

SCUOLA PERMANENTE PER L'AGGIORNAMENTO DEGLI INSEGNANTI DI SCIENZE SPERIMENTALI



René Magritte - La Trahison des Images (1929)

I modelli nelle Scienze

A cura di:

Michele A. Floriano e Marco Russo

SCUOLA PERMANENTE PER L'AGGIORNAMENTO
DEGLI INSEGNANTI DI SCIENZE SPERIMENTALI



I modelli nelle Scienze

Hotel della Valle Agrigento

22 - 27 Luglio 2019

A cura di:

Michele A. Floriano e Marco Russo



Contributi alla

Scuola Permanente per l'Aggiornamento degli Insegnanti di Scienze Sperimentali

XIII edizione: "I modelli nelle Scienze"

Hotel della Valle Agrigento

22 – 27 LUGLIO 2019

Comitato scientifico-organizzatore:

Presidente: Michele A. Floriano

Anna Caronia
Giorgio Cucciardi
Giovanni Magliarditi
Salvatore Stira

Delia Chillura Martino
Claudio Fazio
Marco Russo

infospais@gmail.com - www.unipa.it/flor/spais.htm

Quaderni di Ricerca in Didattica, numero speciale 6

Editor in Chief: Claudio Fazio – University of Palermo, Italy
Editorial Director: Benedetto di Paola - University of Palermo, Italy

ISBN: 978-88-941026-5-9

First edition, 21th February 2020, © SPAIS, Palermo

Indice

Prefazione

Michele A. Floriano e Anna Caronia

I modelli nelle Scienze

1

Fabio Caradonna

Le linee cellulari V79 e Caco-2: due modelli per studi in vitro di epi-mutagenesi

4

Antonino Cerruto

Problemi sulle competenze risolti con la calcolatrice grafica

13

Franco Colombo

Dall'osservazione alla previsione. Che cosa sono e come funzionano i modelli meteorologici

37

Filomena De Leo

La biodiversità microbica di ambienti estremi come risorsa per l'esplorazione di nuove potenzialità biotecnologiche

44

Tiziana Di Salvo

L'Event Horizon Telescope e la prima "foto" di un Buco Nero

54

Antonella di Vincenzo, Michele A. Floriano

Un modello realistico per visualizzazioni dinamiche in didattica della chimica

73

Enrico Giannetto

Teorie fisiche: sintassi logica e matematica, modelli e semantica teorica, pragmatica sperimentale

83

Giovanni Magliarditi

Nuove frontiere dell'insegnamento delle scienze. Modelli didattici ed esperienze vissute

90

Michele Migliore

Modelli computazionali dei meccanismi alla base delle funzioni cognitive

106

Elisabetta Oddo

Organismi modello in biologia vegetale: esempi per la ricerca e la didattica

117

Salvatore Patanè

Dai semiconduttori alle celle solari fotovoltaiche: tecnologie e prospettive

127

Enrico Prenesti

Il concetto di modello e il suo uso nelle scienze

149

Michela Segà

Il mondo delle misure: la metrologia e il nuovo SI

162

Roberto Zingales

La Tabella Periodica. Il dito e la luna

175

Prefazione

I modelli nelle Scienze

Michele A. Floriano^{1,2} e Anna Caronia¹

¹ Divisione Didattica della Società Chimica Italiana

² Dipartimento di Scienze e Tecnologie Biologiche, Chimiche e Farmaceutiche, Università di Palermo

E-mail: michele.floriano@unipa.it; anna.caronia57@gmail.com

Sito web: www.unipa.it/flor/spais.htm

In ambito scientifico i modelli possono essere definiti come rappresentazione di una idea, di un oggetto o anche di un processo o di un sistema che si utilizzano per descrivere o interpretare fenomeni anche non direttamente osservabili. I modelli rivestono un ruolo centrale nella ricerca scientifica sia per la progettazione e verifica di nuove idee sia per l'interpretazione e razionalizzazione dei risultati ottenuti, in quanto essi sono quasi sempre indispensabili anelli di raccordo fra osservazioni e teorie. Per loro natura, quindi, i modelli sono spesso rappresentazioni semplificate che comprendono solo le caratteristiche ritenute indispensabili per descrivere il fenomeno in esame. Non hanno la pretesa di riprodurre fedelmente la realtà ma solo di rappresentarla in alcuni aspetti. Possono essere proposti modelli diversi quando lo stesso fenomeno è esaminato da punti di vista diversi. Un determinato modello, infine, può essere modificato o del tutto rigettato alla luce di nuove evidenze sperimentali. Questo metodo è determinante nella costruzione di nuova conoscenza e ciò ha importanti implicazioni di carattere epistemologico. Inoltre, dal punto di vista quantitativo, il modello è spesso descrivibile mediante rigorosi approcci matematici tanto da interrogarsi se il linguaggio matematico sia insito nelle leggi della Natura ovvero sia una conseguenza della rappresentazione modellistica.

SPAIS 2019 ha preso in esame i più importanti modelli di riferimento nel campo della fisica, della chimica, della biologia e delle altre Scienze più marcatamente multidisciplinari come quelle ambientali, geologiche e naturali. Per ciascuna disciplina è stato presentato un panorama di risultati sperimentali recenti confrontandoli con gli specifici principali modelli di riferimento. In occasione del 150° anniversario della sua pubblicazione, la relazione di apertura di Roberto Zingales è stata dedicata alla Tavola Periodica degli Elementi: il modello fondamentale della chimica e non solo.

Il concetto di modello e il suo uso nelle scienze sono stati presentati da Enrico Prenesti mentre Franco Colombo ha descritto cosa sono e come funzionano i modelli meteorologici e climatici. Michela Segà ha presentato il nuovo Sistema Internazionale delle unità di misura entrato in vigore da maggio 2019. L'importanza dei modelli computazionali come chiave per comprendere i meccanismi alla base delle funzioni cognitive è stato oggetto della relazione di Michele Migliore mentre Elisabetta Oddo ha presentato le caratteristiche e la specificità di organismi modello in biologia vegetale. Le linee cellulari usate come modelli per studi in vitro di epimutagenesi sono state oggetto della relazione di Fabio Caradonna mentre Michele A. Floriano ha presentato dei modelli realistici adatti per la visualizzazione dinamica di fenomeni su scala atomica e molecolare utili per scopi didattici. Il clima del sistema Terra e i possibili scenari futuri sono stati evidenziati da Francesco Parello. Tiziana Di Salvo ha descritto modelli che permettono la rappresentazione della struttura di oggetti astronomici come i buchi neri da osservazioni multispettrali; a seguire Enrico Giannetto ha evidenziato le basi epistemologiche che differenziano le moderne teorie fisiche da quelle classiche. Chiara Cappelli ha illustrato l'uso e l'importanza di simulazioni atomistiche per lo studio di nuovi farmaci e di materiali nanostrutturati e quindi Claudio Fazio ha presentato l'uso di modelli in didattica discutendo un approccio unificante all'analisi di fenomeni che vengono spesso trattati in contesti disciplinari diversi. Filomena De Leo ha descritto alcune tecniche molecolari metagenomiche di comunità che permettono di prevedere complesse elaborazioni bioinformatiche. Salvatore Patanè ha illustrato le tecnologie e le prospettive delle moderne celle solari fotovoltaiche.

Oltre alle relazioni mattutine sono state anche realizzate attività pomeridiane a carattere seminariale. Nella prima di queste attività, durata due pomeriggi, Claudio Fazio e Giovanni Magliarditi hanno coordinato lavori di gruppo riguardanti i

modelli didattici che maggiormente hanno influenzato la pedagogia italiana negli ultimi tempi evidenziando l'importanza della loro conoscenza per sfruttarne le potenzialità. Nella seconda attività Antonino Cerruto ha proposto una prova pratica riguardante la risoluzione di problemi a carattere scientifico mediante calcolatrice grafica.

Infine, a integrazione del programma, in occasione del centesimo anniversario della nascita di Primo Levi, in una serata speciale è stato proiettato il video di una conferenza di Luigi Dei, Magnifico Rettore dell'Università di Firenze, ispirata a due racconti del noto chimico e scrittore.

SPAIS 2019 è stata inserita nei progetti di tutte le aree del Piano Nazionale Lauree Scientifiche delle Università di Catania, Messina e Palermo, si ringraziano tutti i referenti di sede per la collaborazione ed il supporto. Una delle attività seminariali è stata realizzata utilizzando calcolatrici grafiche gentilmente messe a disposizione da Casio.

Siamo grati a quei Relatori che hanno consentito di rendere permanente il proprio contributo con la realizzazione di questi Atti.

Le linee cellulari V79 e Caco-2: due modelli per studi *in vitro* di epi-mutagenesi

Fabio Caradonna

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Biologiche Chimiche e Farmaceutiche (STEBICEF, sezione di Biologia Cellulare),
Università degli Studi di Palermo

E-mail: fabio.caradonna@unipa.it

Riassunto. È da pochi anni noto che alcune sostanze, non classificabili come veri e propri mutageni, sono in realtà dei modulatori epigenetici ed inducono cambiamenti nella metilazione del DNA, nella acetilazione/deacetilazione degli istoni e possono modificare la sintesi endocellulare di alcuni miRNA. Inducendo modificazioni epigenetiche non causano mutazioni genetiche, sfuggono ai test di mutagenesi e carcinogenesi fino ad ora utilizzati ma possono ugualmente avere effetti fenotipici simili a quelli di un mutageno/carcinogeno. Per anni l'arsenico, noto veleno ad alte dosi, contaminante obbligato delle acque potabili, è stato oggetto di dibattiti sulla sua mutagenicità a basse dosi. Utilizzato, paradossalmente, come chemioterapico in alcune terapie oncologiche, mostrava effetti mutagenetici non coerenti a tal punto che la comunità scientifica, fino a qualche anno fa, non lo aveva classificato come mutageno. Alcune risposte sono venute recentemente proprio dall'uso, nel nostro laboratorio, di linee cellulari stabilizzate di laboratorio, come ad esempio le cellule V79-C13 di Hamster cinese, con le quali è stato possibile contribuire a chiarire che l'arsenico, a basse dosi, compatibili con quelle contenute nelle acque potabili, non è un mutageno ma un epi-mutageno cioè una sostanza in grado di indurre modifiche epigenetiche (in particolare nella metilazione del DNA), modifiche che, in certe condizioni possono indirettamente sfociare in situazioni ugualmente problematiche per la cellula o per un organismo.

Un'altra linea cellulare usata come modello è rappresentata dalle cellule Caco-2. Questa linea cellulare, ottenuta da carcinoma di colon umano, se opportunamente coltivata fino alla differenziazione delle cellule, può anche rappresentare un

modello di epitelio intestinale normaloide su cui fare studi di compatibilità, tossicità, genotossicità ed epi-genotossicità di sostanze. Studi metilomici preliminari, condotti nel nostro laboratorio, hanno dato interessanti indicazioni che gli estratti di alcuni cibi sono in grado di contrastare l'effetto epi-mutagenetico dell'arsenico aprendo avvincenti scenari di ricerca applicata, utili alla recente tendenza del settore agro-alimentare industriale, quale quella di "funzionalizzare" cibi e bevande.

Abstract. It has been known that some substances, not classifiable as mutagens, are actually epigenetic modulators and induce changes in DNA methylation, in the acetylation / deacetylation of histones and can modify the endo-cellular synthesis of some miRNAs. By inducing epigenetic modifications, they do not cause genetic mutations, they escape the mutagenesis and carcinogenesis tests but can equally induce phenotypic effects similar to those of a mutagen / carcinogen.

For years arsenic, a well-known high-dose poison, a contaminant of drinking water, has been the subject of debates on its low-dose mutagenicity. Used, unexpectedly, in the chemotherapy of some cancers, it showed mutagenic effects so that the scientific community, until a few years ago, did not classify it as a mutagen. Some responses have recently come from the use, in our lab, of stabilized cell lines, such as the V79-C13 cells from Hamster Chinese, with which was clarified that arsenic, at doses similar to those contained in drinking water, is not a mutagen but an epi-mutagen that is a substance capable of inducing epigenetic changes (in particular in DNA methylation), modifications which, under certain conditions, can indirectly lead to equally problematic situations for the cell or for an organism.

Another cell line used as a model is represented by Caco-2 cells. This cell line, obtained from human colon carcinoma, if properly cultivated up to the differentiation of cells, can also represent a model of normaloid intestinal epithelium on which it is possible to perform compatibility studies, toxicity, genotoxicity and epi-genotoxicity tests. Preliminary methylomic studies, carried out in our lab, have given interesting indications that the extracts of some foods are able to contrast the epi-mutagenic effect of arsenic opening exciting scenarios of applied research, useful to the recent trend of the agro-food industry, such as the "functionalizing" of food or drinks.

1. Introduzione

Studiare fenomeni cellulari non è semplice: per motivi legati alla senescenza cellulare di cellule normali non è possibile perpetuare *in vitro* la vita di una cellula normale differenziata per poterne con calma e per più generazioni studiarne i processi. La senescenza cellulare, infatti, è legata ai fenomeni differenziativi per i quali è necessario, per l'omeostasi di un organismo pluricellulare non patologico, che le cellule che lo compongono, abbiano una vita limitata.

Sarebbe quindi auspicabile ottenere delle cellule che possano essere immortalizzate in laboratorio, fuori dall'organismo che le ha generate, ma che ancora conservino quelle caratteristiche proprie, utili a comprendere il fenomeno che si vuole indagare. Solo che in questo caso occorre fare attenzione a due ordini di differenze rispetto al fenomeno reale. Per prima cosa occorre considerare, come si affronterà in dettaglio dopo, che le cellule normali, se si immortalizzano in laboratorio, lo fanno a prezzo di sconvolgimenti genomici per i quali non tutte le condizioni metaboliche rimangono simili alle cellule primarie. In secondo luogo occorre sempre ricordarsi il grado di accostamento alla realtà che possiede un modello, qualunque esso sia. Nello specifico, studiando i fenomeni cellulari su una linea continua (immortalizzata) di laboratorio si deve tener conto che si stanno osservando non "quelle" cellule ma "un modello di quelle cellule".

2. La linea cellulare continua di laboratorio: un modello di studio *in vitro* di fenomeni biologici

In una linea cellulare è possibile studiare fenomeni riuscendo ad isolarli, enucleandoli dalla convergenza di più elementi che finiscono per comporre i cosiddetti fattori di disturbo e di confusione. Rappresentano un'ottima modellizzazione del fenomeno, forse non esattamente corrispondente ma sicuramente paragonabile. Come si ottiene una linea cellulare continua di laboratorio da una cellula espantata da un organismo? In un solo modo: modulando, aumentando l'instabilità genomica della cellula primaria.

È infatti ampiamente noto che tutte le cellule di un organismo, con grande dispendio di energia metabolica, mantengono funzionali tutta una serie di endpoints: hanno infatti una moderatissima instabilità genomica, attuano una fedele replicazione del DNA della cromatina e dei cromosomi, conducono una corretta segregazione cromosomica, un corretto coordinamento del ciclo cellulare, possiedono la possibilità di riparare il più possibile il DNA e sono in grado, dal punto di vista epigenetico, di mantenere il giusto grado di metilazione genomica del DNA, curando che non scenda sotto certi livelli critici.

La linea cellulare nasce grazie ad una iniziale grande instabilità genomica fra le cellule primarie messe in coltura (*in vitro*); l'instabilità genomica favorisce la

generazione di cellule geneticamente /genomicamente diverse a cause di errori insorti in uno degli endpoints prima menzionati. Si instaura subito una competizione in vitro, una selezione clonale che avvantaggia il clone con la combinazione di aberrazioni per crescere in quelle condizioni. Più in dettaglio, se una cellula per rimaneggiamenti genomici aberranti silenzia i propri geni di controllo della crescita cellulare e contemporaneamente iperattiva quelli della riparazione del DNA, allora può definirsi «immortalizzata». Una linea cellulare continua di laboratorio «nasce» quando dalla grande instabilità genomica si arriva per selezione clonale ad una cellula che è tanto instabile quanto basta per essere immortalizzata ma tanto stabile quanto basta per mantenere una moderata omeostasi cellulare.

Una cellula immortalizzata può NON essere tumorale, mentre una cellula tumorale è sicuramente immortalizzata. L'immortalizzazione si definisce come la possibilità di perpetuare un certo fenotipo cellulare in vitro a condizioni di fornire nutrienti e condizioni chimico-fisiche per il tempo necessario alla crescita. Questo attiene sia alle cellule immortalizzate non tumorali che a quelle tumorali, per le quali si aggiungono alcune altre caratteristiche peculiari, come la crescita senza inibizione da contatto, la non dipendenza da certi fattori di crescita ed altro.

3. L'instabilità genomica è la caratteristica del cancro

È noto che il cariotipo della cellula tumorale è instabile e per questo in continuo cambiamento. Quasi tutti i tumori solidi sono costituiti da cellule aneuploidi, quindi con numero cromosomico diverso dalla normalità. Condizione necessaria affinché il cancro si sviluppi è che tutti i meccanismi di riparazione/controllo falliscano, in modo che la condizione aneuploide si propaghi attraverso le innumerevoli divisioni cellulari (Fig. 1).

Se guardiamo questo stesso evolversi attraverso la chiave di lettura epigenetica, notiamo una correlazione tra il grado di metilazione genomica del DNA e l'insorgenza del cancro (Fig. 1). Più in dettaglio, il DNA di una cellula normale possiede livelli genomici di 5 metilcitosina (5-MeC) normali, tipicamente molto accentuati per via delle grandi quantità di DNA strutturale (centromeri, telomeri, etc) metilato. Al contrario, il DNA di una cellula tumorale possiede livelli genomici di 5-MeC bassi rispetto alla normalità. Questo può essere determinato e può a sua volta determinare una iper-espressione di oncogeni accompagnati da silenziamento di alcuni geni oncosoppressori.

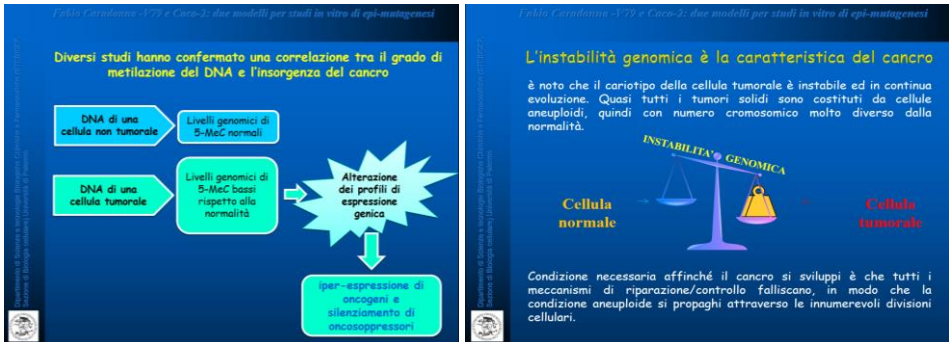


Figura 1. Il rapporto fra instabilità genomica e cancro, a sinistra; relazione epigenetica fra grado di metilazione genomica del DNA e insorgenza del cancro, a destra.

Riepilogando, dunque, le principali differenze, genetiche/epigenetiche, fra una cellula normale primaria ed una appartenente ad una linea cellulare continua di laboratorio sono tutte impiegate sull'instabilità genomica ed epigenetica. In particolare, una cellula normale è geneticamente stabile, è differenziata, è in grado di vivere per un numero di divisioni «a termine», ha un citotipo ben definito ed ha un DNA normometilato. Una cellula appartenente ad una linea continua di laboratorio, è geneticamente instabile, è poco differenziata, in presenza di risorse trofiche ha a sua disposizione un numero di divisioni illimitato, conserva tratti fenotipici della cellula primaria di origine ed ha un DNA meno metilato della cellula primaria. Una cellula tumorale, a prescindere dalla sua collocazione in vitro o in un organismo, presenta un DNA ipometilato.

4. La linea cellulare V79-C13 e gli studi sull'arsenico

È stata ottenuta in seguito a immortalizzazione spontanea di cellule isolate dal polmone di un criceto cinese normale (maschio), l'Hamster cinese *Cricetulus vulgaris*. È particolarmente adatta ad esperimenti di mutagenesi dal momento che nel processo di stabilizzazione in vitro, delezioni cromosomiche e mutazioni genetiche hanno eliminato la funzionalità della maggior parte dei geni CYP e le cellule hanno conservato una certa stabilità del cariotipo e della cito-morfologia. Ricordiamo che la famiglia multigenica dei geni CYP raggruppa geni che codificano per enzimi metabolizzatori di xenobiotici, responsabili della maggior parte del potere detossificante di una cellula. Queste cellule, dunque, non possono rimaneggiare alcuna molecola per detossificazione e quindi possono essere degli ottimi modelli di studio degli effetti di un mutageno.

L'arsenico è un contaminante «obbligato» della nostra vita, è naturalmente presente nel suolo, nell'aria e soprattutto nell'acqua ad uso umano potabile; in

alcuni siti, a causa di usi industriali, può essere più concentrato. La storia annovera il potere mortale dell'arsenico a dosi elevate, quelle da avvelenamento acuto con concentrazioni maggiori di 3,5 mg/kg. Il più temibile, invece, è l'avvelenamento cronico, a dosi submicromolari, che non provoca la morte istantanea ma è concausa di carcinoma polmonari, tumori dell'apparato digerente, urinario, respiratorio, di patologie cardiovascolari, neurologiche e diabetiche. Oggi, alla luce delle nostre conoscenze sull'avvelenamento cronico da arsenico a bassissime dosi, possiamo dire che Re Mitridate VI del Ponto, secondo quello che recita la leggenda, sarà morto quasi sicuramente di cancro! Il nostro laboratorio si occupa da 15 anni di effetti epigenetici dell'Arsenito di Sodio (AdS), riportando che questa molecola in vitro, demetila il DNA di cellule normali rendendolo simile a quello delle cellule tumorali (Fig. 2) [1] ed inoltre innesca una severa instabilità genomica agendo anche sul fuso mitotico ed inducendo, di conseguenza, aneuploidia. Quindi, una bassa dose di AdS, a partire da 6 ore dal trattamento, innesca apoptosi oppure, cosa molto interessante, conferisce alle cellule instabilità genomica ed epigenomica. Quelle cellule sfuggite all'apoptosi indotta da arsenico, hanno severe anomalie del fuso mitotico e diventano genomicamente ed epigenomicamente instabili. Ma il risultato più interessante ma forse più inquietante è che questa instabilità continua anche generazioni dopo aver rimosso l'AdS dal mezzo di coltura creando una linea cellulare "nuova", una sorta di "modello nel modello" che noi abbiamo chiamato "cellule ASO". Queste cellule si mostrano molto instabili, più delle progenitrici V79-C13, ma hanno avuto solo una prima esposizione all'AdS e da generazioni cellulari non lo sono più. Quindi, basse dosi di arsenico, comparabili a quelle cui ciascuno di noi può essere stato esposto almeno una volta nella propria vita, possono dare a cellule in coltura effetti a lungo termine anche quando il veleno non è più presente da tempo. Potrebbe essere, di conseguenza, sufficiente anche soltanto una esposizione a dosi sub-micromolari per indurre, a distanza di tempo e in assenza di altre esposizioni, effetti a lungo termine potenzialmente prodromiche alla cancerogenesi.

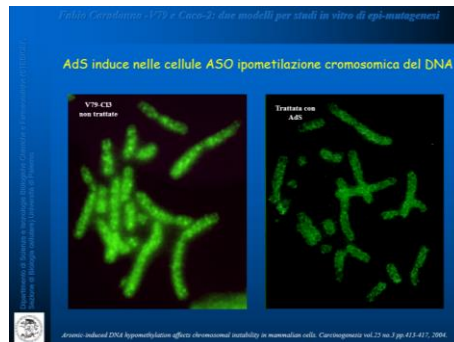


Figura 2. L'Arsenito di Sodio (AdS) induce demetilazione genomica del DNA. Tramite immunolocalizzazione cromosomica di 5MeC, viene visualizzato sui cromosomi di cellule V79-C13 non trattate la condizione di normometilazione (a destra) in confronto ad una forte ipometilazione dopo trattamento con AdS (a sinistra) [1].

5. Gli studi nutrigenomici sulla linea cellulare Caco-2: una luce in fondo al tunnel

La Nutrigenomica è una recente branca della Genetica e dell'Epigenetica che studia i meccanismi con cui molecole contenute nei nutrienti interagiscono con il DNA e con la sua espressione, identificando quegli alimenti che possono avere effetti positivi (o raramente negativi) sulla salute umana. Ciò richiede la comprensione di come alcuni nutrienti agiscono a livello molecolare modificando espressioni geniche, variando di conseguenza alcuni metabolismi ed in ultimo contribuendo a determinare lo stato di salute di un individuo.

La linea cellulare Caco-2 di adenocarcinoma colon-rettale umano è stata isolata negli anni '70 e viene ampiamente usata da almeno venti anni come modello di barriera intestinale. In colture a medio termine le cellule Caco-2 sono da considerarsi tumorali a tutti gli effetti, ma, sorprendentemente, in colture a lungo termine, quando le cellule raggiungono la confluenza, ovvero quando stabiliscono i primi contatti cellula-cellula, sono capaci di differenziare spontaneamente in cellule aventi molte caratteristiche morfologiche e biochimiche degli enterociti normali maturi.

Studi precedenti del nostro Dipartimento hanno dimostrato che nell'estratto di un noto frutto oleaceo siciliano sono contenute molte molecole ad effetto benefico per la salute umana [2].

Nel 2017 ha avuto inizio, nel nostro laboratorio, un progetto di ricerca finalizzato a ricercare un eventuale effetto nutrigenomico (epigenetico) di EIP su cellule intestinali con un finanziamento coperto, ad oggi, da segreto industriale. Utilizzando cellule Caco-2 differenziate abbiamo condotto dei trattamenti in vitro

con 3 dosi di estratto idrofilo del noto frutto oleaceo siciliano (EIP 10, 20 e 30) corrispondenti a 35, 70 e 100 g di frutto e per tempi paragonabili al transito intestinale (3 h). I risultati sono visibili in figura 3: l'EIP è in grado di bilanciare, in alcune condizioni annullare o ribaltare, il danno epigenetico da AdS sia se somministrato alle cellule prima che dopo la dose di arsenico.

Sebbene gli esperimenti *in vitro* sono abbastanza distanti dal poter avere una conferma *in vivo* o direttamente su soggetti o pazienti, si può certamente affermare che in alcuni distretti tissutali dell'organismo, quali per esempio, il colon retto, la contemporanea presenza di arsenico e di estratto di frutto oleaceo siciliano può essere un contrasto agli effetti negativi delle basse dosi di arsenico contenuto, ad esempio, nell'acqua potabile.

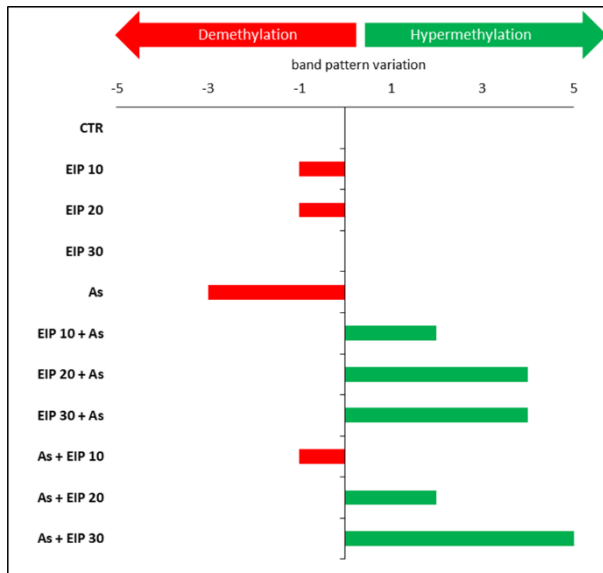


Figura 3. Effetto epigenetico dell'estratto idrofilo di un noto frutto oleaceo siciliano (EIP) a 3 concentrazioni compatibili con assunzioni tradizionali della dieta mediterranea. Come è visibile nel grafico, l'effetto DNA-demetilante in rosso dell'arsenico (As) viene ribaltato dalla compresenza dell'estratto di questo frutto oleaceo (in verde) sia somministrato prima che dopo la bassa dose di arsenico. Si rammenta che un DNA demetilato è simile a quello posseduto da cellule tumorali.

6. Conclusioni

Le linee cellulari continue di laboratorio sono degli ottimi modelli in cui è possibile studiare fenomeni biologici *in vitro* scevri da fattori di disturbo/confusione. Oltre a tutti i vantaggi già descritti, è importante sottolineare che essi rappresentano una ottima soluzione per una prima fase di ricerca in cui è possibile non usare i modelli animali in vivo con notevole risparmio in denaro, in forza lavoro ed anche guadagnando in immagine presso gli animalisti e parte dell'opinione pubblica;

Come tutti i modelli, le linee cellulari restituiscono una condizione non reale ma realistica dei fenomeni biologici ed al pari di ogni tecnica sperimentale va utilizzata conoscendone limiti e ambiti di applicazione.

Riguardo gli studi qui presentati nello specifico, la conclusione è ovvia ed è stata già pronunciata secoli addietro dalla saggezza popolare: variare la dieta assumendo vari cibi, tutti appartenenti alla dieta mediterranea, sicuramente aiuta l'organismo a beneficiare dell'effetto salutistico di alcune molecole in essi contenute anche quando si trovano in associazione ad altre molecole dannose delle quali sono in grado di abbattele o ridurne gli effetti negativi.

La Genetica odierna ha abbandonato la sua visione riduzionista del secolo scorso ed ha imparato che studiare un genoma senza le relazioni con l'ambiente equivale a vedere in bianco/nero un quadro a colori: se ne conoscono i tratti ma non si apprezzano tutte le sfumature in esso contenute, a volte più importanti, e la Nutrigenomica ne è un chiarissimo esempio.

Bibliografia

- [1] Sciandrello G., Caradonna F., Mauro M., Barbata G. (2005). Arsenic-induced DNA hypomethylation affects chromosomal instability in mammalian cells. *Carcinogenesis*, 25(3), 413-417.
- [2] Gentile C., Perrone A., Attanzio A., Tesoriere L., Livrea M.A. (2015). Sicilian pistachio (*Pistacia vera* L.) nut inhibits expression and release of inflammatory mediators and reverts the increase of paracellular permeability in IL-1 β -exposed human intestinal epithelial cells. *European Journal of Nutrition*, 54(5), 811-21.

Problemi sulle competenze risolti con la calcolatrice grafica

Cerruto Antonino

Liceo Scientifico "Galilei-Campailla" Modica (RG)

E-mail: ninocerruto@gmail.com

Riassunto. L'attività proposta si basa sull'utilizzo della calcolatrice grafica FX-CG50 della Casio, recentemente ammessa agli esami di stato. Si tratta di una calcolatrice che chiaramente si colloca ad un livello notevolmente superiore rispetto alla classica calcolatrice scientifica. Essa infatti può tornare utile in diversi campi della matematica: si possono rappresentare graficamente funzioni e calcolarne tangenti, zeri, estremi e integrali definiti; eseguire tutti i tipi di operazioni con le matrici ed il calcolo vettoriale; operare con i numeri complessi; risolvere equazioni e sistemi lineari; effettuare analisi statistiche anche di tipo inferenziale; studiare le diverse distribuzioni di probabilità; operare con oggetti geometrici sia sintetici che analitici. Inoltre consente di scrivere programmi, dispone di un foglio di calcolo, si interfaccia con una centralina per acquisire ed elaborare dati, dialoga con un pc e con altre calcolatrici, ma, a differenza di *software* didattici su *personal computer* o *smartphone*, non è collegabile alla rete e ciò, in diversi contesti, risulta opportuno oltre che didatticamente vantaggioso. Nello specifico verranno presentate diverse situazioni problematiche di carattere chimico, fisico, biologico, la cui risoluzione presuppone la costruzione di un apposito modello matematico. Il mero "calcolo matematico" verrà effettuato mediante la calcolatrice, previa idonea implementazione dei dati.

Abstract. The proposed activity is based on the use of the Casio FX-CG50 graphing calculator, recently admitted to the graduation exams. It is a calculator that clearly stands at a considerably higher level than the classic scientific calculator. In fact, it can be useful in various fields of mathematics: it is possible to graphically represent functions and calculate its tangents, zeros, extremes and definite integrals; perform all types of operations with matrices

and vector calculation; operate with complex numbers; solve equations and linear systems; perform statistical analyzes, including inferential ones; study the different probability distributions; work with both synthetic and analytical geometric objects. It also allows you to write programs, has a spreadsheet, interfaces with a control unit to acquire and process data, communicates with a PC and other calculators, but, unlike educational software on personal computers or smartphones, it cannot be connected to the network and this, in various contexts, is appropriate as well as educationally useful. In particular, various problematic situations of a chemical, physical and biological nature will be presented, the resolution of which presupposes the construction of a special mathematical model. The simple "mathematical calculation" will be performed using the calculator, after an adequate implementation of the data.

1. Il Modello Matematico

Tra i principali obiettivi che dovrebbero conseguire gli studenti attraverso lo studio della matematica, vi è senz'altro quello di riuscire a saper costruire, a partire da una assegnata situazione problematica, un *modello* atto a fornire una esauriente risposta anche ad una classe di problemi di analogo tipo. Lo studente dovrebbe orientare le proprie risorse cognitive principalmente agli aspetti concettuali della disciplina, all'osservazione di un fenomeno ed alla conseguente individuazione di uno strumento matematico in grado di poterlo formalizzare. Sicuramente la semplicità del modello dipende dalle iniziali ipotesi restrittive che trascurano aspetti che si possono ritenere marginali, ma che in alcuni casi bisogna necessariamente considerare per non inficiare significativamente il risultato finale. Ciò porta ad una complicazione del modello che richiede di conseguenza calcoli molto laboriosi. Poter disporre in tal caso di uno strumento tecnologico in grado di eseguire calcoli, risolvere equazioni, rappresentare ed analizzare grafici, elaborare dati potrà da un lato fornire le adeguate soluzioni e dall'altro aiutare a consolidare l'acquisizione dei contenuti. La calcolatrice grafica nel panorama degli strumenti tecnologici rappresenta, per la sua maneggevolezza e per le sue potenzialità paragonabili a quelle di un pc, un'utile risorsa che si può utilizzare in tutti i contesti dell'azione didattica.

2. Le schede di lavoro

In queste schede vengono proposti sei problemi, alcuni dei quali sono stati desunti dai testi adottati nella scuola secondaria di secondo grado, risolti con

l'ausilio della calcolatrice grafica FX-CG50 Casio. Si inizia con un problema sulla mappa logistica; si passa quindi ad un problema di chimica su una trasformazione isoterma di un gas perfetto; si affronta poi un problema di scienze sull'evoluzione di una popolazione di conigli; si continua con due problemi di fisica: uno sulla velocità di scorrimento dell'acqua dal cono superiore a quello inferiore di una clessidra e l'altro sull'analisi della legge di abbassamento del livello del liquido contenuto in un cilindro posto in comunicazione con un altro cilindro di diversa sezione; si conclude infine con un problema di programmazione lineare.

2.1 Mappa logistica

Nel 1976 il biologo R. May propose di considerare come modello per lo studio dell'evoluzione di una popolazione le iterazioni della mappa $f_r(x) = rx(1 - x)$, nota come mappa logistica.

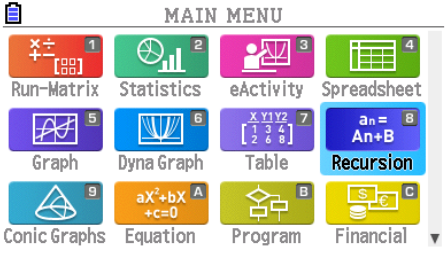
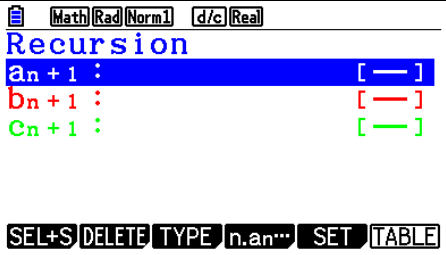
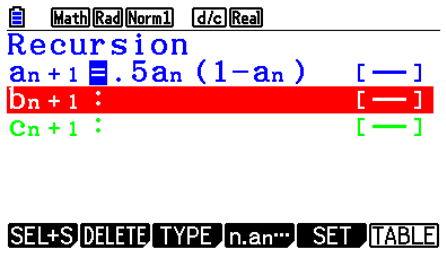
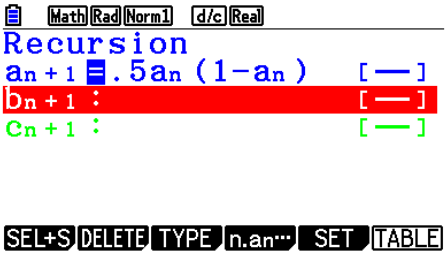
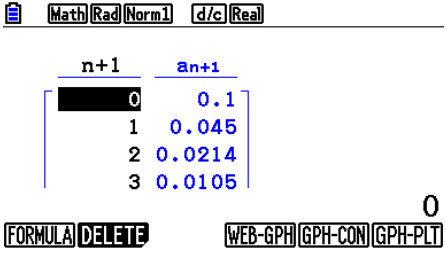
Con semplici considerazioni algebriche si può verificare che per $0 \leq r \leq 4$, la $f_r(x)$, per $0 \leq x \leq 1$, assume valori in $[0, 1]$.

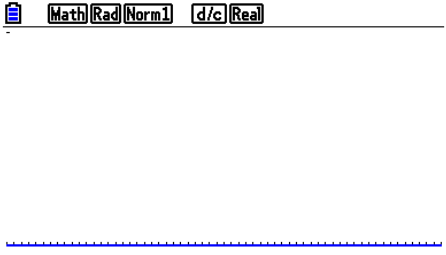
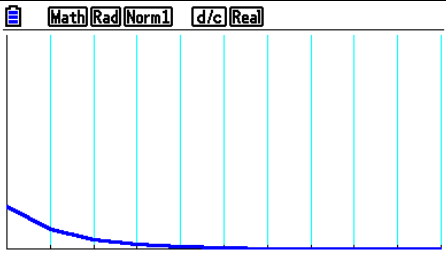
La formula iterativa che fornisce il modello matematico per spiegare l'evoluzione di una popolazione in un ambiente con risorse limitate è data dalla seguente successione definita ricorsivamente:

$x_{n+1} = rx_n(1 - x_n)$ con $0 < x_n < 1$; esso denota il rapporto tra la popolazione esistente e quella massima possibile in un anno n .

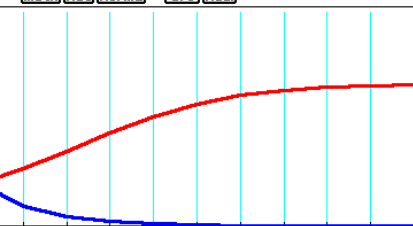
Al variare del parametro r si può studiare l'evoluzione che subisce nel tempo la popolazione; ad es.

per $0 < r < 1$, la popolazione, qualunque sia il suo valore iniziale, è destinata ad estinguersi.

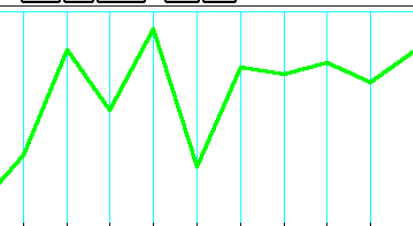
<p>Passaggio 1 Aprire il menu recursion premendo il tasto 8 o spostandosi con i tasti cursore.</p>	 <p>MAIN MENU</p> <p>Run-Matrix Statistics eActivity Spreadsheet</p> <p>Graph Dyna Graph Table Recursion</p> <p>Conic Graphs Equation Program Financial</p>										
<p>Passaggio 2 Scegliere il tipo formula</p> <p>F3 F2</p>	 <p>Math Rad Norm1 d/c Real</p> <p>Recursion</p> <p>$a_{n+1} :$ [—]</p> <p>$b_{n+1} :$ [—]</p> <p>$c_{n+1} :$ [—]</p> <p>SEL+S DELETE TYPE n.an... SET TABLE</p>										
<p>Passaggio 3 Scrivere la formula con $r = 0,5$</p> <p>5 F2 (1 - F2) EXE</p>	 <p>Math Rad Norm1 d/c Real</p> <p>Recursion</p> <p>$a_{n+1} = .5a_n (1-a_n)$ [—]</p> <p>$b_{n+1} :$ [—]</p> <p>$c_{n+1} :$ [—]</p> <p>SEL+S DELETE TYPE n.an... SET TABLE</p>										
<p>Passaggio 4 Da SET Specificare i valori iniziale e finale per la variabile n e il termine iniziale per ogni formula ricorsiva.</p> <p>F5 (1 0 0 EXE . 1 EXE EXIT</p>	 <p>Math Rad Norm1 d/c Real</p> <p>Recursion</p> <p>$a_{n+1} = .5a_n (1-a_n)$ [—]</p> <p>$b_{n+1} :$ [—]</p> <p>$c_{n+1} :$ [—]</p> <p>SEL+S DELETE TYPE n.an... SET TABLE</p>										
<p>Passaggio 5 Visualizzare la tabella numerica della formula ricorsiva.</p> <p>F6</p>	 <p>Math Rad Norm1 d/c Real</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>n+1</th> <th>a_{n+1}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0.1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0.045</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.0214</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.0105</td> </tr> </tbody> </table> <p>FORMULA DELETE WEB-GPH GPH-CON GPH-PLT</p>	n+1	a _{n+1}	0	0.1	1	0.045	2	0.0214	3	0.0105
n+1	a _{n+1}										
0	0.1										
1	0.045										
2	0.0214										
3	0.0105										

<p>Passaggio 6 Specificare il tipo di grafico e disegnare il grafico.</p> <p>F5(GPH-CON) ... grafico a linea</p>	
<p>Passaggio 7 Configurare le impostazioni di V-Window.</p> <p>F3 0 EXE 1 0 EXE ▼ ▼ 0 EXE • 5 EXE EXIT F6 F5</p>	

A questo punto si possono considerare altri valori di r , ad esempio $r=1,5$, e scrivere la corrispondente formula in b_n . Si possono così confrontare i due grafici ed osservare che in questo caso la popolazione tende ad un valore limite dato da $(r - 1)/r$.

<p>EXIT F1 1 • 5 F3 (1 - F3) EXE F5 ▼ ▼ ▼ • 1 EXE EXIT F6 F5</p>	
--	---

Bisogna prima inizializzare i valori di b_n .

<p>Math Rad Norm1 d/c/Real</p> <p>Recursion $a_{n+1} = .5a_n (1 - a_n)$ [—] $b_{n+1} = 1.5b_n (1 - b_n)$ [—] $C_{n+1} = 3.7C_n (1 - C_n)$ [—]</p> <p>SEL+S DELETE TYPE n.an... SET TABLE</p>	
---	--

Altri valori di r danno luogo a diverse evoluzioni della popolazione; così ad es. per $r \sim 3,56995$ si può osservare la cosiddetta insorgenza del caos, dove minime variazioni del valore iniziale della popolazione forniscono risultati molto differenti.

Si potrebbe operare un ulteriore approfondimento considerando la funzione $y = ax^2 + bx + c$ dove $y = a_n + 1$ e $x = a_n$ ed utilizzando il comando WEB-GPH.

Inoltre su grafici (menu 5) in Y1 si riporta la funzione ad es. $y = 1,5x(1-x)$ e sul menu calcoli la seguente assegnazione:

$0.1 \rightarrow x$

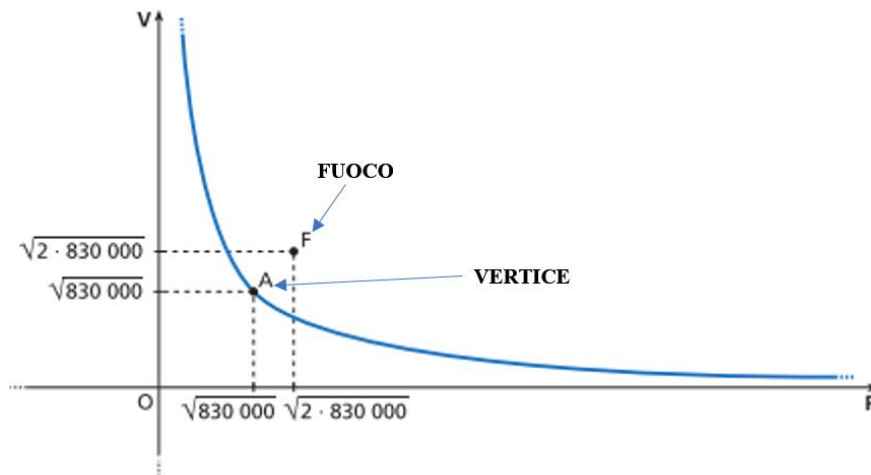
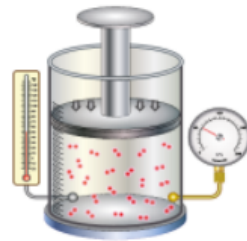
$Y1 \rightarrow x$

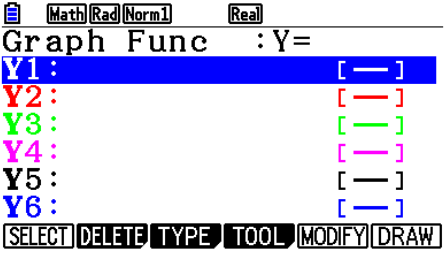
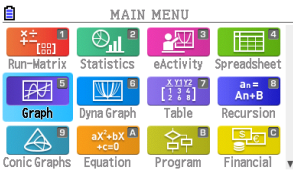
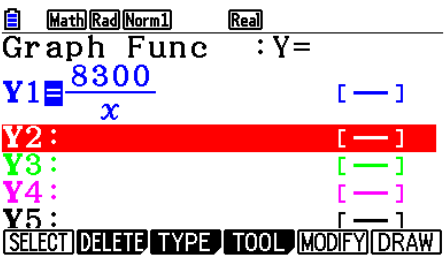
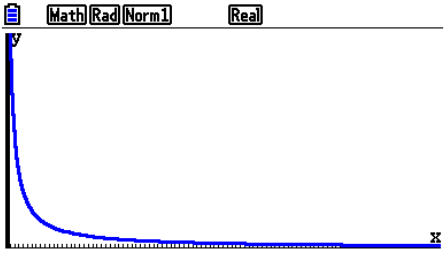
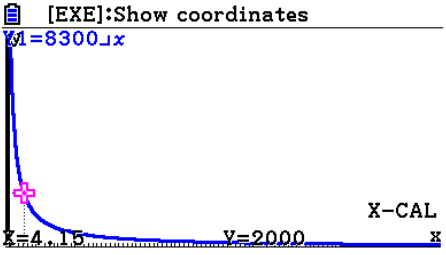
Premendo più volte exe si può vedere verso quale valore tende y .

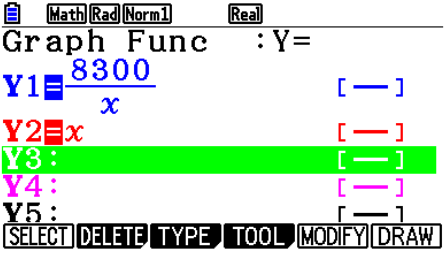
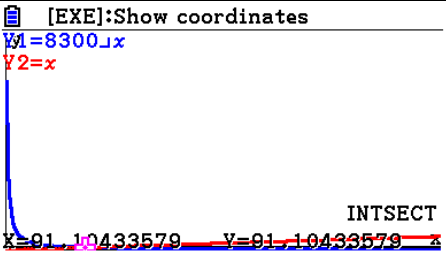
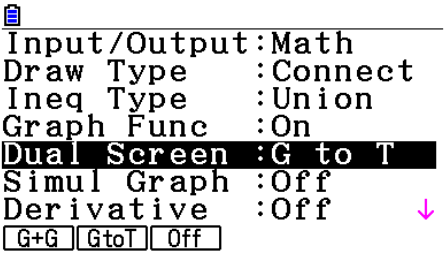
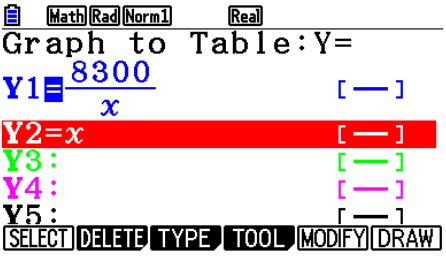
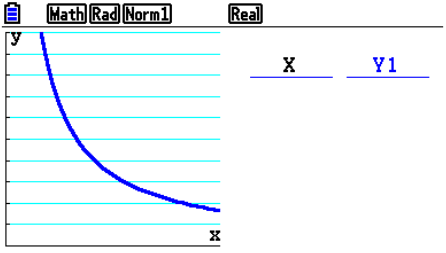
2.2 Chimica: gas perfetti

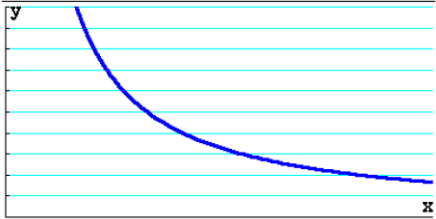
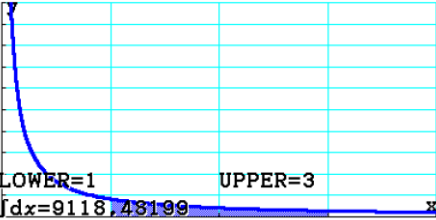
Gas perfetti Grazie all'equazione di stato dei gas perfetti sappiamo che una certa quantità di azoto segue la legge $PV = kT$, dove la costante k , in unità del Sistema Internazionale, vale circa 83, T è la temperatura (in kelvin), P la pressione (in pascal) e V il volume (in m^3).

- Rappresenta l'andamento della pressione in funzione del volume quando la temperatura è di 100 kelvin.
- Se nel nostro laboratorio si può creare al massimo una pressione di 2 kPa, che volume occupa il gas?
- Se si potesse aumentare ancora la pressione del gas, cosa succederebbe al suo volume?



<p>Passaggio 1 Dal MAIN MENU accedi grafici (5)</p>	 <p>Graph Func : Y=</p> <p>Y1: [—] Y2: [—] Y3: [—] Y4: [—] Y5: [—] Y6: [—]</p> <p>[SELECT] [DELETE] [TYPE] [TOOL] [MODIFY] [DRAW]</p>
<p>Passaggio 2 In Y1 scriviamo la legge $y=8300/x$</p>  <p>[8] [3] [0] [0] [X,θ,T] [EXE]</p>	 <p>Graph Func : Y=</p> <p>Y1 = $\frac{8300}{x}$ [—] Y2: [—] Y3: [—] Y4: [—] Y5: [—]</p> <p>[SELECT] [DELETE] [TYPE] [TOOL] [MODIFY] [DRAW]</p>
<p>Passaggio 3 Rappresentiamo la funzione e modifichiamo i parametri di visualizzazione limitandoci alla parte di piano del 1° quadrante.</p> <p>[F6] [F3] [0] [EXE] [1] [0] [0] [EXE] [▼] [▼] [0] [EXE] [8] [0] [0] [0] [EXE] [EXE] [F6]</p>	
<p>Passaggio 4 Calcolo del volume occupato dal gas ad una pressione di 2kPa. In modalità grafico si effettuano le seguenti operazioni:</p> <p>[F5] [F6] [F2] [2] [0] [0] [0] [EXE]</p> <p>Trovando $v=4,15 \text{ m}^3$</p>	 <p>[EXE]:Show coordinates</p> <p>Y1=8300└x</p> <p>X-CAL</p> <p>X=4.15 Y=2000</p>

<p>Passaggio 5 Calcolo delle coordinate del vertice. Basta intersecare con uno dei due assi di simmetria dell'iperbole, $y=x$</p> <p>X,θ,T EXE</p>	
<p>F6 F6 F3 ∇ 5 0 0 EXE ∇ ∇ ∇ 8 0 0 0 EXE EXE EXE F5 F5</p>	
<p>Passaggio 6 Andamento del volume all'aumentare della pressione. Dall'esistenza dell'asintoto verticale, $x=0$, si deduce che al crescere di P, il volume tende a zero. Si può rappresentare grafico e tabella</p> <p>SHIFT MENU ∇ ∇ ∇ ∇ F2</p>	
<p>Conviene deselezionare la $y=x$</p> <p>EXIT \blacktriangle F1</p>	
<p>Effettuiamo la rappresentazione grafica e modifichiamo i parametri di visualizzazione.</p> <p>F6 F3 ∇ . 5 EXE ∇ ∇ ∇ 1 0 0 0 0 0 EXE EXIT F6</p>	

<p>Adesso selezioniamo alcuni punti ed osserviamo nella tabella l'andamento di P e V.</p> <p> F1 EXE ◀ ◀ ◀ ◀ EXE ◀ ◀ ◀ EXE ◀ ◀ ◀ ◀ ◀ ◀ ◀ ◀ ◀ ◀ ◀ EXE </p>	<p>[EXE]:Add Table</p> <p>$y1=8300/x$</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>X</th> <th>Y1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.2177</td> <td>38118</td> </tr> <tr> <td>0.1935</td> <td>42883</td> </tr> <tr> <td>0.1048</td> <td>79169</td> </tr> <tr> <td>0.1048</td> <td>79169</td> </tr> </tbody> </table> <p>$\bar{x}=0.1048387097$ $\bar{y}=79169.23077$</p>	X	Y1	0.2177	38118	0.1935	42883	0.1048	79169	0.1048	79169
X	Y1										
0.2177	38118										
0.1935	42883										
0.1048	79169										
0.1048	79169										
<p>Passaggio 7</p> <p>Calcolo del lavoro da compiere per triplicare il volume partendo da un valore iniziale di 1 m³. Il valore numerico del lavoro è dato dall'area del trapezoide relativo alla funzione $P=83300/V$ ed all'intervallo (1-3). Bisogna quindi calcolare un integrale.</p> <p>Rappresentiamo la funzione eliminando la tabella da SET UP.</p>	<p>[Math] [Rad] [Norm1] [Real]</p> 										
<p> F3 ▼ 4 EXE EXE F6 F5 F6 F3 F1 1 EXE 3 EXE </p>	<p>[Math] [Rad] [Norm1] [Real]</p>  <p>LOWER=1 UPPER=3</p> <p>$\int dx=9118.48199$</p>										

2.3 Scienze: conigli in pericolo

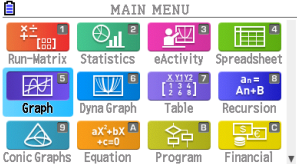
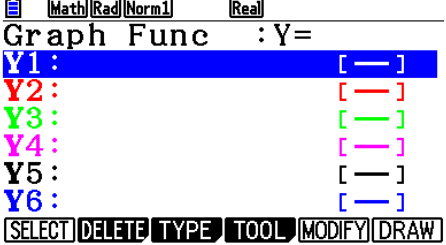
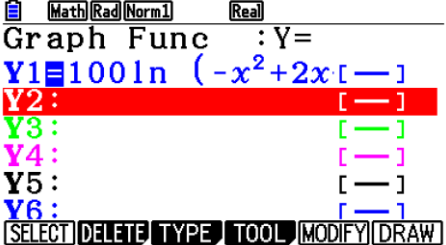
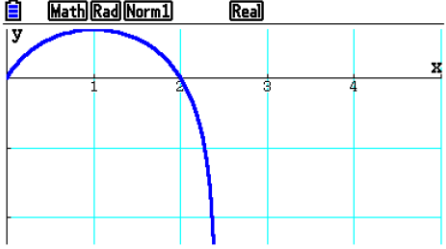
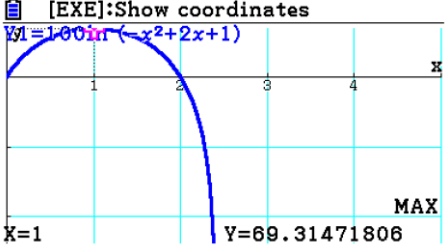
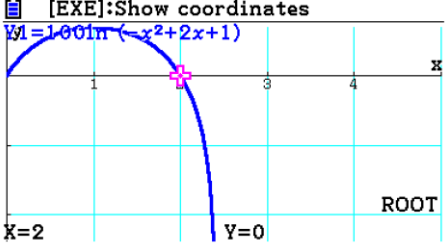
REALTÀ E MODELLI **Conigli in pericolo** Un batterio particolarmente diffuso negli allevamenti di conigli ne causa la cecità. La rapidità di diffusione della popolazione batterica è descritta dalla legge:


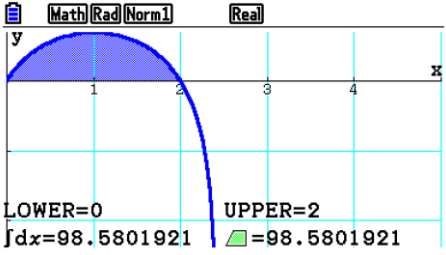
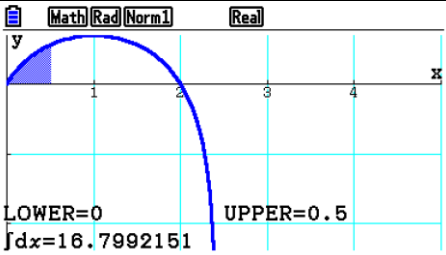
$$B(t) = N \ln(-t^2 + 2t + 1),$$

dove N è il numero iniziale di conigli presenti nell'allevamento, $B(t)$ è il tasso di variazione della popolazione batterica e il tempo t è espresso in giorni.

- Dopo quanti giorni si ha il massimo della diffusione della popolazione batterica?
- Dopo quanti giorni la diffusione della popolazione batterica si arresta?

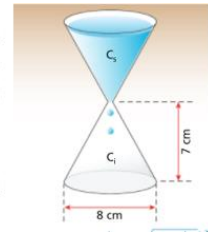


<p>Passaggio 1 Dal MAIN MENU accedi grafici (5)</p> 	
<p>Passaggio 2 Assegniamo ad N ad es. il valore 100 e in Y1 scriviamo la legge $y=100\ln(-x^2+2x+1)$.</p> <p>1 0 0 ln (- x , θ) x² EXIT + 2 x , θ + 1)</p>	
<p>Passaggio 3 Rappresentiamo graficamente la funzione modificando, da V-Window, i parametri di visualizzazione.</p>	
<p>Passaggio 4 Calcoliamo il massimo della funzione</p> <p>F5 F2</p>	
<p>Passaggio 5 Calcoliamo gli zeri della funzione</p> <p>F5 F1 ▶</p>	

<p style="text-align: center;">Passaggio 6</p> <p>Ci proponiamo ora di calcolare il numero di batteri che si sono diffusi in 2 giorni. A tal fine basta calcolare l'integrale definito tra 0 e 2 della funzione assegnata.</p> <p>F5 F6 F3 F2 EXE  EXE</p>	
<p>Se ad es. avessimo voluto il numero di batteri presenti dopo mezza giornata, basta calcolare l'integrale tra 0 e 0,5.</p> <p>F4 F1 F5 F6 F3 F1 0 EXE . 5 EXE</p>	

2.4 Fisica: goccia dopo goccia

IN FISICA **Goccia dopo goccia** Ipotizziamo che la clessidra ad acqua mostrata in figura sia formata da due coni perfetti sovrapposti. La clessidra impiega 1,5 minuti per svuotarsi e supponiamo che il volume di acqua che passa da C_s a C_i in un secondo sia costante.



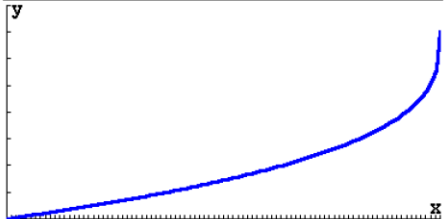
- Determina quanta acqua scorre in un secondo.
- Esprimi il volume V e l'altezza h dell'acqua scesa in C_i in funzione del tempo t , considerando come istante iniziale quello in cui C_s è pieno.

Essendo la portata costante la velocità v , anch'essa costante, di svuotamento è data da $v=V_0/90$, che esprime l'acqua che scorre in 1 s, dove V_0 è il volume iniziale. Ne consegue che la legge con cui il volume varia è di diretta proporzionalità: $V = 1,3t$.

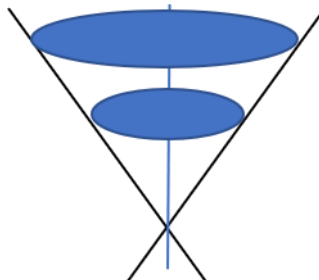
Per ricavare come l'altezza h dipende da t seguiamo tre diverse strategie:

- Considerazioni geometriche;
- Costruzione di un'equazione differenziale;
- Risoluzione approssimata mediante la calcolatrice grafica.
 - a) si calcoli il volume che è sceso nella clessidra inferiore al tempo t ;
 - b) si calcoli il volume V del cono di raggio r ed altezza h' equivalente al volume di acqua rimasto nel cono superiore. A tal fine si tenga presente

- la similitudine tra il triangolo rettangolo di cateti $r_0 = 4 \text{ cm}$ ed $h_0 = 7 \text{ cm}$ ed il triangolo rettangolo di cateti r ed h' ;
- c) l'equazione $V_0 - V = 1,3t$ consente di ricavare h' in funzione di t ;
- d) l'altezza h cercata è data da $h = h_0 - h'$
- Rappresentiamo graficamente la funzione $h(t)$ con la calcolatrice grafica dal menu grafici (5).

<p>7 () 1 = 3 SHIFT ^ 1 =</p> <p>EXIT X,θ,T () 9 0 () () EXE</p>	<p>Math Rad Norm1 Real</p> <p>Graph Func : Y=</p> <p>Y1=7 (1 - √[3]{1 - x/90}) [-]</p> <p>Y2: [-]</p> <p>Y3: [-]</p> <p>Y4: [-]</p> <p>SELECT DELETE TYPE TOOL MODIFY DRAW</p>
<p>Da V-Window impostiamo i parametri di visualizzazione: $0 < x < 90 - 0 < y < 8$</p> <p>F6 F3 0 EXE 9 0 EXE ()</p> <p>() 0 EXE 8 EXE EXE EXE</p>	<p>Math Rad Norm1 Real</p> 

2. Per determinare l'equazione differenziale che permette di ricavare la funzione $h(t)$, si calcoli il volume del tronco di cono che corrisponde al volume di acqua passata nella clessidra inferiore nell'intervallo di tempo infinitesimo dt .


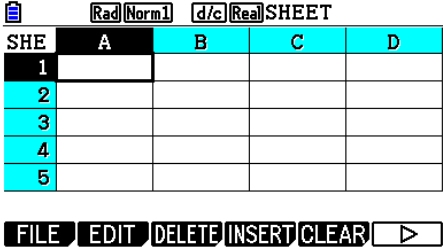
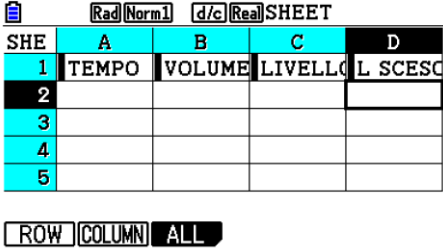


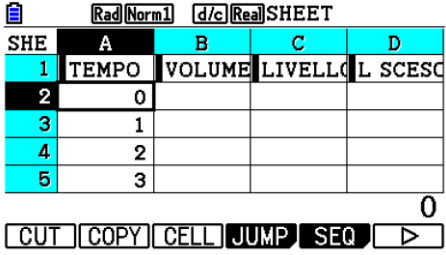
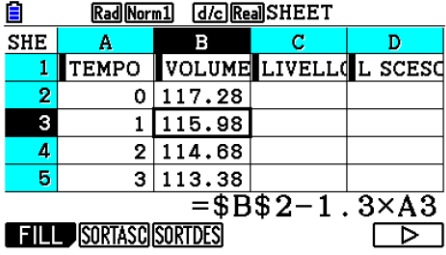
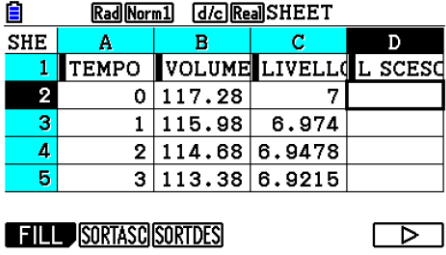
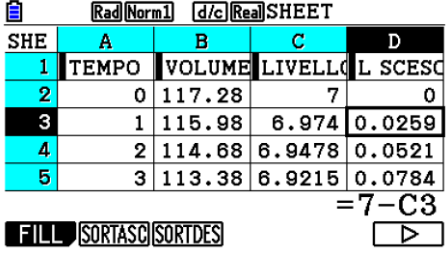
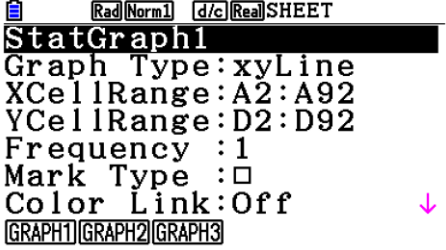
In tale intervallo di tempo l'altezza varia di una quantità $dh < 0$ ed il tronco di cono si può assimilare ad un cilindro di raggio $r = (r_0/h_0)h$ (si tenga presente la similitudine dei triangoli di cui al punto 1-b). Si ha dunque:

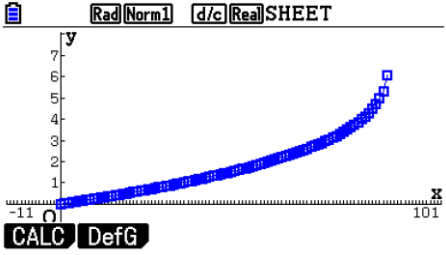
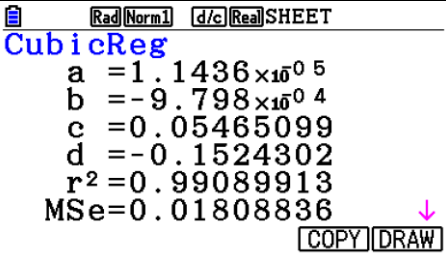
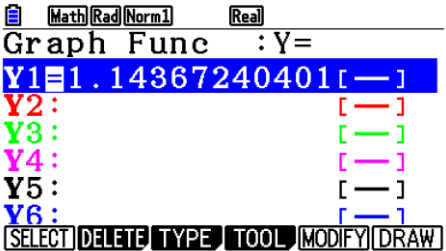
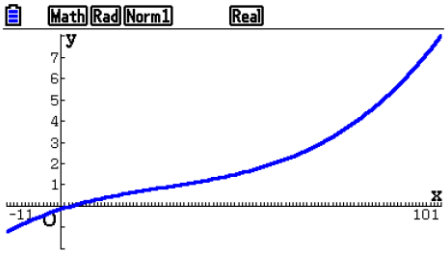
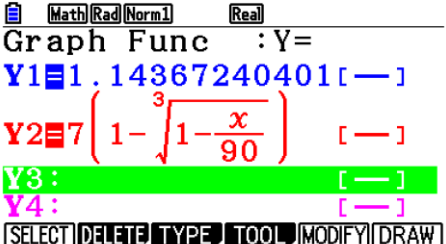
$$\frac{\pi r_0^2 h^2 dh}{h_0^2} = -1,3dt$$

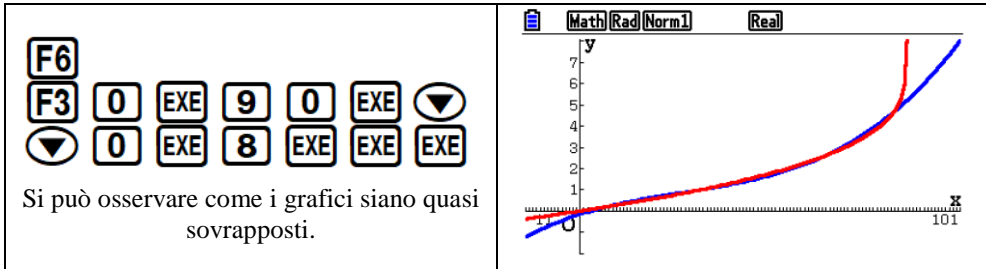
Integrando ambo i membri e tenendo conto che $h(0) = h_0$, si ottiene la funzione $h_1(t)$ che esprime il livello di acqua rimasto nel cono superiore. La funzione $h(t)$ è data da: $h(t) = h_0 - h_1(t)$

- Cerchiamo adesso una curva di regressione che meglio approssima una serie tabulata di valori t_i, h_i . A tal fine apriamo il foglio di calcolo (4), composto da 999 righe e da 26 colonne, della calcolatrice grafica

<p>Dal MAIN MENU accedi al Foglio di Calcolo (4) premendo 4 oppure exe dopo essersi spostati con i tasti cursore.</p>	
<p>Foglio di calcolo</p>	
<p>Nella colonna A riportiamo il tempo, sino a 90 s, nella B il volume di acqua nel cono superiore, nella C il livello di acqua nel cono superiore e nella D di acqua sceso nel cono inferiore.</p>	

<p>Nella colonna A riportiamo i valori di t da 0 a 90. posizionarsi in A2 EXIT F2 F5 X,θ,T EXE X,θ,T EXE 0 EXE 9 0 EXE 1 EXE EXE</p>	 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><thead><tr><th>SHE</th><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>D</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>TEMPO</td><td>VOLUME</td><td>LIVELLO</td><td>L SCESCO</td></tr><tr><td>2</td><td>0</td><td>117.28</td><td>7</td><td>0</td></tr><tr><td>3</td><td>1</td><td>115.98</td><td>6.974</td><td>0.0259</td></tr><tr><td>4</td><td>2</td><td>114.68</td><td>6.9478</td><td>0.0521</td></tr><tr><td>5</td><td>3</td><td>113.38</td><td>6.9215</td><td>0.0784</td></tr></tbody></table>	SHE	A	B	C	D	1	TEMPO	VOLUME	LIVELLO	L SCESCO	2	0	117.28	7	0	3	1	115.98	6.974	0.0259	4	2	114.68	6.9478	0.0521	5	3	113.38	6.9215	0.0784
SHE	A	B	C	D																											
1	TEMPO	VOLUME	LIVELLO	L SCESCO																											
2	0	117.28	7	0																											
3	1	115.98	6.974	0.0259																											
4	2	114.68	6.9478	0.0521																											
5	3	113.38	6.9215	0.0784																											
<p>Nella colonna B riportiamo il volume di acqua del cono superiore. in B2 si riporta il volume del cono superiore SHIFT SHIFT X10 X 1 6 X 7 + 3 EXE nella cella sottostante la seguente formula SHIFT F2 ALPHA log F2 2 - 1 - 3 X ALPHA X,θ,T 3 EXE la formula precedente la ricopiamo nelle celle sottostanti sino a B92 F6 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 EXE</p>	 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><thead><tr><th>SHE</th><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>D</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>TEMPO</td><td>VOLUME</td><td>LIVELLO</td><td>L SCESCO</td></tr><tr><td>2</td><td>0</td><td>117.28</td><td>7</td><td>0</td></tr><tr><td>3</td><td>1</td><td>115.98</td><td>6.974</td><td>0.0259</td></tr><tr><td>4</td><td>2</td><td>114.68</td><td>6.9478</td><td>0.0521</td></tr><tr><td>5</td><td>3</td><td>113.38</td><td>6.9215</td><td>0.0784</td></tr></tbody></table>	SHE	A	B	C	D	1	TEMPO	VOLUME	LIVELLO	L SCESCO	2	0	117.28	7	0	3	1	115.98	6.974	0.0259	4	2	114.68	6.9478	0.0521	5	3	113.38	6.9215	0.0784
SHE	A	B	C	D																											
1	TEMPO	VOLUME	LIVELLO	L SCESCO																											
2	0	117.28	7	0																											
3	1	115.98	6.974	0.0259																											
4	2	114.68	6.9478	0.0521																											
5	3	113.38	6.9215	0.0784																											
<p>Nella colonna C riportiamo il livello di acqua del cono superiore. In C2 riportiamo il livello iniziale pari a 7 cm e in C3 la formula che consente il calcolo del livello del cono superiore a partire dal volume 7 EXE SHIFT - 1 3 X 4 9 X ALPHA log 3 EXE 1 SHIFT X10 X 1 6 1 1 A 1 1 EXE si copi tale formula sino a C92 F2 F6 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 EXE</p>	 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><thead><tr><th>SHE</th><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>D</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>TEMPO</td><td>VOLUME</td><td>LIVELLO</td><td>L SCESCO</td></tr><tr><td>2</td><td>0</td><td>117.28</td><td>7</td><td>0</td></tr><tr><td>3</td><td>1</td><td>115.98</td><td>6.974</td><td>0.0259</td></tr><tr><td>4</td><td>2</td><td>114.68</td><td>6.9478</td><td>0.0521</td></tr><tr><td>5</td><td>3</td><td>113.38</td><td>6.9215</td><td>0.0784</td></tr></tbody></table>	SHE	A	B	C	D	1	TEMPO	VOLUME	LIVELLO	L SCESCO	2	0	117.28	7	0	3	1	115.98	6.974	0.0259	4	2	114.68	6.9478	0.0521	5	3	113.38	6.9215	0.0784
SHE	A	B	C	D																											
1	TEMPO	VOLUME	LIVELLO	L SCESCO																											
2	0	117.28	7	0																											
3	1	115.98	6.974	0.0259																											
4	2	114.68	6.9478	0.0521																											
5	3	113.38	6.9215	0.0784																											
<p>Nella colonna D riportiamo il livello di acqua sceso nel cono inferiore. In D2 il livello iniziale è nullo, nelle celle sottostanti il livello è quello iniziale meno quello rimasto nel cono superiore 0 EXE SHIFT - 7 - ALPHA ln 3 EXE F1 F1 F2 F6 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 EXE</p>	 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"><thead><tr><th>SHE</th><th>A</th><th>B</th><th>C</th><th>D</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>TEMPO</td><td>VOLUME</td><td>LIVELLO</td><td>L SCESCO</td></tr><tr><td>2</td><td>0</td><td>117.28</td><td>7</td><td>0</td></tr><tr><td>3</td><td>1</td><td>115.98</td><td>6.974</td><td>0.0259</td></tr><tr><td>4</td><td>2</td><td>114.68</td><td>6.9478</td><td>0.0521</td></tr><tr><td>5</td><td>3</td><td>113.38</td><td>6.9215</td><td>0.0784</td></tr></tbody></table>	SHE	A	B	C	D	1	TEMPO	VOLUME	LIVELLO	L SCESCO	2	0	117.28	7	0	3	1	115.98	6.974	0.0259	4	2	114.68	6.9478	0.0521	5	3	113.38	6.9215	0.0784
SHE	A	B	C	D																											
1	TEMPO	VOLUME	LIVELLO	L SCESCO																											
2	0	117.28	7	0																											
3	1	115.98	6.974	0.0259																											
4	2	114.68	6.9478	0.0521																											
5	3	113.38	6.9215	0.0784																											
<p>Costruiamo adesso la curva di regressione. EXIT F6 F1 F6 F2 ALPHA X,θ,T 2 F1 ALPHA X,θ,T 9 2 EXE ALPHA sin 2 F1 ALPHA sin 9 2 EXE EXE</p>	 <p>StatGraph1 Graph Type: xyLine XCellRange: A2:A92 YCellRange: D2:D92 Frequency : 1 Mark Type : <input type="checkbox"/> Color Link: Off GRAPH1 GRAPH2 GRAPH3</p>																														

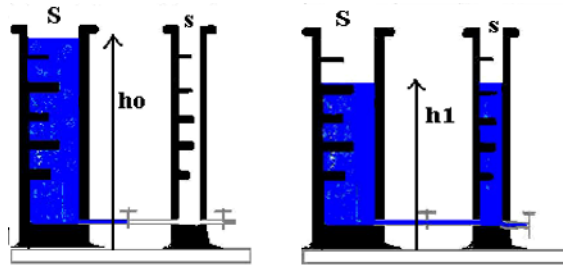
<p>Disegniamo la curva</p> <p>EXIT F1</p>	
<p>Scegliamo come curva di regressione la cubica che presenta il più alto coefficiente di determinazione ed il più basso errore quadrato medio.</p> <p>F1 F5</p>	
<p>Copiamo la formula della curva di regressione nel menu grafici.</p> <p>F5 MENU 5 F1</p>	
<p>F6</p>	
<p>In Y2 del menu 5 riportiamo la formula di h(t) e, nell'intervallo (0, 90) confrontiamo i due grafici.</p> <p>EXIT 7 1 3 SHIFT ^ 1 = 7 9 0 ▶ ▶) EXE</p>	



2.5 Fisica: legge di abbassamento del livello

Un cilindro di sezione S è riempito di acqua fino ad un'altezza h_0 . Lo svuotiamo mettendolo in comunicazione con un cilindro più piccolo di sezione s . Svuotiamo quindi il cilindro piccolo e ripetiamo la procedura fino a quando avremo tolto tutta l'acqua. Troviamo la legge matematica di abbassamento del livello h .

Dati iniziali: $S = 100 \text{ cm}^2$; $s = 10 \text{ cm}^2$; $h_0 = 50 \text{ cm}$



Applicando il principio dei vasi comunicanti si ottiene la relazione tra il livello h_i all'inizio di un processo di svuotamento e il livello h_{i+1} a conclusione dello stesso:


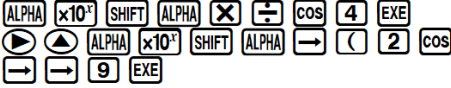
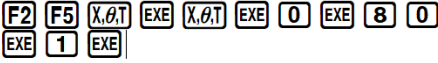

$$Sh_i = Sh_{i+1} + sh_{i+1} \rightarrow h_{i+1} = \frac{Sh_i}{S+s}$$

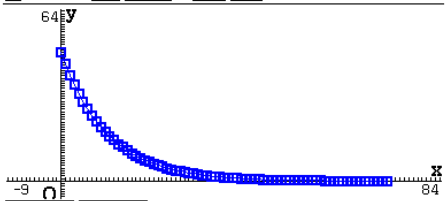
Dalla precedente formula si ricava che i diversi livelli variano in progressione geometrica di ragione $S/(S+s)$, per cui il termine n -esimo è dato da:

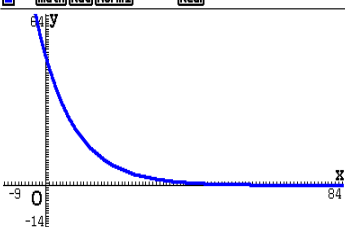
$$h_n = h_0 \left(\frac{S}{S+s} \right)^n$$

Cerchiamo ora una formula che esprima il livello h in funzione dello step i . Si accede al foglio di calcolo dal main menu premendo il tasto 4.

Il foglio di calcolo è composto da 999 righe e da 26 colonne da A a Z.

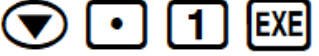
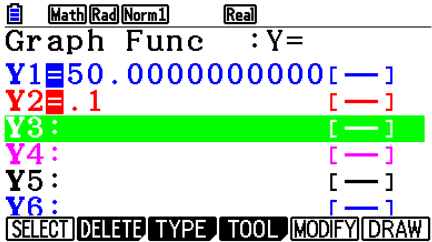

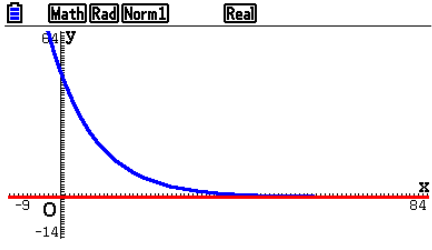
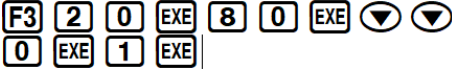
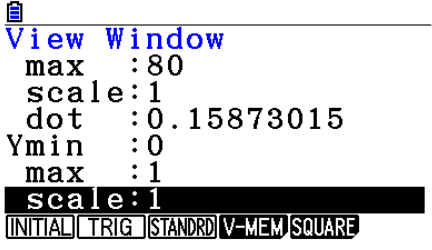

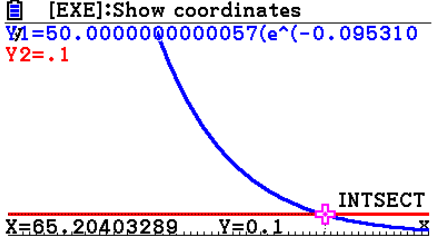
<p>Passaggio 1</p> <p>Dal MAIN MENU accedi al Foglio di Calcolo (4) premendo 4 oppure exe dopo essersi spostati con i tasti cursore.</p>																															
<p>Foglio di calcolo</p>	<p>Rad Norm1 d/c Real SHEET</p> <table border="1" data-bbox="661 542 1098 706"> <thead> <tr> <th>SHE</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> <p>FILE EDIT DELETE INSERT CLEAR ></p>	SHE	A	B	C	D	1					2					3					4					5				
SHE	A	B	C	D																											
1																															
2																															
3																															
4																															
5																															
<p>Passaggio 2</p> <p>Scrivere in A1 Step e in B1 livello.</p> <p>  </p>	<p>Rad Norm1 d/c Real SHEET</p> <table border="1" data-bbox="661 808 1098 971"> <thead> <tr> <th>SHE</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>STEP</td><td>LIVELLO</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> <p>FILE EDIT DELETE INSERT CLEAR ></p>	SHE	A	B	C	D	1	STEP	LIVELLO			2					3					4					5				
SHE	A	B	C	D																											
1	STEP	LIVELLO																													
2																															
3																															
4																															
5																															
<p>Passaggio 3</p> <p>Ci si posiziona in A2 e si riportano i valori di step ad es. da 0 ad 80.</p> <p>  </p>	<p>Rad Norm1 d/c Real SHEET</p> <p>Sequence</p> <p>Expr : X Var : X Start : 0 End : 80 Incre : 1 1st Cell : A2</p>																														
<p></p>	<p>Rad Norm1 d/c Real SHEET</p> <table border="1" data-bbox="661 1343 1098 1506"> <thead> <tr> <th>SHE</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>STEP</td><td>LIVELLO</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td>3</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">0</p> <p>CUT COPY CELL JUMP SEQ ></p>	SHE	A	B	C	D	1	STEP	LIVELLO			2	0				3	1				4	2				5	3			
SHE	A	B	C	D																											
1	STEP	LIVELLO																													
2	0																														
3	1																														
4	2																														
5	3																														

<p>Passaggio 4 Ci si posiziona in B2 e si riporta il valore iniziale del livello 50 cm.</p> <p>▶ 5 0 EXE</p>	<p>Rad Norm1 d/c Real SHEET</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>SHE</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>STEP</td> <td>LIVELLO</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>3</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>CUT COPY CELL JUMP SEQ ▶</p>	SHE	A	B	C	D	1	STEP	LIVELLO			2	0	50			3	1				4	2				5	3			
SHE	A	B	C	D																											
1	STEP	LIVELLO																													
2	0	50																													
3	1																														
4	2																														
5	3																														
<p>Passaggio 5 In B3 si scriva la formula che fornisce il livello dell'acqua allo step 1 in funzione del livello dell'acqua allo step precedente.</p> <p>SHIFT . 1 0 0 X ALPHA log 2 ÷ 1 1 0 EXE</p>	<p>Rad Norm1 d/c Real SHEET</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>SHE</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>STEP</td> <td>LIVELLO</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>1</td> <td>45.454</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>3</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>CUT COPY CELL JUMP SEQ ▶</p>	SHE	A	B	C	D	1	STEP	LIVELLO			2	0	50			3	1	45.454			4	2				5	3			
SHE	A	B	C	D																											
1	STEP	LIVELLO																													
2	0	50																													
3	1	45.454																													
4	2																														
5	3																														
<p>Passaggio 6 Si copi da B4 sino a B 80 la formula riportata in B3 mediante il comando FILL; ci si posizioni su B3 e si seguano le seguenti istruzioni:</p> <p>F2 F6 F1 ▼ ▶ ▶ ▶ ▶ ▶ 7 6 EXE</p>	<p>Rad Norm1 d/c Real SHEET</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>SHE</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>STEP</td> <td>LIVELLO</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0</td> <td>50</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>1</td> <td>45.454</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>2</td> <td>41.322</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>3</td> <td>37.565</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>=B2×100÷110</p> <p>FILL SORTASC SORTDES ▶</p>	SHE	A	B	C	D	1	STEP	LIVELLO			2	0	50			3	1	45.454			4	2	41.322			5	3	37.565		
SHE	A	B	C	D																											
1	STEP	LIVELLO																													
2	0	50																													
3	1	45.454																													
4	2	41.322																													
5	3	37.565																													
<p>Passaggio 7 Rappresentazione della curva di regressione.</p> <p>F6 F1 F6 ▼ F2 ▼ ▶ ▶ 2 F1 ALPHA X.θ.T 2 F1 ALPHA X.θ.T 7 6 EXE ▼ ▶ ▶ ▶ ▶ ▶ 7 6 EXE EXE F1</p>	<p>Rad Norm1 d/c Real SHEET</p>  <p>CALC DefG</p>																														

<p>Passaggio 8 Scriviamo l'equazione della curva di regressione.</p> <p>F1 F6 F3 F1</p> <p>r^2 coefficiente di determinazione compreso tra 0 e 1 indica la bontà della curva di regressione utilizzata MSE errore quadrato medio</p> $MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n}$	<p>Rad(Norm1) d/c(Real)SHEET</p> <p>ExpReg(a · e^{bx}) a = 50 b = -0.0953101 r = -1 r² = 1 MSE = 3.0389 × 10⁻³ y = a · e^{bx}</p> <p>COPY DRAW</p>
<p>Passaggio 9 Ritroviamo nel menu 5 (grafici) l'equazione della curva e la rappresentiamo graficamente.</p> <p>F5 EXE F5</p>	<p>Rad(Norm1) d/c(Real)SHEET</p> <p>Graph Func : Y= Y1=50.0000000000[—] Y2: [—] Y3: [—] Y4: [—] Y5: [—] Y6: [—]</p>
<p>Passaggio 10 Ritroviamo nel menu grafici la funzione di regressione.</p> <p>MENU 5 F1 F6</p>	<p>Math Rad(Norm1) Real</p> 

Dal punto di vista matematico il cilindro più grande non si potrà mai svuotare; si potrebbe ipotizzare che il cilindro possa ritenersi svuotato quando ad esempio il livello dell'acqua è al di sotto di 1mm. Possiamo allora individuare il numero di step in cui il cilindro si svuota.

A tal fine procediamo come di seguito descritto.

<p>Passaggio 11 Nel menu 5 scriviamo in Y2 la funzione $y = 0,1$.</p> <p></p>	
<p>Passaggio 12 Rappresentiamo graficamente le due funzioni.</p> <p></p>	
<p>Passaggio 13 Miglioriamo la visualizzazione dei due grafici.</p> <p></p>	
<p>Passaggio 14 Cerchiamo il punto comune alle due curve</p> <p></p>	

Deduciamo che con il 66° step il cilindro si possa considerare svuotato.

Approfondimento: verifichiamo che le variazioni di livello sono proporzionali ai livelli iniziali.

1. Nella colonna C si riportino i valori $\Delta h_i = h_{i+1} - h_i$;
2. Nella colonna D si riportino i valori $\Delta h_i / h_i = -0,1$.

Si possono a questo punto effettuare ulteriori considerazioni matematiche affrontando il problema con il modello delle equazioni alle differenze finite

2.6 Un problema di programmazione lineare

Supponiamo che un produttore fabbrichi due tipi di barche: canoa e barca a remi. Le barche sono modellate da alluminio per mezzo di una macchina pressante di grandi dimensioni e sono rifinite con il lavoro a mano. Una barca a remi richiede 5 kg in alluminio, 6 min. di tempo macchina e 2 ore di finitura del lavoro; una canoa richiede 6 kg in alluminio, 5 min. di tempo macchina e 5 ore di finitura del lavoro. Per i prossimi tre mesi la società può impegnarsi per la fabbricazione di tali imbarcazioni, fino a mezza tonnellata di alluminio, 5 ore di tempo macchina e 200 ore di lavoro.

L'azienda realizza un profitto di euro 50 sulla vendita di una barca a remi e un profitto di euro 60 sulla vendita di una canoa. Assumendo che ogni barca prodotta venga venduta, quante barche di ogni tipo devono essere fabbricate nei prossimi 3 mesi, al fine di massimizzare i profitti?

Costruiamo per prima cosa il modello matematico: indicando con b il numero delle barche e con c il numero delle canoe da realizzare nei tre mesi, la funzione obiettivo che bisogna ottimizzare è la seguente:

$$p = 50b + 60c (*)$$

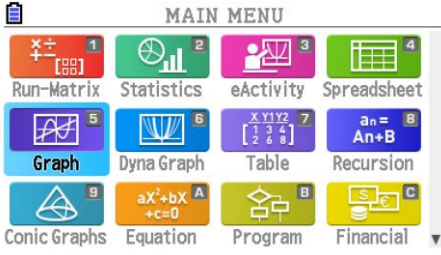
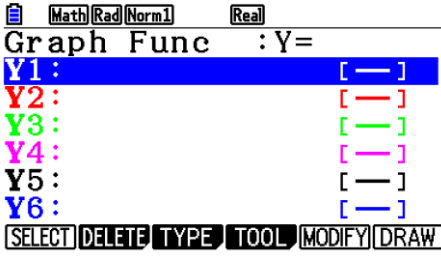
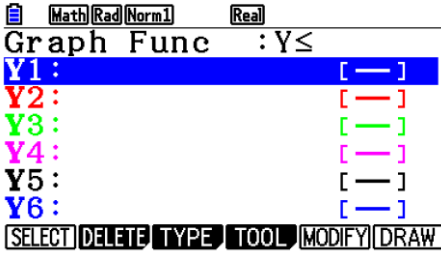
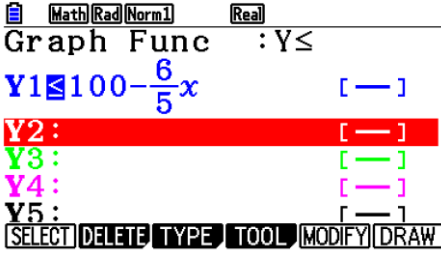
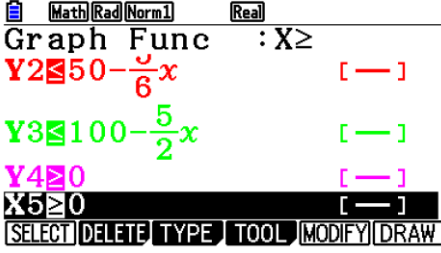
soggetta ai seguenti vincoli:



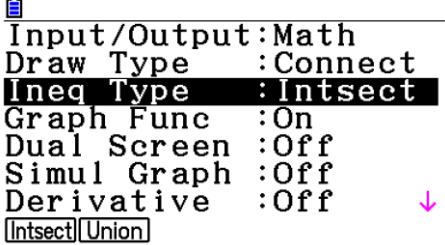



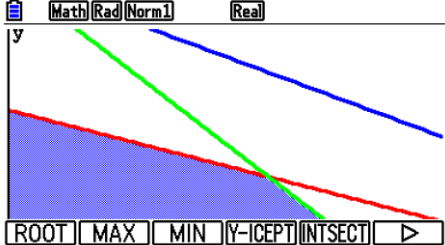




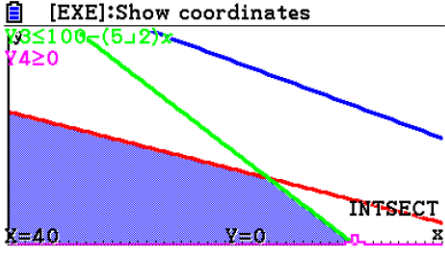
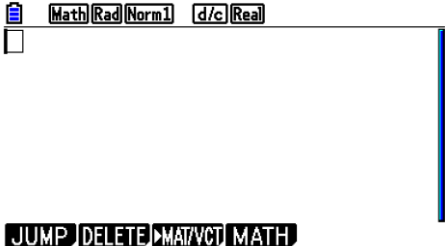
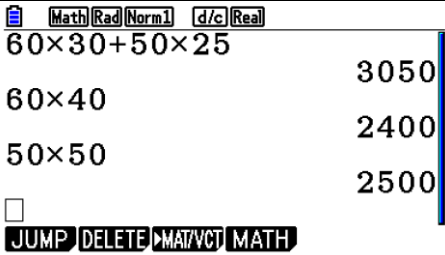
$$\begin{cases} 5b + 6c \leq 500 \\ \frac{b}{10} + \frac{c}{12} \leq 5 \\ 2b + 5c \leq 200 \\ b \geq 0 \\ c \geq 0 \end{cases}$$

dove la prima disequazione si riferisce alla disponibilità dell'alluminio, la seconda al tempo, calcolato in ore macchina, la terza alle ore di lavoro e le ultime esprimono i vincoli di segno.

Essendo un problema di programmazione lineare sappiamo, per un noto teorema di P.L., che il massimo (minimo) assoluto della funzione, la cui esistenza è garantita dal teorema di Weierstrass, viene assunto soltanto in un vertice del poligono che rappresenta il campo di scelta, oppure tutti i punti di un lato del poligono possono essere di massimo (minimo).

Faremo uso del menu grafici (5) per rappresentare il campo di scelta e del menu calcoli (1) per individuare il punto di massimo.

<p>Apriamo il menu grafici</p>	
<p>5</p>	
<p>Modifichiamo la relazione funzionale da equazione a disequazione.</p> <p>F3 F6 F4</p>	
<p>In Y1 riportiamo il primo vincolo esprimendo il numero delle barche (Y) in funzione del numero delle canoe (x).</p> <p>1 0 0 - 6 5 X,θ,T EXE</p>	
<p>Procediamo analogamente per gli altri vincoli.</p> <p>5 0 - 5 6 X,θ,T EXE 1 0 0 - 5 2 X,θ,T EXE F3 F6 F3 0 EXE F3 F6 F6 F3 0 EXE</p>	

<p>Accertiamoci dal menu SET UP che sia impostata l'intersezione di insiemi.</p> <p>SHIFT MENU   F1</p>	
<p>Effettuiamo adesso la rappresentazione grafica modificando artatamente i parametri di visualizzazione.</p> <p>EXIT F6 F3  5 0 EXE   0 EXE 8 0 EXE EXE EXE</p> <p>Abbiamo così trovato un quadrilatero convesso.</p>	
<p>Calcoliamo le coordinate dei vertici del quadrilatero, prendendo nota delle coordinate dei vertici trovati (30, 25), (40, 0), (0, 0), (0, 50)</p> <p>F5 F5  EXE EXE F5 F5   EXE EXE F5 F4  EXE</p> <p>L'ultimo vertice viene determinato come intersezione tra Y2 e l'asse Y.</p>	
<p>Entriamo nel menu 1 e calcoliamo il valore che la funzione (*) assume in ciascuno dei vertici, ricordando che l'ascissa esprime il numero delle canoe e l'ordinata il numero delle barche.</p> <p>MENU 1 (per pulire lo schermo F2 F2 F1)</p>	
<p>6 0 X 3 0 + 5 0 X 2 5 EXE 6 0 X 4 0 EXE 5 0 X 5 0 EXE</p> <p>Dal confronto dei dati si può stabilire che, per realizzare il massimo profitto, corrispondente a 3050 €, all'azienda conviene produrre 30 canoe e 25 barche.</p>	

3. Note conclusive

Gli esempi svolti danno un'idea dell'architettura della calcolatrice che risulta essere composta da diversi ambienti (menu) che s'interfacciano tra loro; inoltre si è visto che la risoluzione di un problema può essere determinata, a seconda dell'approccio scelto, non necessariamente in un solo ambiente.

L'aspetto più importante che forse si può cogliere lavorando con questo strumento è quello che esso non serve a "*chi non sa di matematica*"; resta infatti fondamentale l'attività di costruzione del modello utile alla risoluzione di un problema, senza il quale non si può procedere ad alcuna forma di calcolo.

Scrivendo Leibniz nel XVII secolo "*È indegno per l'uomo eccellente perder tempo come uno schiavo nel lavoro di calcolare*": questa affermazione dai connotati un po' provocatori può avere un proprio fondo di verità. L'attività del calcolare, importante nella fase iniziale della formazione, dovrebbe gradualmente lasciare spazio alla concettualizzazione, alla costruzione di saperi, alla capacità di trasferire le conoscenze in altri ambiti disciplinari, demandando i processi di calcolo ad "altri" che garantiscano velocità di esecuzione e precisione.

Bibliografia

- AA.VV. *Vedere la Matematica*. Casio Italia.
- AA.VV. *Il Mondo dà i numeri*: progetto didattico nazionale per la promozione di ambienti di apprendimento laboratoriali. Casio Italia.
- F. Bologna, E. Rogorà. *I primi passi nel mondo della calcolatrice grafica*. Casio Italia
- M. Bergamini, G. Barozzi, A. Trifone. *Manuale blu 2.0 di matematica*. Zanichelli editore

Dall'osservazione alla previsione. Che cosa sono e come funzionano i modelli meteorologici

Franco Colombo

Aeronautica Militare – Comando Aeroporto Sigonella
Dipartimento di Scienze Matematiche e Informatiche, Scienze Fisiche e Scienze della Terra, Università degli Studi di Messina

E-mail: fcolumbo@unime.it

Riassunto. Negli ultimi anni, il cambiamento climatico è diventato uno dei principali argomenti scientifici. Dopo una breve presentazione degli scienziati che all'inizio del secolo gettarono le basi teoriche della meteorologia moderna, vengono descritte le caratteristiche dei modelli meteorologici e le equazioni fisico-matematiche che guidano i processi atmosferici. Prestiamo particolare attenzione al notevole impulso ricevuto in questo campo dallo sviluppo dei computer. La rete di osservazione meteorologica è quella descritta, i cui standard sono stati definiti dalla World Meteorological Organization (W.M.O.), l'agenzia delle Nazioni Unite (U.N.) che si occupano precisamente di definire gli standard di qualità delle osservazioni meteorologiche che sono alla base di tutti i processi di previsione. Analizzando i dati meteorologici raccolti in tutto il mondo, un forte segnale del riscaldamento globale è stato rilevato principalmente a partire dall'inizio degli anni '80. Al fine di comprendere meglio le cause dell'aumento globale della temperatura, le Nazioni Unite hanno iniziato a studiare il problema tramite Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC). Oggi i rapporti scientifici dell'IPCC rappresentano la principale fonte di informazioni sia per gli scienziati che per i politici che intendono conoscere le basi della scienza del cambiamento climatico. Infine, mostriamo i risultati ottenuti dai modelli climatici regionali in particolare nell'area del Mediterraneo.

Abstract. During last years, Climate Change has become one of the main scientific topic. After a brief presentation of the scientists who at the beginning of the century laid the theoretical foundations of modern meteorology, the characteristics of meteorological models and physical-mathematical equations that guide atmospheric processes are described. We pay particular attention on the considerable impulse received in this field from the development of computers. The meteorological observational network is than described, whose standards have been defined by the World Meteorological Organization (W.M.O.), the United Nations (U.N.) agency that deals precisely with defining the quality standards of meteorological observations that are the basis of all forecasting processes. Analyzing the meteorological data collect all around the World, a strong signal of global warming has been detected mainly starting from early '80. In order to better understand the causes of global increasing of temperature, the U.N. started to study the problem by mean of the Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC). Nowadays the scientific reports of IPCC represent the main source of information for both scientist and politician who intend to know the basis of climate change science. Finally, we show the results obtained by the regional climatic models in particular over the Mediterranean Area.

1. Introduzione

L'estrema diffusione di applicazioni meteorologiche per tablet e smarphone ha reso fruibili, ad una grandissima fetta di popolazione, le previsioni meteorologiche di qualsiasi località mondiale. Ma quali attività e quanto lavoro ci sia dietro ad un'icona, che rappresenta le condizioni meteorologiche medie della località, è cosa in gran parte sconosciuta ai più. La moderna Meteorologia, come d'altro canto molte delle scienze sperimentali, ha ricevuto un notevole impulso a seguito di conflitti bellici, che hanno visto il predominio ora di una parte, ora dell'altra, in relazione alle condizioni meteorologiche. Tra le battaglie le cui sorti sono state decise dall'inclemenza del tempo, va sicuramente annoverata la tempesta che colpì il Mar Nero il 14 novembre 1854 durante la guerra di Crimea. In quella occasione, sia la flotta britannica che quella francese, subirono gravi danni a 38 tra navi e vascelli, incluso l'affondamento della nave ammiraglia inglese "Enrico IV" e causando la morte di circa quattrocento marinai. Meno di un anno dopo la tempesta, i francesi, sotto la guida del famoso astronomo Jean Joseph Le Verrier, realizzarono la prima rete meteorologica in senso moderno, composta da ventiquattro stazioni collegate con l'Osservatorio Astronomico di

Parigi (tredici dei quali per telegrafo). La rianalisi delle dinamiche della tempesta alla luce delle leggi conosciute sulla circolazione atmosferica, consentì a Le Verrier di estrapolare l'evoluzione futura in modo logico e razionale fornendo il primo approccio veramente scientifico alla complessa questione della previsione meteorologica. Nel 1873, durante il Congresso di Vienna, le nazioni partecipanti decisero di costituire un'organizzazione internazionale al fine di facilitare lo scambio di informazioni meteorologiche attraverso i confini nazionali. Nacque così l'Organizzazione Meteorologica Internazionale (I.M.O) dalle cui ceneri, nel 1950 è sorta l'attuale Organizzazione Meteorologica Mondiale (W.M.O.).

3. L'osservazione meteorologica

Il moderno sistema di osservazioni meteorologiche, punto di partenza fondamentale ed essenziale per qualsiasi attività meteorologica, ha oggi una moltitudine di sistemi sconosciuti ai tempi di Le Verrier, che include computer superveloci, satelliti, reti di dati, strumenti meteorologici analogici e digitali, radar e altri strumenti. Una cosa, tuttavia, è rimasta quasi invariata dai tempi di Le Verrier: il lavoro delle quasi 11.000 stazioni di osservazione, che ad intervalli regolari effettuano misurazioni dei principali parametri meteorologici come pressione atmosferica, direzione e velocità del vento, temperatura, umidità, copertura nuvolosa e fenomeni in atto. I dati raccolti dalla rete di stazioni meteorologiche al suolo ed in quota, dislocate in ogni angolo del pianeta, vengono inviati in tempo reale, grazie alle moderne reti informatiche, ai più importanti centri meteorologici mondiali e costituiscono la materia prima da cui partire per far funzionare i modelli meteorologici. Tali dati, misurati presso stazioni meteorologiche dislocate in maniera non omogenea sulla superficie del pianeta, mediante un processo di interpolazione vengono ricalcolati sui punti di un grigliato regolare. Tale processo, consente ai dati di poter essere assimilati dai potenti calcolatori. Essi costituiscono la base di partenza per le successive elaborazioni che portano alla previsione meteorologica.

4. I modelli meteorologici

A porre le basi della moderna meteorologia, fu soprattutto il lavoro del meteorologo svedese Vilhelm Bjerknes. Secondo Bierknes, il problema della previsione meteorologica si riduce fundamentalmente alla soluzione di due condizioni:

- 1) una conoscenza sufficientemente accurata delle condizioni iniziali dell'atmosfera;

- 2) una conoscenza sufficientemente accurata delle leggi secondo le quali l'atmosfera evolve da uno stato iniziale ad un altro successivo.

Egli definisce per primo due concetti fondamentali, i quali ancora oggi vengono spesso confusi:

- **L'analisi meteorologica**, ovvero l'utilizzo delle osservazioni meteorologiche e di altre informazioni, mediante le quali è possibile definire lo stato dell'atmosfera in un determinato istante iniziale.
- **La previsione**, ovvero l'utilizzo di equazioni fisico-matematiche che ci permettono di calcolare come questo stato cambierà nel tempo.

Un modello meteorologico è fondamentalmente costituito da un set di programmi (software) in grado di simulare lo stato iniziale ed il comportamento futuro dell'atmosfera. Per poter funzionare, qualsiasi modello deve poter disporre di un hardware sufficientemente potente per svolgere, nel minor tempo possibile, l'innumerabile mole di calcoli necessari a risolvere le equazioni che governano l'atmosfera. L'ultimo e forse il più importante "ingrediente" di cui deve poter disporre un modello per poter produrre una previsione meteorologica, sono appunto i dati iniziali.

Oggi, grazie all'evoluzione che ha interessato il settore dei calcolatori elettronici, esiste un gran numero di modelli meteorologici, in grado di fornire ogni genere di previsione meteo: da quella generica disponibile sulla totalità degli smartphone, fino alle più specializzate che riguardano ad esempio il settore delle produzioni energetiche o quello dell'agricoltura di precisione. Esiste tuttavia un limite temporale, oltre il quale la qualità della previsione scende inesorabilmente? La risposta è naturalmente affermativa. Ad oggi, mentre fino a 144 ore (7 giorni) le performances dei modelli risultano positive, superando tale soglia le previsioni perdono velocemente di qualità. Ecco perché, a meno di informazioni del tutto generiche e prive di fondamento, guardare una previsione meteorologica a scadenze superiori a 7 giorni ha poco senso.

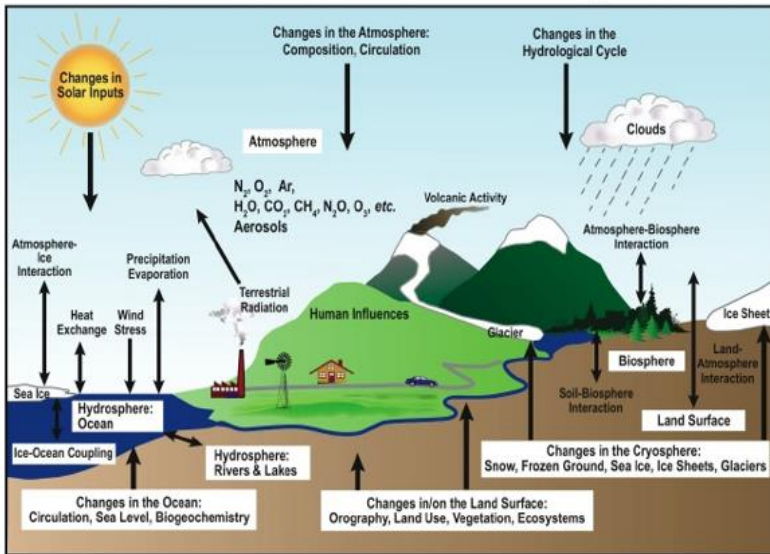
5. I modelli climatici

Il clima di un luogo è spesso definito in un senso molto restrittivo, come l'insieme delle condizioni meteorologiche medie di un determinato luogo. Una definizione del termine in senso più ampio è la seguente: "*stato del sistema climatico*" dove il termine *stato* indica la descrizione statistica in termini di valore medio e varianza dei parametri meteorologici più importanti, quali temperatura, precipitazioni, distribuzione di venti, ecc. in un arco di tempo sufficientemente

lungo e comunque non inferiore a 30 anni. Da questo punto di vista, possiamo affermare con certezza che il clima terrestre non è mai stato costante, ma nel tempo ha subito vari cambiamenti dovuti a fattori naturali. Soprattutto negli anni '80 è iniziata una forte disputa sulla natura antropica dei cambiamenti climatici che ha coinvolto sia il mondo scientifico che quello politico a livello globale. A partire da quel periodo, infatti, una lunga sequenza di anni caratterizzata da record di temperature medie ha indotto la comunità scientifica a studiare la natura e le cause di tale riscaldamento globale. Oggi, nonostante la comprensione dell'origine e dell'evoluzione del riscaldamento globale sia notevolmente migliorata, la tematica dei cambiamenti climatici rimane una delle più dibattute tra l'intera comunità scientifica internazionale. Di fatto, la natura caotica dell'atmosfera e la complessità del sistema climatico terrestre rendono il problema lungi dall'essere risolto.

I modelli climatici, sviluppati soprattutto a partire dagli anni '90, tentano di riprodurre lo stato ed il comportamento di un sistema complesso che è appunto il sistema climatico terrestre (Fig1). Esso è costituito dall'atmosfera, l'idrosfera, la biosfera, la criosfera e la geosfera e dalle loro complesse interazioni.

The Earth's Climate System



Atmosphere + Hydrosphere + Cryosphere + Biosphere + Geosphere

Figura 1. Il Sistema climatico terrestre.

L'obiettivo principale dei modelli climatici, oltre ad essere quello di dare risposte circa l'evoluzione climatica del pianeta nei prossimi decenni o secoli, è soprattutto quello di capire se, ed in quale misura, i comportamenti umani abbiano avuto in qualche modo delle conseguenze sul clima del pianeta. Oggi, dalle rianalisi climatiche eseguite mediante potenti modelli climatici, emerge che esiste una forzante antropica che si è sovrapposta alle naturali fluttuazioni climatiche cui il pianeta è naturalmente soggetto (Fig.2).

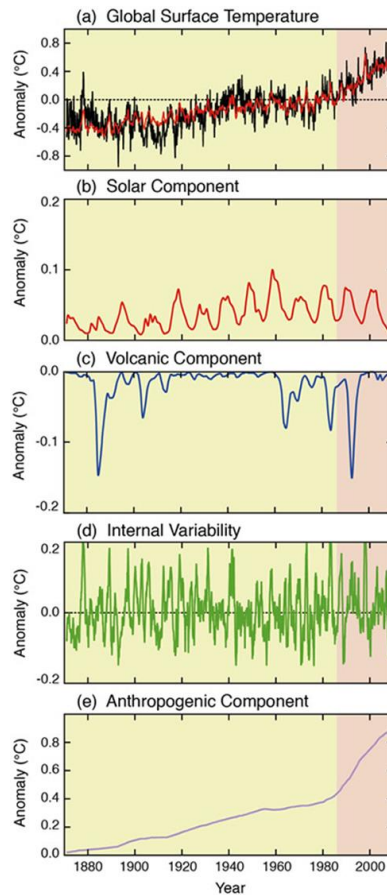


Figura 2. Temperature globali dal 1870 al 2010, (a) La linea nera mostra le temperature globali (1870–2010) relativamente alla media 1961-1990. La linea rossa mostra la simulazione ottenuta dai modelli climatici risultante dalla somma degli impatti sulle temperature da cause naturali (b, c, d) e da fattori antropogenici (e). Notare la diversa scala verticale (fonte: IPCC).

6. Conclusioni

I risultati ottenuti grazie all'utilizzo dei modelli climatici, mostrano chiaramente come l'uomo con i suoi comportamenti sia di fatto divenuto una "forza della natura", capace di modificare il clima del pianeta. A tali conclusioni sono arrivati gli scienziati dell'Intergovernmental Panel of Climate Change, i quali su mandato delle Nazioni Unite investigano a partire dai primi anni '90 sulle cause, gli impatti e le possibili azioni per mitigare gli effetti del riscaldamento globale. I risultati ottenuti vengono pubblicati periodicamente mediante dei rapporti tecnici, resi disponibili sul sito www.ipcc.ch. Da tali rapporti emerge chiaramente che tutti i modelli climatici sono ormai concordi nel prevedere un ulteriore aumento delle temperature globali, che avrà conseguenze sulla distribuzione delle aree glaciali, sull'innalzamento del livello dei mari e sulla distribuzione dei fenomeni estremi. Tali effetti sono peraltro già visibili e costituiscono le prime avvisaglie di un clima in mutazione al quale non possiamo che tentare di adattarci.

La biodiversità microbica di ambienti estremi come risorsa per l'esplorazione di nuove potenzialità biotecnologiche

Filomena De Leo

Dipartimento di Scienze Chimiche, Biologiche, Farmaceutiche ed Ambientali, Università degli Studi di Messina

E-mail: fdleo@unime.it

Riassunto. L'esplorazione degli ambienti estremi è un ambito di ricerca molto affascinante. Negli ultimi anni, grazie soprattutto al miglioramento delle tecniche coltura indipendenti metagenomiche e trascrittomiche, le conoscenze sulle comunità microbiche negli ambienti estremi sono state notevolmente migliorate. Tuttavia, si stima che sia ancora molto basso il numero di specie microbiche conosciute e questo è ancor più vero per le comunità microbiche negli ambienti estremi il cui studio è limitato dalle tecniche di indagine. I microrganismi sono da sempre utilizzati nelle biotecnologie per quello che sanno fare; la ricerca di nuovi enzimi e di metaboliti secondari dagli estremofili e da ambienti estremi è un campo di ricerca particolarmente attivo dato l'uso che ne è possibile fare in campo farmaceutico, medico veterinario, alimentare ecc. L'esplorazione degli ambienti estremi offre dunque molteplici risvolti soprattutto in termini di ampliamento delle conoscenze sulla biodiversità microbica e come parte integrante della ricerca microbiologica applicata.

Abstract. Exploration of extreme environments is a very interesting area of research. Over the last years, knowledge on microbial communities in extreme environments has been significantly improved thanks to the development of culture-independent techniques, such as metagenomics and transcriptomics. Nevertheless, it was estimated that the number of known microbial species is still very low and the studies on microbial communities from extreme environments suffers more than other research areas from the limitations of the investigation

techniques. Microorganisms have been used unawares for biotechnological purposes since ancient time. To date the search for new enzymes and secondary metabolites from extremophiles and from extreme environments is a particularly active area of research that includes application in pharmaceutical industry, veterinary, medicine, etc. Thus, exploration of extreme environments is an important branch of the applied microbiology particularly useful for broadening the knowledge on microbial biodiversity and aiming the discovery of new active molecules.

1. I microrganismi nella Biosfera

In oltre 3.8 miliardi di anni di vita sulla Terra, i microrganismi hanno avuto un'influenza determinante sull'equilibrio ecologico e geochimico del pianeta, sono testimoni della storia dell'evoluzione biologica e agiscono da veri e propri biosensori della Natura.

Secondo la classificazione filogenetica i microrganismi procariotici appartengono ai Domini degli Archea ed Eubatteri, mentre i microrganismi eucariotici sono presenti nel Dominio degli Eucarya con le specie dei Funghi microscopici (lieviti e muffe), alghe unicellulari e protozoi (Fig. 1).

Phylogenetic Tree of Life

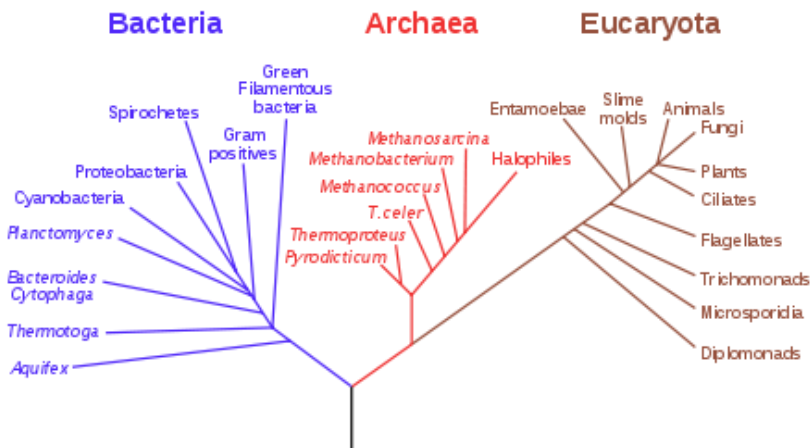


Figura 1. Albero della Vita [1].

I microrganismi rappresentano il 60% della componente biotica terrestre. In effetti sono rari i substrati naturali e gli ambienti che non siano colonizzati dai microrganismi. Anche gli animali non fanno eccezione: sono infatti numerosi i microrganismi che instaurano relazioni mutualistiche nei distretti corporei dell'animale che sono a diretto contatto con l'ambiente esterno (mucose, strati superficiali, peli, cavo orale, intestino ecc.) e la presenza dei microrganismi è fondamentale per il mantenimento del loro stato di salute. Nell'uomo si stima che i microrganismi rappresentino oltre il 90% delle cellule totali del corpo ed è accertato che svolgano importanti funzioni vantaggiose per l'organismo, tra cui azione antagonista nei confronti di microrganismi patogeni, stimolazione del sistema immunitario, produzione di vitamine indispensabili (es. vitamina K), digestione ed eliminazione del bolo alimentare.

Poiché i microrganismi posseggono un ciclo di replicazione breve e una plasticità genomica notevole, essi rispondono velocemente alle variazioni ambientali adattandosi alle più svariate condizioni.

La capacità di colonizzare un ambiente dipende dalle caratteristiche chimico fisiche dell'ambiente stesso tra cui temperatura, disponibilità di acqua, pH, concentrazione di soluti, radiazioni UV, ma anche dalle caratteristiche biologiche del microrganismo quali ad esempio oligotrofia, temperatura ottimale di crescita, pH ottimale di crescita, capacità di formare strutture di resistenza quali spore, presenza di pigmenti, ecc.

In una visione antropocentrica, gli ambienti estremi sono per definizione quelli che si discostano dalle condizioni mesofile ottimali per gli uomini. Queste condizioni estreme si realizzano in ambienti inospitali quali deserti (caldi e freddi), profondità marine, saline, bocche vulcaniche ecc. e paradossalmente anche in ambienti mesofili su particolari substrati sottoposti a condizioni microclimatiche estreme di forte irraggiamento solare e scarsità di acqua e di nutrienti. Un esempio è dato dalle rocce e monumenti lapidei esposti all'aperto in area mediterranea [2]. In queste condizioni le specie microbiche presenti sono poche ed estremamente specializzate; quali ad esempio i funghi neri, che sono noti per la loro capacità di resistere alle forti radiazioni solari e di crescere in ambienti desertici caldi o freddi [3,4]. La loro capacità di resistenza è dovuta principalmente alla presenza di melanina nelle pareti cellulari e alla crescita meristemica (Fig. 2a, 2b). I funghi neri a crescita meristemica sono noti per i gravi fenomeni di biodeterioramento dei monumenti lapidei di cui sono responsabili [5]. Recentemente la specie fungina *Hortaea werneckii* appartenente al gruppo dei funghi neri, i così detti "black yeasts" e capace di crescere in presenza del 30% di NaCl, è risultata la specie fungina dominante nel Mar Mediterraneo fino alla profondità di 3500 m [6,7] (Fig. 2c, 2d).

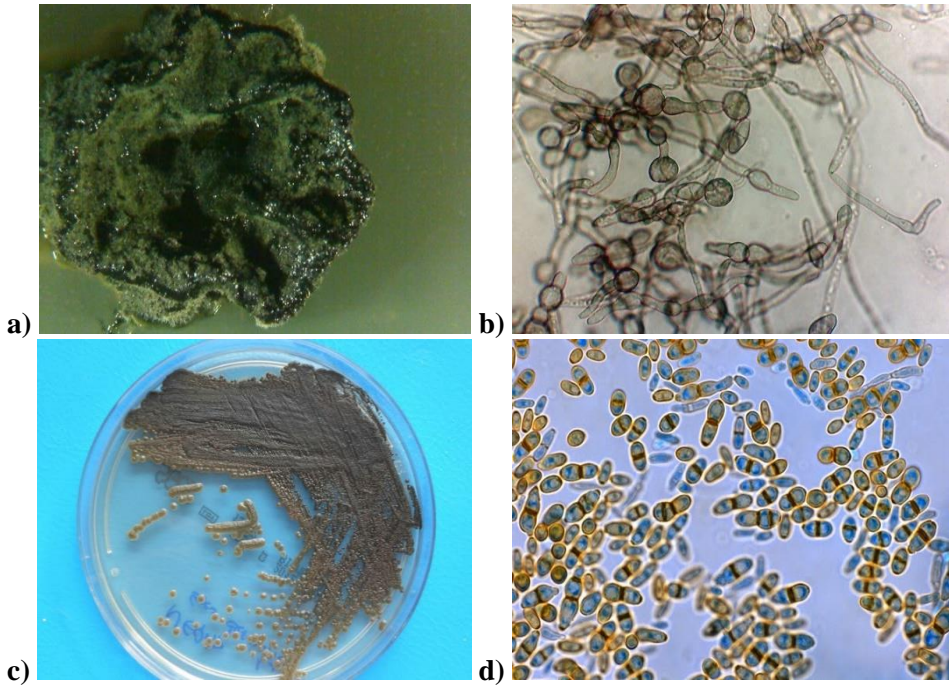


Figura 2. Macro e micromorfologia di funghi neri **a)** Macromorfologia di un fungo nero a crescita meristemica osservato allo stereomicroscopio isolato da una statua, Ingr. 250X. La dimensione della colonia è di circa 1,5 cm. **b)** Cellule globose indifferenziate tipiche della crescita meristemica osservate al microscopio ottico, Ingr. 4000X. **c)** Coltura su piastra del black yeast *Hortaea werneckii* isolata da acqua di mare prelevata a 3500 m di profondità nel mar Mediterraneo. **d)** Cellule lievito-simili di *H. werneckii* osservate al microscopio ottico, Ingr. 4000X.

I funghi capaci di crescere in condizioni estreme vengono per lo più descritti come “estremotolleranti” perché in grado di crescere anche in condizioni mesofile. I batteri estremofili invece, sono generalmente capaci di crescere soltanto in condizioni estreme e sono descritti come alofili (25-30% salinità), termofili (T 50-80°C), ipertermofili (T 80->100°C), psicrofili (T 0°-<0°C) acidofili (pH <4) alcalofili (pH >8) piezofili (>1 atm) ecc. o anche poliestremofili se combinano più caratteristiche di estremofilia. In particolare, molte specie di Archea vengono studiate proprio perché sono estremofile. I primi Archea, sono stati isolati da ambienti estremi [8], quali le sorgenti idrotermali terrestri e marine. Questi microrganismi sono in grado di crescere a temperature molto elevate, come quelle che si riscontrano a livello dei geysers, delle sorgenti idrotermali e black smokers,

ma anche a basse temperature, come nei mari ghiacciati, e in ambienti altamente salini, acidi o alcalini. Per fare alcuni esempi, l'Archeon *Pyrolobus fumarii*, isolato da sorgenti idrotermali, cresce a una temperatura di 113 °C, mentre specie appartenenti al genere *Halobacterium* vivono in ambienti con una salinità superiore al 20-25%. Ancora, la specie acidofila *Picrophilus torridus* cresce in ambienti con pH 0.

La maggior parte dei microrganismi estremofili non può essere isolata con le classiche tecniche colturali; per questo motivo la determinazione della loro presenza negli ambienti estremi viene effettuata tramite l'impiego di tecniche coltura-indipendenti, che vedono l'isolamento e l'analisi degli acidi nucleici (DNA e RNA) direttamente dal campione ambientale utilizzando le tecniche di metagenomica [9].

2. Coltivazione versus metodi non coltivabili

Nel 1985, Staley e Konopka descrissero la "grande anomalia della conta in piastra" ovvero l'enorme disparità tra il numero di microrganismi "vitali" evidenziati mediante diverse tecniche di colorazione e contati sotto il campo del microscopio e il numero di microrganismi ottenuto mediante "conta vitale" in piastra [10]. Essi dimostrarono che la maggioranza di microrganismi in un ambiente non è coltivabile e soltanto lo 0.1–1.0% dei batteri vivi in un campione di suolo ad esempio, possono essere coltivati mentre in ambiente acquatico si stima che questo valore sia da 10 a 1000 volte più basso.

Dunque la maggior parte dei microrganismi (>99.0%) presenti nell'ambiente sono "non coltivabili" o più probabilmente non si conosce abbastanza delle loro caratteristiche per poter riprodurre in laboratorio la loro crescita. Questo è particolarmente vero per i microrganismi che sono capaci di colonizzare ambienti estremi o inusuali per pH, temperatura, salinità, tensione di ossigeno, pressione atmosferica di cui risulta ancora più difficile riprodurre in laboratorio le condizioni ambientali favorevoli per la crescita.

Negli ultimi decenni una spinta notevole allo studio dell'ecologia microbica è stata data dalla messa a punto di tecniche molecolari coltura indipendenti tra cui le tecniche metagenomiche. Queste tecniche rispetto all'analisi microbiologica classica permettono di analizzare il DNA "in toto" di un campione e da questo ricavare vaste informazioni riguardo il numero dei taxa presenti o anche le attività enzimatiche senza dover ricorrere alla coltivazione. Il termine "Metagenomica (al di là della genomica) fu introdotto da Handelsman et al. [11] per indicare quelle tecniche che permettono di determinare l'intera collezione di geni presenti all'interno di un campione ambientale (il metagenoma), e analizzare le loro attività biochimiche e le loro complesse interazioni senza dover ricorrere alla coltivazione.

Gli attuali progetti di metagenomica sono stati promossi dal rapido sviluppo delle cosiddette tecniche di Next-Generation Sequencing (NGS).

Attualmente il miglioramento delle tecniche di indagine e la disponibilità di nuovi "tools bioinformatici" ha spalancato le porte a questo tipo di studi che sono diventati abbastanza accessibili anche dal punto di vista economico.

Alle analisi metagenomiche vengono affiancate spesso le analisi "trascrittomiche" sul campione ambientale. L'analisi del "Trascrittoma" prevede l'estrazione dell' RNA totale dal campione con conseguente formazione di librerie di cDNA (DNA complementare) che vengono poi sequenziate. In questo modo è possibile conoscere lo stato metabolico della popolazione microbica presente e il corredo enzimatico espresso in quella particolare condizione ambientale (Fig. 3).

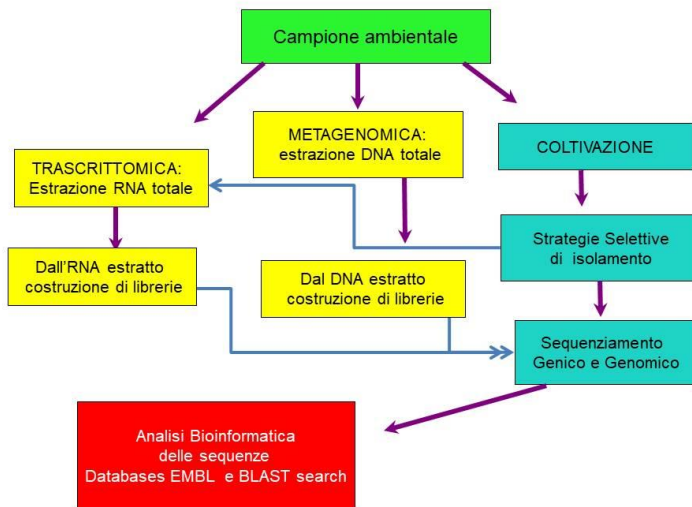


Figura 3. Approccio multifasico per lo studio della biodiversità molecolare dei microrganismi dai campioni ambientali.

I limiti di queste tecniche tuttavia sono molteplici: possono risentire, infatti di problemi legati al metodo di estrazione dell'acido nucleico e anche dell'abbondanza relativa dei ceppi nel campione che potrebbero risultare quindi sotto- o sovrastimati. Inoltre, mediante queste tecniche, è difficile ottenere l'assegnazione tassonomica a livello di specie; generalmente infatti si ricavano informazioni a livello di genere. Inoltre dai ceppi coltivati possono essere ricavate un maggior numero di informazioni sulle loro caratteristiche eco-fisiologiche e

genetiche, oltre al fatto che possono essere facilmente manipolati in laboratorio con l'ingegneria genetica.

Altri limiti di queste tecniche sono l'enorme mole di dati bioinformatici da analizzare, la necessità di personale altamente qualificato, di computer potenti e la scarsità di informazioni nei data base online che permettano di fare un confronto soprattutto quando si studiano ambienti poco esplorati.

3. I microrganismi nelle biotecnologie

I microrganismi vengono usati nelle biotecnologie in modo inconsapevole fin dalla notte dei tempi. Basti pensare alle fermentazioni alcoliche per la produzione di vino, birra, pane, la fermentazione di formaggi ecc.

Recentemente gli studi di microbiologia applicata, di bio-ingegneria e di biologia molecolare sono stati raggruppati per creare questa nuova disciplina chiamata Biotecnologia, il cui scopo è quello di sviluppare nuovi processi tecnologici e nuovi prodotti basati su basi razionali scientifiche [12].

Vi è poi una ricerca mirata di nuove molecole ad attività biologica, ad esempio biomolecole con attività antibiotica, antivirale e chemioterapica nei confronti di cellule tumorali. In una recente review Poli et al., (2017) riportano ad esempio le recenti acquisizioni sulla biodiversità microbica degli ambienti marini estremi e le biomolecole da essi prodotti [13].

Grazie all'esponenziale sviluppo industriale, l'applicazione delle biotecnologie si è diffusa ad una varietà di settori (benessere, ambiente, cibo ecc.), aumentando notevolmente la qualità e la quantità dei prodotti, migliorando la qualità della vita e diventando così un motore importante per la crescita economica. Nella tabella 1 sono riportati i principali enzimi usati dall'industria e gli estremofili produttori.

Tabella 1. Esempi di enzimi ricavati da microrganismi estremofili e loro applicazioni.

Estremofili	Condizioni di crescita	Enzimi	Applicazioni
Termofili	60-80 °C (termofili)	Proteasi	Detergenti, industria alimentare, della birra, panificazione
Ipertermofili	>80 °C (ipertermofili)	Glicosil idrolasi	Degradazione amido, cellulosa, pectina, chitina, industria tessile e della carta
		Lipasi, esterasi	Detergenti, reazioni stereo specifiche, biosintesi organica
		DNA polimerasi Deidrogenasi	PCR Reazioni di ossido-riduzione
Psicrofili	<15 °C	Proteasi	Detergenti, industria alimentare
		Glicosil idrolasi	Degradazione amido, cellulosa, pectina, chitina, industria tessile e della carta
Alofili	2-5 M NaCl	Lipasi	Detergenti, industria alimentare e cosmetica
		Proteasi Deidrogenasi	Produzione di peptidi Biocatalisi in solventi organici
Alcalofili	pH>9	Proteasi, cellulasi	Detergenti, industria alimentare
Acidofili	pH>3	Amilasi	Degradazione amido
		Proteasi, cellulasi Ossidasi	Industria alimentare Desulfurizzazione del carbone
Piezofili	Fino a 130 MPa	Idrolasi	Industria alimentare
		Vari	Produzione di antibiotici

4. Conclusioni

L'esplorazione degli ambienti estremi è un ambito di ricerca molto affascinante e rappresenta una sfida per la messa a punto di tecnologie sempre più sofisticate per ampliare la conoscenza sulla biodiversità microbica e capire le interazioni dei microrganismi con l'ambiente, la loro evoluzione e il loro metabolismo. Passi da gigante sono stati effettuati negli ultimi anni, grazie soprattutto al miglioramento delle tecniche di sequenziamento genomico, trascrittomico e dei tools bioinformatici. Tuttavia nonostante il miglioramento delle tecniche microbiologiche, si stima che sia ancora molto basso il numero di specie microbiche conosciute. Sulla Terra potrebbero vivere quasi 1 trilione (mille miliardi) di specie microbiche, quelle note sono soltanto lo 0,001%.

Inoltre non bisogna dimenticare che solo la coltivazione dei microrganismi permette di avere un quadro completo sulla biologia della specie. Pertanto, è auspicabile che gli studi vengano effettuati con un approccio polifasico, comprendente la contemporanea utilizzazione di tecniche molecolari, colturali e microscopiche. La sfida attuale quindi, è quella di implementare le tecniche

classiche con quelle molecolari per ottenere il massimo delle informazioni utili sia per la microbiologia di base che per la microbiologia applicata.

Più in generale questi studi possono contribuire a:

- Ampliare l'inventario degli organismi viventi e ricostruire la storia dell'evoluzione.
- Ottenere maggiori informazioni sull'origine della vita e sulla possibilità che la vita esista al di fuori della Terra (esobiologia).
- Ampliare le conoscenze sui meccanismi biochimici, genetici e fisiologici dell'adattamento a diversi ambienti.
- Identificare nuovi metaboliti ed enzimi per applicazioni biotecnologiche.
- Sviluppare sistemi genetici per utilizzare i microrganismi come "fabbriche cellulari".

Bibliografia

- [1] Woese, C. R., & Fox, G.E. (1977). Phylogenetic structure of the prokaryotic domain, the primary kingdoms. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 74 (11), 5088–5090.
- [2] Wollenzien, U., de Hoog, G.S., Krumbein, W.E., Urzì, C. (1995). On the isolation of microcolonial fungi occurring on and in marble and other calcareous rocks. *Science of the Total Environment*. 167, 287–294.
- [3] Ruisi, S., Barreca, D., Selbmann, L., Zucconi, L., Onofri, S. (2007). Fungi in Antarctica. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. doi:10.1007/s11157-006-9107-y.
- [4] Sterflinger, K., Tesei, D., Zakharova, K. (2012). Fungi in hot and cold deserts with particular reference to microcolonial fungi. *Fungal Ecology*. doi:10.1016/j.funeco.2011.12.007.
- [5] De Leo, F., Antonelli, F., Pietrini, A.M., Ricci, S., Urzì, C. (2019). Study of the euendolithic activity of black meristematic fungi isolated from a marble statue in the Quirinale Palace's Gardens in Rome, Italy. *Facies*. doi:10.1007/s10347-019-0564-5.
- [6] De Leo, F., Lo Giudice, A., Alaimo, C., De Carlo, G., Rappazzo, A.C., Graziano, M., De Domenico, E., Urzì, C. (2019). Occurrence of the black yeast *Hortaea werneckii* in the Mediterranean Sea. *Extremophiles*. 23, 9-17.
- [7] Marchetta, A., Gerrits van den Ende, B., Al-Hatmi, A.M.S., Hagen, F., Zalar, P., Sudhadham, M., Gunde-Cimerman, N., Urzì, C., de Hoog, S., De Leo, F. (2018). Global molecular diversity of the halotolerant fungus *Hortaea werneckii*. *Life*. 8(3), 31.
- [8] Valentine, D.L. (2007). Adaptations to energy stress dictate the ecology and evolution of the Archaea. *Nature Reviews. Microbiology*. 5 (4), 316–23.
- [9] Garza, D.R., Dutilh, B.E. (2015). From cultured to uncultured genome sequences: Metagenomics and modeling microbial ecosystems. *Cellular and Molecular Life Sciences*. doi:10.1007/s00018-015-2004-1.

- [10] Staley, J.T., Konopka, A. (1985). Measurement of in Situ Activities of Nonphotosynthetic Microorganisms in Aquatic and Terrestrial Habitats. *Annual Reviews of Microbiology*. doi:10.1146/annurev.mi.39.100185.001541.
- [11] Handelsman, J., Rondon, M.R., Brady, S.F., Clardy, J., Goodman, R.M. (1998). Molecular biological access to the chemistry of unknown soil microbes: A new frontier for natural products. *Chemistry and Biology*. doi:10.1016/S1074-5521(98)90108-9.
- [12] Buchholz, K., Collins, J. (2013). The roots - A short history of industrial microbiology and biotechnology. *Applied Microbiology and Biotechnology*. doi:10.1007/s00253-013-4768-2.
- [13] Poli, A., Finore, I., Romano, R., Gioiello, A., Lama, L., Nicolaus, B. (2017). Microbial Diversity in Extreme Marine Habitats and their Biomolecules. *Microorganisms*. doi:10.3390/microorganisms5020025.

L'Event Horizon Telescope e la prima "foto" di un Buco Nero

Tiziana Di Salvo

Dipartimento di Fisica e Chimica – Emilio Segré, Università degli Studi di Palermo

E-mail: tiziana.disalvo@unipa.it

Riassunto. Il 10 aprile 2019 è stata mostrata al mondo la prima foto dell'orizzonte degli eventi di un buco nero. Si tratta di un risultato scientifico di estrema importanza in quanto rappresenta una conferma della Relatività Generale in campo forte. Tuttavia, la dettagliata interpretazione fisica dell'immagine, necessaria per comprendere correttamente ciò che stiamo vedendo e le implicazioni fisiche, è tutt'altro che semplice e si basa su complessi modelli della regione di emissione a ridosso della cosiddetta "photon sphere" attorno al buco nero. In questa breve nota sarà dapprima illustrata la tecnica interferometrica necessaria per raggiungere la risoluzione spaziale richiesta dalla visualizzazione dell'immagine e gli sforzi tecnologici che sono stati necessari per realizzarla. Verranno quindi illustrati i modelli della regione di emissione che ci consentono di determinare alcuni parametri fisici del buco nero (per esempio la massa e la velocità di rotazione attorno al suo asse o spin) e verranno spiegati i motivi per cui questa immagine allo stato attuale risulta in una ulteriore importante conferma della Relatività Generale.

Abstract. On April 10th, 2019, the first picture of a black hole's event horizon was shown to the world. This is a scientific result of extreme importance as it represents a confirmation of General Relativity in a strong field regime. However, the detailed physical interpretation of the image, necessary to correctly understand what we are seeing and the physical implications, is anything but simple and is based on complex models of the emission region close to the so-called "photon sphere" around the black hole. In this brief note, the interferometric technique, necessary to achieve the spatial resolution required by the visualization of the image, and the technological efforts that have been necessary to

achieve it will be illustrated. The models of the emission region, that allow us to determine some physical parameters of the black hole (for example the mass and the speed of rotation around its axis or spin), are also explained as well as the reasons why this image at present is a further important confirmation of General Relativity.

1. Gli oggetti compatti: Stelle di Neutroni e Buchi Neri

I cosiddetti oggetti compatti, caratterizzati da grandi masse racchiuse in piccoli spazi, in modo da generare enormi campi gravitazionali nelle loro vicinanze, sono ciò che rimane alla fine dell'evoluzione di stelle massicce (con masse superiori alle 8-10 masse solari). Durante la loro vita, le stelle brillano per effetto delle reazioni nucleari che avvengono al loro interno, dove le condizioni di temperatura e pressioni sono tali da permettere la fusione di elementi leggeri in elementi più pesanti, con conseguente rilascio di energia. Questa energia, sotto forma di radiazione luminosa, viaggia attraverso la stella finché, alla sua superficie, viene rilasciata nello spazio vuoto. La radiazione riscalda il gas che esercita una pressione verso l'esterno della stella tale da contrastare l'effetto della forza di Gravità che farebbe collassare tutta la massa nel suo centro. Questo bilanciarsi di pressioni permette alla stella di restare in equilibrio e di brillare per milioni o miliardi di anni, a seconda della sua massa. Stelle più massicce, infatti, vivono meno rispetto a stelle più leggere e ciò è dovuto al ritmo con cui procedono le reazioni nucleari nel nucleo. Tuttavia, presto o tardi, tutte le stelle esauriscono il combustibile nucleare avviandosi verso la fine della loro vita come stelle ed iniziando una vita diversa come oggetti esotici, i cosiddetti oggetti compatti.

1.1 La vita delle stelle dopo la loro morte

Nel caso di stelle con massa simile al nostro Sole, quando il combustibile nucleare sarà esaurito, gli strati esterni della stella si espanderanno a formare quella che viene chiamata una Gigante Rossa, ed in seguito si raffredderanno formando una nebulosa planetaria. Nel caso del Sole, ciò avverrà tra circa 5 miliardi di anni, quando gli strati esterni della nostra stella, espandendosi, potrebbero inglobare l'orbita di Venere ed arrivare fino alla Terra. Al centro invece resterà un nucleo caldo e molto piccolo, più o meno delle dimensioni della Terra, formato soprattutto di carbonio e ossigeno che si generano dalla fusione dell'idrogeno e dell'elio. Questo oggetto viene chiamato Nana Bianca. Tipicamente le nane bianche hanno una massa inferiore ad una massa limite di 1.4

M_{sun} (chiamata massa di Chandrasekar – una massa solare è pari a $M_{\text{sun}} = 2 \times 10^{30}$ kg) racchiusa in un raggio di soli 10^4 chilometri (per confronto il raggio del Sole vale 7×10^5 km).

Per stelle più grandi del Sole (sopra le 8 M_{sun} circa), la fusione nucleare al centro della stella procederà fino ad arrivare alla sintesi del ferro; al di là di questo elemento la fusione non è più energeticamente conveniente e di nuovo la stella entrerà in una fase di instabilità che la porterà ad esplodere come una supernova. Queste sono tra le esplosioni più violente dell'Universo: l'energia totale coinvolta nell'esplosione è dell'ordine di 10^{53} erg, corrispondente a circa il 10% dell'intera energia a riposo del Sole (cioè circa 1/10 della massa solare è convertita in energia in base alla relazione $E = M c^2$), la luminosità arriva a 10-100 miliardi di volte la luminosità del Sole (una supernova è luminosa quanto un'intera galassia) per una durata di circa 10-100 giorni. Nell'esplosione solo l'1% dell'energia viene emessa sotto forma di radiazione, il restante 99% viene emesso in neutrini che si generano a seguito del processo chiamato "neutronizzazione": nel nucleo della stella elettroni e protoni sono indotti dall'enorme campo gravitazionale a fondersi in neutroni ed in questa reazione vengono prodotti i neutrini. L'esplosione di supernova nella Nebulosa del Granchio (nella costellazione del Toro) del 1054 d.C. (evento osservato e riportato da astronomi cinesi e arabi) è stata così luminosa da essere visibile ad occhio nudo e da proiettare una seconda ombra in pieno giorno. In questo caso, ciò che rimane a seguito dell'esplosione è una Stella di Neutroni, un oggetto di massa tra 1.4 e 2 M_{sun} racchiuso in un raggio di soli 10 km (le dimensioni di una città come Palermo). La densità della materia in una stella di neutroni è dell'ordine di 1 miliardo di tonnellate per cm^3 ; è talmente alta che il suo stato, descritto da quella che si chiama Equazione di Stato della materia ultra-densa, è tuttora argomento di ricerca: sappiamo che la materia si trova in gran parte sotto forma di neutroni, la cui pressione si oppone all'enorme campo gravitazionale impedendone il collasso gravitazionale, ma il dettaglio dello stato della materia nelle zone centrali non è ancora noto e la sua comprensione costituisce attualmente uno dei principali obiettivi della fisica teorica e dell'astrofisica.

Per stelle con masse superiori alle 15 M_{sun} l'oggetto che rimane alla fine della vita della stella è più massiccio rispetto alla massa massima che può supportare una stella di neutroni. La Relatività Generale di Einstein prevede in tal caso che nessuna forza riesca più ad opporsi alla gravità e che l'intera massa del nucleo della stella collassi in un punto, la cosiddetta singolarità. Un oggetto di questo tipo è stato denominato Buco Nero in quanto nulla, nemmeno la luce, riesce a sfuggire al suo enorme campo gravitazionale: una volta oltrepassato quello che

viene chiamato orizzonte degli eventi né luce né materia possono più sfuggire e l'oggetto apparirà nero all'osservazione, da qui il suo nome. L'orizzonte degli eventi di un buco nero corrisponde alla distanza dal centro dell'oggetto in corrispondenza della quale la velocità necessaria per sfuggire dal campo gravitazionale diventa pari alla velocità della luce: per un buco nero non ruotante il raggio di questo orizzonte, detto raggio di Schwarzschild, è $R_s = 2 G M/c^2$, dove G è la costante di Gravitazione Universale di Newton, M è la massa del buco nero, e $c = 300$ mila km/s è la velocità della luce, e vale 3 km per una massa pari alla massa del Sole. I buchi neri originati dall'evoluzione di stelle massicce hanno tipicamente masse tra 5 e 20 massa del sole (si veda Figura 3, pannello di destra). D'altro canto, i buchi neri supermassicci, con masse tra 10^6 - 10^9 Msun, che si trovano al centro delle galassie, non si formano direttamente dall'evoluzione stellare e la loro origine è a tutt'oggi oggetto di studio.

1.2 Buco Nero: un oggetto squisitamente relativistico

La Relatività Generale, formulata da Einstein nel 1916, predice che quando una massa autogravitante M si trova all'interno del suo raggio di Schwarzschild, si forma ciò che viene comunemente detto Buco Nero (così denominato da John Archibald Wheeler). In base alla metrica di Schwarzschild, la più semplice delle soluzioni delle equazioni di Einstein è valida per una massa puntiforme con simmetria sferica, ricavata solo alcuni mesi dopo la pubblicazione della teoria di Einstein. In un buco nero, l'intera massa dell'oggetto si trova concentrata al centro in un punto (formalmente di densità infinita) che viene detto "singolarità". Per la cosiddetta "Congettura del Censore Cosmico" (formulata da Roger Penrose nel 1969), non possono esistere singolarità nude, cioè una singolarità è sempre nascosta all'interno di un orizzonte degli eventi che ne impedisce l'osservazione diretta. Ciò fa sì che un buco nero sia un oggetto fisico veramente semplice, caratterizzato da poche proprietà fisiche. Infatti, in base al cosiddetto "No Hair Theorem" (formulato da Wheeler nel 1973), un buco nero "non ha capelli", cioè non possono esistere linee di campo che attraversano in entrata ed in uscita l'orizzonte degli eventi (in termini tecnici, un buco nero può soltanto avere campi di monopolo e non di dipolo), il che implica che un buco nero possa essere caratterizzato solo dalle seguenti proprietà fisiche: massa, carica elettrica e *spin* (o momento angolare di rotazione intorno al proprio asse). Considerato che, realisticamente, è difficile mantenere un oggetto carico in presenza di cariche libere (in quanto queste si muoverebbero per effetto del campo elettrico dell'oggetto in modo da neutralizzare il campo), difficilmente esisterà un buco nero carico, per cui le principali proprietà che caratterizzano un buco nero sono la sua massa ed il suo *spin*. Una conseguenza di ciò è che un buco nero, per

esempio, non può avere un campo magnetico che, essendo generato da un momento di dipolo magnetico, avrebbe linee di campo che escono e rientrano dall'orizzonte degli eventi, come quelle di una comune calamita.

Il campo gravitazionale nelle vicinanze dell'orizzonte degli eventi di un buco nero è il più intenso che si conosca e provoca effetti relativistici la cui misura rappresenterebbe un importante test per la teoria della Relatività Generale in campo forte. Tra questi effetti uno dei più importanti riguarda il rallentamento dello scorrere del tempo (così come rilevato da un osservatore lontano), tanto maggiore quanto più si guarda vicino all'orizzonte. All'orizzonte degli eventi, lo scorrere del tempo formalmente si arresta, cosicché la materia a ridosso dell'orizzonte degli eventi apparirebbe all'osservatore lontano come congelata nel tempo. Un altro effetto, collegato al precedente, è il cosiddetto "redshift gravitazionale", per cui la luce proveniente dalle vicinanze dell'orizzonte di un buco nero subisce una perdita di energia per sfuggire alla forte attrazione gravitazionale e viene rilevata da un osservatore lontano a più bassa frequenza, cioè "spostata verso il rosso". Inoltre, l'enorme campo gravitazionale attorno al buco nero "distorce" la geometria dello spazio tempo circostante e ciò, in base alle equazioni di Einstein, influisce sul moto degli oggetti che vi si avvicinano. Visivamente, lo spazio-tempo intorno ad una massa, viene "piegato" come si trattasse di un telone elastico su cui è poggiata la massa stessa, e questo devia il moto naturale della materia che segue la geometria dello spazio-tempo. In altre parole, in Relatività Generale il concetto di forza viene abbandonato e sostituito da una deformazione geometrica dello spazio che a sua volta determina il moto della materia circostante. Poiché anche la luce tende a muoversi seguendo la geometria dello spazio-tempo, questo effetto si osserva anche sulla propagazione dei raggi luminosi, che, in presenza di un forte campo gravitazionale, possono essere deviati dal semplice percorso in linea retta, provocando quindi una distorsione delle immagini noto come "effetto lente gravitazionale" (Fig. 1). Tale effetto è stato dimostrato sperimentalmente da Sir Arthur Eddington che il 29 maggio 1919 osservò, durante un'eclisse di Sole, lo spostamento apparente della posizione di una stella che si trovava dietro il disco del Sole e che, a causa della distorsione dello spazio-tempo dovuta alla massa del Sole, appariva visibile al lato del disco solare. Questo famoso esperimento costituì una delle prime conferme della teoria di Einstein.

I buchi neri, per la loro estrema compattezza, sono oggetti ai limiti della fisica che conosciamo essendo la loro fenomenologia in pieno regime quantistico e relativistico, e rivestono quindi un interesse enorme per la fisica teorica moderna. Tuttavia, data la loro semplicità, le dimensioni estremamente piccole rispetto a

quelle di oggetti "normali" di pari massa, e data la presenza dell'orizzonte degli eventi, che impedisce a qualsiasi segnale prodotto all'interno di poter essere osservato all'esterno, risulta estremamente difficile osservare direttamente un tale oggetto. Nel caso di buchi neri isolati l'unico modo per osservarli è rivelare la distorsione della luce che proviene dallo sfondo per l'effetto gravitazionale di deviazione dei raggi luminosi (effetto lente gravitazionale, Fig. 1). In tal caso, è possibile quantomeno stimare la massa dell'oggetto che crea l'effetto lente.

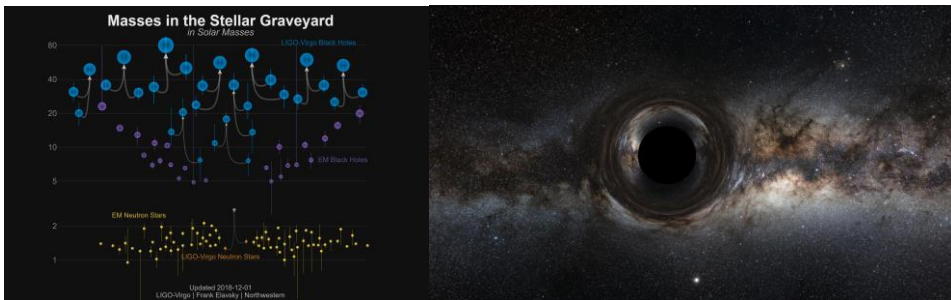


Figura 1. Sinistra: Masse dei sistemi noti contenenti buchi neri (in alto nella figura) o stelle di neutroni (in basso), incluse le masse misurate dai segnali gravitazionali. Si noti che i buchi neri noti con massa superiore a 20 M_{sun} si formano dalla coalescenza di due buchi neri e non direttamente dall'evoluzione stellare.

Credits: LIGO/Virgo/Northwestern/Frank Elavsky. **Destra:** Rappresentazione artistica dell'effetto lente gravitazionale causato da un buco nero supermassiccio sulla luce proveniente da una galassia sullo sfondo. Credits: Wikipedia/CSIC.

Un'altra possibilità è trovare questi oggetti in presenza di materia circostante, per esempio perché parte di un sistema binario insieme ad un'altra stella o perché posti al centro di una galassia. In tal caso, l'enorme campo gravitazionale del buco nero può riuscire ad attrarre gravitazionalmente la materia circostante; la materia precipita verso l'oggetto formando quello che viene chiamato un disco di accrescimento. Qui, a causa dell'attrito viscoso tra i vari strati del disco in rotazione differenziale, la materia si riscalda fino a temperature tanto maggiori quanto più piccola è la massa, e quindi la dimensione, del buco nero ed emette radiazione nella banda dall'ottico/UV ai raggi X, prima di precipitare definitivamente sull'oggetto compatto. In tal modo, anche se non riusciamo a "vedere" direttamente il buco nero, abbiamo la possibilità di studiare gli effetti relativistici sulla materia circostante.

1.3 Buchi Neri rotanti e non: effetti dello spin

I buchi neri, oltre ad essere caratterizzati dalla propria massa, possono avere un momento angolare di rotazione attorno al proprio asse, detto spin, e lo spin può modificare lo spazio-tempo attorno al buco nero. La metrica di Schwarzschild menzionata sopra descrive lo spazio-tempo attorno a buchi neri non ruotanti. In questo caso, l'orizzonte degli eventi, da cui neanche la luce può sfuggire, si trova ad un raggio pari a $R_s = 2 G M_{BH}/c^2$, detto raggio di Schwarzschild. Al di fuori del raggio dell'orizzonte, a circa $3 R_s$, si trova la cosiddetta ultima orbita stabile, che corrisponde al raggio dell'ultima orbita circolare stabile (Innermost Stable Circular Orbit, ISCO) della materia intorno al buco nero: al di sotto di questo raggio la materia non può più orbitare stabilmente intorno al buco nero, ma è costretta a caderci dentro. Tra il raggio di Schwarzschild e quello dell'ISCO si trova la cosiddetta "photon sphere", all'interno della quale i fotoni (che compongono la luce) possono orbitare intorno all'orizzonte su orbite instabili che, prima o poi, portano il fotone ad essere inghiottito dal buco nero. Ciò vuol dire che se un osservatore si trovasse all'interno di questa regione, guardando davanti a se vedrebbe la propria nuca. Infatti, la luce che parte dalla sua nuca, può orbitare intorno al buco nero, e arrivare agli occhi dell'osservatore dopo avere completato un giro. Quindi, se un fotone passa vicino al buco nero ad una distanza inferiore al cosiddetto "photon capture radius", che corrisponde a circa $2.6 R_s = 5.2 G M_{BH}/c^2$, questo rimarrà intrappolato all'interno della photon sphere, cioè sarà costretto ad orbitare intorno al buco nero fino a caderci dentro, e potranno sfuggire dall'attrazione del buco nero solo i fotoni che si trovano ad una distanza dal buco nero superiore a tale raggio.

Per i buchi neri ruotanti la soluzione di Schwarzschild viene modificata in quella che si chiama metrica di Kerr. In questo caso, il momento angolare di spin del buco nero viene espresso in termini di un parametro adimensionale a definito come $a = c J/G M^2$, dove J è il momento angolare di spin del buco nero e $J_{MAX} = G M^2/c$ è il massimo momento angolare di rotazione di un buco nero (corrispondente al caso estremo in cui tutta la massa del buco nero si trovi al suo equatore e ruota con la massima velocità possibile). E' chiaro quindi che il parametro di spin potrà assumere solo valori tra 0 (buco nero non ruotante) e 1 (buco nero massimamente ruotante). All'aumentare del parametro a da 0 a 1, la metrica di Kerr predice che sia il raggio dell'orizzonte degli eventi che il raggio dell'ultima orbita stabile tendano a diminuire fino ad assumere il valore minimo corrispondente al raggio gravitazionale: $R_g = G M/c^2$. Ciò è ragionevole in quanto per un oggetto velocemente ruotante, la forza centrifuga tende a bilanciare la gravità permettendo alla materia e alla luce di poter sfuggire da distanze inferiori

rispetto al caso non ruotante. Per rotazioni più veloci rispetto al valore di J_{MAX} , la forza centrifuga all'orizzonte dovrebbe diventare più grande della gravità e questo dovrebbe permettere alla luce di sfuggire da dentro l'orizzonte, cioè ci sarebbe la possibilità di esporre la singolarità. Ciò è impedito dalla Congettura del Censore Cosmico e da qui si giustifica l'esistenza di un valore massimo per lo spin.

Nel caso di un buco nero ruotante, la geometria dello spazio tempo diventa più complessa rispetto al caso non ruotante. Innanzi tutto la singolarità non è più un punto ma un cerchio in cui è racchiusa tutta la massa (per cui sempre a densità infinita). Inoltre, al di fuori dell'orizzonte (che adesso coincide col raggio della ISCO) esiste una zona, detta "ergosfera", in cui il buco nero trascina lo spazio-tempo nel suo moto di rotazione. In altre parole, un qualsiasi oggetto all'interno dell'ergosfera, non può restare fermo rispetto alle stelle fisse, ma sarà costretto a ruotare insieme al buco nero. Questo significa che se una particella si trova nell'ergosfera, questa acquisterà un'energia di rotazione a spese dell'energia di rotazione del buco nero. Ma poiché la particella si trova all'esterno dell'orizzonte degli eventi, questa potrà ancora sfuggire dal buco nero portandosi dietro una parte della sua energia. Questo interessante meccanismo di estrazione di energia dal buco nero ruotante, noto come meccanismo di Penrose, si pensa che sia all'origine della formazione di jet di particelle con velocità relativistica che molto spesso vengono osservati attorno a buchi neri in presenza di un disco di accrescimento. La materia nel disco, composta sostanzialmente di protoni ed elettroni, cioè particelle cariche, genera un campo magnetico locale che diventa sempre più intenso man mano che ci si avvicina al buco nero. Tale campo magnetico ha il compito di collimare queste particelle relativistiche, con il risultato che i jet rimangono molto collimati fino a distanze parecchio più grandi rispetto al sistema contenente il buco nero. Se questo è un buco nero supermassiccio al centro di una galassia (oggi sappiamo che praticamente tutte le galassie hanno nel proprio centro un grosso buco nero con massa tra 10^6 e 10^9 Msun), il getto di materia relativistica rimane collimato fino a grandi distanze rispetto all'intera dimensione della galassia ospite.

2. Come è possibile fotografare l'orizzonte degli eventi di un buco nero?

Come già accennato, un buco nero è un oggetto necessariamente scuro (in quanto non emette luce) e molto piccolo dal punto di vista astrofisico. Sappiamo che il raggio dell'orizzonte degli eventi aumenta con la massa e ciò ci porta a considerare come soggetti i buchi neri supermassicci al centro delle galassie. Il target ideale in questo senso sarebbe il buco nero al centro della nostra galassia, la Via Lattea, nominato Sagittarius A* (Sgr A*), in quanto è certamente il buco nero

supermassiccio più vicino a noi. Tuttavia, Sgr A* è un buco nero relativamente piccolo, circa 4 milioni di masse solari, e inoltre dalla Terra lo vedremo attraverso lo spessore della galassia, che contiene materia che può disturbare l'immagine. In ogni caso, il raggio di Schwarzschild di Sgr A* è circa 12 milioni di km che, visti da una distanza pari alla distanza della Terra, sottendono un angolo nel cielo di qualche decina di microarcosecondi (μarcsec). Si è deciso quindi di provare a fotografare l'orizzonte degli eventi del buco nero al centro di una galassia relativamente vicina, M87*. Si tratta di un'enorme galassia ellittica a circa 16.4 Mpc (55 milioni di anni-luce) dalla Terra, ma con un enorme buco nero centrale con massa pari a 6.5 miliardi di masse solari. Il suo raggio di Schwarzschild misura circa 20 miliardi di km, circa 3 volte le dimensioni del nostro sistema solare. In altre parole M87* è circa mille volte più massiccio rispetto a Sgr A*, ma anche circa mille volte più distante, e di conseguenza la sua dimensione angolare apparente è molto simile. Tuttavia, M87* presenta alcuni vantaggi: ha una posizione favorevole nel cielo (non troppo a nord non troppo a sud) fatto cruciale per poterla osservare dalla Terra e la sua inclinazione rispetto alla linea di vista è tale che il getto prodotto al suo centro punta verso di noi (si veda l'immagine della galassia in Figura 2), il che significa che possiamo vedere la regione centrale direttamente e non attraverso lo spessore della galassia.

Ad ogni modo, per potere ottenere l'immagine del buco nero centrale, occorre una risoluzione spaziale di almeno 10-20 μarcsec , essendo la sua dimensione angolare di circa 40 μarcsec . Come è possibile raggiungere l'enorme risoluzione spaziale richiesta per poter fotografare il buco nero centrale? Un μarcsec corrisponde a un milionesimo di secondo d'arco, cioè 3.6 miliardesimi di grado. Per definizione è la distanza Terra-Sole vista da una distanza di 1 Mpc (che corrisponde a circa 3×10^{19} km), e corrisponde alle dimensioni di un granello di riso sulla Luna (ad una distanza di 380 mila km). In altre parole, la risoluzione spaziale di 1 μarcsec ci permetterebbe di leggere un giornale a New York ma seduti a Parigi...

2.1 Risoluzione spaziale ed interferometria

Esiste un limite fisico al massimo potere risolutivo di un'immagine, dovuto al fatto che la luce proveniente da un oggetto puntiforme, quando viene focalizzata su uno schermo da una lente (o specchio) di diametro D, subisce la diffrazione, cioè crea sullo schermo una figura caratteristica di ampiezza circa uguale a λ/D , dove λ è la lunghezza d'onda della luce utilizzata. Per distinguere due punti occorre quindi che il massimo della figura di diffrazione creata dal primo punto coincida col primo minimo della figura di diffrazione del secondo. Si trova quindi

che l'angolo minimo a cui devono trovarsi i due punti perché possano essere risolti è: $\vartheta \cong 1.22 \lambda/D$ (*limite diffrattivo*). Ciò implica che il potere risolutivo di un telescopio è tanto più grande quanto più piccola è la lunghezza d'onda della luce utilizzata e tanto maggiore è la sua dimensione. Inoltre, per valori grandi della lunghezza d'onda (ad esempio nella banda radio), occorre un diametro più grande per potere ottenere lo stesso potere risolutivo, e questo è il motivo per cui per osservare in radio occorrono telescopi molto grandi. Ciò implica anche che se vogliamo raggiungere un potere risolutivo di 1 μ arcsec con una lunghezza d'onda di 1 mm (nella banda tra il radio e le microonde), servirebbe un telescopio delle dimensioni della Terra! Questo ovviamente non è fattibile.

C'è un modo, però, per superare questa limitazione. Supponiamo di avere due telescopi posti ad una certa distanza D . Il fronte d'onda che arriva ai due telescopi da un dato angolo ϑ arriverà prima al telescopio più vicino e dopo all'altro telescopio, con un ritardo temporale che dipende dalla loro distanza e dalla direzione di arrivo del fronte. Il ritardo sarà infatti circa $\Delta t \cong \vartheta D/c$. In altre parole, il fronte d'onda arriverà ai due telescopi con una fase diversa e la precisa misura della differenza di fase ci permette di risalire all'angolo di provenienza ϑ . Poiché il ritardo minimo rilevabile è dell'ordine del periodo dell'onda elettromagnetica, che è dato da λ/c , segue che $\lambda \leq \vartheta D$ e che $\vartheta \geq \lambda/D$. In generale, nel caso in cui ϑ sia la distanza angolare apparente di due oggetti sulla volta celeste, si trova di nuovo che il potere risolutivo dei due telescopi è dell'ordine di λ/D , dove adesso D non è più il diametro di un singolo telescopio, ma piuttosto la distanza tra due telescopi, che viene detta *baseline*.

In altre parole, per raggiungere il potere risolutivo richiesto non è necessario costruire un unico telescopio grande quanto la Terra ma basta distribuire opportunamente più telescopi sul globo terrestre. Per far ciò è necessario ricostruire precisamente la fase (ovvero i tempi di arrivo) dell'onda elettromagnetica a diversi telescopi separati da una distanza di centinaia/migliaia di km, e questo richiede che i telescopi siano equipaggiati da precisi orologi esattamente sincronizzati. Questo è il principio che sta alla base del cosiddetto VLBI (Very Long Baseline Interferometer), costituito da una rete di radiotelescopi distribuiti in tutto il mondo. I telescopi del VLBI ricevono nella banda radio e ciò è dovuto al fatto che la lunghezza d'onda nel radio è sufficientemente lunga da permettere la ricostruzione della fase dell'onda anche a grandi distanze. Al diminuire della lunghezza d'onda, la ricostruzione della fase richiede precisioni temporali sempre maggiori (dell'ordine appunto di λ/c), che

rende questa tecnica sostanzialmente impraticabile per radiazioni elettromagnetiche con frequenze maggiori di quelle nella banda ottica.

2.2 L'Event Horizon Telescope

Al fine di migliorare il potere risolutivo, per raggiungere la risoluzione necessaria per ottenere l'immagine di un buco nero, si è deciso di utilizzare quei telescopi radio del VLBI che sono sensibili alle più piccole lunghezze d'onda della banda radio, che sono dell'ordine del millimetro. Sono stati individuati quindi 8 telescopi, funzionanti nel millimetrico, precisamente ad 1.3 mm, disposti opportunamente sul globo terrestre (come mostrato in Figura 2), e che insieme costituiscono quello che è stato denominato l'Event Horizon Telescope (EHT). I telescopi sono distribuiti su una faccia della Terra, in modo da avere la possibilità di osservare simultaneamente una stessa sorgente nel cielo da angolazioni diverse, dalla Scozia al Polo Sud, dal deserto di Atacama in Cile alla Spagna, dall'Arizona e Messico alle Hawaii. Questi sfruttano anche la rotazione della Terra per poter catturare l'immagine del buco nero da ulteriori angolazioni diverse, migliorando ulteriormente la risoluzione dell'immagine. Sono stati equipaggiati di orologi atomici, perfettamente sincronizzati tra loro, e con una precisione tale da perdere 1 secondo in 10 milioni di anni.

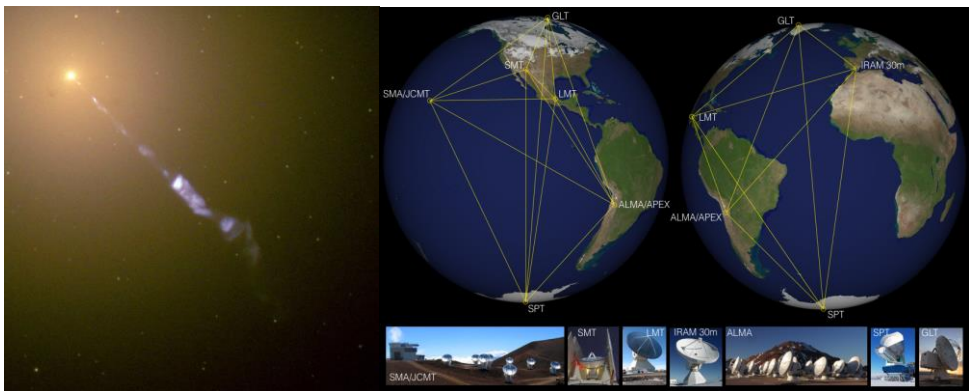


Figura 2. Sinistra: Immagine ottenuta col Telescopio Spaziale Hubble della Galassia M87 (Virgo A) nell'ammasso della Vergine. Dall'immagine è chiaro che il getto è ben visibile e punta verso la linea di vista. Credits: Wikipedia. **Destra:** I telescopi utilizzati per l'EHT, sensibili a lunghezze d'onda del millimetro, e la loro posizione sul globo terrestre. Credits: D. Marrone/UofA.

Sono stati necessari 10 anni di lavoro per configurare l'EHT, in cui gli scienziati hanno dovuto lavorare in condizioni estreme. Il telescopio ALMA

(dell'European Southern Observatory, ESO), ed il suo pathfinder APEX, si trovano nel deserto di Atacama, in Cile, a 5000 metri di altezza in una delle regioni meno piovose e umide della Terra. E' un luogo talmente inospitale che è stato utilizzato per i test dei rover che sono stati inviati su Marte. In quella regione piove in media una volta ogni cento anni, condizione ideale perché l'osservazione del cielo non venga disturbata dall'umidità dell'atmosfera. L'altitudine costringe gli operatori a lavorare con le maschere di ossigeno. Dall'altro capo del mondo, al South Pole Telescope in Antartide, gli operatori hanno dovuto lavorare in condizioni estreme di temperature, talvolta anche durante l'inverno antartico.

Finalmente, nell'Aprile del 2017, l'EHT è pronto per l'osservazione della sorgente selezionata, il grande buco nero al centro della galassia M87. Sono stati registrati dati in 4 diverse osservazioni effettuate dagli 8 telescopi tra il 5 e l'11 aprile 2017, e la mole di dati era tale che si è preferito trasportarli a mano ai centri di calcolo in quanto il download via internet avrebbe richiesto più tempo. I dati sono stati analizzati in due centri indipendentemente, uno in Europa (Max Planck Institute for Radio Astronomy) e l'altro negli USA (MIT Haystack Observatory), in modo da poter poi confrontare i risultati e minimizzare eventuali errori. Qui i dati sono stati cross-correlati e successivamente analizzati su una rete di computer fatti da circa 800 CPU. La ricostruzione dell'immagine è un processo estremamente complesso che ha richiesto circa due anni di lavoro. Infatti, è stato come ricostruire un puzzle a partire da milioni di piccoli pezzi, ciascuno dei quali corrisponde ad una immagine molto sfocata della stessa regione. Per la ricostruzione dell'immagine quindi è stato necessario basarsi su modelli ed in effetti sono stati utilizzati una gran quantità di modelli diversi, in modo da essere sicuri che il risultato finale non dipendesse dal particolare modello utilizzato. Le diverse fasi dell'elaborazione dei dati, come pure l'immagine finale ottenuta dalle quattro osservazioni effettuate nell'aprile 2017, sono schematicamente illustrate in Figura 3.

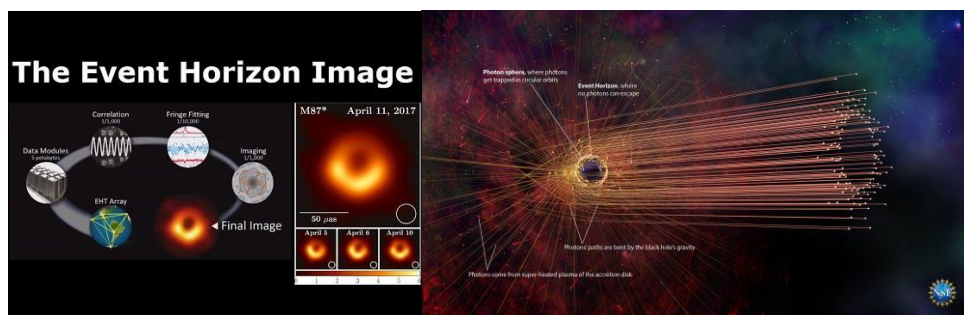


Figura 3. Sinistra: Illustrazione schematica delle diverse fasi dell'elaborazione dei dati necessaria per la ricostruzione dell'immagine: i dati provenienti dai telescopi dell'EHT vengono correlati in modo da ricostruire la fase del segnale ricevuto, il risultato viene adattato ai modelli per la ricostruzione dell'immagine, da cui si ottiene l'immagine finale. Ciò è stato fatto per le 4 osservazioni effettuate il 5, 6, 10 e 11 Aprile del 2017. Credits: Revolvly.com. **Destra:** Immagine artistica che illustra il meccanismo con cui si forma l'ombra del buco nero. La luce prodotta vicino l'orizzonte degli eventi riesce a sfuggire e ad arrivare all'osservatore se viene emessa al bordo esterno della photon sphere, mentre i fotoni prodotti all'interno vengono catturati dal buco nero. Si forma in tal modo un'ombra scura delle dimensioni di circa 2.6 raggi di Schwarzschild. Credits: Nicolle R. Fuller/NSF.

3. La prima "foto" di un buco nero

Ma se un buco nero è nero, cioè non ci aspettiamo che nessuna radiazione possa uscirne, com'è possibile fotografarlo? Quello che, in effetti, appare nelle immagini è un'ombra scura creata sullo sfondo della luce prodotta dalla materia circostante a ridosso dell'orizzonte degli eventi. Qui, particelle cariche che si muovono per effetto del campo magnetico locale emettono luce nella banda radio. La luce viene deviata dall'enorme campo gravitazionale del buco nero verso la direzione dell'osservatore. I fotoni che vengono prodotti all'interno della (o finiscono dentro la) photon sphere, cadranno nel buco nero lasciando un'ombra scura, mentre quelli la cui traiettoria verso l'osservatore è esterna o al più tangente alla photon sphere, riusciranno ad arrivare a noi (Fig. 3). In effetti si è visto che l'immagine varia a causa della turbolenza del moto della materia a ridosso del buco nero, ma sia l'ombra che l'anello di emissione sono sempre presenti con dimensioni praticamente costanti, testimoniando il fatto che non si tratta di una casualità.

E' il caso di ricordare che l'immagine rappresenta la regione centrale di un'enorme e luminosa galassia ellittica, e ci si aspetterebbe che il suo centro rappresenti la parte più luminosa perché è lì che viene emessa la maggior parte dell'energia del sistema. La presenza stessa di un'ombra al centro di questa

immagine è di per se una conferma della Relatività Generale perché non esiste un altro modo semplice di creare un'ombra nera al centro di una regione molto luminosa. Il fatto che sia sferica è un'ulteriore conferma della Relatività Generale ed in particolare di alcune congetture su cui questa si basa: la congettura del Censore Cosmico (se esistessero singolarità nude, non protette da un orizzonte degli eventi, allora la regione centrale dell'immagine di un buco nero non dovrebbe apparire così scura) e il *No Hair Theorem* in quanto se il buco nero potesse avere un campo magnetico, non ci si aspetterebbe un'ombra sferica.

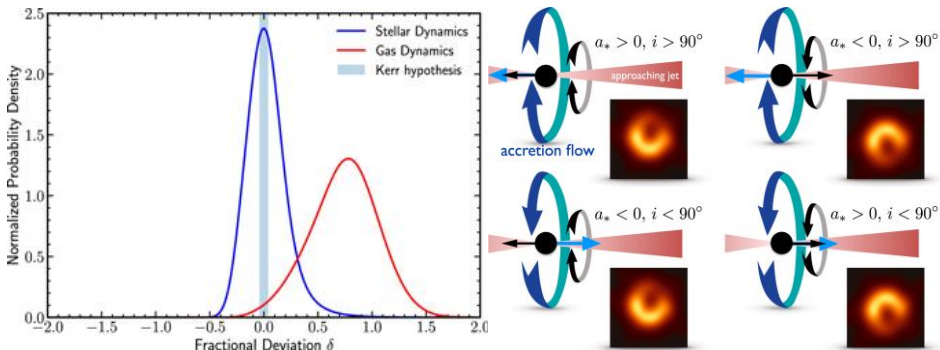


Figura 4. Sinistra: Grafico che illustra diverse misure della massa del buco nero al centro della galassia M87 ed i relativi limiti di incertezza; la linea blu rappresenta la misura ottenuta dallo studio della dinamica stellare nella galassia (Gebhardt et al. 2011), mentre la linea rossa la misura ottenuta con HST dallo studio della dinamica del gas galattico (Walsh et al. 2013). La banda verticale celeste rappresenta la misura ottenuta dalla dimensione angolare dell'ombra del buco nero misurata dall'EHT. Si vede che quest'ultima misura è in ottimo accordo con la misura ottenuta dalla dinamica stellare, e sembra indicare una significativa discrepanza con la misura ottenuta dalla dinamica del gas. **Destra:** Illustrazione dell'effetto dello spin del buco nero e del momento angolare del disco sull'illuminazione asimmetrica dell'anello. L'asimmetria è prodotta principalmente dalla collimazione Doppler: la regione luminosa corrisponde al lato con velocità verso l'osservatore. Nei modelli GRMHD, che si adattano relativamente bene ai dati, l'asimmetria sorge nell'emissione generata dalle pareti del getto. Il senso di rotazione del getto è determinato dalla rotazione del buco nero. Se l'asse di rotazione del buco nero è allineato con il getto su larga scala, che punta verso destra (si veda Fig. 2), l'asimmetria implica che la rotazione del buco nero punta verso la Terra (la rotazione del buco nero è in senso orario vista dalla Terra). La freccia del nastro nero mostra il senso di rotazione del buco nero e la freccia del nastro blu mostra la rotazione del disco, che non sembra avere alcun effetto sull'illuminazione asimmetrica dell'anello. L'inclinazione, i , è definita come l'angolo tra il vettore del momento angolare del disco e la linea di vista. Credits: EHT Collaboration.

L'ombra che si genera nell'immagine avrà quindi le dimensioni della photon sphere, che per un buco nero non-rotante sarà $2.6 R_s = 5.2 G M_{BH}/c^2$. Misurando quindi la dimensione angolare dell'ombra del buco nero è possibile ottenere subito una stima della sua massa. La dimensione angolare apparente dell'ombra è di circa $42 \pm 3 \mu\text{arcsec}$, da cui, nota la distanza di M87 dalla Terra, si è stimata una massa del buco nero di 6.5 ± 0.7 miliardi di masse solari (una massa del sole vale $\sim 10^{30}$ kg). Esistono già due diverse stime (in disaccordo tra loro) della massa del buco nero di M87: una è stata trovata studiando la dinamica del gas intorno al buco nero (Walsh et al. 2013), basata su dati dell'Hubble Space Telescope, HST) e l'altra è stata trovata dallo studio della dinamica delle stelle che si muovono intorno al buco nero (Gebhardt et al. 2011). Come è possibile vedere dalla Figura 4, la massa del buco nero ricavata dallo studio dell'ombra nell'immagine dell'EHT e nell'ipotesi che il buco nero sia rotante (Kerr hypothesis), sembra confermare la stima basata sulla dinamica stellare ed essere incompatibile con quella basata sulla dinamica del gas, assumendo in tutti i casi una distanza di 17.9 Mpc. La misura ottenuta con l'EHT sembra finalmente risolvere dopo vari anni la discrepanza tra le misure basate sulla dinamica stellare e del gas galattico, indicando la prima come quella più attendibile.

3.1 Lo spin del Buco Nero al centro di M87

Un'altra importante informazione che si può ricavare dall'immagine dell'ombra del buco nero al centro della galassia M87 riguarda la misura del momento angolare di rotazione (spin) del buco nero centrale. L'anello luminoso che si osserva intorno all'ombra del buco nero non appare illuminato in modo uniforme, ma si vede chiaramente che è molto più luminoso in basso piuttosto che in alto. Ciò è un fenomeno atteso quando la luce che osserviamo è prodotta da materia che si muove velocemente a causa di effetti dovuti alla Relatività Ristretta. Infatti, quello che vediamo è il risultato di due effetti che diventano importanti quando le velocità sono elevate. Il primo è dovuto all'*effetto Doppler*, cioè al fatto che le frequenze della luce emessa da materia che si muove verso l'osservatore aumentano (*blue-shift*) mentre quelle emesse da materia che si allontana dall'osservatore diminuiscono (*red-shift*). Questo è un fenomeno molto simile a quello che si verifica per le onde sonore, fenomeno per cui la sirena di un'ambulanza ci sembra emettere un suono più acuto quando l'ambulanza si avvicina a noi ed un suono molto più basso quando si allontana da noi. In realtà l'ambulanza emette sempre lo stesso suono, ma il moto da o verso l'osservatore cambia le frequenze del suono ricevuto. L'altro effetto è un effetto squisitamente relativistico e viene indicato con collimazione Doppler o *Doppler boosting*: riguarda l'aumento dell'intensità della luce ricevuta quando la sorgente si

avvicina all'osservatore, e la diminuzione dell'intensità quando la sorgente si allontana dall'osservatore. In altre parole, a causa delle velocità relativistiche della sorgente rispetto all'osservatore, non cambia soltanto la frequenza della luce ricevuta ma cambia anche la sua intensità di modo che l'intensità cambia come la terza potenza della frequenza, cioè: $I \propto \nu^3$. Ciò vuol dire che il lato più luminoso (e *blue-shifted*) nell'immagine è quello in cui la velocità punta verso l'osservatore, mentre il lato meno luminoso (e *red-shifted*) è quello che si allontana dall'osservatore.

In effetti, come per la ricostruzione dell'immagine, anche per l'analisi dell'immagine sono stati utilizzati diversi modelli fisici/matematici per la regione di emissione. Il metodo più conveniente per ottenere dall'immagine le informazioni fisiche sul sistema è quello di ipotizzare un modello per la regione di emissione; questo modello viene quindi convoluto con la risposta dello strumento ottenendo l'immagine del modello così come apparirebbe se fosse stata vista con l'EHT. Per far ciò è stata utilizzata una vasta libreria di modelli basati su simulazioni Magnetoidrodinamiche in Relatività Generale (GRMHD) da cui sono state ottenute immagini sintetiche che sono state paragonate all'immagine reale per poter scegliere il modello (o i modelli) che meglio la descrivono. Da questa analisi si è concluso che l'emissione asimmetrica dell'anello è da ascrivere ad emissione di sincrotrone (dovuta a particelle che ruotano con velocità relativistica attorno alle linee del campo magnetico locale presente a ridosso dell'orizzonte degli eventi), intensificata dall'effetto lente gravitazionale dovuto al forte campo gravitazionale del buco nero. In sintesi, la materia che si trova intorno al buco nero, essendo costituita da particelle cariche (principalmente idrogeno ionizzato che si scompone in protoni ed elettroni), crea correnti elettriche locali che generano un campo magnetico intorno al buco nero. Questo campo magnetico (insieme presumibilmente alla rotazione del buco nero che permette l'estrazione di energia rotazionale per l'effetto Penrose – come descritto al paragrafo 1.3) è responsabile del lancio di un getto relativistico visibile nella banda radio e che si estende con un alto grado di collimazione fino a grandi distanze rispetto all'intera galassia M87. Gli elettroni di cui è costituito il getto ruotano intorno alle linee del campo magnetico per effetto della forza di Lorentz ed emettono luce di sincrotrone, che è quella che vediamo nella banda radio.

I modelli sembrano indicare la base di questo getto come la regione di emissione dell'anello ed il moto della materia alla base del getto determina quindi l'illuminazione asimmetrica dell'anello. Questo moto è determinato dallo spin del buco nero, per cui dall'illuminazione asimmetrica dell'anello possiamo dedurre che il buco nero ruota in senso orario rispetto alle Terra. D'altra parte, la rotazione

del disco di accrescimento intorno al buco nero non ha alcun effetto sulla illuminazione asimmetrica dell'anello (Fig. 4), ed in effetti la parte interna del disco di accrescimento emette principalmente nella banda X e non sarebbe visibile nella banda radio/microonde dell'EHT. Più complicato è determinare la velocità di rotazione del buco nero. La maggior parte dei modelli sembra puntare verso alte velocità di rotazione, ma l'incertezza su questo parametro è ancora molto grande poiché l'immagine può anche essere riprodotta da modelli con bassa (o nulla) rotazione per una opportuna scelta degli altri parametri fisici del sistema. Tuttavia, modelli con basso valore dello spin del buco nero non riescono a riprodurre getti sufficientemente potenti e risultano quindi in disaccordo con le osservazioni del getto su larga scala.

4. Conclusioni

In questa breve nota è stato descritto come è stato possibile ottenere la prima foto dell'orizzonte degli eventi di un buco nero. Si tratta di un risultato molto importante sia perché rappresenta una conferma della teoria della Relatività Generale in campo forte (cioè in una regione dello spazio in cui il campo gravitazionale è certamente la forza dominante, condizioni che sono impossibili da realizzare in un laboratorio terrestre) sia per lo sforzo tecnologico che è stato necessario per ottenere l'immagine ad altissima risoluzione angolare. Questo è soltanto il primo passo verso una nuova scienza che ci permetterà di vedere dettagli sempre più precisi della regione a ridosso dell'orizzonte degli eventi di un buco nero, finora solo ipotizzato teoricamente, e ci permetterà di testare con sempre maggiore precisione la teoria di Einstein e le sue possibili o eventuali alternative.

Nel futuro si cercherà, da un lato, di migliorare la precisione dell'immagine e di ottenere ulteriori immagini di altri buchi neri: il principale candidato in questo senso è il buco nero al centro della nostra galassia, Sgr A*. Come accennato sopra, dalla Terra riusciamo ad osservare Sgr A* attraverso il disco galattico e ciò comporta una maggiore turbolenza e distorsione nell'immagine a causa dell'interazione della luce con la materia nella galassia. Un modo per ovviare a questo problema è quello di osservare a più alte frequenza perché l'interazione della materia con la luce diminuisce al diminuire della lunghezza d'onda della luce. Ciò richiederà ulteriori sforzi tecnologici e di calcolo per poter portare la tecnica interferometrica a funzionare a più alte frequenze rispetto a quelle utilizzate per l'EHT. Dall'altro lato si cercherà di migliorare il dettaglio dei modelli che descrivono la zona di emissione attorno all'orizzonte degli eventi di un buco nero in modo da poter ottenere informazioni sempre più dettagliate sul

comportamento della luce e della materia nelle vicinanze di un buco nero. Saranno inoltre sviluppati modelli basati su teorie avanzate della gravità o alternative alla Relatività Generale, con lo scopo di escluderle o di migliorare l'attuale descrizione della gravità che ad oggi si basa sulla teoria di Einstein. Questo, in prospettiva, potrebbe costituire un passo avanti nella nostra comprensione dell'Universo. Ad oggi, infatti, noi comprendiamo soltanto circa il 5% della composizione dell'Universo, che corrisponde alla parte dell'Universo fatta di materia ordinaria e forme di energia ordinaria. Il restante 75% dell'Universo è fatto invece di *Dark Matter* e *Dark Energy*, cioè di materia ed energia esotica di cui ad oggi non sappiamo dare una descrizione precisa. Non è improbabile che la necessità di ipotizzare queste forme esotiche di materia ed energia non sia in qualche modo legata alla nostra incompleta conoscenza della gravità, per cui migliorare la nostra conoscenza della gravità è certamente uno degli scopi più importanti della fisica moderna.

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare gli organizzatori della Scuola SPAIS e tutti i collaboratori per la loro professionalità e per la cortesia con cui mi hanno accolto.

Bibliografia

- Fish, V. L., Johnson, M. D., Doeleman, S.S., et al. (2016). Persistent Asymmetric Structure of Sagittarius A* on Event Horizon Scales. *Astrophysical Journal*, 820, 90
- Gebhardt, K., Adams, J., Richstone, D., et al. (2011). The Black Hole Mass in M87 from Gemini/NIFS Adaptive Optics Observations. *Astrophysical Journal*, 729, 119
- Johnson, M. D., Fish, V. L., Doeleman, S. S., et al. (2015). Resolved magnetic-field structure and variability near the event horizon of Sagittarius A*. *Science*, 350, 1242.
- The Event Horizon Telescope Collaboration (2019). First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole. *Astrophysical Journal Letters*, 875, L1
- The Event Horizon Telescope Collaboration (2019). First M87 Event Horizon Telescope Results. II. Array and Instrumentation. *Astrophysical Journal Letters*, 875, L2
- The Event Horizon Telescope Collaboration (2019). First M87 Event Horizon Telescope Results. III. Data Processing and Calibration. *Astrophysical Journal Letters*, 875, L3
- The Event Horizon Telescope Collaboration (2019). First M87 Event Horizon Telescope Results. IV. Imaging the Central Supermassive Black Hole. *Astrophysical Journal Letters*, 875, L4

- The Event Horizon Telescope Collaboration (2019). First M87 Event Horizon Telescope Results. V. Physical Origin of the Asymmetric Ring. *Astrophysical Journal Letters*, 875, L5
- The Event Horizon Telescope Collaboration (2019). First M87 Event Horizon Telescope Results. VI. The Shadow and Mass of the Central Black Hole. *Astrophysical Journal Letters*, 875, L6
- Walsh, J. L., Barth, A. J., Ho, L. C., & Sarzi, M. (2013). The M87 Black Hole Mass from Gas-dynamical Models of Space Telescope Imaging Spectrograph Observations. *Astrophysical Journal*, 770, 86

Un modello realistico per visualizzazioni dinamiche in didattica della chimica

Antonella Di Vincenzo, Michele A. Floriano

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Biologiche Chimiche e Farmaceutiche (STEBICEF), Università degli Studi di Palermo

E-mail: michele.floriano@unipa.it

Riassunto. In questo lavoro sono presentate due applicazioni per la visualizzazione dei processi di aggregazione e di solubilizzazione di particelle interagenti e prive di struttura. Le applicazioni consentono di dimostrare qualitativamente e quantitativamente, per mezzo dell'osservazione dell'evoluzione temporale del rapporto superficie/volume e della frazione di particelle aggregate, che, da un lato, il processo di crescita di nanoaggregati è accompagnato da una diminuzione del rapporto superficie/volume e, dall'altro, che interazioni soluto-solvente favorevoli e temperature elevate producono soluzioni omogenee. Si propone che, insieme ad opportuni esempi macroscopici, visualizzazioni mediante le presenti applicazioni possano essere utilizzate per illustrare concetti relativi alla reattività e alla miscibilità/solubilità. Le applicazioni si basano su un modello dinamico bidimensionale in cui le particelle si muovono per via dell'energia termica e dell'energia potenziale di interazione; le traiettorie sono calcolate risolvendo numericamente le leggi di Newton secondo uno schema di Dinamica Molecolare (MD). A questo scopo, è stato adattato un programma MD disponibile online. Si suggerisce che, quando possibile, l'uso di simulazioni realistiche, piuttosto che semplici animazioni, offre diversi vantaggi nella visualizzazione di fenomeni di interesse in didattica della chimica. In primo luogo, in una simulazione il risultato del processo investigato non è stabilito *a priori* ma è una conseguenza dell'evoluzione dinamica del sistema; inoltre, i parametri della simulazione possono essere variati in maniera sistematica e si possono studiare gli effetti di tali cambiamenti. Le applicazioni possono essere utilizzate con diversi livelli di dettaglio e in diversi contesti scolastici. Semplici osservazioni qualitative sono adatte a tutti i livelli. Vengono anche riportate analisi quantitative

sistematiche sull'effetto di variazioni di temperatura e dei parametri di interazione che sono più indicate per le ultime classi della scuola secondaria di secondo grado e per corsi universitari di chimica generale.

Abstract. In this work, two applications for the visualization of the aggregation and the solubilization of structureless interacting particles are presented. The applications allow to demonstrate on a qualitative basis as well as by quantitatively monitoring the time evolution of the surface/volume ratio and of the fractions of aggregated particles, that, on the one hand, the growth of nanoaggregates implies a decrease of their surface/volume ratio and, on the other, that the formation of homogeneous mixtures is the result of favorable solute-solvent interactions as well as of temperature. It is suggested that, along with the use of suitable macroscopic examples, visualizations by the present applications are useful in elucidating concepts related to reactivity and miscibility/solubility. The applications are based on a two-dimensional realistic dynamic model where atoms move because of their thermal and interaction potential energies; the trajectories are determined by solving numerically Newton's laws according to a Molecular Dynamics (MD) scheme. For this purpose, a web-based MD engine was adapted as needed. It is suggested that, when possible, using realistic simulations, rather than simple animations, offers several advantages in the visualization of processes of interest in chemistry education. First of all, in a simulation the outcome of the process under study is not set *a priori* but it is the result of the dynamic evolution of the system; furthermore, specific parameters can be systematically varied and the effects of these changes can be investigated. The applications can be used at different levels of detail and in different instruction levels. Qualitative visual observations are suitable at all levels of instruction. Systematic investigations on the effect of changes in temperature and interaction parameters, suitable for senior high school and college courses, are also reported.

1. Introduzione

Nella didattica della chimica le visualizzazioni di fenomeni a livello atomico/molecolare nella descrizione di fenomeni macroscopici sono un ausilio indispensabile anche allo scopo di prevenire possibili misconcetti. Esistono infatti numerosi esempi di animazioni molecolari di fenomeni e processi di interesse

chimico ma, quasi sempre, il comportamento dinamico non è basato su leggi fisiche realistiche. Infatti, nella maggior parte dei casi, la dinamica non è il risultato di leggi fisiche esplicite e realistiche e, di conseguenza, il comportamento dinamico del sistema può essere considerato come un modo più o meno arbitrario per ottenere un risultato prestabilito. Al contrario, gli attuali strumenti di calcolo e la disponibilità di pacchetti software efficienti per simulazioni molecolari online hanno reso praticabile l'uso di modelli realistici anche a scopo didattico. Essi offrono un'ampia varietà di esempi già pronti o la possibilità di realizzare dimostrazioni interattive personalizzate, di solito in linguaggio Java, anche senza competenze avanzate di programmazione. In questo lavoro vengono descritte procedure di visualizzazione, basate su un modello realistico per lo studio del processo di aggregazione e crescita di nanoparticelle [1] e per la verifica delle condizioni di stabilità di una miscela [2].

È noto che le caratteristiche di reattività di piccoli aggregati di atomi o molecole sono particolarmente elevate quando le dimensioni sono nella scala dei nanometri (10^{-9} m). Queste particolari caratteristiche di reattività sono attribuibili all'elevata area superficiale in rapporto al volume dell'aggregato e cioè al rapporto superficie/volume, S/V , che aumenta man mano che la dimensione dell'aggregato diminuisce. La dipendenza del rapporto S/V dalla dimensione delle particelle può essere ricavata da considerazioni geometriche. Per un cubo di lato ℓ , S/V aumenta al diminuire ℓ come $6/\ell$. Per una sfera di raggio R , $S = 4\pi R^2$ mentre $V = 4/3\pi R^3$ e, quindi, $S/V = 3/R$. In generale, la superficie disponibile per un dato volume è inversamente proporzionale alla dimensione lineare della nanoparticella. Ciò dovrebbe dimostrare agli studenti che è importante ridurre al minimo le dimensioni delle nanoparticelle per poter massimizzare la loro reattività.

Un altro tema di rilievo nella didattica della chimica riguarda lo studio delle condizioni che determinano i meccanismi microscopici responsabili della formazione di miscele omogenee o eterogenee quando si mescolano sostanze diverse.

2. Esempi di visualizzazione

Nella procedura sviluppata nel presente lavoro il comportamento dinamico di un insieme di particelle monoatomiche è stato simulato mediante il metodo della Dinamica Molecolare (MD). In questo metodo, un numero prefissato N di atomi/molecole si muove in un volume fisso a causa dell'agitazione termica e del potenziale di interazione reciproco. Le traiettorie possono essere determinate secondo le leggi classiche del moto e, quindi, risolvendo numericamente le equazioni di Newton. Questo metodo può essere applicato per minimizzare

l'energia totale di un insieme di semplici particelle interagenti a temperatura costante.

È possibile impostare una simulazione MD introducendo opportuni potenziali di interazione tra tutte le coppie molecolari/ioniche presenti nel sistema. Se questo è fatto correttamente, le traiettorie di tutte le specie possono essere calcolate producendo così una sequenza temporale di configurazioni che alla fine illustrerà il processo in esame. Poiché una simulazione si basa su leggi fisiche fondamentali, è sempre possibile variare i parametri del modello, come temperatura e costanti di interazione, ed osservare gli effetti di queste modifiche sul processo.

Nel caso più semplice, come quello adottato nel presente lavoro, costituito da N particelle identiche, neutre e monoatomiche, il potenziale di interazione più utilizzato tra una coppia i e j è il cosiddetto potenziale di Lennard-Jones (LJ):

$$V_{i,j,i \neq j} = 4\varepsilon \cdot \left[\left(\frac{\sigma}{R_{ij}} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{R_{ij}} \right)^6 \right] \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i,j,i \neq j} V_{i,j} \quad (2)$$

dove R_{ij} è la distanza tra l'atomo i e j, ε è un parametro relativo alla forza attrattiva e σ è il diametro atomico corrispondente alla distanza di contatto. L'energia potenziale totale viene calcolata come la somma di tutti i contributi di coppia definiti dall'Equazione 2. Nell'Equazione 1 il termine positivo rappresenta il contributo repulsivo al potenziale che aumenta molto rapidamente a piccole distanze interatomiche e ciò giustifica l'esponente 12; l'esponente 6 nel termine negativo della parte attrattiva ha origine da calcoli quantomeccanici per una coppia di particelle neutre e non polari.

La velocità iniziale di ciascun atomo viene impostata imponendo una distribuzione di Maxwell-Boltzmann delle velocità alla temperatura T e, una volta specificato il potenziale di interazione, è possibile calcolare la posizione, la velocità e l'accelerazione di ciascun atomo in un determinato intervallo temporale dt, risolvendo numericamente le equazioni del moto di Newton soggette alle forze ottenute dal gradiente del potenziale di interazione tra gli atomi. Questa procedura viene ripetuta per ciascun atomo ed iterata, producendo così una sequenza temporale di configurazioni. In sintesi, tutto ciò che l'utente deve fare per iniziare la simulazione è fissare la dimensione della cella di simulazione, il diametro σ e la massa m delle particelle, il parametro del potenziale attrattivo ε e la temperatura T. Le posizioni iniziali delle N particelle sono arbitrarie.

Maggiori dettagli sul metodo e sui principi teorici possono essere reperiti nella bibliografia specializzata [1-2].

2.1 Crescita di nanoparticelle

Nella prima applicazione è stato studiato, mediante simulazioni MD, il processo di aggregazione di un numero arbitrario di particelle monoatomiche prive di struttura ed interagenti mediante un potenziale di Lennard-Jones ed è stato monitorato il rapporto tra il numero di particelle superficiali e il numero totale di particelle aggregate.

L'applicazione [3] sfrutta le risorse disponibili in Molecular Workbench (MW) del The Concord Consortium [4], una piattaforma ad accesso libero basata su linguaggio Java che fornisce gli algoritmi principali per eseguire simulazioni MD 2D e 3D in cui le forze che agiscono sugli atomi si basano su diversi tipi di potenziali di interazione. Per studiare l'aggregazione e il processo di crescita di nanoparticelle, una simulazione MD è stata opportunamente integrata con uno script Java personalizzato. Per ridurre i tempi di calcolo si è scelto di adottare un ambiente 2D.

La pagina principale di questa applicazione contiene una descrizione dei passaggi da eseguire per avviare la simulazione. C'è anche un link a una pagina contenente informazioni generali di background. Inoltre, l'utente troverà una serie di controlli per modificare i parametri di input: diametro atomico, σ (Å), massa atomica, m ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$), numero di atomi, N , temperatura, T (K) e il parametro della parte attrattiva del potenziale di LJ, ϵ (eV). Quando l'applicazione viene avviata, questi parametri sono impostati su valori predefiniti ma questi possono essere modificati liberamente all'interno di specifici range. Una volta selezionato il numero di atomi, le particelle vengono posizionate automaticamente in modo casuale nella cella di simulazione. Facendo clic sul pulsante "Esegui il modello", la simulazione inizia con i parametri specificati.

Nella Figura 1 sono riportati i risultati ottenuti in una simulazione nelle condizioni specificate nella didascalia.

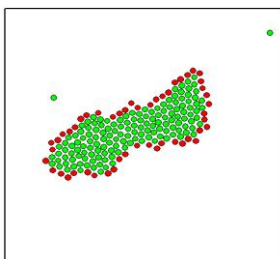


Figura 1. Configurazione ottenuta da una simulazione dopo 380 ps per 200 atomi, inizialmente localizzati in posizioni casuali in una cella di simulazione di dimensioni 60×60 Å, con i seguenti parametri: $\sigma = 1.4$ Å, $m = 40$ $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$, $T = 300$ K e $\epsilon = 0.1$ eV.
Atomi alla superficie (vedi testo) sono colorati in rosso.

Inizialmente gli atomi isolati distribuiti casualmente si aggregano progressivamente in piccoli clusters che, col passare del tempo, si uniscono per formare, alla fine, un singolo nanoaggregato. Durante la simulazione, il numero di atomi liberi diminuisce e il numero totale di atomi aggregati aumenta. Gli atomi di superficie, indicati dal colore rosso, sono stati identificati come quegli atomi che sono in contatto con più di 1 atomo ma meno di 5 altri atomi; gli atomi rimanenti, che sono in contatto con 5 o più atomi, sono considerati interni all'aggregato.

Allo stesso tempo, durante la simulazione, vengono costruiti due grafici, come mostrato in Figura 2: uno che riporta l'evoluzione temporale del numero di atomi isolati (N_{free}), di quelli di superficie (N_{surf}) e di quelli del nucleo (N_{core}) ed uno che riporta l'evoluzione temporale del rapporto superficie/volume, corrispondente a N_{surf}/N_{agg} , dove $N_{agg} = N_{surf} + N_{core}$. Durante la simulazione, all'inizio gli atomi liberi si aggregano abbastanza rapidamente ed inoltre, una diminuzione del numero di atomi di superficie è associata ad un corrispondente aumento del numero di atomi interni.

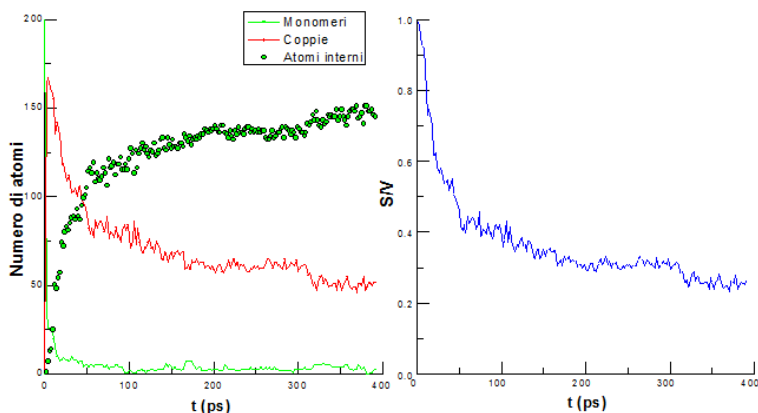


Figura 2. Grafico a sinistra: evoluzione temporale del numero di monomeri, degli atomi di superficie e degli atomi interni all'aggregato. Grafico a destra: evoluzione temporale del rapporto superficie/volume (S/V) per la simulazione realizzata con i parametri di Figura 1.

Il rapporto N_{surf}/N_{agg} diminuisce rapidamente al crescere del nanoaggregato fino al raggiungimento di un valore costante. Gli studenti osservano sul loro computer l'intero processo di aggregazione e crescita, notando anche la diminuzione della superficie disponibile durante la crescita dei nanoaggregati.

Questo approccio può essere efficace per dimostrare che la reattività, che dipende dal numero di atomi di superficie, diminuisce man mano che l'aggregato

crebbe ed è quindi preferibile adottare condizioni che evitano una crescita incontrollata delle nanoparticelle. Il processo in esame non è un evento predeterminato ma, piuttosto, è il risultato del comportamento di un sistema di particelle interagenti soggette ad agitazione termica. Di conseguenza, modificare i parametri che influenzano uno o entrambi i contributi all'energia totale delle particelle, cioè l'energia potenziale e l'energia cinetica, modificherà sicuramente il processo in esame.

Le osservazioni fin qui presentate possono essere utilizzate dal punto di vista didattico a qualsiasi livello scolastico, limitandosi agli aspetti qualitativi nei primi anni dell'istruzione di secondo grado ed affrontando anche aspetti semi-quantitativi, come quelli illustrati nella Figura 3, a livelli più avanzati.

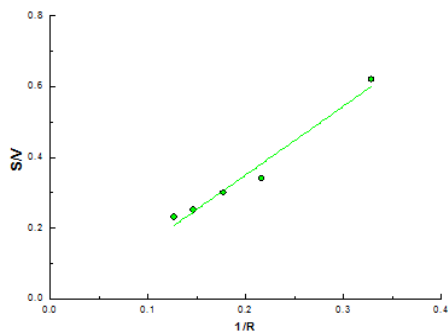


Figura 3. Dipendenza del rapporto superficie/volume (S/V) dal raggio R di aggregati di diverse dimensioni. La linea è il miglior fit dei punti riportati il cui coefficiente angolare è: 1.9 ± 0.2 .

Inoltre, nelle classi superiori dei licei e nei corsi di chimica generale a livello universitario, dove gli studenti dovrebbero possedere le necessarie basi di fisica e familiarità con semplici manipolazioni algebriche, la stessa applicazione può essere utilizzata a un livello più dettagliato.

2.2 Miscela e solubilità

La seconda applicazione [5], sviluppata secondo gli stessi principi della precedente, consente di studiare la stabilità di miscele di particelle diverse di tipo A e B mediante opportune modifiche ai parametri di interazione.

In Figura 4 è riportata una tipica configurazione iniziale.

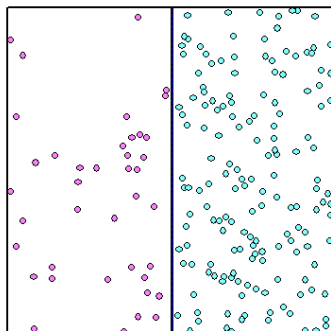


Figura 4. Configurazione iniziale di una miscela di particelle A e B, rappresentate con diversi colori, di uguali dimensioni $\sigma = 1.4 \text{ \AA}$ in una cella di dimensioni $60 \times 60 \text{ \AA}^2$. Il numero totale di atomi è 200 e la frazione di particelle B è 0.2. Inizialmente le particelle A e B sono separate da una barriera impermeabile anch'essa riportata.

A partire dall'esempio illustrato, mediante opportune scelte dei parametri di interazione ϵ_{A-A} , ϵ_{B-B} e ϵ_{A-B} (vedi Equazione 1) è possibile regolare l'affinità delle particelle di soluto rispetto al solvente ad una data temperatura.

In Figura 5 è mostrato un caso rappresentativo in cui le particelle di soluto tendono a separarsi da quelle di solvente così formando un sistema eterogeneo.

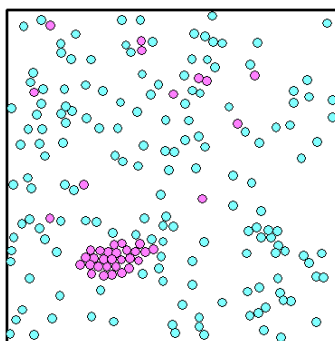


Figura 5. Configurazione ottenuta dopo 400 ps per una miscela di particelle A e B, caratterizzata dai parametri di Figura 4, a $T = 300 \text{ K}$. I parametri di interazione ϵ (vedi testo) sono: $\epsilon_{A-A} = 0.01$, $\epsilon_{B-B} = 0.1$ e $\epsilon_{A-B} = 0.05$.

Analogamente, è possibile investigare il caso opposto in cui le particelle di tipo A hanno una maggiore affinità per quelle di tipo B come mostrato in Figura 6.

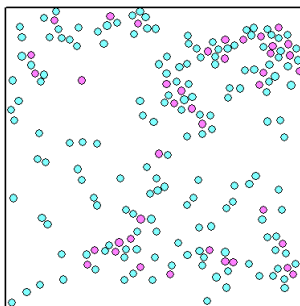


Figura 6. Configurazione ottenuta dopo 200 ps per una miscela di particelle A e B, caratterizzata dai parametri di Figura 4, a $T = 300$ K. I parametri di interazione ϵ (vedi testo) sono: $\epsilon_{A-A} = 0.01$, $\epsilon_{B-B} = 0.05$ e $\epsilon_{A-B} = 0.1$.

Riassumendo, gli esempi appena illustrati dimostrano che, a temperatura costante, il principale meccanismo che determina la formazione di un sistema omogeneo, e quindi la solubilità, riguarda l'entità delle interazioni relative fra particelle dello stesso tipo e particelle diverse. Tuttavia, è altrettanto evidente in una rappresentazione realistica come quella adottata, che la dinamica del sistema dipende non solo dalle interazioni ma anche dalla agitazione termica delle particelle e cioè dalla temperatura. C'è da attendersi quindi che cambiamenti della temperatura possono alterare l'equilibrio energetico del sistema.

Per illustrare questo concetto, a partire da una situazione eterogenea, si può aumentare la temperatura come illustrato in Figura 7.

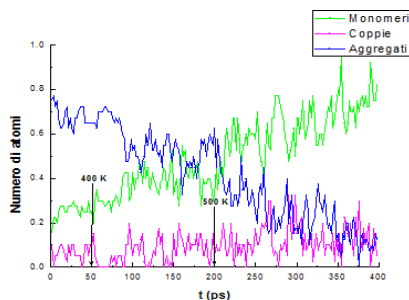


Figura 7. Evoluzione temporale di atomi di vario tipo (vedi legenda) con una simulazione iniziata dalla configurazione riportata in Figura 5. Le frecce indicano l'istante in cui la temperatura della simulazione è stata fissata ai valori specificati.

Si può osservare che l'aggregato presente all'inizio della simulazione, all'aumentare della temperatura, progressivamente scompare come indicato dalla

diminuzione del numero di atomi aggregati. In sintesi, nella formulazione semplificata del modello, un aumento della temperatura provoca un aumento della solubilità. Come è noto, ciò può non essere sempre vero nei casi reali in quanto possono intervenire complicazioni di cui non si è tenuto conto.

3. Conclusioni

Nella didattica della chimica le visualizzazioni a livello atomico/molecolare svolgono un ruolo fondamentale nel chiarire i meccanismi microscopici alla base del comportamento macroscopico della materia. In generale, queste tecniche di visualizzazione, oggi possibili con crescente livello di dettaglio anche per via della disponibilità di applicazioni su dispositivi come tablet e smartphone, rappresentano un importante strumento di connessione fra il mondo macroscopico e modelli microscopici. Tuttavia, nella maggior parte degli esempi oggi disponibili, gli aspetti dinamici dei modelli microscopici sono il risultato di animazioni più o meno arbitrarie essendo progettate per produrre visivamente un risultato prestabilito. Al contrario, utilizzando modelli dinamici realistici, è possibile verificare l'attendibilità delle ipotesi su cui si basa il modello stesso. Sebbene il risultato di una vera simulazione molecolare possa a volte sembrare indistinguibile da una semplice animazione, è importante che i docenti, e conseguentemente gli studenti, siano consapevoli della differenza. Questo principio di carattere generale è stato applicato nella realizzazione delle due applicazioni riportate nel presente lavoro che traggono spunto da due diversi concetti chiave della chimica: l'importanza della superficie esposta nella reattività e i meccanismi legati al processo di solubilizzazione.

Bibliografia

- [1] Di Vincenzo, A., Floriano, M. A. (2019). Realistic Implementation of the Particle Model for the Visualization of Nanoparticle Precipitation and Growth. *Journal of Chemical Education*, 96(8), 1654-1662.
- [2] Di Vincenzo, A., Floriano, M. A. (2019). Visualizing Solubilization by a Realistic Particle Model in Chemistry Education. *Substantia. An international Journal of the History of Chemistry*, 3 (2)(6), 13 - 24.
- [3] Growth Of Metallic Nanoparticles
<http://mw2.concord.org/tmp.jnlp?address=http://www1.unipa.it/flor/MW/nanoparticle.cml>
- [4] Xie, C. Visual, Interactive Simulations for Teaching & Learning Science.
<http://mw.concord.org/modeler/>
- [5] Di Vincenzo, A., Floriano, M. A. Particle Model - Introduction.
http://mw2.concord.org/tmp.jnlp?address=http://www1.unipa.it/flor/MW/Mixtures_1.cml

Teorie fisiche: sintassi logica e matematica, modelli e semantica teorica, pragmatica sperimentale

Enrico Giannetto

Dipartimento di Lettere, Filosofia, Comunicazione, Università di Bergamo

E-mail: enrico.giannetto@unibg.it

Riassunto. Vengono analizzate le strutture della fisica moderna e contemporanea. Viene sottolineata la base fondamentale della pratica sperimentale. La gerarchia tradizionale delle teorie fisiche radicate su basi logico-matematiche viene capovolta.

Abstract. The structures of modern and contemporary physics are analysed. The fundamental ground of experimental practice is stressed. The traditional hierarchy of physical theories rooted on logical and mathematical grounds is turned upside down.

La fisica moderna e contemporanea si distingue dalle altre forme storiche di fisica (fisica antica, fisica medioevale, fisica rinascimentale) perché, con William Gilbert, Thomas Harriot, Galileo Galilei e altri, si costituisce come una forma di filosofia della Natura non basata sulla ragione pura o sulla mera esperienza, ma su una pratica sperimentale rispetto alla quale una teoria è del tutto *a posteriori*. Non si tratta più quindi di una filosofia basata su un *ethos* contemplativo teoretico, di una filosofia teoretica, ma piuttosto di una filosofia basata su un *ethos* della ricerca attiva attraverso azioni sperimentali, di una filosofia pratica, di una filosofia sperimentale, in cui anche la teoria non è più una mera contemplazione intellettuale ma è ricompresa come una prassi.

La necessità di una fisica sperimentale si determinò fra i secoli XII-XIII e XIV a seguito della critica francescana (soprattutto da parte di Giovanni Duns Scotus e Guglielmo d'Ockham) alla fisica aristotelica: si mise in questione la possibilità di fondare la fisica sulla nostra limitata esperienza e sulla base della nostra ragione. Se il mondo non è metafisicamente presupposto come avente una struttura razionale

e se è la creazione della volontà imperscrutabile di Dio, allora non è conoscibile razionalmente *a priori*: non possiamo sapere se è finito o infinito, non possiamo sapere se esiste il vuoto o no perché altri mondi o il vuoto potrebbero esistere al di là della nostra esperienza, non possiamo sapere se ha una struttura matematica o no. Le misure sperimentali sono necessarie per comprendere se effettivamente è possibile stabilire *a posteriori* delle relazioni matematiche che governano i fenomeni.

La Natura non è più un insieme di *dati* dell'esperienza o della visione intellettuale: nell'esperimento non solo vi è una ri-produzione artificiale di fenomeni naturali o una loro simulazione attraverso fenomeni meccanici, ma piuttosto vi è una produzione di un'altra Natura (si pensi, per esempio, alla produzione del vuoto che sulla Terra non incontriamo; oppure, oggi la produzione di particelle subatomiche o addirittura dell'antimateria) non accessibile all'esperienza per i limiti della sensibilità umana e per le dimensioni microscopiche dei fenomeni rispetto all'umanità o per le distanze cosmiche a cui avvengono (si pensi, per esempio, ai quattro satelliti medicei scoperti da Galileo con il cannocchiale). La Natura nell'esperimento, inoltre, si manifesta non da sé direttamente al soggetto umano, ma attraverso strumenti quali soggetti-oggetti che ne misurano proprietà indipendenti dalle proprietà soggettive di un essere vivente. La fisica di Aristotele era una fisica basata sull'esperienza e sulla ragione e si confrontava con la Natura che si dà all'esperienza: nell'esperienza terrestre non si incontra il vuoto e quindi questo viene escluso dalla Natura. La fisica dell'esperienza entra così in contraddizione con la fisica dell'esperimento. Si ha così il paradosso di Tom Stoppard, presentato nella pièce «Rosencrantz and Guildenstern are dead»: si dice che Galileo stabilì come legge di Natura che i gravi, da una stessa altezza, cadono con la stessa velocità e arrivano allo stesso tempo sul terreno, e poi si fanno cadere insieme da una stessa altezza una pallina di piombo e una piuma e non arrivano insieme a terra e la pallina di piombo cade più velocemente. Questa è la fisica della nostra esperienza in cui il vuoto non si presenta ed è questa la situazione studiata da Aristotele: quella di un mondo in cui esistono forze di attrito che rallentano il moto a seconda dei corpi e delle loro forme e in cui il moto non continua per molto dopo la cessazione dell'esercizio di una forza. Le considerazioni di Aristotele non sono sbagliate in assoluto, ma si riferiscono al mondo dell'esperienza con tutti i suoi limiti, nello specifico al moto in un mezzo materiale, mentre Galileo studia il moto nel vuoto. Gli esperimenti mostrano che la Natura è più vasta di quella accessibile alla nostra esperienza.

E c'è un corrispondente problema didattico della fisica moderna; gli studenti e le studentesse che non sono stati avviati a pratiche sperimentali hanno concezioni basate soltanto su una fisica dell'esperienza (per questo, molte volte, si associano

alla fisica di Aristotele; ovviamente, non bisogna identificare la fisica di Aristotele complessa ed elaborata con le concezioni ingenu e spontanee degli studenti e delle studentesse).

La fisica moderna si configura quindi come un insieme di pratiche: una pratica sperimentale, una pratica simbolica matematica che ne codificava le misure, una pratica discorsiva teoretica che interpretava queste pratiche, e anche una pratica tecnica realizzativa di strumenti subordinata ai fini della conoscenza sperimentale. Nel Novecento si sono aggiunte: una pratica simbolica logica (propria della logica matematica) e una pratica della simulazione computerizzata e del virtuale. La fisica si articola quindi su più dimensioni: una dimensione sintattica logico-matematica, una dimensione semantica teoretica, e una dimensione fondamentale di pragmatica sperimentale.

Se Galileo aveva operato una de-funzionalizzazione degli strumenti e delle operazioni tecniche dando loro un nuovo senso "sperimentale" per la sola comprensione della Natura nella prova dell'azione, e aveva subordinato la pratica matematica quale simbolizzazione a posteriori rispetto alla fisica sperimentale, già con Descartes e poi con la reinterpretazione cartesiana dell'opera di Newton la pratica matematica perlopiù tornò ad essere considerata a priori alla fisica e la fisica venne sempre più subordinata a finalità tecniche, e la scienza alla tecnica. Descartes, subordinando la scienza alla tecnica, creò una "meta-fisica tecnica", che si delineò come una concezione meccanicistica della Natura, in cui la Natura e tutti gli esseri viventi (tranne gli uomini, tutti pura *res extensa*, privi di *res cogitans*) erano considerati come macchine utili per l'umanità. Con Descartes e con Newton vengono fissate a priori delle leggi generali matematiche della Natura e la fisica si presenta come una struttura assiomatico-deduttiva, identificandosi (Descartes identificò la Natura con la mera *res extensa* della geometria) o modellandosi sulla geometria. Questa matematica assunta a priori rispetto alla pratica fisica sperimentale si costituì come una "meta-fisica", una "meta-fisica matematica" e questa permise a Descartes e a Newton di innestarvi una teoria teologica: per Descartes la riduzione della Natura a *res extensa* porta a una meta-fisica tecnica che coincide con la meta-fisica matematica, e con una meta-fisica teologica in cui la Natura priva di forze, inerte e passiva, è sottomessa alla sola potenza divina che si esprime nelle leggi di Natura; invece, per esempio, Newton introdusse uno spazio e un tempo matematici, di cui lo spazio e il tempo misurabili fisicamente sono solo un'immagine approssimata, e che sono assoluti, cioè esistono indipendentemente dai corpi materiali e dalle loro relazioni, in quanto attributi di Dio, e introdusse delle forze istantanee e come azioni a distanza non attribuibili ai corpi materiali ma solo all'azione governatrice del mondo da parte di Dio.

Le leggi di Natura, introdotte per la prima volta da Descartes e poi riprese da Newton, derivano da induzioni in parte dall'esperienza (Descartes), in parte dagli esperimenti, e vengono interpretate come generalizzazioni universali, verificabili o falsificabili. Karl Raymund Popper ha enfatizzato la falsificabilità, perché anche un solo esperimento può falsificare la legge, mentre molte verifiche non assicurano mai la validità generale. Questo porta al paradosso evidenziato da Paul K. Feyerabend: una teoria si può dire scientifica solo nel momento in cui è effettivamente falsificata, altrimenti la falsificabilità potrebbe essere solo presunta. Ne segue che una teoria scientifica è tale solo se effettivamente falsificata e quindi solo se falsa.

Per quanto, però, l'induzione ha una sua plausibilità razionale, come per primo notò, contro la formulazione di leggi generali della Natura da parte di Descartes, Blaise Pascal, ci porta al di là della certezza sperimentale e al di là di quanto mai sperimentabile anche in linea di principio: le leggi matematiche della Natura si riferiscono a un'infinità di casi. Ma solo un'intelligenza infinita, quella di Dio, potrebbe conoscere effettivamente una legge di Natura. Le leggi di Natura così intese sono meta-fisiche: si giustificavano come tali solo con i presupposti teologici dai quali sono state derivate da Descartes e da Newton. La caratteristica delle cosiddette scienze nomotetiche (le scienze della Natura), che solitamente si distinguono dalle scienze idiografiche (le scienze dello spirito), di costituire una spiegazione dei fenomeni e di poterli predire attraverso leggi di Natura si basa quindi su un presupposto meta-fisico.

La soluzione «sperimentale» di Pascal evita questa ricaduta della fisica nella metafisica: le formule matematiche non costituiscono delle effettive leggi generali, ma sono una mera tachigrafia delle finite misure sperimentali effettivamente compiute. Il concetto di legge di Natura richiede un'informazione infinita, e quindi una conoscenza infinita non fisicamente raggiungibile dall'intelligenza finita umana, e va quindi rifiutato. D'altra parte, la fisica contemporanea dovrebbe convergere su questa soluzione. La fisica del caos di Henri Poincaré e del Novecento mostra che neanche l'informazione infinita di una presunta legge di Natura è sufficiente a inglobare e a predire i fenomeni fisici, per il problema della cosiddetta sensibilità alle condizioni iniziali delle equazioni differenziali non lineari, che portano a soluzioni divergenti per condizioni iniziali appena leggermente differenti.

Nella fisica quantistica i singoli eventi non sono predicibili e non possono essere sussunti all'interno di una legge di Natura. Non ci sono possibili affermazioni neanche di una legge statistica, ma l'affermazione di una probabilità di una legge statistica. Il principio d'indeterminazione non è una legge di Natura, ma l'attestazione dell'impossibilità di una legge. Il principio d'indeterminazione

quanto-relativistica porta addirittura alla creazione e alla distruzione continua di particelle, ma anche di possibili universi.

Poincaré ha evidenziato che le leggi fisiche possono essere espresse in una molteplicità di linguaggi matematici, che come tali vengono assunti come «convenzioni» (*La science et l'hypothèse*, 1902). Non esisterebbe così una «geometria vera». Se un raggio di luce segue una traiettoria curva, si può decidere di cambiare le leggi dell'ottica e di mantenere la geometria euclidea, oppure si può decidere di assumere una geometria di spazio curvo e di mantenere più semplici le leggi dell'ottica. Poincaré, restando fermo al principio di introdurre in fisica solo grandezze misurabili eliminò lo spazio e il tempo assoluti di Newton. Questo è senz'altro vero se si parte dalla matematica per descrivere la fisica. E quando, nel 1905, Poincaré volle dare una fondazione elettromagnetica alla meccanica, perché elettromagnetiche erano le misure di spazi e di tempi per un sistema in moto, ridefinì però la geometria a partire dalla fisica e ottenne una crono-geometria a quattro dimensioni pseudo-euclidea, inventando lo spazio-tempo come sola crono-geometria adeguata a descrivere le onde, funzioni dello spazio e del tempo, del campo elettromagnetico.

Seguendo Poincaré, dopo la sua morte nel 1912, Einstein e Hilbert nel 1915 formularono la teoria della relatività generale e ridefinirono sulla base di una teoria relativistica della gravitazione una nuova crono-geometria a quattro dimensioni pseudo-riemanniana. La geometria così non è più convenzionale, ma è decisa su base fisica, sperimentale.

A partire già dalla fine della prima metà dell'Ottocento, dopo la nascita delle geometrie non-euclidee, apparirono aritmetiche e algebre «non standard», e poi la pluralità di possibilità assiomatiche portò a una pluralità di teorie degli insiemi, di topologie e di logiche matematiche. Il fondamento delle scienze matematiche quali scienze astratte veniva a crollare.

Fu la nascita della fisica quantistica che permise di risolvere questa ambiguità dei fondamenti e la pluralità astratta a favore di una logica sperimentale quantistica, di una teoria degli insiemi quantistica e di una topologia quantistica, di un'aritmetica e di un'algebra quantistiche (q-numbers, matrici) e che determinò teoricamente anche la sorte della geometria e della teoria delle equazioni differenziali. La teoria delle equazioni differenziali e l'analisi non furono più applicabili alle grandezze fisiche discontinue: la discontinuità alla base dell'indeterminazione rese impossibile la causalità e quindi l'idea di legge naturale che sulla causalità si basava, nella sua trasformazione in determinismo. Si possono scrivere solo per una funzione matematica probabilistica che misura l'informazione del sistema. La geometria si dissolve in una quantizzazione dello spazio e del tempo. La matematica come a priori rispetto alla fisica crolla.

La presentazione solitamente più rigorosa delle teorie fisiche, su base analogica della ricostruzione della matematica, parte da una struttura formale sulla quale si innesta un modello logico-matematico, su questo si innesta a sua volta un modello matematico, e su questo si innesterebbe un modello fisico. Una teoria fisica non sarebbe che un modello di un modello di una struttura formale.

La fisica quantistica più di ogni altra ha mostrato che questa gerarchia non può funzionare e che va del tutto invertita. E il modello fisico va ristabilito sulla base dell'interpretazione degli esperimenti.

Gli esperimenti all'origine della fisica moderna, in effetti, non costituivano altro che un modello meccanico di fenomeni meccanici dei fenomeni fisici. Galileo era certamente consapevole che si trattasse di un modello, che permetteva di trasformare il pensiero astratto in un'azione sperimentale, su cui basare una nuova gnoseologia per potere accedere alla realtà fisica. Con Descartes e con Newton, però il modello venne trasformato in realtà, la Natura ridotta a una macchina (animali compresi), la meccanica da arte tecnica si trasformò in fondamento della fisica. Il modello meccanico, da semplice modello euristico si trasformò in ontologia, ponendosi al posto della teoria effettiva e riducendola a fini applicativi tecnici: divenne una vera e propria concezione meccanicistica della Natura che è ancora oggi la più diffusa e costituisce l'ideologia del dominio della Natura (nessuna etica è necessaria così nei confronti della Natura e degli animali).

Il modello meccanico però si rivelò insufficiente e falso già con la nascita della termodinamica e dell'elettromagnetismo che non permettevano la comprensione dei fenomeni termodinamici ed elettromagnetici in termini di fenomeni meccanici. Il modello meccanico venne confutato definitivamente dalla fisica quantistica.

Si crearono nuove concezioni della Natura: una elettromagnetica e una termodinamica, e queste hanno costituito la base delle teorie della relatività e della teoria quantistica. Questo è un elemento costruttivo che è rimasto perlopiù nascosto nella storia per non intaccare l'ideologia meccanicistica. Questi modelli della Natura non stanno quindi sullo stesso piano e la concezione elettromagnetico-termodinamico della Natura ci ha aperto nuovi orizzonti di pensiero basato sugli esperimenti.

Bibliografia

- Giannetto E. (1990). La logica quantistica tra fondamenti della matematica e della fisica, In BARTOCCI, U. & WESLEY J. P., *Foundations of Mathematics & Physics* (pp. 107-127), Wesley, Blumberg.
- Giannetto E. (1991). L'epistemologia quantistica come metafora antifondazionistica, In PETRUCCIOLI, S., *Immagine Linguaggi Concetti* (pp. 301-322), Roma, Theoria

- Giannetto E. (1991). On Truth: A Physical Inquiry, In Cellucci, C. & Dalla Chiara M., *Atti del Congresso 'Nuovi problemi della logica e della filosofia della scienza' I* (pp. 221-228), Bologna, CLUEB.
- Giannetto E. (1995). Henri Poincaré and the rise of special relativity. *Hadronic Journal Supplement*, 10, 365-433.
- Giannetto E. (1995). Complessità, Indeterminazione, Relatività: Max Born e la nascita della nuova fisica del caos. *Criterio XIII*, 1-2, 69-92.
- Giannetto E. (1995). Physical Theories and Theoretical Physics, In ROSSI A., *Atti del XIII Congresso Nazionale di Storia della Fisica* (pp. 163-177), Lecce, Conte.
- Giannetto E., RENATO A. (2005). *Saggi di storie del pensiero scientifico*, Bergamo University Press, Bergamo, Sestante.
- Giannetto, E. (2010). *Un fisico delle origini. Heidegger, la scienza e la Natura*, Roma, Donzelli.
- Giannetto, E. (2018) *Sguardi sul pensiero contemporaneo. Filosofia e scienze per cambiare il mondo*, Limena (PD), libreriauniversitaria.it.

Nuove frontiere dell'insegnamento delle scienze. Modelli didattici ed esperienze vissute

Giovanni Magliarditi

Liceo Scientifico e Linguistico Statale "Archimede" Messina

E-mail: giomagli@alice.it

Riassunto. Negli ultimi anni abbiamo assistito ad un convulso avvicinarsi di termini didattici, di norme (riguardanti il sistema educativo) e di strategie pedagogiche di cui sono sembrati, a volte, poco chiari il senso e la necessità. Nel corso dell'intervento si cercherà di fare un excursus che riprenda le fila e il significato dei cambiamenti in atto. Si ripercorrerà il cammino dell'evoluzione delle politiche educative prendendo in considerazione, in particolare, la Conferenza di Salamanca, la strategia di Lisbona e le conseguenti riforme attuate in Italia. Si riprenderanno brevemente le caratteristiche di quei modelli didattici che maggiormente hanno influenzato la pedagogia italiana negli ultimi tempi e cioè quello *neoidealista* di Gentile, quello *comportamentista*, quello *cognitivista* e quello *costruttivista*. Ognuno di questi appare utile ma non esaustivo. Resta, dunque, chiaro che non esistono, in linea di principio, modelli "perfetti" ed assoluti, ma è comunque importante conoscerne gli aspetti al fine di distinguere le loro potenzialità. In atto molti considerano il modello costruttivista quello più efficace per affrontare le presenti necessità. Si cercherà di individuare, quindi, delle strategie effettivamente praticabili per ottemperare alle attuali esigenze educative.

Abstract. In the last few years we have witnessed a convulsive succession of didactic terms, norms (concerning the educational system) and pedagogical strategies whose meaning and necessity sometimes seemed unclear. In this contribute, an excursion that takes up the line and the meaning of the changes taking place will be done. The path of the evolution of educational policies taking into consideration, in particular, the Salamanca Conference, the Lisbon strategy and the consequent reforms implemented in Italy will be recalled. Moreover, the characteristics of didactic models

that have mainly influenced Italian pedagogy in recent times, like Gentile's *neo-realist*, *behaviorist*, *cognitive* and *constructivist* ones, will be briefly resumed. Each of these appears useful but not exhaustive. Therefore, it is clear that "perfect" and absolute models do not exist, however, it is important to know their aspects in order to distinguish their potential. In practice, many consider the constructivist model to be the most effective one to face the present needs. An attempt to identify the necessary practicable strategies to comply with current educational needs will be done.

1. Introduzione

Di seguito alcuni termini che ho riscontrato nel corso delle mie ultime esperienze e di cui ho fatto fatica a comprenderne il senso e la necessità:

A.S.L., P.C.T.O., I.B.S.E., Flipped Classroom, Problem Solving, Problem Posing, Hands on, Didattica laboratoriale, Peer education, Prove oggettive, Prove autentiche, PECUP, Obiettivi specifici di apprendimento, Griglie, Rubric, Expertise, Costruttivismo, Comportamentismo.

e inoltre:

WhatsApp, Windows, Android, Banda larga, MMS, SMS, USB, Bluetooth, PDF, JPG, Cloud, Chat, Twittare.

Neologismi questi ultimi, e molti altri, con cui i miei alunni hanno molta familiarità e con i quali ho dovuto prendere confidenza per poter "stare in classe" e per poter sopravvivere ai continui mutamenti degli stili di vita attuali.

Perché tutte queste novità, a me poco familiari, quando mi sembrava così semplice entrare in classe, fare lezione interrogare e mettere i voti? Per dare un senso a tutto ciò e superare le difficoltà riscontrate ho cercato di fare ricerche in merito a quali siano state e siano le attuali tendenze delle politiche didattiche nel Mondo.

2. Nel Mondo

Nel cercare, nell'ormai non molto recente passato, ho ritrovato i principi generali dell'UNESCO relativi alle politiche educative che risalgono alla conferenza di Salamanca del 1994 e che hanno influenzato le politiche nazionali riguardanti l'istruzione nei vari paesi.

Ne riporto di seguito alcuni passaggi significativi:

DICHIARAZIONE DI SALAMANCA

sui principi, le politiche e le pratiche in materia di educazione e di esigenze educative speciali
U.N.E.S.C.O. 1994

[...]

1. Noi, rappresentanti di 92 governi e di 25 organizzazioni internazionali alla Conferenza mondiale sull'educazione e le esigenze speciali riunita a Salamanca (Spagna) dal 7 al 10 giugno 1994, riaffermiamo con la presente il nostro **impegno a favore dell'educazione per tutti**, consapevoli che necessario ed urgente garantire l'educazione, nel sistema educativo normale, **dei bambini, dei giovani e degli adulti** che hanno bisogni educativi speciali e approviamo il Piano di Azione per l'educazione e i bisogni educativi speciali, con la speranza che lo spirito delle sue disposizioni ed esortazioni guidi i governi e le organizzazioni.

2. Siamo convinti e proclamiamo che:

l'educazione è un diritto fondamentale di ogni bambino che deve avere la possibilità di acquisire e di mantenere un livello di conoscenze accettabili,

- ogni bambino ha caratteristiche, interessi, predisposizioni e necessità di apprendimento **che gli sono propri**,
- **i sistemi educativi** devono essere concepiti e **i programmi** devono essere messi in pratica in modo da tenere conto di **questa grande diversità di caratteristiche e di bisogni**,
- le persone che hanno bisogni educativi speciali devono poter accedere alle normali scuole che devono integrarli in un sistema pedagogico centrato sul bambino, capace di soddisfare queste necessità,
- le scuole normali che assumono questo orientamento di integrazione costituiscono il modo più efficace per combattere i comportamenti discriminatori, creando delle comunità accoglienti, costruendo una società di integrazione e raggiungendo l'obiettivo di **un'educazione per tutti**, inoltre garantiscono efficacemente l'educazione della maggioranza dei bambini, accrescono il profitto e, in fin dei conti, il rendimento complessivo del sistema educativo.

3. Invitiamo ed esortiamo tutti i governi a:

- dare la priorità nelle politiche e nei bilanci al miglioramento dei sistemi educativi al fine di poter accogliere tutti i bambini, indipendentemente dalle differenze o difficoltà individuali,
- adottare, come legge o politica, il principio dell'educazione inclusiva, accogliendo tutti i bambini nelle scuole normali, a meno che non si oppongano motivazioni di forza maggiore, [...] ¹ [1]

¹ L' evidenziazione in grassetto non è presente nel testo originale.

Leggendo questo documento, che ha ormai venticinque anni, mi ha colpito il passaggio in cui si evidenzia l' **"impegno a favore dell'educazione per tutti"** e, quindi, non solo quella rivolta ai più meritevoli e neanche solo quella rivolta a bambini con Bisogni Educativi Speciali, ma a tutti! Questo vuol dire che nessuno deve essere escluso dai processi formativi. Un altro aspetto che ritengo degno di nota è che **"ogni bambino ha caratteristiche, interessi, predisposizioni e necessità di apprendimento che gli sono propri,"** e che **"i sistemi educativi devono essere concepiti e i programmi devono essere messi in pratica in modo da tenere conto di questa grande diversità di caratteristiche e di bisogni"**. Ma su questi ultimi aspetti torneremo in seguito; cerchiamo ora di capire cosa hanno fatto l'Europa e l'Italia.

3. In Europa

Strategia di Lisbona

Conclusioni del 23 e 24 marzo 2000 della
Presidenza del Consiglio europeo

[...] La nuova sfida

1. L'Unione europea si trova dinanzi a una svolta epocale risultante dalla globalizzazione e dalle sfide presentate da una nuova economia basata sulla conoscenza. Questi cambiamenti interessano ogni aspetto della vita delle persone e richiedono una trasformazione radicale dell'economia europea. [...]
2. Il ritmo rapido e sempre crescente dei mutamenti rende urgente un'azione immediata da parte dell'Unione per sfruttare appieno i vantaggi derivanti dalle opportunità che si presentano. [...]

Modalità di azione

5. L'Unione si è ora prefissata un nuovo obiettivo strategico per il nuovo decennio: diventare l'economia basata sulla conoscenza più competitiva e dinamica del mondo, in grado di realizzare una crescita economica sostenibile con nuovi e migliori posti di lavoro e una maggiore coesione sociale. [...] [2]

Il Consiglio dell'Unione europea con nota del 5 e 6 maggio 2003 sottolinea che:

- [...] il totale dei laureati in matematica, scienze e tecnologie nell'Unione europea dovrebbe aumentare almeno del 15% entro il 2010 e al contempo dovrebbe diminuire lo squilibrio tra i sessi.
[...] almeno l'85% della popolazione ventiduenne dell'Unione europea dovrebbe avere completato un ciclo di istruzione secondaria superiore. [3]

La strategia Europa 2020

Comunicazione della Commissione europea
del 3 marzo 2010

[...] sviluppare un'economia basata sulla conoscenza e sull'innovazione; [...]
[...] il tasso di abbandono scolastico deve essere inferiore al 10% e almeno il
40% dei giovani deve essere laureato; [...] [4]

4. In Italia

In Italia nel 2001 viene modificata la Costituzione; vedremo successivamente come questo ha inciso nella politica educativa italiana.

Legge costituzionale 18 ottobre 2001, n. 3
"Modifiche al titolo V della parte seconda della Costituzione"
pubblicata nella *Gazzetta Ufficiale* n. 248 del 24 ottobre 2001

Art. 3

1. L'articolo 117 della Costituzione è sostituito dal seguente:

Art. 117 - La potestà legislativa è esercitata dallo Stato e dalle Regioni nel rispetto della Costituzione, nonché dei vincoli derivanti dall'ordinamento comunitario e dagli obblighi internazionali.

Lo Stato ha legislazione esclusiva nelle seguenti materie:

[...] n. norme generali sull'istruzione; [...]

Sono materie di legislazione concorrente quelle relative a:

[...] istruzione, salva l'autonomia delle istituzioni scolastiche e con esclusione della istruzione e della formazione professionale; [...] Nelle materie di legislazione concorrente spetta alle Regioni la potestà legislativa, salvo che per la determinazione dei principi fondamentali, riservata alla legislazione dello Stato.

Spetta alle Regioni la potestà legislativa in riferimento ad ogni materia non espressamente riservata alla legislazione dello Stato. [...] [5]

Quanto sancito dalla Costituzione implica che lo Stato non può più definire i cosiddetti "programmi ministeriali", un tempo prescrittivi, ma solo dare delle indicazioni di massima demandando la programmazione alle Istituzioni scolastiche nel rispetto della loro autonomia. Mi accorgo, quindi, che questo è in sintonia con quanto espresso nella dichiarazione di Salamanca dove si evidenzia che "*i sistemi educativi devono essere concepiti e i programmi devono essere messi in pratica in modo da tenere conto di questa grande diversità di caratteristiche e di bisogni*".

Negli anni successivi alla modifica del titolo V della Costituzione viene varata la cosiddetta riforma Gelmini e, in seguito, promulgati sia la cosiddetta legge sulla "Buona Scuola" che i relativi decreti attuativi. Vengono, anche, emanate le norme riguardanti l'istruzione per gli adulti e quelle per i soggetti con Bisogni Educativi Speciali. Si osserva, ancora, la riforma del sistema di istruzione e formazione professionale. Mi accorgo, dunque, del tentativo di far sì che nessuno venga escluso da una qualche forma di educazione.

In tutte queste ultime norme, di cui ho omesso per brevità i riferimenti, riconosco, ancora, un filo conduttore che lega i principi della dichiarazione di Salamanca riguardanti l'educazione per tutti, la personalizzazione dei programmi e dei percorsi formativi; la richiesta fatta dall'Unione europea di aumentare il numero dei giovani che abbiano "*completato un ciclo di istruzione secondaria superiore*", e il principio costituzionale che demanda la progettazione didattica all'autonomia delle Istituzioni scolastiche. Nelle Indicazioni Nazionali e nelle Linee Guida, infatti, non compaiono programmi ma delle macroaree cui i docenti devono far riferimento per elaborare la programmazione delle varie discipline.

5. Modelli pedagogici a confronto

A questo punto mi sono chiesto come possiamo noi insegnanti, che in definitiva siamo quelli che devono operare sul campo, fare in modo che vengano raggiunti i risultati indicati dell'UNESCO, dalla Unione Europea e dalla politica educativa nazionale?

A titolo di esempio prendo come riferimento la percentuale dei diplomati nel 1951 che in Italia era del 3,3% mentre quella dei laureati era pari all'1,0% [6]. Questo vuol dire che, in quegli anni, i livelli alti dell'istruzione erano riservati ad un numero esiguo di persone altamente selezionate che riuscivano a raggiungere gli elevati standard prefissati. Allo stato attuale le percentuali in esame sono largamente aumentate rispetto a quelle degli anni 50 del Novecento, ma in Italia i livelli di istruzione restano al di sotto della media europea [7].

Appare chiaro che un sistema finalizzato alla genesi del 3,3% di diplomati e dell'1% di laureati risulta poco idoneo alla formazione di ben più alte percentuali di fruitori. Come fare a raggiungere risultati così elevati senza cedere alla tentazione di abbassare i livelli di apprendimento al fine di evitare l'esclusione dei meno brillanti e senza penalizzare, al contempo, i più meritevoli?

In modo certamente non esaustivo cerchiamo, dunque, di vedere brevemente le caratteristiche principali dei vari modelli pedagogici che hanno influenzato la didattica e come questi siano più o meno idonei a quanto richiesto dalle politiche educative mondiali e nazionali.

5.1 La pedagogia idealistica di Giovanni Gentile

Giovanni Gentile fu un filosofo neoidealista; la sua filosofia, da lui stesso denominata attualismo, è fondata sull'asserzione che l'unica vera realtà consiste nell'atto puro derivante dal pensiero. Detto in altri termini: solo ciò che si realizza tramite il pensiero rappresenta la realtà. Questa concezione è in evidente contrasto con la filosofia positivista che considera la realtà come qualcosa di esterno alla mente e che può essere conosciuta attraverso l'indagine scientifica.

Gentile, nel 1923, ha posto in essere in Italia l'omonima riforma scolastica che caratterizza ancora la scuola italiana. Questa, infatti, nonostante l'avvicendamento di varie norme innovative, è a tutt'oggi ispirata al modello idealistico di Giovanni Gentile.

La concezione idealistica del nostro filosofo conduce la pedagogia all'interno dell'ambito della filosofia negando ogni collegamento con la psicologia. È in contrasto con le idee positiviste allora coeve che cercavano di sviluppare teorie dell'apprendimento basate su osservazioni scientifiche. Gentile fu un convinto assertore del connubio docente-discente, secondo il quale, non esistono metodologie precostituite per ottenere un buon risultato nell'insegnamento-apprendimento. Le strategie dell'insegnamento sono demandate al buon senso del docente che deve avere innanzitutto una forte preparazione disciplinare e così essere in grado di fornire elevati livelli di prestazione. D'altro canto, il discente diventa l'espressione del "maestro" che risulta essere l'unico depositario dell'arte dell'insegnare.

La scuola gentiliana era aperta a tutte le classi sociali, ma vi era poca attenzione alla diversa provenienza degli studenti, nel senso che erano richieste elevate prestazioni da parte di tutti gli alunni, ma ci si preoccupava poco dei loro livelli culturali di partenza e della loro provenienza sociale: in altre parole non era negata a nessuno la possibilità di tentare di partecipare alla fruizione della cultura, ma c'era poca attenzione nel cercare di rimuovere e colmare lo svantaggio di chi non aveva gli strumenti per poter accedere al servizio proposto. Questo significa che la scuola era fortemente selettiva e, di fatto, chi non "ce la faceva" veniva escluso dal processo di apprendimento. Vi era una forte discrezionalità da parte del docente riguardo la valutazione e poca attenzione al processo formativo. In altre parole la logica: era: "chi sa passa, chi non sa non passa". Il docente spiegava la lezione, chi capiva ed era in grado di rispondere era promosso, gli altri che non raggiungevano i livelli prestabiliti venivano "bocciati" e non ci si preoccupava molto delle condizioni psicologiche e sociali degli studenti; per essere promossi era necessario conseguire la "sufficienza" che si esprimeva attraverso un voto numerico e cioè il "sei".

In quel periodo emergeva, inoltre, quello che in seguito sarebbe stato indicato come il problema "delle due culture" in quanto Gentile dava più importanza, nella scuola, alle discipline umanistiche rispetto a quelle scientifiche e tecniche². In questo sistema la principale finalità della scuola classica era quella di preparare i futuri funzionari della pubblica amministrazione, professori, giudici, ufficiali, burocrati, e così via, capaci di interpretare ordini e, a loro volta, diffondere ordini. L'istruzione tecnica, invece, aveva la funzione di preparare i quadri da inserire nelle allora nascenti strutture industriali, asse portante dell'economia, ma non ancora completamente consolidate come ambienti incisivi delle scelte strategiche della nazione. Allora la pubblica amministrazione in Italia era fortemente centralizzata per cui un ordine emanato dalla capitale doveva raggiungere, tramite il capillare apparato burocratico, la periferia del Regno ed essere, dunque, eseguito. In queste condizioni erano richieste, nella pubblica amministrazione, prestazioni identiche in tutta Italia. Nel caso di nostro interesse, e cioè nella scuola, tutto ciò implicava che i programmi ed i quadri orari dovevano essere gli stessi in tutto il territorio nazionale e, quindi, lo studente di Palermo doveva fruire di medesime prestazioni rispetto al compagno di Milano ed entrambi, al termine degli studi, dovevano essere dotati di caratteristiche simili. Si evidenziava, dunque, la convinzione che la scuola dovesse produrre e riprodurre modelli precostituiti.

5.2 Nuove idee pedagogiche introdotte in Italia dopo la seconda guerra mondiale

Dopo la seconda guerra mondiale si avvertiva l'esigenza di ampliare la scolarizzazione e di estendere a tutti gli strati sociali l'opportunità di accedere ad alti livelli di istruzione. Si cominciarono ad introdurre le basi della scuola dell'inclusione e si iniziarono, quindi, a studiare strategie e tecniche per migliorare l'insegnamento e l'apprendimento. Così, l'allora ministro della Pubblica Istruzione incaricò nel 1945 il colonnello statunitense Carleton W. Washburne, ed altri esperti italiani, di elaborare nuovi programmi per la scuola materna ed elementare. Washburne si ispirava alla pedagogia attivista di John Dewey. Dewey, a sua volta, basava la sua concezione pedagogica sulla didattica laboratoriale del "learning by doing" e cioè dell' "imparare facendo". L'attivismo di Washburne e di Dewey si fonda sulla concezione che le esperienze fatte a scuola debbano rispecchiare la vita reale e preparare alla vita stessa. Secondo queste idee la scuola deve far parte della vita e non essere separata da essa, il bambino, così, sviluppa la sua capacità di affrontare la realtà cominciando a superare le difficoltà che incontra a scuola. La

² Questo non avvenne nell'Università.

funzione del docente è quella di guidarlo in questa fase di crescita e di scoperta diversamente da quanto attuato dalla pedagogia idealistica che si rifà a modelli ideologici ed etici di cui il "maestro" è depositario e che procedono dal docente verso il discente.

L'attivismo pedagogico dà, quindi, molta importanza alla ricerca psicologica che studia i processi di apprendimento. In questo modo la centralità della didattica si sposta dal docente al discente, si tiene conto delle attitudini dello studente, delle sue aspettative, del contesto sociale e così via.

La scuola cominciava a diventare sempre meno selettiva, la società sempre più competitiva.

Cominciavano, così, a diffondersi in Italia i modelli pedagogici positivisti fortemente influenzati dal pragmatismo anglosassone. Modelli che sono nettamente in antitesi con quello idealistico ma l'impostazione della scuola restava idealistico-gentiliana.

5.3 Comportamentismo

Successivamente nella scuola italiana cominciava a diffondersi un altro modello pedagogico chiamato comportamentismo. Questo si può essenzialmente suddividere in due correnti di pensiero: il comportamentismo classico ed il neocomportamentismo.

Secondo le tesi classiche del comportamentismo non ci si deve focalizzare sullo studio dei meccanismi della mente, ma sulla risposta che questa dà agli stimoli. Questi studi sono, pertanto, basati sugli unici parametri scientificamente misurabili e cioè gli stimoli e le corrispondenti risposte. Il paradigma del modello comportamentista è quindi: Stimolo-Risposta (S-R). Secondo questo modello gli individui reagiscono in base agli stimoli ed ogni comportamento è strettamente condizionato dal corrispondente stimolo: ad un particolare stimolo corrisponde una determinata risposta. In questo modo si possono "costruire" professionisti, persone oneste e, paradossalmente, delinquenti efferati. Il comportamento umano è, quindi, strettamente dipendente dallo stimolo. L'educazione, l'ambiente in cui si è cresciuti e maturati vengono considerati fondamentali per la definizione della personalità dell'individuo ed ogni suo atteggiamento futuro dipenderà da questo. Secondo questa concezione, quindi, resta poco spazio al libero arbitrio.

Il neocomportamentismo cominciava a tener conto della diversità delle persone ed è basato sul paradigma Stimolo-Individuo-Risposta (S-I-R) nel senso che non tutti gli individui reagiscono allo stesso modo allo stesso stimolo: significa, quindi, che se si danno stimoli uguali ad individui diversi si ottengono risposte diverse. Ma significa, anche, che se si stimolano in modo diverso individui diversi si possono ottenere risultati uguali.

Il modello neocomportamentista nella scuola italiana si diffuse negli anni ottanta del Novecento. Secondo questa concezione il docente, adoperando strategie differenti con alunni diversi, riesce a far raggiungere a tutti gli allievi, ed in egual misura, i livelli di preparazione programmati cioè quelli che nel lessico scolastico vengono denominati obiettivi formativi. Come conseguenza si applica la strategia della didattica individualizzata e si parla di programmazione per obiettivi.

Sempre rifacendosi a questo modello le verifiche vengono effettuate predisponendo le cosiddette prove oggettive misurabili mediante opportune griglie. La valutazione si ottiene confrontando ogni passaggio risolutivo previsto nella griglia con la prestazione dello studente, se il passaggio è rispettato viene attribuito il corrispondente punteggio prestabilito, altrimenti, il punteggio non è assegnato. E' possibile, inoltre, prevedere delle penalità se il passaggio è considerato errato o omesso; in questo modo la valutazione è automatica e risulta oggettiva, in quanto, le prestazioni degli allievi sono quantificabili e confrontabili.

Lavorando secondo concezioni comportamentiste aumenta fortemente la responsabilità didattica del docente che deve essere interprete delle attitudini dello studente e, di conseguenza, essere in grado di applicare opportune strategie individualizzate per permettere al discente di raggiungere gli obiettivi prefissati.

Secondo la cultura diffusa in Italia, però, attenzioni diverse ad alunni diversi vengono percepite come ingiustizie: in questo contesto la didattica individualizzata ha avuto una certa resistenza nell'essere accettata dagli studenti e dalle famiglie. Si avverte, quindi, un aumento del divario con il modello idealistico, in quanto, il neocomportamentismo risente del pragmatismo anglosassone mentre la scuola italiana resta di impostazione gentiliana.

5.3 Cognitivism

Il cognitivismo nasceva in opposizione al comportamentismo. Studia i processi della mente umana in modo scientifico. I cognitivisti individuano un parallelo tra il funzionamento della mente umana e quello dei computer dando inizio allo sviluppo dell'intelligenza artificiale.

5.4 Costruttivismo

Secondo il modello costruttivista, anch'esso influenzato dal pragmatismo anglosassone, ogni individuo "costruisce" la conoscenza in modo personale, e quindi soggettivo, tramite l'interazione tra l'ambiente esterno e le strutture psicologiche interne presenti nella propria mente. Diversamente da quanto fatto dai comportamentisti, quindi, i costruttivisti prendono in considerazione i "meccanismi" della mente e ne studiano i processi.

Nella scuola l'applicazione di questo modello comporta l'impiego della didattica personalizzata intesa come valorizzazione ed attuazione delle potenzialità personali, concretizzata anche attraverso la scelta, da parte dello studente, delle discipline da studiare ed approfondire oltre che dei livelli di apprendimento di cui fruire. Per valutare le competenze non si parla più di valutazioni oggettive ma si parla di valutazione delle prestazioni personali nei vari contesti. Prestazioni che possono essere differenti tra persona e persona ma ugualmente valide ed appropriate. Per far questo si predispongono le cosiddette prove autentiche intese come prove che si riferiscono a situazioni contestualizzate che riproducono condizioni quanto più possibile simili a quelle della vita reale.

Una tecnica utilizzata dai costruttivisti nell'ambito delle discipline scientifiche è quella dell'IBSE: Inquiry Based Science Education (educazione scientifica basata sull'indagine). Nell'applicare questo metodo lo studente, singolarmente o in gruppo, è messo in una situazione problematica e deve essere in grado di valutarne il contesto e proporre soluzioni attraverso un processo personale.

Questa tecnica si fonda sulle famose cinque E:

- Engage → fase di coinvolgimento in cui si osserva il fenomeno e si esprimono liberamente opinioni
- Explore → il ragazzo compie l'esperienza diretta
- Explain → si introduce la corretta terminologia finalizzata alla spiegazione del fenomeno
- Elaborate → si rinforza la comprensione e si applicano le conoscenze apprese in nuovi contesti
- Evaluate → processo di valutazione del prodotto finale

In queste condizioni l'allievo:

- Osserva
- Interpreta
- Formula ipotesi
- Comunica
- Propone soluzioni

Detto in altri termini lo studente deve essere posto in una situazione in cui egli stesso deve trovare la strada per affrontare la tematica propostagli. La funzione dell'insegnante diventa quella di organizzatore del contesto e "facilitatore" del processo risolutivo. La condizione dello studente deve essere simile a quella del ricercatore quando deve dare un'interpretazione al fenomeno studiato. Non ha percorsi precostituiti e si trova davanti ad una mole di informazioni non

strettamente correlate tra di loro. Deve essere lui a comprendere quali dati sono significativi, quali ridondanti, quali fuorvianti. In tale contesto insegnamento, apprendimento e valutazione devono essere considerati un tutt'uno e non momenti separati. L'insegnante valuta, così, in modo diretto lo studente, in quanto, osservando le sue prestazioni riesce a rilevare ciò che ha appreso ed, anche, il suo processo di apprendimento. Questo facilita il lavoro del docente aiutandolo a risparmiare il poco tempo a disposizione da dedicare alle innumerevoli attività didattiche.

Il modello costruttivista presuppone, come già detto, che soluzioni diverse possono portare a risultati ugualmente validi. Secondo il costume diffuso in Italia questo crea alcune difficoltà in quanto sia i docenti che gli alunni desiderano una valutazione comparativa intesa ad evitare "disparità di trattamento". In altre parole è considerata un'ingiustizia valutare allo stesso modo prestazioni diverse. In questo senso alcuni prediligono le prove oggettive che aggirano tale problema. In realtà anche attraverso l'utilizzo delle prove autentiche è possibile confrontare i risultati, in quanto, pur essendo personali le soluzioni si possono quantificare le prestazioni attraverso le cosiddette "rubriche". Di seguito, solo per dare un'idea, un esempio grossolano di quella che potrebbe essere una rubrica utile a valutare le prestazioni, riguardanti la lettura, di uno scolaro della scuola primaria:

4. Legge il brano speditamente
3. Legge il brano stentatamente
2. Legge il brano sillabando
1. Non sa leggere

6. Proposte operative

In precedenza mi ero posto la domanda su come fare per ottenere percentuali elevate di laureati e di giovani che completino un ciclo di istruzione secondaria superiore senza abbassare i livelli delle prestazioni evitando, al contempo, di penalizzare i più meritevoli. Detto in altri termini: come far sì che nessuno resti escluso dal circuito educativo? Senza entrare nel merito delle cause che differenziano le caratteristiche individuali è palese che gli esseri umani non sono tutti uguali e che ognuno presenta connotati e potenzialità personali che lo contraddistinguono. E' dunque evidente che non tutti hanno le stesse capacità, le stesse attitudini, gli stessi interessi, etc. Appare opportuno, dunque, impostare le attività didattiche tenendo conto di tali differenze.

Le tesi costruttiviste tengono conto proprio di queste diversità. Risulta, quindi, utile rifarsi a tali concezioni per attuare quanto su esposto³.

³ Niente fa escludere la possibilità che la ricerca in didattica individui strategie più idonee.

Tutto ciò, comunque presuppone che a persone diverse si debbano dare attenzioni differenti. Bisogna, allora, superare il concetto etico secondo il quale si devono prestare a tutti le stesse attenzioni, ovvero fare parti uguali tra persone disuguali, sostituendolo con una diversa concezione etica secondo la quale: ad ognuno ciò che serve per fargli esprimere al massimo le proprie potenzialità.

Per fare un paragone mi viene in mente l'idea di ricercare un modo equo di distribuire l'acqua in tre bicchieri di grandezza diversa: uno piccolo, uno medio ed uno grande. Secondo concezioni, ancora diffuse, riguardanti l'equità bisognerebbe dare a tutti i bicchieri la stessa acqua. Ma quanta? Se forniamo a tutti l'acqua che entra nel bicchiere grande negli altri due trabocca, se si fornisce a tutti la quantità di acqua che entra nel bicchiere medio quello grande non si riempie del tutto e quello piccolo trabocca. Ancora, se si dà a tutti l'acqua che entra nel bicchiere piccolo gli altri due restano non del tutto pieni. Un modo equo a cui penso, dunque, non è quello di fornire a tutti la stessa acqua ma quello di far sì che siano tutti colmi evitando perdite di liquido e, nel contempo, evitando che alcuni bicchieri restino in parte vuoti, cosa che si rivelerebbe uno spreco di opportunità. Parlando fuor di metafora non è etico fare parti uguali tra persone disuguali ma dobbiamo fare in modo che tutti esprimano al massimo le proprie potenzialità superando l'illusoria concezione che nella scuola dell'inclusione tutti acquisiscano competenze uguali.

Questo, a parer mio, si può ottenere facendo in modo che gli argomenti vengano affrontati in modo tale da far raggiungere livelli di competenza progressivi individuando, quindi, gradi di approfondimento crescenti. In questo modo i più brillanti possono ottenere il massimo della preparazione senza, comunque, escludere gli altri che, così facendo, fruiscono, in ogni caso, di livelli di istruzione apprezzabili anche se più contenuti.

6.1 Proposta di lezione sulla Relatività ristretta

In merito a quanto su esposto ho preparato con PowerPoint una presentazione "animata" sulla relatività ristretta. Prima di continuare a scorrere queste righe invito ad osservarla accedendo all'indirizzo di seguito indicato: (Una volta entrati nel sito ed individuata l'icona sulla "Relatività ristretta", al fine di evidenziare le animazioni, spostare il puntatore sull'icona ed effettuare il download cliccando sulla **freccia che compare in alto a sinistra** dell'icona stessa. "Aprire", quindi, la presentazione e visualizzarla. Se non si clicca sulla freccia le immagini risultano statiche)
<https://drive.google.com/open?id=135O2Cza93D9Jb6VEEgGO4jjYQPrUIJbf>

Riprendo commentando la lezione:

senza ricorrere al formalismo matematico, con l'aiuto delle slide che vanno dalla 2 alla 8, lo studente viene accompagnato nella "costruzione" di un modello mentale

del caso studiato. Tale fase si compie quando l'allievo comprende che per i due osservatori, uno in "movimento" e l'altro "fermo", lo stesso fenomeno avviene in tempi diversi perché per i loro occhi il fotone percorre distanze differenti. Si raggiunge, così, il primo livello di comprensione che è paragonabile a quello che si ottiene quando si "colma" il bicchiere piccolo. A questo punto, senza presentare le slide successive, gli allievi vengono invitati, sotto la guida dell'insegnante, a cercare di modellizzare in termini geometrici lo studio del fenomeno. Si completa questa fase commentando le slide dalla 9 alla 14: si "colma", così, il bicchiere medio. Ancora, si invitano gli studenti a dare un significato fisico alle relazioni matematiche trovate, si commentano, quindi, le slide dalla 15 alla 19. Il bicchiere grande si "colma" quando lo studente riesce a padroneggiare le relazioni che intercorrono tra le formule matematiche ed il loro significato fisico.

6.2 Alternanza Scuola Lavoro

Per finire un breve cenno ad un'esperienza, fatta in una terza liceo scientifico, di Alternanza Scuola Lavoro (poi ridefinita Percorsi per le Competenze Trasversali e l'Orientamento). Consideravo queste attività come adempimenti che mi facevano perdere tempo e ostacolavano il regolare svolgimento dei "programmi". Mi sono chiesto come fare per aggirare questa difficoltà. Ho pensato, quindi, ad un accordo con una casa editrice di un giornale on-line. Il progetto consisteva nel far scrivere ai ragazzi degli articoli scientifici. Sono stati, così, prodotti elaborati su:

- Il metodo scientifico
- Sistema geocentrico e sistema eliocentrico
- Il caso Galilei
- La Gravità
- I satelliti

Al fine di realizzare tali articoli gli allievi sono stati guidati nello studio del metodo galileiano, delle leggi di Keplero, della gravitazione, delle coniche, etc. Specifici brani letterari sono stati proposti in Inglese dall'insegnante di lingua, mentre, il docente di Storia e Filosofia ha trattato gli stessi argomenti da un punto di vista storico-filosofico. In questo modo gli studenti, oltre a prendere confidenza con ambienti editoriali, hanno anche acquisito padronanza con gli aspetti disciplinari previsti nelle programmazioni dei dipartimenti. Il percorso effettuato è risultato, dunque, un'opportunità data agli studenti utile per prepararli alla vita reale piuttosto che qualcosa che distraeva dalle attività curriculari.

7. Conclusioni

Con questo mio intervento ho cercato di individuare il trend delle politiche didattiche mondiali e nazionali, senza, comunque, entrare nel merito degli effetti di tali politiche. Da quanto esaminato tale tendenza sembra essere irreversibile almeno in tempi non brevi. La sua attuazione, comunque, a mio avviso, presenta non poche contraddizioni, che sarebbe utile individuare, eventualmente in altre occasioni, al fine di superarle.

In ogni modo, quando ho fatto riferimento ai vari modelli pedagogici ho accennato al fatto che quello idealistico è tipico della cultura italiana, mentre gli altri provengono principalmente da culture straniere. Essendo convinto assertore della validità di quella "nostrana", di cui se ne riconosce il valore a livello internazionale, non vorrei rinunciare al nostro modo di agire senza però misconoscere i meriti di altri metodi di lavoro. Per questo motivo ritengo che bisognerebbe trovare una via italiana allo studio delle discipline scientifiche che coniughi la nostra tradizione con altre metodologie esotiche. Ho provato, dunque, a sperimentare in classe, quelle strategie che ho ritenuto utili alla messa in pratica di quanto individuato e che ho, così, qui proposto.

Bibliografia

- [1] <http://www.iclamon.org/wordpress/wp-content/uploads/2014/11/DichiarazionediSalamanca-1994.doc> ;
http://www.unesco.org/education/pdf/SALAMA_E.PDF
- [2] http://www.europarl.europa.eu/summits/lis1_it.htm#b
- [3] http://archivio.pubblica.istruzione.it/buongiorno_europa/allegati/Consiglio_Ministri_Istruzione2003.pdf
- [4] <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:2020:FIN:IT:PDF>
- [5] <http://www.parlamento.it/parlam/leggi/01003lc.htm>
- [6] L'Italia in 150 anni. Sommario di statistiche storiche 1861-2010. *ISTAT*. Anno 2011.
<https://www.istat.it/it/archivio/228440>
L'Italia in 150 anni. Sommario di statistiche storiche 1861-2010. Capitolo 7. Istruzione. *ISTAT*. Anno 2011. https://www.istat.it/it/files/2019/03/cap_7.pdf
- [7] Istat: in Italia istruzione sotto la media Ue, tra i diplomati il 25% di Neet. *Scuola 24*, Il Sole 24 ore – 16/07/2019.
http://scuola24.ilsole24ore.com/art/scuola/2019-07-15/istat-italia-istruzione-sotto-media-ue-i-diplomati-25percento-neet-174213.php?uuid=ACse5xY&refresh_ce=1
ISTAT Livelli di istruzione della popolazione e ritorni occupazionali. *Comunicato stampa ISTAT*. <https://www.istat.it/it/archivio/232117>

- [8] De Martino M. *Lezioni efficaci per la Scuola Secondaria di primo e secondo grado*, Edises.
- [9] Schiedi A. *La Valutazione nella Scuola. Aspetti, modelli ed esperienze*, Edises.
- [10] Carletti A., Varani A. *Didattica costruttivista*, Erickson.
- [11] Wiggins G., McTighe J. *La teoria di un percorso didattico per la comprensione significativa*, LAS-Roma.
- [12] Wiggins G., McTighe J. *La pratica di un percorso didattico per la comprensione significativa*, LAS-Roma.
- [13] Magliarditi G. (2015) Modelli giuridici, modelli pedagogici. Quale valutazione? *La Fisica nella Scuola*, Anno XLVIII, n. 3, pp. 131-138.
- [14] Magliarditi G. (2017) Le competenze, il costruttivismo e le prove esperte nella didattica della Fisica, *La Fisica nella Scuola*, Anno L, n. 3, pp. 113-124.
- [15] Magliarditi G. (2018) Le prove esperte, le competenze e la didattica costruttivista rivolta all'apprendimento della Fisica, *Quaderni di Ricerca in Didattica*, n.1, pp. 15-22, G.R.I.M. (Department of Mathematics, University of Palermo, Italy).
http://math.unipa.it/~grim/ORD_1_2018_Migliarditi.pdf
- [16] Censi D.L. (2017) Un esempio di prova esperta in Fisica, *La Fisica nella Scuola*, Anno L, n.1, pp. 33-37.
- [17] Comoglio M. *La valutazione autentica*.
http://www.apprendimentocooperativo.it/img/valutaz_autentica.pdf

Modelli computazionali dei meccanismi alla base delle funzioni cognitive

Michele Migliore

Istituto di Biofisica, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Palermo

E-mail: michele.migliore@cnr.it

Riassunto. Comprendere i meccanismi fisiologici delle funzioni e disfunzioni cerebrali avrebbe un enorme impatto scientifico, tecnico e sociale. Le scoperte sperimentali hanno dato e continuano a fornire importanti indizi a diversi livelli, dalle reazioni biochimiche subcellulari al comportamento. Tuttavia, la maggior parte dei meccanismi multilivello alla base dell'architettura cognitiva del sistema nervoso centrale sono ancora in gran parte sconosciuti o poco compresi. Ciò dipende principalmente dall'impossibilità pratica di ottenere registrazioni simultanee *in vivo* dettagliate da un insieme appropriato di neuroni, rendendo quasi impossibile decifrare e comprendere le proprietà e il comportamento complesso del sistema studiato. In questo intervento, illustrerò come si sta affrontando questo problema utilizzando modelli computazionali su larga scala di reti di neuroni implementati in modo molto realistico. Si presenteranno e si discuteranno i principali risultati e le tecniche utilizzate per progettare e sfruttare le possibilità offerte da questi modelli, con l'obiettivo principale di scoprire i meccanismi alla base delle funzioni cognitive e aiutare lo sviluppo di terapie innovative per il trattamento delle malattie cerebrali.

Abstract. Understanding the physiological mechanisms of brain functions and dysfunctions would have a huge scientific, technical and social impact. Experimental discoveries have given and still provide important clues at different levels, from subcellular biochemical reactions to behaviour. However, most of the multilevel mechanisms underlying the cognitive architecture of the central nervous system are still largely unknown or poorly understood. This is mainly due to the practical impossibility of obtaining simultaneous detailed *in vivo* registrations from an appropriate set of neurons, making almost impossible to decipher and

understand the complex properties and behaviour of the studied system. In this contribute, how this problem is being addressed by using large-scale computational models of neuron networks implemented in a very realistic way will be presented. The main results and techniques used to design and exploit the possibilities offered by these models will be presented and discussed, with the main purpose of discovering the mechanisms underlying cognitive functions and helping the development of innovative therapies for the treatment of brain diseases.

Tra le grandi sfide scientifiche che saranno affrontate nei prossimi anni c'è quello di simulare un intero cervello umano, attraverso l'uso di modelli matematici a diverse scale di integrazione [1]. La realizzazione di un progetto simile richiede ovviamente la soluzione di moltissimi problemi, sia tecnici che concettuali. Uno di questi, che affronteremo in quest'articolo, è correlato alle limitazioni tecniche dei metodi sperimentali attualmente utilizzati per studiare il cervello nei suoi vari livelli di integrazione. Nel nostro laboratorio ci occupiamo di sviluppare modelli matematici di sistemi cerebrali che rendano possibile il collegamento tra le proprietà ed i meccanismi cellulari microscopici a livello di singolo neurone, con le funzioni cerebrali macroscopiche complesse, quali memoria e apprendimento, osservate a livello macroscopico. Quest'approccio permette, per esempio, di riprodurre in modo molto realistico i risultati osservati sperimentalmente. Questo consente non solo la comprensione di esperimenti con risultati poco chiari, ma anche di predire o suggerire nuovi esperimenti che possano spiegare meglio i meccanismi cellulari coinvolti. Le conseguenze possono essere particolarmente importanti per indirizzare la ricerca in questo campo ed identificare nuove linee di intervento terapeutico per diverse malattie mentali. Alla base delle nostre ricerche c'è la consapevolezza che i circuiti cerebrali, che trasformano un input sensoriale in un segnale neuronale che possa essere immediatamente classificato, codificato, riconosciuto, ed eventualmente memorizzato, sono tuttora piuttosto confusi e misteriosi. Noi usiamo un approccio modellistico *bottom-up* che potrebbe dare un ausilio fondamentale alla soluzione di questo tipo di problemi, usando tecniche avanzate di simulazione. Nello studio di questo tipo di problemi è essenziale individuare un sistema modello da investigare. Per ottenere il miglior risultato possibile, il sistema scelto dovrebbe avere diverse caratteristiche particolari: 1) avere un'organizzazione funzionale relativamente semplice, 2) essere composto da un numero relativamente piccolo di neuroni, 3) essere ampiamente studiato sperimentalmente, 4) dev'essere possibile il confronto diretto dei risultati

sperimentali su specie diverse, inclusi gli umani, 5) essere coinvolto nelle funzioni cerebrali più elevate. L'unico sistema cerebrale che ha tutte queste caratteristiche è il bulbo olfattivo. E questo è il sistema sul quale abbiamo concentrato i nostri sforzi.

Il bulbo olfattivo (Fig.1, sinistra) è una regione cerebrale con caratteristiche che lo rendono particolarmente adatto allo studio ed alla modellizzazione delle funzioni cognitive di alto livello, quali memoria, apprendimento, e riconoscimento (di odori, in questo caso). Una caratteristica importante del bulbo olfattivo, per i nostri scopi, è la dimensione relativamente ridotta rispetto ad altre regioni del cervello. Le *mitral cells* (i neuroni principali, eccitatori) sono circa 50000 e le *granule cells* (piccoli neuroni inibitori) sono intorno al milione. Le *mitral cells* proiettano i propri dendriti distali (chiamati *tuft*) in zone morfologicamente ben definite, chiamate glomeruli (Fig.1, destra). Ciascun glomerulo è composto da tuft di 20-40 mitral cells e da circa 2000 assoni provenienti da tutti i neuroni sensoriali olfattivi che esprimono lo stesso recettore. Ci sono circa 1800 glomeruli, distribuiti sulla superficie del bulbo olfattivo.

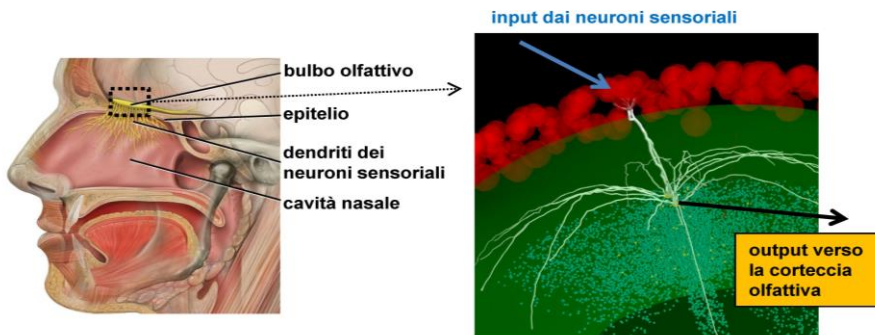


Figura 1. (sinistra) Rappresentazione schematica della posizione del bulbo olfattivo all'interno del cervello; immagine adattata da http://cnx.org/content/m44764/latest/Figure_36_03_01.jpg; (destra) rappresentazione della struttura interna del nostro modello di bulbo olfattivo: glomeruli (in rosso), Mitral cells (in bianco), granule cells (punti cyan).

Un'altra caratteristica importante è la sua organizzazione funzionale relativamente semplice, che può essere descritta schematicamente (Fig.1, destra) con una semplice sequenza di passi con i quali: (a) un odore attiva i recettori presenti sui neuroni sensoriali olfattivi, gli assoni dei quali attivano (b) le mitral cells nel bulbo olfattivo che, dopo un'interazione con le granule cells, (c) mandano il loro output alla corteccia olfattiva. Entro un tempo massimo di 150 ms (praticamente il tempo necessario per uno "sniff") l'organismo è in grado di reagire (o no) all'odore. Il bulbo olfattivo di un ratto è contenuto in un volume di circa

2mm³. Come vedremo, sistemi di queste dimensioni sono alla portata degli attuali supercomputer disponibili.

Usando metodi e tecniche che sono attualmente di frontiera nel campo delle neuroscienze computazionali, noi abbiamo implementato un modello computazionale in 3D del bulbo olfattivo (Fig.2A). Lo scopo principale è stato quello di ottenere, a partire dalle informazioni sperimentali ottenute per i vari livelli di integrazione del segnale, un sistema con il quale studiare i meccanismi cellulari più importanti, con i quali il bulbo olfattivo ripulisce, organizza e codifica un segnale in ingresso (un odore) in modo da semplificare il riconoscimento (e l'eventuale apprendimento) immediato da parte della corteccia. Utilizzando tutte le informazioni sperimentali disponibili, per esempio la struttura morfologica e topologica delle popolazioni di neuroni del bulbo olfattivo e le mappe di attivazione degli input in presenza di una varietà di odori, i risultati che potremo ottenere dal modello saranno direttamente confrontabili con quelli ottenuti sperimentalmente sia in laboratorio che *in vivo*. Sarà quindi possibile sfruttare i risultati delle simulazioni non solo per capire in modo più dettagliato il funzionamento del cervello, ma anche di predire nuovi sviluppi sperimentali o applicativi.

Per implementare il modello siamo partiti da risultati ottenuti *in vivo*. In presenza di diversi odori "naturali", quali caffè, cipolla, kiwi, banana, etc, il segnale neuronale generato dai recettori sensoriali attiva molte zone del bulbo (chiamate glomeruli) in modo diffuso, ma con caratteristiche e distribuzione uniche per ogni odore. Il laboratorio del Prof. Alan Carleton (Università di Ginevra) ci ha fornito le mappe di attivazione in presenza di diversi odori naturali per 128 glomeruli [2] presenti sulla parte dorsale del bulbo olfattivo (Fig.2B). Noi abbiamo riprodotto la loro distribuzione spaziale nel modello, implementato con un ellissoide di dimensioni corrispondenti a quelle osservate negli animali da laboratorio (ratti, nel nostro caso).

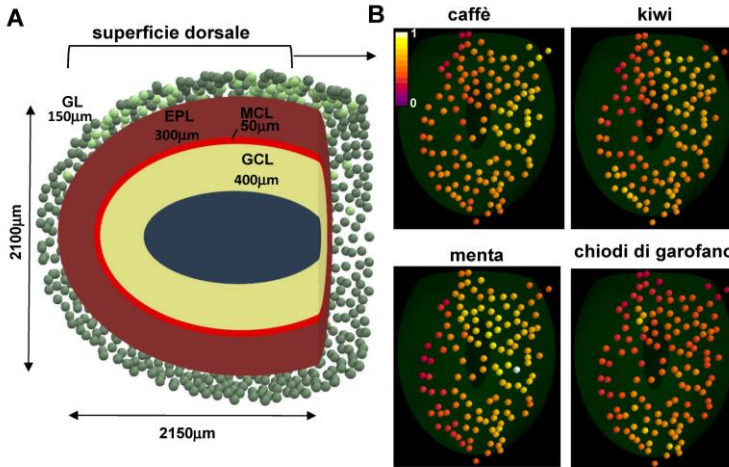


Figura 2. (A) Modello completo del bulbo e della sua struttura interna: GL, glomerular layer; MCL, mitral cell body layer; EPL, external plexiform layer; GCL, granule cell layer. L'intero volume è stato renderizzato nello spazio $\{x,y,z\}$ con un'ellissoide definito dall'equazione $(x-50)/1050)^2+(y-12.75)/1200)^2+(z/1050)^2=1$, troncato lungo l'asse principale a $2150 \mu\text{m}$; (B) mappa di attivazione normalizzata per 128 glomeruli distribuiti sulla superficie dorsale del bulbo, in presenza di odori diversi.

Il passo successivo è stato quello di progettare ed implementare un algoritmo generale per creare le *mitral cells*. Queste ultime sono neuroni con diversi dendriti e ramificazioni piuttosto lunghe (circa 1 mm) che si sviluppano all'interno del bulbo ed interagiscono con i dendriti delle *granule cells* attraverso sinapsi reciproche. Poiché questi neuroni sono fondamentali per le operazioni computazionali svolte dal bulbo, è stato necessario porre molta attenzione alla loro modellizzazione. Ci siamo quindi rivolti al Prof. Kensaku Mori (University of Tokio), responsabile dell'unico laboratorio finora in grado di ottenere alcune ricostruzioni complete in 3D di *mitral cells* (un processo particolarmente lungo e delicato a causa della particolare morfologia di questi neuroni), il quale ci ha fornito i file di alcune delle loro ricostruzioni [3].

Dopo aver analizzato statisticamente le proprietà morfologiche principali di questi neuroni, quali la direzione di crescita, la lunghezza dei dendriti, e la probabilità di biforcarsi, abbiamo creato un algoritmo che permettesse di sintetizzare un numero infinito di *mitral cells* con proprietà statisticamente indistinguibili da quelle reali ed in grado di seguire la forma del bulbo (Fig.3).

```
Set Olfactory Bulb size, layers' boundary, and active glomeruli location;  
Obtain NEURON files of full experimental MC 3D morphologies;  
Rotate morphologies along principal axis;  
Resample dendritic branches in 20µm segments;  
  
Calculate range of LD, and distribution for BL, PL, BO,  $\Delta\theta$ , and  $\Delta\phi$  from data;  
Find parameters for distribution functions;  
  
FOR each MC:  
  Generate soma shape and location on MCL;  
  Generate # of LD and direction of first segment of LD and AD;  
  Create a list (L) of tip dendrites;  
  ITERATE N times AND while L is not empty DO:  
    FOR each element in L:  
      test extension of a dendrite for M times:  
        generate new segment (direction and diam);  
        IF inside the boundary:  
          update L;  
          break;  
        IF extension fails:  
          delete element from L;  
        ELSE IF can bifurcate:  
          generate new tips and add to L;  
        ELSE IF apical dend is within GCL:  
          generate first segment of TDs and add to L;
```

Abbreviations: MC, mitral cell; LD, lateral dendrites; BL, branch length; PL, path length; BO, branch order; MCL, mitral cell layer; AD, apical dendrite; GCL, granule cell layer; TD, tuft dendrites; N=1000; M=10.

Figura 3. Pseudo codice utilizzato per la sintetizzazione delle mitral cells che compongono il nostro modello.

Le morfologie ottenute sono state anche utilizzate come base per creare i file nel formato necessario alla stampa in 3D dei neuroni (Fig.4).

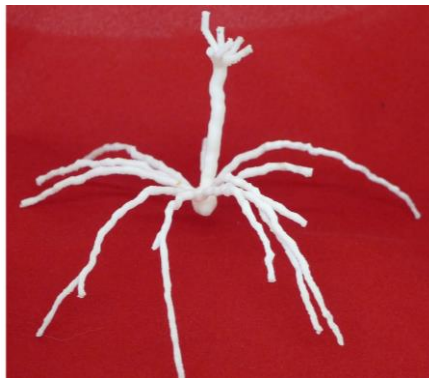


Figura 4. Il primo modello di neurone (una mitral cell) mai stampato in 3D;
<http://news.yale.edu/2013/11/11/knee-neuron-offspring-yale-s-3d-printers-multiply>

Le *granule cells*, neuroni morfologicamente molto più compatti, sono state modellate in modo più semplice con un soma sferico, un singolo dendrita ed un gruppo di sinapsi connesse in modo random con i dendriti delle mitral cells più vicini (per una discussione più dettagliata vedi rif. [4]). I modelli matematici delle proprietà elettrofisiologiche di tutti i neuroni e delle sinapsi coinvolte sono stati implementati in accordo con i dati sperimentali disponibili, seguendo il formalismo delle equazioni di Hodgkin e Huxley, sviluppato negli anni '50 per descrivere la generazione dei potenziali d'azione dei neuroni, e tuttora valido (Hodgkin e Huxley, 1952).



Figura 5. la sala macchine del CINECA (Bologna), con il supercomputer utilizzato per le simulazioni (MARCONI). Maggiori informazioni sul sistema possono essere trovate sul sito ufficiale <http://www.cineca.it>

L'insieme di tutti i neuroni e delle loro connessioni è composto da un sistema di circa 30 milioni di equazioni differenziali ordinarie non lineari, risolto numericamente da un programma (NEURON, [5]) creato appositamente per la realizzazione di simulazioni realistiche di neuroni. Naturalmente, un sistema di questa complessità necessita di un supercomputer parallelo. Noi usiamo regolarmente il sistema del CINECA (Fig.5) sui quale abbiamo installato sia NEURON che *python*, integrati in un unico programma di simulazione parallelo. Le simulazioni girano con un'efficienza maggiore del 98% utilizzando 2048 processi (per le note tecniche sull'approccio utilizzato per massimizzare l'efficienza della simulazione in parallelo vedi rif. [4]) Una simulazione tipica, un odore presentato per 40 secondi, richiede circa 10 ore di tempo macchina e genera 10Gb di output.

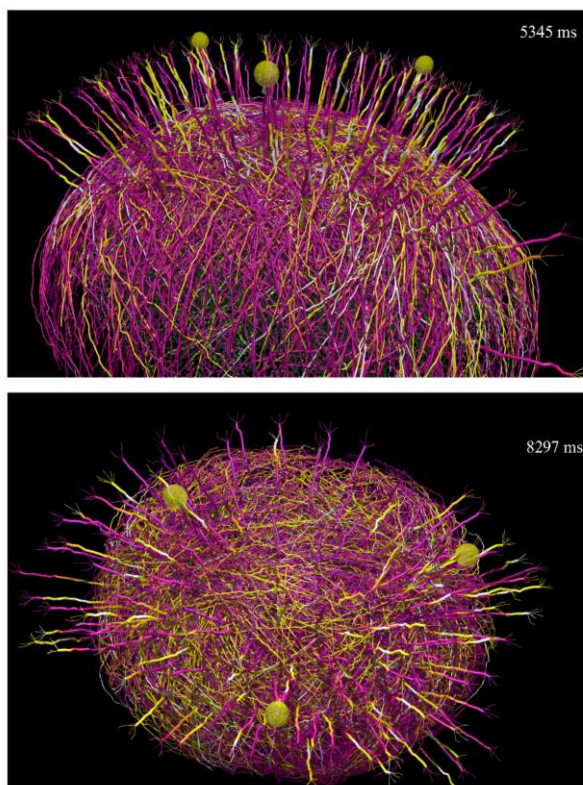


Figura 6. alcuni fotogrammi che illustrano l'attività della rete durante la presentazione di un odore; i fotogrammi provengono da un filmato ottenuto con i dati generati da una simulazione. Un tipico filmato completo in full HD è scaricabile dal database pubblico ModelDB (<http://senselab.med.yale.edu/ModelDB/acc.n.151681>).

Per visualizzare ed analizzare i risultati abbiamo poi creato un set di programmi utilizzando software di dominio pubblico. In particolare, è stato utilizzato l'ambiente *Mayavi* (www.enthought.com) per la visualizzazione in tempo reale del sistema e dei risultati di una simulazione.

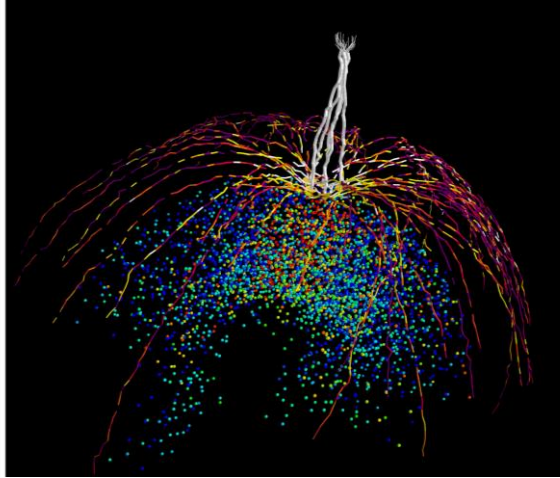


Figura 7. Rappresentazione della configurazione sinaptica di 5 mitral cell appartenenti allo stesso glomerulo alla fine di una simulazione della presenza di un odore per 20 sec; l'intensità delle connessioni sinaptiche generate dalla presenza dell'odore è rappresentata sia dal colore delle granule cell (sfere sotto i dendriti delle mitral cell, colorate dal blu al rosso) che dal colore dei dendriti delle mitral cell (colori dal magenta al bianco).

Per la generazione di filmati che illustrassero la dinamica, la propagazione dei segnali, e l'auto-organizzazione della rete, abbiamo usato il programma *ffmpeg* (www.ffmpeg.org) per montare una serie di singoli fotogrammi realistici, di qualità full HD, generati adattando opportunamente il programma *POVRay* (www.povray.com). Due fotogrammi di esempio sono mostrati in Figura 6. Un esempio dei risultati preliminari che abbiamo ottenuto è mostrato in Figura 7, ed è il risultato della configurazione della rete sinaptica alla fine di una simulazione di test con 5 mitral cells appartenenti allo stesso glomerulo, attivato per 20 secondi. Particolarmente evidenti sono la formazione di sinapsi più forti (sfere in rosso) sotto i soma delle mitral cells (la zona da dove il segnale di output del bulbo viene trasmesso alla corteccia, cf. Fig.1, destra), e la forte inibizione generata dalle *granule cell* sui dendriti delle *mitral cell* (dendriti colorati dal giallo al bianco).

Da un punto di vista più generale, questo tipo di configurazione sinaptica è generata in base a come ciascun odore attiva i vari glomeruli, e può variare nel tempo in base alle esperienze olfattive. Ne consegue quindi che la configurazione sinaptica del bulbo olfattivo di ogni individuo può essere considerata come l'espressione della storia passata degli odori ai quali si è stati esposti, e ne determina il modo in cui si percepiscono sia gli odori conosciuti che quelli nuovi. La configurazione sinaptica a seguito della presentazione di alcuni odori naturali a partire da una rete mai esposta ad altri odori è mostrata in Figura 8.

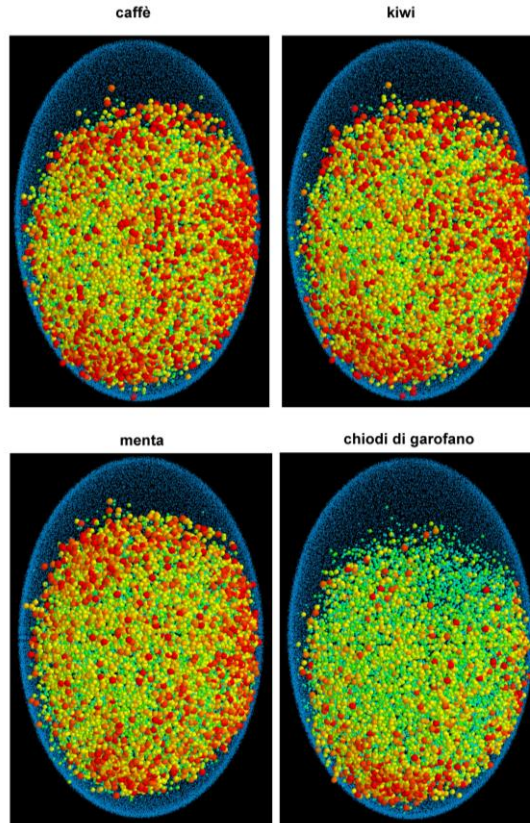


Figura 8. Rappresentazione della configurazione sinaptica nel modello di bulbo olfattivo alla fine di una simulazione della presenza di un odore per 40 sec; l'intensità delle connessioni sinaptiche generate dalla presenza di ciascun odore è rappresentata dal colore e dalle dimensioni delle granule cell (sfere colorate dal blue al rosso di diametro crescente). In questo caso, gli odori sono stati presentati tutti per lo stesso tempo ed alla stessa concentrazione, partendo in ogni caso da una rete mai esposta ad alcun odore.

Alcune considerazioni finali danno un'idea delle possibili conseguenze applicative del nostro approccio di riprodurre in modo realistico un sistema cerebrale. Nel bulbo olfattivo l'informazione segue un flusso ben preciso: l'input entra dai glomeruli, viene codificato sotto forma di potenziali d'azione, elaborato mediante l'interazione fra le *mitral* e le *granule cell*, ed inviato alla corteccia attraverso gli assoni delle *mitral cell*, dove gli odori presenti in input vengono riconosciuti. Si può immaginare che, dopo averne capito il ruolo svolto nella modulazione del segnale, il sistema si presta bene ad essere imitato

algoritmicamente o con una componente hardware appropriata. Le applicazioni quindi spazierebbero dall'ambito puramente informatico ed elettronico a quello biomedico. Per esempio, fra le funzioni del bulbo olfattivo vi sono quelle di *pattern completion* e *pattern recognition*. Quest'ultima si è rivelata invariante rispetto alla concentrazione degli odoranti, particolarmente robusta rispetto all'incompletezza dei pattern di stimolazione [6], e fortemente discriminante in presenza di odori che attivano glomeruli in comune [7]. Inoltre, la distribuzione temporale dei potenziali d'azione generati dalle *mitral cell* evidenzia una progressiva decorrelazione durante la presentazione di odori. La proiezione di questi in uno spazio in tre dimensioni, utilizzando la *principal component analysis*, ha mostrato anche in questo caso stabilità ed invarianza rispetto alla concentrazione degli odori in input [8].

In conclusione, una volta capite le relazioni funzionali che intercorrono fra le varie componenti del bulbo olfattivo, si potrebbero progettare nuovi tipi di reti o circuiti artificiali ispirati al suo funzionamento. Le applicazioni andrebbero da nuovi algoritmi di classificazione o proiezione dei dati, all'implementazione di nuovi codici a correzione d'errore, a sistemi per facilitare il clustering dei dati.

Bibliografia

- [1] Markram, H., (2013). The Human brain project, *Sci Am.* 306:50-5.
- [2] Vincis, R. Gschwend, O. Bhaukaurally, K. Beroud, J. and Carleton, A. (2012). Dense representation of natural odorants in the mouse olfactory bulb. *Nat Neurosci.* 15, 537-539.
- [3] Igarashi, K.M. Ieki, N. and An, M. Yamaguchi, Y. Nagayama, S. Kobayakawa, K. Kobayakawa, R. Tanifuji, M. Sakano, H. Chen, W.R. and Mori, K. (2012). Parallel mitral and tufted cell pathways route distinct odor information to different targets in the olfactory cortex. *J Neurosci.* 32, 7970-7985.
- [4] Migliore, M. Cavarretta, F. Hines, M.L., Shepherd G.M. (2014). Distributed organization of a brain microcircuit analyzed by three-dimensional modeling: the olfactory bulb, *Front Comput Neurosci.* 8:50.
- [5] Hines, M. and Carnevale, N.T. (1997). The NEURON simulation environment. *Neural Comp.* 9, 1179-1209.
- [6] Kaplan, B.A. And Lansner, A. (2014). A spiking neural network model of self-organized pattern recognition in the early mammalian olfactory system. *Front Neural Circuits.* 7:8:5.
- [7] Stettler, D.D. and Axel, R. (2009). Representations of odor in the piriform cortex. *Neuron.* 63, 854-864.
- [8] Niessing, J. and Friedrich RW. (2010). Olfactory pattern classification by discrete neuronal network states. *Nature.* 465, 47-52.

Organismi modello in biologia vegetale: esempi per la ricerca e la didattica

Elisabetta Oddo

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Biologiche, Chimiche e Farmaceutiche, Università degli Studi di Palermo

E-mail: elisabetta.oddo@unipa.it

Riassunto. Gli organismi modello hanno rappresentato in biologia vegetale dei sistemi fondamentali per delucidare importanti processi fisiologici comuni al regno delle piante. I più significativi organismi modello vegetali spaziano nella loro diversità dall'alga unicellulare *Chlamydomonas*, modello principale per lo studio della fotosintesi clorofilliana, alla piccola angiosperma dicotiledone *Arabidopsis thaliana*, passata da insignificante infestante alla specie forse più citata nella letteratura scientifica sulla biologia molecolare delle piante. Molte altre specie sono oggetto di studio della fisiologia vegetale, e sono quindi "organismi sperimentali", ma solo alcune tra queste possono essere definite "organismi modello", in base ad alcune particolari caratteristiche come ad esempio la semplicità di coltivazione, le piccole dimensioni del genoma e la facilità di trasformazione mediante tecniche di ingegneria genetica. Per indagare sui meccanismi fisiologici e molecolari di particolari gruppi di piante, alla lista di organismi modello vegetali possiamo aggiungere ancora il granturco, rappresentante delle monocotiledoni con metabolismo fotosintetico C_4 , la *Medicago truncatula*, una leguminosa che ha permesso di approfondire gli studi sulle simbiosi con i batteri azoto-fissatori, e la *Nicotiana tabacum*, su cui si sono riversati per decenni i fondi di ricerca provenienti dalle multinazionali del tabacco. Le caratteristiche che fanno di una specie vegetale un buon organismo modello sono in parte anche quelle che la rendono un organismo particolarmente adatto alla sperimentazione didattica a tutti i livelli.

Abstract. Model organisms play a fundamental role in plant biology, aiding in investigating important physiological processes common to the plant kingdom. The most significant plant model

organisms range in diversity from the unicellular alga *Chlamydomonas*, main model for the study of oxygenic photosynthesis, to the tiny dicotyledonous angiosperm *Arabidopsis thaliana*, passed from an insignificant weed to the perhaps most cited species in the scientific literature in the field of plant molecular biology. Many other species are studied in plant physiology, and are therefore "experimental organisms", but only a few of these are actually "model organisms", due to specific characteristics such as easy cultivation, small genome size and possibility of being genetically engineered. To investigate the physiological and molecular mechanisms of particular groups of plants, we can add more species to the list of model organisms, such as maize, representing monocots with C₄ photosynthetic metabolism, *Medicago truncatula*, from the legume family, which has helped investigate symbiosis with nitrogen fixing bacteria, and *Nicotiana tabacum*, which for many years received funding from the tobacco industry. The characteristics that make a plant species a good model organism are also those that make it optimal material for teaching resources at all levels.

1. Organismi modello del regno vegetale

Gli organismi modello hanno rappresentato in biologia vegetale dei sistemi fondamentali per delucidare importanti processi fisiologici comuni al regno delle piante. La grande biodiversità vegetale, con più di 370000 specie descritte [1] appartenenti a oltre 17000 generi e 640 famiglie, ha condotto ad individuare diverse specie modello [2]. La letteratura scientifica nell'ambito della fisiologia vegetale riporta studi su centinaia di specie, che rappresentano quindi organismi sperimentali. Ma cosa distingue, nel mondo vegetale, un organismo sperimentale da un organismo modello? Un organismo modello ideale deve avere alcune caratteristiche, come ad esempio le piccole dimensioni e la semplicità di coltivazione in condizioni controllate, che permette di mantenere un adeguato numero di esemplari in spazi gestibili; la brevità del ciclo vitale, che permette di ottenere in un tempo contenuto più generazioni; le dimensioni ridotte del genoma, per facilitare il sequenziamento e l'identificazione dei geni; la facilità di trasformazione mediante tecniche di ingegneria genetica, che permette di studiare la funzione di determinati geni. Un'altra importante caratteristica degli organismi modello è che permettano di delucidare processi e meccanismi funzionali che risultino essere comuni trasversalmente tra specie diverse.

Procedendo lungo la linea dell'evoluzione della vita vegetale, incontriamo una grande variabilità di forme: dalle alghe verdi unicellulari ai muschi, alle felci, alle gimnosperme e angiosperme, con una grande diversità sia di dimensioni che di ambienti. Questo ha portato alla necessità di individuare più organismi modello, utili per investigare aspetti differenti della biologia vegetale. Un aspetto comune a tutti gli organismi vegetali, che ne rappresenta anche la definizione di base, è quella di essere tutti organismi eucarioti, autotrofi, capaci di convertire l'energia del sole in energia chimica mediante il processo di fotosintesi. Per lo studio di questo processo è stato quindi possibile utilizzare i più semplici tra gli organismi modello vegetali: le alghe verdi unicellulari.

2. Le alghe unicellulari

Gli esperimenti chiave che hanno portato alla scoperta e descrizione del ciclo biochimico di organizzazione del carbonio sono quelli che Calvin, Benson e collaboratori hanno portato avanti su *Chlorella*. Le caratteristiche che fanno di *Chlorella* un importante modello sperimentale sono tra l'altro la semplicità del ciclo cellulare e la velocità di crescita [3], che permette di ottenere in pochi giorni colture in sospensione molto concentrate (Fig. 1). Somministrando anidride carbonica marcata con il ^{14}C a colture in sospensione di queste alghe, il gruppo di Calvin riuscì ad identificare i diversi passaggi e prodotti della fissazione del carbonio, ottenendo risultati che valsero al gruppo l'assegnazione del Premio Nobel nel 1961 [4].

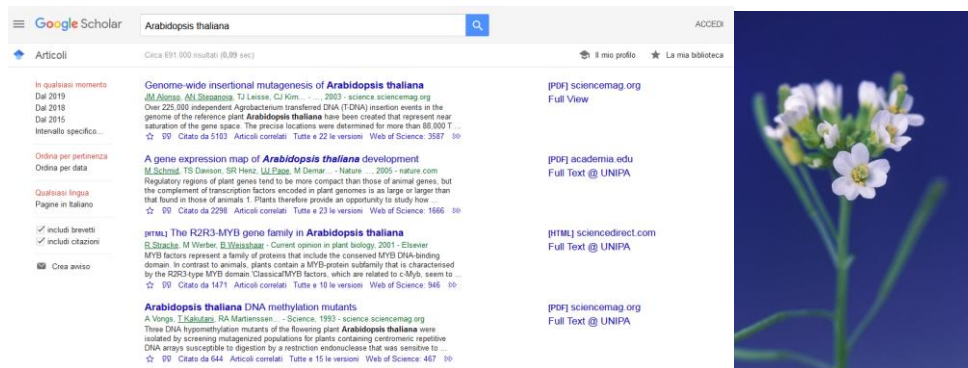


Figura 1. Kit per la coltura di alghe verdi unicellulari come *Chlorella* sono facilmente reperibili sul mercato on-line.

Un'altra alga verde unicellulare utilizzata come modello è *Chlamydomonas*, che in aggiunta alle caratteristiche già viste per *Chlorella* ha permesso anche l'isolamento di numerose linee mutanti e si presta molto bene agli studi di tipo molecolare [5, 6]. Diversi aspetti delle reazioni della fase luminosa della fotosintesi sono stati studiati su questo modello [7], oltre a meccanismi di riconoscimento cellula-cellula, modalità di percezione della luce e aspetti del controllo del ciclo cellulare.

3. Modelli più complessi: le piante terrestri

Quando gli organismi vegetali hanno lasciato l'ambiente acquatico ed hanno cominciato a colonizzare le terre emerse, si è necessariamente assistito ad un aumento della complessità dell'organizzazione degli individui, con la comparsa di tessuti ed organi specializzati, l'aumento delle dimensioni, l'esigenza di mettere in atto meccanismi funzionali che consentissero di vivere e riprodursi con modalità nuove e più complesse. Questo ha condotto alla ricerca di nuovi modelli, che permettessero di investigare i processi più complessi, seppure nelle forme biologiche più semplici possibili. Questo ha portato all'affermazione nel mondo scientifico dell'organismo modello vegetale per eccellenza: *Arabidopsis thaliana* (Fig. 2).



The image shows a Google Scholar search interface for the keyword "Arabidopsis thaliana". The search results page displays approximately 691,000 results. Several search results are visible, including:

- Genome-wide insertional mutagenesis of *Arabidopsis thaliana*** by JM Alonso, AN Stepien, TJ Leister, CJ Kim, et al. (2003). Science. sciencemag.org. Full View.
- A gene expression map of *Arabidopsis thaliana* development** by M Schmid, TS Dawson, SR Herz, JJ Engel, M Demar, et al. (2005). Nature. nature.com. Full Text @ UNIPA.
- The R2R3-MYB gene family in *Arabidopsis thaliana*** by S Stracke, M Wieber, B Wassenaar, et al. (2001). Elsevier. sciencedirect.com. Full Text @ UNIPA.
- Arabidopsis thaliana* DNA methylation mutants** by A Voropai, L Sabatini, OA Marenzeller, et al. (1993). Science. sciencemag.org. Full Text @ UNIPA.

On the right side of the search results, there is a photograph of a flowering Arabidopsis thaliana plant, showing small white flowers on a green stem.

Figura 2. Una ricerca bibliografica sul web con la parola chiave “*Arabidopsis thaliana*” riporta circa 691.000 risultati. Public Domain Images.

Questa specie, appartenente alla famiglia delle Brassicaceae, ha tutte le caratteristiche necessarie per essere un modello ideale: piccole dimensioni, breve ciclo vitale (circa sei settimane dalla germinazione alla fruttificazione), facilmente coltivabile in spazi ristretti, piccolo genoma aploide ($n=5$, circa 135 Mb) che contiene circa 20000 geni, ottima risposta alle tecniche di trasformazione genica

[8], che ha portato ad ottenere negli anni più di mille linee mutanti. Il sequenziamento del genoma è iniziato nel 1996, ed il completamento e la pubblicazione nel 2000 della prima sequenza genomica completa di una pianta a fiore hanno rappresentato un grande passo avanti per le biotecnologie. Uno degli obiettivi successivi per la comunità scientifica internazionale che si occupa di *Arabidopsis* è quello di completare l'identificazione della funzione di tutti i geni, che in parte è ancora ipotizzata o ignota [9, 10]) e di costruire modelli della complessa rete di interazioni molecolari e fisiologiche a livello di sistema [11]. L'uso di *Arabidopsis* come sistema modello in un certo senso varca anche i confini del nostro pianeta: la Stazione Spaziale Internazionale della NASA tra i diversi sistemi modello adottati per investigare la biologia della vita nello spazio, ha utilizzato *Arabidopsis* in un progetto mirato ad investigare le risposte a livello biomolecolare e di espressione genica in condizioni di microgravità [12].

Ogni campo di investigazione della fisiologia vegetale ha poi degli organismi modello "preferiti". Ad esempio, *Nicotiana tabacum* è stata molto utilizzata – anche grazie alla disponibilità di fondi delle multinazionali del tabacco – per studiare alcune risposte della pianta all'esposizione a diverse quantità e qualità di luce. Attraverso il fitocromo, un fotorecettore che cambia di conformazione assorbendo luce nella banda del rosso a 660 o 730 nm, le piante sono in grado di determinare la lunghezza relativa del giorno e della notte, il susseguirsi delle stagioni, la presenza di vegetazione sovrastante, e modificano il loro sviluppo di conseguenza. Uno stato di ombreggiamento da parte di altre piante viene percepito grazie ad un aumento relativo della luce rosso-lontana rispetto a quella rossa, portando ad un allungamento del fusto mirato a superare le piante circostanti che competono per la luce necessaria a svolgere il processo fotosintetico (Fig. 3). Il tabacco è anche un modello di grande interesse per le colture in vitro di tessuti vegetali e per la suscettibilità delle piante a malattie virali [13].



Figura 3. Pianta di *Nicotiana tabacum*. Public Domain Images.

Arabidopsis e tabacco sono due rappresentanti delle piante a fiore appartenenti alle dicotiledoni, mentre per lo studio delle caratteristiche peculiari delle monocotiledoni, in particolare di quelle che portano avanti un meccanismo fotosintetico C_4 (Fig. 4), il sistema modello è rappresentato dal granturco, *Zea mays* [14]. Il mais, come la canna da zucchero e numerose altre piante erbacee tropicali, forma come primo prodotto della fissazione del carbonio un acido a 4 atomi di carbonio, l'acido ossalacetico. Le foglie di queste piante mostrano un'anatomia inusuale (anatomia Kranz) che coinvolge due diversi tipi di cellule contenenti cloroplasti: le cellule del mesofillo, dove avviene la prefissazione del carbonio in acido ossalacetico, e le cellule della guaina del fascio, disposte a corona intorno alle nervature, dove avviene la fissazione definitiva del carbonio attraverso il ciclo di Calvin-Benson. Le piante che fotosintetizzano con il ciclo C_4 sono particolarmente efficienti, sia in termini di produttività che di utilizzo dell'acqua, e questa caratteristica ha spinto i ricercatori a studiare le basi genetiche di questo processo con l'obiettivo di potere ingegnerizzare questo tratto in altre specie di interesse agronomico che hanno solamente la fotosintesi C_3 .

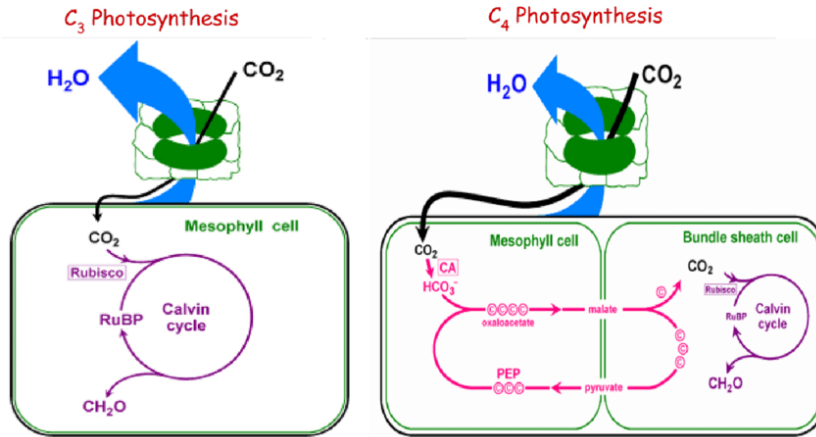


Figura 4. Schema di confronto tra i cicli fotosintetici C₃ e C₄ [15].

Gli studi applicativi sono sempre stati i principali motori della ricerca sugli organismi modello. Una antichissima conoscenza empirica è quella della rotazione delle colture con le leguminose, a causa della loro capacità di arricchire il terreno di composti azotati disponibili per le colture successive, grazie alla capacità di instaurare simbiosi tra le radici e microrganismi in grado di fissare l'azoto atmosferico. L'organismo modello per lo studio del rapporto simbiotico tra leguminose e batteri azoto-fissatori è la piccola *Medicago truncatula* [16]. Fu proposta come organismo modello nel 1990, con l'obiettivo di studiare la genetica molecolare dell'interazione simbiotica tra i rizobi e le leguminose. Così come per *Arabidopsis*, si tratta di una specie con un genoma aploide ($n=8$) relativamente piccolo e con un ciclo vitale dalla germinazione alla fruttificazione di circa quattro mesi. Il sequenziamento del suo genoma di circa 375 Mb è iniziato nel 2002 [17] e nel 2011 è stata pubblicata una prima bozza della sequenza che comprendeva circa il 94% dei geni [18].

I sistemi modello esaminati finora sono tutti piante erbacee, ma anche tra gli alberi è stata scelta una specie modello utile per studiare i processi legati all'accrescimento secondario. Il modello più utilizzato per le specie arboree è il pioppo, che presenta velocità di crescita piuttosto elevate. Il suo genoma aploide ($n=19$) contiene circa 35000 geni, ed ha una dimensione di circa 500 Mb [19]. Il sequenziamento del genoma è stato completato nel 2006, e gli studi principali su questa specie hanno riguardato la regolazione dei processi di lignificazione e di formazione delle pareti secondarie.

4. Organismi modello e didattica

Le caratteristiche che fanno di una specie vegetale un buon organismo modello sono in parte anche quelle che la rendono un organismo particolarmente adatto alla sperimentazione didattica a tutti i livelli. Soprattutto il mondo anglosassone si è dedicato alla messa a punto di protocolli sperimentali adatti alla scuola e all'ideazione di pacchetti didattici per scuole di ogni ordine e grado. Su internet sono disponibili diversi siti, alcuni dei quali inviano materiale didattico in tutto il mondo. Ad esempio il sito internazionale dedicato alla ricerca su *Arabidopsis*, il TAIR, ha una sezione dedicata alle risorse per gli insegnanti [20], così come l'Università statale dell'Ohio [21], mentre la prestigiosa Accademia dei Georgofili cura un sito in lingua italiana in cui, tra gli altri argomenti, viene presentata l'*Arabidopsis* [22]. Con piante di *Arabidopsis*, ma volendo anche con piante di cui è facile trovare i semi nei supermercati, come il ravanello, è possibile organizzare prove sperimentali semplici ma di forte impatto come quelle che dimostrano i movimenti delle piante in risposta agli stimoli ambientali (Fig. 5), come il gravitropismo ed il fototropismo [23, 24].



Figura 5. Plantule orientate verso una fonte di luce laterale mostrano la risposta fototropica [25].

L'utilizzo di organismi modello nel lavoro di classe aiuta gli studenti nell'apprendimento di concetti basilari della biologia. L'apprendimento attivo, soprattutto in laboratorio, mantiene alta la soglia di attenzione grazie all'osservazione diretta delle reazioni di un organismo vivente. La pianificazione e lo svolgimento di un esperimento permettono di comprendere appieno la metodologia scientifica, e l'utilizzo di organismi modello offre il vantaggio di

seguire protocolli altamente replicabili e di confrontarsi con una grande mole di informazioni disponibili su questi particolari organismi.

Bibliografia

- [1] Christenhusz, M. J., & Byng, J. W. (2016). The number of known plants species in the world and its annual increase. *Phytotaxa*, 261(3), 201-217.
- [2] Hedges, S. B. (2002). The origin and evolution of model organisms. *Nature Reviews Genetics*, 3(11), 838.
- [3] Krienitz, L., Huss, V. A., & Bock, C. (2015). Chlorella: 125 years of the green survivalist. *Trends in plant science*, 20(2), 67-69.
- [4] Benson, A. A., & Calvin, M. (1950). Carbon dioxide fixation by green plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 1(1), 25-42.
- [5] Harris, E. H. (2001). Chlamydomonas as a model organism. *Annual review of plant biology*, 52(1), 363-406.
- [6] Sasso, S., Stibor, H., Mittag, M., & Grossman, A. R. (2018). The Natural History of Model Organisms: From molecular manipulation of domesticated Chlamydomonas reinhardtii to survival in nature. *Elife*, 7, e39233.
- [7] Zallen, D. T. (1993). The "light" organism for the job: green algae and photosynthesis research. *Journal of the History of Biology*, 26(2), 269-279.
- [8] Clough, S. J., & Bent, A. F. (1998). Floral dip: a simplified method for Agrobacterium-mediated transformation of Arabidopsis thaliana. *The plant journal*, 16(6), 735-743.
- [9] Koornneef, M., & Meinke, D. (2010). The development of Arabidopsis as a model plant. *The Plant Journal*, 61(6), 909-921.
- [10] Provart, N. J., Alonso, J., Assmann, S. M., Bergmann, D., Brady, S. M., Brkljacic, J., ... & Dangl, J. (2016). 50 years of Arabidopsis research: highlights and future directions. *New Phytologist*, 209(3), 921-944.
- [11] Van Norman, J. M., & Benfey, P. N. (2009). Arabidopsis thaliana as a model organism in systems biology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Systems Biology and Medicine*, 1(3), 372-379.
- [12] https://blogs.nasa.gov/ISS_Science_Blog/2013/11/13/model-organisms-shining-examples-for-simple-effective-biology-research/
- [13] Sierro, N., Battey, J. N., Ouadi, S., Bakaher, N., Bovet, L., Willig, A., ... & Ivanov, N. V. (2014). The tobacco genome sequence and its comparison with those of tomato and potato. *Nature communications*, 5, 3833.
- [14] Strable, J., & Scanlon, M. J. (2009). Maize (Zea mays): a model organism for basic and applied research in plant biology. *Cold spring harbor protocols*, 2009(10), pdb-emo132.
- [15] Wang, C., Guo, L., Li, Y. et al. (2012). Systematic Comparison of C3 and C4 Plants Based on Metabolic Network Analysis. *BMC Systems Biology* 6, S9.
- [16] Rose, R. J. (2008). Medicago truncatula as a model for understanding plant interactions with other organisms, plant development and stress biology: past, present and future. *Functional Plant Biology*, 35(4), 253-264.

- [17] Kang, Y., Li, M., Sinharoy, S., & Verdier, J. (2016). A snapshot of functional genetic studies in *Medicago truncatula*. *Frontiers in plant science*, 7, 1175.
- [18] Young, N. D., Debelle, F., Oldroyd, G. E., Geurts, R., Cannon, S. B., Udvardi, M. K., ... & Van de Peer, Y. (2011). The *Medicago* genome provides insight into the evolution of rhizobial symbioses. *Nature*, 480(7378), 520.
- [19] Cronk, Q. C. B. (2005). Plant eco-devo: the potential of poplar as a model organism. *New Phytologist*, 166(1), 39-48.
- [20] <https://www.arabidopsis.org/portals/education/teach.jsp>
- [21] <https://abrc.osu.edu/educators>
- [22] <http://blog.georgofili.it/arabidopsis-thaliana-la-pianta-fuoriclasse-della-ricerca/>
- [23] [https://bioone.org/journals/The-American-Biology-Teacher/volume-62/issue-1/0002-7685\(2000\)062\[0059:HCPTWW\]2.0.CO;2/How-Can-Plants-Tell-Which-Way-Is-Up/10.1662/0002-7685\(2000\)062\[0059:HCPTWW\]2.0.CO;2.short](https://bioone.org/journals/The-American-Biology-Teacher/volume-62/issue-1/0002-7685(2000)062[0059:HCPTWW]2.0.CO;2/How-Can-Plants-Tell-Which-Way-Is-Up/10.1662/0002-7685(2000)062[0059:HCPTWW]2.0.CO;2.short)
- [24] <https://untamedscience.com/biology/plants/phototropism/>
- [25] <https://phys.org/news/2013-05-scientists-mechanism-phototropism.html>

Dai semiconduttori alle celle solari fotovoltaiche: tecnologie e prospettive

Salvatore Patanè

Dipartimento di Scienze Matematiche e Informatiche, Scienze
Fisiche e Scienze della Terra, Università degli Studi di Messina.

E-mail: salvatore.patane@unime.it

Riassunto. I combustibili fossili, petrolio, gas naturale e carbone, oggi rappresentano la principale fonte di energia delle società tecnologicamente avanzate. Purtroppo, questi idrocarburi sono anche la principale fonte di inquinamento atmosferico e sono responsabili di fenomeni ambientali importanti come l'effetto serra, le piogge acide ed il surriscaldamento globale. Inoltre, per la loro natura, si tratta di fonti di energia destinate ad esaurirsi molto presto. Negli ultimi decenni, la richiesta di fonti di energia rinnovabili (FER) ha polarizzato l'attenzione della ricerca e dell'industria mondiale: sono stati sviluppati sistemi per la conversione dell'energia del vento, delle maree, del Sole in energia elettrica, facilmente trasportabile ed utilizzabile praticamente in qualunque situazione o necessità. Fra tutte le possibili FER, il Sole sembra essere l'alternativa più conveniente sia per alcuni aspetti legati all'impiantistica, priva di parti meccaniche in movimento e quindi implicitamente duratura, che per la possibilità di parcellizzare la conversione in un sistema di rete distribuita costituita da piccoli campi fotovoltaici dal costo ormai competitivo rispetto a tutte le altre tecnologie. La comprensione del funzionamento delle celle fotovoltaiche richiede la conoscenza di alcuni principi fondamentali che spiegano il comportamento dei materiali semiconduttori, con particolare attenzione ai concetti di struttura a bande e drogaggio dei materiali cristallini con carattere semiconduttore. L'efficienza di conversione dipende da una molteplicità di aspetti tecnologici, legati principalmente ad aspetti di *design* che negli anni sono stati affinati al punto da ottenere efficienze di conversione che possono raggiungere il 35%. Il *design* delle moderne celle fotovoltaiche richiede non solo la conoscenza della metallurgia necessaria alla realizzazione delle

giunzioni PN, ma anche alcuni aspetti fondamentali che riguardano il trattamento dei fotoni in strutture più o meno complesse capaci di intrappolare la luce al fine di ottimizzarne l'impiego. Infine, oggi esistono esempi di celle solari fotovoltaiche che utilizzano materiali innovativi come i polimeri, i semiconduttori nanostrutturati ovvero i coloranti organici. Si tratta per lo più di esempi che non hanno ancora un'applicazione industriale, ma sono importanti perché descrivono punti di vista innovativi che potrebbero rivoluzionare alcuni campi di impiego e in un futuro non troppo lontano sostituire la tecnologia del silicio.

Abstract. Fossil fuels, oil, natural gas and coal, today represent the main source of energy for technologically advanced companies. Unfortunately, these hydrocarbons are also the main source of atmospheric pollution and are responsible for important environmental phenomena such as the greenhouse effect, acid rain and global warming. Moreover, due to their nature, they will soon run out. In recent decades the demand for renewable energy sources (RES) has polarized the attention of research and world industry; systems have been developed for the conversion of wind, tidal and solar energy into electrical energy. Among all the possible RESs, sun seems to be the most convenient alternative both for some aspects related to system design, without moving mechanical parts and therefore implicitly lasting, and for the possibility of dividing the conversion into a distributed network system consisting of small photovoltaic fields with a competitive price compared to all other technologies. Understanding the operation of photovoltaic cells requires the knowledge of some fundamental principles that explain the behavior of semiconductor materials with special attention to the concepts of band structure and doping of crystalline semiconductors. Conversion efficiency depends on a multiplicity of technological aspects mainly related to design aspects that over the years have been refined boosting up the efficiency to 35%. The design of modern photovoltaic cells requires not only the knowledge of metallurgy necessary for the realization of PN junctions but also the knowledge of some fundamental aspects concerning the treatment of photons in more or less complex structures capable of trapping light in order to optimize their use. Finally, today there are examples of photovoltaic solar cells that use innovative materials such as polymers, nanostructured semiconductors or organic dyes. These are mostly examples that do not yet have an industrial application but are much important because they describe innovative points of view that could revolutionize

the fields of use and soon in the next future replace silicon technology.

1. Un po' di storia

Quando si parla di fotovoltaico, oggi, ci si riferisce nella grande maggioranza dei casi a dispositivi e tecnologie sviluppate negli ultimi decenni e basate sull'uso del silicio. Sorprendentemente, invece, il fotovoltaico nasce molto tempo fa: nel 1839, quando il fisico francese Alexandre Edmond Becquerel, all'età di 19 anni, scopre casualmente che l'influenza dei raggi del Sole causa lievi flussi ed effetti elettrici su alcune celle elettrolitiche di platino. In questo caso è più corretto parlare di effetto fotogalvanico, tuttavia si tratta di un primo esempio in cui l'energia del Sole veniva convertita in energia elettrica. Il lavoro di Becquerel fu presentato all'accademia delle scienze di Parigi in una relazione intitolata "Memorie sugli effetti elettrici prodotti sotto l'influenza dei raggi solari". L'effetto fotovoltaico vero e proprio nasce solo alcuni anni dopo (nel 1876) ad opera William G. Adams e Richard Evans che notarono come il selenio cambiasse la sua conducibilità quando veniva illuminato. Il primo pannello fotovoltaico vero e proprio fu costruito da Charles Fritts nel 1879; si trattava di una lastra di selenio ricoperta di una sottilissima pellicola d'oro semitrasparente che realizzava bene il concetto di conversione dell'energia solare in energia elettrica sia pur con un'efficienza assolutamente insignificante ai fini pratici. Passarono molti anni e fu necessario un considerevole salto culturale prima che nei laboratori della Bell nascesse il primo pannello fotovoltaico vero e proprio costruito utilizzando un wafer di silicio nel 1954 e brevettato nel 1955. I costi di produzione di questi dispositivi erano ovviamente proibitivi ma si trattava di un punto di partenza fondamentale perché praticamente tutte le celle fotovoltaiche moderne immesse oggi sul mercato si basano sullo stesso principio di funzionamento: la giunzione PN, struttura la cui comprensione ha richiesto una vera e propria rivoluzione culturale nota come "crisi della fisica classica", grazie alla quale il comportamento dei cristalli è stato descritto in termini di una struttura a bande che ha consentito, fra l'altro, di spiegare i fenomeni di trasporto nei semiconduttori e l'interazione radiazione materia, quindi l'effetto fotovoltaico vero e proprio. La storia racconta poi che nel 1958 venne lanciato nello spazio il Vanguard I, il primo veicolo orbitante alimentato da celle fotovoltaiche. Negli anni a seguire, il fotovoltaico divenne commerciale ma non competitivo rispetto ai carburanti fossili, motivo per cui il suo sviluppo, anche dal punto di vista dell'innovazione tecnologica, procedette a rilento, lasciando i pannelli fotovoltaici relegati all'uso in condizioni estreme dove è impossibile utilizzare altre fonti di energia. Ciò nonostante, l'importanza del fotovoltaico venne

universalmente riconosciuta, la ricerca continuò e nel 1979 venne installato il primo campo fotovoltaico in grado di produrre 1 kW di energia al Passo della Mandriola. Fra il 1990 e i tempi odierni la diffusione degli impianti fotovoltaici procedette con un andamento esponenziale, anche grazie ai contributi statali ed alla crisi petrolifera che, facendo lievitare i prezzi dei carburanti e con la complicità dell'innovazione tecnologica, hanno reso il costo per Watt prodotto con le celle fotovoltaiche concorrenziale rispetto ad altre fonti di approvvigionamento energetico alternative (meno di 1\$ per Watt). Il *design* delle moderne celle fotovoltaiche richiede, non solo la conoscenza della metallurgia necessaria alla realizzazione delle giunzioni PN, ma anche alcuni aspetti fondamentali che riguardano il trattamento dei fotoni in strutture più o meno complesse capaci di intrappolare la luce al fine di ottimizzarne l'impiego. Infine, oggi esistono esempi di celle solari fotovoltaiche che utilizzano materiali innovativi come i polimeri, i semiconduttori nanostrutturati ovvero i coloranti organici. Si tratta per lo più di esempi che non hanno ancora un'applicazione industriale ma sono importanti perché descrivono punti di vista innovativi che potrebbero rivoluzionare alcuni campi di impiego e in un futuro non troppo lontano sostituire la tecnologia del silicio.

2. La struttura a bande e la giunzione PN

Il principio di funzionamento delle celle fotovoltaiche va sotto il nome di effetto fotoelettrico, la cui spiegazione valse ad Albert Einstein il premio Nobel per la fisica nel 1921. Per comprendere come funziona una cella solare a semiconduttore è necessario spiegare il principio di funzionamento di una giunzione PN e di conseguenza il concetto di struttura a bande. Cercheremo, nel seguito, di fornire i rudimenti necessari ad una comprensione semplice ma rigorosa delle problematiche cominciando dal concetto di struttura a bande. In un solido cristallino, gli atomi sono ordinatamente disposti in una struttura simmetrica denominata cella primitiva. Gli elettroni dei singoli atomi, ed in particolare quelli delle shell più esterne, in questa situazione perdono la loro caratteristica atomica e divengono parte dell'intero cristallo. La struttura periodica dà luogo ad una distribuzione di stati energetici possibili (bande di energia) per gli elettroni, che li occupano seguendo la statistica di Fermi-Dirac e il principio di esclusione di Pauli. Fra una banda e l'altra si trovano intervalli di energia proibiti agli elettroni e, considerando che in ogni banda si possono "sistemare" $2N$ elettroni, essendo N il numero degli atomi, si vede subito che nel caso in cui il numero di elettroni sia dispari la banda ad energia maggiore risulterà riempita per metà. In questo caso, il cristallo si comporta da conduttore metallico, nel senso che un campo elettrico, anche piccolo, applicato al sistema è in grado di accelerare le particelle che possono acquistare energia in virtù del fatto che, essendo la banda semi vuota, esistono stati vuoti ad energia maggiore

rispetto all'ultimo stato occupato. In questa situazione si dirà che la banda di energia riempita solo parzialmente è la banda di conduzione, mentre quella appena più in basso, completamente piena, è la banda di valenza. Nel caso in cui gli elettroni atomici siano in numero pari la banda ad energia più alta risulterà completamente piena, in tal caso un campo elettrico non è in grado di produrre flussi di corrente perché gli elettroni non possono acquistare energia non avendo stati disponibili ad energia maggiore dell'ultimo stato occupato poiché tali stati ricadrebbero nel gap proibito. Un materiale di questo tipo si dice isolante. Naturalmente quanto sopra non significa che gli elettroni siano immobilizzati, essendo questi ultimi soggetti ad una agitazione termica che però mediamente non produce alcun flusso di corrente. I materiali semiconduttori, come il silicio o il germanio, che vengono ampiamente utilizzati per realizzare dispositivi elettronici, sono caratterizzati dal possedere un numero di elettroni pari ed un gap di energia relativamente piccolo, solitamente dell'ordine di 1 o 2 eV. Quanto sopra significa che, a temperatura ambiente e in un cristallo perfetto, un materiale semiconduttore come questi non è in grado di condurre l'energia elettrica, infatti, perché ciò accada sarebbe necessario che un elettrone andasse ad occupare uno stato libero in banda di conduzione lasciando uno stato vuoto in banda di valenza e quindi acquisendo un'energia pari almeno a quella del gap proibito. In particolare, val la pena di sottolineare che l'energia termica fornisce mediamente un'energia pari a circa 26meV a $T = 300K$, quindi qualunque semiconduttore con energia di gap di qualche eV non può risentire dell'effetto della temperatura sulle proprietà di trasporto, in quanto è praticamente nulla la probabilità che fornendo questo ammontare energetico un elettrone si porti in banda di conduzione. In un semiconduttore classico, quindi, per ottenere un flusso di corrente è necessario "promuovere" degli elettroni in banda di conduzione. Questa "promozione" lascia in banda di valenza una mancanza di carica che, dal punto di vista elettrico, gioca il ruolo di una carica positiva detta "Lacuna" o "Buca". In questo senso, quindi, un semiconduttore può essere visto come un materiale in cui la corrente è dovuta a due tipologie di portatori: le lacune e gli elettroni. Queste due famiglie di portatori danno luogo a due flussi di corrente, uno di cariche positive ed uno di cariche negative che, fluendo nel semiconduttore, compongono la corrente complessiva. Si tenga presente che il moto delle cariche segue sempre la direzione del campo che le accelera, ma il verso della velocità è opposto. Poiché una delle due cariche è negativa alla fine ambedue i flussi di carica contribuiscono alla corrente complessiva piuttosto che annullarsi. Come è stato sottolineato sopra, la possibilità di produrre una coppia elettrone-lacuna che dia luogo a fenomeni di trasporto in un semiconduttore è legata all'ammontare di energia fornito al materiale. Volendo focalizzare l'attenzione sul funzionamento delle celle solari fotovoltaiche, è lecito

chiedersi cosa accade se un fotone colpisce il semiconduttore. Si tratta di un processo noto come interazione radiazione-materia, la cui descrizione richiede l'utilizzo di nozioni anche complesse di meccanica quantistica e quindi esula dagli scopi di questa trattazione. Tuttavia, è possibile descrivere in modo abbastanza semplice e corretto il processo ricordando che la luce può esibire un comportamento ondulatorio e corpuscolare, è possibile cioè pensare alla radiazione elettromagnetica sia come l'oscillazione di un campo elettrico e di un campo magnetico ortogonali uno rispetto all'altro (descritto dalle equazioni di Maxwell) che come un insieme di particelle dette fotoni, in prima approssimazione prive di massa, la cui energia è pari ad $h\nu$ essendo h la costante di Planck e ν la frequenza di oscillazione del campo. Il fotone in oggetto è associato ad un campo elettromagnetico di lunghezza d'onda $\lambda=c/\nu$ essendo c la velocità della luce. Con questa semplice modellizzazione, che tuttavia nasconde uno dei concetti più affascinanti della meccanica quantistica, e cioè il dualismo onda corpuscolo, il processo di interazione fra la luce ed un semiconduttore può risultare intuitivo: se un fotone possiede un'energia maggiore dell'energia di gap del materiale esso è in grado di cedere la sua energia ad un elettrone della banda di valenza e promuoverlo in banda di conduzione. Questo processo, ovviamente, altera le proprietà di trasporto del materiale semiconduttore aumentandone la conducibilità. Vale la pena di notare che un fotone con energia più piccola del gap del semiconduttore non viene assorbito e quindi il materiale per quelle lunghezze d'onda risulta trasparente. I materiali che posseggono questi comportamenti vengono anche detti fotoconduttori. Considerato il fine di questo manoscritto, nel seguito faremo riferimento ad un semiconduttore molto noto come il Silicio che è ampiamente utilizzato per realizzare celle fotovoltaiche commerciali. I concetti che verranno esposti possono tuttavia essere applicati anche ad altri semiconduttori sia pur con i necessari adattamenti. Come abbiamo avuto modo di sottolineare, a temperatura ambiente un materiale intrinseco (cioè puro) come il silicio, che possiede un gap di 1,1 eV ed appartiene al 4 gruppo della tavola periodica degli elementi, non dovrebbe avere proprietà di trasporto elettrico essendo la banda di valenza completamente piena e quella di conduzione vuota. La struttura di un semiconduttore intrinseco può essere alterata dall'aggiunta di impurità costituite da atomi pentavalenti o trivalenti che causano una variazione delle proprietà elettriche dei semiconduttori; in tal caso si dice che il semiconduttore è drogato. Dal punto di vista elettronico, la presenza di un atomo sostituzionale trivalente o pentavalente nel cristallo del silicio produce effetti piuttosto diversi. Per comprendere la situazione si osservi la Figura 1 che, per quanto esemplificativa chiarisce bene il concetto, in particolare un atomo pentavalente che sostituisce un atomo di silicio darà luogo a 4 legami che saturano quelli del silicio. Il quinto elettrone resterà

localizzato intorno all'atomo drogante in una struttura energetica molto simile a quella dell'atomo di idrogeno e quindi sottoposto ad un potenziale $e/\epsilon \cdot r$, quest'ultimo è decisamente meno intenso rispetto al caso dell'atomo di idrogeno perché la costante dielettrica da tenere in considerazione stavolta è quella del semiconduttore e non quella del vuoto. In questo modo l'elettrone è ancora proprietà dell'atomo drogante ma la sua energia di legame è molto piccola.

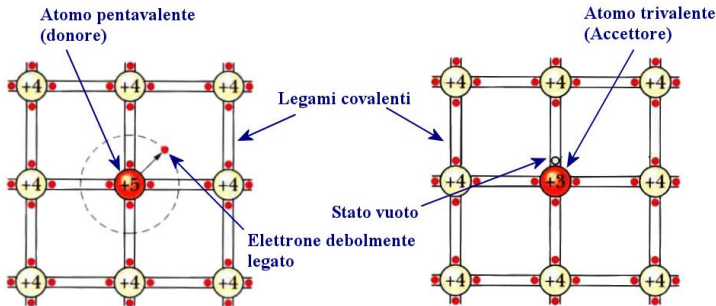


Figura 1. Drogaggio N (a sinistra) e P (a destra) di un cristallo di silicio.

Quanto sopra implica che il quinto elettrone dell'atomo pentavalente si localizza in uno stato elettronico del tutto simile a quelli dell'atomo di idrogeno. Nello schema generale della struttura a bande questo equivale a dire che esiste uno stato elettronico localizzato appena sotto la banda di conduzione. In tal modo, anche la debole energia termica a temperatura ambiente si risolve in una probabilità sensibilmente diversa da zero che l'elettrone si sleghi dall'atomo drogante e venga eccitato in banda di conduzione. In questa situazione la conducibilità elettrica del materiale risulta profondamente alterata e pesantemente dipendente dalla temperatura con un comportamento opposto a quello dei metalli: anche con percentuali di drogaggio relativamente modeste, un aumento della temperatura produce importanti variazioni della conducibilità elettrica. Rispetto al caso in cui la conducibilità venga alterata dall'interazione con la luce, si osserva che in questo caso la corrente è unipolare perché la mancanza di carica derivante dall'eccitazione dell'atomo drogante resta localizzata intorno ad esso e quindi non può dar luogo a fenomeni di trasporto in quanto l'atomo è immobile nella struttura cristallina. L'atomo di drogante in tal modo resta ionizzato. Val la pena di sottolineare che comunque il materiale resta neutro in quanto il numero di cariche negative è uguale a quello delle cariche positive avendo inizialmente addizionato il cristallo con un atomo neutro. Questo tipo di drogaggio si dice di "tipo n" con ciò intendendo che gli atomi di drogante forniscono elettroni utili per il trasporto (cariche negative). Gli atomi di drogante si dicono per quanto sopra donatori. Un processo

metallurgico analogo, ma condotto utilizzando atomi trivalenti, dà luogo ad una struttura cristallina in cui uno dei quattro legami dell'atomo di silicio resta incompleto. Con un analogo ragionamento si può concludere che la presenza di un atomo trivalente (detto accettore) dà luogo dal punto di vista elettronico alla presenza di uno stato localizzato vuoto appena sopra la banda di valenza. Anche in questo caso bastano pochi *millielettronvolt* per portare un elettrone della banda di valenza sullo stato localizzato, il portatore resta però localizzato intorno all'atomo accettore e le proprietà di trasporto vengono alterate dalla presenza di una buca in banda di valenza. Vale la pena adesso di ricordare che gli elettroni, e di conseguenza le lacune intese come una mancanza di elettroni, sono Fermioni e quindi obbediscono alla statistica di Fermi-Dirac. Una conseguenza diretta di questa caratteristica è che è possibile definire un parametro, detto Energia di Fermi, che ha le dimensioni di un'energia e che garantisce, in un sistema isolato, la conservazione del numero di particelle; condizione quest'ultima indispensabile per poter definire la statistica dei Fermioni. Nel caso di un semiconduttore intrinseco allo zero assoluto, si dimostra che l'Energia di Fermi cade a metà del *gap* proibito; tuttavia, è facile intuire che la sua posizione dovrà cambiare con la temperatura e con il drogaggio perché ambedue modificano la distribuzione elettronica nel materiale. In particolare, la presenza di un drogante fa sì che l'energia di Fermi si posizioni fra lo spigolo della banda e il livello localizzato più vicino, restando comunque verificata la circostanza che il livello di Fermi resta costante in tutto il cristallo se quest'ultimo è isolato. Per comprendere il funzionamento di una cella solare fotovoltaica basata sul silicio, è adesso necessario introdurre il concetto di giunzione PN. Si tratta di una giunzione ottenuta con processi metallurgici che consentono di ottenere un unico cristallo di semiconduttore in cui una regione è drogata con atomi trivalenti ed una, adiacente, con atomi pentavalenti. La presenza di due zone drogate in modo diverso ed adiacenti fa sì che gli elettroni della regione N si muovano verso le lacune della regione P lasciando una regione di spazio popolata dagli atomi ionizzati del drogante. Questa circostanza provoca una distribuzione non nulla di campo elettrico all'interno del materiale e realizza la cosiddetta regione di svuotamento in cui non sono presenti cariche libere se non le poche occasionalmente prodotte per eccitazione termica. La distribuzione del campo, in una descrizione esemplificata del problema, come descritto in figura, ha un massimo nella regione di svuotamento e, ricordando che il livello di Fermi si deve mantenere costante lungo il materiale essendo quest'ultimo isolato, è molto semplice concludere che nella regione di svuotamento le bande di energia si devono piegare producendo un gradino di potenziale. Questo gradino di potenziale, detto potenziale interno della giunzione, è strettamente legato alle caratteristiche del materiale semiconduttore, dipende debolmente dalla percentuale di drogante e dalla

temperatura, e rappresenta l'energia che all'equilibrio un portatore deve superare per portarsi nella regione opposta. Nel caso del silicio a temperatura ambiente, il potenziale interno della giunzione è dell'ordine di 0,707 V. Polarizzando negativamente la regione N e positivamente la regione P, il campo esterno tenderà a spingere i portatori nelle regioni opposte abbassando la barriera di potenziale. Quando la differenza di potenziale applicata raggiunge il valore del potenziale interno le cariche saranno libere di fluire attraverso la struttura, si parla in tal caso di polarizzazione diretta. Polarizzando il sistema al contrario, il campo esterno si aggiunge a quello interno della giunzione allargando la regione di svuotamento. In tal caso i portatori della regione N e della regione P non potranno raggiungere le regioni opposte del semiconduttore. Si osserverà, tuttavia, il fluire di una piccola corrente, detta corrente inversa di saturazione, che dipende dalla presenza di portatori termici generati all'interno della regione di svuotamento che "vedono" la barriera di potenziale della giunzione "in discesa" e possono quindi dar luogo ad un flusso di cariche.

3. La cella solare fotovoltaica

Volendo adesso spiegare il funzionamento di una cella fotovoltaica è necessario ricorrere alla descrizione, già brevemente fornita, dell'interazione fotone/cristallo. Se un fotone possiede un'energia almeno uguale a quella dell'energia di gap del cristallo, la sua interazione con quest'ultimo può dar luogo alla promozione di un elettrone dalla banda di valenza a quella di conduzione. Il fotone ovviamente sparisce in quanto assorbito dal cristallo. Se ciò avviene, fisicamente lontano dalla regione di svuotamento, lo sbilanciamento nella densità di carica darà luogo ad un processo di diffusione delle cariche in eccesso e, in tempi relativamente brevi, si otterrà la ricombinazione con un effetto pressoché nullo sul sistema. La situazione è molto diversa se il fotone viene assorbito nella regione di svuotamento. In questo caso gli elettroni promossi in banda di conduzione saranno sottoposti ad un potenziale "in discesa" che li accumula nella regione N. Alla stessa maniera le lacune si addenseranno nella regione P. Se il dispositivo è isolato, il processo di accumulazione delle cariche va avanti fin quando il campo elettrico prodotto dalla dislocazione di carica non eguaglia quello interno della giunzione. In queste condizioni il gradino di potenziale dovuto alla regione di svuotamento viene annullato dalle cariche accumulate nella regione N e nella regione P, quindi lungo tutto il semiconduttore avremo le condizioni di banda piatta e un ulteriore accumulo di cariche non è più possibile: i fotoni assorbiti daranno luogo a cariche che mediamente si ricombinano in tempi relativamente brevi. In queste condizioni, ai capi del dispositivo troveremo una differenza di potenziale uguale e contraria rispetto a quella interna della giunzione. Questa tensione è anche la tensione a vuoto

(V_{oc}) prodotta dalla cella fotovoltaica. Il processo è esemplificato in Figura 2A, la Figura 2B mostra l'effetto dell'illuminazione sulle curve I/V di una giunzione PN.

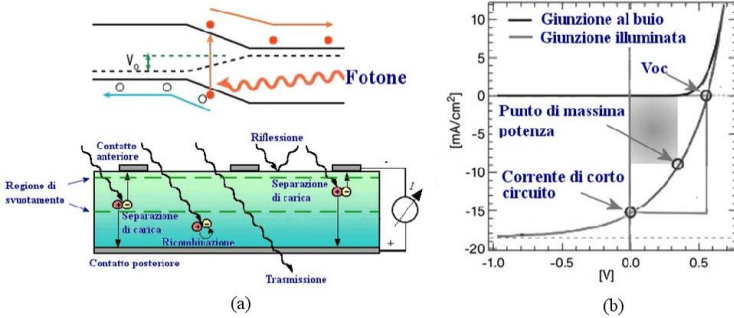


Figura 2. (a): schema esemplificato dei processi di assorbimento fotonico in una giunzione PN. (b): curve I/V di una cella fotovoltaica in condizioni di buio e di illuminazione.

Un aspetto che richiede una certa attenzione riguarda l'efficienza con cui i fotoni vengono convertiti in elettroni. Per una comprensione completa dei fattori che limitano l'efficienza di conversione è necessario analizzare sia le caratteristiche della radiazione solare che i processi ottici di assorbimento e di riflessione della luce sul materiale. In particolare, ricordando che il materiale è un semiconduttore, è piuttosto semplice intuire che i fotoni con energia minore dell'energia di gap non sono in grado di produrre coppie elettroni-lacune e quindi la radiazione infrarossa, di cui è ricca la luce del sole, non darà luogo ad alcun contributo di fotocorrente ed anzi rappresenta un disturbo perché tenderà a scaldare il materiale innescando una serie di processi termoidotti che finiscono con il limitare l'efficienza ed il tempo di vita della cella fotovoltaica.

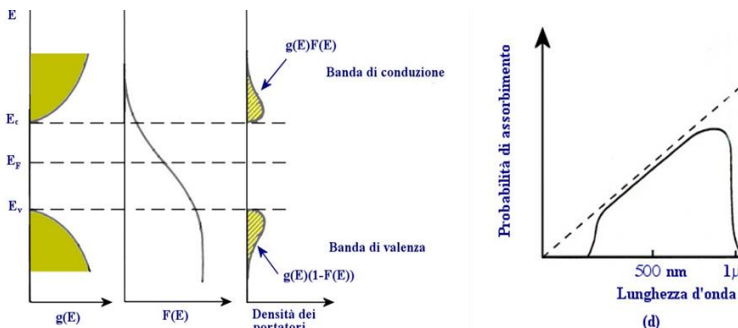


Figura 3. densità degli stati (a), funzione di distribuzione (b), densità dei portatori (c), in un semiconduttore e probabilità di assorbimento in una giunzione PN (d).

I fotoni con energia maggiore possono produrre cariche libere nella regione di svuotamento, ma la probabilità che ciò accada dipende dalla loro energia poiché essa è legata alla cosiddetta densità congiunta degli stati; quest'ultima in modo molto semplificato può essere interpretata ricordando che per ottenere una coppia elettrone-lacuna è necessario che in banda di valenza esista uno stato pieno corrispondente ad uno stato vuoto in banda di conduzione. In altri termini la probabilità di ottenere una coppia elettrone lacuna dipende dalla densità degli stati e dalla funzione di distribuzione. Come si vede in Figura 3, questo dà luogo ad un massimo di probabilità che nel caso del silicio è a circa 800 nm; fotoni con energia maggiore possono ancora essere assorbiti ma con efficienza via via decrescente. Un aspetto importante riguarda il coefficiente di assorbimento del materiale, giacché, da quanto sopra esposto, affinché un fotone possa efficacemente trasformarsi in una coppia di portatori è necessario che il suo assorbimento si produca nella regione di svuotamento. Questa circostanza richiede che la giunzione venga realizzata il più possibile in superficie e che la sua estensione spaziale sia la più grande possibile. Esistono tuttavia degli effetti competitivi che vanno tenuti in considerazione nel *design* di una cella solare. Ad esempio, la profondità a cui si posiziona la regione di svuotamento ha un valore "ottimo", infatti realizzare una regione di svuotamento troppo in superficie non migliora l'efficienza complessiva perché la superficie del cristallo è irta di stati localizzati dovuta all'interruzione della struttura che si comportano da centri di ricombinazione peggiorando l'efficienza di conversione. Al contrario, una regione di svuotamento troppo profonda viene raggiunta da pochi fotoni, che verrebbero assorbiti nella regione di banda piatta. Un altro aspetto riguarda la distribuzione del drogante e la sua concentrazione. La superficie della cella solare deve essere in grado di veicolare le cariche verso gli elettrodi di raccolta che vengono solitamente realizzati come una struttura a dita e quindi lasciano libera buona parte della superficie della cella. Questo significa che i portatori prodotti lontano dagli elettrodi devono poter "viaggiare" lungo la superficie incontrando la resistenza minore possibile per massimizzare l'efficienza di estrazione. A questo scopo si realizza il drogaggio superficiale in modo da rendere degenere il semiconduttore. Come abbiamo detto il livello di Fermi si sposta sempre di più verso la banda più vicina al livello localizzato proveniente dal drogante; se la percentuale di drogante è sufficientemente alta è possibile fare in modo che il livello di Fermi finisca nella banda, realizzando una situazione molto simile a quella che si osserva in un metallo. In questo modo i portatori si muovono quasi liberamente sulla superficie e possono essere raccolti dagli elettrodi. La zona sottostante, al contrario, è solitamente poco drogata. In tal modo la regione di svuotamento si estende verso l'interno del semiconduttore e questo favorisce l'assorbimento dei fotoni nella regione in cui le bande sono piegate. Un altro aspetto non trascurabile

riguarda la possibilità che i fotoni vengano semplicemente riflessi dalla superficie del semiconduttore e quindi non possano essere utilizzati per la conversione fotovoltaica.

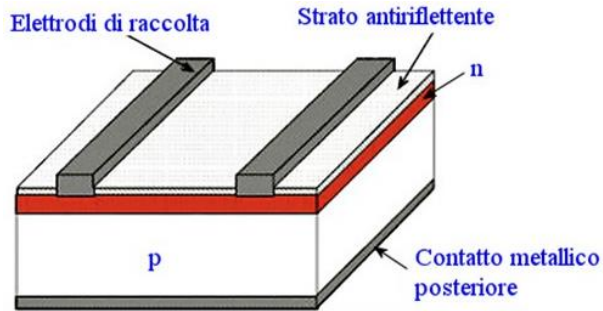


Figura 4. Struttura di una cella solare fotovoltaica “classica”.

Per limitare questo fenomeno si ricopre la cella solare con uno strato di materiale antiriflettente del tutto simile a quello utilizzato per le normali lenti utilizzate in oculistica (Fig. 4). Quanto sopra chiarisce che una strategia ovvia per migliorare l'efficienza di conversione riguarda la massimizzazione della capacità della cella di catturare fotoni. A tale scopo sono state apportate modifiche, anche pesanti, al *design* della cella. In prima istanza è stato ridotto lo spessore dello strato superficiale drogato in modo degenere, ciò consente ad un maggior numero di fotoni di raggiungere la regione di svuotamento. La presenza di stati localizzati sulla superficie è stata minimizzata utilizzando tecniche di ricrescita epitassiale, come si fa con i dispositivi a semiconduttore. La regione di svuotamento, nelle moderne celle solari, è localizzata a meno di un micron dalla superficie del semiconduttore, queste celle garantiscono efficienze di conversione del 15-18%. Un altro modo per massimizzare l'efficienza consiste nel vedere la cella da un punto di vista ottico e cercare di realizzare strutture in grado di intrappolare i fotoni. Ciò può essere ottenuto in prima istanza ingegnerizzando le ricoperture anti riflessione, e, con processi più complicati dal punto di vista produttivo, realizzando una “texture” sulla superficie, come mostrato in Figura 5.

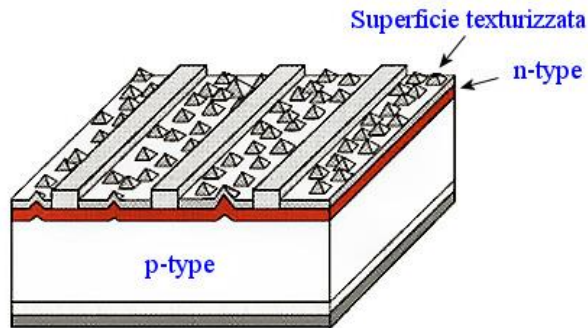


Figura 5. Struttura di una cella solare la cui superficie è microlavorata (texturizzata) per massimizzare l'assorbimento ottico.

Strutture più complesse possono migliorare ulteriormente l'efficienza di cattura ma richiedono processi produttivi molto più articolati che fanno lievitare il costo per Watt e quindi rendono queste celle poco interessanti dal punto vista commerciale relegandole all'utilizzo in ambienti ostili in cui è necessario ridurre il peso e l'area impegnata come nel caso dei satelliti per telecomunicazioni. La Figura 6 mostra la struttura di una cella fotovoltaica equipaggiata con microcanali che aumentano la superficie attiva della cella e migliorano l'efficienza di cattura aumentando il numero di riflessioni multiple all'interno del canale e quindi migliorando la probabilità di assorbimento.

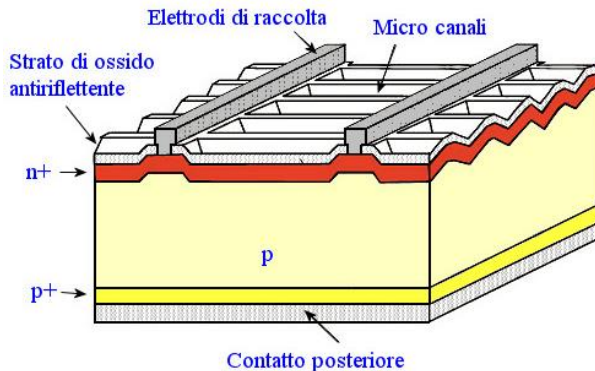


Figura 6. Cella fotovoltaica equipaggiata con una superficie strutturata in microcanali in grado di migliorare l'efficienza di cattura e la superficie attiva. Queste celle sono in grado di esprimere efficienze di conversione che eccedono il 20%.

La particolarità di questa cella consiste anche nella presenza di un sottile strato di ossido integrato sulla superficie che riduce la ricombinazione dovuta agli stati di superficie (*Passivated Emitter Solar Cell* - PESC) [1]. La letteratura riporta nel corso degli anni un considerevole numero di varianti alla struttura della cella PESC, tutte ovviamente pensate per migliorare l'efficienza di conversione. Un esempio è la struttura PERC (*Passivated Emitter and Rear Cell*), la cui principale differenza consiste nel modo in cui viene realizzato il contatto posteriore. Quest'ultimo è separato dal semiconduttore con un sottile strato di ossido che presenta dei fori di contatto. In questo modo si riducono le imperfezioni dell'interfaccia migliorando il rendimento della cella. Un ulteriore miglioramento consiste nel realizzare una texturing a "piramidi invertite" sulla superficie della cella. Queste strutture agiscono come delle trappole per i fotoni che subiscono un numero elevato di riflessioni all'interno della piramide aumentando considerevolmente la probabilità di essere assorbiti [2]. Un altro miglioramento consiste nella struttura PERL (*Passivated Emitter and Rear Locally-diffused solar Cell*), mostrata in Figura 7 che consiste sostanzialmente in una struttura analoga alla PERC in cui però lo strato antiriflettente viene sostituito con un doppio strato dielettrico e il contatto posteriore migliorato con delle diffusioni localizzate p^+ in corrispondenza dei microfori ricavati nello strato di ossido.

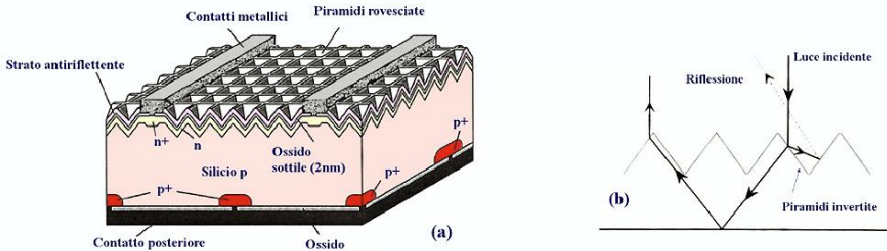


Figura 7. Struttura di una cella PERL (a), schema esemplificativo degli effetti ottici dovuti alla presenza delle piramidi invertite sulla superficie della cella (b).

Un aspetto che non va trascurato riguarda la qualità cristallina del materiale utilizzato per costruire la cella solare. I wafer di silicio commerciale comunemente utilizzati per la realizzazione di dispositivi elettronici sono monocristalli e solitamente sono estremamente puri per garantire una buona efficienza nel trasporto elettrico. Queste proprietà non sono così importanti per una cella solare, sicché è possibile abbattere i costi di produzione utilizzando materiale policristallino. La struttura policristallina, si risolve in una perdita di alcuni punti percentuali nell'efficienza di conversione principalmente dovuta alla presenza dei bordi di grano, ma si ottiene in cambio un costo sensibilmente più basso. Costi di

produzione ancora più bassi si possono ottenere utilizzando la tecnologia dei film sottili. Si tratta di depositare su un supporto di materiale plastico o vetro un film sottile amorfo di silicio. Dal punto di vista strutturale il silicio amorfo si presenta come un materiale irto di difetti e legami non saturi o saturati da atomi di idrogeno; ciò comporta la mancanza di un vero e proprio *gap* di energia, si parla infatti di *pseudo gap*, ed è possibile osservare un ordine *pseudo* cristallino solo a corto range (Fig. 8). A causa dell'elevato numero di difetti, il silicio amorfo ha un coefficiente di assorbimento molto elevato, per cui anche pochi micron di materiale sono sufficienti ad assorbire completamente la radiazione luminosa, ciò consente di ottenere celle solari estremamente sottili realizzate anche su supporti flessibili. La struttura disordinata del materiale, tuttavia, penalizza l'efficienza di conversione che risulta essere peggiore rispetto alle celle mono e poli cristalline.

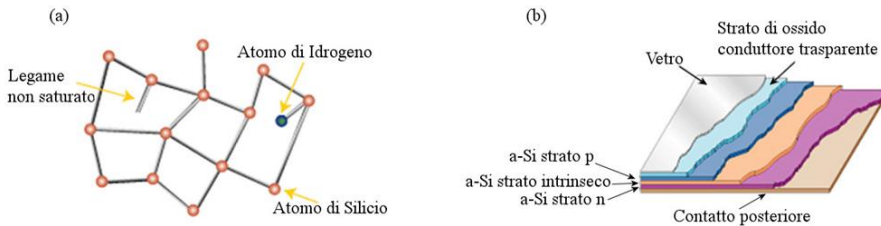


Figura 8. Struttura disordinata del silicio amorfo ricca di difetti (a) e struttura di una cella solare fotovoltaica basata sul silicio amorfo (b).

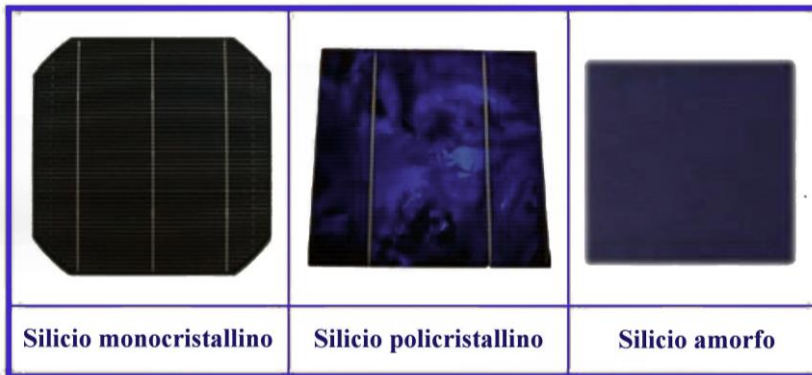


Figura 9. Tipi di celle.

La capacità di convertire la luce solare in energia dipende anche dallo spettro della radiazione.

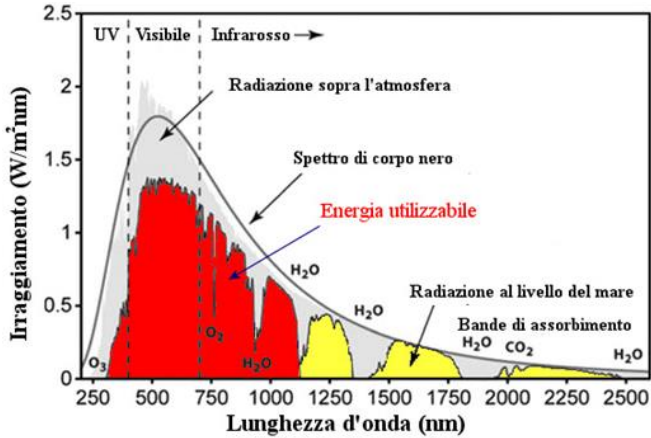


Figura 10. Distribuzione spettrale della radiazione solare al livello del mare.

Come è noto il nostro sole emette uno spettro continuo dall'ultravioletto al lontano infrarosso, tuttavia non tutti i fotoni raggiungono il suolo a causa dei fenomeni di assorbimento dovuti all'atmosfera che, fra gli altri, contiene gas come il CO₂ e il vapore d'acqua che assorbono una buona parte dello spettro. Inoltre si deve tener presente che i fotoni con energia minore di 1.1 eV non vengono assorbiti dal silicio per cui finiscono col trasformarsi in calore sulla cella peggiorandone le prestazioni. La componente spettrale in grado di produrre energia è perciò limitata alla regione rossa della Figura 10. Inoltre si deve tener presente che la densità di energia che raggiunge il suolo cambia con l'angolo di irraggiamento perché cambia anche il cammino della luce nell'atmosfera: inclinazioni dei raggi maggiori producono un cammino ottico più lungo ed una attenuazione maggiore. Al fine di una corretta valutazione dell'efficienza di conversione di una cella solare è necessario tener presente questo effetto che si traduce nella valutazione di una "massa d'aria equivalente" con la seguente espressione:

$$AM = \frac{1 - 0.1 \text{ altitudine}}{\sin(\theta_z)}$$

La grandezza AM (Air Mass) assume il valore 1 al livello del mare quando il sole è allo zenit (Fig. 11).

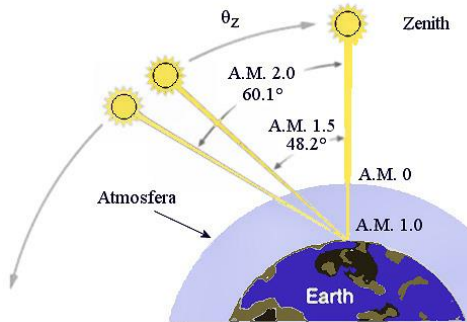


Figura 11. schema semplificato per la descrizione del parametro AM.

Dal punto di vista operativo la valutazione dell'efficienza di conversione richiede la definizione di alcuni parametri. Il più significativo è senza dubbio il *Fill Factor* (FF) definito come il rapporto fra la potenza massima e il prodotto fra la tensione a circuito aperto per la corrente di corto circuito:

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{SC}V_{OC}} = \frac{I_{MP}V_{MP}}{I_{SC}V_{OC}}$$

Inoltre è utile definire anche la Fotoresponsività spettrale $PR(\lambda)$:

$$PR(\lambda) = \frac{I_{SC}(\lambda)}{P_{source}(\lambda)}$$

e l'efficienza quantica esterna:

$$EQE(\lambda) = \frac{N_e}{N_{ph}(\lambda)}$$

dove N_e è il numero di elettroni prodotti da un numero di fotoni N_{ph} alla lunghezza d'onda λ . Infine è possibile definire l'efficienza della cella come il rapporto fra la potenza elettrica prodotta e la potenza ottica incidente:

$$\eta = \frac{P_{electric}}{P_{light}} = \frac{FF \cdot I_{SC} \cdot V_{OC}}{P_{light}}$$

Una cella solare fotovoltaica, dal punto di vista elettrico è un diodo; l'efficienza di conversione dipende anche dalle caratteristiche elettriche del diodo, per cui può

essere utile descrivere la cella attraverso il suo circuito equivalente visibile in Figura 12.

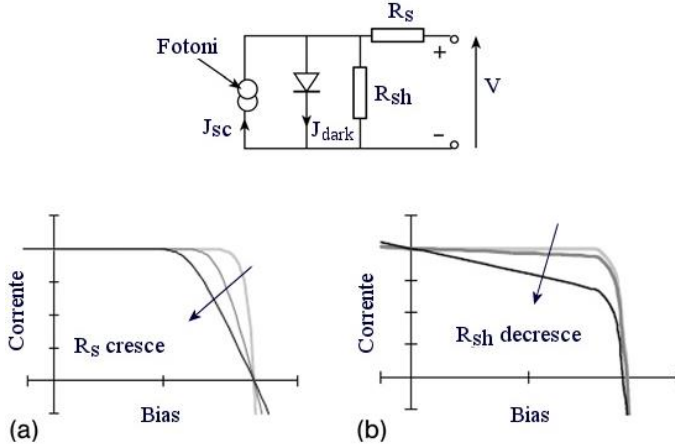


Figura 12. Circuito equivalente di una cella solare fotovoltaica. L'efficienza di conversione dipende dalla resistenza in serie e dalla resistenza di shunt del dispositivo.

Come si vede in Figura 12 il circuito equivalente di una cella solare è del tutto simile a quello di un comune diodo con la differenza che in parallelo al diodo ideale viene posto un generatore di corrente pilotato dalla potenza ottica. Dal punto di vista dell'efficienza di conversione giocano un ruolo piuttosto fondamentale la resistenza di shunt e la resistenza in serie del dispositivo. Ambedue questi elementi circuitali influiscono sulla curva I/V rendendola meno ideale. Ricordando che l'efficienza η è direttamente proporzionale al *Fill Factor*, si comprende subito come un aumento della resistenza in serie (Fig. 12 (a)) o una diminuzione della resistenza di shunt (Fig. 12 (b)), si risolvano in un peggioramento delle *performances*. Da un punto di vista intuitivo è facile capire il motivo per cui ciò accade: la corrente che fluisce nel circuito esterno produce una dissipazione in termini di effetto Joule sulla resistenza interna, quindi maggiore sarà la R_s maggiore la dissipazione in forma di calore. Analogo discorso vale per la resistenza di shunt. In questo caso il parametro da tenere in considerazione è la V_{oc} , che produce il fluire di una corrente nella resistenza di shunt che a sua volta dissipa energia in forma di calore.

4. Tecnologie innovative: le celle multigiunzione e la risposta spettrale

Una delle limitazioni più grosse all'efficienza di conversione consiste nel fatto che non tutti i fotoni disponibili nella radiazione solare hanno la stessa probabilità di essere assorbiti. Ad esempio, se ci riferiamo al silicio, le regioni infrarosse e

ultraviolette dello spettro solare non danno contributo alla fotocorrente. Una maniera per ovviare a questo inconveniente migliorando l'efficienza di conversione, consiste nel realizzare una struttura multigiunzione (Fig. 11) sovrapponendo materiali con energia di gap via via decrescente. In questo modo i fotoni con energia minore possono raggiungere le giunzioni più profonde perché i materiali utilizzati per costruire le giunzioni superficiali, avendo un gap più grande, risultano trasparenti [3,4]. Queste celle fotovoltaiche vengono realizzate con tecniche di crescita epitassiale utilizzando materiali dei gruppi II e V e materiali a piccolo gap come il germanio. La struttura è piuttosto complicata e spesso include una giunzione tunnel che migliora la separazione di carica a vantaggio dell'efficienza di estrazione. Si tratta di celle solari il cui costo è ovviamente fuori mercato rispetto a quelle tradizionali basate sul silicio, ma sono state raggiunte efficienze di conversione che eccedono il 35% e quindi vengono solitamente impiegate nei satelliti dove il costo per Watt non è un parametro importante quanto il peso e l'ingombro.

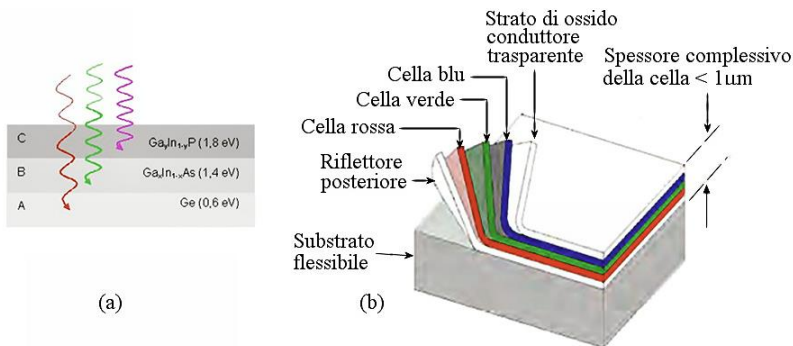


Figura 13. schema di funzionamento di una cella solare multigiunzione (a) e struttura di una cella solare multigiunzione costruita su supporto flessibile.

Recentemente in letteratura si trovano una moltitudine di materiali semiconduttori innovativi che consentono di realizzare celle fotovoltaiche a basso costo e con efficienze di conversione piuttosto elevate, un esempio per tutti è il CIGS ($\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$) che ha uno spettro di assorbimento sostanzialmente sovrapponibile a quello solare e quindi promette efficienze di conversione piuttosto elevate. La tecnologia non è tuttavia ancora matura per rendere questi dispositivi commerciali e disponibili per il grande pubblico.

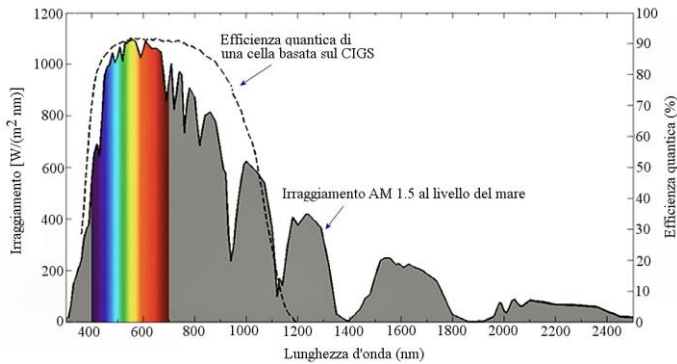


Figura 14. Efficienza quantica di una cella solare che utilizza il CIGS come materiale attivo.

Un altro modo per migliorare l'efficienza spettrale delle celle fotovoltaiche consiste nel fare ricorso ad una conversione dell'energia. Osservando la risposta spettrale dei materiali e lo spettro solare si mette subito in evidenza che buona parte dei materiali utilizzati per la realizzazione delle celle solari non è efficiente nella regione del blu ultravioletto che tuttavia è una regione spettrale in cui l'irraggiamento è ancora piuttosto importante. Un metodo compatibile con la tecnologia delle celle solari al silicio consiste nel ricoprire la cella con uno strato di ossido contenente nanocristalli di silicio. È noto che i nanocristalli di silicio fotoluminescono a lunghezze d'onda comprese fra 500 nm e 900 nm, a seconda delle loro dimensioni, per cui sono un buon candidato per realizzare una *down conversion*. In letteratura si trovano prototipi di celle al silicio che grazie ad una monodispersione di nanocristalli integrata in un sottile strato di ossido sulla superficie della cella migliorano l'efficienza di conversione anche del 10% nel visibile e del 3% nell'UV [5]. È possibile anche ricoprire la regione attiva della cella solare con un film trasparente, ad esempio polimerico, che contiene una piccola percentuale di molecole fluorescenti (DYE) ad elevata efficienza quantica. Scegliendo la molecola giusta si può fare in modo che i fotoni blu-ultravioletti vengano convertiti (*down conversion*) dalle molecole organiche in fotoni infrarossi o rossi che vengono poi efficacemente assorbiti e convertiti in energia elettrica dal materiale della cella vera e propria [6,7]. In questo modo è possibile ottenere miglioramenti nelle performance di alcuni punti percentuali, si deve però sottolineare che questo modo di operare introduce nella cella un punto di debolezza che risiede proprio nel film polimerico che irradiato per tempi lunghi dalla luce solare finisce con il degradarsi. Oggi esistono materiali polimerici in grado di produrre la conversione di fotoni ultravioletti o blu in fotoni rossi che hanno una

efficienza quantica elevatissima e vengono utilizzati per la produzione dei LED bianchi. Questi materiali hanno raggiunto una maturità piuttosto consolidata ed esibiscono tempi di vita di svariati anni, quindi sembrano degli ottimi candidati per la ricopertura delle celle solari, anche in considerazione del fatto che i costi di produzione sono ormai estremamente bassi anche grazie agli effetti di trascinarsi dovuti al loro impiego nella tecnologia dei LED per illuminazione.

5. Conclusioni

Premesso che gli argomenti affrontati non possono essere considerati esaustivi, appare evidente che la tecnologia delle celle solari fotovoltaiche, ancorché per certi versi ormai matura, può riservare ancora molte sorprese e sono possibili molti miglioramenti in termini di affidabilità, durata ed efficienza delle celle solari. Si deve poi sottolineare che la discussione affrontata si è concentrata sul dispositivo trascurando completamente il fatto che l'energia prodotta, per poter essere utilizzata deve essere convertita in corrente alternata ed immessa nella rete domestica, ovvero "conservata" in un accumulatore. Questo implica le necessità di utilizzare un convertitore elettronico che richiede una tecnologia costruttiva e caratteristiche di efficienza e durabilità considerevoli, visto che un pannello solare fotovoltaico commerciale ha una aspettativa di vita di oltre 20 anni. Negli ultimi 20 anni, inoltre, sono state pensate celle solari fotovoltaiche che funzionano utilizzando i materiali organici e fra questi in particolare i polimeri e i coloranti. Questi dispositivi sono molto interessanti perché grazie alla flessibilità con cui la chimica moderna è in grado di manipolare le strutture molecolari, è possibile immaginare soluzioni e miglioramenti non concepibili usando i materiali inorganici [8,9]. Ad esempio è molto affascinante l'idea di realizzare una vernice fotovoltaica con cui ricoprire i palazzi massimizzando in tal modo la superficie utilizzata. Anche l'uso dei coloranti in strutture che ricorrono ad elettrodi con funzione di catalizzatore sembra una strada estremamente promettente (celle di Graetzel). Tuttavia ad oggi queste tecnologie restano confinate al livello della produzione in laboratorio di semplici dimostratori e sono molto lontane dal poter essere pensate come tecnologie industriali o industrializzabili.

Infine, vale la pena di evidenziare che recentemente sono comparse sul mercato celle solari fotovoltaiche basate sull'uso del silicio che possono facilmente essere integrate nelle costruzioni moderne, citiamo ad esempio le tegole fotovoltaiche e le finestre fotovoltaiche. Si tratta di veri e propri elementi architettonici che, seppur ancora poco utilizzati per via dei costi inevitabilmente più elevati di quelli dei pannelli classici, rappresentano senza dubbio il modo in cui il fotovoltaico si integrerà nelle abitazioni del prossimo futuro.

Bibliografia

- [1] Blakers A.W. and Green M.A. (1986). 20% Efficiency Silicon Solar Cells. *Applied Physics Letters*, 48 (3), 215-217.
- [2] Campbell P. and Green M.A. (1987). Light Trapping Properties of Pyramidally Textured Surfaces. *Journal of Applied Physics*, 62 (1), 243-249.
- [3] Dimroth F. and Kurtz S. (2007). High-Efficiency Multijunction Solar Cells. *Advanced Inorganic Materials for Photovoltaics*, 32, (3), 230-235.
- [4] Takamoto T., Kaneiwa M., Imaizumi M., Yamaguchi M. (2005). InGaP/GaAs-based multijunction solar cells. *Prog. Photovolt: Res. Appl*, 13, 495-511.
- [5] Stupca M, Alsalhi M, Saud T, Almuhanha A, and Nayfeh, M. H. (2007). Enhancement of polycrystalline silicon solar cells using ultrathin films of silicon nanoparticle. *Applied Physics Letters*, 91, 063107.
- [6] Richards B.S., Ivaturi A., MacDougall S.K.W., Marques-Hueso J. (2012). Up- and Down-Conversion Materials for Photovoltaic Devices. Conference Paper in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.
- [7] Trupke T., Green M. A., and Würfel P. (2002). Improving solar cell efficiencies by downconversion of high-energy photons. *Journal of Applied Physics*, 92, 1668.
- [8] Previti F., Patanè S., Allegrini M. (2009). Polymer heterostructures with embedded Carbon nanotubes for efficient photovoltaic cells. *Applied Surface Science*, 255, 9877.
- [9] Cataldo S., Fabiano S., Ferrante F., Previti F., Patanè S., Pignataro B. (2010). Organoboron polymers for photovoltaic bulk heterojunctions. *Macromolecular Rapid Communication*, 31, 1281-1286.

Il concetto di modello e il suo uso nelle scienze

Enrico Prenesti

Dipartimento di Chimica, Università degli Studi di Torino

E-mail: enrico.prenesti@unito.it

Riassunto. Nel linguaggio corrente, il termine *modello* indica un esemplare che è ritenuto degno di essere imitato, riprodotto o esibito. Nel linguaggio scientifico, il modello è una rappresentazione concettuale di un fenomeno reale con funzione esplicativa. Un modello serve ad analizzare fenomeni a scopo di descrizione o di predizione: capire le relazioni causa-effetto alla base dei fenomeni per descriverne i meccanismi di funzionamento, per modificarli funzionalmente a uno scopo e per attuare previsioni di andamenti. La simulazione può avvenire in vari modi, dando così origine a: i) modelli concettuali (la base di qualunque modello), ii) modelli fisici in scala (simulazione diretta), iii) modelli matematici (simulazione indiretta), iv) modelli animali. Un modello scientifico di simulazione è, quindi, un archivio di ipotesi (che ne limitano la validità), di dati sperimentali e di teorie. Sviluppare un modello scientifico di simulazione implica usare dei simboli per rappresentare la realtà fenomenica oggetto d'interesse; la rappresentazione può avere differenti gradi di fedeltà, impiegare differenti modalità e strumenti di simulazione nonché perseguire differenti finalità. Il modello scientifico è uno strumento che serve a rappresentare, secondo gli assunti interpretativi della realtà fenomenica di una certa disciplina, un dato fenomeno d'interesse. Un modello scientifico riflette le opinioni e le conoscenze del modellista sul fenomeno in studio: per questa e altre ragioni (principalmente legate alla scelta del tipo di rappresentazione e alle ipotesi semplificative adottate), sono possibili diversi modelli per uno stesso sistema in studio. Ne risulta che un modello scientifico è sempre una rappresentazione semplificata del fenomeno di interesse, funzionale a uno specifico obiettivo. Il modello è, pertanto, lo strumento indispensabile per un lavoro scientifico in funzione dell'accumulazione del sapere (conoscenza) per il fare (azione). Dalle prassi sviluppate grazie alla formulazione di modelli efficaci potranno svilupparsi ulteriori e più raffinate

concettualizzazioni dei fenomeni, nel segno del progresso della scienza (funzione euristica dei modelli).

Abstract. In current language, the term *model* indicates a specimen that is deemed worthy of being imitated, reproduced or exhibited. In scientific language, the model is a conceptual representation of a real phenomenon with an explanatory function. A model is used to analyse phenomena for the purpose of description or prediction: to understand the cause-effect relationships at the base of the phenomena to describe the functioning mechanisms, to modify them functionally for a purpose and to implement trend forecasts. The simulation can take place in various ways, thus giving rise to: i) conceptual models (the basis of any model), ii) physical models on a scale (direct simulation), iii) mathematical models (indirect simulation), iv) animal models. A scientific simulation model is, therefore, an archive of hypotheses (which limit their validity), of experimental data and of theories. Developing a scientific model of simulation involves using symbols to represent the phenomenal reality that is the object of interest; representation can have different degrees of fidelity, use different methods and simulation tools and pursue different purposes. The scientific model is a tool that serves to represent, according to the interpretative assumptions of the phenomenal reality of a certain discipline, a given phenomenon of interest. A scientific model reflects the opinions and knowledge of the model maker on the phenomenon under study: for this and other reasons (mainly related to the choice of the type of representation and the simplifying hypotheses adopted), different models are possible for the same system in the studio. As a result, a scientific model is always a simplified representation of the phenomenon of interest, functional to a specific objective. The model is therefore the indispensable tool for a scientific work in function of the accumulation of knowledge for doing. From the practices developed thanks to the formulation of effective models, further and more refined conceptualizations of the phenomena can be developed, in the sign of the progress of science (heuristic function of the models).

1. Introduzione

Il pensiero scientifico è un modo di ragionare che si discosta dal pensiero quotidiano. Il pensiero scientifico mira a superare stereotipi di ragionamento basati

su un approccio inferenziale ai fenomeni ingenuo e guidato da convinzioni infondate. Il pensiero scientifico si articola affrontando problematiche (anche altamente sfidanti), ossia oggetti ed eventi del mondo materiale fenomenico, così da poterne comprendere i meccanismi di causa-effetto che li caratterizzano attraverso un metodo di indagine che risulti intersoggettivamente affidabile. L'approccio scientifico ai problemi tende alla comprensione dei dati osservabili per scoprirvi delle tendenze (regolarità, ricorsività) che diventano leggi sperimentali esplicative di singoli fenomeni; dalle leggi si elaborano le teorie scientifiche, che servono da strumenti di spiegazione e di previsione dei fenomeni mediante l'accordo con le osservazioni. La formulazione di teorie scientifiche passa per l'ottimizzazione dei modelli, che permettono di concettualizzare e di rappresentare con un determinato linguaggio i termini caratteristici (rispetto a un dato scopo) del problema oggetto di studio. Il cambiamento dei modelli scientifici nel tempo ha modificato il *concetto di realtà* nelle varie epoche: la modalità di descrizione dei sistemi complessi ha comportato una vera e propria trasformazione della visione dell'universo materiale. I grandi modelli del sapere scientifico hanno determinato diverse visioni della realtà che sono state espresse dal pensiero di importanti filosofi e scienziati e hanno contribuito a edificare il cammino dell'umanità.

2. Cosa si intende con il termine *modello*

Nel linguaggio comune, la parola *modello* ha un grande numero di accezioni e può assumere la funzione di sostantivo o di aggettivo; tale vocabolo è, perciò, polisemico (in semantica, *polisemia* indica la proprietà che una parola ha di esprimere più significati) [1-3].

Come *sostantivo*, i significati del termine si possono rinvenire in alcuni dizionari:

- dizionario Devoto Oli 2015 della lingua italiana (selezione): «Oggetto utilizzato come esemplare da riprodurre [...]»; «Persona che posa per un pittore, uno scultore, un fotografo»; «Riproduzione in scala ridotta di edifici, strutture meccaniche e sim., spec. in fase di progettazione, al fine di studiarne o illustrarne le caratteristiche»; «Modulo prestampato usato negli uffici pubblici per scopi amministrativi o burocratici»; «Costruzione teorica che rappresenta fenomeni non direttamente osservabili [...]»;
- dizionario Sabatini Coletti 2008 della lingua italiana (selezione): «Termine di riferimento ritenuto valido come esempio o prototipo e degno d'imitazione; cosa o persona assunta come soggetto per un ritratto, un disegno, una costruzione, ecc.. Riproduzione in scala ridotta di strutture edilizie, meccaniche e simili. Modulo a stampa, spesso contrassegnato da una

sigla, per usi amministrativi. Schema teorico scelto come rappresentativo di una classe di fenomeni»;

- enciclopedia dell'economia Garzanti (selezione): «Un modello è l'insieme di relazioni quantitative che descrivono in modo semplificato un certo gruppo di fenomeni, usate sia nella formulazione di teorie che nella loro verifica empirica».

Come *aggettivo* posposto al nome, *modello* è un termine che può denotare qualcuno o qualcosa (persona, struttura) che funziona in modo esemplare ed è, perciò, degno di essere imitato (cioè, di essere assunto come riferimento virtuoso per una data cosa), per esempio:

- Giacomo è un impiegato modello,
- Carla è una sposa modello,
- questo è un asilo modello.

Una ricognizione accurata del termine in studio (come sostantivo) porta a riconoscerne, sostanzialmente, due sfaccettature dominanti che portano a identificare:

- i modelli di *riferimento*,
- i modelli di *simulazione*.

3. Modelli di riferimento

Nel linguaggio corrente, il termine *modello* indica un esemplare che è ritenuto degno di essere:

- *imitato*: esempio, «Silvia è un modello di onestà»;
- *riprodotto*: prototipo, inteso *i*) come primo esemplare di un manufatto, oppure *ii*) come primo fatto a cui si ispirano, o sono riconducibili, fatti o fenomeni che si verificano in seguito;
- *esibito*: chi posa per artisti (scultori, fotografi, ecc.), chi indossa abiti o accessori per sfilate di moda.

È qui evidente il ruolo (e la potenza) sociale ricoperto da tutto ciò che le fonti di informazione additano come *modello* per indurne l'*imitazione* a scopo di profitto orientando i consumi attraverso l'influenza dei costumi cioè, di quei comportamenti riferiti a un modello per determinare il bisogno di uniformità a uno stile indicato come *trendy*, cioè alla moda. Messaggi di comunicazione persuasiva riescono a inculcare in numerose persone appartenenti a una data categoria sociale uno stato

di bisogno di conformità al modello che finisce, quindi, con l'imporsi per un certo tempo in categorie di individui prestabilite (esempi: studenti che non possono sottrarsi al possesso di uno zainetto griffato, uomini che si identificano con il possesso di un orologio *Rolex*, donne che non possono sottrarsi all'acquisto di capi di vestiario del colore in voga per l'anno in corso).

Il *modello* può anche essere inteso come *strumento di organizzazione razionale* di una determinata materia. Il modello diviene, allora, lo *schema-base*, il *formato standard* cui aderire, cui uniformarsi, cui *referirsi*. A seconda del campo di applicazione, l'adesione a un dato modello di riferimento può essere volontaria oppure obbligatoria. Un primo caso, ad adesione obbligatoria, lo troviamo nel mondo amministrativo, che è ricco di moduli standard preimpostati da compilare secondo regole precise, codificate e prestabilite (per esempio, il "Modello 730" per la dichiarazione annuale dei redditi delle persone fisiche). Un secondo caso, ad adesione volontaria a larga diffusione è quello relativo ai *modelli di Qualità* assunti spontaneamente come riferimento normativo da aziende per le procedure di certificazione o di accreditamento (per esempio, la serie di norme volontarie ISO 9000). La finalità dei modelli di riferimento volontari è quella di stabilire un agire comune, uniforme e condiviso tra individui che si riconoscono nei contenuti prestabiliti dal modello e al quale scelgono di aderire per trarne dei vantaggi diretti e indiretti relativi alle più diverse sfere della vita lavorativa o sociale. Lo sviluppo di standard, di protocolli, sono operazioni che avvengono sotto l'ala della ricerca di riferimenti comuni per i componenti della società che operano nel campo cogente come in quello volontario. In generale, uno standard cristallizza un *modus operandi* e ne impone l'adozione a una data comunità di individui. L'utilità degli standard è riconosciuta in vari ambiti dell'organizzazione della vita lavorativa (e non solo), ma risulta condivisibile nell'ottica che gli si riconosca una validità temporanea e circoscritta con funzione di manuale-guida per singole operazioni che sono state largamente e metodicamente studiate e ottimizzate. Grace Murray Hopper: «La cosa meravigliosa degli standard è che ce ne sono molti tra cui scegliere».

4. Modelli di simulazione

Il modello può anche essere uno *strumento di studio* di una determinata disciplina. Se il concetto di modello si applica al settore dei fenomeni naturali oggetto di studio della scienza (fenomeni chimici, fisici, biologici, geologici, ecc.), il concetto di modello si estende, e si arricchisce, alla rappresentazione di fenomeni (naturali e non) attraverso operazioni matematiche di simulazione realizzate tramite strumenti informatici.

Nel linguaggio scientifico, il modello è una rappresentazione concettuale di un fenomeno reale con funzione esplicativa. Un modello serve ad analizzare fenomeni

a scopo di descrizione o di predizione: capire le relazioni causa-effetto alla base dei fenomeni per descriverne i meccanismi di funzionamento, per modificarli funzionalmente a uno scopo e per attuare previsioni di andamenti.

Il modello scientifico è uno strumento che serve a rappresentare, secondo gli assunti interpretativi della realtà fenomenica di una certa disciplina, un dato fenomeno. Secondo Giorgio Israel (storico della scienza ed epistemologo italiano, 1945 – 2015), «Un modello matematico è una rappresentazione formale di idee e conoscenze relative a un fenomeno»; in generale, un modello scientifico riflette le opinioni e le conoscenze del modellista sul fenomeno in studio: per questa e altre ragioni (principalmente legate alla scelta del tipo di rappresentazione e alle ipotesi semplificative adottate), sono possibili diversi modelli per uno stesso sistema in studio. Nel solco di questa constatazione, giova conoscere la seguente affermazione di George Edward Pelham Box (matematico e statistico inglese, 1919 – 2013): «*All models are wrong but some are useful*». Ne risulta che un modello scientifico è sempre una *rappresentazione semplificata* del fenomeno di interesse, funzionale a uno specifico obiettivo [4].

Il modello è, pertanto, lo strumento indispensabile per un lavoro scientifico in funzione dell'accumulazione del sapere (conoscenza) per il fare (azione). Dalle prassi sviluppate grazie alla formulazione di modelli efficaci potranno svilupparsi ulteriori e più raffinate concettualizzazioni dei fenomeni, nel segno del progresso della scienza (funzione euristica dei modelli).

All'interno della scienza, si distinguono svariati tipi di modelli, tutti accomunati dall'intento di fornire una rappresentazione qualitativa e/o quantitativa, spesso semplificata, di uno o più fenomeni naturali in cui interviene un oggetto, o un sistema di oggetti, inteso come un complesso di componenti interagenti e, talora, variabili nel tempo. Ciò che deve essere ben compreso è che *il modello è una rappresentazione concettuale di un fenomeno reale ed è ben distinto dal fenomeno stesso*. Secondo Albert Einstein: «*Reality is merely an illusion, albeit a very persistent one*». Per queste ragioni è sempre doveroso porsi delle domande sulla *fiducia* da attribuire al modello appena costruito, affinché esso non operi al di là del logicamente lecito.

La trasposizione del concetto informatore nel modello che lo rappresenta – il passaggio dalla concettualizzazione alla modellizzazione – può avvenire in svariati modi che esamineremo più avanti.

In generale, un modello scientifico di simulazione è un *archivio* di:

- ipotesi,
- teorie,
- dati sperimentali.

Le ipotesi provengono principalmente:

- dalle idee del ricercatore sul fenomeno in studio,
- delle teorie impiegate,
- dai principi di misurazione adottati.

Operativamente, si possono concepire:

- modelli dei fenomeni,
- modelli dei dati sperimentali.

A seconda della natura dell'obiettivo, si possono modellare fenomeni o dati provenienti da misurazioni. La modellazione dei dati sperimentali impiega tecniche di *fitting* numerico per sviluppare equazioni (lineari, polinomiali, ecc.) che permettono il calcolo dei valori della grandezza in studio anche in punti non campionati del dominio di modellazione (le curve di livello usate in cartografia si basano su questo principio).

5. Le varie tipologie di modelli di simulazione

La simulazione può avvenire in vari modi, per cui, in scienza, si distinguono diverse tipologie di modelli di simulazione:

- i modelli concettuali,
- i modelli fisici in scala,
- i modelli matematici (vari tipi),
- i modelli animali.

Un modello scientifico di simulazione è, quindi, un archivio di ipotesi (che ne limitano la validità), di dati sperimentali e di teorie. Sviluppare un modello scientifico di simulazione implica usare dei simboli per rappresentare la realtà fenomenica oggetto d'interesse; la rappresentazione può avere differenti gradi di fedeltà, impiegare differenti modalità e strumenti di simulazione nonché perseguire differenti finalità.

Il modello è uno strumento concettuale che intende analizzare e descrivere la realtà realizzando una sintesi tra semplificazione e formalizzazione. Nessun modello può esistere senza una concettualizzazione preliminare (che è il modello concettuale). I modelli consentono al soggetto cosciente di organizzare i dati empirici già a disposizione e, talora, di predirne di nuovi.

Il modello scientifico di simulazione serve per:

- comprendere: estrazione di informazione specifica da teorie e/o dati attuali,

- prevedere: proiezione nel tempo da teorie e/o dati attuali,
- modificare: uso di teoria e/o dati attuali per progettare trasformazioni finalizzate.

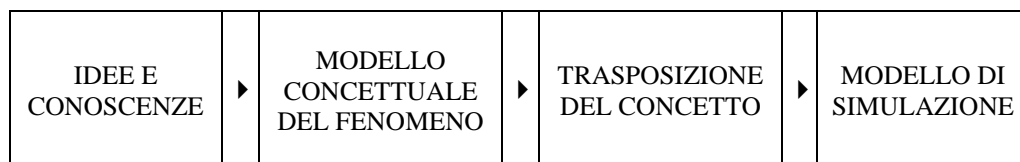
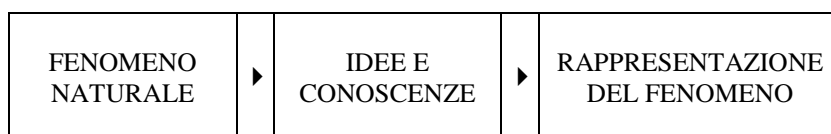
Nessun modello scientifico andrebbe sviluppato quando fossero realizzabili con facilità e ragionevole esattezza (rispetto alle finalità prestabilite) delle misurazioni dirette sul campo delle grandezze d'interesse. I modelli si impiegano, con riferimento alla soluzione di problematiche contingenti:

- per *predire* condizioni inerenti situazioni che si potrebbero verificare in un futuro,
- per *indagare* su fenomeni che avvengono in luoghi difficilmente accessibili.

6. I modelli matematici

Secondo il matematico Giorgio Israel (1988): «Un modello matematico è una rappresentazione formale di idee e conoscenze relative a un fenomeno». Questa definizione permette di precisare due aspetti salienti del processo di modellazione:

- un modello matematico è una rappresentazione formale, cioè non discorsiva, di un fenomeno,
- non esiste una via diretta e univoca dalla realtà fenomenica alla rappresentazione (matematica o di altra natura), perché il percorso si sviluppa passando attraverso idee e conoscenze, ossia il fenomeno non determina automaticamente la sua rappresentazione, ma sono le idee – inclusi i pregiudizi e i preconcetti (in generale, le convinzioni) individuali – e le conoscenze – così come le persone della comunità scientifica di un certo tempo le codificano, esprimono e legittimano – a essere strumento di concepimento di un modello di simulazione.



Il flusso di lavoro necessario per costruire un modello matematico di simulazione, dal chiarimento degli scopi, alle premesse metodologiche fino allo sviluppo e alle prime applicazioni, può così essere sintetizzato:

- definire chiaramente l'obiettivo a priori,
- organizzare razionalmente lo studio per stadi,
- comprendere i dati che si sono raccolti,
- servirsi delle teorie descrittive adatte,
- avanzare eventuali ipotesi semplificative,
- sviluppare il modello di simulazione,
- testarlo in situazioni perlopiù note,
- usarlo per fare previsioni entro i suoi limiti testati.

Si distinguono due famiglie di modelli matematici:

- i modelli c.d. *theory-driven*: modelli deterministici basati sulle conoscenze o *hard models* o modelli a scatola trasparente o *white-box models*,
- i modelli c.d. *data-driven*: modelli basati sui dati o *soft models* o modelli a scatola nera o *black-box models*.

Per sviluppare modelli di simulazione (*model design*) è poi istruttivo conoscere l'affermazione che il celebre matematico Daniel Bernoulli scrisse nel 1766 in una sua memoria sul calcolo delle probabilità applicato a eventi biologici: «Le leggi più semplici della natura sono sempre le più plausibili». Qualunque modello matematico, ma soprattutto i modelli *data-driven* o *soft models*, è basato sull'impostazione di equazioni che sono risolte attraverso modalità di *fitting* numerico che mira a ottimizzare il valore dei parametri operazionali di adattamento ai dati sperimentali. Anche nei modelli matematici, la semplicità è un segno distintivo di competenza del modellista, come sostenuto da George Edward Pelham Box: «*Just as the ability to devise simple but evocative models is the signature of the great scientist so overelaboration and overparameterization is often the mark of mediocrity*» [4]. La stima dei parametri di un modello *data-driven* (ma la cosa è autentica per qualunque tipo di modello che impieghi dei parametri con un valore meramente operativo da raffinare caso per caso) è particolarmente critica, poiché essi non hanno un aggancio diretto con una qualche realtà fenomenica (come può essere, per esempio, il punto di fusione di una sostanza) ma hanno esclusivamente una funzione descrittiva che permette l'aggiustamento della forma della curva che si adatta ai dati sperimentali del momento (cambiando il *data set* disponibile può cambiare il valore dei parametri).

7. Teorie e modelli in scienza

Teorie e modelli, in scienza, sono astrazioni speculative impiegate a scopo di studio con la finalità di comprendere la natura intima di taluni fenomeni naturali per poi poterne prevedere l'andamento nel tempo oppure per poterli modificare in funzione di determinati scopi prestabiliti [5, 6].

Per formazione di una *teoria* si intende il processo di sintesi e generalizzazione dei risultati vari e numerosi di sperimentazioni e speculazioni che avviene, di solito, con l'aiuto della formulazione di alcune ipotesi preliminari, spesso semplificative, grazie alle quali diviene accessibile una trattazione matematicamente mediata del fenomeno in oggetto. Le ipotesi preliminari costituiscono uno dei limiti alla generalizzazione della teoria.

Per formazione di un *modello scientifico* si intende, invece, l'uso di simboli per rappresentare – ovvero *simulare* – segmenti di realtà fenomenica d'interesse. La rappresentazione può avere differenti gradi di fedeltà, impiegare differenti modalità e strumenti di simulazione nonché perseguire differenti finalità. Il modello scientifico è uno strumento all'interno di una teoria che serve per rappresentare e interpretare un fatto in studio. La maggior parte delle teorie scientifiche è generata entro la matrice di qualche modello di realtà. Ogni modello-teoria descrive e interpreta aspetti diversi della realtà fenomenica. Il modello rappresenta un legame tra realtà fenomenica e teoria, ossia serve come guida per costruire le assunzioni fondamentali di una teoria e come fonte di suggerimenti per estendere il suo campo di applicazione e per generalizzarne la validità.

8. I modelli e la mente umana

Imparare a conoscere i modelli è di estrema importanza per un semplice motivo: la mente umana ragiona per modelli. L'idea di rappresentazione mentale che il soggetto ha della realtà risale agli studi di John Bowlby (medico e psicanalista britannico, 1907 – 1990) degli anni '80 del XX secolo. Le valutazioni cognitive ed emotive che la mente opera sui fatti percepiti dall'ambiente attraverso i cinque sensi, in seguito alle quali viene stabilita e prodotta l'azione ritenuta migliore per le circostanze, è basata su confronti con dati archiviati nella memoria e organizzati secondo ciò che le neuroscienze denominano – dalla teoria dell'attaccamento di John Bowlby [7] – «Modelli operativi interni» («*Internal Working Models*»). I modelli operativi interni sono rappresentazioni mentali costruite da ogni individuo come strutture che contengono le diverse configurazioni (spaziale, temporale, causale) dei fenomeni del mondo e che hanno la funzione di veicolare la percezione e l'interpretazione degli eventi, consentendogli di fare previsioni e di crearsi aspettative sugli accadimenti della propria vita relazionale. È allora chiaro quanto sia determinante nell'economia della vita di ciascuno l'esperienza accumulata: con

esperienza intendo non tanto i fatti che sono capitati nel corso degli anni quanto il significato che è stato loro attribuito per i più svariati motivi contingenti e storici. Ciascuna azione che produciamo è il risultato di una sintesi che la mente opera verso la ricerca della soluzione ritenuta in quel momento più vantaggiosa o meno svantaggiosa (dipende se si vive in fuga dal dolore o verso la ricerca del piacere). Tale sintesi è raggiunta rapidamente in risposta a ogni stimolo ambientale ritenuto significativo grazie a delle modalità di valutazione che sono racchiuse in pacchetti di criteri stabiliti *ad hoc* in base alle esperienze acquisite nel passato e stabilmente alloggiato in appositi circuiti sinaptici della memoria. In particolare, secondo John Bowlby gli individui, nel corso dell'interazione col proprio ambiente, costruiscono dei modelli operativi interni del mondo fisico e sociale che li circonda sulla base della relazione impostata dalle sue figure di accudimento (che molto spesso sono i genitori biologici) per le quali sviluppa il legame di attaccamento dalla natura e qualità del quale dipenderà largamente l'immagine di se stesso («modelli operativi di sé») nonché, di conseguenza, la qualità delle sue relazioni sociali («modelli operativi di sé con l'altro»). John Bowlby arrivò ad affermare (1988) che il consolidamento progressivo dei modelli operativi interni li porta a divenire scontati (quindi rigidi e inconsapevoli) arrivando, cioè, a operare a livello inconscio fino, dunque, a diventare tendenzialmente caratteristiche della personalità del soggetto, più che delle sue relazioni. Nell'adolescenza e in età adulta, gli stessi modelli operativi interni si renderanno poi disponibili come repertorio di modelli gerarchicamente organizzati e riferiti a differenti aspetti della realtà.

Ogni giorno compiamo centinaia di azioni delle quali siamo solo parzialmente consapevoli, poiché proprio i modelli operativi interni ci permettono di agire rapidamente secondo ciò che denominiamo automatismi. Dietro a ogni automatismo, così come dietro a qualunque decisione lungamente ponderata, si staglia l'effetto di un gruppo di *istruzioni preconfezionate che ci guidano* procurandoci uno stato d'animo (un'emozione) che ci conduce verso l'azione la quale, a sua volta, ci permette l'acquisizione di uno stato psicofisico di accrescimento del benessere o di contenimento del malessere. I modelli operativi interni racchiudono, quindi, tutti i messaggi educativi ricevuti dalle figure di riferimento/accudimento/attaccamento nei primi anni di vita e trasformati in precetti condizionanti: si tratta di credenze (cioè, convinzioni assiomatiche resistenti al cambiamento), regole (esempio: «Saluta, quando incontri qualcuno che conosci!»), opinioni (credenze fluide, modificabili con relativa semplicità), valori (credenze fondanti dell'assetto della personalità, spesso inamovibili) e atteggiamento mentale che edificano un assetto dell'identità in nome del mantenimento del quale si assumono di fronte alle varie circostanze della vita

comportamenti, generalmente ripetitivi, che danno conferma di se stessi e, quindi, rassicurazione.

I modelli operativi interni sono la via per cristallizzare paradigmi, ossia schemi ricorsivi di pensiero. In *filosofia della scienza*, un *paradigma* è la matrice disciplinare entro la quale si riconosce una comunità scientifica. In questa matrice, si cristallizza una visione globale e condivisa del mondo (*weltanschauung*). Il paradigma costituisce e delimita il campo, la logica e la prassi della ricerca stessa come principio ordinatore. È all'interno della logica paradigmatica che la ricerca scientifica individua il suo oggetto di studio, i problemi più cogenti e la metodica migliore per affrontarli. L'evoluzione del pensiero scientifico avviene attraverso la revisione dei suoi paradigmi. Dalle prassi sviluppate grazie alla formulazione di modelli efficaci potranno svilupparsi ulteriori e più raffinate concettualizzazioni dei fenomeni per lo sviluppo di paradigmi apripista del progresso della scienza (funzione euristica dei modelli).

I modelli operativi interni possono anche rappresentare un ostacolo all'apprendimento scolastico, laddove nuove informazioni in entrata si scontrassero con istruzioni archiviate nella memoria e ritenute dallo studente incompatibili con il nuovo sapere che viene, quindi, di fatto rigettato ovvero imparato pedissequamente a memoria per il solo scopo del superamento della prova d'esame. In tal caso, il nuovo materiale sarà rapidamente dimenticato, vanificando l'intervento educativo e istruttivo con dispendio di energie e di risorse individuali e della collettività.

Nonostante la forza dei modelli operativi interni sia altissima, giova sapere che, grazie alla plasticità cerebrale, essi possono essere cambiati attraverso un lavoro su se stessi. Con la forza della consapevolezza e la giusta autodeterminazione si possono allenare le nuove risorse utili per raggiungere i nuovi obiettivi autonomamente prescelti per il nuovo assetto della propria vita, superando, così, la semplice perpetuazione per imitazione e replicazione di consuetudini radicate nella famiglia d'origine o nell'ambiente di istruzione (i paradigmi acquisiti possono e, a volte, devono essere revisionati per migliorarsi ed evolvere).

Si comprende, adesso, facilmente la ragione per la quale lo strumento del *modello* sia così appropriato allo studio dei fenomeni naturali e quanto, di fatto, i modelli non siano appannaggio degli scienziati ma, più semplicemente, dei meccanismi operazionali della mente umana. Le stesse teorie costruttiviste dell'apprendimento beneficiano dell'apporto del lavoro di John Bowlby, che consente di conferire uno spessore neuropsichico alla modellazione attraverso la quale si studia il rapporto degli esseri umani con l'atto dell'imparare per crescere a svilupparsi in termini sia di conoscenza sia di coscienza.

Bibliografia

- [1] Autori vari, Enciclopedia europea Garzanti, vol. VII.
- [2] Enciclopedia dell'economia (2001). Collana Le Garzantine, Garzanti libri.
- [3] Enciclopedia Pedagogica (diretta da Mauro Laeng) (1992). La Scuola, Brescia.
- [4] George E. P. Box, Science and Statistics, (1976). J. Am. Stat. Ass., 71, 791-799.
- [5] Treccani, Dizionario di Filosofia, (2009). www.treccani.it.
- [6] Boniolo G., Maugeri P., Modelli come rappresentazioni finzionali, in E. Gagliasso, G. Frezza (Eds.) 2010. Metafore del vivente. Linguaggi e ricerca scientifica tra filosofia, bios e psiche, Franco Angeli.
- [7] Bowlby J. (2001). Attaccamento e perdita, Bollati Boringhieri.

Il mondo delle misure: la metrologia e il nuovo SI

Michela Sega

Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM)

E-mail: m.sega@inrim.it

Riassunto. Il 20 maggio 2019 è entrato in vigore il nuovo Sistema Internazionale delle unità di misura (SI). Il nuovo SI continua a mantenere le stesse sette unità di base, ma si assiste ad un cambiamento totale di paradigma. Tutte le unità, infatti, sono ora legate ciascuna a una costante fondamentale della natura, che le rende quindi universali e immutabili nello spazio e nel tempo. Nel presente contributo, vengono illustrati alcuni cenni storici sulla nascita del SI e sulla sua evoluzione, oltre ai concetti alla base del nuovo SI. Vengono inoltre affrontati i temi generali della metrologia, la scienza della misurazione e delle sue applicazioni, incluso il suo contributo verso misure armonizzate e di qualità sia su scala nazionale sia internazionale, con alcuni esempi del ruolo della ricerca metrologica, anche a supporto delle sfide sociali in settori come l'ambiente o la salute.

Abstract. On 20th May 2019 the new International System of Units (SI) came into effect. The new SI maintains the same seven base units, however with a radical paradigm shift. Each unit is now linked to a fundamental constant of nature, hence being universal and unchangeable in space and time. In the present work, some historical notes on the birth of the SI and its evolution are given. Moreover, it deals with the general concepts of metrology, the science of measurement and its applications, including its contribution to harmonised measurements both at national and international level, with some examples of the role of the metrological research also to support the societal challenges in sectors like health and environment.

1. Introduzione

Il 2019 rappresenta un anno di cambiamento nel mondo delle misure: dal 20 maggio, data della firma della Convenzione del Metro e in cui si celebra la Giornata Mondiale della Metrologia, è entrato in vigore il nuovo Sistema Internazionale delle unità di misura (SI). Il nuovo SI continua a mantenere le stesse sette unità di base (m, s, kg, K, mol, A, cd) ma, contrariamente al passato, si assiste ad un cambiamento totale di paradigma. Tutte le unità, infatti, sono ora legate ciascuna a una costante fondamentale della natura, che le rende quindi universali e immutabili nello spazio e nel tempo, oltre a superare i limiti del sistema precedente che prevedeva costanti, esperimenti ideali, proprietà materiali e prototipi. Il presente lavoro illustra alcuni cenni storici sulla nascita del SI e sulla sua evoluzione, oltre ai concetti alla base del nuovo SI. Vengono inoltre affrontati i principi generali della metrologia, che, in quanto scienza della misurazione e delle sue applicazioni, è per sua natura una disciplina trasversale che comprende gli aspetti sia teorici sia pratici della misurazione, qualunque siano il campo di applicazione e l'incertezza di misura. Si forniscono cenni sulle organizzazioni metrologiche internazionali, volte a garantire l'armonizzazione e l'equivalenza delle misure su scala mondiale, e sul ruolo degli Istituti Metrologici Nazionali, elemento di raccordo tra la nazione e il contesto globale.

2. La necessità di riferimenti comuni

2.1 L'esigenza di misurare

L'uomo ha sempre sentito l'esigenza di misurare: poter disporre di modi e metodi per misurare lo scorrere del tempo e le grandezze materiali come la distanza, o la lunghezza e il peso di un oggetto hanno accompagnato l'umanità fin dalla preistoria. Per lungo tempo, l'uomo è stato al centro di tutte le cose e questo aspetto ha condizionato anche le misurazioni. Questa è la ragione per cui in molte civiltà le misure dimensionali sono state effettuate per confronto con alcune parti del corpo, come il pollice, il palmo, la spanna, il piede, il braccio e così via. L'esigenza di misurare le grandezze fisiche utilizzate nella vita di tutti i giorni e il loro impiego in contrattazioni e transazioni anche di tipo commerciale, hanno portato alla necessità di poter disporre di misure accurate, ma anche di riferimenti comuni. Per molti secoli questo aspetto si è però limitato ad avere riferimenti comuni e condivisi solo all'interno di specifiche comunità.

2.2 Verso un sistema universale di unità di misura

Quanto fosse sentita l'esigenza di avere unità di misura eque e uguali per tutti diventò inequivocabilmente chiaro allo scoppio della Rivoluzione Francese nel 1789. Ciascun Paese adottava unità di misura diverse e spesso anche uno stesso

tipo di misura aveva unità diverse a seconda degli impieghi. Questo fatto costituiva un enorme ostacolo, in particolare agli scambi di tipo commerciale. L'Assemblea Nazionale incaricò l'*Académie des Sciences* di studiare una soluzione ed essa nominò una Commissione della quale il matematico e astronomo italiano Giuseppe Luigi Lagrange fu chiamato a far parte. Il nuovo sistema di misura avrebbe dovuto essere universale e quindi possedere alcuni requisiti, quali essere uniforme, legare tra di loro le unità, l'unità di misura doveva essere naturale e invariabile per poter essere accettata da tutti i popoli e alla portata di tutti, non di competenza esclusiva di pochi. Il metodo sperimentale elaborato da Galileo Galilei, venne eletto a modello per condurre le misurazioni necessarie per istituire i nuovi riferimenti. La scelta iniziale di costruire un pendolo campione sfruttandone l'isocronismo e realizzando un campione che battesse il secondo da utilizzare sia per le misure di lunghezza sia per quelle di tempo, viene presto abbandonata: il periodo di oscillazione, infatti, risultò non essere costante ma condizionato dalle anomalie della gravità terrestre. La Terra venne scelta quindi come riferimento, proponendo di utilizzare dei sottomultipli delle dimensioni della Terra per realizzare un campione di lunghezza e condurre sperimentalmente la misura di una porzione di un meridiano campione o un parallelo campione (l'equatore). Per ragioni pratiche, viene abbandonata l'idea di misurare l'equatore e viene deciso di ripetere, sfruttando le potenzialità offerte dalle nuove tecniche di misura, l'esperimento di Eratostene per la misura del meridiano terrestre. Si stabilì quindi che l'unità di lunghezza, cui fu dato il nome di metro, sarebbe stata la decimilionesima parte del quarto di un meridiano terrestre. Per questioni logiche e logistiche, la scelta cadde sul meridiano che passa per Parigi, con la decisione di misurarne un arco che andava da Dunkerque a Barcellona, riprendendo con tecniche moderne quello che era stato il tentativo fatto da Eratostene 2000 anni prima. Vennero quindi incaricati due autorevoli scienziati astronomi, Jean-Baptiste Delambre e Pierre François André Mechain che, nel giugno del 1792, partirono uno verso nord e l'altro verso sud, rispettivamente. Il loro lavoro fu a dir poco eroico, dovendo far fronte a enormi difficoltà, non solo di tipo organizzativo e misuristico, ma anche politico. Si trattava infatti di eminenti scienziati che viaggiavano per un'Europa sconvolta dalle guerre, tra la diffidenza generale, muniti del lasciapassare di un re che nel frattempo era stato ghigliottinato. Mechain venne addirittura arrestato in Spagna. Ma portarono a termine la loro missione concludendo i lavori nel 1798. I risultati furono sottoposti all'esame di una commissione internazionale e il 22 giugno 1799 due campioni materiali di platino che rappresentavano il metro e il kilogrammo (i cosiddetti metro e kilogrammo degli Archivi), vennero depositati presso gli

Archivi della Repubblica di Parigi, andando a costituire i primi passi verso l'attuale SI [1].

2.3 La Convenzione del Metro

Nel 1867, La Conferenza Internazionale di Geodesia, riunitasi a Berlino, decretò sull'importanza di adottare il Sistema Metrico come un sistema di pesi e misure unico per l'Europa, raccomandando la costruzione di un nuovo prototipo del metro e la creazione di una commissione internazionale, decisione vista con favore non solo dalla comunità scientifica francese, ma anche da quelle russa e britannica. Il 1 settembre 1869, un decreto dell'Imperatore Napoleone III propose l'istituzione di una commissione scientifica internazionale per promuovere l'uso delle misure metriche e per costruire un prototipo internazionale del metro, dando così un ruolo fondamentale alla Francia. Il 16 novembre 1869 il governo francese inviò gli inviti a partecipare ai lavori della commissione. La Commissione Internazionale del Metro venne istituita a Parigi nel 1870. I suoi lavori vennero condotti con la partecipazione di circa 30 Paesi, inclusi dieci del continente americano e portarono alla realizzazione del nuovo metro prototipo e, in seguito, alla firma della Convenzione del Metro (*Convention du Mètre*) [1]. La Convenzione del Metro venne firmata a Parigi, il 20 maggio 1875, dai rappresentanti di diciassette nazioni, tra cui l'Italia. È un vero e proprio trattato diplomatico internazionale che istituì l'Ufficio Internazionale dei Pesi e delle Misure (BIPM), organizzazione intergovernativa che opera sotto l'autorità della Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure (CGPM) e la supervisione del Comitato Internazionale dei Pesi e delle Misure (CIPM). La Convenzione del Metro ha costituito una struttura organizzativa permanente dei governi degli stati membri per agire di comune accordo su tutte le questioni legate alle unità di misura. Attualmente conta 60 Stati Membri e 42 Associati.

3. Il Sistema Internazionale delle unità di misura

3.1 Il SI e la sua evoluzione

La creazione del sistema metrico decimale durante la rivoluzione Francese è stato il primo passo verso il Sistema Internazionale SI. Lo scienziato tedesco Johann Friedrich Carl Gauss, nel 1832, si fece promotore dell'applicazione di tale sistema, integrato dal secondo definito in astronomia, come sistema coerente di unità di misura per le scienze fisiche. Gli sviluppi futuri delle scienze fisiche e sperimentali si basarono largamente su questo sistema.

Dopo la firma della Convenzione del Metro nel 1875 che aveva creato il BIPM e istituito la CGPM e il CIPM, iniziarono i lavori per realizzare i nuovi prototipi del metro e del chilogrammo, che vennero formalmente approvati nel corso della

prima CGPM nel 1889. Insieme al secondo astronomico, assunto come unità di tempo, queste unità andarono a costituire il sistema MKS. Nel 1901, il fisico italiano Giovanni Giorgi mostrò che era possibile combinare le unità del Sistema MKS con le unità elettriche per ottenere un Sistema basato su quattro unità, una delle quali di natura elettrica come l'ampere o l'ohm. La proposta di Giorgi venne profondamente esaminata e discussa a livello internazionale, fino a portare al sistema MKSA, che includeva l'ampere come quarta unità, approvato dal CIPM nel 1946. In seguito a una consultazione internazionale condotta dal BIPM, la 10^a CGPM, nel 1954, approvò l'ulteriore introduzione del kelvin e della candela come unità fondamentali per la temperatura termodinamica e l'intensità luminosa rispettivamente. Durante l'11^a CGPM (1960), a tale Sistema venne dato il nome di Sistema Internazionale delle Unità, abbreviato in SI. Vennero anche stabilite delle regole per l'uso di prefissi, di unità derivate e supplementari. Nel 1960 venne anche riformulata la definizione del metro, basata sulla lunghezza d'onda di una particolare transizione del ⁸⁶Kr. I successivi progressi della tecnologia, ne consentirono una nuova formulazione nel 1983 nel corso della 17^a CGPM, che lega il metro alla distanza che la luce percorre nel vuoto in un intervallo di tempo specificato. Considerata l'importanza di una definizione precisa dell'unità di tempo nei settori tecnologici, durante la 13^a CGPM (1967-1968) venne introdotta una nuova definizione del secondo, riferita alla transizione iperfine dell'atomo di ¹³³Cs. Durante la 14^a CGPM (1971) venne introdotta una nuova unità fondamentale per le misure chimiche, la mole, unità della grandezza quantità di sostanza, portando il SI alla struttura con sette unità fondamentali, che mantiene tuttora. La tabella 1 riporta le definizioni delle unità del SI in vigore fino al 19 maggio 2019.

3.2 L'attuale SI

Il SI era precedentemente definito in termini di sette unità di base, scelte per ragioni storiche, e considerate, per definizione, come indipendenti dal punto di vista dimensionale. Dalla sua introduzione, sono stati compiuti progressi straordinari nella tecnica e nella conoscenza scientifica. Tali progressi, uniti alla disomogeneità delle definizioni precedenti, hanno portato alla consapevolezza dell'importanza di legare le unità del SI a grandezze invarianti, come le costanti fondamentali della natura e le proprietà degli atomi. Sulla base delle conoscenze attuali e degli esperimenti condotti per determinare i valori di tali costanti fondamentali in modo coerente e con la massima accuratezza ottenibile, il 16 novembre 2018, durante la 26^a CGPM, gli stati membri del BIPM votarono, all'unanimità, la revisione del SI, che avrebbe implicato una nuova definizione delle unità di misura kilogrammo, ampere, kelvin e mole. In seguito a tale

decisione, a partire dal 20 maggio 2019, tutte le unità di misura del SI sono definite in termini di costanti naturali, assicurando la futura stabilità del SI e aprendo la strada all'impiego di nuove tecnologie, incluse le tecnologie quantistiche, per la realizzazione delle definizioni. La figura 1 riporta il logo dell'attuale SI, indicando la corrispondenza tra le unità e la costante di pertinenza. Le definizioni attualmente in vigore delle unità di misura del SI sono riportate in tabella 1. Informazioni più dettagliate sul SI si possono reperire nella brochure del BIPM "The International System of Units". La nona edizione, quella corrente, è stata pubblicata nel 2019 ed è scaricabile dal sito web del BIPM [2].



Figura 1. Logo del SI (Creative Commons License CC BY-ND 4.0) [3]

Tabella 1. Definizioni delle unità SI.

Grandezza	Unità SI	Precedente definizione dell'unità SI	Definizione in vigore dell'unità SI
Intervallo di tempo (<i>t</i>)	secondo (s)	Il secondo è l'intervallo di tempo che contiene 9192631770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133.	Il secondo è definito dal valore numerico prefissato della frequenza del cesio $\Delta\nu_{Cs}$ (la frequenza della transizione iperfine dello stato fondamentale imperturbato dell'atomo di cesio 133), pari a 9192631770 quando espresso in Hz (che equivale a s^{-1}).
Lunghezza (<i>l</i>)	metro (m)	Il metro è la lunghezza del tragitto compiuto dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo di $1/299792458$ di secondo.	Il metro è definito dal valore numerico prefissato della velocità della luce nel vuoto c , pari a 299792458, quando espresso in $m \cdot s^{-1}$.
Massa (<i>m</i>)	kilogrammo (kg)	Il kilogrammo è l'unità di massa ed è eguale alla massa del prototipo internazionale.	Il kilogrammo è definito dal valore numerico prefissato della costante di Planck h , pari a $6.62607015 \times 10^{-34}$, quando espresso in $J \cdot s$ (che equivale a $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$).
Intensità di corrente elettrica (<i>I</i>)	ampere (A)	L'ampere è l'intensità di corrente elettrica che, mantenuta costante in due conduttori paralleli, di lunghezza infinita, di sezione circolare trascurabile e posti alla distanza di un metro l'uno dall'altro, nel vuoto, produrrebbe tra i due conduttori la forza di 2×10^{-7} newton per ogni metro di lunghezza.	L'ampere è definito dal valore numerico prefissato della carica elementare e , pari a $1.602176634 \times 10^{-19}$, quando espresso in C (che equivale ad $A \cdot s$).
Temperatura termodinamica (<i>T</i>)	kelvin (K)	Il kelvin, unità di temperatura termodinamica, è la frazione $1/273.16$ della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua.	Il kelvin è definito dal valore numerico prefissato della costante di Boltzmann k , pari a 1.380649×10^{-23} $J \cdot K^{-1}$ (che equivale a $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$).
Quantità di sostanza (<i>n</i>)	mole (mol)	La mole è la quantità di sostanza di un sistema che contiene tante entità elementari quanti sono gli atomi in 0.012 kg di carbonio 12; il suo simbolo è "mol".	Una mole contiene esattamente $6.02214076 \times 10^{23}$ entità elementari. Questo numero corrisponde al valore numerico prefissato della costante di Avogadro N_A , espresso in mol^{-1} , ed è chiamato numero di Avogadro.
Intensità luminosa (<i>I_v</i>)	candela (cd)	La candela è l'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette una radiazione monocromatica di frequenza 540×10^{12} Hz e la cui intensità energetica in quella direzione è 1/683 watt allo steradiante.	La candela è definita dal valore numerico prefissato del coefficiente di visibilità della radiazione monocromatica con frequenza 540×10^{12} Hz K_{cd} , pari a 683, espresso in $lm \cdot W^{-1}$, o in $cd \cdot sr \cdot W^{-1}$ (che equivale a $cd \cdot sr \cdot kg^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^3$).

3.3 La costante di Avogadro

Misurare la costante di Avogadro con un'accuratezza mai conseguita nel passato, era fondamentale per la ridefinizione della mole e del kilogrammo. Ciò è stato possibile mediante il lavoro sperimentale condotto nell'ambito del progetto internazionale *International Avogadro Coordination* (IAC). L'IAC, iniziò formalmente come una collaborazione internazionale che si proponeva di determinare la costante di Avogadro N_A con un'incertezza relativa minore o uguale a 2×10^{-8} impiegando un cristallo di silicio (Si) arricchito isotopicamente. Venne scelto il Si perché può dare origine a grossi cristalli singoli, di purezza elevata e praticamente perfetti. L'IAC venne inizialmente condotto nel periodo 2004-2011 come una collaborazione tra i principali istituti metrologici nazionali e internazionali: BIPM, INRIM (Italia), IRMM (Laboratorio della Commissione Europea), NIST (USA), NMIA (Australia), NMIJ/AIST (Giappone), NPL (Regno Unito) e PTB (Germania). La collaborazione venne quindi rinnovata nel 2012 con la firma di un *Memorandum of Understanding* tra BIPM, INRIM, NMIA, NMIJ e PTB [4].

Nell'ambito del progetto, è stato determinato il numero di atomi di Si presenti in due sfere da 1 kg originate da un singolo cristallo di Si, altamente arricchito con l'isotopo ^{28}Si che ne costituiva il 99.995 %. Questo nuovo approccio ha reso possibile il superamento del fattore precedentemente limitante legato alla determinazione della composizione isotopica di un cristallo di Si naturale. L'impiego di tecniche analitiche all'avanguardia, ha permesso di determinare la massa molare del materiale arricchito in ^{28}Si con un'accuratezza senza precedenti. La composizione isotopica delle due sfere, la massa molare, la massa, il volume, la densità e il parametro reticolare vennero determinati con l'accuratezza necessaria; le loro superfici vennero caratterizzate chimicamente e fisicamente alla scala atomica [5]. Le concentrazioni delle impurezze e gli eventuali gradienti vennero anch'essi misurati accuratamente e tenuti in considerazione. La produzione delle due sfere, iniziò nel 2004 con l'arricchimento isotopico mediante centrifugazione del gas SiF_4 (*Central Design Bureau of Machine Building*, San Pietroburgo, Russia). Il gas arricchito venne quindi convertito in SiH_4 e la tecnica *chemical vapour deposition* venne utilizzata per far crescere un policristallo (*Institute of Chemistry of High-Purity Substances* dell'Accademia delle Scienze Russa). Nel 2007, una palla da 5 kg di ^{28}Si venne fatta crescere presso il *Leibniz-Institut für Kristallzüchtung* (Germania). A partire da questa palla, vennero preparate due sfere di ^{28}Si , denominate AVO28-S5 e AVO28-S8, e vennero lavorate fino ad ottenere due sfere pressochè perfette dall'*Australian Centre for Precision Optics* [4]. Una panoramica sulla revisione del SI e della

mole in particolare, con riassunto del lavoro sperimentale che è stato alla base della nuova definizione è reperibile in [6].

4. La metrologia: una scienza trasversale

La metrologia è la scienza della misurazione e delle sue applicazioni [7]. Essa è per sua natura una scienza trasversale: comprende infatti tutti gli aspetti teorici e pratici della misurazione, qualunque siano il campo di applicazione e l'incertezza di misura. La metrologia si suddivide entro tre gruppi di attività, intimamente connessi tra loro: la definizione delle unità di misura, la realizzazione pratica di tali unità e la riferibilità metrologica che ha il compito di collegare le misure che vengono condotte nella pratica ai campioni di riferimento. Queste attività a loro volta vengono utilizzate all'interno dei tre settori della metrologia: la metrologia scientifica o fondamentale, legata alla definizione e realizzazione delle unità di misura, la metrologia applicata o industriale, che si occupa dell'applicazione delle misurazioni alla manifattura e ad altri processi all'interno della società, la metrologia legale, che riguarda i requisiti di legge e normativi per i sistemi di misura e i metodi di misura.

Appare evidente che la metrologia, quindi, non è solo di interesse univoco degli scienziati e ricercatori, ma di importanza vitale anche nella vita quotidiana. Tutti noi infatti dipendiamo da una rete di servizi, forniture, comunicazioni che dipendono dalla metrologia per poter operare in modo efficiente e affidabile. L'equivalenza delle misure per il libero commercio, l'affidabilità dei risultati delle misurazioni che vengono impiegati per svariate decisioni in campo economico, ambientale, nella salute, l'accuratezza nelle misure di tempo che permettono le geolocalizzazioni, il volo degli aerei e le orbite dei satelliti, sono solo alcuni degli esempi dei campi di applicazione della metrologia. Tutte le forme di misurazioni fisiche e chimiche influenzano il mondo in cui viviamo. Per la necessità di avere accordi a livello internazionale su questioni che riguardano la metrologia è nata la Convenzione del Metro nel 1875 e ancora oggi rappresenta le basi per l'accordo internazionale in materia di unità di misura.

4.1 Il contesto internazionale

La CGPM, il CIPM e il BIPM sono le tre organizzazioni istituite per gestire il SI nell'ambito della Convenzione del Metro [1].

La CGPM è composta dai delegati dei governi degli stati membri e dagli osservatori degli associati. Si riunisce a Parigi, generalmente ogni quattro anni. Riceve i rapporti del CIPM sul lavoro svolto, discute e esamina gli accordi necessari ad assicurare la disseminazione e il miglioramento del SI; promuove e avalla i risultati di nuove determinazioni nella metrologia fondamentale e varie

risoluzioni scientifiche di portata internazionale, prende le decisioni relative all'organizzazione e sviluppo del BIPM. La 26^a CGPM si è tenuta a Versailles dal 13 al 16 novembre 2018.

Il BIPM ha il mandato di fornire le basi per un Sistema di misura unico e coerente a livello mondiale, metrologicamente riferibile al SI. Questo compito viene svolto attraverso diverse forme, dalla disseminazione diretta delle unità al coordinamento di confronti internazionali che coinvolgono i campioni nazionali delle unità di misura.

Il CIPM ha come compito principale quello di promuovere l'uniformità a livello mondiale delle unità di misura, sia mediante azioni dirette sia inviando delle proposte di risoluzioni alla CGPM. Il CIPM è composto da diciotto membri di nazionalità diverse. Nella sua struttura attuale, il CIPM ha un membro italiano, la Dr.ssa Maria Luisa Rastello, Direttore Scientifico dell'INRIM e Presidente del Comitato Consultivo di Fotometria e Radiometria (CCPR). Il CIPM si riunisce ogni anno, anche in due sessioni per anno, e discute i rapporti presentati dai suoi Comitati Consultivi. I Comitati Consultivi sono stati istituiti dal CIPM; il presidente di ciascun Comitato viene incaricato dal CIPM e generalmente è un membro del CIPM stesso. I vari Comitati riuniscono esperti da tutto il mondo nel loro settore specifico di attività, in qualità di consulenti su aspetti scientifici e tecnici. Tra i compiti dei Comitati Consultivi si annoverano l'analisi approfondita degli sviluppi scientifici che influenzano direttamente la metrologia, la preparazione di raccomandazioni da sottoporre al CIPM, l'identificazione e l'organizzazione di confronti chiave di misura, la consulenza al CIPM sulle attività scientifiche da condurre nei laboratori del BIPM. Si riuniscono a intervalli regolari.

4.2 La metrologia in Italia

La struttura metrologica italiana è oggetto di una specifica legge, la legge n. 273 dell'11 agosto 1991 che ha istituito il Sistema Nazionale di Taratura (SNT). Il SNT vede al vertice della piramide metrologica nazionale gli Istituti Metrologici Primari (IMP), seguiti, al livello immediatamente inferiore, dai Centri Accreditati come laboratori di taratura (Centri LAT) da ACCREDIA, l'Ente Nazionale di Accreditamento [8]. Attualmente in Italia esistono due IMP: l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM) e l'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti (ENEA-INMRI). L'INRIM, sito a Torino, è nato nel 2006 dalla fusione dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris (IEN) e dell'Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti del Consiglio Nazionale delle Ricerche (IMGC-CNR), e si occupa della metrologia scientifica e industriale delle

varie grandezze [9], eccetto le radiazioni ionizzanti che sono di competenza dell'ENEA-INMRI. La metrologia legale, invece, è di competenza degli uffici centrali metrici. Dal punto di vista della metrologia internazionale, dal momento che formalmente ogni Paese può avere un solo Istituto Metrologico Nazionale (NMI), l'INRIM è l'NMI italiano, mentre l'ENEA-INMRI è un Istituto Designato (DI). Un istituto metrologico nazionale ha come compito istituzionale quello di realizzare, mantenere e sviluppare i campioni di riferimento nazionali delle sette unità di base del Sistema Internazionale. Attraverso tali campioni garantisce l'affidabilità delle misure a livello nazionale e la loro comparabilità a livello internazionale, agendo da elemento di raccordo tra la metrologia internazionale e il Paese. In questo contesto, rappresenta il proprio Paese negli organismi metrologici internazionali ed europei, partecipa ai confronti internazionali di misura che coinvolgono i campioni di riferimento nazionali e i metodi di misura. In questo modo, garantisce la comparabilità dei campioni a livello internazionale, così come l'equivalenza dei certificati di taratura e misura, in conformità all'Accordo di Mutuo Riconoscimento (CIPM MRA). La figura 2 rappresenta schematicamente il ruolo dell'INRIM nella piramide metrologica italiana per le grandezze di sua pertinenza.

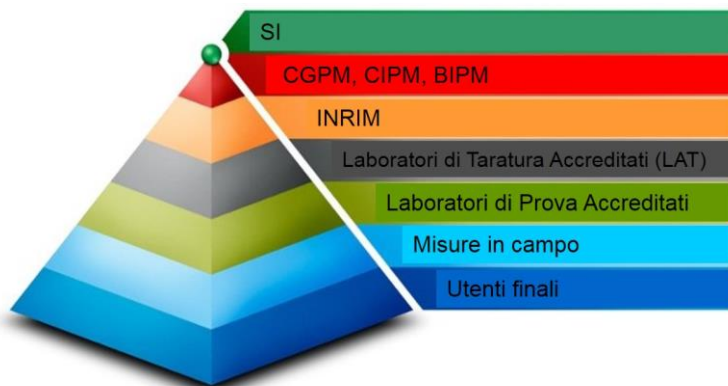


Figura 2. La piramide metrologica italiana per la metrologia scientifica e industriale

5. Le nuove sfide della metrologia

Come è già stato sottolineato, la metrologia è uno strumento fondamentale per le attività di ricerca e sviluppo scientifici ma anche per l'innovazione tecnologica. Essa supporta la competitività industriale ma anche lo sviluppo di nuovi prodotti e processi. Il libero commercio e la normazione dipendono fortemente da misurazioni e campioni accettati a livello globale, e il CIPM MRA e la riferibilità

al SI sono due capisaldi per la comparabilità delle misure. I rapidi avanzamenti della tecnologia, rendono necessarie misure sempre più precise, accurate e affidabili. In questo contesto, la metrologia può e deve continuare a dare il suo supporto nelle attività di ricerca e sviluppo. Alcuni tra i prodotti più significativi sono, ad esempio, nuovi metodi e tecnologie di misura e caratterizzazione, lo sviluppo di materiali di riferimento e di campioni, di protocolli di taratura e documenti normativi. Prodotti di questo tipo, rendono possibile un'innovazione tecnologica e industriale efficace nella produzione di materiali innovativi, nel controllo di processi e prodotti, nel miglioramento delle efficienze e delle prestazioni, anche riducendo i costi associati alle misurazioni. Anche le cosiddette "sfide sociali", come la sostenibilità energetica, ambientale e la salute dei cittadini richiedono lo sviluppo di tecnologie di misura nuove e affidabili, nelle quali la riferibilità metrologica dei risultati riveste un ruolo fondamentale.

5.1 Salute

La sanità è indubbiamente una delle sfide principali ed è tra le priorità nazionali e internazionali sia dal punto di vista politico sia da quello socio-economico. Tra i punti chiave si possono annoverare l'assistenza sanitaria personalizzata, anche dovuta all'invecchiamento della popolazione con conseguente aumento delle malattie croniche, e l'elevato costo delle operazioni di screening, di diagnosi e delle terapie. In questo contesto, la metrologia può dare il suo contributo sotto diversi aspetti, tra cui: la produzione di campioni di misura e materiali di riferimento, lo sviluppo di corretti percorsi di riferibilità metrologica, la redazione di metodi e protocolli di riferimento, il miglioramento delle incertezze di misura, permettendo di migliorare la qualità e la comparabilità dei risultati sia connessi alle attività diagnostiche sia alla somministrazione di terapie.

5.2 Ambiente

È fondamentale che le politiche globali volte alla riduzione degli effetti antropici sui cambiamenti climatici e alla introduzione di misure di contenimento appropriate poggino su basi scientifiche e su validi modelli predittivi, accompagnati da misurazioni di validità e comparabilità riconosciute a livello internazionale. In questo contesto, il ruolo della metrologia è essenziale. La metrologia sta già dando un notevole contributo alla realizzazione di campioni di misura e materiali di riferimento certificati, allo sviluppo di metodi e di protocolli di taratura e misura appropriati, il tutto accompagnato da un'accurata valutazione dell'incertezza di misura. Risulta però necessario sviluppare ulteriormente le capacità di misura in modo da consolidare, dove siano già presenti, o mettere in atto opportune collaborazioni per venire incontro a quelle che sono le esigenze

delle più importanti istituzioni internazionali, come la *World Meteorological Organization* (WMO), il *Global Climate Observing System* (GCOS), l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), che necessitano di disporre di elevati quantitativi di materiali di riferimento stabili e affidabili, in grado di garantire incertezze di misura tali da poter discriminare gli effettivi andamenti da quelle che sono le fluttuazioni stagionali o cicliche. Disporre di risultati di misura accurati e comparabili, è uno strumento chiave per i legislatori per intraprendere opportune misure di mitigazione e mettere a punto politiche volte alla salvaguardia e alla protezione dell'ambiente.

5.3 Energia

Il consumo energetico a livello globale è in costante aumento e, nonostante si stia assistendo ad un aumento delle energie prodotte da fonti rinnovabili, i combustibili fossili continuano ad essere una fonte energetica dominante. In un contesto così variegato, il supporto metrologico è necessario in svariate applicazioni: nelle attività di ricerca collegate all'ottimizzazione dell'utilizzo dei combustibili convenzionali, nella misura accurata dei parametri chimico-fisici e delle condizioni di misura sia negli impianti di produzione tradizionali sia in quelli di ultima generazione, ma anche della composizione e delle proprietà termofisiche e energetiche dei nuovi carburanti, alcuni dei quali vengono direttamente fatti confluire negli stessi oleodotti e metanodotti in cui vengono trasportati i combustibili fossili. La ricerca metrologica in questo settore può contribuire inoltre a promuovere l'innovazione, a ridurre l'impatto ambientale delle infrastrutture energetiche, a fornire dati a supporto circa l'affidabilità, la sicurezza e la sostenibilità delle fonti energetiche.

Bibliografia

- [1] <https://www.bipm.org>.
- [2] <https://www.bipm.org/utils/common/pdf/si-brochure/SI-Brochure-9-EN.pdf>.
- [3] <https://www.bipm.org/en/si-download-area/graphics-files.html#>.
- [4] <https://www.bipm.org/en/bipm/mass/avogadro/>.
- [5] B. Andreas et al (2011). Counting the atoms in a ^{28}Si crystal for a new kilogram definition. *Metrologia*, 48 S1
- [6] B. Güttler et al (2019). Amount of substance and the mole in the SI. *Metrologia*, 56 (4), 044002
- [7] JCGM 200 (2012) International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM 3rd edition) (JCGM 200:2008 with minor corrections)
- [8] <https://www.accredia.it>
- [9] <https://www.inrim.it>

La Tabella Periodica. Il dito e la luna.

Roberto Zingales

Università degli Studi di Palermo

E mail: robertozingales@outlook.it

Riassunto. Individuata da Mendeleév nel 1869, la *Legge di periodicità* ebbe subito nella *Tabella Periodica* la sua rappresentazione grafica bidimensionale. Nel seguito, si cercherà, se possibile, di appurare se l'idea (la Legge) sia predominante sullo strumento (la Tabella), o se, invece, quest'ultimo, fermo restando il suo ruolo ausiliare, non si sia nel tempo reso indipendente, e abbia subito un'evoluzione che l'ha portato a orientare e indirizzare la ricerca chimica, razionalizzando le proprietà degli elementi e la loro periodica ripetizione, favorendo l'individuazione di quelli sconosciuti, suggerendo il valore della carica nucleare e la distribuzione degli elettroni in ciascun atomo, inglobando in sé tutte le scoperte di specie non prevedibili da Mendeleév, come i gas nobili e gli isotopi, radioattivi e non. Nato come strumento di classificazione, la Tabella periodica, si è anche rilevata preziosa sintesi di conoscenze chimiche e *mappa* sulla quale disporre, e ritrovare, gli elementi noti e quelli ancora da scoprire.

Abstract. In the same 1869, when it was discovered by Mendeleév, the *Periodic law* was made explicit by a graphic representation: *The Periodic Table*. Since then, the Table has undergone a continuous evolution and a worldwide popularity, so that here we will check if the idea (the Law) still prevails on the model (the Table) or vice versa. In any case, even if it has kept its auxiliary role, the Table has, by time, acquired independence, by leading the chemical research toward the rationalization of elements' properties and their periodic repetition, favouring the discovery of still unknown elements, suggesting the value of nuclear charges and the electrons distribution inside atoms, incorporating new species, such as noble gases and isotopes. Born as a classificatory tool, it has proved to be also a valuable repository of chemical knowledge, and a *map* on which to set, and to find, known and still unknown chemical elements.

1. Introduzione

Il 17 febbraio del 1869¹ Dmitri I. Mendeleév (1834 – 1907) completò la prima stesura di un sistema di classificazione degli elementi chimici, e distribuì ai colleghi dell'Università di San Pietroburgo un volantino contenente una nota dal titolo "Tentativo di un sistema di elementi secondo i loro pesi atomici e funzioni chimiche". Il sistema fu presentato alla Società Chimica Russa il successivo 6 marzo, quando una nota di Mendeleév, dal titolo "Correlazione delle proprietà con i pesi atomici degli elementi" fu letta da Nikolai A. Menshutkin (1842 – 1907), causa l'assenza dell'autore [1]. Un breve riassunto della comunicazione fu pubblicato in tedesco, nello stesso anno [2].

L'originalità della classificazione di Mendeleév stava nel tentativo di individuare una legge naturale che regolasse la distribuzione degli elementi e delle loro proprietà, mentre i suoi predecessori avevano cercato di elaborare delle funzioni algebriche o degli schemi geometrici nei quali inserire (anche forzatamente) gli elementi e i loro pesi atomici. Con il termine *Legge di periodicità*, indicò *le relazioni multilaterali tra le proprietà degli elementi e i loro pesi atomici, relazioni che hanno la forma di una funzione periodica* [3]. Per il resto della sua vita, Mendeleév si mantenne fermo nel considerarla una legge naturale, e pertanto immutabile e infallibile. Più incerto fu invece il suo atteggiamento nei confronti delle rappresentazioni grafiche, per mezzo delle quali intendeva mostrare le relazioni tra gli elementi e le loro proprietà chimiche e fisiche, probabilmente perché non ne trovò mai una che lo soddisfacesse pienamente [4].

Eppure, la Tabella periodica è ben presto diventata uno dei *paper tools* fondamentali della Chimica, tanto da esserne considerata un'icona, che simboleggia l'ordine stesso della Natura: con la sua forma, i suoi colori, i suoi simboli, il suo significato, chiaro solo agli iniziati, esercita anche oggi enorme fascino e attrattiva, non solo sui Chimici, che la utilizzano come strumento di lavoro, ma anche sugli altri scienziati, e più che mai sui profani. La sua struttura ha assunto un tale valore simbolico, da mantenere il proprio significato anche quando il suo contenuto (gli elementi) è sostituito con altri oggetti [5].

Per questi motivi, in occasione del 150 anniversario della sua prima formulazione, l'anno 2019 è stato individuato dall'UNESCO come Anno internazionale della Tabella periodica (IYPT), trascurando, in qualche modo, il significato profondo della legge naturale che ne sta alla base. Da qui il titolo del presente contributo, ispirato a un vecchio proverbio cinese, attribuito a Lao-Tsè

¹ Secondo il calendario giuliano adottato dell'impero russo, corrispondente al 1° marzo nel resto d'Europa

(V sec. a. C.), fondatore della dottrina taoista: *Quando il saggio indica la luna, lo stolto guarda il dito*. Nella discussione che segue, si cercherà di esaminare il valore della Tabella come strumento, e di chiarirne la relazione con la legge naturale, per provare a stabilire se la rappresentazione grafica (il dito) costituisca un aspetto secondario della Legge di periodicità (la luna), o se invece il modello, nella sua continua evoluzione, non si sia dimostrato uno strumento indispensabile per migliorarne la comprensione e l'interpretazione, evidenziarne le implicazioni, e rivelarne gli aspetti non ancora percepiti.

2. La ricerca di un ordine

L'individuazione della Legge di periodicità è il risultato del desiderio di verificare la presenza in Natura di un ordine immanente e dell'esigenza di classificare, che avevano ispirato la ricerca ed alimentato il dibattito scientifico per almeno due secoli. Nei secoli XVI e XVII, i grandi viaggi e le esplorazioni dei continenti, vecchi e nuovi, avevano rivelato l'esistenza di un numero talmente elevato di nuove specie animali e vegetali da rendere indispensabile l'elaborazione di criteri per stabilire se esse fossero effettivamente diverse da quelle note, o ne costituissero solo lievi modificazioni, dovute ad adattamento ambientale, come premessa a nuovi sistemi di nomenclatura e classificazione. Il passaggio dalle pratiche alchemiche a una ricerca sperimentale sempre più consapevole e organizzata, aveva posto i chimici davanti ad una questione analoga, anche se la netta distinzione tra sostanze semplici e sostanze composte, evidenziata da Antoine L. Lavoisier (1743 - 1794) nel 1789, aveva ristretto il problema alla classificazione degli elementi, raggruppando i composti in base agli elementi dai quali erano costituiti.

Individuato nel peso atomico il parametro che caratterizzava gli elementi, e li distingueva l'uno dall'altro, John Dalton (1766 - 1844) fornì ai chimici quel criterio quantitativo certo per ordinarli, che mancava alle altre discipline. Tuttavia, questa solida base numerica ebbe anche delle ricadute negative: avendo a disposizione grandezze da confrontare e riportare, molti ricercatori con inclinazioni verso il calcolo numerico si misero alacremente alla ricerca di formule algebriche più o meno astruse, che consentissero, in base a numerosi parametri, costanti o variabili, di calcolare tutti i pesi atomici. La ricerca di una tale equazione di validità generale era, però, resa complicata, se non infruttuosa, dal fatto che, per molti elementi, erano disponibili solo i pesi di combinazione (equivalenti), piuttosto che quelli atomici.

Per fortuna, altri ricercatori posero più attenzione alle caratteristiche chimiche e fisiche degli elementi, anche quelle che non potevano essere ridotte a parametri numerici. Questo atteggiamento portò a notare alcune sporadiche regolarità nel

comportamento degli elementi e a identificare alcune *triadi*, gruppi di tre elementi dalle proprietà simili, che variavano gradualmente al crescere del peso atomico, e nei quali, incidentalmente, il peso atomico (o quello equivalente) dell'elemento intermedio era la media aritmetica di quelli degli elementi estremi. Invece, disposti gli elementi secondo il peso atomico crescente, John A. Newlands (1837 – 1898) notò che le loro proprietà si ripetevano ogni sette elementi, e, per analogia con la scala musicale, chiamò questa singolarità *legge delle ottave*, mentre Lothar J. Meyer (1830 – 1895) evidenziò un'oscillazione periodica dei valori dei volumi atomici riportati in grafico contro i pesi atomici.

Tutti questi tentativi, fruttuosi o no, furono rivisitati da Mendeleév, che usò i pesi atomici come tali, semplicemente come parametro ordinatore, senza lasciarsi condizionare dal valore dei loro rapporti o delle loro differenze, concentrandosi invece sulle proprietà degli elementi e dei loro composti, e sulle relazioni reciproche tra quelli che, in quest'ordine, si trovavano in posizioni adiacenti. In questo modo, si svincolò dai casi particolari e riuscì a prendere in considerazione contemporaneamente tutti gli elementi, e perciò a individuare una legge generale, una regolarità, che, nella prima versione, formulò come: *Quando sono disposti secondo il valore dei loro pesi atomici, gli elementi mostrano una variazione graduale delle loro proprietà* [2].

3. La Tabella

Anche se aveva ordinato *soltanto* 63 elementi, questi erano comunque abbastanza da richiedere una rappresentazione grafica della Legge, per poter essere tenuti tutti sott'occhio, e per una più puntuale verifica delle loro relazioni. Come mostrato dai suoi appunti, Mendeleév provò numerose versioni che non lo soddisfacevano [6]. Nell'impresa, si erano già cimentati tutti i suoi predecessori, che avevano utilizzato o la rappresentazione grafica bidimensionale di una funzione algebrica, trigonometrica o semplicemente empirica (come Meyer), o delle Tabelle (come Newlands). Che ne fossero consapevoli o no, questi ultimi si muovevano nella scia di Francis Bacon (1561 – 1626), che aveva progettato la costruzione di tabelle nelle quali condensare il sapere, identificando ogni oggetto o nozione con un segno che ne indicasse, non solo l'esatta posizione nella tabella, ma anche, di conseguenza, la descrizione della sua natura e le relazioni con gli oggetti collocati in posizioni adiacenti [7].

La prima scelta di Mendeleév fu quella di costruire una tabella disponendo gli elementi in colonne verticali, secondo il peso atomico crescente, in modo che le righe orizzontali contenessero elementi analoghi, ordinati anch'essi, da sinistra a destra, secondo il peso atomico crescente. Mendeleév pubblicò questa tabella, riportata in Figura 1, nella sua prima nota [2], e la utilizzò come *strumento*

efficace per ampliare la visuale fornita dalla legge, e scorgerne importanti implicazioni. Ne ricavò otto deduzioni generali, la prima delle quali era la regolarità nelle variazioni delle proprietà degli elementi sopra ricordata; tra le altre, vanno citate la sesta: la tabella *permette di prevedere la scoperta di molti nuovi elementi, per esempio gli analoghi di Silicio e Alluminio, con pesi atomici compresi tra 65 e 75*, e l'ottava: la tabella *suggerisce analogie tra gli elementi, come quelle tra Uranio, Boro e Alluminio, già da tempo solidamente stabilite sperimentalmente*.

				Ti =50	Zr = 90	? =180
				V =51	Nb = 94	Ta =182
				Cr =52	Mo = 96	W =186
				Mn =55	Rh =104.4	Pt =197.4
				Fe =56	Ru =104.4	Ir =198
				Ni =Co =59	Pd =106.6	Os =199
				Cu =63.4	Ag =108	Hg =200
H =1				Zn =65.2	Cd =112	
	Be = 9.4	Mg =24		? =68	Ur =116	Au =197?
	B =11	Al =27.4		? =70	Sn =118	
	C =12	Si =28		As =75	Sb =122	Bi =210
	N =14	P =31		Se =79.4	Te =128?	
	O =16	S =32		Br =80	I =127	
	F =19	Cl =35.5		Rb =85.4	Cs =133	Tl =204
Li =7	Na =23	K =39		Sr =87.6	Ba =137	Pb =207
		Ca =40		Ce =92		
		? =45		La =94		
		?Er =56		Di =95		
		?Yt =60		Th =118?		
		?In =75.6				

Figura 1. La prima tabella a stampa di Mendeleév (1869) [2]

Sotto la veste di una comunicazione scientifica, che aveva lo scopo di informare i colleghi della Società Chimica Russa, si celava una sorta di documento programmatico, nel quale erano indicate le linee di lavoro lungo le quali intendeva procedere, per rifinire il sistema che stava mettendo a punto, utilizzando la Tabella in maniera intensiva e proficua. Nonostante ciò, era consapevole dei limiti della rappresentazione che stava elaborando, soprattutto la provvisorietà, perché non escludeva la possibilità che il modello potesse essere migliorato. Nel suo primo articolo esteso sull'argomento [8], introduceva così la sua prima tabella: *darò adesso uno dei molti sistemi di elementi che sono basati sui pesi atomici. Non è altro che un tentativo di rappresentare i risultati che possono essere conseguiti in questa direzione. Sono pienamente consapevole del fatto che questo tentativo non è definitivo, ma mi sembra che già manifesti in maniera molto chiara come il principio da me proposto sia applicabile a tutti gli elementi i cui pesi atomici sono stati determinati con qualche grado di*

affidabilità. E nelle note aggiunte due altre diverse rappresentazioni, neanche queste esenti dalle sue critiche.

Si arrivò così alla prima versione *orizzontale* della Tabella, presentata alla Società chimica Russa nel Dicembre 1870 [9], e poi pubblicata sugli *Annalen* [3]. In Figura 2, si vede come gli elementi fossero disposti in righe orizzontali, secondo il peso atomico crescente, in modo che quelli con caratteristiche simili si trovassero nella stessa colonna. Le colonne erano indicate col nome di Gruppi e identificate con un numero romano, da I a VIII, mentre in basso erano indicate le forme di combinazione con l' Idrogeno e con l'Ossigeno degli elementi in esse contenuti. Da queste era possibile ricavare la valenza massima, che, dopo un'iniziale titubanza, Mendeleév aveva accettato come criterio numerico sulla base del quale raggruppare gli elementi.

Le righe orizzontali erano indicate come *serie* (Reihe), numerate da 1 a 10, ed accoppiate in 5 periodi; con questo accorgimento, Mendeleév cercava di superare una difficoltà della sua rappresentazione grafica. Disposti secondo l'ordine del peso atomico crescente, gli elementi con la stessa valenza, ma con caratteristiche nettamente diverse (per esempio, metalli alcalini e alogeni, o metalli terrosi e calcogeni), si venivano a trovare in gruppi ben differenziati e distanti; tuttavia, tra i metalli, capitava che, per esempio, nel primo gruppo, metalli nobili monovalenti come Rame, Argento e Oro, si trovassero insieme a quelli alcalini. Dividendo ciascun periodo in due serie, era possibile una separazione visuale, in due sottogruppi distinti, degli elementi con la stessa valenza, ma diverse proprietà [10].

T a b e l l e II.

Reihen	Gruppe I. — R ⁰	Gruppe II. — R ⁰	Gruppe III. — R ⁰	Gruppe IV. RH ⁴ R ⁰	Gruppe V. RH ³ R ⁰	Gruppe VI. RH ² R ⁰	Gruppe VII. RH R ⁰	Gruppe VIII. — R ⁰
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63.
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108.
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	— — — —
9	(—)	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199.
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	— — — —

Figura 2. Tabella di Mendeleév (1871) [3]

Per quanto potesse ritenerle provvisorie, le rappresentazioni grafiche costituirono uno strumento di indirizzo e di controllo, che lo aiutò ad individuare le *analogie atomiche*, cioè le relazioni tra gli elementi, e ad evidenziare come esse fossero non soltanto verticali, come quelle già notate da altri, ma anche orizzontali e persino diagonali. A questo proposito, occorre sottolineare come si siano individuate per prime le relazioni verticali tra gli elementi di un gruppo, sia perché essi mostravano proprietà chimiche simili, sia perché, avendo la stessa valenza, l'uso dei loro pesi equivalenti riproduceva le relazioni tra i pesi atomici, e quindi si ottenevano risultati quantitativi corretti, qualunque fossero i pesi usati. Invece, utilizzando i pesi equivalenti, o pesi atomici non corretti, la successione degli elementi poteva risultare sbagliata: i valori riportati da Wollaston nel 1814 (O = 10, C = 7,54, N = 17,54) avrebbero generato l'andamento C, O, N, diverso da quello corretto, e il loro grande divario non avrebbe posto questi elementi in posizioni adiacenti [4].

La posizione di ciascun elemento nel sistema ne indicava l'appartenenza a un gruppo e a una serie, e le sue proprietà erano determinate da quelle dei suoi vicini, in direzione verticale (simili proprietà, eguali forme di combinazione), e in direzione orizzontale, lungo la quale le proprietà chimiche e fisiche variavano in maniera più uniforme [11]. Per esempio, gli ossidi degli elementi passavano gradualmente, da basi molto forti, a sinistra, ad acidi molto forti, a destra, attraverso tutte le situazioni intermedie, e le forme di combinazione con l'ossigeno mostravano una variazione regolare, e per incrementi interi, così che la valenza assumeva periodicamente gli stessi valori, passando da una riga alla successiva.

Le analogie verticali e orizzontali ponevano ciascun elemento al centro di una croce, ai cui vertici stavano due elementi dello stesso gruppo (sopra e sotto) e due dello stesso periodo (sinistra e destra). Ne risultava che i valori numerici dei parametri che caratterizzavano l'elemento (peso e volume atomico, densità, valenza, ecc.) erano la media aritmetica di quelli degli altri quattro: questo criterio gli consentì, non solo di correggere i valori delle grandezze già note, soprattutto i pesi atomici, ma anche di stimare, con ottima approssimazione, quelle degli elementi sconosciuti. Invece, utilizzando l'analogia atomica diagonale, evidenziò la similitudine tra gli ossidi di Litio e Magnesio, di Berillio e Alluminio e di Boro e Silicio, e perciò posizionò il Berillio nel secondo gruppo, assegnandogli valenza 2, correggendone, di conseguenza, il valore del peso atomico; con questo nuovo valore, il Berillio si veniva a trovare tra il Litio monovalente ed il Boro trivalente, in accordo anche con il fatto che la basicità del suo ossido era intermedia a quella degli altri due.

Tutte queste implicazioni e applicazioni della Legge di periodicità furono esposte in un lungo articolo (97 pagine), pubblicato sugli *Annalen*, nel quale forniva una versione rielaborata dell'enunciato della Legge, dando enfasi alla periodicità: *Le proprietà degli elementi, e delle sostanze semplici e composte che essi formano, mostrano una dipendenza periodica dai loro pesi atomici* [3]. Essendo una legge naturale, la *Legge di periodicità* non era limitata a poche famiglie di elementi, né legata a numeri magici, come le triadi o le ottave, ma abbracciava *tutti* gli elementi, le loro sostanze semplici, i loro composti.

L'esistenza di altri elementi ancora sconosciuti nel 1869 non poteva essere prevista dalla Legge di periodicità, ma era prontamente e chiaramente evidenziata dalla Tabella: per rimanere fedele ai due criteri adottati, quello della crescita regolare del peso atomico lungo una riga, e quello della costanza della valenza lungo una colonna, la procedura di messa in ordine degli elementi costrinse Mendeleév a spostare in avanti qualche elemento, lasciando vuota qualche casella. Piuttosto che a un'imperfezione della legge, che non avrebbe mai ammesso, attribuì queste vacanze all'esistenza di elementi non ancora scoperti, ai quali esse erano destinate, e per i quali i criteri delle analogie atomiche consentivano di prevedere i valori delle grandezze chimiche e fisiche. Quello degli spazi vuoti costituì l'aspetto più innovativo delle tabelle di Mendeleév, che diventò quello più eclatante dopo che furono scoperti gli elementi corrispondenti, e ne furono confermate le caratteristiche da lui previste.

Questi risultati sperimentali sancirono la definitiva accettazione della Legge di periodicità da parte della comunità scientifica, anche se soltanto come strumento di classificazione. Essa, in realtà, conferiva agli elementi il nuovo stato ontologico di entità individuali, definite dalla posizione che occupavano nello schema generale, e dalle loro relazioni con gli altri elementi [12]. La Tabella periodica non era più soltanto quello per cui era stata concepita, cioè una maniera di arrangiare gli elementi in un formato compatto, a beneficio della migliore comprensione degli studenti, ma rappresentava un *codice* che identificava gli elementi, le loro proprietà, il loro comportamento [13], e uno strumento per dedurre le proprietà degli elementi sconosciuti, da quelle degli elementi noti che li circondavano [14]. Sin dalla sua comparsa, è stata oggetto di un'ampia discussione sulla corretta posizione degli elementi, la sua struttura globale, l'impatto della scoperta degli isotopi, il suo significato per la chimica contemporanea. Nonostante le controversie che l'hanno circondata, essa si è però dimostrata strumento di enorme valore per generazioni di chimici [15], in grado di adattarsi, senza subire contraccolpi devastanti, anche all'introduzione di intere nuove famiglie, come il gruppo dei gas nobili o il periodo dei lantanidi.

Resta stridente il contrasto tra il fermo atteggiamento di Mendeleév nei confronti della Legge e la sua incertezza sulle rappresentazioni grafiche, che mostra come egli ritenesse niente affatto secondario il problema del modello rappresentativo, che, nella sua concezione, doveva anche evidenziare l'aspetto fondamentale dei fenomeni chimici, la *discontinuità* espressa dalle leggi dei rapporti costanti e multipli. Ancora nella terza (1887) e nella quarta edizione (1881) dei Principi di Chimica sono riportate non meno di 5 tabelle diverse, perché nessuna di esse lo soddisfaceva pienamente [5].

4. Nuovi elementi, nuovi problemi

Sebbene la scoperta degli elementi previsti da Mendeleév avesse giocato a favore dell'accettazione della Legge e della Tabella periodica, quella di altri elementi, non previsti e non prevedibili, rischiò di comprometterne la struttura. Quando, nel 1894, John W. Strout, Lord Raileigh (1842 – 1919) e William Ramsay (1852 – 1916) scoprirono l'Argon, sorse subito il problema della sua collocazione nella Tabella. Il peso atomico stimato lo poneva tra un elemento monovalente (Potassio) e uno bivalente (Calcio), in contrasto con il concetto stesso di valenza che doveva assumere solo valori interi, mentre il fatto che non formasse composti (valenza zero) non trovava corrispondenti nei gruppi già costituiti. Sembrava che la Tabella rigettasse questo nuovo elemento, tanto da convincere molti autorevoli chimici a negarne l'esistenza e privilegiare piuttosto l'ipotesi che questo gas sconosciuto fosse una forma allotropica del ben noto (e ben posizionato) azoto, N_3 , ipotesi poi rigettata sperimentalmente da Alberto Peratoner (1862 – 1915) e Giuseppe Oddo (1865 – 1954) [16].

Solo dopo che, nel 1895 Ramsay ebbe confermato l'esistenza dell'Elio, già individuato nella corona solare, questi due elementi zerovalenti furono riconosciuti come componenti di un nuovo gruppo che occorreva inserire nel modello. Lo stesso Ramsay, Presidente della Sezione B (Chimica) dell'Associazione Britannica per il Progresso delle Scienze (BAAS), nel discorso di apertura del Convegno del 1897, osservò [17] come una delle colonne verticali della tabella periodica, l'ottava, a differenza delle altre, conteneva tre gruppi di 3 elementi ciascuno, con pesi atomici approssimativamente eguali. In questa colonna, sembrava esserci spazio per una quarta triade, e forse anche una quinta, ipotesi non inverosimile, visto che lo stesso Mendeleév aveva lasciato dei vuoti, poi prontamente colmati.

Analizzando le differenze tra i pesi atomici di coppie di elementi consecutivi dei gruppi rappresentativi, trovò che esse erano sempre comprese tra 16 e 20; poiché la differenza tra i pesi atomici di Argon ed Elio era circa il doppio (36), avanzò l'ipotesi dell'esistenza di un elemento sconosciuto, di peso atomico 20,

anch'esso poco reattivo. Sulla base di questa previsione, sollecitò Morris W. Travers (1872-1961), che, nel 1898, oltre a quello cercato (Neon), ne isolò e identificò altri due, il Kripton e lo Xenon. Questi elementi erano tutti gas monoatomici, che non formavano composti con gli altri elementi (zerovalenti), e che effettivamente costituivano un nuovo gruppo, al quale occorreva trovare una collocazione. La Tabella ne assorbì l'impatto, perché bastò inserire una nuova colonna tra gli alogeni e i metalli alcalini, ma fu evidente che un'attenta analisi delle analogie atomiche poteva condurre a scoperte non prevedibili sulla base del modello vigente.

Tra la fine del '700 e i primi del '900, un lungo e meticoloso processo chimico di separazione e identificazione portò alla scoperta di 14 nuovi elementi, chiamati elementi delle *terre rare*, che, avendo pesi atomici molto prossimi l'uno all'altro, e proprietà non corrispondenti agli elementi degli altri periodi, crearono grossi problemi di collocazione. Mendeleév ne conosceva pochi, che inserì più o meno casualmente, cambiandoli di posto parecchie volte, senza trovare una sistemazione soddisfacente [5]. Tuttavia, aveva notato che la differenza tra i pesi atomici di due elementi consecutivi, il Cerio (140) e l'Erbio (178) era molto più alta delle due unità di differenza che di solito si riscontravano tra i pesi atomici di due elementi adiacenti. Per questo motivo, già nella tabella del 1870 aveva lasciato parecchie caselle vuote tra quella del Cerio e quella dell'Erbio, e nella versione del 1871, nella quale ogni periodo era diviso in due serie, metà della serie 8 e tutta la serie 9 erano vuote (vedi Figura 2) [3].

Man mano che essi venivano identificati, la situazione si faceva più ingarbugliata, perché non si sapeva se collocarli in un gruppo, visto che tutti avevano valenza 3 e caratteristiche simili, o in un periodo, vista la vicinanza dei loro pesi atomici. Per questo, spesso erano posti in un'unica casella, o sistemati in un sotto periodo a parte. Nel 1902 il problema fu parzialmente risolto da Bohuslav Brauner (1855 – 1935), che, subito dopo la casella del Lantanio, ne creò una grossa abbastanza per ospitarli tutti [18], come in Figura 3. Tuttavia, porre più elementi nella stessa casella era in contrasto con il concetto stesso di *tabula*, nella quale ciascun posto deve essere occupato da un solo oggetto, in virtù delle sue caratteristiche. Era chiaro, allora, che la forma compatta della Tabella non era più adatta allo scopo e che bisognava intervenire sulla sua struttura per ripristinarne il significato e la rappresentatività.

A. Periodisches System der Elemente (volle Gestalt).

Reihe	Gruppe 0	Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III	Gruppe IV	Gruppe V	Gruppe VI	Gruppe VII	Gruppe VIII
	—	—	—	—	RH ₄	RH ₃	RH ₂	RH	—
1	R	R ₂ O	RO	R ₂ O ₃	RO ₂	R ₂ O ₅	RO ₃	R ₂ O ₇	RO ₄
		1 H							
2	He 4	Li 7	Be 9	B 11	C 12	N 14	O 16	F 19	
3	20 Ne	23 Na	24 Mg	27 Al	28 Si	31 P	32 S	35.5 Cl	
4	A 40	K 39	Ca 40	Sc 44	Ti 48	V 51	Cr 52	Mn 55	Fe 56 Co 59 Ni 59 Cu 63
5		63 Cu	65 Zn	70 Ga	72 Ge	75 As	79 Se	80 Br	
6	Kr 82	Rb 85	Sr 87	Y 89	Zr 90	Nb 94	Mo 96	-100	Ru 102 Rh 103 Pd 106 Ag 108
7		108 Ag	112 Cd	114 In	119 Sn	120 Sb	128 Te	127 J	
8	Xe 128	Cs 133	Ba 137	La 139	Ce 140	Pr 141	Nd 144	-145	
					-147	Sm 148	Eu 151	-152	
					-155	Gd 156	-159	-160	
					Tb 163	Ho 165	Er 166	-167	
					Tm 171	Yb 173	-176		
					-178	Ta 182	W 184	-190	Os 191 Ir 193 Pt 195 Au 197
9		197 Au	200 Hg	204 Tl	207 Pb	209 Bi	212-	214-	
10	-218	-220	Rd 225?	-230	Th 233	-235	U 239		

Figura 3. La tabella di Brauner (1902) [18]

5. L'evoluzionismo chimico

Le regolarità manifestate dalla Tabella periodica, spinsero inoltre molti illustri scienziati a rivalutare l'ipotesi di William Prout (1785 – 1850) sull'uniformità della materia primordiale, e a immaginare una lenta evoluzione da particelle elementari fino agli elementi, via via più complessi. Formulata dall'astronomo Joseph N. Lockyer (1836 – 1920), questa ipotesi evoluzionista incontrò la ferma e costante opposizione di Mendeleév, ma trovò anche prestigiosi sostenitori, come il fisico William Crookes (1832 – 1919) e il termochimico danese Julius Thomsen (1826 – 1909), il quale, sulla base di una ragionata analisi dei pesi atomici, si propose di dimostrare che *i così detti atomi dei nostri elementi si sono evoluti attraverso la combinazione di particelle di una sostanza di base comune* [19]. Nel 1895, pubblicò una Tabella periodica a sviluppo verticale [20], con la quale intendeva suggerire un'interpretazione evoluzionista della formazione degli elementi. Gli aspetti più interessanti di questa tabella, riportata in Figura 4, sono il fatto che gli elementi del gruppo VIII, quelli di transizione e quelli delle terre rare occupano finalmente ciascuno una differente casella [21]. Per far questo, dovette spostare verticalmente gli elementi dei periodi più esterni, così che quelli dello stesso gruppo non si trovavano più sulla stessa riga, ma erano collegati da linee diagonali. Questa disposizione gli consentiva inoltre di mostrare che i periodi hanno lunghezza diversa: in mancanza dei gas nobili, li costituivano, rispettivamente, 1, 7, 17, 31 elementi, valori esprimibili dalla relazione $N = 2n^2 - 1$. Thomsen si chiese ironicamente se questa relazione fosse una coincidenza, ma ritenne di aver fornito le prove dell'esistenza di un'origine più profonda.

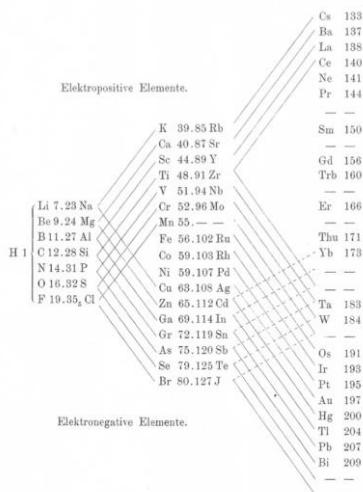


Figura 4. La tabella di Thomson (1895) [20]

6. Le tabelle estese

Nel 1905, Alfred Werner (1866-1919) espanse la Tabella orizzontalmente, come in Figura 5, allungando le righe, in funzione della differente lunghezza dei diversi periodi [22], e alloggiando in caselle differenti, sia tutti gli elementi di transizione, che quelli del gruppo delle terre rare, che essendo poste dopo il Lantanio, come una sua appendice, avevano preso il nome di Lantanidi.

—																		—	—										
H																		He											
1.008																		4											
Li														Be	B	C	N	O	F	Ne									
7.03														9.1	11	12	14.04	16.00	19	20									
Na														Mg	Al	Si	P	S	Cl	A									
23.05														24.36	27.1	28.4	31.0	32.06	35.45	39.9									
K	Ca													Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
39.15	40.1													44.1	48.1	51.2	52.1	55.0	58.9	58.9	63.6	65.4	70	72	75.0	79.1	79.96	81.12	
Rb														Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	Jn	Sn	Sb	Te	J	X
85.4														87.6	89.0	90.7	94	96.0	101.7	103.4	106	107.93	112.4	114	118.5	120	127.6	126.93	129
Cs	Ba	La	Ce	Nd	Pr	—	—	Sa	Eu	Gd	Tb	Ho	Er	Tu	Yb	—	Ta	W	—	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	—	—
133	137.4	139	140	143.6	140.9	—	—	150.3	151.79	156	160	162	166	171	173.0	—	183	184.4	—	191	193.0	194.8	197.2	200.3	204.1	208.5	—	—	—
—	Ra	La ₂	Th	—	—	—	—	U	—	—	—	—	—	Ac	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Pb ₂	Bi ₂	Te ₂	—	—
—	226	226	232	—	—	—	—	238.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Figura 5. La tabella di Werner (1905) [22]

Werner risolse anche l'annoso problema della separazione degli elementi con la stessa valenza, ma proprietà differenti: per esempio, Rame, Argento e Oro, erano ora ben separati dai metalli alcalini, Zinco, Cadmio e Mercurio (bivalenti) dagli alcalino-terrosi, etc, grazie alla inserzione delle tre serie di transizione tra il secondo e il terzo gruppo. D'altro canto, la notevole distanza tra questi due gruppi nei primi periodi sembrava implicare che potessero esistere numerosi elementi sconosciuti: questa difficoltà concettuale si mantenne finché il peso atomico rimase il criterio ordinatore e portò a nuove versioni della Tabella, nelle quali si cercava in tutti i modi di ridurre o eliminare questa distanza. Questa rappresentazione è quella oggi generalmente adottata: la data della sua formulazione dimostra che, contrariamente a quello che si crede, essa non fu una conseguenza della scoperta della configurazione elettronica, anzi, in qualche modo, la indirizzò [5].

7. La tabella come strumento didattico

Mentre la Legge di periodicità mantiene una validità intrinseca, la Tabella, anche se di forte impatto visivo, non è altro che un modello, una rappresentazione grafica bidimensionale, costruita in funzione dei particolari che si vogliono evidenziare, e, come tale, suscettibile di correzioni, variazioni, modifiche. Tra gli anni '20 e gli anni '30 del novecento si sviluppò un acceso dibattito su quale fosse la sua forma migliore, compatta o estesa, mostrando che essa era percepita, oltre che come adeguata rappresentazione di una legge di Natura anche come strumento didattico. Alla fine, prevalsero le finalità didattiche e furono preferite le rappresentazioni estese.

A titolo di esempio, si può citare il contributo di Giuseppe Oddo (1865-1954), professore di Chimica nelle Università di Cagliari, Pavia, e infine Palermo. Resosi conto del fatto che le proprietà degli elementi cambiavano scendendo lungo i gruppi rappresentativi [23], avanzò alcune critiche alle tabelle tradizionali, che riteneva poco adatte a fini didattici: nella stessa colonna si trovavano ancora elementi con la stessa valenza, ma con caratteristiche notevolmente diverse, non era evidenziata la differenza tra elementi metallici e non metallici, nelle rappresentazioni estese si erano create discontinuità nella distribuzione degli elementi. Per risolvere queste difficoltà, propose di disporre gli elementi in maniera differente [24]: mantenendo l'ordine di successione proposto da Mendeleév, sistemò i metalli a destra della colonna dei gas nobili, e i non metalli a sinistra, come in Figura 6. Questo modello, però, non ebbe successo, anche perché, negli stessi anni, si andavano chiarendo le cause che originano la disposizione ordinata degli elementi e il ripetersi periodico delle loro proprietà, attraverso due passaggi chiave: la scoperta della struttura dell'atomo, con

conseguente determinazione della carica nucleare, e la proposta di un modello di distribuzione elettronica.

TABELLA XI. Classificazione periodica degli elementi di c. 1909
(p. n. 102, Compt. Rend.)

METALLOIDI					M E T A L L I																		
GRUPPI					GRUPPI																		
V	IV	III	II	I	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI			
					1 H																		
					2 He																		
					3 Li																		
					4 Be																		
					5 B																		
					6 C																		
					7 N																		
					8 O																		
					9 F																		
					10 Ne																		
					11 Na																		
					12 Mg																		
					13 Al																		
					14 Si																		
					15 P																		
					16 S																		
					17 Cl																		
					18 Ar																		
					19 K																		
					20 Ca																		
					21 Sc																		
					22 Ti																		
					23 V																		
					24 Cr																		
					25 Mn																		
					26 Fe																		
					27 Co																		
					28 Ni																		
					29 Cu																		
					30 Zn																		
					31 Ga																		
					32 Ge																		
					33 As																		
					34 Se																		
					35 Br																		
					36 Kr																		
					37 Rb																		
					38 Sr																		
					39 Y																		
					40 Zr																		
					41 Nb																		
					42 Mo																		
					43 Tc																		
					44 Ru																		
					45 Rh																		
					46 Pd																		
					47 Ag																		
					48 Cd																		
					49 In																		
					50 Sn																		
					51 Sb																		
					52 Te																		
					53 I																		
					54 Xe																		
					55 Ba																		
					56 La																		
					57 Ce																		
					58 Pr																		
					59 Nd																		
					60 Pm																		
					61 Sm																		
					62 Eu																		
					63 Gd																		
					64 Tb																		
					65 Dy																		
					66 Ho																		
					67 Er																		
					68 Tm																		
					69 Yb																		
					70 Lu																		
					71 Hf																		
					72 Ta																		
					73 W																		
					74 Re																		
					75 Os																		
					76 Ir																		
					77 Pt																		
					78 Au																		
					79 Hg																		
					80 Tl																		
					81 Pb																		
					82 Bi																		
					83 Po																		
					84 At																		
					85 Fr																		
					86 Ra																		
					87 Ac																		
					88 Th																		
					89 Pa																		
					90 U																		
					91 Np																		
					92 Pu																		
					93 Am																		
					94 Cm																		
					95 Bk																		
					96 Cf																		
					97 Es																		
					98 Fm																		
					99 Md																		
					100 No																		
					101 Lr																		

numero atomico. Di conseguenza, ogni elemento era caratterizzato da un differente numero atomico, che era il parametro più adeguato per una corretta classificazione.

Il peso atomico perdeva il ruolo che Mendeleév gli aveva assegnato, ma la Tabella non ne risultava alterata: anzi, quelle inversioni nelle posizioni degli elementi che Mendeleév aveva introdotto istintivamente, senza poter addurre giustificazioni sperimentali credibili, erano confermate dalla crescita della carica nucleare secondo l'ordine dei numeri interi.

Adesso, era chiaro che gli elementi chimici costituivano una ben definita serie naturale di oggetti, il cui limite inferiore era dato dall'idrogeno (carica eguale a 1), e quello superiore, almeno per il momento, dall'uranio (92). Non esistevano elementi a carica minore di quella dell'idrogeno e non potevano esistere elementi a carica frazionaria: così, malgrado le circa 70 rivendicazioni della scoperta di nuovi elementi, avanzate al volgere del secolo, i soli elementi ancora da scoprire erano quelli corrispondenti ai numeri mancanti tra 1 e 92 [27]. Infine, la caratterizzazione degli elementi attraverso il loro numero atomico consentì di razionalizzare quella moltitudine di specie che erano state identificate durante le indagini sulla radioattività: in base alla loro carica nucleare, poterono essere identificate come "*varianti*" di elementi già noti e posizionate nelle loro stesse caselle (*isotopi*), senza alterare ulteriormente la Tabella periodica.

Poiché, come conseguenza della neutralità elettrica degli atomi, il numero atomico indicava anche il numero di elettroni di ciascuno, restava da stabilire se e come questo numero influenzasse le proprietà degli elementi, e il loro periodico ripetersi. Il problema principale era quello di stabilire la posizione delle cariche negative intorno al nucleo, ed anche questo fu affrontato, e risolto, facendo riferimento alla distribuzione periodica.

Già nel 1904, nel tentativo di fornire una spiegazione microscopica al sistema periodico, che riteneva uno dei problemi irrisolti della Fisica teorica [4], Thomson aveva elaborato uno dei primi modelli atomici, nel quale i corpuscoli negativi, immersi in una sfera di carica positiva uniforme, si muovevano su anelli concentrici [28]. Per ciascun elemento, il numero degli anelli (e degli elettroni su ciascuno di essi) era associato alla sua posizione sulla Tabella periodica e poteva essere ottenuto dall'elemento che lo precedeva nel gruppo, semplicemente aggiungendo un nuovo anello di elettroni: questa somiglianza nella distribuzione elettronica giustificava anche la somiglianza delle caratteristiche chimiche e fisiche.

Chi diede coerenza a queste ipotesi, rivisitandole alla luce della teoria quantistica elaborata da Max Planck (1858 – 1967), fu il fisico danese Niels H. D. Bohr (1885 – 1962), che, nel 1913, formulò l'ipotesi che ciascun elettrone si

mantenesse in un'orbita, in un definito stato di moto continuo, detto *stato stazionario*, senza radiare energia. Per ottenere un modello che riproducesse le serie di righe individuate nel 1885 dal fisico svizzero Johann J. Balmer (1825 – 1898), introdusse alcune rigide regole di selezione: impose l'esistenza di un numero ben definito di orbite, a ciascuna delle quali era associato un valore di energia definito e discreto, misurato in unità della costante di Plank.

Solo se opportunamente sollecitati dall'esterno, per esempio per riscaldamento o impatto di raggi catodici o raggi X, gli elettroni potevano saltare da un'orbita a un'altra a maggiore energia, per ritornare poi a quella più vicina al nucleo, producendo in questo modo una radiazione luminosa o altra forma di energia: poiché non erano previsti stati energetici intermedi, agli elettroni era consentito soltanto di saltare ad un'orbita più esterna, assorbendo energia, o cadere in un'orbita più interna emettendo energia, ma non era possibile fermarsi in una posizione intermedia, per cui la quantità di energia coinvolta in ogni passaggio era definita, come definite erano le linee dello spettro di assorbimento o di emissione, ciascuna delle quali rappresentava la transizione da uno stato energetico ad un altro. Era chiaro però che ogni singola orbita poteva ospitare soltanto un limitato numero di elettroni: Bohr mise in relazione questo numero con il numero di elementi in un periodo della tabella. Riempire un'orbita significava allora completare un periodo e andare a capo, ricominciando sia a riempire una nuova orbita, che a riprodurre l'andamento delle caratteristiche lungo un periodo. Piuttosto che spiegare la periodicità della tabella di Mendeleév, il riempimento orbitalico era regolato dalla periodicità delle proprietà chimiche. Infatti, come afferma Bohr [29], per cercare di ottenere indicazioni su quale configurazione di elettroni ci si dovesse aspettare nei diversi atomi, si sarebbe dovuti partire dalla conoscenza delle proprietà dei singoli elementi, procedendo lungo due strade parallele: applicare sia principi teorici generali che le conoscenze chimiche e fisiche. Questo conferma che, nel lavoro di Bohr, ebbero un ruolo predominante gli argomenti chimici induttivi, perché i principi teorici quantomeccanici riuscirono a definire soltanto in maniera grossolana le configurazioni [30].

Il tentativo di ridurre il sistema periodico a un prodotto della meccanica quantistica ha creato la falsa impressione che esso possa essere dedotto per via teorica, senza alcun ricorso ai dati sperimentali, che, invece, si sono rivelati cruciali. I livelli elettronici non si riempiono in maniera sequenziale, ma secondo un ordine che si ricava sperimentalmente. Sebbene alcuni aspetti dell'ordine osservabile possano essere spiegati, dopo aver accertato i fatti, queste spiegazioni cominciano ad assomigliare agli ep cicli tolemaici, artifici sempre più complessi sviluppati per giustificare le discordanze nei moti celesti rispetto al modello accettato. Come in quel caso, quella che manca è una teoria più fondamentale

dell'attuale meccanica quantistica, per prevedere quello che per ora è spiegato in maniera semi-empirica [4].

In conclusione, gli elementi di uno stesso gruppo avevano la stessa configurazione elettronica esterna, ed evidentemente era questo, e non la loro valenza, a causarne la somiglianza delle proprietà chimiche. Non restava che completare l'occupazione degli spazi vuoti, e anche le regole del riempimento elettronico contribuirono a questo processo: in base ad esse, Bohr concluse che il sesto periodo dovesse contenere 32 elementi e che l'elemento 72, invano cercato nei minerali contenenti le terre rare, dovesse essere analogo allo Zirconio [31], nei cui minerali fu effettivamente trovato da due suoi collaboratori, l'olandese Dirk Coster (1889 – 1950) e l'ungherese Gyorgy K. von Hevesy (1885 – 1966).

9. Conclusioni

La classificazione periodica ebbe l'effetto principale di cambiare l'attività chimica da un interminabile processo di diversificazione a un'attività concentrata sulla ricerca dell'ordine e della causa che lo genera. Mendeleév vide nella legge della periodicità una conferma all'armonia universale della Natura, già rivelata da Newton per i corpi celesti, e confermata dai principi di conservazione della massa e dell'energia. Essa indicava che il mondo degli elementi sottintende un ordine che, fino a quel momento, era sfuggito e rendeva la scoperta dei nuovi elementi non più un avvenimento occasionale, ma il risultato di una necessità immanente alla struttura relazionale della materia [32].

In questo ambito, la distribuzione degli elementi in uno schema ordinato (Tabella), quale che fosse, non ha costituito un aspetto marginale, ma, anzi, è stato di orientamento, indirizzo, conferma alle ipotesi sulle relazioni tra gli elementi, sull'esistenza di altri elementi, sulla struttura atomica e sulla distribuzione elettronica, per cui si può concludere, con buona pace di Lao Tsè, che se il nostro obiettivo deve essere la Luna, il dito va però osservato attentamente, per non perdere la direzione.

Bibliografia

- [1] Jensen, W. B. Editor (2002). *Mendeleév on the Periodic Law. Selected writings, 1869 – 1905*. Mineola, N.Y., Dover Publications, Inc.
- [2] Mendeleév, D. I. (1869). Über die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente. *Zeitschrift für Chemie*, 12, 405 – 406, Testo in inglese in rif. [1], 16 – 17.
- [3] Mendeleév, D. I. (1871). Die periodische Gesetzmäßigkeit der chemischen Elemente. *Annalen der Chemie und Pharmazie*, Supplementband VII, 133 – 229, Testo in inglese in rif. [1], 38 – 109.
- [4] Scerri, E. (2001). *The Periodic Table: the ultimate paper tool in Chemistry*. in Klein, U. Ed., *Tools and Modes of Representation in the Laboratory Sciences*, Dordrecht, NL, Kluivert Academic Publishers, 163 – 177.
- [5] Bensaude – Vincent, B. (2001). *Graphic Representations of the Periodic System of Chemical Elements*. in Klein, U. Ed., *Tools and Modes of Representation in the Laboratory Sciences*, Dordrecht, NL, Kluivert Academic Publishers, 133 – 161.
- [6] Poeti, R. (2019). L'evoluzione delle Tavole Periodiche di Dmitrii Mendeleev. <http://www.robertopoetichimica.it/le-differenti-tavole-periodiche-dmitrii-mendeleev/> Accessed 3/07/2019.
- [7] Rossi, P. (1997). La nascita della scienza moderna in Europa. Roma – Bari, Editori Laterza, 277 – 278.
- [8] Mendeleév, D. I. (1869). On the Correlation Between the Properties of the Elements and their Atomic Weights. *Zhurnal Russkoe Fiziko-Khimikeskoe Obshchestvo*, 1, 60-77. Testo in inglese in rif. [1], 18-37.
- [9] Richter, V. V. (1870). Korrespondenz aus Petersburg am 6/18 decbr. *Berichte*, 3, 990 – 992.
- [10] Scerri, E. R. (2007). *The Periodic Table. Its Story and Its Significance*. Oxford, UK, Oxford University Press.
- [11] Cerruti, L. (1985). L'orizzonte conoscitivo di D. Mendeleev. II - Uno sguardo sul sistema degli elementi. *La Chimica e l'Industria*, 67, 500 – 507.
- [12] Bensaude – Vincent, B., Stengers, I. (1996) *A History of Chemistry*. Cambridge, MA, USA, Harvard University Press.
- [13] Ball, P. (2002). *The Ingredients*. Oxford, UK, Oxford University Press.
- [14] Knight, D. (1992). *Ideas in Chemistry*. New Brunswick, NJ, USA, Rutgers University Press.
- [15] Rouvray, D. H. (1994). Turning the tables on Mendeleev. *Chemistry in Britain*, 30, 373 – 378.
- [16] Peratoner, A., Oddo, G. (1895). Sulla decomposizione di alcuni triazoturi, *Gazzetta Chimica Italiana*, 25(II), 13 – 21.
- [17] Ramsay, W. (1897). An Undiscovered gas. *Nature*, 56, 378 – 382.
- [18] Brauner, B. (1902). Über die Stellung der Elemente der seltenen im periodischen System von Mendelejeff. *Zeitschrift für anorganische Chemie*, 32, 1 – 30.

- [19] Thomsen, J. (1894). Relation Remarquable entre les Poids Atomiques des Éléments Chimiques, *Royal Danish Academy of Sciences and Letters, Oversigt*, 325 – 343, citato da Kragh (2015).
- [20] Thomsen, J. (1895). Systematische Gruppierung der chemischen Elemente. *Zeitschrift für anorganische Chemie*, 9, 190 - 193.
- [21] Kragh, H. (2015). Reception and Early Use of the Periodic System. The case of Denmark. in Kaji, M., Krag, H. & Pallò, G. Ed. *Early Responses to the Periodic System*. New York, Cambridge University Press, 171 – 190.
- [22] Werner, A. (1905). Beitrag zum Ausbau des periodischen Systems, *Berichte*, 39, 914 – 920.
- [23] Oddo, G. (1933). Sul potere di combinarsi del cripton e dello xenon: due lettere inedite del Prof. William Ramsay, *Gazzetta Chimica Italiana*, 63, 380 – 395.
- [24] Oddo, G. (1931). *Trattato di Chimica Generale e Inorganica*. Seconda edizione, Palermo, Remo Sandron.
- [25] Smeaton, W. A. (1965). Moseley and the Numbering of the Elements, *Chemistry in Britain*, 1, 353 – 355.
- [26] Moseley, H. G. J. (1914). The high-frequency spectra of the elements. Part II, *Philosophical Magazine*, 27, 703 – 713.
- [27] Villani, G. (2001). *La chiave del mondo*, Napoli, CUEN.
- [28] Thomson, J. J. (1904). On the structure of the atom: an investigation of the stability and periods of oscillations of a number of corpuscles arranged at equal intervals around the circumference of a circle; with application of the results to the theory of atomic structure. *Philosophical Magazine*, VII, 237 – 238, 254 – 260, 265, in Robotti, N. (1978). *I primi modelli dell'atomo*. Torino, Loescher Editore, 114 – 122.
- [29] Bohr, N. (1913). On the Constitution of Atoms and Molecules, *Philosophical Magazine*, 26, 476 – 502.
- [30] Kragh, H. (1977). Chemical aspects of Bohr's 1913 theory, *Journal of Chemical Education*, 54, 208 – 210.
- [31] Gol'danskii, V. I. (1970). The Periodic System of D. I. Mendeleev and Problems of Nuclear Chemistry, *Journal of Chemical Education*, 47, 406 – 416.
- [32] Di Meo, A. (2001). *Atomi e molecole nella chimica del XIX secolo*, in Villani, G. *Molecole*, Napoli, CUEN, 61 – 98.

Quaderni di Ricerca in Didattica, numero speciale 6

Atti della Scuola Permanente per l'Aggiornamento degli Insegnanti di Scienze Sperimentali
"I modelli nelle Scienze"
Hotel della Valle Agrigento, 22-27 luglio 2019

ISBN: 978-88-941026-5-9