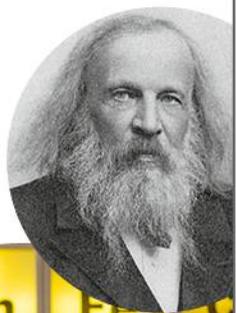


L'ACQUA E LE BIOMOLECOLE



La storia al tempo di...

DMITRIJ IVANOVIČ MENDELEEV
(Tobol'sk, 1834 – San Pietroburgo, 1907)

CHI ERA L'INVENTORE DELLA TAVOLA PERIODICA DEGLI ELEMENTI?

A metà dell'Ottocento, Dmitrij Mendeleev è un insegnante di chimica all'Università di San Pietroburgo, nell'Impero russo. Durante i suoi corsi, si rende conto che gli studenti conoscono alcuni elementi chimici, ma non capiscono quali relazioni esistano tra di loro. La chimica dell'epoca mancava di un chiaro sistema di classificazione degli elementi conosciuti.

CHE COSA PROPONE MENDELEEV?

A quei tempi, era noto alla comunità scientifica che alcuni elementi avevano caratteristiche simili. In particolare, si sapeva che la massa atomica dei metalli alcalino-terrosi forma una serie, con lo stronzio (che ha massa di circa 88 u, cioè unità di massa atomica o *uma*), che si colloca proprio a metà tra il calcio (circa 40 u) e il bario (circa 137 u). Mendeleev, per primo, dispone questa triade di elementi in una tabella a cui aggiunge anche i metalli alcalini e gli alogeni che conosce.

Cl – 35,5	K – 39	Ca – 40
Br – 80	Rb – 85	Sr – 88
I – 27	Cs – 133	Ba – 137

Osservando lo schema ottenuto, Mendeleev si accorge che esiste una periodicità costante nella successione degli elementi: un alogeno è seguito da un metallo alcalino, che a sua volta è seguito da un metallo alcalino-terroso.

PERCHÉ LA SUA TAVOLA PERIODICA HA AVUTO SUCCESSO?

La tavola periodica di Mendeleev non è stato l'unico tentativo di mettere ordine tra gli elementi chimici noti. Tuttavia, il vantaggio della proposta di Mendeleev consta nel fatto che prevede l'esistenza di elementi chimici ancora sconosciuti. I «buchi» lasciati in bianco sono stati colmati nel 1875 con la scoperta del gallio, a cui si sono aggiunti nel 1879 lo scandio e nel 1886 il germanio. Nonostante alcune trasformazioni, come l'introduzione della colonna dei gas nobili, l'andamento periodico della tavola non è mai stato messo in discussione da nessuno dei 60 elementi scoperti dopo la morte di Mendeleev.

> Fai un passo in più

A 150 anni dalla sua ideazione, l'ONU ha dichiarato il 2019 «anno internazionale della tavola periodica degli elementi». Cerca in Rete notizie su questa ricorrenza.

1871

Mendeleev pubblica la tavola periodica degli elementi

COMPLETA LA LINEA DEL TEMPO E AGGIUNGI QUALCHE ALTRO EVENTO STORICO LEGATO ANCHE AD ALTRE MATERIE

1825

Nicola I Romanov diventa imperatore di

1828

Friedrich Wöhler sintetizza per primo un composto organico

1860

Stanislao Cannizzaro propone la «regola» per calcolare la massa atomica degli elementi

1867

..... pubblica il primo volume de *Il Capitale*

1940

Viene sintetizzato in laboratorio il primo elemento transuranico

DMITRIJ MENDELEEV (1834-1907)

1. GLI ATOMI E I LEGAMI CHIMICI

GLI ATOMI SONO LE STRUTTURE DI BASE DELLA MATERIA

Tutta la materia, compresa quella che costituisce gli organismi viventi, è costituita dalla combinazione di più **elementi chimici**. In natura esistono 98 elementi diversi (altri 20 sono stati sintetizzati artificialmente), tra cui l'ossigeno dell'aria e dell'acqua, il calcio delle ossa dei vertebrati e delle conchiglie dei molluschi, e il ferro dei globuli rossi.

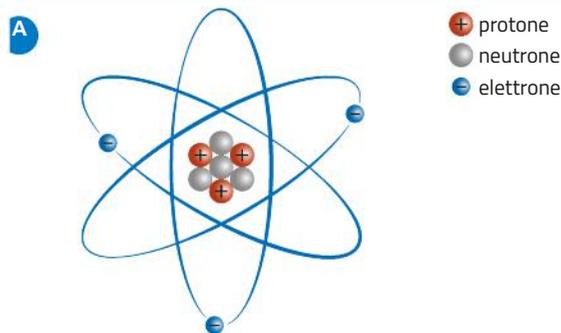
L'**atomo** è la parte più piccola di un elemento chimico, che mantiene le proprietà caratteristiche di quell'elemento. Ogni atomo presenta un **nucleo** molto piccolo e denso, che contiene una o più particelle positive, i **protoni**, insieme a particelle di massa simile ma elettricamente neutre, i **neutroni** (Figura 1A).

Tutti gli atomi di un determinato elemento hanno lo stesso numero di protoni, detto **numero atomico** e indicato con la lettera **Z**. Per esempio, gli atomi di idrogeno hanno un solo protone nel nucleo, mentre gli atomi di carbonio ne hanno 6 e quelli di ossigeno 8, perciò il loro numero atomico è rispettivamente 1, 6 e 8. A volte uno stesso elemento si può presentare con un diverso numero di neutroni: queste varianti sono chiamate **isotopi** (Figura 2).

La somma dei protoni e dei neutroni di un atomo è il suo **numero di massa**, indicato dalla lettera **A**. Di conseguenza, due isotopi differiscono per il numero di massa: per esempio, il numero di massa di un atomo di ossigeno ($Z = 8$) che possiede 8 neutroni è 16, mentre il suo isotopo con 9 neutroni avrà numero di massa 17.

Esternamente al nucleo, si muovono alla velocità della luce gli **elettroni**, leggerissime particelle cariche negativamente e attratte dalla carica positiva dei protoni. In ogni **atomo elettricamente neutro**, il numero di elettroni è uguale a quello dei protoni. Sono gli elettroni che determinano le **proprietà chimiche** dell'atomo; da essi, infatti, dipendono la capacità e le modalità di interazione (o di legame) di un atomo con gli atomi vicini. Anche se sono i mattoni che compongono la materia, gli atomi sono costituiti prevalentemente da spazio vuoto. Se immaginiamo il nucleo atomico grande come una biglia che misura 1 cm posta al centro di un campo da calcio, i suoi elettroni vi ruotano intorno a una distanza equivalente a quella degli spalti (Figura 1B). Questa distanza, però, non è uguale per tutti gli elettroni di uno stesso atomo. In generale, la distanza media di un elettrone dal nucleo dipende dalla quantità di energia che possiede l'elettrone stesso: maggiore è l'energia, maggiore è la distanza dal nucleo che questo può avere. Perciò, un elettrone con una scarsa quantità di energia si trova a un **livello energetico** inferiore (vicino al nucleo), mentre un elettrone che è più lontano dal nucleo occupa un livello energetico superiore.

Figura 1
Rappresentazione della struttura dell'atomo (A). Analogia tra le dimensioni di uno stadio e le distanze tra nucleo ed elettroni di un atomo (B).



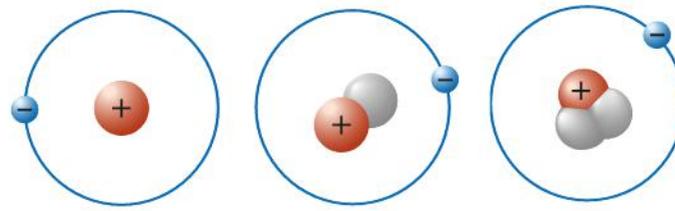
elettroni

nucleo

Figura 2

Gli isotopi dell'idrogeno differiscono per il numero dei neutroni contenuti nel nucleo.

Nome	Simbolo	N° di protoni	N° di elettroni	N° di neutroni	N° atomico	N° di massa
prozio	${}^1\text{H}$ o H	1	1	0	1	1
deuterio	${}^2\text{H}$	1	1	1	1	2
trizio	${}^3\text{H}$	1	1	2	1	3



prozio

deuterio

trizio

Un atomo raggiunge la massima stabilità quando il livello energetico più esterno possiede tutti gli 8 elettroni che è in grado di contenere (fanno eccezione l'idrogeno e l'elio a cui bastano 2 elettroni per stabilizzarsi). Di conseguenza, se sul livello più esterno l'atomo ha un numero di elettroni compreso tra 1 e 7 (il carbonio per esempio ne ha 4 e l'ossigeno 6) risulterà instabile.

Soltanto pochi atomi, quelli dei *gas nobili*, hanno il livello energetico più esterno completo (vedi Scheda 1), tutti gli altri tendono a reagire tra di loro per raggiungere la stabilità; questa interazione è possibile grazie ai **legami chimici**, che sono il risultato dell'unione di due o più atomi per formare **molecole o composti**.

I LEGAMI CHIMICI PIÙ COMUNI SONO DI TIPO IONICO E COVALENTE

Per molti atomi, il modo più semplice per raggiungere la stabilità è acquistare, cedere oppure condividere uno o più elettroni. Per esempio, all'atomo di cloro manca un elettrone per completare il livello energetico più esterno, mentre il sodio ha solo un elettrone nel livello più esterno e otto nel penultimo livello (Figura 3A).

Quando si uniscono, il sodio cede al cloro un elettrone ed entrambi gli atomi si ritrovano con il

livello energetico esterno completo, quindi acquisiscono una **configurazione elettronica** stabile (Figura 3B). Durante la reazione, gli atomi di partenza diventano carichi elettricamente e sono chiamati **ioni**. Il cloro acquista un elettrone dal sodio, quindi possiede un elettrone in più rispetto ai suoi 17 protoni e diventa un **anione**, cioè uno ione carico negativamente (Cl^-).

Lo ione sodio, invece, ha un elettrone in meno rispetto ai suoi 11 protoni, quindi diventa un **catione**, o ione positivo (Na^+). Gli ioni di carica opposta si attraggono reciprocamente: la sostanza che si forma è un **composto ionico**, il cloruro di sodio (NaCl), il comune sale da cucina (Figura 3C). I legami che comportano la reciproca attrazione tra ioni di segno opposto sono detti **legami ionici**.

Per completare il livello energetico più esterno, un atomo può anche condividere elettroni con un altro atomo, cioè metterli in comune per formare **molecole**. I legami chimici costituiti da coppie condivise di elettroni sono detti **legami covalenti**. In un legame covalente, la condivisione degli elettroni da parte dei due atomi che partecipano al legame completa il livello energetico più esterno di entrambi gli atomi (Figura 4). Ciò significa che tutti gli atomi che partecipano al legame covalente hanno raggiunto una condizione di stabilità.

A colpo d'occhio

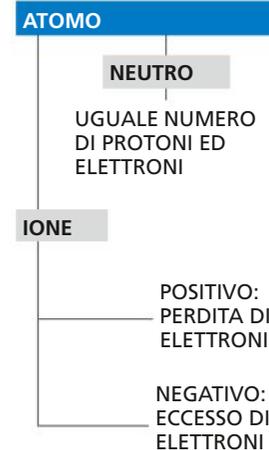


Figura 3

Atomi di sodio e di cloro (A). Formazione del cloruro di sodio (B), il comune sale da cucina (C).

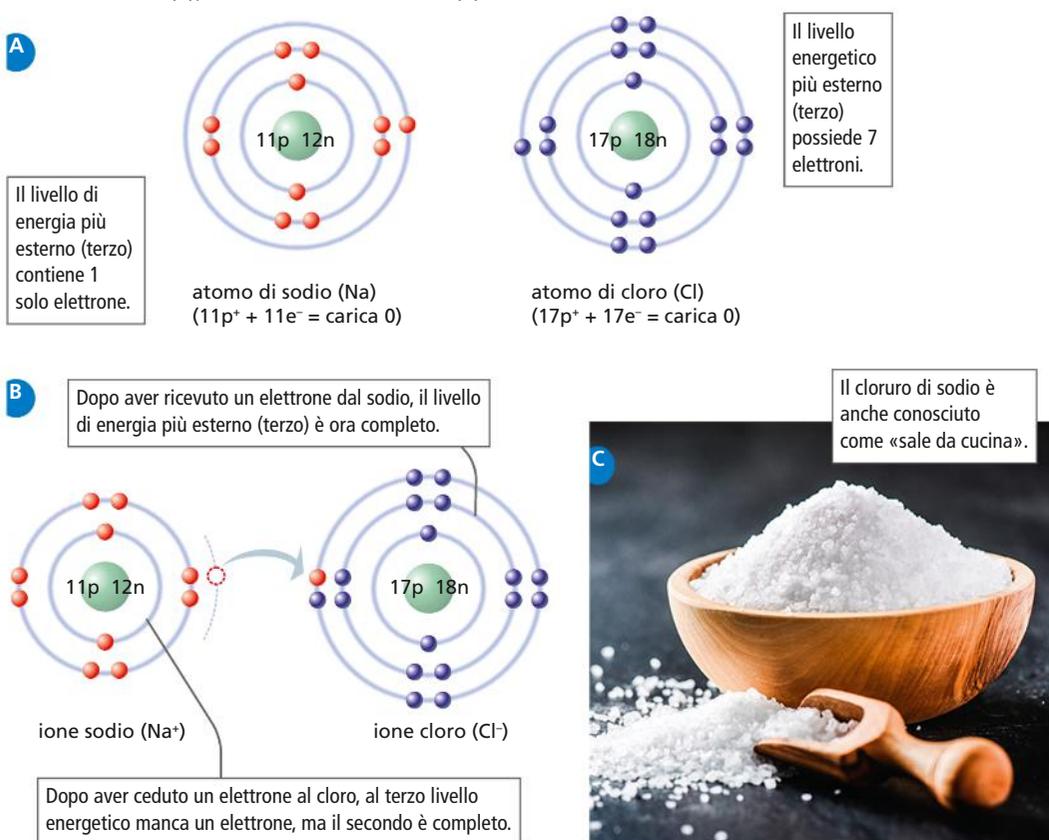
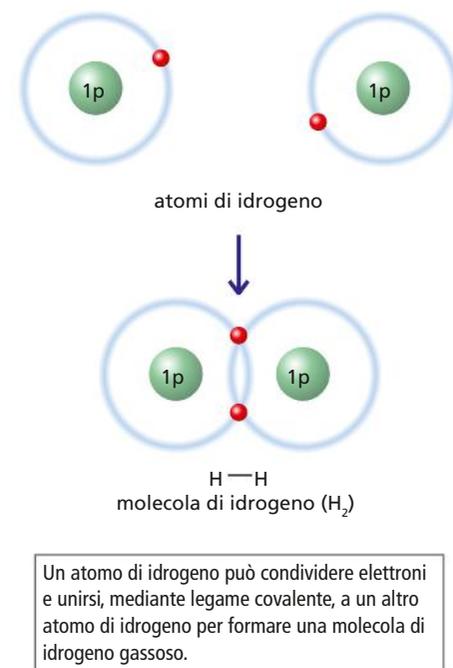
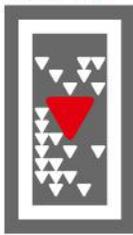


Figura 4

La formazione di un legame covalente.





La tavola periodica interattiva

Nelle rappresentazioni della struttura molecolare, dette *formule di struttura*, il legame covalente è indicato con un trattino (—).

Se il legame covalente si forma tra due atomi diversi, come l'idrogeno e l'ossigeno della molecola dell'acqua, gli elettroni di legame non sono equamente condivisi, poiché il nucleo dell'ossigeno è più positivo di quello dell'idrogeno e li attrae con più forza. Ciò determina la formazione di un **legame covalente polare** che comporta la presenza contemporanea di un polo positivo e di uno negativo sulla molecola, che rimane però complessivamente neutra.

La capacità degli atomi di carbonio di formare legami covalenti è di importanza fondamentale per tutti gli organismi viventi (Figura 5). Come abbiamo visto, un atomo di carbonio possiede quattro elettroni nel suo livello più esterno e può mettere in comune ognuno di questi con un altro atomo, formando legami covalenti con un massimo di quattro atomi, per esempio, nella molecola di metano (Figura 6).

Figura 5

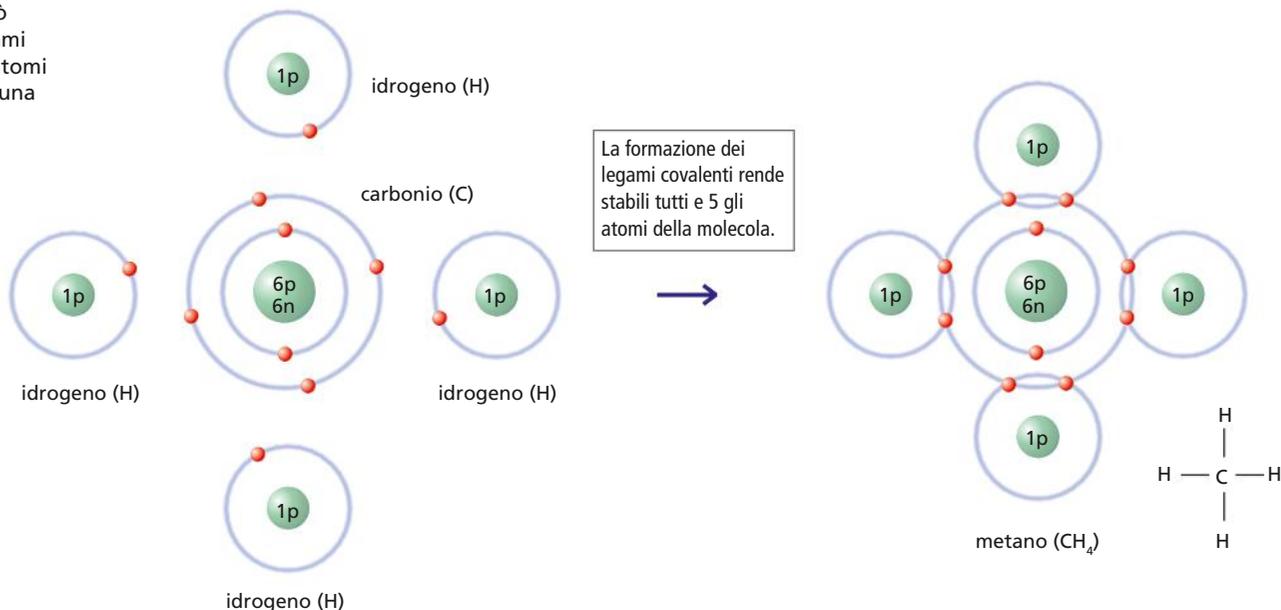
In tutti i viventi, il carbonio è un elemento comune, spesso legato ad atomi di idrogeno, azoto, ossigeno, fosforo e zolfo.



© fontoknak/Shutterstock

Figura 6

Un atomo di carbonio può dare luogo a quattro legami covalenti con altrettanti atomi di idrogeno, per formare una molecola di metano.



FACCIAMO IL PUNTO

Scegli il completamento corretto.

- Il numero di massa (A) indica
 - A il numero dei protoni di un atomo.
 - B il numero di protoni ed elettroni di un atomo.
 - C il numero di neutroni di un atomo.
 - D il numero di protoni e neutroni di un atomo.
- Un atomo è definito elettricamente neutro quando
 - A il numero di protoni è uguale a quello dei neutroni.
 - B il numero dei protoni è uguale a quello degli elettroni.
 - C il numero dei neutroni è uguale a quello degli elettroni.
 - D un atomo non è mai elettricamente neutro.
- Un legame covalente polare comporta
 - A molecole con distribuzione uniforme delle cariche.
 - B un polo positivo e uno negativo sulla molecola.
 - C due poli negativi sulla molecola.
 - D la reciproca attrazione tra ioni di segno opposto.

4. Scegli il termine corretto tra i due proposti.

I legami ionici sono dovuti alla reciproca **attrazione / repulsione** tra due ioni di carica **opposta / uguale**. Questi ioni si formano perché un atomo **perde / acquista** uno o più elettroni dal suo livello energetico più esterno e un altro atomo acquista uno o più elettroni dal livello energetico più **esterno / interno**, per acquisire, entrambi, configurazione **elettronica / protonica** stabile.

5. Completa il testo.

A eccezione dei , che hanno il livello energetico , tutti gli altri atomi tendono a reagire tra di loro per raggiungere la stabilità grazie ai , che sono il risultato dell'unione di due o più , per formare

Per saperne di più
LA TAVOLA PERIODICA ORDINA
GLI ELEMENTI SECONDO
IL NUMERO ATOMICO

Nel 1869, per ordinare in modo razionale gli elementi chimici fino ad allora individuati e studiati, il chimico russo **Dmitrij Mendeleev** costruì una **Tabella** che evidenziava analogie nei comportamenti chimici (come abbiamo visto in apertura di capitolo).

Mendeleev osservò che, disponendo gli elementi secondo un particolare schema e in base al loro numero atomico crescente, i comportamenti chimici si ripresentavano in modo periodico. La **Tabella** costruita da Mendeleev mostrava soltanto i 63 elementi chimici noti all'epoca, quindi presentava ancora molti spazi vuoti, che furono riempiti negli anni successivi. Oggi questa **Tabella** è completa e prende il nome di **tavola periodica degli elementi (Figura A)**.

L'esame della tavola periodica permette di ricavare alcune informazioni utili sulle caratteristiche degli elementi; per esempio, lungo una stessa riga orizzontale, il **periodo**,

si susseguono elementi che via via riempiono di elettroni lo stesso livello energetico. Invece, tutti gli elementi (come il litio, il sodio e il potassio) che appartengono alla stessa colonna verticale, il **gruppo**, hanno uguale numero di elettroni nel livello di energia più esterno e presentano comportamento chimico analogo. In particolare, gli elementi dell'ottavo (VIII) gruppo, i cosiddetti *gas nobili*, hanno il livello energetico esterno completo, quindi sono molto stabili e poco reattivi.

Dei 98 elementi presenti in natura, quattro: il carbonio (C), l'idrogeno (H), l'azoto (N) e l'ossigeno (O) costituiscono circa il 95% di tutta la sostanza vivente, mentre altri due, il fosforo (P) e lo zolfo (S), rappresentano un altro 4%. Questi sei elementi, che si possono ricordare facilmente usando l'acronimo **CHNOPS**, compongono circa il 99% della materia vivente (**Figura B**). Essi, però, non sono gli elementi più abbondanti sulla superficie

terrestre. Perché, allora, sono stati così importanti? La spiegazione sta nel fatto che gli atomi di questi elementi formano legami molto stabili. Inoltre, a eccezione dell'idrogeno, tutti possono formare legami con due o più atomi, e formare le molecole complesse che caratterizzano i viventi.

Elemento	Essere umano	Erba medica	Batterio
carbonio (C)	19,37%	11,34%	12,14%
idrogeno (H)	9,31%	8,72%	9,94%
azoto (N)	5,14%	0,83%	3,04%
ossigeno (O)	62,81%	77,90%	73,68%
fosforo (P)	0,63%	0,71%	0,60%
zolfo (S)	0,64%	0,10%	0,32%
Totale	97,90%	99,60%	99,72%

Figura B
 Composizione atomica media percentuale dei organismi rappresentativi.

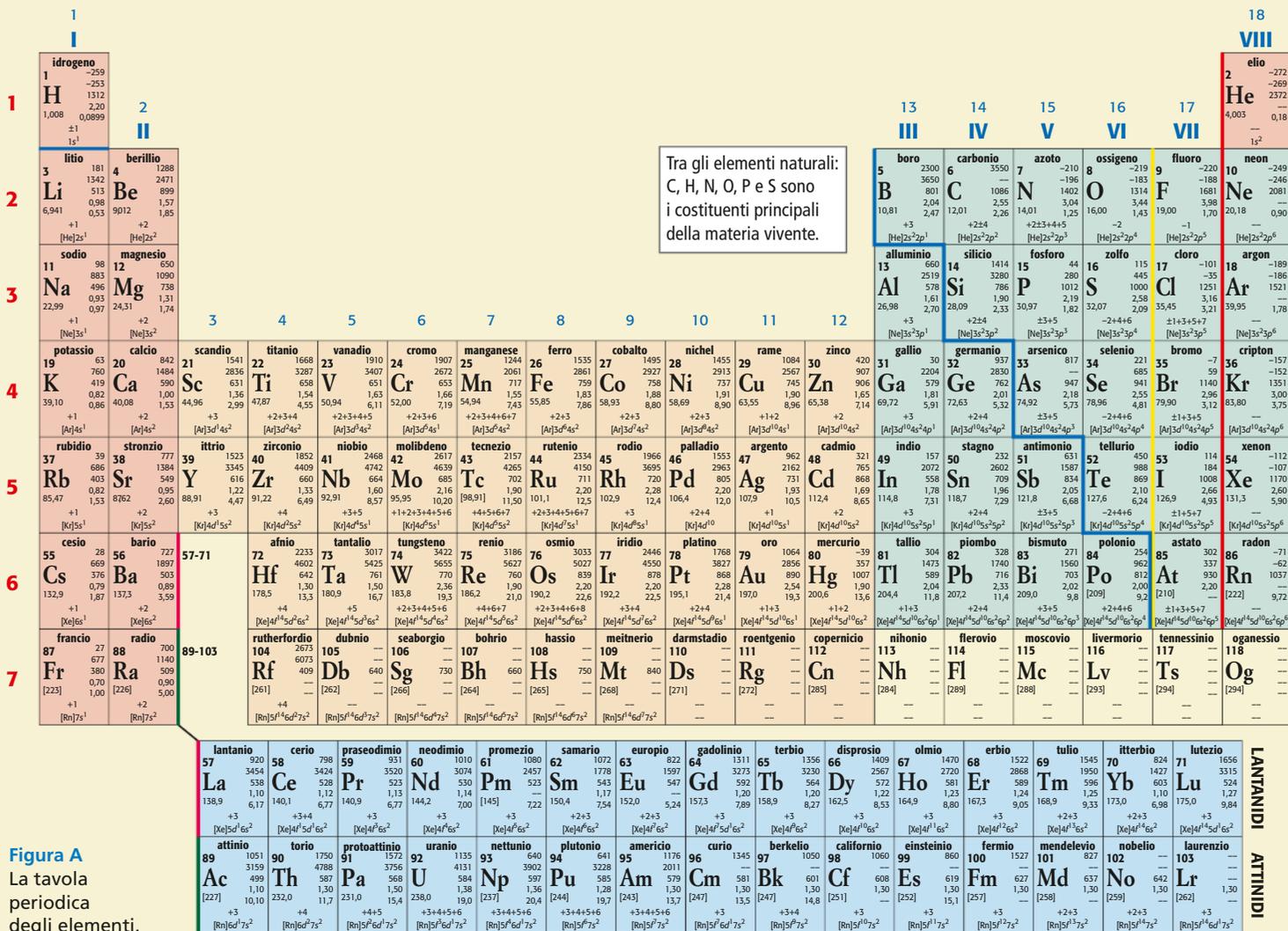
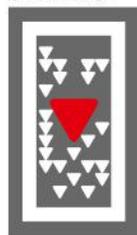
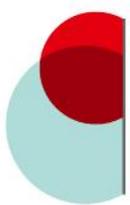


Figura A
 La tavola periodica degli elementi.



Video 1 
Il ciclo dell'acqua



2. L'ACQUA È UNA SOSTANZA SPECIALE

L'ACQUA È FONDAMENTALE PER GLI ESSERI VIVENTI

L'acqua è il liquido più comune sulla Terra e ne ricopre circa tre quarti della superficie. Secondo le teorie più accreditate, la vita sul nostro Pianeta ha avuto origine proprio nell'acqua e da lì si è evoluta per miliardi di anni. Oggi, sulla Terra ovunque vi sia acqua liquida è presente qualche forma di vita. Lo stesso corpo degli organismi viventi è formato in gran parte da acqua, anche se in proporzioni variabili dal 50 al 95%; ne sono particolarmente ricchi i vegetali e le meduse, mentre negli esseri umani; l'acqua costituisce circa il 75% dell'organismo alla nascita, per poi ridursi al 60% in età adulta.

Le particolari caratteristiche chimiche dell'acqua rendono possibile il **ciclo idrogeologico**, una serie di processi che coinvolge l'atmosfera, la superficie terrestre e gli esseri viventi (vedi Scheda 2).

LA MOLECOLA DELL'ACQUA HA PROPRIETÀ CHIMICO-FISICHE UNICHE

Per comprendere perché l'acqua sia così straordinaria e abbia un ruolo fondamentale nei sistemi viventi, si deve considerare la sua struttura molecolare. La molecola di acqua è costituita da due atomi d'idrogeno legati in modo covalente a un atomo di ossigeno (Figura 7); ognuno degli atomi d'idrogeno condivide il proprio elettrone con l'atomo di ossigeno che, a sua volta, mette a disposizione un proprio elettrone per ogni legame.

La molecola dell'acqua è complessivamente *neutra*, poiché possiede un numero uguale di elettroni e di protoni. Il nucleo dell'ossigeno, tuttavia, attrae con maggiore forza gli elettroni condivisi nei legami covalenti rispetto ai nuclei dell'idrogeno; questi elettroni, di conseguenza, trascorrono più tempo nella regione che circonda l'ossigeno, rendendola debolmente negativa, e meno tempo nella regione che circonda l'idrogeno, che al contrario risulta debolmente positiva. La distribuzione asimmetrica degli elettroni di legame rende la molecola d'acqua **polare**, con una struttura con quattro «vertici»: due di carica positiva e due di carica negativa (Figura 8A). Quando una di queste regioni dotate di polarità di una molecola di acqua si avvicina a una regione con polarità opposta di un'altra molecola di acqua, la forza di attrazione dà luogo a un **legame a idrogeno**.

Ogni molecola d'acqua può instaurare legami a idrogeno con altre quattro molecole d'acqua, formando un *tetraedro* (Figura 8B). Il singolo legame a idrogeno è molto più debole di un legame covalente e ha vita assai breve; subito dopo essersi spezzato, però, il legame a idrogeno tende a riformarsi tra due molecole d'acqua diverse. Se presi nel complesso, i legami a idrogeno hanno una forza considerevole, tanto da riuscire a tenere unite tra loro le molecole di acqua allo stato liquido (Figura 9). È proprio l'instaurarsi dei legami a idrogeno che conferisce all'acqua caratteristiche chimico-fisiche uniche e la rende il solvente «ideale» per la vita.

Figura 7

Modelli molecolari dell'acqua: modello a sfere compatte (in rosso l'ossigeno e in viola l'idrogeno) che illustra come i tre atomi siano, di fatto, incastrati l'uno nell'altro e (A) un modello a sfere e bastoncini, meno realistico, ma che rappresenta i due legami covalenti con brevi aste (B).

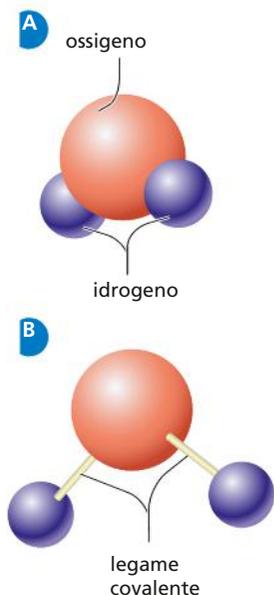


Figura 8

I legami covalenti polari di una molecola d'acqua danno luogo a due regioni positive e a due regioni negative (A); la polarità delle molecole di acqua determina la formazione dei legami a idrogeno disposti lungo i vertici di un tetraedro (B).

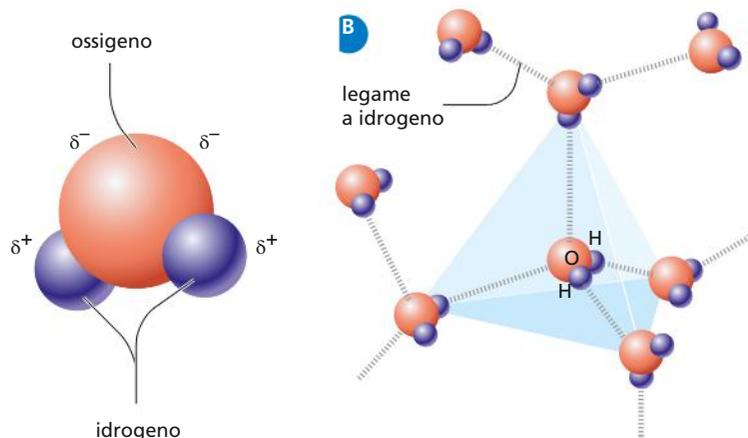


Figura 9

Nell'acqua liquida le molecole si muovono costantemente in modo caotico, ma restano unite grazie ai legami a idrogeno che si formano e si rompono in continuazione.



IL CICLO IDROGEOLOGICO RENDE L'ACQUA UNA RISORSA RINNOVABILE



L'Agenda 2030 (dal nome del documento: *Trasformare il nostro mondo. L'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile*) è un insieme di linee guida e di obiettivi che riconoscono lo stretto legame tra il benessere degli esseri umani e la salute dei sistemi naturali; è stata firmata nel 2015 dai governi di 193 Paesi membri dell'ONU. Il programma d'azione che si propone è riassunto in 17 Obiettivi (in sigla, *SDGs*, che sta per *Sustainable Development Goals*) che includono le tre dimensioni dello sviluppo sostenibile: quella economica, sociale e ambientale.

L'**acqua** rappresenta una risorsa rinnovabile fondamentale per conseguire un modello di sviluppo sostenibile. L'Obiettivo 6, infatti, ha come traguardo proprio la necessità di garantire a tutti la disponibilità e una corretta gestione dell'acqua e delle strutture igienico-sanitarie.

Grazie alle sue proprietà, l'acqua passa da uno stato di aggregazione della materia all'altro e nel farlo, origina il ciclo

idrogeologico o **ciclo dell'acqua** (Figura A e Video 1), una serie di passaggi e trasformazioni che coinvolgono l'atmosfera, l'idrosfera, la litosfera e i viventi. Questo ciclo consente lo sviluppo dei diversi biomi e della biodiversità sulla Terra.

A causa del calore proveniente dal Sole (e dell'effetto serra) l'acqua liquida contenuta in fiumi, laghi, mari e oceani, evapora e, trasportata dalle correnti ascensionali, raggiunge il limite della *troposfera*, lo strato dell'atmosfera più vicino alla superficie terrestre. In quota, le molecole di vapore raggiungono zone in cui la temperatura è molto bassa, quindi condensano e formano ammassi allo stato liquido o solido, noti come nubi. In seguito a cambiamenti di pressione e temperatura, le nubi si trasformano in pioggia o neve, e l'acqua precipita sulla superficie terrestre, ritornando agli oceani.

L'acqua che cade al suolo è in gran parte assorbita dal terreno, generando sopra agli strati rocciosi e impermeabili del sottosuolo

una zona di saturazione chiamata *falda freatica*, da cui può risalire e generare le sorgenti. Per la forza di gravità, l'acqua che scende dai rilievi montuosi si accumula nei fiumi, grazie ai quali può tornare nuovamente al mare. L'acqua potabile per uso umano deriva perlopiù da pozzi che attingono alle falde freatiche. L'acqua potabile non è una risorsa inesauribile, ma dipende dallo «stato di salute» della falda.

Se da un lato è vero che l'acqua liquida si rigenera sempre attraverso il ciclo idrogeologico, dall'altro è anche vero che la parte utilizzabile dagli esseri umani è relativamente scarsa e facilmente soggetta all'inquinamento, che ne degrada la qualità rendendola inutilizzabile. Data la straordinaria importanza che l'acqua riveste per i viventi, occorre preservare attentamente questa preziosa risorsa, limitandone gli sprechi ed evitando di danneggiarla.

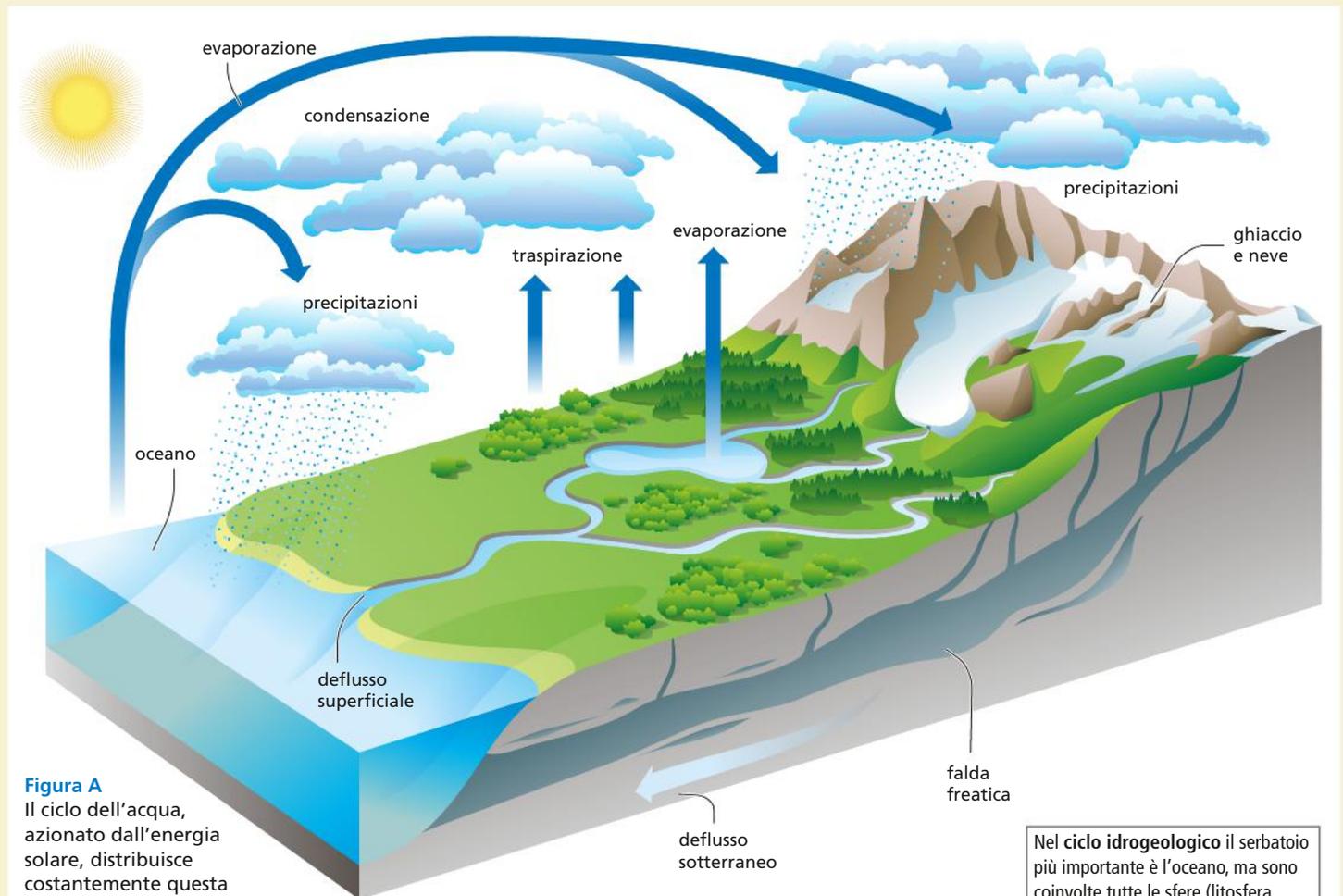


Figura A
Il ciclo dell'acqua, azionato dall'energia solare, distribuisce costantemente questa indispensabile sostanza nelle diverse sfere terrestri.

Nel ciclo idrogeologico il serbatoio più importante è l'oceano, ma sono coinvolte tutte le sfere (litosfera, atmosfera, idrosfera e biosfera).

LE CARATTERISTICHE DELL'ACQUA

I legami a idrogeno conferiscono all'acqua particolari proprietà fisiche.

- La **tensione superficiale** è dovuta all'intensa attrazione che le molecole superficiali dell'acqua instaurano tra loro e con le molecole sottostanti. Ciò fa sì che sulla superficie dell'acqua si crei una sorta di «pellicola» elastica. Se questa attrazione si verifica tra molecole della stessa sostanza è detta **coesione**, mentre se coinvolge molecole di sostanze differenti è detta **adesione** (Figura 10A).
- L'acqua può attraversare spazi piccolissimi per **capillarità**. La capillarità è il risultato dell'azione combinata della coesione delle molecole d'acqua tra loro e dell'adesione alle superfici circostanti (Figura 10B).
- Il **calore specifico** è la quantità di calore richiesta da una sostanza affinché si verifichi un determinato aumento della sua temperatura. Quello dell'acqua è relativamente alto, poiché parte del calore impiegato per scaldarla non si traduce in un aumento di temperatura, ma serve a rompere i legami a idrogeno che tengono unite le sue molecole (Figura 10C).
- L'**evaporazione** è il passaggio dallo stato liquido a quello gassoso (Figura 11). L'acqua

possiede un elevato calore specifico; per poter evaporare, infatti, le molecole devono prima spezzare i legami a idrogeno che le legano e ciò richiede energia termica. Quando si suda ci si raffredda perché l'acqua contenuta nel sudore evapora sottraendo calore al corpo (Figura 10D).

- Nella maggior parte dei liquidi, la **densità** (il rapporto tra la massa e il volume) aumenta al diminuire della temperatura, poiché le molecole si muovono più lentamente e si riducono gli spazi che le separano. A temperature inferiori a 4 °C, tuttavia, le molecole di acqua si allontanano leggermente l'una dall'altra per formare legami a idrogeno più stabili, quindi la densità dell'acqua diminuisce (vedi Figura 11). A 0 °C, l'acqua diventa ghiaccio e forma un reticolo cristallino rigido; come conseguenza, l'acqua solida occupa un volume maggiore di quella liquida e, quindi, il ghiaccio è meno denso e galleggia in superficie (Figura 10E). Questo è il motivo per cui ogni volta che immergiamo dei cubetti di ghiaccio in una bibita, questi non affondano, ma galleggiano fino a sciogliersi completamente.

CURIOSITÀ

Il **calore** è una forma di energia scambiata fra corpi con temperatura diversa messi a contatto; il trasferimento di calore avviene sempre dal corpo più caldo a quello più freddo e non viceversa.

CURIOSITÀ

La **densità** è una grandezza che misura il rapporto tra la massa di un corpo e il suo volume, viene espressa in kg/m^3 e, in genere, dipende dalla temperatura e dalla pressione del sistema.

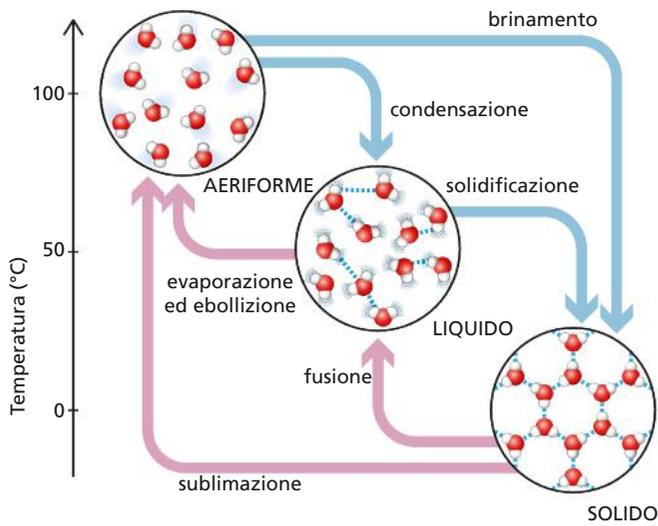
Figura 10

I legami a idrogeno conferiscono all'acqua particolari proprietà.



Figura 11

I cambiamenti di stato sono fenomeni fisici che non modificano la composizione della sostanza e sono reversibili, perché è possibile riportare il materiale allo stato fisico originario, come nei passaggi tra acqua liquida, ghiaccio e aeriforme (o vapore).



FACCIAMO IL PUNTO

Scegli il completamento corretto.

1. Quale proprietà fisica permette all'acqua di attraversare spazi piccolissimi?

- A) Tensione superficiale.
- B) Capillarità.
- C) Calore specifico.
- D) Densità.

2. Quali legami chimici rendono l'acqua il «solvente ideale» per la vita?

- A) Legami ionici.
- B) Legami covalenti.
- C) Legami a idrogeno.
- D) Nessuna delle precedenti risposte.

3. Assegna a ciascuna definizione il termine corretto tra quelli proposti.

forze di adesione, evaporazione, capillarità, calore specifico, densità, forze di coesione

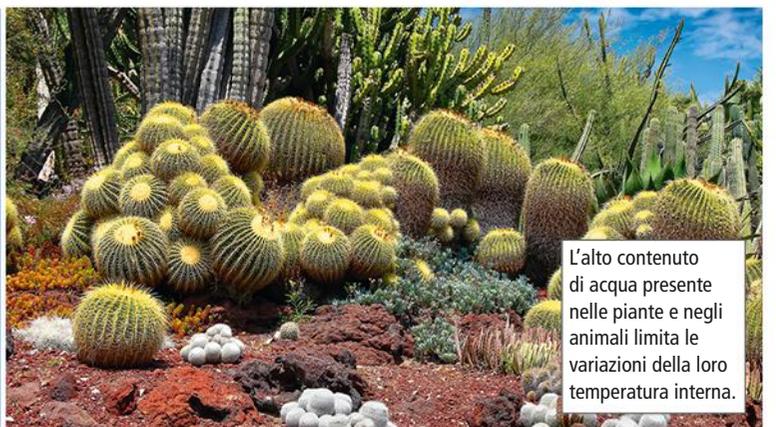
- a) Forze di attrazione che coinvolgono molecole di sostanze diverse.
- b) Il passaggio dallo stato liquido a quello gassoso.
- c) Il risultato dell'azione combinata della coesione delle molecole d'acqua tra loro e dell'adesione alle superfici circostanti.
- d) La quantità di calore richiesta da una sostanza affinché si verifichi un determinato aumento della sua temperatura.
- e) Forze di attrazione che si verificano tra molecole della stessa sostanza.

4. Completa il testo.

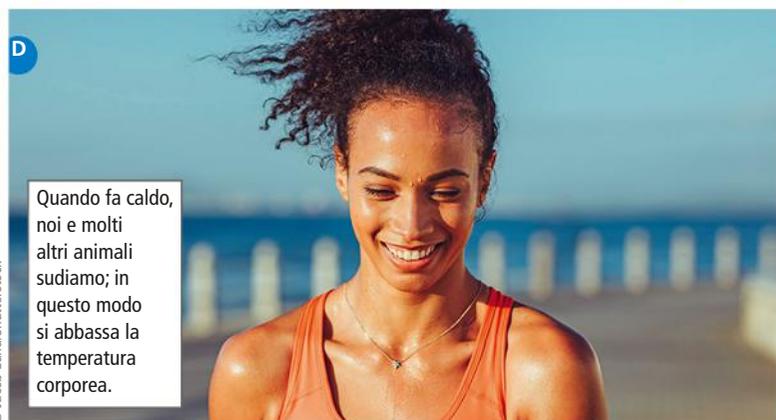
La forza di attrazione tra le molecole d'acqua dà luogo a un Ogni molecola d'acqua può instaurare legami a idrogeno con altre molecole, formando un Il singolo legame a idrogeno è molto più di un legame covalente.



La tendenza dell'acqua a resistere ai cambiamenti di temperatura permette agli organismi acquatici di vivere in un ambiente a temperatura relativamente costante



L'alto contenuto di acqua presente nelle piante e negli animali limita le variazioni della loro temperatura interna.



Quando fa caldo, noi e molti altri animali sudiamo; in questo modo si abbassa la temperatura corporea.



Quando il ghiaccio fonde assorbe energia termica per rompere i legami a idrogeno del suo reticolo, quindi raffredda l'acqua; quando, invece, l'acqua solidifica libera la stessa quantità di calore.

3.

TUTTI I VIVENTI SONO FORMATI DA BIOMOLECOLE

A colpo d'occhio

BIOMOLECOLE

NON POLIMERICHE

LIPIDI

POLIMERICHE

CARBOIDRATI

PROTEINE

ACIDI NUCLEICI

LE BIOMOLECOLE HANNO UNO SCHELETRO CARBONIOSO

Come abbiamo visto, i viventi sono formati in gran parte da acqua, mentre gli ioni (prevalentemente sodio, potassio e calcio) rappresentano solamente l'1% della massa totale. La parte restante della composizione degli esseri viventi è costituita perlopiù da molecole biologiche, chiamate **biomolecole**. Esse sono formate da un numero ristretto di elementi (vedi Scheda 1): **carbonio, idrogeno, azoto, ossigeno, fosforo e zolfo** (Tabella 1), e possono essere suddivise in quattro classi. Esistono i *glucidi* o *carboidrati* (come gli zuccheri), i *lipidi* (come i grassi e gli oli), i *protidi* (o *proteine*) e gli *acidi nucleici* (DNA e RNA).

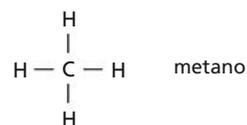
Una singola cellula batterica contiene circa 5000 tipi differenti di biomolecole, mentre una cellula animale o vegetale ne contiene quasi il doppio.

Gli atomi di carbonio formano l'ossatura centrale, detta *scheletro carbonioso*, di tutte le biomolecole, che sono studiate dalla **chimica organica**. Come abbiamo visto, il carbonio, grazie ai quattro elettroni del livello energetico esterno, forma sem-

pre quattro legami covalenti al massimo con altri quattro atomi. Le molecole organiche possono essere rappresentate con **formule grezze** oppure mediante **formule di struttura**: le prime specificano il numero di atomi di ogni elemento presente nella molecola, mentre le seconde evidenziano in che modo gli atomi si legano tra loro.

Nelle formule di struttura i *legami covalenti semplici* sono indicati con un trattino (—), mentre due trattini (=) rappresentano un *legame covalente doppio*. Il carbonio può anche condividere tre elettroni con un altro elemento chimico e formare un *legame covalente triplo* (≡) (Figura 12).

La formula CH₄ rappresenta la formula grezza del gas metano, mentre la corrispondente formula di struttura è indicata nel modo seguente:



A volte, può capitare che due sostanze siano costituite da molecole con la stessa formula grezza ma diversa formula di struttura; in questo caso le sostanze sono dette **isomeri**. I due carboidrati glucosio e fruttosio sono un esempio di isomeria: entrambi hanno formula grezza C₆H₁₂O₆ ma sono due zuccheri differenti.

Le biomolecole sono, generalmente, costituite da molti atomi, quindi sono voluminose e complesse. Questa apparente complessità, però, nasconde una struttura relativamente semplice: così come un treno è formato da più vagoni che si ripetono, le molecole più grandi, dette **polimeri**, sono formate dall'assemblaggio di subunità, simili o identiche tra loro, chiamate **monomeri**.

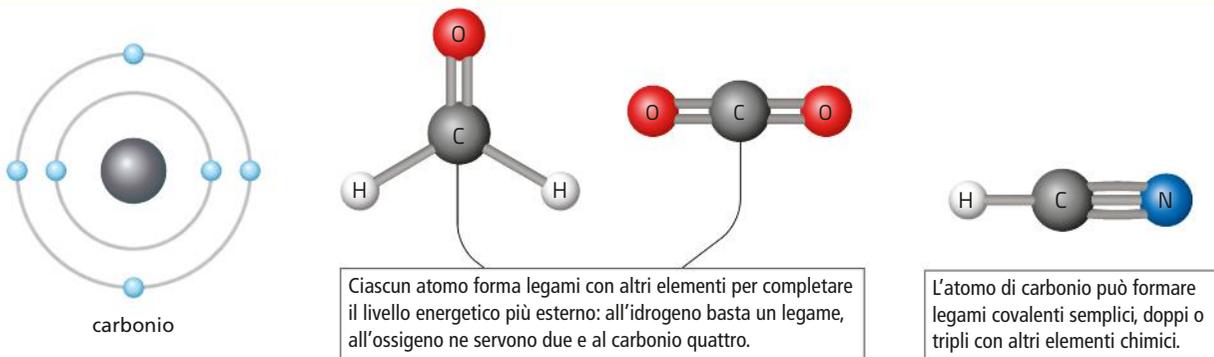
Tabella 1

Composizione chimica delle principali classi di molecole biologiche.

Molecole biologiche	Elementi chimici
carboidrati	C H O
lipidi	C H O (e P nei fosfolipidi)
proteine	C H O N S
acidi nucleici	C H O N P

Figura 12

L'atomo di carbonio può formare uno o più legami covalenti con altri atomi.



I POLIMERI SI FORMANO PER CONDENSANZIONE, SI SPEZZANO PER IDROLISI

Le cellule devono sintetizzare in continuazione nuovi polimeri, oppure devono demolirli.

Durante il processo di sintesi di un polimero, per ogni coppia di monomeri che si unisce viene eliminata una molecola di acqua (Figura 13A): questo tipo di reazione è detta **condensazione**.

Quando, invece, un polimero viene scisso nelle subunità che lo costituiscono, occorre l'aggiunta di molecole d'acqua e la reazione è detta **idrolisi** (Figura 13B).

È grazie alle reazioni di idrolisi se il cibo che ingeriamo, costituito da molecole grandi e complesse, viene demolito in molecole più piccole e semplici che sono trasportate dal sangue ai vari tessuti, dove vengono riassemble in molecole complesse. L'idrolisi del cibo avviene durante la *digestione*.

LE PROPRIETÀ DELLE BIOMOLECOLE DIPENDONO DAI GRUPPI FUNZIONALI

I composti organici più semplici sono gli **idrocarburi**, costituiti soltanto da carbonio e idrogeno. Tra essi vi sono gli **alcani**, caratterizzati dalla presenza di legami covalenti singoli tra gli atomi di carbonio, gli **alcheni**, che presentano almeno un legame covalente doppio nello scheletro carbonioso (Figura 14) e gli **alchini**, che hanno almeno un legame covalente triplo.

Di solito, gli idrocarburi prendono il nome dal numero di atomi di carbonio contenuti nella catena più lunga. Per esempio, viene chiamato *pentano* l'idrocarburo che ne ha 5, *esano* se sono 6, *eptano* se sono 7, *ottano* se sono 8, e così via, mentre i quattro idrocarburi più piccoli hanno un loro nome specifico: *metano* (1 C), *etano* (2 C), *propano* (3 C), *butano* (4 C).

LE PAROLE

Il termine *idrolisi* deriva dalle parole greche *hydro*, «acqua», e *lysis*, «scissione».

Figura 13
Schema delle reazioni di condensazione (A) e di idrolisi (B).

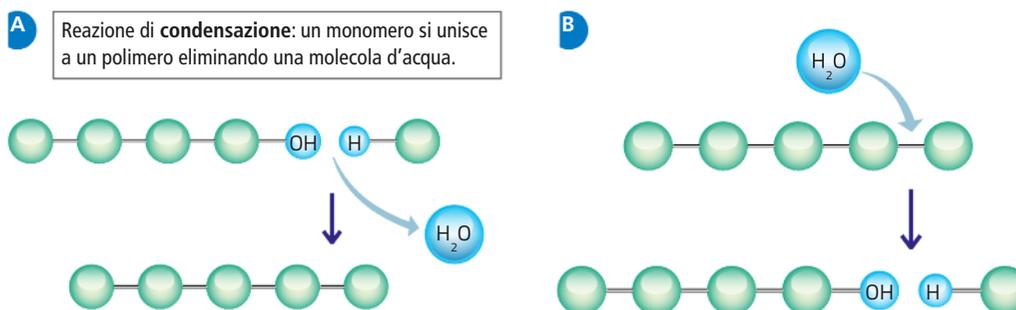
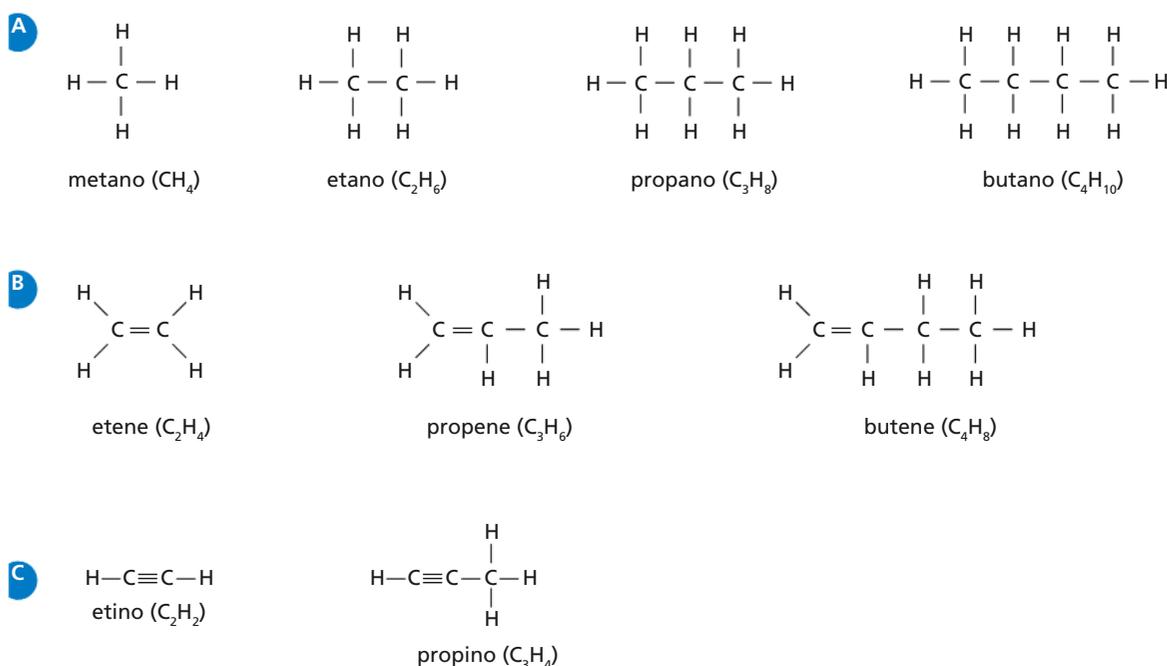


Figura 14

Le formule di struttura e le formule grezze dei quattro idrocarburi più semplici (A) metano, etano, propano e butano; (B) dei tre alcheni più piccoli (etene, propene e butene); e (C) degli alchini etino e propino.



Gli idrocarburi hanno una grande importanza economica, infatti, i combustibili liquidi e gassosi che alimentano gli impianti di riscaldamento e le automobili sono tutti idrocarburi. La benzina, il gasolio e gli oli combustibili derivano da resti di organismi morti milioni di anni fa che, in certe condizioni ambientali, hanno subito un lungo processo di *fossilizzazione*, trasformandosi in carbone e petrolio.

I composti organici più complessi sono caratterizzati da particolari gruppi di atomi legati allo scheletro carbonioso, detti **gruppi funzionali** (Tabella 2). Il *gruppo ossidrilico* ($-\text{OH}$), formato da un atomo di ossigeno e da un atomo di idrogeno, caratterizza gli *alcoli*, dei quali fa parte l'alcol etilico, o *etanolo*, contenuto nel vino e nei liquori.

Il *gruppo carbonilico* è costituito da un atomo di ossigeno legato al carbonio con un doppio legame covalente. Se questo gruppo si trova in posizione terminale della catena, il composto prende il nome di *aldeide*; quando, invece, il gruppo carbonilico è interno alla catena il composto prende il nome di *chetone*. Come si vede nella Figura 15, il glucosio contiene un gruppo aldeidico e per questo è uno

zucchero aldoso, mentre il fruttosio contiene un gruppo chetonico ed è uno zucchero chetoso.

I *gruppi carbossilici* sono formati da un atomo di carbonio a cui si legano un gruppo ossidrilico e un gruppo carbonilico ($-\text{COOH}$). Questi gruppi caratterizzano gli acidi organici, o **acidi carbossilici**, e sono presenti nelle proteine e nei lipidi.

Il *gruppo amminico* è formato da un atomo di azoto che lega due atomi di idrogeno ($-\text{NH}_2$) ed è caratteristico dei composti organici che derivano dall'ammoniaca, le **ammine**, e degli amminoacidi.

FACCIAMO IL PUNTO

Scegli il completamento corretto.

- Gli isomeri sono due molecole
 - A con lo stesso numero di atomi.
 - B esattamente identiche.
 - C che presentano la stessa formula grezza, ma diversa formula di struttura.
 - D che presentano la stessa formula di struttura, ma diversa formula grezza.

2. Scegli il termine corretto tra i due proposti.

I composti organici più semplici sono chiamati **idrocarburi** / **monomeri**. Tra di essi vi sono gli **alcani** / **carboidrati** caratterizzati dalla presenza di legami covalenti singoli, gli **alcani** / **alcheni** che presentano almeno un legame covalente doppio e gli **alchini**, che hanno almeno un legame covalente **puro** / **triplo**. Durante il processo di **idrolisi** / **condensazione** di un polimero, per ogni coppia di **monomeri** / **polimeri** che si unisce viene eliminata una molecola di acqua, mentre nel processo di **idrolisi** / **condensazione** viene aggiunta.

Tabella 2

I principali gruppi funzionali (R).

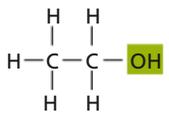
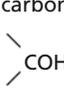
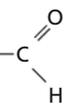
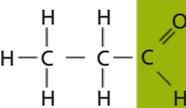
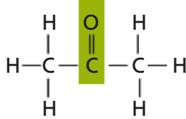
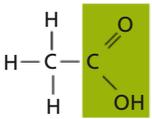
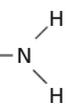
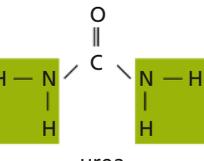
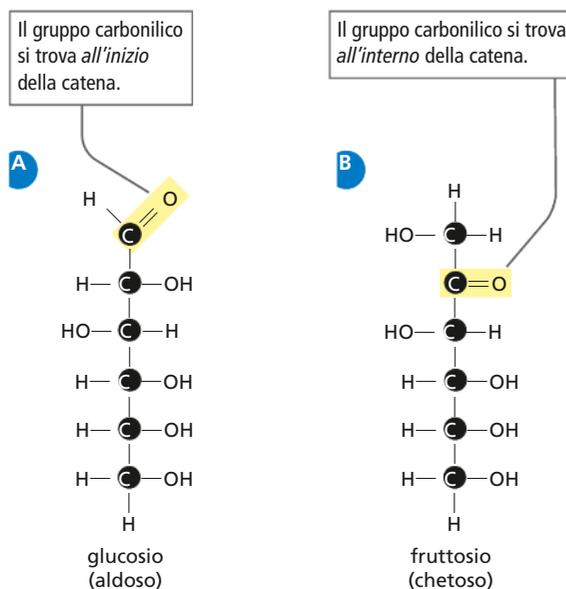
Gruppo funzionale	Formula generale	Classe di composti	Esempi	Molecole che li contengono
ossidrilico $-\text{OH}$	$-\text{OH}$	alcoli	 etanolo	carboidrati; vitamine idrosolubili
carbonilico 		aldeidi	 propanale	alcuni carboidrati; formaldeide (un conservante)
		chetoni	 acetone	alcuni carboidrati; «corpi chetonici» presenti nelle urine (provenienti dalla demolizione dei lipidi)
carbossilico $-\text{COOH}$		acidi carbossilici	 acido acetico	amminoacidi; proteine; alcune vitamine; acidi grassi, lipidi
amminico $-\text{NH}_2$		ammine	 urea	amminoacidi; proteine; urea presente nelle urine (proveniente dalla demolizione delle proteine)

Figura 15

Le molecole di glucosio e di fruttosio differiscono nella struttura poiché gli atomi di carbonio che formano il doppio legame con l'ossigeno si trovano in posizioni differenti.



4.

ESISTONO DIVERSI TIPI DI CARBOIDRATI

I CARBOIDRATI COMPRENDONO ZUCCHERI SEMPLICI E COMPLESSI

I **carboidrati** o *glucidi*, sono la principale *fonte energetica* per la maggior parte dei viventi (vedi Scheda 3). Si tratta di composti organici formati da carbonio, idrogeno e ossigeno, secondo un particolare rapporto numerico. Come suggerisce il termine «carboidrato» (composto formato da «carbonio e acqua»), in queste biomolecole si trova un atomo di carbonio ogni due atomi di idrogeno e uno di ossigeno. Questa composizione è riassumibile con la formula generale: $C_n(H_2O)_n$, in cui n può assumere vari valori, per esempio 6 nel caso del glucosio ($C_6H_{12}O_6$).

Esistono tre tipi principali di carboidrati, classificati a seconda del numero dei monomeri che contengono (Figura 16 e Video 2):

1. i **monosaccaridi** o «zuccheri semplici» (come il *glucosio* e il *fruttosio*) sono costituiti da una sola molecola e rappresentano i monomeri di base dei carboidrati più complessi;
2. i **disaccaridi**, come il *saccarosio* (zucchero da tavola) e il *lattosio* (zucchero del latte), derivano dalla condensazione di due monosaccaridi;
3. i **polisaccaridi**, come la *cellulosa* e l'*amido*, contengono molti monosaccaridi legati tra loro.

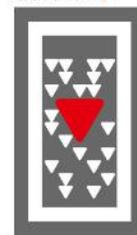
La maggior parte dei carboidrati ingeriti dagli animali sono idrolizzati in monosaccaridi nel sistema digerente e forniscono energia più o meno velocemente, a seconda della loro complessità.

Figura 16

Il glucosio è un monosaccaride che si può trovare in commercio in polvere oppure liquido come sciroppo (A); il saccarosio è il comune zucchero da tavola, che può essere integrale (più scuro) oppure raffinato (bianco) (B); il fiore del cotone è cellulosa quasi allo stato puro e viene usato per la produzione di tessuti (C).



GUARDA!



Video 2
I carboidrati

3

Per saperne di più

CARBOIDRATI, ENERGIA E LEGAMI

Per capire in che modo i monosaccaridi forniscano energia ai sistemi viventi occorre considerare il legame covalente e osservare che cosa succede in una reazione chimica. I legami covalenti che si trovano comunemente nelle molecole organiche sono forti e stabili, perché formati da elettroni condivisi tra due atomi. Ogni tipo di legame è caratterizzato da una *forza di legame*, convenzionalmente espressa dalla quantità di energia necessaria per spezzare il legame (in condizioni standard di temperatura e pressione).

La **Tabella** confronta le forze dei legami covalenti comuni nelle molecole organiche. Più forte è il legame, maggiore è la quantità di energia richiesta per romperlo. Come si può osservare, i legami doppi sono molto più forti di quelli semplici; inoltre, il legame

semplice tra carbonio e idrogeno è più forte del legame semplice tra due atomi di carbonio. Quando un legame covalente si spezza, gli atomi (o gruppi di atomi) si separano e tendono rapidamente a formare nuovi legami covalenti. Se questi nuovi legami sono più deboli di quelli che si sono spezzati, la reazione ha liberato energia nell'ambiente (**reazione esoergonica**); al contrario, se i nuovi legami sono più forti dei precedenti, è stata sottratta energia all'ambiente (**reazione endoergonica**).

Durante le reazioni che sfruttano i carboidrati si ottengono composti come il diossido di carbonio (CO_2), che ha un contenuto energetico inferiore rispetto alla molecola di partenza; ciò significa che è stata liberata energia, che la cellula può utilizzare per le proprie funzioni vitali.

Legame	Energia necessaria per spezzare il legame (kilocalorie per mole)
>C=O	171
>C=C<	147
$\begin{array}{c} \\ -C-H \\ \end{array}$	99
$\begin{array}{c} \\ -C-O- \\ \end{array}$	84
$\begin{array}{c} \quad \\ -C-C- \\ \quad \end{array}$	83

Tabella
Forze di legame a confronto.

Mentre i carboidrati più complessi, come quelli contenuti nel pane e nella pasta, richiedono diverse ore per essere completamente idrolizzati, i monosaccaridi sono assimilati in fretta (vedi Scheda 4).

I PRINCIPALI MONOSACCARIDI SONO IL GLUCOSIO E IL FRUTTOSIO

I **monosaccaridi** sono il materiale da costruzione con cui le cellule fabbricano importanti molecole e rappresentano la principale fonte di energia per la maggior parte degli organismi.

Il **glucosio** e il **fruttosio** fanno parte del gruppo degli *esosi* poiché hanno 6 atomi di carbonio. Quando si trovano in soluzione, molti zuccheri tendono a chiudere la propria molecola in una struttura ad anello, o *ciclica* (Figura 17). Il glucosio è il monosaccaride più comune e si trova in numerosi alimenti, mentre il fruttosio è lo zucchero presente in gran parte della frutta. Il glucosio è particolarmente importante per la specie umana e per tutti gli altri vertebrati, poiché è lo zucchero che, trasportato dal sangue, raggiunge e nutre tutte le cellule dell'organismo. Il **galattosio**, presente nel latte, è un altro isomero del glucosio, perciò ha formula grezza $C_6H_{12}O_6$.

Due monosaccaridi *pentosi* che non hanno funzione energetica, ma sono molto importanti per la riproduzione dei viventi sono: il **ribosio** $C_5H_{10}O_5$ e il **desossiribosio** $C_5H_{10}O_4$ che, come vedremo, si trovano rispettivamente nelle molecole di RNA e di DNA (vedi Lezione 7).

I DISACCARIDI SONO ZUCCHERI FORMATI DALL'UNIONE DI DUE MONOSACCARIDI

In molti organismi, gli zuccheri non sono trasportati sotto forma di glucosio ma di *disaccaridi*. Il **saccarosio** (il comune zucchero da tavola) è il risultato della condensazione dei due *monosaccaridi glucosio e fruttosio* (Figura 18A). Il saccarosio è il disaccaride presente nelle piante, che attraverso i vasi conduttori lo trasportano dalle cellule fotosintetiche delle foglie alle radici e ai fusti, dove è utilizzato come fonte energetica.

Il **lattosio** è un altro disaccaride comune, costituito da *glucosio e galattosio* (Figura 18B). Alcune persone non riescono a digerire il latte poiché non possiedono gli enzimi (una categoria di proteine) in grado di spezzare il legame glucosio-galattosio. In commercio esiste il latte «ad alta digeribilità» con un basso contenuto di lattosio (vedi Scheda 5).

I POLISACCARIDI SONO MOLECOLE DI GRANDI DIMENSIONI

I polisaccaridi sono formati da lunghe catene di monosaccaridi; alcuni sono una riserva energetica, altri hanno una funzione strutturale.

I *polisaccaridi di riserva* costituiscono le forme in cui le cellule accumulano e immagazzinano i monosaccaridi che possono utilizzare in caso di necessità. L'**amido** è formato dalla condensazione di migliaia di molecole di glucosio che formano catene ramificate, e costituisce il principale polisaccaride di riserva delle piante; è presente nei semi per fornir-

A colpo d'occhio

MONOSACCARIDI

GLUCOSIO

FRUTTOSIO

GALATTOSIO

RIBOSIO E
DESOSSIRIBOSIO

A colpo d'occhio

DISACCARIDI

SACCAROSIO

LATTOSIO

Figura 17

Il glucosio e il fruttosio sono rappresentati in forma ciclica; grazie alla numerazione degli atomi di carbonio è possibile confrontare queste formule con quelle lineari.

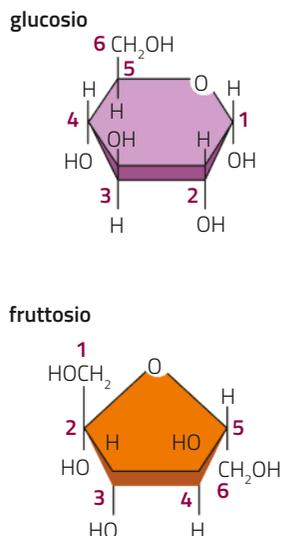
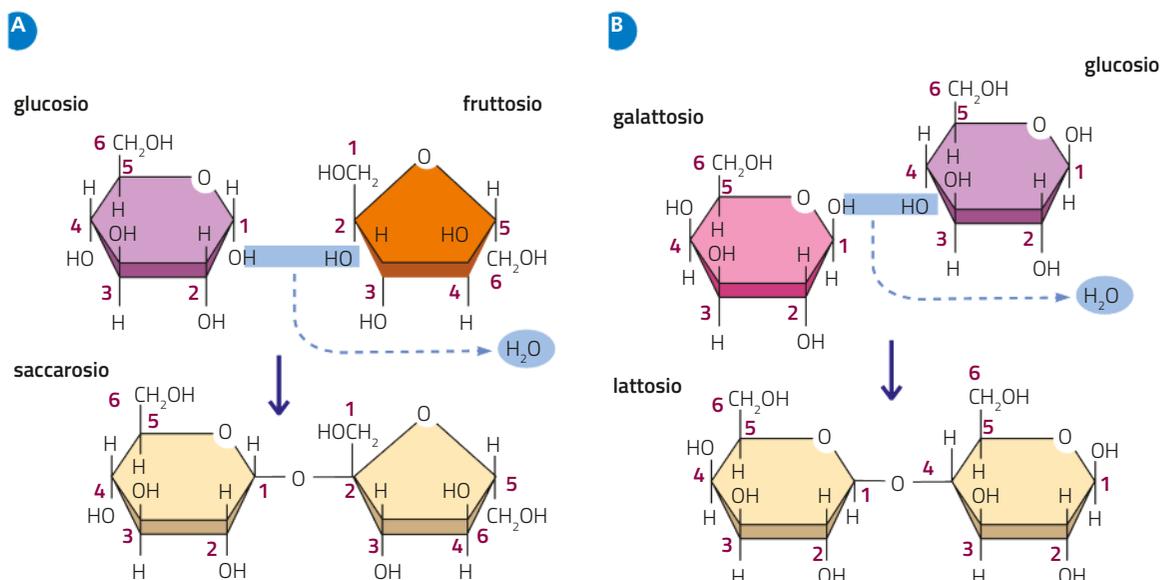


Figura 18

Reazione di condensazione mediante la quale glucosio e fruttosio si uniscono per dare il saccarosio, con l'eliminazione di una molecola d'acqua (fondino azzurro) (A). Il lattosio è formato dall'unione dei due monosaccaridi glucosio e galattosio (B).



re nutrimento al germoglio, ma anche nelle foglie e nei fusti (Figura 19A). Alimenti ricchi di amido sono la pasta, il riso e le patate.

Il **glicogeno**, chimicamente e strutturalmente simile all'amido, è il polisaccaride di riserva presente nei funghi e negli animali, soprattutto nelle cellule del fegato e dei muscoli scheletrici (Figura 19B). I *polisaccaridi di struttura* sono utilizzati per costruire impor-

tanti componenti cellulari; per esempio, la **cellulosa** forma la parete delle cellule vegetali ed è il composto organico più abbondante della biosfera.

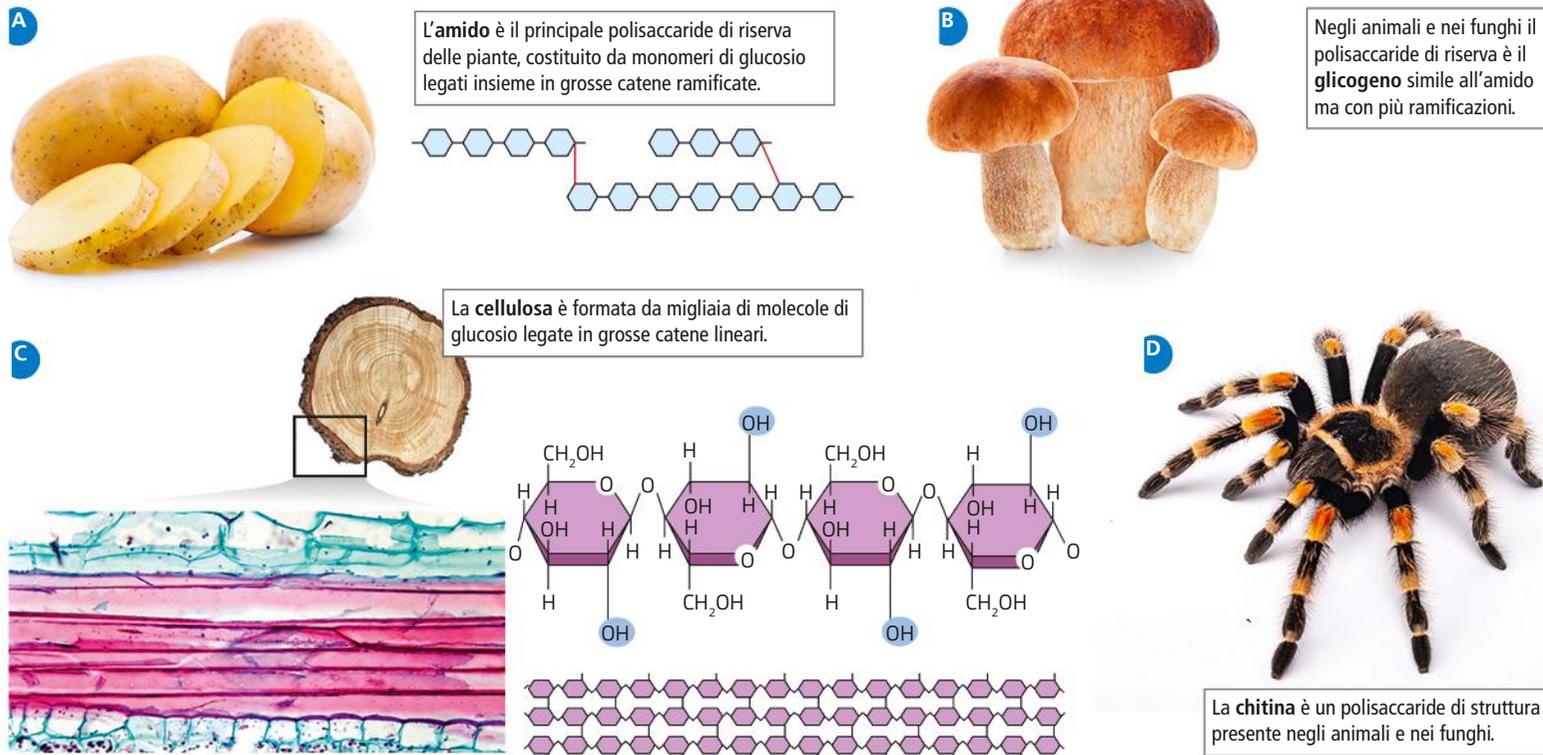
La cellulosa, data dalla condensazione di migliaia di molecole di glucosio in grandi catene lineari non ramificate, compone filamenti resistenti che costituiscono i tronchi e i rami degli alberi, i fili d'erba e i fusti dei fiori (Figura 19C).

A colpo d'occhio



Figura 19

Animali e vegetali utilizzano i polisaccaridi per diverse funzioni.



4

La nostra salute

LO SPORT, LA GLICEMIA E IL DIABETE



Prima di compiere un'attività sportiva è consigliato mangiare delle fette biscottate con la marmellata o, se lo sforzo è prolungato, della pasta poco condita. Perché? Questi alimenti sono composti da **carboidrati**, che vengono idrolizzati in monosaccaridi e ci forniscono energia più o meno rapidamente in base alla complessità delle molecole (Figura).

Il miele, che è una miscela di glucosio e fruttosio, è già parzialmente idrolizzato e quindi passa velocemente nel sangue per raggiungere le cellule, dove fornirà velocemente energia. Viceversa, i carboidrati più complessi, come quelli del pane e della pasta, richiedono anche diverse ore per essere idrolizzati completamente nei monosaccaridi che li compongono. Il **glucosio** è particolarmente importante per tutti i

vertebrati, perché è il monosaccaride più utilizzato come fonte di energia da tutte le cellule. La **glicemia**, cioè la concentrazione del glucosio nel sangue, varia nel corso della giornata: a digiuno, per esempio quando ci svegliamo al mattino, ha un valore di circa 70-90 mg/dL; due ore dopo un pasto, invece, il valore aumenta, ma senza superare i 140 mg/dL. In qualsiasi momento della giornata, un valore di glicemia che supera i 200 mg/dL è considerato segno di **diabete** di tipo II. Questa è una malattia cronica legata al metabolismo del glucosio: lo zucchero non viene assorbito dalle cellule, per cui rimane in concentrazioni elevate nel sangue. Un livello di glicemia eccessivo può causare danni permanenti agli occhi, ai reni, agli arti e al sistema nervoso; nei casi più gravi, inoltre, può indurre il coma.



Figura

Per correre una gara di velocità o fare un allenamento breve è meglio mangiare cibi semplici come miele o marmellata; per sforzi prolungati, come il nuoto o la corsa di resistenza, invece, è meglio un piatto di pasta.

A differenza degli esseri umani, che non sono in grado di idrolizzare e digerire la cellulosa, tutti gli erbivori possono ricavarne energia perché nel loro intestino ospitano microrganismi capaci di scomporla e, quindi, utilizzarla.

Negli insetti e nei crostacei, invece, il polisaccaride di struttura è la **chitina**, che ne costituisce gli esoscheletri, cioè lo scheletro esterno che riveste l'animale stesso (Figura 19D).

La Tabella 3 riassume i principali carboidrati e le loro caratteristiche.

Tabella 3

Quadro riassuntivo dei principali carboidrati.

Monosaccaridi	Disaccaridi	Polisaccaridi
glucosio: esoso molto diffuso in natura	saccarosio: zucchero da tavola, si trova nella linfa delle piante; è formato da una molecola di glucosio e una di fruttosio	amido: carboidrato di riserva presente nei vegetali, è formato da lunghe catene di glucosio ramificate
fruttosio: esoso presente nella frutta, è un isomero del glucosio	lattosio: formato da glucosio e galattosio, è lo zucchero presente nel latte	cellulosa: carboidrato di struttura presente nei vegetali, è formato da lunghe catene di glucosio non ramificate
ribosio: pentoso è presente nell'ATP e nell'RNA	trealosio: presente nel sangue degli insetti, è formato da due molecole di glucosio	glicogeno: zucchero di riserva presente negli animali e nei funghi, è formato da lunghe catene di glucosio ramificate
deossiribosio: pentoso che si distingue dal ribosio solo per un atomo di ossigeno in meno, è presente nel DNA	maltosio: presente nei semi, come quelli dell'orzo, è formato da due molecole di glucosio	chitina: zucchero di struttura presente nel rivestimento di alcuni animali, è formato da lunghe catene di glucosio con legato un composto azotato

FACCIAMO IL PUNTO

Scegli il completamento corretto.

1. Il lattosio è

- A un disaccaride costituito da glucosio e galattosio.
- B un polisaccaride complesso.
- C un monosaccaride costituito da monomeri di glucosio.
- D un disaccaride costituito da fruttosio e galattosio.

2. Completa il testo.

I monosaccaridi sono il materiale da costruzione con cui le cellule fabbricano importanti molecole e rappresentano la principale fonte di per la maggior parte degli organismi. Il e il fruttosio fanno parte del gruppo degli poiché hanno atomi di carbonio.

Altri zuccheri importanti sono: il presente nel latte. Il ribosio e il sono due monosaccaridi che non hanno funzione energetica, ma sono molto importanti per la dei viventi e si trovano, rispettivamente, nelle molecole di RNA e di DNA.

3. Assegna a ciascuna definizione il termine corretto tra quelli proposti:

cellulosa, amido, chitina, fruttosio, glicogeno

- a) Compongono filamenti resistenti che costituiscono i tronchi e i rami degli alberi, i fili d'erba e i fusti dei fiori
- b) È formato dalla condensazione di migliaia di molecole di glucosio e costituisce il principale polisaccaride di riserva delle piante
- c) Il polisaccaride di riserva presente negli animali, soprattutto nelle cellule del fegato e dei muscoli scheletrici
- d) Rappresenta il monosaccaride presente in gran parte della frutta
- e) Costituisce lo scheletro esterno e duro degli insetti

5

La nostra salute L'INTOLLERANZA AL LATTOSIO



Il latte non è per tutti! Appena nati, il latte è il nostro unico alimento (Figura), in molti adulti, invece, il latte provoca crampi, gonfiori e altri problemi intestinali. Questi malesseri dipendono dall'**intolleranza al lattosio**, cioè dall'incapacità di digerire lo zucchero presente nel latte.

A consentire la digestione del lattosio è l'enzima **lattasi**, una molecola molto abbondante nei cuccioli dei mammiferi. La lattasi agisce nello stomaco e scinde il lattosio in glucosio e galattosio, che poi sono assorbiti nell'intestino. Come avviene in tutti gli altri mammiferi, a un certo punto della crescita smettiamo di alimentarci con il latte materno; tuttavia, noi esseri umani siamo gli unici animali che continuano a bere latte anche da adulti.

Negli adulti può succedere che la produzione di lattasi diminuisca o scompaia del tutto con il passare degli anni: in questo caso il lattosio non viene più demolito nello stomaco e arriva nell'intestino, dove è usato come nutrimento dai batteri della flora intestinale attraverso un processo chiamato *fermentazione*. La fermentazione del lattosio produce gas e altre sostanze responsabili di gonfiore addominale, diarrea e crampi.

Questa condizione si risolve scegliendo alimenti a basso contenuto di lattosio, oggi diffusi in commercio, come lo yogurt, i formaggi stagionati e il latte ad alta digeribilità (o HD, *High Digestibility*), in cui il lattosio è già idrolizzato in glucosio e galattosio.

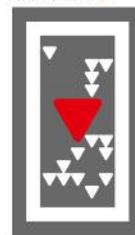


Figura

Prima dello svezzamento, che avviene intorno ai sei mesi di vita, l'unico alimento digeribile per un neonato è il latte.

5. I LIPIDI SONO BIOMOLECOLE RICCHE DI ENERGIA

GUARDA!



Video 3
I lipidi

I GRASSI ANIMALI E GLI OLI VEGETALI SONO FORMATI DA TRIGLICERIDI

I **lipidi** sono sostanze organiche diverse tra loro, ma con due caratteristiche comuni molto importanti: sono *insolubili* nei solventi polari come l'acqua e sono molecole organiche che liberano una *grande quantità di energia*. Inoltre, diversamente dalle altre, i lipidi sono biomolecole non polimeriche di piccole dimensioni (**Video 3**).

A differenza di molte piante, come le patate che accumulano amido nei fusti sotterranei, gli animali hanno una capacità limitata di immagazzinare carboidrati, poiché questi attraggono molecole di acqua e diventano relativamente pesanti. Nel corso dell'evoluzione, i lipidi si sono affermati come sostanze di riserva energetica, perché, a parità di peso, accumulano sei volte l'energia contenuta nel glicogeno. Infatti, nei vertebrati soltanto una piccola parte dei carboidrati in eccesso è accumulata nel fegato e nei muscoli come glicogeno, il resto in genere, è convertito in lipidi. Anche le piante possono immagazzinare energia sotto forma di lipidi (gli oli), soprattutto nei semi (come il mais e le arachidi) o nei frutti (come le olive).

Oltre a essere un'efficiente riserva energetica, i lipidi svolgono anche la funzione di isolanti termici; per questo motivo le foche, gli orsi e gli altri animali adattati ai climi polari hanno uno spesso strato di grasso sottocutaneo che li protegge dal freddo intenso (**Figura 20**).

I lipidi sono classificati in due grandi gruppi: **lipidi complessi** (o saponificabili), tra cui le cere, i trigliceridi e fosfolipidi, che presentano nella loro struttura gli acidi grassi, e **lipidi semplici** (o non saponificabili), tra cui gli steroidi, che non presentano acidi grassi al loro interno.

Un tipo comune di lipide complesso è il **trigliceride**, che si forma per condensazione di tre molecole di *acidi grassi* (acidi carbossilici con una lunga catena carboniosa) e una molecola di *glicerolo* (un alcol con tre atomi di carbonio e tre gruppi OH). Negli organismi, i trigliceridi costituiscono una forma di energia di riserva.

Nella sintesi di un trigliceride vengono eliminate tre molecole di acqua, una per ogni reazione di condensazione (**Figura 21**). Le molecole di trigliceridi sono neutre ed estremamente idrofobiche, poiché contengono gruppi non polari.

Figura 20

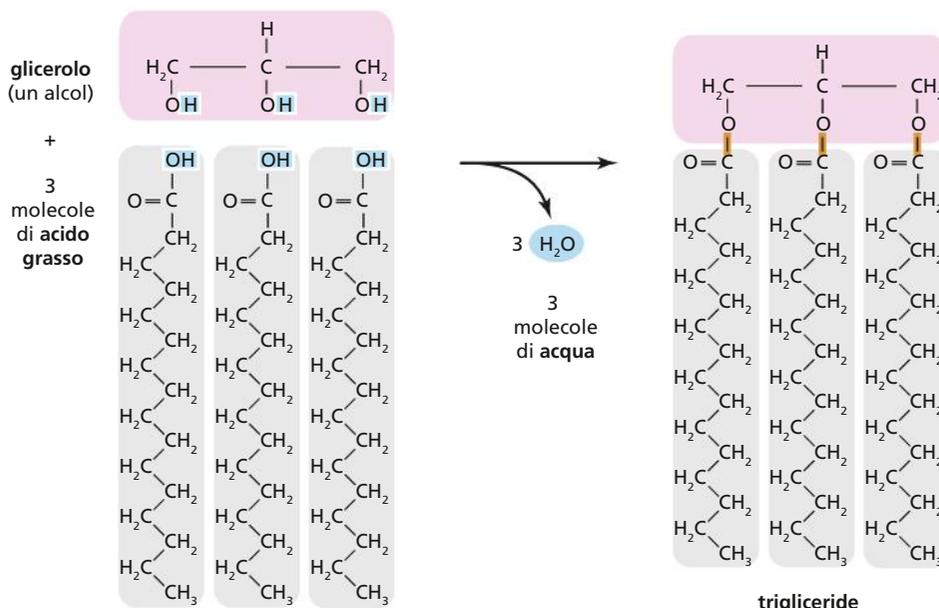
Grazie allo spesso strato lipidico sottocutaneo, che funge da isolante termico, le foche possono vivere in condizioni climatiche estreme.



Il grasso sottocutaneo presente sotto la pelliccia delle foche è costituito da lipidi animali.

Figura 21

La sintesi di un trigliceride avviene per condensazione: 1 molecola di glicerolo si lega a 3 acidi grassi con eliminazione di 3 molecole di acqua.



GLI ACIDI GRASSI POSSONO ESSERE SATURI OPPURE INSATURI

Un **acido grasso** in cui non compaiono legami multipli tra gli atomi di carbonio è detto **saturo**; ogni atomo di carbonio della sua catena forma quattro legami singoli con altri quattro atomi, perciò non può formare ulteriori legami. Di solito, i grassi saturi sono di origine animale, come il burro, e sono solidi a temperatura ambiente.

Viceversa, un acido grasso che presenta nella catena atomi di carbonio uniti anche da legami multipli è detto **insaturo**, poiché non possiede il numero massimo di atomi di idrogeno. Questi lipidi tendono a essere liquidi a temperatura ambiente, come gli oli vegetali di oliva, di arachidi e di mais.

La margarina, a differenza dell'olio, si presenta solida anche se è di origine vegetale; ciò dipende dall'aggiunta artificiale di atomi di idrogeno ai suoi acidi grassi, che diventano così saturi, ma anche più dannosi per la salute. L'olio di palma, pur essendo di origine vegetale, contiene percentuali di

grassi saturi comparabili a quelle di cibi di origine animale; per questa ragione (oltre che per motivi ambientali) è molto dibattuto il suo utilizzo nella produzione industriale di alimenti (vedi Scheda 6).

Figura 22
I grassi di origine animale sono saturi, mentre gli oli vegetali sono, per la maggior parte, insaturi.



© Tajana Baibakova/Shutterstock

6

Educazione ambientale

L'OLIO DI PALMA CONTIENE ACIDI GRASSI SATURI

L'olio di palma è un grasso estratto dai frutti di questa pianta (Figura A) che costa poco e può avere numerosi utilizzi. Pur essendo un olio vegetale, quello di palma è solido a temperatura ambiente come il burro e gli altri grassi animali. In realtà, oltre all'olio di palma, dai semi della pianta si estrae anche un altro grasso solido, l'olio di palmisto. Entrambe queste sostanze trovano un larghissimo impiego nell'industria alimentare, poiché hanno proprietà ottimali per garantire l'aspetto, ma anche il gusto e la conservazione di molti cibi, come i biscotti, i cracker e le creme spalmabili. Il successo di questi oli è dovuto all'elevata quantità di acidi grassi saturi presenti nella loro composizione: circa il 50% per l'olio di palma e fino all'80% per quello di palmisto. Tale caratteristica consente agli oli di non irrancidire, quindi di non alterare il sapore dei cibi, oltre al fatto che conferisce ai prodotti la consistenza ottimale.

Poiché si tratta di grassi saturi, l'olio di palma e quello di palmisto possono aumentare il rischio di malattie cardiovascolari e sono potenzialmente pericolosi per la salute umana. In realtà, è stato specificato come sia difficile raggiungere concentrazioni pericolose di queste sostanze con la normale alimentazione. Dunque, come per tutti i grassi, soprattutto quelli saturi, è consigliabile limitare i cibi ricchi di olio di palma, ma non esiste una controindicazione scientifica perché sia necessario escluderli del tutto



dall'alimentazione. Per di più, molti dei prodotti che si dichiarano «senza olio di palma» devono in qualche modo sostituire tale sostanza grassa con altre che abbiano caratteristiche simili ai fini della lavorazione industriale. Dunque, accade spesso che l'olio di palma sia sostituito dall'olio di cocco o dal burro di cacao, anch'essi estremamente ricchi di grassi saturi, in proporzioni anche superiori (circa il 60% per il burro di cacao e l'80% per quello di cocco).

Oltre all'impiego alimentare, l'olio di palma è utilizzato anche nella produzione di biocarburanti e di prodotti detergenti. Questa sua diffusione ha portato a un aumento progressivo della coltivazione delle palme dalle quali estrarre l'olio. Ciò ha causato un problema forse maggiore di quello alimentare, perché queste coltivazioni sono scarsamente sostenibili. Per produrre i quantitativi di olio di palma necessari a livello globale, i Paesi produttori hanno sacrificato molte altre colture, fondamentali per l'alimentazione delle popolazioni locali, spesso abbattendo ampie zone forestali per estendere l'area di coltivazione (Figura B).

Quello dell'olio di palma, quindi, è un buon esempio di come alcune questioni vadano analizzate sotto più aspetti: l'olio di palma non è un grasso particolarmente sano, ma nemmeno il peggiore, di conseguenza è bene conoscere con quali alternative esso venga sostituito.



© KYIam/Shutterstock - © Rich Carey/Shutterstock

Figura
I frutti della palma al cui interno si trova l'olio (A). Per fare spazio alla coltivazione delle palme da olio spesso si ricorre alla deforestazione di estesi territori (B).

I FOSFOLIPIDI E I GLICOLIPIDI SONO PRESENTI NELLE MEMBRANE CELLULARI

Alcuni tipi di lipidi, in particolare i fosfolipidi e i glicolipidi, svolgono ruoli strutturali estremamente importanti. Come i trigliceridi, anche questi lipidi sono costituiti da catene di acidi grassi legate a uno scheletro di glicerolo; tuttavia, nei **fosfolipidi** il terzo atomo di carbonio del glicerolo non è legato a un acido grasso ma a un gruppo fosfato (PO_4^{3-}) al quale è generalmente legato un altro gruppo (R) polare (come la *colina*; **Figura 23A**). Il gruppo fosfato carico negativamente e il gruppo polare costituiscono la parte idrofila della molecola, chiamata «testa»; la parte rimanente, formata dai due acidi grassi apolari, costituisce le «code» idrofobiche.

Quando si trovano in soluzione acquosa, i fosfolipidi tendono a disporsi in superficie l'uno accanto all'altro con le teste idrofile (polari) rivolte verso l'acqua (anch'essa polare) e le code idrofobiche (apolari) orientate in direzione opposta. I fosfolipidi possono anche formare doppi strati, con le «code» disposte verso l'interno e le «teste» rivolte verso l'esterno acquoso (**Figura 23B**). Questa particolare disposizione a doppio strato costituisce la struttura di base delle membrane cellulari (**Figura 24**). Le molecole fosfolipidiche sono tenute insieme

da forze di attrazione che possono rompersi e riformarsi con facilità, per questo esse si possono muovere lateralmente all'interno del doppio strato e formare configurazioni diverse (mosaici) che variano in continuazione; tale modello è detto *a mosaico fluido* e la sua plasticità rende la membrana plasmatica particolarmente elastica.

Nei **glicolipidi** («carboidrati e lipidi») il terzo atomo di carbonio del glicerolo non si lega a un gruppo fosfato, ma a una corta catena idrofila di carboidrati; in soluzione acquosa i glicolipidi si comportano come i fosfolipidi e sono anch'essi componenti importanti delle membrane cellulari, dove svolgono generalmente il ruolo di riconoscimento: per esempio, i glicolipidi posti sulla membrana dei globuli rossi umani determinano il diverso tipo di gruppo sanguigno A, B, AB, 0.

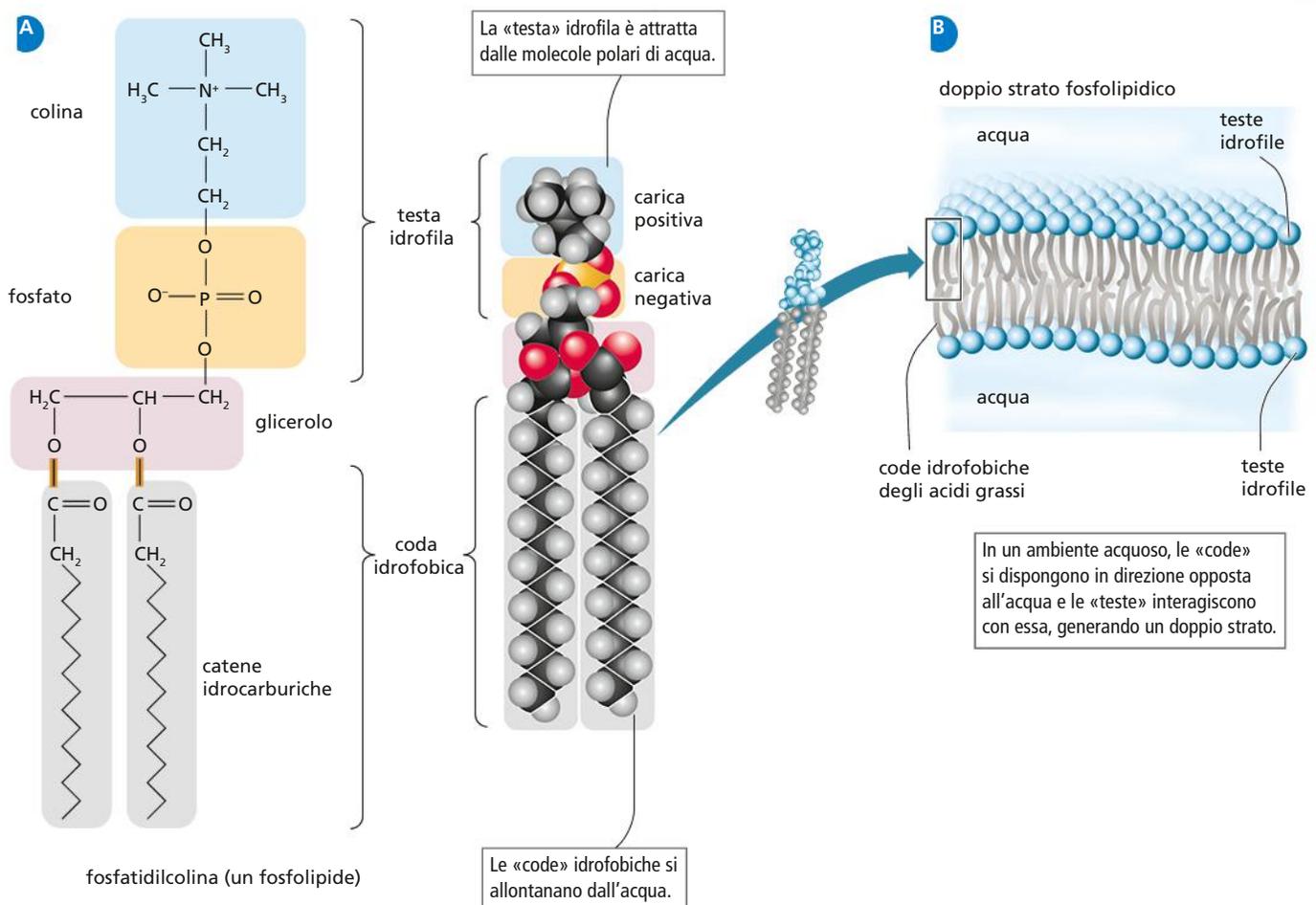
GLI STEROIDI E LE CERE SONO LIPIDI PARTICOLARI

Nelle membrane delle cellule animali, ma non in quelle di procarioti, piante e funghi, vi sono grandi quantità di colesterolo. Il colesterolo è un lipide appartenente a un importante gruppo di composti chiamati *steroidi* (vedi Scheda 7). Sebbene gli steroidi non somiglino strutturalmente agli altri lipi-

Figura 24
Fotografia al microscopio elettronico a trasmissione di una membrana cellulare.



Figura 23
I fosfolipidi hanno una testa idrofila e una coda idrofobica formata da due catene di acidi grassi (A). In ambiente acquoso queste molecole si dispongono a formare un doppio strato, che dà luogo alle membrane di quasi tutte le cellule (B).



di, sono classificati tra queste biomolecole per la loro insolubilità in acqua. Tutti gli steroidi hanno una struttura con quattro anelli carboniosi legati tra loro. Il **colesterolo** svolge diverse funzioni, la principale delle quali è la regolazione della fluidità della membrana plasmatica.

Anche le **cere** sono lipidi strutturali: costituiscono un rivestimento protettivo e impermeabile della cute, del pelo e del piumaggio degli animali, ma sono presenti anche sulle foglie e sui frutti di piante terrestri e sull'esoscheletro di molti insetti. Molti animali, come gli orsi polari e le anatre, possono nuotare per ore e uscire dall'acqua praticamente asciutti grazie al rivestimento ceroso che ne impermeabilizza la pelliccia e le piume (Figura 25).

Figura 25

Le cere rivestono le penne e i peli di alcuni animali, rendendoli praticamente impermeabili all'acqua (A); anche le foglie e i frutti sono ricoperti di cere per evitare un eccessivo assorbimento di acqua che potrebbe farli marcire (B).



FACCIAMO IL PUNTO

Scegli il completamento corretto.

1. I trigliceridi sono

- A una forma di energia di rapido consumo.
- B costituiti da tre molecole di acidi grassi e una di glicogeno.
- C l'energia di riserva degli organismi animali.
- D composti idrofili.

2. Completa le frasi.

- a) I lipidi sono classificati in due grandi gruppi: i , tra cui le cere, i trigliceridi e i fosfolipidi, che presentano nella loro struttura gli
- b) I , tra cui gli steroidi che non presentano acidi grassi al loro interno.
- c) Un tipo comune di lipide è il , che si forma per condensazione di tre molecole di e una molecola di

3. Assegna a ciascuna definizione il termine corretto tra quelli proposti:

glicolipidi, colesterolo, cere, fosfolipidi

- a) Sono come i trigliceridi, ma il terzo atomo di carbonio del glicerolo è legato a una corta catena di carboidrati
- b) Appartiene al gruppo degli steroidi ed è presente nelle membrane delle cellule animali; regola la fluidità della membrana plasmatica
- c) Funziona da rivestimento protettivo per molti animali, piante e insetti
- d) Simili ai trigliceridi, ma il terzo atomo di carbonio del glicerolo è legato a un gruppo fosfato

7

La nostra salute

ALCUNI STEROIDI SONO MOLTO IMPORTANTI PER IL NOSTRO CORPO

Gli steroidi sono biomolecole composte da quattro anelli di carbonio e si differenziano per i diversi gruppi funzionali che presentano. Sono stati scoperti centinaia di steroidi, sia negli animali sia nei vegetali; tra i più importanti nel corpo umano figurano il colesterolo e gli ormoni steroidei e le vitamine.

Il **colesterolo** è un lipide fondamentale che si trova nelle membrane delle cellule animali ed è sintetizzato nel fegato a partire dagli acidi grassi saturi. Però, una dieta ricca di grassi di origine animale (per esempio burro, formaggi e carne) può favorire l'insorgere dell'**aterosclerosi**, una malattia in cui il colesterolo e altri lipidi si accumulano sulle pareti interne delle arterie e stimolano la crescita anomala di tessuto fibroso. Questi depositi tendono a ostruire i vasi sanguigni (Figura). Le conseguenze possono essere l'**ischemia**, un insufficiente apporto di sangue a un organo o a un tessuto, ma anche patologie potenzialmente letali come l'**infarto**, che porta alla necrosi (morte) del tessuto



cardiaco, e l'**ictus** che colpisce le cellule del cervello.

Anche alcuni **ormoni** sono molecole di natura steroidea; tra questi ci sono gli ormoni sessuali **estrogeni** e **testosterone**, che determinano lo sviluppo degli organi sessuali e regolano la maturazione e il rilascio di ovuli e spermatozoi. Oltre a consentire lo sviluppo dei **caratteri sessuali primari**, questi ormoni determinano anche i **caratteri sessuali secondari**. Per esempio, dopo la pubertà le donne sviluppano il seno, un bacino più largo e accumuli di grasso su fianchi e cosce, mentre gli uomini presentano un maggior sviluppo del torace e della muscolatura, peli su gran parte del corpo e accumulano il grasso prevalentemente sul ventre.

Le **vitamine** sono molecole indispensabili per le cellule e devono essere introdotte con gli alimenti poiché il nostro corpo non è in grado di sintetizzarle. Pur avendo strutture chimiche molto diverse, le vitamine si suddividono in due categorie:

- 1. le **vitamine idrosolubili**, come le vitamine B e C, non vengono accumulate nell'organismo e vanno assunte quotidianamente;
- 2. le **vitamine liposolubili**, come la A, la D e la E, sono introdotte con i grassi alimentari e successivamente accumulate nel fegato.

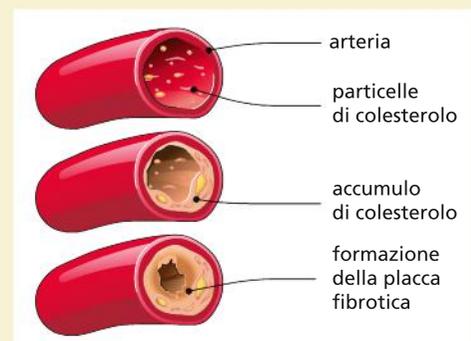


Figura
Schema che illustra la formazione di una placca aterosclerotica in un'arteria.

6.

LE PROTEINE SONO POLIMERI DI AMMINOACIDI

GUARDA!



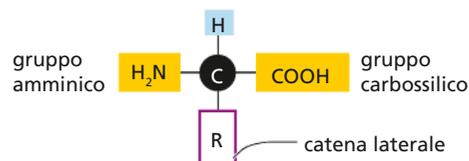
Video 4
Le proteine

LE PROTEINE SVOLGONO MOLTE FUNZIONI FONDAMENTALI

Più del 50% in peso secco della maggior parte dei sistemi viventi è composto da **proteine**. Soltanto le piante hanno un contenuto proteico più basso, perché sono costituite in gran parte da cellulosa. Le proteine svolgono un'incredibile varietà di funzioni e hanno tutte la stessa struttura: sono polimeri di **amminoacidi** disposti in sequenza (Video 4). Gli amminoacidi sono costituiti da carbonio, idrogeno e ossigeno ma, rispetto alle altre biomolecole, contengono anche azoto (N).

Ogni amminoacido ha una struttura che comprende un atomo di carbonio centrale, legato sia a

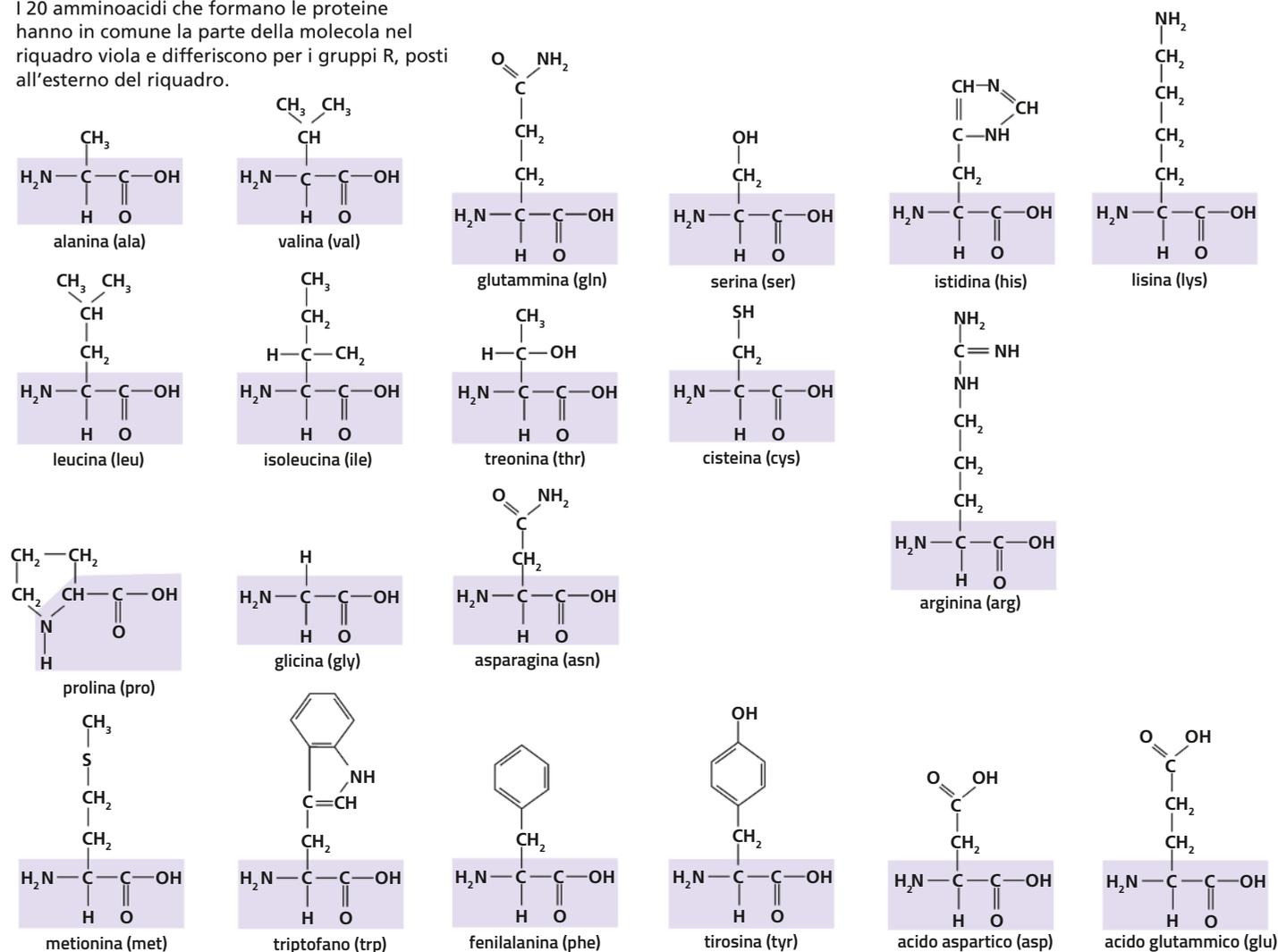
un **gruppo amminico** ($-\text{NH}_2$) sia a un **gruppo carbossilico** ($-\text{COOH}$) e a un atomo di idrogeno:



I diversi amminoacidi differiscono tra loro solamente per il gruppo indicato dalla lettera R, che occupa il quarto legame covalente dell'atomo di carbonio centrale. La varietà dei gruppi R (Figura 26) determina la varietà degli amminoacidi.

Figura 26

I 20 amminoacidi che formano le proteine hanno in comune la parte della molecola nel riquadro viola e differiscono per i gruppi R, posti all'esterno del riquadro.



- ENZIMI
- STRUTTURALI
- DI DIFESA
- DI SEGNALE
- RECETTORE
- DI TRASPORTO

Le specifiche proprietà biologiche dei singoli aminoacidi, e quindi dei vari tipi di proteine, dipendono dal gruppo R. Nei sistemi viventi, per formare le proteine vengono utilizzati fino a 20 tipi diversi di aminoacidi, che si possono unire secondo un numero di combinazioni enorme. Ciò rende possibile una grande varietà di proteine, analogamente al numero pressoché infinito di parole che si possono formare a partire dalle lettere dell'alfabeto.

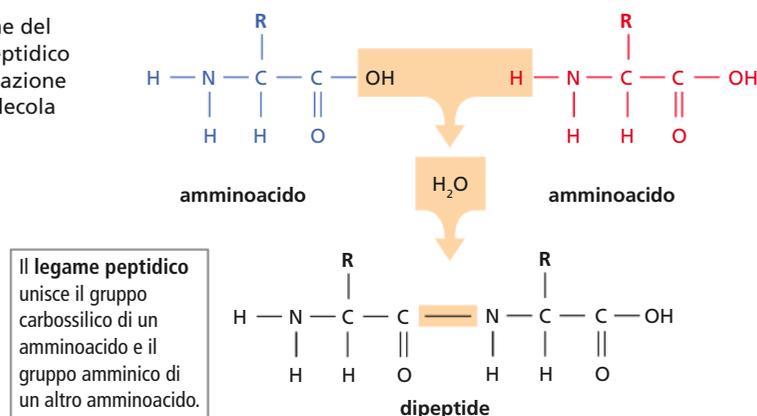
La *funzione* di una proteina è strettamente legata alla sua struttura, a partire dall'esatta sequenza e dal numero di aminoacidi che la compongono; se la struttura fosse imprecisa, una proteina potrebbe non funzionare, oppure svolgere il proprio compito in modo inadeguato.

I principali tipi di proteine con le rispettive funzioni sono: gli *enzimi* che accelerano le reazioni chimiche dell'organismo; le proteine *strutturali* che formano i muscoli e conferiscono stabilità ai tessuti; le proteine *di difesa* sono gli anticorpi, che riconoscono ed eliminano i patogeni; le proteine *di segnalazione* controllano l'esatto svolgimento dei processi nella cellula; le proteine *recettore* ricevono e trasmettono i segnali cellulari che riguardano l'organismo; i *trasportatori di membrana* regolano il passaggio di sostanze attraverso le membrane cellulari; le proteine *di trasporto* legano e trasportano sostanze all'interno di un organismo. Gli organismi sintetizzano solo una piccola parte delle proteine possibili. Il batterio *Escherichia coli*, per esempio, può produrre da 600 a 800 tipi diversi di proteine, mentre una nostra singola cellula può produrre anche 100 000 proteine differenti.

L'unione di due aminoacidi (Figura 27) avviene per *condensazione*: l'atomo di azoto del gruppo amminico di un aminoacido si lega con l'atomo di carbonio del gruppo carbossilico di un altro aminoacido, con eliminazione di una molecola di acqua. Il legame covalente che si forma è detto **legame peptidico** e la molecola ottenuta dall'associazione di molti aminoacidi è un **polipeptide**.

Figura 27

Formazione del legame peptidico con eliminazione di una molecola di acqua.



Per poter assemblare le proteine, una cellula deve avere a disposizione un elevato numero di aminoacidi per ognuno dei 20 tipi. Questo aspetto è di grande importanza ai fini dell'alimentazione; infatti, esistono otto **amminoacidi essenziali** che non riusciamo a produrre autonomamente e devono essere assunti per forza con la dieta. Le proteine animali contenute nella carne, nelle uova e nel pesce forniscono tutti gli aminoacidi, compresi quelli essenziali, ma un analogo apporto si può ottenere mangiando soltanto cibi di origine vegetale, che mescolino i cereali ai legumi. Questo accorgimento permette alle persone vegetariane di introdurre tutti gli aminoacidi e, quindi, di poter sintetizzare le proteine indispensabili per l'organismo.

LE PROTEINE PRESENTANO QUATTRO LIVELLI DI ORGANIZZAZIONE MOLECOLARE

Le proteine sono molecole complesse che mostrano diversi gradi di organizzazione. Si tratta di lunghe catene polipeptidiche in cui gli aminoacidi si susseguono uno dopo l'altro come i vagoni di un treno. Questa sequenza lineare di aminoacidi, dettata dalle informazioni genetiche presenti nel nucleo, è detta **struttura primaria** (Figura 28A) ed è rigorosa per ogni proteina: anche una minima variazione può alterare o distruggere la funzionalità della proteina stessa.

Una volta assemblata, lungo la catena polipeptidica si verificano interazioni tra i vari aminoacidi che ne determinano il parziale ripiegamento su sé stessa, conferendole una **struttura secondaria** (Figura 28B). Una comune struttura secondaria è quella a spirale o ad *alfa elica*, dovuta ai legami a idrogeno che si formano tra l'idrogeno del gruppo amminico e l'ossigeno del gruppo carbossilico di aminoacidi diversi. Poiché i legami a idrogeno si spezzano e si riformano facilmente, le proteine con struttura ad alfa elica sono elastiche; esempi di tali proteine sono la *miosina* dei muscoli e la *cheratina* dei capelli.

Altre proteine, come la seta delle tele dei ragni, sono costituite da lunghe catene polipeptidiche allineate in file parallele e unite da legami a idrogeno; le proteine che presentano questo tipo di struttura secondaria, detta *a foglietto beta ripiegato*, sono lisce e soffici, ma non elastiche.

Il *collagene*, un componente fondamentale di cartilagine, ossa e tendini, ha un altro tipo di struttura secondaria che assomiglia a un cavo elettrico; ciò dipende dal fatto che alcune lunghe catene polipeptidiche tendono ad arrotolarsi tra loro. Le proteine che per gran parte della lunghezza hanno una struttura secondaria elicoidale, a foglietto beta o a forma di cavo sono dette **proteine fibrose**.

In altre proteine, la struttura secondaria si ripiega su se stessa per dare origine a una complessa **struttura terziaria** (Figura 28C), che risulta da interazioni tra i gruppi R dei singoli amminoacidi. Alcune proteine a struttura terziaria sono le **proteine globulari** presenti in molti organismi; tra queste ci sono gli *anticorpi* che combattono i microrganismi patogeni, e gli *enzimi* che regolano le reazioni chimiche. Gli **enzimi** sono *catalizzatori* proteici, cioè sostanze in grado di far avvenire velocemente le reazioni chimiche nelle cellule. Senza enzimi la maggior parte di queste reazioni si svolgerebbe così lentamente da non permettere la vita. Gli enzimi sono altamente specifici, cioè possono attivare uno o pochi tipi di reazioni, al termine delle quali rimangono inalterati e possono essere «riciclati» per catalizzare una nuova reazione. Una proteina in struttura terziaria, di conseguenza, assume una forma tridimensionale e solo a questo livello strutturale può svolgere il suo ruolo.

Ci sono proteine che esplicano la loro funzione con un ulteriore livello di organizzazione, la **struttura quaternaria**, che comporta l'interazione tra due o più catene polipeptidiche (Figura 28D).

Un esempio di proteina con questa struttura è l'*emoglobina* dei globuli rossi dei mammiferi, che trasporta l'ossigeno (vedi Scheda 8).

FACCIAMO IL PUNTO

Scegli il completamento corretto.

1. Gli enzimi

- A allungano i tempi di reazione.
- B sono proteine fibrose.
- C cambiano struttura durante la reazione.
- D sono catalizzatori proteici che accelerano le reazioni.

2. Completa il testo.

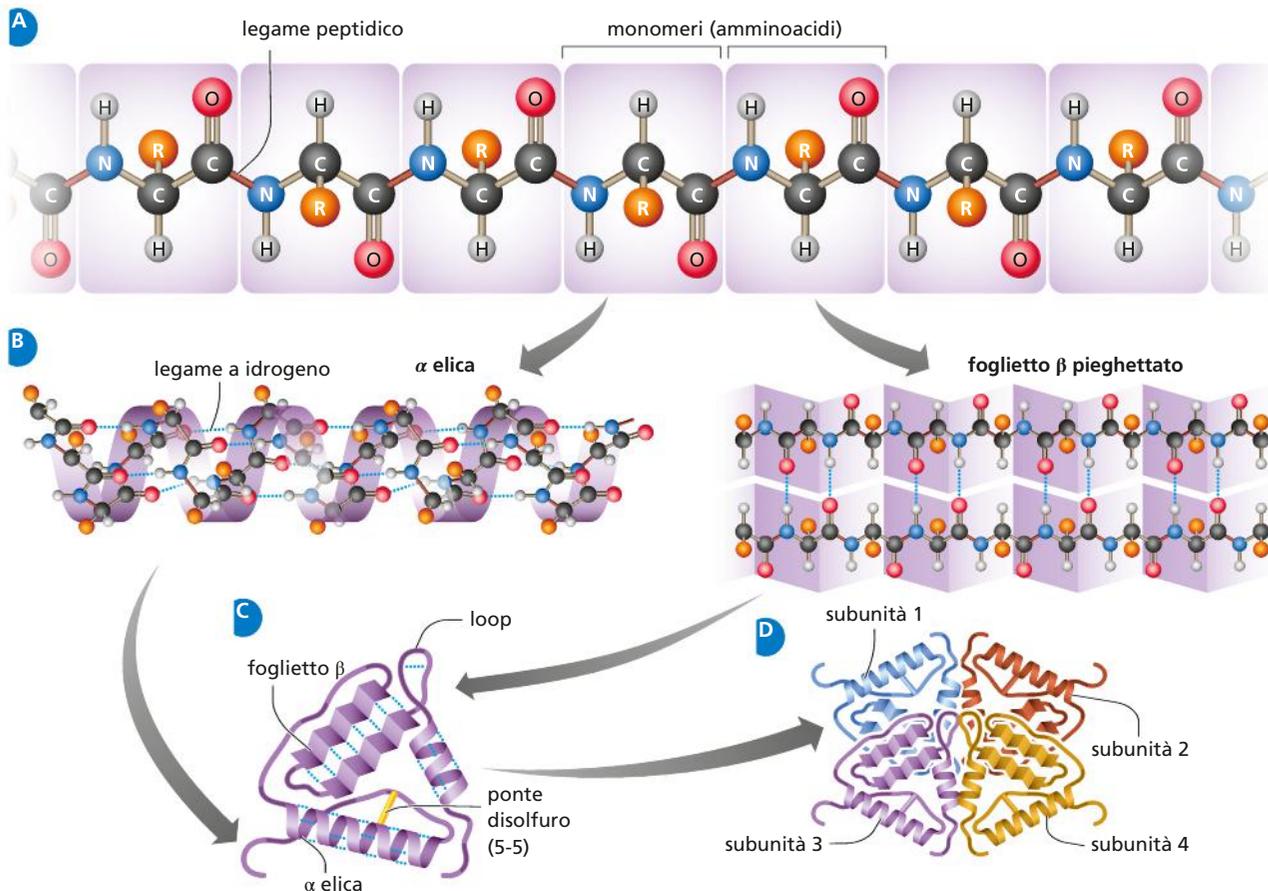
L'unione di due amminoacidi avviene per condensazione: l'atomo di del gruppo di un amminoacido si lega con l'atomo di del gruppo di un altro amminoacido, con l'eliminazione di una molecola di

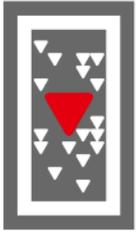
3. Vero o falso?

- a) Tutte le proteine sono catalizzatori delle reazioni. V F
- b) La sequenza degli amminoacidi di una proteina rappresenta la sua struttura primaria. V F
- c) La funzione di una proteina è legata alla sua struttura. V F

Figura 28

I livelli di organizzazione di una proteina: (A) struttura primaria lineare, (B) secondaria ad α elica o a foglietto beta ripiegato, (C) terziaria e (D) quaternaria, un insieme di strutture terziarie.





Video 5
Gli acidi nucleici



7. DNA E RNA COSTITUISCONO IL MATERIALE GENETICO

GLI ACIDI NUCLEICI SONO FORMATI DA SEQUENZE DI NUCLEOTIDI

Le cellule sono in grado di sintetizzare nuove proteine soltanto se dispongono di precise indicazioni sulla sequenza di amminoacidi da assemblare; queste informazioni sono contenute all'interno di grosse molecole chiamate **acidi nucleici**. Gli acidi nucleici si trovano in tutte le forme di vita note, dalle più semplici, come i batteri, a quelle più complesse. Sono polimeri formati da lunghe catene di **nucleotidi**. Come si può vedere nella **Figura 29**, in

un nucleotide sono presenti tre componenti: un gruppo fosfato, uno zucchero a cinque atomi di carbonio (pentoso) e una base azotata.

Il **gruppo fosfato** è la parte del nucleotide che possiede proprietà acide, da cui il termine «acido nucleico». Lo zucchero può essere il monosaccaride **ribosio** oppure il **desossiribosio**, che contiene un atomo di ossigeno in meno rispetto al ribosio. Il terzo componente dei nucleotidi è una **base azotata**, cioè una molecola che contiene azoto e ha proprietà basiche. Esistono cinque diversi tipi di basi azotate: le purine sono formate da due anelli e comprendono **adenina (A)** e **guanina (G)**, mentre le pirimidine hanno un anello solo e sono **citocina (C)**, **timina (T)** e **uracile (U)**.

Negli organismi si trovano due tipi di acidi nucleici: l'**acido deossiribonucleico (DNA)**, una molecola a **doppio filamento** in cui lo zucchero è il desossiribosio e le basi azotate sono l'adenina, la guanina, la citosina e la timina, e l'**acido ribonucleico (RNA)**, una molecola a **singolo filamento** i cui nucleotidi hanno come zucchero il ribosio e tra le basi azotate presentano l'uracile al posto della timina (**Figura 30** e **Video 5**).

Figura 29

La struttura generale di un nucleotide.

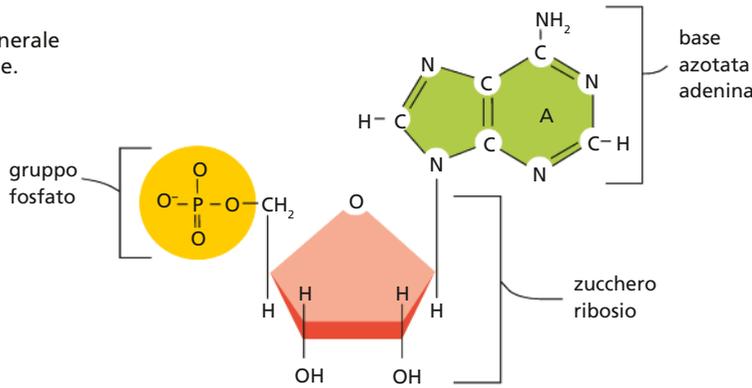
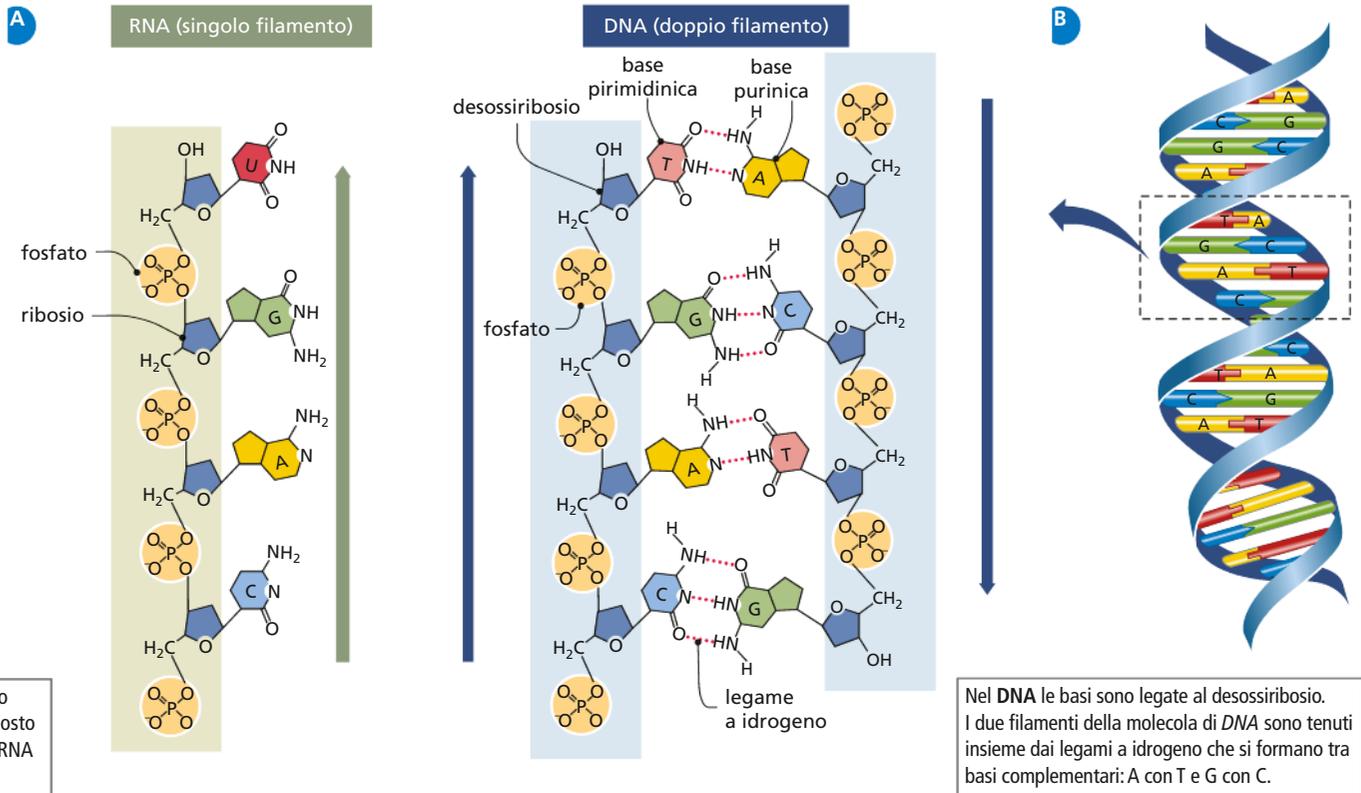


Figura 30

Struttura delle catene di nucleotidi che formano l'RNA (A) e il DNA (B).



DNA E RNA HANNO RUOLI DIFFERENTI

Sebbene le loro strutture chimiche siano molto simili, il DNA e l'RNA svolgono ruoli biologici differenti. Il DNA, formato da due filamenti di nucleotidi avvolti a spirale, contiene il messaggio genetico, quindi custodisce le informazioni ereditarie organizzate in unità dette **geni**.

È grazie a queste informazioni che ogni cellula può assemblare correttamente tutte le proteine di cui ha bisogno, disponendo gli amminoacidi in un ordine preciso. A una specifica sequenza di nucleotidi del DNA corrisponde una determinata sequenza di amminoacidi di una proteina.

La molecola di RNA, invece, è costituita da un singolo filamento ed esiste in tre forme diverse, coinvolte a vario titolo nella sintesi proteica:

- l'*RNA messaggero* o *mRNA* trasporta l'informazione che permette di assemblare gli amminoacidi;
- l'*RNA ribosomiale* o *rRNA* forma i ribosomi (strutture cellulari che si occupano della sintesi delle proteine);
- l'*RNA transfer* o *tRNA* trasporta i singoli amminoacidi da assemblare nelle proteine.

FACCIAMO IL PUNTO

Scegli il completamento corretto.

1. Le informazioni ereditarie di ogni cellula sono custodite
 - A in unità, chiamate geni.
 - B nelle basi azotate.
 - C nel gruppo fosfato.
 - D nello zucchero, che può essere il ribosio o il desossiribosio.
2. Le purine sono
 - A formate da un solo anello.
 - B costituite da due anelli e comprendono A e G.
 - C la citosina, la timina e l'uracile.
 - D grosse molecole chiamate anche acidi nucleici.

3. Completa il testo.

Gli acidi nucleici sono polimeri formati da lunghe catene di; in un nucleotide sono presenti tre elementi: un, la parte del nucleotide che possiede proprietà acide, da cui il termine «acido nucleico»; uno zucchero a cinque atomi di carbonio, il oppure il desossiribosio che contiene un atomo di ossigeno in meno; una cioè una molecola che contiene azoto e ha proprietà basiche. Ne esistono diversi tipi: le purine e guanina e le pirimidine come la citosina, la timina e

8

Per saperne di più

L'EMOGLOBINA: UN ESEMPIO DI SPECIFICITÀ

L'emoglobina è una proteina contenuta nei globuli rossi che ha la capacità di legarsi all'ossigeno polmonare per liberarlo in tutte le altre cellule del corpo.

La molecola dell'emoglobina ha struttura quaternaria, formata da quattro catene polipeptidiche, ognuna delle quali è costituita da circa 150 amminoacidi ed è ripiegata intorno a un gruppo *eme* contenente ferro.

L'anemia falciforme è una malattia in cui le molecole di emoglobina presentano un'anomalia funzionale: dopo il rilascio dell'ossigeno cambiano forma combinandosi tra loro e danno origine a strutture più rigide e allungate. I globuli rossi che contengono molte di queste molecole alterate assumono una caratteristica morfologia a falce. Le cellule deformate non trasportano correttamente l'ossigeno, sono più fragili e si rompono facilmente; inoltre, gli eritrociti anomali possono ostruire i vasi sanguigni più piccoli (capillari) provocando coaguli che impediscono il rifornimento di ossigeno agli organi. Le conseguenze sono: dolori, capogiri, debolezza e uno stato di grave malessere.

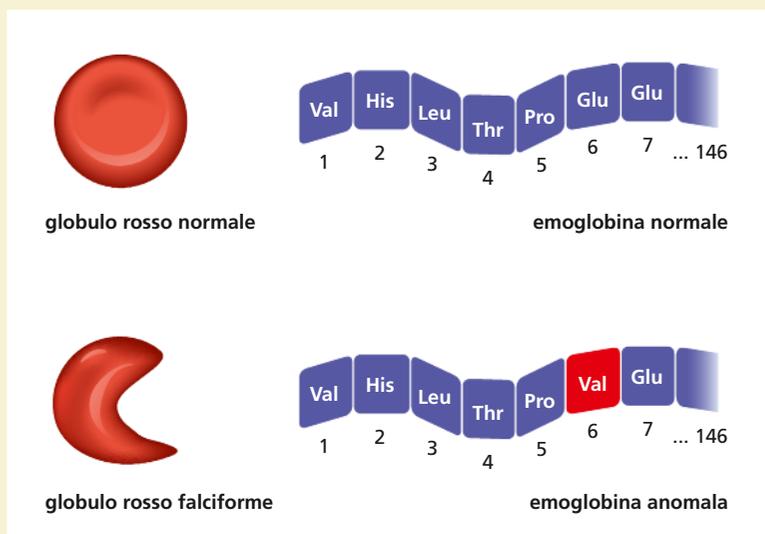
L'analisi molecolare ha rivelato che l'unica differenza che esiste tra l'emoglobina normale e quella delle cellule falciformi è

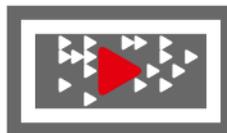
la sostituzione, in un punto preciso della sequenza di due delle quattro catene peptidiche, dell'amminoacido *acido glutammico* con l'amminoacido *valina* (Figura). L'effetto di questa piccola alterazione su un totale di quasi 600 amminoacidi si traduce in una gravissima conseguenza. Questo dà un'idea di quanto sia importante una precisa disposizione degli amminoacidi in ogni sequenza proteica.

L'anemia falciforme è una malattia di origine genetica e, per la sua trasmissione ai figli, è necessario che entrambi i genitori siano portatori della patologia stessa.

Per questo motivo, se esistono casi in famiglia di anemia falciforme, chi vuole avere figli dovrebbe sottoporsi a un test del DNA per verificare la probabilità di trasmettere la malattia alla prole.

Figura
Un amminoacido errato nella sequenza dell'emoglobina trasforma un globulo rosso sano in uno a forma di falce.





Atomi e legami

L'atomo è costituito da un nucleo che contiene *protoni* positivi, *neutroni* senza carica ed *elettroni* negativi, che ruotano attorno al nucleo stesso. Sono gli elettroni che conferiscono all'atomo le sue proprietà chimiche. Il numero atomico corrisponde al numero di protoni contenuti nel nucleo dell'atomo. Gli atomi che perdono o guadagnano elettroni per diventare stabili sono chiamati **ioni**. Gli atomi con carica opposta danno luogo a un *legame ionico*, mentre gli atomi che condividono due o più elettroni formano un *legame covalente* (che può essere singolo, doppio o triplo).

Le caratteristiche della molecola di acqua

L'acqua è una molecola **polare** composta da due atomi di idrogeno e uno di ossigeno, legati da un legame covalente; ognuno degli atomi d'idrogeno divide il proprio elettrone con l'atomo di ossigeno che, a sua volta, mette a disposizione un proprio elettrone per ogni legame. Le particolari caratteristiche chimiche dell'acqua rendono possibile il *ciclo idrogeologico*, essenziale per la vita di tutti i viventi.

Le biomolecole

Le biomolecole sono costituite perlopiù da sei elementi: carbonio, idrogeno, azoto, ossigeno, fosforo e zolfo e vengono classificate in quattro classi: i carboidrati, i lipidi, le proteine e gli acidi nucleici.

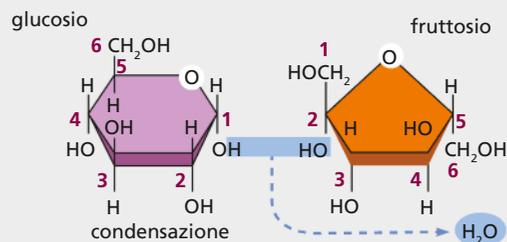
L'ossatura di tutte le biomolecole è data dall'**atomo di carbonio centrale**, che forma quattro legami covalenti con altri quattro atomi. Quasi tutte le biomolecole sono polimeri costituiti da moltissimi atomi che si combinano insieme e danno origine a molecole grosse e complesse, tramite reazioni di *condensazione*, in cui viene eliminata una molecola d'acqua. Le proprietà di ciascuna biomolecola dipendono dai **gruppi funzionali**, cioè gruppi di atomi legati allo scheletro carbonioso. Nelle proteine e nei lipidi abbiamo un gruppo funzionale detto *gruppo carbossilico*, mentre il *gruppo amminico* è caratteristico delle ammine e degli amminoacidi.

I carboidrati

I carboidrati costituiscono una fonte di energia e sono formati dagli elementi: carbonio (C), ossigeno (O) e idrogeno (H). I carboidrati più semplici sono i *monosaccaridi* (come glucosio e fruttosio).

Due monosaccaridi possono unirsi per *condensazione*, così da formare un *disaccaride* (come il saccarosio), mentre più monosaccaridi formano i *polisaccaridi* (come l'amido e la cellulosa).

Il processo opposto, di scissione di carboidrati complessi in monomeri più semplici, è chiamato **idrolisi**.

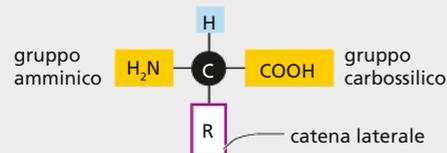


I lipidi

I lipidi sono molecole organiche **non polari** (insolubili in acqua) che svolgono importanti ruoli strutturali o rappresentano riserve di energia. I polimeri nei *trigliceridi* sono formati da acidi grassi uniti insieme. Altri polimeri sono i *fosfolipidi*, che formano le membrane cellulari e gli *steroidi*.

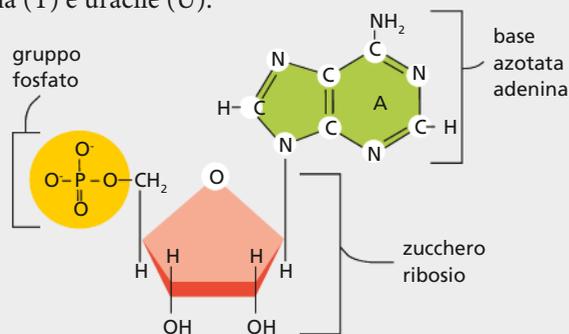
Le proteine

Le proteine sono costituite da lunghe catene di **amminoacidi**, molecole contenenti azoto (N). Le proteine hanno diverse strutture: una struttura *primaria* o lineare; una struttura *secondaria*, il ripiegamento ad alfa elica o a foglietto beta; una struttura *terziaria*, l'ulteriore ripiegamento della struttura secondaria; e infine, la struttura *quaternaria*, determinata da diverse strutture terziarie unite. Gli **enzimi** sono proteine che agiscono come catalizzatori.

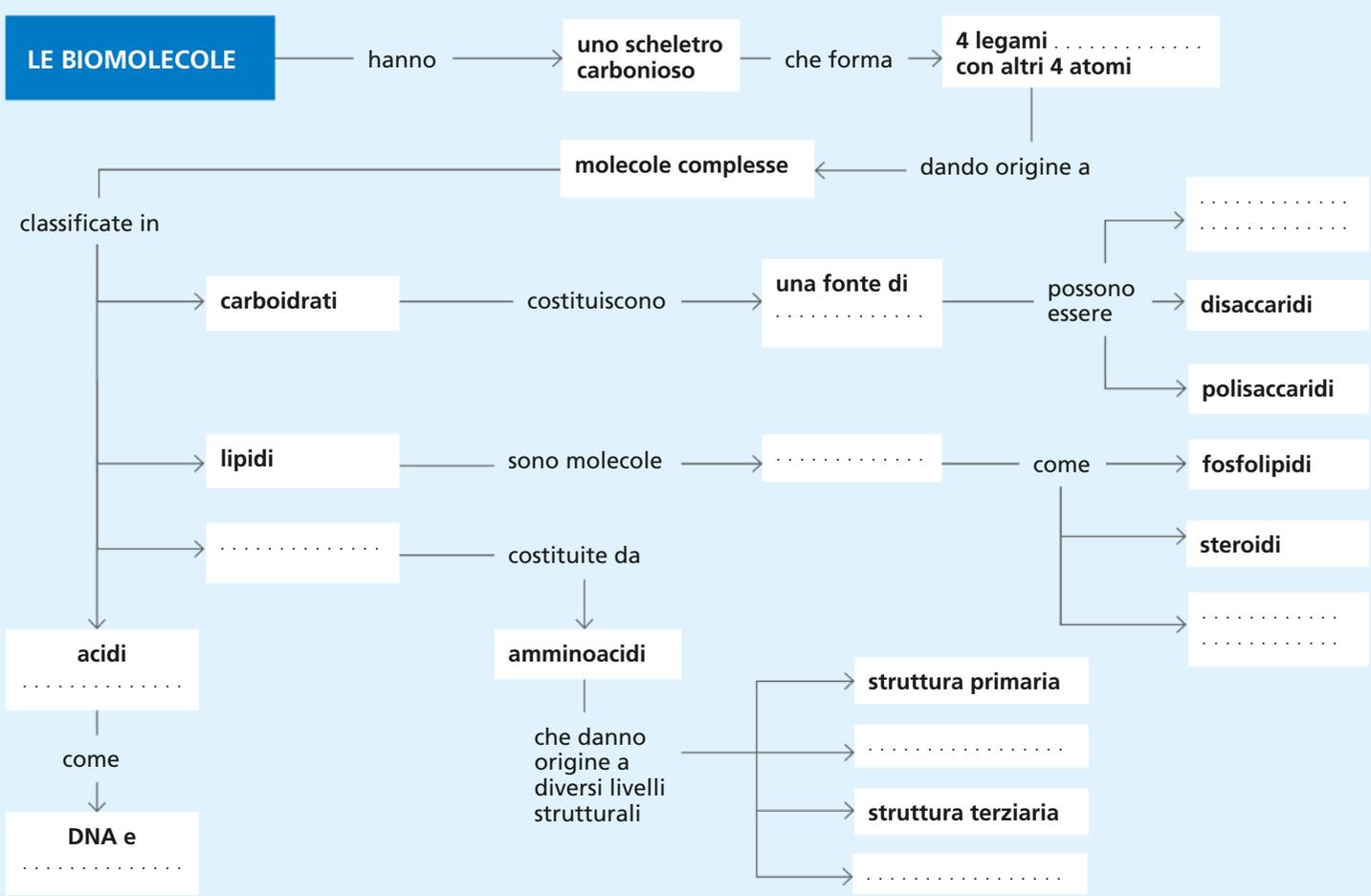
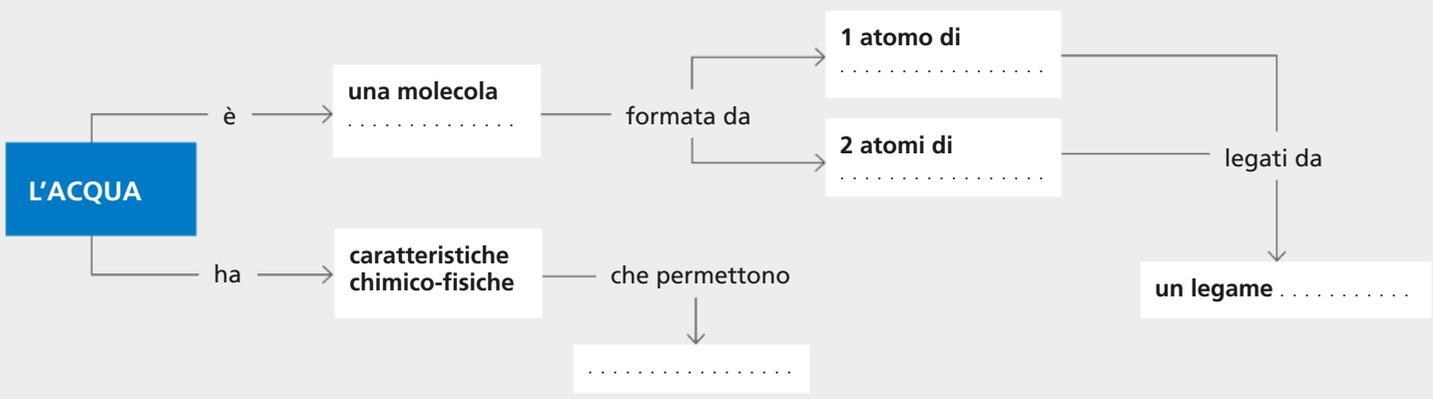
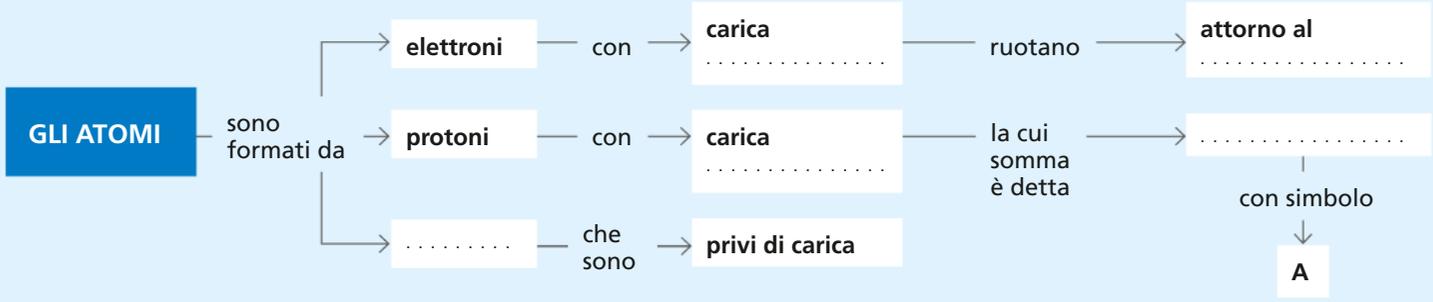


Gli acidi nucleici

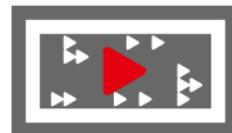
Gli acidi nucleici DNA e RNA sono presenti in tutte le forme di vita. Sono polimeri formati da lunghe catene di *nucleotidi*, costituiti da tre componenti: un *gruppo fosfato*, uno *zucchero a cinque atomi di carbonio* (pentoso) e una *base azotata*. Esistono 5 tipi di basi azotate: le **purine**, comprendono adenina (A) e guanina (G), mentre le **pirimidine** sono citosina (C), timina (T) e uracile (U).



COMPLETA LA MAPPA



VERIFICA LE TUE CONOSCENZE



ZTE
Mettiti alla prova
con gli esercizi
interattivi online

Scegli il completamento corretto.

1. Nel nucleo di un atomo sono presenti

- A protoni ed elettroni.
- B protoni e neutroni.
- C neutroni ed elettroni.
- D neutroni e isotopi.

2. Il numero atomico

- A indica la somma di protoni e neutroni.
- B si indica con la lettera Z.
- C è anche detto numero atomico.
- D indica la somma dei protoni nel nucleo.

3. Ogni atomo è elettricamente neutro perché

- A il numero di elettroni è uguale a quello dei protoni.
- B il numero di elettroni è uguale a quello dei neutroni.
- C il numero di protoni ed elettroni corrisponde al numero di neutroni.
- D il numero di protoni è maggiore del numero degli elettroni.

4. In una molecola di acqua, i legami a idrogeno si instaurano tra

- A un atomo di idrogeno e uno di ossigeno appartenenti alla stessa molecola di acqua.
- B un atomo di idrogeno di molecole di acqua differenti.
- C atomi di ossigeno di molecole di acqua differenti.
- D atomi di idrogeno di una molecola con atomi di ossigeno di un'altra molecola.

5. L'acqua ha un elevato calore specifico perché

- A è un liquido, per cui si scalda facilmente.
- B è in grado di disperdere facilmente il calore.
- C parte del calore serve a rompere i legami a idrogeno.
- D i legami covalenti tra gli atomi sono molto forti.

6. Due molecole si dicono isomeri se

- A presentano la stessa formula grezza, ma diversa formula di struttura.
- B presentano la stessa formula di struttura, ma diversa formula grezza.
- C presentano molteplici formule di struttura.
- D nessuna delle risposte precedenti.

7. Costituiscono una fonte di riserva energetica

- A amido, glicogeno e lipidi.
- B cellulosa e chitina.

C gli acidi nucleici, tutte le proteine e la cellulosa.

D steroidi e cere.

8. Il lipide composto da una testa di glicerolo e tre molecole di acidi grassi è un

- A polisaccaride.
- B trigliceride.
- C fosfolipide.
- D glicolipide.

9. Un acido grasso viene detto saturo se

- A compaiono legami multipli tra gli atomi di C.
- B ogni atomo di C forma quattro legami singoli con altri quattro atomi.
- C non possiede il numero massimo di atomi di idrogeno.
- D è sempre di origine animale.

10. NON è presente nella struttura di un amminoacido

- A un gruppo amminico legato a un carbonio centrale.
- B un gruppo carbossilico legato a un carbonio centrale.
- C un atomo di idrogeno legato a un carbonio centrale.
- D un atomo di ossigeno legato a un carbonio centrale.

11. La struttura terziaria di una proteina è il risultato

- A della sequenza lineare di amminoacidi.
- B dei legami a idrogeno tra gruppi amminici e gruppi carbossilici.
- C delle interazioni tra gruppi R dei diversi amminoacidi.
- D dell'interazione tra due o più catene polipeptidiche.

Scegli la risposta corretta.

12. Che cosa sono i nucleotidi?

- A I polimeri degli acidi nucleici.
- B Composti contenenti un acido desossiribonucleico o ribonucleico.
- C Composti formati da uno zucchero, una base azotata e un gruppo fosfato.
- D Composti costituiti da due monosaccaridi legati da un legame glicosidico.

13. Quale tra i seguenti NON è un monosaccaride?

- A Fruttosio.
- B Galattosio.
- C Saccarosio.
- D Desossiribosio.

14. Scegli il termine corretto tra i due proposti.

- a) L'attrazione che si verifica tra molecole della stessa sostanza è detta forza di **adesione / coesione**.
- b) La capacità dell'acqua di risalire attraverso spazi sottilissimi è detta **capillarità / tensione superficiale**.
- c) È chiamato **evaporazione / tensione superficiale** il passaggio dell'acqua allo stato gassoso.
- d) Il ghiaccio occupa un volume **maggiore / minore** di quello dell'acqua liquida, quindi ha una densità **maggiore / minore**.

15. Completa il testo scegliendo tra i termini seguenti:

liquidi, immediati, il colesterolo, complesse, insolubili, gassosi, polari, energetiche, solubili, polimeri, idrolizzabili, l'olio d'oliva, apolari, il burro, solidi, cerosi

I lipidi sono in solventi polari, in quanto le loro molecole non sono

I lipidi sono le molecole organiche più

I grassi insaturi, come per esempio , tendono a essere

. a temperatura ambiente, mentre quelli saturi, come tendono a essere

16. Vero o falso?

- a) La reazione di condensazione tra due amminoacidi porta alla formazione di un legame covalente, detto legame peptidico. V F
- b) Gli amminoacidi sono costituiti esclusivamente da carbonio e ossigeno. V F
- c) I diversi amminoacidi differiscono tra loro per la presenza del gruppo carbossilico. V F
- d) La varietà dei gruppi R determina la varietà degli amminoacidi. V F
- e) Esistono 20 tipi di amminoacidi essenziali. V F
- f) Un catione è uno ione con carica negativa. V F
- g) Un atomo che acquista un elettrone è detto anione. V F
- h) Ioni di carica opposta si attraggono reciprocamente. V F
- i) In un legame ionico vi sono coppie di elettroni condivisi. V F
- j) In un legame covalente polare c'è un polo positivo e uno negativo. V F
- k) Quando il ghiaccio fonde rilascia energia termica. V F

VERIFICA LE TUE ABILITÀ

Scegli il completamento corretto.

17. Un atomo che contiene 1 protone, 1 elettrone e 1 neutrone, ha
 A Z = 1, A = 2 C Z = 2, A = 1
 B A = 1, Z = 1 D A = 2, Z = 2

18. Si ha una reazione di condensazione quando

- A più monomeri si uniscono demolendo molecole di acqua.
 B i polimeri si spezzano producendo molecole di acqua.
 C più monomeri si uniscono liberando molecole di acqua.
 D un monomero si spezza liberando molecole di acqua.

19. Il filamento di DNA complementare a AATGCCTG è

- A TTACGGAC D nessuna delle risposte precedenti.
 B AATGCCTG
 C UUACGGAC

20. La funzione di una proteina è legata

- A alla sua struttura.
 B alle proteine con cui interagisce.
 C al tipo di cellula a cui appartiene.
 D nessuna delle risposte precedenti.

21. Le molecole biologiche che NON contengono fosforo sono

- A carboidrati e protidi.
 B lipidi e acidi nucleici.
 C protidi e acidi nucleici.
 D glucidi e acidi nucleici.

Scegli la risposta corretta.

22. Quali gruppi funzionali sono presenti in una molecola di glucosio?
 A Gruppo amminico e gruppo carbossilico.
 B Gruppo ossidrilico e gruppo carbonilico.
 C Gruppo carbonilico e gruppo carbossilico.
 D Tutte le risposte precedenti sono corrette.

23. Tra le seguenti coppie di molecole, quali sono isomeri?

- A Glucosio e fruttosio.
 B Amido e glicogeno.
 C Trigliceride e fosfolipide.
 D Cellulosa e chitina.

24. Quali legami tengono uniti i due filamenti del DNA?

- A Legami glicosidici.
 B Legami peptidici.
 C Legami a idrogeno.
 D Forze di coesione.

25. Scrivi accanto a ogni affermazione la lettera (A) se è riferita alle proteine, (B) se è riferita ai carboidrati, (C) se è riferita ai lipidi, e la (D) se è riferita agli acidi nucleici.

- a) Le loro molecole possono costituire strutture cellulari, ormoni o vitamine. (. . . .)
 b) Includono molecole che vengono sempre sintetizzate mediante tre reazioni di condensazione. (. . . .)
 c) In nessuna delle loro molecole sono presenti azoto o fosforo o zolfo. (. . . .)
 d) Le loro molecole possono essere costituite da un solo monomero. (. . . .)
 e) Ogni loro monomero è costituito da tre tipi di molecole diverse, solo una delle quali è un carboidrato. (. . . .)

26. Scegli i DUE completamenti corretti. A differenza dei polisaccaridi, le proteine

- A possono avere sia funzione strutturale sia di riserva.
 B sono formate da monomeri che si legano mediante condensazioni.
 C sono costituite da carbonio, ossigeno, idrogeno e azoto.
 D possono regolare altre reazioni chimiche o avere funzioni immunitarie.
 E sono presenti negli animali, ma sono assenti nei vegetali.

27. Associa a ciascuna molecola (lettere) i gruppi funzionali (numeri) che la caratterizzano.

- | | |
|-----------------|-----------------|
| A. glucosio | 1. ossidrilico |
| B. etene | 2. carbonilico |
| C. fruttosio | 3. carbossilico |
| D. glicerolo | 4. amminico |
| E. acido grasso | 5. alchene |
| F. alanina | |

A	B	C	D	E	F

28. Vero o falso?

Se una proteina ha struttura terziaria

- a) i legami a idrogeno che si formano tra un amminoacido e un altro posto a una certa distanza possono spezzarsi e riformarsi, determinando l'allungamento della molecola. V F
 b) al suo interno si verificano interazioni tra amminoacidi, attrazioni tra gruppi polari e legami a idrogeno. V F
 c) contiene file di amminoacidi legate tramite legami covalenti polari. V F

- d) a causa della disposizione dei suoi amminoacidi ha prevalentemente funzioni strutturali. V F
 e) ogni amminoacido si lega esclusivamente ad altri due, senza che vi siano possibilità di interazione con amminoacidi posti a una certa distanza. V F

29. Scegli il termine corretto tra i due proposti.

Il glucosio può essere prodotto esclusivamente dalle cellule vegetali per mezzo di una reazione di **respirazione / fotosintesi**. La **sintesi / demolizione** del glucosio con conseguente liberazione di **energia / materia** è patrimonio di tutte le cellule, che possono così recuperare l'energia racchiusa nei suoi **legami / atomi**. Sia le cellule animali sia quelle vegetali usano il glucosio per **sintetizzare / demolire** polisaccaridi mediante condensazione; grazie a questo processo la pianta cresce sintetizzando **cellulosa / chitina** e gli animali possono accumulare **glicogeno / chitina** nel fegato.

Rispondi alle domande.

30. Che cos'è un legame covalente polare e quali sono le sue caratteristiche?
 31. Qual è la differenza tra formula grezza e formula di struttura per rappresentare le molecole organiche?
 32. Quali legami chimici determinano la forma delle proteine? E quale struttura avrebbero in assenza di questi legami?

UNITUTOR

Preparati ai test di ammissione sul sito Unitutor.

33. Quale tra le seguenti affermazioni sui trigliceridi è corretta?
 A Possono contenere acidi grassi saturi e insaturi nella stessa molecola.
 B Si formano per idrolisi da una molecola di glicerolo e tre molecole di acido grasso.
 C Quelli che contengono solo acidi grassi polinsaturi a catena corta sono generalmente solidi a temperatura ambiente.
 D Quelli che contengono solo acidi grassi saturi, a parità di lunghezza delle catene carboniose, hanno un punto di fusione più basso di quelli che contengono solo acidi grassi polinsaturi.
 E Gli acidi grassi di uno stesso trigliceride hanno sempre catene carboniose tutte della stessa lunghezza.

(dal test di ammissione a Medicina 2019-2020)

VERIFICA LE TUE COMPETENZE

COLLEGA

1. Metti in relazione ciascun termine con la struttura corrispondente.
- | | |
|---------------------------|-----------------------|
| A. sequenza amminoacidica | G. anticorpi |
| B. alfa elica | H. enzimi |
| C. beta foglietto | I. proteine globulari |
| D. seta | J. proteine fibrose |
| E. cheratina | K. emoglobina |
| F. miosina | L. legame peptidico |

Struttura primaria	Struttura secondaria	Struttura terziaria	Struttura quaternaria

OSSERVA

2. Se fai bollire in una pentola alcune patate e in un'altra pentola la stessa quantità (in peso) di riso, ti accorgerai che si sviluppa una schiuma bianca in entrambe le pentole. Sapresti indicare di quale sostanza si tratta? Questa sostanza si sviluppa in ugual quantità in entrambe le pentole?

CALCOLA

3. In una provetta da laboratorio sta avvenendo una reazione di condensazione per ciascuna delle seguenti biomolecole:
- 400 000 molecole di saccarosio
 - 200 000 molecole di trigliceride
 - 150 000 molecole di fosfolipide
 - 300 000 molecole di insulina (50 amminoacidi)
- Quante molecole d'acqua vengono eliminate da questa reazione?

RIFLETTI

4. Gli amminoacidi sono ioni dipolari che possono avere una carica negativa e una carica positiva; per questa caratteristica sono considerati molecole *anfotere*, ovvero possono comportarsi sia da basi sia da acidi. Da che cosa pensi dipenda il fatto che abbiano l'uno oppure l'altro comportamento?

IPOTIZZA

5. I glicolipidi e i fosfolipidi possiedono una testa idrofila e due code idrofobiche; molecole di questo tipo sono dette *anfipatiche*. Immagina di far cadere 1000 molecole di fosfolipidi in un bicchiere d'acqua: come pensi si disporranno?

SPIEGA

6. In commercio esistono grassi vegetali spalmabili, come la margarina; questi prodotti alimentari si ottengono per idrogenazione di oli. Spiega le conseguenze di questo processo, mettendole in relazione allo stato di aggregazione delle molecole.

ARGOMENTA

7. La vita sott'acqua è un bene preziosissimo! Hai mai visto uno stagno d'inverno completamente ghiacciato? O le coltri di ghiaccio e neve al Polo Nord? Hai mai avuto il dubbio se sotto queste distese congelate c'è ancora ghiaccio oppure acqua allo stato liquido? Prova a spiegarlo in poche righe, considerato quanto hai studiato circa le caratteristiche dell'acqua.



CALCOLA

8. Osserva la tabella sulla densità dell'acqua a diverse temperature e poi, tramite un foglio di calcolo multimediale, costruisci un riferimento cartesiano con i dati forniti e traccia il grafico relativo. A quale temperatura l'acqua ha la maggiore densità? Discutine con la classe.

Temperatura (°C)	Densità (g/cm³)
100	0,9584
70	0,9776
40	0,9922
20	0,9982071
10	0,9997026
4	0,9999720
0	0,9998395
-10	0,998117
-20	0,993547
-30	0,983854

VOCABULARY

9. In this chapter you have learnt about the properties of water. Match the correct term (letters) to each of the definitions (numbers) provided below.

- | | |
|-------------------|---------------------|
| A. cohesion force | D. adhesion force |
| B. density | E. capillary action |
| C. evaporation | F. specific heat |

- the attractive force between molecules of different types
- the movement of water in a porous material due to the forces of adhesion, cohesion, and surface tension
- the quantity of heat needed to raise the temperature of one gram of a substance by one Celsius degree
- the relationship between the mass of the substance and its volume
- the attractive force between molecules of the same type
- the process of turning from a liquid state to a gaseous state

A	B	C	D	E	F

REVISION

10. Read the description of the atom and fill in the gaps with the following words: *atom, electrons, elements, neutrons, negatively, neutral, positively, protons*.

The living matter is made up of the combination of 98 chemical The smallest unit of a chemical element is the, consisting of a nucleus containing and Protons are charged, while neutrons have no electric charge. The nucleus is surrounded by one or more ; electrons are charged. The number of electrons in an atom is equal to the number of protons, and this is the reason why the atom is electrically

PRODUCTION

11. You are sitting by a lake and notice that some insects are able to walk on its surface without falling into water. Explain how it is possible by taking into consideration what you have learnt in this chapter (max. 100 words).

LA STRUTTURA E LA FUNZIONE DEL DNA

La storia al tempo di...

ROSALIND FRANKLIN

(Londra, 1920 – Londra, 1958)

UN NOBEL MANCATO

Il 10 dicembre del 1962, Francis Crick, James Watson e Maurice Wilkins ritirano il premio Nobel per la Medicina per la scoperta della struttura del DNA e del suo meccanismo di replicazione. Tuttavia, alla lista dei vincitori mancava il nome di Rosalind Franklin. Infatti, le sue immagini ai raggi X del DNA hanno fornito la prova chiave per il modello della doppia elica, ma lei non ha mai ottenuto alcun riconoscimento.

LA SCOPERTA DELLA CRISTALLOGRAFIA A RAGGI X

Rosalind Franklin nasce in Inghilterra il 25 luglio del 1920 e fin da ragazzina vuole fare scienza. La famiglia la iscrive al Newnham College di Cambridge, dove si innamora della chimica. Durante la Seconda Guerra mondiale, Rosalind scopre la microstruttura di diversi tipi di carbone, argomento che sarà alla base dei suoi studi di dottorato all'università di Cambridge. In seguito, Franklin si sposta a Parigi, dove l'ambiente è più aperto nei confronti delle donne e scopre per la prima volta le tecniche di cristallografia a raggi X.

LA FOTOGRAFIA 51 E IL DNA

Nel 1951, Rosalind Franklin è già un'affermata ricercatrice a livello internazionale e, al King's College di Londra, si occupa di uno dei settori più effervescenti del periodo: comprendere la struttura

del DNA e il segreto della trasmissione dell'informazione genetica. Qui ottiene una serie di immagini incredibilmente nitide del DNA, tra cui la famosa *Photograph 51*, realizzata con un'esposizione lunghissima di una singola fibra di DNA, che mostra una distribuzione spaziale che per lei è compatibile soltanto con una struttura a doppia elica.

Nel 1953, *Nature* pubblica il famoso articolo sul DNA firmato da Watson e Crick, conseguito grazie alla prova definitiva fornita dalle immagini a raggi X ottenute da Franklin e trafugate dal suo superiore Wilkins.

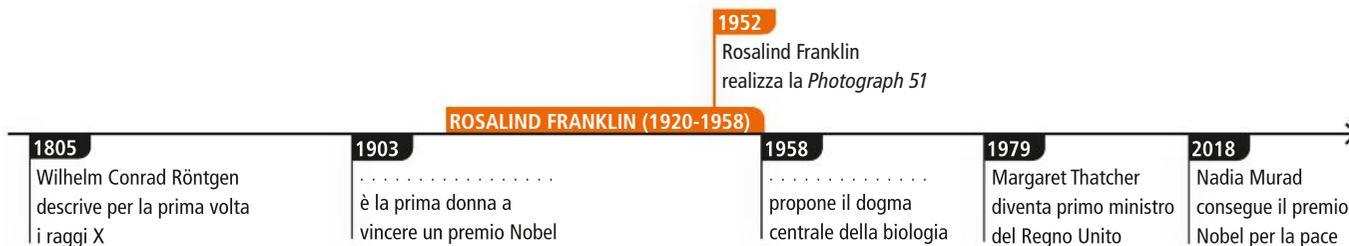
Rosalind Franklin muore a soli 37 anni per un tumore all'ovaio, senza il riconoscimento che le spetta. A rimettere nella giusta prospettiva la storia è la giornalista Brenda Maddox, che nel 2002 pubblica la biografia di Franklin: l'autrice di una delle foto più importanti della scienza.

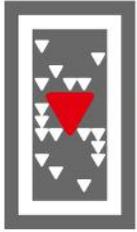
> Fai un passo in più

Leggi il libro di Brenda Maddox, *Rosalind Franklin. La donna che scoprì la struttura del DNA* e, attraverso una presentazione multimediale, ripercorri le tappe della breve storia di questa brillante scienziata, sottolineando in quanti e quali modi il suo talento è stato offuscato dai colleghi e dalle istituzioni scientifiche dell'epoca.



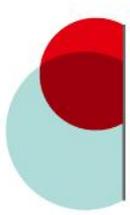
COMPLETA LA LINEA DEL TEMPO E AGGIUNGI QUALCHE ALTRO EVENTO STORICO LEGATO ANCHE AD ALTRE MATERIE





Linea del tempo
interattiva

Dalla scoperta
della nucleina
alla doppia elica



1. LA SCOPERTA E IL RUOLO DEL DNA

DALLA SCOPERTA DELLA NUCLEINA ALLO STUDIO DEI CROMOSOMI

Il materiale ereditario fu isolato per la prima volta nel 1869 dal medico tedesco Friedrich Miescher (Figura 1A), nello stesso decennio in cui Darwin pubblicava il libro *L'origine delle specie* e Mendel comunicava i risultati delle sue ricerche di genetica alla Società di storia naturale di Brünn.

La sostanza isolata da Miescher (Figura 1B) proveniva dal nucleo dei globuli bianchi (ricavati inizialmente dalle bende usate negli ospedali e poi dallo sperma dei salmoni) e per questo fu denominata **nucleina**. Negli anni seguenti, le analisi chimiche rivelarono che la nucleina era una sostanza acida e zuccherina, ricca di azoto e fosforo. In seguito alle scoperte sulle sue proprietà chimiche, la nucleina fu prima rinominata **acido nucleico** e poi **acido desossiribonucleico (DNA)**, per distinguerla da un'altra sostanza simile, l'acido ribonucleico (RNA).

Circa vent'anni dopo furono osservati al microscopio i **cromosomi** e, nel 1910, altri studi dimostrarono che questi erano la sede dell'informazione ereditaria. Negli anni Venti del Novecento gli scienziati erano ormai certi che i cromosomi fossero costituiti da DNA e proteine in quantità più o meno uguali, dunque, entrambe queste molecole erano candidate al ruolo di «materiale ereditario».

In un primo momento l'attenzione dei biochimici si concentrò sulle proteine, che sono polimeri formati dalla combinazione di venti amminoacidi diversi e presentano una grande varietà di strutture e funzioni. Sembrava decisamente più probabile che fossero gli amminoacidi a costituire una specie di «linguaggio della vita» capace di fornire le istruzioni per tutte le attività cellulari, rispetto al DNA, formato dalla combinazione di soli quattro tipi diversi di nucleotidi.

Grazie a una serie di esperimenti sui batteri e sui virus, l'ipotesi che l'informazione genetica fosse di natura proteica si rivelò errata e fu, invece, dimostrato che essa era rappresentata dal DNA.

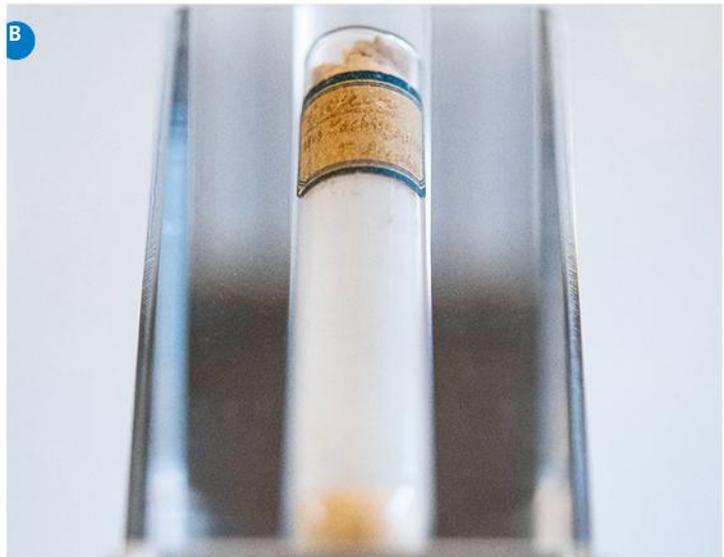
Sia i procarioti sia i virus hanno una struttura più semplice degli eucarioti e furono il modello ideale per ottenere prove sperimentali di questa ipotesi. Nei batteri, infatti, gli unici organuli presenti sono i ribosomi e non esiste un nucleo definito, ma il DNA è disperso nel citoplasma. Il numero di proteine presenti nei procarioti, inoltre, è inferiore rispetto a quello presente negli eucarioti, per cui risultò più semplice identificarne le funzioni. Uno dei batteri più usati per questi studi è stato *Escherichia coli*, ma sono state impiegate anche altre specie, come *Streptococcus pneumoniae*, il batterio patogeno che provoca la polmonite umana.

TI RICORDI?

La struttura di base delle **cellule procariotiche** è data dalla membrana plasmatica, che separa la cellula dall'ambiente circostante, dal citoplasma, nel quale avvengono le reazioni metaboliche, dai ribosomi e dal cromosoma batterico, che conserva le informazioni ereditarie.

Figura 1

(A) Fotografia del biologo tedesco Friedrich Miescher (1844-1895).
(B) Una provetta contenente la nucleina isolata da Miescher nel suo laboratorio, ora esposta al museo dell'Università di Tübingen.



GRIFFITH SCOPRÌ IL FATTORE DI TRASFORMAZIONE

Il primo esperimento fondamentale per comprendere il ruolo del DNA fu condotto nel 1928 dal medico inglese Frederick Griffith (1877-1941), che stava studiando il batterio *S. pneumoniae* (o più semplicemente pneumococco) per trovare un vaccino contro la polmonite, che all'epoca mieteva moltissime vittime, soprattutto bambini, visto che gli antibiotici non erano ancora stati scoperti.

Griffith stava lavorando su due diversi ceppi di pneumococco:

- il *ceppo S* (dall'inglese *smooth*, «liscio») era formato da cellule che producevano colonie dalla superficie piana e lucida. Le cellule del ceppo S sono ricoperte da una capsula di polisaccaridi che le protegge dal sistema immunitario dell'ospite. Infatti, una volta iniettati nel corpo dei topi di laboratorio, i batteri S si dividevano attivamente e provocavano la polmonite, rivelandosi un ceppo altamente patogeno;
- il *ceppo R* (dall'inglese *rough*, «ruvido») produceva colonie dalla superficie irregolare. Questi batteri sono privi della capsula protettiva, quindi vengono facilmente aggrediti dal sistema immunitario dell'ospite e non sono patogeni. Infatti, quando i batteri R venivano inoculati nei topi non erano in grado di generare la malattia e permettevano alle cavie di sopravvivere.

Griffith inizialmente inoculò in alcuni topi gli pneumococchi del ceppo S virulento che erano stati preventivamente esposti a calore intenso e osservò che non erano più capaci di produrre l'infezione e uccidere i topi. Quando, però, Griffith somministrò a un altro gruppo di topi una miscela di batteri S virulenti trattati con il calore e di batteri R non virulenti vivi, osservò con stupore che gli animali si ammalavano e morivano. Eseguendo l'autopsia dei topi, Griffith trovò all'interno dei loro tessuti un gran numero di cellule batteriche vive, sia del ceppo S sia del ceppo R. Lo scienziato concluse che, in presenza degli pneumococchi S uccisi, alcuni pneumococchi R si erano trasformati in batteri del ceppo patogeno S (Figura 2).

Questa *trasformazione* non avveniva solo nei tessuti del topo, ma si verificava anche in provetta: incubando una coltura di batteri R non virulenti vivi insieme a batteri S virulenti uccisi dal calore, si ottenevano batteri S vivi e dunque patogeni. Alcuni anni dopo, un altro gruppo di ricercatori scoprì che la trasformazione delle cellule R in cellule S si otteneva anche usando una miscela che conteneva tutti i componenti cellulari dei batteri S uccisi, ma non le cellule integre.

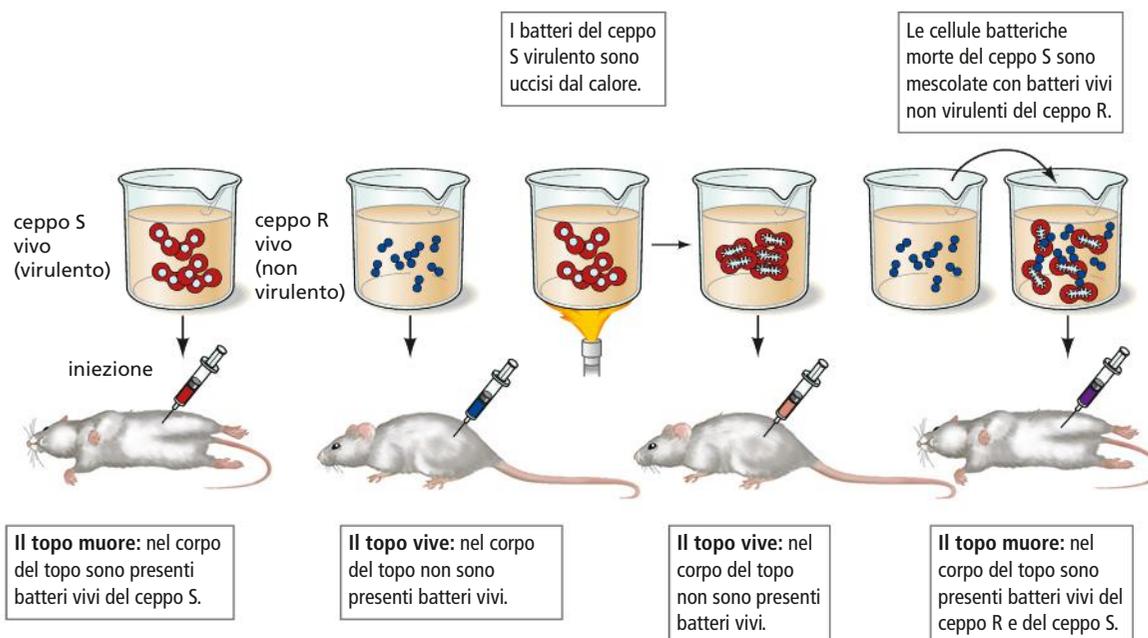
I risultati di Griffith indicavano che nei batteri S uccisi doveva esistere una sostanza che, una volta incorporata dalle cellule R vive, produceva in loro un cambiamento ereditario; questa sostanza, di cui non si conosceva ancora la natura chimica, fu chiamata **fattore di trasformazione**.

LE PAROLE

In microbiologia, un **ceppo batterico** è una popolazione di batteri che derivano tutti da un'unica cellula e che sono quindi geneticamente identici.

Figura 2

Gli esperimenti di Griffith dimostrarono che una sostanza presente nel ceppo S di pneumococco poteva trasformare e rendere virulento anche il ceppo R, inizialmente innocuo.



AVERY DIMOSTRÒ CHE IL FATTORE DI TRASFORMAZIONE È IL DNA

I risultati di Griffith furono ripresi all'inizio degli anni Trenta del Novecento dal gruppo di ricerca coordinato dal medico canadese Oswald Avery (1877-1955). Per quasi dieci anni, Avery e i suoi colleghi sottoposero i campioni contenenti il fattore di trasformazione del pneumococco a vari trattamenti, con lo scopo di distruggere selettivamente i diversi tipi di biomolecole (acidi nucleici, proteine, carboidrati e lipidi) e verificare, poi, la capacità dei campioni trattati di trasformare o meno le colture batteriche.

Gli esperimenti di Avery indicavano che se veniva degradato il DNA, il campione perdeva la sua capacità trasformante, mentre distruggendo le proteine, i lipidi oppure i carboidrati ciò non avveniva (Figura 3). Avery riuscì anche a isolare del DNA quasi puro e a dimostrare che da solo era sufficiente a indurre la *trasformazione batterica*.

Il lavoro di Avery, pubblicato per la prima volta nel 1944, rappresenta una tappa fondamentale del percorso che ha portato a stabilire che il materiale genetico è costituito da DNA e non dalle proteine, tuttavia, la comunità scientifica dell'epoca lo accolse con scetticismo. La molecola di DNA, costituita solamente da quattro diversi nucleotidi, sembrava troppo semplice per essere alla base dei complessi meccanismi ereditari; inoltre, nella prima metà

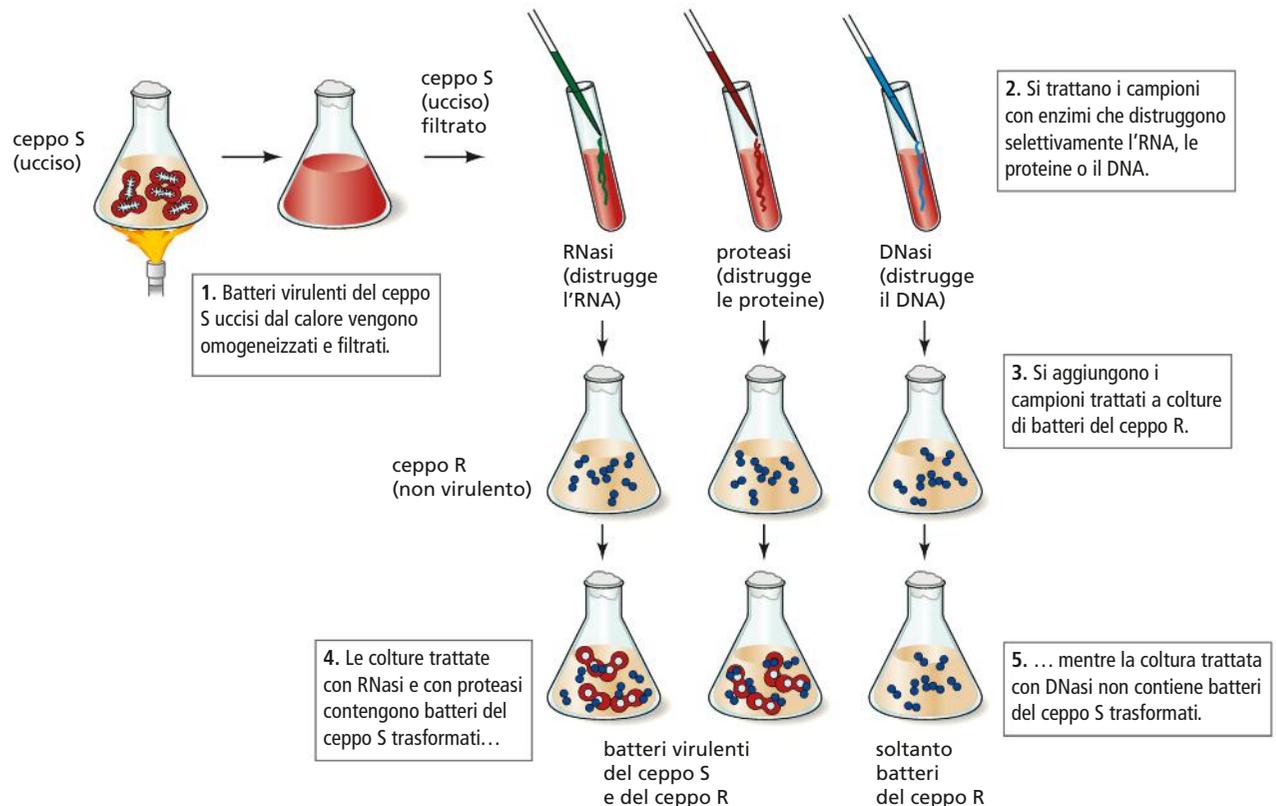
del Novecento la genetica batterica era un campo di studio ancora poco esplorato. Nella comunità scientifica, i procarioti erano considerati organismi «inferiori», al punto che alcuni scienziati dubitavano addirittura che possedessero dei geni. Infine, siccome il campione di DNA impiegato negli esperimenti condotti da Avery non era completamente puro, non si poteva escludere del tutto che la trasformazione dei batteri fosse dovuta alla presenza di proteine rimaste a contaminarlo. Per risolvere la controversia furono necessarie successive ricerche condotte su entità biologiche ancora più piccole e all'epoca sconosciute: i *virus*.

GLI ESPERIMENTI DI HERSHEY E CHASE CONFERMARONO CHE IL MATERIALE GENETICO È IL DNA

Nello stesso periodo in cui Avery pubblicava le sue scoperte, un gruppo di biologi e fisici iniziò a interessarsi alla genetica dei batteri e dei virus capaci di infettarli, chiamati **batteriofagi** o **fagi**; i ricercatori che studiavano i batteriofagi furono soprannominati «il gruppo del fago».

Questo gruppo di ricerca lavorava negli Stati Uniti e comprendeva microbiologi e biofisici provenienti da diversi Paesi, tra cui l'italiano Salvatore Luria, il tedesco Max Delbrück e l'americano Alfred Hershey, che condivisero il premio Nobel per la Medicina nel 1969. Il loro lavoro portò alla

Figura 3
Avery dimostrò che, tra tutte le biomolecole, soltanto il DNA era in grado di rendere patogeno il ceppo R.



nascita della **genetica dei microrganismi**, una nuova disciplina alla base di molte ricerche successive, tra cui l'esperimento di Hershey e Chase.

Negli anni Cinquanta del secolo scorso, Alfred Hershey (1908-1997) e la sua assistente Martha Chase (1927-2003) usarono il fago T2, che infetta il batterio *Escherichia coli*, al fine di stabilire una volta per tutte se il materiale genetico fosse costituito dal DNA oppure dalle proteine. I ricercatori sapevano che il fago T2 è composto esclusivamente da una molecola di DNA «nudo» (cioè non legato ad alcuna proteina), avvolta da un rivestimento proteico. T2 era, quindi, un ottimo modello per stabilire in quale delle due molecole fosse contenuta l'informazione genetica virale trasmessa con l'infezione. Quando il fago infetta un batterio, una parte del virus penetra nella cellula batterica (Figura 4); circa 20 minuti dopo, la cellula va incontro a lisi e libera decine di particelle virali, dimostrando che il fago è capace di replicarsi all'interno del batterio. Hershey e Chase ipotizzarono che l'ingresso di una qualche sostanza virale agisse sulla cellula ospite, trasformandola in una «fabbrica» di nuovi virus. Per stabilire se tale sostanza fosse costituita da DNA o da proteine, i ricercatori progettaronο un esperimento capace di rintracciare le molecole virali lungo tutto il ciclo vitale del fago.

I ricercatori prepararono due campioni distinti di fagi (Figura 5):

1. un campione era costituito da fagi T2 cresciuti in una coltura batterica contenente l'isotopo radioattivo del fosforo (^{32}P), che quindi era stato incorporato nel DNA virale;
2. il secondo campione era formato da fagi T2 cresciuti in una coltura batterica contenente l'isotopo radioattivo dello zolfo (^{35}S); in questo caso, lo zolfo radioattivo era stato incamerato dalle proteine virali.

Figura 4
Fotografia al microscopio elettronico a trasmissione di una cellula batterica (in verde) infettata da tre fagi T2 (in arancione).

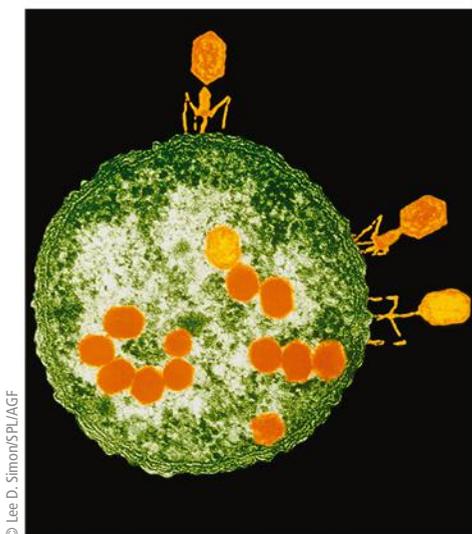
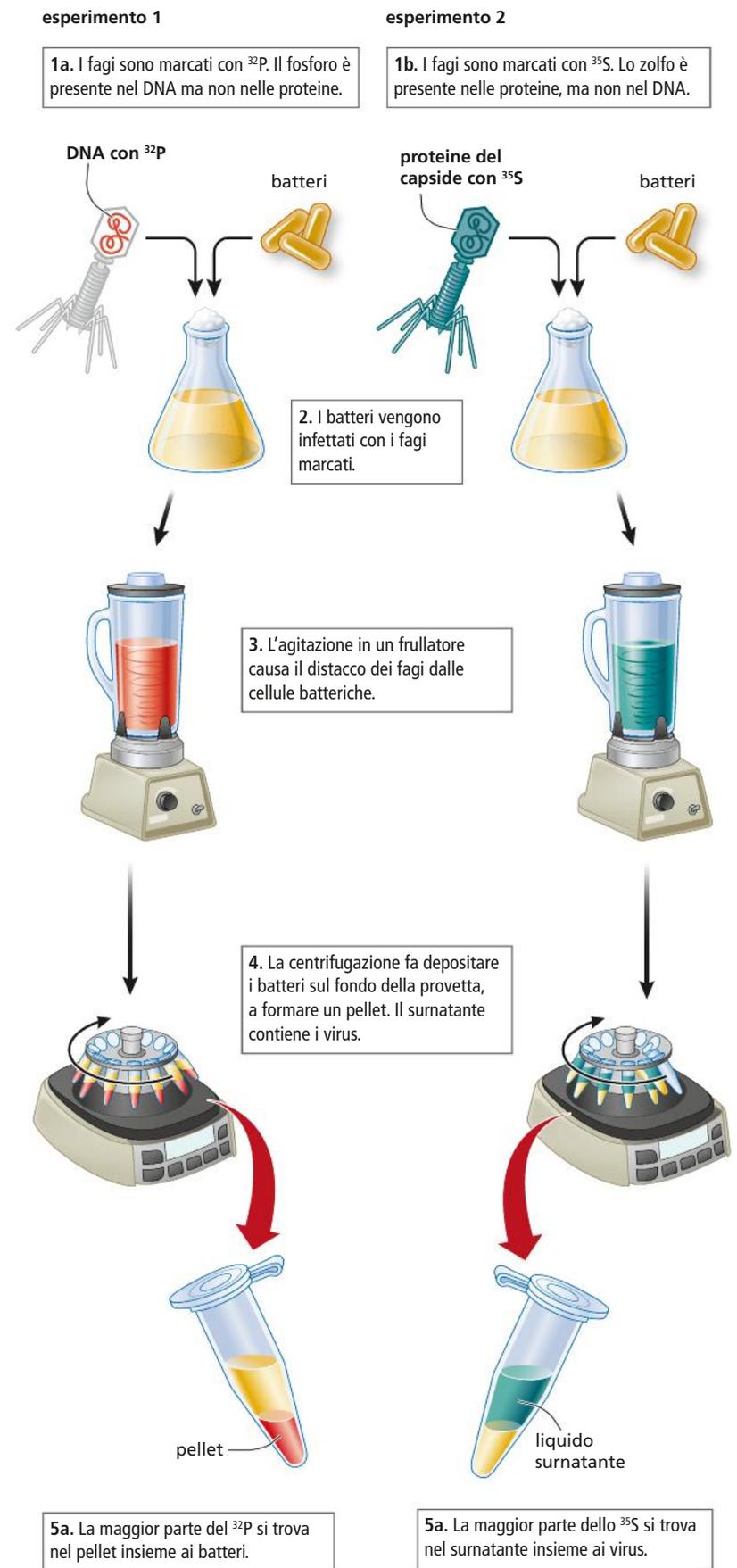


Figura 5

L'esperimento di Hershey e Chase: in cellule batteriche infettate con batteriofagi T2, soltanto il DNA radiomarcato si trovava nei batteri, mentre le proteine radiomarcate rimanevano nel liquido surnatante insieme ai virus.



SCOPERTA DEL DNA

MIESCHER

NUCLEINA

GRIFFITH

FATTORE DI TRASFORMAZIONE

AVERY

IL DNA È IL FATTORE DI TRASFORMAZIONE

HERSHEY-CHASE

IL DNA È IL MATERIALE GENETICO

In seguito, Hershey e Chase usarono i due campioni di fagi per infettare colture distinte di *E. coli* poste in fiasche separate. Venti minuti dopo l'infezione, le soluzioni contenenti i batteri vennero omogeneizzate, in modo da separare gli eventuali virus rimasti agganciati all'esterno delle cellule batteriche, e poi centrifugate. Grazie alla centrifuga, i batteri, che sono più pesanti, precipitano sul fondo della provetta (formando il *pellet*) e con essi il loro contenuto (compreso l'eventuale materiale virale inserito), mentre i virus, più leggeri, restano in sospensione costituendo il *surnatante* (vedi Figura 5).

I risultati erano chiari: il DNA marcato con ^{32}P si trovava sul fondo delle provette, mentre le proteine marcate con ^{35}S restavano in sospensione, quindi il DNA virale era stato trasferito all'interno delle cellule batteriche, ma ciò non era accaduto al capside proteico. Così si arrivò alla dimostrazione che il materiale genetico del fago è costituito da DNA.

Il lavoro di Hershey e Chase fu pubblicato nel 1952 e confermò definitivamente l'ipotesi di Avery, aprendo la strada alla scoperta della struttura molecolare degli acidi nucleici.

FACCIAMO IL PUNTO

Scegli il completamento corretto.

- Hershey e Chase dimostrarono che il materiale genetico è costituito da DNA perché
 - A il fosforo radioattivo si trovava nel surnatante.
 - B lo zolfo radioattivo si trovava nel pellet.
 - C il fosforo radioattivo si trovava nel pellet e lo zolfo nel surnatante.
 - D i batteri venivano infettati dai fagi.
- Completa le frasi.
 - a) La identificata da Miescher era l'insieme degli acidi nucleici e delle proteine associate.
 - b) L'esperimento di Avery dimostrò che la trasformazione batterica non si verificava se i batteri venivano sottoposti a vari trattamenti per il DNA.
- Vero o falso?
 - a) Distruggendo le proteine, i lipidi o i carboidrati, Avery osservò la presenza della capacità trasformante sul campione. V F
 - b) Hershey e Chase utilizzarono il batteriofago T2 perché composto solo da una molecola di DNA nudo. V F

1

Per saperne di più

QUALE FORMA HA IL DNA?

Risposta facile, direte voi... è una doppia elica destrógira, costituita da due filamenti a loro volta formati da nucleotidi. Eppure, questa risposta è incompleta. Il modello elaborato da Watson e Crick si basava sull'osservazione di poche paia di basi, 12 al massimo, e descrive bene la conformazione di piccolissimi frammenti di DNA. Allargando la visuale su frammenti via via più grandi, il quadro in realtà si complica.

ESISTE ANCHE UNA QUADRUPLA ELICA

Sessant'anni dopo la scoperta di Watson e Crick, un gruppo di ricercatori guidato dall'italiana Giulia Biffi, ha mostrato come il DNA possa assumere anche una conformazione a *quadrupla elica*.

Lo studio è il risultato di una ricerca lunga un decennio, culminata nella dimostrazione che queste particolari strutture, chiamate *G-quadruplexes*, esistono anche all'interno di cellule umane viventi. Queste quadruplette si formano in regioni del DNA particolarmente ricche di guanina, da cui deriva la G del nome inglese. In realtà, della loro esistenza *in vitro* si era a conoscenza già da alcuni decenni, ora però i ricercatori di Cambridge le hanno osservate *in vivo* per la prima volta e alcuni indizi fanno pensare che questo tipo

di situazione si verifichi più frequentemente nelle cellule che si dividono rapidamente, come quelle tumorali. Proprio gli esperimenti condotti da Giulia Biffi hanno permesso di identificare in modo più preciso il momento in cui la struttura a quattro eliche del DNA si manifesta con maggiore frequenza: la fase di **replicazione del DNA**, poco prima della divisione cellulare. Secondo i ricercatori, sebbene ci siano indizi, è ancora presto per indicare una relazione diretta tra le eliche quaduple e il cancro.

UNA VARIETÀ DI FORME E CONFIGURAZIONI TRIDIMENSIONALI

All'interno delle cellule, il DNA assume moltissime forme: si ripiega e si attorciglia creando strutture tridimensionali definite **superavvolgimenti** (dall'inglese *supercoiled*).

Grazie a una moderna tecnica di microscopia è stato possibile studiare i dettagli della doppia elica come mai prima d'ora. Gli autori dello studio, pubblicato sulle pagine di *Nature Communications*, hanno cercato di riprodurre in laboratorio i superavvolgimenti del DNA per poterne studiare la forma. Hanno riprodotto dei piccoli anelli di 336 coppie di nucleotidi, circa 10 milioni di volte più corti della

reale molecola di DNA umana, ma sufficientemente lunghi per essere un buon modello della realtà. Per analizzare le forme assunte da questi microanelli, gli scienziati hanno sovrapposto i risultati di due tecniche: la **tomografia crioelettronica**, che permette di ottenere immagini di materiale biologico attivo congelandolo, e la **simulazione al computer** del dinamismo del DNA e di tutte le forme che questo può assumere. Le immagini ottenute hanno mostrato la grande varietà delle forme assunte dalle molecole di DNA: cerchi ripiegati ad angolo vivo, altri simili a un otto, altri ancora che ricordano la cruna di un ago o compattati come un piccolo bastoncino.

Uno dei motivi per cui è importante studiare e comprendere la forma del DNA è il fatto che queste sono informazioni utili per migliorare l'azione di alcuni **farmaci** (come i chemioterapici) che agiscono direttamente sul DNA basandosi su un meccanismo a *incastro*, come una chiave con la propria serratura. Più dettagli si conoscono sulla forma della serratura, più probabile sarà modellare una chiave in grado di aprirla e, quindi, potrà essere più semplice sviluppare farmaci estremamente selettivi, costruiti appositamente sulla forma assunta dal DNA.

2. LA STRUTTURA MOLECOLARE DEL DNA

LE REGOLE DI CHARGAFF AIUTARONO A COMPRENDERE LA STRUTTURA DEL DNA

Una volta compreso che il DNA è la molecola in cui risiede l'informazione genetica, gli scienziati iniziarono a domandarsi quale fosse la sua struttura molecolare. Per risolvere questo dilemma fu necessario raccogliere dati sperimentali di vario tipo e confrontarli con considerazioni teoriche.

La composizione chimica del DNA forniva già alcuni validi indizi, infatti, i biochimici erano a conoscenza del fatto che il DNA è un polimero costituito da nucleotidi e che ciascun nucleotide è formato da tre componenti:

- una molecola di desossiribosio (uno zucchero a cinque atomi di carbonio);
- un gruppo fosfato;
- una base azotata, cioè una molecola organica con struttura ad anello, contenente azoto e con proprietà debolmente basiche.

Oggi sappiamo come sono uniti tra loro questi componenti nella formazione di un nucleotide: il gruppo fosfato è legato al desossiribosio tramite un legame covalente con il carbonio in posizione 5' (si legge *cinque primo*), mentre la base azotata è legata al primo carbonio dello zucchero, che si trova dalla parte opposta del gruppo fosfato (Figura 6A).

La sola differenza tra i quattro nucleotidi presenti nel DNA risiede proprio nella base azotata, che può essere una molecola di *guanina* (G), *adenina* (A), *citocina* (C) oppure *timina* (T). La guanina e l'adenina sono chiamate **purine** e hanno una struttura a due anelli, mentre la citosina e la timina sono dette **pirimidine** e sono formate da un anello semplice (Figura 6B).

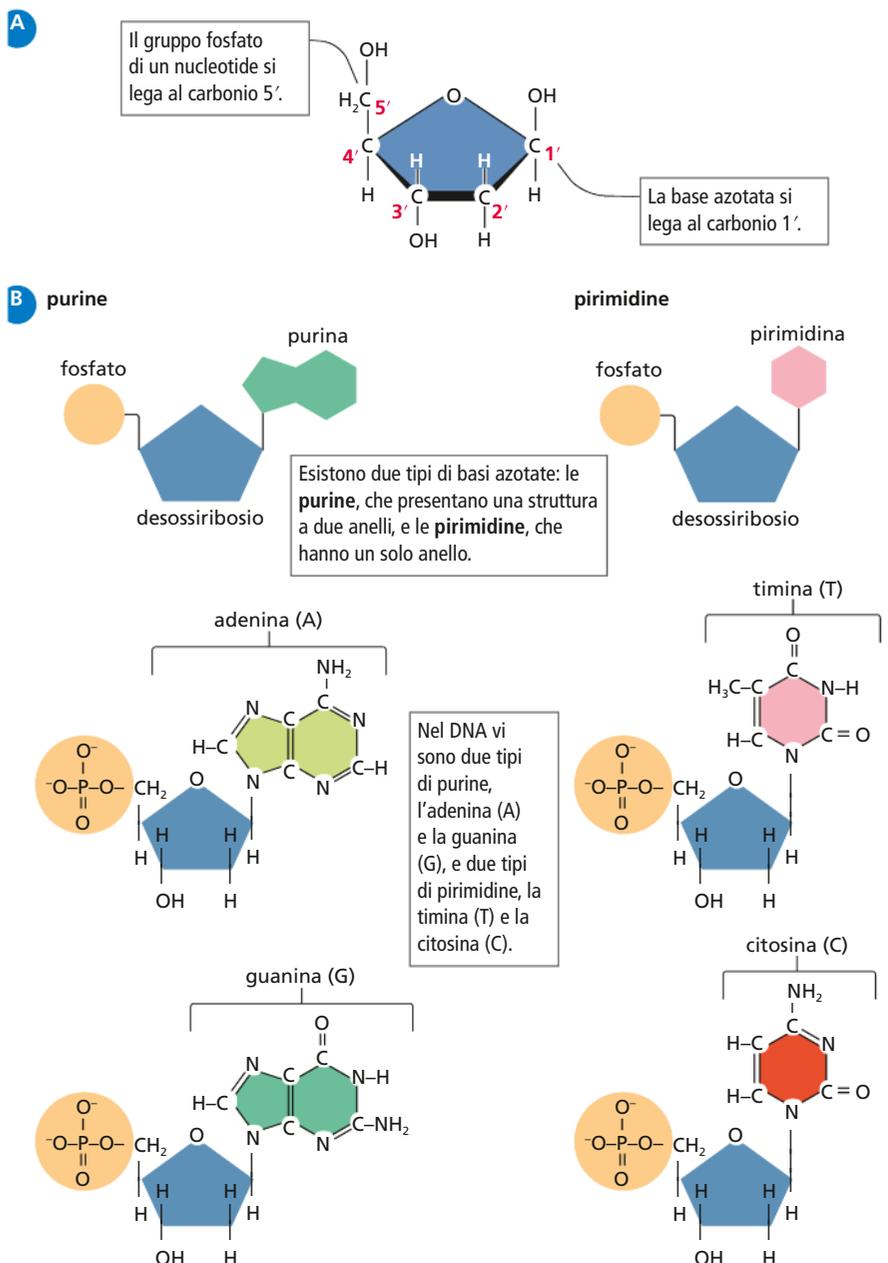
Inoltre, nel 1950 il chimico austriaco Erwin Chargaff (1905-2002) pubblicò uno studio sul confronto del DNA di organismi di specie diverse, riscontrando alcuni aspetti comuni:

- la composizione percentuale delle basi azotate del DNA è diversa da una specie all'altra;
- campioni di DNA isolati da tessuti diversi di organismi della stessa specie mostrano la stessa composizione percentuale di basi;
- la composizione percentuale delle basi non è influenzata dall'età dell'organismo, ma nemmeno dal suo stato di nutrizione oppure dalle specifiche condizioni ambientali in cui vive;

- in tutti i DNA cellulari, indipendentemente dalla specie in esame, la quantità di adenina è sempre uguale alla quantità di timina ($A=T$) e la quantità di guanina corrisponde sempre a quella di citosina ($G=C$); di conseguenza, la quantità totale delle purine ($A + G$) è identica a quella delle pirimidine ($T + C$).

Figura 6

Il desossiribosio e le posizioni degli atomi di carbonio nella formazione di un nucleotide (A). Ogni nucleotide è dato da una base azotata, che può essere una purina o una pirimidine, dallo zucchero desossiribosio e da un gruppo fosfato (B).



Queste relazioni quantitative, dette **regole di Chargaff**, furono indispensabili per stabilire la struttura tridimensionale del DNA e il modo in cui le informazioni genetiche sono codificate al suo interno.

GLI STUDI DI ROSALIND FRANKLIN FURONO FONDAMENTALI PER DEFINIRE LA STRUTTURA A DOPPIA ELICA

Nello stesso periodo in cui Chargaff metteva a punto i suoi risultati, i biofisici Rosalind Franklin (1920-1958) e Maurice Wilkins (1916-2004) del *King's College* di Londra utilizzavano i raggi X per studiare la disposizione degli atomi all'interno delle molecole di DNA. La **diffrazione ai raggi X** è una tecnica che permette di ottenere informazioni sulla struttura interna di una sostanza, che per essere sottoposta a questo tipo di analisi deve trovarsi in forma cristallina, cioè in uno stato in cui le sue molecole siano disposte in modo ordinato. Questa tecnica si basa sul fatto che nei cristalli gli atomi sono disposti secondo schemi tridimensionali ripetuti che danno origine a piani paralleli interni al cristallo stesso. Quando un fascio di raggi X attraversa il cristallo, questi piani si comportano come specchi che riflettono una parte dei raggi solo in certe direzioni. Ponendo una lastra fotografica dietro al cristallo, questa verrà impressionata dai raggi riflessi dai diversi piani di atomi e si formeranno così delle macchie scure. L'analisi della forma e della disposizione di ogni macchia (*diffratogramma*) permette di dedurre la disposizione degli atomi all'interno delle molecole (**Figura 7**).

Attraverso la diffrazione ai raggi X, nel 1951 Linus Pauling determinò la struttura ad α -elica delle proteine e nello stesso anno Rosalind Franklin e Maurice Wilkins ottennero le immagini che suggerivano la struttura del DNA: una struttura fortemente simmetrica, con forma di **elica destrogira**, cioè avvolta da sinistra verso destra, con un diametro costante di 2 nm.

WATSON E CRICK DEFINIRONO IL MODELLO TRIDIMENSIONALE A DOPPIA ELICA DEL DNA

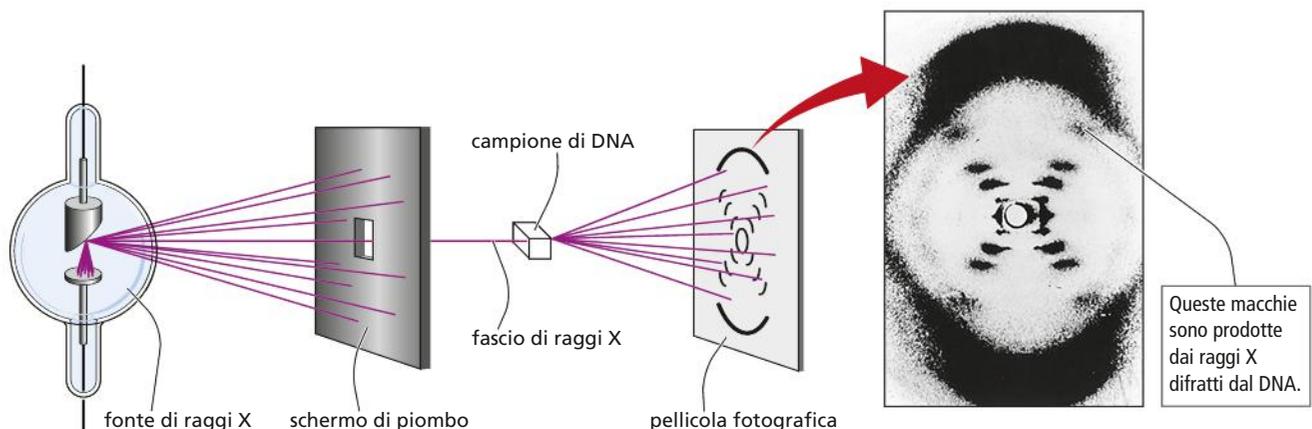
All'inizio degli anni Cinquanta del Novecento, il biologo statunitense James Watson (1928) vinse una borsa di studio presso la *Cavendish Laboratory* di Cambridge, in Inghilterra, per approfondire la struttura delle proteine mediante la diffrazione ai raggi X; qui incontrò il fisico inglese Francis Crick (1916-2004). Watson proveniva dal «gruppo del fago» di Hershey e Luria, mentre Crick era un esperto nell'interpretazione delle immagini ai raggi X delle molecole. Sebbene il loro progetto di ricerca riguardasse le proteine, entrambi i ricercatori erano interessati a scoprire in che modo l'informazione genetica fosse custodita all'interno del DNA.

Prendendo in esame tutti i dati disponibili fino a quel momento, nel 1951 Watson e Crick iniziarono a elaborare un modello tridimensionale della molecola di DNA. In particolare, i due scienziati considerarono tre fattori:

1. le analisi delle immagini ai raggi X di Franklin e Wilkins mostravano che la molecola di DNA aveva la forma di un'elica destrogira;
2. i dati fisici e chimici suggerivano che nella molecola ci fossero due catene polinucleotidiche affiancate;
3. la regola di Chargaff indicava che la quantità totale delle purine fosse sempre pari a quella delle pirimidine.

Il 25 aprile del 1953, Watson e Crick pubblicarono sulla rivista scientifica *Nature* il loro modello della struttura del DNA, in grado di spiegare le proprietà della molecola e di aprire la strada alla comprensione delle sue funzioni. Per questo risultato, nel 1962 Watson, Crick e Wilkins ricevettero il premio Nobel per la Medicina, mentre Rosalind Franklin, che nel frattempo era morta di cancro a causa della prolungata esposizione alle radiazioni, non ricevette neppure un elogio postumo (*vedi Apertura*).

Figura 7
Modello dell'esperimento di diffrazione ai raggi X del DNA (a sinistra) e fotografia del risultato ottenuto (a destra).



IL DNA È SORRETTO DA LEGAMI ZUCCHERO-FOSFATO ED È STABILIZZATO DA LEGAMI A IDROGENO

Secondo il modello di Watson e Crick, il DNA è composto da una doppia elica costituita da due catene di polinucleotidi.

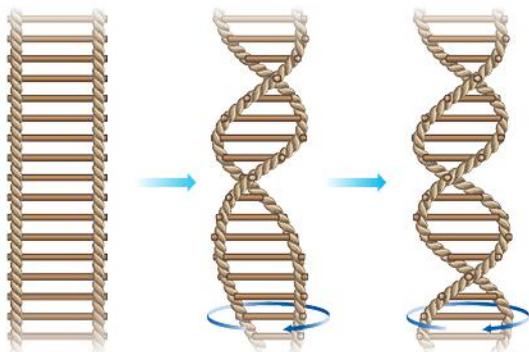
Per visualizzare questa struttura puoi immaginare di prendere una scala a pioli e di ruotarla in modo da formare una spirale, mantenendo i pioli perpendicolari all'asse di rotazione (Figura 8). I due montanti della scala rappresentano lo *scheletro zucchero-fosfato*, cioè la sequenza di molecole di zucchero e gruppi fosfato alternate, mentre ogni piolo perpendicolare ai montanti rappresenta *due basi azotate appaiate*: adenina (A) e timina (T), oppure guanina (G) e citosina (C). Lo scheletro zucchero-fosfato ha un'elevata carica negativa dovuta alla presenza dei gruppi fosfato (PO_4^{3-}) e forma facilmente legami a idrogeno con le molecole di acqua; le basi azotate, al contrario, sono apolari.

I nucleotidi sono tenuti insieme da un legame covalente tra il gruppo fosfato legato al carbonio in posizione 5' di un nucleotide e il carbonio in posizione 3' del nucleotide successivo. Questo **legame fosfodiesterico** costituisce la struttura portante dello scheletro zucchero-fosfato. Il legame fosfodiesterico si forma per *condensazione* tra l'ossidrile del desossiribosio e un ossidrile inizialmente presente nel fosfato, pertanto ogni nucleotide forma legami con altri due nucleotidi. Questo legame attribuisce anche a ciascun filamento una direzionalità (Figura 9), in quanto ogni filamento possiede un'estremità 5' (che termina con un nucleotide che possiede un gruppo fosfato libero) e un'estremità 3' (che termina con un nucleotide che possiede un gruppo ossidrilico $-\text{OH}$ libero, non legato a un gruppo fosfato di un altro nucleotide).

Nella doppia elica, i due filamenti hanno verso opposto: uno è orientato in direzione da 5' a 3' ($5' \rightarrow 3'$), l'altro è orientato in direzione $3' \rightarrow 5'$. Per questo, i filamenti si dicono **antiparalleli**.

Figura 8

La doppia elica del DNA è come una scala a pioli fatta ruotare intorno al proprio asse perpendicolare.

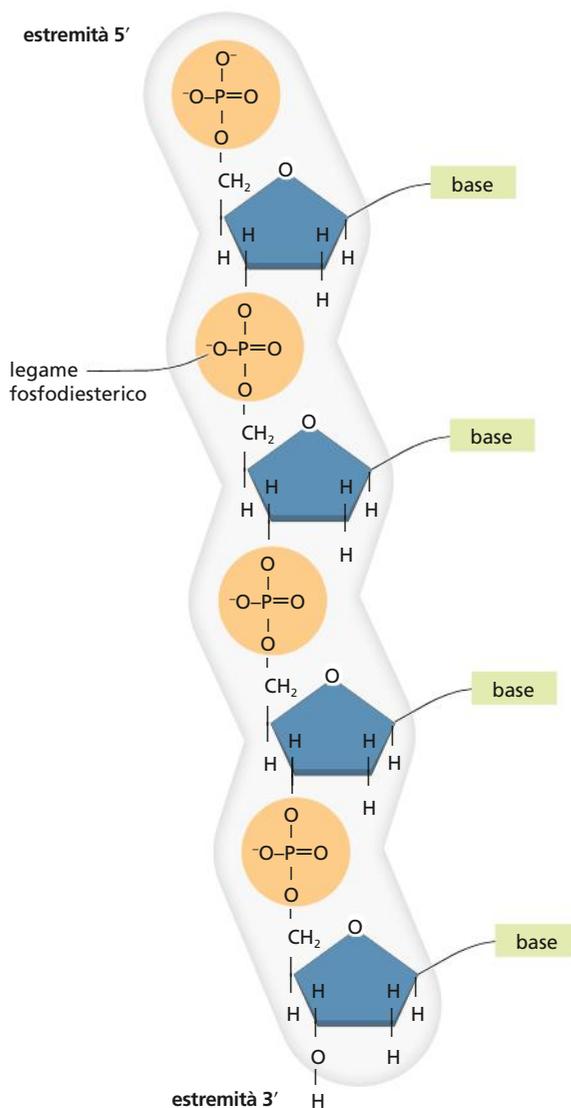


Dallo scheletro zucchero-fosfato di ciascun filamento si dipartono le basi azotate dirette verso il centro della doppia elica; ogni base di un filamento ha la possibilità di appaiarsi alla base che si trova sul filamento opposto per mezzo di legami a idrogeno. I legami a idrogeno sono relativamente deboli, ma nel complesso contribuiscono a dare stabilità alla doppia elica.

Un altro fattore che contribuisce alla stabilità del DNA è il cosiddetto «impilamento delle basi», un fenomeno secondo cui le basi azotate di un filamento si compattano perché, a causa della loro natura idrofobica, tendono a rimanere vicine tra di loro per allontanarsi il più possibile dall'acqua. La distanza tra i due «montanti», calcolata in base alle immagini ottenute dalla Franklin, è di 2 nm.

Figura 9

Il legame fosfodiesterico fa sì che il DNA possieda una direzionalità, in quanto ogni filamento ha un'estremità 5' (che termina con un gruppo fosfato libero) e un'estremità 3' (che termina con un gruppo ossidrilico libero).



TI RICORDI?

I **legami a idrogeno** sono legami intermolecolari di natura elettrostatica che si instaurano, per esempio nell'acqua, tra le parziali cariche negative dell'atomo di ossigeno di una molecola e le parziali cariche positive degli atomi di idrogeno di altre due molecole; sono legami deboli: in media la loro forza è pari al 5-10% di quella dei legami covalenti.

La combinazione di due purine misurerebbe *più* di 2 nanometri, mentre due pirimidine appaiate occuperebbero *meno* di 2 nm; ma se una purina è sempre appaiata a una pirimidina, si genera una perfetta corrispondenza e, in ogni suo punto, la molecola di DNA presenta la stessa larghezza.

Procedendo su tale strada, Watson e Crick arrivarono a costruire un modello della molecola in ferro e stagno, collocando al posto giusto ogni tassello di questo puzzle tridimensionale (Figura 10). Lavorando con il modello, i due ricercatori scoprirono che i nucleotidi potevano essere disposti lungo un singolo filamento in qualunque ordine. Dal momento che una molecola di DNA può essere lunga migliaia di nucleotidi, nella sequenza delle basi è possibile un'enorme varietà: uno dei requisiti fondamentali che deve possedere il materiale genetico per generare la straordinaria variabilità dei viventi.

Quando si misero a costruire il secondo filamento, Watson e Crick si trovarono di fronte a un altro importante vincolo: l'adenina poteva appaiarsi soltanto con la timina mediante **due legami a idrogeno** (A=T) e la guanina soltanto con la citosina, formando **tre legami a idrogeno** (G≡C); le basi appaiate erano, pertanto, **complementari** (Figura 11). Questo modello forniva una spiegazione convincente alla regola di Chargaff e aveva una seconda implicazione: la sequenza dei nucleotidi lungo un filamento era in grado di determinare la sequenza sul filamento complementare. Crick ri-

mase molto colpito da quest'ultimo aspetto, tanto che suppose fosse utile anche per capire i meccanismi di replicazione e trascrizione del DNA.

Misurazioni successive, effettuate sulle molecole di DNA, hanno mostrato che ogni giro dell'elica misura 3,4 nm di lunghezza, equivalenti a 10,5 coppie di basi. Le coppie di basi, o paia di basi (indicate come **bp** oppure **bps** dall'inglese *base pair*), sono comunemente utilizzate come misura della lunghezza degli acidi nucleici (DNA e RNA).

Quando i due filamenti si avvolgono a formare la doppia elica, tra i gruppi fosfato restano esposti due solchi di diversa ampiezza: il **solco minore** è largo 1,2 nm, mentre il **solco maggiore**, dove avvengono principalmente le interazioni tra il DNA e le proteine che ne regolano l'attività, risulta largo 2,2 nm.

IL MODELLO A DOPPIA ELICA COLLEGA LA STRUTTURA DEL DNA ALLE SUE FUNZIONI

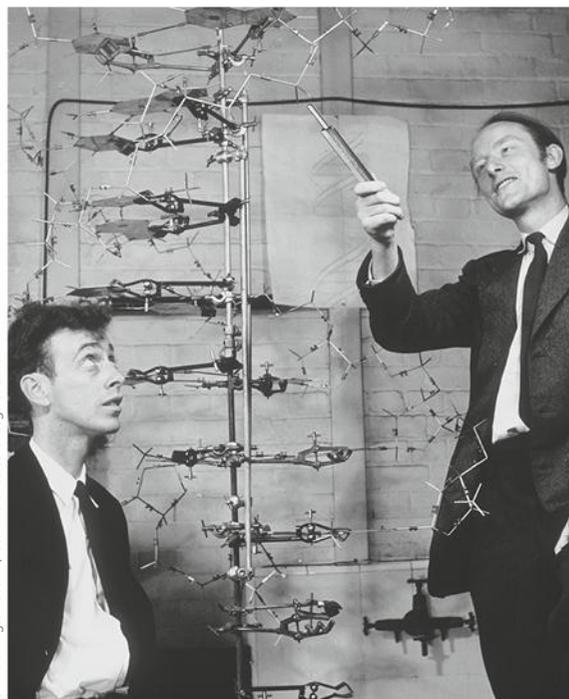
Come abbiamo visto, un requisito fondamentale del materiale genetico è la capacità di contenere informazioni: un aspetto primario della scoperta di Watson e Crick fu proprio il fatto che il loro modello del DNA dimostrava come le **informazioni genetiche** fossero indicate dalla sequenza delle basi azotate. È tale sequenza a dettare le regole per la sintesi delle proteine che avviene nel citoplasma.

Poiché il numero di nucleotidi contenuti nel DNA varia da circa 5000 per i virus più semplici ai 670 miliardi di nucleotidi del protozoo *Amoeba dubia*, le combinazioni possibili raggiungono un numero elevatissimo. Il DNA di una cellula umana, costituito da circa 6 miliardi di nucleotidi (quindi circa 3 miliardi bp), può contenere informazioni equivalenti a 600 000 pagine di un libro, con 500 parole ognuna. Questi numeri spiegano come la struttura del DNA possa essere la sede delle istruzioni per l'infinita diversità degli esseri viventi.

Un'altra caratteristica del materiale genetico è la capacità di produrre copie identiche di sé stesso ogni volta che la cellula si divide. Infatti, ogni volta che una cellula affronta la fase S (di sintesi) del proprio ciclo cellulare il DNA si replica in modo tale da permettere alle cellule figlie di ricevere la corretta quantità di materiale genetico. Questo processo di replicazione deve essere estremamente rapido, per consentire una veloce divisione delle cellule, ma allo stesso tempo deve essere preciso, per evitare errori che potrebbero portare anche a gravi conseguenze.

Già Watson e Crick nel loro primo articolo sulla struttura molecolare del DNA fecero riferimento al fatto che il loro modello a doppia elica ben si prestasse a un particolare meccanismo di replicazione.

Figura 10
Il modello del DNA in ferro e stagno, costruito da Watson e Crick.



© A. Barrington Brown, Gonville & Caius College/SPL/AGF

FACCIAMO IL PUNTO

Scegli il completamento corretto.

1. Secondo le regole di Chargaff

- A la composizione percentuale delle basi azotate del DNA è sempre la stessa.
- B la composizione percentuale delle basi può variare in base alle condizioni ambientali in cui si trova l'organismo.
- C la quantità totale delle purine è sempre identica a quella delle pirimidine.
- D nella molecola ci sono due catene polinucleotidiche affiancate.

2. Il legame fosfodiesterico unisce

- A le basi azotate.
- B i nucleotidi complementari.
- C gli zuccheri pentosi del DNA direttamente tra di loro.
- D gli zuccheri e i gruppi fosfato.

3. Completa le frasi.

- a) L'adenina si appaia alla timina mediante legami a idrogeno, e la guanina

con la citosina, formando legami a idrogeno.

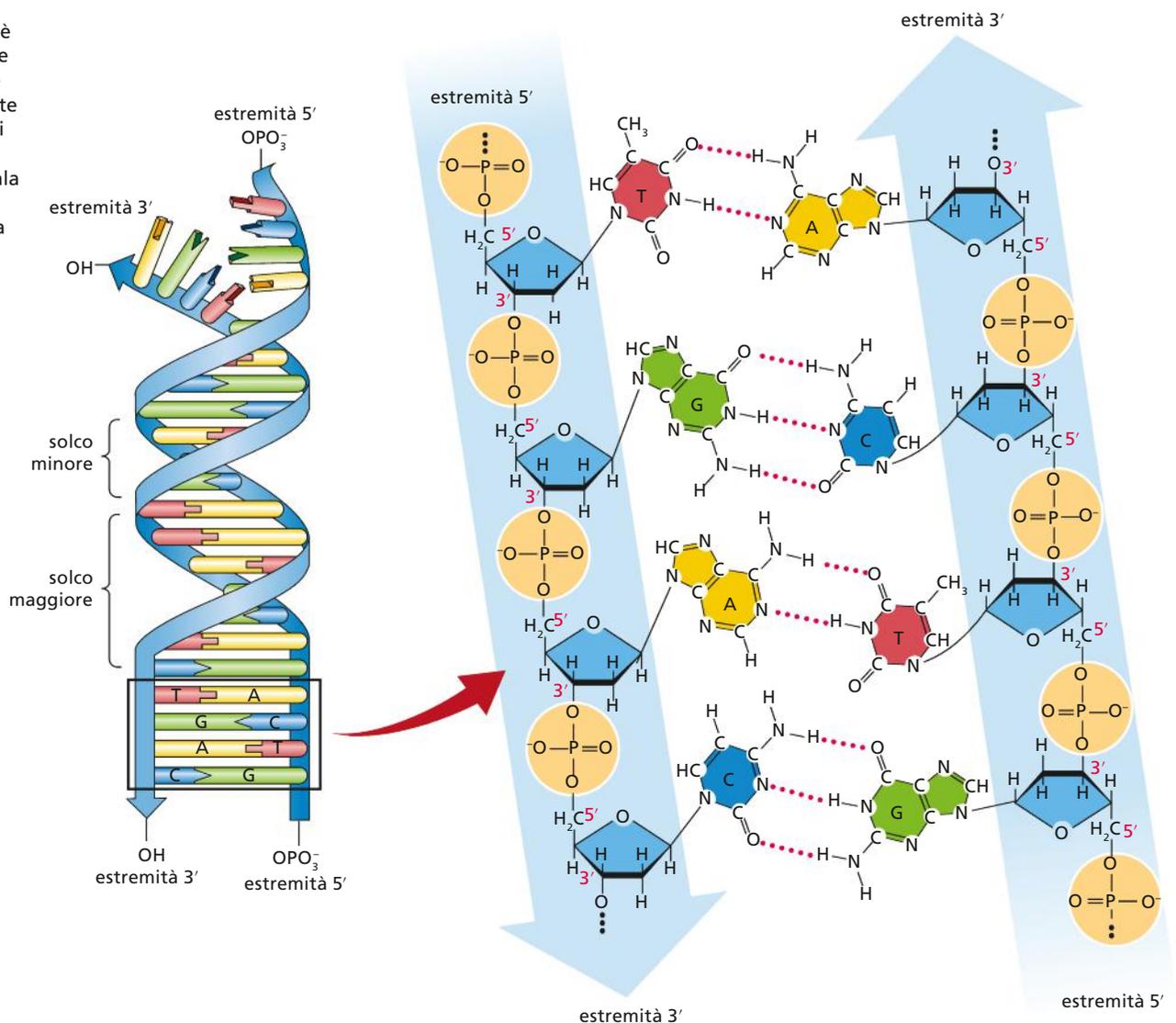
- b) I due filamenti di DNA sono perché uno è orientato in direzione 5'→3', l'altro in direzione 3'→5'.
- c) Quando i due filamenti si avvolgono a formare la doppia elica, tra i gruppi fosfato restano esposti due di diversa ampiezza.

4. Vero o falso?

- a) La combinazione di due purine misurerebbe più di 2 nanometri, mentre due pirimidine appaiate occuperebbero meno di 2 nanometri. V F
- b) La base azotata di ogni nucleotide si lega all'atomo di azoto dello zucchero pentoso. V F
- c) Le immagini ai raggi X ottenute da Rosalind Franklin dimostrarono che il DNA ha larghezza costante. V F
- d) Dato un filamento di DNA è sempre noto anche il suo filamento complementare. V F

Figura 11

L'appaiamento delle basi è complementare. Le purine (A e G) si appaiano con le pirimidine (rispettivamente T e C) a formare coppie di basi di uguale lunghezza, simili ai gradini di una scala a pioli. La scala si avvolge su se stessa a formare una struttura a doppia elica.



3. LA REPLICAZIONE DEL DNA

TI RICORDI?

Il **ciclo cellulare** è l'insieme degli eventi compresi tra la formazione di una cellula e la sua divisione in due cellule figlie. Il ciclo è suddiviso in due fasi, a loro volta divise in sottofasi: l'interfase comprende le fasi G₁, S e G₂, mentre la fase mitotica è divisa in mitosi e citodieresi.

LA REPLICAZIONE DEL DNA È SEMICONSERVATIVA

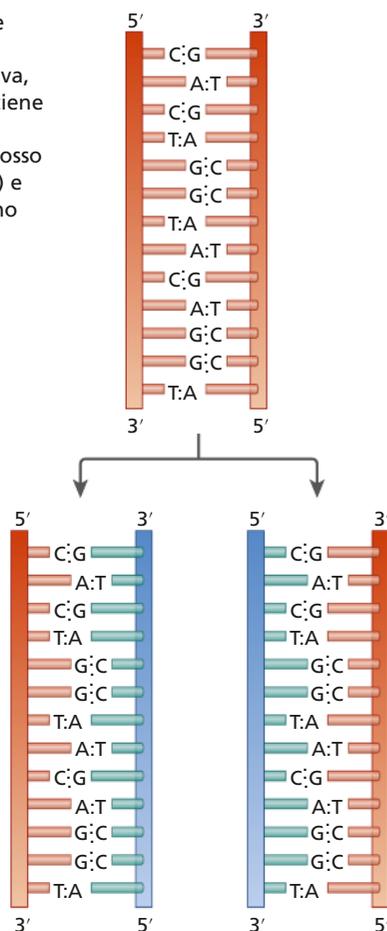
Non è sfuggito alla nostra attenzione il fatto che lo specifico appaiamento delle basi da noi ipotizzato, suggerisce un possibile meccanismo di replicazione per il materiale genetico.

Queste righe facevano parte dell'articolo di Watson e Crick del 1953. Negli anni successivi, la ricerca si concentrò proprio nello scoprire il meccanismo esatto grazie al quale si replica il materiale genetico.

L'articolo di Watson e Crick suggeriva una modalità di replicazione del DNA di tipo **semiconservativo** (vedi Scheda 2). Ricerche successive dimostrarono che l'ipotesi era corretta: ogni filamento della molecola parentale funziona da *stampo* per un nuovo filamento, cosicché le due molecole di DNA neoformate contengono un filamento «vecchio» e uno di nuova sintesi (Figura 12).

Figura 12

La replicazione del DNA è semiconservativa, per cui si mantiene un filamento originario (in rosso nell'immagine) e se ne forma uno nuovo (in blu).



La replicazione del DNA richiede, oltre al DNA da replicare, la presenza di altre molecole, tra cui enzimi e nucleotidi. La formazione dei nuovi filamenti avviene grazie al principio della *complementarietà tra le basi*: se sul filamento stampo è presente un nucleotide con la base azotata T, soltanto la base A potrà prendere il posto corrispondente sul nuovo filamento; allo stesso modo, G si appaierà soltanto con C e viceversa. Grazie a questo principio di corrispondenza univoca, alla fine del processo si ottengono due copie identiche tra loro e identiche alla molecola originaria.

Negli eucarioti, la replicazione del DNA si verifica durante la **fase S** del ciclo cellulare e, nella maggior parte delle cellule eucariotiche, è seguita dalla **mitosi**; nelle cellule sessuali, invece, è seguita dalla **meiosi**. Il processo avviene molto velocemente: nei mammiferi, per esempio, vengono legati circa 50 nucleotidi al secondo, mentre nei procarioti si arriva anche a 1000 nucleotidi al secondo. In questo modo, il batterio *Escherichia coli* può replicare i suoi 4,7 milioni di basi in soli 20-40 minuti. Negli eucarioti, la velocità di replicazione è decisamente minore, per esempio, nelle cellule della rana *Xenopus laevis* è di 10 nucleotidi al secondo, mentre nell'essere umano e nel topo domestico è di circa 50 basi ogni secondo.

LA REPLICAZIONE DEL DNA È BIDIREZIONALE

La replicazione del DNA, secondo cui ogni filamento della doppia elica serve da stampo per la costruzione di un nuovo filamento, richiede un gran numero di proteine ed enzimi.

La replicazione inizia quando un complesso proteico, chiamato **complesso di replicazione**, si lega al DNA in corrispondenza di una specifica sequenza di basi, che fa da **origine di replicazione** e viene detta **ori**. A partire dall'origine di replicazione, il DNA si replica in entrambe le direzioni, formando la **bolla di replicazione** (Figura 13). In corrispondenza di entrambe le estremità della bolla, dove i vecchi filamenti vengono separati e stanno per essere sintetizzati i nuovi filamenti complementari, la molecola forma una struttura a Y, nota come **forcella di replicazione**.

La replicazione avviene in due direzioni opposte rispetto al punto di origine, perciò è definita **bidirezionale**.

La replicazione, quindi, si verifica a mano a mano che la bolla si propaga nelle due direzioni fino a incontrare una bolla adiacente; nel momento in cui tutte le bolle si fondono tra loro, l'intero cromosoma sarà stato replicato.

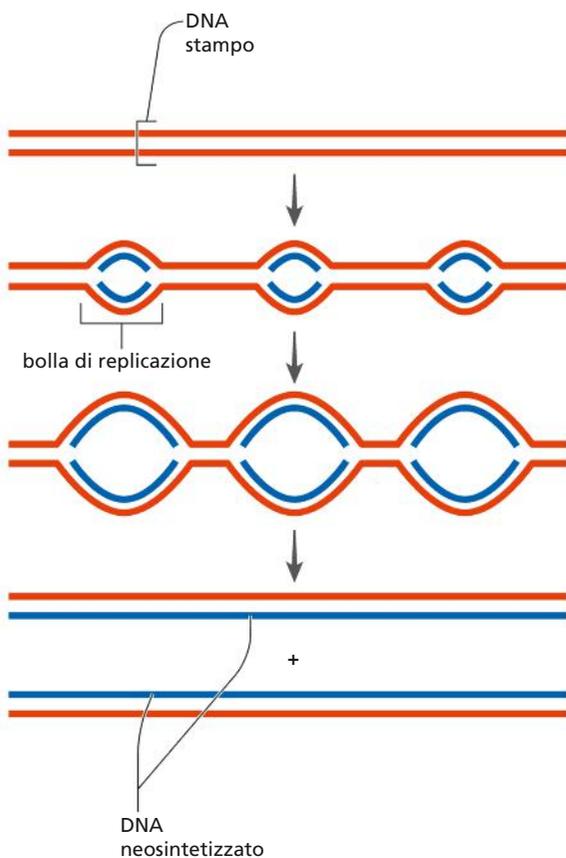
Quando termina la sintesi dei nuovi filamenti di DNA, le due catene si separano, formando due nuove doppie eliche, ciascuna costituita da un filamento originario e un filamento nuovo.

In passato, si riteneva che il complesso di replicazione si muovesse lungo la molecola di DNA come una locomotiva sui binari ferroviari; in realtà sembra che sia il DNA a scorrere attraverso il complesso di replicazione che, invece, rimane ancorato a strutture nucleari e quindi resta fermo.

Nei cromosomi circolari dei procarioti, in genere, è sufficiente una sola origine della replicazione, mentre nelle cellule eucariotiche, che possiedono una quantità maggiore di DNA, su ogni cromosoma lineare sono presenti numerose *ori*. In questo modo, gli eucarioti possono aumentare la velocità di replicazione, poichè la molecola sarà completamente replicata soltanto quando tutte le bolle di replicazione che si allargano in modo bidirezionale si incontrano.

Figura 13

In corrispondenza delle *ori*, il complesso di replicazione apre le bolle di replicazione e sintetizza i filamenti, che poi si uniscono a formare nuove molecole di DNA.



LA REPLICAZIONE DEL DNA È CATALIZZATA DA NUMEROSI ENZIMI

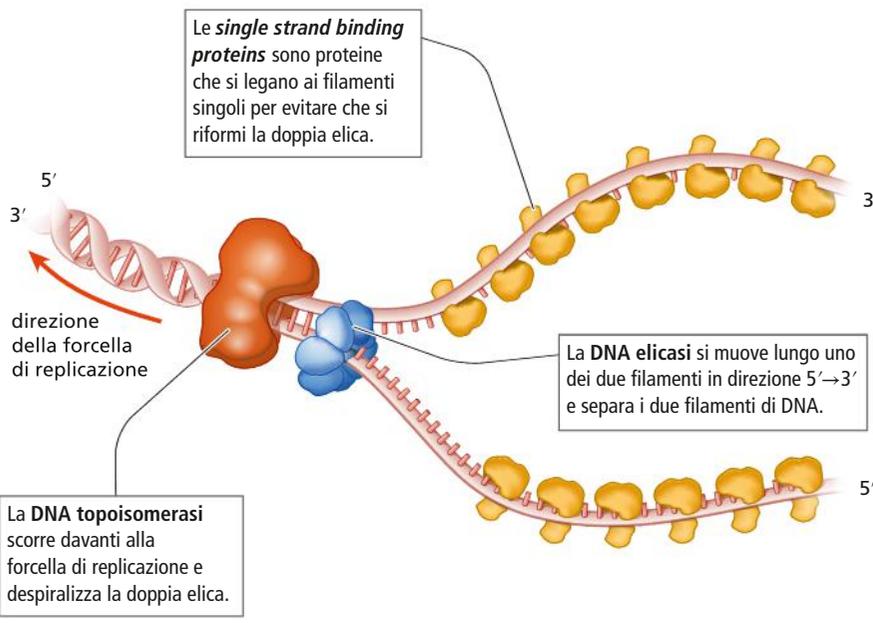
Il complesso di replicazione contiene numerosi enzimi che intervengono in tutte le fasi del processo (Figura 14 e Video 1); in *E. coli* sono solo 17, ma nei genomi eucariotici sono molti di più.

La replicazione del DNA si svolge in due fasi.

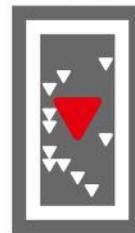
1. Nella prima fase, l'enzima **topoisomerasi** despiralizza la doppia elica (il DNA è compattato così da occupare il minor spazio possibile nel nucleo) e l'enzima **elicasi** rompe i legami a idrogeno tra le coppie di basi appaiate; in questo modo, i due filamenti si allontanano e ognuno può funzionare da stampo per la sintesi dei nuovi filamenti. Non appena l'elicasi apre la doppia elica, però, i filamenti devono essere mantenuti separati, altrimenti tenderebbero spontaneamente ad appaiarsi di nuovo. A svolgere questo compito sono le *single strand binding proteins* (SSBP), proteine che si legano ai filamenti singoli per tenerli divisi.
2. Nella seconda fase, avviene la sintesi vera e propria dei nuovi filamenti, grazie all'azione delle **DNA polimerasi**, una serie di enzimi che aggiunge i nucleotidi esclusivamente all'estremità 3' dei filamenti in formazione, saldandoli mediante legami fosfodiesterici. Si tratta di DNA polimerasi DNA dipendenti, ovvero di enzimi capaci di sintetizzare una molecola di DNA partendo da uno stampo costituito sempre da DNA.

Figura 14

Le proteine coinvolte nelle prime fasi della replicazione sono la topoisomerasi, l'elicasi e le SSBP.



GUARDA!



Video 1
La replicazione del DNA / DNA replication

I DUE FILAMENTI DI DNA SI REPLICANO CON VELOCITÀ E MODALITÀ DIVERSE

Le **DNA polimerasi** sono enzimi molto grandi, con una forma che ricorda una mano semiaperta (**Figura 15**): «nel palmo» si trova il sito attivo dell'enzima che avvicina i nucleotidi allo stampo, mentre «le dita» riconoscono la forma delle diverse basi azotate, permettendo alla polimerasi di legare, di volta in volta, un nucleotide complementare a quello presente sul filamento stampo. Nei batteri come *E. coli* esistono cinque tipi di DNA polimerasi, coinvolte in diversi processi cellulari, tra cui la replicazione e la riparazione del DNA.

Tutte le DNA polimerasi sono capaci di allungare una catena polinucleotidica preesistente aggiungendo un nucleotide alla volta solamente all'estremità 3'. Inoltre, le DNA polimerasi non possono iniziare dal nulla la sintesi di una nuova catena, poiché hanno bisogno di un **innescò** (o *primer*) che sia complementare al DNA stampo e che abbia un'estremità 3' libera alla quale aggiungere i nucleotidi (**Figura 16**). Il *primer* è una **breve sequenza di RNA**, sintetizzata dall'enzima **RNA primasi** (una RNA polimerasi DNA dipendente), che al termine della replicazione deve essere rimossa e sostituita da un tratto corrispondente di DNA.

Il fatto che le DNA polimerasi possano procedere solamente nella direzione 5'→3', aggiungendo nucleotidi all'estremità 3' della catena, genera un problema. Infatti, i due filamenti di DNA sono antiparalleli, quindi, l'allungamento deve avvenire in modo diverso nelle due direzioni (**Figura 17**).

- Il filamento neosintetizzato 5'→3' è detto *veloce* perché può allungarsi in maniera continua via via che la forcella di replicazione si apre; tale filamento, che quindi ha l'estremità 3' libera, è quello complementare al filamento stampo (3'→5');
- l'altro filamento neosintetizzato, quello in direzione 3'→5', è detto *lento*, perché il complesso di replicazione procede nello stesso senso in cui scorre il filamento stampo, dunque a ritroso rispetto all'apertura della forcella. Di conseguenza, la sintesi del nuovo filamento di DNA avviene in modo discontinuo e a più riprese con la formazione di tratti relativamente corti di DNA; questi segmenti sono detti **frammenti di Okazaki** e sono lunghi 100-200 nucleotidi negli eucarioti e 1000-2000 nucleotidi nei batteri.

Figura 16

La DNA polimerasi ha bisogno di un *primer* formato da pochi nucleotidi di RNA per dare inizio alla sintesi di DNA, inoltre può aggiungere nucleotidi solo in direzione 5'→3'.

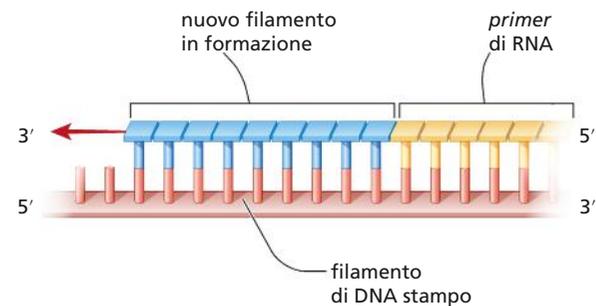
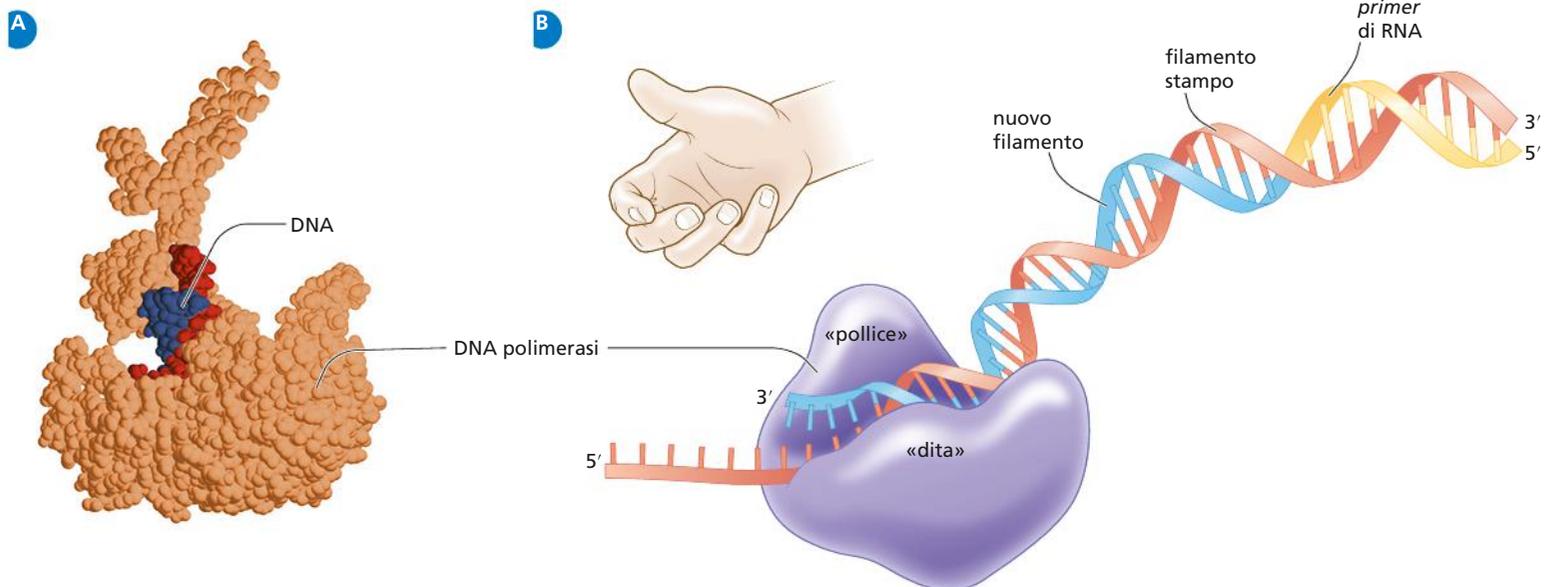


Figura 15

L'enzima DNA polimerasi (in arancione) è molto più grande della molecola di DNA (rossa e blu) (**A**). La DNA polimerasi ha una struttura a forma di mano, le cui «dita» si avvolgono attorno al DNA e riconoscono la diversa forma delle quattro basi azotate (**B**).



Sul filamento veloce, il *primer* di RNA è unico e si trova all'inizio della catena da replicare (Figura 18A); sul filamento lento, invece, i *primer* sono molteplici e si trovano di volta in volta in prossimità della forcella di replicazione (Figura 18B e C). Questo è dovuto al fatto che la DNA polimerasi non può catalizzare la sintesi dei frammenti di Okazaki se non trova un punto di attacco sul filamento da replicare; a mano a mano che la doppia elica di DNA stampo si svolge, quin-

di, la DNA polimerasi sintetizza i frammenti muovendosi sul filamento stampo in direzione 3'→5' e producendo un nuovo filamento che avrà direzione 5'→3', opposta a quella in cui si muove la forcella. Dopo essere stati utilizzati, i *primer* vengono eliminati dall'RNA e sostituiti da DNA sintetizzato da una specifica DNA polimerasi; i vari frammenti sono poi uniti dall'enzima DNA ligasi, che riforma i legami covalenti tra zucchero e fosfato in modo da generare un filamento unico (Figura 18D).

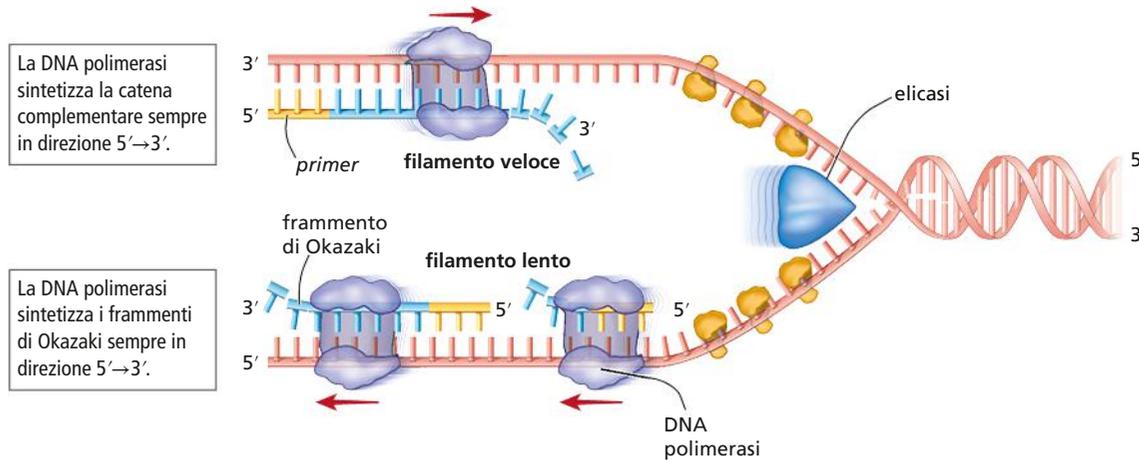
A colpo d'occhio

REPLICAZIONE



Figura 17

La replicazione avviene a velocità diverse sui due filamenti stampo.

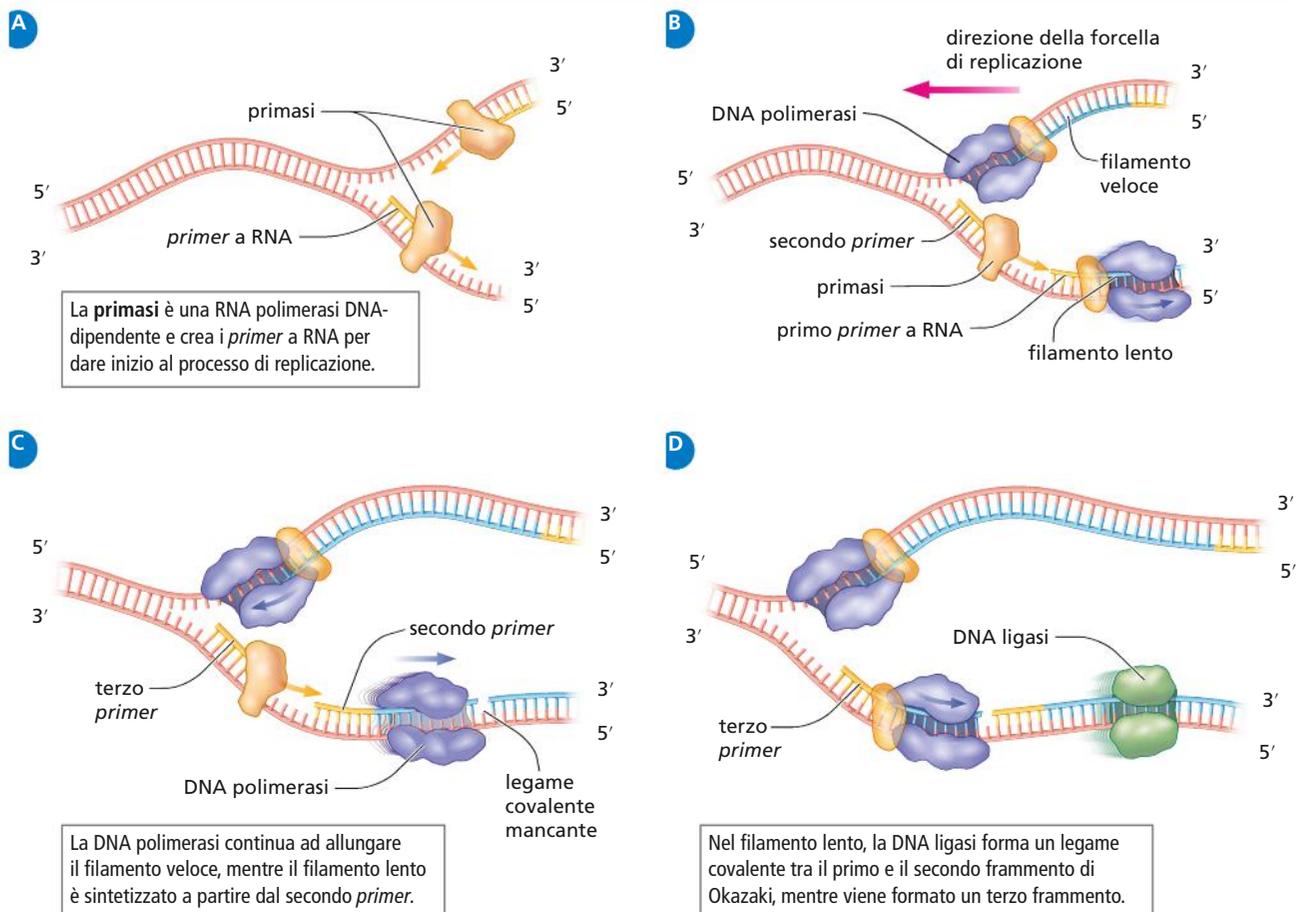


La DNA polimerasi sintetizza la catena complementare sempre in direzione 5'→3'.

La DNA polimerasi sintetizza i frammenti di Okazaki sempre in direzione 5'→3'.

Figura 18

Per il filamento veloce, la replicazione avviene con un solo *primer*, mentre per il filamento lento occorre la presenza di più *primer* e della DNA ligasi, che unirà i frammenti di Okazaki una volta che i *primer* di RNA vengono sostituiti da DNA.



La primasi è una RNA polimerasi DNA-dipendente e crea i primer a RNA per dare inizio al processo di replicazione.

La DNA polimerasi continua ad allungare il filamento veloce, mentre il filamento lento è sintetizzato a partire dal secondo primer.

Nel filamento lento, la DNA ligasi forma un legame covalente tra il primo e il secondo frammento di Okazaki, mentre viene formato un terzo frammento.

A colpo d'occhio

AGENTI MUTAGENI

CHIMICI

ACIDO NITROSO

BENZOPIRENE

FISICI

RAGGI X

RAGGI UV

IL PROCESSO DI REPLICAZIONE È CONTROLLATO DALLA SELEZIONE DELLE BASI E DAL *PROOFREADING*

La replicazione del DNA avviene con un grado di precisione molto elevato grazie alla presenza di diversi sistemi di controllo, che correggono eventuali errori di appaiamento durante la sintesi del nuovo filamento di DNA.

1. Il primo meccanismo di controllo è la **selezione delle basi**: le DNA polimerasi sono in grado di formare il legame fosfodiesterico tra due nucleotidi solo se questi sono già appaiati correttamente ai loro nucleotidi complementari del filamento stampo. La distinzione tra nucleotidi corretti ed errati avviene non solamente in base ai legami a idrogeno che determinano l'appaiamento tra basi complementari, ma anche in relazione alla geometria delle coppie di basi A=T e G≡C; infatti, solo le coppie di basi che presentano questa geometria riescono a entrare nel sito attivo dell'enzima. Un nucleotide sbagliato potrebbe essere in grado di formare legami a idrogeno con un'altra base presente nello stampo, ma non entrerebbe nel sito attivo della DNA polimerasi; di conseguenza, la maggior parte dei nucleotidi errati è scartata prima ancora che si formi il legame fosfodiesterico.
2. Il secondo meccanismo di controllo è basato sulla capacità delle DNA polimerasi di verificare la correttezza di ogni nucleotide dopo che questo è stato aggiunto durante la sintesi del nuovo filamento. Quando viene erroneamente inserito un nucleotide sbagliato, l'enzima lo rimuove e incorpora al suo posto il nucleotide giusto: questo processo è chiamato *proofreading* oppure **correzione di bozze** (Figura 19).

TI RICORDI?

Le molecole di substrato si legano all'enzima nel **sito attivo**, dove avviene la reazione; il legame di un substrato con il sito attivo di un enzima produce il complesso enzima-substrato, che dà origine al prodotto finale e libera l'enzima.

Grazie all'azione combinata dei processi di selezione delle basi e *proofreading*, la DNA polimerasi eucariotica commette un errore solo una volta ogni 10^6 - 10^8 coppie di basi aggiunte.

LE MUTAZIONI POSSONO ESSERE SPONTANEE OPPURE INDOTTE DA AGENTI ESTERNI

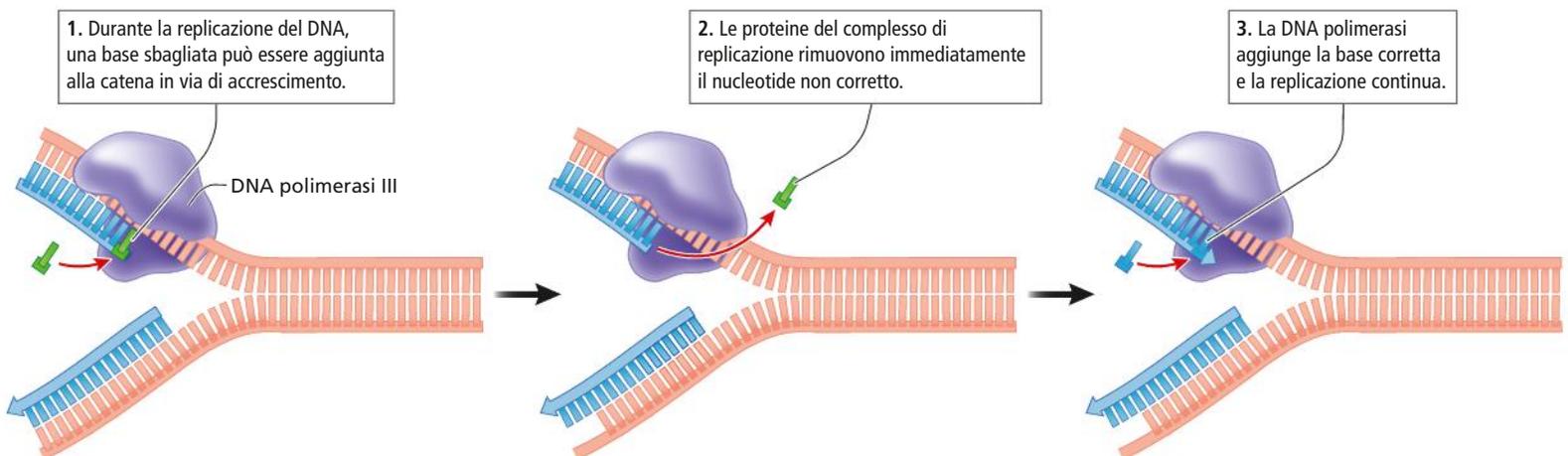
Preservare l'integrità dell'informazione contenuta nel DNA è essenziale per le cellule, tuttavia, la sequenza nucleotidica può essere modificata in seguito a cause *spontanee* oppure *indotte* (determinate da fattori ambientali). In generale, si definiscono **mutazioni** i cambiamenti permanenti nella sequenza di basi del DNA che possono essere trasmessi da una generazione alla successiva.

Le **mutazioni spontanee** insorgono, per esempio, in seguito a errori nella replicazione che sfuggono ai processi di controllo; le **mutazioni indotte**, invece, sono dovute ad *agenti mutageni* chimici o fisici. Tra i mutageni chimici ci sono, per esempio, l'acido nitroso (HNO_2) che converte la citosina in uracile, e il benzopirene presente nel fumo di tabacco, che modifica chimicamente la guanina e le impedisce di appaiarsi con la citosina. Esempi di mutageni fisici sono: i raggi X, capaci di produrre radicali liberi che alterano le basi nucleotidiche e danneggiano lo scheletro zucchero-fosfato, e i raggi ultravioletti che creano pericolosi legami tra timine adiacenti, generando i cosiddetti *dimeri di timina*. Questo ultimo tipo di mutazioni provoca gravi distorsioni nella struttura a doppia elica, che non riesce più a replicarsi e a svolgere le proprie funzioni.

Anche se le ricombinazioni genetiche prodotte dalla riproduzione sessuata e dalle mutazioni sono il materiale sul quale opera la selezione naturale, determinando i fenomeni evolutivi, nell'immediato gli effetti delle mutazioni hanno prevalente-

Figura 19

Le proteine del complesso di replicazione sono coinvolte nei meccanismi di controllo del DNA come il *proofreading*.



mente conseguenze negative, perché compromettono la sintesi proteica o interferiscono con il ciclo cellulare. Nei mammiferi, per esempio, esiste una forte correlazione tra l'accumulo di mutazioni e l'insorgenza del cancro. Per questo motivo, nelle cellule sono attivi diversi **sistemi di riparazione** che si affiancano ai meccanismi di controllo attivi durante la replicazione. La riparazione del DNA è possibile perché la doppia elica è formata da due filamenti complementari: il DNA danneggiato su un filamento può essere rimosso e sostituito utilizzando come stampo la catena complementare.

LA RIPARAZIONE DEL DNA AVVIENE GRAZIE AL SISTEMA *MISMATCH REPAIR* E ALL'ESCISSIONE

La riparazione degli errori di appaiamento tra le basi avviene grazie al **sistema *mismatch repair*** (Figura 20A), subito dopo che il DNA è stato replicato. Nei batteri, questo complesso è costituito da dodici proteine tra cui una DNA polimerasi e una DNA ligasi. Tale sistema ha il compito di trovare gli appaiamenti errati che sono sfuggiti al meccanismo di *proofreading*, quindi, identificare quale filamento è da riparare e sostituire il nucleotide sbagliato grazie all'azione della DNA polimerasi e della DNA ligasi.

Per far questo, il sistema deve poter distinguere tra il filamento stampo (che è la copia corretta) e il filamento neosintetizzato (che contiene il nucleotide errato). La distinzione è possibile perché, al termine della sintesi del nuovo filamento, la cellula «etichetta» il DNA aggiungendo dei gruppi metilici

($-\text{CH}_3$); appena dopo la replicazione, il filamento neoformato non è ancora stato metilato ed è, quindi, ben distinguibile da parte del sistema di riparazione dallo stampo metilato.

Le proteine del **sistema di riparazione per escissione** (Figura 20B) agiscono, invece, sulle basi anomale o sui dimeri di timina che si formano in seguito all'esposizione a sostanze chimiche dannose oppure a mutageni fisici. Il sistema è capace di rompere i legami fosfodiesterici ai due lati della mutazione e rilasciare i nucleotidi escissi; in seguito, la DNA polimerasi sintetizza il frammento mancante, che viene saldato al resto della catena dalla DNA ligasi.

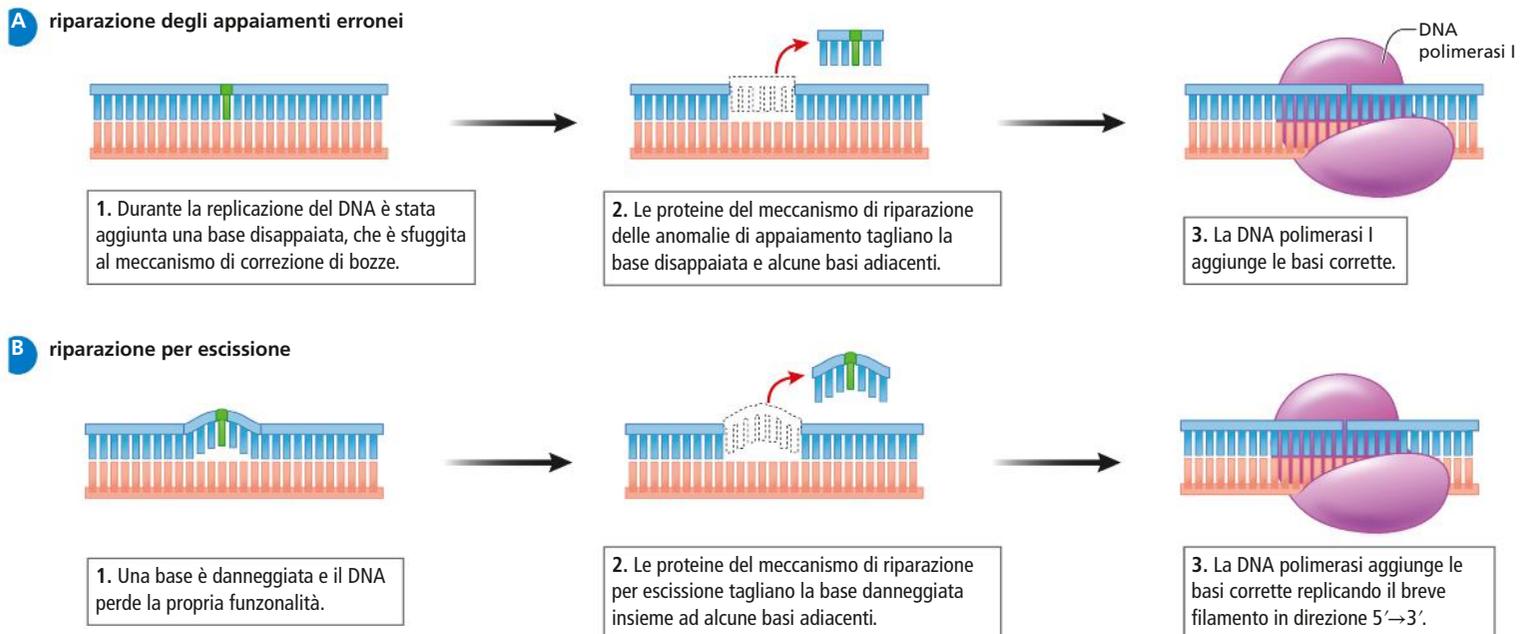
I TELOMERI PROTEGGONO LE ESTREMITÀ DEI CROMOSOMI EUCARIOTICI

Nei batteri, la replicazione del DNA si arresta quando le due forcelle di replicazione si incontrano e si fondono; nei cromosomi lineari eucariotici, invece, la situazione è diversa.

Come abbiamo visto, nelle cellule eucariotiche la replicazione del filamento lento avviene per aggiunta dei frammenti di Okazaki ai *primer* di RNA. Quando però il *primer* terminale è rimosso dall'estremità del cromosoma, non può più essere sostituito da DNA, perché non esiste un'ulteriore estremità 3' da prolungare. Di conseguenza, ciascuna estremità di ogni nuovo cromosoma presenta un breve tratto di DNA a filamento singolo. Tale situazione anomala attiva gli enzimi che rimuovono il tratto a singolo filamento insieme a una piccola porzione del DNA a doppio filamento adiacente.

Figura 20

Le proteine del complesso di replicazione agiscono anche nei meccanismi di riparazione del DNA, tra cui il *mismatch repair* (A) e il sistema per escissione (B).



CURIOSITÀ

Comprendere meglio il ruolo della **telomerasi** può sia aiutare a capire i meccanismi dell'invecchiamento (o senescenza) cellulare sia permettere di studiare nuove terapie contro il cancro. La scoperta dell'enzima telomerasi è valsa, nel 2009, il premio Nobel per la Fisiologia e la Medicina a Elizabeth Blackburn, Carol Greider e Jack Szostak.

Come conseguenza, a ogni divisione cellulare il cromosoma eucariotico diventa leggermente più corto (**Figura 21**).

Un altro problema delle estremità cromosomiche è evitare che i sistemi di riparazione del DNA le congiungano, per errore, alle estremità di altri cromosomi. Infatti, quando il DNA è danneggiato da agenti esterni come le radiazioni, presenta rotture che vengono riparate dall'azione combinata della DNA polimerasi e della DNA ligasi. Gli stessi enzimi potrebbero scambiare per rotture le normali estremità cromosomiche, quindi unire due cromosomi diversi compromettendo così la struttura del corredo genomico.

Per impedire la saldatura dei cromosomi ed evitare che il loro accorciamento a ogni replicazione comporti una perdita di informazioni genetiche, le estremità dei cromosomi eucariotici presentano lunghi tratti di DNA costituiti da sequenze ripetute e chiamati **telomeri**. Nei vertebrati, i telomeri sono ripetizioni della sequenza **TTAGGG**, che nell'essere umano è presente anche 2500 volte. Speciali

proteine si legano a queste ripetizioni proteggendo la loro integrità, un po' come fanno le estremità plastificate dei lacci da scarpe che facilitano l'inserimento degli stessi nell'occhiello e li preservano nel tempo.

A ogni divisione cellulare, un cromosoma può perdere da 50 a 200 coppie di basi di DNA telomerico; quindi, dopo circa 20-30 divisioni, le estremità diventano troppo corte per mantenere la loro funzione protettiva, di conseguenza la cellula va incontro ad *apoptosi* (morte cellulare) e muore.

La perdita dei telomeri è uno dei motivi per cui le cellule non durano per tutta la vita dell'organismo. Tuttavia, le cellule che si dividono di continuo, come le cellule staminali, sono in grado di mantenere intatto il proprio DNA telomerico; in queste cellule, infatti, esiste un enzima, la **telomerasi**, capace di rigenerare i telomeri quando diventano troppo corti, utilizzando come stampo una sequenza di RNA contenuta all'interno dell'enzima stesso (**Figura 22**).

I TELOMERI SONO IMPLICATI NELL'INSORGENZA DEI TUMORI

Come abbiamo appena visto, a causa del continuo accorciamento dei telomeri, la vita della cellula non è eterna. Le cellule tumorali, però, sono in grado di acquisire una sorta di immortalità e proliferare senza controllo, danneggiando così l'intero organismo. Infatti, se per le cellule sane esiste un limite alla proliferazione, chiamato *limite di Hayflick* (alla base dell'invecchiamento dell'organismo), nel 90% delle cellule tumorali la telomerasi rimane attiva e continua a rinnovare costantemente i telomeri.

Grazie ai marcatori fluorescenti, è stato osservato come la telomerasi esegua una sorta di scansione delle estremità dei cromosomi per valutarne la lunghezza: quando i telomeri sono troppo corti, aggiunge nuove sequenze di basi azotate all'estremità cromosomica, inducendo così la cellula a continuare a dividersi. Poiché gran parte delle cellule non possiede questa capacità, la telomerasi è un potenziale bersaglio per i farmaci antitumorali.

Figura 21

La rimozione del *primer* di RNA dei filamenti di nuova sintesi lascia non replicate le regioni all'estremità dei cromosomi.

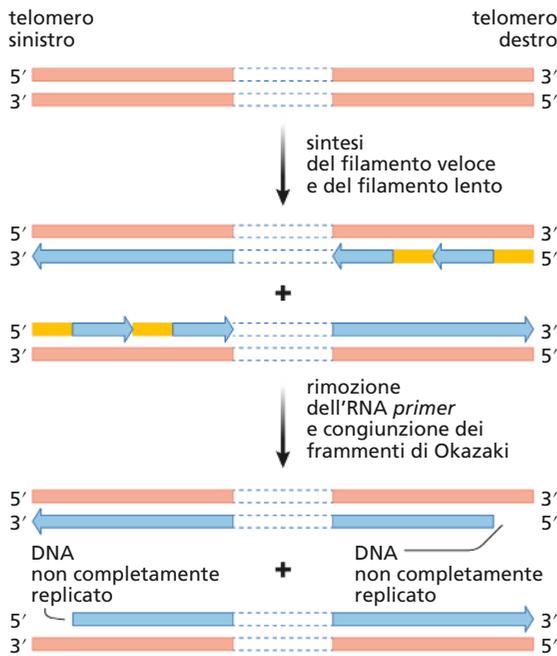


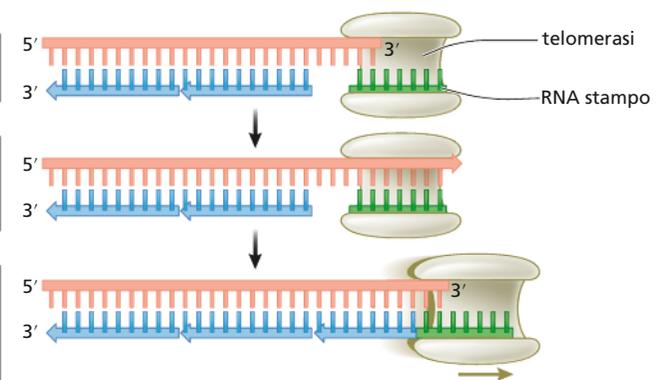
Figura 22

Nelle cellule staminali, la telomerasi si lega all'estremità 3' del filamento stampo estendendolo grazie a una sequenza di RNA integrata nell'enzima stesso.

1. Nelle cellule staminali l'enzima telomerasi utilizza uno stampo di RNA per estendere il telomero.

2. Questa breve sequenza a RNA fa da stampo perché la DNA polimerasi possa sintetizzare la parte di DNA mancante sul filamento lento e allungare il telomero.

3. La telomerasi si sposta verso la nuova estremità terminale e la DNA polimerasi riempie lo spazio vuoto. Questo processo può essere ripetuto molte volte per allungare il telomero.



FACCIAMO IL PUNTO

Scegli il completamento corretto.

1. Il primer è

- A un complesso di proteine che avvia la replicazione del DNA.
- B una breve sequenza di DNA a cui si aggancia la DNA polimerasi.
- C un breve innesco di RNA sintetizzato dall'enzima primasi.
- D l'enzima che apre la doppia elica del DNA permettendo la replicazione di entrambi i filamenti.

2. I frammenti di Okazaki

- A si formano in entrambi i filamenti che sono sintetizzati durante il processo di replicazione del DNA.
- B sono sequenze di DNA, ciascuna separata da primer di RNA.
- C sono brevi tratti di DNA uniti dall'enzima DNA elicasi.
- D si trovano solamente sul filamento veloce e sono uniti da un enzima.

3. Completa le frasi.

- a) La distinzione tra nucleotidi corretti ed errati avviene anche in relazione alla delle coppie di basi A=T e
- b) I telomeri sono ripetizioni della sequenza, che nell'essere umano è presente anche volte.
- c) La replicazione del DNA è un processo, quindi ogni bolla di replicazione è formata da forcelle che procedono in direzioni opposte.

4. Vero o falso?

- a) L'enzima DNA polimerasi procede solo aggiungendo nucleotidi all'estremità 5'. V F
- b) Il sistema di riparazione per escissione agisce durante la replicazione del DNA. V F
- c) Le *single strand binding proteins* si legano ai singoli filamenti per tenerli stabilmente uniti. V F
- d) Le mutazioni sono cambiamenti permanenti del DNA che possono essere trasmessi alle generazioni successive. V F

2

Storia della scienza

L'ESPERIMENTO DI MESELSON E STAHL

Alla fine degli anni Cinquanta del Novecento, era ormai accettato il modello a doppia elica del DNA proposto da Watson e Crick. Nel loro articolo del 1953, i due scienziati proponevano anche come ognuna delle due eliche contenesse l'informazione necessaria per costruire quella complementare, suggerendo un sistema di **replicazione semiconservativa**, secondo cui nelle nuove eliche uno dei due filamenti fosse quello originario, mentre l'altro fosse di nuova sintesi.

Tuttavia, oltre al modello semiconservativo erano state avanzate altre due ipotesi sul possibile meccanismo di replicazione: la **replicazione conservativa** e quella **dispersiva**.

Secondo il modello della **replicazione conservativa**, al termine della replicazione si ottengono due molecole: una contenente entrambi i filamenti originari e l'altra contenente due filamenti nuovi.

Secondo il modello della **replicazione dispersiva**, le eliche delle due molecole di DNA ottenute a ogni replicazione dovevano contenere tratti di DNA originario mescolati casualmente a tratti di DNA di nuova sintesi.

Per dimostrare quale fosse il meccanismo corretto, nel 1958, Matthew Meselson e Franklin Stahl svilupparono un ingegnoso esperimento (Figura). I ricercatori fecero crescere colonie di *Escherichia coli* in un terreno di coltura ricco dell'isotopo pesante dell'azoto (^{15}N). In questo modo, i batteri inglobavano ^{15}N nelle loro basi azotate e,

quindi, nelle molecole di DNA. Alcuni di questi batteri furono prelevati, lisati e venne estratto il loro DNA, che fu pesato attraverso una tecnica di centrifugazione che tiene conto della densità. Alcuni batteri furono poi trasferiti dal terreno di coltura contenente ^{15}N in un nuovo terreno, in cui era presente l'isotopo ^{14}N .

Dopo circa venti minuti, che corrispondono al tempo medio per la nascita di una nuova generazione di batteri (quindi, al tempo che occorre per la replicazione del DNA), alcuni batteri vennero prelevati, lisati e fu estratto il loro DNA. L'analisi per centrifugazione di questo nuovo DNA mostrava una sola banda posta più in alto rispetto a quella di partenza, a indicare che il nuovo DNA era più leggero. Dopo altri 20

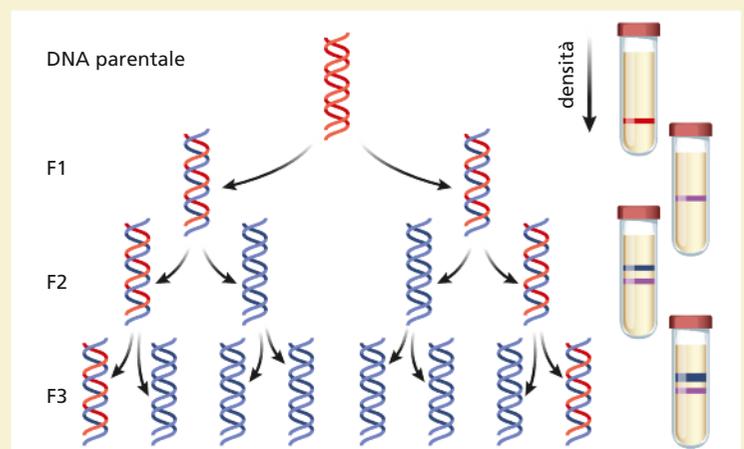
minuti, venne ripetuto l'esame e i ricercatori osservarono due bande: una in posizione superiore e un'altra nella stessa posizione di quella dell'esperimento precedente.

L'analisi di questi risultati sperimentali dimostra che le tre bande corrispondono rispettivamente a:

- un DNA più pesante, in cui erano presenti due filamenti contenenti ^{15}N ;
- un DNA con peso intermedio, in cui era presente un filamento con ^{15}N e uno con ^{14}N ;
- un DNA più leggero, in cui erano presenti due filamenti entrambi contenenti ^{14}N .

L'unico modello capace di spiegare i pesi delle molecole di DNA ottenuti sperimentalmente era quello della replicazione semiconservativa.

Figura
Schema che rappresenta i dati sperimentali dell'esperimento di Meselson e Stahl.



4. LA STRUTTURA DEI GENOMI

I PROCARIOTI CONTENGONO UN SINGOLO CROMOSOMA CIRCOLARE E PIÙ PLASMIDI

Il patrimonio genetico di una cellula procariotica è costituito da un **cromosoma circolare** formato da una sola molecola di DNA a doppio filamento. Il cromosoma di *E. coli* contiene circa 4,6 milioni di paia di basi e, se completamente svolto, misura circa 1 mm. La cellula batterica che lo contiene, però, è lunga meno di 2 μm , cioè circa 1/500 della lunghezza del cromosoma. Ciò è possibile soltanto perché, all'interno della cellula, il cromosoma è compattato a formare una struttura dall'aspetto irregolare detta **nucleoide**, in cui il DNA è associato a proteine. Il nucleoide non è delimitato da una membrana e si trova, quindi, a contatto diretto con il citoplasma.

Oltre al DNA cromosomico, però, molti batteri possiedono anche altre molecole circolari di DNA chiamate **plasmidi** (Figura 23), che possono contenere da poche decine a qualche centinaio di geni. Come il cromosoma batterico, anche i plasmidi possiedono un punto di origine della replicazione e si possono replicare autonomamente: alcuni plasmidi lo fanno contemporaneamente al cromosoma, mentre altri si replicano con una frequenza maggiore, perciò, in una cellula se ne possono trovare anche 50 copie.

Molti di questi plasmidi possono conferire particolari caratteristiche ai batteri: per esempio, la resistenza agli antibiotici, trasferire informazioni ad altri batteri, degradare gli idrocarburi.

GLI EUCARIOTI HANNO UN GENOMA PIÙ COMPLESSO DEI PROCARIOTI

Per molto tempo i procarioti sono stati gli unici organismi impiegati come modello per lo studio della genetica molecolare; in seguito all'avvento della genetica moderna, però, è stato possibile estendere le ricerche anche agli eucarioti, dalle specie unicellulari fino agli organismi pluricellulari.

Oggi sappiamo che il genoma eucariotico presenta notevoli differenze rispetto a quello dei procarioti.

In primo luogo, il genoma eucariotico è più grande di quello procariotico ed è suddiviso in numerosi **cromosomi lineari**. La maggior parte degli eucarioti è costituita da organismi pluricellulari formati da cellule altamente specializzate a svolgere diverse attività; tale complessità richiede un gran numero di proteine diverse, tutte codificate nei numerosi geni del DNA.

In secondo luogo, nel genoma eucariotico esistono *molte sequenze ripetute*, cioè sequenze di nucleotidi presenti in più di una copia. La maggior parte di tali sequenze non contiene informazioni per la sintesi delle proteine, ma può avere funzioni regolatrici oppure è possibile che svolga funzioni per noi ancora sconosciute. Il genoma eucariotico, infatti, è soggetto a una regolazione genica molto più articolata e fine rispetto a quella che caratterizza il genoma procariotico a causa della maggiore complessità generale degli eucarioti rispetto ai batteri.

Figura 23

Quando la cellula si divide, i plasmidi (in giallo e in verde) possono replicarsi in modo autonomo dal cromosoma batterico (in azzurro).

