



GIOVANNI PALUMBO
MICHELANGELO PARRILLI

**CHIRALITÀ
E OMOCHIRALITÀ**
ORIGINE DELLA VITA





©

ISBN
979-12-218-0623-6

PRIMA EDIZIONE
ROMA 31 MARZO 2023

INDICE

- 7 Premessa
- 11 Capitolo I
Chiralità e omochiralità
1.1. Introduzione, 11 – 1.2. Chiralità molecolare, 13 – 1.2.1. Asimmetria delle molecole, 18 – 1.2.2. Differenti tipi di chiralità molecolare, 22 – 1.2.3. Descrittori di chiralità, 24 – 1.2.4. Relazioni enantiomeriche ed attività ottica di molecole chirali, 28 – 1.2.5. Omochiralità, 35 – 1.3. Chiralità fisica e concetto di parità, 41 – Riferimenti bibliografici, 57.
- 59 Capitolo II
Origine della Vita – Rottura della simmetria molecolare
2.1. Introduzione, 59 – 2.2. Inizi degli studi sull'origine della Vita, 61 – 2.2.1. Ipotesi e teorie sull'origine della Vita, 62 – 2.3. Rottura della simmetria molecolare e omochiralità, 75 – 2.4. Approcci sperimentali allo studio della rottura della simmetria molecolare, 78 – 2.4.1. Processi casuali, 79 – 2.4.1.1. Fluttuazioni stocastiche, 79 – 2.4.1.2. Cristallizzazione, 81 – 2.4.1.3. Sistemi autoassemblati chirali, 88 – 2.5. Modello deterministico, 93 – 2.5.1. Interazione debole e violazione della parità, 93 – 2.5.1.1. Misure di PVED in atomi e molecole, 103 – 2.5.2. Rottura della simmetria in una miscela racemica: β -radiolisi e cattura elettronica, 107 – 2.5.2.1. Ricerche sulla rottura della simmetria nello spazio mediante β -decadimento, 111 – 2.5.2.2. Processi rilevanti per la formazione di

molecole semplici nello spazio, 113 – 2.5.3. Fotochirogenesi, 118 – 2.5.3.1. Fotodegradazione, 121 – 2.5.3.2. Fotorisoluzione, 126 – 2.5.3.3. Fotosintesi asimmetrica, 128 – 2.5.3.4. Studi sulla presenza di luce circolarmente polarizzata nel cosmo, 139 – 2.5.4. Dicroismo magnetochirale, 140 – 2.5.5. Moti vorticosi, 144 – 2.5.6. Raggi cosmici, 148 – Appendice 2.1, 151 – Appendice 2.2, 159 – Riferimenti bibliografici, 164.

173 Capitolo III

Meccanismi di amplificazione della chiralità

3.1. Introduzione, 173 – 3.2. Modello di Frank, 174 – 3.3. Reazione autocatalitica di Soai, 177 – 3.4. Origine della omochiralità mediante autocatalisi asimmetrica, 180 – 3.4.1. Autocatalisi asimmetrica con luce CPL, 180 – 3.4.2. Reazione di Soai catalizzata da cristalli enantiomorfi, 183 – 3.4.2.1. Cristalli enantiomorfi formati da composti organici achirali, 184 – 3.4.3. Sintesi asimmetrica assoluta mediante reazione di Soai, 188 – 3.4.4. Autocatalisi asimmetrica innescata da isotopomeri chirali, 189 – 3.5. Formazione di α -amminoacidi proteinogenici da α -metil- α -amminoacidi, 191 – 3.5.1. Amplificazione della chiralità degli amminoacidi mediante metodi fisici, 194 – 3.5.1.1. Trasferimento di fase soluzione-solido: cristallizzazione, 194 – 3.5.1.2. Trasferimento di fase gas-solido: sublimazione, 199 – 3.5.1.3. Adsorbimento asimmetrico su cristalli, 202 – 3.6. Amplificazione della chiralità di carboidrati in reazioni catalizzate da amminoacidi, 205 – 3.7. Amplificazione della chiralità con agglomerati di serina, 211 – 3.7.1. Chimica dell'ottamero della serina, 214 – 3.7.2. Chimica della serina, 215 – 3.8. Combinazione di processi fisici e chimici per un enantioarricchimento da materiale racemico, 217 – 3.9. Amplificazione della chiralità mediante forze cooperative, 221 – 3.9.1. Processo di polimerizzazione, 221 – 3.9.2. Aggregati sopramolecolari, 225 – 3.9.3. Polimerizzazione all'interfaccia aria/acqua: chiralità bidimensionale, 226 – 3.10. Origine della Vita: possibili scenari tra teorie e dati sperimentali, 230 – Riferimenti bibliografici, 244.

249 Indice analitico

PREMESSA

Solo la conoscenza delle leggi della Natura e l'osservazione attenta della sua biodiversità con le sue mille sfumature di colori possono permettere di comprendere cosa è la Vita e cercare di determinarne l'origine!!!

Lo studio dell'origine della Vita, che a prima vista potrebbe sembrare un argomento da salotto o puramente un argomento religioso-filosofico, ha interessato ed interessa tuttora studiosi di ogni genere e disciplina. L'interesse per questo studio è messo in risalto da una frase dell'etologo e biologo R. Dawkins che nel suo libro⁽¹⁾ *Il racconto dell'antenato, la grande storia dell'evoluzione*, afferma: «Chiunque non sia stato reso insensibile dalla quotidianità guarda con stupore e gioia il mondo che lo circonda, ma prova ancora più stupore e gioia nel rendersi conto che ha la capacità di comprendere le proprie origini».

In accordo con la maggior parte delle definizioni della Vita, l'entità più semplice che si può considerare viva, cioè quella in grado di nutrirsi, di riprodursi e trasmettere i propri caratteri ereditari, è la cellula. Questa è costituita da molecole e quindi da atomi per cui è a questo livello che si deve ricercare l'origine della Vita così come noi la conosciamo. È per

(1) DAWKINS R., *Il racconto dell'Antenato. La grande storia dell'evoluzione*, collana Biologia, Arnoldo Mondadori Editore, 2004, p. 673.

questo motivo che il libro ha come punto di partenza lo studio di due delle più importanti proprietà che caratterizzano le molecole, ed in particolare le biomolecole che sono alla base della Vita, come la chiralità e la omochiralità.

La chiralità è la proprietà geometrica di un oggetto rigido (o disposizione spaziale di punti o atomi) di essere non sovrapponibile alla sua immagine speculare. Il generale convincimento, di coloro che non sono avvezzi a tale argomento, che tutte le molecole siano achirali, cioè sovrapponibili alla loro immagine speculare, nasce da esempi di molecole come il metano ed il benzene che si trovano diffusamente in natura, e inoltre dal fatto che tutti siamo attratti, a causa del nostro senso estetico, da specie altamente simmetriche. Tuttavia, quando si considerano tutti i possibili composti che si possono ottenere combinando un dato numero di atomi, ad esempio di carbonio con atomi di idrogeno, si osserva una netta predominanza delle strutture chirali su quelle achirali anche se si considerano molecole con un numero relativamente basso di atomi. Così, nel caso di idrocarburi saturi (alcani), a livello del decano $C_{10}H_{22}$, il numero di composti chirali è già due volte più abbondante di quelli achirali, e per il tetradecano $C_{14}H_{30}$ circa il 95% dei possibili composti sono chirali.

In effetti le macromolecole alla base della Vita, come le proteine e gli acidi nucleici (DNA e RNA), preposti al trasferimento dei caratteri ereditari, sono costituite da semplici unità molecolari che sono rispettivamente gli α -amminoacidi, che presentano tutti una chiralità di tipo *L*, e i carboidrati che invece presentano tutti una chiralità di tipo *D*, in particolare il *D*-ribosio nel RNA e il *D*-desossiribosio nel DNA.

La formazione di molecole con una determinata chiralità può essere ottenuta solo nel caso in cui nell'ambiente di reazione vi sia una specie (substrato, reagente, solvente, catalizzatore) chirale. Nel caso di un ambiente non chirale si ha solo una miscela al 50% in moli delle due forme chirali (*D*) e (*L*), che viene definita come racemo. Questa semplice constatazione presuppone che nell'era primordiale, all'origine della Vita vi sia stato probabilmente un processo, definito come "rottura della simmetria speculare", con formazione di una predominante o unica forma enantiomerica (destrorsa o sinistrorsa) che ha dato luogo alla omochiralità biologica.

Molti progressi sono stati fatti negli ultimi decenni sulla non semplice questione dell'origine della "rottura della simmetria speculare" a livello molecolare e della omochiralità. Anche se questo aspetto è spesso sottovalutato ai fini dell'origine della Vita esso rappresenta, come vedremo, un ulteriore problema tuttora non ancora risolto che vede coinvolte più discipline come la chimica, la biologia, la fisica, la cosmologia e la mineralogia.

In questa breve trattazione cercheremo di dare una panoramica generale dell'origine della Vita e della omochiralità biologica. Nel I capitolo è riportata una breve trattazione sulla chiralità molecolare, con approfondimenti sulla omochiralità, e sulla chiralità fisica con riferimento alla rottura della simmetria e alla violazione di parità. Nel II capitolo vengono, invece, riportate alcune teorie sull'origine della Vita e alcuni possibili processi fisici e chimici che hanno potuto portare originariamente alla rottura della simmetria sulla Terra e/o nell'Universo. Nel III capitolo, infine, sono accennati alcuni dei più interessanti processi relativi all'amplificazione della chiralità che avrebbe portato alla omochiralità biologica ed alla formazione delle prime biomolecole essenziali per l'inizio e lo sviluppo della Vita.

CHIRALITÀ E OMOCHIRALITÀ

1.1. Introduzione

Molti degli oggetti che si trovano in natura non sono sovrapponibili con la loro immagine speculare e si dice pertanto che hanno **chiralità**⁽¹⁾.

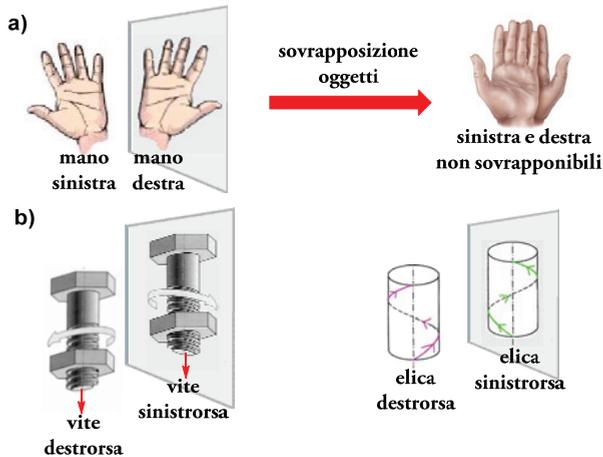


Figura 1.1. Oggetti chirali; immagini speculari non sovrapponibili; a) mano sinistra e mano destra; b) vite sinistrorsa e destrorsa.

(1) Oggetti le cui immagini speculari sono, sovrapponibili all'originale sono achirali o simmetrici.

Esempi macroscopici di oggetti chirali sono ad esempio una mano (in greco χεῖρ = kheir, da cui deriva la parola chirale) che può essere destra o sinistra o una vite che può avere una filettatura (elica) destrorsa o sinistrorsa per cui quando si avvita, cioè avanza lungo l'asse, ruota in senso orario (vite destrorsa) o antiorario (vite sinistrorsa) (fig. 1.1). Un oggetto achirale è ad esempio una bottiglia la cui immagine speculare è completamente sovrapponibile all'originale (fig. 1.2).

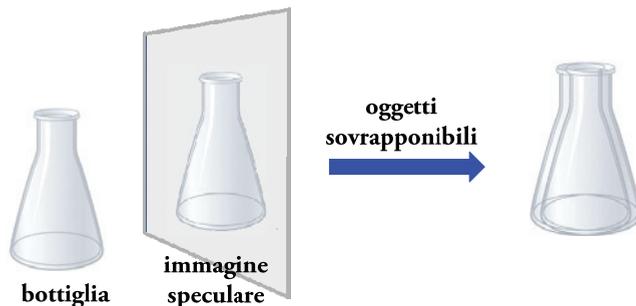
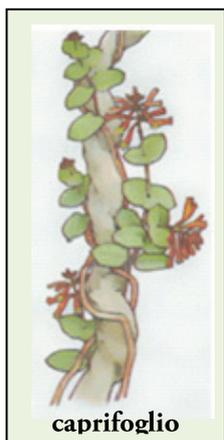
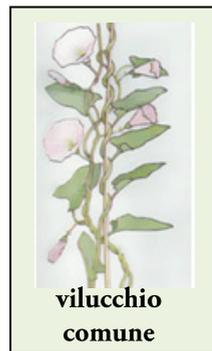


Figura 1.2. Oggetto achirale; bottiglia e sua immagine speculare sovrapponibile.

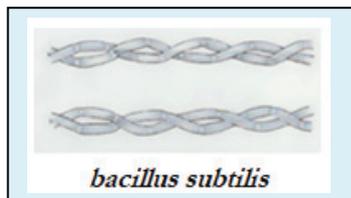
La chiralità è una caratteristica comune agli esseri viventi. Molti esempi



di asimmetria e chiralità (elicità) possono essere trovati nel mondo delle piante come gli avvolgimenti dei rampicanti, i fiori di alcune specie, le comuni pigne. Ad esempio il Caprifoglio, *Lonicera Sempervirens*, si avvolge in senso sinistrorso, mentre il Vilucchio comune, *Convolvulus Arvensis*, si avvolge in senso destrorso, come la maggior parte delle piante rampicanti. 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. Le chiocchie come *Liguus virgineus* sono generalmente destrorse, ma nell'ambito di una specie, a seguito di mutazioni,

si possono avere esemplari sinistrorsi. Il batterio *Bacillus subtilis* di norma dà origine a colonie a forma di spirale destrorsa; con l'aumentare della temperatura, però, le colonie tendono a diventare sinistrorse.

1.2. Chiralità molecolare

In chimica è detta chirale una molecola non sovrapponibile alla sua immagine speculare nelle tre dimensioni [1]. Una molecola sovrapponibile alla propria immagine speculare è detta invece achirale. Per distinguere due differenti forme non sovrapponibili (enantiomorfe⁽²⁾) ciascuna di esse viene indicata come forma destrorsa e sinistrorsa.

La chiralità è una proprietà di asimmetria molto importante in molte branche della Scienza e in Natura si mostra in diversi modi. Dalla scala degli atomi a quella umana la natura è essenzialmente chirale, ossia mostra una preferenza per la destra o per la sinistra; di questa asimmetria, che sembra universale, si cercano di comprendere le correlazioni causa-effetto.

Una molecola chirale e la sua immagine speculare sono definite come coppia di enantiomeri (dal greco *enántios* che significa “contrario” e *meros* che significa “parte”) e si dice che esse sono in una relazione enantiomerica. Nel caso di oggetti macroscopici come ad esempio i cristalli questi vengono definiti enantiomorfi (fig. 1.3).

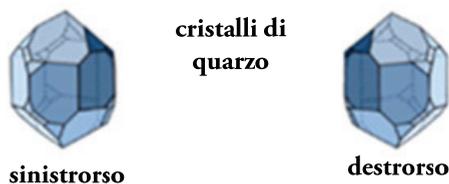


Figura 1.3. Cristalli di quarzo (SiO_2) enantiomorfi.

Lord Kelvin definì il termine chiralità per un oggetto o molecola affermando: «Io chiamo ogni figura geometrica o gruppo di punti, chirale e dico che ha chiralità se la sua immagine speculare non può essere portata a coincidere con sé stessa».

(2) Termine introdotto nel 1904 dal fisico irlandese W.Th. Kelvin nel linguaggio scientifico per indicare una figura geometrica o una struttura materiale non sovrapponibile alla sua immagine speculare. Nel caso di molecole si parla di enantiomeria.

In natura, come abbiamo visto, esistono, nel caso di strutture polimeriche molto lunghe, una generale preferenza di strutture elicoidali, sia cilindriche che coniche secondo se si arrotolano lungo una superficie di un cilindro o di un cono, a svantaggio di strutture lineari. L'esempio noto a tutti è quello dei tralci dei vitigni il cui arrangiamento comporta un guadagno di spazio. È noto che la struttura elicoidale cilindrica è quella che comporta la distanza più corta tra due punti non disposti sulla stessa verticale e inoltre conferisce alla struttura una elasticità e flessibilità maggiore rispetto a quella lineare, il che comporta una maggiore resistenza rispetto ad esempio al vento e alla pioggia nel caso dei tralci della vite.

A livello molecolare queste strutture elicoidali sono in genere determinate da interazioni attrattive intramolecolari tra gli atomi della elica che sopravanzano quelle con le molecole dell'ambiente circostante che tenderebbero a distruggere l'elica. Una elica cilindrica è l'archetipo di tutti gli oggetti che esibiscono chiralità ivi comprese le molecole. Una elica destrorsa, in cui l'avvolgimento dell'elica dall'alto verso il basso si muove in senso orario (fig. 1.4; a), e la sua immagine speculare sinistrorsa (fig. 1.4; b), in cui l'avvolgimento nello stesso senso avviene in modo antiorario, non possono essere sovrapposte in quanto la riflessione inverte il senso dell'elica (fig. 1.4).

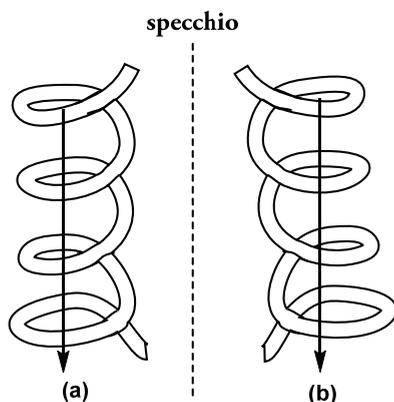


Figura 1.4. a) Elica cilindrica destrorsa e b) sinistrorsa.

Le molecole chirali esistono in due forme, l'una immagine speculare dell'altra non sovrapponibili, ossia non esiste una combinazione di rotazioni o traslazioni nello spazio che consenta la loro sovrapposizione. La causa più comune di chiralità in una molecola è la presenza di un centro di chiralità o centro chirale, anche detto centro asimmetrico, cioè un

atomo che legni un insieme di ligandi disposti nello spazio in modo che la molecola e la sua immagine speculare risultino non sovrapponibili.

La vita di tutti i giorni è basata quasi esclusivamente sulla chiralità. Sebbene non ci sia un'apparente relazione tra la chiralità a livello macroscopico (ogni giorno si ha a che fare con la chiralità; ad esempio calzare le scarpe al piede giusto o ammirare la spirale destrorsa di una lumaca) e la chiralità a livello molecolare, è generalmente accettato che la chiralità e la omochiralità delle molecole essenziali (proteine, DNA e RNA, carboidrati) è uno degli aspetti fondamentali della Vita sulla terra. Gli organismi viventi sono chirali, a partire dal loro DNA e pertanto interagiscono spesso in modo molto diverso con due enantiomeri di una molecola: due enantiomeri di un profumo possono avere odori differenti; due enantiomeri di una molecola alimentare possono avere sapori differenti, due enantiomeri di un farmaco possono essere uno buono e uno inefficace o addirittura dannoso. Di seguito sono elencati alcuni esempi del differente modo di interagire di coppie di molecole enantiomeriche con il corpo umano. Gli enantiomeri vengono indicati con descrittori differenti come ad esempio (*R*)/(*S*) o (*D*)/(*L*) come vedremo in seguito.

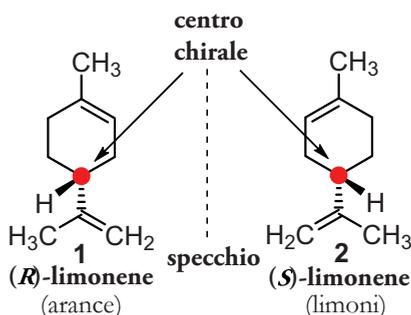


Figura 1.5. Strutture molecolari delle due forme non sovrapponibili (enantiomeriche) di *R*- e *S*-limonene. Il legame tratteggiato indica un legame rivolto lontano dall'osservatore, mentre in grassetto quello rivolto verso l'osservatore essendo lo specchio di riflessione perpendicolare al piano del foglio.

Un enantiomero del limonene, quello identificato come (*R*)-limonene (1), è ad esempio il principale componente responsabile dell'aroma delle arance mentre la sua immagine speculare, l'enantiomero (*S*)-limonene (2) è responsabile dell'aroma dei limoni (fig. 1.5). Un altro esempio delle caratteristiche proprietà delle forme enantiomeriche è dato dal glutammato di sodio. Mentre il composto *L*-glutammato di sodio (3)

fornisce il sapore tipico della carne (umami) la sua immagine speculare, il *D*-glutammato di sodio (4), è completamente insapore (fig. 1.6).

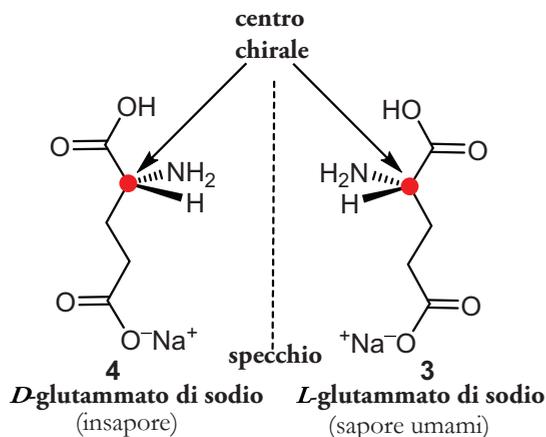


Figura 1.6. Immagini speculari del glutammato di sodio (il legame tratteggiato indica un legame rivolto lontano dall'osservatore, mentre in grassetto quello verso l'osservatore; il pallino rosso indica il carbonio chirale).

Un interessante caso nel campo dei farmaci è quello della *L*-dopamina (5; *L*-DOPA) usata nel trattamento della malattia di Parkinson (fig. 1.7).

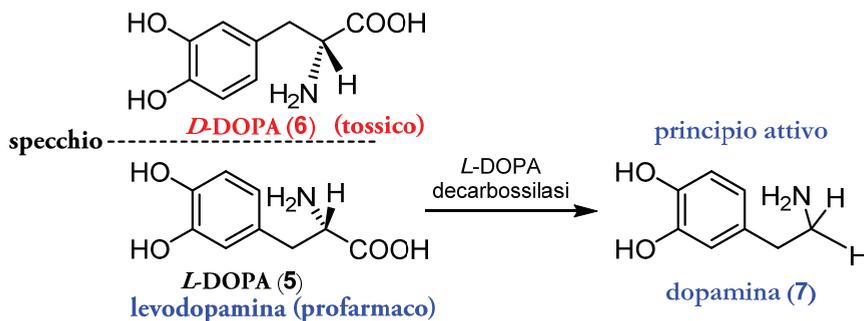


Figura 1.7. *L*-DOPA (5) come profarmaco per la malattia di Parkinson.

Il farmaco attivo è la dopamina (7) un composto achirale che si forma nell'organismo per decarbossilazione. Poiché la dopamina (7) non riesce ad oltrepassare la barriera ematoencefalica, per permettere al farmaco di raggiungere il sito di azione, si somministra il profarmaco *L*-DOPA (5). In vivo, l'enzima *L*-DOPA decarbossilasi discrimina gli stereoisomeri di DOPA e decarbossila⁽³⁾ solo uno dei due ed in particolare l'enantiomero *L*.

(3) La decarbossilazione è la reazione che permette di sostituire il gruppo carbossilico (COOH) con un idrogeno (H).

Per tale ragione è importante somministrare solo la *L*-DOPA (5), nella sua forma pura, in quanto se fosse presente anche il suo enantiomero (immagine speculare), la *D*-DOPA (6) (fortemente tossico), non essendo decarbossilato dall'enzima specifico, si accumulerebbe nell'organismo creando gravi danni.

Ancora interessante è il caso della talidomide, farmaco venduto negli anni Cinquanta e Sessanta del secolo scorso come sedativo, antiemetico ed ipnotico rivolto soprattutto alle donne in gravidanza in quanto sembrava avere un profilo rischio/beneficio estremamente favorevole rispetto ai barbiturici, unici farmaci disponibili all'epoca per lo stesso scopo. Dopo solo pochi anni dalla sua introduzione sui mercati di Australia, Giappone e Europa risultò chiara l'associazione tra l'uso di questo farmaco durante la gestazione e l'aumentata frequenza di malformazioni alla nascita. A causa dei circa 10.000 casi riportati di focomelia e amelia (patologie genetiche che comportano gravi malformazioni nello sviluppo degli arti dei neonati), la talidomide venne bandita nella maggior parte dei paesi nel 1961. In realtà era stato scoperto che la talidomide era stata prodotta e venduta come una miscela (racemica) delle due enantioforme: la forma (*S*)-talidomide (8) e quella (*R*)-talidomide (9) (fig. 1.8).

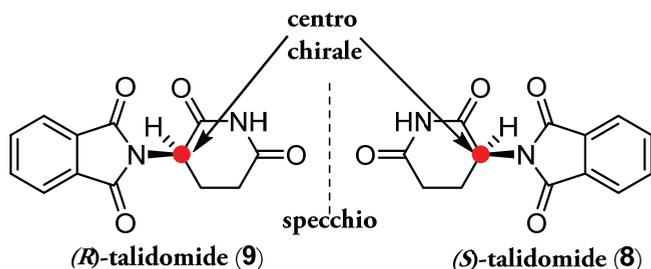


Figura 1.8. Immagini speculari della talidomide (8) e (9).

Successivi studi clinici hanno poi dimostrato che mentre l'effetto sedativo era dovuto a entrambi gli enantiomeri solo l'enantiomero *S*-8 era responsabile dei gravi e molteplici difetti alla nascita mentre quello *R*-9 era sedativo ma non tossico. Infine un ultimo esempio è quello della penicilamina, farmaco utilizzato elettivamente per il trattamento della malattia di Wilson che determina un accumulo di rame nel fegato ed in altri organi. Esso è anche usato per le persone con calcoli renali che hanno alti livelli di cistina nelle urine, artrite reumatoide e avvelenamento da metalli pesanti.

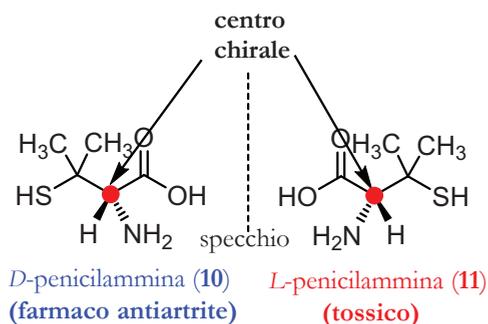


Figura 1.9. Immagini speculari della penicilammina.

Mentre la enantioforma destrorsa *D*-penicilammina (10) è un farmaco antiartritico la sua immagine speculare sinistrorsa, l'enantiomero *L*-penicilammina (11), è fortemente tossico (fig. 1.9).

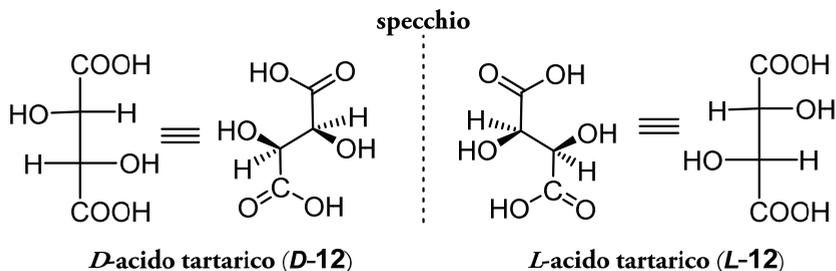
Da quanto detto appare chiara l'importanza dello studio dell'asimmetria (o chiralità) ed il ruolo importante che essa gioca nelle Scienze della Vita. Per tale ragione nel paragrafo successivo verrà effettuato uno studio sistematico dei sistemi molecolari asimmetrici (chirali).

1.2.1. Asimmetria delle molecole

La storia della scoperta della asimmetria delle molecole può essere riassunta attraverso varie tappe scandite dai risultati ottenuti da molti scienziati di differenti discipline.

Nel 1801 il mineralogista francese Hauy notò che i lati nei cristalli di quarzo erano disposti in modo non sovrapponibile a quelli della sua immagine speculare. Più tardi nel 1809 il fisico francese Malus osservò che gli stessi cristalli di quarzo potevano indurre la polarizzazione della luce. Qualche anno dopo nel 1812 il fisico francese Biot trovò che una lamina di quarzo, tagliata con un angolo opportuno lungo un particolare asse del cristallo, ruotava il piano della luce polarizzata di un angolo proporzionale allo spessore della lamina. Forme destrorse e sinistrorse dei cristalli ruotavano l'angolo della luce polarizzata in opposte direzioni. Egli estese queste osservazioni ai puri liquidi organici ed alle soluzioni puntualizzando anche che vi erano alcune differenze tra la rotazione causata dai cristalli di quarzo e quella delle soluzioni: la rotazione dei cristalli erano dovute all'intero cristallo mentre quella delle soluzioni alle singole molecole.

Infine nel 1846 Pasteur osservò che i cristalli di acido tartarico destrorotatorio hanno facce emiedriche con la stessa orientazione correlando in tal modo la struttura emiedrica al suo potere rotatorio. Nel 1848 lo stesso Pasteur separa i cristalli enantiomorfi del sale misto di ammonio e sodio dell'acido tartarico (12).



Egli fu capace di separare i differenti cristalli con una pinzetta con l'aiuto di una lente d'ingrandimento. Tali studi lo portarono a fare una prima importante deduzione e cioè che *la rotazione del piano della luce polarizzata causata dal sale dei cristalli di acido tartarico è una proprietà delle molecole chirali*.

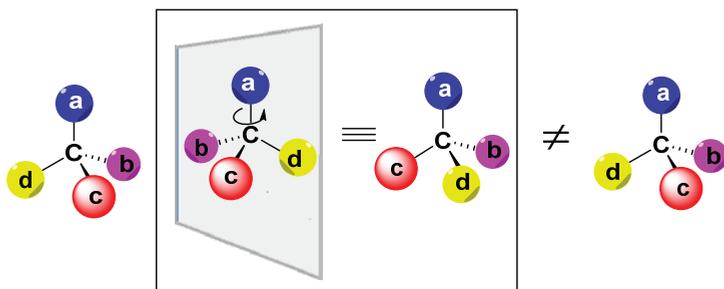


Figura 1.10. Carbonio tetraedrico con 4 sostituenti differenti **a**, **b**, **c**, **d** non sovrapponibile alla sua immagine speculare. La non-sovrapposibilità è verificata facendo ruotare l'immagine speculare intorno al legame C-**a** in modo da far coincidere i sostituenti **a** e **b** dell'immagine speculare con quelli della struttura iniziale e verificando che gli altri sostituenti (**c** e **d**) comunque non coincidono. Lo stesso accade se si fanno coincidere altri due qualsiasi sostituenti.

Le molecole enantiomeriche di solito sono caratterizzate dalla presenza di un atomo tetraedrico legato a 4 sostituenti diversi. L'esempio più comune è dato dalla chiralità del carbonio tetraedrico nello stato di ibridizzazione sp^3 legato a 4 sostituenti differenti tra loro. In tal caso le immagini speculari della molecola non sono sovrapponibili (fig. 1.10) e la

molecola è detta chirale. In questo caso il carbonio rappresenta un elemento stereogenico.

Un elemento stereogenico (punto, asse, piano) è, in una molecola, fonte di stereoisomerismo in quanto lo scambio di posto di due sostituenti rispetto a tali elementi dà luogo ad uno stereoisomero⁽⁴⁾ che in alcuni casi può essere chirale come appunto accade in un enantiomero.

Oltre all'atomo di carbonio esistono altri centri tetraedrici fonti di chiralità così come l'azoto, il fosforo e lo zolfo (fig. 1.11).

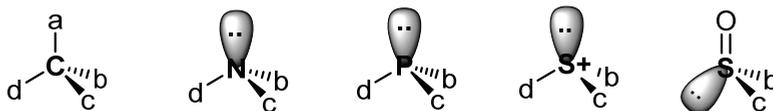


Figura 1.11. Carbonio chirale e altri centri (N, P, S) di asimmetria (a, b, c, d: atomi o gruppi differenti tra loro).

Le condizioni perché esistano i presupposti per una chiralità molecolare determinata da un atomo è quello di avere una geometria tetraedrica intorno a tale atomo il quale lega quattro sostituenti differenti tra loro, uno dei quali può anche essere un doppietto elettronico isolato come può accedere ad esempio per atomi trivalenti come l'atomo di fosforo P, e quello di azoto N. Altri atomi per i quali è stata verificata la esistenza di chiralità sono gli atomi di Si, Ge, N (in sali di ammonio quaternari o *N*-ossidi e nel caso in cui l'atomo di azoto si trovi in una struttura rigida), Mn, Cu, Bi e Zn, S.

Comunque la presenza di atomi di carbonio o di altri atomi chirali non è una condizione necessaria e sufficiente perché vi sia chiralità in una molecola ma la loro presenza può rappresentare soltanto una possibilità di esistenza di chiralità. Esistono, infatti, molecole chirali che non hanno carboni asimmetrici e molecole non chirali che hanno più carboni asimmetrici. In pratica la possibilità di definire la chiralità o meno di una molecola determinando se essa è o non è sovrapponibile alla sua immagine speculare in molti casi (molecole complesse) è abbastanza complicata. Molto più semplicemente la chiralità di una molecola può essere verificata utilizzando un concetto matematico noto come "teoria dei gruppi" che si

(4) Gli stereoisomeri sono particolari isomeri che hanno la stessa formula bruta e la stessa connettività, ovvero gli atomi sono legati tra loro nello stesso modo, ma differiscono per la loro disposizione spaziale.