

Capitolo 2 - Gli elementi del ciclo

Precisazioni su un quadro vago

Abbiamo dato una risposta al problema posto all'inizio del libro, e possiamo renderci conto del perché alimenti e ossigeno non si esauriscano. La risposta fornita, tuttavia, è quanto mai ampia e generica. Non vi sono dati particolareggiati e senza dubbio vorremmo conoscere tutti i dettagli possibili riguardanti il ciclo da cui dipendono tutti i fenomeni vitali.

Il termine più vago, fra tutti quelli utilizzati nella figura 1, è quello di "alimenti". Gli uomini mangiano svariatissimi tipi di alimenti. Per meglio dire, quasi ogni sostanza non velenosa che si possa masticare, deglutire e utilizzare come nutrimento, è servita da alimento a qualche nucleo umano o animale. Sarebbe molto utile se si potesse precisare questo termine così vago.

Tutti gli svariatissimi tipi di alimenti possono essere ridotti a tre classi di composti: 1) carboidrati; 2) lipidi, detti più comunemente grassi; 3) proteine.

Essi hanno molteplici utilizzazioni nell'organismo umano, ma la maggior parte di queste non ci riguardano. Il ciclo del carbonio è un meccanismo per utilizzare e produrre energia: ci interessa quindi sapere se una di queste classi di alimenti abbia più delle altre a che vedere con la produzione di energia.

In effetti ciascuno di questi tipi di composti può servire come fonte di energia, anche se non con uguale prontezza. Le proteine, per esempio, sono le sostanze chiave dei tessuti viventi. Esse esistono in migliaia di forme adempiono a migliaia di funzioni vitali. Benché possano servire alla produzione di energia, ciò avviene solo in condizioni disperate o quando vi sia necessità di eliminare del materiale superfluo. Non sono, però, il normale combustibile usato dall'organismo; non più di quanto i mobili di casa siano il combustibile per il camino, anche se si possono bruciare quando viene a mancare, in circostanze disperate, la legna da ardere.

Nel caso dei tessuti viventi la «legna da ardere.» è rappresentata dai carboidrati e dai grassi. Di questi, i grassi sono la riserva più concentrata di energia: vale a dire che un grammo di grasso reagendo con l'ossigeno produrrà più energia di un grammo di carboidrati. Il grasso è perciò il mezzo più economico con cui immagazzinare una notevole quantità di energia. (Una persona obesa sarebbe grossa il doppio se la sua riserva di energia superflua fosse rappresentata da carboidrati anziché da grasso.)

Il grasso serve come riserva di energia anche per un altro motivo. È insolubile nell'acqua. I tessuti viventi sono molto idratati (circa i quattro quinti in peso sono costituiti da acqua) e le reazioni chimiche che vi si svolgono sono generalmente associate ad essa. Essendo insolubile, il grasso viene per così dire sottratto per gran parte allo scompiglio chimico all'interno dei tessuti. Se ne può immagazzinare una grande quantità senza che esso venga preso negli ingranaggi della complessa macchina chimica dell'organismo.

In senso rigoroso, tuttavia, l'insolubilità del grasso vuole dire che esso può venire demolito con una certa difficoltà. I carboidrati, molto più compatibili con l'acqua, possono essere utilizzati con maggiore rapidità e minori complicazioni.

I carboidrati, beninteso, possono presentarsi in molte forme, alcune delle quali insolubili nell'acqua quanto il grasso, e anche più difficili da trattare. Un tipo di carboidrato è la cellulosa, che costituisce la struttura portante delle piante. Il legno è costituito in gran parte di cellulosa.

Né le piante né gli animali possono tuttavia utilizzare la cellulosa per la produzione di energia. Le termiti e certi altri insetti, è vero, vivono di legno, ma solo perché nel loro tubo digerente sono presenti dei microrganismi capaci di scindere la cellulosa: essi producono composti a struttura semplice, utilizzabili per produrre energia, in quantità in eccesso rispetto alle proprie necessità; questo eccesso viene appunto usato dalle termiti.

Allo stesso modo, i bovini e gli altri ruminanti possono nutrirsi d'erba e altri vegetali ad alto contenuto di cellulosa, perché i batteri presenti nel loro tubo digerente scindono la cellulosa.

Un'altra forma complessa di carboidrato insolubile nell'acqua è l'amido. Esso non è costituito da grosse fibre come la cellulosa, ma si presenta piuttosto come polvere granulata.

Sia la cellulosa che l'amido sono costituiti da una caratteristica unità chimica che si ripete disponendosi in lunghe catene. Anzi, l'unità è la stessa in entrambi i composti: solo che nella cellulosa i punti di congiunzione resistono alla scissione da parte dei mezzi chimici di cui dispongono piante e animali, mentre questi stessi punti nel caso dell'amido sono facili da scindere.

Ogni animale è dotato della capacità di scindere l'amido nel proprio tubo digerente. Le unità di cui esso è costituito si ritrovano quindi libere e isolate, e possono essere assorbite dall'organismo e utilizzate per ottenere energia. Questa unità è denominata «glucosio».

Il glucosio può anch'esso essere classificato come un carboidrato, di un tipo molto semplice. I carboidrati semplici vengono in genere indicati con il nome di zuccheri; il glucosio, tra gli altri, è stato per la prima volta scoperto nell'uva, e per questo lo si chiama anche zucchero d'uva.

Nel corpo umano vi sono grandi riserve di grasso, ma la riserva di energia destinata a richieste immediate è il «glicogeno», una specie di amido presente nel fegato e nei muscoli.

Ad ogni richiesta di energia, il glicogeno viene scisso con facilità in unità di glucosio. (Il nome stesso di glicogeno, del resto, derivante dal greco vuol dire «produttore di glucosio».) Il glucosio così prodotto passa nel sangue, e il sangue circolando lo porta a tutte le parti dell'organismo.

È il glucosio quindi a essere l'alimento distribuito direttamente ai tessuti dell'organismo umano. L'economia dell'organismo è tale per cui il contenuto di glucosio nel sangue viene mantenuto a un livello costante, malgrado le variazioni nell'apporto alimentare e nel consumo di energia. Per questo motivo il glucosio potrebbe essere definito altrettanto bene sia «zucchero del sangue» che «zucchero d'uva».

Quel che vale per i tessuti dell'uomo vale per i tessuti viventi in generale. Il glucosio è un composto chiave dal punto di vista della produzione di energia. I chimici inoltre, nell'ultimo mezzo secolo, hanno determinato in maniera sempre più precisa i particolari dei processi chimici che si svolgono nei tessuti. Nelle condizioni adatte il glucosio può essere trasformato in quasi tutti gli altri composti tessutali e

viceversa. Sembra del tutto corretto prendere il glucosio come rappresentativo delle sostanze alimentari in genere, e considerarlo come fonte paradigmatica di energia.

In altri termini possiamo precisare l'equazione della respirazione (vedi equazione [1] a p. 17) sostituendo «glucosio» ad «alimenti»). Ne risulta così :

Glucosio + Ossigeno > (Respirazione) > Anidride carbonica + Acqua + Energia.

Teniamo però presente che abbiamo a che fare con un ciclo, e non è perciò legittima alcuna sostituzione in una metà sino a che non siamo certi che tale sostituzione sia accettabile anche per l'altra metà. In altre parole, possiamo parlare di glucosio anziché di alimenti anche trattando della fotosintesi?

L'esperimento chiave a questo proposito venne effettuato da Sachs, lo scopritore della respirazione delle piante (vedi p. 22). Egli sapeva che in condizioni normali le foglie contengono dell'amido. Questo è facile da mettere in evidenza in quanto l'amido reagisce con lo iodio dando origine a un composto nero, e le foglie, esposte a vapori di iodio, appunto diventano nere. Se però teniamo le foglie al buio per alcune ore esse consumano il loro amido per produrre energia e non reagiscono più con i vapori di iodio.

Nel 1872 Sachs espose alla luce del sole una foglia così depauperata di amido, coprendone però metà con uno schermo opaco. Dopo un po' espose l'intera foglia ai vapori di iodio. La metà che era stata esposta alla luce solare divenne nera, l'altra metà, che non era stata colpita dai raggi solari, no.

Parve chiaro, quindi, che la fotosintesi aveva prodotto amido (e non qualche altro composto, come grassi o proteine). poiché l'amido è costituito da lunghe catene di unità di glucosio legate assieme, sembra logico supporre che dapprima si formi del glucosio, e che questo poi si combini per formare amido.

Sembrirebbe quindi giustificata la sostituzione di «glucosio» ad «alimenti» sia nella parte del ciclo che si riferisce alla fotosintesi, sia nella parte che si riferisce alla respirazione. È dunque lecito riscrivere l'intero ciclo nella forma

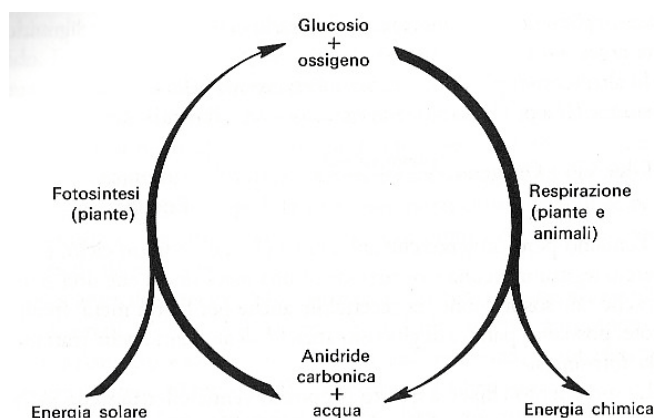


Figura 2
Il ciclo del carbonio (introducendo il glucosio).
della figura 2.

L'inventario degli atomi

La sostituzione della parola «glucosio» a quella «alimenti» è più della semplice sostituzione di un termine ben definito a uno vago. Gli alimenti sono una enorme e complessa miscela di una vasta gamma di sostanze differenti, e una miscela non si può considerare come una sostanza chimicamente dotata di individualità, per così dire. Il glucosio, d'altro canto, è un composto ben definito, che i chimici sono in grado di trattare e studiare senza difficoltà.

Questa facilità deriva almeno in parte dal fatto che nei primi decenni del secolo scorso i chimici svilupparono un linguaggio adatto. Essi elaborarono una serie di metodi per indicare la natura chimica dei diversi composti mediante una serie di simboli, serie che fu possibile determinare a partire dal 1803, quando un chimico inglese, John Dalton, sviluppò una teoria atomica della materia.

Dalton affermava che tutta la materia è costituita da piccolissime particelle, così piccole da risultare invisibili anche con il migliore dei microscopi. Le chiamò atomi. Ciascun elemento è costituito da un tipo differente di atomo. Così il carbonio è costituito da atomi di carbonio, l'idrogeno da atomi di idrogeno, l'ossigeno da atomi di ossigeno.

Gli atomi possono esistere separatamente, ma in genere si riuniscono in gruppi. I gruppi di atomi prendono il nome di molecole, e i chimici scoprirono che potevano meglio definire un composto calcolando il numero e i tipi di atomi contenuti entro la sua molecola.

L'ossigeno, per esempio, quale lo si ritrova nell'atmosfera, è costituito da molecole ognuna delle quali è formata da due atomi di ossigeno uniti assieme. Possono unirsi assieme anche atomi di tipo differente. Per esempio, due atomi di idrogeno e uno di ossigeno si uniscono a formare una molecola d'acqua. Un atomo di carbonio e due atomi di ossigeno si uniscono a formare una molecola di anidride carbonica.

Invece di dare a un composto un nome, è possibile utilizzare dei simboli riuniti in una «formula», per indicare il numero e il tipo di atomi che costituiscono le molecole del composto.

Il sistema in uso è quello di rappresentare il singolo atomo di ciascun elemento mediante una lettera (talvolta due). Nel caso di carbonio, ossigeno e altri elementi le lettere utilizzate sono, in maniera abbastanza pratica, le iniziali dei nomi degli elementi. Così un atomo di carbonio è C, un atomo di ossigeno O. Questi sono i «simboli chimici» degli elementi.

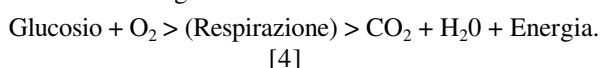
Se in un composto vi è più di un atomo di un determinato tipo, il numero di atomi è indicato da un suffisso adatto: vale a dire da un numerino al piede della lettera. Per esempio, dal momento che la molecola di ossigeno contiene due atomi di ossigeno, la si può scrivere O₂. Questa è la «formula chimica» dell'ossigeno molecolare.

L'ossigeno nella forma presente nell'atmosfera, o ossigeno atmosferico, è ossigeno allo stato molecolare, cioè O₂. Rispetto ad ogni altro tipo di rappresentazione, per esempio rispetto alla denominazione corrente, la formula chimica offre il vantaggio di un massimo d'informazione con un minimo di notazione. Nel nostro caso, per esempio, scrivendo O₂ vediamo subito che si tratta di ossigeno e che vi sono due atomi di ossigeno nella molecola, informazione di importanza essenziale per lo studio di reazioni chimi-

che. Ci si può dimenticare della presenza di due atomi se si parla di «ossigeno», ma non se si parla di «O₂».

La molecola di anidride carbonica, costituita da un atomo di carbonio e due atomi di ossigeno, la possiamo scrivere CO₂, e la molecola d'acqua, costituita da due atomi di idrogeno e uno di ossigeno, la possiamo scrivere H₂O. Avviene così che il termine "biossido di carbonio", (equivalente ad «anidride carbonica») è utile dal momento che indica la presenza di un atomo di carbonio e due atomi di ossigeno, ammesso che sappiate che il prefisso «bi-» vale «due». Il termine «acqua», invece, non ci dà informazioni di questo tipo ed è quindi un mediocre sostituto di H₂O.

Possiamo perciò scrivere la reazione della respirazione (vedi equazione [3] a p. 27) in maniera molto più concisa e istruttiva nella seguente forma:



Ma questo ci porta a parlare del glucosio. Si può parimenti indicarlo con una formula chimica? È semplice constatare che dal momento che tutti i composti sono costituiti da molecole a loro volta formate da atomi, tutti i composti sono indicabili con formule chimiche. Quel che è possibile in teoria, comunque, può essere di difficile attuazione in pratica.

I complessi costituenti i tessuti viventi appartengono a un gruppo detto composti organici, poiché li si trova negli organismi viventi più che nel regno minerale. Mentre l'ossigeno, l'anidride carbonica e l'acqua hanno ^{molecole} costituite (la due o tre specie di atomi, i composti organici presentano molecole contenenti dozzine, centinaia, migliaia, anche milioni di atomi. Le molecole semplici del regno minerale (composti inorganici) possono esprimersi comunemente in formule senza molta difficoltà. Non così accade per le complesse molecole organiche, per le quali soltanto oggi si va lentamente risolvendo il problema della esatta struttura di quelle di maggiori dimensioni.

L'amido, per esempio, è costituito da molecole giganti con innumerevoli disposizioni diverse, e se proprio l'amido facesse parte del nostro ciclo del carbonio, non saremmo in grado di trovare una formula esatta e completa di questo composto (anche se potremmo utilizzarne una semplificata che andrebbe abbastanza bene).

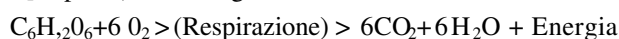
Il glucosio, fortunatamente, è uno dei composti organici più semplici, a molecole costituite da solo due dozzine di atomi. L'esatto numero e la natura di questi atomi furono scoperti nel 1868 dal chimico tedesco Rudolf Fittig, che determinò che la molecola del glucosio è formata da sei atomi di carbonio, dodici di idrogeno e sei di ossigeno: cioè C₆H₁₂O₆.

Supponiamo a questo punto di voler scrivere l'equazione della respirazione facendo ricorso alla formula chimica del glucosio. Dovremmo scrivere che C₆H₁₂O₆ più O₂ dà origine a CO₂ e H₂O. Ma la molecola di glucosio contiene sei atomi di carbonio mentre la molecola di anidride carbonica ne contiene solamente uno. Ciascuno dei sei atomi di carbonio della molecola di glucosio può diventare parte di una singola molecola di anidride carbonica. Una molecola di glucosio dovrà quindi dare origine a sei molecole di anidride carbonica, che scriveremo 6CO₂. Allo stesso modo i dodici atomi di idrogeno della molecola di glucosio possono passare, a coppie, nelle molecole di acqua. Sarebbero

sei coppie in totale e si formerebbero sei molecole di acqua, cioè 6H₂O.

Se una molecola di glucosio dà origine a 6CO₂ e 6H₂O, allora queste molecole hanno in totale diciotto atomi di ossigeno (dodici nelle sei molecole di anidride carbonica più sei nelle sei molecole d'acqua). Da dove vengono tutti questi atomi di ossigeno? La molecola di glucosio da sola ne ha sei, il che vuol dire che ne occorrono ancora dodici.

E a questo punto che interviene l'ossigeno atmosferico. Dal momento che questo ossigeno atmosferico è sotto forma di molecole costituite ciascuna da due atomi di ossigeno, i dodici atomi di ossigeno debbono esser forniti sotto forma di sei molecole di ossigeno, vale a dire 6O₂. Possiamo quindi scrivere la reazione della respirazione (vedi equazione 14] a p. 30) come segue:



Confrontando la parte di equazione alla sinistra con quella a destra della freccia, noterete che il numero totale di atomi è uguale. In totale vi sono 6 atomi di carbonio, 12 di idrogeno e 18 di ossigeno a sinistra; e 6 atomi di carbonio, 12 di idrogeno e 18 di ossigeno a destra.

Questo è un esempio di «reazione chimica in equilibrio». Tutte le reazioni dovrebbero essere in equilibrio: nei processi chimici gli atomi non scompaiono nel nulla, né compaiono dal nulla.

La disposizione degli atomi

Immaginiamo di dare uno sguardo più da vicino alla formula del glucosio, C₆H₁₂O₆. La parte H₁₂O₆ potrebbe rappresentare sei molecole di acqua, 6H₂O. Si può forse concludere che la molecola del glucosio può essere scritta C₆(H₂O)₆ (vale a dire come una catena di sei atomi di carbonio a ognuno dei quali è attaccata una molecola d'acqua)?

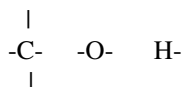
Allorché si venivano elaborando le formule del glucosio e di altri zuccheri, vi fu qualche sospetto in questo senso: il termine «carboidrati» ci conserva una traccia di questo dubbio, ma non è così: gli zuccheri non sono semplici idrati di carbonio. Faccio cenno di questo dubbio solamente perché rende ragione del nome della classe di composti cui appartiene il glucosio, e perché ebbe un certo peso sullo sviluppo delle idee sulla fotosintesi. Come si scoprì più tardi, nella molecola di glucosio non vi sono molecole di acqua.

Per poter dimostrare la presenza o l'assenza di molecole d'acqua entro una molecola più grande, i chimici dovevano riuscire non solamente a calcolare il numero e il tipo di atomi entro una molecola, ma il modo preciso in cui erano disposti. Questo cominciò a divenire possibile nel 1850, quando il chimico inglese Edward Frankland dimostrò per la prima volta che un dato tipo di atomo poteva legarsi a un numero fisso di altri atomi. Questo dato venne ulteriormente sviluppato e applicato in particolare ai composti organici dal chimico tedesco Friedrich August Kekulé nel 1858.

Per capire come si applica questo principio, limitiamoci per ora ai tre tipi di atomi che più ci interessano al momento: il carbonio, l'idrogeno e l'ossigeno. Un atomo di carbonio può unirsi a un numero massimo di quattro altri atomi, mediante «giunzioni» che prendono il nome di "legami"; un atomo di

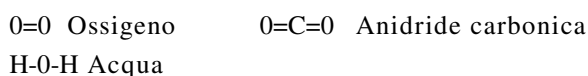
ossigeno a un numero massimo di due atomi; un atomo di idrogeno a un solo altro atomo.

Possiamo sottolineare questo numero caratteristico di legami per ciascun atomo (la cosiddetta «valenza» di un elemento) aggiungendo al simbolo dell'elemento il suo numero di valenza in forma di brevi trattini:



Questi atomi possono unirsi a formare molecole nelle quali ciascun atomo utilizza, per unirsi a un atomo vicino, una delle sue valenze, o talora due, o, del tutto eccezionalmente, tre valenze, supponendo che le possenga.

Per esempio, la molecola di ossigeno, la molecola di anidride carboni e la molecola di acqua si possono scrivere mettendo in evidenza le modalità di connessione e il numero di legami, con quella che si definisce una formula di struttura:*



* Le formule di struttura sono date in questo libro nella loro forma più elementare. La chimica moderna ha di fatto introdotto in esse taluni dettagli più precisi, indispensabili qualora si debbano chiarire per esteso le proprietà della molecola, ma in questo libro non è necessario tenerne conto.

Si noti che in queste formule il numero di legami per l'atomo di idrogeno è sempre uno, per l'atomo di ossigeno due e per l'atomo di carbonio quattro.

Nel caso di molecole così semplici non si ha un gran vantaggio a scrivere le formule di struttura. Per un chimico esperto le formule di struttura che abbiamo qui indicato sono assolutamente ovvie, sicché gli basterà dire O_2 , CO_2 , H_2O . Questo vale anche per altre molecole costituite da una mezza dozzina di atomi o meno.

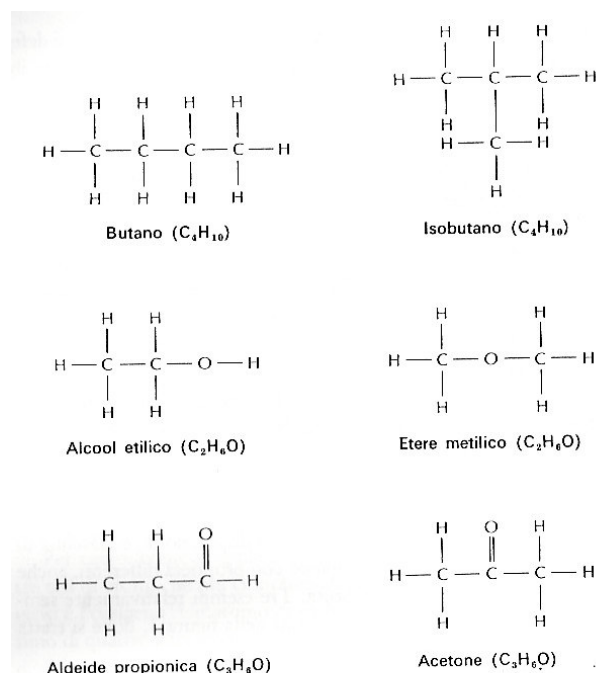


Figura 3
Coppie di isomeri.

Non così per i composti organici con i loro numerosi atomi. In questo caso le formule di struttura sono di molto maggiore aiuto rispetto alle semplici «formule brute», che, come nel caso di $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, riportano semplicemente il numero totale di atomi per ciascun tipo. Per l'esattezza, questo è dovuto al fatto che un determinato numero di determinati atomi può spesso assumere più di una disposizione, e ciascuna di queste dà origine a un diverso composto con proprietà differenti, anche se tutti hanno la stessa formula bruta. Tre esempi relativamente semplici di quanto intendo dire sono indicati nella figura 3, dove si tratta di tre coppie di «isomeri».

È chiaro che anche per composti semplici come quelli indicati nella figura 3 le formule di struttura possono essere necessarie per distinguere composti che sulla scorta della sola formula bruta non sarebbero distinguibili. Per composti veramente complessi il numero di disposizioni possibili arriva senza difficoltà all'ordine di milioni, e non si può proprio fare a meno dell'impiego delle loro formule di struttura.

I chimici, beninteso, fanno quel che possono per semplificare queste formule. Comunemente cercano di evitare di infilzare un gran numero di atomi di idrogeno sulle stanghette delle valenze. Si suppone che chi deve lavorare con le formule impari rapidamente ad assegnare l'esatto numero di valenze a ciascun atomo e a disporre correttamente gli atomi di idrogeno. Lasciando sottintese queste operazioni ci si può concentrare sulla disposizione dei restanti atomi. Sono possibili anche altre semplificazioni, delle quali però farò grazia al lettore. Mi limiterò a raggruppare gli atomi di idrogeno assieme all'atomo di carbonio cui sono collegati senza altre abbreviazioni.

Le formule indicate per esteso nella figura 3 possono essere rappresentate in forma «abbreviata» nella figura 4. Penso che concorderete, confrontando la figura 4 con la figura 3, che non si è perso nulla condensando le formule, e che anzi se ne ha un vantaggio. Le differenze fra gli isomeri e le disposizioni basilari degli atomi sono state rese più chiare riunendo gli atomi di idrogeno nel modo anzidetto.

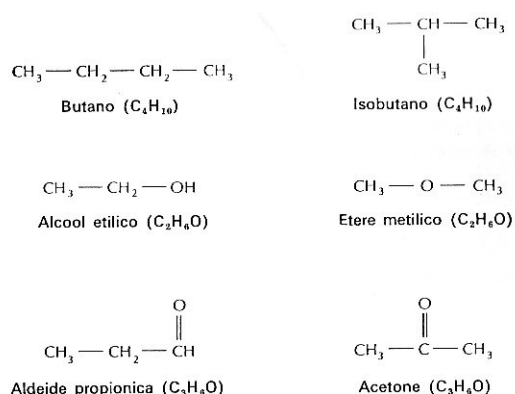
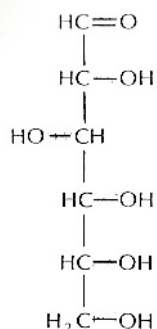


Figura 4
Coppie di isomeri (formule di struttura ridotte).

Fu solamente nel 1891 che il chimico tedesco Emil Fischer riuscì a stabilire la formula strutturale del glucosio. Vi sono molte maniere di presentare questa formula strutturale; io sceglierò la più semplice, indicata nella figura 5. La formula riportata è inesatta in quanto i sei atomi di carbonio sono scritti in successione lineare aperta, mentre, in realtà, si ha la formazione di un anello a sei atomi: cinque atomi di

carbonio più un atomo di ossigeno. Tuttavia per i nostri scopi questa formula «a catena aperta» è sufficiente; è più facile da maneggiare e da illustrare della formula ad anello, e metterà in evidenza quelle proprietà del glucosio di cui dovremo occuparci.



Glucosio ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)

Figura 5
Il glucosio.

Vi chiederete perché uno dei gruppi idrogeno-ossigeno (che possiamo denominare «gruppo ossidrilico» e scrivere sia OH che HO) nella formula del glucosio sia volto a sinistra, mentre gli altri sono volti a destra. Questo è dovuto al fatto che in realtà la disposizione degli atomi nelle molecole è tridimensionale. Nel riportare le formule su di un foglio, quindi su due dimensioni, siamo costretti a fare delle scelte convenzionali utilizzando la destra e la sinistra.

Vi sono altri tre zuccheri assai comuni, per esempio, denominati fruttosio, galattosio e mannosio, che hanno tutti la formula bruta $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, come il glucosio. Ognuno di essi può essere indicato con una catena lineare di sei atomi di carbonio alla quale sono uniti cinque gruppi ossidrilici e un atomo di ossigeno mediante un doppio legame (=O). La differenza sta nella disposizione tridimensionale dei gruppi ossidrilici intorno agli atomi di carbonio: questo nella formula bidimensionale viene indicato convenzionalmente variando la distribuzione di questi gruppi ossidrilici a destra e a sinistra. Il glucosio è, di questo gruppo, l'unico composto di cui ci occuperemo in maniera così dettagliata da richiedere una formula di struttura: senza insistere su questo problema diamo per acquisita la disposizione dei suoi gruppi ossidrilici.

A questo punto diamo un'altra occhiata alla formula del glucosio. Vedrete che in essa non figurano molecole d'acqua. La molecola d'acqua è costituita da un atomo di idrogeno unito a un gruppo ossidrilico (H-OH). Nella molecola del glucosio vi sono un certo numero di atomi di idrogeno e un certo numero di gruppi ossidrilici, ma in nessun punto essi sono uniti l'uno all'altro. In ogni punto atomi di idrogeno e gruppi ossidrilici sono uniti a un atomo di carbonio indipendentemente gli uni dagli altri. Un atomo di idrogeno e un gruppo ossidrilico possono essere uniti allo stesso atomo di carbonio, ma per quanto vicini essi siano l'uno all'altro, non lo sono tanto da formare una molecola d'acqua.

Ora che si è chiarito questo punto, vediamo se possiamo utilizzare questa formulazione della struttura del glucosio per semplificare l'equazione della respirazione (equazione [5] p. 31). È un po' complicato avere a che fare

con sei molecole di ciascun tipo - ossigeno, anidride carbonica e acqua - per avere l'equazione in pareggio, specie con le molecole di glucosio a sei atomi di carbonio con cui abbiamo a che fare. Perché non cavarcela considerando invece un sesto di molecola di glucosio?

Se prendiamo solamente la formula bruta, è una grossa tentazione trattare il problema alla stregua di un esercizio di aritmetica:

$$\frac{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6}{6} = \text{CH}_2\text{O}$$

Prima che si capisse esattamente l'importanza delle formule di struttura, a questo esercizio di aritmetica fu attribuito molto più peso di quanto fosse giusto. La formula bruta CH_2O sta a indicare la formaldeide (o aldeide metilica). La formula potrebbe più esattamente venire scritta $\text{H}_2\text{C}=\text{O}$, ma questo non sembra molto importante dal momento che la molecola è così semplice. Vi è un solo modo di disporre un atomo di carbonio, due atomi di idrogeno e un atomo di ossigeno in modo da ottenere un composto reale, e quest'unico modo è costituito dalla formaldeide.

L'idea di affermare che un sesto di una molecola di glucosio non sia altro che formaldeide è una tentazione abbastanza grande.

Anche prima che nel 1872 Sachs lo dimostrasse in maniera definitiva, molti avevano affermato che la fotosintesi produce amido. Si era giunti a supporre a fil di logica che, dal momento che l'amido è costituito di unità di glucosio, il primo composto prodotto nella fotosintesi era il glucosio, e che molte molecole di glucosio venivano poi unite a formare l'amido.

Nel 1870 il chimico tedesco Adolf Baeyer fece un passo avanti assolutamente logico. La fotosintesi non dovrebbe produrre per prima della formaldeide? Sei molecole di formaldeide si combinerebbero per produrre una molecola di glucosio e molte molecole di glucosio si combinerebbero poi per produrre amido. Si potrebbero anzi fare combinare le molecole di formaldeide in modo da produrre composti simili agli zuccheri, e in questo modo la teoria di Baeyer sembrerebbe abbastanza plausibile.

Nessuno riuscì, beninteso, a dimostrare nei tessuti viventi questo genere di combinazione di molecole di formaldeide, o anche solo a dimostrare la presenza di formaldeide. Si poteva però supporre che la formaldeide venisse utilizzata con tale rapidità, dopo che si era formata, da non essere mai presente in quantità sufficiente a permetterne l'individuazione.

Per tre quarti di secolo l'ipotesi della formaldeide sopravvisse. Solo recentemente venne dimostrata errata, mediante esperimenti di cui parleremo più tardi.

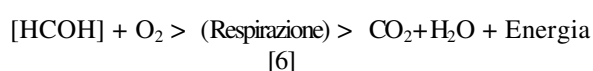
Per tale ragione sono in dubbio se sia opportuno scrivere la formula di un sesto della molecola di glucosio nella forma CH_2O , perché suggerisce sia l'idea di un atomo di carbonio cui sia unita una molecola d'acqua, sia l'idea che si tratti di una molecola di formaldeide: ed entrambe queste idee corrispondono a teorie errate, come ho detto.

Immaginiamo comunque di disporre il nostro CH_2O in questo modo: HCOH . È ancora la combinazione di un atomo di carbonio con un atomo di ossigeno e due atomi di idrogeno, e pertanto rappresenta un sesto di una molecola di glucosio. Non lo si può tuttavia scambiare per un

atomo di carbonio più acqua, e neppure per formaldeide, la cui formula non viene mai scritta in questa forma. Inoltre assomiglia a quello che ci si aspetterebbe essere un sesto di una molecola di glucosio. (Immaginate di tagliare in sei pezzi la formula della figura 5, mediante tagli che scindano i legami tra atomi di carbonio contigui, e avrete almeno quattro frammenti HCOH).

Non vogliamo però dare l'impressione che HCOH sia una molecola a pieno diritto. È il frammento virtuale di una molecola, da noi introdotto non perché esista in realtà, ma solamente perché ci renderà più semplice scrivere e illustrare la nostra equazione. Per questo lo indicherò tra parentesi quadre, per distinguerla dalla vera formula di una vera molecola; così: [HCOH].

Utilizzando la formula per un sesto di molecola di glucosio diviene possibile scrivere l'equazione della respirazione inserendovi una sola molecola di ciascuno degli altri composti:



Possiamo inoltre scrivere il ciclo del carbonio indicando tutti i suoi costituenti con formule chimiche del tipo più semplice possibile, come nella figura 6.

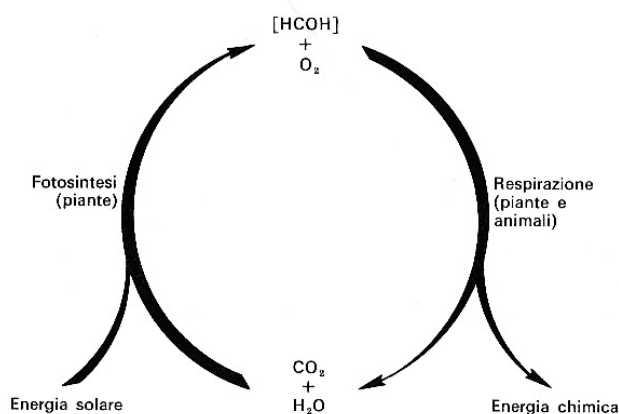


Figura 6
Il ciclo del carbonio (in formule chimiche).

La foglia verde

La figura 6 mostra come gli elementi del ciclo siano a una estremità glucosio e ossigeno, all'altro estremo anidride carbonica e acqua. Ma in questo modo l'elenco degli elementi chiave è completo?

Certamente no! Il ciclo del carbonio non va avanti da solo. Se così fosse, esso procederebbe ininterrottamente in tutte le forme viventi, il che non è. Procede senza interruzione nelle piante, non negli animali. In questi ultimi procede sino a mezza via, cioè (la glucosio e ossigeno Alla formazione di anidride carbonica e acqua; non si ha invece la fase di ritorno.

Si può presumere che nelle piante esista qualcosa che negli animali manca e che rende possibile la fase di ritorno. Ed è chiaro che questo qualcosa è un altro elemento chiave del ciclo. Possiamo fermarci a riflettere sulle sue caratteristiche. Esso rende possibile la fotosintesi, e il dato di fondo nella fotosintesi è l'utilizzazione dell'energia solare. Il composto che cerchiamo deve perciò assorbire luce.

Vediamo ora di che aiuto ci è questo fatto. Se un composto non assorbe molta luce ma nel complesso la

riflette, risulta bianco. Se complessivamente la assorbe in misura elevata, risulta nero. Moltissimi composti che assorbono luce, tuttavia, non si comportano così. Ne assorbono certe parti e riflettono il resto. Le diverse parti componenti la luce bianca appaiono ai nostri occhi di differenti colori. Se una sostanza assorbe alcuni colori e riflette gli altri, risulterà ai nostri occhi del colore che riflette.

Il composto che innesca la fotosintesi deve assorbire luce, perciò non può essere bianco. Molto verosimilmente non assorbe tutte le componenti della luce: perciò deve essere colorato. Se nelle piante c'è un composto che regola la fotosintesi e che manca negli animali, si può supporre che le piante abbiano un qualche colore che non c'è negli animali.

Prima di andare avanti va però sottolineato che un composto può essere colorato (perché capace di un parziale assorbimento della luce) senza avere nulla a che vedere con la fotosintesi. Il sangue umano contiene una sostanza che gli dà un colore rosso, ma esso non ha niente a che fare con le sue funzioni. Anzi, dato che all'interno dei vasi sanguigni la luce non giunge in misura significativa, qualunque sia la capacità di assorbimento della luce posseduta dal sangue, è completamente irrilevante nei confronti della sua funzione. Inoltre i colori possono dipendere da fattori che non hanno nulla a che vedere con la struttura chimica o la funzione di una sostanza. Vi sono fiori rossi come il sangue, ma il colore rosso del petalo e quello del sangue dipendono da sostanze assolutamente differenti con proprietà e funzioni prive di somiglianza tra loro.

A condizione di tenere ben presente questo, possiamo ancora porci la domanda se vi è una differenza sostanziale tra il colore delle piante e il colore degli animali, che possa presumibilmente avere qualcosa a che vedere con la fotosintesi. E abbiamo un buon candidato, si intende.

Praticamente tutte le piante sono verdi o hanno parti verdi molto abbondanti, mentre nessun animale è verde. (Nelle penne di alcuni uccelli vi sono dei pigmenti verdi, ma non vi è assolutamente alcun rapporto fra questa colorazione e quella verde delle piante. Possiamo perciò trascurare le penne verdi.)

Noti è difficile dimostrare che solo le parti verdi di una pianta sono capaci di fotosintesi. Le parti non verdi - fiori, radici, parti lignee - non sono capaci di fotosintesi. Vi sono organismi che sembrerebbero piante sotto tutti gli aspetti, ma che non sono verdi (l'esempio migliore è costituito dai funghi) e perciò non sono capaci di fotosintesi.

Pare quindi pressoché certo, senza che vi insistiamo oltre, che la sostanza responsabile del colore verde delle piante deve essere un elemento chiave nel ciclo del carbonio.

Nel 1817 due chimici francesi, Pierre Joseph Pelletier e Joseph-Bienaimé Caventou, isolarono questa sostanza verde e le diedero il nome di «clorofilla» (dal greco, «verde foglia»).

All'epoca della scoperta di questo composto, i chimici non erano in grado di risolvere i particolari molecolari di un composto organico, per quanto semplice questo fosse. Dovette trascorrere l'intero secolo XIX prima che venissero sviluppati mezzi tali da poter affrontare lo studio di sostanze complesse come la clorofilla.

Il primo importante attacco venne mosso nel 1906 a opera del chimico tedesco Richard Willstatter. Egli fu il primo a preparare la clorofilla in forma sufficientemente pura e a compiere numerose e importanti scoperte su di essa.

Egli scoprì, innanzitutto, che non si trattava di un unico composto, ma di due composti strettamente affini, che differivano di poco nelle modalità di assorbimento della luce. Egli denominò «clorofilla a» e «clorofilla b» le due sostanze: la prima era la più comune e costituiva i tre quarti circa della miscela.

Egli studiò inoltre i differenti tipi di elementi presenti nella molecola della clorofilla. Vi erano carbonio, idrogeno, ossigeno e azoto, come ci si poteva aspettare. Questi quattro elementi compaiono in effetti in ogni sostanza a struttura complessa presente nei tessuti viventi. Oltre questi, tuttavia, vi erano anche atomi di magnesio. E' questo fu un dato sorprendente. La clorofilla era il primo composto nei tessuti viventi che si scoprisse contenere questo elemento.

Il passo successivo sarebbe stato quello di identificare la disposizione degli atomi dei cinque elementi nella molecola della clorofilla; ma era un problema estremamente arduo. Dalle ricerche di Willstatter risulta che la molecola della clorofilla *a* contiene nientemeno che 137 atomi, e quella della clorofilla *b* 136. La formula bruta di questi composti (Mg è il simbolo chimico del magnesio) è $C_{55}H_{72}N_4O_5Mg$ per la clorofilla *a*, e $C_{55}H_{70}N_4O_6Mg$ per la clorofilla *b*.

Il numero di composti possibili per un tale numero e una tale varietà di atomi è enorme, e all'epoca di Willstatter non vi era assolutamente speranza di approdare a qualcosa studiando la molecola nella sua integrità. La tecnica comunemente usata dai chimici in questi casi consisteva nello scindere la molecola con vari mezzi, ed esaminare poi la struttura dei frammenti ottenuti. Con un po' di fortuna sarebbe stato poi possibile cercare di dedurre come questi frammenti potevano essere riuniti in modo da ottenere la struttura di partenza, e controllare l'ipotesi con opportuni esperimenti.

Willstatter trattò la clorofilla in modo da provocarne la scissione in frammenti. Il dato più importante che egli poté ottenere in tal modo fu che la struttura molecolare di questi frammenti pareva includere quello che si indica come «anello pirrolico». Questo anello è costituito di quattro atomi di carbonio e un atomo di azoto disposti a pentagono. Il più semplice composto che presenta questo anello è il pirrolo, rappresentato nella figura 7.

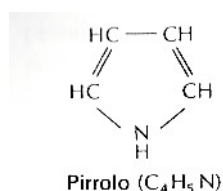


Figura 7
Il pirrolo.

Parve logico, quindi, supporre che, qualunque potesse essere la struttura della clorofilla, si sarebbe scoperto che vi erano compresi uno o più anelli pirrolici.

Fu a questo punto che Willstatter abbandonò le ricerche. Per quanto egli aveva scoperto, comunque, e per i suoi risultati su altri composti colorati delle piante, egli ricevette nel 1915 il premio Nobel per la chimica.

L'anello di anelli

La fiaccola fu passata a un altro chimico tedesco, Hans Fischer. Il suo interesse si fissò all'inizio su quella sostanza presente nei globuli rossi che dà il colore rosso al sangue: si tratta di una proteina che prende per questo il nome di «emoglobina». Questa proteina era facilmente scindibile in due parti di differente costituzione, l'«eme» (dal greco, "sangue") e la "globina".

È la globina che ha struttura proteica; l'eme non è una proteina, bensì un composto relativamente piccolo a struttura non proteica unito alla proteina. Le proteine, peraltro, sono molecole gigantesche e l'eme può essere considerato relativamente piccolo, al confronto, pur essendo molto grande rispetto ad altri composti.

La molecola dell'eme aveva le dimensioni e la complessità della molecola di clorofilla e presentava anch'essa un atomo metallico al pari della clorofilla. Ma mentre la molecola di clorofilla conteneva un atomo di magnesio, l'eme era provvisto di un atomo di ferro.

Allorché Fischer cominciò a scindere la molecola dell'eme, le somiglianze con la clorofilla divennero ancora più marcate. Come già Willstatter aveva visto per la clorofilla, anche Fischer scoprì che nei frammenti di eme vi erano anelli pirrolici. Fischer andò oltre, però. Continuò le sue ricerche finché fu certo che la struttura della molecola dell'eme risultava di quattro anelli pirrolici uniti fra loro ad anello mediante ponti costituiti da singoli atomi di carbonio.

I composti che presentano un tale anello di anelli prendono il nome di «porfirine» (dal greco, «porpora» per via del fatto che molti dei composti presentano un colore rosso porpora). La porfirina più semplice, quella costituita da un anello di anelli pirrolici senza alcun fronzolo, prende il nome di «porfina» ed è rappresentata nella figura 8.

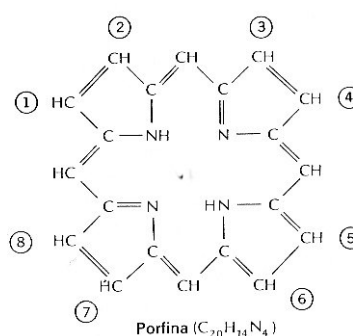


Figura 8
L'anello porfinico.

La porfina come tale non è presente nei tessuti viventi. Fischer nel 1935 la sintetizzò partendo da molecole più semplici, e solo in questo nodo poté studiarla direttamente. Le porfirine presenti nei tessuti hanno un nucleo porfinico, ma ad esso sono uniti molti radicali ad atomi di carbonio

(«catene laterali») che si attaccano ai vertici liberi degli anelli pirrolici: nella figura 8 questi ultimi sono indicati con numeri da 1 a 8.

La conclusione di Fischer che l'eme era un composto di natura porfirinica era acuta fin che si vuole, ma lasciava aperto il problema: che tipo di derivato era? Nell'eme quali catene laterali si trovavano? E ciascuna catena laterale in quale punto si fissava?

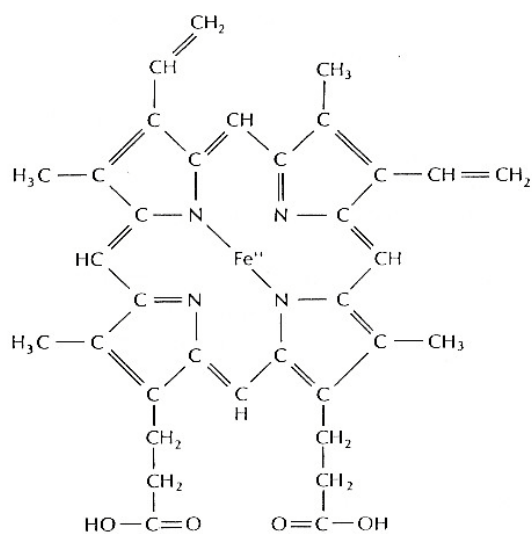
Per risolvere questi problemi Fischer studiò attentamente i diversi pirroli che aveva ricavato dalla demolizione della molecola dell'eme al fine di chiarire quali catene laterali vi erano attaccate. L'anello pirrolico, più piccolo dell'anello porfirinico, cedette i suoi segreti più facilmente.

Fischer concluse che sull'anello porfirinico erano distribuite, nelle otto posizioni, quattro catene laterali a un solo atomo di carbonio, due catene a due atomi di carbonio e tre catene a tre atomi di carbonio. Vi erano nondimeno quindici sequenze possibili secondo le quali queste catene avrebbero potuto essere distribuite lungo l'anello, ed era necessario sapere qual era la sequenza che si aveva nell'eme.

Per rispondere a queste domande, Fischer decise di sintetizzare un campione di ciascuna sequenza possibile, e a tal fine divise i suoi studenti in quindici gruppi affidando a ciascun gruppo la sintesi di una diversa sequenza.

Come ebbe ottenuto diversi campioni ne esaminò le caratteristiche per confrontarle con quelle della porfirina ottenuta dall'eme.

Risultò che la porfirina che cercava presentava le catene a un atomo di carbonio nelle posizioni 1, 3, 5, 8; le catene a due atomi di carbonio in posizione 2 e 4; e le catene a tre atomi di carbonio nelle posizioni 6 e 7. Un atomo di ferro al centro di tale porfirina completava l'eme. (Il ferro ha come simbolo chimico Fe. Il ferro presente nell'eme non è però un atomo del tipo solito di cui sappiamo. Possiede una doppia carica elettrica positiva, per ragioni che non possiamo approfondire in questa sede lo si può indicare in simbolo come Fe^{++} .) La figura 9 mostra la formula dell'eme.



Eme ($C_{34}H_{32}O_4N_4Fe$)

Figura 9
L'eme.

Fischer completò la sua definizione della struttura dell'eme nel 1930, e quello stesso anno gli fu subito assegnato il premio Nobel per la chimica.

Le ragioni per cui ci soffermiamo su questi particolari della struttura dell'eme sono dupplici. In primo luogo esso ha un rapporto diretto con la struttura della clorofilla, e in secondo luogo questo composto ha una parte importante nel ciclo del carbonio.

L'eme ci è meglio noto come componente dell'emoglobina, la quale è il composto che trasporta l'ossigeno nel sangue. Allorché il sangue attraversa i vasi a tunica sottilissima che circondano la parete dei polmoni, le molecole di ossigeno li attraversano a loro volta e si vanno ad attaccare labilmente agli atomi di ferro della molecola dell'eme.

L'emoglobina ossigenata ("ossiemoglobina") è trasportata dal sangue in ogni parte del corpo e cede l'ossigeno ai tessuti. Ma questa non è ancora la funzione fondamentale cui l'eme è destinato nel complesso (nei processi vitali). L'emoglobina è tipica dei vertebrati, ma molti invertebrati utilizzano altri tipi di composti per il trasporto dell'ossigeno, o, se sono di dimensioni sufficientemente piccole, sono capaci di distribuirlo anche con diverso meccanismo di trasporto.

L'eme, però, è unito anche ad altre proteine. Lo si ritrova, in particolare, in una famiglia di proteine indicate con il nome di «citocromi», che manipolano le molecole di ossigeno una volta che queste dal sangue sono passate nei tessuti. Questi citocromi sono indispensabili alla produzione di energia nel ciclo di carbonio. Tutte le piante e gli animali, grandi o piccoli, posseggano o no emoglobina, sono provvisti di citocromi.

L'aggiunta di una coda

Una volta chiarita la struttura dell'eme, Fischer affrontò lo studio della clorofilla, che, egli confidava, doveva essere abbastanza simile. E la somiglianza si dimostrò essere in realtà stretta, sotto certi aspetti. L'anello porfirinico costituiva il nucleo della molecola della clorofilla, proprio come costituiva quello della molecola dell'eme. Le catene laterali nelle posizioni 1, 3, 5, 8 erano radicali a un atomo di carbonio nella clorofilla proprio come nell'eme; le catene laterali in 2 e 4 erano radicali a due atomi di carbonio, e le catene laterali in 6 e 7 radicali a tre atomi di carbonio.

Vi erano tuttavia delle differenze. Vi è, è chiaro, un atomo di magnesio provvisto di doppia carica positiva (Mg^{++}), al posto occupato dal ferro nell'eme. La catena laterale in posizione 4 presenta sì - nella clorofilla - due atomi di carbonio, ma è priva del doppio legame presente nel corrispondente radicale dell'eme. In un anello pirrolico uno dei doppi legami, presente nell'eme, manca nella clorofilla.

È a livello dei radicali a tre atomi di carbonio che si hanno le differenze più complesse. Nell'eme queste catene laterali sono libere e rettilinee. Nella clorofilla non è così. Quella in posizione 6 si ripiega per unirsi alla contigua catena a un solo atomo di carbonio, formando così un ulteriore piccolo anello (il quinto). Vi sono anche alcuni atomi in più.

La catena laterale a tre atomi di carbonio in posizione 7 è unita a una lunga catena a 20 atomi di carbonio, indi-

cata con il nome di «radicale fitilico» o «fitile»: e questa è la differenza più rilevante. Tutto quanto ho detto si rileva chiaramente dalla formula della clorofilla a, riportata in figura 10; è facile fare il confronto con la formula dell'eme in figura 9. Potrete notare che la clorofilla è molto simile all'eme con l'aggiunta di una coda.

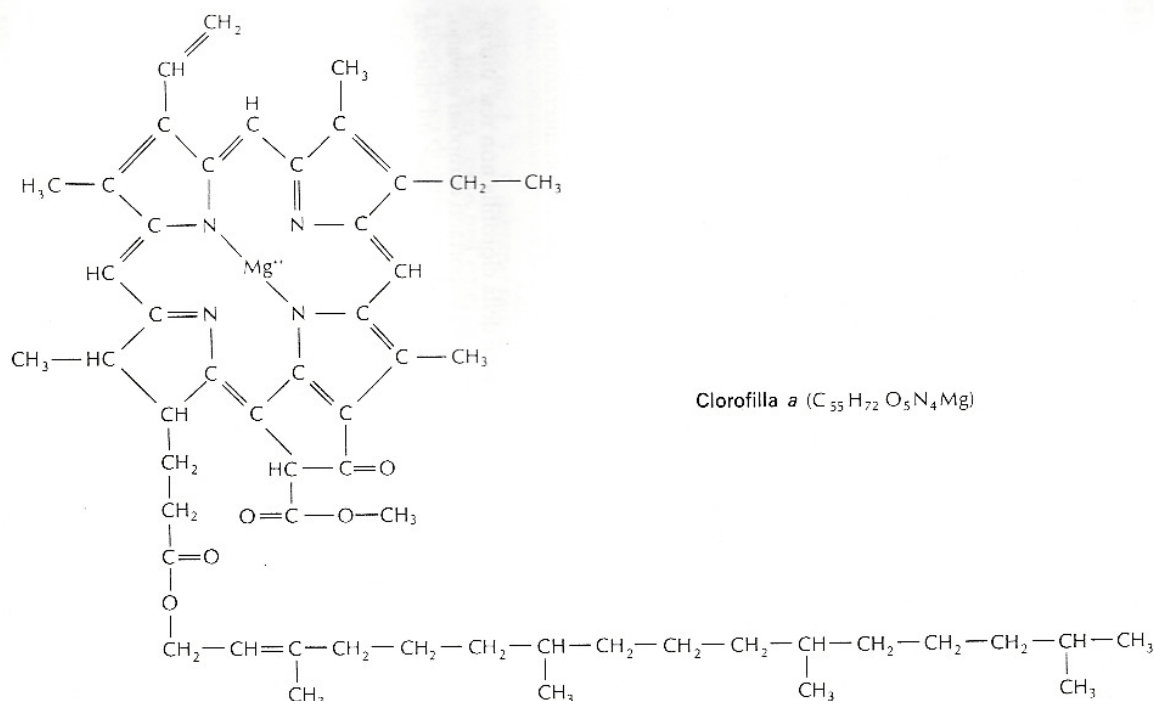


Figura 10
La clorofilla.

La clorofilla b differisce dalla clorofilla a solo per la catena laterale in posizione 3. Nella clorofilla a la catena a un atomo di carbonio è $-CH_2$, mentre nella clorofilla b questo gruppo è $-CHO$. Ne risulta che la clorofilla b possiede un atomo di ossigeno in più e due di idrogeno in meno, rispetto alla clorofilla a.

La clorofilla non è la sola sostanza colorata che si ritrova nei tessuti capaci di fotosintesi. Tutti questi tessuti ne contengono infatti altri tipi. Fra questi, i più importanti sono quelli riuniti nella famiglia dei «carotenoidi». Sono composti di colore tendente al rosso, all'arancio e al giallo. (Il colore delle carote, ad esempio, è dovuto alla presenza di carotenoidi, e dalla carota ha derivato il suo nome questa classe di pigmenti.)

Le molecole di carotene sono costituite da catene di 40 atomi di carbonio. La catena fitilica a 20 atomi di carbonio attaccata alla molecola della clorofilla è, in sostanza, una mezza molecola di carotene. La funzione dei carotenoidi nei tessuti vegetali è in parte (non interamente, però) di servire come fonte di gruppi fitilici.

La scoperta della struttura dell'eme e della clorofilla non rese interamente chiaro all'istante il modo in cui questi importanti composti agivano.

Tuttavia, come vedremo, l'estendersi delle conoscenze sul ciclo sta facendo breccia nel complesso anello di anelli che permette alle molecole dell'eme e della clorofilla di presiedere a svariate funzioni. La complicata struttura di queste molecole comincia ad assumere un significato preciso.

Certamente, per cogliere il valore della complessa architettura degli atomi in questi composti chiave del ciclo del carbonio, sarebbe di aiuto sapere se stiamo effettivamente operando sulla giusta ricostruzione della struttura della clorofilla. I chimici ritengono che la migliore conferma della struttura di una molecola sia la sintesi di questa struttura a partire dai frammenti, e la dimostrazione che la struttura così

ottenuta possiede tutte le proprietà della sostanza di cui si suppone ripeta la struttura.

Hans Fischer aveva ottenuto la sintesi dell'eme, e questo era un fatto importante. L'esattezza della struttura dell'eme riceveva ulteriore conferma dalle accurate indagini sulla struttura della clorofilla, ma la conferma conclusiva, dalla sintesi, sfuggì a ogni tentativo per molti anni. Fu solamente nel 1960 che il chimico americano Robert Burns Woodward riuscì a ottenere la sintesi della clorofilla e a dimostrare che la formula di struttura attribuitale era veramente corretta (per queste ricerche e per altri importanti e complessi processi di sintesi nel 1965 gli fu assegnato il premio Nobel per la chimica).

Dentro la cellula

Se dai tessuti vegetali estraiamo in forma pura la clorofilla, e in una provetta vi aggiungiamo anidride carbonica e acqua in presenza di luce solare, osserveremo che non si ha fotosintesi. E anche se vi aggiungiamo caroteni e tutte le altre sostanze che ritroviamo nelle cellule vegetali, ciò non sarà di alcun aiuto.

A quanto pare entro i tessuti vegetali la clorofilla fa parte di un complesso e ben organizzato congegno che opera con regolarità come un tutto unico, portando a termine un processo di fotosintesi che comprende numerose tappe. La clorofilla rende possibile la tappa chiave, e senza di essa nulla di questo processo può svolgersi: ma di per sé sola la tappa chiave non è sufficiente.

Se ci mettiamo a studiare l'organizzazione di un organismo animale o di una pianta, scopriamo che la più piccola entità capace di funzionamento autonomo è la cellula. Il diametro di una cellula di media grandezza è 0,0035 millimetri; pertanto essa non è visibile a occhio nudo, bensì solamente per mezzo di un microscopio. Ogni cellula è delimitata rispetto all'ambiente circostante (e nei confronti delle altre cellule) da una sottile membrana a struttura ben definita, nella quale sono comprese molecole proteiche e molecole lipidiche.

Un uomo adulto è costituito da qualcosa come 50 milioni di milioni (5000000000000) di cellule. Ognuna ha un tale grado di specializzazione da essere dipendente da altre cellule dell'organismo per poter svolgere funzioni che non sarebbe in grado di svolgere da sola: isolata, una singola cellula umana non è in grado di continuare a vivere.

Eppure ciò non basta a sminuire l'importanza della singola cellula. L'uomo (e tutti gli organismi multicellulari) inizia la sua vita come cellula singola. Vi sono anche forme viventi costituite da una sola cellula, e hanno dimensioni ridottissime. Vi sono animali unicellulari («protozoi») e piante unicellulari («alghe»). I batteri, che non sono né animali né piante in senso stretto, sono anch'essi unicellulari. (Vi sono inoltre anche i virus, entità inferiori rispetto alla cellula, ma di essi in questo libro non ci occupiamo.)

Entro la cellula vi è una ulteriore specializzazione; vi sono degli «organelli», ognuno dei quali svolge una sua particolare funzione. Questi organelli sono di difficile osservazione. Al microscopio ottico ordinario le più comuni cellule sono virtualmente trasparenti sotto la forte luce necessaria ai forti ingrandimenti, per cui all'interno di esse appaiono pochi particolari.

A questa difficoltà hanno ovviato i biologi trattando le cellule con soluzioni coloranti diverse; ciò che ci si attendeva era che parti differenti della cellula - specializzate per fini diversi e pertanto provviste di differenti composti - reagissero con modalità differenti al colorante. Infatti, alcune parti della cellula assorbono il colorante, altre no.

In questo modo furono scoperti gli organelli che regolano la cellula e la vita. Essi furono scoperti entro il «nucleo», un corpicciolo posto pressappoco al centro di ogni cellula e separato dalla restante parte della cellula mediante una sottile membrana. Entro questo nucleo alcuni organelli in forma di filamenti racchiudono i composti dai quali dipendono la divisione cellulare e la trasmissione dei caratteri genetici. A questi organelli, scoperti grazie alla loro proprietà di assorbire un colore rosso, venne dato il nome di «cromosomi» (corpi colorati), sebbene essi siano in realtà incolori.

Nel 1898 un biologo tedesco, Carl Benda, esaminò delle cellule applicando un complesso di coloranti da lui studiato. Egli osservò che questa tecnica permetteva di evidenziare piccoli granuli all'esterno del nucleo, in quella parte della cellula che prende il nome di «citoplasma». Egli denominò «mitocondri» questi granuli.

Con il passare dei decenni si vide che il citoplasma di tutte le cellule capaci di processi di respirazione conteneva questi mitocondri e che erano i mitocondri a essere dotati del complesso sistema della catena respiratoria del ciclo del carbonio. Essi avevano in sé tutto quanto era richiesto per manipolare l'ossigeno molecolare, per l'ossidazione del glucosio e, anzi, per l'ossidazione in genere dei carboidrati,

dei grassi e delle proteine. Essi contenevano, in particolare, le varie molecole della famiglia dei citocromi

Per solito il mitocondrio ha la forma di una palla ovale, della lunghezza di 0,00025 millimetri e della larghezza di 0,00010 millimetri. Una cellula può contenere per solito da qualche centinaio al migliaio di mitocondri. Cellule di dimensioni assai notevoli possono contenere un paio di centinaia di migliaia di mitocondri, mentre certi batteri che non utilizzano l'ossigeno molecolare ne sono del tutto sprovvisti.

Il mitocondrio ha dimensioni così ridotte, che osservandolo a un comune microscopio ottico lo si può prendere per un semplice granulo privo di struttura. Intorno al 1930 i fisici costruirono il microscopio elettronico, uno strumento capace di ingrandimenti centinaia di volte maggiori di quelli raggiungibili con il microscopio ottico.

Dopo la seconda guerra mondiale il microscopio elettronico fu largamente impiegato nello studio dell'organizzazione interna della cellula; si scoprì così che il mitocondrio, per quanto piccolo, ha una complessa struttura interna. Il mitocondrio possiede una membrana doppia, una esterna liscia e una interna ripiegata in maniera complicata in modo da presentare un'estesa superficie. Le membrane sono costituite di molecole proteiche che forniscono una struttura continua, ricoperta a sua volta da uno strato di molecole lipidiche che isolano quelle proteiche evitando che esse si dispongano su tre dimensioni e mantenendole in uno strato lamellare di spessore monomolecolare.

Sulla superficie interna del mitocondrio vi sono migliaia di piccole particelle dette «particelle elementari», che probabilmente fanno parte integrante di questa superficie.

Inserito in questo congegno si trova un gran numero di molecole proteiche labili, dotate di struttura specifica. Le numerose reazioni chimiche riunite a formare la catena respiratoria del ciclo del carbonio sono poste ciascuna sotto il controllo di una ben precisa proteina. Una proteina dotata di tale capacità di regolazione di reazioni chimiche prende il nome di «enzima»; in assenza di un enzima la reazione che esso controlla può procedere solamente con notevole lentezza.

È la distribuzione degli opportuni enzimi in una precisa sequenza, che permette a una complessa serie di reazioni di procedere senza intoppi e con efficienza.

Associate agli enzimi si trovano molecole non proteiche (di dimensioni relativamente piccole, che sono capaci di legarsi labilmente a uno o all'altro dei diversi enzimi e di fungere da trasferitori di gruppi atomici staccati dalle molecole più grandi nella reazione che l'enzima regola. Queste piccole molecole prendono il nome di «coenzimi» per il fatto che cooperano con l'enzima. Si ritrovano inoltre atomi di metalli, forniti di carica elettrica, che mantengono attivo l'enzima e che vengono perciò denominati «attivatori». Ogni mitocondrio contiene tutti gli elementi necessari per la respirazione: enzimi, coenzimi e attivatori.

Possiamo immaginarci una molecola, poniamo, di glucosio, che si sposta entro il mitocondrio: la sua struttura viene modificata attivamente in un senso, poi in un altro, poi in un altro ancora, via via che un enzima (con quei coenzimi e attivatori che possono essere necessari) e poi un altro entrano in azione. Le molecole di ossigeno che entrano in un punto differente vengono anch'esse lavorate in modo op-

portuno. Dopo un tempo assai breve, ciò che prima era glucosio e ossigeno è diventato anidride carbonica e acqua, e l'energia prodotta è messa a disposizione di tutta la cellula. Il mitocondrio, in poche parole, è una specie di catena di montaggio chimica.

E come sarà un organello che compia la metà «fotosintesi» del ciclo del carbonio? Dovrà contenere clorofilla e sarà, per questo, verde? Ovviamente, se un organello è già colorato, non lo si dovrà colorare. Lo si potrà vedere direttamente. In realtà, non appena il perfezionamento tecnico del microscopio ottico giunse al punto di permettere di osservare piccoli corpiccioli entro la cellula, almeno in forma di puntini, fu possibile stabilire se la clorofilla era distribuita diffusamente nella cellula, o se era concentrata in organelli.

Era esatta la seconda ipotesi, e nel 1883 Julius Sachs poté dimostrarlo. A questi organelli contenenti clorofilla venne poi dato il nome di «cloroplasti».

I cloroplasti sono per solito notevolmente più grandi dei mitocondri. Talune piante unicellulari sono fornite di un solo grande cloroplasto, ma la maggior parte delle cellule vegetali contiene molti cloroplasti di piccole dimensioni (anche in questo caso il cloroplasto è in media due o tre volte più lungo e più largo di un mitocondrio).

La struttura del cloroplasto sembra anche più complessa di quella di un mitocondrio. L'interno del cloroplasto è costituito di molte sottili membrane tese trasversalmente da una parete all'altra. Sono le «lamelle». Nella maggior parte dei cloroplasti queste lamelle in alcuni punti ~i ispessiscono e divengono più scure, formando degli agglomerati scuri denominati «granuli». E appunto all'interno dei granuli che si trovano le molecole di clorofilla.

Se si esaminano al microscopio elettronico le lamelle nelle zone a granuli, si ha l'impressione che questi a loro volta risultino formati da piccolissime unità, al limite del visibile, somiglianti a piastrelle disposte con regolarità a formare come un pavimento. Ognuna di quelle unità sarebbe un'unità di fotosintesi, contenente da 250 a 300 molecole di clorofilla.

I cloroplasti sono più difficili da maneggiare dei mitocondri. Se si demolisce una cellula, è possibile isolare con una certa facilità i mitocondri intatti, ed essi, una volta accuratamente isolati, sono in grado (li continuare a svolgere la loro funzione. I cloroplasti sono decisamente più delicati: nel 1937 si riuscì a isolare, da cellule frammentate, dei cloroplasti, ma non abbastanza ben conservati da poter far proseguire la fotosintesi. Fu solamente nel 1954 che Daniel I. Arnon lavorando su cellule delle foglie di spinacio disintegrate riuscì a ottenere dei cloroplasti perfettamente integri, e a far compiere loro l'intera sequenza delle reazioni della fotosintesi.

Il cloroplasto - di cui è così dimostrata definitivamente la natura di unità di fotosintesi autonoma - racchiude al suo interno l'intera catena di montaggio necessaria a questo scopo. Non contiene solamente clorofilla e carotenoidi, ma un intero corredo di enzimi, coenzimi e attivatori ordinati in maniera precisa e complessa. Contiene anche citocromi, comunemente associati alla respirazione, ma presenti nei cloroplasti per un ben preciso motivo, come vedremo. (Alla luce di tutti questi dati non fa meraviglia che la clorofilla non sia in grado di compiere da sola la fotosintesi.)

Il cloroplasto si presta meno del mitocondrio alle manipolazioni dall'esterno. Le reazioni della respirazione entro il

mitocondrio possono essere accelerate o rallentate somministrando alle cellule svariati composti. E' in questo modo che si è riusciti a dedurre quanto avviene entro il mitocondrio.

Questa tecnica non funzionò col cloroplasto, neppure con quello apparentemente meglio isolato. Ne deriva che i biochimici riuscirono a definire i particolari chimici della respirazione prima di poter fare qualcosa di analogo per la fotosintesi.

Tutto questo nostro discorso ci permette ora di concludere che per trattare delle due metà del ciclo del carbonio, quella respiratoria e quella della fotosintesi, non occorre parlare continuamente di piante e di animali: metteremo meglio a fuoco i termini del problema se ci concentreremo su quegli organelli che di fatto attuano queste due metà del ciclo, quale che sia la cellula o l'organismo. Questo è quanto abbiamo fatto nella figura 11.

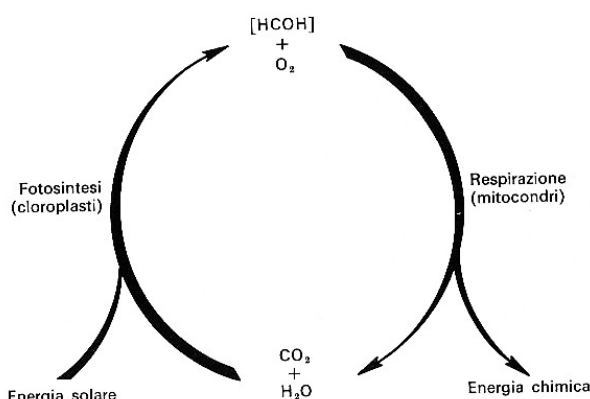


Figura 11
Il ciclo del carbonio (con gli organelli).