



REGIONE TOSCANA
Consiglio Regionale

PIANETA GALILEO

2013

A cura di Chiara Bodei e Marco Maria Massai

Si ringrazia il Comitato Scientifico di Pianeta Galileo 2013

Pianeta Galileo : 2013 / Regione Toscana, Consiglio regionale ; a cura di Chiara Bodei e Marco Maria Massai. – Firenze : Consiglio regionale della Toscana, 2015

1. Toscana. Consiglio regionale 2. Bodei, Chiara 3. Massai, Marco Maria

507

Educazione scientifica – Atti di congressi

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

Consiglio regionale della Toscana

Settore Rappresentanza e relazioni istituzionali. Assistenza generale alla CPO

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

Pubblicazione realizzata dalla tipografia del Consiglio regionale, ai sensi della l.r. 4/2009
Giugno 2015

ISBN 978-88-89365-52-6

SOMMARIO

Presentazione - <i>Alberto Monaci</i>	5
Introduzione - <i>Chiara Bodei, Marco Maria Massai</i>	7
LECTIO MAGISTRALIS	
Bruno Pontecorvo, a cento anni dalla nascita - <i>Rino Castaldi</i>	11
MOSTRA SU BRUNO PONTECORVO	
Bruno Pontecorvo: un lungo viaggio tra storia e scienza - <i>Vincenzo Cavasinni, Sergio Giudici, Marco M. Massai, Paolo Rossi, Giovanni Signorelli, Gloria Spandre, Elena Volterrani</i>	27
LEZIONI-INCONTRO	
Un invito alla logica e alla teoria dei giochi - <i>Bruno Codenotti</i>	71
Biotecnologie del futuro: i microrganismi per la produzione di idrogeno - <i>Roberto De Philippis</i>	77
Il Cosmo Vivente: l'Astrobiologia e la Ricerca della Vita nell'Universo - <i>Enzo Gallori</i>	85
Julius.Caesar@interrete.spqr: un insolito viaggio nel tempo alla scoperta delle tecnologie per le telecomunicazioni - <i>Filippo Giannetti</i>	91
Mozart gioca a Dadi: musica e combinatoria nel XVIII secolo - <i>Sergio Giudici</i>	97
Il Temperamento: una questione scientifica e musicale - <i>Sergio Giudici</i>	103
La probabilità: capire la realtà e prendere decisioni migliori - <i>Leonardo Grilli</i>	111
Il benessere inizia a tavola: la nutraceutica - <i>Laura Pucci</i>	119
Polline, atomi, Wall Street: l'imprevedibile viaggio del moto browniano - <i>Roberto Renò</i>	121
Il caso e la necessità - <i>Francesco Romani</i>	125
La donna del Pleistocene - <i>Anna Maria Rossi</i>	133
Il World Wide Web: una meravigliosa avventura scientifica, tecnologica e umana - <i>Oreste Signore</i>	141
Matematica vs Armageddon: come prevedere l'imprevedibile - <i>Giacomo Tommei</i>	147
I ragazzi nella rete: opportunità e rischi (calcolati) - <i>Anna Vaccarelli, Stefania Fabbri, Francesca Nicolini</i>	157
Cinema nella cellula: visualizzazione 3D in biologia - <i>Monica Zoppè</i>	165

PREMIO GIULIO PRETI

Motivazione per il conferimento del Premio Giulio Preti a Vittorio Silvestrini - <i>Marco M. Massai</i>	173
--	------------

ALTRE ATTIVITÀ

Le iniziative di divulgazione del Cnr: Areaperta e Pianeta Galileo - <i>Luciano Celi</i>	179
Le mostre organizzate dai Laboratori didattico-scientifici Franco Conti - <i>Rosellina Bausani, Ornella Sebellin</i>	185
Scienza e cultura in Henri Poincaré - <i>Ornella Pompeo Faracovi</i>	189

PRESENTAZIONE

Continua, anche per quest'anno, l'impegno del Consiglio regionale per la divulgazione della cultura scientifica fra i giovani toscani.

Torna, dunque, "Pianeta Galileo", occasione di confronto fra i giovani delle scuole superiori della Toscana ed il mondo della ricerca scientifica, di confronto fra una rete sempre più ampia di istituti di scuola secondaria superiore della Toscana con l'università e le istituzioni pubbliche di eccellenza nel campo della scienza.

È un impegno gravoso per il bilancio del Consiglio regionale, convinto più che chiamato, a ridurre costi e fabbisogni dal perdurante difficile quadro della finanza pubblica e dell'economia italiana in generale. Un impegno, però, dal quale non abbiamo, pur in presenza di tale situazione, voluto distogliere un centesimo. Perché troppo importante è, soprattutto oggi, avvicinare i giovani alla conoscenza della scienza e di tutto ciò che ad essa è collegato. Scienza come parte fondamentale della nostra cultura (terra di Galileo, tanto per cominciare); scienza come unico veicolo di rinascita di un'economia, quella italiana e quella toscana, in difficoltà. Scienza, soprattutto, come frontiera di sfida per i grandi problemi dell'umanità, luogo di eccellenza per la capacità umana di andare oltre i limiti del presente.

"Pianeta Galileo" è l'occasione di un incontro irripetibile, raro momento nel panorama nazionale di fattivo dialogo fra scuola, università ed istituzioni pubbliche nell'interesse primario della crescita culturale e formativa dei cittadini del domani.

È un invito ai giovani ad esplorare nuovi terreni di impegno per il proprio intelletto, per il proprio entusiasmo. È la richiesta ai docenti delle scuole superiori di collaborare, con il loro straordinario bagaglio culturale (loro, snodo centrale, fondamentale della formazione dei giovani), a costruire percorsi integrativi di formazione, oltre i limiti che alla scuola impongono i bilanci pubblici. È l'auspicio che l'Università, luogo di ricerca per definizione, sappia mettersi al servizio di quelli che, prima di loro, hanno preso a cuore la formazione dei nostri giovani, esplorando con loro e secondo i loro bisogni nuovi spazi di conoscenza.

Sarà, anche questa edizione, un successo. Perché tale è quando anche un solo ragazzo, oltre gli obblighi del programma, allunga il proprio sguardo sullo "scibile umano", rimanendo estasiato dalle possibilità che l'intelletto offre di esplorare il mondo, le sue cose, le sue leggi. Ed anche oltre.

ALBERTO MONACI
Presidente del Consiglio regionale della Toscana

INTRODUZIONE

CHIARA BODEI

MARCO MARIA MASSAI

Università di Pisa

Frutto della convenzione del Consiglio Regionale della Toscana, tradizionalmente stipulata con l'Ufficio Scolastico Regionale e con gli atenei di Firenze, Pisa e Siena, per promuovere la divulgazione della cultura scientifica presso le scuole secondarie di II grado della regione, l'edizione 2013 di "*Pianeta Galileo*" è stata la prima che ha visto il coinvolgimento anche della Rete delle Scuole, nata sempre su impulso del Consiglio Regionale.

Molte e molto seguite sono state le attività promosse da associazioni culturali e istituti operanti in Toscana, a riprova della vitalità del territorio e delle infinite possibilità esistenti di declinare la divulgazione scientifica: dalle più tradizionali quali mostre, convegni, conferenze, seminari, a visite guidate a musei e osservatori astronomici, fino ad arrivare a esperienze dirette in laboratori di università e istituti di ricerca o a spettacoli teatrali dedicati a figure o eventi legati alla scienza.

Le iniziative di questa edizione, inaugurata il 23 novembre con la *lectio magistralis* di Rino Castaldi sul fisico pisano Bruno Pontecorvo a cent'anni dalla sua nascita, sono proseguite fino a maggio 2014, puntellate da alcuni appuntamenti consueti e che costituiscono ormai il marchio di fabbrica dell'intera proposta di "*Pianeta Galileo*".

Il primo di questi è stato l'attestazione e la consegna del Premio "Giulio Preti 2013", conferito all'illustre fisico Vittorio Silvestrini - fondatore e Presidente della "Fondazione Idis - Città della Scienza" – per la capacità di affiancare un costante impegno civile all'attività di ricerca e di divulgazione, come testimonia la sua volontà di non arrendersi dopo l'incendio doloso della Città della Scienza, appiccato nel marzo 2013.

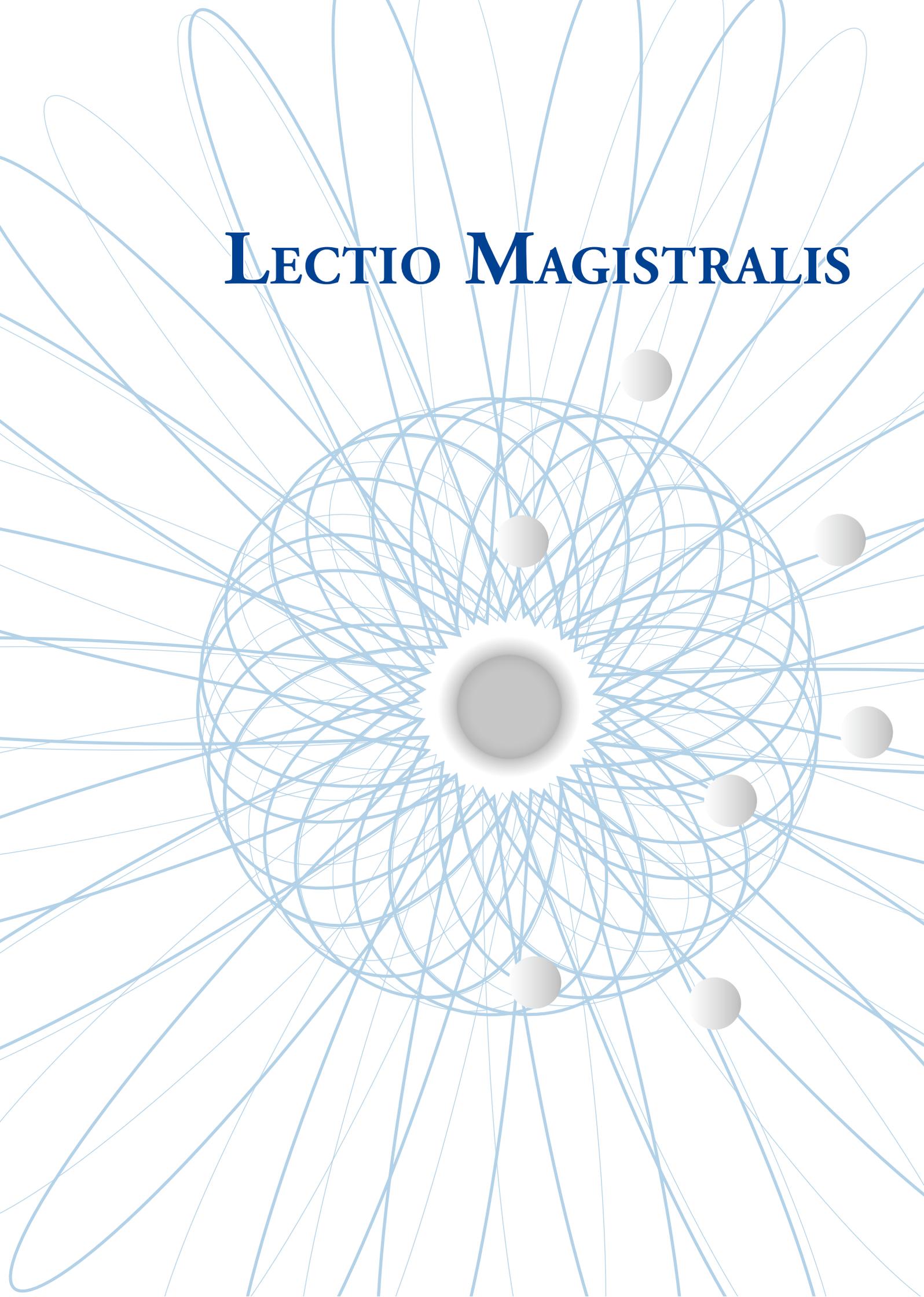
Con entusiasmo docenti e ricercatori delle tre università e dei centri di ricerca toscani hanno poi nuovamente proposto stimolanti lezioni-incontro da svolgere presso le scuole di tutta la regione. Ne sono così scaturiti più di 150 eventi che hanno reso possibile il cortocircuito tra chi si occupa di scienza e gli studenti che a essa si avvicinano.

A chiudere il calendario è stata l'iniziativa "Primo Incontro con la Scienza", finalizzata a promuovere nelle scuole la lettura di opere di divulgazione scientifica, appositamente scelte dal Comitato Scientifico. La formula di questa edizione ha previsto un'articolazione per aree geografiche, seguendo la tripartizione del territorio regionale scelta anche per la Rete delle Scuole: la zona di Firenze, Prato e Pistoia; quella di Livorno, Pisa, Massa Carrara e Lucca; infine quella di Grosseto, Siena e Arezzo.

A Firenze, Pisa e Siena – le città capofila di ciascun'area – si sono svolti gli incontri con gli autori dei libri letti dagli studenti. La risposta è andata ben oltre le aspettative, come mostrato dagli eccellenti e originali lavori preparati dagli studenti (quarte di copertina, strisce di fumetti, video-trailer) relativi ai testi affrontati.

Il momento storico che stiamo attraversando è difficile e bisogna essere attrezzati per affrontarlo. Proprio per questo il sapere scientifico - non contrapposto, come auspicava Galilei, a quello umanistico - rappresenta un bagaglio irrinunciabile da affidare alle nuove generazioni, per meglio affrontare con fiducia il presente e il futuro. Questo è lo scopo sotteso all'intero progetto "Pianeta Galileo" ed è anche l'obiettivo che la presente sintesi dei lavori presentati durante la decima edizione si augura di contribuire a far raggiungere.

LECTIO MAGISTRALIS



BRUNO PONTECORVO, A CENTO ANNI DALLA NASCITA¹

RINO CASTALDI

INFN, Sezione di Pisa

Gli studi a Pisa e a Roma

Bruno Pontecorvo, il quarto degli otto figli di Massimo e Maria Maroni, nasce a Marina di Pisa il 22 agosto 1913.

Fin da piccolo studia con profitto ed è un abile sportivo; ama giocare a tennis, nuotare e praticare sport all'aria aperta. A Pisa frequenta il Liceo Classico "Galileo Galilei" e, dopo la maturità, presa a soli sedici anni, si iscrive alla facoltà di Ingegneria dove frequenta con profitto il biennio; ma non ama il disegno e decide di iscriversi a fisica. Il fratello maggiore, Guido, approva ma afferma con autorità *"Fisica! Vuol dire che devi andare a Roma. Lì ci sono Fermi e Rasetti!"* come testimonia Bruno nella sua nota autobiografica [1, p. 2] per l'Enciclopedia della Scienza e della Tecnica del 1988.

Pontecorvo arriva così a Roma nell'autunno del 1931 e viene immatricolato al terzo anno del corso di "Matematica e Fisica" dopo aver superato brillantemente l'esame di ammissione con Fermi e Rasetti. Fermi dopo l'esame, come fa con tutti gli studenti anche con quelli più brillanti, asserisce perentoriamente [1, p. 2]: *"Se un teorico non possiede straordinarie capacità, il suo lavoro non ha senso. Per quanto riguarda la fisica sperimentale, qui esiste la possibilità di un lavoro utile anche per un individuo di capacità medie"*; e Bruno decide che sarà uno sperimentale!

A soli 20 anni, il 10 novembre del 1933, si laurea con 110/110 e lode in Fisica e Matematica con una tesi dal titolo "Ottica geometrica dell'elettrone e microscopio a elettroni".

In via Panisperna

Fermi nella primavera del 1934 usando una sorgente di Radio-Berillio e un contatore Geiger scopre che anche i neutroni possono essere usati per indurre la radioattività su alcuni elementi. A partire dal settembre 1934 anche Pontecorvo è coinvolto in queste ricerche. Insieme ad Amaldi deve valutare quantitativamente la radioattività nei vari elementi. I risultati che ottengono sembrano non essere riproducibili e sembrano dipendere miracolosamente dai materiali circostanti. Fermi ha l'intuizione geniale di sistemare della paraffina tra la sorgente e il campione d'argento che voleva irradiare e osserva un grande aumento della radioattività indotta. La paraffina infatti, ricca di

¹ Lectio Galileiana [6] tenuta il 23 novembre 2013 presso l'Auditorium del complesso di Sant'Apollonia, via San Gallo 25/a, Firenze.

idrogeno, ha la proprietà di rallentare i neutroni che diventano più facilmente catturabili da parte dei nuclei atomici rendendoli radioattivi con una probabilità migliaia di volte maggiore dei neutroni veloci. Questa scoperta, che avrà applicazioni di vasta portata, sancisce l'ingresso ufficiale di Pontecorvo nel gruppo noto come "i ragazzi di via Panisperna", nel quale tutti hanno un soprannome: Fermi è il *Papa*, Rasetti è il *Cardinale vicario*, Segré e Amaldi sono gli *Abati*, e Pontecorvo è *il Cucciolo*.



Figura 1. I Ragazzi di via Panisperna (Foto scattata da Bruno Pontecorvo)

A Parigi

Nel 1936 Bruno vince una borsa di studio di 6 mesi da trascorrere all'estero e Fermi gli propone di andare a Parigi allo *Institut du Radium*, diretto da Frédéric Joliot, premio Nobel insieme alla moglie Irène figlia di Pierre e Marie Curie, per la scoperta della radioattività artificiale indotta da particelle α .

Il 15 aprile 1936, Pontecorvo giunge a Parigi e vi resterà quattro anni fino a dopo lo scoppio della seconda guerra mondiale. Sono anni molto importanti per la sua formazione politica. Pontecorvo è affascinato dal nuovo ambiente decisamente più democratico e politicamente più impegnato rispetto a Roma e a Pisa.

L'amicizia con Joliot e col cugino Sereni, esule a Parigi, sono determinanti per la formazione della coscienza politica di Pontecorvo. Miriam Mafai nel suo libro "Il lungo freddo" riporta così il pensiero di Bruno [2, p. 80]: "*Ho cominciato a guardare con interesse prima e con entusiasmo poi a quello che accadeva in URSS, dove il proletariato era al potere e dove si andava costruendo l'uomo nuovo*"; e verso la fine di agosto del 1939 Pontecorvo decide di prendere la tessera del Partito Comunista d'Italia [2, p. 99]: "... *Nel momento in cui i comunisti erano così isolati, calunniati, insultati, ebbene io scelsi proprio quel momento per aderire al partito.*"

A Parigi, anche la vita privata di Bruno ha importanti cambiamenti; conosce Marianne Nordblom, una studentessa svedese con cui stabilisce una stretta relazione

che porterà alla nascita del loro primo figlio Gil. Due anni dopo la nascita di Gil, il 10 gennaio 1940, Bruno e Marianne si sposano.

Il 3 settembre 1939 la Francia dichiara guerra alla Germania; un anno dopo, con l'invasione nazista alle porte, Bruno insieme ad alcuni amici è costretto a fuggire da Parigi. Raggiunge Tolosa in bicicletta dove vive la sorella Giuliana e dove lo attendono Marianne e Gil già arrivati in treno. Da Tolosa raggiungono Lisbona dove si imbarcano per l'America e il 20 agosto arrivano a New York.

Negli USA

Con l'aiuto di Fermi e Segrè, da tempo negli USA, Pontecorvo ottiene una proposta dalla Well Surveys Inc. che fa ricerche di sviluppo di nuove tecnologie per individuare giacimenti di petrolio. La guerra è alle porte e la richiesta di petrolio sta aumentando. Queste ricerche sono lontane dalla ricerca pura ma, come gli scrive Segrè per consolarlo nella lettera che gli pre-annuncia questa proposta di lavoro, *"i dati che si raccolgono sono interessanti anche per la geofisica"*.

Pontecorvo rimane a Tulsa, Oklahoma, per quasi tre anni dove trascorre una vita tranquilla con la moglie e il figlio Gil. Anche il lavoro procede bene e gli procura grandi soddisfazioni. Sviluppa un sistema per identificare la presenza nel sottosuolo di campi petroliferi sfruttando le a lui ben note proprietà dei neutroni lenti. Questa nuova tecnica, in uso ancor oggi, è la prima applicazione industriale dei neutroni lenti, e presto ce ne saranno molte altre...

In Canada

Nel 1942, negli USA, sta partendo la corsa per la costruzione della bomba atomica col Progetto Manhattan a Los Alamos, in New Mexico. Anche l'Inghilterra vuole la sua bomba ma, vista la vicinanza con la Germania, le ricerche sul nucleare vengono organizzate in Canada, dove vanno a lavorare alcuni dei vecchi colleghi francesi di Pontecorvo. Così all'inizio del 1943 Pontecorvo viene invitato ad unirsi a loro presso il laboratorio di Montreal del National Research Council of Canada per progettare e costruire il primo reattore nucleare anglo-canadese.

Per Bruno questa è un'ottima occasione per tornare in un ambiente di ricerca e si trasferisce a Montreal con la famiglia nella primavera del 1943. A metà del 1944 viene deciso di costruire a Chalk River il grande reattore nucleare ad acqua pesante *NRX (National Research eXperimental)*. Così Bruno negli anni 1944-47 è impegnato a lavorare alle molteplici problematiche del reattore incluso un grande contatore di neutroni per rivelare eventuali perdite radioattive e altri monitors per controllarne il buon funzionamento.

In questi anni la famiglia cresce con l'arrivo dei figli Tito nel 1944 e Antonio un anno dopo. È nel periodo canadese che Pontecorvo matura alcune intuizioni geniali sulla fisica delle particelle elementari [2, p.126]: *"...Fu lì, in Canada, che ho intuito la simmetria elettrone-muone che ha avuto, penso, qualche importanza per la elaborazione successiva della universalità delle interazioni deboli"*.

È ancora in quegli anni che Bruno si pone il problema di rivelare l'ipotetica particella ipotizzata da Pauli nel 1930, il neutrino. Propone [3] di rivelarli usando la reazione $\nu + {}^{37}\text{Cl}_{17} \rightarrow {}^{37}\text{Ar}_{18} + e^-$ rivelando successivamente la radioattività dei nuclei di Argon-37. È un'idea geniale che solo dopo molti anni verrà ripresa e messa in pratica da altri a cui varrà il premio Nobel. In collaborazione con G.C. Hanna e D.H.W. Kirkwood sviluppa dei rivelatori a gas in regime proporzionale necessari per rivelare la radioattività dei nuclei di argon prodotti dai neutrini. Esegue una serie di esperimenti insieme a E.P.Hincks con raggi cosmici per studiare le proprietà e il decadimento del muone.

In Inghilterra

Il periodo canadese si conclude nella primavera del 1948. Forse Bruno vuole tornare in Europa per avvicinarsi ai vecchi amici e ai numerosi parenti. Rinuncia a numerose proposte di prestigiose Università e lascia cadere anche la proposta di Gilberto Bernardini per una cattedra a Pisa. Accetta invece di trasferirsi in Inghilterra, nel nuovo centro per ricerche atomiche costruito ad Harwell, vicino ad Oxford e prende casa nel vicino villaggio di Abingdon.

Siamo all'inizio della guerra fredda e la segretezza della tecnologia nucleare viene considerata come il problema centrale della sicurezza nazionale. Scoppiano vari casi di spionaggio nucleare, e anche il comunista Pontecorvo viene indagato senza che tuttavia gli venga contestato alcunché. Forse Bruno inizia a temere per la sua libertà personale e forse già comincia a pensare di trasferirsi a vivere in Unione Sovietica. Tuttavia all'inizio dell'anno 1950 accetta la cattedra all'Università di Liverpool. Non vi prenderà mai servizio.

Nell'estate del 1950, Bruno decide di fare una bella vacanza in Italia con la famiglia. Il 25 luglio, dopo aver scritto all'Università di Liverpool che prenderà servizio con un po' di ritardo, parte con la famiglia in macchina per un lungo viaggio che lo porterà in Francia, in Svizzera, in Austria e finalmente arriverà in Italia. Il 22 agosto Bruno festeggia il suo trentasettesimo compleanno al Circeo, ospite del fratello Gillo e il 25 agosto la famiglia Pontecorvo rientra a Roma. La macchina con la quale sono arrivati dall'Inghilterra viene consegnata ad un garage della capitale, con l'impegno di ritirarla dopo qualche tempo. Ma quella macchina nessuno la ritirerà mai.

I primi anni in Russia

Con tutta la famiglia Bruno si imbarca su un volo della Scandinavian Airlines per Stoccolma. Il giorno seguente i Pontecorvo raggiungono Helsinki, e poco dopo vengono accompagnati in auto fino al confine con l'URSS. Dal confine i Pontecorvo prendono un treno per Leningrado e dopo due settimane, nel settembre del 1950, arrivano a Mosca. A fine ottobre dello stesso anno i Pontecorvo si trasferiscono a Dubna presso lo "Institute of Nuclear Problems" dove dal dicembre del 1949 è in funzione un sincrociclone che all'epoca era il più potente acceleratore di particelle esistente al mondo.

Chi è Bruno Pontecorvo come uomo e come scienziato quando decide di abbandonare tutto per andare a vivere in Russia? e quali sono i motivi per prendere questa

drastica decisione? decisione che cambierà irrevocabilmente non solo tutta la sua vita ma anche quella della moglie e dei figli.

È certamente un fisico sperimentale con una grande esperienza sui più avanzati rivelatori di particelle dell'epoca ed è al tempo stesso un fisico teorico con una conoscenza profonda delle idee teoriche che si stanno sviluppando a quel tempo sulla fisica delle particelle elementari.

È inoltre un comunista convinto che crede fermamente nella possibilità di realizzare una vera società socialista fondata su un profondo senso di giustizia e di uguaglianza.

Non deve pertanto meravigliare questa sua decisione; anzi Pontecorvo deve essere stato entusiasta di avere la possibilità di fare le sue ricerche presso il più potente acceleratore di particelle esistente al mondo e, per di più, di andare a vivere in una società che proclamava di voler realizzare il vero comunismo.

La sua fama di geniale discepolo di Fermi lo precede e suscita grande entusiasmo tra i fisici del Laboratorio. È abitudine tra colleghi del laboratorio di chiamarsi col nome seguito dal patronimico e risulta quindi a tutti molto imbarazzante chiamarlo semplicemente Bruno, con il suo solo nome di battesimo. Il padre di Bruno si chiamava Massimo per cui decisero di chiamarlo Bruno Maximovich, nome che gli rimase per sempre.

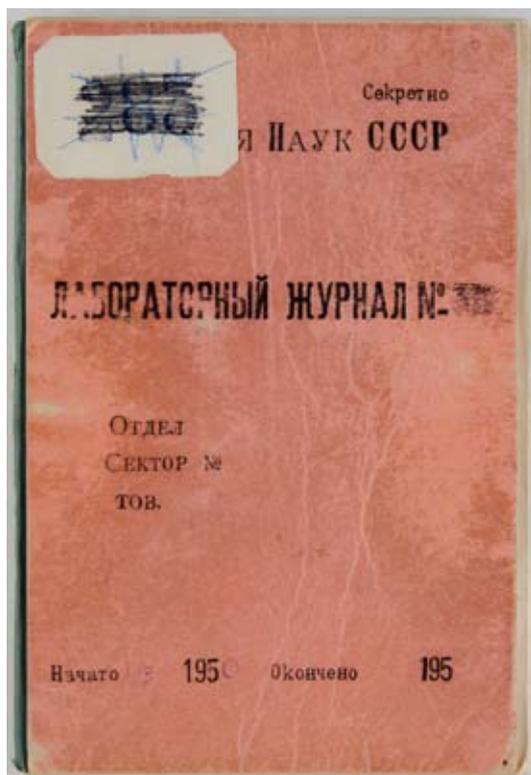


Figura 2. Il quaderno di appunti

L'anno scorso, nel centenario della nascita di Bruno Pontecorvo, è stata allestita la mostra "Da Pisa a Mosca, un lungo viaggio attraverso storia e scienza" [7] presso La Limonaia - Scienza Viva di Pisa, per ricordare la vita e le opere di questo grande fisico

italiano del XX secolo. Per questa occasione il figlio maggiore di Bruno, Gil Pontecorvo, ci ha consegnato per essere esposto alla mostra un documento inedito, estremamente interessante sia da un punto di vista storico che scientifico sulla vita di questo grande scienziato. Il documento è un voluminoso quaderno di appunti, idee e considerazioni che Bruno Pontecorvo scrive di proprio pugno, prevalentemente in inglese, durante il primo anno e mezzo della sua attività presso lo "Institute of Nuclear Problems" di Dubna. È stato per me un onore e un grandissimo piacere aver avuto così la possibilità di leggere e studiare per primo in qualche dettaglio questo inedito quaderno di appunti.

Questo documento è particolarmente interessante anche perché, dopo la vacanza in Italia dell'estate del 1950, di Bruno Pontecorvo e della sua famiglia non si sa più niente fino al 4 marzo del 1955 quando nella sede dell'Accademia Delle Scienze di Mosca tiene una conferenza stampa spiegando ai molti giornalisti esteri presenti i motivi che l'avevano portato a prendere la decisione di vivere nell'Unione Sovietica e di diventare cittadino russo. Il giorno dopo la stampa internazionale dà grande risalto alla notizia. Si parla con grande enfasi dello scienziato italiano che ha trafugato in Russia i segreti della bomba atomica americana e che sta collaborando alla realizzazione russa della bomba all'idrogeno.

Niente di più falso, come lui stesso ripeterà più volte in molte altre occasioni. In questo documento credo ci sia la conferma più evidente che Bruno Pontecorvo non ha mai lavorato né contribuito alla realizzazione della bomba atomica russa ma che in Russia ha fatto solo ricerca di base in fisica delle particelle elementari.

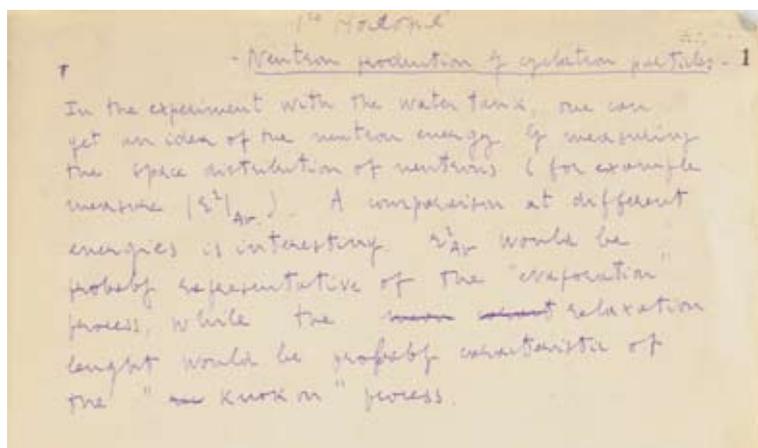


Figura 3. La prima pagina del quaderno

Inizia a lavorare al laboratorio di Dubna il primo novembre del 1950, e nella prima pagina del quaderno sotto la data scritta in russo scrive in inglese una sua prima considerazione su come potrebbe essere possibile valutare l'energia del fascio di neutroni che si può ottenere con il ciclotrone di Dubna (*Neutron production by cyclotron particles*). Nelle successive otto pagine continua a scrivere le sue idee su quali siano gli esperimenti interessanti che possono essere fatti con quell'acceleratore e quali possano essere i rivelatori di particelle da utilizzare per realizzarli.

Pochi giorni dopo smette di scrivere su questo quaderno e solo alcuni mesi più tardi, il 14 settembre 1951, riprende a scrivervi capovolgendo il quaderno ed iniziando a scrivere dall'ultima pagina.

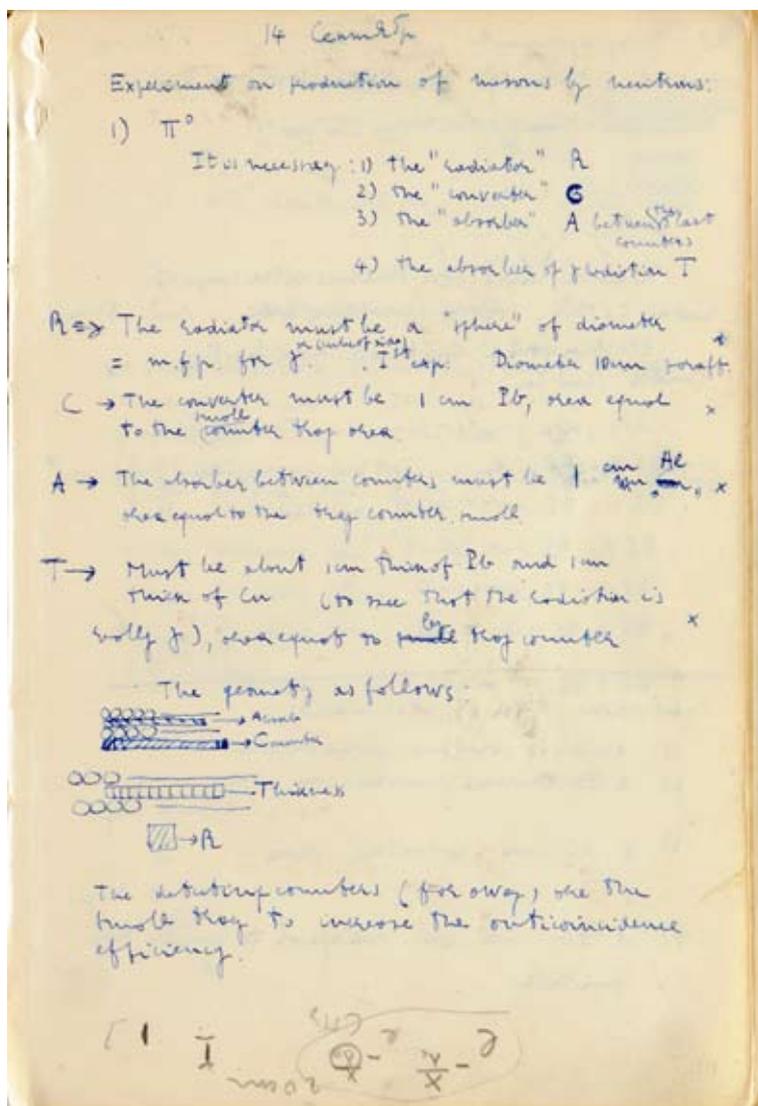


Figura 4. Il primo esperimento

Ha ora finalmente deciso quale esperimento vuol fare; adesso è uno stimato "group leader" di un piccolo gruppo di giovani fisici e ingegneri del laboratorio con la cui collaborazione può iniziare a fare gli esperimenti che ritiene più interessanti con l'acceleratore di Dubna.

In questo quaderno di appunti c'è la storia di alcuni esperimenti sulla produzione di mesoni pi-greco con fasci di neutroni e di protoni su bersagli di protoni e di nuclei complessi che Bruno Maximovich Pontecorvo e il suo piccolo gruppo hanno fatto al ciclotrone di Dubna. Bruno usa questo quaderno per riportarci giornalmente l'attività scientifica sua e del suo gruppo ma anche per annotarci idee, calcoli e disegni in modo

assolutamente informale. Vi scrive anche alcune prime stesure degli articoli degli esperimenti fatti in quel periodo.

Dalle pagine di questo quaderno emerge la figura di bravo fisico sperimentale che coordina le attività del suo gruppo con competenza e grande rigore scientifico.

Gli esperimenti sull'interazione π – nucleone che in questi anni Pontecorvo realizza col suo gruppo al ciclotrone di Dubna sono certamente molto importanti per capire, almeno da un punto di vista fenomenologico, le interazioni forti². Con questi esperimenti si conferma che il protone e il neutrone per quanto riguarda le interazioni forti non sono due particelle diverse ma sono la stessa particella in due stati diversi di un nuovo numero quantico chiamato spin isotopico. Tuttavia l'interesse scientifico di Pontecorvo va ben oltre questi, seppur importanti esperimenti di diffusione di nucleoni e mesoni pi-greco su nuclei, e molte delle sue riflessioni di questi anni riguardano ancora le interazioni deboli e lo studio delle così dette particelle strane.

Interessantissimo è ciò che scrive alla pagina n. 8 del quaderno. In questa pagina Pontecorvo riflette sul comportamento contraddittorio di certe strane particelle da poco scoperte in esperimenti con i raggi cosmici. Queste particelle vengono prodotte con probabilità elevata tipica delle interazioni forti e decadono invece con vite medie relativamente lunghe (10^{-8} - 10^{-10} sec) il che induce a pensare che le interazioni deboli siano le forze responsabili del loro decadimento. Ma perché, si domanda Pontecorvo, se queste particelle vengono prodotte nell'interazione forte dei raggi cosmici con i nuclei dell'atmosfera e quindi sono soggette all'interazione forte, non decadono con vite medie tipiche dei decadimenti forti? Come si risolve questa contraddizione?

In questa pagina, scritta i primi giorni di novembre del 1950, Bruno Pontecorvo asserisce che la contraddizione tra l'esistenza di una particella che interagisce forte e la sua lunga vita media può essere risolta con l'ipotesi che questo tipo di particelle vengano prodotte in coppie "... *there is a contradiction between the existence of a strong interacting particle and his long lifetime. This contradiction, of course, is resolved if the strongly interacting particle is produced in pair.*" In effetti è questa la soluzione giusta al problema come due anni dopo A. Pais [3] scriverà nel suo articolo del 1952; il fenomeno verrebbe spiegato dall'esistenza di un nuovo numero quantico, successivamente chiamato stranezza, che viene conservato nelle interazioni forti ma non nelle interazioni deboli.

Da quanto si legge in questo quaderno, sembrerebbe quindi che Bruno sia stato il primo ad intuire che il comportamento contraddittorio di queste strane particelle può essere compreso se si assume che esse vengano prodotte in coppia. Sfortunatamente questa idea rimase nascosta in questo quaderno ed in successivi report interni scritti in russo, non accessibili per lungo tempo alla comunità dei fisici al di fuori dell'Unione Sovietica.

2 Le interazioni forti sono quelle interazioni che sono responsabili delle forze che tengono legati i neutroni e i protoni nel nucleo nonostante la presenza della forza repulsiva delle cariche elettriche dei protoni

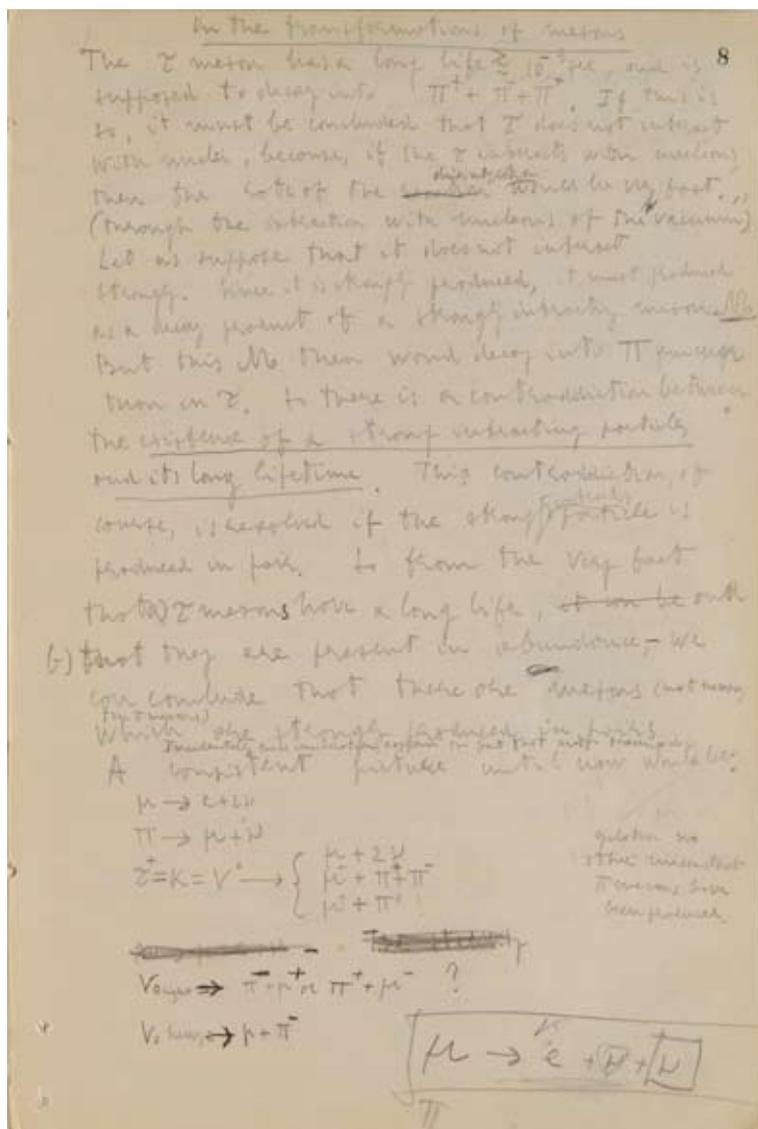


Figura 5. Due grandi intuizioni

Ma c'è un altro elemento estremamente interessante in questa stessa pagina che fa supporre che già nel 1950 Pontecorvo sospettasse che i due neutrini del decadimento del muone in elettrone e due neutrini ($\mu \rightarrow e + 2\nu$) fossero due particelle di natura diversa, ben dodici anni prima che questo fatto fosse provato sperimentalmente. Infatti dopo aver scritto che "a consistent picture until now would be: $\mu \rightarrow e + 2\nu$ " (un quadro consistente fino ad oggi sarebbe che $\mu \rightarrow e + 2\nu$) poche righe più in basso, verso la fine della pagina, riscrive il decadimento come $\mu \rightarrow e + \nu + \nu$ indicando i due distinti neutrini con due segni diversi. Molto probabilmente già fin dal 1950 Bruno sospettava che i due neutrini fossero di natura diversa.

Otto anni più tardi, nel 1958, quando a Dubna prende forma il progetto di costruire un ciclotrone di alta intensità capace di accelerare protoni fino a 800 MeV, Pontecorvo propone un esperimento per dimostrare che i due neutrini presenti nel

decadimento del μ non sono lo stesso tipo di particella. Purtroppo l'acceleratore non verrà mai costruito e l'esperimento verrà fatto solo nel 1962 al Brookhaven AGS negli USA da L.M.Lederman, M.Schwartz and J.Steinberger grazie al quale furono insigniti del Premio Nobel nel 1988.

Le oscillazioni dei neutrini

Pontecorvo nel suo articolo del 1946 [3] in cui propone di rivelare direttamente i neutrini usando la reazione $\nu + {}^{37}\text{Cl}_{17} \rightarrow {}^{37}\text{Ar}_{18} + e^-$, aveva anche proposto che il sole potesse essere usato come sorgente di neutrini. Venti anni più tardi, R. Davis utilizzò proprio questo metodo per rivelare i neutrini emessi dal sole installando un rivelatore di 378.000 litri di tetracloroetilene nella miniera di Homestake nel South Dakota e scoprendo così un vistoso deficit nel flusso dei neutrini rispetto al flusso che ci si aspettava fosse emesso dal sole.

Nasce così il famoso problema del deficit dei neutrini solari che proprio Pontecorvo, nel suo famoso articolo del 1958 *"Inverse beta processes and non-conservation of lepton charge"* [5], aveva previsto più di dieci anni prima con quella che è certamente stata la sua più grande e ardita intuizione: l'oscillazione dei neutrini. Nell'articolo asserisce infatti che tale fenomeno doveva essere certamente osservabile almeno su distanze astronomiche come la distanza terra-sole: *"...it will certainly occur, at least, on an astronomic scale"* scrive Pontecorvo nell'articolo.

Nel 2002 R. Davis fu insignito del Premio Nobel.

L'idea che i neutrini potessero oscillare è stata certamente l'intuizione più rivoluzionaria di Bruno Pontecorvo, l'idea cioè che fossero possibili transizioni da un certo tipo di neutrino ad un altro; per esempio la transizione in cui un ν_e emesso dal sole in una tipica reazione di fusione nucleare ($p+p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$) nel suo viaggio verso la terra potesse trasformarsi in un ν_μ e come tale venisse rivelato sulla terra.

Quando un neutrino viene prodotto in una interazione debole (in una reazione o in un decadimento) viene prodotto con una carica di "sapore" ben definita (ν_e o ν_μ) corrispondente al leptone (e o μ) coinvolto nella reazione in modo da conservare la carica di "sapore" totale. Se i neutrini hanno massa, e questa è l'ipotesi fondamentale (controcorrente per l'epoca) di Pontecorvo, può avvenire il fenomeno dell'oscillazione tra ν_e e ν_μ . E' questo un fenomeno tipico della meccanica quantistica in cui lo stato fisico ν_e (o ν_μ) di definita carica di "sapore" e (o μ) viene descritto come una sovrapposizione di due stati fisici ν_1, ν_2 corrispondenti a due valori di massa ben definiti. L'oscillazione avviene se le masse di ν_1 e ν_2 sono differenti (come è ragionevole che siano data la diversità di massa tra e e μ) e può quindi succedere che avendo prodotto diciamo un ν_e sul sole, nel rivelatore posto sulla terra si riveli un ν_μ perché il ν_e di partenza si è trasformato in un ν_μ durante il percorso tra il sole e la terra.

La vita in Russia

Se è certamente vero che Bruno Pontecorvo ha mancato il Premio Nobel solo perché non ha avuto a disposizione in Russia acceleratori di particelle sufficientemente poten-

ti, né ha avuto le risorse per poter costruire gli apparati sperimentali necessari per fare gli esperimenti da lui ideati, è anche vero che come fisico ha ottenuto i più prestigiosi riconoscimenti russi: nel 1953 gli è stato assegnato il Premio Stalin e nel 1963, per i suoi lavori sulle interazioni deboli e sulla fisica del neutrino, il Premio Lenin. È stato insignito anche di due ordini della Bandiera Rossa del Lavoro. Nel 1964 divenne membro dell'Accademia delle Scienze dell'Unione Sovietica.

La posizione di accademico riserverà a Pontecorvo privilegi che pochi hanno in Russia. Ma Bruno seguirà a trascorrere sempre una vita normale, tra ricerca, insegnamento e famiglia. Nel 1952 Bruno diventa cittadino sovietico. Due anni dopo si iscrive al PCUS. È un comunista convinto, un idealista che crede che in Unione Sovietica stia nascendo una vera società socialista. Un anno dopo, all'indomani dell'invasione dell'Ungheria avvenuta nel novembre del 1956, è tra i milioni di sovietici che condividono la decisione presa dal segretario del PCUS Nikita Krusciov su un intervento armato. In Italia, Giolitti, Nenni ed altri funzionari lasciano il PCI. Anche il fratello Gillo restituisce la tessera del partito. Ma la fede di Bruno nel comunismo non vacilla! Bisogna arrivare all'agosto del 1968 e all'invasione della Cecoslovacchia da parte delle truppe sovietiche perché inizi a dubitare della bontà del comunismo nell'Unione Sovietica.

Gli ultimi anni

Il 6 settembre 1978, dopo 28 anni di lontananza, Pontecorvo, ritorna in Italia anche se per pochi giorni. Torna per festeggiare i 70 anni del vecchio amico Edoardo Amaldi, al quale lo legano tanti ricordi ed esperienze fatte insieme in via Panisperna. Dopo di allora Pontecorvo ritorna molte altre volte in Italia, anche per partecipare a convegni e incontri scientifici. Durante uno dei suoi ultimi soggiorni a Roma, a Miriam Mafai che gli chiede [2, p.293]: *“Sei pentito di aver fatto quella scelta, quarant'anni fa?”* Bruno Pontecorvo risponde: *“Ci ho pensato molto, a questa domanda. Puoi immaginare quanto ci ho pensato. Ma non riesco a dare una risposta”*.



Figura 6. La lapide nel Cimitero degli Inglesi a Roma

Affetto dal morbo di Parkinson, Pontecorvo muore a Dubna il 24 settembre 1993. Le sue ceneri, per sua espressa volontà, sono deposte metà a Roma nel cimitero acattolico degli Inglesi e metà nel piccolo cimitero di Dubna.

Come riconoscimento che fu Bruno Pontecorvo ad avere avuto per primo l'intuizione che il neutrino ν_e è una particella diversa dal neutrino ν_μ e per aver proposto per primo un esperimento per dimostrarlo, sulla lapide della sua tomba nel cimitero degli Inglesi è stata incisa l'epigrafe $\nu_\mu \neq \nu_e$.

L'eredità dell'uomo e dello scienziato

Con le sue idee rivoluzionarie Bruno Pontecorvo ha aperto in tutto il mondo un programma di ricerca sperimentale impressionante. Molti sono gli esperimenti che sono stati realizzati negli ultimi 70 anni sulla fisica del neutrino, da quando per la prima volta nel 1945 Pontecorvo propose un metodo per rivelarli, e molti altri sono ancor oggi in corso o in preparazione per rispondere alle molte questioni di fisica da lui sollevate. Purtroppo l'esser vissuto in Russia, a Dubna, e il non aver avuto quindi a disposizione sufficienti risorse né acceleratori di particelle sufficientemente potenti gli hanno impedito di realizzare in prima persona gli esperimenti da lui proposti, esperimenti che hanno invece permesso ad altri di essere insigniti del premio Nobel.

Ma oltre alla grande eredità scientifica che lo scienziato Bruno Pontecorvo ci ha lasciato, io credo ci sia un'altra grande eredità che l'uomo Bruno Pontecorvo ha lasciato alle future generazioni: il suo grande desiderio di giustizia sociale.

Alla Mafai che lo intervista ammette di essersi sbagliato e di essere stato per molti anni un grande ingenuo nel credere [2, p. 80] che nell'Unione Sovietica “*si andasse costruendo l'uomo nuovo*”.

Tuttavia, nonostante tutto quello che era successo in Unione Sovietica, nel 1988, quando scrive la sua autobiografia, è ancora ottimista e continua a credere che sia possibile costruire in quel paese una società giusta e democratica “*fondata su leggi avanzate e sui diritti dell'uomo*” [1, p.7].

BIBLIOGRAFIA/SITOGRAFIA

- [1] Pontecorvo, B., Una Nota Autobiografica, Enciclopedia della Scienza e della Tecnica, 88/89, Arnoldo Mondadori Editore.
- [2] Mafai, M., “ *Il lungo freddo*”, Rizzoli Editore, 1992.
- [3] Pontecorvo, B., Chalk River, 1946, P.D.-205.
- [4] Pais, A., Phys. Rev., 1952, vol. 86, p.655.
- [5] Pontecorvo, B., J. Exptl. Theoret. Phys, 34, 247 (1958).
- [6] http://www.pi.infn.it/%7Ecastaldi/Pontecorvo/Lectio_Potecorvo.pdf
- [7] <http://www.pontecorvopisa/>

MOSTRA
SU BRUNO PONTECORVO



BRUNO PONTECORVO: UN LUNGO VIAGGIO TRA STORIA E SCIENZA¹

VINCENZO CAVASINNI

SERGIO GIUDICI

MARCO M. MASSAI

PAOLO ROSSI

Dipartimento di Fisica 'E. Fermi', Università di Pisa

GIOVANNI SIGNORELLI

GLORIA SPANDRE

INFN - sezione di Pisa

ELENA VOLTERRANI

La Limonaia-Scienza Viva, Pisa

1. Introduzione

Nel 2013 ricorreva il centesimo anniversario della nascita, a Pisa il 22 agosto, di Bruno Pontecorvo, fisico tra i più significativi del XX secolo, laureato a Roma con Enrico Fermi, ma con una naturale vocazione a girare il mondo.

Infatti, il giovane pisano iscritto ad Ingegneria a Pisa, fu attratto dalle sfide della Fisica e, lasciata Pisa, andò a proseguire gli studi a Roma dove si laureò nel 1933, a soli 20 anni, nel Gruppo di Fermi. Ma già dopo pochi anni, nella primavera del 1936, si recò a Parigi, nel Laboratorio di Frederic Joliot e Irène Curie, i quali, dopo la scomparsa nel '34 di Madame Curie, portavano avanti, e con grande successo, le ricerche nel campo della fisica del nucleo, la nuovissima frontiera della ricerca sui costituenti della natura e delle forze che la governano.

Ma per Bruno, ancora giovane e già con un figlio ed una moglie, la via del ritorno in Italia venne preclusa dalle Leggi Razziali del '38, e la strada dell'emigrazione, segnata; nell'agosto del '40 approderà negli USA avendo trovato, grazie all'amico Emilio Segrè, un contratto di lavoro a Tusla, in Oklahoma.

Ma in quegli anni il Progetto Manhattan, dal quale sarà preventivamente escluso in quanto notoriamente comunista, era iniziato, ed i vecchi amici francesi, emigrati nel Canada, Dominion inglese, cominciavano le loro ricerche su un nuovo tipo di arma.

1 Mostra sul fisico pisano, a 100 anni dalla nascita, allestita a Pisa dall'8 novembre al 22 dicembre

Bruno quindi dopo pochi anni si trasferisce a Montreal, dando inizio ad un periodo assai fecondo per la sua carriera scientifica. Qui, infatti, rientrato nel mondo della ricerca più avanzata, si dedica allo studio di mille nuovi problemi che nascono da una ricerca mai tentata prima. E' qui in Canada che nascono alcune sue intuizioni che svilupperà negli anni '50 in Unione Sovietica.

Nel '45, finalmente, la guerra è finita, pur con l'olocausto della popolazione di due città del Giappone, Hiroshima e Nagasaki, ma molti problemi nell'incognito mondo nucleare sono ancora da risolvere; e dallo studio dei raggi cosmici vengono nuovi segnali che indicano, inesorabilmente, che il mondo delle particelle elementari è molto più complesso di quanto si poteva supporre.

Pontecorvo torna nel '49 in Europa, stabilendosi in Inghilterra nel nuovo centro di ricerche nucleari costruito a Harwell dove si concentra la maggior parte degli scienziati inglesi, perché la nuova ricerca richiede l'utilizzo di nuove e possenti macchine acceleratrici, nuovi strumenti di calcolo, nuove competenze che devono ancora essere consolidate.

Ma il sempre più sospettoso clima della guerra fredda che sta crescendo in tutto il mondo, la contrapposizione ideologica che si radicalizza, fanno sentire Bruno, comunista e pacifista, un estraneo nel mondo occidentale. Nell'estate del '50 la decisione di fuggire in URSS era già presa e da settembre Bruno è stabilmente uno scienziato che lavora per il socialismo, come era suo grande desiderio. Ma tutto nel più grande riserbo, quasi fosse un segreto da nascondere al mondo che fino al '55 non avrà la certezza del destino di questo brillante fisico italiano; ma solo molti dubbi e sospetti.

Lavora a Dubna, il nuovo centro di ricerca vicino a Mosca costruito dall'URSS per indagare i molti misteri che rimangono nella conoscenza del nucleo. Le ricerche sulle nuove bombe vengono condotte in altri laboratori, ma il campo della fisica è lo stesso. Bruno scompare per cinque lunghi anni dalle cronache, nessuno sa dove sia, dove lavori, su quali progetti.

Si saprà solo dopo molto tempo, ed alcuni dettagli sono emersi proprio in occasione della comparsa di nuovi documenti sul suo lavoro nei primi anni a Dubna e presentati in questa occasione del centenario, che il suo lavoro aveva come argomento d'indagine la fisica sub-nucleare alla quale Bruno ha dedicato i tre decenni di vita in URSS. Anni di grande lavoro, di grandi idee, coronati da grandi successi. Dalla metà degli anni '50 egli comparirà regolarmente in molti congressi internazionali portando il suo originalissimo contributo alla soluzione di problemi sempre nuovi quando un acceleratore viene inaugurato, nuove tecniche di rivelazione vengono messe a punto, nuove teorie vengono formulate. Pontecorvo ritorna in Italia, la prima volta, a Roma nel 1978 per i 70 anni del vecchio amico Edoardo Amaldi; ma è cittadino sovietico, da tanti anni, ormai.

In altre occasioni riceverà nel suo vecchio Paese amicizia e riconoscimenti, ma i maggiori li ebbe in URSS, dove gli fu conferito il Premio Lenin ed il Premio Stalin.

Tuttavia non gli verrà mai assegnato il Premio Nobel; perché?

Anche a quest'ultima domanda la Mostra allestita a Pisa dal 8 novembre al 22 dicembre del 2013 ha cercato di dare una risposta, basandosi anche sul lavoro di ricerca e di raccolta critica di documenti provenienti da molti archivi, che ne è stata la necessaria premessa.

Seguire il percorso che ha condotto Bruno Pontecorvo ad attraversare la Storia del Novecento e a districare alcuni tra i più grandi misteri della Fisica, è stato senz'altro un'occasione dal grande fascino, rivolta a studenti appassionati e a cittadini curiosi, non solo per trovare molte risposte, ma anche per porsi nuove domande.

È curioso ricordare che nella stessa zona di Pisa dove alla fine dell'800 sono stati installati i telai delle fabbriche di Pellegrino Pontecorvo, adesso, dopo una profonda ristrutturazione degli edifici di una successiva fabbrica dei Conti Marzotto che proseguirono le attività dei Pontecorvo, adesso è presente il maggiore Polo scientifico dell'Università di Pisa, con i Dipartimenti di Matematica, Informatica e Fisica, e la sezione di Pisa dell'INFN, chiamato proprio Area Pontecorvo.

2. La storia: 1913 - 1930

1913, 23 gennaio, la componente centralista dei Giovani Turchi prende il potere in Turchia.

1913, 30 maggio, durante la Revolucion Mexicana, Emiliano Zapata forma una giunta autonoma e riprende la guerriglia contro il potere centrale.

1914, 28 giugno, con l'uccisione a Sarajevo del Principe ereditario d'Austria e la dichiarazione di guerra alla Serbia un mese dopo, scoppia la I Guerra mondiale.

1915, 24 maggio, l'Italia entra in Guerra contro Germania ed Austria.

1917, 25 ottobre, (calendario ortodosso) con la presa del Palazzo d'Inverno, a Pietrogrado, i bolscevichi rovesciano il governo di Kerenskij e danno inizio alla Rivoluzione d'Ottobre.

1922, 22 ottobre, dopo quasi due anni di continue violenze ed omicidi politici, alcune decine di migliaia di aderenti al Partito Nazionale Fascista organizzano una adunata armata nella capitale, la marcia su Roma; il re Vittorio Emanuele III incarica Benito Mussolini di formare il nuovo governo.

1922, 30 dicembre, dopo la vittoria contro le truppe 'bianche' i partiti rivoluzionari russi danno vita all'URSS.

1925, 3 gennaio, il discorso di Mussolini alla Camera segna l'inizio della dittatura fascista.

1929, 24 ottobre, a New York il crollo della Borsa di Wall Street è il segnale di inizio della crisi economica mondiale che prende il nome di Grande Depressione.

Pisa

I Pontecorvo arrivano a Pisa

Nel 1887 i Pontecorvo giungono a Pisa da Roma. Con la Breccia di Porta Pia e la presa di Roma, 20 settembre 1870, viene sancita la fine dello Stato Pontificio; le porte del ghetto si aprono, agli ebrei vengono riconosciuti i diritti.

Molte famiglie ebee lasciano Roma per stabilirsi in Toscana e a Pisa.

Nella Toscana, già governata dai Lorena, si respira un clima politico e culturale 'liberale' e in particolare a Pisa per la presenza della sua Università. Già dal 1593 il Granduca di Toscana, Ferdinando I de' Medici, al fine di garantire lo sviluppo economico e sociale delle città di Pisa e Livorno promulga la Costituzione Livornina. Tra gli aspetti più importanti, essa garantiva libertà di culto, di professione religiosa e politica, annullamento dei debiti e di altre condanne, istituiva un regime doganale a vantaggio delle merci destinate all'esportazione ed assicurava la libertà di esercitare qualsiasi mestiere, purché i beneficiari abitassero nella città di Pisa o di Livorno.

Il Serenissimo Gran Duca... a tutti Voi Mercanti di qualsivoglia Nazione, Levantini, Ponentini, Spagnuoli, Portughesi, Grechi, Tedeschi, Italiani, Ebrei, Turchi, Mori, Armeni, Persiani, dicendo ad ognuno di essi salute... per il suo desiderio di accrescere l'animo a forestieri di venire a frequentare lor traffichi, merchantie nella sua diletta Città di Pisa e Porto e scalo di Livorno con habitarvi, sperandone habbia a resultare utile a tutta Italia, nostri sudditi e massime a poveri... [Dalla prima pagina della Costituzione Livornina]

La comunità ebraica a Pisa

A Pisa già vivono molte famiglie di ebrei: i Nissim, gli Ascarelli, i Di Nola, alcune di queste provenienti dal ghetto ebraico di Roma e anch'esse impegnate, come i Pontecorvo, nel commercio e nella produzione di tessuti. I progressi economici si accentuarono negli anni successivi alla metà del sec. XIX e, in particolare, dopo l'Unità d'Italia. Continuava l'espansione delle attività industriali commerciali e finanziarie. Ma, soprattutto, gli ebrei pisani (facendo spesso leva su solidarietà familiari e su alleanze matrimoniali, di largo raggio nazionale e sovranazionale) acquistarono posizioni di notevole rilievo sia nel settore degli investimenti immobiliari in città e nelle campagne, sia, in particolare, nel settore industriale, come nel caso delle imprese tessili cotoniere che interessarono, insieme con Pisa, anche Pontedera, Cascina e San Giuliano Terme (Nissim, Di Nola, Pitigliani, Rouf, Pontecorvo). [M. Luzzati - Ebrei ed ebraismo a Pisa]

A fine '800 e inizio '900 gli strati medio-alti della popolazione ebraica sono inseriti a pieno titolo nella classe dirigente cittadina. Ricordiamo fra gli altri: Alessandro D'Ancona, direttore della Scuola Normale dal 1892 al 1900 e sindaco di Pisa; Davide Supino, Rettore dell'Università dal 1898 al 1920; entrambi furono nominati Senatori del Regno.

Pellegrino Pontecorvo

Nasce a Roma il 21 agosto 1841. Primo di sei figli, cresce nel ghetto ebraico in una modesta abitazione dove vivono, oltre alla sua famiglia, anche gli zii paterni con i figli. In questa famiglia patriarcale, la cui attività consisteva nel commercio di tessuti, l'impegno per lo studio era fondamentale, sebbene reso difficile a tutti gli ebrei. Pellegrino studia, si appassiona alla lettura e all'arte, dipinge, e insegna l'ebraico.

Quando le difficoltà economiche incominciano a farsi più pesanti, è costretto ad interrompere lo studio e la pittura per dedicarsi all'attività di famiglia dimostrando anche in questa grande talento.

Lavora e sostiene le iniziative patriottiche per l'Italia Unita. Alla presa di Porta Pia esulta: può finalmente essere cittadino italiano.

Viaggia per l'Europa, si specializza nel commercio di nuovi tessuti, portando forti innovazioni nelle tecnologie legate alla tessitura.

Nel 1881 rileva a Pisa la ditta 'Gentiluomo' passando in breve tempo da 60 a 200 telai.

Vive tra Roma e Pisa fino al 1887, quando decide di trasferirsi definitivamente a Pisa, con tutta la famiglia, dove fonda la ditta 'Pellegrino Pontecorvo'. Gli imprenditori ebrei mantenevano tra loro forti legami. Nel 1904, i Pontecorvo acquistarono dai Nissim un gruppo di terreni e fabbricati tra via S. Marta e via S. Bibbiana in Pisa, e, contemporaneamente, i fratelli Nissim divennero azionisti della Pontecorvo. Dopo l'acquisto di alcuni terreni e case posti nel comune di San Giuliano, si cominciò a costruire il 'Fabbricone'. [C. Torti - La piana dei telai: opifici tessili nel pisano]

Pellegrino muore a Roma nel 1918.

I funerali furono un evento nazionale a cui parteciparono molti esponenti politici, imprenditori ed autorità. Operai e industriali si trovarono fianco a fianco, per commemorare il Cavaliere del Lavoro Pellegrino Pontecorvo nonostante i conflitti sociali di quegli anni si facessero sempre più aspri. [C. Sereni - Il gioco dei regni]

L'industria tessile pisana all'inizio del XX secolo

Nel 1910 si dà inizio alla costruzione del nuovo impianto che diviene attivo nel 1912 e a cui viene dato il nome di 'La Fontina'.

All'inizio della prima Guerra Mondiale, la società Pontecorvo possiede 1250 telai, e due impianti completi: 'La Fontina', nel comune di San Giuliano, l'altro in via San Lorenzo e circa 2.000 sono gli operai che vi lavorano.

Durante la Prima Guerra Mondiale, lo sviluppo e l'attività della ditta Pellegrino Pontecorvo costituì un'eccezione rispetto alla crisi delle altre manifatture tessili, che dovettero ridurre il numero dei lavoratori o chiudere per il richiamo sotto le armi del proprietario: essa, infatti, lavorò intensamente per le forniture militari. Lo stabilimento a 'La Fontina' continuò ad avvalersi anche di telai a mano e, in contrasto con la tendenza generale aumentò il numero dei lavoratori provenienti per la maggior parte dalle frazioni del Comune di San Giuliano. [C. Torti - La piana dei telai: opifici tessili nel pisano]

Dopo la morte di Pellegrino è Massimo Pontecorvo, insieme al fratello Attilio, a continuare l'attività del padre. Gli affari vanno a gonfie vele fino all'inizio degli anni trenta quando, a causa della grave crisi economica mondiale, la situazione si aggrava anche in Italia. Lo stabilimento 'La Fontina' viene venduto nel giugno 1937 alla 'Manifatture

Valdarno' e pochi mesi dopo l'impianto di via San Lorenzo ai conti Marzotto. Nel 1938 sono emanate le leggi razziali che riguardano anche la confisca dei beni degli ebrei.

L'edificio ospita oggi i dipartimenti di Fisica, Matematica e Informatica dell'Università di Pisa e, nel 2003, lo spazio antistante i dipartimenti è stato intitolato 'Largo Bruno Pontecorvo' in onore del fisico e del cittadino pisano.

La famiglia

Massimo Pontecorvo e Maria Maroni hanno otto figli, tutti nati a Pisa: Guido nel 1907, Paolo nel 1909, Giuliana nel 1911, Bruno nel 1913, Gilberto detto Gillo nel 1919, Laura nel 1921, Anna nel 1924 e Giovanni nel 1926.

La famiglia abita in una villa in Via Bonanno a due passi dalla torre pendente.

Maria proviene da una famiglia agiata di Milano, il padre Arrigo Maroni è direttore del Fatebenefratelli. I figli la ricordano come una donna dolce ma severa, raffinata, che amava la musica e la lettura.

'La mamma era sicuramente una snob, e noi scherzavamo su questo. Mio padre no. Era un uomo sostanzialmente semplice, con un grande rispetto per il lavoro proprio e degli altri... Negli anni turbolenti dell'immediato dopoguerra, i giovani operai venivano sottocasa a cantare: Verrà Lenin, verrà Lenin li manderà li manderà a lavorare senza mangiare. E anche Pontecorvo, a lavorare, a lavorare, senza mangiare. Le parole, a me che avevo cinque anni, sembravano molto minacciose, ma capii che non mi dovevo spaventare quando sentii che anche mio padre si divertiva a canticchiarla, tamburellando le dita sul tavolo. In realtà egli aveva un buon rapporto con i suoi operai... Stimava in modo particolare un operaio di nome Danilo, anarchico...'. Venne organizzato uno sciopero, e la fabbrica si fermò. In casa quella sera arrivò il gerarca fascista Buffarini Guidi. Voglio i nomi dei caporioni dello sciopero intimò Buffarini Guidi - Mio padre disse che quei nomi non li avrebbe mai fatti... Devo dire che questo episodio aumentò molto in noi ragazzi l'ammirazione per papà. Ci sembrò molto bello, molto giusto che si fosse rifiutato di denunciare Danilo...'

[Bruno Pontecorvo in M. Mafai - Il lungo freddo]

La diaspora

Alla fine del 1938, inizi del '39, a causa delle leggi razziali la famiglia Pontecorvo lascia Pisa e l'Italia. Dei figli, Anna e Laura vanno in Inghilterra dove da circa un anno si trova il fratello maggiore Guido. Paolo è negli Stati Uniti, Bruno e Gillo a Parigi, dove Bruno lavora con i coniugi Joliot-Curie; Giuliana è in Svizzera. Massimo Pontecorvo e la moglie, non vogliono lasciare l'Italia. Si trasferiscono in un primo tempo a Milano, dove vivono i parenti di Maria e alcuni amici. Ma non sono al sicuro nonostante l'ambiente di Milano non sia legato alla comunità ebraica: la famiglia di Maria è infatti di religione valdese. Su insistenza dei figli, dei parenti e degli amici, si recano quindi in Svizzera dove già si trova la figlia Giuliana con il marito.

Le leggi razziali del 1938 non sconvolsero soltanto una Comunità, già in ripiego e molto assottigliata, ma la vita di numerose persone che avevano magari da

tempo rotto i ponti con l'ebraismo, dal momento che venne utilizzato, per l'identificazione degli ebrei, un criterio di 'razza' definito in base ai parametri dei legami familiari di sangue. Si trattava di una vera e propria 'rivoluzione' rispetto a tutta la secolare esperienza degli ebrei italiani e di quelli pisani. Da questo momento divenivano ebrei, se tali erano o erano stati i loro genitori, anche individui cattolici fin dalla nascita, e, perché no, forse divenuti sacerdoti o suore. [M. Luzzati - Ebrei ed ebraismo a Pisa]

Guido il genetista

Classe 1907, è il maggiore dei fratelli Pontecorvo. A Pisa, dopo aver frequentato il Liceo Classico 'Galileo Galilei', si iscrive alla Facoltà di Agraria dove si laurea nel 1928.

Suo professore all'Università è Enrico Avanzi, con il quale lavora anche dopo la laurea e dopo aver svolto il servizio militare.

Tra il 1930 e il 1931 viene chiamato a Firenze dall'Ispettorato Compartimentale Agrario dove si occupa di allevamento di bestiame e dove rimarrà per circa sei anni.

Negli anni 1937-1938 è in giro per l'Europa a visitare allevamenti quando vengono promulgate le leggi razziali. Si trova ad Edimburgo per un Congresso internazionale di genetica, dove riceve la comunicazione del suo licenziamento dall'Ispettorato di Firenze: le leggi razziali prevedono l'allontanamento di persone di origine ebraica dalle cariche pubbliche.

Non potendo rientrare in Italia, decide di rimanere ad Edimburgo dove incomincia le sue ricerche di genetica. Direttore del Dipartimento di Genetica dell'Università di Glasgow, entra a far parte dello staff dell'Imperial Cancer Research Fund di Londra. Le sue ricerche sulla genetica della *Drosophila* (il moscerino dell'uva) ma soprattutto dell'*Aspergillus Nidulans* (un tipo di muffa) di cui scopre la riproduzione asessuata, proponendone il concetto di gener come unità funzionale, lo portano alla notorietà della comunità scientifica internazionale.

È stato tra i primi ad intraprendere gli studi per la determinazione delle mappe cromosomiche dell'uomo ed ha introdotto la tecnica di irradiazione con raggi X per provocare la rottura dei cromosomi.

Muore nel 1999 nella sua casa sulle Alpi, in Svizzera.

Gillo 'il selvaggio'

Gilberto Pontecorvo (Gillo) nasce a Pisa il 19 novembre 1919. Chiamato affettuosamente 'il selvaggio' è riluttante a qualsiasi disciplina: passa ore sul nespolo del giardino, ama il tennis che pratica soprattutto nella villa degli zii a Forte dei Marmi dove la famiglia Pontecorvo è solita trascorrere una parte dell'estate. Dopo la maturità scientifica si iscrive alla facoltà di Chimica, più per far piacere ai genitori che per un reale interesse. La sua vera passione rimane il tennis che pratica con grande successo e che gli permette di viaggiare per l'Europa.

Proprio per il tennis si trova in Francia quando vengono promulgate le leggi razziali e non potendo rientrare in Italia decide di stabilirsi a Parigi dove vive il fratello Bruno, a

cui Gillo è particolarmente attaccato. Parigi, in quegli anni, è la “centrale dell’antifascismo”. Gillo si ritrova in un ambiente eccezionale fatto di persone, di ideali. Ci sono gli amici di Bruno, Aldo Natoli, Salvatore Luria, Sergio De Benedetti, e tanti altri personaggi celebri: Pablo Picasso, Jean Paul Sartre, Igor Stravinskij che avranno una decisiva influenza nella formazione di Gillo.

Le manifestazioni, i cortei... le ragazze che arrivavano in bicicletta con il fazzoletto rosso al collo da principio lo entusiasmarono... ma, fu il cugino Emilio Sereni che cercò di aiutarlo a districarsi nei sottili distinguo di una situazione politica certamente complessa per tutti, particolarmente confusa per il cucciolo Pontecorvo, che del resto era più interessato ad altro. [I. Bignardi - Memorie estorte ad uno smemorato] Si appassiona al cinema dopo aver visto Paisà di Roberto Rossellini. Compra una cinepresa 16 mm e comincia a girare documentari a sfondo sociale. Poi passa a film di grande impegno storico, politico e artistico. Tra i più noti ricordiamo:

- *Kapò*, sul dramma dei campi di sterminio;
- *La battaglia di Algeri*, sulla lotta del popolo algerino per l’indipendenza dalla Francia;
- *Queimada*, sulle sopraffazioni del colonialismo e la rivolta dei popoli oppressi in Sud America.

Muore a Roma il 12 ottobre 2006.

‘Sono nato a Pisa nel 1913’

Il 22 agosto del 1913, Bruno Pontecorvo nasce a Marina di Pisa, in un albergo di fronte al mare, dove la famiglia trascorre un periodo di vacanza, in un clima estivo più confortevole che in città. Bruno, fin da piccolo, studia con profitto; ama giocare a tennis e nuotare. E’ un abile sportivo, nonostante non emerga questa caratteristica dalla sua pagella di maturità: dovrà infatti riparare a settembre proprio in educazione fisica. Molto umile, non pensa di essere dotato di una particolare intelligenza.

Un giorno involontariamente, sorpresi una conversazione tra i miei genitori. Era la mamma che dava un giudizio su ognuno di noi... Bruno, disse la mamma con tenerezza, è il più buono. Esitò un attimo e aggiunse: ma è il più limitato, come si vede dagli occhi. Ha gli occhi buoni, ma non intelligenti... Credo che a questo episodio risalga un mio certo complesso di inferiorità che mi ha accompagnato molto a lungo. L’ho superato, quando ho avuto qualche piccolo successo nel mio lavoro. Ma mi è rimasta una grande timidezza. Quella temo di non averla superata mai del tutto. [M. Mafai - Il lungo freddo]

A Pisa Bruno, che diventerà uno dei più grandi scienziati del Novecento, frequenta il Liceo Classico ‘Galileo Galilei’ e, dopo la maturità, presa a soli sedici anni, si iscrive alla Facoltà di Ingegneria dove frequenta con profitto il biennio.

A me però non piaceva il disegno cosicché decisi di abbandonare gli studi di ingegneria e di iscrivermi al terzo anno di fisica. Mio fratello Guido affermava

con autorità: 'Fisica! Vuol dire che devi andare a Roma. Lì ci sono Fermi e Rasetti!' [B. Pontecorvo - Una nota autobiografica]

3. La storia: 1931 - 1936

1931, 14 aprile, nasce la II Repubblica spagnola.

1932, 7 novembre, il democratico Franklin Delano Roosevelt viene eletto presidente degli Stati Uniti; rimarrà in carica, rieletto, fino alla morte, il 12 aprile 1945.

1933, 30 gennaio, il capo del Partito Nazionalsocialista Tedesco dei Lavoratori (NSDAP) Adolf Hitler viene nominato Cancelliere del Reich.

1934, ottobre, in Cina ha inizio la Lunga Marcia che permetterà alle truppe comuniste di Mao Tse-Tung di sfuggire all'accerchiamento da parte dell'esercito nazionalista del Kuomintang.

1935, marzo, Teheran, lo Scià Reza Pahalavi modifica il nome del paese da Persia a Iran, paese degli Arii.

1935, 15 settembre, con le leggi di Norimberga gli ebrei tedeschi vengono privati della cittadinanza; è un primo passo verso la pianificazione del loro sterminio.

1935, 3 ottobre, l'esercito italiano supera il confine tra l'Eritrea e l'Impero Etiope: ha inizio la Guerra di Etiopia.

1936, 9 maggio, conclusa la campagna militare, il re d'Italia Vittorio Emanuele III viene proclamato Imperatore di Etiopia.

Roma

Pontecorvo a Roma

Seguendo il consiglio del fratello Guido, Pontecorvo arriva a Roma nell'autunno del 1931 e chiede di essere immatricolato al terzo anno del corso di Matematica e Fisica. Viene esaminato da Fermi e Rasetti. L'esame ha esito positivo, ma, al termine del colloquio, Fermi aggiunge un commento (che in realtà rivolge sempre ad ogni studente):

La fisica è una sola ma disgraziatamente oggi i fisici sono divisi in due categorie: i teorici e gli sperimentatori. Se un teorico non possiede straordinarie capacità, il suo lavoro non ha senso... Per quanto riguarda la sperimentazione, invece, anche una persona di medie capacità ha la possibilità di svolgere un lavoro utile. [M. Mafai - Il lungo freddo]

Pontecorvo lo considera un avvertimento personale e decide che sarà un fisico sperimentale.

Si trasferisce a Roma presso il pensionato protestante YMCA (Young Men Christian Association) non troppo lontano dall'Istituto di Fisica di via Panisperna (oggi incorporato nel complesso del Ministero degli Interni), sul colle del Viminale. Nel novembre del 1933 si laurea con lode discutendo una tesi di spettroscopia, suggerita da Fermi e Segrè, intorno al fenomeno dello spostamento delle righe spettrali dei vapori alcalini immersi in un gas estraneo. Si tratta di un lavoro sperimentale in cui Pontecorvo

estende lo studio anche al caso dei vapori di Mercurio. Questa ricerca sarà pubblicata nei Rendiconti dell'Accademia dei Lincei ed è il suo primo lavoro dato alle stampe. Il primo novembre 1934 Pontecorvo è nominato 'Assistente incaricato presso l'Istituto di Fisica' della regia Università degli Studi di Roma.

La scoperta dei neutroni lenti

Mentre Pontecorvo si occupa ancora di spettroscopia, Fermi scopre nel Marzo del 1934 la radioattività indotta dai neutroni con una strumentazione semplice costituita da una sorgente e da un contatore Geiger. Il gruppo (Fermi, Amaldi, Segrè, Rasetti) indirizza subito il proprio interesse verso la Fisica Nucleare. Entro l'estate del 1934 vengono 'creati' radioisotopi da oltre 40 dei 60 elementi chimici studiati. Pontecorvo è coinvolto in queste ricerche a partire dal settembre 1934. Il suo primo compito consiste nel predisporre, insieme con Amaldi, una scala quantitativa di 'attivabilità' della radioattività indotta. Amaldi e Pontecorvo ottengono risultati 'strani': l'attività sembra dipendere dal materiale che circonda l'apparato. Rasetti li critica ma Fermi crede in un effetto fisico reale.

Amaldi e Pontecorvo hanno notato delle irregolarità nella radioattività indotta se i neutroni, prima di incidere sul campione, passano attraverso degli spessori metallici. Fermi ha la brillante idea di sistemare della paraffina tra la sorgente e il campione da irradiare e osserva un grande aumento dell'attività. La paraffina, ricca di idrogeno, ha la proprietà di rallentare i neutroni che diventano più facilmente catturabili da parte dei nuclei atomici. Questo fenomeno si rivelerà cruciale soprattutto per i suoi futuri impieghi nei reattori nucleari. L'effetto della paraffina viene evidenziato sabato 20 Ottobre 1934 e il lunedì seguente la scoperta viene comunicata alla rivista 'La Ricerca Scientifica' con una Lettera firmata da E. Fermi, E. Amaldi, B. Pontecorvo, F. Rasetti, E. Segrè.

Questa lettera rappresenta l'ingresso ufficiale di Pontecorvo nel gruppo noto come 'ragazzi di via Panisperna', nel quale tutti hanno un soprannome: Fermi è il Papa, Pontecorvo è il Cucciolo.

Il brevetto e la fine di via panisperna

Il direttore dell'Istituto di Fisica di Roma, Orso Mario Corbino, si rende conto dell'importanza strategica della scoperta e consiglia di brevettare 'le parti del lavoro brevettabili'. A quattro giorni di distanza dalla pubblicazione della scoperta, il 26 ottobre 1934, viene depositata al Ministero delle Corporazioni la domanda per il brevetto N° 324458 riguardante il "Metodo per accrescere il rendimento dei procedimenti per la produzione di radioattività artificiali mediante il bombardamento con neutroni".

Il gruppo di Fermi passa dunque ad occuparsi degli effetti delle sostanze idrogenate sulla radioattività indotta.

Pontecorvo inventa una disposizione dell'apparato sperimentale per studiare la diffusione dei neutroni che sarà oggetto di una pubblicazione personale e sarà citata nei lavori successivi di Fermi.

La tecnica del rallentamento dei neutroni avrà molte applicazioni: dalla produzione

di radioisotopi, ai reattori nucleari, alla bomba atomica. Per il riconoscimento del brevetto da parte degli Stati Uniti Fermi e collaboratori intenteranno una causa legale che si concluderà solo nel 1953, con una sentenza favorevole ed un risarcimento in denaro di cui Pontecorvo non riuscirà a beneficiare.

Ma non è solo l'amore per la ricerca che tiene unito il gruppo: i ragazzi di via Panisperna condividono anche la passione per lo sport, in modo particolare per il tennis e le escursioni in montagna.

Nell'estate del 1935 il gruppo inizia a sfaldarsi: Rasetti si reca per un anno negli Stati Uniti, alla Columbia University, mentre Segrè vince la cattedra di Fisica Sperimentale a Palermo. Bruno si lega particolarmente a Gian Carlo Wick, un giovane fisico teorico assistente di Fermi dal 1932, l'unico del gruppo ad interessarsi di politica e a manifestare sentimenti antifascisti.

Pochi giorni dopo l'invio dell'ultimo articolo con Wick sulla diffusione dei neutroni lenti (marzo 1936), Pontecorvo si dimette in anticipo e per sempre dall'Università di Roma.

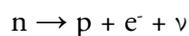
La fisica dal 1930 al 1934

1930 Per spiegare l'apparente non conservazione dell'energia osservata nel decadimento beta, Pauli postula l'esistenza di una particella neutra molto leggera e confida l'idea a Fermi nel 1931.

1932 Chadwick bombardando il Berillio con particelle alfa (nuclei di elio prodotti da processi di radioattività naturale) osserva per la prima volta una particella neutra, subito chiamata neutrone, troppo pesante per potere essere identificata con la particella di Pauli.

1932 Anderson osserva il positrone studiando i raggi cosmici e notando traiettorie del tutto simili a quelle degli elettroni, ma corrispondenti a particelle dotate di carica positiva.

1933 Fermi formula la teoria del decadimento beta, incorporandovi l'idea di Pauli e ribattezzando neutrino la particella leggera (che nel suo modello ha massa nulla). Il decadimento è interpretato come la trasformazione di un neutrone in un protone, con l'emissione di un elettrone e di un neutrino:



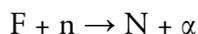
Il neutrino sarà osservato sperimentalmente soltanto nel 1956.

1934 (gennaio) I coniugi Joliot-Curie, che da anni studiano la radioattività naturale, bombardando elementi leggeri (boro e alluminio) con particelle alfa ottengono i primi esempi di radioattività artificiale. Per questo l'anno successivo riceveranno il premio Nobel per la chimica.

Tuttavia le particelle alfa, avendo carica elettrica positiva, non sono adatte per attivare i nuclei pesanti (con Z elevato).

1934 (marzo) Fermi comprende che i neutroni, senza carica elettrica, possono invece penetrare nel nucleo facilmente e inizia subito a bombardare con sorgenti di neutroni

(tubi di vetro contenenti polvere di berillio e radon) tutti gli elementi della tavola periodica, procedendo sistematicamente da quelli più leggeri. Giunto al fluoro ottiene una reazione interpretabile come la trasformazione del fluoro in azoto



1934 (giugno) Con l'uranio il gruppo di Fermi osserva un fenomeno che viene scambiato per la produzione di elementi transuranici. Solo Ida Noddack, una radiochimica tedesca, avanza l'ipotesi che si tratti di fissione nucleare, ossia di rottura del nucleo d'uranio in frammenti più leggeri.

1934 (settembre-ottobre) Partendo da alcune osservazioni sperimentali di Amaldi e Pontecorvo, Fermi scopre che i neutroni sono fortemente rallentati dall'attraversamento della paraffina. Di conseguenza sono catturati molto più facilmente dai nuclei poiché la probabilità è direttamente proporzionale al tempo trascorso dal neutrone entro il raggio di cattura del nucleo. La produzione di nuovi isotopi risulta quindi più facile. Dopo una settimana dalla pubblicazione dei risultati di Fermi ('Azione di Sostanze Idrogenate sulla radioattività provocata da neutroni', *La Ricerca Scientifica*, Anno V, Vol. II, n. 7-8), la scoperta è confermata anche dai coniugi Joliot-Curie a Parigi.

4. La storia: 1936 - 1940

1936, 4 giugno, dopo la vittoria del Front Populaire, in Francia, Leon Blum forma un Governo di sinistra.

1936, 17 luglio, il generale Franco, comandante della guarnigione spagnola in Marocco, entra in Spagna dando inizio alla Guerra Civile; ad ottobre nascono le Brigate Internazionali.

1937, 22 giugno, Francia, dimissione di Leon Blum.

1938, 15 luglio, viene pubblicato su 'Il Giornale d'Italia' il Manifesto della razza, firmato da dieci Professori universitari.

1938, 17 novembre, viene pubblicato il decreto legge che espelle gli ebrei da ogni forma di lavoro pubblico, le cosiddette Leggi Razziali.

1939, aprile, crollo della Repubblica in Spagna e inizio della Dittatura franchista.

1939, 1 settembre, truppe tedesche invadono la Polonia: ha inizio la II Guerra mondiale.

1940, 10 giugno, l'Italia dichiara guerra a Francia e Inghilterra.

1940, 14 giugno, le truppe tedesche della Wehrmacht, dopo la fulminante offensiva di primavera attraverso le Ardenne, entrano a Parigi.

Parigi

Da Roma a Parigi

Nel 1936 Pontecorvo vince una borsa di studio per trascorrere 6 mesi in un laboratorio all'estero. La scelta della destinazione non è facile. A seguito dell'invasione dell'Etiopia, all'Italia sono state appena imposte pesanti sanzioni economiche e il governo fascista

individua nell'Inghilterra il maggior responsabile. Per questa ragione i prestigiosi laboratori di Cambridge sono esclusi.

Fermi decide per il parigino Institut du Radium, fondato dai premi Nobel Pierre e Marie Curie e diretto da Frédéric Joliot, premio Nobel insieme alla moglie Irène, per la scoperta della radioattività artificiale.

Il 15 Aprile 1936, Pontecorvo giunge a Parigi: nei primi sei mesi porterà ancora avanti le ricerche iniziate in via Panisperna, quindi, scaduta la borsa italiana, i francesi gli offrono di restare. Pontecorvo accetta e decide di non rientrare in Italia nonostante nel 1937 fosse stato bandito a Roma un concorso per un posto di assistente a tempo indeterminato.

A Parigi Pontecorvo sfrutta le competenze francesi nella realizzazione di Alte Tensioni che consentono di produrre intense sorgenti di raggi X con cui studia il fenomeno dell'isomeria nucleare: una nuova linea di ricerca, individuata autonomamente, che lo renderà famoso. Alla luce degli interessanti risultati, la borsa di studio francese è rinnovata ogni sei mesi fino al dicembre del 1939, dopo lo scoppio della seconda guerra mondiale.

La Vie Parisienne

Nei quattro anni del suo soggiorno parigino, Pontecorvo abita in una modesta stanza dell'Hôtel des Grands Hommes in Piazza del Pantheon n. 17 a pochi passi dall'Istitut du Radium dove lavora. Siamo nel quartiere latino: La Sorbonne, l'École Polytechnique, il Collège de France e intorno una moltitudine di laboratori privati, botteghe e atelier. Pontecorvo è affascinato dal nuovo ambiente decisamente più democratico e melangé rispetto a Pisa e Roma:

Mi colpì molto la generale promiscuità, la presenza di tanta gente di colore, il gran numero di ragazze che frequentavano l'università, il loro atteggiamento così disinvolto. Ma soprattutto mi colpirono gli operai. A Parigi c'erano gli operai, si riconoscevano fisicamente e frequentavano gli stessi locali dove andavamo noi studenti e intellettuali. Mangiavano al nostro fianco, tranquillamente. A Roma credo di non aver mai visto un operaio. [...] certo non avevo mai mangiato alla stessa tavola con loro. [M. Mafai - Il lungo freddo]

Ai tavoli del Foyer des étudiants o Chez Marthe, un ristorante del quartiere, Pontecorvo discute di politica con gli amici Sergio De Benedetti futuro fisico, Salvatore Luria (Premio Nobel per la medicina 1969) e frequenta il cugino Emilio Sereni esule antifascista. Pochi mesi dopo il suo arrivo, conosce Marianne Nordblom, una studentessa svedese che sposerà civilmente nel 1940, due anni dopo la nascita del primo figlio, Gil.

Nel 1938 è raggiunto dal fratello Gillo, non ancora ventenne, che con la scusa di partecipare ad un torneo di tennis decide di non rientrare in Italia dove sono state promulgate da poco le leggi razziali.

L'incontro con Joliot

In Frédéric Joliot, Pontecorvo non trova soltanto il suo secondo maestro ma anche un amico che lo accoglie e lo coinvolge nelle proprie passioni: lo sport e la politica.

Frequenti sono gli inviti alla villa al mare di Arcouest in Bretagna, località in voga tra gli intellettuali e scienziati parigini. Quando arriva a Parigi, la Francia è in piena campagna elettorale e Pontecorvo inizia a respirare il clima politico libertario ed antifascista degli intellettuali parigini e degli esuli italiani e spagnoli.

Le elezioni sono vinte dal Front Populaire: una coalizione di sinistra che porterà al governo di Léon Blum, il primo presidente del consiglio ebreo della storia francese.

Frédéric e la moglie sono figure di spicco sulla scena politica tanto che Irène Curie viene scelta come Sottosegretario per la ricerca nel neonato governo.

Pochi mesi dopo, rientrati da una missione scientifica in Russia, i Joliot testimoniano il loro apprezzamento per il progresso economico sociale dell'Unione Sovietica e il convincimento che 'la scienza al servizio del socialismo diventava uno strumento di militanza rivoluzionaria'. [S. Turchetti - Il caso Pontecorvo]

L'amicizia con Joliot resterà solida anche durante gli anni della guerra fredda quando le posizioni politiche di Joliot entreranno in conflitto con l'influenza americana nell'Europa della NATO. I due amici si incontrano per l'ultima volta in URSS, a Dubna nel maggio del 1958, pochi mesi prima della morte di Joliot.

Così Pontecorvo ricorda l'amico sulle colonne dell'Unità: 'Ho avuto la fortuna di lavorare con lui e di esserne amico... era terribilmente affascinante, tipicamente francese, di quelli a cui piace un po' ascoltarsi'.

Il cugino Emilio e la formazione politica

Altra figura importante per la formazione politica di Pontecorvo negli anni parigini è il cugino Emilio Sereni, esule antifascista, futuro uomo chiave della Resistenza e in seguito parlamentare del PCI.

Mio cugino Emilio mi ha dato per la prima volta delle cose da leggere, delle cose - intendo - che non fossero libri di Fisica o di Letteratura... con Sereni tutto è cambiato. Ho cominciato a vedere cose che prima non vedevo, e soprattutto mi sono convinto che ognuno di noi doveva fare qualcosa per cambiare il mondo...Ho cominciato a guardare con interesse prima e con entusiasmo poi a quello che accadeva in URSS, dove il proletariato era al potere e dove si andava costruendo l'uomo nuovo. [M. Mafai - Il lungo freddo]

L'amicizia con Joliot e la frequentazione con Sereni sono i momenti centrali per la formazione della coscienza politica di Pontecorvo. L'impegno civile si fa spazio tra la Fisica e lo sport e assume un ruolo sempre più centrale nella sua vita. La politica viene incontro a Pontecorvo come un vigoroso intreccio di sentimenti e ragione.

Nel momento in cui i comunisti erano così isolati, calunniati, insultati, ebbene io scelsi proprio quel momento per aderire al partito. [M. Mafai - Il lungo freddo]

Verso la fine di Agosto del 1939 Pontecorvo prende la tessera del Partito Comunista d'Italia.

Il 3 settembre la Francia dichiara guerra alla Germania e la borsa di studio di Pontecorvo, scaduta nel dicembre dello stesso anno, non viene rinnovata. Con l'aiu-

to di Enrico Fermi e di Frédéric Joliot, Pontecorvo prepara il suo trasferimento in America.

5. La storia: 1940 - 1949

1940, 22 giugno, inizio dell'Operazione Barbarossa, oltre 130 divisioni tedesche invadono l'URSS.

1941, 7 dicembre, 350 aerei partiti da sei portaerei giapponesi al comando dell'Ammiraglio Nagumo bombardano Pearl Harbor: gli USA entrano in guerra.

1943, 25 luglio, durante una drammatica seduta, il Gran Consiglio del Partito Fascista approva l'ordine del giorno Grandi ed esautorava Mussolini che viene arrestato il giorno seguente.

1943, 8 settembre, a Cassibile viene firmato l'armistizio tra Italia e Alleati.

1945, 27 gennaio, l'Armata Rossa libera il campo di sterminio di Auschwitz rivelando al mondo le atrocità del nazismo.

1945, 4-11 febbraio, a Yalta, in Crimea i Capi delle Nazioni Alleate si riuniscono e definiscono le future sfere di influenza in Europa e nel mondo.

1945, 8 maggio, la resa incondizionata della Germania pone fine alla guerra in Europa.

1945, 15 luglio, prima esplosione atomica sperimentale ad Alamogordo, New Mexico.

1945, 6 e 9 agosto, i bombardamenti atomici di Hiroshima e Nagasaki pongono fine alla II Guerra mondiale anche nel Pacifico.

1948, 15 maggio, New York, alle Nazioni Unite viene approvata la fondazione dello Stato di Israele.

1948, 10 dicembre, a Parigi viene firmata la 'Dichiarazione Universale dei Diritti dell'Uomo'.

1949, aprile, Parigi: si riuniscono per la prima volta i 2.000 delegati dei Partisans de la Paix che chiedono l'abolizione di tutte le armi atomiche.

1949, 29 agosto, l'URSS esegue il primo test di un ordigno nucleare.

1949, 1 ottobre, viene fondata la repubblica Popolare Cinese.

USA – Canada - UK

La fuga da Parigi

Il 13 giugno 1940, con la Wehrmacht alle porte, Pontecorvo, insieme agli amici Lauria e De Benedetti, fugge da Parigi in bicicletta, in quei momenti convulsi unico mezzo disponibile ed agile. Raggiunge la sorella Giuliana a Tolosa dove si è stabilita con il marito Duccio Tabet e dove sono già arrivati Marianne con il figlio Gil. Da lì, attraversando la Spagna, giungono a Lisbona, unico imbarco sicuro per gli Stati Uniti, ritenuto ormai il solo Paese dove poter continuare a lavorare; e sopravvivere.

Il viaggio è lungo, difficile, con la moglie Marianne che soffre per la gravidanza, il caldo opprimente ed il percorso travagliato. A Lisbona, dopo alcuni giorni di ansia ed

incertezza, i Pontecorvo si imbarcano sulla motonave Quanza e arrivano a New York il 20 agosto; due giorni dopo, Bruno compirà 27 anni, ma ha già alle spalle un'ottima fama di fisico nucleare ed una grande esperienza.

Da mesi è in contatto con l'amico Emilio Segrè e con Enrico Fermi per cercare un contratto di lavoro, condizione necessaria per poter entrare negli USA; dopo un contatto con la Westinghouse non andato a buon fine, ha ottenuto una proposta dalla Well Surveys Inc. che si occupa di ricerche petrolifere. Andrà a sviluppare nuove tecnologie per l'individuazione di giacimenti di petrolio.

A Tulsa, Oklahoma, si sistema con piena soddisfazione, sia per il lavoro sia per la nuova vita. La sorella Giuliana si è fermata a New York, dove ogni tanto capita anche Bruno, che riesce a mantenere, nella diffidente America, i legami con parenti e vecchi amici. Anche se chiede subito la cittadinanza, negli USA ha lo status di enemy alien (straniero nemico) che gli limita i diritti civili.

... e tuttavia ho un buon ricordo del periodo dell'Oklahoma. Ho messo a punto un sistema che è la prima applicazione del neutrone, il cosiddetto carotaggio neutronico. [M. Mafai - Il lungo freddo]

Neutroni e campi petroliferi

Bruno rimane a Tulsa quasi tre anni raggiungendo presto una notevole fama per una sua originale applicazione dei neutroni lenti: sviluppa infatti un nuovo sistema di rilevamento della presenza di petrolio nel sottosuolo che si basa sulla tecnica del rallentamento dei neutroni; proprio la scoperta che nel 1938 aveva portato il Premio Nobel a Fermi e che Bruno aveva imparato e messo a punto negli anni romani.

Ma in questo nuovo lavoro mette a frutto anche la sua geniale inventiva e la sua spiccata fantasia che gli permettono di portare un contributo originale alle tecniche di prospezione petrolifera.

Il carotaggio neutronico, che va a migliorare le già note tecniche di carotaggio elettrico e gamma, viene subito utilizzato su larga scala ed è una tecnica ancora attuale. Bruno non la brevetta, manifestando la sua personalità tesa soprattutto alla ricerca pura; e tuttavia, rinuncia alla proposta di diventare Professore all'Università, in Michigan e a Cornell.

Sono anni di grandi soddisfazioni, di vita tranquilla, di contatti costanti, seppur non frequenti, con Fermi, Segrè e di assidui rapporti epistolari, in particolare, con l'amico Gian Carlo Wick.

È il 1942 e negli USA sta partendo in gran segreto il Progetto Manhattan che porterà alla costruzione del Laboratorio di Los Alamos, in New Mexico. I contatti con Fermi e gli altri si interrompono, improvvisamente.

Anche in Inghilterra si sta organizzando la corsa alla bomba atomica, e con maggiore timore, vista la vicinanza con la nemica Germania. Il governo britannico decide di trasferire il team di ricerca e le attrezzature in Canada, dove sono arrivati anche alcuni dei vecchi amici francesi di Pontecorvo. Saranno anche loro a proporre nel 1943 a Lord

John Cockcroft di chiamare il giovane fisico italiano a Montreal, a collaborare alla progettazione e alla costruzione del primo reattore nucleare anglo-canadese.

La bomba

Nel 1943 la maggior parte dei fisici lavora ai progetti segreti per sviluppare la nuova bomba, e soprattutto, per arrivare prima dei tedeschi. Non tutti però, tra gli ex 'Ragazzi di via Panisperna', partecipano a questa sfida principalmente scientifica; Franco Rasetti, il Venerato Maestro, ha scelto di stare lontano, tra i monti del Canada a studiare fossili e farfalle.

Ed in Canada si sta intensificando lo sforzo degli inglesi. Anche Bruno Pontecorvo, escluso dal Progetto Manhattan, comincia a lavorare alla costruzione di un reattore nucleare nei nuovi laboratori di Chalk River. Qui ritrova alcuni dei colleghi fuggiti dalla Francia occupata, come Hans von Halban e Pierre Auger; ma non Joliot che ha deciso di prendere le armi nella Resistenza francese.

Anni dopo, a Miriam Mafai che gli chiede chi lo aveva chiamato in Canada, risponde:

Non ricordo chi mi ha contattato per primo, forse Auger, forse Placek...Il periodo canadese fu molto bello, molto utile, molto stimolante dal punto di vista scientifico. [M. Mafai - Il lungo freddo]

Negli anni canadesi Pontecorvo getta le basi per molti dei suoi futuri successi nel campo della ricerca, ma durante il periodo bellico il suo maggiore impegno riguarda la costruzione del reattore nucleare: studio dei materiali, misura delle sezioni d'urto, messa a punto di nuovi rivelatori.

Alla fine del 1944 viene inviato a Chicago per discutere di questi problemi con Fermi che, due anni prima, aveva messo in funzione la prima pila atomica. Diventa presto uno degli scienziati più esperti e determinanti nello sviluppo dei reattori ad acqua pesante.

In questi anni la famiglia cresce con l'arrivo dei figli Tito nel 1944 e Antonio un anno dopo.

Nel luglio del 1945, alla notizia del test della prima bomba atomica ad Alamogordo, come quasi tutti i fisici esprime soddisfazione per il successo che sente anche suo, come una grande scoperta scientifica appartenente a tutti coloro che vi hanno lavorato.

Al contrario dei suoi colleghi che sono scettici sull'uso della nuova arma, Pontecorvo è convinto che gli Americani la useranno contro il Giappone, per motivi politici, come ricorda Philip R. Wallace, a quel tempo fisico teorico a Montreal. [La Phisique au Canada, aprile 2000]

Nuove idee per la nuova fisica

Nel 1946, pur rimanendo inserito nella ricerca nucleare, Pontecorvo ritorna allo studio delle particelle elementari. Esegue con i colleghi Geoffery Hanna e David Kirkwood accurate misure sui raggi cosmici dalle quali trae la convinzione che gli elettroni osservati provengono dal decadimento in volo dei muoni e che entrambe queste particelle hanno la stessa natura, ma una sola grande differenza, la massa.

Bruno si pone anche il problema di rivelare la ancora sconosciuta particella ipotizzata da Pauli nel 1930, il neutrino, che nei reattori nucleari viene prodotta in eccezionale quantità. Per questo scopo propone di sfruttare la reazione:



È un'idea geniale che solo dopo molti anni verrà ripresa e messa in pratica da altri.

Ho lavorato per anni alla progettazione e alla messa in servizio di un reattore nucleare a uranio ordinario e ad acqua pesante. Io dirigevo gli aspetti fisici del progetto. Ma in Canada ho anche iniziato le mie ricerche di fisica delle particelle elementari che poi ho continuato per tutta la vita... Fu lì, in Canada, che intuì la simmetria elettrone-muone che ha avuto, penso, qualche importanza per la elaborazione successiva della universalità delle interazioni deboli. [M. Mafai - Il lungo freddo]

In quegli anni per il mondo occidentale c'è un nuovo problema: la fuga di cruciali informazioni di carattere tecnico-scientifico verso l'Unione Sovietica. Iniziano le indagini segrete, le delazioni, i sospetti. L'FBI scopre una rete di spie intorno ad un addetto dell'ambasciata sovietica a Montreal, Igor Gouzenko, il quale confessa che numerosi scienziati stanno fornendo informazioni sul reattore di Chalk River. Viene arrestato Alan Nunn May; ma anche Pontecorvo viene sospettato in quanto straniero e comunista. Niente viene trovato su di lui a riscontro dei sospetti avanzati; ne esce quindi scagionato e prosegue la sua attività di ricerca.

Alla fine della guerra Bruno riallaccia i rapporti con i vecchi amici francesi e, seppur nelle difficili condizioni post-belliche, realizza alcuni viaggi in Europa, tornando anche in Italia.

Nuovi cambiamenti sono alle porte per la famiglia Pontecorvo.

In Inghilterra

Il periodo canadese si conclude nella primavera del 1948, quando Pontecorvo accetta di trasferirsi in Inghilterra, nel nuovo centro per ricerche atomiche costruito ad Harwell, vicino ad Oxford. Ha rinunciato a numerose proposte ricevute da prestigiose Università, a testimonianza della fama che si è costruito nei lunghi anni americani. Forse, lo ha convinto anche l'idea di avvicinarsi con la famiglia ai vecchi amici, ai numerosi parenti; molti dei suoi fratelli, infatti, abitano da tempo in Inghilterra. Bruno prende quindi casa nel villaggio di Abingdon, vicino ad Harwell.

Adesso è al centro dei rapidi progressi della fisica nucleare, con la costruzione dei primi reattori in Europa; può anche dedicarsi alla fisica delle particelle e allo sviluppo di nuovi strumenti. Partecipa ai Convegni di Fisica Nucleare, come Edimburgo, Basilea, Como dove, nel settembre del 1949, incontra Fermi e presenta un lavoro sui contatori proporzionali. Riceve anche una proposta da Gilberto Bernardini per una cattedra a Pisa, che però lascia cadere. Ma nuove tensioni sorgono intorno alla segretezza della tecnologia nucleare che spie sovietiche violano spesso, anche in modo clamoroso. Agli inizi del 1950 scoppia il 'caso Fuchs', un fisico teorico tedesco che ha partecipato al

Progetto Manhattan e da tempo, rifugiato in Inghilterra, lavora al centro nucleare di Harwell. Klaus Fuchs viene scoperto, processato e condannato per spionaggio nucleare. Anche Pontecorvo, che ben lo conosce, viene indagato, ma, di nuovo, senza che gli venga contestato alcunché

In Francia, le pressioni americane sul governo portano alla rimozione di Joliot-Curie da direttore del CEA, Centre pour l'Energie Atomique, per motivi ideologici. Sono colpi decisivi. Forse, Bruno vede alzarsi nuove minacce intorno a sé. Forse comincia a pensare al suo trasferimento in URSS, nonostante accetti la cattedra che gli è stata proposta dall'Università di Liverpool su indicazione di John Cockcroft.

Vacanze in Italia

È l'estate del 1950, Bruno si appresta ad andare in vacanza in Italia con la famiglia. Il 25 luglio dopo aver scritto all'Università di Liverpool che prenderà servizio con un po' di ritardo, inizia il lungo viaggio in auto, che lo porterà in Francia, in Svizzera, in Austria.

Sul tetto ha caricato la tenda, gli attrezzi per il campeggio, la bicicletta di Gil e i bagagli necessari per una vacanza di un mese. [M. Mafai – Il lungo freddo]

Arrivano in Italia dove, a Ladispoli, li attendono Giuliana e Duccio. Il 22 agosto sono al Circeo a festeggiare con Gillo e Henrietta il 37° compleanno di Bruno.

Nelle acque del Circeo impara da Gillo ad utilizzare l'attrezzatura per la pesca subacquea e a cogliere il momento preciso nel quale lanciare l'arpione. Passano giorni felici che ricorderà a lungo. Con amici e parenti rammenta quando, da bambino, trascorreva le vacanze al Forte insieme ai cugini, tra i quali Emilio Sereni, ormai diventato un dirigente del Partito Comunista Italiano, allineato alla politica dell'URSS.

Dai giornali giungono notizie allarmanti da tutte le parti del mondo; lo scoppio della guerra in Corea ha segnato la fase più acuta della Guerra Fredda. Si percepisce il rischio di un nuovo utilizzo della bomba atomica. Una notizia attira l'attenzione: il governo degli Stati Uniti è stato convocato in giudizio per aver utilizzato indebitamente il brevetto dei 'Ragazzi di via Panisperna': viene chiesto un risarcimento iperbolico di 10 milioni di dollari!

Sono momenti di intensa emozione. Forse la decisione è presa. Il 25 agosto rientrano a Roma. L'auto viene consegnata ad un garage della capitale, con l'impegno di ritirarla dopo qualche tempo. Ma quel tempo non arriverà mai.

Con tutta la famiglia si imbarca su un volo della Scandinavian Airlines per Stoccolma.

6. La storia: 1950 - 1991

1950, aprile, Parigi, Frédéric Joliot-Curie viene allontanato dalla direzione del CEA, Centre pour l'Energie Atomique.

1950, 25 giugno, l'esercito della Corea del Nord, con l'avallo della Repubblica Popolare Cinese, invade la Corea del Sud, alleata degli USA: inizia la Guerra di Corea, che rappresenta la fase più acuta della Guerra Fredda.

- 1951, 26 ottobre, Winston Churchill forma il suo secondo governo.
- 1952, novembre, gli USA effettuano la prima esplosione termonucleare (bomba H).
- 1953, agosto, l'URSS fa esplodere la sua prima bomba H.
- 1954, maggio, in Viet Nam, i francesi vengono sconfitti a Dien-Bien-Phu dall'esercito dei Viet Minh, guidati dal generale Giap.
- 1954, 29 settembre, a Ginevra viene fondato il CERN.
- 1954, 1 novembre, in Algeria, il Front de Libération Nationale dà inizio alla guerra di liberazione dalla Francia.
- 1955, 14 maggio, i Paesi socialisti dell'Europa dell'Est danno vita al Patto di Varsavia, alleanza militare che si contrappone alla Nato.
- 1955, 14 dicembre, l'Italia entra nell'Organizzazione delle Nazioni Unite.
- 1956, 26 luglio, crisi di Suez: Nasser, presidente dell'Egitto, nazionalizza il canale che viene quindi occupato da paracadutisti inglesi e francesi; l'URSS minaccia l'intervento a fianco dell'Egitto.
- 1956, ottobre – novembre, le truppe del Patto di Varsavia invadono l'Ungheria e pongono fine alle aperture democratiche di Imre Nagy.
- 1957, 4 ottobre, l'URSS mette in orbita il primo satellite artificiale, lo Sputnik-1.
- 1959, 1 gennaio, il dittatore cubano Batista fugge da l'Havana, occupata dai barbudos, guidati da Fidel Castro e da Ernesto 'Che' Guevara.
- 1960, dicembre, si costituisce il Fronte di Liberazione Nazionale del Viet-Nam, il Viet-Cong.
- 1961, 12 aprile, il russo Yuri Gagarin, a bordo della navicella Vostok-1, è il primo uomo in orbita intorno alla Terra.
- 1961, 30 ottobre, l'URSS fa esplodere la Zar Bomb, progettata da Andreij Sacharov, 3.000 volte più potente della bomba di Hiroshima.
- 1962, ottobre, crisi di Cuba, blocco navale degli USA per impedire l'installazione di missili russi (MRBM). Kennedy e Krushev minacciano lo scoppio della III guerra mondiale.
- 1967, 5 - 10 giugno, guerra dei 'sei giorni', tra Israele e gli Stati Arabi.
- 1968, agosto, crisi cecoslovacca, il governo di Dubcek è l'ultimo atto della 'Primavera di Praga'.
- 1969, 20 luglio, Neil Armstrong, dell'Apollo-11, posa il piede sulla luna: 'E' un piccolo passo per un uomo, un grande balzo per l'Umanità'.
- 1975, 30 aprile, l'ultimo elicottero americano si alza dall'ambasciata USA di Saigon: finisce la guerra del Viet-nam.
- 1978, 16 marzo, Roma, le Brigate Rosse compiono la strage di via Fani, rapiscono Aldo Moro e lo uccidono dopo quasi due mesi di prigionia.
- 1978, 16 ottobre, il cardinale polacco Karol Wojtila viene eletto Papa e sceglie il nome di Giovanni Paolo II.

1989, 9 novembre, aperte le frontiere tra le due Germanie, inizia il crollo del muro di Berlino.

1991, 26 dicembre, il Soviet Supremo dell'URSS dichiara dissolta l'Unione Sovietica.

Da Bruno a Бруно Максимович

Il Viaggio

È la fine di agosto del 1950, Bruno Pontecorvo, con la famiglia è in volo verso Stoccolma. Il figlio Gil, il maggiore, che all'epoca aveva solo 12 anni, ricorda molto bene quel viaggio: 'Siamo stati lì una notte ma stranamente non siamo andati a trovare la nonna. Il giorno seguente abbiamo preso un piccolo aereo per Helsinki. Ricordo la costa delle Svezia dall'alto, era bellissima. Due giorni dopo ci hanno accompagnato in automobile fino al confine con l'Unione Sovietica. Io ero con mia madre e miei fratelli; mio padre viaggiava da solo in un'altra macchina. Passato il confine abbiamo preso un treno per Leningrado e dopo due settimane siamo andati a Mosca. Avevamo un bell'appartamento, grande, ma io non ero contento. Non parlavo la lingua, non avevo amici. Mi avevano promesso che saremmo ritornati a casa per l'inizio della scuola. Quando ho realizzato che non saremmo più ripartiti per l'Inghilterra mi sono molto arrabbiato con mio padre, ho urlato, pianto...Sono stato per due mesi sempre rinchiuso in casa. Di questo periodo ho un brutto ricordo, il peggiore della mia vita.'

Anni dopo Bruno Pontecorvo racconterà a Miriam Mafai:

Viaggiai da clandestino chiuso nel bagagliaio e occupai il tempo pensando a cosa avrei detto all'arrivo a Mosca. Mi ero preparato una specie di piccolo discorso, rivolto idealmente ai miei colleghi occidentali, con il quale intendevo spiegare le ragioni della mia scelta...Non c'entra niente l'atomica. L'URSS l'aveva già da oltre un anno. Io volevo lavorare per il progresso e la pace... volevo in qualche modo mettermi a disposizione dell'URSS. Solo in quel paese, pensavo, la mia passione scientifica e i miei sentimenti profondi non sarebbero entrati in contrasto. Trovavo scandaloso l'atteggiamento antisovietico che andava prevalendo in tutto l'Occidente. Era una cosa molto ingiusta se si pensa a quei milioni di russi, soldati e civili, uomini e donne che erano morti anche per noi nella seconda guerra mondiale. Per questo sono partito.' [M. Mafai - Il lungo freddo]

I Pontecorvo arrivano a Mosca una mattina di settembre, protetti da accompagnatori e guardie del corpo. I colleghi di Bruno e il direttore del Dipartimento di Fisica dell'Università di Liverpool, Herbert Skinner, lo aspetteranno invano alla conferenza di Harwell, programmata per il 6 settembre.

Pochi mesi prima, il 25 giugno, l'esercito della Corea del Nord, con l'avallo della Repubblica Popolare cinese, aveva invaso la Corea del Sud, alleata degli Stati Uniti, dando inizio alla Guerra di Corea. Siamo al culmine della guerra fredda e del fisico nucleare e della sua famiglia non si avrà più notizia per cinque, lunghi, anni.

'Non ha detto una parola a nessuno. Era molto scientifico' - dichiara il fratello

Gillo - 'se nessuno sapeva, tutti erano più tranquilli.' [dal film Pontecorvo - di Ella Vlasova, prodotto da Science Video Mosca e La Limonaia Scienza Viva, 2003]

Ma non è solamente Pontecorvo a mantenere il silenzio; alla vicenda viene infatti messa la sordina da parte di tutte le nazioni, in primo luogo l'Inghilterra che non vuole essere accusata dagli americani di inaffidabilità per avere avuto spie all'interno del suo organico scientifico. Gli stessi italiani cercano di far calmare le acque, il PCI non ha infatti nessun interesse a immischiarsi nella faccenda. Il dirigente del PCI Gianni Cervetti spiega così il silenzio intorno a Pontecorvo:

I cinque anni di silenzio, prima della dichiarazione famosa in cui disse dove si trovava, si spiegano con un interesse delle varie parti, di tutte le parti, a non esporre il caso perché tutti avrebbero potuto trovarsi di fronte a speculazioni di altri, o accuse, a critiche. [archivio RAI, La storia Siamo Noi – Il caso Pontecorvo - Il silenzio intorno all'affaire Pontecorvo]

In realtà gli americani sanno dove si trova Pontecorvo. Nella relazione dell'aprile del 1951 del Joint Committee on Atomic Energy (82esimo congresso, prima sessione) che tratta i casi delle tre famose spie Fuchs, May e Greenglass e presieduta dal senatore del Connecticut, Brien McMahon, si parla anche di lui:

A special situation is presented by Dr. Bruno Pontecorvo, the Italian-born British scientist, who worked at Canadian atomic energy centers and visited American laboratories during World War II....Pontecorvo, his wife, and three children disappeared behind the Soviet iron curtain, fleeing via Sweden and Finland, during September 1950. While Pontecorvo had no direct contact with weapons work, it is possible to speculate that he may have betrayed reactor data from 1943 onward-supplementing the bomb details and the U-235 processing information divulged by Fuchs and thereby furnishing Russia with a particularly well-rounded picture. In any event, as of September 1950, the Soviets acquired in Pontecorvo not only a human storehouse of knowledge about the Anglo-American-Canadian atomic projects but also a first-rate scientific brain.

All'arrivo alla stazione di Mosca i Pontecorvo vengono accolti da un giovane alto ed elegante. Di quel giovane ufficiale del KGB Pontecorvo ne conserva un ricordo affettuoso:

Mi aiutò molto. Era lui a risolvere i nostri problemi, era un uomo tranquillo, intelligente e colto. [M. Mafai - Il lungo freddo]

Chiuso con la famiglia nella casa di Mosca, per ragioni 'di vigilanza', Pontecorvo studia il russo e legge i classici della letteratura francese. Il figlio Gil ricorda che suo padre 'usciva tutte le mattine ma non diceva dove andava e noi non lo chiedevamo'. A Mosca Pontecorvo viene interrogato a lungo, si vuole sapere che aiuto può dare agli studi sulla bomba atomica.

'Forse la parola interrogatorio è troppo forte' - afferma il fisico nucleare Boris Joffe, grande esperto di reattori nucleari - 'diciamo che dovette presentarsi di fronte a una commissione di dieci scienziati, fisici, più alcuni membri del

partito. Gli fecero un sacco di domande, volevano sapere tutto quello che sapeva, le sue conoscenze teoriche sui reattori nucleari, i progetti in cui era stato impegnato e Pontecorvo rispondeva ma rimasero insoddisfatti perché non raccontò nulla che già non sapessero'. [archivio RAI, La storia Siamo Noi – Il caso Pontecorvo - Qual è il suo legame con la bomba atomica?]

Il Laboratorio di Problemi Nucleari di Dubna

Nell'ottobre 1950 la famiglia Pontecorvo si stabilisce a Dubna, una cittadina a circa 150 km a nord- ovest di Mosca. A Dubna, che fino a pochi anni prima era un villaggio di contadini in un'ansa del Volga, è sorto da poco un importante centro di ricerche nucleari, il Joint Institute for Nuclear Researches (JINR). Presto la cittadina diviene il regno della ricerca pura, in cui lavorano centinaia di scienziati, ricercatori e tecnici.

‘Nell'agosto del 1946’ – scrive Venedikt Dzhelepov - ‘il nostro Governo su iniziativa dell'accademico Kurchatov decise di costruire un laboratorio di ricerca di fisica nucleare e di dotarlo di un potente acceleratore, il più grande esistente al mondo, un sincrociclotrone. La macchina poteva accelerare deutoni (nucleo del deuterio, isotopo dell'idrogeno, costituito da un protone e da un neutrone) fino ad un'energia di 280 MeV, particelle alfa (nucleo dell'elio, costituita da due protoni e da due neutroni) fino a 560 MeV; infine, poteva accelerare protoni, inizialmente, fino a 460 e successivamente a 680 MeV. La costruzione della struttura procedette rapidamente e nel mese di dicembre 1949 il sincrociclotrone entrò in funzione. In gennaio gruppi di fisici del nostro laboratorio e di vari Istituti di Mosca iniziarono il loro lavoro di ricerca all'acceleratore di Dubna'. [B. Pontecorvo, Selected Scientific Works, SIF, pag. 487]

Immaginata da Kurchatov, la cittadina viene realizzata da Beriija, che utilizza come manodopera coatta i detenuti condannati ai lavori forzati. Dubna è una città chiusa, controllata dai militari e dal KGB.

Al centro di Ricerche Nucleari, Pontecorvo riprende il lavoro sulle particelle elementari. La sua vita nella ‘città della scienza’ è organizzata all'insegna del benessere ma anche della massima sicurezza. In questo periodo tutti gli scienziati sono sottoposti a un rigidissimo controllo da parte delle autorità russe, Bruno Pontecorvo in particolare.

Nel suo diario Boris Joffe annota:

All'epoca gli scienziati si trovavano nel più completo isolamento, non potevano nemmeno parlare tra loro se non tramite il capo progetto...Non si potevano prendere appunti e scrivere formule se non su un quaderno ufficiale che a fine giornata veniva consegnato e poi controllato periodicamente dalle autorità. Nel 1951 il mio capo andava a Dubna almeno una volta a settimana per parlare con Pontecorvo e al suo rientro ci diceva: ‘Ho parlato con il professore’, ma non pronunciava mai il suo nome anche se noi sapevamo che si trattava di lui. Era un tabù, non si poteva nemmeno nominare almeno fino al 1955!. [B. Joffe - Особо секретное задание. Из истории атомного проекта в СССР. «Новый Мир», 1999, No5]

‘La sua presenza fu tenuta nascosta per un motivo semplicissimo.’ - spiega Semion Gerhstein fisico dell’Accademia delle scienze di Mosca - ‘La sua fuga aveva creato un grosso scandalo, le autorità inglesi e americane lo avevano accusato di essere una spia, e quindi alla Russia non conveniva renderne pubblica la presenza, era meglio far calmare le acque, e così fecero’. [archivio RAI, La storia Siamo Noi – Il caso Pontecorvo – Il mistero del periodo russo]

La vita a Dubna

Alla famiglia Pontecorvo viene assegnata una villetta a due piani a pochi passi dal Volga, con un giardino nel quale crescono un albero di susine e un pero. Pontecorvo è sorvegliato costantemente. Per allontanarsi oltre la zona autorizzata deve essere richiesto uno speciale permesso. I bambini vengono iscritti a scuola, ma anche lì, come al campo dei pionieri, nessuno pronuncia mai il loro cognome.

Il figlio Tito ricorda così quel periodo:

Per i primi due anni c’era un agente del KGB che seguiva mio padre dappertutto, anche a casa. Era diventato un uomo di famiglia. Diceva che era lì per proteggerci. E’ rimasto con noi due anni e poi è sparito. [archivio RAI, La storia Siamo Noi – Il caso Pontecorvo – Il mistero del periodo russo]

Dai colleghi Bruno viene chiamato alla maniera russa con nome e patronimico. Diventa Bruno Maximovic.

‘Mi chiedevo perché non mi chiamassero con il nome e il cognome interi. Non sapevo darmi una risposta di questa mancanza di rapporti. Si parlava di lavoro e solo di lavoro. Non mi sono mai incontrato con nessuno. Non sono mai andato nelle loro case. Sono stato completamente solo per molti anni.’ [M. Mafai - Il lungo freddo]

Bisogna attendere fino al 1955 prima che Bruno Maximovic riprenda il suo cognome, la sua piena identità. E’ la fine di febbraio e sulla Pravda appare una sua dichiarazione nella quale appoggia la campagna dei Partigiani della Pace per la distruzione di tutte le bombe atomiche ed il divieto di costruirne nuove. Pochi giorni dopo, il 4 marzo, alla presenza di giornalisti provenienti da tutto il mondo tiene una conferenza stampa nella sede dell’Accademia delle Scienze. La notizia rimbalza sulle pagine di tutti i quotidiani. Il giorno seguente il corrispondente da Mosca dell’Unità, Giuseppe Boffa, riporta la notizia in prima pagina. Dopo quella dichiarazione l’ambiente attorno a lui si fa più cordiale, meno riservato e sospettoso, la vigilanza si allenta. Pontecorvo può invitare a casa amici, colleghi, giovani studenti, per mangiare, ascoltare musica o discutere insieme qualche lezione particolarmente difficile. In questi anni, la sua è diventata una casa di soli uomini, disordinata e confusa. Col tempo infatti la moglie Marianne, da sempre schiva e solitaria, comincia a manifestare i sintomi di una malattia nervosa che spesso la costringe a lunghe permanenze in clinica.

A Bruno piace cucinare, stare in compagnia ma soprattutto ama molto scherzare. Il

fisico teorico Arkadii Migdal racconta che un giorno lui e Pontecorvo decidono di scrivere una falsa lettera a firma di Pauli e di farla pervenire a Landau. E' il 1958 e Landau è entusiasta degli ultimi articoli di Heisenberg in cui il famoso fisico teorico suggerisce una teoria unificata, non lineare, dei fermioni. Nella breve lettera, che Landau legge in un seminario, Pauli sostiene di aver trovato nuovi argomenti a favore della teoria di Heisenberg e che ci sono nuove prove sperimentali a sostegno di tale teoria. Tuttavia queste prove non sono menzionate esplicitamente ma solo accennate. La maggior parte dei partecipanti al seminario si esalta a questa notizia.

Qualcuno va persino alla lavagna e cerca di immaginare quali esperimenti possano essere. Migdal prende la lettera e dopo averla letta attentamente dice (con voce innocente):

Per favore, guardate. La prima lettera di ciascuna riga forma la parola russa "duraki" (sciocchi): cosa vorrebbe significare? [At the Frontier of Particle Physics - Handbook of QCD, World Scientific, vol 4.]

Lo sport e il tempo libero

Da sempre Pontecorvo pratica diversi sport con notevole successo, specialmente il tennis. E' lui a proporre la costruzione del primo campo da tennis a Dubna. Sono note le sue partite con Fermi. L'unica critica che abbia mai mosso al suo maestro riguarda proprio le scarse capacità di Fermi in questo gioco.

Ama la montagna e adora sciare ma è anche appassionato di sci d'acqua e di pesca subacquea. Verso la fine degli anni cinquanta con il suo amico e collega, Arkadi Migdal, si reca in vacanza a Koktibel, una località balneare sul Mar Nero. Vuole provare l'attrezzatura da sub appena ricevuta dall'Italia. E' qui che conosce Rodam Amirejibi, una donna bellissima e molto colta, di nobili origini georgiane, che gli starà al fianco per quasi trent'anni. Grazie a lei, Bruno entra a far parte di un circolo di artisti, scrittori, cineasti, gente di teatro. E' il mondo elitario di Peredelkino, un bel villaggio in mezzo ai boschi a pochi chilometri da Mosca dove hanno le loro dacie molti dei più noti letterati sovietici.

Ma la grande passione di Bruno, oltre lo sport, è la scienza. Sostenitore attivo della diffusione della cultura scientifica presso tutti gli strati della popolazione tiene spesso lezioni nei luoghi più disparati, dai circoli di fabbrica alle navi della flotta dell'Estremo Oriente. Si interessa di problemi di genere più diverso, come le comunicazioni ferroviarie tra Dubna e Mosca o l'organizzazione di un gruppo teatrale presso la Taganka, il teatro dell'avanguardia sovietica.

La fede politica

Nel 1952 Bruno Pontecorvo diventa cittadino sovietico. L'anno seguente, il 6 marzo 1953, all'età di 73 anni per emorragia cerebrale, muore Stalin. L'URSS è in lutto. La gente accorre davanti al feretro sulla Piazza Rossa, ma a Pontecorvo ancora non è consentito. A luglio, con un armistizio, termina la guerra di Corea. L'uso della bomba atomica contro la Cina accusata di prestare aiuto alla Corea del Nord è scongiurato, ma la minaccia atomica grava ancora sul mondo.

Nel suo discorso al Soviet Supremo, l'8 febbraio 1955, il compagno Molotov sottolinea la forza dell'URSS in quel campo. Gli Stati Uniti hanno nutrito l'illusione di una loro supremazia atomica,

ma gli scienziati sovietici, gli ingegneri, i tecnici e tutti coloro che hanno lavorato in questo campo, hanno ottenuto in un breve periodo di tempo dei risultati che dimostrano le possibilità eccezionali dello Stato Sovietico. Le cose sono giunte a tal punto che nella produzione delle armi all'idrogeno non è l'Unione Sovietica ma gli Stati Uniti che si trovano oggi nella posizione dei ritardatari.

Nella riunione della cellula del partito che si tiene nel suo laboratorio, Pontecorvo, iscritto al PCUS dal 1954, applaude insieme agli altri compagni, la relazione del segretario che riprende parola per parola il rapporto di Molotov al Soviet Supremo.

Meno di un mese dopo esordirà nella famosa conferenza stampa con queste parole:

Le potenze atlantiche hanno deciso di preparare la guerra atomica. Per costoro le armi nucleari sarebbero le armi legittime. Durante i quattro anni vissuti in URSS ho potuto convincermi che il popolo sovietico, tutto il popolo sovietico, vuole la pace e che il governo dell'URSS prende tutte le misure possibili per impedire una guerra. [archivio storico dell'Unità, 5 marzo 1955]

Pontecorvo è un comunista convinto; è un idealista che crede nella forza ispiratrice del comunismo nel mondo e nella correttezza del tipo di sviluppo scelto da parte dell'Unione Sovietica.

Il 25 febbraio 1956 nel corso di una riunione a porte chiuse dei delegati al XX Congresso del PCUS, il segretario del partito, Nikita Krusciov denuncia le purghe e le limitazioni alla libertà imposte dal regime di Stalin. Il processo di destalinizzazione ha ripercussioni nei paesi dell'Europa orientale, satelliti dell'Unione Sovietica. Quando l'Ungheria rivendica la sua neutralità e l'uscita dal patto di Varsavia Mosca soffoca nel sangue la rivolta. La mattina del 4 novembre i carri armati del generale Laschenk entrano a Budapest. Pontecorvo è tra i milioni di sovietici che condividono le decisioni di Krusciov. E' dalla stessa parte anche Giorgio Napolitano, allora giovane funzionario del Partito Comunista Italiano, che, all'indomani dell'invasione dei carri armati sovietici a Budapest, sostiene che si tratti di un elemento di 'stabilizzazione internazionale' e addirittura di un "contributo alla pace nel mondo". Napolitano attacca con parole dure Giolitti e Nenni contrari all'intervento militare sovietico. Molti anni dopo il presidente Napolitano, riconoscerà pubblicamente l'errore commesso ammettendo che entrambi gli esponenti del PCI avevano ragione. Giolitti insieme ad altri funzionari lascia il PCI e anche Gillo, il fratello prediletto di Pontecorvo, restituisce la tessera del partito. Ma la fede di Pontecorvo nel comunismo ancora non vacilla.

Il lancio dello Spuntnik, il primo satellite artificiale (4 ottobre 1957) e quattro anni dopo del primo uomo nello spazio, Jurij Gagarin (12 aprile 1961), segnano un periodo di grande orgoglio per l'URSS e di riconoscimento mondiale delle conquiste della scienza sovietica.

Provai una grande felicità e una grande emozione...’ - racconta Pontecorvo a Miriam Mafai - ‘Fu il momento di massimo prestigio della scienza sovietica anche se già allora avremmo dovuto capire che si stava commettendo l’errore di concentrare tutto lo sforzo in una sola direzione, quello della ricerca spaziale, mentre altri settori ne soffrivano. Mandavano la navicella nello spazio, ma non riuscivano a fornire il paese di dentifricio o carta igienica... [M. Mafai - Il lungo freddo]

Accusato di aver commesso errori politici durante la crisi dei missili di Cuba nel 1962 e di aver organizzato male l’economia sovietica, soprattutto nel settore agricolo, il 13 ottobre 1964 Krusciov viene costretto a dare le dimissioni da Primo Ministro dell’unione Sovietica. In quell’occasione Pontecorvo conosce Enrico Berlinguer, giovane dirigente del PCI e segretario regionale del Lazio, mandato a Mosca per chiedere chiarimenti sul ‘pensionamento anticipato’ di Krusciov. Sale alla guida del partito come primo segretario e poi dal 1966 come segretario generale, Leonid Breznev. In un primo tempo le maglie della censura sembrano allargarsi ma con l’invasione di Praga, nell’agosto del 1968 si chiude la prima fase brezneviana. L’invasione della Cecoslovacchia è conseguenza della linea politica estera applicata da Breznev, nota come la ‘politica della sovranità limitata’. Nel suo discorso davanti al quinto congresso del Partito Operaio Polacco, il 13 novembre 1968, Breznev dichiara :

Quando le forze che sono ostili al socialismo cercano di portare lo sviluppo di alcuni paesi socialisti verso il capitalismo, questo non diventa solo un problema del paese coinvolto, ma un problema comune ed una preoccupazione per tutti i paesi socialisti.

Pontecorvo ricorda bene quel mese di agosto: fa un caldo insopportabile, sta attendendo insieme al corrispondente dell’Unità, Adriano Guerra, la visita di Luigi Longo divenuto segretario del PCI alla morte di Palmiro Togliatti. Ma Longo non arriva. Informato della notizia dell’invasione della Cecoslovacchia rientra in Italia. Anni dopo, Pontecorvo durante un’intervista della Mafai, confessa:

Forse è lì, a Praga, che è morto il socialismo, la mia idea del socialismo. [M. Mafai - Il lungo freddo]

Quattro giorni dopo l’invasione dei carri armati che ha posto fine alla primavera di Praga, otto persone protestano con vari striscioni sulla Piazza Rossa. Vengono tutti arrestati. E’ la prima manifestazione pubblica di dissenso. Pur condannando l’invasione Pontecorvo non si unisce alle voci di protesta capeggiate dal fisico Andrej Sacharov, padre della bomba atomica sovietica.

In quel tempo pensavo che Sacharov avesse qualche ragione ma lo giudicavo un terribile ingenuo dal punto di vista politico. - afferma Pontecorvo molti anni dopo - Ci ho messo molto tempo a capire che era lui ad avere ragione. L’ingenuo ero io. [M. Mafai - Il lungo freddo]

Lo scienziato

A Dubna Pontecorvo diviene il capo della divisione di fisica sperimentale del Laboratorio di Problemi Nucleari.

Sotto la sua direzione, all'acceleratore per protoni di Dubna, il più potente al mondo fino alla nascita del CERN, vengono condotte una serie di ricerche nel corso delle quali è osservata per la prima volta la produzione di particelle neutre, dette pioni, nelle collisioni nucleone-nucleone. Per queste ricerche e per i suoi meriti scientifici ottiene nel 1953 il Premio Stalin. Compie diversi esperimenti in cui vengono stabilite alcune proprietà fondamentali del muone. Colpito dai risultati della esperienza di Conversi, Pancini e Piccioni (1947) nella quale i tre fisici dimostrano che il muone, all'epoca chiamato mesotrone perché dotato di una massa intermedia tra quella dell'elettrone e del protone, non interagisce attraverso la forza forte con il nucleone e pertanto non è l'ipotizzata particella di Yukawa, Pontecorvo intuisce la profonda analogia tra il muone e l'elettrone.

Egli osserva che i processi di cattura nucleare di queste particelle hanno probabilità comparabili e predice che l'interazione tra muone e protone avvenga secondo lo schema: $\mu^- + p \rightarrow \nu_\mu + n$.

Nel 1958 studiando i processi di cattura muonica sui nucleoni con il collega Muckhin e successivamente, nel 1961, con Sulyaev, dimostra:

- la dipendenza dall'energia dell'asimmetria degli elettroni emessi da parte di muoni polarizzati, in accordo con la teoria del neutrino a due componenti [B. Pontecorvo, Selected Scientific Works, SIF, pag. 155, 1958]

- la natura 'neutrinica' della particella neutra emessa quando il muone è catturato dai nuclei (reazione $\mu^- + {}_3\text{He} \rightarrow {}_3\text{H} + \nu$), ottenuta in una camera a diffusione riempita di ${}_3\text{He}$. [B. Pontecorvo, Selected Scientific Works, SIF, pag. 200, 1962]

Inoltre, molto importanti sono i suoi studi sull'assenza dei processi $\mu^- \rightarrow e + \gamma$ e $\mu^- \rightarrow e + e + e$. [B. Pontecorvo, Selected Scientific Works, SIF, pag. 196, 1962]

Nel 1951 nota l'apparente contraddizione tra l'alta probabilità di produzione di certe particelle che oggi vengono chiamate strane e la loro lunga vita media e nel 1953 predice, indipendentemente da Pais, la legge di produzione associata dei mesoni K e degli iperoni. Con Selianov dimostra che nucleoni con energia di 700 MeV non producono le reazioni $N \rightarrow N + \Lambda^0$ e $n + n \rightarrow \Lambda^0 + \Lambda^0$ in contraddizione con i risultati di Schein considerati giusti, all'epoca. [B. Pontecorvo, Selected Scientific Works, SIF, pag. 129, 1955]

La profonda intuizione scientifica e la tempra di uomo e di scienziato si rivelano in tutta la loro misura nei dibattiti sul problema fondamentale dell'esistenza di due tipi di neutrino, alla cui soluzione egli fornisce un apporto determinante. Il suo lavoro 'Электронные и мюонные нейтрино (neutrino elettronico e muonico)' segna l'inizio della fisica dei neutrini ad alta energia. [B. Pontecorvo, Selected Scientific Works, SIF, pag. 167, 1959]

Sono indicativi l'entusiasmo e l'energia con cui nei seminari, nei consigli scientifici,

nelle conferenze discute i metodi per provare sperimentalmente l'ipotesi dell'esistenza di due diversi tipi di neutrini: quello elettronico e quello muonico.

La verifica sperimentale dell'intuizione di Pontecorvo, cioè che i neutrini associati agli elettroni sono diversi da quelli associati ai muoni, viene dagli scienziati americani Jack Steinberger, Leon Lederman e Melvin Schwartz che per questo ricevono il Premio Nobel nel 1988.

Dal 1957 al 1967 Pontecorvo si dedica a una serie di problemi connessi con la massa del neutrino e con la possibilità di violazione della carica leptonica, come il doppio decadimento β senza emissione di neutrino e le oscillazioni tra diversi stati di neutrino. Pontecorvo propone e sviluppa l'idea che il neutrino di un tipo si possa trasformare nel neutrino di un altro tipo. Le sue ricerche in questo campo condotte in collaborazione con Bilenky e Gribov, hanno aperto nuovi orizzonti nella fisica delle particelle e nell'astrofisica, dando origine a un gran numero di indagini sperimentali in tutto il mondo.

L'esistenza delle oscillazioni di neutrino è stata verificata per la prima volta nel 1968. In un esperimento condotto nella miniera di Homestake, negli Stati Uniti, Davis osserva che il flusso dei neutrini solari è circa un terzo di quello aspettato. Recentemente le oscillazioni sono state confermate per i neutrini atmosferici (esperimento Super Kamiokande in Giappone, 1998) e utilizzando fasci di neutrini prodotti da acceleratori (esperimento MINOS al Fermilab, 2006, e OPERA ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 2010). Il più stretto collaboratore di Pontecorvo, il fisico Samoil Bilenki, ha commentato così la scoperta dell'esistenza delle oscillazioni di neutrino:

The experimental establishment of neutrino oscillations can be considered a real triumph of Bruno Pontecorvo who first introduced this concept and pursued this idea for many years when the general consensus did support massless neutrinos, with no possibility of Oscillations.

Per i meriti acquisiti nel promuovere lo sviluppo della fisica nucleare e per la sua intensa attività sociale Bruno Pontecorvo è insignito nel 1963 dell'ordine di Lenin e di due ordini della Bandiera Rossa del Lavoro. Nel 1964 è eletto membro dell'Accademia delle Scienze dell'URSS. Diventa titolare della cattedra di fisica delle particelle elementari e membro del consiglio scientifico della facoltà di Fisica dell'Università statale di Mosca dal 1961.

Dal 1971 al 1990 è direttore del Dipartimento 'Interazioni deboli e elettromagnetiche' di JINR.

7. Il rientro e il disgelo

Il rientro in Italia

Il 6 settembre 1978, dopo 28 anni, Bruno Pontecorvo, accompagnato da due guardie del corpo, ritorna, ma solo per pochi giorni, in Italia. L'occasione è la celebrazione del 70esimo compleanno di Edoardo Amaldi, suo vecchio amico, unico del gruppo romano di Fermi rimasto a lavorare in Italia, al quale lo legano tanti ricordi ed esperienze comuni.

Non ho parole per descrivere la mia emozione nel trovarmi di nuovo all'Istituto di Fisica di Fermi, Amaldi, Rasetti e Segré, Majorana e Wick... [M. Mafai - Il lungo freddo]

Appena sceso dall'aereo è assalito da un'orda di giornalisti e cineoperatori che lo assediavano per carpirgli qualche dichiarazione. Alle TV e alla stampa confessa: Io subito vi voglio svelare un gran segreto. Io non ho mai, dico mai, lavorato alla bomba atomica, alla bomba all'idrogeno o ad altre bombe, né in Occidente né in Russia né in Cina né altrove.

Dopo quella prima volta ritorna molte altre volte in Italia. Partecipa a convegni e incontri scientifici, si reca ai Laboratori del Gran Sasso (tra i più grandi laboratori sotterranei del mondo in cui si realizzano esperimenti di fisica delle particelle), visita città toscane che, pur essendo toscano, non conosceva. L'incontro con Miriam Mafai incontra Bruno nell'agosto del '90 a casa del fratello Gillo a Fregene e poi, successivamente, molte altre volte a Roma, Pisa, Parigi e Mosca. Durante una delle sue ultime interviste a Roma, alla Mafai che gli chiede se è pentito di aver fatto quella scelta, quarant'anni prima, Pontecorvo risponde:

Ci ho pensato molto, a questa domanda. Puoi immaginare quanto ci ho pensato. Ma non riesco a dare una risposta. Io credo di essere sempre stato una persona per bene, anche se alle volte forse ho fatto delle scelte sbagliate; ma cosa è più importante, fare le scelte giuste o essere una persona per bene? [M. Mafai - Il lungo freddo]

Affetto dal morbo di Parkinson, Pontecorvo muore a Dubna il 24 settembre 1993. Le sue ceneri, per sua espressa volontà, sono deposte metà a Roma nel cimitero acattolico degli Inglesi e metà nel piccolo cimitero di Dubna. L'epigrafe sulla sua lapide nel Cimitero di Roma è un riconoscimento all'originalità della sua idea che il neutrino associato al muone sia diverso da quello dell'elettrone.

Premi e riconoscimenti

Nel 1982 Pontecorvo è nominato membro straniero dell'Accademia dei Lincei e nel 1991 l'Università di Ferrara gli conferisce la laurea honoris causa in fisica.

Lo ricordo all'Università di Ferrara quando quella Università, la stessa in cui aveva lavorato Copernico, gli assegnò la laurea honoris causa. Avvolto nella toga nera, il viso pallido incorniciato dalla gorgiera di pizzo bianco, la magrezza spettrale, sembrava emergere da un ritratto di El Greco. [M. Mafai - La Repubblica, 4 ottobre 2000]

Nel 1991 riceve il Premio 'I Delfini d'Argento. Una vita per la scienza', istituito dalla Pubblica Assistenza del Comune di Cascina per 'aver partecipato ad alcuni dei momenti più significativi connessi con lo sviluppo delle conoscenze sull'energia nucleare e sulle sue ampie possibilità di utilizzazione'.

È il prof. Luigi Arialdo Radicati di Brozolo della Scuola Normale a consegnargli il premio.

Alla Pubblica Assistenza lo ricordano ancora oggi con affetto e commozione:

Dopo la premiazione, durante il soggiorno a Pisa andammo insieme a cercare funghi, sembrava di essere tra amici. Lo accompagnammo poi, prima a Cortona e in seguito a Roma dai suoi parenti; era un uomo di straordinaria umanità.

Il premio Pontecorvo. Nel 1995 il Joint Institute for Nuclear Research di Dubna istituisce in suo onore il Premio Pontecorvo, attribuito annualmente al fisico che ha contribuito maggiormente alla ricerca nel campo delle particelle elementari. Nell'anno del centenario della nascita di Bruno Pontecorvo, il prestigioso premio è stato assegnato al fisico italiano Ettore Fiorini, ricercatore dell'INFN e professore emerito all'Università di Milano-Bicocca. La cerimonia ha avuto luogo a Dubna il 22 febbraio 2013.

Bruno Pontecorvo, un genio in campo scientifico e una personalità eccezionale, rimarrà nei cuori di tutti coloro che hanno avuto la fortuna di incontrarlo e di lavorare con lui.

Egli merita il totale riconoscimento e il profondo rispetto di tutto il mondo scientifico.

8. Il Nobel mancato

Bruno Pontecorvo non ha mai ricevuto il premio Nobel per la Fisica ma a seguito delle sue intuizioni e proposte in seguito realizzate da altri, sono stati assegnati i seguenti premi Nobel:

1988 - L. Lederman, J. Steimberger e M. Schwarz, 'for the neutrino beam method and the demonstration of the doublet structure of the leptons through the discovery of the muon neutrino'. Hanno verificato sperimentalmente la predizione di Pontecorvo che i neutrini associati agli elettroni fossero diversi da quelli associati ai muoni.

1995 - F. Reines, 'for the detection of the neutrino'. Ha utilizzato il metodo suggerito da Pontecorvo per rivelare gli antineutrini prodotti nei reattori nucleari.

2002 - R. Davis e M. Koshiba 'for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos'. Hanno utilizzato il metodo radiochimico suggerito da Pontecorvo che utilizza la trasmutazione di nuclei di cloro in argon per rivelare i neutrini solari.

9. La Scienza di Bruno Pontecorvo

Una mostra sulla figura di Bruno Pontecorvo non può essere completa se non si cerca di rendere il visitatore partecipe dell'eredità scientifica che Bruno ha lasciato. E questo non può essere fatto che nell'ultima sala: il visitatore nel tornare nel mondo di tutti i giorni si sente arricchito dall'esperienza della mostra, tanto quanto il mondo stesso si sente arricchito dal lascito scientifico di Bruno.

Il fulcro attorno al quale ruotano le idee, le scoperte, le intuizioni di Bruno è la teoria di Fermi del decadimento β . Per questo motivo al centro della sala sta il pannello che ne spiega i tratti salienti, necessariamente più complesso, ma che fornisce la filigrana sul quale sono sviluppate le idee presentate nei pannelli successivi.

L'universalità delle interazioni deboli è collegata allo studio delle proprietà del muone. La presenza elusiva dei neutrini, siano essi di origine cosmica, solare o artificiale, ci

accompagna, attraverso il fenomeno dell'oscillazione, nella scoperta delle famiglie dei costituenti della materia.

La teoria di Fermi del decadimento Beta

Nel 1934 Enrico Fermi inventò un modello semplice e brillante per descrivere il decadimento radioattivo con l'emissione di un elettrone (decadimento- β). Egli basò il suo modello sull'elettrodinamica quantistica formulata da Dirac, nella quale due elettroni che si muovono (chiamati 'correnti') esercitano una forza l'uno sull'altro attraverso lo scambio di fotoni (particelle di luce). Nell'interazione fra due elettroni, letta da sinistra verso destra, i segmenti rappresentano le correnti (elettroni che si muovono) mentre la linea ondulata rappresenta l'emissione di un fotone da parte di una corrente e l'assorbimento da parte dell'altra.

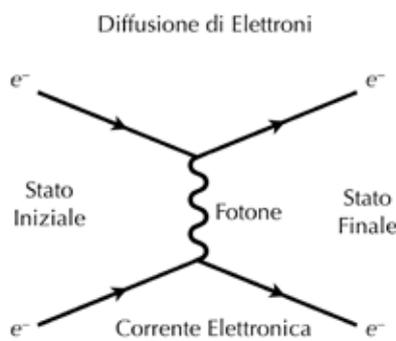


Figura 0.1. Schema di diffusione di elettroni mediato da un fotone, mediatore dell'interazione elettromagnetica

Nel decadimento- β un neutrone si trasforma in un protone, un elettrone ed un antineutrino, come schematizzato dal disegno seguente:

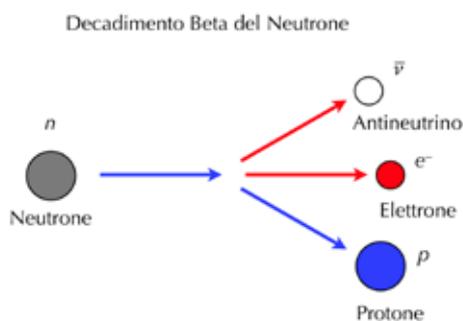


Figura 0.2. Il decadimento del neutrone

Per spiegare questa reazione nel linguaggio delle correnti, Fermi partì da una possibile interazione elementare fra due correnti, ognuna con una carica 'debole' (per distinguerla dalla carica elettrica). Contrariamente all'interazione elettromagnetica (che ha un raggio d'azione infinito) l'interazione debole ha un raggio limitato e le due correnti interagiscono direttamente in uno stesso punto. È così che la corrente del neutrone 'guadagna' una carica trasformandosi nella corrente del protone, mentre la corrente del neutrino 'perde' una carica trasformandosi nella corrente di elettrone.

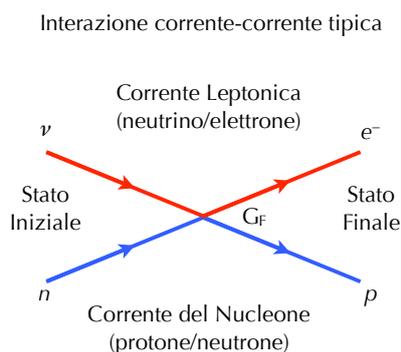


Figura 0.3. Interazione debole tra un protone ed un elettrone nel linguaggio delle correnti

In analogia con la corrente elettrica, ogni corrente debole è rappresentata da una particella (segmento di freccia) che trasporta carica debole. Al punto di interazione le due correnti si scambiano un quanto di questa carica.

Il diagramma può descrivere processi diversi, a seconda dello stato iniziale e finale. Le 'particelle' sono rappresentate da frecce che puntano verso lo stato finale, le 'antiparticelle' da frecce che puntano nella direzione opposta. Tutte le reazioni descritte dallo stesso diagramma hanno la medesima intensità.

Tornando al decadimento del neutrone, Fermi notò che il processo si poteva spiegare leggendo il diagramma precedente spostando il neutrino nello stato finale, trasformandolo in antineutrino. In questo modo riuscì a calcolare la probabilità del processo, proporzionale al quadrato della costante G_F , che oggi viene chiamata 'costante di Fermi'. Vediamo come vengono descritte in questo nuovo linguaggio alcune interazioni.

Nel decadimento β del neutrone, il neutrone è l'unica particella nello stato iniziale, ma l'interazione fra le due correnti ne provoca il decadimento. Il neutrone diventa un protone, e la carica in eccesso crea una particella (elettrone) ed un'antiparticella (anti-neutrino) tramite la corrente elettrone/neutrino. La freccia associata al neutrino punta all'indietro, verso lo stato iniziale, ad indicare la presenza di un anti-neutrino nello stato finale.

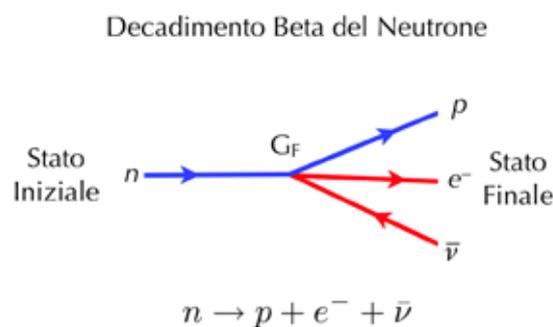


Figura 0.4. Il decadimento beta del neutrone nel linguaggio delle correnti

Nella cattura elettronica, nello stato iniziale, abbiamo sia una corrente protonica che una corrente elettronica. L'interazione fra le due correnti provoca lo scambio di un'unità di carica, di modo che il protone si trasforma in neutrone e l'elettrone in un neutri-

no. Il processo inverso (leggendo cioè il diagramma da destra a sinistra) è ugualmente possibile e descrive la rivelazione di neutrino mediante il suo assorbimento.

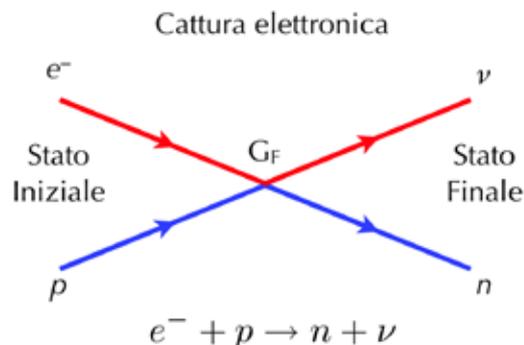


Figura 0.5. La cattura elettronica nel linguaggio delle correnti

Nel decadimento- β inverso, nello stato iniziale abbiamo un(a corrente di) protone e un(a di) anti-neutrino. Lo scambio di carica debole causato dall'interazione fra le due correnti, l'anti-neutrino in positrone e il protone in neutrone. Di nuovo, le frecce rivolte all'indietro indicano che un anti dello stato iniziale si è trasformato in un anti-elettrone (positrone) nello stato finale.

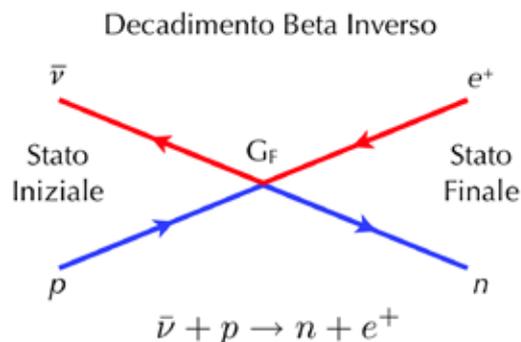


Figura 0.6. Il decadimento beta-inverso nel linguaggio delle correnti

Il muone: fratello maggiore dell'elettrone

I raggi cosmici sono particelle elementari (protoni, nuclei leggeri) prodotte nello spazio a centinaia di migliaia di anni luce da noi e che arrivano sulla terra dando origine, a volte, ad altre particelle (elettroni, fotoni,...) in seguito al loro passaggio attraverso l'atmosfera.

Il muone, indicato dalla lettera greca μ , fu scoperto nei raggi cosmici nel 1936 ed è una particella instabile, con vita media di circa 2.2 microsecondi.

All'epoca, protoni ed elettroni erano conosciuti quali costituenti della materia, e questa nuova particella, con massa intermedia fra quella dell'elettrone e quella del protone arrivò del tutto inaspettata.

Grazie ad un esperimento condotto dai fisici italiani M. Conversi, E. Pancini e O. Piccioni a Roma nel 1946, si scoprì che il muone era una particella del tutto identica

all'elettrone, ma con una massa circa duecento volte maggiore: un risultato del tutto inaspettato! Fino ad allora non si conoscevano esempi di tale familiarità fra particelle. Protone ed elettrone, per esempio, hanno non solo massa diversa, ma si comportano diversamente nell'interazione con le altre particelle. Muone ed elettrone sembravano essere invece due gemelli, diversi soltanto nel... peso.

Una differenza di massa, in fisica delle particelle, è particolarmente importante, in quanto per raggiungere il minimo dell'energia il fratello 'grasso' tenderebbe naturalmente a... perdere peso e trasformarsi nel fratello magro! Questo fenomeno prende il nome di decadimento radioattivo.

La ricerca del decadimento $\mu \rightarrow e\gamma$

Nei fenomeni di diseccitazione atomica o nucleare l'energia in eccesso viene emessa sotto forma di radiazione elettromagnetica (fotoni, o raggi- γ). In tali transizioni il fotone non è presente nell'atomo (o nel nucleo) prima della sua emissione, ma viene 'creato' contestualmente al decadimento stesso.

Per questo motivo Bruno Pontecorvo, mentre si trova in Canada nel 1947, pensa di fare un esperimento per ricercare la transizione $\mu \rightarrow e\gamma$ come fonte di indicazioni preziose circa il 'rapporto di parentela' fra elettrone e muone. Ne parla anche nella corrispondenza con gli amici in Italia.

La ricerca di un fotone associato alla disintegrazione [del muone] è una questione di cui ci stiamo interessando da tempo [...]. Se hai da darmi notizie in questo senso mi farai molto piacere. [Gilberto Bernardini a Bruno Pontecorvo, 23 Settembre 1947]

Ad ogni modo, l'esperienza che proponi [...] mi pare fattibile [...]. Bisognerebbe organizzare le cose in modo che risulti che il quanto gamma e l'elettrone sono emessi in direzioni opposte [Gian Carlo Wick a Bruno Pontecorvo, 2 Giugno 1947].

Bruno, insieme al fisico canadese Ted Hinks, progetta e realizza una misura in cui fra i prodotti di decadimento del μ , solo l'elettrone risulta visibile, ed emesso insieme ad altre particelle neutre e leggere dalle caratteristiche del tutto simili a quelle dei "neutrini", particelle allora ipotizzate per spiegare i decadimenti- β .

Questa fu la prima osservazione della somiglianza del decadimento dei μ a quello dei nuclei, che porterà Bruno ad ipotizzare l'universalità delle interazioni deboli.

Ancor oggi il decadimento $\mu \rightarrow e\gamma$ non è stato trovato, sebbene i fisici continuino a cercarlo in quanto fondamentale per comprendere la teoria alla base dell'esistenza di 'famiglie di particelle'.

In particolare gli esperimenti Crystal Box e MEGA, prima, e poi MEG, presso il laboratorio PSI di Villigen (Svizzera) hanno posto limiti sempre più stringenti all'esistenza di questa transizione, confermando che nel decadimento del μ i neutrini giocano un ruolo fondamentale.

Is there any connection between, say, the $\mu \rightarrow e\gamma$ process and the phenomenon of neutrino oscillations? The observation of anyone of these effects would mean that there is lepton mixing. In this general sense and only in this sense the observation of the $\mu \rightarrow e\gamma$ decay would make the existence of oscillations more likely, and conversely.” [B. Pontecorvo, Comments Nucl. Part. Phys. 1977, vol.7 n.5 149-152]

I Neutrini Solari

Il Sole non è soltanto fonte di luce e di calore: le reazioni nucleari che lo tengono in funzione, in particolare la reazione di fusione nucleare dell'idrogeno in elio, producono anche neutrini.

Quattro nuclei di idrogeno (protoni) riescono, a causa delle particolari pressioni e temperature presenti sul Sole, a fondersi in un nucleo di elio (formato da due protoni e due neutroni) liberando energia. Nella reazione vengono emessi anche due positroni (elettroni di carica positiva) e due neutrini.

I positroni si annichilano immediatamente con gli elettroni presenti nel Sole producendo fotoni, che, a fatica, raggiungono la superficie solare (ci possono volere anche 10 milioni di anni perché questo succeda!) e vengono emessi in tutto l'universo sotto forma di luce visibile. I neutrini, invece, poiché interagiscono pochissimo, riescono a sfuggire la materia solare estremamente densa e, in meno di un secondo, sono irradiati per l'Universo.

Il Sole, dunque, oltre ad essere una grossa sorgente di luce, è anche una sorgente estremamente intensa di neutrini, i quali ci danno moltissime informazioni sul modo in cui sono stati prodotti, e in ultima analisi, sulle reazioni che avvengono all'interno del Sole stesso. La loro scarsissima interazione con la materia li rende però altamente elusivi e difficilmente rivelabili.

Rivelazione dei neutrini solari

Bruno Pontecorvo si rese conto per primo che la stessa reazione di produzione dei neutrini, opportunamente rimaneggiata (si veda il pannello sulla teoria di Fermi del decadimento- β) poteva essere usata per rivelarne il passaggio sulla terra. Con un'intuizione capì che neutrini potevano interagire con alcuni elementi provocandone la trasmutazione in elementi diversi.

Grazie alla sua enciclopedica conoscenza degli elementi chimici, maturata durante gli anni di lavoro a stretto contatto con Fermi e Joliot-Curie, Bruno individuò come possibili candidati il Cloro e il Gallio, i quali, si sarebbero trasformati, se colpiti da neutrini, rispettivamente in Argon e Germanio.

L'idea di Bruno Pontecorvo fu perfezionata dal punto di vista sperimentale da Ray Davis jr. e John N. Bahcall alla fine degli anni '60. Bahcall fece i calcoli teorici mentre Davis disegnò l'esperimento, che si tenne a circa 1500 metri sotto terra nella miniera di Homestake nel South Dakota. L'esperimento rivelò per la prima volta l'esistenza dei neutrini solari, fruttando a Davis il premio Nobel per la fisica nel 2002.

Il flusso di neutrini solari misurato si trovò essere però pari a circa un terzo di quello

aspettato! Erano sbagliati i modelli? I calcoli vennero rifatti moltissime volte ed altri esperimenti indipendenti osservarono sempre questa differenza fra calcolo e misura sperimentale. A Pontecorvo venne in mente l'idea che nel viaggiare dal Sole alla Terra i neutrini della prima famiglia (neutrini elettronici) si trasformassero (oscillassero) in neutrini delle altre due famiglie, in modo che una volta giunti sulla terra solo un terzo dei neutrini originali era rimasto del sapore giusto.

Da allora moltissimi esperimenti hanno misurato il flusso di neutrini solari, ad esempio Homestake (USA), SAGE (Baksan, Urali), Gallex (Gran Sasso), SNO (Ontario), Borexino (Gran Sasso), Kamiokande e Superkamiokande (Giappone) allargando la nostra conoscenza sul Sole e sul suo funzionamento, oltre a dare un contributo fondamentale alla fisica delle particelle.

Le tre famiglie di neutrini

Le investigazioni effettuate negli anni 1947-1950 intorno al decadimento della particella μ , già incontrato in un altro pannello, stabilirono che nel suo decadimento venissero emesse tre particelle: un elettrone e due particelle neutre molto leggere ed elusive, chiamate all'inizio neutrino e neutretto. In realtà non era chiaro se le due particelle fossero identiche diverse. Tant'è che Bruno Pontecorvo già in un suo quaderno d'appunti cerciava le due particelle in maniera differente.

Con due particelle cariche e due particelle neutre veniva naturale immaginare che le due particelle neutre potessero appartenere, come le due particelle cariche, a due 'famiglie' distinte, e che esistessero quindi coppie di particelle, una carica ed una neutra, con relazioni privilegiate, ovvero che un tipo di neutrino si accompagnasse sempre all'elettrone e l'altro al muone.

L'idea per verificare sperimentalmente questa ipotesi venne in mente per la prima volta a Bruno Pontecorvo nel 1959, usando fasci intensi di neutrini prodotti da decadimenti del pione. Il pione (indicato dalla lettera greca π) è una particella instabile che decade prevalentemente in muone e neutrino.

Pontecorvo pensò che se i due neutrini fossero stati identici, fasci intensi di neutrini provenienti da questo decadimento diretti contro un bersaglio avrebbero prodotto in egual quantità elettroni e muoni; al contrario, se ν_e e ν_μ fossero state particelle distinte, solo muoni sarebbero apparsi nello stato finale.

'One may say that experiments planned to test the identity on ν_e and ν_μ , though very difficult, must be seriously thought over when new intense accelerators are being designed.' [B. Pontecorvo, Zh. Eksp. Teor. Fiz. Vol. 37 (1959) 1751]

All'epoca (1959) si stava progettando a JINR di Dubna un sincrociclotrone per protoni di energia 800 MeV, che poteva essere usato per produrre i pioni per l'esperimento, ma non fu mai realizzato: tuttavia Pontecorvo aveva addirittura calcolato quale dovesse essere lo schermaggio necessario per proteggere l'esperimento da eventi esterni che si sarebbero potuti confondere con un segnale positivo, ad esempio quelli provenienti dalla radiazione cosmica.

L'esperimento cruciale fu fatto da Mel Schwartz, Leon Lederman e Jack Steinberger nel 1962 a Brookhaven, vicino a New York, dove era presente un acceleratore, chiamato AGS, costruito in maniera tale da poter produrre un fascio di neutrini sufficientemente intenso e collimato.

Il fascio di neutrini era generato dirigendo il fascio di protoni da 15 GeV dall'AGS su un bersaglio di Berillio. Pioni secondari producono neutrini decadendo in volo. Siccome l'interazione di neutrini è minutissima il rivelatore doveva essere schermato da 15 metri di ferro, per evitare di misurare particelle provenienti, ad esempio, dai raggi cosmici.

Vennero rivelati eventi in cui venivano prodotti in prevalenza muoni, e non elettroni, confermando quindi l'ipotesi che il neutrino si ricordasse del 'partner' che aveva al momento della sua creazione. Per questo esperimento Schwartz, Lederman e Steinberger vinsero il premio Nobel per la Fisica nel 1962.

In seguito alla scoperta del terzo fratello dell'elettrone, il τ , un'ulteriore coppia di particelle (τ , ν_τ) si è aggiunta al quadro, ed un terzo neutrino, diverso sia da ν_e che da ν_μ , ha fatto la sua comparsa, ed è stato rivelato, ad esempio, dall'esperimento Opera, ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso.

L'idea di Bruno Pontecorvo di avere fasci di neutrini per studi di fisica è tutt'oggi all'avanguardia: moltissimi fasci sono stati realizzati nel passato e sono tutt'ora in uso per studi di oscillazione (un esempio su tutti: il fascio di neutrini dal CERN di Ginevra al Gran Sasso, ma ne esistono anche al Fermi National Accelerator Laboratory di Chicago e al laboratorio J-Parc in Giappone) ed altri sono in progetto.

L'intuizione della differenza esistente fra neutrino elettronico e neutrino muonico è talmente legata alla figura di Bruno Pontecorvo, da essere riportata sulla lapide che lo ricorda, nel Cimitero degli Ingleesi, a Roma.

L'universalità delle interazioni deboli

La forza debole è una delle quattro forze fondamentali della natura e si esercita tra particelle molto diverse tra loro: i protoni e neutroni, l'elettrone, il muone, i vari tipi di neutrini. Tale forza è anche cruciale per il funzionamento e la stabilità delle stelle. L'osservazione originale di Pontecorvo fu che esisteva una sostanziale stessa probabilità tra l'assorbimento da un nucleo atomico di un muone e di un elettrone dell'atomo (cattura K). Il processo è collegato al decadimento beta ed era già calcolabile nella teoria di Fermi del 1934. Entrambe le reazioni sono quindi governate da una costante universale, quella di Fermi: ' G_F ', caratteristica delle interazioni deboli, che determina la probabilità che il processo avvenga.

Negli anni '60 il fisico italiano Nicola Cabibbo formulò una teoria delle interazioni deboli tra quark: così come i leptoni sono organizzati in tre doppietti, anche i quark, che sono i costituenti elementari di protoni e neutroni, e anche di altre particelle più esotiche non stabili come, tra le altre, i pioni, i kaoni (chiamate generalmente adroni) sono organizzati in tre doppietti.

La trasformazione di un quark di un tipo in un quark di tipo diverso avviene, come nel caso dei leptoni, attraverso una interazione debole con un mediatore chiamato bosone W (equivalente al fotone, ma dotato di massa e di carica elettrica). Ad esempio, il decadimento beta si descrive in modo analogo al decadimento di un muone, cioè:

- uno dei quark di tipo d del neutrone si trasforma in un quark u con l'emissione di una particella virtuale W negativa che si materializza in un elettrone e un antineutrino.

Se l'energia di massa (mc^2) del W è molto più grande delle energie scambiate dalle particelle nei vari processi, si può fare l'approssimazione, come fatto nella teoria di Fermi del decadimento beta, che le particelle interagiscano tutte in un unico punto dello spazio-tempo.

Nel caso dei quark, la transizione tra essi avviene all'interno dello stesso doppietto (u,d), come nel caso dei leptoni. Tuttavia, a differenza dei leptoni, la transizione all'interno dei doppietti è solo favorita (è esclusiva nel caso leptonic); transizioni tra doppietti diversi sono possibili e sono regolate da un parametro: l'angolo di Cabibbo.

L'intuizione di Pontecorvo della universalità delle interazioni deboli è stata estesa con la creazione di una teoria che unifica sia le interazioni deboli che quelle elettromagnetiche la cui conferma più spettacolare si è avuta nel 1983 con la misura diretta delle particelle responsabili di questa interazione unificata elettro-debole: il W e lo Z dagli esperimenti UA(1) e UA(2) nelle collisioni tra protoni e antiprotoni del CERN. Questa misura è valsa a Carlo Rubbia il premio Nobel per la fisica nel 1984.

La descrizione unificata dei processi elettromagnetici e deboli, è, dopo la formulazione unificata dell'elettromagnetismo dovuta soprattutto a J.C. Maxwell alla fine dell'ottocento, uno dei passi più importanti nella direzione di una teoria fisica che riesca a inquadrare e spiegare in uno stesso schema logico-matematico tutti i fenomeni fisici.

Anche la fisica che viene studiata ai grandi acceleratori di oggi, come LHC, o nell'indagine dei fenomeni astrofisici, ricerca evidenze sperimentali che confermino le teorie che unificano anche le altre due interazioni: quella forte, che tiene insieme i nucleoni nel nucleo atomico e quella gravitazionale (la teoria del tutto).

In questo processo di unificazione dei processi fisici, l'intuizione di Bruno Pontecorvo rimane un passaggio fondamentale.

Oscillazione di neutrini

Esistono tre tipi di neutrini chiamati elettronici, muonici e tauonici organizzati in doppietti (famiglie) con la corrispondente particella carica.

Un neutrino, interagendo con la materia genera il corrispondente partner carico: ad esempio un ν_e produce un e^- conservando una quantità chiamata 'numero leptonic' elettronico. A ciascun doppietto di leptoni corrisponde un doppietto di antileptoni: ad esempio esiste anche il doppietto 'antineutrino elettronico, antielettrone (positrone)'.

L'ipotesi che neutrini di un tipo, ad esempio di tipo elettronico, come quelli solari, potessero oscillare, cioè trasformarsi in neutrini di altra famiglia, violando anche la

conservazione del numero leptonico, è stato proposto da B. Pontecorvo nel 1957 e nel 1962. Molti esperimenti sono effettuati nel mondo per verificare questa ipotesi con vari tipi di neutrini: solari, prodotti nell'atmosfera, da reattori nucleari, da acceleratori di particelle.

I neutrini emessi dal sole, di tipo elettronico, sono misurati tipicamente in esperimenti sotterranei dove, di tutte le particelle, solo i neutrini possono superare la barriera di roccia che funziona da filtro.

In Italia, nella caverna sotto il Gran Sasso, l'esperimento Gallex ha raccolto dati negli anni '90 misurando i neutrini attraverso il loro assorbimento da parte del Gallio che si trasforma così in Germanio: $\nu_e + \text{Ga}^{71} \rightarrow \text{Ge}^{71} + e^-$. Il Germanio è radioattivo e la misura del suo decadimento testimonia l'arrivo dei neutrino.

L'esperimento Borexino, attualmente in funzione al Gran Sasso misura la reazione $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$. L'elettrone, muovendosi nello scintillatore, emette luce che viene rivelata da grandi fotomoltiplicatori.

Questi esperimenti mostrano che, rispetto a quelli aspettati, circa solo il 40% di neutrini emessi dal sole arrivano sulla terra. Quelli mancanti si sono trasformati in neutrini di altra famiglia che sono invisibili ai rivelatori.

La prova più diretta dell'oscillazione tra neutrini viene dall'esperimento del G.Sasso, OPERA, che misura neutrini artificiali, di tipo muonico, provenienti dal CERN a circa 700 Km di distanza. L'oscillazione può produrre un neutrino tauonico che è rivelato in quanto produce un tau che decade rapidamente, dopo una traiettoria di una frazione di millimetro. La sua disintegrazione viene visualizzata da un misuratore di tracce di alta precisione. OPERA misura le tracce cariche prodotte dall'interazione di neutrino e quelle provenienti da un possibile decadimento del tau con una precisione spaziale dell'ordine del micron, avvalendosi dell'impressione lasciata in emulsioni fotografiche.

Una condizione perché i neutrini possano oscillare è che abbiano anche massa. Lo studio delle oscillazioni tra neutrini ci fornisce quindi informazioni importanti su nuove teorie delle particelle elementari ed è fondamentale anche per la comprensione della struttura e dell'evoluzione dell'universo.

Per saperne e per vederne di più visitate il sito web della Mostra:
www.pontecorvopisa.it





LEZIONI-INCONTRO



UN INVITO ALLA LOGICA E ALLA TEORIA DEI GIOCHI¹

BRUNO CODENOTTI

Istituto di Informatica e Telematica (IIT-CNR), Pisa

Introduzione

Molte sono le domande intorno alla natura dell'uomo. Una delle possibili risposte è che l'uomo è un animale che ha coscienza di sé, una caratteristica che nasce dalla capacità di ragionare su se stesso e sulla realtà intorno a lui.

Quando si cerca di focalizzare la natura del ragionamento umano, ci si trova a dover stabilire ciò che è logico e ciò che è razionale. Ben presto si entra in contatto con il sottile confine tra vero e falso e con fenomeni controintuitivi, come i paradossi.

Questi sono presenti nella storia dell'umanità fin dai tempi più antichi e sembrano messi lì per creare perplessità riguardo a qualche suggerimento della nostra intuizione, oppure per invitarci a verificare la correttezza di ragionamenti apparentemente "logici".

Cosa si nasconde dietro a un paradosso? Siamo di fronte a giochi di parole? O a divertenti rompicapo che tutt'al più possono servire come ginnastica mentale? Oppure si tratta di astruse sottigliezze filosofiche da lasciare agli specialisti?

Qualche volta forse sì. Dietro a certi paradossi si celano semplicemente delle ambiguità linguistiche, come accade quando ragionamenti che sembrano esenti da errori mascherano in realtà concetti non ben definiti che ne minano alla base la correttezza. Ma non sempre le cose stanno così.

I paradossi più profondi indicano che qualcosa non va nella comprensione di un determinato fenomeno, e pertanto ci chiedono di cercare nuove strade, di usare strumenti di indagine diversi, di adottare nuovi punti di vista. Spesso contengono un'idea che con una piccola modifica porta ad una nuova importante scoperta.

Questa consapevolezza che "qualcosa non va" è il punto di partenza per riflettere sul ragionamento dell'uomo. Il tema portante è il ragionamento logico, ossia il ragionamento esente da contraddizioni, che da premesse vere conduce a conclusioni vere.

Il passaggio dall'ambito della *Logica* a quello della *Teoria dei Giochi* avviene quando si considera l'interazione tra il ragionamento logico di un singolo individuo e quello di altri. In questa prospettiva, diventa necessario procedere non solo con deduzioni, ma anche con controdeduzioni legate al ragionamento degli altri. Le deduzioni e controde-

¹ Lezione tenuta giovedì 21 novembre 2013, ore 11 - ISIS G. Vasari, Piazza Caduti di Pian d'Albero, Figline V.no (FI); venerdì 17 gennaio 2014, ore 11 - ISIS Il Pontormo, Via Raffaello Sanzio n. 159, Empoli (FI)

duzioni di ogni individuo opereranno su fatti ed eventi; ciascuno si dovrà preoccupare anche dei fatti che gli altri conoscono e degli eventi a cui hanno assistito, e, in particolare, di ciò che conoscono riguardo a ciò che egli conosce...

Da questa esigenza, emerge l'importanza di sapere quali informazioni siano condivise e che spazio abbia l'incertezza circa "i dati di partenza" del ragionamento di ciascuno.

Saremo così invitati a riflettere sul bagaglio di conoscenze comuni tra individui diversi, sulle differenze di informazione rispetto agli stessi fatti e a trarne le opportune conseguenze.

Fin qui la fa da protagonista il processo di deduzione logica, ma alla base del ragionamento umano c'è un principio più complesso: la razionalità. Per parlare di razionalità dobbiamo andare oltre la logica. Mentre ad un ragionamento logico chiediamo di essere esente da contraddizioni e di condurre da premesse vere a conclusioni vere, ad un comportamento razionale chiediamo, oltre a questo, ben altro.

Vediamo di cosa si tratta. La transizione dalla logica alla razionalità avviene quando il ragionamento logico del singolo si unisce alle sue aspirazioni e genera scelte rivolte a massimizzare le possibilità di realizzare tali aspirazioni.

Le interazioni tra individui che si comportano in modo razionale, ognuno con l'obiettivo di realizzare le proprie aspirazioni "private", avvengono in due contesti complementari: la suddivisione di risorse comuni e la composizione di preferenze individuali. I conflitti che ne conseguono portano a concludere che, quando gli individui non collaborano, "il meglio che possono fare è di evitare il peggio". Obiettivi più alti non possono essere raggiunti, perché in contrasto con la razionalità. La strada maestra per ovviare a questo inconveniente consiste nell'introduzione di meccanismi che conducano gli individui a collaborare: accordi vincolanti, regole e punizioni per infrazioni. Questi meccanismi fungono da surrogati per la fiducia negli altri, che sembra proprio violare i criteri fondamentali che stanno alla base della razionalità.

Come abbiamo notato prima, le discipline scientifiche che trattano gli argomenti sin qui accennati sono la logica e la teoria dei giochi.

Per motivi di spazio, nel resto di questo articolo ci dedicheremo ad un aspetto fondamentale legato ai paradossi logici, ossia l'autoriferimento.

Paradossi logici e autoriferimento

L'incontro con i paradossi ha interrogato e continua ad interrogare chi si occupa dei fondamenti della matematica. Piccole modifiche ad alcuni paradossi hanno condotto a rivoluzionarie scoperte nel mondo della matematica.

I paradossi più antichi risalgono al mondo greco, a cui dobbiamo la prima versione del *paradosso del mentitore* (attribuito al cretese Epimenide).

Esaminiamo la seguente versione di questo paradosso: **Questa frase è falsa.**

Se supponiamo che la frase in grassetto sia vera, allora ciò che la frase afferma deve verificarsi, ossia la frase è falsa, il che è una contraddizione. Se viceversa supponiamo

che la frase sia falsa, allora dev'essere vera la sua negazione, ossia la frase è vera, e così anche in questo caso si arriva ad una contraddizione.

Giunti a questo punto, ci dobbiamo chiedere se ci sia qualcosa che “non va” nel ragionamento che abbiamo appena presentato, oppure se ci siano problemi... a monte.

Iniziamo la nostra indagine osservando che la frase sotto esame è *autoreferenziale*, vale a dire fa riferimento a se stessa. L'autoreferenzialità è spesso causa di ambiguità che possono mettere in dubbio l'effettivo significato di un'affermazione che ne faccia uso. Per poter attribuire un valore di verità ad un'affermazione, è necessario che questa abbia un significato. Proponiamoci allora di escludere tutte le frasi che non abbiano un significato. Una prima “tentazione” potrebbe essere quella di eliminare il problema alla radice, non ammettendo affermazioni che facciano riferimento a se stesse. Questa decisione sembra essere troppo drastica. Ci sono infatti frasi autoreferenziali il cui significato è del tutto chiaro e che non avrebbe senso escludere.

Ad esempio, la frase *Questa frase ha cinque parole* è autoreferenziale, ma ha un significato ben preciso. Dopo avere colto tale significato, basta contare le parole per verificare che la frase è vera. Anche la frase *Questa frase ha sei parole* ha un significato chiaro: benché falsa, non ci sono dubbi su ciò che la frase afferma. Quindi il problema non sta sempre e solo nell'autoriferimento.

Consideriamo adesso la frase *Questa frase è vera*. Contrariamente al caso di “Questa frase è falsa”, che abbiamo esaminato sopra, la frase “Questa frase è vera” non comporta alcun paradosso, come si può facilmente verificare supponendola prima vera e poi falsa e osservando che non si giunge ad alcuna contraddizione. Nonostante questo, la frase non ha un significato ben preciso.

Vediamo allora come individuare un criterio generale per chiarire quali frasi debbano essere considerate legittime. Prima di poter stabilire la verità o la falsità di una frase, è necessario capirne il significato. Ad esempio, per stabilire la verità della frase “due più due fa quattro”, è necessario prima conoscere il significato delle parole che la compongono e poi capire ciò che la frase asserisce. Solo a questo punto (sapendo che due più due fa quattro e una volta capito che la frase asserisce proprio questo) si può affermare che la frase è vera. Queste osservazioni suggeriscono di considerare legittime solo frasi *la cui verità dipenda dal significato*, che vengono dette frasi *ben fondate*.

Proposizioni per cui questo non si verifica non hanno un senso compiuto prima che venga loro attribuito un valore di verità e pertanto non ci si può nemmeno chiedere se siano vere o false. Il paradosso del mentitore nasce dal fatto che la frase che lo esprime non è ben fondata.

Una formulazione del paradosso del mentitore che ovvia all'inconveniente che abbiamo esaminato e che torna particolarmente utile in svariati contesti si ottiene facendo ricorso alla distinzione tra *uso* di una certa frase e *riferimento ad essa*, che si può operare introducendo le *virgolette*. Data una frase F , indicheremo il riferimento ad F con “ F ”. Questa distinzione può alterare il significato di una frase e quindi il suo valore di verità.

Ad esempio, la frase *una sillaba consiste di due parole* è chiaramente falsa, mentre la frase *“una sillaba” consiste di due parole* è vera.

Consideriamo una frase A e il suo riferimento “ A ” e proponiamoci di costruire una frase che asserisca la propria falsità, come accade nel paradosso del mentitore, combinando tra loro A e “ A ”. L’idea è di costruire un’affermazione che abbia la forma “ A ” A . In questo caso, se sostituiamo ad A la frase *è falsa se è preceduta dal proprio riferimento*, otteniamo:

“è falsa se è preceduta dal proprio riferimento”
è falsa se è preceduta dal proprio riferimento

Questa frase asserisce la propria falsità e pertanto rappresenta un’altra versione del paradosso del mentitore. Si noti tuttavia che stavolta la frase non si riferisce esplicitamente a se stessa: l’autoriferimento avviene in modo implicito.

La tecnica che abbiamo descritto consente di evitare l’uso esplicito dell’autoriferimento ed è ampiamente utilizzata in logica e in informatica. Consideriamo ad esempio il seguente comando impartito ad un essere umano:

Ripeti la frase seguente due volte
“Ripeti la frase seguente due volte”

L’effetto provocato dall’esecuzione del comando è esattamente uguale al comando stesso: tramite l’autoriferimento, otteniamo la duplicazione del comando.

Il fenomeno che abbiamo mostrato si verifica solo con il numero due. Sono vani i tentativi di ottenere triplicazione, o quadruplicazione, usando il numero tre o il numero quattro. L’unica parola magica è *due*! Del resto, tutto questo era stato scoperto da madre natura molto tempo fa: basti pensare al meccanismo di duplicazione del DNA.

Venendo a tempi molto più recenti, i programmi per computer che stampano il proprio *codice sorgente* e anche alcuni *virus informatici* sono basati su questo principio.

Per questo genere di applicazioni, la strada da seguire è infatti di ideare un programma che abbia una struttura del tipo:

stampa la seguente sequenza di caratteri seguita dal proprio riferimento
“stampa la seguente sequenza di caratteri seguita dal proprio riferimento”

Non è difficile scrivere un programma che implementa questa idea in uno degli ordinari linguaggi di programmazione.

BIBLIOGRAFIA

- Bratley, Paul, Millo, Jean. Computer Recreations; Self-Reproducing Automata', Software -- Practice & Experience, Vol. 2, pp. 397-400 (1972).
- Burger, John, Brill, David, Machi, Filip. Self-Reproducing programs, Byte. August 1980. pp. 74-75.
- Smullyan, Raymond. ``Qual è il titolo di questo libro? L'enigma di Dracula e altri indovinelli logici'', cur. M. Evangelisti, Zanichelli 1981.

BIOTECNOLOGIE DEL FUTURO: I MICRORGANISMI PER LA PRODUZIONE DI IDROGENO¹

ROBERTO DE PHILIPPIS

*Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente (DISPAA),
Università degli Studi di Firenze*

1. Introduzione

Il consumo di energia primaria nel nostro Pianeta ha raggiunto, nel corso del 2011, un valore pari a circa 13 GTep (miliardi di tonnellate di petrolio equivalente). Più dell'80% di questa energia è stata ottenuta dalla combustione di fonti fossili di energia (carbone, petrolio e gas naturale; IEA, 2013). È stato stimato che entro il 2035 i consumi di energia cresceranno di circa il 30%, superando quindi i 17 GTep, mantenendo al tempo stesso una netta dipendenza dalle fonti fossili che continueranno a rappresentare circa l'80% di quelle utilizzate per produrre energia. Il dibattito su quanti anni occorreranno prima di raggiungere l'esaurimento delle riserve di fonti fossili di energia è ampio e articolato, ma è indubbio che esse, per il fatto stesso di essere non rinnovabili, andranno incontro ad esaurimento nel corso dei prossimi decenni.

Le proiezioni dei consumi di energia primaria derivata da fonti fossili per i prossimi dieci anni indicano un ulteriore incremento dei consumi, con il conseguente aumento quasi proporzionale delle emissioni annue di anidride carbonica, che in tal modo passerebbero dai circa 20 miliardi di tonnellate del 1990 ai circa 32 miliardi di tonnellate del 2020 [6]. Le conseguenze di queste scelte di politica energetica sarebbero quindi da un lato la riduzione delle riserve di fonti energetiche non rinnovabili e dall'altro l'emissione in atmosfera di grandi quantità di gas ad effetto serra, quali l'anidride carbonica, con il conseguente aumento della temperatura del pianeta.

Ai possibili danni all'ambiente che sarebbero conseguenza di queste scelte di politica energetica occorre poi aggiungere le problematiche di natura politica legate alla necessità, sempre più vincolante per la stabilità politico-economica delle singole Nazioni, di avere accesso a fonti energetiche sicure, la cui disponibilità a prezzi sostenibili dai diversi sistemi economici non sia legata né a fattori fisici (esaurimento delle fonti stesse,

¹ Lezione tenuta mercoledì 12 febbraio 2014, ore 11 - ITI Ferrari, Piazza Bersaglieri n. 1, Borgo a Mozzano (LU), martedì 19 novembre 2013, ore 11 - Istituto Statale Superiore Russell-Newton, Via F. De Andrè n. 6, Scandicci (FI), giovedì 21 novembre 2013, ore 11 - ISIS Simoni, Via 20 aprile n. 12, Castelnuovo di Garfagnana (LU), lunedì 2 dicembre 2013, ore 11 - ITIS G. Galilei, Via Dino Menci n. 1, Arezzo

interruzioni nella produzione etc.) né a fattori economici (variabilità dei prezzi, pressioni speculative etc.) [2, 3, 10].

Una delle principali sfide per l'umanità nel prossimo futuro è quindi legata alla risoluzione dei problemi della disponibilità di risorse di energia pulita e rinnovabile e la riduzione delle emissioni di gas serra nell'atmosfera. In conseguenza di questo, è necessario individuare nuove fonti di energia non inquinanti, rinnovabili e che al tempo stesso siano economicamente sostenibili. Tenendo conto di tutte queste considerazioni, nel corso degli ultimi venti anni si è sviluppato un notevole interesse nei confronti dell'uso dell'idrogeno come vettore energetico. Questo gas infatti non solo può essere utilizzato per produrre energia senza la contemporanea emissione di sostanze inquinanti nell'atmosfera ma potrebbe anche essere prodotto utilizzando fonti rinnovabili di energia in alternativa alle tecnologie produttive fino ad ora utilizzate. Al momento, infatti, la produzione di idrogeno su scala industriale viene condotta a partire da metano o da altri idrocarburi derivati dal petrolio attraverso trattamenti ad alta temperatura e pressione. Recentemente, però, si è sviluppato un notevole interesse scientifico verso la produzione di idrogeno per via biologica, sfruttando specifici processi metabolici di alcuni gruppi microbici che portano alla produzione di idrogeno gassoso. A questo proposito, va sottolineato come nel metabolismo microbico l'idrogeno sia molto frequentemente presente come prodotto finale di processi che producono l'energia necessaria alla crescita microbica oppure venga utilizzato come substrato per la crescita stessa. Negli ambienti naturali privi di ossigeno, ad esempio, l'idrogeno svolge un ruolo fondamentale per la stabilità della comunità microbica: molti batteri anaerobi, infatti, fermentano molecole organiche, producendo H_2 , CO_2 , acidi ed alcoli a basso peso molecolare, tutti composti che possono essere a loro volta utilizzati da altri membri della comunità microbica per le loro attività metaboliche. In particolare, i microrganismi consumatori di H_2 evitano che questo gas si accumuli a livelli tali da inibire i microrganismi produttori, contribuendo così in modo determinante alla stabilità dell'ecosistema.

La possibilità di ottenere H_2 per via fermentativa attraverso la conversione di fonti rinnovabili è stata ampiamente studiata in questi ultimi anni e sono ormai note numerose specie batteriche capaci di fermentare un'ampia gamma di substrati naturali, semplici o complessi, per la produzione di idrogeno.

Alla luce di queste conoscenze, lo sfruttamento di risorse energetiche rinnovabili, quali ad esempio quelle derivabili dal sistema agroindustriale, potrebbe assumere una notevole importanza, sia dal punto di vista economico che dal punto di vista ambientale. Infatti, i vari processi che consentono di ottenere energia dalle biomasse vegetali e dai residui del sistema agroindustriale permetterebbero lo sfruttamento di fonti energetiche ampiamente disponibili e rinnovabili in processi che possono essere considerati a bilancio zero per quanto riguarda la fissazione e l'emissione di anidride carbonica. In questa direzione si sono quindi orientate molte delle ricerche attualmente in corso sia a livello nazionale che internazionale, indirizzate ad individuare e a sperimentare processi

che portino al recupero efficiente dell'energia contenuta nei diversi tipi di residui vegetali derivanti dalle attività agroindustriali e forestali. Va inoltre evidenziato come l'utilizzo dei residui vegetali per produrre energia possa allo stesso tempo ridurre il costo da sostenere per un loro smaltimento economicamente ed ambientalmente sostenibile.

2. La produzione d'idrogeno per via biologica

La produzione d'idrogeno per via biologica può avvenire attraverso i seguenti processi: (i) per biofotolisi dell'acqua, tramite l'impiego di microrganismi fotosintetici ossigenici (cianobatteri e microalghe), (ii) per fotodegradazione di composti organici a basso peso molecolare, tramite l'impiego di batteri fotosintetici anossigenici, (iii) per fermentazione di substrati organici, tramite l'impiego di batteri chemoeterotrofi anaerobi, (iv) tramite sistemi integrati, che utilizzano una prima fase di fermentazione, condotta da batteri chemoeterotrofi anaerobi ed una seconda fase con batteri fotosintetici anossigenici che utilizzano gli acidi prodotti nella fase precedente [1, 8, 9].

2.1 Produzione di idrogeno tramite biofotolisi diretta dell'acqua.

I microrganismi fotosintetici ossigenici assorbono l'energia luminosa della radiazione solare attraverso due fotosistemi operanti in serie: il fotosistema II, che sottrae elettroni dall'acqua liberando O_2 , ed il fotosistema I, che genera il potere riducente necessario per la riduzione di CO_2 nel ciclo di Calvin. A questo flusso di elettroni generato dall'assorbimento di fotoni dalla radiazione solare è associato un flusso di protoni che determina la formazione di un gradiente elettrochimico trans-membrana dal quale dipende la sintesi di ATP. Se gli elettroni così generatisi vengono indirizzati verso gli enzimi che catalizzano la reazione di idrogeno (idrogenasi nelle microalghe, nitrogenasi nei cianobatteri) si può avere sintesi di H_2 . Occorre però sottolineare che, affinché questo avvenga, è necessario operare in condizioni particolari, dettate dalla necessità di preservare gli enzimi dal contatto con l'ossigeno prodotto fotosinteticamente.

2.2 Produzione di idrogeno da microrganismi a fotosintesi anossigenica (fotofermentazione)

Nel caso della fotosintesi anossigenica attuata dai batteri rossi non-solfurei, l'energia luminosa della radiazione solare viene assorbita dall'unico fotosistema presente, concettualmente analogo al fotosistema I dei microrganismi a fotosintesi ossigenica, con generazione di ATP attraverso un flusso ciclico di elettroni. A causa della presenza di un solo fotosistema, i batteri rossi non-solfurei non possono utilizzare come donatore di elettroni l'acqua, ma utilizzano sostanze organiche a basso peso molecolare, specialmente acidi organici quali acido malico, succinico, acetico, lattico etc. L'ATP prodotto nel processo fotosintetico viene utilizzato dalla cellula batterica, oltre che per le reazioni di biosintesi, per indirizzare una parte del flusso di elettroni alla riduzione della ferredossina e per consentire il funzionamento dell'enzima nitrogenasi. In condizioni di luce e carenza di azoto, la nitrogenasi riduce i protoni ad H_2 , contribuendo in tal modo a realizzare la completa fotodecomposizione dei substrati organici ad H_2 e CO_2 . Nei

batteri rossi non-solfurei, la reazione foto-dipendente sopra descritta, generalmente definita fotofermentazione, procede senza inibizione della nitrogenasi da parte dell' O_2 dell'aria dal momento che questi microrganismi vivono in ambienti anaerobi e nel loro processo fotosintetico non si ha rilascio di ossigeno.

2.3 Produzione di idrogeno da microrganismi chemoeterotrofi.

Molti batteri chemoeterotrofi sono capaci di produrre idrogeno in condizioni anaerobiche tramite la fermentazione di sostanze organiche di varia natura, in un processo che viene definito fermentazione al buio per distinguerla dalla fotofermentazione sopra descritta.

La produzione di idrogeno nella fermentazione al buio è dovuta alla necessità dei batteri chemoeterotrofi di liberarsi dell'eccesso di potere riducente generatosi nel corso dell'ossidazione dei substrati organici. Il potere riducente quindi viene indirizzato verso l'idrogenasi, l'enzima che catalizza la reazione di formazione dell'idrogeno nei batteri chemoeterotrofi, consentendo così ai batteri di liberarsene producendo al tempo stesso H_2 . Se il substrato organico utilizzato dai batteri chemoeterotrofi è costituito da residui agricoli, residui derivanti da prodotti vegetali dell'industria alimentare o di altra origine, l'idrogeno così ottenuto si può considerare rinnovabile in quanto la biomassa vegetale è stata originariamente generata dal processo fotosintetico. Va però sottolineato come i batteri chemoeterotrofi siano in grado di utilizzare anche altri composti per liberarsi dell'eccesso di potere riducente, con il conseguente rilascio di composti ridotti quali acetato, butirrato, lattato, etanolo etc, a seconda delle vie metaboliche presenti.

2.4 Sistemi integrati di produzione di idrogeno

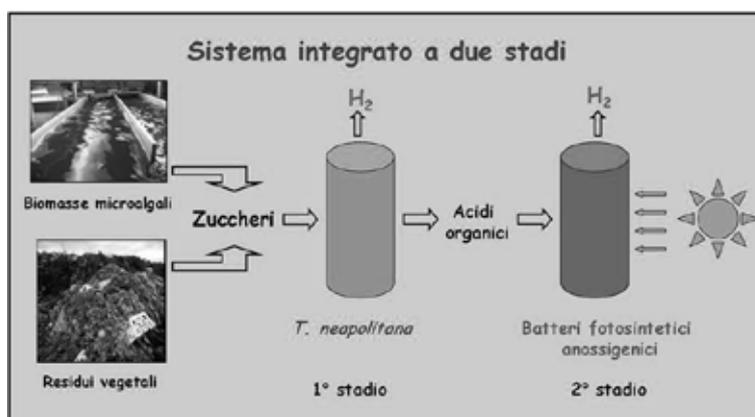


Figura 1. Esempio di sistema integrato a due stadi che utilizza il batterio chemoeterotrofo termofilo *Thermotoga neapolitana* e il batterio fotosintetico anossigenico *Rhodospseudomonas palustris* per la produzione di idrogeno a partire da biomasse di microalghe e da residui vegetali (Progetto PIRODE, condotto in collaborazione con l'Istituto di Chimica Biomolecolare (ICB) del CNR di Pozzuoli (NA) e con l'Istituto di Chimica dei Composti Organometallici (ICCOM) del CNR di Sesto fiorentino (FI), e finanziato dal Ministero dell'Ambiente).

La fermentazione al buio, come sopra riportato, comporta la produzione di idrogeno e di altri composti ridotti che non possono essere ulteriormente utilizzati dai batteri chemoeterotrofi come donatori di elettroni per la produzione del gas in quanto la loro

ossidazione richiede energia. Quando però questi composti vengono utilizzati come donatori di elettroni dai batteri fotosintetici anossigenici, queste reazioni possono utilizzare l'energia della luce solare assorbita da questi ultimi e portare quindi alla completa ossidazione dei composti rilasciati dai batteri chemoeterotrofi, con produzione di ulteriori quantità di idrogeno. Partendo da queste considerazioni, molti gruppi di ricerca hanno avviato studi per la messa a punto di sistemi integrati di produzione di idrogeno a due stadi, nei quali ad un primo stadio condotto dai batteri chemoeterotrofi viene fatto seguire un secondo, condotto dai batteri fotosintetici anossigenici che sfruttano i composti rilasciati nel corso del primo stadio (Figura 1).

Occorre sottolineare come la biofotolisi dell'acqua, pur essendo molto interessante dal punto di vista scientifico, appare al momento molto lontana da una possibile applicazione a livello industriale, mentre gli altri tre processi appaiono più vicini ad una reale utilizzazione tecnologica a patto che vengano risolti alcuni aspetti sia di natura biologica che impiantistica che ne limitano ancora le prestazioni.

Processo	Microrganismi	Vantaggi	Svantaggi
Biofotolisi dell' acqua	Microalghe; cianobatteri	-Produzione da H ₂ O e luce solare	- Enzimi connessi alla produzione di H ₂ sensibili a O ₂ -Bassi tassi di produzione di H ₂
Fermentazione al buio	Batteri fermentativi chemoeterotrofi (vari generi)	- Processo anaerobico - Può utilizzare substrati rinnovabili contenenti carboidrati fermentescibili (scarti vegetali, residui agricoli etc) - Non è influenzato dai cicli luce/buio, a differenza dei microrganismi fotosintetici - Alti tassi di produzione di H ₂	- Incompleta ossidazione dei substrati - Influenzato negativamente dall'aumento della pressione parziale di H ₂ -Produce CO ₂ , che deve essere separata da H ₂
Fotofermentazione	Batteri fotosintetici anossigenici (batteri rossi non sulfurei)	- Uso di composti contenuti in acque reflue industriali o derivanti dalla fermentazione dei batteri chemoeterotrofi - Usa l'energia di un'ampia gamma di lunghezze d'onda della luce	- La nitrogenasi (enzima che catalizza la reazione di produzione di H ₂) consuma grandi quantità di ATP - La nitrogenasi è sensibile a NH ₄ ⁺ - Bassa efficienza di conversione dell'energia della luce in H ₂

Tabella 1. I processi di produzione biologica di idrogeno tramite l'impiego di microrganismi e i loro vantaggi e svantaggi [4]

Numerosi studi hanno messo in evidenza vantaggi e svantaggi dei vari processi (Tabella 1; da [4]), individuando in particolare la fermentazione operata con batteri chemoeterotrofi come il processo capace di produrre idrogeno con i tassi maggiori.

Come detto, grande attenzione è attualmente rivolta all'uso di processi microbici integrati a due stadi, con i quali è teoricamente possibile giungere alla conversione completa in idrogeno di composti organici fermentescibili contenuti in biomasse vegetali (scarti vegetali oppure residui di biomasse microalgali derivanti dall'estrazione di biodiesel), non realizzabile con i soli batteri chemoeterotrofi a causa di vincoli di natura termodinamica.

3. Conclusioni

Nonostante i notevoli risultati ottenuti dalla ricerca nel corso degli ultimi decenni nello studio della produzione biologica di idrogeno, restano ancora un certo numero di ostacoli da superare prima che questo processo possa essere sfruttato industrialmente in maniera economicamente sostenibile. In particolare, occorre aumentare ulteriormente le rese di conversione dei substrati e della luce in idrogeno, ottimizzando il processo sia da un punto di vista biologico che tecnologico, in un percorso che richiede una intensa attività di studio per la soluzione dei problemi ancora presenti.

Per concludere questa breve rassegna, vale però la pena citare quanto scritto di recente da uno dei massimi esperti di produzione biologica di idrogeno, Patrick C. Hallenbeck, dell'Università di Montreal, Canada, che ha affermato che i tassi di produzione di idrogeno ottenuti con la fermentazione al buio a partire da residui lignocellulosici rendono questo processo già adesso confrontabile con quello di produzione biologica di etanolo, attualmente in via di utilizzazione a livello industriale [5].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Adessi, A., De Philippis, R., Hallenbeck, P.C. (2012) Combined systems for maximum substrate conversion. In: Hallenbeck, P.C. (ed) *Microbial Technologies in Advanced Biofuels Production*. Springer, New York; pp 107-126.
- [2] Demirbas, A. (2009) Politics, economic and environmental impacts of biofuels: A review. *Applied Energy*; S108-17.
- [3] Dunn, S. (2002) Hydrogen futures: toward a sustainable energy system. *International Journal of Hydrogen Energy*; 27: 235-64.
- [4] Hallenbeck, P.C. (2014) Bioenergy from Micro-organisms: an overview. In: Zannoni, D., De Philippis, R. (eds) *Microbial BioEnergy: Hydrogen Production*. Springer, Dordrecht; pp 3-21.
- [5] Hallenbeck, P.C., Ghosh, D. (2009) Advances in fermentative biohydrogen production: the way forward? *Trends in Biotechnology*; 27: 287-297.
- [6] IEA (International Energy Agency): *World Energy Outlook 2006* <http://www.worldenergyoutlook.org/>
- [7] IEA (International Energy Agency): *World Energy Outlook 2013* <http://www.worldenergyoutlook.org/>
- [8] Redwood, M.D., Paterson-Beedle, M., Macaskie, L.E. (2009) Integrating dark and light bio-hydrogen production strategies: towards the hydrogen economy. *Reviews Environmental Sciences and Biotechnology*; 8: 149-85.
- [9] Rupprecht, J., Hankamer, B., Mussgnug, J.H., Ananyev, G., Dismukes, C., Kruse, O. (2006) Perspectives and advances of biological H₂ production in microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*; 72: 442-449.
- [10] Yergin, D. (1991) *The prize: the epic quest for oil, money, and power*. Simon and Schuster, New York.

IL COSMO VIVENTE: L'ASTROBIOLOGIA E LA RICERCA DELLA VITA NELL'UNIVERSO¹

ENZO GALLORI

Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Firenze

1 - Introduzione

L'Astrobiologia è la disciplina scientifica che ha al centro del suo interesse uno dei problemi più affascinanti di tutta la scienza: lo studio dell'origine, dell'evoluzione e della diffusione della vita sulla Terra e nell'Universo. Essa è nata, come campo di ricerca autonomo, intorno agli anni novanta del secolo scorso, principalmente a seguito della decisione della NASA di unificare in un'unica disciplina le diverse materie scientifiche interessate alla ricerca della vita nel cosmo. In questo senso l'Astrobiologia è una disciplina scientifica nuova, poiché solo nelle ultime decadi si è avuta la possibilità di esplorare più profondamente lo spazio extraterrestre e di venire in contatto con corpi celesti del nostro sistema solare; allo stesso tempo è una disciplina molto antica in quanto essa cerca di dare delle risposte a delle domande che l'uomo da sempre si è posto, cioè di come sia nata la vita sul nostro pianeta e della possibile esistenza di altre forme di vita nell'Universo.

L'origine della vita, cioè il passaggio dal non vivente al vivente, rappresenta uno dei problemi ancora irrisolti della scienza contemporanea e, probabilmente, rimarrà tale anche in futuro in quanto è un evento storico e come tutti gli eventi storici, è unico ed irripetibile. Possono essere avanzate ipotesi riguardo ai possibili meccanismi che hanno portato all'origine delle prime forme viventi che, in alcuni casi, possono essere sottoposte anche a delle verifiche sperimentali. Tuttavia non sarà mai possibile dimostrare ciò che realmente è accaduto sulla Terra primordiale. Nonostante questo, i progressi che si sono avuti negli ultimi anni nelle discipline che hanno a che fare con questo campo di indagine, che è necessariamente multidisciplinare, ossia la biologia, la chimica, la fisica, l'astronomia e le scienze planetarie, la geologia, ecc., come pure la possibilità di poter esplorare il cosmo più lontano da noi in modo sempre più approfondito grazie ai telescopi montati sui satelliti (come Hubble e Spitzer), ci stanno aiutando a comprendere sempre meglio i meccanismi molecolari che sono alla base della vita e della sua nascita. L'individuazione in questi ultimi anni di un numero sempre maggiore di pianeti al di

¹ Lezione tenuta venerdì 29 novembre 2013, ore 11 - Liceo Scientifico G. Galilei, Via Cesare Battisti n.13, Siena, lunedì 9 dicembre 2013, ore 11 - Liceo Classico Statale Michelangiolo, Via della Colonna nn. 9-11, Firenze, giovedì 13 febbraio 2014, ore 11 - ISIS L. da Vinci, Via del Terzolle n. 91, Firenze

fuori del nostro sistema solare, i cosiddetti esopianeti (quasi duemila alla fine di Aprile 2014), ci induce a sperare di trovare qualche pianeta avente caratteristiche simili alla Terra e quindi in grado di poter ospitare qualche forma di vita extraterrestre.

2 - Origine della vita sulla Terra

La ricostruzione del processo evolutivo che partendo dalla materia inanimata ha portato alle prime forme di vita, può essere fatta solo basandosi sulle conoscenze scientifiche dei processi biologici che regolano la vita di tutte le cellule. In particolare, gli studi condotti negli ultimi cinquanta anni hanno dimostrato che tutti gli esseri viventi, da quelli più semplici come i batteri a quelli più complessi come l'uomo, condividono lo stesso programma biologico basato sugli acidi nucleici (DNA, RNA) e sulle proteine, il cosiddetto "Principio centrale della biologia" [1]. In base a questo principio l'informazione genetica, archiviata nella sequenza dei nucleotidi, l'unità costitutiva degli acidi nucleici, è la base fondante della vita.

Essa infatti, mediante i processi della trascrizione e della traduzione, contiene l'informazione per produrre le proteine, sia quelle che costituiscono l'ossatura delle cellule, sia quelle (enzimi) che permettono la maggior parte delle reazioni che avvengono nelle cellule stesse. Inoltre, la specifica sequenza con cui si susseguono i nucleotidi, l'unità costitutiva degli acidi nucleici, lungo la molecola del DNA è trasmessa, mediante il processo della replicazione, da una generazione a quella successiva, assicurando così la perpetuazione dell'informazione genetica sul nostro pianeta. Non solo, poiché questa informazione può andare incontro a dei cambiamenti ereditabili (mutazioni) essa rappresenta il materiale di partenza su cui ha agito e agisce l'evoluzione.

Questi sono gli aspetti fondamentali del processo biologico che chiamiamo vita e, sebbene altre caratteristiche siano necessarie ad essa, la presenza da un lato del materiale genetico (DNA/RNA) è dall'altro delle molecole proteiche è assolutamente essenziale.

Relativamente all'origine di queste biomolecole, in linea di principio esistono due possibilità: un'origine spontanea qui sulla Terra (origine endogena), oppure un'origine extraterrestre (origine esogena).

Per quanto riguarda la prima ipotesi, essa si basa sulle geniali intuizioni di un giovane biochimico russo Aleksandr I. Oparin il quale, agli inizi degli anni '20 del secolo scorso, ipotizzò che le molecole organiche dei viventi si fossero originate a partire dai gas presenti nell'atmosfera primordiale (H_2 , CH_4 , NH_3 , HCN , H_2O , CO_2 , ecc.). Un'atmosfera di questo tipo, detta "riducente" perché caratterizzata dalla mancanza di ossigeno gassoso (O_2), sotto l'azione dei fulmini e di altre forme di energia (raggi cosmici, il calore delle eruzioni vulcaniche, ecc.), avrebbe favorito la combinazione di questi gas, con la formazione di molecole organiche più complesse, come gli aminoacidi, che sarebbero andate a finire per effetto delle piogge nei mari primordiali, dando origine al cosiddetto "brodo primordiale". In quegli stessi anni (1929), il genetista inglese John B.S. Haldane era giunto a delle conclusioni analoghe. Per questo la teoria dell'origine del vivente a partire da composti organici semplici presenti sulla Terra ancestrale è nota

come “Teoria di Oparin-Haldane” [2]. Questa ipotesi così rivoluzionaria, trovò la sua consacrazione ufficiale circa 15 anni più tardi grazie agli esperimenti condotti da un giovane chimico statunitense Stanley L. Miller, il quale verificò in laboratorio la fondatezza delle idee di Oparin e Haldane riuscendo ad ottenere, in un esperimento che simulava le condizioni da loro ipotizzate, alcuni aminoacidi, cioè gli elementi costitutivi delle proteine [3].

Negli anni successivi, sono stati condotti molti altri esperimenti dello stesso tipo grazie ai quali è stato possibile ottenere i più svariati composti tipici degli esseri viventi, fra cui le basi nucleotidiche presenti nel DNA e nell'RNA.

Tuttavia rimaneva il problema della formazione delle prime molecole biologiche in presenza di enormi quantità di acqua, come quelle degli oceani primordiali, data la scarsa concentrazione dei precursori. Questo aspetto era ben presente ad alcuni scienziati, in particolare all'inglese John D. Bernal, il quale nel 1951 [4] suggerì che queste reazioni dovessero essere avvenute sulla superficie di particelle minerali, in particolare le argille. Queste ultime, infatti, per le loro proprietà chimico-fisiche avevano la capacità di assorbire e concentrare le molecole organiche presenti nelle acque, di proteggerle nei confronti della degradazione da parte delle alte temperature e del forte irraggiamento e di favorire (catalizzare) la loro unione in polimeri sempre più complessi.

Negli ultimi anni, l'ipotesi di un'origine del vivente mediata dalle superfici minerali, il cosiddetto “mineral honeycomb” (“culla minerale”), ha ricevuto una serie di impressionanti conferme sperimentali. Tra l'altro si è visto che gli acidi nucleici adsorbiti alle argille risultano protetti nei confronti delle radiazioni (raggi X e UV) [5].

3 - La vita altrove

Queste osservazioni sul ruolo “chiave” svolto dai minerali riguardo alla formazione, alla “preservazione” del materiale genetico primordiale e quindi alla sua possibilità di “evolvere”, hanno dato nuovo impulso alla teoria esogena sull'origine della vita, la cosiddetta Panspermia (dal greco “semi ovunque”), la quale afferma che le molecole di partenza per la costruzione delle prime cellule viventi sono state trasportate sulla Terra da corpi celesti come meteoriti, comete, asteroidi, ecc. L'Universo, infatti, è molto “ricco” dal punto di vista chimico. Più di 100 specie molecolari, alcune molto complesse come gli idrocarburi policiclici aromatici, noti con la sigla PAH, sono state identificate nel gas presente nel mezzo interstellare della nostra Galassia [6]. Tra queste un cenno particolare merita l'individuazione della glicolaldeide, il materiale di partenza per ottenere lo zucchero ribosio presente nell'RNA, nel gas al centro della Via Lattea, così come nella regione di formazione di una stella lontana 26.000 anni luce da noi. Oltre agli ambienti interstellari e nelle regioni attorno alle stelle in formazione, molecole sono state trovate anche nelle comete, nelle meteoriti, e associate ai grani di polvere cosmica, la cosiddetta “polvere cosmica”, la quale pervade tutto l'Universo. Le analisi molto approfondite condotte nel corso di oltre venti anni su alcuni meteoriti, in particolare sul meteorite di Murchison, hanno indicato la presenza in questo corpo celeste, una condrite carbona-

cea di 4,6 miliardi di anni, di oltre 100 composti organici complessi, dagli aminoacidi agli zuccheri, agli acidi carbossilici, alle basi nucleotidiche come la xantina e l'uracile [7]. Per quanto riguarda le comete, nell'agosto 2009 è stato annunciato, dai ricercatori della NASA, il ritrovamento dell'aminoacido glicina in uno dei grani di polvere della cometa Wild 2, riportati a terra dalla sonda spaziale Stardust della NASA [8].

In questo scenario, lo studio dei meccanismi di formazione, trasporto e "protezione" del materiale biotico sulla superficie terrestre o di altri pianeti, attraverso meteoriti, grani cometari o polvere cosmica, acquista un rilievo estremamente importante in quanto il loro studio può fornire informazioni estremamente utili non solo sulla formazione del nostro sistema solare, ma anche sull'origine della vita, avendo contribuito all'inseminazione della Terra, circa 4.0 miliardi di anni fa, con la materia organica dalla quale poi si sono originate attraverso un complesso percorso evolutivo le prime cellule viventi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] B. Lewin et al., *Il Gene*, Zanichelli, Bologna, 2011
- [2] A.I.Oparin, *L'origine della vita*, Boringhieri, Torino, 1977
- [3] S.L.Miller, A production of amino acids under possible primitive Earth conditions, *Science*, 117, 528-529, 1953
- [4] J.D.Bernal, *The Physical Basis of Life*, Routledge & Kegan Paul, London, 1951
- [5] E.Gallori et al., Looking for the Primordial Genetic Honeycomb, *Origin of Life and Evolution of the Biosphere*, 36, 493-499, 2006
- [6] P. Ehrenfreund and J. Cami, Cosmic carbon chemistry: from the interstellar medium to the early Earth, in D. Deamer and J. Szostak (eds.), *The Origin of Life*, pp. 21-34, Cold Spring Harbor, New York, 2010
- [7] S. Pizzarello, G. U. Cooper, C. J. Flynn, *Meteorites and the Early Solar System*, University of Arizona Press, Tucson, 2006
- [8] M. McKee, Found: first amino acid on a comet, «*New Scientist*», August 2009

JULIUS.CAESAR@INTERRETE.SPQR: UN INSOLITO VIAGGIO NEL TEMPO ALLA SCOPERTA DELLE TECNOLOGIE PER LE TELECOMUNICAZIONI¹

FILIPPO GIANNETTI

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università di Pisa

1. Introduzione

I sistemi di telecomunicazione ed i sistemi per la trasmissione di segnali sono presenti in ogni momento della nostra vita. Per esempio, senza rendercene conto, noi utilizziamo un sistema di comunicazione quando, con il nostro smartphone, consultiamo i social network, inviamo messaggi, guardiamo video e visitiamo siti internet, oppure quando guardiamo i programmi televisivi diffusi dalla rete di ripetitori terrestri o dai satelliti per telecomunicazioni in orbita intorno alla Terra. E potremmo continuare con tanti altri esempi ancora. Ma le cose non sono state sempre così. In epoche passate, e fino a periodi relativamente recenti, i sistemi di comunicazione erano rudimentali e la trasmissione delle informazioni risultava lenta e difficile. Questo contributo intende quindi far acquistare al lettore la consapevolezza del fatto che per giungere alle odierne meraviglie delle tecnologie dell'informazione, che diamo per scontate e che utilizziamo quotidianamente con tanta naturalezza, sono serviti gli sforzi, le intuizioni ed i colpi di genio di molte persone nel corso dei secoli. Per questo scopo faremo un viaggio nel tempo, durante il quale rivivremo importanti episodi ed incontreremo personaggi di fondamentale importanza nello sviluppo delle tecnologie delle comunicazioni, concedendoci qua e là anche qualche licenza di contaminare il passato con il nostro presente. A questo punto non ci resta che entrare nella nostra macchina del tempo, sederci ai comandi e partire per la prima destinazione. Lontano nel passato ...

2. L'Epoca Classica

Piana di Maratona, 12 Settembre 490 a.C. - Le truppe della polis di Atene ed i loro alleati affrontano e sconfiggono un'imponente armata persiana sbarcata per conquistare la Grecia. Secondo la tradizione, conclusa la battaglia, un messaggero di nome Fidippide viene inviato di corsa ad Atene dove fa appena in tempo ad annunciare la vittoria con le parole "χαίρετε, νικῶμεν" ("gioite, abbiamo vinto") prima di morire, esausto per la fatica. Questo noto episodio, seppur leggendario, è una emblematica rappresentazione delle limitate capacità di comunicazione del mondo antico. Ma come sarebbero

¹ Lezione tenuta lunedì 9 dicembre 2013, ore 11 - IIS P. Rossi - sede Rossi, Via Democrazia n. 26, Massa; venerdì 21 febbraio 2014, ore 11 - Liceo Scientifico Francesco Redi Arezzo, Via L. Leoni n. 38, Arezzo.

andate le cose se gli antichi Greci avessero avuto a disposizione le moderne tecnologie di comunicazione? Molto semplicemente, sarebbe bastato digitare sulla tastiera di un dispositivo connesso in rete (come ad esempio un computer o uno smartphone o un tablet) il messaggio in questione, che è composto da una parola di 7 lettere (χαίρετε), una virgola, uno spazio ed un'altra parola di 7 lettere (νικῶμεν), per un totale di 16 caratteri (risparmiando, tra l'altro, l'estremo sacrificio del povero Fidippide). Osserviamo adesso che nei moderni dispositivi digitali di comunicazione ogni carattere che viene inserito tramite una tastiera (sia esso alfabetico maiuscolo o minuscolo, cifra numerica o simbolo di punteggiatura) viene trasformato in un gruppo di "bit", cioè di cifre che assumono solo due valori, "0" oppure "1", secondo una opportuna tabella detta "codifica". Volendo dunque rappresentare i caratteri dell'alfabeto Greco, oltre che di quello Latino, possiamo ad esempio utilizzare la codifica Unicode che associa un gruppo di 16 bit ad ogni carattere della tastiera. Ne consegue che il numero di bit che servono per rappresentare il messaggio trasportato da Fidippide è dato dalla seguente formula

$$\begin{aligned} \text{Numero di bit del messaggio} &= \text{Numero di caratteri del messaggio} \times \text{Numero di bit di ciascun carattere} \\ &= 16 \text{ caratteri} \times 16 \text{ bit/carattere} = 256 \text{ bit} \end{aligned}$$

Non sappiamo quanto tempo abbia impiegato lo sventurato messaggero a percorrere i circa 40 km che separano la piana di Maratona dalla città di Atene. Però nel 2004, proprio su quello stesso percorso, l'atleta italiano Stefano Baldini ha vinto la gara della maratona olimpica con un tempo di 2 ore, 10 minuti e 55 secondi, equivalente a 7855 secondi. Assumendo (in verità molto ottimisticamente!) che Fidippide abbia impiegato lo stesso tempo di Baldini, possiamo dunque calcolare la velocità con cui fu effettuata la trasmissione del messaggio

$$\begin{aligned} \text{Velocità di trasmissione} &= \text{Numero di bit del messaggio} / \text{Tempo impiegato a trasportare il messaggio} \\ &= 256 \text{ bit} / 7855 \text{ s} = 0.0326 \text{ bit/s} \end{aligned}$$

Quindi, possiamo concludere che, dal punto di vista puramente "tecnico", il messaggero di Maratona fu l'equivalente di una connessione alla infima velocità di 0.0326 bit al secondo, che è ben poca cosa se confrontata alle attuali connessioni internet. Per esempio, una connessione "20 Mega", che corrisponde a circa 20 milioni di bit al secondo, equivale ad oltre 600 milioni di messaggeri! Per molti secoli a venire le comunicazioni avrebbero continuato ad essere basate principalmente su messaggeri a piedi o a cavallo, oltre che su varie tecniche di segnalazione acustica tramite corni e tamburi, o visiva tramite bandiere, segnali di fumo, specchi e torce. La più estesa infrastruttura di comunicazione dell'antichità fu la capillare rete viaria dell'Impero Romano. A questa, si aggiungeva una rete di torri dispiegata lungo le coste del Mediterraneo dalla cui sommità venivano effettuate segnalazioni tramite torce, secondo un sistema ideato da Polibio nel 150 a.C.. Con un piccolo sforzo di fantasia, possiamo vedere nella rete viaria dell'Impero Romano una sorta di internet ante litteram. E dato che la parola "internet" è la contrazione dell'Inglese "interconnected networks", cioè reti interconnesse, se gli anti-

chi Romani avessero avuto una visione “moderna” delle telecomunicazioni avrebbero potuto utilizzare il termine Latino “interrete” e magari definire anche degli indirizzi per individuare gli utenti di questa vastissima rete, cosicché un messaggio destinato a Giulio Cesare sarebbe stato indirizzato a `Julius.Caesar@interrete.spqr`. Ma, nonostante le limitazioni delle telecomunicazioni in epoca antica, una cosa fu ben chiara fin dall’inizio: l’esigenza di proteggere da intercettazioni non autorizzate il contenuto dei messaggi trasmessi. Ed in questo campo, si distinse proprio il grande Cesare che mise a punto uno dei primi algoritmi crittografici (cioè procedimenti per cifrare un messaggio in modo tale che lo possa decifrare e leggere solo il destinatario (n.d.r.) della storia. Si trattava di un cifrario a sostituzione monoalfabetica in cui ogni lettera del messaggio da trasmettere (detto “testo in chiaro”) veniva sostituita dalla lettera che si trova un certo numero di posizioni dopo nell’alfabeto, producendo così il testo da trasmettere (detto “testo cifrato”) che risultava incomprensibile a chi non conosceva l’algoritmo di sostituzione adottato. A buon diritto, anche Giulio Cesare può quindi essere annoverato fra i pionieri delle tecnologie delle comunicazioni.

3. Una Rivoluzione nella Rivoluzione

Varennes, 21 Giugno 1791 – Il re di Francia Luigi XVI e la famiglia reale mettono in pratica un maldestro piano per fuggire all’estero, ma vengono bloccati ed arrestati a Varennes, a pochi chilometri dal confine. La clamorosa notizia viene subito diffusa in tutta la Francia da messaggeri che impiegano fino a sei giorni per raggiungere le località più remote del regno. È questo l’ultimo grande avvenimento storico di cui viene data notizia con i metodi antichi. Infatti, appena due anni dopo, nel 1793, un inventore francese di nome Claude Chappe (1763-1805) inventa il “telegrafo ottico” (Fig. 1a). Si tratta di un sistema di comunicazione costituito da torri distanziate di alcune decine di chilometri e sormontate da un sistema di bracci meccanici manovrabili da parte di un operatore, con i quali è possibile comporre dei segni convenzionalmente associati a lettere dell’alfabeto (Fig. 1b). Si realizza una infrastruttura appositamente dedicata alla trasmissione di segnalazioni e nascono così le telecomunicazioni moderne: una rivoluzione tecnologica nel mezzo di una rivoluzione politica. L’invenzione di Chappe riscuote ben presto un grande successo ed una rete costituita da centinaia di torri ripetitrici dei segnali telegrafici viene dispiegata in tutta la Francia. Anche Napoleone, che come Cesare aveva ben chiara l’importanza delle comunicazioni in ambito militare, fece ricorso al telegrafo ottico sui campi di battaglia (Fig. 1c). Questo innovativo mezzo di comunicazione fu così efficace da essere addirittura definito “l’arma segreta di Napoleone”. Il telegrafo Chappe è anche protagonista di un episodio del romanzo di Alexandre Dumas “Il Conte di Montecristo” (capitoli LX e LXI.) in cui il Conte corrompe l’operatore di una stazione telegrafica ed invia un falso messaggio alla Borsa di Parigi, provocando un tracollo finanziario che causa la rovina del suo nemico Danglars. E rileggendo ancora una volta eventi e tecnologie del passato in chiave moderna, possiamo concludere che il Conte di Montecristo, inserendosi in maniera illegale in una

rete di comunicazioni per alterarne il contenuto dei messaggi, si è comportato proprio come un “hacker”, cioè un pirata informatico dei nostri giorni.

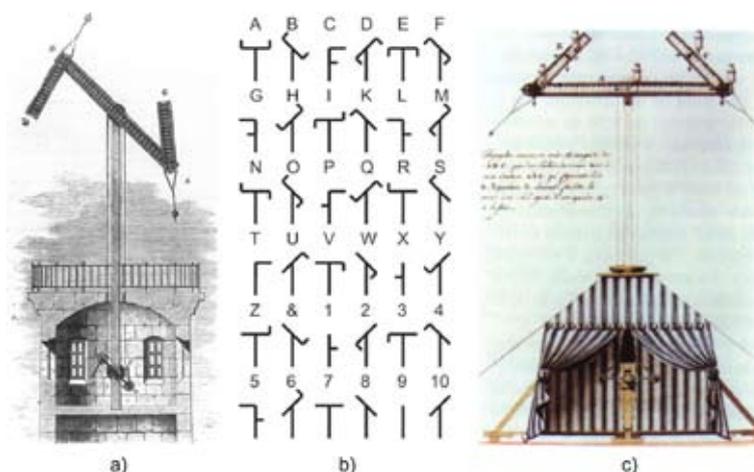


Figura 1. Telegrafo ottico di Chappe: a) torre di segnalazione con il meccanismo di manovra dei bracci; b) simboli dell'alfabeto del telegrafo Chappe ed i corrispondenti caratteri alfanumerici; c) torre telegrafica mobile per uso militare, del tipo impiegato da Napoleone per la campagna di Russia.

4. Bang! Bang! Bang!

Ford's Theatre, Washington, 14 Aprile 1865 – La guerra di Secessione è da poco conclusa ed il presidente Abramo Lincoln è tranquillamente seduto nel suo palco a teatro quando un fanatico sudista sbuca all'improvviso alle sue spalle e ... Bang! ... fa fuoco con una pistola, uccidendolo. Un giornalista che ha assistito al delitto si imbarca subito sulla prima nave in partenza per la Gran Bretagna e dopo 12 giorni di navigazione, come un moderno Fidippide transoceanico, porta in Europa la notizia dell'assassinio del presidente degli Stati Uniti.

Villa Griffone, Pontecchio, Bologna, 1895 – Un giovane sperimentatore di nome Guglielmo Marconi (1874-1937), con apparecchiature di sua costruzione, invia dalla propria casa un segnale radio e ... Bang! ... lo sparo di un fucile lo informa che il segnale è stato captato dietro una collina a circa due chilometri di distanza: nascono le radiocomunicazioni. Nel giro di pochi anni, per l'esattezza nel 1901, Marconi riesce ad effettuare la trasmissione di un segnale radio da Poldhu (Cornovaglia) fino a Terranova (Canada) a 3200 km di distanza, dimostrando che è possibile comunicare tra le due sponde dell'Oceano Atlantico senza bisogno di navi, né di cavi sottomarini: il mondo è improvvisamente diventato piccolo piccolo.

Dallas, 22 Novembre 1963 – Il presidente John Kennedy passa in mezzo alla folla su di un'auto scoperta quando ... Bang! ... si accascia colpito a morte da uno sparo di fucile. Un secolo dopo Lincoln, un altro presidente degli Stati Uniti viene assassinato, ma questa volta ci sono i moderni mezzi di comunicazione. Così la notizia viene immediatamente diffusa da radio e televisioni, e nel giro di poche ore le drammatiche immagini dell'assassinio, riprese da una videocamera amatoriale, fanno il giro del mondo.

5. La II Guerra Mondiale ed i geni delle tecnologie dell'informazione

Come abbiamo già avuto modo di osservare, molto spesso le innovazioni tecnologiche nascono sotto l'impulso di esigenze militari o in periodi drammatici della storia. Ed anche l'evento più tragico del XX secolo, la II Guerra Mondiale, si è rivelato estremamente prolifico da questo punto di vista, producendo grandi sviluppi nel campo delle tecnologie dell'informazione. Come primo esempio consideriamo il matematico inglese Alan Turing (1912-1954) che durante il conflitto lavorò alla decodifica dei codici creati dai Tedeschi mediante la macchina Enigma (basata su un cifrario a sostituzione polialfabetica, in pratica, una versione evoluta del codificatore di Cesare) ed in seguito si dedicò allo studio delle tecniche di calcolo artificiale gettando le basi per l'informatica e la realizzazione dei moderni computer. Una curiosità che ci ricollega all'inizio di questo viaggio nel tempo: Alan Turing fu anche un buon maratoneta. Tra i geni delle tecnologie dell'informazione che furono attivi durante la II Guerra Mondiale è doveroso ricordare la bellissima diva del cinema Hedy Lamarr (1914-2000), che nel 1942 inventò e brevettò, non senza incontrare un forte scetticismo, un ingegnoso sistema di radiocomunicazione, detto "Frequency-Hopping Spread-Spectrum", i cui segnali risultano particolarmente robusti ai tentativi di disturbo da parte del nemico e difficilmente intercettabili. Potrà essere sorprendente sapere che si tratta della stessa tecnologia che viene tutt'oggi impiegata dai dispositivi Bluetooth. Nello stesso periodo, Ugo Tiberio (1904-1980), docente presso l'Accademia Navale di Livorno, condusse studi pionieristici riguardanti la tecnologia dei radar ed installò i primi apparati sulle navi della Marina Militare. Erano i precursori dei moderni radar che oggi garantiscono la sicurezza del traffico aereo e marittimo in ogni condizione di visibilità. Infine, nell'ottobre del 1945, quando la guerra era terminata da pochi mesi e l'Europa era ancora un cumulo di macerie, lo scrittore di fantascienza Arthur Clarke (1917-2008), che aveva lavorato per la Royal Air Force come esperto di radar, ipotizzò la realizzazione di stazioni ricetrasmittenti poste in orbita intorno alla Terra: nasceva l'idea dei satelliti artificiali per telecomunicazioni, che poi diventeranno una realtà commerciale alla fine degli anni '60. E così, se oggi possiamo seguire in diretta televisiva importanti eventi, come ad esempio le olimpiadi o i campionati mondiali di calcio, ovunque essi si svolgano, lo dobbiamo alla geniale intuizione di uno scrittore di fantascienza.

6. Le telecomunicazioni nel XXI secolo ed oltre

Il nostro viaggio nel tempo è finito. Siamo ritornati nel XXI secolo ed intorno a noi troviamo un mondo pervaso da sistemi di comunicazione (internet, reti telefoniche, televisione digitale, ecc.) che utilizziamo quotidianamente ed ovunque, mentre 1.8 miliardi di chilometri di cavi in fibra ottica (fonte Corning) attraversano continenti ed oceani trasportando quantità inimmaginabili di dati. Per renderci pienamente conto della immensa quantità di informazioni che fluiscono attraverso queste straordinarie infrastrutture di telecomunicazioni possiamo dare un'occhiata ai dati riportati in Fig. 2 che ci mostrano che cosa accade in internet durante un solo minuto (fonte Intel).



Figura 2. Che cosa accade in un minuto su internet (GB, leggasi "Gigabyte", corrisponde a circa 8 miliardi di bit.)

E se pensiamo che internet è divenuta un fenomeno di massa solo alla fine degli anni '90 del XX secolo, non possiamo che rimanere sbalorditi dall'impressionante progresso compiuto dai sistemi di comunicazione in appena una ventina di anni. E che cosa ci riserverà allora il futuro? Per scoprirlo, non ci resta che entrare nuovamente nella nostra macchina del tempo e ripartire per una nuova destinazione. Stavolta, nel futuro...

MOZART GIOCA A DADI: MUSICA E COMBINATORIA NEL XVIII SECOLO

SERGIO GIUDICI

dip. di Fisica "Enrico Fermi", Università di Pisa

Il 14 Febbraio 2014, presso l'associazione La Limonaia-Scienza Viva di Pisa, abbiamo proposto ad un pubblico di studenti delle Scuole Superiori e dei Licei Musicali, una lezione-concerto dedicata ai giochi musicali. Sono stati allestiti i giochi musicali attribuiti a Mozart e Haydn che permettono di comporre semplici brani tirando una coppia di dadi. La realizzazione effettiva del gioco è stata preceduta da una lezione introduttiva in cui si presentava il meccanismo del gioco stesso e le sue relazioni con lo sviluppo del calcolo combinatorio e con l'estetica musicale. L'iniziativa si è conclusa con un concerto dedicato ad un repertorio particolare del tardo barocco che illustra alcune procedure compositive presenti nei giochi in questione.

I giochi musicali

A partire dalla seconda metà del '700 ebbero un discreto successo un tipo particolare di giochi da tavolo: i giochi musicali, ovvero dei sistemi per generare musica combinando a caso elementi precomposti. Tra i più fortunati dal punto di vista editoriale troviamo: *Der allezeit fertige Menuetten und Polonaisen componist* (Il sempre pronto compositore di minuetti e Polonaise, J.P. Kirnberg, 1757); *Table pour composer des minuets et des Trios à la infinie avec deux dez à jouer* (Tavola per comporre minuetti e trii all'infinito con due dadi, M. Stadler, 1780); *Gioco Filarmonico ossia maniera facile per comporre un infinito numero di minuetti e trio, anche senza sapere il contrappunto, da eseguirsi per due violini e basso o due flauti e basso* (attr. Haydn 1793). Il più noto di questi giochi è il *Musicalishes Würfelspiel* attribuito a Mozart che compare nel catalogo Kochel delle opere mozartiane con il numero K516f. Il gioco fu pubblicato simultaneamente a Berlino e Amburgo nel 1793 ed ebbe molta fortuna tanto che fu ristampato più volte anche in edizioni di lusso. L'attribuzione a Mozart non è certa e potrebbe trattarsi di una astuzia editoriale per incrementare le vendite. Il gioco consiste in due matrici 8 x 11 i cui elementi sono battute musicali pre-composte nella tonalità di Do maggiore. Il numero totale delle colonne, 8+8=16, corrisponde alla struttura 8+8 tipica del minuetto viennese dell'epoca mentre il numero di righe corrisponde agli undici diversi esiti del lancio di una coppia di dadi. Si gioca tirando i dadi e si trascrive su un pentagramma la battuta corrispondente al punteggio realizzato. Il gioco termina con il sedicesimo lancio quando il minuetto è completato. Man mano che il giocatore procede nel gioco appare una composizione che, pur non essendo grande musica, è però perfettamente sensata e conforme alla grammatica musicale del tempo. Si può consultare una edizio-

ne d'epoca del gioco presso l'archivio musicale on-line <http://www-imslp.org>. Esistono anche versioni moderne del gioco, anche sotto forma di applicazione per smartphone, che utilizzano al posto dei dadi gli algoritmi di generazione di numeri pseudo-casuali. Seguendo le istruzioni riportate al sito <http://sunsite.univie.ac.at/Mozart/dice> è possibile generare vari minuetti con relativa partitura e file midi.

Dal punto di vista combinatorio, il numero di minuetti generabili è davvero enorme. In teoria si possono avere $11^{16} \approx 45 \times 10^{15}$ composizioni diverse anche se in realtà il loro numero effettivo è leggermente minore tenuto conto che le battute 8 e 16 sono fisse ed inoltre alcune battute hanno meno di 11 realizzazioni *diverse*, ma si tratta pur sempre di un numero elevatissimo. Ma quello che maggiormente incuriosisce non è tanto il numero sbalorditivo di combinazioni ma piuttosto cercare di capire perché il gioco funziona e come possa produrre una musica sensata. Allo scopo occorre 'smontare' alcuni meccanismi formali della musica dell'epoca evidenziandone le caratteristiche modulari e strutturali. Lo faremo analizzando un minuetto giovanile di Mozart ma prima conviene dire qualcosa sulla sociologia musicale dell'epoca.

Musica e conversazione

Consumare una grande quantità di musica – come mai era stato fatto prima - era uno dei tanti lussi che l'aristocrazia del '700 si concedeva. Quasi ogni corte aveva una propria orchestra, un teatro ed un compositore di corte. Certamente, esisteva anche musica da strada e musica religiosa, tuttavia è nelle corti e per le corti che il linguaggio musicale settecentesco è stato concepito. Presso la corte vive e lavora una gran quantità di cortigiani: ci sono camerieri, giardinieri, artigiani, medici, paggi, dame di compagnia, cavalieri e - naturalmente - musicisti. Ognuno svolge un ruolo preciso con obblighi e privilegi stabiliti secondo una rigida scala gerarchica. Importantissimo è poter riconoscere a prima vista il rango di chi si ha davanti, per tanto massima cura è riservata all'abito, ai modi e ai gesti. Il linguaggio – inutile dirlo - è sottoposto a regole ben precise e saper conversare secondo l'etichetta è una faccenda molto seria dalla quale spesso dipende la fortuna del cortigiano. Saper conversare significa essere brillanti nei diversi generi che la conversazione prevede: il pettegolezzo, l'aneddoto, la maldicenza, l'adulazione e così via. Allo scopo è necessario disporre di schemi già collaudati, frasi pronte, aforismi e giochi di parole che, esibiti al momento opportuno, garantiscono il successo della conversazione.

La musica del '700 imita lo stile del parlare di corte. In essa troviamo la stessa eleganza, la stessa cortesia e soprattutto l'impiego di schemi modulari riutilizzabili. Un medesimo stile musicale – lo *stile galante*¹ - si estendeva in tutta Europa e ovunque la musica era composta secondo le regole codificate dalla trattatistica teorica. Se applicate, queste regole producevano le dolcissime eufonie degli intervalli di terza e sesta, evitavano i parallelismi di quinta che suonavano arcaici e plebei, e disciplinavano in una sorta di galateo musicale, l'uso della dissonanza. Questa grammatica aveva lo scopo di muovere la musica su un terreno stabile, inserendo di tanto in tanto qualche elemento

1 R. Gjerdingen, *Music in the Galant Style*, Oxford University Press.

di stupore, ma sempre entro l'orizzonte della comprensibilità e del diletto dell'ascoltatore. I giovani compositori imparavano a padroneggiare questo stile esercitandosi sui *partimenti* (linee destinate alle voci gravi alle quali l'allievo doveva aggiungere il canto) e sui *solfeggi* che avevano lo scopo di educare il gusto e fornire all'allievo un repertorio di melodie che sarebbero tornate utili in futuro. Le "melodie appropriate" apprese in questo modo erano per il giovane musicista del '700 le "buone maniere" indispensabili per ottenere una posizione a corte.

La struttura di un minuetto galante

A corte si danzava moltissimo e ogni compositore doveva essere in grado di comporre in breve tempo musica da ballo perfettamente in stile. Allo scopo ci si esercitava fin da giovanissimi. Un esempio è il quinto dei brani contenuti nel *Nannerl Notebuch* - la raccolta di pezzi facili con cui il padre di Mozart, Leopold, insegnava musica ai propri figli. Si tratta di un minuetto, composto all'età di cinque anni, *che* non va visto come il risultato autonomo di un Mozart *enfant prodige* ma piuttosto come lo svolgimento di un esercizio di composizione assegnato dal padre insegnante. Si tratta di un semplice minuetto di 8+8 battute che nel catalogo mozartiano vanta il primo numero ed è - dal punto di vista strutturale - molto simile alla musica che emerge dal *Musicalisches Würfelspiel*. L'esercizio consiste nel realizzare un minuetto rispettando le regole formali che ne fissano il genere².

Esempio 1. Mozart, minuetto in Sol maggiore K1

1. Il minuetto si compone di due parti, ciascuna di 8 battute
2. la prima parte deve "modulare" alla dominante
3. La seconda parte inizia liberamente ma deve concludere sulla tonica
4. Le battute (1-2) devono avere la stessa figura ritmica delle battute (3-4) e simmetricamente ciò avviene anche nella seconda parte
5. Le battute (5-6) e (13-14) possono essere ritmicamente diverse da quelle precedenti

² S. Eckert, Instruction on How to Write a Minuet in the Galant Style, http://www.mtosmt.org/issues/mto.05.11.2/mto.05.11.2.eckert_frames.html

6. Le battute (7-8) e (15-16) contengono una cadenza standard (IV-V-I)

Ovviamente il padre di Mozart non si limitava ad insegnare meccanicamente le regole formali ma voleva anche trasmettere il gusto e le “buone maniere” dello stile galante, ecco dunque alcuni stratagemmi stilistici:

1. L'attacco è una anacrusi: un gruppo di note poste sul tempo debole che precedono il primo accento forte, come accade anche nel famoso minuetto di Boccherini. L'effetto dell'anacrusi è quello di un garbato “invito alla danza”
2. Ci sono dei ritardi sui tempi forti (vedi la coppia di note legate) ovvero note estranee all'armonia che risolvono sulla nota giusta scendendo di un grado. La distribuzione delle dissonanze è assolutamente regolare, sul battere delle battute 2,4,10,12 e creano tensione ma sempre quando ce lo si aspetta !
3. Le battute 3-4 sono il *fonte* delle battute 1-2 e simmetricamente le battute 11-12 lo sono delle 9-10. Nella didattica musicale dell'epoca *fonte* indica l'abbassamento di un grado di un gruppo di note. (Pensare al tema di apertura della sinfonia in Sol minore n. 40)
4. Alle battute 5,6 e 13,14 compare una emiolia in cui il ritmo ternario è sostituito da una scansione binaria ($3 \times 2 = 2 \times 3$).
5. La frivolezza della terzina nelle cadenze è quasi un marchio di fabbrica della galanteria.

Il brano risulta strutturato secondo moduli di 2 battute che rispecchiano evidentemente la coreografia della danza. Concentriamoci sulle coppie di battute con cui termina ciascuna frase: la cadenza, cioè quel particolare movimento del basso (IV-V-I) che storicamente ha assunto il significato di punto di arrivo, pausa e conclusione. Nel quaderno dei giovani Mozart si trovano molti minuetti dai quali possiamo estrarre un repertorio di formule cadenzali: c'è quella con terzine, con terzine acefale, con salti intervallati ampi o per grado congiunto, interessanti sono quelle con il ritardo tanto a salire quanto a scendere.



Esempio 2: Formule cadenzali estratte dal Nannerl Notebuch

Se proviamo a sostituire una qualunque di queste cadenze al posto di quelle originali, il senso del minuetto non cambia. Le parte acuta è di fatto modificabile mentre

ciò che conta è preservare il movimento del basso e la successione armonica che ne deriva. Astruendo dal materiale melodico – non solo per le cadenze ma anche per le altre battute - ciò che resta del minuetto è una sorta di scheletro strutturale articolato secondo il percorso tonica-dominante-tonica che si svolge entro una cornice di 8+8 battute. L'effettivo materiale melodico impiegato svolge dunque un ruolo secondario di rivestimento così come il costume indossato da un ballerino potrebbe essere cambiato senza modificare la coreografia. Uno dei massimi teorici dell'epoca, il compositore Jean Philippe Rameau, diceva che “la melodia discende dall'armonia”, intendendo che l'elemento musicale fondante è la struttura armonica (la successione degli accordi) mentre la melodia è scelta tra le tante linee melodiche compatibili con la successione accordale prefissata. Questo modo di concepire la musica dà luogo ad una pluralità di soluzioni melodiche possibili ed il sorteggio tra diverse soluzioni può essere un criterio di scelta per una realizzazione particolare.

Questa procedura compositiva si ritrova in molti ambiti della musica barocca: si pensi ad esempio alle composizioni costruite su un ostinato (ciaccona, passacaglia) o al genere del tema con variazioni. La natura algoritmica di queste tecniche compositive è ciò che rende possibile il gioco musicale aleatorio. Il gioco funziona perché le battute sorteggiate con i dadi sono state precomposte *ad-hoc* in modo da adattarsi perfettamente alla struttura armonica ed inoltre ciascuna è realizzata secondo gli stilemi tipici della galanteria musicale dando così l'impressione di un discorso melodico “ispirato” quando invece si tratta di puro patchwork combinatorio.

Caso e Struttura

I giochi musicali come il *Musicalishes Würfelspiel* sono, di fatto un sistema di composizione automatica, e il successo che ebbero all'epoca può essere ricondotto al fascino che in generale l'automatismo esercitava nel '700. Basta ricordare la grande fortuna degli automi costruiti da Jacques de Vaucanson tra i quali, in ambito musicale, troviamo un piccolo flautista completamente automatizzato, dotato di labbra mobili, una lingua meccanica che fungeva da valvola per il flusso dell'aria e dita mobili le cui punte in pelle aprivano e chiudevano i fori di un flauto. Ancora più famosa fu «l'anatra digeritrice» costruita nel 1739: un'anatra meccanica che dava l'impressione di nutrirsi e digerire e sembrava avvallare l'idea cartesiana per cui gli animali non sono altro che macchine biologiche. Se, dunque, un automa esemplifica una idea filosofica viene da chiedersi – per analogia – quale concezione estetica sia veicolata attraverso i giochi musicali. Il fatto che una musica sensata possa emergere da un algoritmo aleatorio obbliga infatti a rivedere l'idea pre-romantica di musica come linguaggio, soprattutto come linguaggio sentimentale, e a meditare meno ingenuamente sui meccanismi psicologici che intervengono quando attribuiamo significato alla musica. Una musica prodotta lanciando dei dadi ma comunque percepita come dotata di significato, suggerisce che “*il senso di una composizione può non identificarsi con i suoni che la compongono, bensì con il suo progetto o, in altri termini, con l'insieme delle norme predisposte a vuoto dall'autore e destinate*”

a riempirsi di materiale di qualsiasi provenienza.”³ In questo senso i giochi musicali del ‘700 sono gli antecedenti di certi esperimenti compositivi del XX secolo che prevedono l’intervento del caso come accade in certa musica aleatoria di Iannis Xenakis. Una citazione da Milan Kundera aiuta a cogliere questa prospettiva:

Mi ricordo dei tristi anni passati in Boemia agli inizi della occupazione russa. Fu allora che mi innamorai di Varèse e di Xenakis: quelle immagini di mondi sonori oggettivi ma inesistenti mi parlavano dell’essere liberato dalla soggettività umana, aggressiva e ingombrante - mi parlavano della bellezza dolcemente disumana del mondo prima o dopo il passaggio degli uomini⁴

Un concetto importante testimoniato dai giochi musicali è che da scelte casuali non segue necessariamente il caos. Nonostante la casualità, quando è presente una struttura soggiacente, una forma di sensatezza è comunque preservata. In sostanza, caos e caso non sono la stessa cosa.

Alla medesima conclusione era giunta anche la matematica del XVIII secolo: un esempio famoso è il numero π che si affaccia nel problema dell’ago di Buffon. Il numero π è un ente di squisita origine geometrica, definito come il rapporto tra lunghezza della circonferenza e quella del suo diametro. Un numero che ha assai poco a che fare con il caso. Ebbene, in un saggio intitolato meravigliosamente: *Essai d’Arithmétique Morale* (1777), il naturalista George Louis Leclerc, comte de Buffon, mostrava che gettando a caso un ago su una superficie piatta divisa da righe equispaziate (una sorta di parquet o di tappeto a strisce), la probabilità che l’ago intersechi una delle linee è $2/\pi$ ammesso che l’ago sia lungo quanto la spaziatura tra le righe. Rovesciando l’argomento si ha che il numero π può essere determinato sperimentalmente, con una certa precisione, gettando per davvero un ago sul pavimento un numero abbastanza elevato di volte. Ecco dunque un misterioso legame tra caso e geometria: lanciando casualmente un ago emerge il numero π . Questo tipo di ragionamenti intorno alla *mensura sortis* – espressione con cui de Moivre indicava il calcolo della probabilità – erano dunque nell’aria dei tardi lumi e costituivano oggetto di indagine per la matematica dell’epoca. Non stupisce ritrovare negli stessi anni il caso intervenire nei giochi musicali. Come avveniva per l’ago di Buffon, anche i giochi musicali mostravano che dal caso non emerge necessariamente il caos, soprattutto quando una struttura opportuna permette di addomesticare la sorte.

3 A. Lanza, voce “Alea-Aleatorio”, Dizionario Enciclopedico Universale della Musica e dei Musicisti, UTET

4 M.Kundera, i testamenti traditi, Adelphi

IL TEMPERAMENTO: UNA QUESTIONE SCIENTIFICA E MUSICALE

SERGIO GIUDICI

dip. di Fisica "Enrico Fermi", Università di Pisa

Il 27 Marzo 2014, presso i locali dell'Istituto Franci di Siena, sede del Liceo e del Conservatorio, si è tenuta una lezione/concerto dedicata alla questione del temperamento e delle accordature antiche, rivolta agli studenti. Nell'aula magna dell'Istituto erano sistemati due clavicembali i cui registri erano stati precedentemente accordati secondo i quattro temperamenti principali: pitagorico, mesotonico, ben temperato ed equabile, permettendo così di integrare il discorso teorico con esempi musicali dal vivo. L'allestimento prevedeva anche uno speciale monocordo, realizzato dal dipartimento di Fisica "Enrico Fermi" dell'università di Pisa, che permette di visualizzare il fenomeno degli ipertoni. La compresenza in aula di strumenti musicali e scientifici si è rivelata didatticamente efficace nell'illustrare il rapporto tra estetica musicale ed indagine scientifica del fenomeno del suono.

Introduzione

Se consideriamo uno strumento musicale a tastiera ed uno strumento ad arco, un pianoforte ed un violino tanto per fissare le idee, una differenza è particolarmente interessante: nel pianoforte le note sono tutte già disponibili e pre-intonate ed è sufficiente abbassare un tasto per farle risuonare; nel caso del violino, invece, la nota non è altrettanto disponibile: il violinista deve costruirselo posizionando le dita in un punto preciso del manico del suo strumento. Il problema del violinista è dunque quello di sapere dove stanno le note. Come si stabilisce quando un suono è quello giusto? Il suono giusto - si dirà - è quello appartenente ad una certa scala musicale: ecco, dunque, il nocciolo della questione: come è definita una scala musicale?

La questione scientifica

Le frequenze percepite dall'orecchio umano cadono nell'intervallo compreso tra 20 e 20000 Hz. Dal punto di vista percettivo la banda acustica è più estesa di quella ottica: i suoni che siamo in grado di udire variano entro tre ordini di grandezza. In confronto la banda della luce visibile è assai più limitata essendo compresa tra i 400 e i 790 THz. Questo fatto ha l'importante conseguenza che per molti suoni siamo in grado di udire anche certe frequenze multiple o sottomultiple. Preso un suono comodo per l'orecchio, ad esempio il LA corrispondente alla frequenza di 440 Hz, risultano udibili i suoni di frequenza doppia, quadrupla o anche la metà e un quarto. Questi suoni, ottenuti per raddoppi o dimezzamenti successivi, sono chiamati tutti LA e corrispondono ai LA delle diverse ottave. Ascoltare due suoni tali che il più acuto abbia frequenza

doppia rispetto a quello grave produce una sensazione universalmente condivisa - almeno secondo quanto afferma l'etnomusicologia - di perfetta consonanza. Ascoltarli risuonare insieme o di seguito produce un effetto piacevole, talvolta perentorio, spesso utilizzato dai musicisti come risorsa espressiva. Si trovano molti esempi musicali con salti di ottava: tra i tanti si può citare l'attacco del *Nocturne pour violon et piano* di Lili Boulanger (1893-1918) in cui compare una figura costituita da una successione di DO spalmati su quattro ottave¹.

The image shows a musical score for 'Nocturne' by Lili Boulanger. The score is for Violin and Piano. It features a series of octaves of the note 'do' (C) across four staves, illustrating the concept of octave equivalence. The tempo is marked 'Assez lent' and the dynamics include 'pp très doux et soutenu' and 'f expressif'.

Se moltiplichiamo la frequenza di un suono per $3/2$ otteniamo un nuovo suono chiamato "quinta" del suono iniziale perchè occupa il quinto grado nella scala musicale eptafonica². Nella scala di LA (LA = 440 Hz), il quinto grado è la nota MI che ha una frequenza pari a $440 \times 3/2 = 660$ Hz. Anche il bicondimento di quinta (LA-MI) è percepito come consonante, sebbene lo sia meno rispetto a quello di ottava. Il quinto grado svolge un ruolo fondamentale nella grammatica della musica occidentale ed è chiamato 'dominante' dai teorici musicali. Fin qui abbiamo costruito solo due note: il LA e il MI. Per generare il resto della scala si può procedere attraverso il circolo delle quinte: dal MI possiamo generare il SI moltiplicando per $3/2$, oppure dal LA possiamo generare il RE dividendo per $3/2$ e così via. Se tutto filasse liscio, percorrendo il circolo delle quinte si dovrebbe poter partire da un certo LA iniziale e dopo un numero finito di salti, ciascuno pari a $3/2$, si dovrebbe giungere ad un altro LA di una qualche ottava superiore. Le frequenze incontrate lungo il cammino definirebbero un insieme di note, una scala musicale, con le quali si potrebbero costruire consonanze perfette di ottava

1 Si può ascoltare l'intero brano su youtube: <http://www.youtube.com/watch?v=57ifMZotkh4>. Lo stile del notturno è quello tipico dell'impressionismo derivato da Debussy e proseguito con Gabriel Fauré – amico di famiglia ed insegnante di composizione della Boulanger. Quando attacca il violino, la successione di "do" viene fatta "gocciolare" su un accordo di nona do-(mi)-(sol)-sib-re che dipinge la squisita atmosfera sfuggente e languida *fin de siècle*.

2 Si tratta della usuale scala di 7 note (DO-RE-MI-FA-SOL-LA-SI) che impariamo da bambini sulla quale si fonda il sistema musicale occidentale. Il primo grado DO si chiama Tonica, il terzo grado è il MI (modale) e il quinto è il SOL (dominante).

e di quinta. Sarebbe bello ma purtroppo non si può fare! Attenzione, non si può fare non perché non ne siamo tecnicamente capaci ma perché è matematicamente impossibile farlo, per lo stesso motivo per cui un tappo rotondo non può chiudere un buco quadrato. Il fatto è dimostrabile per assurdo: assumiamo che partendo da un LA, dopo n salti, ciascuno pari a $3/2$, si possa arrivare effettivamente ad uno qualunque dei tanti LA delle ottave superiori. Se questo fosse vero allora dovrebbero esistere due numeri interi n ed m tali che

$$\left(\frac{3}{2}\right)^n = 2^m$$

ovvero $3^n = 2^{m+n}$. Quest'ultima espressione è evidentemente assurda perché a sinistra dell'uguale compare un numero intero necessariamente dispari mentre a destra abbiamo un intero necessariamente pari. Un numero non può essere contemporaneamente pari e dispari. Risulta dimostrato che è impossibile l'esistenza di una scala musicale in cui per ciascuna nota siano presenti anche le corrispondenti consonanze di ottava e quinta. Poiché la consonanza di ottava è irrinunciabile, l'unico modo per procedere ulteriormente nella definizione della scala è rinunciare ad avere tutte le quinte perfette. Possiamo decidere di averne o solo qualcuna oppure nessuna. Una possibile soluzione - che di fatto è quella adottata nella musica occidentale - consiste nel definire una scala musicale di 12 note (scala cromatica) tale che i 12 suoni - o meglio le loro frequenze - formino una progressione geometrica di ragione $\sqrt[12]{2}$ in modo che partendo dalla prima nota della scala e salendo i 12 gradi che la compongono si termina sul suono con frequenza doppia rispetto a quella del suono di partenza. La scelta di avere 12 gradi può sembrare arbitraria ed in effetti lo è. Altri sistemi musicali - come quello arabo - prevedono un numero diverso di gradi ed includono terzi di tono o quarti di tono. La scala cromatica definita come successione di 12 suoni in progressione geometrica contiene soltanto l'ottava come consonanza perfetta ed è chiamata "temperamento equabile" perché ha la caratteristica di avere tutti gli intervalli leggermente imperfetti ma tutti uguali fra loro. A grandi linee, questa soluzione era già stata concepita dal teorico greco Aristosseno intorno al 320 A.C. ma è stata adottata nel nostro sistema musicale solo all'inizio del XX secolo. Il sistema equabile che ora sembra ovvio, è stato per lungo tempo rifiutato proprio perché non contiene - a parte l'intervallo di ottava - consonanze perfette esprimibili come rapporti tra numeri interi. Nel sistema equabile, l'intervallo di quinta non corrisponde al rapporto $3/2$ ma a $\sqrt[12]{2} \approx 1.4983$. La differenza tra quinta perfetta e quinta equabile è molto piccola e potrebbe sembrare una inezia ma non è così se si considerano altri intervalli. Prendiamo, ad esempio, l'intervallo di terza maggiore (DO - MI): dal punto di vista della purezza delle consonanze, il rapporto tra le frequenze dei due suoni dovrebbe essere $5/4$ mentre il sistema equabile fornisce il rapporto $\sqrt[3]{2} \approx 1.26$ che differisce percettibilmente dal rapporto esatto $5/4 = 1.25$. Considerata l'enorme importanza che gli intervalli di terza svolgono in ambito polifonico si comprende come sia stato difficile - almeno fino alla seconda metà del '600

do uno schema quasi equabile - avesse turbato e non poco il raffinatissimo orecchio italiano di Giuseppe Sarti che dopo averne fatto un rigido 'esame acustico' lo stroncò ferocemente³

La questione musicale

La transizione avvenuta intorno al 1680 dal temperamento mesotonico al 'buon temperamento' che compare nel titolo di una famosa raccolta bachiana di preludi e fughe, è dovuto all'imporsi del 'pensiero tonale' e della pratica della modulazione. La modulazione non è, infatti, compatibile con il sistema pitagorico o mesotonico. Ammettendo di aver predisposto una scala in modo che il terzo e il quinto grado siano consonanze perfette rispetto alla tonica, non appena cambiamo tonalità in generale la nuova tonica non formerà più consonanze perfette con il nuovo terzo e quinto grado.

Ho spesso notato che un dato pezzo in La maggiore era abbastanza piacevole fino a che l'armonia si limitava a percorrere i toni ben temperati. Ma non era più la stessa cosa quando la modulazione si indirizzava verso il tono di MI e quindi compariva il Re#; ancora peggio quando si passava al tono di Do# minore, nel quale la detestabile armonia dell'accordo perfetto sul Sol# straziava immancabilmente le orecchie di molti fra gli stessi musicisti.⁴

Il 'buon temperamento' fu la soluzione escogitata per evitare questi effetti detestabili e realizzava un accettabile compromesso tra la pratica della modulazione e l'esigenza di ottenere delle consonanze il più possibile perfette. Si faccia attenzione a non giudicare come 'difettosi' i temperamenti antichi: le disuniformità presenti in essi non erano difetti ma piuttosto risorse espressive come testimoniato da molti esempi tratti dalla letteratura madrigalistica. Certe quinte o terze, particolarmente imperfette e *dolenti*, offrivano una soluzione espressiva assai efficace quando occorreva musicare una parola particolarmente drammatica come 'morte' o 'dolore'. In questa prospettiva, il sistema equabile appare espressivamente più limitato rispetto ai sistemi antichi perchè ha eliminato queste sottili sfumature nell'intonazione.

The image shows a musical score snippet with four staves. The top staff is for the 1st Orchestra (Violins, Violas, & Basses) playing *Pizzicato*. The second staff is for the Organ. The third staff is for the Chorus (Tenors and Basses) with the lyrics "Spectres! larves!" and "ff Non, Non,". The bottom staff is for the 2nd Orchestra (Violins, Violas, & Basses) playing *With the bow*. The music is in a key with one flat (B-flat) and a common time signature.

3 S. Cappelletto, *La notte delle dissonanze*, EDT, 2006

4 *Friedrich Marpurg, Principes de clavecin, 1756*. Citazione tratta da Patrizio Barbieri: il massimo esperto italiano in fatto di temperamento la cui vasta produzione è consultabile alla pagina <http://www.patriziobarbieri.it/articlespdf.htm>

Nel suo trattato di orchestrazione, Berlioz discute la famosa scena dell'Orfeo di Gluck in cui il protagonista ottiene il permesso di varcare la soglia degli inferi incantando con il suo canto le creature infernali che stanno di guardia. Berlioz si sofferma sulle seguenti battute in cui i mostri infernali, non ancora del tutto convinti, sbarrano la strada ad Orfeo pronunciando dei perentori "No".

Raddoppiati da alcuni strumenti, gli spettri intonano un FA diesis mentre una seconda sezione strumentale esegue un SOL bemolle. Nel sistema equabile, FA diesis e SOL bemolle sono la stessa nota e dunque la loro presenza in partitura sarebbe un caso di banale sinonimia: due segni diversi che indicano lo stesso suono. Così però non è dal punto di vista dei temperamenti antichi nei quali FA diesis e SOL bemolle non sono lo stesso suono, anzi, se suonati insieme producono una terribile cacofonia. Berlioz, che 'pensa' la musica nel sistema quasi-equabile, liquida come idiozia i fiumi di inchiostro che - a suo avviso - alcuni commentatori, in particolare Rousseau, avrebbero sprecato per descrivere l'effetto di questa aspra dissonanza che per Berlioz – lo ripetiamo – non esiste trattandosi soltanto di una sinonimia.

Dans le célèbre Choeur de Dèmons de son Orphée, Gluck a établi une relation enharmonique entre deux parties, dans une tonalité indéterminée. Je veux parler du passage sur lequel Jean Jacques Rousseau et d'autres on écrit tant des folies, basées sur la différence qu'il croyaient trouver entre le Sol bémol et le Fa dièze... L'auditeur est profondément ému par un sentiment d'effroie grandiose, très musical. Il ne sait à la vérité quelle est la tonalité qu'il entend, est-ce Si bémol, est-ce sol mineur? Il l'ignore, peu lui importe; mais rien ne le blesse dans l'association des diverses parties instrumentales et vocales. Le Fa dièze du choeur et du seconde orchestre produit le prodigieux effect que nous connaissons à cause de la manière imprévue dont il est amené, de l'accent sauvage qui lui est propre dans cette indécision de la tonalité, et non point à cause de sa prétendue et monstreuse discordance avec le Sol bémol.⁵

Per Berlioz, l'origine dell'effetto infernale "*très musical*" non sta nell'urto – per lui inesistente - tra FA diesis e SOL bemolle ma altrove e precisamente nella indeterminatezza tonale implicita nell'accordo di settima diminuita (LA-DO-MI bemolle – FA diesis): un agglomerato dissonante che – come è noto – può risolversi su otto accordi diversi. Berlioz non comprende che chi è abituato a pensare la musica secondo un temperamento non equabile potrebbe onestamente interpretare il FA diesis il SOL bemolle presenti nella partitura di Gluck come una autentica volontà di produrre un aspro effetto enarmonico che – tra l'altro - non sarebbe nemmeno fuori luogo considerato il contesto infernale della scena. Il livore con cui Berlioz attacca il povero Rousseau è sintomatico di come l'assuefazione ad un certo tipo di sistema musicale impedisca di cogliere alcune sottigliezze della musica pensata all'interno di un altro sistema.

5 H. Berlioz, *Grand traité d'instrumentation et d'orchestration moderne*, Paris, Schonenberg, 1865, p.289

Conclusioni

Quale lezione possiamo trarre dalla vicenda storica del temperamento? Se volgiamo lo sguardo alla nostra contemporaneità, mi pare che una delle vicende culturali più interessanti capitate nella musica occidentale negli ultimi 30 anni sia stata la rivoluzione filologica che ha completamente rinnovato il modo di accostarsi, di interpretare e di presentare al pubblico la musica barocca e tardo-barocca. In questo contesto sembra del tutto ovvio che apprendere ed interiorizzare la questione dei temperamenti antichi sia destinato a diventare una tappa importante del cammino formativo di un musicista classico. Prima dell'imporsi del temperamento equabile, la musica si muoveva su un terreno assai complesso dal punto di vista dell'intonazione: intervalli perfetti o leggermente crescenti o calanti potevano trovarsi entro la medesima composizione. Tornando al violinista che cerca sul manico del violino la posizione giusta, si può fare un esempio ovvio: il Si bemolle pensato come sottodominante del Fa maggiore non è la stessa cosa del Si bemolle pensato come modale del Sol minore ed è ancora diverso dal Si bemolle pensato come dominante del Mi bemolle. Questa varietà di sfumature nell'intonazione non va pensata come difetto ma piuttosto come ricchezza di colore armonico. Prestare attenzione ai (micro) dettagli dell'intonazione al fine di ottenere un "bel suono", coerente con il repertorio, può essere altrettanto importante quanto altri parametri dell'esecuzione come l'articolazione, la dinamica e il fraseggio. Controllare intelligentemente l'intonazione richiede in primo luogo l'esercizio quotidiano dell'orecchio e quindi l'abilità intellettuale e culturale necessaria per cogliere certi dettagli armonici. Quel poco di discorso matematico che interviene nella questione del temperamento forse non è davvero necessario al musicista però, considerando che l'educazione dell'orecchio passa anche attraverso l'educazione della mente, quel poco di matematica - e in generale di formazione analitica che è il vero scopo dell'insegnamento scientifico - potrebbe rivelarsi una scorciatoia didattica per interiorizzare i dettagli dell'intonazione e trasformarli in risorsa espressiva e gesto interpretativo.

LA PROBABILITÀ: CAPIRE LA REALTÀ E PRENDERE DECISIONI MIGLIORI¹

LEONARDO GRILLI

Dipartimento di Statistica, Informatica, Applicazioni “G. Parenti”, Università di Firenze

1. Il ruolo del caso nella nostra vita: ignorarlo o comprenderlo?

L’atteggiamento ambiguo degli esseri umani di fronte al caso è ben descritto da Jeffrey Rosenthal [5]: “Gli esseri umani sono sempre stati affascinati e, contemporaneamente, terrorizzati dal caso. La verità è che, quando entra in gioco il caso, possiamo fuggire, ma non possiamo nasconderci. Moltissimi aspetti della nostra vita sono determinati da eventi che non controlliamo completamente, e l’incertezza è ineliminabile. Abbiamo due opzioni: possiamo lasciare che l’incertezza prevalga su di noi o possiamo imparare a comprendere il caso. Se optiamo per la seconda soluzione, faremo scelte migliori e impareremo a sfruttare la casualità per i nostri scopi.”

Lo strumento per la comprensione del caso è la probabilità. Il concetto di probabilità è tuttora oggetto di controversie sia tra i filosofi che tra i matematici e gli statistici. Una definizione molto generale, dovuta al matematico italiano Bruno De Finetti, afferma che la probabilità è il grado di fiducia che un individuo razionale attribuisce al verificarsi di un evento. Formalmente la probabilità di un evento E si indica con $P(E)$ ed è un numero compreso tra 0 (impossibile) e 1 (certo). In alternativa la probabilità può essere espressa in termini percentuali, variando quindi tra 0% (impossibile) e 100% (certo). Per assegnare un valore alla probabilità l’individuo razionale usa tutte le informazioni disponibili sulla struttura dell’esperimento e sulle sue precedenti realizzazioni. In alcune situazioni vi sono delle semplici regole per determinare il valore della probabilità: si tratta dell’approccio classico e di quello frequentista.

L’approccio classico si applica ad un esperimento aleatorio i cui risultati possibili sono in numero finito ed equiprobabili (= stessa probabilità). In questa situazione la probabilità di un evento è il rapporto tra il numero di casi favorevoli e il numero di casi possibili. Ad esempio, nel lancio di un dado la probabilità di ottenere un valore dispari è 0.5, dato dal rapporto tra i 3 casi favorevoli e i 6 casi possibili (assumendo che il dado sia bilanciato).

L’approccio frequentista si applica quando un esperimento aleatorio viene ripetuto con una serie di prove indipendenti e in identiche condizioni. In questa situazione la

¹ Lezione tenuta il 13.01.2014 presso il Liceo Scientifico “Copernico”, Prato; il 10.02.2014 presso il Liceo Classico Statale “Michelangiolo”, Firenze.

probabilità di un evento è calcolata come rapporto tra il numero di prove in cui si è verificato l'evento e il numero totale di prove (formalmente la probabilità in senso frequentista è definita come il limite a cui tende il suddetto rapporto quando il numero di prove tende a infinito). Ad esempio, supponiamo di lanciare un dado 50 volte ottenendo un valore dispari in 23 casi: la stima della probabilità è $23/50 = 0.46$. Se dopo 100 lanci i valori dispari osservati sono 49, la stima della probabilità viene aggiornata in $49/100 = 0.49$. La stima frequentista della probabilità è dunque variabile, ma al crescere del numero di prove si stabilizza attorno ad un valore (0.5 nell'esempio del dado, se questo è bilanciato).

2. Eventi indipendenti e la regola moltiplicativa

Due eventi sono indipendenti quando il verificarsi dell'uno non modifica la probabilità del verificarsi dell'altro. Ad esempio, consideriamo i seguenti eventi: E_1 = «indossare calzini a righe», E_2 = «arrivare tardi all'appuntamento con la fidanzata», E_3 = «litigare con la fidanzata». Verosimilmente E_1 è indipendente sia da E_2 che da E_3 , mentre E_2 non è indipendente da E_3 !

L'indipendenza è la condizione alla base della regola moltiplicativa $P(A \text{ e } B) = P(A) \cdot P(B)$. Infatti, la probabilità che due eventi possibili A e B si verifichino entrambi è uguale al prodotto delle singole probabilità se e solo se i due eventi sono indipendenti. Un errore comune consiste nell'applicare la regola moltiplicativa quando la condizione di indipendenza è palesemente violata.

I calcoli probabilistici errati di solito non hanno gravi conseguenze (se non un brutto voto all'esame di Statistica), ma a volte gli esiti sono drammatici, come nel caso giudiziario di Sally Clark. Nel 1999 una corte Britannica condannò Sally Clark per l'omicidio dei due suoi bambini morti improvvisamente all'età di 11 e 8 settimane per cause ignote. Non furono trovate prove dell'omicidio, né una valida motivazione. L'accusa sosteneva il soffocamento volontario, la difesa parlava di cause naturali, la cosiddetta sindrome della "morte in culla" (SIDS). La prova principale per la condanna di Sally Clark fu una stima probabilistica contenuta nella perizia di un pediatra, secondo cui la probabilità che si verifichino due casi di "morte in culla" è di circa 1 su 73 milioni. Questo valore è stato ottenuto in due passi: prima il pediatra ha esaminato i dati sulla sindrome della "morte in culla", osservando che colpisce un bambino ogni 8500, per cui la probabilità di un caso è stimata pari a $1/8500$; poi il pediatra ha calcolato la probabilità congiunta di due casi di "morte in culla" tramite la regola moltiplicativa, ottenendo l'impressionante stima di 1 su 73 milioni.

Come evidenziato dalla Royal Statistical Society, il calcolo del pediatra era completamente errato per vari motivi, fra cui il fatto che non vi erano le condizioni per applicare la regola moltiplicativa. Infatti, una seconda "morte in culla" non è indipendente dalla prima perché vi sono cause genetiche: in una famiglia in cui si è già verificato un caso, la probabilità che si verifichi un secondo caso è stimata in circa $1/100$ (si tratta è una probabilità condizionata). Pertanto, la probabilità congiunta di

due casi di “morte in culla” non è data da $1/8500$ $1/8500$, ma da $1/8500$ $1/100$, il cui risultato è $1/850000$. Un primo appello nel 2000 ha confermato la sentenza, ma un secondo appello nel 2003 ha assolto Sally Clark, rilasciata dopo tre anni di carcere. Questa esperienza ha segnato irrimediabilmente la donna, deceduta nel 2007. Il sito web www.sallyclark.org.uk riporta i dettagli di questa triste vicenda, nella speranza che il dibattito pubblico contribuisca ad evitare il ripetersi di errori così gravi.

3. Coincidenze e raggruppamenti casuali

Alcuni eventi appaiono sorprendenti perché intuitivamente riteniamo che abbiano una probabilità molto piccola. Tuttavia, se eseguiamo correttamente il calcolo, in molti casi scopriamo che la probabilità non è così piccola [2]. Ad esempio, nell'estrazione del gioco del Lotto del 24 dicembre 2013 il numero 57 è uscito, come primo estratto, sulle ruote di Bari e Milano – che coincidenza!

Per capire se si tratta davvero di un evento raro dobbiamo calcolare la sua probabilità. A questo punto ci rendiamo conto che la probabilità dipende dalla formulazione della domanda: spesso l'ambiguità sta proprio nel fatto che nella nostra mente la domanda non è espressa in modo preciso. Consideriamo tre formulazioni alternative:

- Formulazione n. 1 – Probabilità che esca il numero 57 come primo estratto sia a Bari che a Milano: $1/90 \cdot 1/90 = 1/8100 = 0.00012$;
- Formulazione n. 2 – Probabilità che esca lo stesso numero (non necessariamente il 57, può essere anche il 12 o il 63) come primo estratto sia a Bari che a Milano: $1/90 = 0.01111$;
- Formulazione n. 3 – Probabilità che, considerando tutte le 11 ruote, vi siano almeno due numeri primi estratti identici: $P(\text{almeno due numeri identici}) = 1 - P(\text{tutti numeri diversi}) = 1 - 90/90 \cdot 89/90 \cdot 88/90 \dots 80/90 = 10.5292 = 0.4708$.

L'ultimo calcolo mostra che non dovremmo sorprenderci quando osserviamo due numeri primi estratti identici perché questo accade quasi una volta ogni due estrazioni!

Un caso particolarmente interessante di coincidenze ingannevoli è quello dei raggruppamenti casuali. Il tema è introdotto da Carlo Rovelli [4] con l'esempio dei chicchi di riso lanciati sul pavimento: anche se il riso viene lanciato a caso, i chicchi non si distribuiscono uniformemente perché si osserva che alcune mattonelle risultano vuote, mentre su altre finiscono molti chicchi. L'esperimento del riso si può effettuare in modo virtuale tramite un foglio di calcolo elettronico: ad esempio, possiamo disegnare un quadrato di lato unitario (pavimento) suddiviso in 16 quadratini (mattonelle) e generare in modo casuale le coordinate di 16 punti (chicchi di riso). Per generare le coordinate si può usare la distribuzione uniforme tra 0 e 1 della funzione CASUALE() sia per la x che per la y . Siccome la superficie è divisa in 16 quadratini, ci aspettiamo in media 1 punto per quadratino, ma non è quello che accade. La figura a sinistra mostra il risultato di una estrazione casuale delle coordinate di 16 punti.

A fronte di un numero atteso di 1 punto per quadratino, osserviamo che la distribuzione dei punti è molto variabile: vi sono molti quadratini con 0 punti, mentre un quadratino ha addirittura 6 punti, con un rapporto osservati su attesi di 6 a 1. In questo esperimento abbiamo generato i punti casualmente e quindi sappiamo che quel rapporto così elevato è solo frutto del caso, ma studiando dati reali potremmo concludere che il quadratino con rapporto 6 a 1 ha una concentrazione anomala di punti. Nei dati reali i quadratini sono aree geografiche e i punti rappresentano eventi registrati in certo intervallo di tempo, ad es. casi di tumore, incidenti stradali, omicidi ... allora il quadratino con rapporto 6 a 1 potrebbe generare un inutile allarme. È compito degli statistici valutare, di volta in volta, se un elevato rapporto osservati su attesi è spiegabile da un raggruppamento casuale oppure se è così grande da indicare una situazione anomala e far scattare l'allarme.

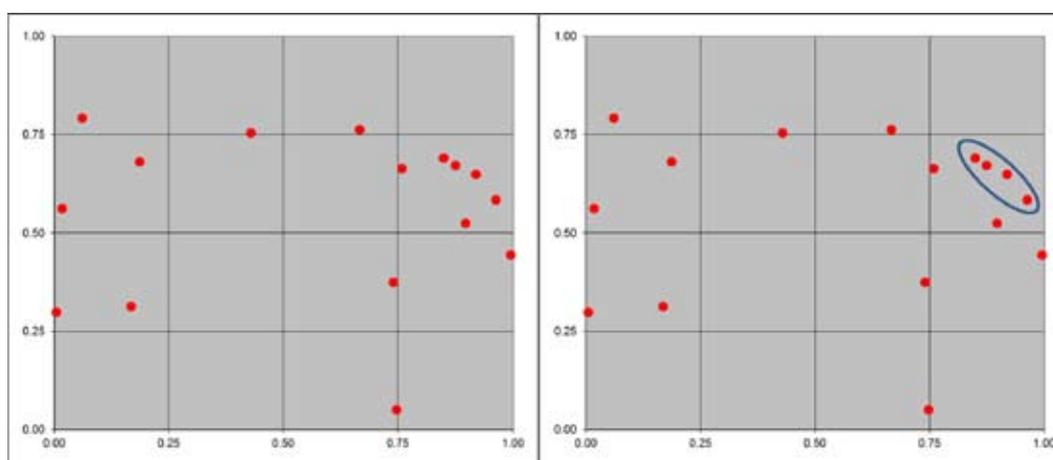


Figura 1

Un raggruppamento casuale genera un rapporto osservati su attesi ancora più impressionante se l'area di riferimento viene definita a posteriori, disegnandola attorno al gruppo di punti. Si tratta del cosiddetto effetto cecchino, a ricordo della storiella di quel tipo bizzarro che per mostrare la sua abilità di tiratore sparava un colpo a caso e poi disegnava il bersaglio intorno al foro. Ad esempio, la figura a destra mostra un'ellisse che racchiude 4 punti ed ha un'area pari a circa $1/5$ di quadratino, per cui il rapporto osservati su attesi è $4/(1/5) = 20$, dunque 20 a 1 – davvero impressionante!

Leonard Mlodinow [3] riporta l'opinione di alcuni esperti a proposito delle conseguenze dei raggruppamenti casuali sulle politiche di sanità pubblica. Raymond Richard Neutra (Dipartimento della sanità della California) afferma che prendendo in esame un tipico registro dei tumori (una banca dati sui tassi di incidenza locali di dozzine di tumori diversi) per i 5000 distretti della California, ci attendiamo di trovarne 2750 con un'incidenza elevata di qualche forma di tumore, statisticamente significativa ma casuale. L'opinione pubblica è molto allarmata da queste situazioni di incidenza elevata e non ritiene verosimile che siano frutto del caso, per cui i diparti-

menti di sanità sono indotti ad avviare costose indagini sulle possibili cause ambientali (es. inquinamento atmosferico, elettromagnetico etc.) che di solito non portano ad alcun risultato convincente. Alan Bender (Dipartimento della sanità del Minnesota) è convinto che queste indagini siano “un assoluto, totale e completo spreco dei dollari dei contribuenti”.

4. Probabilità a priori e a posteriori: come valutare il risultato un test diagnostico?

La probabilità che ognuno di noi assegna ad un evento dipende dalle informazioni a disposizione. Raccogliere informazioni attendibili consente di rendere più precisa la stima della probabilità: ad esempio, di fronte a certi sintomi il medico stima (di solito in modo inconscio) la probabilità che il paziente abbia una certa patologia e poi prescrive un test diagnostico (esame del sangue, radiografia etc.) per “raffinare” la stima iniziale. Si consideri che i test diagnostici sono fallibili, cioè non forniscono risultati sicuri, per cui anche dopo l’esito del test il medico assegna una probabilità che in genere è diversa sia da 0 che da 1. La probabilità prima del test diagnostico viene detta a priori, mentre quella successiva viene detta a posteriori. Come si passa dall’una all’altra?

Consideriamo una ipotetica malattia chiamata Stupidite che colpisce il 10% della popolazione (in termini medici questo 10% è detto prevalenza). Prendiamo una persona a caso dalla popolazione. Se non conosciamo l’esito del test diagnostico, la probabilità che abbia la malattia è detta a probabilità a priori e coincide con la prevalenza, in questo caso 10%.

Supponiamo di fare la diagnosi usando il test di laboratorio StupiTest. Come tutti i test diagnostici, lo StupiTest è utile ma non è perfetto: infatti, il test viene positivo (cioè, indica presenza di malattia) nel 70% dei soggetti malati (sensibilità del test) e nel 20% dei soggetti sani (percentuale di falsi positivi).

Sappiamo che Tizio ha effettuato il test, ottenendo un esito positivo: qual è la probabilità che Tizio sia davvero affetto da Stupidite? Dobbiamo calcolare la probabilità a posteriori. Prendiamo una persona a caso dalla popolazione. Se sappiamo che ha effettuato il test ed è risultato positivo, la probabilità che abbia la malattia è detta a probabilità a posteriori. Quanto vale la probabilità a posteriori? In questa situazione ipotetica, siccome il test è risultato positivo, la probabilità a posteriori deve essere maggiore di quella a priori (10%). È forse uguale alla sensibilità del test (70%)? La risposta si ottiene con la famosa formula di Bayes oppure con il metodo delle frequenze, cioè convertendo le probabilità in frequenze di una ipotetica popolazione – vediamo come si applica questo metodo. Ricapitoliamo:

- i soggetti malati sono il 10%;
- tra i malati, il test viene positivo nel 70% dei casi;
- tra i sani, il test viene positivo nel 20% dei casi.

Cosa ci aspettiamo sottoponendo al test 100 soggetti?

- 10 sono malati e 90 sono sani;
- tra i 10 malati, il test viene positivo a 7 soggetti;
- tra i 90 sani, il test viene positivo a 18 soggetti.

La situazione è illustrata dalla seguente matrice le cui 100 celle rappresentano i soggetti; le 10 celle con la lettera 'm' rappresentano i soggetti malati, mentre le 25 celle scure rappresentano i soggetti per i quali il test viene positivo (si noti che, per rappresentare le caratteristiche del test, le celle scure sono 7 tra le 10 con la lettera 'm' e 18 tra le altre 90).

m	m	m	m	m	m	m	m	m	m		

Figura 2

Con questa impostazione la soluzione è semplice: infatti, il test viene positivo a 25 soggetti, di cui 7 malati e 18 sani, quindi se prendiamo un soggetto a caso tra i 25 che hanno effettuato il test con risultato positivo, la probabilità che sia malato è $7/25 = 28\%$ – questa è la probabilità a posteriori, un valore intermedio tra la probabilità a priori (10%) e la sensibilità del test (70%).

Lo psicologo cognitivo G. Gigerenzer [1] ritiene che il metodo appena illustrato, basato sulle frequenze di una ipotetica popolazione, sia più facile da apprendere rispetto alla formula di Bayes e che quindi debba essere impiegato come strumento didattico per colmare la diffusa incapacità di calcolare correttamente i rischi, che riguarda perfino i professionisti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Gigerenzer, G., Quando i numeri ingannano. Imparare a vivere con l'incertezza. R. Cortina, 2003.
- [2] Hand, D., Il caso non esiste: Perché le cose più incredibili accadono tutti i giorni. Rizzoli, 2014.
- [3] Mlodinow, L., La passeggiata dell'ubriaco. Le leggi scientifiche del caso. Rizzoli, 2009.
- [4] Rovelli, C., Sì, no, anzi: probabilmente. Il Sole 24 ore del 20 gennaio 2013. Sito web: <http://foglianuova.wordpress.com/2013/01/20/carlo-rovelli-si-no-anzi-probabilmente>.
- [5] Rosenthal, J.S., Le regole del caso: istruzioni per l'uso. Longanesi, 2006.

IL BENESSERE INIZIA A TAVOLA: LA NUTRACEUTICA¹

LAURA PUCCI

CNR Pisa

Ottimizzare lo stile di vita rappresenta l'obiettivo primario per conseguire e mantenere un buono stato di salute. Insieme all'esercizio fisico, l'alimentazione è uno dei fattori che maggiormente incidono sulla qualità della vita e sulle condizioni psico-fisiche di ciascun individuo.

Gli effetti preventivi e terapeutici di un'alimentazione corretta sono stati ampiamente dimostrati sia nell'ambito delle malattie dismetaboliche che tumorali e neurodegenerative.

Le più recenti ricerche hanno portato a maggiori conoscenze rispetto a quanto compreso solo un paio di decenni fa quando l'analisi degli alimenti era limitata al valore nutrizionale; ora vi è una crescente evidenza che alcune componenti degli alimenti possono svolgere un ruolo chiave non solo dal punto di vista energetico e nutrizionale ma anche funzionale.

In questo contesto si fa strada una nuova scienza, la nutraceutica, disciplina nata dalla fusione dei termini "nutrizione" e "farmaceutica", che focalizza l'attenzione sul riconoscimento dei principi attivi presenti negli alimenti, capaci di prevenire o rallentare il decorso di svariate patologie.

Questa scienza indaga le proprietà salutistiche di un insieme di componenti di origine naturale e i meccanismi alla base di tali proprietà; l'ampio consenso nei confronti della nutraceutica nell'ambito della prevenzione è dovuto all'utilizzo di sostanze naturali, percepite come non invasive e prive di effetti collaterali.

È essenziale precisare che il trattamento con i nutraceutici non va inteso come sostitutivo al farmaco ma, in associazione ad una terapia farmacologica, può risultare un'ottima strategia dal punto di vista medico per prevenire patologie metaboliche, tumorali e neurodegenerative.

Quindi, dopo un rapido *excursus* dei principali macronutrienti presenti nella dieta quali proteine, carboidrati e grassi, abbiamo focalizzato l'attenzione sui micronutrienti, presenti negli alimenti funzionali, fonte essenziale di principi bioattivi utili per la salute.

Innanzitutto è stato importante sottolineare che un alimento può essere considerato "alimento funzionale" se e solo se evidenze scientifiche dimostrano in modo inequivocabile i suoi effetti positivi su una o più funzioni specifiche dell'organismo.

¹ Lezione tenuta mercoledì 27 novembre 2013, ore 11, ITAS Monna Agnese, Via del Poggio n. 16, Siena; mercoledì 4 dicembre 2013, ore 11, Liceo Scientifico F. Enriques, Via della Bassata nn. 19-21, Livorno

Pertanto, abbiamo analizzato insieme i meccanismi d'azione di alimenti o loro componenti dando particolare risalto alle dimostrazioni scientifiche ad oggi presenti in letteratura.

Abbiamo inoltre messo in evidenza differenze oramai note tra componenti estratte ed utilizzate singolarmente, rispetto alle componenti presenti nell'alimento che spesso agiscono in sinergia tra loro.

La soia, il tè verde, i fitosteroli ed altri nutraceutici si sono dimostrati in grado di inibire la sintesi o di indurre la degradazione del colesterolo, supportando quindi la loro possibile indicazione quali nutraceutici ipolipemizzanti.

Numerose sostanze presenti negli alimenti sono ad oggi considerate ottimi antiossidanti; tra questi i polifenoli presenti nel vino rosso e i flavonoidi dei quali è ricco il cioccolato fondente.

Anche i carotenoidi, pigmenti liposolubili, precursori della vitamina A (retinolo) presenti in verdure quali carote, peperoni e pomodori hanno mostrato un'elevata attività antiossidante nell'organismo.

Insieme alle tecniche di laboratorio che ci consentono di valutarne il reale potere antiossidante *in vitro* ed *in vivo*, abbiamo valutato i principali studi clinici che hanno confermato o confutato l'azione nutraceutica delle sostanze in oggetto.

In conclusione sono stati evidenziati i parametri che influenzano la capacità antiossidante degli alimenti: tipologia di coltivazione (convenzionale e biologica), freschezza dell'alimento, modalità di cottura, associazioni alimentari e stagionalità. L'utilizzo nella dieta di verdure di stagione e fresche, quindi prodotte a livello locale, aiuta, oltre che la nostra salute, l'ambiente e l'economia, e questo si traduce in un ulteriore vantaggio per l'uomo.

POLLINE, ATOMI, WALL STREET: L'IMPREVEDIBILE VIAGGIO DEL MOTO BROWNIANO¹

ROBERTO RENÒ

Università degli Studi di Siena

La storia del moto browniano è una delle più affascinanti della storia della scienza. La sua invenzione coinvolge tutte le discipline che fanno uso della matematica come lo strumento formale più adatto a capire e interpretare la realtà, facendo seguito alla ben nota intuizione galileiana. Il viaggio affrontato dalla lezione è imprevedibile ed erratico, proprio come quello del moto browniano stesso, e spazia dalla botanica alla fisica, dalla teoria delle probabilità all'economia e alla finanza. I contenuti multimediali legati alla lezione sono visualizzabili al link <http://prezi.com/x5hmcpvyhsee/>

1. Perdersi in un bicchier d'acqua

La storia del moto browniano comincia con gli studi di Robert Brown, un botanico scozzese che nei primi decenni del 1800 osservò con il suo microscopio (formato da un'unica lente: praticamente una lente di ingrandimento) il movimento di granelli di polline e vario materiale inorganico in acqua. L'osservazione del polline non riservò alcuna sorpresa. Per poter osservare il moto browniano, infatti, occorrono oggetti di dimensioni paragonabili a quelle molecolari. Un granello di polline ha un diametro di circa 50 micron, decisamente troppo grande rispetto ad un atomo, le cui dimensioni sono di un decimillesimo di micron circa. Tuttavia, Brown notò due tipi di corpuscoli, uno di forma oblunga e uno di forma sferica (del raggio di 2-3 micron, quindi molto più piccoli e leggeri), che fuoriuscivano dal granello polline e che si muovevano in maniera assolutamente irregolare, e per lui sbalorditiva. Tale movimento appariva come un moto continuo che si rivolgeva, casualmente, in tutte le direzioni, nella forma di vibrazioni erratiche. In teoria, tali corpuscoli erano soggetti unicamente alla forza di gravità (che li attira verso il basso) e alla resistenza dell'acqua (che ne rallenta il moto). Come facevano quindi a muoversi in ogni direzione? Inizialmente Brown aveva pensato ad un fenomeno organico, come la riproduzione, come possibile causa di quel movimento; ma l'osservazione dello stesso movimento in minuscoli granelli di polvere e altro materiale inorganico aveva escluso questa affascinante possibilità, che l'aveva portato a congetturare che questi corpuscoli fossero presenti in tutta la materia organica.

¹ Lezione tenuta all'Istituto Statale Superiore Russell-Newton di Scandicci (FI) il 31 gennaio 2014 alle ore 11.00.

Nel corso della sua vita, Brown non riuscì mai a capire il motivo di quel movimento: per dirla con le sue parole, lo spostamento dei corpuscoli erano “*motions for which I am unable to account*”, cioè “movimenti che non sono capace di spiegare”. Tuttavia, tali movimenti presero e conservano tutt’ora il nome di “moti browniani”.

2. Gli atomi

Il motivo per cui corpi minuscoli, delle dimensioni dell’ordine del micron, si muovono in tutte le direzioni è perché essi sono abbastanza piccoli (e abbastanza leggeri) per subire l’impatto delle molecole di acqua, grandi “solo” 5000 volte di meno. Se una molecola d’acqua colpisce il corpuscolo in basso, esso si sposterà verso l’alto; se lo colpisce a sinistra, esso si muoverà verso destra. Ciascuno di questi “spostamenti” è minuscolo, ma di molecole d’acqua ce ne sono tante, quindi il loro impatto complessivo non è trascurabile. Poiché le molecole d’acqua si muovono in tutte le direzioni, ecco che i corpuscoli si muoveranno anch’essi in tutte le direzioni, in maniera del tutto casuale. Questa spiegazione, per noi abbastanza ovvia, non poteva essere compresa da Brown per il semplice motivo che egli non era consapevole che l’acqua fosse fatta di molecole! All’epoca di Brown, infatti, gli atomi erano ancora una possibile ipotesi teorica sulla composizione della materia, e nemmeno universalmente condivisa: tutte le evidenze sulla loro esistenza erano indirette. Le prime evidenze sperimentali dirette dell’esistenza degli atomi risalgono ai primi anni del 1900, grazie all’invenzione dell’ultramicroscopio nel 1903, e l’esistenza degli atomi è diventata accettata unanimemente solo a partire dal 1910, proprio in seguito agli studi di un fisico francese, Jean Perrin sul... moto browniano (questa volta di pigmenti in una soluzione colloidale). Jean Perrin usò per i suoi calcoli la teoria sul moto Browniano elaborata da Albert Einstein, in uno dei suoi articoli fondamentali del 1905, il cosiddetto *Annus Mirabilis* (gli altri comprendevano l’effetto fotoelettrico, per il quale Einstein fu insignito del premio Nobel nel 1921, e la relatività ristretta). È piuttosto sorprendente rendersi conto che un aspetto che a noi appare scontato, come la teoria atomistica della natura, si sia in realtà palesato in tutta la sua completezza appena 100 anni fa.

3. L’allievo sfortunato

Negli stessi anni in cui i fisici si avventurano nel mondo delle particelle atomiche (dopo averne finalmente appurato l’esistenza), scrive la sua tesi di dottorato uno studente del matematico francese Henri Poincaré, Louis Bachelier. La tesi è del tutto originale per l’epoca: Bachelier vuole capire il movimento dei prezzi delle azioni alla Borsa di Parigi. Per scrivere la sua tesi, “Teoria della speculazione”, si reca alla Borsa personalmente, registra nel suo taccuino i prezzi delle azioni, e fa una scoperta sensazionale. Per dirla con le sue parole,

Les influences qui déterminent les mouvements de la Bourse sont innombrables, des événements passés, actuels ou même escomptables, ne présentant souvent aucun rapport apparent avec ses variations, se répercutent sur son cours. (...) La détermination de ces mouvements se subordonne à nombre infini de facteurs: il est des lors impossible d’en espérer la prévision mathématique.

[I motivi che determinano i movimenti della Borsa sono innumerevoli, e taluni avvenimenti passati, contemporanei ma anche futuri, che non presentano alcun rapporto evidente con i movimenti stessi, si ripercuotono su di essi (...) La determinazione di questi movimenti è subordinata a un numero infinito di fattori: è impossibile quindi prevederli matematicamente]

Ci ricorda qualcosa? Un numero infinito di fattori (le molecole d'acqua) che influenzano il movimento dei prezzi (i corpuscoli), i quali si muovono in forme bizzarre e casuali, che si riproducono in un ordine non prevedibile. Altro non è che il moto browniano. E infatti nella sua tesi di dottorato Louis Bachelier getta le basi per la formulazione *matematica* del moto browniano, che oggi rappresenta la base per lo studio dei titoli finanziari (torneremo su questo in seguito). La "scoperta" di Bachelier era sensazionale anche perché l'idea che i movimenti dei prezzi seguissero le leggi della probabilità, e fossero quindi intrinsecamente imprevedibili, era piuttosto blasfema all'epoca (e appare abbastanza stravagante anche oggi). In realtà Bachelier aveva perfettamente ragione. La sua ipotesi di imprevedibilità dei corsi azionari è diventata una fortunatissima teoria economica, la teoria dell'*efficienza informativa* dei mercati finanziari, sviluppata dagli economisti dell'Università di Chicago intorno agli anni '70: il progenitore è considerato Eugene Fama, che nel 2013 ha ricevuto il premio Nobel per l'economia proprio per questa "scoperta". Pur se aspramente criticata, tale teoria, per lo meno nella forma basilare intuata da Bachelier, mantiene una formidabile validità empirica ed è con ogni probabilità la teoria economica verificata con maggior precisione sui dati. La teoria, nella sua forma cosiddetta *debole*, afferma che è impossibile prevedere i prezzi dei titoli azionari basandosi sull'andamento dei prezzi nel passato. Una quantità vastissima di studi empirici ha pienamente confermato questa tesi.

Se i prezzi non si possono prevedere, a cosa serve allora tutta la matematica che si utilizza oggi in finanza? Essa serve a fornire modelli precisi per la valutazione dei titoli e per l'analisi della loro rischiosità. Considerazioni analoghe a quelle di Bachelier hanno pure fruttato il premio Nobel per l'economia del 1997 a Robert Merton e a Myron Scholes, due economisti che hanno utilizzato la teoria della probabilità per valutare le opzioni finanziarie e il rischio di credito, con un approccio pionieristico al momento dalla sua proposizione (risalente agli anni 70) ma di immediato e duraturo successo, tanto da rappresentare ancora oggi il caposaldo della finanza quantitativa. Il premio sarebbe anche stato assegnato a Fisher Black, se questi non fosse deceduto anzitempo. Le motivazioni del Nobel citano lo stesso Bachelier come un precursore dell'idea di base.

Purtroppo per lui, Bachelier ebbe la sfortuna di nascere troppo presto: le sue idee non erano pronte per l'epoca in cui viveva, e lui non possedeva la forza accademica e il rigore di un Poincaré, di un Einstein o di un Samuelson per plasmare la disciplina economica, che agli inizi del secolo era ancora in una fase primordiale della sua esistenza. La sua vita fu oscura e anonima, ignorata dalla comunità accademica fino alla riscoperta dei nostri giorni, decenni dopo la sua morte.

4. La matematica come linguaggio della natura

Il Moto browniano è oggi soprattutto uno strumento matematico nell'ambito della teoria delle probabilità. Tale strumento ha molti sinonimi: passeggiata aleatoria, rumore bianco o processo di Wiener. Tale teoria matematica si applica ai movimenti di oggetti che ricevono spinte casuali e isotrope, e quindi ad un gran numero di discipline. Abbiamo già citato la diffusione dei pollini in acqua, e i prezzi dei titoli finanziari; ma anche la diffusione del calore, delle popolazioni di animali, dei batteri, di una malattia, del suono o della luce sono modellate con lo stesso strumento. È questa una delle caratteristiche fondamentali della matematica, cioè la capacità di unificare fenomeni apparentemente diversi, secondo la popolarissima intuizione Galileana:

La filosofia naturale è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi agli occhi, io dico l'universo, ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua e conoscer i caratteri nei quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro labirinto. Ne "Il Saggiatore".

L'utilizzo della teoria della probabilità nella scienza è oggi diffusissimo; non è stupefacente quindi che "triangoli" e "cerchi" non bastino più. La teoria degli atomi si spostò quasi subito nel campo della probabilità: oggi accettiamo come un fatto naturale che non si possa conoscere la posizione di un elettrone in un atomo, ma solo la probabilità che esso si trovi in un certo luogo. Il moto browniano è uno dei "triangoli" o "cerchi" galileiani dei giorni nostri, cioè un oggetto fondamentale di grande potenza che viene utilizzato per descrivere i fenomeni naturali più disparati. Pur se più sofisticata di quella di Galileo, la matematica offre comunque un aspetto unificante nel "libro" della natura, e per questo motivo non smette di affascinare gli scienziati di ogni epoca. Forse anche perché la matematica, oltre a essere utile, è anche esteticamente ed intellettualmente appagante.

IL CASO E LA NECESSITÀ¹

FRANCESCO ROMANI

Dipartimento di Informatica, Università di Pisa

1. Causalità, casualità, e pseudo-casualità

Dio non gioca a dadi con l'universo, Egli è sottile ma non malizioso
(A. Einstein).

Il gioco del biliardo è un gioco di precisione. Conoscendo esattamente l'intensità e la direzione del tiro, il movimento di tutte le palle *potrebbe* essere calcolato esattamente utilizzando le leggi della dinamica; il condizionale *corsivo* è da intendere "a meno degli inevitabili errori di misura e di calcolo". Il gioco della roulette è un gioco di azzardo puro. A gioco corretto, il risultato di ogni lancio è completamente imprevedibile e la probabilità di uscita di ognuno dei 37 numeri è esattamente $1/37$.

Sia il biliardo che la roulette sono dispositivi meccanici, obbediscono alle stesse leggi fisiche, e in entrambi vi è l'intervento manuale di un operatore (il giocatore o il croupier). La differenza è che nel biliardo tutto è fatto per minimizzare gli effetti del caso: la superficie del tavolo è piana e orizzontale, il panno è liscio e le palle sono pesanti, rotonde e pulite. Nella roulette invece tutto massimizza gli effetti del caso: il piatto ruota e le losanghe servono a far rimbalzare la leggera pallina in modo imprevedibile.

Nella realtà, al livello macroscopico che cade sotto i nostri sensi, il caso è spesso un velo che impedisce una conoscenza deterministica; nella fisica classica gli approcci statistici sono una scorciatoia potentissima adottata quando le variabili in gioco sono troppe e non si conoscono le condizioni iniziali. In questo senso, una sequenza di numeri generati da una macchina usata per le estrazioni del Lotto e delle lotterie potrebbe essere prevista in via teorica se si conoscesse tutto il conoscibile sulla macchina e sulla posizione iniziale delle palline, ma in pratica il risultato è completamente imprevedibile ed è comunemente considerato casuale.

Nella meccanica quantistica, invece, l'approccio probabilistico è inevitabile e ogni tentativo di farne a meno è finora fallito. Era questo che dava fastidio ad Albert Einstein, che la considerò fino all'ultimo una teoria "incompleta". Una sequenza di numeri generata da un rivelatore di fenomeni microscopici come, ad esempio, le emissioni radioattive, è casuale anche da un punto di vista puramente teorico.

¹ Lezione tenuta martedì 28 gennaio 2014, ore 11- Liceo Scientifico Barsanti e Matteucci, Via IV Novembre n. 151, Viareggio (LU)

Una sequenza di numeri è pseudo-casuale se è facilmente generabile con un programma e gode delle stesse proprietà statistiche di una sequenza casuale.

Questi sono, ad esempio, veri numeri del Lotto:

29 52 31 80 7 18 44 29 50 1 29 21 46 84 13 87 48 28 78 4 32 34 24 83 41 1 81 2 36
68 13 62 44 55 12 56 65 2 5 81 64 14 54 83 53 81 43 87 37 45 18 50 85 3 42 45 15
25 74 23 90 59 46 30 52 51 9 89 54 36 34 19 60 84 17 89 58 84 11 32 15 30 83 82
3 12 89 54 66 86 58 1 21 19 59 2 39 70 72 66 12 62 51 88 30 83 84 38 78 59 70 15
50 59 10 64 7 53 30 85 73 52 3 89 76 86 48 53 57 18 2 25 13 74 36 63 50 1 26 75
5 66 17 22 21 60 81 87 42 24 43 79 15 38 90

Questi, invece, sono numeri pseudo-casuali generati al computer:

74 75 2 27 28 2 7 60 73 41 3 60 22 41 68 19 64 47 13 2 76 3 41 49 63 85 73 65 37
42 23 27 3 55 36 46 87 29 78 90 52 65 82 30 58 65 22 4 84 89 2 10 6 28 26 69 24
37 68 56 63 32 37 22 57 45 81 42 86 70 46 55 35 56 75 65 82 68 30 37 81 39 63 46
71 42 53 44 90 72 39 7 75 26 16 39 32 49 12 37 46 50 53 85 75 22 83 48 90 47 43
12 33 62 16 69 82 14 58 22 57 85 59 38 8 72 20 4 73 60 30 26 29 39 62 78 16 63
13 59 62 21 47 58 17 20 86 3 65 69 22 44 13 75

La differenza tra le due sequenze sta nel fatto che non esiste alcun programma che possa generare la prima, a parte quello che la memorizza tutta e poi la stampa, mentre la seconda invece è prodotta da un programma abbastanza corto. In altre parole, per trasmettere a un amico un miliardo di numeri della prima sequenza io dovrei fare un miliardo di estrazioni, annotarne i risultati e spedire un file enorme, mentre nel secondo caso posso trasmettere solo un piccolo programma e il mio amico può calcolarsi quanti numeri vuole della seconda sequenza. A parte questa profonda differenza sulla possibilità di generarle, a posteriori le due sequenze sono *algoritmicamente indistinguibili*, nel senso che non esiste alcun procedimento che permetta di dire quale delle due è veramente casuale.

2. Il Lotto (ovvero *la madre dei fessi è sempre incinta*)

Il gioco del Lotto e le lotterie sono stati introdotti per migliorare le finanze statali, non solo in Italia e non solo in tempi recenti: anche Giacomo Casanova organizzò lotterie per il Re di Francia. Una semplice analisi del regolamento mostra che il Lotto è un gioco non equilibrato in cui il banco (lo Stato) guadagna sempre. Anche la Roulette è un gioco non equilibrato, per la presenza dello zero, ma in confronto giocare al Lotto è molto più svantaggioso. L'unico modo *razionale* (sic!) per vincere al Lotto è aspettare che la buonanima di un parente defunto ci appaia in sogno e ci dia qualche numero buono.

È abbastanza diffusa l'ingenua credenza che lo studio dei risultati passati possa portare qualche informazione sui risultati futuri e in particolare che una strategia di gioco basata sui ritardi abbia qualche speranza di guadagno. Purtroppo, una semplice analisi della tecnologia fisica con cui sono effettuate le estrazioni mostra senza ombra di dubbio che, imbrogli a parte, le estrazioni sono indipendenti e che quindi

in nessun modo il passato può influenzare il futuro. Tutte le strategie di gioco hanno la stessa speranza di vincita qualunque sia il numero giocato (non fa differenza giocare sempre gli stessi numeri o cambiarli ogni volta). Questo è banalmente ovvio, se si pensa che i numeri sono solo nomi accidentali e che il gioco è invariante per permutazione. In altre parole, le proprietà meccaniche e statistiche del gioco non dipendono (né potrebbero dipendere in alcun modo) dai numeri scritti sui foglietti all'interno delle palline.

3. La legge dei grandi numeri e il Teorema centrale dei limiti

Consideriamo una sequenza illimitata di variabili casuali indipendenti, tutte con la stessa distribuzione, in particolare con la stessa media μ e la stessa varianza σ^2 . Un semplice esempio è dato da una serie di lanci di monete “non truccate” a cui si attribuisce il valore 0 se esce *testa* e il valore 1 se esce *croce*. La *Legge debole dei grandi numeri* (LDGN) è un teorema di Calcolo delle Probabilità che afferma che il valore medio di n estrazioni tende al valore atteso μ . Più precisamente, per qualunque $\varepsilon > 0$ prefissato piccolo a piacere, se si indica con S_n la somma dei primi n risultati (nell'esempio di cui sopra il numero delle croci su n lanci), allora:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \Pr\left(\frac{S_n}{n} - \mu < \varepsilon\right) = 1$$

Applicato al Lotto, ciò significa che il rapporto tra le uscite e le estrazioni di ogni numero tende a $5/90 = 1/18$ quando il numero delle estrazioni tende all'infinito.

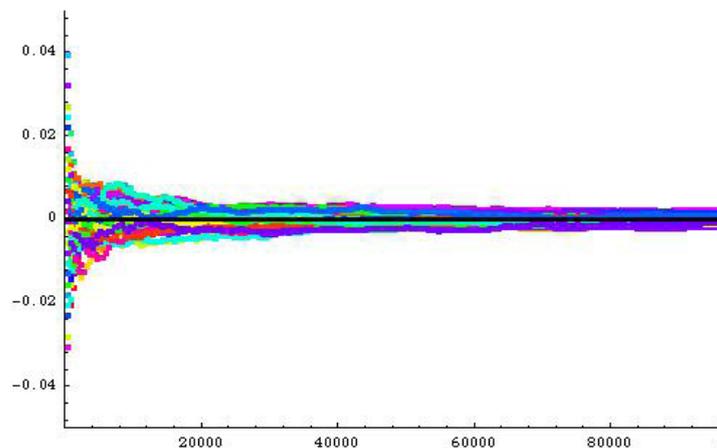


Figura 1. Differenza tra il rapporto uscite/estrazioni e la media teorica $1/18$ per i 90 numeri del lotto su 200000 estrazioni. Secondo la LDGN, il valore tende a zero al crescere di n

Molti (con superficialità, ignoranza o malafede) sostengono che la LDGN implichi che al crescere del numero delle estrazioni il numero delle teste tende a pareggiare il numero delle croci e si appellano quindi a una qualche legge empirica che favorisca le uscite meno frequenti in passato. Ciò non è affatto vero, la LDGN non afferma che lo scarto $S_n - \mu n$ tende a zero per n che tende all'infinito. Per avere qualche informazione sul comportamento dello scarto bisogna scomodare un teorema più complesso, dal nome

ambiguo: il *Central Limit Theorem*² (CLT). In base al CLT con la stessa notazione di cui sopra si può affermare che per ogni x reale vale:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \Pr(S_n - \mu n \leq x\sigma\sqrt{n}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt$$

Il termine al secondo membro è praticamente 1 per $x > 3$, quindi, il numero di uscite effettivo si avvicina al numero di uscite teorico con un errore che va come la radice di n . In altre parole (e meno rigorosamente) si può dire che la grandezza $\frac{S_n - \mu n}{\sigma\sqrt{n}}$ tende a una gaussiana di media 0 e varianza 1. Lo scarto, quindi, può andare all'infinito (sorpresa!) ma non più velocemente della radice di n , e quest'ultimo fatto permette di ricavare facilmente la LDGN in quanto $\frac{\sqrt{n}}{n}$ tende a zero per n che tende all'infinito.

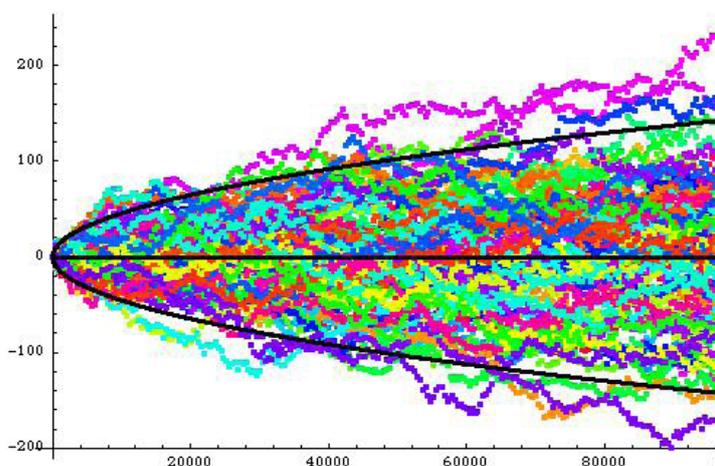


Figura 2. Differenza tra il numero delle uscite e il valore atteso $n/18$ per i 90 numeri del lotto su 200000 estrazioni. Secondo il CLT, il valore può crescere come la radice di n . Questa figura mostra in modo evidente l'assurdità delle farneticazioni dei ritardisti: chi usa la Legge dei Grandi Numeri per giustificare la teoria dei ritardi è un ignorante oppure un truffatore

4. Entropia e bit

In Termodinamica l'**entropia** rappresenta una misura del disordine di un sistema e costituisce uno dei concetti fondamentali della fisica. Se un sistema riceve una quantità di calore Δq a una temperatura assoluta T , questo causa un aumento $\Delta S = \Delta q/T$ dell'entropia del sistema. Il *Secondo Principio della Termodinamica* afferma informalmente che

In un sistema isolato l'entropia non può diminuire.

Si può dare anche una formulazione statistica dell'entropia:

In un sistema le cui componenti hanno distribuzione di energia w_n vale:

2 L'inglese *Central Limit Theorem* si può tradurre sia *Teorema centrale dei limiti* che *Teorema del limite centrale*, ma il nome è stato introdotto, in tedesco, da Georg Pólya nel 1920 nel lavoro *Über den zentralen Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitsrechnung und das Momentenproblem* e questa citazione risolve senza dubbi l'ambiguità linguistica.

$$S = - \sum_n w_n \log w_n$$

La definizione statistica formalizza quello che è il vero concetto che sta dietro l'entropia. Se ho due cestini vuoti e li riempio di palline lanciando ogni volta una moneta per scegliere il cestino da riempire è estremamente improbabile che dopo migliaia di lanci un cesto sia vuoto e l'altro pieno. Se al posto delle palline metto molecole di gas, anche se il loro moto è casuale è praticamente impossibile che tutte quante si concentrino in angolo della stanza in cui mi trovo lasciandomi morire asfissiato. È con considerazioni simili che si dimostra che le leggi della Fisica Statistica, per n molto grande, producono le leggi deterministiche della Termodinamica classica.

In Informatica, l'incertezza nel risultato di un esperimento con un numero finito di possibili risultati ciascuno con probabilità $p_1, p_2, \dots, p_i, \dots$ vale:

$$H = - \sum_i p_i \log_2 p_i$$

Questa quantità si misura in bit e viene detta *Entropia dell'esperimento* [3]. La formula, simile a quella usata in fisica statistica, si può derivare da alcuni semplici e ragionevoli assiomi sul contenuto informativo di un esperimento stocastico. Brillouin in [1] ha dimostrato che ogni esperimento che porta a un aumento dell'informazione costa un aumento maggiore di entropia termodinamica, ne consegue che ogni conoscenza che può portare ordine si paga con un disordine fisico non minore.

Un importante corollario del secondo principio della Termodinamica è il seguente:

Se in un sistema isolato l'entropia termodinamica aumenta, il processo è irreversibile.

Le leggi della dinamica sono simmetriche rispetto al tempo. Se, ad esempio, guardiamo il filmato di uno scontro di due palle su di un biliardo, non è possibile stabilire se il filmato è proiettato in modo corretto o all'inverso.

D'altra parte lo scorrere del tempo è sinonimo di irreversibilità e le leggi della probabilità ci vengono in aiuto per stabilire la freccia del tempo in caso di eventi complessi. Nell'esempio del biliardo se il film mostra una palla che ne colpisce molte altre disposte in modo regolare è banale individuare la corretta sequenza temporale.

In generale la Termodinamica ci viene in aiuto per stabilire la direzione della freccia del tempo.

- Il calore passa sempre da un corpo caldo a uno freddo, ma non viceversa.
- Il moto si trasforma spontaneamente in calore, ma non viceversa. Nessuno ha mai visto una ruota che si mette in moto da sola perché si sta raffreddando.
- Se fai bollire un acquario ottieni una zuppa di pesce, ma raffreddando la zuppa di pesce non ritorni ad avere l'acquario.

Si può avere inoltre *irreversibilità per perdita di informazione*: ogni qual volta una certa quantità di informazione viene distrutta il processo è irreversibile. Inoltre, per i legami tra le due entropie, la distruzione di informazione è un processo che costa energia e produce aumento di entropia termodinamica.

Esiste infine l'*irreversibilità per l'osservazione microscopica*. In meccanica quantistica un'osservazione altera permanentemente lo stato del sistema (all'apertura della scatola il gatto di Schrödinger si rivela tutto vivo o tutto morto).

4. L'evoluzione

Il secondo principio della termodinamica viene spesso interpretato come una tendenza naturale al disordine. In realtà, all'interno di sistemi non isolati o in parti di sistemi chiusi lontane dall'equilibrio nulla impedisce il verificarsi di fenomeni di auto-organizzazione. Chi scrive è uno di questi fenomeni (non nel senso che sono bravo a tenere le penne in ordine). Nei casi in cui si può fare una analisi precisa, si vede che l'organizzazione locale avviene sempre a spese dell'entropia termodinamica globale.

L'evoluzione è un fatto (come la terra rotonda, anche se c'è chi dubita anche di questo). L'evoluzione biologica darwiniana aumenta l'ordine a spese dell'entropia termodinamica (aumento locale - perdita globale). Si dice che l'evoluzione biologica si mantiene al margine del caos. Secondo Dawkins [2], il motore dell'evoluzione non è la sopravvivenza degli individui, dei gruppi o delle specie ma di quegli insiemi di informazione che (semplificando) egli chiama geni e che possono durare milioni di anni. Nessuna visione teleologica ma solo un dato di fatto matematico, quasi una tautologia: *i replicanti capaci di sopravvivere meglio e più a lungo, replicano più degli altri!* Quella che si propaga e sopravvive è quindi l'informazione, i sistemi auto-organizzati, gli individui e le specie hanno invece una durata limitata nel tempo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Brillouin, L., Science and Information Theory, Academic Press, 1962. (ristampa Dover, 2004)
- [2] Dawkins, D., Il gene egoista, Mondadori, 2009.
- [3] Shannon C.E., A Mathematical Theory of Communication, Bell system Technical Journal, 1948.

LA DONNA DEL PLEISTOCENE¹

ANNA MARIA ROSSI

Università di Pisa

L'evoluzione della nostra specie è stata a lungo rappresentata come un percorso che va dalla condizione scimmiesca alla perfezione umana, gli aspetti caratteristici della quale sono l'intelligenza simbolica e la coscienza. Ora siamo consapevoli che la nostra storia è solo uno dei tanti possibili approdi di un'evoluzione guidata dalla contingenza storica e che, sebbene *Homo sapiens* sia l'unico ramo superstite, l'albero evolutivo delle specie umane è stato molto rigoglioso [18]. Oggi i paleoantropologi individuano la comparsa del genere *Homo* circa 2,5 milioni di anni fa, quando si cominciano a datare le prime testimonianze della lavorazione della pietra che segnano l'inizio del Pleistocene² [13, 19].

Per molto tempo si è ritenuto che il processo di ominazione fosse stato avviato dalla postura eretta e dalla locomozione bipede che, avendo liberato l'arto anteriore, avrebbero favorito lo sviluppo dell'abilità di manipolare oggetti, che avrebbe stimolato a sua volta l'espansione della scatola cranica e l'aumento delle facoltà cognitive [22, 20]. Studi recenti suggeriscono, invece, che primati arboricoli vissuti circa 20 milioni di anni fa potessero già camminare sugli arti posteriori [12]. Si è, quindi, fatta strada l'ipotesi che sia stato decisivo un sostanziale cambiamento di stile di vita dei nostri antenati che, a differenza delle altre scimmie antropomorfe, si trovarono a sopravvivere nelle aride praterie africane. Fuori della foresta tropicale, sarebbero stati più esposti ai pericoli durante la perlustrazione di ampi territori alla ricerca di cibo, carichi di viveri e magari portando in braccio un cucciolo. In questa situazione la postura eretta avrebbe permesso di aumentare il campo visivo per avvistare i predatori in agguato nell'erba alta e, allo stesso tempo, di mantenere il contatto con il branco. Se la vita per gli individui isolati era diventata più pericolosa, era di vitale importanza l'evolversi di un'organizzazione sociale più articolata, in cui si stabilivano legami duraturi con i membri della comunità.

Quando incominciò il processo di encefalizzazione, cioè l'aumento di volume cerebrale? Sembra che la capacità della scatola cranica di *Homo habilis* non superasse i 760 cc e il volume massimo sia stato raggiunto circa 100.000 anni fa [8].

Il "ragazzo del Turkana", trovato in Kenya, è datato circa 1,6 milioni di anni ed è il primo reperto che mostra chiari segni di un considerevole aumento della scatola crani-

1 Lezione tenuta il 14 febbraio 2014 presso il Liceo Chini, Via Beata 40, Lido di Camaiore (LU).

2 Si distinguono il Pleistocene inferiore e medio che corrispondono al paleolitico inferiore (durante il quale sono vissuti *H. habilis* e *H. erectus*), mentre il Pleistocene superiore corrisponde ai periodi del paleolitico medio e superiore (*H. neanderthalensis* e *H. sapiens*).

ca (fino a 1000 cc) con un'asimmetria tra i due emisferi, segno di un uso preferenziale della mano destra. Apparteneva a una stirpe di esploratori che si spostavano in branchi di una trentina di individui. La vita si faceva più complessa, la tecnologia si sviluppava e sempre più importanza acquisiva l'apprendimento, una concatenazione di cause che avrebbe aperto la strada all'evoluzione culturale.

Quando comparve *H. sapiens*, fra 160 e 200 mila anni fa, aveva un'anatomia già completamente "moderna" e la sua testa aveva raggiunto le dimensioni attuali, circa 1300-1400 cc. Anche gli uomini di Neanderthal, più bassi e più robusti di *H. sapiens*, avevano un cervello ugualmente sviluppato e una vita sociale organizzata.

Le impronte endocraniche avvalorano la tesi di una riorganizzazione cerebrale: la parte corticale del cervello espandendosi avrebbe consentito una maggiore capacità di elaborazione delle informazioni che arrivavano dagli organi di senso e aree più vaste dell'encefalo sarebbero state deputate al controllo del movimento, delle emozioni e delle sensazioni.

Non solo vantaggi

Le potenzialità che si svilupparono furono determinanti per il successo della nostra specie ma furono associate a qualche inconveniente. Il cambiamento posturale fu accompagnato da diverse ristrutturazioni anatomiche che si affermarono un po' alla volta nel corso del tempo. Gli arti posteriori diventarono più lunghi e più robusti delle braccia, la pianta del piede s'innalzò, il tallone s'ingrandì, il tendine di Achille si allungò cosicché il peso del corpo risultò più distribuito, a danno della funzionalità delle articolazioni del ginocchio e del femore che dovettero sostenere un carico maggiore. Comparvero le due curvature della colonna vertebrale che portano indietro il centro di gravità del tronco, migliorando l'equilibrio ma sono spesso causa di mal di schiena.

Sono anche cambiate la posizione e le dimensioni del bacino che ruotò all'indietro: mentre il cinto pelvico diventò più piatto, il pavimento pelvico si rafforzò dovendo sostenere il peso e la pressione degli organi addominali, ma alla rotazione dell'anca conseguì il restringimento del canale del parto [16].³ Come è noto, il principale ostacolo al transito del neonato è il volume della testa del feto in rapporto all'ampiezza dell'apertura pelvica. Il passaggio della testa del feto di Scimpanzé attraverso il canale del parto è più agevole, perché il cinto pelvico è più allungato e più verticale di quello umano. Al contrario, nella nostra linea evolutiva, i rischi per la madre e il bambino durante il parto sarebbero aumentati proprio in conseguenza di questo cambiamento anatomico.⁴

3 Nella donna attuale l'apertura è di circa 13 cm nel suo asse maggiore e 10 cm in quello minore ed è appena sufficiente a permettere il transito del nascituro.

4 L'altissimo tasso di mortalità per problemi legati alla gravidanza e al parto, anche se ovviamente solo in parte ascrivibili al rapporto tra diametro della testa del feto e quello del canale del parto, è notevolmente diminuito dalla metà del '900. Tuttavia ancora oggi nel mondo muore una donna ogni minuto, in totale 500 mila donne l'anno, cui vanno sommate le morti neonatali, stimate intorno a 171 milioni di decessi l'anno, gran parte dei quali durante il primo mese di vita. L'Italia ha il tasso di mortalità tra i più alti d'Europa: 11,8 decessi ogni 100 mila nati. Il valore è in linea con la media europea, ma

Visto che il volume della testa del neonato ha dei limiti imposti dalla dimensione del bacino, la riduzione del canale del parto avrebbe potuto condizionare anche la capacità cranica dell'adulto umano. Invece, si pensa che il processo di encefalizzazione abbia potuto proseguire grazie ad una mutazione che avrebbe cambiato i tempi di crescita intrauterina e postnatale. Questo fenomeno evolutivo, che prende il nome di "neotenia", avrebbe avuto l'effetto di far sì che i piccoli umani potessero nascere prematuri e con una testa piccola, che potesse però crescere ancora dopo la nascita.

D'altra parte una mutazione di questo tipo avrebbe avuto un grosso vantaggio anche dal punto di vista metabolico, perché si sarebbe ridotto il fabbisogno nutritivo del feto, che dipende molto dal consumo energetico del cervello, e la madre avrebbe dovuto passare meno tempo nella ricerca di cibo [5]. Infatti, il parto è innescato da un cambiamento dell'equilibrio ormonale quando la madre non è più in grado di soddisfare le esigenze nutritive del feto.

Per quanto possa sembrare strano, questo "assestamento" avrebbe avuto un peso considerevole per l'evoluzione umana, non solo sotto il profilo biologico, ma soprattutto per l'evoluzione socioculturale della nostra specie.

La nascita prematura e lo sviluppo post-natale

La nascita prematura sarebbe causata proprio dalla modificazione dei geni che controllano la produzione di ormoni e dei geni che regolano lo sviluppo embrionale. Considerando la differenza genetica tra noi e gli Scimpanzé (1,4% del DNA), Stephen J. Gould aveva ipotizzato già nel 1984 che il cambiamento riguardasse geni di tipo speciale – i cosiddetti geni "chiave", "master" o "architetto" – responsabili di una serie di effetti a cascata, capaci di giustificare la differenza rilevante sul piano anatomico, cerebrale, cognitivo e comportamentale tra le due specie [6, 7]. Il cambiamento dello schema temporale dello sviluppo intrauterino sarebbe duplice e antitetico: alcuni processi avrebbero subito un'accelerazione, per esempio la maturazione degli apparati cardio-circolatorio e respiratorio, che devono essere funzionanti al momento del parto, mentre sarebbero stati rallentati i ritmi di crescita del feto.

La gravidanza dello Scimpanzé dura circa come quella umana e nasce un solo piccolo del peso di circa 2 kg ma, come ha osservato l'antropologo Desmond Morris, il cervello del feto aumenta in dimensioni e complessità soprattutto prima della nascita. Quando l'animale nasce, il cervello ha già raggiunto il settanta per cento delle sue dimensioni definitive e lo sviluppo è completato entro i primi sei mesi di vita. Nella nostra specie invece, alla nascita il cervello è solo il 23% delle sue dimensioni finali e l'accrescimento continua fino al ventitreesimo anno di vita [17].

Uno dei principali vantaggi della neotenia sarebbe stato proprio nel fatto che il cervello ha un'elevata plasticità cerebrale nella prima infanzia e, quindi, prolungando questa fase, si sarebbero potenziate le capacità di apprendimento e, in genere, le

più alto rispetto a 9,6 della Francia, 8 della Danimarca e 5,8 della Finlandia [9].

principali funzioni cognitive superiori, che dipendono in primo luogo dalla neocorteccia.

Le cure parentali e lo sviluppo della società

La nascita prematura deve essere seguita da un lungo periodo di cure parentali. Infatti, mentre la madre Scimpanzé assiste il suo piccolo solo per i primi anni, la madre umana è impegnata per un periodo più esteso [15].

L'autonomia del piccolo umano arriva molto più tardi dei cugini Scimpanzé ma questo fatto rafforza il legame tra madre e figlio, anche sul piano affettivo. La lunga infanzia e la lenta maturazione dei piccoli potrebbero aver aumentato l'efficacia della trasmissione "culturale". "La rivoluzione cognitiva", cioè l'emergere dell'intelligenza razionale e simbolica, della coscienza, della creatività e dell'espressività, potrebbe essere la conseguenza del lungo periodo di ammaestramento. Così pure il riconoscimento dei volti e delle espressioni, che avrebbe stimolato aree del cervello dedicate ai processi cognitivi e mnemonici (sistema limbico).

Piano piano si sarebbe affermata un'organizzazione di tipo familiare e rafforzati i legami interpersonali all'interno delle comunità, potenziando le capacità di adattamento all'ambiente naturale e sociale. Anche le relazioni sessuali sarebbero diventate più durature [16].

La stabilità e la coesione del gruppo sociale organizzato offrono un grande vantaggio evolutivo dato dallo spostamento dall'interesse individuale a quello collettivo, favorendo comportamenti e attitudini che avvantaggiano i parenti stretti e il clan e realizzano il principio della "kin selection" o selezione parentale [10].

L'importanza del linguaggio verbale articolato

Si ritiene che l'interazione continua con la madre nella prima infanzia, e forse anche durante l'adolescenza, sia stata anche l'ambiente ideale per l'evoluzione della comunicazione interpersonale prima sotto forma di linguaggio gestuale e, poi, di linguaggio verbale [3, 21].

È noto, infatti, che la madre comincia a comunicare col proprio figlio appena nato, reagisce immediatamente e istintivamente al suo pianto e la sua voce è per il neonato fonte di rassicurazione. Qualcuno ipotizza che i suoni della comunicazione madre-figlio in questa fase (in inglese "baby talk" o "motherese") siano stati poi presi a prestito per trasmettergli il bagaglio di conoscenze e di tradizioni, il patrimonio socioculturale della comunità [4, 11].

Prima si sarebbe evoluto un sistema di comunicazione basato su un lessico ricco di segni ed espressioni manuali e facciali, simile a quello dei primati superiori attuali, che richiede l'abilità di comunicare combinata con un controllo motorio fine delle mani e viso. L'emergere del linguaggio verbale articolato si sarebbe realizzato più tardi per un cambiamento anatomico che avrebbe avuto luogo solo nella nostra linea evolutiva e avrebbe causato l'abbassamento della faringe e della laringe, ampliando la gamma dei suoni prodotti dall'apparato vocale [14].

È del primatologo inglese Robin Dunbar l'ipotesi dell'origine sociale del linguaggio che avrebbe svolto un ruolo di collante sociale e rafforzato la cooperazione all'interno dei gruppi [2].

Epilogo

Abbiamo solo un'idea frammentaria della nostra storia più remota, una storia ancora molto incerta e continuamente soggetta a revisioni. Ci sembra però che si possa riconoscere che dal Pleistocene a oggi la femmina del genere *Homo* abbia garantito la continuità della vita di generazione in generazione, pagando un prezzo molto alto, in termini di sofferenza e di vite perdute. Sarebbe giusto anche rivalutare il contributo che ha dato all'evoluzione della nostra seconda natura, la cultura.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bolk Louis, *Il problema dell'ominazione*, Derive Approdi, Roma 2006.
- [2] Dunbar Robin, *Up through the Mists of Time*, Harvard University Press, Cambridge (USA) 1996.
- [3] Falk Dean, *Lingua madre*, Bollati Boringhieri, Torino 2011.
- [4] Falk Dean, *Prelinguistic evolution in early hominins: whence motherese?* Behavioral and Brain Sciences, 27, 2004, 491-503;
- [5] Fonseca-Azevedo Karina, Fonseca-Azevedo Suzana, *Metabolic constraint imposes tradeoff between body size and number of brain neurons in human evolution*, Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 6, 2012, 109, 45, pp. 18571-18576.
- [6] Gould Stephen Jay, *Ontogenesi e filogenesi*, Maria Turchetto (a cura di), Mimesis, Milano-Udine 2013.
- [7] Gould Stephen Jay, *Questa idea della vita. La sfida di Charles Darwin*, Editori Riuniti, Roma 1984.
- [8] Harcourt-Smith William E.H., Aiello Leslie C., *Fossils, feet and the evolution of human bipedal locomotion*, Journal of Anatomy, 204, 2004, 5, 403-416.
- [9] Hogan Margaret C., Foreman Kyle J., Naghavi Mohsen, Ahn Stephanie Y., Wang Mengru, Makela Susanna M., Lopez Alan D., Lozano Rafael, Murray Christopher J.L., *Maternal mortality for 181 countries, 1980-2008: a systematic analysis of progress towards Millennium Development Goal 5*, Lancet, 375, 2010, 9726, 1609-1623.
- [10] Jonas Hans, *Organismo e libertà. Verso una biologia filosofica*, Einaudi, Torino 1999.
- [11] Lewin Roger, *Human Evolution: An Illustrated Introduction*, Blackwell Science, Malden (USA) 1999.
- [12] MacLatchy Laura, *The oldest ape*, Evolutionary Anthropology, 13, 2004, 3, 90-103.
- [13] Manzi Giorgio, *L'evoluzione umana*, Il Mulino, Bologna 2007
- [14] Marshall John C, *The descent of the larynx*, Nature, 338, 1989, 702-703.
- [15] Montagu Ashley, *Saremo bambini*, Red Edizioni, Milano 1992;
- [16] Morgan Elaine, *L'origine della donna*, p. 36 Einaudi, Torino 1974.
- [17] Morris Desmond, *La scimmia nuda. Studio zoologico sull'animale uomo*, Bompiani, Milano 1967.
- [18] Pievani Telmo, *Homo sapiens e altre catastrofi. Per una archeologia della globalizzazione*, Meltemi, Roma 2006.
- [19] Pievani Telmo, *La vita inaspettata*, Cortina, Milano 2011.
- [20] Richmond Brian G., Jungers William L., *Orrorin tugenensis femoral morphology and the evolution of hominin bipedalism*, Science, 319, 2008, 5870, 1662-1665.
- [21] Tattersall Ian, *Il cammino dell'uomo. Perché siamo diversi dagli altri animali*, Garzanti, Milano 2004;

-
- [22] Wood Bernard, *Palaeoanthropology: Hominid revelations from Chad*, Nature, 418, 2002, 133-135.

IL WORLD WIDE WEB: UNA MERAVIGLIOSA AVVENTURA SCIENTIFICA, TECNOLOGICA E UMANA¹

ORESTE SIGNORE

W3C Italia e CNR - Area della Ricerca di Pisa

1. Le radici del Web

L'invenzione del Web, cui hanno contribuito molti ricercatori, è il risultato di un lungo percorso, favorito dalla definizione dello standard SGML e dagli sviluppi delle reti, partendo dalle idee pionieristiche di Vannevar Bush sull'ipertesto, e passando attraverso l'invenzione del mouse e le visioni affascinanti di Ted Nelson. Non è stata un'illuminazione improvvisa, ma un'idea nuova, quella di poter *combinare in modo libero* le idee, stimolata da una sfida posta dal CERN, ambiente di ricerca di altissimo livello.

1.1. Internet

L'elemento scatenante dello sviluppo di Internet si può far risalire ai primi successi spaziali della Russia, quando in piena guerra fredda era viva la lotta tra gli USA e la Russia per la conquista dello spazio. L'orgoglio americano viene ferito profondamente quando il 4 ottobre 1957 i russi lanciano lo Sputnik, primo satellite artificiale costruito dall'uomo. Per rispondere a questo successo dei russi il Dipartimento della Difesa americano avvia, il 7 febbraio 1958, il progetto ARPA (Advanced Research Project Agency). Si arriva così ai primi collegamenti in rete e infine (1972) alla prima dimostrazione pubblica di ARPANET, la prima rete operativa basata sulla tecnologia della commutazione di pacchetto (packet switching), che ha completamente soppiantato la tecnologia precedente (commutazione di circuito).

Dopo i primi esperimenti con ARPANET, DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) inizia a lavorare su altre tecnologie di trasmissione dati, sotto la guida di Robert E. Kahn e Vinton Gray Cerf che, con la collaborazione di vari altri ricercatori, studiano *modelli aperti per l'interconnessione* e nel 1973 presentano la loro proposta, in cui le differenze tra i protocolli di rete vengono mascherate usando un *internetwork protocol* comune e la responsabilità dell'affidabilità della trasmissione dei messaggi viene demandata non più alla rete, ma agli host (singoli nodi della rete (n.d.r.)). Riducendo al minimo il ruolo della rete, diventa possibile interconnettere facilmente reti eterogenee. Successivamente il gruppo di ricerca di Cerf giunge

¹ Lezione tenuta lunedì 10 febbraio 2014, ore 11 - Liceo San Bartolomeo, Via S. Croce n. 2, Sansepolcro (AR). Una versione più estesa di questo lavoro, con link alla presentazione, si trova a: <http://www.w3c.it/talks/2014/pianetagalileo/webFromPastToFuture.pdf>.

nel 1973-74 alla definizione della prima specifica del protocollo TCP (Transmission Control Protocol), fino al completamento della transizione di ARPANET al protocollo TCP/IP (1° gennaio 1983).

1.2. SGML

L'invenzione della stampa ad opera di Gutenberg (circa 1439) rivoluziona il metodo di produzione di documenti scritti, permettendo di passare dai manoscritti alla produzione a stampa. Nascono nuove professioni e il *markup*, il linguaggio di marcatura dei testi usato da personale specializzato per annotare sui manoscritti le informazioni da passare ai tipografi per la composizione manuale dei caratteri.

Svolte tecnologiche importanti sono la comparsa delle macchine da scrivere con caratteri intercambiabili e la possibilità di preparare documentazione in formato elettronico, utilizzando sistemi di markup proprietari. Il limite principale di questi sistemi è costituito dal fatto che il markup è mescolato al contenuto, e nel 1967 William Tunnicliffe propone di separare il contenuto informativo dei documenti dal loro formato di presentazione. Nel 1960 Charles Golfarb, Edward Mosher e Raymond Lorie avevano sviluppato il GML (acronimo dei loro cognomi, ma anche di Generalized Markup Language). Nel 1978 l'ANSI (American National Standards Institute) inizia il lavoro per rilasciare uno standard per la definizione di testi, e adotta come base di riferimento GML, rilasciando poi nel 1986 lo standard SGML (ISO 8879).

1.3. Hypertext

Nel 1945 Vannevar Bush pubblica sulla rivista Atlantic Monthly l'articolo "*As we may think*" [4], nel quale ipotizza una macchina *ipertestuale*, denominata Memex (per Memory Extension)² che, concepita con le tecnologie dell'epoca, non fu mai realizzata, per cui l'idea fu dimenticata.

Douglas Englebart nel 1960 inventa il mouse, e tra il 1960 e il 1970 realizza NLS (oNLine System) che costituisce la prima implementazione dell'ipertesto³, che a metà degli anni 1980 attira l'attenzione di una vasta comunità di ricercatori.

2. Tim Berners-Lee e la nascita del World Wide Web

Negli anni 1980 la tecnologia delle reti si diffonde ampiamente nel CERN, che nel 1989 viene connesso ad Internet diventando, nel 1990, il più grosso sito internet in

2 A memex is a device in which an individual stores all his books, records, and communications, and which is mechanized so that it may be consulted with exceeding speed and flexibility. It is an enlarged intimate supplement to his memory. [...] It affords an immediate step, however, to *associative indexing*, the basic idea of which is a provision whereby any item may be caused at will to select immediately and automatically another. This is the essential feature of the memex. The process of *tying two items together* is the important thing. [4, p. 7-8]

3 Nel 1965 Theodor Holm (Ted) Nelson definisce l'ipertesto come: "*A body of written or pictorial material interconnected in a complex way that it could not be conveniently represented on paper. It may contain summaries or maps of its contents and their interrelations; it may contain annotations, additions and footnotes from scholars who have examined it.*"

Europa. Così maturano alcune delle condizioni tecnologiche che portano all'invenzione del Web. Per la riuscita degli esperimenti è vitale infatti che i gruppi di ricerca del CERN, composti spesso da centinaia di persone appartenenti a decine di istituzioni di varie nazionalità, possano condividere dati e informazioni, e la natura intrinsecamente distribuita dei gruppi richiede che centinaia di computer siano connessi in rete e collaborino per la raccolta e l'elaborazione dei dati. Queste esigenze, già ampiamente presenti negli anni 1980, costituiscono la premessa per l'invenzione del World Wide Web.

Tim Berners-Lee dopo la laurea in fisica ha la possibilità di un lavoro come programmatore a contratto presso il CERN. Ed è così che già nel 1980, in occasione del suo primo soggiorno al CERN, comincia ad immaginare il web (*"Suppose all the information stored on computers everywhere were linked. Suppose I could program my computer to create a space in which anything could be linked to anything."*) e realizza ENQUIRE, successivamente andato perduto, che prevede un insieme di *nodi* e di *link* (o collegamenti), in cui ogni nodo ha un *nome*, un *tipo* e una lista di *link* *tipati bidirezionali*. Nel 1989 propone la condivisione di documenti e definisce una DTD SGML, che segna la nascita di HTML. È del marzo 1989 *"Information Management: A Proposal"*, che delinea l'architettura di quello che diventerà il web [1]. Questa proposta, che il suo capo Mike Sendall giudica *"Vague, but exciting"* rimane inizialmente senza risposta, e viene ripresentata, di nuovo senza successo, nel maggio 1990. Nel frattempo compare un nuovo personal computer, chiamato NeXT, e Mike Sendall acconsente alla richiesta di Tim Berners-Lee di acquistargli una di queste macchine per sviluppare il suo progetto di ipertesto.

Nella proposta del 1989 emergono già i tre elementi fondamentali del web: *Universal Resource Identifier*, protocollo per il *fetch dei documenti* e *document markup* (URI, HTTP e HTML), ma non esiste ancora un nome per il sistema, chiamato semplicemente "Mesh". Considera, e scarta, varie alternative, e alla fine decide di chiamarlo World Wide Web, per indicare un insieme di nodi e archi in cui ogni nodo può essere collegato con qualunque altro. Negli anni successivi (1991-93) continua nel suo lavoro di progettazione e sviluppo del Web al CERN, raffinando le specifiche iniziali di URI, HTTP e HTML. Il primo browser realizzato è un browser/editor, che consente la *visualizzazione* e l'*aggiornamento* dei contenuti, rispettando così il principio di fondo che aveva portato all'invenzione del Web⁴. Nell'ottobre 1994 Tim Berners-Lee, in collaborazione con il CERN e con il supporto da parte di DARPA e della Commissione Europea, fonda il World Wide Web Consortium (W3C) che persegue lo scopo di portare il Web al massimo del suo potenziale definendo protocolli comuni che favoriscano l'*evoluzione* e assicurino l'*interoperabilità* del Web.

4 The Web is more a *social* creation than a technical one. I designed it for a social effect - *to help people work together* - and not as a technical toy. The ultimate goal of the Web is *to support and improve our weblike existence* in the world." [2, p. 123]

4. Il futuro del Web può essere in pericolo?

Per molti di noi il Web è ormai una realtà acquisita, ma proprio perché viene ritenuto un'infrastruttura sempre disponibile, come l'elettricità o l'acqua, si rischia di perdere di vista la necessità di garantirne l'evoluzione nel rispetto dei principi fondanti. In [3] Tim Berners-Lee sottolinea i pericoli incombenti e chiama tutti a vigilare ed eventualmente a far sentire la propria voce. I temi chiave sono l'*universalità*, gli *open standard*, la *separazione tra Web e Internet*, i *diritti umani elettronici*, il *divieto di intercettazioni* e l'aggancio con il *futuro*.

Il Web è universale, quindi deve essere accessibile a tutti, indipendentemente da limitazioni tecniche o disabilità, e gli URI, che permettono di collegare tra di loro due informazioni qualunque, sono la base per l'*universalità*. Se le informazioni non sono associate ad un URI, ma sono accessibili solo all'interno di specifici contesti applicativi, esiste il rischio che si vengano a creare regimi di monopolio. L'architettura del Web è *decentralizzata*, e chiunque può pubblicare qualunque cosa, senza chiedere autorizzazioni a nessuna autorità centrale, creando una pagina HTML, assegnandole un URI e rendendola accessibile sul Web con il protocollo HTTP.

Gli *open standard* sono poi la base per lo sviluppo del web: devono essere disponibili gratuitamente e condivisi dalla platea dei tecnici del web. Sarà poi libera determinazione delle singole imprese utilizzarli per realizzare eventualmente applicazioni dalle quali trarre profitti.

Dal punto di vista tecnico, è importante che Internet e il Web continuino a svilupparsi in maniera *indipendente*. Il Web è un'applicazione sviluppata su Internet, e come tale può trarre vantaggio dai suoi sviluppi, ma può a sua volta evolvere e ampliare il suo campo d'azione semplicemente facendo affidamento sui protocolli di Internet (TCP, IP).

L'aspetto dei *diritti umani elettronici* porta a considerazioni relative alla net neutrality e al diritto per gli utenti di poter disporre della larghezza di banda stabilita nel contratto stipulato con il fornitore (Internet Service Provider – ISP), indipendentemente dai servizi utilizzati. Violare la net neutrality può costituire un grosso ostacolo allo sviluppo delle PMI.

Intercettare e analizzare i comportamenti degli utenti, tenendo traccia degli URI acceduti, costituisce una vera e propria *intercettazione non autorizzata*, e come tale una violazione di legge. Come dimostrano alcune vicende recenti, questo tipo di "spionaggio" purtroppo non è appannaggio solo dei regimi totalitari e, se scoperto, richiederebbe una chiara e ferma presa di posizione da parte dei cittadini.

Infine, è opportuno restare al passo con gli sviluppi *futuri*, che non possono e non sono nelle mani di una singola persona o organizzazione. L'importante è mantenere saldi i principi fondanti, perché il Web possa darci ancora ulteriori vantaggi.

5. Conclusioni

Il Web nasce in un ambiente di ricerca di altissimo livello, che poneva sfide impegnative, e già nella sua proposta originaria contiene idee non ancora completamente realizza-

te. Alla sua nascita hanno contribuito molti ricercatori che operavano in settori diversi, ma la sua concretizzazione si deve all'intuizione di Tim Berners-Lee, alla sua capacità di individuare gli elementi essenziali dell'architettura, e alla sua costanza nel perseguirne l'implementazione e nel mantenerlo un ambiente libero da protocolli proprietari⁵.

Tuttavia il futuro del Web potrebbe essere in pericolo se l'intera comunità internazionale non vigilerà per mantenere saldi i principi che hanno portato a questa meravigliosa invenzione, che non è solo scientifica e tecnologica, ma ha importanti risvolti e motivazioni ideali.

5 "If someone tries to monopolize the Web - by, for example, pushing a proprietary variation of network protocols - they're in for fight." [2, p. 107-108]

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] Berners-Lee, T., Information Management: A Proposal <http://www.w3.org/History/1989/proposal.html>
- [2] Berners-Lee, T., Weaving the Web: The Original Design and Ultimate Destiny of the World Wide Web by Its Inventor, Harper SanFrancisco (1999), ISBN 0-06-251587-X – Versione italiana: L'architettura del nuovo web: dall'inventore della rete il progetto di una comunicazione democratica, interattiva e intercreativa, Milano, Feltrinelli, 2001, ISBN 88-07-46028-9.
- [3] Berners-Lee, T., Long Live the Web: A Call for Continued Open Standards and Neutrality, Scientific American Magazine, December 2010 <http://www.scientific-american.com/article/long-live-the-web/>
- [4] Bush V., As We May Think, The Atlantic Monthly July 1945. <http://www.theatlantic.com/magazine/archive/1945/07/as-we-may-think/303881/>

MATEMATICA VS ARMAGEDDON: COME PREVEDERE L'IMPREVEDIBILE¹

GIACOMO TOMMEI

Dipartimento di Matematica, Università di Pisa

Introduzione

A cosa serve la *Matematica*? Se le sono chiesto in tanti (...e molti altri continueranno a farlo), la risposta è complessa, però se volessimo provare a spiegarlo in poche righe non possiamo non citare il protagonista della serie tv Numb3rs, il geniale matematico Charlie Epps, per il quale “Ogni cosa è numero”. La Matematica è ovunque ed è necessaria in molti campi e in diversi aspetti della nostra vita. Non voglio qui fare un elenco (che risulterebbe sicuramente incompleto), il mio scopo è raccontare come la Matematica sia utile in un contesto particolare, la protezione del nostro pianeta da pericoli provenienti dallo spazio (non pensate subito ad un’invasione aliena...). Detto in altri termini, la Matematica ci può aiutare a non fare la fine dei *dinosauri*. Questi rettili giganteschi hanno dominato la Terra da 230 a 65 milioni di anni fa, quando improvvisamente si sono estinti.

L’ipotesi più accreditata per la causa dell’estinzione (*ipotesi di Alvarez*, 1980) è quella di un impatto asteroidale o cometario che ha fortemente alterato l’ecosistema in cui vivevano i dinosauri. Nel 1990 è stato identificato il cratere di *Chicxulub*, sulla costa dello Yucatan, in Messico, che ha i requisiti per soddisfare l’ipotesi di Alvarez: questo cratere ha un diametro stimato di circa 180 chilometri, e il suo ritrovamento è stato possibile solo grazie a tecniche moderne in quanto è interamente sommerso dal mare.

Gli asteroidi da tenere sotto controllo non sono però solo quelli che portano ad un’estinzione di massa, ce ne sono molti altri, più piccoli, che possono creare danni considerevoli. Nell’estate del 1908 un oggetto, probabilmente un asteroide roccioso con un diametro stimato tra i 60 e i 190 m, esplose ad un’altitudine tra i 6 e i 10 Km vicino a *Tunguska*, in Siberia. Nell’esplosione furono rilasciati circa 15 Megatons di energia bruciando svariati ettari di tundra siberiana. Il 15 Febbraio 2013 a *Chelyabinsk*, in Russia, un oggetto di natura asteroidale (di circa 18 m di diametro) è esploso nei cieli a 23 Km di altezza provocando più di 1000 feriti e molti milioni di euro di danni (su YouTube si trovano diversi filmati). Pensate se un simile oggetto (o, peggio, un oggetto di tipo Tunguska) invece di esplodere e frantumarsi finendo la sua corsa in un lago

¹ Lezione tenuta martedì 26 novembre 2013, ore 11 - Istituto C. Lorenzini, Via Sismondi n. 7, Pescia (PT); mercoledì 15 gennaio 2014, ore 11 - ISIS Sismondi, Via Aldo Moro n. 11, Pescia (PT)

ghiacciato, avesse impattato su una città o su una zona popolosa, oppure in mare creando forti tsunami. È questo il motivo che spinge gli scienziati a tenere sotto controllo gli incontri ravvicinati di asteroidi.

Naturalmente non si deve creare allarmismo, le frequenze degli impatti e le loro conseguenze in termini di energia rilasciata sono visibili nella Figura sottostante.

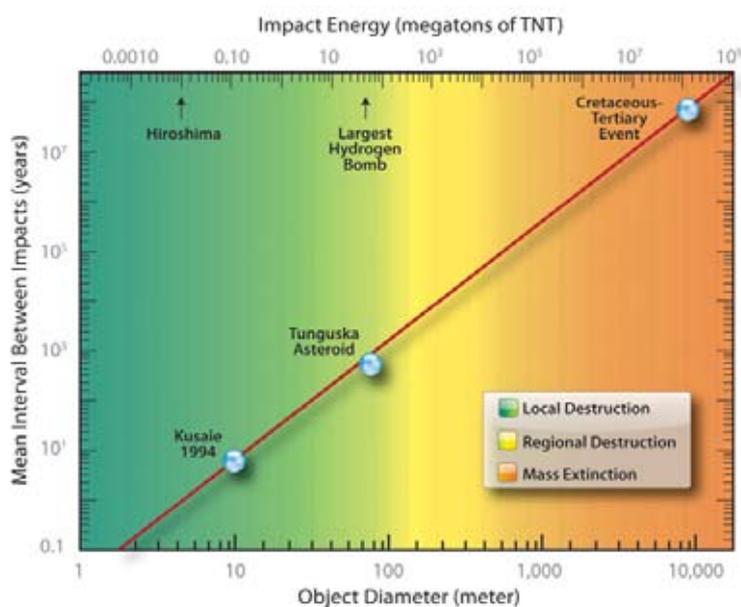


Figura 1

Come si può notare un evento tipo Tunguska si verifica in media ogni 100 anni, mentre un evento catastrofico come quello che ha portato all'estinzione dei dinosauri ogni 100 milioni di anni. Quindi, da una parte la statistica ci può far stare tranquilli, ma dall'altra la comunità scientifica non può ignorare il problema, che, come vedremo nei successivi paragrafi, non è così semplice da risolvere.

2. I nostri vicini scomodi

La parola *asteroide* significa “come una stella”, anche se questi corpi minori del Sistema Solare non emettono luce propria, ma sono visibili solo perché riflettono la luce solare. Le dimensioni degli asteroidi variano notevolmente: si va dalle centinaia di chilometri in diametro (*Cerere*, il più grande ed il primo ad essere scoperto, misura 913 Km in diametro) ai pochi metri. La massa totale di tutti gli asteroidi è inferiore a quella della Luna.

Vi sono asteroidi in diverse posizioni del Sistema Solare e se ne conoscono più di 500000. La maggioranza di essi orbita nella fascia principale (detta anche cintura principale, *Main Belt*) tra Marte e Giove. I pianetini che maggiormente ci interessano, però, sono quelli che arrivano in un intorno della Terra e sperimentano incontri ravvicinati con il nostro pianeta: tali asteroidi sono chiamati NEAs (*Near Earth Asteroids*) e hanno la proprietà di avere una distanza minima dal Sole (*perielio*) inferiore a 1.3 Unità

Astronomiche (le orbite di questi oggetti sono ellissi con il Sole in uno dei fuochi secondo la prima legge di *Keplero*). Fu con la scoperta di 433 Eros (1898) che si accertò l'esistenza di tali asteroidi e al momento (fine Luglio 2014) se ne contano 11130.

L'attenzione per questi oggetti aumentò notevolmente con l'avvento dell'era spaziale e, in particolare, con le missioni lunari. Queste missioni misero in luce la natura da impatto dei crateri sulla Luna costringendo la comunità scientifica a porsi il problema degli impatti sulla Terra. Il monitoraggio di impatti (*impact monitoring*) è quindi una "scienza" giovane, basti pensare che nel 1998, anno in cui uscirono ben due film americani sul tema ("Armageddon" e "Deep Impact"), ancora non esistevano algoritmi per il calcolo della probabilità d'impatto.



Figura 2

3. Ci serve la matematica!

Capire se un asteroide può in un futuro (prossimo o lontano) impattare con il nostro pianeta è un problema difficile che può essere suddiviso in tre passi.

1. Guardare il cielo e scoprire gli oggetti. Più osservazioni si hanno (purché siano di qualità), maggiore è l'accuratezza con la quale si può conoscere l'orbita dell'oggetto.
2. Calcolare, a partire dalle osservazioni, le orbite degli oggetti scoperti (*determinazione orbitale*).
3. Capire, con le informazioni a disposizione (osservazioni e orbite), se in futuro gli oggetti potranno impattare con il nostro pianeta, calcolando una probabilità d'impatto (*impact monitoring*).

Il passo 1) è compito degli astronomi di tutto il mondo, mentre per i passi 2) e 3) la Matematica è essenziale.

La determinazione dell'orbita di un corpo celeste è un processo costituito da due fasi: (1) costruzione di un'*orbita preliminare* a partire da un numero minimo di osser-

vazioni; (2) perfezionamento dell'orbita con metodi correttivi grazie ad un numero più consistente di osservazioni (ottenendo una soluzione nominale). Tradizionalmente esistono due metodi per il calcolo di orbite preliminari, il metodo di *Laplace* (matematico, fisico e astronomo francese, 1749-1827) ed il metodo di *Gauss* (matematico, fisico e astronomo tedesco, 1777-1855). In entrambi i metodi si cerca di determinare un'orbita *kepleriana* determinata dall'attrazione gravitazionale agente tra il corpo e il Sole. La base di partenza è data da tre osservazioni, ognuna delle quali è costituita da una terna (t, α, δ) in cui t rappresenta l'istante dell'osservazione, α l'ascensione retta e δ la declinazione del corpo (due angoli che servono a individuare l'oggetto sulla sfera celeste, come un punto sulla superficie terrestre è individuato da longitudine e latitudine). Ciò che non conosciamo è la distanza dell'oggetto, ed è proprio tale quantità che deve essere calcolata. Si tratterà, nella risoluzione del problema, di trovare le radici di un polinomio di ottavo grado (peraltro tale polinomio risulterà simile in entrambi i metodi), e scoprire quali di queste possono essere accettate e quali invece devono essere scartate. Dovremo tener conto del fatto che le osservazioni iniziali contengono un *errore di misura* in nessun modo eliminabile; inoltre sarà necessario procedere ad ulteriori approssimazioni, utilizzando *metodi numerici* dei quali non è sempre assicurata la convergenza. La soluzione del problema non è quindi di per sé garantita (anzi ci sono casi in cui è impossibile trovarla). Nonostante questo, i metodi in questione sono ancora molto attuali e permettono spesso di risolvere il problema della costruzione di un'orbita preliminare. Naturalmente esistono oggi altri metodi per il calcolo di un'orbita preliminare, alcuni dei quali sviluppati dal Gruppo di Meccanica Celeste dell'Università di Pisa pochi anni fa. Con l'aggiunta di nuove osservazioni l'orbita preliminare può essere migliorata con il *metodo dei minimi quadrati*, inventato da Gauss, che permise di ritrovare l'asteroide Cerere (scoperto da *Giuseppe Piazzi* il primo giorno dell'anno 1801) un anno circa dopo la scoperta.

Ogni volta che calcoliamo un'orbita dobbiamo tener conto della sua incertezza, dovuta alla propagazione degli errori di misura negli algoritmi. Quindi se vogliamo scoprire possibili impatti di un certo oggetto nel futuro dobbiamo, non solo propagare la sua orbita nominale, ma anche l'incertezza associata. Ed è qui che il problema si complica a causa della natura caotica delle orbite.

4. Breve storia del caos

Un sistema caotico ha le seguenti caratteristiche:

- a. l'evoluzione su tempi lunghi è imprevedibile e simula un processo stocastico, ovvero una variazione casuale del sistema;
- b. due sistemi con condizioni molto vicine possono avere un futuro radicalmente diverso;
- c. le orbite degli elementi che compongono il sistema restano generalmente confinate, ovvero il sistema non evolve verso l'infinito.

Contrariamente a quanto si tenda a pensare comunemente dire che un sistema è caotico non vuole dire che sia instabile, ma piuttosto che sia imprevedibile: la nostra conoscenza della sua evoluzione ha un orizzonte temporale limitato che dipende dal sistema in considerazione. La Teoria del Caos è una disciplina relativamente giovane che, nella seconda metà del Novecento ha fatto breccia nell'immaginario collettivo anche grazie a numerosi romanzi e film. È famoso il personaggio di Ian Malcolm, il matematico del libro (e dell'omonimo film, interpretato magistralmente da Jeff Goldblum) "Jurassic Park", il quale illustra il caos parlando del famoso effetto farfalla, enunciato per la prima volta dal matematico statunitense *Edward Norton Lorenz* (1917 – 2008): una farfalla sbatte le ali a Pechino e a Central Park piove. Lorenz fu colui che riscoprì il caos negli anni Sessanta del secolo scorso, ma il primo a riscontrare fenomeni caotici fu un brillante matematico francese *Henri Poincaré* (1854 – 1912). Nel 1885 il re Oscar II di Svezia, per celebrare il suo sessantesimo compleanno, decise di offrire un premio di 2500 corone a chiunque fosse stato in grado di descrivere matematicamente il moto di un certo numero di corpi soggetti alla forza di attrazione gravitazionale, quella descritta da Newton un paio di secoli prima. L'intento era chiaro: sfruttare la potenza della Matematica per predire il futuro, ma soprattutto la stabilità del Sistema Solare. Il problema, noto oggi come *problema degli N-corpi gravitazionale*, è difficilissimo perché appartiene a quella classe di problemi matematici detti non integrabili, ovvero la soluzione non può essere espressa mediante un algoritmo che include quadrature (calcolo di integrali) e funzioni implicite. Nonostante il problema fosse così difficile, il premio fu assegnato a Poincaré che studiò il moto di tre corpi, dimostrando che la soluzione non è esprimibile in forma esplicita. Nel lavoro che gli valse il premio enunciò inoltre un risultato di stabilità sul moto di questi tre corpi, a cui era arrivato arrotondando differenze molto piccole nelle posizioni dei corpi, pensando che ciò non avrebbe influito sul risultato finale. Solo dopo la consegna del lavoro, si accorse di aver commesso un grave errore: a differenza di quanto aveva creduto inizialmente, un piccolo cambiamento nelle condizioni iniziali portava ad orbite completamente diverse. Si affrettò quindi a contattare l'editore per far cessare la stampa del suo lavoro e si prodigò per recuperare e distruggere tutte le copie già stampate. Si vocifera che dovette ricomprarne una buona quantità spendendo più delle 2500 corone del premio. Ma dopo l'errore, cosa sarebbe successo al premio? Sembrava che stesse per scoppiare uno scandalo e invece, come spesso succede quando si fa ricerca, un errore clamoroso aveva spianato la strada ad un risultato sensazionale: Poincaré aveva scoperto il caos. I tempi, però, non erano maturi per quella scoperta. Con l'inizio del Novecento le attenzioni della comunità scientifica (e quindi anche di Poincaré) si spostarono verso nuove teorie fisiche, la teoria della relatività (ristretta e generale) di *Albert Einstein* (1879-1955) e la meccanica quantistica di *Max Planck* (1858-1947), che avrebbero influenzato tutto il secolo. Toccò allora a Lorenz riscoprire il caos durante alcune simulazioni di moti turbolenti nell'atmosfera. Si cominciarono ad usare elaboratori elettronici i quali lavorano in aritmetica finita, troncando i valori numerici durante i calcoli. Lorenz si accorse che, trascurando le cifre

troncate dall'elaboratore nelle condizioni iniziali utilizzate per una nuova propagazione, si arrivava a risultati drasticamente diversi: i moti erano imprevedibili.

I fenomeni caotici nel Sistema Solare sono ben visibili, l'intero Sistema Solare può considerarsi caotico su tempi scala lunghi, non si possono infatti fare previsioni attendibili oltre i 100 milioni di anni. Ci sono inoltre dei meccanismi che amplificano il caos e che sono particolarmente importanti per capire la dinamica e l'origine degli asteroidi potenzialmente pericolosi.

a) *Collisioni*. Le collisioni tra i numerosi asteroidi che abitano nella fascia principale rappresentano un evento consueto, le cui conseguenze dipendono dalle condizioni e dalle caratteristiche dei corpi. I principali fenomeni che possono verificarsi in questo caso sono due: l'accrescimento e la frammentazione. La prima ha luogo quando due corpi collidono a una velocità relativa sufficientemente scarsa e porta alla fusione dei due corpi. La frammentazione avviene invece a velocità relative maggiori, o se la composizione chimica dei due corpi è più fragile. In questo caso, i corpi si frammentano dando vita a diversi frammenti più piccoli. Il destino dei frammenti prodotti da una collisione può essere diverso: possono diventare singoli asteroidi oppure dar luogo a una delle tante famiglie dinamiche di asteroidi.

b) *Incontri ravvicinati*. Il Sole, con la sua grande massa, costituisce l'attrattore principale di tutti i corpi del Sistema Solare; per questo le orbite possono essere calcolate, in prima approssimazione, applicando le *leggi di Keplero* per il moto a due corpi. La principale eccezione a questa legge si ha quando il corpo passa vicino ad un pianeta. In questo caso c'è una zona dove l'attrazione esercitata dal pianeta è più forte di quella degli altri corpi, incluso il Sole. Questa zona si chiama *sfera di influenza* del pianeta e al suo interno l'orbita originale del corpo cambia drasticamente diventando indipendente da quella originaria, anche se molto sensibile alle condizioni iniziali, cioè allo stato di moto prima dell'entrata nella sfera d'influenza. Per questa ragione gli incontri ravvicinati sono visti come amplificatori del caos.

c) *Risonanze*. La *risonanza* è un fenomeno efficiente nel rendere caotiche le orbite su tempi scala molto lunghi. Ma che cos'è una risonanza? Consideriamo un asteroide con un'orbita che incrocia quella di Giove. Come è noto, l'attrazione newtoniana tra due corpi, è inversamente proporzionale alla loro distanza, per cui quando i due corpi sono vicini, l'asteroide subisce la massima attrazione da parte del pianeta. Se i periodi di Giove e dell'asteroide non sono proporzionali, i due corpi si ritroveranno saltuariamente vicini e l'effetto generale della reciproca attrazione sarà nullo. Invece l'interazione tra Giove e l'asteroide torna ad avere importanza quando le orbite dei due corpi hanno dei periodi risonanti. In altre parole, quando il periodo dell'asteroide è una frazione di quello di Giove, i due si trovano vicini periodicamente e la perturbazione si amplifica rendendo l'orbita dell'asteroide instabile.

d) *Effetto Yarkovsky*. *Yarkovsky* era un ingegnere russo che aveva proposto, più di un secolo fa, una teoria sui cambiamenti delle orbite dei corpi vaganti nello spazio interplanetario, innescati dalle variazioni di temperatura superficiale fra l'emisfero diurno e

quello notturno. Dato che un corpo solido tanto più è caldo tanto più emette radiazione infrarossa, e questa emissione produce una piccola forza di rinculo (un po' come i gas emessi dall'ugello di un razzo), Yarkovsky propose che un piccolo corpo roccioso orbitante e rotante sul proprio asse avrebbe avuto la sua orbita lentamente modificata a causa del riscaldamento asimmetrico della superficie prodotto dalla radiazione solare. Yarkovsky e il suo effetto furono quasi dimenticati fino a tempi recenti, quando calcoli accurati, basati sulle proprietà termiche delle meteoriti e delle rocce lunari hanno mostrato che, per gli asteroidi di diametro fino a 20 km, l'effetto Yarkovsky altera lentamente, ma in misura non trascurabile i semiassi maggiori delle orbite. In una predizione d'impatto con orizzonte lontano nel futuro è necessario includere tale effetto nel modello.

5. Impact monitoring

Quando un asteroide viene scoperto, come abbiamo già evidenziato, non si sa niente circa l'orbita reale dell'oggetto. Vi è un insieme di possibili orbite, tutte compatibili con le osservazioni, che formano una regione di confidenza nello spazio delle orbite (tale spazio ha dimensione 6, servono infatti sei numeri per individuare univocamente posizione e velocità dell'oggetto). Possiamo descrivere questo fatto pensando ad uno sciame di asteroidi virtuali (VAs, *Virtual Asteroids*), con orbite diverse, ma molto vicine, e tutte compatibili con le osservazioni. La verità dell'asteroide è divisa tra tutti quelli virtuali, nel senso che solo uno è reale, ma non si sa quale. Per rendere le cose semplici è possibile pensare che tutti gli asteroidi virtuali abbiano la stessa probabilità di essere quello reale, ma in realtà si utilizza una distribuzione di probabilità più complicata (*Gaussiana*).

Poiché la regione di confidenza contiene un continuo di orbite, ogni asteroide virtuale è il rappresentante di una piccola porzione di spazio. C'è da notare che l'orbita nominale, soluzione del fit ai minimi quadrati dei residui osservativi, è solo uno dei tanti asteroidi virtuali, senza nessun altro specifico significato. Nel caso che un asteroide sia Earth-crossing, è possibile che esistano uno, o più asteroidi virtuali associati ad esso, per i quali è ammissibile una collisione. Quindi può esistere una piccola regione connessa piena di orbite collisionali, la quale definisce un impattore virtuale (VI, *Virtual Impactor*). Lo scopo dell'impact monitoring è individuare impattori virtuali ed assegnare a ciascuno una probabilità d'impatto. Per raggiungere lo scopo dobbiamo prendere ciascun asteroide virtuale e propagare la sua orbita nel futuro (di solito 100 anni) registrando eventuali incontri ravvicinati e impatti con il nostro pianeta. Per la propagazione dobbiamo naturalmente campionare con un numero finito di VAs la regione di confidenza. Questo viene fatto utilizzando un sottospazio unidimensionale dello spazio degli elementi orbitali (una curva) che chiamiamo Linea Delle Variazioni (LOV, *Line Of Variations*). Su questa curva vengono presi un certo numero di punti che rappresentano l'insieme dei VAs da propagare. Per la ricerca di impattori è necessario poi utilizzare un *piano bersaglio*, un piano passante per il centro della Terra e perpendicolare alla velocità relativa imperturbata dell'asteroide, sul quale viene segnata

la sezione della Terra e l'intersezione con le orbite dei VAs. Se un asteroide virtuale si trova dentro la sezione della Terra siamo in presenza di un impattore virtuale e possiamo procedere al calcolo della probabilità utilizzando una proiezione della regione di confidenza 6-dimensionale sul piano bersaglio che rappresenta l'incertezza associata all'impattore virtuale. Gli algoritmi qui descritti sono implementati in un software chiamato CLOMON2 (la prima versione CLOMON risale al 1998), creato dal Gruppo di Meccanica Celeste dell'Università di Pisa, che dal 2002 si occupa di calcolare orbite e probabilità d'impatto degli asteroidi potenzialmente pericolosi: gli output sono riassunti in una Risk Page pubblicata sul sito web NEODyS. Un sistema analogo, Sentinel, si trova al Jet Propulsion Laboratory (JPL) di Pasadena, California. I due gruppi di ricerca (UniPI e JPL) sono in continuo contatto per la verifica ed il confronto dei risultati.

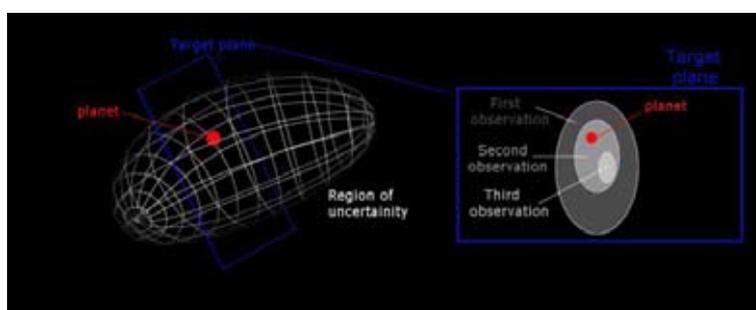


Figura 3

Se dovesse capitare di trovare una probabilità d'impatto uguale a 1, che cosa si fa? I fattori da prendere in considerazione sono essenzialmente due: dimensioni dell'oggetto e tempo rimanente all'impatto.

È chiaro che, maggiore è il tempo all'impatto, più possibilità si hanno di trovare una soluzione, che potrebbe anche consistere nell'organizzare una missione spaziale per la deflessione dell'asteroide. Se l'impatto è imminente (pochi giorni o addirittura poche ore) possiamo fare poco, ma gli oggetti in questi casi sono piccoli e spesso si sgretolano all'ingresso in atmosfera. Ad ogni modo il "cosa fare in caso di previsione di impatto" è un argomento molto complesso e ancora estremamente dibattuto sia a livello scientifico che politico.

6. Bibliografia e spunti di ricerca

Non ho di proposito inserito nei paragrafi precedenti riferimenti bibliografici, ma ho preferito evidenziare con il corsivo alcune parole chiave che possono essere ricercate sul web per ottenere maggiori informazioni (su Wikipedia, ma non solo).

Mi sento però di consigliare a tutti la lettura del seguente libro divulgativo

"Pianeti per caso" di Alessandra Celletti e Ettore Perozzi, UTET 2012

dove vengono trattati in maniera piacevole, ma rigorosa molti aspetti di meccanica celeste e astrodinamica.

Inoltre, se volete avere informazioni sulle orbite dei NEAs e su possibili impatti andate a visitare il sito NEODyS

<http://newton.dm.unipi.it/neodys/>

I RAGAZZI NELLA RETE: OPPORTUNITÀ E RISCHI (CALCOLATI)¹

ANNA VACCARELLI

STEFANIA FABBRI

FRANCESCA NICOLINI

Registro .it e Istituto di Informatica e Telematica, Consiglio Nazionale delle Ricerche di Pisa

1. Sommario

La sicurezza di Internet e la gestione dei propri dati e della propria identità in Rete è scottante e coinvolge tutti dai bambini delle elementari agli studenti delle superiori, includendo nel dibattito docenti e genitori, spesso più inesperti dei giovani, nativi digitali.

L'obiettivo è sfruttare al meglio tutte le potenzialità e le opportunità che la Rete offre e non quello di demonizzare la Rete per i suoi rischi, ma di imparare a conoscerli, controllarli.

Partiamo da casi concreti: partecipazione a social network, condivisione di file, giochi online, per introdurre il tema della privacy, del furto di identità, delle relazioni con altri utenti, della fiducia, in un continuo parallelo tra i nostri comportamenti nel mondo reale e quelli "virtuali".

2. Nativi digitali, immigrati digitali e mobile born

I nativi digitali (termine coniato da Prensky nel 2001 e oggi un po' abusato), vivono immersi dentro la tecnologia e che per questo hanno modelli di apprendimento completamente diversi dai genitori, gli "immigrati digitali", così definiti per sottolineare la natura non spontanea del rapporto con le nuove tecnologie.

Come intercettare questo target e fare formazione di qualità ai nativi digitali?

Secondo Paolo Ferri - Professore Associato docente di Tecnologie didattiche e Teoria e tecnica dei nuovi media presso la Facoltà di Scienze della Formazione dell'Università degli studi Milano Bicocca - la base su cui impostare progetti formativi davvero inno-

¹ Lezione tenuta giovedì 30 gennaio 2014, ore 11 - Liceo artistico Artemisia Gentileschi, Via Sarteschi n. 1, Carrara; venerdì 14 febbraio 2014, ore 11 - Liceo Artistico A. Passaglia, Via Fillungo n. 205, Lucca; giovedì 20 febbraio 2014, ore 11 - Liceo Scientifico XXV Aprile, Via Milano n. 36, Pontedera (PI); lunedì 18 novembre 2013, ore 11 - IISS A. Manetti, Via Brigate Partigiane n. 19, Grosseto; mercoledì 20 novembre 2013, ore 11 - Istituto Tecnico Aeronautico Lindbergh Flying School, Via di Ripoli n. 92, Firenze; lunedì 25 novembre 2013, ore 11 - Liceo Machiavelli, Via S. Spirito n. 39, Firenze; giovedì 5 dicembre 2013, ore 11 - Liceo Linguistico e Artistico L. B. Alberti, Via Pertini n. 25, Piombino (LI).

vativi dovrebbe partire dalla conoscenza delle abitudini dei bambini e ragazzi di oggi, soprattutto della loro “dieta mediale”, caratterizzata da una fruizione multimodale (tv, smartphone, videogiochi, computer) e, nella maggioranza dei casi, multitasking. Negli ultimi anni si è poi accentuato l’utilizzo “mobile”, in seguito alla diffusione su larga scala di smartphone e tablet, con il risultato che i giovani risultano sempre connessi e in continua relazione con i coetanei: “i cellulari sono uno strumento facile e relativamente poco costoso per accedere a quella parte della vita sociale, di relazione e di apprendimento che si svolge all’interno dello schermo” (Ferri P. - 2008). Ecco perché il concetto di nativo digitale (che nasce già in un’era interconnessa e trova naturale l’utilizzo della rete e dei mezzi a esso connessi) si estende in quello di mobile generation (connessa 24 ore su 24 e con mezzi di ultima tecnologia mobile), per la quale i social network rappresentano il mezzo per tessere e mantenere relazioni, un’estensione digitale della sfera sociale. Oggi si parla della generazione dei “mobile born”. In questo “ecosistema mediale”, non c’è alcuna distinzione tra reale e virtuale: i giovani “crescono, apprendono, comunicano e socializzano all’interno dei media digitali, non li utilizzano semplicemente come strumento di produttività individuale e di svago, sono in simbiosi strutturale con essi” (Ferri P. - 2008). La vita reale e la vita virtuale sono un’unica cosa: sia nell’una che nell’altra, i nativi digitali o mobile born “esistono”, con dati reali e nickname, dove ciò che si fa nell’una si fa nell’altra, ciò che non si farebbe nell’una non si farebbe nell’altra.

3. Il Registro .it e la cultura digitale

Il Registro è l’anagrafe dei domini Internet italiani, l’organismo che da oltre venticinque anni assegna e gestisce i domini a targa.it. Il Registro ha iniziato la sua storia all’interno dell’Istituto Cnuce del Cnr nel dicembre del 1987, con la nascita di *cnuce.cnr.it*, il primo dominio della rete italiana. Oggi il .it, con oltre 2.600.000 nomi, è tra i country code top level domain più popolati, a livello europeo, per numero di domini registrati.

Il Registro .it è un servizio gestito dall’Istituto di Informatica e Telematica del Consiglio Nazionale delle Ricerche e ha sede a Pisa nell’Area della ricerca del Cnr che conta tredici istituti, mille e cento persone tra ricercatori, tecnici e personale amministrativo, 10 brevetti e oltre 1.000 pubblicazioni scientifiche internazionali solamente nell’ultimo anno di attività.

La costola pisana del Consiglio Nazionale delle Ricerche è la culla dell’Internet made in Italy.

Il Registro .it è da sempre impegnato nella diffusione della cultura di Internet. Dal 2011 ha avviato un progetto di intervento nelle scuole, la Ludoteca del Registro .it (www.ludotecaregistro.it) per spiegare in modo semplice agli scolari e agli studenti il funzionamento della Rete e portarli al suo uso consapevole. Oggi, attraverso il laboratorio portato nelle scuole elementari, medie inferiori e superiori, abbiamo incontrato circa 2000 studenti, quasi 100 docenti e svolto oltre 200 ore di lezione.

4. Internet: che bella la rete!

Internet non può più essere definito new media: tecnicamente la sua presenza in Italia risale a oltre 25 anni fa (è proprio dal Cnr di Pisa che parte il primo collegamento alla rete Internet nel dicembre 1987). Il suo volto, dagli inizi, è molto cambiato e oggi la vera star della Rete sono i social network, che non sono solamente Facebook, Youtube e Twitter: se ne contano a centinaia, generici, tematici, orientati ai più diversi interessi e continuamente ne appaiono di nuovi. Costituiscono un nuovo paradigma di comunicazione, non ne sono soltanto uno strumento; hanno cambiato il modo di relazionarci con gli altri, dove “gli altri” possono essere vicini o lontani, amici, conoscenti o perfetti sconosciuti; hanno cambiato il luogo dove ci relazioniamo: non esiste più la piazza del paese, o il tradizionale faccia a faccia, ma il luogo virtuale, dove potenzialmente la platea degli ascoltatori è enorme.

Eppure, alla domanda fatta ai ragazzi: “Perché sei sui social network?” la risposta è timida e spesso vaga; molti hanno davanti a sé la (limitata) prospettiva delle proprie personali esperienze, ma i social network sono uno strumento potente per abbattere barriere spaziali, sociali e temporali. Pensiamo all’uso che ne è stato fatto durante gli ultimi anni, di denuncia e informazione e alla nascita della primavera araba, al ruolo chiave nella gestione delle emergenze ambientali, come, recentemente, l’uragano nelle Filippine o l’alluvione in Sardegna, e riflettiamo anche sulle censure, più o meno riuscite, che le popolazioni subiscono in alcuni Paesi, non ultima la Turchia. Ma anche limitandosi a temi e prospettive più vicine al nostro quotidiano, scopriamo che per alcune aziende diventa uno strumento per migliorare il “business” (<http://www.fattoreinternet.it/studio>), come per alcuni lavoratori di “antichi mestieri” (<http://www.registro25.it/services-view/contest-cnr/index.html>). Tutto il movimento dei “wwwworkers”, come quello dei “makers” (movimento “fai da te” di artigiani digitali), è “figlio” della rete e della tecnologia e schiude modelli completamente nuovi di mercato. In alcuni incontri gli studenti hanno osservato “Internet distrugge posti di lavoro tradizionali”: è uno stereotipo, i mestieri si trasformano. I piccoli negozi spesso chiudono (ma più spesso a causa della crisi che non della Rete), ma molti artigiani e imprenditori rilanciano la loro azienda o attività proprio grazie a Internet (una vera e propria “finestra sul mondo”), trovando nuove forme di investimenti e vendita. Le nuove competenze digitali, invece, non richiedono necessariamente specifiche conoscenze tecniche della Rete. Ci sono poi le “21 nuove professioni del web” (<http://www.skilprofiles.eu/>): alcune richiedono profili strettamente tecnici, ma altre sono esercitate da professionisti con una formazione umanistica, come il “social strategist”, il “social media manager”, ecc. Il rapporto “Crescita digitale” curato da Marco Simoni e Sergio de Ferra nel 2012 per Italia Futura (www.crescitadigitale.it) sostiene che se in Italia la Rete fosse diffusa come in Francia o in Olanda si creerebbero centinaia di migliaia di nuovi posti di lavoro (vedi figura 1).

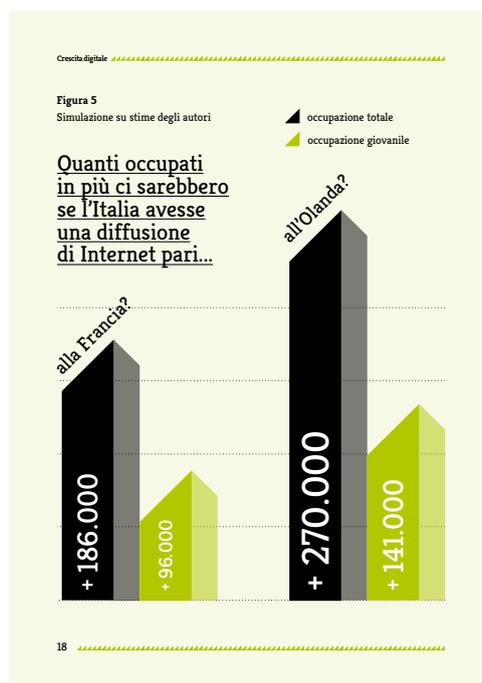


Figura 1

5. Internet delle cose e smart city

I dati scambiati in Rete e le informazioni che viaggiano sono quantità spaventose che tendono ad aumentare perché aumentano gli oggetti che si connettono a Internet: pensiamo ai “body sensors”, i sensori che ci portiamo addosso per misurare i passi, il battito cardiaco ecc., che possono già connettersi in Rete, pensiamo ai nuovi tessuti tecnologici con i quali ci vestiremo (wearable sensors), che contengono chip e antenne per trasmettere parametri fisiologici (temperatura, umidità, ecc), alla casa domotica, in cui gli elettrodomestici “parlano” tra loro e vengono comandati a distanza da uno smartphone. E pensiamo anche, allargando ancora di più l’orizzonte, alla città del futuro, la smart city, in cui ogni elemento urbano e ogni veicolo saranno connessi: la pensilina avviserà l’autobus se ci sono persone in attesa alla fermata, il cassonetto dei rifiuti avviserà il camion della raccolta quando è pieno, ottimizzando la circolazione di questi mezzi pesanti e contribuendo al risparmio energetico e all’impatto ambientale, con minori consumi e minor inquinamento. Questi scenari sono futuri, ma non così lontani dalla realtà: ci sono già esempi di “città intelligenti” anche in Italia, come ad es. Siracusa, Agordo (in provincia di Belluno), Riccione (in provincia di Rimini), le prime a sperimentare le tecnologie e le soluzioni sviluppate nell’ambito del progetto Cnr “Energia da fonti rinnovabili e Ict per la sostenibilità energetica”. I nostri ragazzi vivranno la realtà delle smart city e i nuovi paradigmi urbani richiederanno competenze e professionalità specifiche, che venti o anche dieci anni fa non esistevano e a cui, invece, oggi i ragazzi possono guardare come nuove opportunità di lavoro.

6. Il grande Fratello

Alcuni dei ragazzi delle classi in cui poniamo la domanda “Ma allora siamo nello scenario del Grande Fratello?” ci guardano meravigliati, pensando al reality televisivo piuttosto che a Orwell... Eppure la domanda è inquietante. Enormi quantità di dati (i cosiddetti “big data”) sono a disposizione di chi li raccoglie per elaborarli e ottenere risultati volti a migliorare la vita delle persone e della società, oltre che a semplificarla, ma rappresentano anche potenzialmente un rischio per la nostra privacy. Il problema della privacy oggi ossessiona e preoccupa un po’ tutti: la Rete è certamente un amplificatore dei nostri dati e delle informazioni che inseriamo ad ogni accesso, in ogni sito web o sui social, ad esempio, e non si può negare che un margine di rischio esista. Quest’ultimo va, tuttavia, misurato, possibilmente ridotto e in parte accettato (come accade sempre anche nella vita reale): non possiamo rinunciare alle opportunità che la Rete, la tecnologia e il progresso ci offrono. Privarsene sarebbe come scegliere di vivere sotto la famosa campana di vetro per non correre rischi affrontando la vita quotidiana. Bisogna muoversi nella Rete come nella vita reale, con buon senso e prudenza, evitando di affidare ad essa informazioni particolarmente delicate o riservate come quelle sulla propria salute, sul proprio conto in banca e così via, a meno che non ci siano adeguate garanzie di riservatezza. Ed oggi la tecnologia offre soluzioni robuste.

7. La memoria della rete

I dati e le informazioni che noi stessi immettiamo nella Rete costituiscono un enorme serbatoio di memoria collettiva a cui tutti attingiamo. L’esempio per antonomasia è certamente Wikipedia, ma anche le foto condivise tra amici e parenti, documenti di lavoro comuni a più gruppi e più persone, racconti e documentazione di fatti e avvenimenti, che possiamo sempre consultare, cercandoli online. In definitiva, ancora un’opportunità. Ma c’è anche in questo caso un rovescio della medaglia: in Rete non c’è diritto all’oblio (anche se Google sta tentando, con un procedimento ancora in via di affinamento, di rimuovere link e url “non più rilevanti” dalla Rete, su richiesta del singolo utente o di una azienda, con un semplice invio di un modulo). Chi immette in Rete un’informazione deve sapere che non potrà cancellarla definitivamente: qualcuno potrebbe averla memorizzata, o potrebbe aver salvato anche un semplice screenshot e potrebbe renderla di nuovo pubblica in qualunque momento. Questo aspetto deve far riflettere e suggerire prudenza nel “postare” immagini, commenti e informazioni tipicamente sui social network, ma non solo, perché, anche se dovessimo pentirci, non potremmo tornare indietro e non basterebbe semplicemente chiedere scusa. L’invito che facciamo ai ragazzi è di usare con giudizio l’opportunità di condividere i propri dati, la storia personale e le proprie informazioni: non sempre teniamo completamente aperte le finestre di casa, ci sono momenti privati in cui tiriamo le tende; non sempre possiamo dire senza filtri quello che pensiamo, per non ferire o offendere chi abbiamo davanti. Dobbiamo imparare che nella Rete esistono gli stessi limiti di buon senso e civile convivenza della vita reale.

8. Identità digitale

La capacità della Rete di conservare la memoria di ciò che viene pubblicato ci porta immediatamente a considerare l'aspetto della propria identità digitale. Essa nasce con la nostra prima comparsa su Internet, sia diretta (noi ci proponiamo in prima persona con un profilo), che indiretta (qualcuno parla di noi), esattamente come nella vita reale. La nostra identità digitale oggi è un bene prezioso: parla di noi, di quello che siamo (o che sembriamo...) e la costruiamo giorno per giorno senza possibilità di correggere il passato (la Rete ha la memoria lunga!). Essa parlerà di noi nei colloqui di lavoro, nell'instaurare nuove relazioni, nel proporsi per svolgere qualunque attività: professionale, sportiva, ludica, hobbistica. È per questo che dobbiamo curarla con attenzione, perché anche attraverso di essa stiamo costruendo il nostro futuro e questo è (tanto più) vero anche per i ragazzi delle scuole superiori. Essi spesso non riflettono abbastanza su questo aspetto, sulle opportunità o sulle conseguenze che la costruzione della loro identità digitale può portare. Ciascuno, come nella vita reale, si fa una propria reputazione e la costruisce giorno per giorno, tassello dopo tassello, con dati e informazioni, spesso molto personali. Una buona reputazione, costruita da subito con perseveranza, probabilmente ci faciliterà nella vita da "adulti". A volte i ragazzi hanno obiettato che ci si può costruire una falsa identità: è vero, come lo è nella vita reale. Questa scelta comporta comunque delle conseguenze, che, se portata all'estremo, possono essere anche penali (la falsa identità è infatti un reato).

La riflessione sull'identità offre anche lo spunto per parlare di anonimato: un po' il demone di ragazzi e dei genitori. È un po' un mito da sfatare: nella maggior parte dei casi le forze dell'ordine, quando chiamate a intervenire, svelano in breve tempo le identità degli anonimi ed è giusto che ne siano consapevoli, sia quelli che si nascondono dietro un tentativo di anonimato sia quelli che ne sono vittime: possono incastrare l'anonimo e svelarci, in breve tempo, nome, cognome e volto.

9. Comportamenti e rischi

Internet è soprattutto un'opportunità: di ampliare la conoscenza, di arricchire le relazioni, di scoprire nuovi sbocchi professionali, ma non si può negare che la vita virtuale, come quella reale comporti alcuni rischi. I rischi, come insegna la teoria, non si possono azzerare, in nessuna situazione, si possono solo ridurre a un livello che venga ritenuto accettabile per quel determinato contesto. Nella nostra attività in Rete dobbiamo sapere quali sono i rischi che potremmo correre (violazione della privacy, furto di dati, furto di identità, violazione di alcuni diritti in generale, ecc.) e dobbiamo adottare comportamenti corretti e prudenti, oltre che contromisure tecniche (password sicure, cifrature di dati ecc.). A ben vedere i comportamenti corretti e prudenti da adottare su Internet sono circa gli stessi che adottiamo nella vita reale, oltretutto gli stessi per intere generazioni, opportunamente "tradotti".

- "non dare confidenza agli sconosciuti", classica raccomandazione dei genitori: lo sconosciuto è il (vago) amico sul facebook o la nostra controparte in una chat, magari di una stazione di gioco online (Xbox, Wii, Playstation ecc.);

- “non accettare caramelle dagli sconosciuti”: facile traduzione se a “caramelle” sostituiamo, per esempio, una ricarica telefonica o analoghi regali;
- “non raccontare a chiunque i fatti tuoi”: mai così attuale! Mettere la nostra vita online senza pensarci su, ci espone al rischio di dare più informazioni di quanto non avremmo voluto, o dovuto, a perfetti estranei o quasi. Postare le foto da un luogo di vacanza, dichiarando che la vacanza dura due settimane, dà immediatamente adito a un malintenzionato, potenziale ladro, di avere campo libero in casa nostra.

Esempi forse banali, ma che servono a capire che è il buon senso che deve guidare le nostre azioni sia nella vita virtuale che nella vita reale.

Un accenno merita sempre il problema del diritto di proprietà intellettuale: quasi sempre le condizioni che accettiamo iscrivendoci a un social network prevedono che i diritti di sfruttamento di ciò che pubblichiamo su quel social, siano esse foto, video, musica o altri prodotti originali del proprio ingegno, vengano ceduti al social. Utilizzare la piattaforma di un social network per far conoscere le proprie opere originali è sicuramente un vantaggio, ma dobbiamo essere consapevoli che questo vantaggio ha un prezzo (che può valere la pena di pagare!).

10. Chi insegna e chi impara

Spesso gli adulti si sentono inadeguati per affrontare i problemi della Rete con i bambini e gli adolescenti, perché sono consapevoli di non avere la padronanza tecnologica, mentre i nostri ragazzi sono tutti piccoli potenziali “nerd”. In questo caso però bisogna accettare che i ruoli di chi impara e chi insegna si scambino continuamente. Gli adulti insegnano ai bambini o ragazzi come comportarsi saggiamente, online come per strada, e sanno farlo certamente; i ragazzi, invece, spiegano ai grandi come funziona la tecnologia, che gli adulti da “immigrati digitali” non conoscono alla perfezione. Si invertono i ruoli “tradizionali” ed entrambi devono sempre imparare qualcosa: gli adulti da un lato, che devono adeguarsi alle nuove tecnologie e riuscire a tradurre i loro insegnamenti in un linguaggio più semplice e familiare, oltre che imparare ad “ascoltare” anche i “nativi digitali”; e i ragazzi dall’altro, che devono comunicare “insegnando” a genitori e insegnanti ad utilizzare strumenti tecnologici a loro familiari e a navigare in Rete.

È tutto rovesciato, nuovo ed entusiasmante.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ferri P. *Nativi digitali*, Mondadori 2008

CINEMA NELLA CELLULA: VISUALIZZAZIONE 3D IN BIOLOGIA¹

MONICA ZOPPÈ

Scientific Visualization Unit, Istituto di Fisiologia Clinica, CNR, Pisa

1. Introduzione

La Biologia è la scienza che studia i fenomeni legati alla vita, di ogni genere: batteri, vegetali, animali, compresi gli esseri umani. In particolare, noi biologi cerchiamo di capire quali siano e come lavorino i meccanismi che permettono agli esseri viventi di funzionare. Come sapete, l'unità fondamentale degli esseri viventi è la cellula, all'interno della quale avvengono tutti i processi che permettono la sopravvivenza dell'organismo. Ogni cellula, se per esempio parliamo degli esseri umani, è diversa dalle altre: le cellule dei muscoli (miociti) sono specializzate nella produzione di energia meccanica, mentre quelle del sangue (i globuli rossi) nel trasporto di ossigeno e anidride carbonica dai polmoni al resto del corpo e viceversa. Così ogni cellula ha una sua funzione, ed è attrezzata per svolgerla nel migliore dei modi. Tutte le cellule però hanno anche molti elementi in comune: tutte hanno dei meccanismi per comunicare con l'esterno, hanno un nucleo in cui è contenuto il materiale genetico (DNA, che è uguale per tutte), ed hanno strumenti (i ribosomi) per costruire le proteine; proprio queste ultime sono le vere responsabili dei processi metabolici. Tornando al muscolo, le fibre che producono le contrazioni sono fatte di proteine, così come è una proteina l'emoglobina, che porta l'ossigeno e l'anidride carbonica e sono proteine anche quelle che ricevono la luce negli occhi, che trasformano il cibo in energia ed elementi, o gli anticorpi che ci proteggono da alcune infezioni.

Nella lezione di oggi, vedremo alcune di queste proteine, e ne analizzeremo alcuni caratteri importanti.

2. Le proteine

Abbiamo appena visto che le proteine stanno perlopiù dentro le cellule; queste però sono piccolissime, invisibili all'occhio umano; infatti per vederle dobbiamo utilizzare un microscopio. Le proteine, di cui ogni cellula è piena, sono a loro volta molto più piccole, infatti sono invisibili anche con i microscopi: per riuscire a capire come sono fatte, dobbiamo utilizzare degli strumenti molto complessi. Questi studi sono iniziati

¹ Lezione tenuta lunedì 2 dicembre 2013, ore 11, Liceo Artistico Porta Romana e Sesto Fiorentino, Via Giusti n. 31, Sesto Fiorentino (FI). Tutti i video qui descritti, nonché gli altri lavori ed articoli prodotti dal gruppo SciVis sono liberamente visibili su internet, tramite il nostro sito www.scivis.it. Il video sulla contrazione muscolare è derivato da un lavoro più complesso che descrive alcuni meccanismi patologici di una malattia del cuore (la Cardiomiopatia Dilatativa).

parecchi anni fa, ed oggi abbiamo informazioni sulla forma di molte proteine diverse; proprio in questi giorni la Protein Data Bank, che è il deposito globale per tutti i dati sulle proteine, ha annunciato di aver raggiunto il numero di 100.000 strutture molecolari.

Ma di cosa parliamo esattamente quando diciamo proteine?

So che la prima immagine a cui si pensa è quella della bistecca, ma abbiamo detto che si tratta di cose piccolissime, invisibili. In effetti quello che si dice, che la carne è ricca in proteine, è anche vero: nel video che ora vediamo si vedono le principali proteine che compongono la carne, con una differenza importante rispetto alla bistecca: nel nostro video le proteine sono vive, si muovono e compiono lavori importanti, mentre nella bistecca, che è ovviamente proveniente da un animale già morto, non solo le proteine sono ferme, ma sono anche state distrutte (denaturate) dalla cottura.

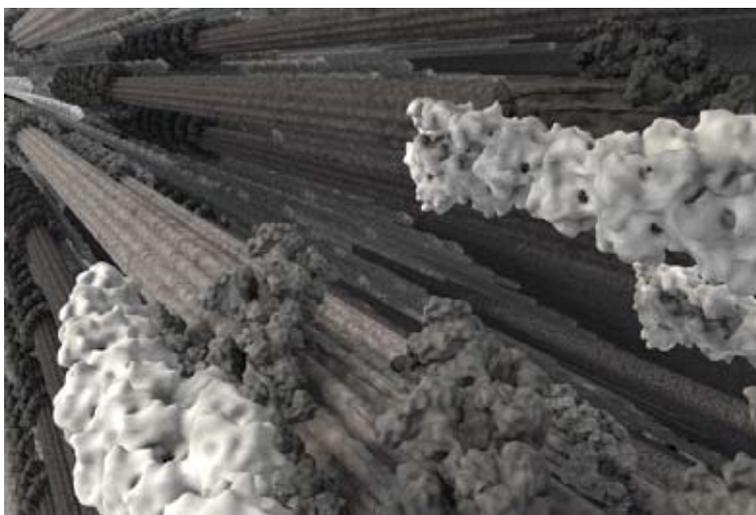


Figura1. Tratto da ActinMyosin²

Cerchiamo ora di capire cosa abbiamo visto, e come abbiamo fatto a produrre questo filmato e i prossimi che vedremo.

Abbiamo detto che le proteine sono oggetti piccolissimi, talmente piccoli che è possibile descriverli sulla base della loro composizione in atomi: grazie alla genetica sappiamo il codice, cioè di quali atomi è composta ogni proteina; grazie alla biochimica, sappiamo in che modo questi atomi sono legati tra di loro, e grazie alla biologia strutturale, sappiamo, per ognuno di questi atomi dove si trova esattamente nello spazio.

Ecco quindi che possiamo 'costruire' un modello fatto di sfere (gli atomi) e bastoncini (i legami), ognuno disposto nel modo corretto. In effetti i primi modelli erano davvero costruiti con sfere e bacchette, ma oggi tutto questo si fa in modo virtuale, cioè al computer. In pratica, tutte le informazioni necessarie vengono inserite in un programma di modellazione 3D, del tipo utilizzato per il cinema o videogiochi, e il sistema può riuscire a costruire il modello, e farcelo vedere su schermo. C'è da aggiungere che

gli atomi non sono tutti uguali, anzi, ce ne sono di tipi diversi, ed ognuno si comporta in modo diverso a seconda della sua posizione, dei suoi vicini, e delle caratteristiche generali dell'ambiente, come il pH, la temperatura, o la presenza di sostanze particolari.

Ogni essere umano, per funzionare, produce circa 30.000 tipi diversi di proteine. Se contiamo anche le modificazioni e le varianti, arriviamo fino a 300.000. Ognuna di queste è diversa dalle altre per forma, dimensione, luogo e momento in cui viene prodotta. L'informazione per ogni proteina è contenuta nel codice genetico, il DNA, che specifica come costruire le molte migliaia di proteine diverse, secondo un 'codice' fatto di amminoacidi. Questi amminoacidi sono dei piccoli gruppi di atomi, e ce ne sono solo 20. Per capire come, a partire da 20 aminoacidi si possano costruire così tante proteine diverse, consideriamo che il nostro alfabeto è fatto di un numero simile di lettere, ma con queste noi possiamo costruire una quantità infinita di parole. Una differenza tra le parole e le proteine è che se le prime sono composte da un numero solitamente piccolo di lettere, le proteine sono composte di molte centinaia, a volte migliaia di aminoacidi. Così come la composizione di parole segue alcune regole generali (per esempio un rapporto costante tra vocali e consonanti), così anche la composizione delle proteine segue regole, dettate dalla fisica e dalla chimica.

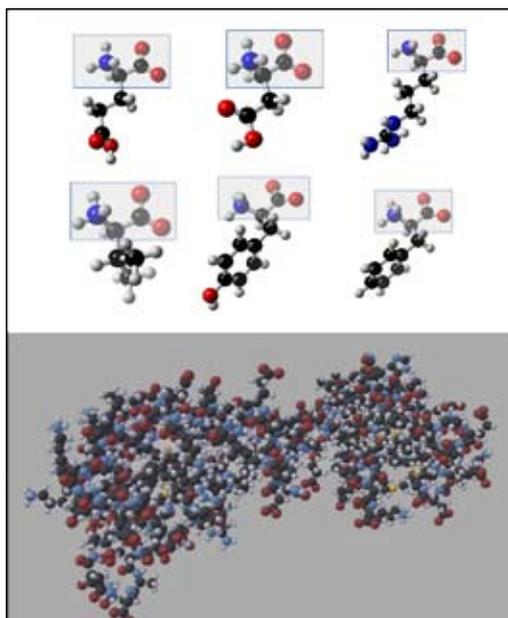


Figura 2. Proteine

Nella figura vediamo una rappresentazione di alcuni aminoacidi, con la parte uguale per tutti evidenziata nei riquadri; ogni atomo è rappresentato da una sfera (di diversi colori per atomi diversi) e le sfere sono unite da piccole barre che rappresentano i legami. Vediamo anche una proteina intera, sempre rappresentata in forma atomistica. Si tratta di una proteina piuttosto piccola, composta di 'solo' 148 aminoacidi, per un totale di circa 2000 atomi. Questa rappresentazione, in cui è possibile distinguere ogni atomo, è però difficile da interpretare. Noi esseri umani siamo abituati a vedere delle

superfici continue, e non riusciamo ad interpretare l'insieme di atomi. Inoltre, come abbiamo visto nel video, le proteine si muovono e cambiano forma, cioè ogni atomo si può spostare, sempre mantenendo i suoi legami.

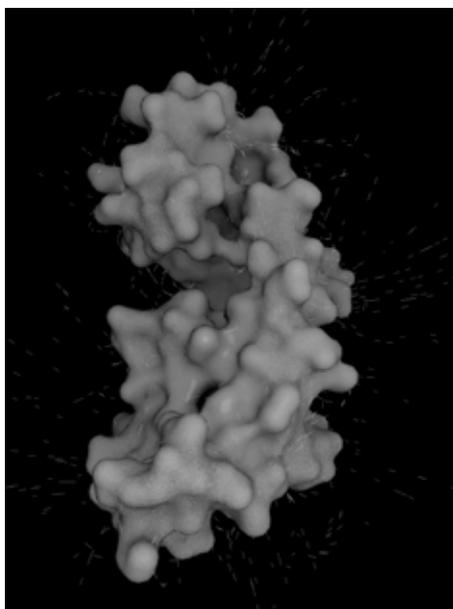


Figura 3. Calmodulin

Per ovviare il problema della rappresentazione ad atomi si utilizzano delle tecniche che ricavano la superficie che ingloba tutti gli atomi, ottenendo un unico oggetto, magari di forma 'strana' ma geometricamente coerente, e comprensibile; per far vedere il movimento, ogni volta che un atomo si muove 'dentro' la superficie, ricalcoliamo tutta la superficie, in sequenza di 24 immagini al secondo. In questo modo possiamo produrre dei video abbastanza accurati, tanto da poterli osservare senza sforzo e senza effetti sgradevoli. Vediamo dunque uno dei nostri video, in cui effettuiamo un viaggio in una cellula.

3. Viaggio nella cellula

Quello che vediamo ora è uno dei nostri video, dal titolo PROTEIN EXPRESSIONS³ - Study N. 3; in questo video sono rappresentati diversi ambienti: il viaggio inizia nel sangue, in cui vediamo molti globuli rossi, e ci avviciniamo sempre più alla superficie di un globulo bianco. Man mano che il globulo bianco si avvicina, distinguiamo sempre meglio i dettagli, e nel frattempo va via il colore, per lasciare il video in bianco e nero. Quando voliamo ad una certa altezza dalla superficie, possiamo riconoscere che questa si muove, è come fatta di colline ondegianti, e su queste le chiazze più scure (che rappresentano gruppi di proteine viste da lontano) anche queste si muovono, come isole galleggianti e dinamiche su un mare piuttosto denso.

La superficie della cellula bianca, vista da vicino, è ricoperta di molte proteine ed

anche di altre molecole, tra cui notiamo degli zuccheri. Già ora si può riconoscere che alcune proteine hanno l'abitudine di stare in gruppo (aggregate), mentre altre tendono a muoversi in solitudine, come il canale di potassio (quello da cui vediamo uscire gli ioni di potassio - sfere bianche), che utilizziamo per entrare proprio all'interno del nostro globulo bianco.

All'interno della cellula è tutto un brulicare di minuscoli oggetti, (sempre proteine) che paiono affollarsi senza senso né scopo. Quello che si nota è il grande affollamento, e la presenza di alcune strutture di grandi dimensioni.

Questa rappresentazione è realistica solo fino ad un certo punto: in realtà l'affollamento proteico è molto maggiore, tanto che ogni proteina si trova sempre a contatto con altre 3 o 4. E' un po' come essere in un autobus molto affollato: abbiamo sempre qualcuno su ogni lato, e, se dobbiamo raggiungere l'uscita, facciamo una certa fatica e ci mettiamo del tempo, a causa dell'affollamento.

Le grandi strutture che vediamo, quella specie di lunga corda, sono microtubuli. Anche questi sono composti di proteine: decine di migliaia di proteine uguali che si organizzano a formare un tubicino, che può essere utilizzato da altre proteine per camminarci sopra, a volte portando dei carichi che possono essere altre proteine, oppure addirittura delle vescicole di grandi dimensioni.



Figura 4. Tubulin

Ci spostiamo poi verso la periferia della cellula, un luogo in cui avvengono molti eventi determinanti per la vita cellulare, tra cui la formazione di una struttura contrattile, simile a quella osservata prima nel muscolo. Si tratta di un anello che scorre internamente alla membrana, e che, con la contrazione, porterà alla divisione cellulare, per cui dove prima c'era una cellula dopo ce ne sono due. La contrazione però, avviene solo nel momento in cui tutto è pronto, situazione che viene segnalata all'anello contrattile

grazie ad un sistema di comunicazione che include un'ondata di ioni di Calcio e la mediazione della Calmodulina, la proteina vista prima.

Questa è sensibile alla presenza del Calcio: infatti è in grado di inglobarne 4 atomi, cosa che la induce a cambiare conformazione, diventando così attiva nel trasmettere al complesso contrattile il segnale di VIA per la divisione cellulare.

4. Tecnologie per la visualizzazione

Per poter produrre questi filmati, il gruppo di visualizzazione scientifica dell'Istituto di Fisiologia Clinica di Pisa ha sviluppato BioBlender, un programma apposito, che può accedere alle banche dati, ricavare le posizioni degli atomi delle proteine, calcolare i movimenti, calcolare le superfici, e finalmente filmarle. Il tutto avviene in un sistema di computer graphics 3D, in cui, aldilà delle funzioni scientifiche, sono presenti sistemi che simulano fonti di luce, una telecamera, ed ogni altro 'trucco' che possa essere utilizzato per la rappresentazione.

Il sistema da noi sviluppato è basato sul pacchetto Blender, uno dei migliori programmi di grafica 3D, disponibile in formato Open Source. Per poter utilizzare il nostro metodo, è sufficiente scaricarlo dal sito BioBlender.it, ed installarlo su Blender, seguendo le istruzioni.

Se qualcuno di voi pensa di voler applicare alcune delle arti che coltivate in questo Liceo Artistico alla Biologia, BioBlender è un ottimo punto di partenza.

PREMIO GIULIO PRETI

Settima edizione



MOTIVAZIONE PER IL CONFERIMENTO DEL PREMIO GIULIO PRETI A VITTORIO SILVESTRINI

Il Premio Giulio Preti, nell'ambito dell'edizione 2013 di Pianeta Galileo, è stato assegnato al Professor Vittorio Silvestrini dal Consiglio Regionale della Toscana, su proposta unanime del Comitato Scientifico Tecnico. Di seguito una breve descrizione della figura del Professor Silvestrini.

Il Professor Vittorio Silvestrini, pur essendo nato in Alto Adige, a Bolzano nel 1935, si sente romagnolo di Faenza dove è cresciuto e si è formato negli anni della scuola. I suoi interessi di giovane brillante e curioso lo portano a tentare il concorso di ammissione alla Scuola Normale, dove entra, iscrivendosi quindi al corso di Laurea in Fisica della Università degli Studi di Pisa.

Silvestrini quindi, si è laureato in fisica, giovanissimo, nel 1957, presso l'Istituto di Fisica di Pisa e nello stesso anno si è diplomato con lode alla Scuola Normale Superiore.

Sono anni di formidabili avventure intellettuali e di confronto con i migliori giovani che in Italia si cimentano con lo studio della materia che fece grande Enrico Fermi, non molti anni prima. E sono anni nei quali trova nuovi amici con i quali manterrà indelebile un'amicizia per tutta la vita: e vi sono Giorgio Bellettini e Italo Mannelli, tra gli altri.

E con loro, fisici anch'essi con una brillante futuro, ancora solo sperato, Vittorio intraprende lo studio prima, e il mestiere poi, di fisico. In particolare, di fisico delle particelle elementari che dietro la figura trainante di Edoardo Amaldi, grande vecchio della fisica italiana, sebbene ancora solo cinquantenne, stava diventando rapidamente la figura di punta, il vero stereotipo dello scienziato.

Vittorio quindi, dopo la laurea, va dove la ricerca italiana sta scrivendo nuove pagine di storia della fisica: a Frascati, infatti, si sta costruendo l'elettrosincrotrone (detto 'sincrotrone' dai suoi utilizzatori) e su di esso, alla fine degli anni '50, alcuni nuovi esperimenti potevano essere installati sui fasci di elettroni estratti.

Silvestrini, giovane fisico entusiasta di essere sulla frontiera della ricerca, trovò il terreno ideale per formarsi come fisico sperimentale partecipando a diversi esperimenti che si andavano succedendo in quegli anni.

Mentre altri tra i vecchi amici vanno a lavorare sulle nuove 'macchine', in Germania, al CERN, in Russia ed in America, Vittorio rimane a Frascati, con Giorgio Salvini e altre nuove certezze della fisica italiana, come Marcello Conversi. Per oltre dieci anni lavora alle scoperte che segnano quel pionieristico, ma significativo periodo della fisica.

In particolare, tra le altre cose, il Prof. Silvestrini, si è occupato di:

1. misura della fotoproduzione di pioni neutri per fotoni incidenti di energia compresa tra 400 e 800 MeV, utilizzando l'elettrosincrotrone di Frascati, all'epoca una delle macchine acceleratrici più potenti al mondo(1965);

2. misura della sezione d'urto di fotoproduzione della particella eta per energie del fotone incidente comprese tra 800 e 1.000 MeV (1966);
3. determinazione dei branching-ratio dei vari canali di decadimento della particella eta (1966);
4. studio della struttura elettromagnetica di particelle adroniche (1972);
5. studio delle interazioni elettrone-positrone ad alta energia (1973);
6. misura del fondo di muoni prodotti nel back-scattering di raggi cosmici sulla superficie del rivelatore di neutrini (1990);

Ma il Prof. Silvestrini non rivolge i propri interessi solo all'elusivo mondo delle particelle elementari; ben prima che il 'solare' (come si dice malamente oggi) diventasse quella moda che è ormai da una ventina di anni, quale precursore, egli decide di occuparsi di energia solare e di nuovi dispositivi ideati e costruiti per catturarne la smisurata ma inafferrabile potenza.

Nel 1972 vinse la Cattedra di Fisica Generale all'Università Federico II di Napoli. Adesso, il nuovo scenario con il quale si deve confrontare sono gli studenti dell'Università, certo ben più articolato e complesso panorama rispetto alla comunità dei fisici. Ma Vittorio Silvestrini affronta questa sfida con grande impegno e da quel momento, le sue nuove passioni divengono la didattica e la divulgazione della Scienza, e della Fisica, in particolare. È la passione per l'impegno sociale che lo muove, e lo spinge anche verso l'impegno politico che lo impegnerà per una legislatura nel Consiglio Regionale della Campania.

Questo è solo l'inizio del lungo percorso che vedrà alla fine la nascita della Città della Scienza, a Bagnoli, nell'area che aveva ospitato le acciaierie dell'Italsider; ed alla Fondazione IDIS che ne è lo strumento operativo.

Con queste parole egli descrisse l'inizio della sua nuova avventura:

Era l'intuizione attraverso la quale si poteva trasferire a tutti, ai visitatori tipici di una normale esposizione, il frutto delle nostre ricerche. Ed era il mezzo per mostrare e spiegare che il progresso della scienza occorre proprio a guidare l'avanzata delle civiltà.

Vittorio Silvestrini ha oggi alle spalle una lunga e prestigiosa attività scientifica in diversi campi, documentata da oltre cento pubblicazioni su riviste internazionali. Ha svolto per cinquanta anni attività didattica in numerose istituzioni scientifiche pubbliche e private ed è autore di decine di testi universitari, libri di divulgazione, centinaia di articoli su svariate riviste e giornali; storie, insomma, che comunque parlano di scienza ai ragazzi e ai cittadini.

Ma parlano, o dovrebbero parlare, anche e soprattutto ai politici, agli amministratori, a chi insomma ha nelle mani il futuro di questo Paese dove la Scienza è ancora ancella di una Cultura sedicente 'alta', ma in realtà solamente 'altra' per chi così la vuole vedere.

Invece Vittorio Silvestrini con il suo instancabile lavoro ha dimostrato, dimostra ancora oggi, come si possano raggiungere i risultati che sono davanti a tutti, quando il valore dell'impegno umano, della volontà e della fiducia nell'uomo si uniscono alla conoscenza scientifica e ai metodi della scienza, in una sintesi che è per adesso unica in Italia.

E che nonostante la sua riconosciuta 'bellezza', qualche mano criminale ha tentato di cancellare nella primavera del 2013. Ma inutilmente. La Città della Scienza è ancora viva e tornerà ad essere un esempio, l'esempio, per tutto il nostro Paese.

Marco M. Massai

ALTRE ATTIVITÀ



LE INIZIATIVE DI DIVULGAZIONE DEL CNR: AREAPERTA E PIANETA GALILEO

LUCIANO CELI

Istituto per i Processi Chimico-Fisici (IPCF), CNR, Pisa

Areaperta

Anche per l'edizione 2013, Areaperta, attività di divulgazione della scienza del CNR di Pisa, ha collaborato con Pianeta Galileo, organizzando alcune conferenze (di cui riportiamo di seguito delle brevi sintesi), in particolare:

- *Come battere Mr. K: capire i tumori e curare i pazienti* di Lucio Luzzatto (20 novembre 2013)
- *Studiare la vita attraverso le immagini* di Ranieri Bizzarri (27 novembre 2013) e
- *L'elasticità del cervello: genetica ed esperienza* di Laura Baroncelli (4 dicembre 2013).

offrendo così un bell'esempio di collaborazione tra enti, accomunati dall'idea di una corretta divulgazione scientifica, soprattutto verso i ragazzi.

Come battere Mr K: capire i tumori e curare i pazienti

Un tumore (o cancro, o neoplasia) insorge in seguito alla trasformazione di una cellula normale in una cellula tumorale (o cancerosa, o neoplastica). Sebbene si tratti di un processo complesso, conosciamo oggi l'essenziale. Tutte le cellule del nostro corpo (cellule somatiche) possono incorrere, soprattutto nel corso della divisione cellulare, in piccoli errori nella replicazione del DNA (mutazioni). La maggior parte delle mutazioni somatiche sono innocue ma alcune possono aumentare il ritmo riproduttivo o rendere la cellula meno disciplinata nel percepire e recepire i segnali di regolazione che provengono da altre cellule o dall'ambiente. Ogni mutazione che aumenti il ritmo di divisione cellulare conferisce alla cellula un vantaggio selettivo in senso darwiniano e se il processo si ripete si potrà accumulare un certo numero (probabilmente tra 3 e 6) di mutazioni tali da rendere una cellula così disregolata da chiamarla tumorale.

In alcuni casi le mutazioni che causano tumori sono note da tempo: in particolare quando danno alterazioni cromosomiche visibili al microscopio, come il cosiddetto cromosoma Philadelphia [traslocazione t(9;22)] nella leucemia mieloide cronica, o la traslocazione t(8;14) nel linfoma di Burkitt – più frequente in Africa ma presente in tutto il mondo. In altri casi le mutazioni somatiche che danno origine ai tumori sono così piccole che le chiamiamo puntiformi: oggi le tecnologie di sequenziamento del DNA

sono molto più rapide e più economiche di prima, e hanno una tale potenza risolutiva che si sta progressivamente costruendo un catalogo completo delle mutazioni che causano tumori. Da questi studi emerge che sono moltissime le combinazioni di mutazioni capaci di dare un tumore; neoplasie che finora abbiamo chiamato con lo stesso nome spesso non sono, sulla base delle mutazioni che li hanno causati, veramente uguali.

La cura di un malato oncologico ha sempre avuto come obiettivo di eliminare il tumore causando il minor danno possibile al resto dell'organismo. Per la maggior parte dei tumori, che chiamiamo solidi, il cardine della cura è perciò la chirurgia che consiste, ove possibile, nella resezione totale del tumore. Un'altra modalità ben nota di trattamento efficace è la radioterapia: questa ha fatto enormi progressi grazie a strumentazioni che riescono a concentrare le radiazioni sul tumore e a modularne l'intensità con precisione estrema (tenendo conto persino dei movimenti causati dalla respirazione), in modo da massimizzare l'effetto voluto sul tumore e minimizzare gli effetti tossici sui tessuti sani. Queste cure sono in complesso assai efficaci quando il tumore è localizzato in uno o pochi siti; quando però è più diffuso, o si teme che lo diventi, si è indirizzati verso una cura farmacologica che possa arrivare in tutte le parti colpite. Dato che il ritmo di proliferazione è caratteristicamente aumentato nei tumori, i farmaci della chemioterapia anti-tumorale classica sono quelli che inibiscono la replicazione del DNA o la divisione cellulare. Questi farmaci, pur efficaci nella cura di pazienti con tumori: colpiscono anche i tessuti normali, che subiscono effetti tossici. Ciò ha reso poco accettata socialmente la chemioterapia, malgrado i suoi risultati straordinari: ivi compresa la guarigione completa di molti linfomi e di tumori del testicolo, per fare solo due esempi.

In sostanza, la terapia dei tumori è sempre stata mirata: oggi però abbiamo mezzi assai più potenti per identificare il tallone d'Achille di un tumore, e perciò possiamo affinare la mira. Personalizzare la terapia in modo ottimale per ogni paziente è un obiettivo della medicina in generale; in campo oncologico occorre ottimizzare il trattamento sia per quanto riguarda la tipologia del tumore sia in relazione alle caratteristiche del paziente, ed anche ai suoi desiderata. *In primis*, vorremmo debellare il tumore e guarire il paziente. Dobbiamo riconoscere che oggi questo non è sempre possibile: in tal caso è altrettanto importante l'obiettivo di conciliare il controllo del tumore con il benessere del paziente.

Studiare la vita attraverso le immagini

Negli ultimi anni si è andato via via sviluppando un campo di ricerca molto promettente che combina microscopia ad alta risoluzione spaziale con la progettazione di molecole dotate di proprietà ottiche peculiari quali l'emissione di luce in risposta a determinati stimoli (in genere luminosi). L'obiettivo è quello di osservare in maniera diretta cosa avviene in una cellula, ovvero generare veri e propri "film" o fotografie in diverse condizioni, che mostrino i processi biologici che avvengono nello spazio di pochi nanometri, alla base della vita e delle patologie.

Questi progressi sono legati alla nostra crescente capacità di progettare e realizzare adeguati sensori molecolari capaci di assorbire e poi riemettere luce, un fenomeno che è definito fotoluminescenza. La fotoluminescenza ha due caratteristiche che la rendono un mezzo estremamente potente per investigare il mondo ultramicroscopico. La prima è che, inevitabilmente, tra il processo di assorbimento e quello di emissione luminosa, un po' di energia si perde sempre. La perdita energetica è alla base della straordinaria sensibilità della rivelazione di fotoluminescenza: in alcuni casi si può vedere una singola molecola in un mare di radiazione eccitante di fondo un risultato notevole se si pensa che in un centimetro cubo di materia vi sono in genere da un milione di miliardi (10^{15}) a un miliardo di miliardi (10^{18}) di molecole diverse. La seconda proprietà fondamentale del processo di fotoluminescenza è che l'emissione luminosa è "lenta" rispetto alle variazioni strutturali dell'ambiente intorno alle molecole, e pertanto dipende fortemente da esse. Ovvero, dalla natura dell'emissione (la sua energia, la sua intensità e la sua orientazione rispetto ad una certa direzione) si possono capire molte cose sull'ambiente circostante, ad esempio se essa contenga molta acqua, se sia viscosa o meno, se vi siano cariche elettriche, se vi siano altre specie con caratteristiche specifiche. Questo quadro affascinante è completato dai meravigliosi sviluppi della tecnologia, che permette ormai di incorporare nei più moderni microscopi sia sorgenti di eccitazione laser potenti e variabili nel tempo, sia detector ad alta sensibilità e velocità di acquisizione. Per questo è ormai semplice capire quanto è grande una biomolecola, verso quale direzione e con che velocità si muove, con chi interagisce direttamente all'interno della cellula vivente.

L'elasticità del cervello: genetica ed esperienza

Oggi sappiamo che i geni guidano le prime fasi dello sviluppo cerebrale e la formazione iniziale delle connessioni neurali, mentre le interazioni con l'ambiente sono fondamentali per completare in maniera appropriata e individuo-specifica la maturazione dei circuiti deputati al controllo della maggior parte delle funzioni cerebrali. La finestra temporale in cui l'esperienza gioca un ruolo essenziale nel piano di sviluppo è nota come periodo critico, e i processi di rimodellamento dei circuiti nervosi guidati dall'esperienza ambientale sono noti come fenomeni di plasticità neurale. La plasticità è una caratteristica peculiare del sistema nervoso in sviluppo; con il passaggio all'età adulta si verifica una notevole riduzione delle potenzialità plastiche dei circuiti nervosi, ma una serie di studi ha recentemente evidenziato che un'adeguata stimolazione ambientale è in grado di indurre fenomeni di plasticità anche nel cervello adulto. Una vita ricca di attività cognitive, sociali e motorie (arricchimento ambientale) ha numerosi effetti benefici sul sistema nervoso, stimolando la maturazione delle funzioni cerebrali e ripristinando lo stato di plasticità giovanile del cervello. L'arricchimento ambientale è in grado di ringiovanire il sistema nervoso, arrivando a ritardare l'invecchiamento cerebrale o la comparsa di malattie neurodegenerative, come la malattia di Alzheimer. Il seminario ha illustrato i recenti studi che attestano come l'arricchimento ambientale permetta di agire su molecole essenziali per la plasticità in maniera fisiologica e natura-

le, dimostrandosi di grande interesse clinico per l'applicazione nel campo di patologie neurologiche umane.

Le attività di divulgazione scientifica del CNR di Pisa

Il CNR ha proprio, tra i suoi compiti statutari, lo svolgimento di «attività di comunicazione e promozione della ricerca, curando la diffusione dei relativi risultati economici e sociali all'interno del Paese». A tal fine l'Ente si è dotato di un Ufficio Stampa centralizzato a Roma. A questo ufficio è affiancata una attività editoriale interna – con la recente costituzione di “CNR Edizioni”, mentre a Genova ha sede l'Ufficio PSC (Promozione e sviluppo delle collaborazioni), che contribuisce significativamente alla progettazione e realizzazione del Festival della Scienza di Genova, di cui il CNR è *Main Partner* e socio fondatore.

A Pisa, inoltre, il CNR, insieme a Università, Enti Locali e altri enti, è tra i promotori dell'Internet Festival, manifestazione che ogni anno coinvolge tutta la città per una settimana di iniziative divulgative sulle nuove tecnologie di comunicazione informatica.

Sul territorio è prassi comune che gli Istituti CNR partecipino a iniziative di divulgazione locali, ad esempio ospitando e invitando scolaresche a visitare i propri laboratori.

In questo contesto si inserisce l'Area della Ricerca di Pisa: tredici istituti, mille e cento persone tra ricercatori, tecnici e personale amministrativo, 10 brevetti e oltre 1.000 pubblicazioni scientifiche internazionali nell'ultimo anno di attività, con un *know-how* orientato alle tecnologie internet.

Nel 2009 l'Area della Ricerca CNR di Pisa, con il supporto del Comune, della Provincia e della Regione, ha inaugurato un'attività di divulgazione della scienza, intitolata «Areaperta. Parlando di scienza al CNR di Pisa». Tutti gli eventi in programma sono rivolti al pubblico dei non addetti ai lavori e la partecipazione è gratuita. Il primo ciclo di conferenze, tenuto tra ottobre 2009 e maggio 2010, ha avuto un grosso successo di pubblico, dimostrando così che l'obiettivo di diffondere i risultati del lavoro di ricerca verso un pubblico più ampio e differenziato rispetto alle sole comunità scientifiche non era velleitario. L'iniziativa si è ripetuta negli anni successivi.

Ogni anno, i seminari sono stati sviluppati su temi specifici intorno ad un unico filo conduttore, per accompagnare gli interessati in un coinvolgente percorso di approfondimento. Specialisti di diverse discipline si sono alternati sul palco nei vari appuntamenti, per offrire punti di vista diversi e complementari sull'argomento trattato. Gli oratori provenivano in maggioranza dall'Area della Ricerca pisana, ma alcuni interventi sono stati proposti da specialisti che lavorano in centri di ricerca di eccellenza di altri enti.

Un riferimento importante per i destinatari dell'iniziativa è offerto dal sito web della manifestazione: <http://www.area.pi.cnr.it/areaperta>. Il sito contiene, per ogni seminario, una breve scheda che ne descrive l'argomento, illustra il curriculum dell'oratore e fornisce spunti di approfondimento. È possibile iscriversi online ai singoli seminari (la prenotazione è raccomandata alle classi scolastiche) e inviare un commento. Il sito è anche utile per comunicare eventuali aggiornamenti al programma in tempo reale.

Nonostante le difficoltà di budget i risultati raggiunti da Areaperta nelle edizioni già espletate sono stati ragguardevoli, con cicli di conferenze che hanno avuto per temi il rapporto tra Umanità e Cosmo (2009-2010), la mente e l'uomo (2010-11), scienza e fantascienza (2011-12), il tempo (2012-13) e gli aspetti dell'innovazione, all'interno del Cnr, che hanno il maggiore influsso sull'interesse pubblico (2013-14).

Il comitato Areaperta è costituito da ricercatori afferenti agli Istituti presenti nell'Area della Ricerca di Pisa e appartenenti alle più svariate discipline, come l'informatica, la fisica, la geologia, le scienze della vita, e che possiedono interessi di ricerca e competenze specifiche complementari tra di loro; si tratta quindi di un gruppo multidisciplinare in cui si incontrano e si confrontano interessi e punti di osservazione sulla scienza diversi; il gruppo possiede poi le competenze tecniche che gli permettono di condurre, anche materialmente, un progetto di portata complessa come quello proposto (competenze di tipo tecnico, manageriale, organizzativo, amministrativo).

Alla fine della sessione invernale di incontri (dicembre 2013) sono stati somministrati via web e in forma cartacea questionari utili al comitato promotore come indicazione e orientamento per il futuro dell'iniziativa. Il questionario – compilato da 116 persone (68 in cartaceo e 48 online) – è stato suddiviso in 4 sezioni:

1. *Scoperta e partecipazione* (4 domande): sezione volta alla comprensione dei meccanismi grazie ai quali l'iniziativa Areaperta è stata scoperta dall'intervistato (web, carta stampata, manifesti, ecc.), quali sono stati i seminari che hanno riscosso maggiore gradimento tra quelli seguiti e quanti ne sono stati seguiti complessivamente;
2. *Organizzazione* (6 domande): al fine di verificare la puntuale efficacia e utilità dei canali di informazione che abbiamo messo in atto (sito web, registrazione dei dibattiti e dei seminari resi disponibili online, ecc.);
3. *Il futuro dell'iniziativa* (5 domande): utile a comprendere quali strade Areaperta dovrebbe "percorrere" per l'intervistato (cosa gli piacerebbe che Areaperta discutesse e quali argomenti vorrebbe veder affrontati);
4. *Dicci chi sei* (5 domande): sezione anagrafica utile a comprendere il target (età, sesso, tasso di scolarizzazione) dell'utenza Areaperta.

I risultati ci hanno sorpreso soprattutto per la sezione anagrafica, perché convinzione del comitato era quella di avere un target, mentre invece chi segue le iniziative è un'altra fetta di popolazione. Di conseguenza anche le risposte – per le quali non entriamo in questa sede in dettaglio – è stato necessario rivalutarle all'interno di questo preciso quadro di utenza, che pure ha dimostrato, per fare un esempio, di preferire molto di più le comunicazioni web a manifesti e carta stampata.

LE MOSTRE ORGANIZZATE

DAI LABORATORI DIDATTICO-SCIENTIFICI FRANCO CONTI

ROSELLINA BAUSANI

Responsabile dei Laboratori didattico - scientifici Franco Conti

ORNELLA SEBELLIN

Coordinatrice del Laboratorio di Matematica

Introduzione

I laboratori didattico-scientifici “Franco Conti”, laboratori promossi dall’Assessorato alla PI della Provincia di Pisa, come risorsa presente sul territorio, con la finalità di migliorare l’insegnamento-apprendimento in ambito scientifico e il rinnovamento delle metodologie didattiche, anche per l’edizione 2013 di Pianeta Galileo hanno proposto e organizzato, a Pisa, tre mostre. Vogliono essere un piccolo esempio di ricerca-azione, nell’ottica di un insegnamento laboratoriale che avvicini con piacere i ragazzi allo studio della matematica e delle scienze, il che li allinea agli obiettivi di Pianeta Galileo.

I laboratori sono intitolati a Franco Conti, docente della Scuola Normale, prematuramente scomparso, didatta appassionato e straordinario divulgatore della matematica e della fisica.

Partiamo da un gioco: riflessioni matematiche nascoste

La mostra si è tenuta dal 17 febbraio al 3 marzo con orario 9 – 13, presso la Limonaia di Palazzo Ruschi, in Vicolo del Ruschi 4, a Pisa.

Nata dalle attività con giochi di strategia proposte a Carrara, nel 2011 e nel 2012, dal gruppo di docenti dell’associazione Matematica in Gioco, ha avuto lo scopo di far passare il visitatore dall’osservazione di giochi di strategia, idonei a sviluppare abilità di pensiero, ad alcune riflessioni matematiche sulla struttura dei giochi stessi.

A studenti dei diversi ordini di scuola sono stati presentati giochi astratti di varie tipologie, su tavolieri e non, al fine di sviluppare, attraverso l’attività ludica, processi logici e meta cognitivi.

I giochi offrivano un’occasione per riflessioni su alcuni temi della matematica suggerendo la possibilità di utilizzarli nella didattica per favorire un atteggiamento positivo verso questa disciplina e per introdurre concetti teorici in un contesto motivante.

La ricerca della strategia risolutiva poi, ed il controllo delle fasi di gioco si legano al miglioramento dell’attenzione e della capacità di previsione.

Alcuni giochi proponevano esercizi in cui si utilizza l'induzione, processo logico tipico delle scienze e in particolare della matematica, che conduce alla scoperta di leggi generali a partire dall'osservazione e dall'analisi di regolarità e analogie in situazioni particolari.

Con l'aiuto di tre animatori si sono utilizzati così giochi più o meno conosciuti per far ragionare i ragazzi su problemi di probabilità, di numerica, di calcolo. Tra l'altro, si è giocato a costruire numeri triangolari (e più in generale poligonali), numeri tetraedrici (ovvero i numeri piramidali a base triangolare), e numeri stellari (numeri che possono essere rappresentati disponendo dei punti in modo da formare una stella a sei punte) ed è stato possibile imparare a calcolare il numero di strette di mano tra più persone, giocare a dama cinese riflettendo sulla strategia vincente o imparare nuovi giochi come il Pylos, l'Abalone e il Chomp. Su richiesta, agli insegnanti che hanno visitato la mostra è stata fornita la documentazione necessaria a approfondire gli argomenti trattati nella mostra.

Durante la mostra è stato organizzato un incontro pomeridiano con il dott. Giorgio Dendi, matematico e divulgatore scientifico, storico allenatore della nazionale italiana dei giochi matematici. L'incontro, rivolto a insegnanti, studenti e cultori della materia ha avuto un buon successo di pubblico, mostrando tra l'altro come formule e teoremi appresi a scuola possano essere utilizzati con relativa facilità nel calcolo mentale. L'incontro ha registrato 80 presenze.

La mattina successiva il dott. Dendi ha incontrato le classi che visitavano la mostra e ha "giocato" con loro.

La mostra ha avuto un totale di presenze pari a 528 persone così suddivise: 459 alunni, 24 classi, 49 docenti, 20 visitatori.

Tessere e Colori: la Matematica che non ti aspetti

La mostra si è svolta da martedì 4 a sabato 16 marzo con orario 9 - 13 presso il Liceo Artistico F. Russoli, in Via San Frediano 13, a Pisa, a cura di MaDE@DM, associazione di studenti, laureandi e dottorandi in matematica dell'università di Pisa.

La mostra è stata aperta alle visite libere, ma sono state fatte visite della durata di 30-40 minuti, per gruppi di max 10/15 elementi, guidate da studenti e dottorandi in matematica. Un momento importante è stata l'attività laboratoriale che ha permesso di scoprire in modo divertente e costruttivo concetti anche complessi.

La mostra ha analizzato il problema del ricoprimento del piano con dei tasselli, ossia dei pezzi geometrici che si ripetono. Le tassellazioni possono essere periodiche o non periodiche, fatte di uno, due o anche più tipi di tasselli diversi.

Si partiva dalle tassellazioni con poligoni regolari (con lati della stessa lunghezza) e con tassellazioni lato-contro-lato. Partendo con una tessera alla volta ci si rendeva conto che erano possibili solo poche tassellazioni ed il visitatore era guidato a capirne il perché. Ma se si prendevano due o più tessere alla volta? E qui si poteva inizialmente giocare con la fantasia fino a quando non veniva sollevata la richiesta di una maggior

regolarità (ad esempio che i vertici fossero tutti “uguali”). In questo modo si potevano scoprire le famose 11 tassellazioni archimedee.

Si passava poi alle tassellazioni di Penrose: tra le diverse varianti era possibile giocare a costruire quella con freccia e aquilone...

Lo studio delle diverse figure di simmetria che possono comparire, oltre ad avere un forte fascino estetico, risulta di grande importanza sia in ambiti più avanzati della matematica che in altre scienze (per esempio, lo studio della struttura dei cristalli).

I visitatori avevano a disposizione il materiale in legno per realizzare i vari tipi di tassellazioni e potevano utilizzare numerosi pannelli esplicativi per verificare le soluzioni trovate.

Il totale delle presenze registrate è stato di 337, di cui 307 alunni di 15 classi accompagnate da 30 docenti.

Piccoli, tanti, invincibili: gli insetti sociali

La mostra si è tenuta dal 9 gennaio all'8 febbraio 2014 con orario 9 – 13, presso la Limonaia di Palazzo Ruschi, in Vicolo del Ruschi 4, a Pisa. Date le numerose richieste, su prenotazione la mostra è rimasta spesso aperta anche di pomeriggio.

La mostra era composta da 12 campane di vetro (35 cm di diametro x 60 cm di altezza) in cui erano presentati alcuni modelli in resina dei 4 gruppi principali di insetti sociali oggi viventi, api, formiche, termiti e vespe, rappresentati in scene di gruppo che riproponevano tridimensionalmente ciò che accade in natura.

Sotto ogni bolla era presentato un argomento che caratterizza la vita sociale degli insetti. I singoli temi proponevano questioni che appartengono anche alla nostra vita quotidiana essendo anche noi esseri sociali: proprio dal confronto tra i nostri modi di vivere e quelli degli insetti sono nate interessanti riflessioni sui nostri comportamenti e sulla nostra morale.

Gli argomenti trattati erano: la famiglia, l'altruismo, la gestione dei rifiuti, il lavoro minorile, la sicurezza, l'organizzazione della società, l'allevamento e l'agricoltura, l'impollinazione, il futuro.

La parte espositiva della mostra era completata da video e pannelli e occupava una superficie di circa 150 mq. In un ambiente vicino alla sala espositiva è stato organizzato il laboratorio in cui i visitatori piccoli (e grandi) potevano cimentarsi nella costruzione di modelli di insetti con cartone, plastica...; osservare insetti viventi (insetti stecco-Medauroidea extradentata, tenebrione della farina *Tenebrio molitor*, con schede esplicative relative a aspetto, abitudini, ciclo vitale); giocare al domino degli insetti; classificare piccoli invertebrati e artropodi presentati in fotografie utilizzando una chiave analitica di riconoscimento; conoscere i cicli vitali e le modalità di metamorfosi degli insetti...

Ecco un esempio di pannello:

Altruismo

Nelle famiglie degli insetti non esiste egoismo: il cibo viene portato al nido e diviso fra tutti; se sono minacciate, formiche, api, vespe e termiti

non esitano a sacrificare la propria vita per la colonia. Osserviamo nelle famiglie degli insetti quello che in piccolo avviene anche nelle nostre.

I comportamenti altruistici tra operaie derivano da quelli tipici delle regine che formano una nuova colonia. La regina, che inizialmente si dedica totalmente alle proprie larve, quando la colonia cresce smette di rigurgitare il proprio cibo nella bocca delle figlie e pensa solo a farsi servire.

Anticamente anche le madri umane, seguendo il proprio istinto materno, masticavano il cibo per poi passarlo con la bocca ai loro bambini più piccoli. Oggi ci sono gli omogeneizzati.

Certe formiche hanno operaie grasse e goffe chiamate formiche-damigiane che ricevono cibo liquido zuccherino dalle loro sorelle nei periodi di abbondanza perché possano cederlo indietro quando scarseggia. Le api invece ammassano questo miele nei loro nidi di cera.

La mostra era aperta sia alle visite libere sia a visite per le classi della durata di 1h 30m, per gruppi di max 25 elementi, visite guidate da tre animatori esperti laureati in scienze naturali il cui apporto risultava determinante per una migliore fruizione della parte espositiva e laboratoriale della mostra.

Oltre alle scene di gruppo e numerosi personaggi ben differenziati in formiche, api, vespe e termiti... il tutto sotto una bolla di vetro, facevano parte della mostra anche un insetto anatomico che i ragazzi potevano scomporre e ricomporre e un pannello con 5 modelli di teste di insetto in cui erano evidenziati gli apparati boccali.

L'autore di tutti i modelli esposti nella mostra è Lorenzo Possenti, che da oltre 16 anni produce modelli scientifici di insetti ingranditi per musei di tutto il mondo, dall'Asia all'America dove ha una propria mostra itinerante che a breve sarà allo zoo di San Francisco.

Una sua recente mostra attualmente in uso presso i musei scientifici degli Stati Uniti è recensita al sito della Smithsonian Institution all'indirizzo web:

<http://blogs.smithsonianmag.com/artscience/2013/02/honey-i-blew-up-the-bugs/>

Totale presenze 1316

Totale alunni 980

Totale classi 49

Docenti 98

Pubblico e famiglie con bambini 240

SCIENZA E CULTURA IN HENRI POINCARÉ

ORNELLA POMPEO FARACOVÌ

Centro Studi Enriques

Il convegno *Scienza e cultura in Henri Poincaré*, promosso dal Centro Studi Enriques con il patrocinio del Conseil International de Philosophie et Sciences Humaines dell'Unesco, svolto il 29 Novembre 2013 a Pisa presso l'Associazione La Limonaia, si è collegato alle celebrazioni del centenario della morte del matematico-filosofo, mettendo a fuoco gli aspetti salienti delle sue ricerche matematiche e della sua filosofia scientifica.

1. Uno straordinario lascito matematico

Come ha affermato Marco Franciosi, del Dipartimento di Matematica dell'Università di Pisa, in una relazione su *Henri Poincaré e la matematica del Novecento*, nessuno di quanti si affacciano agli studi di matematica può evitare di imbattersi nel nome del matematico francese. La sua impronta è unica nella matematica contemporanea: forse solo Hilbert ha provocato, in modo diverso, un impatto altrettanto importante. Sebbene non abbia avuto allievi, Poincaré ha lasciato un'eredità estremamente significativa, che solo oggi può dirsi davvero compresa. Si è occupato di teoria del caos, fisica matematica, topologia algebrica, analisi matematica, teoria dei numeri: una varietà di campi che testimonia di una grande versatilità. Il denominatore comune della sua opera sta nell'eleganza delle formule e nella centralità dei concetti geometrici: alla geometria è affidato lo scopo di farci conoscere le relazioni tra gli oggetti studiati, consentendo di cogliere matematicamente l'estetica della natura. Lo scienziato secondo Poincaré non studia la natura perché è utile, ma perché prova piacere nel farlo, in quanto essa è meravigliosa.

Molti i temi legati direttamente al suo nome: mappa di Poincaré, serie di Poincaré, caratteristica di Eulero-Poincaré, dualità di Poincaré, gruppo di Poincaré, congettura di Poincaré. Quest'ultima si riferisce al modo di riconoscere, attraverso invarianti algebrici, la forma di un oggetto di qualsiasi dimensione. È uno dei sette problemi che il Clay Institute nel 2000 ha indicato come caratterizzanti il nostro secolo, mettendo in palio un milione di dollari per chi ne avesse risolto uno. Il problema era già stato affrontato da numerosi studiosi, in particolare americani, inglesi e russi, che nel corso del '900 avevano risolto molti tasselli del complicato puzzle, utilizzando teorie e approcci differenti. L'ultima tessera è stata individuata nel 2003 dal russo Grigori Perelman, che con una piccola nota su internet ha individuato i passi necessari alla soluzione. Il suo approccio è stato sviluppato da diversi studiosi, e la dimostrazione è stata portata in

fondo. Perelman si è però rifiutato di ricevere il premio ed ha anche respinto la medaglia Fields, massimo riconoscimento mondiale per la matematica.

È impossibile non citare il premio internazionale assegnato a Poincaré nel 1889 dal re di Svezia, Oscar II, per il trattato sul problema dei tre corpi. Il problema era quello della stabilità del sistema solare, nel quale tre o più corpi interagiscono con perturbazioni gravitazionali che ne modificano le traiettorie teoriche. Le traiettorie effettive non corrispondono a quelle previste: ma quali soluzioni matematiche possono ricondurre le perturbazioni all'interno delle traiettorie? Il concorso richiedeva di «rappresentare le coordinate di ciascun punto sotto forma di serie che procedono secondo qualche funzione nota del tempo e che convergono uniformemente per ogni valore reale della variabile». Ricevuto il premio per l'originalità degli argomenti introdotti e la prosa efficace, nel predisporre il testo per la pubblicazione Poincaré si avvide di aver commesso un errore significativo; per correggerlo, sviluppò nuove osservazioni con le quali, utilizzando una geometria non euclidea, pose le basi della teoria del caos.

2. La filosofia scientifica di Poincaré

Come ha notato Gaspare Polizzi nella relazione su *Poincaré e la filosofia scientifica*, alla sua morte Poincaré era più noto al largo pubblico per gli scritti di filosofia scientifica che non per le ricerche matematiche e fisiche. La sua indagine epistemologica era iniziata con un articolo del 1887, anno del suo primo corso di Fisica matematica alla Sorbonne, e si era espressa nel volume *La science et l'hypothèse*, pubblicato nel 1902 da Flammarion nella «Bibliothèque de Philosophie Scientifique» e divenuto presto un *best seller*, vendendo in pochi anni sedicimila copie. Sulla scia di tale successo, l'autore pubblicò altre tre raccolte di saggi, presto tradotte in diversi paesi: *La valeur de la science* (1905); *Science et méthode* (1908); *Dernières pensées* (pubblicata postuma nel 1913). Questi scritti ebbero grande impatto internazionale, influenzando i promotori del Circolo di Vienna (ai quali il matematico francese appariva «una specie di Kant liberato dai rimasugli della scolastica medievale e unto con il crisma della scienza moderna»), e suscitando un confronto critico con Federigo Enriques. Anche il giovane Einstein lesse e apprezzò *La science et l'hypothèse* in traduzione tedesca, pur se i suoi rapporti con Poincaré rimasero competitivi e poco esplicitati, nel quadro dell'elaborazione del principio di relatività, che il matematico francese intese sempre – a differenza di Einstein – come evidenza sperimentale.

Nella sua prima grande opera epistemologica, i *Problemi della scienza* (1906), Enriques dialoga intensamente con *La science et l'hypothèse*. Tra i due scienziati-filosofi, che si conobbero a Parigi nel 1907, in occasione del conferimento a Enriques e a Francesco Severi del Prix Bordin, non mancarono le affinità. Entrambi maturarono una riflessione filosofica in rapporto con i problemi posti dalle nuove geometrie, si interrogarono sulle relazioni tra fisica e matematica e si confrontarono con le grandi svolte, quantistica e relativistica, della fisica del Novecento. Dal punto di vista filosofico gli esiti furono però differenti: Poincaré contribuì alla nascita del convenzionalismo,

valorizzando il primato della dimensione relazionale del sapere matematico e rintracciando nelle ipotesi il motore dello sviluppo scientifico; Enriques si orientò verso un razionalismo sperimentale con rapporti privilegiati con la realtà fisica e psicologica. Il comune tentativo di ridefinire la scienza e i suoi rapporti con la filosofia li rese protagonisti importanti del movimento di filosofi-scienziati, che fu attivo in Europa fra i due secoli, anche attraverso le pagine di due agguerrite riviste, che li ebbero ambedue come collaboratori: la «Revue de Métaphysique et de Morale» in Francia (promotrice della fondazione, nel 1901, anche con il contributo di Poincaré, della *Société Française de Philosophie*) e «Scientia» in Italia (fondata nel 1907 dallo stesso Enriques, che nel 1906 darà vita anche alla Società Filosofica Italiana).

Dell'epistemologia geometrica di Poincaré va sottolineato il legame con la concezione kantiana dello spazio come forma dei fenomeni: il concetto di "gruppo di trasformazioni" consente infatti di dare un fondamento virtuale allo spazio geometrico, pur se tale forma si colloca nell'intelletto e non nella sensibilità. Per Poincaré esistono varie geometrie, ma la sola coerente con lo spazio fisico è quella euclidea, che permette il più semplice inquadramento dei fatti sperimentali. Questa concezione non gli impedisce una spregiudicata utilizzazione di geometrie non euclidee per la soluzione dei problemi analitici, come il problema dei tre corpi, che trattò mostrando come, nel concreto lavoro dei matematici, le geometrie non euclidee fossero utili alla generalizzazione dell'analisi, e contribuendo al loro inserimento in una visione analitica del mondo fisico, espresso in equazioni differenziali.

Particolare rilievo hanno le pagine che pongono le basi della teoria del caos deterministico. La argomentazione può essere riassunta così: una causa trascurabile, che ci sfugge, determina un effetto considerevole, che viene giudicato come dovuto al caso. Se conosciamo con precisione le leggi della natura e la situazione iniziale dell'universo, potremmo prevedere esattamente la situazione dell'istante successivo. Ma anche se le leggi naturali non avessero segreti per noi, non potremmo conoscere la situazione iniziale se non approssimativamente. Se siamo in grado di prevedere la situazione successiva con la stessa approssimazione, questo è in verità tutto ciò di cui abbiamo bisogno; consideriamo allora il fenomeno come regolato da leggi, e dunque prevedibile. Piccole differenze nelle condizioni iniziali possono però generarne di grandissime nei fenomeni finali; un piccolo errore in rapporto alle prime può produrne uno enorme sui secondi; la predizione diventa allora impossibile e parliamo di fenomeno fortuito. Ad esempio: perché le previsioni meteorologiche incontrano tante difficoltà? Le grandi perturbazioni hanno di solito luogo nelle regioni in cui l'atmosfera è in equilibrio instabile. I meteorologi vedono questa instabilità, e sanno che un ciclone sorgerà da qualche parte; ma dove, non sono in grado di dirlo; un decimo di grado in più o in meno in un punto qualsiasi, e il ciclone scoppia qui e non là, provocando devastazioni in zone che avrebbe altrimenti risparmiato. Anche qui troviamo un contrasto tra una causa minima, non apprezzabile dall'osservatore, e effetti considerevoli, che sono a volte degli spaventosi disastri.

La riflessione sulla complessità naturale conduce all'idea di un universo non riconducibile ad un ordine prestabilito: la complessità diventa un problema ontologico, e non più soltanto la proiezione di un deficit di conoscenza. Si potrebbe stabilire una proporzione 'filosofica': Cartesio sta a Leibniz, come Laplace a Poincaré. Un secolo esatto separa l'immagine di un universo totalmente prevedibile da quella di un universo fatto di contingenze e di cammini inattesi. Al determinismo di Cartesio e al demone di Laplace, Poincaré oppone curve e superfici che sono le matrici dirette delle teorie del "caos deterministico". La caoticità del comportamento di un sistema sottoposto all'azione di forze non lineari diventa la norma; la regolarità dei moti celesti un'eccezione. I fenomeni possono essere descritti dalle equazioni differenziali della dinamica classica; ma la determinazione matematica non ne garantisce la predicibilità. Si tratta di definire grandezze matematiche che individuino il tipo di disordine che si sta studiando, con la consapevolezza che i vari tipi di disordine non si possono prevedere, ma solo descrivere e classificare. Poincaré ha scoperto che dall'ordine deterministico si genera il caos; tuttavia la teoria del caos non altera per lui lo schema deterministico, perché parte dalle leggi del moto, e tende a determinare un ordine nascosto nel disordine, una "struttura ordinata del disordine".

Sulle strane pagine costellate di punti della memoria sul problema dei tre corpi sono tracciate figure nuove, dalle quali nasce una scienza qualitativa dello spazio, che abbandona l'idea di una prevedibilità universale. Questa immagine del mondo riemerge un secolo dopo Poincaré, quando le sue figure diventano familiari. A partire dal 1954, con l'integrazione del problema dei tre corpi di George Birkhoff (1913) e gli studi della scuola di Andrej Kolmogorov, che usa algoritmi realizzati con la potenza di calcolo dei computer, l'imprevedibilità dell'evoluzione di un sistema complesso diventa oggetto di calcolo. Con l'informatizzazione delle matematiche la riflessione sul caos si appropria di algoritmi potenti, gli unici a poter esprimere nei dettagli il mondo intravisto da Poincaré. Il computer introduce nell'apparato matematico l'approssimazione emersa negli strumenti di misura, ed è esso stesso un esempio di "caos deterministico": basta tener conto di un decimale in più o in meno, perché appaiano soluzioni del tutto diverse; si possono però calcolare un'enorme quantità di soluzioni numeriche per equazioni prive di soluzioni analitiche. La simulazione si colloca in una zona intermedia tra teoria ed esperimento fisico: dalla teoria trae le considerazioni per la costruzione di modelli da studiare tramite algoritmi; dall'esperimento le caratteristiche necessarie per mettere in evidenza un fenomeno, eliminando la contaminazione di effetti spuri. Il computer non è più un semplice strumento di calcolo, ma 'crea' fenomeni fisici ideali attraverso la simulazione. La rappresentazione del nuovo piano complesso descritto da Poincaré può allora apparire nello schermo con i pixels del computer: il piano di scrittura non è più quello invariabile della geometria cartesiana, ma un paesaggio che fluttua a ogni istante. Il supporto della nostra scrittura assomiglia a un quadro *pointilliste* alla maniera di Georges-Pierre Seurat (o dei Macchiaioli), a uno spartito di musica impressionista.

Nelle pagine di Poincaré c'è l'autorappresentazione di un mondo complesso e ad assetto variabile: ma siamo ancora lontani dalla soluzione di tutti i problemi da lui formulati un secolo fa. Nel 1900 il figlio di Charles Darwin, George, conferendogli la medaglia d'oro della *Royal Astronomical Society* per le ricerche di meccanica celeste, disse che esse avrebbero fornito per cinquant'anni materiale ai ricercatori futuri. La previsione è risultata falsa per difetto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Frank, Ph., *La scienza moderna e la sua filosofia* (1941), tr. it. di G. Picca, il Mulino, Bologna 1973
- [2] Polizzi, G. *Poincaré nei Problemi della scienza: un incontro "geometrico"*, in, *Federigo Enriques e la cultura europea*, a cura di P. Bussotti, Agorà Publishing, Lugano 2008,
- [3] Poincaré, H. *La scienza e l'ipotesi*, in Id., *Opere epistemologiche*, a cura di G. Boniolo, Piovani Ed., Abano Terme 1989, vol. I.