dei due contendenti ha maggiori probabilità di vittoria rispetto all'altro? O queste sono 50% per entrambi?

Soluzione

Andrea vince solo se, nei primi due lanci, esce TT. Biagio, invece, vince non solo se esce subito CT, ma anche: TC o CC. In questi due casi, infatti, Biagio vincerà non appena sarà uscita una T (Andrea, quindi, non potrà più completare una TT). Quindi, Andrea ha solo $1/4$ di probabilità di vincere.

Nota. In teoria, si potrebbe verificare una situazione di stallo, se dovessero uscire sempre e solo delle C; ma la probabilità di un evento del genere tende a 0, con l'aumentare del numero dei lanci.

d. Diversi anni fa, prima che i controlli agli aeroporti diventassero più rigidi, il signor Rossi aveva letto che la probabilità di viaggiare in un aereo, sul quale era salito anche

un dirottatore armato di bomba, poteva valutarsi intorno a $1/10.000$. Alla luce di quel dato, aveva calcolato che la probabilità di trovare su uno stesso aereo due passeggeri armati di bomba era uguale a circa: $(1/10.000)(1/10.000) = 1/100.000.000$ (una su cento milioni...). Di conseguenza, il signor Rossi aveva adottato l'accortezza di viaggiare in aereo, nascondendo sempre una bomba nel proprio bagaglio. In questo modo, era convinto di rendere praticamente nulla la possibilità di trovarne un'altra a bordo.

Era corretto il suo ragionamento?

Soluzione

In effetti, se si pone uguale a $1/10.000$ la probabilità che a bordo di un aereo ci sia un passeggero armato di bomba, la probabilità che ce ne siano due può ritenersi uguale a $(1/10.000)(1/10.000) = 1/100.000.000$. Due casi del genere, infatti, non sono incompatibili e, in linea teorica, possono essere considerati indipendenti; quindi, la probabilità che si verificano contemporaneamente, è uguale al prodotto delle loro singole probabilità, come afferma la legge sulla probabilità composta.

Un tale ragionamento è valido, però, se entrambe le situazioni avvengono in maniera casuale. Ma l'azione intenzionale di portarsi dietro una bomba corrisponde a un evento assolutamente certo, al quale deve essere attribuita, quindi, una probabilità uguale a 1. Di conseguenza, siccome: $1 \times 1/10.000 = 1/10.000$, si può verificare facilmente che l'espedito di portarsi una bomba in aereo, non ha alcun effetto sulla probabilità che a bordo ce ne sia un'altra.

e. Si prelevano da un mazzo quattro carte: A di picche (Ap), A di cuori (Ac), 2 di quadri (2q) e 2 di fiori (2f) e se ne consegnano due a una persona.

Se questa, dopo averle guardate, afferma: «Una di queste carte è un asso», qual è la probabilità che anche l'altra sia un asso? Se, invece, dichiara: «Una di queste carte è l'asso di picche», la probabilità che anche l'altra sia un asso, rimane la stessa o cambia?

Soluzione

Le quattro carte possono essere abbinate nei seguenti sei modi:

$$Ap/Ac - Ap/2q - Ap/2f - Ac/2q - Ac/2f - 2q/2f$$

Ci sono, quindi, cinque casi in cui almeno una carta è un asso e, tra questi, ce n'è uno solo in cui entrambe le carte sono assi. Di conseguenza, la risposta al primo quesito è: $1/5$.

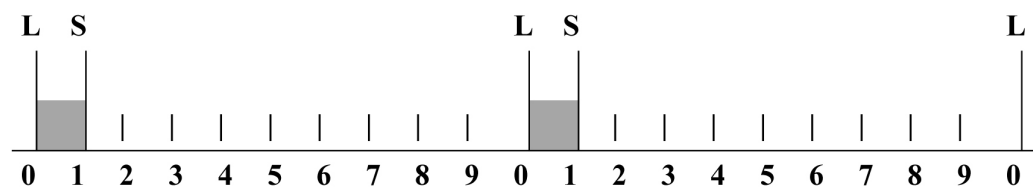
Ci sono, invece, soltanto tre casi in cui una delle due carte è l'asso di picche e, tra questi, ce n'è uno solo in cui entrambe le carte sono assi. Di conseguenza, la risposta al secondo quesito è: $1/3$.

f. Turiddu ha due amiche: Lola e Santuzza, che abitano nella sua stessa città. Siccome gli piacciono entrambe, decide di affidare al caso il criterio con cui frequentarle. In un momento qualsiasi della giornata, si reca a una fermata dove transitano sia l'autobus «L» che porta a casa di Lola, sia quello «S» che porta a casa di Santuzza, e prende il pri-

mo dei due che passa. Le vetture della linea «L», come quelle della linea «S», arrivano a intervalli di dieci minuti l'una dall'altra, con assoluta regolarità. Qualche tempo dopo, però, Turiddu si accorge che, in quel modo, gli capita di recarsi da Lola 9 volte su 10. Come si può spiegare una tale apparente anomalia?

Soluzione

Anche se le vetture di una stessa linea si succedono a 10 minuti l'una dall'altra, evidentemente tra l'arrivo di un autobus «L» e di uno «S», trascorre un solo minuto (e, quindi, tra l'arrivo di un autobus «S» e quello di uno «L», trascorrono 9 minuti). Di conseguenza, recandosi casualmente alla fermata, Turiddu ha una sola probabilità su 10 di giungere prima dell'arrivo di un autobus «S» (e 9 su 10 di giungere prima dell'arrivo di un autobus «L»).



g. Si hanno tre scatole identiche per forma e colore; una contiene due monete d'oro, un'altra due monete d'argento e la terza una moneta d'oro e una d'argento. Si chiudono le tre scatole e si dispongono su un tavolo in un ordine qualsiasi; poi, se ne sceglie una a caso e si preleva da questa una moneta, senza guardare l'altra. Se la moneta estratta è d'oro, qual è la probabilità che anche l'altra sia d'oro?

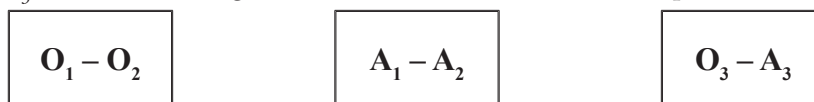
Avendo estratto una moneta d'oro, si può escludere di aver scelto la scatola che conteneva due monete d'argento; quindi, la scatola aperta può essere solo o quella con due monete d'oro o quella con una moneta d'oro e una d'argento. Siccome queste due possibilità sono equivalenti, dovrebbe essere uguale a 1/2 la probabilità che la moneta rimasta nella scatola sia d'argento.

Ma è proprio così?

Soluzione

Per maggiore chiarezza, chiamiamo le tre monete ne seguente modo:

- O_1 e O_2 : le due monete d'oro che si trovano nella stessa scatola;
- A_1 e A_2 : le due monete d'argento che si trovano nella stessa scatola;
- O_3 : la moneta d'oro che si trova nella scatola con quella d'argento;
- A_3 : la moneta d'argento che si trova nella scatola con quella d'oro.



Relativamente a tale denominazione, la moneta d'oro estratta può essere:

- O_1 e, in questo caso, l'altra moneta è d'oro (O_2);

- O_2 e, in questo caso, l'altra moneta è d'oro (O_1);
- O_3 e, in questo caso, l'altra moneta è d'argento (A_3).

Siccome in due casi su tre la moneta rimasta nella scatola è d'oro, la relativa probabilità è uguale a: $2/3$.

Nota. Questo paradosso è stato ideato dal matematico francese Joseph Louis François Bertrand, che lo propose nel 1889, nel suo libro *Calcul des Probabilités*. Nel 1950, il matematico statunitense Warren Weaver ne propose su Scientific American, una versione che utilizza tre cartoncini: uno con due facce rosse, un altro con due facce nere e un terzo con una faccia rossa e una nera.

h. Jones, un giocatore d'azzardo, mette tre carte coperte sul tavolo. Una delle carte è un asso; le altre sono due figure. Voi appoggiate il dito su una delle carte, scommettendo che sia l'asso. Ovviamente, la probabilità che lo sia realmente è pari a $1/3$. Ora Jones dà una sbirciatina di nascosto alle tre carte. Dato che l'asso è uno solo, almeno una delle carte che non avete scelto deve essere una figura. Jones la volta e ve la fa vedere: è una figura. A questo punto, qual è la probabilità che ora il vostro dito sia sull'asso?

Soluzione

Molti pensano che la probabilità sia salita da $1/3$ a $1/2$. Dopo tutto, ci sono solo due carte coperte, e una deve essere l'asso. In realtà la probabilità rimane $1/3$. La probabilità che NON abbiate scelto l'asso rimane $2/3$, anche se Jones sembra aver eliminato parzialmente l'incertezza mostrando che una delle due carte non prescelte non è l'asso. La probabilità che l'altra delle due carte non prescelte sia l'asso, tuttavia, resta uguale a $2/3$, perché la scelta era avvenuta prima. Se Jones vi desse l'opportunità di spostare la vostra scommessa su quella carta, dovrete accettare (sempre che non abbia qualche carta nella manica, naturalmente).

Nota. Questo problema venne presentato per la prima volta da Martin Gardner, nell'ottobre 1959, in una formulazione diversa (al posto delle tre carte, c'erano tre prigionieri, uno dei quali era stato graziato dal governatore locale). Nel 1990 Marilyn vos Savant, autrice di una popolare rubrica sulla rivista *Parade*, ne propose un'ulteriore versione (che contemplava tre porte, dietro le quali si celavano un'automobile e due capre). La vos Savant fornì la risposta corretta, ma ricevette migliaia di lettere infuriate (molte delle quali, inviate da docenti di matematica ...) che l'accusavano di ignorare la teoria delle probabilità. Il caso finì in prima pagina sul New York Times e il problema acquistò in breve tempo una popolarità planetaria, arrivando addirittura a essere votato da una giuria di esperti, come il più bel paradosso probabilistico del secondo millennio.

11. La legge dei grandi rischi

A causa del massiccio proliferare di nuove forme legali di gioco d'azzardo, a cui si sta assistendo negli ultimi anni in Italia, le cronache registrano sempre con maggiore frequenza casi di persone che finiscono per rovinarsi completamente, praticando

ossessivamente questi allettanti passatempi, apparentemente innocui. È sconcertante notare, però, come una gran parte di quei mezzi di informazione che denunciano tali drammatici episodi, non rifugge dalla tentazione di dispensare, in apposite rubriche, inconsistenti consigli per arricchirsi *matematicamente* al gioco. È, infatti, proprio la fiducia posta nei sedicenti metodi *sicuri* per vincere la causa principale delle perdite in denaro più cospicue.

La maggioranza di tali sistemi si basa sulla falsa convinzione che, col trascorrere del tempo, tutti gli eventi legati a una determinata situazione siano destinati a realizzarsi una stessa quantità di volte; per cui, più uno di questi tarda a manifestarsi, più cresce, per compensazione, la sua probabilità di verificarsi nell'immediato futuro. Nonostante l'evidenza dei fatti, i sostenitori dell'influenza dei *ritardi* hanno il vezzo di rivendicare la scientificità delle loro elucubrazioni, appellandosi alla *Legge dei grandi numeri* – come se si trattasse di una sorta di entità pensante, capace di intervenire nello svolgimento delle vicende umane ...

La validità del teorema di Bernoulli, però, non comporta necessariamente che un eventuale scarto dal valore atteso, riscontrato nell'effettuazione dei primi tentativi, debba essere compensato da quelli successivi (anche se può sembrare una contraddizione). In realtà, ogni risultato fa storia a sé. La convergenza tra frequenza e probabilità è garantita semplicemente dal fatto che, con l'aumentare del numero di tentativi effettuati, l'incidenza di un eventuale scarto dal valore atteso diventa sempre più trascurabile (anche se non arriva a estinguersi del tutto).

Esempio. Si immagini di aver eseguito una lunghissima serie di lanci di una moneta e di aver ottenuto i risultati riportati nella seguente tabella.

Lanci della moneta effettuati	Quantità di teste uscite	Quantità di teste attese	Scarto tra i valori attesi e quelli usciti	Frequenza di uscita delle teste
10	4	5	1	0,4
100	46	50	4	0,46
1.000	484	500	16	0,484
10.000	4.936	5.000	64	0,4936
100.000	49.744	50.000	256	0,49744
1.000.000	498.976	500.000	1.024	0,498976

Come si può notare, mentre la frequenza di uscita delle teste si avvicina sempre di più al valore 0,5 della relativa probabilità, lo scarto tra i valori attesi e quelli effettivamente usciti non si compensa, ma anzi cresce in maniera esponenziale.

In ogni caso, bisogna considerare che il valore della probabilità, calcolato prima di cominciare ad effettuare i tentativi (quando, cioè, non se ne può ancora conoscere l'esito), è diverso da quello ricavabile, una volta venuti a conoscenza di alcuni risultati.

Esempio. Se si pensa di lanciare una moneta 4 volte di seguito, si possono prevedere 16 potenziali successioni di uscita, così raffigurabili (T = *testa*, C = *croce*):

TTTT - TTTC - TTCT - TCTT - CTTT - TTCC - TCTC - CTTC

TCCT - CTCT - CCTT - TCCC - CTCC - CCTC - CCCT - CCCC

Come si vede, in un solo caso su 16 si ha l'uscita di 4 *teste* su 4 successivi lanci (TTTT); di conseguenza, la probabilità relativa a un tale evento, calcolata prima di iniziare a lanciare la moneta, è uguale a $1/16$ (sensibilmente minore di $1/2$).

Ciò non autorizza, però, a dedurre che, se dopo 3 successivi lanci si sono ottenute 3 *teste* di seguito (TTT), diventa più probabile, per compensazione, l'uscita successiva di una *croce*.

Arrivati a questo punto, infatti, delle 16 successioni previste all'inizio, solo 2 sono ancora attuabili: TTTC e TTTT, entrambe con $1/2$ di probabilità; tutte le altre, infatti, non possono più essere prese in considerazione, in quanto nessuna di loro inizia con TTT.

WALT DISNEY, I PITAGORICI E LA MATEMATICA

ANDREA SANI

Società Filosofica Italiana e Liceo Classico Galileo, Firenze

1. Matematica, filosofia e cinema

Può un film a disegni animati introdurre ad alcuni temi significativi di matematica e persino di filosofia della matematica? La risposta è positiva. Il film in questione è, in realtà, un “mediometraggio” disneyano, a disegni animati, di 27 minuti: *Paperino nel mondo della matematica* (*Donald in Mathmagicland*, 1959), con la regia di Hamilton Luske.

Donald in Mathmagicland permette di accennare in modo divertente ad argomenti scientifici e anche a un classico problema di natura filosofica che riguarda il rapporto fra la matematica e il mondo reale. Per questo motivo il mediometraggio disneyano è utilmente valorizzabile a scopo didattico. Il cinema ha infatti un forte potere di coinvolgimento: fa vivere situazioni e dà concretezza sensibile a pensieri e a concetti. Anche i disegni animati possono svolgere questa funzione, come ebbe a dire Walt Disney (1901-1966), riferendosi proprio a *Donald in Mathmagicland*:

Il disegno animato è un ottimo mezzo per stimolare l'interesse. Di recente, abbiamo spiegato la matematica in un film e in quel modo abbiamo suscitato l'interesse del pubblico per questa tematica importantissima¹.

E a proposito della filosofia, Julio Cabrera, autore del celebre libro *Da Aristotele a Spielberg. Capire la filosofia attraverso i film* (2000), ha affermato:

Dal punto di vista di una concezione filosofica del cinema, l'elemento 'evasione' non va assolutamente escluso, in quanto direttamente vincolato all'impatto sensibile [...]; abitualmente invece lo si esclude in quanto 'svierebbe' da ciò che un film filosoficamente si proporrebbe di dimostrare. [...] Non sarà necessario, quindi, cercare la filosofia solo nei film di Andrej Arsen'evic Tarkovskij o di Ingmar Bergman; essa è presente – perché no? – anche nella *Carica dei 101*².

Naturalmente, il ricorso al cinema è efficace come *punto di partenza* per suscitare l'attenzione su determinate questioni, che poi vanno comunque trattate con i metodi tradizionali della didattica.

¹ [10], p. 198.

² [3], p. 28. Cabrera si riferisce al disegno animato disneyano *101 Dalmatians*, diretto da Clyde Geronimi, Hamilton Luske e Wolfgang Reitherman nel 1961.

2. *Donald in Mathmagicland*

Donald in Mathmagicland risale al 1959 e si avvale della consulenza del fisico, matematico e divulgatore scientifico, Heinz Haber (1913-1990). Del disegno animato diretto da Luske esiste anche una versione a fumetti (1959), sceneggiata da Don Christensen e disegnata da Tony Strobl. In Italia, la storia a fumetti è apparsa per la prima volta su “Topolino”, n. 233 del 1960, con il titolo *Paperino nel regno della matematica*. L'ultima ristampa è su “Zio Paperone”, n. 162 del 2003, rititolata *Paperino nel paese della matematica*.

Il mediometraggio a disegni animati si inserisce in una serie di film disneyani a carattere educativo iniziata durante la Seconda Guerra Mondiale, allorché gli Studi Disney cominciano a lavorare per le forze armate e per il governo. Nel 1942, Paperino è protagonista di un cortometraggio intitolato *The New Spirit (Assistant Director Louis Debny, animazione di Ed Aardal)*, nel quale il papero disneyano è messo a disposizione del Ministero del Tesoro per convincere gli americani a pagare le tasse per sostenere lo sforzo bellico contro il Giappone e contro la Germania nazista. Il disegno animato è diffuso in tutto il Paese e viene visto da circa 60 milioni di persone: secondo un sondaggio Gallup, influenza positivamente le intenzioni del 37% dei contribuenti statunitensi.

Nel 1943, sempre Paperino collabora con il governo degli Stati Uniti attraverso il cortometraggio *La faccia del Führer (Der Fuehrer's Face, regia di Jack Kinney)*, una pungente satira del nazismo che ottiene l'Oscar nello stesso anno³. Nel dopoguerra, il filone educativo disneyano annovera *How To Have An Accident In The Home* (1956) e *How To Have An Accident At Work* (1959), diretti entrambi da Charles A. Nichols, dove Paperino propaga la sicurezza in casa e sul posto di lavoro, rappresentando i vari comportamenti sbagliati da evitare. Del 1961 è *Paperino e la ruota (Donald Duck and the Wheel, con la regia di Hamilton Luske)*, in cui Donald Duck incontra lo “Spirito del Progresso” che lo trasporta nella preistoria e gli fa inventare la ruota. Ma il più celebre disegno animato del filone *educational* risulta, appunto, *Paperino nel mondo della matematica*, dove il personaggio disneyano scopre la presenza di principi matematici nella natura, nell'arte e in molti giochi come il biliardo e gli scacchi.

In *Donald in Mathmagicland* l'esploratore Paperino penetra in una regione fantastica, simile al mondo fiabesco già descritto da Hamilton Luske (insieme agli altri registi Clyde Geronimi e Wilfred Jackson) nel lungometraggio disneyano *Alice nel Paese delle Meraviglie (Alice in Wonderland)* del 1951, ispirato all'omonimo capolavoro di Lewis Carroll. In questa dimensione psichedelica, gli alberi hanno le foglie a forma di numero e possiedono “radici quadrate”, mentre nei corsi d'acqua scorrono simboli e cifre,

³ Paperino ha un incubo e sogna di trovarsi in un villaggio della Germania nazista, dove lavora a una catena di montaggio, avvitando le spolette delle granate per l'artiglieria. Nel cortometraggio fa anche una fulminante apparizione una banda musicale con l'imperatore giapponese Hirohito al basso tuba, Benito Mussolini alla grancassa, Hermann Göring all'ottavino e Rudolf Hess come voce solista.

a dimostrazione che il mondo naturale è matematizzabile. Il mediometraggio alterna sequenze animate a sequenze *live action*, sul modello dei film disneyani a “tecnica mista” *Saludos Amigos* (id., 1943) e *I tre Caballeros* (*The Three Caballeros*, 1945), entrambi diretti da Norman Ferguson, Clyde Geronimi, Jack Kinney e Bill Roberts.

All’inizio di *Donald in Mathmagicland*, Paperino dichiara di disprezzare la matematica, che considera una materia per “sgobboni”, ma viene indotto a cambiare idea sull’argomento dallo “Spirito d’Avventura”, che lo trasferisce magicamente nell’antica Grecia, all’epoca di Pitagora, tra VI e V secolo a. C. Paperino è ammesso nella scuola del filosofo e matematico greco e apprende i segreti dei Pitagorici⁴.

3. Pitagora e i Pitagorici

“Pitagora – racconta lo Spirito d’Avventura – comunicava regolarmente le sue scoperte ai colleghi di una confraternita di sgobboni che si chiamavano appunto ‘Pitagorici’. Si riunivano in segreto per discutere le loro scoperte matematiche. Solo gli iniziati erano ammessi”. Quello che si narra nel mediometraggio disneyano corrisponde a ciò che sappiamo dalle fonti.

In effetti, Pitagora (570 - 497/96 a. C.), dopo aver lasciato a circa quarant’anni la città natale di Samo per sfuggire alla tirannide di Policrate (574 - 522 a. C.) e aver viaggiato in Oriente, si ferma a Crotona, nella Magna Grecia, ove fonda una scuola. Scuole simili si diffondono in tutta la Magna Grecia, da Reggio Calabria a Taranto, e anche in Beozia, a Tebe.

La scuola pitagorica è contemporaneamente un’associazione religiosa, politica e filosofica. Pitagora è ritenuto il depositario di un sapere trasmessogli direttamente da Apollo, e i suoi discepoli non possono discutere questa sua sapienza né modificarla: devono rimanere fedeli alla sua dottrina, tanto che a Pitagora è riferito il celebre *autòs efe* (*ipse dixit*). I Pitagorici sono inoltre tenuti a mantenere il segreto e l’insegnamento è impartito per gradi, come avviene per l’iniziazione ai misteri in ambito religioso. Secondo la testimonianza del filosofo neoplatonico Giamblico (245-325), gli allievi sono divisi in “acusmatici”, semplici “ascoltatori” costretti al silenzio, e “matematici”, che possono fare domande ed esprimere opinioni e ai quali sono trasmessi gli insegnamenti più profondi.

Anche se si dice che sia stato Pitagora a coniare la parola “filosofia” (= “amore per la sapienza”) e “matematica” (= “ciò che è insegnato”), una sola concezione può essere attribuita sicuramente al fondatore della scuola (che molto probabilmente non ha scritto nulla): la teoria religiosa della metempsicosi, secondo la quale l’anima sopravvive dopo la morte e trasmigra di corpo in corpo, cioè in altri esseri viventi (animali compresi). L’incarnazione di un uomo nel corpo di un animale è considerata una conseguenza delle colpe commesse nella vita precedente, secondo i canoni della religione orfica. Infatti, i Pitagorici non sono seguaci della religione olimpica (quella che conosciamo

4 Su Paperino nel regno della matematica e più in generale sul rapporto tra cinema e matematica, cfr. [8].

attraverso i poemi omerici e le tragedie greche e che ritiene l'Olimpo la sede degli dei), ma dell'orfismo, una setta filosofico-religiosa fondata dal mitico poeta trace Orfeo che considera la vita terrena come una preparazione per una vita più alta dopo la morte. Tale vita può essere meritata per mezzo di cerimonie e riti purificatori. L'anima di chi non riesce a purificarsi, è invece destinata a reincarnarsi.

Secondo i Pitagorici, per purificarsi sono necessari una disciplina dei piaceri e dei desideri e il rispetto di alcuni divieti. I Pitagorici non consumano carni, per riguardo nei confronti dell'anima umana che può essere incarnata negli animali, e nella setta vige la strana proibizione di mangiare le fave. Le regole dei Pitagorici hanno probabilmente un significato simbolico, che però ci resta oscuro. Fra queste, si ricordano le massime di non attizzare il fuoco con il ferro, di non spezzare il pane, di non far nidificare le rondini sotto il tetto, di non lasciare l'impronta del corpo sul letto, né quella della pentola sulle ceneri.

Sappiamo, inoltre, che politicamente, i seguaci di Pitagora appoggiano i governi aristocratici delle loro città nella Magna Grecia. Quanto alla loro dottrina più specificamente matematico-filosofica, le fonti sembrano avvalorare l'ipotesi che per i Pitagorici l'*archè*, cioè il principio delle cose, sia costituito dai *numeri*.

Nel mediometraggio disneyano, frequentando i Pitagorici, Paperino scopre, appunto, che la realtà è fatta di numeri, dato che tutto, in natura, si svolge con ordine e secondo regole matematiche. Stando alla testimonianza di Aristotele, per i Pitagorici i numeri sono addirittura "le cose stesse": *auta ta pragmata*⁵.

4. La metafisica del numero

L'argomentazione che può aver condotto i seguaci di Pitagora a sostenere che "le cose sono numeri" è forse la seguente: di fatto, ogni cosa possiede una sua figura geometrica; ma ogni figura geometrica è formata di piani; i piani, a loro volta, sono formati di linee, e le linee sono composte di punti (che i primi Pitagorici concepiscono come dotati di dimensioni, sebbene molto piccole). Se si tiene presente che i punti vengono identificati con i numeri, si capisce allora quello che vogliono dire i discepoli di Pitagora, quando affermano che alla base delle cose ci sono i numeri. "Le cose sono numeri" perché gli oggetti, in realtà, sono gruppi di punti (cioè di corpuscoli), distribuiti secondo un preciso ordine geometrico.

Evidentemente, i primi Pitagorici non pensano che i numeri siano entità astratte, oggetti logici, ma li reputano enti concreti: il numero uno è designato con un punto spaziale e i numeri successivi con altrettanti punti disposti nello spazio, in modo da costituire determinate figure geometriche. Di conseguenza, nasce la cosiddetta "aritmo-geometria": l'aritmetica, o scienza delle unità che compongono i numeri interi, coincide di fatto con la geometria, o scienza dei punti. Ancora oggi, d'altra parte, i numeri vengono raffigurati con i punti sui dadi da gioco. I Pitagorici – in particolare un certo Eurito, discepolo di Filolao – simboleggiano i numeri così concepiti con dei sassolini,

⁵ Aristotele, *Metafisica*, 987b 27-9.

ed eseguono le operazioni aritmetiche con un'opportuna disposizione di ciottoli (da questo uso è derivato il termine latino *calculus*, "calcolo", che significa, appunto "pietruzza"). Per i primi Pitagorici, dunque, i numeri, oltre a possedere un carattere aritmetico (sono un insieme di unità) e geometrico (sono un insieme di punti), hanno anche un carattere reale (sono una sorta di atomi fisici o *mònadi*).

La scelta pitagorica del numero come principio di tutte le cose è motivata anche dall'osservazione dei fenomeni astronomici e musicali. In ambito astronomico, i Pitagorici sanno che le posizioni successive degli astri nel cielo ricorrono identiche dopo un determinato periodo di tempo, prevedibile con il calcolo. Quanto ai fenomeni musicali, nel mediometraggio disneyano lo Spirito d'Avventura ricorda a Paperino che le consonanze, e cioè i suoni armoniosi e piacevoli, si ottengono quando le note prodotte dalle corde di una lira hanno delle lunghezze i cui rapporti corrispondono a quelli dei primi numeri interi. In particolare, i seguaci di Pitagora si accorgono che le tre consonanze principali, l'ottava, la quinta e la quarta, si possono esprimere mediante rapporti numerici rispettivamente di due a uno, tre a due, quattro a tre.

I tre rapporti sono fondamentali perché compaiono nel numero 10 (ritenuto sacro), che è la somma, appunto, di 4, 3, 2, 1. Il numero 10 è rappresentabile nel cosiddetto "triangolo quaternario", che simboleggia le quattro forme geometriche (cfr. Fig. 1), risultando dalla somma di 1 punto + 2 punti (che danno luogo a una linea) + 3 punti (che danno luogo a una superficie, dato che 3 punti non allineati determinano un triangolo esteso su due dimensioni) + 4 punti (che danno luogo a un solido, giacché 4 punti non allineati determinano un tetraedro, cioè una piramide con quattro facce triangolari, il cui volume si estende in tre dimensioni):

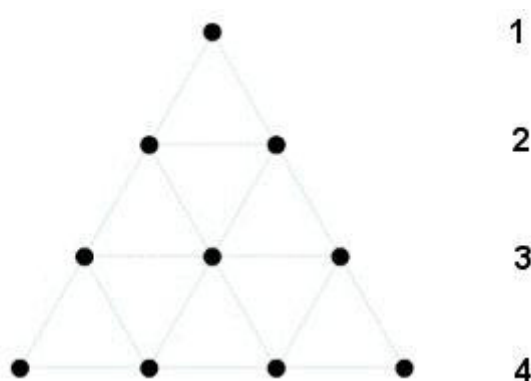


Figura 1.

Anche la cosiddetta "tavola pitagorica", essendo basata sul sistema decimale, si impenna sul numero sacro 10. Ai Pitagorici sono attribuite molte scoperte, fra le quali il famoso teorema relativo al triangolo rettangolo (detto, appunto "teorema di Pitagora"), che afferma l'uguaglianza tra l'area del quadrato costruito sull'ipotenusa e la somma delle aree dei quadrati costruiti sui cateti, e il teorema secondo cui la somma degli angoli interni di un triangolo è uguale a due angoli retti.

Il grande interesse dei Pitagorici per la matematica contribuisce a far nascere in loro la convinzione che sia possibile spiegare in termini numerici *tutti* gli aspetti dell'universo: non solo i fenomeni del mondo naturale, ma anche quelli del mondo umano, compresi i sentimenti, le passioni, e persino le nozioni astratte come la giustizia o la salute. La giustizia, in particolare, che opera divisioni in parti uguali o fa corrispondere la pena all'offesa, per i Pitagorici coincide con il numero 4 (secondo altri con il 9), in quanto tale numero si divide appunto in due parti uguali e risulta il prodotto di queste stesse quantità⁶.

5. Numeri pari e numeri dispari

Abbandoniamo per un momento *Paperino nel mondo della matematica* e cerchiamo di approfondire la concezione pitagorica della matematica.

I numeri vengono suddivisi dai seguaci di Pitagora in pari e dispari. Questi ultimi sono calcolati dal tre in poi, giacché l'uno, secondo i Pitagorici, è concepito come "parimpari", avendo in sé sia la natura del pari, sia quella del dispari, in quanto sorgente di tutti i numeri.

Come testimonia Aristotele nel primo libro della *Metafisica* (1, 5, 986a), alcuni Pitagorici pongono il pari in relazione con l'infinito, e il dispari col finito. Altri Pitagorici (di cui non sono specificati i nomi) fanno corrispondere alle coppie infinito-finito, pari-dispari, altre antitesi. Le opposizioni pitagoriche (dieci in tutto) sono le seguenti:

finito	infinito
dispari	pari
uno	molteplice
destro	sinistro
maschio	femmina
immobile	in moto
diritto	curvo
luce	tenebre
buono	cattivo
quadrato	rettangolo

Il motivo per cui i Pitagorici associano il pari all'infinito e il dispari al finito, non è chiarissimo. Alcuni interpreti fanno l'ipotesi che i Pitagorici rappresentino geometricamente i numeri pari come coppie di punti che danno luogo a una serie 'aperta', cioè, che può essere proseguita all'infinito, e i numeri dispari come coppie di punti con un punto isolato che chiude la serie. In tal modo, i numeri pari risultano illimitati, mentre i numeri dispari danno l'idea di ciò che è delimitato e compiuto (Fig. 2).

⁶ [4], p. 108.

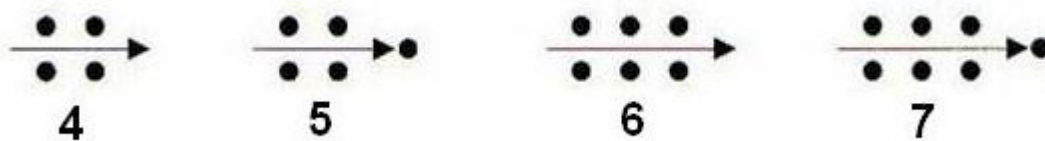


Figura 2.

Altri commentatori, invece, ritengono che la corrispondenza pari-illimitato, dispari-limitato vada collegata con l'uso di disporre i punti-unità a *gnomone*, cioè a squadra (lo gnomone è l'orologio solare babilonese). Infatti, se si dispongono a squadra, attorno all'unità, i punti costituenti i numeri dispari, si ottengono dei quadrati (Fig. 3).

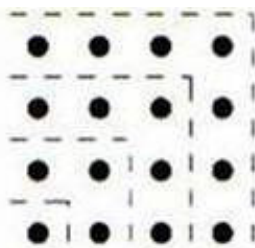


Figura 3.

Invece, se si dispongono a squadra, attorno alla diade (costituita da due punti), i numeri pari, si ottengono dei rettangoli (Fig. 4).

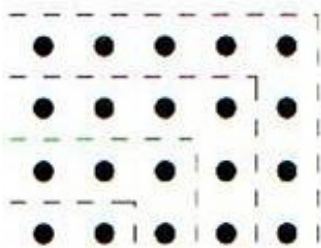


Figura 4.

Dunque, sommando i successivi numeri dispari, si ottiene sempre *una* sola forma: quella del quadrato, espressa, appunto da “numeri quadrati”⁷:

$$1 + 3 = 2^2$$

$$1 + 3 + 5 = 3^2$$

$$1 + 3 + 5 + 7 = 4^2$$

Invece, sommando i successivi numeri pari, si ottengono *infinite* forme rettangolari diverse, dato che questi rettangoli non sono simili fra loro⁸:

⁷ I numeri quadrati successivi sono formati dalla sequenza: $1 + 3 + 5 + 7 \dots + (2n - 1)$

⁸ I numeri rettangolari successivi sono formati dalla sequenza: $2 + 4 + 6 + \dots + 2n = n(n + 1)$

$$2 + 4 = 6 = 2 \cdot 3$$

$$2 + 4 + 6 = 12 = 3 \cdot 4$$

$$2 + 4 + 6 + 8 = 20 = 4 \cdot 5$$

Di conseguenza, al dispari corrispondono il quadrato, l'uno (una sola forma), il finito, mentre al pari corrispondono il rettangolo, il molteplice (molte forme), l'infinito (infinite forme).

6. La concezione di Filolao

Se si scorre la lista dei contrari riportata sopra, ci si accorge inoltre che il bene si riconduce al finito, mentre il male all'infinito. Nell'elenco non viene inserita l'antitesi "vero-falso", giacché le coppie sono già dieci e dieci, per i Pitagorici, è il numero perfetto. Ma Filolao (seconda metà del V sec. a. C.), uno degli esponenti di maggior rilievo del pitagorismo, metterà anche l'errore dalla parte dell'illimitato. I Pitagorici, dunque, riportano all'infinito (all'incalcolabile, all'incomprensibile) i valori negativi, e al finito (al calcolabile, al comprensibile) quelli positivi, dimostrando così la loro diffidenza – tipica della mentalità greca – nei confronti dell'*apeiron*. Il fatto è che il bene e la verità hanno una definizione precisa, mentre il male e l'errore no. Per esempio, di un problema matematico esiste una sola soluzione esatta e infinite soluzioni sbagliate. Inoltre, di fronte a una certa situazione, esiste un solo modo di comportarsi bene e infiniti modi di comportarsi male. L'infinito appare ai Greci non come "ciò che è illimitato", ossia privo di limiti e quindi perfetto, ma, al contrario, come ciò che "non è finito", cioè come qualcosa di incompiuto e di imperfetto. L'infinito è identificato con ciò che non ha forma, non solo nel senso spaziale, ma anche nel senso che manca di ogni struttura. Il finito, invece, essendo determinato e compiuto, è perfetto⁹.

I Pitagorici, con Filolao, elaborano anche una concezione dell'universo. L'universo è per loro delimitato da una sfera, il Cielo, in cui sono infisse le stelle. Al centro dell'universo c'è il Fuoco sacro, generatore di tutte le cose. Attorno al Fuoco centrale girano l'Antiterra, la Terra, la Luna, il Sole, i cinque pianeti allora conosciuti (Mercurio, Venere, Marte, Giove, Saturno) e il Cielo delle stelle fisse. L'Antiterra è un pianeta inventato dai Pitagorici per completare il numero perfetto di 10. L'Antiterra non è visibile perché gli uomini vivono nell'emisfero della Terra che è rivolto verso le orbite esterne della Luna, del Sole e degli altri pianeti. Secondo i Pitagorici, il Sole, che è una sorta di grande cristallo, accoglie il riflesso del Fuoco centrale e lo rinvia sulla Terra sotto forma di luce e calore.

I pianeti, ruotando, emettono ciascuno un suono continuo, che dev'essere una musica armonica come il loro movimento regolare. Sulla Terra, infatti, ogni corpo emette un suono quando si muove; altrettanto faranno i corpi celesti più grandi e più veloci di quelli terrestri (cfr. Aristotele, *De Caelo*, 290b). Noi non sentiamo questo suono perché lo udiamo da sempre e ci siamo assuefatti. Per questo suono, infatti, accade quel che

⁹ Sull'argomento, cfr. [9]

succede ai fabbri, che, per l'abitudine fatta al rumore, non lo distinguono più. La Terra, dunque, per i Pitagorici si muove: ha un moto di rivoluzione intorno al Fuoco. E non è al centro dell'universo (perché al centro c'è il Fuoco). Quello dei Pitagorici è un modello dell'universo simile (anche se non eliocentrico) a quello di Copernico.

7. La sezione aurea

Ritorniamo ora a Paperino e al mondo della matematica. Dopo aver partecipato a una *jam session* con i Pitagorici, *Paperino* stringe la mano a Pitagora in persona e si ritrova, inciso sul palmo della mano, il pentagramma, ossia la stella a cinque punte che, secondo lo scrittore e retore greco Luciano del II secolo d.C. (cfr. *Dell'errore nel salutare*), è il simbolo della società segreta dei Pitagorici. Questa figura geometrica si ottiene inserendo le diagonali in un pentagono regolare (Fig. 5). Lo Spirito d'Avventura mostra quindi a Paperino come nel pentagramma compaia la famosa "sezione aurea" di un segmento. Ricordiamo che il termine "sezione aurea" sarà introdotto solo nel XIX secolo da Martin Ohm (1835), e che, nel III secolo a. C., Euclide, negli *Elementi*, parla di "proporzione estrema e media", mentre Luca Pacioli, nel 1509, di "divina proporzione".

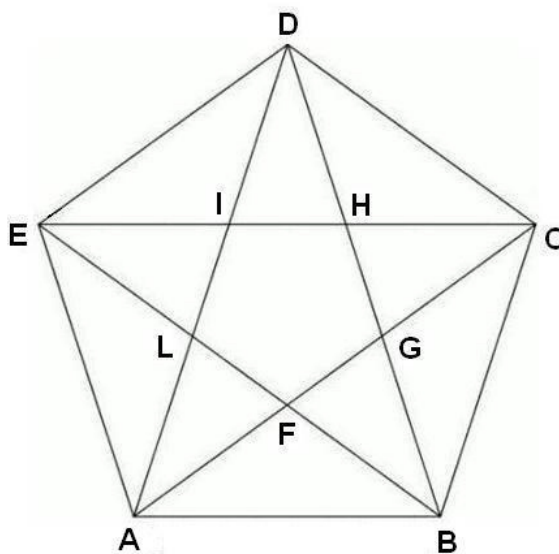


Figura 5.

Effettivamente, in un pentagono regolare $ABCDE$, ciascun punto d'intersezione delle diagonali divide ogni diagonale in due segmenti disuguali, tale che il rapporto dell'intera diagonale (per esempio AC) al segmento maggiore (AG) è uguale al rapporto di quest'ultimo al segmento minore (GC). In geometria, si chiama appunto "sezione aurea" la parte di un segmento che è media proporzionale tra l'intero segmento e la parte rimanente (nel pentagono regolare anche il lato è la sezione aurea della diagonale). In particolare, dato un segmento AC (Fig. 6), si dice che il segmento AB è la sezione aurea di AC se vale la seguente proporzione:

$$AC : AB = AB : BC$$

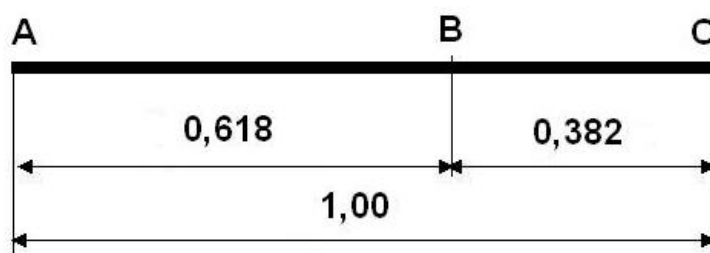


Figura 6.

La definizione della sezione aurea è effettivamente fissata dalla scuola pitagorica. Secondo una testimonianza di Giamblico (*in Nicom.* 100, 19-25), il rapporto aureo è scoperto dal pitagorico Ippaso di Metaponto (fine del VI - inizi del V secolo)¹⁰, che associa a esso il concetto di incommensurabilità (cfr. più avanti). Invece, il primo calcolo decimale noto della sezione aurea è effettuato dall'astronomo e matematico tedesco Michael Maestlin (1550-1631), insegnante di Keplero.

Nella Fig. 6, se si assume che AC sia uguale a 1, non è difficile dimostrare che il rapporto (detto "aureo") fra la misura della sezione aurea AB del segmento e la misura del segmento stesso è:

$$\frac{\sqrt{5} - 1}{2}$$

che è circa 0,618 (per dare solo i primi tre decimali). Questo numero "irrazionale" (cioè decimale illimitato non periodico e quindi non esprimibile come quoziente di interi) è indicato con la lettera minuscola φ , dall'iniziale del grande scultore Fidia (490 a.C. circa - 430 a.C. circa), che applica ripetutamente il rapporto aureo nelle sue opere. Talvolta è usata la maiuscola Φ per denotare il reciproco del numero suddetto, cioè:

$$\Phi = \frac{\sqrt{5} + 1}{2}$$

che è circa 1,618¹¹.

¹⁰ [4], p. 84.

¹¹ Al numero irrazionale 1,618... è legata anche la successione numerica formulata dal matematico pisano Leonardo Fibonacci (1170-1250). L'uso della cosiddetta "successione di Fibonacci" risale all'anno 1202. Essa si compone della seguente successione di numeri:

1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21...

Ogni termine successivo della successione (dal terzo in poi) è uguale alla somma dei due numeri immediatamente precedenti. Nel 1611 Keplero scoprì che, procedendo lungo la successione, il rapporto tra un termine e il suo precedente oscilla (in eccesso o in difetto) intorno a 1,618..., al quale si avvicina sempre di più.

Lo Spirito d'Avventura mostra a *Paperino* anche il “rettangolo aureo” (Fig. 7), cioè un rettangolo $ABCD$ le cui proporzioni sono basate sul rapporto aureo. Ciò significa che il lato minore (per esempio AD) è la sezione aurea del lato maggiore (AB).

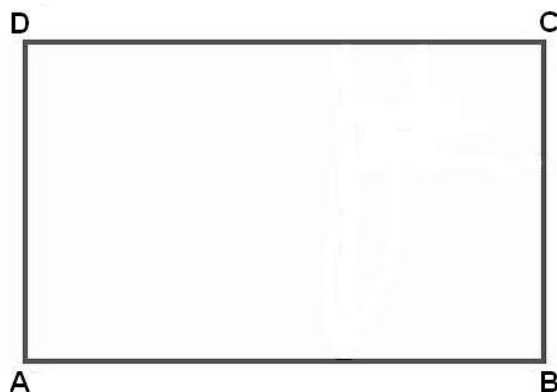


Figura 7.

Sempre lo Spirito d'Avventura spiega a *Paperino* che se, all'interno di un rettangolo aureo, disegniamo un quadrato con il lato uguale al lato minore del rettangolo, il rettangolo-differenza sarà anch'esso un rettangolo aureo. E si può ripetere l'operazione all'infinito, ottenendo rettangoli aurei sempre più piccoli (Fig. 8).

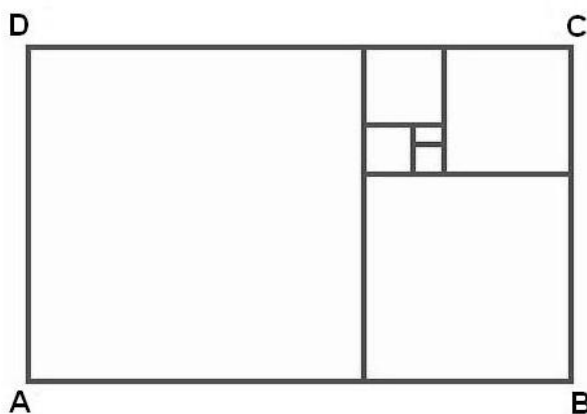


Figura 8.

Dalla proprietà del rettangolo aureo di potersi “rigenerare” infinite volte, deriva la possibilità di creare al suo interno una successione infinita di rettangoli aurei e di quadrati. Tracciando all'interno di ciascun quadrato un arco di cerchio, avente per raggio il lato del quadrato stesso, otteniamo una curva che approssima la cosiddetta “spirale logaritmica”, ammirevole per le sue caratteristiche matematiche ed estetiche (Fig. 9).

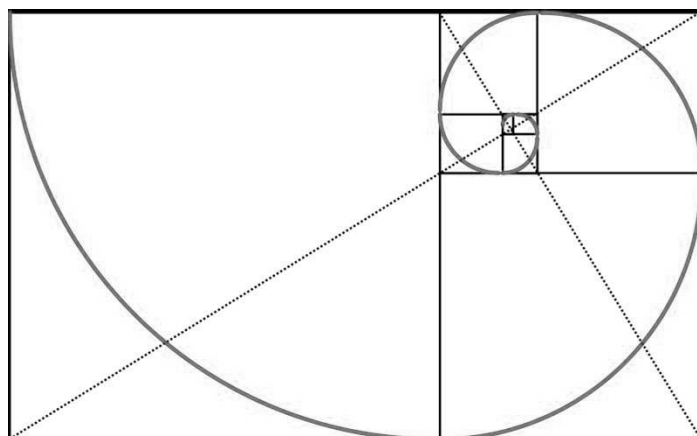


Figura 9.

8. Arte e sezione aurea

Lo Spirito d'Avventura rivela a *Paperino* che il concetto di sezione aurea è utilizzato ampiamente nell'arte greca e poi nel Rinascimento: il rettangolo aureo è ritenuto tradizionalmente il principio matematico della bellezza, e appare nella facciata del Partenone¹² e nella cattedrale di Notre-Dame, ma anche in quadri famosi come *La Gioconda* di Leonardo da Vinci e persino nel palazzo delle Nazioni Unite a New York.

Un esempio molto evidente (non citato nel disegno animato disneyano) di uso artistico della sezione aurea è un dipinto di Piero della Francesca, pittore che dimostra un'attenzione fuori dal comune per la matematica: *La flagellazione di Cristo* (1444-1470). Il dipinto è diviso in due scene distinte, una quadrata e una rettangolare, che mostrano in modo esplicito le proporzioni del rettangolo aureo.

In effetti, numerosi autori ritengono che il nostro apparato percettivo manifesti una naturale preferenza verso le proporzioni che risultano in accordo con la sezione aurea, e che questo rapporto ci appaia esteticamente piacevole¹³. Secondo quest'interpretazione, il rettangolo aureo ci sembra il più "bello" rispetto all'infinita varietà di tutti i rettangoli possibili.

Il rapporto aureo, in virtù del quale una parte è in proporzione armoniosa con il tutto, è riscontrabile in natura, come ci attestano la fisica, la biologia, la botanica, la zoologia, la mineralogia e la chimica. Rispettano la sezione aurea gli organismi dei mammiferi, dei pesci, degli uccelli e delle farfalle e il corpo umano, quando le sue

12 La presenza del rapporto aureo nel Partenone è comunque controversa. Cfr. [7], p. 114.

13 Tuttavia, altri studiosi, pur riconoscendo il frequente utilizzo del rapporto aureo nell'arte, non ritengono che esso sia da considerarsi un'immutabile norma estetica, ed escludono che esista un canone di bellezza ideale (cfr. [7], p. 296). Fra i numerosi esempi di opere d'arte contemporanea ispirate alla sezione aurea si può citare anche il quadro *Il sacramento dell'Ultima Cena* (1955) di Salvador Dalí (1904-1989), le cui dimensioni sono quelle di un rettangolo aureo, e in cui altri rettangoli aurei compaiono nella disposizione delle figure. Inoltre, la tavola è sovrastata da un grande dodecaedro, le cui facce pentagonali ci riportano sempre alla sezione aurea.

proporzioni sono perfette (ma non è il caso del corpo di *Paperino*, che, in *Donald in Mathmagicaland*, cerca vanamente di incastrarsi in un rettangolo aureo!). Per esempio, nella *Nascita di Venere* (1482-85) di Sandro Botticelli, l'altezza da terra dell'ombelico della Venere è la sezione aurea della sua altezza complessiva.

Gli esempi più evidenti di rapporto aureo citati nel mediometraggio disneyano sono quelli della stella di mare, che è una stella a cinque punte, o della conchiglia del Nautilus, che è una spirale logaritmica. Spirali logaritmiche sono formate dagli stami di una margherita o di un girasole. E i tronchi, i rami e le foglie delle piante crescono e sono disposti secondo il rapporto aureo, dato che, con questo ordine, godono della migliore insolazione¹⁴.

Tale armonia è presente nel microcosmo come nel macrocosmo, negli esseri infinitamente piccoli e negli enormi corpi celesti. Oggi sappiamo che la molecola del Dna, la celebre doppia elica, alterna un solco grande e un solco piccolo. Il rapporto tra le loro lunghezze è, appunto, il rapporto aureo. Analogamente, su scala cosmica, i bracci a spirale della Via lattea e di altre galassie sono riconducibili allo stesso schema. Viene da pensare che la sezione aurea sia la sigla che il Creatore ha posto nel mondo naturale¹⁵.

Così, lo Spirito d'Avventura può concludere il suo discorso a *Paperino* sull'importanza della matematica con queste parole, di stampo filosofico, attribuite a Galileo Galilei: "La matematica è l'alfabeto nel quale Dio ha scritto l'universo". Secondo questa concezione, la matematica, e in particolare la geometria, costituisce la trama e l'ordito del mondo.

Effettivamente, anche per Galileo, la vera scienza della natura è la meccanica geometrica perché, a giudizio del grande scienziato pisano, il mondo in sé è 'ontologicamente' geometrico. In un celebre passo del *Saggiatore* (1623), Galileo sostiene, appunto, che il libro dell'universo "è scritto in una lingua matematica, e i suoi caratteri sono cerchi, triangoli, e altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto"¹⁶. La "fattura" reale del mondo è di tipo geometrico, per cui solo chi conosce il linguaggio matematico risulta in grado di decifrarla. In questo senso, Galileo si proclama "pitagorico".

14 I quozienti di fillotassi (cioè della disposizione delle foglie) si possono esprimere come quozienti dei numeri di Fibonacci (cfr. nota 11). Ricordiamo che fra le spirali logaritmiche potremmo citare anche i vortici degli uragani e il volo del falco pellegrino quando cala sulla sua preda.

15 Cfr. sull'argomento l'opinione espressa da Vittorio Messori in un articolo pubblicato sul "Corriere della sera" del 28 dicembre 2009 (*Il segreto dell'armonia. Quel numero divino che scorre nel sangue*): "Bisogna guardarsi, certo, da forzature apologetiche e riconoscere che non tutto, nella natura, è misura e armonia. L'ordine sembra convivere con il disordine, almeno apparente. Ma c'è da capire coloro che, dai tempi pagani sino a oggi – in ambienti non solo cristiani ma anche ebraici, musulmani, buddisti, non dimenticando la tradizione delle Logge – dicono di scorgere nella 'sezione aurea' le impronte digitali del Deus absconditus, del Dio che si cela e al contempo si rivela, lasciando tracce, indizi, segnali della Sua creazione". Sul rapporto fra la sezione aurea, l'arte e la biologia, cfr. anche M. Piattelli Palmarini, *Così occhio e mente colgono la bellezza*, in "Corriere della sera", martedì 12 gennaio, 2010.

16 [6], vol. VI, p. 232.

9. La scoperta delle grandezze incommensurabili

Abbiamo già fatto notare che il numero che esprime il rapporto fra la sezione aurea di un segmento e il segmento stesso è un numero “irrazionale”, e cioè $0,618\dots$. In effetti, il segmento e la sezione aurea sono grandezze “incommensurabili” ed è importante rilevare che la scoperta di grandezze di questo tipo, effettuata dai Pitagorici, contraddice l’originaria concezione dei numeri sostenuta dai primi aderenti della setta, secondo i quali le figure geometriche sarebbero composte da un numero *finito* di punti, piccolissimi, ma non privi di dimensioni (a tale concezione abbiamo fatto riferimento nel precedente § 4).

Come abbiamo visto, i primi Pitagorici concepiscono il punto come una sorta di granellino di sabbia, e i segmenti come un insieme finito di questi granellini, posti a contatto l’uno di seguito all’altro. Tale ingenua concezione entra appunto in crisi allorché i Pitagorici scoprono l’esistenza di grandezze incommensurabili. Vediamo dunque di chiarire, in termini generali, in che cosa consista il problema.

Due segmenti AB e CD si dicono commensurabili quando esiste un segmento EF contenuto m volte in AB e n volte in CD , dove m e n sono numeri interi (Fig. 10). In altre parole, AB e CD sono commensurabili se ammettono un sottomultiplo in comune.

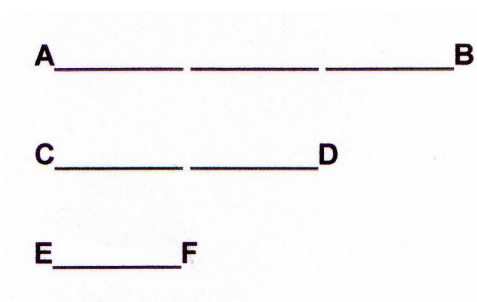


Figura 10.

Invece, due segmenti si chiamano incommensurabili quando non esiste una siffatta misura comune. Il rapporto fra due grandezze incommensurabili non può quindi essere espresso da un numero razionale, rappresentato da una frazione m/n , con m e n numeri interi. Sono grandezze incommensurabili la sezione aurea di un segmento e il segmento stesso, così come la diagonale (AC) e il lato (AB) di un quadrato $ABCD$ (Fig. 11).

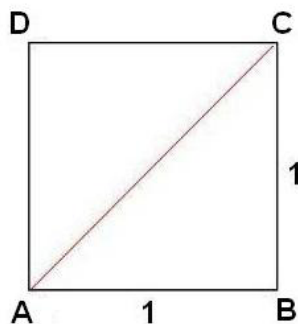


Figura 11.

Come e quando i matematici greci giungano a scoprire l'esistenza di grandezze incommensurabili è molto incerto. Secondo Aristotele, i Pitagorici sarebbero arrivati a tale scoperta dimostrando per assurdo che se la diagonale e il lato di un quadrato (l'ipotenusa e il cateto di un triangolo rettangolo isoscele) fossero commensurabili, allora un numero risulterebbe contemporaneamente pari e dispari.

Una prova di questo tipo, ad esempio, – scrive Aristotele – è quella che stabilisce l'incommensurabilità della diagonale, fondandosi sul fatto che quando viene supposta la sua commensurabilità, i numeri dispari risultano uguali a quelli pari¹⁷.

La prova è fondata su una *reductio ad absurdum* e può essere ricostruita nel seguente modo, seguendo quanto afferma Euclide in uno scolio del X libro dei suoi *Elementi*.

Supponiamo, per assurdo, che il rapporto fra la diagonale d e il lato l di un quadrato $ABCD$ sia commensurabile, e cioè che sia uguale al rapporto fra due numeri interi m e n . Si può ipotizzare che m e n siano primi fra loro, ossia che siano privi di divisori comuni (a parte l'unità), altrimenti si divide per questi. Dato che, per il teorema di Pitagora, il quadrato di d è equivalente al doppio del quadrato di l , ne segue che:

$$(1) \quad m^2 = 2n^2$$

Il numero di destra ($2n^2$) è pari, giacché ha 2 come fattore. Valendo l'uguaglianza, è pari anche il numero di sinistra (m^2). Quindi anche m è pari, essendo sempre dispari il quadrato di un numero dispari. Di conseguenza, n sarà dispari, avendo supposto all'inizio che m e n siano primi fra loro. Dunque, dato che m è pari, si può porre $m = 2p$. Sostituendo nell'uguaglianza precedente (1) a m il suo valore $2p$, si ha:

$$(2) \quad 4p^2 = 2n^2$$

Se dividiamo entrambi i membri per 2 si ottiene:

$$(3) \quad n^2 = 2p^2.$$

Ma allora anche n risulta pari, contro il risultato precedente. L'ipotesi della commensurabilità del lato del quadrato e della sua diagonale conduce all'assurdo che uno stesso numero, n , sia contemporaneamente pari e dispari. Essendo n arbitrario, ciò che vale per n vale per ogni altro numero; perciò, ogni numero pari è dispari, e viceversa. Il che è assurdo. Dunque, lato e diagonale sono incommensurabili.

I greci chiamavano il rapporto fra la lunghezza della diagonale e quella del lato del quadrato *alogos*, cioè "irrazionale", e ancora oggi denominiamo in questo modo un numero come $\sqrt{2}$ ($= 1,4142135623 \dots$), che esprime, appunto, la relazione fra queste due grandezze incommensurabili. Che $\sqrt{2}$ sia il valore del rapporto fra la diagonale e il lato è facilmente dimostrabile applicando, di nuovo, il teorema di Pitagora a uno dei due triangoli rettangoli in cui la diagonale divide un quadrato di lato 1. Se la diagonale d è l'ipotenusa, avremo, dunque, che $d^2 = 1^2 + 1^2$, cioè $d^2 = 2$, e quindi $d = \sqrt{2}$.

17 Aristotele, *Analitici Primi*, I (A), 23, 41 a 25, in [1], vol. I, p. 156.

10. La crisi del pitagorismo

È stato comunque messo in dubbio che la dimostrazione – molto astratta – relativa all'incommensurabilità della diagonale e del lato di un quadrato alla quale fa riferimento Aristotele possa essere quella originale. Gli storici della matematica, infatti, ritengono che i Pitagorici scoprano l'incommensurabilità considerando piuttosto un pentagono regolare con le sue cinque diagonali (come quello della precedente Fig. 5). In questo caso, incommensurabili sono il lato e la diagonale del pentagono, fra cui sussiste un rapporto "aureo".

Tracciando le diagonali e considerando i loro punti di incontro i Pitagorici individuano un altro pentagono regolare le cui diagonali individuano a loro volta un pentagono ancora più piccolo, e così via. Ebbene, sfruttando le proprietà del pentagono, si può dimostrare che un eventuale sottomultiplo comune della diagonale e del lato del pentagono di partenza sarebbe sottomultiplo comune della diagonale e del lato dei pentagoni via via costruiti, col risultato, evidentemente assurdo, che a un certo punto si otterrebbe un pentagono con la diagonale e il lato entrambi minori del sottomultiplo comune che inizialmente si era supposto esistere¹⁸.

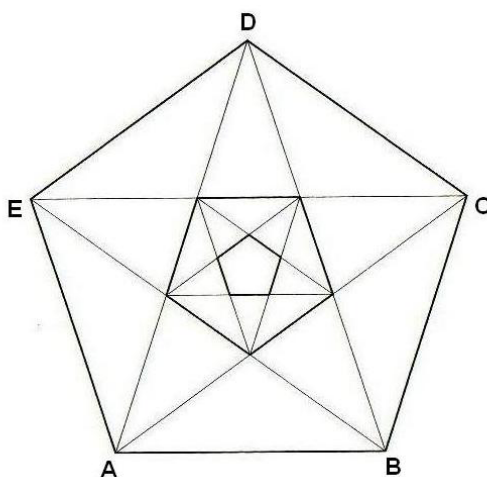


Figura 12.

Se così fosse, non sarebbe stato $\sqrt{2}$ a rivelare per la prima volta l'esistenza di grandezze incommensurabili, ma $\sqrt{5}$, dato che, come si è già detto, il rapporto del lato di un pentagono regolare con la diagonale (di cui rappresenta la sezione aurea) è:

$$\frac{\sqrt{5} - 1}{2}$$

Ma per quale motivo la scoperta delle grandezze incommensurabili – comunque sia avvenuta – mette in crisi la concezione granulare delle linee sostenuta dai primi Pitagorici? La risposta è semplice: se ogni segmento fosse costituito da un numero finito di punti

¹⁸ [2], p. 13

(piccoli ma *non nulli* e tutti uguali fra loro come pensavano originariamente i seguaci di Pitagora), uno qualunque di questi punti sarebbe contenuto un numero intero finito di volte (per esempio m volte) nella diagonale del pentagono, e un altro numero intero finito di volte (per esempio n volte) nel lato. Ma allora la diagonale e il lato avrebbero un sottomultiplo in comune, il punto, e non sarebbero incommensurabili. Viene dimostrato, invece, che le cose non stanno affatto in questo modo. Così i Pitagorici devono riconoscere che il punto non è un granello, ma va concepito come un ente senza dimensioni. Di conseguenza ogni segmento, per quanto breve, conterrà sempre un numero *infinito* di punti: l'infinito fa dunque irruzione nella geometria!

La natura ha sempre una sua logica matematica – attesta lo Spirito d'Avventura – ma ricorda, Paperino, che in matematica esiste il concetto di infinito! [...] Nella stella pitagorica si può inserire un'altra stella, e poi una terza, una quarta e così via all'infinito. Non c'è matita che possa disegnare finemente come l'immaginazione, né carta tanto grande da contenerla. È solo nella mente che si può contenere la nozione di infinito.

Secondo la leggenda, la scoperta delle grandezze incommensurabili diviene uno dei segreti più inconfessabili dei Pitagorici, poiché fa crollare la primitiva concezione monadica della setta e la tesi fondamentale dell'aritmo-geometria. La tradizione racconta che un giorno Ippaso di Metaponto viola l'obbligo del segreto, rendendo di pubblico dominio la teoria degli irrazionali. Ippaso è cacciato dalla scuola pitagorica e viene maledetto. Il traditore si dà alla fuga ma non fa molta strada, perché è colpito dall'ira degli dei e perisce in un naufragio a poche miglia da Crotone.

È fama che colui il quale per primo rese di pubblico dominio la teoria degli irrazionali, – scrive Euclide – sia perito in un naufragio, e ciò perché l'inesprimibile e l'inimmaginabile avrebbero dovuto rimanere sempre celati. Perciò il colpevole, che fortuitamente toccò e rivelò quest'aspetto delle cose viventi, fu trasportato al suo luogo d'origine e là venne in perpetuo flagellato dalle onde¹⁹.

La crisi del Pitagorismo sarà resa ancora più acuta dalla scoperta dei paradossi di Zenone (489 - 430 a.C.) sulla molteplicità e sul movimento (di cui il più celebre è il paradosso di Achille e della Tartaruga), entrambi legati all'infinita divisibilità dello spazio geometrico. Inoltre, la scoperta dei Pitagorici porterà Platone a considerare gli enti geometrici, e in primo luogo il punto, come *enti ideali*, che possiedono una realtà diversa dagli enti corporei. Dall'ingenuo realismo fisico dei Pitagorici, si passa al realismo metafisico di Platone, che intende la quantità – oggetto di studio della geometria – non più come esistenza corporea, ma come essenza razionale, non per questo, però, meno reale. Infatti, a giudizio di Platone, le entità matematiche sussistono in una dimensione metafisica extra-mentale al di fuori dello spazio e del tempo, e cioè nel cosiddetto "Iperuranio".

19 [5], t. III, p. 417.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Aristotele, *Organon*, Laterza, Bari 1970, 3 voll.
- [2] Borga, M. e Palladino, D., *Oltre il mito della crisi. Fondamenti e filosofia della matematica nel XX secolo*, La Scuola, Brescia 1997.
- [3] Cabrera, J., *Da Aristotele a Spielberg. Capire la filosofia attraverso i film*, Bruno Mondadori, Milano 2000, p. 28.,
- [4] Centrone, B., *Introduzione ai Pitagorici*, , Laterza, Roma-Bari 1996.
- [5] Euclides, *Elementa*, a cura di. di L. Heiberg e H. Menge, Teubner, Lipsia, 1883-1888.
- [6] Galilei, G., *Opere*, edizione nazionale a cura di A. Favaro, 20 voll. in 21, Giunti-Barbera, Firenze 1890-1909 (ristampe 1929-1939, 1964-1966, 1968).
- [7] Livio, M., *La sezione aurea. Storia di un numero e di un mistero che dura da tremila anni*, Rizzoli, Milano 2003.
- [8] Perrone, P., *Quando il cinema dà i numeri. Dal mathematics movie all'ossessione numerologica*, , Le Mani, Genova 2009.
- [9] Sani, A., *Infinito*, La Nuova Italia, Firenze 1998.
- [10] Smith, D., *Disney A to Z. The Official Encyclopedia* (3 ed.), Disney Press, New York 1997.

Fisica

L'ATTIVITÀ SPERIMENTALE DI ENRICO FERMI, TRA SCIENZA, STORIA ED ETICA

MARCO MARIA MASSAI

Dipartimento di Fisica, Università di Pisa

1. Introduzione

Scrivere di Enrico Fermi, anche se limitatamente alla sua attività di fisico sperimentale, rappresenta una sfida che si sa già essere persa in partenza: e questo, sia per la moltitudine di temi che segnano il suo percorso scientifico, sia per l'incapacità di addentrarsi nella maggior parte di essi. Ma resta il fascino di parlare di un protagonista del nostro tempo e di dare un piccolo contributo a mantenere vivo il ricordo e dell'uomo e della sua opera.

Parlare di Fermi vuol dire raccontare le imprese di un fisico, l'ultimo forse nella storia della scienza, che ha conquistato una fama indiscussa sia con lavori geniali ed innovativi nel campo della fisica teorica, sia con imprese tecnico-sperimentali tra le più grandi che l'uomo avesse mai tentato prima. Vuol dire anche raccontare di un scienziato che ha avuto i riconoscimenti più alti, in patria e all'estero, assieme ai suoi principali collaboratori e amici. Vuol dire infine raccontare di un uomo che ha fatto delle scelte che mai prima di allora nessuno era stato chiamato a fare; e alcune di queste, possiamo affermare oggi, hanno lasciato un'eredità di dubbi laceranti.

Avventurarsi in un percorso che tracci l'attività sperimentale di Enrico Fermi offre l'opportunità di incontrare numerose scoperte, invenzioni, misure, idee, molte delle quali hanno contribuito a caratterizzare il mondo come lo vediamo oggi, anche a distanza di decenni. E per un fisico che ha lasciato segni altrettanto indelebili in molti campi della fisica teorica, questo fatto è semplicemente straordinario. Non un'analisi per aree di ricerca omogenee, ma un semplice racconto, quasi una cronaca, un diario su oltre trent'anni di lavoro, credo che sia un modo semplice ed efficace per assicurare una sufficiente comprensione dell'eredità che Fermi ha lasciato alla Scienza e all'Umanità.

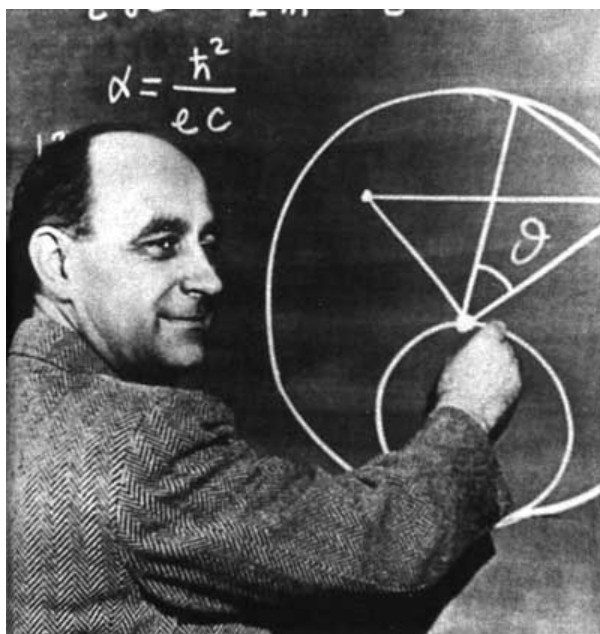


Figura 1. Enrico Fermi durante una lezione.

2. Cenni sulla vita

Enrico Fermi nasce il 29 settembre 1901 a Roma, ove trascorre un'infanzia normale in una famiglia piccolo-borghese con il padre ispettore delle ferrovie, e il fratello, più grande, che ne diviene l'inseparabile amico e compagno di avventure e con il quale si dedica ai primi esperimenti scientifici. Ha solo quattordici anni quando rimane sconvolto per l'improvvisa morte del fratello, al quale era legato profondamente; il giovane Enrico si dedica quindi allo studio della fisica e della matematica, che affronta in modo originale studiando anche sul massiccio trattato di novecento pagine, in latino, *Elementorum Physicae Mathematicae* del padre gesuita Andrea Caraffa (trovato chissà come su una bancarella a Campo de' Fiori). Compie gli studi liceali a Roma ma, nella carriera scolastica, Fermi non appare ai suoi professori come uno studente eccezionale, anche se certamente bravo e dotato. Il suo modo di scrivere, essenziale e poco incline alla retorica tipica dell'epoca, gli garantiscono solo una onesta sufficienza.

Certo, hanno un'impressione radicalmente diversa i suoi esaminatori, quando si presenta al concorso di ammissione alla Scuola Normale, a Pisa, nel 1918, al quale concorre in seguito all'interessamento di un amico di famiglia che lo aveva seguito negli ultimi anni di liceo. In questa occasione, Fermi stupisce la Commissione per la sua straordinaria preparazione fisico-matematica. Vito Volterra, matematico, tra i maggiori in Italia, sospetta persino che l'elaborato non sia opera sua e lo aspetta per il colloquio durante il quale però non esita a ricredersi completamente!

Nell'Istituto di Fisica di Pisa, in piazza Torricelli, non ci sono fisici teorici e così gli studi non possono portare al giovane universitario maggiori conoscenze di quelle che ha già raggiunto da autodidatta; d'altra parte, la necessità di affrontare la pratica del

laboratorio lo avvicina al mondo della fisica sperimentale, ancora solitaria regina degli insegnamenti in fisica in Italia: solo nel '26 infatti verrà istituita la prima cattedra di Fisica Teorica, e proprio per l'ancora giovane Enrico.

Fermi affronta quindi lo studio della nuova teoria proposta da Einstein solo pochi anni prima, la Relatività Generale, le cui previsioni erano state confermate dalle osservazioni astronomiche di Lord Eddington, nella primavera del 1919; studia il calcolo tensoriale, la meccanica quantistica, la fisica atomica che si stava mostrando essere il nuovo confine della scienza della Natura.

Il direttore dell'Istituto di Fisica di Pisa, Luigi Puccianti, sperimentale, gli chiede presto di organizzare seminari su queste materie, all'epoca del tutto ignote alla maggioranza dei fisici italiani.

Fermi, studente dell'Università di Pisa e allievo della Scuola Normale, inizia quindi a frequentare il laboratorio di spettroscopia assieme a Franco Rasetti e Nello Carrara. Le sue vaste ed esclusive conoscenze sulla fisica moderna convincono il Professor Puccianti a lasciare liberi questi 'ragazzi' di frequentare il laboratorio. Costruiscono rudimentali apparati sperimentali per esplorare il mondo atomico alla ricerca di risposte per validare o falsificare la nuova teoria, la Meccanica Quantistica, da poco introdotta da Bohr e Sommerfeld. Insomma, giovani studenti che con pochi mezzi, ma fantasia e ingegno hanno la possibilità di indagare la natura e le sue leggi, ai confini della conoscenza.

Agli inizi del Novecento, in Europa, la fisica teorica si è già affermata come disciplina autonoma: con Kirchhoff, Hertz, Planck, a Berlino e a Bonn; ma in Italia la fisica è solamente sperimentale, pur essendo attivi da anni degli ottimi fisici matematici e geometri, come Levi-Civita, Ricci, Enriques, Bianchi, il lavoro dei quali aveva fornito allo stesso Einstein il sostrato di matematica e geometria necessario per sviluppare le sue rivoluzionarie idee di spazio, di tempo, di massa ed energia. Ma il cambiamento di scenario che era sollecitato dalle nuove teorie in fisica atomica e dalle misure sempre più accurate che ne sostenevano la validità, poneva già problemi profondi: qual era la realtà dei sistemi studiati attraverso i nuovi strumenti?

E poi, con la meccanica quantistica e la relatività, mutava lo scenario di una Natura oggetto 'esterno' di studio e d'indagine, che invece diveniva sempre meno accessibile e sempre più mutevole, proprio sotto l'azione degli strumenti usati per studiarla: uno scenario interessante e una sfida unica per un giovane brillante che intende esplorare i terreni della fisica ancora sconosciuti.

Fermi non accede alla cattedra di fisica matematica messa a concorso nel 1925; invece, nel 1926 vince quella, prima in Italia, di fisica teorica. Viene chiamato a Roma, all'Istituto di via Panisperna, dove continua lo studio delle nuove teorie, portandovi continuamente originali contributi.

Ma una nuova avventura lo stava aspettando. Trova infatti sul suo cammino un gruppo di giovani straordinari: di nuovo Rasetti, poi Segré, Amaldi e Pontecorvo, con i quali, apparentemente in modo contraddittorio rispetto alla propria formazione scientifica e alla cattedra appena vinta, Fermi si lancia nella ricerca in fisica sperimentale, cfr. [1, 3].

3. L'attività sperimentale di Fermi

1922, Pisa. *La tesi di laurea*. A partire da marzo, Fermi lavora alla tesi di laurea, sperimentale, sulla formazione delle immagini di diffrazione di raggi X prodotte da cristalli curvi; lavoro certamente pionieristico, ma non totalmente originale. Dopo la discussione della tesi presso l'Università che gli conferisce la Laurea in Fisica, discute una relazione per la Scuola Normale su argomenti di astrofisica teorica, "Teoria delle probabilità applicata allo studio delle comete".

1924. Roma - Leida. Tra i molti argomenti che affronta in questo periodo, soprattutto di carattere teorico, ne ricordiamo uno che avrà applicazioni nel campo dei rivelatori di particelle elementari: costruisce un modello con il quale, per analogia con l'interazione di un fotone con l'atomo che rimane ionizzato, riesce a descrivere l'effetto ionizzante di elettroni energetici che urtano atomi. Questo fenomeno è alla base del funzionamento dei rivelatori di particelle che sfruttano il fenomeno della ionizzazione di un gas, dal contatore Geiger (1913) alle più recenti Microgap Gas Chamber.

1925, Firenze. *Spettroscopia molecolare*. Viene chiamato per un incarico di insegnamento a Firenze. Qui ritrova Franco Rasetti con il quale comincia ad allestire un laboratorio per eseguire misure di spettroscopia molecolare utilizzando la radiazione elettromagnetica nell'intervallo delle microonde. È questo infatti l'intervallo di energia che permette di sondare i legami molecolari tra atomo e atomo. Insieme costruiscono bobine, rivelatori, circuiti elettrici, sempre dopo aver fatto dei conti, delle stime, approssimativi, certo, ma in grado di portare ad apparati funzionanti.

1927, Roma. Arrivato all'Istituto di Fisica a Roma, nel '26, per alcuni anni Fermi, su incarico del Direttore Orso Mario Corbino, allestisce e sviluppa un moderno laboratorio di spettroscopia atomica e molecolare, basandosi sull'esperienza di Rasetti e sull'entusiasmo di nuovi giovani che vengono reclutati a questo scopo: Edoardo Amaldi, Emilio Segrè e, in seguito, Bruno Pontecorvo.

1929, Roma. *Studi di Fisica del Nucleo*. Fermi decide di abbandonare la fisica atomica e dedica gli sforzi del suo gruppo allo studio del nucleo. Rasetti e Segrè vanno ad acquisire esperienza sulle tecniche di rivelazione frequentando i migliori laboratori europei. A dare un contributo sul piano teorico, che sarà di valore storico, arriva un giovane, Ettore Majorana, con il quale Fermi avrà occasione di confrontarsi molte volte, riconoscendone l'eccezionale competenza e valore.

1931, Roma. *Congresso Internazionale di Fisica Nucleare*. È un punto di svolta per la fisica italiana e in particolare per il Gruppo di Fermi che lo organizza, formato da giovani ricercatori che si presentano ai colleghi di tutta Europa con un'esperienza ancora limitata, ma che ambiscono a porsi sullo stesso livello dei laboratori più accreditati. In questo congresso si delineano le nuove linee di ricerca sperimentale nello studio del nucleo atomico.

L'impulso decisivo verrà con la scoperta nel 1932 del neutrone (Chadwick) che rivolu-

zionerà le ipotesi sul modello del nucleo dell'atomo: non più elettroni e protoni, ma protoni e neutroni. Il nucleo diventa la nuova frontiera della ricerca in fisica della materia.

1934, Roma. via Panisperna. Con la scoperta della radioattività artificiale indotta da particelle alfa (carica $++$) fatta nel gennaio del '34 da Irène Curie e Frédéric Joliot, si apre lo studio sperimentale sulla stabilità dei nuclei. Fermi e Rasetti, con il loro gruppo, decidono di cambiare tecnica: utilizzeranno neutroni che possono avvicinarsi al nucleo senza dover incontrare la repulsione coulombiana che invece limita l'utilizzo di particelle alfa. Costruiscono una camera a nebbia, diffrattometri per raggi gamma e contatori Geiger-Müller per potenziare il loro laboratorio. È un clamoroso successo: nel giro di alcuni mesi vengono sottoposti a bombardamento con neutroni, sistematicamente, tutti gli elementi della scala di Mendeleev e verranno prodotti oltre la metà degli isotopi radioattivi scoperti nel mondo nello stesso periodo.

Nell'estate del '34 concludono il loro lavoro bombardando il torio (90) e l'uranio (92), ultimo elemento conosciuto. Inaspettatamente, osservano ancora della radioattività che è da loro spiegata, pur con molti dubbi, con l'ipotesi che siano stati prodotti nuovi elementi della scala, detti 'trans-uranici'. Fermi non ne è convinto, ma la notizia trapela, diffondendosi nel mondo, ed è confermata in altri laboratori.

Esperio e ausonio (dai nomi di antiche popolazioni italiche...), se vennero accolti come una grande novità, per Fermi rappresentarono un cruccio in quanto non fu mai sicuro della interpretazione dei risultati sperimentali. L'idea di fondo era che l'assorbimento di neutroni portasse a nuclei più pesanti, e non certo alla loro frammentazione. Avevano preso un clamoroso abbaglio: nessun nuovo elemento. In realtà avevano scoperto la fissione dell'uranio indotta da neutroni con 4-5 anni di anticipo. Ma non se ne resero conto, cfr. [2].



Figura 2. Il Gruppo di via Panisperna. Da sinistra a destra: Oscar D'Agostino, Emilio Segrè, Edoardo Amaldi, Franco Rasetti, Enrico Fermi.

1934, Roma, 20 ottobre. Fermi si accorge degli strani risultati che si ottengono dal bombardamento dell'argento con neutroni. Le misure sono instabili, non si riescono a riprodurre, cambiano in continuazione. Sembra addirittura che esse dipendano dal supporto (tavolo di legno o di marmo!) sul quale è posto l'apparato sperimentale. E in parte è veramente così: la presenza di materiale ricco di nuclei leggeri, come l'idrogeno, rallenta i neutroni che "sembrano diventare più grandi" e quindi fanno aumentare la frequenza delle interazioni nucleari. È il 20 ottobre e Fermi fa la scoperta per la quale gli verrà conferito il Premio Nobel.

1938, Roma. Nella richiesta di finanziamenti che presenta alle autorità italiane, mette in evidenza due aspetti: il primo, tecnico, è in relazione alla necessità di costruire nuovi acceleratori di particelle, come stavano facendo negli Stati Uniti d'America, allo scopo di avere a disposizione fasci di neutroni più intensi, in quanto le sorgenti radioattive avevano dei limiti intrinseci (bassa intensità, energia limitata). Il secondo riguarda le applicazioni della radioattività artificiale:

Un altro importante campo di studi, per il quale si hanno già promettentissimi inizi, è l'applicazione di sostanze radioattive artificiali quali indicatori per l'analisi di reazioni chimiche. Non meno importanti si prospettano le applicazioni nel campo biologico e medico. Tale importanza è stata riconosciuta in vari paesi nei quali le ricerche sulla radioattività artificiale sono largamente sovvenzionate da istituzioni mediche. Alcune applicazioni riguardano le sostituzioni delle sostanze radioattive a quelle naturali per gli usi terapeutici. (Dalla proposta fatta da Fermi al CNR, il 29/01/1937 e citata da Giovanni Battimelli in: http://www.fisicamente.net/FISICA_2/index-1910.htm).

Anche qui una visione lungimirante sulle applicazioni della radioattività; chi lavora in un moderno ospedale sa bene quale aiuto venga oggi dal sapiente utilizzo di sostanze radioattive, naturali e artificiali, nella diagnostica e nella terapia.

Ma ormai il "Gruppo di via Panisperna" (con questo nome passerà alla storia) non esisteva più. Pontecorvo era a Parigi dal '36, presso il Laboratorio di Joliot; Rasetti andrà negli Stati Uniti, dove aveva lavorato con successo dieci anni prima, mentre Segrè era a Berkeley, da dove non tornò più, anche perché il 18 settembre 1938 ci fu la proclamazione delle leggi razziali,

1938, Stoccolma. Il 10 dicembre Enrico Fermi, a 37 anni, riceve il Premio Nobel per la fisica "per la scoperta di numerosi elementi radioattivi e del meccanismo di rallentamento dei neutroni".

Da Stoccolma, con tutta la famiglia, va in Inghilterra e da lì s'imbarca sulla motonave *Franconia*; sta andando negli Stati Uniti per un periodo di studio, su invito della Columbia University. Sa bene, però, che sta lasciando l'Italia per sempre e sa pure che ormai lascia ben poco dietro di sé: il suo Gruppo si è disperso, anche a seguito del clima razzista creato e alimentato dal Governo fascista in Italia, che gli ha inoltre negato i mezzi per proseguire le sue ricerche.

1939, *New York City*. Arrivato a New York, ai primi di gennaio, Fermi inizia subito a lavorare presso i Pupin Laboratories, della Columbia University, con Leo Szilard, fisico ungherese anche lui transfuga al pari di molti suoi colleghi europei, come von Neumann, Teller e Wigner. Fermi e Szilard si occuperanno dello studio del nuovo fenomeno della fissione artificiale dell'uranio, da poco osservato per la prima volta a Berlino da Otto Hahn e Fritz Strassmann (e correttamente interpretato da Lise Meitner, esule in Inghilterra), e pubblicato proprio mentre Fermi era in viaggio verso l'America. Il 25 gennaio, Fermi osserva per la prima volta i risultati della fissione provocata da neutroni lenti.

Si trattava ora di costruire un modello che spiegasse quantitativamente i risultati degli esperimenti. Fermi e Szilard intuiscono che nello sconvolgimento del nucleo seguito dalla fissione in due nuclei più leggeri si possono liberare uno o più neutroni e che questi possono essere usati per indurre la fissione di altri nuclei. È l'idea che sta alla base della pila atomica; ma anche della bomba A.

1942, *Chicago*. "Il navigatore italiano è appena sbarcato nel nuovo mondo". È la frase in codice con la quale Arthur Compton, illustre fisico americano, comunica al Presidente degli Stati Uniti, Franklin Delano Roosevelt, l'avvenuto successo dell'esperimento di Fermi al Metallurgical Laboratory. Nel laboratorio allestito sotto le tribune dello stadio di Chicago, quasi in mezzo alla città, Fermi, coordinando un folto gruppo di fisici, chimici e ingegneri, ha condotto in porto la realizzazione della prima pila atomica liberando parte dell'energia racchiusa nel nucleo dell'uranio. Ma ha anche prodotto Plutonio-239, necessario per produrre un secondo tipo di bomba A.

1942, *Los Alamos, New Mexico*. Nel periodo di Los Alamos, durante la realizzazione del "Progetto Manhattan" sotto la direzione del Generale Leslie Groves e la responsabilità scientifica di Robert Oppenheimer, Fermi dirige il Dipartimento F (F per Fermi!), creato allo scopo di dare un supporto a tutti gli altri gruppi di ricerca, teorica e sperimentale, in vari settori; ma non si limita alla messa a punto di una tecnologia completamente nuova e, fin dal primo momento, usa la pila come sorgente di neutroni molto intensa per studi di purezza della grafite, il cui uso come assorbitore è necessario per tenere sotto controllo il meccanismo di reazione a catena.

1943 – 1944, *Argonne, Illinois*. Nei due anni successivi, Fermi utilizza la fonte di neutroni per studiare il loro comportamento nell'interazione con la materia: dalle prime osservazioni e misure sulla riflessione e diffrazione di neutroni da parte di cristalli, nasce un nuovo campo di ricerca, l'ottica neutronica.

1945, 16 luglio, *Trinity - Alamogordo, New Mexico*. In uno sperduto angolo del deserto vicino ad Alamogordo viene fatta esplodere la prima bomba atomica, basata sulla tecnologia del plutonio-239. È la prima volta che l'uomo libera in maniera esplosiva l'energia del nucleo, immagazzinata all'inizio del tempo, nelle fucine delle stelle. Ed è la prima di una serie interminabile di esplosioni nucleari che ancora oggi non si è

arrestata, e che prosegue, seppur in misura grandemente ridotta, cfr. [4]. Fermi assiste all'esplosione e riesce a stimare il valore dell'energia liberata mediante l'osservazione dello spostamento di pezzetti di carta lasciati cadere sul pavimento. Un'ora dopo, è tra coloro che si recano sul punto dell'esplosione a prelevare campioni di terreno per studiarne la radioattività che si è formata a causa dell'esplosione nucleare. L'esposizione alle alte dosi di radiazioni, forse, gli sarà fatale.

1945, 3 – 6 agosto, Hiroshima - Nagasaki, Giappone. Due bombe atomiche, la prima all'uranio, la seconda al plutonio, a tre giorni di distanza l'una dall'altra, vengono sganciate sulle due città giapponesi. "I fisici hanno conosciuto il peccato", dirà Robert Oppenheimer a commento di questo tragico evento.

Le prime esplosioni atomiche della storia effettuate su centri abitati, e densamente popolati, erano ormai avvenute: possono essere anche viste, drammaticamente, come due esperimenti dai quali sono state raccolte una sterminata quantità di informazioni, soprattutto sugli effetti delle radiazioni ad alte dosi sull'uomo. Per fortuna, sono state anche le ultime e, vogliamo credere, grazie anche a quanto si è potuto imparare da quei tragici avvenimenti, che il sacrificio di centinaia di migliaia di vite umane non sia stato del tutto vano.

1949, Chicago. Tornando al lavoro teorico, ma con l'occhio attento alle nuove misure effettuate sui raggi cosmici, Fermi pubblica un lavoro nel quale propone un modello per spiegare la distribuzione in energia dei raggi cosmici che, provenienti dallo spazio profondo, raggiungono la Terra. Questi sono in massima parte protoni (ma anche nuclei di elio e di materiali più pesanti). Lo spettro energetico è dato dalla semplice legge di potenza: $dN/dE \sim E^{-2.7}$.

Fermi ipotizza che le particelle vengano accelerate a causa di urti multipli che subiscono con l'onda d'urto provocata dalle esplosioni delle Supernovae galattiche, mentre la loro traiettoria viene 'curvata' dal campo magnetico presente nella galassia, proprio come se fosse all'opera un immenso 'acceleratore cosmico'. Un numero elevato di collisioni successive può far crescere l'energia fino a valori altissimi, che però non possono eccedere un certo valore limite, corrispondente al raggio di Larmor, il quale non può superare le dimensioni della galassia. Un ulteriore aumento di energia porta la particella ad abbandonare la galassia dove è 'nata' e a iniziare il viaggio nello spazio intergalattico, prima di giungere fino a noi.

Dal 2008 orbita intorno alla Terra un osservatorio che misura lo spettro della radiazione gamma (ma anche degli elettroni) in un vasto intervallo di energia, fin quasi a 1 TeV, e che porta il nome di Fermi. Equipaggiato con strumenti tra i quali il LAT (Large Area Telescope), costruito con l'apporto di scienziati e tecnici italiani, contribuirà a svelare alcuni tra i numerosi misteri del cosmo.

1953, Chicago. Come sempre attratto da strumenti nuovi, Fermi, dopo aver preso confidenza con i programmi di calcolo e utilizzando i primi rudimentali ma già rivoluzionari calcolatori elettronici, quali l'ENIAC e il MANIAC, si dedica a un problema

originale: i sistemi fisici non lineari. Nel 1953 inizia lo studio, attraverso la simulazione numerica, di come si evolve nel tempo un sistema (unidimensionale) di 64 particelle tra le quali si esercita una forza con una componente non lineare – un problema che verrà ancora considerato “nuovo” dopo più di vent’anni.

Alcuni hanno visto in questo primo lavoro di simulazione numerica la nascita della “matematica sperimentale”. Fermi collabora con il matematico polacco Stanislaw Ulam e con l’informatico statunitense John Pasta a codificare un problema che passerà alla storia come “Problema di Fermi-Pasta-Ulam”, il quale rappresenta una vera e propria palestra nello studio di come si comporta un sistema in cui sono all’opera forze non-lineari (da cui lo studio dei “sistemi dinamici non-lineari”).

Dopo molti anni questo lavoro pionieristico verrà riconosciuto come la base per lo studio del caos deterministico. La sua importanza è molteplice.

- a) Per la fisica: si cerca di capire come si evolvono sistemi fisici, anche elementari, quando le interazioni (forze agenti) non sono più lineari, ma compare una componente, ad esempio, quadratica. È in effetti un passo importante per avere un modello della natura più realistico.
- b) Per la matematica: nella ricerca di soluzioni, compaiono molte zone sconosciute della matematica che solo dopo decine di anni verranno esplorate compiutamente.
- c) Per l’informatica: l’uso del calcolatore per la prima volta diventa dirimente rispetto alla possibilità di trovare la soluzione di un problema, perché solo il calcolo numerico può portare alla descrizione delle soluzioni, altrimenti inaccessibili per via analitica.



Figura 3. Enrico Fermi e i primi calcolatori elettronici.

1954, Italia. CEP (*Calcolatrice Elettronica Pisana*). Fermi fa il suo ultimo viaggio in Italia nell'agosto del '54 per un Convegno a Varenna, sul lago di Como. In questa occasione gli giunge una richiesta dal Rettore dell'Università di Pisa su come investire al meglio, ai fini della ricerca, una cospicua somma che si era resa disponibile dal trasferimento a Frascati del progetto di un Sincrotrone nazionale, che inizialmente doveva essere costruito a Pisa.

Fermi non ha dubbi: grazie alla sua diretta esperienza sui primi calcolatori sviluppati in America suggerisce di progettare e costruire un Calcolatore Elettronico per eseguire i complessi ma necessari calcoli che avrebbero permesso di trovare la soluzione, tra l'altro, di equazioni differenziali non integrabili analiticamente.

Nell'inverno del 1955 alcuni giovani ricercatori, fisici di Roma, vennero a Pisa per studiare le poche macchine elettroniche al mondo e buttare giù qualche idea sulla nuova calcolatrice e sulle proprietà logiche che avrebbe dovuto avere. Dopo pochi mesi il gruppo incaricato, formato da poche decine di ingegneri, fisici e matematici, iniziò la progettazione esecutiva. Nel 1957 inizia a funzionare la "Macchina Ridotta", primo prototipo della CEP, che dal '59 sarà il primo calcolatore interamente pensato, progettato, costruito e gestito in una università italiana.

Ma l'impulso allo sviluppo di una nuova branca della scienza non si esaurisce con l'hardware, anche se questo rimane basilare. L'enorme sforzo per sviluppare il software necessario per gestire la CEP favorisce gradualmente la crescita di una cultura che ormai si può chiamare 'informatica': dieci anni dopo, nel 1969, nasce a Pisa, primo in Italia, il Corso di Laurea in Scienze dell'Informazione.

In questi ultimi lavori, al culmine del suo percorso di scienziato e purtroppo alla fine della sua breve vita, si può vedere nel lavoro di Enrico Fermi un ritorno alla costante esigenza di affrontare rapidamente il calcolo di grandezze, la stima di valori, una prima valutazione della bontà di un nuovo modello, ma stavolta muniti di un nuovo potente strumento, il calcolatore elettronico. Calcoli e stime gli avevano permesso, nel 1923, a commento della prima edizione italiana della Relatività Generale (August Kopff, Hoepli, Milano 1923), di fare la seguente affermazione a proposito dell'equivalenza massa-energia, ipotizzata da Einstein:

La relazione tra massa ed energia ci porta senz'altro a delle cifre grandiose. Per esempio, se si riuscisse a mettere in libertà l'energia contenuta in un grammo di materia si otterrebbe un'energia maggiore di quella sviluppata in tre anni dal lavoro continuo di un motore di mille cavalli (inutili i commenti). Si dirà con ragione che non appare possibile che, in un prossimo avvenire, si trovi il modo di mettere in libertà queste enormi quantità di energia, cosa del resto che non si può che augurarsi, perché l'esplosione di una così spaventosa quantità di energia avrebbe come primo effetto di ridurre in pezzi il fisico che avesse la disgrazia di trovare il modo di produrla. (A. Kopff, I fondamenti della relatività einsteiniana, Hoepli, 1923, pp. 342 - 344)

Non sorprende che queste parole possano suscitare due reazioni: la prima, di ammira-

zione per un giovane, appena laureato, che comprende la portata della nuova teoria di Einstein, al contrario di molti illustri fisici italiani del tempo; la seconda, di incredulità e sconcerto per il bizzarro destino in serbo per quel fisico ventiduenne – proprio colui che per primo doveva liberare l'immensa energia nascosta nel nucleo.

4. Conclusioni, tra scienza ed etica

Certamente la scienza deve a Enrico Fermi molto di più che alla maggior parte degli scienziati che pure hanno segnato il Novecento: teorie fondamentali, modelli rivoluzionari, soluzioni tecnologiche che hanno cambiato il volto del secolo e che per qualcuno, hanno contribuito persino a dare il nome a una nuova era, l'Era Atomica. Non è quindi strano collegare al nome del fisico italiano molte delle questioni di carattere etico che in questa nuova era si sono andate ponendo, proprio in seguito alle scoperte e agli orizzonti dischiusi da Fermi. Prima fra tutte, la questione del ruolo e della responsabilità dello scienziato nel capire, prevedere e gestire le conseguenze che derivano dal proprio lavoro.

Per l'importanza ancora attuale di questioni nate in quel tempo ormai lontano, oggi siamo autorizzati a porci alcune domande, o meglio, porle retoricamente al grande scienziato:

Perché nel 1938 lasciò l'Italia?

Perché partecipò al Progetto Manhattan?

Perché non si dissociò dopo la fine della Germania nazista?

Perché non si oppose all'esplosione su Hiroshima?

Perché non si oppose a quella su Nagasaki?

Perché dopo la fine della guerra rimase nel Progetto Manhattan?

Queste domande vogliono essere soltanto un modo di porci criticamente, oggi, davanti alla storia, per capire meglio quel che è successo quasi settant'anni fa.

Anche il contesto storico nel quale si svolsero quelle vicende deve essere pazientemente ricomposto per cercare almeno parziali risposte. Fermi infatti non lavorava da solo, anzi, tra i suoi allievi e collaboratori vi furono scienziati e tecnici di grande valore. Quindi anche le responsabilità che si è assunto vanno suddivise, ma non sminuite; vanno anzi ricordate e studiate con un atteggiamento rispettoso e, al tempo stesso, aperto e critico, perché le condizioni nelle quali si sono trovati Fermi e i suoi colleghi del Progetto Manhattan possono ripresentarsi di nuovo – e forse si sono già ripresentate più volte. Un esempio per tutti: come si deve porre l'uomo di scienza davanti all'ipotesi di clonazione umana?

Non credo che possano esistere soluzioni a priori, pre-confezionate da usare al momento opportuno, in qualunque situazione. Credo sia invece necessario mantenere viva una discussione continua tra scienziati e tecnici che hanno le conoscenze per capire e le responsabilità per decidere. Ma credo sia altrettanto necessario compiere ogni sforzo possibile per coinvolgere tutti coloro che oggi hanno un ruolo in quei problemi ... e coloro che potranno averlo domani.

BIBLIOGRAFIA - WEBGRAFIA

- [1] Amaldi, E., *Da via Panisperna all'America: i fisici italiani e la seconda guerra mondiale*, a cura di G. Battimelli e M. De Maria, Editori Riuniti, Roma 1997.
- [2] <http://www.phys.uniroma1.it/DipWeb/museo/home.htm>
- [3] De Maria, M., *Enrico Fermi: un fisico da via Panisperna all'America*, a cura di M. De Maria, I grandi della scienza n.8, supplemento a *Le Scienze*, 368, aprile 1999.
- [4] <http://www.youtube.com/watch?v=dXxPRHkyAvY>

RADICI QUADRATE E COLLISIONATORI DI PARTICELLE¹

ROBERTO CASALBUONI

*Dipartimento di Fisica, Sezione INFN, Istituto G. Galilei per la Fisica Teorica e OpenLab,
Università di Firenze*

1. Introduzione

Nel 1928, Paul Adrien Maurice Dirac formulò la versione relativistica della meccanica quantistica [1, 2]. La teoria di Dirac aveva però degli aspetti problematici. La risoluzione di questi problemi portò Dirac alla formulazione del concetto di antiparticella [3]. L'idea era rivoluzionaria ma ebbe quasi subito una conferma sperimentale dalla scoperta di Carl David Anderson dell'antielettrone, o positrone, fatta nell'anno successivo [4]. Nei prossimi paragrafi vedremo come Dirac arrivò all'idea di antimateria. Le antiparticelle furono poi usate negli acceleratori di particelle a partire dagli anni Sessanta, in particolare con un prototipo di collisionatore realizzato a Frascati sotto la guida di un fisico austriaco, Bruno Touschek. Attualmente, moltissimi acceleratori usano collisioni particelle-antiparticelle che permettono di accedere facilmente a nuove forme di materia. Accenneremo infine a una importante applicazione diagnostica dei positroni.

2. Antiparticelle e radici quadrate

Tutti conoscono la famosa equazione di Einstein che connette l'energia di una particella con la sua massa, $E = mc^2$. Dove m è la massa della particella e c la velocità della luce. Questa relazione si riferisce ad una particella ferma. Dunque ci possiamo domandare quale sia l'energia associata ad una particella in movimento. La teoria della relatività ci insegna che vale la seguente relazione:

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2,$$

dove p è la quantità di moto della particella ($p = mv$, con v la velocità). Per una particella ferma, $p = 0$, ed estraendo la radice quadrata si ritrova la famosa relazione di Einstein. Ma i matematici ci insegnano che un'equazione quadratica ha due soluzioni, una positiva ed una negativa. Per esempio, le soluzioni dell'equazione $x^2 = 4$, sono $x = +2$ e $x = -2$. Dunque anche nel nostro caso, se vogliamo conoscere l'energia della particella, dovremo considerare entrambe le soluzioni: una positiva

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2},$$

e una negativa

¹ Lezione tenuta a Firenze il giorno 11 novembre 2010 presso la Sala delle Feste, Palazzo Bastogi, nell'ambito di Pianeta Galileo.

$$E = -\sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$$

Il problema che Dirac dovette affrontare era proprio l'esistenza di queste soluzioni negative che, come vedremo, la meccanica quantistica non può ignorare. Per capire le difficoltà associate alle energie negative riportiamo in un grafico le formule che danno le due soluzioni (positiva e negativa) dell'energia in termini dell'impulso, assumendo per semplicità (come in pratica abbiamo fatto nelle formule precedenti) che la particella si muova lungo una direzione fissata, e che quindi intervenga nelle equazioni solo l'impulso lungo quella direzione.

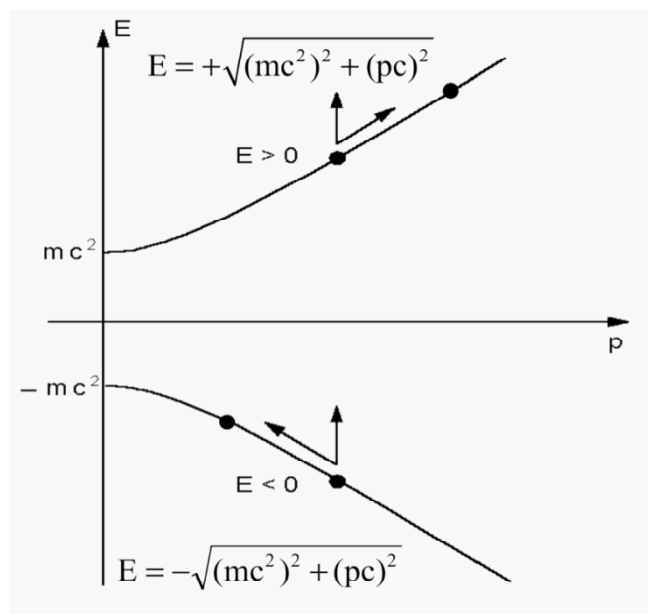


Figura 1. Grafico delle soluzioni a energia positiva e negativa.

Il grafico in Figura 1 rappresenta l'energia della particella in funzione della quantità di moto p . Il significato del grafico è che se la particella ha una quantità di moto p , la sua energia positiva si trova disegnando sulla curva superiore il punto sulla curva corrispondente all'ascissa p . L'energia è allora la corrispondente ordinata. Analogamente per la soluzione ad energia negativa.

Siamo ora in grado di vedere dove sta il problema. Se si ha una particella a energia positiva e ne aumentiamo l'energia, il punto sulla curva si sposta verso l'alto a destra, mostrando che la quantità di moto aumenta. Questo è il comportamento usuale dei corpi, cioè: aumentandone l'energia, la velocità cresce. Ma se prendiamo una particella a energia negativa, con il punto rappresentativo che adesso sta sulla curva inferiore del grafico, vediamo che, aumentandone l'energia, il punto si sposta verso l'alto ma questa volta a sinistra, e quindi l'impulso diminuisce.

Questo è un comportamento assolutamente anomalo rispetto a quanto osservato in natura ed è appunto l'origine delle difficoltà nella teoria di Dirac. D'altra parte, il pro-

blema può essere superato nell'ambito della meccanica classica. Infatti, noi sappiamo che classicamente le quantità fisiche cambiano con continuità. Per esempio, possiamo fornire energia a un sistema solo in modo continuo o, come diceva Newton: *la natura non fa salti!*

Se ritorniamo alla Figura 1 vediamo che le due curve sono separate di una quantità che, per $p = 0$, cioè per particelle ferme, vale $2mc^2$. Dunque, si può passare da uno stato ad energia positiva a uno ad energia negativa solo facendo un salto energetico pari ad almeno $2mc^2$. Questo è impossibile secondo la meccanica classica; quindi, se tutte le particelle dell'universo sono inizialmente in uno stato di energia positiva, non vedremo mai particelle a energia negativa.

La meccanica quantistica prevede invece che siano appunto possibili dei salti discreti di energia. L'ipotesi avanzata da Planck nel 1900 sui quanti di energia, implementata da Einstein nel 1905 con l'ipotesi del fotone, cioè pensando che una radiazione di frequenza ν corrispondesse a un quanto di energia $E = h\nu$, implicava che l'energia potesse essere emessa ed assorbita in quantità discrete, appunto in quanti. Ma allora una particella a energia positiva potrebbe perdere energia emettendo un quanto di radiazione elettromagnetica (un fotone), con energia sufficiente per andare in uno stato di energia negativa. Questo, unito al fatto che, in natura, per ogni sistema lo stato di equilibrio corrisponde allo stato con minima energia, fa vedere che una particella a energia negativa perderebbe sempre più energia fino ad andare all'equilibrio ad una energia corrispondente a meno infinito!

Le considerazioni precedenti sono del tutto generali e si applicano a ogni teoria relativistica, ma la teoria di Dirac era disegnata per descrivere gli elettroni (a quell'epoca si conoscevano solo elettroni, protoni e fotoni – il neutrone sarà scoperto nel 1932). La peculiarità degli elettroni, scoperta da Pauli nel 1925, è quella per cui due elettroni non possono stare, simultaneamente, nello stesso stato quantico ("Principio di esclusione"). Ricorrendo a un'immagine classica, gli elettroni ruotano attorno al nucleo secondo certe orbite. Il Principio di esclusione afferma che in ogni orbita ci possono stare al più due elettroni. Infatti gli elettroni hanno un momento angolare intrinseco che può assumere solo due valori

$$S = \pm \frac{\hbar}{2}$$

e dunque in un'orbita possono stare solamente un elettrone con S (*spin*) positivo e un altro con S negativo. Usando questo principio era possibile prevedere il riempimento delle orbite successive e ottenere una spiegazione, almeno qualitativa, della tavola periodica di Mendeleev.

Dirac pensò allora di sfruttare a suo vantaggio questo principio assumendo che tutti i possibili stati a energia negativa fossero occupati da elettroni. Ne conseguiva che, per un elettrone a energia positiva, era impossibile fare una transizione in uno stato a energia negativa, dato che tutti i posti erano occupati: era come volere una camera in un

albergo completamente occupato. In questo modo Dirac poteva risolvere il problema della stabilità [3].

D'altro canto, questa interpretazione portava a una serie di conseguenze. Infatti, un elettrone a energia negativa può assorbire un fotone con energia sufficiente per passare a uno stato ad energia positiva. Si arriva a una situazione che presenta una lacuna nel "mare" degli elettroni a energia negativa più un elettrone a energia positiva. Come si possono interpretare le lacune?

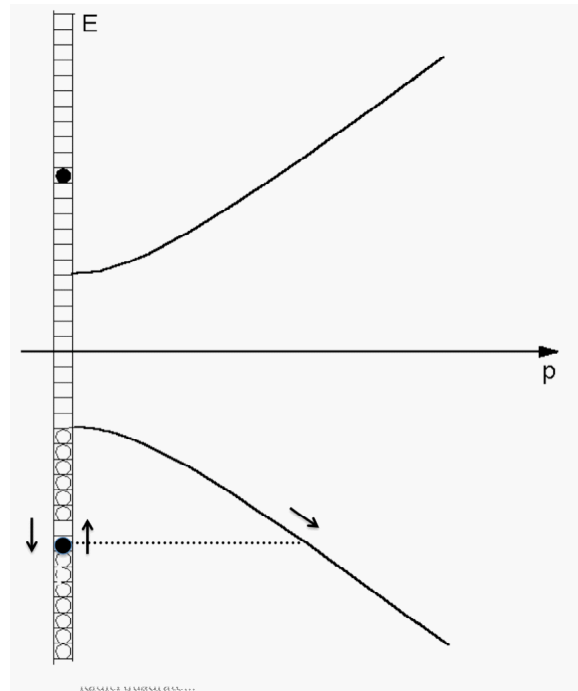


Figura 2. I pallini bianchi sulla scala delle energie negative indicano stati occupati. Il quadrato bianco una lacuna ed i pallini neri indicano stati occupati a energia negativa e positiva.

In Figura 2 abbiamo rappresentato gli stati pieni a energia negativa con pallini bianchi e un pallino nero, dato che ci concentreremo su questo elettrone. Gli stati vuoti sono i quadratini bianchi. La situazione corrisponde a un elettrone ad energia negativa che sia stato eccitato (pallino nero ad energia positiva), lasciando una lacuna nel mare. Se all'elettrone ad energia negativa sottostante alla lacuna (pallino nero) applichiamo energia sufficiente per andare a occupare la lacuna sovrastante, vediamo che la lacuna precedente viene occupata, mentre si libera una lacuna al posto dell'elettrone rappresentato dal pallino nero. Il risultato è che, applicando energia, la lacuna si è trasferita in basso, quindi, se assegniamo un impulso alla lacuna, vediamo che la sua quantità di moto è aumentata. Dunque, una lacuna si comporta come una particella.

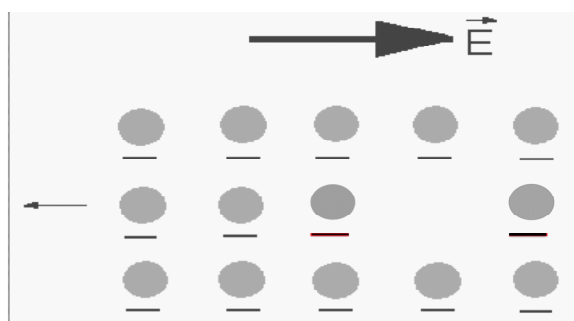


Figura 3. Nella figura sono rappresentate delle cariche negative più una lacuna.

Se poi consideriamo un sistema di cariche negative, come in Figura 3, con una lacuna, cui applichiamo un campo elettrico, le cariche negative si sposteranno in direzione opposta al campo e quindi la lacuna si sposterà verso destra. Pertanto la lacuna si comporta come una normale particella ma con carica opposta a quella dell'elettrone. Dire *lacuna* è come dire *antiparticella*. L'antiparticella è identica alla particella (di cui è anti), salvo che ha segno opposto della carica.

Siamo adesso in grado di capire i nuovi processi che si possono generare. Se un elettrone a energia negativa assorbe un fotone e passa a uno stato ad energia positiva, è come dire che il fotone iniziale produce un elettrone ad energia positiva più una lacuna o antiparticella. Questo processo è detto di *creazione di coppie*. In maniera analoga, se abbiamo una lacuna ed un elettrone ad energia positiva che emette un fotone con energia tale da permettergli di arrivare ad occupare la lacuna, dalla coppia iniziale elettrone-lacuna o elettrone-positrone produciamo energia e la coppia sparisce, dato che non abbiamo più né l'elettrone né la lacuna iniziali: è il processo di *annichilazione di coppie*.

Questa interpretazione fu data da Dirac nel 1931 e l'anno dopo Anderson, osservò il passaggio di una particella con la massa dell'elettrone ma con carica opposta, tramite uno strumento detto "camera a nebbia". Si tratta di una camera che contiene del vapore sovrassaturo in cui, il passaggio di una particella carica crea dei nuclei di condensazione che danno luogo a delle minuscole goccioline. La traccia della particella può quindi essere visualizzata fotografando la camera. Ovviamente questo fu un enorme successo per la teoria di Dirac e fu presto dimostrato che ogni particella ha la sua propria antiparticella. Qualche volta accade anche che l'antiparticella della particella sia la particella stessa. Questo vale per le particelle che non hanno alcun tipo di carica come, per esempio, il fotone la cui antiparticella è il fotone stesso.

3. I collisionatori di particelle

Il 7 Marzo 1960, Bruno Touschek, brillante fisico teorico austriaco trapiantato a Roma, tenne uno storico seminario ai Laboratori di Frascati (dove lavorava), in cui fu discussa la possibilità di realizzare un nuovo tipo di acceleratore di particelle con fasci di elettroni e di positroni che avrebbero dovuto collidere tra di loro.

La novità di questa proposta non stava tanto nel fatto di far collidere delle particelle le une contro le altre, sfruttando l'energia in modo molto più vantaggioso rispetto alla collisione su un bersaglio fisso. Infatti, si può mostrare che in una collisione tra particelle che si urtano tra loro con velocità uguali ed opposte, l'energia a disposizione è data semplicemente dalla somma delle energie dei due fasci. Invece, nel caso del bersaglio fisso, l'energia disponibile va come la radice quadrata dell'energia del fascio. Per esempio, se facciamo collidere due fasci di protoni di 30 GeV ciascuno, si ha un'energia a disposizione pari a 60 GeV. Per raggiungere lo stesso risultato con una macchina a bersaglio fisso, occorrerebbe un fascio con energia di circa 2000 GeV. Questo significa che a parità di energia a disposizione, l'acceleratore può avere dimensioni più piccole realizzando allo stesso tempo un grosso risparmio in energia elettrica per il funzionamento. In effetti questa soluzione era già stata proposta nel 1943 da Ralf Wideroe, un fisico norvegese con il quale Touschek aveva collaborato in gioventù. La stessa idea era stata ripresa anche negli Stati Uniti intorno agli anni Cinquanta. In questo caso si considerava la possibilità di fare due anelli tangenti con elettroni che circolavano nei due anelli (in direzione opposta) e che si potevano scontrare nella regione di tangenza. L'idea fu ripresa anche in Russia ma, in tutti questi casi, l'attenzione era più sui vantaggi della macchina in quanto tale e non sulla fisica che si poteva studiare. Per esempio, nella collisione elettrone-elettrone nei due anelli tangenti si poteva fare uno studio dell'elettrodinamica quantistica a energie più elevate, ma le speranze di poter analizzare nuova fisica erano alquanto scarse.

Le idee di Touschek erano diverse. Touschek voleva realizzare una macchina in cui fosse possibile studiare nuovi fenomeni. Occorre anche ricordare che l'unica teoria quantistica delle particelle elementari che era ben fondata era appunto l'elettrodinamica quantistica, mentre molto poco si sapeva sulle interazioni forti e la teoria delle interazioni deboli, formulata da Fermi, non aveva basi sicure.

Touschek comprese che la situazione ideale stava nel far collidere particelle su antiparticelle e, in particolare, elettroni su positroni. Un ulteriore vantaggio di quest'idea, oltre al guadagno energetico, stava nel fatto che era sufficiente utilizzare un singolo anello. Infatti, in un acceleratore circolare, c'è bisogno di un campo elettrico per accelerare le particelle e di un campo magnetico per farle curvare. Ma particelle di carica opposta si muovono in direzione opposta sotto l'azione di un campo elettrico. Inoltre il verso di curvatura di una particella in un campo magnetico dipende sia dal segno della velocità sia da quello della carica. Quindi, due particelle di carica e velocità opposte curvano nello stesso modo. Pertanto, con un unico anello, un unico campo elettrico ed un unico campo magnetico, si potevano accelerare in direzioni opposte i due fasci di elettroni e di positroni.

Ma la cosa più rilevante per Touschek era il fatto che tramite il processo di annichilazione dell'elettrone con il positrone era possibile produrre particelle anche di massa più elevata dell'elettrone. Infatti, se pensiamo che nel processo di annichilazione si produce un fotone con energia pari a $2E$, dove E è la comune energia dei due fasci,

questo fotone può poi materializzarsi in una coppia particella-antiparticella di massa totale minore od uguale a $2E$ (vedi Figura 4).

Per esempio con una coppia elettrone positrone, ognuna di energia pari a 1 GeV, si può produrre una coppia protone-antiprotone, dato che la massa del protone vale circa 0.94 GeV. Ricordiamo qui che l'elettronvolt (eV), è l'energia che un elettrone acquista passando attraverso una differenza di potenziale di 1 Volt. I multipli più usati dell'eV sono il MeV = 10^6 eV, il GeV = 10^9 eV, e il TeV = 10^{12} eV.

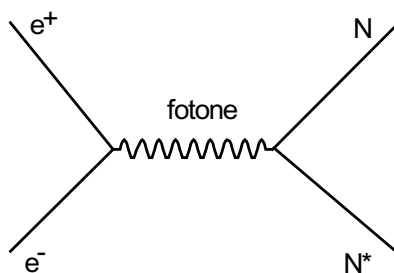


Figura 4. La creazione di una coppia di nuove particelle NN^* (dove N^* è l'antiparticella di N), tramite l'annichilazione della coppia elettrone-positrone.

Un gruppo di fisici di Frascati si mise immediatamente al lavoro per mettere a punto i dettagli tecnici della macchina da costruire, che avrebbe dovuto essere un prototipo di dimensioni contenute. La macchina fu chiamata AdA (Anello di Accumulazione) ed entrò in funzione il 27 Febbraio 1961, meno di un anno dopo il seminario di Touschek (vedi Figura 5).

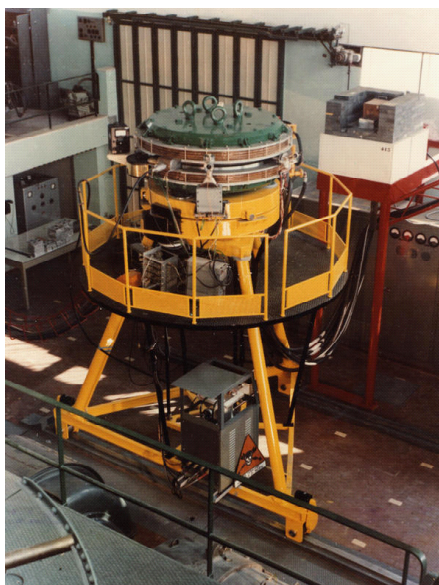


Figura 5. Il primo collisionatore elettrone-positrone (AdA) costruito nei Laboratori Nazionali di Frascati nel 1960. Le sue dimensioni sono dell'ordine di quelle di un normale tavolo.

L'elenco degli acceleratori di tipo AdA, adesso chiamati collisionatori, è impressionante. Quelli realizzati sino al 2003 sono i seguenti:

1964 VEPP 2, Novosibirsk, URSS - 1965 ACO, Orsay, France - 1969 ADONE, Frascati, Italy - 1971 CEA, Cambridge, USA - 1972 SPEAR, Stanford, USA - 1974 DORIS, Hamburg, Germany - 1975 VEPP-2M, Novosibirsk, URSS - 1977 VEPP-3, Novosibirsk, URSS - 1978 VEPP-4, Novosibirsk, URSS - 1978 PETRA, Hamburg, Germany - 1979 CESR, Cornell, USA - 1980 PEP, Stanford, USA - 1981 Sp-pbarS, CERN, Switzerland - 1982 Fermilab p-pbar, USA - 1987 TEVATRON, Fermilab, USA - 1989 SLC, Stanford, USA - 1989 BEPC, Peking, China - 1989 LEP, CERN, Switzerland - 1992 HERA, Hamburg, Germany - 1994 VEPP-4M, Novosibirsk, Russia - 1999 DAΦNE, Frascati, Italy - 1999 KEKB, Tsukuba, Japan - 1999 PEP-II, Stanford, USA - 2003 VEPP-2000, Novosibirsk, Russia.

La maggior parte di queste macchine ha avuto un ruolo importante per lo sviluppo delle nostre conoscenze nel mondo delle particelle elementari. In particolare vorrei citare la scoperta di una particella chiamata J/ψ , che è stata determinante per l'affermazione definitiva del modello a quark per le particelle elementari. Questa scoperta fu annunciata in contemporanea il giorno 11 Novembre 1974 dal gruppo che lavorava a Brookhaven su una macchina convenzionale e dal gruppo di SLAC che usava un collisionatore elettrone-positrone, chiamato SPEAR e fu confermata una settimana dopo dal gruppo di Frascati che usava ADONE, il successore di AdA. Un'altra tappa importante fu quella di PETRA (ancora un collisionatore elettrone-positrone) ad Amburgo, che portò nei primi anni Ottanta alla prima evidenza sperimentale dei gluoni, i portatori delle interazioni forti (le interazioni forti sono quelle responsabili delle forze nucleari).

Infine all'inizio degli anni Novanta, i due collisionatori LEP al CERN e SLC a SLAC hanno contribuito alla conferma della validità del modello standard delle particelle elementari. Questo modello descrive i quark (costituenti dei protoni e dei neutroni), i leptoni (per esempio, l'elettrone) e le loro interazioni elettromagnetiche, deboli e forti. L'evoluzione di queste macchine, a partire da AdA, che poteva essere ospitata su un tavolo, fino ad arrivare a LEP, è stata enorme, sia per l'energia dei fasci sia per le dimensioni. Ricordiamo che LEP era costituito da un anello circolare di circa 28 Km. di circonferenza!

Vorrei anche ricordare l'ultimo acceleratore di particelle costruito presso il CERN di Ginevra, LHC (Large Hadron Collider) che è stato realizzato utilizzando lo stesso tunnel in cui risiedeva LEP. LHC è un acceleratore protone-protone e quindi, apparentemente, non è del tipo particella-antiparticella. Ma il punto è che i protoni non sono costituiti solamente da quark: essi contengono anche coppie quark-antiquark che non contribuiscono alla carica totale. Il numero di queste coppie, che i due fasci osservano quando si scontrano, aumenta con l'energia. LHC avrà una energia massima per fascio di 7 TeV e in queste condizioni il numero di coppie è molto elevato. Inoltre, i processi che interessano sono quelli corrispondenti alle collisioni quark-antiquark. I due fasci di protoni, illustrati in Figura 6, emettono gluoni (linee ondulate) che producono coppie di quark-antiquark. I processi interessanti sono quelli in cui un quark di una coppia si annichila con l'antiquark dell'altra, producendo nuove particelle.

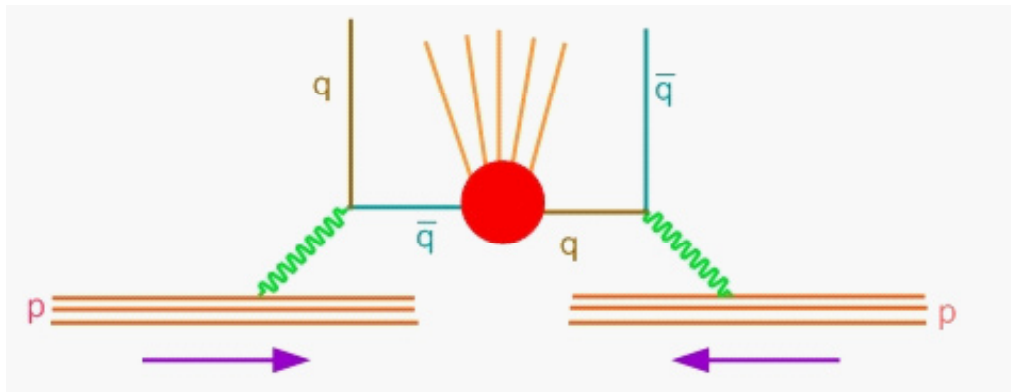


Figura 6. A LHC i due fasci di protoni (p) emettono gluoni (linee ondulate) che danno luogo a coppie quark antiquark. Il quark di una coppia si annichila con l'antiquark dell'altra coppia generando nuove particelle.

La produzione di antiparticelle, e in particolare di positroni, ha importanza anche in medicina dove si è sviluppata una tecnica chiamata PET (Proton Emission Tomography). Questa tecnica si basa sull'introduzione nell'organismo di opportuni isotopi radioattivi che decadono emettendo positroni. Questi positroni viaggiano per pochi millimetri e poi si annichilano con elettroni del corpo umano e decadono in due fotoni. I fotoni vengono emessi in direzioni opposte e vengono rivelati entrambi. Da qui è possibile ricostruire con buona precisione il punto in cui è avvenuta l'annichilazione. Uno scanner utilizza la rilevazione delle coppie di fotoni per mappare la densità dell'isotopo nel corpo. La mappa risultante (vedi Figura 7) rappresenta i tessuti in cui la molecola campione si è maggiormente concentrata e viene letta e interpretata da uno specialista in medicina nucleare o in radiologia al fine di determinare una diagnosi e il conseguente trattamento.

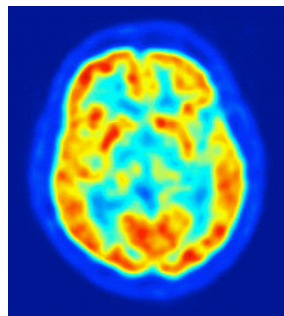


Figura 7. Immagine di una tipica acquisizione di scansione del cervello ottenuta tramite la PET.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Dirac, P. A. M, The Quantum Theory of electron, *Proc. Roy. Soc.*, *A117*, 1928, pp. 610-624.
- [2] Dirac, P. A. M, The Quantum Theory of electron, *Proc. Roy. Soc.*, *A118*, 1928, pp. 351-361.
- [3] Dirac, P. A. M, Quantum Singularities in the Electromagnetic Field, *Proc. Roy. Soc.*, *A133*, 1931, pp. 60-72.
- [4] Anderson, C. D., The Apparent Existence of Easily Deflectable Positives, *Science* 76, 1932, pp. 238-239.

MASTERCLASS DI FISICA DELLE PARTICELLE

SANDRA LEONE

STEFANO VENDITTI

INFN, Sezione di Pisa, e Dipartimento di fisica, Università di Pisa

1. Premessa

Nell'ambito di Pianeta Galileo 2010 si è svolta una giornata dedicata a una Masterclass di fisica delle particelle elementari, rivolta a studenti dell'ultimo anno dei licei scientifici e classici. Hanno partecipato 27 studenti provenienti da quattro scuole della provincia di Pisa (Pisa e Pontedera) e da una scuola di Empoli. I ragazzi, accompagnati da un docente di riferimento della propria scuola, hanno trascorso l'intera giornata ospiti della Sezione di Pisa dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e del Dipartimento di Fisica dell'Università di Pisa. Il programma dettagliato della giornata è riportato nella pagina seguente.

Le Masterclass di fisica delle particelle nascono in Inghilterra nel 1997, in occasione del centenario della scoperta dell'elettrone fatta da J. J. Thomson [1]. Si trattava, fin dall'inizio, di un evento della durata di un giorno, organizzato in contemporanea in vari istituti di fisica, che si rivolgeva a studenti delle scuole superiori e ai loro professori ed era caratterizzato dallo slogan *Vivi un giorno da ricercatore!*

Lo *European Particle Physics Outreach Group* (EPPOG) promuove la divulgazione scientifica nel campo della fisica delle particelle degli istituti e laboratori per i paesi membri del CERN. Nel 2005, in occasione dell'Anno Mondiale della Fisica che commemorava *l'annus mirabilis* di Albert Einstein, Michael Kobel, dell'Università di Dresda, propone all'EPPOG di organizzare delle Masterclass a livello europeo. Pisa ha aderito alla Masterclass europea fin dalla sua prima edizione e, dato il grande successo dell'iniziativa in termini di gradimento da parte di studenti e professori, la Masterclass è diventata un appuntamento annuale [2]. Abbiamo pensato che quest'iniziativa ben si adattasse alle finalità e allo spirito di Pianeta Galileo, progetto che dedica un mese alla conoscenza scientifica nelle città della Toscana, perciò abbiamo accettato con entusiasmo di organizzare una giornata di Masterclass all'interno del programma di Pianeta Galileo 2010.

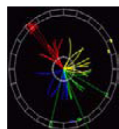
2. Che cos'è la Masterclass

L'idea alla base della Masterclass è quella di far lavorare per un giorno gli studenti dei licei come veri scienziati, in un vero istituto di fisica dove si fa ricerca. Durante la mattina, gli studenti hanno assistito a lezioni tenute da ricercatori, per apprendere le

nozioni di base che servono a capire il mondo di quark e leptoni e per avvicinarsi ai temi e ai metodi di ricerca rivolti alla comprensione della materia e delle forze presenti in natura.

In queste lezioni si cerca di dare una risposta a una serie di domande: quali sono i costituenti fondamentali della materia? Come si possono identificare? Quali forze li tengono insieme? Come agiscono queste forze? A che punto siamo nella comprensione della natura? Il tutto con un linguaggio adatto al livello di conoscenze dei giovani studenti. Il programma della mattina è stato completato con una rassegna delle applicazioni delle tecniche sviluppate nel campo della fisica delle particelle alla fisica medica e alla conservazione dei beni culturali, per mostrare come vi sia interdipendenza tra la cosiddetta “ricerca pura” e la “ricerca applicata” e come ciascuna non possa fare a meno dell'altra.

Poiché i nostri giovani ospiti si trovano a un passo dal momento cruciale in cui dovranno scegliere il corso di studi universitario, abbiamo ritenuto opportuno che potessero discutere con docenti del dipartimento di fisica anche degli aspetti pratici e amministrativi legati all'accesso all'università.



Agenda Masterclass di Fisica delle Particelle

Giovedì 18 Novembre 2010

Sezione INFN di Pisa - Dipartimento di Fisica Università di Pisa

Sala Seminari 131 Piano Terra Edificio C	
09:15	Apertura della Masterclass: Dr. Gloria Spandre, INFN Sezione di Pisa
09:30	Primo Seminario: preparazione per l'esercitazione al PC Introduzione alla fisica delle particelle e al Modello Standard Prof. Giorgio Chiarelli, INFN Sezione di Pisa Discussione
10:20	Breve Pausa
10:35	Secondo Seminario: preparazione per l'esercitazione al PC Acceleratori di particelle e rivelatori Prof. Sandra Leone, INFN Sezione di Pisa Discussione
11:25	Terzo Seminario: Applicazioni di tecniche di fisica nucleare nella nostra società Prof. Maria Giuseppina Bisogni, Università di Pisa Discussione
12:15	Informazioni locali: Studiare fisica a Pisa Prof. Giuseppe Grosso, Presidente del Corso di Laurea in Fisica dell'Università di Pisa
12:45	Pianeta Galileo Prof. Marco Maria Massai, Università di Pisa
13:00-13:45	Pausa per il pranzo: spazio antistante laboratori edificio C (piano -1) Discussioni informali con i ricercatori e i tutors
Laboratorio di Informatica (aula M-Lab)	
13:45-16:00	Esercizio al PC: Misura dei rapporti di decadimento della particella Z al LEP 14:00 Introduzione 14:30 Gli studenti lavorano al PC 15:30 Raccolta dei risultati, discussione e interpretazione
Sala Riunioni 250 Primo piano Edificio C	
16:00	Breve pausa
16:15-17:30	Video Conferenza con il Fermi National Accelerator Laboratory Interverranno ricercatori e Dottorandi dell'Università di Pisa Discussione
17:30	FINE della Masterclass, distribuzione di materiale: e.g. brochures, CDs,...

Figura 1. Programma dettagliato della Masterclass.

Nel pomeriggio gli studenti hanno avuto la possibilità di effettuare una misura di fisica analizzando dati reali raccolti da un esperimento presso l'acceleratore LEP del CERN di Ginevra (l'esperimento OPAL) e applicando le nozioni acquisite in mattinata. Dopo la pausa-pranzo hanno preso posto in un'aula dei laboratori di informatica e sono stati divisi in gruppi di 2 persone, ognuno dei quali aveva a disposizione un PC.

Attraverso internet ogni coppia di studenti si è collegata alla pagina web in cui sono presenti le immagini (*event displays*) dei decadimenti da analizzare. In particolare, si trattava di decadimenti del bosone Z^0 in coppie di leptoni di carica opposta (elettroni, muoni, tau) o quark. Prima d'iniziare l'esercizio sono state ricordate le nozioni acquisite in mattinata, con particolare riferimento al modo di riconoscere le diverse particelle prodotte a seconda del tipo di segnale registrato nei vari sistemi di rivelazione che compongono l'esperimento OPAL. I gruppi sono stati poi incaricati di analizzare 100 eventi ciascuno, di riconoscere in ogni evento la tipologia di decadimento dello Z^0 e di calcolare il numero di decadimenti trovati per ogni tipologia. Durante l'esercizio vero e proprio, della durata di circa 40 minuti, i ricercatori hanno risposto alle domande poste dagli studenti riguardo all'identificazione dei modi di decadimento nei singoli eventi. Una volta compresi i criteri del "codice di interpretazione", gli studenti hanno scoperto di essere in grado di riconoscere da soli le particelle, almeno nella maggior parte dei casi. Ma hanno anche scoperto che i ricercatori non possono avere la certezza, evento per evento, che la loro classificazione sia corretta. Nelle Figure 2 e 3 mostriamo un esempio del tipo di immagini che gli studenti hanno dovuto classificare.

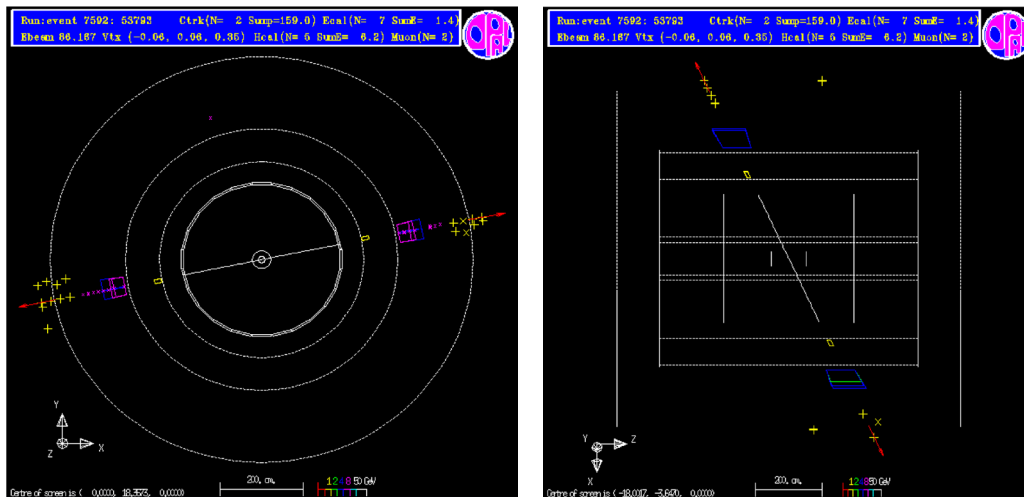


Figura 2. Display che mostra il decadimento di un bosone Z^0 nell'esperimento OPAL, presso l'acceleratore LEP del CERN, in una coppia elettrone-positrone, nella sezione perpendicolare all'asse dei fasci (a sinistra) e parallela all'asse dei fasci (a destra).

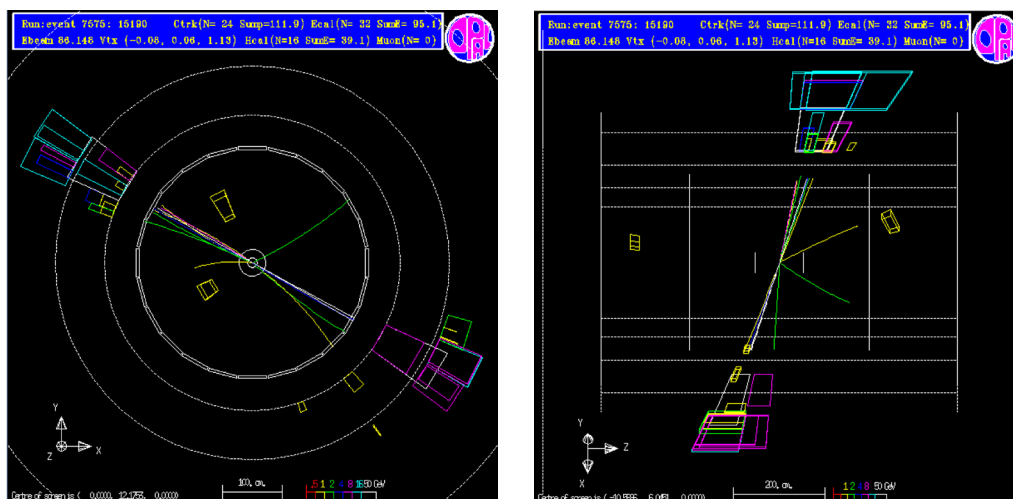


Figura 3. Display che mostra il decadimento di un bosone Z^0 in una coppia di quark che formano sciami di particelle collimate, nella proiezione perpendicolare e parallela.

Una volta esaurita l'analisi dei dati assegnati, si è proceduto, gruppo per gruppo, alla rilevazione del numero di eventi identificati per ogni categoria e al loro successivo inserimento in un foglio di calcolo Excel appositamente preparato, tramite cui si è ottenuta la media delle misurazioni delle frazioni di decadimento del bosone Z^0 nei vari canali e il loro errore statistico.

La misura finale così ottenuta è stata quindi confrontata con l'analoga misura di fisica realmente effettuata dagli esperimenti del CERN e con la predizione della teoria. È stato spiegato agli studenti perché a livello teorico ci si aspetta quei risultati e sono state fornite le ragioni delle discrepanze tra il loro risultato e il valore sperimentale misurato al CERN. Si è inoltre evidenziata la necessità di raccogliere il maggior numero di dati possibile e di limitare gli effetti strumentali nei rivelatori al fine di diminuire l'incertezza sulla misura effettuata.



Figura 4. Gli studenti lavorano in coppie al PC per identificare vere particelle in dati raccolti presso l'acceleratore LEP del CERN.

La Masterclass europea generalmente si conclude con un collegamento in videoconferenza con altri istituti che hanno ospitato una Masterclass, per mostrare come la

tecnologia aiuta a lavorare (e collaborare) in gruppi di ricerca internazionali formati da scienziati provenienti da ogni parte del mondo. In occasione della Masterclass di Pianeta Galileo, ci siamo collegati in videoconferenza con il laboratorio Fermilab, situato nei pressi di Chicago, e in particolare con la sala di controllo dell'esperimento *Collider Detector at Fermilab* (CDF). Gli studenti hanno avuto la possibilità di parlare in videocollegamento con un giovane ricercatore che sta per conseguire il dottorato di ricerca in fisica presso l'università di Pisa e trascorre lunghi periodi presso il laboratorio americano per effettuare le sue ricerche.

Gli studenti hanno fatto domande su: quali sono i compiti specifici di un ricercatore presso il laboratorio, quale è il percorso formativo ideale di uno studente che aspira a fare ricerca e, più in generale, come si svolge la vita di un giovane ricercatore italiano all'estero.

Alla fine del collegamento si è passati a un questionario a risposta multipla, in cui gli studenti, in gruppi di 2, hanno risposto a domande (alcune delle quali erano di una certa complessità) sui temi affrontati durante la giornata, per permetterci di verificare l'attenzione prestata e la comprensione dei temi. La coppia che ha risposto esattamente al maggior numero di domande ha ricevuto un piccolo "premio". Inoltre, a ogni partecipante è stato consegnato un CD contenente gli esercizi svolti al computer e materiale divulgativo sui temi di ricerca in fisica delle particelle elementari.

3. Valutazione della Masterclass

Abbiamo chiesto agli studenti di compilare anche un questionario per verificare se e quanto la Masterclass avesse risposto alle loro aspettative. Le risposte ottenute sono state analizzate e sono risultate in linea con quelle degli studenti che hanno partecipato alle Masterclass negli anni precedenti.

La totalità degli studenti ha dichiarato che gli argomenti dell'attività svolta sono stati interessanti e che valeva la pena partecipare. Il 75% vorrebbe che, a scuola, si prestasse maggiore attenzione all'aspetto sperimentale e pratico nell'insegnamento della fisica. Il 70% ha dichiarato di interessarsi di fisica al di fuori della scuola e il 60% che il proprio interesse per la fisica è aumentato dopo aver partecipato alla Masterclass. Questa percentuale è stata più alta tra gli studenti che non si interessano di fisica al di fuori delle attività scolastiche. Il 75% ha dichiarato di aver migliorato la propria conoscenza su come è organizzata la ricerca scientifica e l'80% di essere uscito dalla Masterclass sapendone di più di fisica delle particelle. Solo il 50% degli studenti pensa che la partecipazione alla Masterclass possa essere utile nella scelta degli studi futuri, confermando che la Masterclass si colloca nell'ambito della divulgazione scientifica più che dell'orientamento scolastico.

Infine, è interessante cercare di capire come gli studenti vedono i ricercatori e come proiettano se stessi nel futuro. L'ultima domanda che abbiamo posto loro era: *Vorresti fare lo scienziato?* Abbiamo chiesto di motivare la risposta scegliendo tra varie opzioni. Il 70% ha risposto affermativamente, e le tre motivazioni prevalenti sono state: "Mi

piacciono le materie scientifiche”, “Mi piace l’idea di studiare i misteri dell’universo e rispondere a domande sempre nuove” e “Questo lavoro mi permetterebbe una vita più interessante”. Tra i restanti invece le tre motivazioni prevalenti per “non” voler fare lo scienziato sono state: “Non mi sento portato/a”, “Le materie scientifiche sono troppo difficili” e “Voglio una vita normale”.

4. Conclusioni

Durante la Masterclass abbiamo toccato con mano come vi sia da parte dei ragazzi il desiderio di capire e approfondire i temi inerenti alla ricerca di base nel campo della fisica delle particelle e le sue ricadute tecnologiche nella vita di ogni giorno. Gli studenti si sono divertiti avvicinandosi a un mondo che non conoscevano e diventando protagonisti, scienziati appunto, per un giorno. Le lezioni sono state seguite con interesse e concentrazione, tanto che quando al termine della giornata ai gruppi sono state poste delle domande sui temi trattati, tutti hanno dato una percentuale molto alta (> 85%) di risposte corrette.

Riteniamo che la formula della Masterclass di fisica delle particelle, che unisce momenti formativi a momenti in cui lo studente partecipa in prima persona “hands-on” al processo di nascita del risultato scientifico (in questo caso, una “misura”), potrebbe essere facilmente estesa ad altri campi della fisica e della ricerca scientifica in generale. Pianeta Galileo, che si impegna a tutto campo nella diffusione della cultura e della conoscenza scientifica su scala regionale, rappresenta il contesto ideale in cui poter condividere tra diversi campi di ricerca e sviluppare esperienze efficaci come la Masterclass.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Kobel, *Masterclass spreads the word for physics*, CERN Courier, 29 settembre, 2005.
- [2] M. Cobal e S. Leone, *L'esperienza delle Masterclass in fisica delle particelle*, Proceedings Comunicare Fisica 07, Frascati Physics Series, 2007.

Scienze umane

**GLI YANOMAMI DELLA FORESTA AMAZZONICA:
CULTURA TRADIZIONALE E STORIA RECENTE
NELLA COLLEZIONE DEL MUSEO DI STORIA NATURALE
DELL'UNIVERSITÀ DI FIRENZE¹**

FRANCESCA BIGONI

Università di Firenze

GIOVANNI SAFFIRIO

Carnegie Museum of Natural History, Section of Anthropology Pittsburgh, PA (USA)

1. Introduzione

La sezione di Antropologia ed Etnologia ospita un vasto numero di collezioni raccolte nell'arco di diversi secoli dalle aree geografiche più disparate. Il Sud America in particolare è ben documentato. Attraverso le collezioni sudamericane del Museo di Storia Naturale dell'Università di Firenze è possibile compiere un completo percorso storico del collezionismo etnologico partendo dalle curiosità esotiche rinascimentali fino alla realizzazione del più moderno concetto di collezione antropologica.

Gli oggetti più antichi furono collezionati dalla famiglia de' Medici: i mantelli Tupinamba di piume di Ibis rosso erano già presenti a Firenze all'inizio del Seicento. Durante il periodo positivista e sotto l'influsso della teoria dell'evoluzione, nella stessa Firenze, grazie a Paolo Mantegazza, si ponevano le basi delle moderne scienze antropologiche. Fra le collezioni della seconda metà dell'Ottocento spicca quella di Guido Boggiani, frutto di coraggiose esplorazioni nel Gran Chaco.

La straordinaria collezione di manufatti provenienti dalla cultura degli Yanomami, popolazione della foresta Amazzonica nel Nord del Brasile e nel Sud del Venezuela, è invece fra le ultime acquisizioni del Museo. Essa è stata solo recentemente studiata [1] e attende ancora di essere adeguatamente conosciuta e valorizzata perché non ha ancora una sua collocazione nelle sale espositive. Gli oggetti che compongono la collezione provengono dagli Yanomami di Roraima che vivono sui fiumi Catrimani e Ajarani (Brasile). Giovanni Saffirio e Guglielmo Damioli, missionari della Consolata che lavorarono a lungo su questi fiumi, raccolsero gli oggetti nei villaggi Yanomami. La collezione fu donata nel 1996 dall'Istituto Missioni Consolata di Torino al Museo di Storia Naturale dell'Università di Firenze.

¹ Rielaborazione della conferenza tenuta da Francesca Bigoni il 17 novembre 2010 presso la sezione di Antropologia ed Etnologia del Museo di Storia Naturale dell'Università di Firenze. In occasione dell'evento sono stati per la prima volta esposti al pubblico alcuni manufatti della cultura Yanomami che appartengono alla collezione Saffirio-Damioli.

La collezione si distingue per la completezza e la precisa attinenza a ogni usanza della vita degli Yanomami e ne testimonia la cultura tradizionale negli aspetti materiali, rituali e spirituali. Attraverso più di 140 reperti sono rappresentati gli utensili utilizzati quotidianamente per l'accensione del fuoco, il trasporto e il consumo del cibo, le armi per caccia e pesca, ma anche abbigliamento, amache, ornamenti, oggetti legati a cerimonie rituali, giocattoli e infine strumenti e materiali impiegati per la produzione degli oggetti stessi e per la realizzazione di pitture corporali.

2. Il popolo Yanomami

Gli Yanomami (il cui nome significa “noi siamo persone”) sono un popolo straordinario e un importante soggetto di studio della moderna antropologia. Per stile di vita, gli Yanomami sono più vicini alle popolazioni umane di 12.000 anni fa, quando ancora non esistevano agricoltura e allevamento, che alla nostra società altamente tecnologica. La loro cultura, unica per la sua originalità e per i suoi legami con una storia antica, è giunta fino a noi perché l'impatto con il mondo esterno si è verificato solo in tempi molto recenti. I primi incontri sporadici con missionari cattolici avvennero dopo il 1950. Quando furono esposti a questi contatti, gli Yanomami erano lontani migliaia di anni dalla nostra società tecnologico-consumistica e, per quanto riguarda le convinzioni spirituali, dalle religioni monoteiste.

La loro vita sociale si svolge tradizionalmente in villaggi costituiti da un'abitazione comune di forma circolare in cui vive una famiglia allargata, o gruppo tribale. Il suffisso -theri aggiunto all'indicazione geografica in cui si trova il villaggio, indica il nome del gruppo di appartenenza che è più importante del nome individuale. Infatti, la dimensione collettiva prevale sempre su quella privata e la condivisione è un obbligo sociale irrinunciabile. In condizioni ambientali così difficili i legami familiari e di solidarietà sono essenziali per la sopravvivenza dell'individuo.

Caccia e pesca sono attività importanti. La caccia è condotta con arco e frecce nei territori che circondano il villaggio. Alcune frecce hanno le punte ricoperte di curaro e sono usate per immobilizzare scimmie che vivono nella parte alta della foresta. La pesca tradizionale Yanomami fa uso di sostanze vegetali preparate appositamente e disperse in specchi d'acqua. Esse causano l'intontimento dei pesci che vengono quindi raccolti con cesti a trama larga [2]. Nella cultura Yanomami non esiste l'allevamento di animali da consumarsi come cibo. Gli animali presenti nel villaggio (cani, uccelli, piccole scimmie) sono sempre e soltanto animali da compagnia.

Non esiste neppure l'agricoltura come da noi concepita, ma una forma di sfruttamento delle risorse chiamata “orticoltura”, che consiste nella creazione di piccole coltivazioni temporanee realizzate aprendo spazi della foresta con scuri, machete e uso del fuoco. In questi piccoli appezzamenti di terreno la coltivazione di banani, manioca amara e dolce, patate dolci, tabacco, cotone e altre piante che hanno anche uso medicinale, avviene solo con l'impiego di bastoni e zappe. L'aratro e l'impiego di animali domestici è inesistente [3]. Il villaggio e le coltivazioni vicine erano tradizionalmente

abbandonati dopo qualche anno di sfruttamento e ristabiliti in una diversa zona della foresta. In questo modo la casa comune, ormai invasa da insetti e parassiti in modo irreparabile, veniva completamente ricostruita e una nuova zona della foresta forniva i mezzi di sussistenza permettendo a quella abbandonata di rigenerare le sue risorse vegetali ed animali.

L'abbigliamento tradizionale degli uomini consiste nel legame penico (ora sempre più spesso sostituito da calzoncini) e, per le donne, in un ridottissimo gonnellino di frange di cotone abbinato, dalla pubertà in poi, a un sottile cordino di cotone che è portato incrociato sul seno. Nell'umido ambiente della foresta pluviale è molto più salubre permettere alla pelle di respirare che ricoprirla con vestiti. Gli ornamenti sono invece molto appariscenti e di grande impatto estetico perchè sfoggiano piume colorate e anche pelli di scimmia. Essi vengono portati sugli avambracci e sul capo. Le piume vengono anche utilizzate per ornare i lobi delle orecchie di maschi e femmine. Le donne inseriscono inoltre ornamenti di talli di fieno e piccole piume intorno alla bocca. Questi ornamenti, come le pitture corporali, sono indossati soprattutto in occasioni di feste e rituali.



Figura 1. Coroncina di penne di uccello.



Figura 2. Ornamento di penne di diverse specie di pappagalli che viene portato sul braccio.



Figura 3. Ornamenti con la coda dell'uccello tucano e cordini che vengono legati al braccio.



Figura 4. Ornamento di penne per l'orecchio.

Le convinzioni religiose e le pratiche spirituali sono un aspetto molto importante dello stile di vita degli Yanomami perché sono alla base della loro struttura sociale, economica e politica. Inoltre esse sono strettamente connesse al rapporto dell'uomo con la natura, con la foresta e i suoi animali. Gli Yanomami interagiscono con gli Hekurap, gli spiriti della foresta che intervengono durante le sedute sciamaniche in loro aiuto per curare i malati. Sono gli stessi Hekurap che proteggono la famiglia estesa. Essi assicurano che le coltivazioni intorno ai villaggi siano ricche di banani, piante di manioca, patate dolci e che caccia e pesca nella foresta diano buoni frutti.

Nella loro storia millenaria, gli Yanomami hanno sviluppato conoscenze e valori che permettono loro di vivere in armonia con il difficile ambiente della foresta pluviale rispettandone la diversità biologica, traendone sostentamento, ma senza mettere in pericolo la sopravvivenza delle specie che la popolano. Il legame così stretto fra l'essere umano e la natura in cui è immerso è ben espresso anche nella tradizione dei rixi.

Ogni Yanomami ha il suo rixi, un alter ego rappresentato da un animale che vive nella foresta: la sua morte provoca anche quella dell'essere umano cui è indissolubilmente associato.

3. Incontri e scontri

La collezione è strettamente legata alle vicende degli Yanomami e degli uomini provenienti da paesi lontani che si trovarono coinvolti nella lotta per la sopravvivenza fisica e culturale di questo popolo, condivisero le difficoltà degli Yanomami e cercarono di aiutarli fornendo loro strumenti per adattarsi a situazioni spesso drammatiche. La storia di Giovanni Saffirio spiega inoltre la competenza con cui è stata raccolta la collezione, che documenta con precisione la cultura degli Yanomami dei fiumi Catrimani e Ajaranì alla fine del Novecento.

Alla fine degli anni '90 gli Yanomami della regione del medio Catrimani e alto Ajaranì, erano suddivisi in 21 gruppi tribali o –theri, composti da un numero di persone che variava da un minimo di 8 ad un massimo di 68 individui. L'impatto con la società brasiliana ha avuto conseguenze drammatiche per gli Yanomami e in particolare per i villaggi del medio Catrimani. Nel settembre del 1973 il governo militare brasiliano iniziò la costruzione della strada BR-210, chiamata anche "Perimetrale Nord", che, penetrando nel folto della foresta, causò gravi problemi ambientali, determinò la scomparsa di alcune specie animali e provocò la morte di molti nativi. Nel periodo di giugno-luglio 1974 nella zona del medio Catrimani furono 12 gli Yanomami che morirono a causa di un'epidemia di morbillo. Da febbraio a giugno del 1977 una seconda epidemia di morbillo uccise 68 persone che vivevano sull'alto fiume Catrimani. In totale morirono 80 Yanomami, più di un quarto dell'intera popolazione.

La scoperta di metalli preziosi nella zona provocò l'invasione del territorio da parte di cercatori d'oro. Dal 1986 furono migliaia gli uomini che entrarono nei territori pensando di impossessarsi di oro e diamanti. Gli effetti di questa invasione furono devastanti e numerose le morti causate dalla diffusione di malattie che in molti casi erano sconosciute nella zona. Oltre alle numerose esplosioni di violenza causate dal fatto che i nativi erano considerati un ostacolo allo sfruttamento delle risorse, un'altra gravissima conseguenza fu l'inquinamento del terreno e dei corsi d'acqua causato dall'uso del mercurio nel processo di purificazione dell'oro. La catena di distruzione causata da questi eventi non è stata ancora interrotta.

Giovanni Saffirio, che raccolse e fece pervenire nel 1986 al Museo di Storia Naturale dell'Università di Firenze gli oggetti della collezione, è sia missionario sia antropologo. Nato in Italia a Bra nel 1939, è stato missionario nel medio Catrimani nei periodi 1968-1977 e 1985-1995. Nel '77, dopo la drammatica epidemia che uccise molti Yanomami, Saffirio maturò la convinzione di non essere sufficientemente preparato per comprendere in modo approfondito la lingua, la cultura e l'antica storia degli Yanomami. Perciò, fece richiesta ai superiori di recarsi negli Stati Uniti per studiare antropologia e, dal 1977 al 1985, intraprese negli Stati Uniti gli studi universitari di

antropologia culturale presso l'Università di Pittsburgh fino ad ottenere il titolo accademico di PhD. I lavori di ricerca [4-5] effettuati durante il corso di studi furono basati su dati raccolti in tre viaggi tra gli Yanomami e condotti sotto la guida di Napoleon Chagnon, importante antropologo, principale esperto di Yanomami e professore universitario negli Stati Uniti.

Il libro di Chagnon sugli Yanomami è stato per decenni il più importante testo nei corsi di antropologia culturale delle università americane [2]. Secondo una bellissima definizione di Chagnon, l'antropologia è "lo studio della bellezza, dell'integrità e dei valori delle culture umane". Giovanni Saffirio ha pubblicato articoli scientifici sugli Yanomami in riviste internazionali su diversi aspetti della loro società [6-7] ed anche sulla contaminazione di mercurio presso le popolazioni native [8]. Saffirio ha continuato il suo lavoro di antropologo presso la sezione di antropologia del Carnegie Museum of Natural History di Pittsburgh come curatore della collezione Yanomami e delle fotografie che ha donato al Museo stesso.

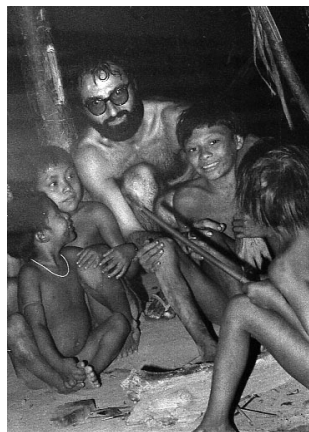


Figura 5. Giovanni Saffirio con bambini Yanomami (1986).

4. Processi di adattamento

Gli Yanomami hanno sviluppato nel corso della loro storia una cultura ben adattata al difficile ambiente in cui vivevano. L'irrompere nella foresta amazzonica di forze e pressioni completamente diverse li hanno costretti a far fronte a nuove situazioni e alla ricerca di un adattamento a esse. I missionari della Consolata non hanno battezzato gli Yanomami, ancora molto legati alle proprie convinzioni tradizionali, ma hanno cercato di essere loro vicini cercando di facilitare il difficile processo di adattamento e di salvaguardare la loro sopravvivenza fisica e culturale.

La storia del Sud America è nota: le popolazioni degli indios, quando sono riuscite a sopravvivere all'etnocidio, sono state spogliate sia dei loro mezzi tradizionali di sussistenza sia delle loro ricchezze culturali e sono state relegate ai margini dalla società. I missionari della Consolata hanno dedicato la loro vita perché questo non accadesse agli Yanomami: hanno cercato di fornire loro gli strumenti affinché comprendano la società moderna con cui vengono in contatto, prendano coscienza della propria identi-

tà e possano difendere i propri diritti salvaguardando in questo modo anche l'ambiente naturale cui sono profondamente adattati.

5. Conclusioni

In un mito sull'origine della foresta (*huribi*), gli anziani (*patape*) raccontano che molto tempo fa gli antenati, per sfogare la loro rabbia, iniziarono a tagliare i pali che sostenevano la cupola del cielo. La volta del cielo si incrinò e minacciò di crollare. Lesti, gli sciamani Yanomami la puntellarono con tronchi di cacao e la sostennero con le mani. Nonostante ciò, una parte della cupola del cielo cadde insieme a sciamani, antenati e animali, e formò la terra. Da lungo tempo gli sciamani sostengono la cupola del cielo con canti, cure e azioni simboliche. Ancora oggi il compito di sciamani, maestri Yanomami e persone di buona volontà consiste nel puntellare l'incrinata cupola del cielo denunciando la distruzione della foresta amazzonica, l'avvelenamento dei fiumi con mercurio organico, l'estinzione di specie animali e lo sfruttamento dei popoli nativi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bigoni, F., Zavattaro, M., Roselli, M.G., Saffirio, G., Cultura tradizionale e storia recente degli Yanomami nella collezione del Museo di Storia Naturale di Firenze. *Archivio per l'Antropologia e l'Etnologia*, CXXXIX, 2009, pp.193-215.
- [2] Chagnon, N., *Yanomamö: The Fierce People*, seconda edizione, Holt, Rinehart and Winston, New York 1977.
- [3] Damoli, G. e Saffirio G., *Yanomami Indios dell'Amazzonia*. Il Capitello, Torino 1996.
- [4] Saffirio, G., *Some social and economic changes among the Yanomama of northern Brazil (Roraima): a comparison of 'forest' and 'highway' villages*. Tesi di laurea (M.A.). University of Pittsburgh, Pittsburgh 1980.
- [5] Saffirio, G., *Ideal and actual kinship terminology among the Yanomama indians of the Catrimani river basin (Brazil)*. Tesi di Dottorato, University of Pittsburgh, Pittsburgh 1985.
- [6] Saffirio, G. and Scaglione, R., Hunting efficiency in acculturated and unacculturated Yanomama villages. *Journal of Anthropological Research*, 38/3, 1982, pp. 315-327.
- [7] Saffirio, J., Hames, R., Chagnon, N., Melancon, T., *The impact of contact: two Yanomama case studies*. In: *Working Papers on South American Indians*, 6, Cultural Survival, Occasional Paper 11. Transcript Printing Company, Cambridge 1983.
- [8] Sing, K.A., Hryhorczuk D., Saffirio, G., Sinks, T., Paschal, D.C., Sorensen J., Chen, E. H., Organic mercury levels among the Yanomama of the Brazilian Amazon basin. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 32, 2003, pp. 434-439.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano Monica Zavattaro e Maria Gloria Roselli, conservatrici presso la sezione di Antropologia ed Etnologia del Museo di Storia Naturale dell'Università di Firenze. Grazie anche a Rossella Biagi e Anna Maria Bedini per il prezioso aiuto nella preparazione dell'evento in cui sono stati per la prima volta esposti al pubblico alcuni oggetti della collezione.

**ALLA RICERCA DELLA MENTE: DALLA *RES COGITANS*
AL *COGITO ERGO SUM*¹**

FRANCESCO ROMANI

Dipartimento di Informatica, Università di Pisa

1. Realtà e Rappresentazione

L'uomo si differenzia dagli animali (tra l'altro) per la sua maggiore possibilità e capacità di indagare il reale. L'universo non è un tutto unico ma è fatto di "oggetti" (τὰ ὄντα). Non è possibile indagare tali oggetti senza nominarli o rappresentarli. Vi sono due modi di intendere la rappresentazione: convenzionale e sostanziale.

rappresentazione convenzionale

I nomi sono puri purissimi accidenti (Manzoni).

I nomi e gli attributi si devono accomodare all'essenza delle cose e non l'essenza ai nomi perché prima furono le cose e poi i nomi (Galileo).

Chi dubita che un francese o un tedesco possano avere gli stessi pensieri o ragionamenti riguardo alle medesime cose benché nondimeno concepiscano parole interamente differenti? (Cartesio).

Quella che chiamiamo rosa, con un altro nome conserverebbe lo stesso dolce profumo (Shakespeare).

rappresentazione sostanziale

Ἐν ἀρχῇ ἦν ὁ λόγος *et verbum caro factum est* (Giovanni).

Conveniunt rebus nomina saepe suis (Riccardo Venosa).

I bambini spesso confondono le cose e i loro nomi. L'associazione dei concetti ai nomi è un problema di dimensioni epocali: vi sono nomi (concetti) facili (*pera, mela, sole, ...*), nomi (concetti) difficili (*protosincrotone, conica, coleottero, ...*) e nomi (concetti) problematici (*pensiero, intelligenza, mente, coscienza, dolore, ...*). Nell'associare nomi e concetti è necessario definire i termini in base ad altri termini e i criteri oggettivi richiesti sono spesso difficili o impossibili da stabilire (ad esempio, la misura del dolore).

Per quanto riguarda la percezione della realtà, non si può fare a meno di considerare il *medium cognitivo* classicamente evidenziato nel mito platonico della caverna: quello che percepiamo non è la realtà, ma solo il prodotto di una mediazione attraverso nostri

1 Queste brevi note sono il tentativo di mettere su carta un seminario essenzialmente basato su immagini e filmati in cui si era cercato un approccio provocatorio al problema delle "macchine pensanti", non con l'intento di esaurire la questione (non basterebbe una vita), ma con quello di stimolare riflessioni e discussioni. Spero che, pur nell'inevitabile schematicità, quest'approccio provocatorio sia stato preservato.

sensi. Per di più la percezione è influenzata pesantemente dalla “ontogenesi culturale” del soggetto. Un classico problema è costituito dalla *fenomenologia degli oggetti non osservati*: “Chi mi assicura che un albero resti lì quando non lo guardo?” La risposta è “un modello implicito generato dall’esperienza e dalla cultura”. Tutti noi siamo pressoché certi che quando torneremo a guardarlo l’albero sarà ancora lì (perlomeno se non vi sono potatori in agguato); lo stesso non si può dire per un’automobile che può partire in qualsiasi momento o un passero che può levarsi in volo. Per un “selvaggio” o per un antico romano, che non conoscono le automobili, queste verrebbero probabilmente considerate inamovibili come i monti e gli alberi.

2. L’intelligenza delle “cose”

Forse l’approccio più semplice alla definizione di “pensiero intelligente” è quello dogmatico: *ego sum res cogitans*. Il pensiero diviene quindi una proprietà di una “cosa”: le pecore fanno “bee”, il fuoco brucia, gli uomini ... pensano. E le donne? Le pecore? Le macchine?

Queste tre domande, chiaramente provocatorie, a taluni possono sembrare perfino offensive (specie nell’accostamento delle donne alle pecore), ma bisogna considerare che l’approccio “dogmatico” alla definizione delle caratteristiche di categorie di “diversi” ha avuto nei secoli conseguenze catastrofiche.

Oggi nella nostra civiltà occidentale, le barzellette sulle donne al volante, di moda verso la metà del secolo scorso, possono irritare o far sorridere, ma non bisogna dimenticare che è cronaca del 2011 la battaglia che in un paese non lontano le donne stanno combattendo per poter guidare l’auto senza commettere reato. Non bisogna dimenticare, inoltre, che alla base teorica della schiavitù dei neri e delle persecuzioni degli ebrei stavano affermazioni “dogmatiche” sulla loro presunta inferiorità.

Tornando all’argomento che ci interessa, negare “a priori” la possibilità di pensiero delle macchine “in quanto macchine” è una posizione ascientifica che come fa notare D. Hofstadter, [2, pag. 515] è del tutto equivalente a fondare una teoria della inferiorità delle donne basandola sulla loro diversità.

Il grande matematico Alan Turing (uno dei padri dell’informatica) introduce in modo mirabile il problema dell’intelligenza delle macchine in un famoso articolo del 1950.

Mi propongo di considerare la questione: “Possono pensare le macchine?” Si dovrebbe cominciare con il definire il significato dei termini macchina e pensare ... Se il significato delle parole macchina e pensare deve essere trovato esaminando le parole stesse attraverso il loro uso comune, è difficile sfuggire alla conclusione che tale significato e la risposta alla domanda “Possono pensare le macchine?” vadano ricercati in una indagine statistica.²

Ci troviamo di fronte di nuovo a un problema di nomi e l’approccio di Turing è squisitamente comportamentista: *una macchina è intelligente se si comporta in modo intelli-*

2 Dalla trad. it. di [1], ripresa da [3].

gente, ovvero se, analizzate alla cieca, le sue risposte sono indistinguibili da quelle di un essere umano.

Nel test di Turing classico ci sono tutti gli elementi della normale esperienza dei rapporti umani dove però il medium cognitivo (in senso platonico) è sostituito da una telescrivente.

Ognuno di noi nella vita di tutti i giorni è costretto a sottoporre gli interlocutori a un *test di Turing implicito*. Spesso macchine ci telefonano (o ci rispondono); nelle interazioni via e-mail o via chat dobbiamo sempre cercare di capire se l'interlocutore è quello che sembra, o se invece dietro a una apparente banca si nasconde un truffatore.

Ma anche di fronte a un interlocutore in carne e ossa, ne valutiamo l'intelligenza giudicandone il comportamento. Di solito i bambini parlano con i loro pupazzi, molti parlano con i gatti e con i cani come fossero bambini piccoli, alcuni parlano con le piante (come la zia Bettina di Gianburrasca che parlava col dittamo); infine, se qualcuno parla con il frigo o con le scarpe allora ha dei problemi, oppure è molto solo.

3. I vari gradi dell'esistenza intelligente

A questo punto vediamo una scaletta esemplificativa di come si possono attribuire gradi diversi di intelligenza (o addirittura esistenza) ai nostri interlocutori o agli "oggetti" che ci circondano.

"Io che sto parlando". Di fronte a un interlocutore diretto, ad esempio il conferenziere, nessuno dubita di essere in comunicazione con un soggetto pensante. Ma già la registrazione di un intervento può far sorgere dei dubbi: può essere un caso di un vero pensiero differito oppure si può trattare di una recita in cui un attore/attrice riferisce un testo scritto da altri e il soggetto pensante è immaginario. Un'attrice di talento riesce a comunicare i sentimenti che deve rappresentare anche senza parlare solo con le espressioni (pensiero silenzioso). Più complesse e intriganti sono le situazioni in cui il copione impone agli attori di interpretare altri attori che stanno recitando, come nei vari film di argomento teatrale o cinematografico (recita nella recita). Ma anche i personaggi dei cartoni animati, evidentemente fittizi, possono esibire sentimenti. Al giorno d'oggi si possono girare film con attori 'sintetici' (primo tra tutti *Final Fantasy*) che ad uno spettatore con deficit visivo lieve possono sembrare del tutto reali.

Andando verso situazioni più sfumate, vi è la classica contrapposizione tra sogno e realtà e il dubbio shakespeariano di quali sogni posano venire nel sonno della morte ("Morire, dormire, forse sognare"). Ma anche la morte può essere complicata, come per il gatto di Schrödinger che si trova in uno stato di combinazione lineare tra un gatto vivo e un gatto morto. (Sic!) Infine cosa vi è di ancora meno reale dell'essere morti? Non esser nati, il μή φῦναι di Sofocle.

Non esser nati è cosa
che ogni condizione supera
ma poi, una volta apparsi,
tornare al più presto colà donde si giunse

è il secondo bene.
 [...]

 Invidie, rivolte, contese, battaglie

 e stragi, e poi, spregiata, sopraggiunge

 estrema, impotente, diserta,

 vecchiezza odiosa, dove

 dei mali tutti i mali coabitano.

 (*Sofocle, Edipo a Colono*)

Sorge allora il problema dell'Identità: se X non è nato, come si fa a parlare di X? Forse perché grazie alla metempsicosi vi è un legame tra una vita e l'altra? Cosa distingue un elettrone da un altro? Esiste l'elettrone Gustavo? ... E l'elettrone Calogero? Cosa distingue una persona da un'altra? Forse l'anima?

4. Come pensa una macchina? Come parla una macchina?

A volte le macchine ci fanno domande per sapere se noi siamo umani o macchine in una specie di test di Turing *inverso* (tipicamente si tratta di indovinare avendo a disposizione un testo scritto molto "disturbato"). Questo accade in molti siti internet per evitare che programmi automatici eseguano azioni ripetute. Ma un test più divertente, una specie di test di Turing *linguistico* consiste in mettere insieme scritti umani e scritti senza senso generati al computer. Attenzione! Qui non si tratta di decidere se una macchina è intelligente, certamente l'autore dei testi meccanici non è intelligente e le sue frasi non significano nulla – casomai si tratta di vedere quanto possono essere stupidi gli umani.

Esempio 1. L'espressione esplosiva può essere considerata la sostituzione inversa di materiale semiotico (doppiaggio) con un prodotto semiotico dialogico in una riflessione dinamica.

Esempio 2. I servi di una nazione dilaniata dalle lotte terranno spesso un atteggiamento.

Esempio 3. Amore mi squassa la mente, come il vento le querce sulla cima dei monti.

I primi due esempi sono tratti dal bel testo di Douglas Hofstadter, Goedel, Escher, Bach. [2, pag. 672]. È facile capire che la terza frase è umana (uno straordinario verso di Saffo, ma il dubbio sulle prime due frasi prime due (entrambe apparentemente senza senso) è sciolto da Hofstadter stesso: la seconda frase è artificiale mentre la prima è umana, tratta da un rivista d'arte moderna.

5. Paura del lupo?

Spesso la negazione a priori del possibile pensiero delle macchine è dovuta alla paura, non tanto delle "macchine che pensano" ma forse proprio di essere noi stessi una "macchina pensante".

Si noti che tutto quello che si può dire per dimostrare la presunta superiorità dell'uomo sulle macchine si potrebbe dire (ed è stato detto in passato) per dimostrare

una presunta superiorità dell'uomo sulla donna (in passato, per esempio, in Occidente, le donne non avevano diritto di voto, non potevano studiare, insegnare, e così via).
Anche questa è paura?

Nel X secolo, andare sulla Luna era ritenuto impossibile e lo era di fatto, stante la tecnologia dell'epoca, ma non certo perché la Luna era nel "Cielo di Dio". I viaggi nel tempo ancora oggi sono tecnologicamente impossibili e non è chiaro se vi saranno mai gli strumenti per farli. Le macchine pensanti sembrano un obiettivo possibile, certamente più difficile che andare sulla Luna, e assolutamente fuori dalla portata dell'attuale tecnologia, ma teoricamente più plausibile dei viaggi nel tempo.

5. Rigiriamo la frittata!

La vera dualità non è quella tra uomo e macchina, ma quella tra soggetto pensante e oggetto percepito: *cogito ergo sum* (penso quindi esisto).

Test di Turing assoluto

Io sono un uomo o una macchina?

ovvero qual è il substrato della *MIA* mente?

Una volta abbandonata la *res cogitans* non è più tanto importante:

IO SONO!

BIBLIOGRAFIA

- [1] Hofstadter, D. R., Dennett, D. C., a cura di, *L'Io della mente*, Adelphi, Milano 1985.
- [2] Hofstadter, D. R., *Gödel, Escher, Bach*, Adelphi, Milano, 1990.
- [3] Turing, A. M.. Computing Machinery and Intelligence, in *Mind*, 59/236 (1950), pp. 433-460; trad. it. in [1], pp. 62-74.

*Storia del pensiero scientifico
ed epistemologia*

LA MUSICA E LA GENESI DEL PENSIERO SCIENTIFICO MODERNO

NATACHA FABBRI

Museo Galileo. Istituto e Museo di Storia della Scienza

1. Sull'«utilità» dell'armonia

La tradizionale classificazione delle arti del quadrivio proponeva un ordinamento dei *mathèmata* in scienza della quantità e scienza dell'estensione: alla prima guardavano l'aritmetica (quantità considerata in sé) e la musica (relazione tra quantità), alla seconda si rivolgevano la geometria (figure statiche) e la sferica (configurazioni delineate dal movimento). Ne conseguiva un'evidente sovraordinazione dell'aritmetica, la quale era architettonica rispetto: alla geometria, poiché i contenuti di questa non sono concepibili senza l'esistenza dei numeri; alla musica, poiché ciò che è in sé è anteriore a ciò che è relativo ad altro e poiché gli intervalli musicali presuppongono i numeri; alla sferica, in quanto lo studio del movimento è successivo a quello delle figure statiche (geometria), che a sua volta dipende dall'aritmetica.

Questa sistematizzazione subisce un progressivo cambiamento tra Cinque e Seicento, che culmina con Kepler, Galileo, Mersenne, Descartes, i quali affrancano la musica dalla millenaria subordinazione all'aritmetica e la annoverano tra le matematiche applicate afferenti alla geometria. Tale rivolgimento non scaturisce solo dal riconoscimento della prioritaria importanza della geometria (come avviene, per motivi diversi, con Descartes e Kepler), ma anche dallo sforzo di sottrarre le matematiche miste (ottica, musica, ecc.) ai dubbi sollevati dallo scetticismo; a questi si aggiunge una differente interpretazione della scienza dei suoni, sempre più distante dalla numerologia di matrice pitagorico-platonica e rivolta alla dimensione sperimentale sulle 'corde sonore'. La musica si presenta perciò come una disciplina matematica particolarmente adatta per rifondare i principi della filosofia naturale, e molti protagonisti della scienza moderna le dedicano opere o pagine importanti: ad esempio, Descartes scrive un breve compendio di musica, l'astronomo Kepler pone al centro della sua ricerca l'idea di un concerto planetario, Galileo beneficia di una formazione musicale, Marin Mersenne impiega modelli musicali in molti ambiti del sapere, persino in discussioni teologiche. Il contributo più o meno significativo che tali filosofi hanno dato alla musica è stato da tempo ampiamente scandagliato, soprattutto dalla musicologia anglosassone che ha cominciato ad affrontare tale filone di studi quasi quaranta anni fa¹.

La prospettiva adottata in questo intervento è inversa, in quanto si chiede se e in quale misura la musica abbia svolto un ruolo nella genesi del pensiero scientifico e

1 Si vedano i testi indicati in bibliografia.

filosofico moderno². La musica – intesa come scienza dei suoni – è a mio avviso stata assunta come modello epistemologico o, quantomeno, come principale ambito nel quale vengono delineati e messi in pratica i principi della ricerca di alcuni protagonisti della moderna scienza. Il mio intento non è di descrivere ciò che Descartes, Galileo, Bacon ecc. hanno scritto sulla musica, bensì di mostrare – attraverso questi stessi filosofi – come le riflessioni sulla musica siano confluite in problemi filosofici centrali per la riflessione epistemologica, la definizione della durata e del tempo, la cosmologia, la teologia, la matematizzazione della fisica, l'etica.

Come ha chiaramente espresso il teologo e filosofo francese Marin Mersenne (1588-1648), l'«armonia si trova in tutte le cose del mondo» e «insegna come i suoni possono servire a comprendere le più belle cose spiegate nelle altre scienze, o, almeno, a ricordarsene». Mersenne applica le proporzioni musicali a vari ambiti del sapere: dalla meccanica alla teoria del moto (cerca di pervenire a una legge della caduta dei gravi alternativa a quella esposta da Galileo), dalla geometria all'astronomia, dall'etica alla teologia.

L'opera più nota di Mersenne, ossia l'enciclopedia *Harmonie Universelle* (1636-1637), si conclude con un libro intitolato *De l'utilité de l'harmonie*. All'interno di quella che definisce come 'società inviolabile delle scienze', egli decide infatti di dedicarsi in particolare alla scienza dei suoni per condurre la sua confutazione di magia e alchimia, filosofia ermetica e scetticismo: la musica, pur essendo una scienza media e, in quanto tale, incapace di pervenire a conclusioni apodittiche, possiede principi certi ed evidenti (avendo un fondamento geometrico) ed è pertanto in grado di rispondere alle perplessità sollevate dagli scettici o ai misteri trasmessi segretamente agli iniziati della tradizione magica ed ermetica.

2. La musica e le regole del metodo

La scienza dei suoni è assunta da René Descartes (1596-1650) come modello conoscitivo e come primo ambito di elaborazione delle regole del suo metodo. Nell'opera giovanile dedicata alla musica, il *Compendium Musicae* (*Breviario di musica*, 1619), Descartes traccia per sua stessa ammissione i lineamenti del proprio ingegno. Questo breve scritto non è da considerarsi tanto come un testo musicologico relativo alla definizione delle consonanze, quanto come il tentativo di sottoporre un fenomeno fisico – in questo caso il suono – ai principi sistematizzati nelle *Regulae ad directionem ingenii* (*Regole per la guida dell'intelligenza*, opera postuma, la cui stesura definitiva risale al 1628 circa, sebbene la redazione sia in parte contemporanea a quella del *Compendium*) e alla lettura geometrica della fisica.

Il *Compendium* permette di affrontare questioni che ricorrono in tutto il pensiero cartesiano: il rapporto tra quantità continua e discreta, tra deduzione e intuito; la lettura geometrica della fisica; il ruolo rivestito dalla musica sia nella formulazione del metodo (per pervenire a conoscenze dotate di un elevato grado di certezza), sia in relazione al progetto cartesiano della *mathesis universalis* (matematica universale).

2 Mi permetto di rinviare a [4], dei cui capitoli 2 e 3 il presente intervento costituisce una sintesi.

L'incipit del *Compendium* iscrive l'opera nel filone di una lettura geometrica della fisica. L'inizio presenta le due proprietà dei suoni che saranno prese in considerazione, ossia la durata (*duratio*) e l'altezza (*intensio*), le quali corrispondono alle qualità geometrizzate di *extensio* e *intensio* di Nicolas Oresme (1325 c.-1382), un noto commentatore di Aristotele che aveva intrapreso un'analisi geometrica della durata (*extensio*) nella quale si verifica il moto di un corpo e della sua velocità (*intensio*), estendendo tale lettura anche alla musica.

L'interpretazione proposta dalla Tarda Scolastica viene riletta alla luce dei dibattiti sorti a fine Cinquecento sulla *Mathesis Universalis* e della 'nuova scienza' di cui parla Descartes nei mesi precedenti la stesura del *Compendium Musicae*: viene cioè integrata con il rifiuto dell' 'incomunicabilità dei generi' di Aristotele. Negli *Analitici secondi* (I, 7, 75b) Aristotele aveva distinto aritmetica e geometria negando la possibilità di applicare dimostrazioni aritmetiche a grandezze geometriche e suddividendo le scienze subordinate all'aritmetica (tra le quali la musica) da quelle subordinate alla geometria. Vi sono però altri passi aristotelici (ad esempio *Analitici secondi*, I, 5, 74a) che sostengono la possibilità di impiegare una sola dimostrazione per questioni concernenti le proporzioni tra numeri, linee, solidi e intervalli di tempo. Ed è a questa impostazione che Descartes fa riferimento seguendo il dibattito sorto tra la fine del Cinquecento e l'inizio del Seicento attorno all'idea di una matematica universale, la *Mathesis Universalis*.

La 'nuova scienza' è in grado di risolvere in maniera univoca i problemi relativi sia alla quantità continua (geometria) che alla discreta (aritmetica), pur mantenendo la distinzione tra questi due generi. Nelle *Regulae* Descartes compie un passo ulteriore: chiarisce che la *Mathesis Universalis* è un metodo generale, a cui aritmetica e geometria forniscono i principi da applicare indifferentemente a tutte le discipline matematiche per pervenire a un elevato grado di certezza nel percorso conoscitivo. Si realizza così una sovrapposizione e traducibilità (a volte imperfetta) tra quadri concettuali differenti, tra quantità continue e discrete: viene dunque a cadere la suddivisione tra scienze subordinate all'aritmetica (che afferiscono alle quantità discrete) e quelle subordinate alla geometria (quantità continue). La musica non è più esclusa dall'ambito d'indagine della geometria; al contrario, nel progetto della *Mathesis Universalis* la musica è soggetta a descrizioni e definizioni che appartengono a entrambi i generi. Nel *Compendium musicae* Descartes infatti afferma e cerca di mostrare (non senza qualche forzatura) che sia l'analisi secondo la divisione della corda (grandezza continua della geometria), sia quella secondo le proporzioni numeriche della tradizione platonico-pitagorica (le quantità discrete dell'aritmetica) conducono alla medesima classificazione delle consonanze.

Nel caso del *Compendium* possiamo parlare non di una prima elaborazione sistematica del metodo bensì di una sua prima messa in opera. Numerose e significative sono le affinità con le *Regulae*: tra queste vi è l'attenzione ai diversi modi con cui una grandezza può essere concepita e alla dimensione temporale con la quale un fenomeno fisico viene percepito e pensato, e una conoscenza viene acquisita.

Riprendendo un esempio presentato da Descartes nelle *Regulae* (che muove dal-

la lettura degli *Analitici secondi* di Aristotele), una determinata figura geometrica, ad esempio un triangolo, può essere ‘pensato’ in diversi modi, ossia secondo la moltitudine o la grandezza: nel primo caso il triangolo è concepito come composto da un insieme di punti discontinui, nel secondo dalla congiunzione di linee continue.



Figura 1. René Descartes, *Regulae ad directionem ingenii*, in *Œuvres de Descartes*, a cura di C. Adam e P. Tannery, Paris, Vrin, 1969-1974², vol. X, Regula XIV: illustrazione.

La coesistenza e traducibilità di descrizioni che procedono per quantità continue e per quantità discrete porta prima alla più matura elaborazione della cosiddetta geometria analitica di Descartes e poi alla geometrizzazione della fisica, ossia alla possibilità di esaminare il moto di un corpo sulla base della diversa dimensione temporale con la quale viene pensato: considerando o la durata continua del suo moto (continuità della linea) oppure la sua descrizione per punti isolandone alcuni istanti (corrispondenti alle coordinate).

Il tempo è un ‘modo’ di pensare la durata delle *res* (sia *extensa* che *cogitans*) per quantità discrete o continue: il *cogito* può numerare (ad esempio le idee che ha avuto durante la sua esistenza) – ricorrendo così alle quantità discrete –, oppure pensare la durata di se stesso e delle altre *res* considerandone la grandezza. La definizione del tempo come *modus cogitandi* (modo di pensare) è presentata nei *Principia Philosophiae* (*Principi filosofici*, 1644) ma è l’elaborazione finale di un percorso che ha il suo punto di partenza nelle *Regulae* e che trova applicazione nell’analisi della fisica e anche del fenomeno sonoro: due corpi sollecitati devono vibrare per una certa durata, anche se molto breve, prima di produrre una consonanza, la quale viene definita da alcuni istanti, ossia dai punti geometrici di congiunzione delle vibrazioni.

Vorrei infine fare un ultimo esempio tratto dal *Compendium* e relativo alla teoria della percezione musicale: la questione circa il modo in cui la continuità del *motus cogitationis* (movimento del pensiero) trascende la discontinuità delle singole parti prese in considerazione ha un risvolto nell’elaborazione dell’epistemologia cartesiana e, più precisamente, nella trattazione condotta nelle *Regulae* sulla differenza tra una conoscenza acquisita mediante la deduzione e una mediante l’intuito. Durante l’ascolto di una composizione, concepiamo progressivamente le parti come un tutto unico, congiungendo inizialmente le prime due udite – e formando così un’unità –, poi la terza e la quarta – per ottenere un’altra unità –, e in seguito uniamo le due unità raggiunte: le parti si sommano di volta in volta alle varie unità sino a quando la composizione non sia concepita come una percezione-visione unitaria e simultanea. Il tempo continuo nel quale si svolge l’esecuzione

musicale viene infatti reso discreto da una serie di atti intellettivi irrelati, i quali sono poi trascesi e congiunti dal moto continuo del pensiero, un pensiero che necessita del sostegno della memoria. Nonostante l'impressione di aver abbracciato tutta la composizione in una visione unitaria e simultanea, tale percezione finale non è frutto dell'intuito ma della deduzione, poiché necessita del soccorso della memoria e di un moto del pensiero che ripercorre incessantemente le singole unità formanti la composizione.

L'importanza di questo passo consiste nel cogliere il punto di tangenza tra la deduzione e l'intuito. L'intuito è definito concetto della mente pura e attenta, frutto della sola luce della ragione, è una conoscenza certa che si rivolge alle singole nature semplici (sono note di per sé, evidenti: es. 'esistenza', 'unità', 'durata', 'istante', 'quiete') come fossero degli indivisibili. La deduzione si rivolge invece a una molteplicità di nature semplici ed è in grado di passare dalla prima all'ultima natura semplice presa in considerazione con una rapidità tale da suscitare l'impressione di intuire simultaneamente tutta la cosa, di avere la visione unitaria propria dell'intuito; ma tale impressione è dovuta al moto continuo del pensiero e al supporto della memoria. Questa affinità finale tra deduzione e intuito, nelle *Regulae*, diviene premessa per un genere di deduzione corrispondente all'*intuitus mentis*, ossia la deduzione necessaria di due nozioni divisibili ma che formano un'unità indivisibile, e nella cui congiunzione non può esservi falsità: *cogito, sum*.

3. La musica delle 'sensate esperienze'

L'immagine della scienza alla base della cosmologia galileiana è illustrata mediante un mito musicale: nel *Saggiatore* (1623) Galileo narra che il protagonista del mito non possiede alcuna nozione scientifica o musicale, ma sopperisce a tale manchevolezza con un 'ingegno perspicacissimo' e una 'curiosità straordinaria'. La chiarezza della visione intellettuale e la sollecitudine e cura nell'investigazione della natura – che corrispondono, rispettivamente, alla certezza con la quale l'intelletto conosce alcune proposizioni matematiche e alla dimensione dell'esperienza – lo inducono a indagare differenti fonti sonore: il suo percorso conoscitivo va dal canto degli uccelli allo zufolo di legno, dal violino allo sfregamento delle dita sopra l'orlo di un bicchiere, dall'osservazione del suono emesso dal movimento delle ali degli insetti a quello di numerosi strumenti musicali.

Gli esempi proposti da Galileo non sono casuali ma afferiscono a differenti ambiti d'indagine: i bicchieri rinviano all'esperimento attribuito dalla tradizione a Pitagora e a quelli compiuti dal padre Vincenzo Galilei e da Galileo medesimo; il battito delle ali degli insetti alla trasmissione del suono come movimento d'aria; il violino e lo zufolo all'organologia, ai dibattiti sulla musica strumentale e agli studi condotti sul monocoldo e le canne dell'organo. Inoltre, sono proposti una serie di dualismi tra musica naturale e artificiale, strumenti musicali e oggetti sonori (bicchieri) che procedono verso una sempre più definita dimensione sperimentale (il laboratorio organizzato con bicchieri, canne d'organo, ecc.) e una ricerca delle cause fisiche condotta su 'corpi sonori' (battito d'ali, sezionamento della cicala), lasciando in secondo piano l'arte musicale

come imitazione della natura (lo zufolo e il violino attraggono l'uditore per la loro somiglianza al canto degli uccelli).

Nonostante l'accumulo di esperienza, il protagonista del racconto si trova «più che mai rinvolto nell'ignoranza» perché non conosce le cause del canto della cicala in quanto essa non muove le ali né emette un suono con la voce. Il mito introduce due generi di considerazioni: la musica non è arte esecutiva ma, innanzitutto, oggetto della ricerca scientifica; la scienza dei suoni è l'ambito in cui si delinea il nuovo metodo d'indagine, si sancisce il primato delle 'sensate esperienze' pur riconoscendo che il compito dello scienziato è circoscritto a un numero finito di esperienze a causa delle sue limitate capacità conoscitive.

A questo mito musicale Galileo affida dunque l'enunciazione di alcuni principi della propria ricerca scientifica: il rifiuto del principio di autorità, l'importanza della dimensione sperimentale (considerazione delle variabili quantitative), la non esaustività della ricerca (l'uomo non può conoscere tutta la ricchezza della natura ma solo come l'universo è *de facto*, non la determinazione delle essenze, né i piani divini di Creazione).

Le pagine del *Saggiatore* presentano inoltre un apparentemente curioso accostamento tra il telescopio, una tromba e le canne d'organo. Ciò che in quest'opera sembra essere una mera analogia descrittiva, cela invece un legame significativo tra strumento ottico e strumento musicale.

Il manoscritto del *Nuncius* (ma non il testo a stampa) mostra un telescopio dotato di una forma simile a quella di una tromba; tale telescopio compare anche nella parte sovrastante il ritratto di Galileo apposto in apertura dell'*Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari* (1613).

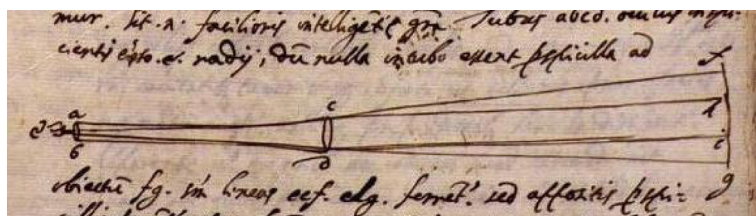


Figura 2. Galileo, *Sidereus Nuncius*, 1610, Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze, *Manoscritto Gal. 48, folio 9r (particolare)*.

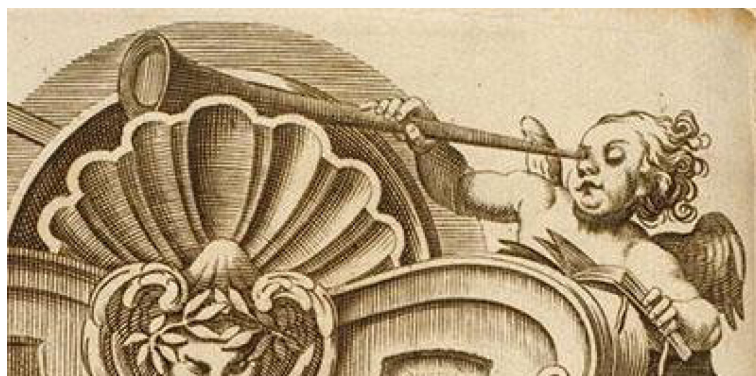


Figura 3. Galileo, *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti*, Roma 1613, ritratto di Galileo (particolare).

Galileo aveva in effetti impiegato delle canne d'organo per costruire i suoi primi telescopi. Come è possibile leggere sul retro di una lettera inviata nel novembre del 1609, tra le componenti necessarie alla costruzione del telescopio sono elencate le canne d'organo di stagno³. Non ci sono pervenuti esemplari di "trumpet telescopes" realizzati da Galileo o a lui appartenuti, ma l'attendibilità di una tale ipotesi è testimoniata dall'ampia diffusione che essi ebbero nel corso del Seicento.

Galileo non descrive il percorso compiuto per giungere alla determinazione delle singole componenti del suo telescopio, ma si limita a rinviare a un successivo studio – mai redatto – dedicato a tale strumento. Gran parte della storiografia concorda nel ritenere che il procedimento seguito dallo scienziato toscano sia stato empirico, senza passare per le leggi prospettiche e di rifrazione evocate genericamente nel *Sidereus Nuncius*. In tale contesto assumono non poca rilevanza le significative analogie con la tromba. Tra queste, un accostamento simbolico – con valenza anche estetica – tra strumenti che annunciano novità o messaggi di particolare importanza, sia tramite il senso della vista che tramite quello dell'udito. Inoltre, entro un più vasto parallelismo tra ottica e acustica, la teoria dell'estromissione presente nelle pagine del *Nuncius* prevede che i raggi visivi procedano verso l'oggetto dopo essere fuoriusciti dall'occhio, aver attraversato il tubo del telescopio ed essere stati rifratti dalle due lenti; tale successione avviene anche nella tromba, ove il suono è prodotto dall'aria proveniente dalla bocca e trasmessa dal tubo.

Un altro esempio attestante la stretta relazione tra musica e filosofia attraversa le pagine dei *Discorsi e dimostrazioni matematiche*. Qui non solo Galileo si dedica alla definizione delle consonanze, ma presenta il moto pendolare come una trasposizione verticale della corda sonora: in entrambi i casi, il periodo di oscillazione è indipendente dal variare dell'ampiezza. Modificando l'ampiezza della vibrazione varia il timbro (perché varia la velocità) ma rimane costante il periodo, ossia l'altezza del suono.

Le regolarità osservabili nel cosiddetto 'mondo sublunare' sono poi trasposte anche in quello celeste: Galileo propone una spiegazione della difformità del moto di rivoluzione terrestre (dovuto in realtà alla variazione di velocità caratterizzante il suo percorso ellittico) che è errata ma significativa. Muovendo dal presupposto dell'omogeneità ontologica dello spazio (consistente nel rifiuto della suddivisione aristotelica tra mondo sublunare e mondo celeste) e dal conseguente riconoscimento di una medesima legalità naturale, Galileo estende alla meccanica celeste un comportamento che aveva osservato e sperimentato sulle corde sonore (grazie all'insegnamento del padre Vincenzo) e sul pendolo. Assumendo il Sole come fulcro, la Luna come peso e la Terra come luogo da cui passa la corda immaginaria, il pendolo spiega l'accelerazione e il ritardo di Terra e Luna nei novilunii e plenilunii. Quando la Luna è in opposizione al Sole, la corda ideale sarà più lunga e oscillerà più lentamente, conferendo così una minor velocità alla Terra; il moto del nostro pianeta aumenterà invece la propria velocità in modo propor-

3 Si veda [13].

zionale all'accorciamento della corda, ossia con l'avvicinarsi della Luna al Sole nel suo moto mestruo di rivoluzione.

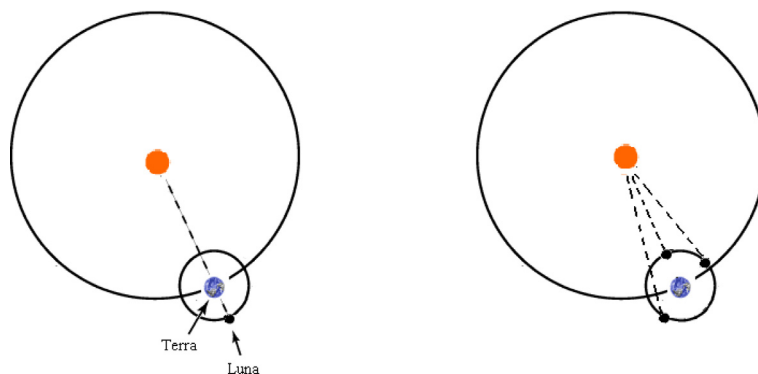


Figura 4. Schema raffigurante il rapporto tra Sole, Terra e Luna secondo l'«oriuolo celeste» descritto da Galileo nella quarta giornata del Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo (Firenze 1632).

Tale analogia lascia trapelare la ricerca di una spiegazione meccanica dei moti celesti che rifugge le occulte simpatie su cui si basa – secondo Galileo – il magnetismo adottato da Kepler. Le inesorabili leggi della natura che governano il cosmo galileiano vengono scoperte mediante l'osservazione delle regolarità individuabili nei fenomeni della natura circostante (in come l'universo è *de facto*), non sono possedute in modo innato dall'uomo, né svelano i misteri dell'essenza divina. Questa cesura tra matematica (e, dunque, musica) e metafisica non è condivisa dall'astronomo tedesco Johannes Kepler (1571-1630), che anzi si spinge verso una perfetta identità ontologica tra enti matematici, archetipi divini di creazione ed essenza trinitaria. Il Dio Musicista di Kepler ha disposto gli enti della creazione attenendosi ad archetipi inclusi nel Verbo e composti secondo rapporti geometrici corrispondenti alle consonanze musicali di ottava (1:2), quinta (2:3), quarta (3:4), terza maggiore (4/5) e minore (5/6), sesta maggiore (3/5) e minore (5/8).

Galileo perviene invece all'adozione del sistema copernicano non perché assuma a priori il suo modello di ordine e di armonia, ma perché la sua verità è testimoniata dalle osservazioni telescopiche e dalle prove fisiche, da un'esegesi del libro della natura condotta con le sensate esperienze⁴ e le matematiche dimostrazioni attorno a come l'universo è *de facto* e non a come avrebbe potuto o dovuto essere *de iure*.

⁴ Con «sensate esperienze» s'intende non l'immediata esperienza sensibile del senso comune aristotelico ma un'unione di sensazione e di facoltà cogitativa, un'esperienza congiunta a un discorso razionale. Per una approfondita analisi del sintagma «sensate esperienze» rinviamo a [2].

BIBLIOGRAFIA

- [1] *La musica e la rivoluzione scientifica del Seicento*, a cura di P. Gozza, Il Mulino, Bologna 1989 (raccolta antologica con contributi, tra gli altri, di P.J. Amman, H.F. Cohen, A.C. Crombie, P.M. Gouk, E. Knobloch, C.V. Palisca, D.P. Walker).
- [2] Baroncini, G., Sulla galileiana esperienza sensata, *Studi secenteschi*, LII, 1984, pp. 147-172.
- [3] Cohen, H.F., *Quantifying Music. The Science of Music at the First Stage of the Scientific Revolution, 1580-1650*, Reidel Publishing Company, Dordrecht 1984.
- [4] Fabbri, N., "De l'utilité de l'harmonie". *Filosofia, scienza e musica in Mersenne, Descartes e Galileo*, Edizioni della Normale, Pisa 2008.
- [5] Gouk, P., *Music, Science and Natural Magic in Seventeenth Century England*, Yale University Press, New Haven-London 1999.
- [6] Gozza, P., Una matematica rinascimentale: la musica di Descartes, *Saggiatore musicale*, II, 1995, pp. 237-257.
- [7] Palisca, C.V., Scientific Empiricism in Musical Thought, in Rhys H.H. (a cura di), *Seventeenth Century Science and the Arts*, Princeton University Press, Princeton 1961, pp. 91-137.
- [8] Palisca, C.V., *Humanism in Italian Renaissance Musical Thought*, Yale University Press, New Haven-London 1985.
- [9] Palisca, C.V., Mersenne pro Galilei contra Zarlino, *Nuova civiltà delle macchine*, XVI, 1998, pp. 74-80.
- [10] Palisca, C.V., Vincenzo Galilei, scienziato sperimentale, mentore del figlio Galileo, *Nuncius. Annali di storia della scienza*, XV, 2000, pp. 497-514.
- [11] Palisca, C.V., *Music and ideas in the sixteenth and seventeenth centuries*, University of Illinois press, Urbana 2006.
- [12] Settle, T., *La rete degli esperimenti galileiani*, in *Galileo e la scienza sperimentale*, a cura di M. Baldo Ceolin, Dipartimento di Fisica 'Galileo Galilei', Padova 1995, pp. 11-62.
- [13] Strano, G., La lista della spesa di Galileo: un documento poco noto sul telescopio, *Galileiana*, VI, 2009, pp. 197-211.
- [14] Walker, D.P., *Studies in Musical Science in the Late Renaissance*, J. Brill, London 1978.

CHARLES DARWIN: VIAGGIO ALLE ORIGINI DELLA VARIETÀ DEI VIVENTI¹

ANNA LEPRE

Vicepresidente dell'Associazione Nazionale Insegnanti di Scienze Naturali (ANISN)

1. Charles Darwin: uno schema, un cliché?

Darwin, come spesso accade ai grandi uomini e soprattutto agli scienziati, è agli occhi del grande pubblico, uno schema, un cliché: è colui che ha affermato che l'uomo deriva "dalla scimmia", cioè l'autore di una teoria che riesce a molti piuttosto disgustosa per il suo carattere freddamente materialistico e perché sostiene l'origine animale dell'umanità. Pochi sono oggi in Italia coloro che conoscono Darwin di prima mano per averne letto le opere fondamentali [1 pag. XIX]

Sono passati quasi 50 anni da quando Giuseppe Montalenti, insigne genetista, scriveva queste parole nella prefazione all'*Autobiografia* [1] di Charles Darwin, ma le cose non sembrano essere molto cambiate, anche se, come scrive Ernst Mayr nel *Modello biologico* [2 pag. 145],

Ben oltre un secolo dopo Darwin la realtà dell'evoluzione è diventata talmente evidente che i biologi non si riferiscono più all'evoluzione come a una teoria, bensì come a un fatto, un fatto altrettanto certo quanto quello che la terra gira intorno al sole e che è sferica e non piatta. Come ha osservato Dobzansky: "In biologia, nulla ha senso se non alla luce dell'evoluzione".

Prenderò le mosse proprio dalla consapevolezza delle difficoltà che ancor'oggi incontra la penetrazione culturale, presso i non addetti ai lavori, della portata rivoluzionaria del pensiero di Darwin sia per la conoscenza del mondo dei viventi e della loro diversità sia per la collocazione dell'uomo nella natura.

Le parole con cui si chiude l'*Origine delle specie* – "[...] innumerevoli forme, bellissime e meravigliose, si sono evolute e continuano a evolversi", [2] – aprono nel 1859 la strada a tutti gli studi successivi e di esse nessun naturalista non potrà non tener conto.

Bello sarebbe se a poco più di 150 anni anche il ragazzo che esce dalla scuola dell'obbligo, il cittadino di media cultura, il professionista o il letterato, l'operaio o l'artigiano, avessero incontrato e apprezzato il grande scienziato in modo diretto attraverso qual-

¹ La lezione-incontro per Pianeta Galileo si è tenuta il 5 novembre 2010 presso la Biblioteca Italo Calvino di Castiglione della Pescaia (Grosseto).

cuno dei suoi scritti e ne avessero almeno intuito la grandezza delle idee e la modalità metodologica, lasciandosi coinvolgere dalla passione per la ricerca e dall'acuto spirito di osservazione che da essi prorompe.

Con queste premesse e con l'intento di far conoscere opere sicuramente accessibili e godibilissime da qualunque lettore almeno un po' curioso e attento ai fatti della natura, presenterò stralci da quelle note ai più, perché citate nei testi scolastici, ma poco conosciute e pochissimo lette direttamente, tracciando un percorso che attraversa i punti salienti della biografia stessa dell'autore. Il lettore non specialista potrebbe partire dalla prima opera di grande risonanza che Darwin scrisse pochi anni dopo il suo rientro in patria dal lungo viaggio che lo portò a scoprire le coste e l'entroterra di interi continenti come l'America meridionale e l'Australia nonché di isole e atolli corallini: il *Viaggio di un naturalista intorno al mondo* [4].

2. In viaggio con Darwin

Quanti lettori di piccoli stralci riportati nei testi di divulgazione sono riusciti a immaginare il giovane Charles che a ogni tappa del *Beagle* scendeva a terra e percorreva lunghissimi tratti di costa o di entroterra a piedi o a cavallo (su cavalli di volta in volta noleggiati)? Quanti hanno riflettuto sul fatto che questo modo di viaggiare caratteristico dell'epoca contribuiva ad affinare le sue già straordinarie capacità di osservazione e a costruire elementi di riferimento spaziali e temporali assai più attenti e acuti di quelli dei frettolosi viaggiatori di oggi?

Scriva il futuro scienziato a proposito di una cavalcata finalizzata allo studio delle coste dell'isola di Chiloe nella parte meridionale del Cile:

La strada è davvero insolita; per tutta la sua lunghezza, tranne che in pochissimi tratti, è formata di grandi tronchi di legno, larghi e disposti longitudinalmente, oppure stretti e disposti trasversalmente...è necessario perciò che i lunghi tronchi longitudinali siano attraversati da pali trasversali, fissati con dei pioli da ogni lato del terreno. Questi pioli rendono pericolosa una caduta da cavallo, perché non è piccola la probabilità di finire su uno di essi. È notevole tuttavia vedere come l'abitudine abbia reso abili i cavalli di Chiloe. Nell'attraversare i tratti malagevoli, dove i tronchi si sono spostati, saltano dall'uno all'altro, quasi con la stessa rapidità e sicurezza di un cane. [4, pag. 273]

Le descrizioni sono sempre accurate, ogni particolare viene annotato, non si parla solo di piante o animali ma di rocce, di uomini con abitudini e consuetudini diverse, di eventi legati alle dinamiche terrestri come terremoti e eruzioni vulcaniche vissuti in diretta, di condizioni del tempo sempre mutevoli, di mari calmi o in tempesta sempre accuratamente descritti. Insomma, il *Viaggio di un naturalista intorno al mondo* è un libro che si inserisce a pieno titolo nella migliore letteratura del viaggio, catturando il lettore come e più di altri libri di questo genere, per le avventure che racconta in modo mai noioso perché intriso del gusto sottile per la scoperta, del piacere intenso di comunicare, attraverso un pensiero che unisce e continuamente mette in relazione

elementi di ambienti, complessi e intrecciati, che ai più apparivano e appaiono tuttora separati.

Il viaggio di Darwin è in effetti anche un “lungo ragionamento”² che inizia con le tappe del *Beagle* e continuerà per tutta la vita dell'autore. Qui si pongono le basi oltre che di una grande teoria, di una lettura simultanea del territorio con una visione integrata e dinamica del paesaggio assolutamente moderna e fortemente anticipatrice rispetto al proprio tempo, caratteristica questa, che accomuna molti geni dell'umanità. E il suo senso di meraviglia spesso espresso chiaramente non può non coinvolgere il lettore trascinato nel viaggio e nel pensiero, come nel brano che chiude il capitolo ventesimo a proposito delle formazioni coralline osservate nelle isole Keeling situate nell'Oceano Indiano [4 pag. 450]:

I coralli costruttori di scogliere hanno infatti innalzato e conservato meravigliose testimonianze delle oscillazioni sottomarine di livello; vediamo in ogni barriera una dimostrazione che la terra è stata qui abbassata e in ogni atollo un monumeto sopra un'isola ormai sparita. Possiamo così, come un geologo che sia vissuto migliaia di anni e si ricordi dei cambiamenti passati, penetrare un po' in quel grandioso complesso di fenomeni per cui la crosta terrestre è stata spezzata e terra e acqua si son venute sostituendo a vicenda.

Seguire sul planisfero e attraverso le descrizioni, in un'epoca come la nostra nella quale anche il viaggio più lontano si compie nel giro di pochi giorni, le lente circonvoluzioni del *Beagle* e gli spostamenti avventurosi del giovane Charles, è un esercizio della mente e dell'immaginazione che può risultare di grande fascino indipendentemente da quello che l'autore ne avrebbe tratto come fonte di inesauribili dati per le sue elaborazioni successive.

Durante il viaggio sul *Beagle* Darwin scrive 770 pagine di diario, 1383 di note sulla geologia e 368 sulla zoologia. Quando sbarca in Inghilterra il 2 ottobre 1836, ha raccolto 1529 campioni di specie conservati in alcool, 3907 fra pelli, ossa ed esemplari conservati a secco e un esemplare vivo, una piccola tartaruga presa alle Galàpagos. L'avventura è appena cominciata.

3. Innumerevoli forme, bellissime e meravigliose

Come già detto, con queste parole si chiude *L'origine delle specie* [2], *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*, di seguito indicato come *Origin*, il libro più noto e più rivoluzionario di Darwin, pubblicato la prima volta nel 1859, a vent'anni di distanza dalla prima uscita del *Viaggio di un naturalista*. Durante questo lungo periodo Darwin scrisse altri saggi a carattere più specialistico ma soprattutto raccolse innumerevoli prove che avvalorassero il suo lungo ragionamento, finalmente divenuto una teoria a tutti gli effetti. A proposito dell'*Origin*, l'autore scrive nell'autobiografia [1]: “questo è senza dubbio il lavoro più importante della mia vita”.

Su questo libro molto è stato scritto, già a pochi mesi dalla sua prima uscita. Lo

2 L'espressione è usata da Darwin in vari scritti ed è il titolo di un libro di E. Mayr, vedi [6]

stesso Darwin, nell'autobiografia, nota che a un certo punto dovette smettere di raccogliere critiche, recensioni, articoli e volumi che di esso parlavano o a questo si ispiravano, a causa del loro incessante succedersi e la tendenza non si è mai fermata fino ai nostri giorni. Non è quindi il caso di soffermarsi laddove in saggi molto più autorevoli si continuano ad esporre spunti di ricerca e di riflessione da letture e riletture di questo testo.

Piuttosto, ci sono alcune indicazioni che possono servire al lettore non specialista ma curioso e in qualche modo volenteroso, perché, mentre l'avventura del Beagle è più facile da condividere, quella dell'*Origin*, richiede un certo impegno intellettuale e non è sempre agevole.

Per prima cosa conviene leggere l'indice, che come si noterà immediatamente non è un indice qualsiasi ma già una traccia organizzata del piano dell'opera. I titoli dei 15 capitoli sono significativi di per sé ma i sottotitoli dei molti paragrafi in cui essi sono suddivisi tracciano veri e propri percorsi. Ogni capitolo è poi chiuso da un utilissimo riassunto, per cui, se il lettore volesse sorvolare sulle parti troppo specialistiche, non perderebbe il senso complessivo e, inoltre, il ricco glossario e l'indice analitico contribuirebbero a fornirgli un valido aiuto.

Prendiamo come esempio il riassunto del capitolo quarto (pag. 193) denominato *Selezione naturale o sopravvivenza del più adatto*.

Il riassunto, con percorso logico stringente, inizia con un *Se*, procede con concetti chiave come *le condizioni mutevoli di vita degli esseri viventi le loro indubbe differenze individuali in quasi ogni parte della loro struttura*, continua con un altro *Se a cagione del loro aumento numerico in progressione geometrica si determina una severa lotta per la vita [...]* e ciò certamente non può essere discusso, prosegue con *Allora* e da qui spiega con parole comprensibili da chiunque che, da quelle premesse consegue come inevitabile che le differenze favorevoli avranno maggiore probabilità di essere conservate e saranno ereditate dai discendenti. Darwin conclude il ragionamento dicendo: "Questo principio della conservazione, o sopravvivenza del più adatto, l'ho denominato selezione naturale."

Il riassunto, e quindi il capitolo, termina con la metafora-chiave che ha cambiato il modo di guardare all'insieme dei viventi sulla Terra, prima disposti lungo una scala gerarchica e da allora sull'albero della vita [2, pag. 196]:

Come i germogli crescendo danno origine a nuovi germogli, e questi, se vigorosi, si ramificano e superano da ogni parte un ramo più debole, così per generazione io credo sia avvenuto per il grande albero della vita, che riempie la crosta terrestre con i suoi rami morti e rotti e ne copre la superficie con le sue sempre rinnovantesi, meravigliose ramificazioni.

I riassunti aiutano ma molte descrizioni di specie animali e vegetali sono imperdibili e vanno lette per esteso. Si trovano numerose nei capitoli dedicati alle *Difficoltà della teoria* (VI) e alle *Obiezioni* (VII) perché, lungi dall'argomentare teorico, lì si portano

fatti e i fatti sono gli organismi con le loro strutture e peculiarità – con la loro biodiversità, per usare un termine di oggi – che avvalorano le ipotesi e danno loro sostanza. Il capitolo VI, per esempio, inizia con una serie di domande che potrebbero mettere in crisi la teoria poiché riguardano lo spinoso problema della transizione da una specie ad un'altra, ma per ognuno di questi dubbi vengono portati innumerevoli e dettagliati esempi tratti sia dal mondo animale sia da quello vegetale che descrivono con cura le peculiarità di ciascuna specie e l'utilità delle forme di transizione solo apparentemente imperfette alla luce di una forma ritenuta perfetta [2 pag233].

Prendiamo la famiglia degli scoiattoli: troviamo qui la più perfetta gradazione dagli animali con la coda appena appiattita e da quelli , con la parte posteriore del corpo piuttosto allargata e la pelle dei fianchi più sviluppata fino ai cosiddetti scoiattoli volanti; questi hanno le membra e anche la base della coda uniti da una larga membrana di pelle che ha funzione di paracadute e che permette loro di planare nell'aria a straordinaria distanza da un albero all'altro.

È ovviamente impossibile in questo scritto dare un'idea della ricchezza di informazioni e descrizioni di specie che vanno dalle orchidee alle balene, dai pipistrelli agli insetti secco; dell'esame accurato di organi che si modificano da una specie all'altra fino ad assumere nuove funzioni, come gli aculei dei ricci di mare da cui derivano le pedicellarie prensili delle stelle marine o lo sviluppo delle ghiandole mammarie dei mammiferi a partire da ghiandole cutanee ipertrofiche che dapprima hanno costituito un seno senza capezzolo come quello dell'ornitorinco. Nell'autobiografia [1] Darwin scrive a proposito del successo dell'*Origin* che per molti anni aveva seguito l'ottima regola di annotare subito tutto ciò che poteva sembrare contrario alla sua teoria in modo da prevenire tutte le obiezioni.

Il libro è denso e la lettura a più voci che nella biblioteca di Castiglione è stata fatta di alcuni brani, unita alla proiezione di diapositive, ha affascinato l'uditorio, che potrà assaporarne meglio la ricchezza se vorrà approfondire la conoscenza del testo e soprattutto se riuscirà, grazie a questa stessa ricchezza, a guardarsi intorno con occhi più attenti, come nell'ultimo capitolo (il quindicesimo) l'autore suggerisce [2, pag. 553]:

È interessante contemplare una plaga lussureggiante, rivestita da molte piante di vari tipi, con uccelli che cantano nei cespugli, con vari insetti che ronzano intorno, e con vermi che strisciano nel terreno umido, e pensare che tutte queste forme così elaboratamente costruite, così differenti l'una dall'altra, e dipendenti l'una dall'altra in maniera così complessa, sono state prodotte da leggi che agiscono intorno a noi.

Capitolo VII dell'*Origin* : *Obiezioni*

“La struttura del becco del mestolone (*Spatula clypeata*) è di natura ancor più meravigliosa e complessa di quella della bocca della balena. La mascella superiore è fornita su ogni lato di una serie , o pettine, di 188 lamine sottili ed ed elastiche, tagliate obliquamente in modo da essere appuntite, e inserite trasversalmente all'asse maggiore della bocca”

Figura 1. Brano tratto dal capitolo VII dell'*Origine delle specie* in cui Darwin discute a lungo le “Obiezioni” alla sua teoria; le illustrazioni in figura evocano “passaggi ben graduati ognuno dei quali utile al suo possessore” che hanno portato alle strutture attuali.

“Negli organismi viventi , la variazione causerà piccole alterazioni, la riproduzione le moltiplicherà quasi all'infinito, e la selezione naturale si impadronirà con infallibile abilità di ogni miglioramento”

L'origine delle specie, cap.VI Difficoltà della teoria



“L'esempio della vescica natatoria dei pesci è particolarmente appropriato, perché dimostra un fatto molto importante: che un organo originariamente costruito per uno scopo, cioè la funzione idrostatica, può trasformarsi in un organo capace di una funzione completamente diversa, cioè la respirazione.”

Figura 2. Brani tratti dal capitolo VI dell'*Origine delle specie*, intitolato “Difficoltà della teoria”; nel paragrafo “Modi di transizione” si parla a lungo della vescica natatoria dei pesci e delle trasformazioni che essa ha subito grazie alla selezione naturale.

Le leggi sono quelle illustrate dalla teoria: quella dell'*accrescimento con riproduzione*, l'*ereditarietà*, la *variabilità*, il *ritmo di accrescimento così elevato da condurre a una lotta per l'esistenza*, e *conseguentemente alla selezione naturale* .

A proposito di “lotta per l'esistenza”, lungi dal vedere una natura con gli artigli come qualcuno ha scritto travisando il pensiero dell'autore, Darwin in modo poetico e profondo così si esprime [2, pag. 142]:

Se lanciamo in aria una manciata di piume, tutte ricadranno al suolo obbedendo a leggi ben definite ma quanto è semplice il problema della loro caduta se confrontato con quello delle azioni e reazioni delle numerose piante e animali che nel volgere dei secoli hanno determinato i numeri proporzionali e la qualità degli alberi che ora crescono sulle antiche rovine indiane!

4. Autobiografia, 1809-1882

È il 31 maggio del 1876 e Darwin intitola il primo capitolo della sua autobiografia [1] *Reminiscenze sullo sviluppo della mia mente e del mio carattere*. Il capitolo è preceduto da un grande albero genealogico e l'autore dichiara di scrivere di sé per il proprio divertimento, ma anche pensando al futuro, ai suoi discendenti probabilmente interessati a conoscerlo meglio:

Ho cercato di scrivere questi appunti su me stesso, come se fossi un uomo morto che dall'altro mondo si volge indietro a considerare la propria vita passata. La cosa non è stata difficile, perché la mia vita volge ormai al termine. Nello scrivere non mi sono troppo preoccupato dello stile. [1, pag. 3]

In effetti, lo stile è discorsivo, piano, a tratti divertito e spiritoso. L'uomo Darwin guarda sé stesso, il percorso che ha fatto sia nelle tappe della vita e degli affetti, sia nelle modalità di pensiero e di studio. Nel sesto capitolo – in realtà qui non ci sono veri e propri capitoli ma il libro è suddiviso in tappe biografiche importanti – parla del suo rapporto con l'amata moglie, Emma Wedgwood rivolgendosi direttamente ai cinque figli:

Voi tutti conoscete bene vostra madre e sapete quale ottima madre sia sempre stata. Essa è stata per me la più grande benedizione, e in tutta la mia vita non l'ho mai sentita pronunciare una parola sgradevole [...] La mia vita familiare è stata molto felice e devo riconoscere che nessuno di voi, figli miei, mi ha dato la minima preoccupazione, se non per ragioni di salute. Credo che pochissimi padri di cinque figli possano dire altrettanto con tutta sincerità. [1 pagg. 78-79]

La lettura di questo piccolo libro ci fa apparire il grande uomo così familiare e sincero da rendercelo ancora più amico. Il suo ritratto più noto, quello di un uomo ormai anziano con una lunga barba bianca si adatta perfettamente allo stile della sua autobiografia.

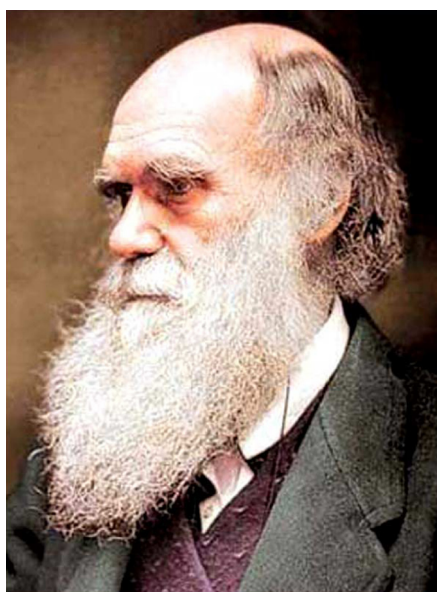


Figura 3. Charles Darwin (colorazione aggiunta all'originale in bianco e nero).

Ma anche l'autobiografia contiene riflessioni profonde soprattutto là dove si sofferma sullo stile di pensiero, sui tratti della personalità anch'essi oggetto continuo di studio: una mente che osserva se stessa e si offre al lettore senza presunzione ma con benevolenza.

Ho sempre la stessa difficoltà a esprimermi in modo chiaro e conciso, cosa che mi ha provocato gran perdita di tempo, ma ho trovato compenso e vantaggio nella conseguente necessità di pensare a lungo e intensamente ogni frase, così da poter individuare gli errori del mio ragionamento e delle osservazioni mie e di altri. [1, pag. 119]

E in seguito:

[...] posso dire di avere una capacità superiore alla media degli uomini di notare cose che sfuggono facilmente all'attenzione e di osservarle con cura. Nell'osservazione e nella raccolta dei fatti penso di aver messo tutto l'impegno di cui sono capace. E ciò che più conta, il mio amore per le scienze naturali è stato continuo e ardente. [1, pag. 122]

5. L'origine dell'uomo e il senso comune

Darwin dedica un intero capitolo dell'autobiografia alle sue pubblicazioni ripercorrendone la storia e soffermandosi su quelle che avevano all'epoca suscitato maggiore scalpore. Senza dubbio, l'*Origine dell'uomo* (*Descent of man*, [3]), pubblicato la prima volta nel 1871, è una di queste. Nell'autobiografia Darwin dice che gli sembrava inevitabile un completamento dell'*Origin* che desse molto spazio alla nostra specie, a pieno titolo inserita nell'albero della vita.

Nell'*Origine dell'uomo* l'autore, che non era ancora in possesso dei dati paleontologici di cui oggi disponiamo, poggia le sue convinzioni su due argomentazioni forti: una di carattere deduttivo, secondo la quale, una volta ammessa l'evoluzione, non c'è ragione di pensare che l'uomo debba esserne escluso; l'altra consistente in un'analisi comparativa molto accurata delle affinità morfologiche, fisiologiche, comportamentali dell'uomo con altri mammiferi, in particolare con le scimmie antropomorfe:

È noto che l'uomo è costruito sullo stesso tipo o modello generale di ogni altro mammifero. Tutte le ossa del suo scheletro si possono paragonare con le ossa corrispondenti di una scimmia, di un pipistrello o di una foca. La stessa cosa vale per i muscoli, i nervi, i vasi sanguigni e gli organi interni. [3, pag. 34]

Ancora oggi molte rappresentazioni fuorvianti, come quelle di una scimmia che gradualmente si solleva sulle zampe posteriori fino a diventare uomo, in un percorso lineare che suggerisce un finalismo antropocentrico indimostrabile, falsano il senso dell'opera di Darwin, togliendo spessore e verità a quello che è stato un complesso e irripetibile percorso compiuto sulla Terra da innumerevoli specie, trasformatesi di continuo, rincorrendo e producendo esse stesse le continue trasformazioni ambientali in un tempo lunghissimo.

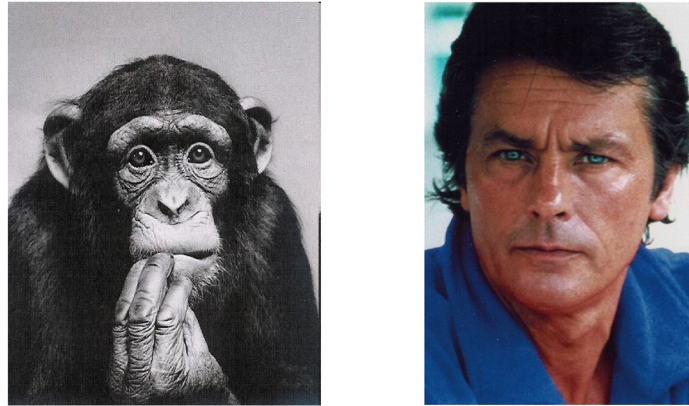


Figura 4. Oggi sappiamo che il genoma dello scimpanzé è identico per il 99% a quello dell'uomo!

Di questa complessità Darwin era pienamente consapevole e il suo pensiero al riguardo emerge in modo chiaro in tutte le sue opere. Troppa volte questo pensiero, ampio e anticipatore, che dà una spiegazione scientificamente inoppugnabile dell'enorme varietà dei viventi sulla Terra è stato semplificato e arbitrariamente strumentalizzato.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Darwin, C., *Autobiografia* (1958), Einaudi, Torino 1962 (ristampa, 2006).
- [2] Darwin, C., *L'origine delle specie* (1872), Bollati-Boringhieri, Torino 1967 (ristampa, 1999).
- [3] Darwin, C., *L'origine dell'uomo* (1874), Newton-Compton, Roma 1972 (2^a ed. 1992).
- [4] Darwin C. *Viaggio di un naturalista intorno al mondo* (1845), Einaudi, Torino, 1989 (5^a ed. 2004)
- [5] Mayr, E., *This is Biology: The Science of the Living World* (1997); trad. it. *Il modello biologico*, Mc-Graw-Hill Italia, Milano 1998.
- [6] Mayr, E., *One long Argument. Charles Darwin and the Genesis of Modern Evolutionary Thought* (1991); trad. it. *Un lungo ragionamento*, Bollati Boringhieri, Torino 1994.

VISIONE SCIENTIFICA E SENSO COMUNE

MICHELE MARSONET

Dipartimento di Filosofia, Università di Genova

1. L'immagine manifesta

Nell'ambito della filosofia contemporanea, si è spesso detto che la visione scientifica del mondo è destinata a sostituire l'immagine della realtà fornita dal senso comune. A ciò si può obiettare, tuttavia, che il senso comune vanta una sorta di priorità *metodologica* nei confronti di ogni visione scientifica del mondo. Ad esempio, la tesi della indeterminatezza della traduzione radicale implica l'impossibilità di specificare, in senso assoluto, di che cosa parla una teoria scientifica. Possiamo dire di cosa tratta una teoria scientifica solo facendo ricorso al nostro linguaggio ordinario, presupponendo cioè di sapere *in anticipo* di cosa parliamo nel corso della nostra vita quotidiana.

Chiediamoci allora: è vero che non abbiamo *una sola* visione del mondo, bensì due immagini molto complesse, ognuna delle quali intende proporsi come rappresentazione completa della posizione dell'uomo nella realtà? Wilfrid Sellars ritiene di sì e definisce queste due prospettive, rispettivamente, l'immagine *manifesta* e l'immagine *scientifica* dell'uomo-nel-mondo¹. Esse si rivelano a suo avviso entrambe intersoggettive e non arbitrarie.

Che cosa sono queste due immagini? E fino a che punto sono alternative? Notiamo innanzitutto che si tratta, in entrambi i casi, di idealizzazioni da intendersi nello stesso senso dei "tipi ideali" di Max Weber. Ciò significa che, per scoprire la loro presenza, dobbiamo fare ricorso a una buona dose di astrazione. In altri termini, esse non si manifestano grazie ad una mera ricognizione empirica. Per esempio noi viviamo *nella* visione del mondo del senso comune, e soltanto un complesso processo di riflessione è in grado di farci capire che – proprio in quanto esseri umani - condividiamo un'immagine comune del mondo, la quale è a sua volta determinata (ma questo Sellars non lo dice) dal fatto che la nostra struttura fisica ci obbliga a concepire la realtà in un certo modo piuttosto che in un altro.

Questo quadro è complicato dal fatto che, secondo Sellars, ciascuna delle due immagini su menzionate ha una storia e, mentre le origini dell'immagine manifesta risalgono a tempi preistorici, quelle dell'immagine scientifica sono assai più recenti. Non solo: l'immagine scientifica muta in continuazione e cambia addirittura davanti ai nostri occhi. Ecco dunque la descrizione sellarsiana dell'immagine manifesta:

¹ Vedi [4] e [1].

L'immagine "manifesta" dell'uomo-nel-mondo può essere caratterizzata in due modi, che sono complementari piuttosto che alternativi. È, in primo luogo, la cornice nei cui termini l'uomo è diventato cosciente di se stesso come uomo-nel-mondo. È la cornice in cui, per usare un'espressione tipica dell'esistenzialismo, l'uomo ha per la prima volta incontrato se stesso - il che significa dire, ovviamente, che in quell'occasione egli divenne uomo. Poiché non è una caratteristica accidentale dell'uomo che egli concepisca se stesso come uomo-nel-mondo; ed è pure ovvio, a ben riflettere, che se l'uomo avesse una concezione radicalmente differente di se stesso, egli sarebbe un tipo di uomo radicalmente diverso. Ho posto al centro dell'attenzione questa dimensione quasi-storica perché desidero sottolineare fin dall'inizio ciò che potrebbe essere definito il paradosso dell'incontro dell'uomo con se stesso. Il paradosso consiste nel fatto che l'uomo non ha potuto essere tale finché non ha incontrato se stesso².

Questa caratterizzazione è importante ai nostri fini. Essa implica che la sostituzione dell'immagine del mondo propria del senso comune ci obbligherebbe a vedere noi stessi in una maniera radicalmente diversa e, com'è ovvio, ci si può chiedere fino a che punto ciò possa *realmente* accadere. Se l'uomo non può essere tale finché non incontra se stesso, ciò che abbiamo appena detto implica che questo incontro (il quale è un incontro *socialmente condiviso*) ha avuto luogo nell'immagine manifesta. Sostituire tale immagine con un'altra significa che l'incontro dovrebbe essere rielaborato *ab initio*. D'altro canto, l'immagine manifesta non è neppure una concezione ingenua, poiché può essere caratterizzata come il progressivo affinamento di un'immagine più primitiva che è stata a poco a poco rimpiazzata nel corso dell'evoluzione culturale dell'umanità. In questo senso, la cornice concettuale dell'immagine manifesta è, essa stessa, un genere di immagine scientifica. Sellars nota pure che

C'è, tuttavia, un genere di ragionamento scientifico che essa, per definizione, *non* include, vale a dire quello che richiede la postulazione di entità impercettibili, e dei principi ad esse connessi, per spiegare il comportamento delle cose percettibili³.

Giunti a questo punto possiamo dire che nella vita di ogni giorno l'immagine manifesta *domina* quella scientifica – e ciò ha conseguenze piuttosto importanti. Infatti, la visione filosofica dell'uomo nel mondo può a qualcuno apparire distorta proprio a causa di questo fatto, poiché l'uomo è *essenzialmente* un essere che concepisce se stesso nei termini dell'immagine manifesta. Se le cose stanno così, è necessario concludere che la concezione che l'uomo ha della propria posizione nel mondo non si accorda facilmente con l'altra immagine (quella scientifica); la rappresentazione dell'uomo nel mondo che l'immagine scientifica ci fornisce sembra essere in contrasto con quella dell'immagine manifesta, nel senso che vi è tensione fra esse. Se l'immagine scientifica è corretta, allora

2 [4], p. 6 (le traduzioni di Sellars sono mie).

3 [4], p. 7.

l'uomo non è il tipo di essere che viene concepito all'interno dell'immagine manifesta e la sua intera esistenza appare basata sull'errore. Giustamente Sellars rammenta che non si tratta certo di una novità se si guarda con attenzione alla storia della filosofia:

Pensiamo, per esempio, a Spinoza, il quale istituì una dicotomia tra il modo in cui l'uomo concepisce falsamente se stesso e quello in cui scopre di essere nell'impresa scientifica. Si potrebbe ben dire che Spinoza tracciò una distinzione fra un'immagine "manifesta" ed un'immagine "scientifica" dell'uomo, rifiutando la prima come falsa ed accettando la seconda come vera⁴.

L'immagine manifesta, inoltre, possiede un'esistenza *oggettiva* che trascende le opinioni personali dei singoli individui. Ciò significa che al suo interno troviamo la verità e l'errore, anche se per Sellars resta aperta la possibilità che essa debba, in ultima analisi, essere rifiutata in quanto *falsa*. In altre parole, possiamo valutare la correttezza o meno delle descrizioni fornite dall'immagine manifesta facendo ricorso a criteri ben fondati. Se tale è il quadro generale in cui ci troviamo a operare, il fatto che gli esseri umani sono ciò che sono perché pensano a se stessi nei termini dell'immagine manifesta induce a porsi un quesito: fino a che punto può sopravvivere l'immagine manifesta dell'uomo all'interno di un contesto nel quale l'immagine scientifica, cresciuta rapidamente negli ultimi secoli, sembra diventare l'elemento predominante?

L'immagine manifesta non include soltanto oggetti, ma anche teorie, credenze, ecc. Si tratta di uno strumento d'*interpretazione*, non di una riproduzione fedele e meccanica di quanto i nostri sensi percepiscono. Pertanto, anche se l'immagine manifesta fosse falsa, avremmo comunque verità ed errore al suo interno proprio grazie alla sua *oggettività*. Tuttavia, questo genere di oggettività è sempre una oggettività-per-noi.

2. L'immagine scientifica

Anche l'immagine scientifica dell'uomo è una idealizzazione. È difficile definirla in termini precisi perché sta costantemente evolvendo davanti ai nostri occhi. Inoltre, si potrebbe obiettare che le "immagini" scientifiche sono più d'una, nel senso che fisica, chimica, biologia, sociologia, ecc. hanno, ognuna, una particolare immagine dell'uomo, e ciascuna di tali immagini dovrebbe a sua volta essere posta a confronto con quella manifesta. Ciò nonostante, quando prendiamo in considerazione l'immagine scientifica che emerge dalle molteplici immagini fornite dalle diverse scienze, è facile constatare che essa si propone quale visione *completa*, contenente l'intera verità circa il mondo e il ruolo che l'uomo vi svolge. Proprio per questo motivo l'immagine scientifica può essere pensata come *rivale* di quella manifesta. Essa mette in dubbio la visione che abbiamo di noi stessi: se l'immagine scientifica è corretta, allora noi non siamo ciò che pensiamo e diciamo di essere.

È importante notare che ogni argomento mirante a mostrare che gli oggetti del senso comune (o quelli scientifici) sono tutto ciò che esiste *realmente*, rifiutando l'esistenza di altri tipi di oggetti, *opera entro una cornice* (la cornice del senso comune o

4 [4], p. 8.

quella scientifica) e, di conseguenza, non fornisce alcun punto di vista *esterno* su cui appoggiarsi. Né serve ricorrere alle nozioni di coerenza e d'incoerenza, giacché una cornice può essere incoerente e, al contempo, rappresentare uno schema concettuale di successo nella pratica quotidiana.

Molti problemi sorgono quando alcuni autori – tra i quali lo stesso Sellars – rivendicano il primato dell'immagine scientifica. Sellars, per esempio, accetta la tesi secondo cui

la visione scientifica del mondo è (in linea di principio) l'immagine adeguata⁵,

da cui segue che

la scienza è misura di tutte le cose, di ciò che è in quanto è, e di ciò che non è in quanto non è⁶.

Ciò che Sellars ha in mente si può dedurre da questa breve affermazione:

Sono d'accordo con Kant che il mondo del senso comune è un mondo "fenomenico", ma suggerisco che sono gli "oggetti scientifici", piuttosto che gli inconoscibili metafisici, a costituire le vere cose-in-sé⁷.

Ma si debbono avanzare seri dubbi circa la possibilità di costruire una simile immagine scientifica completa. La domanda che occorre porsi a questo riguardo è: *di quale* immagine scientifica stiamo parlando? Una sintesi stabile sembra irraggiungibile *nella pratica*. Tale visione risulta plausibile soltanto se la ricerca scientifica potesse davvero esaurirsi avendo conseguito tutti i suoi obiettivi; e si può naturalmente obiettare che nessun indizio ci autorizza a trarre questa conclusione.

Inoltre, anche l'immagine manifesta non può essere considerata stabile. È un dato di fatto che essa evolve, trasferendo continuamente all'interno della propria cornice elementi che provengono dall'immagine scientifica. L'ontologia del senso comune è tutt'altro che stabile e determinata: essa non è affatto "data" una volta per tutte. La sua incessante evoluzione, al contrario, è caratterizzata dalle interrelazioni dinamiche con l'immagine scientifica.

Un quadro come quello proposto dai sostenitori della validità incondizionata dell'immagine scientifica acquisterebbe senso soltanto se la scienza fosse qualcosa di *neutrale*. In altre parole la scienza è sempre il risultato delle nostre indagini sulla natura; e questa è, inevitabilmente, una questione di *transazione* in cui la natura stessa è uno degli elementi coinvolti, mentre l'altro elemento è colui che indaga. Proprio per questo non è possibile accettare a cuor leggero la parafrasi sellarsiana di Protagora secondo cui "la scienza è la misura di tutte le cose". Risultano quindi più che mai attuali le seguenti parole di Werner Heisenberg:

5 [4], p. 36.

6 [5], p. 201.

7 [6] p. 143.

La scienza naturale non descrive e spiega semplicemente la natura; descrive la natura in rapporto ai sistemi usati da noi per interrogarla. È qualcosa, questo, cui Descartes poteva non aver pensato, ma che rende impossibile una netta separazione fra il mondo e l'io⁸.

La logica della spiegazione scientifica potrebbe giungere allo stadio finale solo nel caso che la scienza fosse in grado di conseguire la *completezza*. Nella scienza completa (o "teoria finale"), infatti, gli uomini non hanno più alcun bisogno di indagare la natura degli oggetti; in altre parole si suppone che la scienza all'ultimo stadio di sviluppo descriva tutti i possibili aspetti di ciò che ci circonda, fornendo così un quadro del mondo come *realmente* è. E per giustificare una simile posizione occorre adottare un approccio di tipo peirceano che assuma un progresso lineare in ambito scientifico, culminante in una teoria finale.

3. Il senso comune

Torniamo ora all'affermazione che l'immagine del mondo del senso comune è destinata ad essere sostituita da quella scientifica.

In base a *quali* elementi si può sostenere la falsità dell'immagine manifesta? Chiaramente, siamo autorizzati a compiere tale mossa solo adottando una visione *teleologica* della scienza, e cioè ammettendo la plausibilità di una teoria finale. Tuttavia si deve pure notare che, per far questo, è necessario prendere in considerazione l'immagine manifesta così come essa si presenterebbe quando avessimo a disposizione una scienza conclusa capace di proporsi come autentica rivale. Poiché lo stato della scienza è caratterizzato dal divenire e non dall'immobilità, ne consegue che la nostra scienza attuale non può avere la forza di rimpiazzare il senso comune.

Appare infatti assurdo porre a confronto la scienza completa *del futuro* con l'immagine scientifica *attuale*. Innanzitutto, non sappiamo in quale veste si manifesterà la scienza futura e, in secondo luogo, non possiamo davvero escludere la possibilità che l'immagine manifesta continui a svilupparsi, di conserva con quella scientifica. È giocoforza concludere, pertanto, che il secondo elemento della comparazione deve essere l'immagine scientifica "nel suo ultimo stadio possibile", giacché nient'altro potrebbe svolgere quel compito.

Chiediamoci ora: *in quale contesto* dobbiamo andare a cercare i principi che ci autorizzano ad abbandonare uno schema concettuale in favore di un altro? La risposta è che tale contesto altro non può essere che quello del senso comune. Qualsiasi tentativo di affinare e rendere più preciso lo schema del senso comune è in primo luogo determinato dalla necessità di *agire*, il che significa da bisogni di tipo pragmatico. In altri termini, non ci imbarcheremmo in un'impresa così difficile se affinamento e maggiore precisione non avessero lo scopo primario di rendere lo schema concettuale generale che utilizziamo più adatto alle nostre necessità *pratiche*.

Il senso comune, in effetti, costituisce il contesto generale al cui interno vanno

8 [2], p. 98.

rintracciati gli esordi della scienza. Non solo: si può ipotizzare che il senso comune abbia dato inizio all'impresa scientifica ritenendo che essa gli avrebbe fornito indicazioni preziose sul rapporto uomo-mondo; anche il senso comune, infatti, ha bisogno di rispondere alle fondamentali domande circa la struttura della realtà. Ciò significa che esso è in grado di assimilare le novità introdotte dalla scienza se esse si dimostrano adeguate a rispondere ai quesiti di cui sopra.

Dunque, supporre che il senso comune stia fermo mentre l'immagine scientifica evolve è una semplice assurdità, poiché esso è pienamente coinvolto dagli stessi mutamenti che riguardano la scienza. Il senso comune contiene credenze e, come la scienza, teorie – teorie che vengono costantemente accettate e sviluppate oppure abbandonate; in conseguenza di ciò, l'immagine del mondo cui il senso comune dà vita cambia in continuazione e più o meno rapidamente a seconda delle varie epoche. Non v'è davvero alcun motivo di negare che il senso comune sia pronto ad accettare una teoria scientifica se essa risulta convincente. Tra senso comune e scienza non vi sono dunque soltanto rapporti conflittuali e di opposizione (pur presenti), ma anche, e soprattutto, rapporti di interscambio e di collaborazione. Una delle principali attività del senso comune è proprio la verifica e l'accettazione della scienza. Senza dubbio ciò comporta un continuo affinamento della base concettuale del senso comune, affinamento che è del resto percepibile nella nostra esperienza quotidiana.

Se l'accettazione dei risultati scientifici avviene facendo ricorso ai principi del senso comune, e se, per di più, tale accettazione risulta indispensabile ai fini della *nostra* comprensione del ruolo della scienza, è fuorviante pensare che l'immagine scientifica abbia il compito di sostituire quella manifesta. Al contrario, la scienza viene promossa dal senso comune proprio perché il nostro bisogno di conoscenza è determinato dal bisogno di *agire* nel mondo. Lo scienziato che ci dice “la materia è un mito”, nella vita quotidiana si comporta come tutti noi, senza abbandonare le categorie dell'immagine manifesta, in quanto è quest'ultima che ci fornisce la rappresentazione che abbiamo di noi stessi. In questo senso, l'immagine manifesta (e il suo linguaggio) funziona come una sorta di “camera di compensazione” tra scienziato e scienziato, e tra scienziato e uomo della strada.

Il senso comune, insomma, è presupposto in ogni caso: se la possibilità di costruire una teoria finale destinata a sostituire il senso comune dipende a sua volta dalla possibilità della sua adozione sul piano razionale, tale sostituzione è priva di significato. Il senso comune è sempre il motore dell'intera operazione, dal momento che esso *usa* l'immagine generata dalla scienza. La conclusione che si può trarre è che, considerata la nostra struttura fisica, e visto che la nostra vita si svolge in un mondo che sembra piuttosto diverso da quello rappresentato dalla nostra scienza attuale – ma, comunque, *reale* – i tentativi di ottenere una sorta di “disboscamento” a livello ontologico tendono a ipersemplicizzare una situazione che è di per sé assai complicata.

4. Conclusioni

Finora abbiamo accettato, almeno a grandi linee, la tematizzazione che Wilfrid Sellars offre delle due immagini. In questo paragrafo conclusivo cerchiamo di superarla per verificare brevemente quali potrebbero essere le conseguenze di una simile mossa.

Dobbiamo chiederci: fino a che punto la scienza rappresenta il mondo? Descrive veramente in modo adeguato la natura, da un lato, e noi e i nostri rapporti con la natura, dall'altro? Ci fornisce realmente un'immagine esatta ed accurata?

Naturalmente simili domande revocano in dubbio una presupposizione di fondo, che spesso non viene esplicitata: si suppone che la scienza "rappresenti", che ci fornisca una visione complessiva: la cosiddetta *immagine scientifica del mondo*. Com'è noto, gli stessi scienziati parlano di visione scientifica del mondo almeno a partire da Galileo. Si tratta quindi di un modo comune di parlare; ci viene spontaneo immaginare visioni del mondo complessive perché si tratta di espressioni che appartengono alla storia stessa della filosofia e della scienza occidentali. Tuttavia, non sempre le espressioni spontanee riflettono fatti realmente esistenti.

Sellars ci presenta nei suoi scritti una netta dicotomia. All'immagine scientifica, che è il mondo come viene descritto dalla scienza, si contrappone l'immagine manifesta, il mondo così come ci appare nella vita di ogni giorno. L'immagine scientifica ci fornisce una rappresentazione assai diversa da come le cose ci appaiono. Eppure la scienza si propone di rappresentare, come il senso comune, proprio la realtà in cui noi tutti viviamo. Sellars conclude che vi è un conflitto irrisolvibile tra le due immagini, e che l'immagine scientifica – che è a suo avviso superiore – è eventualmente destinata a sostituire completamente quella manifesta.

In fondo, il discorso di Sellars è contiguo all'idealismo. Sostenere l'inferiorità e l'eliminabilità dell'immagine manifesta significa in sostanza dire che tutto ciò che ci circonda, almeno come *noi* lo vediamo, è pura illusione, mera apparenza e non realtà. E si tratta, come tutti sappiamo, di un tema che non è certo nuovo. Basti pensare agli idealisti britannici del XIX secolo, Bradley e McTaggart, che, non a caso, Sellars aveva letto con attenzione (come del resto Russell, Moore e molti altri).

L'immagine manifesta – la versione sellarsiana della "apparenza" – si rivela coerente ad un'analisi attenta, ma il resoconto della realtà che essa ci fornisce è inferiore, perché meno esplicativo, al resoconto che ci viene dall'immagine scientifica. Anzi, Sellars cerca di mostrare che l'immagine manifesta è necessariamente "incompleta" sul piano della spiegazione, poiché ammette rotture e discontinuità *non* spiegabili nei suoi stessi termini.

L'immagine manifesta è una teoria, nata nelle nebbie della preistoria, che è stata da noi interiorizzata (diventando per l'appunto "senso comune") dopo averla creata. Tuttavia questa teoria non si differenzia dalla scienza solo per la sua età, ma anche per il fatto che la sua formazione non ha condotto – a differenza della scienza – alla postulazione di entità non-manifeste per spiegare quelle manifeste. Ne consegue che

essa si trova nella scomoda posizione di ammettere fenomeni che non possono essere spiegati nel suo contesto. Ed è un fatto, secondo Sellars, che spesso la spiegazione è possibile soltanto postulando realtà che trascendono il piano puramente fenomenico. Ecco perché l'immagine manifesta è apparenza e *non* realtà: essa si rivela incompleta a livello esplicativo. Il filosofo con ambizioni sistematiche cerca di completare l'immagine manifesta fornendo le spiegazioni (metafisiche) di cui essa ha bisogno, ma non ci riesce perché, nel tentativo, deve comunque postulare come "reali" entità che non si riscontrano al suo interno.

E se *non* vi fossero "entità" (rappresentazioni, teorie, schemi concettuali, ecc.) come l'immagine manifesta o quella scientifica? In altre parole: proviamo ad adottare una qualche forma di scetticismo a proposito delle immagini del mondo, delle cornici concettuali, dei "mondi" cui sembriamo dar vita quando parliamo del "mondo della scienza", del "mondo del senso comune", e via dicendo.

L'immagine manifesta di cui parla Sellars è il modo in cui il mondo appare a noi, esseri umani; è pure il mondo descritto dalla filosofia sistematica; ed è infine un'immagine la cui evoluzione non prevede la postulazione di entità non manifeste per spiegare i fenomeni osservabili. Tuttavia, la filosofia è stata *costantemente* impegnata, nell'intero corso della sua storia, in postulazioni e reificazioni di ogni tipo. Entità "postulate" quali concezioni globali, cornici concettuali, immagini e visioni del mondo sono da sempre presenti nella cosiddetta "filosofia perenne", mediante la reificazione di espressioni linguistiche. Com'è possibile, allora, sostenere che la postulazione è estranea all'immagine manifesta? Rammentiamo quanto afferma Popper:

Quel che riscontriamo in Platone e nei suoi predecessori è l'elaborazione consapevole e l'invenzione di un nuovo accostamento al mondo e alla conoscenza di esso. Tale atteggiamento trasforma una concezione originariamente teologica, *l'idea di spiegare il mondo visibile mediante un presupposto mondo invisibile*, nello strumento fondamentale della scienza teorica. Tale idea era stata esplicitamente formulata da Anassagora e da Democrito come principio di indagine della materia o struttura fisica; la materia visibile doveva essere spiegata mediante delle ipotesi intorno a degli invisibili, relative cioè a *una struttura invisibile, troppo piccola per essere vista*. Con Platone questa concezione risulta consapevolmente accettata e generalizzata; il mondo visibile del mutamento deve essere in definitiva spiegato mediante un mondo invisibile di "Forme" immutabili⁹.

Vi sono pertanto due fatti nella caratterizzazione fornita da Sellars delle due immagini che causano contraddizioni. In primo luogo egli ci spiega i termini che usa, ma lo fa ricorrendo al linguaggio tradizionale, cioè quello del senso comune. Si tratta della classica spiegazione della natura umana che introduce entità mentali come immagini e concezioni. Così, quando cerca di farci capire cosa sono le sue due immagini, utilizza termini del senso comune che non dovrebbero trovar posto nell'immagine scientifica.

9 [3], p. 155 (corsivi nell'originale).

Essi dovrebbero essere eliminati. La conclusione è che il linguaggio del senso comune non può essere completamente ridotto a quello scientifico.

Il secondo fatto – ancor più sorprendente – è che se rammentiamo che per Sellars la postulazione di entità non manifeste è un'attività per definizione estranea all'immagine manifesta, ci troviamo invece di fronte a immagini, visioni del mondo, cornici concettuali ecc. che nell'immagine manifesta non dovrebbero esserci. Ne consegue che parlando delle sue due immagini, Sellars adotta una prospettiva che non appartiene all'immagine manifesta né a quella scientifica: le due immagini si trovano in una sorta di limbo ontologico. In questo caso l'ontologia sellarsiana non è esplicita perché il nostro autore non può rivendicarne la legittimità senza contraddirsi.

Che ne è, a questo punto, dell'uomo comune che vive nell'immagine manifesta? Rammentiamo ancora una volta che, secondo Sellars, la linea divisoria è data dal fatto che l'immagine scientifica è caratterizzata dalla postulazione, mentre quella manifesta non contiene entità postulate, ma solo cose sperimentate, per quanto descritte in modo errato. Agendo in questo modo, tuttavia, togliamo al senso comune l'intera dimensione delle analogie e delle metafore, seguite dalla personificazione e dalla reificazione, che hanno sempre riempito il nostro mondo di grandi quantità di enti postulati. E ciò che sottende questa dinamica è proprio l'esigenza di *spiegare*.

In altri termini, i filosofi hanno privilegiato il senso comune ogni volta che un nuovo paradigma – non soltanto, e non necessariamente – scientifico ha messo in crisi un numero troppo elevato di credenze in precedenza accettate. Il Dottor Johnson, dando un calcio al sasso, volle dimostrare che la credenza spontanea nell'esistenza degli oggetti fisici è più forte e più convincente delle argomentazioni gnoseologiche avanzate da Berkeley. Una mossa analoga la ritroviamo quando Reid contestò i dubbi di Hume circa la nostra capacità di conoscere gli oggetti della percezione.

Dunque il senso comune, piuttosto che un'immagine nell'accezione sellarsiana, è una *procedura* di tipo razionale: essa ci spinge a mantenere tenacemente le nostre attuali credenze fin quando non vi sia abbastanza evidenza per abbandonarle. La (relativa) inerzia del senso comune si è rivelata spesso utile in ambito filosofico; oggi vediamo che la gnoseologia empirista di Berkeley e Hume era fondata sul presupposto errato che sia possibile isolare i dati sensoriali indipendentemente dal contesto concettuale; avevano dunque ragione Johnson e Reid a notare che la credenza negli oggetti fisici precede *logicamente* il linguaggio delle sensazioni. In conclusione, i termini "immagine" e "cornice" implicano una rigidità che non si riscontra nel nostro effettivo rapporto con la realtà circostante.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Gabbani, *Per un'epistemologia dell'esperienza personale*, Guerini, Milano 2007.
- [2] W. Heisenberg, *Scienza e filosofia* (1959), trad. it. Il Saggiatore, Milano 1966.
- [3] K. R. Popper, *Congetture e confutazioni* (1963), trad. it. Il Mulino, Bologna 1972.
- [4] W. Sellars, Philosophy and the scientific image of man, in Id., *Science, perception, and reality*, Routledge & Kegan Paul, Londra, 1963, pp. 1-40.
- [5] W. Sellars, Empirismo e filosofia della mente (1956), trad. it. in *Iride*, N. 4/5, gennaio-dicembre 1990.
- [6] W. Sellars, *Science and metaphysics. Variations on Kantian themes*, Routledge & Kegan Paul, Londra, 1968.

TRA UNIVERSO DEL SENSO COMUNE E UNIVERSO DELLE SCIENZE: OLTRE IL CONFLITTO

CARLO GABBANI

Università di Firenze

1. Una diagnosi

“Non è mai accaduto di dover subire tante idee lontane dal senso comune, e d'altra parte sostenute meglio, più controllate, e più instabili, più rapidamente fuori moda, detronizzate, rimpiazzate [...]”. Così faceva dire, nei primi anni Trenta del secolo scorso, Paul Valéry [28, pp. 103-104] a una delle voci del dialogo *L'Idée fixe*, nel contesto di una singolare riflessione sul rapporto tra scienza, universo del senso comune e immaginazione. In quegli stessi anni si potrebbero trovare considerazioni forse non dissimili (anche se diversamente motivate o espresse) da parte di alcuni degli scienziati che concorrevano al sorgere di quelle stesse idee.

Ma che cosa è *l'universo del senso comune*?

Non potrò qui soffermarmi sui molteplici profili storici rilevanti in proposito, anche perché nella tradizione filosofica la questione del senso comune sembra centrale in primo luogo in relazione ai problemi dello scetticismo generale e della costruzione di conoscenza certa, che eccedono rispetto al nostro tema¹. Sarà però il caso di cominciare tentando una caratterizzazione minimale dell'universo del senso comune, anche solo per chiarire a che cosa mi riferirò in queste pagine².

a) L'universo del senso comune *non* è, *almeno in quanto* polarità che può essere distinta, correlata, opposta etc. rispetto a quella costituita dalle teorie scientifiche, semplice-

1 Per una molteplicità di approfondimenti in merito, ad esempio: [3]. Circa la questione dello scetticismo generalizzato mi limito qui ad osservare come, secondo alcuni, esisterebbe un nesso (più o meno diretto) tra scetticismo e naturalismo, specie se questo è inteso quale riduzione non solo di ogni conoscenza, ma degli stessi tradizionali problemi epistemologici a mere questioni interne all'universo delle scienze della natura (*epistemologia naturalizzata forte*): un tale naturalismo sarebbe infatti fortemente esposto al rischio di risultare scettico, o privo di risposte al dubbio scettico. Su questo tema vedi ad esempio: [26, cap. VI]; [13]; [14]. Cfr. anche: [7], specie pp. 217-227.

2 Per la caratterizzazione teorica del senso comune sono da vedere i saggi di Agazzi (che vi vede “il contenuto dell'unità dell'esperienza nella sua concretezza storica”, [1, p. 33]) e Montecucco [16] (non posso, però, qui discutere l'interpretazione (§5, pp. 68-69), di ascendenza wittgensteiniana, secondo cui alcune proposizioni del senso comune “sembrano non appartenere allo spazio del conoscere e del dubitare” potendo assumere un “carattere non cognitivo”). In una precedente edizione di *Pianeta Galileo* si era soffermato su alcuni temi attinenti a quelli della presente tavola rotonda: [9].

mente il mondo della ‘realtà’ incontrato in maniera immediata e certa, né quello di un’esperienza pre-teorica e incontaminata.

Esso non equivale, dunque, alla *realtà* oggettiva, al mondo colto direttamente nei suoi tratti propri, nella passività neutrale del soggetto conoscente. Anche la cosiddetta ‘incorreggibilità’ di alcune nostre esperienze non garantisce di per sé che i nostri resoconti concettuali basati su di essa siano resoconti veritieri di come sta la realtà esterna: anzi, la non modificabilità dell’esperienza (percettiva, per esempio) risalta proprio in connessione con quei nostri giudizi (percettivi, per esempio) che sarebbero verosimilmente erronei e da rettificare se pretendessero di vertere direttamente sulla realtà indipendente dalla mente, invece che sulla nostra esperienza del mondo (cfr. i punti di vista di [3, p. 13] e [32, p. 11]).

Ma l’universo del senso comune, così inteso, non è neppure quello della mera *esperienza*. Infatti, i contenuti, gli oggetti e i nessi propri del senso comune, *in quanto* possono essere messi a confronto con le descrizioni del mondo restituiteci dalla scienza, non sono esperienza allo stato puro, o che si iscrive in maniera immediata e obbligata in uno “spazio delle ragioni” (Wilfrid Sellars). Si tratterà, piuttosto, di un universo che si articola in resoconti proposizionali dell’esperienza, dunque di qualcosa che dipende anche da opzioni di costruzione e coordinazione concettuale e che potrà essere valutato come vero o falso, adeguato o inadeguato, su basi normative³.

b) L’universo del senso comune *può* essere considerato l’universo che abbiamo in comune a partire dall’esperienza sensibile condivisa: cioè quell’universo che si costituisce grazie al concorso *sia* delle nostre comuni capacità di consapevolezza tanto *esterna* quanto *interna*, *sia* di quel *set* di capacità (anch’esso comune e distintivo) che ci permette di fare di quanto si offre a noi nell’esperienza ordinaria l’oggetto *e/o* lo sfondo per atti riflessivi, credenze e conoscenze (come anche per intenzioni e azioni), che non derivano da un sapere specialistico di tipo scientifico-sperimentale (cfr.: [6, §1]). Tali modalità di organizzazione epistemica e pratica dell’esperienza hanno una basilarità e, di fatto, hanno incontrato storicamente un tale *con-senso* (che è ancora un sentire comune) da essere per lo più ubiquo nel pensiero e spesso anche cristallizzate in forme comparabili nelle diverse lingue, attraverso diverse culture. Ad esempio: esistono individui, hanno desideri, intenzioni e credenze, persistono nel tempo (almeno a certe condizioni), incontrano oggetti, ma anche altri esseri viventi etc.

Il resoconto di senso comune dell’esperienza potrà distinguersi per alcune peculiari caratteristiche *formali*. Ad esempio, se caratterizzato sulla falsariga della “immagine manifesta” di Wilfrid Sellars [23], esso non includerà spiegazioni basate sul ricorso a entità concrete, fisiche, naturali, che siano troppo piccole per essere direttamente

3 Assumo dunque qui una caratterizzazione affine a quella ben espressa così da Montecucco: “l’immagine di senso comune potrebbe essere vista come una *teoria implicita con contenuti prevalentemente empirici*, nel senso che verità ed errore la riguardano e che, se esplicitata e riconosciuta falsa, dovrebbe essere respinta, in modo simile a quanto accade con le teorie esplicite” [16, pp. 58-59].

percepibili-per-noi, quali sono appunto quelle introdotte invece dalle odierne teorie scientifico-sperimentali. Oppure, si potrà sottolineare che tale resoconto non si limita a individuare, categorizzare e conoscere i soli aspetti *strutturali* dei dati d'esperienza (come fa la scienza), ma riconosce ed attesta le dimensioni *contenutistiche* e qualitative dell'esperienza soggettiva che accomunano i parlanti, incorporando distinzioni, riferimenti e inferenze appropriati per parlarne (pur senza poter sempre 'indurre' per mezzo di parole tali esperienze)⁴.

Da queste caratterizzazioni dovrebbe cominciare a emergere che mi occuperò qui dell'*universo del senso comune* intendendolo primariamente come quello che si costituisce nell'applicazione delle ordinarie facoltà intellettive e linguistiche alla descrizione e spiegazione della nostra comune esperienza cosciente di percezione, riflessione, azione. Tralascio, invece, in questa sede, per quanto possibile, ogni, pur legittima, considerazione circa valori, giudizi etico-normativi, fini dell'esistenza, opzioni di senso etc. che si discute se possano/debbero trovare l'assenso di chiunque li comprenda.

Sembra ragionevole supporre che non sia possibile fissare in modo definitivo, esaustivo e non vago tutti e soli i tratti esperienziali, epistemici e pratici che caratterizzano l'universo del senso comune. Ma questo, più che suggerire che il concetto di 'universo di senso comune' sia malformato, essenzialmente ambiguo o privo di un referente effettivo, mostra probabilmente una genuina caratteristica della natura di tale 'universo'. E, in ogni caso, una caratterizzazione *formale* dell'universo del senso comune (come quella che si è brevemente iniziato a tratteggiare sopra) può aiutarci a coglierne i tratti costitutivi e a non confonderlo, ad esempio, semplicemente con l'insieme delle opinioni statisticamente più diffuse tra le persone in una data comunità, in un dato momento. Contro tale interpretazione 'sociologica' dell'universo del senso comune, una caratterizzazione formale ci permette di dire che, se è plausibile che (come detto) molte delle credenze che concorrono a costituire per noi un universo di senso comune siano di fatto diffuse in maniera generalizzata, non è però sufficiente che una convinzione sia largamente prevalente in un dato momento perché essa concorra legittimamente a costituire un universo di senso comune quale l'abbiamo caratterizzato. Questo significa ad esempio che, di fronte ad un universo di senso comune così inteso, non si può presupporre che sarà senz'altro sufficiente rendere tutti, magari fin da bambini, familiari (solo) con la visione scientifica del mondo, perché ogni rischio di contrasto tra scienza

4 La questione della conoscibilità e comunicabilità del *contenuto* dell'esperienza, al di là dei suoi aspetti strutturali, è una questione complessa e annosa dell'epistemologia. Il fatto che i diversi uomini abbiano un'esperienza soggettiva che presenta caratteristiche contenutistiche e qualitative di tipo analogo (e la possibilità di riconoscere questo stesso fatto) mi pare rappresenti comunque un elemento di comunanza essenziale perché si dia una forma di vita umana. A questa *comunanza tipologica nei contenuti dell'esperienza soggettiva* fanno velo tanto l'idea che la conoscenza (scientifica e non) possa interessarsi soltanto delle caratteristiche strutturali e formali dell'esperienza, quanto la tesi che le esperienze sensibili avrebbero contenuti assolutamente idiosincratici, dei quali ciascuno sarebbe arbitro assoluto e solitario ("misura" avrebbe detto Protagora), nell'istante in cui fa esperienza.

e senso comune sia superato, e l'universo della scienza divenga universo di senso comune⁵. In base alla caratterizzazione dell'universo di senso comune proposta sopra, anzi, alcune nozioni scientifiche (ad esempio quella di *'quark'*) per le loro caratteristiche definitorie sembrano destinate a *non* poter diventare mai costitutive del *nostro* universo di senso comune, per quanto possa diffondersi (auspicabilmente) la padronanza che le persone hanno di esse. C'è dunque un limite alla possibilità di 'aggiornamento' scientifico del nostro senso comune.

In maniera analoga, è utile notare, a fronte di tante sottolineature della continuità tra conoscenza di senso comune e conoscenza scientifica, o del (giustissimo) richiamo all'irriducibile pluralismo delle discipline scientifiche in ambiti e a scale diverse, che anche per la cornice concettuale scientifico-sperimentale ed i suoi oggetti pare possibile individuare caratteristiche epistemiche formali e rapporti strutturali peculiari, che ci autorizzano (al di là delle effettive differenze tra discipline) anche a parlarne unitariamente: come si è fatto, appunto, impiegando il concetto *ideale* (nel senso dei "tipi ideali" di Weber) di "immagine scientifica" ([23], pp. 36 e 65).

Dovrebbe adesso risultare chiaro che, se accettiamo di parlare (come ci invita a fare il titolo di questa tavola rotonda) di 'universo del senso comune' e di 'universo della/scienza/e', non intendiamo che vi siano due diversi universi intesi in quanto 'realtà' esterne concrete e indipendenti, ma ci riferiamo all'esistenza di due matrici di descrizione, spiegazione e rappresentazione dell'unico universo, che però (come molti hanno sottolineato) sono strutturalmente distinte e differenti, al punto che possono restituirci due 'immagini' costitutivamente diverse dell'unico universo (più in particolare, due 'immagini' in ciascuna delle quali appare costitutivamente problematico includere alcune caratteristiche dell'unico universo, che figurano invece nell'altra)⁶.

Così inteso, il problema dell'incontro/scontro tra universo di senso comune e universo restituitoci dall'indagine scientifico-sperimentale pare formulato in maniera intelligibile e legittima e sembra di poter dire che si porrà sempre, anche se in modi via via diversi.

Al presente, in ogni caso, la questione del rapporto tra universo del senso comune e concezioni scientifiche dell'uomo e del mondo sembra porsi all'insegna di un diffuso contrasto, se non reale almeno 'percepito'⁷. Dunque, in un certo senso, l'onere della

5 Autorevoli filosofi, da Paul Feyerabend (almeno in via ipotetica e sotto certe condizioni, cfr. [10, capp. 5-6]) a Paul Churchland (cfr. [5]) hanno invece suggerito che il contrasto tra le attuali credenze di senso comune e le conoscenze scientifiche potrebbe essere superato il giorno in cui gli uomini, invece di rapportarsi alla nuova visione scientifica sulla base di una *forma mentis*, di un *explanandum* e di vincoli che sono il frutto delle *odierne* concezioni 'di senso comune', imparassero a descrivere e spiegare la loro esperienza *direttamente* attraverso le risorse offerte da teorie scientifico-sperimentali valide, che prendano interamente il posto di quelle concezioni obsolete.

6 Una simile impostazione in parte converge e in parte diverge rispetto a quella che si può trovare in [32, § IV].

7 Già questo termine rimanda, almeno in parte, a una distinzione tra descrizioni scientifiche 'oggetti-

prova spetterà a quanti (come chi scrive) ritengano possibile e opportuno disinnescarlo, o almeno circoscriverlo significativamente. Inizialmente tale contrasto è sembrato riguardare soprattutto il modo di descrivere e spiegare gli oggetti esterni e le loro proprietà. Col tempo, però, il conflitto è parso estendersi fino a toccare lo stesso soggetto conoscente. In esso, cioè, sembra sempre più andarne dell'uomo stesso, almeno da quando biologia, etologia, antropologia, scienze cognitive, neuroscienze e psicologia sperimentale si sono proposte di fornirci una sistematica conoscenza scientifico-sperimentale di noi stessi, che secondo alcuni non avrebbe fatto che svelarci "com'è che non siamo ciò che crediamo di essere" (per usare un'espressione di Derek Parfit).

Sellars ([23], § 5) ha perciò potuto parlare del rischio di un *clash* tra "l'immagine manifesta" e "l'immagine scientifica" dell'uomo nel mondo: la prima, costruita attorno alla nozione di *persona* e, come detto, al riferimento ai dati per noi direttamente percepibili; l'altra, invece, incentrata sul riferimento agli *inosservabili* introdotti dalle teorie scientifiche, e dunque su oggetti che, per definizione, non sono appannaggio del senso comune, per come l'abbiamo qui inteso. Potremmo così dire che la finalità dell'immagine scientifica sia, per usare le parole del fisico Jean Baptiste Perrin, "expliquer du visible compliqué par de l'invisible simple".

Naturalmente, si potrebbe chiedere quale sia il problema anche ove l'immagine scientifica nel suo svilupparsi ed estendersi dovesse scontrarsi radicalmente e sistematicamente con le descrizioni e le spiegazioni invalse nell'immagine di senso comune di noi stessi e del mondo. In fondo, uno potrebbe aggiungere, se la comprensione scientifica del mondo soppianta quella di senso comune, ne prenderà anche il posto ed anzi lo occuperà più efficacemente. Se poi proprio qualcuno vedesse delle difficoltà in questo processo – potrebbe continuare il sostenitore dei diritti dell'immagine scientifica –, sarà in definitiva più per resistenze psicologiche, che per ragioni epistemologiche. Del resto, già Freud aveva asserito che l'avanzamento della scienza, mettendo in dubbio convinzioni diffuse, avrebbe inflitto all'uomo tre mortificazioni del suo amor proprio: la prima (*cosmologica*) con Copernico, la seconda (*biologica*) con Darwin, la terza (*psicologica*) con la psicoanalisi stessa⁸.

Non sembra, però, che tutti i problemi connessi al confronto tra mondo del senso comune e mondo scientifico possano davvero liquidarsi come mere reazioni soggettive di incompienza, rifiuto, umiliazione suscitate da certe teorie scientifiche (tali reazioni, per altro, si appuntano spesso più ancora che sulle teorie in sé, su certe *interpretazioni* di queste). Vi sono anche e soprattutto questioni di natura propriamente epistemologica.

ve' di un fenomeno e resoconti soggettivi dell'esperienza di esso, basati sul senso comune.

8 Cfr. [11, pp. 660-664]. Pirandello aveva colto questo stato d'animo nella *Premessa seconda (filosofica) a mo' di scusa a Il fu Mattia Pascal* ([19], pp. 8-11) ove il "ritornello" anti-copernicano del protagonista si lega al fatto che con l'eliocentrismo la Terra sarebbe divenuta soltanto "un'invisibile trottolina" e di conseguenza sarebbero "storie di vermicchi ormai le nostre".

Vi è, per esempio, il fatto ben noto che il processo della ricerca scientifica e della produzione di nuove teorie non si arresta (come notava già Valéry nella citazione di apertura), generando costantemente innovazioni e modifiche che non è sempre facile considerare come l'accrescimento cumulativo di un sapere teoricamente coerente nel tempo. Basti dire che oggi non mancano neppure quanti rimprovererebbero appunto a Freud di averci restituito una interpretazione largamente inadeguata del dinamismo psichico, e, secondo alcuni, anche in quanto ancora troppo legata al senso comune, alla psicologia ordinaria e a nozioni non scientifiche.

Ma soprattutto vi è il fatto che non è chiaro se il mondo restituitoci dalla sola immagine scientifica sia ancora un mondo 'a misura d'uomo': ossia se entro la *sola* cornice delle categorie e delle teorie che tale immagine ci procura e può procurarci sia possibile fornire resoconti adeguati e veri di noi stessi, dei nostri stati coscienti, della nostra esperienza e delle nostre capacità come soggetti agenti e conoscenti. Si tratta allora per l'appunto di capire se il sapere scientifico-sperimentale, quand'anche potesse imporsi fino a divenire *buon senso*, potrebbe mai essere completamente adeguato a esprimere un resoconto descrittivo che includa tutto ciò che possiamo dire circa quanto è di senso comune, cioè circa quel mondo che abbiamo (costituito) in comune a partire dalla comune esperienza.

In fondo, se ci basiamo sui livelli descrittivi più basilari, il mondo che le sole scienze sperimentali della natura ci restituiscono pare fatto, almeno a prima vista, di oggetti costituiti da particelle che non possiamo percepire direttamente (cioè a occhio nudo), un mondo dove al posto delle nostre esperienze coscienti e del contenuto dei nostri pensieri si parla di entità e processi nel cervello, dei quali non facciamo esperienza introspettiva e che non sembrano avere nessun isomorfismo coi primi dal punto di vista contenutistico e dell'analisi logico-normativa, etc. Certo, questa disomogeneità si lega al fatto che la nostra esperienza sensoriale ha dei limiti, un'esigua portata e dunque non dovrebbe pretendere di valere come metro di tutto ciò che realmente esiste. Al contempo, però, se il nostro obiettivo epistemico non è di cogliere qualcosa come la realtà in sé, ma, appunto, quello di rendere conto concettualmente nel modo più adeguato della nostra esperienza (che, per inciso, fa pur sempre parte della realtà), allora sembra plausibile che le nostre caratteristiche ed i nostri limiti abbiano un rilievo e costituiscano un vincolo legittimo rispetto alle cornici concettuali e alle teorie che scegliamo per articolare quel resoconto.

2. Una prognosi

Wilfrid Sellars, introducendo la distinzione tra 'immagine scientifica' e 'immagine manifesta', ha sottolineato che una cornice concettuale come quella nella quale si esprime anche il senso comune si presta a molti compiti essenziali oltre a quello del descrivere e dello spiegare che caratterizza l'impresa scientifica. Essa, ad esempio, serve ad esprimere i giudizi, i valori, le intenzioni di un soggetto inserito in una comunità. Rispetto a tali compiti (e, più ampiamente, per quanto concerne la dimensione normativa in genere) egli evidenzia come la sola comprensione scientifica dell'universo non potrebbe mai essere

adeguata e sufficiente: dunque tra il repertorio concettuale del senso comune e quello delle scienze dovrà esservi necessariamente una integrazione. In questa sede tralascierò, però, questo aspetto, poiché intendo trattare del confronto tra i due ‘universi’ esclusivamente per ciò che concerne le pratiche del *descrivere* e dello *spiegare* (che, del resto, sembrano avere un rilievo decisivo anche per ogni altra pratica concettuale del soggetto-agente).

Quanto proporrò si muove nella prospettiva per cui un resoconto di senso comune e una cornice concettuale del *tipo* di quella in cui esso si articola (cioè quella veicolata dai linguaggi ordinari) costituiscono per noi una necessità epistemica ineliminabile se vogliamo ottenere una descrizione e spiegazione adeguata, veritiera e non parziale della nostra esperienza e del mondo del quale facciamo esperienza. Una tale cornice concettuale e un tale resoconto risulteranno strutturalmente distinti, non isomorfi e però largamente connessi a quelli scientifico sperimentali.

È da richiamare come una tale difesa dell’universo costituito dal senso comune *non* significhi e *non* implichi che il senso comune abbia una ‘presa’ ontologica sulla realtà in sé di tipo indiscutibile, indefettibile (*rectius*: che genera resoconti concettuali indiscutibili, indefettibilmente fondati). È, del resto, senz’altro possibile che i nostri giudizi di senso comune, o le attuali categorie nelle quali essi si articolano rivelino anche limiti, o specifiche distorsioni. Questo però non toglie che possano esservi molti buoni motivi, e vi accenneremo, per ritenere che cornici concettuali del *tipo* di quelle di senso comune, articolate nei linguaggi ordinari, ci siano *indispensabili* se vogliamo formulare il nostro miglior resoconto possibile della nostra esperienza. Dunque, per quanto possibile, dovremmo evitare di contrapporre *in linea generale e di principio* i resoconti scientifico-sperimentali e quelli di senso comune.

Da questo punto di vista, credo che le ‘vie d’uscita’ che può individuare chi è incline a disinnescare lo ‘scontro’ tra universo del senso comune e universi della scienza siano molteplici e interdisciplinari. Mi limiterò a indicare qui qualcosa di quanto mi pare pertenga all’epistemologia. In particolare, credo vi sia, *in primis*, una proficua linea di approccio *generale*, concernente la nostra attitudine d’insieme rispetto alla scienza, e poi molte linee di approccio *specifico*, riguardanti i singoli problemi, e il resoconto dei singoli, diversi fenomeni.

2.1 Profili generali

Per prima cosa è opportuno osservare come la percezione di un contrasto sistematico tra universo del senso comune e universo delle scienze potrebbe non dipendere (sol-) tanto dai contenuti delle teorie scientifiche, quanto dal nostro modo di guardare a tali teorie, alle loro finalità e ai loro risultati. Non a caso, alla base dell’analisi di Sellars circa il rapporto tra le due ‘immagini’ per quanto attiene al descrivere e allo spiegare, stanno anche due sue precise opzioni concernenti la natura, le possibilità e le finalità generali della conoscenza scientifica. Ovvero: (i) l’adesione a una forma di realismo scientifico, da un lato, e dall’altro (ii) l’idea che la scienza, almeno per ciò che concerne il descrivere e lo spiegare, sia “la misura di tutte le cose”, per usare la parafrasi del detto di Protagora

cara a Sellars⁹. Questo significa non solo che accettare una teoria scientifica equivale a crederla tendenzialmente vera in ogni sua parte, ma che, *in linea di principio*, non ci sono tipi di fenomeni realmente esistenti nel nostro mondo che la scienza non sia in grado di descrivere e spiegare adeguatamente.

Elevare la scienza a “misura di tutte le cose” induce, di fatto, ad adottare quello che è stato definito “un criterio di realtà epistemologico – secondo cui solo ciò che può essere compreso in un certo modo esiste”¹⁰, ossia solo quanto in linea di principio è descritto e spiegato all’interno della cornice metodologica e concettuale di tipo scientifico-sperimentale. Portando all’estremo questa opzione, ci sarà allora chi (come gli ‘eliminativisti’) si spingerà a pensare che quando certi fenomeni dell’esperienza comune dei quali ordinariamente parliamo si rivelassero irriducibili (in linea di principio) a tale cornice, non saremmo di fronte a fenomeni che legittimamente eccedono il *range* del sapere scientifico, ma a pseudo-fenomeni che non esistono realmente (almeno per come sono stati concepiti fin qui).

In ogni caso, si può osservare che sorge qui, tra l’altro, una asimmetria strutturale nel rapporto tra le due ‘immagini’. Infatti, mentre la cosiddetta immagine manifesta (in base alla caratterizzazione datane) non può, per ragioni costitutive, proporsi ragionevolmente come ‘misura’ di tutto ciò che realmente esiste (e dunque non si pretende unica e onnicomprensiva), invece, in base a certe interpretazioni dell’immagine scientifica sarebbe iscritta in questa proprio una simile pretesa di esaustività (cfr. anche: [23], p. 66)¹¹.

Sarà però di decisiva importanza cogliere, in che misura l’idea di una *scientia mensura* non faccia in realtà tutt’uno con l’accettazione di certe teorie scientifiche o di certe risultanze sperimentali, ma dipenda semmai appunto da un nostro modo di collocarle in un più vasto spazio di ragioni, in modo che contribuiscano a darci un’immagine d’insieme dell’esperienza. Si tratta, cioè, di una questione *non solo sperimentale*, ma legata all’attribuzione di un dato ruolo epistemico complessivo alla scienza. In questo senso, allora, il significato filosofico e ontologico delle teorie scientifiche non è mai *ready-*

9 “(...) *parlando da filosofo*, non ho problemi a dire che il mondo del senso comune degli oggetti fisici nello spazio e nel tempo è irreali – a dire, cioè, che non esistono cose del genere. Oppure a dire, in modo meno paradossale, che per quanto riguarda la descrizione e la spiegazione del mondo, la scienza è la misura di tutte le cose, di ciò che è in quanto è, di ciò che non è in quanto non è” [22, § 41, p. 59].

10 [17, p. 18]. Su queste tematiche, specie con riferimento alla filosofia della mente, è da vedere [6, § II]. Contro la “assolutizzazione” della scienza insiste [1, §§ 4-5].

11 Di conseguenza, non costituirà, *di per sé*, una ragione di conflitto il fatto che la rappresentazione dell’universo che abbiamo attraverso il senso comune debba collocarsi in una cornice più ampia, anche grazie alle risorse, a esso esterne, dell’immagine scientifica (e si tratterà semmai di comprendere la natura di questa integrazione e le modalità, le difficoltà, nonché gli impegni epistemici ad essa propriamente connessi). Invece, una radice del conflitto tra i due tipi di immagini sembra risiedere nella pretesa che, quanto al descrivere e allo spiegare, niente possa eccedere l’immagine scientifica: pretesa sostenuta, appunto, da quanti guardano ad essa come ad un’immagine autosufficiente ed esaustiva (“in linea di principio”) dell’intera realtà.

made, ma sempre oggetto di un'interpretazione che va ben al di là della accettazione di tali teorie come risorse concettuali adeguate per i loro scopi propri di tipo esplicativo, manipolativo, previsionale etc. Lo sviluppo scientifico potrà rendere soggettivamente più o meno inclini a opzioni come quelle menzionate sopra, ma ogni devoluzione di autorità ontologica alla scienza, come il farne l'arbitro dell'intero arredo ontologico del mondo, non è mai solo scienza: costituisce sempre un'opzione filosofica che riposa, da ultimo, su una scelta argomentabile, ma non cogente.

Proprio dal modo complessivo di guardare in sede epistemologica alle teorie scientifiche potranno allora emergere anche prospettive che contribuiscano a 'disinnescare' il rischio di un conflitto sistematico tra mondi della scienza e mondo del senso comune. Ad esempio:

(1) In alternativa al realismo scientifico, potrebbe essere messa alla prova una prospettiva *empirista* in filosofia della scienza¹². Una tale prospettiva (pur senza negare che gli asserti teorici su inosservabili abbiano un valore di verità) individuerà lo scopo precipuo delle teorie scientifiche non tanto nell'andare *'al di là dei fenomeni'*, quanto nel procurarci una conoscenza e un'interazione migliori, più ricche e più efficaci, proprio in rapporto a questi (sia studiando i fenomeni dati, sia anche *creandone* sperimentalmente di nuovi). Di conseguenza, potrà apparire ragionevole *anche* scegliere di non equiparare mai i nostri impegni ontologici ed epistemici connessi a credenze su oggetti concreti comunemente percepiti dai nostri sensi, e gli impegni connessi invece a credenze specialistiche su quei tipi di entità naturali e concrete introdotti dalle teorie scientifico-sperimentali accettate, i quali eccedono il *range* delle nostre possibilità di accesso percettivo diretto¹³. In una simile prospettiva, *a fortiori* non sarà affatto necessario, ovvio, o fondato fare della scienza il nostro unico criterio di realtà.

In quest'ottica, inoltre, anche il problema (al quale già accennavamo) della crescita del sapere scientifico dovrà essere attentamente valutato e la stessa plausibile (di *buon senso*) percezione di una *cumulatività* di tale sapere, cioè, di un accrescimento additivo nell'ambito dell'immagine scientifica, dovrà essere non certo negata, ma senza dubbio interpretata e specificata: essa, infatti, riguarda il progressivo e coerente definirsi di una ontologia esatta e la crescita in *veridicità* delle teorie, oppure riguarda piuttosto la progressiva, costante crescita di successo e "adeguatezza empirica" (van Fraassen) in rapporto ai fenomeni che osserviamo e produciamo?¹⁴.

12 Mi riferisco qui all'*empirismo costruttivo* di Bas van Fraassen, per il quale cfr. [29]; [30]; [31]. Propongo dunque di coniugare la difesa di una cospicua legittimità epistemica dell'universo del senso comune a un empirismo epistemologico a curvatura antirealista, piuttosto che a un'opzione di carattere realista (come spesso avviene).

13 Una tale distinzione vale, tra l'altro, a farci riconoscere adeguatamente la rilevanza che ha per noi, nella costituzione e nell'individuazione di concrete entità fisiche nel nostro mondo, la possibilità di farne esperienza diretta e condivisa (cioè, appunto, quel tipo di esperienza cui abbiamo ricollegato il senso comune).

14 La questione della cumulatività e della coerenza ontologica e/o teorica emerge quando confron-

(2) In alternativa ad un riduzionismo ontologico a base epistemologica, poi, potrebbe essere messa alla prova, all'opposto, una prospettiva di *antiriduzionismo*. Essa tenderà a far emergere che, per parafrasare liberamente Wittgenstein, *'i limiti dei nostri linguaggi scientifici non sono i limiti del nostro mondo'*: neanche per ciò che concerne il descrivere e lo spiegare. Sarà, cioè, legittimo, in linea di principio, pensare che possano realmente esistere nel nostro mondo fenomeni la cui descrizione e spiegazione non può essere appannaggio delle scienze sperimentali della natura, e ritenere che, se il nostro sguardo di senso comune sulle cose è limitato, situato, lo sguardo scientifico, pur diverso e infinitamente più efficace rispetto alle finalità sue proprie, ha anch'esso i suoi specifici limiti costitutivi, i suoi 'punti ciechi', i suoi aspetti di parzialità e storicità¹⁵. In questo senso, potremmo allora dire che cercare (o avere a che fare con) un'immagine più scientifica dell'uomo, richiede però anche di sviluppare un'immagine più umana della scienza.

2.2 Profili particolari

Se fin qui abbiamo brevemente visto alcuni dei modi in cui la questione potrebbe essere affrontata su un piano generale, vorrei ora provare ad accennare ad alcuni tipi di strategie, complementari, vevoli a seconda dei particolari tipi di fenomeni coi quali abbiamo a che fare: farò dunque di volta in volta anche degli esempi sommari, senza pretese di originalità, e soltanto in quanto ipotesi destinate a chiarire meglio ciò che intendo.

Profili di distinzione (e di possibile cooperazione)

In questa fattispecie rientrano tutti quei casi nei quali sembra esservi una qualche forma di distinzione tra i fenomeni coi quali ha a che fare il senso comune (e dunque dei quali parla il discorso ordinario) e i fenomeni coi quali ha a che fare la ricerca scientifica (e dunque dei quali parlano e possono parlare le teorie scientifiche). Una simile condizione può darsi in diverse forme e in diverse gradazioni, in base sia ai differenti fenomeni in questione, sia ai vari aspetti di ciascuno di essi che si può essere interessati a descrivere e spiegare¹⁶.

tiamo le risposte fornite da teorie scientifiche successive a una stessa domanda. Lawrence Sklar ha però sostenuto che, se anche ci limitiamo alle sole teorie scientifiche contemporanee, non è chiaro sotto ogni aspetto a quale 'arredo' del mondo esse impegnino chi le accetta, e interpretazioni alternative sono ben presenti. Perciò: "How can we ask our fundamental physical theories to tell us about what there is in the world when each of those theories is subject to multiple interpretations, interpretations that often radically disagree with one another about what kind of a world the fundamental theory is really describing?" [24, p. 47].

15 Aveva notato Merleau-Ponty: "si tratta solo di sapere se la scienza già offre o sarà in grado di offrire una rappresentazione del mondo completa, autosufficiente, rinchiusa in qualche modo su se stessa in modo che non si abbia più nessuna valida questione da porsi al di là di essa. Non si tratta di negare o di limitare la scienza; si tratta di sapere se essa ha il diritto di negare o di escludere come illusorie tutte le ricerche che non procedono, secondo il suo metodo, per misurazioni, comparazioni e che non si concludono con leggi come quelle della fisica classica, che fanno derivare specifiche conseguenze da specifiche condizioni" [15, p. 18].

16 Più in generale, Agazzi ha invitato alla cautela per "non dimenticare la regionalità e la "delimita-

Ad esempio, è possibile che una caratteristica, che risulta basilare ed essenziale nella descrizione della nostra esperienza di senso comune, non abbia un equivalente, oppure non ne abbia uno altrettanto fondamentale nel contesto delle teorie scientifiche, senza che ciò infici la possibilità che tale fenomeno sia legittimamente annoverato tra quelli basilari della nostra esperienza.

A questo proposito, possiamo forse utilizzare come esempio il *tempo*. Si tratta di comprendere quale sia il rapporto tra parametro temporale nelle teorie fisiche e il tempo della nostra comune esperienza cosciente. La questione si pone, in effetti, fin dal sorgere della fisica moderna, ma è oggi più acutamente avvertita perché il *tempo della fisica*, che era basilare, unico e con simultaneità assoluta nella meccanica newtoniana, o che appariva direzionato in base alla comune lettura del secondo principio della termodinamica, nella teorie della fisica contemporanea presenta proprietà significativamente diverse, finché addirittura si giunge ad interrogarsi sulla possibilità che esso non figuri in una futura teoria come la gravità quantistica. Si è così anche ipotizzato che il tempo possa costituire un fenomeno derivato ed emergente, che compare solo a una scala meno basilare¹⁷.

Comunque stiano le cose nel contesto della fisica, si tratta, però, di capire se e in che senso nella costruzione e nell'uso del parametro temporale nelle diverse teorie fisiche davvero ne va ogni volta anche della legittimità del tempo inteso quale fenomeno reale, basilare ed irriducibile della nostra esperienza soggettiva, o, meglio, inteso come effetto del succedersi orientato e irreversibile dei fenomeni dati alla nostra esperienza di soggetti autocoscienti in un certo 'ora' presente¹⁸.

Solo per fare un esempio, un filosofo come Edmund Husserl ha ritenuto, al contrario, che la prima mossa necessaria per giungere ad una comprensione adeguata della "fenomenologia della coscienza interna del tempo" con i suoi tratti peculiari fosse una provvisoria "messa fuori causa del tempo obbiettivo", cioè il lasciare da parte qualunque considerazione (pur del tutto legittima, su un altro piano) concernente "il tempo mondano, il tempo reale, il tempo della natura nel senso delle scienze della natura, [...] quello della stessa psicologia in quanto scienza naturale dello psichico"¹⁹.

zione specifica" dei discorsi scientifici e quindi nell'evitare che si attribuisca loro un significato e una portata universali. Ciò accade in particolare quando si "rilanciano" nel discorso di senso comune concetti e proposizioni di una data scienza che, per quanto si usino gli stessi termini del discorso comune, hanno in realtà un significato in buona parte diverso. Ciò produce come minimo equivoci e può condurre anche ad argomentazioni false, che pretendono magari di "confutare" convinzioni di senso comune" [2, pp. 353-354].

17 Così, ad esempio, nella cosiddetta *thermal time hypothesis* avanzata da Carlo Rovelli [21, §§ 3.4 e 10.1.3]; sulle diverse nozioni di tempo nel contesto dei vari livelli linguistici e teorici, è da vedere: [21, § 2.4.4, pp. 82-87].

18 Per una *opinionated introduction* a molti profili della questione, cfr. [18], che tenta di evitare le "costrizioni poste dalla illegittima estrapolazione della descrizione fisica al di fuori dei suoi limiti costitutivi" (p. 328).

19 [12, §1, p. 44; cfr. p. 48, vedi anche pp. 207-209]. Nella prospettiva di Husserl la fenomenologia è

Anche in una prospettiva meno radicale di questa, dovrebbe apparire comunque plausibile almeno riconoscere che il ‘tempo’, pur senza costituire una nozione equivoca, “si dice in molti modi” (per usare un’espressione di Aristotele), e dunque è possibile distinguere tra le varie accezioni e i loro differenti correlati, in modo che non ci sia né confusione, né dipendenza concettuale diretta tra il tempo dell’esperienza cosciente e quello del quale parlano le teorie scientifiche. Queste potranno, dunque, porre o non porre il parametro temporale del quale si servono tra le proprie variabili alla scala fondamentale, senza che ciò abbia conseguenze *dirette e necessarie* circa il tempo in quanto dimensione dell’esperienza cosciente soggettiva: dimensione che appartiene propriamente all’orizzonte del senso comune *per come lo si è qui inteso* (e ciò nonostante poi, di fatto, nel discorso ordinario risultino già correlate, o anche confuse, dimensioni distinte del fenomeno tempo).

Ci siamo qui riferiti soltanto a quelle impostazioni che derivino la *necessità* di una eliminazione o revisione della descrizione ordinaria dell’esperienza del tempo *esclusivamente* dall’appello a quanto potrebbe accadere nel contesto della descrizione scientifica del mondo: dunque niente di quanto detto toglie che la realtà del tempo, la sua natura, le sue proprietà e il nostro modo di parlarne possano e debbano continuare a essere discusse in filosofia sotto altri aspetti e/o per ragioni ulteriori rispetto alla sola qui considerata. Parimenti, la distinzione tracciata sopra (1) non implica che, per altri versi, non si debba cercare di accrescere e modificare la comprensione della nostra esperienza soggettiva del tempo, come pure della sua abituale correlazione con il tempo esterno e dotato di una metrica, proprio della fisica; (2) non implica che l’indagine scientifica non abbia niente da dire in proposito²⁰; (3) non implica che le sorti intrascientifiche del parametro temporale siano irrilevanti per il mondo del senso comune: al contrario, già il fatto che la scienza costruisca teorie nelle quali figurano parametri temporali con proprietà non isomorfe rispetto a quelle del tempo dell’esperienza cosciente, può contribuire a ricordarci che le dimensioni basilari della nostra comune esperienza cosciente non sono immediatamente o necessariamente identificabili anche con proprietà primitive dei modelli scientifici del mondo che trascende la coscienza (cfr. [18, p. 284]).

D’altra parte, e più in generale, il fatto che in una teoria un fenomeno non appaia o non sia primario, o basilico, sembra costituire un problema per la legittimazione di esso solo ove *già* si sia delegato a quella teoria di essere l’unico arbitro ontologico dell’esistente. Come ha notato Barry Stroud ([27, p. 268]), nessuno direbbe che, siccome una

impegnata a rendere conto della nostra comune esperienza cosciente della temporalità all’interno di una cornice concettuale non scientifico-naturalistica, e senza negarla o ridurla, ma, al contempo, fare questo richiederà che, assieme ad ogni presupposizione scientifica, sia anche, e più ampiamente, sospeso quel pervasivo “atteggiamento naturale” che è tipico del pensare ordinario e che porta ad assunzioni ingiustificate circa la realtà extra-coscienziale.

20 Si potrà, per esempio, studiare scientificamente quali siano i correlati neurali della nostra esperienza soggettiva del divenire temporale, o anche quali caratteristiche fisiche deve avere il nostro mondo per poter ospitare soggetti come noi che esperiscono una temporalità cosciente.

teoria concernente le transazioni finanziarie formulata in termini puramente economici non ha tra le proprie variabili il peso e l'altezza degli agenti (e, anzi, nei suoi soli termini propri non può neppure riferirsi a queste), allora o tali proprietà non esistono nel nostro mondo, oppure vanno ridotte a qualche proprietà effettiva del discorso economico. Chi invece si aspetta questo dalla fisica deve già averla eletta a 'misura di tutte le cose': e non perché una riduzione generalizzata ad essa di tutti i fenomeni sia effettivamente disponibile e riuscita; ma, al contrario, per sostenere l'idea che essa *deve* poter riuscire.

Potranno però anche emergere profili di distinzione tra approccio scientifico-sperimentale e di senso comune con una marcata necessità di *cooperazione*, ossia fenomeni (o aspetti di essi) rispetto ai quali la cornice concettuale di senso comune e quella scientifica presentano due approcci distinti e caratterizzati da un'autonoma metodologia, ma, al contempo, appare necessario che tali approcci interagiscano per restituirci un resoconto complessivo e non parziale del fenomeno in questione. Così è probabilmente nel caso dello studio della mente cosciente e dei suoi contenuti. Da un lato, l'analisi e la descrizione dei nostri contenuti coscienti sembra essenzialmente legata alla presenza di una cornice concettuale del tipo di quella della psicologia di senso comune, che si situa su un piano unitario, sintetico, normativo etc. Sembra perciò infondata la pretesa che il discorso scientifico che verte sulle sub-agenzie funzionali e sui processi neurali del nostro cervello possa essere un discorso *esaustivo* di tutto ciò che possiamo dire e conoscere sulla nostra esperienza cosciente.

Al contempo, non c'è dubbio che la conoscenza scientifico-sperimentale dell'attività che si svolge nei nostri cervelli mentre siamo coscienti, ma senza affiorare direttamente alla coscienza introspettiva (per lo più o sempre), possa costituire un arricchimento fondamentale anche per la comprensione della mente e del ruolo dell'esperienza cosciente. Per questo, come non avrebbe senso studiare i correlati neurali e funzionali della nostra esperienza eliminando ogni ruolo per i resoconti in prima persona di essa, così sarebbe erroneo rinunciare ai vantaggi epistemici che l'interazione tra i due approcci può portare.

Potranno al contempo esservi fenomeni rispetto ai quali la distinzione tra l'approccio scientifico-sperimentale e quello di senso comune giunge fino all'*esclusione* di una diretta interazione conoscitiva. In altri termini, potrebbero darsi situazioni nelle quali proprio se un certo fenomeno esiste, allora la scienza *non* può farne un proprio 'oggetto', includerlo nel proprio dominio. Questo, ad esempio, perché, in ipotesi, a tale fenomeno viene riconosciuta una natura che non è passibile di adeguata analisi scientifico-sperimentale: nel senso che gli sono attribuite proprietà che sembrano strutturalmente estranee a tale genere di indagine, mentre, al contempo, esso mancherebbe di quelle caratteristiche che hanno reso possibile ed efficace per altri tipi di fenomeni uno studio scientifico-sperimentale²¹.

21 Un esempio in tal senso, sebbene ecceda i limiti del nostro discorso, potrebbe essere l'agire *libero*, almeno in base ad alcuni modi di concepirlo, come la *agent causation theory*. In questa prospettiva, proprio

Il punto è, perciò, che certe nozioni concernenti la nostra esperienza ordinaria di soggetti agenti potrebbero essere tali che, se si applicano a qualcosa, si applicano a qualcosa che non è un possibile oggetto d'indagine scientifico-sperimentale. La scienza potrà forse dare descrizioni e modelli del mondo che facciano sentire qualcuno *soggettivamente* più o meno incline ad accettare l'esistenza di simili fenomeni che cadono fuori dal dominio delle scienze: ma non ci si deve aspettare che, se essi esistono, allora la scienza possa direttamente provarlo.

Questo ha come corollario che, ogni volta che qualcuno afferma che un dato fenomeno posto dal senso comune non trova spazio nell'immagine scientifica del mondo, dovremmo chiederci che cosa questo eventualmente provi. In particolare, dovremmo chiederci se quel fenomeno, *qualora esistesse*, potrebbe davvero trovarvi posto. In caso contrario, infatti, quando, cioè, non risulti neppure controfattualmente concepibile un esito interno alla cornice metodologica scientifico-sperimentale che provi o accerti l'esistenza del fenomeno in discussione, dovremmo valutare se e cosa l'indagine scientifico-sperimentale possa davvero insegnarci circa un fenomeno di tal genere, e se constatare *di fatto* la sua assenza dall'immagine del mondo che la scienza ci presenta aggiunga realmente qualcosa sul piano conoscitivo. Ovviamente, a patto di non aver *già* arbitrariamente deciso che quanto non può trovare posto nell'immagine scientifica del mondo, non esiste *tout court*.

Profili di revisione (unilaterale o bilaterale)

Vi sono poi casi nei quali un approfondito confronto tra universo del senso comune e universi della scienza può portare a una diversa comprensione e a una revisione dell'uno, dell'altro, o di entrambi.

Dal punto di vista dell'immagine scientifica, il processo di revisione significherà spesso o la necessità di ulteriore indagine sperimentale per avere risposte certe a un dato problema, o la necessità di ulteriore approfondimento concettuale per essere certi che le risposte sperimentali ottenute siano davvero valide rispetto al fenomeno del quale ci stiamo occupando nel confronto con l'universo di senso comune (si tratta di un tipo di questioni già emerso al punto precedente). Quanto è soggetto a revisione in conseguenza del confronto con l'universo del senso comune non sarà, dunque, in genere l'esattezza e la validità dei dati scientifico-sperimentali in sé, ma la loro rilevanza e il loro significato rispetto alle tematiche generali della nostra esperienza sulle quali senso comune e scienza sono poste a confronto.

Quanto all'universo del senso comune, per come l'abbiamo inteso in queste pagine,

se qualcosa come la libertà del volere esiste, allora essa non può essere un oggetto adeguato per l'indagine scientifico-sperimentale. In linea di principio, questo di per sé non esclude che la ricerca scientifico-sperimentale possa comunque trovare qui un significativo rilievo *indiretto* attraverso un'appropriata indagine concernente le pre-condizioni, oppure i vincoli e le condizioni al contorno, che accompagnano (o che si può ritenere debbano accompagnare) un nostro eventuale esercizio della libertà di volere (anche se, di fatto, non sembra questo il caso di recenti risultanze sperimentali, che pure hanno suscitato un vasto clamore). Non è però possibile affrontare qui adeguatamente il tema.

non c'è dubbio che la conoscenza scientifica ci obblighi in vari casi non solo a integrare le nostre credenze di senso comune in una cornice più ampia (processo che, *di per sé*, non implica conflitti o revisioni), ma anche a modificarle.

Lo studio sperimentale sistematico ci insegna, ad esempio, che i nostri giudizi basati sulla percezione sensoriale, e anche quelli basati sulle capacità psicologiche comuni rischiano di andare soggetti a distorsioni delle quali non siamo spontaneamente consapevoli. È immediato qui pensare ai nostri giudizi davanti alla figura di Müller-Lyer o di fronte a un miraggio; oppure a distorsioni come il cosiddetto *errore fondamentale di attribuzione* in psicologia sociale, o alla propensione (in particolari situazioni) a spiegazioni del nostro agire che, all'esame sistematico, potrebbero rivelarsi simili a razionalizzazioni a posteriori non fondate. L'indagine scientifico-sperimentale può, dunque, contribuire a svelare distorsioni ed errori di questo genere, portando a una revisione dei nostri processi di valutazione e giudizio o, se questi fossero impermeabili alla revisione, almeno dell'affidabilità che riconosciamo loro. Perciò, più in generale, l'indagine scientifica in certi casi contribuisce indubbiamente a farci cogliere dei limiti e dei 'punti ciechi' del senso comune.

Naturalmente, è proprio dai limiti nelle categorizzazioni e nei giudizi di senso comune che prendono il via anche i vari progetti di filosofia massivamente revisionista, correttiva, o addirittura eliminativista. Quine ha anzi teorizzato che il lavoro ontologico abbia sempre un carattere correttivo del senso comune²²; e in anni recenti, studiosi come Peter van Inwagen, Ted Sider e Achille Varzi ne hanno dato prova, in modi diversi, cercando di superare (e spiegare) "allucinazioni e miopie" del senso comune per ottenere finalmente "il mondo messo a fuoco", secondo un'espressione di Varzi [32]. Tanto più questo revisionismo ha avuto spazio in filosofia della mente, ove più diretti sono i contatti con l'indagine scientifico-sperimentale, e il caso estremo è stato probabilmente il cosiddetto *eliminativismo* di Paul e Patricia Churchland.

Se ho però indicato anche le strategie correttive del senso comune tra i modi per *disinnescare* il contrasto, piuttosto che per aggiudicare l'intera posta a uno dei contendenti, è perché ritengo più opportuno considerarle opzioni 'locali' e parziali, piuttosto che soluzioni sistematiche e globali, che giungano a mettere in discussione la legittimità stessa di qualcosa come una cornice concettuale non scientifica di senso comune. In altre parole, dal mio punto di vista, la possibilità di revisioni legate alle nuove conoscenze scientifiche (non meno che all'approfondirsi dell'analisi concettuale) non dovrebbe portare ad abolire ogni cornice concettuale non scientifica e di senso comune, ma semmai contribuire a riformarla puntualmente e a ripensarne le finalità, ove necessario. Questo non tanto perché *di fatto* è improbabile che possiamo imparare a descrivere e spiegare abitualmente la nostra esperienza condivisa nei soli

22 "Putting our house in ontological order is not a matter of making an already implicit ontology explicit by sorting and dusting up our ordinary language. It is a matter of devising and imposing", [20, p. 88]; similmente [32, p. 105].

termini scientifico-sperimentali, o, comunque, non sembra che farlo sarebbe proficuo nella pratica (sui limiti di questo argomento [10, pp. 123-124]; [32, pp. 106-107; 127-128]).

Ciò che davvero conta è che, sul piano *teorico*, una cornice concettuale non scientifica del *tipo* di quella di senso comune (per quanto riformata e riformabile) pare rimanga indispensabile per costituire, individuare e descrivere caratteristiche, contenuti e oggetti propri dell'esperienza cosciente che ci è dato fare. In quest'ottica, pur senza negare la possibilità di revisioni scientifiche delle concezioni di senso comune dei fenomeni di esperienza, sembra che per lo più la scienza si qualifichi nella misura in cui (pur relativizzandolo) si riferisce e rapporta ai resoconti di senso comune dell'esperienza, piuttosto che sollecitare l'*explanandum* che essi costituiscono, fino ad eliminarlo. E questo appunto perché quell'esperienza che la scienza presuppone, e che anche cerca per molti versi di spiegare, non è passibile di un resoconto integrale in termini esclusivamente scientifico-naturalistici, e perciò richiede sempre l'intervento di una cornice concettuale *del tipo di* quella di senso comune (nel senso detto)²³. Questa sembra perciò, per impiegare un'immagine abusata, simile alla nave di Neurath che è possibile riparare solo muovendosi all'interno di essa.

Profili di approfondimento, analisi riflessiva ed esplicitazione concettuale

Non va d'altra parte dimenticato che i limiti non occasionali (e non legati ad applicazioni soggettive) delle categorie e dei giudizi di senso comune, non sembrano essere assoluti, ma legati a specifici contesti, specifiche finalità, specifiche prestazioni del senso comune. Inoltre, anche quando essi emergono, in molti casi la revisione invece di limitarsi a sostituire un contenuto di senso comune 'obsoleto', con uno scientificamente *up-to-date*, potrà (anche) utilmente applicarsi a riscoprire e ripensare le condizioni di senso e validità, l'ambito di applicazione e il significato proprio dei giudizi di senso comune in discussione (cfr. anche [16]).

Più in generale: non di rado, più che (o: oltre che) rivedere, riformare, correggere la cornice concettuale di senso comune, c'è bisogno di analizzare e comprendere riflessivamente quanto abbiamo in comune attraverso i sensi e il nostro modo abituale

23 La pur giusta osservazione che la scienza debba "fornire *spiegazioni* di evidenze empiriche accessibili al senso comune" ([2, p. 344]) non sarebbe di per sé sufficiente a garantire *in via generale* che essa non possa dunque mai "perdere i contatti" con il senso comune *se* inteso quale *corpus* epistemico-proposizionale dato. Potrebbe infatti essere obiettato da alcuni che lo stesso resoconto delle esperienze di senso comune (che la scienza deve in effetti spiegare) potrà però essere assai meglio riformulato dalla scienza stessa, attraverso un resoconto che scalza quelli inadeguati del senso comune, ma non può, per ragioni strutturali, essere poi incorporato da questo. La vera garanzia che la scienza non possa scalzare una cornice concettuale del tipo di quella di senso comune deve perciò legarsi più in specifico alla tesi che la scienza, in linea di principio e in ragione delle proprie caratteristiche strutturali, non sia in grado di fornire un resoconto della nostra esperienza comune in tutto equipollente e intercambiabile rispetto a quello che una cornice del *tipo* di quella di senso comune (proprio per le sue differenti caratteristiche strutturali) può invece giungere a offrirci.

di categorizzarlo. Questo mi pare sia un punto decisivo (che influisce anche sul precedente), tanto più per chi abbia una propensione più “descrittiva” che “correttiva” rispetto ai resoconti di senso comune²⁴. Infatti, il rapporto epistemico che intratteniamo con contenuti e strutture di questo mondo comune richiede continuamente di essere analizzato riflessivamente, approfondito, arricchito, articolato e anche “reso esplicito” (per dirla con Robert Brandom). E soprattutto richiede che le pretese epistemiche del senso comune siano analizzate nella loro legalità, nei loro limiti, nella portata e nella finalità loro proprie. Quest’attività credo sia anche uno dei modi in cui l’epistemologia può contribuire a farci porre mente al mondo dell’esperienza che abbiamo in comune (il che costituisce uno dei compiti più alti e antichi della ragione). Ma che cosa può significare per la filosofia applicarsi a questa riflessione su ciò che è comune, e perché dovremmo aver bisogno di reimparare a pensare filosoficamente il ‘comune’ dell’esperienza, per come l’ho definito?

Vorrei, conclusivamente, provare a dirlo in breve. E nel farlo mi servo ancora di uno scrittore, David Foster Wallace, che in un discorso dal titolo *Questa è l’acqua* racconta questa storia:

Ci sono due giovani pesci che nuotano e a un certo punto incontrano un pesce anziano che va nella direzione opposta, fa un cenno di saluto e dice: - Salve, ragazzi. Com’è l’acqua? – I due pesci giovani nuotano un altro po’, poi uno guarda l’altro e fa: - Che cavolo è l’acqua?²⁵

Ecco: l’essere immersi nell’acqua non garantisce una comprensione concettuale giustificata ed esplicita di ciò in cui siamo immersi, né garantisce di possedere e sapere usare tutte le risorse epistemiche opportune per descrivere, distinguere, ‘catalogare’ l’esperienza che pure abbiamo in comune. Così è anche per il mondo della nostra esperienza soggettiva che ci accomuna: spesso crediamo di conoscerlo solo perché ci imbattiamo continuamente in esso; ma non è così²⁶. Anzi, a pensarci bene, un punto di partenza in genere comune a molte differenti forme di sapienza (tanto filosofica, quanto religiosa,

24 Le due espressioni sono di Peter Strawson che, propendendo per una “metafisica descrittiva”, nota: “Vi è infatti un solido nucleo centrale del pensiero umano che non ha storia, o non ne ha una che sia riportata nelle storie del pensiero; vi sono categorie e concetti che, nei loro caratteri più fondamentali, non cambiano affatto. Ovviamente non si tratta delle particolarità del pensiero più raffinato. Si tratta invece dei luoghi comuni del pensiero meno raffinato, che però sono il nucleo indispensabile dell’equipaggiamento concettuale degli esseri umani più sofisticati” [25, p. 10].

25 [33, p. 143]. “Il succo della storiella dei pesci è semplicemente che le realtà più ovvie, onnipresenti e importanti sono spesso le più difficili da capire e da discutere”.

26 “Il mondo della percezione, ossia quello che ci è rivelato per mezzo dei sensi e della pratica della vita, sembra a prima vista quello che conosciamo meglio, poiché non sono necessari né strumenti né calcoli per accedervi, e in apparenza, è sufficiente, per penetrarvi, aprire gli occhi e lasciarsi vivere. Eppure questa è una falsa apparenza [...] in larga misura noi ignoriamo un tale mondo almeno sin quando assumiamo un’attitudine pratica o utilitaria [...] sono stati necessari molto tempo, molti sforzi e molta cultura per metterlo a nudo” [15, p. 15].

quanto scientifica) è proprio nella tesi che “innanzitutto e per lo più” non abbiamo una comprensione integrale adeguata del mondo nel quale ci troviamo e con il quale quotidianamente abbiamo a che fare²⁷.

Molti problemi e pseudo-problemi circa il mondo del senso comune e i suoi rapporti con i modelli scientifico-sperimentali dei fenomeni possono allora nascere anche dal fatto che noi crediamo di sapere qual è il mondo che ci accomuna a partire dall'esperienza, ma in realtà non è così, e magari lo abbiamo solo confuso con il mondo del buon senso, che è un'altra e più angusta cosa. Si tratta perciò di imparare a ri-conoscere meglio, sempre e di nuovo, quel mondo comune che ci è dato a partire dall'esperienza sensibile (cioè il mondo della nostra esperienza personale) non solo attraverso il suo “rischiaramento scientifico” (Jurgen Habermas), ma anche attraverso la riflessione epistemologica sull'esperienza e sui nostri modi concettuali di renderne conto.

Così, prima ancora di sapere *se e come* l'universo di senso comune (per come l'abbiamo caratterizzato) si relaziona al mondo delle teorie scientifiche, dobbiamo forse esaminare e chiarificare la nostra comprensione di questo universo e delle nostre stesse categorie, nonché delle relazioni inferenziali che le legano. In modo da poter poi anche meglio capire dove i contrasti percepiti con la scienza sono solo apparenti, dove dipendono dal fatto che in realtà si parla di fenomeni diversi, dove invece richiedono davvero una ricomprensione o modifica delle asserzioni e pretese dei resoconti di senso comune, e dove, infine, potrebbero anche eventualmente aprirsi ad una “co-evoluzione” (cioè alla possibilità che resoconti di senso comune e resoconti scientifici influiscano ciascuno sull'evolversi dell'altro, cfr.: [4, §§ 5 e 9.3]). Ma questo sempre nell'orizzonte di una distinzione che, se non esclude l'interazione (anzi, la incoraggia), esclude però l'eliminazione di uno dei due livelli descrittivo-esplicativi.

Proprio per questo, allora, la filosofia, come impresa intersoggettiva e argomentata di riflessione sistematica dell'intelligenza sulla nostra esperienza, diventa la fatica di “salvare” e costruire (anche in un dialogo interdisciplinare) un universo comune, aiutandoci a riconoscere, finalmente, ciò in cui siamo da sempre immersi assieme, come i pesci nell'acqua²⁸.

27 Le divergenze o distinzioni (disciplinari o di metodo) si legano invece alle convinzioni circa i modi nei quali potremmo procurarci una visione corretta, e al rapporto tra esperienza e credenze relative all'esperienza.

28 Sono molto grato a Elena Castellani, Emanuele Coppola, Luisa Montecucco, Elena Pagni ed Angela Ulacco per le loro preziose osservazioni su una precedente versione di questo testo, dei cui limiti rimango (tanto più) il solo responsabile. Ringrazio inoltre tutti gli intervenuti alla tavola rotonda per la ricca discussione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Agazzi E., Il senso comune e l'unità dell'esperienza, in [3], pp. 25-38.
- [2] Agazzi E., Continuità e discontinuità tra scienza e senso comune, in [3], pp. 341-355.
- [3] Agazzi E. (a cura di), *Valore e limiti del senso comune*, Franco Angeli, Milano 2004.
- [4] Bermúdez J. L., *Philosophy of Psychology. A Contemporary Introduction*, Routledge, New York-London 2005.
- [5] Churchland P., *A Neurocomputational Perspective. The Nature of Mind and the Structure of Science*, MIT Press, Cambridge (Mass.) 1989; trad. it. parziale, *La natura della mente e la struttura della scienza. Una prospettiva neurocomputazionale*, Il Mulino, Bologna 1992.
- [6] Crane T., *Elements of Mind. An Introduction to the Philosophy of Mind* (2001); trad. it., *Fenomeni mentali. Un'introduzione alla filosofia della mente*, Cortina, Milano 2003.
- [7] De Caro M., L'irrefutabilità dello scetticismo: aporia insanabile o questione irrilevante?, in M. De Caro-E. Spinelli (a cura di), *Scetticismo. Una vicenda filosofica*, Carocci, Roma 2007, pp. 211-229.
- [8] De Caro M.-Macarthur D. (a cura di), *Naturalism in Question* (2004); trad. it., *La mente e la natura. Per un naturalismo liberalizzato*, Fazi, Roma 2005.
- [9] Dorato M., I due tavoli di Eddington, ovvero l'immagine scientifica del mondo e il mondo della vita, in A. Peruzzi (a cura di), *Pianeta Galileo 2008*, Centro Stampa del Consiglio Regionale della Toscana, Firenze 2009, pp. 81-88.
- [10] Feyerabend P. K., *Realism, Rationalism and Scientific Method. Philosophical Papers. Volume I*, Cambridge U. P., Cambridge 1981.
- [11] Freud S., Eine Schwierigkeit der Psychoanalyse (1917); trad. it., Una difficoltà della psicoanalisi, in Id., *Introduzione alla psicoanalisi e altre scritti* (Opere, vol. VIII, 1915-1917), Boringhieri, Torino 1976, pp. 657-664.
- [12] Husserl E., *Zur Phänomenologie des inneren Zeitbewusstseins (1893-1917)* (1966); trad. it. *Per la fenomenologia della coscienza interna del tempo*, Franco Angeli, Milano 1981.
- [13] McDowell J., Il naturalismo in filosofia della mente, in [8], cap. V, pp. 81-96.
- [14] Macarthur D., Naturalismo e scetticismo, in: [8], cap. VI, pp. 97-116.
- [15] Merleau-Ponty M., *Causeries 1948* (2002); trad. it. *Conversazioni*, SE, Milano 2002.
- [16] Montecucco L., Il senso comune come teoria e come limite, in [3], pp. 57-72.
- [17] Nagel T., *The View from Nowhere* (1986); trad. it., *Uno sguardo da nessun luogo*, Il Saggiatore, Milano 1988.
- [18] Pauri M., La descrizione fisica del mondo e la questione del divenire temporale, in G. Boniolo (a cura di), *Filosofia della fisica*, Bruno Mondadori, Milano 1997, pp. 245-333.

- [19] Pirandello L., *Il fu Mattia Pascal*, Einaudi, Torino 1993 (ediz. orig. 1904).
- [20] Quine W. V. O., *The Roots of Reference*, Open Court, La Salle 1974.
- [21] Rovelli C., *Quantum Gravity*, Cambridge U. P., Cambridge 2004.
- [22] Sellars W., *Empiricism and the Philosophy of Mind* (1956); trad. it., *Empirismo e filosofia della mente*, Einaudi, Torino 2004.
- [23] Sellars W., *Philosophy and the Scientific Image of Man* (1962); trad. it., *La filosofia e l'immagine scientifica dell'uomo*, Armando Editore, Roma 2007.
- [24] Sklar L., Naturalism and the Interpretation of Theories, *Proceedings and Addresses of the American Philosophical Association*, 75 (2001), pp. 43-58.
- [25] Strawson P. F., *Individuals. An Essay in Descriptive Metaphysics* (1959); trad. it., *Individui. Saggio di metafisica descrittiva*, Feltrinelli, Milano 1978.
- [26] Stroud B., *The Significance of Philosophical Scepticism*, Oxford U. P., Oxford 1984.
- [27] Stroud B., *The Physical World*, "Proceedings of the Aristotelian Society" 87 (1987), pp. 263-277.
- [28] Valéry P., *L'Idée fixe* (1932); trad. it., *L'idea fissa*, Adelphi, Milano 2008.
- [29] van Fraassen B., *The Scientific Image* (1980); trad. it., *L'immagine scientifica*, Clueb, Bologna 1985.
- [30] van Fraassen B., Constructive Empiricism Now, *Philosophical Studies*, 106 (2001), pp. 151-170.
- [31] van Fraassen B., *The Empirical Stance*, Yale U. P., New Haven 2002.
- [32] Varzi A. C., *Il mondo messo a fuoco. Storie di allucinazioni e miopie filosofiche*, Laterza, Roma-Bari 2010.
- [33] Wallace D. F., *This is Water* (2009); trad. it. *Questa è l'acqua*, in Id., *Questa è l'acqua*, Einaudi, Torino 2009, pp. 143-155.

IMRE TOTH, SOGNO DI UN'OMBRA

LUIGI MAIERÙ

Dipartimento di Matematica, Università della Calabria

1. Cenni biografici

Imre (Emerich) Toth nasce a Satu-Mare (Szatmar-Németi), in Transilvania, appartenente prima all'Ungheria, poi alla Romania, da famiglia ebraica, il 21 dicembre 1921. La sua famiglia è qui arrivata per sfuggire ai pogrom del 1920. La famiglia ritiene di essere di passaggio da questa città e in attesa di emigrare in America (possibilmente negli Stati Uniti o in Canada) per scampare al pericolo di persecuzioni. “Ma il provvisorio è eterno!”, afferma Imre.

Segue gli studi secondari in un Liceo cattolico. Negli anni 1935-1936 entra nel movimento comunista di resistenza al nazismo, costituito in tutto da una decina di ragazzi e ragazze, dei quali è il più anziano. Il gruppo è giudicato come la “Grande Resistenza”, tanto da far paura agli altissimi Funzionari dello Stato Fascista Ungherese dell'Ammiraglio Horthy.

Per avere scritto “Abbasso il fascismo! Abbasso la guerra! Morte ai fascisti!” nel 1940 viene arrestato. Nel 1942 ha una condanna “esemplare” a sei anni di carcere dai giudici di uno stato “legalista”. Ha 21 anni.

Dopo l'occupazione dell'Ungheria da parte dei Terzo Reich (19 marzo 1944), gli invasori scoprono che alcuni ebrei “molto astuti” sono scampati alla deportazione del 5 maggio 1944, rimanendo nascosti nelle carceri tra i condannati comuni del regime “legalista”. Il 5 giugno 1944, davanti alla cella piena di prigionieri compare un ufficiale tedesco, molto elegante e distinto, con in mano i guanti e un monocolo. Tratta tutti senza odio. Fa la selezione degli ebrei, indicando coloro che devono essere deportati, sorridendo un po', con eleganza. “In quel momento ho la netta sensazione di essere diventato un oggetto”.

Alle 4 del mattino del 6 giugno, quaranta ebrei in catene attraversano la città deserta verso la stazione per essere instradati ad Auschwitz. Vengono caricati su un vagone destinato agli animali. Il treno parte lentamente. Dopo mezz'ora si ferma, fa marcia indietro e ritorna alla stazione. Verso le ore 8 si sparge la voce che gli Alleati sono sbarcati in Normandia. Un ufficiale ungherese degli Ussari, Hugo Homonnay, antinazista, appreso ciò da Radio Londra, telefona al direttore del carcere, che è un Ussaro, comandandogli di riportare indietro gli ebrei. Così Imre ritorna in carcere!

Un mese dopo, mentre, insieme ad altri ebrei, è impegnato a sgomberare le macerie, conseguenza di un bombardamento degli inglesi, un sorvegliante, al quale è invisibile, gli

fa cadere un grosso blocco di pietra alle spalle travolgendolo e ferendolo gravemente. Viene portato nel carcere dell'Ospedale Militare, da cui esce – evade – con un paio di grucce. “Il pensiero della mia invalidità non mi turbava più di tanto”.

Durante il periodo di prigionia dedica molto tempo allo studio: “Ero un roditore, avido d'imparare”. Tra le altre cose studiate vi è il trattato sulla quadratura della parabola d'Archimede.

La mia vita è stata drammatica, un evento poliziesco dietro l'altro, cose che vedi soltanto nei film: prima devo fuggire, scappo, ma non so se mi salvo; poi m'imprigionano, mi condannano, riesco ad evadere, mi nascondo, mi trovano; scappo di nuovo, quando mi trovano, mi mettono sul treno per Auschwitz e mi salvo. In tutte queste situazioni, senza eccezioni, si è presentata una persona – un uomo, una donna, un ragazzo – sconosciuta, che mi ha aiutato e poi è scomparsa; senza che la cosa fosse prevista o preparata e, inutile dirlo, senza alcun interesse personale [...] Si dice che per vivere occorra un miracolo: per me, non uno è stato necessario, bensì una catena di miracoli¹.

Esce dalla guerra con il titolo ufficiale di “più giovane eroe della classe operaia nella Resistenza”. Ormai non è più ungherese; ora è rumeno e farà parte della delegazione che deve trattare la resa della Romania alla Russia.

In qualità di “eroe” ritiene di potere esprimere critiche nei confronti di un regime che già dall'inizio evidenzia segni di cedimento rispetto alle norme morali che Imre Toth annette all'idea di socialismo. In successione temporale, viene rimproverato di abusare del suo ritenersi “eroe”, di collaborare con il “nemico di classe”, quindi giudicato come “nemico idealista, agente dell'imperialismo” ed, infine, espulso dal partito, con la conseguenza di avere spesso la visita della polizia politica.

Ciò che lo angoscia non è la tortura fisica, quanto quella morale, fra cui, prima tra tutte, la “giornata della stella gialla”, segno distintivo della razza ebraica voluta dal Nazismo. Questo marchio fa perdere ogni dignità. Le leggi razziali sono estese anche all'Ungheria mentre Imre è nell'ultima classe del Liceo. Allora formula per sé la seguente espressione: *Cogito, ergo timeo. Timeo quia sum. Ergo nihil timeo quia nihil sum.*

Apparire in pubblico con questo segno significa che ognuno può sputargli in faccia e ridere di lui, senza che possa difendersi. In realtà vi sono state solo poche espressioni in questo senso.

Dopo la guerra, riprende i suoi studi di matematica presso l'Università *Bolyai* di Cluj (Kolozsvár), laureandosi nel 1948. Dal 1949 al 1969 è professore di Filosofia e Storia della Matematica presso la Facoltà di Scienze dell'Università di Bucarest. Dal 1969-1971 è professore visitatore presso l'Università di Francoforte. Nell'anno accademico 1971-1972 è professore presso l'Università di Bochum. Dal 1972 al 1990 è professore ordinario presso l'Università di Regensburg, coprendo la cattedra di Storia della Scienza. Dal 1990 è professore emerito. Negli anni successivi si trasferisce a Parigi, dove muore il 12 maggio 2010.

1 Imre Toth, *Matematica e emozioni*, Di Renzo Editore, Roma 2004, pp. 27-28.

Imre Toth ha tenuto cicli di seminari presso l'École Normale Supérieure di Parigi (un semestre nel 1975), l'Università di Princeton (Visiting Fellow, 1975-1976), l'Institute for Advanced Study di Princeton (membro dell'Istituto, 1980-81), l'Università della Calabria (1991), l'Istituto Italiano di Studi Filosofici di Napoli (dal 1992 fino al 2010), il Collège International di Philosophie di Parigi (1993) e in varie altre sedi.

Suo padre, Abraham Roth, ufficiale del XII Reggimento Regio Imperiale di Artiglieria, combatté anche in Italia, conservando un ottimo ricordo della campagna italiana. Le famiglie ebraiche della Transilvania si rendono conto che il clima diventa gradualmente più rovente nei confronti degli Ebrei; pensano di potere un giorno emigrare; fanno apprendere, perciò, più lingue possibili ai loro figli. Ma ... non succede nulla! Quando ormai è imminente il viaggio di queste famiglie verso il campo di concentramento di Auschwitz, il padre lascia, sul camino di casa, una lettera al vincitore:

Vi rivolgo una preghiera [...] Io ho cinquantasei anni. È tutto quello che ho accumulato nella mia vita. Questi libri. Non li toccate. Appartengono a mio figlio. Quando i Romani hanno occupato Siracusa e penetrarono nella dimora d'Archimede, lo hanno trovato intento a disegnare figure geometriche sulla sabbia. Al soldato che si lanciava su di lui per ucciderlo, disse solo una cosa: "Non toccate i miei cerchi"².

I vincitori cercavano oro, non libri. Essi sono stati trovati da Imre assieme alla lettera alla fine della guerra.

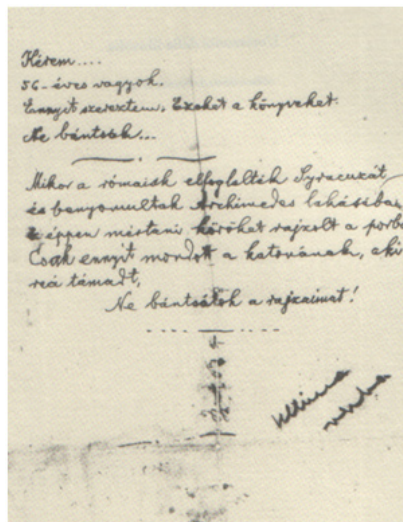


Figura 1.

Tra quei libri vi erano il *Candido*, *Il nipote di Rameau*, alcuni romanzi di Stefan Zweig, *Giuseppe e i suoi fratelli* di Thomas Mann, un manuale di archeologia biblica, *La vita di Gesù* di Ernest Renan, *La donna e il socialismo* di August Bebel, i poemi di Goethe, di Heine e di Villon, le opere giovanili di Marx, il *Trattato teologico-politico* di Spinoza, il *Platone* di Schleiermacher, *Così parlò Zarathustra* di Nietzsche, i *Presocratici* di Nestlé,

2 Imre Toth, *Essere ebreo dopo l'olocausto*, Cadmo, Fiesole 2002, p. 91.

la *Critica della ragion pura* di Kant, qualche scritto di Erasmo di Rotterdam.

Con la liberazione, non essendoci possibilità di controllo anagrafico, sceglie di chiamarsi Toth, non più Roth. Ecco come articola una sua interpretazione filologico-umoristica del suo cognome: “Toth, in greco Τώθ, residuo di τωθάζο, che significa *derido, schernisco, prendo in giro, sono mordace, sono canzonatorio*”. A ciò Imre lega l’espressione greca σκιῶς ὄναρ, “sogno di un’ombra” per indicare un uomo, presa dalla *Pitica* di Pindaro, 8, 95.

Quando deve apporre la propria firma, facendolo in totale libertà, sceglie un’immagine su cui Τοθ e σκιῶς ὄναρ sono legate insieme, come si può vedere nelle pagine iniziali dell’edizione italiana del suo palinsesto.

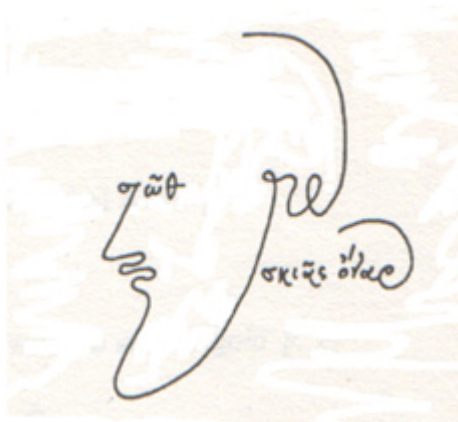


Figura 2.

Ho avuto modo di apprendere dalla sua viva voce tante vicende della sua vita. È molto vivo il ricordo d’un viaggio in macchina nel marzo del 1991, che ci ha portato da Cosenza a Reggio Calabria (per vedere i bronzi di Riace), quindi a Locri, a Gerace e infine a Crotona, ad ammirare l’unica colonna rimasta del tempio dedicato ad Hera Lacinia: quel viaggio fu segnato da un ininterrotto parlare di Imre. Tanti altri momenti sono stati segnati allo stesso modo. Uno di questi è stato registrato e pubblicato su *Lettera Pristem*, n. 6, novembre 1992, pp. 4-12 a firma di Romano Gatto.

Tante volte gli ho sentito ripetere: “fu la filosofia a condurmi alla matematica”, pur registrando che i suoi interessi per la matematica e per le questioni che la fondano si manifestano già durante le scuole secondarie, dove l’insegnante esige che lo studente risolva gli esercizi assegnati, non che faccia domande o ponga questioni. Fin da allora la biblioteca cominciò a essere il suo rifugio.

Tra i suoi professori di matematica all’Università di Kolozsvár, Imre Toth ricorda in particolare Samuel Van Borbely, che, pur occupandosi di applicazioni della matematica, lo incita e lo aiuta a coltivare i suoi interessi per la storia della matematica, letta da un punto di vista filosofico, cioè la storia considerata come parte integrante dello sviluppo dello spirito umano. “Lo spirito umano”: un’espressione ricorrente nel parlare di Toth. Per lui, non esiste la vita umana con le sue traversie e i suoi sconvolgimenti, da

una parte, e la vita “scientifica”, quella della riflessione e della ricerca, dall'altra. Esiste la vita, una sola unica vita, in cui le due realtà non sono divisibili. La prima vita non prepara la seconda e la seconda non inverte la prima.

2. Alcune convinzioni di Toth

Alla luce di questa sua idea della vita possiamo comprendere alcune espressioni che troviamo nei suoi scritti:

(1) La matematica è l'espressione di una libertà umana che si manifesta nella creazione di mondi, che è una prerogativa divina, e questa creazione è veicolata da un atto di cui solo l'essere umano è capace: la negazione [...] la matematica valorizza l'atto della negazione, che diventa un evento dello spirito e che produce anche una forma specifica di essere, molto diversa dalle altre [...] In matematica, se esiste l'uomo, non solo non posso escludere l'esistenza del non-uomo, ma l'atto della negazione è sufficiente per garantirne l'esistenza³.

(2) La “creazione matematica” è “norma” o “regola” per ogni creazione umana: l'articolazione del discorso, la sua scientificità, il senso delle dimostrazioni, fanno da guida.

(3) La “creazione matematica” è libera e liberante creazione dello spirito: l'andare “oltre” il conosciuto, osare sfondare le barriere del mondo delle conoscenze; sfondare una volta, due volte, ..., tante volte, tutte le volte che lo spirito sente la necessità ed è motivato ad “osare”.

(4) Viene posta la domanda: quando la “creazione matematica” è, nello stesso tempo ed in maniera inscindibile, norma e regola e libera e liberante esperienza per ogni creazione umana? Certamente lo è stato per Imre Toth. È sempre e per tutti così?

(5) Viene posta anche quest'altra domanda: come si fa a marcare il confine tra ortodossia ed eterodossia in relazione alla “creazione matematica”? Sono interscambiabili?

(6) In particolare, la geometria, la metageometria e la metafisica sono tra loro collegate ed evidenziano tanti nessi. Ogni creazione geometrica porta in sé un'ontologia.

(7) Un'ulteriore domanda è: cosa dobbiamo fare? “Conservare”? Oppure, “ampliare”?

(8) Infine: cosa significa “fedeltà” alla “tradizione”?

Toth stesso fa propria l'espressione di Niccolò di Cusa:

noster spiritus intellectualis virtutem ignis in se habet. Missus est enim a deo in terra: non ob aliud nisi ut ardeat et crescat in flammam.

il nostro spirito intellettuale ha in sé la virtù del fuoco. Infatti, è stato mandato da dio sulla terra a non fare altro se non che arda e cresca in ardore (calore).

3. La ricerca di Toth

La sua ricerca e la sua produzione scientifica è concentrata su “problemi fondazionali”. Scopre la geometria non euclidea studiando la teoria della relatività: ciò gli pone

3 Imre Toth, *Matematica ed emozioni*, cit., pp. 51-52.

problemi di natura ontologica e metafisica, che si esprimono nel chiedersi “come sia possibile l'impossibile”. Il mondo euclideo può ritenersi connaturale allo spirito umano.



Figura 3.

Qualiter omnipotens dicatur quaedam non posse [...] Deus facere non possit sicut [...] quod triangulum non habeat tres angulos aequales duobus rectis

(*Contra Gentiles, libro II, rep. 25*)

Il mondo non euclideo è prima concepito, poi accettato dallo stesso spirito, anche se si presenta come una “realtà stravagante” senza alcuna applicazione e senza avere alcuna motivazione reale all’interno dello sviluppo del pensiero matematico. Poiché il non-euclideo si è affermato, nonostante tutto e al di là di tutto, cioè, nonostante le resistenze e al di là di queste, in cosa consiste la sua forza?

L’interesse per questi problemi fondazionali (propri della filosofia o della matematica?) lo porta a ricercare e scavare, anche lì dove altri hanno già ricercato e scavato prima di lui. La sua ricerca si muove dal fronte strettamente storico a quello filologico e semantico, scoprendo, tra l’altro, alcuni passi negli scritti aristotelici, in cui Aristotele si muove tra l’euclideo e il non euclideo prima d’Euclide, supponendo l’esistenza d’un atto iniziale, un *arché*, che è scelta preferenziale, una decisione tra due alternative (l’euclideo e il non euclideo), come succede tante volte nella vita di tutti i giorni.

Ecco due passi aristotelici:

Se la somma degli angoli di un triangolo è uguale a due retti, allora la somma degli angoli di un quadrangolo è uguale a quattro retti, ma *se il triangolo cambia la sua essenza geometrica, allora anche il quadrangolo cambia la sua essenza*. Per esempio, se la somma degli angoli di un triangolo è uguale a tre o a quattro retti, allora la somma degli angoli di un quadrangolo deve essere uguale a sei oppure a otto retti.

(*Etica ad Eudemo, 1222 b 36*)

Se è impossibile che in un triangolo la somma degli angoli interni sia uguale a due retti, allora *il lato di un quadrato è commensurabile con la diagonale*.

(*Sul Cielo*, 281 b 5-6)

Così, se l'atto iniziale, l'*arché*, è la scelta che corrisponde a "la somma degli angoli interni d'un triangolo è uguale a due retti"), abbiamo certe conseguenze, ovvero, abbiamo una certa geometria. Ma se l'*arché* è "la somma degli angoli interni d'un triangolo è diversa da due retti", le conseguenze sono altre, ovvero, un'altra geometria. Il suo lavoro di scavo nei manoscritti aristotelici porta Toth a dare senso a questo percorso storico. Nello stesso tempo, egli constata che i cultori d'Aristotele non hanno colto questa possibile alternanza tra l'euclideo e il non euclideo.

L'attenzione agli scritti d'Aristotele porta Toth a studiare il greco, per poter decifrare ciò che avverte come presente in questi scritti, perché, senza una conoscenza approfondita della lingua greca, le sue affermazioni sarebbero state facilmente contraddette dagli specialisti. D'altra parte, dare senso alle espressioni aristoteliche è possibile solo se si hanno profonde e consolidate conoscenze matematiche. La ricerca di Toth si presenta, dunque, molto complicata, a cominciare dalla conoscenza della lingua greca, che è un passaggio obbligato se si vuole comprendere la storia del rapporto tra l'euclideo e il non-euclideo.

La lunga carriera di docente e di ricercatore di Toth ha messo in evidenza quanto fossero vaste le sue conoscenze in diversi campi, che lo portano ad esprimere nei suoi lavori scientifici chiare intuizioni circa l'evolversi della storia del pensiero scientifico in generale, e della storia del pensiero matematico in particolare. Le sue ricerche in storia della matematica coprono l'arco che va dal mondo greco ai nostri giorni ed evidenziano l'interconnessione fra i diversi ambiti del sapere e l'evolversi del pensiero matematico.

In particolare, Toth è considerato un ricercatore di grande spicco per tutto ciò che riguarda il sorgere e l'affermarsi delle geometrie non-euclidee e la storia delle vicende che hanno riguardato il postulato delle parallele. I suoi lavori sono caratterizzati da una lettura filologicamente eccellente dei "fatti" e da un profondo senso storico.

4. Le tematiche principali

I risultati più importanti delle ricerche di Toth concernono le seguenti tematiche:

1. Aristotele e il problema delle parallele;
2. la storia e la filosofia delle geometrie non-euclidee;
3. i paradossi di Zenone e i problemi dell'irrazionale nell'antichità.

Tali tematiche sono state indagate in tanti lavori, ad alcuni dei quali farò ora riferimento.

4.1 Attorno al *Corpus Aristotelicum*

Il risultato più importante (ma anche il più controverso rispetto alla posizione di altri ricercatori) può essere considerato la scoperta di 18 passaggi contenuti nel *Corpus*

Aristotelicum, che dimostrano, secondo l'interpretazione di Toth, che i geometri dell'Accademia avevano già trovato un sistema geometrico che Toth designa come "antieucclideo", opposto a quello che sarà d'Euclide.

Questo risultato è esposto nel saggio *Das Parallelenproblem im Corpus Aristotelicum*, pubblicato in *Archive for History of Exact Sciences*, 3 (1967), pp. 249-422, che è il primo lavoro fondamentale di Toth su questa tematica; ed è ripreso in *Geometria more ethico. Die Alternative: Euklidische oder nichteuklidische Geometrie bei Aristoteles und die axiomatische Grundlegung der euklidischen Geometrie* (in Y. Maeyama, W. G. Saltzer, *Prismata. Naturwissenschaftsgeschichtliche Studien. Festschrift für W. Hartner*, Wiesbaden 1977, pp. 395-415). Per una succinta esposizione, si veda l'articolo intitolato *Non-Euclidean Geometry before Euclid* (pubblicato in *Scientific American*, novembre 1969, pp. 87-98).

L'intera problematica è stata ripresa nel volume *Aristotele e i fondamenti della geometria. Prolegomeni alla comprensione dei frammenti non-euclidei nel 'Corpus Aristotelicum'* (Vita e Pensiero, Milano 1997), che dovrebbe avere il suo prosieguo in un ulteriore volume, al quale Toth ha lavorato negli ultimi anni, come ho avuto modo di vedere di persona durante i nostri incontri parigini. Questo volume dovrebbe contenere l'analisi filologica dei 18 passi del *Corpus Aristotelicum*.

4.2 Sulle geometrie non-euclidee

Toth ha scritto una serie di lavori dedicati alle geometrie non-euclidee. Tra questi sono da segnalare:

- *Die nicht-euklidische Geometrie in der Phänomenologie des Geistes. Wissenschaftstheoretische Betrachtungen zur Entwicklungsgeschichte der Mathematik* (Frankfurt im Main, 1972);
- *La révolution non euclidienne* (in *La Recherche*, n. 75, febbraio 1977, pp. 143-151);
- *Un problème de logique et de linguistique concernant le rapport entre Géométrie euclidienne (GE) et Géométrie non-euclidienne (GNE)* (in *Langage et Pensée Mathématique. Actes du Colloque International organisé au Centre Universitaire de Luxemburg*, 9-10-11 giugno 1976, pp. 96-142);
- *An absolute geometric model of the hyperbolic plane and some related metamathematical consequences* (in *6th International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science*, Hannover, agosto 22-29, 1979, pp. 167-171);
- *Wann und von wem wurde die nichteuklidische Geometrie begründet?* (in *Archives Intern. Hist. Sciences*, vol. 30/1980, pp. 192-205);
- *Mathematische Philosophie und Hegelsche Dialektik* (in *Die Naturwissenschaften*, Stuttgart, 1987, pp. 89-182);
- *Wissenschaft und Wissenschaftler in Postmodernen Zeitalter* (in *Schriftenreihe der*

Universität Regensburg, 1987, pp. 85-153; un estratto di questo lavoro è stato pubblicato con il titolo *Scienza e scienziati nell'età postmoderna. Il valore scientifico e il suo ruolo nella costituzione della scienza*, in *Intersezioni*, anno VIII, n. 2, agosto 1988, pp. 311-339);

- *De Interpretatione. La geometria non-euclidea nel contesto della Oratio continua del commento ad Euclide*, La Città del Sole, Napoli, 2000.

Questi scritti (il primo più degli altri) sono tra i più stimolanti contributi circa l'apparizione delle geometrie non euclidee. In essi registriamo tanto una 'ricostruzione razionale' quanto una attenta e rigorosa ricerca storica. L'attenzione è incentrata, soprattutto, sulla genesi delle alternative al postulato delle parallele d'Euclide tra Settecento e Ottocento. (Toth mi ha sollecitato ad occuparmi del "problema delle parallele" tra Cinquecento e Settecento.)

La sua ricerca è particolarmente attenta a Gauss, Lobacevskij e Bolyai (non altrettanto si può dire per Riemann e per la sistemazione data da Klein, Poincaré e Hilbert). Il suo è un ragguardevole lavoro di storia della matematica (interna ed esterna, secondo il detto tradizionale), in cui sono prese in esame tematiche che contribuiscono a ricostruire alcuni filoni dell'evoluzione del pensiero scientifico:

- il ruolo della geometria (Toth, sulla scia di Spinoza, considera la "geometria more ethico");
- il rapporto matematica-esperienza;
- il passaggio della geometria da "scienza della natura" a "scienza principe di matematica pura", attraverso un'analisi testuale filologicamente precisa, ove la cronologia fa da guida per una migliore comprensione di fatti ed eventi.

L'accento posto su tante questioni rappresenta un fatto totalmente nuovo rispetto alla storiografia tradizionale, condizionata da personaggi che fanno da modello tra fine Ottocento ed inizio Novecento (Clifford, Klein, Bonola, Enriques, Fano) e dalla discussione epistemologica del convenzionalismo francese (Poincaré). Tra i pregi più notevoli registriamo ancora la netta distinzione tra l'"anti-euclideo" e il "non-euclideo" che di fatto segna tanti programmi di ricerca tra Settecento e Ottocento. Per concludere: quella di Toth è una preziosa ricerca storica, sorretta da una prospettiva veramente originale.

4.3 I paradossi di Zenone e gli irrazionali

Lavorando su una nuova interpretazione storico-filosofica dei paradossi di Zenone di Elea, Toth ha scritto i seguenti saggi:

- *Aristote et les paradoxes de Zenon d'Elée* (in *ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ*, Mathematical Journal of the Seminar, Atene, Actes du Colloque "Le continue et l'Homme", 1979, n. 2, pp. 304-309);
- *... car comme disait Philolaos le Pythagoricien ... Philosophie, Géométrie, Liberté*

(in Diogène, n. 182, *Philosophie, éthique, politique*, aprile-giugno 1988, pp. 38-62).

- *I Paradossi di Zenone nel Parmenide di Platone* (Istituto Italiano di Studi Filosofici, Napoli, 1994);
- *Le problème de la mesure dans la perspective de l'être et du non-être. Zenon et Platon, Eudoxe et Dedekind: une généalogie philosophico-mathématique* (in *Mathématiques et philosophie de l'antiquité à l'âge classique. Hommage à Jules Vuillemin*, sous la direction de Roshdi Rashed, Editions du CNRS, Paris, 1991, pp. 21-99);
- *The dialectical structure of Zeno's arguments* (in *Hegel and Newtonianism*, a cura di John Michael Petry, Kluwer, Dordrecht 1992).
- *Lo Schiavo di Menone. Il lato del quadrato doppio, la sua misura non-misurabile, la sua ragione irrazionale. Commentario a Platone, Menone, 82 B-86 C* (Vita e Pensiero, Milano 1998).

Relativamente a queste ricerche, in particolare a quelle riguardanti il *Parmenide* di Platone, nella cui problematica rientrano i paradossi di Zenone, Toth afferma:

L'investigazione ermeneutica che ne propongo è differente dalle esegesi classiche. Per quanto ne so, è la prima volta che si fa il tentativo di offrire un'interpretazione di questo testo misterioso nel contesto della ricerca geometrica della sua epoca. In effetti, il resto del dialogo diviene trasparente se si parte dall'ipotesi che la dialettica della sua argomentazione sia stata suscitata e determinata dalla presa di coscienza dell'irrazionale, che la presenza delle grandezze incommensurabili trascina nell'universo del Logos, della ragione geometrica⁴.

Se un "matematico di professione", non uno storico della matematica, sfoglia questi lavori, dopo una riluttanza iniziale nell'avvicinarsi a problematiche tanto antiche, ammira quanta matematica Toth crea e/o richiama attorno al problema della dicotomia, della diade inseguitore-inseguito (Achille ed Ettore, Achille e la tartaruga) e a quella del vecchio e del giovane. Tali problematiche, come sappiamo, compaiono ogni volta che nel percorso matematico si affrontano difficoltà che riguardano i fondamenti di questa disciplina.

Toth fa vedere come a fianco di una successione infinita di numeri possa costruirsi una successione infinita di segmenti, come il rapporto tra lato e diagonale del quadrato faccia da sfondo e sostanzi le espressioni paradossali, dove l'alternanza tra lato e diagonale e il rapporto tra loro (ben evidenziato nel dialogo fra Socrate e il giovane schiavo del *Menone*) portano alla costruzione di una successione infinita di quadrati, mentre la loro serie porta ad approssimare il valore della diagonale. La successione infinita di numeri, da una parte, e la successione infinita dei segmenti, dall'altra, sono gli strumenti necessari per risolvere i paradossi.

4 Imre Toth, *I Paradossi di Zenone nel Parmenide di Platone*, Bibliopolis, Napoli 2006, p. XI.

In questo percorso matematico, emerge non solo la conoscenza che Toth aveva della matematica antica, anche nei suoi risvolti più problematici, ma anche la sua “meditazione” sui matematici che hanno segnato punti di svolta nella matematica dell'Ottocento: in particolare Richard Dedekind e la sua riflessione-chiarificazione sugli irrazionali, George Cantor e la sua riflessione-elaborazione attorno al continuo e al discontinuo.

Come contorno alla sua produzione scientifica è opportuno ricordare altre opere di Toth:

- *Essere ebreo dopo l'olocausto* (Cadmò, Fiesole 2002);
- *Matematica ed emozioni* (Di Renzo Editore, Roma 2004);
- *La filosofia e il suo luogo nello spazio della spiritualità occidentale* (a cura di Romano Romani, Bollati Boringhieri, Torino 2007).

Considerando la produzione ed il contenuto dei lavori di Toth, viene da chiedersi come mai gli storici e i filosofi della matematica siano restii a riconoscere il valore e l'incidenza che le sue ricerche hanno avuto negli studi, in particolare, della storia e della filosofia delle geometrie non euclidee.

È vero che Toth non viene da una “scuola” né ha formato una “scuola”. Dev'essere considerato un ricercatore “solitario” che ha visto lontano, individuando all'orizzonte realtà che altri non hanno visto. La sua “libertà interiore” gli ha consentito di occuparsi anche di tematiche da cui generalmente rifuggono gli storici e i filosofi della matematica, come i paradossi di Zenone (generalmente oggetto di studio dei filosofi) e le questioni sugli irrazionali. Bisogna, però, mettere in evidenza che i lavori di Toth hanno di fatto influenzato la visione storica di tante realtà (come è testimoniato in *Grundris der Geschichte der Philosophie begründet von Friedrich Überweg, Die Philosophie der Antike*, Band 3, *Ältere Akademie Aristoteles-Peripatos* a cura di Hellmut Flashar, Basel, 1983, p. 430).

5. Il Palinsesto

Ho ritenuto opportuno, alla fine di questo mio intervento, fare riferimento al suo palinsesto, pubblicato anche in lingua italiana con il titolo *No! Libertà e verità, Creazione e negazione* (Rusconi, Milano 1998). La ragione di ciò sta nel fatto che, leggendolo, abbiamo l'impressione di trovarci di fronte a una creazione veramente originale. Cerchiamo d'immaginare 720 personaggi storici (tanti sono gli autori citati, celebri, importanti, conosciuti alcuni; sconosciuti, poco importanti tanti altri) che, nello stesso istante temporale, discutono della creazione matematica, della concezione e della lettura dello spazio, della pluralità dei mondi, della geometria euclidea, di quelle non-euclidee, ...

Dobbiamo giudicare la sua azione legittima? ortodossa? letterariamente significativa? Qualcuno potrebbe affermare che questa sia un'opera cervellotica, senza alcun fondamento bibliografico, di esclusiva invenzione di Toth. Certamente è uno scritto straordinario, la cui realizzazione ha richiesto fantasia, capacità di passare da un linguaggio a un altro, duttilità di pensiero.

Chi, come me, ha in mano il primo manoscritto completo, in cui per ogni espressione è indicata la fonte con estrema precisione, si rende conto dell'immane lavoro di ricerca necessario per arrivare a concepire la possibilità d'un dialogo "culturale" ma non "temporale" tra i diversi personaggi. Ho visto crescere questo libro con gradualità. La sua scrittura ha impegnato Imre per oltre 20 anni.

Collateralmente al palinsesto, veniamo a conoscere anche che Toth ha cercato di "raffigurare" alcune di queste scene e "rappresentare in immagine" un'idea o l'altra. Alcune di queste rappresentazioni sono riprodotte nel palinsesto. Una visione più completa, in cui si coglie lo stretto legame tra le immagini create e il palinsesto, si ha nel catalogo della mostra delle immagini di Toth, tenuta presso il Museo Laboratorio di Arte contemporanea dell'Università di Roma "La Sapienza" nei giorni 12-27 novembre 1997.

Ecco un esempio, nel quale Toth rappresenta la discussione sul primo modello di geometria non-euclidea (la geometria iperbolica di Lobacevskij).

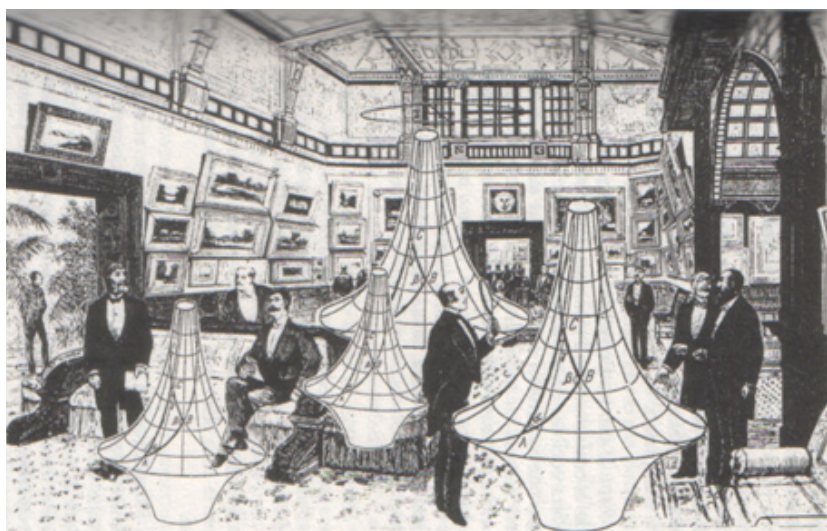
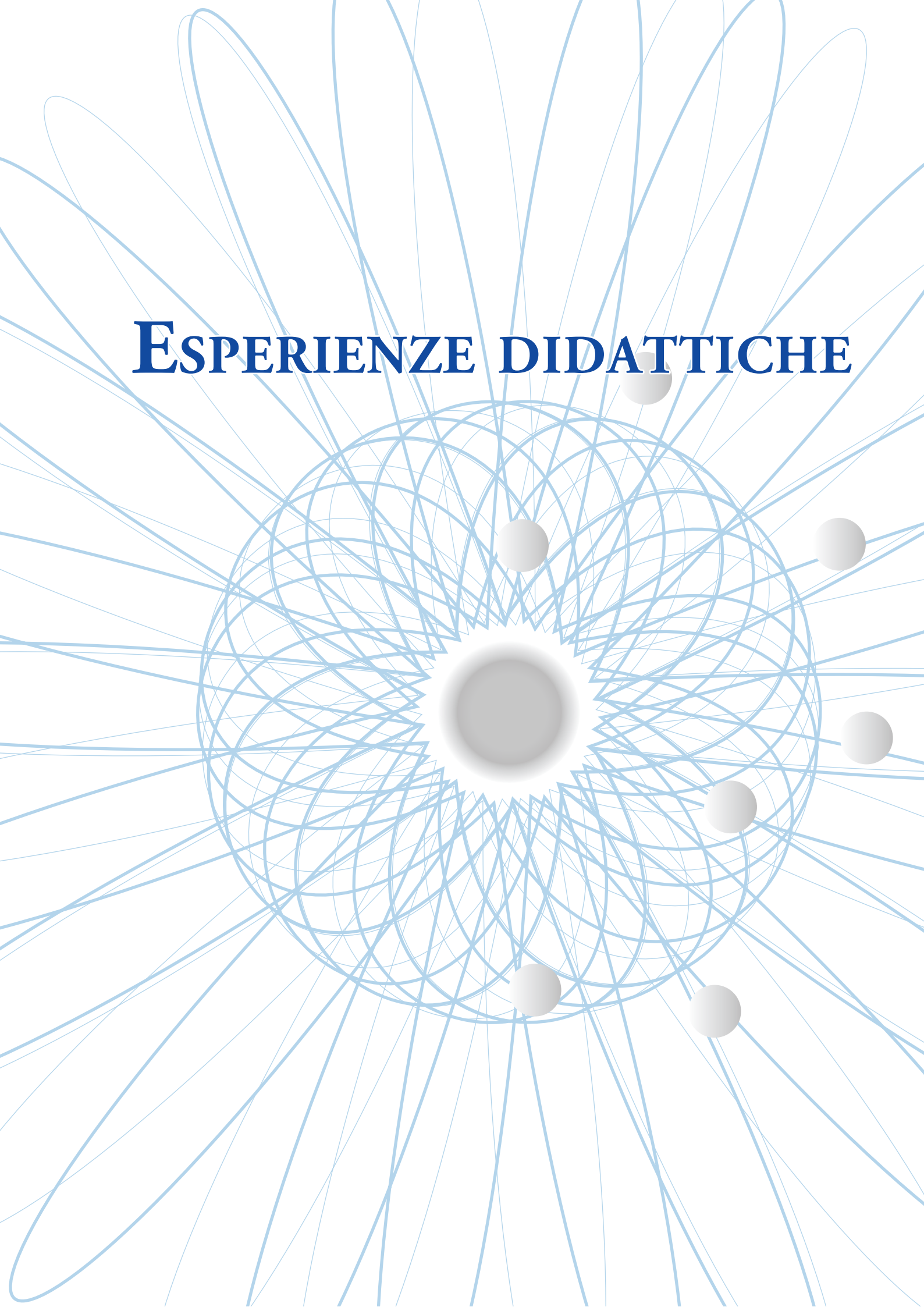


Figura 4. Nella Hall del Grande Hotel Waldorff-Astoria, New York, un gruppo di geometri, metafisici, teologi, metamatematici, membri della Società degli Scettici, esaminano l'ontologia negativa della pseudosfera, presentata dal prof. Eugenio Beltrami di Bologna, Italia, in occasione della Grande Esposizione Universale.

6. Conclusione

La figura umana, culturale e scientifica di Imre Toth, dal 1978 fino alla sua morte, ha accompagnato la mia vita, nel senso più positivo del termine, facendomi negli anni acquisire quella sicurezza necessaria che un ricercatore in storia della matematica deve avere per tracciare e percorrere il proprio personale cammino di ricerca, che non è per nulla separato dagli eventi che ho vissuto in questi decenni. Imre è stato compagno di viaggio e fratello, guida e termine di costante confronto, rifugio e stimolo a camminare da solo, severo maestro ed entusiasta sostenitore. A lui vada, anche questa sera, il mio più vivo ringraziamento!

ESPERIENZE DIDATTICHE



AVVENTURA SUI VULCANI: LA TERRA RACCONTATA DAI RAGAZZI

SIMONA CERRATO

ROSSELLA CRESCENTE

Sissa Medialab

È un fatto notevole, che tutte quante le isolette che stanno lungi da ogni continente nel Pacifico, nell'Oceano Indiano e nell'Atlantico, eccettuate le isole Seychelles e questa piccola punta di scogli, sono, credo, composte di coralli o di materia vulcanica. La natura vulcanica di queste isole oceaniche è evidentemente l'estensione di quella legge, e l'effetto di quelle stesse cause, sia chimiche che meccaniche, da cui risulta che una vasta maggioranza dei vulcani ora in attività sono collocati presso le coste marine o sorgono come isole in mezzo al mare.

Charles Darwin, febbraio 1832, arrivando col Beagle in prossimità degli scogli di Saint Paul in pieno Atlantico

Avventura sui vulcani. La Terra raccontata dai ragazzi è una mostra interattiva e multimediale che si basa sulla spedizione *Mini Vulcanologi* realizzata dal 6 al 18 luglio 2008, quando un gruppo di ragazzi, accompagnati dagli scienziati dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), sono andati alla scoperta dei principali vulcani italiani.

La spedizione, organizzata da Sissa Medialab e INGV nell'Anno Internazionale del Pianeta Terra, si è svolta a bordo del veliero Adriatica dei Velisti per Caso. I ragazzi sono partiti da Napoli, Ercolano e Pozzuoli, si sono poi diretti verso Stromboli, Lipari e Vulcano e infine sono approdati alle pendici del maestoso Etna.

I ragazzi sono anche saliti fino al Gran Cono del Vesuvio e hanno passeggiato nella conca maleodorante della Solfatarata di Pozzuoli, hanno visitato gli scavi di Ercolano (quelli veri e quelli virtuali del Museo Archeologico Virtuale inaugurato a Ercolano proprio nel luglio 2008). Si sono poi spinti fin sulla cima di Stromboli, il vulcano "educato" che erutta regolarmente da più di 1000 anni ogni circa 15 minuti, con un'ascensione notturna di più di 900 metri di dislivello. A Stromboli, accompagnati dai gentili tecnici dell'ENEL, hanno anche visitato l'innovativa centrale fotovoltaica di Ginostrea.

Al largo di Lipari si sono immersi per osservare le fumarole sottomarine, e sono poi saliti fin sul cratere di Vulcano, con i suoi fantastici colori e le sue... puzze. Per due giorni hanno esplorato una parte dell'imponente massiccio dell'Etna, con la fortuna di vedere da vicino la colata dell'eruzione iniziata il 5 maggio 2008. Infine, l'ultimo pomeriggio è stato dedicato ai Colli Albani, che hanno stupito tutti per la loro poca somiglianza con gli altri vulcani.

La spedizione è stata inaugurata da Patrizio Roversi, il 6 luglio, alla Città della Scienza di Napoli. I vulcanologi dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia sono stati, insieme ai bambini, i veri protagonisti: Gianni Macedonio, Patrizia Landi, Paolo Madonia, Boris Behncke e Piergiorgio Scarlato, coordinati dai Concetta Nostro, ognuno esperto di un particolare ambiente e vulcano, che con entusiasmo e professionalità hanno accompagnato Alberto, Kai, Maxine, Amrit, Ciaran, Tonia, Claudio, Anny e Valeria alla scoperta del complesso mondo dei vulcani.

La spedizione dei mini-vulcanologi è documentata da racconti, immagini e video che sono raccolti sul sito <http://www.minivulcanologi.it>, ove giorno per giorno si può leggere il diario di viaggio. Da questa bellissima esperienza, che segue quella dei *Mini Darwin alle Galápagos* (<http://www.minidarwin.it>), sono stati realizzati, oltre alla mostra, un libro per ragazzi, esperimenti e attività che sono disponibili sul sito e sul libro.

1. La mostra

La mostra multimediale e interattiva racconta i vulcani e il loro significato nella storia del nostro pianeta e dell'umanità. Come il progetto generale, la mostra vuole presentare i vulcani da un punto di vista inusuale: i vulcani come origine della vita e come finestra per guardare verso l'interno della Terra. Utilizzando l'ampia documentazione fotografica, audiovisiva e scientifica raccolta durante la spedizione, la mostra affronta in generale il tema dei vulcani italiani: la loro storia, le caratteristiche morfologiche e geologiche e il rapporto con le popolazioni che ci vivono vicino dall'antichità ai giorni nostri, per arrivare al mestiere del vulcanologo oggi e alle tecniche e gli strumenti utilizzati per monitorare la pericolosità delle eruzioni.

Inoltre, i vulcani italiani hanno caratteristiche tali da rendere ciascuno di essi un esempio emblematico di una particolare categoria di vulcano. Si parla infatti di eruzioni *pliniane*, in ricordo della grande eruzione del Vesuvio del 79 d.C. documentata da Plinio il Giovane; di vulcani *stromboliani*, per indicare quei vulcani che producono delle eruzioni a intervalli regolari e frequenti; di vulcani *vulcaniani*, che hanno eruzioni esplosive con lanci di bombe di lava e gas carichi di cenere ecc.



Figura 1. L'allestimento della mostra a Pisa, presso l'Associazione La Limonaia, in occasione di Pianeta Galileo 2010.

2. Target

La mostra è principalmente dedicata ai ragazzi dagli 8 ai 12 anni, alle famiglie e alle classi, ma è progettata in modo da catturare l'attenzione di qualunque genere di pubblico, essendo semplice ed efficace, e presentando aspetti curiosi e in un certo modo provocatori. Contiene alcuni elementi interattivi particolarmente adatti ai bambini, in modo da richiamare le famiglie, che costituiscono una grossa fetta del pubblico di questo tipo di esposizioni. I genitori (o comunque gli accompagnatori) porteranno i bambini a visitarla, e nel farlo saranno direttamente coinvolti. Per le scuole, la mostra è affiancata da una serie di attività di laboratorio riproducibili anche in classe o a casa.

3. Gli exhibit

3.1 Le isole e il grande ingresso

La mostra è sviluppata in 4 isole tematiche, ognuna riguardante un vulcano o un fenomeno geologico legato ai vulcani in Italia: Vesuvio, Stromboli, Vulcano, Etna. Le isole sono spazi delimitati all'interno dei quali i visitatori possono entrare.



Figura 2. Esempio di isola.

Le isole sono formate da una struttura di grandi pannelli leggeri ma stabili che presentano un vulcano e i fenomeni geologici a esso associati attraverso grandi fotografie spettacolari. Ogni fotografia è associata a un breve testo di un grande scrittore o scienziato del passato che racconta, senza spiegare, un fatto o un aspetto particolarmente toccante: lo scopo è suscitare emozione e curiosità.

Alle spiegazioni e alle descrizioni scientifiche sono dedicati i pannelli sul lato esterno dell'isola. Per ogni isola vengono illustrate le diverse caratteristiche di ogni vulcano, utilizzando le parole e le domande stesse dei bambini che hanno partecipato alla spedizione e le risposte dei vulcanologi.

Il grande pannellone iniziale che fa da ingresso riporta in forma grafica anche tutte le informazioni essenziali sui vulcani, la loro struttura, la loro origine e il loro significato per la vita sul pianeta. Anche qui sono state utilizzate le vere domande dei ragazzi per affrontare tutti i temi scientificamente rilevanti.



Figura 3. Pannellone con spiegazioni scientifiche.

3.2 Multimedia

Parte del materiale audiovisivo raccolto durante il viaggio dei *Mini Vulcanologi* è stato utilizzato per realizzare alcuni brevi documentari, non più lunghi di 10 minuti ognuno, dedicati ai vari vulcani a cui è stato aggiunto un breve video sul super vulcano della Val Sesia, recentemente studiato da un gruppo di ricercatori italiani e che ha aperto nuove prospettive sui vulcani simili ai Campi Flegrei e sulle possibili misure preventive per proteggere la popolazione che vive nelle vicinanze. Uno slide-show di circa 200 fotografie presenta gli aspetti più spettacolari dei vulcani visitati.

3.3 Il teatro delle rocce

Delle postazioni molto semplici e leggere, in sintonia con il design del resto della mostra, presentano un campionario di rocce vulcaniche vere, prelevate dai vari vulcani di cui si racconta la storia nella mostra. Le rocce possono essere prese in mano, toccate, osservate con una lente, analizzate, confrontate. A ogni postazione sono associati dei quiz, scritti su pannelli evidenziati con un grande punto interrogativo. Sono domande curiose alle quali il pubblico è invitato a rispondere, in una sorta di piccola e interessante indagine geologica. Le domande possono essere utilizzate dagli animatori per organizzare una specie di caccia al tesoro. Le risposte sono nascoste sotto i pannelli. In questo modo, in maniera molto semplice e intuitiva, il visitatore rifletterà sui reperti che può manipolare.



Figura 4. Uno scorcio delle postazioni hands-on con le rocce vulcaniche.



Figura 5. Un ragazzo osserva un campione.

4. Gli altri prodotti

4.1 Il sito web (<http://www.minivulcanologi.it>)

Inaugurato alla vigilia della spedizione con la documentazione sui vulcani italiani, il sito ha raccolto il diario di viaggio e le foto in tempo reale durante lo svolgimento della spedizione. Oggi sul sito è disponibile un'ampia documentazione scientifica e fotografica, i giochi e gli esperimenti, il diario di viaggio.

4.2 Il libro

Come già per i *Mini Darwin* (<http://www.minidarwin.it>), quest'esperienza è diventata un libro per ragazzi (8-12 anni) illustrato e arricchito da apparati e schede scientifiche, interviste, esperimenti da fare a scuola o a casa: Simona Cerrato e Paola Catapano, *Mini Darwin. Un'avventura sui vulcani*, Editoriale Scienza, 2010.

La mostra è stata ideata e realizzata da Sissa Medialab, con la collaborazione scientifica di INGV, il contributo della Cooperativa La Clorofilla e il patrocinio di Planet Earth.

BIBLIO/SITOGRAFIA

Le avventure dei Mini Vulcanologi sono riportate sul sito:

<http://www.minivulcanologi.it>

Le informazioni sull'anno Internazionale del Pianeta Terra si trovano qui:

<http://www.annodelpianetaterra.it/index.php>

In generale sui vulcani

Geography for kids: Earth structure,

http://www.geography4kids.com/files/earth_intro.html

Stromboli online: i vulcani del mondo, <http://www.swisseduc.ch/stromboli/>

molte belle foto da tutto il mondo e consigli su come fare belle foto di un'eruzione

<http://www.swisseduc.ch/stromboli/volcano/photos/photech-en.html>

Kerrod, R., *Vulcani e terremoti*, White Star, Vercelli 2006.

Luciani, R., *Noi e i vulcani*, Giunti Progetti educativi, Firenze 2007.

Decade Volcanoes,

<http://ngm.nationalgeographic.com/2007/09/vesuvius/decade-volcano-map-interactive>

Volcanoes and earthquakes, <http://www.nhm.ac.uk/nature-online/earth/volcanoes-earthquakes/index.html>

Bandintzeff, J.-M., *Piccola enciclopedia dei vulcani*, Rizzoli libri illustrati, Milano 2003.

Girault, F., Bouysse, P., Rançon, J.-P., *Vulcani: 40 immagini dal satellite SPOT*, DeAgostini, Novara 1999.

Rosi, M., Papale, P., Lupi, L., Stoppato, M., *Tutto-Vulcani*, Mondadori, seconda edizione, Milano 2003.

Sui vulcani italiani

Italy's volcanoes. The cradle of vulcanology, <http://boris.vulcanoetna.com/>

I Campi Flegrei, http://www.ov.ingv.it/campi_flegrei.html

Gruppo nazionale vulcanologia, <http://vulcan.fis.uniroma3.it/gnv/index.html>

Vulcani (Vesuvio, campi Flegrei, Etna, Stromboli, Vulcano, Ischia, Vulcani minori, inattivi) <http://www.ingv.it/vulcani/stato-dei-vulcani-attivi-italiani/>

Stato dei vulcani attivi in Italia, http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/vulcani_attivi.wp

Mercalli, G., *La grande eruzione vesuviana cominciata il 4 aprile 1906*, Roma 1906 (ristampa INGV, Roma 2006).

Stephen S. Hall e Robert Clark, *Vesuvius Countdown*, <http://ngm.nationalgeographic.com/2007/09/vesuvius/vesuvius-text> (con simulazione e galleria fotografica <http://ngm.nationalgeographic.com/2007/09/vesuvius/clark-photography>), settembre 2007.

Osservatorio Vesuviano, <http://www.ov.ingv.it/> (con dati sismici in tempo reale)

Rischio vulcanico,

http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/rischio_vulcanico.wp

Rischio vulcanico: Campi Flegrei,

http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/rischio_vulcanico_flegrei.wp

Rischio vulcanico: Etna,

http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/rischio_vulcanico_etna.wp

Rischio vulcanico: Stromboli,

http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/rischio_vulcanico_1.wp

Rischio vulcanico: Vesuvio,

http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/rischio_vulcanico_vesuvio.wp

Esplora i vulcani italiani, http://vulcan.fis.uniroma3.it/index_ita.html

L'eruzione del 79 d.C.,

<http://www.ov.ingv.it/italiano/vesuvio%5Cstoria%5C79.htm>

Deadly shadow of Vesuvio, <http://www.pbs.org/wgbh/nova/vesuvius/>

Vulcani italiani, http://it.wikipedia.org/wiki/Categoria:Vulcani_italiani

Vulcani della Campania,

http://it.wikipedia.org/wiki/Categoria:Vulcani_della_Campania

Vulcani del Lazio, http://it.wikipedia.org/wiki/Categoria:Vulcani_del_Lazio

Vulcani della Sicilia,

http://it.wikipedia.org/wiki/Categoria:Vulcani_della_Sicilia

Vesuvio, <http://it.wikipedia.org/wiki/Vesuvio>

Dal satellite

Stromboli. Terra di satelliti,

http://www.esa.int/esaCP/SEMUTMN0LYE_Switzerland_it_0.html

Napoli e dintorni: il controllo del Vesuvio via satellite,

http://www.esa.int/esaCP/SEM730DU8E_Italy_1.html

2001 Etna eruption satellite images,

http://www.etnaexcursions.com/etna_2001-eruption_satellite.htm

Etna, <http://ava.jpl.nasa.gov/volcano.asp?vnum=0101-06=>

Stromboli, <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=48724>

Vulcano, <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=9046>

Letteratura, mitologia e testimonianze antiche

Etna e mito,

<http://xoomer.alice.it/perin.valeria/mito/index.htm>

Lettera di Plinio,

<http://www.stabiana.it/testpliniogiovanelett.htm>

Spallanzani, L., *Viaggio all'Etna*, Tessere, CUEN, Napoli 1994.

Testimonianze antiche, <http://www.stabiana.it/testimonianze.htm>

Verne, J., *Viaggio al centro della Terra*, 1864, edizione BUR, Rizzoli, Milano 2006.

Parchi ed escursioni

Parco naturale del Vesuvio,

<http://www.parconazionaledelvesuvio.it/pnv/home/index.asp>

Il parco dell'Etna,

<http://www.parcoetna.ct.it/>

L'Italia dei vulcani, Touring, Roma 2007

2008 VolcanoTrek Activities,

<http://www.volcanotrek.com/ita/home.htm>

Vulcania: parc d'attraction et de loisirs sur les Volcans en Auvergne,

<http://www.vulcania.com/>

Esperimenti e didattica

Kerrod, R., *Vulcani e terremoti*, White Star, Vercelli 2006.

Vulcania: parc d'attraction et de loisirs sur les Volcans en Auvergne,

<http://www.vulcania.com/>

INSEGNARE MATEMATICA... A TEATRO

ROSA SANTORI

Scuola secondaria di 1° grado "S. Bernardino", Siena

ALFIA LUCIA FAZZINO

ANTONELLA CASTELLINI

Scuola secondaria di 1° grado "Leonardo da Vinci", Poggibonsi

Premessa

Nell'ambito di Pianeta Galileo, il 6 novembre 2010, abbiamo presentato lo spettacolo *Trilogia di matematica*, che si chiude con la frase (adattata) di Galileo: "La natura è un libro scritto in caratteri matematici"¹.

Come si deduce dal titolo, lo spettacolo che nasce, nel 2008-09, presso la scuola secondaria di 1° grado "Leonardo da Vinci" di Poggibonsi, è costituito da tre scenografie. Gli alunni che lo hanno messo in scena (9 classi: prime, seconde e terze), ormai frequentano la scuola superiore, e così ci rimane solo il DVD della registrazione del primo spettacolo.

La prima scenografia viene, comunque, presentata da un gruppo di alunni delle attuali seconde della scuola secondaria di 1° grado "S. Bernardino" di Siena, poiché una di noi, trasferitasi, ha potuto rimetterla in scena, lo scorso anno scolastico. Mentre la seconda e terza scenografia sono state fatte vedere attraverso il DVD.

Terminato lo spettacolo, i ragazzi presenti hanno dichiarato di essersi divertiti ma anche molto incuriositi: hanno chiesto chiarimenti, posto domande, si sono esercitati con i "nostri" modelli dinamici che opportunamente ci eravamo portati dietro, si sono meravigliati di quanta matematica hanno potuto scoprire con le lamine e le bolle di sapone.

1. Motivazioni: quando e come nasce l'idea di rappresentare la matematica?

Siamo tre docenti di scuola media che hanno avuto la fortuna di lavorare insieme per un buon numero di anni condividendo molte idee e di incontrare, prima sui libri e poi

¹ Nel 1623, in un brano del Saggiatore, Galileo formulò la filosofia della scienza moderna dicendo che il grande libro dell'universo non si può leggere, se non si impara la lingua nella quale è scritto e questa lingua è la matematica: "La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche". Secondo Galileo, chi non conosce questi mezzi non può capire il linguaggio della natura, ed è condannato ad aggirarsi vanamente per un oscuro labirinto.

personalmente, Emma Castelnuovo. Ormai tanti anni fa, ci siamo accorte che la sua didattica apriva a un nuovo modo di insegnare la matematica, quello che più o meno consapevolmente stavamo cercando e provando, e il ritrovarci insieme ci ha dato la spinta per sperimentare ciò che da tempo sognavamo: una nuova didattica.

Da tempo la “didattica tradizionale”, intesa come trasposizione di concetti, non ci convinceva più. Gli atteggiamenti e gli sguardi dei nostri alunni erano avviliti, molti non capivano, chi seguiva sembrava farlo per farci un piacere ma i più non dimostravano nessun vero interesse nei confronti di ciò che facevano. Molti studenti imparavano ad accettare passivamente ciò che veniva loro detto e a subire un’educazione formale.

Inoltre le notizie che ci giungevano dai media, il comunicato Ministeriale del 2007 sull’emergenza matematica e la visione errata della matematica che ripetutamente sentivamo in giro sono le cose che fra le altre, hanno fatto scattare in noi una molla e ci hanno portato a progettare e a realizzare iniziative diverse. Abbiamo così iniziato a frequentare corsi di aggiornamento, a leggere testi di psicologia e di didattica, a guardare da “un altro punto di vista” e a tentare di emulare Emma con le ... sue Esposizioni.

Ancora ci colpisce ciò che Emma scrive rivolgendosi ai ragazzi:

[...] in quelle pagine sono stati toccati i più gravi problemi che la realtà abbia mai posto all’uomo; sono questi i veri problemi che l’umanità ha faticosamente affrontato nel corso dei secoli per poter risolvere quelle questioni che la tecnica, il commercio, l’industria, la natura stessa imponeva giornalmente; sono problemi che ne aprono sempre di nuovi, di veri, di reali. Vedrete che voi stessi sarete condotti a porvi delle questioni, a pensare degli altri problemi; e il pensare un problema, il porsi delle questioni e dei perché è molto più difficile che saperli risolvere, ed è più bello. È in questo che consiste la matematica. [1]

Soprattutto ci siamo messe in gioco, in prima persona, sperimentando tutto ciò che leggevamo perché, se la matematica è un’arte, è qualcosa che si fa e allora ... ecco i nostri primi modelli, rudimentali sì, ma coinvolgenti, soprattutto per gli alunni.

La teoria costruttivista, molto apprezzata nel contesto dell’educazione matematica, sottolinea che la conoscenza è in gran parte costruita dal discente, che non si limita ad aggiungere nuove informazioni alle sue conoscenze, ma crea collegamenti e costruisce nuove relazioni fra queste informazioni. Secondo questo modello, l’individuo posto davanti alla “realtà”, fin dai primi anni di vita, è soggetto attivo che costruisce interpretazioni dell’esperienza, nel tentativo di dare senso al mondo e di anticipare così le esperienze future. Quindi il mondo della scuola, a nostro modesto parere, dovrebbe porre l’attenzione, prima che sulla conoscenza di *cosa* s’insegna, sul *come* e sul *perché* lo si insegna, poiché l’innovazione didattica, se di “innovazione” si vuol parlare, dovrebbe passare proprio attraverso questo nodo cruciale: l’insegnante, più che trasmettere nozioni, deve preoccuparsi di costruire concetti e di guidare gli alunni alla reinvenzione della matematica, in modo che non siano più ricettori passivi dell’insegnamento ma prendano parte attiva al processo di apprendimento.

Insegnamento e apprendimento devono divenire cooperativi, come suggerisce la

didattica meta-cognitiva. Piuttosto che accumulare sapere, è molto più importante disporre a un'attitudine generale a porre e a trattare problemi, sviluppando principi organizzatori che siano in grado di collegare i saperi e dar loro un senso.

L'insegnante deve dare il tempo agli alunni di fare scoperte e formulare ipotesi, aiutandoli a perfezionare le loro argomentazioni, creando un'atmosfera di sana e vibrante critica matematica, mantenendosi flessibile e disponibile a cambiare bruscamente direzione per andare dove la loro curiosità potrebbe condurre. Noi, tutto questo proviamo a metterlo in pratica e cerchiamo anche di comunicare entusiasmo e amore per l'apprendimento.

2. Lo spettacolo

Nell'anno scolastico 2007-08, grazie al progetto ministeriale "Scuole Aperte" abbiamo organizzato due settimane matematiche: laboratori aperti alla cittadinanza, che con nostra meraviglia, sono stati frequentati da un ottantina di persone, dai 18 fino ai 77 anni, che ci hanno chiesto, successivamente, di ripetere nel tempo iniziative simili poiché: "non avevamo idea che ci si potesse *divertire* così tanto facendo matematica".

Così abbiamo cominciamo a pensare a un altro possibile percorso per rendere più accattivante la matematica, per far capire che è materia non arida ma ricca di fantasia, per divulgare il nostro lavoro didattico e trasmettere la nostra passione (e poi ... avevamo ancora davanti agli occhi il "divertimento" di quegli adulti). Comincia a balenare in noi un'idea: una rappresentazione teatrale – ma non trovavamo il coraggio ...

Ci risuonavano sempre più nella testa le parole di De Finetti e Hardy. Scrive Bruno De Finetti:

la funzione creativa della matematica viene fatta apprezzare mostrando la matematica non come un'astrazione morta e statica ma la matematica come strumento. [2]

Ed ecco come Godfrey Harold Hardy descrive la matematica:

Il matematico, come il pittore e il poeta, è un creatore di forme. Se le forme che crea sono più durature delle loro, è perché sono fatte di idee. [3]

Così ci convinciamo che la matematica può diventare anche oggetto di spettacolo teatrale: in scena, come d'altra parte in classe, essa perde la dimensione di scienza austera e accessibile solo a pochi iniziati, diventa materia esplorabile e comprensibile a tutti e fa emergere con forza la bellezza e il fascino che le sono propri. Chi recita a teatro non è solo l'attore (gli alunni) ma anche lo spettatore che "vive" l'esperienza non come artificio ma come realtà e vita (potenza del teatro). E questa possibilità ... non ce la possiamo far scappare!

L'anno successivo iniziamo questa nuova avventura: uno spettacolo teatrale, il cui scopo fondamentale è stato quello di raccontare la matematica utilizzando il linguaggio del teatro. L'idea base era quella di far vivere agli spettatori un'esperienza significativa di ciò che avviene nelle nostre classi.

Abbiamo cercato di esplorare teatralmente alcuni di quegli aspetti della matematica che la rendono materia viva, reale, concreta e che sono molto lontani da una pura e semplice applicazione meccanica di formule che la rendono fonte di molti insuccessi scolastici. Volevamo far capire ai nostri alunni, e a tutti gli spettatori, che la matematica è fantasia, creatività, piacere di scoprire.

Fissati i contenuti, si deve scrivere il copione, pensando anche a un *file rouge* che metta in risalto come non esistano comparti stagni ma un percorso, che è poi quello che l'uomo ha seguito per costruire nel tempo le conoscenze matematiche.

Tre le scenografie introdotte da un "mago della matematica" che, attraverso tre magie, ci porta nel magico mondo dell'aritmetica e della geometria.

Prima magia (classi prime): la conoscenza, lettore fuori campo, racconta alcuni segreti sui numeri e ciò che li lega, illustrando le loro qualità attraverso la storia, l'essenza, le relazioni, le curiosità in una sorta di sana competizione. Ecco che si parla di numeri pari e dispari, di abaco, di cifre, dello zero e dell'uno. Si affrontano anche temi rilevanti come l'infinito e la dualità ma sempre con leggerezza teatrale. I bambini impersonano alcuni numeri e si calano nella parte mettendo tutto il loro impegno, ma anche, e soprattutto, la loro spontaneità.

Seconda magia (classi seconde): con balletti e canzoni, prima la grande famiglia dei quadrilateri e poi quella dei triangoli si materializzano e si animano davanti a una studentessa che non ama la matematica, svelando proprietà, principi e relazioni fino a farle cambiare idea. I ragazzi, aiutati da modelli dinamici costruiti in legno, impersonano figure geometriche piane e in modo molto naturale espongono le loro proprietà; lo spettatore riesce così ad afferrare le relazioni fra i quadrilateri e ad abbattere molti concetti erronei che, spesso, proprio gli adulti portano nel proprio bagaglio culturale. Inoltre è possibile comprendere perché nella realtà si utilizzano certe figure rispetto ad altre, proprio a causa della loro rigidità o articolabilità.

Terza magia (classi terze): un balletto introduce la scenografie sulle bolle e poi, in casa di Federico, si gioca con le bolle di sapone e si scoprono un sacco di segreti sulle superfici minime. Quindi si parla di tassellazioni del piano, isoperimetria ed equiestensione. Diventa naturale parlare della natura, e della matematica, con le api e le pecore, ma anche di storia, con la leggenda di Didone. Si arriva poi a parlare di architettura e superfici minime con le tensostrutture. Ogni scena vede sullo sfondo la proiezione di immagini inerenti all'argomento, per aiutare lo spettatore nel suo apprendimento-scoperta.

La scena finale, proprio a conclusione del percorso fatto e in relazione alle idee-base della rappresentazione, termina con una scena di gruppo nella quale ogni alunno entra con un cartello in cui è scritta la classe di appartenenza, si posiziona opportunamente e a un certo punto, girando il cartello si può leggere a caratteri cubitali la frase (adattata) di Galileo: "la natura è un libro scritto a caratteri matematici".

I testi sono stati ideati e scritti da noi e nascono dalle esperienze che da molti anni portiamo avanti con i nostri ragazzi, nella didattica quotidiana in classe. Dello spet-

tacolo abbiamo curato la regia, gli aspetti scenografici, i costumi, le presentazioni in computer che accompagnano lo spettacolo mentre la scelta delle musiche è stata fatta dai ragazzi.

A fine anno scolastico sono stati realizzati tre rappresentazioni: due spettacoli serali per gli adulti ed uno al mattino rivolto soltanto ai ragazzi della nostra scuola, spettacoli che hanno ottenuto un buon successo, tanto che siamo stati invitati con i ragazzi a presentarlo il 10 novembre 2009 a Viareggio al 26° Convegno sulla didattica della matematica, organizzato dal Gruppo di Formazione Matematica della Toscana (GFMT) e successivamente ad Empoli in un Liceo Scientifico.

L'anno successivo, una parte dello spettacolo, rivisitata, è stata rappresentata a Siena al S. Maria della Scala e al Teatro dei Rozzi. Il DVD è stato proiettato, anche al Convegno Nazionale "Matematica ed esperienze didattiche" di Castel S. Pietro Terme, 5-7 Novembre 2010.

3. Conclusioni

Siamo convinte che se, invece di proporre agli alunni problemi che, la maggior parte delle volte, non sono problemi veri ma solo esercizi meccanici e ripetitivi, cominciasimo a chiedere ai nostri studenti perché e come è nata un'idea, una formula, chi l'ha inventata e quali sono le applicazioni nel mondo reale, del lavoro, del gioco e dell'arte, sicuramente presterebbero un'attenzione diversa alle *nostre* lezioni perché diventerebbero ... le *loro* lezioni.

Pur vivendo l'epoca del virtuale e digitale che piace così tanto ai ragazzi, non si deve abbandonare l'esperienza manuale perché *toccare, ripiegare, ritagliare, manipolare* sono attività che fanno parte del processo creativo di un individuo.

A tal proposito ricordiamo il pedagogo Johann Heinrich Pestalozzi, che ben due secoli fa fondava le sue ricerche sul fatto che alla base di ogni insegnamento c'è l'intuizione, cioè l'esperienza personale. Egli sottolineava che l'osservazione e la manipolazione precedono ogni apprendimento e lo sviluppo del pensiero astratto.

Se chiedessimo a un buon numero di persone a cosa serve la matematica, probabilmente molti risponderebbero che "non serve a niente". Ma allora, a cosa servirebbe insegnare la matematica?

Invece è una materia che serve, e tanto, non solo perché senza di essa non avremmo molti degli strumenti che hanno portato allo sviluppo del progresso umano, ma soprattutto perché rende i ragazzi autonomi e pertanto liberi: coltiva conoscenza per creare coscienza. E questo non ci sembra poco!

Concludiamo con un'ultima considerazione, che ci ha reso molto fiere. Numerosi sono stati i messaggi pervenutici dagli spettatori che ci hanno comunicato il loro entusiasmo, la loro sorpresa e soprattutto ci hanno fatto notare che, durante lo spettacolo, traspariva fortemente la sintonia tra gli insegnanti, i ragazzi e la matematica!

BIBLIOGRAFIA

- [1] Castelnuovo, E., *La via della matematica* (2 voll., *I numeri e La geometria*), La Nuova Italia, Firenze 1966, pp.V-VI.
- [2] De Finetti, B., Parole di apertura al congresso in Sila, *Periodico di Matematiche*, vol. 15 (1975), n. 1-2, pp. 55-62.
- [3] Hardy, G. H., *Apologia di un matematico*, trad. it. di L. Saraval, Garzanti, Milano 1989, pp. 66-67.

GIOCHI MATEMATICI DEL MEDIOEVO: PENSARE-E-AGIRE LUDICAMENTE

ANTONIO DI PIETRO

MICHELA LORENZI

GIAMPAOLO MAZZA

GIANFRANCO STACCIOLI

FRANCESCO TANINI

Gruppo Sperimentazione della Federazione Italiana dei CEMEA

1. Alcuni giochi medievali

La ricerca sul gioco, così come quella attorno a specifici giochi, si è sviluppata in questi ultimi anni grazie a un modo diverso di vedere la storia e, in particolare, ‘eventi’ che si sono verificati in luoghi e in tempi diversi. Dalla fine degli anni Cinquanta, Jaques Le Goff ha proposto lo studio della storia (proprio a partire dal Medioevo) attraverso i suoi aspetti specifici e di vita quotidiana. Questo studio riguarda anche il gioco e l’attività del giocare nel Medioevo. L’interesse per il gioco ha messo in luce una gran varietà di attività ludiche che erano comuni nella nobiltà come nel popolo minuto, nella borghesia come nel clero. A volte si trattava di giochi corporei (recuperati da codici dell’epoca), altre volte di giochi linguistici, anche molto raffinati. I giochi rappresentavano spesso una modalità adatta a mostrare le proprie capacità fisiche, ma anche di pensiero, di logica, di intelligenza. La riscoperta di questi giochi appare oggi estremamente interessante e stimola la necessità di riappropriarsene per sperimentare forme ludiche antiche, che non risultano né banali né semplici anche per noi “moderni”.

Qualche esempio può essere utile per rendersi conto della ricchezza dei giochi del basso e dell’alto Medioevo.

Adam de la Halle scrisse nel 1275, alla corte di Carlo d’Angiò, *Le jeu de Robin et Marion*, un’operetta che è considerata il primo esempio di musica profana. Al suo interno viene citato un gioco interessante dal punto di vista logico: *Falso/Vero*, detto anche *Il gioco del re e della regina*. In questo gioco vengono poste delle domande al “re”, alle quali egli dovrà rispondere con assoluta verità. Ovviamente occorrerà una competenza linguistica e “diplomatica” per dire la verità senza dirla esplicitamente, escogitando forme eleganti e sottili per dire e per non dire, insomma: per dire il vero senza però dirlo apertamente.

Ad Alfonso X, *el sabio*, re di Castiglia e Leon, si deve il volume più importante dedicato ai giochi di tavoliere (1283). Nel suo *Libro de los juegos*¹ (il testo originale esiste ancora, conservato presso la biblioteca di San Lorenzo dell'Escorial, che si trova nei pressi di Madrid), si possono leggere i giochi raccolti da lui e dal suo gruppo di studiosi attorno al 1252; fra le belle immagini che li arricchiscono, è possibile comprendere le regole specifiche dei “giochi da seduti”. Fra le immagini del testo ce n'è una che mostra i tre saggi che presentano al re, su tre tavolieri diversi, le tre forme fondamentali di tutti i giochi: giochi del caso, giochi di strategia e giochi misti. Una classificazione questa che rimarrà attuale fino ai nostri giorni. Fra questi giochi abbiamo scelto *Il mulino* e *El mundo* o *Gioco delle quattro stagioni*. Di questo secondo gioco ci siamo permessi di semplificare le regole per renderlo accessibile anche ai bambini delle scuole primarie.

Alcuino da York (735 – 804) insegnò dal 765 a York, alla scuola che raccoglieva i figli della nobiltà locale. Scrisse vari testi e, per ragioni di studio, si recava spesso dal Papa. In uno dei suoi viaggi incontrò a Parma Carlo Magno, re dei Franchi, che lo invitò a trasferirsi nella sua corte di Aquisgrana a dirigere la scuola del palazzo (poi divenuta la famosa *Schola palatina*), dove venivano educati anche i suoi figli. Alla corte di Carlo Magno, Alcuino scrisse numerosi trattati e mise insieme anche la più antica collezione di problemi matematici in latino che attualmente conosciamo: *Propositiones ad acuendos juvenes*. In questo testo, che circolava manoscritto (la prima stampa è del 1563)², si avvicina l'allievo alla matematica in modo ludico, con un metodo che oggi chiamiamo “matematica ricreativa”. Le *Propositiones*, pur appartenendo all'area dell'in-

1 Il titolo completo del manoscritto è: *Juegos diversos de Axedrez, dados y tablas con sus esplicaciones, ordenados por mandado del Rey don Alfonso el Sabio*; indicato nella biblioteca con j.T.6, il testo è composto da 98 pergamene con 150 splendide miniature a colori. Alfonso X classifica i giochi in voga nel Medioevo in tre categorie: quelli che si fanno a cavallo, quelli che si fanno stando in piedi e quelli che si giocano da seduti. Nel libro si prendono in considerazione solo questi ultimi. Il codice è diviso in tre sezioni: la prima è dedicata agli scacchi, poi si passa ai dadi e poi ai giochi di *tablas*, con quindici giochi diversi che venivano praticati all'epoca. Un particolare interessante: il gioco degli *scacchi* e delle *tablas* sono considerati più ‘nobili’ rispetto ai giochi con i soli dadi. Nelle immagini che accompagnano i giochi dei dadi compaiono anche personaggi non nobili. In quelle delle *tablas* e degli scacchi “vi è la dimostrazione della funzione educativa dei giochi. Oltre ad ogni tipo di nobiltà sono infatti rappresentati donzelle, bambini e uomini di chiesa”, [3, p. 44]. Cfr. anche [2] e [1].

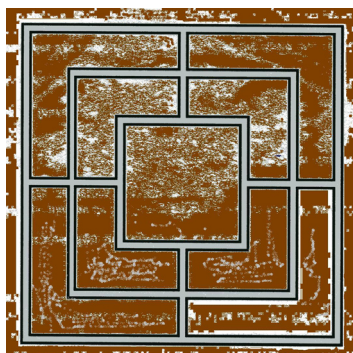
2 I manoscritti delle *Propositiones* che ci sono finora pervenuti, vanno dal IX al XIV secolo e sono stati redatti in latino in conventi di Francia, Inghilterra e Germania. Non ci risulta esistere una trascrizione del testo in Italia. La maggior parte dei problemi presentati da Alcuino non si trovano in raccolte precedenti e alcuni di essi affrontano questioni presenti nella tradizione orale. La corte di Aquisgrana accoglieva persone di cultura provenienti da vari paesi. Esse partecipavano alle riunioni conviviali narrando e proponendo questioni e problemi. La tradizione culturale matematica era al tempo basata sulla dimostrazione ipotetico-deduttiva. Esisteva una matematica popolare ed una dotta. Alcuino riprende la tradizione della matematica della Grecia classica che era essenzialmente scienza della risoluzione di problemi, una matematica “pratica”, cfr. [4]

segnamento matematico sono poste in forma di gioco. I vari settori del testo – problemi di aritmetica elementare, problemi del mucchio, problemi di dare e avere, problemi d’inseguimento ecc. – appaiono ancora oggi stimolanti e sono particolarmente adatti a un pubblico giovanile. Nelle nostre proposte ai bambini abbiamo scelto alcuni di questi giochi arricchendoli con oggetti materiali e manipolabili.

2. Giochi logici e matematici

I giochi, le cui schede presentiamo qui di seguito sono quelli sperimentati con i ragazzi delle quinte classi di una scuola primaria di Prato. Rispetto alla versione originale, alcuni presentano “aggiustamenti” sia per quanto riguarda la lingua (in alcuni casi le schede erano scritte in latino, in altre in spagnolo), sia per quanto riguarda le regole.

Filetto di nove



19. El alquerque de nueve.

Figura 1.

L’immagine è tratta da *Libros de Ajedrez, Dados y Tablas de Alfonso X el Sabio*, Toledo, 1283, denominata *Alquerque de nueve*. Si tratta di un gioco che nel tavoliere ricorda, sia nella forma che nelle dinamiche, i giochi di allineamento come il “Tris”.

Il supporto utilizzato per il tavoliere era un semplice foglio A4 sul quale era stata stampata una versione a colori del tavoliere con un’illustrazione ripresa dal volume di Alfonso X *el sabio*, con a margine una nota che contestualizzava storicamente l’illustrazione e il tavoliere.

Per le pedine sono stati scelti semi di glicine (marroni) e scaglie di fave (bianche), 9 per giocatore, contenute in una bustina di plastica.

Scopo:

Mettere in fila tre pedine sulla stessa linea. Vince chi riesce a realizzare più tris.

Regole:

- Le pedine possono essere poste sul tavoliere solo in corrispondenza delle intersezioni (i punti di congiuntura fra le linee). Se una pedina occupa una intersezione non è possibile posizionarne un’altra nella stessa posizione.

- Una volta formato un tris di pedine, non è più possibile spostarlo fino alla fine della partita.
- Quando un giocatore forma un tris di pedine, e solo in quel caso, ha diritto a “mangiare”, e cioè togliere dal tavoliere, una pedina dell’avversario, a patto che questa non sia parte di un tris già formato.
- Vince il giocatore che riesce a rendere impossibile la formazione di ulteriori tris all’avversario.

Svolgimento del gioco:

Il gioco si compone di due fasi distinte:

- Nella prima fase i due giocatori posizionano a turno le loro pedine sul tavoliere, fino ad esaurirle. In questa fase è possibile comporre tris (se l’avversario lo permette) e “mangiare” le pedine avversarie.
- Una volta che la prima fase di posizionamento si è conclusa, a turno, ogni giocatore può muovere le pedine di una “posizione” per volta, e cioè da una congiunzione all’altra del tavoliere, a patto che sia adiacente.

Quando, a seguito di questa fase, uno dei due giocatori non è più in grado di muovere o di comporre altri tris, si contano quanti tris sono stati formati e termina la partita.

Le quattro stagioni dell'anno *detto anche Il mondo*

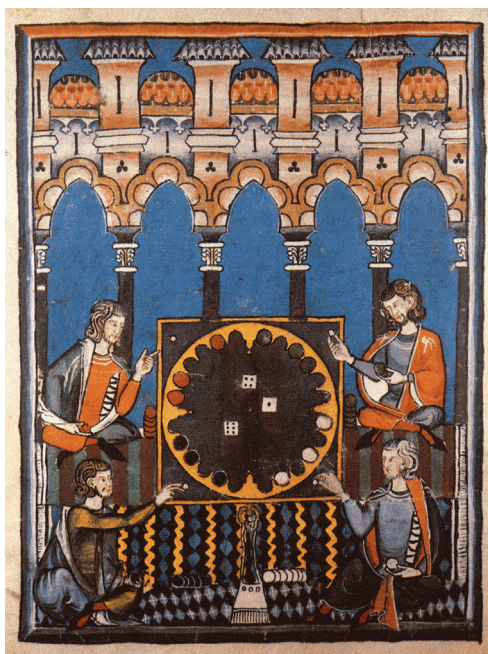


Figura 2.

Nel manoscritto di Alfonso X ci sono due tipi di gioco che si chiamano “delle quattro stagioni”: uno è denominato “scacchi” (*açedrex*) e l’altro tavola (*tabla*). Quello che noi abbiamo utilizzato è il secondo che è sempre fatto “a somiglianza delle quattro stagioni

dell'anno che inventarono i sapienti antichi”, ma che ha una forma diversa, pedine diverse e un regolamento diverso. “Questo tavoliere è quadrato, le barre sono poste in tondo, il tondo è diviso in quattro parti e in ciascuna parte ci sono sei caselle incavate a mo' di semicerchio in cui vanno incasellate le tavole” (cioè le pedine).

Supporti:

Per giocare con i bambini abbiamo utilizzato una base quadrata, sulla quale veniva incollato un cerchio di cartone (supporto da dolci) ed incollati sei adesivi per parte. Ogni stagione un colore diverso: primavera/verde; estate/rosso; autunno/nero; inverno/ bianco. Occorrono 3 dadi e 12 pedine per ciascuno.



Figura 3.

Scopo:

Riempire i sei spazi personali con le proprie pedine..

Regole:

A turno si tirano i dadi. Se dal lancio si ottiene un

- *DOPPIO* (due numeri uguali nei tre dadi) si mette, in ordine, una pedina nelle proprie caselle.
- *TRIPLO* (stesso numero sui tre dadi) si toglie una pedina all'avversario. O se ne mette una nostra, se lui non ne ha.
- *SCALA* (tre numeri diversi a scalare nei tre dadi) si sposta una nostra pedina del numero più alto o più basso fatto con il lancio. Se non ci sono pedine da spostare, lo fa il compagno successivo.

Giochi matematici

I tre giochi presentati sono stati tratti dal testo *Giochi matematici alla corte di Carlomagno*, redatti da Alcuino da York, cfr. [4]. Prima di proporre i giochi è stata fatta una breve introduzione al tema e al contesto storico di riferimento.

Problema n.12. Un padre e i suoi tre figli

Un padre morendo lasciò in eredità ai suoi tre figli 30 ampolle di vetro, dieci delle quali erano piene d'olio, altre dieci riempite a metà, le terze dieci vuote. Divida, chi può,

olio e ampole in modo che ciascuno dei tre figli ottenga la stessa quantità sia di vetro che di olio.

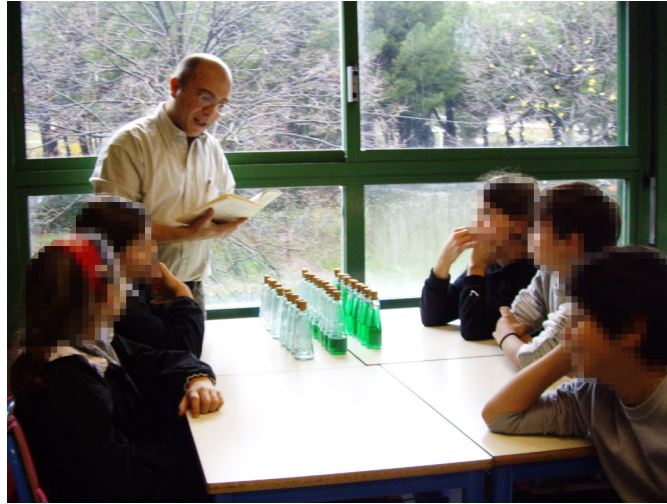


Figura 4.

Problema n.18. *Il lupo, la capra e il cavolo*

Un uomo doveva trasportare aldilà di un fiume un lupo, una capra e un cavolo e non poté trovare altra barca se non una che era in grado di portare soltanto due di essi. Gli era stato ordinato però di trasportare tutte queste cose di là senza alcun danno. Chi è in grado dica in che modo poté trasferirli indenni.

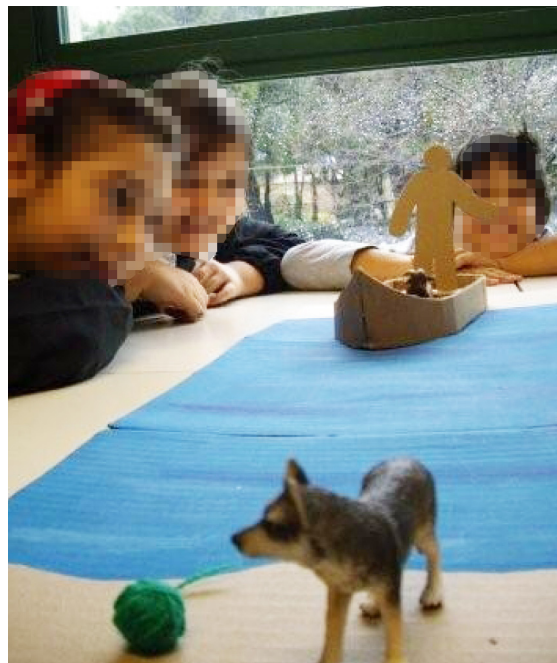


Figura 5.

Problema n. 32. *Un padre di famiglia che distribuisce viveri*

Un padre di famiglia aveva 20 familiari e ordinò di dare ad essi 20 moggi di grano: egli

ordinò che gli uomini ricevessero tre moggi, le donne due e i bambini mezzo moggio. Dica, chi può, quanti uomini, quante donne e quanti bambini devono essere.



Figura 6.

Pensiero Tangibile. Per sostenere (e accompagnare) il pensiero di astrazione logica necessaria alla risoluzione dei quesiti, a disposizione dei gruppi sono stati messi materiali, riproduzioni e oggetti evocativi. In questo modo i bambini hanno toccato e spostato gli elementi dei problemi fino ad individuarne le soluzioni.

Formulazione dei quesiti. È importante porre attenzione a come viene proposto il quesito ai possibili “inganni” che nella generalità del testo si possono insinuare. Ad alcuni bambini – nel problema “Un padre e i suoi tre figli” – l’ambito dei 20 familiari e la distinzione fra uomini donne e bambini aveva richiamato inizialmente un contesto fatto per forza da gruppi imprescindibili di “babbi, mamme e bambini...”. Il testo “Il lupo, la capra e il cavolo” non dice espressamente che il lupo mangia la capra e che questa mangia il cavolo, quando vengono lasciati soli o che questi non si mangiano anche solo nel salire e scendere vicini sulla barca.

Seguire lo svolgimento. La sola fedele esposizione del testo del quesito non è spesso sufficiente per arrivare alla risoluzione. È stato utile dare un qualche sostegno per aiutare i bambini a uscire da schemi logici rigidi. Per risolvere i problemi di questo tipo occorre un pensiero divergente, laterale. La creatività di pensiero non è una modalità ancora molto utilizzata in educazione.

3. Pensieri sul metodo e sulla reazione dei ragazzi

La proposta ludica che abbiamo presentato ai bambini è stata preceduta da una breve descrizione di una mappa-percorso, riferita alle Crociate. Altre informazioni “leggere” sono state date durante il gioco. L’idea di lavorare su materiali antichi è apparsa stimolante e ha messo in moto una infinità di pensieri e di domande.

I ragazzi sono stati suddivisi in *piccoli gruppi*, che erano distribuiti nelle stanze predisposte per l’attività. La *cura degli ambienti* e dei materiali sono condizioni indispensabili per svolgere una attività ludica. Se non c’è calma e intimità non ci può essere

concentrazione. Se non c'è concentrazione, non c'è pensiero. Nei giochi logici occorre pensare, riflettere, non correre immediatamente alle conclusioni, deviare il pensiero e avere il tempo per individuare "altre" strade. La calma non è in contrasto con il piacere. Il gioco è divertente quando lo si può gustare, quando si può assorbire lentamente, senza stress. Il piacere non rilassa: rassicura. E per fare dei giochi logici occorre essere rassicurati. Tanti adulti – ma anche tanti bambini – hanno paura di "sbagliare". L'errore non è un dramma: è un tentativo, un modo di ricercare. Quando i bambini sono entrati negli ambienti hanno trovato un luogo che li attendeva, che parlava loro. Il messaggio: "qualcuno ha avuto cura, perché tu possa star bene", è passato immediatamente.

I ragazzi erano interessati, incuriositi e meravigliati. Circa il gioco del Mulino, abbiamo spiegato le regole, abbiamo risposto alle iniziali domande e perplessità e poi abbiamo chiesto se volevano fare una partita. Così si sono divisi autonomamente a coppie e abbiamo distribuito tavolieri e pedine per tutti. Le partite sono iniziate e inevitabilmente le domande sono state molte, ma non tante da impedire lo svolgimento delle partite o da scoraggiare i giocatori. Abbiamo notato che all'inizio molte partite tendevano a finire subito, a discapito di chi non aveva ancora chiara la strategia di "blocco" dell'avversario. Una volta che i ragazzi hanno capito che nel gioco è importante fare tris, ma è anche importante impedire che l'avversario lo faccia, le partite hanno iniziato a entrare nel vivo e i ragazzi si sono mostrati molto concentrati sull'attività.

Nei giochi sono stati presentati e utilizzati anche *oggetti* che potevano sembrare buffi, per confermare l'idea di gioco, per attenuare l'atmosfera emotiva tipica da "stress da prestazione" che ci pervade quando siamo chiamati comunque a svolgere un'attività (o un esercizio?) in ambito scolastico. In questi giochi la presenza dell'adulto, non giudicante ma accompagnatore del pensiero, è determinante. Abbiamo cercato di intervenire meno possibile nelle partite dei ragazzi, anche lì dove chiedevano consiglio. Abbiamo cercato di lasciar ragionare i ragazzi sulla loro strategia senza dir loro quello che avremmo fatto o quali mosse erano "chiaramente" quelle da fare. Siamo rimasti piacevolmente colpiti da un ragazzo che ha perso sonoramente le prime due partite, ma che poi ha fatto sua la strategia dell'avversario ed è riuscito a vincere le successive, segno che il Mulino non è un gioco né scontato né immediato. Gli scambi relazionali tra avversari erano serrati, ma non tra tavoli diversi, segno di una concreta concentrazione sul gioco".

Per la *risoluzione dei problemi* di Alcuino di York, i bambini hanno "mosso" le loro ipotesi spostando i materiali a disposizione. I pensieri muovevano le cose e le cose muovevano i pensieri. Non solo, durante la fase del "dopo gioco" (cioè, di riflessione e presa di coscienza sull'esperienza svolta), i bambini si sono resi conto di alcuni dei loro processi di *problem solving*: "dire la prima cosa che viene in mente", "pensare e ri-pensare", "dare una soluzione che fa ridere", "farsi venire in mente un'idea dopo aver ascoltato quella di un compagno" ... Aver risolto problemi non semplici, in piccolo gruppo e con un sostegno di un adulto che andava nella direzione della valorizzazione delle ipotesi, ha creato un clima di sereno coinvolgimento cognitivo, emotivo e relazionale. Quasi

tutti i bambini, al termine, si sono sentiti capaci e hanno continuato a giocare in autonomia anche quando la proposta era terminata: un “fuori programma” che ha mosso pensieri inaspettati anche da parte delle insegnanti presenti.

Al *termine del gioco* i ragazzi hanno avuto una copia del tavoliere con il quale avevano giocato e del materiale per la classe. Un’attività ludica non inizia con il gioco e non finisce con esso. Come nei giochi della tradizione infantile, prima di giocare c’è un tempo che va dedicato all’organizzazione; e alla fine c’è sempre un momento conclusivo, di “ripresa”, di discussione (o di amichevole litigata). Per i ragazzi poter portare in classe o a casa un frammento legato all’esperienza ludica, può essere un viatico perché la situazione si riproduca in un nuovo contesto. Chi ha tratto piacere nel fare qualcosa, vorrebbe ripetere l’esperienza.

Il *messaggio* del piacere ludico, è passato attraverso informazioni “storiche” semplici e comprensibili, attraverso una situazione “intima”, di piccolo gruppo, attraverso un’interazione non giudicativa con l’adulto, attraverso stimoli concreti e “a basso costo”. La semplicità non è banalità, ma ricerca dell’essenziale e del significativo. Si è trattato di un messaggio difficile in tempi di sovrabbondanza di informazioni e di carenza di riflessione. Ci conforta l’idea che, con un po’ di sforzo e in un tempo breve, questa idea sia stata resa possibile, o per lo meno percepita.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Alfonso X el Sabio, *Libro de Ajedrez, Dados y Tablas*, Editorial Patrimonio Nacional, Madrid 1977.
- [2] Ceccoli, G., *Giocare nel Medioevo. Conoscere e costruire i giochi in uso fra XIII e XIV secolo*, AIEP, San Marino 2004.
- [3] De Toffoli, D., *Giocare a Backgammon. La storia e le tecniche di gioco*. F.I.B.A., Arsenale, Venezia 1991.
- [4] Franci, R., a cura di, *Alcuino da York, Giochi matematici alla corte di Carlomagno. Problemi per rendere acuta la mente dei giovani*, Edizioni ETS, Pisa 2005.

The background features a complex, abstract design of thin blue lines. A central sphere is formed by a dense, overlapping pattern of these lines. From the center, numerous lines radiate outwards, some forming larger, looser loops. Several semi-transparent grey spheres are scattered across the composition, some appearing to be connected to the central structure by thin lines. The overall aesthetic is clean, modern, and technical.

CONVEGNI

*Informatica nella didattica
dell'informatica*

PREMESSA

MARCO MARIA MASSAI

Dipartimento di Fisica "Enrico Fermi", Università di Pisa

Il ruolo degli educatori in ogni tempo e in ogni civiltà è stato sempre cruciale per garantire la trasmissione del sapere, dei suoi metodi, dei suoi valori. Si pensa al passato, anche recente, e sovviene l'immagine di poeti e letterati, pittori e architetti, forse anche di qualche filosofo e scienziato; questo quadro corrisponde ai contenuti che hanno reso peculiare ciascuna cultura che ci ha preceduto. È evidente che l'avvicinarsi proficuamente a tali contenuti è possibile solo attraverso il processo educativo, grazie allo studio e alle conoscenze con esso acquisite.

Tuttavia, da alcuni decenni si assiste a un fenomeno nuovo: i contenuti tecnici e scientifici di molti degli strumenti che oggi usiamo, sfuggono sempre più alla comprensione anche di chi svolge un ruolo tecnico, magari in settori affini. Ad esempio, fino a pochi anni fa, uno studente di liceo, magari bravo e curioso, era in grado di comprendere fino a un grado di notevole dettaglio il funzionamento dei principali 'oggetti' che andavano modificando la vita, anche quotidiana: la radio e la televisione, il telefono e il volo di un aereo, la macchina fotografica e l'automobile. In fondo, sia i principi alla base di queste 'invenzioni', sia le complicazioni tecnologiche che li rendevano utilizzabili, erano descritti in poche pagine nei libri liceali e in qualche manuale; poche leggi della fisica e della chimica, un po' di matematica, e il misterioso comportamento di tante macchine diventava comprensibile, e prevedibile. In questo caso potevamo parlare di un 'mondo analogico'.

Recentemente, questo scenario è radicalmente mutato, specialmente da quando è entrata in gioco l'informatica, che sta plasmando il nostro mondo e la nostra quotidiana esistenza sull'immagine di bit e byte. Per riprendere l'esempio precedente, sono certo che tanto la comprensione del funzionamento di un moderno televisore a LED quanto la comprensione della modalità con la quale un cellulare trasmette i nostri messaggi e la nostra voce siano fuori dalla portata anche di laureati in materie scientifiche, come fisica o ingegneria. E, naturalmente, sfugge a una sufficiente comprensione anche il software che permette, ad esempio, al computer con il quale stiamo scrivendo queste note, di fare le mille e mille cose che poi faticiamo a capire in profondità.

Questo scenario rappresenta una sfida per il sistema educativo che deve affrontare la formazione delle nuove generazioni, le quali avranno sempre di più a che fare con quel che possiamo chiamare 'mondo digitale'. Sfida per il sistema, certo, ma anche sfida per gli insegnanti, ai quali spetta l'onore e l'onere di sostenere e favorire questo epocale processo.

Non meraviglia quindi che immaginare e sperimentare nuovi approcci all'insegnamento dell'informatica e a varie modalità di impiego delle sue tecniche, sia la giusta via per perseguire questi obiettivi. Nelle aule scolastiche si possono costruire percorsi formativi che, partendo dalle definizioni e dai teoremi, permettano di costruire gli elementi dell'informatica, seguendo uno schema tradizionale sperimentato, ad esempio, in matematica e fisica. Ma, parallelamente, con un approccio informale, si può allo stesso tempo condurre lo studente verso un proprio personale percorso di esperienza diretta con il mondo dell'informatica, portandolo fino alla compiuta realizzazione di quei processi di astrazione che sono il robusto supporto per una profonda comprensione della struttura di questo nuovo 'mondo di bit'.

Ecco quindi che l'informatica può essere vista sia come mezzo, sia come fine, nello stesso momento, nello stesso luogo. Alcuni esempi di un simile approccio verranno descritti nel corso di questa giornata di studi.¹

¹ La giornata di studi dedicata a L'informatica nella didattica dell'informatica si è svolta a Pisa il giorno 29 novembre 2010, presso la sede della Limonaia-Scienza Viva, vicolo de' Ruschi, nell'ambito delle iniziative promosse da Pianeta Galileo.

INTRODUZIONE

MARIA RITA LAGANÀ

Dipartimento di Informatica, Università di Pisa

Quando si parla di informatica, e dunque anche nel suo insegnamento, occorre tener presenti le sue tre sfaccettature: scientifica, tecnica e sociale. Di quest'ultima fa parte il problema di accedere agli strumenti e acquisire la capacità di usarli – capacità con cui spesso si identifica questa disciplina. Oggi, d'altra parte, quasi tutte le attività umane, proprio grazie all'aspetto tecnologico, fanno uso di software specifici, di solito interattivi, che sono di notevole aiuto nel nostro lavoro. Per utilizzarli occorre sviluppare un'attività intellettuale di memorizzazione, astrazione, decisione ... Così facendo, tuttavia, non ci confrontiamo ancora con l'aspetto scientifico dell'informatica, che adesso cercheremo di delineare.

La parola “informatica” è la traduzione del francese “informatique”, vocabolo che nasce nel 1962, in Francia, dalla fusione dei due termini “information” e “automatique”, per indicare appunto il trattamento automatico dell'informazione. Occorre allora chiarire cosa si intende per “informazione” e per suo “trattamento automatico”.

Il linguaggio comune suggerisce per il primo termine un certo significato da cui dobbiamo in questo contesto svincolarci e, allo scopo, dobbiamo sostituire la mente che la elabora con un meccanismo di retroazione o feedback. Tanto per fare qualche esempio, informazione è per un termostato la misura della temperatura che riceve dall'ambiente e che gli consente di prendere la decisione se spegnere la resistenza o continuare a riscaldare l'acqua del nostro bucato. Informazione sono i colori dei fiori per gli insetti che li scelgono, informazione è la successione di nucleotidi del DNA che influenza la formazione e lo sviluppo di un organismo.

Parlando in generale, “informazione” è tutto ciò che può permettere ad un soggetto, animato o no, di superare un' “incertezza” dirimendo un'alternativa tra almeno due eventi possibili. Facendo l'esempio del termostato analogico, l'informazione è la temperatura che, quando supera una soglia legata alle proprietà fisiche del sistema, causa lo scatto del meccanismo.

L'informazione discreta si ha quando la scelta è all'interno di un insieme finito di possibilità, ad esempio un esperimento casuale con n possibili uscite, ciascuna con la sua probabilità.

La teoria dell'informazione associa al risultato di un esperimento finito un valore numerico che rappresenta la quantità di incertezza sul risultato dello stesso esperimento. L'incertezza si misura in bit e l'incertezza di un esperimento con due sole uscite equiprobabili (testa o croce) vale 1 bit .

L'incertezza dipende ovviamente dal soggetto. Un semplice esemp si trova tra queste rig. Come nativi italiani non abbiamo nessuna incertezza nel completare con "io" e "he", per correggerli, i due refusi della frase precedente. Molto diversa sarebbe la situazione di un malcapitato di lingua russa!

Senza entrare in particolari fuori dallo spirito di questa introduzione, si fa presente che spesso si approssima la situazione non probabilistica in cui i soggetti si scambiano messaggi formati da simboli, sovrapponendo un modello probabilistico che consenta di trattare questi problemi con gli strumenti della teoria dell'informazione.

Nel nostro contesto l'informazione è sempre vista in senso discreto: le paghe dei dipendenti sono sequenze di numeri, come d'altronde le misure della temperatura che arrivano al termostato digitale, una melodia è una sequenza di note, una immagine un insieme di valori associati ai suoi pixel e così via.

Passando adesso all'altro termine, cioè "elaborazione automatica", "elaborare" l'informazione significa lavorare su queste stringhe di simboli e "automatica" significa che ciò è possibile che avvenga in modo autonomo, ovvero senza l'intervento umano. Naturalmente questa elaborazione deve essere possibile per la macchina che abbiamo e dev'essere significativa, interpretabile, da chi deve usare i risultati. In altre parole, per essere trattata automaticamente, l'informazione dev'essere rappresentata, modellata, strutturata in modo che il dispositivo possa elaborarla e restituircela in forma a noi comprensibile. Ecco un primo concetto fondamentale della scienza informatica.

Un secondo concetto riguarda l'architettura di un sistema di trattamento automatico dell'informazione. Quali sono le zone del sistema? Come i dati vengono immagazzinati, elaborati, trattati e scambiati tra le varie zone del computer? Possono essere trattati parallelamente?

E passiamo ai concetti che diciamo operativi: in sostanza, gli algoritmi e i programmi. L'informatica ha una caratteristica particolare, che consiste nella necessità di risolvere concretamente un problema: non basta, come in matematica, dimostrare che una soluzione esiste. Occorre fornire i passi per arrivarci. Occorre, in effetti, anche esser sicuri che il tutto possa svolgersi in un tempo ragionevole perché, qualunque sia la potenza di calcolo del nostro dispositivo, non basterà mai ad assicurarci che, per sua specifica natura, il problema sia così arduo o il nostro modo di risolverlo così ingenuo da costringerci ad attendere ... oltre la fine del mondo per avere la risposta richiesta.

Quando si passa al software applicativo, si usano poi i metodi della disciplina di riferimento: ad esempio, informatizzare una biblioteca o un archivio storico richiede che l'informatico si documenti con i metodi della biblioteconomia e dell'archivistica; informatizzare il processo educativo della scuola significa studiare metodi della pedagogia. E allora lo strumento computer può essere programmato in modo da diventare strumento didattico. In particolare potrebbe essere usato nella didattica dell'informatica.

Ma il nocciolo duro sono i metodi fondamentali dell'informatica, e questi affondano le radici nella matematica. È sul modo di proporli ai ragazzi, per interessarli alla

scienza informatica, che vogliamo oggi concentrarci, presentando esperienze che hanno avuto buoni risultati e che possono essere ripetute nei vari contesti scolastici.

LA DANZA DEI BIT: DAI FOGLI A QUADRETTI AL PALCOSCENICO

CHIARA BODEI

Dipartimento di Informatica, Università di Pisa

Come mai in Francia e negli Stati Uniti ci sono bambini poco portati alla matematica, ma solo negli Stati Uniti ci sono bambini poco portati per il francese? La risposta che si dava Papert è che la lingua madre non si insegna: il bambino la impara “sul campo”, quasi per assorbimento, senza che nessuno gli insegni le regole. È quello che Papert chiama “apprendimento sporco”, un processo che non segue cioè un percorso sistematico e predeterminato, distinto dall’apprendimento “pulito” tradizionale.

Proprio seguendo questo approccio, abbiamo approfittato dell’ancora instabile collocazione dell’informatica (non intesa semplicemente come familiarizzazione col computer) all’interno dei curricula scolastici, per sperimentare nuove metodologie e strategie didattiche. Ci siamo infatti posti il problema di come insegnare ai bambini una materia così impregnata di nozioni astratte, laddove invece in età infantile prevale la necessità di concretezza. Nel percorso che qui documentiamo, le nozioni, o meglio le loro definizioni, hanno costituito il punto di arrivo e non di partenza.

Per insegnare la rappresentazione binaria dei numeri e la struttura logica del calcolatore, “abbiamo fatto finta che” i bambini fossero bit e come tali agissero nello spazio teatrale della città “computer”. Dall’interno, in una posizione decisamente privilegiata, hanno potuto, agendo nello spazio e recitando, capire come è fatto un computer e come funziona. I concetti non sono stati quindi trasmessi attraverso definizioni formali, ovvero attraverso un processo di apprendimento che Papert avrebbe considerato pulito. Sono stati invece acquisiti immergendo i bambini all’interno di una storia, dove anche i procedimenti algoritmici sono diventati processi narrativi. Il metodo usato ha fatto quindi leva sull’affabulazione e sulla teatralizzazione. Inoltre, ha fatto uso della sintonia tra la rappresentazione numerica e il proprio corpo. Anche in questo caso ci si è ispirati all’apprendimento sintonico, messo in luce sempre da Papert.

Abbiamo cominciato raccontando che sono i bit a far funzionare il computer e che i bit sanno fare solo due cose, zero e uno, uno su, zero giù. Attraverso un patto di fantasia li abbiamo quindi invitati a “tramutarsi” in bit e fare altrettanto, alzandosi in piedi per rappresentare l’uno e abbassandosi per rappresentare lo zero. Non è stato per loro difficile immedesimarsi nei bit, al ritmo della “Danza dei bit”, marcia scritta appositamente per loro e Leitmotiv dell’operetta teatrale omonima:

Noi siamo i bit,

il popolo dei bit.
 Siam qui al tuo comando,
 il popolo dei bit!

All'inizio, abbiamo proposto ai bambini di creare due file parallele di bit: la prima quella dell'uno (ovvero del 2 elevato a 0, ma su questo abbiamo sorvolato), l'altra quella del due (ovvero del 2 elevato a 1, e anche su questo abbiamo sorvolato).

L'idea è quella di avere cioè una fila per ogni potenza di due, così come ce ne sarebbe una per ogni potenza di dieci, nella notazione posizionale decimale.. Abbiamo quindi chiesto cosa fare per comporre il numero zero. I bambini si sono messi tutto giù. Perfetto. E uno? Si sono alzati solo i bambini della prima fila. Se dico due? I bambini della prima fila si sono abbassati, mentre si sono alzati quelli della seconda fila. I bambini erano perplessi, ma attentissimi. E se dico tre? Dopo una rapida riflessione, si sono alzati tutti insieme. Il primo concetto difficile era passato. Da qui a comprendere che per comporre numeri più grandi occorrono nuove file (del quattro, dell'otto etc), il passo è stato breve. Il concetto dei numeri binari è stato quindi appreso, senza passare da una definizione formale, per dirla con uno slogan, e senza usare i fogli a quadretti del quaderno. Abbiamo a questo punto proposto vari passatempi, come la tombola binaria e il crucibit, varianti binarie della tombola e del cruciverba. Spostando l'attenzione sul gioco, i bambini hanno rafforzato il concetto della numerazione binaria, senza nemmeno accorgersene. È stato quindi evocato, sempre guidati dalla canzone, l'intervento del terribile scienziato von Neumann, capace di mettere ordine tra i bit, schierandoli in gruppi di otto, ovvero in byte, ché da soli i bit non possono fare molto.

Legati siamo a byte.
 Noi siamo i byte,
 L'esercito dei byte.
 Siam qui al tuo comando,
 l'esercito dei byte”

Così schierati sono stati pronti a danzare i numeri da lui comandati cantando, e a mettere in scena ciò che avviene all'interno del computer. Ancora una volta, non abbiamo dato nessuna spiegazione. L'architettura del computer è stata semplicemente suggerita, o meglio, raccontata dalle parole e dalla coreografia della canzone e dell'operetta. I bambini-byte si sono distribuiti sul palcoscenico della città-computer, al suono di:

Vogliamo una casetta,
 vogliamo un indirizzo
 dove andare ad abitare.
 Dove andremo?
 Dove andremo?
 In via della RAM numero zero ...
 Noi invece andremo in piazza, in piazza CPU,
 la piazza del controllo.
 Su va' anche tu.

Solo allora le due unità sono state introdotte come la memoria (o RAM) e il cervello (o CPU), e si è detto che si scambiano le informazioni cantando le configurazioni dei bit. Non senza l'intervento del Generale Clock che detta il ritmo. Tutto è apparso nella sua concretezza: non ha creato sorpresa che nella RAM ogni byte abbia il suo posto e il suo indirizzo, né che ci siano dei bus a trasmettere i bit da una parte all'altra. La canzone ha guidato anche il procedimento algoritmico della somma binaria:

Per la somma in CPU
zero e uno salgo su.
Per la somma in CPU
Zero e zero scendo giù.

E ancora

uno e uno vado giù
ma il vicino tiro su"

Naturalmente vista la meno banale nozione di riporto, sottesa all'ultimo verso-istruzione, la discussione completa su come funziona è stata continuata in classe.

La rappresentazione è stata inoltre arricchita da interventi esplicativi di voci fuori campo e da diversi dialoghi tra il Professor von Neumann e la presentatrice, che con un colpo di scena, alla fine ha rivelato di essere un robot ... anche se è rimasto il dubbio che lo fosse veramente, nonostante avesse superato il Test di Turing con il Professor von Neumann! Il tutto si è concluso con una cascata di palloncini colorati sui bambini che cantavano il ritornello della Danza dei bit.

Il nostro lavoro, in particolare la sua prima parte, è totalmente ripetibile, data la documentazione prodotta in [1].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bodei, C., Giannetti, A., Laganà M. R., La Danza dei bit: imparare l'informatica con attività motoria e teatrale, *Difficoltà di apprendimento*, 14(1), 2008, pp. 85-107.

I ROBOT: GIOCO NELLA SCIENZA

MARCO RIGHI

Dipartimento di Informatica, Università di Pisa

I robot affascinano i ragazzi (e non solo i ragazzi). I ragazzi guardano i robot in funzione chiedendoti che cosa fanno, come lo fanno, aspettando qualcosa da quegli strani oggetti che si muovono. L'interazione porta i bambini a essere creativi: per ottenere che il robot si comporti in un certo modo, debbono infatti risolvere una serie di problemi specifici e assemblare in modo corretto i componenti a disposizione. L'assemblaggio di un robot fornisce rapidamente lo stimolo per capire, o la soddisfazione per un oggetto che funziona oppure l'impegno a riflettere perché quel comportamento tanto atteso non si verifica.

È proprio per capire come far muovere nel modo desiderato il robot, che i bambini, senza rendersene conto, si confrontano con piccoli problemi legati a svariate discipline: matematica, ingegneria meccanica, informatica ecc. Risolverli non rappresenta un fine, ma il mezzo per ottenere che il robot "obbedisca" ai comandi del bambino.

È emblematica l'esperienza di un bambino che per far muovere un robot e dovendo contare le rotazioni di un meccanismo, aveva di fatto "reinventato" i numeri relativi. Costruire un robot, anche quando è un giocattolo assemblato con componenti pre-costituite come i mattoncini Lego, non è certo un compito semplice, ma richiede un grande sforzo intellettuale. Tuttavia i bambini, giocando, non ne sentono il peso.

Un altro aspetto importante che entra in gioco è quello cooperativo: la progettazione richiede infatti un ben coordinato lavoro di gruppo, in grado di valorizzare le capacità di ogni singolo bambino. Ed ecco che la divisione dei compiti avviene quasi spontaneamente: chi ha senso pratico e assembla il robot, chi riesce ad astrarre i problemi e pianifica gli algoritmi, chi riesce a scrivere dei programmi e scrive il codice che permette al robot di eseguire il programma. In quest'attività, supervisionata dagli insegnanti, i ragazzi imparano a lavorare insieme.

Proporre questa attività nelle scuole richiede molto tempo e non sempre questo tempo si può sottrarre alle attività curriculari. Un'attività alternativa, che comunque dà ai bambini un'idea di come funzionano i robot e di come si potrebbero costruire è quella che annualmente viene proposta presso la Ludoteca Scientifica a Pisa mettendo a disposizione una collezione di giochi e strumenti creati per riprodurre, con uno spirito tutto galileano, gli esperimenti che hanno fatto la storia della scienza e degli scienziati (v. il sito <http://www.ludotecascientifica.it/>).

In quest'occasione presentiamo alcuni robot che abbiamo costruito per stimolare la fantasia dei piccoli, ognuno dei quali affronta e risolve un problema specifico.

Osservando il comportamento dei robot si stimolano i bambini a capire quali algoritmi sono stati utilizzati, coinvolgendoli in una sorta di reverse engineering. Un approccio simile rende possibile dare ai ragazzi, in tempi relativamente brevi, la possibilità di apprendere i rudimenti del funzionamento di un robot. Si dice loro che un robot, come un computer, raccoglie informazioni e le raccoglie tramite i sensori mentre, tramite una CPU, elabora automaticamente le informazioni, e tramite gli attuatori esegue le azioni che la CPU comanda (ad esempio si sposta da una parte all'altra di un tavolo).

Uno dei robot che mostriamo è la Falena, dotata di un comportamento bio-ispirato: il robot, che si muove su ruote, cerca la luce evitando gli ostacoli e i precipizi. I ragazzi si divertono a far seguire alla Falena la luce della torcia che hanno in mano, sperimentando che una volta portato il robot sul margine del tavolo, il robot si ferma e non cade. Questa semplice esperienza è sufficiente ad aprire una prima discussione, stimolata dalle domande degli incuriositi presenti.

Un altro spettacolo che lascia il segno nei nostri visitatori è legato a due robot, che abbiamo battezzato Romeo e Giulietta, i quali riproducono un comportamento sociale: i due robot, si cercano e si incontrano ... con una Giulietta che fugge e un Romeo che dopo un attimo di esitazione torna a cercare Giulietta per ricominciare il suo corteggiamento davanti agli occhi meravigliati degli spettatori. Come fanno a trovarsi? Questa e altre domande innescano animate discussioni.

Ricordiamo inoltre il robot Teseo, nato per uscire da qualsiasi labirinto che i ragazzi gli costruiscano sul tavolo a disposizione, con apposite assi di legno. Il nostro Teseo lo percorre fino a trovarne l'uscita, facendo nascere nuove domande su come è fatto l'algoritmo che permette a Teseo di cavarsela ogni volta. Infine permettiamo ai ragazzi di essere loro a programmare un altro robot, utilizzando un linguaggio studiato appositamente per far compiere semplici movimenti. Essendo di immediata comprensione, il linguaggio è accessibile anche a bambini che non abbiano mai programmato prima, come testimoniato dal seguente frammento di codice per disegnare un quadrato:

```
Funzione quadrato
  ripeti 4
  finchenonostacolo avanti
    avanti 5
  fine
  seostacolo sinistra
    destra
  fine
finefunzione quadrato
```

L'attività di programmare un robot consente di avere un riscontro immediato e concreto della bontà del programma sviluppato, permettendo quindi di aggiustare gradualmente il tiro. Inutile dire che ottenere il comportamento desiderato dopo qualche tentativo riempie i ragazzi di soddisfazione. Una conferma dell'efficacia di questa attività dal

punto di vista didattico è data dalla constatazione che, davanti ai robot della Ludoteca, la distinzione tra i ragazzi più bravi e gli altri sembra quasi annullarsi, con meraviglia degli insegnanti.

OLIMPIADI DI INFORMATICA: LE GARE DI PROGRAMMAZIONE COME STIMOLO PER L'AUTOAPPRENDIMENTO

ROBERTO GROSSI

Dipartimento di Informatica, Università di Pisa

Le Olimpiadi Internazionali di Informatica (IOI: International Olympiad in Informatics) nascono in Bulgaria nel 1989 su iniziativa e con il patrocinio dell'UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) e da allora si sono svolte con cadenza annuale. Per quanto riguarda l'informatica, si tratta della gara più importante e prestigiosa rivolta a studenti delle scuole secondarie superiori. L'obiettivo è quello di individuare i possibili talenti di questa disciplina, incoraggiarli e metterli in contatto con le realtà culturali di altri paesi, attraverso una competizione di alto livello e di carattere mondiale.

La prossima edizione, la ventitreesima, si svolgerà a Pattaya, in Thailandia, dal 22 al 29 luglio 2011. Ogni paese può partecipare con una squadra di non più di quattro studenti. La gara è individuale: il concorrente affronta in due giorni distinti, avendo a disposizione cinque ore al giorno, tre problemi di natura algoritmica e di problem solving. Trascorre poi i restanti cinque giorni in attività socio-culturali. La premiazione avviene a fasce – per cui la metà dei partecipanti ottiene una medaglia: precisamente, un quarto dei partecipanti vince la medaglia di bronzo, un sesto quella d'argento e un dodicesimo la medaglia d'oro. Il sito ufficiale delle IOI è www.ioinformatics.org.

Tra gli ottanta paesi partecipanti c'è anche l'Italia. La nostra partecipazione alla gara è iniziata nel 2000, anno in cui la competizione ha ricevuto il supporto scientifico ed economico da parte del MIUR (Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca) e dell'AICA (Associazione Italiana per l'Informatica e il Calcolo Automatico) che ne fu la iniziale promotrice, riconoscendo l'alto valore educativo di tale iniziativa come strumento di sviluppo dell'informatica.

Agli obiettivi generali delle IOI si affianca quello di stimolare l'interesse dei giovani verso gli aspetti scientifici dell'informatica e le tecnologie informatiche, nonché di contribuire alla loro conoscenza e alla loro diffusione nelle scuole italiane. In concreto, il "Comitato Olimpico", struttura paritetica MIUR-AICA, definisce l'organizzazione della gara e il Gruppo dei Selezionatori Nazionali (ovvero gli "allenatori") si occupa della formazione scientifica e del processo di selezione degli studenti per la gara internazionale. Dal 2002 in poi, il Comitato Olimpico ha istituito le OII, "Olimpiadi italiane di informatica" che si svolgono contestualmente con il processo di selezione. Il cammino

verso la selezione e la preparazione della squadra italiana si svolge durante tutto il corso dell'anno ed è organizzato in quattro fasi di selezione:

- scolastica, in cui vengono scelti un migliaio di studenti tra gli oltre 10.000 partecipanti;
- regionale, in cui vengono scelti 80 studenti tra il migliaio a disposizione;
- nazionale, in cui viene svolta la gara (appuntamento, nazionale), denominata Olimpiadi Italiane di Informatica, individuandone i vincitori e selezionando in totale un gruppo di 15 studenti chiamati "Probabili Olimpici".
- olimpica, in cui vengono scelti i 4 componenti della squadra italiana per partecipare alle IOI, più 2 riserve, scelte tra i 15 Probabili Olimpici dopo un periodo di allenamento e formazione, sia in presenza sia telematica, con i Selezionatori Nazionali.

In generale tutte le olimpiadi scientifiche (ricordiamo quelle di altre discipline come astronomia, biologia, chimica, fisica e matematica) che si svolgono nelle nostre scuole non sono soltanto un semplice motivo di orgoglio, ma rappresentano anche un'importante cartina di tornasole per valutare la diffusione della cultura scientifica nelle scuole superiori e quindi delle generazioni future.

Lo stato dell'insegnamento dell'informatica nelle scuole superiori italiane non è certamente fra i migliori: a parte gli istituti tecnici specialistici e alcuni licei sperimentali, l'insegnamento è pressoché assente, né l'ultima riforma ha realizzato la svolta che si sperava: gli istituti tecnici di informatica e gli istituti sperimentali confluiranno infatti nelle otto tipologie di liceo (dal classico al tecnologico) ... ove l'informatica sembra mancare! Peccato, perché la cultura informatica, intesa in senso lato, come disciplina che insegna a ragionare, e non ridotta alla mera capacità di usare il computer, rappresenta l'irrinunciabile lasciapassare per un futuro sempre più digitale. E sono proprio i ragazzi delle scuole superiori i migliori candidati per acquisire questa cultura ed integrarla con le altre, che non devono essere viste in contrapposizione.

Ma se Sparta piange ... anche negli Stati Uniti ci si lamenta dell'insufficiente preparazione che le scuole forniscono. Negli ultimi anni si è accesa, infatti, un'intensa discussione in diversi forum e riviste (cfr. slashdot.org, CNET News.com e Communication of the ACM), in merito all'andamento della squadra statunitense nelle gare ACM-ICPC (ACM International Collegiate Programming Contest) organizzate dall'ACM, che sono analoghe a quelle delle nostre IOI.

Nel presente intervento abbiamo cercato di dare un'idea dell'aspetto organizzativo e del significato delle Olimpiadi di Informatica ma ci sembra anche importante dare un'idea della difficoltà dei problemi che i ragazzi sono chiamati a risolvere. Per fare un solo esempio, consideriamo il problema denominato "Fish", che è stato assegnato nell'edizione internazionale delle IOI 2008 in Egitto. Si parte da una situazione iniziale in cui c'è un numero N di pesci, ciascuno con una perla nel proprio stomaco. Non tutte

le perle sono dello stesso tipo, ma ci sono P tipi differenti di perle. Pesce grande mangia pesce piccolo: la regola qui si applica quando la taglia del pesce grande è almeno il doppio della taglia di quello piccolo, altrimenti non può mangiarlo. Poiché le perle non vengono mai digerite, il pesce ingerisce anche le perle del pesce piccolo che mangia. Con il tempo, i pesci accumulano perle quando mangiano via via i pesci più piccoli. Le combinazioni possibili sono moltissime e generano configurazioni per cui lo stesso numero di perle, divise per ciascuno dei P tipi, possono apparire più volte. Il problema è: quante configurazioni distinte di perle è possibile ritrovare all'interno dei pesci? La soluzione è piuttosto complessa ma veloce, a fronte del fatto che ci sia un'esplosione combinatoria delle possibili configurazioni, e può essere reperita in <http://ioinformatics.org/locations/ioi08/contest/IOI2008Booklet1.0.pdf>.

ESPERIENZE SCENICHE DI DIFFUSIONE DELLA CULTURA INFORMATICA

ROMEO CRAPIZ

GIUSEPPINA TRIFILETTI

Liceo Copernico di Udine

In questo intervento si darà conto di due esperienze sceniche: la prima, NOUMA, svoltasi presso il Liceo Scientifico Statale Niccolò Copernico di Udine. La seconda, L'ALGORITMO DI ULISSE, presso l'Università delle LiberEtà di Udine, un'istituzione che si dedica all'educazione permanente degli adulti di tutte le età.

1. NOUMA

L'evento scenico NOUMA è uno dei risultati finali di un'attività che si è sviluppata dall'anno scolastico 2002-3 al 2007-8 nelle classi aderenti al PNI (Piano Nazionale Informatico) del Liceo Scientifico Statale Niccolò Copernico di Udine, postosi come capofila di una rete di scuole secondarie superiori della Provincia di Udine, in collaborazione con il Dipartimento di Matematica e Informatica dell'Università di Udine.

Quest'attività si è risolta nella produzione di un *game-book* informatico (2006), nella pubblicazione di un volume (2008) contenente una parte significativa dei materiali elaborati nel corso della realizzazione del *game-book*, e nel testo scenico NOUMA rappresentato fra il 3 e l'8 settembre 2007 al Liceo Copernico e il 13 luglio 2008 al Mittelfest, un importante festival internazionale che si svolge a Cividale del Friuli.

Il tratto distintivo di tutte queste iniziative, che hanno coinvolto insegnanti dell'area umanistica e scientifica, è stato la multidisciplinarietà finalizzata alla promozione e all'arricchimento della cultura informatica. Gli obiettivi che ci si è posti sono stati:

- far incontrare e dialogare le “due culture”, scientifica e umanistica, cercando di conciliare i valori della scienza (oggettività, precisione, rigore ...) con quelli dell'arte (soggettività, emozione, suggestione ...);
- suscitare l'interesse per le problematiche del metodo e della ricerca scientifica soprattutto nell'ambito matematico-informatico;
- potenziare le chiavi di lettura della realtà, sollecitando anche riflessioni sulla collocazione dell'uomo nel mondo a seguito della diffusione sempre più pervasiva delle nuove tecnologie incentrate sull'intelligenza artificiale;
- sottolineare l'impatto del paradigma informazionale sulla scienza, l'arte, la realtà, la quotidianità.

Nello specifico, attraverso l'evento scenico NOUMA ci si è proposti inoltre di:

- coniugare scienza e spettacolo, trasmutando la scienza in poesia e rivitalizzando l'invenzione letteraria con l'apporto della matematica e dell'informatica;
- divertirsi ragionando e ragionare divertendosi;
- sviluppare il pensiero algoritmico;
- salvaguardare le ragioni della scienza e quelle del teatro (spettacolarità, linguaggi, emozioni, coinvolgimenti).



Figure 1-3. Alcuni momenti dello spettacolo: "magie", enigmi e rompicapi.

Lo spettacolo racconta la storia che faceva da supporto al *game-book* di cui si è detto: è quella dell'uccisione di Iutinto, un membro del Club Negami, da parte di un robot, NOUMA, particolarmente sofisticato e simile a un essere umano. NOUMA era stato costruito da un gruppo di studenti di Informatica, denominato Gruppo Cia e custodito gelosamente all'interno del loro laboratorio-labirinto. Sul delitto indagano, secondo procedure investigative differenziate, un amico del morto chiamato Threeman, la polizia guidata dalla Commissaria Nonda e i costruttori del robot con il loro leader Delusoman. È quest'ultimo a scoprire per primo il responsabile del delitto, avvenuto a causa di un errore di programmazione.

All'inizio dell'azione scenica, gli spettatori vengono suddivisi in modo casuale in tre gruppi di 15 e, dopo un breve prologo, vengono guidati dagli attori lungo tre percorsi diversi, che corrispondono ai tre diversi metodi investigativi e che si snodano attraverso spazi labirintici. Lungo il percorso ciascun gruppo apprende storie diverse e punti di vista divergenti sull'accaduto, ma viene anche contemporaneamente coinvolto in giochi e rompicapi di varia natura; solo per citarne alcuni, la *conta* per anticipare un esito, giochi con le carte o con i numeri per simulare magie, pesate con una bilancia a equilibrio per risolvere un problema con una strategia ottimale, formalizzazione in diagrammi di flusso di riti e preghiere, crittografie, anagrammi e giochi di parola, giochi di logica, fino all'uso di una "macchina poetica" che compone *limerick*. Alla fine dei tre percorsi tutti gli spettatori convergono nell'ufficio della Commissaria di polizia, Nonda. Qui tutte le tessere della storia sono ricomposte, il caso viene risolto e viene emesso un verdetto che pone il pubblico davanti al dilemma: di chi è la responsabilità di un delitto commesso da una macchina dotata di intelligenza artificiale?

Nel complesso, la vicenda e le situazioni proposte sollecitano anche la riflessione sul paradigma indiziario, sul metodo abduittivo, sulla correlazione fra ricerca dell'errore

di programmazione – *debug* – e ricerca di un assassino, sulla dialettica tra sintassi e semantica nel campo della teoria dell'informazione, sulla combinatoria, sulla natura dell'intelligenza, sulla distinzione fra uomo e macchina e sui rapporti emotivi e sentimentali che possono instaurarsi fra di essi.

L'informatica assume nello spettacolo un ruolo centrale, per la sua attualità, perché ci propone modi originali di interpretare la realtà. L'accezione *strumentale* che prevale nel senso comune relega generalmente l'informatica nell'ambito tecnologico, associandola allo sviluppo di artefatti particolarmente raffinati e complessi. Questa visione è diventata predominante anche nella scuola, che frequentemente ha finito per trascurarne le implicazioni dal punto di vista scientifico, filosofico e culturale, aspetti che invece vengono sottolineati nella rappresentazione teatrale.



Figure 4–6. Alcuni momenti dello spettacolo: indagini, uomini e macchine.

Nei seguenti 1.1 e 1.2 sono brevemente descritte alcune situazioni in cui il pubblico è stato coinvolto durante la rappresentazione.

1.1 I giochi di parole, l'ambiguità del linguaggio, la macchina poetica, l'importanza del contesto

Nel giallo viene data importanza ai giochi linguistici perché permettono di imparare a smontare e a rimontare il linguaggio [1, 5]. Infatti, la combinatoria e i giochi di parole aiutano a capire come funziona il linguaggio e le regole che nasconde, suggerendo anche come riprodurlo artificialmente. Si pensi poi alle riflessioni anticipatrici di Italo Calvino sulla “macchina narrante”:

una macchina scrivente, in cui sia stata immessa un'istruzione confacente al caso, potrà elaborare sulla pagina una personalità di scrittore spiccata e inconfondibile [...] la macchina potrebbe collegare i propri cambiamenti di stile alle variazioni di determinati indici [1].

Oppure si guardi alle sperimentazioni combinatorie dell'*Oulipo* [5]. Il gioco tra sintassi e semantica inoltre cerca di scoprire in quali pieghe del linguaggio si nasconde il significato, per divertire, ma anche al fine di riprodurlo artificialmente. La differenza essenziale tra i linguaggi artificiali e naturali è nella semantica. “Sono stato al cinema, ho visto Monica Bellucci”, “La vecchia porta la sbarra” sono frasi ambigue. Noi siamo quasi sempre capaci di capire il significato corretto delle frasi ambigue, ma un robot si troverebbe in grave difficoltà. L'ambiguità, che permea la comunicazione tra gli esseri umani, offre però la possibilità di esprimere ironia, poesia ... [2].

1.2 La maga Gropatia e i numeri spioni

Una maga (dice di essere una sensitiva) racconta di avere un rapporto del tutto particolare con i numeri: la mettono in comunicazione con chi li possiede e le raccontano con quale tipo di persone ha a che fare. “I numeri” – dice – “hanno il potere di rivelare il senso della realtà”.

Gropatia chiede a uno del pubblico di scegliere sei persone tra i presenti e di ordinarle: I, II, III, IV, V, VI; fatto questo, gli chiede di distribuire a cinque di loro 8 piccoli cartoncini rettangolari, che sostituiscono monete, sui quali deve scrivere il loro peso, ad esempio “5 grammi”, senza metterla al corrente delle scelte. Al rimanente però, a scelta del pubblico, devono essere consegnati 8 cartoncini con un peso diverso. Solo un grammo in più o in meno, raccomanda la maga, del peso esatto che, fa presente al pubblico, lei non conosce. A quest'ultimo, quindi, vengono dati cartoncini (monete false) con scritto 4 invece di 5, sempre all'insaputa della maga. La sensitiva dice poi all'aiutante di prendere una moneta dal primo, due dal secondo, e così di seguito, $1+2+3+4+5+6$, 21 monete in tutto. Gli chiede di riferirle la somma dei pesi di tutte le monete. Questi simula la bilancia sommando tutti i numeri presenti sui cartoncini e trova come somma 101. A questo punto la sensitiva strepita dicendo che il numero 101 le indicherà con estrema chiarezza chi dei sei ha le monete false. Ella si ritira per cogliere bene il messaggio che il numero vuole trasmetterle. Dopo qualche minuto si rivolge al pubblico e indica la persona seduta al IV posto come colei che ha le monete false [3].

Una vera maga! Come l'ha capito? Gropatia è sì una maga, ma dei numeri. Il suo nome ricorda infatti qualcuno, chi? È l'anagramma di un famoso matematico, filosofo, guaritore e anche mago (così dice la leggenda). Ella nei pochi minuti in cui si ritira a riflettere fa rapidamente alcuni calcoli. Trova che 17 è il resto della divisione tra 101 e 21. Dato che il resto è 17 il falsario deve essere il quarto. Perché? Se il resto fosse stato 20 il falsario sarebbe stato il primo (un solo grammo in meno), se fosse stato 19 il secondo (due grammi in meno), se 18 il terzo, se 17 il quarto, se 16 il quinto, se 15 il sesto. Se invece le monete false pesassero 1 grammo in più allora il resto potrebbe essere 1 (una sola moneta falsa) e pertanto il falsario sarebbe il primo, col resto 2 (due monete false) il falsario sarebbe il secondo, col resto 3 (tre monete false) il falsario sarebbe il terzo e così via. A Gropatia basta che venga effettuata una sola pesata quindi per scoprire chi ha le monete false.

Gropatia procede nel modo seguente:

1. memorizza il numero di persone n ;
2. calcola il numero totale di monete: $S=1+2+3+4+\dots+n$, $S = n(n+1)/2$;
3. memorizza il peso effettivo T di tutte le monete;
4. sa che se il peso giusto di una moneta è p , il peso giusto di tutte dovrebbe essere $S \cdot p$, cioè un numero divisibile per S ;
5. sa che i resti della divisione tra il peso trovato T e il numero totale di monete

S potrebbero essere: 1, 2, 3, 4, ..., n se le monete false pesassero 1g in più, oppure S-1, S-2, S-3, ..., S-n, se pesassero 1g di meno;

6. a questo punto la maga fa la divisione tra T e S e tiene conto solamente del resto. Se il resto è 1 o S-1 allora il falsario è la persona I, se il resto è 2 o S-2 allora è la persona II, e così via. Infatti, se le monete false pesano 1 grammo di più si può scrivere $T=S \cdot p+x$, ($1 \leq x \leq n$, $S > n$), quindi il resto della divisione di T per S è ovviamente x e questo significa che può variare da 1 ad n compresi. Se invece le monete false pesano 1 grammo di meno allora si ha $T=S \cdot p-x$, ma, dato che -x non può essere un resto, bisogna scrivere $T=S \cdot (p-1)+S-x$ e quindi il resto è S-x e può variare da S-1 a S-n compresi.

2. L'algoritmo di Ulisse

Anche questa rappresentazione si è proposta lo scopo di diffondere la cultura matematica e informatica mediante l'incontro fra letteratura e scienza. Negli schemi della tragedia classica viene narrata la vicenda mitologica della guerra di Troia, cui tutti i re della Grecia si sono accinti dopo la fuga di Elena da Sparta al seguito di Paride, figlio di Priamo, re di Troia. Secondo un oracolo, i Greci non avrebbero mai riportato la vittoria se alla spedizione non avesse partecipato anche Achille. Ma Achille era scomparso. La madre Teti, sapendo che, se avesse preso parte alla guerra contro Troia, vi avrebbe incontrato la morte, dall'età di nove anni lo aveva nascosto nell'isola di Sciro, alla corte del re Licomede, celato fra le 16 figlie del re in abiti femminili e col falso nome di Pirra. Come stanarlo? I greci fecero ricorso a Ulisse il quale – narra la leggenda – arrivato alla reggia di Licomede, con uno stratagemma esibì davanti al coro delle sue figlie uno splendido scudo e una lancia e fece suonare una tromba di guerra, ridestando gli spiriti guerreschi di Achille, il quale imbracciò irresistibilmente queste armi; ma in questo modo rivelò il suo vero sesso e la sua identità, e non poté fare a meno di partire per Troia.

Noi abbiamo immaginato che Ulisse, invece di far ricorso allo stratagemma delle armi per scoprire Achille, elaborasse uno speciale algoritmo [4]; da qui il titolo della rappresentazione. Essa però, oltre a proporre un algoritmo, in vari passaggi offre anche altri contenuti di natura matematica e informatica, quali la distribuzione di un liquido in parti uguali con il minor numero di travasi utilizzando 3 contenitori di data capacità, un gioco combinatorio - numerico per scoprire quali numeri si nascondono in 5 anfore, crittogrammi e giochi di parole.

L'ALGORITMO DI ULISSE è stato rappresentato scenicamente tramite una danza: *la danza della divinazione binaria*.

Il re Licomede ha 16 figlie. Ulisse fa disporre le figlie del re Licomede, tra le quali si nasconde Achille, su due file da 8. Il re deve rispondere a 4 domande sempre uguali che Ulisse gli rivolgerà: "Achille si nasconde nella prima fila?". Le fanciulle non verranno in nessun caso allontanate, rimarranno sempre 16, sempre distribuite su due file di 8, ma in base alle risposte del re cambierà la loro posizione nelle due file.



Figura 7. Un momento della danza della divinazione binaria.

L'algoritmo è il seguente (può essere invertito l'ordine tra il punto 3 e il punto 4).

Inizio

Per 3 volte:

1. Ulisse domanda a Licomede
"Achille si trova nella prima fila?";
2. separazione,
– le prime quattro delle due file si separano dalle altre quattro in modo da formare due colonne di due file di quattro: una fila in gioco e una eliminata in ogni colonna;
3. inserimento con alternanza,
– le quattro eliminate si inseriscono tra le quattro della fila in gioco in modo da formare, dalle due parti, due nuove file di otto (al primo posto delle due nuove file ci devono essere sempre due fanciulle in gioco).
4. incolonnamento
– le principesse si incolonnano in modo da formare due nuove file da 8 come all'inizio.

Ulisse per la quarta volta fa la domanda a Licomede: "Achille si trova nella prima fila?"

Se la risposta del re Licomede è sì,
allora Achille è il primo della prima fila,
altrimenti Achille è il primo della seconda fila

Fine

Per capire meglio, seguono alcune immagini che rappresentano l'algoritmo di Ulisse con 8 carte. Un giocatore sceglie una carta, un prestigiatore deve indovinare qual è dopo aver rivolto al giocatore per tre volte sempre la stessa domanda: "La carta si trova nella prima fila?"

Dopo la prima risposta inizia la prima danza, cioè il primo spostamento di carte (Figura 8).

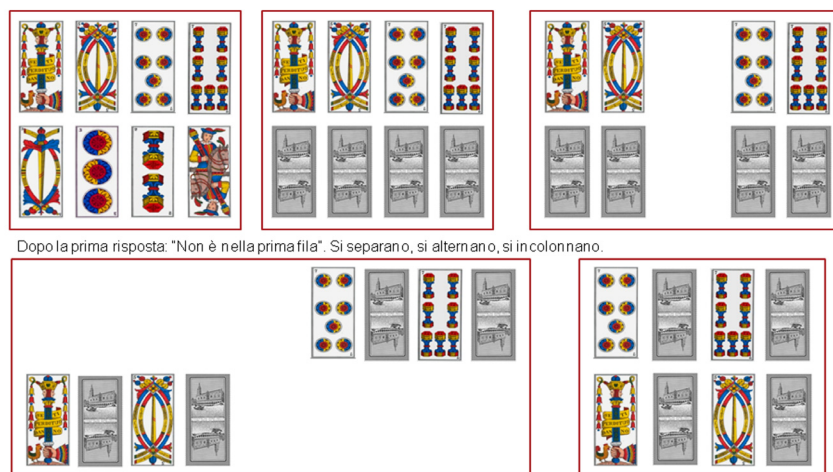


Figura 8.

Inizia ora la seconda danza, cioè il secondo spostamento di carte (Figura 9).

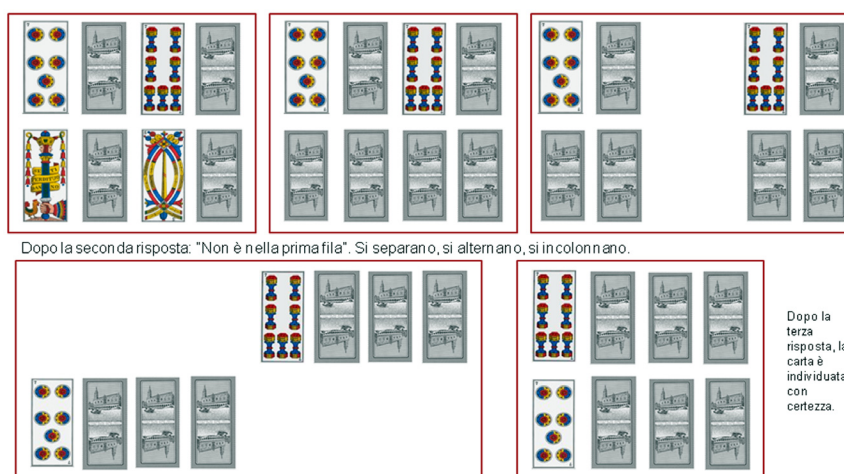


Figura 9.

Se le principesse, o le carte, non fossero una potenza di due, per esempio se fossero 10, allora si dovrebbe fare, nel caso più sfortunato, 4 domande al giocatore, perché 10 è più grande di 8 ma più piccolo di 16. Se il numero è esattamente una potenza di 2, allora, al penultimo passaggio, le ultime due ancora in gioco si trovano sempre al primo posto delle due file. Se invece il numero degli oggetti inizialmente in gioco non è una potenza di 2, allora le ultime due fanciulle non è detto che si trovino al primo posto delle due file ... Le cose si complicano ... però Achille, o la carta, verranno comunque individuati.

Di seguito è raffigurato l'albero dell'algoritmo nel caso in cui le principesse (o le carte) siano 10. La domanda di Ulisse è sempre la stessa: "Achille si trova nella prima fila?" (Figura 10).

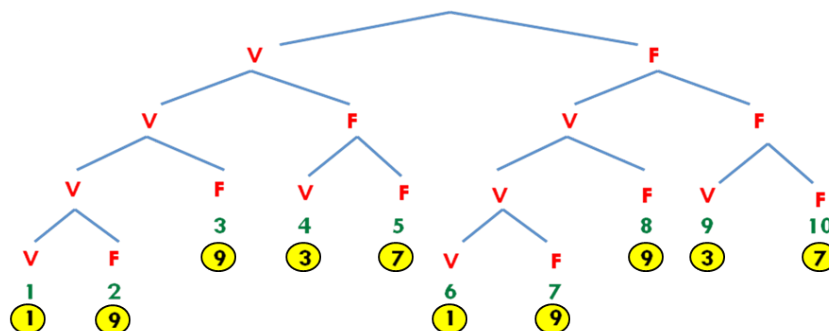


Figura 10. L'albero per 10 carte.

La risposta del re sarà un semplice sì (vero = V) oppure no (falso = F). In questo caso le situazioni finali sono cinque ($10:2 = 5$). Achille si può trovare al posto 1 o al posto 9 se servono quattro domande per poter concludere con certezza; al posto 3, 7 oppure 9 se bastano tre sole domande. In verde, sopra le posizioni finali in giallo, sono indicati i posti che Achille avrebbe dovuto occupare nei vari casi. Se Achille all'inizio si trovava nel posto 1 o nel posto 6, alla fine si troverà nel posto 1 dopo quattro risposte e tre danze. Se si trovava nel posto 2 o 7 alla fine si troverà nel posto 9 dopo quattro risposte e tre danze. Se si trovava nel posto 3 o 8 alla fine sarà nel posto 9 però dopo solo tre risposte e due danze. Se si trovava nel posto 4 o 9 alla fine sarà nel posto 3 dopo solo tre risposte e due danze. Se si trovava nel posto 5 o 10 allora alla fine sarà nel posto 7 dopo solo tre risposte e due danze.



Figura 11.

Nell'immagine (Figura 11) sono rappresentati gli algoritmi, ricavati dagli alberi binari sintetizzati, nel caso di 10 e di 16 oggetti, che riproducono in forma di *grafollane* i vari percorsi e i risultati finali. Ma la maga o il mago, che devono indovinare la carta pensata dal giocatore, possono anche incidere sul loro braccio un tatuaggio (Fig. 12), che è un

altro modo molto essenziale di rappresentare l'algoritmo di Ulisse. Il tatuaggio rappresentato in figura si riferisce all'algoritmo con 40 carte ed è in generale di notevole aiuto nel caso in cui il numero di carte non sia una potenza di 2. Con 40 carte ($32 < 40 < 64$) ci sono 5 possibili risultati (infatti $40:8=5$): 1 o 33 dopo 6 risposte; 9, 25 o 33 dopo 5 risposte. Le prime tre risposte non hanno influenza sul risultato ma solo sulla danza, sugli spostamenti quindi, non serve memorizzarle per individuare la carta cercata.



Figura 12. Il tatuaggio della maga per il gioco con 40 carte.

Ma non è finita qui. Sempre (naturalmente) giocando, si può approfondire ancora. Se il numero di carte è N ed è una potenza di 2, il posto che occuperà la carta scelta alla fine del gioco, se gli spostamenti di carte saranno quelli descritti, sarà sempre o il posto 1 o il posto $1+N:2$. Se la carta scelta è inizialmente in un posto dispari andrà alla fine a occupare il posto 1 e se occupa un posto pari la sua posizione finale sarà $1+N:2$. Perché?

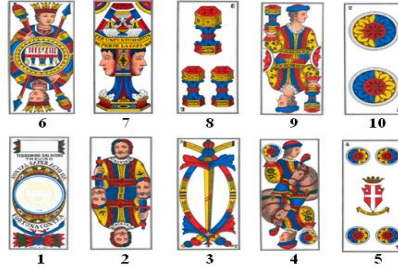
E ancora: se è vero che la maga può non memorizzare tutte le risposte e comunque riesce a individuare la posizione finale della carta scelta, è anche vero però che, se vuole individuare quale era la posizione che la carta scelta occupava all'inizio, deve memorizzare la stringa delle risposte. Per esempio, se nel caso di 40 carte la stringa delle risposte è VVVFV, cioè I fila, I fila, II fila, I fila, II fila, allora le carte che rimarranno in gioco ad ogni risposta sono 1-20, 1-10, 6-10, 6-8, 8, quindi la carta inizialmente si trovava nel posto 8 e alla fine si troverà nel posto 33, resto della divisione $(8 \cdot 16 - 15) : 40$.

Ma, bisogna anche dire che, se l'eventuale prestigiatore ha molta memoria e sa fare i calcoli, può fare a meno sia delle grafollane sia dei tatuaggi ... Esiste un *procedimento*, che una macchina riuscirebbe a fare meglio del prestigiatore, per cavarsela in tutte le situazioni che potrebbero verificarsi con un mazzo di 40 carte. Teniamo presente che, se il numero di carte è pari, la carta che occupa inizialmente il posto n , dopo ogni spostamento occuperà il posto $2n-1$...

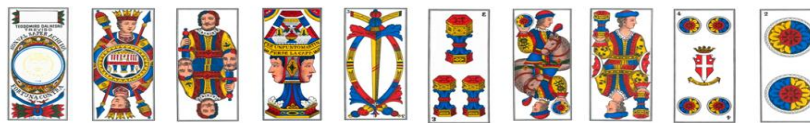
Alla fine dell'evento scenico, alcune maghe hanno intrattenuto il pubblico facendo giocare i volontari con l'algoritmo di Ulisse variando il numero di carte in gioco. Provate anche voi! Ci sono tante altre cose da scoprire!

L'ALGORITMO DI ULISSE CON 10 CARTE

Domanda del mago: "La carta che hai scelto è nella prima fila?". Risposta: "Sì".



INSERIMENTO CON ALTERNANZA
della fila eliminata nella fila in gioco iniziando dalla prima della fila in gioco



SEPARAZIONE E NUOVO INCOLONNAMENTO.
Seconda risposta alla stessa domanda: "Non è nella prima fila".



INSERIMENTO CON ALTERNANZA
della fila eliminata nella fila in gioco iniziando dalla prima della fila in gioco



SEPARAZIONE E NUOVO INCOLONNAMENTO.
Terza risposta alla stessa domanda: "Non è nella prima fila".



A questo punto si può concludere con certezza che la carta scelta dal giocatore è il 4 DI DENARI che si trova NEL POSTO 7.

Se si riguarda l'albero binario per le 10 carte, si può osservare che percorrendo il ramo VFF si trova in verde il 5 e in giallo il 7: questo significa che la carta scelta occupava inizialmente il posto 5 e alla fine il posto 7. Anche se si percorre il ramo della grafollana 10 - BIANCO, BLU, BLU - si trova alla fine il 7. Nelle grafollane il BIANCO sta per INDIFFERENTE (ai fini del risultato), il ROSSO sta per VERO (si trova nella I fila) e il BLU sta per FALSO (non si trova nella I fila).

Figura 13.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Calvino, I., *Cibernetica e fantasmi. Appunti sulla narrativa come processo combinatorio*, in *Nuova Corrente*, 1967; ripubblicato in Id., *Saggi*, Mondadori, Milano 1995.
- [2] R. Crapiz, R., Trifiletti, G., a cura di, *NOUMA: giallo informatico*, – libro e DVD con i filmati dell’evento teatrale, Pubbl. Liceo Scientifico “N. Copernico”, Udine 2008.
- [3] Gardner, M., *Enigmi e giochi matematici*, Rizzoli, Milano 1987.
- [4] Honsell, F., Bagni, G. T., *Curiosità e divertimenti con i numeri*, Aboca Edizioni, Sansepolcro Arezzo 2009.
- [5] Oulipo, *Atlas de littérature potentielle*, Gallimard, Parigi 1988.

Il progetto
"Extreme Energy Events" (EEE)
un'esperienza di collaborazione tra scuole
e tra scuola e università

INTRODUZIONE¹

GLORIA SPANDRE

INFN, sezione di Pisa

MARCO MARIA MASSAI

Dipartimento di Fisica 'Enrico Fermi', Università di Pisa

1. Perché Scienza?

Nei confronti della scienza è facile incontrare nell'uomo di oggi un atteggiamento che può oscillare tra due estremi: timore della sua potenza, al servizio di chi non condivide gli stessi ideali, oppure ammirazione quasi mistica e fiducia illimitata nelle sue potenzialità. Comunque sia, viene riconosciuto alla scienza un ruolo cruciale per il futuro.

Ma non sempre la scienza è stata al centro delle speranze e delle paure dell'uomo. Anzi, possiamo riconoscere nel lungo passato dell'umanità, nei diversi luoghi in cui sono nate e si sono sviluppate le diverse civiltà, una costante assenza del ruolo giocato dalla scienza. Altre forze hanno avuto invece una parte più importante ed esercitato spinte ben più poderose: la fede, il desiderio di conquista, il bisogno di nuovi spazi per crescere e la conquista di nuovi mercati per l'economia.

Solamente negli ultimi quattro secoli, e solamente in Europa, è apparso chiaro il ruolo che le conquiste scientifiche e lo sviluppo della tecnica stavano svolgendo per favorire il progresso dell'uomo e il miglioramento della qualità della sua vita. È stato a partire dall'opera di Galileo che la conoscenza scientifica e le competenze della tecnica sono andate crescendo, prima lentamente e poi sempre più velocemente grazie al lavoro di tanti ricercatori, taluni raggiunti dalla fama, i più rimasti nell'ombra. Nulla di simile era avvenuto prima di Galileo, forse con la sola eccezione del mondo greco-ellenistico, quando la scienza si sviluppò in molte discipline ma senza riuscire a mettere radici durature.

Come si pongono la scienza e la tecnologia rispetto ad altre attività dell'uomo?

La conoscenza dei meccanismi naturali che stanno alla base di molti fenomeni fisici o che spiegano il comportamento degli animali arricchisce non solo la cultura, ma permette all'uomo di godere del mondo che lo ospita con un maggiore grado di completezza; non solo emozioni quindi, e sensazioni che ciascuno prova di fronte alle mille possibili esperienze, ma anche una razionale comprensione di quel che non ap-

¹ Il convegno omonimo si è svolto a Viareggio, il 19 novembre 2010, nell'ambito di Pianeta Galileo. Non tutte le relazioni tenute nel corso del convegno sono presenti in questo volume di Atti.

pare e tuttavia agisce: dietro alla potenza del fulmine, così come davanti ai colori di un tramonto, sotto lo sfavillio delle stelle o nel volo di un gabbiano.

La comprensione di un fenomeno naturale arricchisce la nostra esperienza e, soprattutto, la rende più facilmente condivisibile con i nostri simili. Ecco che allora possiamo vedere la conoscenza scientifica sotto una duplice, nuova, luce: strumento che ci permette di rendere più ricca e piacevole l'esperienza, e denominatore comune col quale possiamo rinforzare il legame con gli altri uomini.

2. Scienza: ma come?

La scienza è come un bel castello, collocato in cima a un'erta collina dalla quale il panorama si allarga e spazia in lontananza, ma per raggiungere il quale sono necessari tempo, fatica e applicazione che rendono questa salita privilegio di pochi.

Questa fatica può essere resa meno gravosa se il percorso viene scelto con intelligenza e se si riesce a ricevere, strada facendo, una gratificazione dai piccoli passi fatti, di volta in volta, in avanti.

Il Progetto EEE (Extreme Energy Events) può essere visto anche da questa particolare angolatura: un modo piacevole, stimolante e coinvolgente, anche se non semplice, di entrare nei meccanismi che sono alla base della scienza. La presente giornata di studi è un piccolo, benché significativo, episodio nel Progetto EEE e ha come obiettivo (ambizioso) quello di proporre un viaggio all'interno della ricerca scientifica, con modalità e strumenti direttamente riconducibili al lavoro dei professionisti della ricerca: scienziati, tecnici e ricercatori al lavoro su una misura di fisica fondamentale.

3. Descrizione di EEE

Costruire con le proprie mani un rivelatore di particelle, anzi, un telescopio formato da tre rivelatori posti uno su l'altro, rivelare i raggi cosmici che arrivano al suolo, misurarne la direzione di provenienza e l'istante del loro arrivo, cercare le coincidenze con rivelatori posti a chilometri di distanza: queste sono le tappe operative che i ragazzi che partecipano a EEE devono percorrere. E ogni tappa, una scoperta.

C'è l'hardware, cioè la struttura fisica dell'apparato, con gli annessi dispositivi elettronici che permettono di tradurre la misura di grandezze fisiche in numeri da fornire ai computer; e c'è il software, che permette di gestire sia l'acquisizione dei dati, sia la loro elaborazione. Infine, c'è la discussione sui risultati e c'è la loro interpretazione: un'esperienza che, quando maturerà, sarà vibrante e ricca di emozioni.

Ebbene, la scienza può anche suscitare reazioni emotive, non solo razionali ... Ma non è un esito immediato, data la complessità di quest'avventura, proprio come non lo è l'esito in un esperimento reale.

4. Scienza: con chi?

Oggi, non vi è ricerca importante che non veda la stretta collaborazione tra diversi istituti universitari, enti di ricerca, spesso di vari paesi nel mondo. Tale collaborazione si estende spesso a industrie pubbliche e private.

Anche il Progetto EEE si basa sulla collaborazione: in questo caso è la collaborazione tra le decine di scuole che hanno aderito, il Centro Fermi di Roma, che finanzia e coordina il lavoro, e le sezioni dell'INFN, distribuite su tutto il territorio nazionale, che seguono da vicino l'attività nelle scuole.

La scelta di dedicare a metà percorso una giornata per comunicare le cose già fatte e le altre che rimangono da fare, ma anche le esperienze di tanti ragazzi, è stata unanimemente accolta con entusiasmo dai docenti e dai ricercatori coinvolti.

L'inserimento di questo convegno nelle iniziative di Pianeta Galileo vuol essere una proposta rivolta ad altri insegnanti, studenti e ricercatori: un invito a mettersi in gioco su un progetto ambizioso e coinvolgente. Il convegno² del quale i contributi qui raccolti rappresentano una testimonianza, parziale ma non per questo meno significativa, è solo una tappa intermedia di un percorso ancora lungo: non siamo arrivati in cima alla collina ma sicuramente abbiamo posto le basi per proseguire il cammino.



Figura 1. La locandina del convegno sul Progetto EEE.

² Nel programma della giornata di studi ci sono stati anche interventi sui seguenti temi: fisica delle alte energie nell'era del Large Hadron Collider (Luigi Calligaris) e la CAEN nel Progetto EEE e nel territorio (Marcello Givoletti).

L'ESPERIENZA DELLE SCUOLE DI VIAREGGIO NELL'AMBITO DEL PROGETTO EXTREME ENERGY EVENTS (EEE)

BARBARA NATUCCI

Liceo Scientifico "Barsanti e Matteucci", Viareggio

Durante gli "Incontri di fisica" organizzati dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Sezione Laboratori Nazionali di Frascati, ebbi l'occasione di conoscere il Progetto EEE grazie ai ricercatori S. Miozzi e G. Bencivenni dei Laboratori, che già avevano portato nella nostra scuola "La fisica su ruote" nell'anno mirabile 2005.

Il progetto "La scienza nelle scuole: Extreme Energy Events (EEE)", ideato da Antonino Zichichi (Emerito dell'Università di Bologna), è stato avviato nel 2005 in collaborazione con l'INFN, il CERN (Organizzazione Europea per la Ricerca Nucleare), la Società Italiana di Fisica ed il Centro Fermi, sotto l'egida del Ministero per l'Università e la Ricerca Scientifica. Obiettivo principale del progetto è quello di portare la scienza nel cuore dei giovani, mettendoli in diretto contatto con la realizzazione di un esperimento scientifico di grande attualità: contribuire alla comprensione di come, dove e quando nascono i raggi cosmici.

EEE è infatti un esperimento per la rivelazione e lo studio dei raggi cosmici di alta energia attraverso l'utilizzo di telescopi per la rivelazione di particelle cariche (principalmente muoni, prodotti finali dello sciame di particelle prodotte dalla collisione di un raggio cosmico primario con il nucleo di un elemento presente in atmosfera) denominati Multigap Resistive Plate Chambers (MRPCs). Tali telescopi sono costruiti al CERN di Ginevra direttamente dagli studenti e insegnanti impegnati nel progetto, coadiuvati da personale del CERN, dell'INFN e del Centro Fermi, partendo da rivelatori ideati nell'ambito dell'esperimento ALICE (A Large Ion Collider Experiment) presso l'acceleratore LHC (Large Hadron Collider). I telescopi MRPC consentono anche di rivelare le coincidenze e le correlazioni temporali tra le diverse scuole, studiando gli sciami di particelle generati nell'atmosfera.

Questi rivelatori infatti sono stati pensati per ottenere la massima precisione possibile nella misura del tempo di volo delle particelle e raggiungono una risoluzione temporale, fino a oggi insuperata, di alcune decine di millesimi di milionesimi di secondo.

L'esperimento che prevede la disposizione dei rivelatori su una superficie di decine di migliaia di chilometri quadrati del territorio italiano, investe scuole di diverso indirizzo e di diverse regioni attraverso la partecipazione di studenti e insegnanti, non solo nella costruzione e installazione dei rivelatori, ma anche nella raccolta di dati e nell'analisi dei risultati – in sostanza, in tutte le diverse fasi dell'esperimento.

A Frascati, Miozzi e Bencivenni mi condussero a vedere l'allestimento delle camere presso il Liceo Scientifico Bruno Touschek di Grottaferrata (Roma) e la messa in funzione della complessa strumentazione che costituisce il telescopio a muoni. Mi colpì immediatamente il fatto che gli studenti partecipassero quotidianamente e responsabilmente alla raccolta di dati, alla gestione e al controllo della strumentazione.

Comunicai il mio entusiasmo per l'esperimento ai colleghi del Liceo e a D. Lucchesi, docente all'Istituto Nautico "Artiglio" di Viareggio, insieme al quale facemmo richiesta al Centro Fermi per essere inseriti nel numero assai ristretto delle scuole selezionate per l'attuazione del progetto EEE.

Oggi sono 32 le scuole medie superiori italiane che partecipano alla "caccia" ai raggi cosmici nel Progetto EEE: un progetto che vede coinvolti centinaia di studenti, da Torino a Catania, passando per Reggio Emilia, Bologna, L'Aquila, Cagliari, Lecce, Parma, Savona, Frascati, Grottaferrata, Teramo, Altamura, Bari, Grosseto, Catanzaro, Trinitapoli, Savona, cui si aggiungano i nostri studenti di Viareggio, lasciando sperare che nel prossimo futuro il progetto possa essere ulteriormente esteso a molte altre scuole e città.

Quali motivazioni ci hanno spinto ad aderire al Progetto EEE? Innanzitutto, per promuovere l'insegnamento della fisica moderna nella scuola e per completare la programmazione curricolare con un progetto a diretto contatto con la realtà dell'università e della ricerca. Era anche un'occasione unica per partecipare a un progetto nazionale di valenza internazionale. Agli studenti è data, infatti, la possibilità di entrare in un progetto di ricerca sui raggi cosmici di durata pluriennale che ha tutte le caratteristiche di un esperimento scientifico internazionale. Inoltre, questa iniziativa, che ha un elevato valore didattico e ha pure le caratteristiche di una vera ricerca condotta da studenti e docenti, supportati da fisici delle sezioni INFN coinvolte oltre che dal Centro Fermi, potrebbe auspicabilmente condurre a importanti risultati in un campo con molti aspetti ancora ignoti.

Si tratta di un'impresa entusiasmante che oltre alla valenza scientifica, propone un obiettivo di tipo sociale/culturale: per la prima volta, infatti, viene a crearsi una particolare opportunità di collaborazione fra profili scolastici differenti: le caratteristiche storico-didattiche diverse per ciascuna scuola coinvolta permetteranno, infatti, di organizzare un lavoro di squadra in cui il valore aggiunto sarà determinato proprio dagli apporti di abilità differenti e complementari.

La partecipazione al Progetto EEE è poi utile a favorire l'aggiornamento degli insegnanti sugli sviluppi della fisica, a favorire lo scambio di conoscenze ed esperienze sull'argomento tra docenti e ricercatori.

Infine, è un'ottima opportunità per lavorare in modo nuovo a fianco degli studenti fuori dall'aula in un rapporto paritario e ciò consente di conoscerli più a fondo e di scoprire, come infatti è stato, qualità che sui banchi di scuola potevano non emergere.

Il progetto è stato inserito da ben quattro anni nel POF delle scuole ed è una porta aperta verso la moderna ricerca scientifica che coinvolge gli studenti direttamente

e li responsabilizza. È un modo per dimostrare quale importanza abbia la fisica nella scienza odierna e quali legami ci siano tra la fisica del cosmo e variazioni climatiche che sconvolgono il nostro pianeta.

Il Progetto EEE si sviluppa attraverso le seguenti fasi principali:

- formazione continua degli studenti,
- costruzione dei rivelatori MRPC presso il CERN,
- verifica delle prestazioni dei rivelatori presso una sezione INFN,
- installazione del telescopio MRPC presso le scuole e messa a punto della strumentazione,
- raccolta dati e analisi.

Vediamo brevemente come la partecipazione al progetto sia stata realizzata congiuntamente dalle due scuole di Viareggio.

prima fase: organizzazione interna alle scuole

Percorso di formazione sugli aspetti scientifici e pratici del telescopio per raggi cosmici.

Formazione di un gruppo di lavoro in grado di affiancare i ricercatori nella fase di formazione degli studenti, installazione del telescopio nelle scuole e della successiva raccolta e analisi dei dati.

seconda fase: selezione degli studenti

La selezione è avvenuta tenendo conto delle seguenti caratteristiche: interesse verso il progetto, volontà, capacità, assiduità ai corsi e alle lezioni preparatorie, elevato rendimento scolastico e in concorsi (olimpiadi della fisica e della matematica).

terza fase: formazione

Partecipazione alle lezioni teoriche del progetto sui raggi cosmici, come di seguito elencate.

– Anno scolastico 2007/2008, presso Istituto Tecnico Nautico “Artiglio”:

elettromagnetismo (Francesco Celati),

fisica dei raggi cosmici, rivelatori MRPC e loro funzionamento (David Lucchesi),

relatività (David Lucchesi),

elettronica dei rivelatori per le alte energie (Marcello Givoletti, CAEN, Viareggio).

– Anno scolastico 2008/2009, attività formativa esterna:

i rivelatori di particelle e la visione del mondo subatomico (Giorgio Chiarelli, INFN, Pisa),

i raggi cosmici: messaggeri dell’Universo (Giorgio Chiarelli, INFN, Pisa),

obiettivi del progetto EEE (Franco Fabbri, LNF-INFN, Frascati),

i raggi cosmici, i rivelatori MRPC e la loro costruzione (Silvia Miozzi (LNF-INFN, Frascati).

– **Anno scolastico 2008/2009, presso Istituto Tecnico Nautico “Artiglio”:**

l’elettronica dei rivelatori MRPC (Franco Lari, Istituto Nautico “Artiglio” Viareggio),
i raggi cosmici (David Lucchesi),
relatività (David Lucchesi),
principi di conservazione (David Lucchesi),
simmetrie e invarianze (David Lucchesi).

– **Anno scolastico 2008/2009, presso Liceo scientifico “Barsanti e Matteucci”:**

teoria degli errori, analisi dati e problemi di FIT (Stefano Romani, Liceo scientifico “Barsanti e Matteucci”),
elementi di meccanica quantistica: righe spettrali, corpo nero, effetto Compton ed effetto fotoelettrico, elementi di fisica delle particelle e modello standard (Cristiana Corona, Liceo scientifico “Barsanti e Matteucci”),
relatività: invarianza della massa, principi di conservazione, annichilazione (Stefano Romani, Liceo scientifico “Barsanti e Matteucci”),
elettromagnetismo (Barbara Natucci, Liceo scientifico “Barsanti e Matteucci”),
fisica solare, formazione ed evoluzione stellare e supernovae (Fabrizio Ciabattari, Liceo scientifico “Barsanti e Matteucci”),
approfondimenti su temi di elettronica e fisica dei materiali (Biagio De Masi, Liceo scientifico “Barsanti e Matteucci”).

– **Anno scolastico 2008/2009, presso Istituto Tecnico Nautico “Artiglio”:**

È stato organizzato un ciclo di conferenze per l’Anno Internazionale della Astronomia, finalizzate al Progetto EEE, sui temi qui elencati.

Astrofisica

La nascita delle stelle (Daniele Galli, INAF-Firenze)

Le ultime fasi dell’evoluzione stellare (Marco Salvati, INAF-Firenze)

I buchi neri: le più potenti sorgenti di luce dell’Universo (Guido Risaliti, INAF-Firenze)

Origine dei raggi cosmici (Pasquale Blasi, INAF-Firenze)

Planetologia

Dinamica e fisica dei corpi minori del Sistema Solare (Alessandro Rossi, CNR-Pisa)

Se ci cade addosso il cielo: il rischio di impatti sulla Terra (Adriano Campo, Dipartimento di Fisica, Università di Alicante)

Astronomia

Galileo: la scoperta delle lune di Giove e le pre-osservazioni di Nettuno (Anna Nobili, Dipartimento di Fisica, Università di Pisa)

Fisica fondamentale

Universalità della caduta libera e principio di equivalenza: da Galileo a Newton, ad Einstein, alla odierna fisica fondamentale (Anna Nobili, Dipartimento di Fisica, Università di Pisa)

Fisica spaziale

La gara spaziale e i primi sbarchi umani sulla Luna (Luciano Anselmo, CNR-Pisa)

quarta fase: gli sviluppi

L'obiettivo principale di EEE, tramite opportune misure di coincidenza fra più rivelatori su base molto ampia, consiste nello studio di raggi cosmici di energie talmente alte che vengono definite "estreme". Si tratta in realtà di un obiettivo molto ambizioso che cerca di rilevare raggi cosmici con energie superiori a 10¹⁹ eV, corrispondenti a un flusso di particelle inferiore a 1 particella/km²/anno! Questo spiega la necessità di una base di rivelatori molto ampia, con l'interessamento di più scuole su più città. Le coincidenze vengono stabilite sincronizzando i tempi di arrivo ai diversi rivelatori tramite ricevitori del sistema Global Positioning System (GPS).

Gli "extreme energy events" sono portatori di messaggi ancora tutti da comprendere e, in effetti, nessuno conosce con certezza la loro origine. Ad esempio, sappiamo che:

- i raggi cosmici dovrebbero variare in funzione dell'attività solare e del campo magnetico solare che agisce come una sorta di schermo;
- poiché c'è un legame tra raggi cosmici e macchie solari e poiché le macchie solari hanno effetti sul clima, dovrebbe esserci un legame tra raggi cosmici e clima.
- in particolare, dovrebbe esserci una relazione tra periodi di glaciazione e ingresso della Terra in zone in cui aumenta il flusso di raggi cosmici;
- maggiore è il flusso dei raggi cosmici nell'atmosfera, più nuvole vengono prodotte, con un conseguente effetto sulla meteorologia sul breve periodo, e sul clima su tempi lunghi;

Al di là di questi obiettivi ambiziosi, EEE sicuramente costituisce ai ragazzi un'opportunità unica di studio e ricerca, fornendo la possibilità di collaborare direttamente con ricercatori e tecnici dell'INFN e delle università, nonché la possibilità di approfondire importanti argomenti di fisica contemporanea e di condurre un'attività sperimentale di grande interesse.

Per fare un solo esempio: si è pensato di utilizzare il Laboratorio di Meteorologia dell'Istituto Navale per studiare le correlazioni (o anticorrelazioni) dei raggi cosmici secondari con le condizioni meteorologiche in quota e al suolo – pressione (effetto barometrico), temperatura, umidità, struttura e distribuzione della massa d'aria atmosferica – mettendo così in relazione il flusso dei raggi cosmici con l'attività solare.

Qui di seguito sono ricostruite, in sintesi, le tappe che hanno condotto le scuole di Viareggio a partecipare al Progetto EEE.

Novembre 2006. Le scuole di Viareggio partecipano all'incontro nazionale, organizzato presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna, alla presenza di Antonino Zichichi, con le scuole già inserite nel progetto e con quelle desiderose di parteciparvi.

Novembre 2007. Le scuole partecipano al Primo Workshop del Progetto EEE organizzato dal Centro Fermi di Roma e presieduto dallo stesso Zichichi presso la Fondazione Ettore Majorana di Erice. Tale convegno ha visto la partecipazione e gli interventi dei

colleghi Natucci, De Masi e Lucchesi. In quest'occasione, grazie anche alla collaborazione ed il sostegno di Rinaldo Baldini Ferroli (Direttore del Centro Fermi) e di Franco Luigi Fabbri (LNF-INFN di Frascati), viene confermata la partecipazione delle due scuole di Viareggio al Progetto e la successiva "chiamata" a Ginevra per costruire le camere.

Dicembre 1007 – febbraio 2009. In questo periodo il nostro paese ha dovuto affrontare una seria crisi economica che ha investito anche i Centri di Ricerca, per cui le scuole hanno dovuto cercare fondi per far avanzare il progetto nel rispetto dei tempi della programmazione scolastica. La situazione si è poi sbloccata: le scuole hanno ottenuto aiuti in termini economici dalla Fondazione San Paolo di Torino (Concorso Cento Scuole, per quanto riguarda l'Istituto Nautico) e dalla Provincia di Lucca. Tali fondi ci hanno consentito di proseguire nel Progetto con le attività svolte nelle scuole. Infine, grazie al contributo della CAEN e a quello (determinante) del Centro Fermi, che sovvenziona l'esperimento, il progetto ha potuto proseguire il suo iter. Durante questo difficile periodo non sono venuti mai meno il sostegno morale e gli aiuti in termini di competenze da parte dei ricercatori dell'INFN di Pisa e, in particolare, di Carlo Avanzini.

Marzo 2009. Finalmente arriva dal Centro Fermi la convocazione per recarsi al CERN, presso Ginevra, dove gli studenti hanno preso parte alla costruzione dei rivelatori MRPC.

Aprile 2009. Inizia l'avventura per alcuni degli allievi delle nostre scuole. Per il Liceo Scientifico: Sara Lucarotti, Manuel Grotti, Tania Cortopassi, Bartolomeo Fiorini, Sara Nuti, Claudia Puntoni, Irene Amato, Michele Biancalana, Michele Corti, Michele Franceschi, Gianluca Paolinelli e Tiziana Mazzoni. Insegnanti accompagnatori: Barbara Natucci e Stefano Romani. Per l'Istituto Nautico: Claudio Bessi, Roberta Del Chiaro, Martina Petrucci, Onofrio Langella, Simone Guidi, Matteo Panconi, Joseph Bensellam, Giacomo Casci. Lorenzo Edoardo Pierini. Insegnanti accompagnatori: David Lucchesi e Marco Pescaglioni.

Un tecnico dell'INFN di Pisa, Carlo Avanzini, ha accompagnato e affiancato i gruppi nell'attività di costruzione dei rivelatori e nelle visite ai laboratori del CERN, il più grande laboratorio del mondo di fisica delle alte energie, ed in particolare ai diversi esperimenti di LHC. Avanzini ha inoltre contribuito a creare un clima di cordialità unica, che i ragazzi hanno apprezzato e tutt'ora ricordano, a distanza di un paio d'anni, con affetto. Gloria Spandre e Marco Maria Massai hanno per qualche giorno condiviso con noi questa esperienza esaltante.

Costruzione dei rivelatori

Al CERN gli studenti hanno vissuto tra i ricercatori in un ambiente suggestivo e stimolante, hanno lavorato fianco a fianco, hanno apprezzato il fatto che tanti ricercatori di nazionalità e culture diverse collaborino insieme per la riuscita di un esperimento. Hanno imparato che la scienza non ha frontiere né barriere. Hanno avuto, inoltre, la possibilità di confrontarsi e di lavorare al fianco di ricercatori provenienti da tutto il

mondo e lo hanno fatto come se fossero stati "uno di loro", così che un altro universo, quello della ricerca scientifica, che per la gran parte dei nostri ragazzi appare lontano e del tutto estraneo alla loro vita, è diventato un ambiente familiare. I ragazzi hanno lavorato con molto scrupolo, efficienza e anche con grande rapidità. Hanno avuto la possibilità di costruire, con materiali di uso comune, uno strumento di altissima precisione che permetterà loro di "vedere" un universo invisibile anche per il più potente dei microscopi. Hanno imparato a effettuare e assemblare misure di grande precisione e hanno infine preso coscienza di quanto lavoro, pazienza, perseveranza ed entusiasmo ci siano dietro a un'idea che diventa esperimento. Hanno compreso quanta differenza ci sia tra *guardare* e *osservare* e hanno di persona sperimentato che per comprendere veramente l'universo di cui facciamo parte non ci si può fermare a ciò che si vede ma si deve sempre fare lo sforzo di andare *molto oltre* a ciò che appare.

Il rivelatore che hanno costruito occupa una superficie di due metri quadrati, è alto circa 2 metri, funziona con l'alimentazione di rete, consuma quanto due lampadine da 250 Watt ed è costruito con materiali di uso comune come vetro, metallo, plastica, ecc. Quindi si può fare ricerca seria anche con materiali "poveri".

Saranno questi studenti a istruire i compagni che poi si occuperanno, insieme a loro, della registrazione dei segnali che arrivano dal cosmo, della loro rielaborazione, analisi e interpretazione fisica. L'avventura della scoperta, per questi studenti, è appena iniziata eppure li ha già profondamente maturati, dando loro la possibilità di esprimere le loro potenzialità e abilità in ambiti molto diversi. Sono, infatti, emerse le loro capacità organizzative, di relazione, di analisi, e la loro inventiva: hanno studiato non per sostenere un'interrogazione, ma per comprendere ciò che loro stessi stavano costruendo per poi lasciarlo in eredità ai loro compagni più giovani. Sono cresciuti come uomini e donne, ma soprattutto come cittadini, perché fare ricerca non significa solo voler comprendere un nuovo fenomeno naturale, ma anche voler migliorare se stessi per essere protagonisti attivi e non spettatori passivi del mondo. È stato un lavoro lungo, faticoso e molto avvincente.

I rivelatori sono stati successivamente trasportati dal CERN alla sezione INFN di Pisa, dove attualmente si trovano, per essere controllati, completati con l'elettronica di lettura e infine testati.

Stiamo quindi attendendo ansiosamente l'arrivo nelle nostre scuole dei rivelatori MRPC e di tutte le altre apparecchiature elettroniche necessarie al loro funzionamento. A breve i rivelatori verranno ufficialmente consegnati alle scuole. Verranno quindi installati, collegati alla rete, collaudati e calibrati.

A questo punto potrà iniziare la vera raccolta di dati in ciascuna scuola. Il ricevitore GPS consentirà di rilevare le eventuali misure di coincidenza. Le scuole dovranno preoccuparsi dell'acquisizione quotidiana dei dati, controllare e garantire il funzionamento dell'intero apparato in turni di lavoro ben pianificati. Un'attività preliminare importante, al fine delle misure di coincidenza, sarà quella di determinare l'orientamento dei rivelatori rispetto al Nord geografico, così da poter ricostruire la direzione

di provenienza dei muoni dalle due scuole e quindi determinare dove il raggio cosmico primario abbia colpito il nucleo di un elemento presente nella nostra atmosfera.

Il progetto, quindi, è tutt'altro che terminato! La parte più interessante del progetto deve ancora arrivare. Allora gli studenti diventeranno i veri protagonisti, dovranno curare la macchina, rilevare i dati, interpretarli e confrontarli con quelli degli altri Istituti dislocati in tutta Italia.



Figura 2. Studenti ed Insegnanti nella sala Barsanti della Croce Verde di Viareggio.

**IL PROGETTO EXTREME ENERGY EVENTS (EEE):
COSTRUZIONE DEI RIVELATORI MRCP PRESSO IL CERN DI GINEVRA**

JOSEPH BENSELLAM

CLAUDIO BESSI

ONOFRIO LANGELLA

MATTEO PANCONI

MARTINA PETRUCCI

Istituto Tecnico Nautico Statale "Artiglio", Viareggio

Il Progetto Extreme Energy Events (EEE) è un progetto di eccellenza, riservato alle scuole superiori, che vede coinvolti diversi istituti scolastici sul territorio nazionale. L'obiettivo principale del progetto è di "portare la scienza nelle scuole" attraverso un esperimento di fisica delle alte energie. L'esperimento si esplica attraverso misure di coincidenza di muoni rivelati da telescopi per raggi cosmici ubicati in scuole diverse. I muoni sono particelle cariche con una vita media di circa $2 \mu\text{s}$ che si producono da un fenomeno a cascata che inizia con l'urto di un raggio cosmico primario, generalmente un protone, con un nucleo dell'atmosfera terrestre. L'urto produce uno sciame di particelle subatomiche con vite medie molto brevi e, fra i prodotti finali, la componente carica che riesce a raggiungere il suolo è proprio costituita dai muoni.

Le scuole di Viareggio che partecipano al Progetto EEE sono il Liceo Scientifico "Barsanti e Matteucci" e l'Istituto Tecnico Nautico "Artiglio", la nostra scuola. Nelle scuole sono stati selezionati due gruppi di studenti che hanno iniziato un percorso di preparazione basato su un approfondimento di alcuni argomenti curricolari e su nuovi argomenti di fisica, principalmente legati alla fisica delle particelle e dei raggi cosmici in particolare. Infine, nel corso del mese di aprile del 2009, i due gruppi di allievi si sono recati presso il CERN di Ginevra per la costruzione di rivelatori Multigap Resistive Plate Chambers (MRPC).

I rivelatori MRPC costituiscono i 'telescopi' per raggi cosmici del Progetto EEE. Si tratta di camere a ionizzazione che vengono poi riempite con due diversi gas, esafluoruro di zolfo SF₆ e freon ecologico C₂F₄H₂. Tre camere, disposte una sopra l'altra, costituiscono il 'telescopio' vero e proprio.

La costruzione del rivelatore si suddivide in varie fasi. La prima consiste nel collocare diverse *strip* di rame su un pannello di vetronite. Su tale pannello, di forma rettangolare, abbiamo tracciato con lapis e riga 24 linee equidistanti 32 mm che sono servite come guida per posizionare altrettante *strip* di rame larghe 25 mm. Tali strisce hanno

un lato adesivo; vanno quindi tese facendo bene attenzione che aderiscano perfettamente alla vetronite in quanto eventuali bolle d'aria creerebbero una alterazione nella misura del tempo di arrivo dei segnali alle due estremità della *strip*. Ogni striscia va poi ripiegata per qualche centimetro sulla faccia sottostante del pannello di vetronite. Il tutto va ripetuto per i sei pannelli di vetronite necessari per costruire le tre camere di rivelazione. Si tratta di un'operazione semplice, ma importante, in quanto la *strip* permette di individuare il punto d'impatto della particella. Successivamente si praticano su ogni lato lungo dei piani di vetronite, in precedenza accoppiati ad altrettanti piani di honeycomb per dare maggiore stabilità all'intera struttura, dei fori passanti, con filettatura, dove vengono inserite viti di plastica che servono come guide per il filo da pesca, usato nell'assemblaggio, come spiegheremo successivamente.

Sui piani di vetronite si fissa un foglio isolante di mylar. Quindi si ritaglia su ogni foglio uno spazio in cui si posiziona un elettrodo di nastro di rame per il contatto con l'alta tensione. A questo punto si passa alla preparazione delle lastre di vetro su cui, dopo un primo passaggio con carta per rimuovere la polvere e lo strato protettivo, si versa alcool puro lavando bene in modo da non lasciare aloni che potrebbero falsare i risultati delle misure o addirittura impedire il funzionamento della camera. Dopo la pulizia si procede soffiando le superfici con argon ionizzato in modo da eliminarne le eventuali cariche elettrostatiche formatesi nello sfregamento. Con questo i cinque vetri intermedi risultano pronti. Dall'altra parte si devono trattare con una vernice resistiva i due vetri che saranno poi utilizzati come catodo e anodo del rivelatore e, solo dopo aver controllato che tale vernice si sia distribuita uniformemente sulla superficie, si procede applicando sopra di essa un materiale protettivo spray.

Dopo aver preparato i vari componenti delle camere si procede al loro assemblaggio: su un primo piano di honeycomb e vetronite si posiziona, sulla parte superiore del pannello, il primo vetro verniciato attaccandolo con del semplice nastro adesivo ai lati corti di quest'ultimo, poi, intervallandoli con il filo da pesca, avvolto a zig zag attorno alle viti in modo da creare uno spessore di 300 μm , si posizionano in successione i cinque vetri trasparenti e, infine, si colloca il secondo vetro verniciato. Si chiude infine il tutto con il secondo pannello di vetronite e honeycomb. Si procede quindi saldando ai due capi di ogni *strip* i connettori che verranno utilizzati per la trasmissione dei segnali e che si collegheranno poi all'elettronica di *front end*.

Una volta pronta la camera, questa viene sollevata tramite un sistema ad aspirazione, collocata in un box di alluminio, precedentemente assemblato e, dopo averla fermata internamente con delle zeppe, in modo che non si sposti e urti le pareti, si collegano i cavi alle prese situate all'interno dei box e si sigilla il tutto con un coperchio d'alluminio. In alcune delle precedenti fasi viene utilizzato del silicone per chiudere orifizi e sigillare la camera in modo da evitare future perdite di gas.

L'opportunità che ci è stata data di vivere quest'esperienza, ha portato il nostro gruppo a scoprire e apprezzare studi e metodologie completamente nuovi, di cui, fino a quel momento, non conoscevamo neppure l'esistenza: un mondo interessante che ci

affascina e incuriosisce anche per le numerose possibili applicazioni a cui apre la strada. Un mondo che ci invoglia ad apprendere e assimilare ancora di più, ad andare oltre nella conoscenza della grandezza di ciò che ci circonda.



Figura 3. La presentazione da parte degli studenti.



Figura 4. La presentazione da parte degli studenti.

**SUGLI EFFETTI COLLATERALI DELLA RICERCA FONDAMENTALE:
LA PARTECIPAZIONE DI UN'AZIENDA DI ELETTRONICA LOCALE
AL PROGETTO EEE**

CARLO AVANZINI

Dipartimento di Fisica 'Enrico Fermi', Pisa

Nell'ambito degli incontri che avvengono tra le istituzioni universitarie ed enti di ricerca, e studenti e docenti delle scuole medie superiori, la giornata che si è svolta a Viareggio nella sala consiliare della Croce Verde, è di quelle che certamente si ricordano con piacere. Ci siamo trovati dinanzi a una folla di studenti estremamente variegata per età e istituti di provenienza, ma un dato di rilievo si è posto in assoluto risalto: l'estremo, e non stiamo enfatizzando, interesse che l'incontro ha suscitato in quella multiforme popolazione.

Tra i vari interventi ce ne è stato uno che oseremmo definire strano, inconsueto. Stiamo parlando di quello del patron della CAEN, azienda che è testimone di una vera singolarità anche territoriale. La CAEN (Costruzioni Apparecchiature Elettroniche Nucleare SpA) è leader nel campo dei dispositivi elettronici orientati al mondo della fisica nucleare. Nasce dall'interno dell'Istituto di Fisica Nucleare, essendo i fondatori ex-dipendenti di questo ente, in particolare della sezione di Pisa. Nasce e cresce a Viareggio fino ad assumere dimensioni ragguardevoli, per occupazione, contenuti e interesse internazionale. Questo legame con il mondo della ricerca merita di essere sottolineato.

Innanzitutto, bisogna dire che non a tutti è chiaro fino in fondo quale significato ha il termine "ricerca". Molti l'associano a un mezzo diretto e unipolare, rivolto alla soluzione di problemi, soprattutto tecnologici e di immediato utilizzo. Ebbene, questa è ciò che comunemente si definisce "Ricerca Applicata" il cui scopo, appunto, è quello di "risolvere problemi" e contribuire, in ultima analisi, a un miglioramento della qualità della nostra vita.

Tuttavia, esiste anche una ricerca orientata "semplicemente" ad accrescere le nostre conoscenze tout court: è questo l'ambito in cui si muovono schiere di ricercatori e studiosi di tutta la terra. Persone che, in virtù della spinta inarrestabile della curiosità, si pongono domande del tipo: perché, se lancio un sasso, questo cade al suolo? Sì, certo, è una questione antica, che già prima della civiltà ellenica era rimuginata dalla mente di qualche filosofo. Ma non si creda che la soluzione sia di quelle banali. Einstein ce lo ha ricordato. Ebbene, a che cosa potrebbe servire, nell'immediato, saper rispondere compiutamente al quesito? Probabilmente ... a nulla! A cosa poteva servire la legge di gravitazione universale quando Newton la formulò? Eppure, è grazie a essa che oggi

siamo in grado di lanciare un missile con a bordo un satellite per le telecomunicazioni, e con un certo successo.

Quest'esempio serve a capire che la ricerca cosiddetta "fondamentale" (cioè, che si pone domande fondamentali, sebbene apparentemente sembri soltanto accrescere le nostre conoscenze senza altri benefici se non "spirituali", spesso invece dispiega le sue ali anche laddove meno ce lo aspetteremmo. La CAEN è il prodotto di una ricaduta simile. Progettare, costruire, installare e mantenere in funzione dispositivi elettronici finalizzati alla ricerca nella fisica delle particelle, ha consentito il concretizzarsi di una realtà aziendale che è sul mercato, producendo reddito e occupazione.

Oggi, l'elettronica, insieme alla scienza dei materiali, più di ogni altra tecnologia ha rivoluzionato la vita di miliardi di esseri umani. Tecnologie consolidate nel tempo che hanno permesso la nascita di nuove discipline stanno oggi scomparendo: la pellicola fotografica, ormai sostituita dai sensori digitali; il disegno tecnico, basato su penna a china e tecnigrafo, che è migrato da tempo su computer; le modalità di registrazione, di riproduzione e di fruizione della musica, che si stanno evolvendo in continuazione; anche nella diagnostica medica, nuove tecnologie stanno soppiantando la gloriosa e storica lastra radiografica.

Certo, non tutto si è tradotto in benefici e vantaggi. Sono infatti emersi nuovi e drammatici problemi, ora legati all'ambiente e al sistema ecologico nel suo complesso, ora legati all'occupazione e all'educazione. Questo rilievo, però, ha a che vedere con il modo in cui i sistemi umani sono oggi organizzati, piuttosto che con il fatto che la scienza e la tecnologia siano di per sé "cattive". Resta il fatto che l'impatto dell'elettronica sulla società richiede un cambiamento di atteggiamento culturale ed è con questo fatto che, prima o poi, bisogna fare i conti. Per tornare a noi o, se vogliamo, ai nostri ragazzi: la presenza sul nostro territorio di una realtà come la CAEN può offrire una chance, oltre che un punto di riferimento, certamente non trascurabile.



Figura 5. I rivelatori con l'elettronica di acquisizione, durante i test nella sede dell'INFN di Pisa.

APPLICAZIONI DI TECNICHE DI FISICA NUCLEARE IN MEDICINA

MARIA GIUSEPPINA BISOGNI

Dipartimento di Fisica 'Enrico Fermi', Pisa e INFN, sezione di Pisa

Una delle principali applicazioni delle tecnologie di rivelazione della radiazione ionizzante è l'*imaging*. Un'immagine è una rappresentazione bi-dimensionale o tri-dimensionale della distribuzione spaziale dei valori che assume in ogni punto del campo d'immagine una grandezza fisica misurata (immagine fisica) o un parametro calcolato (immagine parametrica). Per l'*imaging* medico, il principale tipo di radiazione utilizzata è costituito dalla radiazione elettromagnetica di energia compresa tra 10 keV e 1 MeV (raggi X, di origine atomica, e raggi gamma, di origine nucleare).

In questo intervento mi propongo di illustrare due aspetti fondamentali dell'*imaging* medico: l'*imaging* morfologico e l'*imaging* funzionale. Entrambi hanno lo scopo di aiutare il medico nella diagnostica, terapia e prognosi, di molte patologie, tra cui quelle tumorali.

L'*imaging* morfologico si basa essenzialmente sull'attenuazione selettiva da parte dei tessuti attraversati da un fascio di raggi X e la successiva rivelazione della radiazione trasmessa tramite un opportuno sistema di *imaging*.

Sin dagli albori della diagnostica radiologica (fine del XIX secolo), il principale rivelatore utilizzato è stato il sistema formato da una lastra fotografica accoppiata a uno schermo luminescente. Tuttavia, da circa dieci anni i rivelatori digitali stanno guadagnando sempre maggiore importanza nell'ambito diagnostico. L'*imaging* digitale offre infatti numerosi vantaggi rispetto all'*imaging* convenzionale: le immagini possono essere mostrate su un display, archiviate in memoria ed elaborate da un computer; inoltre possono essere facilmente trasferite via rete da un sito ospedaliero all'altro. Inoltre, i rivelatori digitali presentano una dinamica più ampia della lastra, superando in tal modo il problema critico dei sistemi tradizionali dell'esposizione e, quindi, permettendo l'ottimizzazione della quantità di radiazione cui esporre il paziente.

I rivelatori digitali per l'*imaging* medico sono sostanzialmente di due tipi: a rivelazione diretta e a rivelazione indiretta della radiazione ionizzante. Nel primo caso la radiazione interagisce direttamente con il rivelatore, mentre nel secondo caso la radiazione interagisce con uno scintillatore e la luce prodotta in esso viene rivelata dal rivelatore digitale.

Un primo esempio di rivelatori digitali indiretti per l'*imaging* medico è costituito da Charge Coupled Devices (CCD), che si basano sulla tecnologia di Metal Oxide Semiconductor (MOS). La carica prodotta in seguito all'interazione della luce con il silicio viene memorizzata in una buca di potenziale. La lettura della carica è effettuata

variando il potenziale della buca permettendo la migrazione della carica da un pixel all'altro in una data colonna della matrice. Le CCD sono in genere accoppiate a scintillatori CsI (Tl) per migliorarne l'efficienza.

Un altro metodo di rivelazione indiretta si basa sui *flat panels* a Si amorfo (a-Si). Essi sono costituiti larghi pannelli di a-Si idrogenato (bassa corrente di buio, elevata sensibilità alla luce verde), accoppiati a fosfori CsI(Tl), sui quali viene realizzata una matrice di fotodiodi (pixels). Un esempio di rivelatore digitale diretto è anche costituito dai *flat panels* a Selenio amorfo (a-Se), realizzati in lega a-SE con ppm di Cl. Il sistema di rilevazione è costituito da matrici di Thin Film Transistors (TFT).

Un'altra applicazione di fondamentale importanza per l'*imaging* medico è la Tomografia Assiale Computerizzata (TAC). Mediante la TAC vengono rivelate un gran numero di immagini radiologiche del paziente ad angoli differenti e successivamente combinate insieme per visualizzare una sezione interna del paziente (immagini transassiali). Le proiezioni sono combinate tra loro con l'impiego di un computer che utilizza algoritmi software di ricostruzione. Questa modalità di *imaging* è intrinsecamente collegata al rivelatore digitale, dal momento che le immagini transassiali devono essere ricostruite a partire da immagini proiezione tramite un algoritmo specifico.

Le attuali macchine TAC operano una scansione a spirale, cioè acquisiscono l'intero volume di interesse in una sola esposizione ruotando continuamente sia il tubo a raggi X che il rivelatore mentre il paziente si muove lungo la direzione assiale. Usando più archi di rivelatori, è ora possibile acquistare più di una sezione contemporaneamente. I sistemi moderni sono in grado di acquisire fino a 256 sezioni differenti nella stessa scansione. Il futuro della TAC è la TAC *cone beam* (fascio conico) con un rivelatore di area, che consente l'acquisizione di aree di grandi dimensioni in un tempo molto piccolo.

L'*imaging* funzionale è dedicato a misurare, attraverso grandezze fisiche specifiche, processi funzionali/metabolici che si verificano all'interno di un essere vivente. La branca della medicina cui fa riferimento l'*imaging* funzionale è chiamata "medicina nucleare" in quanto utilizza molecole o farmaci marcati con isotopi radioattivi (radiofarmaci) per questo tipo di indagine diagnostica.

Il principio sul quale si basa la realizzazione di un radiofarmaco è quello di cambiare un atomo di una bio-molecola con un suo radioisotopo, mantenendo inalterate le proprietà chimiche e biologiche della molecola. Di conseguenza, il movimento, la distribuzione, la concentrazione della molecola possono essere misurati con rivelatori di radiazione.

Le due metodiche di *imaging* principali utilizzate in medicina nucleare sono la SPECT (Single Photon Emission Computer Tomography) e PET (Positron Emission Tomography).

In SPECT il radiofarmaco utilizzato (ad esempio ^{99m}Tc che emette gamma da 140 keV) emette un fotone per ogni decadimento del nucleo radioattivo, mentre in PET i radiofarmaci contengono un radioisotopo che emette elettroni positivi (le antiparticelle degli elettroni: cioè, i cosiddetti positroni). Il positrone, interagendo con un elettrone atomico del tessuto vivente, annichila, trasformando la sua massa e quella

dell'elettrone con cui si è legato in energia elettromagnetica (per la nota equazione della relatività di Einstein $E=mc^2$). Il prodotto di questa trasformazione di massa in energia sono due fotoni gamma di uguale energia (511 keV ciascuno), emessi lungo la stessa direzione ma in versi opposti.

Il rivelatore principale utilizzato in SPECT è la gamma-camera, che si compone di un collimatore Pb (che codifica le informazioni spaziali), una lastra di cristallo di scintillazione NaI(Tl) e una matrice di tubi fotomoltiplicatori (PMT), letti da amplificatori e circuiti di logica posizionale. I raggi gamma sono emessi in tutte le direzioni, quindi sono necessari collimatori per determinare la direzione di emissione del fotone. Per eseguire una TAC funzionale, la gamma-camera SPECT ruota intorno al paziente.

In PET la rilevazione del segnale si basa sulla rilevazione della coincidenza temporale dei due raggi gamma antilineari da 511 keV e sulla ricostruzione delle Lines of Response (LOR), cioè delle linee di volo dei gamma. Dalla intersezione di tante LOR è possibile ricostruire la posizione del radioisotopo e stimarne la concentrazione. Ciò porta a una maggiore sensibilità e ad una qualità delle immagini migliore rispetto alla SPECT.

Gli scintillatori utilizzati in PET sono solitamente il BGO (Bismuth germanate, $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) e più recentemente lo LSO (Lutezio Oxi-orto silicato (LuSiO)), accoppiati a fotorivelatori (tipicamente PMT ma anche fotodiodi al silicio operanti in regime di scarica Geiger), che possono essere disposti in una geometria ad anello o in una geometria a piani paralleli.



Figura 6. Un'immagine della relazione di Maria Giuseppina Bisogni.

LA RELATIVITÀ GENERALE DI ALBERT EINSTEIN:

UNA TEORIA GEOMETRICA PER LA GRAVITAZIONE

DAVID M. LUCCHESI

Istituto di Fisica dello Spazio Interplanetario – Istituto Nazionale di Astrofisica, Roma

1. Introduzione

La Teoria della Relatività Generale di Albert Einstein [6, 7] costituisce la miglior descrizione che abbiamo dell'interazione gravitazionale, in particolare alle basse energie (campi deboli), come avviene nel laboratorio (naturale) costituito dal nostro sistema solare. Alle alte energie (campi forti), fatto salvo alcune importanti eccezioni [13, 3] – come nel caso di sistemi binari compatti formati da stelle di neutroni – le predizioni della teoria sono meno verificate, sia per le difficoltà pratiche nello sperimentare in campi forti, sia perché la teoria stessa cessa di valere in presenza di singolarità. Il regime dei campi intensi è quello che si deve comunque indagare più a fondo quando siamo interessati a comprendere le prime fasi evolutive dell'universo primordiale, o per capire le proprietà dei buchi neri e delle stesse stelle di neutroni.

La Relatività Generale costituisce inoltre la teoria di riferimento per la cosmologia, quella parte della scienza che cerca di spiegare l'universo nel suo insieme e che cerca di rispondere a domande legate ai suoi costituenti fondamentali, a come esso sia nato e a come evolva. La teoria si caratterizza per bellezza, coerenza interna ed eleganza, costituendo uno dei prodotti più significativi del pensiero umano di tutti i tempi. Oggi, la gravitazione sperimentale, che si occupa in generale della verifica empirica delle leggi dell'interazione gravitazionale [27], costituisce lo strumento principale di verifica della relatività generale: validandola o meno rispetto a teorie alternative ad essa proposte negli anni e fornendo anche un possibile mezzo, dal punto di vista sperimentale, per 'sintonizzare' la relatività con le teorie quantistiche di campo.

Quest'ultimo sembra essere un punto essenziale, dal momento che la relatività non è in grado di spiegare dal punto di vista fisico alcuni dei fatti che essa stessa predice, come le singolarità, quali un buco nero o il Big Bang. Si tratta, in realtà, di situazioni estreme, ma importanti da analizzare e studiare. Essendo infatti la Relatività Generale di Einstein una teoria classica (non quantistica) della gravitazione, essa non riesce a spiegare completamente il 'funzionamento' di un buco nero, ovvero di un 'oggetto' che, nei termini della Relatività Generale, si presenta caratterizzato da densità e curvatura elevatissime, praticamente infinite.

Si pensa che sia la meccanica quantistica a proibire il verificarsi delle singolarità, o meglio degli aspetti non fisici a esse legati, come densità e temperature infinite, situa-

zioni che si verificherebbero in campi gravitazionali infinitamente intensi. Alle fondamenta della Relatività Generale sta il Principio di Equivalenza, uno dei principi meglio verificati della fisica, attualmente con una precisione dell'ordine di 1 parte in 10^{13} [24, 1, 28]. Questo grado di precisione non è al momento sufficiente per dirci se la relatività sia effettivamente la migliore teoria per la descrizione dei fenomeni gravitazionali, almeno in campo debole e per basse velocità, nonostante che tutte le attuali verifiche sperimentali lo confermino. Altre teorie, mutate anche dalla fisica delle particelle e dalla necessità di unificare le diverse interazioni della natura, prevedono violazioni del Principio di Equivalenza, violazioni che possono verificarsi in contesti diversi, sia alle alte sia alle basse energie. Si tratta di teorie che nascono in regime quantistico e con un numero superiore, e di diversa natura, per i 'mediatori' dell'interazione gravitazionale di quanto avvenga invece per la Relatività Generale, ove l'interazione è mediata dal solo tensore metrico.

Il presente contributo vuole mettere l'accento su alcuni dei temi fin qui introdotti, sulle idee fondamentali che portarono Einstein a formulare la sua teoria della gravitazione, con particolare enfasi sul Principio di Equivalenza, la vera pietra angolare di tutta la teoria.

2. Alle fondamenta della Relatività Generale

Tre sono le idee principali alla base della formulazione, nel 1915, della teoria della gravitazione di Albert Einstein. Queste idee legano intimamente la gravitazione, con il concetto di inerzia e con quello di curvatura dello *spazio-tempo*. Le idee ispiratrici della nuova teoria furono: il *Principio di Equivalenza* di Galilei e Newton, il concetto di *curvatura dello spazio* di Riemann e il *Principio di Mach*, con le fondamentali implicazioni che ciascuna di queste idee comporta [4]. La matematizzazione di questi concetti (1907–1915) portò alla formulazione di una delle più belle teorie fisiche mai realizzate dall'uomo, che si caratterizza – come già notato – per una coerenza interna e una eleganza ancora insuperate. È importante aggiungere che, sia dal punto di vista teorico sia da quello sperimentale/osservativo, agli inizi del XX secolo non c'erano spinte per la formulazione di una nuova teoria della gravitazione in sostituzione di quella newtoniana¹. Piuttosto, le tre idee rispondono, oltre che a un'esigenza di tipo fisico, a esigenze di carattere geometrico ed estetico/filosofico.

Adesso analizzeremo brevemente il concetto di curvatura dello spazio di Riemann e il Principio di Mach, mentre nei successivi paragrafi l'attenzione sarà focalizzata sul Principio di Equivalenza.

Le geometrie non-euclidee, di cui fa parte la geometria riemanniana, nascono con la rimozione del V postulato di Euclide che così recita: *dato un punto P esterno ad una*

1 Il problema della anomala precessione del perielio di Mercurio, poi brillantemente spiegato dalla teoria della Relatività Generale, era allora imputato a perturbazioni di origine gravitazionale all'orbita del pianeta causate dalla possibile presenza di un pianeta (Vulcano), o da una fascia di minuscoli corpi, fra l'orbita di Mercurio e il Sole.

retta r su un piano, esiste una e una sola retta passante per P e parallela a r . Dall'ipotesi che nessuna retta passante per P sia parallela alla retta r nasce la geometria riemanniana o ellittica. Viceversa, dalla ipotesi che per P passino infinite rette parallele alla retta r nasce la geometria iperbolica di Bolyai e Lobacevskij.

Gli studi di Georg Friedrich Bernhard Riemann si concretizzano nel 1854 [22] con la generalizzazione dei precedenti lavori di Gauss sulla curvatura di superfici a 2-dimensioni alle superfici a n -dimensioni (con $n > 2$) e con l'introduzione di alcuni concetti matematici assai importanti, come quello di varietà ("riemanniana"), con la sua metrica e curvatura. Un caso particolare è rappresentato dalla geometria della superficie di una sfera bidimensionale. In questo caso le geodetiche sono equivalenti alle rette nel piano, rappresentano la minima distanza fra due punti sulla superficie della sfera e si ottengono dalla intersezione di un piano con detta superficie, purché il piano passi per il centro della sfera stessa². La cosa interessante è che Riemann cercò di applicare questi concetti anche all'universo, parlando di curvatura dello spazio fisico e di come questa debba legarsi alle forze fisiche. In particolare, secondo Riemann, lo spazio curvo 'dice' alle masse come muoversi e queste, per il principio di azione e reazione di Newton, devono a loro volta influenzare lo spazio stesso.

Ernst Waldfried Josef Wenzel Mach si rese protagonista di un'aspra critica ai fondamenti della meccanica newtoniana [15]. In particolare, secondo Mach, l'accelerazione rispetto allo spazio assoluto di Newton assume significato, nel senso che può venire correttamente compresa, soltanto quando è riferita alla materia che costituisce l'universo, rappresentata dal riferimento delle stelle lontane. Quest'affermazione costituisce il *Principio di Mach*³, profondamente legato ai concetti di massa e di inerzia. Secondo Mach, l'inerzia qui, ovvero l'inerzia locale, ha a che fare con la massa là, ovvero con la materia molto lontana. Il grado di incorporamento del *Principio di Mach* da parte della teoria della Relatività Generale è ancora dibattuto, soprattutto per quanto concerne le sue implicazioni cosmologiche, che dipendono dal tipo di universo possibile, compatto, aperto, o piatto all'infinito.

Per quanto concerne il Principio di Equivalenza, accontentiamoci per il momento di ricordarlo in una formulazione corrispondente a quella di Galileo: *tutti i corpi cadono nel vuoto con la medesima accelerazione, indipendentemente dalla loro massa e composizione chimica*, rimandando al prossimo paragrafo per un maggior approfondimento.

La domanda che adesso possiamo porci è la seguente: *che cosa implicano, dal punto di vista concettuale, le tre idee su cui si basa la teoria di Einstein?* Per rispondere, occorre rivedere radicalmente il nostro concetto di interazione gravitazionale come "forza fra

2 Questi risultati sono intuitivi e si basano sul fatto che la superficie (a due-dimensioni) della sfera è immersa nel "nostro" spazio a tre-dimensioni. Fu proprio Gauss a dimostrare che le proprietà di una superficie possono comunque ricavarsi intrinsecamente dalle sole misure fatte sulla superficie.

3 Fu Einstein stesso a coniare questa espressione.

corpi”. La risposta è la seguente: *la gravità è una manifestazione della curvatura dello spazio-tempo*.

In altre parole, la gravità non è una forza fisica che si trasmette attraverso lo spazio e il tempo, come vale per la legge di Newton della gravitazione universale o per le altre interazioni note della natura. In sostanza, la gravità è legata alla geometria dell’universo. In effetti, la teoria della gravitazione di Einstein, o teoria della Relatività Generale, viene più correttamente chiamata *geometrodinamica* dagli specialisti del settore. Einstein capì che spazio e tempo giocavano un ruolo fondamentale e che essi non andavano considerati come entità indipendenti ma, bensì, interdipendenti⁴, e che la curvatura era dello *spazio-tempo* e non del solo spazio come aveva concluso mezzo secolo prima Riemann. Per cercare di ‘intuire’ quest’effetto della curvatura dello *spazio-tempo* sulla materia ricordiamo la parabola della mela [17].

Consideriamo un ipotetico universo costituito dalla superficie curva di una mela e gli abitanti di tale universo. Consideriamo due linee parallele che passano da due punti vicini posizionati sull’equatore della mela. Che cosa accadrebbe agli ipotetici abitanti se seguissero tali linee? Supponiamo che essi navighino sulla superficie della mela con ipotetiche imbarcazioni non provviste di timone e quindi possano andare soltanto ‘a dritto’. Con l’allontanarsi delle due imbarcazioni dall’equatore, quindi con il loro conseguente avvicinamento al polo della mela, rappresentato, ad esempio, dal suo picciolo, i due naviganti si avvicinerebbero fra loro con un tasso governato dalla curvatura della mela, fino ad incrociare le loro rotte (magari scontrandosi) in prossimità del picciolo, per poi tornare ad allontanarsi.

Cosa possiamo concludere da questa parabola? La conclusione è che due linee inizialmente parallele si incontrano, per effetto della curvatura della superficie della mela. Il picciolo, cioè, agisce come centro di forza, ovvero come massa nella interpretazione newtoniana della gravitazione.

La teoria geometrica della gravitazione di Einstein può riassumersi nei seguenti tre concetti:

1. localmente le geodetiche appaiono linee rette;
2. su regioni più ampie di spazio e di tempo, geodetiche inizialmente parallele (o che si allontanano) iniziano ad avvicinarsi con un tasso governato dalla curvatura dello *spazio-tempo* – questo effetto della geometria sulla materia è quello che noi chiamiamo gravitazione;
3. la materia, a sua volta, *curva* la geometria.

Quindi, secondo l’interpretazione einsteiniana della gravitazione, lo *spazio-tempo* agisce sulla materia ‘dicendole’ come muoversi e a sua volta la materia reagisce sullo *spazio-tempo* ‘dicendogli’ come incurvarsi. In definitiva, la materia qui influenza la materia là.

⁴ Questo legame fra spazio e tempo è già presente nella Relatività Speciale, formulata da Einstein nel 1905. L’aspetto nuovo sta nella curvatura dello spazio-tempo.

3. Il Principio di Equivalenza: formulazioni di Galileo e Newton

Il Principio di Equivalenza costituisce il cuore della teoria della gravitazione di Einstein o, più correttamente, della *geometrodinamica*. Il principio fu concepito e formulato da Galileo intorno al 1600. Galileo eseguì le prime verifiche sperimentali con corpi in caduta, piani inclinati e pendoli. Successivamente, il principio venne ripreso da Newton (1680) ed espresso in termini di identità fra massa inerziale e massa gravitazionale, eseguendo misure con pendoli e diverse sostanze. Il passo successivo, decisivo, si deve ad Einstein (1907). Cominciamo con il rivedere la formulazione del Principio di Equivalenza data da Galileo nei *Discorsi* (1638), [8]:

Le cose da me sin qui prodotte, ed in particolare questa, che la differenza di gravità, ben che grandissima, non abbia parte veruna nel diversificare le velocità de i mobili, sì che, per quanto da quella dipende, tutti si moverebbero con egual celerità, [...] L'esperienza fatta con due mobili quanto più si possa differenti di peso, col fargli scendere da un'altezza per osservar se la velocità loro sia eguale, patisce qualche difficoltà: [...] E però sono andato pensando di reiterar tante volte la scesa da piccole altezze, ed accumulare insieme tante di quelle minime differenze di tempo, che potessero intercedere tra l'arrivo al termine del grave e l'arrivo del leggiero, che così congiunte facessero un tempo non solo osservabile, ma grandemente osservabile. [...] In oltre, per potermi prevaler di moti quanto si possa tardi, ne i quali manco lavora la resistenza del mezzo in alterar l'effetto che dipende dalla semplice gravità, sono andato pensando di fare scendere i mobili sopra un piano declive, non molto elevato sopra l'orizzontale; ché sopra questo, non meno che nel perpendicolo, potrà scorgersi quello che facciano i gravi differenti di peso [...]

Dalla magnifica prosa scientifica di Galileo si evince come, in questa serie di esperimenti fatti studiando la caduta dei corpi in aria e lungo un piano inclinato, Galileo metta in evidenza l'indipendenza dalla massa (*peso*) della caduta di corpi aventi la stessa composizione chimica, se si riuscisse ad eliminare gli effetti del mezzo, ovvero l'attrito con l'aria. E ancora Galileo scriveva:

[...] e passando più avanti, ho anco voluto liberarmi da qualche impedimento che potesse nascer dal contatto di essi mobili su 'l detto piano declive: e finalmente ho preso due palle, una di piombo ed una di sughero, quella ben più di cento volte più grave di questa, e ciascheduna di loro ho attaccata a due sottili spaghetti eguali, [...] allontanata poi l'una e l'altra palla dallo stato perpendicolare, gli ho dato l'andare nell'istesso momento, ed esse, scendendo per le circonferenze de' cerchi descritti da gli spaghetti eguali, lor semidiametri, passate oltre al perpendicolo, son poi per le medesime strade ritornate indietro; e reiterando ben cento volte per lor medesime le andate e le tornate, hanno sensatamente mostrato, come la grave va talmente sotto il tempo della leggiera, che né in ben cento vibrazioni, né in mille, anticipa il tempo d'un minimo momento, ma camminano con passo egualissimo. Scorgesi anco l'operazione del mezzo, il quale, arrecando qualche impedimento al moto, assai più diminuisce le vibrazioni del sughero che quelle del piombo, ma non però che le renda più o men frequenti; anzi quando gli archi

passati dal sughero non fusser più che di cinque o sei gradi, e quei del piombo di cinquanta o sessanta, son eglin passati sotto i medesimi tempi [...]

In questa parte dei *Discorsi*, Galileo mette in risalto una serie di esperimenti fatti con pendoli utilizzando oggetti di diversa composizione chimica. La precisione delle misure di Galileo nell'accelerazione relativa di caduta dei corpi è dell'ordine di $2 \cdot 10^{-3}$, paragonabile alle misure fatte da Newton, sempre utilizzando dei pendoli, ma diversi decenni dopo. Questa serie di esperimenti è databile fra il 1600 ed il 1602. Possiamo riassumere gli esperimenti di Galileo nell'enunciato già anticipato nel § 2: *tutti i corpi cadono nel vuoto con la medesima accelerazione, indipendentemente dalla loro massa e composizione chimica*.

Emergono quindi chiaramente i seguenti aspetti dagli esperimenti condotti da Galileo:

1. l'importanza di eliminare l'effetto del mezzo;
2. l'indipendenza della caduta libera dalla massa dei corpi;
3. l'indipendenza della caduta libera dalla composizione dei corpi;
4. il concetto di misure locali e della loro relazione con la precisione delle stesse misure.

La formulazione di Newton del Principio di Equivalenza risale al 1680 ed è riportata nei *Principia* [18, 19], Definizione I⁵:

It is this quantity that I mean hereafter everywhere under the name of body or mass. And the same is known by the weight of each body; for it is proportional to the weight, as I have found by experiments on pendulums, accurately made, which shall be shown hereafter.

Come si evince, Newton si esprime in termini di proporzionalità fra massa inerziale (corpo o massa) e massa gravitazionale (peso)⁶. Successivamente, nel Libro III, Proposizione VI, Teorema VI, a conferma di quanto sopra scrive:

That all bodies gravitate towards every planet; and that the weights of bodies towards any the same planet, at equal distances from the centre of the planet, are proportional to the quantities of matter which they severally contain.

Qui Newton comincia a riportare i risultati dei suoi esperimenti conseguiti utilizzando pendoli e sostanze di diversa composizione chimica:

It has been, now of a long time, observed by others, that all sorts of heavy [...] descend to the earth from equal heights in equal times; and that equality of

5 Qui utilizzeremo una traduzione in Inglese dei *Principia* [19] che, come è noto, furono scritti in Latino da Newton.

6 Si ricorda che i due tipi di massa esprimono proprietà diverse. La massa inerziale misura l'inerzia di un corpo, ovvero la resistenza che questo oppone alle alterazioni del suo stato. La massa gravitazionale esprime invece la capacità di attrazione fra corpi, è una sorta di carica (attrattiva) gravitazionale.

times we may distinguish to a great accuracy, by the help of pendulums. I tried the thing in gold, silver, lead, glass, sand, [...] I provided two wooden boxes, round and equal: I filled the one with wood, and suspended an equal weight of gold (as exactly as I could) in the centre of oscillation of the other. The boxes hanging by equal threads of 11 feet made a couple of pendulums perfectly equal in weight and figure, and equally receiving the resistance of the air [...] I observed them to play together forward and backward, for a long time, with equal vibrations. And therefore the quantity of matter in the gold [...] was to the quantity of matter in the wood as the action of the motive force (or vis motrix) upon all the gold to the action of the same upon all the wood; that is, as the weight of the one to the weight of the other: [...] By these experiments, in bodies of the same weight, I could manifestly have discovered a difference of matter less than the thousandth part of the whole, [...]

Come si può notare, la precisione delle misure effettuate da Newton era di $1 \cdot 10^{-3}$ nell'accelerazione relativa utilizzando pendoli di diversa composizione, dello stesso ordine di grandezza quindi della precisione delle misure fatte da Galileo.

Newton porta il moto dei satelliti di Giove e quello di Giove stesso nel campo del Sole come ulteriore esempio:

[...] since the satellites of Jupiter perform their revolutions in times which observe the sesquiphiate proportion of their distances from Jupiter's centre, their accelerative gravities towards Jupiter will be reciprocally as the squares of their distances from Jupiter's centre; [...] that the weights of Jupiter and of his satellites towards the sun are proportional to the several quantities of their matter, appears from the exceedingly regular motions of the satellites [...] if some of those bodies were more strongly attracted to the sun in proportion to their quantity of matter than others, the motions of the satellites would be disturbed by that inequality of attraction [...]

Riassumendo, Newton osservò che:

1. le Lune di Giove rivoluzionano intorno a esso come se l'effetto di *attrazione gravitazionale* del Sole fosse nullo;
2. questo è vero se l'attrazione provocata dal Sole su Giove e le sue Lune è la stessa;
3. la forza di gravità prodotta dal Sole deve essere proporzionale alla massa inerziale del corpo da esso attratto.

4. Il Principio di Equivalenza: formulazione di Einstein

Einstein fece proprie le formulazioni di Galileo e Newton del Principio di Equivalenza e andò oltre. Il Principio di Equivalenza di Einstein (PEE) è alla base della Relatività Generale (RG) e della sua struttura geometrica. Con Einstein si hanno tre formulazioni del Principio di Equivalenza.

1. DEBOLE: è alla base delle teorie *praticabili* della gravitazione;

2. MEDIO-FORTE: è alla base delle teorie *metriche* della gravitazione compresa la RG;
3. MOLTO-FORTE, è una caratteristica della RG, ovvero della *geometrodinamica* di Einstein.

Sottolineiamo la differenza tra queste tre formulazioni perché quelle di Newton ed Einstein non sono le uniche teorie della gravitazione. Una teoria si dice *metrica* quando prevede uno *spazio-tempo* curvo e si basa sul PEE. In particolare, una teoria si dice *praticabile* se soddisfa i seguenti requisiti: i) è completa, ii) è auto-consistente, iii) è relativistica, iv) possiede il corretto limite newtoniano.

Per *completezza* di una teoria si intende che essa è in grado di analizzare i risultati di un dato esperimento a partire da alcuni ‘principi primi’. Una teoria è *auto-consistente* quando predice risultati univoci per un dato esperimento. Una teoria si dice *relativistica* quando, in assenza di effetti gravitazionali, le leggi non-gravitazionali della fisica si riducono a quelle della relatività speciale. Infine, una teoria si dice *newtoniana* quando, nel limite di campi gravitazionali deboli e basse velocità rispetto a quella della luce, i risultati della teoria concordano con quelli newtoniani.

Come arrivò Einstein alla sua formulazione del Principio di Equivalenza? Partì dall’osservazione che in un sistema di riferimento accelerato (ovvero non-inerziale nella visione newtoniana) si avverte una forza apparente che è proporzionale alla massa (inerziale) del corpo su cui agisce ed è opposta all’accelerazione del sistema di riferimento. Ma allora la forza apparente nel riferimento accelerato gode della stessa proprietà della forza di gravità di Newton (per la seconda legge della dinamica): entrambe sono *proporzionali* alla massa inerziale del corpo sul quale agiscono.

È opportuno notare che si tratta di un risultato sperimentale: non c’è una spiegazione teorica per questo fatto. Secondo Einstein *l’identità* delle due masse, ossia la *proporzionalità* delle due forze (quella di gravità e quella apparente) con la massa non è casuale, ma piuttosto esprime la *vera natura* della gravitazione.

Si consideri un sistema di riferimento in caduta libera – il famoso ascensore di Einstein con i cavi recisi – e una pallina libera posizionata nel centro di massa dell’ascensore. Si osserverà che la pallina non si muove rispetto alle pareti e al pavimento o al tetto dell’ascensore. Perché? Perché la forza risultante, somma di quella di gravità rivolta verso il basso e di quella apparente rivolta verso l’alto, è nulla⁷. Questo risultato non solo implica l’identità fra massa inerziale m_i (quella al secondo membro della seconda legge della dinamica) e quella gravitazionale m_g (quella che compare nella legge della gravitazione universale di Newton), ma implica anche l’assenza di *peso*. Allora, poiché la forza risultante è nulla, se alla pallina diamo una piccola spinta, in accordo con il *Principio di Inerzia* di Galileo, questa si muoverà di moto rettilineo e uniforme.

⁷ Si noti che l’accelerazione apparente, eguale e opposta a quella del riferimento in caduta libera, è anche eguale in modulo a quella di gravità della pallina, perché questa è collocata nel centro di massa dell’ascensore.

Quindi, se ci dimentichiamo della forza di gravità, il riferimento in *caduta libera* altro non è che un riferimento inerziale! Sostanzialmente è come trovarsi in un riferimento (laboratorio) che, lontano da qualsiasi corpo, si muove di moto rettilineo e uniforme. La conclusione di Einstein è la seguente:

eseguendo un qualsiasi esperimento di fisica all'interno del riferimento in caduta libera, dai risultati locali non potrò distinguere il mio riferimento da quello costituito da un riferimento inerziale lontano da qualsiasi campo gravitazionale.

Attenzione: quest'affermazione vale solo localmente (sia nello spazio che nel tempo) perché il campo gravitazionale non è uniforme, ovvero esistono le forze di marea.

Il lettore potrebbe chiedersi: *ma cosa c'entrano le forze di marea con il Principio di Equivalenza?* Inoltre, se le forze di gravità della Luna e del Sole si annullano in un riferimento in caduta libera: *come possiamo parlare delle maree provocate da tali corpi?* La risposta a tali domande sta proprio nel significato locale del Principio di Equivalenza, ossia: i riferimenti in caduta libera sono localmente (nello spazio e nel tempo) equivalenti a un riferimento inerziale.

Al fine di capire meglio questo punto, consideriamo una Terra sferica⁸. In questo caso l'accelerazione di gravità è, come noto dalla legge di Newton della gravitazione universale ($F_G = G M_g m_g / r^2$), inversamente proporzionale al quadrato della distanza. Allora, oggetti a diversa distanza dal centro della Terra saranno soggetti a diverse accelerazioni: maggiore è la distanza dal centro della Terra, minore risulterà l'accelerazione.

Supponiamo di considerare, nel nostro riferimento in caduta libera, tre palline e non una come in precedenza, allineate lungo la direzione radiale, con quella centrale ancora posizionata nel centro di massa dell'ascensore e le altre poste sopra e sotto a distanza D da questa. La forza apparente è la stessa per le tre palline ma, mentre questa eguaglia la forza di gravità per la pallina posizionata nel centro di massa, per quella posizionata sopra risulta maggiore, perché questa è più lontana dal centro della Terra, mentre per quella posizionata sotto, risulta inferiore, perché questa risulta più vicina al centro della Terra. La forza risultante non è più nulla per queste palline e, nel riferimento dell'ascensore, vedremo quella più distante dal centro della Terra spostarsi verso il soffitto, mentre quella più vicina spostarsi verso il pavimento. Quindi le distanze relative fra le palline crescono. Ecco, in questi spostamenti relativi si esplicano le forze di marea che, nella visione di Einstein, misurano la curvatura dello *spazio-tempo*.

Se supponiamo di sostituire le palline con una nube sferica di particelle d'acqua attorno al centro di massa dell'ascensore in caduta libera, vedremo la nube sferica trasformarsi in un ellissoide, stirandosi nella direzione radiale e schiacciandosi trasversalmente: si forma l'ellissoide di marea. Questo è ciò che avviene per gli oceani e la crosta terrestre, perché la Terra è in caduta libera nei campi gravitazionali di Luna e Sole. La forza residua (non cancellata) delle maree lunari è circa il doppio di quelle solari.

⁸ Il fatto che la Terra reale non sia sferica non altera i termini della discussione che segue.

Questo lo si può capire dalla espressione matematica della forza di marea che, con ottima approssimazione, è data da $\Delta F \cong 2(GM_g m_g / r^3)D$.

Come si può notare, la forza di marea, al pari quella di gravità, dipende dal prodotto delle masse ma è inversamente proporzionale al cubo della distanza e non al suo quadrato. Inoltre, la forza di marea è proporzionale alla distanza D , ovvero alla dimensione caratteristica dell'oggetto su cui agisce. L'equazione ci spiega quindi perché le maree lunari sono più grandi di quelle solari: sebbene la Luna abbia una massa molto più piccola di quella del Sole, essa è molto più vicina. Infine, sebbene questa nostra discussione si sia basata su un'espressione newtoniana, la sua dipendenza dalla separazione D ci aiuta a capire l'importanza del concetto di *locale* nella formulazione del Principio di Equivalenza.

A questo punto possiamo esplicitare le tre formulazioni di Einstein del Principio di Equivalenza [4].

Formulazione DEBOLE: *il moto di una qualsiasi particella di prova in caduta libera è indipendente dalla sua composizione e struttura.*

La formulazione DEBOLE è anche indicata in termini della *universalità della caduta libera* e si basa sul principio secondo il quale il rapporto fra la massa inerziale e quella gravitazionale è costante.

Per “particella di prova” si intende una particella:

1. elettricamente neutra;
2. con energia di legame gravitazionale trascurabile rispetto alla sua massa a riposo;
3. con momento angolare trascurabile;
4. sufficientemente piccola da far sì che le eventuali disomogeneità del campo gravitazionale all'interno del suo volume abbiano un effetto trascurabile sul suo moto.

In definitiva, l'enunciato DEBOLE del Principio di Equivalenza di Einstein può anche enunciarsi come segue: *in un qualsiasi riferimento locale (non rotante) in caduta libera, la traiettoria seguita da una particella di prova in caduta libera è una linea retta, in accordo con la relatività speciale.*

Formulazione MEDIO-FORTE: *per ogni evento “puntiforme” dello spazio-tempo esiste un intorno sufficientemente piccolo, tale che, in ogni riferimento locale in caduta libera in tale intorno, tutte le leggi non-gravitazionali della fisica obbediscono alle leggi della relatività speciale.*

Con questa formulazione Einstein generalizza il Principio di Equivalenza a tutte le leggi della fisica esclusa la gravitazione stessa. In tal modo, Einstein postula che in nessun riferimento in *caduta libera* sia possibile rilevare l'esistenza di un *campo gravitazionale* da un qualsiasi esperimento di fisica *non-gravitazionale*: meccanico, termodinamico, elettromagnetico, nucleare, ... Quando in letteratura si parla di PEE, solitamente

ci si riferisce alla presente formulazione MEDIO-FORTE. Tale principio è soddisfatto dalla RG (*Geometrodinamica*) e dalle teorie *metriche* della gravitazione.

Formulazione MOLTO-FORTE: *per ogni evento “puntiforme” dello spazio-tempo esiste un intorno sufficientemente piccolo tale che, in ogni riferimento locale in caduta libera in tale intorno, tutte le leggi della fisica obbediscono alle leggi della relatività speciale.*

La presente formulazione è estesa a TUTTE le leggi della fisica – non solo a quelle *non-gravitazionali*, come nella formulazione MEDIO-FORTE. Inoltre, la formulazione MOLTO-FORTE del Principio di Equivalenza è una peculiarità della RG di Einstein, quindi è alla base della sua *geometrodinamica*.

5. Lo spazio-tempo della relatività

Esiste un concetto intuitivo, oltre a quello delle forze di marea, che possa aiutarci ulteriormente a comprendere un po' più a fondo la teoria della gravitazione di Einstein e, in particolare, le proprietà dello *spazio-tempo*? E poi, che cosa è il *tensore metrico* citato nell'Introduzione?

Partiamo da un esempio concreto. Come possiamo descrivere il moto di un corpo, diciamo di un punto materiale o particella, secondo la relatività di Einstein? In relatività si parla in termini di *linea di universo* seguita dalla particella. Nella fisica galileiana e newtoniana sappiamo come procedere: si usa il tempo (assoluto) t come parametro per descrivere le successive posizioni assunte dalla particella nello spazio tridimensionale euclideo. Se con \vec{r} indichiamo la *posizione (vettore) spaziale della particella*, la *traiettoria* sarà descritta da $\vec{r}(t)$, che fornisce la legge oraria.

In relatività le cose stanno diversamente perché il tempo t è una semplice coordinata (assieme a quelle spaziali)⁹ e non ha il carattere assoluto che ha nella fisica newtoniana (“vero”, “matematico”, che scorre indipendentemente da tutto il resto). Abbiamo allora bisogno di un nuovo parametro che abbia un carattere assoluto e con la caratteristica di crescere (dal passato al futuro) lungo la *linea di universo* della particella. Questo parametro prende il nome di *tempo proprio* della particella e rappresenta una “*lunghezza*” nello *spazio-tempo*. Si dice anche che è un *invariante*. Indichiamolo con la lettera τ dell'alfabeto greco.

Il *tempo proprio* è il tempo che segna un orologio attaccato alla particella, cioè che viaggia con il corpo. Il fatto che sia un *invariante* dello *spazio-tempo* significa che non dipende dal sistema di coordinate utilizzato per descrivere il moto della particella: in altre parole, assume lo stesso valore in tutti i sistemi di riferimento. Per comprendere questa frase si deve capire il termine “*lunghezza*” nello *spazio-tempo*.

Nella geometria euclidea, la distanza fra due punti, o, se si preferisce, la lunghezza di un'asta rigida, è una grandezza invariante. Infatti, indipendentemente dal sistema di coordinate spaziali utilizzate, il suo valore è sempre lo stesso e si ottiene applicando il Teorema di Pitagora. Cambiano i valori delle componenti (due se operiamo nel piano,

⁹ Ricordiamoci che in precedenza abbiamo sottolineato come in relatività spazio e tempo siano interdipendenti.

tre se operiamo nello spazio), ma non la radice quadrata della somma dei loro quadrati. In altri termini, indipendentemente dal sistema di coordinate, la lunghezza dell'asta è quel numero che otteniamo misurando direttamente la distanza fra i suoi estremi con un metro. Se assumiamo un sistema di coordinate cartesiane ortogonali, per il quadrato della lunghezza $\Delta\ell$ dell'asta possiamo scrivere $\Delta\ell^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$, con ovvio significato per i diversi simboli.

Nel caso dello *spazio-tempo* piatto della relatività speciale, la lunghezza invariante $\Delta\tau$ è legata alle coordinate spazio-temporali da una relazione analoga alla precedente ma con una piccola (ma sostanziale) differenza di segno, ovvero $\Delta\tau^2 = \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2$. In questa espressione si è implicitamente assunto di utilizzare le stesse unità per tutte le coordinate; ad esempio, possiamo misurare tutte le coordinate in secondi o tutte in centimetri. La velocità della luce c , che è costante e invariante, gioca semplicemente il ruolo di un fattore di conversione dalle unità di distanza a quelle di tempo, o viceversa, ed è stata assunta eguale a 1 nello scrivere l'espressione per l'intervallo di *tempo proprio* $\Delta\tau$.

I coefficienti che moltiplicano i quadrati delle coordinate nell'espressione della lunghezza dello *spazio-tempo*, rispettivamente $[1, -1, -1, -1]$, rappresentano le componenti del tensore metrico dello *spazio-tempo* piatto della relatività speciale¹⁰.

Questo è ciò che accade nella relatività speciale, ma come cambiano le cose in relatività generale? In altre parole, quale è l'effetto della *curvatura* dello *spazio-tempo* sul tensore metrico? La risposta sta in quanto detto nel § 4.

In relatività generale non è possibile costruire un riferimento inerziale per così dire "globale", ovvero: in presenza di campi gravitazionali non è possibile coprire tutto lo *spazio-tempo* con un singolo riferimento inerziale. Al contrario, i riferimenti inerziali (per il Principio di Equivalenza) hanno solo un significato locale (nello spazio e nel tempo) e sono i riferimenti (non rotanti) in caduta libera. In tali riferimenti possiamo localmente annullare la gravità a meno delle forze di marea, che risultano una misura della curvatura dello *spazio-tempo*.

Per dirla in termini puramente matematici, se indichiamo con η il tensore metrico dello *spazio-tempo* piatto della relatività speciale e con \mathbf{g} quello dello *spazio-tempo* curvo della relatività generale, per il Principio di Equivalenza in un riferimento in caduta libera (localmente) \mathbf{g} tenderà a η ($\mathbf{g} \rightarrow \eta$). In tale riferimento si potranno annullare le derivate prime di \mathbf{g} , ma non le derivate seconde che si legano alla curvatura. Per dirla ancora in altri termini, in relatività generale le componenti del tensore metrico dipendono dalle coordinate stesse e, qualunque sistema di coordinate si scelga fra tutti i possibili sistemi di coordinate, non se ne troverà mai uno in cui tali componenti risultino formate dalla sequenza $[1, -1, -1, -1]$.

¹⁰ Non ci interessa approfondire ulteriormente che cosa sia un tensore. Per chi ha familiarità con l'algebra lineare possiamo ulteriormente sottolineare che si tratta di una matrice 4×4 diagonale i cui elementi sono dati da $[1, -1, -1, -1]$ nel caso dello spazio-tempo piatto della relatività speciale introdotto nel testo.

6. Osservazioni cosmologiche e modelli teorici

Ci sono evidenze *osservative* così come argomenti *teorici* sulla base delle quali si prevedono modifiche alla struttura geometrica della Relatività Generale e possibili violazioni del Principio di Equivalenza.

A) EVIDENZE OSSERVATIVE. Le evidenze *osservative* si basano principalmente sull'espansione dell'universo e la sua accelerazione da una parte e sugli (apparentemente) anomali comportamenti dei moti delle stelle alla periferia delle galassie¹¹ dall'altra, osservazioni attualmente interpretate con la (possibile) presenza di ciò che i fisici hanno chiamato, rispettivamente, *energia oscura* e *materia oscura*. Infatti, a partire dalla fine degli anni '90 del secolo scorso, le misure della distanza di galassie lontane grazie alle esplosioni di *Supernovae* Ia [10], che fungono da candele standard, così come le misure sempre più precise della distribuzione della radiazione cosmica di fondo - il residuo fossile a circa 2.7 K del Big Bang - e delle sue fluttuazioni [5,14], hanno mostrato che la materia così come la conosciamo (si dice barionica) sembra costituire soltanto il 4% della massa-energia presenti nell'universo visibile. Circa il 73% dell'universo sarebbe costituito da una qualche forma di energia non spiegabile (apparentemente) dalle nostre attuali leggi della fisica, a cui è stato dato il nome di *energia oscura*. Il restante 27% sarebbe costituito da materia, la cui la stragrande maggioranza (il 23% dei costituenti dell'universo) si presenterebbe non visibile e principalmente dislocata all'interno delle galassie e, in particolar modo, all'interno degli ammassi di galassie, a cui è stato dato quindi il nome di *materia oscura fredda*.

B) ARGOMENTI TEORICI. Gli argomenti *teorici* si basano sul fatto che la teoria di Einstein è una teoria *classica* della gravitazione, ovvero *non-quantistica*, mentre le altre forze della natura si interpretano in una teoria quantistica delle diverse interazioni, che ha portato al *Modello Standard* [11, 26, 23] della fisica delle particelle: l'interazione elettromagnetica, l'interazione nucleare forte e l'interazione nucleare debole. A oggi, tutti gli sforzi effettuati nell'unificare l'interazione gravitazionale, e quindi il suo modello standard, ovvero la Relatività Generale, con le altre interazioni fondamentali della natura in un'unica teoria quantistica dei campi sono falliti. Questi sforzi prevedono l'introduzione di nuovi campi (scalari, vettoriali, tensoriali) in aggiunta al tensore metrico \mathbf{g} di Einstein, che portano, naturalmente, a una violazione del Principio di Equivalenza.

In particolare, negli ultimi trent'anni la comunità dei fisici teorici si è sempre più focalizzata sulla *teoria delle stringhe* [2] e sulle sue possibili varianti. Secondo questa teoria¹² le diverse particelle del *Modello Standard* altro non sarebbero che diverse "manifestazioni" di un'entità chiamata *stringa* (o *corda*): a seconda della frequenza di oscil-

11 Si tratta delle curve di rotazione delle galassie che tendono a diventare asintoticamente piatte ad un valore costante della velocità periferica, quando ci si aspetterebbe, dal punto di vista classico, un andamento del tipo $v \propto 1/\sqrt{r}$.

12 Si tratta di una teoria molto ambiziosa chiamata anche Teoria del Tutto.

lazione di una corda, essa si manifesterebbe come elettrone piuttosto che come protone o come una qualsiasi altra particella nota¹³. Una delle predizioni della teoria delle stringhe riguarda le dimensioni dello *spazio-tempo*. Queste non sarebbero soltanto le quattro discusse in precedenza, ma potrebbero essere 10 o 11, o addirittura 26, a seconda della variante che si considera di questa teoria. La teoria delle stringhe, che si propone di unificare le diverse interazioni della natura – e di avere come limite sia la meccanica quantistica sia la relatività generale – dovrebbe quindi anche fornirci la corretta teoria della gravità quantistica tanto cercata dai fisici.

Ma le cose stanno proprio così? Si è certi di queste misure? O meglio, si è certi nel considerarle nel giusto contesto fisico? Sono corrette le equazioni che utilizziamo per i possibili modelli cosmologici? E, in esse, è preso nella giusta considerazione il ruolo della costante cosmologica Λ ? Ci sono riscontri sperimentali alle predizioni della teoria delle stringhe? Risponderemo a tali domande cercando di mettere in evidenza alcune questioni aperte:

1. Le osservazioni ci dicono che su grande scala l'universo è spazialmente piatto, ovvero euclideo. Queste osservazioni, anche se corrette, si riferiscono a una porzione (quella visibile) dell'universo in cui viviamo – si dice “alla scala del nostro orizzonte”, che è dell'ordine dell'inverso della costante di Hubble H , cioè pari a circa 13,7 miliardi di anni. Le dimensioni spaziali dell'universo, sulla base dei modelli cosmologici, dovrebbero essere più grandi di almeno un fattore 10 tenendo conto delle osservazioni. Ma allora la curvatura globale dell'universo non potrebbe evidenziarsi oltre il limite $\approx 1/H$? (Ciò in analogia con quel che avviene per la superficie curva della Terra e l'orizzonte apparente piatto di un suo osservatore qualsiasi.);
2. Recentemente i comportamenti anomali delle stelle di ben 47 galassie, particolarmente ricche di gas interstellare, sono stati interpretati in buon accordo con una modifica della interazione gravitazionale di Newton che prende il nome di teoria di MOND¹⁴ [16], dunque *senza ricorrere alla materia oscura fredda*. Possibile allora che la *materia oscura* conti per le misure riguardanti la radiazione cosmica di fondo e non per le curve di rotazione delle galassie? Tutto questo è coerente con il *Principio Cosmologico* (implicitamente ammesso in cosmologia)¹⁵ secondo cui, ovunque si osservi l'universo nel suo complesso,

13 Ciascun modo di oscillazione si caratterizza per un certo numero di numeri quantici che rappresentano quindi i diversi tipi di particelle che conosciamo. In una maniera molto intuitiva possiamo dire che le diverse particelle si manifestano come le diverse note musicali da una singola corda di violino a seconda di come questa venga pizzicata.

14 Acronimo di MODified Newtonian Dynamics. Una delle predizioni di questa teoria riguarda la relazione esistente fra la massa della galassia e l'andamento piatto della curva di rotazione delle galassie.

15 Il Principio Cosmologico ha più una natura filosofica che fisica, esso vorrebbe dirci che non ci troviamo in nessun punto privilegiato (sia nello spazio che nel tempo) dell'universo.

questo si presenta omogeneo e isotropo?

3. La costante cosmologica Λ fa parte naturalmente delle equazioni dei campi di Einstein e giocherebbe un ruolo fondamentale per interpretare l'espansione dell'universo e la sua accelerazione *senza ricorrere all'energia oscura*;
4. Fino a oggi non esiste una verifica sperimentale delle previsioni della teoria delle stringhe, o, per dirla ancora più esplicitamente, nessuna delle previsioni della teoria è verificabile dal punto di vista sperimentale;
5. Infine – e, forse, cosa ancor più significativa – se vogliamo dar credito alla teoria della gravitazione di Einstein, dobbiamo anche considerare che le equazioni dei campi della relatività generale sono molto complicate da risolvere dal punto di vista matematico, salvo alcuni (rari) casi caratterizzati da particolari simmetrie. Quindi, forse non siamo ancora in grado di trovare le soluzioni, in certi contesti, che ci permetterebbero di interpretare correttamente le evidenze osservative, almeno laddove gli effetti quantistici sono trascurabili.

Non possiamo qui approfondire ulteriormente le cinque questioni, i cui aspetti sono comunque incompleti per fornire un quadro esauriente dello *status dell'arte* di osservazioni e teorie fisiche. Tali aspetti sono stati introdotti perché mettono in evidenza quanto sia difficile 'costruire', oggi più di ieri, un paradigma cosmologico soddisfacente e, in definitiva, quanto sia importante verificare la teoria della gravitazione di Einstein in tutte le sue possibili previsioni.

7. Conclusioni

Nei precedenti paragrafi sono state introdotte le *idee* ispiratrici della teoria della gravitazione di Albert Einstein, o *geometrodinamica*. Il cuore della teoria si fonda sul Principio di Equivalenza di Einstein, base della relatività generale e della sua struttura geometrica. Esso è quindi alle fondamenta della teoria e la sua continua verifica sperimentale costituisce una delle più importanti attività della moderna fisica fondamentale.

Fino a oggi, la teoria di Einstein ha superato brillantemente tutte le verifiche sperimentali, soprattutto in campo debole, come vale per gli esperimenti condotti nei laboratori terrestri e per quelli eseguiti nel sistema solare, ma anche in campi più intensi (sistema binario con pulsar al milli-secondo).

Tutto questo non è, però, sufficiente. Come si è accennato nel § 6, le osservazioni cosmologiche non sono (apparentemente) spiegabili in termini della sola teoria della gravitazione di Einstein. Inoltre, le verifiche delle previsioni della relatività generale in campi estremamente intensi non sono mai state effettuate e richiedono (probabilmente) una teoria quantistica della gravitazione. Da questo quadro generale risulta l'importanza di nuove e più precise misure delle predizioni della teoria della relatività generale e, in particolare, della verifica della validità del Principio di Equivalenza di Einstein nelle sue diverse formulazioni: DEBOLE, MEDIO-FORTE, MOLTO-FORTE.

Nella Introduzione abbiamo segnalato come esso sia oggi verificato con una preci-

sione dell'ordine di 1 parte in 10^{13} . Queste misure sono state ottenute confrontando l'accelerazione relativa di caduta libera di sostanze con diversa composizione chimica nel campo del Sole utilizzando una bilancia di torsione rotante – tramite esperimenti di laboratorio – e comparando la caduta di Terra e Luna nel campo del Sole tramite la tecnica del Lunar Laser Ranging (LLR)¹⁶. Una maggiore precisione – di qualche ordine di grandezza – nella verifica del Principio di Equivalenza consentirebbe (eventualmente) di poter discriminare fra le diverse teorie alternative della gravità, che prevedono violazioni per diversi valori della accelerazione relativa di caduta libera di corpi con diversa composizione chimica.

La svolta potrebbe aversi con sofisticati (e precisi) esperimenti di caduta libera a bordo di satelliti artificiali attorno alla Terra. La caduta libera e il segnale di riferimento relativamente grande, l'accelerazione orbitale essendo in questo caso circa tre ordini di grandezza più grande¹⁷ rispetto a quella della Terra nel campo del Sole, consentono l'utilizzo di masse di diversa composizione molto più grandi rispetto a quelle degli esperimenti terrestri, con il grande vantaggio di essere però debolmente accoppiate e con lunghi tempi di integrazione – ossia di raccolta dati – contro i pochi secondi della caduta libera in esperimenti da torri di caduta. Le masse debolmente accoppiate (diciamo a mezzo di opportune molle) in caduta libera – per esempio, due cilindri di diversa composizione con gli assi ed i centri di massa coincidenti – costituiscono un accelerometro differenziale che, se messo in rotazione, consente di modulare il segnale di un'eventuale violazione del Principio di Equivalenza a una ben determinata frequenza, con il vantaggio di separare questo segnale da altri effetti perturbativi che potrebbero mascherare o mimare il segnale (eventuale) di violazione.

Fra le diverse proposte di missione di questo genere segnaliamo *Galileo Galilei (GG)* dell'Università di Pisa. Questo esperimento, in avanzata fase di studio e progettazione, potrebbe verificare *l'universalità della caduta libera*, ovvero la forma DEBOLE del Principio di Equivalenza, con una precisione dell'ordine di 1 parte in 10^{17} [20], corrispondente a un salto in avanti di ben 4 ordini di grandezza!

Termina qui questa Lettera principalmente focalizzata sui fondamenti della *geometrodinamica* di Einstein, con particolare attenzione al Principio di Equivalenza e alla struttura dello *spazio-tempo*. L'argomento è assai vasto, con collegamenti fra fisica teorica, esperimenti, osservazioni e modelli cosmologici, ciascuno dei quali richiederebbe, anche per una semplice trattazione divulgativa, molto più spazio. La speranza è di aver destato nel lettore un interesse da coltivare ulteriormente con letture più approfondite e finalizzate. Segnalo, a questo proposito, una serie di testi a carattere divulgativo per

16 Da opportune stazioni laser terrestri si sparano impulsi di breve durata verso degli specchi laser riflettori posizionati sulla superficie della Luna. Dalla misura del tempo di andata e ritorno si risale alla misura della distanza del nostro satellite naturale (con accuratezza centimetrica) e da questa, tramite opportuni modelli, ad una serie di parametri legati alla geofisica della Luna (struttura interna, librazioni, ...) e alla Relatività Generale.

17 Per satelliti in orbita bassa, diciamo 500 km in altezza, l'accelerazione di gravità g è circa 8.4 m/s^2 .

approfondire i temi discussi nella presente Lettera¹⁸: per la relatività, si consigliano [25] e [21]; per la meccanica quantistica, [9]; infine, per la teoria delle stringhe, [12].

¹⁸ La Bibliografia citata fino a questo punto, ad eccezione di alcune voci [15,8,18,19], è piuttosto specialistica e di non facile lettura.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Baeßler, S., Heckel, B. R., Adelberger, E. G., et al., Improved Test of the Equivalence Principle for Gravitational Self-Energy, *Phys. Rev. Lett.* 83, 3585 (1999).
- [2] Becker, K., Becker, M., and Schwarz, J. H., *String Theory and M-Theory: A Modern Introduction*, Cambridge University Press, Cambridge 2007.
- [3] Burgay, M., D'Amico, N., Possenti, A., et al., An increased estimate of the merger rate of double neutron stars from observations of a highly relativistic system, *Nature* 426, 531-533 (2003).
- [4] Ciufolini I., Wheeler, J. A., *Gravitation and Inertia*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1995.
- [5] De Bernardis P., et al., Multiple peaks in the angular power spectrum of the cosmic microwave background: significance and consequences for cosmology, *The Astrophys. Journ.* 564, 559 (2002).
- [6] Einstein, A., Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, *Ann. Phys.* 354, 769 (1916).
- [7] Einstein, A., *The Meaning of Relativity*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1955.
- [8] Galilei, G., *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a due nuove scienze*, Elsevier, 1638.
http://www.liberliber.it/biblioteca/g/galilei/discorsi_e_dimostrazioni_matematiche_intorno_a_due_nuove_etc/html/index.htm.
- [9] Gilmore, R., *Alice nel paese dei quanti. Le avventure della fisica*, Raffaello Cortina, Milano 1996.
- [10] Glanz, J., Astronomy: Cosmic Motion Revealed, *Science* 282 n. 5397, 2156 (1998).
- [11] Glashow, S., Partial-symmetries of weak interactions, *Nucl. Phys.* 22, n. 4, 579 (1961).
- [12] Green, B., *L'universo elegante*, Einaudi, Torino 1999.
- [13] Hulse, R. A., Taylor, J. H., Discovery of a pulsar in a binary system, *Astrophys. J.* 195, L51-3 (1975).
- [14] Jarosik N., et al., Seven-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: sky maps, systematic errors, and basic results, *The Astrophys. Journ. Suppl. Series*, 192:14 (2011).
- [15] Mach, E. F. J. W., *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*, 1883; trad. it. *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, 1908 (Boringhieri, Torino, 1977).
- [16] Milgrom, M., A modification of the Newtonian Dynamics: implication for Galaxies, *The Astrophys. Journ.* 270, 371 (1983).
- [17] Misner, C. W., Thorne, K. S., Wheeler, J.A., *Gravitation*. W.H. Freeman & Company, San Francisco, 1973.

- [18] Newton, I., *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, 1687; trad. it. *Principi matematici della filosofia naturale*, Utet, Torino 1997.
- [19] Newton, I., *Mathematical Principles of Natural Philosophy*, A. Motte, D. Adee, New York, 1846. <http://www.archive.org/details/newtonspmathema00newtrich>.
- [20] Nobili, A. M., et al., “Galileo Galilei” (GG) a small satellite to test the equivalence principle of Galileo, Newton and Einstein, *Exp. Astron.* 23, 689 (2009). <http://eotvos.dm.unipi.it/ggproject.html>.
- [21] Penrose, R., *Il grande, il piccolo e la mente umana*, Raffaello Cortina, Milano, 1998.
- [22] Riemann, G. F. B., Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen, in Id., *Gesammelte Mathematische Werke* (1866); trad. it. in *Sulle ipotesi che stanno a fondamento della geometria e altri scritti scientifici e filosofici*, Bollati Boringhieri, Torino 1994.
- [23] Salam, A., Svartholm, N., *Elementary Particle Physics: Relativistic Groups and Analyticity*, Nobel Symposium n. 8, Almquist and Wiksell, Stoccolma 1968.
- [24] Su, Y., Heckel, B. R., Adelberger, E. G., et al., New tests of the universality of free fall, *Phys. Rev. D* 50, 3614 (1994).
- [25] Taylor, E. F., Wheeler, J. A., *Fisica dello spazio-tempo*, Zanichelli, Bologna 1999.
- [26] Weinberg, S., A Model of Leptons, *Phys. Rev. Lett.* 19, 1264 (1967).
- [27] Will, C. M., *Theory and Experiment in Gravitational Physics*, Cambridge University Press, Cambridge/New York 1993. <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2006-3>.
- [28] Williams, J. G., Turyshev, S. G., Boggs, D. H., Progress in lunar laser ranging tests of relativistic gravity, *Phys. Rev. Lett.* 93, 261101 (2004).

PREMIO GIULIO PRETI

Quarta edizione



MOTIVAZIONI PER IL CONFERIMENTO DEL PREMIO AL PROF. FRANCIS WILLIAM LAWVERE

Il Premio Giulio Preti, istituito nel 2007 dal Consiglio regionale della Toscana, rappresenta ogni anno l'evento conclusivo del programma di Pianeta Galileo. Il Premio è stato intitolato al filosofo Giulio Preti per il suo impegno nei confronti di una cultura in cui scienza e filosofia non siano più pensate come due ambiti reciprocamente estranei o in opposizione, bensì unite da un dialogo che valorizzi il comune sforzo di comprensione della natura e del posto dell'uomo nella natura. Ciò al fine di promuovere una più avanzata cittadinanza democratica, fornendo la cornice di un'educazione in cui l'abito razionale dell'indagine scientifica sia parte integrante della formazione dei cittadini. Il fatto che tale Premio si collochi entro una manifestazione nel nome di Galileo trova la sua più naturale ragione nello spirito da cui la manifestazione è nata: quando, nel 1610, Galileo venne chiamato dal Granduca di Toscana Cosimo II de' Medici, la nomina ricevuta fu quella di "matematico e filosofo primario". Galileo univa in una stessa persona – e la sua opera ne dà ampia testimonianza –, l'interesse sia per la matematica sia per la filosofia. Da questa congiunzione di interessi trassero nutrimento le sue scoperte nel campo di quella che Galileo chiamava "filosofia naturale" e che oggi chiamiamo "fisica".

Dai tempi di Galileo a oggi, la fisica, la matematica e la filosofia hanno preso strade diverse, ma ci sono ancora studiosi che testimoniano nella loro opera l'esigenza di un raccordo, non superficiale e non occasionale, bensì profondo e sistematico, e sono studiosi animati dall'idea che lo spirito della ricerca scientifica e la condivisione, aperta a tutti, dei suoi risultati siano essenziali per il progresso civile. Fra essi sicuramente c'è Francis William Lawvere, uno dei maggiori matematici viventi, che ha contribuito in maniera sostanziale allo sviluppo della teoria delle categorie e ne ha precisato il senso filosofico.

Nato nel 1937 a Moncie (Indiana) lo statunitense Francis William (Bill) Lawvere ha conseguito il Ph.D. alla Columbia University con Samuel Eilenberg, il quale negli anni quaranta, insieme a Saunders Mac Lane, aveva introdotto la teoria della categorie. Dopo aver svolto attività di ricerca presso l'ETH di Zurigo, l'University of Chicago (ove insegnava Mac Lane) e la Dalhousie University, a Halifax, Canada, Lawvere ha insegnato all'Università di Perugia dal 1972 al 1974 e dal 1974 in poi è stato professore di matematica alla State University di New York nella sede di Buffalo, ove ha ricevuto il titolo di Emerito sia in matematica sia in filosofia.

Autore di numerosi contributi che hanno aperto nuove linee di ricerca in più di un'area della matematica, Lawvere è anche autore di una serie di monografie alcune delle quali sono rivolte a far conoscere a non specialisti i concetti fondamentali della teoria delle categorie e i modi in cui essa può essere impiegata per affrontare quesiti che interessano le più diverse branche della matematica. Tra queste monografie basti

qui ricordare *Conceptual mathematics: a first introduction to categories* del 1997 (testo di cui è coautore Steve Schanuel; di una prima stesura dell'opera esiste una traduzione italiana col titolo *Teoria delle categorie: un'introduzione alla matematica*, 1994) e *Sets for mathematics* del 2003 (con Robert Rosebrugh). Entrambi i testi sono nati da una lunga esperienza di ricerca e di didattica ed esprimono nel modo migliore l'intento di costituire una base innovativa per l'insegnamento della matematica. Lawvere ha anche svolto un'ampia attività di curatore, di cui sono testimonianza vari volumi, tra i quali *Toposes, algebraic geometry and logic*, 1972, *Categories in continuum physics*, 1982, i cui soli titoli lasciano intuire l'ampiezza dei temi indagati da Lawvere e la specificità dei suoi contributi.

Entrando nel merito dell'attività di ricerca di Lawvere, potranno essere qui tratteggiate soltanto alcune delle sue principali e più innovative scoperte, che hanno portato allo sviluppo di intere aree che prima non esistevano. Per ragioni di brevità saranno elencati soltanto quattro importanti risultati conseguiti da Lawvere.

Il primo di essi risale al 1964 ("An elementary theory of the category of sets") e consiste nell'aver mostrato come assiomatizzare la teoria degli insiemi in termini puramente categoriali, senza fare uso del simbolo di appartenenza. Il secondo consiste nell'aver introdotto nei primi anni settanta, insieme a Myles Tierney, il concetto di "topos elementare", tirando le fila di ricerche relative alla geometria algebrica, nell'impostazione datale da Alexandre Grothendieck, e facendo della teoria dei topoi la più generale e flessibile cornice sia per lo sviluppo dell'analisi sia per la formulazione di una dinamica categoriale. Il terzo consiste nell'aver mostrato come esprimere tutte le nozioni della logica in linguaggio categoriale (mediante quelli che si chiamano "funtori aggiunti" - si veda "Quantifiers and sheaves", del 1971): un risultato, questo, che non solo ha fatto nascere la logica categoriale come nuova branca della logica, ma ha anche consentito di intendere la natura della logica in modo diverso da come tradizionalmente era stata descritta. Il quarto, infine, è il teorema di punto fisso che da lui prende nome e che ha permesso di vedere in una luce nuova i classici teoremi di Gödel e Tarski come casi particolari di una situazione molto più generale ("Diagonal arguments and cartesian closed categories", 1969).

È semplicemente straordinario che tutto ciò abbia potuto trovare posto entro un quadro unitario dei fondamenti della matematica, un quadro che negli ultimi quarant'anni ha avuto vaste ramificazioni; ed è significativo che l'attenzione di Lawvere per una nuova didattica della matematica sia strettamente connessa proprio con la sua concezione dei fondamenti e, conseguentemente, con una filosofia "dialettica" della matematica che mette al centro concetti e costruzioni "universali", grazie ai quali diventa possibile unificare i vari ambiti della matematica non semplicemente attraverso l'uso di uno stesso linguaggio, ma anche attraverso principi che, trasversali ai settori, si concretizzano di volta in volta nella maniera appropriata agli oggetti e alle mappe specifiche in esame. Nel corso degli anni Lawvere si è dedicato a mostrare come l'uso di questi principi possa costituire un più efficace punto di riferimento per insegnare e per

imparare la matematica, in quanto il quadro unitario che ne risulta offre la possibilità di cogliere fin dai primi passi i rapporti sistematici fra geometria e algebra, fra logica e teoria degli insiemi, fra lo studio delle proprietà dello spazio e lo studio delle quantità. A tale attività Lawvere ha strettamente associato un impegno per la diffusione della razionalità scientifica, quale elemento decisivo nello sviluppo dell'umanità.

Trovare riunite nella stessa mente una grande competenza scientifica e una profonda sensibilità filosofica è molto raro. Tuttavia, come fu nel caso di Galileo, ci sono momenti in cui l'apertura di un nuovo orizzonte di conoscenze può richiedere proprio una tanto rara congiunzione. Oggi, una simile congiunzione si trova realizzata in Lawvere. I suoi numerosi allievi sparsi nel mondo, così come coloro che stanno proseguendo lungo le linee per la prima volta tracciate da Lawvere, possono testimoniare la fecondità di idee, la generosità intellettuale, lo spirito di fraterna partecipazione al superamento delle difficoltà nella soluzione di un problema e, non ultimo, l'impegno costante a favorire la più ampia condivisione di ogni nuova conoscenza.

Per i motivi qui sinteticamente espressi, il comitato scientifico di Pianeta Galileo è stato unanime nell'attribuire a Francis William Lawvere il Premio Giulio Preti.

LA GUIDA ALLA NATURA

FRANCIS WILLIAM LAWVERE

State University of New York, Buffalo

April 19, 2011, in the chambers of the Consiglio regionale della Toscana, who have the great wisdom to support the admirable effort in science education known as Pianeta Galileo.

Sono felice di essere ospite in questa illustre sede, e Vi ringrazio per l'invito e per l'assegnazione del Premio Preti che mi rende orgoglioso ma anche umile.

Umile perché ancora non sono riuscito a raggiungere la mia meta, una meta che da giovane mi sono posto, cioè quella di creare delle guide ben definite e moderne per chi volesse condurre seriamente lo studio della matematica o delle altre scienze. Ma penso che oggi siano disponibili i mezzi per conseguire importanti progressi in tale direzione e intendo continuare a dare il mio contributo a questo progetto.

Ho tentato di rendere espliciti i principi che stanno a fondamento della matematica partendo da un'indagine sulla pratica stessa della matematica, invece di partire da una base speculativa di tipo platonico. Mi sono reso conto che gli sviluppi della matematica negli ultimi secoli permettono di concentrare in modo proficuo i caratteri essenziali dello spazio e della quantità, le loro mutue relazioni e il loro mutuo sviluppo, e così permettono anche di fornire una guida per apprendere, sviluppare e usare la matematica. Con l'aiuto di colleghi fortemente motivati in tal senso, è andata avanti la disseminazione di queste idee e di questi metodi in una cerchia sempre più ampia di persone. Mi sono reso conto che battersi per rendere espliciti i concetti emergenti è a vantaggio sia della ricerca sia dell'insegnamento.

Tuttavia, ci sono ancora oggi degli impedimenti che ostacolano questo sforzo; e sono impedimenti che più in generale intralciano quello sviluppo della scienza, che è necessario per la democrazia. Il sostegno anti-democratico all'anti-scienza ha bisogno di essere prima riconosciuto e poi contrastato: riconoscerlo, e contrastarlo, è parte integrante dello sforzo.

Seicento anni fa, i leader del mondo finanziario sovvenzionarono la rinascita di una filosofia che corrispondeva ad una precedente epoca di schiavitù. Questa filosofia fu mutuata dai bizantini e ci si potrebbe chiedere perché fu tenuta in così alta considerazione, quando chiaramente non aveva funzionato per gli stessi bizantini. Si trovò (e fu una scoperta fatta dai più acuti reazionari) che l'essenza platonica poteva essere mantenuta assimilando versioni distorte dalla stessa nuova scienza.

Perfino la poesia di uno scienziato poteva essere sfruttata a tale scopo. Per esempio,

il famoso “Libro della Natura” non esiste certamente: non fa parte della realtà. Ma un altro libro, che si potrebbe chiamare la “Guida alla Natura”, esiste: è in corso di costruzione, che è da diecimila anni una costruzione comune, realizzata da noi esseri umani per mezzo della nostra capacità di fare scienza.

In effetti, gran parte di questo libro è scritto nella matematica, non per renderlo difficile, ma per assicurare unità e chiarezza nella trasmissione dei concetti che riflettono la natura. La stessa matematica dev'essere inventata via via che la scienza progredisce. Tutti quanti hanno il diritto di essere informati in matematica, in modo da poter seguire la guida genuina, senza perdersi nella superstizione antiscientifica.

La distorsione di concetti scientifici recentemente scoperti è costosa. Che si tratti di microfisica, o di astrofisica, o che si tratti perfino dei fondamenti della matematica, gli ultimi sviluppi positivi vengono colti al volo e ri-elaborati da gruppi al servizio di un pugno di magnati dell'odierno mondo finanziario, i quali sfruttano una situazione in cui i fondi per la scuola e per la ricerca sono stati drasticamente ridotti.

Il potere esercitato da questi signori dello sfruttamento è stato usato per aggirare le norme consolidate della verità scientifica, cosicché viene compromessa la stessa indipendenza delle istituzioni scientifiche. (Naturalmente io ho presenti soprattutto gli esempi anglo-americani, i quali però non sono privi di effetti in Italia.)

Nell'arco degli ultimi cinque anni, questi gruppi si sono organizzati, dentro e fuori dalle università e dalle società scientifiche: sono finanziati abbastanza bene da essere in grado di evitare i consueti controlli di *peer review* e analoghi vincoli accademici. C'è un tratto ricorrente nelle loro pubblicazioni che un matematico non può fare a meno di notare: si insiste sull'eliminazione di definizioni precise dei concetti e si insiste pure sull'omissione di una chiara dimostrazione di quanto si afferma.

Così facendo, l'insegnamento e il progresso della matematica sono messi sotto attacco. Sarà più difficile ottenere una conoscenza chiara e utilizzabile, non solo per i cittadini che hanno sete di divulgazione e vogliono capire i risultati recenti della scienza ma anche per gli studenti a ogni livello, e perfino per gli studiosi in settori disciplinari vicini fra loro. Con la flagrante distorsione che ne consegue del vocabolario, della grammatica e dello stile della matematica, e addirittura dello stesso linguaggio, è difficile per noi 'non addetti' sperare di confutare le ultime trovate anti-scientifiche e le ultime scusanti per le guerre. L'anti-scienza, che riguardi la microfisica o l'economia internazionale o la natura della matematica, serve a preparare la gente a un'accettazione non-democratica di altre guerre e di altro sfruttamento. Questo è il guadagno di un investimento relativamente modesto sulla filosofia.

Un esempio di rilievo è quello offerto da una fondazione che la settimana scorsa ha annunciato di assegnare il premio annuale per la religione (di un milione di sterline) a un astrofisico. Questo astrofisico è stato per parecchi anni a capo della Royal Society a Londra ed è stato al tempo stesso un funzionario della fondazione. Il destinatario del premio non ha fatto professione di fede religiosa ma ha sostenuto più volte la possibilità di un intervento extraterrestre nella storia dell'umanità. La fondazione festeggia il vin-

citore affermando che “ben oltre la descrizione di fatti, ha aperto più ampie prospettive di quelle che qualsiasi telescopio avrebbe mai potuto aprire”, con ciò dichiarando guerra al metodo scientifico d’indagine di cui Galileo è stato un campione.

Un altro funzionario favorito della stessa fondazione ha dichiarato in pubblico con spavalderia di essere una prostituta, perché lavora per la stessa fondazione anche se asserisce di non dividerne i valori. Ciò potrebbe ispirare qualche giovane opportunisto a unirsi al club, perché è proprio questo genere di vaga, non seria e cinica descrizione delle cose che alimenta l’anti-scienza. Ma il suo lavoro particolare consiste nello scegliere giovani ricercatori di qualità eccezionale, e già riconosciuti nel loro campo, per associare, con dei premi, i loro nomi rispettati al nome della fondazione.

Tre o quattro fondazioni, parto di istituti finanziari privati, stanno agendo da mandrini, perché non solo estraggono il massimo dall’economia mondiale sfruttando i nuovi mezzi offerti dalle tecnologie avanzate, ma in più usano questa ricchezza per impedire che le menti delle persone si aprano, con il pretesto di promuovere una scienza “umanistica”. I banchieri onesti e le persone sinceramente religiose non possono considerarli loro alleati; e gli scienziati di cui essi si sono fatti nemici si accorgeranno che il loro scopo principale è far sì che l’Irrazionalità diventi lo standard di una pubblica discussione.

A dispetto di una così tetra tendenza, le persone hanno la capacità di imparare a riconoscere l’anti-scienza e i suoi dannosi effetti.

Sono gli sforzi produttivi, tra loro molto diversi, di milioni di persone ciò che fornisce la base della Guida alla Natura. Esse *vogliono* partecipare anche alla sua scrittura, come Preti mise in evidenza, e affinché questo sia possibile le persone devono essere nella condizione di poterla leggere, cioè, di accedere ai suoi contenuti e di comprenderli.

Non basta più una formazione minima, che dà loro quel tanto di conoscenze sufficienti per servire i pochi. Vogliono sapere e vogliono anche insegnare. Per i loro figli, spero che sia la verità della scienza a vincere.