CAPITOLO

3

La struttura della cellula: procarioti ed eucarioti

Un batterio e una cellula del tuo fegato hanno in comune più di quanto sembri; ma dentro la seconda c'è un'intera città.

OBIETTIVI

1. Riconoscere le strutture comuni a tutte le cellule e distinguere una cellula procariotica da una eucariotica.
2. Descrivere la cellula procariotica: nucleoide, plasmidi, ribosomi, parete, capsula, pili e flagello.
3. Descrivere struttura e funzione del nucleo e degli organuli della cellula eucariotica e seguire il percorso di una proteina di secrezione.
4. Confrontare cellula animale e cellula vegetale e distinguere organismi unicellulari, coloniali e pluricellulari.
5. Esporre la teoria endosimbiontica e gli indizi che la sostengono.

INDICE DEL CAPITOLO

3.1 Che cosa hanno in comune tutte le cellule 2
3.2 La cellula procariotica 4
3.3 La cellula eucariotica: il nucleo e le membrane interne 6
3.4 Mitocondri, cloroplasti e citoscheletro 10
3.5 Cellula animale e cellula vegetale; dagli unicellulari ai pluricellulari 12
3.6 L'origine della cellula eucariotica: la teoria endosimbiontica 15

Scienze naturali 2 · Parte I · La cellula · versione 1.0
Capitolo 3: La struttura della cellula: procarioti ed eucarioti · pagine 65–86 del volume completo · estratto per lo studio

Nel Capitolo 1 hai osservato al microscopio le cellule della cipolla e della mucosa boccale; nel Capitolo 2 hai visto di quali molecole sono fatte. Ora apriamo la cellula. Il microscopio ottico ne mostra poco più del contorno e del nucleo; è stato il microscopio elettronico, dagli anni Cinquanta del Novecento, a rivelare che il citoplasma è attraversato da membrane, sacchi e tubuli, ognuno con un compito preciso.

Scopriremo che esistono due grandi tipi di cellule. Quelle dei batteri sono piccole e, almeno in apparenza, semplici; quelle di animali, piante, funghi e protisti sono molto più grandi e divise al loro interno in compartimenti, come una casa è divisa in stanze. Capire questa differenza, e da dove è venuta, è il primo passo per orientarsi nell'enorme varietà dei viventi che incontrerai nella Parte III.

3.1 Che cosa hanno in comune tutte le cellule

Una cellula di lievito, un neurone, un batterio dello yogurt e una cellula della foglia di un pomodoro sembrano non avere nulla in comune. Eppure, se le osserviamo con attenzione, ritroviamo in tutte quattro componenti fondamentali.

- La **membrana plasmatica**, un sottile doppio strato di fosfolipidi e proteine (Capitolo 2) che delimita la cellula, la separa dall'ambiente esterno e controlla che cosa entra e che cosa esce. La studieremo nel Capitolo 4.
- Il **citoplasma**, cioè tutto ciò che sta dentro la membrana. La sua parte liquida, il **citosol**, è una soluzione acquosa densa di ioni, zuccheri, amminoacidi ed enzimi, in cui avvengono molte reazioni chimiche della cellula.
- I **ribosomi**, piccole strutture fatte di RNA e proteine, prive di membrana, che costruiscono le proteine. Sono così piccoli (circa 20–30 nm) che al microscopio elettronico appaiono come puntini.
- Il **DNA**, la molecola che conserva l'informazione ereditaria e che passa alle cellule figlie quando la cellula si divide.

Su questa base comune si costruiscono due piani di organizzazione molto diversi. Nella **cellula procariotica** il DNA si trova direttamente nel citoplasma, senza una membrana che lo racchiuda. Nella **cellula eucariotica** il DNA è chiuso in un **nucleo** delimitato da membrane, e il citoplasma contiene molti **organuli**, strutture specializzate circondate da una o due membrane. I nomi vengono dal greco: *káryon* significa «nocciolo», cioè nucleo; *pró* significa «prima» ed *eû* «bene». Procarioti sono le cellule «prima del nucleo», eucarioti quelle «con un vero nucleo».

La differenza riguarda anche le dimensioni. Un batterio tipico misura 1–2 µm, una cellula eucariotica 10–100 µm. Nella Figura 3.1 una cellula eucariotica di 20 µm di diametro, un batte-

rio e alcuni mitocondri sono disegnati alla stessa scala: il batterio è grande più o meno quanto uno solo degli organuli della cellula eucariotica. In proporzione, è come confrontare un'automobile con un palazzo.

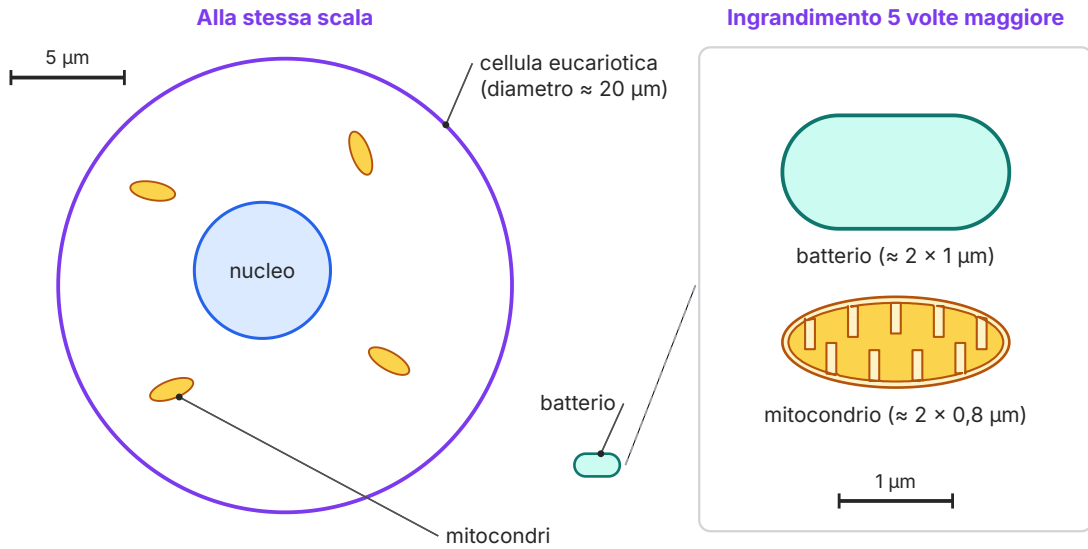


Figura 3.1 Dimensioni a confronto: una cellula eucariotica di circa 20 µm, un batterio di circa 2 µm e i mitocondri (circa 2 × 0,8 µm). A sinistra tutto è alla stessa scala; a destra il batterio e un mitocondrio sono ingranditi 5 volte di più.

ESEMPIO SVOLTO

Quante volte più grande?

Problema. Confronta il volume di una cellula eucariotica con quello di un batterio usando un modello semplice: la cellula è un cubo di 20 µm di lato, il batterio un parallelepipedo di 2 µm × 1 µm × 1 µm. Calcola anche il rapporto superficie/volume (S/V) dei due modelli.

Volumi. Cellula: $V = (20\ \mu m)^3 = 8000\ \mu m^3$. Batterio: $V = 2\ \mu m \times 1\ \mu m \times 1\ \mu m = 2\ \mu m^3$. Rapporto: 8000 : 2 = 4000. Nel volume della cellula eucariotica starebbero circa 4000 batteri.

Superfici. Cellula: $S = 6 \times (20\ \mu m)^2 = 2400\ \mu m^2$, quindi $S/V = 2400/8000 = 0{,}3\ \mu m^{-1}$. Batterio: $S = 2 \times (2 \times 1 + 2 \times 1 + 1 \times 1)\ \mu m^2 = 10\ \mu m^2$, quindi $S/V = 10/2 = 5\ \mu m^{-1}$.

Commento. Ogni micrometro cubo del batterio ha a disposizione una superficie di scambio circa 17 volte maggiore (5 : 0,3 ≈ 17). Come hai visto nel Capitolo 1, una cellula grande ha poca superficie rispetto al suo volume: la cellula eucariotica compensa questo svantaggio dividendo il suo interno in compartimenti, ciascuno con le proprie membrane.

DA RICORDARE

Tutte le cellule hanno membrana plasmatica, citoplasma, ribosomi e DNA. **Solo le eucariotiche** hanno un nucleo delimitato da membrane e organuli con membrana. Procariote non significa «senza DNA», ma «senza nucleo».

3.2 La cellula procariotica

Sono procarioti i batteri e gli archei, due dei tre grandi gruppi in cui oggi si dividono i viventi (li conoscerai meglio nei Capitoli 11 e 12). I **Bacteria** comprendono le specie più familiari: quelle che fanno fermentare il latte, quelle che vivono nel nostro intestino, quelle che causano malattie come la tubercolosi. Gli **Archaea** somigliano ai batteri nell'aspetto, ma ne differiscono per la chimica della membrana e della parete; molti vivono in ambienti estremi, come sorgenti calde o acque molto salate, ma se ne trovano anche nel suolo, negli oceani e nell'intestino umano.

La Figura 3.2 mostra lo schema di un batterio a bastoncello, lungo circa 2 µm, come *Escherichia coli*. Procedendo dall'interno verso l'esterno incontriamo:

- il **nucleoide**, la regione del citoplasma occupata dal DNA. Di solito è un'unica molecola circolare, molto lunga e ripiegata su sé stessa, che non è separata dal resto del citoplasma da alcuna membrana;
- i **plasmidi**, piccole molecole circolari di DNA in più, che si duplicano per conto proprio e possono passare da un batterio all'altro. Spesso portano geni utili in situazioni particolari, per esempio quelli che rendono il batterio resistente a un antibiotico;
- i ribosomi, numerosissimi, più piccoli e un po' diversi da quelli delle cellule eucariotiche;
- la membrana plasmatica, che nei procarioti svolge anche compiti che negli eucarioti spettano agli organuli, come produrre gran parte dell'energia della cellula;
- la **parete cellulare**, uno strato rigido esterno alla membrana che dà forma alla cellula e le impedisce di scoppiare quando assorbe acqua. Nei batteri è fatta di **peptidoglicano**, un polimero di zuccheri e amminoacidi che non esiste negli eucarioti;
- in molte specie, una **capsula** di sostanze viscose, che protegge dalla disidratazione e, nei batteri che causano malattie, dalle difese dell'organismo ospite.

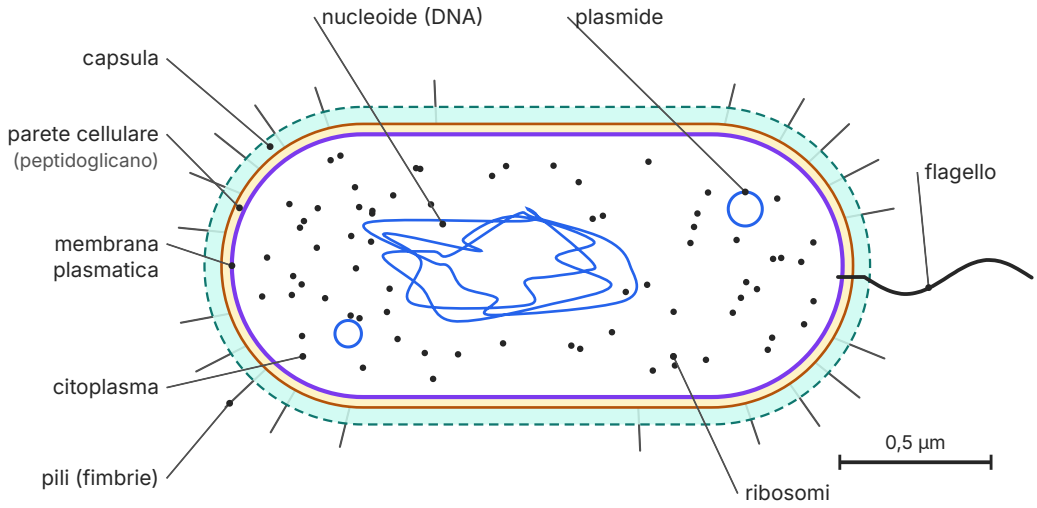


Figura 3.2 Schema di una cellula procariotica a bastoncello (un batterio di circa 2 µm). I ribosomi sono disegnati più grandi del reale per renderli visibili.

All'esterno molti batteri portano anche appendici. I **pili** (o **fimbrie**), corti e numerosi, servono ad aderire alle superfici, per esempio alle cellule dell'intestino o delle vie urinarie; un pilo più lungo, presente in alcuni batteri, permette di trasferire plasmidi da una cellula all'altra. Il **flagello** batterico è un lungo filamento di proteine che ruota come l'elica di una barca e spinge la cellula. Pur avendo lo stesso nome, ha una struttura del tutto diversa dal flagello degli spermatozoi, che incontreremo più avanti in questo capitolo.

Piccola e senza compartimenti non vuol dire poco riuscita: i procarioti si riproducono in fretta, colonizzano quasi ogni ambiente del pianeta e svolgono funzioni indispensabili agli ecosistemi, come la decomposizione.

ERRORE FREQUENTE

«I batteri non hanno DNA né ribosomi». Falso: li hanno, come ogni cellula. Ai procarioti mancano il nucleo e gli organuli circondati da membrana, non il materiale genetico né le strutture che producono le proteine. Ed è falso anche che i batteri siano tutti dannosi: la grande maggioranza è innocua o utile, e senza i batteri del nostro intestino digeriremmo peggio molti alimenti.

COLLEGAMENTI

Perché gli antibiotici colpiscono i batteri e non noi. Un buon farmaco antibatterico deve colpire una struttura che i batteri hanno e le nostre cellule no. La penicillina, scoperta da Alexander Fleming nel 1928, impedisce ai batteri di costruire la parete di peptidoglicano: la cellula batterica che cresce senza una parete integra finisce per scoppiare, mentre le cellule umane, che non hanno parete, non vengono danneggiate. Altri antibiotici si legano ai ribosomi batterici, diversi dai nostri. Per lo stesso motivo gli antibiotici **non servono contro i virus**, come quelli del raffreddore e dell'influenza: i virus non sono cellule e non hanno né parete né ribosomi (Capitolo 12). Usarli senza bisogno favorisce la diffusione dei batteri resistenti, i cui geni di resistenza viaggiano spesso sui plasmidi.

3.3 La cellula eucariotica: il nucleo e le membrane interne

La Figura 3.3 mostra una cellula animale come appare combinando molte immagini al microscopio elettronico. La prima cosa che colpisce è la quantità di membrane. Oltre alla membrana plasmatica, il citoplasma è percorso da un vero **sistema delle membrane interne**: involucro nucleare, reticolo endoplasmatico, apparato di Golgi, vescicole e lisosomi. Queste strutture sono collegate fra loro, direttamente o grazie a piccole vescicole che si staccano da una membrana e si fondono con un'altra, e dividono la cellula in compartimenti, ognuno con un proprio contenuto chimico.

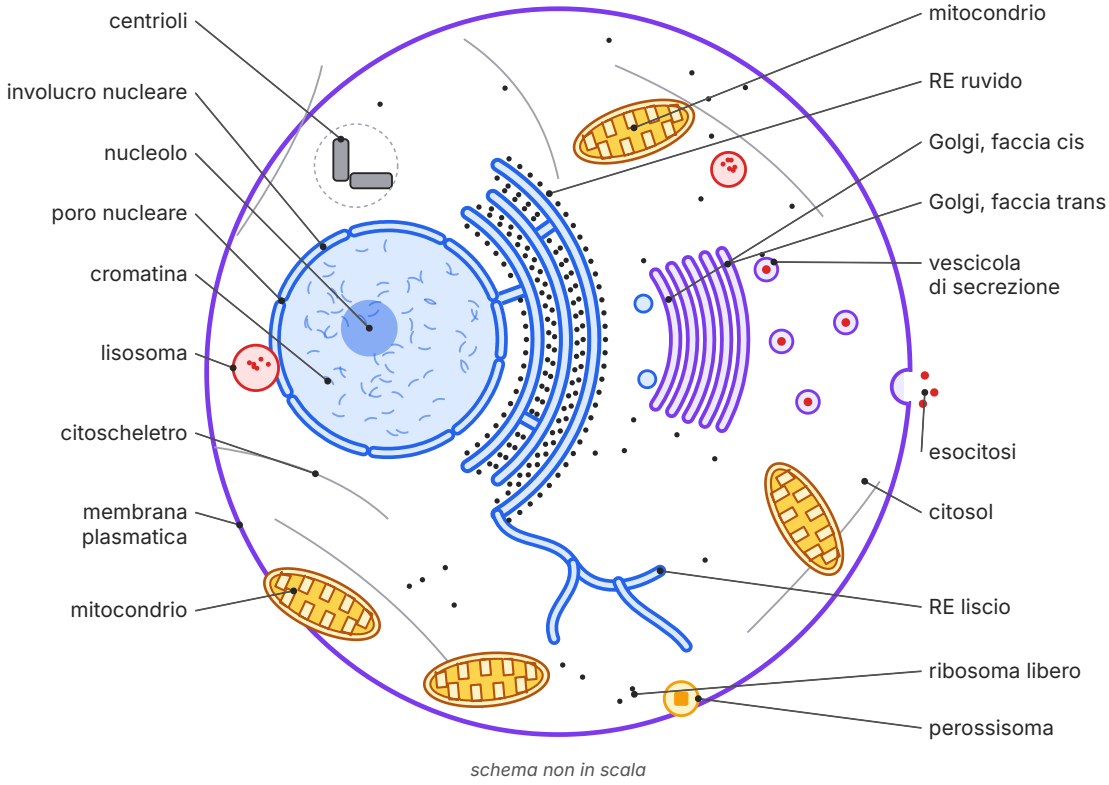


Figura 3.3 Una cellula animale in sezione (schema non in scala). Il reticolo endoplasmatico ruvido (RE ruvido) è continuo con l'involucro nucleare; l'apparato di Golgi riceve le vescicole dal reticolo sulla faccia *cis* e le spedisce dalla faccia *trans*.

3.3.1 Il nucleo

Il **nucleo** è di solito l'organulo più grande della cellula eucariotica, con un diametro di circa 5–10 µm; fu descritto e chiamato così dal botanico scozzese Robert Brown nel 1831. Contiene quasi tutto il DNA della cellula ed è quindi il suo centro di controllo: le «istruzioni» per costruire le proteine partono da qui.

Il nucleo è circondato dall'**involucro nucleare**, formato da **due membrane** separate da uno stretto spazio. L'involucro è attraversato da migliaia di **pori nucleari**, aperture in cui le due membrane si uniscono e che sono regolate da grandi complessi di proteine: da qui escono verso il citoplasma le molecole di RNA che portano le istruzioni, ed entrano le proteine che servono nel nucleo.

All'interno, il DNA è associato a proteine e forma la **cromatina**, che nella cellula che non si divide è distesa e appare come una trama granulosa. Quando la cellula si prepara a dividersi, la cromatina si condensa in bastoncelli ben visibili, i **cromosomi** (Capitolo 6). Nel nucleo si vede

infine una zona più scura e compatta, il **nucleolo**, dove si fabbricano e si assemblano le parti che compongono i ribosomi; queste escono poi dai pori e completano il loro montaggio nel citoplasma.

3.3.2 Il reticolo endoplasmatico

Il **reticolo endoplasmatico** (RE) è una rete di sacchi appiattiti e di tubuli che si estende nel citoplasma. La sua membrana è in continuità con la membrana esterna dell'involucro nucleare, e il suo spazio interno, il **lume**, comunica con lo spazio fra le due membrane del nucleo. Se ne distinguono due parti.

- Il **reticolo endoplasmatico ruvido** (RER) è formato soprattutto da sacchi appiattiti e deve il nome ai ribosomi attaccati alla sua superficie esterna, che al microscopio elettronico la fanno apparire granulosa. Questi ribosomi producono le proteine destinate a essere esportate dalla cellula, a far parte delle membrane o a finire nei lisosomi: man mano che vengono costruite, le proteine entrano nel lume del reticolo.
- Il **reticolo endoplasmatico liscio** (REL) è fatto soprattutto di tubuli e non ha ribosomi. Vi si producono i lipidi, come i fosfolipidi delle membrane e gli ormoni steroidei; nelle cellule del fegato contribuisce a rendere meno tossiche molte sostanze, come alcuni farmaci e l'alcol; nelle cellule muscolari immagazzina ioni calcio, che servono alla contrazione.

Accanto ai ribosomi del RER, nel citosol si trovano molti **ribosomi liberi**: sono identici, ma producono le proteine che restano nel citosol, come gli enzimi che vi lavorano.

3.3.3 L'apparato di Golgi, i lisosomi e i perossisomi

L'**apparato di Golgi** è una pila di 4–8 sacchi appiattiti e un po' incurvati, detti cisterne, circondati da piccole vescicole. Fu descritto nel 1898 dal medico italiano Camillo Golgi, che lo osservò nelle cellule nervose grazie a una colorazione a base di sali d'argento da lui stesso inventata; per decenni molti lo considerarono un artefatto della colorazione, finché il microscopio elettronico non ne confermò l'esistenza.

L'apparato di Golgi ha una polarità. La **faccia *cis*** è rivolta verso il reticolo endoplasmatico e riceve le vescicole che arrivano da lì; la **faccia *trans*** è rivolta verso la membrana plasmatica e da essa si staccano le vescicole in partenza. Passando da una cisterna all'altra, le proteine vengono modificate (per esempio vi si attaccano catene di zuccheri), poi smistate e «impacchettate» in vescicole diverse a seconda della destinazione: la membrana plasmatica, l'esterno della cellula, i lisosomi.

I **lisosomi** sono vescicole delimitate da una membrana e piene di enzimi digestivi, prodotti dal RER e spediti dal Golgi. Digeriscono le particelle che la cellula ha inglobato (un globulo bianco, per esempio, demolisce così i batteri catturati) e gli organuli vecchi o danneggiati, i cui materiali vengono riciclati. La membrana del lisosoma tiene gli enzimi separati dal citosol: è un buon esempio del vantaggio dei compartimenti.

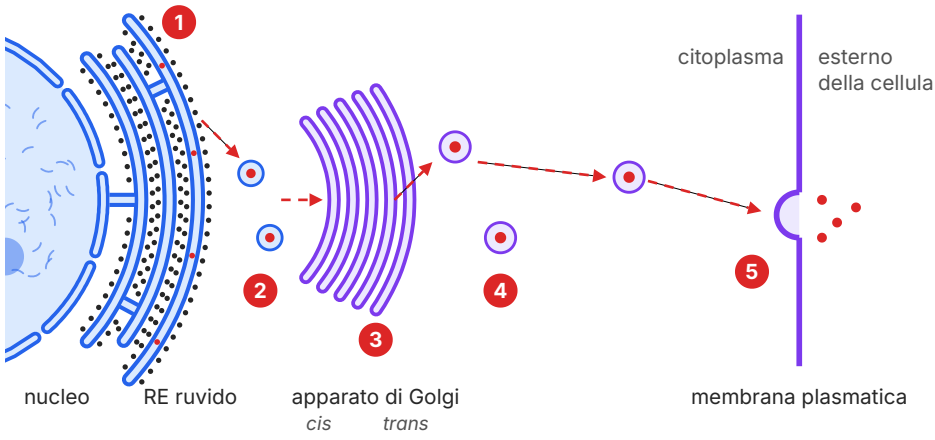
I **perossisomi** sono piccoli organuli delimitati da una membrana, che contengono enzimi capaci di demolire varie sostanze, tra cui gli acidi grassi. In queste reazioni si forma perossido di idrogeno (H_2O_2, l'acqua ossigenata), dannoso per la cellula, che un altro enzima del perossisoma, la **catalasi**, decompone subito in acqua e ossigeno:

$$2\ H_2O_2 \rightarrow 2\ H_2O + O_2$$

È la stessa reazione che vedi quando versi acqua ossigenata su una ferita o su una fetta di patata cruda: le bollicine sono ossigeno, liberato dalla catalasi delle cellule.

3.3.4 Il percorso di una proteina di secrezione

Molte cellule producono proteine destinate all'esterno: le cellule del pancreas, per esempio, secernono gli enzimi della digestione, quelle delle ghiandole salivari gli enzimi della saliva. Il percorso che compie una di queste proteine collega fra loro gli organuli che abbiamo appena descritto (Figura 3.4).



1. Il ribosoma attaccato al RE ruvido produce la proteina, che entra nel lume del reticolo.
2. Una vescicola di trasporto si stacca dal RE e la porta alla faccia *cis* del Golgi.
3. Nel Golgi la proteina è modificata e smistata, dalla faccia *cis* alla faccia *trans*.
4. Una vescicola di secrezione si stacca dalla faccia *trans* e raggiunge la membrana.
5. La vescicola si fonde con la membrana: il contenuto esce dalla cellula (esocitosi).

Figura 3.4 La via di secrezione: una proteina passa dal RE ruvido all'apparato di Golgi e da qui, in una vescicola, alla membrana plasmatica, con cui la vescicola si fonde liberando la proteina all'esterno (esocitosi; schema non in scala).

1. Un ribosoma attaccato al RER costruisce la proteina, che entra nel lume del reticolo.

2. Una piccola **vescicola di trasporto** si stacca dal reticolo e porta la proteina fino alla faccia *cis* dell'apparato di Golgi.
3. Nel Golgi la proteina viene modificata e smistata, passando dalla faccia *cis* alla faccia *trans*.
4. Dalla faccia *trans* si stacca una vescicola di secrezione, che si muove verso la membrana plasmatica.
5. La vescicola si fonde con la membrana plasmatica e il suo contenuto viene liberato all'esterno: questo processo si chiama **esocitosi** (Capitolo 4).

Nota che la proteina, una volta entrata nel reticolo, non torna mai nel citosol: viaggia sempre dentro compartimenti delimitati da membrana, finché la vescicola non si apre verso l'esterno.

APPROFONDIMENTO

Approfondimento · Seguire una proteina con la radioattività. Negli anni Sessanta del Novecento il biologo di origine romena George Palade e i suoi collaboratori ricostruirono questo percorso nelle cellule del pancreas di cavia. Fornirono alle cellule, per pochi minuti, amminoacidi resi radioattivi, che venivano incorporati nelle proteine appena prodotte; poi li sostituirono con amminoacidi normali. Fissando le cellule a intervalli di tempo crescenti e cercando la radioattività nelle immagini al microscopio elettronico, videro le proteine marcate comparire prima nel RE ruvido, poi nel Golgi, poi nelle vescicole di secrezione. Nel 1974 Palade ricevette il premio Nobel per la medicina insieme ad Albert Claude e a Christian de Duve, lo scopritore dei lisosomi, per le loro scoperte sull'organizzazione della cellula.

3.4 Mitocondri, cloroplasti e citoscheletro

3.4.1 I mitocondri

I **mitocondri** sono gli organuli in cui avviene la **respirazione cellulare**: qui l'energia contenuta nelle molecole del cibo, come il glucosio, viene trasferita all'ATP, la «moneta energetica» della cellula (Capitolo 5). Sono lunghi di solito 1–2 µm e hanno una forma a bastoncello o a fagiolo, che può cambiare nel tempo.

Un mitocondrio è delimitato da **due membrane**. Quella esterna è liscia; quella interna è ripiegata molte volte in pieghe dette **creste**, che ne aumentano di molto la superficie, e racchiude una soluzione densa di enzimi, la **matrice** (il mitocondrio ingrandito nella figura 3.1). Nella matrice si trovano anche ribosomi e un piccolo DNA circolare, proprio del mitocondrio.

Il numero di mitocondri dipende da quanta energia la cellula consuma: sono numerosissimi nelle cellule muscolari, in quelle del fegato e nel tratto iniziale della coda degli spermatozoi, dove alimentano il movimento del flagello. Le cellule vegetali hanno mitocondri esattamente come quelle animali, perché anche le piante respirano, giorno e notte.

3.4.2 I cloroplasti e gli altri plastidi

I **cloroplasti** sono gli organuli della **fotosintesi**: catturano l'energia della luce e la usano per costruire zuccheri a partire da anidride carbonica e acqua (Capitolo 5). Si trovano nelle cellule delle piante esposte alla luce, soprattutto nelle foglie, e nelle alghe; sono più grandi dei mitocondri, lunghi circa 5 µm, e una cellula di foglia può contenerne alcune decine.

Anche il cloroplasto ha **due membrane**. All'interno, immerse in un liquido denso detto **stroma**, si trovano pile di sacchetti appiattiti, i **tilacoidi**: ogni pila si chiama **granum** (al plurale **grana**), e le pile sono collegate fra loro da tilacoidi allungati. Nelle membrane dei tilacoidi c'è la **clorofilla**, il pigmento verde che assorbe la luce. Come i mitocondri, i cloroplasti hanno ribosomi e un DNA circolare propri.

I cloroplasti appartengono a una famiglia di organuli vegetali detti **plastidi**. Altri plastidi non fanno fotosintesi: gli **amiloplasti**, abbondanti nelle cellule della patata, accumulano amido; i **cromoplasti** contengono pigmenti gialli, arancioni o rossi, e danno il colore alla carota, al pomodoro maturo e ai petali di molti fiori.

> **ERRORE FREQUENTE**
>
> **«Le piante hanno i cloroplasti, gli animali i mitocondri».** No: le cellule vegetali hanno sia cloroplasti sia mitocondri, perché fanno la fotosintesi ma anche la respirazione cellulare. E non tutte le cellule di una pianta hanno cloroplasti: ne sono prive, per esempio, le cellule delle radici e quelle del bulbo di cipolla che hai osservato nel Capitolo 1, che vivono al buio.

3.4.3 Il citoscheletro, i centrioli, le ciglia e i flagelli

Il citoplasma della cellula eucariotica non è un liquido informe: è attraversato dal **citoscheletro**, una rete di filamenti di proteine che dà forma alla cellula, tiene gli organuli al loro posto e permette i movimenti. Comprende tre tipi di filamenti, che si distinguono per spessore e funzione:

- i **microfilamenti** (circa 7 nm di diametro), fatti della proteina actina, responsabili dei cambiamenti di forma della cellula e, nelle cellule muscolari, della contrazione;
- i **filamenti intermedi** (circa 10 nm), cavi resistenti alla trazione che rinforzano la cellula; nelle cellule della pelle sono fatti di cheratina;
- i **microtubuli** (circa 25 nm), tubi cavi della proteina tubulina, lungo i quali le vescicole e gli organuli vengono trasportati come su binari; durante la divisione cellulare formano il fuso che separa i cromosomi (Capitolo 6).

Nelle cellule animali, vicino al nucleo, si trova una coppia di **centrioli**, piccoli cilindri formati da nove gruppi di microtubuli e disposti ad angolo retto fra loro, al centro di una regione da cui

partono i microtubuli. Le cellule delle piante con fiore non hanno centrioli, eppure organizzano ugualmente i loro microtubuli.

Molte cellule eucariotiche hanno infine **ciglia** (corte e numerose) o **flagelli** (lunghi e pochi), sporgenze mobili rivestite dalla membrana plasmatica e sostenute da microtubuli disposti in uno schema caratteristico: nove coppie in cerchio attorno a due microtubuli centrali, la cosiddetta struttura «9 + 2». Le ciglia delle cellule che rivestono la trachea spingono il muco, con la polvere e i microbi intrappolati, verso la gola; il flagello dello spermatozoo lo fa nuotare.

IN SINTESI

Chi fa che cosa nella cellula eucariotica

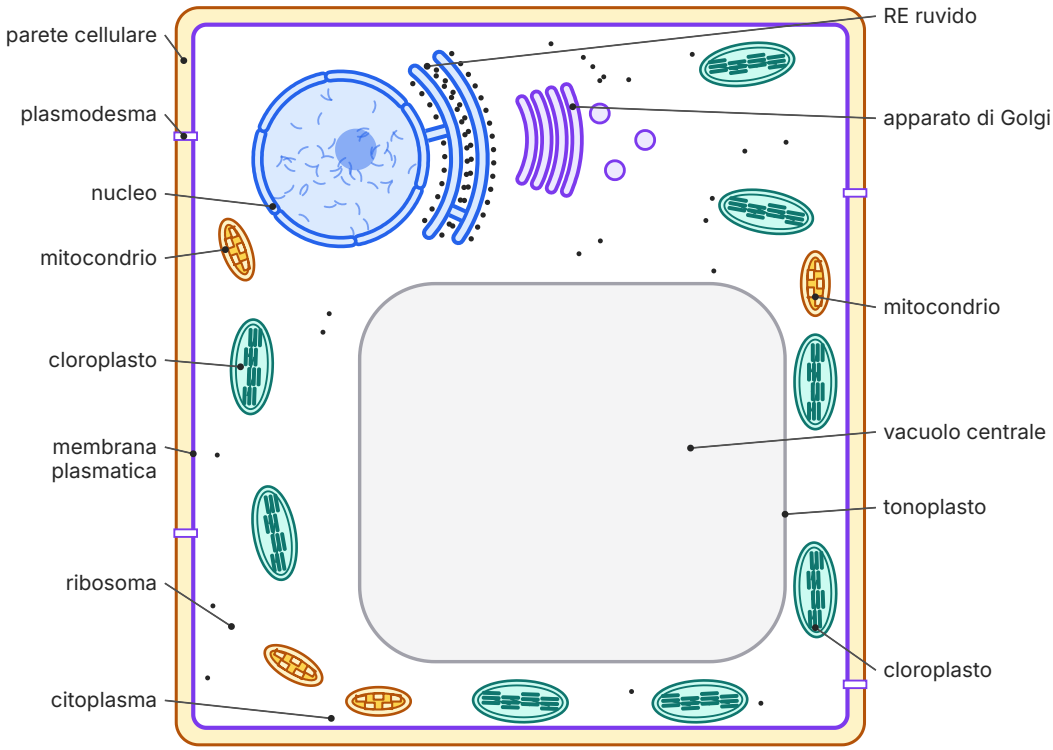
- **nucleo**: conserva il DNA e controlla l'attività della cellula; il nucleolo produce le parti dei ribosomi;
- **ribosomi**: costruiscono le proteine (liberi nel citosol o attaccati al RER);
- **RE ruvido**: proteine da esportare o da inserire nelle membrane; **RE liscio**: lipidi, detossificazione;
- **apparato di Golgi**: modifica, smista e spedisce (*cis* → *trans*);
- **lisosomi**: digestione; **perossisomi**: demolizioni che producono H_2O_2, subito decomposta;
- **mitocondri**: respirazione cellulare; **cloroplasti**: fotosintesi;
- **citoscheletro**: forma, sostegno, trasporto interno e movimento.

3.5 Cellula animale e cellula vegetale; dagli unicellulari ai pluricellulari

Le cellule delle piante hanno tutti gli organuli che abbiamo descritto nella cellula animale, ma presentano anche alcune strutture proprie (Figura 3.5).

- Una **parete cellulare** di **cellulosa**, il polisaccaride del Capitolo 2, esterna alla membrana plasmatica. Le fibre di cellulosa la rendono robusta: è la parete che dà al legno e alle fibre vegetali, come il cotone, la loro resistenza. Anche i funghi hanno una parete, ma fatta di chitina, e i batteri, ma fatta di peptidoglicano: la parola «parete» indica strutture chimicamente diverse.
- I **plasmodesmi**, sottili canali che attraversano la parete e mettono in comunicazione il citoplasma di cellule vicine, permettendo il passaggio di acqua e piccole molecole.
- I cloroplasti e gli altri plastidi.
- Un grande **vacuolo centrale**, delimitato da una membrana detta **tonoplasto**, che nelle cellule mature può occupare la maggior parte del volume e spinge il citoplasma in uno strato sottile contro la parete. Contiene acqua, sali, zuccheri, pigmenti (il colore rosso-violetto del cavolo rosso è nei vacuoli) e sostanze di rifiuto o di difesa.

Il vacuolo centrale ha un ruolo meccanico importante. Quando la cellula è ben rifornita d'acqua, il vacuolo si gonfia e preme il citoplasma contro la parete, che resiste: la cellula si trova in uno stato di tensione detto **turgore**, che mantiene rigidi gli steli e le foglie delle piante erbacee. Se la pianta perde più acqua di quanta ne assorbe, i vacuoli si svuotano, il turgore cala e la pianta appassisce. Vedrai nel Capitolo 4 come e perché l'acqua entra ed esce dalle cellule.



schema non in scala

Figura 3.5 Una cellula vegetale di foglia in sezione (schema non in scala). Rispetto alla cellula animale compaiono la parete di cellulosa con i plasmodesmi, i cloroplasti e il grande vacuolo centrale; mancano i centrioli.

Le differenze fra i tre tipi di cellula che abbiamo studiato sono riassunte nella Tabella 3.1.

Tabella 3.1 Cellula procariotica, cellula animale e cellula vegetale a confronto.

	Procariotica (batterio)	Eucariotica animale	Eucariotica vegetale
Dimensioni tipiche	1–2 µm	10–30 µm	10–100 µm
DNA	nel nucleoide, circolare; plasmidi	nel nucleo (e nei mitocondri)	nel nucleo (e in mitocondri e cloroplasti)
Nucleo con involucro	no	sì	sì
Ribosomi	sì, più piccoli	sì	sì
RE, Golgi, lisosomi	no	sì	sì (funzioni digestive svolte anche dal vacuolo)
Mitocondri	no	sì	sì
Cloroplasti	no	no	sì, nelle parti verdi
Parete cellulare	sì, di peptidoglicano (batteri)	no	sì, di cellulosa
Vacuolo centrale	no	no (piccoli vacuoli)	sì
Centrioli	no	sì	no (piante con fiore)
Citoscheletro	proteine simili, più semplici	sì	sì

3.5.1 Unicellulari e pluricellulari

Molti organismi sono formati da una sola cellula: tutti i procarioti e molti eucarioti, come il lievito, il paramecio e numerose alghe. In un organismo **unicellulare** la stessa cellula deve svolgere tutte le funzioni vitali: nutrirsi, eliminare i rifiuti, rispondere agli stimoli, riprodursi.

Esistono anche situazioni intermedie. Alcune alghe verdi vivono in **colonie**, gruppi di cellule che restano unite dopo la divisione: il *Volvox* è una sfera cava di centinaia o migliaia di cellule (a seconda della specie) dotate di flagelli che battono in modo coordinato, e solo alcune cellule, più grandi, si occupano della riproduzione. È un primo esempio di divisione dei compiti.

In un organismo **pluricellulare** le cellule sono specializzate: durante lo sviluppo, cellule che derivano tutte da un'unica cellula iniziale diventano diverse per forma e funzione, un processo chiamato **differenziamento cellulare**. Cellule simili, che svolgono insieme la stessa funzione, formano un **tessuto**, come il tessuto muscolare o quello nervoso; più tessuti formano un organo (Capitolo 1). Il corpo umano conta più di 200 tipi di cellule diversi, che contengono tutti lo stesso DNA ma ne usano parti diverse.

ESPERIENZA DI LABORATORIO

Cloroplasti in movimento e granuli di amido

Scopo: osservare i cloroplasti in cellule vegetali vive e riconoscere gli amiloplasti con un colorante.

Materiale: microscopio ottico, vetrini e coprioggetto, contagocce, pinzette, una fogliolina di *Elodea* (pianta d'acquario), una patata cruda, un taglierino (usato dall'insegnante), soluzione di Lugol, guanti e occhiali di protezione.

Procedimento. (1) Stacca con le pinzette una fogliolina giovane di *Elodea* e montala in una goccia d'acqua, senza colorante. Osserva prima a 100× e poi a 400×. (2) Lascia la lampada accesa qualche minuto e osserva di nuovo una stessa cellula. (3) Gratta con il coprioggetto la superficie tagliata della patata e stendi il liquido torbido su un secondo vetrino. Osservalo, poi aggiungi una goccia di Lugol a un lato del coprioggetto e osserva ancora.

Sicurezza: il Lugol macchia la pelle e i vestiti ed è irritante per gli occhi: usa guanti e occhiali. Il taglio della patata spetta all'insegnante.

Risultati attesi. Nelle cellule di *Elodea* si vedono la parete, che ne disegna il contorno rettangolare, e numerosi cloroplasti verdi, lunghi pochi micrometri; spesso, dopo un po' di illuminazione, i cloroplasti scorrono lungo il bordo della cellula, trascinati dal movimento del citoplasma (**ciclosi**). Il vacuolo centrale, trasparente, non si vede direttamente: lo si riconosce dallo spazio vuoto al centro. Nel campione di patata si osservano granuli ovali con striature concentriche, che con il Lugol diventano blu-nero: sono gli amiloplasti pieni d'amido.

Domande. Perché i cloroplasti si vedono lungo i bordi e non al centro della cellula? Perché nelle cellule della patata non ci sono cloroplasti?

COLLEGAMENTI

La forma segue la funzione. Una cellula specializzata ha molto di ciò che le serve e poco del resto. Le cellule del pancreas che producono gli enzimi digestivi sono piene di RE ruvido e di vescicole di secrezione. Le cellule del fegato, che smaltiscono farmaci e alcol, sono ricche di RE liscio. Le fibre muscolari sono stipate di mitocondri e di filamenti contrattili. I globuli rossi dei mammiferi, maturando, perdono il nucleo e i mitocondri, lasciando più spazio all'emoglobina che trasporta l'ossigeno. E il fumo di sigaretta danneggia le ciglia della trachea: il muco ristagna, e per liberarsene il fumatore deve tossire.

3.6 L'origine della cellula eucariotica: la teoria endosimbiontica

I fossili e i confronti fra i viventi indicano che i procarioti sono comparsi molto prima degli eucarioti: per più di un miliardo di anni la vita sulla Terra è stata soltanto procariotica. Come si è formata, a partire da cellule procariotiche, una cellula tanto più complessa? Per il nucleo e il re-

ticolo endoplasmatico si pensa a ripiegamenti verso l'interno della membrana plasmatica, che avrebbero formato compartimenti interni. Per mitocondri e cloroplasti esiste invece una spiegazione più sorprendente.

Secondo la **teoria endosimbiontica**, proposta in forma completa dalla biologa statunitense Lynn Margulis nel 1967, mitocondri e cloroplasti discendono da **procarioti** che un tempo vivevano liberi e che furono inglobati da una cellula più grande senza essere digeriti. L'ospite e l'ospitato trassero vantaggio dalla convivenza: una relazione di questo tipo si chiama **simbiosi**, ed è detta **endosimbiosi** quando un organismo vive dentro l'altro (Figura 3.6).

- Un batterio capace di respirazione aerobica, cioè di usare l'ossigeno per ricavare molta energia dal cibo, venne inglobato da una cellula ospite e diventò, nel corso di moltissime generazioni, il **mitocondrio**. Da questa linea discendono tutti gli eucarioti.
- Più tardi, in una linea di queste cellule, venne inglobato un **cianobatterio**, un batterio capace di fotosintesi, che diventò il **cloroplasto**. Da questa linea discendono le alghe e le piante.

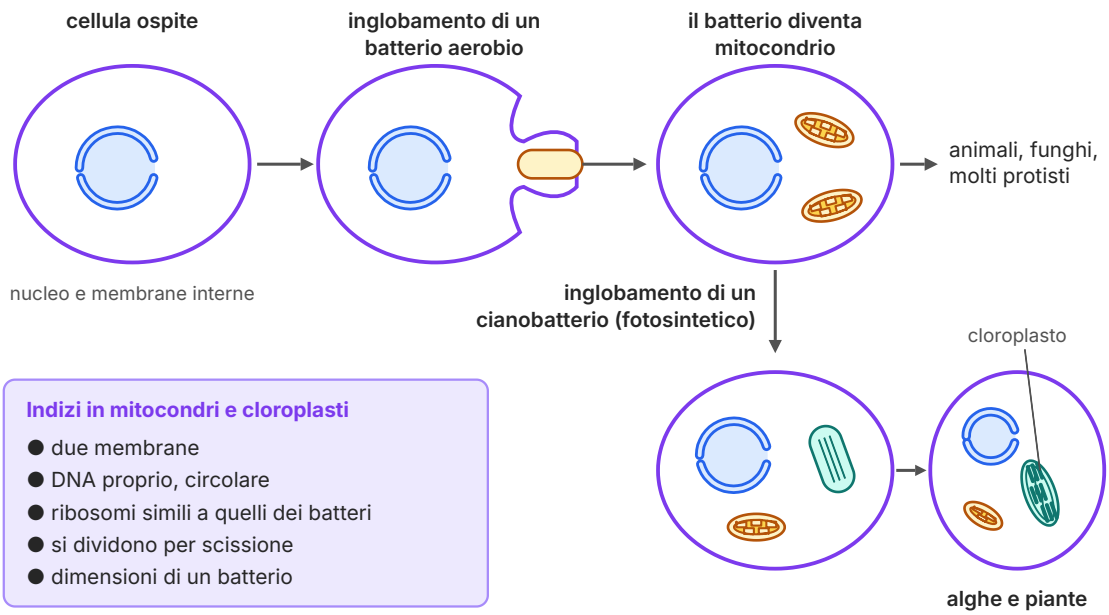


Figura 3.6 La teoria endosimbiontica in tappe (schema). Un batterio aerobio inglobato da una cellula ospite diventa il mitocondrio; in una delle linee discendenti, un cianobatterio inglobato diventa il cloroplasto. Nel riquadro, gli indizi che legano questi organuli ai batteri.

Non possiamo osservare un evento accaduto oltre un miliardo e mezzo di anni fa, ma possiamo verificare se mitocondri e cloroplasti conservano tracce della loro origine. E le conservano:

- hanno **due membrane**: quella interna corrisponderebbe alla membrana del batterio, quella esterna alla membrana della cellula ospite che lo ha avvolto;

- possiedono un **DNA proprio, circolare**, come quello dei batteri, che porta alcuni dei loro geni;
- hanno **ribosomi propri**, più simili a quelli dei batteri che a quelli del citosol della stessa cellula (ed è per questo che alcuni antibiotici rallentano anche il lavoro dei mitocondri);
- si formano solo da altri mitocondri o cloroplasti, dividendosi in due per **scissione**, come i batteri; una cellula che li perde non può più fabbricarli da zero;
- hanno le **dimensioni di un batterio**, come hai visto nella Figura 3.1.

Inoltre il DNA dei cloroplasti somiglia a quello dei cianobatteri, e quello dei mitocondri a quello di un gruppo di batteri che respirano ossigeno. Mitocondri e cloroplasti, però, non sono più organismi indipendenti: gran parte dei loro geni si è trasferita nel nucleo, e fuori dalla cellula non sopravvivono.

APPROFONDIMENTO

Approfondimento · Lynn Margulis e un'idea controcorrente. L'idea che i cloroplasti derivassero da organismi simbionti circolava già all'inizio del Novecento, ma era rimasta ai margini. Lynn Margulis (1938–2011) la estese ai mitocondri e la sostenne con dati di microbiologia, genetica e paleontologia in un articolo del 1967, firmato con il cognome del primo marito, Sagan. Accolta con scetticismo, l'ipotesi divenne una teoria condivisa quando i confronti fra il DNA degli organuli e quello dei batteri le diedero ragione: una teoria scientifica si afferma quando molte prove indipendenti convergono.

SINTESI

- Tutte le cellule hanno **membrana plasmatica**, **citoplasma** (con il citosol), **ribosomi** e **DNA**.
- Le **cellule procariotiche** (batteri e archei) misurano 1–2 µm e non hanno nucleo né organuli con membrana; le **eucariotiche** misurano 10–100 µm, hanno un nucleo e molti organuli.
- Nel procariote il DNA forma il **nucleoide**; ci sono spesso **plasmidi**. All'esterno della membrana si trovano la **parete** (di peptidoglicano nei batteri), talvolta la **capsula**, i **pili** e il **flagello**.
- Il **nucleo** ha un involucro di due membrane con **pori**; contiene la **cromatina** e il **nucleolo**, dove si producono le parti dei ribosomi.
- Il **RE ruvido**, con i ribosomi, è continuo con l'involucro nucleare e riceve le proteine da esportare; il **RE liscio** produce lipidi e detossifica.
- L'**apparato di Golgi** riceve le vescicole sulla faccia *cis*, modifica e smista le proteine e le spedisce dalla faccia *trans*. Via di secrezione: RER → vescicola → Golgi → vescicola → membrana (esocitosi).
- I **lisosomi** digeriscono materiali inglobati e organuli vecchi; i **perossisomi** demoliscono varie sostanze e decompongono H_2O_2.
- I **mitocondri** (due membrane, creste, DNA proprio) sono la sede della respirazione cellulare; i **cloroplasti** (due membrane, tilacoidi in grana, stroma, DNA proprio) della fotosintesi.
- Il **citoscheletro** (microfilamenti, filamenti intermedi, microtubuli) dà forma e permette trasporto e movimento; ciglia e flagelli eucariotici hanno microtubuli «9 + 2»; i centrioli mancano nelle piante con fiore.
- La cellula vegetale ha in più **parete di cellulosa**, **plasmodesmi**, **plastidi** e un grande **vacuolo centrale**, che mantiene il turgore.
- Negli organismi **pluricellulari** le cellule si specializzano (**differenziamento**) e formano tessuti; le colonie, come *Volvox*, sono una situazione intermedia.
- Secondo la **teoria endosimbiontica** (Margulis, 1967) mitocondri e cloroplasti derivano da batteri inglobati: lo indicano doppia membrana, DNA circolare, ribosomi di tipo batterico, divisione per scissione e dimensioni.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Quale struttura è presente sia nelle cellule procariotiche sia in quelle eucariotiche?
   - **A.** i ribosomi
   - **B.** il nucleo
   - **C.** i mitocondri
   - **D.** il reticolo endoplasmatico

2. ● Nei batteri il DNA principale si trova:
   - **A.** nel nucleo, racchiuso da un involucro
   - **B.** soltanto nei plasmidi
   - **C.** nel nucleoide, senza membrana che lo separi dal citoplasma
   - **D.** nella capsula

3. ● La parete cellulare dei batteri è fatta principalmente di:
   - **A.** cellulosa
   - **B.** peptidoglicano
   - **C.** chitina
   - **D.** fosfolipidi

4. ● Il nucleolo è:
   - **A.** l'organulo che produce la maggior parte dell'ATP
   - **B.** un organulo delimitato da due membrane
   - **C.** la regione del citoplasma che contiene i plasmidi
   - **D.** la regione del nucleo dove si producono le parti dei ribosomi

5. ●● Quale organulo contiene enzimi digestivi che demoliscono le particelle inglobate e gli organuli usurati?
   - **A.** il lisosoma
   - **B.** il perossisoma
   - **C.** il nucleolo
   - **D.** il centriolo

6. ●● Una cellula che secerne grandi quantità di enzimi, come quelle del pancreas, è particolarmente ricca di:
   - **A.** cloroplasti
   - **B.** vacuoli centrali
   - **C.** centrioli
   - **D.** RE ruvido e apparato di Golgi

7. ●● Quale di queste strutture si trova nelle cellule vegetali ma non in quelle animali?
   - **A.** i mitocondri
   - **B.** i ribosomi
   - **C.** i plasmodesmi
   - **D.** l'apparato di Golgi

8. ●● La faccia *trans* dell'apparato di Golgi:
   A. riceve le vescicole che arrivano dal reticolo endoplasmatico
   B. è rivolta verso la membrana plasmatica, e da essa si staccano le vescicole in partenza
   C. produce i ribosomi
   D. contiene il DNA della cellula

9. ●●● Quale osservazione **non** è un indizio a favore della teoria endosimbiontica?
   A. i mitocondri hanno un DNA circolare proprio
   B. i cloroplasti sono delimitati da due membrane
   C. i mitocondri si formano soltanto per scissione di altri mitocondri
   D. i mitocondri si trovano sia nelle cellule animali sia in quelle vegetali

Vero o falso

10. ● Le cellule procariotiche non hanno DNA.

11. ● Le cellule delle foglie possiedono sia cloroplasti sia mitocondri.

12. ●● Tutte le cellule di una pianta contengono cloroplasti.

13. ●● Il reticolo endoplasmatico ruvido è in continuità con la membrana esterna dell'involucro nucleare.

14. ● Gli antibiotici sono efficaci contro i virus del raffreddore.

15. ● I centrioli sono presenti nelle cellule delle piante con fiore.

Applicare

16. ● Per ciascuna struttura indica in quale tipo di cellula si trova: P (procariotica), A (eucariotica animale), V (eucariotica vegetale); una struttura può avere più lettere. a) parete di peptidoglicano; b) cloroplasto; c) centrioli; d) vacuolo centrale; e) nucleoide; f) involucro nucleare; g) ribosomi.

17. ●● Usa i modelli dell'Esempio svolto «Quante volte più grande?», ma con una cellula eucariotica cubica di 10 µm di lato. a) Quanti volumi di batterio (2 µm × 1 µm × 1 µm) contiene? b) Qual è il suo rapporto S/V? c) Quante volte è maggiore il rapporto S/V del batterio?

18. ●● In una fotografia al microscopio elettronico, ingrandita 15 000 volte, un mitocondrio è lungo 30 mm. Qual è la sua lunghezza reale in micrometri?

19. ●● In un disegno fatto al microscopio ottico con ingrandimento 400× una cellula di *Elodea* è lunga 32 mm e un suo cloroplasto 2 mm. Calcola le dimensioni reali della cellula e del cloroplasto in micrometri. Quanti cloroplasti, messi in fila per il lungo, coprirebbero la lunghezza della cellula?

20. ● Nell'equazione della catalasi, $2\ H_2O_2 \rightarrow 2\ H_2O + O_2$, conta gli atomi di idrogeno e di ossigeno a sinistra e a destra della freccia. L'equazione è bilanciata?

21. ●●● Modella una cellula vegetale come un cubo di 40 µm di lato, con al centro un vacuolo cubico di 36 µm di lato. a) Che percentuale del volume cellulare occupa il vacuolo? b) Qual è il volume che resta al citoplasma e agli altri organuli? (Trascura lo spessore della parete.)

22. ● Metti in ordine le tappe percorse da un enzima digestivo prodotto da una cellula del pancreas: membrana plasmatica, faccia *trans* del Golgi, RE ruvido, vescicola di secrezione, vescicola di trasporto, faccia *cis* del Golgi.

23. ●●● Abbina ogni cellula all'organulo che, in proporzione, vi è più abbondante, e spiega perché in una riga: 1) cellula del pancreas che secerne enzimi; 2) fibra muscolare; 3) cellula del fegato che smaltisce l'alcol; 4) cellula verde dell'interno di una foglia. Organuli: a) cloroplasti; b) RE liscio; c) RE ruvido; d) mitocondri.

Leggere dati e figure

24. ●● Confronta la Figura 3.3 e la Figura 3.5. a) Indica tre strutture della cellula vegetale che non compaiono in quella animale. b) Indica una struttura della cellula animale che manca nella cellula vegetale. c) Quali organuli compaiono in entrambe?

25. ●●● Una classe ha misurato al microscopio cinque cellule di *Elodea* e un cloroplasto per ciascuna (dati di esempio). Lunghezze delle cellule: 62, 70, 58, 66, 74 µm. Lunghezze dei cloroplasti: 5, 6, 4, 5, 5 µm. a) Calcola la lunghezza media delle cellule e dei cloroplasti. b) Quante volte la cellula media è più lunga del cloroplasto medio? c) Perché conviene misurare più cellule invece di una sola?

26. ●●● Osserva la Figura 3.1. a) Usando la barra di scala di sinistra, quanti batteri lunghi 2 µm, messi in fila, coprirebbero il diametro della cellula eucariotica? b) Un oggetto 10 volte più lungo di un altro della stessa forma in tutte e tre le direzioni ha un volume quante volte maggiore?

27. ● Osserva la Figura 3.4. a) Che cosa accade alla proteina nella tappa 3? b) Come si chiama il processo della tappa 5? c) Dopo essere entrata nel RE ruvido, la proteina torna nel citosol?

Indagare e argomentare

28. ●● Spiega perché la penicillina danneggia i batteri ma non le cellule del corpo umano, e perché non serve a curare l'influenza.

29. ●●● Progetta un esperimento controllato per verificare se la luce influisce sul movimento dei cloroplasti nelle cellule di *Elodea*. Indica la variabile indipendente, la variabile dipendente, le variabili da mantenere costanti e il controllo.

30. ●●● «I mitocondri sono ex batteri». Discuti questa frase: porta almeno tre prove a favore e indica in che senso, oggi, i mitocondri non possono più essere considerati batteri.

PER APPROFONDIRE

- [ALB] I capitoli sulla struttura della cellula, sul sistema delle membrane interne e sul citoscheletro, con molte micrografie elettroniche.
- [CAM] Il capitolo «Un viaggio nella cellula», con il confronto fra procarioti ed eucarioti e la teoria endosimbiontica.
- [SAD] Il capitolo sulle cellule, per le tecniche con cui si studiano gli organuli.

Glossario del capitolo

Apparato di Golgi
Pila di cisterne membranose che riceve le proteine dal RE (faccia *cis*), le modifica, le smista e le spedisce in vescicole (faccia *trans*).

Cellula eucariotica
Cellula con il DNA racchiuso in un nucleo e con organuli delimitati da membrane; è propria di protisti, funghi, piante e animali.

Cellula procariotica
Cellula priva di nucleo e di organuli delimitati da membrana, con il DNA nel nucleoide; è propria di batteri e archei.

Citoscheletro
Rete di filamenti proteici (microfilamenti, filamenti intermedi, microtubuli) che dà forma alla cellula e permette trasporto e movimento.

Citosol
La parte liquida del citoplasma, una soluzione acquosa di ioni, piccole molecole ed enzimi.

Cloroplasto
Plastidio a due membrane, con tilacoidi impilati in grana immersi nello stroma, sede della fotosintesi.

Cromatina
Il complesso di DNA e proteine che si trova nel nucleo; si condensa nei cromosomi quando la cellula si divide.

Differenziamento cellulare
Processo con cui cellule derivate da una stessa cellula iniziale diventano diverse per forma e funzione.

Involucro nucleare
La doppia membrana, attraversata dai pori nucleari, che delimita il nucleo.

Lisosoma
Vescicola delimitata da membrana che contiene enzimi digestivi.

Mitocondrio
Organulo a due membrane, con la membrana interna ripiegata in creste, sede della respirazione cellulare.

Nucleoide
Regione del citoplasma procariotico occupata dal DNA, non delimitata da membrane.

Nucleolo
Zona compatta del nucleo, senza membrana, dove si producono e si assemblano le parti dei ribosomi.

Parete cellulare
Strato rigido esterno alla membrana plasmatica: di peptidoglicano nei batteri, di cellulosa nelle piante, di chitina nei funghi.

Plasmide
Piccola molecola circolare di DNA, separata dal cromosoma batterico, che si duplica da sola e può passare da un batterio all'altro.

Reticolo endoplasmatico
Rete di sacchi e tubuli membranosi continua con l'involucro nucleare; ruvido (con ribosomi) o liscio (senza).

Ribosoma
Struttura di RNA e proteine, priva di membrana, che costruisce le proteine; si trova in tutte le cellule.

Teoria endosimbiontica
Teoria secondo cui mitocondri e cloroplasti derivano da procarioti inglobati da una cellula ospite e vissuti con essa in simbiosi.

Vacuolo centrale
Grande vescicola della cellula vegetale, delimitata dal tonoplasto, che accumula acqua e soluti e mantiene il turgore.

Soluzioni

1. A. I ribosomi ci sono in tutte le cellule; nucleo, mitocondri e reticolo endoplasmatico solo negli eucarioti.

2. C. Il nucleoide non è delimitato da membrane; i plasmidi sono DNA aggiuntivo.

3. B. Peptidoglicano; la cellulosa forma la parete delle piante, la chitina quella dei funghi.

4. D. Nel nucleolo si producono e si assemblano le parti dei ribosomi; non ha membrana.

5. A. Il lisosoma.

6. D. Le proteine di secrezione sono prodotte dal RE ruvido e smistate dal Golgi.

7. C. I plasmodesmi attraversano la parete delle cellule vegetali; le altre strutture sono comuni a cellule animali e vegetali.

8. B. La faccia *cis* riceve dal RE, la faccia *trans* spedisce.

9. D. La presenza nelle cellule animali e vegetali non dice nulla sull'origine batterica; A, B e C sono indizi a favore.

10. F. Le cellule procariotiche hanno DNA: un cromosoma circolare nel nucleoide ed eventuali plasmidi. Manca il nucleo, non il DNA.

11. V. Le cellule delle foglie fanno fotosintesi (cloroplasti) e respirazione cellulare (mitocondri).

12. F. Le cellule delle radici o del bulbo di cipolla, che vivono al buio, non hanno cloroplasti.

13. V. Il lume del RE comunica con lo spazio fra le due membrane dell'involucro nucleare.

14. F. Gli antibiotici colpiscono strutture batteriche (parete, ribosomi); i virus non sono cellule e non hanno queste strutture.

15. F. Le cellule delle piante con fiore non hanno centrioli; i centrioli sono tipici delle cellule animali.

16. a) P; b) V; c) A; d) V; e) P; f) A, V; g) P, A, V.

17. a) $V = (10\ \mu m)^3 = 1000\ \mu m^3$; 1000 : 2 = 500 volumi di batterio. b) $S = 6 \times 100\ \mu m^2 = 600\ \mu m^2$; $S/V = 600/1000 = 0{,}6\ \mu m^{-1}$. c) 5 : 0,6 ≈ 8,3 volte.

18. Lunghezza reale = 30 mm : 15 000 = 0,002 mm = 2 µm.

19. Cellula: 32 mm : 400 = 0,08 mm = 80 µm. Cloroplasto: 2 mm : 400 = 0,005 mm = 5 µm. In fila: 80 : 5 = 16 cloroplasti (lo stesso risultato si ottiene da 32 : 2).

20. A sinistra: H = 2 × 2 = 4, O = 2 × 2 = 4. A destra: H = 2 × 2 = 4, O = 2 × 1 + 2 = 4. L'equazione è bilanciata.

21. a) Cellula: $(40\ \mu m)^3 = 64\,000\ \mu m^3$; vacuolo: $(36\ \mu m)^3 = 46\,656\ \mu m^3$; 46 656/64 000 = 0,729 ≈ 73 %. b) 64 000 − 46 656 = 17 344 $\mu m^3 \approx 1{,}7 \cdot 10^4\ \mu m^3$ (circa il 27 %).

22. RE ruvido → vescicola di trasporto → faccia *cis* del Golgi → faccia *trans* del Golgi → vescicola di secrezione → membrana plasmatica (esocitosi).

23. 1-c: il RE ruvido produce le proteine da esportare. 2-d: la contrazione consuma molto ATP, prodotto nei mitocondri. 3-b: il RE liscio contribuisce alla detossificazione. 4-a: le cellule verdi della foglia fanno la fotosintesi.

24. a) Parete cellulare (con i plasmodesmi), cloroplasti, vacuolo centrale. b) I centrioli (nello schema compaiono anche i lisosomi; nella cellula vegetale funzioni simili sono svolte anche dal vacuolo). c) Nucleo con involucro, pori e nucleolo, RE ruvido, apparato di Golgi, mitocondri, ribosomi, membrana plasmatica.

25. a) Cellule: (62 + 70 + 58 + 66 + 74) : 5 = 330 : 5 = 66 µm. Cloroplasti: (5 + 6 + 4 + 5 + 5) : 5 = 25 : 5 = 5 µm. b) 66 : 5 ≈ 13 volte. c) Le cellule e le misure variano: la media di più misure è più rappresentativa e riduce l'effetto degli errori casuali.

26. a) La barra di 5 µm sta circa 4 volte nel diametro: 20 µm : 2 µm = 10 batteri. b) Il volume è 10 × 10 × 10 = 1000 volte maggiore.

27. a) Nel Golgi la proteina viene modificata e smistata, passando dalla faccia *cis* alla faccia *trans*. b) Esocitosi. c) No: viaggia sempre dentro compartimenti delimitati da membrana (RE, vescicole, Golgi) fino all'esterno.

28. *Traccia di risposta.* La penicillina blocca la costruzione della parete di peptidoglicano, che esiste solo nei batteri: le cellule umane non hanno parete e non vengono colpite. L'influenza è causata da un virus, che non è una cellula e non ha parete né ribosomi: l'antibiotico non ha bersagli. Usarlo inutilmente favorisce i batteri resistenti.

29. *Traccia di risposta.* Variabile indipendente: la luce (presente/assente, oppure intensità diverse). Variabile dipendente: il movimento dei cloroplasti (per esempio quante cellule mostrano ciclosi, o la distanza percorsa da un cloroplasto in un minuto). Costanti: età e posizione delle foglie, temperatura, tempo di osservazione, ingrandimento. Controllo: foglie tenute al buio per lo stesso tempo e osservate rapidamente. Ripetere su più foglie.

30. *Traccia di risposta.* Prove: due membrane; DNA circolare proprio; ribosomi simili a quelli batterici; nascono solo per scissione da altri mitocondri; dimensioni simili ai batteri; il loro DNA somiglia a quello di batteri che respirano ossigeno. Limite: oggi non sono organismi indipendenti; gran parte dei loro geni si trova nel nucleo e fuori dalla cellula non sopravvivono. «Ex batteri» descrive quindi la loro origine, non quello che sono adesso.