

**SCUOLA PERMANENTE PER L'AGGIORNAMENTO  
DEGLI INSEGNANTI DI SCIENZE SPERIMENTALI**



<https://www.johnsearles.com/mobius-metal-sculptures/>

**Scienza inForma**  
La Forma nella Scienza

**A cura di:**

**Michele A. Floriano e Marco Russo**

SCUOLA PERMANENTE PER L'AGGIORNAMENTO  
DEGLI INSEGNANTI DI SCIENZE SPERIMENTALI



# Scienza inForma La Forma nella Scienza

Le Dune Sicily Hotel Catania

24 - 29 Luglio 2017

A cura di:

**Michele A. Floriano e Marco Russo**

Contributi alla

## **Scuola Permanente per l'Aggiornamento degli Insegnanti di Scienze Sperimentali**

**XI edizione: "Scienza inForma. La Forma nella Scienza"**

**Le Dune Sicily Hotel Catania**

**24 – 29 LUGLIO 2017**

Comitato scientifico-organizzatore:

Presidente: Michele A. Floriano

Claudia Caligiore  
Delia Chillura Martino  
Giorgio Cucciardi  
Claudio Fazio  
Josette Immè  
Giovanni Magliarditi  
Scolastica Serroni

Anna Caronia  
Maria Concetta Consentino  
Guido De Guidi  
Patrizia Gasparro  
Bianca Maria Lombardo  
Marco Russo

[infospais@gmail.com](mailto:infospais@gmail.com) - [www.unipa.it/flor/spais.htm](http://www.unipa.it/flor/spais.htm)

Quaderni di Ricerca in Didattica, numero speciale 1

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

ISBN: 978-88-941026-3-5

First edition, 5<sup>th</sup> February 2018, © SPAIS, Palermo

# *Indice*

*Prefazione*

Michele Antonio Floriano e Anna Caronia

*Scienza inForma. La Forma nella Scienza*

1

Alessandro Alfieri

*La “forma” nella riflessione di Adorno, dalla lettura di Aristotele all’arte moderna*

5

Salvatore Caccamese

*La Chiralità nella Natura e nell’Arte: osservazioni personali*

15

Roberto Cazzolla Gatti

*La biodiversità è frattale*

25

Cipriano Di Maggio

*La forma del rilievo terrestre e il problema della convergenza morfologica*

30

Giorgio Häusermann

*Le forme nella Scatola di Einstein*

56

Mauro Icardi

*Breaking Bad: il cambiamento*

59

Anna Maria Mannino

*Viaggio alla scoperta delle diatomee: microscopiche forme di vita dai mille segreti*

66

Luigi Monsù Scolaro

*Chiralità: dalle molecole all’universo*

78

Gabriella Morini  
*Il gusto: dare un senso alla chimica*  
88

Giovanni Randazzo  
*La forma della Terra dai graffiti ai droni*  
99

Scolastica Serroni  
*Alberi molecolari: i dendrimeri, dai primi esempi alle applicazioni più recenti*  
109

Luca Sineo  
*Le forme dell'uomo*  
135

Mariano Venanzi  
*Crescita e forma: un approccio molecolare*  
145

Giovanni Villani  
*La forma nel mondo microscopico degli atomi*  
155

Giovanni Villani  
*La forma delle molecole e delle macromolecole biologiche*  
167

## *Prefazione*

# **Scienza inForma. La Forma nella Scienza**

**Michele A. Floriano<sup>1,2</sup> e Anna Caronia<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Divisione Didattica della Società Chimica Italiana

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze e Tecnologie Biologiche, Chimiche e Farmaceutiche, Università di Palermo

<sup>3</sup> I.S. "Ettore Majorana", Palermo

E-mail: [michele.floriano@unipa.it](mailto:michele.floriano@unipa.it); [anna.caronia@tin.it](mailto:anna.caronia@tin.it)

Sito web: [www.unipa.it/flor/spais.htm](http://www.unipa.it/flor/spais.htm)

*"Che fai?" gli domandai. E lui, a sua volta, mi fece una domanda. "Qual è la forma dell'acqua?". "Ma l'acqua non ha forma!" dissi ridendo: "Piglia la forma che le viene data" (Andrea Camilleri, La forma dell'acqua, Sellerio editore - Palermo, 1994)*

La forma è dunque sostanza e chi, come un liquido che adatta la propria forma a quella del contenitore, muta la propria personalità in relazione al contesto sociale è giudicato privo di identità definita. Una forma precisa esprime quindi connotazione e proprietà specifiche. Ciò è vero in maniera quasi universale tanto che il termine informale è sinonimo di aspecificità.

Nelle Scienze impariamo presto a identificare le molecole anche in base alla loro geometria prevedendola sulla base di modelli semplici come il VSEPR o trattamenti più avanzati di natura quantomeccanica ma molto raramente viene chiarito come la forma delle molecole, attraverso le interazioni intermolecolari, determini le proprietà della sostanza. Infatti, anche se l'acqua magistralmente evocata da Camilleri è apparentemente senza forma, le sue eccezionali proprietà derivano dalle particolari interazioni intermolecolari e dalla forma della molecola. In generale nelle Scienze il tema della forma è senza dubbio uno dei più pervasivi! La possibilità di correlare proprietà che fanno parte della comune esperienza alla forma delle molecole è uno degli aspetti più intriganti: spiegare la natura a partire dallo studio di atomi e molecole. La struttura di aggregati di molecole di tensioattivo di forma opportuna consente la produzione di saponi e detersivi

sempre più efficaci e biodegradabili o di cristalli liquidi per l'uso in dispositivi elettronici così come lunghe catene polimeriche possono essere progettate per soddisfare esigenze specifiche. Studi interdisciplinari in cui si integrano anche competenze di fisica e di ingegneria consentono la realizzazione di materiali sempre più avanzati. In questo ambito generale si colloca anche la ricerca sulle macchine molecolari alla quale nel 2016 è stato assegnato il premio Nobel per la Chimica. Noi e la natura che abbiamo intorno funzioniamo grazie a sofisticate macchine molecolari (quali enzimi e proteine) la cui forma è estremamente complicata ed è essenziale nel determinarne caratteristiche e funzioni; se una proteina si degrada e non ha più la capacità di autoripararsi perde la sua forma, cambia le sue caratteristiche, per esempio potrebbe non essere più solubile nell'ambiente cellulare con conseguenze importanti sulle sue funzioni. Inoltre l'esistenza di conformazioni e forme specifiche apre la strada a importanti applicazioni nel campo del riconoscimento molecolare che da un lato, grazie ai contributi sinergici di chimica, fisica, elettronica e anche informatica, consente di realizzare sensori sempre più accurati e specifici e dall'altro importanti applicazioni nel campo della nanomedicina per il rilascio controllato di farmaci.

L'importanza della forma è immediatamente evidente anche su scala macroscopica. Nel mondo animale tutti gli esseri viventi si sono evoluti anche adattando le proprie caratteristiche di forma e dimensione alle esigenze dell'ambiente circostante così come nel mondo vegetale non solo l'aspetto complessivo della pianta ma anche quello di apparati specifici sono ottimizzate per uno scopo specifico: per esempio ampia superficie per massimizzare l'assorbimento della luce e gli scambi con l'ambiente o altre forme per assolvere funzioni di supporto e sostentamento.

A ben guardare forme particolari sono presenti ovunque nell'ambiente che ci circonda. La stessa forma della Terra, analizzata sfruttando tecnologie multiscale oggi divenute di altissima risoluzione e larghissima diffusione, consente al geologo di leggere la dinamicità endogena ed esogena del pianeta, così come, l'analisi morfometrica dei fossili ha posto le basi per una ricostruzione della dinamicità evolutiva di lungo termine della componente biologica.

Su una scala dimensionale ancora più ampia, anche l'osservazione dell'Universo offre notevoli spunti, dalla forma delle grandi galassie o di ammassi stellari sino a quelle dei singoli corpi celesti e delle loro traiettorie. Ma pur rimanendo confinati nell'ambito del nostro pianeta anche il moto di grandi masse d'aria, apparentemente caotico, in condizioni particolari assume forme che possono essere devastanti come i vortici di grandi cicloni o uragani.

D'altra parte il tema della forma e il suo rapporto con la sostanza non attiene solo al contesto scientifico. Dalla concezione atomistica che attribuiva alla loro

forma il comportamento degli atomi, si perviene alla definizione tecnica di Aristotele in cui è la forma, distinta dalla sostanza, che ci fa concepire le differenze fra gli esseri e quindi a quella di Kant che nella "Critica della ragion pura" intende per materia "ciò che corrisponde alla sensazione" e per forma "ciò per cui il molteplice del fenomeno può essere ordinato" secondo le forme pure a priori di spazio e tempo. Infine, in ambito contemporaneo, con Adorno la forma raggiunge una sua piena autonomia in campo artistico e architettonico.

SPAIS 2017 ha fatto uscire le molecole fuori dalla lavagna evidenziandone la struttura tridimensionale per capirne il funzionamento e per approfondire l'analisi dell'importanza della forma in vari campi del sapere scientifico.

I lavori sono stati aperti da una relazione di Anna Brancaccio Dirigente del MIUR sul declino dell'interesse dei giovani nello studio delle scienze e quindi Giovanni Villani ha messo in evidenza la relazione tra la meccanica quantistica e la forma geometrica degli atomi, delle molecole e degli orbitali e nel suo secondo intervento ha descritto le correlazioni tra quantistica chimica e l'importanza delle forme delle molecole di interesse biologico. La forma dell'homo sapiens e della sua evoluzione è stata presentata da Luca Sineo. Il concetto di "forma" ha assunto significati molteplici, ponendosi come una delle parole chiave della filosofia di ogni tempo ed è quanto emerso dalla relazione di Alessandro Alfieri. Luigi Monsù Scolaro ha parlato della chiralità sia a livello molecolare sia a livello macromolecolare e dell'importanza della omochiralità nel fantastico sistema complesso ma perfetto: la Natura. Scolastica Serroni ha riassunto la progettazione dei dendrimeri in relazione alle loro proprietà e le possibili funzioni conseguenza della forma. Gianleonardo Grasso ci ha parlato di una realtà quasi fantascientifica e cioè delle enormi potenzialità delle leghe metalliche e dei polimeri a memoria di forma, nuova e particolare classe di materiali funzionali, mentre Carolina D'Arpa ci ha trasportato nel lontano passato trattando nella sua relazione del Nautilus e della sua forma vincente che ha permesso a questo mollusco di sopravvivere sino ai nostri giorni. Gabriella Morini ha presentato composti che hanno sapore e quindi ha parlato della chemorecezione, cioè l'interazione ed il riconoscimento, in base alla complementarietà di forma e carica, tra recettori specifici e "ligandi" che è alla base del gusto e dell'olfatto. Anche il nostro pianeta nel tempo ha subito mutazioni nella forma della terra emersa di questo si è occupato durante il suo intervento Giuseppe Randazzo. Il self-assembly è usato nelle nanotecnologie per costruire strutture a livello nanometrico e mesoscopico a partire da unità molecolari e Mariano Venanzi ci ha illustrato i meccanismi di crescita e la morfologia di nanostrutture amiloidi responsabili di una serie di malattie neurodegenerative. Salvatore Caccamese ha messo in evidenza che il concetto di chiralità non è legato solo alla Chimica ma anche ad altri sistemi presenti in Natura e in alcune opere



d'arte. Roberto Cazzolla Gatti invece ci ha mostrato un aspetto particolare della biologia e dell'ecologia come sistemi autocatalitici. Cipriano Di Maggio ci ha riportato sulla Terra e ci ha parlato dell'importanza delle forme differenti nel rilievo terrestre anche se l'aspetto a volte è simile. Nella giornata conclusiva Eloisa Bentivegna ha descritto la teoria Gravitazionale che determina la forma dell'Universo e ha illustrato le recenti osservazioni riguardanti le onde gravitazionali mentre Anna Maria Mannino ci ha presentato le bellissime forme delle diatomee.

Nelle attività laboratoriali pomeridiane Giorgio Häusermann ha presentato una serie di semplici dimostrazioni di Fisica contenute nella sua "Scatola di Einstein", mentre Maria Concetta Consentino, Claudio Fazio e Patrizia Gasparro hanno coordinato lavori di gruppo riguardanti la progettazione di percorsi didattici basati sui contenuti delle relazioni mattutine. Infine, il programma è stato integrato da una discussione serale coordinata da Guido De Guidi e a cui hanno partecipato Alessandro Alfieri e Mauro Icardi sugli aspetti chimici e sociali della fortunata serie televisiva "Breaking Bad".

La provenienza multidisciplinare dei relatori ha consentito efficacemente di mettere in luce punti di vista diversi nello studio della stessa tematica.

Si ringraziano l'Ufficio Scolastico Regionale per la Sicilia, le Università di Catania, Messina e Palermo e il Piano Nazionale Lauree Scientifiche di tutte le aree delle stesse sedi, per il patrocinio e il supporto.

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

## **La “forma” nella riflessione di Adorno, dalla lettura di Aristotele all’arte moderna**

**Alessandro Alfieri**

Dipartimento di Filosofia Università degli Studi “Sapienza” di  
Roma – Accademia di Belle Arti di Roma

E-mail: [alfiogt@libero.it](mailto:alfiogt@libero.it)

**Riassunto.** Nella storia del pensiero occidentale, il concetto di "forma" assumeva diversi significati, diventando una delle parole chiave della filosofia; questa importanza coincide con la natura plurale e complessa del concetto, perché la "forma" non ha una definizione rigorosa ed esaustiva. Spesso la forma ha coinciso nel dibattito filosofico con l'astrazione concettuale rispetto alla contingenza concreta della dimensione sensibile, e in questa "forma" condivide la sua origine etimologica con uno dei termini più importanti della ricerca scientifica e matematica: la "formula". La filosofia moderna e contemporanea ha messo in discussione molti dei principi inerenti al passato; un autore del ventesimo secolo che attribuiva grande importanza alla "forma", in particolare all'estetica, è Theodor W. Adorno, che nel 1965 tenne un corso universitario dedicato alla Metafisica di Aristotele. La lettura di Adorno evidenzia le trasformazioni dall'età classica sul rapporto tra universale e particolare, tra atto e potere, e precisamente tra materia e forma. La forma nella modernità ha sovvertito in molti aspetti il suo significato: iperuranico e astratto, identico a se stesso come eterno, e in questo senso opposto alla materia, la forma è diventata sinonimo di una dimensione sensibile, concreta, e questo è evidente nell'arte in cui la forma coincide con gli elementi strutturali. Se la forma è considerata ciò che può essere osservato nel mondo sensibile, Aristotele considera la forma nel suo senso trascendente e metafisico: la forma è l'archetipo iperuranico, il concetto sempre identico, che per diventare reale nel mondo della molteplicità diventa materia. La riflessione dialettica di Adorno, tuttavia, torna a connettere i due piani: la forma aristotelicamente non può essere un concetto assolutamente indipendente: senza la realtà l'uomo non potrebbe mai realizzarlo e rimarrà inconoscibile.

In questi termini, la forma aristotelica di *eidos* è lontana dal concetto di estetica sviluppato da Adorno. Il problema dialettico della relazione tra concetti adorniani e concetti aristotelici sorge tuttavia dalla priorità aristotelica attribuita all'atto piuttosto che al potere. A partire dalla riflessione estetica di Theodor W. Adorno e dalla sua interpretazione della filosofia aristotelica, saranno messi in evidenza i paradossi del concetto di "forma" nell'arte moderna.

**Abstract.** In the history of Western thought, the concept of "form" assumed several meanings, becoming one of the key words of philosophy; this importance coincides with the plural and complex nature of the concept, because "form" doesn't have a strict and exhaustive definition. Often the form coincided in philosophical debate with conceptual abstraction compared to the concrete contingency of sensitive dimension, and in this "form" shares its etymological origin with one of the most important term of scientific and mathematical research: "formula". Modern and contemporary philosophy have questioned many of the principles inherent in the past; an author of the twentieth century who attributed great importance to "form", especially in aesthetics, is Theodor W. Adorno, who in 1965 held a university course dedicated to Aristotle's *Metaphysics*. Adorno's reading highlights the transformations since classical age about relationship between universal and particular, between act and power, and precisely between matter and form. Form in modernity has in many aspects overturned its meaning: hyperuranic and abstract, identical to itself as eternal, and in this sense opposed to matter, form has become synonymous of a sensible dimension, concrete, and this is evident in art where the form coincides with the structural elements. If form is considered what can be observed in sensible world, Aristotle considers form in its transcendent and metaphysical sense: form is the hyperuranic archetype, the always identical concept, that for becoming real in the world of multiplicity becomes matter. Adorno's dialectical reflection, however, returns to connect the two planes: the aristotelically form cannot be an absolutely independent concept: without reality man could never realize it and it will remain unknowable. In these terms, the aristotelian form as *eidos* is far from the concept of aesthetics developed by Adorno. The dialectical problem of the relationship between Adornian concepts and Aristotelian concepts arises, however, from the Aristotelian priority attributed to the act rather than to power. Starting with the aesthetic reflection of Theodor W. Adorno and his interpretation of Aristotelian philosophy, the

paradoxes of the concept of "form" in modern art will be highlighted.

Le implicazioni teoretiche relative al rapporto tra forma e materia, in corrispondenza a quelle di atto e potenza, rappresentano la matrice fondamentale della metafisica aristotelica. Aristotele espone una serie di termini in opposizione dialettica, dando la priorità e lo statuto di fondamento a ciò che, per sua natura, si svincola dalla contingenza e dall'incessante divenire della realtà terrena. Il mondo dell'idea è il mondo reale, la vera realtà fondata sulla perpetua identità; a esso è subordinato il mondo dell'esperienza, ovvero la molteplicità sensibile. Questo rapporto viene riproposto, per l'appunto, nella celebre opposizione di "materia" e "forma"; in Aristotele la forma ha tutt'altro significato da quello ricoperto nelle riflessioni del filosofo del Novecento Theodor W. Adorno, e Adorno lo sa bene, dato che è lui stesso a sottolineare come l'utilizzo di una serie di concetti da parte dello Stagirita possa confondere le idee di un lettore moderno: «In Aristotele [...] le sostanze seconde avrebbero una realtà superiore alle prime [...] quindi la forma, per quanto si realizzi nella materia, rappresenta come forma la realtà superiore ed è l'elemento più sostanziale, mentre d'altra parte la materia, che per noi indica proprio il momento che, in quanto dato nell'esperienza, solo decide sul grado di realtà, in questa filosofia è ridotta alla semplice possibilità [...]. Nella filosofia aristotelica la realtà corrisponde propriamente a ciò che chiamiamo possibilità, e la possibilità corrisponde a ciò che chiamiamo realtà» [1a].

La stessa nozione di forma è lontana dalle connotazioni che ha assunto nel corso dei secoli, e specie in epoca moderna; se comunemente la forma è ritenuta ciò che può essere osservato nel mondo sensibile, Aristotele considera la forma nel suo senso trascendente e metafisico: la forma è l'archetipo iperuranico, il concetto sempre identico, che per farsi reale nel mondo della molteplicità diviene materia, snaturando la sua essenza eterna: «In Aristotele l'universale o la forma – in lui sono entrambi la stessa cosa – è la realtà più elevata proprio come nel suo maestro» [1b].

La riflessione dialettica di Adorno, però, torna a mettere in connessione i due piani: la stessa forma aristotelicamente intesa non può mai darsi come concetto assolutamente indipendente; se non si "degradasse" nella realtà attraverso il suo confondersi nella materia, l'uomo non potrebbe mai renderne conto e resterebbe inconoscibile. La metafisica di Aristotele rivela timidamente il suo volto dialettico, nella consapevolezza che la forma, l'assoluto, pur essendo il "primo" dotato di incorruttibilità ed eternità, resterebbe un nulla se non esistesse la materia attraverso la quale si manifesta; Adorno sa bene che la sua lettura rischia di cadere in un qualche anacronismo, alla luce del fatto che, se il merito di Aristotele è stato quello

di compiere un passo decisivo rispetto a Platone nella comprensione del rapporto tra universale e particolare, tra idea ed esperienza, è vero anche che Aristotele mantiene l'elemento ideale su un piano di maggiore valore: «[...] l'essere deve essere qualcosa come il giusto mezzo tra forma e materia – però con un accento più forte appunto sulla forma» [1c] anche se «[...] il sensibile è certamente ritenuto inferiore, ma non un non-ente» [1d]. In maniera ancora più radicale, Adorno espone questo paradosso della filosofia di Aristotele: «[...] il paradosso consiste nel fatto che la forma, di cui si dovrebbe pensare sia l'effimero, l'irreale, il semplice ideale, lo sbiadito rispetto al reale che sarebbe invece il tangibile, l'evidente della materia, sia trasformata proprio nella vera realtà rispetto alla quale [...] quest'altra, questo strato iletico, la materia della conoscenza, viene degradata a un non-reale in senso stretto, a una semplice potenzialità» [1e].

Tuttavia Adorno è consapevole del fatto che la forma non è in grado di sussistere senza ciò di cui essa può dirsi forma, ovvero la materia: «[...] non possiamo assolutamente parlare di una forma senza dover dire: la forma di qualcosa» [1f] e questo in un certo senso contrariamente a quella che è la convinzione aristotelica per cui è possibile pensare una forma senza materia, ma non il contrario. Conoscere significa rivolgersi alla forma in quanto unità razionale e astratta, derivante dalla sensazione, ma che fa dell'oggetto della mera sensibilità (sfera del "sentire") un concetto (sfera della "logica"); la materia ha valore solo in quanto "poter essere" giacché in sé è puro "nulla", ed è l'intelletto che, a partire da quella potenzialità, la attualizza, creando l'universale, ovvero l'unità nella molteplicità. In tale contesto, è interessante specificare una corrispondenza con l'ambito che ci interessa particolarmente in questa sede, ovvero quello scientifico: è evidente la comune etimologia latina di "forma" e "formula", e non è un caso che proprio formula si riferisca al processo di astrazione intellettuale in grado di tradurre in linguaggio concettuale le verifiche sperimentali empiriche, attraverso un processo di deduzione dal molteplice (ovvero dall'individualità singolare dell'esperienza) all'unità (ovvero all'universale applicabile ai casi particolari). Dinamizzare dialetticamente le due sfere di "forma astratta" e "materia", e perciò di "formula" ed "esperienza empirica e concreta", era anche l'ambizione di un noto epistemologo francese del Novecento, ovvero Gaston Bachelard, che affermava non a caso: «La concettualizzazione scientifica ha bisogno di una serie di concetti in via di perfezionamento per acquisire quel dinamismo cui ci riferiamo, ossia per formare un asse di pensieri inventivi. Questa concettualizzazione totalizza e attualizza la storia del concetto. Al di là della storia, e spinta dalla storia, essa suscita esperienze destinate a deformare un certo stadio storico del concetto stesso. Essa ricerca nell'esperienza delle occasioni per *complicare* il concetto, per *applicarlo* malgrado la sua resistenza e per realizzare le condizioni di applicazione che la realtà non

riuniva. È allora che ci si rende conto che la scienza *realizza* i suoi oggetti, e non li trova mai già belli e fatti. Un concetto diventa scientifico nella misura in cui diventa tecnico, o viene accompagnato da una tecnica di realizzazione» [2a].

Torniamo ad Aristotele: come vedremo, la forma aristotelica in quanto *eidōs* è quanto di più lontano dal concetto di forma estetica sviluppato da Adorno, molto più consonante al concetto greco di *morphé*; il problema dialettico del rapporto tra concetti adorniani e concetti aristotelici emerge proprio a proposito della priorità aristotelica attribuita all'atto piuttosto che alla potenza. Possiamo affermare, anche semplificando, che la dimensione della potenza, e perciò della possibilità intesa aristotelicamente in senso spregiativo, spetta alla materia come caos, come ambito dell'informe e dell'origine primigenia precategoriale e prelogica. Nella dimensione della materia tutto è possibile perché ancora non costituito in forma, e il passaggio dalla materia alla forma, ovvero dall'essere in potenza all'essere in atto, è il divenire. Ora, la forma verso cui si dirige e si plasma la materia è *eidōs* in Aristotele, perché cristallizzatasi in oggetto la materia torna a essere tale, materia appunto, nell'orizzonte della sensibilità precaria, riattivando incessantemente il divenire delle cose. La forma in quanto *eidōs* non è perciò sensibile, ma è la forza motrice che agisce sugli eventi e sul mutamento; necessità trascende, l'*eidōs* è principio di organizzazione dell'universo. In Adorno, la forma resta il momento necessario rispetto alla materia, che stavolta assume un connotato profondamente socio-storico perché il caos che essa rappresenta si rapporta alla catastrofe del mondo esterno. Si tratta di due diverse modalità di comprensione del concetto di forma, tra idea astratta e dimensione sensibile; piuttosto che rinnegare la forma, l'arte moderna abbandona il modello classico di una forma formata, pacificante, basata sul principio dell'ordine, e diventa piuttosto una forma in perpetua formazione, interrotta e incompiuta, che in quanto *work in progress* si pone sullo stesso piano della contingenza e del divenire della temporalità.

A questo punto torniamo alla *Teoria estetica*, dove al rapporto dialettico di complementarità tra "materia" e "forma" (*eidōs*) corrisponde quello tra "contenuto" e "forma" (*Form*); infatti al contenuto è necessaria la forma artistica, ma ciò che ci interessa evidenziare è l'inversione del significato del termine in questione. La forma estetica adorniana corrisponde e possiede le specificità proprie della materia aristotelica: entrambe sono "apparenza", entrambe sono sensibili e legate al mondo del divenire. Oltretutto, tale forma non è se non la composizione concreta di elementi sensibili, configurazione di mezzi percepibili e soprattutto volti a costituire una singolarità, una individualità non sussumibile in un concetto o principio logico superiore, o in una classificazione categoriale dell'intelletto. Specie nell'arte moderna, la forma estetica diviene transeunte per sua stessa conformazione, *in fieri* o come sostiene ancora meglio Adorno e come abbiamo già

annunciato, *work in progress* (in quanto mette in mostra lo stesso processo di costituzione dell'opera); tale "inversione" di termini si dimostra anche nel fatto che l'arte per Adorno ha a che fare con le "possibilità", perciò con la "potenza" e non con l'"atto". L'arte infatti mette in mostra lo stesso formarsi del reale, risalendo a quello che Paul Klee (Fig. 1) definisce "cuore della creazione", ovvero alveo delle possibilità all'origine del formarsi della realtà, tra le quali solo una si realizza determinandosi in atto. Mettendo in evidenza le possibilità che invece non si sono date, la forma artistica è forma in formazione, "preistoria della visibilità", espressione della cifra del divenire; perciò in tutta evidenza una forma contrapposta alla fissazione astratta e concettuale garantita dalla forma aristotelica, principio di identità opposto all'inconsistenza ontologica della mera potenza o possibilità.



**Figura 1.** Paul Klee, Il prigioniero, 1940.

Sebbene Adorno riconosca l'insita intenzionalità dialettica propria alla filosofia aristotelica, ovviamente non può condividerne gli esiti e gli assunti fondamentali; si tratta di due punti nevralgici per i quali l'impostazione adorniana si distingue nettamente da quella del filosofo greco; la prima è la priorità del concetto e dell'idea sul sensibile, sulla cosa percepita, sui fatti dell'esperienza. Seppur mantenuta la dialettica dei termini, è indubbio che la priorità di Adorno sia rivolta all'oggetto: non c'è essere, né soggetto senza ente, mentre è possibile ancora pensare l'ente senza soggetto. Seppure Adorno sia stato a tutti i titoli il filosofo della

“mediazione”, il pensatore che più di chiunque altro ha avuto coscienza di quanto spirito e materia, soggetto e mondo (forma e materia, per l'appunto) fossero reciprocamente condizionati e incessantemente chiamati in causa l'uno dall'altro, è pur vero che non si può trascurare questo primato che Adorno dedica all'oggetto.

La forma aristotelica è vera realtà, fondamento determinante l'incessante mobilità del mondo (atto); di contro, la materia resta semplice possibilità, perpetuo divenire e mutarsi (potenza). È la forma a garantire l'identità di un oggetto, percepito ed esperito sempre all'interno del flusso temporale. Adorno discorda col filosofo greco proprio su questo punto: rivendicando lui stesso il fondamento intimamente dialettico di mobilità e immobilità (indeterminato/determinato, cosa/concetto), Adorno sottolinea come gli stessi principi che la tradizione ha posto come immutabili e intrinsecamente “primi”, in realtà siano anch'essi mediati da subito, legati alla realtà esterna e perciò stesso alla temporalità: «[...] Aristotele ha posto le forme, i concetti, come qualcosa di eterno e immutabile. Egli ha loro attribuito come qualità positiva, cioè come loro proprietà ontologica, come il loro puro essere-in-sé, ciò che per così dire si toglie loro con l'astrazione, cioè questo momento della de-temporalizzazione» [1g]. Ciò che si muove è sempre materia e il movimento si rivela essere il “realizzarsi del possibile”; per Aristotele non è possibile concepire il movimento senza l'immutabile, e perciò la materia senza la forma. Adorno concorda col filosofo greco, ma aggiunge anche il presupposto inverso: la stessa forma non può esistere senza materia – negando con questa posizione il fondamento di eternità della prima – e lo stesso movimento è la risultante dialettica di idea (forma) e sensibilità (materia). In pratica, questo significa molto semplicemente che non esistono idee, concetti, ambiti di conoscenza che possano astrarsi dalla temporalità, cioè dalla storia, ma ancora più concretamente dalla società. Torniamo a tal proposito ancora una volta a Bachelard: «Tanto in una classe moderna di chimica quanto nel laboratorio dell'alchimista, l'allievo e l'adepto non si presentano in prima istanza come dei puri spiriti. La materia stessa non è una ragione sufficiente perché siano tranquillamente oggettivi. L'uomo, naturalmente, si reca con tutti i suoi desideri, con tutte le sue passioni e con tutta l'anima allo spettacolo dei fenomeni più interessanti e più sorprendenti. Non bisogna stupirsi, quindi, che la prima forma della conoscenza oggettiva sia anche un primo errore» [2b].

Se l'arte moderna ha il compito etico di esprimere la catastrofe della nostra realtà, di riflettere nella propria struttura formale la frammentarietà e il non-senso di un mondo abbandonato al dominio del principio di identità, testimoniando al contempo delle sofferenze delle vittime della storia, allora per Adorno la cupezza di quest'arte si fa carico anche del dovere di strappare all'oblio il ricordo di chi ha sofferto nei campi di sterminio; questo perché il mondo che la forma moderna mette



in scena è un mondo dilaniato per sempre dall'esperienza limite della Shoah, non riconciliabile né oggi né in un futuro prospettabile. Tutto questo è palese in un'opera come *Guernica*, che come è ovvio non mette in scena la barbarie di Auschwitz ma comunque può essere ritenuta il più significativo atto di accusa contro la guerra e la barbarie del totalitarismo del Novecento: «Che le opere rinuncino alla comunicazione è una condizione necessaria, non già quella sufficiente, della loro essenza non-ideologica. Criterio cruciale è la forza dell'espressione attraverso la cui tensione le opere d'arte diventano eloquenti con una movenza priva di parole. Nell'espressione esse svelano di essere una ferita sociale; l'espressione è il fermento sociale della loro configurazione autonoma. Teste principale di ciò potrebbe essere la *Guernica* di Picasso (Fig. 2) che, strettamente incompatibile con il realismo prescritto, proprio con la sua costruzione inumana consegue quell'espressione che la acuisce a protesta sociale al di là di ogni fraintendibilità contemplativa. Le zone socialmente critiche delle opere d'arte sono quelle dove si sente dolore; dove nella loro espressione storicamente determinata viene alla luce la non-verità della situazione sociale. È propriamente a ciò che reagisce la rabbia» [3].



**Figura 2.** Pablo Picasso, *Guernica*, 1937.

Samuel Beckett si inserisce in questa modernità artistica: le sue pièce interpellano l'attività interpretativa da subito, non già perché il contenuto resti criptico in funzione di una forma a suo modo comprensibile, ma proprio perché il valore di criticità e di enigmaticità compete innanzitutto la forma stessa. È la forma di Beckett a mostrarsi immediatamente come ambito di non ovvia assimilazione intellettuale; d'altronde, quando diciamo che in Beckett la "riflessione è montata con la forma", in altro modo stiamo dicendo che è proprio il contenuto a essere

costruito nella forma stessa. Infatti, in luogo di una visione che vede distinte le due categorie di forma e contenuto, ma anche in opposizione all'idea formalista di una completa identificazione delle due, in Adorno il contenuto (per queste ragioni "sedimentato") mantiene sempre uno scarto rispetto alla sua manifestazione nella forma; tale contenuto è per il filosofo un "contenuto di verità", ovvero il livello dell'opera che si mette in relazione dialettica, polemica e critica con il reale. Il contenuto di verità montato con la forma significa, in altri termini, che in Beckett la denuncia delle storture del mondo moderno, le pene di quell'umanità colpevolmente sopravvissuta ad Auschwitz, il mondo ridotto in frammenti dalla degenerazione della logica tecnica, si esprimono a livello di forma. Tutto questo non ci viene raccontato o descritto da Beckett: il *non-sense* delle sue costruzioni narrative sono la manifestazione e la testimonianza della crudele realtà del mondo; la destrutturazione della prassi sintattica corrisponde alla destrutturazione raggiunta dal sistema tardo capitalistico, la frammentarietà del suo linguaggio corrisponde alla frammentazione dei rapporti sociali, alla dispersione del senso e all'atomizzazione degli individui.

Nell'ambito delle arti visive, possiamo pensare a un rappresentante della cosiddetta "arte informale"; l'esperienza personale delle atrocità naziste da parte di Jean Fautrier (Fig. 3), che è riuscito a sfuggire ai rastrellamenti della Gestapo nascondendosi in un ospedale, segnato dall'ascolto delle urla e dei colpi di fucile dei suoi connazionali prelevati e trucidati dai nazisti, ci aiuta a comprendere come la sua arte, più che affidarsi all'occhio e al visibile – e perciò rinnegando la figurazione che avrebbe significato appunto consegnare la testimonianza dell'orrore alla normalizzazione della cultura di massa – si affidi a una dimensione che paradossalmente prende avvio dall'udito e non dalla visione. La sua arte è una messa in discussione della preponderanza del visibile sugli altri sensi, perché il suo materismo è un'offesa per l'occhio e una chiamata in causa immediata per il sistema nervoso e per il pensiero.



**Figura 3.** Jean Fautrier, Testa di ostaggio n. 8, 1944.

Il sanguinamento testimonia quest'atto violento di distaccamento dal mondo, e se il mondo e la società vengono respinti essi vengono al contempo negativamente messi in evidenza restando come l'orizzonte da cui si è dato tale sanguinamento e strappo. Ciò che ne risulta è una forma malconcia, stravolta e irriconoscibile, in altri termini ciò che è rimasto del suo strappo violento e sanguinoso dall'orrore del mondo.

### **Bibliografia**

- [1] Adorno, Th. W., (2006). *Metafisica*. Torino: Einaudi.  
a) p. 13; b) p. 42; c) p. 57; d) p. 64; e) p. 74; f) p. 75; g) p.85
- [2] Bachelard, G. (1995), *La formazione dello spirito scientifico*. Milano: Raffaello Cortina. a) pp. 70-71; b) p. 62
- [3] Adorno, Th. W., (2009), *Teoria estetica* (p.118). Torino: Einaudi.

# **La Chiralità nella Natura e nell'Arte: osservazioni personali**

**Salvatore Caccamese**

Dipartimento di Scienze Chimiche, Università di Catania

E-mail: [scaccamese@unict.it](mailto:scaccamese@unict.it)

**Riassunto.** L'uomo è stato inconsciamente consapevole da millenni della chiralità e già nel 1783 Kant si rese conto della chiralità osservando l'immagine allo specchio di una mano. Ciò accadde quasi un secolo prima che Pasteur fondasse la stereochemica (la chimica nello spazio tridimensionale) come una nuova area della scienza e Van't Hoff e Le Bel avanzassero l'ipotesi del carbonio tetraedrico e asimmetrico. Non solo la Natura è chirale ma esiste in gran parte come solo un enantiomero (immagine speculare non sovrapponibile all'originale) e in ogni caso sa distinguere il senso di una struttura o oggetto elicoidale, destrorso o sinistrorso. I sistemi biologici hanno un marcato senso di chiralità e l'attività biologica è spesso correlata con le proprietà stereochemiche. Anche se nascosta esiste inoltre una relazione tra un modello di tetraedro e una elica. Molti esempi di asimmetria ed elicità possono essere osservati nel mondo delle piante come gli avvolgimenti dei rampicanti, i fiori di alcune specie, le comuni pigne. Nel mondo animale l'area più studiata è l'asimmetria delle lumache e dei molluschi. Le famose escargot francesi sono ad esempio destrorse e solo una su ventimila è sinistrorsa. L'elicità delle corna di alcune capre e delle ammoniti sono esempi di strutture meso cioè di oggetti in cui una metà è l'immagine speculare non sovrapponibile dell'altra metà. In opere d'arte vari tipi di colonne elicoidali, di scale e decorazioni tridimensionali a spirale in antiche chiese e chiostri tentano di collegare la terra al cielo e danno leggerezza a facciate ed altari. In questa relazione presento, attraverso mie foto, osservazioni di chiralità nel mondo della Natura, in opere d'arte e oggetti di artigianato.

**Abstract.** Human kind has been in some way aware of chirality for millennia and also Kant in 1783 provided a short description of chirality watching his hand in the looking glass. This observation

was about nearly a century before Pasteur established stereochemistry (chemistry in three dimensions of the space) as a new area of science and Van't Hoff and Le Bel proposed the hypothesis of an asymmetric tetrahedral carbon atom. Not only Nature is chiral but to a great extent it exists as just one enantiomer (a mirror image not superimposable upon the original) and, in any case, can tell the difference between right-handed and left-handed helical structures or objects. Biological systems possess a marked chirality sense and the biological activity is often related to stereochemical properties. Also, a hidden relationship exists between tetrahedron and helix. Many examples of asymmetry and helicity can be observed in the plant world as twining vines, flowers in specific families and common pine-cones. In the animal world the most studied area is the asymmetry of gastropods and snail shells. French escargot snails are, as example, right-handed and only one in twenty thousand exists in the left-handed form. Helicity in the horns in girentean goats and in ammonites is an example of meso structures, namely structures where a half part of it is a not superimposable mirror image of the other half part. Several varieties of helical columns, stairs, tridimensional spiral decorations in ancient churches and cloisters try to connect earth with heaven and add magnificence to a facade or an altar. Here I present personal observations through photographs concerning enantiomers in the natural world, art and craft works.

Il concetto di chiralità è stato presente nelle varie culture dell'uomo da tempo immemorabile anche se in maniera inconscia e non critica. Già nel 1783 Kant scriveva "cosa rassomiglia di più alla mia mano ed essere in tutti i punti simile che la sua immagine allo specchio? e tuttavia io non posso sovrapporre questa mano vista allo specchio alla mano originale". Ciò accadde quasi un secolo prima che Pasteur nel 1848 fondasse la stereochemica (la chimica nello spazio tridimensionale) e ampliando questa visione scrivesse nel 1883 che "tutte le specie viventi, nella loro struttura e nella forma esterna, sono funzione dell'asimmetria del cosmo". Escher, in alcune sue litografie, dà bellissime illusioni tra la bidimensionalità del foglio e la rappresentazione tridimensionale di oggetti chirali come vortici e spirali.

Nel 1874 Van't Hoff e Le Bel avanzarono l'ipotesi del carbonio tetraedrico e asimmetrico: esso è un carbonio, posto al centro di un tetraedro, a cui sono legati quattro atomi o gruppi disposti ai vertici del tetraedro e che sono diversi l'uno dall'altro. Da allora i concetti di asimmetria, chiralità e in genere la stereochemica

hanno compiuto passi da gigante. Nel 1901 Van't Hoff ricevette il primo premio Nobel per la Chimica e moltissime sintesi organiche hanno al giorno d'oggi implicazioni stereochimiche [1].

Come le mani destra e sinistra, gli enantiomeri sono strutture che non sono identiche ma sono l'una l'immagine speculare dell'altra: e quindi sono strutture chirali in quanto non possono essere sovrapposte alle loro immagini speculari. Invece strutture achirali sono sovrapponibili con le loro immagini speculari e la differenza più evidente tra una struttura chirale ed una achirale è la simmetria. Ogni struttura che non ha un piano di simmetria, cioè un piano che la divida in due parti uguali, può esistere come due enantiomeri. Invece, una struttura che possiede un piano di simmetria non può esistere come due enantiomeri. Ciò si applica anche agli oggetti di ogni giorno e a molti esempi nella Natura e nell'arte [2,3]. Per esempio, un paio di forbici, una palla con delle scritte, una vite sono oggetti chirali mentre una tazza senza scritte, una sedia, una palla senza decorazioni sono oggetti achirali.

Non solo la Natura è chirale ma esiste in gran parte come solo un enantiomero tra i due possibili e in ogni caso sa distinguere il senso di chiralità in forme del regno vegetale e animale. Per esempio un'elica con avvolgimento orario (destrorso) e un'elica antioraria (sinistrorsa) sono due enantiomeri. Dalla Natura l'uomo ha preso ispirazione per realizzare opere d'arte che sono chirali.

La chiralità è rilevante nei sistemi biologici e l'attività biologica di un prodotto naturale o l'attività farmacologica di un prodotto di sintesi è spesso correlata con le proprietà stereochimiche [4]. Qui di seguito riporto quattro casi come esempi.

Gli aromi dell'arancio e del limone differiscono perché i recettori olfattivi, che sono chirali ma presenti come un solo enantiomero, distinguono l'enantiomero R del limonene presente nell'arancia dall'enantiomero S (immagine speculare non sovrapponibile della forma R) che è invece presente nel limone.

La naringenina è contenuta nel pompelmo e nell'arancio amaro come il glicoside naringina più solubile in acqua ed è in genere un potente antiossidante. Essa inibisce fortemente l'ossidazione di alcuni farmaci (p. es. la warfarina) mediata dall'enzima citocromo P 450. La S-naringenina è due volte più potente come inibitore di alcune isoforme di questo enzima mentre l'enantiomero R è due volte più potente in altre isoforme dello stesso enzima [5].

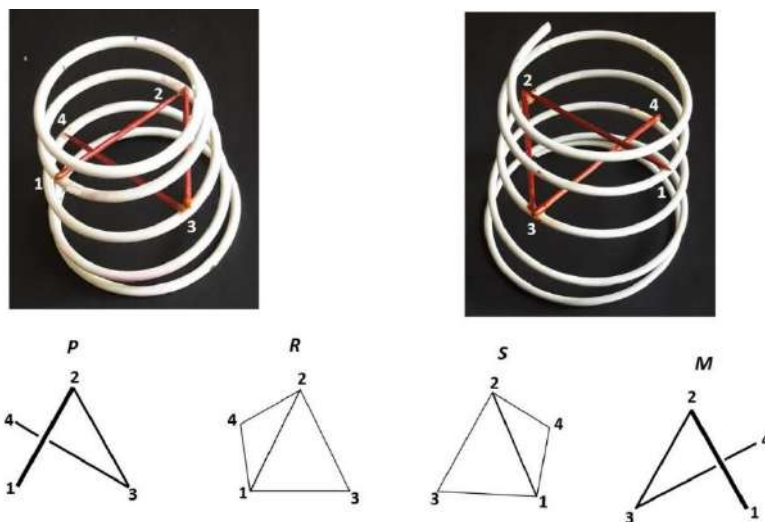
La D-alanina è usata dalla Natura nella costruzione delle proteine presenti nelle pareti delle cellule dei batteri mentre l'enantiomero L è di solito presente nelle altre proteine. Un antibiotico, la vancomicina, riconosce la insolita D-alanina nelle proteine delle cellule batteriche e distrugge le cellule che la contengono.

L'ibuprofene è un comune farmaco analgesico da banco. Solo l'enantiomero S in effetti cura il dolore ma il prodotto commerciale viene venduto come racemato

cioè una miscela in parti eguali dei due enantiomeri (R ed S). Per fortuna il nostro organismo fa il resto essendo capace di trasformare l'enantiomero R, inattivo, nell'enantiomero S.

Quindi è fondamentale il riconoscimento chirale nell'interazione tra una sostanza formata da due enantiomeri con un recettore enzimatico (RE) o con una fase stazionaria chirale (CSP) usata in HPLC, presenti come un singolo enantiomero. E' lo stesso meccanismo per cui la mano destra (paragonabile a un RE o CSP) interagisce in maniera differente con un guanto destro, che calza bene o con un guanto sinistro, che calza male.

Due forme apparentemente molto diverse tra di loro sono un tetraedro e un'elica. Eppure esiste una relazione nascosta tra di esse elegantemente esposta da Prelog [6] vincitore del premio Nobel per la Chimica nel 1975 per la sua ricerca nella stereochemica di molecole organiche. Dopo aver stabilito regole di priorità per i quattro gruppi diversi legati ad un atomo di carbonio tetraedrico ed un percorso che va dal gruppo a priorità più alta (1) a quello a priorità più bassa (4) è possibile inserire questo tetraedro all'interno di un'elica (Fig. 1).



**Figura 1.** Relazione tra tetraedro e un'elica. A sinistra un'elica e un tetraedro destrorsi, a destra elica e tetraedro sinistrorsi. Il punto 1, a priorità maggiore, è il punto più vicino all'osservatore.

Le regole per la selezione della priorità dei gruppi fanno parte del cosiddetto sistema CIP dal nome degli inventori e sono alla base della nomenclatura degli enantiomeri [7]. Se osserviamo l'elica a sinistra della Figura 1 dalla estremità in

alto, il punto più vicino a noi, e la percorriamo verso il basso l'avvolgimento si presenta in senso orario, cioè destrorso, e chiamiamo l'elica P (plus) e il tetraedro R (rectus). Se l'avvolgimento è antiorario dallo stesso punto di osservazione, come a destra in Figura 1, avremo un'elica M (minus) e un tetraedro S (sinister). La sequenza nel tetraedro dà la priorità maggiore (1) al punto più vicino all'osservatore, in un giro dell'elica più alto rispetto al punto a priorità minore (4). Ovviamente le due eliche sono oggetti enantiomorfi (termine analogo a enantiomeri usato spesso nelle forme macroscopiche).

Un'opera d'arte elicoidale o a spirale è il gioiello in bronzo in Figura 2, usato dalle donne della Sibarite nel nono secolo a.C. L'avvolgimento dell'elica allontanandoci dal punto di osservazione, ovvero il senso di chiralità, è destrorso quindi a nomenclatura P.



**Figura 2.** Gioiello in bronzo di donna della Sibarite. Elicità destrorsa.



**Figura 3.** Conchiglie di Neptunea. A sinistra elicità destrorsa, a destra elicità sinistrorsa.

Elicità destrorsa e sinistrorsa sono presenti nelle conchiglie di molluschi del genere Neptunea fotografati al Museo del Mare di Catania e mostrati in Figura 3. La Natura ha scelto la Neptunea a sinistra come molto più comune della Neptunea a destra. Ha scelto quindi un enantiomero rispetto ad un altro. Anche in questo caso, osservando lungo l'asse di chiralità ed allontanandoci è chiaro il senso di chiralità, destrorso a sinistra e sinistrorso a destra. Una conchiglia molto più grande di un mollusco australiano, *Syrinx auranus*, possiede una elicità destrorsa molto evidente nell'avvolgimento. Essa non è mostrata nella relazione ma può essere rintracciata su Internet.



Un caso particolare di chiralità in Natura è rappresentato in Figura 4. Essa è una ammonite presente al Museo di Scienze Naturali di Ginevra, fotografata davanti (a sinistra) e dietro (a destra). Il senso di chiralità è destrorso (P) a destra se osserviamo dal punto più vicino a noi (l'estremità in alto) e procediamo verso il punto più lontano (il centro). Chiralità opposta si ha invece osservando la stessa ammonite dall'altra parte a destra. Quindi abbiamo entrambi i sensi di chiralità (P ed M) nello stesso oggetto. Ne risulta che l'ammonite è un oggetto meso. Cioè contiene entrambi i sensi di chiralità ma è achirale perché vi è un piano di simmetria che la divide a metà in due parti tra di loro enantiomorfe. Le capre girgentane con lunghissime corna elicoidali mostrate nelle slides della relazione orale, sono un altro esempio di animali meso.



**Figura 4.** Ammonite vista davanti (a sinistra) e di dietro (a destra). A sinistra elicità destrorsa, a destra elicità sinistrorsa.

Il senso di chiralità di un'elica non dipende dal punto di osservazione lungo l'asse dell'elica. Un'elica destrorsa osservata dall'estremità in alto rimarrà destrorsa se osservata dall'estremità in basso. Ciò è evidente nella scala elicoidale della Certosa di Padula mostrata in Figura 5. Essa ha un avvolgimento antiorario (sinistrorso) sia osservandola da sotto, a sinistra, sia osservandola dall'alto, a destra, in cui la parte più scura è più vicina all'osservatore.



**Figura 5.** Scala elicoidale della Certosa di Padula. A sinistra osservata dal basso, a destra dall'alto. Elicità sinistrorsa in entrambi i casi.

L'uso di avvolgimenti ad elica nelle colonne di portali ed altari di chiese conferisce a queste un senso di leggerezza e di movimento che le classiche colonne cilindriche non hanno. Il portale della Chiesa Madre di Sortino mostrato in Figura 6 ne è un bellissimo esempio. Le due colonne a destra hanno un senso di chiralità sinistrorso mentre quelle a sinistra sono destrorse. E dal confronto con le colonne classiche più esterne si nota subito lo slancio che l'elica conferisce.



**Figura 6.** Chiesa Madre di Sortino. Elicità sinistrorsa delle colonne a sinistra, viceversa nelle colonne a destra.



**Figura 7.** Moschea di Kairouan, decorazione di una parete. Doppia elica ad avvolgimenti destrorsi.

Il DNA è il classico esempio di una doppia elica costituita da due filamenti ognuno destrorso attorno allo stesso asse.

La decorazione a pietra intagliata in Figura 7 dà l'illusione della tridimensionalità, e quindi della possibilità di parlare di chiralità. Essa è sulle pareti della Moschea di Kairouan e costituisce un finissimo esempio di doppia elica ad avvolgimenti destrorsi come il DNA. L'arte islamica è ricchissima di esempi di chiralità.

La chiralità esiste anche in alcuni fiori ristretta tuttavia alle piante delle famiglie Malvaceae e Apocynaceae. In generale la asimmetria destra o sinistra nelle piante è sotto controllo genetico o stocastico. I petali dell'Ibisco in Figura 8 a sinistra sono sistemati in modo che il singolo petalo si inserisce sotto il petalo successivo se noi andiamo in senso antiorario scorrendo il fiore da un petalo all'altro. Quindi abbiamo un'elicità M o "spiralizzazione sinistrorsa" usando il termine preferito dai botanici. La stessa elicità si nota osservando questo fiore dallo stelo, a destra in Figura 8, a riprova della ininfluenza del punto di osservazione di un'elica sulla definizione della sua chiralità. Osservando i fiori di Ibisco nella stessa pianta essi sono presenti sia ad elicità destrorsa che sinistrorsa come si può vedere nella slide mostrata nella relazione orale. Se nella stessa pianta il numero dei fiori M fosse eguale al numero di fiori P avremmo un racemato, ossia una miscela in parti eguali dei due enantiomeri. Se il numero fosse diverso parleremmo di un eccesso enantiomerico, per usare termini stereochimici.



**Figura 8.** Fiore di Ibisco. A sinistra visto dall'alto, a destra dal basso. Elicità sinistrorsa in entrambi i casi.

Diverso è il caso dei fiori di *Vinca minor* mostrati in Figura 9. A sinistra i petali si inseriscono uno dopo l'altro sotto il successivo formando un'elica che va in senso orario e quindi a elicità P e tutti i fiori sulla medesima pianta hanno elicità P. A destra è mostrata invece una pianta di *Vinca minor* con fiori di colore rosa, e quindi forse una cultivar diversa, in cui tutti i fiori hanno elicità M. Altre specie di Apocynaceae in cui si osserva chiralità sono la *Plumeria* e l'*Oleandro* anch'esse molto comuni. Dalle Apocynaceae vengono estratte numerose sostanze che hanno attività farmacologica e tossica per l'uomo.



**Figura 9.** Fiori di *Vinca minor*. Elicità destrorsa a sinistra, sinistrorsa a destra.

In alcune specie di Cactus è possibile osservare chiralità. Un comune Cactus dell'Orto Botanico di Palermo mostrato in Figura 10 ha chiralità destrorsa nell'andamento delle spire, altri Cactus hanno chiralità opposta.

Tutti noi abbiamo avuto tra le mani una comunissima pigna. Anche essa è chirale (Fig. 11). Osservando infatti dall'asse dell'elica e cioè dal punto di attacco si vede chiaramente un avvolgimento antiorario delle brattee legnose man mano che ci allontaniamo.

Questi sono solo alcuni esempi che mostrano come la chiralità sia intorno a noi anche in oggetti o architetture realizzate dall'uomo o in espressioni semplici della Natura. Essa si estende dai microorganismi, come in alcuni batteri, alle profondità dell'Universo come le nebulose. Bisogna sapere fermarsi e guardare intorno a noi con maggiore curiosità. Come scriveva Proust "il vero viaggio verso la scoperta non consiste nella ricerca di nuovi paesaggi ma nell'averne nuovi occhi".



**Figura 10.** Cactus ad elicità destrorsa.



**Figura 11.** Comune pigna ad elicità sinistrorsa.

### **Bibliografia**

- [1] Eliel, E.L., Wilen, S.H., Doyle, M.P. (2001) *Basic Organic Stereochemistry*, New York, Wiley Interscience.
- [2] Brunner, H. (1999) *Rechts oder links in der Nature und anderswo*, Weinheim, Wiley-VCH.
- [3] Welch, C.J. (2002) Chirality in the natural world: life through the looking glass, In W.J. Lough, I.W. Wainer (Ed.), *Chirality in natural and applied science* (pp.285-302), Oxford, Blackwell Science.
- [4] Crossley, R. (1992) The relevance of chirality in the study of biological activity. *Tetrahedron* 48, 8155-8178.
- [5] Lu, W.J., Ferlito V., Xu C., Flockhart, D. A., Caccamese, S. (2011) Enantiomers of naringenin as pleiotropic, stereoselective inhibitors of cytochrome P 450 isoforms. *Chirality* 23, 891-896.
- [6] Prelog, V., Helmchen G. (1982) Basic principles of the CIP-system and proposal for a revision. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 5, 385-415.
- [7] Cahn, R.S., Ingold, C. K., Prelog, V. (1966) Specification of molecular chirality. *Angew. Chem. Intern. Ed. Engl.* 5, 385-415.

# La biodiversità è frattale

**Roberto Cazzolla Gatti**

Biological Institute, Tomsk State University, Russia

E-mail: [robertocgatti@gmail.com](mailto:robertocgatti@gmail.com)

**Riassunto.** Per molto tempo, gli ecologi hanno messo in discussione le variazioni della biodiversità attraverso il gradiente latitudinale. È emerso che i cambiamenti nella  $\beta$ -diversità sono causati semplicemente da cambiamenti nelle dimensioni dei pool di specie. Ho unito le dimensioni del pool di specie e la natura frattale degli ecosistemi per chiarire alcuni schemi generali di questo gradiente. Considerando temperatura, umidità e NPP come le principali variabili di una nicchia dell'ecosistema e come asse del poligono nello spazio cartesiano, è possibile costruire ipervolumi frattali, la cui dimensione frattale sale fino a tre spostandosi verso l'equatore. In un articolo di ricerca, ho dimostrato che la figura migliore che sintetizza graficamente le forze evolutive che si adattano a questo ipervolume dell'ecosistema è il cavolfiore frattale.

**Abstract.** For a long time, ecologists have questioned the variations of biodiversity across the latitudinal gradient. It has emerged that the changes in  $\beta$ -diversity are caused simply by changes in the sizes of species pools. I combined the species pool size and the fractal nature of ecosystems to clarify some general patterns of this gradient. Considering temperature, humidity and NPP as the main variables of an ecosystem niche and as the axis of the polygon in the Cartesian space, it is possible to build fractal hypervolumes, whose fractal dimension rises up to three moving towards the equator. In a research paper, I showed that the best figure that graphically synthesizes the evolutionary forces that fit this ecosystem hypervolume is the fractal cauliflower.

Una delle domande più interessanti per l'ecologia è perché i tropici sono così diversi o, in altre parole, perché ci sono variazioni di biodiversità lungo il gradiente latitudinale. Dal momento che la diversità tropicale rispetto a quella delle aree

temperate divenne evidente nel corso del XIX secolo, un gran numero di fattori diversi sono stati proposti come possibili spiegazioni [1] Recentemente è stato dimostrato che i cambiamenti nella  $\beta$ -diversità sono causati semplicemente da variazioni nelle dimensioni della nicchia ecosistemica (la quantità di specie contenute in un'ampia regione). Infatti, dopo la correzione per la variazione di ricchezza di specie nel pool ( $\gamma$ -diversità), le differenze di  $\beta$ -diversità scompaiono. Pertanto, le differenze nei processi di assemblaggio locali (quelli che realizzano la biodiversità di un ambiente) non possono essere considerate cause di variazione latitudinale ed altitudinale della biodiversità, ma sono piuttosto le variazioni nei processi biogeografici che stabiliscono la dimensione del pool (quante specie in una determinata area) [2].

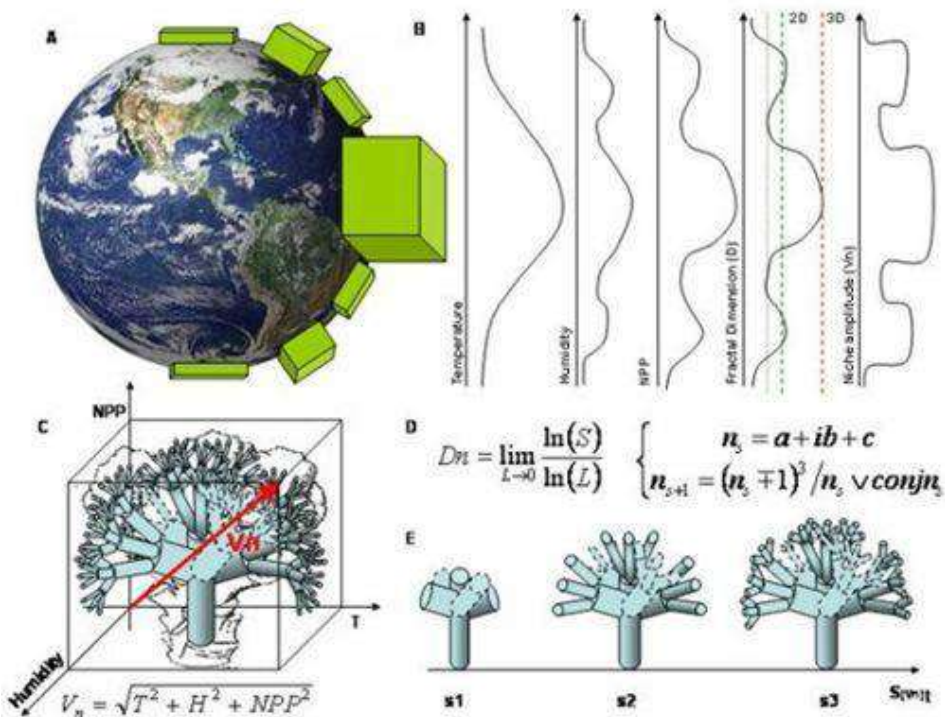
Una delle più corroborate ipotesi ecologiche ed evolutive è quella che stabilisce come sia il clima regionale (C) ad influenzare la produzione primaria netta (NPP) in modo tale che, incrementando/riducendo la biomassa disponibile (B) e così aumentando/diminuendo il numero di individui (I), questo «controlli» il numero di specie (S). Finora la relazione «clima  $\rightarrow$  NPP  $\rightarrow$  I  $\rightarrow$  S» non è stata chiaramente dimostrata, perché sembra non essere mediata direttamente da biomassa. Qui dimostro che non sono l'I o la B ad influenzare S, ma piuttosto l'estensione della NPP e del clima sulle variabili di nicchia.

È possibile estendere il concetto di nicchia ecologica ad una dimensione ecosistemica per meglio definire le dimensioni del pool di specie invocata da [2]. Questa «nicchia ecosistemica», dunque, si può immaginare come la somma delle nicchie di ogni specie (esigenze e ruoli ecologici di ogni specie) incluse nel pool. Da un punto di vista *Hutchinsoniano* una nicchia ecosistemica è un ipervolume n-dimensionale, dove le dimensioni sono le condizioni ambientali (C) e le risorse (NPP) che definiscono i requisiti fondamentali che garantiscono la riproduzione a tutte le specie presenti in un determinato ecosistema.

Inoltre, esempi della natura frattale della Natura sono stati evidenziati costantemente nel corso degli ultimi anni [3]. Diversi elementi del mondo naturale sono stati associati o definiti come frattali, ma solo considerandoli separatamente e non in una prospettiva olistica. Che gli ecosistemi siano strutturati in modo frattale (costituiti da relazioni che sono auto-somiglianti su una vasta gamma di scale spaziali e temporali, così come i singoli elementi di cui sono composti), sta diventando un'idea intrigante in ecologia.

Ho combinato questi due concetti apparentemente distinti, la nicchia dell'ecosistema e la natura frattale di questi, nel tentativo di chiarire alcuni «comportamenti» generali della diversità biologica.

Qui dimostro che il gradiente latitudinale della biodiversità può essere spiegato come la differenza di dimensione frattale di nicchia degli ecosistemi (Fig. 1A). Riduciamo le variabili che possono modellare la nicchia ecologica a quelle fondamentali. La temperatura (T) è sicuramente una di queste [4]. Diversi autori suggeriscono che la ricchezza delle specie che non possono regolare la propria temperatura interna (ectoterme) può essere derivata dalla temperatura ambientale [5, 6]. La seconda variabile fondamentale di un ipervolume ecosistemico è l'umidità (H), che mostra valori diversi nelle regioni terrestri, ma è costante in ambiente marino, all'interno del quale la temperatura e la profondità della zona fotica sono le principali variabili.



**Figura 1.** La nicchia ecologica nella sua dimensione frattale (D), composta dalle 3-dimensioni (temperatura, umidità, produttività primaria netta) dell'ipervolume all'interno del quale si sviluppa il cavolfiore frattale. Si veda il testo per maggiori dettagli.

La variazione latitudinale di entrambe queste variabili è mostrata nella Figura 1B. Unendo temperatura e umidità da un polo all'altro, è possibile stimare la curva di produzione primaria netta (NPP). Quest'ultima mostra una forma a tripla-gobba,



con una gobba grande tra circa 20° N e S dall'Equatore e due moderate sulle aree temperate. I valori più bassi di NPP ricadono sulle regioni alle latitudini polari e tropicali (deserti) dove T e/o H sono bassi. Modelli semplici di dinamiche spaziali [7] prevedono con precisione l'aumento della ricchezza di specie con l'aumento della produttività ambientale (ad esempio l'«ipotesi ricchezza-energia»).

Sembra ragionevole che la diversità degli organismi autotrofi possa essere legata principalmente all'umidità (o alla luce in ambiente marino), quella degli ectotermi dalla temperatura, mentre la disponibilità di risorse (NPP) è la variabile fondamentale che consente la differenziazione delle specie endotermiche. Così, sia T sia H sono costituenti e co-variabili della NPP nelle nicchie ecosistemiche. Pertanto, considerando questa nicchia come un poligono nel piano cartesiano dove x, y e z sono rispettivamente gli assi T, H e NPP (Fig. 1C) dimostro che dove questi valori, in particolare l'NPP sono vicini allo zero come nelle aree polari o nei deserti, la dimensione frattale (D, Fig. 1D dove L è la scala lineare e S è il risultato dell'aumento di dimensione) di questo poligono è inferiore a due (~ 1,5). Ciò significa che abbiamo un'ipersuperficie piuttosto che un ipervolume disponibile per l'occupazione da parte delle specie. Muovendosi latitudinalmente e seguendo la curva della NPP, la dimensione frattale passa attraverso il valore 2,5 raggiungendo il valore 3 (una forma a 3-dimensioni) al livello dell'equatore (Fig. 1A e B). In altri termini, qui considero il valore D dell'ipervolume ecosistemico come un fattore di stima dello spazio disponibile per la *pool* di specie. Chiaramente, maggiori sono T ed H, e pertanto l'NPP, più grande è D e maggiore è l'ampiezza di nicchia ecosistema ( $V_n$ , Fig. 1B e C). Questa teoria sembra risolvere i problemi delle ipotesi della «conservazione di nicchia» [8] e della relazione «ricchezza-energia» (così come l'incompreso ruolo di B o la minor correlazione tra NPP ed I rispetto a quella tra NPP e S).

Definite le cause ecologiche della «dimensione della biodiversità», è quindi fondamentale concentrarsi sui processi evolutivi che possono «colmare» lo spazio di nicchia a disposizione. La migliore figura che sintetizza graficamente le forze evolutive che spingono al riempimento dell'ipervolume ecosistemico è il «cavolfiore frattale». Infatti, per ogni iterazione, che può essere considerata come l'aggiunta/immigrazione/speciazione di una nuova specie (s), il volume di nicchia può essere riempito fino ad un valore prossimo a 3 D (ad esempio 2,7-2,9 delle equazioni in Fig. 1D). Il sistema semplice in Fig. 1D realizza nel modo più efficace il riempimento di uno spazio funzionale, dove  $n_s$  è la nicchia ecosistemica occupata dalle nicchie ecologiche delle specie ed a, b, c sono la porzione delle tre variabili fondamentali (T, H e NPP) utilizzata da ciascuna specie. I rami del cavolfiore frattale sono creati *step by step* (Fig. 1E) con l'aggiunta/speciazione di nuove specie

verso l'ampiezza massima ( $V_n$ ) consentita dalla NPP e conseguentemente da D. Ogni segmento costituisce una nuova nicchia ecologica disponibile all'interno dell'ipervolume ecosistemico che altre specie possono occupare, come suggerisce l'ipotesi della diversità che genera la diversità [9, 10].

Il modello sopra descritto [11], riassumibile come l'«ipotesi del cavolo della diversità biologica», pur se potrebbe apparire semplicistico, può essere esteso anche a gradienti altitudinali e far luce sui processi ecologici ed evolutivi che caratterizzano la biodiversità sulla Terra.

## **Bibliografia**

- [1] Pianka, E. R. (1966). Latitudinal gradients in species diversity: a review of concepts. *The American Naturalist* 100(910), 33-46.
- [2] Kraft, N. J. B., Comita, L. S., Chase, J. M., Sanders, N. J., Swenson, N. G., Crist, T. O., et al. (2011). Disentangling the Drivers of  $\beta$  Diversity Along Latitudinal and Elevational Gradients. *Science*, 333(6050), 1755-1758.
- [3] Brown, J. H., Gupta, V. K., Li, B.-L., Milne, B. T., Restrepo, C., West, G. B. (2002). The fractal nature of nature: power laws, ecological complexity and biodiversity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 357(1421), 619-626.
- [4] McArthur, R.H. (1972). *Geographical Ecology*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- [5] Blackburn, T.M. and Gaston, K.J. (1996). A sideways look at patterns in species richness, or why there are so few species outside the tropics. *Biodiversity Letters*, 3(2), 44-53.
- [6] Janzen, D.H. and Pond, C.M. (1975) A comparison, by sweep sampling, of the arthropod fauna of secondary vegetation in Michigan, England and Costa Rica. *Transactions of the Royal Entomological Society of London*, 127(1), 33-50.
- [7] Kay, R. F., Madden, R. H., Van Schaik, C., Higdon, D. (1997). Primate species richness is determined by plant productivity: Implications for conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(24), 13023-13027.
- [8] Wiens, J.J. and Graham, C.H. (2005). Niche Conservatism: integrating evolution, ecology and conservation biology. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 36, 519-539.
- [9] Currie, D. J., Mittelbach, G. G., Cornell, H. V., Field, R., Guégan, J.-F., Hawkins, B. A., et al. (2004). Predictions and tests of climate-based hypotheses of broad-scale variation in taxonomic richness. *Ecology Letters*, 7(12), 1121-1134.
- [10] Cazzolla Gatti, R. (2011) Evolution is a Cooperative Process: The Biodiversity-related Niches Differentiation Theory (BNDT) Can Explain Why. *Theoretical Biology Forum*, 104(1), 35-44.
- [11] Cazzolla Gatti, R. (2016). The fractal nature of the latitudinal biodiversity gradient. *Biologia*, 71(6), 669-672.

## **La forma del rilievo terrestre e il problema della convergenza morfologica**

**Cipriano Di Maggio**

Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare, Università degli Studi di Palermo

E-mail: [cipriano.dimaggio@unipa.it](mailto:cipriano.dimaggio@unipa.it)

**Riassunto.** Argomento della presente relazione è la forma del rilievo terrestre. Il rilievo terrestre può essere raffigurato come un grande mosaico le cui tessere sono i versanti. Un versante può essere: o una superficie piana caratterizzata da una determinata esposizione e da una specifica inclinazione; oppure una superficie curva di tipo concavo o convesso. Ogni singolo versante è inoltre identificabile con una forma del rilievo ben definita, la cui genesi è riconducibile ad un processo morfogenetico peculiare. Ogni cambiamento nell'esposizione, nell'inclinazione o nella curvatura di un versante segna pertanto il passaggio a forme del rilievo diverse. Complessivamente, tutti i processi morfogenetici che modellano la superficie terrestre creano grandi e piccole forme del rilievo che, sebbene siano prodotte da meccanismi profondamente differenti, mostrano sempre le stesse geometrie. Questa occorrenza, conosciuta in Geomorfologia come problema della convergenza morfologica, crea difficoltà nel distinguere forme simili nell'aspetto ma profondamente diverse nella genesi. Le forme semplici sono costituite da un solo versante e, a prescindere dal processo morfogenetico che le produce, possono assumere le sembianze di: scarpata (superficie piana verticale), pendio a media inclinazione (superficie piana obliqua), pianura (superficie piana orizzontale), conca (superficie curva concava) o rilievo arrotondato (superficie curva convessa). Dalla combinazione di due o più forme semplici (versanti singoli) possono a loro volta ottenersi delle forme complesse (insieme di più versanti) che possono assumere l'aspetto di: altura (insieme di versanti che convergono verso uno o più punti di quota maggiore), depressione (insieme di versanti che convergono verso uno o più punti di quota inferiore) o rilievo articolato (insieme di diversi tipi di versante, variamente

combinati). Prendendo spunto dalla forma della superficie terrestre, la presente relazione mostra: le cause delle forme del rilievo; le principali forme del rilievo suddivise sulla base della scala di osservazione; i casi più significativi di convergenza morfologica.

**Abstract.** *The shape of the Earth's relief and the geomorphological convergence problem.* The shape of the Earth's relief is the subject matter of this paper. The Earth's relief may be represented as a large mosaic whose pieces are the slopes. A slope is a planar or curved surface. A single slope is also a well-defined landform whose genesis is due to a peculiar geomorphic process. Changes in exposure, inclination or curvature of a slope mark the transition to a different landform. Overall, geomorphic processes causing the Earth's surface create large and small landforms that always show the same geometries, though they are produced by deeply different mechanisms. This occurrence is known as geomorphological convergence problem creating difficulties in distinguishing similar but deeply different in genesis landforms. Regardless of the geomorphic process that produce them, the simple landforms (a single slope) may assume the following geometric shapes: scarp (vertical planar surface), inclined slope (oblique planar surface), plain (horizontal planar surface), rounded hollow (concave curved surface) or rounded hill (convex curved surface). Complex landforms (a set of slopes) take on by the combination of two or more simple landforms. The complex landforms can assume the appearance of topographic high (a set of slopes converging toward higher altitudes), topographic depression (a set of slopes converging toward lower altitudes) or articulate relief (a set of several slopes which are differently combined). Starting from the shape of the Earth's surface, this paper shows landform causes, main landforms in relation to the scale factor, and most significant cases of geomorphological convergence.

## 1. Introduzione

Il rilievo terrestre è costituito dall'insieme di una miriade di superfici di tipo planare e curvo (Fig. 1). Osservando il paesaggio fisico possiamo infatti osservare l'alternarsi di scarpate, pendii inclinati e pianure (superfici planari a sviluppo, rispettivamente, verticale, obliquo e orizzontale) e di zone depresse ed elevate più o meno arrotondate (superfici curve, rispettivamente concave e convesse). Ognuna di

queste superfici viene genericamente indicata con il termine di “versante”. Possiamo quindi raffigurare il rilievo terrestre come un grande mosaico le cui tessere sono rappresentate dai versanti. A loro volta, i versanti che compongono il rilievo sono il prodotto dei processi di modellamento della superficie terrestre, andando così a costituire le “forme del rilievo”. Ogni versante coincide quindi con una ben definita forma del rilievo la cui genesi è riconducibile ad uno o più processi di modellamento.



**Figura 1.** Il rilievo terrestre come insieme di versanti (superfici piane e curve).

I processi di modellamento [1-3] vengono generalmente suddivisi in processi tettonici, dovuti ai movimenti profondi della crosta terrestre, e in processi esogeni, collegati alla dinamica dell’atmosfera, dell’idrosfera e della parte più superficiale della litosfera. I processi tettonici si manifestano attraverso la lenta ma inesorabile mobilità della crosta terrestre e, attraverso la sua progressiva deformazione, sono responsabili della genesi di forme del rilievo anche di grandi dimensioni (e.g., rilievi continentali e bacini oceanici; [4]). I processi esogeni si esplicano attraverso il movimento di un agente geomorfologico (e.g., acque correnti superficiali, vento) e, lungo le superfici delle forme del rilievo più grandi, producono forme del rilievo di dimensioni più piccole (e.g., valli fluviali, dune eoliche; [5-9]). Ne consegue che la forma del rilievo terrestre è in continua evoluzione essendo il risultato dell’interazione e della costante competizione tra processi tettonici e processi esogeni [10]. A prescindere dal processo di modellamento, le forme del rilievo, in quanto versanti, possono quindi assumere le sembianze di una delle figure geometriche prima descritte (superfici planari o curve), riducendosi quindi a pochi tipi. Questo problema di convergenza morfologica [11] crea non poche difficoltà nel distinguere forme del rilievo dall’aspetto analogo ma dai meccanismi genetici ed evolutivi differenti.

Prendendo spunto dalla forma del rilievo terrestre, gli obiettivi della presente relazione sono di ricostruire le cause delle forme del rilievo in relazione alla scala di osservazione e, facendo riferimento al problema della convergenza morfologica, di mostrare come forme del rilievo collegate a processi di modellamento profondamente diversi, possano assumere lo stesso aspetto geometrico.

## **2. Le cause della forma del rilievo terrestre: i processi di modellamento e la loro dinamica**

I processi di modellamento della superficie terrestre, o processi geomorfologici, sono anche definiti: processi morfogenetici, in quanto generano forme del rilievo; oppure processi morfodinamici, in quanto tendono a modificare inesorabilmente tutte le forme del rilievo via via prodotte.

I processi morfogenetici più significativi sono: la tettonica, che si manifesta attraverso il movimento (e la conseguente deformazione) della crosta terrestre, la cui dinamica è in qualche modo alimentata dalle differenze termiche dell'interno della Terra e dalla rotazione terrestre; i processi vulcanici, che si esplicano grazie alle eruzioni di lava e di materiali di origine più o meno profonda; i processi idrici, che si sviluppano tramite lo scorrimento delle acque correnti superficiali incanalate (processi fluviali) o mediante lo scorrimento delle acque correnti superficiali "selvagge" (processi di dilavamento); i processi costieri, che si manifestano grazie alle escursioni di marea, al moto ondoso e alle correnti marine sottocosta; i processi glaciali e periglaciali, che si esplicano attraverso il movimento, rispettivamente, dei ghiacciai e del ghiaccio sotterraneo (permafrost); i processi franosi, che si manifestano tramite lo spostamento, dovuto alla gravità, di roccia o detrito lungo i versanti; i processi eolici, che si innescano grazie all'azione del vento; i processi carsici, che si sviluppano a seguito di fenomeni di soluzione delle rocce solubili e di fenomeni di precipitazione di sali da soluzioni sovrassature; i processi marini, che si esplicano essenzialmente per tramite delle correnti sottomarine e, più in generale, dei movimenti dell'acqua marina; i processi antropici, dovuti all'azione dell'uomo, attualmente responsabili delle modificazioni più repentine e profonde della superficie terrestre.

Relativamente ai processi esogeni, occorre sottolineare come il clima possa ora intensificare, ora inibire l'azione di un processo piuttosto che un altro (e.g., un clima arido-caldo favorisce lo sviluppo di processi eolici ma non può consentire l'azione di processi glaciali).

È altresì opportuno segnalare come l'azione dei processi morfogenetici sia favorita dai fenomeni di degradazione meteorica; questi fenomeni alterano e disgregano la roccia costituente i versanti, comportando la formazione di nuovi minerali

e di più piccoli frammenti detritici, "sciolti", che possono più facilmente essere presi in carico e allontanati dagli agenti erosivi.

Per ciò che concerne la velocità di sviluppo/crescita delle forme del rilievo, da cui si evince l'efficacia dei processi morfogenetici, i valori medi sono generalmente compresi fra 1-2 mm/anno a 1-2 cm/anno, con velocità massime superiori a 1 m/s come, ad esempio, per le forme prodotte da frane rapidissime e, soprattutto, per le forme direttamente o indirettamente riconducibili all'attività dall'uomo. Naturalmente, le grandi forme si creeranno nell'arco di decine e decine di milioni di anni ma, per tempi altrettanto lunghi, tenderanno a mantenersi (e.g., rilievi continentali e bacini oceanici); mentre le micro-forme si produrranno nell'arco di poche ore ma, in altrettanto breve tempo, potranno essere distrutte (e.g., micro-vacuoli dovuti a soluzione/corrosione).

Da quanto appena esposto, si può notare come il "movimento" della litosfera, dell'idrosfera e dell'atmosfera sia alla base del modellamento della superficie terrestre; e come questo incessante movimento sia responsabile delle continue modificazioni della superficie terrestre, con la genesi ininterrotta di nuove forme del rilievo, a loro volta in continua trasformazione, a scapito di forme precedentemente prodotte.

Occorre infine sottolineare come il motore di tutto questo movimento sia da ricercare, in maniera diretta o indiretta, nella gravità, nella radiazione solare, nel calore interno della Terra e nella rotazione terrestre.

### **3. Le unità fondamentali della superficie terrestre: le forme del rilievo**

Il rilievo terrestre deve la sua forma alla combinazione e all'incastro delle molteplici forme del rilievo che si rinvengono, senza soluzione di continuità, sulla superficie del nostro pianeta (Fig. 1). Le forme del rilievo rappresentano quindi le unità elementari della stessa superficie terrestre.

A seconda dei parametri considerati, le forme del rilievo possono essere suddivise in più tipologie.

Una prima suddivisione tiene conto del processo morfogenetico che le produce; in questo caso si possono identificare: forme tettoniche, forme vulcaniche, forme fluviali, forme di dilavamento, forme costiere, forme glaciali, forme periglaciali, forme di frana, forme eoliche, forme carsiche, forme marine e forme antropiche. Quando le forme del rilievo sono prodotte sempre dallo stesso processo che agisce anche in maniera discontinua nel tempo, durante più cicli (fasi morfogenetiche), si dicono forme policicliche o polifasiche. Quando sono il risultato di due o più processi morfogenetici, che contribuiscono alla loro origine in modo essenzialmente paritario, si indicano con il termine di forme poligeniche. Quando più processi morfogenetici si sviluppano selettivamente, smantellando più intensamente il rilievo

costituito da roccia più facilmente erodibile (roccia "tenera"; e.g., argillite) rispetto al rilievo impostato su roccia più resistente (roccia "dura"; e.g., calcare), oppure agendo con maggiore efficacia lungo discontinuità strutturali (e.g., lungo fratture, faglie, piani di stratificazione), le forme che si producono si dice che sono dovute ad erosione selettiva.

Ragionando in termini di genesi ed evoluzione, le forme del rilievo vengono distinte in: i) forme attive, quando il processo morfogenetico che le ha prodotte continua tuttora a modificarle (e.g., una falesia costiera, ovvero una costa rocciosa e ripida prodotta dal moto ondoso, lambita ancora dal mare); ii) forme inattive o abbandonate, quando il processo morfogenetico responsabile della loro origine non le elabora più (e.g., una falesia costiera che, in posizione arretrata rispetto all'attuale linea di costa per la recente formazione di una larga spiaggia ai suoi piedi, non può più essere raggiunta dal moto ondoso); iii) forme relitte, quando si tratta di antiche forme abbandonate la cui genesi risale a tempi geologici precedenti all'Olocene, ovvero anteriormente all'epoca geologica che stiamo attualmente vivendo, iniziata circa 11.700 anni fa (e.g., un'antica falesia costiera venutasi a trovare, per movimenti di sollevamento tettonico, a quote molto più elevate rispetto all'attuale livello marino e in aree interne molto lontane dal mare).

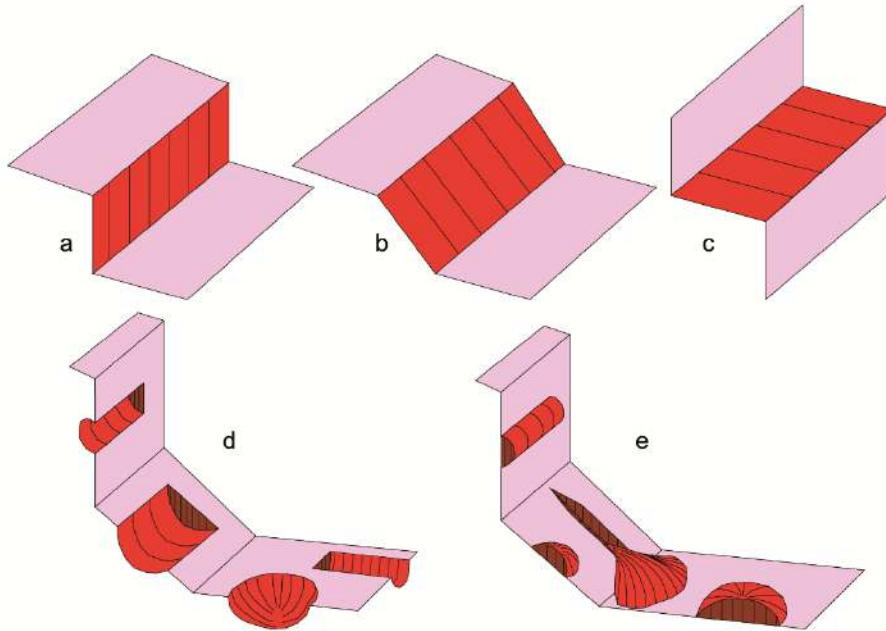
Considerando i meccanismi genetici con cui i processi morfogenetici si manifestano, si possono riconoscere: i) forme di erosione (e.g., valli fluviali), che si producono in quelle aree dove i processi morfogenetici tendono a smantellare (denudare) il rilievo, producendo un progressivo abbassamento delle alture; ii) forme di accumulo (e.g., dune eoliche), che si generano laddove i processi morfogenetici si manifestano con meccanismi di deposizione, contribuendo alla costruzione di nuovo rilievo.

Sulla base della scala di osservazione, Salisbury [12] ha suddiviso le forme del rilievo in forme di primo, secondo e terzo ordine. Le forme di primo ordine, le più grandi in assoluto, si osservano a piccolissima scala e sono i rilievi continentali e i bacini oceanici; le forme di secondo ordine, sempre di dimensioni molto grandi, si riconoscono a piccola scala all'interno dei rilievi continentali (e.g., catene montuose) e dei bacini oceanici (e.g., dorsali medio-oceaniche); le forme di terzo ordine, di dimensioni molto più piccole, si osservano a media, grande e grandissima scala, all'interno delle forme di secondo ordine (e.g., valli glaciali, canyon sottomarini).

Le forme del rilievo, in quanto versanti, possono infine presentarsi come superfici piane, con esposizioni e inclinazioni specifiche, oppure come superfici curve, con tratti concavi o convessi. Ogni cambiamento nell'esposizione e nell'inclinazione di un versante planare e ogni passaggio da un versante di tipo planare ad uno

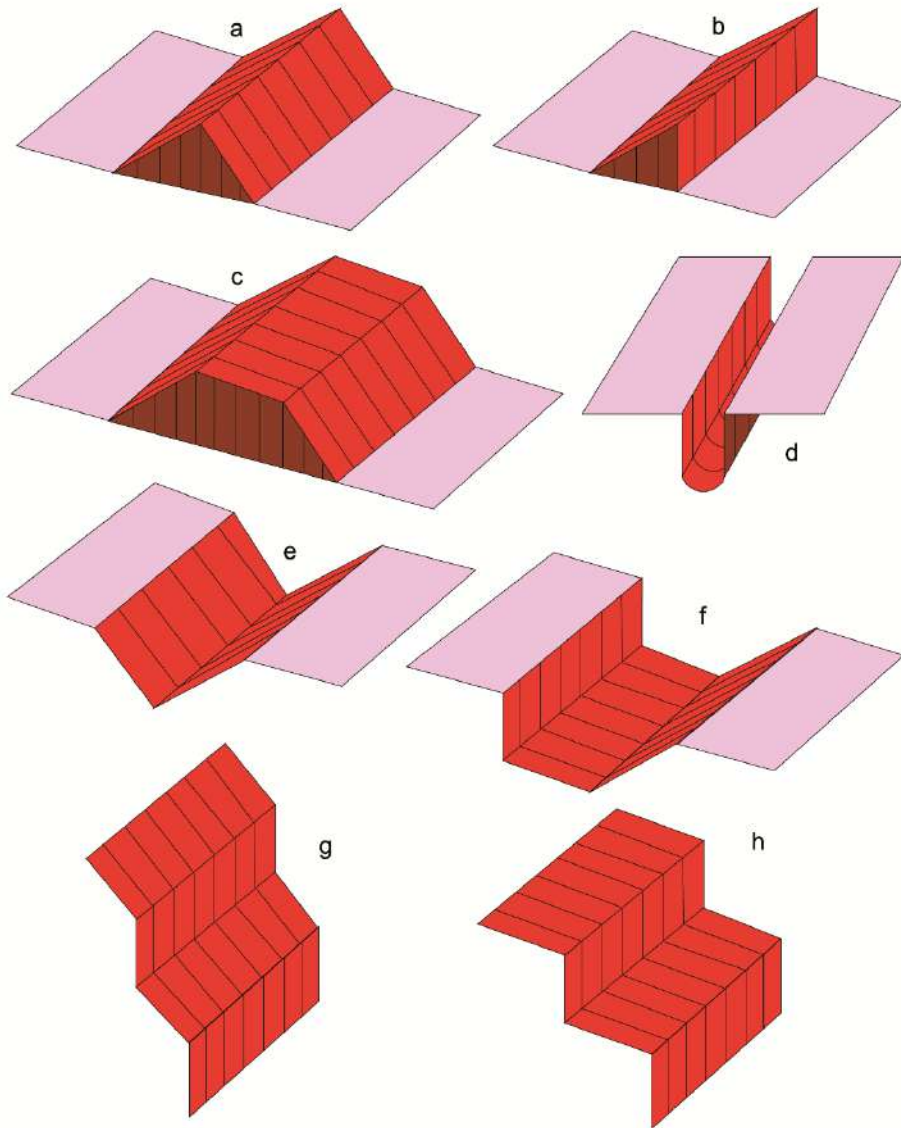


di tipo curvo, oppure da una concavità ad una convessità del rilievo (o viceversa), segna anche il passaggio a forme del rilievo diverse.



**Figura 2.** Modelli geometrici delle forme del rilievo di tipo semplice.

Sebbene siano numerosissime e sebbene siano prodotte da processi e da meccanismi profondamente differenti, le forme del rilievo tendono a convergere morfologicamente verso pochi tipi topografici (Fig. 2, 3). In particolare, le forme semplici (costituite da un singolo versante; Fig. 2), a prescindere dal processo che le produce, possono infatti assumere le sembianze di: scarpata (superficie piana verticale, sub-verticale o aggettante; Fig. 2a), pendio a media inclinazione (superficie piana obliqua; Fig. 2b), pianura (superficie piana orizzontale o sub-orizzontale; Fig. 2c), conca (superficie curva concava; Fig. 2d) o rilievo arrotondato (superficie curva convessa; Fig. 2e); le forme complesse (costituite dall'insieme di due o più versanti e, conseguentemente, dalla combinazione di due o più forme semplici; Fig. 3) possono assumere l'aspetto di: altura (insieme di versanti che convergono verso uno o più punti di quota maggiore; Fig. 3a, b, c), depressione topografica (insieme di versanti che convergono verso uno o più punti di quota inferiore; Fig. 3d, e, f) o rilievo articolato (insieme di diversi tipi di versanti semplici, variamente combinati; Fig. 3g, h).



**Figura 3.** Esempi di modelli geometrici di forme del rilievo di tipo complesso.

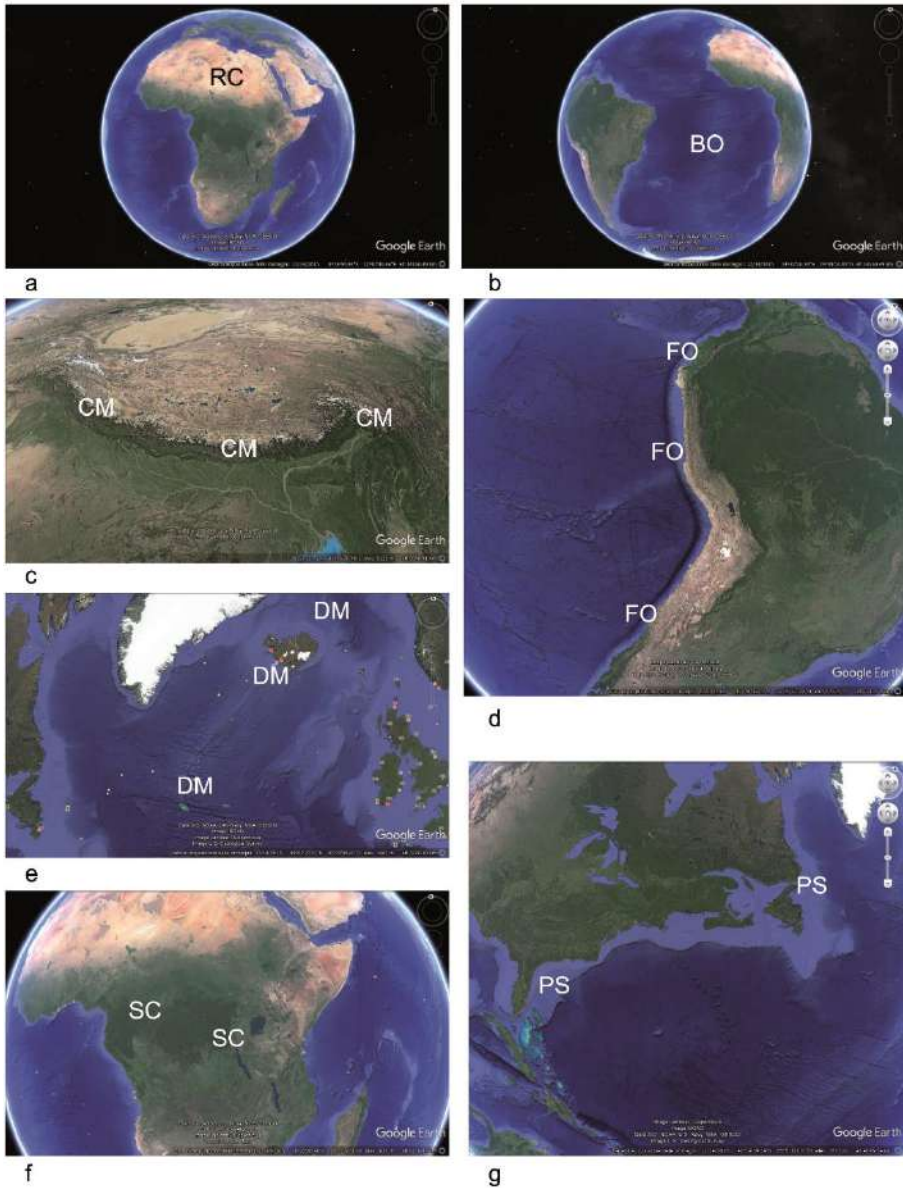
#### **4. Le forme del rilievo e la scala di osservazione**

Se un ipotetico turista extraterrestre decidesse di scegliere la Terra come meta delle sue vacanze, perché attratto dall'incantevole colorazione del nostro pianeta blu, e si mettesse in cammino verso di noi con la sua navicella spaziale; e se, prima di arrivare a destinazione, spegnesse i motori della sua navicella, per una breve sosta sulla Luna; si accorgerebbe che ciò che da molto più lontano appariva come una sfera dalla superficie perfettamente liscia, è in realtà un insieme di grandissime superfici curve, a larghissimo raggio di curvatura, di tipo convesso (rilievi continentali) e concavo (bacini oceanici, questi ultimi sommersi dalle acque).

Rilievi continentali (Fig. 4a) e bacini oceanici (Fig. 4b), di dimensioni di migliaia di chilometri, sono le uniche forme del rilievo di primo ordine. Si tratta di forme tettoniche dovute alla dinamica crostale. I rilievi continentali hanno origine in corrispondenza di placche convergenti, con conseguenti processi di raccorciamento, inspessimento e sollevamento della crosta terrestre, che tendono a creare rilievo (altezza topografica); per analogia, è quello che succede se proviamo a comprimere un panetto di plastilina. I bacini oceanici si producono in corrispondenza di placche divergenti, dove si manifestano processi di espansione, assottigliamento e subsidenza della crosta terrestre, che tendono a "distruggere" rilievo, sviluppandosi in profondità. Per analogia, è quello che succede se proviamo a stirare un panetto di plastilina. Il dislivello fra i rilievi continentali e i bacini oceanici è inoltre accentuato dalla differente composizione litologica di continenti e fondali oceanici: i continenti sono costituiti da rocce a composizione granitica, con densità media di circa  $2,7 \text{ g/cm}^3$ ; i fondali oceanici sono formati da rocce a composizione basaltica, con densità media di circa  $3 \text{ g/cm}^3$ . A causa della minore densità, la crosta continentale tende quindi a spostarsi verso l'alto; mentre la crosta oceanica, più densa, tende a spostarsi verso il basso.

Riprendendo il suo viaggio di avvicinamento verso la Terra, il nostro turista extraterrestre comincerebbe a notare che le grandi concavità e convessità apparentemente lisce, sono a loro volta il risultato della combinazione di superfici relativamente più piccole, ma sempre di grande dimensione (dell'ordine delle centinaia di chilometri), che cominciano ad assumere un aspetto planare: le forme del rilievo di secondo ordine. La maggior parte delle forme del rilievo di secondo ordine sono ancora una volta di origine tettonica e, fra queste, le più significative sono catene montuose (Fig. 4c), fosse oceaniche (Fig. 4d) e dorsali medio-oceaniche (Fig. 4e).

Le catene montuose sono formate da due lunghi versanti inclinati (superfici piane oblique) che convergono verso punti di quota maggiore, assumendo le sembianze di una lunghissima, stretta e alta dorsale montuosa che si erge dai continenti (e.g., Alpi, Himalaya).



**Figura 4.** Forme di I e II ordine. RC rilievo continentale, BO bacino oceanico, CM catena montuosa, FO fossa oceanica, DM dorsale oceanica, SC scudo continentale, PS piattaforma e scarpata continentale.

Le catene si formano esattamente nella zona in cui si realizza lo scontro fra due placche continentali (zona di sutura, coincidente quindi con un limite fra due placche), dove si hanno le massime deformazioni della crosta e dove avviene il processo di "saldatura" fra le stesse due placche entrate in collisione.

Le fosse oceaniche sono costituite da due lunghi versanti fortemente inclinati che convergono verso punti di quota inferiore, che danno origine a lunghissime, strette e profondissime depressioni sottomarine (e.g., fossa delle Marianne). Queste depressioni solcano i bacini oceanici e si producono in quelle aree dove, a seguito della convergenza fra due placche, una delle due placche subduce (sprofonda) sotto l'altra e, inflettendosi al di sotto della placca obducente (sovrastante), ne determina l'origine.

Le dorsali medio-oceaniche sono formate da due versanti lunghissimi e debolmente inclinati, che convergono verso punti di quota maggiore, formando una dorsale montuosa sottomarina. Questa dorsale si eleva di qualche migliaio di metri dai fondali oceanici, talvolta fino ad emergere come nel caso dell'isola di Islanda. Le dorsali medio-oceaniche rappresentano un grande edificio vulcanico, a sviluppo lineare, che si rinviene, in modo più o meno continuo, nelle parti mediane di tutti i fondali oceanici. Questo edificio vulcanico è il prodotto dell'accumulo di grandi quantità di materiale lavico eruttato in corrispondenza del limite fra due placche divergenti. L'intensa attività vulcanica di queste aree è conseguenza delle continue lacerazioni della crosta oceanica, dovute ai continui sforzi di trazione prodotti dal processo di allontanamento delle due placche. Attraverso queste stesse lacerazioni (fratture) della crosta – le quali comportano una diminuzione delle pressioni nelle rocce sottostanti del mantello superiore (qui posto a poca profondità), il conseguente abbassamento della temperatura di fusione di queste rocce e la conseguente produzione di magma – si realizza infatti la risalita e la fuoriuscita di lava (magma degassato) dai fondali oceanici.

A questo punto, rimanendo sempre alla stessa distanza dalla Terra, il nostro turista extraterrestre noterebbe che, accanto alle forme di secondo ordine direttamente o indirettamente prodotte dalla tettonica, inizierebbero a comparire altre forme di secondo ordine dovute all'azione dei processi esogeni quali, ad esempio, scudi continentali (Fig. 4f) e piattaforme e scarpate continentali (Fig. 4g).

Gli scudi continentali sono vastissime superfici pianeggianti, a debolissimo raggio di curvatura (convessità appena accennate), situate all'interno dei rilievi continentali, in aree stabili da più di un centinaio di milioni di anni e lontanissime dalle zone attive dei limiti di placca. Si tratta di forme di erosione che sono il risultato dello smantellamento completo (spianamento) di antiche catene montuose di età pre-Mesozoica (realizzatesi prima di 250 milioni di anni fa), ad opera di più processi esogeni che hanno operato indisturbati per decine e decine di milioni di anni.

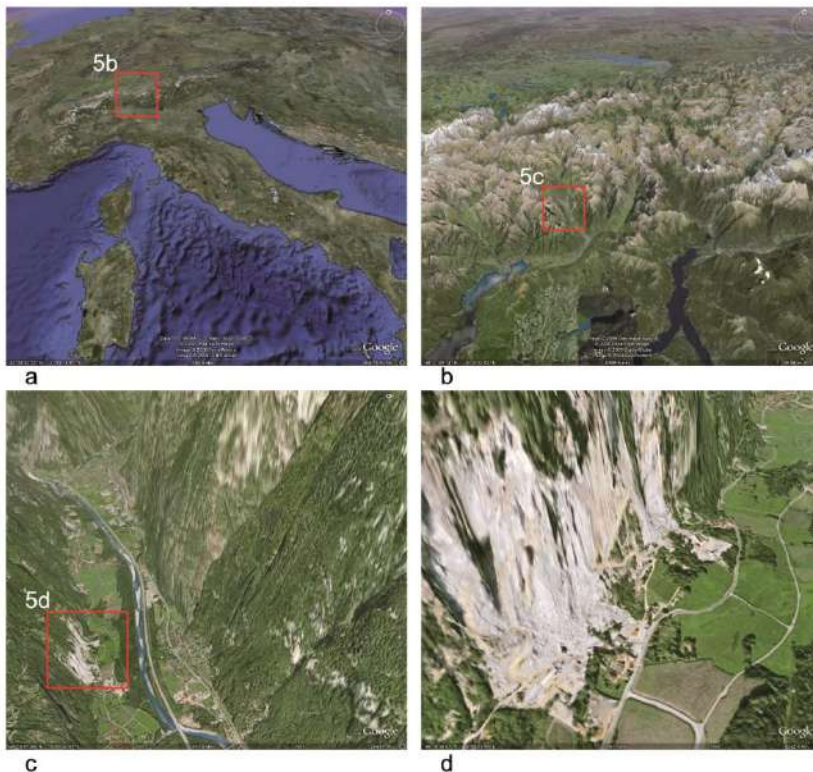
Lo spianamento delle antiche catene montuose è stato quindi possibile in un lunghissimo arco di tempo e solo a seguito della cessazione dei movimenti di convergenza fra le placche e, di conseguenza, della cessazione di tutti i processi tettonici tendenti a creare rilievo.

Le piattaforme (aree sottomarine più interne, adiacenti ai continenti) e le scarpate continentali (aree sottomarine immediatamente più esterne, passanti verso il largo alle piane sottomarine) sono superfici sub-pianeggianti a debolissima inclinazione verso mare (con valori medi inferiori a  $1^\circ$  per le piattaforme, di circa  $4^\circ$  per le scarpate), che rappresentano la prosecuzione sottomarina dei continenti, collegando questi ultimi alle piane abissali. Si tratta di grandi forme di accumulo che devono la loro origine a processi marini di deposizione conseguenti alle grandi quantità di materiali portate a mare dai fiumi, a loro volta derivanti dallo smantellamento delle aree continentali emerse.

Dopo queste osservazioni, il nostro ospite extraterrestre dedurrebbe che: laddove la tettonica tende a creare rilievo (nei continenti), i processi esogeni tendono a distruggerlo con l'innescarsi di processi erosivi (negli scudi); laddove la tettonica tende a creare profondità (oceani), i processi esogeni tendono a colmarla con lo sviluppo di processi deposizionali (nelle piattaforme e scarpate continentali). In realtà, continuando nel suo percorso di avvicinamento, il turista alieno comincerebbe a scoprire anche le forme del rilievo più piccole (di terzo ordine) e, fra queste forme, potrebbe constatare che: fra tante e grandi forme di erosione, nei continenti esistono anche piccole forme di accumulo (e.g., dune eoliche); fra tante e grandi forme di accumulo, nei bacini oceanici esistono anche piccole forme di erosione (e.g., canyon sottomarini). Queste ulteriori osservazioni lo porterebbero quindi a sostenere che: i continenti, sia pure in un contesto di generale erosione, sono localmente interessati da processi di accumulo che creano piccoli rilievi; i fondali oceanici, sia pure in un contesto di generale deposizione, sono localmente interessati da processi di erosione che distruggono parzialmente gli accumuli sedimentari.

Ma procedendo con ordine, nella sua rotta di avvicinamento al nostro pianeta e fino all'atterraggio sul suolo terrestre, l'ormai famoso viaggiatore extraterrestre si accorgerebbe che le grandi superfici delle forme del rilievo di secondo ordine, apparentemente lisce e uniformi, sono a loro volta costituite da un insieme di superfici più piccole (forme del rilievo di terzo ordine). Inoltre si renderebbe conto che, osservando il rilievo ad un dettaglio sempre più grande, le forme del rilievo di terzo ordine, di dimensione maggiore (dell'ordine della decina di chilometri) e dalla superficie apparentemente liscia, sono a loro volta costituite dall'insieme di versanti sempre più piccoli; fino ad arrivare ad una scala micrometrica. Portando un esempio, se il nostro esploratore alieno avesse come meta una località delle Alpi (Fig.

5), durante il suo viaggio egli avrebbe via via osservato il rilievo continentale europeo (forma di primo ordine), la catena montuosa alpina (forma di secondo ordine; Fig. 5a) e, in successione, forme del rilievo di terzo ordine via via più piccole: valli fluviali e glaciali che dissecano la catena (Fig. 5b); strette pianure alluvionali lungo i fondovalle (Fig. 5c); concavità lungo i versanti vallivi (dovuti a distacco di materiale franato) e, ai loro piedi, piccole convessità (dovute all'accumulo del materiale franato; Fig. 5d); piccoli rivoli e solchi incisi, dalle acque ruscellanti, sulle superfici delle precedenti concavità e convessità; un taglio stradale prodotto dall'uomo, alto pochi metri, che attraversa le aree in frana; sporgenze (su livelli di roccia dura, più "resistente") e incavature (su livelli di roccia tenera, più "facilmente erodibile"), di dimensione centimetrica e decimetrica, prodottesi per erosione selettiva lungo il taglio stradale; rilievi e conche di dimensione millimetrica e micrometrica, prodotte dalla degradazione meteorica e dal distacco dei frammenti detritici avvenuti lungo le superfici delle sporgenze e delle incavature.



**Figura 5.** Grandi e piccole forme del rilievo di III ordine.

Alla fine del suo viaggio, il turista extraterrestre, oltre ad avere scoperto che la forma del rilievo terrestre è data dall'insieme di tanti piccolissimi versanti che, incastrandosi fra di loro, danno origine a versanti via via più grandi; avrebbe anche realizzato che, passando dalle forme del rilievo più grandi alle forme del rilievo più piccole: 1) diminuisce il ruolo della tettonica nella genesi delle forme del rilievo e aumenta quello dei processi esogeni; 2) il ruolo dell'erosione selettiva diventa significativo nelle piccole forme dell'ordine metrico-centimetrico; 3) i processi di degradazione delle rocce acquisiscono una grande importanza a scala millimetrica e micrometrica.

## **5. Le forme del rilievo di terzo ordine e il problema della convergenza morfologica**

Come precedentemente esposto, le forme del rilievo di terzo ordine (Fig. 6, 7) sono essenzialmente prodotte da processi esogeni di varia natura e tendono ad assumere uno degli aspetti geometrici riportati nelle Figure 2, 3. Si descrivono adesso alcuni casi significativi di convergenza morfologica di forme semplici del terzo ordine, tenendo conto che le forme complesse derivano dalla combinazione di due o più forme semplici.

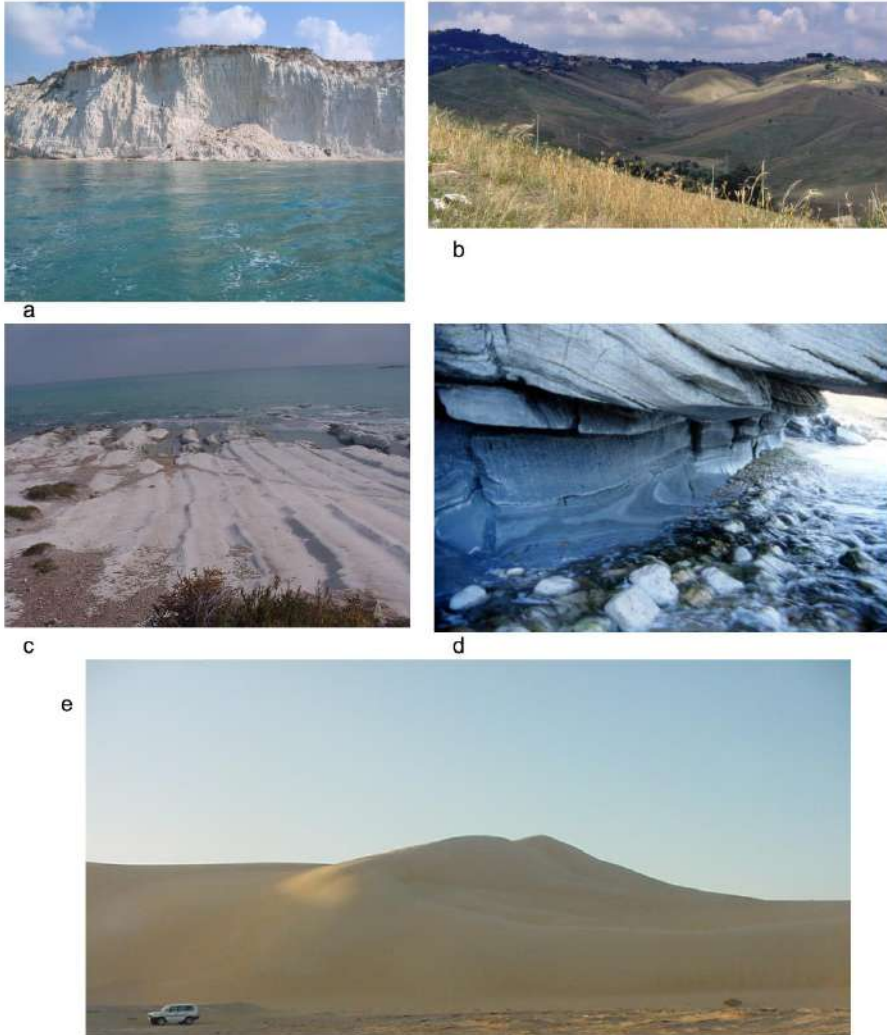
### *5.1 Forme del rilievo di tipo planare, a sviluppo verticale*

Le forme del rilievo che assumono l'aspetto di una superficie piana a sviluppo verticale (scarpata; Fig. 2a) sono prodotte da differenti meccanismi genetici di tipo essenzialmente erosivo.

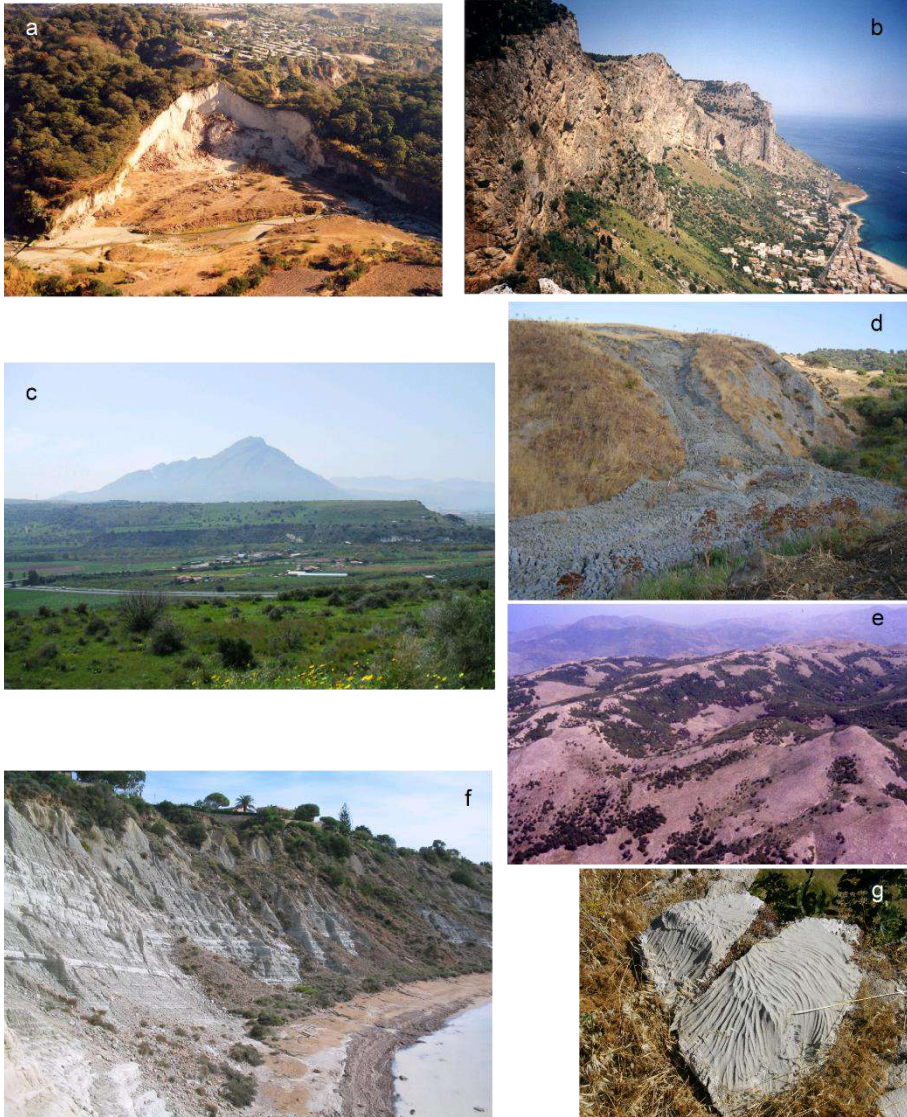
Uno dei più comuni è lo scalzamento basale operato, al piede dei versanti, da un qualsiasi agente geomorfologico (Fig. 8). In questo caso, l'erosione al piede di un versante tende a produrre un incavo, creando condizioni di instabilità e, conseguentemente, inducendo processi di crollo nello stesso versante per la mancanza di un sostegno basale.

Nel momento in cui si produrrà il primo crollo, alla base del pendio si creerà una piccola scarpata che, nel tempo, potrà accrescersi in altezza se il processo di scalzamento continuerà ad interessare il suo piede e se le condizioni topografiche lo consentiranno. Condizione necessaria affinché lo scalzamento prosegua nel tempo e affinché la scarpata possa mantenere la sua verticalità, è che i detriti prodotti dai frequenti crolli non rimangano e non si accumulino al piede della scarpata, proteggendola altrimenti da successive azioni di scalzamento; ma che questi detriti vengano prontamente rimossi dallo stesso agente geomorfologico, esponendo la stessa scarpata a costante erosione basale. Il processo per cui queste scarpate tendono a migrare nel tempo verso posizioni più interne, mantenendo la loro verticalità, prende il nome di arretramento parallelo dei versanti.

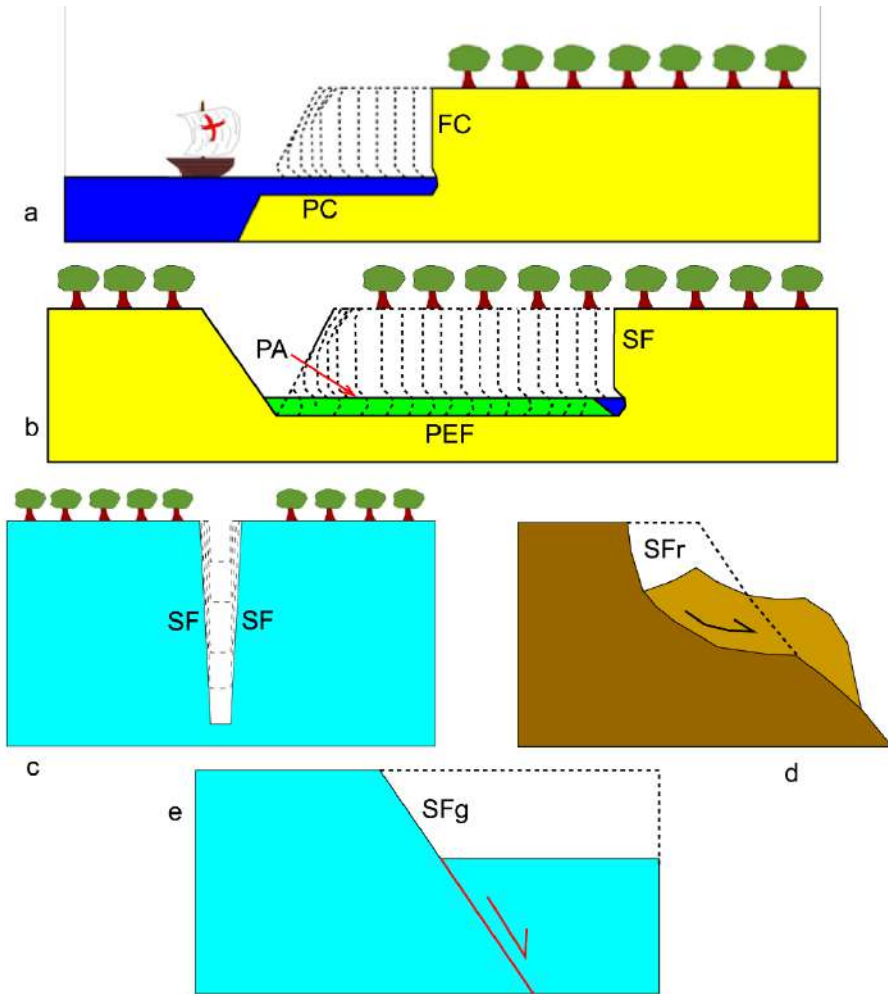




**Figura 6.** Esempi di forme del rilievo di tipo scarpata (a), pendio mediamente inclinato (b), pianura (c), concavità (d) e convessità (e).



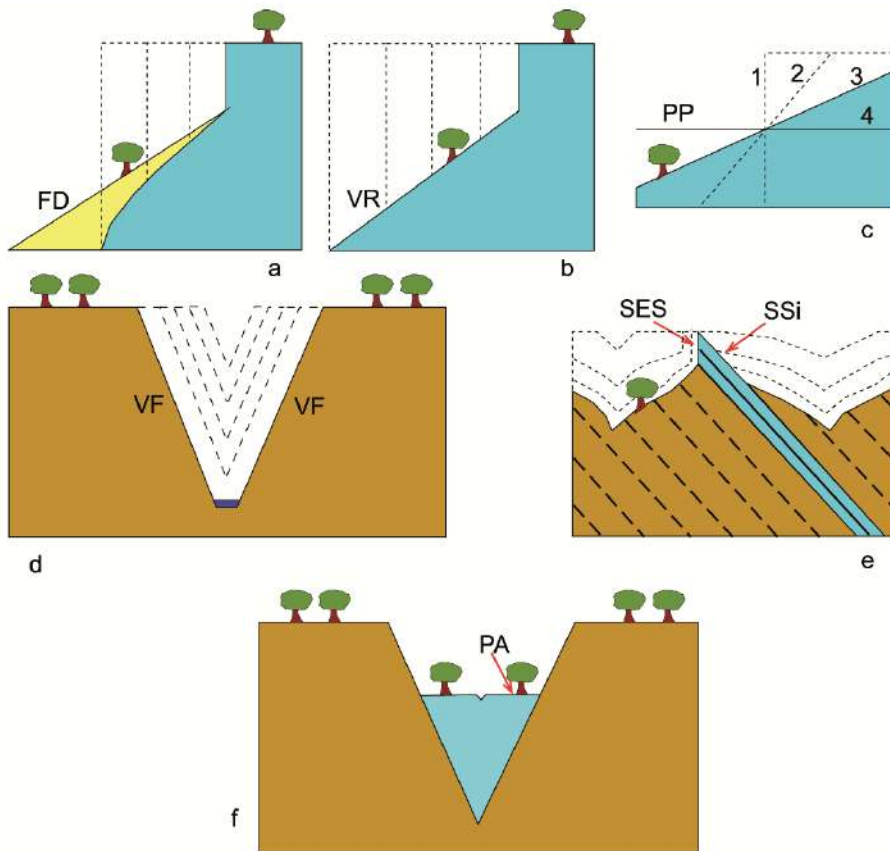
**Figura 7.** Esempi di forme del rilievo di tipo scarpata (a, f), pendio mediamente inclinato (b), pianura (c), concavità (d, e, f, g) e convessità (d, f).



**Figura 8.** Meccanismi genetici di scarpate e pianure. FC falesia costiera, PC piattaforma costiera, SF scarpata di erosione fluviale, PEF piano di erosione fluviale, PA pianura alluvionale, SFR scarpata di frana, SFg scarpata di faglia.

A seconda dell'agente geomorfologico (o del processo morfodinamico) che produce lo scalzamento basale, le forme del rilievo di tipo scarpata che si creano prendono il nome di: i) falesie costiere (Fig. 6a, 8a), quando l'agente che scalza un pendio è il moto ondoso; ii) scarpate di erosione fluviale, quando si ha erosione di sponda (laterale) in un corso d'acqua (Fig. 7a, 8b); iii) scarpate di erosione selettiva, quando le pareti si creano su banconi di roccia più resistente sovrapposti a roccia

facilmente erodibile soggetta, rispetto ai banconi rocciosi sovrastanti, ad un più intenso smantellamento (Fig. 9e); iv) versanti di polje, quando si ha un processo di soluzione/corrosione marginale (processo carsico) lungo i fianchi di un polje (grande depressione carsica chiusa, con fondo pianeggiante e dimensioni chilometriche). In quest'ultimo caso, il processo di "scalzamento chimico" si produce ogni qualvolta, a seguito di forti precipitazioni meteoriche, il fondo del polje viene allagato.



**Figura 9.** Meccanismi genetici di pendii a media inclinazione e di pianure. FD falda di detrito, VR versante in roccia, PP penepiano, VF versante fluviale, SES scarpata di erosione selettiva in roccia dura, SSi superficie strutturale inclinata, PA pianura alluvionale.

Un altro meccanismo che produce forme a sviluppo verticale è l'erosione di fondo (Fig. 8c). Quando l'erosione di fondo si manifesta lungo un fiume in approfondimento su un substrato di roccia dura (resistente), nel corso del tempo si vengono a creare due pendii fortemente inclinati che, come nel caso delle precedenti pareti prodotte da erosione laterale fluviale, vengono ancora una volta indicati con il termine di scarpate di erosione fluviale. Dall'unione delle due scarpate che marginano un fiume e del canale fluviale su cui scorre lo stesso fiume, si ottiene una forma complessa chiamata gola fluviale (valle stretta e profonda, con pareti ripide; Fig. 3d).

Anche il processo di distacco di masse rocciose o detritiche da un versante, prodotte da un movimento franoso, può lasciare, sul materiale rimasto in posto, un pendio fortemente inclinato che, in questo caso, prende il nome di scarpata di frana (Fig. 7a, 8d).

L'ultimo meccanismo qui trattato, responsabile della genesi di superfici planari a sviluppo verticale, è la fagliazione a blocchi. L'attivazione di una faglia che propaga il suo movimento fino in superficie, produce infatti una parete denominata scarpata di faglia (Fig. 8e).

## *5.2 Forme del rilievo di tipo planare, a sviluppo obliquo*

Le forme del rilievo coincidenti con superfici piane a sviluppo obliquo (Fig. 2b) derivano, generalmente, dalla degradazione di preesistenti forme planari a sviluppo verticale. Qualsiasi versante fortemente inclinato, come le forme di tipo scarpata che abbiamo trattato nel precedente paragrafo, va inesorabilmente incontro a processi di degradazione (produzione e caduta di piccoli frammenti di detrito; distacco di masse rocciose più consistenti, per fenomeni franosi; allontanamento di materiale per processi di dilavamento, fluviali, eolici e altri ancora).

Quando una scarpata è soggetta a degradazione, possono verificarsi quattro casi (Fig. 9).

Nel primo caso, se il materiale detritico prodotto dalla degradazione viene allontanato da un agente basale che, al tempo stesso, esercita un'azione di scalzamento, si ha il modello dell'arretramento parallelo dei versanti e, a seconda dell'agente geomorfologico che "scalza", si creerà una delle forme planari a sviluppo verticale trattate all'inizio del paragrafo 5.1 (e.g., falesie costiere, scarpate di erosione fluviale; Fig. 8a, b). Non si creerà, quindi, un piano obliquo.

Nel secondo caso, se il materiale detritico non viene allontanato dal piede della scarpata e tende ad accumularsi alla base della stessa scarpata, si svilupperà una forma di deposito chiamata falda di detrito (Fig. 7b, 9a). La falda di detrito è una superficie planare di tipo obliquo, la cui inclinazione dipende dalla granulometria dei detriti che la sostengono (la sua inclinazione è, solitamente, di 30°-35°). Essa

coincide con il top geometrico a cui si dispone il materiale (detrito di falda) che via via si accumula ai piedi della scarpata. Se le condizioni al contorno (e.g., clima) non cambiano e l'alimentazione (produzione di detriti) è continua, una falda di detrito è destinata ad accrescersi di quota nel corso del tempo, sviluppandosi verso valle (avanzando il suo piede) e verso monte (arretrando e innalzando il suo apice). Il suo sviluppo verso monte tende inoltre a far indietreggiare l'originaria scarpata e a spingere verso l'alto il piede della stessa scarpata la quale, arretrando e diminuendo in altezza, è destinata a sparire del tutto. Il modello evolutivo di questi versanti è chiamato recessione ed è tipico dei climi aridi, semiaridi o con scarse precipitazioni, dove la vegetazione e il suolo non sono continui e la roccia può essere direttamente esposta ai processi di degradazione.

Nel terzo caso, se il materiale detritico viene prontamente allontanato dal piede di un versante ad opera di un agente geomorfologico che, però, non possiede un'energia necessaria per esercitare un'azione di scalzamento, allora dalla scarpata originaria tenderà a svilupparsi un versante in roccia a media inclinazione (superficie planare a sviluppo obliquo), secondo il modello della recessione (Fig. 9b). A differenza del caso precedente, in cui si aveva un pendio in detrito (falda di detrito) che spingeva verso l'alto l'originaria scarpata, in questo terzo caso si produce invece un pendio in roccia (forma di erosione) che tende a svilupparsi verso l'alto, mantenendo però il suo piede sempre nella stessa posizione (coincidente con il piede dell'originaria scarpata). Il valore di inclinazione di questi versanti dipende dal materiale roccioso su cui si impostano, variando da valori minimi di circa 12°-15° (e.g., versanti in argilla; Fig. 6b) a valori massimi di 50°-55° (e.g., versanti in rocce carbonatiche compatte). In ogni caso, la loro denominazione dipenderà dal nome della forma originaria, a cui si aggiungerà l'aggettivo "degradato" (e.g., falesia costiera degradata, scarpata di erosione fluviale degradata, scarpata di frana degradata). Occorre comunque sottolineare che, sia i versanti in detrito (falde di detrito) sia i versanti in roccia appena descritti, una volta raggiunte le loro inclinazioni "minime" (da 10°-15° a 50°-55°) tendono a divenire delle forme "stabili" nel tempo, fino a quando le condizioni al contorno non si modificheranno (cambiamenti ambientali dovuti a oscillazioni climatiche o a movimenti tettonici o ad altro).

Nel quarto caso si ha un processo di graduale diminuzione dell'inclinazione di una scarpata (Fig. 9c), tipico dei climi caldo-umidi, dove le rocce sono profondamente alterate e i processi pedogenetici molto avanzati. In queste condizioni si sviluppa uno spesso strato di suolo e di prodotti di alterazione che ricoprono le rocce del substrato. Questo strato, protetto dall'abbondante vegetazione tipica di questi climi, sarà soggetto a lentissimi movimenti del suolo che, nel tempo, tenderanno ad allontanare materiale dalle parti più alte dell'originaria scarpata e ad accumularle nelle parti più basse, determinando la graduale diminuzione della sua inclinazione.

A differenza dei modelli precedenti, dove i versanti si “stabilizzavano” a certe pendenze, il processo della diminuita inclinazione potrebbe, in teoria, continuare per milioni di anni, portando alla formazione di una spianata orizzontale (superficie planare a sviluppo orizzontale; vedi paragrafo 5.3). Questa evoluzione è possibile in quanto i materiali che costituiscono questi pendii (suoli e prodotti di alterazione), essendo poco coerenti e formati da granuli di dimensioni finissime, possono andare incontro a movimenti gravitativi, sia pure molto lenti, anche in situazioni di debolissima inclinazione dei versanti.

Anche l'interazione tra processi di erosione di fondo di un corso d'acqua e processi di degradazione dei versanti, può originare pendii a media inclinazione (Fig. 8d). Se il processo di approfondimento di un fiume avviene infatti in corrispondenza di rocce facilmente erodibili, l'azione fluviale da un lato tende a creare scarpate di erosione fluviale (e, complessivamente, una gola fluviale – vedi paragrafo 5.1); allo stesso tempo, i processi di degradazione tendono a smantellare le scarpate di erosione fluviale impostate in roccia “tenera” (poiché queste rocce non riesce a mantenere pendii verticalizzati), producendo dei versanti a minore inclinazione (versanti vallivi o versanti fluviali) e, complessivamente, una valle a V (forma fluviale complessa formata da due versanti vallivi che convergono verso il basso in un canale fluviale (Fig. 6b).

Oltre che versanti degradati, i pendii mediamente inclinati possono essere anche forme del rilievo “originarie” (non degradate). È il caso delle superfici strutturali inclinate. Queste forme del rilievo si originano quando strati inclinati di roccia dura, situati in profondità e ricoperti da rocce tenere, vengono esumati e portati a giorno dall'erosione selettiva che smantella più facilmente le coperture di roccia più erodibile, “risparmiando” i sottostanti strati di roccia dura. Si viene così a creare un versante coincidente con il top geometrico di un piano di stratificazione di roccia dura: la superficie strutturale inclinata (Fig. 9e).

### *5.3 Forme del rilievo di tipo planare, a sviluppo orizzontale*

I meccanismi genetici che producono forme del rilievo planari a sviluppo orizzontale (Fig. 2c), possono essere di tipo erosionale e di tipo deposizionale.

Fra i meccanismi erosionali rientrano i processi di scalzamento basale responsabili della genesi di scarpate o versanti fortemente inclinati (vedi paragrafo 5.1). A seguito dei processi di arretramento parallelo cui vanno incontro queste scarpate, ai loro piedi viene a svilupparsi una pianura di erosione (superficie di spianamento) che, nel tempo, tende a divenire via via sempre più estesa (Fig. 8a, b). A seconda del processo morfogenetico responsabile dell'arretramento parallelo del versante, questa pianura erosionale può essere indicata come: piattaforma costiera (prodotta

dal moto ondoso; Fig. 6c), pianura fluviale di erosione laterale (prodotta dall'erosione laterale di un corso d'acqua) e spianata carsica (prodotta dalla soluzione/corrosione marginale carsica).

Il processo di arretramento parallelo dei versanti è tipico anche delle regioni a clima semi-arido. In questi contesti climatici, la mancanza di una continua copertura vegetale espone la roccia agli agenti atmosferici che la degradano fortemente, producendo notevoli quantità di frammenti detritici. Questi frammenti, non protetti dalla vegetazione, vengono facilmente asportati e allontanati dai versanti in quelle poche occasioni in cui si verificano le piogge. Una volta arrivate al suolo, le acque "selvagge" di origine piovana scorrono liberamente e, non trovando ostacoli nella vegetazione, acquisiscono grandi velocità: sono così in grado di ripulire i versanti dai frammenti detritici e di allontanare questo materiale dal loro piede, facendo arretrare i pendii parallelamente. Le superfici pianeggianti che vengono rilasciate ai piedi dei versanti a seguito di questi processi, prendono il nome di pediment (o glacis). Se questo processo di spianamento (pedimentazione) è molto spinto e, per demolizione dei rilievi montuosi, si arriva alla coalescenza di più pediment (processo di pediplanazione), si creerà una grande superficie sub-orizzontale di importanza regionale denominata pedipiano.

Nelle regioni con clima caldo-umido i versanti evolvono secondo il modello della diminuita inclinazione (vedi paragrafo 5.2; Fig. 9c). In questi contesti climatici e nel caso in cui si avesse una lunga stabilità climatica e tettonica di decine di milioni di anni, potrebbe crearsi una superficie di spianamento sub-orizzontale, indicata con il termine di peneplano, data dalla coalescenza di tutti i versanti diminuiti di inclinazione (processo di peneplanazione). Si tratta in realtà di una superficie di spianamento teorica in quanto lunghi periodi di stabilità tettonica e, soprattutto, climatica sono difficili da realizzarsi.

Altri piani a sviluppo orizzontale sono le superfici strutturali. Si tratta di forme prodotte dall'erosione selettiva, la cui genesi è analoga a quella che porta alla formazione di una superficie strutturale inclinata (vedi paragrafo 5.2; Fig. 9e). La differenza sta nel fatto che, stavolta, ad essere esumato e portato a giorno è uno strato tabulare (orizzontale) di roccia dura, privato (per erosione) della sua copertura di roccia tenera.

Fra le forme pianeggianti dovute a processi di accumulo vengono menzionate le spiagge, che si sviluppano lungo quei litorali dove la bassa energia dei processi costieri consente l'accumulo di depositi ciottolosi e/o sabbiosi, e le pianure alluvionali (Fig. 7c), la cui genesi può essere ricondotta a due differenti meccanismi: processi di sedimentazione che si ripetono alle stesse quote e che consistono nel rilascio di un livello sottilissimo (una decina di metri massimo) di detriti alluvionali, al di sopra di una pianura fluviale di erosione laterale (questa sedimentazione si



verifica in occasione di eventi di inondazione, conseguenti alle piene fluviali; Fig. 8b); oppure processi di forte riempimento delle valli fluviali (sovralluvionamenti), che tendono a far migrare verso l'alto il fondovalle grazie al continuo accumulo di materiale (in queste situazioni lo spessore dei depositi fluviali è di decine e decine di metri; Fig. 9f).

#### *5.4 Forme del rilievo di tipo concavo*

Le forme del rilievo coincidenti con superfici curve di tipo concavo (Fig. 2d), sono essenzialmente dovute a meccanismi erosionali o a processi di soluzione/corrosione delle rocce; esse possono svilupparsi lungo superfici planari a sviluppo verticale, obliquo o orizzontale.

Lungo le superfici planari di tipo scarpata e pendio mediamente inclinato (vedi, rispettivamente, paragrafi 5.1 e 5.2) e a seconda del processo morfogenetico responsabile della loro genesi, le depressioni concave più significative che possono prodursi sono: nicchie di frana (dovute al distacco di materiale a seguito di un movimento franoso); solchi del battente (incavati alla base di una falesia costiera e dovuti sia all'azione del moto ondoso e, laddove la falesia si imposta su rocce solubili, sia a processi di soluzione/corrosione; Fig. 6d); tafoni (dovuti alla forte degradazione di alcune rocce cristalline); rivoli, solchi di ruscellamento e calanchi (depressioni di tipo lineare, dovute a processi di incisione prodotti dallo scorrimento superficiale e selvaggio delle acque; Fig. 7f); scannellature carsiche (depressioni lineari centimetriche e decimetriche prodotte dal carsismo, che solcano piccolissimi versanti in rocce solubili; Fig. 7g).

Lungo le superfici planari di tipo pianura (vedi paragrafo 5.3) e a seconda del processo morfogenetico responsabile della loro genesi, le depressioni concave più significative che si producono sono: doline (Fig. 7e) e vaschette (depressioni carsiche di dimensione, rispettivamente, di 1-1000m e 0,1-1m); sinkhole (cavità da sprofondamento, il più delle volte prodotte dal crollo del soffitto di grotte sotterranee); marmitte di erosione marina o di erosione fluviale (cavità cilindriche a sviluppo verticale che si formano, rispettivamente, lungo le piattaforme costiere o il letto dei fiumi, a seguito dell'innescio di vortici turbolenti); conche di deflazione (aree depresse scavate dall'azione del vento); conche di sovraescavazione, prodotte dal movimento dei ghiacciai.

Tutti i tipi di versante possono infine essere solcati da canali (o alvei) fluviali, a sviluppo essenzialmente lineare, i quali si producono per processi di incisione lungo quelle linee dove si realizza lo scorrimento superficiale e incanalato delle acque. Processi di incisione legati a frane di colamento (flussi ad alta velocità costituiti da miscele di acqua e di fango e/o detriti) e a correnti sottomarine (in fondali sabbiosi

generalmente di spiaggia sommersa) generano forme simili chiamate, rispettivamente, canali (o alvei) di frana (Fig. 7d) e truogoli.

### *5.5 Forme del rilievo di tipo convesso*

Le forme del rilievo coincidenti con superfici curve di tipo convesso (Fig. 2e), sono essenzialmente dovute a meccanismi deposizionali; esse possono svilupparsi prevalentemente lungo superfici planari a sviluppo orizzontale.

Qualsiasi flusso avente un moto turbolento (fiume, moto ondoso, vento) tende a creare forme di accumulo sabbioso le cui dimensioni variano da pochi centimetri fino a centinaia di metri. Le piccole forme, chiamate ripple (increspature), si producono per flussi a bassa turbolenza e consistono in una serie di piccole creste, a sviluppo rettilineo o più articolato, alte meno di 4 cm e distanziate fra di loro meno di 60 cm. Le dune (Fig. 6e) sono rilievi di maggiore dimensione (le dune eoliche arrivano fino a qualche centinaio di metri di altezza) dovuti a flussi molto turbolenti. Queste forme si producono su depositi sabbiosi costituenti letti fluviali, spiagge (sommerse ed emerse) e deserti.

Nel momento in cui un flusso, costretto in una stretta incisione, confluisce in una vasta area pianeggiante, tende a divagare, disperdendo la sua energia e, di conseguenza, rilasciando parte del materiale detritico prima trasportato. Si vengono così a creare delle forme di deposito convesse, la cui superficie assume le sembianze di un settore di cono che si apre verso la pianura (Fig. 2e). A seconda del processo che le produce, queste forme sono indicate con i termini di: coni (o conoidi) alluvionali, disposti allo sbocco di strette valli fluviali in pianure alluvionali, la cui genesi è riconducibile a processi fluviali; coni di deiezione (Fig. 7f), situati allo sbocco di rivoli, solchi e calanchi, la cui origine è imputabile a processi di dilavamento; coni di detrito, posti alla base di un canale in parete rocciosa (luogo incavato a seguito di intensa produzione e conseguente distacco di detriti), il cui sviluppo è dovuto alla caduta di detrito; coni di frana, solitamente collocati alla fine di un canale di frana; coni sottomarini, situati allo sbocco di grandi canyon sottomarini o di più piccoli truogoli.

Anche la presenza di permafrost nel sottosuolo può essere responsabile di piccole collinette arrotondate, alte fino ad alcune decine di metri, prodotte dalle deformazioni del terreno a seguito dell'aumento di volume dell'acqua al passaggio dalla sua fase liquida alla sua fase solida. Questi piccoli rilievi sono: i pingo, collinette alte fino a 50 m, che si creano laddove il permafrost è continuo; le palsa, rilievi più piccoli alti fino a una decina di metri, che si formano dove il permafrost è discontinuo.

Un ultimo cenno va dedicato agli accumuli franosi, presenti prevalentemente su pendii inclinati, anche loro responsabili di superfici convesse (Fig. 7d).

## **6. Conclusioni**

Le informazioni riportate in questa relazione hanno mostrato che la forma del rilievo terrestre può essere raffigurata come un grande mosaico le cui tessere sono costituite da versanti (superfici planari o curve), ovvero da forme del rilievo dovute a differenti processi di modellamento.

Complessivamente, le cause del modellamento della superficie terrestre sono state ricondotte all'interazione fra dinamica crostale, dinamica idrosferica e dinamica atmosferica; la perenne dinamicità di queste tre sfere è a sua volta responsabile della continua trasformazione del rilievo terrestre.

Andando a differenziare le forme del rilievo sulla base della scala di osservazione, è stato rimarcato come i grandissimi versanti (di dimensioni dell'ordine del migliaio di chilometri) costituenti le forme del rilievo di primo ordine, siano in realtà formati da versanti di dimensioni un po' più piccole (dell'ordine del centinaio di chilometri) costituenti le forme del rilievo di secondo ordine; e come questi ultimi siano a loro volta formati da versanti via via sempre più piccoli (dimensioni variabili da decine di chilometri fino all'ordine micrometrico), costituenti le forme del rilievo di terzo ordine.

Considerando i processi morfogenetici, è stato osservato come: le grandi forme del rilievo siano essenzialmente di origine tettonica, mentre le forme del rilievo più piccole siano essenzialmente dovute a processi esogeni; le forme di erosione tendano a prevalere sui rilievi continentali (smantellando parzialmente le alture), mentre le forme di accumulo tendano a prevalere negli ambienti sottomarini (colmando parzialmente le bassure).

Poiché le forme del rilievo sono state identificate come versanti, è stato possibile dedurre che ogni cambiamento nell'esposizione, nell'inclinazione o nella curvatura di un versante, segna il passaggio a forme del rilievo diverse. In particolare, i dati esposti hanno mostrato come le forme del rilievo semplici (costituite da un solo versante), dalla cui combinazione si ottengono forme del rilievo complesse (costituite da due o più versanti), possano essere ricondotte a cinque tipi principali: scarpate (superfici piane verticali), pendii variamente inclinati (superfici piane oblique), pianure (superfici piane orizzontali), conche (superfici curve concave) e rilievi arrotondati (superfici curve convesse). L'analisi qui condotta ha quindi mostrato come, qualunque processo di modellamento e qualunque meccanismo genetico si prenda in considerazione, le forme del rilievo semplici convergano sempre verso le cinque figure geometriche sopra enunciate.

## **Bibliografia**

- [1] Federici, P. R., & Piacente, S. (1993). *Geografia Fisica*. Roma: Carrocci.
- [2] Marsh, W. M., & Kaufman, M. M. (2012). *Physical Geography. Great systems and global environments*. New York: Cambridge University Press.
- [3] Lupia Palmieri, E., & Parotto, M. (2014). *Il globo terrestre e la sua evoluzione*. Bologna: Zanichelli.
- [4] Bartolini, C., & Peccerillo, A. (2003). *I fattori geologici delle forme del rilievo. Lezioni di Geomorfologia Strutturale*. Bologna: Pitagora Editrice.
- [5] Pranzini, E. (2004). *La forma delle coste. Geomorfologia costiera, impatto antropico e difesa dei litorali*. Bologna: Zanichelli.
- [6] Panizza, M. (2014). *Geomorfologia*. Bologna: Pitagora Editrice.
- [7] Ciccacci, S. (2015). *Le forme del rilievo. Atlante illustrato di Geomorfologia*. Roma: Mondadori Università.
- [8] Dramis, F., & Ollier, C. (2016). *Genesi ed evoluzione del rilievo terrestre. Fondamenti di Geomorfologia*. Bologna: Pitagora Editrice.
- [9] Huggett, R. J. (2016). *Fundamentals of Geomorphology*. London & New York: Taylor & Francis Group.
- [10] Burbank, D. W., & Anderson, R. S. (2012). *Tectonic Geomorphology*. Oxford: Wiley Blackwell.
- [11] Castiglioni, G. B. (2004). *Geomorfologia*. Torino: UTET.
- [12] Salisbury, R. D. (1919). *Physiography*. New York: Henry Holt and Co.

## Le forme nella Scatola di Einstein

**Giorgio Häusermann**

Il Giardino della scienza, Ascona (Svizzera)

E-mail: [ghausermann@bluewin.ch](mailto:ghausermann@bluewin.ch)

**Riassunto.** La scatola di Einstein era una proposta per le scuole in occasione dell'Anno Mondiale della Fisica del 2005. Conteneva una collezione di giocattoli e facili esperimenti che permettono di affrontare vari argomenti di fisica in modo divertente. Era destinato a permettere agli alunni negli ultimi anni della scuola primaria o della scuola media di fare i primi passi nel campo della scienza, guidati dai loro insegnanti. Nel corso degli anni, il numero di giocattoli e di esperimenti è aumentato e sotto forma di spettacoli o lezioni sono stati presentati centinaia di volte in Italia, Svizzera, Francia, Spagna, Belgio e Messico. Per seguire il tema di SPAIS 2017, sono stati scelti giocattoli ed esperimenti che evidenziano l'importanza della forma per il loro funzionamento.

**Abstract.** Einstein's box was a proposal for schools on the occasion of the World Year of Physics 2005. It contained a collection of toys and easy experiments that make it possible to address various physics topics in an amusing way. It was meant to enable pupils in the final years of primary school or middle school to take the first steps in the field of science, guided by their teachers. Over the years, the number of toys and experiments has increased and in the form of shows or lessons have been presented hundreds of times in Italy, Switzerland, France, Spain, Belgium and Mexico. In order to follow the theme of SPAIS 2017, toys and experiments have been chosen that highlight the importance of the form for their operation.

Per qualcuno l'utilizzo dei giocattoli nell'insegnamento della fisica può sembrare superato, viste le nuove tecnologie e le tendenze didattiche che spingono verso attività in cui gli studenti siano chiamati a costruire in prima persona strumenti d'apprendimento. Per altri, che non hanno mai abbandonato la sedia della cattedra e il manuale davanti al naso, rimane un possibile piccolo passo nella

direzione di motivare gli studenti e di mostrare loro il ponte tra la scienza che s'insegna e quella che è fuori dalla finestra dell'aula.

La Scatola di Einstein [1] è nata nel 2005 come attività dedicata alle scuole dell'obbligo in occasione dell'anno mondiale della fisica prendendo spunto dalla mostra "I giocattoli e la scienza" del prof. Vittorio Zanetti.

La Scatola conteneva una cinquantina di piccoli giocattoli e oggetti con cui era possibile svolgere delle osservazioni scientifiche nel campo della fisica, dalla meccanica alla termologia, dall'elettricità alle onde. Con il passare del tempo la Scatola, come oggetto da prestare alle scuole, non è più stata utilizzata ma è cresciuta la richiesta di presentazioni al pubblico dei suoi contenuti, per cui è diventata a poco a poco una conferenza/spettacolo in cui gli argomenti di fisica erano proposti con esperimenti divertenti la cui spiegazione e approfondimento veniva tarata a seconda del livello scolastico degli studenti o del pubblico generico. La scatola di Einstein è servita in tutti questi anni come oggetto didattico da utilizzare in vari contesti entro e fuori dall'ambiente scolastico (Tabella 1).

**Tabella 1.** Ambiti di applicabilità e contenuti della Scatola di Einstein.

Primaria 5-11 anni	Secondaria inf. 11-15 anni	Secondaria sup. 15-19 anni	Formazione degli insegnanti	Per tutti 4-104 anni
I fenomeni	Collegare i diversi fenomeni	I modelli	Progettare percorsi didattici	La scienza può essere divertente
Vedere e toccare con mano	Cominciare a misurare	Ponte tra teoria e mondo reale	Costruire oggetti con materiale povero	Comprendere i fenomeni della vita quotidiana
Giocare e divertirsi imparando	Giocare e divertirsi imparando	Giocare e divertirsi imparando	Giocare e divertirsi imparando	Giocare e divertirsi imparando

Ormai sono più di duecento le presentazioni svolte in diversi paesi e in molteplici contesti, di volta in volta è stato possibile porre l'accento su aspetti particolari come "le forme" in quella proposta a Spais 2017 (per scaricare la presentazione in pdf del percorso proposto vedi [2])

Riprendendo il discorso sull'utilizzo dei giocattoli nella didattica, occorre ricordare che quando ho iniziato a utilizzarli nelle lezioni al liceo, più di vent'anni fa, me ne servivo come chiave d'apertura di un nuovo argomento per presentare i fenomeni che avremmo studiato e per i quali avremmo cercato modelli teorici che

li approssimassero. In seguito ho ripreso e approfondito questa metodologia nelle lezioni di didattica delle scienze sperimentali per i futuri docenti di scuola elementare e dell'infanzia che hanno molto apprezzato vedere un volto della fisica molto diverso da quello che avevano affrontato alle scuole superiori e hanno cercato di mettere in pratica quanto appreso nelle loro attività di tirocinio. Sono convinto che se a livello dei primi anni di scuola fosse generalizzato l'approccio ludico associato a quello della sperimentazione pratica e dell'osservazione scientifica, negli anni di scuola successivi sarebbe possibile costruire una conoscenza più approfondita in ambito scientifico, naturalmente sempre che i docenti delle superiori siano in grado di cogliere questa opportunità.

### **Sitografia**

- [1] Per ulteriori approfondimenti: [www.scatoladieinstein.com](http://www.scatoladieinstein.com)
- [2] <https://giocafisica.files.wordpress.com/2017/07/presentazione-forme-scatola-di-einstein-spaiss-20172.pdf>

## **Breaking Bad: il cambiamento**

**Mauro Icardi**

Prealpi Servizi Varese

E-mail: [siricar@tiscali.it](mailto:siricar@tiscali.it)

**Riassunto.** La serie televisiva "Breaking Bad" prodotta negli Stati Uniti e trasmessa successivamente anche in Italia dal 2008 fino al 2013, ha ottenuto eccellenti recensioni da parte della critica, e molto successo di pubblico. In questa serie viene narrata la trasformazione di un professore di chimica che, a seguito della diagnosi di un cancro ai polmoni, incapace di accettare questa realtà e preoccupato per il futuro della sua famiglia, decide di sfruttare le sue conoscenze di chimica per produrre metanfetamina, una sostanza stupefacente. Inizialmente la sua attività di produttore di droga troverà una giustificazione che gli farà superare i suoi dubbi iniziali e trasgredire alle proprie regole morali. La necessità di procurarsi denaro in maniera facile e rapida per provvedere ai bisogni della famiglia, quando lui sarà morto. Ma il cambiamento di Walter White il protagonista della serie sarà invece più profondo e la conoscenza e padronanza della chimica sarà uno strumento fondamentale.

**Abstract.** The TV series "Breaking Bad", produced in the United States and aired in Italy from 2008 to 2013, has gained excellent reviews from critics and great enthusiasm by the public. The series describes the change of a Chemistry teacher who is faced with a lung cancer diagnosis and, worried about the financial consequences of this new situation on his family, decided to use his chemistry knowledge to synthesize the drug methamphetamine. At the beginning, producing an illegal drug has a reason allowing him to overcome his initial doubts and break his ethical rules. The need to obtain quick and easy money for the family survival after his death. However, the transformation by Walter White, the main character of the series, is much deeper demonstrating that a thorough knowledge of chemistry is a powerful tool.



*“La chimica è, tecnicamente, lo studio delle sostanze. Ma io preferisco vederla come lo studio dei cambiamenti. Ad esempio pensate a questo, elettroni loro cambiano i loro livelli d'energia, molecole, le molecole cambiano i loro legami, elementi si combinano e cambiano in composti. Questa è la vita giusto? Cioè è la costante, è il ciclo, creazione e dissoluzione, poi di nuovo creazione, poi ancora dissoluzione. E' crescita, poi decadimento, poi trasformazione. Ed è affascinante, davvero...”*

Queste parole sono pronunciate dal protagonista principale della serie, Walter White, professore di chimica in un liceo di Albuquerque nel New Mexico durante una lezione di chimica ai suoi studenti.

White, con un passato da ricercatore, ma con una vita presente insoddisfacente dovuta a problemi familiari. La moglie che è incinta di un secondo figlio non voluto, il primogenito Walter Junior che è tetraplegico ed è costretto a camminare con le stampelle. Problemi economici, e insoddisfazione per la sua vita professionale. Chimico brillante e molto promettente in passato, costretto a svolgere un secondo lavoro in un autolavaggio. Prima come cassiere, ma vessato da un principale arrogante presto dovrà adattarsi a lavare le auto dei suoi stessi studenti, che non rinunceranno a prenderlo in giro quando lo vedranno impegnato in quel tipo di lavoro.

Nella narrazione, già nella prima puntata assistiamo da parte degli sceneggiatori alla messa in scena di un nuovo elemento narrativo, cioè la diagnosi di un cancro polmonare inoperabile.

Il protagonista cinquantenne è quindi schiacciato da un destino implacabile e beffardo. E con questi elementi narrativi inizia la serie, che ha guadagnato ottime recensioni da parte della critica, e un buon successo di pubblico. Ma come ogni serie televisiva diversa dai normali canoni ha trovato anche detrattori, seppure in misura minore rispetto ai fan della serie.

Si tratta di una serie in cui si narra il cambiamento, la trasformazione di un insegnante e padre di famiglia in un signore della droga.

Quindi prima di analizzare la chimica ed il cambiamento nella serie credo vada fatta una non inutile precisazione.

Breaking Bad è una serie televisiva che come “I soprano” ha modificato profondamente lo stile e il filone narrativo. La differenza con le opere e i telefilm dei decenni precedenti consiste in un ribaltamento dei canoni narrativi consueti a cui eravamo abituati. Uno smarrimento dovuto al fatto che il lavoro degli sceneggiatori è pensato in modo da non definire con precisione chi sia il personaggio positivo. Ciò, nello svolgersi della serie, non permette quasi mai allo

spettatore di identificarsi o di affezionarsi totalmente ad uno dei personaggi. La scomparsa della normale divisione tra il personaggio buono e il cattivo.

Il cambiamento mostrato nella serie è un cambiamento che coinvolge non solo Walter White, ma anche tutti i personaggi che con lui interagiscono. Anche la moglie Skyler che sembra rappresentare per molto tempo un personaggio positivo, non sarà esente dal compiere atti non propriamente morali. E sarà complice, non così involontaria delle azioni di Walter, aiutandolo a riciclare il tanto denaro guadagnato con la sua attività criminale. Il mite "Signor White" che utilizza anche la diagnosi di cancro, come lo stimolo, la scintilla che lo porta a trasformarsi in un produttore di droga. La sua trasformazione avverrà per stadi successivi, con difficoltà e ripensamenti ma sarà in ogni caso inarrestabile, fino a svelare l'alter ego Heisenberg, il sublime cuoco di metanfetamina.

La conoscenza della chimica diventerà uno degli strumenti di cui White si servirà per dominare il mercato degli stupefacenti. La sua "blu meth" la metanfetamina blu riscuoterà immediatamente il favore dei consumatori abituali di stupefacenti e lo proietterà nel tempo al vertice dell'organizzazione e dello spaccio di stupefacenti dopo essere stato al servizio prima di un piccolo boss messicano con spiccata tendenza alla violenza insensata, e poi dipendente di un boss molto più signorile nell'aspetto esteriore, ma quanto mai feroce negli atti concreti e nella gestione del traffico di stupefacenti; spietato nei confronti di chi potrebbe ostacolare il suo traffico di stupefacenti, che gli procura ingenti quantità di denaro. Lo stesso White lo paragonerà al giro di affari di una multinazionale, durante un litigio con la moglie, che una volta scoperta la sua attività vorrebbe in un primo momento che lui si costituisse alle forze dell'ordine.

Nel guardare la serie occorre essere consapevoli del fatto che, nonostante l'impegno degli sceneggiatori per scrivere scene realistiche dal punto di vista chimico, qualche licenza ovviamente esiste; il colore della metanfetamina per esempio. Nella serie il blu è simbolo di purezza, ma in realtà i prodotti puri sono incolori. La chimica in *Breaking Bad* c'è ed è una chimica messa al servizio del crimine. Il fascino che essa esercita viene mostrato non solo nella figura di Walter White, ma anche in quella di Gale Boetticher altro chimico della serie, forse il personaggio comprimario meglio caratterizzato. Il cambiamento avverrà anche da un'iniziale produzione artigianale di metanfetamina all'interno di un camper adattato a laboratorio, passando poi per l'utilizzo di un moderno laboratorio nascosto sotto una lavanderia industriale, fino ad un laboratorio di nuovo itinerante, come quello ricavato inizialmente nel camper. Utilizzando come copertura un'azienda che si occupa di disinfestazione da parassiti e insetti, il laboratorio verrà montato all'interno delle case che devono essere disinfestate. terminate la disinfestazione e la sintesi della metanfetamina il laboratorio viene ripulito e

smontato, prima del rientro di chi abita la casa utilizzata allo scopo. E' interessante l'uso della parola cucinare, inteso come sinonimo della sintesi di un prodotto organico. Il termine "cucinare cristalli" viene pronunciato molto spesso nei 52 episodi della serie e non è nuovo l'accostamento della cucina alla chimica. Lo si trova nel racconto "Nichel" del Sistema Periodico di Primo Levi, ma chi ha lavorato nella formulazione di prodotti vernicianti o di cosmetici, sa che i fogli di lavoro con le indicazioni dei dosaggi dei componenti e degli eccipienti sono normalmente chiamati ricette nel gergo dei reparti di produzione chimica industriale.

La serie guardata con l'occhio del chimico riserva sempre qualche momento che attrae inevitabilmente dal punto di vista dell'immaginario chimico. Le sequenze che mostrano la sintesi della metanfetamina, oppure il dialogo tra Walter White e Gale Boetticher nel laboratorio dove si trovano a lavorare insieme. Walter e Gale sono due chimici preparati, due professionisti ed in un dialogo esprimono tutta la meraviglia che sempre si rinnova del lavoro in laboratorio. La produzione di una sostanza stupefacente e psicotropa non è differente da quella di un qualsiasi altro prodotto. La sensazione è quella di una magia che si rinnova ogni volta e questa sensazione prevale su tutto cancellando remore di tipo morale ed etico.

Il cambiamento e la trasformazione di Walter White nel suo alter ego Heisenberg, cioè un drug lord, un signore della droga sarà guidato non solo dalla frustrazione, dalla rabbia, dalla necessità di guadagnare denaro ma avrà il forte impulso dalla perfetta conoscenza della chimica. White affermerà già nel primo episodio parlando al suo ex allievo e poi socio e collaboratore Jesse Pinkman che "Tu sei nel giro, e io conosco la chimica". Dal primo episodio metterà in chiaro questa sua capacità. Pinkman che è uno spacciatore e suo ex allievo non potrà mai essere il cuoco, ci si avvicinerà di molto ma il chimico resterà sempre Walter White (Figura 1).

Per iniziare l'attività ruberà vetreria dal magazzino del liceo dove insegna, e spiegherà con enfasi e pura gioia a cosa serve a Jessie. Rimproverandolo per il modo empirico e grezzo con cui lui cucinava cristalli, e per il disordine e la disorganizzazione dei suoi improvvisati laboratori.

Nel proseguire della serie White rimarcherà diverse volte questa sua conoscenza, in generale quando si sentirà minacciato o rischierà di essere estromesso dalla gestione del processo di sintesi, quando avrà il timore di non poter più essere "il cuoco" o quando imporrà regole certe e non derogabili di lavoro in laboratorio, non dissimili da quelle che si debbono rispettare in ogni laboratorio produttivo.



**Figura 1.** Walter White e Jesse Pinkman.

Il cambiamento però sarà anche il cambiamento del protagonista, che per molto tempo troverà la facile giustificazione per aver deciso di produrre droga nel sostentamento della famiglia. Questa giustificazione sarà ulteriormente rafforzata dalle parole di Gustavo Fring (Figura 2), il boss della droga per cui Walter accetta di lavorare insieme a Jesse Pinkman.

*“Quando si hanno figli si ha sempre una famiglia, sono loro la priorità, la responsabilità. E un uomo deve assolverla. E lo fa anche se non si apprezza il suo gesto anche se non viene rispettato, anche se non è amato. Semplicemente resiste e va avanti, è suo dovere, perché è un uomo”*

Le parole sono pronunciate da Fring per convincere Walter White a produrre droga per lui. C'è un paradosso evidente, visto che parole che richiamano il dovere e l'etica sono pronunciate da un trafficante di droga. Walter White entrerà presto in conflitto con Fring, e sarà costretto ad eliminarlo. Arrivato al vertice del traffico di stupefacenti inizierà per Walter White una fase rapida di decadenza, e arriverà anche una sorta di tardivo riscatto morale. Riscatto che però passerà più che dall'ammissione degli errori commessi, dal confessare a sé stesso la vera ragione che lo ha portato a cucinare metanfetamina. White finalmente ammetterà di aver fatto quella scelta in maniera cosciente. Di essersi sentito vivo, realizzato e soprattutto bravo, molto bravo. Lui che chiederà ad un altro trafficante con cui vuole entrare in affari di pronunciare il nome con cui è conosciuto: Heisenberg.

Per rimarcare che solo lui è il chimico, il cuoco, Walter White, il mite e dimesso professore di chimica che si è trasformato in Heisenberg, è il depositario del sapere, il chimico per eccellenza.

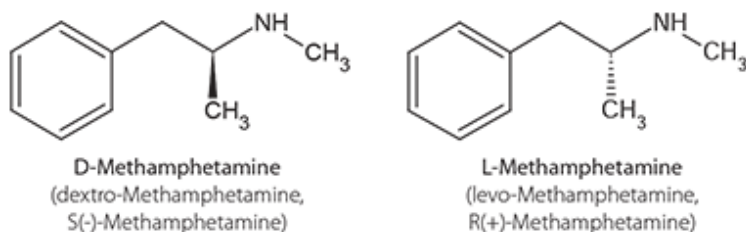


**Figura 2.** Gustavo Fring.

### Considerazioni finali

Breaking Bad è risultata una serie di grande successo. Molto premiata e con un gran seguito di appassionati. Storia, trama, sceneggiatura sono molto ben costruite. Si vede un gran lavoro sull'intreccio della trama. La psicologia e l'atteggiamento dei protagonisti non è mai univoco. Gli sceneggiatori si sono serviti di una consulente chimica per cercare di dare coerenza e validità scientifica alla serie.

La metanfetamina esiste sotto forma di due enantiomeri D ed L (Figura 3). La prima è la molecola psicotropa e stimolante del sistema nervoso.



**Figura 3.** Le due strutture enantiomere della metanfetamina.

Durante lo svolgimento della serie il protagonista Walter White cambierà il metodo di produzione della metanfetamina, passando dal metodo della riduzione della pseudo efedrina, a quello meno diffuso nell'ambiente dei laboratori clandestini, cioè quello dell'amminazione riduttiva del fenilacetone. Questo secondo metodo produce la miscela racemica dei due enantiomeri. Nella serie non si mostra e non si parla della risoluzione degli enantiomeri ottenuti con questo secondo metodo.

Walter White mostrerà la sua conoscenza della chimica anche producendo la miscela incendiaria chiamata termite<sup>1</sup> per fondere una serratura di una porta di un magazzino di prodotti chimici, dove insieme a Jessie si reca per rubare un bidone di metilamina, e costruendo una batteria di fortuna nel deserto di Albuquerque per rimettere in marcia il camper adibito a laboratorio, la cui batteria è stata inavvertitamente scaricata.

La serie ha anche avuto il merito di risvegliare l'interesse per la chimica, sia tra gli addetti, sia tra chi ne aveva un certo timore.

Una delle frequenti critiche alla serie è quella che possa in qualche modo spingere al consumo di stupefacenti.

Il dibattito sul consumo di droghe è sempre quanto mai vivo ed attuale. *Breaking Bad* non è la sola serie in cui si tratti l'argomento. Ma si tratta di una fiction quindi, come suggerito dal titolo, di un'opera di finzione.

Il dibattito sull'evoluzione del consumo di sostanze stupefacenti, va fatto in maniera oggettiva e circostanziata, ed esula dal tema di questo scritto.

Ma per affrontare il tema la conoscenza della composizione chimica, degli effetti tossicologici, e di quelli psicologici e sociali sono ovviamente indispensabili.

---

<sup>1</sup> La termite è una miscela costituita da un metallo in polvere che ha funzione di combustibile ed un ossido metallico che è il comburente. E' chiamata anche reazione di Goldschmidt chimico tedesco che la scoprì e la brevettò. E' una reazione altamente esotermica in cui il metallo più reattivo riduce l'ossido metallico ossidandosi e rilasciando una grande quantità di energia nel corso della reazione. Di solito si conduce la reazione bruciando una miscela di ossido di ferro e polvere di alluminio.

## **Viaggio alla scoperta delle diatomee: microscopiche forme di vita dai mille segreti**

**Anna Maria Mannino**

Sezione di Botanica ed Ecologia vegetale, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Biologiche, Chimiche e Farmaceutiche, Università degli Studi di Palermo

E-mail: [annamaria.mannino@unipa.it](mailto:annamaria.mannino@unipa.it)

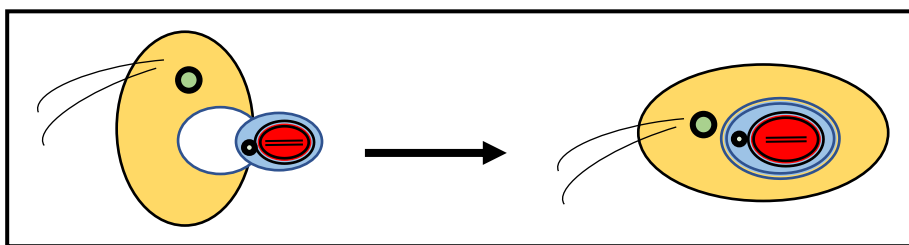
**Riassunto.** Le diatomee, alghe unicellulari eucariotiche, rappresentano il gruppo algale più ricco in specie (circa 300.000). Sono ubiquitarie e possono vivere sia isolate che in colonie, sia adese a diversi substrati (bentoniche) che libere (planctoniche). Sono caratterizzate da un involucro esterno composto di silice (frustulo), formato da due metà (epiteca e ipoteca), che conferisce loro elevata resistenza meccanica e nel contempo incredibile leggerezza. Il frustulo presenta tutta una serie di ornamentazioni utili per il movimento, l'adesione al substrato, il galleggiamento, l'adesione tra cellule, la protezione dal disseccamento e dai predatori. Questo gruppo di alghe ha una notevole importanza dal punto di vista ecologico. Alcune diatomee possono dare origine a blooms tossici (Harmful Algal Blooms - HABs) e produrre tossine. Le diatomee trovano applicazione in diversi campi quali: Scienze forensi, Biomimetica, Fotonica, Biomedicina, Produzione di biodiesel, Arte e Design.

**Abstract.** Diatoms, unicellular and eukaryotic algae, are the richest species group of algae (about 300.000). They are ubiquitous and can live both isolated and forming colonies, attached to different substrates (benthos) and free floating (plankton). They are characterized by a siliceous cell wall (frustule), made up of two halves (epitheca and hypotheca), which gives them a high mechanical resistance and an extraordinary lightness. The frustule presents several ornamentations involved in the movement, adhesion to the substrate, floating, linkage between cells, protection by dissection and grazers. These algae play an important role from an ecological point of view. Some diatoms are capable of forming harmful blooms (Harmful Algal Blooms -

HABs) and producing toxins. Diatoms find application in several fields as Forensic sciences, Biomimetic, Photonic, Biomedicine, Biofuel production, Art and Design.

## 1. Biologia [1-3]

Le diatomee (Bacillariophyceae), alghe unicellulari eucariotiche, rappresentano il gruppo algale più ricco in specie (circa 300.000). Con il termine "alghe" oggi indichiamo un gruppo eterogeneo di organismi (prevalentemente fotoautotrofi ossigenici, acquatici, morfologicamente semplici e privi di strutture riproduttive protette) distribuiti in numerose linee evolutive. Dal punto di vista evolutivo le diatomee sono inserite nel gruppo degli Stramenopili (dal greco stramen=cannuccia, pila=peli) fotosintetici o Heterokontophyta, caratterizzati da cellule flagellate eteroconte, cioè con un flagello munito di mastigonemi (peli tubulari) diretto in avanti e uno liscio diretto all'indietro. In accordo con i recenti sistemi di classificazione degli eucarioti [4], gli Stramenopili vengono oggi inseriti nel supergruppo SAR insieme a Rizari (organismi ameboidi, a volte coloniali, dotati di pseudopodi filiformi) e Alveolati (con sacchi "alveoli" al di sotto della membrana plasmatica). Le diatomee sono microalghe (range dimensionale (2) 20-40 (500)  $\mu\text{m}$ ) di colore bruno-dorato, legato all'elevato contenuto di pigmenti bruni presenti nei plastidi, che mascherano il colore verde della clorofilla ( $a$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ). Le diatomee sono ricche in carotenoidi ( $\beta$ -carotene) e numerosi derivati ossigenati, le xantofille (fucoxantina, neofucoxantina, diadinoxantina e diatoxantina), alcuni dei quali hanno un ruolo importante come pigmenti accessori e agenti fotoprotettivi. I plastidi, con tilacoidi disposti a gruppi di tre, sono circondati da quattro membrane, risultato di un evento di endosimbiosi secondaria [5], cioè di un evento di ingestione (fagocitosi) di un'alga rossa da parte di un organismo eterotrofo (Fig. 1).

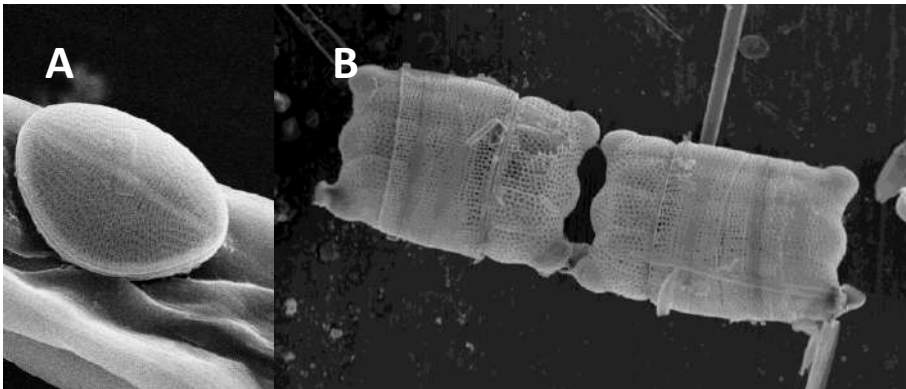


**Figura 1.** Endosimbiosi secondaria.

La posizione dei plastidi in prossimità del frustulo ottimizza il processo di raccolta delle radiazioni luminose.



All'interno del vacuolo vengono accumulati nutrienti e metaboliti secondari quali ad es. olii, acidi grassi e steroidi. La particolarità che meglio distingue queste alghe è la parete cellulare (frustulo), composta di silice amorfa ( $\text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$ ) e provvista di un rivestimento organico fatto da amminoacidi e zuccheri. Il frustulo, definito "casa di vetro", conferisce a queste alghe protezione da grazers e altri agenti nocivi, elevata resistenza meccanica e nel contempo incredibile leggerezza. La silice si deposita in una vescicola (silicalemma) che si forma al di sotto della membrana plasmatica per fusione di vescicole prodotte dal Golgi. Una volta completato il processo, la struttura viene portata all'esterno della cellula. Nella sintesi della silice sono coinvolti polipeptidi quali silaffine, poliammine, frustuline e cinguline. La parete silicizzata richiede meno energia rispetto alle pareti di natura organica, il 3.7% di energia richiesta per quelle lignificate e il 6.7% di energia richiesta per quelle composte da polisaccaridi. Inoltre, il carbonio che non viene utilizzato nella formazione della parete, in quanto sostituito dalla silice, può essere utilizzato dalla cellula per altri scopi. Il frustulo è costituito da due metà (rispettivamente epiteca ed ipoteca) che si incastrano l'una sull'altra come una scatola ed il suo coperchio. Ciascuna teca del frustulo è costituita da una valva (rispettivamente epivalva ed ipovalva) e da una banda cingolare silicea (cingulum), è possibile quindi distinguere una vista frontale (valvare) della diatomea e una vista laterale (cingolare) (Fig. 2).

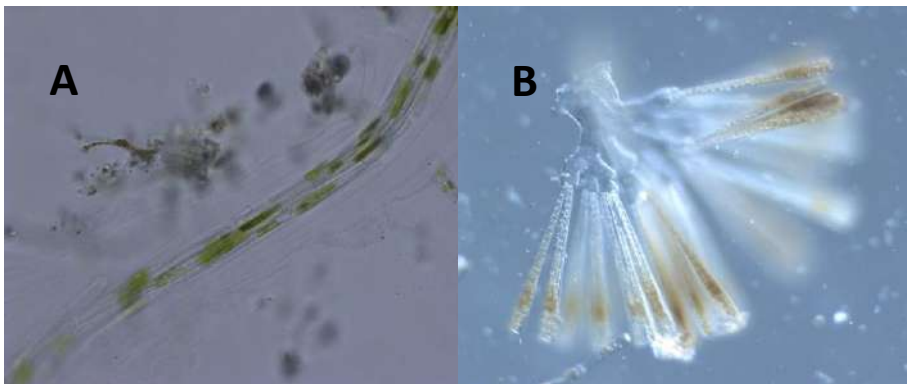


**Figura 2.** (A) Vista valvare e (B) vista cingolare.

Le due valve sono ricche di ornamentazioni (ad es. pori, areole, processi, fessure; Fig. 3), che hanno una disposizione non casuale ma specie-specifica, utili per il movimento, l'adesione a substrati e tra cellule, la formazione di colonie, il galleggiamento, la protezione dal disseccamento e dai predatori (Fig. 4).



**Figura 3.** (A) *Diploneis* (rafe) e (B) *Mastogloia* (ornamentazioni).

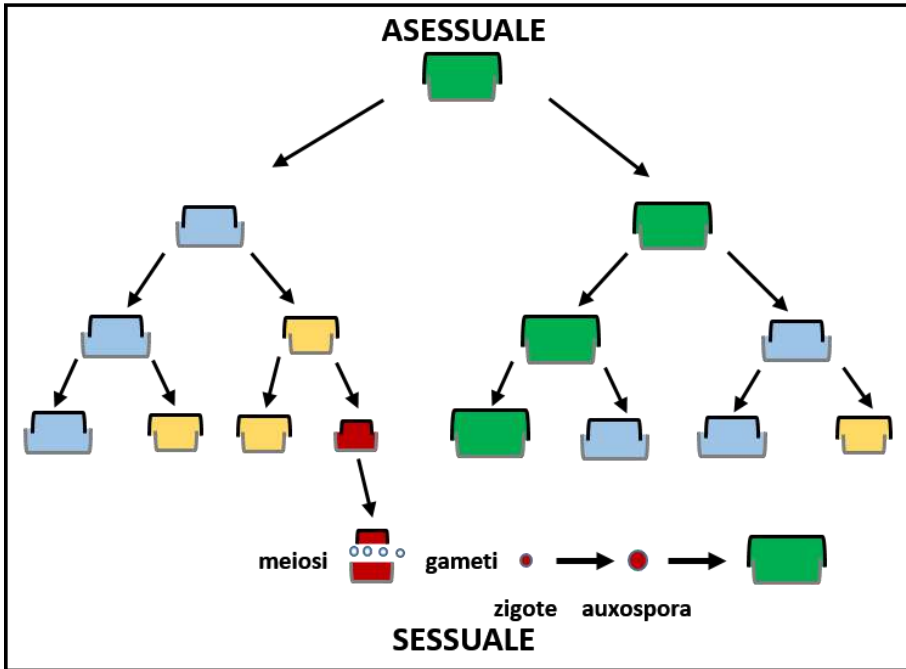


**Figura 4.** (A) Tubo mucillaginoso contenente cellule di *Navicula* e (B) cellule di *Licmophora* unite da stalk mucillaginosi.

Sulla base della forma e della disposizione delle ornamentazioni distinguiamo due gruppi principali: le diatomee centriche con simmetria raggiata (le ornamentazioni disposte come i raggi di una ruota) e le diatomee pennate con simmetria bilaterale (ornamentazioni disposte simmetricamente rispetto all'asse longitudinale). I pori possono essere aperti o chiusi da una sottile membrana silicea finemente perforata; le coste sono ispessimenti nella valva; le areole sono camerette a base esagonale comunicanti tra loro e munite superiormente e inferiormente di pori, uno dei quali può essere chiuso da una sottile membrana finemente perforata;

i processi chiamati fultoportulae sono coinvolti nella secrezione di chitina mentre quelli definiti rimoportulae sono coinvolti nella secrezione di mucillagine; le spine e le sete sono appendici che consentono alle cellule di unirsi tra di loro e formare catene; il rafe, presente esclusivamente nelle diatomee pennate, in posizione centrale o lungo il bordo della valva, è coinvolto nel movimento a seguito di secrezione di polisaccaridi. Le diatomee vengono definite monorafidee, birafidee e arafidee in base al fatto che il rafe è presente solo su una valva, su entrambe le valve o se è totalmente assente. Si riproducono per via asessuata e sessuata. La riproduzione asessuata si realizza per divisione cellulare (ciclo di 8-24 ore), quando le due cellule figlie si separano, ciascuna eredita una valva dalla cellula madre che diventerà l'epivalva e formerà la valva mancante cioè l'ipovalva. In una popolazione che deriva da una stessa cellula madre, alcune cellule avranno le stesse dimensioni della cellula madre mentre per altre si verificherà una progressiva riduzione. Quando si raggiunge la minima dimensione compatibile con la vita (1/3 della dimensione originaria) si attua la riproduzione sessuata per ristabilire le dimensioni originarie (Fig. 5).

La riproduzione sessuata si attua attraverso un ciclo gametico (la divisione meiotica interviene nella formazione dei gameti) con modalità diverse nelle diatomee centriche e in quelle pennate dal momento che solo i gameti maschili delle diatomee centriche sono munite di flagello. Nelle diatomee centriche dopo la formazione dei gameti per divisione meiotica si attua l'oogamia, cioè l'unione di oosfera (gamete femminile immobile) e anterozoide (gamete maschile mobile). Nelle diatomee pennate due cellule si avvicinano e si circondano di un involucro mucillaginoso. Si formano i gameti attraverso una divisione meiotica, per ciascuna cellula restano in genere 2 gameti (gli altri 2 degenerano) dalla cui fusione si originano due zigoti (auxospore). Alcune diatomee in condizioni ambientali avverse (nutrienti, luce, temperatura) possono formare stadi di resistenza, statospore (cisti silicee) o cellule di resistenza. Distinguiamo due gruppi tassonomici, le Biddulphiales (centriche): discoidali o cilindriche, simmetria radiale, numerosi plastidi discoidali, soprattutto planctoniche e le Bacillariales (pennate): simmetria bilaterale, pochi plastidi allungati, soprattutto bentoniche.



**Figura 5.** Riproduzione asessuale e sessuale nelle diatomee.

## 2. Ecologia [1-3]

Sono ubiquitarie, le troviamo, infatti, sia in ambiente acquatico (acque dolci, marine, salmastre) che terrestre. Possono vivere sia isolate che in colonie, le cui cellule sono unite tra di loro mediante sostanze polisaccaridiche o spine. Le colonie possono avere forma diversa e possono anche formarsi all'interno di tubi mucillaginosi. Le diatomee possono vivere sia adese ad un substrato (bentoniche) che libere (planctoniche). Le diatomee bentoniche saldamente attaccate ad un substrato costituiscono il periphyton e, in base al tipo di substrato, vengono distinte in epilittiche (roccia), epipsammiche (sabbia), epipeliche (fango), epifitiche (piante o alghe) e epizoiche (animali). Le diatomee debolmente attaccate a piante, alghe o altri substrati sommersi costituiscono il metaphyton. Alcune diatomee sono in grado di realizzare simbiosi con altri organismi. Crescita e distribuzione delle diatomee dipendono da numerosi fattori: velocità della corrente, pH, temperatura, luce, ossigeno disciolto, silicio, sostanza organica, salinità. Le diatomee hanno una notevole importanza dal punto di vista ecologico: forniscono alimento a molti organismi, contribuiscono fino al 30% circa della produttività globale e fino al 40% circa della produzione globale di O<sub>2</sub>. La maggior parte delle specie sono autotrofe,

ma troviamo anche specie mixotrofe (cioè sia autotrofe che eterotrofe) o eterotrofe obbligate. Alcune diatomee possono dare origine a blooms, alcuni dei quali sono tossici (Harmful Algal Blooms - HABs) a seguito della produzione di tossine, come l'acido domoico prodotto da *Pseudo-nitzschia*, che ha effetti neurotossici. Alcune diatomee possono ostruire le branchie dei pesci a seguito della produzione di grandi quantità di mucillagini o della presenza di spine. Le diatomee sono coinvolte anche nel ciclo dello zolfo. Lo zolfo oltre ad essere coinvolto nella formazione del frustulo è presente nel dimetil solfuro (DMS), liberato dalle cellule nell'atmosfera. Il DMS, una volta ossidato, viene coinvolto nella produzione di aerosol che contribuisce alla condensazione delle nubi e alla dispersione della radiazione solare.

Il frustulo è in grado di resistere ai processi degradativi, conservandosi inalterato dopo la morte e accumulandosi nei sedimenti (diatomite o farina fossile, depositi di frustuli fossili). La diatomite viene utilizzata ad es. come filtro, abrasivo (dentifricio, per pulire metalli), additivo alimentare, nell'industria della carta e della plastica, come insetticida (grazie al potere igroscopico determina l'essiccamento dell'insetto).

### **3. Applicazioni**

Charles Darwin [6], rimanendo affascinato dalla bellezza delle diatomee, si domandava se fossero state create esclusivamente per essere ammirate al microscopio *"few objects are more beautiful than the minute siliceous cases of diatoms, were they only created to be admired under the microscope?"*

Oggi sappiamo che la straordinaria bellezza di queste alghe è legata oltre che alla forma anche alle proprietà ottiche del frustulo. Il frustulo, interagendo con la radiazione solare, produce straordinari colori strutturali con intensi effetti di rifrazione ed interferenza quando osservate al microscopio. Questi "giochi" con la luce hanno lo scopo di aumentare l'efficienza fotosintetica della cellula.

Le prime applicazioni del frustulo delle diatomee risalgono al XIX secolo quando venivano usate per testare il potere di risoluzione degli obiettivi dei microscopi. Le diatomee hanno ricevuto recentemente grande attenzione nel tentativo di trasferire i principi che regolano le caratteristiche fotoniche, meccaniche, morfologiche e strutturali del frustulo a diversi settori produttivi. Trovano oggi applicazione in diversi campi quali ad es. quello Farmaceutico, Biomedico, Nutrizionistico, del Biomonitoraggio, della Bioremediation, delle Scienze forensi, della Fotonica, delle Nanotecnologie, della Biomimetica, del Biofuels, dell'Arte e del Design. La coltivazione delle diatomee per scopi industriali avviene oggi in bioreattori, in sistemi indoor e outdoor o in sistemi misti. Per aumentare l'efficienza di questi sistemi di coltivazione occorre aumentare l'efficienza fotosintetica delle cellule. Nei bioreattori si possono ottenere biomasse

che vanno da 5 a 25 g/m<sup>2</sup>/giorno. L'impiego delle diatomee ai fini industriali è legato alla possibilità di abbattere i costi di coltivazione e raccolta.

### *3.1 Farmaceutico, Biomedico e Nutrizionistico [7-11]*

Le diatomee sono fonte di numerosi composti bioattivi quali lipidi, carotenoidi, composti fenolici, vitamine, xantofille, amminoacidi e acidi grassi omega-3 quali l'acido eicosapentaenoico (EPA). Questi composti, che possono avere anche azione antibatterica, antimicotica, antiossidante e anticancro, vengono ampiamente utilizzati in campo nutrizionistico, farmaceutico e biomedico. Gli acidi grassi omega-3 agiscono a livello del sistema cardiovascolare, sono presenti nella materia cerebrale (20%) ed hanno azione anticancro. La produzione media, in condizioni ottimali di luce, in *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin è di 530 mg l/giorno di acidi grassi omega-3 e 118 mg l/giorno di EPA. L'elevato contenuto di EPA nelle diatomee (circa il 30% degli acidi grassi) ne abbatta i costi della purificazione. La diatomea marina *Odontella aurita* (Lyngbye) C. Agardh contiene carotenoidi, fucoxantina e steroli, sostanze con proprietà antiossidanti e antitumorali. Le molecole antiossidanti agiscono in modo efficace contro i ROS (Reactive Oxygen Species). Nella terapia antitumorale è fondamentale colpire le cellule tumorali lasciando illese le altre cellule. L'uso di carrier nanoporosi silicizzati per il rilascio dei farmaci si è dimostrato altamente efficace, ma i costi risultano molto elevati, i tempi molto lunghi e richiedono per la loro sintesi sostanze tossiche. Il frustulo delle diatomee, essendo una struttura naturale, biocompatibile e biodegradabile, può costituire un efficace carrier di anticorpi (incorporati attraverso ingegneria genetica) e contemporaneamente di droghe da rilasciare nelle cellule tumorali.

### *3.2 Bioindicatori [12]*

Poiché sono molto sensibili alle variazioni dei parametri ambientali ed hanno un tempo di resilienza breve (2-4 settimane), trovano largo impiego come indicatori delle condizioni ambientali di fiumi e laghi. Tra le diatomee bentoniche vengono preferite, in particolare, quelle epilitiche. L'indice diatamico di eutrofizzazione/polluzione o EPI-D, espressamente elaborato per il monitoraggio dei corsi d'acqua d'Italia, si basa sulla sensibilità delle diatomee alle condizioni ambientali soprattutto a salinità, nutrienti e sostanza organica. Le diatomee fossili vengono studiate per avere informazioni sulle variazioni delle condizioni ambientali (salinità, pH, livello del mare, clima) avvenute nel passato.

### *3.3 Bioremediation [7]*

Le diatomee sono in grado di legare e accumulare metalli pesanti attraverso la produzione di fitochelatine. La elevata capacità di fissare il carbonio e di utilizzare

i nutrienti rende le diatomee utili nell'abbattimento della CO<sub>2</sub> e nel trattamento delle acque di scarto.

### *3.4 Scienze forensi [13, 14]*

Vengono utilizzate prevalentemente nelle diagnosi di morte per annegamento. Se la vittima è viva quando entra in acqua, le diatomee passano la barriera alveolo-capillare e attraverso la circolazione sanguigna raggiungono organi distanti quali fegato, reni, cervello, ossa e midollo osseo. Se la vittima è già morta quando entra in acqua, le diatomee possono raggiungere passivamente i polmoni ma, in assenza di circolazione sanguigna attiva, non potranno raggiungere gli organi distanti. Analizzando le diatomee presenti in questi organi si può capire se l'annegamento è avvenuto in casa, in un lago, in un fiume, in un estuario o a mare. Questi organi possono anche ospitare diatomee accumulate nel corso della vita di un pescatore o di un marinaio che andranno dunque distinte da quelle penetrate durante l'annegamento. Anche l'analisi di indumenti può rivelare la presenza di diatomee.

### *3.5 Fotonica [15-17]*

Molti sistemi biologici producono effetti ottici impiegando nanostrutture. Il colore ha origine dalla riflessione o dall'assorbimento di una banda, l'iridescenza è il risultato di un band gap fotonico (frequenze cui non è consentita la propagazione nel mezzo). La somiglianza del frustulo delle diatomee (dotato di nanoparticelle di silice) con gli opali (minerali di silice amorfa idrata formati per lentissima deposizione geologica), ha portato a definirle spesso "gioielli del mare" o "opali viventi". La straordinaria somiglianza delle ultrastrutture del frustulo con quelle dei cristalli fotonici ha indotto ad ipotizzare che il frustulo potesse comportarsi come un cristallo fotonico naturale, avendo così un ruolo fondamentale nella manipolazione della luce. I cristalli fotonici sono materiali dotati di nanostrutture periodiche e spazialmente ordinate che possono controllare la propagazione della luce, permettendo solo a certe lunghezze d'onda di passare attraverso il cristallo. Le diatomee forniscono, a costo zero e a impatto ambientale nullo, nanostrutture periodiche e spazialmente ordinate. I pori, distribuiti in modo regolare, formano una rete di geometrie esagonali e tetragonali le cui unità hanno dimensioni dello stesso ordine di grandezza delle lunghezze d'onda della luce visibile. Il frustulo, con le sue nanostrutture, interagisce con la radiazione solare sfruttandola al meglio, e la radiazione incidente può essere diffratta, con un angolo correlato alla lunghezza d'onda della radiazione, o essere assorbita. Le diatomee presentano, inoltre, fotoluminescenza, processo specie dipendente, che consente di convertire la radiazione UV, dannosa per il DNA, in radiazione blu. La cellula si protegge dalle radiazioni nocive come gli UV anche attraverso i meccanismi di diffrazione e

l'assorbimento di queste radiazioni da parte della silice amorfa. Da rilevare, inoltre, come i cloroplasti possano cambiare la loro posizione in relazione alle condizioni luminose. In condizioni di intenso irraggiamento si spostano verso il centro della cellula, dove i meccanismi di diffrazione concentrano principalmente le radiazioni del visibile.

### *3.6 Nanotecnologie [16, 18]*

Le diatomee trovano ampia applicazione nel campo delle nanotecnologie in quanto dotate naturalmente di nanostrutture che possono essere usate per lo sviluppo di nano-congegni quali microsensori, cellule solari e batterie. La presenza di gas può ad es. arrestare o incrementare le emissioni di fotoluminescenza. Possono, pertanto, essere utilizzate per la produzione di supersensori in grado di rilevare la presenza di quantità anche molto piccole di gas. I frustuli possono anche essere modificati chimicamente introducendo elementi (Ge, Ti) nel mezzo di coltura. L'introduzione, ad es., di  $\text{Ge}(\text{OH})_4$  porta alla sostituzione di alcuni atomi di silicio con il germanio, e quindi al manifestarsi di proprietà elettro- e fotoluminescenti tipiche degli ioni di  $\text{Ge}^{4+}$ . I frustuli possono essere utilizzati come templates per la produzione di materiali porosi.

### *3.7 Biomimetica (o Hybrid Design) [19]*

Nuova branca delle biotecnologie mirata alla realizzazione di prodotti, materiali e dispositivi partendo da principi, logiche, morfologie e strutture presenti in sistemi biologici. L'innovazione dell'approccio biomimetico sta nella necessità di comprendere il significato funzionale delle morfologie naturali per progettare i materiali e gli oggetti del futuro. Vengono utilizzati comportamenti della natura per ottenere strutture efficienti che non richiedono energia non rinnovabile e utilizzano le variazioni di temperatura e umidità che avvengono nell'ambiente. Trova ampia applicazione in architettura e nell'industria del design. La pensilina solare polifunzionale (Edo) ed energeticamente autonoma, sviluppata da ricercatori partenopei dell'Hdl (Hybrid Design lab), trova ispirazione in una diatomea a forma di ventaglio (*Licmophora*). Edo è in grado di immagazzinare energia solare, come le diatomee, illuminare lo spazio sottostante e fornire una serie di facilities, quali ricarica cellulari e informazioni tramite bluetooth. La struttura forata del frustulo ha ispirato la realizzazione di un casco sportivo, raggiungendo l'obiettivo di ottimizzarne le prestazioni attraverso la diminuzione del peso complessivo e il miglioramento della vestibilità.



### 3.8 *Biofuel* [7, 11, 20]

Le microalghe trovano largo impiego nella produzione di biofuel in quanto sono più efficienti delle piante nella trasformazione di luce e nutrienti in molecole utili. Vivendo in acqua hanno infatti accesso ad acqua, CO<sub>2</sub> e nutrienti in modo più efficiente. Le diatomee, accumulando nel vacuolo sostanze di riserva e nutrienti presenti nell'ambiente, raggiungono elevati tassi di crescita, condizione ottimale per la produzione di biofuel. Le diatomee producono lipidi e acidi grassi polinsaturi a lunga catena e quindi rappresentano una potenziale alternativa per la produzione di biodiesel. Ai fini della produzione di biofuel è importante anche l'accumulo di lipidi sia come lipidi totali che come trigliceridi (TAG), che forniscono il carbonio necessario per la conversione in biofuel. Le diatomee riescono a trasformare in lipidi fino all'85% del peso totale, e accumulano TAG in condizioni di limitazioni di Si o N ed anche quando viene bloccato il ciclo cellulare. L'elevata quantità di lipidi accumulata nella cellula serve anche per consentire il galleggiamento nonostante il peso della parete cellulare. La produzione di bio-oil o biodiesel comporta: la coltivazione in condizioni di stress per massimizzare la produzione di lipidi, la rottura della cellula (mediante variazioni di pressione o brevi scariche elettriche) per estrarre i lipidi, la trasformazione dei lipidi in bio-oil o biodiesel. Sebbene la parete cellulare sia resistente, le sub-strutture silicee di cui è composta sono unite da molecole organiche e quindi è relativamente facile rompere la parete per estrarre lipidi e pigmenti con solventi organici (ad es. acetone).

### 3.9 *Art and design* [18]

La straordinaria bellezza di forme nelle diatomee ha catturato l'immaginazione di numerosi scienziati ed artisti, diventando fonte di ispirazione per la realizzazione di gioielli, sculture e oggetti di design. Il Professore Klaus Kemp, rimanendo affascinato dalla straordinaria complessità di forme e bellezza delle diatomee, cominciò a creare al microscopio composizioni di diatomee. Oggi le sue spettacolari composizioni si possono considerare vere opere d'arte.

## **Bibliografia**

- [1] Round, F.E., Crawford, R.M., Mann, D.G. (1990). *The Diatoms*. New York: Cambridge University Press.
- [2] Cox, E.J. (1996). *Identification of freshwater diatoms from live material*. London: Chapman & Hall.
- [3] John, J. (2012). *A beginner's guide to Diatoms*. Liechtenstein: A.R.G. Gantner Verlag, Ruggell.
- [4] Keeling, P.J. (2013). The number, speed, and impact of plastid endosymbioses in eukaryotic evolution. *Annual Review of Plant Biology*, 64, 583–607.

- [5] Margulis, L. (1981). *Symbiosis in cell evolution: life and its environment on the early Earth*. San Francisco: W.H. Freeman.
- [6] Darwin, C. (1859). *On the origin of species by means of natural selection*. London: J. Murray.
- [7] Bozarth, A., Maier, U-G., Zauner, S. (2009). Diatoms in biotechnology: modern tools and applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 82(2), 195–201.
- [8] Aw, M.S., Simovic, S., Addai-Mensah, J., Losic, D. (2011). Silica microcapsules from diatoms as new carrier for delivery of therapeutics. *Nanomedicine*, 6(7), 1159–1173.
- [9] Aw, M.S., Simovic, S., Yu, Y., Addai-Mensah, J., Losic, D. (2012). Porous silica microshells from diatoms as biocarrier for drug delivery applications. *Powder Technology*, 223, 52–58.
- [10] Delalat, B., Sheppard, V.C., Ghaemi, S.R., Rao, S., Prestidge, C.A., McPhee, G., et al. (2015). Targeted drug delivery using genetically engineered diatom biosilica. *Nature Communications*, 6, 8791. doi: 10.1038/ncomms9791.
- [11] Kuppusamy, P., Soundharrajan, I., Srigopalram, S., Yusoff, M.M., Maniam G.P., Govindan, N., Choi, K.C. (2017). Potential pharmaceutical and biomedical applications of Diatoms microalgae - An overview. *Indian Journal of Geo Marine Sciences*, 46(4), 663–667.
- [12] Dell'Uomo, A. (2004). *L'indice diatamico di eutrofizzazione/polluzione (EPI-D) nel monitoraggio delle acque correnti*. Roma: APAT.
- [13] Verma, K. (2013). Role of diatoms in the world of forensic science. *Journal of Forensic Research*, 4(2), doi: 10.4172/2157-7145.1000181.
- [14] Sasidharan, A., & Resmi, S. (2014). Review-Forensic diatomology. *Health Sciences*, 1(3), JS002B.
- [15] Gordon, R., Losic, D., Tiffany, M.A., Nagy, S.S., Sterrenburg, F.A.S. (2009). The glass menagerie: diatoms for novel applications in nanotechnology. *Trends in Biotechnology*, 27(2), 116–127.
- [16] Cassaignon, S., de Maleprade, R., Nassif, N., Livage, J. (2014). From living light to living materials. *Materials Today: Proceedings 1S*, 209–215.
- [17] De Tommasi, E. (2016). Light manipulation by single cells: the case of diatoms. *Journal of Spectroscopy*. doi: 10.1155/2016/2490128.
- [18] Bradbury, J. (2004). Nature's Nanotechnologists: Unveiling the Secrets of Diatoms. *PLoS Biology*, 2(10), e306. doi: 10.1371/journal.pbio.0020306
- [19] Kooistra, W.H.C.F., & Pohl, G. (2015). Diatom Frustule Morphology and its Biomimetic Applications in Architecture and Industrial Design. In *Evolution of Lightweight Structures: Analyses and Technical Applications*, Hamm, C., Ed. Springer Netherlands: Dordrecht, 75-102.
- [20] Hildebrand, M., Davis, A.K., Smith, S.R., Traller, J.C., Abbriano R. (2012). The place of diatoms in the biofuels industry. *Biofuels*, 3(2), 221–240.

## Chiralità: dalle molecole all'universo

**Luigi Monsù Scolaro**

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

E-mail: [lmonsu@unime.it](mailto:lmonsu@unime.it)

**Riassunto.** Partendo dalla classica definizione di Lord Kelvin, la chiralità viene definita operativamente come la specifica proprietà ascrivibile ad un qualsiasi oggetto, qualora la sua immagine speculare, anche idealmente realizzata, non risulti sovrapponibile all'oggetto stesso. Prendendo spunto da questa definizione si estenderà il concetto dal mondo delle molecole a quello delle macromolecole, per passare infine al mondo macroscopico ed alle galassie. In campo molecolare saranno forniti esempi di molecole chirali, e ne saranno esaminate le proprietà, e le implicazioni. Verrà discussa brevemente la polarizzazione della luce e sarà mostrato un semplice esperimento sulla rotazione del piano della luce polarizzata operata da una sostanza chirale. In campo macromolecolare, saranno discusse le implicazioni della chiralità nel riconoscimento di farmaci o di generici substrati da parte di proteine o acidi nucleici. Infine, saranno discusse alcune delle teorie sull'origine dell'omochiralità, ovvero del fatto che solo una delle due forme chirali possibili degli amminoacidi o degli zuccheri sia stata selezionata dalla Natura per la costruzione delle impalcature complesse delle proteine e degli acidi nucleici, rispettivamente.

**Abstract.** Going back to the classic definition given by Lord Kelvin, chirality is a specific property of an object, when its mirror image, even ideally realized, cannot be superimposable to the starting object. Moving from this definition, we will expand this concept from molecules, up to macromolecules and eventually to the macroscopic world and the galaxies. At the molecular level, we will discuss examples of chiral molecules, together with their properties and the implications. We will discuss briefly the polarization of light and a simple experiment on the rotation of the polarization plane by an optically active compound will be shown. At macromolecular level, we will discuss how chirality impacts on

the mechanism of recognition of drugs and other small chiral compounds by proteins and nucleic acids. In a second part, we will focus on some theories concerning the origin of homochirality, i.e. the occurrence in Nature of only one of the two possible enantiomers for aminoacids and sugars as constituents for proteins and nucleic acids, respectively.

## **1. Considerazioni iniziali**

Le osservazioni sul mondo naturale, a partire dall'invisibile ad occhio nudo fino alla scala immensamente grande delle galassie ed in ultimo dell'Universo, ci pongono di fronte al fatto che l'asimmetria o la dissimmetria è uno dei fattori dominanti. Quando pensiamo a sistemi altamente simmetrici, come ad esempio i cristalli, dobbiamo di converso ammettere che è veramente difficile, se non puramente ideale, l'esistenza di un cristallo perfetto – sia pur lievi imperfezioni sono sempre riscontrabili. Un'altra considerazione importante è che la Natura ha selezionato forme adeguate per svolgere determinate funzioni. L'origine della vita sulla Terra è uno dei problemi più complessi che l'uomo possa tentare di spiegare, sia per quanto riguarda la sintesi dei composti di base, ma soprattutto per la loro organizzazione in strutture in grado di auto-organizzarsi ed auto-replicarsi, interagendo tra loro in modo altamente specifico. In questo contesto la chiralità è una delle modalità di controllo della forma che la Natura ha impiegato per sviluppare sistemi altamente selettivi. L'asimmetria genera la possibile ed uguale esistenza di forme che siano l'una l'immagine speculare dell'altra, pur risultando di fatto diverse. La domanda a cui si tenta di dare una risposta, peraltro ancora non trovata, è perché tutte le biomolecole essenziali alla vita sulla Terra – proteine, polisaccaridi ed acidi nucleici – contengano mattoni fondamentali (amminoacidi e zuccheri) tutti di una specifica forma e non dell'altra.

Dopo aver discusso dell'origine storica del problema, delle definizioni iniziali e delle proprietà più importanti di molecole chirali, verranno trattati gli argomenti del riconoscimento molecolare e delle funzioni di alcuni composti chirali. Successivamente saranno prese in considerazione le problematiche aperte sull'omochiralità nei sistemi biologici e verranno esaminati, non in forma esaustiva, alcuni degli esperimenti presenti nella letteratura scientifica a riguardo, con riferimento alla potenziale origine terrestre od extra-terrestre di questo fenomeno.

## **2. Chiralità. Luce polarizzata e definizioni**

Un'onda elettromagnetica è costituita da un campo elettrico e da un campo magnetico oscillanti in fase su piani mutuamente perpendicolari, con una velocità di

propagazione nel vuoto pari a quella della luce. La luce visibile costituisce solo una porzione ridotta, in termini di frequenza ovvero di lunghezza d'onda, dell'intero spettro elettromagnetico. Se consideriamo un fascio di luce generato da una sorgente quale il sole o una lampada ad incandescenza, l'onda elettromagnetica non è polarizzata, ovvero non esiste uno specifico piano di oscillazione per il campo elettrico (ovvero per quello magnetico). Nel caso in cui il campo elettrico si trovi ad oscillare su un piano la luce si dirà polarizzata linearmente o nel piano. Da questo momento si trascurerà il riferimento al campo magnetico, che ovviamente seguirà la stessa sorte su un piano perpendicolare al campo elettrico. Possiamo visualizzare il fenomeno della polarizzazione nel piano se consideriamo che il vettore campo elettrico possa essere scomposto nelle sue componenti vettoriali  $E_x$  ed  $E_y$ , oscillanti nelle direzioni  $x$ ,  $y$  che individuano il piano perpendicolare all'asse  $z$  di propagazione dell'onda elettromagnetica. Se queste due componenti oscilleranno in fase, la loro ricomposizione vettoriale darà un vettore campo elettrico che oscilla in un piano, ovvero la luce risulterà polarizzata nel piano. Viceversa, se una delle due componenti risulterà sfasata (in anticipo od in ritardo) rispetto l'altra esattamente di un quarto di lunghezza d'onda, la ricomposizione vettoriale genererà un vettore campo elettrico che si propaga nello spazio seguendo una traiettoria circolare di senso orario od anti-orario, in funzione del ritardo. In questo caso, si parlerà di luce polarizzata circolarmente destro- o levo-gira (RCPL o LCPL, right- o left-circularly polarized light). Nel caso specifico in cui l'intensità delle due componenti  $E_x$  ed  $E_y$  siano differenti, la composizione vettoriale produrrà un fascio di luce polarizzata ellitticamente.

Senza entrare nel dettaglio tecnico, la luce polarizzata linearmente può essere generata o impiegando un dispositivo ottico detto polarizzatore, oppure per riflessione sulla superficie di un mezzo trasparente (ad esempio l'acqua). Nel primo caso, un polarizzatore è costituito da un particolare cristallo di calcite o altro materiale in grado di selezionare da un fascio incidente non polarizzato, un solo piano di polarizzazione. Nel secondo caso, la polarizzazione per riflessione è un fenomeno ben noto e l'impiego di filtri polarizzatori in fotografia, per togliere riflessi dalla superficie, o in dispositivi quali gli schermi dei computer portatili è un'applicazione abbastanza diffusa.

Gli studi iniziali sulla chiralità riportano alla Francia dell'inizio del XIX secolo. Nel 1809 Malus si accorse che la luce riflessa da superfici di mezzi trasparenti come vetro o acqua dava una sola immagine, invece di due, quando osservata attraverso un cristallo birifrangente di calcite. Qualche anno dopo Arago osservò che delle lamine di quarzo, opportunamente tagliate perpendicolarmente all'asse ottico, erano in grado di dare un fenomeno di rotazione ottica, dipendente dalla lunghezza

d'onda. Nel 1812 Biot ascrisse il fenomeno osservato alla rotazione del piano di polarizzazione della luce e riscontrò l'esistenza di forme di quarzo destrogire e levogiro. Successivamente, il fenomeno venne ritrovato anche in liquidi o soluzioni di certi composti (1815) e Biot sviluppò il metodo della saccarometria per determinare la concentrazione zuccherina in soluzione, applicandola a studi sul diabete. La rotazione del piano della luce polarizzata linearmente si misura mediante un polarimetro. Tale strumento è costituito da una sorgente di luce non polarizzata che viene resa linearmente polarizzata da un primo polarizzatore lineare ed inviata sul campione da analizzare. La rotazione del piano di polarizzazione viene poi misurata con precisione (e ne viene stabilito anche il verso) mediante un secondo polarizzatore lineare (detto analizzatore) che viene ruotato opportunamente per ripristinare le condizioni iniziali di luminosità. La rilevazione dell'intensità luminosa può essere fatta ad occhio da un operatore o mediante sistemi fotometrici (negli strumenti più moderni). Sulla base del senso di rotazione del piano della luce, le sostanze possono essere classificate in destrogire (d(+)) o levogire (l(-)). In questa discussione non viene ulteriormente trattata né la nomenclatura delle molecole chirali (D o L), né la problematica della configurazione assoluta (forme R o S).

Nel 1848 Louis Pasteur riuscì ad identificare e separare due forme speculari di cristalli da una soluzione satura di tartrato di sodio e ammonio. In seguito introdusse il concetto di dissimmetria e spiegò le osservazioni sperimentali con l'esistenza di forme strutturali non sovrapponibili per sola rotazione o traslazione alle corrispondenti immagini speculari. La definizione di enantiomeri è riservata alle due forme molecolari, mentre il termine enantiomorfo si riferisce ad oggetti di dimensioni macroscopiche, aventi queste caratteristiche. Una definizione più generale venne formulata successivamente da Lord Kelvin "definisco chirale e dico che ha chiralità qualsiasi figura geometrica o gruppo di punti se la sua immagine, idealmente realizzata, in uno specchio piano non può essere fatta coincidere con la figura stessa" [1]. In termini di moderna applicazione della simmetria, la chiralità è una proprietà che insorge in un oggetto quando non sono presenti assi di roto-riflessione (ovvero, nei casi più semplici, un piano di simmetria o un centro di inversione). Si comprende appieno, quindi, come le molecole organiche contenenti un carbonio asimmetrico (ovvero legato a quattro sostituenti tutti diversi) rientrino nella definizione, così come motivi strutturali importanti, quale le  $\alpha$ -eliche presenti nelle proteine o la doppia elica del DNA. Inoltre, da questo punto di vista, due eliche da motoscafo a tre pale speculari sono enantiomorfe ed è interessante osservare come sia chirale il loro moto: un'elica destrorsa ruotando in senso orario genera una propulsione in avanti, mentre un'elica sinistrorsa ruotando in senso orario genera una propulsione opposta.

### **3. Forma e funzione**

Quando due persone si scambiano una stretta di mano, l'uso della stessa mano (destra) è forzato dall'enantiomorficità della mano. Inoltre, il guanto destro è specificamente fatto per calzare la mano destra. Questi sono esempi tratti dal mondo reale su come la chiralità (ovvero uno degli aspetti della forma di un oggetto) abbia un impatto sulla funzione. Se si prendono in considerazione i sistemi biologici, da un punto di vista molecolare, molte delle funzioni svolte dalle varie biomolecole dipendono, anche se non esclusivamente, dalla loro forma. Ovviamente, a livello di singoli frammenti molecolari, le varie interazioni (elettrostatiche, idrofobiche, legami ad idrogeno) giocano un ruolo importante. Tuttavia, la disposizione nello spazio di questi frammenti governa il riconoscimento specifico tra due entità che debbano svolgere un ruolo reciproco (si pensi ad esempio al riconoscimento della doppia elica del DNA da parte degli enzimi preposti alla sua duplicazione o alla sua riparazione). La chiralità, pertanto, è stata sfruttata dalla Natura per poter svolgere funzioni complesse.

Un esempio specifico nel campo della chimica farmaceutica è dato dal caso della talidomide, che mentre nella sua forma destrogiro è un sedativo anti-nausea, nella forma levogiro è un pericoloso agente teratogeno. In passato, molti farmaci basati su sostanze chirali, come appunto l'esempio in questione, erano immessi sul mercato come miscele racemiche, nell'assunzione che una delle due forme enantiomere fosse attiva, mentre l'altra fosse innocua. A tal proposito è bene ricordare che, in assenza di precauzioni particolari, la sintesi di una sostanza chirale produce sempre una miscela statistica al 50% di entrambe le molecole enantiomere (miscela racemica). L'industria farmaceutica, adesso ben conscia del problema, indirizza la produzione verso la specie attiva. Nella maggior parte dei casi, è più economico sintetizzare direttamente l'enantiomero di interesse, piuttosto che procedere ad una separazione di una miscela dei due. Per ottenere questo obiettivo ci si serve molto spesso della catalisi asimmetrica, ovvero l'impiego di catalizzatori chirali che permettono la preparazione con alte rese e con elevata purezza enantiomerica solo di una delle due forme. Per la propulsione allo sviluppo di catalizzatori asimmetrici in reazioni di idrogenazione e di ossidazione, W. Knowles, R. Noyori e B. Sharpless conseguirono il premio Nobel nel 2001, a testimonianza dell'importanza teorica ed applicativa di questi studi. In particolare, alcuni composti chirali a base di rodio sono stati impiegati per la sintesi industriale di L-DOPA, un importante farmaco chirale nella cura del morbo di Parkinson.

Altro esempio nel campo della chimica inorganica, con applicabilità ai sistemi biologici, è basato sul fatto che composti di coordinazione di metalli di transizione

a geometria ottaedrica, quando legati ad opportuni sostituenti chelanti, acquistano chiralità. Un'osservazione attenta delle relative strutture mostra una forte somiglianza ad eliche a tre pale. Solo una delle due forme enantiomeriche è in grado di riconoscere e legarsi efficientemente alla doppia elica del DNA, inserendosi nel solco maggiore e causando distorsioni sulla struttura dell'acido nucleico [2].

Dal modo animale un esempio di relazione tra chiralità e funzione è dato da un esemplare di chiocciola terrestre giapponese [3]. Questa specie esiste con uno sviluppo della conchiglia di tipo enantiomorfo, in cui la forma destrorsa è maggiormente abbondante. L'aspetto interessante è che la disposizione dei organi riproduttivi risulta tale che solo un accoppiamento di specie aventi la stessa chiralità sia possibile. Si osserva quindi un impatto della chiralità sul successo riproduttivo di questa specie. Studi recenti hanno anche evidenziato che queste chiocciole posseggono un gene specifico che ne consente l'inversione di chiralità, come risposta alla presenza di predatori (rettili) con dentatura in grado di operare su una delle due forme.

#### **4. Omochiralità nei sistemi biologici**

Abbiamo già osservato come la sintesi in laboratorio di una molecola chirale conduca ad una miscela egualmente ripartita nei due possibili enantiomeri. Da ciò ne consegue che la constatazione dell'omochiralità in campo biologico è alquanto sorprendente. Di fatto, tutti gli amminoacidi riscontrati nelle proteine appartengono alla serie L, mentre gli zuccheri costituenti lo scheletro degli acidi nucleici sono della serie D.

Nel racconto "Attraverso lo specchio" di Lewis Carroll, sequel del più famoso "Alice nel paese delle meraviglie", Alice si chiede, rivolgendosi al suo gattino, se il latte, nel mondo allo specchio, sia ugualmente buono da bere. La domanda sembra essere contestualizzata solo nel racconto in oggetto, ma, in realtà ci pone di fronte ad un interrogativo molto intrigante: due forme enantiomere sono realmente identiche, in termini di contenuto energetico, ovvero di stabilità? Se così fosse non dovrebbero davvero esserci preferenze tra le due e la loro sintesi dovrebbe condurre ad una miscela racemica.

Questa domanda di natura fondamentale ha ricevuto una risposta dalla fisica teorica. La descrizione del moto di oggetti di qualsiasi dimensione nello spazio e nel tempo è riconducibile all'azione di quattro forze: gravitazione, forze elettromagnetiche, interazioni forti ed interazioni deboli. Inizialmente, era opinione comune che l'impiego di un sistema di coordinate destro- o sinistrogiro fosse ininfluen-



nella descrizione del problema. Ovvero, le leggi fisiche dovrebbero essere invarianti in seguito a riflessioni o inversioni spaziali (operazioni di parità). Tuttavia, nel 1956 due ricercatori, T.D. Lee e C.N. Yang, teorizzano la violazione della parità nel caso delle forze deboli. Tali interazioni sono responsabili di un moto elicoidale degli elettroni intorno ai nuclei, imponendo una chiralità persino al singolo atomo. Nel 1957, C.S. Wu riesce a confermare con un esperimento che la violazione della parità è possibile a livello dell'emissione beta da atomi radioattivi e per questo, Lee e Yang ottengono nello stesso anno il riconoscimento col premio Nobel. Da quel momento in poi, molta sperimentazione ha dimostrato che nel campo degli atomi questo effetto esiste ed è misurabile. Tuttavia, riguardo le molecole, studi teorici hanno previsto una differenza di energia tra due enantiomeri dello stesso composto da femto a pico-joules, ma l'entità di tale valore non ha consentito a tutt'oggi una dimostrazione sperimentale. Inoltre, la semplice differenza nella stabilità dei due enantiomeri non giustifica l'osservazione in natura di una delle due forme soltanto. In realtà, uno dei maggiori esperti nel settore, Meir Lahav, ha affermato che la rottura spontanea della simmetria non può essere il fattore limitante. Infatti, nelle cristallizzazioni in molti casi è possibile osservare questo fenomeno, soprattutto quando la fase di nucleazione, ovvero la formazione dei primi cristalliti in soluzione, è lenta rispetto la fase successiva di crescita dei cristalli. Quindi è necessario cercare altrove le motivazioni per la omochiralità, ad esempio nei meccanismi con cui l'iniziale sbilanciamento enantiomerico si propaga e si amplifica nei sistemi in crescita.

Un esempio classico di evoluzione di un sistema verso una chiralità ben definita è offerta da vari processi di separazione spontanea di racemi durante la loro cristallizzazione. Una soluzione contenente una miscela racemica può cristallizzare dando un racemato, ovvero cristalli in cui è presente la miscela equimolare dei due enantiomeri, oppure un conglomerato, ovvero cristalli singolarmente enantiopuri formati dai due enantiomeri separati. Questo ultimo caso, abbastanza meno frequente, è il caso fortuito occorso a Pasteur nella risoluzione del tartrato di sodio ed ammonio. Ancora più sorprendente è il fatto che soluzioni di semplici molecole non chirali possano dare cristalli di una sola chiralità. Questo esperimento, riportato per la prima volta da Kondepudi [4], è stato condotto su soluzioni sature di clorato di sodio, soggette o meno ad agitazione meccanica. In queste condizioni, in assenza di agitazione, si osserva la formazione di un racemato, ovvero, miscele di cristalli enantiomorfi, mentre, in presenza di agitazione, un unico tipo di cristallo enantiomorfo è presente, anche se la chiralità non è riconducibile ad alcun fattore predittivo. Il meccanismo sotteso a tale fenomeno è legato al fatto che la cristallizzazione è un processo costituito da una fase di nucleazione iniziale seguito da una crescita

catalitica a partire dai nuclei. La formazione del primo nucleo in assoluto, ovviamente di una chiralità specifica, in presenza di agitazione meccanica, porta alla sua frammentazione in semi di cristallizzazione più piccoli, tutti della stessa chiralità, che crescendo conducono ad un insieme di cristalli omochirali.

Mentre questo esperimento, ed altri simili, darebbero un chiave di lettura al processo di formazione di sistemi omochirali durante la cristallizzazione, non spiegano tuttavia perché i sistemi biologici si siano evoluti con una precisa e totale selezione enantiomerica. Altri meccanismi potrebbero essere plausibili, operanti sia sulla Terra, che nello spazio. La possibile causa dell'omochiralità si sposta all'esterno del nostro pianeta, ad esempio, con l'osservazione che in alcuni meteoriti (es. meteorite di Murchinson, Australia, 1970) sono stati ritrovati degli amminoacidi, alcuni dei quali non noti sulla Terra, e tutti con uno sbilanciamento della miscela verso una delle due forme (generalmente la S) [5]. Tra le varie ipotesi formulate per spiegare questo ritrovamento, una abbastanza accreditata è quella della fotolisi in luce polarizzata circolarmente. Esperimenti hanno mostrato che l'irradiazione con luce polarizzata circolarmente (ad esempio destro-polarizzata) di una miscela racemica di amminoacidi, inducendo la rimozione specifica dell'enantiomero D, arricchisce la miscela nell'altro [6]. In realtà, la ricerca di stelle che emettano luce polarizzata circolarmente ha condotto a non molti risultati: in Orione una sorgente è stata identificata, ma la luce è nel campo delle radiazioni infrarosse, quindi ad energia troppo bassa per un'efficiente meccanismo di fotolisi.

Un meccanismo alternativo, che vede la luce come ingrediente per l'arricchimento di una miscela enantiomerica, è basato sull'effetto magneto-chirale. Quest'ultimo era stato ipotizzato da Wagniere e poi sperimentalmente dimostrato da Rikken e Raupach [7]. Quando la luce non polarizzata viene applicata parallelamente o anti-parallelamente ad un campo magnetico si ha una perturbazione chirale che produce lievi eccessi enantiomerici in miscele racemiche. L'entità dell'eccesso dipende dall'intensità del campo magnetico, per cui è ragionevole pensare che nello spazio in prossimità di alcuni corpi celesti, dove i campi magnetici possono essere ordini di grandezza più intensi che sulla Terra, questo tipo di effetto possa essere stato rilevante ai fini di una selezione chirale.

Tornando in ambito terrestre, altre combinazioni di campi fisici possono essere responsabili di induzione di chiralità macroscopica. E' sufficiente pensare alle forze di Coriolis ed al loro ruolo nel controllare la formazione di vortici (dai semplici mulinelli d'acqua ai ben più estesi uragani), aventi un senso di rotazione specifica in dipendenza dell'emisfero nel quale ci si trovi. Queste osservazioni hanno indotto vari ricercatori allo studio dell'influenza dei vortici sulla chiralità di sistemi in

grado di auto-organizzarsi in soluzione. Esperimenti condotti su molecole discoidali (porfirine) hanno mostrato che, facendo ruotare il recipiente contenente la soluzione col sistema in formazione, era possibile ottenere un controllo statistico della chiralità [8, 9]. Per chiarire meglio il ruolo della gravità e della rotazione, è, pertanto, interessante cercare di separare tali contributi. Mentre la rotazione è abbastanza semplice da controllare in un esperimento in laboratorio, sia in velocità che in senso, altrettanto non sembrerebbe per la gravità. Tuttavia, l'impiego di forti campi magnetici consente di creare forze magnetiche che localmente imprimono a soluzioni acquose una forza di gravità effettiva concorde a quella terrestre o opposta, passando per condizioni di levitazione [10]. Impiegando questo approccio, è stato possibile osservare come la molecola in soluzione possano strutturarsi dando aggregati con chiralità opposta quando il recipiente di reazione viene sottoposto a rotazione e si trova a quote diverse e specifiche dentro un magnete. Inoltre, questi esperimenti hanno mostrato come sia sufficiente l'applicazione della rotazione e del campo magnetico solo all'inizio del processo, perché si possa osservare una selezione completa della chiralità, confermando che la propagazione ed amplificazione sono importanti nella formazione di sistemi omochirali [11].

#### **4. Conclusioni**

La chiralità è una delle proprietà più intriganti della materia. La sua comparsa può avvenire a livello molecolare, propagarsi a livello meso-, micro e quindi macroscopico, fino a raggiungere la scala galattica. Abbiamo rapidamente osservato come la Natura abbia tratto vantaggio da questa proprietà per costruire sistemi in grado di riconoscersi selettivamente e dar luogo a funzioni altamente specifiche, come quelle operanti nei sistemi biologici.

A tal proposito, l'omochiralità, ovvero il riscontro di una sola delle due possibili forme enantiomere dei mattoni fondamentali della vita, gli amminoacidi e gli zuccheri, pone una domanda fondamentale alla quale ancora non è stata data una risposta definitiva. Varie sono le ipotesi, a partire da quelle in cui tale selezione è stata operata sul nostro pianeta, unitamente a quelle che invece prevedono un coinvolgimento di meccanismi extra-terrestri. Ogni esperimento in questo senso costituisce un avanzamento nel grado delle nostre conoscenze del problema, che probabilmente non ha una soluzione univoca.

## **Bibliografia**

- [1] Kelvin, W. T., Baron. (1904). *Baltimore lectures on molecular dynamics and the wave theory of light*. London, C. J. Clay and sons, Baltimore: Publication agency of the Johns Hopkins University
- [2] Barton, J. K., Danishefsky, A., Goldberg, J. (1984). Tris(phenanthroline)ruthenium(II): stereoselectivity in binding to DNA. *Journal of American Chemical Society*, 106 (7), 2172-2176.
- [3] Ueshima, R., Asami, T. (2003). Single-gene speciation by left–right reversal. *Nature*, 425, 679.
- [4] Kondepudi, D. K., Kaufman, R. J., Singh, N. (1990). Chiral Symmetry Breaking in Sodium Chlorate Crystallization. *Science*, 250(4983), 975-976.
- [5] Cronin, J. R., Pizzarello, S. (1997). Enantiomeric Excesses in Meteoritic Amino Acids. *Science*, 275(5302), 951-955.
- [6] Flores, J. J., Bonner, W. A., Massey, G. A. (1977). Asymmetric photolysis of (RS)-leucine with circularly polarized ultraviolet light. *Journal of the American Chemical Society*, 99(11), 3622-3625.
- [7] Rikken, G. L. J. A., Raupach, E. (2000). Enantioselective magnetochiral photochemistry. *Nature*, 405, 932.
- [8] Ribó, J. M., Crusats, J., Sagués, F., Claret, J., Rubires, R. (2001). Chiral Sign Induction by Vortices During the Formation of Mesophases in Stirred Solutions. *Science*, 292(5524), 2063-2066.
- [9] D'Urso, A., Randazzo, R., Lo Faro, L., Purrello, R. (2010). Vortexes and Nanoscale Chirality. *Angewandte Chemie*, 122(1), 112-116.
- [10] HFML, Nijmegen, Olanda: [www.ru.nl/hfml](http://www.ru.nl/hfml)
- [11] Micali, N., Engelkamp, H., van Rhee, P. G., Christianen, P. C. M., Sclaro, L. M., Maan, J. C. (2012). Selection of supramolecular chirality by application of rotational and magnetic forces. *Nature Chemistry*, 4, 201.

## **Lettere consigliate**

- Luisi, P. L. (2006). *The emergence of Life. From chemical origins to synthetic biology*. Cambridge University Press.
- Mason, S. (1982). *Molecular optical activity and the chiral discriminations*. Cambridge University Press.
- Wagnière, G. H. (2007). *On chirality and Universal Asymmetry. Reflections on image and mirror image*. Wiley-VCH.

## **Il gusto: dare un senso alla chimica**

**Gabriella Morini**

Università degli Studi di Scienze Gastronomiche Pollenzo – Bra  
(Cuneo)

E-mail: [g.morini@unisg.it](mailto:g.morini@unisg.it)

**Riassunto.** Siamo in grado di percepire un'ampia gamma di entità chimiche, ma qualitativamente esse suscitano un numero limitato di sensazioni gustative, gradevoli o meno, attraverso l'attivazione di recettori specifici. Indubbia è la rilevanza dei fattori genetici (innati) nel determinare i nostri comportamenti alimentari, ma le esperienze alimentari possono modificarli, a causa della rilevanza del cervello nello stabilire cosa ci piace o meno.

**Abstract.** We are able to perceive a wide range of chemical entities but, qualitatively, they evoke a few distinct taste sensations, pleasant or unpleasant, through the activation of specific receptors. Although innate preferences are important, food experience may mold eating behaviours, due to the relevance of brain in determining what we like or dislike.

### **1. Introduzione**

Il binomio alimentazione e chimica, data la diffusa chemofobia della società moderna, è visto quasi sempre in chiave negativa, dimenticando che l'uomo è un organismo *chemoeterotrofo*, cioè che si nutre attraverso l'ingestione e digestione di composti chimici, organici e non, utilizzati come tali (minerali, vitamine e altri nutrienti essenziali) o ossidati per ottenere energia. Quindi, il nostro cibo è e deve essere *chimico*.

Per riconoscere la sua composizione due dei nostri sensi sono, appunto, sensi chimici: l'olfatto e il gusto. L'olfatto ci permette di identificare alcuni composti, quelli volatili, a distanza, mentre il gusto è determinante nella scelta finale di ingoiare o meno un certo alimento, a seconda che questo ci piaccia o non ci piaccia. La componente edonica è così importante al punto che, in fondo, mangiamo solo quello che ci piace. In natura le necessità appagate generano piacere per spingerci

a soddisfare un bisogno, mentre quanto può esserci dannoso genera dolore o avversione. Nel caso del cibo, il piacere sta nelle complesse sensazioni generate dal "buon sapore" di un certo alimento che ci piace e quindi introduciamo nell'organismo, mentre l'avversione è nel "cattivo sapore" di un altro alimento che, una volta assaggiato non ci piace e quindi ci rifiutiamo di introdurre. E' l'elaborazione di tutte le informazioni conseguenti all'ingestione di un certo alimento, elaborazione che porta a due semplici risultati: benessere o malessere, che fissiamo nella memoria. A complicare il problema del piacere è la sua natura composita e le diverse cause che lo determinano. Nelle sue molteplici manifestazioni rientrano non solo fattori culturali, sociali e rituali, ma anche altri motivi, più soggettivi e psicologici, i quali fanno sì che solo l'attività cerebrale renda complessivamente ragione del gusto.

## **2. Sapore e gusto**

Quanto viene comunemente indicato come "sapore" è il risultato di un insieme di sensazioni tra loro connesse che il cibo induce e che possiamo schematicamente suddividere in sensazioni fisiche (temperatura, consistenza, umidità, frizione), sensazioni chimiche (gusto e olfatto) e sensazioni chemestetiche<sup>1</sup>.

Ciascuna sensazione è rilevata da specifici recettori, pertanto, in senso stretto, gusto andrebbe utilizzato solo per le sensazioni chimiche rilevate da cellule specializzate presenti nella cavità orale, le cellule gustative, sulle quali sono presenti recettori sensibili alle molecole contenute negli alimenti.

Malgrado siamo in grado di percepire un'ampia gamma di entità chimiche, qualitativamente esse suscitano un numero limitato di sensazioni gustative, attivando recettori specifici: dolce, umami, salato, grasso, amaro e acido [2, 3]. Umami è una parola derivata dal giapponese "umai", che significa delizioso, ed è il gusto associato al sale sodico degli amminoacidi L-glutammato (MSG) e L-aspartato (e a pochi altri composti, prevalentemente oligopeptidi ricchi in glutammato e aspartato). Spesso viene indicato come l'ultimo gusto, il che non può essere vero, in quanto ciò presupporrebbe un nuovo recettore. Ad essere nuovo, è il termine umami, scelto dal ricercatore giapponese che all'inizio del secolo scorso

---

<sup>1</sup> Le sensazioni chemestetiche sono sensazioni indotte chimicamente che non implicano l'attivazione dei recettori del gusto e dell'olfatto. Coinvolge altri recettori che possono essere attivati sia dalla temperatura (stimolo fisico) che da sostanze contenute in alcuni alimenti. Ad esempio il recettore dei vanilloidi TRPV1 è sensibile a temperature maggiori di 43°C e a composti quali la capsaicina e la piperina, mentre TRPM8 è attivato da stimoli freddi (temperature comprese tra 8 e 28°C) e dal mentolo e l'eucaliptolo. Quindi la chemestesi può essere definita come l'attivazione chimica di sensori per stimoli fisici, che segnalano un inesistente aumento di temperatura nella sensazione di piccante, o un illusorio abbassamento di temperatura, nel caso del mentolo e di altri composti freschi [1].

ha identificato i composti in grado di esercitare una sensazione diversa da quelle fino a quel momento descritte. Pur essendo poco noto, l'umami è forse il gusto che più differenzia l'essere umano dagli altri animali a noi molto vicini nella scala evolutiva [4], in quanto sensibili quantità di MSG ed altri composti dal gusto umami vengono rilasciate solo in seguito ad idrolisi proteica in carni fermentate e stagionate, a lunghe cotture, o in alimenti quali i formaggi e altre preparazioni ottenute per fermentazione, quindi in alimenti prettamente *umani*. Per comprendere quanto rilevanti nel gradimento di un alimento siano i composti umami, ecco cosa scrive Brillat-Savarin nella sua *Fisiologia del gusto* sull'osmazoma, nome di origine greca con cui veniva indicato quello che oggi sappiamo essere il glutammato ed altri composti dal gusto umami: *"Il maggior servizio che la chimica abbia reso alla scienza degli alimenti è la scoperta o piuttosto la determinazione dell'osmazoma ... scoperto dopo aver formato così a lungo la delizia dei nostri padri, può paragonarsi all'alcol, che ha ubriacato molte generazioni prima che si sapesse che poteva prodursi per mezzo della distillazione"* (Savarin, *Fisiologia del gusto*, meditazione V, 1826).

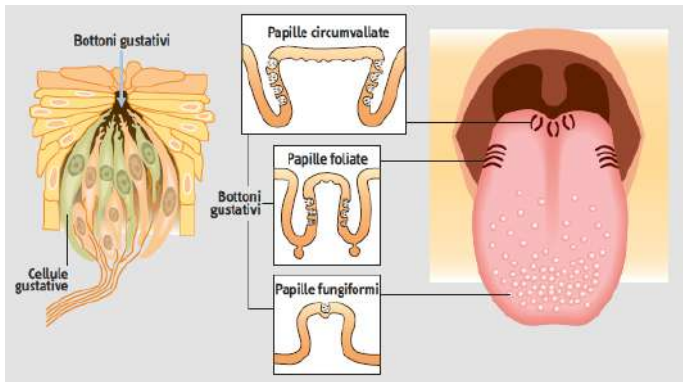
### **3 Il codice del gusto**

Il codice del gusto può sinteticamente essere così descritto: le sostanze dolci sono in genere gradite e di esse fanno parte i carboidrati, importante fonte energetica; l'umami è apprezzato e gli amminoacidi che costituiscono le proteine sono fondamentali per il nostro metabolismo (oltre che apportare calorie sono la sola fonte di N). L'apprezzamento del gusto salato è stato sviluppato dai mammiferi durante la loro evoluzione lontano dal mare per mantenere la concentrazione dello ione sodio (non molto diffuso in natura) a livelli accettabili. I grassi sono generalmente graditi da tutti gli animali e sono una importante fonte calorica (avendo il doppio delle calorie/g); prevalentemente i grassi alimentari sono costituiti da trigliceridi di acidi grassi a lunga catena. Invece, le sostanze amare possono essere accettate, ma solo in bassissime concentrazioni. La maggior parte delle sostanze amare sono prodotte dalle piante, le quali hanno evoluto la strategia di accumulare metaboliti secondari amari (quali polifenoli, flavonoidi, isoflavoni, terpeni, glucosinolati, etc.) per difendersi dagli erbivori e dai patogeni. Il gusto acido, che può essere segnale di frutti non maturi e di cibo avariato, può essere tollerato e gradito solo fino a un certo punto.

E' da notare che siamo in grado di rilevare sostanze amare in concentrazioni nell'ordine del micromolare, mentre dobbiamo arrivare a concentrazioni millimolari per rilevare il sapore dolce di zuccheri: perciò il sistema che permette la percezione dei diversi gusti si è evoluto in modo da rispondere a stimoli

potenzialmente tossici a concentrazioni molto basse, ma rispondendo agli zuccheri solo a livelli ai quali possono apportare una discreta quantità di calorie.

I recettori del gusto si trovano all'apice di cellule gustative strutturate a formare i bottoni gustativi (50-100 cellule in ciascuno), i quali sono distribuiti nelle diverse papille della lingua e del palato molle. Le papille circumvallate si trovano al fondo della lingua e nell'uomo contengono circa un migliaio di bottoni gustativi; le papille foliate sono presenti al limite latero-posteriore della lingua e contengono una dozzina di bottoni gustativi, mentre le papille fungiformi contengono pochi bottoni gustativi e si trovano principalmente sulla punta e, in quantità minore, fino ai 2/3 della lingua. Le papille filiformi (le più abbondanti) non hanno bottoni gustativi, ma sono coinvolte nelle percezioni tattili (Fig. 1).



**Figura 1.** Bottoni gustativi e loro distribuzione nelle papille gustative.

Recenti dati molecolari e funzionali hanno dimostrato che le diverse papille non sono selettive per un certo sapore e quindi la vecchia mappa dei sapori fondamentali va abbandonata (Fig. 2).

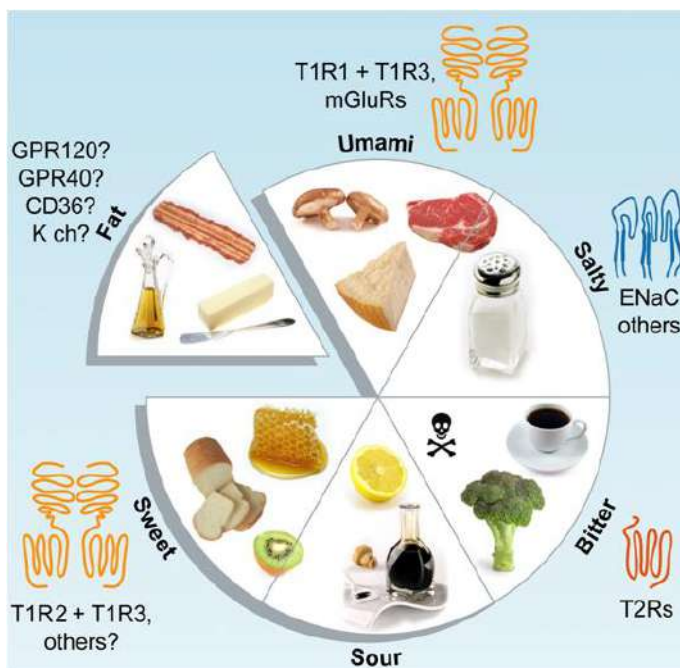


**Figura 2.** Mappa errata dei sapori fondamentali.



I recettori del gusto sono proteine transmembrana in grado di connettere l'esterno della cellula gustativa a contatto con la cavità buccale - dove si trovano le sostanze sapide - con l'interno della cellula nella quale, in seguito all'attivazione del recettore stesso, avvengono altri cambiamenti che generano lo stimolo nervoso che viene poi trasmesso al cervello.

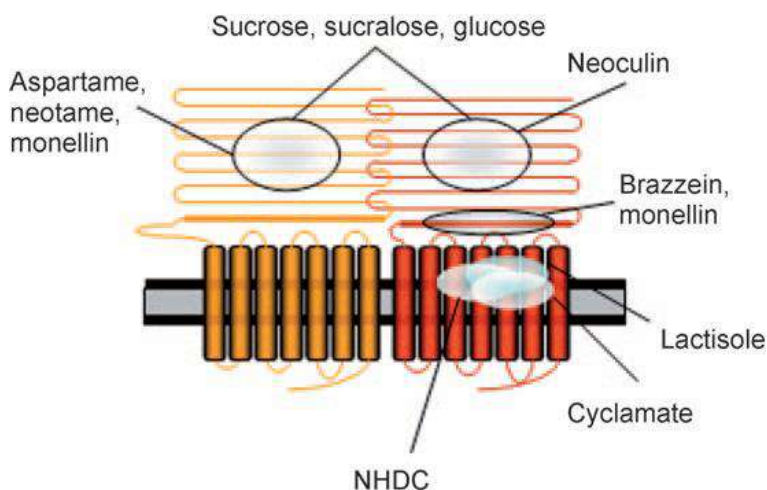
Ci sono due tipi di recettori transmembrana importanti per il gusto che differiscono nel modo in cui il segnale è trasmesso all'interno della cellula e tradotto in stimolo nervoso: i canali ionici e i recettori accoppiati a proteine G (G Protein Coupled Receptors, GPCRs) (Fig. 3, da rif. [3]).



**Figura 3.** I recettori coinvolti nell'identificazione dei sapori.

Appartengono alla classe dei canali ionici il recettore per il salato (sensibile allo ione  $\text{Na}^+$  ed in misura minore a  $\text{K}^+$ ) e il recettore per l'acido (sensibile allo ione  $\text{H}^+$ ). Maggiori sono le nostre conoscenze dei recettori di dolce, amaro e umami, che appartengono alla classe delle GPCRs. Per quanto riguarda il gusto dolce, è da notare che i composti dolci presenti in natura non sono molti, ma sono strutturalmente molto diversi tra loro, andando da piccole molecole quali zuccheri semplici, disaccaridi, amminoacidi e peptidi, alle proteine (quali brazzeina, taumatina e monellina). A questi si aggiungono alcuni composti di sintesi e loro

derivati appartenenti ad altre classi di composti organici che pure sono dolci: saccarina, ciclamato, acido sucrononico per citarne alcuni. La variabilità strutturale dei composti dolci ha per lungo tempo alimentato la discussione se vi fosse un solo recettore in grado di legare tutti questi composti o più recettori. Il dubbio ha trovato risposta solo dopo che la sequenza del genoma (umano e di altri mammiferi) è divenuta di pubblico dominio. Ad oggi è stato identificato un solo recettore per il sapore dolce, formato da due proteine (T1R2 e T1R3) che solo quando formano un eterodimero sono in grado di rispondere a tutte le sostanze dolci con cui il recettore è stato testato. Esso è in grado di fare ciò in quanto presenta diversi siti di legame che possono ospitare i vari ligandi [5]. Inoltre è stato dimostrato che è sempre il recettore T1R2-T1R3 a essere coinvolto nell'azione di sostanze in grado di inibire la percezione del sapore dolce, come il lactisole, il quale si lega alla parte transmembrana del recettore stesso, impedendone il corretto funzionamento (Fig. 4, da rif, [5]).



**Figura 4.** Inibizione del recettore transmembrana del sapore dolce.

E' stato anche possibile speculare su un altro fenomeno particolarmente importante: la sinergia che alcuni composti dolci esercitano usati in miscele: è stato suggerito [6] che un composto è attivo se si lega al suo sito di legame generando una certa risposta in termini di dolcezza relativa<sup>2</sup>, ma se nella cavità buccale è presente un altro composto che può legarsi a un sito diverso, la contemporanea

<sup>2</sup> La dolcezza relativa viene definita come  $[S] / [X]$  in cui  $[S]$  è la concentrazione di una soluzione standard di saccarosio e  $[X]$  è la concentrazione del composto in esame che risulta isodolce a quella dello standard.

occupazione dei due siti nel recettore porta all'esaltazione della risposta in modo sinergico. Questo fenomeno è particolarmente importante perché permette di usare quantità minori di sostanze dolcificanti per ottenere una stessa dolcezza relativa.

Il recettore del gusto umami è anch'esso un dimero, in analogia con quello del sapore dolce. Addirittura una subunità è in comune: infatti il recettore dell'umami è costituito da T1R1 e T1R3. I composti in grado di stimolare questo recettore nell'uomo non sono molti: l'L-glutammato e l'L-aspartato, mentre nel ratto tutti gli amminoacidi sono in grado di attivare il recettore. Anche nucleotidi purinici quali IMP e GMP (inosina-5'-monofosfato e guanosina-5'-monofosfato) hanno un blando gusto umami, ma soprattutto esercitano una notevole sinergia con l'L-glutammato, fatto scoperto e utilizzato dall'industria alimentare nella formulazione dei dadi ben prima dell'identificazione del recettore specifico.

L'identificazione del recettore del gusto grasso è recente ed ancora speculativa. Verosimilmente si tratta di recettori di acidi grassi a lunga catena (prodotto dell'idrolisi dei trigliceridi ad opera di una lipasi presente nella saliva), oltre che a componenti somatosensoriali legate alla texture e alla viscosità.

A differenza del gusto dolce e umami che si sono evoluti per selezionare positivamente un numero limitato di molecole, il gusto amaro ha dovuto assolvere al compito di prevenire l'ingestione di un numero molto elevato di composti tra loro diversi strutturalmente. Per il gusto amaro sono stati identificati circa 25 recettori funzionali appartenenti alla classe delle GPCR, indicati con T2Rs [7]. Questi recettori sono alquanto diversi tra loro, con una variabilità negli amminoacidi che li compongono che va dal 10 al 75%. È proprio questa variabilità che consente a pochi recettori di rispondere a migliaia di composti amari strutturalmente molto diversi.

E' importante notare che recentemente i recettori di dolce, umami e amaro sono stati identificati anche nell'apparato digerente e nelle vie respiratorie [8], dove la loro funzione è probabilmente di regolazione della digestione e della respirazione ed attualmente oggetto di molti studi.

#### **4. Variabilità genetica ed ecologia del gusto**

Non tutti percepiscono i gusti nello stesso modo e ciò dipende dalla variabilità genetica, l'età e da fattori ambientali. L'uomo è un onnivoro ed un buon onnivoro deve sapersi adattare a mangiare cose diverse a seconda dell'habitat e delle situazioni. Le variazioni genetiche che riguardano i recettori del gusto (polimorfismi) sono molto frequenti e particolarmente studiate sono quelle del recettore del dolce e dell'amaro, soprattutto in relazione alla loro influenza sul tipo di dieta, la quale a sua volta, nel lungo termine, può portare a delle modificazioni genetiche. Recentemente è stata identificata la componente genetica che fa sì che

alcuni individui percepiscono come amari gli steviosidi, i composti della stevia che hanno sapore dolce e che sono ora ammessi come dolcificanti intensivi anche in Europa [9]. Uno dei più eleganti esempi di adattamento è rappresentato da quanto è stato scoperto in alcune popolazioni dell'Africa sub-Sahariana, dove lo staple food è costituito dalla manioca, la quale contiene glucosidi ciano genici, tossici e molto amari. La preparazione tradizionale della manioca è complessa per poter eliminare questi composti rendendola edibile. La detossificazione è raramente completa, quindi l'alimento ottenuto è ancora amaro. E' da notare che i glucosidi cianogenici sono tossici anche per il parassita della malaria. Si è scoperto che il recettore dell'amaro che riconosce questi composti (T2R16) è mutato e poco attivo nelle popolazioni che vivono in queste zone, quindi il gusto amaro di questo cibo è da loro meglio tollerato, aumentandone il loro consumo, conferendo una certa resistenza verso la malaria, dove questa malattia è endemica [10].

Altro classico esempio della variabilità tra individui è la sensibilità all'amaro di sostanze quali la feniltiocarbammide (PTC) e il 6-n-propiltiouracile (PROP), dovuta alla presenza e funzionalità di un particolare recettore dell'amaro, TAS2R38 [11]. Si è anche scoperto che chi è sensibile a queste due sostanze presenta una maggiore densità di papille fungiformi e quindi è in grado di percepire maggiormente sia l'amaro che il dolce.

## **5. Preferenze innate ed educazione del gusto**

Volendo fare un semplice esperimento per capire qual è il bagaglio gustativo di un uomo dovuto al suo patrimonio genetico, possiamo osservare un neonato e le sue espressioni facciali quando vengono offerti stimoli gustativi diversi per concludere che vi è una generale innata preferenza per il sapore dolce, umami, grasso e salato mentre sono sgraditi l'amaro e l'acido. Anche nei bambini più grandi possiamo notare una sensibilità particolare al dolce, al grasso e al salato, con avversione per l'amaro e l'astringente, fatto che rende difficile far accettare loro le verdure che contengono metaboliti secondari che sono amari o astringenti<sup>3</sup>. E' però anche facile notare come l'avversione verso questi gusti diminuisca sia con l'età che con la consuetudine a mangiare alimenti caratterizzati da questi sapori, quasi che il nostro organismo impari ad apprezzare questi composti via via che ne ha più bisogno, dato che molti di essi hanno funzione positiva nel nostro organismo. Infatti nell'uomo le preferenze innate e le tendenze comportamentali (i fattori genetici) sono modificate dall'esperienza. Anche i cibi tradizionali - in particolare le piante

---

<sup>3</sup> L'astringenza è dovuta alla presenza di sostanze, tra cui i polifenoli (alla quale appartengono i tannini) che interagendo con alcune proteine della saliva ne riducono le proprietà lubrificanti [13].

non domesticate alle quali, tra l'altro, sono spesso riconosciute proprietà medicinali - sono connotati da particolari sapori che li rendono unici, ma anche graditi solo a chi è stato abituato ad assumerli.

Questo margine di possibilità nell'educare il gusto è particolarmente importante in quanto è stato dimostrato come la percezione individuale di dolce e amaro associata all'assunzione di vegetali sia la principale forza motrice al consumo dei vegetali stessi, favorendo o meno il consumo di cibi ricchi di micronutrienti e antiossidanti che il nostro organismo necessita con l'invecchiamento e ai quali di recente la scienza si sta notevolmente interessando. Il percorso di educazione del gusto inizia già durante la gravidanza, in quanto i gusti degli alimenti mangiati dalla madre arrivano al feto attraverso il liquido amniotico, continua con l'allattamento e lo svezzamento [12] ed oggi molta rilevanza viene data a questo lungo percorso che porta a determinare le preferenze individuali di ciascuno, al punto da essere considerato come una via "alternativa" all'educazione alimentare classica per contrastare l'obesità.

Potremmo pensare che questo sia vero anche per altri animali, ma l'uomo, oltre ai suoi sensi e alla sua memoria, ha una cultura, un patrimonio personale e collettivo che conserva l'esperienza di quanti sono venuti prima di lui, favorendo i processi di adattamento. Il cibo è uno degli elementi principali di questo puzzle di stimoli e conseguenti risposte che portano all'adattamento essendo il legame più profondo che abbiamo con il mondo esterno. L'uomo ha imparato ad utilizzare quanto il territorio in cui viveva gli offriva, in alcuni casi solo dopo opportuni trattamenti che rendessero commestibile un alimento tossico, e/o mettendo a punto preparazioni culinarie che rendessero assimilabili e appetibili alcune derrate (per esempio le granaglie trasformate in pasta). La cucina è, da questo punto di vista, un processo di assimilazione culturale conseguente ad una assimilazione corporea. Per questo è più corretto dire che l'uomo è un onnivoro che mangia selettivamente di tutto, selezionando non solo in base ai suoi recettori gustativi, ma anche tenendo conto dell'elaborazione del cervello che, come abbiamo detto, decide cosa è buono e cosa non lo è [14]. Inoltre nel lungo periodo siamo stati in grado di identificare alimenti che portavano con sé composti chimici con effetti positivi sulla salute. In particolare l'uso di molte piante spontanee e altri prodotti vegetali con funzioni terapeutiche è noto da tempo e soprattutto il gusto amaro è tradizionalmente associato alle proprietà benefiche dei vegetali, al punto che erbe molto amare vengono considerate non più un alimento, ma consumate in piccole quantità come una medicina [15].

## **6. Conclusioni**

Il senso del gusto ha avuto il ruolo di guidare le nostre scelte alimentari che ci hanno portato ad essere ciò che siamo, dato che la selezione (positiva o negativa) di alimenti ha (e ha avuto) importanza sull'adattamento ad un determinato ambiente e quindi sull'evoluzione, nonché sullo stato di nutrizione e quindi nel definire uno stato di salute o di malattia. Ma il nostro passato, anche prossimo, è sempre stato del fabbisogno e ci ha portato verso il gradimento e la ricerca di cibi ricchi di energia, nonché alla capacità di saper gestire anche a livello metabolico la scarsità di cibo. La società dei consumi e dell'abbondanza ci ha trovato impreparati nella gestione dell'eccesso: i nostri sensi si sono evoluti meno velocemente di quanto sia cambiato il modo di approvvigionarci, di mangiare e di vivere. Comprendere questo significa educare il gusto di conseguenza, richiamando quindi in causa l'importanza dell'attività del nostro cervello nel determinare cosa ci piace e non ci piace.

## **Bibliografia**

- [1] Nilius, B., Appendino, A. (2011). Tasty and healthy TR(i)Ps. *EMBO Reports*, 12(11), 1094-1101.
- [2] Roper, S.D., Chaudari, N. (2017). Taste buds: cells, signals and synapses. *Nature Reviews Neuroscience*, 18, 485-497.
- [3] Chaudari, N., Roper, S.D. (2010) The Cell Biology of Taste. *The Journal of Cell Biology*, 190(3), 285-296.
- [4] Breslin, P.A.S. (2013) An Evolutionary Perspective on Food and Human Taste. *Current Biology*, 23(9), R409-R418.
- [5] Behrens, M., Meyerhof, W., Hellfritsch, C., Hofmann, T. (2011). Sweet and Umami Taste: Natural Products, Their Chemosensory Targets, and Beyond. *Angewandte Chemie International Edition*, 50(10), 2220-2242.
- [6] Morini, G., Bassoli, A., Temussi, P. A. (2005). From Small Sweeteners to Sweet Proteins: Anatomy of the Binding Sites of the Human T1R2\_T1R3 Receptor. *Journal of Medicinal Chemistry*, 48(17), 5520-5529.
- [7] Meyerhof, W., Born, S., Brockhoff, A., Behrens, M. (2011). Molecular biology of mammalian bitter taste receptors. A review. *Flavour and Fragrance Journal*, 26(4), 260-268.
- [8] Finger, T.E., Kinnamon, S.C. (2011). Taste isn't just for taste buds anymore. *F1000 Biology Reports*, 3(20).
- [9] Riso, D., Morini, G., Pagani, L., Quagliariello, A., Giuliani, C., De Fanti, S., et al. (2014). Genetic signature of differential sensitivity to stevioside in the Italian population. *Genes & Nutrition*, 9(3), 401.
- [10] Soranzo, N., Bufo, B., Sabeti, P. C., Wilson, J. F., Weale, M. E., Marguerie, R., et al. (2005). Positive Selection on a High-Sensitivity Allele of the Human Bitter-Taste Receptor TAS2R16. *Current Biology*, 15(14), 1257-1265.

- [11] Riso, D. S., Mezzavilla, M., Pagani, L., Robino, A., Morini, G., Tofanelli, S., et al. (2016). Global diversity in the TAS2R38 bitter taste receptor: revisiting a classic evolutionary PROPosal. *Scientific Reports*, 6, 25506.
- [12] Morini, G. (2009). L'educazione del gusto nella prima infanzia. *Area Pediatrica*, 1, 43-48.
- [13] Ma, S., Lee, H., Liang, Y., Zhou, F. (2016). Astringent Mouthfeel as a Consequence of Lubrication Failure. *Angewandte Chemie International Edition*, 55(19), 5793-5797.
- [14] Morini, G., et al. (2015) Il gusto degli Italiani, In *La Cultura del Cibo*, vol. III, *Il cibo in Italia* (p. 365). Torino: UTET Grandi Opere.
- [15] Morini, G. (2015). Il gusto e la salute. In Morini, G., Sironi, V. A, *Le declinazioni del cibo* (pp. 15-22). Roma: Laterza.

## **La forma della Terra dai graffiti ai droni**

**Giovanni Randazzo**

Dipartimento di Scienze Matematiche e Informatiche, Scienze Fisiche e Scienze della Terra (MIFT), Università degli Studi di Messina

E-mail: [grandazzo@unime.it](mailto:grandazzo@unime.it)

**Riassunto.** L'Uomo, fin dalla preistoria, ha avuto la necessità di riprodurre il proprio ecumene terrestre. L'evoluzione della cartografia attraversa veloce la nostra storia, lasciando un percorso culturale continuo, contrassegnato da vere e proprie pietre miliari. Dalla geografia degli albori, concentrata sulla definizione delle regole, si passa a una cartografia religiosa e quindi a quella pratica, finalizzata alla scoperta di nuove terre. Con la progressiva conquista dello spazio cambia il punto di vista del cartografo, restituendo delle forme sempre più precise e dettagliate, passando dall'aerofotogrammetria alle immagini satellitari, per ritornare all'estremamente dettagliato con l'utilizzo dei moderni droni.

**Abstract.** Man, since prehistoric times, had the need to reproduce his own terrestrial ecumene. The evolution of cartography quickly across our history, showing a continuous cultural path, marked by very important milestones. From the geography of the beginning, focused on the definition of the rules, we pass to a religious cartography and then to a practical one, finalized at the discovery of new lands. With the progressive conquest of spaces, the cartographers' point of view changes, drawing shapes always more detailed, moving from aero photogrammetry to the satellite images, to be back, at the extremely little, with the use of modern drones.

*... the lines on the map  
Moved from side to side  
(Us and Them - Pink Floyd)*



## **1. Il perché delle prime forme**

Non è facile riassumere in poche pagine l'evoluzione che, in termini di forma, la geografia ha compiuto attraverso i secoli, modellando i contorni degli stati, dei continenti e dello stesso mondo in seguito all'acquisizione di nuove conoscenze. Uno degli aspetti più affascinanti delle mappe antiche è proprio la misura in cui sono sbagliate, rendendole così diverse da quelle moderne.

Baricco scriveva che "le mappe ritraggono non tanto il mondo, quanto il cervello degli umani che lo abitano".

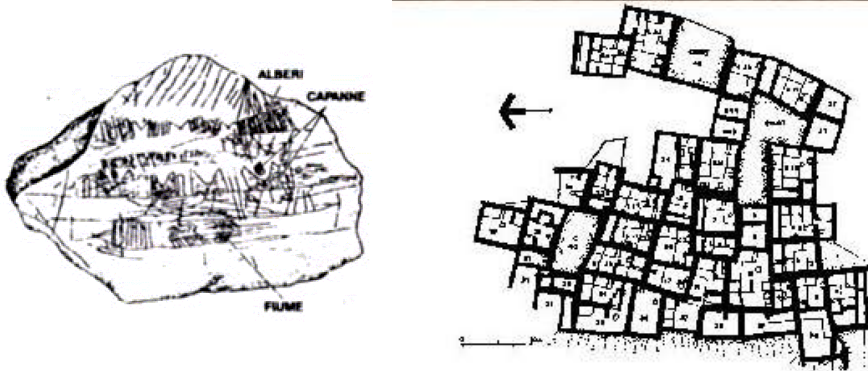
La "forma" nella scienza della Geografia è sostanza: nella stessa etimologia della parola non si fa mistero della finalità della ricerca, focalizzata sul disegno della terra che, nella sua accezione dinamica, la Geomorfologia, mira allo studio della forma della terra, tenendo pure conto della sua evoluzione nel corso delle ere geologiche e sotto l'incessante azione antropica.

Sarebbe interessante sapere cosa avesse in mente lo scalpellino di Mezin, 15.000 anni fa, quando su un sasso dava forma al territorio che lo circondava informandoci che il suo villaggio si trovava compreso tra un fiume e un bosco che occupava un versante fin dalle pendici, oppure di quell'altro nostro antenato che 6.200 anni fa sulla parete di una grotta disegnava, in Anatolia (a Catal-Hyük), un susseguirsi di abitazioni connesse da strade che si intersecavano ortogonalmente, come indicazione stradale della sua metropoli in fieri (Fig. 1).

## **2. Le prime forme: tra geometria e leggenda**

I primi geografi, nel senso più reale del termine, probabilmente furono i greci, in verità, matematici e scienziati a tutto tondo che applicavano le proprie conoscenze alla definizione della forma del mondo. Chiaramente tendevano a disegnare la loro immagine del mondo, ma per questo simbolica, sintetica e chiara, riportando tutto a forme semplici e geometriche.

Il loro campo d'azione si limitava al Mediterraneo che proprio un matematico e filosofo messinese, Dicearco, nel 300 a.C., iniziò a inquadrare all'interno di due linee ortogonali: un parallelo diaframma (tra le chiusure) che partiva appunto dallo Stretto di Gibilterra, dalle Colonne d'Ercole per passare dallo Stretto di Messina, toccare Atene e finire a Rodi e un meridiano perpendicolare a esso passante sempre per Rodi. E' evidente che con queste semplici linee definiva la propria geografia dell'anima, dando l'input prodromico allo sviluppo dei paralleli e dei meridiani che oggi noi usiamo per squadrare il mondo.



**Figura 1.** A sinistra, graffito di Mezin e a destra quello di Catal-Hyük.

Le Colonne d'Ercole rappresentano un punto certo nella nostra interpretazione del mondo dei greci, anche se sulla loro esatta ubicazione esiste una potenziale disputa dovuta proprio alla forma dello stesso Mediterraneo.

Se pensiamo che 17.000 anni fa, ancora in piena era glaciale wurmiana, il Mediterraneo era un centinaio di metri meno profondo: la linea delle paleo coste doveva corrispondere, più o meno, all'attuale isobata dei 120 m.

Ora provate a pensare dove fate il bagno e cercate di immaginare dove dovrete mettere l'ombrellone se la costa arrivasse dove oggi c'è la profondità di 120 m: un ragusano o un marsalese si troverebbero a Malta o molto vicino alle coste tunisine. Ecco il punto è proprio questo, rimossi 120 m al Mediterraneo, Capo Lilibeo a Marsala e Cap Bon in Tunisia, sarebbero estremamente vicini e nel breve tratto di mare spunterebbero numerosi isolotti (le Colonne d'Ercole?).

Del resto Platone in un dialogo del Crizia parla dell'esistenza di un'isola a tre gambe nel centro del Mediterraneo, forma appunto simile a quella di una Sicilia limitata dal perimetro dell'isobata di 120 m. E poi anche Claudio Tolomeo dalla sua Geografia lascia emergere un'isola estremamente sproporzionata e allungata verso Sud, quasi a voler avvalorare cartograficamente la forma platonica (o wurmiana?) dell'isola (Fig. 2).

Ma queste sono solo fantasticazioni che rimangono tra scienza, storia e mito, riempiendo di suggestioni i sogni di tutti i potenziali odissei.



**Figura 2.** A sinistra, perimetro della Sicilia durante l'ultimo massimo glaciale (Wurm) che durò da 115.000 a 11.700 anni fa, provocando un abbassamento dei livelli dei mari di oltre 120 m (la temperatura media dell'aria era di circa 4,5° rispetto all'attuale). A destra la Sicilia in una carta di derivazione tolemaica (1520), rappresentata con un orientamento della punta di Capo Lilibeo proiettata a Sud verso l'Africa, difforme dalla realtà attuale.

I Romani riportano tutto alla concreta realtà, producendo molto prosaicamente quella che, con assoluta certezza, può essere definita la prima carta stradale della storia: la tavola Peutingeriana. Questa tavola, che deve il nome all'antiquario che la scoprì intorno al 1500, è un documento lungo quasi 7 m e alto 33 cm, rappresentante l'intero sistema viario dell'impero.

È un mondo completamente deformato, ridotto praticamente alla sola dimensione orizzontale e fatto di fitti reticoli stradali, intervallati da città, porti, stazioni di posta, in mezzo ai quali spicca Roma, simboleggiata da una matrona seduta sul suo trono. Il punto di forza della *Tabula*, sta però nelle distanze di tutte le strade che tra un punto e l'altro sono scrupolosamente annotate, come appunto in una moderna mappa stradale.

Probabilmente i Romani sono i primi a passare dalla geografia meramente speculativa a quella applicativa.

### **3. La forma del mondo tra religioni e navigazione**

Con la fine dell'impero romano, nel 476 d.C., tutte le grandi opere che erano state create dal genio di scienziati e stimati pensatori, andarono in gran parte perdute, essendo ancora lontana l'invenzione della stampa e non essendo ancora iniziata l'opera degli amanuensi che di lì a poco avrebbero iniziato a riportare ai posteri le conoscenze del passato.

Agli inizi del Medioevo l'affermarsi del Cristianesimo come religione dominante stravolse completamente la cartografia.

Si arriva a mettere in dubbio la sfericità della Terra e a considerare assurda l'esistenza degli antipodi. Tutti erano convinti che la zona equatoriale della Terra (la zona Torrida) fosse inabitabile. Questo atteggiamento influenza anche l'aspetto delle carte geografiche che, nel Medio Evo, non hanno più il fine di rappresentare, nel modo più fedele possibile la forma delle terre emerse, bensì quello di schematizzare la loro suddivisione concettuale, indipendentemente dal loro aspetto. Regioni notissime come l'Italia e la Grecia venivano distorte fino a renderle irriconoscibili, ed il rapporto tra le dimensioni fu completamente trascurato. Le terre appaiono popolate da mostri terribili e animali meravigliosi; appare il Paradiso Terrestre e luoghi leggendari come Gog e Magog.

Al posto dell'ecumene tolemaico troviamo le rappresentazioni di Cosma detto Indicopleuste (cioè "viaggiatore nelle terre dell'India"), un mercante e scrittore del VI secolo di origine alessandrina come Tolomeo. Il suo mappamondo però è una sorta di tabernacolo, nel quale si distinguono la Terra, il mare Oceano che la circonda, e il Paradiso terrestre, che è la terra creata da Dio per gli uomini, da cui essi sono stati cacciati dopo il peccato di Adamo, ma che non per questo ha smesso di esistere come luogo geografico concreto.

Fin verso il XII secolo, furono delineati dei grossolani mappamondi circolari, talvolta anche più rozzi di quelli dei filosofi ionici, chiamati mappamondi a T; rappresentavano, con la parte verticale il Mediterraneo e con quella orizzontale da un lato Tana, l'antico nome del fiume Don, e dall'altra il Nilo, dividendo così in tre parti il mondo allora conosciuto: Europa, Asia, Africa.

Nel buio periodo medievale, tutti i saperi rimangono chiusi all'interno di conventi e abbazie, lasciando i profani nella più oscura ignoranza, luoghi dove però l'importante opera degli amanuensi permetterà di sanare quella lacuna che era stata propria dei secoli precedenti.

Se però in Occidente, nel Medioevo, dato il generale regresso delle scienze, anche la Geografia e la Cartografia decadde, l'opera geografica di Tolomeo si diffuse in Oriente per opera dei geografi Arabi.

Gli Arabi si espansero in tutto il Mediterraneo meridionale, lungo le coste settentrionali dell'Africa, fino a occupare la Spagna e la Sicilia, portando scienza e conoscenza, arricchendo le città di palazzi e fontane, ma soprattutto avvalendosi di uomini di cultura e geografi appunto, il più importante dei quali è probabilmente El Idrisi che viaggiò in Sicilia intorno al 1100.

El Idrisi è un geografo – esploratore, infatti, se nel passato i Greci si limitarono a costruire il quadro tecnico all'interno del quale disegnare il mondo conosciuto, gli Arabi furono dei viaggiatori curiosi che annotarono usanze, acquisirono conoscenze e descrissero luoghi.

Nel 1154 El Idrisi completò quello che a noi è noto come Libro di Ruggero che mette insieme la summa di quanto era possibile desumere dalle opere arabe, riproducendo alcune regioni africane e asiatiche del tutto inesplorate a quel tempo.

A partire dal XIII sec., dopo il perfezionamento e la diffusione della bussola, che permise di apprezzare direzioni e distanze tra le località costiere delle due sponde del Mediterraneo, vennero realizzate le prime carte nautiche o carte da navigare e sorsero delle vere e proprie scuole cartografiche come quelle "italiane" (genovese e veneziana) e spagnole (catalana e maiorchina). In queste "carte al compasso" (cioè secondo la rosa dei venti) le posizioni delle singole località non erano fissate in base alle latitudini e alle longitudini, ma in base alle distanze itinerarie, riportate su una rete di linee direttrici che partivano da un punto centrale e rappresentavano le direzioni della rosa dei venti, incrociandosi con le direzioni di altre rosette disposte in circolo intorno alla prima.

#### **4. La geografia a supporto della conquista del mondo**

La riscoperta in Europa della Geografia di Claudio Tolomeo, nel XV secolo, dette un importante impulso al recupero dei metodi della geografia matematica.

Alla fine del quindicesimo secolo, quando si aggiunsero sulle mappe xilografate e incise su rame i caratteri a stampa, per produrre i primi atlanti, coesistevano tre differenti tradizioni, ognuna delle quali in competizione con le altre: le credenze del Medioevo cristiano sulla piattezza della terra, le teorie classiche o tolemaiche di tipo "geometrico" e le storie riferite dai naviganti o dai viaggiatori.

Se la cartografia terrestre e quindi il disegno del mondo conosciuto, era influenzata da un lato da elaborazioni derivate da preconcetti di natura religiosa e dall'altro da rappresentazioni del territorio unicamente finalizzate ad una "cristallizzazione" ispirata dal senso del possesso, viceversa la cartografia nautica dal momento stesso della sua nascita, da quando, cioè cominciò ad acquisire le fondamentali nozioni dell'orientamento, si indirizzò verso un'*imago mundi* unicamente e concretamente finalizzato alle strette necessità del raggiungimento delle mete prefissate.

Il 1500 è caratterizzato da una nuova grande opera geografica: la *Cosmographia* di Sebastian Münster (1489-1552), pubblicata nel 1544 a Basilea e riprodotta in stampa in 44 edizioni fino al 1650. Con quest'opera, suddivisa in sei libri, Münster tentò di esporre le grandi conoscenze geografiche a un pubblico vasto: infatti, l'opera non era stata scritta in latino bensì in tedesco. Egli descriveva minuziosamente tutte le terre conosciute, accennando seppure brevemente anche alle ultimissime terre scoperte del nuovo mondo.

Il XVI secolo è il periodo in cui la rinata cartografia trova la sua finalizzazione. La necessità di mostrare i possessi dei grandi sovrani prevale sulle limitazioni religiose e la stampa permette una diffusione delle opere, sconosciuta fino ad allora.

Mercatore, Ortelius e i Blaue, padre e figlio, ci restituiscono atlanti bellissimi, dettagliati e precisi, ritorna quindi non solo un segno cartografico sostenuto da una profonda conoscenza della geometria, ma anche un disegno ricco di particolari, necessari a comprendere l'importanza della casa reale o dell'imprenditore committente.

La committenza non era semplicemente dettata da necessità edonistiche, ma era ispirata alla stessa necessità di ampliare i confini della conoscenza, soprattutto per fini commerciali.

Si sviluppa così la scienza del disegno della forma della terra che da un lato recepisce le continue conoscenze che vengono acquisite dalle esplorazioni e dalle conquiste del nuovo mondo, dall'altro registra la forma e le caratteristiche morfologiche dei nuovi territori sempre più distanti dal mondo noto fino a pochi secoli prima.

Con la scoperta del Polo Sud, nel 1912, che vide l'intrecciarsi dell'azione di tre uomini di straordinaria capacità (Robert Falcon Scott, il testardo, Ernest Henry Shackleton, l'eroe e Roald Amudsen, il perfetto) possiamo dire che si conclude la grande epopea della corsa alla conoscenza del mondo per mezzo della navigazione via mare e si apre a un nuovo punto di vista: lo spazio.

## **5. Alla ricerca della forma perfetta**

Già dagli aerostati verso la fine del 1800 era stato possibile osservare la superficie terrestre dall'alto, ma con l'imporsi dell'aviazione già nel corso della prima Guerra Mondiale verranno fatte osservazioni "dall'alto" che cambiano completamente il nostro modo di vedere la terra.

Fino ad allora la sfericità della terra era stata dimostrata con esperienze empiriche indirette, come per esempio "l'abbassamento" del comignolo di una nave che naviga verso l'orizzonte, ma solo il volo e l'osservazione della terra dall'alto permette di apprezzarne direttamente la forma "sferica".

Nel XX secolo lo studio della forma della terra subisce un'accelerazione, prima con l'aerofotogrammetria che ci permette di avere una visione stereoscopica della superficie terrestre e poi con l'avvento dei satelliti che ci permette di monitorarne dall'alto la sua dinamica.

Oggi le immagini satellitari ci permettono diversi tipi di analisi, ripetute, di vasti territori, sfruttando i diversi sensori montati, mentre le aerofotogrammetrie restituiscono puntualmente immagini di aree limitate; con i primi abbiamo la possibilità di avere un monitoraggio continuo, con un dettaglio limitato che

difficilmente, per usi civili, arriva a un quadrato inferiore di 5-10 m di lato, mentre con i secondi possiamo osservare in modo più dettagliato, comunque non sotto il metro quadrato, superfici delimitate.

Con l'avvento e il progresso della tecnologia *remote sensing*, insieme ai programmi di *image processing*, sono emersi nuovi metodi per lo sviluppo di sistemi di monitoraggio, con la possibilità di collezionare dati ad alta frequenza temporale, basso costo e precisione spaziale. Tra questi gli *Unmanned Airborne o Aerial Vehicles* (UAV; in italiano Aeromobili a Pilotaggio Remoto - APR), i droni, rappresentano un'importante alternativa, con numerosi vantaggi, alle piattaforme tradizionali installate su aerei o elicotteri.

La sicurezza della missione, la ripetitività dei voli, la riduzione dei costi e minori limitazioni dovute alle condizioni meteo aprono un nuovo campo allo studio delle forme del territorio.

Questi forniscono un solido supporto per acquisire e produrre informazioni collegabili ai dati raccolti sul campo o alle immagini satellitari, creando una connessione tra diverse scale spaziali che possono essere facilmente omogeneizzate in una qualsiasi piattaforma GIS (*Global Information System*). A ulteriore vantaggio di questi aviogetti di piccola dimensione gioca la reale capacità di acquisire dati e informazioni uniche in maniera estremamente flessibile.

In questo sistema fortemente in evoluzione un altro input importante è stato dato dalla miniaturizzazione dei sensori e degli apparecchi fotografici e dal rapido miglioramento della qualità delle immagini.

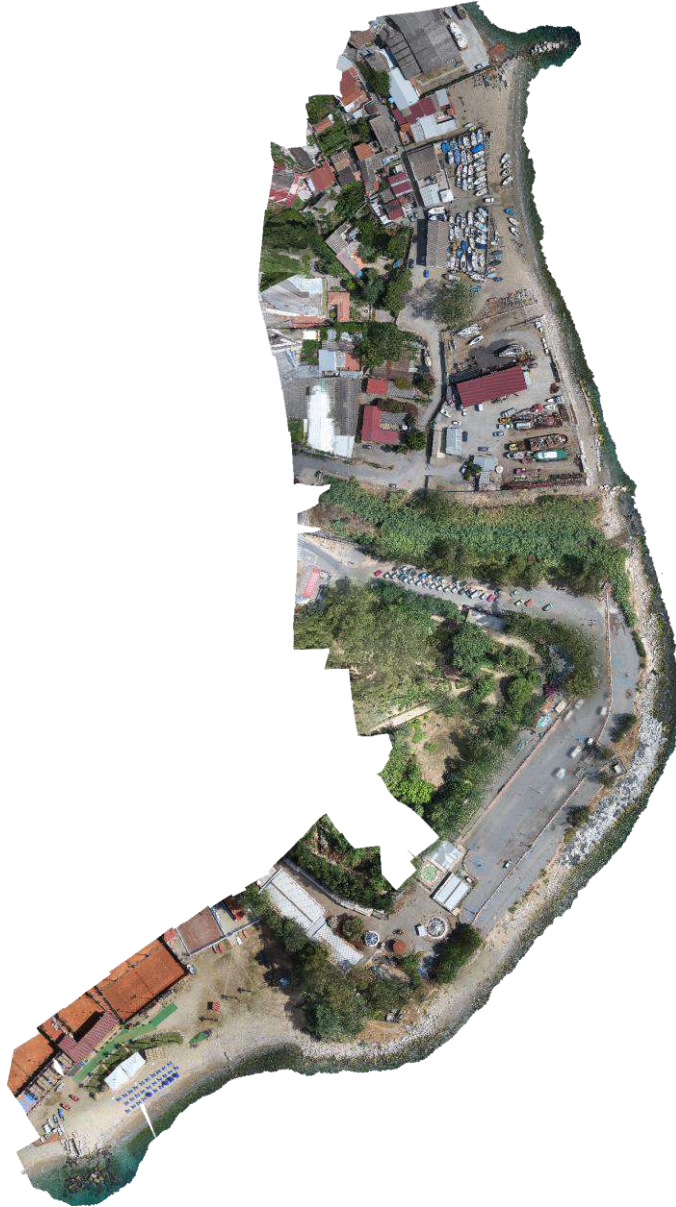
Per classificare le attrezzature utilizzabili mediante droni, possiamo considerare da un lato le video/foto camere e dall'altro i diversi sensori che è utile raggruppare in funzione del sistema di acquisizione dei dati che può essere attivo o passivo. Sensori passivi (termocamere e spettrocamere) misurano naturalmente le radiazioni riflesse o emesse dall'obiettivo da analizzare, mentre i sensori attivi (laser scanner o LiDAR) emettono radiazioni e misurano la frazione riflessa dall'obiettivo da analizzare.

Il primo prodotto disponibile da APR è l'ortofoto (Fig. 3) che rappresenta il risultato di un processo aerofotogrammetrico e permette un'analisi descrittiva del territorio, nonché l'apprezzamento, anche quantitativo, di aspetti botanici e agronomici.

Dall'ortofoto deriva il DEM (*Digital Elevation Model*) che è usato spesso come termine generico al posto di DTM (*Digital Terrain Model*), senza specificare il tipo di elevazione del terreno (naturale o antropica) considerata nella modellizzazione.

A differenza del DEM, il Modello Digitale del Terreno (DTM) fornisce informazioni di carattere quantitativo e qualitativo relative alla superficie terrestre,

decurtata dalla copertura arborea ed antropica, permettendo di quantizzare la reale morfologia del terreno e della sua evoluzione (Fig. 4).



**Figura 3.** Ortofoto di un'area costiera di Messina: Annunziata – Baby Park.





**Figura 4.** A sinistra, Digital Elevation Model, con, sulla sinistra, la scala delle elevazioni e a destra Digital Terrain Model che separa terreno da strutture antropiche e vegetazione.

## 6. Conclusioni

Nel corso dei secoli l'Uomo ha sempre sentito l'esigenza di disegnare la forma del proprio universo, evidenziandone diversi aspetti che andavano dalla concretizzazione di teorie geometriche, alle rivendicazioni religiose, alla necessità di spostamento su terra e su mare fino alla mera necessità di definire l'esistenza e la proprietà di un determinato areale.

Se per modificare il disegno delle terre emerse, sono stati necessari millenni, nel corso dell'ultimo paio di secoli i confini interni si sono rapidamente evoluti a seguito di conflitti (*the lines on the map/Moved from side to side*) più o meno estesi.

Oggi, in campo scientifico, la ricerca è mirata a definire sistemi di rilevamento delle forme terrestri, quanto più precise possibili al fine di comprendere i processi superficiali che modificano la terra e provvedere alla loro modellizzazione al fine di prevederli e prevenirli.

L'analisi dei movimenti di versante, la dinamica di un corso d'acqua o di una linea di riva, in un contesto urbano spesso sviluppatosi, in modo assolutamente irrispettoso delle condizioni di equilibrio naturali, costituiscono delle modifiche della superficie terrestre la cui conoscenza, valutazione e monitoraggio sono indispensabili per la nostra stessa sopravvivenza.

Proprio in questo campo oggi lo studio delle forme sta cercando di spingersi alla ricerca di quelle che possano resistere con maggiore resilienza all'azione dell'uomo.

## Bibliografia – Sitologia

Campbell, T. (1981). *Mappe Antiche*. Sugarco Editore

[www.arcetri.atro.it](http://www.arcetri.atro.it)

[www.cronologia.leonardo](http://www.cronologia.leonardo).

[www.ilsileno.it](http://www.ilsileno.it)

[www.imparareconlastoria.blogspot.it](http://www.imparareconlastoria.blogspot.it)

[www.instoria.it](http://www.instoria.it)

[www.scuolafilosofica.it](http://www.scuolafilosofica.it)

## **Alberi molecolari: i dendrimeri, dai primi esempi alle applicazioni più recenti**

**Scolastica Serroni**

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

E-mail: [sserroni@unime.it](mailto:sserroni@unime.it)

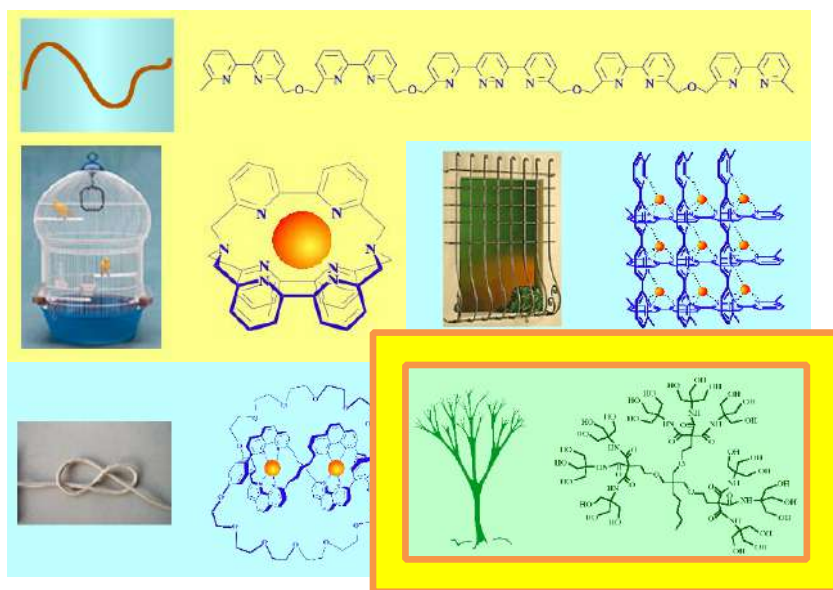
**Riassunto.** L'interesse scientifico per i dendrimeri è senza dubbio testimoniato dal numero di pubblicazioni che li riguardano (più di 20.000 dalla fine degli anni 80 ad oggi). I dendrimeri sono specie caratterizzate da una struttura ramificata nelle tre dimensioni che ricorda quella di un albero, il nome deriva infatti dal greco "déndron" che significa appunto albero. La peculiare struttura di queste specie si riflette nella possibilità di modularne le proprietà in funzione delle loro dimensioni, topologie, natura chimica delle cavità e dei gruppi terminali; il numero di informazioni che così possono essere inserite in tali specie li rende particolarmente versatili. Dopo l'interesse iniziale verso la sintesi di dendrimeri di generazioni sempre più grandi e con gruppi funzionali diversi, l'interesse scientifico ha iniziato a riguardare anche le loro possibili applicazioni nei settori più diversi. Questa breve review riporta una introduzione sulle strategie di sintesi e degli esempi di applicazioni nei campi della fotosintesi artificiale e della nanomedicina.

**Abstract.** Dendrimers constitute nowadays a major field of research that has already generated more than 20 000 publications. Dendrimers have a highly branched treelike 3-D architecture. They are synthesized by step-by-step strategies, affording perfectly defined and highly reproducible structures. Their name comes from two Greek words, déndron, which translates to "tree", and méro, which translates to "part". The peculiar structure of dendrimers allows to insert in these species a lot of information in term of dimensions, topology, chemical nature of the cavities and terminal units. This possibility makes these molecules smart, and indeed they have been used in a lot of applications. This review

article reports a general introduction on synthetic strategies and some examples of synthesis and applications in artificial photosynthesis and nanomedicine.

## 1. Introduzione

L'evoluzione delle strategie di sintesi e delle tecniche di analisi strutturale ha reso possibile la trasformazione della figura del chimico che, da puro osservatore della natura è diventato un ingegnere a livello molecolare: sono state sintetizzate specie le cui strutture molecolari ricordano quelle di oggetti macroscopici quali fili, gabbie, griglie nodi, alberi (Fig. 1).

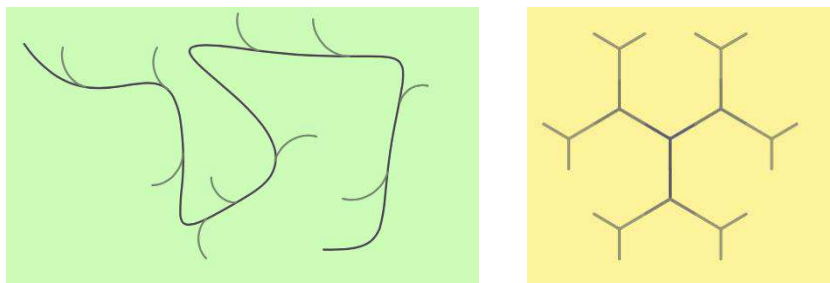


**Figura 1.** Rappresentazione di alcune particolari strutture molecolari.

In particolare il termine *dendrimer* (dal greco *dendron* = albero) indica una particolare struttura molecolare che si ramifica nelle tre dimensioni a partire da un *core* centrale ricordando appunto la struttura di un albero.

I dendrimeri, pur derivando concettualmente dalla stessa concezione dei polimeri iper-ramificati - la ripetizione di un'unità strutturale ramificata - sono il risultato di strategie sintetiche diverse che si riflettono in proprietà diverse proprie dei due tipi di specie:

1. I polimeri iper-ramificati sono ottenuti per polimerizzazione di un monomero ramificato, presentano strutture irregolari e ricche di difetti;
2. I dendrimeri sono il risultato di "condensazioni" ripetitive della stessa unità ramificata e sono caratterizzati da strutture definite e altamente regolari (Fig. 2).



**Figura 2.** Rappresentazione schematica di un polimero iper-ramificato (a sinistra) e di un dendrimero (a destra).

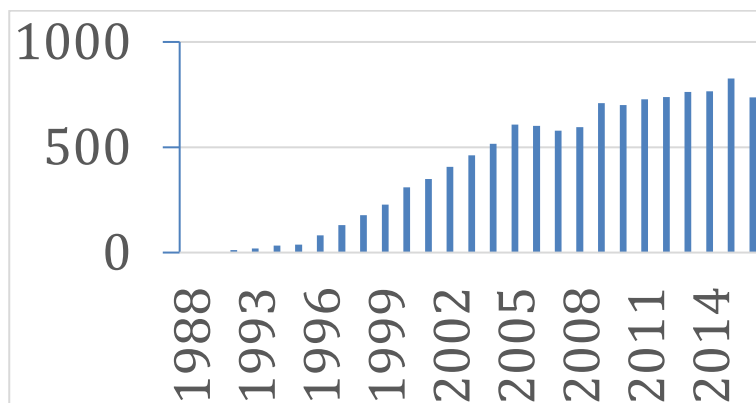
Mentre un dendrimero può essere isolato come un singolo composto monodisperso, i polimeri sono sempre miscele di molecole diverse le cui masse molecolari sono distribuite attorno ad un valore medio; un'ulteriore differenza da sottolineare riguarda la crescita di queste specie, mentre un polimero può crescere teoricamente in modo illimitato, un dendrimero si ferma, per motivi sterici, ad una certa generazione.

In un sistema dendritico è possibile distinguere, oltre al core centrale, le diverse unità ripetitive che definiscono le diverse generazioni del dendrimero (Fig. 3).



**Figura 3.** Rappresentazione di un dendrimero in cui sono evidenziati il core e le diverse generazioni.

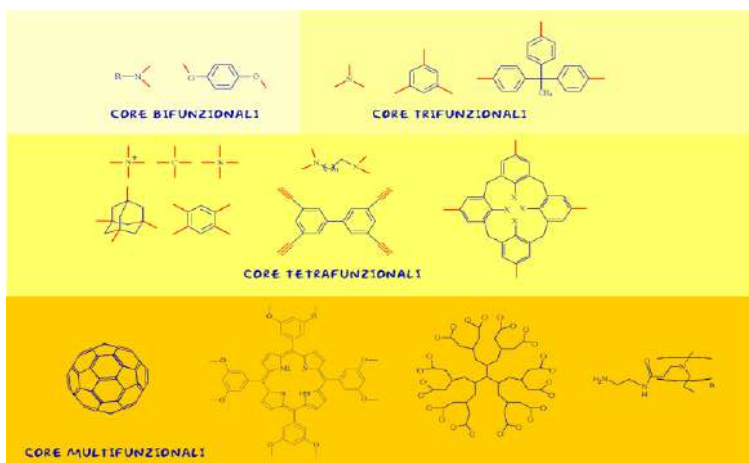
Il crescente interesse verso questo tipo di sistemi è inequivocabilmente testimoniato dall'andamento del numero di pubblicazioni riguardanti tale settore apparse in letteratura negli ultimi anni (Fig. 4) [1, 2].



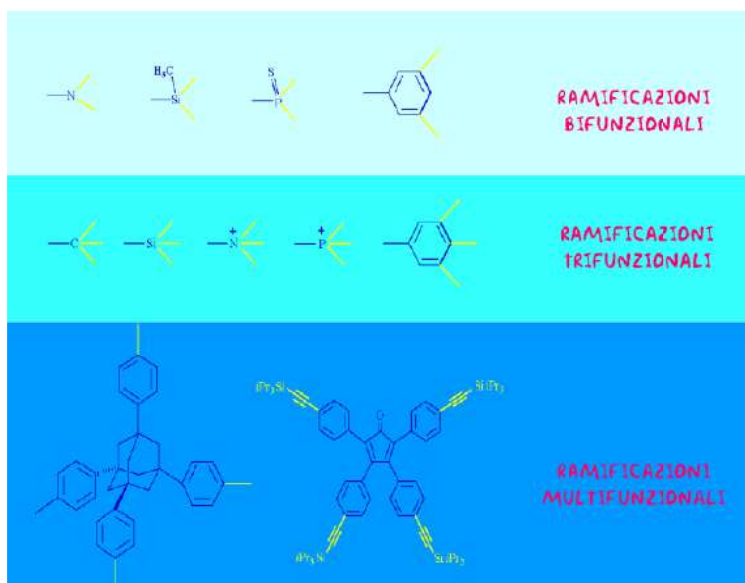
**Figura 4.** Numero di pubblicazioni riguardanti dendrimeri (ISI web of Science).

## 2. Sintesi di sistemi dendritici.

I primi dendrimeri apparsi in letteratura sono di natura organica [3]. Nelle Figure 5 e 6 sono riportati, a titolo di esempio, alcuni gruppi fra i più utilizzati come core e ramificazioni.



**Figura 5.** Esempi di core.



**Figura 6.** Esempi di ramificazioni.

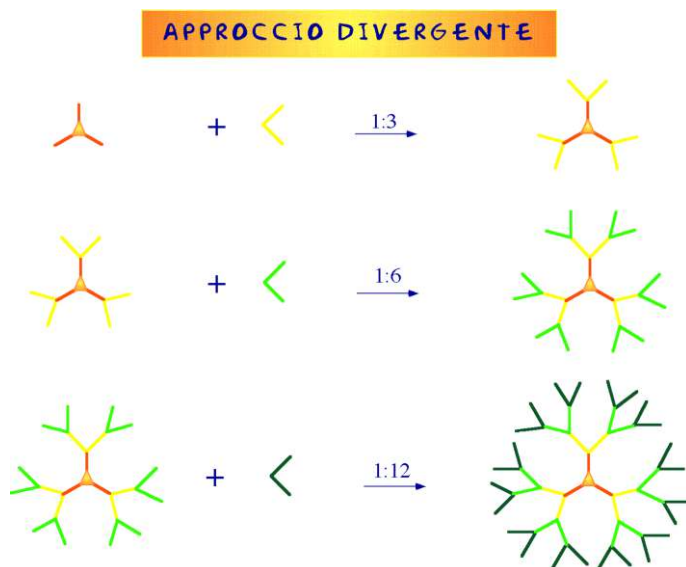
Più recentemente i progressi compiuti nella chimica di coordinazione hanno permesso la sintesi di dendrimeri contenenti centri metallici.

I complessi metallici sono caratterizzati da una precisa geometria molecolare legata al numero di coordinazione dello ione metallico centrale ed, in alcuni casi, alla struttura rigida dei leganti.

Tali composti presentano inoltre peculiari proprietà spettroscopiche e redox (assorbimento della luce visibile, luminescenza e processi di riduzione ed ossidazione a potenziali accessibili) che possono conferire alla struttura dendritica interessanti funzioni (come per esempio la possibilità di studiare processi di trasferimento energetico e/o elettronico).

### 2.1 Sintesi divergente

In questo tipo di approccio il dendrimero si costruisce a partire dal core per aggiunta successiva delle diverse unità ripetitive. In particolare il core polifunzionale reagisce con adeguati building blocks per dare il dendrimero della I<sup>a</sup> generazione. Se le unità periferiche contengono ancora dei siti reattivi, o se sono possibili delle reazioni che li introducano, il dendrimero della I<sup>a</sup> generazione può reagire ulteriormente ed il processo può essere iterato per ottenere le generazioni successive. Una rappresentazione di questo tipo di approccio è riportata in Figura 7.

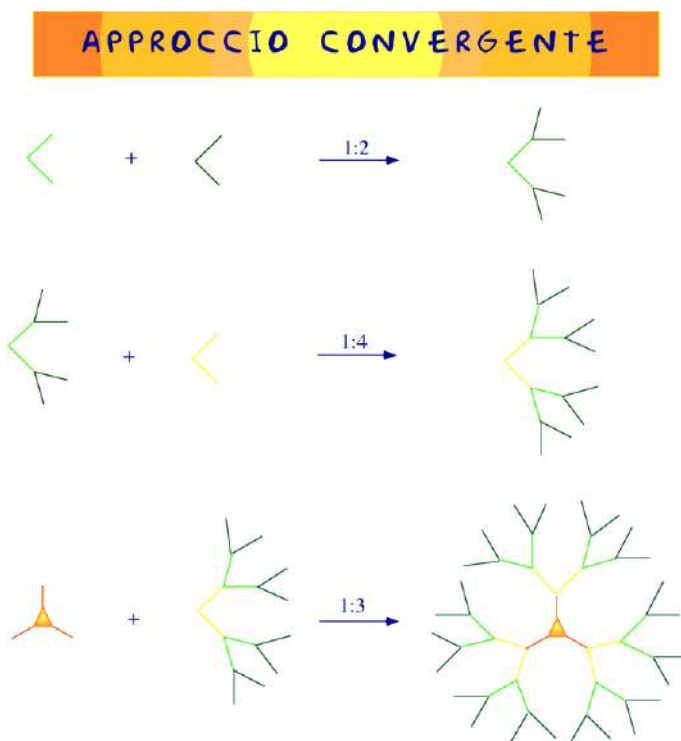


**Figura 7.** Rappresentazione schematica di una metodologia divergente.

Una caratteristica significativa di tutti gli approcci divergenti è il rapido aumento del numero dei siti reattivi alla periferia del dendrimero. Ciò può portare a dei potenziali problemi nel processo di crescita. Qualsiasi reazione incompleta dei gruppi terminali può causare delle imperfezioni e dei fallimenti nei passaggi successivi. Inoltre, per prevenire le eventuali reazioni laterali e per forzare la reazione a completezza, si usano in genere grandi eccessi di reagenti e questo ovviamente complica i processi di purificazione.

## 2.2 Sintesi convergente

Questo approccio sintetico è schematizzato in Figura 8.



**Figura 8.** Rappresentazione schematica di una metodologia convergente.

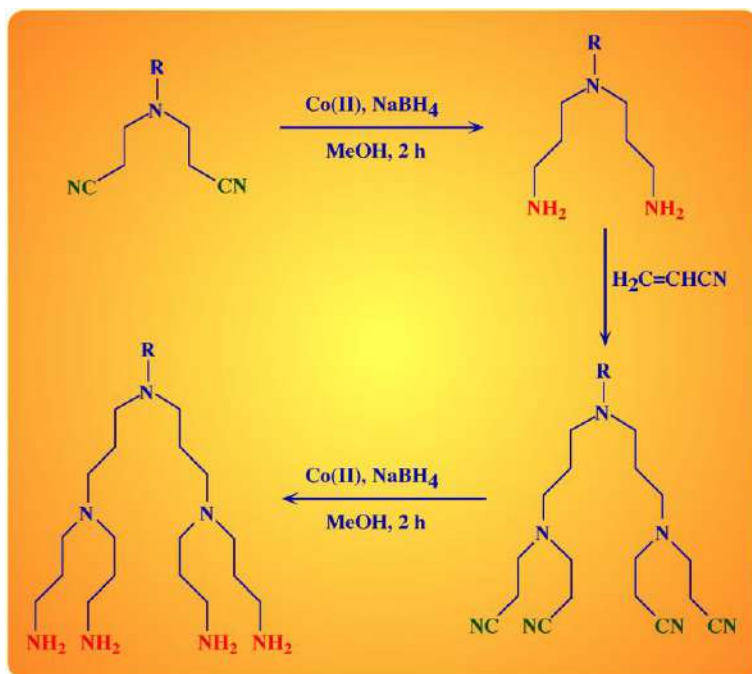
In questo tipo di approccio la struttura dendritica si costruisce a partire dalla periferia e, passaggio dopo passaggio, la sintesi è progettata in modo da utilizzare un numero limitato di siti reattivi; si costruiscono così le ramificazioni che poi vengono fatte reagire con il core.



Al fine di chiarire meglio le differenze fra i due tipi di approccio ed evidenziarne con maggiore chiarezza le rispettive potenzialità sono di seguito riportati e discussi alcuni esempi di letteratura.

### 2.3 Confronto fra approccio divergente e convergente

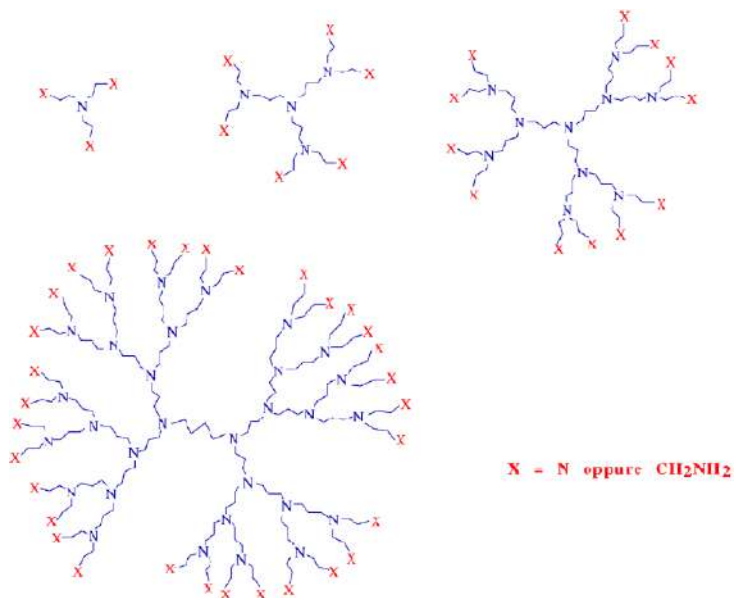
Il primo esempio di sintesi iterativa è stato riportato da Vögtle nel 1978, anche se lo scopo principale del lavoro era la sintesi di molecole che potessero fungere da recettori [4].



**Figura 9.** Schema sintetico di dendrimeri polipropileniminici (PPI).

La sintesi riportata in Figura 9 si basa sulla cianoetilazione delle ammine con acrilonitrile in una reazione di addizione di Michael, seguita dalla riduzione chimica dei cianuri al fine di ripristinare in periferia le funzioni amminiche. La riduzione chimica dei nitrili ha come reazione secondaria la rottura delle catene laterali. Successivamente lo stesso Vögtle ha messo a punto un metodo di riduzione più semplice [5]. Nel 1993 due gruppi di ricerca, uno tedesco e l'altro olandese, hanno pubblicato, praticamente in contemporanea, un miglioramento della sintesi delle polipropilenimine (PPI) funzionalizzate alla periferia con nitrili o ammine.

Tale procedura si basa sulla idrogenazione ( $P = 8 \text{ atm}$ , TA, in presenza di Nichel-Raney) dei nitrili in ammine. Tale miglioramento ha consentito la sintesi di sistemi analoghi di generazione elevata (Fig. 10) [6, 7].



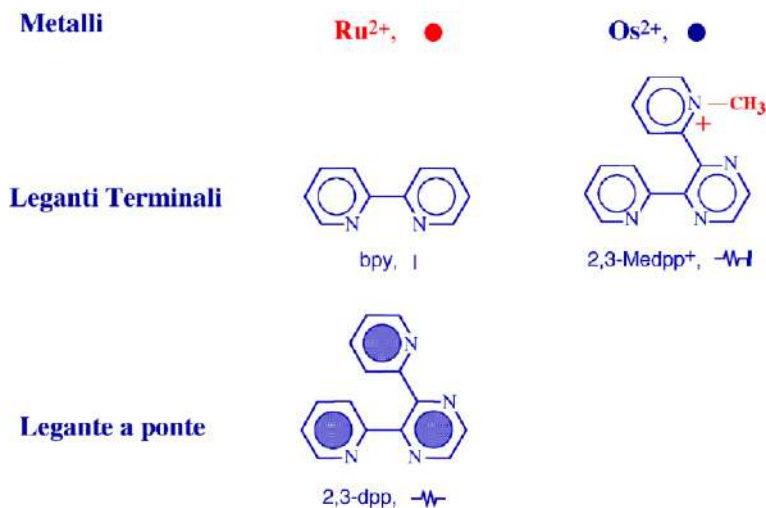
**Figura 10.** Esempi di poliimmine aventi come core  $\text{NH}_3$  o  $\text{NH}_2(\text{CH}_2)_4\text{NH}_2$ .

Nel campo della chimica di coordinazione l'approccio divergente è stato utilizzato con successo nella sintesi di dendrimeri contenenti fino a ventidue centri metallici [8]. I componenti utilizzati e le loro rappresentazioni grafiche sono riportati in Figura 11.

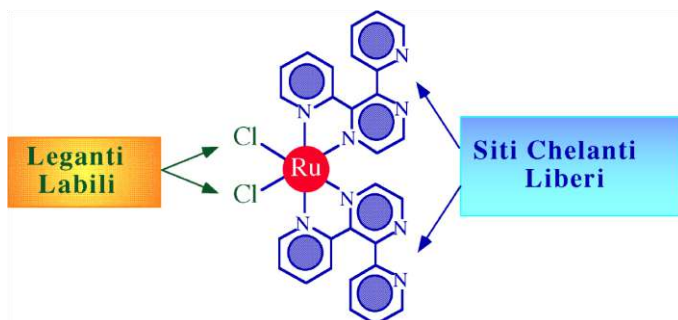
Per poter condurre con successo una sintesi divergente sarebbe auspicabile poter disporre di building blocks bifunzionali, nella chimica di coordinazione un building block versatile dovrebbe contenere leganti labili che possano essere opportunamente sostituiti da adeguati siti chelanti e siti di coordinazione ancora liberi per poter coordinare nuovi centri metallici. Un esempio è riportato in Figura 12.

Sfortunatamente un complesso di questo tipo non si può isolare in quanto si tratta di una specie autoreattiva nelle condizioni di preparazione (i cloruri di un'unità verrebbero sostituiti dai siti chelanti presenti su un'altra), per superare questo tipo di problema gli autori hanno pensato di proteggere una delle due funzioni reattive.

Tale scopo è stato raggiunto metilando uno dei due siti chelanti del legante a ponte 2,3-dpp. Tale reazione trasforma il legante a ponte in un legante terminale (2,3-Medpp<sup>+</sup>, Fig. 11).

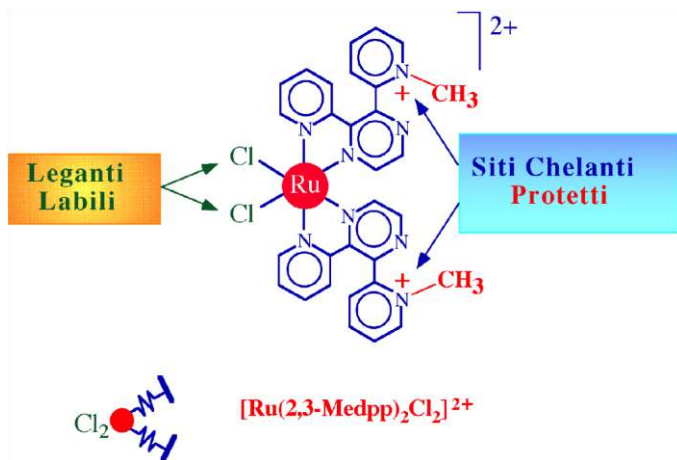


**Figura 11.** Metalli e leganti utilizzati nella sintesi di dendrimeri metallici.



**Figura 12.** Building block bifunzionale.

Il nuovo legante così preparato è stabile nelle condizioni di preparazione dei suoi complessi ed è stato infatti possibile sintetizzare il building block riportato in Figura 13.



**Figura 13.** Rappresentazione schematica del complesso  $[\text{Ru}(2,3\text{-Medpp})_2\text{Cl}_2]^{2+}$ .

Tale building block si è rivelato particolarmente versatile in quanto è stato possibile sfruttarne dapprima la reattività dovuta alla presenza dei cloruri facendolo reagire con opportuni substrati leganti (in condizioni in cui la protezione del sito chelante è risultata essere stabile), sono stati così ottenuti sistemi "chiusi" contenenti nelle posizioni periferiche dei siti di coordinazione "bloccati" dalla presenza dei metili. La reattività di questi ultimi siti è stata quindi ripristinata mediante una reazione di transalchilazione con 1,4-diazabicyclo[2.2.2]ottano che ha fornito sistemi aventi nella periferia siti di coordinazione nuovamente disponibili per la reazione con adeguati centri metallici. La strategia di sintesi divergente messa a punto utilizzando questo interessante building block è riportata nella Figura 14.

È interessante sottolineare che ogni complesso "aperto", contenente cioè siti chelanti liberi, così come evidenziato nella Figura 14, può essere utilizzato come core in opportuni approcci convergenti. Per esempio il core mononucleare  $[\text{Ru}(2,3\text{-dpp})_3](\text{PF}_6)_2$  e l'analogo complesso di Os -  $[\text{Os}(2,3\text{-dpp})_3](\text{PF}_6)_2$  - sono stati utilizzati con successo nella sintesi convergente di sistemi decanucleari (Fig.15). Come evidenziato nello schema, all'interno di queste strutture supramolecolari, i metalli possono occupare tre diversi siti topologici:

1. centrale: occupato dal metallo Mc proveniente dal complesso utilizzato come core;
2. intermedio: occupati dai metalli Mi che occupano la posizione centrale del complesso trinucleare utilizzato come ramificazione;

3. periferico: occupati dai metalli Mp che occupano le posizioni periferiche nel complesso trinucleare.

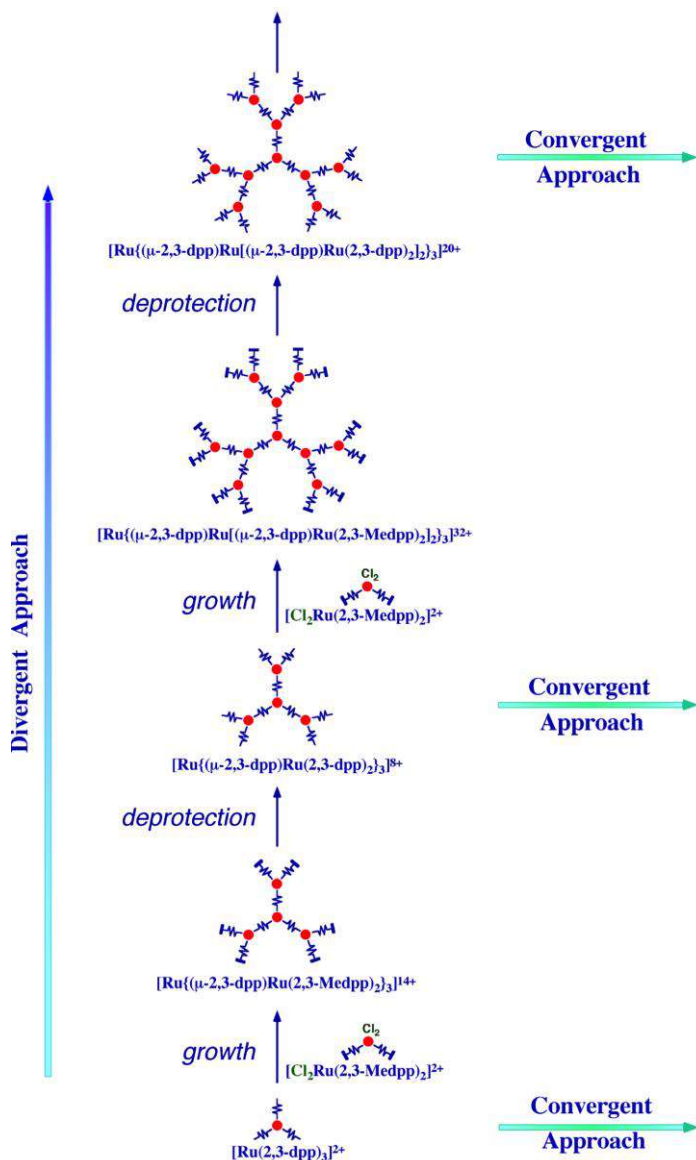
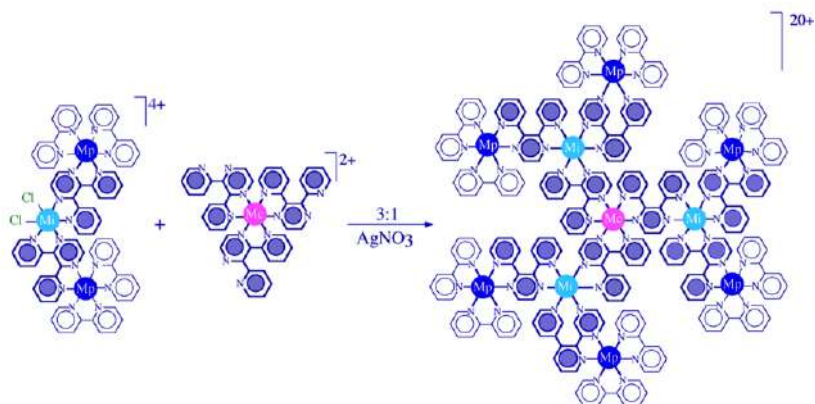


Figura 14. Sintesi divergente usando  $[\text{Ru}(2,3\text{-Medpp})_2\text{Cl}_2]^{2+}$  come building block.



**Figura 15.** Sintesi convergente di sistemi decanucleari usando  $[\text{Ru}(2,3\text{-dpp})_3](\text{PF}_6)_2$  e  $[\text{Os}(2,3\text{-dpp})_3](\text{PF}_6)_2$ .

Risulta quindi evidente che esiste un controllo sintetico sulla topologia del sistema, cioè la scelta opportuna dei building block di partenza si traduce nella topologia del sistema decanucleare ottenuto.

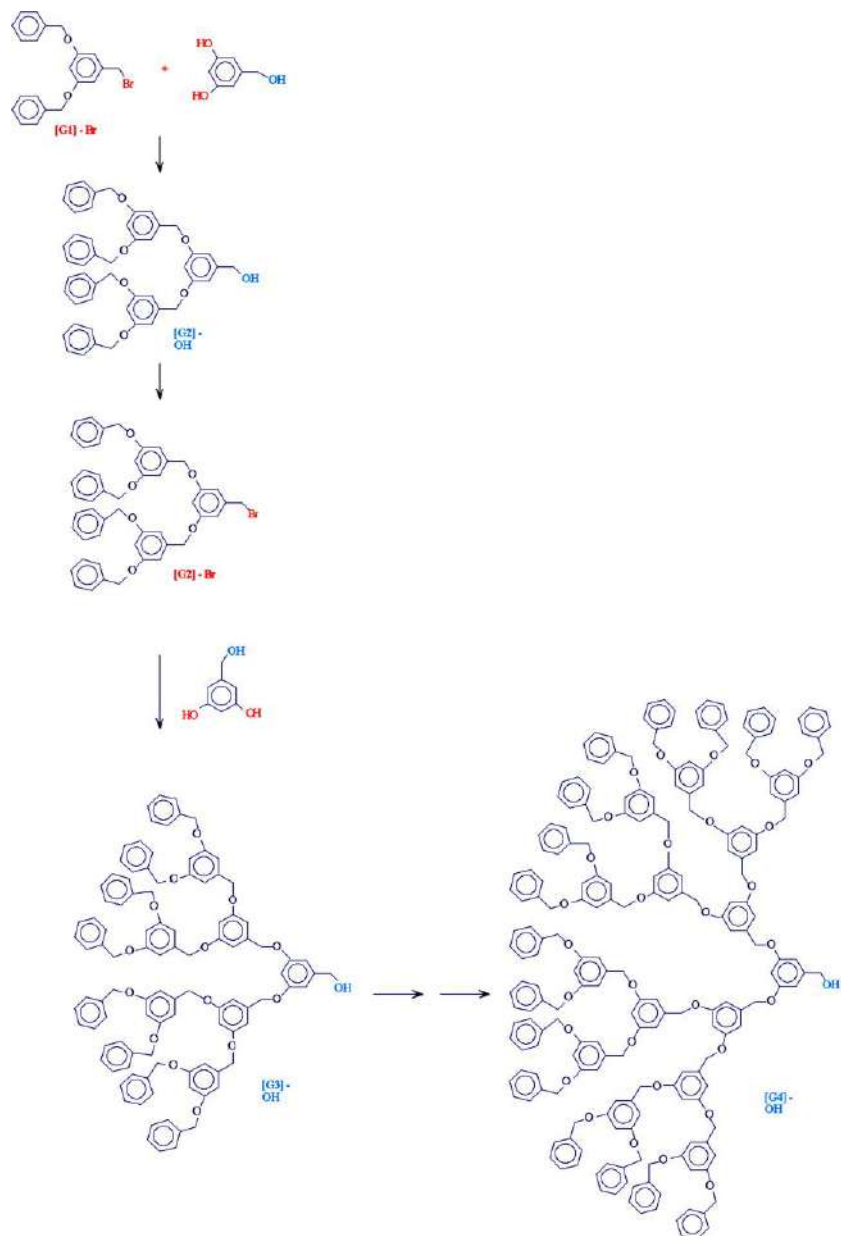
Il primo esempio di approccio convergente si deve a Fréchet [9].

I passaggi chiave della sintesi delle ramificazioni consistono nella reazione di bromuri benzilici con 3,5-diidrossibenzilalcol. Ciò permette di ottenere l'alcol benzilico della generazione successiva.

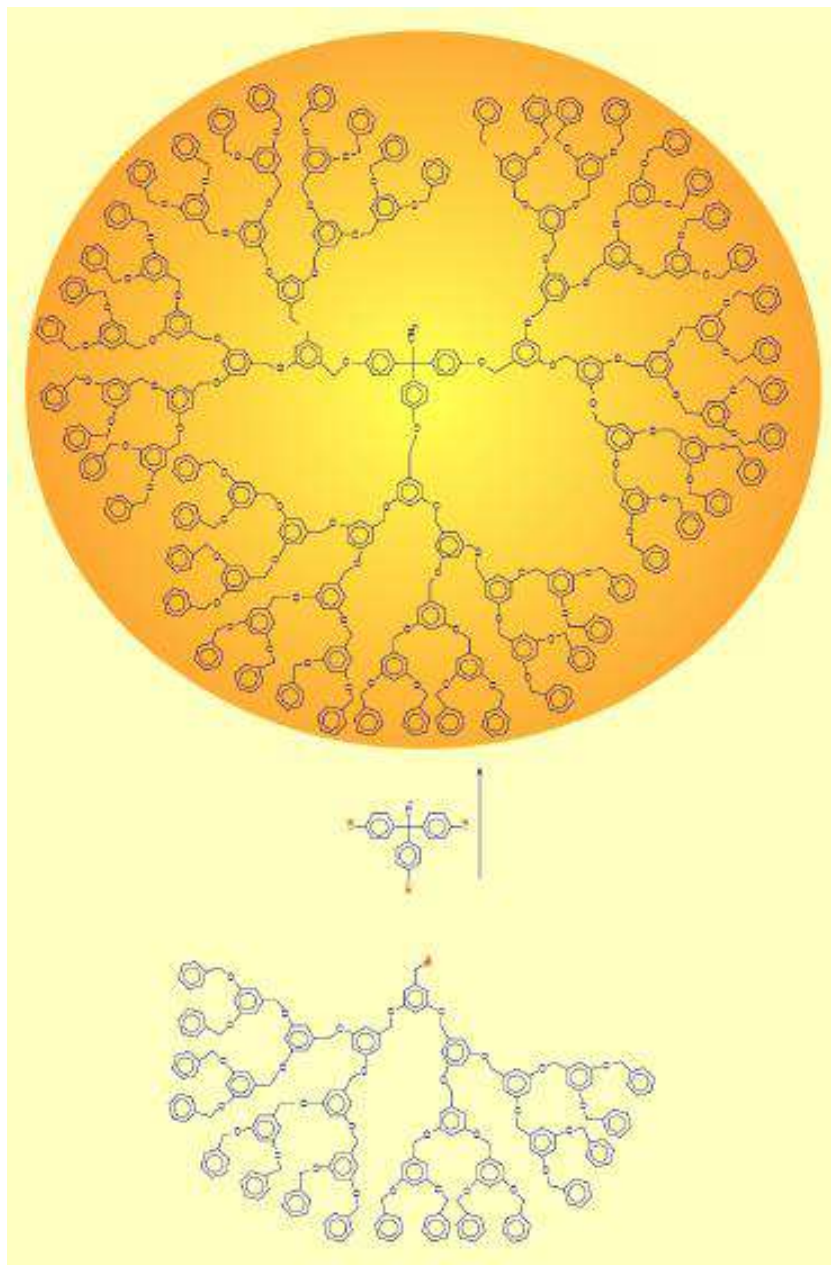
Sull'alcol benzilico così ottenuto è possibile effettuare un ulteriore step di bromurazione al fine di ripristinare la funzione bromuro e quindi di iterare il processo di crescita. Tale procedura sintetica è riportata nella Figura 16.

Le ramificazioni così ottenute si fanno reagire con un core opportunamente funzionalizzato.

La reazione fra un tipico *core* utilizzato da Fréchet e le ramificazioni della quarta generazione è illustrata nella Figura 17.



**Figura 16.** Sintesi convergente di Fréchet per ottenere sintoni ramificati a base di 3,5-diidrossibenzilalcol.



**Figura 17.** Reazione tra core funzionalizzati e sintoni ramificati di Fréchet.



## 2.4 Sintesi Ortogonale

Un'ulteriore possibilità è fornita dalla sintesi ortogonale. Il termine ortogonale deriva dalla definizione data nel 1977 da Baranay e Merrifield [10] di sistema ortogonale come di "un set di classi di gruppi di protezione completamente indipendenti tale che ogni classe possa essere rimossa in qualsiasi ordine ed in presenza di tutte le altre".

L'uso della strategia di gruppi di protezione ortogonali ha trovato ampio uso nella chimica dei peptidi.

In questo tipo di approccio sintetico i passaggi di protezione (es. metilazione di un sito chelante) o attivazione (es. riduzione dei ciano-gruppi in gruppi amminici vista nella sintesi messa a punto da Vögtle, o bromurazione degli alcol benilici nella sintesi di Fréchet) sono eliminati dall'uso sequenziale di due diversi building blocks opportunamente progettati per poter reagire con i diversi gruppi funzionali ortogonali.

Nella Figura 18 è riportato un interessante esempio di questo tipo di sintesi [11].

Il monomero 1 (acido 5-iodoisoftalico) reagisce in una reazione di esterificazione con il 2-(4-(*terz*-butil)fenossi)etanolo.

Lo ioduro arilico così ottenuto può quindi reagire con i gruppi alchinnici terminali del monomero 2.

E' importante sottolineare che in questo tipo di strategia sintetica ogni step reattivo incrementa di una generazione il dendrimero.

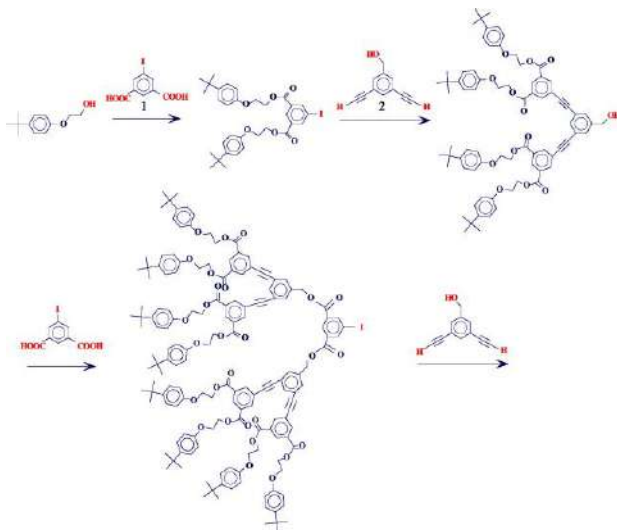


Figura 18. Esempio di schema sintetico ortogonale.

### **3. Applicazioni**

All'inizio l'interesse per le specie a struttura dendritica era essenzialmente focalizzato sulla sintesi di dendrimeri con nuovi scheletri e di generazioni sempre più elevate; con il passare del tempo la ricerca è stata sempre più rivolta alla progettazione mirata di sistemi che potessero svolgere determinate funzioni. D'altra parte, le potenziali applicazioni di un oggetto (anche non a livello molecolare) dipendono dal numero di informazioni contenute, maggiore è il numero di informazioni più l'oggetto è "potenzialmente intelligente" e i dendrimeri sono molecole con un alto contenuto di informazioni legate alla loro topologia in particolare alla natura e dimensioni delle cavità, delle ramificazioni, dei gruppi terminali.

Negli ultimi anni d'altra parte, la disponibilità commerciale di alcuni di questi sistemi ed il progressivo sviluppo delle tecniche analitiche, hanno dato ulteriore impulso a questo campo di ricerca e sono iniziati ad apparire i primi esempi di applicazioni.

#### *3.1 Dendrimeri quali possibili sistemi antenna nella fotosintesi artificiale*

La vita sulla Terra e la nostra stessa civiltà sono possibili grazie alla Fotosintesi Naturale, processo che, attraverso l'utilizzo della luce solare, permette la conversione di specie chimiche a basso contenuto energetico (acqua e anidride carbonica) in specie chimiche ad alto contenuto energetico (ossigeno molecolare e carboidrati). I combustibili fossili di cui l'Uomo ha sempre fatto finora ampio uso sono essi stessi derivati ultimi dei carboidrati sintetizzati dalle piante e da altri organismi fotosintetici nel corso dei secoli (da cui la designazione di *energia solare fossile* riferita ai combustibili fossili). L'importante e pregiata funzione svolta dalla Fotosintesi Naturale ha ispirato da sempre la possibilità di realizzare sistemi in grado di compiere la stessa funzione e cioè sistemi fotosintetici artificiali. D'altra parte, il crescente e non più sostenibile fabbisogno energetico annuo della nostra civiltà, finora soddisfatto essenzialmente dai combustibili fossili e destinato comunque a raddoppiarsi in pochi decenni (dai circa 12,7 TW, calcolati nel 2010, ai 27 TW stimati nel 2050), sta sempre più trasformando tale *possibilità* in una *necessità* [12-17]. La luce solare che arriva sulla Terra in *un'ora* (13,6 TW) porta con sé un contenuto energetico equivalente al consumo energetico globale *annuo* [18], ed il suo utilizzo efficiente appare la risposta più efficace per risolvere la crescente richiesta di energia. Mentre la Terra, vista come un sistema chiuso, ha infatti risorse limitate, se consideriamo l'input della luce solare la quantità di energia su cui è possibile contare, a patto di riuscire ad immagazzinarla in forme opportune, diventa virtualmente infinita [12]. Le "*forme opportune*", in accordo ai processi naturali, sono i legami chimici, in particolare C-H, C-C e H-H, presenti

in specie ad alto contenuto energetico: la conversione dell'energia solare in energia chimica (in breve, l'essenza del processo fotosintetico) permette di avere energia trasportabile e immagazzinabile, e di superare i problemi legati alla bassa intensità e intermittenza della luce solare. È da sottolineare che il processo essenziale della fotosintesi è lo splitting fotoindotto dell'acqua: in particolare è il processo di ossidazione dell'acqua a ossigeno molecolare (potenziale di riduzione: + 1,23 V) a fornire l'energia necessaria per la successiva sintesi di specie chimiche ad alta energia di interesse tecnologico, quali metano (da riduzione della CO<sub>2</sub>) o idrogeno molecolare [16-19].

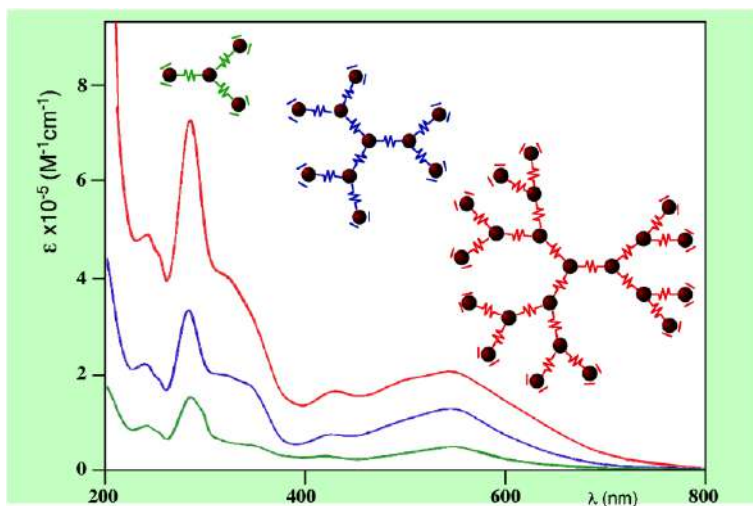
La fotosintesi artificiale, preannunciata da alcuni lavori "visionari" di inizio novecento [20, 21], è apparsa una tecnologia realistica grazie ad alcuni lavori pionieristici pubblicati alla fine del secolo scorso, da Fujishima e Honda, Balzani, Meyer e Lehn [22-25], che hanno posto solide basi per successivi studi. Più recentemente, sono stati i progressi nei campi della spettroscopia ultraveloce e della chimica supramolecolare ad aver fornito nuovi e probabilmente decisivi mezzi per la progettazione e lo studio delle proprietà di sistemi fotosintetici artificiali.

In analogia a quanto accade in natura, un sistema fotosintetico artificiale deve comprendere: i) un insieme di cromofori (l'antenna), avente il ruolo di assorbire luce solare e convogliarla ad un sito specifico, attraverso una serie di trasferimenti energetici fotoindotti (la funzione compiuta dall'antenna è quindi quella di convertire energia solare in energia elettronica); ii) un centro di reazione, costituito da una serie di specie redox-attive, in cui l'energia solare, già convertita in energia elettronica, è utilizzata per compiere una serie di processi di trasferimento elettronico che portano alla separazione delle cariche (la funzione del centro di reazione è quindi la trasformazione dell'energia elettronica in energia idonea ad attivare processi redox); iii) catalizzatori multielettronici, capaci di accumulare cariche per compiere processi multielettronici quali l'ossidazione dell'acqua e la riduzione dei protoni ad idrogeno molecolare.

I punti essenziali da considerare per la progettazione di sistemi antenna artificiali sono: i) la scelta dei cromofori da usare come "building block" (subunità); ii) la scelta delle connessioni tra i vari cromofori; iii) la messa a punto di metodologie sintetiche appropriate. I building block devono avere elevata assorbanza nella zona visibile dello spettro solare, stabilità nello stato fondamentale e nello stato eccitato, tempi di vita degli stati eccitati relativamente lunghi, facile modulabilità delle proprietà fotofisiche (alcuni di tali requisiti sono più stringenti nei sistemi artificiali che negli stessi sistemi naturali, data l'assenza di meccanismi di auto-riparazione nei primi) [26]. Le connessioni tra le subunità devono essere tali da permettere ai cromofori di mantenere le loro proprietà individuali (es.: assorbimento elettronico) e al tempo stesso consentire processi veloci di

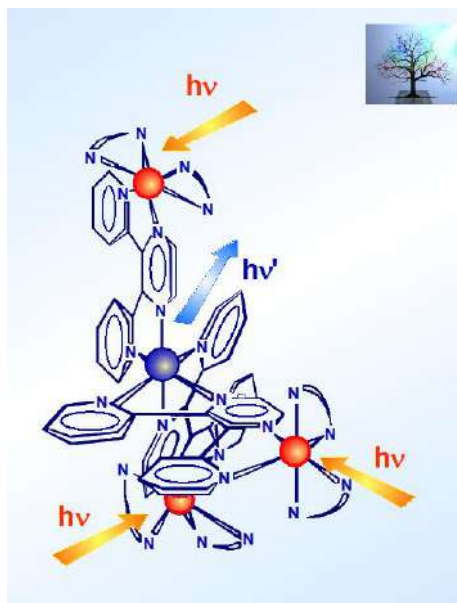
trasferimento energetico intercomponente. Le metodologie sintetiche impiegate devono permettere di assemblare, con pochi passaggi sintetici, un elevato numero di cromofori con controllo della topologia del sistema finale.

Sono diverse le combinazioni di "cromofori/connessioni/strategie sintetiche" che possono soddisfare tali requisiti, i dendrimeri metallici contenenti quali subunità cromoforiche complessi polipiridinici di Ru(II) ed Os(II) senza dubbio rappresentano una delle migliori combinazioni [27, 28]. Sin dagli anni settanta la sintesi e lo studio di complessi mono- e polinucleari di Ru(II) contenenti leganti polipiridinici ha accentrato particolare interesse scientifico; tale interesse è giustificato proprio da quella particolare combinazione di proprietà fotofisiche ed elettrochimiche quali il buon assorbimento nel visibile, la notevole stabilità sia negli stati eccitati che in quelli redox che li rende buoni candidati quali subunità in sistemi antenna artificiali [29]. In queste specie l'assorbimento della luce visibile è dovuta a transizioni di tipo MLCT (trasferimento di carica dal metallo al legante) è quindi naturale che al crescere della generazione del dendrimero e quindi del numero di metalli e leganti presenti, aumenti l'interfaccia di questi sistemi con la luce visibile. La Figura 19 riporta gli spettri di assorbimento registrati in acetonitrile di dendrimeri polipiridinici di Ru(II) di prima, seconda e terza generazione e evidenzia appunto l'aumento del coefficiente di estinzione molare di queste specie al crescere della generazione [27].



**Figura 19.** Spettri di assorbimento di dendrimeri polipiridinici di Ru(II).

La Figura 20 invece riporta la schematizzazione dell'effetto antenna che si realizza in un dendrimero tetranucleare di Ru(II) e Os(II) in cui tutta l'energia assorbita viene efficientemente trasferita verso il cromoforo centrale a base di Os(II) che la riemette [30].

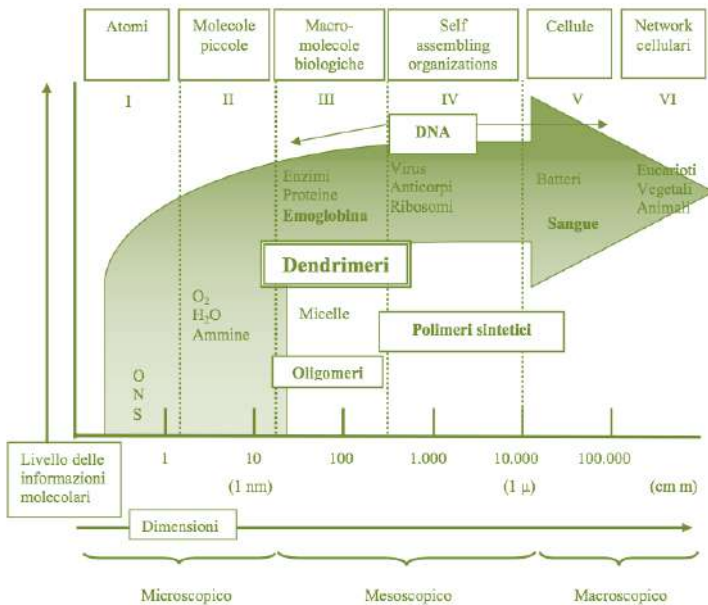


**Figura 20.** Schematizzazione dell'effetto antenna in un dendrimero tetranucleare.

### 3.2 Dendrimeri in Nanomedicina

La forma e le dimensioni dei dendrimeri sono comparabili a quelle delle biomacromolecole biologiche (Fig. 21) [31, 32], in virtù di tali proprietà negli ultimi anni diversi dendrimeri organici sono stati testati quali vettori di farmaci (*drug delivery*) [2]. Un vettore efficiente deve essere:

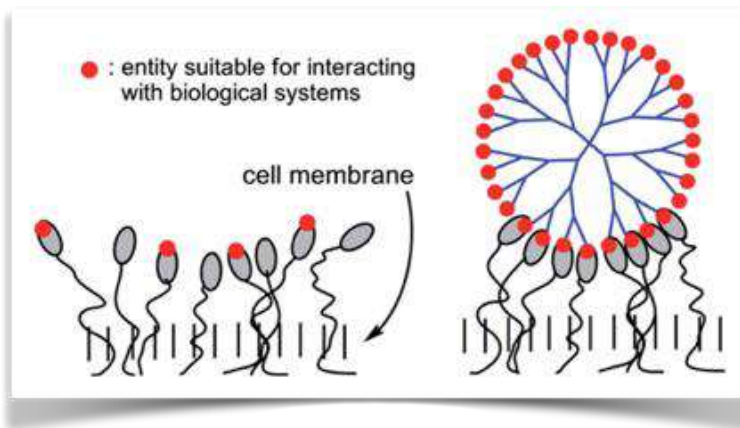
1. Biocompatibile;
2. non tossico;
3. non immunogenico;
4. inerte, biodegradabile (con prodotti di degradazione che devono essere ben tollerati dall'organismo e facilmente eliminabili);
5. in grado di riconoscere selettivamente le cellule malate da quelle sane per rilasciare il farmaco nel sito di interesse.



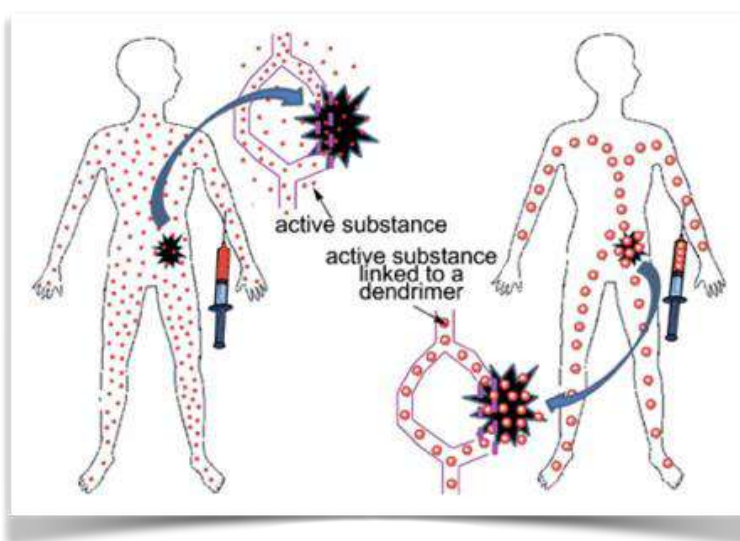
**Figura 21.** Dimensioni vs Informazioni nei sistemi biologici e in quelli artificiali.

Molti polimeri organici possiedono tali caratteristiche, le ragioni che giustificano il loro utilizzo come vettori sono essenzialmente tre [33]:

1. una singola molecola di dendrimero può veicolare più unità di principio attivo inducendo un effetto polivalente simile a quello largamente presente nei sistemi biologici, come rappresentato schematicamente in Figura 22;
2. le loro dimensioni sono tali da non essere eliminati per via renale;
3. le loro dimensioni nanometriche, inoltre, possono indurre il cosiddetto effetto EPR (Enhanced Penetration and Retention), il sistema vascolare dei tessuti sani ha un endotelio ben impacchettato che impedisce il passaggio dei materiali nanometrici mentre i vasi nei tessuti tumorali hanno un endotelio che ne consente il passaggio, inoltre, il sistema linfatico, che usualmente rimuove i materiali di dimensione nanometrica, non funziona nei tessuti malati. Entrambi questi fenomeni sono responsabili dell'effetto EPR che è illustrato in Figura 23. Purtroppo questo effetto è inefficace per i tumori non-solidi.

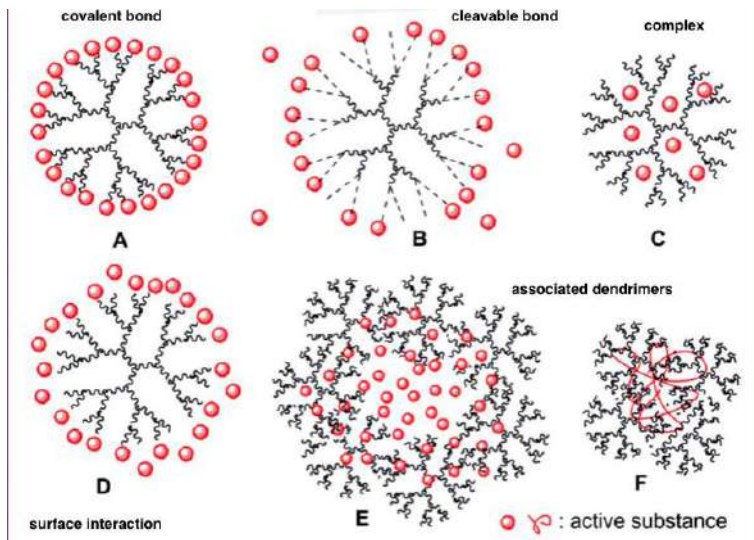


**Figura 22.** Rappresentazione schematica dell'interazione dendrimero + farmaco e membrana cellulare.



**Figura 23.** Illustrazione dell'effetto EPR, a sinistra le molecole di farmaco non veicolate da vettori nanometrici passano attraverso i vasi sanguigni diffondendo in tutto il corpo e solo una piccola porzione di esse raggiunge il tumore. Sulla destra, materiali di dimensioni nanometriche, come i dendrimeri, attraversano solo l'endotelio dei tessuti tumorali.

Ci sono cinque diversi tipi di interazioni fra farmaci e dendrimeri rappresentate schematicamente in Figura 24.



**Figura 24.** Schematizzazione delle diverse possibili interazioni fra dendrimeri e farmaci.

Le diverse unità di farmaco possono essere utilizzate come funzioni terminali del dendrimero, legate sia attraverso legami covalenti (caso A), o attraverso legami meno stabili (caso B), il farmaco può interagire non covalentemente con la porzione interna del dendrimero (caso C) o con la parte esterna (caso D). In funzione sia della struttura che delle dimensioni del dendrimero che del farmaco, questa interazione può avvenire anche con dendrimeri associati (casi E e F). Studi sistematici su particolari famiglie di dendrimeri hanno permesso di correlare le loro proprietà alle dimensioni e la tossicità al tipo di funzionalità superficiali [33, 34].

Nel caso di esperimenti in vivo, composti di grandi dimensioni come i dendrimeri possono accumularsi nel corpo, poiché non possono essere escreti dai reni, per questo motivo è desiderabile progettare dendrimeri che poi possano essere facilmente “disassemblati” in pezzi più piccoli da specifiche degradazioni enzimatiche o da stimoli esterni, è necessario bilanciare bene stabilità e instabilità, in modo che i dendrimeri possano essere dei proiettili “congelati” stabili fino al raggiungimento del bersaglio e poi in grado di “scompare” (disassemblarsi).

Appare evidente che i dendrimeri possono svolgere un ruolo chiave nel promettente campo della nanomedicina, ma c'è ancora molto lavoro da fare.



## **Bibliografia**

- [1] Fischer, M., Vögtle, F. (1999). Dendrimers: From Design to Application—A Progress Report. *Angewandte Chemie International Edition*, 38(7), 884-905.
- [2] Campagna S., Ceroni P., Puntoriero, F. (2012). *Designing Dendrimers*. Wiley.
- [3] Newkome G.R., Moorefield C.N., Vögtle F. (1996). *Dendritic Molecules: Concepts, Syntheses and Perspectives*. Weinheim: VCH.
- [4] Vogtle, F., Buhleier, E.W., Wehner, W. (1978). Cascade and Nonskid-Chain-Like Syntheses of Molecular Cavity Topologies. *Synthesis*, 2, 155-158
- [5] Moors, R., Vögtle, F. (1993). Dendrimere Polyamine. *Chemische Berichte*, 126(9), 2133-2135.
- [6] Wörner, C., Mülhaupt, R. (1993). Polynitrile- and Polyamine-Functional Poly(trimethylene imine) Dendrimers. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 32(9), 1306-1308.;
- [7] de Brabander-van den Berg, E. M. M., Meijer, E. W. (1993). Poly(propylene imine) Dendrimers: Large-Scale Synthesis by Heterogeneously Catalyzed Hydrogenations. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 32(9), 1308-1311.
- [8] Campagna, S., Denti, G., Serroni, S., Juris, A., Venturi, M., Ricevuto, V., et al. (1995). Dendrimers of Nanometer Size Based on Metal Complexes: Luminescent and Redox-Active Polynuclear Metal Complexes Containing up to Twenty-Two Metal Centers. *Chemistry – A European Journal*, 1(4), 211-221.
- [9] Hawker, C. J., Frechet, J. M. J. (1990). Preparation of polymers with controlled molecular architecture. A new convergent approach to dendritic macromolecules. *Journal of the American Chemical Society*, 112(21), 7638-7647.
- [10] Barany, G., Merrifield, R. B. (1977). A new amino protecting group removable by reduction. Chemistry of the dithiasuccinoyl (Dts) function. *Journal of the American Chemical Society*, 99(22), 7363-7365.
- [11] Zeng, F., Zimmerman, S. C. (1996). Rapid Synthesis of Dendrimers by an Orthogonal Coupling Strategy. *Journal of the American Chemical Society*, 118(22), 5326-5327.
- [12] Balzani, V., Armaroli, N. (2010). *Energy for a Sustainable World: From the Oil Age to a Sun-Powered Future*. New York: Wiley.
- [13] Armaroli, N., Balzani, V., Serpone, N. (2012). *Powering Planet Earth: Energy Solutions for the Future*. New York: Wiley.
- [14] Gust, D., Moore, T. A., Moore, A. L. (2012). Realizing artificial photosynthesis. *Faraday Discussions*, 155(0), 9-26.
- [15] Eisenberg, R., Gray, H. B. (2008). Preface on Making Oxygen. *Inorganic Chemistry*, 47(6), 1697-1699.
- [16] Nocera, D. G. (2009). Chemistry of Personalized Solar Energy. *Inorganic Chemistry*, 48(21), 10001-10017.
- [17] Lewis, N. S., Crabtree, G. (2005). *Basic Research Needs for Solar Energy Utilization: report of the Basic Energy Sciences Workshop on Solar Energy Utilization*. Washington, DC: US Department of Energy.
- [18] *World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability*. New York: United Nations Development Programme (2000).

- [19] Kanan, M. W., Surendranath, Y., Nocera, D. G. (2009). Cobalt-phosphate oxygen-evolving compound. *Chemical Society Reviews*, 38(1), 109-114.
- [20] Ciamician, G. (1912). THE PHOTOCHEMISTRY OF THE FUTURE. *Science*, 36(926), 385-394.
- [21] Calvin, M. (1978). Simulating photosynthetic quantum conversion. *Accounts of Chemical Research*, 11(10), 369-374; e riferimenti ivi contenuti.
- [22] Fujishima, A., Honda, K. (1972). Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. *Nature*, 238, 37.
- [23] Balzani, V., Moggi, L., Manfrin, M. F., Bolletta, F., Gleria, M. (1975). Solar Energy Conversion by Water Photodissociation. *Transition metal complexes can provide low-energy cyclic systems for catalytic photodissociation of water*, 189(4206), 852-856.
- [24] Gersten, S. W., Samuels, G. J., Meyer, T. J. (1982). Catalytic oxidation of water by an oxo-bridged ruthenium dimer. *Journal of the American Chemical Society*, 104(14), 4029-4030.
- [25] Hawecker, J., Lehn, J.-M., Ziessel, R. (1986). Photochemical and Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide to Carbon Monoxide Mediated by (2,2'-Bipyridine)tricarbonylchlororhenium(I) and Related Complexes as Homogeneous Catalysts. *Helvetica Chimica Acta*, 69(8), 1990-2012.
- [26] Campagna, S., Serroni, S., Puntoriero, F., Pietro, C. D., Ricevuto, V., (2008). Antennas. In V. Balzani (Ed.), *Electron Transfer in Chemistry* (pp. 186-214). Wiley-VCH Verlag GmbH.
- [27] Balzani, V., Campagna, S., Denti, G., Juris, A., Serroni, S., Venturi, M. (1998). Designing Dendrimers Based on Transition-Metal Complexes. Light-Harvesting Properties and Predetermined Redox Patterns. *Accounts of Chemical Research*, 31(1), 26-34.
- [28] Serroni, S., Campagna, S., Puntoriero, F., Di Pietro, C., McClenaghan, N. D., Loiseau, F. (2001). Dendrimers based on ruthenium(ii) and osmium(ii) polypyridine complexes and the approach of using complexes as ligands and complexes as metals. *Chemical Society Reviews*, 30(6), 367-375; e riferimenti ivi contenuti.
- [29] Juris, A., Balzani, V., Barigelletti, F., Campagna, S., Belser, P., von Zelewsky, A. (1988). Ru(II) polypyridine complexes: photophysics, photochemistry, electrochemistry, and chemiluminescence. *Coordination Chemistry Reviews*, 84, 85-277.
- [30] Campagna, S., Denti, G., Sabatino, L., Serroni, S., Ciano, M., Balzani, V. (1989). A new hetero-tetrametallic complex of ruthenium and osmium: absorption spectrum, luminescence properties, and electrochemical behaviour. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, (19), 1500-1501.
- [31] Svenson, S., Tomalia, D. A. (2012). Dendrimers in biomedical applications—reflections on the field. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 64, 102-115.
- [32] Tomalia, D. A., Naylor, A. M., Goddard, W. A. (1990). Starburst Dendrimers: Molecular-Level Control of Size, Shape, Surface Chemistry, Topology, and Flexibility from Atoms to Macroscopic Matter. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 29(2), 138-175.

- [33] Caminade, A.-M., Turrin, C.-O. (2014). Dendrimers for drug delivery. *Journal of Materials Chemistry B*, 2(26), 4055-4066; e riferimenti ivi contenuti.
- [33] Tomalia, D. A., Reyna, L. A., Svenson, S. (2007). Dendrimers as multi-purpose nanodevices for oncology drug delivery and diagnostic imaging. *Biochemical Society Transactions*, 35(1), 61-67.

## Le forme dell'uomo

**Luca Sineo**

LabHOMO – Laboratorio di Antropologia, Dipartimento STEBICEF,  
Università degli Studi di Palermo

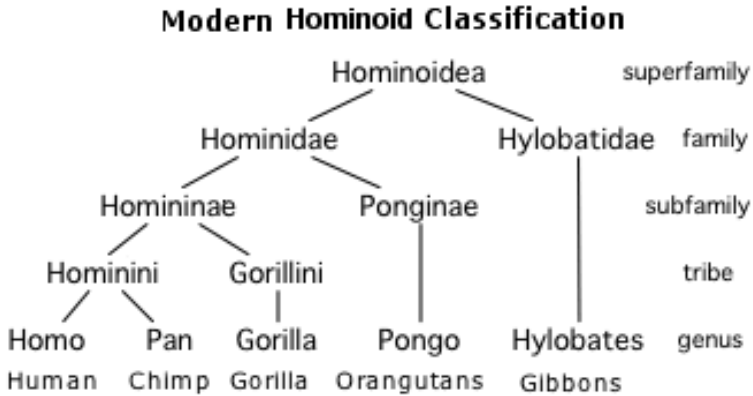
E-mail: [luca.sineo@unipa.it](mailto:luca.sineo@unipa.it)

**Riassunto.** *Homo sapiens*, un mammifero di grandi dimensioni, è una tra le specie più recenti nell'ordine dei primati. Sviluppato nel Continente africano nel Pleistocene medio finale ha iniziato, sin dal Pleistocene superiore, un'intensa attività migratoria che lo ha portato, in tempi e modi diversi, ad occupare differenti nicchie ecologiche nel Mondo. Tutti gli uomini appartengono alla specie *sapiens* che risulta oggi altamente polimorfica e politipica.

**Abstract.** *Homo sapiens*, a large mammal, is one of the most recent species in the primate order; he developed in the African continent in the Upper Middle Pleistocene. Since the Upper Pleistocene he has begun an intense migratory activity, in different times and by different ways, to occupy the diverse ecological niches in the World. All men belong to the *H. sapiens* species which is today highly polymorphic.

### 1. La specie *Homo sapiens* e la sua origine recente

*Homo sapiens* è un primate di grandi dimensioni appartenente alla famiglia delle Hominidae, raggruppamento tassonomico che condividiamo con le antropomorfe (le grandi scimmie). Noi abbiamo di fatto una storia comune con tutti i primati e soprattutto con le Hominoidea (il raggruppamento sistematico gerarchicamente superiore alla famiglia). Rappresentiamo quindi l'inizio della nostra evoluzione, in accordo con un approccio cladistico, che prevede come due taxa che arrivano insieme alla loro divergenza (un nodo nell'albero filogenetico) appartengano alla stessa categoria e abbiano una storia comune, con una netta biforcazione (Fig. 1).



**Figura 1.** L'albero cladistico delle Hominoidea (Superfamiglia). Si noti la biforcazione a livello degli Hominini, che ha portato alla comparsa della linea filogenetica umana. Questo tipo di rappresentazione è stata rivista più volte negli ultimi 25 anni. La classificazione si basa sulla ricerca genetica e genomica più attuale, che ha dimostrato che le antropomorfe sono strettamente legate all'uomo e tra queste in particolar modo lo Scimpanzé (Genere: Pan), è quello che mostra la maggiore vicinanza genetica con l'umanità attuale. Proposte recenti hanno messo Pan nel genere Homo [1].

In accordo con Henning [2] nell'analisi cladistica si identificano come ancestrali e antenati quei taxa che mantengono caratteri e forme primitive. Ogni specie diverge poi per l'acquisizione di caratteristiche proprie, dette apomorfie, mentre converge con le altre per caratteristiche comuni, le plesiomorfie. Nel caso dell'uomo, potremmo identificare le apomorfie con:

1. l'acquisizione di specifiche cranio-facciali ed encefaliche (l'encefalo è variato per forma, funzioni e per dimensioni);
2. un significativo dimorfismo sessuale, e quindi di una riduzione della dimensione dei canini;
3. un apparato masticatorio alleggerito in un cranio facciale non prognato;
4. un forame magno alla base del cranio e di una colonna vertebrale organizzata in un'alternanza di lordosi e cifosi;
5. una pelvi allargata a formare un bacino,
6. un arto superiore più breve dell'arto inferiore, con una mano molto sensibile in grado di una prensilità forte e al contempo di precisione, e con un piede con un arco plantare molto efficace per la deambulazione bipede.

A queste caratteristiche fisiche si aggiungono quelle legate alla complessità del sistema nervoso centrale, all'evoluzione neuromotoria, visiva, del linguaggio,

psichica e psicologica che di certo hanno contribuito ad ampliare il divario tra l'uomo e il resto dei viventi.

La nostra specie quindi sintetizza in un'unica soluzione queste apomorfie che, secondo il dato fossile, si sono evolute in circa 7 milioni di anni di sperimentazione e di selezione naturale, ossia sin dalle prime forme di proto-ominide tentativamente bipede in territorio africano [3]. La divergenza temporale tra la linea ominide-umana e quella di un ancestrale comune alla famiglia Hominidae, tarata sui dati molecolari (il nodo a cui ci si riferisce sopra), è di circa 10-7 milioni di anni. Una coincidenza confortante.

L'albero filogenetico che si è sviluppato in questo arco temporale biologicamente enorme è molto complesso e straordinariamente ramificato. Il modello dell'evoluzione tridimensionale, che si paragona metaforicamente ad un albero vero e proprio, con complesse ramificazioni (radiazioni evolutive) e drammatiche estinzioni (i rami secchi), è stato proposto relativamente di recente e sostituisce la classica quanto errata rappresentazione di evoluzione lineare e graduale, dove la specie "B" evolve da e sostituisce la specie "A".

La linea evolutiva, ossia quell'immagine tramandata come un insieme di passaggi lineari, è un qualcosa che per altro mi è molto familiare dato che è la rappresentazione che ho appreso da discente, quella che era in tutti i libri di testo universitari fino a non molti anni fa – e che ora si ritrova solo in alcune vignette satiriche o su t-shirt ironiche. L'albero, seppur complesso e talvolta "invisibile" in alcune parti, è una rappresentazione che ci mette costantemente in guardia circa la pericolosità delle banalizzazioni e il limite dei modelli. L'albero ci conforta su alcuni concetti chiave della cosiddetta Nuova Sintesi, come ad esempio l'evidente contemporaneità di molte specie, con nicchie ecologiche diverse e con capacità diverse di affrontare le situazioni ambientali, nonché i meccanismi di evoluzione "a mosaico" delle specie. È un albero che, al pari dell'altezza dei rami, mi dimostra diverse "fitness", ossia diverse capacità riproduttive. L'evoluzione "a mosaico" (che vediamo nei fossili che mostrano plesiomorfie ed apomorfie intricate) è a sua volta causa ed effetto della fitness modulata, puntuale, legata al clima e alla geografia di un luogo.

Non è compito di questa breve disamina tracciare, seppur a grandi tratti, la storia evolutiva degli Hominini, lungo i milioni di anni tra la fine del Miocene (7-5 milioni di anni fa) e Pleistocene (iniziato 2,5 milioni di anni fa); ci dobbiamo limitare invece all'ultimo tantalizzante sforzo di descrivere (e spiegare?) la diversità dell'umanità attuale.

## **2. La geografia genica umana**

Negli ultimi quarant'anni si è consolidata la conoscenza della filogenesi di noi *Homo sapiens*, l'uomo anatomicamente moderno. Abbiamo progressivamente metabolizzato che è una specie "recente" ed è anche uno dei migliori esempi pratici di specie che si è manifestata per un "equilibrio punteggiato", ossia un evento stocastico, non graduale [4]. *Sapiens* è un prodotto biologico ad elevata fitness, che si è affermato in modo "esplosivo" nel continente africano circa 300 mila anni fa (Ipotesi della Origine africana recente dell'umanità; OAR) [5], in un orizzonte cronologico contenuto (biologico e non geologico, direi).

Il modello dell'OAR è accattivante. Prevede che gruppi di migranti, presumibilmente piccoli abbiano ripetutamente intrapreso rotte di migrazione percorrendo corridoi ecologici nuovi. La storia che ci piace raccontarci è che questi gruppi, seguendo le migrazioni delle prede, o sfuggendo ad eventi catastrofici, siano approdati in nuovi e promettenti territori. La genetica dei gruppi umani in queste migrazioni generazionali subisce i primi cambiamenti delle frequenze alleliche, per selezione e deriva genetica; l'*inbreeding* acuisce la deriva di questi gruppi e alcune mutazioni sono selezionate in modo diverso, presumibilmente, date le diverse ecologie in cui vengono testate. Volendo rappresentare graficamente queste variazioni in una gaussiana dinamica vedremmo che la mediana si muove a destra o a sinistra, evidenziando nuovi assetti allelici e nuovi metabolismi, in relazione a nuove offerte della Natura.

L'ipotesi di una origine africana recente della specie *sapiens* è attualmente confortata da una ampia serie di evidenze diverse: archeologiche e genetiche fra tutte.

Le evidenze archeologiche, relative ai siti africani, dimostrano morfologie anatomiche ed industriali *sapiens* coeve, nel Pleistocene medio e superiore, con evidenze anatomiche ed industriali eurasiatiche non *sapiens*. Le evidenze geneticomolecolari, ottenute sia dai genomi umani viventi che sull'antico (derivanti dall'analisi paleogenetica del cosiddetto DNA antico), dimostrano inoltre che il *sapiens* è geneticamente distinguibile e che l'umanità attuale è frutto di più pulsioni migratorie africane e quindi extra-africane (Out of Africa 2). Diversi colli di bottiglia quindi hanno fatto la base della genomica dei migranti, poi mutata e modulata nelle nuove ecologie [6]: l'umanità attuale è nata in Africa e le distanze genetiche tracciabili tra Africa e gli altri continenti soddisfano bene un modello di dispersione progressiva verso nord (Eurasia) e verso oriente (Asia, Oceania, Americhe). Noi bianchi, elitari e "civili" siamo i più africani ... una bella beffa per qualcuno.

Ma la storia non è limitata ai comportamenti e agli accadimenti in queste famiglie migranti. A differenza del suo predecessore *Homo ergaster*, che, iniziando a migrare fuori dall'Africa circa due milioni di anni fa (Out of Africa 1) trova immensi territori vergini e senza competitori umani, *Homo sapiens*, nei suoi percorsi migratori, incontra altri uomini, stanziali, seppur rari, che hanno avuto storie profonde extra-africane. E con essi compete, da essi apprende, con essi combatte o si accoppia. L'evidenza attuale, che deriva da ripetuti e solidi studi di sequenziamento di interi genomi nucleari moderni e "fossili", riporta una frazione superiore al 5% (ma fino al 11%) del genoma sapiens come di origine neanderthaliana (*Homo neanderthalensis*) [7]. Il dato non è comunque confermato né dalle analisi comparative eseguite sul DNA mitocondriale (trasmesso per linea femminile), moderno o fossile che sia, che al contrario risulta non sovrapponibile tra le due specie, né per quanto riguarda il DNA del cromosoma Y (trasmesso invece per via paterna) [8, 9]. Due dati, questi, discordanti che certamente non aiutano nella comprensione degli scenari archeologici ed antropologici del periodo Würm (110mila-9.7mila anni fa), l'ultima glaciazione del Quaternario. E ancora, per usare un andante famoso che recita "non c'è due senza tre": la recente scoperta di una terza umanità del Pleistocene superiore. *Homo sp. Altai*, detto frequentemente *Homo sapiens ssp. Denisova*, sviluppatosi nella regione continentale asiatica degli Altai, da cui il nome; datato a 100 mila anni, con una genetica intermedia tra neanderthal e *sapiens* (un po' più neanderthal...) [10], ci dimostra la disarmante fragilità dei nostri modelli previsionali. Al contempo siamo esaltati dalla potenza dei metodi analitici, sempre maggiore, che permette significative revisioni. Francis Bacon (1561-1626) sarebbe entusiasta della "scientifica incertezza" attuale – nessun idolo!

### **3. Un formalismo?**

Gli uomini attuali appartengono tutti alla specie *sapiens* perché (per definizione) sono interfecondi e riproduttivamente isolati. Il modello dell'Out of Africa 2 è soddisfacente, e le diverse etnie attuali, divergenti solo per alcuni tratti e frequenze alleliche, sono geneticamente uniformi. Gli uomini anatomicamente moderni sono uguali quindi per discendenza, diversi per variazione mutazionale e per significativi adattamenti fisiologici. Se venissero progressivamente confermate le componenti genetiche "altre" nell'umanità attuale, e non generatesi recentemente in Africa e/o in seguito agli eventi mutazionali legati all'Out of Africa 2, e quindi si confermassero gli episodi di ibridazione con taxa non *sapiens*, simpatrici, allora, secondo definizione, dovremo includere *sapiens* e altri coevi precedentemente stanziati in Eurasia, in una specie comprensiva di sottospecie. Idea non nuova...



#### **4. Clima ed evoluzione dell'uomo**

Gli uomini del mondo sono molto diversi, e questa diversità ha indotto nei secoli un immane sforzo classificatorio e una serie non meno numerosa di fraintendimenti sulla "qualità" degli uomini stessi [11]. I motivi di questa diversità sono da ricercarsi negli adattamenti alle diverse ecologie: caldo, freddo, altitudine, portanza di un luogo sono stati momenti di adattamento. *Homo sapiens* nella sua dispersione progressiva e nella conquista di ambienti diversi, talvolta estremi, è stato accuratamente selezionato, al pari, né più né meno, delle altre specie viventi, e questo ha portato ad una serie di fenotipi anatomici e fisiologici.

Ma come cambia un fenotipo in relazione ai diversi ambienti? Il quesito se lo sono ripetutamente posto gli zoologi che, nel tempo, hanno elaborato una serie di regole teoriche, che trovano applicazione ovviamente anche sull'uomo. Le cosiddette "Regole ecogeografiche" hanno sollevato qualche scetticismo tra i biogeografi, ma, seppur risultino a volte delle banalizzazioni, possono dare una prima spiegazione alla variabilità umana. La lettura di questi meccanismi adattativi nell'uomo si complica in relazione al fatto che esso è capace di una notevole progettazione e pianificazione di strategie adattative artificiali. In questo caso, *H. sapiens* ha notevolmente superato molti filtri della selezione naturale.

#### **5. Le regole Eco-geografiche**

Cronologicamente parlando la prima regola ecogeografica venne elaborata nel 1833 dallo zoologo tedesco Constantin Gloger. La regola dice che in una specie ad ampia diffusione geografica le forme più pigmentate si trovano nelle aree calde e umide a latitudini equatoriali. La regola trova una discreta applicazione nella descrizione dei fenotipi umani: a livello equatoriale o subequatoriale esistono infatti, nel mondo, i fenotipi maggiormente melanodermi. Per altro il carattere pigmentazione è molto complesso: di recente, proprio l'osservazione di diverse etnie africane, anche alle stesse latitudini, ha messo in evidenza una straordinaria variabilità nell'intensità del pigmento, un carattere modulato dall'ancestralità dell'adattamento, dalle ibridazioni successive e dalle migrazioni panafricane.

La seconda regola, di Carl Bergmann, del 1847, afferma che un taxon ad ampia diffusione vede i rappresentanti di maggiori dimensioni e peso distribuiti alle latitudini fredde [12]. Effettivamente le popolazioni umane che si sono adattate a climi rigidi hanno una maggior complessione fisica rispetto a quelli che vivono a latitudini meridionali. Questo parametro è comunque quello di più difficile valutazione, stante un frequente stato di iponutrizione e disagio ecologico in aree con temperature rigide e con ridotta portata. Molte popolazioni attuali sono inoltre

andate incontro (forse anche più volte) ad un considerevole “secular trend”, ossia un incremento o un’oscillazione nelle dimensioni staturali, durante la loro storia, che ne ha modificato significativamente i fenotipi.

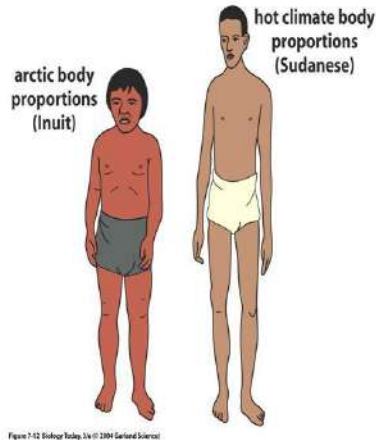
La terza regola, proposta da Joel A. Allen nel 1877 [13], dichiara che le dimensioni del corpo delle specie endotermiche variano con la temperatura: una maggiore superficie di esposizione facilita lo scambio di calore alle alte temperature, mentre un corpo alle basse temperature cercherà di limitare la superficie di scambio termico. Volendo procedere per gruppi abbastanza generalizzati e non gerarchizzati, potremmo parlare di effetto “radiatore” in due fenotipi umani: leptomorfi (e.g. Africa orientale) e brachiomorfi (dei climi artici). Sia nei primi, longilinei con arti lunghi, che nei secondi, brevilinei e con arti corti, ben si adatta, con le dovute eccezioni, tale regola.

La Figura 2 (Fig. 2) sintetizza in modo didatticamente semplice le principali regole ecogeografiche sopra menzionate.

Tra le diverse altre regole proposte dagli zoologi e dagli ecologi ricordiamo, per la sua indubbia valenza, quella di Foster [14], che mette in relazione le specie insulari alla portanza e alla predazione a cui sono sottoposte. I mammiferi diffusi nelle isole propriamente dette o in aree fortemente isolate da un punto di vista geografico, esprimono nel tempo geologico tendenze al nanismo (per portanza limitata) o al gigantismo (per portanza elevata, resistenza ai predatori, competizione). In questo caso esistono esempi pregevoli, sia viventi che fossili, in molti taxa di mammiferi e nell’uomo in cui la selezione positiva ha favorito situazioni ormonali e metaboliche a basso dispendio energetico [15]. Le forme pigmoidi umane distribuite nella fascia equatoriale dall’Africa alle Andamane, alle Filippine e all’America latina sono forme di resistenza metabolica ad un ambiente molto selettivo, ricco di risorse ma soggetto a molto prelievo, data l’alta biodiversità. Un esempio interessante di ancestrale umano Pleistocenico è la forma pigmoide dell’isola di Flores, in Indonesia, recentemente descritta come *H. floresiensis* (90-20 mila anni fa, le diverse datazioni su materiali ossei e altro hanno dato risultati molto discordanti) [16].

## Human Variation

- Arms and legs are longer and thinner in warm areas of the planet - shorter and thicker in cold regions.
- Conserves heat in cold regions by reducing surface area
- Skin pigmentation is darker the nearer the equator to protect the skin from UV.



**Figura 2.** Un'efficace schematizzazione delle regole ecogeografiche tratta dal noto tutorial di divulgazione [17].

Strettamente connessa alla regola di Forster è la Legge di Gause, che descrive come due specie che competono per una risorsa comune, entrino in competizione con la presumibile estinzione del competitore più debole a meno che esso non sia in grado di mutare le proprie esigenze ecologiche. La capacità di mutare le esigenze ecologiche prevede teoricamente un basso livello di specializzazione. Nella filogenesi umana questa ipotesi è stata più volte dibattuta in relazione all'estinzione del neanderthal e alla competizione con *sapiens* nei rifugi tardoglaciali.

### 6. Out of Africa → ∞

Il costante incremento delle conoscenze sull'origine dell'uomo anatomicamente moderno e sulla genesi delle popolazioni attuali (i gruppi etnici) ha messo in luce alcuni grandi errori nei paradigmi del passato:

a) l'inesistenza delle razze come categoria tassonomica; b) la fragilità dei concetti di purezza e coesione genetica di una etnia; c) l'impossibilità di definire quale sia stata la migrazione cruciale, stante il fatto che sono state molte, continue, forse a partire dal Pleistocene medio. Sin dalla sua prima migrazione (quindi potremmo dire Out of Africa con  $n$  tendente all'infinito) *sapiens* ha incontrato umanità diverse. Fino all'origine delle società stanziali ha mantenuto livelli di flusso genico

potenzialmente molto alti: la ricerca genetica ha rilevato che le etnie attuali sono il frutto di migrazioni ed ibridazioni complesse. La nascita dei nazionalismi su base genealogica risulta essere sostenuta quindi da basi molto fragili se non addirittura inconsistenti. La antropogenetica moderna ha dichiarato la morte di concetti storici, seppur emotivamente coinvolgenti: non esistono i Baschi puri, come non esistono i Celti, e gli "indoeuropei" sono stati solo un utile escamotage per spiegare alcune convergenze linguistiche.

## **Riconoscimenti**

L' autore ringrazia il Dr. Giuseppe Bellomo per la preziosa revisione del testo.

## **Bibliografia**

- [1] <http://www.oocities.org/dtmcbride/science/biology/taxonomy.html>
- [2] Henning, W. (1966). *Phylogenetic Systematics*. Urbana: University of Illinois Press.
- [3] Manzi, G. (2017). *Ultime notizie sull'evoluzione umana*. Bologna: Il Mulino.
- [4] Gould, S. J. (2002)-postuma. *The structure of evolutionary theory*. Cambridge:Belknap Press of Harvard University Press.
- [5] Stringer, C., Andrews, P. (1988). Genetic and fossil evidence for the origin of modern humans. *Science*, 239(4845), 1263-1268.
- [6] Cann, R. L., Stoneking, M., Wilson, A. C. (1987). Mitochondrial DNA and human evolution. *Nature*, 325, 31.
- [7] Fu, Q., Hajdinjak, M., Moldovan, O. T., Constantin, S., Mallick, S., Skoglund, P., et al. (2015). An early modern human from Romania with a recent Neanderthal ancestor. *Nature*, 524, 216.
- [8] Green, R. E., Malaspina, A.-S., Krause, J., Briggs, A. W., Johnson, P. L. F., Uhler, C., et al. A Complete Neandertal Mitochondrial Genome Sequence Determined by High-Throughput Sequencing. *Cell*, 134(3), 416-426.
- [9] Mendez, Fernando L., Poznik, G. D., Castellano, S., Bustamante, Carlos D. (2016). The Divergence of Neandertal and Modern Human Y Chromosomes. *The American Journal of Human Genetics*, 98(4), 728-734.
- [10] Sawyer, S., Renaud, G., Viola, B., Hublin, J.-J., Gansauge, M.-T., Shunkov, M. V., et al. (2015). Nuclear and mitochondrial DNA sequences from two Denisovan individuals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(51), 15696-15700.
- [11] Biondi GF et al., (2017). La falsificazione del paradigma razziale. In C.A. Redi, M. Monti (Ed.), *No razza, sì cittadinanza. Cellule e genomi XV corso*. Pavia: IBIS edizioni.
- [12] Ashton, K. G., Tracy, M. C., Queiroz, A. d. (2000). Is Bergmann's Rule Valid for Mammals? *The American Naturalist*, 156(4), 390-415.
- [13] Allen, J. A. (1877). The influence of Physical conditions in the genesis of species. *Radical Review*, 1, 108-140.
- [14] Foster, J. B. (1964). Evolution of Mammals on Islands. *Nature*, 202, 234-235.

- [15] Perry, G. H., Foll, M., Grenier, J.-C., Patin, E., Nédélec, Y., Pacis, A., et al. (2014). Adaptive, convergent origins of the pygmy phenotype in African rainforest hunter-gatherers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(35), E3596-E3603.
- [16] Brown, P., Sutikna, T., Morwood, M. J., Soejono, R. P., Jatmiko, Wayhu Saptomo, E., et al. (2004). A new small-bodied hominin from the Late Pleistocene of Flores, Indonesia. *Nature*, 431, 1055-1061.
- [17] Minkoff, E., Baker, P. (2004). *Biology Today*. New York: Garland Science.

## **Crescita e forma: un approccio molecolare**

**Mariano Venanzi**

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche, Università di Roma  
'Tor Vergata'

E-mail. [venanzi@uniroma2.it](mailto:venanzi@uniroma2.it)

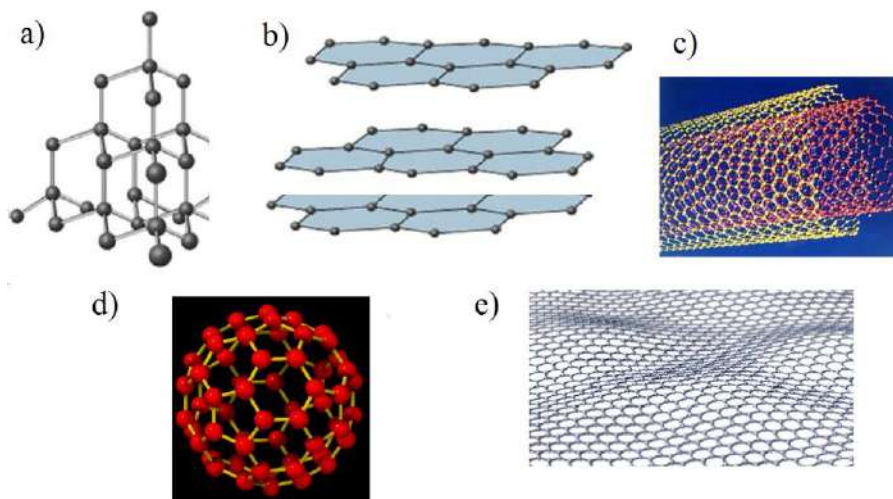
**Riassunto.** Storicamente i chimici hanno privilegiato un approccio sintetico per determinare la forma delle molecole. In questo caso, il network a grande contenuto energetico dei legami chimici ne determina la stereochimica e l'impalcatura molecolare. Più recentemente sono state esplorate le capacità di auto-assemblaggio dei sistemi a partire da mattoni molecolari elementari, al fine di ottenere architetture supramolecolari nanometriche (bottom-up approach). In questo contributo verranno brevemente delineate le strategie sintetiche e le interazioni intermolecolari che danno luogo alla crescita di strutture chimiche complesse.

**Abstract.** Chemists usually recur to synthetic strategies to obtain macromolecules of specific shape and dimension. In this case, high energy chemical bonds fix the stereochemistry and structure of the molecule. Recently, the self-assembly properties of molecular building blocks have been exploited to produce nano- and mesoscopic supramolecular architectures (bottom-up approach). This contribution aims to describe the synthetic strategies and the intermolecular interactions responsible for the growth of complex chemical structures.

### **Introduzione**

Quest'anno ricorre il centenario della pubblicazione del classico 'On the growth and form' di D'Arcy Wentworth Thompson, dedicato alla morfologia e struttura dei sistemi biologici [1]. L'idea di questo contributo è rivedere gli stessi concetti di crescita e forma da un punto di vista chimico, e quindi necessariamente molecolare. Il problema, come sempre accade, va inquadrato storicamente. Se avessimo dovuto rispondere alla domanda sulle diverse forme del Carbonio trent'anni fa, avremmo risposto semplicemente che il carbonio, allo stato solido, si presenta sotto forma di

diamante o di grafite [2]. In realtà dal 1985 in poi abbiamo scoperto che il carbonio poteva assumere la forma di un fullerene (Premio Nobel 1996 ad Harold Kroto, Robert Curl e Richard Smalley), di un nanotubo (1991, Sumio Iijima, NEC Corporation) o di un foglio monomolecolare di grafene (2004, Premio Nobel 2006 a Andrej Gejm e Konstantin Novoselov) (Fig. 1). La forma quindi, sta negli occhi di chi guarda, e dipende da quanto conosciamo delle molecole e dei fattori che ne determinano la crescita.



**Figura 1.** Forme allotropiche del Carbonio. a) diamante; b) grafite; c) nanotubi; d) fullerene; e) grafene.






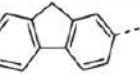


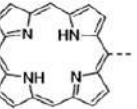

## 1. LEGO Chemistry: la via sintetica alla forma

Tradizionalmente, i chimici sintetici hanno dato forma alle molecole sfruttando la stereochimica dei legami chimici. Nella chimica del carbonio introdurre un carbonio ibridizzato  $sp^3$ ,  $sp^2$  o  $sp$  vuol dire costringere la molecola ad assumere localmente una struttura tetraedrica, planare o lineare. Recentemente, la chimica si è arricchita di una nuova strategia di sintesi per determinare la forma delle molecole. La LEGO chemistry parte dalla sintesi di mattoni molecolari (building-blocks), per costruire architetture supramolecolari in cui forma e funzione sono fortemente legati [3].

Una breve lista della struttura molecolare e delle dimensioni di alcuni mattoni molecolari è riportata in Figura 2.

La combinazione di questi elementi permette la sintesi di strutture mono- (nanowires), bi- (monostrati, film organici ultrasottili) e tridimensionali

(dendrimeri) (Fig. 3). In questo caso la elevata energia dei legami covalenti e le loro proprietà direzionali permettono di costruire strutture stabili e dalla stereochimica ben definita.

Modulo	Lunghezza / Å	Larghezza / Å		3.164	5.5 3.4
	1.30-1.34	3.4		4.15	6.4 4.2
	2.66	3.4		4.31	6.7 3.4
	7.855	7.9 3.4		3.72	6.7 3.4
	3.236	5.5 3.4		8.35	11.4 3.4
	3.880	5.5 3.4			

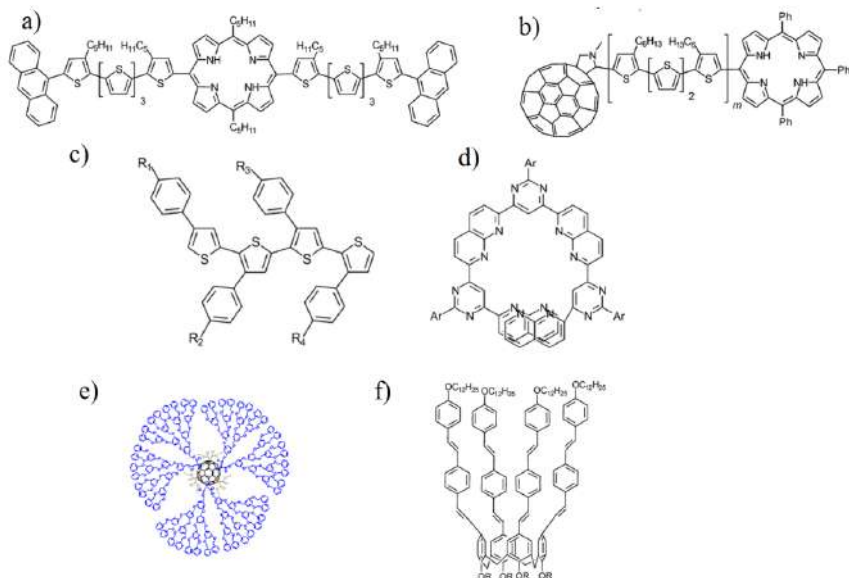
**Figura 2.** Struttura molecolare e dimensioni (Å) di alcuni mattoni molecolari (LEGO Chemistry).

Il ricorso a mattoni molecolari ricchi in elettroni permette di modulare la densità elettronica lungo la molecola, inserendo nella struttura centri redox capaci di dar luogo a reazioni di trasferimento elettronico. Lunghe catene coniugate possono poi dotare la molecola di elevata conducibilità elettronica lungo specifiche direzioni per eventuali applicazioni in elettronica molecolare e optoelettronica.

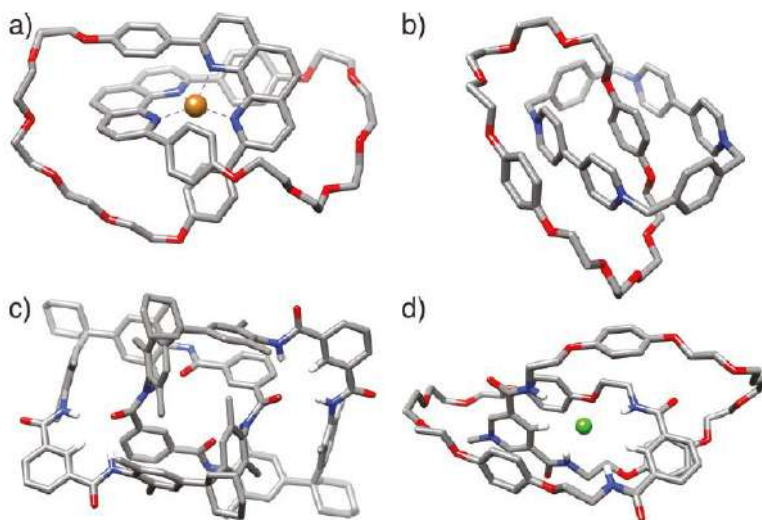
Un aspetto importante è costituito dalle proprietà dinamiche di queste strutture, determinate essenzialmente dall'insieme delle conformazioni popolate. A questo riguardo, l'introduzione di un gruppo più o meno rigido, rappresenta un vero e proprio vincolo stereochimico, che limita la libertà conformazionale, e quindi la flessibilità dell'intero scheletro molecolare.

Ma la fantasia e la creatività dei chimici sintetici non si è fermata alle canoniche strutture tridimensionali, investigando anche topologie chimiche complesse, come i catenani [4]. La formazione di strutture cicliche interconnesse è stata ottenuta utilizzando l'ampia gamma delle interazioni intramolecolari, come lo stacking di gruppi aromatici, la coordinazione ligando-metallo, le interazioni di legame a idrogeno, le interazioni a trasferimento di carica (Fig. 4).





**Figura 3.** Strutture 1D: a, b) fili molecolari; Strutture 2D: c) carpet, d) anelli; Strutture 3D: e) dendrimeri, f) calixareni.



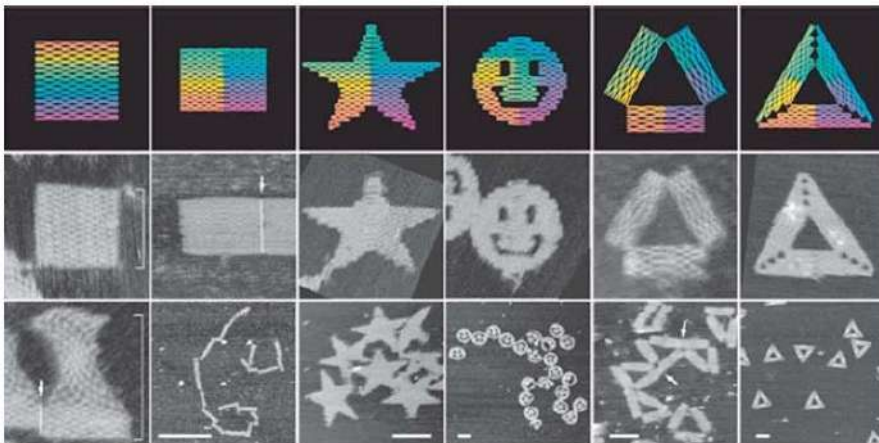
**Figura 4.** Catenani. Le diverse strutture sono stabilizzate da: a) coordinazione metallica (Cu(II)); b)  $\pi$ - $\pi$  stacking e charge-transfer; c) legame a idrogeno; d) coordinazione metallica (anione).

## **2. Il nuovo paradigma: self-assembly molecolare**

Il processo di auto-assemblaggio è definito come la spontanea e reversibile associazione di specie molecolari per formare aggregati supramolecolari secondo le intrinseche proprietà strutturali dei singoli componenti [3]. L'autoassemblaggio può dar luogo a strutture puntiformi (quantum dots), mono- (nanotubi, filamenti), bi- (foglietti) e tri-dimensionali (colloidi, nanoclusters).

A questo riguardo bisogna considerare tre aspetti fondamentali che devono essere presi in considerazione quando si scende a dimensioni nanometriche: i) la densità degli stati energetici accessibili (legata alla dimensionalità del sistema); ii) le proprietà di superficie, che diventano altrettanto importanti rispetto a quelle della massa del sistema; iii) il numero di particelle che compongono il sistema stesso [5]. In sistemi nanometrici, generalmente il numero di particelle  $N$  è sufficientemente grande da conferire al sistema proprietà di una certa complessità (la complessità di un sistema cresce con  $A^N/N$ ), ma non troppo grande da poter considerare trascurabili le fluttuazioni (la cui grandezza diminuisce con  $1/\sqrt{N}$ ).

La costruzione di strutture supramolecolari per autoassemblaggio ha spesso tratto ispirazione dai sistemi biologici. Valga per tutti l'esempio delle nanotecnologie basate sul DNA, che traggono origine dalla estrema affinità e specificità della interazione tra basi complementari. Sfruttando questo meccanismo specifico di interazione, oltre alle notevoli applicazioni sensoristiche, è stato possibile costruire architetture supramolecolari anche molto complesse (Fig. 5, DNA origami).

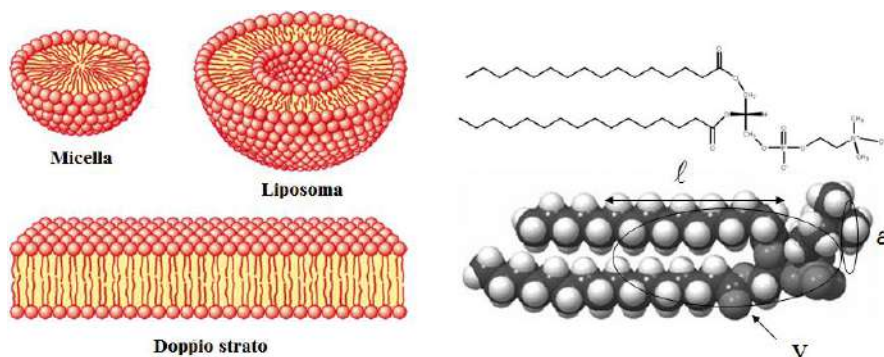


**Figura 5.** DNA origami.

Un aspetto molto interessante dal punto di vista della organizzazione dei sistemi è l'autoassemblaggio di molecole anfifiliche. Nei fosfolipidi il bilanciamento delle interazioni elettrostatiche tra le teste polari e le interazioni di Van der Waals tra le lunghe catene lipidiche determina la forma delle strutture aggregate. Si può facilmente dimostrare come l'autoassemblaggio sotto forma di micelle, liposomi o doppi strati sia determinato da un semplice fattore geometrico che correla il volume occupato dalle catene idrocarburiche ( $v$ ), la lunghezza delle catene lipidiche ( $l$ ), e

l'area superficiale occupata dalle teste polari ( $a$ ):  $\rho = \frac{v}{al}$  [6].

Per  $\rho < 1/3$  si ottengono micelle sferiche, mentre per valori di  $\rho$  compresi tra 0.5 e 1 si ottengono vescicole o doppi strati.



**Figura 6.** Strutture formate dall'autoassemblaggio di fosfolipidi;  $l$  è la lunghezza della catena lipidica,  $a$  l'area occupata dalla testa polare,  $v$  è il volume occupato dalla catena idrocarburica.

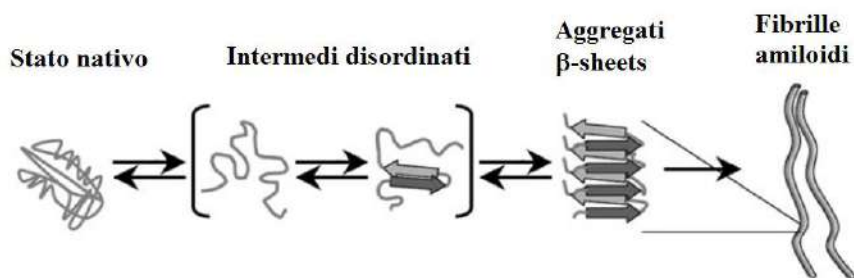
I contributi entropici giocano un ruolo fondamentale nei processi di self-assembly. La struttura più stabile in un dato ambiente e per una data temperatura, è determinata dal bilancio delicato tra contributi entropici, legati all'organizzazione del sistema, ed entalpici, misura delle interazioni intermolecolari.

La struttura finale deve essere sufficientemente stabile a temperatura ambiente, ma le interazioni che la stabilizzano sufficientemente deboli da permettere al sistema di esplorare tutte le possibili configurazioni per raggiungere la struttura di minima energia. In questo modo, i sistemi sono in grado di correggere gli 'errori' che si verificano durante il processo e trovare gradualmente la via verso il prodotto termodinamicamente più stabile. Tuttavia, è anche possibile che fattori cinetici riescano ad intrappolare il sistema in una configurazione di non equilibrio.

Nel computo dell'entropia di processi in soluzione, è necessario considerare anche il guadagno entropico costituito dal rilascio di molecole di solvente, impegnate nella solvatazione delle superfici la cui interazione determina il processo di aggregazione (l'aggregazione è in definitiva un processo di interfaccia). In questo caso il processo di self-assembly può avvenire con un guadagno entropico nonostante il contributo entropico negativo associato alla formazione di strutture ordinate, grazie al contributo entropico positivo associato alla desolvatazione (entropy-driven).

Un processo di auto-assemblaggio di grande interesse nei sistemi complessi, spesso legato alla relazione struttura-funzione, è il self-assembly gerarchico [7]. Questo processo è caratterizzato da una serie di passi successivi, ognuno caratterizzato da un livello strutturale ben definito, che portano il sistema ad organizzarsi via via in strutture più complesse e di differente significato funzionale. In questo processo nessun nuovo passo viene compiuto, ovvero nessuna struttura viene acquisita, prima che il passo precedente sia completato.

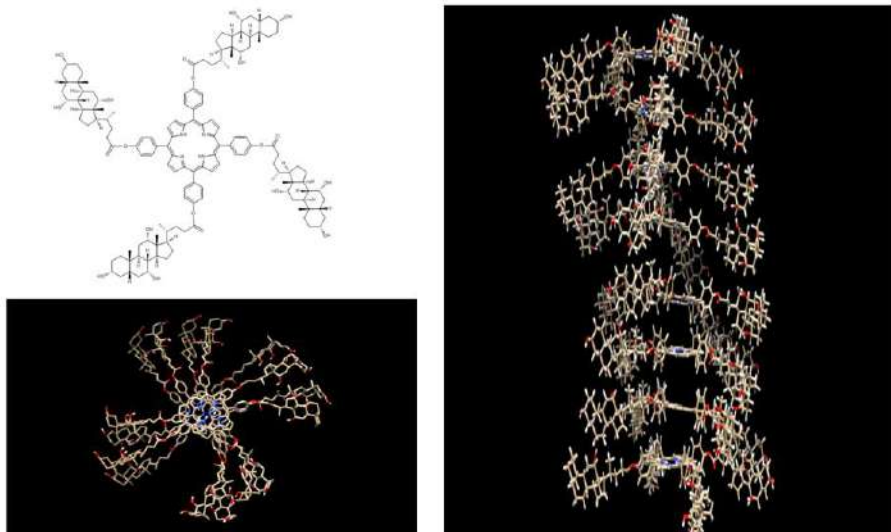
Un esempio tipico di self-assembly gerarchico è quello della formazione di fibrille peptidiche, caratteristico di molte malattie di tipo neurodegenerativo (Fig. 7) [8]. La formazione di fibrille amiloidi ha luogo partendo da catene polipeptidiche disordinate, fase seguita dalla esplorazione di strutture intermedie disordinate, fino alla formazione di nuclei di aggregazione in cui le catene peptidiche sono organizzate in foglietti  $\beta$ . Nella fase successiva si ottengono vere e proprie fibre, la cui coalescenza porta alla formazione delle larghe placche che inibiscono il corretto funzionamento dei centri neuronali.



**Figura 7.** Processo gerarchico di autoassemblaggio per la formazione di fibre amiloidi.

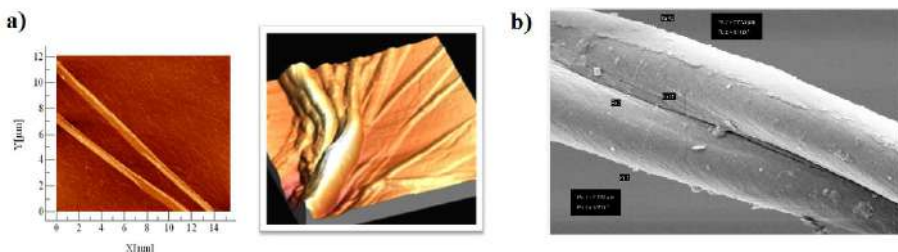
Per concludere, vorrei riportare due esempi frutto di lavori di ricerca compiuti nel nostro laboratorio. In particolare, abbiamo studiato l'aggregazione di porfirine funzionalizzate con gruppi steroidei (Fig. 8) [9] e l'aggregazione di oligopeptidi.

L'aggregazione del derivato porfirinico è stata ottenuta per effetto idrofobico in miscele alcol metilico/acqua, ottenendo strutture chirali di tipo elicoidale, il cui avvolgimento è determinato dall'interazione tra le catene steroidee.



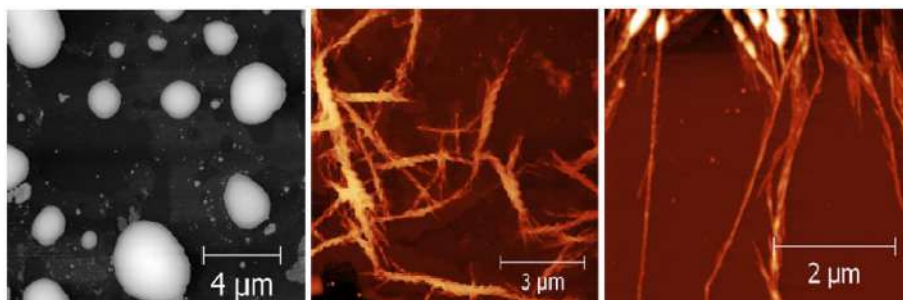
**Figura 8.** Scaffold porfirinico funzionalizzato nelle posizioni meso da quattro gruppi steroidei. In alto a sinistra: formula molecolare; in basso a sinistra: avvolgimento a spirale del tetramero (visione dall'alto); a destra: avvolgimento elicoidale dell'ottamero (visione laterale).

Misure di microscopia a forza atomica e di microscopia elettronica a scansione, hanno permesso di visualizzare l'intreccio di fibre, caratteristico delle strutture micrometriche formatesi (Fig. 9).



**Figura 9.** a) Immagine di microscopia a forza atomica e b) di microscopia elettronica a scansione di aggregati della porfirina steroidea investigata.

Nel secondo esempio che qui riportiamo, abbiamo studiato l'aggregazione di oligopeptidi di diversa lunghezza ( $n=6, 9, 12, 15$ ), trovando che la formazione di fibrille richiede una lunghezza minima della catena peptidica di almeno nove amminoacidi [10]. Questa lunghezza critica è associata alla popolazione di eliche sufficientemente stabili da permettere la formazione di cluster oligomericati ordinati, la cui nucleazione causa la propagazione veloce del processo di aggregazione fino alla formazione di strutture fibrillari. Nel caso di catene troppo corte, la predominanza dell'effetto idrofobico da luogo invariabilmente alla formazione di strutture globulari (Fig.10).



**Figura 10.** Immagini di microscopia a forza atomica di aggregati di peptidi di diversa lunghezza. A sinistra: esapeptide; al centro: dodecapeptide; a destra: pentadecapeptide.

### 3. Conclusioni

I chimici, novelli architetti molecolari, hanno a disposizione due metodi per costruire strutture molecolari complesse. Le tradizionali vie sintetiche, in cui le strutture molecolari sono tenute insieme da interazioni di legame (covalenti, ligando-metallo, elettrostatico) e il processo di natura dinamica di auto-assemblaggio, per il quale è cruciale il bilanciamento tra contributi entropici ed entalpici, questi ultimi determinati generalmente da interazioni deboli (dipolari, van der Waals, legame a idrogeno).

Nel primo caso, la stabilità delle strutture ottenute permette il preciso disegno stereochimico della architettura molecolare, mentre nel secondo la crescita dinamica delle strutture permette di controllare il processo di aggregazione. Nel caso di self-assembly gerarchico, il livello strutturale raggiunto spesso è legato strettamente alla funzione esercitata. E' questo un esempio affascinante di come le proprietà strutturali e dinamiche dei mattoni molecolari si propagano durante il processo di crescita dal livello sub-nanometrico alla scala micrometrica dei dispositivi molecolari. Una declinazione su base molecolare del rapporto struttura-forma-funzione delineato da D'Arcy Wentworth Thompson giusto cento anni fa.

## **Bibliografia**

- [1] D'Arcy Wentworth Thompson. (1917). *On the growth and form*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.
- [2] Suggestisco all'insegnante che mi legge, un semplice esperimento: illustri ai suoi studenti la struttura allo stato solido del diamante e della grafite e poi chieda alla classe quale delle due forme è la più stabile (la mia previsione è che la maggior parte degli studenti risponderà che la forma più stabile del carbonio è quella del diamante).
- [3] Steed, J.W., Turner, D.R., Wallace, K.J. (2007). *Core concepts in supramolecular chemistry and nanochemistry*. Chichester, England: John Wiley & Sons.
- [4] Sauvage, J.-P., Dietrich-Buchecker, C. (1988). *Molecular catenanes, rotaxanes and knots. A journey through the world of molecular topology*. Germany: Wiley-VCH.
- [5] Lindsay, S.M. (2010). *Introduction to Nanoscience*. New York: Oxford University Press.
- [6] Israelachvili, J. (2011). *Intermolecular and Surface Forces*. San Diego, CA: Academic Press.
- [7] Elemans, J. A. A. W., Rowan, A. E., Nolte, R. J. M. (2003). Mastering molecular matter. Supramolecular architectures by hierarchical self-assembly. *Journal of Materials Chemistry*, 13(11), 2661-2670.
- [8] Hamley, I. W. (2007). Peptide Fibrillization. *Angewandte Chemie International Edition*, 46(43), 8128-8147.
- [9] Lettieri, R., Cardova, L., Gatto, E., Mazzuca, C., Monti, D., Palleschi, A., et al. (2017). Hierarchical transfer of chiral information from the molecular to the mesoscopic scale by Langmuir-Blodgett deposition of tetrasteroid-porphyrins. *New Journal of Chemistry*, 41(2), 639-649.
- [10] Caruso, M., Placidi, E., Gatto, E., Mazzuca, C., Stella, L., Bocchinfuso, G., et al. (2013). Fibrils or Globules? Tuning the Morphology of Peptide Aggregates from Helical Building Blocks. *The Journal of Physical Chemistry B*, 117(18), 5448-5459.

# La forma nel mondo microscopico degli atomi

**Giovanni Villani**

Istituto di Chimica dei Composti OrganoMetallici – CNR Pisa

E-mail: [giovanni.villani@cnr.it](mailto:giovanni.villani@cnr.it)

**Riassunto.** La forma degli atomi da sempre è stata impiegata per spiegare le loro proprietà e quelle delle sostanze macroscopiche da loro create. In questo lavoro partiremo da una veloce ricognizione storica sul concetto di “forma” nei filosofi greci, per approdare poi al concetto di forma dell'atomo alla nascita della scienza moderna e seguirla nella meccanica quantistica contemporanea. Il rapporto tra la descrizione probabilistica della meccanica quantistica e la forma geometrica degli atomi sarà analizzato. Nel mondo atomico il concetto di forma è partito con un'importanza notevole ed è arrivato a un suo notevole ridimensionamento, quasi a una sua scomparsa. Nel mondo microscopico della chimica, tuttavia, il concetto di forma è ben presente nel mondo molecolare, come vedremo nel lavoro successivo.

**Abstract.** The form of atoms has largely been used to explain their properties and those of the macroscopic substances that they generate. In this work, we will start from a rapid historical reconnaissance on the concept of "form" in Greek philosophers, to approach the concept of atomic form at the birth of modern science and follow it in contemporary quantum mechanics. The relationship between the probabilistic description of quantum mechanics and the geometric form of atoms will be analyzed. In the atomic world, the concept of form has started with a remarkable importance and has come to its significant downsizing, almost to its disappearance. In the microscopic world of chemistry, however, the concept of form is well present in the molecular world, as we will see in the next paper.

## 1. Introduzione

L'idea che ogni ente del mondo microscopico (in questo caso l'atomo) sia dotato di una specifica “forma” (nel senso più ampio del termine) e che questa possa



spiegare alcune proprietà della sostanza macroscopica collegata è sempre stata presente nell'indagine scientifica del mondo operata con l'aiuto di un mondo microscopico non direttamente esperibile, in pratica dall'atomismo antico alla moderna chimica. È ben noto, per esempio, che ogni macromolecola biologica ha una specifica "forma" e questa è importante per capire le sue interazioni e reazioni (si pensi al modello chiave-serratura) e dare una spiegazione di approccio chimico del mondo animato. Altrettanto noto è che tale tipo di spiegazione non è una peculiarità del mondo animato, ma si applica anche al mondo inanimato dei materiali, per esempio.

In questo lavoro partiremo da una veloce ricognizione storica sul concetto di "forma" nei filosofi greci per approdare poi al concetto di forma dell'atomo alla nascita della scienza moderna e seguirla nella meccanica quantistica contemporanea. In un lavoro successivo, ci concentreremo in maniera specifica sul concetto di forma delle molecole e delle macromolecole biologiche in particolare; ci concentreremo, sulle problematiche che si generano nella spiegazione delle proprietà e delle interazioni di questi enti complessi con l'aiuto della loro "forma".

## **2. L'importanza del concetto di forma nei filosofi greci**

Il concetto di forma è largamente presente nella filosofia greca. Qui ne riprendiamo tre aspetti assegnabili, anche se non in maniera esclusiva, all'atomismo democriteo, a Platone e ad Aristotele. In particolare, gli aspetti che vogliamo evidenziare sono: i) gli enti microscopici possono avere molte forme geometriche (Democrito), ii) tali enti possono avere poche specifiche forme geometriche (Platone) e, infine, iii) la forma può travalicare (o considerare del tutto irrilevanti) gli aspetti geometrici e essere collegata ad aspetti ritenuti più generali (Platone e Aristotele). Queste tre possibili caratterizzazioni della forma degli enti atomici saranno poi riprese nella scienza moderna e contemporanea e cercheremo di far vedere la loro importanza attuale.

La teoria atomica greca, destinata nel corso del tempo ad avere un'influenza molto profonda sullo sviluppo della scienza, fu elaborata da Leucippo [seconda metà del V sec. a.C.] e da Democrito [460-370 a.C.]. La concezione principale di questi due autori era la seguente: le cose sono aggregati (più o meno stabili, ma mai indivisibili) di parti indivisibili ("atomi"), eterne, immutabili, senza parti o moto al loro interno e di numero infinito. Gli atomi erano frammenti del medesimo essere, la materia prima che non poteva venire ulteriormente definita, e differivano fra loro soltanto nella forma, nelle dimensioni e nel moto. Gli atomisti rompevano l'essere di Parmenide in piccoli frammenti e spargevano questi frammenti dell'essere in

quello che gli Eleati avevano chiamato il non-essere: il vuoto, al quale veniva così assegnato un essere separato.

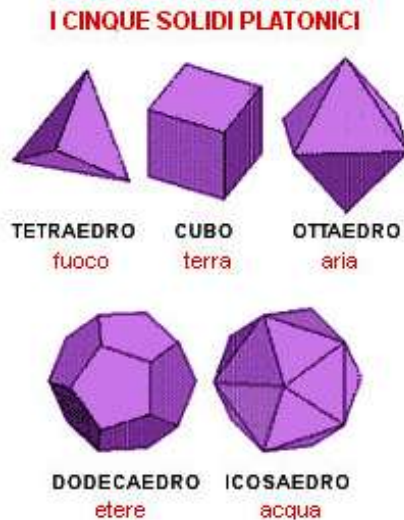
Ciascun atomo, diceva Democrito, era internamente immutabile e la sola cosa che gli atomi facevano era di muoversi e di colpirsi a vicenda, e, a volte, di combinarsi quando accadeva loro di avere forme capaci di unirsi. Gli atomi avevano forme di ogni genere: il fuoco era composto di piccoli atomi sferici e così l'anima. Gli atomi per collisione producevano dei vortici che generavano i corpi e, infine, i mondi. Il mondo delle qualità (caldo e freddo, dolce e amaro, colorato, ecc.) era soltanto soggettivo, derivando unicamente dalle reazioni dei nostri sensi alle impressioni esterne, reazioni a cui si davano convenzionalmente nomi, come se fossero state qualità vere. Per esempio, Democrito attribuiva il sapore salato di alcuni cibi allo sprigionarsi di atomi grandi e irregolari e la capacità del fuoco di penetrare nei corpi ai rapidi movimenti dei piccolissimi atomi sferici del fuoco. Risale, perciò, a Democrito la distinzione, che diverrà fondamentale nella scienza moderna, fra qualità "vere" (che poi verranno dette "primarie") e qualità "convenzionali" (che poi verranno dette "secondarie").

Secondo la teoria atomica tutti i mutamenti sostanziali o qualitativi che si osservano nei corpi fisici dovevano essere ridotti ai movimenti dei corpuscoli ipotetici, mentre tutte le differenze qualitative fra le varie sostanze venivano attribuite alle differenze di forma, di dimensione, di posizione, di distribuzione e di condizione di movimento degli atomi.

Per Platone i veri elementi erano due specie di triangoli rettangoli, uno che era la metà di un quadrato e l'altro che era la metà di un triangolo equilatero (in linguaggio moderno: il triangolo rettangolo isoscele (angoli di  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $45^\circ$ ) e il triangolo rettangolo scaleno (angoli di  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $30^\circ$ )). Egli pensava che i quattro elementi di Empedocle (fuoco, aria, acqua e terra) non fossero i primi principi o le lettere dell'universo o gli elementi; essi non erano neppure le sillabe, e neppure i composti più semplici. Il fuoco, per esempio, per Platone non doveva essere chiamato questo, ma tale: vale a dire, non era una sostanza, ma piuttosto un modo di essere della sostanza. Originariamente tutto il mondo materiale era mescolato e "i vari elementi stavano in luoghi diversi prima che fossero sistemati in modo da formare l'universo". Poi Dio li fornì di forma e di numero, e "li fece il più possibile belli e buoni, traendoli da cose che belle e buone non erano". Le due specie di triangoli summenzionate erano le forme più belle e, quindi, Dio le usò per costruire la materia.

Anche in Platone era presente una visione atomica della realtà. Secondo il mito

del *Timeo* era il Demiurgo che, mosso dal desiderio di plasmare la materia amorfa e inerte a somiglianza del mondo ideale, aveva creato il mondo corporeo. Egli aveva, per così dire, frantumata la materia in atomi, dividendo poi questi in quattro gruppi, corrispondenti ai quattro elementi di Empedocle. Per Platone, tuttavia, i veri elementi erano le due specie di triangoli rettangoli. Per mezzo di questi due triangoli era possibile costruire i cinque solidi regolari (Fig.1) e quattro di questi erano associati agli elementi di Empedocle.



**Figura 1.** I cinque solidi Platonici.

Gli atomi della terra erano cubici; quelli del fuoco era tetraedrici; dell'aria, ottaedrici e dell'acqua, icosaedrici. Quanto al dodecaedro, Platone diceva solo: "C'era tuttavia una quinta combinazione che Dio usò nel disegnare l'universo". Il passo è oscuro, e sembra suggerire che l'universo avesse la forma di un dodecaedro; ma altrove è detto che era sferico. Gli atomi degli elementi, quindi, differivano non in maniera qualitativa intrinseca, come per Empedocle, ma per differenza di forma geometrica. L'atomismo platonico appare, dunque, assai più simile a quello democriteo che non alle teorie corpuscolari di Anassagora o Empedocle, ma anche con Democrito le differenze sono ben presenti. Per Democrito la riduzione delle differenze tra gli atomi a differenze geometriche serviva a eliminare dalla scienza fisica il soggettivismo delle qualità. In Platone, invece, serviva al contrario per determinare alla radice stessa della natura dei significati e dei valori qualitativi, anzi mistico-simbolici, quali erano per i platonici e i pitagorici le forme dei corpi solidi regolari. In secondo luogo, nella fisica democritea le differenze tra gli atomi erano

prevalentemente dinamiche; in Platone, invece, mancava qualsiasi considerazione di tipo dinamico, e le differenze di figura obbedivano a leggi di statica (equilibrio qualitativo) in cui si rispecchiava l'ideale armonia dei modelli numerici eterni.

La concezione platonica, esposta nel dialogo del *Timeo*, della formazione dell'universo in base alla forma e alla materia, viene ripresa e approfondita da Aristotele che se ne serve per la definizione della *sostanza*, concepita come *sinolo*, unione indissolubile di forma e materia. Anche per Aristotele, come per il suo maestro Platone, infatti, uno dei punti essenziali della metafisica era la distinzione tra "forma" e "materia". Consideriamo, per esempio, una statua di marmo; qui il marmo è la materia, mentre la figura fatta dallo scultore è la forma. O, per prendere gli esempi di Aristotele, se si costruisce una sfera di bronzo, il bronzo è la materia e la sfericità la forma; mentre nel caso d'un mare calmo, l'acqua è la materia e la calma è la forma. È in virtù della forma che la materia è qualcosa di definito e questo genera una sostanza. Le forme sono sostanziali. La forma è, quindi, ciò che dà unità e significato a una porzione di materia. Quando un uomo fabbrica una sfera d'ottone, sia la materia sia la forma esistevano prima e tutto ciò che egli fa è metterli insieme. L'uomo non crea la forma più di quanto non crei la materia. Le cose acquistano realtà acquistando forma; la materia senza forma è soltanto una potenzialità. La dottrina della materia e della forma è connessa in Aristotele con la distinzione tra potenzialità e attualità. La materia bruta è concepita come una forma in potenza; tutto il cambiamento consiste nell'acquisto di una nuova forma e, quindi, dopo il cambiamento l'ente in questione ha una forma differente da prima: è avvenuta una tras-formazione. La similitudine, anche lessicale, con la scienza moderna è evidente [1].

Per Aristotele, la forma, ha una priorità *cronologica* e *ontologica*, prima nel tempo e prima come essere, rispetto alla materia: essa è infatti sia *causa efficiente*, quella che rende possibile l'esistenza della sostanza, sia *causa finale*, esprime il fine che dà senso all'esistenza della cosa stessa. Aristotele sostiene, inoltre, anche la priorità *logica* della forma perché "di ogni cosa si può parlare in quanto ha una forma e non per il suo aspetto materiale in quanto tale". (*Metafisica* VII, 1035a).

Riguardo alla costituzione della materia, Aristotele rigettava l'ipotesi atomica principalmente per due motivi. Il primo era l'idea che gli atomisti avevano nei confronti dei corpi composti. Gli atomisti non giunsero mai all'idea che si potesse formare qualcosa di realmente nuovo mettendo insieme vari atomi. Da questo punto di vista loro negano l'individualità delle sostanze composte. Aristotele era su questo punto più consono con la visione chimica moderna: i costituenti nel formare i composti danno vita a sostanze nuove e non a semplici giustapposizioni di elementi

preesistenti. L'altro punto di Aristotele contro l'atomismo era la negazione dell'esistenza del vuoto. L'esistenza del vuoto era una parte essenziale dell'atomismo. Esso serviva a rendere possibile il movimento degli atomi e, quindi, a permettere agli atomi di aggregarsi e di allontanarsi portando alla generazione e alla corruzione di tutte le cose. Aristotele era convinto, invece, che il movimento nel vuoto fosse impossibile. Per tale filosofo, poiché nel vuoto non c'era nessun luogo naturale, le sostanze non potevano muoversi di moto naturale perché non avevano una direzione privilegiata verso cui muoversi. Se a un oggetto nel vuoto fosse stato imposto dall'esterno un moto, questo, non trovando opposizione, avrebbe avuto una velocità infinita, indipendentemente dal suo peso. Il vuoto era, quindi, incompatibile sia con il moto sia con la quiete e ciò rendeva l'ipotesi del vuoto assurda. Per Aristotele, la negazione del vuoto portava anche alla negazione degli atomi.

### **3. Il concetto di forma alla nascita della scienza moderna: Gassendi e Boyle**

Alla nascita della scienza moderna nel Seicento, le tre caratteristiche della *forma*, identificate in Democrito, Platone e Aristotele, ebbero un ruolo differente. L'idea democritea degli atomi con molte forme differenti fu sostanzialmente accettata e sarà solo in seguito, principalmente con Dalton, che l'atomo si trasformerà in una "pallina" di differente grandezza (e, quindi, peso). *An passant* notiamo che, poiché non tutti i pesi atomici risulteranno possibili (numero finito di elementi) non tutte le dimensioni degli atomi-palline saranno possibili e questo, insieme all'unica forma sferica degli atomi, comporterà un avvicinamento all'idea platonica di forma degli atomi. L'idea platonica di poche forme (quattro delle cinque forme dei solidi platonici) per gli atomi ebbe poco applicazione, anche se "platonici" sono stati definiti quasi tutti gli scienziati di quel periodo. L'idea aristotelica, infine, di forma come essenza, come caratteristica che individualizza un tipo di ente, fu combattuta in nome di un'analisi quantitativa e non qualitativa della materia.

La rinascita del concetto greco di atomo viene di solito attribuita a Pierre Gassendi [1592-1655]. Ovviamente, la visione atomistica greca non era mai sparita del tutto dal panorama culturale occidentale, anche se fortemente avversata dalla Chiesa Cattolica. Occorreva, tuttavia, un uomo di chiesa (Gassendi era canonico a Digne) per potere, se non eliminare almeno ridurre, il collegamento tra atomismo e ateismo. Gassendi, nella sua formazione filosofica, metteva insieme tre culture: quella medioevale clericale, quella rinascimentale e quella scientifica e si proponeva di fare una sintesi di queste tre visioni, per molti aspetti opposte.

L'immagine del mondo della materia di Gassendi somigliava a quella di Democrito, a parte le differenze dovute a considerazioni teologiche. Gli atomi erano anche per lui invisibili, ma non privi di estensione, erano divisibili matematicamente, ma non fisicamente. La natura ultima di questi atomi consisteva di *soliditas*, ossia di fermezza e impenetrabilità ed erano, pertanto, sostanze permanenti e invariabili, che non differivano tra loro in qualità. Anche per Gassendi, le proprietà caratteristiche dei singoli atomi erano la *moles* (la dimensione) e la *figura* (la forma), mentre come terza proprietà veniva aggiunta il *pondus* (il peso), ma quest'ultimo non era, come in Epicuro, una gravità che metteva in movimento gli atomi nello spazio secondo un'unica direzione definita, dalla quale poteva allontanarli solo il misterioso *clinamen*. Il peso veniva, invece, concepito da Gassendi come una forza motrice intrinseca, come un impeto, impresso negli atomi da Dio all'atto della creazione e perdurante immutato sino alla fine del mondo. Accanto alle proprietà della *moles*, della *figura* e del *podus*, che appartenevano ai singoli atomi, questo filosofo introduceva altre proprietà che si riferivano a gruppi di atomi. Queste erano il *situs*, la situazione di un atomo rispetto all'ambiente che lo circondava e l'*ordo*, il modo in cui gli atomi erano disposti nei composti. Per Gassendi, gli atomi esistevano in un numero inconcepibile, ma finito, di forme, e ciascuna singola forma era presente in un numero di esemplari che era anch'esso assai grande, anche se finito.

Agli albori dell'atomismo moderno, Boyle [1627-1691] fu il primo importante fisico a utilizzare la chimica come strumento atto a sistemare la filosofia corpuscolare. Questo fu un tentativo ambizioso, un passo di grossa portata a cui Galileo aveva posto le basi cambiando il moto - modificazione traslazionale - da processo in stato. Boyle compì lo stesso cambiamento per la struttura della materia, prendendo in considerazione, dallo stesso punto di vista, la modificazione sostanziale. Boyle vide nella chimica la scienza che era in grado di fondare il meccanicismo e, insieme, di confermarne la validità. Per tale filosofo e scienziato, modificazione sostanziale non voleva dire penetrazione da parte di qualità attive - calore, colore, vita - e nemmeno un rimescolamento della sostanza del mondo fra le categorie di forma. Egli sosteneva, invece, che il filosofo meccanico doveva ritenersi soddisfatto che una parte della materia potesse agire su di un'altra in virtù del moto locale e cercare gli effetti e le conseguenze di esso. Egli doveva, quindi, supporre che la causa di tutti i cambiamenti fosse un riordino delle parti di un mondo oggettivo ed erano questi due grandi e molto cattolici principi (materia e moto) che rendevano intelligibile il mondo fisico.

L'impostazione corpuscolare di Boyle, tuttavia, non fu mai qualcosa di più di un'inferenza, un'asserzione sulla materia che - analogamente a quelle di Cartesio - fu nei fatti un'asserzione sul metodo. Fino a Dalton, per un altro secolo, la "filosofia corpuscolare" non poteva assumere quel significato positivo che le sarebbe derivato dall'essere rivestita di numeri. In Boyle perciò, come in Democrito (e in realtà in tutto il XVII secolo) l'atomismo costituiva una precondizione di una scienza oggettiva, più che la scoperta di una scienza sperimentale. Boyle diceva che, poiché la materia era un corpo finito, le sue dimensioni dovevano essere limitate e misurabili e anche se poteva cambiare la sua forma, tuttavia, per la stessa ragione, doveva necessariamente avere una forma o un'altra. Boyle pensava che la "forma" degli atomi potesse essere una spiegazione delle proprietà fisiche e chimiche delle sostanze. Egli credeva, quindi, in sintonia con gli antichi atomisti e a differenza di Newton, che l'adesione degli atomi fosse dovuta a irregolarità della superficie dei corpuscoli (uncini, cavità, ecc.) e, quindi, un passaggio di stato fosse dovuto alla rottura di queste protuberanze.

#### **4. Il concetto di forma nella meccanica quantistica**

La scoperta dell'elettrone nel 1897 da parte di J. J. Thomson [1856-1940] cambiò la prospettiva nello studio del mondo atomico e introdusse il concetto di "struttura atomica". Tale strutturazione dell'atomo ha notevoli conseguenze, sia in campo scientifico sia in quello epistemologico, e si rapporta al concetto di *forma* dell'atomo. Thomson trovò che i raggi catodici, prodotti da una scarica elettrica in un tubo contenente gas rarefatti, erano formati da particelle che trasportavano una carica elettrica negativa e, in seguito, per questa particella fu coniato da G. J. Stoney il nome di *elettrone*. Questi raggi provavano la natura corpuscolare dell'elettricità e, una volta determinata da Millikan la carica elettrica, si trovò che questa particella aveva una massa di 1836 volte più piccola di quella dello ione idrogeno. In seguito Thomson dimostrò che le proprietà degli elettroni erano le stesse indipendentemente dal tipo di gas che aveva generato i raggi catodici e ne dedusse che gli elettroni erano costituenti di tutti gli atomi, "poiché gli elettroni possono essere prodotti da tutti gli elementi chimici, noi dobbiamo concludere che essi entrano nella costituzione di tutti gli atomi. Noi abbiamo quindi fatto il primo passo verso la comprensione della struttura dell'atomo" [2].

La presenza degli elettroni negli atomi portò a molte domande tra cui le tre principali erano: i) quanti elettroni erano presenti in ogni atomo, ii) dove risiedeva la carica positiva e iii) come spiegare la massa degli atomi. Queste problematiche (insieme alla scoperta di una particella neutra, il neutrone) costituirono gli ingredienti di un nuovo concetto: la struttura atomica. Non staremo qui a

ripercorrere i molti tentativi di trovare una specifica struttura atomica (i ben noti modelli di Thomson, Rutherford, Bohr, ecc.) e la loro veloce confluenza in una nuova meccanica, quella quantistica. Qui ci occuperemo solamente e velocemente del risultato di questo processo: l'atomo quantistico e la sua "forma".

La visione atomica agli inizi del XX secolo sembrava aver raggiunto una certa coerenza quando cambiò di nuovo tutto. Dopo che alla radiazione era stata attribuita la doppia natura di onda e particella, nel 1924 Louis De Broglie estese questa doppia natura, corpuscolare e ondulatoria, anche alla materia. L'impatto della formula di De Broglie sulla nascente meccanica quantistica fu veloce. Due anni dopo, nel 1926 Erwin Schrödinger [3, 4] diede vita a quella branca della fisica nota come "meccanica ondulatoria". La base di questa nuova meccanica era l'equazione d'onda o equazione di Schrödinger. La soluzione di questa equazione dava le funzioni d'onda del sistema che per Schrödinger descrivevano onde "reali", come le onde acustiche. Egli pensava che esse rappresentassero delle vibrazioni fisiche che avvenivano in tutte le direzioni dello spazio. Da un punto di vista matematico, la difficoltà maggiore era che le funzioni d'onda erano complesse e ciò rendeva difficile associarle a delle reali vibrazioni.

Una interpretazione completamente diversa del significato della funzione d'onda fu proposto già nel 1926 da Max Born [1882-1970] [5-7] e introdusse un punto di vista probabilistico nell'universo subatomico. Leon Lederman [8], un fisico attuale dell'alta energia, considera questa interpretazione come "il cambiamento più drammatico e profondo nella nostra percezione del mondo da Newton". Tenendo conto della natura complessa della funzione d'onda, il principio di Born stabilisce che il quadrato del modulo della funzione d'onda a un dato punto e a un dato istante è una misura della probabilità che la corrispondente particella possa essere trovata in quel punto e in quell'istante. Questa interpretazione probabilistica cambia notevolmente il nostro modo "normale" di intendere la localizzazione di una particella. Non si può più dire che all'istante  $t$  la particella è nel punto  $P$ , ma solo che esiste una certa probabilità che ciò avvenga. In pratica la particella può essere dovunque nello spazio e non esiste possibilità di localizzarla con "certezza".

Va precisato che, nell'interpretazione di Born della funzione d'onda, l'aspetto probabilistico è molto diverso da quello della probabilità classica, applicata per esempio nell'ottocento alla teoria dei gas. In questo ultimo caso il sistema era considerato del tutto deterministico e solo la nostra impossibilità a padroneggiare l'enorme mole di traiettorie, dovute alla grande quantità di atomi presenti anche in piccole porzioni di gas, rendeva necessaria un'approssimazione statistica. Nella



meccanica quantistica la situazione è completamente diversa. È nella "natura" della particella la sua componente probabilistica e non nella nostra incapacità o ignoranza.

Data la natura probabilistica della meccanica quantistica, viene fuori un concetto di atomo molto diverso da quello "classico". Per gli atomi si può ancora parlare di differente grandezza se si intende con questo termine la posizione media degli elettroni più distanti dal nucleo. Un atomo con molti elettroni, quindi, e che riempie dei gusci di valenza ad alto numero quantico principale, ha, in questo senso, un raggio maggiore. Naturalmente queste grandezze atomiche non sono in numero infinito. Riferendosi alla grandezza classica si potrebbe dire che l'atomo di ogni elemento (e di ogni ione) ha una grandezza fissata. Si vede che, sebbene in un certo senso si possa ancora parlare di "raggio atomico", siamo a concetti diversi dalla dimensione dei corpuscoli pensata in passato. Riguardo alla forma degli atomi, essa ha perso la rilevanza che aveva avuto dai greci all'Ottocento. Gli "orbitali atomici", il concetto della meccanica quantistica che ha sostituito l'orbita classica immaginata nei modelli planetari dell'atomo, hanno ancora una loro "forma", ma non si parla più di "forma atomica". Come per le dimensioni, in ogni caso le forme possibili sono poche, non certo infinite.

Una delle caratteristiche più importanti della fisica classica è la divisibilità di ogni processo. Ogni processo fisico può essere pensato come costituito da una successione di processi parziali. Almeno teoricamente, ogni processo può essere seguito passo per passo nel tempo e nello spazio. L'orbita di un pianeta intorno al Sole può essere concepita come una successione di piccoli spostamenti. È questo il punto di vista a cui si è dovuto rinunciare per capire la natura delle qualità, la specificità e l'individualità microscopiche.

La natura ondulatoria dell'elettrone all'interno dell'atomo è in rapporto con l'indivisibilità e il carattere globale dello stato dell'atomo. Se provochiamo una suddivisione del processo e cerchiamo di "vedere" con maggiore esattezza dove l'elettrone si trova all'interno dell'onda, riusciamo a trovarlo come particella, ma distruggiamo in questo modo la sottile individualità dello "stato quantico". Inoltre, se lo stato quantico viene osservato con una luce che localizza con precisione, l'elettrone verrà trovato in qualche posto entro la regione dell'onda, ma il punto esatto in cui verrà trovato non può essere previsto in precedenza. A produrre le proprietà caratteristiche dello stato quantico è, infatti, la natura ondulatoria. La grande scoperta della fisica quantistica è stata quella di questi stati quantici individuali, ognuno dei quali costituisce un tutto indivisibile, fino a che non viene attaccato da mezzi di osservazione penetranti. Ogni tentativo di osservare

suddivisioni utilizzerà mezzi la cui energia è tanto alta da distruggere la delicata struttura dello stato quantico. Pur risultando diffuso principalmente entro specifiche regioni dello spazio, lo stato quantico costituisce un'entità singola che non può venire divisa in parti senza essere distrutta, in pratica, non è un ente spaziale.

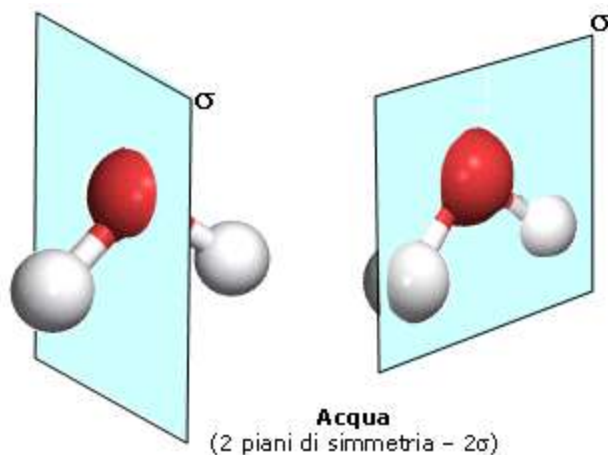
Il carattere quantistico dei sistemi meccanici è pertanto limitato; si manifesta solo finché i fattori di disturbo sono più deboli di specifiche energie di eccitazione. Tali soglie di eccitazione dipendono dalle caratteristiche del sistema e sono tanto più elevate quanto minore è lo spazio occupato dal sistema considerato. Occorre, ad esempio, poca energia per cambiare lo stato quantico di una molecola grande; ne occorre assai di più per cambiare lo stato quantico di un atomo; occorre, infine, un'energia molto più alta per produrre un cambiamento nel nucleo atomico. Questo crea una "scala quantica" di energia, correlata a una scala di dimensione.

La scala quantica dell'energia ci ha consentito di scoprire passo dopo passo le strutture del mondo naturale. Quando studiamo i fenomeni delle energie atomiche, non dobbiamo occuparci della struttura interna dei nuclei e quando studiamo la meccanica dei gas a temperature normali non dobbiamo occuparci della struttura interna degli atomi. Nel primo caso, possiamo considerare come unità identiche e immutabili i nuclei; nel secondo caso, i singoli atomi. In tal modo, i fenomeni osservati risultano più semplici e, fintanto che le energie prevalenti sono basse al punto da consentirci di considerare i costituenti come unità inerti, i sistemi possono venire studiati senza alcuna conoscenza della struttura interna dei costituenti.

## **5. Conclusioni**

Prima di chiudere questo lavoro, puntualizziamo due aspetti da noi ritenuti essenziali. Per prima cosa, il concetto di forma è molto antico e nella scienza moderna e contemporanea esso ha avuto differenti coniugazioni. Nel mondo atomico di cui ci siamo occupati in questo lavoro, tale concetto è partito con un'importanza notevole ed è arrivato a un suo notevole ridimensionamento, quasi a una sua scomparsa. Nel mondo microscopico della chimica, tuttavia, esso è ben presente nel mondo molecolare, come vedremo nel prossimo lavoro. Abbiamo, infine, analizzato il rapporto tra la meccanica quantistica e il concetto di struttura e forma. In generale, si ritiene che tali concetti non possano avere spazio in tale teoria: la meccanica quantistica e la natura ondulatoria delle particelle quantistiche, sembrano collidere con una loro strutturazione e con una forma di tali enti. In realtà, è proprio la natura ondulatoria degli enti microscopici a permette di chiarire l'aspetto globale (e individualizzante) di una struttura, permette cioè di comprendere uno dei suoi aspetti fondamentali, come abbiamo accennato.

Riguardo alla forma, questi stati hanno particolari proprietà di simmetria e questa è la loro "forma" quantistica. Tale forma quantistica si riflette poi sulle proprietà globali della molecola e sulla sua "forma". In Figura 2 vediamo le proprietà di simmetria della molecola di acqua.



**Figura 2.** Struttura della molecola di acqua e relativi piani di simmetria.

## Bibliografia

- [1] Villani, G. (2016). La trasformazione della materia. L'approccio chimico. *Nuova Secondaria*, 1, 102-105.
- [2] Thomson, J. J. (1914). *The Atomic Theory*. Oxford: Clarendon Press.
- [3] Schrödinger, E. (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem. *Annalen der Physik*, 384(4), 361-376. traduz. Inglese: Schrödinger, E. (1928). Quantization as a problem of proper values. In Schrödinger, E. (Ed.), *Collected Papers on Wave Mechanics* (pp.1-40). London: Blackie & Son Limited.
- [4] Schrödinger, E. (1926). Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinem. *Annalen der Physik*, 384(8), 734-756.
- [5] Born, M. (1926). Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge. *Zeitschrift für Physik*, 37(12), 863-867.
- [6] Born, M. (1926). Quantenmechanik der Stoßvorgänge. *Zeitschrift für Physik*, 38(11), 803-827.
- [7] Born, M. (1926). Zur Wellenmechanik der Stoßvorgänge. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1926, 146-160.
- [8] Lederman, L., Teresi, D. (1993). *The God Particle: If the Universe Is the Answer, What Is the Question?* New York: Dell Publishing.

## La forma delle molecole e delle macromolecole biologiche

**Giovanni Villani**

Istituto di Chimica dei Composti OrganoMetallici – CNR Pisa

E-mail: [giovanni.villani@cnr.it](mailto:giovanni.villani@cnr.it)

**Riassunto.** In questo lavoro ci occuperemo della forma nel mondo molecolare e macromolecolare (in particolare delle macromolecole di interesse biologico). L'odierna Meccanica Quantistica pone delle problematiche specifiche ai concetti di forma e di struttura delle molecole. La struttura molecolare, infatti, viene dall'approssimazione di Born-Oppenheimer che separa il moto elettronico da quello nucleare, consentendo di trattare gli elettroni come oggetti quantistici e i nuclei atomici come classici. Questa approssimazione sembra far discendere uno dei principali concetti chimici dalla nostra incapacità di trattare in maniera completa elettroni e nuclei insieme. Partendo dal concetto di *struttura molecolare*, andremo a vedere in che senso si può parlare di forma delle molecole e di quella delle macromolecole in meccanica quantistica. Per queste ultime in particolare, la loro "forma" è da tempo connessa alla loro funzione biologica (per esempio con il modello chiave-serratura). Noi sosteniamo che la semplice *forma geometrica* delle molecole non è sufficiente per capire la specificità delle macromolecole e che altri aspetti vanno inclusi nella spiegazione molecolare delle loro proprietà. Di conseguenza, sebbene il modello chiave-serratura (ma anche gli altri modelli biochimici più recenti su queste problematiche sono sostanzialmente simili) colga una parte importante delle caratteristiche interazioni delle macromolecole, esso va superato con il passaggio dalla *forma geometrica* alla *forma chimica* della macromolecola.

**Abstract.** In this work we will be dealing with the form in the molecular and macromolecular world (in particular the macromolecules of biological interest). Today's quantum mechanics poses specific issues to the concepts of form and structure of molecules. In fact, molecular structure comes from the Born-Oppenheimer approximation that separates the electronic motion from the nuclear one, by allowing to treat electrons as quantum objects and atomic nuclei as classics. This approximation seems to lead one of the main chemical concepts out of our inability to fully treat electrons and nuclei together. Starting from the concept of molecular structure, we will see in what sense we can talk about the molecular form and that of the macromolecules in quantum mechanics. For these latter in particular, their "form" has long been associated with their biological function (for example with the lock-and-key model). We argue that the simple geometric form of molecules is not sufficient to understand the specificity of macromolecules and that other aspects should be included in the molecular explanation of their properties. Consequently, although the lock-and-key model (but also the other most recent biochemical models on these issues are substantially similar) includes an important part of the characteristics macromolecular interaction, it must be overcome with the passage from the *geometric form* to the *chemical form* of the macromolecule.

## 1. Introduzione

Nel lavoro precedente sulla forma degli atomi abbiamo analizzato il significato che si può attribuire alla forma degli enti microscopici all'interno della meccanica quantistica. In questo lavoro ci occuperemo del mondo molecolare e macromolecolare (in particolare delle macromolecole di interesse biologico). Partendo dal concetto di *struttura molecolare*, andremo a vedere in che senso si può parlare di "forma delle molecole" e di quella delle macromolecole. Per queste ultime in particolare, la loro "forma" è da tempo connessa alla loro funzione (per esempio con il modello chiave-serratura) e, quindi, la sua importanza nella comprensione di aspetti del vivente in un approccio chimico è sicuramente ben stabilito e difficilmente può essere sottovalutato.

La meccanica quantistica pone delle problematiche specifiche al concetto di forma e struttura e noi l'abbiamo già visto nel caso degli atomi. Nel caso delle molecole, la struttura molecolare viene sostanzialmente dall'approssimazione di Born-Oppenheimer che separa il moto elettronico da quello nucleare consentendo di trattare gli elettroni come quantistici e i nuclei atomici come classici. In pratica, gli stati elettronici si calcolano a configurazione nucleare fissata. Questa separazione è un'approssimazione e sembra, quindi, che un concetto fondamentale della chimica, e della scienza in generale, venga fuori più dalla nostra incapacità a trattare in maniera completa, elettroni e nuclei insieme, che in maniera autonoma. Tale approssimazione, inoltre, viene meno in particolari casi e con essa dovrebbe venire meno il concetto di struttura molecolare.

Ci sono molti modi di rispondere alle problematiche sul concetto di struttura molecolare all'interno della teoria quantistica, ma non voglio dilungarmi a considerarli in dettaglio in quanto credo sia la meccanica quantistica a dovere essere in grado di spiegare l'enorme mole di "fatti" razionalizzati dal concetto di struttura molecolare e non viceversa. Un aspetto generale va, comunque, evidenziato, perché di notevole significato epistemologico. Lo studio di un composto viene fatto separandolo nei costituenti e analizzando i fenomeni e le proprietà del sistema globale in termini di fenomeni e di proprietà delle parti. Tale approccio è generale. La funzione di tale dissezione (approccio analitico) è quella di rendere possibile il confronto tra enti che, se non decomposti, sarebbero unici e inconfondibili. Sullo stesso piano epistemologico si pone la separazione temporale dei fenomeni, implicata appunto nella Born-Oppenheimer. Anche la separazione temporale è, infatti, generale nella scienza e svolge una funzione essenziale da evidenziare. In questo contesto, tuttavia, ci preme solo sottolineare che la critica alla separazione dei tempi elettronici da quelli nucleari (che si ottiene tenendo fermi i nuclei e muovendo solo gli elettroni, perché i primi sono "lenti" rispetto ai secondi), separazione che è alla base dell'approssimazione di Born-Oppenheimer e della conseguente struttura molecolare, è una critica non specifica ma generale. Essa, infatti, implica una critica a un approccio scientifico, e a guardare bene anche della vita comune, quello di sezionare i processi e gli enti che operano su scale differenti e tale approccio mostra la sua efficacia anche nella pratica di tutti i giorni, oltre ad avere solide basi concettuali.

In pratica, possiamo dire che il concetto di "approssimazione" va rivisto alla luce del concetto di scale, sia delle energie (e delle dimensioni) sia dei tempi. Trattare un livello di complessità che, sebbene non sempre coincidente con un gradino della scala quantica di energia, ma sicuramente a essa strettamente correlato, equivale a "trascurare" altre strutturazioni perché irrilevanti in quel

contesto. Trattare un fenomeno, scomponendolo in enti statici ed enti dinamici, equivale a un'approssimazione che permette di decomporre il fluire degli eventi. Sono questi gli insegnamenti che ci vengono dalla scienza e che permettono di evitare molte aporie filosofiche.

In questo lavoro partiremo dal concetto di struttura e da quello specifico di struttura molecolare e per quest'ultima analizzeremo il suo rapporto con la *forma geometrica* delle molecole e la sua spiegazione della specificità delle interazioni molecolari e macromolecolari. In queste ultime, ragioneremo su un possibile superamento di modelli (come quello chiave-serratura) basati esclusivamente sulla forma geometrica.

## **2. Il concetto di struttura**

Partiamo dal cercare di mettere in evidenza le caratteristiche che un insieme di enti devono avere per dire che tale insieme è strutturato. Noi crediamo che un sistema è dotato di struttura quando l'insieme delle sue parti costituenti presenta due caratteristiche: tali parti sono in certe relazioni specifiche per un tempo sufficientemente lungo rispetto ai fenomeni che si stanno considerando e tali relazioni modificano i componenti, rendendo specifica e unica questa aggregazione. Esempifichiamolo nel caso della molecola. All'interno della molecola non tutti gli atomi interagiscono allo stesso modo. È evidente, infatti, che ci sono delle interazioni "privilegiate" (o principali) che noi chiamiamo *legami chimici*. Anche in una molecola semplice di tre atomi come l'acqua, noi diciamo che l'ossigeno è legato ai due idrogeni e, quindi, ogni idrogeno è legato all'ossigeno, ma diciamo anche che i due idrogeni non sono legati tra di loro. La specificità di queste relazioni è temporalmente legata all'ambiente in cui si trova la molecola (per esempio un ambiente ossido-riduttivo può spezzare i legami e dissolvere le relazioni). È altrettanto evidente che gli atomi all'interno di una molecola sono "particolari", essi non sono uguali a quelli isolati e si parla di atomi *in situ*. Analizziamo un gruppo di molecole: H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH. Tutte contengono atomi di idrogeno (e la presenza di "H" nelle formule lo sta a dimostrare), ma questi idrogeni non possono essere tutti uguali se noi chimici diciamo che la loro acidità va nell'ordine acqua, alcol etilico (l'idrogeno legato all'ossigeno, non quelli legati al carbonio: questo dimostra che anche nella stessa molecola ci possono essere tipi differenti di idrogeno) e metano. Quindi, le definizioni classiche della struttura molecolare [1-4] in termini di costituzione, configurazione e conformazione possono andare bene se, definita la costituzione come la sequenza dei legami, si metta poi in evidenza la modifica che tali legami generano sugli atomi costituenti. È questa modifica, dovuta all'interazione specifica e unica tra gli atomi di una

molecola, che crea un ente unico e nuovo, una nuova molecola. È in questo senso che noi affermiamo che i concetti di molecola e struttura molecolare sono concetti moderni e che, quindi, tanto gli atomisti classici quanto i primi atomisti moderni non possedevano nozioni equivalenti a tali concetti [5].

Il concetto di struttura è fondamentale in molti campi del sapere, dalla matematica alla linguistica e, tanto in ambito epistemologico quanto in quello scientifico, ha acquisito recentemente ancora maggiore importanza con il declinare dell'approccio riduzionista e il sorgere della Sistemica e delle "Scienze della Complessità". Esso è sicuramente indispensabile nell'ambito delle scienze sociali e umane, ma noi sosteniamo che esso è fondamentale anche nelle scienze naturali. In chimica il concetto di struttura è utilizzato in più contesti: si parla di struttura cristallina, di struttura molecolare, ecc. Qui noi ci occuperemo solo della struttura molecolare, cercando di chiarire in che senso una molecola è diversa dalla somma dei suoi costituenti. Sul piano epistemologico vogliamo sottolineare che la chimica utilizza il concetto di struttura molecolare da oltre un secolo per descrivere la proprietà fondamentale di una molecola, quella che la specifica e la individualizza. Tale disciplina può, quindi, giustamente aspirare a divenire un punto di riferimento per le problematiche introdotte dal concetto di struttura per tutte le discipline che usano, o potrebbero usare, tale concetto.

Il concetto di struttura è in relazione con i concetti di "ordine-disordine" e, quindi, con l'entropia (misura in ambito scientifico dell'ordine di un sistema) e con il concetto di "informazione". Non è questo il lavoro in cui tali relazioni possono essere analizzate. In questo lavoro accenneremo solamente alla relazione della struttura molecolare con il concetto di informazione e qui vediamo una sua realizzazione quasi materiale: la vita, come si è sviluppata nel nostro mondo, ha alla sua base "l'informazione" genetica incorporata nella macromolecola del DNA. Sono le varie strutture di questa macromolecola, delle quali parleremo più avanti, che rendono possibili immagazzinare e riutilizzare quella imponente massa di informazioni necessaria per iniziare una nuova vita. È questa una problematica scientifica ed epistemologica alla quale la struttura molecolare ha molto da dire, come cercheremo di far vedere.

### **3. Teoria della struttura molecolare**

La teoria della struttura molecolare venne posta all'ordine del giorno nella seconda parte del XIX secolo (ma solo nel XX ha ricevuto la sua consacrazione) dalla scoperta e dallo studio dei fenomeni di isomeria e omologia che inducevano a pensare che nella molecola si stabilisse un ordine definito di distribuzione delle



forze di interazione tra i costituenti atomici. Infatti, già nel XIX secolo venivano considerati problemi chimici di primaria importanza il chiarire come fossero disposti gli atomi nei composti, come si distribuisse l'azione delle "forze chimiche" di ogni atomo nella molecola e se questi, direttamente o indirettamente, influissero gli uni sugli altri. Le premesse fondamentali che prepararono il terreno al sorgere della teoria strutturale furono: i) la teoria della valenza e dei legami tra gli atomi; ii) il riconoscimento che gli atomi di carbonio potevano unirsi in catene; iii) l'esatta definizione di atomo e di molecola; iv) la messa a punto di metodi per la determinazione precisa dei pesi atomici e molecolari.

Riguardo alla struttura molecolare, due opposte visioni si contrapposero. Da un lato, alcuni chimici (anche importanti, come in certi momenti lo stesso Kekulé) dicevano che le formule razionali erano formule di trasformazione e non già di costituzione e esse non potevano in alcun modo esprimere la costituzione, cioè la posizione degli atomi nei composti. Dall'altro (la scuola russa, per esempio), quelli che tramite le trasformazioni chimiche, soprattutto quelle graduali, speravano di determinare come era "fatta" una molecola. Kekulé [6], nel *Lehrbuch der organischen Chemie* (1858-61), sosteneva che "è stupefacente che molti chimici credano ancora oggi che attraverso lo studio delle trasformazioni chimiche si possa con sicurezza definire la costituzione di un composto e che questa, cioè la disposizione degli atomi, si possa esprimere con formule chimiche [...] non è possibile aggruppare sul piano di un foglio di carta gli atomi che sono disposti spazialmente, l'uno accanto all'altro nelle molecole, in modo che nella stessa formula siano disposti vicini gli atomi che rimangono nel composto nelle sue varie trasformazioni e che le posizioni relative degli atomi nella formula diano una rappresentazione delle proprietà più importanti del composto", mentre Butlerov [7] nel 1861 scriveva che "Conclusioni sulla struttura chimica delle sostanze possono assai verosimilmente essere basate sullo studio della loro formazione per sintesi e, principalmente, su quelle sintesi che hanno luogo a temperature poco elevate e, in genere, in condizioni alle quali sia possibile seguire l'andamento del graduale complicarsi delle particelle chimiche. Per ogni corpo sarà possibile una sola formula razionale e, quando saranno note le leggi generali della dipendenza delle proprietà chimiche dei corpi dalla loro struttura chimica, tale formula sarà l'espressione di tutte queste proprietà" o Bazarov [8] nel 1873 sosteneva che "Una reazione chimica dà la più fedele rappresentazione della struttura dei composti e quanto più svariate saranno queste reazioni, tanto più chiara risulterà tale struttura, allo stesso modo che la conoscenza della costituzione anatomica di un organismo sarà tanto più completa e definita, quanto più piccole saranno le parti in cui l'avremo sezionato, e quanto più varia la direzione delle dissezioni".

Il termine "struttura chimica" era già stato utilizzato prima di Butlerov, ma egli gli diede un nuovo significato applicandolo alla definizione del concetto di distribuzione nella molecola della forza di interazione tra gli atomi. Nel 1861 egli definì la struttura chimica [9]: "La natura chimica delle particelle composte è determinata da quella dei componenti elementari, dal loro numero e dalla struttura chimica. Ogni atomo chimico che entra nella composizione del corpo prende parte alla formazione di quest'ultima e agisce con la quantità determinata di forza chimica (affinità) che gli è propria. Io chiamo *struttura chimica* la distribuzione dell'azione di questa forza, in conseguenza della quale gli atomi agendo direttamente l'uno sull'altro si uniscono in una particella chimica". Nello stesso anno Butlerov [7] aveva evidenziato due aspetti importanti della struttura chimica: l'unicità della struttura per ogni sostanza ed il collegamento tra la struttura molecolare e il piano macroscopico delle proprietà della sostanza: "Per ogni corpo sarà possibile una sola formula razionale e, quando saranno note le leggi generali della dipendenza delle proprietà chimiche dei corpi dalla loro struttura chimica, tale formula sarà l'espressione di tutte queste proprietà".

La situazione, tuttavia, era complicata. Due altri problemi concettuali richiedevano di essere analizzati. Li esemplifichiamo sempre con Butlerov.

1. Il numero di legami in una molecola. Egli pensava che in ogni molecola esistessero tanti legami e così disposti in modo che *ogni atomo* fosse legato a tutti i rimanenti atomi della molecola. Che questa fosse un'idea comune lo si può vedere anche in Mendeleev [10] che, nella sua memoria sulla legge di periodicità del 1871, ricollegandosi alla visione newtoniana della forza chimica, diceva che: "È necessario supporre che gli atomi nella particella si trovino in un qualche equilibrio dinamico e agiscano l'uno sull'altro. L'intero sistema è legato da forze, appartenenti alle diverse parti, e non è lecito pensare che due parti qualunque dell'insieme si trovino in dipendenza da una terza e non influiscano l'una sull'altra, tanto più se tutto ciò che sappiamo su queste sue parti ci orienta verso il riconoscimento di una loro chiara e costante interazione 'chimica'". Noi abbiamo detto che l'esistenza di relazioni privilegiate tra gli atomi all'interno della molecola è fondamentale nella definizione del concetto di struttura molecolare, e di struttura in generale. Questo punto verrà chiarito gradualmente e non avrà un vero "scopritore".
2. La natura degli atomi nelle molecole. Nel 1864 egli sviluppò il suo pensiero sull'azione reciproca degli atomi che entravano nella composizione di una data molecola [11]: "Due atomi identici nella loro natura, entrando nella composizione di una stessa molecola assumono differente carattere

chimico quando l'influenza che ciascuno di essi esercita sulle altre parti componenti di questa molecola è differente".

Un discorso a parte merita il caso della struttura dei composti aromatici. Guardiamola un po' in dettaglio. Lo svilupparsi della chimica del catrame aveva portato alla luce molti composti di questo tipo tra cui il benzene e per loro il nome di "aromatici" fu introdotto da Kekulé nel 1860. Nel 1865, utilizzando la teoria di Erlenmeyer sull'esistenza di legami multipli, Kekulé elaborò un'ipotesi di struttura per i composti aromatici. Essa si basava sul postulato che tutti i composti aromatici contenessero un raggruppamento comune, qualcosa come un nucleo, formato da sei atomi di carbonio. Dall'analisi di tale nucleo vennero fuori tre nuovi postulati:

1. Tale nucleo era una struttura chiusa a forma esagonale.
2. Gli atomi di carbonio erano legati alternativamente da legami singoli e da legami doppi.
3. I sei atomi di idrogeno erano tutti equivalenti.

Tale teoria dei composti aromatici incontrava grandi difficoltà nella determinazione degli isomeri dei prodotti sostituiti. Nel 1879 Ladenburg fece notare che dalla struttura del benzene proposto da Kekulé due sostituenti in orto (cioè su atomi di carbonio vicini) potevano stare su un doppio legame o su uno singolo e, quindi, vi dovevano essere due differenti derivati. Fu allora che Kekulé rispose all'obiezione ammettendo che i doppi legami del benzene non occupassero posizioni fisse, ma oscillassero e questo portò alla doppia formula del benzene. Nel 1899 fu Thiele che, in applicazione della sua teoria delle valenze parziali, propose una formula simile a quella odierna.

In conclusione possiamo dire che l'introduzione della teoria della struttura molecolare modificò radicalmente la situazione della chimica organica. L'empirismo e l'ignoranza del meccanismo delle reazioni (soprattutto di quelle complesse della chimica organica) fu soppiantato da un atteggiamento attivo e cosciente nella sintesi di nuovi composti, secondo un piano studiato a tavolino. Invece dei tentativi alla cieca, si seguì uno schema basato sulla conoscenza della struttura dei prodotti di partenza e di quelli a cui si voleva arrivare. La sintesi di nuove sostanze ottenute in questo modo, più di ogni altro fatto, testimoniò la fertilità della teoria della struttura molecolare, la cui validità nessuna delle successive scoperte ha messo in dubbio, portando anzi a una sua conferma e a un suo completamento.

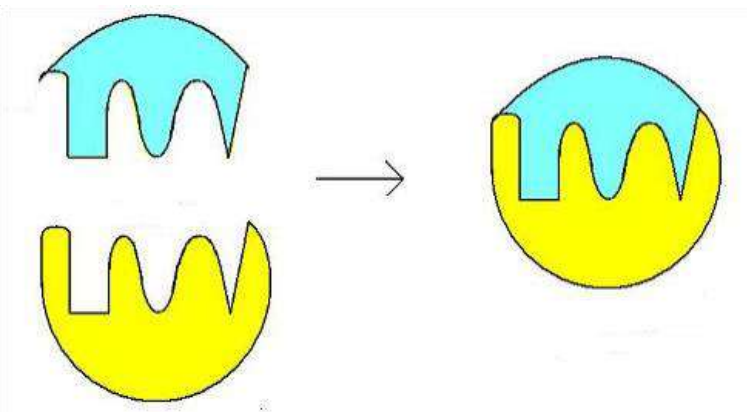
#### **4. La struttura nelle macromolecole**

Una critica al concetto di struttura poggia sulle macromolecole e sulla loro possibilità di avere delle sovrastrutture. In realtà, vi sono due problemi che le macromolecole pongono a questo concetto. Per prima cosa chiediamoci se il DNA di tutti gli esseri umani è identico. Ovviamente la risposta è negativa e solo i gemelli omozigoti hanno lo stesso DNA. Allora perché chiamiamo con lo stesso nome DNA tante sostanze diverse? Nelle ricerche del XX secolo sulle macromolecole (biologiche e non, come i polimeri) si è capito che erano possibili variazioni individuali fra una macromolecola e l'altra all'interno di una stessa "famiglia", di uno stesso tipo molecolare, e la conformazione complessiva era più importante della esatta sequenza atomica nel generare nuovi individui chimici. Così, per la biochimica dopo il 1950 due molecole di emoglobina, in cui alcuni degli amminoacidi sono diversi, sono la stessa molecola mentre per un chimico organico classico esse non lo sarebbero.

Riguardo alle sovrastrutture, esse esistono tanto per le macromolecole organiche, che possono presentare una sovrastruttura di insieme, per esempio formare una molecola globulare, quanto per le macromolecole biologiche. Per queste ultime, tuttavia, le sovrastrutture diventano ancora più importanti perché generalmente correlate alla loro funzione biologica. Per esempio, le proteine presentano più tipi di sovrastrutture (o differenti tipi di struttura) e si parla di:

1. Una struttura primaria, legata alla sequenza degli amminoacidi e che possiamo identificare, almeno sostanzialmente, con la normale struttura chimica se si accetta la visione che in biochimica le unità di partenza sono le molecole (in questo caso gli amminoacidi) e non gli atomi;
2. una struttura secondaria che definisce il primo livello di comportamento globale della catena peptidica. Per esempio una struttura  $\alpha$ -elica. Tale struttura è tenuta in piedi da legami idrogeno e svolge importanti ruoli biochimici. Per esempio, la separazione tra le due eliche del DNA, e relativa ricostruzione di quella complementare, rende possibile il passaggio dell'informazione da una molecola all'altra;
3. una struttura terziaria legata all'inglobamento di parti idrofobiche, per ridurre il contatto con l'acqua. Questo tipo di struttura mostra come è difficile per questi sistemi separare completamente la molecola dall'ambiente;
4. e, infine, una struttura quaternaria quando la macromolecola si organizza in più subunità polipeptidiche. Le quattro unità dell'emoglobina sono un esempio.

Il principale problema che queste strutture di ordine superiore pongono al normale concetto di struttura molecolare è il seguente. Dato che queste molecole sono sufficientemente grandi e flessibili, a prima vista sembra che, più che gli aspetti chimici, viene a contare la forma geometrica che tali molecole assumono. Un chiaro esempio di ciò è il modello di Fischer del 1894 che descrive l'interazione delle molecole biologiche nei termini di chiave e serratura. Tale modello, largamente utilizzato anche oggi in biochimica, rende la struttura chimica della macromolecola irrilevante e solo un supporto per formare un sito (la serratura) di particolare forma dove un'altra molecola (la chiave) va a posizionarsi bene in virtù della sua forma e a reagire. In Figura 1 si vede come questo processo "meccanico", legato solo alla forma geometrica delle molecole, possa avvenire.

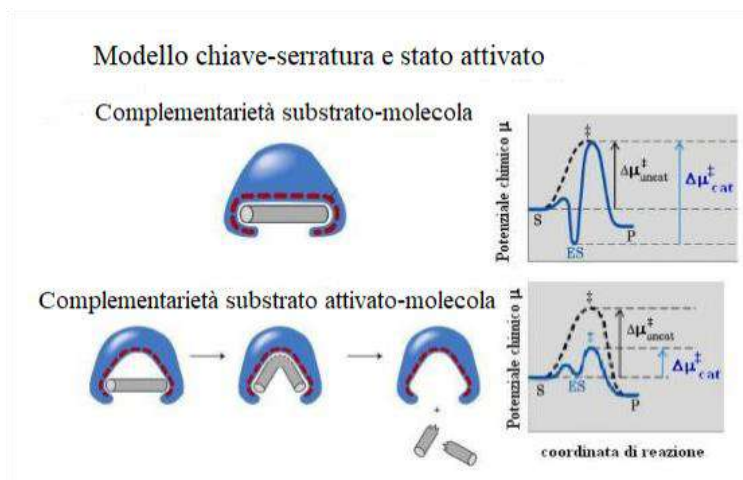


**Figura 1.** Schematizzazione del modello "chiave-serratura".

Tre considerazioni fondamentali per capire la relazione tra la forma geometrica delle molecole e le loro interazioni, vanno esplicitate.

1. Per prima cosa, le sovrastrutture che determinano la forma della macromolecola sono comprensibili solamente se le macromolecole sono considerate enti chimici costituiti di atomi con proprie caratteristiche in opportune posizioni. Abbiamo detto, infatti, che sono i legami idrogeno (e altri, come quelli disolfuro) e le interazioni tra gruppi idrofobici e l'acqua a determinare la struttura secondaria e terziaria delle proteine. Senza gli atomi adatti e nelle giuste posizioni la forma geometrica della molecola non verrebbe mai fuori.
2. Il modello chiave-serratura si deve applicare non alla macromolecola (substrato) e alla molecola reagente ma al sito attivato di questo complesso.

In Figura 2 si vede, infatti, che solo in questo caso si ha un abbassamento dell'energia di attivazione di questa reazione. Il sito attivato del complesso substrato-molecola è, tuttavia, un risultato chimico non legato direttamente alla forma geometrica delle due molecole in gioco.



**Figura 2.** Correlazione tra il modello “chiave-serratura” e la struttura del complesso attivato.

3. Eventuali altri effetti (come quelli allosterici) sono effetti chimici e possono avere una ripercussione sulla forma delle molecole, ma possono anche avere un effetto solamente sulle proprietà chimiche (per esempio la carica atomica) degli atomi maggiormente coinvolti nella reazione. In pratica, anche con la stessa forma geometrica del sito (e/o del complesso attivato) si possono avere effetti reattivi differenti se gli atomi del sito (e/o del complesso attivato) sono chimicamente “differenti” (con una differente carica elettrica, per esempio).

## 5. Conclusione

In questo lavoro abbiamo visto l'importanza che possiamo attribuire alla “forma” delle molecole e delle macromolecole. Partendo dalla storia del concetto di struttura molecolare siamo arrivati alla forma delle macromolecole, geometrica e non solo. Il risultato di questo percorso è che la semplice *forma geometrica* delle molecole non è sufficiente per capire la specificità delle sue interazioni (sia quelle non-reattive sia quelle reattive) e che altri aspetti vanno inclusi nella spiegazione molecolare di tali interazioni. In particolare, noi riteniamo che un'ottica sistemica,

in cui ogni molecola ha una propria *organizzazione* interna, sia quella giusta per spiegare le proprietà statiche e dinamiche tanto delle molecole quanto delle macromolecole. Il concetto molecolare che più si avvicina (senza, tuttavia, identificarsi) al concetto di organizzazione è quello di *struttura molecolare* e, in questo contesto, questi due concetti possono essere considerati equivalenti. In questo lavoro, il rapporto tra il concetto di struttura molecolare e quello più intuitivo di *forma geometrica* delle molecole è stato trattato per il caso più interessante, quello delle macromolecole. In questo caso si vede che, sebbene il modello chiave-serratura (ma anche gli altri modelli biochimici più recenti su queste problematiche sono sostanzialmente simili) colga una parte importante delle caratteristiche delle interazioni tra macromolecole (e/o tra macromolecola e molecola), esso va superato con il passaggio dalla *forma geometrica* alla *forma chimica* della macromolecola.

## **Bibliografia**

- [1] Mainzer, K. (1997). Symmetry and Complexity - Fundamental Concepts of Research in Chemistry. *Hyle*, 3(1), 29 - 49.
- [2] Del Re, G. (1998). Ontological status of molecular structure. *Hyle*, 4(2), 81-103.
- [3] Zeidler, P. (2000). The epistemological status of theoretical models of molecular structure. *Hyle*, 6(1), 17-34.
- [4] Sukumar, N. (2008). The chemist's concept of molecular structure. *Foundations of Chemistry*, 11(1), 7-20.
- [5] Villani, G. (2001). *La chiave del mondo. Dalla filosofia alla scienza: l'onnipotenza delle molecole*. Napoli: CUEN.
- [6] Kekulé, F. A., Anschütz, R., Schultz, G., LaCoste, W. (1861). *Lehrbuch der organischen Chemie, oder der Chemie der Kohlenstoffverbindungen*. Erlangen: Ferdinand Enke.
- [7] Solov'ev, J. I. (1976). A. M. Butlerov, In *L'evoluzione del pensiero chimico dal '600 ai giorni nostri* (p. 224). Milano: Biblioteca della EST, Edizioni scientifiche e tecniche Mondadori.
- [8] Solov'ev, J. I. (1976). A. Barazov. In *L'evoluzione del pensiero chimico dal '600 ai giorni nostri* (p. 224, nella nota). Milano: Biblioteca della EST, Edizioni scientifiche e tecniche Mondadori.
- [9] Butlerov, A. M. (1953). *Opere*, I. Mosca.
- [10] Mendeleev, D. (1871). Memoria su *La legge della periodicità degli elementi chimici*. In Di Meo, A. *Atomi e molecole fra due secoli (XIX e XX)*. E. Niccoli, P. Riani e G. Villani (Ed.), *Atti della III<sup>a</sup> Scuola Estiva "Fondamenti Metodologici ed Epistemologici, Storia e Didattica della Chimica"*, Pisa 2000 (pp. 87-88).
- [11] Butlerov, A. M. (1864). *Sulle differenti spiegazioni di alcuni casi di isomeria*. In *Opere*, I, Mosca 1953.

**Quaderni di Ricerca in Didattica, numero speciale 1**

Atti della Scuola Permanente per l'Aggiornamento degli Insegnanti di Scienze Sperimentali  
"Scienza inForma – La Forma nella Scienza"  
Le Dune Sicily Hotel Catania, 24-29 luglio 2017

ISBN: 978-88-941026-3-5